



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών
Τομέας Τοπογραφίας
Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας

Αξιολόγηση Συστήματος Ραδιοσημάτων Υπερ-Ευρείας Ζώνης (UWB) σε Εφαρμογές Στατικού και Κινηματικού Εντοπισμού



Εξαρχαίος Χρήστος

Υπεύθυνος

Γκίκας Βασίλειος
Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα 2016



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
School of Rural and Surveying Engineering
Department of Topography
Laboratory of General Geodesy

*Ultra Wide Band (UWB) Radio System Evaluation in Static
and Kinematic Applications*



Exarcheos Christos

Supervisor

Gikas Vasileios
Associate Professor

Athens 2016

Ευχαριστίες

Θα ήθελα πρώτο από όλους να ευχαριστήσω τον αναπληρωτή καθηγητή της ΣΑΤΜ, κύριο Βασίλειο Γκίκα για την συνεργασία που είχαμε και την πολύτιμη βοήθειά του κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επιπλέον θέλω να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες Αθανάσιο Μπίμη και Χάρη Περάκη για την σημαντική βοήθεια που μου έδωσαν τόσο κατά την εκτέλεση των πειραμάτων που περιλαμβάνονται στην παρούσα διπλωματική εργασία, όσο και στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων τους. Ήταν παρόντες όποια στιγμή και αν τους χρειάστηκα και χωρίς τις πολύτιμες συμβουλές τους δε θα μπορούσα να φέρω εις πέρας αυτή την εργασία και ειλικρινά θέλω να τους ζητήσω συγγνώμη αν κάποια στιγμή έγινα φορτικός με τις ερωτήσεις μου.

Ευχαριστώ και τον συμφοιτητή μου Ανδρέα Δημητράτο για τη συνεισφορά του στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας αλλά και για τη συνεργασία που είχαμε όλα αυτά τα χρόνια. Γενικότερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους/ες τους/τις συμφοιτητές/τριες μου με τους/τις οποίους/ες συνεργάστηκα τα χρόνια που φοίτησα στη ΣΑΤΜ καθώς με τη βοήθειά τους έφερα εις πέρας αρκετές απαιτητικές εργασίες.

Τέλος δε θέλω να παραλείψω να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στο σύνολο του διδακτικού προσωπικού της ΣΑΤΜ για τις πλούσιες γνώσεις που μου προσέφερε καθώς και ότι στάθηκαν στο πλευρό μου όταν τους χρειάστηκα.

Περίληψη

Τις τελευταίες δεκαετίες, η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας δορυφορικού εντοπισμού συνέβαλε ουσιαστικά στην επίλυση προβλημάτων με απαιτήσεις σε προσδιορισμό θέσης για ποικίλες εφαρμογές. Ωστόσο, η εφαρμογή τους περιορίζεται σε ανοικτούς χώρους λόγω της αδυναμίας λήψης του δορυφορικού σήματος σε εσωτερικούς χώρους, θέσεις με υψηλά εμπόδια ή πυκνή βλάστηση. Ο προσδιορισμός θέσης σε αυτές τις περιπτώσεις στηρίζεται σε άλλες τεχνολογίες (αδρανειακές, οπτικές, ραδιοσημάτων, κ.α.), ενώ το πρόβλημα λόγω της πολυπλοκότητας που εμφανίζει εξ' αιτίας ατελειών που χαρακτηρίζουν τις τεχνολογίες εντοπισμού και των συνθηκών (εμπόδια, πολυανακλάσεις, κ.α.) σε κλειστούς χώρους δεν έχει επιλυθεί πλήρως. Σε αυτό το πλαίσιο, αυτή η εργασία πραγματεύεται την τεχνολογία ραδιοσημάτων υπερ-ευρείας ζώνης (*Ultra-Wide-band*) για εφαρμογές εντοπισμού. Ειδικότερα, πέρα από την θεωρητική ανασκόπηση στο αντικείμενο, αξιολογείται ενδελεχώς το σύστημα *UWB PulsON® 410, Time Domain Inc.* ως προς την ποιότητα (ακρίβεια, αξιοπιστία, διαθεσιμότητα) λήψης πρωτογενών μετρήσεων αποστάσεων, όσο και κατά τον προσδιορισμό θέσης σε κινηματικό εντοπισμό. Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκαν δύο πειραματικές εφαρμογές. Η πρώτη αφορά την λήψη, επεξεργασία και τον στατιστικό έλεγχο μετρήσεων αποστάσεων (2 m – 720 m) και συγκριτική αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων έναντι αντίστοιχων μετρήσεων υψηλής ακρίβειας με χρήση γεωδαιτικού σταθμού. Η δεύτερη εφαρμογή αφορά την παραγωγή τροχιών κινηματικού εντοπισμού με χρήση οχήματος. Η αξιολόγηση του συστήματος *UWB* στηρίζεται σε εξωτερικό έλεγχο και συγκρίσεις με συγχρονισμένες τροχιές που παρήχθησαν με την βοήθεια συστήματος *GNSS/IMU* υψηλής ακρίβειας. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι το σύστημα *PulsON® 410* μπορεί να επιτύχει την λήψη μετρήσεων εμβέλειας (χωρίς την παρεμβολή εμποδίων) 720 m. Η διαθεσιμότητα του είναι σχεδόν εκατό τοις εκατό για αποστάσεις έως 200 m ενώ η εξωτερική ακρίβειά του της τάξεως των 0.01 m για αποστάσεις έως 100 m. Αντίστοιχα, σε εφαρμογές κινηματικού εντοπισμού χαμηλής δυναμικής (μέγιστη ταχύτητα 18 km/h) και περιοχές ελεύθερες εμποδίων η εξωτερική ακρίβεια θέσης είναι της τάξης των 0.1 m.

Abstract

During the last decades, the rapid growth of global positioning satellite technology contributed significantly to solving problems with requirements at localization with a variety of applications. However, their application is limited in outdoors because of the inability to obtain satellite signal indoors, at locations with high blocks or dense vegetation. In these cases, localization is based on other technologies (inertial, optical, radio etc.), while the problem occurring despite of the imperfections which characterized positioning technologies and conditions (obstacles, multipath etc.) indoors has not totally resolved. In this context, this thesis deals with radio technology of Ultra Wide Band (UWB) for localization applications. Particularly, beyond the theoretical background to the object, assessed thoroughly UWB PulsON® 410, Time Domain Inc. system so the quality (accuracy, reliability, availability) making primary range measurements as kinematic localization. Particularly, two experimental applications were performed. The first concerns the taking, processing and static testing range measurements (2 m – 720 m) and comparative collation of results against respective measurements of high accuracy using total station. The second experimental application concerns the production of kinematic localization trajectories using a vehicle. The valuation of UWB system based on external testing and comparisons with synchronized trajectories which produced by GNSS/IMU high accuracy system. From results analysis revealed that PulsON® 410 system could succeed measurements at range of 720 m (without interference with obstacles). Its availability is almost a hundred percent for distances up to 200 m and its accuracy is of the order of 0.01 m for distances up to 100 m. In kinematic positioning applications of low dynamic (maximum speed of 18 km/h) and areas clear from obstacles, the accuracy of location is about 0.1 m.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Σχημάτων	xiii
Κατάλογος Πινάκων	xxii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Αντικείμενο και Στόχοι Εργασίας.....	1
1.2 Ιστορικά Στοιχεία.....	2
1.3 Δομή Εργασίας.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ	6
2.1 Τριπλευρισμός (<i>Trilateration</i>)	6
2.1.1 Τεχνικές Υπολογισμού Απόστασης.....	6
2.1.1α Χρονική Στιγμή Άφιξης Σήματος (<i>Time of Arrival, ToA</i>).....	7
2.1.1β Χρονική Διαφορά Άφιξης Σήματος (<i>Time Difference of Arrival, TDoA</i>) ..	9
2.1.1γ Ισχύς Λαμβανόμενου Σήματος (<i>Received Signal Strength, RSS</i>)	11
2.1.1δ Χρονική Διάρκεια Μετάδοσης Σήματος Μετ' Επιστροφής (<i>Two Way Time of Flight, TWToF</i>)	11
2.1.1ε Φάση Λαμβανόμενου Σήματος (<i>Phase of Arrival, PoA</i>)	12
2.1.2 Τεχνικές Χρήσης Γωνίας Κατεύθυνσης Σήματος (<i>Angle of Arrival, AoA</i>)	13
2.2 Χαρτογράφηση Αποτυπώματος Ισχύος Σήματος (<i>Fingerprinting</i>).....	15
2.2.1 Πιθανοτικές Μέθοδοι (<i>Probabilistic Methods</i>)	16
2.2.1α Πλησιέστερος Γείτονας (<i>Nearest Neighbour</i>)	16
2.2.2 Μέθοδοι Μηχανικής Μάθησης (<i>Machine Learning Methods</i>).....	17
2.2.2α Νευρωνικά Δίκτυα (<i>Neural Networks</i>).....	17
2.2.2β Μηχανή Υποστήριξης Διανυσμάτων (<i>Support Vector Machine</i>).....	17
2.2.3 Ελάχιστο N-γωνο (<i>Smallest N- vertex Polygon</i>).....	17
2.3 Αλγόριθμοι Εγγύτητας (<i>Proximity Detection</i>).....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ ΚΑΙ ΠΕΔΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ	19
3.1 Τεχνολογίες Εντοπισμού.....	19
3.1.1 Οπτικές Τεχνολογίες	20
3.1.1α Συστήματα Βιντεοληψίας	20
3.1.1β Συστήματα Υπέρυθρου	21
3.1.1γ Συστήματα Πολικών Συντεταγμένων	21
3.1.2 Ασύρματες Τεχνολογίες.....	22
3.1.2α Μαγνητικά Συστήματα	22
3.1.2β Συστήματα Ήχου	23
3.1.2γ Κυψελωτά Δίκτυα	23
3.1.2δ Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα.....	24

3.1.2ε Επικοινωνία <i>Bluetooth</i>	25
3.1.2στ Ραντάρ	25
3.1.2ζ Συστήματα Αναγνώρισης Ραδιοσυχνοτήτων	25
3.1.2η Συστήματα Υπέρ-ευρείας ζώνης.....	26
3.1.3 Ολοκληρωμένα Συστήματα Εντοπισμού	27
3.2 Εφαρμογές Εντοπισμού	28
3.2.1 Υπηρεσίες Προστασίας του Πολίτη.....	29
3.2.2 Διαχείριση Εργοταξίων.....	29
3.2.3 Διαχείριση Αποθεμάτων	30
3.2.4 Έξυπνα Συστήματα Μεταφορών	30
3.2.5 Καθοδήγηση Ατόμων με Ειδικές Ανάγκες	30
3.2.6 Υγεία	30
3.2.7 Τοπογραφία- Γεωδαισία	31
3.2.8 Πειραματικές Εφαρμογές.....	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΠΕΡ-ΕΥΡΕΙΑΣ ΖΩΝΗΣ (UWB)	32
4.1 Αρχή Λειτουργίας - Μετρήσεις - Εντοπισμός	32
4.2 Σύστημα PulsON [®] 410	33
4.2.1 Αρχιτεκτονική Συστήματος	33
4.2.2 Χαρακτηριστικά Σήματος.....	34
4.2.2α Κυματομορφή και Ένταση Σήματος.....	34
4.2.2β Ζώνη Fresnel.....	36
4.2.3 Μέτρηση Απόστασης.....	38
4.2.3α Ακριβής Μέτρηση Απόστασης	38
4.2.3β Χονδρική Εκτίμηση Απόστασης.....	39
4.2.3γ Φιλτραρισμένη Μέτρηση Απόστασης	39
4.2.4 Κινηματικός Εντοπισμός	40
4.2.5 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα	43
4.3 Άλλα Συστήματα UWB	44
4.3.1 Series 9000 IP [®]	44
4.3.2 ScenSor [®]	44
4.3.3 Dart [®]	45
4.3.4 RTLS [®]	46
4.3.5 PulsOn [®]	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ UWB ΣΕ ΣΤΑΤΙΚΟ	
ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ	47
5.1 Στόχος Πειραματικού Ελέγχου	47
5.2 Μεθοδολογία Υλοποίησης.....	48

5.2.1 Επιλογή Αποστάσεων Ελέγχου.....	48
5.2.2 Τεχνική Λήψης Μετρήσεων	48
5.2.3 Πλήθος Επαναλήψεων	48
5.2.4 Ένταση Ισχύος Σήματος	49
5.2.5 Προσανατολισμός Κεραιών.....	49
5.2.6 Αποστάσεις Αναφοράς	50
5.3 Προπαρασκευαστικές Εργασίες.....	51
5.3.1 Επιλογή Περιοχής Μελέτης.....	51
5.3.2 Εξοπλισμός	52
5.4 Υλοποίηση Πειράματος	53
5.5 Επεξεργασία Δεδομένων Πεδίου	55
5.5.1 Μετρήσεις Γεωδαιτικού Σταθμού.....	55
5.5.2 Μετρήσεις Αποστάσεων Συστήματος UWB	56
5.6 Ανάλυση Αποτελεσμάτων	57
5.6.1 Ανάλυση Αξιοπιστίας (<i>Trueness</i>)	57
5.6.2 Ανάλυση Αβεβαιότητας (<i>Precision</i>).....	62
5.6.3 Ανάλυση Διαθεσιμότητας (<i>Availability</i>).....	63
5.6.4 Χρονική Διάρκεια Μετρήσεων	65
5.6.5 Στατιστική Κατανομή των Μετρήσεων	66
5.6.5α Μετρήσεις Εντός Εμβέλειας Συστήματος	67
5.6.5β Μετρήσεις Εκτός Εμβέλειας Συστήματος	69
5.7 Συμπεράσματα	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ UWB ΣΕ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟ	
ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ	78
6.1 Στόχος Πειραματικού Ελέγχου	78
6.2 Μεθοδολογία Υλοποίησης.....	78
6.2.1 Μέθοδος Εντοπισμού.....	78
6.2.2 Εξαγωγή Τροχιάς Αναφοράς	79
6.2.3 Σενάρια Καταγραφής.....	79
6.3 Προπαρασκευαστικές Εργασίες.....	80
6.3.1 Επιλογή Περιοχής Μελέτης.....	80
6.3.2 Εξοπλισμός Πεδίου	81
6.4 Υλοποίηση Πειράματος	83
6.5 Επεξεργασία Δεδομένων Πεδίου	85
6.5.1 Υπολογισμός Τροχιάς Αναφοράς	85
6.5.2 Υπολογισμός Τροχιάς Συστήματος UWB	87
6.5.3 Υπολογισμός Τροχιάς βάσει Αλγόριθμου Τριπλευρισμού.....	88

6.6 Ανάλυση Αποτελεσμάτων	89
6.6.1 Πρώτο Σενάριο Παρατήρησης (S-I)	89
6.6.2 Δεύτερο Σενάριο Παρατήρησης (S-II)	98
6.6.3 Τρίτο Σενάριο Παρατήρησης (S-III).....	107
6.7 Συμπεράσματα	110
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΕΤΑΙΡΩ	
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ	111
7.1 Συμπεράσματα	111
7.2 Προτάσεις για Περεταίρω Διερεύνηση.....	112
Βιβλιογραφία	113
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	115
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	138
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....	141

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Προσδιορισμός θέσης σημείου με μετρήσεις ToA (2D).....	8
Σχήμα 2.2: Προσδιορισμός θέσης από μετρήσεις TDoA (2-D).....	10
Σχήμα 2.3: Προσδιορισμός θέσης σημείου με τη μέθοδο AoA (2D).....	14
Σχήμα 3.1: Τεχνολογίες εντοπισμού σε κλειστούς χώρους συναρτήσει της ακρίβειας και του μήκους κύματος/συχνότητας λειτουργίας [Mautz, 2012].....	20
Σχήμα 3.2 Συσκευή WLAN.....	24
Σχήμα 3.3 Πομποδέκτης του συστήματος RFID.....	26
Σχήμα 3.4 Παθητική ετικέτα του συστήματος RFID.....	26
Σχήμα 3.5 IMU.....	28
Σχήμα 4.1 Η συχνότητα λειτουργίας των συστημάτων UWB σε σχέση με άλλες τεχνολογίες επικοινωνίας [Mautz 2012].....	32
Σχήμα 4.2 Πομποδέκτης του συστήματος PulsON® 410 με τις μπαταρίες του.....	34
Σχήμα 4.3 Κεραία του συστήματος PulsON® [www.timedomain.com].....	34
Σχήμα 4.4 Κυματομορφή του σήματος RF του συστήματος UWB στο πεδίο του χρόνου (δεξιά) και των συχνοτήτων (αριστερά) [www.timedomain.com].....	35
Σχήμα 4.5 Χαρακτηριστικά της πρώτης ζώνης Fresnel [en.wikipedia.org].....	37
Σχήμα 4.6 Μέγιστη ακτίνα της ζώνης Fresnel συναρτήσει της μετρούμενης απόστασης για το εύρος της συχνότητας λειτουργίας του συστήματος PulsON® 410.....	38
Σχήμα 4.7 Ενδεικτική διάταξη των πομποδεκτών UWB PulsON® 410 για εντοπισμό με τη χρήση του λογισμικού RangeNet® [www.timedomain.com].....	41
Σχήμα 4.8 Περιοχή (κόκκινο) εντός της οποίας βρίσκεται η θέση του κινητού.....	42

Σχήμα 4.9 Το σύστημα UWB της εταιρείας Ubisence [ubisence.net/en].....	44
Σχήμα 4.10 Πομποδέκτες UWB ScenSor® [www.decawave.com].....	45
Σχήμα 4.11 Σύστημα Dart® UWB [www.zebra.com].....	46
Σχήμα 4.12 Σύστημα RTLS® [nanotron.com].....	46
Σχήμα 5.1: Προσανατολισμοί κεραιών συστήματος UWB κατά την διενέργεια του στατικού ελέγχου (κάτοψη).....	50
Σχήμα 5.2 Εγκατάσταση εξοπλισμού κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στατικού ελέγχου.....	51
Σχήμα 5.3: Περιοχής εκτέλεση πειράματος [Κτηματολόγιο ΑΕ].....	52
Σχήμα 5.4 Πομποδέκτης PulsON® 410.....	53
Σχήμα 5.5 Φωτογραφικός τρίποδας.....	53
Σχήμα 5.6 Γεωδαιτικός σταθμός.....	53
Σχήμα 5.7 Γενική άποψη.....	53
Σχήμα 5.8 Μέτρηση απόστασης με χρήση κατάφωτου.....	54
Σχήμα 5.9 Διαφορά μεταξύ της μέσης τιμής των μετρήσεων UWB όπως προέκυψαν με την μέθοδο CRE από την απόσταση αναφοράς.....	57
Σχήμα 5.10 Διαφορά μεταξύ της μέσης τιμής των μετρήσεων UWB όπως προέκυψαν με την μέθοδο PRM από την απόσταση αναφοράς.....	58
Σχήμα 5.11 Διαφορά μεταξύ της μέσης τιμής των μετρήσεων UWB όπως προέκυψαν με την μέθοδο FRE από την απόσταση αναφοράς.....	58
Σχήμα 5.12 Διαφορά μεταξύ της διαμέσου τιμής των μετρήσεων UWB όπως προέκυψαν με την μέθοδο CRE από την απόσταση αναφοράς.....	60

Σχήμα 5.13 Διαφορά μεταξύ της διαμέσου τιμής των μετρήσεων UWB όπως προέκυψαν με την μέθοδο PRM από την απόσταση αναφοράς.....	61
Σχήμα 5.14 Διαφορά μεταξύ της διαμέσου τιμής των μετρήσεων UWB όπως προέκυψαν με την μέθοδο FRE από την απόσταση αναφοράς.....	61
Σχήμα 5.15 Εύρος αβεβαιότητας μετρήσεων με τη μέθοδο FRE για τη ΘΕΣΗ I των κεραιών.....	62
Σχήμα 5.16 Εύρος αβεβαιότητας μετρήσεων με τη μέθοδο FRE για τη ΘΕΣΗ IV των κεραιών.....	63
Σχήμα 5.17 Αριθμός αποτυχημένων μετρήσεων της μεθόδου PRM.....	64
Σχήμα 5.18 Απαιτούμενη χρονική διάρκεια για το σύνολο 200 επαναλήψεων για κάθε απόσταση αναφοράς και προσανατολισμό κεραιών.....	65
Σχήμα 5.19 Χρονική διάρκεια καταγραφής κάθε μεμονωμένης μέτρησης για την ονομαστική απόσταση των 400 m, με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ IV και μέθοδο μέτρησης PRM.....	66
Σχήμα 5.20 Ιστόγραμμα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή για την ονομαστική απόσταση των 10 m με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ I και μέθοδο μέτρησης PRM.....	67
Σχήμα 5.21 Τιμές μετρημένων αποστάσεων για 200 επαναλήψεις και για ονομαστική απόσταση 10 m, θέση κεραιών I και μέθοδο μέτρησης PRM.....	68
Σχήμα 5.22 Ιστόγραμμα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή για την ονομαστική απόσταση των 10 m με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ I και μέθοδο μέτρησης FRE.....	68
Σχήμα 5.23 Τιμές μετρημένων αποστάσεων για 200 επαναλήψεις και για ονομαστική απόσταση 10 m, θέση κεραιών I και μέθοδο μέτρησης FRE.....	69

Σχήμα 5.24 Ιστόγραμμα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή για την ονομαστική απόσταση των 2 m με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ Ι και μέθοδο μέτρησης PRM.....	70
Σχήμα 5.25 Τιμές μετρημένων αποστάσεων για 200 επαναλήψεις και για ονομαστική απόσταση 2 m, θέση κεραιών Ι και μέθοδο μέτρησης PRM.....	70
Σχήμα 5.26 Ιστόγραμμα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή για την ονομαστική απόσταση των 2 m με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ Ι και μέθοδο μέτρησης FRE.....	71
Σχήμα 5.27 Τιμές μετρημένων αποστάσεων για 200 επαναλήψεις και για ονομαστική απόσταση 2 m, θέση κεραιών Ι και μέθοδο μέτρησης FRE.....	71
Σχήμα 5.28 Ιστόγραμμα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή για την ονομαστική απόσταση των 300 m με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ Ι και μέθοδο μέτρησης PRM.....	72
Σχήμα 5.29 Τιμές μετρημένων αποστάσεων για 200 επαναλήψεις και για ονομαστική απόσταση 300 m, θέση κεραιών Ι και μέθοδο μέτρησης PRM.....	73
Σχήμα 5.30 Ιστόγραμμα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή για την ονομαστική απόσταση των 300 m με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ Ι και μέθοδο μέτρησης FRE.....	73
Σχήμα 5.31 Τιμές μετρημένων αποστάσεων για 200 επαναλήψεις και για ονομαστική απόσταση 300 m, θέση κεραιών Ι και μέθοδο μέτρησης FRE.....	74
Σχήμα 5.32 Ιστόγραμμα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή για την ονομαστική απόσταση των 400 m με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ Ι και μέθοδο μέτρησης PRM.....	74
Σχήμα 5.33 Τιμές μετρημένων αποστάσεων για 200 επαναλήψεις και για ονομαστική απόσταση 400 m, θέση κεραιών Ι και μέθοδο μέτρησης PRM.....	75

Σχήμα 5.34 Ιστόγραμμα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή για την ονομαστική απόσταση των 400 m με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ Ι και μέθοδο μέτρησης FRE.....	75
Σχήμα 5.35 Τιμές μετρημένων αποστάσεων για 200 επαναλήψεις και για ονομαστική απόσταση 400 m, θέση κεραιών Ι και μέθοδο μέτρησης FRE.....	76
Σχήμα 6.1: Περιοχή πειράματος [Κτηματολόγιο ΑΕ].....	81
Σχήμα 6.2 Διάταξη συστήματος μετρήσεων.....	82
Σχήμα 6.3 Γεωδαιτικός σταθμός GPT-3107N.....	83
Σχήμα 6.4 Πομποδέκτης PulsON® 410.....	83
Σχήμα 6.5 Φωτογραφικός τρίποδας.....	83
Σχήμα 6.6 Βάση στήριξης κινούμενου πομποδέκτη UWB.....	83
Figure 6.7: Περιοχή μελέτης με σημειωμένες τις θέσεις των σημείων που αποτυπώθηκαν (UWB: 101-104) [Κτηματολόγιο ΑΕ].....	84
Σχήμα 6.8: Τροχιά οχήματος για το σενάριο S-I από μετρήσεις GNSS/IMU.....	86
Σχήμα 6.9: Τροχιά οχήματος σεναρίου S-II από μετρήσεις GNSS/IMU.....	87
Σχήμα 6.10 Τροχιά οχήματος για το σενάριο S-I όπως προέκυψε από το λογισμικό του κατασκευαστή.....	89
Σχήμα 6.11 Αποχή τροχιών.....	90
Σχήμα 6.12 Αποχή τροχιών κατά τον άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής.....	91
Σχήμα 6.13 Αποχή τροχιών κάθετα στον άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής.....	91
Σχήμα 6.14 Ποσοστά εμφάνισης τιμών αποχής κατά τον άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής.....	92

Σχήμα 6.15 Κατανομή συχνοτήτων εμφάνισης τιμών αποχής κατά τον άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής.....	92
Σχήμα 6.16 Ποσοστά εμφάνισης τιμών αποχής κάθετα στον άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής.....	93
Σχήμα 6.17 Κατανομή συχνοτήτων εμφάνισης τιμών αποχής κάθετα στον άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής.....	93
Σχήμα 6.18 Τροχιά σεναρίου S-I από το λογισμικό εντοπισμού της Time Domain Inc. με χρήση των συντεταγμένων που προέκυψαν από τις μετρήσεις με τον γεωδαιτικό σταθμό.....	94
Σχήμα 6.19 Αποχή τροχιών.....	95
Σχήμα 6.20 Τροχιά σεναρίου S-I από την εφαρμογή της τεχνικής του τριπλευρισμού.....	96
Σχήμα 6.21 Αποχή τροχιών.....	96
Σχήμα 6.22 Τροχιά σεναρίου S-I από την εφαρμογή της τεχνικής του τριπλευρισμού (πύκνωση δεδομένων μέσω γραμμικής παρεμβολής).....	97
Σχήμα 6.23 Αποχή τροχιών.....	97
Σχήμα 6.24 Τροχιά σεναρίου S-II από το λογισμικό εντοπισμού της Time Domain Inc. με χρήση των συντεταγμένων που δόθηκαν από μετρήσεις με αποστασιόμετρο.....	98
Σχήμα 6.25 Αποχή τροχιών.....	99
Σχήμα 6.26 Αποχή τροχιών κατά τον άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής...100	
Σχήμα 6.27 Αποχή τροχιών κάθετα στον άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής.....	100
Σχήμα 6.28 Ποσοστά εμφάνισης τιμών αποχής κατά τον άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής.....	101

Σχήμα 6.29 Κατανομή συχνοτήτων εμφάνισης τιμών αποχής κατά τον άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής.....	101
Σχήμα 6.30 Ποσοστά εμφάνισης τιμών αποχής κάθετα στον άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής.....	102
Σχήμα 6.31 Κατανομή συχνοτήτων εμφάνισης τιμών αποχής κάθετα στον άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής.....	102
Σχήμα 6.32 Τροχιά σεναρίου S-II από το λογισμικό εντοπισμού της Time Domain Inc. με χρήση των συντεταγμένων που προέκυψαν από τις μετρήσεις με τον γεωδαιτικό σταθμό.....	103
Σχήμα 6.33 Αποχή τροχιών.....	104
Σχήμα 6.34 Τροχιά σεναρίου S-II από την εφαρμογή της τεχνικής του τριπλευρισμού.....	105
Σχήμα 6.35 Αποχή τροχιών.....	105
Σχήμα 6.36 Τροχιά σεναρίου S-II από την εφαρμογή της τεχνικής του τριπλευρισμού (πύκνωση δεδομένων μέσω γραμμικής παρεμβολής).....	106
Σχήμα 6.37 Αποχή τροχιών.....	106
Σχήμα 6.38 Τροχιά σεναρίου S-III από μετρήσεις του συστήματος UWB.....	107
Σχήμα 6.39 Τροχιά σεναρίου S-III από το λογισμικό εντοπισμού της Time Domain Inc. με χρήση των συντεταγμένων που δόθηκαν από μετρήσεις με αποστασιόμετρο.....	108
Σχήμα 6.40 Τροχιά σεναρίου S-III από την εφαρμογή της τεχνικής του τριπλευρισμού.....	109
Σχήμα 6.41 Τροχιά σεναρίου S-III από την εφαρμογή της τεχνικής του τριπλευρισμού (πύκνωση δεδομένων μέσω γραμμικής παρεμβολής).....	109

Σχήμα A.1 Εύρος αβεβαιότητας μετρήσεων για την ΘΕΣΗ I των κεραιών με τις μεθόδους CRE, FRE, PRM.....	118
Σχήμα A.2 Εύρος αβεβαιότητας μετρήσεων για την ΘΕΣΗ II των κεραιών με τις μεθόδους CRE, FRE, PRM.....	119
Σχήμα A.3 Εύρος αβεβαιότητας μετρήσεων για την ΘΕΣΗ III των κεραιών με τις μεθόδους CRE, FRE, PRM.....	120
Σχήμα A.4 Εύρος αβεβαιότητας μετρήσεων για την ΘΕΣΗ IV των κεραιών με τις μεθόδους CRE, FRE, PRM.....	121
Σχήμα A.5 Εύρος αβεβαιότητας μετρήσεων για την ΘΕΣΗ V των κεραιών με τις μεθόδους CRE, FRE, PRM.....	122
Σχήμα A.6 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ I και μέθοδο μέτρησης PRM.....	123
Σχήμα A.7 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ II και μέθοδο μέτρησης PRM.....	124
Σχήμα A.8 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ III και μέθοδο μέτρησης PRM.....	125
Σχήμα A.9 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ IV και μέθοδο μέτρησης PRM.....	126
Σχήμα A.10 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ V και μέθοδο μέτρησης PRM.....	127
Σχήμα A.11 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ I και μέθοδο μέτρησης CRE.....	128
Σχήμα A.12 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ II και μέθοδο μέτρησης CRE.....	129

Σχήμα A.13 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ III και μέθοδο μέτρησης CRE.....	130
Σχήμα A.14 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ IV και μέθοδο μέτρησης CRE.....	131
Σχήμα A.15 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ V και μέθοδο μέτρησης CRE.....	132
Σχήμα A.16 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ I και μέθοδο μέτρησης FRE.....	133
Σχήμα A.17 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ II και μέθοδο μέτρησης FRE.....	134
Σχήμα A.18 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ III και μέθοδο μέτρησης FRE.....	135
Σχήμα A.19 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ IV και μέθοδο μέτρησης FRE.....	136
Σχήμα A.20 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ V και μέθοδο μέτρησης FRE.....	137

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 5.1 Μετρήσεις αποστάσεων με την αβεβαιότητά τους.....	56
Πίνακας 6.1 Συντεταγμένες σημείων S1 και S2.....	85
Πίνακας 6.2 Συνταγμένες σταθερών σημείων σταθμών UWB (προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ '87).....	87
Πίνακας 6.3 Συντεταγμένες σταθερών σημείων σταθμών UWB με χρήση γεωδαιτικού σταθμού και αποστασιόμετρου (τοποκετρικό σύστημα αναφοράς)...	88
Πίνακας A.1 Στατιστικά μεγέθη μετρήσεων αποστάσεων με τη μέθοδο PRM (Στατικό Πείραμα).....	115
Πίνακας A.2 Στατιστικά μεγέθη μετρήσεων αποστάσεων με τη μέθοδο CRE (Στατικό Πείραμα).....	116
Πίνακας A.2 Στατιστικά μεγέθη μετρήσεων αποστάσεων με τη μέθοδο FRE (Στατικό Πείραμα).....	117

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο και Στόχοι Εργασίας

Η ανάγκη για προσδιορισμό θέσης αντικειμένων, οχημάτων και πεζών τόσο σε κινηματικές όσο και στατικές εφαρμογές διαρκώς μεγαλώνει ως αποτέλεσμα της προόδου της τεχνολογίας. Τις τελευταίες δεκαετίες η ανάπτυξη των παγκόσμιων δορυφορικών συστημάτων εντοπισμού θέσης (*GNSS, Global Positioning Navigation Satellite Systems*) και ιδίως του *GPS (Global Positioning System)* έχουν βελτιώσει θεαματικά τόσο την ποιότητα, την διαθεσιμότητα όσο και την ευκολία αντιμετώπισης του προβλήματος.

Ωστόσο, τα δορυφορικά συστήματα εντοπισμού αδυνατούν να προσφέρουν λύση σε κλειστούς χώρους καθώς το σήμα που εκπέμπεται από τους δορυφόρους εξασθενεί σημαντικά ή ολοκληρωτικά καθώς διέρχεται μέσα από εμπόδια. Ως αποτέλεσμα, έχουν αναπτυχθεί εναλλακτικές τεχνολογίες που στηρίζονται αρχή του αδρανειακού εντοπισμού, του οπτικού εντοπισμού και εντοπισμού μέσω ραδιοκυμάτων *RF*.

Σε αυτή την διπλωματική εργασία παρουσιάζονται οι κύριες τεχνολογίες εντοπισμού σε κλειστούς χώρους καθώς και τα πεδία εφαρμογών τους. Ωστόσο, βασικό αντικείμενο αποτελεί η μελέτη μιας τεχνολογίας ραδιοκυμάτων υπέρ-ευρείας ζώνης *UWB (Ultra Wide Band)*. Συγκεκριμένα, το ενδιαφέρον αυτής της εργασίας εστιάζεται στην αξιολόγηση του συστήματος *UWB PulsON® 410*, της εταιρείας *Time Domain Inc.*. Το σύστημα ελέγχεται ως προς την ακρίβεια, την αξιοπιστία και την εμβέλεια του σε στατικό και κινηματικό εντοπισμό. Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, το σύστημα ελέγχεται στις πλέον ιδανικές συνθήκες σε ανοικτό περιβάλλον και συγκρίνεται με δοκιμασμένα συστήματα υψηλότερης ακρίβειας τα οποία θεωρούνται ως πρότυπα.

1.2 Ιστορικά Στοιχεία

Έως τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, το πρόβλημα του εντοπισμού βασιζόταν αποκλειστικά σε οπτικομηχανικές μεθόδους. Καθώς όμως τα χρόνια περνούσαν, αυξάνονταν και οι ανάγκες για γρήγορο και ακριβή εντοπισμό. Αφορμή για την περεταίρω μελέτη στα συστήματα εντοπισμού υπήρξαν οι στρατιωτικές ανάγκες. Έτσι παραμονές του Β' Παγκοσμίου Πολέμου αναπτύχθηκε το σύστημα ραντάρ το οποίο χρησιμοποιήθηκε ευρέως πρώτα από τη Μ. Βρετανία για τον εντοπισμό των σχηματισμών των εχθρικών αεροπλάνων πολύ πριν αυτά γίνουν ορατά με κυάλια επιτρέποντας έτσι στην έγκαιρη απογείωση αεροσκαφών για την αναχαίτισή τους παίζοντας καθοριστικό ρόλο στην επικράτηση της επί της Γερμανίας ιδίως κατά τα πρώτα χρόνια του πολέμου όταν και είχε την αποκλειστική του χρήση. Η χρήση του συστήματος ραντάρ επεκτάθηκε και σε πολεμικά πλοία επιτρέποντας τόσο στην ανίχνευση των κινήσεων εχθρικών σκαφών, όσο και στην ακριβέστερη σκόπευση των πυροβόλων των πλοίων επιτυγχάνοντας ακριβή πλήγματα από μεγάλη απόσταση.

Μετά τον πόλεμο και χάρη στην ανάπτυξη των πυραύλων άρχισε η προσπάθεια του ανθρώπου για την κατάκτηση του διαστήματος. Στα πλαίσια αυτά κατά τη δεκαετία του '50 άρχισε η εκτόξευση τεχνητών δορυφόρων για στρατιωτική χρήση τόσο από τις ΗΠΑ, όσο και από την ΕΣΣΔ. Έτσι αναπτύχθηκε η ιδέα της ανάπτυξης ενός παγκόσμιου συστήματος εντοπισμού που θα βασιζόταν σε δορυφόρους και θα επέτρεπε αφενός τον έγκαιρο εντοπισμό μιας εχθρικής κίνησης, αφετέρου την καθοδήγηση των πυραυλικών συστημάτων για ένα επιθετικό ή αμυντικό χτύπημα. Η ιδέα αυτή άρχισε να υλοποιείται κατά τη δεκαετία του '80 με την ανάπτυξη από τις ΗΠΑ του *GPS* για καθαρά στρατιωτική χρήση. Το σύστημα αυτό πήρε την τελική του μορφή στις αρχές τις δεκαετίας του '90.

Παράλληλα όμως, δεδομένων των πλεονεκτημάτων αυτού του συστήματος εντοπισμού, ξεκίνησε και η χρήση του για πολιτικές εφαρμογές (π.χ. γεωδαισία) χρησιμοποιώντας κάποιες από τις ελεύθερες συχνότητες εκπομπής του σήματος. Το *GPS* παρέμενε όμως ένα εργαλείο κατασκευασμένο για στρατιωτικές εφαρμογές με τις ΗΠΑ να διατηρούν το αποκλειστικό δικαίωμα διαχείρισής του επεμβαίνοντας σε

αυτό επηρεάζοντας την ακρίβειά του σε περιόδους πολεμικών συγκρούσεων. Έτσι ξεκίνησε η ανάπτυξη και άλλων παρεμφερών συστημάτων από άλλες χώρες. Π.χ. η ΕΕ αναπτύσσει το σύστημα εντοπισμού *GALILEO* για καθαρά πολιτική χρήση.

Παρότι η χρήση του *GPS* στον εντοπισμό βελτίωσε θεαματικά την ευκολία και τη διαχείριση πολλών εφαρμογών, δεν έδωσε λύσεις σε κλειστούς χώρους λόγω της εξασθένησης του σήματος κατά την εισχώρησή του σε αυτούς. Για αυτό το λόγο ξεκίνησε η ανάπτυξη συστημάτων εντοπισμού που θα μπορούσαν να δώσουν λύση εκεί που το *GPS* αδυνατούσε. Η ανάπτυξη αυτών των συστημάτων βασίστηκε είτε σε υπάρχοντες τεχνολογίες που είχαν δημιουργηθεί για άλλες χρήσεις, όπως το *Bluetooth* ή το *Wi-Fi*, είτε σε τεχνολογίες που δημιουργήθηκαν αποκλειστικά για το σκοπό αυτό όπως το *UWB*.

Ουσιαστικά η ιδέα της τεχνολογίας *UWB* για τη μετάδοση σημάτων ευρείας ζώνης ξεκίνησε με τα πειράματα του *Hertz* το 1880 και του *Marconi* το 1901. Όμως τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας δεν εξετάστηκαν με ακρίβεια εκείνη την εποχή λόγω έλλειψης της απαραίτητης τεχνολογίας καθώς απαιτούνταν πομποί πολύ μεγάλης ισχύος για τη μετάδοση τέτοιου τύπου σήματος κάτι που καθιστούσε αυτόν τον τρόπο επικοινωνίας ασύμφορο οικονομικά [Thomos, 2011].

Σχεδόν 60 χρόνια μετά τα πειράματα του *Marconi*, η λογική της τεχνολογίας *UWB* άρχισε να βρίσκει εφαρμογές στον στρατιωτικό τομέα αρχικά για την ασφαλή μετάδοση πληροφοριών καθώς και για την ανίχνευση αντικειμένων με τη λογική του ραντάρ λόγω της μεγάλης ακρίβειας που μπορούσε να επιτευχθεί. Ο όρος *UWB* άρχισε να χρησιμοποιείται στις Η.Π.Α. κατά τη δεκαετία του '80 [Thomos, 2011].

Τα επόμενα χρόνια η εξέλιξη αυτής της τεχνολογίας ήταν ραγδαία. Στα τέλη της δεκαετίας του '90 και στις αρχές του 2000 κάνουν την εμφάνισή τους οι πρώτες εταιρείες κατασκευής εμπορικών συστημάτων *UWB* (όπως η *Time Domain Inc.*). Σημείο - σταθμός σε αυτή την τεχνολογία αποτέλεσε ο Φεβρουάριος του 2002 όταν η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών των Η.Π.Α. θέσπισε τα όρια της ζώνης του φάσματος των συχνοτήτων στην οποία ανατέθηκε η λειτουργία των

συστημάτων *UWB*. Από εκεί και πέρα ξεκινά η μαζική παραγωγή εμπορικών συστημάτων *UWB* για εφαρμογές εντοπισμού.

1.3 Δομή Εργασίας

Σε αυτό το Κεφάλαιο παρουσιάστηκαν κάποια ιστορικά στοιχεία γύρω από τις τεχνολογίες εντοπισμού καθώς και ο σκοπός της παρούσας εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο, αναλύονται οι βασικές τεχνικές που υπάρχουν για εντοπισμό σε κλειστούς χώρους (τριπλευρισμός, χαρτογράφηση αποτυπώματος ισχύος σήματος, εντοπισμός εγγύτητας) καθώς και οι αλγόριθμοι που τις υλοποιούν.

Στο τρίτο Κεφάλαιο εξετάζονται οι τεχνολογίες που υπάρχουν για εντοπισμό σε κλειστούς χώρους καθώς και που αυτές εφαρμόζονται ή μπορούν να εφαρμοστούν μελλοντικά τόσο στην ανθρώπινη καθημερινότητα, όσο και σε πιο εξειδικευμένες περιπτώσεις.

Το τέταρτο Κεφάλαιο αφορά αποκλειστικά την τεχνολογία *UWB*. Αναλύονται οι βασικές αρχές λειτουργίας του και γίνεται μια σύντομη παρουσίαση στα διαθέσιμα συστήματα που κυκλοφορούν στην αγορά καθώς και στις εταιρείες κατασκευής τους. Στη συνέχεια αναλύεται το σύστημα *PulsON® 410*, πώς αυτό χρησιμοποιείται σε εφαρμογές εντοπισμού καθώς και τα πλεονεκτήματά του.

Το πέμπτο Κεφάλαιο περιλαμβάνει την περιγραφή και την ανάλυση του πειράματος που πραγματοποιήθηκε για την αξιολόγηση του συστήματος σε στατικό εντοπισμό ως προς την εμβέλεια, την αξιοπιστία και την ακρίβειά του. Αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, η υλοποίησή του και γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων και εξαγωγή συμπερασμάτων.

Στο έκτο Κεφάλαιο περιγράφεται το πείραμα που αφορά την αξιολόγηση του συστήματος σε κινηματικό εντοπισμό. Αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, η υλοποίησή του και γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων και εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την ακρίβεια και την αξιοπιστία του με διαφορετικές μεθόδους εντοπισμού.

Τέλος, στο έβδομο Κεφάλαιο συνοψίζονται τα τελικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη του συστήματος *PulsON® 410* και παρουσιάζονται προτάσεις για περεταίρω διερεύνηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ

Οι τεχνολογίες εντοπισμού σε κλειστούς χώρους χρησιμοποιούν ποικίλες τεχνικές για να προσδιορίσουν την θέση και τα κινηματικά χαρακτηριστικά ενός αντικειμένου στο χώρο. Σε αυτό το Κεφάλαιο αναλύονται οι τεχνικές εντοπισμού που εφαρμόζουν σήμερα οι περισσότερες τεχνολογίες εντοπισμού και οι οποίες μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες ανάλογα με τη μεθοδολογία που χρησιμοποιούν: τριπλευρισμός, χαρτογράφηση αποτυπώματος ισχύος σήματος και εντοπισμός εγγύτητας.

2.1 Τριπλευρισμός (*Trilateration*)

Μια βασική κατηγορία των τεχνικών εντοπισμού σε κλειστούς χώρους είναι οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν την τεχνική του τριπλευρισμού (*trilateration*). Ο βασικός αλγόριθμος στηρίζεται στην επίλυση οπισθοτομίας στο χώρο με πλευρομετρήσεις. Παραλλαγή του βασικού αλγόριθμου αποτελεί η συνδυασμένη χρήση μετρημένων γωνιών. Σε κάποιες περιπτώσεις ο υπολογισμός θέσης μπορεί να στηρίζεται αποκλειστικά σε μετρήσεις γωνιών, οπότε το πρόβλημα μεταπίπτει στο πρόβλημα του τριγωνισμού (*triangulation*). Σε κάθε περίπτωση, για την εφαρμογή της μεθόδου είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός ελάχιστου αριθμού σημείων γνωστών συντεταγμένων, στα οποία είναι τοποθετημένοι είτε πομποί είτε δέκτες ανάλογα με την τεχνική που χρησιμοποιείται.

Συνήθως, προκειμένου να αυξηθεί η ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης, χρησιμοποιούνται μετρήσεις από περισσότερα από τα απαραίτητα σημεία οι οποίες συνορθώνονται με τη Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων (MET).

2.1.1 Τεχνικές Υπολογισμού Απόστασης

Οι αλγόριθμοι αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούν τις αποστάσεις ανάμεσα στο σημείο του οποίου ζητείται η θέση και σημείων γνωστών συντεταγμένων. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση του δισδιάστατου (2D) χώρου αρκεί η γνώση

στοιχείων από τρία άλλα σημεία, ενώ στην περίπτωση του τρισδιάστατου χώρου (3D) είναι απαραίτητη η γνώση τεσσάρων σημείων.

Για τον προσδιορισμό της τιμής κάθε μιας από τις αποστάσεις παρατήρησης αξιοποιούνται τα χαρακτηριστικά του λαμβανόμενου σήματος. Ακολουθεί η ανάλυση αυτών των χαρακτηριστικών και της εφαρμογής τους στην εύρεση της απόστασης αλλά και του προσδιορισμού της θέσης του ζητούμενου σημείου.

2.1.1α Χρονική Στιγμή Άφιξης Σήματος (*Time of Arrival, ToA*)

Σε αυτή την περίπτωση η απόσταση παρατήρησης προσδιορίζεται από την χρονική διάρκεια της διάδοσης του σήματος από τον πομπό στον δέκτη και κατά συνέπεια ανάμεσα σε ένα σημείο γνωστών συντεταγμένων και του ζητούμενου σημείου. Θεωρώντας ως δεδομένο ότι, το RF σήμα κινείται με την ταχύτητα του φωτός ($c = 3 \cdot 10^8 m/s$) και ότι υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη χωρίς να υπάρχουν μεταξύ τους πάσης φύσεως παρεμβολές, η ζητούμενη απόσταση προκύπτει από το γινόμενο της χρονικής διάρκειας διάδοσης του σήματος με την ταχύτητα του φωτός.

Θεωρώντας ως t_0 τη χρονική στιγμή εκπομπής του σήματος, η χρονική διάρκεια διάδοσής του από κάθε πομπό προκύπτει από την χρονική στιγμή άφιξης του σήματος στον δέκτη (*Time of Arrival, ToA*). Με αυτή τη μεθοδολογία στην περίπτωση του δισδιάστατου χώρου και με τον ελάχιστο απαιτούμενο αριθμό γνωστών σημείων, προκύπτουν οι εξισώσεις:

$$r_1^2 = (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 = (c(t_1 - t_0))^2 \quad (2.1)$$

$$r_2^2 = (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 = (c(t_2 - t_0))^2 \quad (2.2)$$

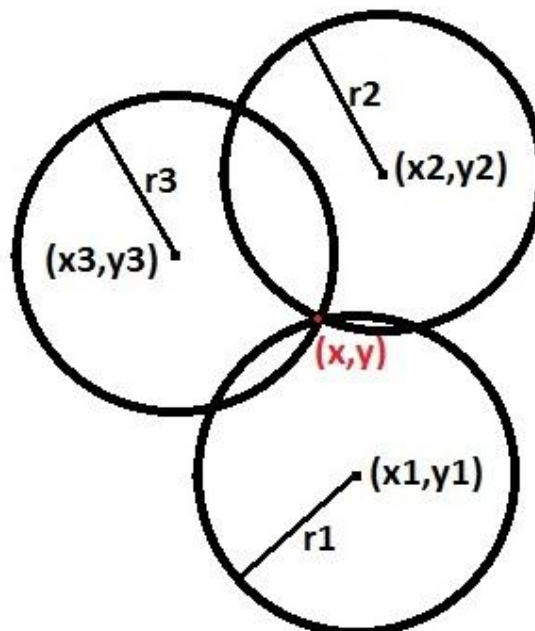
$$r_3^2 = (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 = (c(t_3 - t_0))^2 \quad (2.3)$$

όπου, (x, y) οι συντεταγμένες του ζητούμενου σημείου, t_1, t_2, t_3 και $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ οι χρονικές στιγμές άφιξης του σήματος και οι συντεταγμένες αντίστοιχα των πομπών σε τοπικό σύστημα αναφοράς.

Από τις Εξισώσεις 2.1 έως 2.3 προκύπτει ότι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων της κάθε μίας είναι κύκλος με κέντρο το τις συντεταγμένες του πομπού. Έτσι το ζητούμενο σημείο προκύπτει από την τομή αυτών των τριών κύκλων (Σχήμα 2.1).

Στην περίπτωση του τρισδιάστατου χώρου ο γεωμετρικός τόπος των σημείων της κάθε μίας εξίσωσης είναι σφαίρα. Το ζητούμενο σημείο προκύπτει από την τομή των σφαιρών και για αυτό είναι απαραίτητη η ύπαρξη τεσσάρων σημείων γνωστών συντεταγμένων όπου εγκαθίστανται οι πομποί, οπότε προκύπτει μοναδική λύση από την επίλυση του συστήματος.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότερα από τα ελάχιστα απαιτούμενα σημεία. Σε αυτή την περίπτωση οι αποστάσεις που προσδιορίζονται συνορθώνονται με τη MET. Προκειμένου να επιτευχθεί όσο το δυνατόν καλύτερη ακρίβεια στο τελικό αποτέλεσμα επιλέγεται η απόρριψη όποιων αποστάσεων διαφέρουν σημαντικά από την αληθή τιμή της απόστασης.



Σχήμα 2.1: Προσδιορισμός θέσης σημείου με μετρήσεις ToA (2D)

Figure 2.1 Localization with ToA measurements (2D)

Δεδομένου ότι η διάδοση του σήματος RF γίνεται με την ταχύτητα του φωτός, η ακρίβεια προσδιορισμού της απόστασης (και κατά συνέπεια των συντεταγμένων) επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια μέτρησης του χρόνου. Για αυτό είναι απαραίτητος ο ακριβής συγχρονισμός πομπού - δέκτη.

Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια της μεθόδου είναι οι παρεμβολές, οι πολυανακλάσεις, η εξασθένιση του σήματος κατά τη διάδοσή του και τυχόν εμπόδια στην διεύθυνση διάδοσης.

2.1.1β Χρονική Διαφορά Άφιξης Σήματος (*Time Difference of Arrival, TDoA*)

Με αυτή τη μεθοδολογία υπολογίζεται η διαφορά της απόστασης του πομπού από δύο δέκτες μέσω της μέτρησης της διαφοράς της χρονικής άφιξης του σήματος *RF* μεταξύ των δύο δεκτών (*Time Difference of Arrival, TDoA*). Δηλαδή αν η εκπομπή γίνεται τη χρονική στιγμή t_0 και δύο δέκτες λαμβάνουν το σήμα *RF* τις χρονικές στιγμές t_1 και t_2 , τότε η διαφορά $|t_2 - t_1|$ πολλαπλασιασμένη με την ταχύτητα του φωτός δίνει τη διαφορά της απόστασης πομπού - δέκτη 1 από την απόσταση πομπού - δέκτη 2.

Στη δισδιάστατη περίπτωση, όπως έχει αναφερθεί, είναι απαραίτητη η ύπαρξη τριών σημείων γνωστών συντεταγμένων όπου τοποθετούνται οι δέκτες. Καθώς σχηματίζονται δύο ζευγάρια διαφορών αποστάσεων (δέκτης 1 - δέκτης 2 και δέκτης 1 - δέκτης 3) προκύπτουν οι ακόλουθες δύο εξισώσεις:

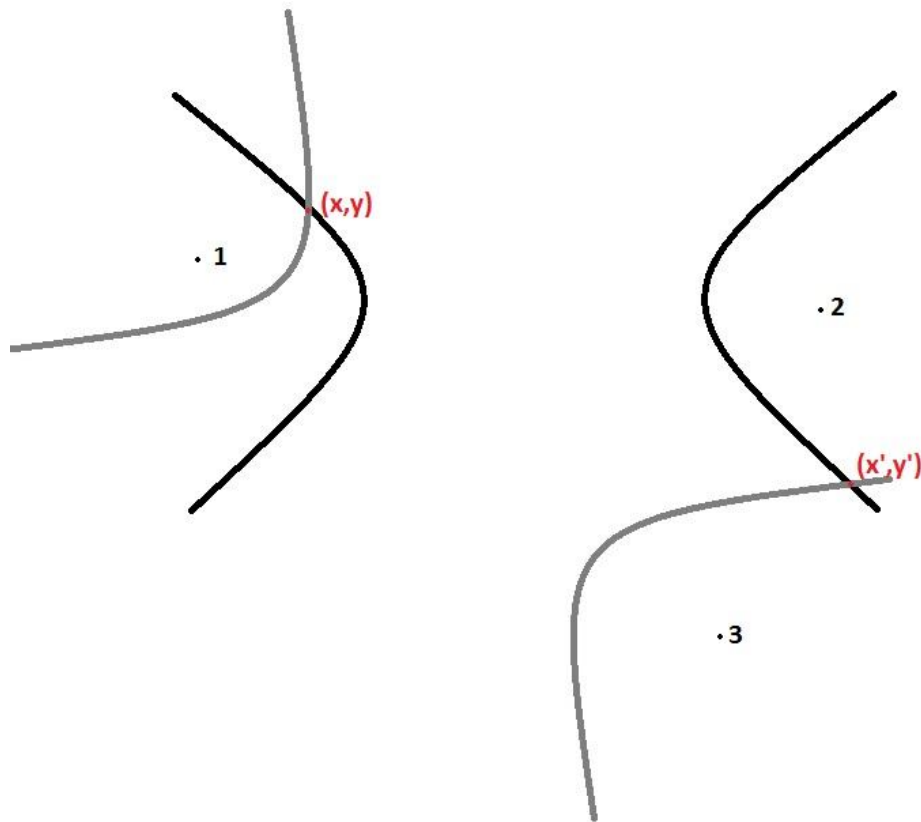
$$c(t_2 - t_1) = c(t_2 - t_0) - c(t_1 - t_0) = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \quad (2.4)$$

$$(t_3 - t_1) = c(t_3 - t_0) - c(t_1 - t_0) = \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \quad (2.5)$$

όπου (x, y) οι συντεταγμένες του ζητούμενου σημείου, t_1, t_2, t_3 και $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ οι χρονικές στιγμές άφιξης του σήματος *RF* και οι συντεταγμένες αντίστοιχα των δεκτών.

Ο γεωμετρικός τόπος των σημείων κάθε μίας από τις παραπάνω εξισώσεις είναι υπερβολή (Σχήμα 2.2). Έτσι από την τομή των δύο υπερβολών προκύπτουν δύο σημεία από τα οποία το ένα απορρίπτεται εφόσον βρίσκεται εκτός της περιοχής όπου γίνεται ο εντοπισμός.

Στην περίπτωση τρισδιάστατου εντοπισμού ακολουθείται η ίδια διαδικασία. Ωστόσο, απαιτείται ακόμη ένα σημείο γνωστών συντεταγμένων. Εφόσον υπάρχουν περισσότερες από τις ελάχιστες αναγκαίες μετρήσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί η MET.



Σχήμα 2.2: Προσδιορισμός θέσης από μετρήσεις TDoA (2-D)
Figure 2.2 Localization with TDoA measurements (2-D)

Από τις Εξισώσεις 3.4 και 3.5 είναι εμφανές ότι δεν υπάρχει εξάρτηση από την χρονική στιγμή εκπομπής του σήματος RF κάτι που σημαίνει ότι ενδεχόμενος αποσυγχρονισμός μεταξύ πομπού και δεκτών δεν θα επηρεάσει την ακρίβεια του εντοπισμού. Είναι απαραίτητο όμως να υπάρχει συγχρονισμός μεταξύ των δεκτών καθώς πιθανή απόκλιση μεταξύ τους αποτελεί πηγή σοβαρού σφάλματος που επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα. Επιπλέον, την ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος επηρεάζουν και οι ίδιοι παράγοντες που επηρεάζουν τις ToA μετρήσεις.

2.1.1γ Ισχύς Λαμβανόμενου Σήματος (*Received Signal Strength, RSS*)

Οι αλγόριθμοι αυτής της κατηγορίας προσδιορίζουν τις αποστάσεις μεταξύ των σημείων γνωστών συντεταγμένων και του ζητούμενου σημείου βάση των μετρήσεων ισχύος ή εξασθένησης του σήματος *RF*. Καθώς το σήμα *RF* διαδίδεται από τον πομπό, λαμβάνεται κατά την άφιξή του από τον δέκτη εξασθενημένο για διάφορους λόγους. Έχοντας γίνει μια μοντελοποίηση του τρόπου διάδοσης του σήματος *RF* στον χώρο, μπορεί να προκύψει μια συσχέτιση της μεταβολής της ισχύος του σήματος *RF* συναρτήσει της απόστασης. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να προσδιοριστούν οι αποστάσεις από τον πομπό προς τρεις σταθερούς δέκτες για την δισδιάστατη περίπτωση (ή τέσσερις για την περίπτωση τρισδιάστατου εντοπισμού) και ακολουθείται η ίδια διαδικασία επίλυσης με την περίπτωση των μετρήσεων *ToA*.

Για την δισδιάστατη περίπτωση σχηματίζονται οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$r_1^2 = (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 \quad 2.6$$

$$r_2^2 = (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 \quad 2.7$$

$$r_3^2 = (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 \quad 2.8$$

Το πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής σε σχέση με τις δύο προηγούμενες είναι ότι δεν απαιτείται οπτική επαφή μεταξύ δέκτη και πομπού, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμη για εντοπισμό σε κλειστούς χώρους όπου ενδέχεται να υπάρχουν αρκετά εμπόδια. Όμως η ακρίβεια της ενδέχεται να είναι χαμηλή καθώς είναι ιδιαίτερα δύσκολο να μοντελοποιηθεί με ακρίβεια η διάδοση του σήματος *RF*, ιδίως σε κλειστούς χώρους με εμπόδια, όπου εμφανίζονται πολυανακλάσεις.

2.1.1δ Χρονική Διάρκεια Μετάδοσης Σήματος Μετ' Επιστροφής (*Two Way Time of Flight, TWToF*)

Οι αλγόριθμοι αυτής της υποκατηγορίας προσδιορίζουν την απόσταση πομπού - δέκτη χρησιμοποιώντας την χρονική διάρκεια από τη στιγμή που εκπέμπεται το σήμα *RF* έως ότου επιστρέψει και πάλι στον πομπό (*Two Way Time of Flight*,

TWToF). Ουσιαστικά χρησιμοποιείται η τεχνική του ραντάρ καθώς το σήμα *RF* αποστέλλεται, φτάνει σε έναν αναμεταδότη, ο οποίος αφού το λάβει το στέλνει πίσω στη θέση εκπομπής.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων του ζητούμενου σημείου είναι η ίδια με αυτή που ακολουθείται στις μετρήσεις *ToA* με την διαφορά ότι η χρονική διάρκεια της μέτρησης πρέπει να διαιρεθεί στο μισό λόγω της διπλής διαδρομής.

Βασικό πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι η μείωση της επίδρασης ενός πλημμελούς συγχρονισμού μεταξύ πομπού - αναμεταδότη. Ωστόσο, πηγή σφάλματος αυτής της τεχνικής είναι η καθυστέρηση απόκρισης του αναμεταδότη. Η επίδραση που μπορεί να έχει αυτή η καθυστέρηση στην ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος αυξάνεται όσο μειώνεται η απόσταση μεταξύ πομπού και αναμεταδότη, εφόσον ο χρόνος καθυστέρησης της αναμετάδοσης αποτελεί σημαντικό τμήμα του συνολικού χρόνου διάδοσης του σήματος *RF* μετ' επιστροφής. Αυτό σημαίνει ότι η έκταση του εσωτερικού χώρου παίζει σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια της εν λόγω τεχνικής. Επιπλέον ισχύουν και οι παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων *ToA* (πολυανακλάσεις, οπτική επαφή, κ.α.).

2.1.1ε Φάση Λαμβανόμενου Σήματος (*Phase of Arrival, PoA*)

Η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη μπορεί να προκύψει από τη μέτρηση της φάσης του σήματος *RF* που λαμβάνει ο δέκτης (*Phase of Arrival, PoA*). Για να γίνει αυτό πρέπει ο δέκτης να γνωρίζει την γωνιακή συχνότητα του σήματος *RF* στον χρόνο. Με αυτό τον τρόπο προκύπτει η απόσταση Δz σύμφωνα και με την σχέση:

$$\Delta z = \left(\frac{\varphi_1 \cdot c}{\omega} \right) \quad (2.9)$$

όπου, φ_1 η φάση του κύματος, ω η γωνιακή συχνότητα του κύματος και c η ταχύτητα διάδοσης του φωτός.

Το Δz αντιστοιχεί στην απόσταση από τον πομπό, αποκλειστικά στην περίπτωση που η απόσταση αυτή είναι μικρότερη από το μήκος κύματος. Σε διαφορετική περίπτωση πρέπει να είναι γνωστός ο αριθμός των ακέραιων κύκλων που έχουν προηγηθεί.

Στην περίπτωση που είναι γνωστό το Δz , τότε με γνωστές τις αποστάσεις ανάμεσα στους πομπούς και τον δέκτη μπορεί να βρεθεί η θέση του τελευταίου με τη μεθοδολογία που ακολουθείται στον αλγόριθμο *ToA*. Επίσης, μπορεί να γίνει υπολογισμός των διαφορών φάσης μεταξύ του σήματος *RF* που προέρχεται από δύο πομπούς και να ακολουθηθεί η μεθοδολογία του αλγορίθμου *TDoA*.

