Βαθμονόμηση μετρήσεων συστήματος ραδιοσυχνοτήτων υπέρ-ευρείας ζώνης (Ultra-Wideband) για εφαρμογές εντοπισμού υψηλής ακρίβειας.

Χαράλαμπος Περάκης[1], Βασίλειος Γκίκας[1], Παναγιώτης Σωτηρίου[1], Ορθοδοξία Αραμπατζή[1], Χρήστος Εξαρχαίος[1]
[1]Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα
e-mail: hperakis@central.ntua.gr

Περίληψη

Η τεχνολογία ραδιοσυχνοτήτων υπέρ-ευρείας ζώνης (Ultra-Wideband – UWB) τα τελευταία χρόνια εξελίσσεται με ταχείς ρυθμούς βρίσκοντας εφαρμογή τόσο στον τομέα των τηλεπικοινωνιών όσο και σε εφαρμογές εντοπισμού και πλοήγησης. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας UWB η οποία στηρίζεται στη μετάδοση παλμών πολύ μικρής διάρκειας σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων την καθιστούν κατάλληλη για μέτρηση μηκών σε μικρές και μεσαίες αποστάσεις με υψηλή ακρίβεια, προσφέρουν ανθεκτικότητα έναντι πολυ-ανακλάσεων ενώ παρέχουν τη δυνατότητα μετάδοσης σήματος σε συνθήκες μη οπτικής επαφής (NLoS). Στην συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζονται αποτελέσματα της αξιολόγησης της απόδοσης εμπορικού συστήματος UWB (Time Domain®) για εφαρμογές εντοπισμού καθώς και η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την βαθμονόμηση των μετρητικών συσκευών. Η μεθοδολογία βαθμονόμησης αξιολογείται μέσω πειραματικών διερευνήσεων σε διαφορετικά περιβάλλοντα και για διαφορετικές ρυθμίσεις του εξοπλισμού στοχεύοντας στην τυποποίηση της διαδικασίας. Η αξιολόγηση της επίδοσης πραγματοποιείται σε συνθήκες στατικού και κινηματικού εντοπισμού υπολογίζοντας μεγέθη ποιότητας όπως η επαναληψιμότητα και η ορθότητα έναντι μετρήσεων αναφοράς που προκύπτουν με συμβατικές και δορυφορικές μεθόδους.

Λέξεις-Κλειδιά: UWB, εντοπισμός, μέτρηση αποστάσεων, βαθμονόμηση.

Abstract

Ultra-Wideband (UWB) is a technology that undergoes a rapid development both in communication and positioning/ navigation applications. The nature of the RF signal transmitted in the form of ultra-short pulses, offers advantages for high-accuracy ranging in short and medium distances while at the same time it provides robustness against multipath and Non-Line of Sight (NLoS) conditions. In this study, a commercially available UWB system of Time Domain® is being assessed both in static and kinematic positioning applications while calibration techniques are being examined. The calibration is being performed for various environments and system settings aiming at the standardization of the procedure. Measures of trueness and accuracy against reference equipment are estimated for the needs of the performance assessment of the UWB system.

Keywords: UWB, positioning, ranging, calibration.

1. Εισαγωγή

Η ραγδαία ανάπτυξη τεχνολογιών ασύρματης μετάδοσης δεδομένων με χρήση ραδιο-σημάτων τα τελευταία χρόνια έχει οδηγήσει στην ευρεία αξιοποίησή τους για την κάλυψη

αναγκών επικοινωνίας [Whitmore et al., 2015]. Ωστόσο, πέρα από την εφαρμογή σε συστήματα τηλεπικοινωνίας, διερευνάται και αναπτύσσεται παράλληλα η χρήση ασύρματων συστημάτων για ανάγκες μέτρησης αποστάσεων και κατά συνέπεια για εφαρμογές εντοπισμού θέσης. Μεγάλο μέρος της επιστημονικής διερεύνησης αφορά στην αξιοποίηση διαδεδομένων τεχνολογιών (WiFi, Bluetooth, RFID) για εφαρμογές εντοπισμού καθώς οι προ-ϋπάρχουσες υποδομές διευκολύνουν σημαντικά την ευρεία εφαρμογή εντοπισμού με μικρό κόστος. Ωστόσο, μειονέκτημα αυτών των τεχνολογιών RF είναι η «συνεχής» φύση του μεταδιδόμενου κύματος που δυσχεραίνει την χρονική ανάλυση του μειώνοντας σημαντικά την ακρίβεια μέτρησης μηκών. Η συγκεκριμένη αδυναμία δεν συναντάται κατά τη χρήση σημάτων υπερ-ευρείας ζώνης (Ultra-Wide Band, UWB). [Lee et al. 2007]

Η τεχνολογία συστημάτων ραδιοσημάτων UWB στηρίζεται στη χρήση μεγάλου εύρους συχνότητας λειτουργίας (?της τάξης των 500 MHz?) για την ασύρματη επικοινωνία. Η επίτευξη του μεγάλου εύρους ζώνης προκύπτει από την χρήση παλμών διάρκειας μερικών nanosecond οι οποίοι φέρουν την μεταδιδόμενη πληροφορία[Gezici et al. 2005]. Αυτά τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των συστημάτων UWB τους δίνουν τη δυνατότητα διάδοσης σήματος μέσα από δομικά υλικά καθώς επίσης το καθιστούν ανθεκτικό στο φαινόμενο της πολύ-ανάκλασης (multipath) εφαρμόζοντας αλγόριθμους αναγνώρισης [Dewberry and Petroff, 2015].

