



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

**Πειραματική αξιολόγηση δεκτών GNSS χαμηλού κόστους σε
εφαρμογές ευφύων συστημάτων μεταφορών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σωτηρίου Παναγιώτης

Επιβλέπων:

Γκίκας Βασίλειος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2017



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

School of Rural and Surveying Engineering

Department of Topography

Laboratory of General Geodesy

**Experimental evaluation of low cost GNSS receivers for intelligent
transport systems applications**

DIPLOMA THESIS

Sotiriou Panagiotis

Supervisor:

Gikas Vasileios, Associate Professor NTUA

Athens 2017

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η πειραματική διερεύνηση των δυνατοτήτων συστημάτων γεωδαιτικού εντοπισμού GNSS χαμηλού κόστους και η αξιολόγηση των επιδόσεων τους (διαθεσιμότητα, ακρίβεια και ορθότητα) σε διαφορετικές συνθήκες λήψης του δορυφορικού σήματος, για εφαρμογές ευφυών συστημάτων μεταφορών. Για τον σκοπό αυτό, σχεδιάστηκε και καταγράφηκε τροχιά οχήματος με χρήση συστημάτων GNSS (*M8T, u-blox®*) και GNSS/INS (*SPATIAL, Advanced Navigation Inc.*) χαμηλού κόστους, καθώς και συστήματος GNSS/INS (*SPAN, NovAtel®*) υψηλής ακρίβειας, που μετά από κατάλληλη επεξεργασία παρείχε την τροχιά αναφοράς.

Από τις πρωτογενείς παρατηρήσεις του δέκτη GNSS (*M8T, u-blox®*) συνδεδεμένου με γεωδαιτικού τύπου κεραία (*NovAtel Pinwheel 702-GG*), υπολογίστηκαν τρεις τροχιές του οχήματος ελέγχου. Η πρώτη τροχιά προήλθε με χρήση του λογισμικού του δέκτη *u-blox®* με τη μέθοδο του απόλυτου εντοπισμού (*stand-alone positioning, SPP*) σε πραγματικό χρόνο. Προκειμένου να διερευνηθεί περαιτέρω η λύση απόλυτου εντοπισμού, οι πρωτογενείς παρατηρήσεις ψευδοαποστάσεων διοχετεύτηκαν στο ελεύθερο λογισμικό *RTKLIB* και η τροχιά του οχήματος υπολογίστηκε πάλι με τη μέθοδο του απόλυτου εντοπισμού. Τέλος, προκειμένου να αξιολογηθεί η τεχνική κινηματικού εντοπισμού με μετρήσεις φάσεων (*Real Time Kinematic, RTK*) οι παρατηρήσεις φάσεων του δέκτη χαμηλού κόστους διοχετεύτηκαν στο ελεύθερο λογισμικό *RTKLIB* και επιλύθηκαν με την τεχνική RTK GNSS.

Στη φάση ανάλυσης, οι τροχιές που παρήχθησαν από τον δέκτη GNSS χαμηλού κόστους συγκρίθηκαν έναντι της τροχιάς αναφοράς με τη βοήθεια λογισμικού αξιολόγησης τροχιών προκειμένου να προκύψουν οι παράμετροι ποιότητας, διαθεσιμότητα, ακρίβεια και ορθότητα για κάθε επίλυση.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι η σύνδεση του δέκτη χαμηλού κόστους GNSS (*M8T, u-blox®*) με γεωδαιτικού τύπου κεραία, επηρεάζει το λογισμικό του δέκτη και δεν παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα απόλυτου εντοπισμού. Ακόμα, πως το ελεύθερο λογισμικό και ο χαμηλού κόστους δέκτης, μπορούν να φέρουν εις πέρας μη κρίσιμου χαρακτήρα εφαρμογές ευφυών συστημάτων μεταφορών, όμως η χρήση γεωδαιτικού τύπου κεραίας δεν προσέφερε κάποια ουσιαστική βελτίωση στην ποιότητα του απόλυτου εντοπισμού. Όσον αφορά την επίδοση του ελεύθερου λογισμικού και του χαμηλού κόστους δέκτη στην υλοποίηση της μεθόδου RTK, προέκυψε ότι προσφέρει ικανοποιητική υλοποίηση του σχετικού εντοπισμού, με βασικό πλεονέκτημα τη μεγάλη μείωση του κόστους.

Λέξεις Κλειδιά: GNSS, GNSS/INS, Εντοπισμός χαμηλού κόστους, SPP, RTK, ITS

ABSTRACT

The scope of this diploma thesis is to investigate the potentials of low cost GNSS positioning systems and to evaluate their performance (availability, precision and trueness) in different satellite signal reception situations, for applications regarding intelligent transport systems. For this, vehicle's trajectory planned and obtained with the use of GNSS low cost receiver (*M8T, u-blox®*), GNSS/INS low cost system (*SPATIAL, Advanced Navigation Inc.*) and the high precision GNSS/INS system (*SPAN, NovAtel®*) that produced the reference trajectory.

From GNSS (*M8T, u-blox®*) receiver's raw data measurements acquired using geodetic grade antenna (*NovAtel Pinwheel 702-GG*), produced three trajectories of the vehicle. The first one calculated by the u-blox receiver's software using real time absolute positioning method (*stand-alone positioning, SPP*). In order to investigate the before mentioned absolute positioning trajectory, the receiver's raw data code measurements supplied in the open source software *RTKLIB* and the trajectory calculated again by using the absolute positioning method. Also, in order to investigate the kinematic positioning method, with the use of phase measurements (*Real Time Kinematic, RTK*), the low cost receiver's raw phase data supplied in the *RTKLIB* software and processed using the RTK positioning method.

The trajectories obtained by the low cost GNSS receiver, compared with the reference trajectory, using trajectory evaluation software that produces the quality parameters of availability, precision and trueness for each trajectory.

From the comparison of trajectories derives that the low cost GNSS (*M8T, u-blox®*) receiver's internal software, affected from the use of geodetic grade antenna and produced unreliable absolute positioning. Also, the open source software along with the low cost receiver can produce accurate absolute positioning for non safety critical applications, but the use of geodetic grade antenna does not improve the quality of the positioning. Regarding the performance of the open source software and the low cost receiver, for producing RTK positioning, the comparison shows that the method can successfully derived, having great cost reduction.

Key Words: GNSS, GNSS/INS, Low cost positioning, SPP, RTK, ITS

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Γκίκα Βασίλειο, Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ, για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και την επιμελή επίβλεψη και καθοδήγησή του, καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες, Μπίμη Αθανάσιο και Περάκη Χαράλαμπο, για την πολύτιμη βοήθειά τους, κατά την προετοιμασία και διεξαγωγή των μετρήσεων και την επεξεργασία των δεδομένων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ABSTRACT	2
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	4
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
Γενικά	7
Μεθοδολογία και Φάσεις Υλοποίησης.....	8
Δομή Διπλωματικής Εργασίας	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΥΦΥΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ	
ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ	12
1.1. Ευφυή Συστήματα Μεταφορών και Δορυφορικός Εντοπισμός.....	12
1.2. Συστήματα Δορυφορικού Εντοπισμού Χαμηλού Κόστους.....	13
1.2.1. Δέκτες και κεραίες δορυφορικού εντοπισμού (GNSS receivers, antennas).....	13
1.2.2. Λογισμικό επεξεργασίας δεδομένων δορυφορικού εντοπισμού	15
1.3. Αδρανειακά Συστήματα Εντοπισμού (INS systems)	16
1.4. Μέτρα Ποιότητας Εντοπισμού.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ (GNSS)	18
2.1. Γενικά	18
2.1.1. Αρχή Λειτουργίας Συστημάτων GNSS	18
2.1.2. Τμήματα συστημάτων GNSS	19
2.1.3. Συστήματα GNSS	20
2.2. Βασικά Στοιχεία Δορυφορικού Εντοπισμού	21
2.2.1. Δορυφορικό Σήμα	21
2.2.2. Μετρήσεις	23
2.2.3. Σφάλματα	26
2.3. Μέθοδοι και Τεχνικές Δορυφορικού Εντοπισμού	30
2.3.1. Απόλυτος Εντοπισμός και PPP	30
2.3.2. Σχετικός Εντοπισμός και τεχνικές επεξεργασίας των μετρήσεων	31
2.4. Τεχνική εντοπισμού σε Πραγματικό Χρόνο (RTK)	33
2.5. Σχετικός Εντοπισμός Μεγάλης Εμβέλειας.....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ (INS)	37
3.1. Αρχή Λειτουργίας Συστημάτων INS	37
3.2. Συστήματα Αναφοράς και Αδρανειακός Εντοπισμός	38
3.2.1. Παράγοντες που επιδρούν στη λειτουργία των INS	38
3.2.2. Συστήματα αναφοράς	39
3.3. Αισθητήρες και Μέρη των Συστημάτων INS.....	41
3.3.1. Αισθητήρες αδρανειακών συστημάτων εντοπισμού	41
3.3.2. Μέρη αδρανειακών συστημάτων εντοπισμού	42
3.4. Κατηγορίες Συστημάτων INS.....	44
3.4.1. Συστήματα σταθερής πλατφόρμας (gimballed INS)	44
3.4.2. Προσκολλημένα συστήματα (strapdown INS)	44

3.5. Έναρξη Λειτουργίας INS	45
3.6. Πηγές Σφαλμάτων	46
3.7. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Συστημάτων INS	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΟ ΦΙΛΤΡΟ KALMAN ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ GNSS/INS	49
4.1. Γενικά	49
4.2. Πρόβλεψη, Φιλτράρισμα και Εξομάλυνση.....	50
4.3. Μαθηματικά Μοντέλα Φίλτρου Kalman	51
4.3.1. Συναρτησιακό μοντέλο	51
4.3.2. Δυναμικό μοντέλο.....	52
4.3.3. Στοχαστικά μοντέλα	52
4.4. Εναλλακτικές Μορφές Φίλτρων Kalman	52
4.5. Ολοκληρωμένα Συστήματα Εντοπισμού GNSS/INS	54
4.5.1. Βαθμός συνεργασίας συστημάτων GNSS/INS	54
4.6. Πλεονεκτήματα Ολοκληρωμένων Συστημάτων Εντοπισμού	56
4.7. Αξιολόγηση Λύσης Πλοήγησης	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ	59
5.1. Ολοκληρωμένο Σύστημα Εντοπισμού NovAtel SPAN System.....	59
5.1.1. Σύστημα δορυφορικού εντοπισμού	59
5.1.2. Αδρανειακή μονάδα.....	62
5.1.3. Λογισμικό συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων	62
5.2. Ολοκληρωμένο Σύστημα Εντοπισμού Advanced Navigation SPATIAL.....	64
5.2.1. Σύστημα δορυφορικού εντοπισμού	65
5.2.2. Σύστημα αδρανειακού εντοπισμού	66
5.2.3. Λογισμικό συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων	67
5.3. Δέκτης Δορυφορικού Εντοπισμού u-blox EVK-M8/NEO-M8T.....	67
5.4. Λογισμικό Επεξεργασίας Δεδομένων GNSS RTKLIB	69
5.5. Λογισμικό Υπολογισμού Συμβιβαστότητας και Ορθότητας Τροχιών	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΥΛΛΟΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	72
6.1. Σχεδιασμός Πειράματος	72
6.2. Συλλογή Δεδομένων	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΙ ΕΞΑΓΩΓΗ ΤΡΟΧΙΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ	
7.1. Εξαγωγή Τροχιάς Αναφοράς Οχήματος Ελέγχου	78
7.2. Εξαγωγή Τροχιάς με Χρήση Δέκτη GNSS Χαμηλού Κόστους (u-blox M8T)	84
7.3. Εξαγωγή Τροχιάς με Χρήση Δέκτη GNSS Χαμηλού Κόστους και Ελεύθερου Λογισμικού (u-blox M8T, RTKLIB SPP RTKPOST)	85
7.4. Εξαγωγή Τροχιάς με Χρήση Δέκτη GNSS Χαμηλού Κόστους και Ελεύθερου Λογισμικού (u-blox M8T, RTKLIB RTK-GNSS RTKNAVI)	86
7.5. Εξαγωγή Τροχιάς με Χρήση Δέκτη GNSS Χαμηλού Κόστους και Συστήματος GNSS/INS Χαμηλού Κόστους (u-blox M8T, SPATIAL RTK-GNSS/MEMS-IMU) .	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΡΟΧΙΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	88
8.1. Αυτόνομη Λύση Εντοπισμού Δέκτη GNSS Χαμηλού Κόστους (u-blox M8T) ...	88
8.2. Λύση Εντοπισμού Δέκτη GNSS Χαμηλού Κόστους και Ελεύθερου Λογισμικού	

(u-blox M8T, RTKLIB SPP RTKPOST).....	92
8.3. Λύση Εντοπισμού Δέκτη GNSS Χαμηλού Κόστους και Ελεύθερου Λογισμικού (u-blox M8T, RTKLIB RTK-GNSS RTKNAVI).....	96
8.4. Λύση Εντοπισμού Δέκτη GNSS Χαμηλού Κόστους και Συστήματος GNSS/INS Χαμηλού Κόστους (u-blox M8T, SPATIAL RTK-GNSS/MEMS-IMU)	100
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	102
9.1. Συμπεράσματα.....	102
9.2. Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.....	104
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	105
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	106
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	108

Γενικά

Τα συστήματα έξυπνων μεταφορών (*Intelligent Transport Systems, ITS*), βασίζονται κυρίως στον δορυφορικό εντοπισμό, προκειμένου να παρέχουν υπηρεσίες για εφαρμογές όπως διαχείριση κίνησης και διαδρομών, διαχείρισης στόλου οχημάτων, χρέωση χρήσης οδού, διαχείριση έκτακτων καταστάσεων, υποβοήθηση οδήγησης και πληθώρα άλλων εφαρμογών. Η εκάστοτε εφαρμογή έχει διαφορετικές απαιτήσεις σε ακρίβεια, ορθότητα, διαθεσιμότητα και ακεραιότητα του δορυφορικού εντοπισμού. Όταν οι απαιτήσεις μιας εφαρμογής το επιβάλουν, είναι συνήθης πρακτική η συνεργασία των δορυφορικών συστημάτων (GNSS) με άλλα συστήματα εντοπισμού, προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι εγγενείς περιορισμοί του δορυφορικού εντοπισμού, με πιο διαδεδομένη συνεργασία αυτή με τον αδρανειακό εντοπισμό.

Τα δορυφορικά (GNSS) και αδρανειακά (INS) συστήματα εντοπισμού είναι αυτόνομα συστήματα εντοπισμού με δυνατότητα υψηλών επιδόσεων ακρίβειας. Ωστόσο, αφενός η αδυναμία λειτουργίας των συστημάτων GNSS σε κλειστούς χώρους και χώρους με περιορισμένη λήψη του δορυφορικού σήματος και αφετέρου, η μείωση της ακρίβειας εντοπισμού των αδρανειακών συστημάτων κατά το πέρασ του χρόνου, οδήγησε στην ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων εντοπισμού μέσω της συνεργασίας συστημάτων GNSS και INS και την εφαρμογή προηγμένων τεχνικών επεξεργασίας (*Kalman filtering*). Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται υψηλή ποιότητα στη λύση πλοήγησης οχημάτων ακόμη και σε δύσκολα περιβάλλοντα. Για την επίτευξη υψηλής ποιότητας στη λύση πλοήγησης είναι συνήθης η χρήση γεωδαιτικών δεκτών GNSS και αδρανειακών συστημάτων υψηλού κόστους. Πρόσφατα όμως, οι εξελίξεις στην τεχνολογία των συστημάτων GNSS επιτρέπουν την λήψη μετρήσεων ψευδοαποστάσεων και φάσεων με δέκτες υψηλής ευαισθησίας και χαμηλού κόστους. Παράλληλα, οι εξελίξεις στις τεχνολογίες αδρανειακών συστημάτων της κατηγορίας MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) επιτρέπουν την λήψη αδρανειακών μετρήσεων χαμηλού κόστους.

Σε αυτό το πλαίσιο, στόχος της εργασίας αυτής είναι η ανάδειξη και η διερεύνηση, των δυνατοτήτων συστημάτων GNSS και GNSS/INS χαμηλού κόστους σε εφαρμογές πλοήγησης οχημάτων. Ειδικότερα, η εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη ακρίβειας (συμβιβαστότητας και ορθότητας) και διαθεσιμότητας της λύσης πλοήγησης, με συστήματα GNSS χαμηλού κόστους. Η μεθοδολογία υλοποίησης στηρίζεται στη λήψη, επεξεργασία και στατιστική ανάλυση δεδομένων εντοπισμού σε διαφορετικά σενάρια παρατήρησης.

Μεθοδολογία και Φάσεις Υλοποίησης

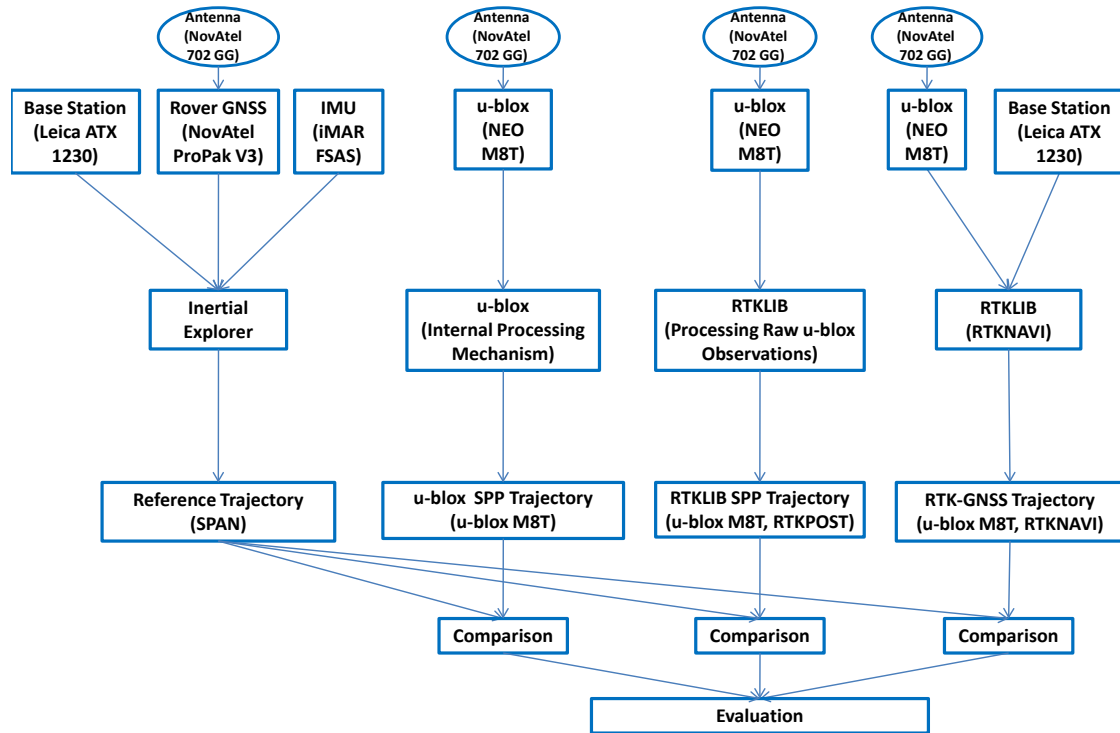
Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση των δυνατοτήτων και επιδόσεων, συστημάτων γεωδαιτικού εντοπισμού GNSS σε εφαρμογές πλοήγησης οχημάτων. Συγκεκριμένα, το σενάριο παρατήρησης περιελάμβανε την καταγραφή τροχιάς οχήματος η οποία περιλαμβάνει τμήματα με την παρουσία εμποδίων καθώς και τμήματα ανεμπόδιστης λήψης του δορυφορικού σήματος. Η διαδρομή του οχήματος καταγράφηκε με τρία συστήματα εντοπισμού καταλήγοντας στη εξαγωγή των τροχιών του οχήματος με την εφαρμογή των μεθοδολογιών που παρουσιάζονται στα αντίστοιχα κεφάλαια.

Η βασική διερεύνηση της εργασίας περιλαμβάνει τον υπολογισμό της τροχιάς του οχήματος ελέγχου με χρήση του δορυφορικού δέκτη GNSS χαμηλού κόστους *u-blox M8T* και κεραία GNSS υψηλής ποιότητας *Novatel Pinwheel 702-GG*. Συγκεκριμένα, από τα δεδομένα καταγραφής προέκυψαν τρεις τροχιές ως εξής.

Η πρώτη τροχιά (*u-blox SPP*) υπολογίστηκε από το λογισμικό του ίδιου του δέκτη με τη μέθοδο του απόλυτου εντοπισμού σε πραγματικό χρόνο. Η δεύτερη τροχιά (*RTKLIB SPP*) προέκυψε με επεξεργασία των πρωτογενών παρατηρήσεων ψευδοαποστάσεων, του δέκτη *u-blox M8T* στο ελεύθερο λογισμικό *RTKLIB* και ειδικότερα μέσω της εφαρμογής *RTKPOST*, επίσης με τη μέθοδο του απόλυτου εντοπισμού και τις ίδιες παραμέτρους επεξεργασίας όπως στην πρώτη περίπτωση. Τέλος, η τρίτη τροχιά (*RTK GNSS*) του οχήματος καταγραφής προέκυψε με επίλυση των μετρήσεων φάσης κινούμενου δέκτη (*u-blox M8T*) και των αντίστοιχων μετρήσεων του σταθμού αναφοράς (*Leica ATX*) με την τεχνική κινηματικού προσδιορισμού σε πραγματικό χρόνο (*Real Time Kinematic, RTK*). Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το ελεύθερο λογισμικό *RTKLIB* μέσω της εφαρμογής *RTKNAVI*.