Η μέτρηση της φάσης του λαμβανόμενου σήματος *RF* επηρεάζεται εύκολα από παρεμβολές και πολυανακλάσεις. Ιδίως στην περίπτωση έλλειψης οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη το τελικό αποτέλεσμα ενδέχεται να είναι ιδιαίτερα αναξιόπιστο.

2.1.2 Τεχνικές Χρήσης Γωνίας Κατεύθυνσης Σήματος (*Angle of Arrival, AoA*)

Μια επιπλέον κατηγορία προσδιορισμού της θέσης σημείου είναι αυτή που στηρίζεται στη χρήση των γωνιών άφιξης του σήματος *RF* (*Angle of Arrival, AoA*). Σε αυτή την περίπτωση, ο πομπός που είναι τοποθετημένος στο ζητούμενο σημείο εκπέμπει ένα σήμα *RF* το οποίο λαμβάνεται από τους δέκτες που είναι τοποθετημένοι στα σημεία γνωστών συντεταγμένων. Με ειδικές κεραίες μπορεί να μετρηθεί η διεύθυνση κατεύθυνσης της διάδοσης του σήματος *RF* προς κάθε δέκτη. Οι γωνίες που προκύπτουν χρησιμοποιούνται για τον τελικό προσδιορισμό των άγνωστων συντεταγμένων του πομπού.

Στην περίπτωση εντοπισμού δισδιάστατου χώρου είναι απαραίτητη η ύπαρξη τουλάχιστον δύο σημείων γνωστών συντεταγμένων. Προσδιορίζονται οι γωνίες θ_1 και θ_2 (Σχήμα 2.3). Έτσι σχηματίζονται οι εξισώσεις:

$$x = x_1 + r_1 \sin \theta_1 \quad (2.9)$$

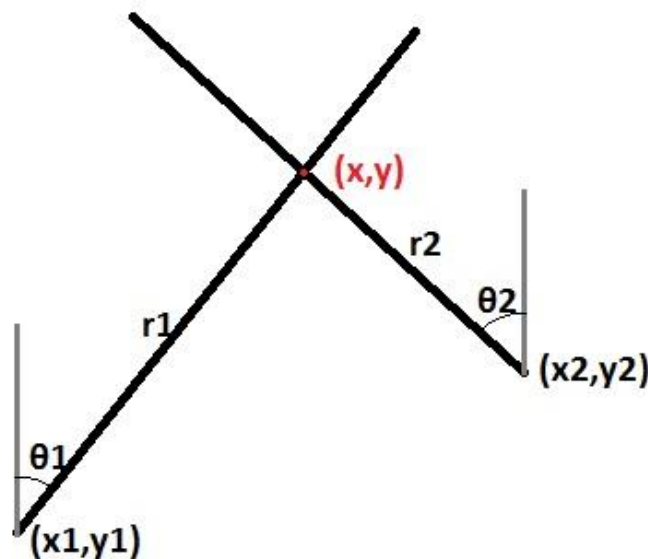
$$y = y_1 + r_1 \cos \theta_1 \quad (2.10)$$

$$x = x_2 + r_2 \sin \theta_2 \quad (2.11)$$

$$y = y_2 + r_2 \cos \theta_2 \quad (2.12)$$

όπου (x, y) οι συντεταγμένες του ζητούμενου σημείου, (x_1, y_1) και (x_2, y_2) οι συντεταγμένες των δύο δεκτών και r_1, r_2 οι αποστάσεις του κάθε δέκτη από τον πομπό (ζητούμενο σημείο). Η επίλυση αυτού του συστήματος τεσσάρων εξισώσεων δίνει ως μοναδική λύση τις ζητούμενες συντεταγμένες.

Στην περίπτωση του τρισδιάστατου χώρου είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός ακόμη σημείου γνωστών συντεταγμένων προκειμένου να γίνει ο εντοπισμός. Εφόσον υπάρχουν περισσότερα από τα απαραίτητα σημεία γνωστών συντεταγμένων, μπορεί να εφαρμοστεί η MET.



Σχήμα 2.3: Προσδιορισμός θέσης σημείου με τη μέθοδο AoA (2D)

Figure 2.3 Localization based on AoA measurements (2D)

Η τεχνική αυτή έχει δύο βασικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις τεχνικές που χρησιμοποιούν αποστάσεις:

- απαιτεί ένα λιγότερο σημείο γνωστών συντεταγμένων από τα ελάχιστα απαραίτητα.
- δεν απαιτείται συγχρονισμός ανάμεσα στον πομπό και τους δέκτες που έχει ως επακόλουθο να μην υφίσταται σφάλμα συγχρονισμού στο τελικό αποτέλεσμα.

Βασικά μειονεκτήματα αυτής της τεχνικής είναι ο περίπλοκος εξοπλισμός που απαιτείται (ειδικές κεραίες) για να γίνουν οι μετρήσεις των γωνιών διάδοσης του σήματος *RF* και τα σημαντικά σφάλματα που μπορεί να υπάρχουν στη μέτρηση των γωνιών, τα οποία αυξάνονται στην περίπτωση που δεν υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Όπως στις τεχνικές που χρησιμοποιούν μετρήσεις αποστάσεων έτσι και εδώ παράγοντες που έχουν να κάνουν με πολυανακλάσεις του σήματος *RF* επηρεάζουν σημαντικά την ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος.

2.2 Χαρτογράφηση Αποτυπώματος Ισχύος Σήματος (*Fingerprinting*)

Βασική προϋπόθεση των τεχνικών που χρησιμοποιούν ως αφετηρία την χαρτογράφηση του αποτυπώματος της ισχύος σήματος *RF* (RSS) αποτελεί η πειραματική καταγραφή των τιμών RSS στην περιοχή ενδιαφέροντος, οπότε παράγεται ένας χάρτης αναφοράς που συσχετίζει τιμές ισχύος σήματος *RF* στη συγκεκριμένη περιοχή και συνθήκες με αποστάσεις πομπού - δέκτη. Ουσιαστικά συλλέγονται τα δακτυλικά αποτυπώματα (*fingerprints*) του εσωτερικού χώρου, μια διαδικασία που γίνεται μέσω της συλλογής στοιχείων για τη συμπεριφορά του σήματος *RF* σε κάθε σημείο του εσωτερικού χώρου. Με αυτόν τον τρόπο όταν γίνουν οι μετρήσεις της έντασης του σήματος *RF* για την εφαρμογή του εντοπισμού, οι αλγόριθμοι καλούνται να εφαρμόσουν μια τεχνική προκειμένου να προσδιορίσουν τις πιθανές θέσεις του αντικειμένου στον χώρο συσχετίζοντας τον χάρτη που έχει παραχθεί στην αρχή με τις μετρήσεις της έντασης του σήματος *RF*.

Η λογική αυτού του είδους εντοπισμού στηρίζεται σε ανάλυση της συμπεριφοράς / κατανομής του σήματος *RF* στον χώρο με σκοπό να ελαχιστοποιηθούν οι επιδράσεις του περιβάλλοντος στο τελικό αποτέλεσμα κάτι που αποτελεί βασικό πρόβλημα των αλγορίθμων που χρησιμοποιούν τις τεχνικές του τριπλευρισμού. Η τεχνική αυτή βασίζεται σε μεγάλο πλήθος μετρήσεων. Φυσικά ενδέχεται να υπάρξουν προβλήματα κατά την τελική επιλογή της θέσης του αντικειμένου κάτι το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε λάθος αποτέλεσμα. Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η διαδικασία χαρτογράφησης του χώρου λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής τους.

Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την τελική επιλογή της θέσης του αντικειμένου αναλύονται παρακάτω.

2.2.1 Πιθανοτικές Μέθοδοι (*Probabilistic Methods*)

Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούν την θεωρία πιθανοτήτων για τον εντοπισμό αντικειμένων ενδιαφέροντος. Ειδικότερα, στηρίζονται στον υπολογισμό της πιθανότητας με την οποία ένα διάνυσμα μετρήσεων αντιστοιχεί σε μια υποψήφια θέση. Στη συνέχεια στη φάση των μετρήσεων έχοντας το διάνυσμα μετρήσεων γίνεται αντιστοίχιση του και πάλι βάση πιθανοτήτων με την πλησιέστερη από τις υποψήφιες θέσεις. Με αυτόν τον τρόπο προσεγγίζονται οι συντεταγμένες του ζητούμενου αντικειμένου. Εναλλακτικά ο εντοπισμός προκύπτει ως ο μέσος όρος των συντεταγμένων όλων των υποψήφιων θέσεων, βάσει κριτηρίων αναζήτησης.

Γενικά η αξιοπιστία της μεθόδου είναι ικανοποιητική, ωστόσο το σημαντικότερό της μειονέκτημα είναι ότι απαιτεί αρκετή μνήμη για την αποθήκευση των δεδομένων και αρκετό χρόνο εκτέλεσης.

2.2.1α Πλησιέστερος Γείτονας (*Nearest Neighbour*)

Πρόκειται για μία από της Πιθανοτικές Μεθόδους στην οποία η διαδικασία εντοπισμού στηρίζεται σε σύγκριση διανυσμάτων της έντασης σήματος RF που συλλέγονται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων και έναντι αυτών με τον χάρτη της συμπεριφοράς του σήματος RF στον χώρο που έχει προκύψει στο πρώτο στάδιο. Από αυτή την σύγκριση προκύπτει ένας αριθμός υποψήφιων θέσεων στα σημεία όπου οι μετρήσεις βρίσκονται κοντά στις τιμές που δίνει ο χάρτης.

Η θέση του ζητούμενου σημείου βρίσκεται στην περιοχή όπου συγκεντρώνονται οι περισσότερες υποψήφιες θέσεις. Οι συντεταγμένες αυτού του σημείου μπορούν να προκύψουν ως μέσος όρος των συντεταγμένων των υποψήφιων σημείων.

Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η αυξημένη της ακρίβειά σε σχέση με άλλες Πιθανοτικές Μεθόδους. Τα μειονεκτήματά της είναι η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου και ο μεγάλος χρόνος που απαιτείται για τον εντοπισμό.

2.2.2 Μέθοδοι Μηχανικής Μάθησης (*Machine Learning Methods*)

2.2.2α Νευρωνικά Δίκτυα (*Neural Networks*)

Η βασική λογική των νευρωνικών δικτύων στηρίζεται στη δημιουργία συναρτήσεων που προσεγγίζουν εμπειρικά άγνωστες πολύπλοκες συναρτήσεις. Στην περίπτωση της τεχνικής της χαρτογράφησης του αποτυπώματος της ισχύος του σήματος *RF*, η ζητούμενη συνάρτηση είναι αυτή που συνδέει τις τιμές της έντασης του σήματος *RF* που προκύπτουν από τις μετρήσεις με τις τιμές που υπάρχουν στον χάρτη της ισχύος του σήματος *RF* έτσι ώστε να προσεγγιστεί η θέση του αντικειμένου στον χώρο. Αυτή η συνάρτηση είναι άγνωστη και μπορεί να προσεγγιστεί μέσω των νευρωνικών δικτύων. Οι τιμές εισόδου για τη συνάρτηση είναι οι τιμές της έντασης του σήματος *RF* που προκύπτουν από το στάδιο των μετρήσεων και οι τιμές εξόδου οι συντεταγμένες του ζητούμενου σημείου.

Η συγκεκριμένη μέθοδος χαρακτηρίζεται ως χαμηλότερης ακρίβειας σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους που χρησιμοποιούν την τεχνική της χαρτογράφησης του αποτυπώματος της ισχύος του σήματος *RF*. Είναι όμως ταχύτερη μέθοδος και δίνει τις τελικές συντεταγμένες του σημείου και όχι την πλησιέστερη υποψήφια θέση σε αυτό.

2.2.2β Μηχανή Υποστήριξης Διανυσμάτων (*Support Vector Machine*)

Σε αυτή τη μέθοδο οι τιμές της έντασης του σήματος *RF* στον εσωτερικό χώρο που υπάρχουν στον χάρτη ταξινομούνται σε κλάσεις. Στη συνέχεια το διάνυσμα της έντασης του σήματος που προκύπτει από το στάδιο των μετρήσεων ταξινομείται σε κάποια από αυτές τις κλάσεις και έτσι προκύπτει η θέση του αντικειμένου στον χώρο.

Η μέθοδος θεωρείται γενικά αξιόπιστη έχει όμως μεγάλο χρόνο υπολογισμού.

2.2.3 Ελάχιστο N-γωνο (*Smallest N- vertex Polygon*)

Ο αλγόριθμος σε αυτή τη μέθοδο υπολογίζει για κάθε δέκτη ξεχωριστά τις πιθανές θέσεις του ζητούμενου σημείου που βρίσκονται κοντά σε αυτόν. Έτσι δημιουργείται

ένα πολύγωνο με n αριθμό κορυφών όσες και οι πιθανές θέσεις του αντικειμένου. Τελικά δημιουργούνται τόσα πολύγωνα όσα και οι δέκτες. Από αυτά τα πολύγωνα επιλέγεται αυτό που έχει την μικρότερη περίμετρο και οι συντεταγμένες του ζητούμενου σημείου προκύπτουν από τον μέσο όρο των συντεταγμένων των κορυφών του συγκεκριμένου πολύγωνου.

2.3 Αλγόριθμοι Εγγύτητας (*Proximity Detection*)

Η τρίτη τεχνική εντοπισμού θέσης χρησιμοποιεί ένα δίκτυο κεραιών το οποίο εγκαθίσταται σε έναν εσωτερικό χώρο. Κάθε κεραία είναι ένας δέκτης που έχει τοποθετηθεί σε σημείο γνωστών συντεταγμένων. Ένας πομπός εγκαθίσταται στο αντικείμενο στο οποίο εφαρμόζεται ο εντοπισμός. Έτσι προκύπτει μια προσεγγιστική θέση του αντικειμένου στον χώρο βάσει του ποια κεραία λαμβάνει το ισχυρότερο σήμα RF από τον πομπό.

Η συγκεκριμένη τεχνική δεν δίνει ακριβείς συντεταγμένες του ζητούμενου σημείου αλλά την περιοχή στην οποία βρίσκεται η οποία αναγνωρίζεται από τις συντεταγμένες τις κεραιάς που λαμβάνει το ισχυρότερο σήμα RF . Το πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι η εύκολη σχετικά εφαρμογή της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ ΚΑΙ ΠΕΔΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

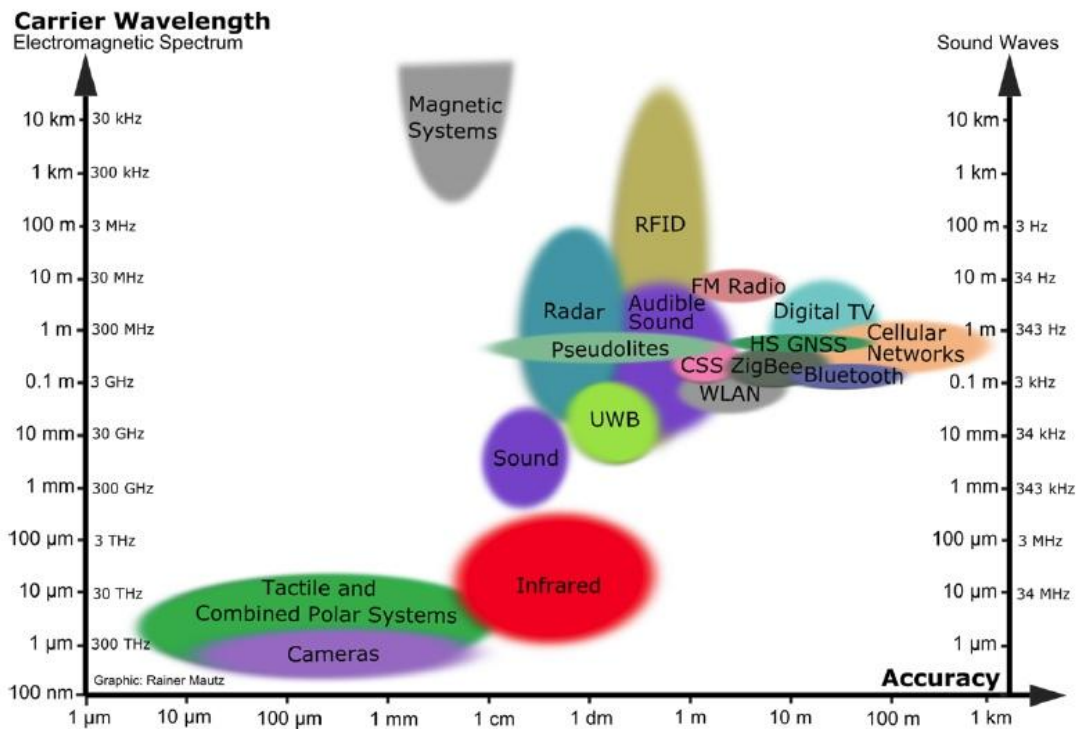
Σε αυτό το Κεφάλαιο περιλαμβάνει μια σύνοψη όλων των διαθέσιμων τεχνολογιών εντοπισμού που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για εφαρμογές σε κλειστούς χώρους. Επίσης αναφέρονται και ορισμένες εφαρμογές που μπορεί να έχουν αυτές οι τεχνολογίες στην καθημερινότητα αλλά και σε εξειδικευμένες περιπτώσεις.

3.1 Τεχνολογίες Εντοπισμού

Όλες οι διαθέσιμες τεχνολογίες για εντοπισμό σε κλειστούς χώρους μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας τους:

- **Οπτικές Τεχνολογίες:** Οι τεχνολογίες αυτές βασίζονται στην επιστήμη της οπτικής και στην ανθρώπινη παρατήρηση.
- **Ασύρματες Τεχνολογίες:** Περιλαμβάνονται όλες οι τεχνολογίες των οποίων οι μετρήσεις βασίζονται στη διάδοση και στην επεξεργασία ηλεκτρομαγνητικών ή μηχανικών κυμάτων.
- **Ολοκληρωμένα Συστήματα Εντοπισμού:** Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται συνδυασμοί διαφόρων τεχνολογιών μεταξύ τους με σκοπό την εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων την κάθε μιας για την παραγωγή ενός όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστου και ακριβούς αποτελέσματος.

Κάθε μία από τις παραπάνω τεχνολογίες χρησιμοποιεί και διαφορετικό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και δίνει διαφορετικές ακρίβειες στο τελικό αποτέλεσμα (Σχήμα 3.1). Έτσι η επιλογή της κάθε μίας από αυτές τις τεχνολογίες εξαρτάται από την φύση της εφαρμογής.



Σχήμα 3.1: Τεχνολογίες εντοπισμού σε κλειστούς χώρους συναρτήσει της ακρίβειας και του μήκους κύματος/ συχνότητας λειτουργίας [Mautz, 2012]

Figure 3.1 Indoor technologies in dependence on accuracy and carrier wavelength [Mautz, 2012]

3.1.1 Οπτικές Τεχνολογίες

3.1.1α Συστήματα Βιντεοληψίας

Η χρήση καμερών για εφαρμογές εντοπισμού γίνεται ολοένα και πιο διαδεδομένη καθώς προσφέρει μεγάλη ποικιλία δυνατοτήτων καθώς και ακρίβεια. Βασίζεται στην λήψη διαδοχικών στιγμιότυπων της κίνησης ενός αντικειμένου στον χώρο. Εφαρμόζοντας τις αρχές της φωτογραμμετρίας, γίνεται λήψη της ίδιας εικόνας από διαφορετικές θέσεις. Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται στερεοζεύγη από τα οποία μπορεί να αντληθεί μετρητική πληροφορία για το κινούμενο αντικείμενο. Αυτό όμως δεν αρκεί για την εύρεση της κλίμακας.

Προκειμένου να γίνει προσδιορισμός της κλίμακας καθώς και της κίνησης του αντικειμένου στον χώρο, είναι απαραίτητη η ύπαρξη είτε σημείων γνωστών συντεταγμένων που να είναι ορατά στο κάθε στιγμιότυπο (φωτοσταθερά), είτε μετρημένων αποστάσεων (μόνο για την εύρεση της κλίμακας) τα οποία έχουν προκύψει από γεωδαιτικές μετρήσεις ακριβείας. Με τη σύνδεση όλων των στιγμιότυπων μεταξύ τους αλλά και την ένταξή τους σε ένα σύστημα

συντεταγμένων, μπορεί να προσδιοριστεί η θέση ενός αντικειμένου στον χώρο ανά πάσα στιγμή.

Η ακρίβεια του εντοπισμού με χρήση καμερών κυμαίνεται από το 1 μm έως τα μερικά δεκατόμετρα. Η ακρίβεια αυτή εξαρτάται από παράγοντες όπως τα χαρακτηριστικά της κάμερας (ποιότητα αισθητήρα, τύπος κ.α.) και την ακρίβεια των συντεταγμένων των φωτοσταθερών.

3.1.1β Συστήματα Υπέρυθρου

Η υπέρυθη ακτινοβολία έχει μήκος κύματος λίγο μεγαλύτερο από το ορατό φως και δεν είναι ορατή από το ανθρώπινο μάτι. Η εφαρμογή της για τον εντοπισμό θέσης μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους.

Ένας τρόπος είναι βάσει της θερμοκρασίας που εκπέμπει το αντικείμενο. Π.χ. μπορεί να γίνει ο εντοπισμός ενός ανθρώπου μέσα σε ένα δωμάτιο από την στιγμή που γνωρίζουμε την θερμοκρασία του σώματός του και η οποία διαφέρει από το περιβάλλον. Η ανίχνευση αυτή γίνεται μέσω θερμικών καμερών οι οποίες απεικονίζουν με διαφορετικό χρώμα στην οθόνη τις περιοχές με διαφορετική θερμοκρασία κάνοντας έτσι δυνατή την ανίχνευση της κίνησης ενός ατόμου.

Εναλλακτικά, υπάρχουν ειδικές ετικέτες που μπορούν να τοποθετηθούν πάνω στον άνθρωπο ή στο αντικείμενο του εντοπισμού οι οποίες εκπέμπουν σε μια συγκεκριμένη συχνότητα της υπέρυθρης ακτινοβολίας η οποία ανιχνεύεται από τους δέκτες του συστήματος.

Η ακρίβεια των συστημάτων υπέρυθρου κυμαίνεται από τα μερικά εκατοστά έως λίγα μέτρα.

3.1.1γ Συστήματα Πολικών Συντεταγμένων

Τα συστήματα αυτά στηρίζονται σε μετρήσεις πολικών συντεταγμένων ενός σημείου για την εύρεση της θέσης του στον χώρο. Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται τα όργανα της κλασσικής γεωδαισίας όπως οι θεοδόλιχοι οι

ολοκληρωμένοι γεωδαιτικού σταθμοί, τα αποστασιόμετρα, καθώς και πιο σύγχρονα όργανα όπως οι σαρωτές *laser*.

Τα όργανα αυτά χρησιμοποιούν μηχανικούς ή οπτικούς τρόπους για τη μέτρηση διευθύνσεων (και κατά συνέπεια γωνιών) καθώς και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία για την μέτρηση της απόστασης. Η γωνία και η απόσταση αποτελούν της πολικές συντεταγμένες του σημείου μέσω των οποίων μπορούν τελικά να προσδιοριστούν οι καρτεσιανές του συντεταγμένες.

Τα συγκεκριμένα συστήματα παρέχουν πολύ υψηλή ακρίβεια στον εντοπισμό από λίγα μm έως μερικά m, είναι όμως ιδιαίτερα ακριβά για να χρησιμοποιηθούν σε μαζικές εμπορικές εφαρμογές.

3.1.2 Ασύρματες Τεχνολογίες

3.1.2α Μαγνητικά Συστήματα

Τα συστήματα αυτά βασίζονται στη δημιουργία μαγνητικών πεδίων είτε από μονίμους μαγνήτες, είτε από πηνία τα οποία διαπερνώνται από ηλεκτρικό ρεύμα. Σε γνωστές θέσεις τοποθετούνται μαγνήτες οι οποίοι δημιουργούν γύρω τους μαγνητικά πεδία. Πάνω στο αντικείμενο για το οποίο εφαρμόζεται ο εντοπισμός τοποθετείται ένας αισθητήρας που ανιχνεύει την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Γνωρίζοντας την ένταση του μαγνητικού πεδίου σε κάθε σημείο του χώρου μπορεί να προσδιοριστεί η θέση του αντικειμένου.

Άλλα μαγνητικά συστήματα λειτουργούν αντίστροφα με τον μαγνήτη να βρίσκεται τοποθετημένος επάνω στο κινούμενο αντικείμενο και τους αισθητήρες να είναι τοποθετημένοι σε γνωστά σημεία. Καθώς το μαγνητικό πεδίο κινείται στον χώρο, οι αισθητήρες ανιχνεύουν τις μεταβολές που προκαλεί αυτό γύρω τους και έτσι προσδιορίζεται η θέση του κινητού.

Τα μαγνητικά συστήματα μπορούν να επιτύχουν ακρίβειες από λίγα χιλιοστά έως λίγα εκατοστά. Βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι δεν απαιτούν συνθήκες οπτικής επαφής μεταξύ της πηγής και του αισθητήρα κάτι που τα καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμα σε κλειστούς χώρους.

3.1.2β Συστήματα Ήχου

Τα συστήματα ήχου χρησιμοποιούν την διάδοση των υπέρ-ηχητικών κυμάτων στον χώρο και μέσω της ταχύτητας και της χρονικής διάρκειας διάδοσης τους μπορούν να υπολογίσουν την απόσταση ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη και στη συνέχεια εφαρμόζοντας διάφορες τεχνικές εντοπισμού να προκύψει η θέση κάποιου αντικειμένου στον χώρο.

Η διάταξη αυτών των συστημάτων είναι παρόμοια με αυτής των μαγνητικών καθώς μπορούν είτε να τοποθετηθούν ηχητικές πηγές σε διάφορες σταθερές θέσεις και ένας δέκτης στο κινούμενο αντικείμενο, είτε η ηχητική πηγή να είναι κινούμενη και οι δέκτες τοποθετημένοι σε σταθερές θέσεις γνωστών συντεταγμένων.

Η ακρίβεια εντοπισμού αυτών των συστημάτων είναι της τάξεως των μερικών εκατοστών. Γενικά τα συστήματα αυτά δεν είναι ιδιαίτερα αξιόπιστα καθώς επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία) που μεταβάλλουν την ταχύτητα διάδοσης του ήχου, από το φαινόμενο *Doppler*, καθώς και από πολυανακλάσεις των ηχητικών κυμάτων στον εσωτερικό χώρο.

3.1.2γ Κυψελωτά Δίκτυα

Τα συστήματα αυτά βασίζονται στο Παγκόσμιο Σύστημα Κινητής Τηλεφωνίας (*Global System of Mobile- GSM*). Βάση της τεχνικής των αλγορίθμων εγγύτητας (βλ. Ενότητα 2.3) είναι δυνατός ο εντοπισμός ενός κινητού τηλεφώνου ανάλογα σε ποια κεραία του δικτύου βρίσκεται εγγύτερα. Έτσι μπορεί να τοποθετηθεί μια συσκευή κινητού τηλεφώνου στο αντικείμενο στο οποίο εφαρμόζεται ο εντοπισμός και να προσδιοριστεί η θέση του.

Σε κλειστούς χώρους η κάλυψη από το δίκτυο του *GSM* ενδέχεται να είναι περιορισμένη. Για το λόγο αυτό είναι η απαραίτητη η πύκνωσή του με εγκατάσταση κεραιών εντός του χώρου στον οποίο γίνεται ο εντοπισμός. Έτσι επιτυγχάνεται ακρίβεια εντοπισμού επιπέδου μερικών μέτρων.

3.1.28 Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα

Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (*Wireless Local Area Networks, WLAN*) χρησιμοποιούνται σε αρκετές εφαρμογές όπως το ευρυζωνικό δίκτυο (ιντερνέτ). Η υποδομή αυτών των δικτύων είναι τέτοια ώστε με την προσθήκη ενός εξυπηρετητή εντοπισμού (*location server*) μπορούν να χρησιμεύσουν σε εφαρμογές εντοπισμού σε κλειστούς χώρους [Mautz, 2012].

Τοποθετούνται συσκευές του συστήματος (Σχήμα 3.2) σε διάφορα σημεία έτσι ώστε να παρέχουν τη μέγιστη δυνατή κάλυψη του χώρου, ενώ στο αντικείμενο στο οποίο εφαρμόζεται ο εντοπισμός τοποθετείται ένα κινητό τηλέφωνο που έχει δέκτη *Wi-Fi*. Χρησιμοποιώντας τιμές της έντασης του σήματος και εφαρμόζοντας διάφορους αλγόριθμους της τεχνικής της χαρτογράφησης του αποτυπώματος ισχύος του σήματος (βλ. Ενότητα 2.2), είναι δυνατός ο εντοπισμός σε κλειστούς χώρους με ακρίβεια που κυμαίνεται μεταξύ 3 m και 30 m ανάλογα με την εφαρμογή. Βασικό πλεονέκτημα του συστήματος είναι ότι μπορεί να λειτουργήσει επιτυχώς και σε συνθήκες μη οπτικής επαφής που είναι συνηθισμένες σε κλειστούς χώρους.



Σχήμα 3.2 Συσκευή WLAN
Figure 3.2 WLAN device

3.1.2ε Επικοινωνία *Bluetooth*

Πρόκειται για μία ακόμη τεχνολογία που χρησιμοποιεί τις συσκευές κινητών τηλεφώνων για εντοπισμό και πιο συγκεκριμένα την τεχνολογία του *Bluetooth* που έχουν για επικοινωνία μεταξύ τους. Όπως και στην περίπτωση των *WLAN* τοποθετούνται μέσα στον χώρο όπου γίνεται ο εντοπισμός συσκευές που λαμβάνουν το σήμα που εκπέμπει το κινητό τηλέφωνο που έχει τοποθετηθεί στο αντικείμενο του εντοπισμού αλλά χρησιμοποιούν κυρίως την τεχνική των αλγορίθμων εγγύτητας (βλ. Ενότητα 2.3). Το σύστημα μπορεί να δώσει ακρίβειες εντοπισμού της τάξεως των λίγων μέτρων.

3.1.2στ Ραντάρ

Η αρχή λειτουργίας του ραντάρ βασίζεται στην ανάκλαση σημάτων πάνω στο αντικείμενο για το οποίο εφαρμόζεται ο εντοπισμός. Μία κεραία στέλνει σήμα το οποίο ανακλάται πάνω στο αντικείμενο και καθώς επιστρέφει λαμβάνεται και πάλι από την κεραία. Μετρώντας την γωνία άφιξης του σήματος καθώς και τον χρόνο που μεσολάβησε μεταξύ της εκπομπής του σήματος και της επιστροφής του, μπορεί να εκτιμηθεί η θέση του στον χώρο.

Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι το μεγάλο ποσοστό απώλειας του σήματος. Η ακρίβεια του συστήματος μπορεί να βελτιωθεί με την χρήση περισσοτέρων κεραίων και να είναι καλύτερη του μέτρου και να φτάσει έως και τα μερικά cm υπό ιδανικές συνθήκες και αναλόγως του συστήματος.

3.1.2ζ Συστήματα Αναγνώρισης Ραδιοσυχνοτήτων

Ένα σύστημα *RFID* (*Radio Frequency Identification*) αποτελείται από τους αναγνώστες (*readers* - Σχήμα 3.3) και από τις ετικέτες (*tags* - Σχήμα 3.4). Οι αναγνώστες είναι πομποδέκτες οι οποίοι αποστέλλουν σήμα *RF* προς τις ετικέτες και στη συνέχεια το λαμβάνουν πίσω και το καταγράφουν. Οι ετικέτες αυτές οι οποίες αναμεταδίδουν το σήμα *RF* και διακρίνονται σε παθητικές που δεν έχουν δική τους πηγή ενέργειας και μπορούν να λάβουν και να αναμεταδώσουν το σήμα *RF* σε μικρή απόσταση (έως 10 m) και σε ενεργητικές που χάρη στη δική τους πηγή

ενέργειας μπορούν να λάβουν και να αναμεταδώσουν το σήμα *RF* σε αποστάσεις που φτάνουν τις μερικές εκατοντάδες μέτρα.

Ο εντοπισμός μπορεί να γίνει τοποθετώντας είτε τους αναγνώστες σε σημεία γνωστών συντεταγμένων και τις ετικέτες επάνω στα αντικείμενα για τα οποία γίνεται ο εντοπισμός, είτε αντίστροφα. Ως τεχνικές εντοπισμού χρησιμοποιούνται είτε οι αλγόριθμοι χαρτογράφησης του αποτυπώματος της ισχύος του σήματος, είτε ο τριπλευρισμός συνδέοντας την τιμή της έντασης του σήματος *RF* με την απόσταση στην οποία αντιστοιχεί. Τα συστήματα αυτά μπορούν να επιτύχουν ακρίβεια της τάξεως του 1 m σε εντοπισμό.



Σχήμα 3.3 Πομποδέκτης του συστήματος RFID
Figure 3.3 Reader of RFID system



Σχήμα 3.4 Παθητική ετικέτα του συστήματος RFID
Figure 3.4 Passive tag of RFID system

3.1.2η Συστήματα Υπέρ-ευρείας ζώνης

Τα συστήματα *UWB* (*Ultra Wide Band*) αποτελούνται από πομποδέκτες (και ετικέτες ορισμένα) οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους με σήματα *RF* που ανήκουν σε ένα εκτεταμένο εύρος του φάσματος των συχνοτήτων. Ο εντοπισμός μπορεί να γίνει με την εγκατάσταση ενός δικτύου από αυτούς τους πομποδέκτες και αξιοποιώντας τις μετρήσεις αποστάσεων μεταξύ των πομποδεκτών χρησιμοποιώντας διάφορους αλγόριθμους της τεχνικής του τριπλευρισμού (βλ. Ενότητα 2.1) ανάλογα με το σύστημα.

Τα συστήματα *UWB* μπορούν να επιτύχουν ακρίβειες στον εντοπισμό που φτάνουν έως και τα μερικά cm υπό συνθήκες οπτικής επαφής μεταξύ των πομποδεκτών. Τα συστήματα αυτά αναλύονται εκτεταμένα στο τέταρτο Κεφάλαιο.

3.1.3 Ολοκληρωμένα Συστήματα Εντοπισμού

Τα πλέον ακριβή και διαδεδομένα συστήματα εντοπισμού είναι τα *GNSS* (*Global Positioning Navigation Satellite Systems*) και κυρίως το *GPS* (*Global Positioning System*). Αυτά τα συστήματα βασίζονται σε μετρήσεις απόστασης από δορυφόρους που κινούνται σε συγκεκριμένες τροχιές γύρω από την γη. Ποιο συγκεκριμένα ένας δέκτης του συστήματος *GPS* τοποθετείται επάνω στο αντικείμενο για το οποίο γίνεται ο εντοπισμός και βάσει των μετρήσεων αποστάσεων από τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους προκύπτει η θέση του (απόλυτος εντοπισμός). Η ακρίβεια μπορεί να βελτιωθεί αισθητά με την εφαρμογή σχετικού εντοπισμού κατά τον οποίο προστίθεται ένας ακόμη δέκτης (σταθερός) τοποθετημένος σε σημείο γνωστών συντεταγμένων. Έτσι η θέση του αντικειμένου προκύπτει από την σχετική του απόσταση από τον σταθερό δέκτη. Με αυτή τη μέθοδο μπορεί να επιτευχθεί ακρίβεια της τάξεως των λίγων cm στον εντοπισμό.

Το βασικό μειονέκτημα αυτών των συστημάτων όμως είναι ότι δε μπορούν να λειτουργήσουν σε κλειστούς χώρους καθώς το σήμα των δορυφόρων δε μπορεί να εισχωρήσει σε κατασκευές. Για αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η υποστήριξη από ένα άλλο σύστημα το οποίο μπορεί να λειτουργήσει σε κλειστούς χώρους. Έτσι προέκυψαν τα ολοκληρωμένα συστήματα εντοπισμού.

Ένα σύστημα που μπορεί να συνδυαστεί με το *GPS* είναι το *INS* (*Inertial Navigation System*). Το σύστημα αυτό αποτελείται από τη συσκευή *IMU* (*Inertial Measurement Unit* - Σχήμα 3.5) η οποία έχει ενσωματωμένα τρία επιταχυνσιόμετρα, τρία γυροσκόπια και τρία μαγνητόμετρα (προαιρετικά). Καθώς η *IMU* κινείται, υπολογίζει τις επιταχύνσεις και τις στροφές στους τρεις άξονες του τρισδιάστατου χώρου και έτσι προκύπτει το διάνυσμα της μετάθεσης του κινούμενου αντικειμένου στον χώρο.



Σχήμα 3.5 IMU

Figure 3.5 IMU

Το *INS* δίνει μόνο τη μετατόπιση στον χώρο. Για να υπολογιστεί η απόλυτη θέση του αντικειμένου ανά πάσα στιγμή της κίνησής του είναι απαραίτητη η γνώση της θέσης του τη στιγμή της έναρξης της κίνησής του. Αυτό μπορεί να το δώσει το σύστημα *GPS* και γενικότερα τα *GNSS*. Έτσι το ολοκληρωμένο σύστημα εντοπισμού *GNSS/INS* αποτελείται από δέκτες του πρώτου συστήματος καθώς και από μια *IMU*. Το *GPS* δίνει τη θέση του αντικειμένου στον εξωτερικό χώρο και όταν αυτό εισέρχεται στον εσωτερικό χώρο το *INS* υπολογίζει το διάνυσμα της μετάθεσής του και καθώς είναι γνωστή η αρχική του θέση μπορεί να προσδιοριστεί η μετέπειτα τροχιά του. Επιπλέον το *INS* μπορεί να βελτιώσει και την ακρίβεια του εντοπισμού στον ανοικτό χώρο συνδυάζοντας τα αποτελέσματά του με αυτά που δίνει το *GPS*.

Με την ίδια λογική, τα *GNSS* μπορούν να συνδυαστούν με άλλα συστήματα εντοπισμού που λειτουργούν σε κλειστούς χώρους, όπως το *UWB*, τα οποία αναλαμβάνουν τον προσδιορισμό της τροχιάς εκεί που τα *GNSS* δεν είναι δυνατόν να δώσουν λύση. Αντίστοιχα ένα σύστημα *UWB* μπορεί να συνδυαστεί με το *INS* για αύξηση της ακρίβειας του πρώτου.

3.2 Εφαρμογές Εντοπισμού

Όλες οι παραπάνω τεχνολογίες εντοπισμού μπορούν να έχουν ποικίλες εφαρμογές στην καθημερινότητά των ανθρώπων παρέχοντας σημαντικές υπηρεσίες και διευκολύνοντας κρίσιμες εργασίες.

3.2.1 Υπηρεσίες Προστασίας του Πολίτη

Συστήματα εντοπισμού που λειτουργούν σε κλειστούς χώρους μπορούν να παράσχουν σημαντική βοήθεια στους πυροσβέστες κατά τη διάρκεια μιας επιχείρησης έρευνας, διάσωσης και κατάσβεσης πυρκαγιάς στο εσωτερικό ενός κτιρίου. Καθώς σε τέτοιες περιπτώσεις ο χώρος καλύπτεται από καπνό περιορίζοντας την ορατότητα, είναι πολύ σημαντικό για τους πυροσβέστες που επιχειρούν στο εσωτερικό να μην χαθούν. Για αυτό το λόγο φροντίζουν να μένουν κοντά ο ένας στον άλλον και να μην χάσουν τη μάνικα του νερού που αποτελεί και οδηγό για την έξοδο. Με τη χρήση ενός συστήματος εντοπισμού σε κάθε πυροσβέστη που επιχειρεί, είναι γνωστή η θέση του μέσα στο κτίριο ανά πάσα στιγμή κάτι που αφενός προστατεύει τον ίδιο από το να μη χαθεί μέσα στον πυκνό καπνό, αφετέρου βοηθά στην έρευνα καθώς εξασφαλίζει ότι θα ελεγχθεί το σύνολο του εσωτερικού χώρου με τον πλέον γρήγορο και αποδοτικό τρόπο (κάτι ιδιαίτερα κρίσιμο στο εσωτερικό ενός φλεγόμενου κτιρίου), αποφεύγοντας τους διπλούς ελέγχους.

Με παρόμοια λογική, ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να βοηθήσει την αστυνομία κατά την έρευνα στο εσωτερικό ενός κτιρίου για πιθανή ύπαρξη εκρηκτικών από ειδικά εκπαιδευμένους σκύλους καθώς μπορεί να εξασφαλίσει τον αποτελεσματικό έλεγχο του συνόλου του χώρου και ταυτόχρονα την ακριβή θέση ενός εκρηκτικού μηχανισμού εφόσον υπάρχει.

Επίσης τέτοια συστήματα μπορεί να είναι χρήσιμα σε φυλακές υψίστης ασφαλείας για την αποτελεσματική παρακολούθηση επικίνδυνων κρατούμενων ύποπτων για απόδραση.

3.2.2 Διαχείριση Εργοταξίων

Σε ένα εργοτάξιο εντός κλειστού χώρου μπορούν να εφαρμοστούν συστήματα εντοπισμού για την ασφαλή καθοδήγηση διαφόρων ρομποτικών οχημάτων και εργαλείων εξασφαλίζοντας την ομαλή και ασφαλή λειτουργία τους καθώς και τη συνύπαρξή τους με το εργατικό δυναμικό.

3.2.3 Διαχείριση Αποθεμάτων

Η διαχείριση αποθεμάτων (*logistics*) είναι μια ιδιαίτερα απαιτητική εργασία λόγω της πολυπλοκότητας της καθώς και του όγκου των προϊόντων που πρέπει να διαχειριστεί κάποιος. Ένα σύστημα εντοπισμού μπορεί να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό καθώς εξασφαλίζει τον εύκολο εντοπισμό οποιουδήποτε αποθηκευμένου προϊόντος ενώ μπορεί να φανεί χρήσιμο και στην ταχεία ταξινόμηση και αποθήκευση του καθώς και στον έλεγχο και στην καταγραφή των αποθεμάτων.

3.2.4 Έξυπνα Συστήματα Μεταφορών

Η τεχνολογία του *GPS* χρησιμοποιείται επί το πλείστον σε τέτοιου είδους εφαρμογές, δε μπορεί όμως να δώσει λύσεις σε κλειστούς χώρους. Έτσι συστήματα εντοπισμού σε κλειστούς χώρους μπορούν συνδυαστικά με το *GPS* να χρησιμοποιηθούν στην πλοήγηση αυτοκινήτων και οχημάτων της δημόσιας συγκοινωνίας καθώς αυτά διέρχονται από κλειστούς χώρους όπως υπόγειοι χώροι στάθμευσης, στοές, σήραγγες και γενικά όπου το *GPS* δε μπορεί να δώσει λύση.

3.2.5 Καθοδήγηση Ατόμων με Ειδικές Ανάγκες

Τα συστήματα εντοπισμού μπορούν να βοηθήσουν στην ασφαλή καθοδήγηση ΑΜΕΑ, ιδίως τυφλών, σε κλειστούς χώρους βοηθώντας τους να βρουν εύκολα τα σημεία ενδιαφέροντός τους και προστατεύοντάς τους από επικίνδυνες καταστάσεις όπως η ανάμιξή τους με την κυκλοφορία των αυτοκινήτων.

3.2.6 Υγεία

Η χρήση συστημάτων εντοπισμού μπορεί να είναι ιδιαίτερα υποβοηθητική για το νοσηλευτικό προσωπικό μεγάλων νοσοκομείων εξασφαλίζοντας τη γρήγορη και άμεση καθοδήγησή τους κατά τη διάρκεια επειγόντων περιστατικών. Επίσης υψηλής ακρίβειας συστήματα εντοπισμού χρησιμοποιούνται σε ρομποτικά μηχανήματα κατά τη διάρκεια εγχειρήσεων.

3.2.7 Τοπογραφία- Γεωδαισία

Ο τομέας αυτός έχει συνεχή ανάγκη για την χρήση συστημάτων εντοπισμού μεγάλης ακρίβειας για τον προσδιορισμό συντεταγμένων σημείων εντός κλειστών χώρων όπως π.χ. κατά την κατασκευή σηράγγων.

3.2.8 Πειραματικές Εφαρμογές

Τα συστήματα εντοπισμού μπορούν να φανούν χρήσιμα για τη συλλογή δεδομένων για πειραματικές εφαρμογές σε κλειστούς χώρους. Π.χ. με την εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος μπορούν να συλλεχθούν στοιχεία για την κίνηση των αυτοκινήτων σε ένα υπόγειο χώρο στάθμευσής τα οποία να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή κατάλληλου λογισμικού προσομοίωσης της κίνησής τους.

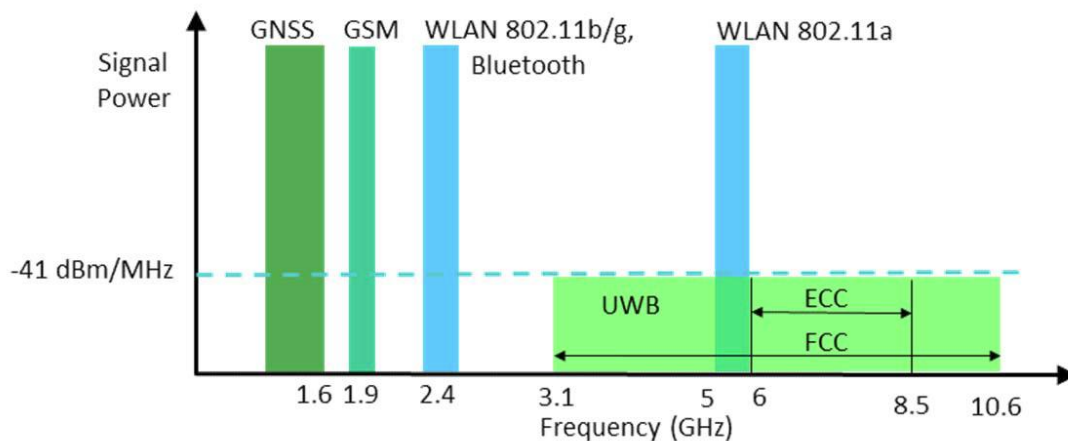
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΠΕΡ- ΕΥΡΕΙΑΣ ΖΩΝΗΣ (UWB)

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των συστημάτων υπέρ-ευρείας ζώνης (*UWB*) και ειδικότερα το σύστημα *PulsON[®] 410* της εταιρείας *Time Domain Inc.* Περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας, οι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα των μετρήσεων, καθώς και ζητήματα που αφορούν τον εντοπισμό σε κλειστούς χώρους.

4.1 Αρχή Λειτουργίας - Μετρήσεις - Εντοπισμός

Το σύστημα υπέρ-ευρείας ζώνης (*Ultra Wide Band, UWB*) είναι μια ασύρματη τεχνολογία επικοινωνίας που έχει ως βασικό της χαρακτηριστικό το μεγάλο εύρος της συχνότητας λειτουργίας του το οποίο υπερβαίνει τα 500 MHz. Τα διάφορα συστήματα *UWB* λειτουργούν στις συχνότητες 3.1 GHz έως 10.6 GHz. Ταυτόχρονα η φασματική πυκνότητα ισχύος δεν υπερβαίνει τα 41 dBm/MHz που χαρακτηρίζεται ως χαμηλή και δεν έχει αρνητικές επιδράσεις στον ανθρώπινο οργανισμό, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η πιθανότητα παρεμβολών από άλλα συστήματα επικοινωνίας που λειτουργούν στην ίδια συχνότητα (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1 Η συχνότητα λειτουργίας των συστημάτων *UWB* σε σχέση με άλλες τεχνολογίες επικοινωνίας [Mautz 2012]

Figure 4.1 Operating frequencies of *UWB* systems in comparison with other wireless technologies [Mautz 2012]

Αυτό το ιδιαίτερα μεγάλο εύρος ζώνης δημιουργείται καθώς τα συστήματα UWB βασίζονται στη μετάδοση πολύ μικρής χρονικής διάρκειας (μερικά ns) σήματος *RF* μέσω παλμών (*impulse radio*).

Εξαιτίας των προηγούμενων χαρακτηριστικών το σήμα *RF* που εκπέμπει ένα σύστημα *UWB* έχει τη δυνατότητα να διεισδύει σε διάφορα υλικά όπως το τσιμέντο, το γυαλί και το ξύλο (όχι όμως μεταλλικά αντικείμενα) κάτι ιδιαίτερα χρήσιμο σε κλειστούς χώρους. Σε σχέση με άλλες ασύρματες τεχνολογίες, τα συστήματα *UWB* μπορούν να επιτύχουν μεγαλύτερες ακρίβειες στον εντοπισμό, της τάξεως των μερικών εκατοστών ή και καλύτερα σε καλές συνθήκες και ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης τεχνολογίας.

Για τον προσδιορισμό της θέσης ενός αντικειμένου, τα συστήματα *UWB*, ανάλογα με τον κατασκευαστή, στηρίζονται στις τεχνικές εντοπισμού *ToA*, *TDoA* και *AoA* (βλ. Κεφάλαιο 2).

4.2 Σύστημα PulsON® 410

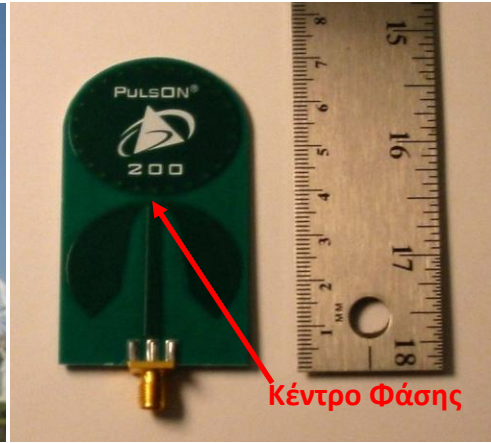
4.2.1 Αρχιτεκτονική Συστήματος

Το σύστημα *PulsON® 410* αποτελείται αποκλειστικά και μόνο από πομποδέκτες χωρίς να υπάρχει κάποιος διαχωρισμός ανάμεσα στους σταθερούς και στους κινητούς όπως συμβαίνει με άλλα συστήματα. Ωστόσο, κατά την εγκατάσταση του συστήματος ο χρήστης καθορίζει μέσω του λογισμικού τον ρόλο του κάθε πομποδέκτη και εισάγει σε αυτόν τις απαραίτητες παραμέτρους.

Οι πομποδέκτες του συστήματος στεγάζονται σε πλαστικές θήκες διαστάσεων 76 mm x 80 mm x 16 mm βάρους 58 gr (Σχήμα 4.2) και τροφοδοτούνται από μπαταρίες οι οποίες συνδέονται εξωτερικά. Στο άνω μέρος της θήκης του αισθητήρα τοποθετείται η κεραία που έχει ύψος περίπου 7 cm (Σχήμα 4.3). Το κέντρο φάσης της κεραίας (από όπου γίνεται η εκπομπή και η λήψη του σήματος) είναι σαφώς υλοποιημένο επάνω στην κεραία σε σχήμα «λουλουδιού». Η συσκευή μπορεί να λειτουργεί σε εύρος θερμοκρασίας από 0°C έως 70°C.



Σχήμα 4.2 Πομποδέκτης του συστήματος PulsON® 410 με τις μπαταρίες του
Figure 4.2 PulsON® 410 module with its batteries



Σχήμα 4.3 Κεραία του συστήματος PulsON® [www.timedomain.com]
Figure 4.3 PulsON® 410 antenna [www.imedomain.com]

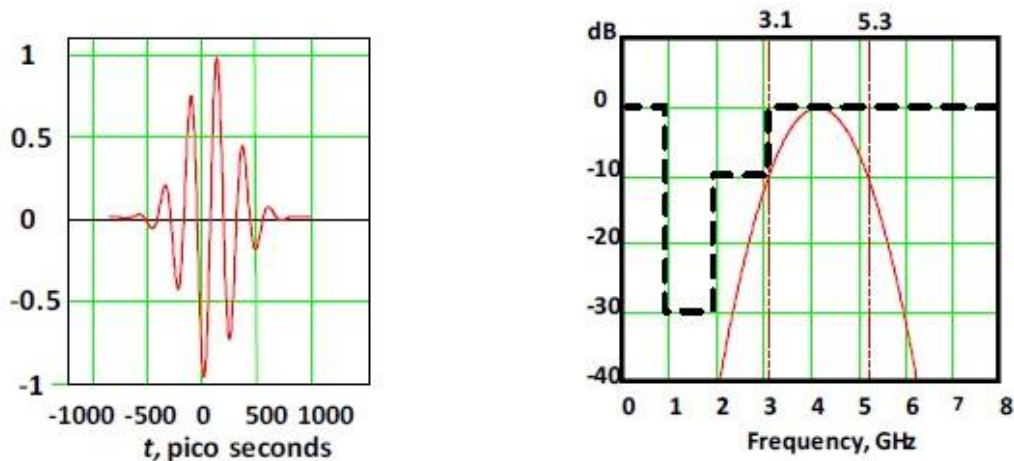
Κάθε συσκευή *UWB* διαθέτει θύρα *USB* για τη σύνδεσή της με υπολογιστή (προκειμένου να γίνουν οι αναγκαίες ρυθμίσεις), υποδοχή για τη σύνδεση με τις μπαταρίες καθώς και δύο λυχνίες ένδειξης λειτουργίας. Η κίτρινη λυχνία ανάβει όσο η συσκευή είναι ενεργοποιημένη. Η ενεργοποίηση και η απενεργοποίηση της συσκευής γίνεται με την σύνδεση και την αποσύνδεση αντίστοιχα των μπαταριών. Η πράσινη λυχνία ανάβει όταν το σύστημα είναι έτοιμο να λειτουργήσει και αναβοσβήνει κατά τη διάρκεια των μετρήσεων κάθε φορά που αποστέλλεται κάποιος παλμός *UWB*.

4.2.2 Χαρακτηριστικά Σήματος

4.2.2α Κυματομορφή και Ένταση Σήματος

Ένας πομποδέκτης του συστήματος PulsON® 410 της *Time Domain Inc.* μεταδίδει έναν παλμό μικρής διάρκειας στο φάσμα των ραδιοσυχνοτήτων (*RF signal*) ο οποίος λαμβάνεται από τους πομποδέκτες εντός της εμβέλειας του συστήματος. Κάθε πομποδέκτης PulsON® 410 που λαμβάνει το σήμα *RF* το αναμεταδίδει πίσω στον πομποδέκτη από τον οποίο προήλθε. Με αυτόν τον τρόπο, αφού ο δεύτερος πομποδέκτης λάβει το σήμα *RF* το οποίο έφτασε χρονικά πρώτο, είναι σε θέση να απορρίψει το σήμα *RF* που φτάνει μετέπειτα και το οποίο προέρχεται από πολυανακλάσεις. Με αυτόν τον τρόπο βελτιώνεται η ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος.

Το εύρος της συχνότητας λειτουργίας του συστήματος *PulsOn*[®] 410 κυμαίνεται από τα 3.1 GHz έως τα 5.3 GHz με μεσαία συχνότητα τα 4.3 GHz. Η κυματομορφή του τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και σε αυτό των συχνοτήτων φαίνεται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4 Κυματομορφή του σήματος RF του συστήματος UWB στο πεδίο του χρόνου (δεξιά) και των συχνοτήτων (αριστερά) [www.timedomain.com]

Figure 4.4 UWB waveform shown in time domain (left) and frequency domain (right) [www.timedomain.com]

Ο χρήστης του συστήματος έχει τη δυνατότητα να επιλέξει την ένταση του εκπεμπόμενου σήματος RF ανάλογα με την απόσταση στην οποία πραγματοποιούνται οι μετρήσεις. Η ένταση αυτή κυμαίνεται από τα 42 dB έως τα 60 dB. Στη χαμηλότερη ένταση το σύστημα είναι σε θέση να μετρήσει με επιτυχία αποστάσεις έως 35 m ενώ στη μέγιστη ισχύ του να μετρήσει αποστάσεις που σύμφωνα με τον κατασκευαστή φτάνουν τα 354 m σε χώρο ελεύθερο εμποδίων.

Αύξηση της έντασης του σήματος RF συνεπάγεται και αύξηση της χρονικής διάρκειας της κάθε μέτρησης που κυμαίνεται από τα 6.5 ms για τη χαμηλότερη ένταση και φτάνει έως τα 132 ms για τη μέγιστη ένταση.

Το λογισμικό της Time Domain χρησιμοποιεί τον δείκτη *PII* (*Pulse Integration Index*) για τη ρύθμιση της έντασης του σήματος RF ο οποίος λαμβάνει μόνο ακέραιες τιμές. Έτσι τα 42 dB έχουν δείκτη *PII* 4. Αύξηση κατά μία μονάδα του δείκτη *PII* αυξάνει την ένταση του σήματος RF κατά 3 dB.

Το σύστημα *PulsON*[®] 410 έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιεί μετρήσεις αποστάσεων τόσο σε συνθήκες οπτικής επαφής μεταξύ των πομποδεκτών (*Line of Sight, LoS*), όσο και σε συνθήκες απουσίας οπτικής επαφής μεταξύ τους (*Non Line of Sight, NLoS*).

Στην περίπτωση συνθηκών *LoS* το σύστημα αποδίδει στο μέγιστο δυνατό βαθμό και είναι ικανό να μετρήσει αποστάσεις που φτάνουν τα 354 m με ακρίβεια $\pm 0.021m$. Στην περίπτωση συνθηκών *NLoS* (που επικρατούν συνήθως σε κλειστούς χώρους), το σήμα είναι σε θέση να μετρήσει μέσα από υλικά όπως το τσιμέντο ή το ξύλο, όχι όμως μέσα από μέταλλο. Για παράδειγμα, το σύστημα δεν είναι δυνατόν να μετρήσει μέσα από κολώνες ή δοκούς από οπλισμένο σκυρόδεμα. Σε αυτή την περίπτωση το σήμα *RF* θα διαδοθεί γύρω από την κολώνα με αποτέλεσμα η απόσταση που θα μετρηθεί τελικά να είναι μεγαλύτερη από την πραγματική. Η εμβέλεια των μετρήσεων σε συνθήκες *NLoS* περιορίζεται από τα 30 m έως τα 60 m ενώ η ακρίβεια των μετρήσεων εκτιμάται στα $\pm 0.01 m$ [Time Domain, 2015].

4.2.2β Ζώνη Fresnel

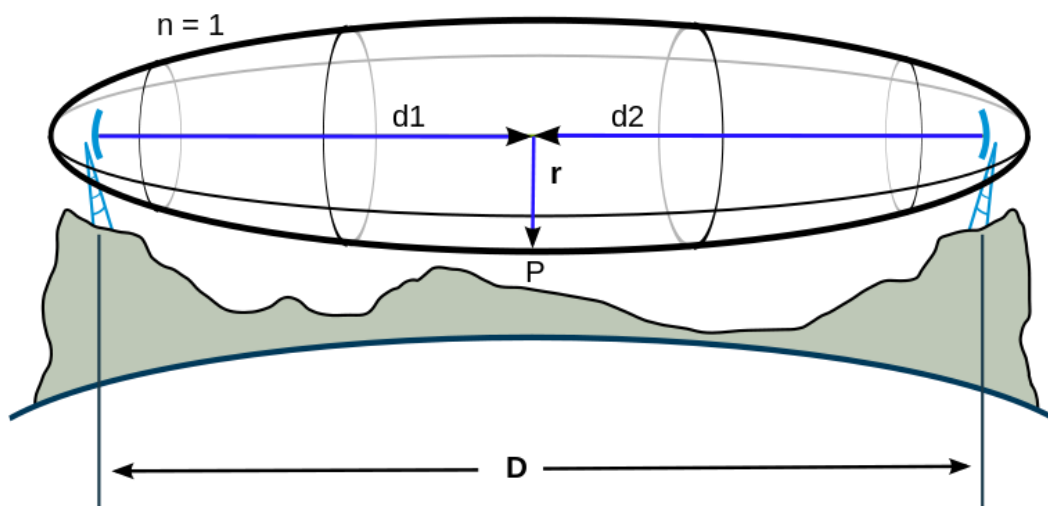
Ένα άλλο χαρακτηριστικό που επηρεάζει την ακρίβεια των μετρήσεων σχετίζεται με φαινόμενο της ζώνης *Fresnel*. Σύμφωνα με την θεωρία *Fresnel* κατά την λειτουργία του συστήματος δημιουργείται μια σειρά ζωνών με μορφή ελλειψοειδούς και μεγάλο άξονα την ευθεία που ενώνει τα κέντρα φάσης των κεραιών των δύο πομποδεκτών μεταξύ των οποίων πραγματοποιείται η επικοινωνία. Στην περίπτωση που μεταξύ των δύο πομποδεκτών παρεμβάλλεται κάποιο εμπόδιο, αν αυτό εμπίπτει σε ζώνη που έχει μονό αριθμό, τότε το αποτέλεσμα είναι τελικά να ενισχύεται το λαμβανόμενο σήμα *RF*. Αν όμως το εμπόδιο βρίσκεται εντός ζώνης με ζυγό αριθμό, τότε προκαλείται εξασθένηση του σήματος *RF*.

Κατά κύριο λόγο, σε πρακτικές εφαρμογές όπως αυτή που μελετάται, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην πρώτη ζώνη *Fresnel* και κυρίως στον υπολογισμό του μικρού ημιάξονα του ελλειψοειδούς (Σχήμα 4.5) ο οποίος δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$r = 8.657 \cdot \sqrt{\frac{D}{f}} \quad (4.1)$$

όπου, r ο μικρός ημιάξονας σε m, D η απόσταση μεταξύ των πομποδεκτών (μεγάλος άξονας) σε km και f η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος σε GHz.