Για την μέτρηση αποστάσεων με χρήση τεχνολογιών ραδιοσυχνοτήτων οι τεχνικές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε αυτές που στηρίζονται στη μέτρηση του χρόνου και σε αυτές που αξιοποιούν την καταγραφή της ισχύος λήψης σήματος. Για την πρώτη κατηγορία ο υπολογισμός της απόστασης στηρίζεται στην ακριβή καταγραφή του χρόνου ο οποίος χρειάζεται για την μετάδοση του σήματος από τον πομπό στον δέκτη (Time of Arrival - ToA), την διαφορά του χρόνου λήψης σήματος από τουλάχιστον 2 πομπούς (Time Difference of Arrival - TDoA) ή τον συνολικό χρόνο μετάδοσης από τη στιγμή αποστολής αρχικού σήματος και λήψης του σήματος απόκρισης (Two Way Time of Arrival – TW-ToA). Σημειώνεται πως για την τεχνική ToA απαιτείται συγχρονισμός μεταξύ πομπού και δέκτη ενώ για τις TDoA και TW-ToA δεν τίθεται αυτός ο περιορισμός. Ο υπολογισμός της απόστασης με χρήση της ισχύος σήματος στηρίζεται στην μετατροπή της πληροφορίας Received Signal Strength των λαμβανόμενων σημάτων με χρήση θεωρητικών ή εμπειρικών μοντέλων μετατροπής. Οι συσκευές UWB κυρίως χρησιμοποιούν τεχνικές ToA ή TW-ToA οι οποίες παρέχουν σημαντικά υψηλότερη ακρίβεια, ενώ η πληροφορία ισχύος σήματος χρησιμοποιείται επικουρικά για την αύξηση της συχνότητας δειγματοληψίας σε αρχιτεκτονικές δικτύων κόμβων όπου ο όγκος μεταδιδόμενων δεδομένων αυξάνεται σημαντικά.

Ενώ η ακρίβεια (accuracy) μέτρησης μηκών με χρήση συσκευών UWB μπορεί να είναι σε επίπεδα μερικών cm, η ορθότητα των μετρήσεων μπορεί να φέρει επιδράσεις συστηματικών σφαλμάτων (bias) που οφείλονται σε ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε συσκευής που επηρεάζουν το εσωτερικό χρόνο μετάδοσης μεταξύ γεννήτριας παλμών και της κεραία εκπομπής. Για αυτό το λόγο επιβάλλεται η εφαρμογή διαδικασίας βαθμονόμησης των συσκευών για την επίτευξη της μέγιστης δυνατής ακρίβειας. [Dierenbach et al., 2015] Στη συνέχεια του άρθρου παρουσιάζονται οι διαδικασίες πειραματικής αξιολόγησης των συσκευών PulseOn P410 της Time Domain® καθώς και τα αποτελέσματα διερεύνησης μεθόδων βαθμονόμησης.

2. Μεθοδολογία

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται συνοπτικά η μεθοδολογία που ακολουθείται για την βαθμονόμηση των πομποδεκτών UWB για την αξιοποίησή τους σε εφαρμογές εντοπισμού. Το πειραματικό σκέλος της παρούσας εργασίας αποτελείται από 2 πειράματα πεδίου. Η πρώτη καμπάνια αφορά τη συλλογή στατικών μετρήσεων αποστάσεων μεταξύ ζεύγους δεκτών και η δεύτερη τη συλλογή κινηματικών μετρήσεων αποστάσεων από σταθερούς κόμβους προς κινούμενο.

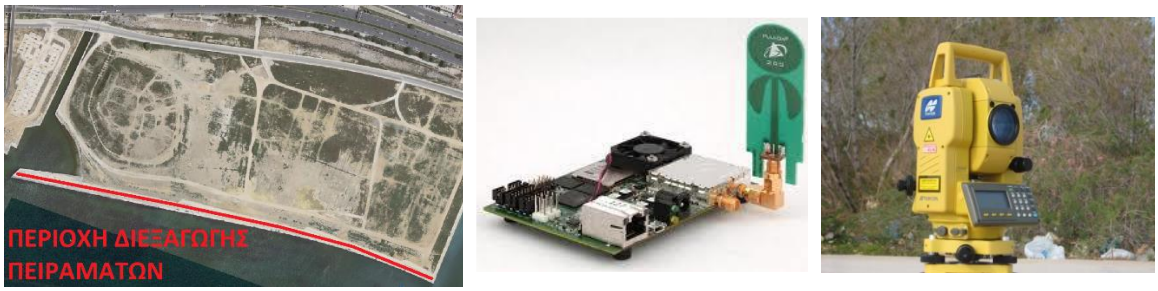
Αρχικά αξιολογείται η ποιότητα των στατικών πρωτογενών μετρήσεων όσον αφορά την ορθότητα και την ακρίβεια συναρτήσει της σχετικής απόστασης και του προσανατολισμού των κεραιών μετάδοσης. Στη συνέχεια επιχειρείται ο υπολογισμός στοιχείων βαθμονόμησης ανά ζεύγος δεκτών και συναρτήσει των σχετικών αποστάσεων για εφαρμογές κινηματικού εντοπισμού. Οι διορθώσεις μηκών εφαρμόζονται μέσω τριών εμπειρικών μοντέλων προσαρμογής των στοιχείων βαθμονόμησης από τα οποία προκύπτουν οι τελικές διορθωμένες αποστάσεις. Τέλος, πραγματοποιείται αξιολόγηση της βαθμονομημένης τροχιάς σε επίσης σε όρους ορθότητας και ακρίβειας.