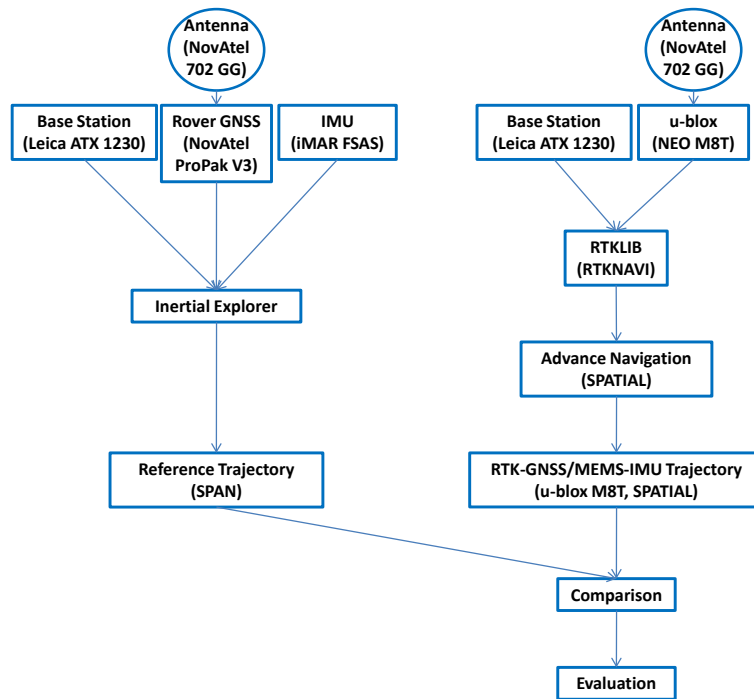
Προκειμένου να ελεγχθεί η ποιότητα της τροχιάς του οχήματος με εξοπλισμό χαμηλού κόστους, προσδιορίστηκε ταυτόχρονα η τροχιά του οχήματος με εξοπλισμό υψηλής ακρίβειας και εξειδικευμένες τεχνικές επεξεργασίας. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε το ολοκληρωμένο σύστημα εντοπισμού GNSS/INS, *NovAtel® SPAN*. Η εξαγωγή της τροχιάς από το σύστημα *SPAN* έγινε με εκ των υστέρων επεξεργασία, ώστε να υπολογιστεί με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια, κάνοντας χρήση του λογισμικού *Inertial Explorer* που παρέχει η κατασκευάστρια εταιρία. Η τροχιά του οχήματος έτσι όπως προέκυψε από το σύστημα *SPAN* θεωρήθηκε ως η αληθής τροχιά του οχήματος ή αλλιώς τροχιά αναφοράς.

Με βάση την τροχιά αναφοράς, συγκρίθηκαν οι τροχιές που προέκυψαν όπως περιγράφηκε και αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα της σύγκρισης. Στο Σχήμα 1.α απεικονίζονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά την εκπόνηση της εργασίας.



Σχήμα 1.α: Σχηματική απεικόνιση των βημάτων πειραματικής διερεύνησης της εργασίας
Figure 1.a: Schematic presentation of thesis experimental processes

Τέλος, στο πλαίσιο αυτής της εργασίας έγινε κατ' αρχήν διερεύνηση εφαρμογής GNSS χαμηλού κόστους σε συνδυασμό με αδρανειακές μετρήσεις συστήματος GNSS/INS χαμηλού κόστους. Ειδικότερα, για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η λύση πλοήγησης από τον δέκτη *u-blox M8T* με τις αδρανειακές μετρήσεις του συστήματος GNSS/INS χαμηλού κόστους *SPATIAL, Advance Navigation*. Το σύστημα *SPATIAL* διαθέτει δορυφορικό και αδρανειακούς δέκτες χαμηλού κόστους, καθώς και το απαραίτητο λογισμικό για τον υπολογισμό του εντοπισμού, από τη συνεργασία αυτών των δεκτών. Στην προσπάθεια βελτίωσης της επίδοσης του συστήματος *SPATIAL*, διοχετεύτηκε σε αυτό η λύση RTK, έτσι όπως υπολογίστηκε από το λογισμικό *RTKLIB* με τις παρατηρήσεις του δέκτη *u-blox M8T*, αγνοώντας έτσι τη λύση που παρέχει ο ενσωματωμένος σε αυτό δορυφορικός δέκτης. Όμοια, η τροχιά αυτή συγκρίθηκε και αξιολογήθηκε με βάση την τροχιά αναφοράς.



Σχήμα 1.β: Σχηματική απεικόνιση των βημάτων πειραματικής διερεύνησης της εργασίας
Figure 1.b: Schematic presentation of thesis experimental processes

Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συστήματα ευφύων μεταφορών, η σχέση τους με τα αναδυόμενα συστήματα δορυφορικού και αδρανειακού εντοπισμού χαμηλού κόστους και τα μεγέθη που περιγράφουν την ποιότητά του εντοπισμού.

Το δεύτερο, τρίτο και τέταρτο κεφάλαιο αφορούν την κάλυψη του θεωρητικού υποβάθρου των δορυφορικών συστημάτων εντοπισμού, των αδρανειακών συστημάτων εντοπισμού και της ολοκλήρωσής τους αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα, στο δεύτερο και τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται στοιχεία σχετικά με την αρχή λειτουργίας των συστημάτων εντοπισμού GNSS και INS, τη δομή τους και τους παράγοντες που επιδρούν στη λειτουργία τους. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα ολοκληρωμένα συστήματα εντοπισμού GNSS/INS, στο μαθηματικό υπόβαθρο που καθιστά τη συνεργασία των δύο συστημάτων εφικτή και τα πλεονεκτήματα της συνεργασίας των δύο συστημάτων.

Το πέμπτο κεφάλαιο, περιλαμβάνει στοιχεία για τον εξοπλισμό και το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε κατά τη συλλογή, επεξεργασία των παρατηρήσεων και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν κατά τον σχεδιασμό και τη διεξαγωγή του πειράματος, προκειμένου να γίνει η συλλογή των δεδομένων. Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μεθοδολογίες και οι παράμετροι της επεξεργασίας των

παρατηρήσεων, προκειμένου να εξαχθεί η τροχιά του οχήματος για κάθε σενάριο επεξεργασίας των πρωτογενών δεδομένων. Στο όγδοο και ένατο κεφάλαιο γίνεται η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της σύγκρισης των παραγόμενων τροχιών και παρατίθενται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις που απορρέουν από αυτή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΥΦΥΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ

ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται τα συστήματα ευφυών μεταφορών, η σχέση τους με τα αναδυόμενα συστήματα δορυφορικού και αδρανειακού εντοπισμού χαμηλού κόστους και τα μεγέθη που περιγράφουν την ποιότητά του εντοπισμού.

1.1. Ευφυή Συστήματα Μεταφορών και Δορυφορικός Εντοπισμός

Οι μεταφορές αγαθών και ανθρώπων αποτελούν θεμελιώδη πυλώνα οικονομικής και πολιτιστικής ανάπτυξης. Για τον λόγο αυτό, η αποτελεσματικότερη οργάνωση και διεξαγωγή των μεταφορών, κρίνεται απαραίτητη προκειμένου να μεγιστοποιηθούν τα οικονομικά και κοινωνικά οφέλη που παρέχουν και να μειωθούν οι αρνητικές τους επιπτώσεις στο περιβάλλον. Ένας τρόπος για την επίτευξη της αποτελεσματικότερης χρήσης των μεταφορών, αποτελεί η αξιοποίηση και βελτίωση των ευφυών συστημάτων μεταφορών (*Intelligent Transport Systems, ITS*). Ως συστήματα ευφυών μεταφορών, ορίζονται τα συστήματα που συνδυάζουν τεχνολογίες επικοινωνιών, πληροφοριών, πληροφορικής και εντοπισμού θέσης, προκειμένου να παρέχουν υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας στους χρήστες τους, καθιστώντας τις μεταφορές αποτελεσματικότερες, ασφαλέστερες και φιλικότερες προς το περιβάλλον. Τα συστήματα ευφυών μεταφορών που χρησιμοποιούν και δεδομένα θέσης, σε συνδυασμό με τα υπόλοιπα δεδομένα και τεχνικές επεξεργασίας που εφαρμόζουν, προκειμένου να παρέχουν τις υπηρεσίες τους, καλύπτουν μεγάλο πεδίο εφαρμογών. Μερικές από αυτές είναι η πλοήγηση οχημάτων/πεζών, διαχείριση κίνησης και διαδρομών, χρέωση χρήσης οδού, ασφάλιση οχήματος με βάση τη χρήση του, διαχείριση έκτακτων καταστάσεων όπως εντοπισμός διάσωσης και μεταφορά επικίνδυνων φορτίων, υποβοήθηση οδήγησης και πολλές άλλες.

Στην πλειοψηφία των ευφυών συστημάτων μεταφορών, τα δεδομένα θέσης παρέχονται από δορυφορικά συστήματα εντοπισμού GNSS. Συνήθης πρακτική αποτελεί και η συνεργασία των δορυφορικών συστημάτων με άλλα συστήματα εντοπισμού ή η υποβοήθηση τους από άλλες πηγές δεδομένων. Η ποιότητα του εντοπισμού, αποτελεί κύριο παράγοντα, που επηρεάζει την ακρίβεια της τελικής υπηρεσίας που παρέχει το ευφύες σύστημα μεταφορών στον χρήστη του. Μερικές από τις εφαρμογές έχουν κρίσιμο χαρακτήρα, με την έννοια ότι η τυχόν αποτυχία παροχής αξιόπιστης υπηρεσίας από το ευφύες σύστημα μεταφορών, μπορεί να κοστίζει κάποιον τραυματισμό ή θάνατο, ή να έχει κάποια αρνητική οικονομική επίπτωση. Για τον λόγο αυτό, η ποιότητα του εντοπισμού πρέπει να σχετίζεται με κριτήρια, που επιτρέπουν στο ευφύες σύστημα μεταφορών να διασφαλίζει ότι η

τελική υπηρεσία που παρέχει, είναι εντός των πλαισίων των απαιτήσεων της εφαρμογής. Ανάλογα με την εφαρμογή, διάφορα κριτήρια λαμβάνονται υπόψη για την αξιολόγηση της ποιότητας του εντοπισμού, όπως η ακρίβεια, η ορθότητα, η διαθεσιμότητα και η ακεραιότητα του εντοπισμού. Έτσι, κρίνεται απαραίτητη η αξιολόγηση του εντοπισμού των δορυφορικών συστημάτων GNSS και ειδικότερα των GNSS χαμηλού κόστους, προκειμένου να επιταχυνθεί η ανάπτυξη και βελτίωση των ευφυών συστημάτων μεταφορών.

1.2. Συστήματα Δορυφορικού Εντοπισμού Χαμηλού Κόστους

Το κόστος με το οποίο πραγματοποιείται ο δορυφορικός εντοπισμός προσδιορίζεται από τα χαρακτηριστικά του δορυφορικού δέκτη και κεραίας που θα χρησιμοποιηθούν, καθώς επίσης από τη μέθοδο εντοπισμού που θα επιλεγεί και το λογισμικό με την οποία θα υλοποιηθεί.

1.2.1. Δέκτες και κεραίες δορυφορικού εντοπισμού (GNSS receivers, antennas)

Στην πλειοψηφία των τοπογραφικών εργασιών που εκτελούνται με δορυφορικούς δέκτες, χρησιμοποιούνται υψηλής ποιότητας γεωδαιτικοί δέκτες και κεραίες. Οι δέκτες αυτοί είναι τις περισσότερες φορές δύο συχνοτήτων προκειμένου να παρέχουν μία πληθώρα πλεονεκτημάτων, όπως πιο γρήγορη και σταθερή επίλυση των ασαφειών φάσης και διόρθωση σφαλμάτων της ιονόσφαιρας. Ακόμα, παρέχουν τεχνικές αξιολόγησης των λαμβανόμενων σημάτων, που απορρίπτουν τα κακής ποιότητας και τα προερχόμενα από ανάκλαση σήματα. Επίσης, η ποιότητα των ηλεκτρονικών διατάξεων και του χρονομέτρου των δεκτών είναι πολύ υψηλή, παρέχοντας ηλεκτρομαγνητική προστασία από τις εξωτερικές πηγές παρεμβολών και διευκόλυνση στην διατήρηση συγχρονισμού. Παρέχουν ακόμα μεγάλης διάρκειας ενεργειακή αυτονομία. Το κόστος των δεκτών αυτών μπορεί να φτάσει αρκετές χιλιάδες ευρώ, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους.

Τα τελευταία χρόνια, οι δέκτες μίας συχνότητας, έχει αποδειχθεί ότι παρέχουν αξιόπιστα αποτελέσματα για βάσεις της τάξης αρκετών χιλιομέτρων. Το γεγονός αυτό έχει ανοίξει το πεδίο σε δέκτες χαμηλού κόστους τύπου πλοήγησης, να χρησιμοποιούνται σε τοπογραφικές εργασίες. Το κόστος τους είναι μειωμένο διότι είναι δέκτες κώδικα και διαθέτουν χαμηλότερης ποιότητας ηλεκτρονικές διατάξεις και χρονόμετρα. Τα τελευταία χρόνια όμως, οι δεκτές αυτοί επιπρόσθετα παρέχουν τη δυνατότητα μετρήσεων φάσης και τη λήψη παρατηρήσεων από περισσότερα GNSS συστήματα, γεγονός που βελτιώνει τις επιδόσεις ακρίβειας που μπορούν να επιτύχουν. Ακόμα, οι δέκτες χαμηλού κόστους στην πλειοψηφία τους παρουσιάζουν υψηλή ευαισθησία στη λήψη του δορυφορικού σήματος, πράγμα που καθιστά

δυνατή την παρακολούθηση εξασθενημένων δορυφορικών σημάτων, όπως αυτών που διέρχονται εντός κτηρίων, πυκνής βλάστησης ή φθάνουν ανακλώμενα. Επομένως, παρέχουν εντοπισμό κάτω από συνθήκες όπου οι γεωδαιτικού τύπου δέκτες αδυνατούν να παρέχουν, με επηρεασμένη όμως την ακρίβειά του. Στο Σχήμα 1.1 φαίνονται διάφορες κατηγορίες δεκτών GNSS, η τάξη μεγέθους της τιμής τους, αλλά και για ποιες εφαρμογές ενδείκνυται η κάθε κατηγορία.

receiver class	used signal	applications	accuracy	appr. costs
low cost	code or phase-smoothed code, 1 frequency	car navigaton, location based services, sailing, mass market	1 to 10 m	100 – 500 €
geodata acquisition	phase-smoothed code, 1 frequency	infrastructure planning, architecture, GIS applications	0,5 to 3 m	5 000 – 10 000 €
geodetic	code and phase, in general 2 frequencies	surveying, geodynamics	0,001 to 0,1 m	10 000 € - 30 000 €

Σχήμα 1.1: Κατηγορίες δορυφορικών δεκτών εντοπισμού(Πηγή: Schwieger, 2010)
Figure 1.1: Categories of GNSS Receivers (Source: Schwieger, 2010)



Σχήμα 1.2: Δέκτης GNSS χαμηλού (αριστερά) και υψηλού (δεξιά) κόστους
Figure 1.2: Low cost (left) and geodetic grade (right) GNSS receivers

Άρρηκτα συνδεδεμένη με την απόδοση του δέκτη, είναι και η κατηγορία της κεραίας GNSS. Οι κεραίες υψηλής ποιότητας τύπου *micro-strip* και *choking*, που χρησιμοποιούνται για γεωδαιτικές/τοπογραφικές εργασίες, κοστίζουν έως αρκετές χιλιάδες ευρώ. Οι κεραίες αυτές μειώνουν την επίδραση πολυανάκλασεων, έχουν εξαιρετικά σταθερή συμπεριφορά του κέντρου φάσης τους, του οποίου η θέση είναι γνωστή με μεγάλη ακρίβεια και παρέχουν προστασία από παρεμβολές. Οι κατασκευαστές δεκτών GNSS χαμηλού κόστους παρέχουν επίσης κεραίες GNSS

χαμηλού κόστους. Οι κεραιές αυτές, δεν έχουν τόσο σταθερή συμπεριφορά, ούτε παρέχουν προστασία απορρίπτοντας σήματα που προέρχονται από πολυανακλάσεις, είναι όμως εξαιρετικά ευαίσθητες στη λήψη του σήματος.



Σχήμα 1.3: Κεραιές GNSS χαμηλού (αριστερά) και υψηλού (δεξιά) κόστους
Figure 1.3: Low cost (left) and high cost (right) GNSS antennas

1.2.2. Λογισμικό επεξεργασίας δεδομένων δορυφορικού εντοπισμού

Οι κατασκευαστές δεκτών GNSS γεωδαιτικού τύπου, παρέχουν επίσης ποικιλία πακέτων λογισμικών για πληθώρα εργασιών που αφορούν στον σχεδιασμό γεωδαιτικών/τοπογραφικών εργασιών, τις διαδικασίες συλλογής δεδομένων πεδίου και κυρίως την επεξεργασία και στατιστική ανάλυση των δεδομένων που συλλέγουν οι δέκτες. Η επεξεργασία των δεδομένων οδηγεί στην εξαγωγή των τελικών προϊόντων που ενδιαφέρουν τον χειριστή, όπως η επίλυση βάσεων και δικτύων με στόχο τον υπολογισμό συντεταγμένων σημείων. Αντίστοιχα στην περίπτωση κινηματικών εφαρμογών και πλοήγησης οχημάτων στόχος είναι ο υπολογισμός της τροχιάς οχημάτων. Τα λογισμικά αυτά, είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να απλοποιούν τις εργασίες του χειριστή, του οποίου η πρόσβαση στους αλγόριθμους και τις τεχνικές επεξεργασίας του λογισμικού δεν είναι δυνατή. Οι εταιρίες κατασκευής δορυφορικών δεκτών, αναπτύσσουν και παρέχουν με χρέωση στους χρήστες τα αντίστοιχα λογισμικά, ανάλογα με τις υπηρεσίες που καλύπτουν, την εμπορική πολιτική της εταιρίας, κ.α. Μεταξύ άλλων, τέτοια λογισμικά είναι τα *Javad Justin*, *Leica GeoOffice*, *Topcon Tools*, *Trimble BusinessCenter* και *Novatel GrafNav* των αντίστοιχων οίκων κατασκευής δορυφορικών δεκτών.

Τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί από κρατικούς φορείς, εκπαιδευτικούς οργανισμούς και ερευνητές, ελεύθερα λογισμικά ανοικτού κώδικα για την επεξεργασία δορυφορικών δεδομένων, τα οποία χρησιμοποιούν εξελιγμένους αλγόριθμους και τεχνικές επεξεργασίας και παρέχουν αποδεδειγμένα αξιόπιστα αποτελέσματα. Επίσης, πολλά από αυτά δίνουν τη δυνατότητα εποπτείας και παρέμβασης στη λειτουργία τους. Τα λογισμικά αυτά όντας ελεύθερα, δεν επιβαρύνουν οικονομικά τον χρήστη. Ενδεικτικά, τέτοια λογισμικά είναι τα *RTKLIB*, *OPUS*, *SCOOT*, κ.α.

1.3. Αδρανειακά Συστήματα Εντοπισμού (INS systems)

Το μέγεθος, το βάρος, η επίδοση και το κόστος των αδρανειακών συστημάτων, διαφέρουν ανάλογα με την τεχνολογία κατασκευής τους και τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων τους. Γενικά, τα συστήματα υψηλών επιδόσεων είναι ογκωδέστερα και κοστίζουν περισσότερο. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των μικρο-ηλεκτρομηχανικών συστημάτων (*Micro-Electro-Mechanical-Systems, MEMS*), έκανε δυνατή την κατασκευή μικροσκοπικών επιταχυνσιομέτρων και γυροσκοπίων χαμηλού κόστους, τα οποία αντικατέστησαν τους παραδοσιακούς αδρανειακούς αισθητήρες σε πολλές εφαρμογές. Το γεγονός αυτό, τους έχει επιτρέψει να κερδίζουν ολοένα και περισσότερο έδαφος σε εφαρμογές όπως η πλοήγηση οχημάτων. Ωστόσο, η ακρίβεια και οι επιδώσεις των αισθητήρων αυτών είναι σημαντικά μειωμένη. Λόγω του υψηλού θορύβου στις μετρήσεις, η ακρίβεια της πλοήγησης μειώνεται πολύ πιο σύντομα. Ως αποτέλεσμα, τα συστήματα INS και ειδικότερα αυτά που χρησιμοποιούν αισθητήρες *MEMS*, δεν ενδείκνυνται για χρήση σε εφαρμογές πλοήγησης χωρίς τη συνεργασία τους με άλλα συστήματα.

Ένας τρόπος κατηγοριοποίησης των συστημάτων INS, αφορά τον βαθμό ελάττωσης της ακρίβειάς τους στον προσδιορισμό θέσης με το χρόνο. Άλλος τρόπος κατηγοριοποίησης, αποτελεί η ποιότητα των αισθητήρων του INS. Στο Σχήμα 1.4 φαίνονται διάφορες κατηγορίες συστημάτων INS, ανάλογα με την αβεβαιότητα που παρουσιάζουν τα γυροσκόπια τους, η τάξη μεγέθους της τιμής τους, αλλά και για ποιες εφαρμογές ενδείκνυται η κάθε κατηγορία.