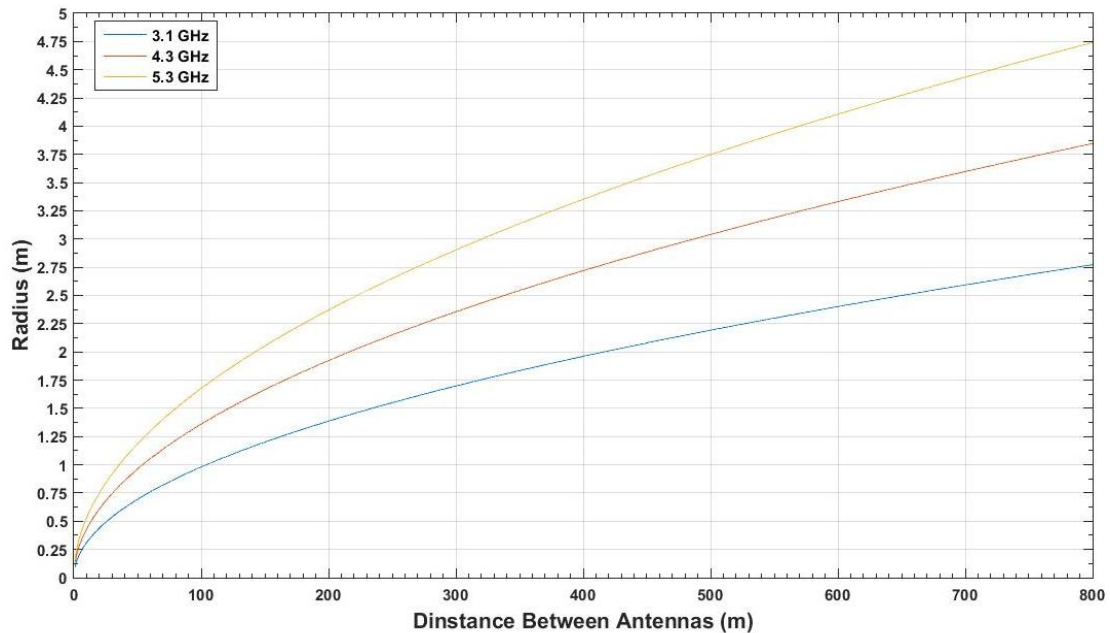
Είναι φανερό ότι όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των πομποδεκτών, τόσο μεγαλώνει και η ζώνη *Fresnel*, ενώ όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα λειτουργίας, τόσο μικρότερη είναι η ζώνη.



Σχήμα 4.5 Χαρακτηριστικά της πρώτης ζώνης *Fresnel* [en.wikipedia.org]
Figure 4.5 First *Fresnel* zone [en.wikipedia.org]

Η γνώση της μορφής της πρώτης ζώνης του *Fresnel* είναι σκόπιμη κατά των προγραμματισμό των μετρήσεων με το σύστημα *UWB* προκειμένου να καθοριστεί η περιοχή η οποία θα πρέπει να είναι ελεύθερη από εμπόδια, καθώς και το ύψος στο οποίο θα πρέπει να τοποθετηθούν οι κεραιές των πομποδεκτών του συστήματος έτσι ώστε η ζώνη να μην τέμνεται από το έδαφος. Γενικά η ζώνη *Fresnel* πρέπει να είναι οπωσδήποτε κατά 60% ελεύθερη από παρεμβολές άλλων αντικειμένων προκειμένου η επιδράσεις να θεωρηθούν αμελητέες, ενώ προτείνεται ως ιδανικό το 80% αν αυτό είναι εφικτό [ZyTrax, 2016].

Στην περίπτωση του συστήματος *PulsON® 410* σύμφωνα με την Εξίσωση 4.1 και γνωστό το εύρος της συχνότητας λειτουργίας του, προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα του μήκους του μικρού ημιάξονα του ελλειψοειδούς συναρτήσεως της απόστασης στην οποία πραγματοποιούνται οι μετρήσεις.



Σχήμα 4.6 Μέγιστη ακτίνα της ζώνης Fresnel συναρτήσει της μετρούμενης απόστασης για το εύρος της συχνότητας λειτουργίας του συστήματος PulsON® 410

Figure 4.6 Maximum radius of Fresnel zone depending measurement range for the frequency of PulsON® 410 UWB

4.2.3 Μέτρηση Απόστασης

Το σύστημα PulsON® 410 της Time Domain Inc. έχει τη δυνατότητα μέτρησης της απόστασης μεταξύ δύο πομποδεκτών με τρεις τρόπους:

- Ακριβής Μέτρηση Απόστασης (*Precision Range Measurement, PRM*)
- Χονδρική Εκτίμηση Απόστασης (*Coarse Range Estimate, CRE*)
- Φιλτραρισμένη Μέτρηση Απόστασης (*Filtered Range Measurement, FRE*)

4.2.3α Ακριβής Μέτρηση Απόστασης

Η μέτρηση με τη μέθοδο *PRM* βασίζεται στον αλγόριθμο *TWToF* (βλ. Ενότητα 2.1.1δ) ο οποίος προσδιορίζει την απόσταση με βάση το χρονικό διάστημα που ορίζεται μεταξύ εκπομπής του σήματος *RF* από έναν πομποδέκτη και λήψης της επιστροφής του σε αυτόν. Πιο συγκεκριμένα, ο πομποδέκτης 1 (*requester*) καταγράφει την χρονική στιγμή εκπομπής του σήματος *RF* προς τον πομποδέκτη 2 (*responder*). Ο πομποδέκτης 2 εφόσον λάβει το σήμα *RF* το αναμεταδίδει καταγράφοντας την χρονική καθυστέρηση από τη στιγμή που το έλαβε μέχρι να το αναμεταδώσει. Τέλος, ο πομποδέκτης 1 καταγράφει την χρονική στιγμή λήψης του

επιστρεφόμενου σήματος RF . Η απόσταση μεταξύ των δύο πομποδεκτών δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$r_{prm} = \frac{c}{2} \cdot (t_2 - t_1 - dt) \quad (4.2)$$

όπου c η ταχύτητα του φωτός σε m/s, t_1 η χρονική στιγμή εκπομπής του σήματος από τον πομποδέκτη 1, t_2 η χρονική στιγμή λήψης του σήματος RF από τον πομποδέκτη 1 και dt η χρονική καθυστέρηση της αναμετάδοσης του σήματος RF από τον πομποδέκτη 2. Το λογισμικό παρέχει στον χρήστη και μια εκτίμηση του σφάλματος της κάθε μέτρησης βασισμένη στη σχήμα (κλίση και ύψος) του σήματος RF που φτάνει απευθείας χωρίς να έχει ανακλαστεί [Time Domain, 2015].

4.2.3β Χονδρική Εκτίμηση Απόστασης

Η μέθοδος CRE υπολογίζει την απόσταση από την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος RF που φτάνει χρονικά πρώτο θεωρώντας ότι προέρχεται απευθείας από την πηγή εκπομπής του, και συνεπώς αποκλείοντας με αυτόν τον τρόπο το σήμα RF που προέρχεται από πολυανακλάσεις. Σε αυτή την περίπτωση το λογισμικό παρέχει μια εκτίμηση του σφάλματος της κάθε μέτρησης. Η μέθοδος CRE μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη μόνο για μετρήσεις υπό συνθήκες LoS [Time Domain, 2015].

4.2.3γ Φιλτραρισμένη Μέτρηση Απόστασης

Η μέθοδος FRE συνδυάζει τα αποτελέσματα των δύο προηγούμενων μεθόδων και με την εφαρμογή ενός φίλτρου $Kalman$, μειώνει τον θόρυβο που έχει υπεισέλθει στις μετρήσεις βελτιώνοντας έτσι την ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος. Ουσιαστικά χρησιμοποιεί κάθε φορά την προηγούμενη μέτρηση για να διορθώσει τα αποτελέσματα της νέας μέτρησης. Για την εφαρμογή του φίλτρου η μέθοδος χρησιμοποιεί τόσο τις μετρήσεις απόστασης όσο και την σχετική ταχύτητα κίνησης των πομποδεκτών (εφόσον υφίσταται αλλιώς 0) σύμφωνα με τους ακόλουθους τύπους:

$$r_t = r_{t-1} + v_{t-1} \cdot T + (T^2/2) \cdot a \quad (4.3)$$

$$v_t = v_{t-1} + T \cdot a \quad (4.4)$$

όπου r_t, r_{t-1} η μέτρηση της απόστασης την χρονική στιγμή t και $t - 1$ αντίστοιχα, v_t, v_{t-1} η ταχύτητα την χρονική στιγμή t και $t - 1$ αντίστοιχα, T ο χρόνος μεταξύ των χρονικών στιγμών $t - 1$ και t (*update*) και a η επιτάχυνση το σφάλμα της οποίας διαμορφώνεται ως θόρυβος της διαδικασίας. Όπως και στις προηγούμενες μεθόδους, το λογισμικό παρέχει μια εκτίμηση της ακρίβειας της κάθε μέτρησης.

4.2.4 Κινηματικός Εντοπισμός

Για τον εντοπισμό ενός κινούμενου αντικειμένου και τελικά την εξαγωγή της τροχιάς του στον χώρο μπορεί να εφαρμοστεί η τεχνική του τριπλευρισμού αξιοποιώντας τις μετρήσεις αποστάσεων μεταξύ των πομποδεκτών. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας τρεις σταθερούς πομποδέκτες μπορεί να γίνει εντοπισμός ενός τέταρτου κινητού πομποδέκτη στον δισδιάστατο χώρο χρησιμοποιώντας τις *TWToF* μετρήσεις ανάμεσα στους σταθερούς δέκτες και τον κινητό.

Η εταιρεία *Time Domain Inc.* έχει δημιουργήσει το λογισμικό *RangeNet*[®] το οποίο πραγματοποιεί εντοπισμό σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο χώρο χρησιμοποιώντας τέσσερις πομποδέκτες (τρεις σταθερούς και έναν κινητό). Αυτό το λογισμικό είναι σε θέση να δώσει την ακριβή θέση του κινητού πομποδέκτη στον δισδιάστατο χώρο και να κάνει μια εκτίμηση της θέσης του στον τρισδιάστατο η οποία μπορεί να βελτιωθεί καθώς δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να εισάγει στο σύστημα υψομετρικές πληροφορίες (Z) σχετικά με το αν ο κινούμενος πομποδέκτης βρίσκεται πάνω ή κάτω από το οριζόντιο επίπεδο (X, Y) που ορίζουν οι τρεις σταθεροί.

Οι σταθεροί πομποδέκτες τοποθετούνται στον χώρο με τέτοιο τρόπο ώστε, αφενός να σχηματίζεται ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων του οποίου ο προσανατολισμός των αξόνων του ορίζεται από αυτούς (Σχήμα 4.7), αφετέρου ο τέταρτος πομποδέκτης να κινείται εντός ή κοντά στην περιοχή που ορίζει αυτό το σύστημα. Συστήνεται ο τέταρτος πομποδέκτης να μην κινείται σε απόσταση μεγαλύτερη από το διπλάσιο της απόστασης μεταξύ των σταθερών πομποδεκτών για λόγους γεωμετρίας του συστήματος [Time Domain, 2015].



Σχήμα 4.7 Ενδεικτική διάταξη των πομποδεκτών UWB PulsON® 410 για εντοπισμό με τη χρήση του λογισμικού RangeNet® [www.timedomain.com]

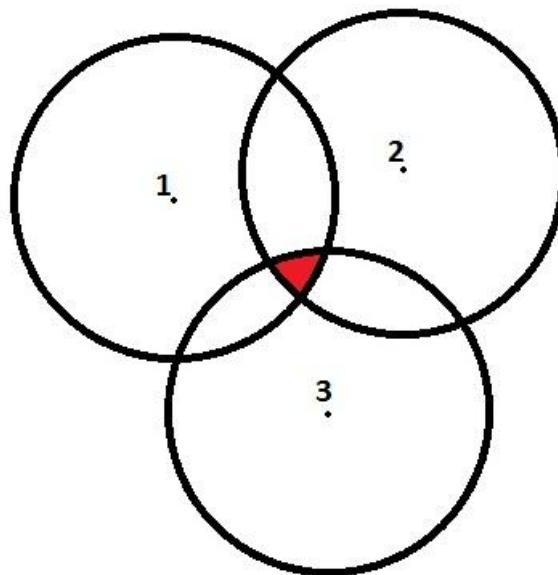
Figure 4.7 Indicator positions of PulsON® 410 nodes for localization with RangeNet® [www.timedomain.com]

Οι τέσσερις πομποδέκτες που αποτελούν το δίκτυο βρίσκονται σε συνεχή επικοινωνία μεταξύ τους αποστέλλοντας μηνύματα για την εξέλιξη της διαδικασίας των μετρήσεων. Κατά την εγκατάσταση του δικτύου γίνεται ρύθμιση της σειράς με την οποία οι πομποδέκτες θα επικοινωνούν μεταξύ τους. Με αυτό τον τρόπο ορίζεται η αλληλουχία των μετρήσεων όπου σε μία πλήρη επανάληψη έχουν μετρηθεί όλες οι αποστάσεις μεταξύ των πομποδεκτών (έξι συνολικά για τέσσερις πομποδέκτες). Πιο συγκεκριμένα, γίνεται η μέτρηση της απόστασης μεταξύ δύο πομποδεκτών (π.χ. 101-102). Μόλις ολοκληρωθεί η μέτρηση, ακολουθεί μια άλλη μέτρηση απόστασης (π.χ. 103-100). Η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου ολοκληρωθούν οι μετρήσεις όλων των αποστάσεων οπότε ολοκληρώνεται ένας κύκλος μετρήσεων και η διαδικασία ξεκινά από την αρχή.

Προκειμένου να ξεκινήσει η διαδικασία στο πεδίο είναι απαραίτητη η γνώση των συντεταγμένων των σταθερών πομποδεκτών. Αυτό μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Πρώτον, ο χρήστης να δώσει στο σύστημα τις ακριβείς αποστάσεις μεταξύ των σταθερών πομποδεκτών (ή και του υψομέτρου τους προαιρετικά) και έτσι αυτό να υπολογίσει τις συντεταγμένες τους. Ο δεύτερος τρόπος είναι μέσω του λογισμικού Autosurvey®. Το σύστημα πραγματοποιεί μετρήσεις αποστάσεων μεταξύ των τριών σταθερών πομποδεκτών (αλλά και του κινητού) και με μια επαναληπτική διαδικασία προσδιορίζει τις συντεταγμένες τους. Αυτό το λογισμικό μπορεί να είναι

σε λειτουργία κατά τη διάρκεια του εντοπισμού, επαναπροσδιορίζοντας με αυτό τον τρόπο συνεχώς τις θέσεις των σταθερών εφόσον το επιλέξει ο χρήστης.

Ο εντοπισμός γίνεται εφαρμόζοντας την τεχνική του τριπλευρισμού, όμως επειδή μεσολαβεί ένα χρονικό διάστημα μέχρι να μετρηθούν οι τρεις απαραίτητες αποστάσεις, η θέση του κινητού έχει αλλάξει. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τα σφάλματα που υπεισέρχονται στις μετρήσεις των αποστάσεων έχει σαν αποτέλεσμα οι τρεις κύκλοι να μην τέμνονται σε ένα σημείο. Έτσι σχηματίζεται μια περιοχή μέσα στην οποία βρίσκεται το κινητό (Σχήμα 4.8). Για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης του κινητού μέσα σε αυτή την περιοχή εφαρμόζεται ένα φίλτρο *Kalman* το οποίο χρησιμοποιεί τις προγενέστερες μετρήσεις και θέσεις του αντικειμένου προκειμένου να κάνει μια πρόβλεψη του διανύσματος της μετατόπισης του κινητού από την τελευταία γνωστή του θέση. Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να εισάγει τις αποστάσεις από τους σταθερούς πομποδέκτες προς τον κινούμενο όταν αυτός είναι ακίνητος για τη ρύθμιση του συστήματος. Όλα τα αποτελέσματα καταγράφονται σε υπολογιστή ο οποίος είναι συνδεδεμένος σε έναν από τους πομποδέκτες.



Σχήμα 4.8 Περιοχή (κόκκινο) εντός της οποίας βρίσκεται η θέση του κινητού
Figure 4.8 Region (red) in which is the position of the mobile

4.2.5 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Το σύστημα *PulsON*[®] 410 της *Time Domain Inc.* έχει κάποια πλεονεκτήματα για εφαρμογές εντοπισμού συγκρινόμενο με άλλα εμπορικά συστήματα της ίδιας τεχνολογίας:

- το σύστημα έχει τη δυνατότητα μέτρησης απόστασης σε μεγάλη σχετικά απόσταση που φτάνει τα 354 m σε συνθήκες *LoS* σύμφωνα με τον κατασκευαστή, στην πράξη όμως πολύ μεγαλύτερες ακόμη και της τάξεως των 600 m (Brandon Dewberry & Alan Petroff, Time Domain).
- οι τρεις διαφορετικοί τρόποι μέτρησης της απόστασης δίνουν τη δυνατότητα μετρήσεων με διαφορετική ποιότητα. Ο αλγόριθμος *TWToF* θεωρείται ιδιαίτερα αξιόπιστος για τη μέτρηση απόστασης, ενώ η ποιότητα των ρολογιών των πομποδεκτών περιορίζει σημαντικά τα σφάλματα που μπορεί να οφείλονται σε λάθος συγχρονισμό. Η μέθοδος *CRE* έχει τη δυνατότητα να απορρίπτει το σήμα *RF* που προέρχεται από πολυανακλάσεις, ενώ η μέθοδος *FRE* με τη χρήση του φίλτρου *Kalman* βελτιώνει ακόμη περισσότερο την ακρίβεια του συστήματος.
- η λειτουργία που συστήματος είναι σχετικά απλή όπως και η διάταξή του δεδομένου ότι αποτελείται μόνο από τον ίδιο τύπο συσκευών (πομποδέκτες) και όλες μπορούν να λειτουργήσουν και ως σταθεροί πομποδέκτες και ως κινητοί. Ταυτόχρονα όμως αυτό αποτελεί και μειονέκτημα καθώς η σύνθετη αρχιτεκτονική των εν λόγω συσκευών ανεβάζει το συνολικό κόστος αγοράς του συστήματος.
- το λογισμικό *RangeNet* το οποίο επιτρέπει παρέμβαση στις ρυθμίσεις του δικτύου επικοινωνίας και μετρήσεων απόστασης μεταξύ των πομποδεκτών του συστήματος σε συνδυασμό με το λογισμικό εντοπισμού της εταιρείας (εφαρμογή φίλτρου *Kalman*) μπορεί να δώσει ικανοποιητικές ακρίβειες σε εφαρμογές κινηματικού εντοπισμού.
- το γεγονός ότι η εκπομπή του σήματος *RF* γίνεται με παλμούς πολύ μικρής χρονικής διάρκειας αποτελεί βασικό παράγοντα της ακρίβειας του συστήματος, καθώς καθιστά εύκολη την αναγνώριση του πρώτου παλμού και κατά συνέπεια τη μείωση των πολυανακλάσεων.

4.3 Άλλα Συστήματα UWB

4.3.1 Series 9000 IP®

Εταιρεία παραγωγής αυτού του συστήματος UWB είναι η εταιρεία *Ubisense*. Το σύστημα αποτελείται από ενεργητικές ετικέτες (*tags*) που εκπέμπουν σήμα RF με συχνότητα από 6.5 GHz έως 8 GHz, καθώς και από ειδικούς αισθητήρες οι οποίοι λαμβάνουν το εκπεμπόμενο σήμα RF. Οι αισθητήρες αυτοί τοποθετούνται σε διάφορα σημεία γνωστών συντεταγμένων στον χώρο και ταξινομούνται σε ομάδες (κυψέλες) των τεσσάρων ή και περισσότερων αισθητήρων. Οι αισθητήρες αυτοί έχουν τη δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ τους. Οι ετικέτες τοποθετούνται πάνω στα αντικείμενα για τα οποία ενδιαφέρει ο εντοπισμός. Οι αισθητήρες λαμβάνουν το εκπεμπόμενο σήμα RF και χρησιμοποιούν τους αλγόριθμους AoA και TDoA για να εκτιμήσουν τη θέση του αντικειμένου. Πρόκειται για το μοναδικό σύστημα UWB που χρησιμοποιεί μετρήσεις γωνιών (τριγωνισμός) σε εντοπισμό.

Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, η ακρίβεια στον εντοπισμό είναι της τάξεως των 0.15 m και εμβέλεια που σε εσωτερικούς χώρους κυμαίνεται από τα 30 m έως τα 50 m.



Σχήμα 4.9 Το σύστημα UWB της εταιρείας Ubisense [ubisense.net/en]

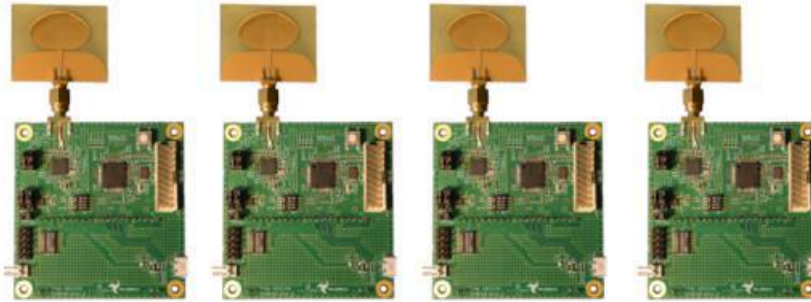
Figure 4.9 Ubisense real time location technologies [ubisense.net/en]

4.3.2 ScenSor®

Το σύστημα της εταιρείας *Decawave* αποτελείται από πομποδέκτες οι οποίοι τοποθετούνται σε σταθερά σημεία γνωστών συντεταγμένων καθώς και πάνω στο αντικείμενο για το οποίο ενδιαφέρει ο εντοπισμός του. Οι αποστάσεις ανάμεσα

στους σταθερούς πομποδέκτες και τον κινούμενο υπολογίζονται μέσω των αλγορίθμων *ToA* και *TDoA*. Στη συνέχεια εφαρμόζεται η τεχνική του τριπλευρισμού για τον προσδιορισμό της θέσης του αντικειμένου.

Το σύστημα λειτουργεί στις συχνότητες από 3.5 GHz έως 6.5 GHz. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή μπορεί να επιτύχει ακρίβεια της τάξεως των 0.01 m για εντοπισμό σε κλειστό χώρο, ενώ η εμβέλεια του συστήματος φτάνει τα 300 m.



Σχήμα 4.10 Πομποδέκτες UWB ScenSor® [www.decawave.com]

Figure 4.10 UWB wireless transceivers of ScenSor® family [www.decawave.com]

4.3.3 Dart®

Η εταιρεία *Zebra Technologies* έχει δημιουργήσει ένα σύστημα *Dart® UWB* το οποίο μπορεί να λειτουργήσει με διάφορους τρόπους (και ως σύστημα *RFID*) ανάλογα με την εφαρμογή. Αποτελείται από ενεργητικές ετικέτες οι οποίες εκπέμπουν σήμα *RF* σε μορφή παλμών *UWB*. Αυτές οι ετικέτες τοποθετούνται στα αντικείμενα για τα οποία ενδιαφέρει ο εντοπισμός τους. Οι δέκτες τοποθετούνται σε σημεία γνωστών συντεταγμένων και λαμβάνουν το εκπεμπόμενο σήμα *RF* από τις ενεργητικές ετικέτες υπολογίζοντας την απόσταση με τον αλγόριθμο *TDoA*. Στη συνέχεια το λογισμικό εφαρμόζει την τεχνική του τριπλευρισμού και προσδιορίζει τις συντεταγμένες των θέσεων ενδιαφέροντος. Το σύστημα διαθέτει και μία ακόμη συσκευή (*Dart Hub*) η οποία λειτουργεί ως πηγή τροφοδοσίας και είναι υπεύθυνη για το συγχρονισμό των μετρήσεων των ετικετών καθώς διαθέτει ρολόι για τη μέτρηση του χρόνου, στοιχείο απαραίτητο για την επιτυχή εφαρμογή του αλγορίθμου *TDoA*.

Βάσει του κατασκευαστή, η ακρίβεια του συστήματος *Dart® UWB* είναι καλύτερη από 0.03 m σε εντοπισμό και η εμβέλειά του φτάνει τα 200 m σε ιδανικές συνθήκες. Το σύστημα λειτουργεί στη συχνότητες από 6.35 GHz έως 6.75 GHz.



Σχήμα 4.11 Σύστημα Dart® UWB [www.zebra.com]

Figure 4.11 Dart® UWB real time location technology [www.zebra.com]

4.3.4 RTLS®

Το σύστημα RTLS® της εταιρείας *Nanotron Technologies* αποτελείται από δέκτες που τοποθετούνται σε σημεία γνωστών συντεταγμένων, καθώς και από ενεργές ετικέτες (*tags*) οι οποίες τοποθετούνται στα αντικείμενα για τα οποία ενδιαφέρει ο εντοπισμός τους και εκπέμπουν ένα σήμα *RF* διαφορετικής φύσεως από τους παλμούς που χρησιμοποιούν τα προηγούμενα συστήματα. Το σήμα *RF* λαμβάνεται από τους δέκτες και μέσω του αλγόριθμου *TDoA* προσδιορίζονται οι αποστάσεις και μέσω της τεχνικής του τριπλευρισμού γίνεται ο εντοπισμός με ακρίβεια της τάξεως των 2 m για κλειστούς χώρους ενώ η εμβέλεια του φτάνει τα 50 m.



Σχήμα 4.12 Σύστημα RTLS® [nanotron.com]

Figure 4.12 Nanotron real time location technologies [nanotron.com]

4.3.5 PulsOn®

Η εταιρεία *Time Domain Inc.* έχει κατασκευάσει μια σειρά από συστήματα *UWB* με την ονομασία *PulsON®*. Ο τρόπος λειτουργίας τους για εφαρμογές εντοπισμού είναι παρόμοιος με αυτές του συστήματος *ScenSor®* της εταιρείας *Decawave* τις οποίες χρησιμοποιεί τα chips. Το σύστημα *PulsON® 410* εξετάστηκε στην Ενότητα 4.2.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ UWB ΣΕ ΣΤΑΤΙΚΟ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ

Σε αυτό το Κεφάλαιο παρουσιάζεται ο πειραματικός σχεδιασμός και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον έλεγχο του συστήματος υπέρ-ευρείας Ζώνης (UWB), *PulsON® 410* της εταιρείας *Time Domain Inc.* σε στατικό εντοπισμό σε εξωτερικό χώρο και σε συνθήκες οπτικής επαφής μεταξύ των πομποδεκτών. Αναλύεται ο σκοπός του πειράματος, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, η προετοιμασία του, περιγράφεται η υλοποίησή του και η επεξεργασία των δεδομένων. Τέλος, αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον πειραματικό έλεγχο.

5.1 Στόχος Πειραματικού Ελέγχου

Ο πρώτος έλεγχος του συστήματος *PulsON® 410* της *Time Domain Inc.* επιλέχθηκε να γίνει σε κατά το δυνατόν ιδανικές συνθήκες για το σύστημα έτσι ώστε να απομονωθούν στο μέγιστο δυνατό βαθμό εξωγενείς επιδράσεις και να αξιολογηθεί το σύστημα ως προς τις μέγιστες επιδόσεις του. Οι ιδανικές συνθήκες περιλαμβάνουν έναν εξωτερικό, ανοικτό χώρο καθώς και απουσία εμποδίων μεταξύ των πομποδεκτών έτσι ώστε να εξασφαλίζεται μεταξύ τους οπτική επαφή ώστε να αποκλείονται φαινόμενα λήψης δευτερογενών σημάτων *RF* που θα επηρέαζαν την ποιότητα των μετρήσεων. Σε αυτή την πειραματική εφαρμογή το ζητούμενο είναι η εξέταση των δυνατοτήτων του συστήματος σε στατικό εντοπισμό. Ειδικότερα, εξετάζεται η αξιοπιστία των μετρήσεων αποστάσεων και πώς αυτή επηρεάζεται καθώς αυξάνει η απόσταση μεταξύ των πομποδεκτών καθώς και η εμβέλεια του συστήματος (σε τι απόσταση δύναται να μετρήσει επιτυχώς). Επίσης εξετάζεται η διαθεσιμότητα του συστήματος, δηλαδή ο αριθμός των επιτυχημένων μετρήσεων σε οποιαδήποτε απόσταση. Ταυτόχρονα διερευνάται η επίδραση του προσανατολισμού μεταξύ των κεραιών των πομποδεκτών στο τελικό αποτέλεσμα.

5.2 Μεθοδολογία Υλοποίησης

5.2.1 Επιλογή Αποστάσεων Ελέγχου

Βάσει των αρχών λειτουργίας του συστήματος *PulsON® 410* της *Time Domain Inc.*, οι μετρήσεις για αποστάσεις μικρότερες των 5 m δεν είναι αξιόπιστες λόγω της εμφάνισης του φαινομένου του κορεσμού του σήματος *RF* σε τόσο μικρή απόσταση. Παράλληλα, προκειμένου να ελεγχθεί και η μέγιστη δυνατή εμβέλεια του συστήματος, επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν μετρήσεις σε απόσταση άνω των 500 m με τον κατασκευαστή να δίνει τυπικό εύρος λειτουργίας έως 354 m.

Με τα παραπάνω υπόψη, επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν μετρήσεις στις χαρακτηριστικές αποστάσεις των 2 m, 3 m, 10 m, 20 m, 50 m, 100 m, 200 m, 300 m, 400 m, 500 m και 720 m.¹

5.2.2 Τεχνική Λήψης Μετρήσεων

Για τη μέτρηση της απόστασης, επιλέχθηκε η τεχνική της *TWToF*, δηλαδή την χρήση της μέτρησης της χρονικής διάρκειας διάδοσης του σήματος μετ' επιστροφής που χρησιμοποιεί το σύστημα *PulsON® 410* της *Time Domain Inc.*. Δύο πομποδέκτες θα τοποθετούνταν στα άκρα της απόστασης που έπρεπε να μετρηθεί και με την τεχνική της *TWToF* θα προσδιοριζόταν η απόσταση.

5.2.3 Πλήθος Επαναλήψεων

Προκειμένου να αυξηθεί η αξιοπιστία της διαδικασίας αξιολόγησης για κάθε απόσταση ελέγχου έγινε συλλογή μεγάλου πλήθους μετρήσεων. Παράλληλα λήφθηκε υπόψη ο παράγοντας της χρονικής διάρκειας της μέτρησης κατά την επιλογή του αριθμού των επαναλήψεων έτσι ώστε να μην είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα η διαδικασία. Λαμβάνοντας υπόψη αυτούς τους δύο παράγοντες επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν διακόσιες επαναλήψεις σε κάθε απόσταση.

¹ Η χαρακτηριστική απόσταση των 720 m επιλέχθηκε στην περιοχή εκτέλεσης του πειράματος καθώς ήταν η μέγιστη απόσταση που μπορούσε να επιτευχθεί και να πληροί τις προϋποθέσεις που περιγράφονται στην Ενότητα 5.1.

5.2.4 Ένταση Ισχύος Σήματος

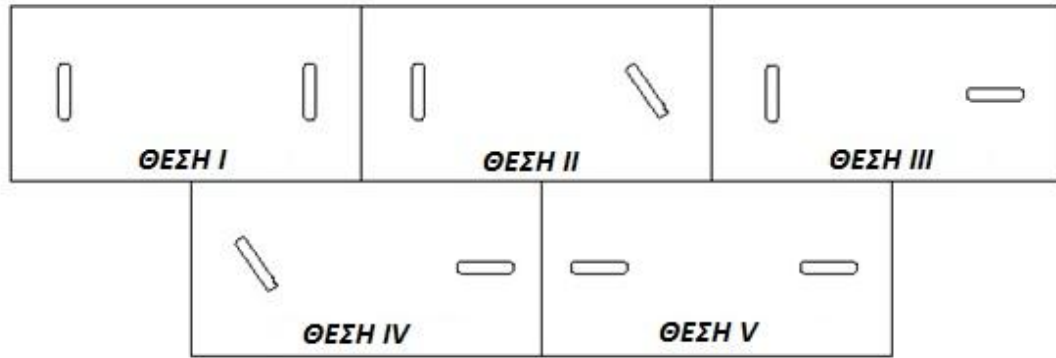
Το σύστημα δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει την ένταση του εκπεμπόμενου σήματος *RF*. Η αύξηση της έντασης του σήματος *RF* αυξάνει την εμβέλεια μέτρησης, ωστόσο αυξάνει και την χρονική της διάρκεια της μέτρησης.

Για την εκτέλεση του πειράματος λαμβάνοντας τους παραπάνω παράγοντες υπόψη επιλέχθηκε η ρύθμιση *P11 7* (που αντιστοιχεί σε ένταση σήματος 51 dB) για τις μετρήσεις αποστάσεων έως και 50 m και τιμή *P11 9* (57 dB) για τις μεγαλύτερες αποστάσεις. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή οι παραπάνω τιμές αντιστοιχούν σε μέγιστη εμβέλεια μέτρησης 125 m και 250 m αντίστοιχα.

5.2.5 Προσανατολισμός Κεραιών

Προκειμένου να εξεταστούν η επίδραση του προσανατολισμοί μεταξύ των κεραιών του συστήματος, κάθε σειρά μετρήσεων επαναλήφθηκε σε πέντε θέσεις ως εξής :

- **ΘΕΣΗ I:** Οι κεραιές είναι παράλληλες μεταξύ τους (Σχήμα 5.1). Πρόκειται για την πλέον ιδανική θέση στην οποία αναμένεται να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή ακρίβεια.
- **ΘΕΣΗ II:** Η κεραιά του δεύτερου πομποδέκτη στρέφεται κατά 45^{deg} (Σχήμα 5.2).
- **ΘΕΣΗ III:** Η κεραιά του δεύτερου πομποδέκτη σχηματίζει γωνία 90^{deg} σε σχέση με τον προσανατολισμό της στη ΘΕΣΗ I (Σχήμα 5.3).
- **ΘΕΣΗ IV:** Η κεραιά του πρώτου πομποδέκτη στρέφεται κατά 45^{deg} ενώ η κεραιά του δεύτερου πομποδέκτη έχει τον ίδιο προσανατολισμό με την ΘΕΣΗ III (Σχήμα 5.4).
- **ΘΕΣΗ V:** Οι δύο κεραιές σχηματίζουν γωνία 90^{deg} σε σχέση με τον προσανατολισμό τους στην ΘΕΣΗ I (Σχήμα 5.5). Θεωρητικά είναι η δυσμενέστερη περίπτωση και σε αυτήν αναμένεται να παρατηρηθούν τα περισσότερα προβλήματα.



Σχήμα 5.1: Προσανατολισμοί κεραιών συστήματος UWB κατά την διενέργεια του στατικού ελέγχου (κάτωψη)

Figure 5.1 UWB system antenna orientation scenarios for the static trials (top view)

5.2.6 Αποστάσεις Αναφοράς

Προκειμένου να γίνει έλεγχος της εξωτερικής ακρίβειας του συστήματος UWB, ήταν απαραίτητη η μέτρηση της ίδιας απόστασης με όργανο υψηλότερης ακρίβειας. Επιλέχθηκε ο γεωδαιτικός σταθμός GPT- 3107N με αβεβαιότητα μέτρησης $\pm 20^{cc}$ στις διευθύνσεις και $\pm 2mm \pm 2ppm$ στις μετρήσεις αποστάσεων με πρίσμα και $\pm 3mm \pm 2ppm$ στις μετρήσεις αποστάσεων χωρίς πρίσμα. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά δίνουν τη δυνατότητα προσδιορισμού της απόστασης με αβεβαιότητα έως $\pm 6mm$ για τις αποστάσεις της συγκεκριμένης πειραματικής εφαρμογής κάτι που καθιστούσε την μέτρηση με τον γεωδαιτικό σταθμό πιο αξιόπιστη από τη μέτρηση του συστήματος UWB στο οποίο ο κατασκευαστής δίνει αβεβαιότητα μέτρησης της απόστασης $\pm 0.021 m$ για συνθήκες LoS.

Για τη μέτρηση των αποστάσεων των 2 m, 3 m και των 10 m επιλέχθηκε η χρήση είτε μετροταινίας, είτε αποστασιόμετρου. Και αυτές οι μέθοδοι δίνουν ακρίβειες της τάξης των λίγων mm κάτι που πληροί τις προϋποθέσεις όπως τέθηκαν προηγουμένως.

Για τον προσδιορισμό των αποστάσεων που θα μετρούνταν με γεωδαιτικό σταθμό ακολουθήθηκε η εξής μεθοδολογία: ο γεωδαιτικός σταθμός τοποθετήθηκε προσεγγιστικά στη μεσοκάθετο της απόστασης ελέγχου (Σχήμα 5.2). Μετρήθηκαν οι αποστάσεις και διευθύνσεις (κάθετες και οριζόντιες) σε δύο θέσεις τηλεσκοπίου και δύο περιόδους μετρήσεων με σκόπευση στο κέντρο φάσης της κάθε κεραιάς του συστήματος UWB το οποίο υλοποιούνταν με σαφήνεια. Η μέτρηση της απόστασης

έγινε χωρίς την χρήση πρίσματος προκειμένου η σκόπευση να γίνει αυστηρά στο κέντρο φάσης του της κεραίας του αισθητήρα, εκτός αν αυτό απαιτούνταν σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Παράλληλα, μετρήθηκαν τα ύψη σκόπευσης και το ύψος του οργάνου. Με αυτόν τον τρόπο σχηματίστηκε ένα τρίγωνο στον χώρο με δύο γνωστές πλευρές και τη μεταξύ τους γωνία με επίλυση του οποίου προσδιορίστηκε η τρίτη του πλευρά, δηλαδή η απόσταση ελέγχου.



Σχήμα 5.2 Εγκατάσταση εξοπλισμού κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στατικού ελέγχου
Figure 5.2 Equipment setup during the static experiment

5.3 Προπαρασκευαστικές Εργασίες

5.3.1 Επιλογή Περιοχής Μελέτης

Η επιλογή της τοποθεσίας του πειράματος έγινε βάσει των στόχων του πειράματος (βλ. Ενότητα 5.1). Επιλέχθηκε ένα παραθαλάσσιο οικοπέδο στην περιοχή του Νέου Φαλήρου ιδιοκτησίας της εταιρείας *Ολυμπιακά Ακίνητα ΑΕ* (Σχήμα 5.3). Το πείραμα πραγματοποιήθηκε πάνω στην προκουαία του οικοπέδου οι οποία σχηματίζει μια πολύ ανοικτή καμπύλη με τα κοίλα της στραμμένα προς τη στεριά. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα οι μετρήσεις των μεγάλων αποστάσεων να πραγματοποιηθούν πάνω

από την επιφάνεια της θάλασσας κάτι που περιορίζει την πιθανότητα να υπάρξει παρεμβολή από κάποιο κινητό αντικείμενο κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του πειράματος, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίστηκε η μέγιστη δυνατή απόσταση ελέγχου.



Σχήμα 5.3: Περιοχής εκτέλεση πειράματος [Κτηματολόγιο ΑΕ]

Figure 5.3 Study area (aero photograph) [NSMA SA]

5.3.2 Εξοπλισμός

Για την εκτέλεση του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος εξοπλισμός:

- 2 πομποδέκτες του συστήματος *PulsON 410 UWB* της *Time Domain Inc.* (Σχήμα 5.4)
- 2 φωτογραφικοί τρίποδες για την στερέωση των πομποδεκτών (Σχήμα 5.5)
- 1 γεωδαιτικός σταθμός (*GPT 3107N* της *Topcon*) για την ακριβή μέτρηση της απόστασης (Σχήμα 5.6)
- 1 γεωδαιτικός τρίποδας (Σχήμα 5.7)
- 1 μικρό κατάφωτο
- 1 μεταλλική μετροταινία (5 m)
- 1 πλαστική μετροταινία (30 m)
- 1 αποστασιόμετρο (*Leica Disto D8*) ονομαστικής ακρίβειας $\pm 1\text{ mm}$
- 1 φορητός υπολογιστής για την καταγραφή των μετρήσεων του συστήματος *UWB*
- ασύρματος για επικοινωνία μεταξύ μελών της ομάδας στις μεγάλες αποστάσεις



Σχήμα 5.4 Πομποδέκτης PulsON® 410
Figure 5.4 Node of PulsON® 410



Σχήμα 5.5 Φωτογραφικός τρίποδας
Figure 5.5 Photographic tripod



Σχήμα 5.6 Γεωδαιτικός σταθμός
Figure 5.6 Total station



Σχήμα 5.7 Γενική άποψη
Figure 5.7 General view

5.4 Υλοποίηση Πειράματος

Η εκτέλεση του πειράματος έγινε τις μεσημβρινές/ απογευματινές ώρες στις 21.03.2016 και διήρκησε περίπου 3,5 h. Οι καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν ήταν αραιή συννεφιά, μικρής έντασης άνεμος και θερμοκρασία γύρω στους 20-25° C, συνθήκες ικανοποιητικές σύμφωνα με τον κατασκευή.

Κατά τη διαδικασία των μετρήσεων, ο πομποδέκτης 1 (*requester*) του συστήματος *UWB* (όπου ήταν συνδεδεμένος και ο φορητός υπολογιστής) παρέμενε σταθερός στο σημείο εκκίνησης των μετρήσεων και μετακινούνταν μόνο ο πομποδέκτης 2 (*responder*), έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η ζητούμενη ονομαστική απόσταση. Στις μεγάλες αποστάσεις η ονομαστική απόσταση προσεγγιζόταν με λίγες δοκιμαστικές μετρήσεις με το σύστημα *UWB*.

Στις αποστάσεις των 400 m, 500 m και 720 m για τη μέτρηση της απόστασης με τον γεωδαιτικό σταθμό προς τον πομποδέκτη 2 χρησιμοποιήθηκε το μικρό κατάφωτο

καθώς παρότι η μετρούμενη απόσταση ήταν εντός του εύρους μέτρησης του γεωδαιτικού σταθμού χωρίς ανακλαστήρα, το γεγονός ότι η σκόπευση γινόταν προς τα δυτικά και κατά συνέπεια με κόντρα τον ήλιο ο οποίος εκείνη την ώρα πλησίαζε τη δύση του, δημιουργούσε πρόβλημα στον γεωδαιτικό σταθμό να κάνει τη μέτρηση.



Σχήμα 5.8 Μέτρηση απόστασης με χρήση κατάφωτου
Figure 5.8 Range Measurement with mini prism

Έτσι η μέτρηση της απόστασης έγινε ως εξής: το κατάφωτο τοποθετούνταν δίπλα στην κεραία (Σχήμα 5.8) με τη μέτρηση της απόστασης και της κατακόρυφης διεύθυνσης να γίνεται σκοπεύοντας το κέντρο του. Στη συνέχεια γινόταν ανάγνωση της οριζόντιας διεύθυνσης με σκόπευση το κέντρο φάσης της κεραίας.

Οι μετρήσεις αποστάσεων από τα 2 m έως και τα 100 m έγιναν με τη μετάδοση του σήματος *RF* να γίνεται πάνω από την προκυμαία ενώ στις μεγαλύτερες αποστάσεις εν μέρει και πάνω από την θάλασσα. Επίσης, κατά τη μέτρηση των 300 m ένα αυτοκίνητο βρισκόταν σταθμευμένο κοντά στην νοητή ευθεία που ένωνε τους δύο πομποδέκτες γεγονός που ενδεχομένως να επηρέαζε την ακρίβεια των μετρήσεων εφόσον ενέπιπτε στη ζώνη *Fresnel*.

5.5 Επεξεργασία Δεδομένων Πεδίου

5.5.1 Μετρήσεις Γεωδαιτικού Σταθμού

Για τον προσδιορισμό της κάθε απόστασης μέσω των μετρήσεων του γεωδαιτικού σταθμού ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία: αρχικά προσδιορίστηκε η οριζόντια απόσταση μεταξύ του γεωδαιτικού σταθμού και της κάθε μιας από τις δύο κεραιές μέσω της κεκλιμένης μετρημένης απόστασης και της κατακόρυφης γωνίας. Τα τρία σημεία (γεωδαιτικός σταθμός, πομποδέκτης 1, πομποδέκτης 2) εντάχθηκαν σε ένα αυθαίρετο τοπικό σύστημα συντεταγμένων με αρχή (0,0) την θέση του γεωδαιτικού σταθμού και προσανατολισμό την πλευρά στάση γεωδαιτικού σταθμού - πομποδέκτης 1. Μέσω των Εξισώσεων 5.1 και 5.2 του πρώτου θεμελιώδους προβλήματος της Γεωδαισίας, προσδιορίστηκαν οι συντεταγμένες των δύο πομποδεκτών στο τοπικό σύστημα:

$$x_{\Pi} = x_{Γ.Σ.} + D_{ΓΣ-Π} \sin \alpha_{ΓΣ-Π} \quad (5.1)$$

$$y_{\Pi} = y_{ΓΣ} + D_{ΓΣ-Π} \cos \alpha_{ΓΣ-Π} \quad (5.2)$$

όπου, (x_{Π}, y_{Π}) οι συντεταγμένες του πομποδέκτη, $(x_{ΓΣ}, y_{ΓΣ})$ οι συντεταγμένες του γεωδαιτικού σταθμού που έχουν τεθεί αυθαίρετα ως το (0,0), $D_{ΓΣ-Π}$ η οριζόντια απόσταση μεταξύ πομποδέκτη και γεωδαιτικού σταθμού και $\alpha_{ΓΣ-Π}$ η γωνία διεύθυνσης γεωδαιτικού σταθμού - πομποδέκτη.

Από την Εξίσωση 5.3 προσδιορίστηκε η οριζόντια απόσταση μεταξύ των δύο πομποδεκτών και τελικά με γνωστή την υψομετρική διαφορά τους (από τη διαφορά των υψών στόχων που είχαν μετρηθεί), μέσω της Εξίσωσης 5.4 προσδιορίστηκε η ζητούμενη κεκλιμένη απόσταση μεταξύ των δύο πομποδεκτών (Πίνακας 5.1).

$$D_{\Pi_1-\Pi_2} = \sqrt{(x_{\Pi_2} - x_{\Pi_1})^2 + (y_{\Pi_2} - y_{\Pi_1})^2} \quad (5.3)$$

$$S_{\Pi_1-\Pi_2} = \sqrt{D_{\Pi_1-\Pi_2}^2 + \Delta H_{\Pi_1-\Pi_2}^2} \quad (5.4)$$

Μέσω νόμου μετάδοσης σφαλμάτων στις παραπάνω σχέσεις και με δεδομένες τις αβεβαιότητες μέτρησης του γεωδαιτικού σταθμού (βλ. Ενότητα 5.2.6), υπολογίστηκαν η αβεβαιότητα μέτρησης των αποστάσεων (Πίνακας 5.1).

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ (m)	ΑΛΗΘΗΣ (m)	ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ (m)
2	1.880	0.005 ²
3	3.130	0.005 ²
10	9.780	0.005 ²
20	19.709	0.003
50	49.575	0.004
100	99.330	0.004
200	200.850	0.004
300	299.416	0.005
400	400.138	0.004
500	500.959	0.005
720	718.730	0.006

Πίνακας 5.1 Μετρήσεις αποστάσεων με την αβεβαιότητά τους
Table 5.1 Distance measurements with their uncertainty

5.5.2 Μετρήσεις Αποστάσεων Συστήματος UWB

Για την επεξεργασία των μετρήσεων που προέκυψαν από το σύστημα UWB δημιουργήθηκαν υπολογιστικά εργαλεία σε προγραμματιστικό περιβάλλον *MATLAB*[®].

Η τιμή της απόστασης προέκυψε ως η μέση τιμή από το σύνολο των επιτυχών επαναλήψεων μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε κάθε θέση κεραίας για κάθε απόσταση. Για κάθε θέση κεραίας προέκυψαν τρεις τιμές απόστασης, μία για κάθε τύπο μέτρησης (*PRM*, *CRE*, *FRE*). Ταυτόχρονα προσδιορίστηκε και το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής, δηλαδή η διασπορά των μετρήσεων.

Από το μέσο όρο των αβεβαιοτήτων της κάθε μέτρησης που δίνει το σύστημα, προσδιορίστηκε η αβεβαιότητα της κάθε απόστασης. Επίσης μετρήθηκαν σε κάθε θέση ο αριθμός των επιτυχημένων μετρήσεων καθώς και η χρονική διάρκεια των μετρήσεων.

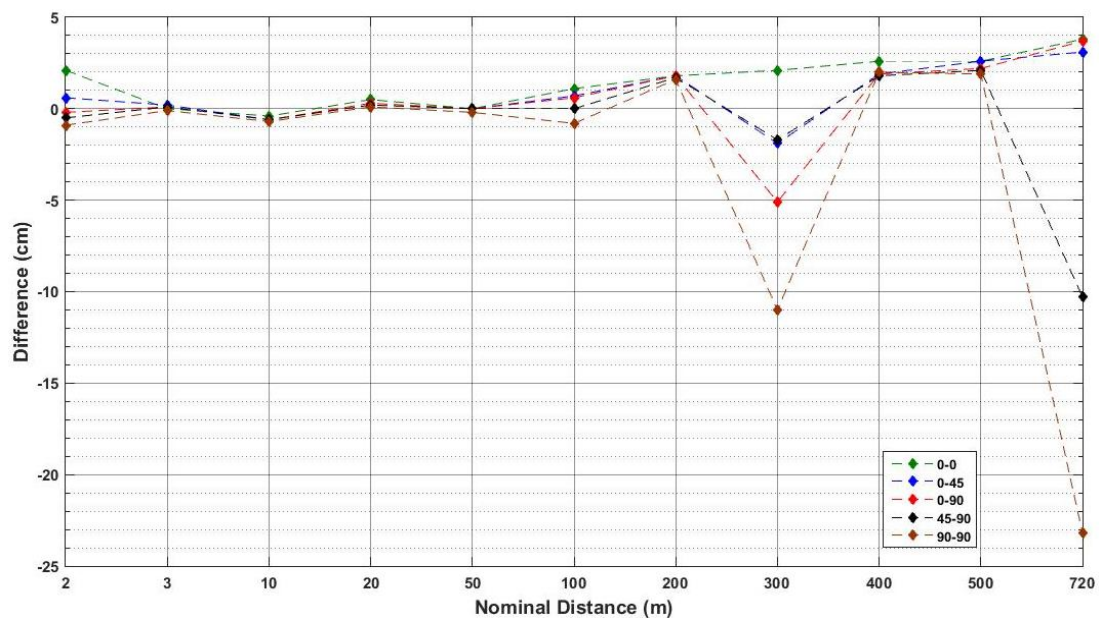
² Για τις αποστάσεις αυτές που μετρήθηκαν με μετροταινία/ αποστασιόμετρο, θεωρήθηκε $\sigma = \pm 5 \text{ mm}$ λόγω της αβεβαιότητας στο τέντωμα της μετροταινίας και στην σκόπευση με το αποστασιόμετρο

5.6 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

5.6.1 Ανάλυση Αξιοπιστίας (*Trueness*)

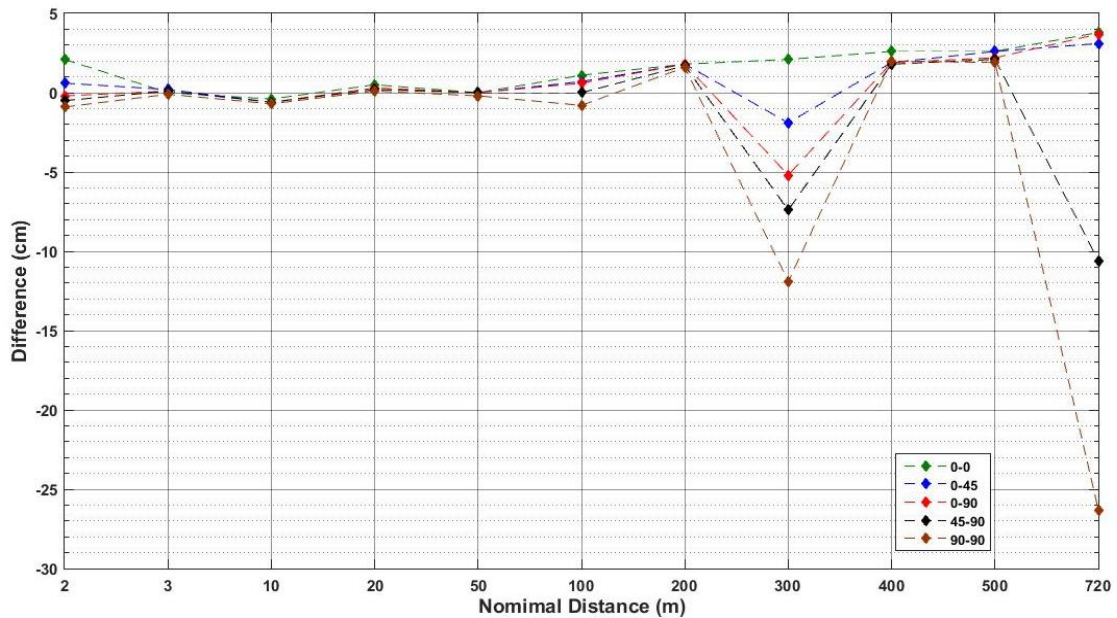
Στα Σχήματα 5.9, 5.10 και 5.11 απεικονίζονται οι αποκλίσεις των μέσων τιμών των μετρήσεων που προέκυψαν από το σύστημα *UWB* από τις αποστάσεις αναφοράς. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζονται οι μετρήσεις που προέκυψαν με την μέθοδο *CRE* (εκτίμηση απόστασης), στο Σχήμα 5.10 με τη μέθοδο *PRM* (ακριβής απόσταση) και στο Σχήμα 5.11 με τη μέθοδο *FRE* (με χρήση φίλτρου *Kalman*). Στα αντίστοιχα διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν και για τους πέντε διαφορετικούς προσανατολισμούς των κεραιών.

Στον άξονα Χ απεικονίζονται οι ονομαστικές τιμές των μετρημένων αποστάσεων, ενώ στον άξονα Υ οι αποκλίσεις από την αληθή τιμή της απόστασης σε εκατοστά.



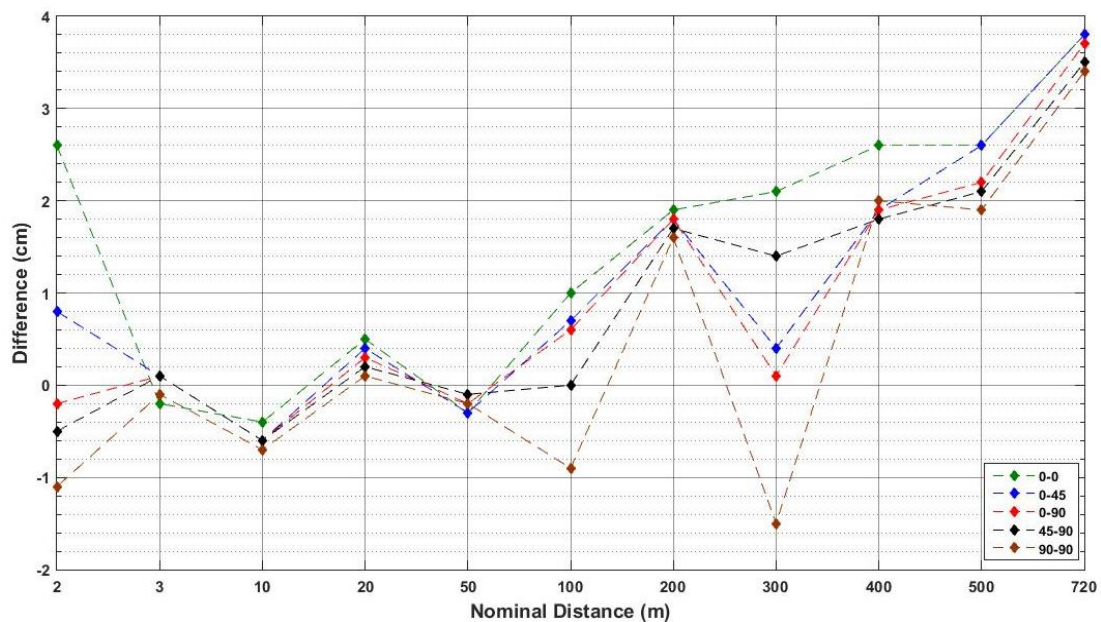
Σχήμα 5.9 Διαφορά μεταξύ της μέσης τιμής των μετρήσεων *UWB* όπως προέκυψαν με την μέθοδο *CRE* από την απόσταση αναφοράς

Figure 5.9 Difference between the mean value of the *UWB CRE* solution and the nominal distance



Σχήμα 5.10 Διαφορά μεταξύ της μέσης τιμής των μετρήσεων UWB όπως προέκυψαν με την μέθοδο PRM από την απόσταση αναφοράς

Figure 5.10 Difference between the mean value of the UWB PRM solution and the nominal distance



Σχήμα 5.11 Διαφορά μεταξύ της μέσης τιμής των μετρήσεων UWB όπως προέκυψαν με την μέθοδο FRE από την απόσταση αναφοράς

Figure 5.11 Difference between the mean value of the UWB FRE solution and the nominal distance

Προκύπτει ότι, για αποστάσεις έως 100 m η αποκλίσεις από την αληθή τιμή είναι μικρότερες του 1 cm. Επίσης, παρότι σύμφωνα με τον κατασκευαστή ως εμβέλεια του συστήματος δίνεται η τιμή των 250 m για $P_{II} = 9$, έως και τα 720 m που ήταν η μέγιστη απόσταση που μετρήθηκε, υπήρχαν επιτυχείς μετρήσεις.

Γενικά δεν παρατηρείται μεγάλη απόκλιση μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων μετρήσεων. Εξάιρεση αποτελεί η απόσταση των 720 m. Στις μετρήσεις με τις

μεθόδους *CRE* και *PRM* και για τις ΘΕΣΕΙΣ IV και V των κεραιών οι μετρήσεις παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση από την αληθή τιμή, άνω των 10 cm, ενώ οι μετρήσεις για τις υπόλοιπες θέσεις της ίδιας απόστασης δεν υπερβαίνουν τα 4 cm. Ωστόσο, με την εφαρμογή του φίλτρου *Kalman* στη μέθοδο *FRE*, η ακρίβεια των μετρήσεων βελτιώνεται σημαντικά και η απόκλιση από τη μέση τιμή για αυτές τις δύο θέσεις γίνεται αντίστοιχη και των άλλων θέσεων για την ίδια απόσταση. Γενικά με τη μέθοδο *FRE* σε καμία περίπτωση η απόκλιση δεν υπερβαίνει τα 4 cm.

Επίσης, ο έλεγχος της απόστασης 300 m εμφανίζει προβλήματα. Συγκεκριμένα, παρατηρείται απότομη μείωση της ακρίβειας (με εξαίρεση τις μετρήσεις στη ΘΕΣΗ I) που δε συνάδει με τις μετρήσεις μεγαλύτερων αποστάσεων όπου η ακρίβεια είναι εμφανώς καλύτερη. Μάλιστα στη συγκεκριμένη περίπτωση η επιλογή της λύσης με το φίλτρο *Kalman* δε φαίνεται να βελτιώνει την ακρίβεια.

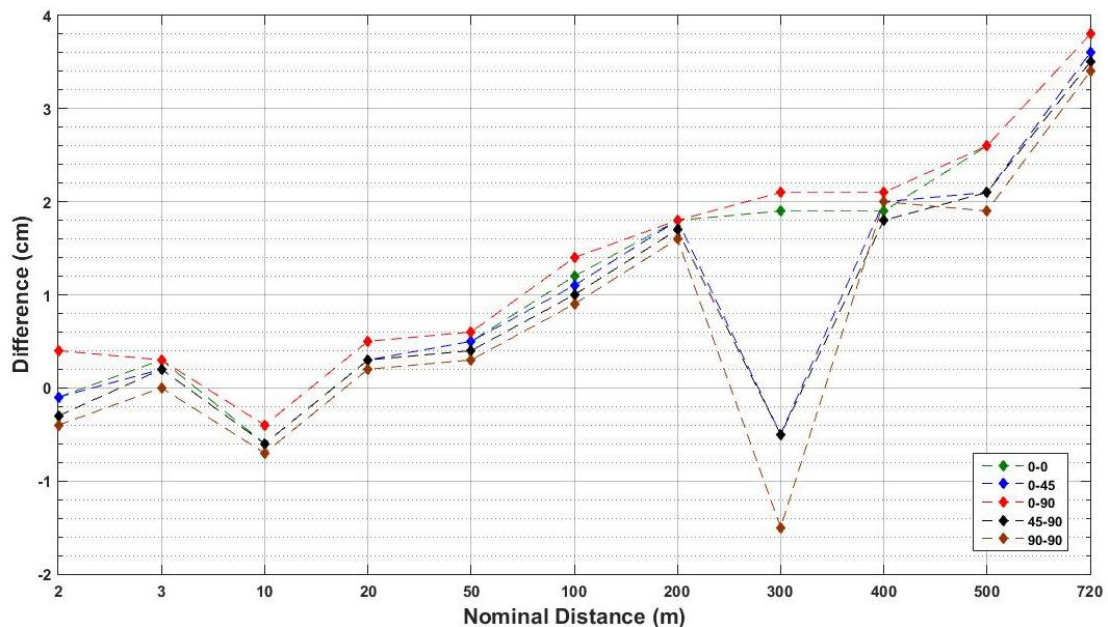
Η εξήγηση των αποτελεσμάτων για την απόσταση των 300 m αναζητείται με αναφορά το φαινόμενο *Fresnel*. Για μετρήσεις αποστάσεων μέχρι 100 m, το ύψος της κεραίας από το έδαφος ήταν της τάξεως των 1.8 m. Για τις μεγαλύτερες αποστάσεις, όπου το σήμα *RF* διέρχεται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, η απόσταση αυτή έφτανε τα 3.3 m (λαμβάνοντας υπόψη επιπρόσθετα 1,5 m του ύψους της προκυμιάς από την επιφάνεια της θάλασσας). Βάση του φαινομένου *Fresnel* (βλ. Ενότητα 4.2.2β), σε όλες οι αποστάσεις από τα 400 m και κάτω δεν υπάρχει τομή της ζώνης *Fresnel* από την επιφάνεια του εδάφους ή της θάλασσας. Η επίδρασή της είναι οριακή στις μετρήσεις της απόστασης των 500 m και μπορεί να θεωρηθεί σημαντική μόνο στην περίπτωση των 720 m.