3. Στατικές μετρήσεις αποστάσεων

Ως πρώτο στάδιο της διαδικασίας αξιολόγησης των δεκτών UWB επιλέγεται η συλλογή μετρήσεων αποστάσεων μεταξύ σταθερών κόμβων, σε ελεγχόμενο πειραματικό περιβάλλον με βέλτιστες συνθήκες οπτικής επαφής.

3.1 Προπαρασκευαστικές εργασίες

Σημαντικό στοιχείο των στατικών μετρήσεων είναι η ύπαρξη κατά το δυνατών ελεγχόμενων συνθηκών χωρίς παρεμβολές εμποδίων (οχήματα, άνθρωποι, φυτά, κλπ.). Ως χώρος διεξαγωγής του πειράματος επιλέχθηκε παραθαλάσσια έκταση στην περιοχή του Φαλήρου η οποία παρέχει ανεμπόδιστη οπτική επαφή μεταξύ των δεκτών κατά μήκος μεγάλης απόστασης (~700 m). Οι δύο πομποδέκτες UWB P410 εγκαθίστανται σε φωτογραφικούς τρίποδες οι οποίοι προσφέρουν την απαιτούμενη σταθερότητα αλλά και την εύκολη μετακίνηση τους στις διαφορετικές θέσεις. Ο υπολογισμός των αποστάσεων αναφοράς μεταξύ των κέντρων φάσης των κεραιών UWB γίνεται με χρήση γεωδαιτικού σταθμού Topcon GPT 3107N για αποστάσεις μεγαλύτερες των 10 m ενώ μετρήσεις με μετροταινία σε 2 επαναλήψεις παρέχουν τις αποστάσεις αναφοράς για τις υπόλοιπες αποστάσεις.



Σχήμα 1: Περιοχή διεξαγωγής στατικών μετρήσεων (αριστερά), Πομποδέκτης Time Domain® P410 (κέντρο), Γεωδαιτικός Σταθμός Topcon GPT 3107N (δεξιά)

3.2 Διεξαγωγή μετρήσεων

Πριν την διεξαγωγή μετρήσεων μήκους μεταξύ ζεύγους πομποδεκτών, πραγματοποιείται βαθμονόμηση αποστάσεων μέσω της λειτουργικότητας που παρέχει το λογισμικό καταγραφής του κατασκευαστή τοποθετώντας τις συσκευές σε γνωστή απόσταση της τάξης των 5 m. Σημειώνεται πως η συγκεκριμένη λειτουργικότητα μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα ζεύγος δεκτών κάθε φορά. Οι αποστάσεις για τις οποίες θα διεξαχθούν μετρήσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 1

Πίνακας 1: Ονομαστικές τιμές και τιμές αναφοράς αποστάσεων πομποδεκτών στατικών μετρήσεων.

Ονομαστική (m)										
2	3	10	20	50	100	200	300	400	500	720
Αληθής (m)										
1,880	3,130	9,780	19,709	49,575	99,330	200,850	299,416	400,138	500,959	718,730

Επιπλέον, διερευνάται η επίδραση του προσανατολισμού των κεραιών στην τελική μετρούμενη σχετική απόσταση. Οι κεραίες τοποθετούνται διαδοχικά στα εξής ζεύγη γωνιών: 0^o-0^o, 0^o-45^o, 0^o-90^o, 45^o-90^o, 90^o-90^o.

Η μέτρηση αποστάσεων αφορά σε καταγραφή τιμών Precise Range Measurement - PRM οι οποίες προκύπτουν από την μετατροπή του συνολικού χρόνου που απαιτείται για την μετάδοση του σήματος. Ο πομποδέκτης αίτησης αποστέλλει τη χρονική στιγμή t_1, ο πομποδέκτης απόκρισης πραγματοποιεί επεξεργασία του σήματος για χρόνο dt και τέλος αποστέλλει το σήμα απόκρισης στον πομποδέκτη αίτησης ο οποίος το λαμβάνει σε χρόνο t_2. Ως ταχύτητα μετάδοσης σήματος c θεωρείται η ταχύτητα του φωτός στο κενό. Η απόσταση προκύπτει από τη σχέση:

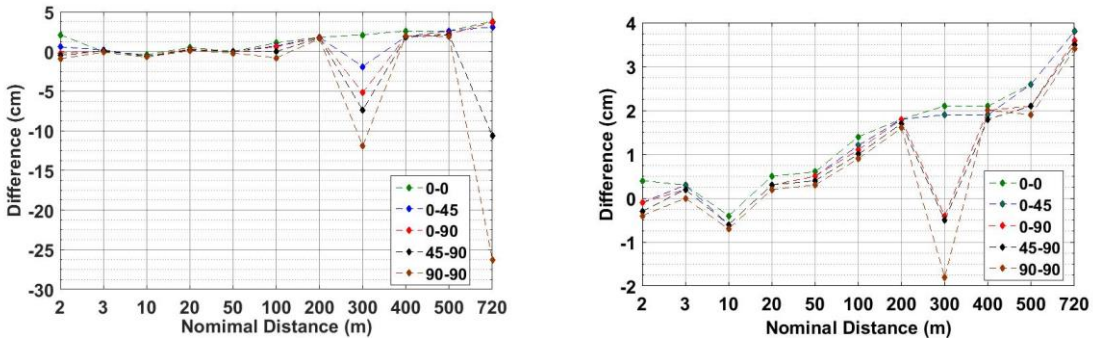
$$r_{prm} = \frac{c}{2} \cdot (t_2 - t_1 - dt) \qquad (1)$$

Σε κάθε προεπιλεγμένη απόσταση και θέση κεραιών επιχειρούνται 200 μετρήσεις αποστάσεων r_{prm} ώστε να υπάρχει επαρκές δείγμα για την αξιόπιστη στατιστική ανάλυση τους.