Computers Cameras Medical Games	Sensor Stabilization Automotive General Aviation	Commercial AHRS Guided Munitions	Commercial & Military Aircraft Navigation Commercial Spacecraft
>200 deg/hr	10-200 deg/hr	0.1-10 deg/hr	<0.01 deg/hr
\$50 - 1,000	\$5,000-10,000	\$10,000-50,000	>\$100,000
Consumer	Automotive	Tactical	Navigation

Σχήμα 1.4: Κατηγορίες συστημάτων INS (Πηγή: tut.fi)

Figure 1.4: Categories of INS systems (Source: tut.fi)

1.4. Μέτρα Ποιότητας Εντοπισμού

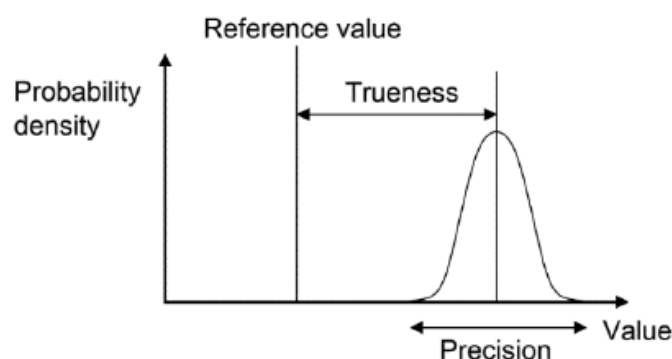
Προκειμένου να περιγραφεί με σαφήνεια η ποιότητα του κινηματικού εντοπισμού, κρίνεται απαραίτητος ο ορισμός των ακόλουθων μεγεθών.

Διαθεσιμότητα (availability)

Με τον όρο διαθεσιμότητα εννοείται το ποσοστό αναφορικά της διάρκειας λειτουργίας του δέκτη, όπου αυτός παρείχε εντοπισμό.

Ακρίβεια (accuracy)

Ο όρος ακρίβεια του εντοπισμού περιγράφεται από δύο στατιστικά μεγέθη, τη συμβιβαστότητα (*precision*) και την ορθότητα (*trueness*) του. Ο όρος συμβιβαστότητα του εντοπισμού χαρακτηρίζει την ποιότητα της λύσης του, βασιζόμενοι στις εκτιμήσεις του σφάλματος που παράγει ο δέκτης που τον υπολογίζει. Η συμβιβαστότητα της λύσης χαρακτηρίζεται από τον μέσο όρο και την τυπική απόκλιση αυτής. Λύση με υψηλή συμβιβαστότητα προσδιορίζεται από μικρή τυπική απόκλιση, δηλαδή η κάθε εκτίμηση της λύσης να βρίσκεται κοντά στη μέση τιμή αυτής. Με τον όρο ορθότητα του εντοπισμού εννοείται η αποχή της λύσης που υπολογίζει ο δέκτης από την θέση αναφοράς του, η οποία θεωρείται η πραγματική θέση του δέκτη.



Σχήμα 1.5: Διαφορά μεταξύ συμβιβαστότητας και ορθότητας εντοπισμού (Πηγή: Perakis et al 2015)
Figure 1.5: Difference between positioning precision and trueness (Source: Perakis et al 2015)

Ακεραιότητα (integrity)

Με τον όρο ακεραιότητα εννοείται η εμπιστοσύνη που μπορεί να έχει ο χρήστης ενός δέκτη, στην τιμή του εντοπισμού που του παρέχει ο δέκτης. Η ακεραιότητα εκφράζεται συνήθως με την τιμή ενός επιπέδου εμπιστοσύνης (*protection level*) ή ενός επιπέδου αβεβαιότητας (*integrity risk*). Το επίπεδο εμπιστοσύνης αποτελεί το πλαίσιο που εξασφαλίζει σε πιο ποσοστό περιέχει την πραγματική θέση του δέκτη. Το επίπεδο αβεβαιότητας αποτελεί το βαθμό στον οποίο ένα επίπεδο εμπιστοσύνης αποτυγχάνει να συμπεριλάβει εντός των πλαισίων, την πραγματική θέση του δέκτη. Οι παράγοντες που επιδρούν και συντελούν την ακεραιότητα ενός δέκτη καθορίζουν και τις εφαρμογές που μπορεί να φέρει εις πέρας. Στο Σχήμα 1.6 φαίνεται η σχέση μεταξύ του σφάλματος εντοπισμού θέσης ενός δέκτη και του επιπέδου εμπιστοσύνης. Παρατηρείται πως ο συνδυασμός τους καθορίζει την ακεραιότητα του εντοπισμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ (GNSS)

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας των παγκόσμιων συστημάτων δορυφορικού εντοπισμού GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) και γίνεται αναφορά στα διάφορα συστήματα που βρίσκονται σε λειτουργία ή σε φάση ανάπτυξης. Έμφαση δίδεται στα χαρακτηριστικά του Παγκόσμιου Συστήματος εντοπισμού *Navstar GPS (Global Positioning System)*, λόγω της ευρύτερης χρήσης και αποδοχής του, σε σχέση με τα άλλα συστήματα GNSS.

2.1. Γενικά

Ο όρος σύστημα δορυφορικού εντοπισμού και πλοήγησης GNSS, χρησιμοποιείται προκειμένου να περιγράψει τα συστήματα που παρέχουν προσδιορισμό θέσης, ταχύτητας και χρόνου, πραγματοποιώντας μετρήσεις από δορυφόρους που βρίσκονται σε γνωστή τροχιά γύρω από τη Γη. Τα συστήματα GNSS λειτουργούν συνεχώς, ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών και έχουν απήχηση σε ένα τεράστιο φάσμα εφαρμογών.

2.1.1. Αρχή λειτουργίας συστημάτων GNSS

Τα συστήματα GNSS αποτελούνται από ένα σχηματισμό δορυφόρων σε τροχιά γύρω από τη Γη, οι οποίοι εκπέμπουν κωδικοποιημένα σήματα. Τα σήματα αυτά λαμβάνονται από κατάλληλους δέκτες, των οποίων η θέση ζητείται. Οι δέκτες, έχοντας τη δυνατότητα να υπολογίζουν το χρόνο που ταξίδεψε το δορυφορικό σήμα, από τη στιγμή εκπομπής του από το δορυφόρο μέχρι τη στιγμή λήψης και πολλαπλασιάζοντάς τον με την ταχύτητα του φωτός, μπορούν και υπολογίζουν την απόστασή τους από το δορυφόρο.

Επιπλέον, η θέση του δορυφόρου τη στιγμή που εξέπεμψε το σήμα είναι γνωστή και περιλαμβάνεται στην πληροφορία που φέρει το σήμα. Έτσι όταν ένας δέκτης μετρήσει την απόσταση του από τρεις δορυφόρους ταυτόχρονα θεωρητικά μπορεί να υπολογίσει τις συντεταγμένες του με τη διαδικασία του τριπλευρισμού. Δηλαδή η θέση του δέκτη σε κάθε χρονική στιγμή, ορίζεται γεωμετρικά ως η τομή τριών σφαιρών με κέντρα τους δορυφόρους και ακτίνες τις μετρημένες αποστάσεις.

Ωστόσο, κρίσιμη παράμετρο για τον ακριβή υπολογισμό της απόστασης δέκτη-δορυφόρων, αποτελεί η ακριβής γνώση του χρόνου μετάβασης του δορυφορικού σήματος που αντιστοιχεί σε κάθε παρατήρηση και ο συγχρονισμός των χρονομέτρων των δεκτών και των δορυφόρων, με το σύστημα χρόνου του εκάστοτε

συστήματος. Ο χρόνος εκπομπής του σήματος μετράται με υψηλής ακρίβειας ατομικά χρονόμετρα που διαθέτουν οι δορυφόροι. Οι δέκτες διαθέτουν χαμηλότερης ποιότητας χρονόμετρα χαλαζία, ώστε να μπορούν να είναι οικονομικά προσεγγίσιμοι. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό ως επιπλέον άγνωστη παράμετρος, εκτός της θέσης του δέκτη, θεωρείται και το σφάλμα συγχρονισμού του χρονόμετρου του. Έτσι η λήψη ταυτόχρονων μετρήσεων από τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους κρίνεται απαραίτητη.

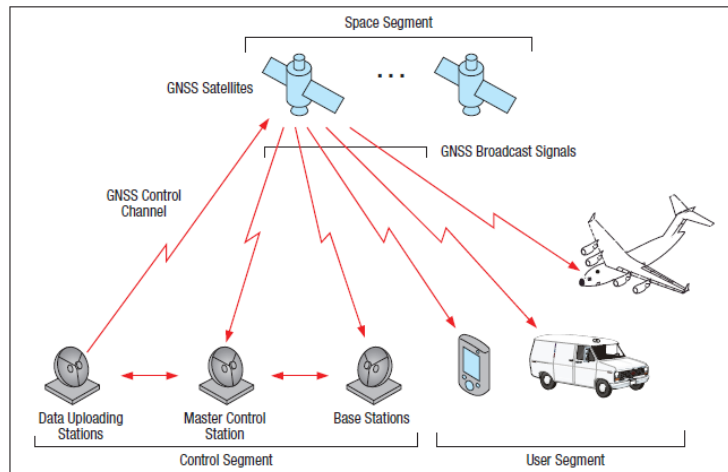
2.1.2. Τμήματα συστημάτων GNSS

Τα σύστημα GNSS αποτελούνται από τρία μέρη, το δορυφορικό τμήμα, το τμήμα ελέγχου και το τμήμα των χρηστών.

Το δορυφορικό τμήμα αποτελείται από τον σχηματισμό των δορυφόρων του εκάστοτε συστήματος, οι οποίοι στέλνουν το σήμα στα τμήματα ελέγχου και χρηστών. Οι δορυφόροι είναι κατανομημένοι με διάταξη τέτοια, που διασφαλίζεται η συνεχής ορατότητα τουλάχιστον τεσσάρων δορυφόρων οπουδήποτε στη Γη. Το δορυφορικό τμήμα των περισσότερων συστημάτων GNSS υπόκειται σε συνεχή αναβάθμιση, με την εκτόξευση νέων δορυφόρων. Κάθε νεότερης γενιάς δορυφόρος διαθέτει βελτιωμένα χαρακτηριστικά, αναβαθμίζοντας έτσι την αξιοπιστία του εκάστοτε συστήματος.

Το τμήμα ελέγχου ενός συστήματος GNSS αποτελείται από έναν ή περισσότερους σταθμούς ελέγχου, ένα δίκτυο σταθμών παρακολούθησης και από τους σταθμούς τηλεπικοινωνιών. Το τμήμα αυτό είναι υπεύθυνο για την επίβλεψη και διατήρηση του συστήματος και οι κύριες ενέργειες για την επίτευξη αυτού του στόχου, περιλαμβάνουν τον υπολογισμό και παρακολούθηση των τροχιών των δορυφόρων και τη διόρθωσή τους, την παρακολούθηση της καλής λειτουργίας («υγείας») των δορυφόρων, τη διατήρηση του χρόνου του συστήματος και την ενημέρωση των στοιχείων που περιλαμβάνονται στο μήνυμα δεδομένων ώστε να είναι αξιόπιστο.

Το τμήμα χρηστών αποτελείται από όλους τους χρήστες που διαθέτουν δέκτη GNSS για τη λήψη των δορυφορικών σημάτων, προκειμένου ο χρήστης να μπορεί να υπολογίσει τη θέση του, την ταχύτητά του και τον χρόνο.



Σχήμα 2.1: Τμήματα συστημάτων GNSS (Πηγή: Charles Jeffrey 2010)
Figure 2.1: GNSS segments (Source: Charles Jeffrey 2010)

2.1.3. Συστήματα GNSS

Το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού GPS (*Global Positioning System*) αποτελεί το πρώτο και πλέον διαδεδομένο σύστημα GNSS. Αναπτύχθηκε από το Υπουργείο Άμυνας των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής, στις αρχές της δεκαετίας του 1970 και έφτασε σε πλήρη επιχειρησιακή ικανότητα το 1995. Αρχικά το σύστημα αναπτύχθηκε για στρατιωτικούς σκοπούς αλλά στη συνέχεια δόθηκε και για πολιτική χρήση. Το σύστημα GPS αρχικά αποτελείτο από 24 δορυφόρους σε τροχιά γύρω από τη Γη, ενώ ο σημερινός σχηματισμός περιλαμβάνει 31 ενεργούς δορυφόρους.

Το Ρώσικο σύστημα δορυφορικού εντοπισμού GLONASS (*GLObal Navigation Satellite System*), βασίζεται στην ίδια αρχή με το GPS, αλλά χρησιμοποιεί διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά. Όπως και στο GPS, το GLONASS προσφέρει υπηρεσίες εντοπισμού, πλοήγησης και χρόνου, για πολιτικούς και στρατιωτικούς σκοπούς. Το σύστημα διαθέτει 26 δορυφόρους σε τροχιά και είναι σε πλήρη επιχειρησιακή λειτουργία, δεν χαιρεί όμως την ευρεία αποδοχή από το κοινό, σε αντίθεση με το GPS.

Το Galileo είναι το δορυφορικό σύστημα εντοπισμού που αναπτύσσεται από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Αναμένεται να φτάσει σε πλήρη επιχειρησιακή ικανότητα μέχρι το 2020 και θα διαθέτει 30 δορυφόρους σε τροχιά. Το Galileo έχει ως κύριο στόχο να εξυπηρετήσει πολιτικές χρήσεις, παρέχοντας δύο υπηρεσίες εντοπισμού εκ των οποίων, μία θα είναι ελεύθερη στο κοινό αλλά μειωμένης ακρίβειας και η δεύτερη θα παρέχεται έναντι χρηματικού αντιτίμου.

Η Κίνα έχει επίσης αναπτύξει ένα σύστημα δορυφορικού εντοπισμού γνωστό ως BeiDou-1. Το σύστημα παρέχει υπηρεσίες εντοπισμού για πολιτικούς και

στρατιωτικούς σκοπούς, κυρίως στην περιοχή της ανατολικής Ασίας. Η εξέλιξή του σε παγκόσμιο σύστημα δορυφορικού εντοπισμού, υπό την ονομασία BeiDou-2 η αλλιώς CNSS (*Compass Navigation Satellite System*) αναμένεται μέχρι το 2020. Ο σχηματισμός του συστήματος θα αποτελείται από 35 δορυφόρους, εκ των οποίων οι 5 θα είναι γεωστατικοί.

2.2. Βασικά Στοιχεία Δορυφορικού Εντοπισμού

Στις επόμενες ενότητες αναφέρονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος GPS, λόγω της ευρείας χρήσης και αποδοχής του. Τα άλλα συστήματα GNSS υπόκεινται στις ίδιες αρχές και περιορισμούς αλλά χρησιμοποιούν διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά.

Οι δορυφόροι των συστημάτων GNSS εκπέμπουν σήματα, τα οποία αποτελούνται από επιμέρους στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά είναι διαμορφωμένοι κώδικες ψευδοτυχαίου θορύβου (PRN) και μηνύματα δεδομένων. Μετρήσεις φάσης των εκπεμπόμενων σημάτων και ψευδοαποστάσεων στους κώδικες, χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της απόστασης του δορυφόρου από το δέκτη και είναι πάντοτε επηρεασμένες από συστηματικά σφάλματα. Τα σφάλματά αυτά περιγράφονται ικανοποιητικά από κατάλληλα μοντέλα ή απαλείφονται με χρήση κατάλληλων τεχνικών επεξεργασίας των μετρήσεων.

2.2.1. Δορυφορικό σήμα

Οι δορυφόροι GPS μεταδίδουν σήματα σε δύο συχνότητες που ονομάζονται και φέρουσες συχνότητες, την $L1=1575.42$ MHz και $L2=1227.60$ MHz με μήκος κύματος 19.03 cm και 24,42 cm αντίστοιχα. Οι μετρήσεις φάσης στην $L1$ και $L2$ παρέχουν μεγάλη ακρίβεια στη μέτρηση της απόστασης δορυφόρου-δέκτη και είναι οι μόνες κατάλληλες για γεωδαιτικές εφαρμογές. Ακόμα ο συνδυασμός τους παρέχει τη δυνατότητα ανίχνευσης των σφαλμάτων που προκαλούνται στο σήμα λόγω της μετάδοσής του στην ιονόσφαιρα.

Οι συχνότητες αυτές διαμορφώνονται από δύο κώδικες και ένα μήνυμα δεδομένων ή αλλιώς μήνυμα πλοήγησης. Όλοι οι δορυφόροι GPS μεταδίδουν τις ίδιες φέρουσες συχνότητες, αλλά οι διαμορφωμένοι κώδικες είναι διαφορετικοί για κάθε δορυφόρο. Οι δύο κώδικες είναι ο C/A-κώδικας (Coarse Acquisition code) και ο P-κώδικας (Precise code). Οι κώδικες αυτοί είναι κώδικες ψευδοτυχαίου θορύβου (PRN) και αποτελούνται από ακολουθίες δυαδικών ψηφίων. Ο C/A-κώδικας διαμορφώνεται μόνο στην $L1$ και είναι ελεύθερος σε όλους τους χρήστες, ενώ ο P-

κώδικας διαμορφώνεται στην L1 και στην L2 και είναι κρυπτογραφημένος σε P(Y)-κώδικα ώστε να είναι προσβάσιμος μόνο από εξουσιοδοτημένους χρήστες.

Ο C/A-κώδικας είναι μία ακολουθία από 1023 δυαδικά ψηφία που παράγονται με συχνότητα 1.023 MHz που σημαίνει ότι ο κώδικας έχει περίοδο 1 ms και το μήκος κύματός του (μήκος ψηφίου) είναι περίπου 300 m. Ο C/A-κώδικας επιτρέπει λιγότερο ακριβή μέτρηση της απόστασης δορυφόρου-δέκτη, αλλά τον ικανοποιητικό συγχρονισμό του ρολογιού του δέκτη ως προς το χρόνο GPS και συνεπώς και τον συγχρονισμό όλων των δεκτών που παρατηρούν ταυτόχρονα, ώστε οι μετρήσεις που καταγράφονται από τους δέκτες να είναι με ικανοποιητική ακρίβεια ταυτόχρονες. Ακόμα παρέχει τη γρήγορη πρόσβαση στον P-κώδικα.

Ο P-κώδικας είναι μία ακολουθία από περίπου $2.3547 \cdot 10^{14}$ ψηφία που παράγονται με συχνότητα 10.23 MHz, αυτό σημαίνει ότι ο κώδικας έχει περίοδο 0.1 μs και το μήκος κύματός του (μήκος ψηφίου) είναι περίπου 30m. Επειδή ο κώδικας θα χρειαζόταν 266.4 ημέρες για να επαναληφθεί, πράγμα που θα απαιτούσε πολύ χρόνο για τη συσχέτιση του στο δέκτη, χωρίζεται σε 38 τμήματα διαφορετικών εβδομάδων. Κάθε δορυφόρος εκπέμπει ένα από τα τμήματα του κώδικα, ενώ τα εναπομείναντα τμήματα διατίθενται για άλλες χρήσεις του συστήματος. Ο P-κώδικας παρέχει τον υπολογισμό της απόστασης δορυφόρου-δέκτη με μεγαλύτερη ακρίβεια. Επιπλέον παρέχει αυξημένη προστασία από παρεμβαλλόμενα σήματα.

Το μήνυμα δεδομένων ή αλλιώς μήνυμα πλοήγησης (*data code, navigation message*) διαμορφώνεται και στις δύο φέρουσες συχνότητες. Αποτελεί μια δυαδική ακολουθία που αντιστοιχούν σε γράμματα και αριθμούς, τα οποία παράγονται με συχνότητα 50 Hz. Το μήνυμα δεδομένων περιλαμβάνει πληροφορίες για τη θέση του δορυφόρου (εφημερίδες), την κατάσταση του δορυφόρου, χρονικές διορθώσεις, ατμοσφαιρικές παραμέτρους για διορθώσεις σφαλμάτων λόγω της διάδοσης του σήματος και λιγότερο ακριβείς εφημερίδες αλλά για όλους τους δορυφόρους στο σχηματισμό (almanac). Οι εφημερίδες και οι χρονικές διορθώσεις επαναλαμβάνονται κάθε 30 s, χρειάζεται όμως 12.5 min για τη μετάδοση όλου του μηνύματος δεδομένων.

Στα πλαίσια εκσυγχρονισμού του συστήματος GPS, ένας νέος κώδικας θα περιλαμβάνεται στην L2 συχνότητα, γνωστός ως κώδικας L2C. Ο νέος αυτός κώδικας θα δίνει τη δυνατότητα σε δέκτες δύο συχνοτήτων, να διορθώνουν τα ιονοσφαιρικά σφάλματα όταν συνδυάζεται κατάλληλα με τον C/A-κώδικα, αυξάνοντας έτσι την ακρίβεια του εντοπισμού. Ακόμα αυξάνει την ταχύτητα απόκτησης του σήματος και την παρακολούθηση του κάτω από αντίξοες συνθήκες (κάτω από βλάστηση κ.α.). Ακόμα ένα καινούργιο πολιτικό σήμα, γνωστό και ως L5 θα εκπέμπεται, για την κάλυψη αναγκών που αφορούν κυρίως την ασφάλεια των μεταφορών και θα βελτιώνει ακόμα περισσότερο την ακρίβεια προσδιορισμού θέσης. Τέλος, ακόμα ένα νέο σήμα γνωστό και ως L1C θα εκπέμπεται, παρουσιάζοντας αυξημένη

απόδοση και θα προσφέρεται για την διαλειτουργικότητα μεταξύ του συστήματος GPS και των άλλων συστημάτων GNSS.