Όμως στην περίπτωση της απόστασης των 300 m κοντά στη διεύθυνση που ενώνει τους δύο πομποδέκτες βρισκόταν σταθμευμένο αυτοκίνητο εντός της ζώνης *Fresnel*. Κατά πάσα πιθανότητα σε αυτό το γεγονός οφείλεται η παρατηρούμενη μείωση της ακρίβειας. Η ακρίβεια όμως αυτή δε φάνηκε να επηρεάζεται ιδιαίτερα στην περίπτωση που οι κεραιές βρίσκονταν στη ΘΕΣΗ I.

Ιδιαιτερότητες παρουσιάζει και η συμπεριφορά του σήματος *RF* στην περίπτωση των μετρήσεων για την απόσταση των 2 m. Εδώ παρατηρείται ότι με στραμμένες τις

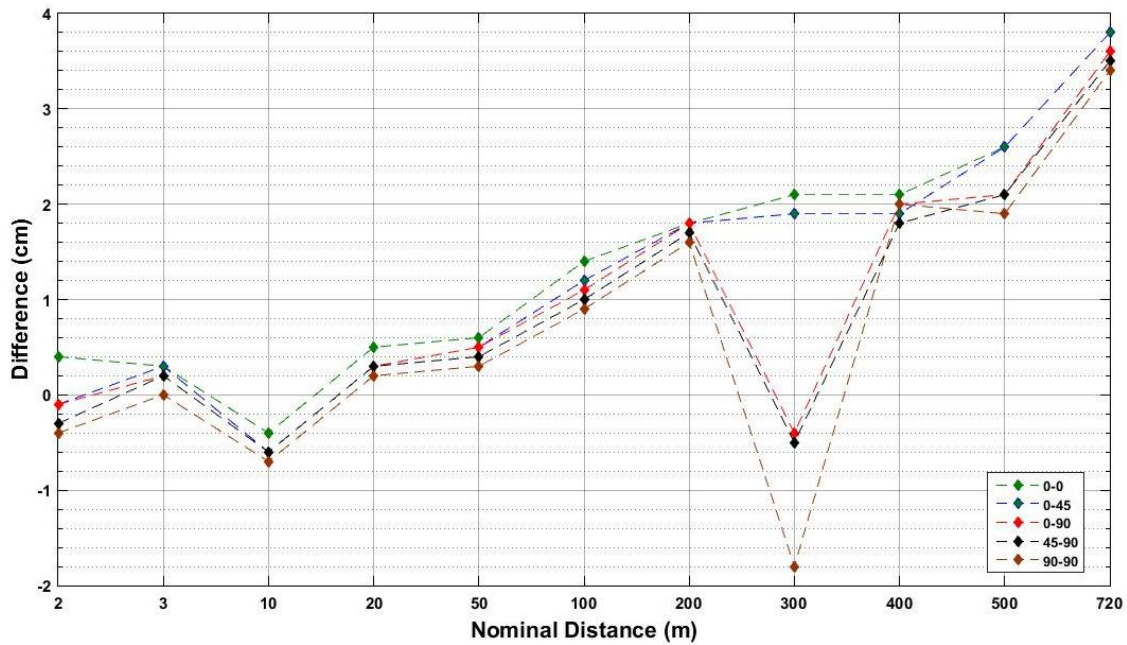
κεραίες απευθείας μεταξύ τους επιτυγχάνεται καλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τις κεραίες στη ΘΕΣΗ Ι. Όπως προηγούμενα, σε αυτή την περίπτωση το φίλτρο *Kalman* φαίνεται να μην επιφέρει βελτίωση σε αυτό το πρόβλημα. Η εξήγηση βρίσκεται κατά πάσα πιθανότητα στο γεγονός ότι σε πολύ μικρές αποστάσεις η διάδοση του σήματος *RF* επηρεάζεται από άλλα φαινόμενα κορεσμού του (βλ. Ενότητα 5.2.1) ενώ όταν οι κεραίες είναι στραμμένες μεταξύ τους δημιουργείται εκτόνωση που βελτιώνει την ακρίβεια της μέτρησης.

Στα Σχήματα 5.12, 5.13 και 5.14 φαίνονται οι διαφορές των διαμέσων τιμών των μετρήσεων που προέκυψαν από το σύστημα *UWB* από τις αληθείς τιμές των αποστάσεων. Οι αποκλίσεις αυτές είναι σημαντικά μικρότερες από τις αντίστοιχες των μέσων τιμών για τις μεθόδους *PRM* και *CRE* και δεν υπερβαίνουν σε καμία περίπτωση τα 4 cm.

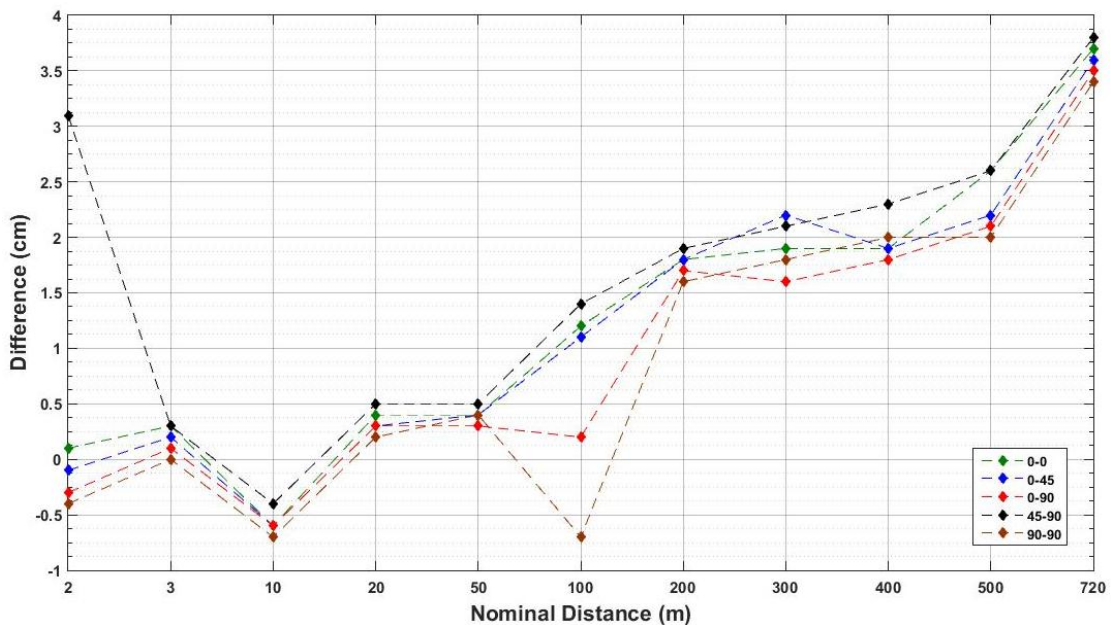


Σχήμα 5.12 Διαφορά μεταξύ της διαμέσου τιμής των μετρήσεων *UWB* όπως προέκυψαν με την μέθοδο *CRE* από την απόσταση αναφοράς

Figure 5.12 Difference between the median value of the *UWB CRE* solution and the nominal distance



Σχήμα 5.13 Διαφορά μεταξύ της διαμέσου τιμής των μετρήσεων UWB όπως προέκυψαν με την μέθοδο PRM από την απόσταση αναφοράς
Figure 5.13 Difference between the median value of the UWB PRM solution and the nominal distance



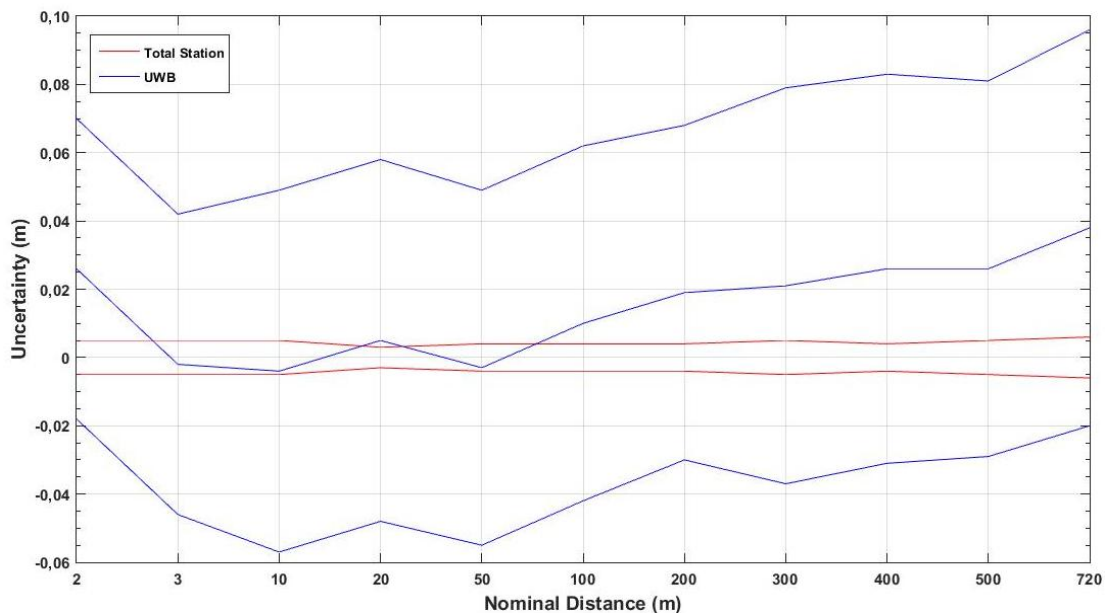
Σχήμα 5.14 Διαφορά μεταξύ της διαμέσου τιμής των μετρήσεων UWB όπως προέκυψαν με την μέθοδο FRE από την απόσταση αναφοράς
Figure 5.14 Difference between the median value of the UWB FRE solution and the nominal distance

Όπως φαίνεται, η διάμεσος τιμή βρίσκεται πολύ πιο κοντά στην αληθή τιμή από ότι η μέση τιμή στις μεγάλες αποστάσεις. Αυτό το γεγονός εξηγείται από το ότι η διάμεσος τιμή επηρεάζεται σε μικρότερο βαθμό από μετρήσεις που απέχουν πολύ από την αληθή τιμή από ότι η μέση τιμή.

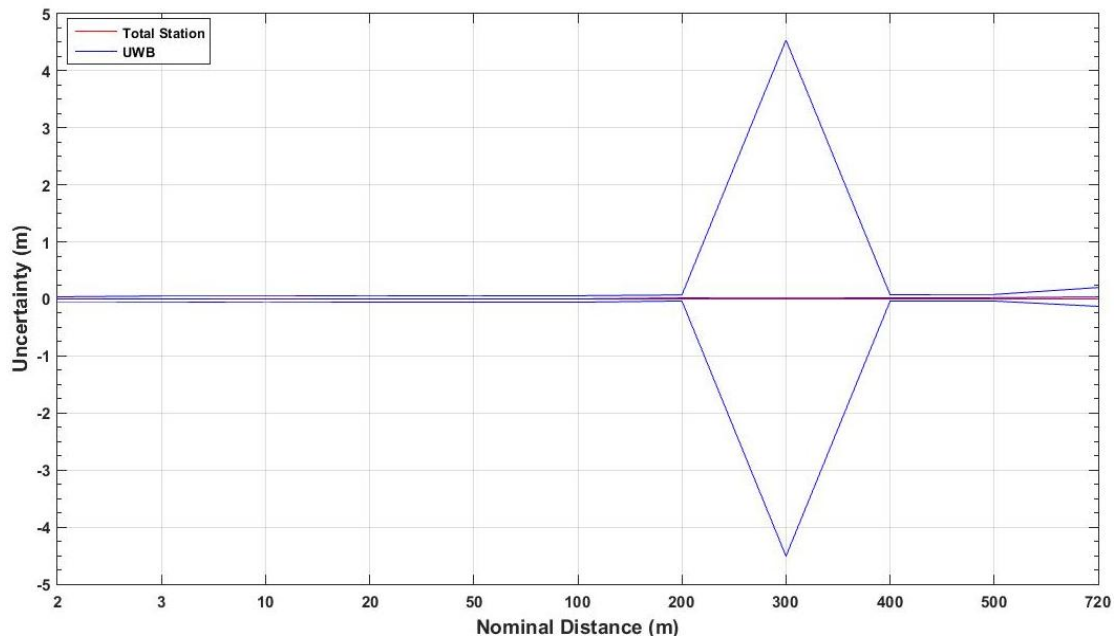
5.6.2 Ανάλυση Αβεβαιότητας (*Precision*)

Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται η ακρίβεια, δηλαδή η επαληψιμότητα ή βαθμός συμβιβαστότητας των μετρήσεων όπως απορρέουν από την κατανομή των μετρήσεων και βάσει στατιστικών δεικτών, όπως η τυπική απόκλιση. Ο σχετικός έλεγχος αφορά όλες τις μετρήσεις, τόσο του συστήματος *UWB* όσο και των συμβατικών συστημάτων.

Εδώ, παρουσιάζονται ενδεικτικά δύο διαγράμματα, ενώ το σύνολο των αποτελεσμάτων δίνεται σε παράρτημα. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η ζώνη της αβεβαιότητας των μετρήσεων αναφοράς (αποστασιόμετρο ή γεωδαιτικός σταθμός), ενώ με μπλε απεικονίζεται η ζώνη της αβεβαιότητας των μετρήσεων του συστήματος *UWB*, όπου φαίνεται και η μέση τιμή των μετρήσεων..



Σχήμα 5.15 Εύρος αβεβαιότητας μετρήσεων με τη μέθοδο FRE για τη ΘΕΣΗ I των κεραιών
Figure 5.15 Uncertainty range of measurements from FRE solution for antennas orientation I



Σχήμα 5.16 Εύρος αβεβαιότητας μετρήσεων με τη μέθοδο FRE για τη ΘΕΣΗ IV των κεραιών
Σχήμα 5.16 Uncertainty range of measurements from FRE solution for antennas orientation IV

Στο Σχήμα 5.15 παρουσιάζονται οι αβεβαιότητες των μετρήσεων όλων των αποστάσεων με τη μέθοδο FRE και με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ I. Είναι εμφανές ότι η αληθής τιμή βρίσκεται μέσα στο εύρος της αβεβαιότητας των μετρήσεων με το σύστημα UWB.

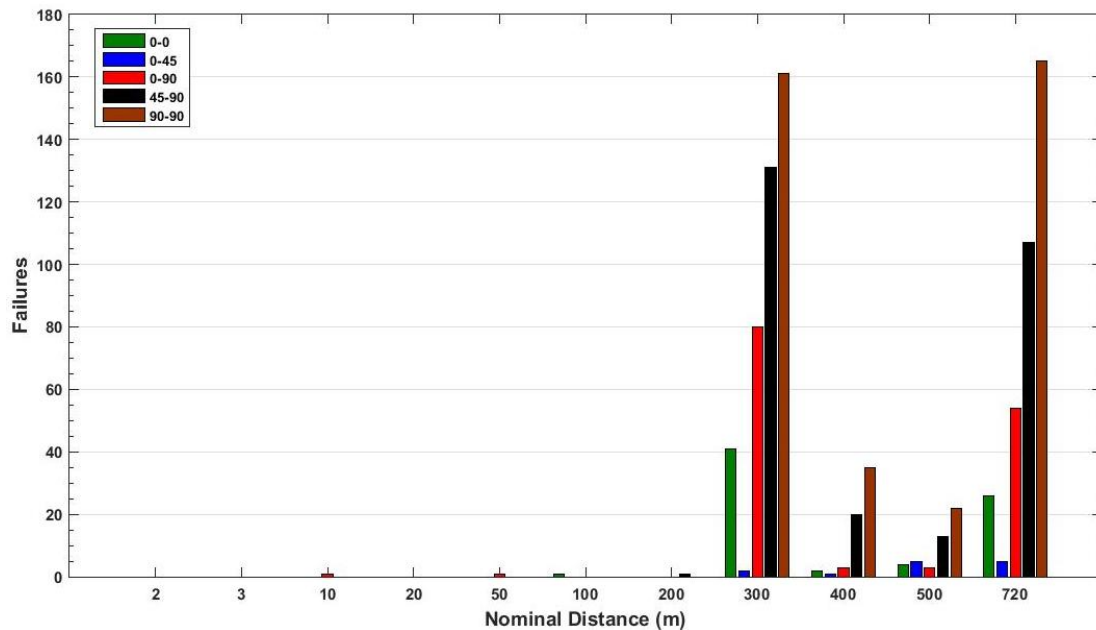
Στο Σχήμα 5.16 παρουσιάζονται οι αβεβαιότητες όλων των αποστάσεων με τη μέθοδο FRE με τις κεραιές όμως στη ΘΕΣΗ IV. Εδώ η αληθής τιμή βρίσκεται μέσα στο εύρος της αβεβαιότητας των μετρήσεων με το σύστημα UWB. Φαίνεται όμως και η μεγάλη αβεβαιότητα των μετρήσεων για την απόσταση των 300 m, ένα ακόμη δείγμα των προβλημάτων που παρουσιάστηκαν κατά τη μέτρηση της συγκεκριμένης απόστασης.

Γενικά σε όλες τις περιπτώσεις η αληθής τιμή βρίσκεται εντός του εύρος της αβεβαιότητας των μετρήσεων με το σύστημα UWB γεγονός που καθιστά το σύστημα αξιόπιστο.

5.6.3 Ανάλυση Διαθεσιμότητας (*Availability*)

Κατά τη διάρκεια του πειράματος υπήρξαν περιπτώσεις στις οποίες το σύστημα UWB δεν ανταποκρίθηκε για κάποιο πλήθος επαναλήψεων με αποτέλεσμα την

αδυναμία λήψης μετρήσεων. Το Σχήμα 5.17 περιλαμβάνει το πλήθος των αποτυχημένων προσπαθειών του συστήματος.



Σχήμα 5.17 Αριθμός αποτυχημένων μετρήσεων της μεθόδου PRM
Figure 5.17 Number of failures of the PRM solution

Συγκεκριμένα, σημειώνεται ότι μεταξύ των διαφορετικών τεχνικών μέτρησης της απόστασης με το σύστημα UWB δεν εντοπίζονται αξιόλογες διαφορές στον αριθμό των αποτυχιών. Για αυτό το λόγο παρουσιάζεται ενδεικτικά μόνο το διάγραμμα για τις μετρήσεις με τη μέθοδο PRM.

Για τις μετρήσεις των αποστάσεων έως και 200 m ο αριθμός των αποτυχιών είναι μηδαμινός για όλες τις θέσεις των κεραιών (διαθεσιμότητα 100%). Παρατηρείται μια απότομη αύξηση των αποτυχιών για την απόσταση 300 m, παρατήρηση που συνάδει με την μείωση της αξιοπιστίας όπως συζητήθηκε στην Ενότητα 5.6.1. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και στην περίπτωση απόστασης 720 m, όπου το πλήθος των αποτυχιών είναι αντίστοιχο με την περίπτωση της απόστασης 300 m. Επίσης φαίνεται ότι όσο ο προσανατολισμός των κεραιών αποκλίνει από την βέλτιστη θέση (0^{deg}), τόσο αυξάνεται και ο αριθμός των αποτυχιών με αυξητική τάση για την ΘΕΣΗ V.

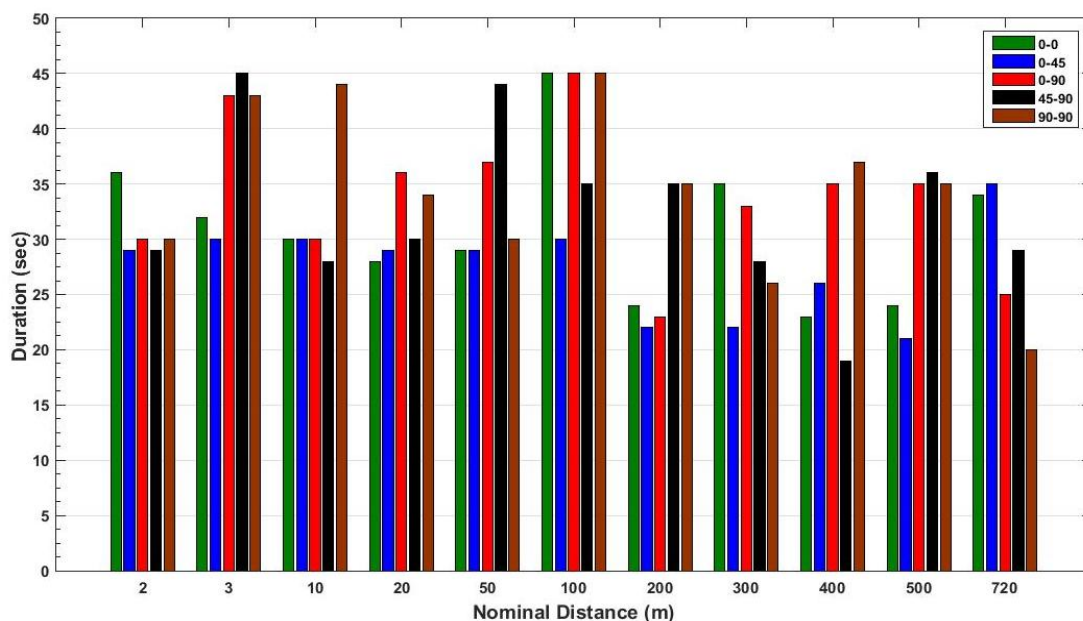
Επίσης, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στην περίπτωση της ΘΕΣΗΣ II το πλήθος των αποτυχιών είναι ιδιαίτερα περιορισμένο για το σύνολο των αποστάσεων ελέγχου. Το γεγονός αυτό αντικατοπτρίζεται και στην ακρίβεια των μετρήσεων

καθώς σε αυτή την θέση παρουσιάζονται και οι μικρότερες αποκλίσεις από την αληθή τιμή.

Τέλος, συγκρίνοντας τα διαγράμματα της απόκλισης από την αληθή τιμή με το διάγραμμα των αποτυχιών προκύπτει συμπεραίνεται ότι αύξηση των αποτυχιών συνεπάγεται μείωση της ακρίβειας, με εξαίρεση την περίπτωση της απόστασης των 2 m όπου η μείωση της ακρίβειας οφείλεται σε άλλο λόγο. Εμπόδια που βρίσκονται εντός της ζώνης *Fresnel* (300 m, 720 m) προκαλούν αύξηση του αριθμού των αποτυχιών.

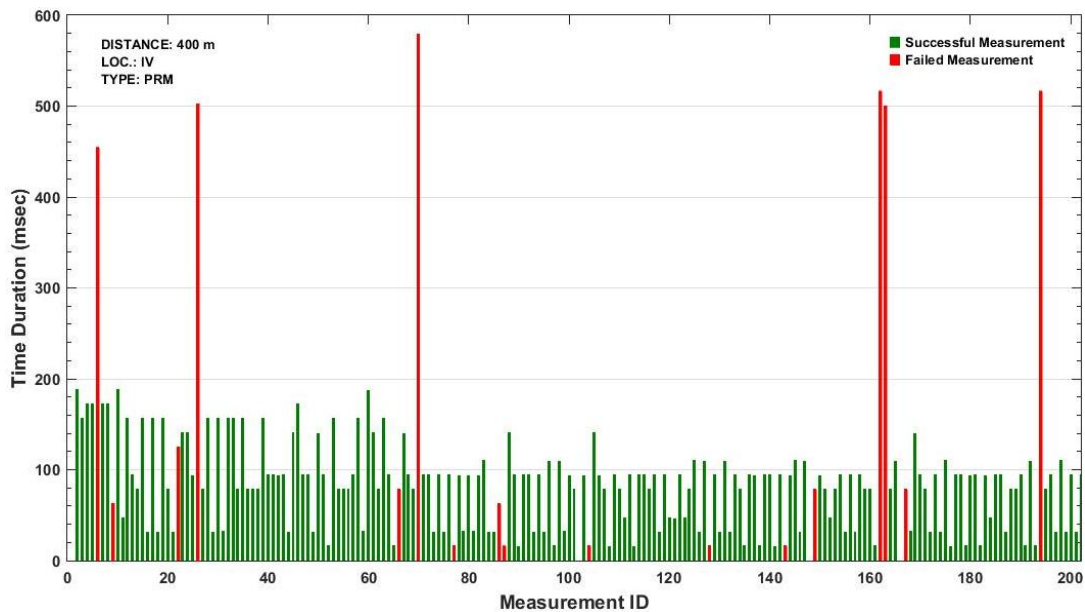
5.6.4 Χρονική Διάρκεια Μετρήσεων

Στο Σχήμα 5.18 παρουσιάζεται η συνολική χρονική διάρκεια που απαιτείται για την λήψη διακοσίων επαναλήψεων για κάθε απόσταση και για κάθε θέση κεραίας. Στο Σχήμα 5.19 παρουσιάζεται η χρονική διάρκεια για κάθε μία από τις διακόσιες επαναλήψεις, συμπεριλαμβανομένων και των αποτυχιών που είναι σημειωμένες με κόκκινο χρώμα, ενδεικτικά για την μέτρηση των 400 m με τις κεραίες στη ΘΕΣΗ IV και μέθοδο μέτρησης την *PRM*.



Σχήμα 5.18 Απαιτούμενη χρονική διάρκεια για το σύνολο 200 επαναλήψεων για κάθε απόσταση αναφοράς και προσανατολισμό κεραίων

Figure 5.18 Time interval required for acquiring 200 repetitions for every observed distance and antenna orientation



Σχήμα 5.19 Χρονική διάρκεια καταγραφής κάθε μεμονωμένης μέτρησης για την ονομαστική απόσταση των 400 m, με τις κεραίες στη ΘΕΣΗ IV και μέθοδο μέτρησης PRM

Figure 5.19 Time duration of each single measurement for a nominal distance of 400 m, antennas orientation IV and PRM solution

Σχετικά με την χρονική διάρκεια των μετρήσεων δεν προκύπτει κάποιος ξεκάθαρος κανόνας, δεδομένου ότι δεν φαίνεται να εξαρτάται ούτε από το πλήθος των αποτυχιών, ούτε από την απόσταση των πομποδεκτών, αλλά ούτε και από τον προσανατολισμό των κεραιών. Ένα σημείο που προκύπτει ξεκάθαρα από το Σχήμα 5.19 είναι ότι όλες οι μετρήσεις που διήρκησαν περισσότερο από 0.2 sec είναι αποτυχημένες χωρίς όμως να είναι και οι μοναδικές δεδομένου ότι υπάρχουν και αποτυχίες με χρονική διάρκεια 0 sec.

5.6.5 Στατιστική Κατανομή των Μετρήσεων

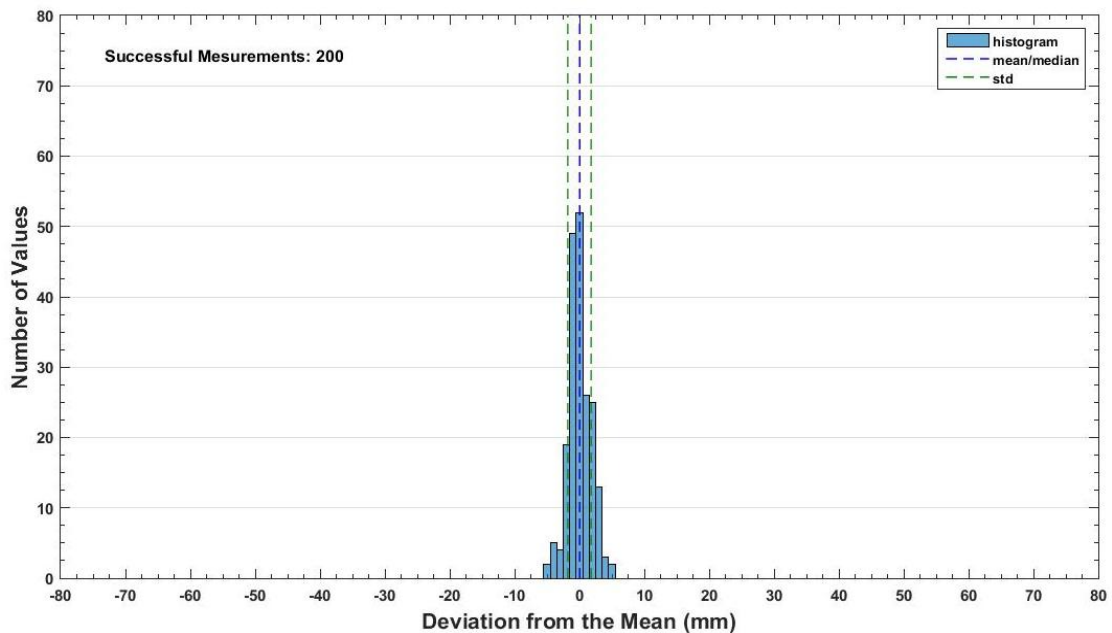
Σε αυτή την Ενότητα παρουσιάζονται τα διαγράμματα κατανομής των διαφορών των μετρήσεων από τη μέση τιμή, τη διάμεσο τιμή και την τυπική απόκλιση. Επίσης, απεικονίζονται οι τιμές των διαφορών συναρτήσει του αύξοντα αριθμού των μετρήσεων για τέσσερις αποστάσεις αναφοράς (2 m, 10 m, 300 m, 400 m) για τις μεθόδους PRM και FRE. Τα πλήρη αποτελέσματα κατανομής των διαφορών των μετρήσεων από τη μέση τιμή, όπως και το σύνολο των μέσων τιμών, διάμεσων τιμών και τυπικών αποκλίσεων για όλες τις αποστάσεις δίνονται στο Παράρτημα.

5.6.5α Μετρήσεις Εντός Εμβέλειας Συστήματος

Σε αυτή την Ενότητα αναλύεται η στατιστική κατανομή των μετρήσεων που αναφέρονται στην ονομαστική απόσταση των 10 m, η οποία βρίσκεται εντός της εμβέλειας μέτρησης του συστήματος που δίνει ο κατασκευαστής του.

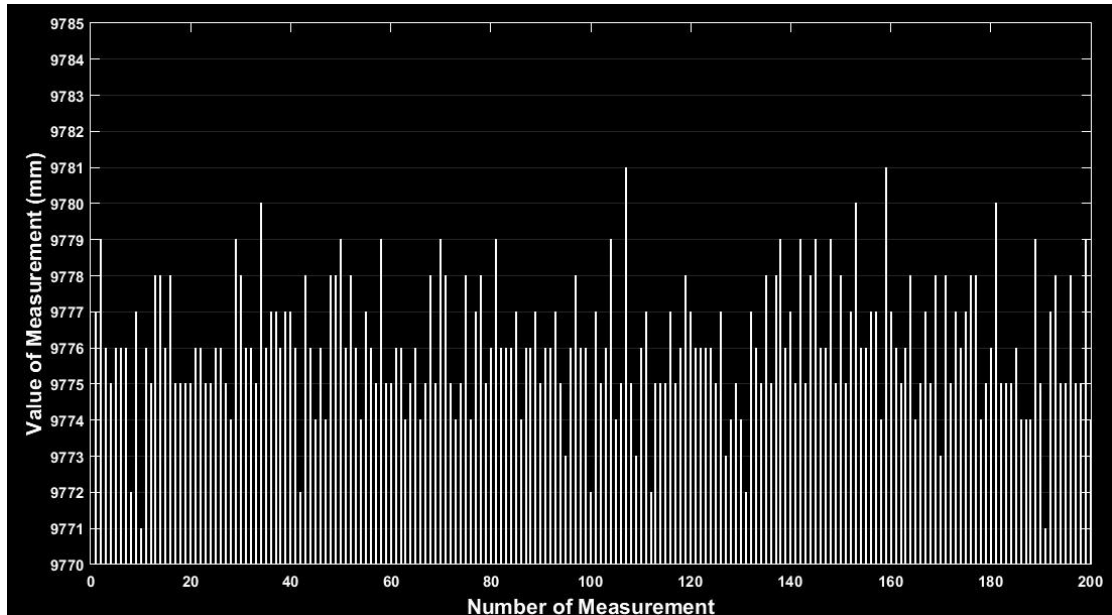
Το Σχήμα 5.20 αφορά ονομαστική απόσταση 10 m με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ I και μέθοδο μέτρησης PRM. Οι αποκλίσεις των μετρήσεων από τη μέση τιμή σχηματίζουν μία «καμπάνα» συμμετρική σχεδόν γύρω από το μηδέν με διάμεσο τιμή πρακτικά να ταυτίζεται με τη μέση τιμή. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνει την καλή ακρίβεια των συγκεκριμένων μετρήσεων σύμφωνα και με το Σχήμα 5.10.

Επίσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.21, οι τιμές που αποκλίνουν από τη μέση τιμή δεν είναι συγκεντρωμένες σε κάποια χρονική στιγμή, αλλά είναι τυχαία καταναμημένες σε όλο το εύρος των μετρήσεων.



Σχήμα 5.20 Ιστόγραμμα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή για την ονομαστική απόσταση των 10 m με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ I και μέθοδο μέτρησης PRM

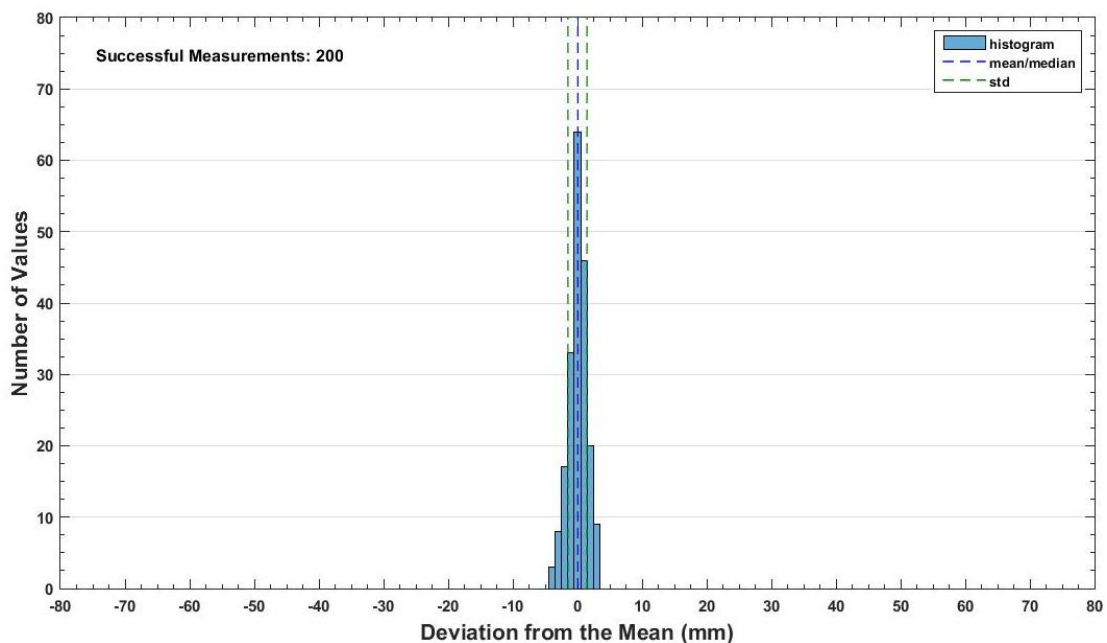
Figure 5.20 Distribution histogram of measurements deviation from the mean for a nominal distance 10 m, antennas orientation I and PRM solution



Σχήμα 5.21 Τιμές μετρημένων αποστάσεων για 200 επαναλήψεις και για ονομαστική απόσταση 10 m, θέση κεραίων I και μέθοδο μέτρησης PRM

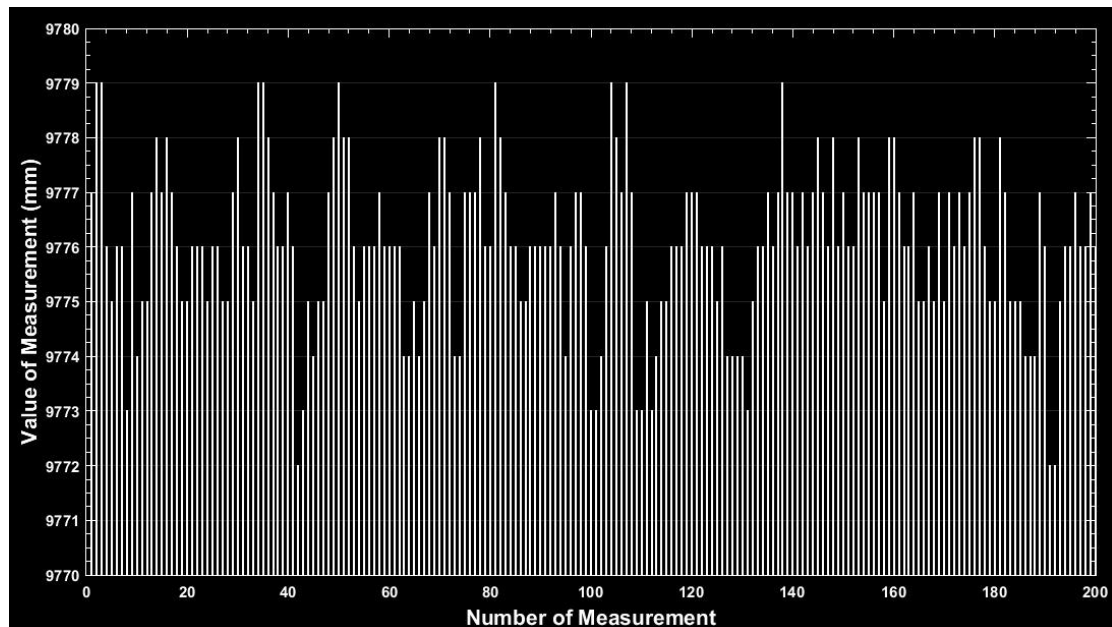
Figure 5.21 Observed ranges for 200 repetitions, for a nominal distance 10 m, antennas orientation I, and PRM solution

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.22, η μέθοδος FRE περιορίζει το εύρος της «καμπάνας» χωρίς ωστόσο να βελτιώνει περισσότερο την ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος δεδομένου ότι οι μετρήσεις είναι εν γένει υψηλής ακρίβειας.



Σχήμα 5.22 Ιστόγραμμα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή για την ονομαστική απόσταση των 10 m με τις κεραίες στη ΘΕΣΗ I και μέθοδο μέτρησης FRE

Figure 5.22 Distribution histogram of measurements deviation from the mean for a nominal distance 10 m, antennas orientation I and FRE solution



Σχήμα 5.23 Τιμές μετρημένων αποστάσεων για 200 επαναλήψεις και για ονομαστική απόσταση 10 m, θέση κεραιών I και μέθοδο μέτρησης FRE

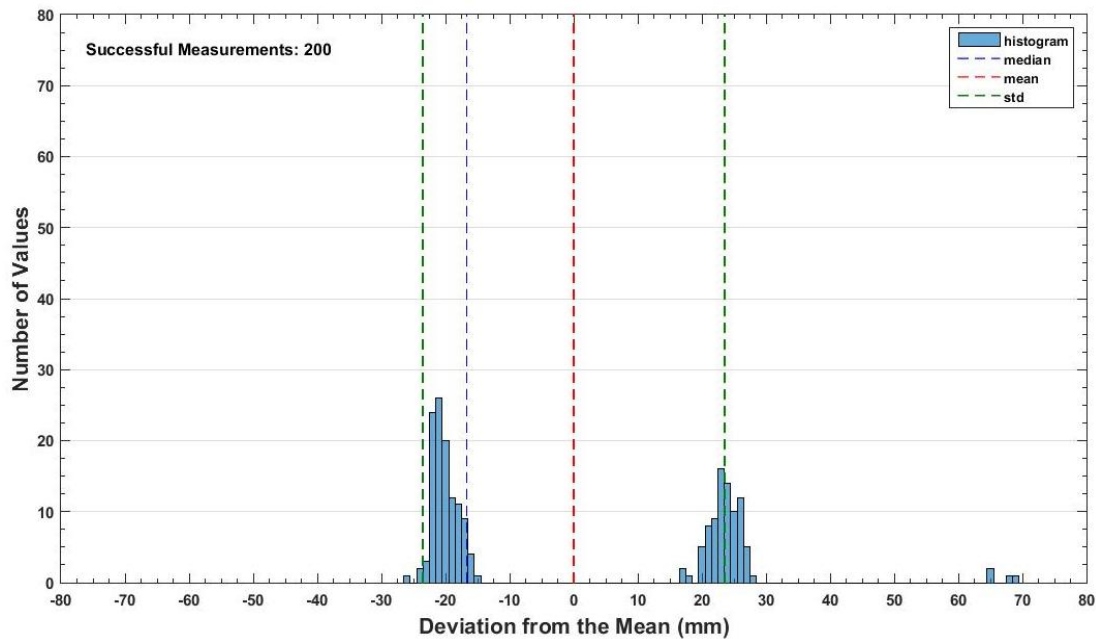
Figure 5.23 Observed ranges for 200 repetitions, for a nominal distance 10 m, antennas orientation I, and FRE solution

5.6.5β Μετρήσεις Εκτός Εμβέλειας Συστήματος

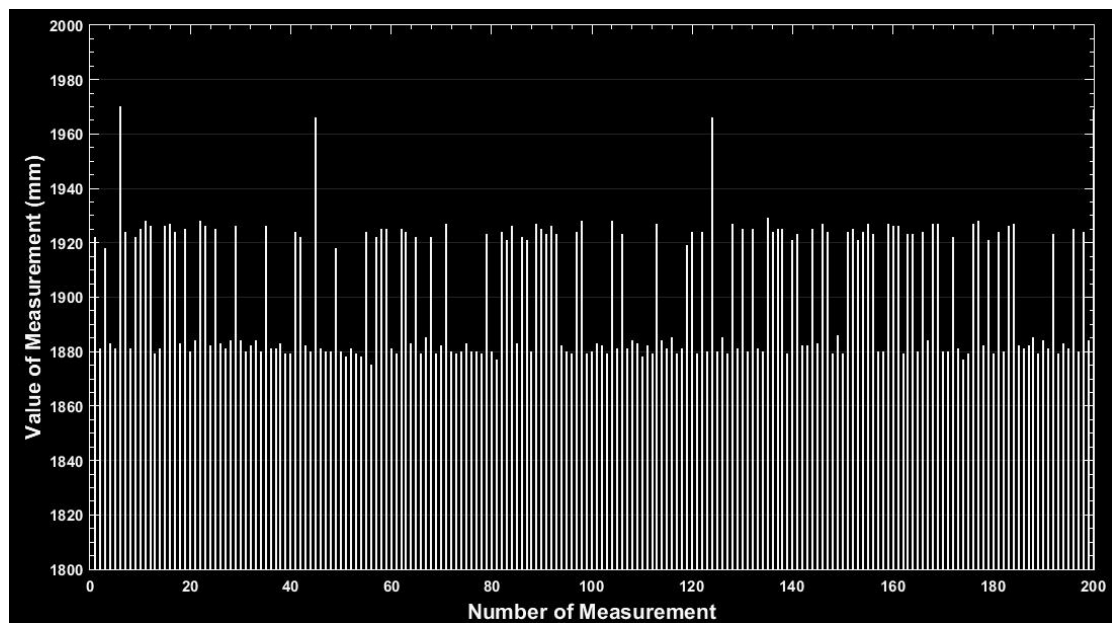
Σε αυτή την Ενότητα αναλύεται η στατιστική κατανομή των μετρήσεων για τις ονομαστικές αποστάσεις των 2 m, 300 m και 400 m που βρίσκονται εκτός της εμβέλειας μέτρησης του συστήματος που δίνει ο κατασκευαστής.

Το Σχήμα 5.24 αφορά την ονομαστική απόσταση των 2 m με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ I και μέθοδο μέτρησης την PRM. Όπως φαίνεται, οι μετρήσεις βρίσκονται συγκεντρωμένες σε δύο «καμπάνες» περίπου 20 mm αριστερά και δεξιά της μέσης τιμής. Η διάμεσος τιμή είναι περίπου 16 mm μικρότερη της μέσης τιμής και προσεγγίζει καλύτερα την αληθή τιμή, όπως αυτή έχει προκύψει από τις μετρήσεις με τον γεωδαιτικό σταθμό.

Όπως και στην περίπτωση των 10 m, οι τιμές των μετρημένων αποστάσεων οι οποίες διαφέρουν από την αληθή τιμή είναι τυχαία κατανομημένες σε όλο το εύρος των μετρήσεων (Σχήμα 5.25).



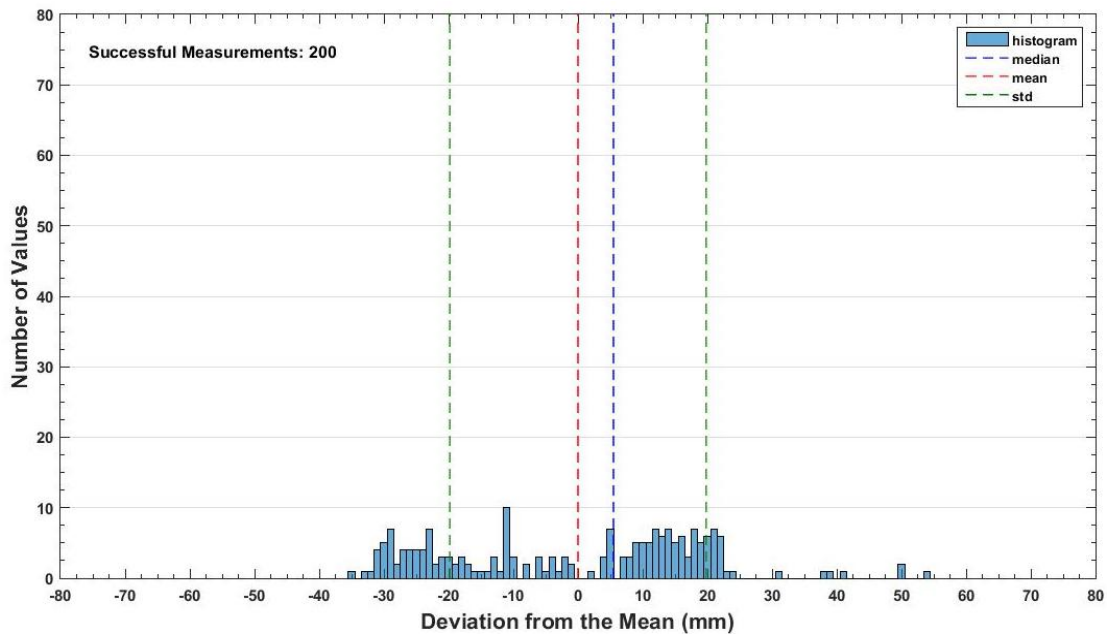
Σχήμα 5.24 Ιστόγραμμα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή για την ονομαστική απόσταση των 2 m με τις κεραίες στη ΘΕΣΗ I και μέθοδο μέτρησης PRM
Figure 5.24 Distribution histogram of measurements deviation from the mean for a nominal distance 2 m, antennas orientation I and PRM solution



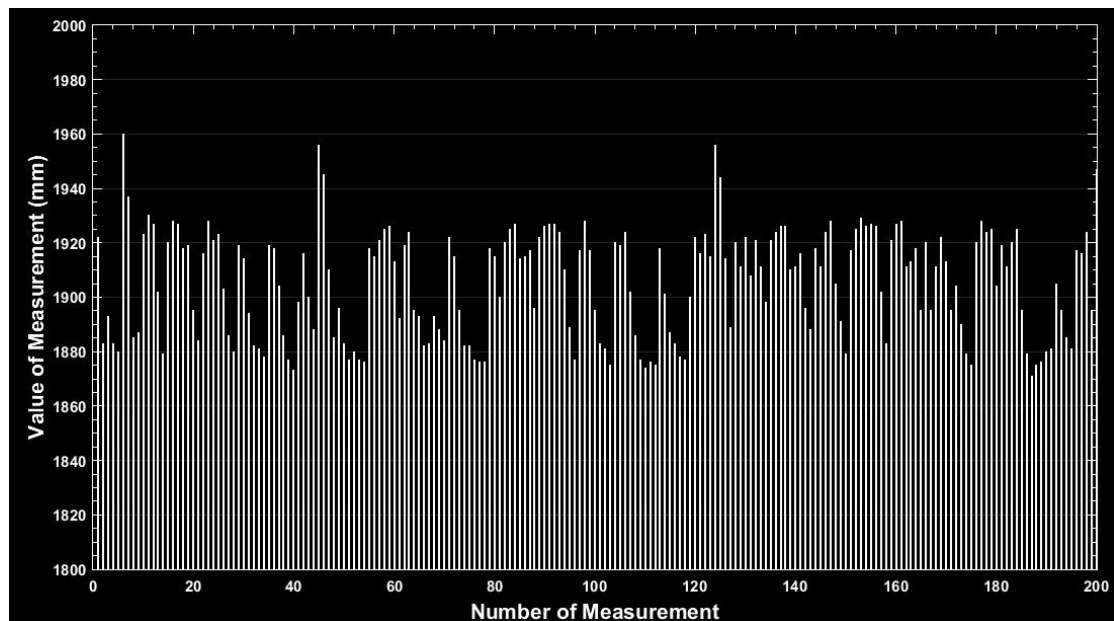
Σχήμα 5.25 Τιμές μετρημένων αποστάσεων για 200 επαναλήψεις και για ονομαστική απόσταση 2 m, θέση κεραίων I και μέθοδο μέτρησης PRM
Figure 5.25 Observed ranges for 200 repetitions, for a nominal distance 2, antennas orientation I, and PRM solution

Το Σχήμα 5.26 αφορά την ίδια περίπτωση αλλά τις μετρήσεις που προέρχονται από τη μέθοδο FRE. Σε αυτή την περίπτωση οι δύο «καμπάνες» έχουν εξαφανιστεί και οι μετρήσεις είναι κατανεμημένες σε όλο το μεταξύ τους εύρος.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.11 η ακρίβεια των μετρήσεων δεν βελτιώθηκε, ενώ η διάμεσος τιμή βρίσκεται πιο κοντά την αληθή τιμή (Σχήμα 5.14). Είναι εμφανές ότι σε τόσο μικρή απόσταση η μέθοδος *FRE* δε μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος.



Σχήμα 5.26 Ιστογράμμο κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή για την ονομαστική απόσταση των 2 m με τις κεραίες στη ΘΕΣΗ I και μέθοδο μέτρησης *FRE*
Figure 5.26 Distribution histogram of measurements deviation from the mean for a nominal distance 2 m, antennas orientation I and *FRE* solution

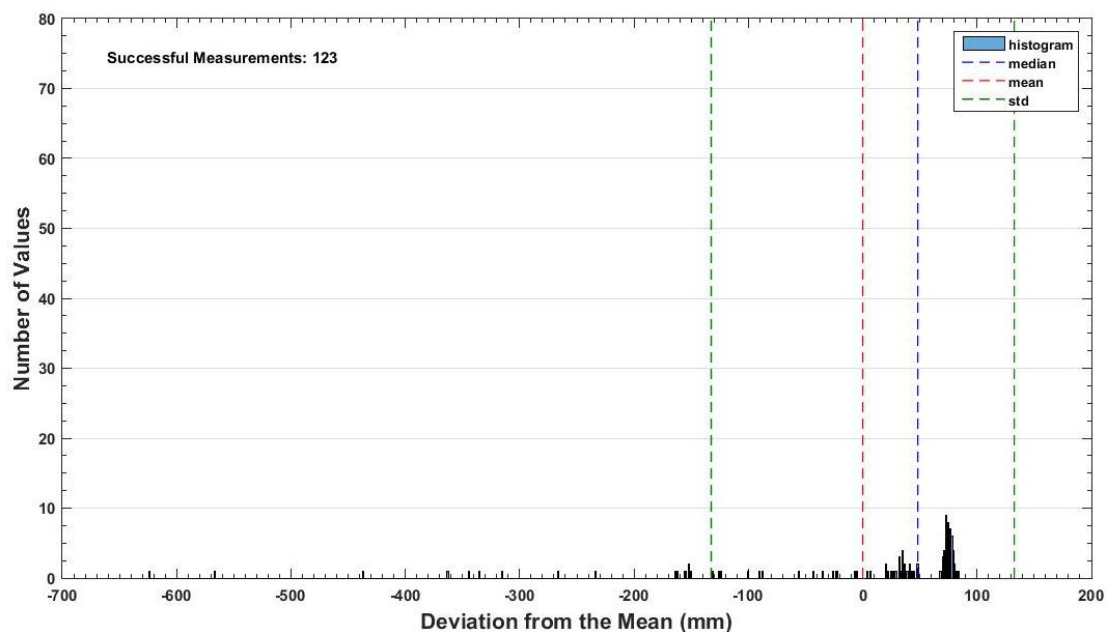


Σχήμα 5.27 Τιμές μετρημένων αποστάσεων για 200 επαναλήψεις και για ονομαστική απόσταση 2 m, θέση κεραίων I και μέθοδο μέτρησης *FRE*
Figure 5.27 Observed ranges for 200 repetitions, for a nominal distance 2, antennas orientation I, and *FRE* solution

Στη συνέχεια εξετάζεται περίπτωση ονομαστικής απόστασης 300 m όπου περισσότερα προβλήματα, όπως μετρήσεις χαμηλής ακρίβειας και αυξημένος αριθμός αποτυχιών. Στο Σχήμα 5.28 φαίνονται τα αποτελέσματα όπως προκύπτουν με τις κεραίες στη ΘΕΣΗ III και μέθοδο μέτρησης την PRM.

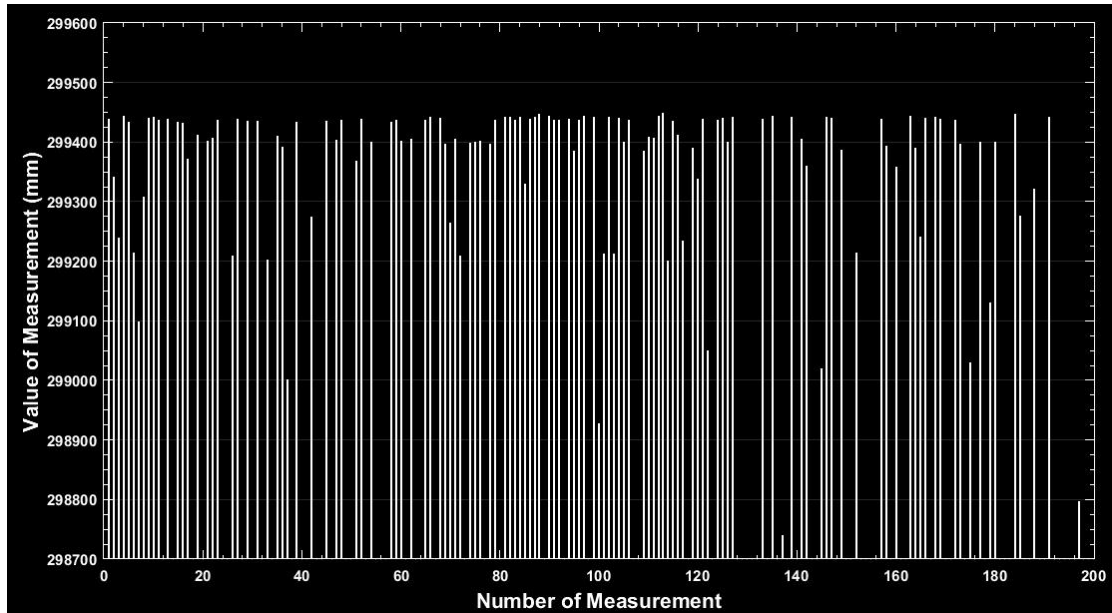
Οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρήσεων φτάνουν και τα 700 mm με τις περισσότερες αποκλίσεις να είναι συγκεντρωμένες σε μια «καμπάνα» περίπου 80 mm δεξιά της μέσης τιμής και τη διάμεσο να βρίσκεται 50 mm δεξιά της μέσης τιμής. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 5.13 η διάμεσος προσεγγίζει καλύτερα την ακριβή τιμή, όμως η ύπαρξη μετρήσεων σε μεγάλη απόσταση στα αριστερά έχει σαν αποτέλεσμα την αποχή της μέσης τιμής από την ακριβή (Σχήμα 5.10).

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.29 η κατανομή τόσο των μετρήσεων, όσο και των αποτυχιών είναι τυχαία.



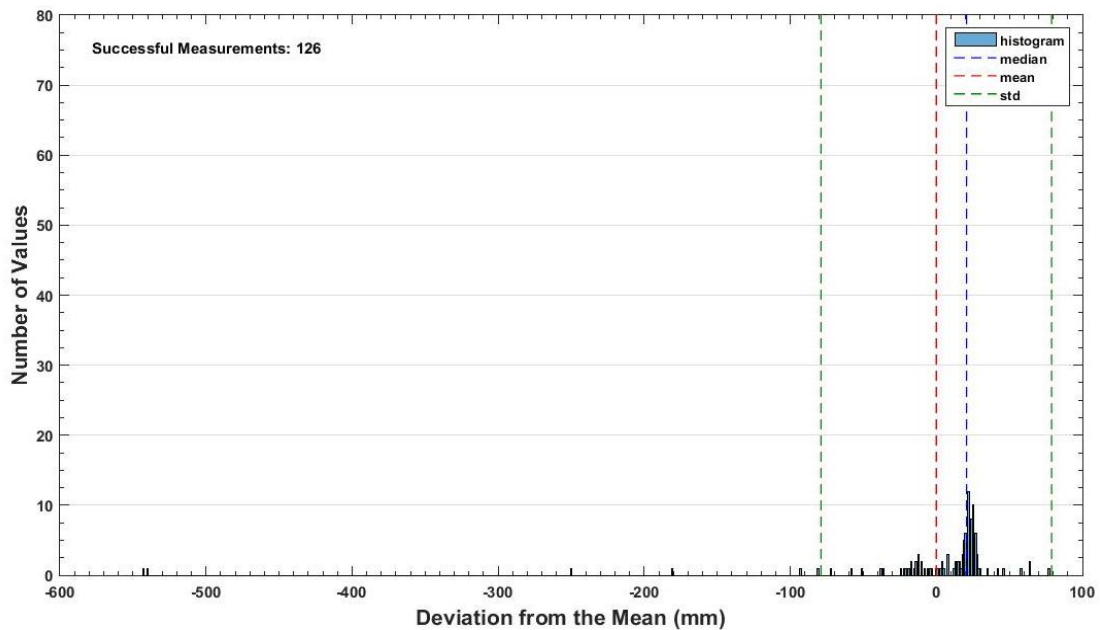
Σχήμα 5.28 Ιστόγραμμα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή για την ονομαστική απόσταση των 300 m με τις κεραίες στη ΘΕΣΗ I και μέθοδο μέτρησης PRM

Figure 5.28 Distribution histogram of measurements deviation from the mean for a nominal distance 300 m, antennas orientation I and PRM solution

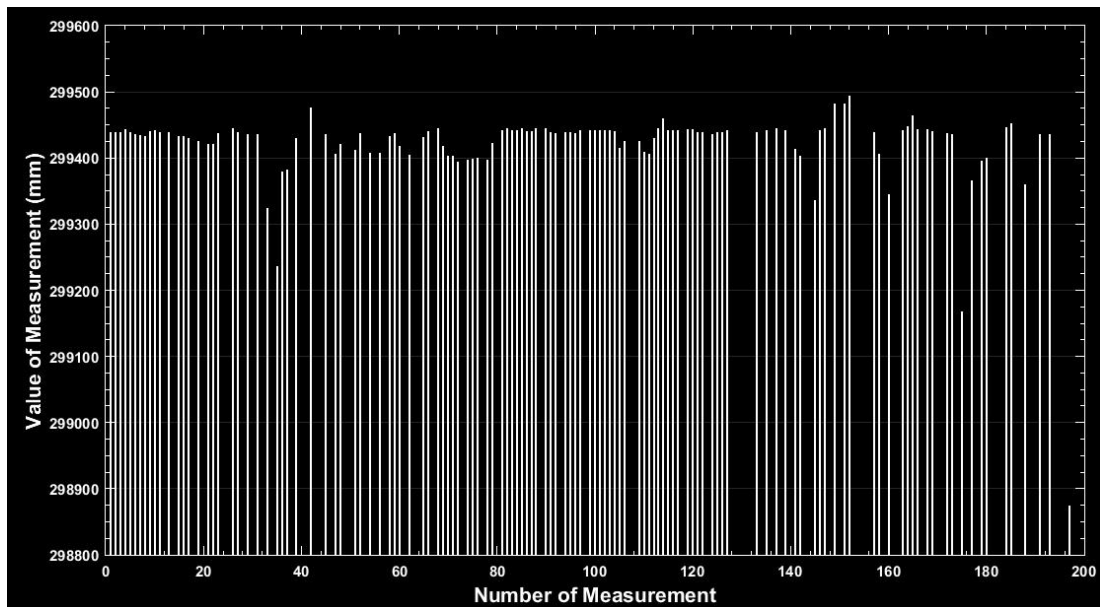


Σχήμα 5.29 Τιμές μετρημένων αποστάσεων για 200 επαναλήψεις και για ονομαστική απόσταση 300 m, θέση κεραιών I και μέθοδο μέτρησης PRM
Figure 5.29 Observed ranges for 200 repetitions, for a nominal distance 300, antennas orientation I, and PRM solution

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.30 η μέθοδος FRE περιορίζει την διασπορά των μετρήσεων βελτιώνοντας έτσι σημαντικά την ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος (Σχήμα 5.11).