3.3 Ανάλυση

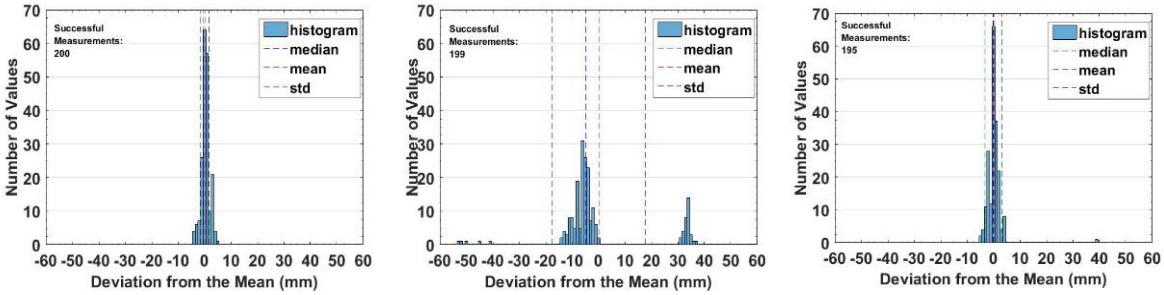
Εφόσον πραγματοποιηθεί η κατάλληλη προ-επεξεργασία των μετρήσεων για την κατηγοριοποίησή και τυποποίησή τους ανά ονομαστικό μήκος και προσανατολισμό κεραίας, τα δεδομένα είναι σε κατάλληλη μορφή για περαιτέρω επεξεργασία. Επίσης, στα πλαίσια της προ-επεξεργασίας υπολογίζονται οι αποστάσεις αναφοράς που προκύπτουν από τον εξοπλισμό ελέγχου.

Στη συνέχεια υπολογίζονται τα επίπεδα ορθότητας και ακρίβειας των μετρήσεων συναρτήσει της απόστασης και του προσανατολισμού των κεραιών. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται οι τιμές ορθότητας που προκύπτουν χρησιμοποιώντας την μέση τιμή και την διάμεσο των μετρήσεων αντίστοιχα.



Σχήμα 2: Διαφορά μεταξύ της μέσης τιμής (αριστερά) και διαμέσου τιμής (δεξιά) των μετρήσεων UWB όπως προέκυψαν με την μέθοδο PRM από την απόσταση αναφοράς.

Και στα 2 διαγράμματα παρουσιάζεται μία τάση απόκλισης της ορθότητας όσο η σχετική απόσταση αυξάνεται. Οι τιμές ορθότητας στην απόσταση των 2 m αποκλίνουν σημαντικά, γεγονός αναμενόμενο καθώς σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή οι συσκευές UWB σε αποστάσεις μικρότερες των 3 m δύνανται να παρουσιάζουν κορεσμό σήματος ο οποίος οδηγεί σε ανακριβή μέτρηση. Επίσης διαπιστώνεται πως η χρήση της διαμέσου τιμής προσφέρει σημαντικά ορθότερες τιμές οι οποίες προκύπτουν από την ανθεκτικότητα της διαμέσου τιμής ενάντια ακραίων τιμών (outliers) οι οποίες αντίθετα επηρεάζουν έντονα τη μέση τιμή. Τέλος, διαπιστώνεται πως ο προσανατολισμός των κεραιών φαίνεται να επιδρά στην ορθότητα μέτρησης σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 500 m. Σημειώνεται πως η έξαρση τιμών στα 300 m αποδίδεται στην ύπαρξη σταθμευμένου οχήματος εγγύς της οπτικής ακτίνας μεταξύ των δεκτών κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.



Σχήμα 3: Ιστογράμματα συχνοτήτων απόκλισης από τη μέση τιμή των καταγραφών για ονομαστική απόσταση 200 m (αριστερά), 400 m (κέντρο) και 720 m (δεξιά)

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται τα ιστογράμματα συχνοτήτων της απόκλισης από την μέση τιμή. Είναι εμφανής η υψηλή επαναληψιμότητα των μετρήσεων καθώς ακόμα και οι ο μικρός αριθμός ακραίων τιμών δεν ξεπερνά τα 6 cm ακόμα και για τις μέγιστες αποστάσεις. Σημειώνεται πως η μέγιστη απόσταση των 720 m καθορίζεται από τις διαστάσεις της περιοχής μετρήσεων και δεν αποτελεί τη μέγιστη εμβέλεια του συστήματος UWB.