2.2.2. Μετρήσεις

Παρατηρήσεις ψευδοαποστάσεων

Ψευδοαπόσταση είναι η μετρημένη απόσταση μεταξύ δορυφόρου και δέκτη, η οποία προκύπτει από την παρατήρηση στον C/A και P κώδικα. Ονομάζεται ψευδοαπόσταση γιατί διαφέρει από την πραγματική γεωμετρική απόσταση δορυφόρου-δέκτη, λόγω των σφαλμάτων που υπεισέρχονται στη μέτρηση της. Η διαδικασία μέτρησης της ψευδοαπόστασης ανάγεται στη μέτρηση του χρόνου διάδοσης του δορυφορικού σήματος από το δορυφόρο στο δέκτη. Δηλαδή η διαφορά της χρονικής στιγμής εκπομπής του σήματος από το δορυφόρο και της λήψης του από το δέκτη, πολλαπλασιασμένη με την ταχύτητα του φωτός, αποτελεί τη μέτρηση της ψευδοαπόστασης P_r^s . Επομένως, ισχύει η βασική σχέση

$$P_r^s = c(t_r - t_s) \quad (2.1)$$

όπου,

t_r , ο χρόνος λήψης του σήματος από το δέκτη στη δική του κλίμακα χρόνου,
 t_s , ο χρόνος εκπομπής του σήματος από το δορυφόρο στη δική του κλίμακα χρόνου,
 c , η ταχύτητα του φωτός.

Στη μέτρηση της ψευδοαπόστασης υπεισέρχονται σφάλματα, τα οποία τη διαφοροποιούν από την πραγματική γεωμετρική απόσταση δορυφόρου δέκτη. Λαμβάνοντας υπόψη τα σφάλματα αυτά, η εξίσωση παρατήρησης της ψευδοαπόστασης γράφεται ως εξής,

$$P_r^s = \rho_r^s + c\delta t_r - c\delta t_s + \delta_{ion} + \delta_{tro} + e \quad (2.2)$$

όπου,

ρ_r^s , η γεωμετρική απόσταση δορυφόρου-δέκτη,
 δt_r , η αποχή χρονομέτρου του δέκτη από την κλίμακα χρόνου του GPS,
 δt_s , η αποχή χρονομέτρου του δορυφόρου από την κλίμακα χρόνου του GPS,
 δ_{ion} , το ιονοσφαιρικό σφάλμα,
 δ_{tro} , το τροποσφαιρικό σφάλμα,
 e , το τυχαίο σφάλμα της μέτρησης και άλλα μικρά εναπομένοντα σφάλματα.

Η γεωμετρική απόσταση δορυφόρου-δέκτη δίδεται από την παρακάτω σχέση,

$$\rho_r^s = \sqrt{(X - x)^2 + (Y - y)^2 + (Z - z)^2} \quad (2.3)$$

όπου,

X, Y, Z , οι συντεταγμένες του δορυφόρου στο σύστημα αναφοράς WGS 84,
 x, y, z , οι συντεταγμένες του δέκτη στο σύστημα αναφοράς WGS 84.

Οι άγνωστες παράμετροι στην εξίσωση 2.3 είναι οι συντεταγμένες του δέκτη και η αποχή χρονομέτρου του δέκτη από την κλίμακα χρόνου του GPS. Έτσι χρειάζονται παρατηρήσεις από τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους για την εύρεση των αγνώστων παραμέτρων. Οι υπόλοιπες παράμετροι υπολογίζονται από τις πληροφορίες που φέρει το μήνυμα δεδομένων και μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με τη χρήση κατάλληλων τεχνικών επεξεργασίας των μετρήσεων.

Παρατηρήσεις φάσης

Η απόσταση δορυφόρου-δέκτη μπορεί επίσης να υπολογιστεί από μετρήσεις κύκλων φάσης μήκους κύματος λ , στις φέρουσες συχνότητες L1 και L2. Ο δέκτης GPS μπορεί και μετρά με ακρίβεια την κλασματική φάση ενός κύκλου σε κάθε χρονική στιγμή και καταγράφει τις μεταβολές της από την πρώτη στιγμή εγκλωβισμού του σήματος και μετά. Όμως ο αρχικός αριθμός ακεραίων κύκλων μεταξύ δορυφόρου-δέκτη την πρώτη στιγμή του εγκλωβισμού είναι άγνωστος. Ο αρχικός αριθμός ακεραίων κύκλων ονομάζεται ασάφεια φάσης.

Η απόσταση δορυφόρου-δέκτη σε κάθε χρονική στιγμή, υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το μήκος κύματος της φέρουσας συχνότητας, με το άθροισμα της ασάφειας φάσης και του αθροιστικού κλασματικού τμήματος φάσης από την πρώτη στιγμή εγκλωβισμού. Όμως και στην περίπτωση των μετρήσεων φάσης σφάλματα υπεισέρχονται στη διαδικασία. Έτσι η τελική μορφή της εξίσωσης παρατήρησης της μετρημένης φάσης εκφρασμένη σε μονάδες απόστασης είναι η εξής,

$$\Phi_r^s = \lambda \phi_r^s = \rho_r^s + c \delta t_r - c \delta t_s - \delta_{ion} + \delta_{tro} + \lambda N + \lambda e \quad (2.4)$$

όπου,

λ , το μήκος κύματος της φέρουσας συχνότητας,

N , η ασάφεια φάσης,

ρ_r^s , η γεωμετρική απόσταση δορυφόρου-δέκτη,

δt_r , η αποχή χρονομέτρου του δέκτη από την κλίμακα χρόνου του GPS,

δt_s , η αποχή χρονομέτρου του δορυφόρου από την κλίμακα χρόνου του GPS,

δ_{ion} , το ιονοσφαιρικό σφάλμα,

δ_{tro} , το τροποσφαιρικό σφάλμα,

e , το τυχαίο σφάλμα της μέτρησης και άλλα μικρά εναπομένοντα σφάλματα.

Οι άγνωστες παράμετροι στην εξίσωση 2.4 είναι οι συντεταγμένες της θέσης του δέκτη, η αποχή χρονομέτρου του δέκτη από την κλίμακα χρόνου του συστήματος και η ασάφεια φάσης. Η ασάφεια φάσης είναι σταθερή για το ίδιο σύστημα δορυφόρου-δέκτη εφόσον δεν υπάρχει απώλεια σήματος. Κάθε νέο σύστημα δορυφόρου-δέκτη προσθέτει και νέα ασάφεια φάσης, δηλαδή και νέα άγνωστη παράμετρο, έτσι δεν μπορεί να επιτευχθεί η εύρεση των αγνώστων παραμέτρων από τις μετρήσεις μόνο ενός δέκτη. Για την εύρεση των αγνώστων παραμέτρων απαιτείται η παρατήρηση των ίδιων δορυφόρων από τουλάχιστον δύο δέκτες και η χρήση κατάλληλων τεχνικών για την επεξεργασία των μετρήσεων.

Ο σωστός προσδιορισμός των ασαφειών φάσης είναι απαραίτητος προκειμένου να βρεθεί με ακρίβεια η απόσταση δορυφόρου-δέκτη. Διάφορες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την εύρεση της ασάφειας φάσης. Αναφορικά μερικές από αυτές είναι η μέθοδος επίλυσης ασαφειών φάσης με μετρήσεις και στις δύο συχνότητες, η μέθοδος FARA, η μέθοδος Sigma και η μέθοδος προσδιορισμού των ασαφειών φάσης με τη βοήθεια τριπλών διαφορών. Όταν μία μέθοδος εύρεσης των ασαφειών φάσης χρησιμοποιείται και η εφαρμογή της έχει πετύχει τον στόχο της, δηλαδή οι ασάφειες φάσης έχουν προσεγγιστεί στον σωστό ακέραιο αριθμό κύκλων, τότε κάνουμε λόγο για εύρεση της απόστασης δορυφόρου-δέκτη με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια γνωστή ως "Fixed Solution". Στην αντίθετη περίπτωση, όπου η μέθοδος δεν μπόρεσε να προσεγγίσει το σωστό ακέραιο αριθμό κύκλων και έτσι η ασάφεια φάσης εκτιμάται ως πραγματικός αριθμός, η εύρεση της απόστασης δορυφόρου-δέκτη γίνεται με μειωμένη ακρίβεια και είναι γνωστή ως "Float Solution". Διάφοροι λόγοι μπορεί να οδηγήσουν σε Float λύση, μερικοί από αυτούς είναι η ατέλεια του μαθηματικού μοντέλου της εξίσωσης των φάσεων, οι διάφορες αλλαγές στην ατμόσφαιρα και λάθη στις τροχιές των δορυφόρων.

Κατά την απώλεια του σήματος ένας αριθμός ακεραίων κύκλων χάνεται. Ο κύκλος αυτοί λέγονται κύκλοι ολίσθησης. Μετά την επανάκτηση του σήματος όλες οι παρατηρήσεις είναι επηρεασμένες από τον αριθμό των κύκλων ολίσθησης, με αποτέλεσμα να εισάγεται σφάλμα στη μέτρηση της απόστασης δορυφόρου δέκτη. Το συστηματικό αυτό σφάλμα είναι εύκολα ανιχνεύσιμο αλλά σχετικά δύσκολα προσδιορίσιμο. Ο εντοπισμός του γίνεται με τη χρήση κατάλληλων τεχνικών επεξεργασίας των μετρήσεων και ενδεχομένως μπορεί να επιτευχθεί και η διόρθωσή του μέσω αυτών. Σε περίπτωση που η διόρθωσή του δεν είναι δυνατή, εισάγεται νέα ασάφεια φάσης για τις επηρεασμένες παρατηρήσεις.

Ακρίβεια παρατηρήσεων

Το τυχαίο σφάλμα της παρατήρησης φτάνει το 1% του μήκους κύματος/παλμού του σήματος. Έτσι στον κώδικα C/A με μήκος παλμού 300m, η μέτρηση της ψευδοαπόστασης γίνεται με ακρίβεια 3m. Στον κώδικα P με μήκος παλμού 30m, η μέτρηση της ψευδοαπόστασης γίνεται με ακρίβεια 0,3m. Στη φέρουσα L1 με μήκος

κύματος περίπου 0,2m, η μέτρηση της φάσης γίνεται με ακρίβεια 0,002m. Στη φέρουσα συχνότητα L2 με μήκος κύματος περίπου 0,25m, η μέτρηση της φάσης γίνεται με ακρίβεια 0,0025m. Είναι φανερό πως οι μετρήσεις φάσης είναι αυτές που χρησιμοποιούνται σε εργασίες υψηλής ακρίβειας. Η ακρίβεια των τελικών συντεταγμένων είναι προφανώς χειρότερη από την ακρίβεια διεξαγωγής των μετρήσεων.

2.2.3. Σφάλματα

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 2.2.2 με μετρήσεις στις φέρουσες συχνότητες και στους κώδικες μπορεί να υπολογιστεί η απόσταση δορυφόρου-δέκτη. Οι μετρήσεις όμως αυτές περιέχουν σφάλματα που οφείλονται σε διάφορους παράγοντες. Για τον σωστό προσδιορισμό της θέσης του δέκτη, οι παράγοντες αυτοί πρέπει να μειωθούν. Παρακάτω παρουσιάζονται οι κύριες πηγές σφαλμάτων που επηρεάζουν τις μετρήσεις των συστημάτων GNSS.

Σφάλμα της τροχιάς των δορυφόρων

Το σφάλμα της τροχιάς του δορυφόρου είναι η διαφορά ανάμεσα στην πραγματική θέση του δορυφόρου στο διάστημα και σε αυτή που υπολογιστική από τον δέκτη χρησιμοποιώντας τις εκπεμπόμενες εφημερίδες. Λαμβάνοντας υπόψη την κίνηση του δορυφόρου και γνώση του βαρυτικού πεδίου της Γής, τα σφάλματα της τροχιάς του δορυφόρου προβλέπονται από το τμήμα ελέγχου και στέλνονται στους δορυφόρους, για να τα εκπέμψουν με τη σειρά τους μέσω των εφημερίδων που περιλαμβάνονται στο μήνυμα δεδομένων. Τα προβλεφθέντα σφάλματα δεν αποτελούν τα πραγματικά, αλλά μία προσέγγιση αυτών, λόγω της αδυναμίας των μαθηματικών μοντέλων πρόβλεψης να περιγράψουν την πραγματική τροχιά. Έτσι η εκπεμπόμενες τροχιές των δορυφόρων σε πραγματικό χρόνο περιέχουν ένα σφάλμα της τάξεως των 2m με 5m. Είναι δυνατό, σε εκ των υστέρων επεξεργασία, να χρησιμοποιηθούν εφημερίδες ακριβείας, οι οποίες μειώνουν κατά πολύ τα σφάλματα αυτά. Ακόμα κατά τον σχετικό προσδιορισμό θέσης, τα σφάλματα αυτά μπορούν σχεδόν να εξαλειφθούν.

Σφάλμα χρονομέτρων των δορυφόρων

Παρόλο που τα χρονόμετρα των δορυφόρων είναι ατομικά και πολύ ακριβή, με το πέρασ του χρόνου ολισθαίνουν από το σύστημα χρόνου του συστήματος. Οι σταθμοί παρακολούθησης, εκτελούν παρατηρήσεις χρονικών δεδομένων στους δορυφόρους, τις οποίες επεξεργάζεται το τμήμα ελέγχου και εκτιμά τα σφάλματα των χρονομέτρων των δορυφόρων. Στη συνέχεια αυτά διαβιβάζονται στους δορυφόρους για να τα εκπέμψουν με τη σειρά τους μέσω του μηνύματος δεδομένων. Και σε αυτή την περίπτωση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκ των

υστέρων καλύτερες εκτιμήσεις για τα σφάλματα αυτά ή να σχεδόν εξαλειφθούν στον σχετικό προσδιορισμό θέσης.

Σφάλμα χρονομέτρου του δέκτη

Όπως προαναφέρθηκε, το χρονόμετρο του δέκτη είναι κατώτερης ποιότητας ώστε να έχει και χαμηλότερη αγοραστική αξία. Η κατώτερη ποιότητα συνεπάγεται και χαμηλότερη ακρίβεια στη μέτρηση του χρόνου και εισαγωγή μεγάλου σφάλματος απόκλισης από την κλίμακα χρόνου του συστήματος. Έτσι είναι απαραίτητη η διεξαγωγή μετρήσεων σε τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους ώστε το σφάλμα αυτό να προκύψει ως μέρος της λύσης μαζί με τη θέση του δέκτη. Στον σχετικό προσδιορισμό θέσης το σφάλμα αυτό σχεδόν απαλείφεται από τις μετρήσεις.

Το τροποσφαιρικό σφάλμα

Το τμήμα της ατμόσφαιρας που εκτείνεται από 8 μέχρι 40 km πάνω από την επιφάνεια της Γης, ονομάζεται τροπόσφαιρα. Η διάδοση του δορυφορικού σήματος μέσω της τροπόσφαιρας, προκαλεί την διάθλαση του, με αποτέλεσμα την καθυστέρηση του. Έτσι η απόσταση μεταξύ δορυφόρου-δέκτη μετράται ως μεγαλύτερη από ότι είναι στην πραγματικότητα. Οι διαφορές της μετρημένης και της πραγματικής απόστασης κυμαίνονται από 3 μέχρι 30m, αναφορικά με την γωνία ύψους του δορυφόρου. Δορυφόροι με μικρή γωνία ύψους παρουσιάζουν μεγαλύτερα σφάλματα. Η καθυστέρηση λόγω της τροπόσφαιρας είναι σταθερή και για τις δύο συχνότητες και δεν μπορεί να απαλειφθεί με συνδυασμό των δύο συχνοτήτων. Η αντιμετώπιση της έγκειται στη χρήση μοντέλων που την περιγράφουν για μικρές βάσεις. Μερικά από τα μοντέλα αυτά είναι το μοντέλο Hopfield, το μοντέλο Saastamoinen και το μοντέλο Chao. Για μεγαλύτερες βάσεις μπορεί να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας μετεωρολογικές μετρήσεις εδάφους ή να συμπεριληφθεί ως άγνωστος, κατά τη διαδικασία συνόρθωσης των μετρήσεων. Κάνοντας χρήση τεχνικών σχετικού προσδιορισμού θέσης, μεγάλο μέρος του τροποσφαιρικού σφάλματος απαλείφεται.

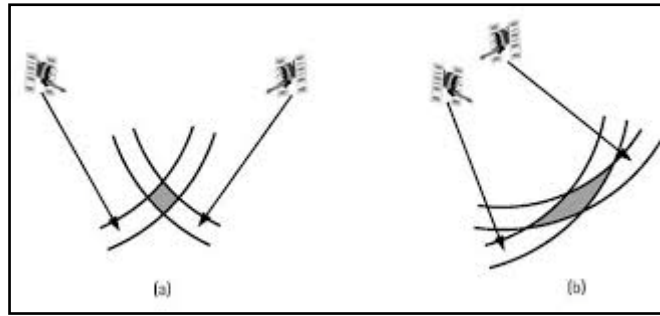
Το ιονοσφαιρικό σφάλμα

Η ιονόσφαιρα είναι το τμήμα της ατμόσφαιρας που εκτείνεται από 50 έως 1000 km πάνω από την επιφάνεια της Γης. Αποτελεί μέσο διασποράς για το δορυφορικό σήμα, με αποτέλεσμα να αλλάζει τον χρόνο διάδοσής του. Το μέγεθος του σφάλματος που προκαλείται στο σήμα λόγω της διάδοσής του στην ιονόσφαιρα, είναι της τάξης των 1 με 100 m και εξαρτάται από την ηλιακή δραστηριότητα και από τη γωνία ύψους του δορυφόρου. Μετρήσεις από δορυφόρους σε μικρή γωνία ύψους, έχουν μεγαλύτερο σφάλμα, καθώς το σήμα διανύει μεγαλύτερη απόσταση μέσα στο ιονοσφαιρικό στρώμα. Το μέγεθος του ιονοσφαιρικού σφάλματος είναι το ίδιο για τις μετρήσεις στις φέρουσες συχνότητες και σε αυτές στους κώδικες, έχει

όμως διαφορετικό πρόσημο. Δέκτες δύο συχνοτήτων μπορούν σχεδόν να εξαλείψουν το εν λόγω σφάλμα, χρησιμοποιώντας κατάλληλο συνδυασμό των μετρήσεων από τις δύο φέρουσες συχνότητες. Το γεγονός αυτό πηγάζει από την ιδιότητα της ιονόσφαιρας να επηρεάζει το σήμα ανάλογα με τη συχνότητα του, επομένως η L1 έχει άλλο σφάλμα από την L2 για μια συγκεκριμένη απόσταση. Οι δέκτες μονής συχνότητας βασίζονται σε μοντέλα που περιγράφουν το ιονοσφαιρικό σφάλμα για τη διόρθωση του. Ένα από αυτά είναι το μοντέλο Klobuchar, που οι παράμετροι του μεταδίδονται μέσω του μηνύματος δεδομένων. Κάνοντας χρήση τεχνικών σχετικού προσδιορισμού θέσης, μεγάλο μέρος του ιονοσφαιρικού σφάλματος απαλείφεται.

Η γεωμετρία του δορυφορικού σχηματισμού

Η γεωμετρία του δορυφορικού σχηματισμού, δηλαδή η θέση των δορυφόρων στο διάστημα τη χρονική περίοδο των μετρήσεων, αποτελεί σημαντικό παράγοντα ακρίβειας της θέσης του δέκτη, σε συνδυασμό με τους υπόλοιπους που αναφέρθηκαν προηγούμενα. Καλή γεωμετρία επιτυγχάνεται όταν οι δορυφόροι είναι καλά τοποθετημένοι στο διάστημα. Γενικά, αν θεωρήσουμε ότι οι θέσεις των δορυφόρων και του δέκτη αποτελούν τις κορυφές ενός γεωμετρικού σχήματος, τότε όσο πιο μεγάλο όγκο έχει το γεωμετρικό σχήμα αυτό, τόσο πιο ισχυρός θα είναι και ο γεωμετρικός προσδιορισμός της θέσης του δέκτη. Δηλαδή όσο πιο ευρέως διατεταγμένοι είναι οι δορυφόροι στον ορίζοντα, τόσο η λύση θα είναι καλύτερη. Βέβαια το γεγονός αυτό υπόκειται σε κάποιους περιορισμούς, διότι δορυφόροι με μικρή γωνία ύψους συντελούν στη μεγέθυνση του όγκου αυτού του σχήματος, όμως τα σήματα που λαμβάνονται από αυτούς έχουν μεγάλα ατμοσφαιρικά σφάλματα και έτσι είναι προτιμότερο να αγνοηθούν. Το Σχήμα 2.2 δείχνει μια γραφική επεξήγηση της σημασίας που έχει η δορυφορική γεωμετρία στον υπολογισμό της θέσης του δέκτη, υποθέτοντας ότι το πρόβλημα είναι δύο διαστάσεων. Σε αυτή την περίπτωση, η θέση του δέκτη θα δίνεται από την τομή δύο κύκλων με κέντρα τους δύο δορυφόρους και ακτίνες την απόσταση τους από το δέκτη. Επειδή η απόσταση μεταξύ δορυφόρων-δέκτη περιέχει διάφορα σφάλματα η θέση του δέκτη δεν θα είναι μονοσήμαντη, αλλά θα κυμαίνεται μεταξύ των ορίων της περιοχής αβεβαιότητας που δημιουργούν τα σφάλματα των αποστάσεων (σκιαγραφημένη περιοχή). Από τη στατιστική είναι γνωστό πως αν το μέγεθος της περιοχής αβεβαιότητας είναι μικρό, η υπολογιζόμενη θέση του δέκτη θα είναι ακριβέστερη. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2(a), αν οι δορυφόροι είναι πιο ευρέως διατεταγμένοι, δηλαδή έχουν καλύτερη γεωμετρική διάταξη, τόσο η περιοχή αβεβαιότητας θα είναι μικρότερη, σε αντίθεση με αυτή του σχήματος 2.2(b).