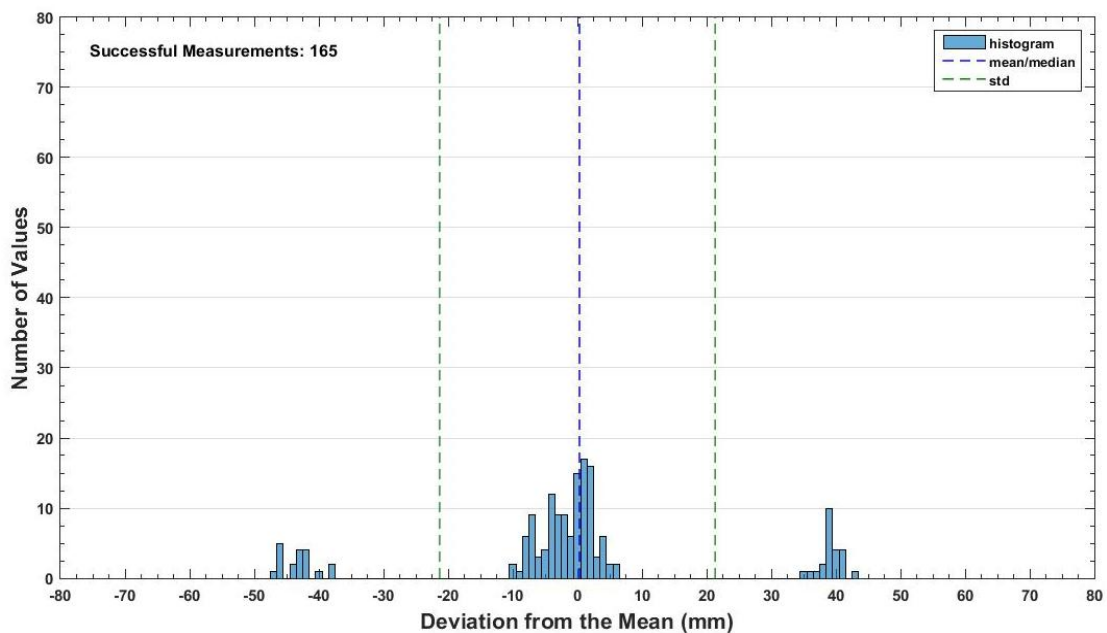
Σχήμα 5.30 Ιστογράμμο κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή για την ονομαστική απόσταση των 300 m με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ I και μέθοδο μέτρησης FRE
Figure 5.30 Distribution histogram of measurements deviation from the mean for a nominal distance 300 m, antennas orientation I and FRE solution



Σχήμα 5.31 Τιμές μετρημένων αποστάσεων για 200 επαναλήψεις και για ονομαστική απόσταση 300 m, θέση κεραιών I και μέθοδο μέτρησης FRE

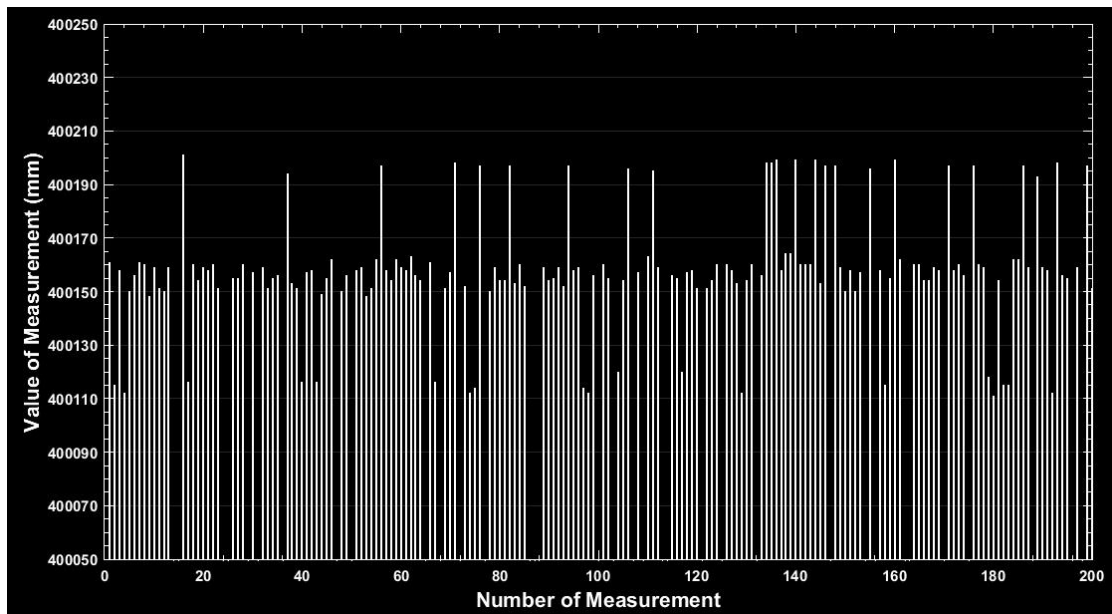
Figure 5.31 Observed ranges for 200 repetitions, for a nominal distance 300, antennas orientation I, and FRE solution

Τέλος εξετάζεται η περίπτωση των 400 m με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ V. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.32 οι αποκλίσεις των μετρήσεων με τη μέθοδο PRM συγκεντρώνονται σε τρεις ομάδες με τις περισσότερες γύρω από τη μέση τιμή η οποία ταυτίζεται και με τη διάμεσο τιμή.



Σχήμα 5.32 Ιστόγραμμα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή για την ονομαστική απόσταση των 400 m με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ I και μέθοδο μέτρησης PRM

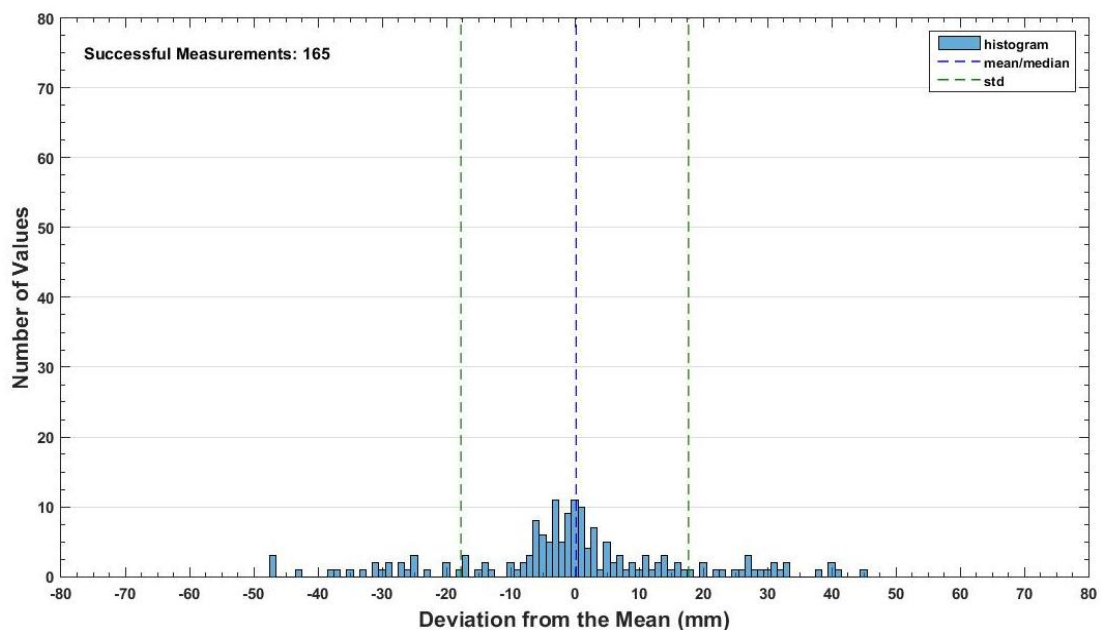
Figure 5.32 Distribution histogram of measurements deviation from the mean for a nominal distance 400 m, antennas orientation I and PRM solution



Σχήμα 5.33 Τιμές μετρημένων αποστάσεων για 200 επαναλήψεις και για ονομαστική απόσταση 400 m, θέση κεραιών I και μέθοδο μέτρησης PRM

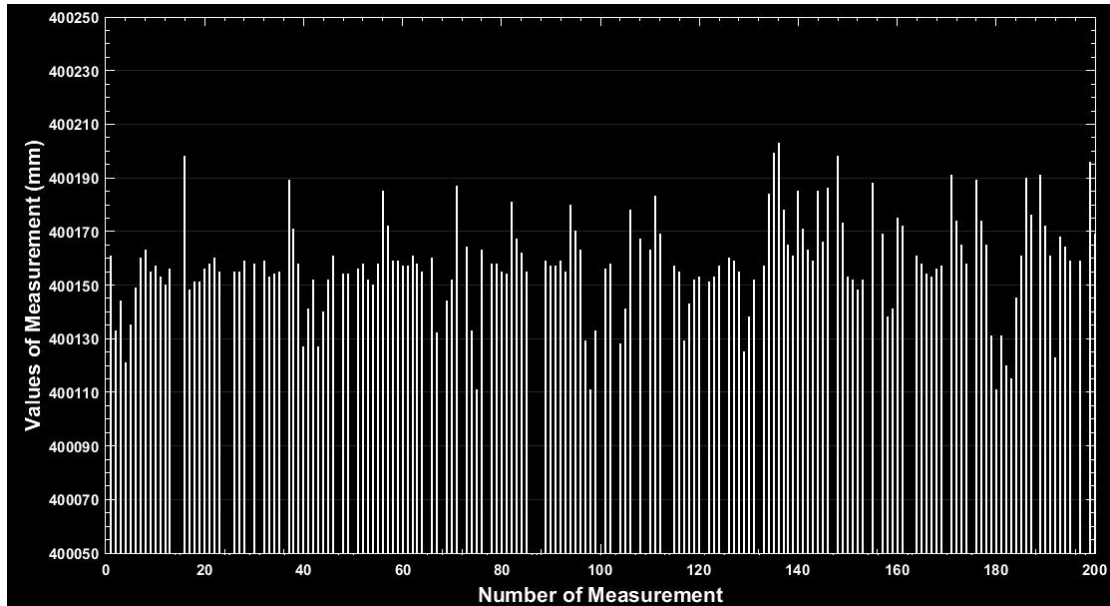
Figure 5.33 Observed ranges for 200 repetitions, for a nominal distance 400, antennas orientation I, and PRM solution

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.34 η μέθοδος FRE κατανέμει τις μετρήσεις σε όλο αυτό το εύρος χωρίς όμως να βελτιώνει την ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος (Σχήματα 5.11, 5.14).



Σχήμα 5.34 Ιστογράμμο κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή για την ονομαστική απόσταση των 400 m με τις κεραιές στη ΘΕΣΗ I και μέθοδο μέτρησης FRE

Figure 5.34 Distribution histogram of measurements deviation from the mean for a nominal distance 400 m, antennas orientation I and FRE solution



Σχήμα 5.35 Τιμές μετρημένων αποστάσεων για 200 επαναλήψεις και για ονομαστική απόσταση 400 m, θέση κεραιών I και μέθοδο μέτρησης FRE

Figure 5.35 Observed ranges for 200 repetitions, for a nominal distance 400, antennas orientation I, and FRE solution

Στο Παράρτημα υπάρχει συγκεντρωτικός πίνακας με τη μέση τιμή, τη διάμεσο τιμή και την τυπική απόκλιση των μετρήσεων για όλες τις αποστάσεις ελέγχου, προσανατολισμό κεραιών και μεθόδους μέτρησης.

5.7 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα σχετικά με την ακρίβεια, την εμβέλεια και την αξιοπιστία του συστήματος *PulsON® 410 UWB*:

- η εξωτερική ακρίβεια μέτρησης των αποστάσεων είναι της τάξεως του 0.01 m για μετρήσεις αποστάσεων έως 100 m και της τάξεως των 0.04 m για μετρήσεις έως 720 m σε συνθήκες LoS.
- η τυπική απόκλιση των μετρήσεων δεν υπερβαίνει τα 0.015 m για μετρήσεις αποστάσεων από 3 m έως 720 m για προσανατολισμό κεραιών στη ΘΕΣΗ I και μέθοδο μέτρησης *FRE* καθιστώντας το, σε συνδυασμό και με την εξωτερική ακρίβεια, αξιόπιστο.
- η διαθεσιμότητα του συστήματος είναι 100% για αποστάσεις έως 200 m και κυμαίνεται από 25% έως 75% για αποστάσεις της τάξεως των 700 m αναλόγως του προσανατολισμού της κεραίας.

- η αληθής τιμή της απόστασης βρίσκεται εντός του εύρους της αβεβαιότητας των μετρήσεων του συστήματος που προκύπτει από την εκτίμηση σφάλματος που δίνει.
- η εφαρμογή της μεθόδου *FRE* (φίλτρο *Kalman*) στις μετρήσεις *UWB* επιφέρει βελτίωση στην ακρίβεια των μετρήσεων, αρκεί οι μετρήσεις που απέχουν πολύ από την αληθή τιμή να είναι μικρού πλήθους.
- ο προσανατολισμός των κεραιών του συστήματος επηρεάζει αλλά όχι σημαντικά την ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος.
- το σύστημα μπορεί να μετρήσει με ικανοποιητική αξιοπιστία ακόμη και σε αποστάσεις που υπερβαίνουν τα 600 m σε συνθήκες *LoS*.
- το σύστημα μπορεί να δώσει ικανοποιητικές ακρίβειες ακόμη και στην περίπτωση ύπαρξης σημαντικού αριθμού αποτυχιών μετρήσεων.
- η επίδραση του φαινομένου *Fresnel* παίζει ζωτικό ρόλο στην αξιοπιστία του τελικού αποτελέσματος.
- ο υπολογισμός της διαμέσου τιμής δίνει τιμή εγγύτερη στην αληθή τιμή από ότι ο υπολογισμός της μέσης τιμής καθώς μειώνει την επίδραση των λίγων μετρήσεων που απέχουν αρκετά από αυτήν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ UWB ΣΕ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ

Σε αυτό το Κεφάλαιο παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και τα αποτελέσματα του πειράματος που πραγματοποιήθηκε για τον έλεγχο του συστήματος *UWB* σε κινηματικό εντοπισμό και συνθήκες οπτικής επαφής με το κινούμενο αντικείμενο. Παρουσιάζεται ο στόχος και το αντικείμενο του πειραματικού ελέγχου, η μεθοδολογία ελέγχου, καθώς και η επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων που προέκυψαν.

6.1 Στόχος Πειραματικού Ελέγχου

Στόχος της πειραματικής εφαρμογής αποτελεί η αξιολόγηση του συστήματος *UWB PulsON® 410* σε κινηματικό εντοπισμό. Ειδικότερα, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στον έλεγχο επιδόσεων του συστήματος ανεξάρτητα από τις συνθήκες μέτρησης. Για το σκοπό αυτό η διεξαγωγή του πειράματος έγινε σε κατά το δυνατόν ιδανικές συνθήκες, συγκεκριμένα σε ανοικτό χώρο και σε συνθήκες οπτικής επαφής μεταξύ των πομποδεκτών (*LoS*). Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται οι παρεμβολές και οι πολυανακλάσεις του σήματος *RF*.

Ωστόσο, αντικείμενο του ελέγχου αποτελεί η διερεύνηση της συμπεριφοράς της τεχνολογίας *UWB* για διαφορετικές συνθήκες κίνησης του αντικειμένου, όπως επιταχύνσεις, στροφές, μεγάλες με μικρές ταχύτητες κ.α..

6.2 Μεθοδολογία Υλοποίησης

6.2.1 Μέθοδος Εντοπισμού

Για την εκτέλεση του πειράματος επιλέχθηκε αφενός η χρήση της τεχνολογίας *RangeNet®* (βλ. Ενότητα 4.2.4) που διαθέτει το σύστημα *UWB PulsON® 410* της *Time Domain Inc.*, αφετέρου η χρήση της τεχνικής του τριπλευρισμού με συνόρθωση με τη *MET*. Για το σκοπό αυτό, εγκαταστάθηκαν τέσσερις πομποδέκτες σε ισάριθμα σταθερά σημεία γνωστών συντεταγμένων πραγματοποιώντας διαδοχικές μετρήσεις

αποστάσεων ο ένας προς τον άλλον αλλά και προς έναν πέμπτο κινητό πομποδέκτη που τοποθετήθηκε στην οροφή ενός οχήματος.

6.2.2 Εξαγωγή Τροχιάς Αναφοράς

Προκειμένου να υπολογισθεί η αξιοπιστία του συστήματος *UWB* σε κινηματικό εντοπισμό, χρησιμοποιήθηκε παράλληλα σύστημα ολοκληρωμένου εντοπισμού *GNSS/IMU* υψηλής ακρίβειας από το οποίο προέκυψε η τροχιά αναφοράς και τα κινηματικά χαρακτηριστικά του οχήματος.

Για το σκοπό αυτό εγκαταστάθηκε στην οροφή του οχήματος δοκιμών η αδρανειακή μονάδα (*IMU*) και ο δέκτης του συστήματος *GPS (rover)*. Ταυτόχρονα, δεύτερος δέκτης του συστήματος *GPS (base)* τοποθετήθηκε σε σημείο γνωστών συντεταγμένων (*S1*) για την παραγωγή κατάλληλων διορθώσεων των μετρήσεων. Με τη μέθοδο του σχετικού κινηματικού εντοπισμού (*kinematic*) θα υπολογίζονταν οι συντεταγμένες του κινούμενου οχήματος ανά χρονική στιγμή καταγραφής. Παράλληλα, η χρήση του συστήματος *IMU* θα βελτίωνε την ακρίβεια του εντοπισμού σε θέσεις όπου ο δέκτης *GPS* δεν είχε τόσο καλή επαφή με τους δορυφόρους.

Επίσης το όχημα θα παρέμεινε σταματημένο για περίπου 10 sec σε χαρακτηριστικά σημεία (ανάμεσα σε δύο πομποδέκτες του συστήματος *UWB*) ως υποβοήθηση της επίλυσης του συστήματος *GNSS/IMU*. Με αυτούς τους τρόπους θα προέκυπτε η ακριβής τροχιά του οχήματος που θα χρησιμοποιούνταν ως πρότυπο για τη σύγκρισή της με την τροχιά που θα προέκυπτε από το σύστημα *UWB*.

6.2.3 Σενάρια Καταγραφής

Προκειμένου να εξεταστεί η συμπεριφορά του συστήματος *UWB* σε διαφορετικές συνθήκες κίνησης, δημιουργήθηκαν τρία διαφορετικά σενάρια κίνησης (*S-I, S-II, S-III*) του οχήματος καταγραφής.

Το πρώτο σενάριο (*S-I*) αφορά στην λήψη δεδομένων από τα δύο συστήματα (*UWB, GNSS/IMU*), με μικρή ταχύτητα κίνησης (max. 12 km/h) για δύο τροχιές κυκλικού σχήματος εντός της περιοχής που ορίζεται από τις θέσεις των σταθμών *UWB*.

Το πρώτο σενάριο (S-II) καταγραφής είναι όμοιο με το S-I, ωστόσο επιπρόσθετα περιλαμβάνει μία διέλευση από το μέσο του ορθογωνίου παραλληλογράμμου που ορίζεται από τους σταθερούς σταθμούς *UWB*. Η ταχύτητα ήταν ελαφρά υψηλότερη (max. 18 km/h). Επίσης, πριν την έναρξη της συλλογής μετρήσεων και ενόσω το όχημα ήταν σε στάση μετρήθηκαν οι αποστάσεις (χρήση αποστασιόμετρου) από τον πομποδέκτη *UWB* στο όχημα προς τους τέσσερις σταθερούς, προκειμένου να εισαχθούν στο λογισμικό επεξεργασίας *UWB* για ρύθμιση.

Το τρίτο σενάριο (S-III) περιλάμβανε πιο σύνθετες κινήσεις (κυκλικές τροχιές, ελιγμοί μορφής 8) του οχήματος καταγραφής εντός της περιοχής που ορίζεται από τους σταθμούς *UWB*, υψηλότερες ταχύτητες και επιταχύνσεις, καθώς και μια διέλευση έκτος της περιοχής που ορίζουν οι τέσσερις σταθεροί πομποδέκτες. Όπως και στο δεύτερο σενάριο, έγινε ρύθμιση του συστήματος *UWB* μέσω των μετρήσεων με το αποστασιόμετρο.

6.3 Προπαρασκευαστικές Εργασίες

6.3.1 Επιλογή Περιοχής Μελέτης

Σύμφωνα με τους στόχους της πειραματικής εφαρμογής και τον σχεδιασμό των σεναρίων παρατήρησης ως χώρος υλοποίησης του πειράματος επιλέχθηκε ο υπαίθριος χώρος στάθμευσης αυτοκινήτων πλησίον των νέων εστιών στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Ο υπόψη χώρος διασφάλισε ικανοποιητική ορατότητα δορυφόρων για το σύστημα *GPS* (πλην ελαχίστων σημείων όπου υπήρχαν δέντρα), καθώς και αμοιβαία ορατότητα μεταξύ των πομποδεκτών του συστήματος *UWB* διασφαλίζοντας έτσι συνθήκες αμοιβαίας ορατότητας.

Αρχικά, εγκαταστάθηκαν στην περιοχή μελέτης δύο σταθερά σημεία. Προκειμένου να δοθούν συντεταγμένες σε αυτά τα δύο σημεία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του σχετικού στατικού δορυφορικού εντοπισμού (*static GPS*) με αναφορά τον μόνιμο σταθμό *GNSS* στο Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου.

Τα σημεία αυτά χρησιμοποιήθηκαν αφενός προκειμένου να δοθούν συντεταγμένες στα τέσσερα σημεία όπου τοποθετήθηκαν οι πομποδέκτες του συστήματος *UWB*

μέσω αποτύπωσης με γεωδαιτικό σταθμό, αφετέρου στο ένα από αυτά τα σημεία τοποθετήθηκε ο σταθερός δέκτης του συστήματος *GPS* κατά την εκτέλεση του πειράματος.



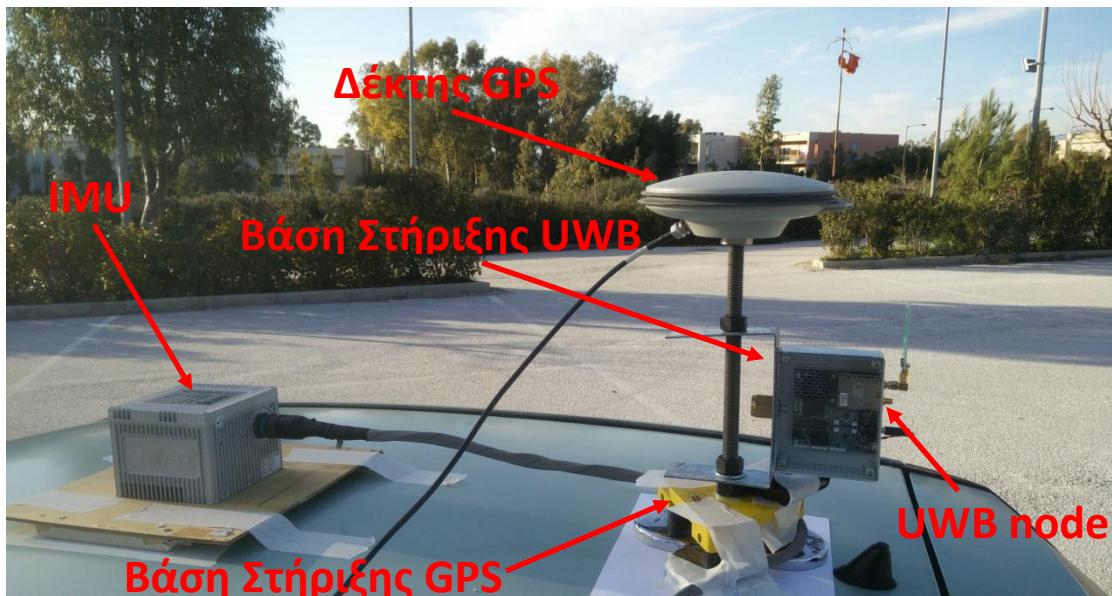
Σχήμα 6.1: Περιοχή πειράματος [Κτηματολόγιο ΑΕ]
Figure 6.1 Experiment area [NSMA SA]

6.3.2 Εξοπλισμός Πεδίου

Για την εκτέλεση του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ο εξής εξοπλισμός:

- 2 δέκτες του συστήματος *GPS* (*SPAN*[®] της εταιρείας *NovAtel*[®]) (Σχήμα 6.2)
- γεωδαιτικός σταθμός *GPT-3107N* της εταιρείας *Torcon* για την αποτύπωση των σταθερών με αβεβαιότητα μέτρησης $\pm 20^{cc}$ στις διευθύνσεις και $\pm 2mm \pm 2ppm$ στις μετρήσεις αποστάσεων με πρίσμα και $\pm 3mm \pm 2ppm$ στις μετρήσεις αποστάσεων χωρίς πρίσμα (Σχήμα 6.3)
- 5 σταθμοί του συστήματος *PulsON*[®] 410 της *Time Domain Inc.* (Σχήμα 6.4)
- 3 γεωδαιτικοί τρίποδες για την τοποθέτηση των πομποδεκτών του συστήματος *UWB* καθώς και του σταθερού δέκτη του συστήματος *GPS*, καθώς και του γεωδαιτικού σταθμού κατά την αρχική αποτύπωση των σταθερών σημείων,

- 2 φωτογραφικοί τρίποδες για την τοποθέτηση των πομποδεκτών του συστήματος *UWB* (Σχήμα 6.5),
- αδρανειακό σύστημα *IMU* (*iMAR IMU-FSAS*) (Σχήμα 6.2),
- 2 φορητοί υπολογιστές για την καταγραφή των μετρήσεων του συστήματος *GNSS/IMU* και του συστήματος *UWB*
- βάση στήριξης για την τοποθέτηση του κινούμενου δέκτη *GPS* στον ουρανό του αυτοκινήτου (Σχήμα 6.2),
- βάση για την στήριξη του κινούμενου πομποδέκτη του συστήματος *UWB* στην βάση του συστήματος *GPS* (Σχήμα 6.2, Σχήμα 6.6)
- μεταλλική μετροταινία για τη μέτρηση των υψών στόχων και οργάνων
- αποστασιόμετρο (*Leica Disto D8*) για το ρύθμιση στα σενάρια S-II και S-III
- όχημα για την εκτέλεση των κινήσεων των σεναρίων



Σχήμα 6.2 Διάταξη συστήματος μετρήσεων
Figure 6.2 Experimental sensor setup



Σχήμα 6.3 Γεωδαιτικός σταθμός GPT-3107N
Figure 6.3 Total station GPT-3107N



Σχήμα 6.4 Πομποδέκτης PulsON® 410
Figure 6.4 Node of PulsON® 410



Σχήμα 6.5 Φωτογραφικός τρίποδας
Figure 6.5 Photographic tripod



Σχήμα 6.6 Βάση στήριξης κινούμενου πομποδέκτη UWB
Figure 6.6 Cradle of the mobile node

6.4 Υλοποίηση Πειράματος

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε το απόγευμα της 11.02.2016 και διήρκεσε περίπου 2,5 h. Τοποθετήθηκαν τέσσερις σταθεροί πομποδέκτες του συστήματος UWB, δύο σε φωτογραφικούς τρίποδες και άλλοι δύο σε γεωδαιτικούς τρίποδες. Η τοποθέτηση έγινε με τρόπο ώστε να σχηματίζεται ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο με κορυφές τις θέσεις των τεσσάρων σταθμών UWB στους οποίους οι ονομασίες UWB_101-104 (Σχήμα 6.7). Στον κινητό σταθμό UWB, που τοποθετήθηκε στην οροφή οχήματος (Σχήμα 6.2), δόθηκε ο κωδικός UWB_100. Ο

βασικός πομποδέκτης στον οποίο ήταν συνδεδεμένος και ο φορητός υπολογιστής για την καταγραφή των μετρήσεων ήταν ο *UWB_101*.



Figure 6.7: Περιοχή μελέτης με σημειωμένες τις θέσεις των σημείων που αποτυπώθηκαν (UWB: 101-104) [Κτηματολόγιο ΑΕ]

Figure 6.7 Test area and points of interest (UWB: 101-104) [NSMA SA]

Σε πρώτο στάδιο έγιναν μετρήσεις με τον γεωδαιτικό σταθμό προκειμένου να υπολογιστούν συντεταγμένες στα τέσσερα σημεία εγκατάστασης των σταθμών του συστήματος *UWB*. Ο γεωδαιτικός σταθμός τοποθετήθηκε στο σημείο S1 και έγινε μηδενισμός στο σημείο S2. Στη συνέχεια με τη μέθοδο των πλήρων περιστροφών έγινε σκόπευση στο κέντρο φάσης της κάθε κεραίας και καταγράφηκαν οι οριζόντιες και οι κατακόρυφες διευθύνσεις, καθώς και η απόσταση χωρίς την χρήση ανακλαστήρα. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε πρώτη και δεύτερη θέση τηλεσκοπίου και σε μία περίοδο. Επίσης, μετρήθηκαν τα ύψη στόχων και το ύψος οργάνου και οι αποστάσεις μεταξύ των πομποδεκτών με την χρήση του αποστασιόμετρου προκειμένου να δοθούν άμεσα συντεταγμένες σε αυτούς σε τοπικό σύστημα αναφοράς και να χρησιμοποιηθούν ως στοιχεία εισαγωγής στο λογισμικό του συστήματος *PulsON® 410* για τα σενάρια S-II και S-III.

Στη συνέχεια ξεκίνησε η εκτέλεση των τριών σεναρίων όπως είχαν σχεδιαστεί (βλ. Ενότητα 6.2.3). Δεδομένου ότι οι μέγιστες αναμενόμενες αποστάσεις παρατήρησης είναι της τάξης των 20 m, επιλέχθηκε ρύθμιση της έντασης του σήματος *Pll* στο 7. Στο σενάριο S-I οι συντεταγμένες των τριών σταθερών πομποδεκτών που χρησιμοποιήθηκαν από το λογισμικό *RangeNet*[®] για να γίνει ο εντοπισμός (101, 102, 103) προσδιορίστηκαν μέσω του λογισμικού πακέτου *Autosurvey*[®], που διαθέτει το σύστημα *PulsON*[®] 410. Για τα σενάρια S-II και S-III εισήχθησαν στο λογισμικό οι συντεταγμένες των σταθερών πομποδεκτών όπως αυτές προέκυψαν από τις μετρήσεις με το αποστασιόμετρο. Επισημαίνεται ότι στα σενάρια S-II και S-III πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με χρήση αποστασιόμετρου μεταξύ των σταθερών πομποδεκτών και του κινητού πριν την έναρξη και μετά τη λήξη του κάθε σεναρίου. Αυτές οι μετρήσεις εισήχθησαν στο λογισμικό του συστήματος για τη ρύθμισή του. Κατά τη διάρκεια του σεναρίου S-III υπήρξαν κάποια προβλήματα με τον υπολογιστή που κατέγραφε τις μετρήσεις του συστήματος *GNSS/IMU*, τα οποία είχαν σαν αποτέλεσμα η καταγραφή των δεδομένων να παρουσιάζει κενά.

6.5 Επεξεργασία Δεδομένων Πεδίου

6.5.1 Υπολογισμός Τροχιάς Αναφοράς

Για την επεξεργασία των δεδομένων που προέκυψαν από τις μετρήσεις του συστήματος *GNSS/IMU* χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό *Inertial Explorer 8.60*. Σε αυτό το λογισμικό αρχικά έγινε η επίλυση των δύο βάσεων από τον σταθμό *GPS* του Κέντρου Δορυφόρων Διονύσου προς τα σταθερά σημεία S1 και S2 αντίστοιχα. Απορρίφθηκαν όλες οι μετρήσεις από δορυφόρους για γωνία ύψους < 15°, ενώ οι συντεταγμένες των σημείων S1, S2 υπολογίστηκαν στο προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ '87 (Πίνακας 6.1).

ΟΝΟΜΑ	X (m)	Y (m)	σ_x (m)	σ_y (m)
S1	480638.12	4203443.36	0.008	0.011
S2	480632.57	4203428.75	0.007	0.010

Πίνακας 6.1 Συντεταγμένες σημείων S1 και S2

Table 6.1 Coordinates of point S1 and S2

Αρχικά έγινε επίλυση μόνο με τα δεδομένα που προέκυψαν από το σύστημα *GPS* και στη συνέχεια έγινε συνδυαστική επίλυση και με τα δεδομένα από το αδρανειακό σύστημα *IMU*. Ο υπολογισμός των συντεταγμένων των σημείων της κάθε μιας από τις τρεις τροχιές των σεναρίων S-I έως S-III (σε ΕΓΣΑ '87) έγινε με βήμα 0.1 sec.

Λόγω των προβλημάτων που ανέκυψαν με τον υπολογιστή κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του σεναρίου S-III, δεν κατέστη δυνατή η εξαγωγή της τροχιάς από το σύστημα *GNSS/IMU* παρά μόνο κάποιες σποραδικές μετρήσεις από το *GPS*.

Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η τροχιά που διέγραψε το αυτοκίνητο στα δύο πρώτα σενάρια.



Σχήμα 6.8: Τροχιά οχήματος για το σενάριο S-I από μετρήσεις *GNSS/IMU*
Figure 6.8 Vehicle Trajectory for scenario S-I using the *GNSS/IMU* system



Σχήμα 6.9: Τροχιά οχήματος σεναρίου S-II από μετρήσεις GNSS/IMU
Figure 6.9 Vehicle trajectory of scenario S-II using the GNSS/IMU system

6.5.2 Υπολογισμός Τροχιάς Συστήματος UWB

Αρχικά προσδιορίστηκαν οι συντεταγμένες των τεσσάρων σταθερών πομποδεκτών του συστήματος UWB στο προβολικό σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ '87. Αυτό έγινε μέσω των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με τον γεωδαιτικό σταθμό και με τη χρήση θεμελιωδών προβλημάτων της Γεωδαισίας ενώ με εφαρμογή του νόμου μετάδοσης των μεταβλητοτήτων σε αυτές τις σχέσεις, προέκυψαν τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.2.

ΣΗΜΕΙΟ	X (m)	Y (m)	σ_x (m)	σ_y (m)
101	480609.51	4203403.34	0.008	0.011
102	480631.43	4203394.69	0.008	0.011
103	480629.21	4203451.87	0.008	0.011
104	480652.06	4203441.96	0.008	0.011

Πίνακας 6.2 Συνταγμένες σταθερών σημείων σταθμών UWB (προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ '87)
Table 6.2 UWB anchor points coordinates (cartographic projection EGSA '87)

Με χρήση των συντεταγμένων των σημείων UWB_101, UWB_102 και UWB_103 έγινε εξαγωγή της τροχιάς του αυτοκινήτου για τα σενάρια S-I και S-II.

Στη συνέχεια έγινε εξαγωγή της τροχιάς του αυτοκινήτου και για τα τρία σενάρια παρατήρησης σε τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς, δεδομένου ότι το λογισμικό *RangeNet*[®] χρησιμοποιεί ως συντεταγμένες των τριών σταθερών πομποδεκτών για το μεν πρώτο σενάριο αυτές που είχε υπολογίσει το *Autosurvey*[®], για τα άλλα σενάρια δε αυτές που υπολόγισε από τις μετρήσεις αποστάσεων με το αποστασιόμετρο οι οποίες είχαν εισαχθεί (Πίνακας 6.3). Στη συνέχεια επιβλήθηκε μετασχηματισμός ομοιότητας της τροχιάς στο προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ '87, προκειμένου να καταστεί δυνατή σύγκριση με την τροχιά όπως προέκυψε από το σύστημα *GNSS/IMU* (για τα σενάρια S-I, S-II) και από τις σποραδικές μετρήσεις του *GPS* (ποιοτικά για το σενάριο S-III) με κατάλληλο κώδικα λογισμικού που δημιουργήθηκε σε προγραμματιστικό περιβάλλον *MATLAB*[®].

ΣΗΜΕΙΟ	ΑΠΟ AUTOSURVEY		ΑΠΟ ΑΠΟΣΤΑΣΙΟΜΕΤΡΟ	
	x (m)	y (m)	x (m)	y (m)
101	0.000	0.000	0.000	0.000
102	23.958	0.000	23.580	0.000
103	-0.642	53.001	0.000	52.640

Πίνακας 6.3 Συντεταγμένες σταθερών σημείων σταθμών UWB με χρήση γεωδαιτικού σταθμού και αποστασιόμετρου (τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς)

Table 6.3 UWB anchor point coordinates (cartographic projection EGSA '87)

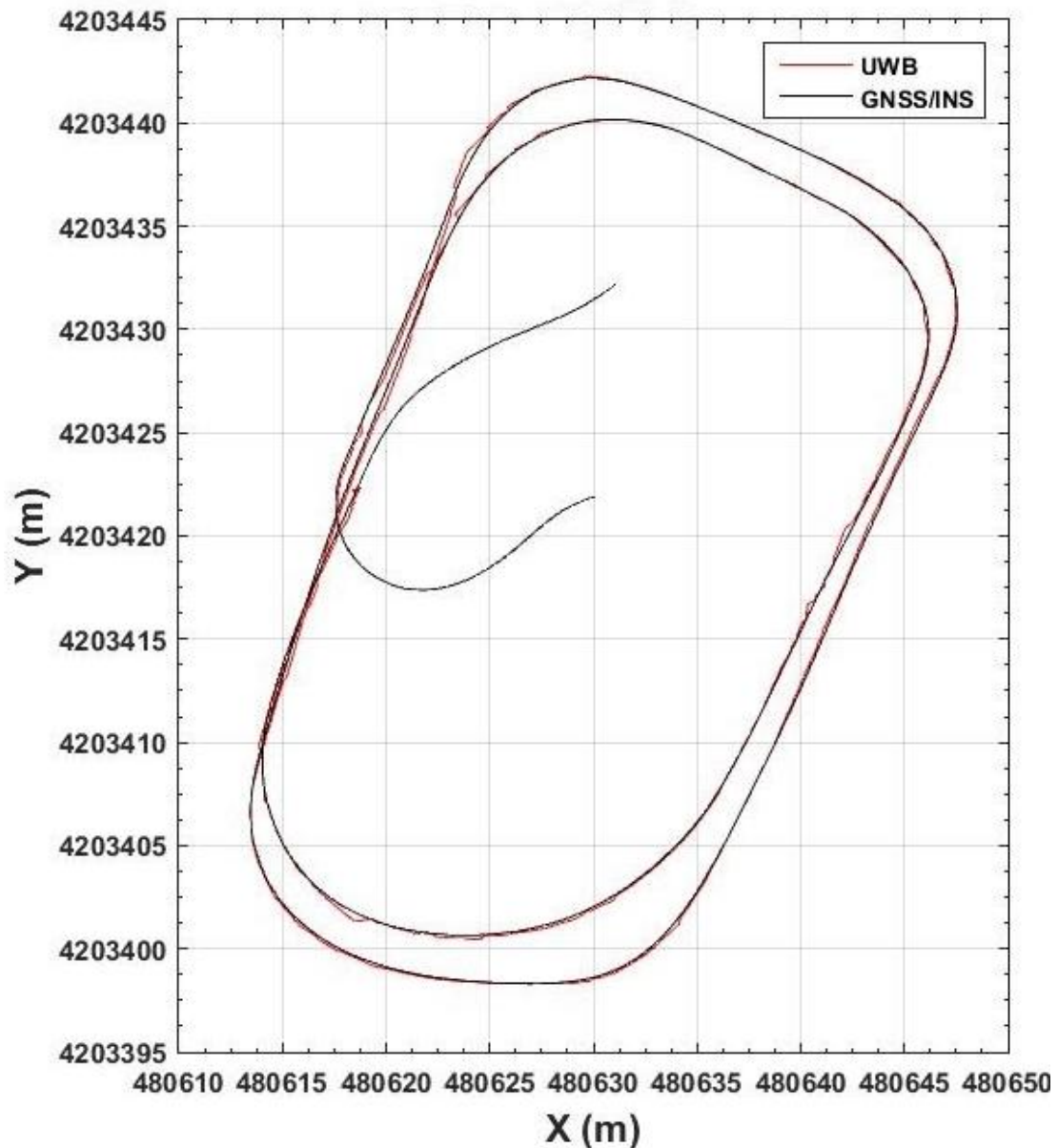
6.5.3 Υπολογισμός Τροχιάς βάσει Αλγόριθμου Τριπλευρισμού

Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε λογισμικό εντοπισμού με την τεχνική του τριπλευρισμού σε υπολογιστικό περιβάλλον *MATLAB*[®]. Χρησιμοποιώντας τις τοποκεντρικές συντεταγμένες για τους τέσσερις σταθμούς *UWB* (Πίνακας 6.2), καθώς και τις μετρήσεις των αποστάσεων μεταξύ των σταθμών *UWB* και του κινητού σταθμού *UWB*, προσδιορίστηκαν οι συντεταγμένες της τροχιάς του αυτοκινήτου και για τα τρία σενάρια παρατήρησης.

Η τροχιά του οχήματος και στα τρία σενάρια επαναπροσδιορίστηκε αφότου προηγήθηκε πύκνωση των μετρήσεων αποστάσεων μέσω γραμμικής παρεμβολής με κατάλληλο εργαλείο λογισμικό που επίσης δημιουργήθηκε σε προγραμματιστικό περιβάλλον *MATLAB*[®].

6.6 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

6.6.1 Πρώτο Σενάριο Παρατήρησης (S-I)

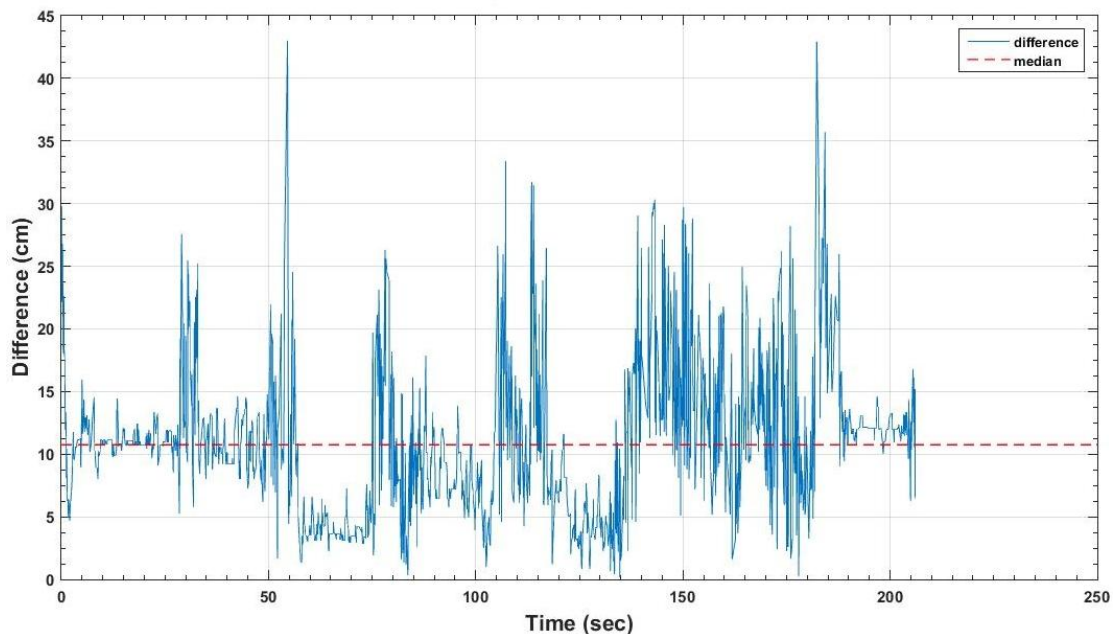


Σχήμα 6.10 Τροχιά οχήματος για το σενάριο S-I όπως προέκυψε από το λογισμικό του κατασκευαστή
Figure 6.10 Trajectory for scenario S-I from manufacturer's localization software

Στο Σχήμα 6.10 απεικονίζεται η τροχιά του οχήματος καταγραφής κατά τη διάρκεια του σεναρίου S-I όπως αυτή προέκυψε τόσο από τις μετρήσεις του συστήματος *GNSS/IMU*, όσο και από τις μετρήσεις του συστήματος *UWB* με την χρήση του λογισμικού εντοπισμού της εταιρείας *Time Domain Inc.* με συντεταγμένες των σταθερών πομποδεκτών αυτές του *Autosurvey®*.

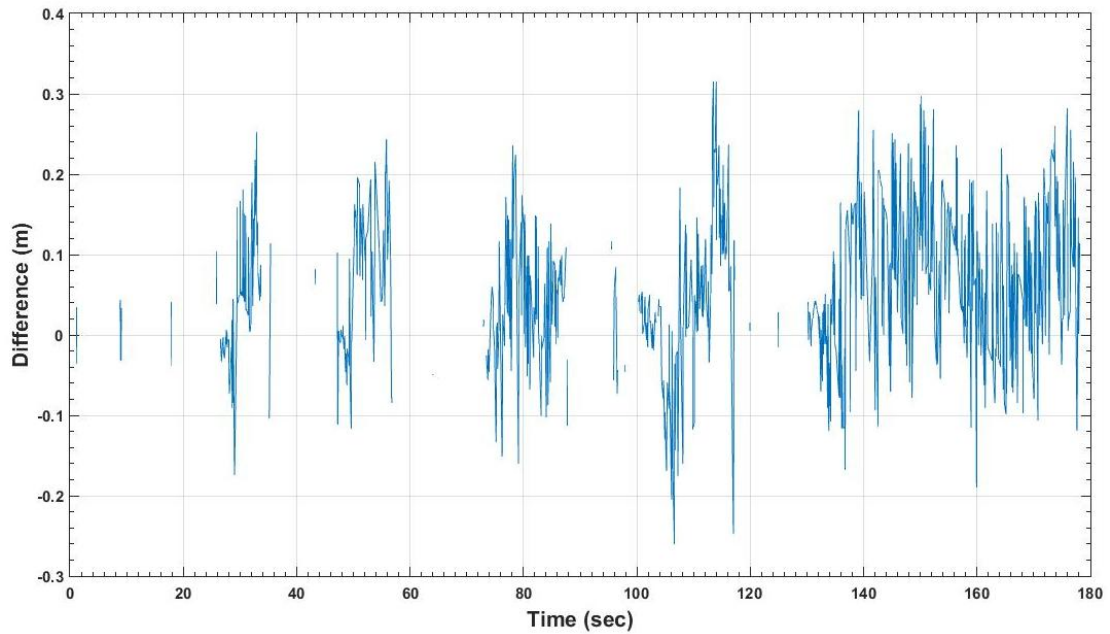
Είναι εμφανές ότι οι δύο τροχιές σχεδόν ταυτίζονται σε μεγάλο τμήμα της τροχιάς τόσο στις ευθείες όσο και στις στροφές με εξαίρεση κάποια σημεία στα οποία παρουσιάζονται κάποια πετάγματα της τροχιάς που προέρχεται από τις μετρήσεις του συστήματος *UWB*. Αυτά πιθανόν να οφείλονται είτε σε αυξημένη ταχύτητα που ανέπτυξε το όχημα καταγραφής σε εκείνα τα σημεία, είτε σε παρεμβολές στις μετρήσεις κάποιου από τους πομποδέκτες εξαιτίας των μεταλλικών στύλων φωτισμού που υπήρχαν στον χώρο.

Όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 6.11 η μέγιστη αποχή των τροχιών δεν ξεπερνά τα 0.45 m στη δυσμενέστερη περίπτωση με τη μέση αποχή να είναι της τάξεως των 0.11 m.

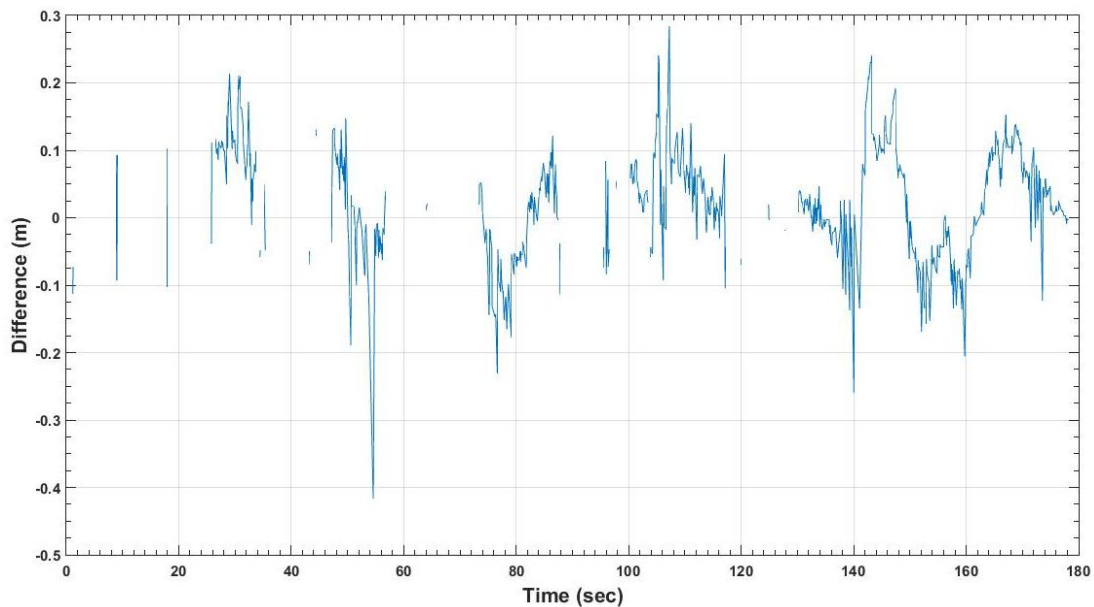


Σχήμα 6.11 Αποχή τροχιών
Figure 6.11 Trajectories difference

Τα Σχήματα 6.12 και 6.13 απεικονίζουν την αποχή στις τροχιές κατά μήκος της κίνησης (*along track*) και κάθετα στην κίνηση (*across track*) του οχήματος καταγραφής αντίστοιχα. Οι μέγιστες αποκλίσεις δεν ξεπερνούν τα 0.3 m (με εξαίρεση ένα σημείο του Σχήματος 6.13) και είναι ομοιόμορφα κατανομημένες γύρω από το όχημα καταγραφής (αριστερά - δεξιά και μπροστά - πίσω). Όμως εμφανίζεται μια εντονότερη διακύμανση στις τιμές απόκλισης κατά τον άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής.

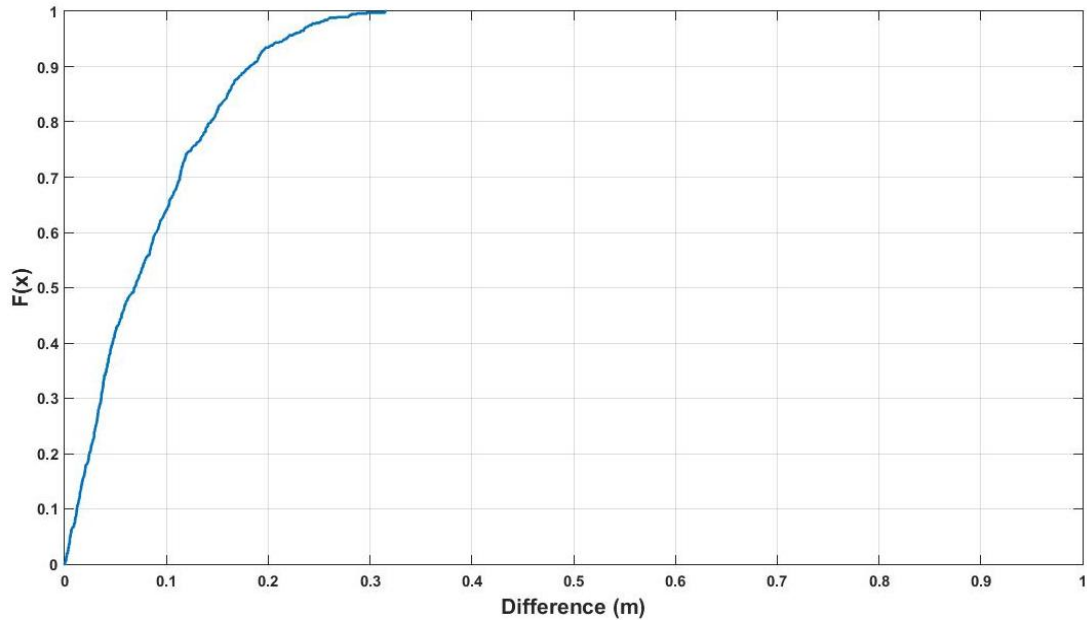


Σχήμα 6.12 Αποχή τροχιών κατά τον άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής
Figure 6.12 Along track difference of trajectories

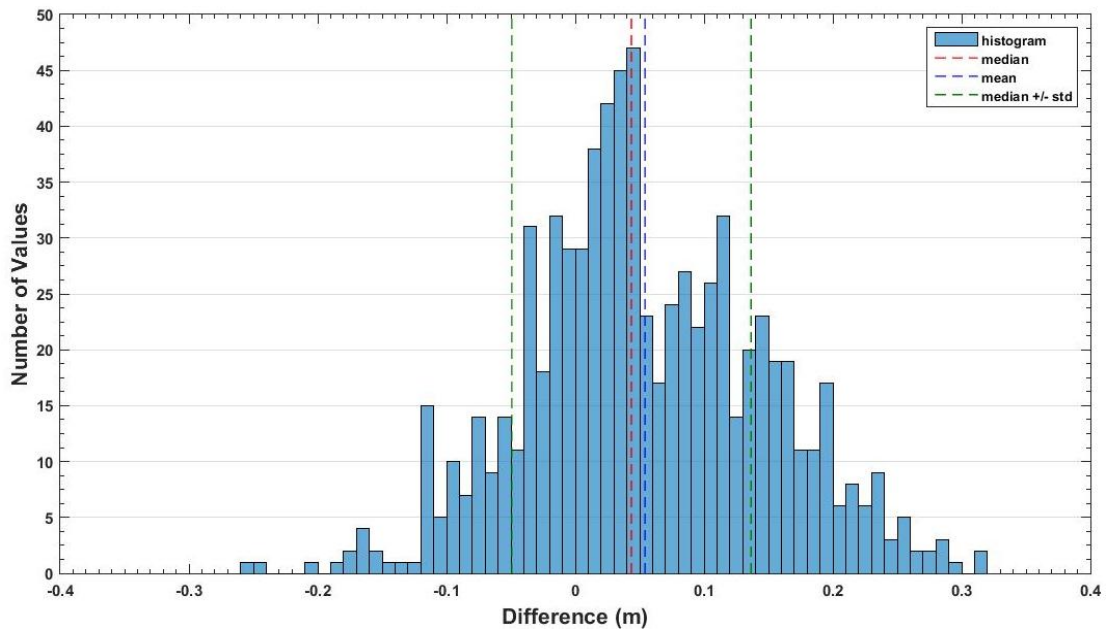


Σχήμα 6.13 Αποχή τροχιών κάθετα στον άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής
Figure 6.13 Across track difference of trajectories

Όπως φαίνεται και στα Σχήματα 6.14 και 6.15 περίπου το 40% των τιμών της απόκλισης των τροχιών κατά τον άξονα κίνησης του οχήματος δεν ξεπερνά τη μέση τιμή, ενώ το 80% δεν ξεπερνά τα 0.15 m.

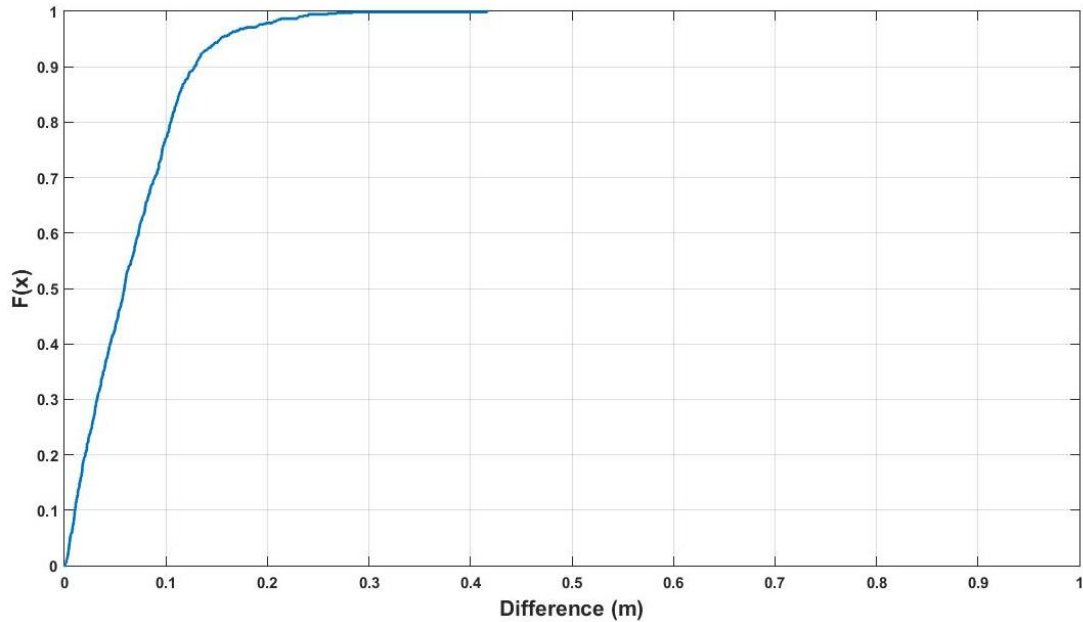


Σχήμα 6.14 Ποσοστά εμφάνισης τιμών αποχής κατά τον άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής
Figure 6.14 Incidence rates of difference values along track

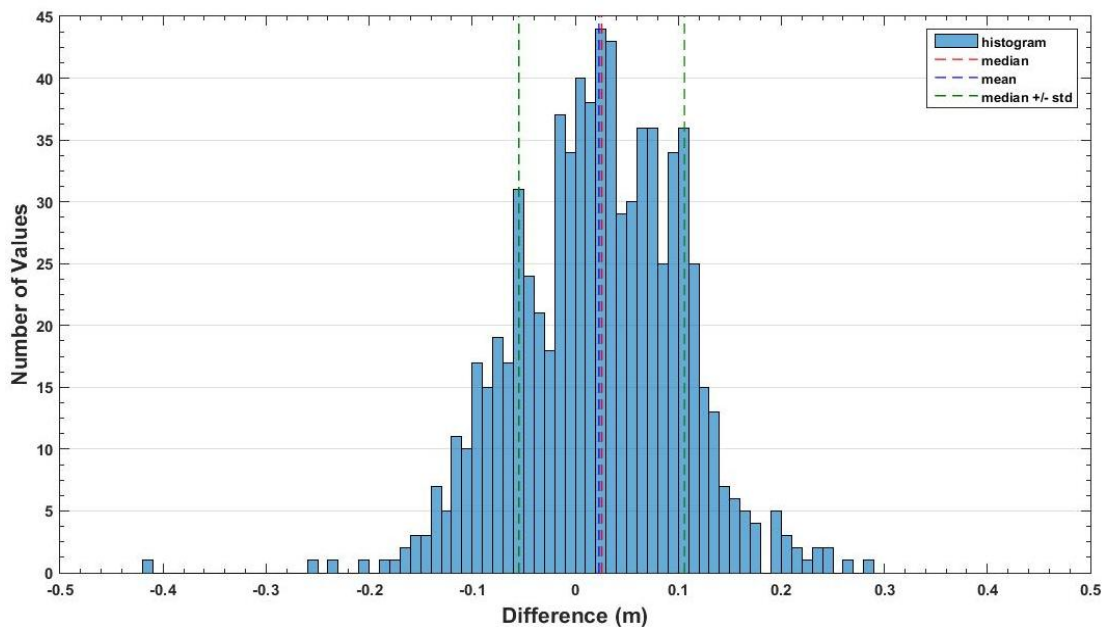


Σχήμα 6.15 Κατανομή συχνοτήτων εμφάνισης τιμών αποχής κατά τον άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής
Figure 6.15 Frequency distribution of difference values along track

Αντίστοιχα στα Σχήματα 6.16 και 6.17 για τις τιμές απόκλισης των τροχιών κάθετα στο άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής, το 20% δεν ξεπερνά τη μέση τιμή ενώ το 80% μόλις που ξεπερνά τα 0.1 m.