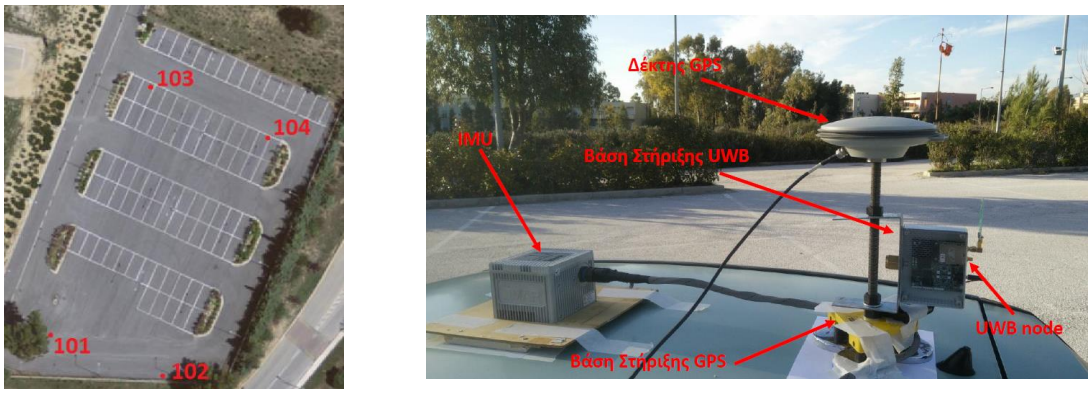
4. Κινηματικός εντοπισμός

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται αποτελέσματα της διεξαγωγής μετρήσεων UWB για τον εντοπισμό κινούμενου κόμβου τοποθετημένου επί οχήματος.

4.1 Προπαρασκευαστικές εργασίες

Η πρώτη εργασία για τη διεξαγωγή των μετρήσεων είναι η επιλογή του καταλληλότερου διαθέσιμου χώρου πειραμάτων. Ο επαρκής χώρος κίνησης του οχήματος, η ορατότητα μεταξύ των πομποδεκτών αλλά και οι καλές συνθήκες για δορυφορικό εντοπισμό οδήγησαν στην επιλογή του χώρου στάθμευσης των Νέων Εστιών της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου.

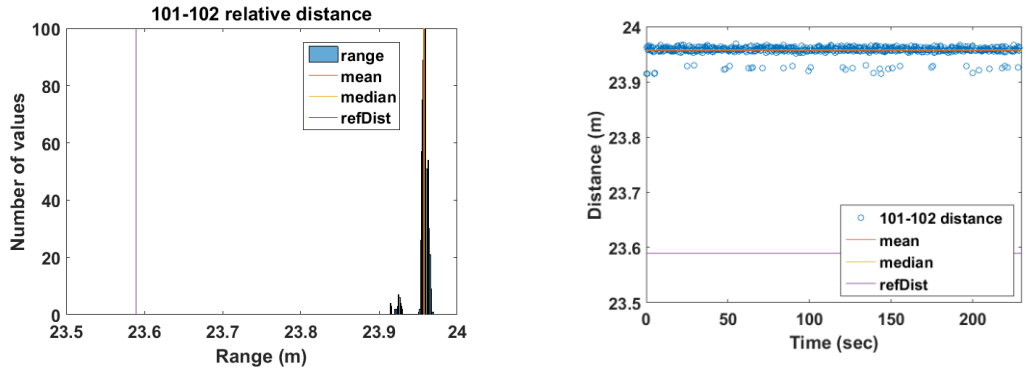
Η χαμηλή κινητικότητα οχημάτων στον χώρο προσφέρει επιπλέον πλεονέκτημα για την διεξαγωγή των πειραμάτων.
Για την υλοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν 5 πομποδέκτες UWB, οι τέσσερις αποτελούν στατικούς σταθμούς γνωστών συντεταγμένων και ο 5ος εγκαταστάθηκε με ειδικά διαμορφωμένη πλατφόρμα επί του οχήματος δοκιμών. Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκε ως εξοπλισμός αναφοράς το σύστημα GPS/INS Span της Novatel® [Gikas and Perakis, 2016]. Οι σχετικές θέσεις των αισθητήρων (lever arms) καταγράφηκαν για την μετέπειτα αντιστοίχισή τους και την σύγκριση των παραγόμενων τροχιών. Οι θέσεις των στατικών δεκτών αποτυπώθηκαν με κλασσικές τοπογραφικές μεθόδους.



Σχήμα 4: Περιοχή διεξαγωγής κινηματικών μετρήσεων (αριστερά). Ο εξοπλισμός εντοπισμού εγκατεστημένος στην οροφή του οχήματος (δεξιά).

4.2 Μετρήσεις αποστάσεων μεταξύ στατικών κόμβων

Παράλληλα με τη μέτρηση αποστάσεων προς τον κινούμενο πομποδέκτη πραγματοποιούνται μετρήσεις μεταξύ των στατικών για την περαιτέρω διερεύνηση της διαδικασίας βαθμονόμησης αποστάσεων για διαφορετικά ζεύγη πομποδεκτών. Ενδεικτικά στο Σχήμα 5 παρουσιάζονται σε μορφή ιστογράμματος συχνοτήτων και χρονοσειράς οι καταγραφές αποστάσεων, η μέση τιμή, η διάμεσος καθώς και η αληθής τιμή.



Σχήμα 5: Μετρήσεις αποστάσεων μεταξύ πομποδεκτών 101-102 κατά τη διάρκεια των κινηματικών μετρήσεων. Ιστόγραμμα συχνοτήτων (αριστερά) και χρονοσειρά (δεξιά).

Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τις τιμές απόκλισης από την αληθή τιμή για τη μέση τιμή αλλά και τη διάμεσο.