Σχήμα 2.2: Γεωμετρία δορυφορικού σχηματισμού (Πηγή: Ahmed El Rabbany 2006)
Figure 2.2: Satellite geometry (Source: Ahmed El Rabbany 2006)

Ένα μέτρο ακρίβειας της γεωμετρικής διάταξης του δορυφορικού σχηματισμού, αποτελεί ο δείκτης DOP (Dilution Of Precision). Μικρός δείκτης DOP υποδεικνύει καλύτερη γεωμετρία. Ο δείκτης DOP μπορεί να υπολογιστεί χωρίς να γίνουν μετρήσεις, γνωρίζοντας προσεγγιστικά τη θέση του δέκτη και τις θέσεις των δορυφόρων μέσω του almanac, ή να υπολογίζεται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των μεταβλητοτήτων των εκτιμήσεων των συντεταγμένων και του σφάλματος του χρονομέτρου του δέκτη ονομάζεται GDOP (Geometric DOP). Αν αναφερόμαστε μόνο στη θέση του δέκτη το μέτρο ονομάζεται PDOP (Position DOP) ενώ μόνο για την οριζόντια ή για την κατακόρυφη θέση, το μέτρο ονομάζεται HDOP (Horizontal DOP) και VDOP (Vertical DOP) αντίστοιχα.

Το σφάλμα πολυανάκλασης

Η πολυανάκλαση είναι ένας μεγάλος παράγοντας εισαγωγής σφάλματος, κυρίως σε αστικές περιοχές, όπου το δορυφορικό σήμα μπορεί να φτάσει στο δέκτη μέσω πολλών διαδρομών. Αυτές οι διαδρομές οφείλονται σε ανάκλαση του σήματος από τα διάφορα αντικείμενα και επιφάνειες του περιβάλλοντος, όπως κτίρια κ.α. Έτσι το ανακλώμενο σήμα διανύει μεγαλύτερη απόσταση από την κανονική, καθυστερεί και επηρεάζει τις παρατηρήσεις εισάγοντας σφάλμα. Το μέγεθος του σφάλματος αυτού μπορεί να υπερβαίνει τα 10m για τις παρατηρήσεις στους κώδικες, ενώ είναι δύο τάξης μεγέθους μικρότερο για τις παρατηρήσεις στις φέρουσες συχνότητες. Η αντιμετώπιση του έγκειται στη σωστή επιλογή της θέσης του δέκτη όσο αυτό είναι δυνατόν και στην επιλογή κατάλληλων κεραιών που το περιορίζουν.

Μεταβολές των κέντρων φάσης της κεραίας του δέκτη

Το σημείο στο οποίο λαμβάνονται τα δορυφορικά σήματα, ονομάζεται κέντρο φάσης της κεραίας. Γενικά το σημείο αυτό δεν συμπίπτει με το γεωμετρικό κέντρο της κεραίας και μεταβάλλεται ανάλογα με τη γωνία ύψους και το αζιμούθιο του δορυφόρου που εκπέμπει το σήμα, αλλά και από την ένταση του σήματος. Ως αποτέλεσμα, σφάλμα στη μετρημένη απόσταση δορυφόρου-δέκτη μπορεί να

παρουσιαστεί. Το μέγεθος του σφάλματος αυτού εξαρτάται από τον τύπο της κεραίας και είναι της τάξης των μερικών χιλιοστών. Αποκτά κρίσιμο χαρακτήρα όταν η εφαρμογή απαιτεί υψηλή ακρίβεια. Για μικρές βάσεις και όταν χρησιμοποιούνται κεραίες ίδιου τύπου, το σφάλμα αυτό μπορεί να εξαλειφθεί αν οι κεραίες έχουν ίδιο προσανατολισμό. Πρέπει να σημειωθεί πως το σφάλμα αυτό είναι διαφορετικό για την L1 και την L2. Αυτό μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια της λύσης αν επιλεγθεί ο συνδυασμός των δύο συχνοτήτων για την εύρεση της, ειδικότερα σε μικρού μήκους βάσεις.

Το τυχαίο σφάλμα της παρατήρησης (θόρυβος)

Το σφάλμα αυτό είναι αναπόφευκτο και σχετίζεται με την ποιότητα των ηλεκτρονικών διατάξεων του δέκτη. Το μέγεθος του φτάνει το 1% του μήκους κύματος/παλμού του σήματος.

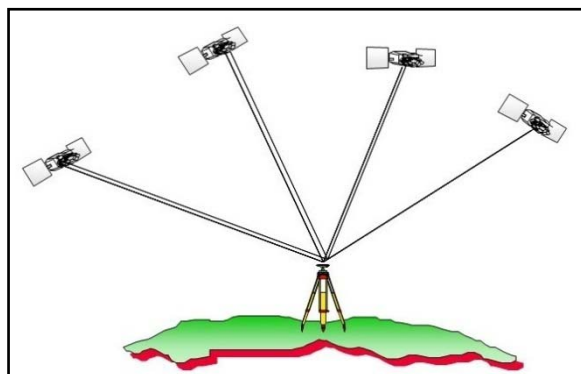
2.3. Μέθοδοι και Τεχνικές Δορυφορικού Εντοπισμού

Ο προσδιορισμός της θέσης του δέκτη με σύστημα GNSS διακρίνεται στις εξής κατηγορίες, απόλυτος ή σχετικός προσδιορισμός θέσης, στατικός ή κινηματικός και σε προσδιορισμό εκ των υστέρων ή σε πραγματικό χρόνο. Ο στατικός προσδιορισμός θέσης, αναφέρεται στην περίπτωση που ο δέκτης παραμένει ακίνητος πάνω από το σημείο, του οποίου οι συντεταγμένες ζητείται να υπολογιστούν, καθόλη τη διάρκεια των παρατηρήσεων. Ο κινηματικός προσδιορισμός θέσης αναφέρεται στον προσδιορισμό των συντεταγμένων των σημείων από τα οποία πέρασε ο δέκτης ενώ βρισκόταν σε κίνηση. Μία μέθοδος δορυφορικού εντοπισμού χαρακτηρίζεται ανάλογα από τον ποιο συνδυασμό από τις παραπάνω κατηγορίες απαρτίζει.

2.3.1. Απόλυτος εντοπισμός και PPP

Ο απόλυτος προσδιορισμός θέσης αναφέρεται στον προσδιορισμό των συντεταγμένων του δέκτη, μόνο από τις δικές του παρατηρήσεις. Οι παρατηρήσεις είναι μετρήσεις ψευδοαποστάσεων από τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους. Τα σφάλματα που υπεισέρχονται στις μετρήσεις είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν πλήρως. Έτσι η ακρίβεια της θέσης ενός δέκτη σε απόλυτο εντοπισμό είναι χαμηλότερη. Η ακρίβεια του απόλυτου εντοπισμού κυμαίνεται από 1 έως 25 m, ανάλογα με το ποια κατηγορία από τις υπόλοιπες θα συνδυαστεί. Για παράδειγμα, στον απόλυτο στατικό εντοπισμό, με εκ των υστέρων επεξεργασία, η ακρίβεια των συντεταγμένων του δέκτη κυμαίνεται από 1 έως 5m, καθώς η παρατηρήσεις όλων των εποχών μπορούν να εκμεταλλευτούν για την παραγωγή των συντεταγμένων. Σε

αντίθεση με τον απόλυτο στατικό εντοπισμό σε πραγματικό χρόνο, όπου η ακρίβεια μειώνεται κατά πολύ, αφού μόνο από παρατηρήσεις μίας εποχής τη φορά εξάγεται η λύση.

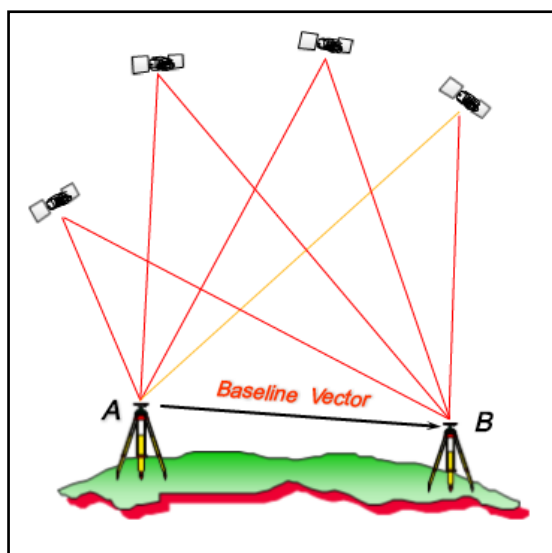


Σχήμα 2.3: Απόλυτος εντοπισμός (Πηγή: Leica Geosystems)
Figure 2.3: Absolute positioning (Source: Leica Geosystems)

Μια ειδική κατηγορία απόλυτου εντοπισμού, αποτελεί ο ακριβής απόλυτος εντοπισμός PPP (*Precise Point Positioning*). Στον PPP εντοπισμό χρησιμοποιούνται παρατηρήσεις ψευδοαποστάσεων και φάσης. Μεγαλύτερη ακρίβεια επιτυγχάνεται όταν χρησιμοποιούνται παρατηρήσεις φάσης και στις δύο φέρουσες συχνότητες. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη διεξαγωγή του PPP εντοπισμού, είναι η χρήση εφημερίδων και χρονικών δεδομένων μεγάλης ακρίβειας, που παράγονται από διάφορες υπηρεσίες. Τα ακριβή δεδομένα αυτά, παράγονται με καθυστέρηση κάποιων ημερών, έτσι ο PPP εντοπισμός καθίσταται ως εκ των υστέρων εντοπισμός. Για την εξάντληση της ακρίβειας που μπορεί να επιτευχθεί με τον PPP εντοπισμό, χρειάζονται μεγάλα χρονικά διαστήματα παρατηρήσεων, καθώς και όσο το δυνατόν αδιάκοπη παρακολούθηση του δορυφορικού σήματος, από όσο το δυνατόν περισσότερους δορυφόρους. Στην περίπτωση που οι παραπάνω συνθήκες πληρούνται, ο εντοπισμός μπορεί να έχει ακρίβεια μερικών εκατοστών.

2.3.2. Σχετικός εντοπισμός και τεχνικές επεξεργασίας των μετρήσεων

Ο σχετικός προσδιορισμός θέσης αναφέρεται στον προσδιορισμό των συντεταγμένων του δέκτη σε σχέση με έναν άλλο, που η θέση του θεωρείται γνωστή. Δηλαδή προσδιορίζεται το διάνυσμα (ΔX , ΔY , ΔZ) το οποίο ονομάζεται βάση, μεταξύ του δέκτη στη θέση γνωστών συντεταγμένων (Base) και του δέκτη στη θέση της οποίας οι συντεταγμένες ζητούνται. Η ακρίβεια του κυμαίνεται από μερικά χιλιοστά έως 1m, ανάλογα με το είδος των μετρήσεων που θα χρησιμοποιηθούν και με το ποια κατηγορία από τις υπόλοιπες θα συνδυαστεί.



Σχήμα 2.4: Σχετικός εντοπισμός (Πηγή: Leica Geosystems)
Figure 2.4: Relative positioning (Source: Leica Geosystems)

Στο σχετικό προσδιορισμό θέσης, χρησιμοποιούνται μετρήσεις φάσεων ή μετρήσεις ψευδοαποστάσεων και απαιτείται η ταυτόχρονη παρακολούθηση κοινών δορυφόρων από τους δύο δέκτες. Όταν δύο δέκτες εκτελούν ταυτόχρονες μετρήσεις, έχοντας σχετικά μικρή απόσταση μεταξύ τους, τα σφάλματα που επηρεάζουν τις μετρήσεις τους, θα είναι σε μεγάλο βαθμό ίδιου μεγέθους. Οι πρωτογενείς παρατηρήσεις, είναι δυνατό να συνδυαστούν κατάλληλα ως γραμμικοί συνδυασμοί, ώστε να καταλήγουν σε διάφορους τύπους εξισώσεων παρατήρησης. Οι βασικότεροι γραμμικοί συνδυασμοί είναι οι απλές, δίπλες και τριπλές διαφορές. Έτσι χρησιμοποιώντας ως εξισώσεις παρατήρησης τους γραμμικούς συνδυασμούς, το μεγαλύτερο μέρος των σφαλμάτων απαλείφεται. Οι γραμμικοί συνδυασμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κάθε τύπο μετρήσεων, όμως οι παρατηρήσεις φάσης είναι αυτές που χρησιμοποιούνται στο σχετικό προσδιορισμό θέσης για εργασίες υψηλής ακρίβειας. Βεβαίως, η χρήση τους διαφοροποιεί τις παραμέτρους που παραμένουν προς λύση, τα στοχαστικά μοντέλα και μειώνουν την πλεονάζουσα πληροφορία.

Απλές διαφορές

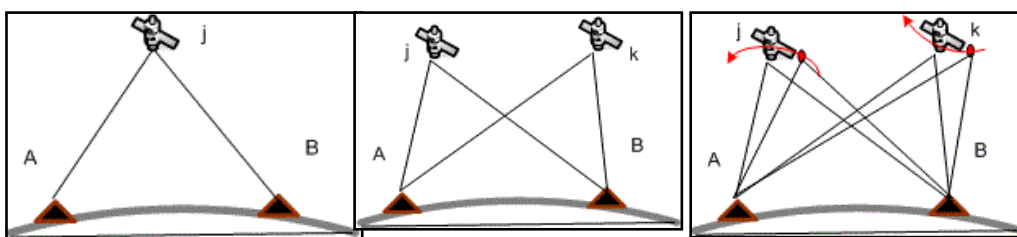
Ως απλή διαφορά, ορίζεται η διαφορά ταυτόχρονων παρατηρήσεων μεταξύ δύο δεκτών ως προς τον ίδιο δορυφόρο. Με τις απλές διαφορές, τα κοινά σφάλματα που οφείλονται στον δορυφόρο απαλείφονται (στην πραγματικότητα πάντα υπάρχουν μικρά εναπομείναντα σφάλματα), αλλά και τα υπόλοιπα σφάλματα μειώνονται αφού παρουσιάζονται ως διαφορές. Οι απλές διαφορές χρησιμοποιούνται κυρίως ως ενδιάμεσες ποσότητες για τον σχηματισμό των διπλών διαφορών.

Διπλές διαφορές

Ως διπλή διαφορά, ορίζεται η διαφορά ταυτόχρονων απλών διαφορών μεταξύ δύο δεκτών ως προς δύο δορυφόρους. Με τις διπλές διαφορές, επιπλέον τα κοινά σφάλματα που οφείλονται στους δέκτες απαλείφονται αλλά και τα υπόλοιπα σφάλματα μειώνονται ακόμα περισσότερο. Οι διπλές διαφορές είναι αυτές που κυρίως χρησιμοποιούνται για την εύρεση της τελικής λύσης.

Τριπλές διαφορές

Ως τριπλή διαφορά, ορίζεται η διαφορά δύο διπλών διαφορών ως προς δυο διαφορετικές χρονικές στιγμές. Με τις τριπλές διαφορές, στην περίπτωση μετρήσεων φάσης, απαλείφονται οι ασάφειες φάσης και τα υπόλοιπα σφάλματα μειώνονται ακόμα περισσότερο. Οι τριπλές διαφορές χρησιμοποιούνται για την εύρεση προσεγγιστικών συντεταγμένων, οι οποίες βοηθούν στην επίλυση των ασαφειών φάσης. Ακόμα χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση των κύκλων ολίσθησης.



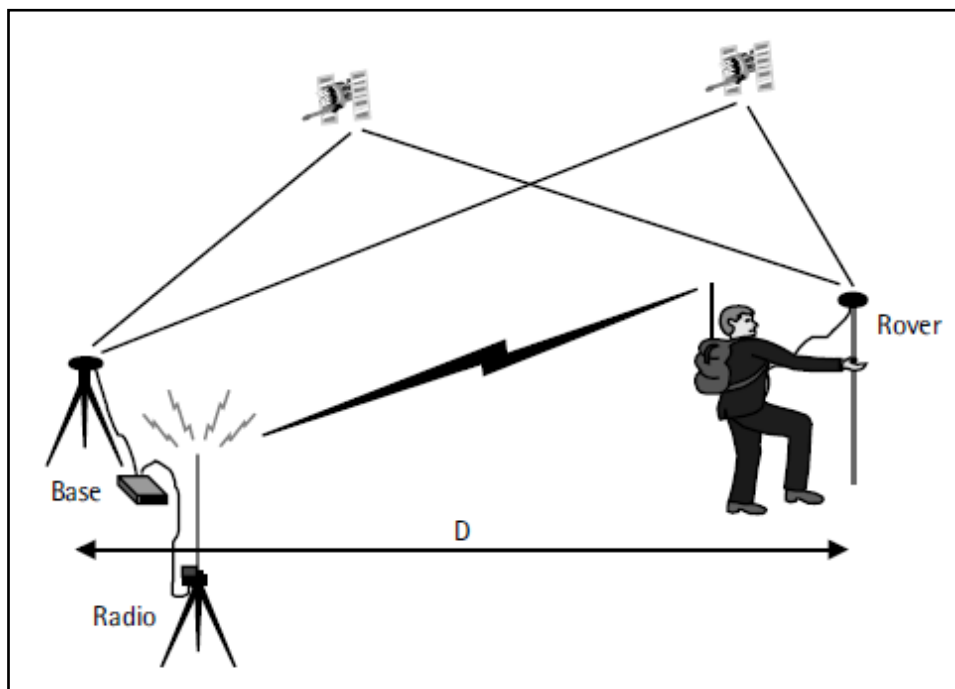
Σχήμα 2.5: Απλές, διπλές και τριπλές διαφορές (Πηγή: GPS Tutor 1998)
Figure 2.5: Single, double and triple differences (Source: GPS Tutor 1998)

Οι παραπάνω γραμμικοί συνδυασμοί μπορούν να γίνουν και από δέκτες μονής συχνότητας. Ένας ακόμα γραμμικός συνδυασμός, που μόνο οι δέκτες δύο συχνοτήτων μπορούν να χρησιμοποιήσουν, καθώς αναφέρεται σε παρατηρήσεις μεταξύ των διαφορετικών φορέων, είναι ο συνδυασμός L_3 ή αλλιώς ελεύθερης ιονόσφαιρας. Με τη χρήση του απαλείφεται το ιονοσφαιρικό σφάλμα, εισάγεται όμως θόρυβος και έτσι δε θα πρέπει να χρησιμοποιείται σε μικρές βάσεις. Ο συνδυασμός P_3 έχει την ίδια μορφή με τον L_3 αλλά αναφέρεται στον κώδικα P. Η διαφορά L_3-P_3 περιέχει μόνο το σφάλμα πολυανάκλασης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευσή του.

2.4. Τεχνική Εντοπισμού σε Πραγματικό Χρόνο (RTK)

Μια τεχνική σχετικού εντοπισμού, που χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές πλοήγησης, είναι η τεχνική εντοπισμού σε πραγματικό χρόνο RTK (*Real Time Kinematic*). Η τεχνική αυτή βασίζεται σε παρατηρήσεις φάσης που

πραγματοποιούνται σε τουλάχιστον τέσσερις κοινούς δορυφόρους, από ένα δέκτη ακίνητο σε θέση γνωστών συντεταγμένων και από τον κινούμενο δέκτη, του οποίου οι συντεταγμένες ζητούνται. Η απόσταση μεταξύ των δύο δεκτών, όσο αυξάνεται, δυσχεραίνει την ακρίβεια και την διαδικασία υλοποίησης της μεθόδου. Για την εύρεση των συντεταγμένων των σημείων που περνάει ο κινούμενος δέκτης, σε πραγματικό χρόνο, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η επικοινωνία των δύο δεκτών μέσω ενός συστήματος ασύρματης επικοινωνίας (ραδιοεπικοινωνία, internet κ.α). Το σύστημα αυτό, εξυπηρετεί στο να στέλνονται οι παρατηρήσεις - διορθώσεις και οι συντεταγμένες του σταθερού δέκτη, στον κινούμενο. Αυτός, με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού, συνδυάζει τις δικές του παρατηρήσεις με αυτές που έλαβε και καταλήγει στην εύρεση των συντεταγμένων του με μεγάλη ακρίβεια. Πριν ξεκινήσει ο εντοπισμός, οι αέριες ασάφειες φάσεις πρέπει να υπολογιστούν. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται αρχικοποίηση, πραγματοποιείται με διάφορες τεχνικές και σε περίπτωση απώλειας του σήματος πρέπει να επαναληφθεί. Η ακρίβεια εντοπισμού με την τεχνική αυτή, κυμαίνεται από 0,02 έως 0,1m. Ο σχετικός εντοπισμός σε πραγματικό χρόνο με παρατηρήσεις ψευδοαποστάσεων είναι γνωστός ως DGPS. Η αρχές της μεθόδου είναι ίδιες με τη μέθοδο RTK, με τη διαφορά ότι δεν εμπλέκονται ασάφειες φάσης στην επίλυση, η απόσταση των δύο δεκτών μπορεί να είναι και μεγαλύτερη και η ακρίβεια του εντοπισμού κυμαίνεται από μερικά εκατοστά ως 5 μέτρα.