Σχήμα 6.16 Ποσοστά εμφάνισης τιμών αποχής κάθετα στον άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής
Figure 6.16 Incidence rates of difference values across track

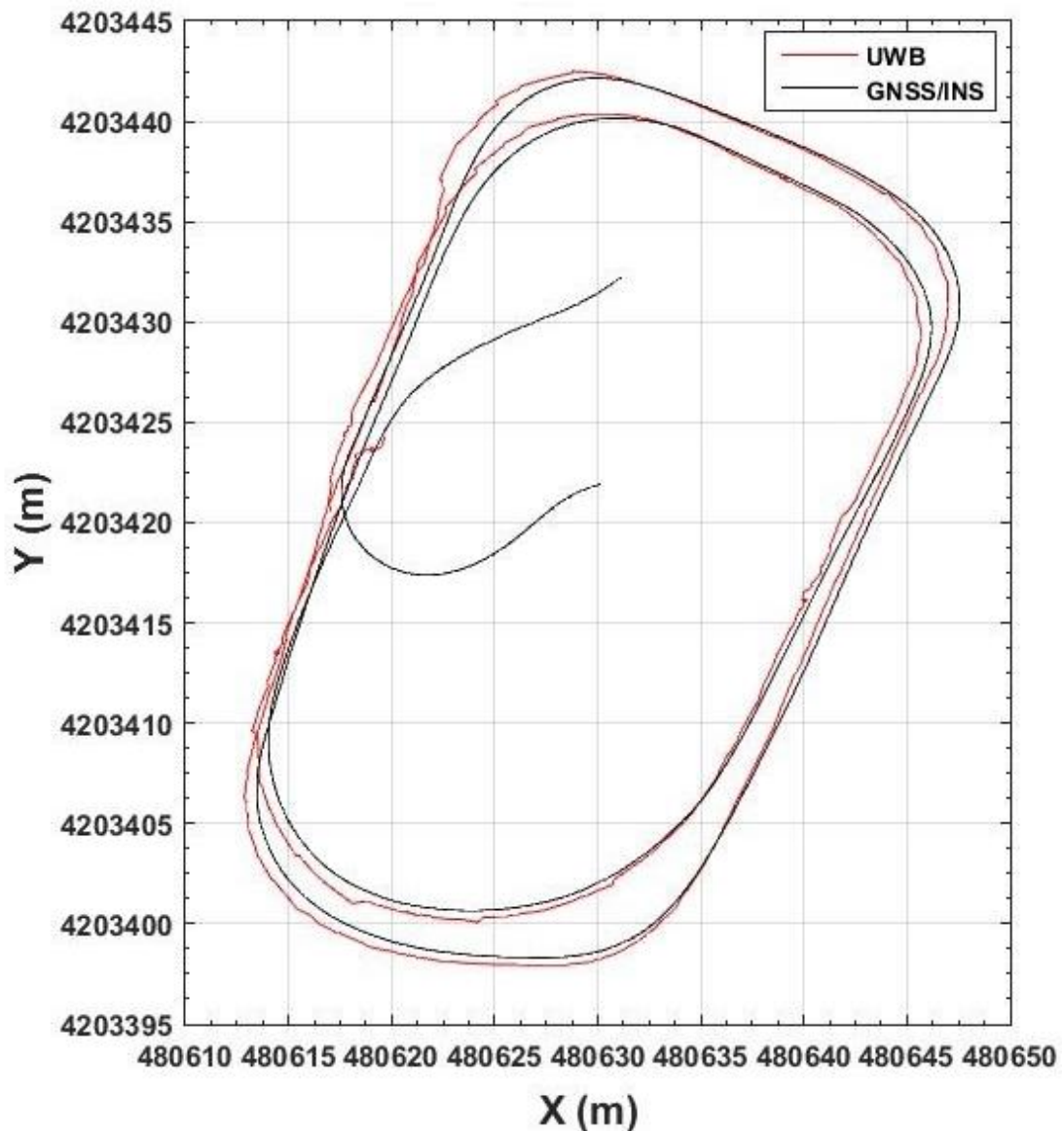


Σχήμα 6.17 Κατανομή συχνοτήτων εμφάνισης τιμών αποχής κάθετα στον άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής
Figure 6.17 Frequency distribution of difference values across track

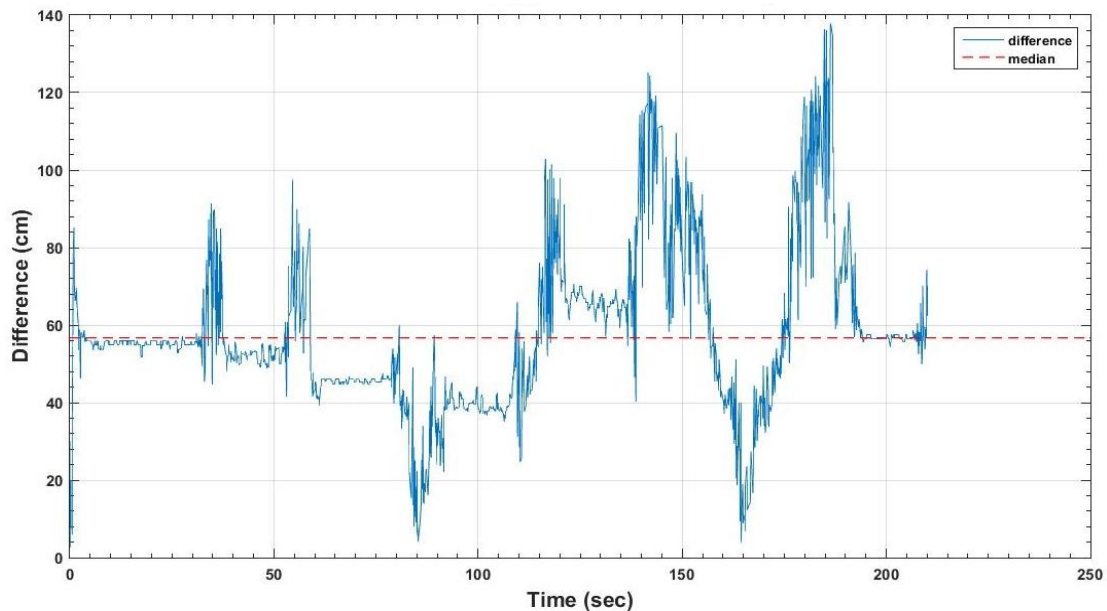
Γενικά φαίνεται πως οι τιμές απόκλισης της τροχιάς κάθετα στο άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής παρουσιάζουν μικρότερη διασπορά γύρω από τη μέση τιμή από αυτές κατά μήκος του άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής.

Το Σχήμα 6.18 απεικονίζει την τροχιά κίνησης του οχήματος καταγραφής όπως έχει αυτή προκύψει από το λογισμικό εντοπισμού της *Time Domain Inc.* χρησιμοποιώντας ως συντεταγμένες των πομποδεκτών αυτές που προέκυψαν από

τις μετρήσεις με τον γεωδαιτικό σταθμό. Όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 6.19 οι αποκλίσεις μεταξύ των τροχιών είναι μεγαλύτερες με αυτή τη μέθοδο προσδιορισμού της τροχιάς έχοντας μια μέση τιμή της τάξεως των 0.56 m ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις αγγίζουν και τα 1.4 m. Παρά το γεγονός ότι οι συντεταγμένες που έχουν προκύψει από τις μετρήσεις με τον γεωδαιτικό σταθμό είναι ακριβέστερες από αυτές που έχει υπολογίσει το *Autosurvey*[®], το τελικό αποτέλεσμα είναι ακριβώς το αντίθετο.



Σχήμα 6.18 Τροχιά σεναρίου S-I από το λογισμικό εντοπισμού της *Time Domain Inc.* με χρήση των συντεταγμένων που προέκυψαν από τις μετρήσεις με τον γεωδαιτικό σταθμό
Figure 6.18 Trajectory of scenario S-I from localization software of *Time Domain Inc.* with coordinates from total station measurements

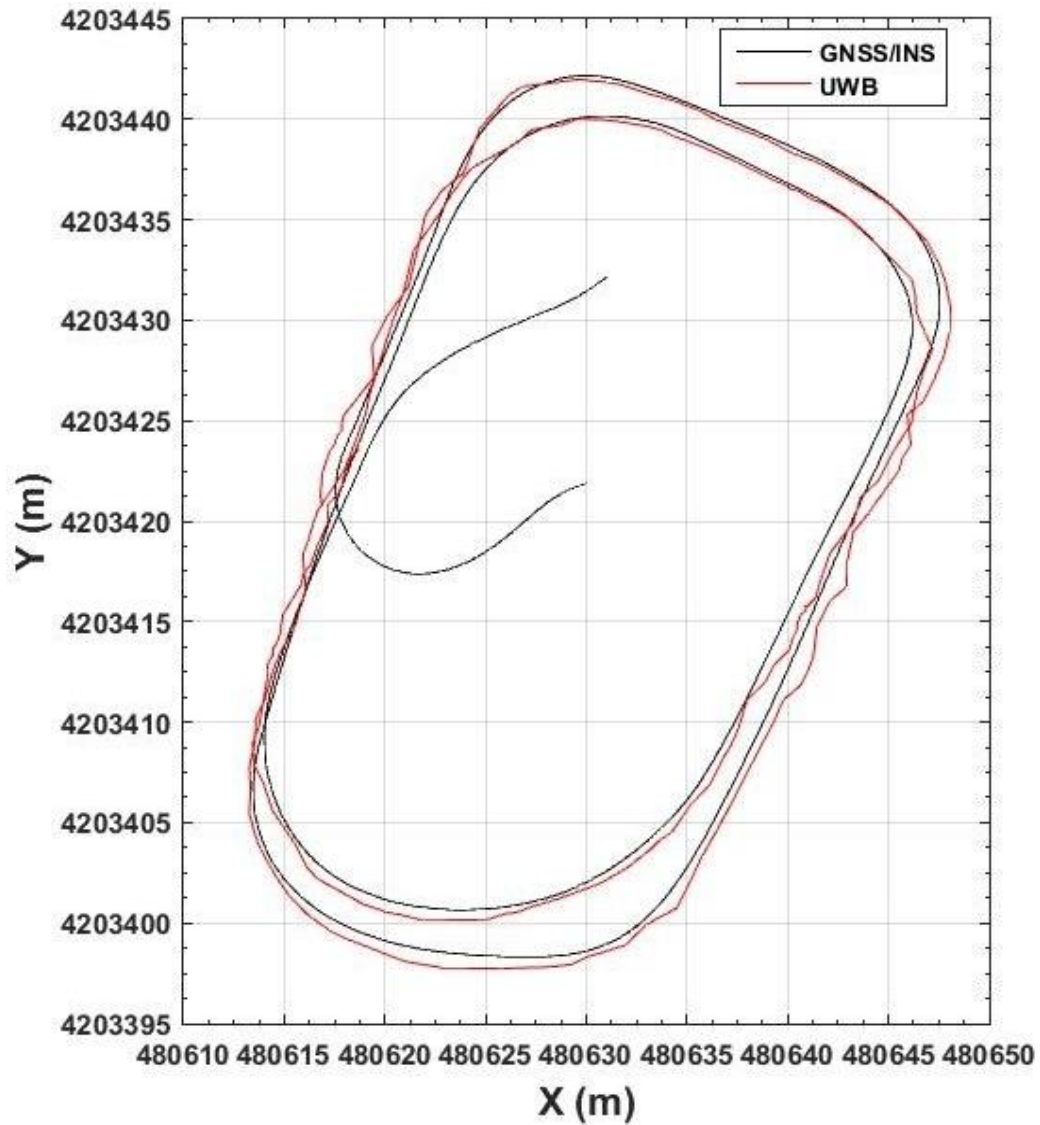


Σχήμα 6.19 Αποχή τροχιών
Figure 6.19 Trajectories difference

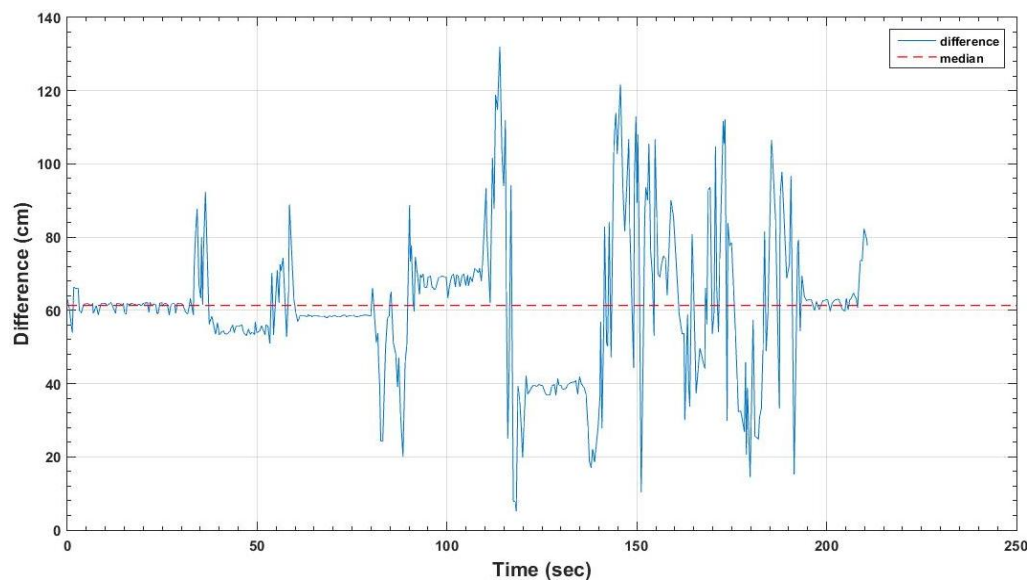
Το Σχήμα 6.20 απεικονίζει την τροχιά του οχήματος καταγραφής όπως έχει αυτή προκύψει από την εφαρμογή της τεχνικής του τριπλευρισμού, χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις αποστάσεων μεταξύ του κινούμενου πομποδέκτη και των τεσσάρων πομποδεκτών και επιλύοντας με τη MET. Όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 6.21 οι αποχές μεταξύ των τροχιών είναι τις ίδιες τάξεως με αυτές που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 6.19 και έχουν μια μέση τιμή της τάξεως των 0.6 m και φτάνουν έως και τα 1.3 m σε κάποια σημεία.

Η ύπαρξη αυτών των αποκλίσεων καθώς και κάποιων «ανωμαλιών» στην τροχιά οφείλεται κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι οι μετρήσεις αποστάσεων μεταξύ των πομποδεκτών δεν είναι ταυτόχρονες με αποτέλεσμα οι τέσσερις αποστάσεις που χρησιμοποιούνται κάθε φορά για τον προσδιορισμό της θέσης να μην αναφέρονται στην ίδια ακριβώς θέση.

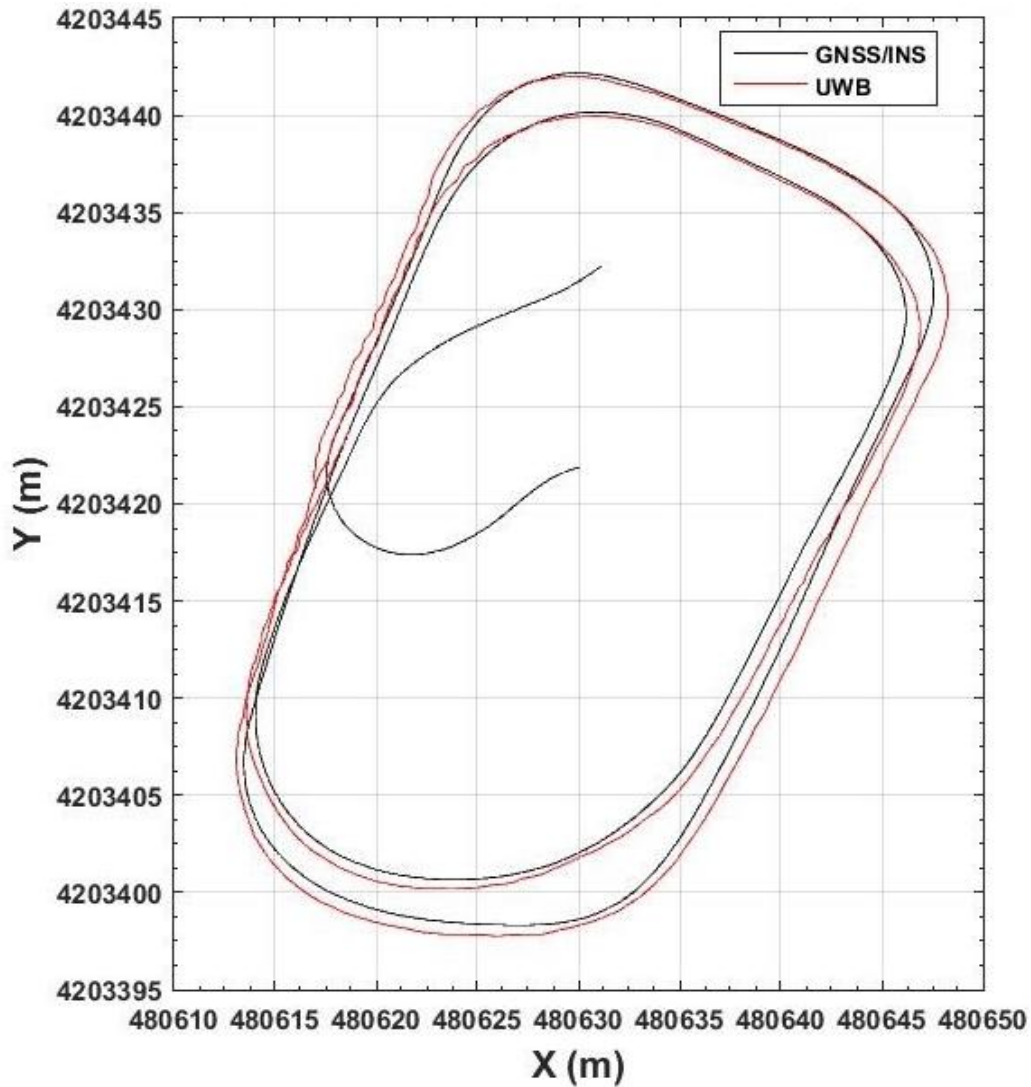
Προκειμένου να μειωθεί η επίδραση αυτού του παράγοντα, έγινε πύκνωση των μετρήσεων μέσω γραμμικής παρεμβολής. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την εξομάλυνση της τροχιάς (Σχήμα 6.22) καθώς και τη μείωση των αποχών από την τροχιά του *GNSS/IMU* σε μια μέση τιμή κάτω από τα 0.6 m ενώ οι μέγιστες δεν ξεπερνούν πλέον το 1 m (Σχήμα 6.23).



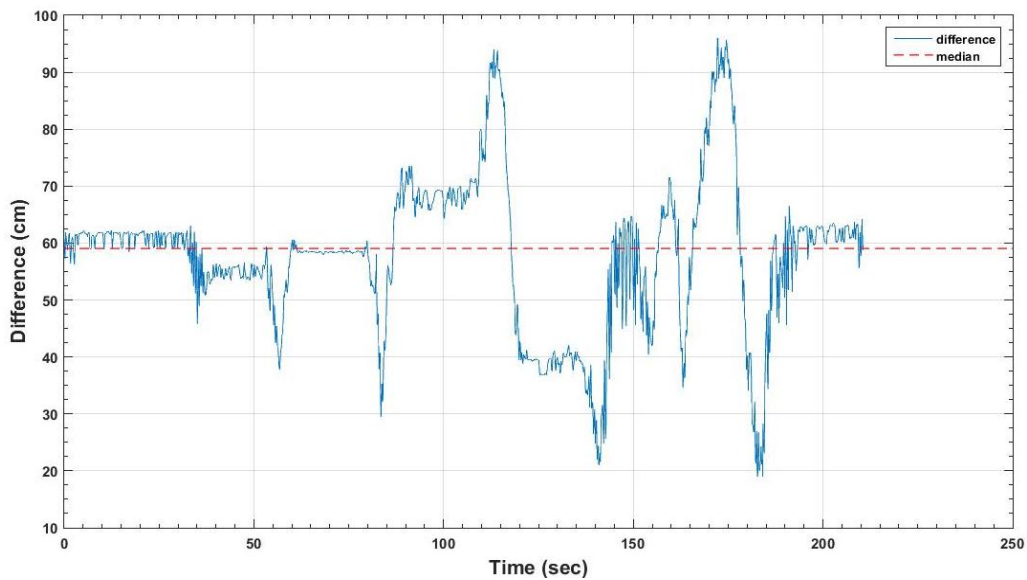
Σχήμα 6.20 Τροχιά σεναρίου S-I από την εφαρμογή της τεχνικής του τριπλευρισμού
Figure 6.20 Trajectory for scenario S-I from trilateration process



Σχήμα 6.21 Αποχή τροχιών
Figure 6.21 Trajectories difference

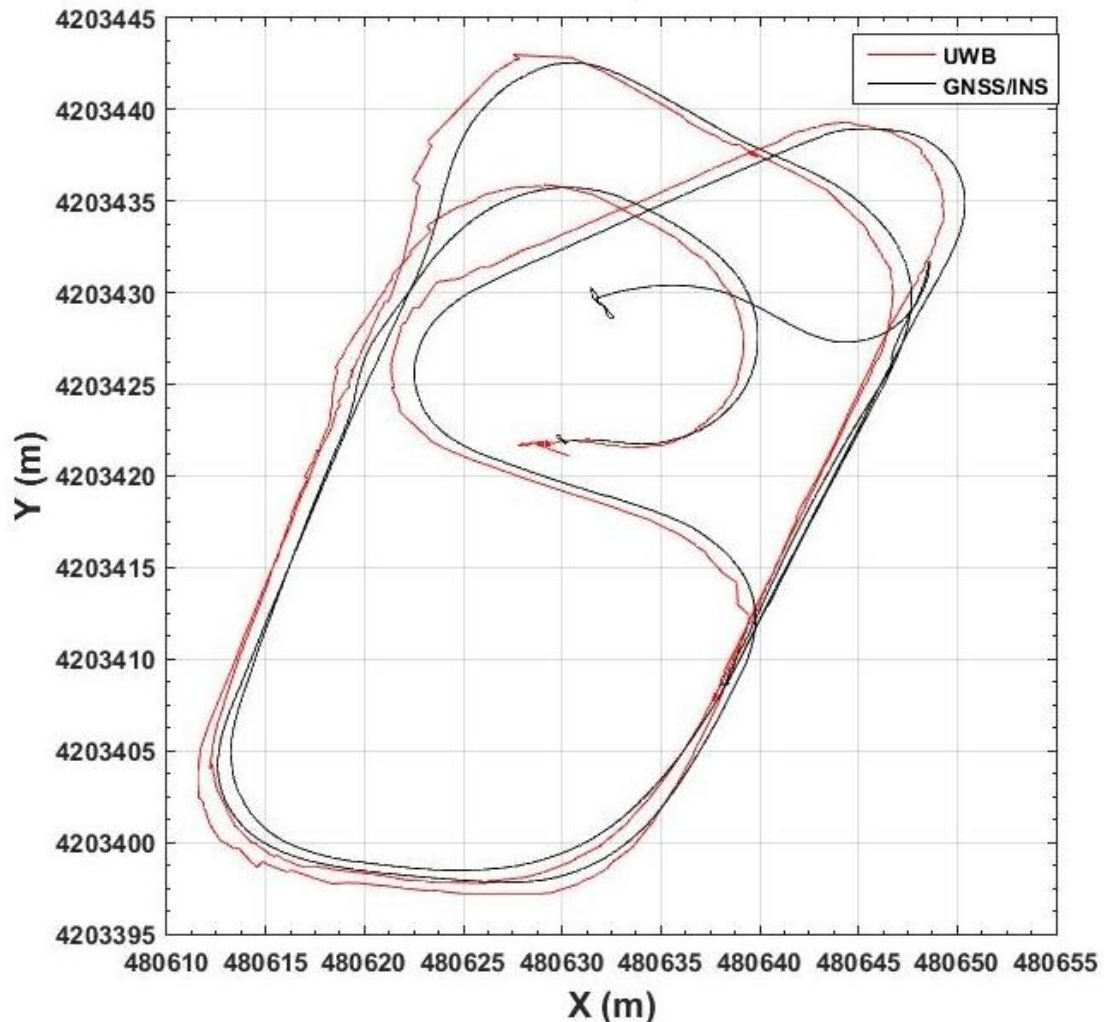


Σχήμα 6.22 Τροχιά σεναρίου S-I από την εφαρμογή της τεχνικής του τριπλευρισμού (πύκνωση δεδομένων μέσω γραμμικής παρεμβολής)
Figure 6.22 Trajectory of scenario S-I from trilateration process (using interpolation)



Σχήμα 6.23 Αποχή τροχιών
Figure 6.23 Trajectories difference

6.6.2 Δεύτερο Σενάριο Παρατήρησης (S-II)



Σχήμα 6.24 Τροχιά σεναρίου S-II από το λογισμικό εντοπισμού της *Time Domain Inc.* με χρήση των συντεταγμένων που δόθηκαν από μετρήσεις με αποστασιόμετρο

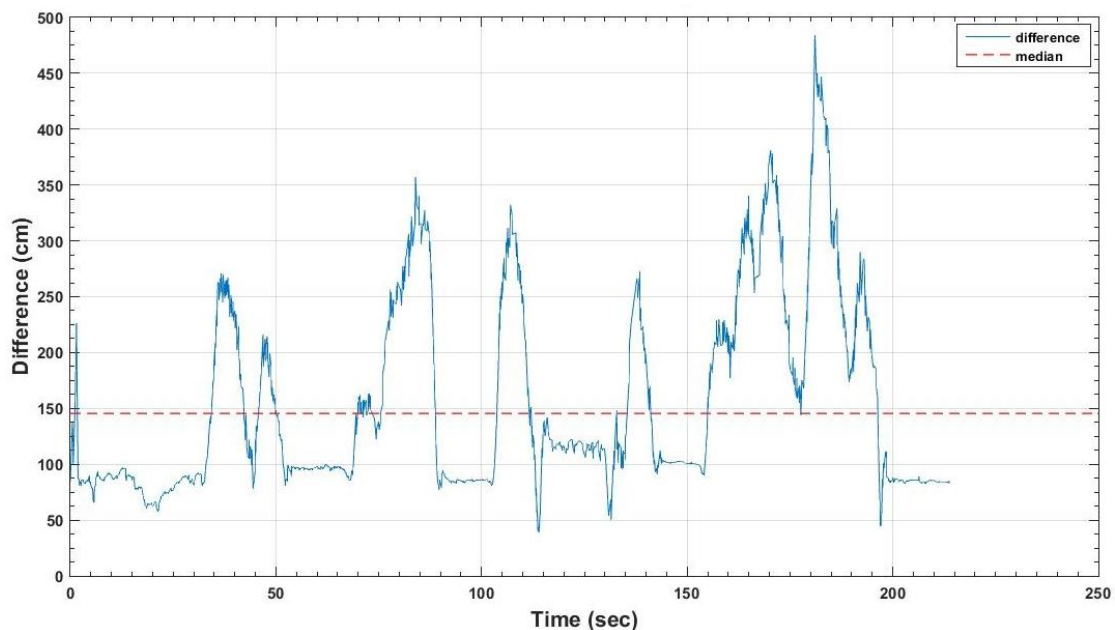
Figure 6.24 Trajectory of scenario S-II from localization software of *Time Domain Inc.* with coordinates from measurements using rangefinder

Στο Σχήμα 6.24 απεικονίζεται η τροχιά του αυτοκινήτου κατά τη διάρκεια του σεναρίου S-II όπως αυτή προέκυψε τόσο από τις μετρήσεις του συστήματος *GNSS/IMU*, όσο και από τις μετρήσεις του συστήματος *UWB* με την χρήση του λογισμικού εντοπισμού της εταιρείας *Time Domain Inc.* με συντεταγμένες των σταθερών πομποδεκτών αυτές που προέκυψαν από μετρήσεις με αποστασιόμετρο.

Η τροχιά από το σύστημα *UWB* φαίνεται μετατοπισμένη παράλληλα κατά τους άξονες X και Y του συστήματος αναφοράς σε σχέση με αυτή του συστήματος *GNSS/IMU*. Αυτή η μετατόπιση πιθανόν οφείλεται κατά κύριο λόγο στις μετρήσεις που έγιναν με το αποστασιόμετρο και εισήχθησαν στο σύστημα *UWB* για τη

ρύθμισή του και δεν ήταν τόσο ακριβείς. Επιπλέον, η αποχή μεταξύ των δύο τροχιών οφείλεται και στις συντεταγμένες των τριών σταθερών πομποδεκτών που δόθηκαν καθώς προέκυψαν από προσεγγιστική μέθοδο (απλές μετρήσεις αποστάσεων με αποστασιόμετρο). Επιπλέον η τροχιά που προέρχεται από τις μετρήσεις του συστήματος *UWB* εμφανίζει περισσότερες «ανωμαλίες» σε σχέση με την αντίστοιχη του σεναρίου *S-I* λόγω της μεγαλύτερης ταχύτητας του οχήματος καταγραφής.

Εξαιτίας των παραπάνω λόγων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.25 η αποχή ξεκινάει από τα 0.5 m και αγγίζει και τα 5 m σε ορισμένα σημεία έχοντας μια μέση τιμή της τάξεως του 1.5 m.

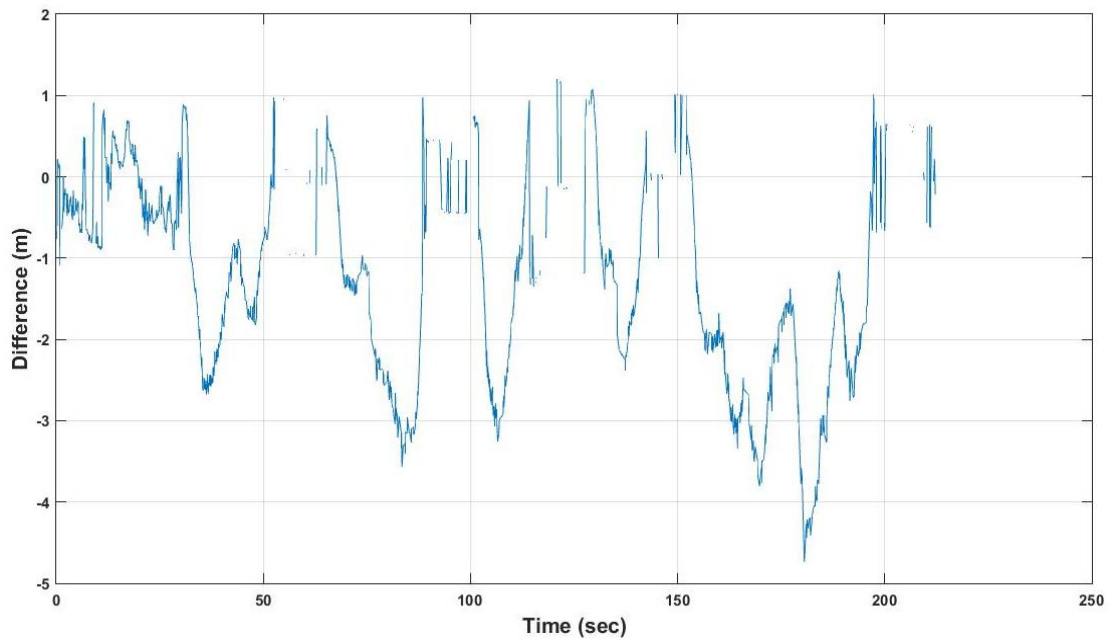


Σχήμα 6.25 Αποχή τροχιών

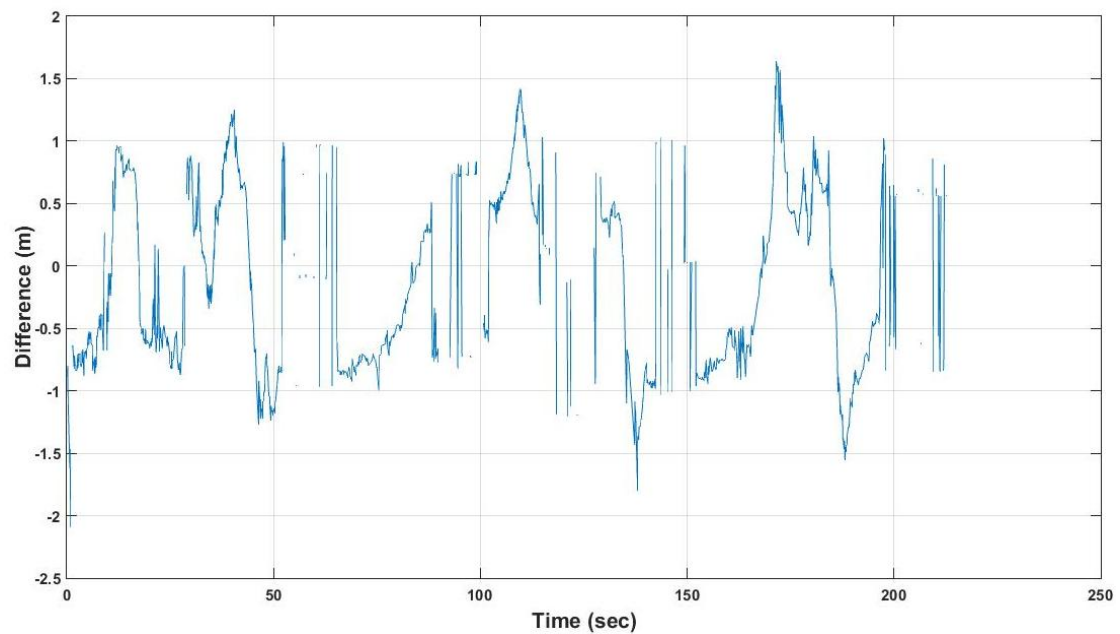
Figure 6.25 Trajectories difference

Στα Σχήματα 6.26 και 6.27 παρουσιάζεται η αποχή μεταξύ των τροχιών κατά μήκος του άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής και κάθετα αντίστοιχα. Η αποχή αυτή είναι εντονότερη κατά τον άξονα κίνησης του οχήματος φτάνοντας και τα 5 m ενώ κάθετα στον άξονα κίνησης δεν ξεπερνά τα 2 m.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι αποχές δε είναι ομοιόμορφα κατανομημένες γύρω από το όχημα καταγραφής, αλλά είναι μεγαλύτερες αντίθετα της κατά μήκος κίνησής του.

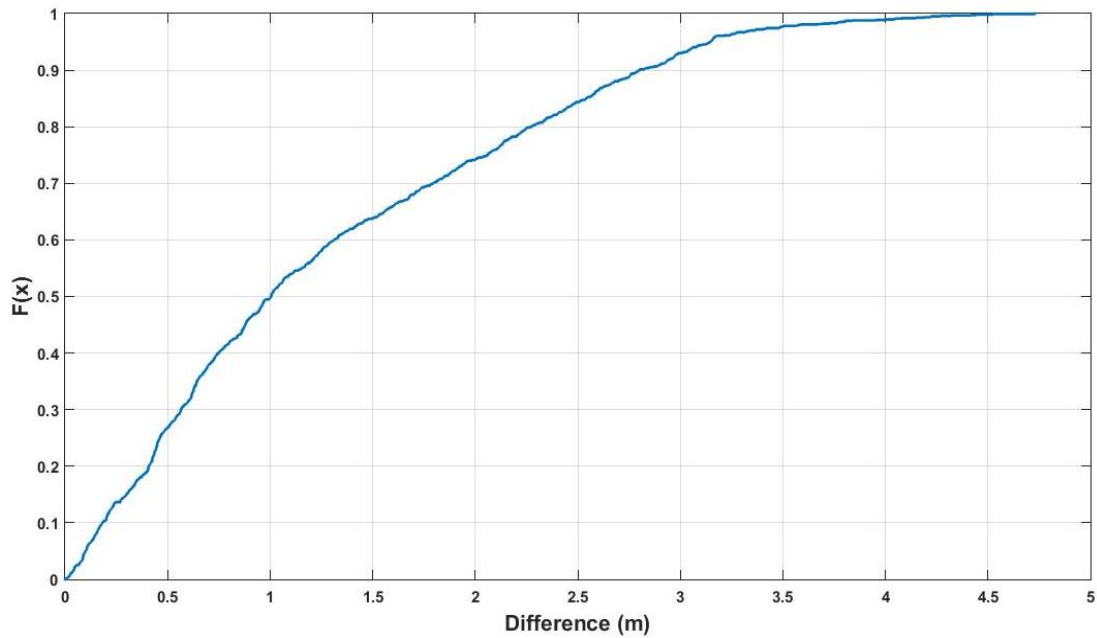


Σχήμα 6.26 Αποχή τροχιών κατά τον άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής
Figure 6.26 Along track difference of trajectories

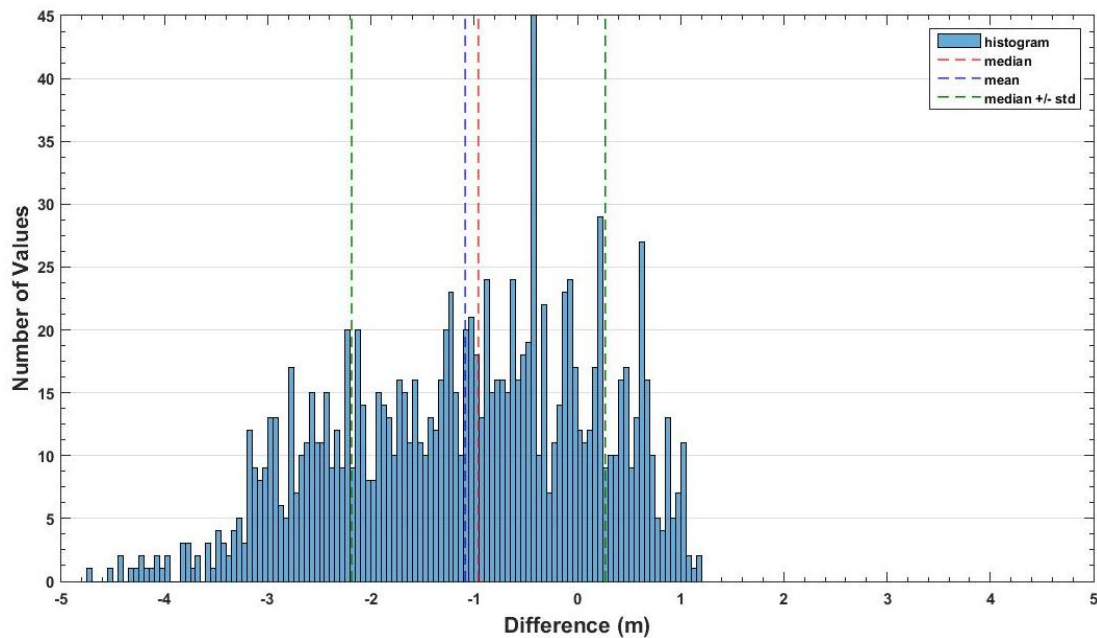


Σχήμα 6.27 Αποχή τροχιών κάθετα στον άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής
Figure 6.27 Across track difference of trajectories

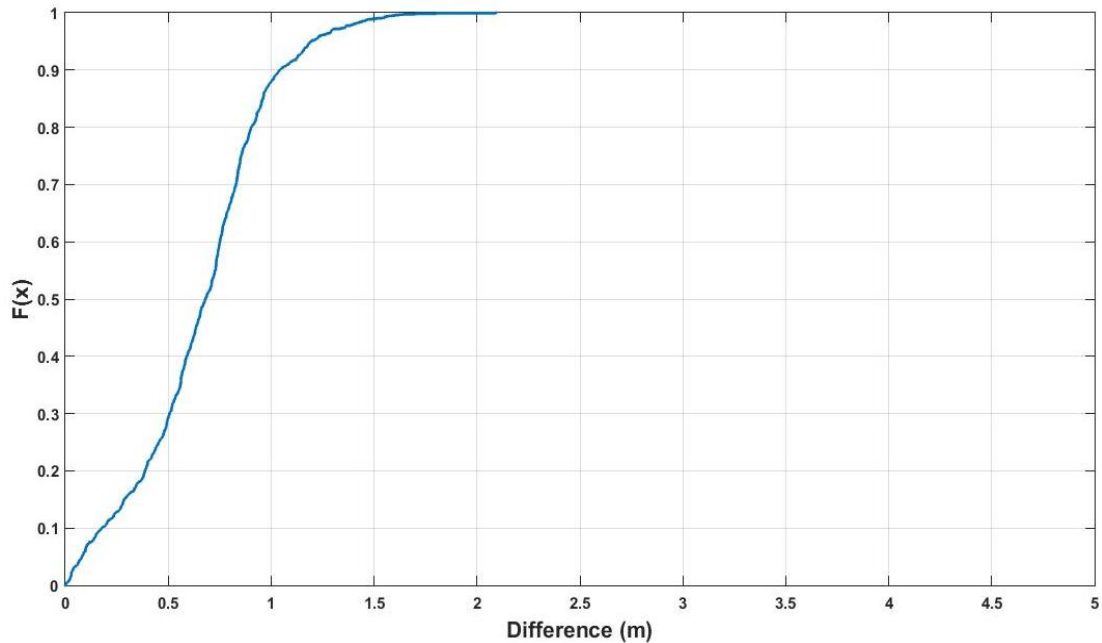
Σύμφωνα με τα Σχήματα 6.28 έως 6.31 παρουσιάζεται μεγαλύτερη διασπορά τιμών στην περίπτωση της κατά μήκος κίνησης του οχήματος με το 50% των τιμών αποχής να μην ξεπερνά την μέση τιμή και το 85% τα 2,5 m. Αντίθετα οι τιμές της αποχής κάθετα στον άξονα κίνησης του οχήματος μόλις το 10% δεν ξεπερνά την μέση τιμή με το 90% των τιμών να υπερβαίνει οριακά το 1 m. Επιπλέον όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.29 οι περισσότερες τιμές αποχής έχουν αρνητικό πρόσημο.



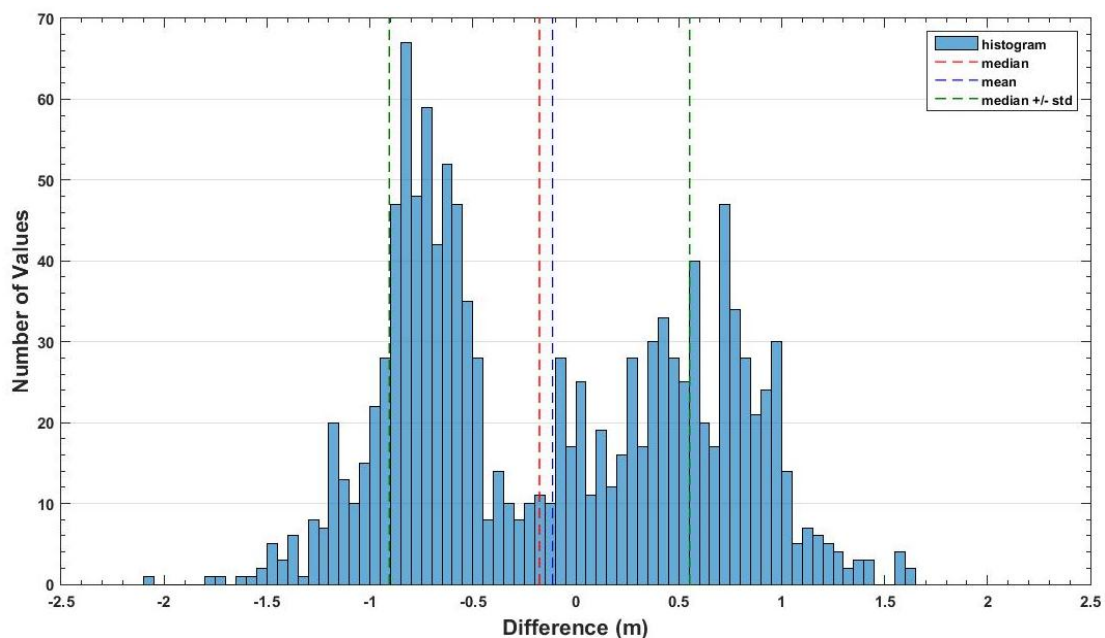
Σχήμα 6.28 Ποσοστά εμφάνισης τιμών αποχής κατά τον άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής
Figure 6.28 Incidence rates of difference values along track



Σχήμα 6.29 Κατανομή συχνοτήτων εμφάνισης τιμών αποχής κατά τον άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής
Figure 6.29 Frequency distribution of difference values along track



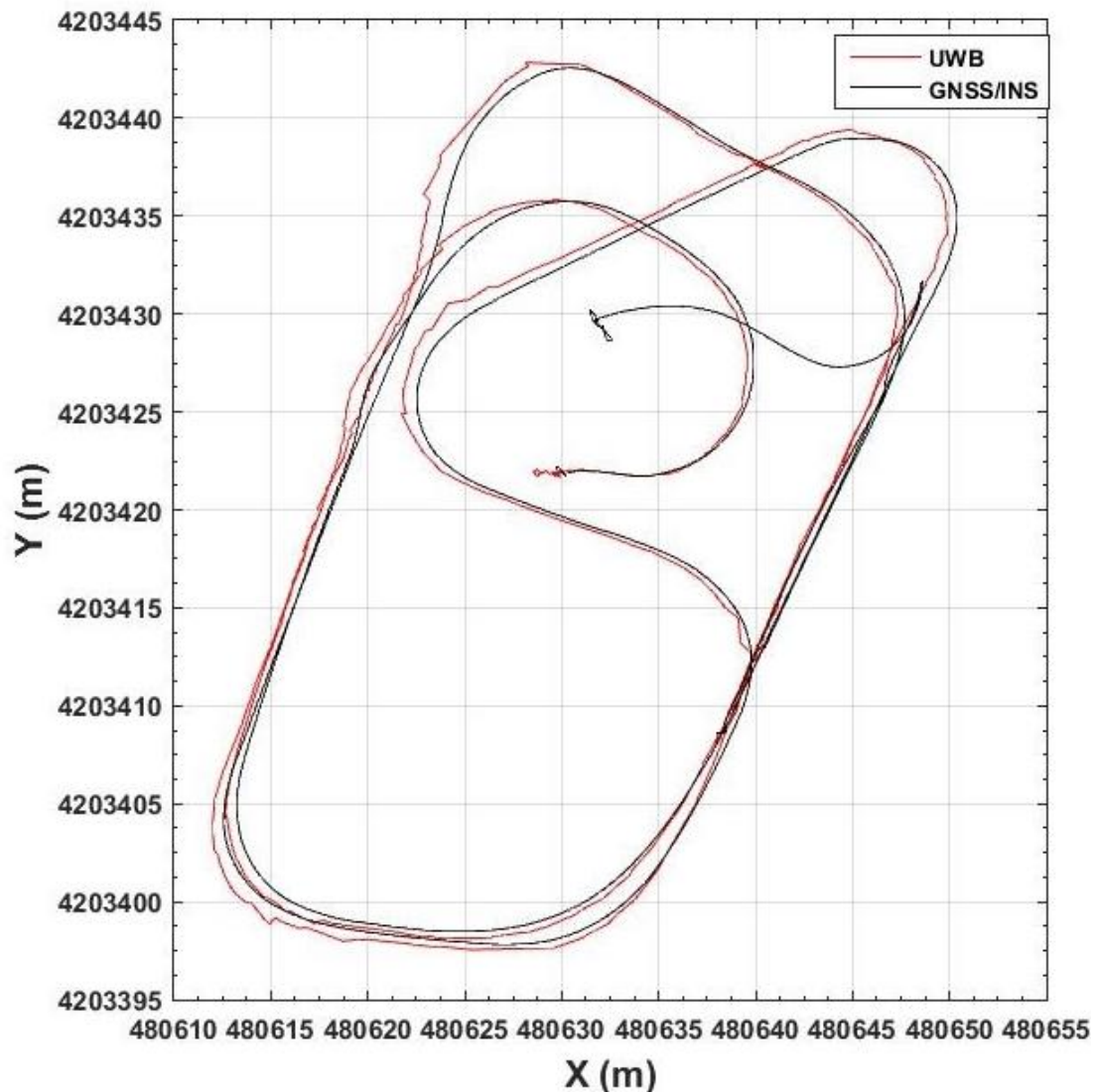
Σχήμα 6.30 Ποσοστά εμφάνισης τιμών αποχής κάθετα στον άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής
Figure 6.30 Incidence rates of difference values across track



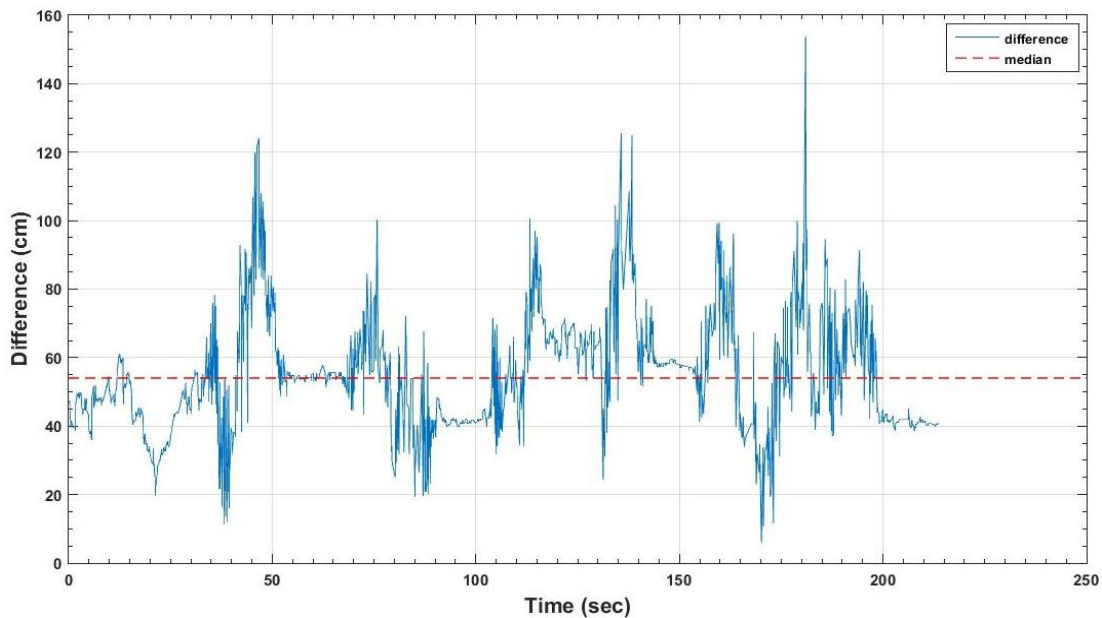
Σχήμα 6.31 Κατανομή συχνοτήτων εμφάνισης τιμών αποχής κάθετα στον άξονα κίνησης του οχήματος καταγραφής
Figure 6.31 Frequency distribution of difference values across track

Το Σχήμα 6.32 απεικονίζει την τροχιά κίνησης του οχήματος καταγραφής όπως αυτή προέκυψε από το λογισμικό εντοπισμού της *Time Domain Inc.* χρησιμοποιώντας ως συντεταγμένες των πομποδεκτών αυτές που προέκυψαν από τις μετρήσεις με τον γεωδαιτικό σταθμό. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.33 η μέση τιμή των αποχών μεταξύ των τροχιών είναι της τάξεως των 0.55 m με τις μέγιστες να μην ξεπερνούν τα 1.3 m (με εξαίρεση ένα σημείο).

Το αποτέλεσμα είναι εμφανώς βελτιωμένο σε σχέση με το αποτέλεσμα που προέκυψε χρησιμοποιώντας ως συντεταγμένες των σταθερών πομποδεκτών αυτές που προέκυψαν από τις μετρήσεις με το αποστασιόμετρο. Αυτό οφείλεται στη μειωμένη ακρίβεια των τελευταίων. Παρόλα αυτά, εξακολουθεί να υπάρχει μια παράλληλη μετατόπιση της τροχιάς που προκύπτει από το σύστημα *UWB* κατά τους άξονες *X* και *Y* σε σχέση με αυτή του συστήματος *GNSS/IMU* που οφείλεται στις μετρήσεις για τη ρύθμιση του συστήματος που έγιναν με το αποστασιόμετρο.



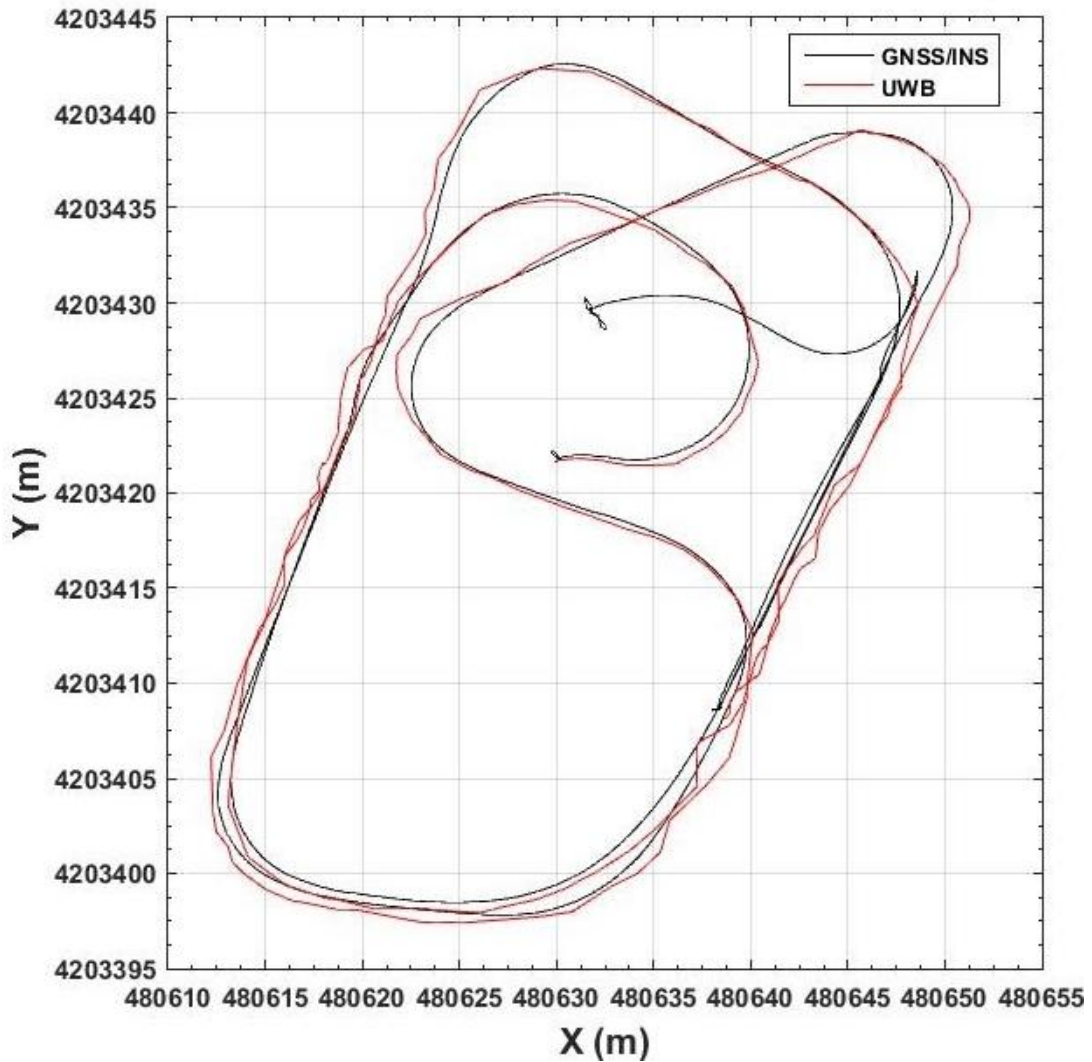
Σχήμα 6.32 Τροχιά σεναρίου S-II από το λογισμικό εντοπισμού της Time Domain Inc. με χρήση των συντεταγμένων που προέκυψαν από τις μετρήσεις με τον γεωδαιτικό σταθμό
Figure 6.32 Trajectory of scenario S-II from localization software of Time Domain Inc. with coordinates from total station measurements



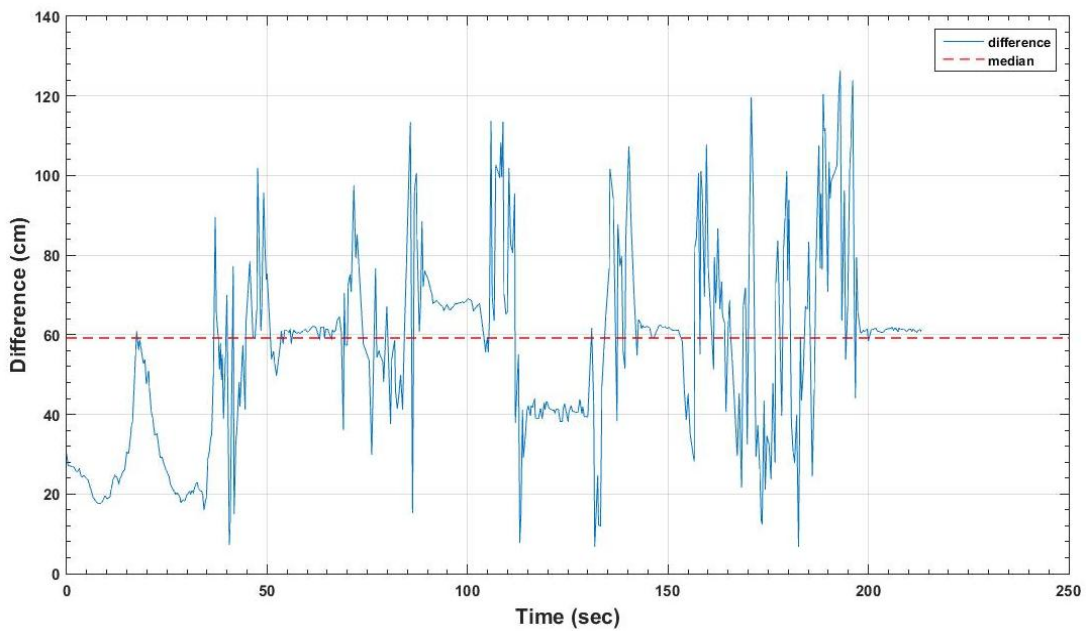
Σχήμα 6.33 Αποχή τροχιών
Figure 6.33 Trajectories difference

Στο Σχήμα 6.34 απεικονίζεται η τροχιά του οχήματος καταγραφής όπως έχει προκύψει εφαρμόζοντας της τεχνική του τριπλευρισμού και επίλυση με τη MET για το σενάριο S-II. Η τροχιά είναι απαλλαγμένη τόσο από την αρνητική επίδραση των μετρήσεων για τη ρύθμιση του συστήματος, όσο και από μειωμένης ακρίβειας συντεταγμένες των σταθερών πομποδεκτών. Όμως η χρονική απόκλιση μεταξύ των μετρήσεων αποστάσεων που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της θέση κάθε σημείου της τροχιάς έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση «ανωμαλιών» στην τροχιά που είναι εντονότερες από την αντίστοιχη περίπτωση του σεναρίου S-I κάτι που οφείλεται στην μεγαλύτερη ταχύτητα κίνησης του οχήματος. Η μέση τιμή των αποχών είναι της τάξεως των 0.6 m με τις μέγιστες να μην υπερβαίνουν τα 1.3 m (Σχήμα 6.35).

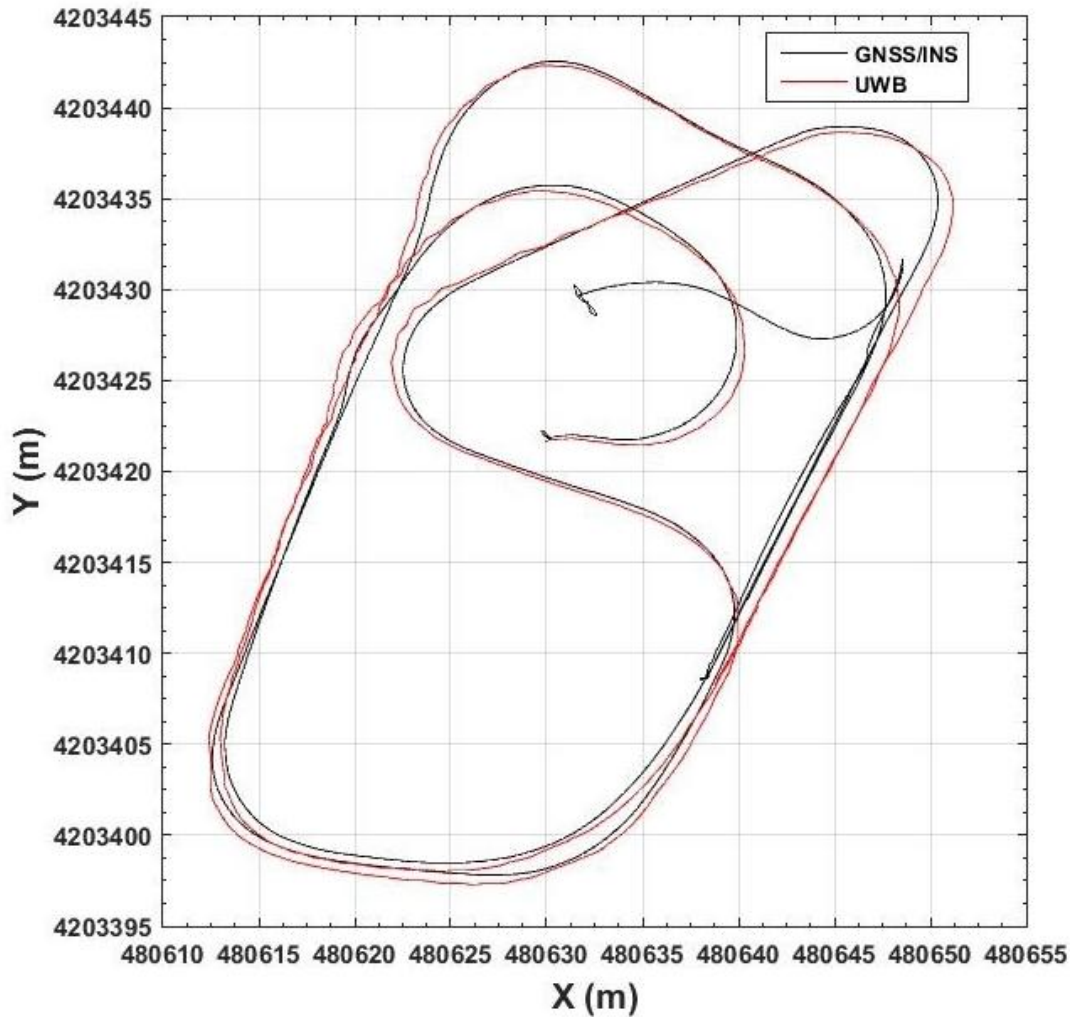
Με την πύκνωση των μετρήσεων μέσω γραμμικής παρεμβολής η τροχιά εξομαλύνεται σε μεγάλο βαθμό (Σχήμα 6.36) ενώ οι αποχές μειώνονται με τη μέση τιμή να είναι της τάξεως των 0.6 m ενώ η μέγιστες τιμές τους μόλις ξεπερνούν τα 1.3 m (Σχήμα 6.37).