Πίνακας 2: Πίνακας αποκλίσεων μετρημένων αποστάσεων από αποστάσεις αναφοράς

Ζεύγος δεκτών	Απόκλιση από	
	μέση τιμή (m)	διάμεσο (m)
101-102	0,368	0.367
101-103	0.352	0.351
101-104	0.355	0.355
102-103	0.741	0.741
102-104	0.741	0.734
103-104	0.752	0.742

Είναι εμφανής η ύπαρξη συστηματικών σφαλμάτων (bias) για τα ζεύγη πομποδεκτών καθώς δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί εκ των προτέρων βαθμονόμηση για περισσότερα του ενός ζεύγους με χρήση του λογισμικού της Time Domain®. Οι τιμές του Πίνακα 2 για τη διάμεσο χρησιμοποιούνται στη συνέχεια ως τιμές βαθμονόμησης ανά ζεύγος και την επίλυση του δικτύου με ΜΕΤ για τον προσδιορισμό των τοπικών συντεταγμένων από τις μετρήσεις UWB. Επιλέγεται η τιμή απόκλισης από τη διάμεσο καθώς προσεγγίζει καλύτερα την τιμή που καταγράφεται αγνοώντας ικανοποιητικά τα outliers. Για την επίλυση του τρισδιάστατου δικτύου λαμβάνονται οι εξής δεσμεύσεις: Το σημείο 101 είναι σταθερό, τα ύψη είναι δοσμένα καθώς έχουν μετρηθεί στο πεδίο και το σημείο 102 βρίσκεται επί του άξονα X ($y_{101} = y_{102}$). Συνεπώς, οι ανεξάρτητες καθοριστικές παράμετροι του μοντέλου είναι [x_{102},x_{103},y_{103},x_{104},y_{104}]. Η διαδικασία της Μεθόδου Σταθμισμένων Μη-Γραμμικών Ελαχίστων Τετραγώνων επαναλαμβάνεται για το σύνολο των διαθέσιμων μετρημένων αποστάσεων. Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται οι τιμές απόκλισης των αποστάσεων όπως προκύπτουν από την επίλυση των ΜΕΤ από τις αποστάσεις αναφοράς για τις περιπτώσεις πριν και μετά την βαθμονόμηση των αποστάσεων.

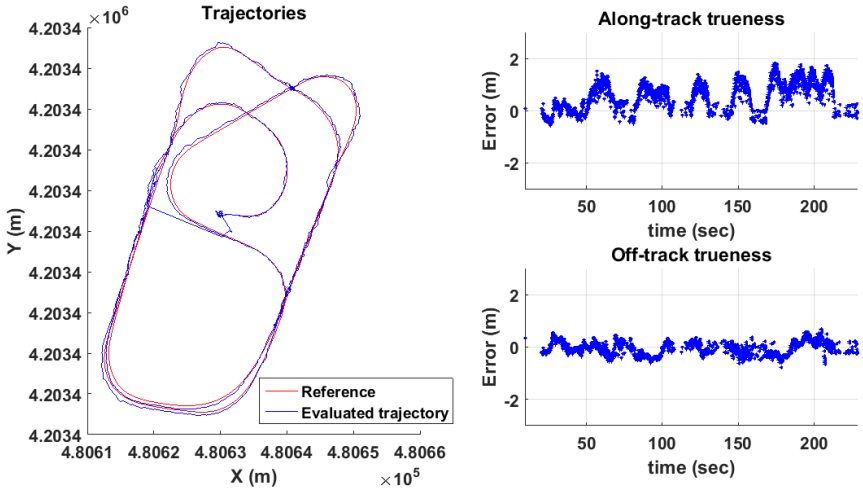
Πίνακας 3: Απόκλιση αποστάσεων όπως προκύπτουν από την επίλυση δικτύου με ΜΕΤ με και χωρίς τη εφαρμογή τιμών βαθμονόμησης

Ζεύγος δεκτών	Απόκλιση ΜΕΤ - αποστάσεις αναφοράς (m)	
	Χωρίς calibration	Με calibration
101-102	0.204	0.002
101-103	0.282	-0.002
101-104	0.422	0.005
102-103	0.803	0.001
102-104	0.697	0.013
103-104	0.604	-0.013

4.3 Εντοπισμός κινητού κόμβου

Για τον κινηματικό εντοπισμό οχήματος πραγματοποιούνται μετρήσεις UWB μεταξύ σταθερών και κινητού πομποδέκτη με συχνότητα δειγματοληψίας ~5 Hz για ένα πλήρη κύκλο διαδοχικών μετρήσεων. Για την εφαρμογή βαθμονόμησης του κινητού πομποδέκτη πραγματοποιείται διαδικασία stop & go κατά την οποία καταγράφεται επαρκής αριθμός θέσεων GPS/INS από τον εξοπλισμό αναφοράς παράλληλα με την διεξαγωγή μετρήσεων UWB. Η βαθμονόμηση πραγματοποιείται βάσει των αποστάσεων αναφοράς υπολογισμένες μεταξύ των σημείων γνωστών συντεταγμένων (σταθεροί κόμβοι) και των καταγεγραμμένων αποστάσεων UWB.

Η εξαγωγή της τροχιάς UWB προκύπτει από την εφαρμογή Extended Kalman Filter με δυναμικό μοντέλο σταθερής ταχύτητας χρησιμοποιώντας τις γνωστές συντεταγμένες των σταθερών πομποδεκτών και τις διαδοχικές μετρημένες αποστάσεις προς αυτούς.
Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η τροχιά του οχήματος καθώς και οι χρονοσειρές ορθότητας από την τροχιά αναφοράς κατά μήκος (along-track) και εγκάρσια (off-track) στην κίνηση του οχήματος. Παρατηρείται αυξημένη απόκλιση κατά μήκος της κίνησης με τιμές που προσεγγίζουν τα 2 m.