Σχήμα 2.6: Τεχνική σχετικού εντοπισμού σε πραγματικό χρόνο (Πηγή: Ahmed El Rabbany 2006)
Figure 2.6: Real time kinematic positioning (Source: Ahmed El Rabbany 2006)

2.5. Σχετικός Εντοπισμός Μεγάλης Εμβέλειας

Καθώς ο κινούμενος δέκτης απομακρύνεται από τον σταθερό, τα σφάλματα των μετρήσεων τους παύουν να σχετίζονται. Έτσι, η ποιότητα του σχετικού εντοπισμού μειώνεται δραματικά, αφού τα σφάλματα δεν αλληλοαναιρούνται με την επεξεργασία των μετρήσεων. Το γεγονός αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με την διάφορες τεχνικές που στηρίζονται στη λειτουργία ενός δικτύου μόνιμων σταθμών αναφοράς, που καλύπτουν μία περιοχή μεγάλης εμβέλειας.

Τεχνική CORS RTK

Η τεχνική αυτή πραγματοποιείται σε μία μεγάλης έκτασης περιοχή, στην οποία υπάρχει δίκτυο μόνιμων σταθμών αναφοράς CORS (*Continuous Operating Reference Stations*). Έτσι, όταν ένας δέκτης κινείται στην περιοχή, λαμβάνει συνεχώς διορθώσεις από τον κοντινότερο σταθμό αναφοράς, αλλά καθώς απομακρύνεται από αυτόν και βγαίνει από την περιοχή εμβέλειας του, δέχεται διορθώσεις από τον επόμενο κοντινότερο σταθμό αναφοράς, καθιστώντας αδιάκοπη τη διαδικασία RTK εντοπισμού. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο σταθμός αναφοράς, είναι ένας γεωδαιτικού τύπου δέκτης, δύο συχνοτήτων και διαθέτει υψηλής ποιότητας κεραία. Λόγω του υψηλού κόστους που συνεπάγεται η απόκτηση του δέκτη αναφοράς αλλά και του διαχειριστικού κόστους λειτουργίας του, σήμερα χρησιμοποιούνται ευρέως τα δίκτυα μόνιμων σταθμών αναφοράς (CORS). Τα δίκτυα αυτά, δημιουργούνται και συντηρούνται από κρατικούς φορείς και ιδιωτικές επιχειρήσεις, διαθέτουν γεωδαιτικούς σταθμούς αναφοράς υψηλών προδιαγραφών και παρέχουν τα δεδομένα τους σε πραγματικό και εκ των υστέρων χρόνο, έναντι συνδρομής. Η συνδρομή μπορεί να φτάνει μερικές εκατοντάδες ευρώ ετησίως και απαλλάσσει τον ενδιαφερόμενο από το κόστος απόκτησης του σταθμού αναφοράς, αλλά και από τα τυχόν έξοδα σε προσωπικό ή εργασία για τη λειτουργία του.

Τεχνική VRS

Κατά την τεχνική αυτή οι σταθμοί αναφοράς, στέλνουν τα δεδομένα που συλλέγουν σε ένα υπολογιστικό κέντρο και αυτό με τη σειρά του υπολογίζει τις διορθώσεις για κάθε σταθμό. Ο κινούμενος δέκτης στέλνει την προσεγγιστική του θέση στο υπολογιστικό κέντρο και αυτό χρησιμοποιεί τη θέση αυτή για να εξάγει ένα σταθμισμένο μέσο όρο των διορθώσεων, ανάλογα με την απόσταση της προσεγγιστικής θέσης από τους σταθερούς σταθμούς. Έτσι, το υπολογιστικό κέντρο στέλνει διορθώσεις στον κινούμενο δέκτη, σαν να τις έστελνε ένας εικονικός σταθμός αναφοράς VRS (*Virtual Reference Station*) από την θέση των προσεγγιστικών συντεταγμένων. Η τεχνική αυτή συμβάλει στη μείωση του απαιτούμενου αριθμού σταθμών αναφοράς για την κάλυψη μίας περιοχής.

Τεχνικές επαύξησης

Κατά την τεχνική αυτή οι σταθμοί αναφοράς, στέλνουν τα δεδομένα που συλλέγουν σε ένα υπολογιστικό κέντρο και αυτό με τη σειρά του υπολογίζει τις διορθώσεις που αντιστοιχούν στους εκάστοτε δορυφόρους που παρακολουθούνται. Οι διορθώσεις αυτές αποστέλλονται σε κέντρα μετάδοσης και φτάνουν στον δέκτη. Όταν οι διορθώσεις μεταδίδονται στον δέκτη από γεωστατικούς δορυφόρους, το σύστημα ονομάζεται δορυφορικό σύστημα μεγάλης εμβέλειας ή *Space Based Augmentation System* (SBAS). Όταν οι διορθώσεις μεταδίδονται από πομπούς στο έδαφος, το σύστημα ονομάζεται σύστημα εδάφους μεγάλης εμβέλειας ή *Ground Based Augmentation System* (GBAS). Το σύστημα EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), αποτελεί το ευρωπαϊκό σύστημα SBAS, διαθέτει τρεις γεωστατικούς δορυφόρους που αποστέλλουν διορθώσεις και σχετικές πληροφορίες για τα εκπεμπόμενα σήματα, με σκοπό τη βελτίωση της ακρίβειας προσδιορισμού της θέσης του χρήστη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ (INS)

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας των αδρανειακών συστημάτων εντοπισμού, οι επιμέρους διατάξεις από τις οποίες αποτελείται ένα INS (*Inertial Navigation System*), καθώς και τα διάφορα είδη αδρανειακών συστημάτων. Ακόμα παρουσιάζονται οι παράγοντες και τα σφάλματα που επιδρούν στη λειτουργία των συστημάτων αυτών και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης τους σε εφαρμογές πλοήγησης οχημάτων.

3.1. Αρχή Λειτουργίας Συστημάτων INS

Τα συστήματα αδρανειακού εντοπισμού αποτελούν αυτόνομες συσκευές, που παρέχουν πληροφορίες θέσης, ταχύτητας και προσανατολισμού ενός κινούμενου σώματος, βασιζόμενα στους νόμους της Νευτώνειας μηχανικής. Πιο συγκεκριμένα, τα συστήματα αυτά διαθέτουν αισθητήρες που αντιλαμβάνονται τις δυνάμεις (επιταχυνσιόμετρα) και τις γωνιακές ταχύτητες (γυροσκόπια) στις οποίες υπόκειται κινούμενο σώμα. Οι δυνάμεις αυτές συνδέονται με την επιτάχυνση του σώματος μέσω του 2^{ου} Νόμου του Νεύτωνα.

Δηλαδή, σε σώμα μάζας m , στο οποίο επιδρά δύναμη F , η επιτάχυνση του σώματος θα είναι,

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{m} \quad (3.1)$$

Υπολογίζοντας έτσι την επιτάχυνση $\mathbf{a}(t)$ του σώματος σε μία δεδομένη χρονική στιγμή t , υπολογίζεται η ταχύτητα $\mathbf{v}(t)$ και η θέση $\mathbf{x}(t)$ του σώματος εκείνη τη χρονική στιγμή, ολοκληρώνοντας την επιτάχυνση μια φορά ως προς το χρόνο για την ταχύτητα και ολοκληρώνοντας δεύτερη φορά για τη θέση του σώματος. Δηλαδή,

$$\mathbf{v}(t) = \int_{t_0}^t \mathbf{a}(t) dt + \mathbf{v}(t_0) \quad (3.2)$$

και

$$\mathbf{x}(t) = \int_{t_0}^t \mathbf{v}(t) dt + \mathbf{x}(t_0) \quad (3.3)$$

Ακόμα ο 2^{ος} Νόμος του Νεύτωνα περιγράφει ότι ο ρυθμός μεταβολής της στροφορμής ισούται με το μέγεθος της ροπής που ασκείται σε μία περιστρεφόμενη μάζα. Δηλαδή,

$$\frac{dH}{dt} = L \quad (3.4)$$

και

$$H = I\omega \quad (3.5)$$

όπου,

H , Στροφορμή της μάζας,

L , Ροπή,

I , Ροπή αδράνειας ως προς τον άξονα περιστροφής,

ω , Γωνιακή ταχύτητα περιστρεφόμενης μάζας.

Αντίστοιχα, ολοκληρώνοντας τη γωνιακή ταχύτητα $\omega(t)$ που αντιλαμβάνονται τα γυροσκόπια μία φορά ως προς το χρόνο, υπολογίζεται ο προσανατολισμός του σώματος $A(t)$.

Για τη διεξαγωγή των ολοκληρώσεων και τον υπολογισμό των ζητούμενων, απαραίτητη είναι η γνώση των αρχικών τιμών της θέσης $x(t_0)$, ταχύτητας $v(t_0)$ και προσανατολισμού $A(t_0)$, του σώματος.

Οι παραπάνω εξισώσεις παρουσιάζονται για την κατανόηση της βασικής αρχής των αδρανειακών συστημάτων και δεν αποτελούν τις εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στην πραγματικότητα, καθώς δεν περιλαμβάνουν παράγοντες και σφάλματα που αναφέρονται στη συνέχεια και επιδρούν στη λειτουργία των αδρανειακών συστημάτων.

3.2. Συστήματα Αναφοράς και Αδρανειακός Εντοπισμός

Πίσω από την απλή περιγραφή της αρχής του αδρανειακού εντοπισμού που αναφέρεται παραπάνω, διάφοροι παράγοντες και σφάλματα υπεισέρχονται στη διαδικασία εντοπισμού και αν δεν ληφθούν υπόψη, ο αδρανειακός εντοπισμός αποτυγχάνει στο να παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα.

3.2.1. Παράγοντες που επιδρούν στη λειτουργία των INS

Ένα αδρανειακό σύστημα σε κατάσταση ακινησίας εξακολουθεί να μετράει δυνάμεις. Αυτό είναι αποτέλεσμα της ιδιότητας των αδρανειακών αισθητήρων να μετρούν δυνάμεις σε ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Η Γη κινείται σε σχέση με το αδρανειακό σύστημα αναφοράς στο οποίο επιπλέον εκδηλώνονται βαρυτικές δυνάμεις.

Τα επιταχυνσιόμετρα μετρούν τις δυνάμεις που ασκούνται πάνω στο σώμα και υπολογίζουν την επιτάχυνση του, όμως εκτός από τις δυνάμεις που ασκούνται λόγω της κίνησης του σώματος, ασκείται και η δύναμη της βαρύτητας στο σώμα ακόμα και όταν αυτό είναι ακίνητο. Τα επιταχυνσιόμετρα δεν έχουν τη δυνατότητα να ξεχωρίσουν εάν η δύναμη που αντιλαμβάνονται οφείλεται στη βαρυτική έλξη ή στην κίνηση του σώματος και έτσι εάν δεν ληφθεί υπόψη η επιτάχυνση που οφείλεται σε βαρυτική έλξη τα επιταχυνσιόμετρα λανθασμένα θα υποδεικνύουν κίνηση όταν το σώμα είναι ακίνητο ή θα υποδεικνύουν λανθασμένη τιμή επιτάχυνσης όταν το σώμα κινείται. Η επιτάχυνση της βαρύτητας οφείλεται σε δύο παράγοντες, στην έλξη των μαζών της Γης και στην περιστροφή της, και έχει διαφορετική τιμή ανάλογα με τη θέση του σώματος στη φυσική γήινη επιφάνεια.

Η περιστροφή της Γης σε σχέση με το αδρανειακό σύστημα αναφοράς γίνεται αντιληπτή από τα γυροσκόπια και έχει διαφορετική τιμή ανάλογα με τη θέση του σώματος στη φυσική γήινη επιφάνεια. Έτσι εάν δε ληφθεί υπόψη, ακόμα και όταν το σώμα είναι ακίνητο, τα γυροσκόπια λανθασμένα θα υποδεικνύουν αλλαγή προσανατολισμού.

Ένας ακόμα παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη, είναι η δύναμη που ασκείται στο σώμα λόγω της κίνησης του σε περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς, δηλαδή τη Γη. Η δύναμη αυτή είναι γνωστή ως δύναμη *Coriolis*.

Όλοι αυτοί οι παράγοντες λαμβάνονται υπόψη από την κύρια υπολογιστική μονάδα του INS, προκειμένου ο υπολογισμός των στοιχείων πλοήγησης του σώματος να είναι όσο το δυνατόν ακριβής.

3.2.2. Συστήματα αναφοράς

Ο εντοπισμός και η πλοήγηση προϋποθέτουν τη χρήση διαφόρων συστημάτων αναφοράς. Για παράδειγμα, οι αδρανειακοί αισθητήρες μετρούν την κίνηση του σώματος ως προς ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς, η οποία μετατρέπεται στο σύστημα αναφοράς του κινούμενου σώματος και ακολούθως σε ένα σύστημα αναφοράς πλοήγησης ως προς τη Γη, ώστε η πληροφορία της κίνησης να είναι αξιοποιήσιμη, δηλαδή να μπορεί να εμποτευθεί και να συνδυαστεί με άλλες πληροφορίες. Παρακάτω παρουσιάζονται τα κύρια συστήματα αναφοράς που χρησιμοποιούνται στον αδρανειακό εντοπισμό.

Αδρανειακό σύστημα αναφοράς (*Inertial coordinate system*)

Αδρανειακό σύστημα αναφοράς, χαρακτηρίζεται αυτό στο οποίο ισχύουν ο πρώτος και δεύτερος νόμος του Νεύτωνα. Κέντρο του είναι το κέντρο μάζας της γης, ο άξονας Z συμπίπτει με τον μέσο άξονα περιστροφής της Γης, ο άξονας X βρίσκεται

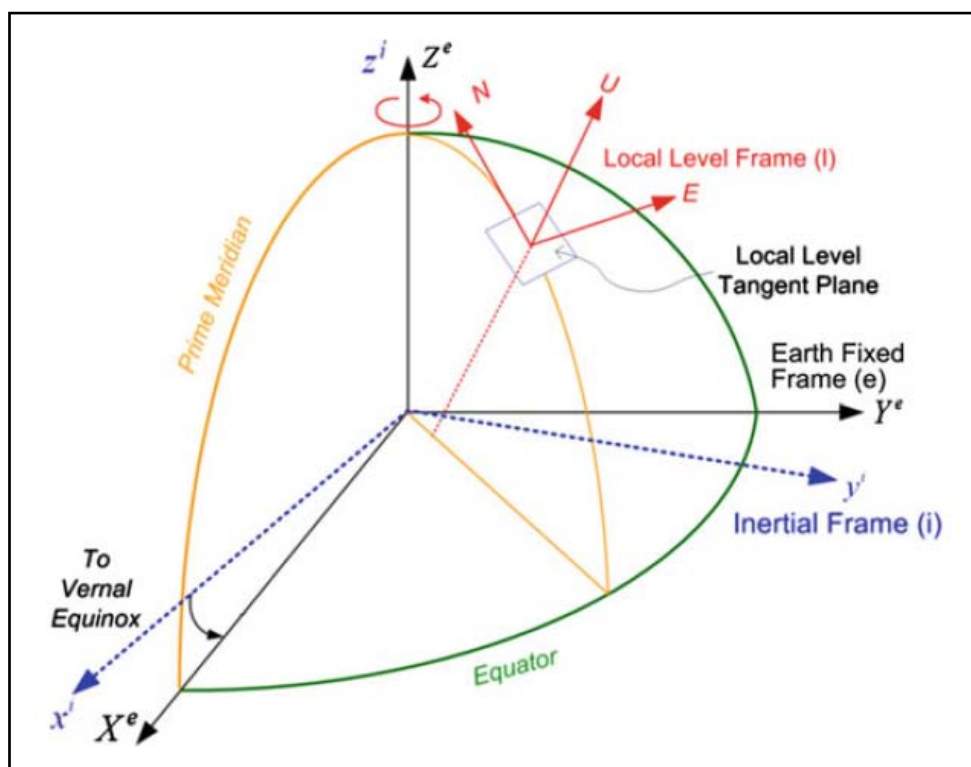
στο ισημερινό επίπεδο και είναι προσανατολισμένος προς το σημείο τομής της Εκλειπτικής με το ισημερινό επίπεδο και ο άξονας Y συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα αξόνων.

Γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς (Earth-Centered Earth-Fixed Coordinate system)

Στο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς, πραγματοποιείται ο μετασχηματισμός των πρωτογενών μετρήσεων, προκειμένου να είναι δυνατή η επεξεργασία τους. Κέντρο του συστήματος αυτού είναι το κέντρο μάζας της Γης, ο άξονας Z συμπίπτει με το μέσο άξονα περιστροφής της γης, ο άξονας X διέρχεται από το σημείο τομής του ισημερινού επιπέδου με τον μεσημβρινό του Greenwich και ο άξονας Y συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα αξόνων.

Τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς (Local Level Coordinate system)

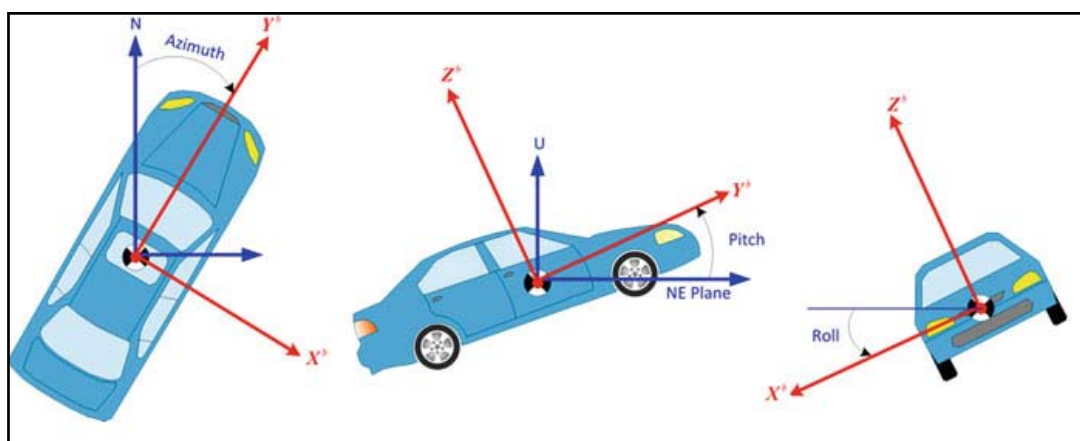
Το σύστημα αυτό εξυπηρετεί στο να γίνονται εύληπτα τα στοιχεία πλοήγησης ενός σώματος πάνω ή κοντά στην επιφάνεια της γης και συχνά αναφέρεται ως σύστημα αναφοράς πλοήγησης. Το κέντρο του είναι ένα σημείο πάνω στη φυσική γήινη επιφάνεια, ο άξονας Y είναι προσανατολισμένος στον γεωδαιτικό Βορρά, ο άξονας Z συμπίπτει με την κάθετο στο ελλειψοειδές και ο άξονας X συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα αναφοράς.



Σχήμα 3.1: Σχέση μεταξύ συστημάτων αναφοράς (Πηγή: Noureldin et al 2013)
 Figure 3.1: Differences between coordinate systems (Source: Noureldin et al 2013)

Σύστημα αναφοράς του κινούμενου σώματος (*Body Coordinate system*)

Στις περισσότερες εφαρμογές οι άξονες των αισθητήρων τοποθετούνται έτσι ώστε να συμπίπτουν με τους βασικούς άξονες του κινούμενου σώματος πάνω στο οποίο τοποθετούνται. Οι άξονες του κινούμενου σώματος δημιουργούν το σύστημα αναφοράς του κινούμενου σώματος. Το κέντρο αυτού του συστήματος είναι συνήθως το κέντρο μάζας του σώματος, ο άξονας Y συμπίπτει με τη διεύθυνση κίνησης του σώματος, ο άξονας X είναι κάθετος στη διεύθυνση κίνησης του σώματος και ο άξονας Z είναι προσανατολισμένος προς τα πάνω και συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα αναφοράς. Η γωνία στροφής ως προς τον Y άξονα ονομάζεται γωνία διατοιχισμού (*roll*), η γωνία στροφής ως προς τον X άξονα ονομάζεται γωνία πρόνευσης (*pitch*) και η γωνία στροφής ως προς τον Z άξονα ονομάζεται αζιμούθιο (*azimuth*).



Σχήμα 3.2: Γωνίες στροφής κατά τους άξονες Z,X,Y (Πηγή: Noureldin et al 2013)
Figure 3.2: Azimuth, Pitch and Roll angles (Source: Noureldin et al 2013)

3.3. Αισθητήρες και Μέρη των Συστημάτων INS

Ένα αδρανειακό σύστημα εντοπισμού διαθέτει δύο ειδών αισθητήρες για τη λήψη των απαραίτητων μετρήσεων και αποτελείται από τρία κυρίως μέρη, την αδρανειακή μονάδα IMU (*Inertial measurement unit*), μία μονάδα προεπεξεργασίας και την κύρια υπολογιστική μονάδα.