Σχήμα 6.34 Τροχιά σεναρίου S-II από την εφαρμογή της τεχνικής του τριπλευρισμού
Figure 6.34 Trajectory of scenario S-II from trilateration process

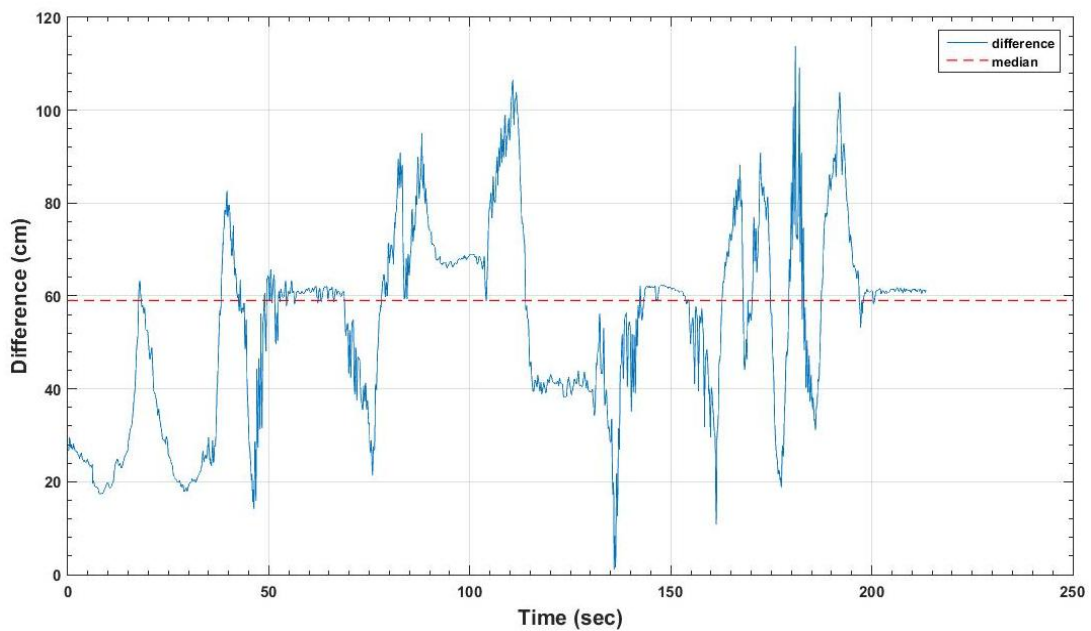


Σχήμα 6.35 Αποχή τροχιών
Figure 6.35 Trajectories difference



Σχήμα 6.36 Τροχιά σεναρίου S-II από την εφαρμογή της τεχνικής του τριπλευρισμού (πύκνωση δεδομένων μέσω γραμμικής παρεμβολής)

Figure 6.36 Trajectory of scenario S-II from trilateration process (using interpolation)

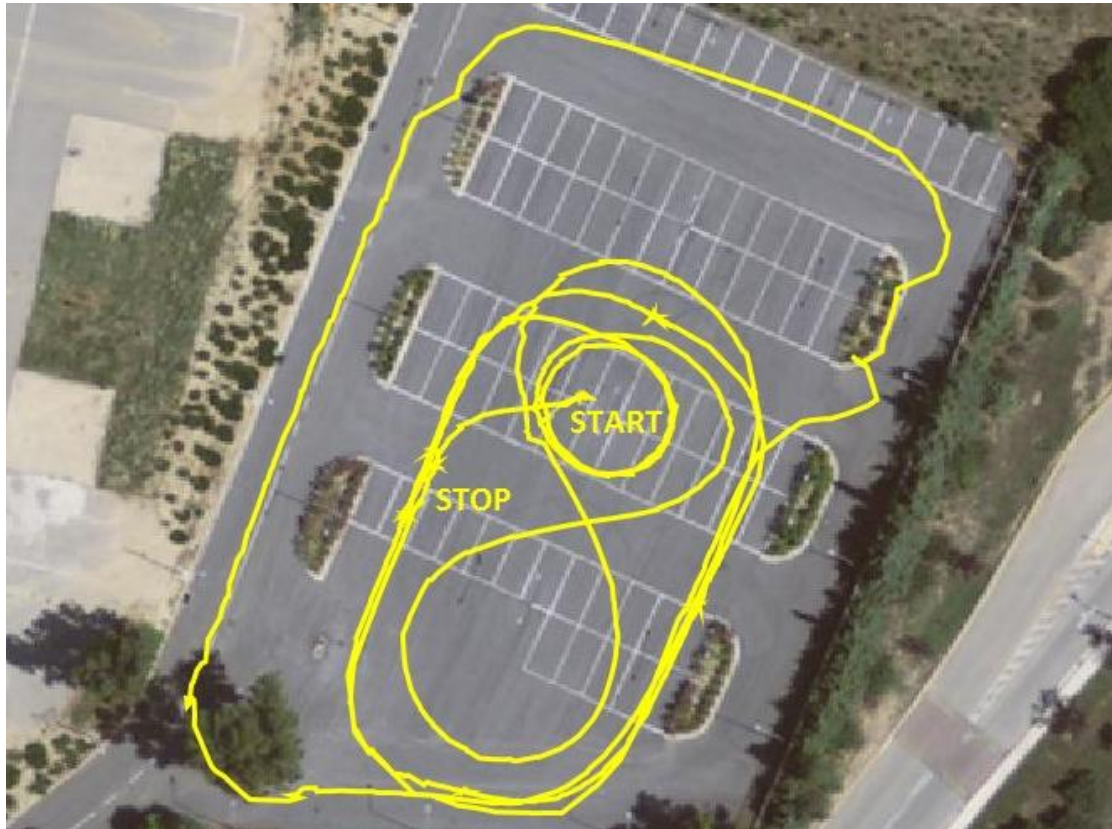


Σχήμα 6.37 Αποχή τροχιών

Figure 6.37 Trajectories difference

6.6.3 Τρίτο Σενάριο Παρατήρησης (S-III)

Λόγω των προαναφερθέντων προβλημάτων με τις μετρήσεις του συστήματος *GNSS/IMU* δεν είναι δυνατή η ποσοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων παρά μόνο η ποιοτική. Στο Σχήμα 6.38 φαίνεται η τροχιά που διέγραψε στον χώρο εκτέλεσης του πειράματος το όχημα καταγραφής βάσει των μετρήσεων του συστήματος *UWB*.

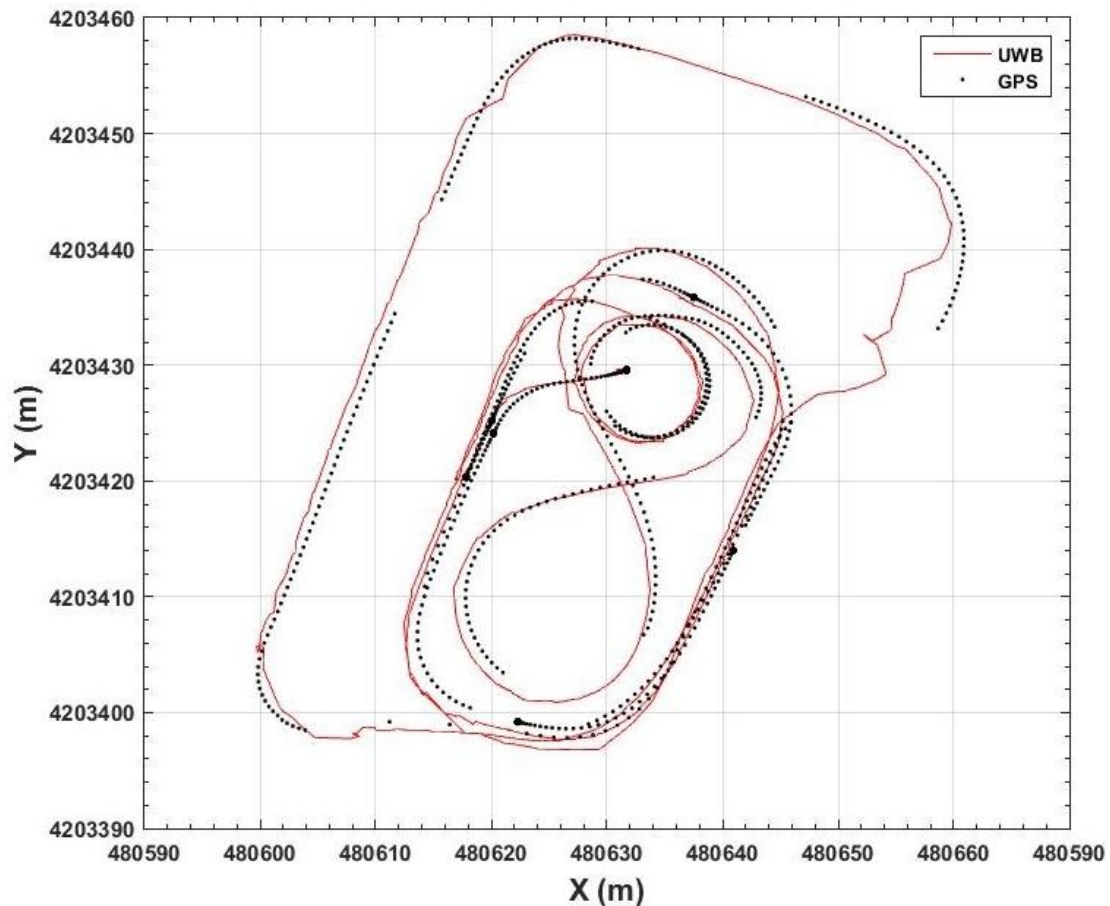


Σχήμα 6.38 Τροχιά σεναρίου S-III από μετρήσεις του συστήματος *UWB*
Figure 6.38 Trajectory of scenario S-III from *UWB* measurements

Στο Σχήμα 6.39 απεικονίζεται η τροχιά του οχήματος καταγραφής όπως αυτή προέκυψε από τις μετρήσεις του συστήματος *UWB* με συντεταγμένες των σταθερών πομποδεκτών αυτές που προέκυψαν από τις μετρήσεις με το αποστασιόμετρο, καθώς και σποραδικές επιτυχείς μετρήσεις του *GPS*. Φαίνεται και εδώ να υπάρχει μια παράλληλη μετατόπιση της μια τροχιάς ως προς την άλλη όπως και στην αντίστοιχη περίπτωση στο σενάριο S-II που οφείλεται στις μετρήσεις για τη ρύθμιση του συστήματος.

Η καταγραφή της τροχιάς του οχήματος καταγραφής κατά την κίνησή του εκτός του ορθογωνίου που ορίζουν οι τέσσερις σταθεροί πομποδέκτες φαίνεται να είναι

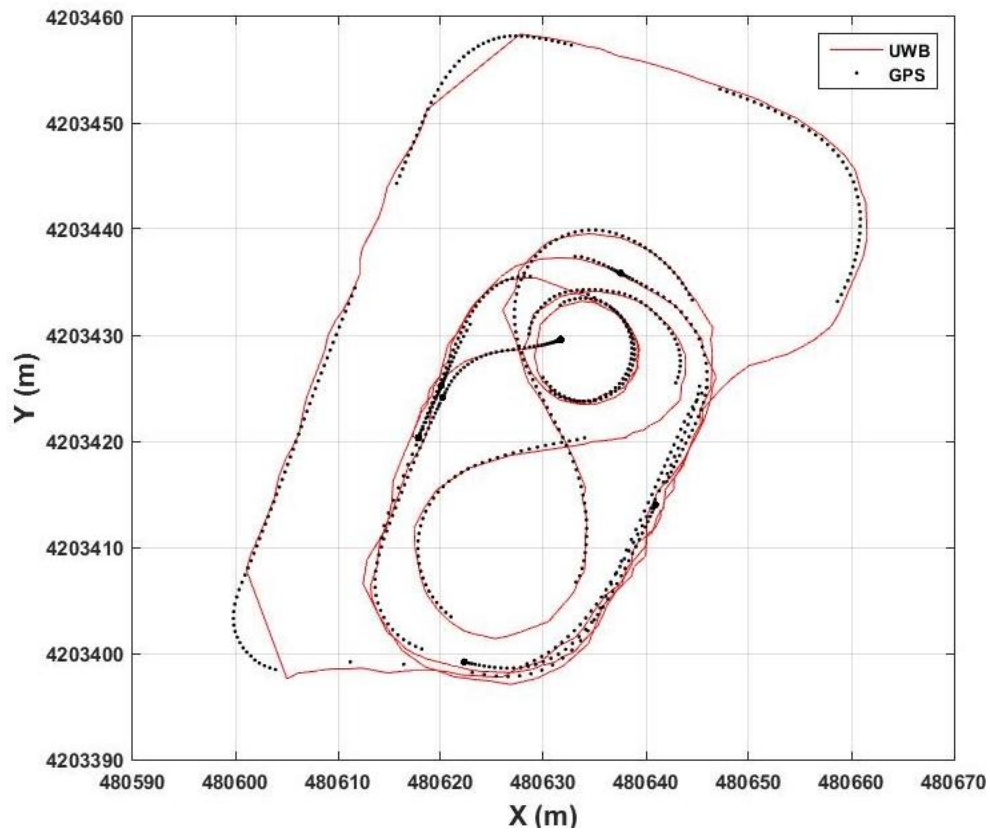
αρκετά καλή με εξαίρεση ένα τμήμα της στα βόρειο - ανατολικά όπου πιθανόν να υπήρχαν παρεμβολές από διάφορα εμπόδια. Επίσης η καταγραφή φαίνεται να είναι αξιόπιστη και στα τμήματα της τροχιάς όπου το όχημα καταγραφής κινήθηκε με μεγαλύτερη ταχύτητα ή πραγματοποίησε απότομους ελιγμούς.



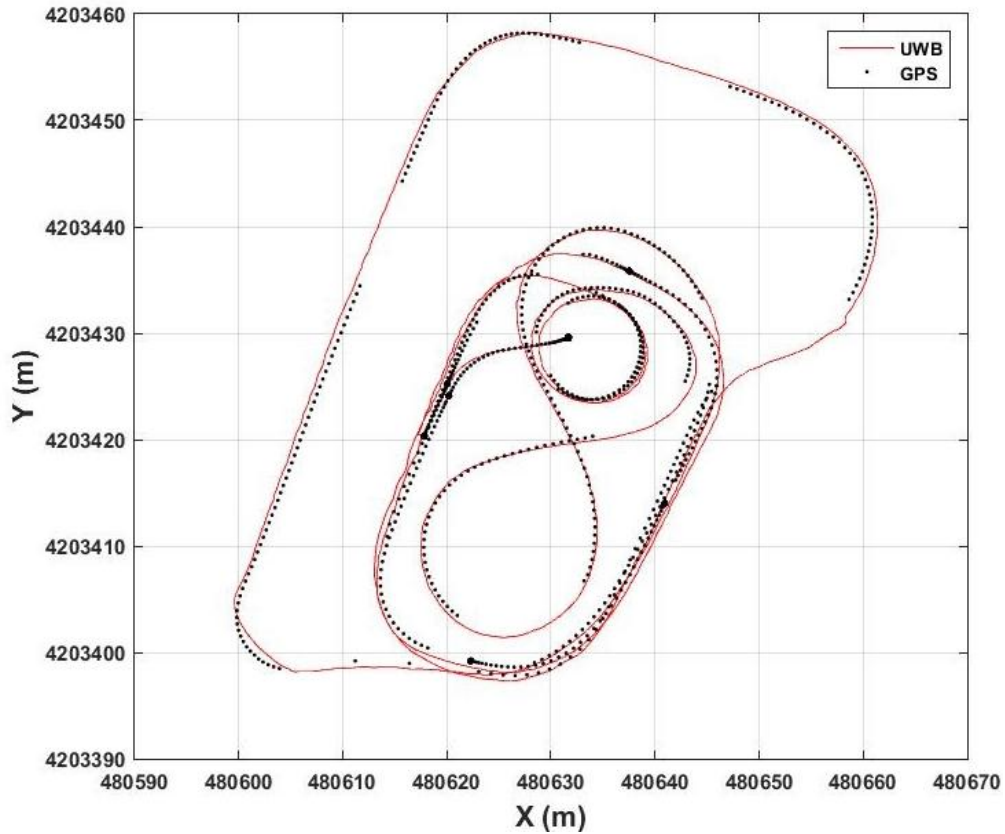
Σχήμα 6.39 Τροχιά σεναρίου S-III από το λογισμικό εντοπισμού της Time Domain Inc. με χρήση των συντεταγμένων που δόθηκαν από μετρήσεις με αποστασιόμετρο

Figure 6.39 Trajectory of scenario S-III from localization software of Time Domain Inc. with coordinates from measurements using rangefinder

Η τροχιά του αυτοκινήτου που προκύπτει εφαρμόζοντας την τεχνική του τριπλευρισμού και επίλυση με MET. (Σχήματα 6.40 και 6.41) είναι αισθητά βελτιωμένη (κυρίως όταν έχει γίνει πύκνωση των μετρήσεων με γραμμική παρεμβολή) στα σημεία που βρίσκονται εκτός του ορθογωνίου παραλληλογράμμου που ορίζουν οι τέσσερις σταθεροί πομποδέκτες. Αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές στο βόρειο - ανατολικό τμήμα της τροχιάς. Αυτό οφείλεται στο ότι λαμβάνονται υπόψη και οι μετρήσεις του τέταρτου σταθερού πομποδέκτη (UWB_104) ο οποίος βρίσκεται στη συγκεκριμένη περιοχή.



Σχήμα 6.40 Τροχιά σεναρίου S-III από την εφαρμογή της τεχνικής του τριπλευρισμού
Figure 6.40 Trajectory of scenario S-III from trilateration process



Σχήμα 6.41 Τροχιά σεναρίου S-III από την εφαρμογή της τεχνικής του τριπλευρισμού (πύκνωση δεδομένων μέσω γραμμικής παρεμβολής)
Figure 6.41 Trajectory of scenario S-III from trilateration process (using interpolation)

6.7 Συμπεράσματα

Βάσει της ανάλυσης των αποτελεσμάτων του κινηματικού πειράματος, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα όσον αφορά τη συμπεριφορά του συστήματος *UWB* υπό τις συνθήκες που περιγράφηκαν στην Ενότητα 6.1:

- υπό ιδανικές συνθήκες *LoS* είναι δυνατή η επίτευξη εξωτερικής ακρίβειας σε κινηματικό εντοπισμό της τάξεως των 0.1 m.
- το σύστημα μπορεί να αντεπεξέλθει επιτυχώς υπό διαφορετικές συνθήκες κίνησης όπως οι μεγάλες ταχύτητες, οι απότομοι ελιγμοί και επιταχύνσεις καθώς και οι κλειστές στροφές.
- η χρήση του λογισμικού εντοπισμού της εταιρείας *Time Domain Inc.* για την εξαγωγή της τροχιάς ενός κινητού δίνει την μεγαλύτερη ακρίβεια τουλάχιστον για το τμήμα που βρίσκεται εντός της περιοχής που ορίζεται από τους σταθερούς πομποδέκτες χάρη στην χρήση του φίλτρου *Kalman*.
- η επίλυση με χρήση συντεταγμένων για τους σταθερούς πομποδέκτες που δεν προέρχονται από το λογισμικό *Autosurvey*[®] φαίνεται να επηρεάζει αρνητικά την ακρίβεια της λύσης ακόμη και αν αυτές είναι μεγαλύτερης ακρίβειας.
- οι μετρήσεις για τη ρύθμιση του συστήματος έχουν αρνητική επίδραση στην αξιοπιστία του τελικού αποτελέσματος τουλάχιστον με τη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την πειραματική εφαρμογή.
- ο εντοπισμός με την εφαρμογή της τεχνικής του εντοπισμού με τέσσερις σταθερούς πομποδέκτες (επίλυση με τη *MET*) δεν βελτιώνει την ακρίβεια του, ακόμη και αν προηγηθεί πύκνωση των μετρήσεων με γραμμική παρεμβολή, για την περιοχή που βρίσκεται εντός του ορθογωνίου παραλληλογράμμου που ορίζουν οι σταθεροί πομποδέκτες. Αντίθετα βελτιώνει αισθητά το αποτέλεσμα σε τμήματα της τροχιάς που βρίσκονται εκτός καθώς δίνει λύση στην περίπτωση που οι μετρήσεις από κάποιον πομποδέκτη εμπεριέχουν σημαντικό σφάλμα ή είναι αποτυχημένες λόγω συνθηκών *NLoS*.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΕΤΑΙΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

7.1 Συμπεράσματα

Αυτή η εργασία πραγματεύεται μεθοδολογίες και τεχνολογίες εντοπισμού σε κλειστούς χώρους με έμφαση σε συστήματα ραδιοσημάτων *RF* υπερ-ευρείας ζώνης (UWB). Ειδικότερα η εργασία εστιάζει στη διεξοδική μελέτη το συστήματος UWB *PulsON® 410, Time Domain Inc.*. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην αξιολόγηση του συστήματος ως προς την δυνατότητα, αφενός μέτρησης αποστάσεων (ακρίβεια, αξιοπιστία, διαθεσιμότητα), και αφετέρου, τον κινηματικό εντοπισμό οχήματος σε συνθήκες χαμηλής δυναμικής. Επισημαίνεται ότι ο έλεγχος αφορά σε συνθήκες λήψης ελεύθερες εμποδίων και σε ανοικτό περιβάλλον. Με αυτόν τον τρόπο εξετάζονται οι μέγιστες δυνατότητές του σε εντοπισμό της υπόψη τεχνολογίας.

Συνοψίζοντας, προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα σχετικά με τις επιδόσεις του συστήματος. Κατά την μέτρηση αποστάσεων παρατηρείται ότι για αποστάσεις άνω των 3 m και έως 100 m, επιτυγχάνεται εξωτερική ακρίβεια της τάξεως των 0.01 m, ενώ για αποστάσεις μικρότερες των 5 m και έως 720 m, η εξωτερική ακρίβεια είναι της τάξεως των 0.04 m. Ως προς την εσωτερική ακρίβεια του συστήματος, για μετρήσεις αποστάσεων από 3 m έως 720 m, η τυπική απόκλιση είναι της τάξεως των 0.015 m για προσανατολισμό κεραιών στη ΘΕΣΗ I και μέθοδο μέτρησης *FRE*. Τέλος, η διαθεσιμότητα του συστήματος αγγίζει το 100% για αποστάσεις έως 200 m, ενώ στη συνέχεια μειώνεται καθώς αυξάνεται η απόσταση κυμαινόμενη από 25% έως 75%, αναλόγως του προσανατολισμού των κεραιών, για αποστάσεις της τάξεως των 700 m.

Οι επιδόσεις του συστήματος σε κινηματικές εφαρμογές είναι εξωτερικής ακρίβειας της τάξεως των 0.1 m.

Τα παραπάνω καθιστούν το σύστημα *PulsON® 410* αξιόπιστη λύση για εφαρμογές εντοπισμού σε ανοικτό περιβάλλον και συνθήκες οπτικής επαφής μεταξύ των πομποδεκτών.

7.2 Προτάσεις για Περεταίρω Διερεύνηση

Η τεχνολογία *UWB* καλείται να δώσει λύσεις σε προβλήματα που αφορούν τον εντοπισμό σε κλειστούς χώρους, είτε αυτόνομα, είτε συνδυαστικά με ένα άλλο σύστημα (*GNSS*, *INS* κ.α.). Για αυτό το λόγο, μετά την αξιολόγηση του συστήματος *UWB* σε ιδανικές συνθήκες, το ζητούμενο είναι να ελεγχθεί η αξιοπιστία του συστήματος σε κλειστούς χώρους.

Αρχικά προτείνεται κατάλληλη πειραματική εφαρμογή που να περιλαμβάνει κινηματικό και στατικό εντοπισμό σε ανοικτό χώρο με την παρουσία στατικών και κινητών εμποδίων διαφορετικού μεγέθους και υλικού, προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά του σήματος *RF* και η επίδραση αυτών των εμποδίων στην ακρίβεια του εντοπισμού. Ως επόμενο βήμα, προτείνεται η αξιολόγηση του συστήματος σε κινηματικό εντοπισμό σε κλειστό χώρο και τέλος μια συνδυαστική εφαρμογή εντοπισμού σε κλειστό χώρο με ένα άλλο σύστημα (*GNSS*, *INS* κ.α.).

Μέσω των παραπάνω πειραματικών εφαρμογών μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τον τρόπο λειτουργίας και την ακρίβεια του συστήματος *UWB* σε κλειστούς χώρους από τα οποία θα προκύψουν κανόνες για την πλέον κατάλληλη κατά περίπτωση εγκατάσταση και διάταξη τέτοιων συστημάτων σε κλειστούς χώρους για εφαρμογές εντοπισμού σαν αυτές που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 3, επιτυγχάνοντας τον πλέον κατάλληλο συνδυασμό αποδοτικότητας, ακρίβειας, αξιοπιστίας και χαμηλού κόστους.

Βιβλιογραφία

- Dr. Rainer Mautz, *Indoor Positioning Technologies*, February 2012
- Steven T. Ostrowski, B.S., *Ultra Wideband (UWB) Sensor Integration and Application in GPS- Compromised Environments*, The Ohio State University, 2015
- Mohammadreza Yavari and Bradford G. Nickerson, *Ultra Wideband Wireless Positioning Systems*, March 27, 2014
- Fredrik Olsson, Jouni Rantakokko, Jonas Nygards, *Cooperative Localization Using a Foot-mounted Inertial Navigation System and Ultra Wideband Ranging*, 2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, 27th–30th October 2014
- Θώμος Ι. Χρήστος, *Δέκτες/ Αποδιαμορφωτές Βασικής Ζώνης για Ασύρματα Συστήματα Υπερ-Ευρείας Ζώνης (Ultra Wideband – UWB)*, Πάτρα, Δεκέμβριος 2011
- Βασίλειος Α. Θεοδωρέλος, *Εφαρμογή της Θεωρίας Ειδώλων για τον Υπολογισμό της Συνεισφοράς του Εδάφους σε Τρισδιάστατο Πρόβλημα Ραδιοκάλυψης σε Αστικά Περιβάλλοντα*, Αθήνα, Δεκέμβριος 2007
- Α. Παναγόπουλος, *Wireless Technologies*
- Brandon Dewberry & Alan Petroff, *Precision Navigation with AD-HOC Autosurvey using UltraWideBand Two-Way Ranging Network*, Huntsville, Alabama USA
- *320-0289D P410 Data Sheet*, Time Domain 2015
- *320-0303C CAT User Guide*, Time Domain 2015
- *320-0320A RCM - RangeNet RET User Guide*, Time Domain 2015
- *320-0320B RCM - RangeNet RET User Guide*, Time Domain 2015

- *320-0321A Localization Demo User Guide*, Time Domain 2015
- *TD_Broadspec_Antenna*, Time Domain 2015
- *TD_DS_P410_RCM_FA*, Time Domain 2015
- *Time Domain UWB - Part 2 Definition & Advantages*, Time Domain 2015
- *Time Domain UWB - Part 3 TW-TOF Ranging*, Time Domain 2015
- *Time Domain UWB - Part 4 Tracking Architectures TW-TOF*, Time Domain 2015
- <http://ubisense.net/en>, Web July 4, 2016
- <http://www.decawave.com>, Web July 4, 2016
- <https://www.zebra.com/gb/en.html>, Web July 4, 2016
- <http://nanotron.com/EN/index.php>, Web July 4, 2016
- <http://www.timedomain.com/>, Web July 4, 2016
- *Trilateration*, <https://en.wikipedia.org/wiki/Trilateration>, Web July 4, 2016
- *Fresnel Zone*, https://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_zone, Web July 4, 2016

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ (m)	ΑΛΗΘΗΣ (m)	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (m)	ΔΙΑΜΕΣΟΣ ΤΙΜΗ (m)	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ (m)
2	1.880	1.901	1.884	0.024
		1.886	1.879	0.020
		1.878	1.879	0.007
		1.875	1.877	0.012
		1.871	1.876	0.014
3	3.130	3.130	3.133	0.012
		3.132	3.133	0.007
		3.131	3.132	0.004
		3.131	3.132	0.004
		3.129	3.130	0.009
10	9.780	9.776	9.776	0.002
		9.774	9.774	0.003
		9.774	9.774	0.003
		9.774	9.774	0.003
		9.773	9.773	0.002
20	19.709	19.714	19.714	0.002
		19.712	19.712	0.004
		19.712	19.712	0.002
		19.711	19.712	0.004
		19.710	19.711	0.006
50	49.575	49.575	49.581	0.015
		49.575	49.580	0.014
		49.575	49.580	0.014
		49.575	49.579	0.013
		49.573	49.578	0.015
100	99.330	99.341	99.344	0.011
		99.337	99.342	0.015
		99.336	99.341	0.015
		99.330	99.340	0.018
		99.322	99.339	0.022
200	200.850	200.868	200.868	0.002
		200.868	200.868	0.002
		200.868	200.868	0.003
		200.867	200.867	0.004
		200.866	200.866	0.005
300	299.416	299.437	299.437	0.003
		299.397	299.435	0.279
		299.364	299.412	0.133
		299.342	299.411	0.291
		299.297	299.398	0.327
400	400.138	400.164	400.159	0.018
		400.157	400.157	0.004
		400.157	400.158	0.006
		400.156	400.156	0.005
		400.158	400.158	0.021
500	500.959	500.985	500.985	0.002
		500.985	500.985	0.002
		500.981	500.980	0.002
		500.980	500.980	0.002
		500.978	500.978	0.004
720	718.730	718.768	718.768	0.003
		718.761	718.768	0.096
		718.767	718.766	0.005
		718.624	718.765	0.001
		718.467	718.764	0.002

Πίνακας Α.1 Στατιστικά μεγέθη μετρήσεων αποστάσεων με τη μέθοδο PRM (Στατικό Πείραμα)
Table A.1 Statistical figures of range measurements from PRM solution (Static Experiment)

Αξιολόγηση Συστήματος UWB σε Εφαρμογές Στατικού και Κινηματικού Εντοπισμού

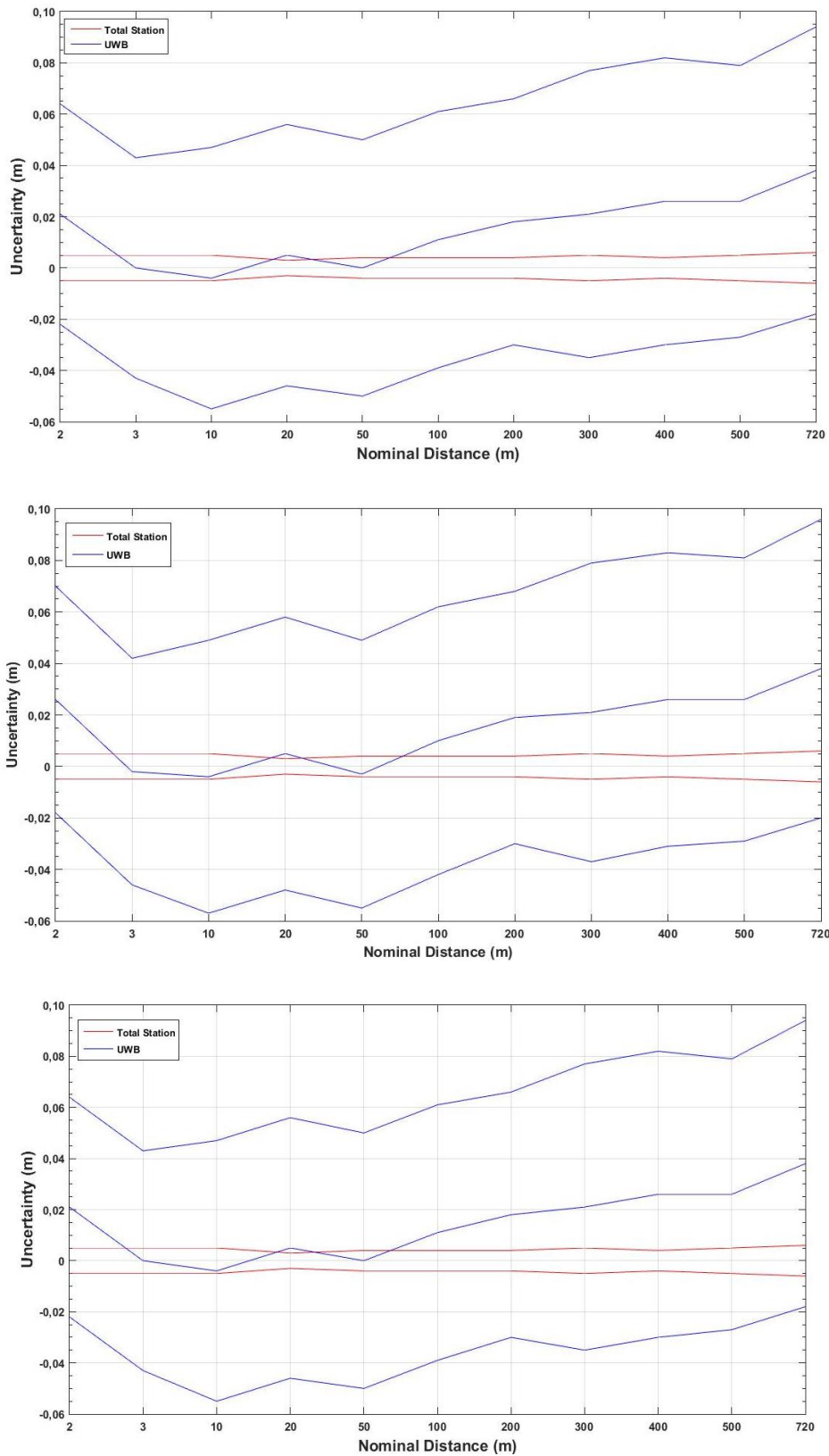
ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ (m)	ΑΛΗΘΗΣ (m)	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (m)	ΔΙΑΜΕΣΟΣ ΤΙΜΗ (m)	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ (m)
2	1.880	1.901	1.884	0.024
		1.886	1.879	0.020
		1.878	1.879	0.007
		1.875	1.877	0.012
		1.871	1.876	0.014
3	3.130	3.130	3.133	0.012
		3.132	3.133	0.007
		3.131	3.132	0.004
		3.131	3.132	0.005
10	9.780	3.129	3.130	0.009
		9.776	9.776	0.002
		9.774	9.774	0.003
		9.774	9.774	0.003
20	19.709	9.774	9.774	0.003
		9.773	9.773	0.002
		19.714	19.714	0.002
		19.712	19.712	0.004
		19.712	19.712	0.002
50	49.575	19.711	19.712	0.004
		19.710	19.711	0.006
		49.575	49.581	0.015
		49.575	49.580	0.014
		49.575	49.580	0.014
100	99.330	49.575	49.579	0.013
		49.573	49.578	0.015
		99.341	99.344	0.011
		99.337	99.342	0.015
		99.336	99.341	0.015
200	200.850	99.330	99.340	0.018
		99.322	99.339	0.022
		200.868	200.868	0.002
		200.868	200.868	0.002
		200.868	200.868	0.003
300	299.416	200.867	200.867	0.004
		200.866	200.866	0.005
		299.437	299.437	0.003
		299.397	299.435	0.279
		299.365	299.411	0.131
400	400.138	299.399	299.411	0.284
		299.306	299.401	0.322
		400.164	400.159	0.018
		400.157	400.157	0.004
		400.157	400.158	0.006
500	500.959	400.156	400.156	0.005
		400.158	400.158	0.021
		500.985	500.985	0.002
		500.985	500.985	0.002
		500.981	500.980	0.002
720	718.730	500.980	500.980	0.002
		500.978	500.978	0.004
		718.768	718.768	0.003
		718.761	718.768	0.096
		718.767	718.766	0.005
720	718.730	718.627	718.765	0.001
		718.498	718.764	0.002

Πίνακας Α.2 Στατιστικά μεγέθη μετρήσεων αποστάσεων με τη μέθοδο CRE (Στατικό Πείραμα)
Table A.2 Statistical figures of range measurements from CRE solution (Static Experiment)

Αξιολόγηση Συστήματος UWB σε Εφαρμογές Στατικού και Κινηματικού Εντοπισμού

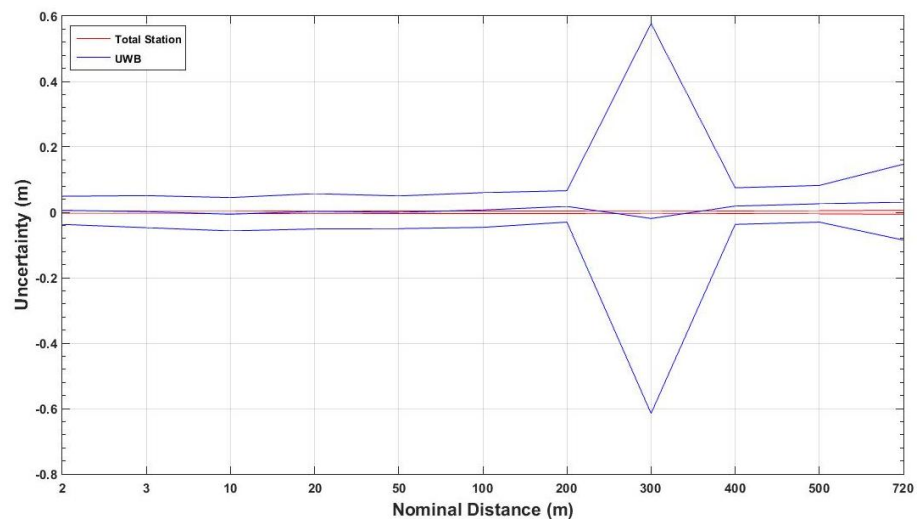
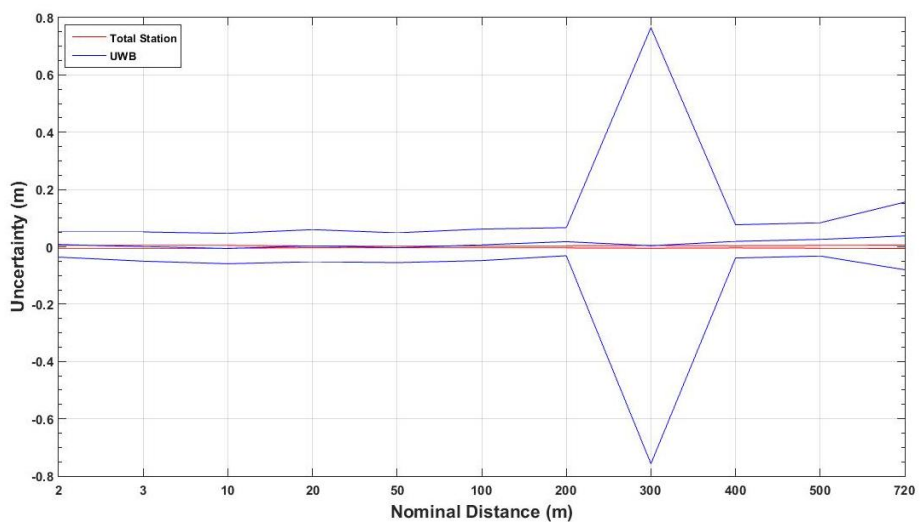
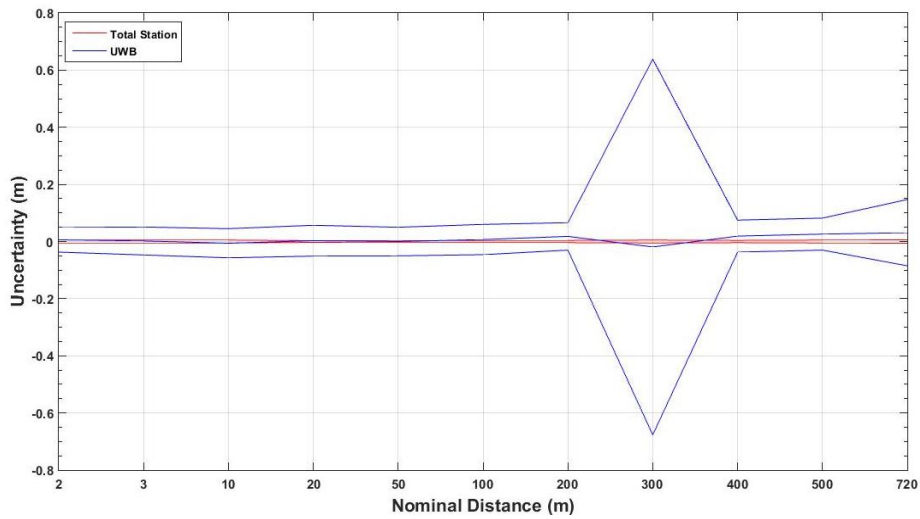
ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ (m)	ΑΛΗΘΗΣ (m)	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (m)	ΔΙΑΜΕΣΟΣ ΤΙΜΗ (m)	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ (m)
2	1.880	1.906	1.911	0.020
		1.886	1.881	0.018
		1.878	1.879	0.006
		1.875	1.877	0.011
		1.869	1.876	0.013
3	3.130	3.128	3.133	0.012
		3.131	3.133	0.007
		3.131	3.132	0.003
		3.131	3.131	0.004
10	9.780	3.129	3.130	0.008
		9.776	9.776	0.002
		9.774	9.774	0.003
		9.774	9.774	0.002
		9.774	9.774	0.002
20	19.709	9.773	9.773	0.001
		19.714	19.714	0.001
		19.713	19.713	0.002
		19.712	19.712	0.002
		19.711	19.712	0.004
50	49.575	19.710	19.711	0.004
		49.572	49.580	0.015
		49.572	49.579	0.015
		49.573	49.579	0.014
		49.574	49.578	0.012
100	99.330	49.573	49.579	0.011
		99.340	99.344	0.011
		99.337	99.342	0.013
		99.336	99.341	0.013
		99.330	99.332	0.012
200	200.850	99.321	99.323	0.019
		200.869	200.869	0.001
		200.868	200.868	0.001
		200.868	200.868	0.003
		200.867	200.867	0.003
300	299.416	200.866	200.866	0.003
		299.437	299.437	0.002
		299.420	299.435	0.080
		299.417	299.438	0.079
		299.430	299.432	0.075
400	400.138	299.401	299.434	0.205
		400.164	400.161	0.013
		400.157	400.157	0.003
		400.157	400.157	0.004
		400.156	400.156	0.003
500	500.959	400.158	400.158	0.018
		500.985	500.985	0.002
		500.985	500.985	0.001
		500.981	500.981	0.002
		500.980	500.980	0.002
720	718.730	500.978	500.979	0.003
		718.768	718.768	0.003
		718.768	718.767	0.004
		718.767	718.766	0.004
		718.765	718.765	0.002
		718.764	718.764	0.006

Πίνακας Α.3 Στατιστικά μεγέθη μετρήσεων αποστάσεων με τη μέθοδο FRE (Στατικό Πείραμα)
Table A.3 Statistical figures of range measurements from FRE solution (Static Experiment)



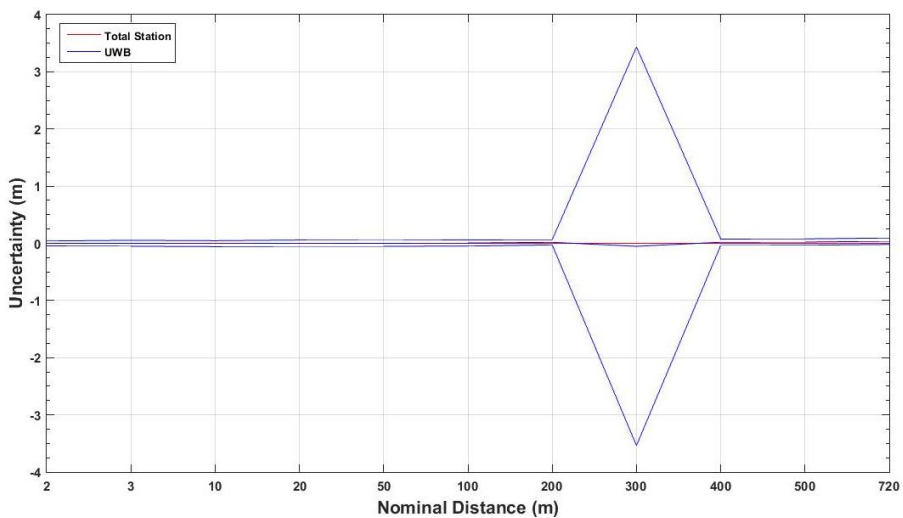
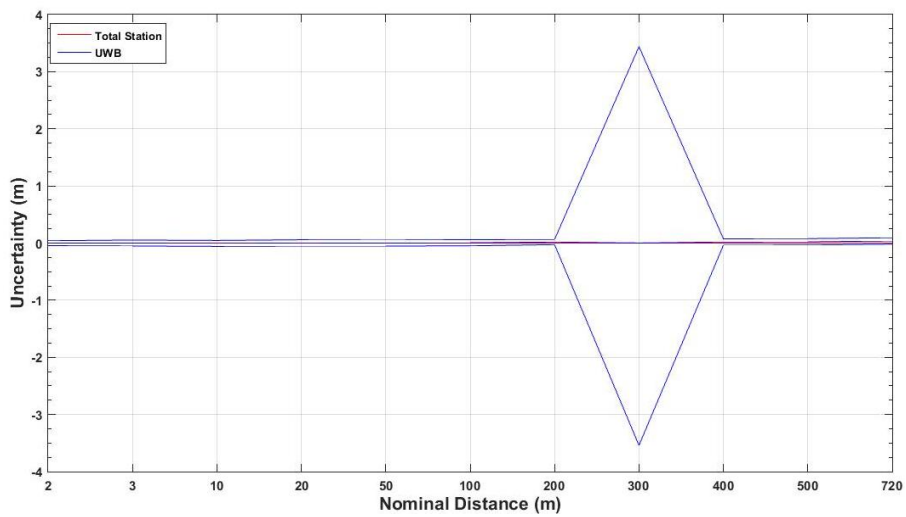
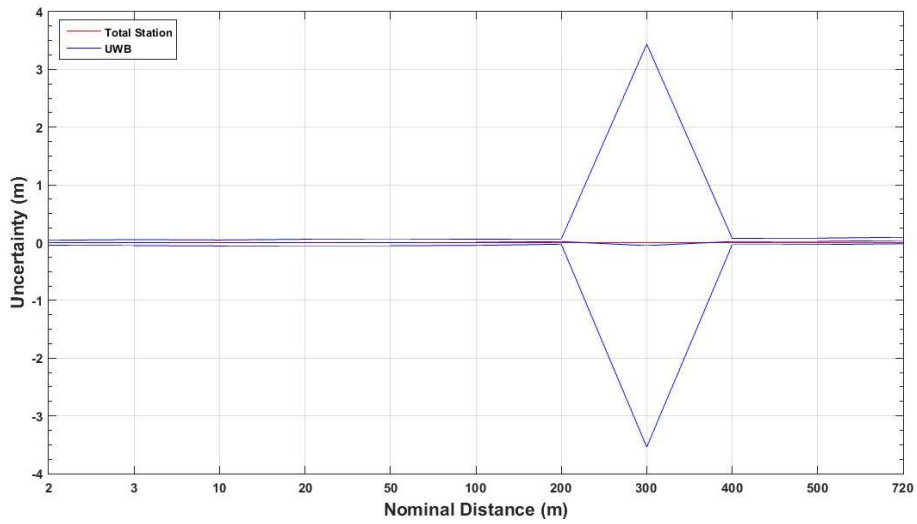
Σχήμα Α.1 Εύρος αβεβαιότητας μετρήσεων για την ΘΕΣΗ Ι των κεραιών με τις μεθόδους CRE, FRE, PRM

Figure A.1 Uncertainty range of measurements for antennas orientation I and CRE, FRE, PRM solutions



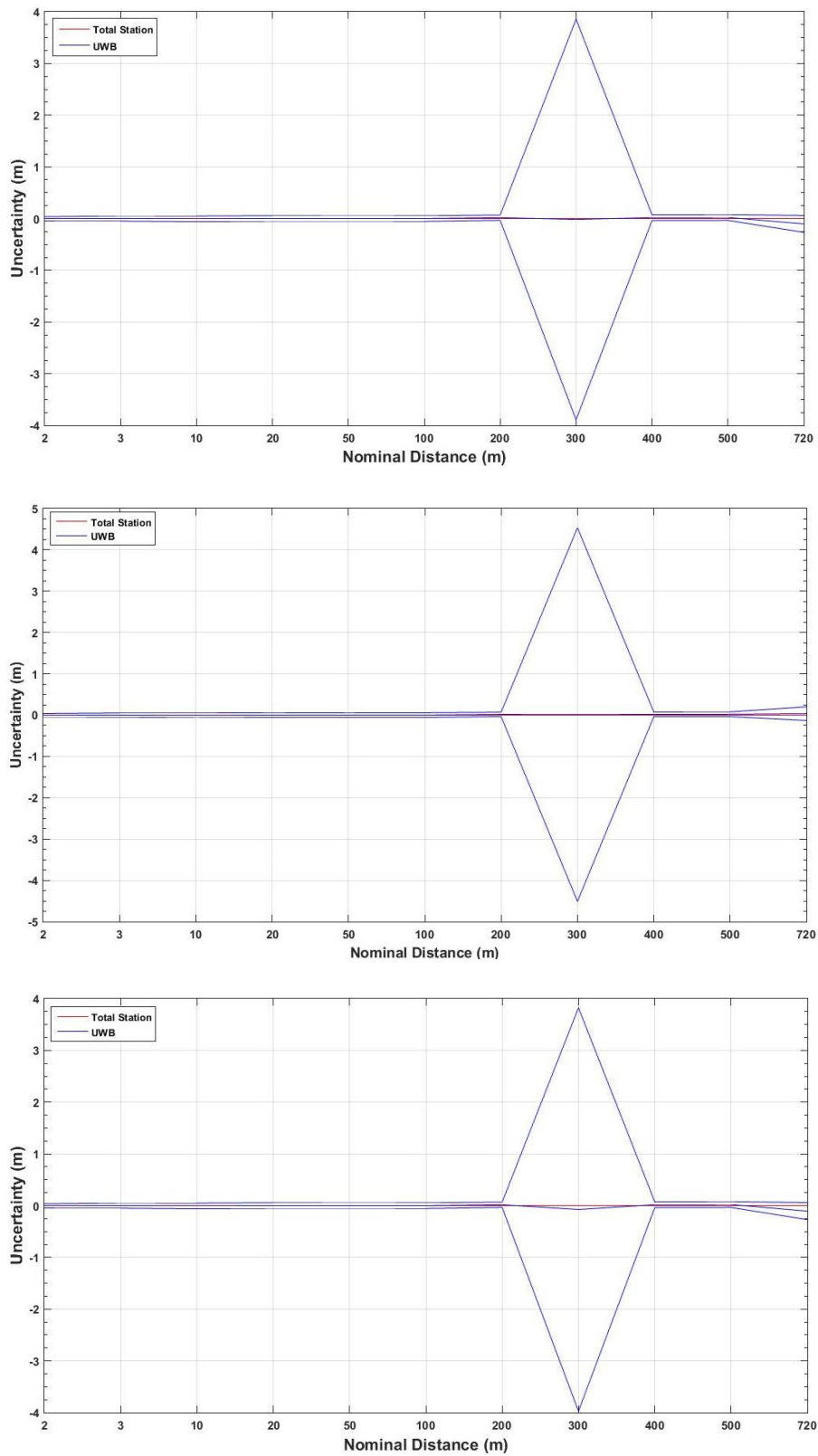
Σχήμα A.2 Εύρος αβεβαιότητας μετρήσεων για την ΘΕΣΗ II των κεραιών με τις μεθόδους CRE, FRE, PRM

Figure A.2 Uncertainty range of measurements for antennas orientation II and CRE, FRE, PRM solutions



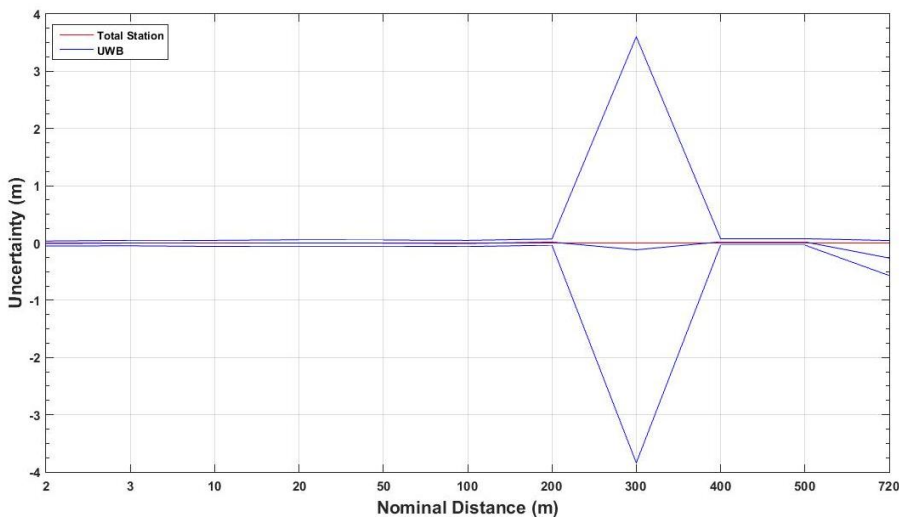
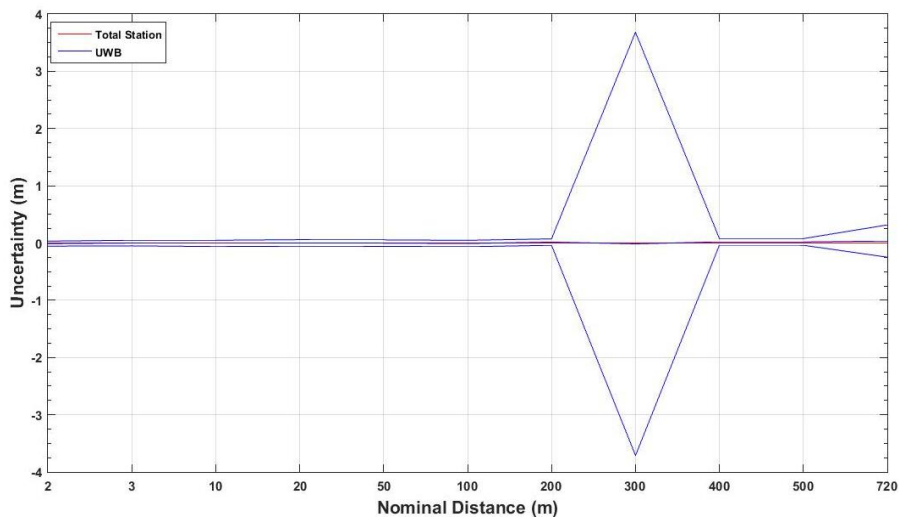
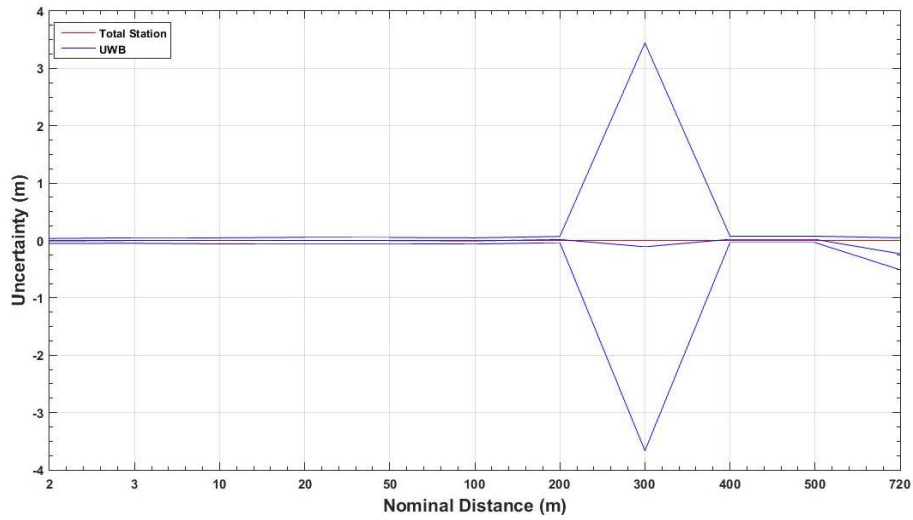
Σχήμα A.3 Εύρος αβεβαιότητας μετρήσεων για την ΘΕΣΗ III των κεραιών με τις μεθόδους CRE, FRE, PRM

Figure A.3 Uncertainty range of measurements for antennas orientation III and CRE, FRE, PRM solutions



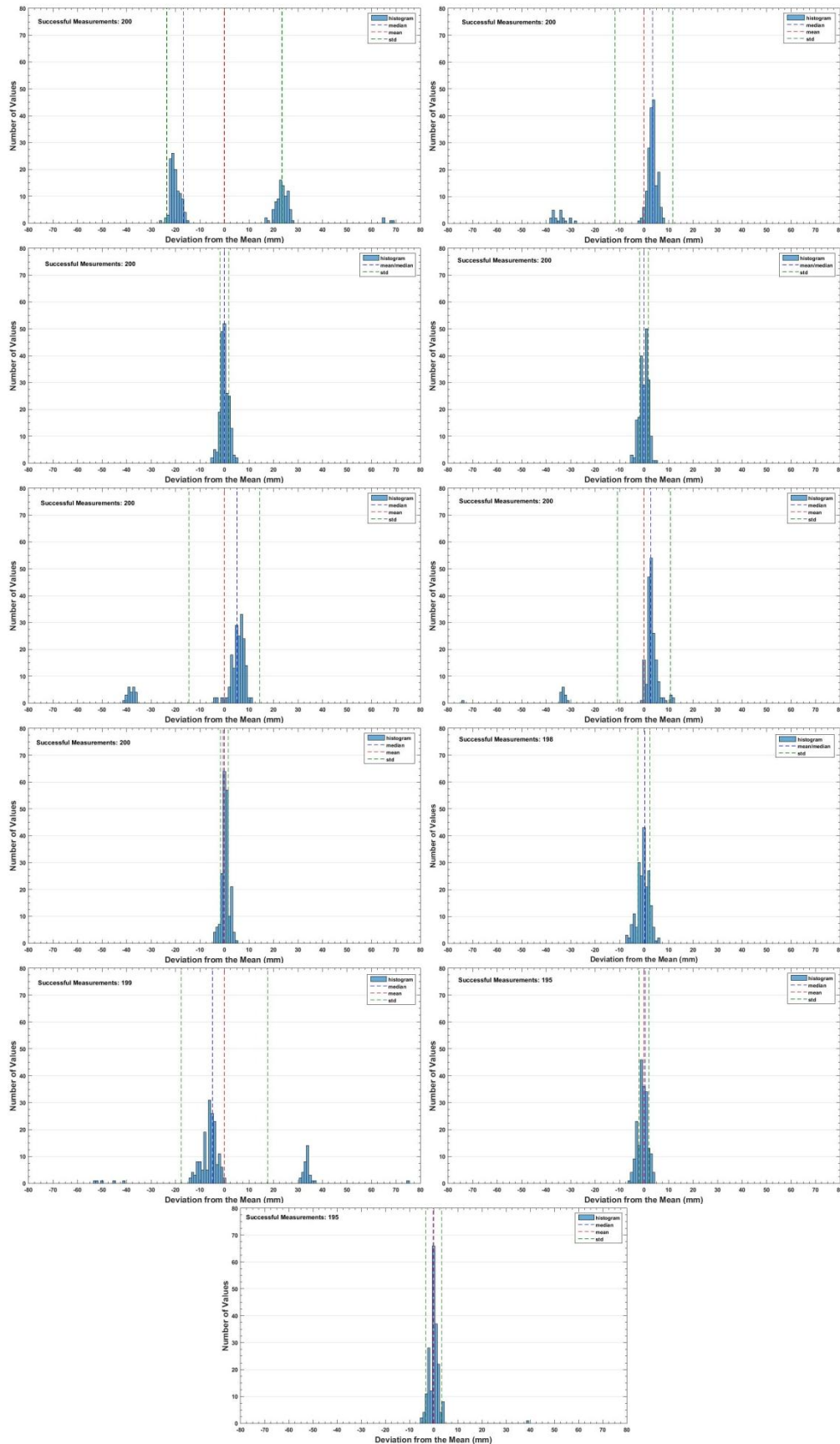
Σχήμα A.4 Εύρος αβεβαιότητας μετρήσεων για την ΘΕΣΗ IV των κεραιών με τις μεθόδους CRE, FRE, PRM

Figure A.4 Uncertainty range of measurements for antennas orientation IV and CRE, FRE, PRM solutions