Σχήμα 6: Τροχιά οχήματος (αριστερά) όπως προκύπτει από τον εξοπλισμό αναφοράς (κόκκινο) και από το UWB (μπλε). Χρονοσειρές απόκλισης κατά μήκος (δεξιά άνω) και εγκάρσια στο όχημα (δεξιά κάτω).

Η βαθμονόμηση των κινηματικών μετρήσεων UWB βάσει των stop & go σημείων εφαρμόζεται με 3 διαφορετικά εμπειρικά μοντέλα, της μέσης τιμής, της γραμμικής προσαρμογής και της προσαρμογής με πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού. Χρησιμοποιώντας τις διαφορετικές τιμές απόκλισης από την απόσταση αναφοράς ανά ζεύγος και ανά απόσταση τα μοντέλα υλοποιούνται ακτινικά γύρω από κάθε σταθερό πομποδέκτη και οι διορθώσεις εφαρμόζονται συναρτήσει της εκάστοτε απόστασης.
Η σχέση που περιγράφει το μοντέλο μέσης τιμής είναι:

$$\hat{d}_{ij} = d_{ij} + \bar{x} \qquad (2)$$

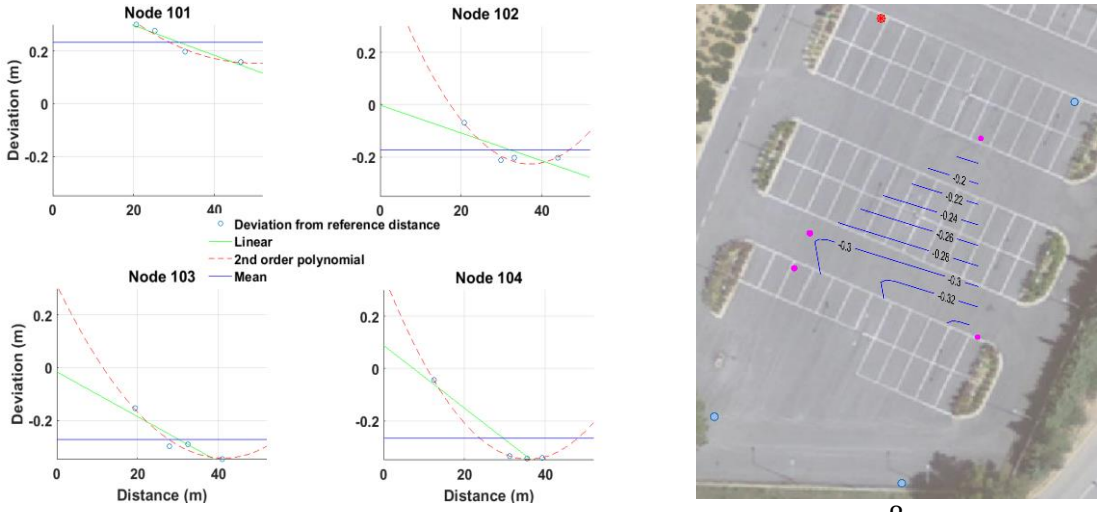
Όπου: $\hat{d}_{ij}$ η διορθωμένη απόσταση, d_{ij} η πρωτογενής μέτρηση απόστασης, $\bar{x}$ η μέση τιμή διόρθωσης
Η σχέση της γραμμικής προσαρμογής είναι:

$$\hat{d}_{ij} = d_{ij} + f_L(d_{ij}) \qquad (3)$$

Όπου: $\hat{d}_{ij}$ η διορθωμένη απόσταση, d_{ij} η πρωτογενής μέτρηση απόστασης, $f_L(d_{ij})$ η εξίσωση της ευθείας που περιγράφει τις τιμές διόρθωσης συναρτήσει της απόστασης.
Η σχέση της προσαρμογής με πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού είναι:

$$\hat{d}_{ij} = d_{ij} + f_P(d_{ij}) \qquad (4)$$

Όπου: $\hat{d}_{ij}$ η διορθωμένη απόσταση, d_{ij} η πρωτογενής μέτρηση απόστασης, $f_P(d_{ij})$ η εξίσωση του πολυωνύμου που περιγράφει τις τιμές διόρθωσης συναρτήσει της απόστασης. Το αποτέλεσμα των τριών μοντέλων παρουσιάζεται γραφικά στο Διάγραμμα 7 (αριστερά). Στο Διάγραμμα 7 (δεξιά) παρουσιάζονται οι τιμές διορθώσεων που προκύπτουν για τον πομποδέκτη 103 (κόκκινο σημείο) με απεικόνιση σε μορφή ισοδυναμικών καμπύλων. Τα magenta σημεία είναι τα σημεία stop & go.



α β

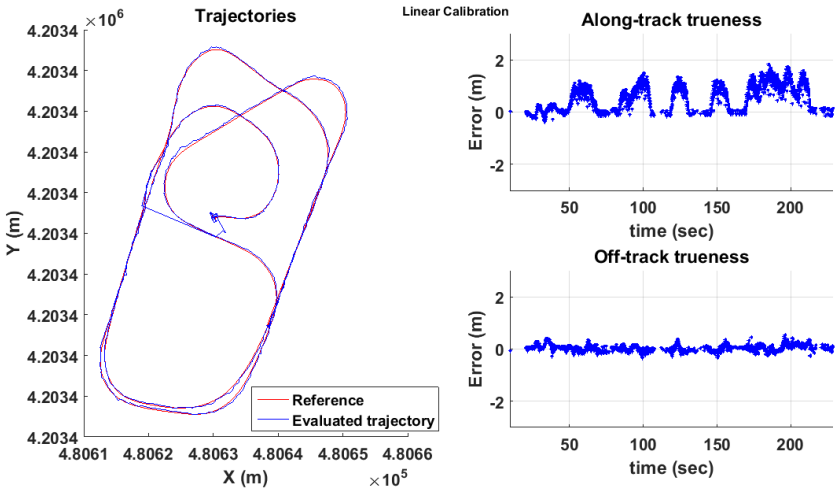
Σχήμα 7: Γραφική αναπαράσταση μοντέλων βαθμονόμησης για μεταξύ στατικών και κινητού πομποδεκτών (αριστερά), καμπύλες τιμών απόκλισης για τον πομποδέκτη 103 (δεξιά).