3.3.1. Αισθητήρες αδρανειακών συστημάτων εντοπισμού

Οι αισθητήρες των συστημάτων INS είναι τα επιταχυνσιόμετρα και τα γυροσκόπια.

Επιταχυνσιόμετρα

Τα επιταχυνσιόμετρα είναι αισθητήρες που αντιλαμβάνονται και μετρούν τις δυνάμεις που ασκούνται σε ένα δοκίμιο, καταλήγοντας έτσι στον υπολογισμό της επιτάχυνσης του ασκείται σε αυτό μέσω του 2^{ου} Νόμου του Νεύτωνα. Διάφορα είδη επιταχυνσιόμετρων έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται για κάθε εφαρμογή, ανάλογα με την ακρίβεια που επιτυγχάνουν και συνεπώς το κόστος τους. Μερικά από τα βασικότερα είδη είναι τα μηχανικά επιταχυνσιόμετρα εξισορρόπησης δυνάμεων, τα επιταχυνσιόμετρα δονούμενης δοκού, τα πιεζοηλεκτρικά, τα επιταχυνσιόμετρα με πυκνωτές και τα μικρο-ηλεκτρομηχανικά επιταχυνσιόμετρα.

Γυροσκόπια

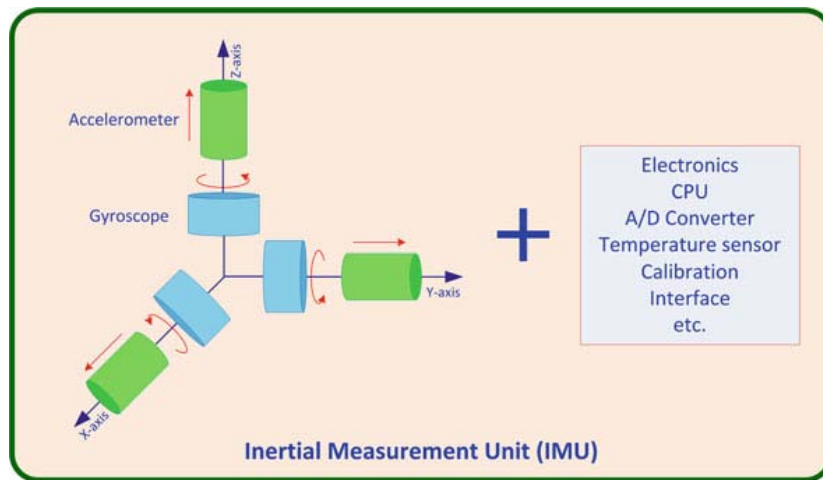
Τα γυροσκόπια είναι αισθητήρες που αντιλαμβάνονται και μετρούν τις μεταβολές στη γωνιακή ταχύτητα του κινούμενου σώματος ως προς το αδρανειακό σύστημα αναφοράς, παρέχοντας τον υπολογισμό και τη μετατροπή του προσανατολισμού του σώματος στα διάφορα συστήματα αναφοράς. Διάφορα είδη γυροσκοπίων έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται για κάθε εφαρμογή, ανάλογα με την ακρίβεια που επιτυγχάνουν και συνεπώς το κόστος τους. Μερικά από τα βασικότερα είδη είναι τα μηχανικά γυροσκόπια περιστρεφόμενης ή δονούμενης μάζας, τα οπτικά γυροσκόπια με δακτύλιο *Laser* ή οπτικών ινών και τα μικρο-ηλεκτρομηχανικά γυροσκόπια.

3.3.2. Μέρη αδρανειακών συστημάτων εντοπισμού

Τα κύρια μέρη που αποτελούν ένα σύστημα INS είναι η αδρανειακή μονάδα (IMU), η μονάδα προεπεξεργασίας και η κύρια υπολογιστική μονάδα.

Αδρανειακή μονάδα (IMU)

Η αδρανειακή μονάδα αποτελείται από τρία επιταχυνσιόμετρα και τρία γυροσκόπια, τοποθετημένα ομοαξονικά ανά δύο, σε ένα τρισσορθογώνιο σύστημα αξόνων όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ο υπολογισμός των παραμέτρων της πλοήγησης στον τρισδιάστατο χώρο. Επιπλέον, η αδρανειακή μονάδα περιέχει τις απαραίτητες ηλεκτρονικές διατάξεις για τον έλεγχο και τη διασφάλιση της καλής λειτουργίας των αισθητήρων.

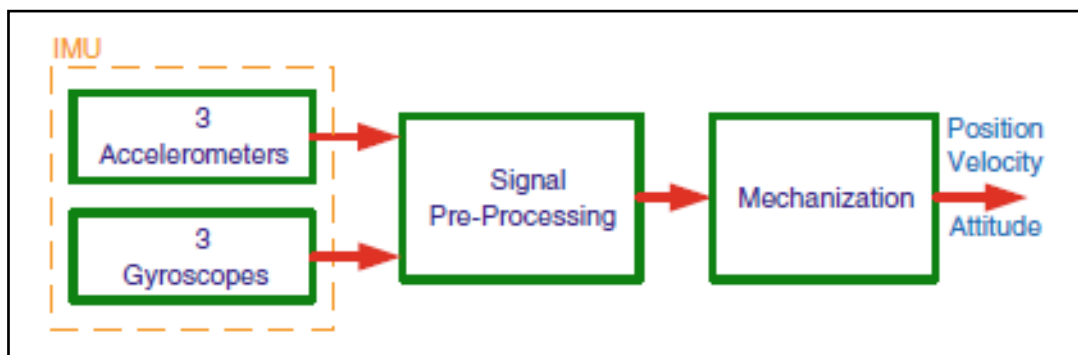


Σχήμα 3.3: Αδρανειακή μονάδα (IMU) (Πηγή: Noureldin et al 2013)
 Figure 3.3: Inertial Measurement Unit (IMU) (Source: Noureldin et al 2013)

Μονάδα προεπεξεργασίας και κύρια υπολογιστική μονάδα

Η μονάδα προεπεξεργασίας πραγματοποιεί ένα είδος φιλτραρίσματος των μετρήσεων των αισθητήρων λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους των ηλεκτρονικών διατάξεων της υπολογιστικής μονάδας, όπως για παράδειγμα τη θερμοκρασία των αισθητήρων, ώστε να μειώσει το θόρυβο των μετρήσεων και να τις διοχετεύσει στην κύρια υπολογιστική μονάδα.

Η κύρια υπολογιστική μονάδα είναι υπεύθυνη για την εφαρμογή των κατάλληλων αλγορίθμων και ολοκληρώσεων των μετρήσεων, καθώς και για τον υπολογισμό των παραμέτρων που επηρεάζουν τις μετρήσεις, όπως ο υπολογισμός της επιτάχυνσης λόγω βαρύτητας, καταλήγοντας έτσι στην εξαγωγή της θέσης, ταχύτητας και προσανατολισμού του κινούμενου σώματος, στο επιλεγθέν σύστημα αναφοράς.



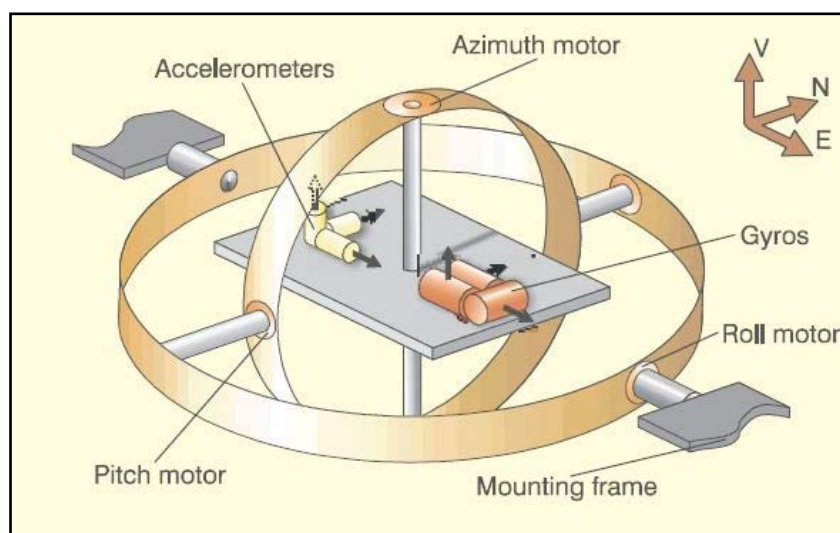
Σχήμα 3.4: Κύρια μέρη συστήματος INS (Πηγή: Noureldin et al 2013)
 Figure 3.4: Main parts of an INS (Source: Noureldin et al 2013)

3.4. Κατηγορίες Συστημάτων INS

Τα αδρανειακά συστήματα εντοπισμού κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες, τα συστήματα σταθερής πλατφόρμας (gimbaled INS) και τα προσκολλημένα συστήματα (strapdown INS).

3.4.1. Συστήματα σταθερής πλατφόρμας (gimbaled INS)

Στα συστήματα αυτά, οι αδρανειακοί αισθητήρες είναι τοποθετημένοι πάνω σε μία πλατφόρμα, η οποία πλαισιώνεται από μία διάταξη σερβομηχανισμών έτσι ώστε να μένει ανεπηρέαστη από τις στροφές του σώματος στο οποίο έχει τοποθετηθεί. Αυτό επιτυγχάνεται με τη στροφή της πλατφόρμας από τους σερβομηχανισμούς, λαμβάνοντας υπόψη τις μετρήσεις των γυροσκοπίων. Τα συστήματα σταθερής πλατφόρμας παρέχουν μεγάλη ακρίβεια, αλλά είναι περίπλοκα από μηχανικής πλευράς, ογκώδη και έχουν υψηλό κόστος, έτσι η χρήση τους είναι περιορισμένη.



Σχήμα 3.5: Σύστημα INS σταθερής πλατφόρμας (Πηγή: globalspec)
Figure 3.5: Gimbaled INS (Source: globalspec)

3.4.2. Προσκολλημένα συστήματα (Strapdown INS)

Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών συστημάτων έδωσε τη δυνατότητα για τη δημιουργία των προσκολλημένων συστημάτων. Στα συστήματα αυτά οι αισθητήρες είναι τοποθετημένοι πάνω στο κινούμενο σώμα και ακολουθούν την κίνησή του. Έτσι οι μετρήσεις με τα συστήματα αυτά αναφέρονται στο σύστημα αναφοράς του σώματος, μπορούν όμως να μετασχηματιστούν σε άλλο σύστημα αναφοράς χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις των γυροσκοπίων. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται περισσότερο λόγω του μικρού μεγέθους και κόστους τους.

3.5. Έναρξη Λειτουργίας INS

Όταν ένα σύστημα INS ξεκινά τη λειτουργία του, εκτελούνται μία σειρά από ενέργειες που διαρκούν μερικά λεπτά, ώστε το σύστημα να μπορέσει να παρέχει τα δεδομένα πλοήγησης, δηλαδή τη θέση, ταχύτητα και προσανατολισμό του κινούμενου σώματος.

Οι ενέργειες αυτές αρχικά περιλαμβάνουν έναρξη της λειτουργίας των αισθητήρων, ώστε να φτάσουν στη σωστή θερμοκρασία λειτουργίας τους και βαθμονόμηση τους από μετρήσεις της επιτάχυνσης της βαρύτητας και της περιστροφής της γης, ενώ το σώμα είναι ακίνητο.

Ένα σύστημα INS ολοκληρώνει τις επιταχύνσεις και τις γωνιακές ταχύτητες που λαμβάνει από τους αισθητήρες, ώστε να υπολογίσει την ταχύτητα και τον προσανατολισμό αντίστοιχα, ενός κινούμενου σώματος και ολοκληρώνει την ταχύτητα για τον υπολογισμό της θέσης του. Οι ολοκληρώσεις αυτές, για να πραγματοποιηθούν, απαιτούν τη γνώση των αρχικών τιμών θέσης, ταχύτητας και προσανατολισμού του σώματος. Η διαδικασία της εύρεσης των αρχικών τιμών της θέσης και της ταχύτητας ονομάζεται αρχικοποίηση, ενώ του προσανατολισμού ονομάζεται ευθυγράμμιση.

Αρχικοποίηση (Initialization)

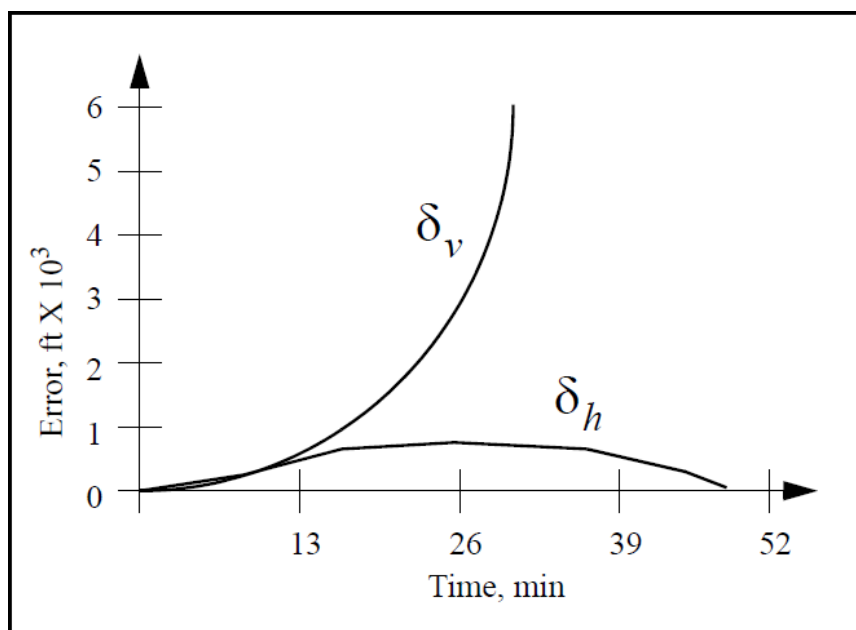
Οι αρχικές τιμές θέσης μπορούν να δοθούν στο αδρανειακό σύστημα εάν το σώμα βρίσκεται σε θέση γνωστών συντεταγμένων, η διαδικασία είναι γνωστή ως CUPT (*Coordinate update*). Ακόμα, εξωτερική πηγή όπως ένας δέκτης GPS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση των αρχικών τιμών θέσης. Οι αρχικές τιμές ταχύτητας μπορούν να δοθούν στο αδρανειακό σύστημα ως μηδενικές εάν το σώμα είναι ακίνητο, διαδικασία γνωστή ως ZUPT (*Zero velocity update*), ή να χρησιμοποιηθεί εξωτερική πηγή όπως δέκτης GPS ή οδόμετρο.

Ευθυγράμμιση (Alignment)

Ο αρχικός προσανατολισμός του σώματος όταν δεν παρέχεται από εξωτερική πηγή, αλλά υπολογίζεται από το ίδιο το σύστημα, περιλαμβάνει δύο βήματα και στηρίζεται σε μετρήσεις της επιτάχυνσης της βαρύτητας και της περιστροφής της Γης, ενώ το σώμα είναι ακίνητο. Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει την οριζοντίωση των οριζόντιων επιταχυνσιομέτρων ώστε η επιτάχυνση της βαρύτητας να επηρεάζει μόνο το κατακόρυφο επιταχυνσιόμετρο. Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει την εύρεση της στροφής του οριζοντιωμένου πλέον συστήματος αναφοράς του σώματος ως προς το γεωκεντρικό, από μετρήσεις της γωνιακής περιστροφής της Γης που αντιλαμβάνονται τα γυροσκόπια του ακίνητου σώματος.

3.6. Πηγές Σφαλμάτων

Πολλές είναι οι πηγές σφαλμάτων που επηρεάζουν την απόδοση ενός αδρανειακού συστήματος. Οι πηγές αυτές είναι τα σφάλματα των αισθητήρων του, σφάλματα στη μοντελοποίηση του γήινου πεδίου βαρύτητας, άρα και της επιτάχυνσης της βαρύτητας και τα σφάλματα αρχικοποίησης και ευθυγράμμισης. Τα σφάλματα αυτά υπεισέρχονται στις μετρήσεις και καθώς οι μετρήσεις ολοκληρώνονται ως προς τον χρόνο για τον υπολογισμό των παραμέτρων πλοήγησης, έτσι και τα σφάλματα ολοκληρώνονται μαζί τους, αυξάνοντας το μέγεθος τους γραμμικά, τετραγωνικά και κυβικά σε κάθε ολοκλήρωση και επηρεάζοντας τις παραμέτρους πλοήγησης αναλόγως. Στο Σχήμα 3.6 φαίνεται η διόγκωση των σφαλμάτων κατά το πέρασ του χρόνου και κατ' επέκταση ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν τη θέση. Με δ_h απεικονίζεται το οριζοντιογραφικό σφάλμα, ενώ με δ_v το σφάλμα στην κατακόρυφη θέση. Οι τιμές στο σχήμα αλλάζουν ανάλογα με την ποιότητα του εκάστοτε αδρανειακού συστήματος.



Σχήμα 3.6: Επίδραση σφαλμάτων INS κατά το πέρασ του χρόνου (Πηγή: Alonzo Kelly 2005)
Figure 3.6: Development of position error over time (Source: Alonzo Kelly 2005)

Έτσι κρίνεται απαραίτητη η κατανόηση της φύσης των σφαλμάτων αυτών, ώστε να εκτιμηθούν με ακρίβεια και στη συνέχεια να αφαιρεθούν από τις παρατηρήσεις προκειμένου να παράγονται λύσεις μεγαλύτερης ακρίβειας και να αυξάνεται η διάρκεια αυτονομίας του συστήματος. Στη συνέχεια αναφέρονται οι σημαντικότεροι παράγοντες σφαλμάτων.

Εύρος διακριτικής ικανότητας αισθητήρα

Το εύρος των τιμών μίας φυσικής ποσότητας που μπορούν να αντιληφθούν οι αισθητήρες πρέπει να είναι συνυφασμένο με την εφαρμογή, καθώς φυσικές ποσότητες που ξεπερνούν το εύρος αυτό δεν μπορούν να μετρηθούν ή μετρώνται λανθασμένα οδηγώντας σε λάθος πληροφορία πλοήγησης.

Σφάλμα λανθασμένης εκτίμησης (*Bias*)

Η τιμή που εξάγει ο αισθητήρας για μια φυσική ποσότητα διαφέρει από αυτή που δέχεται κατά το σφάλμα λανθασμένης εκτίμησης. Το σφάλμα αυτό οφείλεται στην ποιότητα των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών των αισθητήρων και μπορεί να μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

Σφάλμα συντελεστή κλίμακας (*Scale factor*)

Η σχέση της τιμής που εξάγει ο αισθητήρας για μια φυσική ποσότητα και της πραγματικής της τιμής, ονομάζεται σφάλμα συντελεστή κλίμακας.

Θόρυβος αισθητήρα (*Random walk*)

Τυχαία σφάλματα ή αλλιώς θόρυβος, υπεισέρχονται στις μετρήσεις όλων των ειδών αισθητήρων. Τα σφάλματα αυτά περιγράφονται από στοχαστικά μοντέλα και μειώνονται χρησιμοποιώντας μεθόδους στατιστικής επεξεργασίας.

Μη καθετότητα των αισθητήρων (*Sensor Non orthogonality*)

Τα τρία επιταχυνσιόμετρα και γυροσκόπια είναι τοποθετημένα ομοαξονικά ανά δύο, σε ένα τρισσορθογώνιο σύστημα αξόνων. Βέβαια το σύστημα αξόνων αυτό δεν είναι ποτέ απόλυτα τρισσορθογώνιο αλλά έχει μικρά σφάλματα που οδηγούν σε συσχέτιση των μετρήσεων. Για παράδειγμα, υποθέτοντας ότι ένας άξονας είναι τέλεια προσανατολισμένος κατακόρυφα άρα το σύστημα είναι οριζοντιωμένο, τότε μόνο το επιταχυνσιόμετρο του κατακόρυφου άξονα θα πρέπει να μετρά την επιτάχυνση της βαρύτητας. Αν όμως οι άξονες δεν είναι κάθετα τοποθετημένοι, τότε και τα επιταχυνσιόμετρα των άλλων αξόνων, εκτός του κατακόρυφου, θα μετρούν ένα ποσοστό της επιτάχυνσης της βαρύτητας.

Σφάλματα των μοντέλων βαρύτητας

Η επιτάχυνση της βαρύτητας πρέπει να είναι γνωστή, προκειμένου να εισαχθεί στην επεξεργασία των μετρήσεων, ώστε να διαχωριστεί από την επιτάχυνση που οφείλεται μόνο στην κίνηση του σώματος. Η γνώση της επιτάχυνσης της βαρύτητας παρέχεται από μοντέλα που περιγράφουν το γήινο πεδίο βαρύτητας, τα οποία χαρακτηρίζονται από μία ακρίβεια με την οποία μπορούν να το επιτύχουν. Έτσι η ακρίβεια με την οποία εκτιμάται η επιτάχυνση της βαρύτητας από το εκάστοτε

μοντέλο, αποτελεί το σφάλμα που υπεισέρχεται στην επεξεργασία των μετρήσεων λόγω της μη απόλυτης γνώσης της.

Σφάλμα αρχικοποίησης και ευθυγράμμισης

Η ακρίβεια με την οποία είναι γνωστές οι αρχικές τιμές της θέσης, της ταχύτητας και του προσανατολισμού του σώματος, που χρησιμοποιούνται στην ολοκλήρωση των μετρήσεων, επηρεάζουν την ακρίβεια των προσδιορισμένων δεδομένων πλοήγησης.