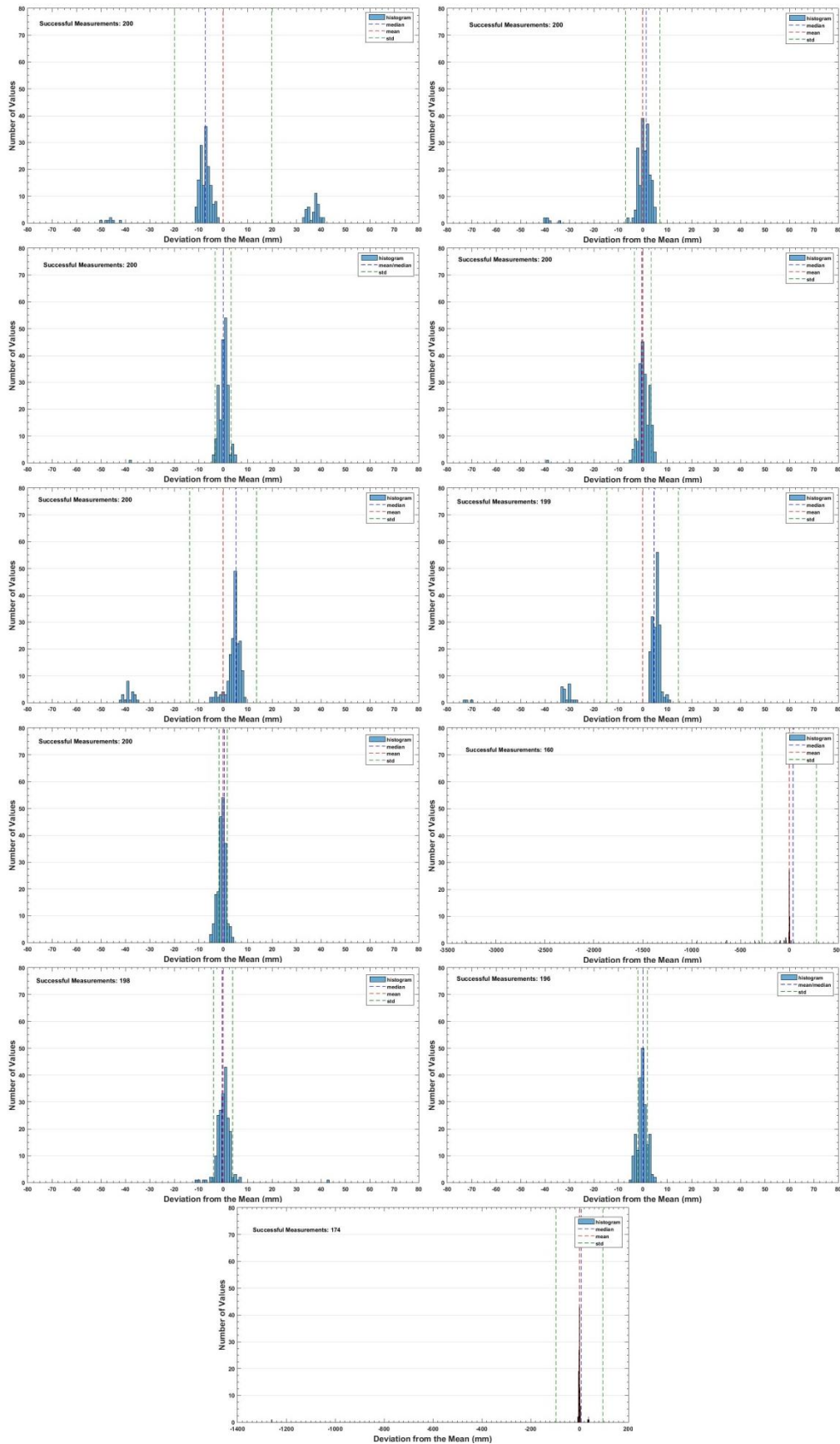
Σχήμα A.5 Εύρος αβεβαιότητας μετρήσεων για την ΘΕΣΗ V των κεραιών με τις μεθόδους CRE, FRE, PRM

Figure A.5 Uncertainty range of measurements for antennas orientation V and CRE, FRE, PRM solutions



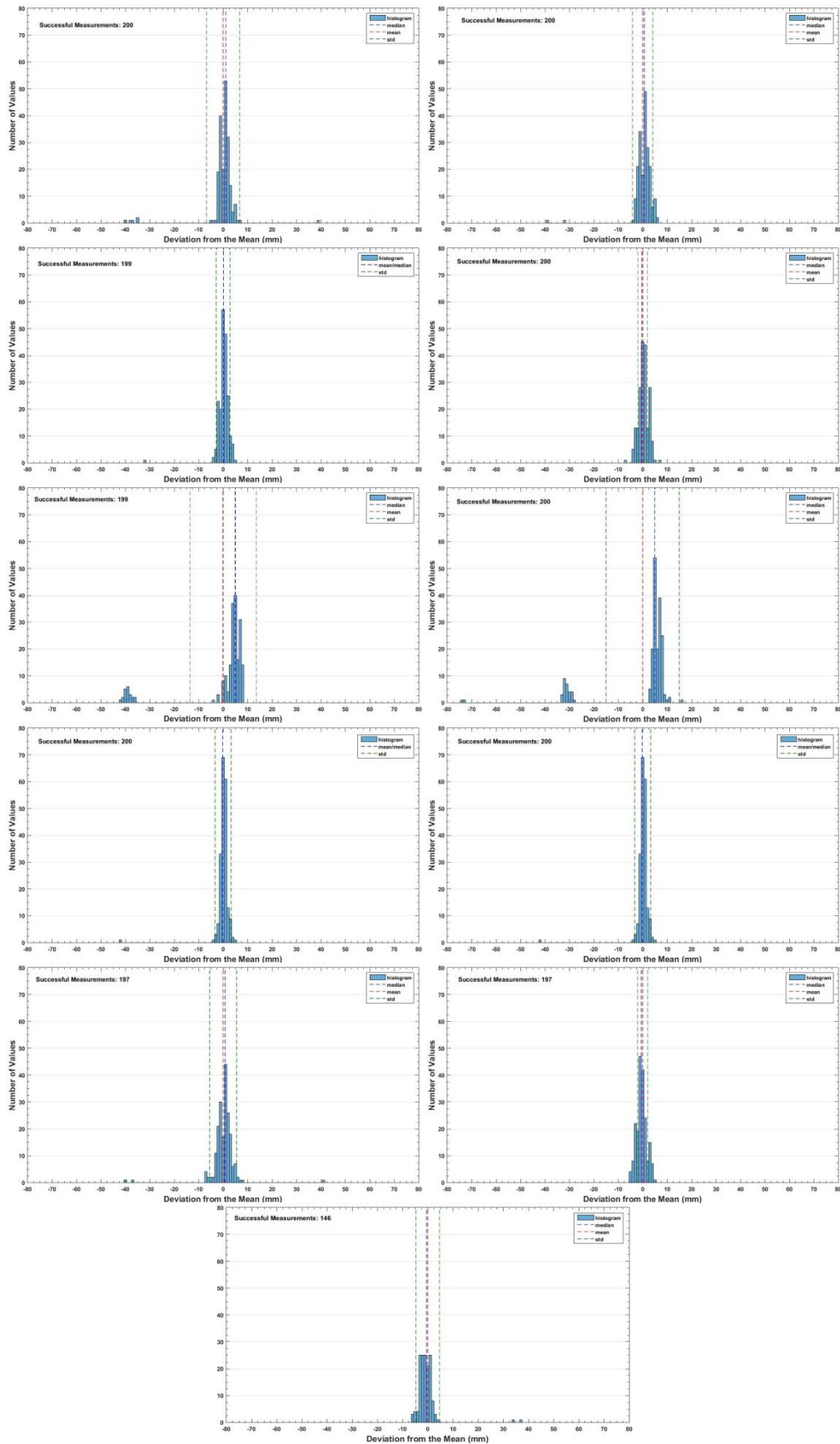
Σχήμα Α.6 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραίες στη ΘΕΣΗ Ι και μέθοδο μέτρησης PRM

Figure A.6 Distribution histogram of the difference between the measurements deviation and the mean value for antennas orientation I and PRM solution



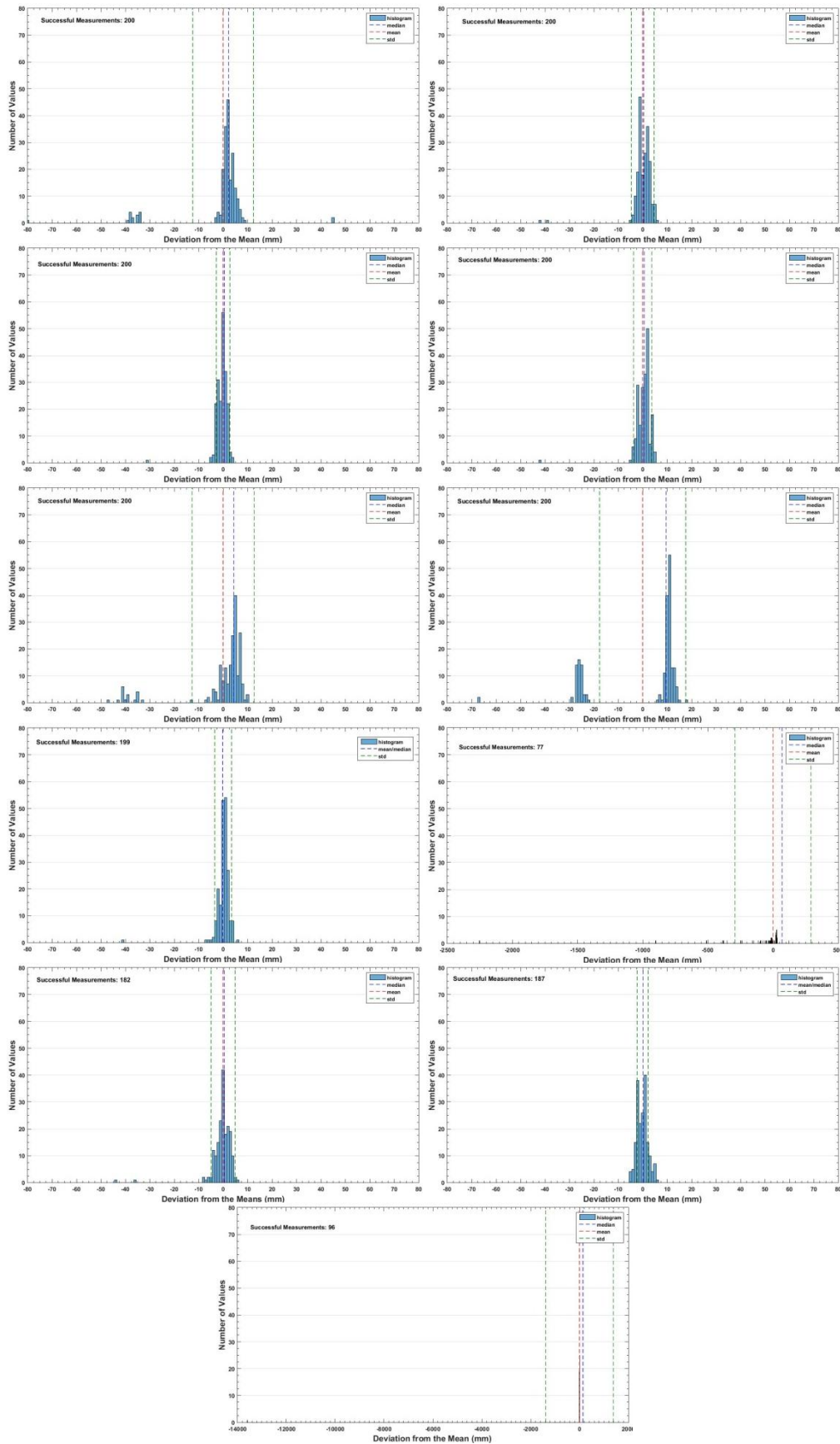
Σχήμα Α.7 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραίες στη ΘΕΣΗ II και μέθοδο μέτρησης PRM

Figure A.7 Distribution histogram of the difference between the measurements deviation and the mean value for antennas orientation II and PRM solution



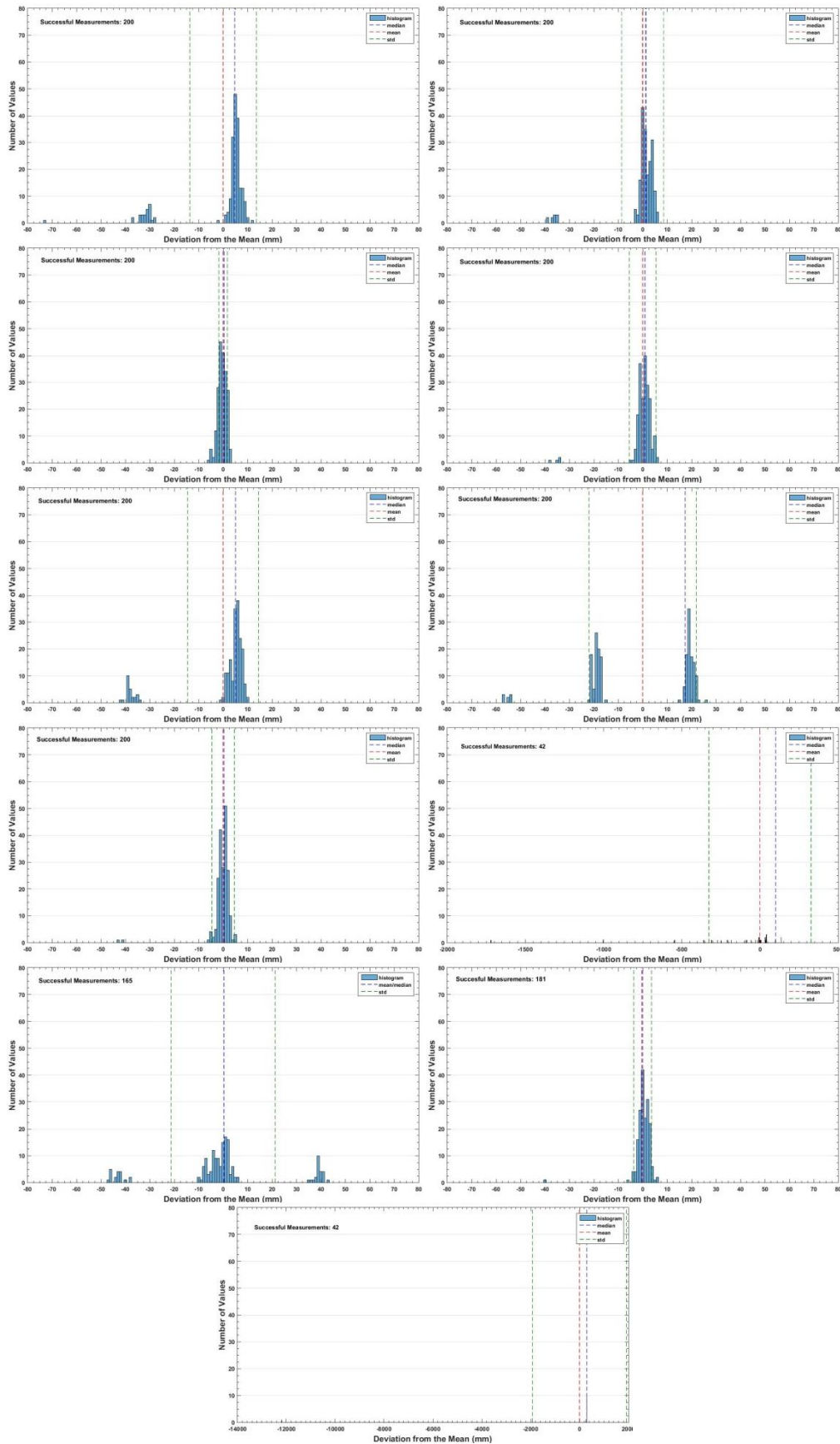
Σχήμα Α.8 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραίες στη ΘΕΣΗ III και μέθοδο μέτρησης PRM

Figure A.8 Distribution histogram of the difference between the measurements deviation and the mean value for antennas orientation III and PRM solution



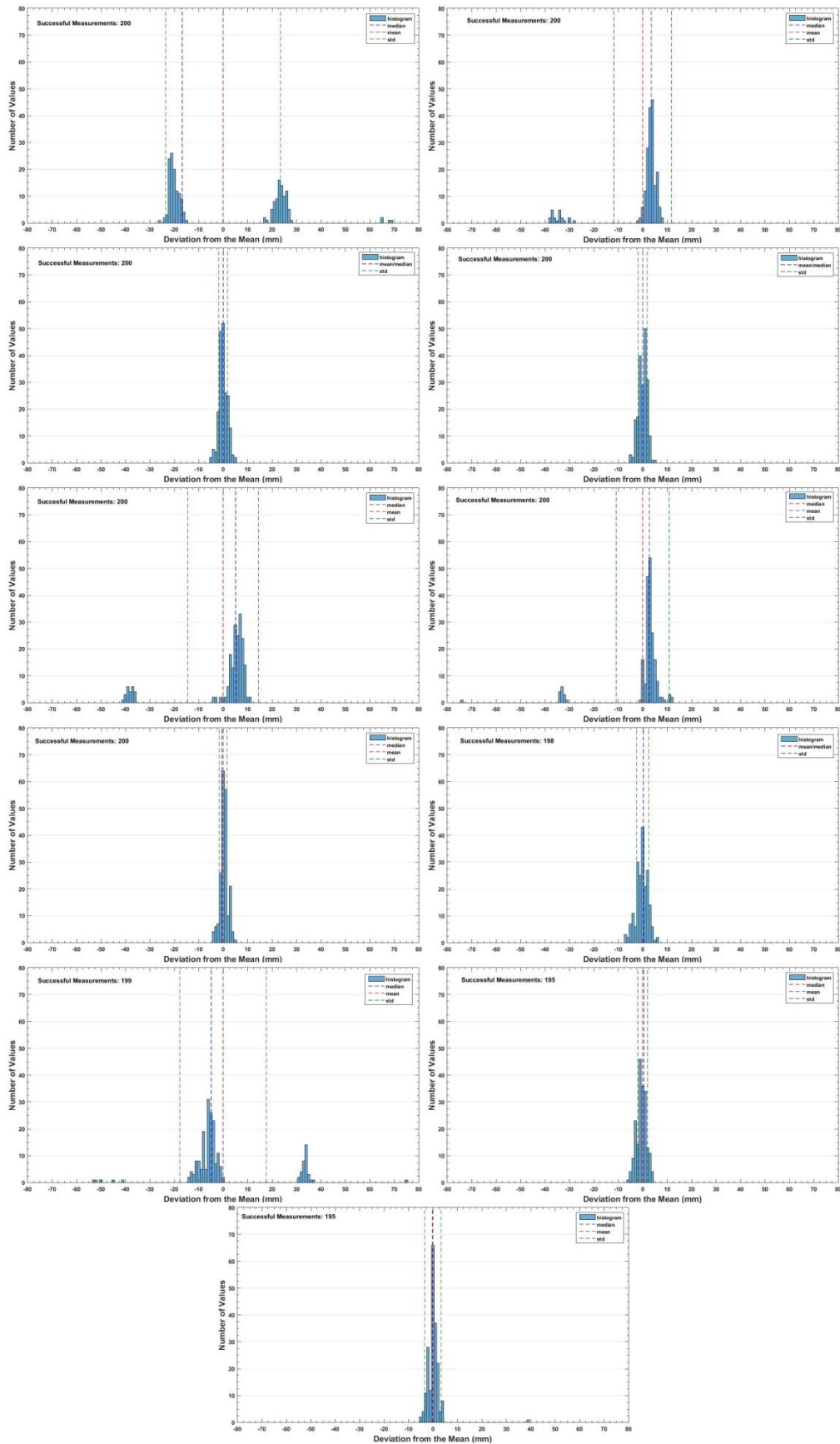
Σχήμα A.9 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραίες στη ΘΕΣΗ IV και μέθοδο μέτρησης PRM

Figure A.9 Distribution histogram of the difference between the measurements deviation and the mean value for antennas orientation IV and PRM solution



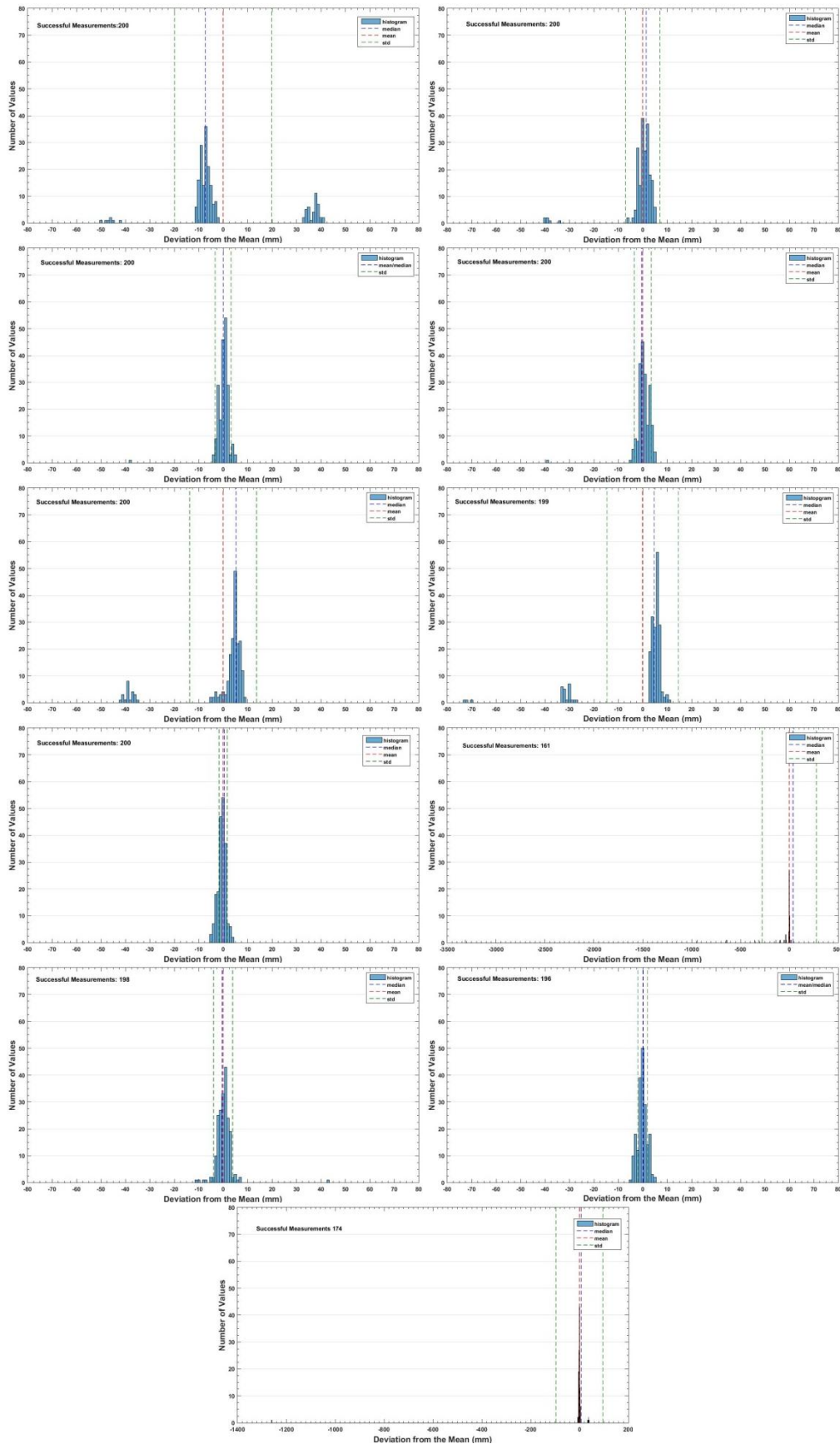
Σχήμα A.10 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραίες στη ΘΕΣΗ V και μέθοδο μέτρησης PRM

Figure A.10 Distribution histogram of the difference between the measurements deviation and the mean value for antennas orientation V and PRM solution



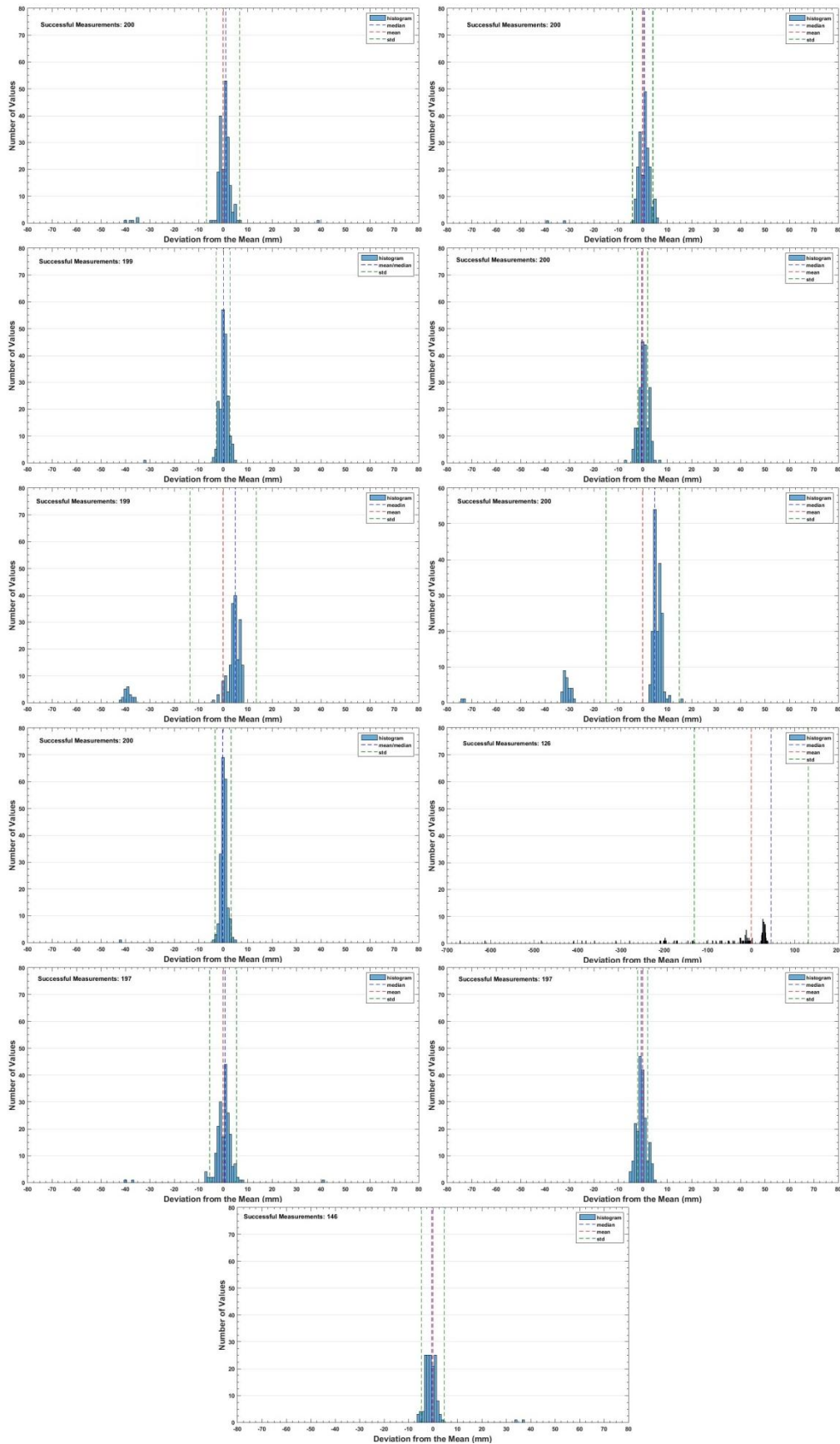
Σχήμα A.11 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραίες στη ΘΕΣΗ I και μέθοδο μέτρησης CRE

Figure A.11 Distribution histogram of the difference between the measurements deviation and the mean value for antennas orientation I and CRE solution



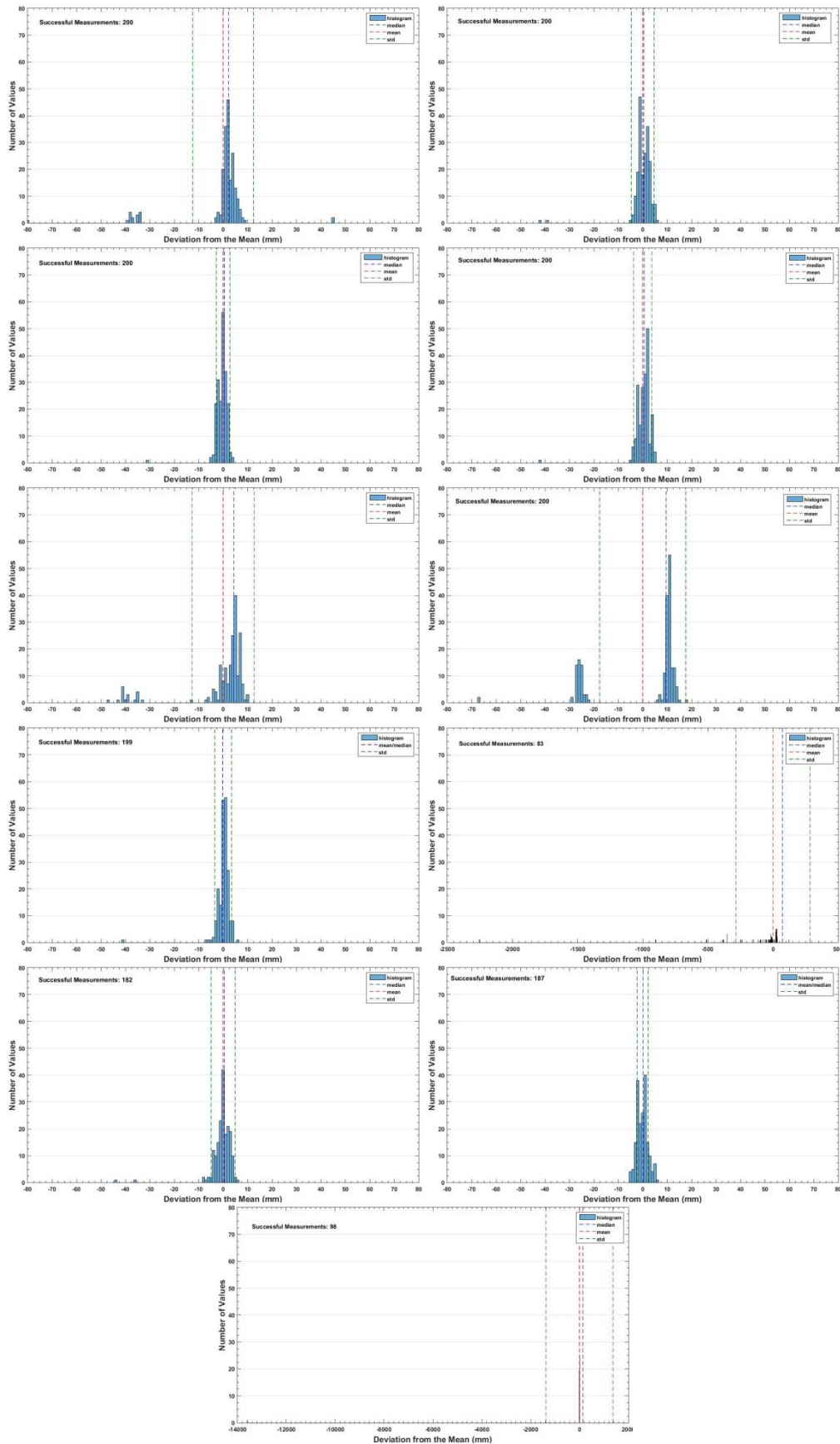
Σχήμα A.12 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραίες στη ΘΕΣΗ II και μέθοδο μέτρησης CRE

Figure A.12 Distribution histogram of the difference between the measurements deviation and the mean value for antennas orientation II and CRE solution



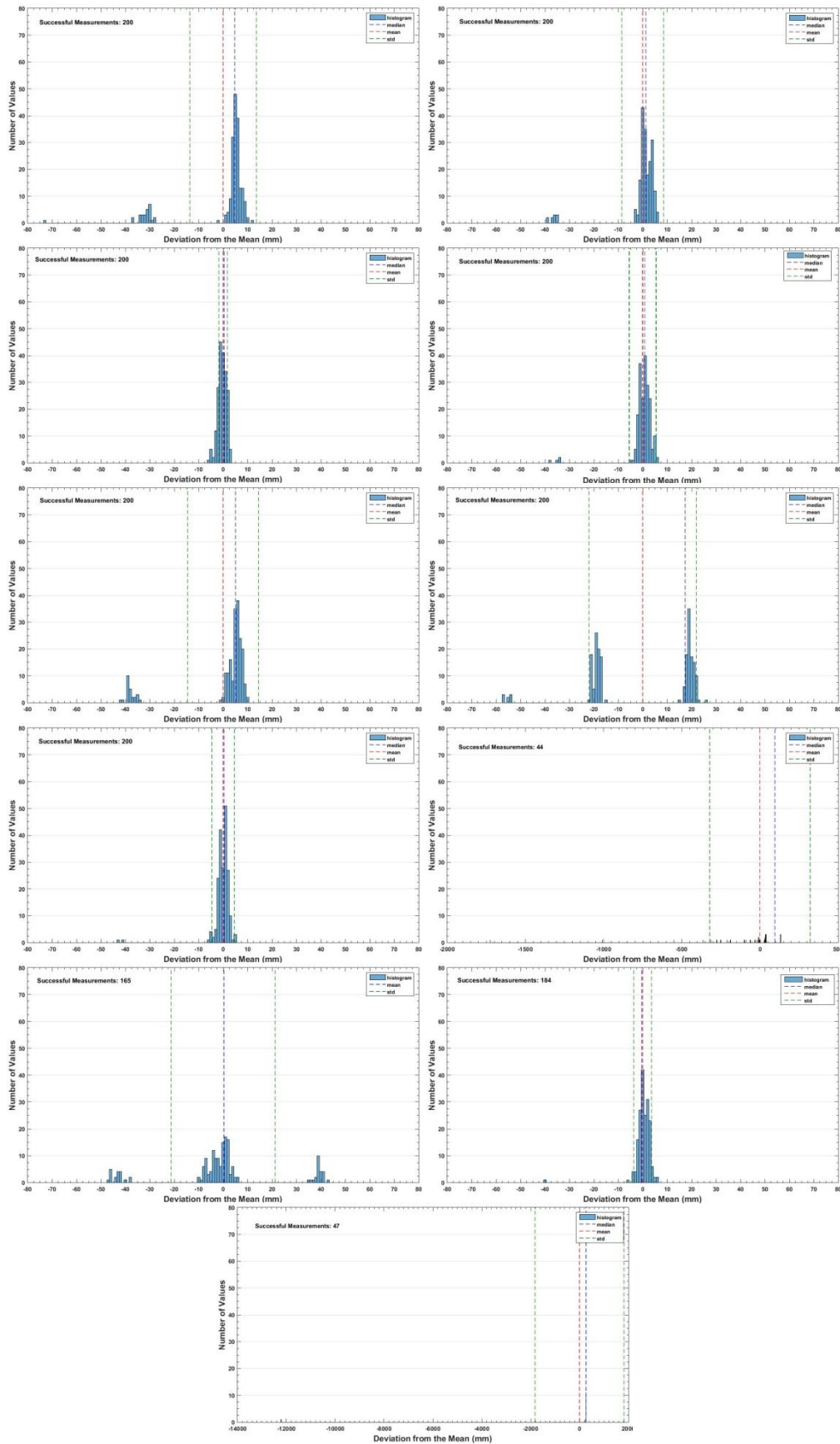
Σχήμα A.13 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραίες στη ΘΕΣΗ III και μέθοδο μέτρησης CRE

Figure A.13 Distribution histogram of the difference between the measurements deviation and the mean value for antennas orientation III and CRE solution

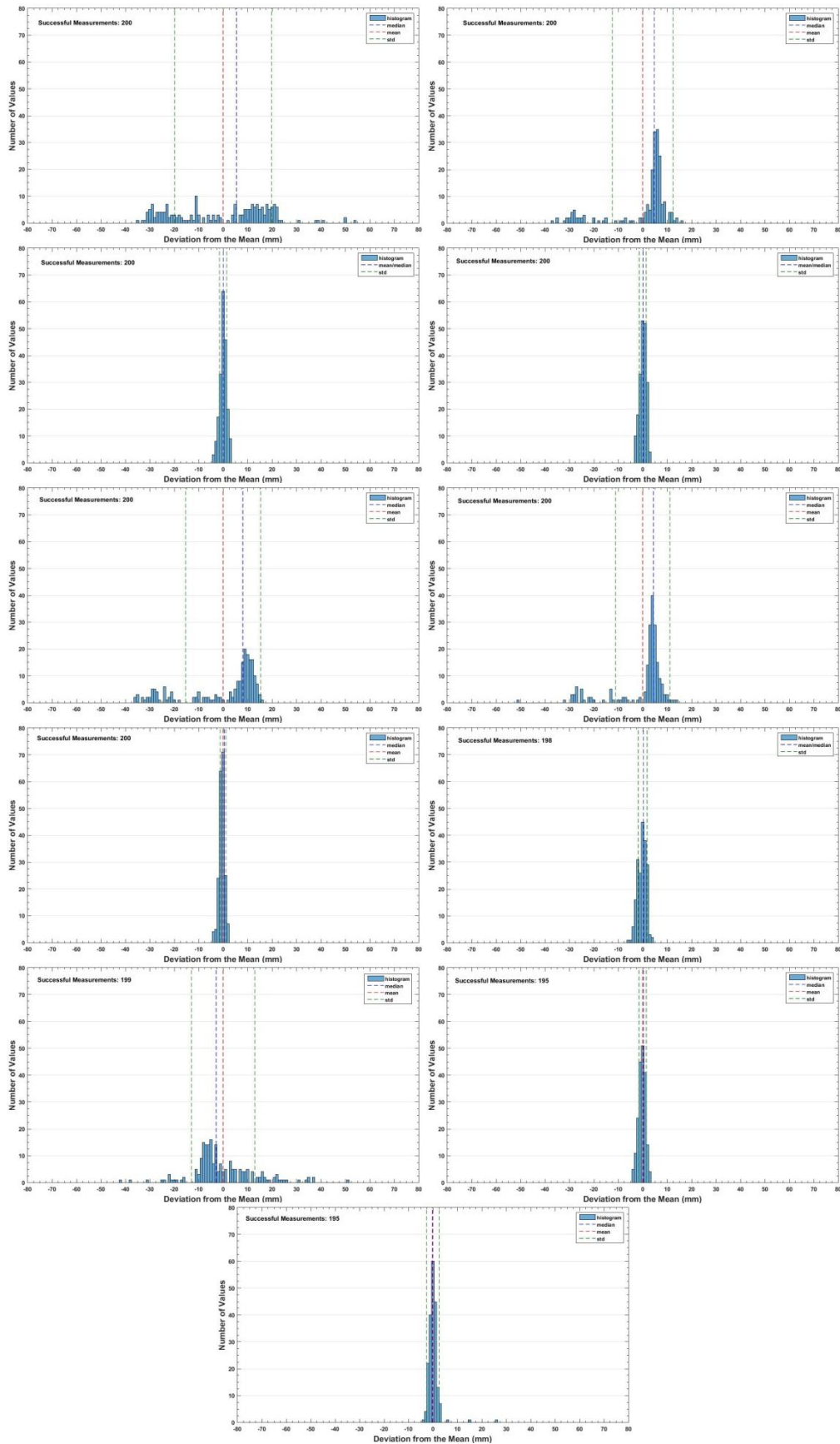


Σχήμα A.14 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραίες στη ΘΕΣΗ IV και μέθοδο μέτρησης CRE

Figure A.14 Distribution histogram of the difference between the measurements deviation and the mean value for antennas orientation IV and CRE solution

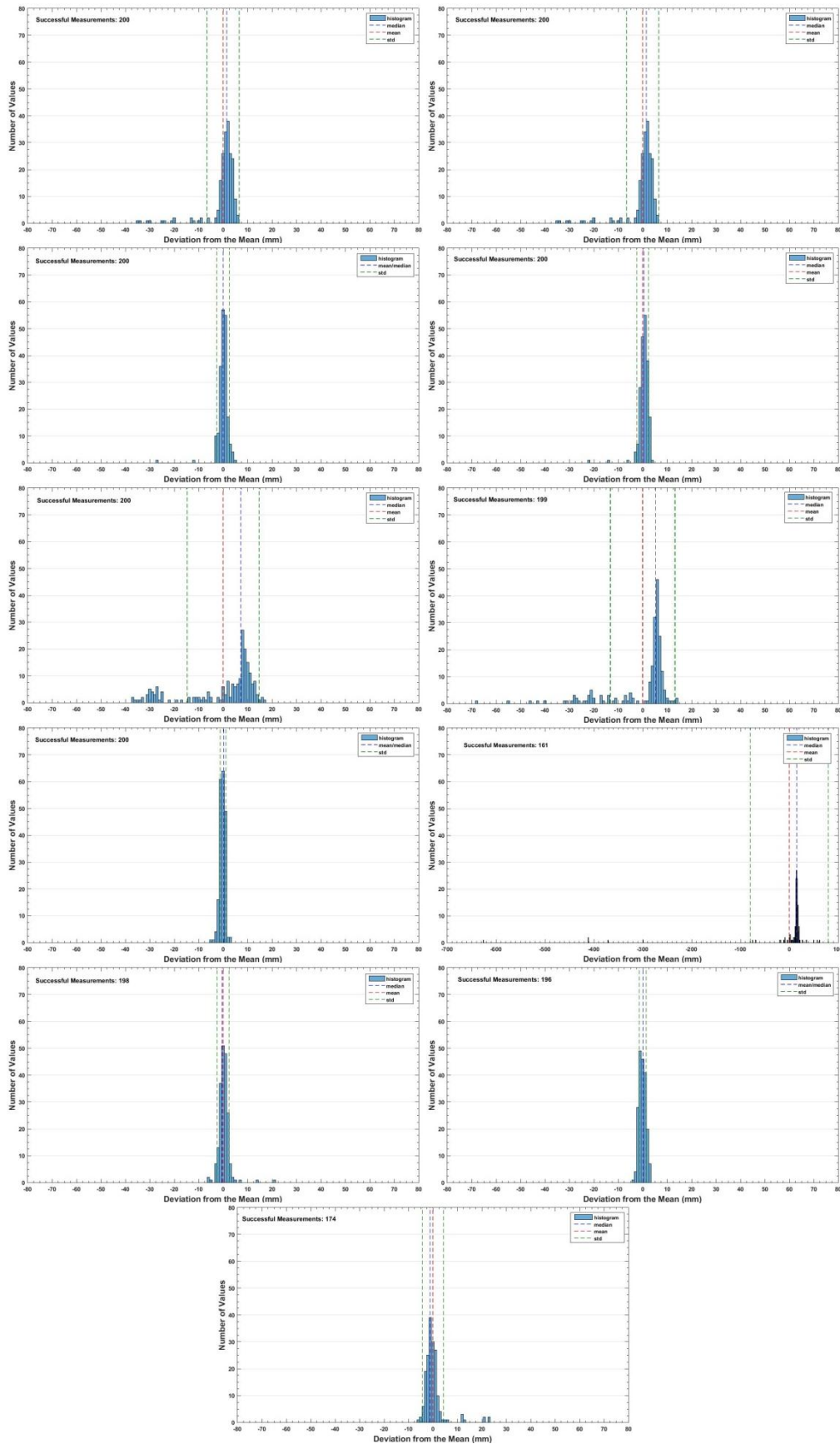


Σχήμα A.15 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραίες στη ΘΕΣΗ V και μέθοδο μέτρησης CRE
Figure A.15 Distribution histogram of the difference between the measurements deviation and the mean value for antennas orientation V and CRE solution



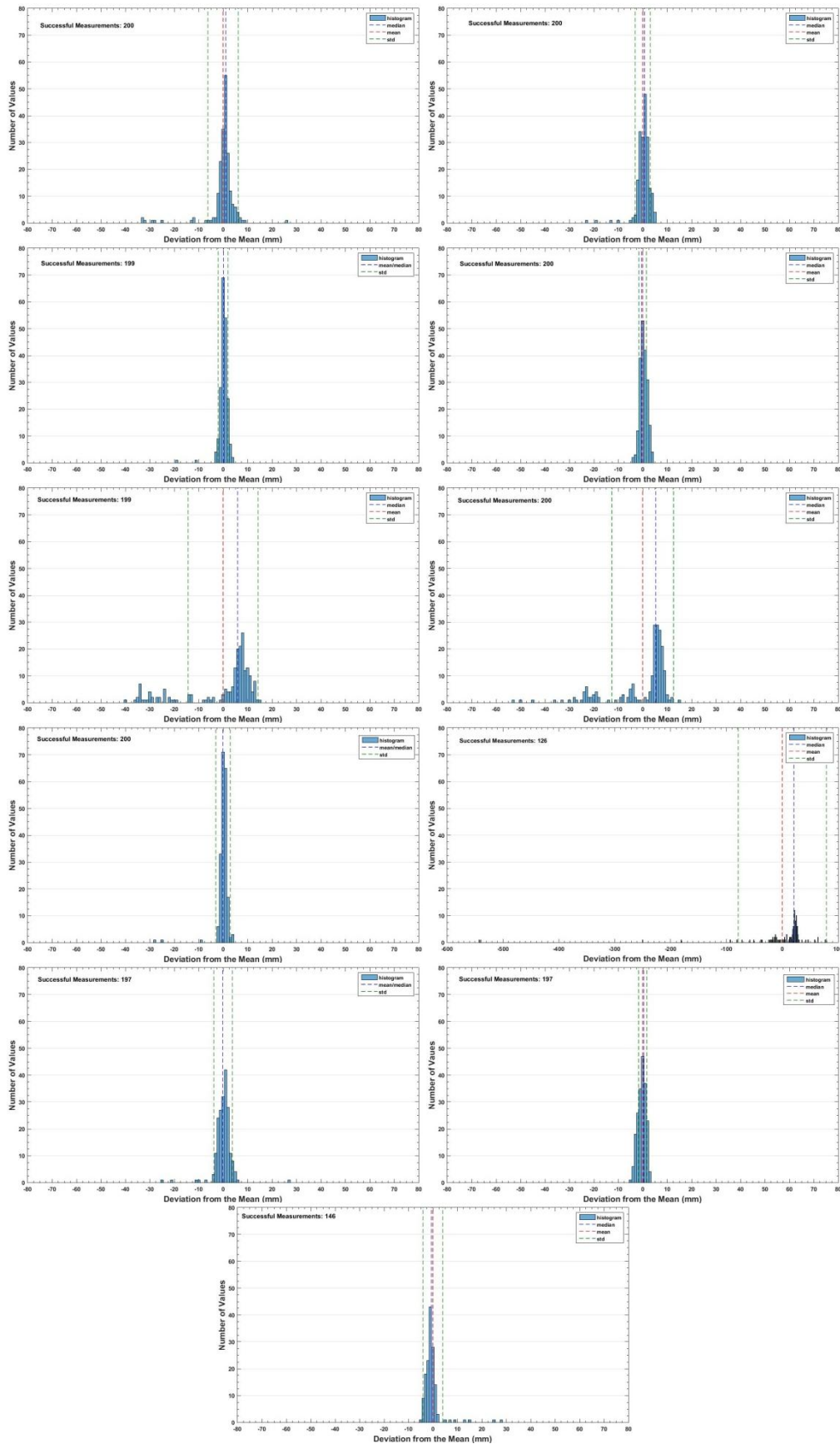
Σχήμα A.16 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραίες στη ΘΕΣΗ I και μέθοδο μέτρησης FRE

Figure A.16 Distribution histogram of the difference between the measurements deviation and the mean value for antennas orientation I and FRE solution



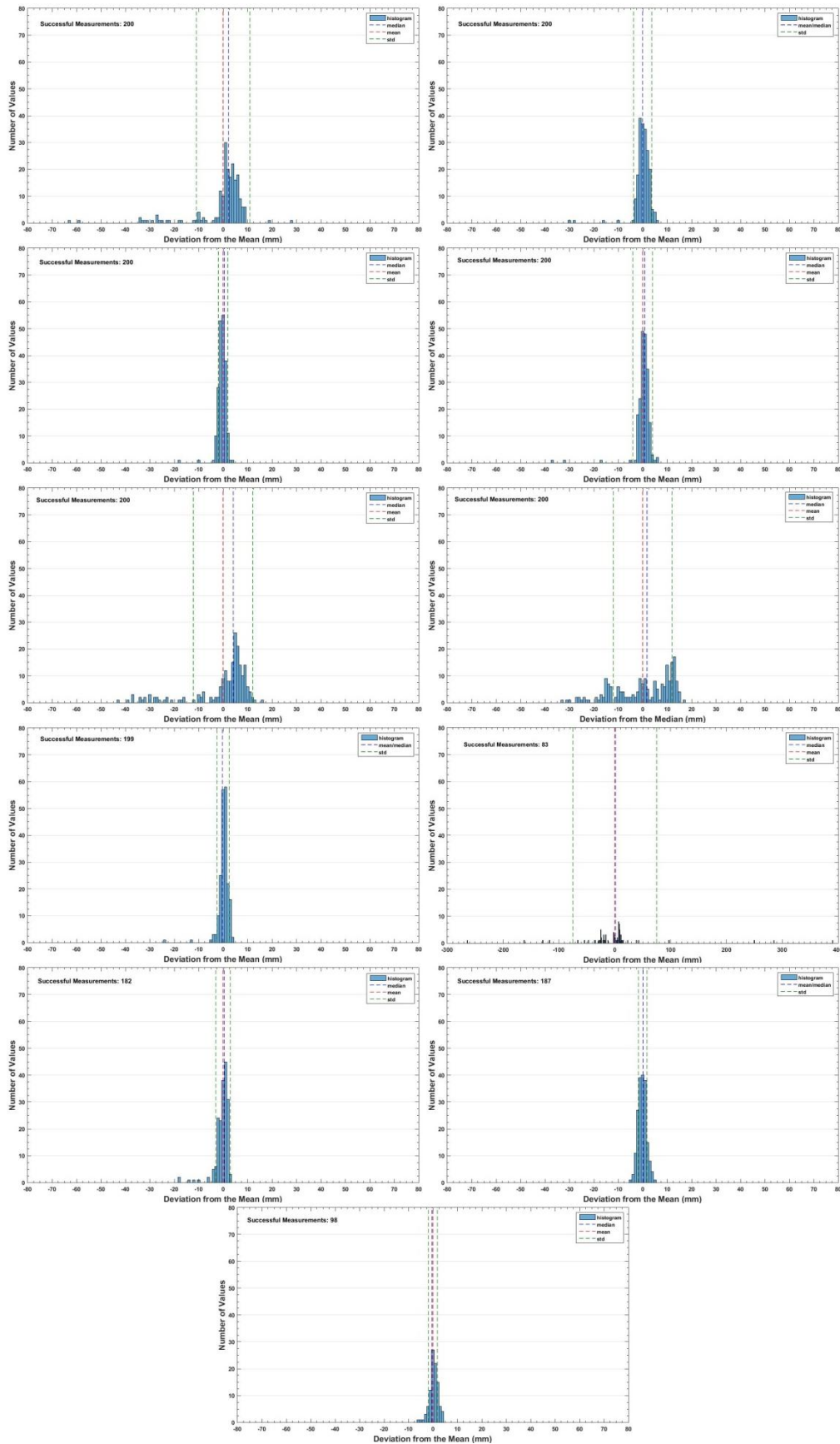
Σχήμα A.17 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραίες στη ΘΕΣΗ II και μέθοδο μέτρησης FRE

Figure A.17 Distribution histogram of the difference between the measurements deviation and the mean value for antennas orientation II and FRE solution



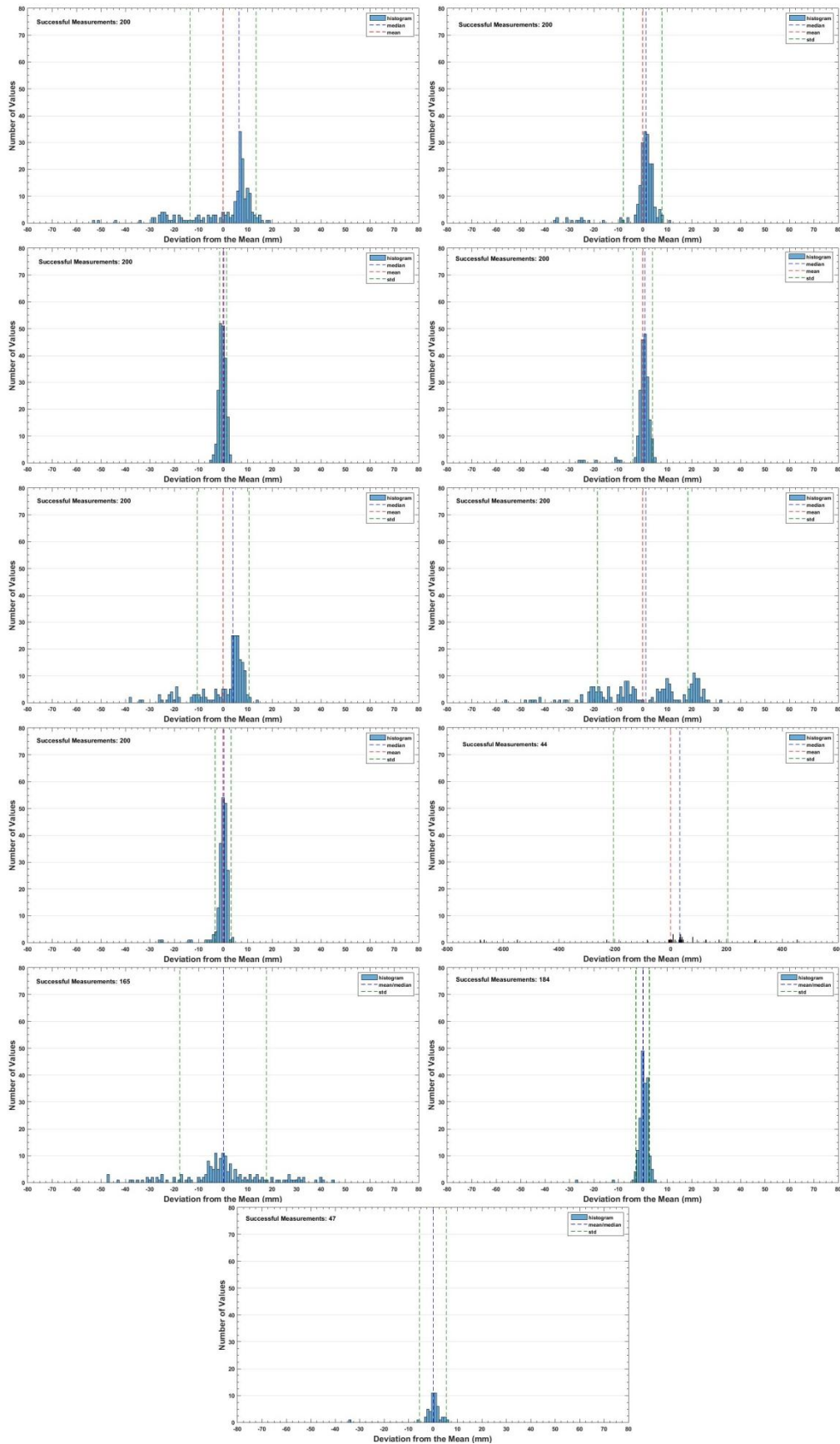
Σχήμα A.18 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραίες στη ΘΕΣΗ III και μέθοδο μέτρησης FRE

Figure A.18 Distribution histogram of the difference between the measurements deviation and the mean value for antennas orientation III and FRE solution



Σχήμα A.19 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραίες στη ΘΕΣΗ IV και μέθοδο μέτρησης FRE

Figure A.19 Distribution histogram of the difference between the measurements deviation and the mean value for antennas orientation IV and FRE solution



Σχήμα A.20 Ιστογράμματα κατανομής των αποκλίσεων των μετρήσεων από τη μέση τιμή με τις κεραίες στη ΘΕΣΗ V και μέθοδο μέτρησης FRE

Figure A.20 Distribution histogram of the difference between the measurements deviation and the mean value for antennas orientation V and FRE solution

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Πρόγραμμα σε προγραμματιστικό περιβάλλον *MATLAB*[®] για την εφαρμογή της τεχνικής του τριπλευρισμού μέσω επίλυσης με τη MET που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή της τροχιάς του οχήματος αναφοράς κατά την επεξεργασία των δεδομένων της πειραματικής εφαρμογής που αποσκοπούσε στην αξιολόγηση του συστήματος *PulsON*[®] 410 σε κινηματικό εντοπισμό.

```
function [] = CE_Resection_V2
%Input file with range measurements and their timestamp (table D)
fid=uigetfile();
f=fopen(fid);
D=dlmread('New_Data_Run_1.txt');
SZ=size(D);
n=SZ(1,1);
%Input file with coordinates of nodes (table COORD)
fid=uigetfile();
f=fopen(fid);
COORD=dlmread('Local_Coordinates.txt');
i=1;
j=1;
%Create table TEMP 1x5 with four ranges and time stamp
while i<=n
    a=0;
    b=0;
    c=0;
    d=0;
    while ((a==0) || (b==0) || (c==0) || (d==0)) && (i<=n)
        if D(i,3)==101
            TEMP(1)=D(i,4);
            TEMP(5)=D(i,1);
            a=1;
            i=i+1;
        elseif D(i,3)==102
            TEMP(2)=D(i,4);
            TEMP(5)=D(i,1);
            b=1;
            i=i+1;
        elseif D(i,3)==103
            TEMP(3)=D(i,4);
            TEMP(5)=D(i,1);
            c=1;
            i=i+1;
        elseif D(i,3)==104
            TEMP(4)=D(i,4);
            TEMP(5)=D(i,1);
            d=1;
            i=i+1;
        end
        %Repeat process until completion of table TEMP
    end
end
if (a && b && c && d)==1
    %Finding initial values via trilateration algorithm
    P=trilateration(COORD,TEMP);
    %Finding final coordinates via least squares method
```



```

[X,Vdx]=MET(P,TEMP,COORD);
F_COORD(j,1)=j;
F_COORD(j,2)=TEMP(5);
F_COORD(j,3)=X(1);
F_COORD(j,4)=X(2);
F_COORD(j,5)=sqrt(Vdx(1,1));
F_COORD(j,6)=sqrt(Vdx(2,2));
j=j+1;
end
%Repeat process until it finishes scanning table D
end
%Output file with coordinates of vehicle's trajectory and their
timestamp
dlmwrite('UWB_ResectionTrajectory_Run_1.txt',F_COORD,'delimiter','\t'
,'precision',10,'newline','pc');
SZ=size(F_COORD);
n=SZ(1,1);
for i=1:n
    E(i)=F_COORD(i,3);
    N(i)=F_COORD(i,4);
end
figure
plot(E,N);
fclose all;
end
%-----
function [P]=trilateration(COORD,TEMP)
P1(1)=COORD(1,2);
P1(2)=COORD(1,3);
P2(1)=COORD(2,2);
P2(2)=COORD(2,3);
P3(1)=COORD(3,2);
P3(2)=COORD(3,3);
ex=(P2-P1)/norm(P2-P1);
i=dot(ex,(P3-P1));
ey=(P3-P1-(i*ex))/norm(P3-P1-(i*ex));
d=norm(P2-P1);
j=dot(ey,(P3-P1));
x = ((TEMP(1))^2 - (TEMP(2))^2 + d^2) / (2*d);
y = ((TEMP(1))^2 - (TEMP(3))^2 + i^2 + j^2) / (2*j) - (i/j)*x;
P=P1+x*ex+y*ey;
end
%-----
function [X,Vdx]=MET(P,TEMP,COORD)
for i=1:4
    S(i)=sqrt(power(P(1)-COORD(i,2),2)+power(P(2)-COORD(i,3),2));
    A(i,1)=(P(1)-COORD(i,2))/S(i);
    A(i,2)=(P(2)-COORD(i,3))/S(i);
    dl(i,1)=TEMP(i)-S(i);
end
N=A'*A;
dx=inv(N)*A'*dl;
X(1)=P(1)+dx(1);
X(2)=P(2)+dx(2);
u=A*dx-dl;
s02=(u'*u)/2;
Vdx=s02*inv(N);
end

```

Πρόγραμμα σε προγραμματιστικό περιβάλλον *MATLAB*[®] για το μετασχηματισμό των συντεταγμένων της τροχιάς του οχήματος καταγραφής που προέκυψε από τις μετρήσεις του συστήματος *PulsON*[®] 410 από το τοπικό σύστημα στο προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ '87.

```
%Transformation
%Input file with parameters of transformation
fid=uigetfile();
f=fopen(fid);
PAR=dlmread('Parameters_1.txt');
%Create table PAR with parameters of transformation
%Variable m is scale factor
m=PAR(1);
%Variable fr is steering angle
fr=PAR(2);
%Variables XA and YA are transfer parameters
XA=PAR(3);
YA=PAR(4);
%Input coordinates of local system and timestamp
T=UWB_Run1.time;
X=UWB_Run1.loc.X;
Y=UWB_Run1.loc.Y;
sz=size(T);
n=sz(1,1);
xo=-(1/m)*(cos(fr)*XA+sin(fr)*YA);
yo=-(1/m)*(-sin(fr)*XA+cos(fr)*YA);
for i=1:n
    EGSA(i,1)=T(i);
    EGSA(i,2)=m*((X(i)-xo)*cos(fr)-(Y(i)-yo)*sin(fr));
    EGSA(i,3)=m*((X(i)-xo)*sin(fr)+(Y(i)-yo)*cos(fr));
end
%Output coordinates of EGSA '87 system
dlmwrite('UWB_EGSA_Run_2(AS).txt',EGSA,'delimiter','\t','precision',
%.2f','newline','pc');
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Ημερομηνία:..... Ώρα..... Καιρικές Συνθήκες..... Σειρά Μετρήσεων:..... Ονομαστική Απόσταση:.....

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑ UWB

Ύψος Κεραίας UWB 1 (m)					<i>Παρατηρήσεις</i>				
Ύψος Κεραίας UWB 2 (m)									
ΡΗ									
Αριθμός Επαναλήψεων									
Όνομα Αρχείου ανά Τρόπο Μέτρησης									
I	II	III	IV	V					

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ TOTAL STATION/ ΜΕΤΡΟΤΑΙΝΙΑ

Περίοδος	Σκόπευση	Οριζόντια Γωνία (grad)				Κατακόρυφη Γωνία (grad)				Κεκλιμένο Μήκος (m)
		Θέση I	Θέση II	Μέση Τιμή	Μ.Α. Τιμή	Γ.Μ.Ο.	Θέση I	Θέση II	Μέση Τιμή	
1 ^η	UWB 1									
	UWB 2									
2 ^η	UWB 1									
	UWB 2									
Τύπος Total Station			Ύψος Οργάνου (m)			Χρήση Κατάφωτου			Μήκος με Μετροταινία	

Παρατηρήσεις

Σκαρίφημα

Έντυπο καταγραφής μετρήσεων στατικού πειράματος