Εφαρμόζοντας τις διορθώσεις των τριών διαφορετικών μοντέλων εξάγονται 3 επιπλέον τροχιές UWB οι οποίες αξιολογούνται με την ίδια διαδικασία. Ο Πίνακας 4 συνοψίζει την απόδοση του κινηματικού εντοπισμού για τις διαφορετικές μεθόδους βαθμονόμησης.

Πίνακας 4: Συγκεντρωτικά στοιχεία επιδόσεων διαφορετικών μεθόδων βαθμονόμησης.

		Χωρίς Βαθμονόμηση (m)	**Μέση τιμή (m)**	**Γραμμική προσαρμογή (m)**	**Πολυωνυμική προσαρμογή (m)**
Κατά μήκος	$\bar{x}$	0.65	0.61	0.60	0.65
	σ	0.44	0.46	0.46	0.44
Εγκάρσια	$\bar{x}$	0.21	0.12	0.10	0.21
	σ	0.14	0.09	0.08	0.14

Προκύπτει πως η βελτίωση στο τελικό αποτέλεσμα υπολογισμού τροχιάς εμφανίζεται με χρήση της βαθμονόμησης μέση τιμής και γραμμικής προσαρμογής με τη γραμμική προσαρμογή να παρουσιάζει της μεγαλύτερη βελτίωση. Η πολυωνυμική προσαρμογή δεν παρουσιάζει βελτίωση γεγονός που οφείλεται ενδεχομένως στην υπερβολική προσαρμογή στα δεδομένα (overfitting) λόγω του μικρού σχετικά δείγματος. Η εντονότερη βελτίωση εγκάρσια στην κίνηση πιθανών υποδεικνύει αδυναμία του EKF εστιασμένη στη ρύθμιση των παραμέτρων του δυναμικού μοντέλου.



Σχήμα 8: Τροχιά οχήματος (αριστερά) και χρονοσειρές απόκλισης κατά μήκος (δεξιά άνω) και εγκάρσια (δεξιά κάτω) με εφαρμογή διορθώσεων γραμμικού μοντέλου προσαρμογής.

5. Συμπεράσματα- Προτάσεις

Η χρήση της τεχνολογίας UWB σε εφαρμογές κινηματικού εντοπισμού παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα καθώς μπορούν να επιτευχθούν υψηλά επίπεδα ορθότητας και ακρίβειας. Τα εγγενή χαρακτηριστικά της τεχνολογίας της προσφέρουν αντοχή σε παρεμβολές και εμπόδια αντιμετωπίζοντας σφάλματα που οφείλονται σε συνθήκες NLoS και πολύ-ανακλάσεων. Η μεγάλη εμβέλεια και υψηλή δειγματοληψία την καθιστούν σημαντικό εργαλείο στη διαδικασία ανάπτυξης εφαρμογών που απαιτούν εντοπισμό καθώς είναι κατάλληλη για χρήση σε διαφορετικά περιβάλλοντα.

Ένα σημαντικό σημείο κατά την χρήση των μετρήσεων UWB είναι η ορθή εφαρμογή βαθμονόμησης για την ελαχιστοποίηση συστηματικών σφαλμάτων. Από την πειραματική διερεύνηση της παρούσας εργασίας προκύπτει πως η βαθμονόμηση των μετρήσεων UWB μπορεί να βελτιώσει την επίλυση δικτύου σταθερών κόμβων κατά ποσοστό 98% ενώ η επιλογή σωστής μεθόδου βαθμονόμησης για κινηματικό εντοπισμό μπορεί να προσφέρει βελτίωση της τάξης του 52%.

6. Βιβλιογραφία

Dewberry B. and Petroff A., *"Precision Navigation with Ad-Hoc Autosurvey using Ultra-Wideband Two-Way Ranging Network"* 12th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC'15), 2015

Dierenbach K. O., Ostrowski S., Jozkow G., Toth C.K., Grejner-Brzezinska D. A. and Koppanyi Z., *"UWB for Navigation in GNSS Compromised Environments"*, ION GNSS+ 2015, Tampa, Florida

Gezici S., Tian Z., Giannakis G. B., Kobayashi H., Molisch A. F., Poor H. V. and Sahinoglu Z., *"Localization via ultra-wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks"* in IEEE Signal Processing Magazine, vol. 22, no. 4, pp. 70-84, 2005.

Gikas V. and Perakis H., *"Rigorous Performance Evaluation of Smartphone GNSS/IMU Sensors for ITS Applications"*, Sensors 16, no. 8: 1240, 2016

Lee J. S., Su Y. W. and Shen C. C., *"A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi"* IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 46-51., 2007, Taipei

Whitmore A., Agarwal A. and Da Xu, L., "*The Internet of Things-A survey of topics and trends"* Information Systems Frontiers, Volume 17, Issue 2, pp 261–274, 2015