3.7. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Συστημάτων INS

Η χρήση αδρανειακού συστήματος εντοπισμού έχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως την αυτονομία που παρέχει, καθώς δεν βασίζεται σε εξωτερικές πηγές δεδομένων και δεν επηρεάζεται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Επιπλέον, παρέχει προσδιορισμό της θέσης, της ταχύτητας και του προσανατολισμού του κινούμενου σώματος με πολύ υψηλό ρυθμό και λόγω του ότι δεν εκπέμπει ούτε δέχεται κάποιο σήμα για τη λειτουργία του, δεν επηρεάζεται από παρεμβολές και δε γίνεται ανιχνεύσιμο.

Το βασικότερο μειονέκτημα ενός αδρανειακού συστήματος εντοπισμού είναι η ραγδαία αύξηση των σφαλμάτων που υπεισέρχονται στις μετρήσεις, πράγμα που κάνει τον εντοπισμό ακριβή μόνο για μικρό χρονικό διάστημα, εάν δεν συνδυαστεί με εξωτερική πηγή όπως ένα σύστημα GPS. Επιπλέον, το κόστος απόκτησης και λειτουργίας των συστημάτων αυτών είναι υψηλό, αλλά τα τελευταία χρόνια συνεχώς μειώνεται.

ΤΟ ΦΙΛΤΡΟ KALMAN ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ GNSS/INS

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το φίλτρο Kalman ως βασική μέθοδος βελτιστοποίησης σε προβλήματα κινηματικού εντοπισμού. Ειδικότερα, αναλύεται η θεωρητική βάση της μεθόδου, ενώ εισάγονται τα μαθηματικά μοντέλα που το υλοποιούν. Επιπρόσθετα, γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά που καθιστούν εφικτή τη συνεργασία των συστημάτων GNSS και INS σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα εντοπισμού, ο τρόπος και ο βαθμός με τον οποίο επιτυγχάνεται η συνεργασία των δύο συστημάτων καθώς και τα πλεονεκτήματα που απορρέουν από αυτή.

4.1. Γενικά

Ο όρος φίλτρο αναφέρεται στο μέσο το οποίο χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση μη επιθυμητών στοιχείων. Με αυτή την έννοια, το φίλτρο Kalman αξιοποιεί τις μετρήσεις και την δυναμική της κίνησης που συνθέτουν την κατάσταση θέσης και ταχύτητας του οχήματος.

Το φίλτρο Kalman αναπτύχθηκε από τον R.E Kalman το 1960, και έκτοτε αποτελεί αντικείμενο εκτενούς έρευνας, καθώς βρίσκει εφαρμογή σε πολλά επιστημονικά πεδία. Αποτελείται από ένα σύνολο αναδρομικών μαθηματικών εξισώσεων, οι οποίες επιτρέπουν την εκτίμηση των μεταβλητών της κατάστασης ενός χρονικά μεταβαλλόμενου, γραμμικού συστήματος, κάνοντας χρήση παρατηρήσεων και μοντέλων της κινηματικής κατάστασης που υπόκεινται σε θόρυβο. Η εκτίμηση γίνεται με τρόπο τέτοιο ώστε να είναι στατιστικά “βέλτιστη” και μπορεί να πραγματοποιηθεί σε χρονική στιγμή που αναφέρεται στο παρόν, παρελθόν και μέλλον.

Η στατιστικά βέλτιστη λύση αναφέρεται στην ελαχιστοποίηση των μέσων τετραγωνικών σφαλμάτων των μετρήσεων. Με αυτή την έννοια, το φίλτρο Kalman αποτελεί επέκταση της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων (MET), διαφέρει όμως ως προς αυτή καθώς χρησιμοποιεί και πληροφορίες για τη δυναμική κατάσταση του συστήματος, δηλαδή ένα δυναμικό μοντέλο μαζί με το συναρτησιακό, προκειμένου να καταλήξει στη βέλτιστη εκτίμηση. Έτσι το φίλτρο Kalman παρουσιάζει μια σειρά πλεονεκτημάτων σε σχέση με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων σε προβλήματα κινηματικού εντοπισμού.

Με τη MET επεξεργάζονται παρατηρήσεις που αναφέρονται σε συγκεκριμένη εποχή, ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες και δεν λαμβάνει υπόψη τη δυναμική κατάσταση του συστήματος, με αποτέλεσμα να μην γίνεται αξιοποίηση της

πλεονάζουσας πληροφορίας, που προέρχεται από τις προηγούμενες λύσεις και τη δυναμική κατάσταση. Σε αντίθεση, το φίλτρο λαμβάνει υπόψη όλη τη δυνατή πληροφορία, από όλες τις εποχές λήψης της και παρέχει βέλτιστη εκτίμηση των επιθυμητών ποσοτήτων. Επιπλέον, επειδή το φίλτρο μπορεί και χρησιμοποιεί τη δυναμική κατάσταση του συστήματος, είναι σε θέση να παρέχει τις επιθυμητές παραμέτρους και σε περίπτωση που οι παρατηρήσεις δεν είναι αρκετές για τον προσδιορισμό τους. Βέβαια κατά το πέρασ του χρόνου η ποιότητα της λύσης υπό αυτές τις συνθήκες υποβαθμίζεται. Ακόμα, η ικανότητα του φίλτρου να εκτίμα τις επιθυμητές ποσότητες και σε μελλοντικό χρόνο, το καθιστά ένα εργαλείο ελέγχου. Τέλος, το φίλτρο Kalman ενδείκνυται για την επεξεργασία μετρήσεων που προέρχονται από διαφορετικούς τύπους αισθητήρων.

4.2. Πρόβλεψη, Φιλτράρισμα και Εξομάλυνση

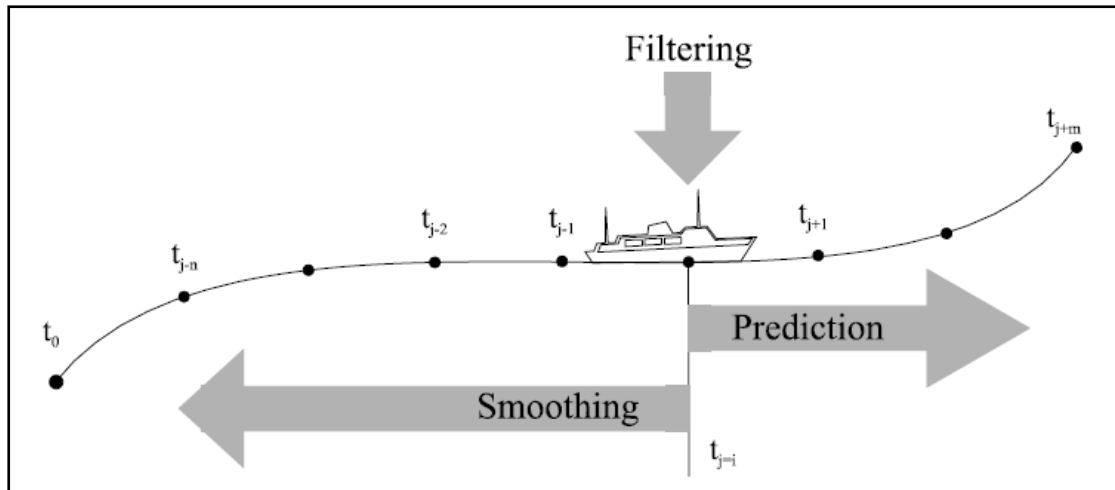
Το πρόβλημα εκτίμησης με το φίλτρο Kalman περιλαμβάνει τρία στάδια, γνωστά ως πρόβλεψη (*prediction*), φιλτράρισμα (*filtering*) και εξομάλυνση (*smoothing*). Αυτά σχετίζονται με την εκτίμηση του διανύσματος κατάστασης x , ενός χρονικά μεταβαλλόμενου συστήματος.

Το στάδιο της πρόβλεψης σχετίζεται με τον υπολογισμό του διανύσματος κατάστασης x , από το φίλτρο, σε χρονική στιγμή μετά από αυτήν της τελευταίας μέτρησης, δηλαδή σε μελλοντική χρονική στιγμή. Σε αυτή την περίπτωση, το διάνυσμα κατάστασης που προέκυψε από την τελευταία μέτρηση και η γνώση της δυναμικής κατάστασης του συστήματος, παρέχουν το προβλεφθέν διάνυσμα κατάστασης που συμβολίζεται και ως $x(-)$.

Τη στιγμή που μία νέα μέτρηση γίνει διαθέσιμη, το προβλεφθέν διάνυσμα κατάστασης $x(-)$, χρησιμοποιείται μαζί με τη νέα μέτρηση ώστε να υπολογιστεί το διάνυσμα κατάστασης εκείνη τη χρονική στιγμή και συμβολίζεται ως $x(+)$. Αυτή η περίπτωση, όπου ο χρόνος της τελευταίας μέτρησης συμπίπτει με το χρόνο πρόβλεψης, ονομάζεται στάδιο φιλτραρίσματος.

Σε εκ των υστέρων επεξεργασία, για κάθε χρονική στιγμή το διάνυσμα κατάστασης μπορεί να υπολογισθεί από πληροφορία που παρέχεται από χρονικά διαστήματα πριν και μετά, της υπόψη χρονικής στιγμής. Αυτή η περίπτωση ονομάζεται στάδιο εξομάλυνσης και το διάνυσμα κατάστασης συμβολίζεται ως $x(s)$.

Στο Σχήμα 4.1 φαίνονται τα τρία στάδια εκτίμησης του διανύσματος κατάστασης. Υποθέτοντας πως την χρονική στιγμή t_j γίνεται λήψη μέτρησης ή μετρήσεων, τότε για $t > t_j$ πραγματοποιείται πρόβλεψη, για $t = t_j$ φιλτράρισμα και για $t < t_j$ εξομάλυνση.



Σχήμα 4.1: Πρόβλεψη, φιλτράρισμα και εξομάλυνση (Πηγή: Β. Γκίκας 1996)
 Figure 4.1: Prediction, Filtering and Smoothing (Source: V. Gikas 1996)

4.3. Μαθηματικά Μοντέλα Φίλτρου Kalman

Η εφαρμογή του φίλτρου Kalman προϋποθέτει τη χρήση μαθηματικών μοντέλων που περιγράφουν το σύστημα. Τα μοντέλα αυτά είναι, το συναρτησιακό μοντέλο, το οποίο συνδέει τις παραμέτρους του διανύσματος κατάστασης με τις μετρήσεις, το δυναμικό μοντέλο, το οποίο συνδέει τις παραμέτρους του διανύσματος κατάστασης μίας εποχής με μία επόμενη και τα στοχαστικά μοντέλα, τα οποία περιγράφουν την ακρίβεια των υπόψη μοντέλων.

4.3.1. Συναρτησιακό μοντέλο

Για την εφαρμογή του φίλτρου Kalman, πρέπει να υπολογιστεί ο ελάχιστος αριθμός των ανεξάρτητων παραμέτρων που περιγράφουν το σύστημα, αυτός είναι γνωστός ως διάνυσμα κατάστασης. Το συναρτησιακό μοντέλο αναπαριστά τη φυσική και γεωμετρική σχέση που υπάρχει ανάμεσα στις μετρήσεις και στο διάνυσμα κατάστασης. Έτσι, εάν l_i είναι το διάνυσμα των παρατηρήσεων και x_i το διάνυσμα των αληθών τιμών των παραμέτρων του συστήματος, σε χρονικές στιγμές t_i αντίστοιχα, τότε το συναρτησιακό μοντέλο για ένα γραμμικό σύστημα γράφεται ως εξής,

$$A_i x_i = l_i + u_i \quad (4.1)$$

όπου,

A_i , ο πίνακας σχεδιασμού,
 u_i , τα υπόλοιπα των μετρήσεων.

4.3.2. Δυναμικό μοντέλο

Το δυναμικό μοντέλο περιγράφει τις αλλαγές του διανύσματος κατάστασης μεταξύ δύο χρονικών εποχών. Εάν η σχέση που συνδέει τις δύο εποχές είναι γραμμική, τότε το δυναμικό μοντέλο γράφεται ως εξής,

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{M}_{i-1}\mathbf{x}_{i-1} + \mathbf{y}_{i-1} \quad (4.2)$$

όπου,

\mathbf{x}_i , το διάνυσμα κατάστασης στη χρονική στιγμή t_i ,

\mathbf{x}_{i-1} , το διάνυσμα κατάστασης στη χρονική στιγμή t_{i-1} ,

\mathbf{M}_{i-1} , ο πίνακας μετάβασης από την χρονική στιγμή t_{i-1} στην t_i ,

\mathbf{y}_{i-1} , ο θόρυβος του δυναμικού μοντέλου από την χρονική στιγμή t_{i-1} στην t_i .

Το διάνυσμα \mathbf{y}_{i-1} εκφράζεται από το γινόμενο $\mathbf{T}g$, όπου το διάνυσμα g περιλαμβάνει τις ποσότητες που αναγκάζουν το δυναμικό μοντέλο, να περιγράψει λανθασμένα την πραγματική δυναμική κατάσταση του συστήματος και το \mathbf{T} περιλαμβάνει τους συντελεστές ώστε το γινόμενο $\mathbf{T}g$ να εκφράζει την επίδραση της λανθασμένης περιγραφής του μοντέλου στο διάνυσμα κατάστασης.

4.3.3. Στοχαστικά μοντέλα

Για την εφαρμογή του φίλτρου, δύο στοχαστικά μοντέλα πρέπει να οριστούν. Τα μοντέλα αυτά έχουν τη μορφή πίνακα μεταβλητοτήτων-συμεταβλητοτήτων και εκφράζουν την ακρίβεια του συναρτησιακού και δυναμικού μοντέλου. Δηλαδή, περιγράφουν την ακρίβεια των παρατηρήσεων και το πόσο το δυναμικό μοντέλο ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα αντίστοιχα. Ο ακριβής προσδιορισμός των στοχαστικών μοντέλων είναι ιδιαίτερα κρίσιμος προκειμένου το φίλτρο να παρέχει ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα.

4.4. Εναλλακτικές Μορφές Φίλτρων Kalman

Όπως αναφέρθηκε ήδη, το φίλτρο Kalman παρέχει βέλτιστη στατιστικά λύση για γραμμικά συστήματα μόνο. Όμως τα γραμμικά συστήματα αποτελούν εξιδανικευμένες περιπτώσεις και πρακτικά δεν υπάρχουν σε προβλήματα πλοήγησης οχημάτων. Τα περισσότερα συστήματα περιγράφονται από μη γραμμικές εξισώσεις και δέχονται μη γραμμικές εξισώσεις παρατήρησης. Σε προηγούμενες ενότητες, παρουσιάστηκε η γενική μορφή των εξισώσεων του φίλτρου Kalman, όμως οι εξισώσεις αυτές μπορούν και διαμορφώνονται ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Η διαμόρφωση αυτή αφορά τη

γραμμικοποίηση των μη γραμμικών συστημάτων και την εφαρμογή του φίλτρου στις γραμμικοποιημένες σχέσεις. Επομένως, το φίλτρο παίρνει διάφορες μορφές, μερικές εκ των οποίων αναφέρονται στη συνέχεια.

Linearized Kalman filter

Όταν το φίλτρο Kalman εφαρμόζεται σε ένα σύστημα, το οποίο έχει γραμμικοποιηθεί αναφορικά με μία γνωστή τροχιά, τότε το φίλτρο ονομάζεται γραμμικοποιημένο φίλτρο Kalman. Για παράδειγμα, η τροχιά που καλείται να ακολουθήσει ένα πλοίο, αεροπλάνο ή δορυφόρος, μπορεί να είναι γνωστή εκ των προτέρων και ονομάζεται τροχιά αναφοράς.

Extended Kalman filter

Πολλές φορές δεν είναι δυνατή η γνώση της τροχιάς αναφοράς ενός οχήματος εκ των προτέρων, έτσι ως τροχιά αναφοράς μπορεί να θεωρηθεί η τελευταία καλύτερη πρόβλεψη της πραγματικής τροχιάς. Όταν το φίλτρο εφαρμόζεται σε μία τροχιά που γραμμικοποιείται χρησιμοποιώντας την τελευταία καλύτερη πρόβλεψη, ονομάζεται εκτεταμένο φίλτρο Kalman.

Iterated Kalman filter

Στο εκτεταμένο φίλτρο Kalman πραγματοποιείται γραμμικοποίηση των εξισώσεων με βάση το προβλεφθέν διάνυσμα κατάστασης του συστήματος. Στο επαναληπτικό φίλτρο Kalman η γραμμικοποίηση πραγματοποιείται εκ νέου με βάση την πιο πρόσφατη εκτίμηση, κάνοντας έτσι τη διαδικασία γραμμικοποίησης πιο ακριβή.

Adaptive Kalman filter

Το προσαρμοστικό φίλτρο Kalman είναι το φίλτρο στο οποίο πραγματοποιείται μια στατιστική διαδικασία ελέγχου, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων των μετρήσεων, που προκαλούν τον λανθασμένο υπολογισμό των παραμέτρων κατάστασης του συστήματος.

Augmented Kalman filter

Όταν οι παρατηρήσεις είναι χρονικά συσχετισμένες, ένας τρόπος για να μοντελοποιηθούν τα κοινά τους σφάλματα είναι να προστεθούν επιπλέον παράμετροι στο συναρτησιακό μοντέλο. Το φίλτρο που λειτουργεί κατ' αυτόν τον τρόπο ονομάζεται ενισχυμένο φίλτρο Kalman.

Sequential Kalman filter

Εάν τα σφάλματα των μετρήσεων δεν είναι συσχετισμένα, τότε οι αντίστροφες διαδικασίες που συμπεριλαμβάνονται στους υπολογισμούς μπορούν να εξαλειφθούν, επεξεργάζοντας τις παρατηρήσεις κατά ομάδες ή κατά μια τη φορά.

Το φίλτρο που χρησιμοποιεί αυτήν την τεχνική ονομάζεται διαδοχικό φίλτρο Kalman.

4.5. Ολοκληρωμένα Συστήματα Εντοπισμού GNSS/INS

Σε προηγούμενα κεφάλαια έγινε αναφορά στα χαρακτηριστικά και στα σφάλματα των συστημάτων GNSS και INS. Τα δύο συστήματα επιδίδονται σε μετρήσεις διαφορετικών ποσοτήτων και έτσι, τα σφάλματα που επηρεάζουν τις μετρήσεις τους έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά. Ο εντοπισμός με το σύστημα INS είναι πολύ ακριβής για μικρά χρονικά διαστήματα, αλλά η ακρίβεια ελαττώνεται ραγδαία και χωρίς περιορισμό. Αντίθετα, τα συστήματα GNSS παρέχουν εντοπισμό χαμηλότερης ακρίβειας η οποία όμως δε μειώνεται. Το γεγονός αυτό καθιστά συμπληρωματικά τα δύο συστήματα και επιτρέπει τη συνεργασία τους, παρέχοντας αποτελέσματα καλύτερα από ότι θα παρείχε το κάθε σύστημα μεμονωμένα.

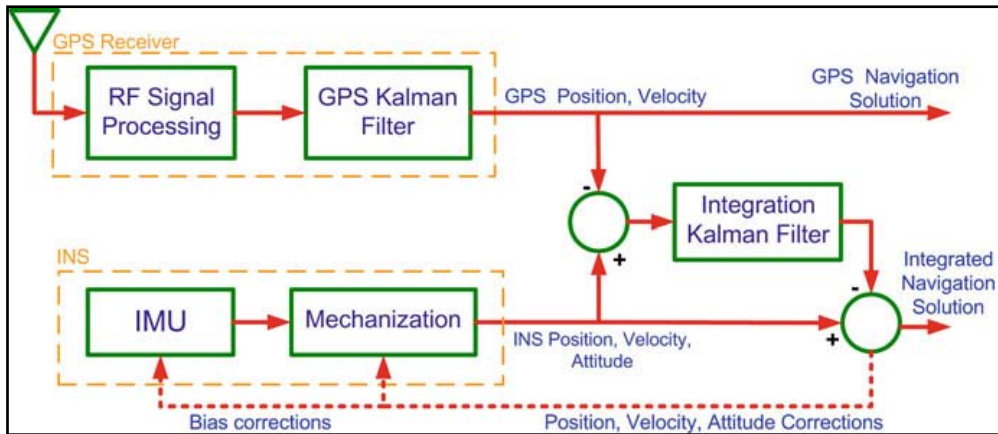
Η συνεργασία αυτή, καθίσταται εφικτή κάνοντας χρήση των αλγορίθμων του φίλτρου Kalman. Το φίλτρο Kalman μπορεί και συνδυάζει τις παρατηρήσεις των δύο συστημάτων, παρέχοντας έτσι μια σειρά πλεονεκτημάτων.

4.5.1. Βαθμός συνεργασίας συστημάτων GNSS/INS

Διάφοροι βαθμοί συνεργασίας ανάμεσα στα συστήματα GNSS και INS χρησιμοποιούνται ώστε να υλοποιηθεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα εντοπισμού. Οι βαθμοί αυτοί επιλέγονται ανάλογα με την ιδιαιτερότητα της εφαρμογής και αναφέρονται ως βαθμοί χαλαρής συνεργασίας (*loosely coupled*), σφιχτής συνεργασίας (*tightly coupled*) και συνεργασίας ως ενιαίο σύστημα.

Χαλαρός βαθμός συνεργασίας (*Loosely coupled*)

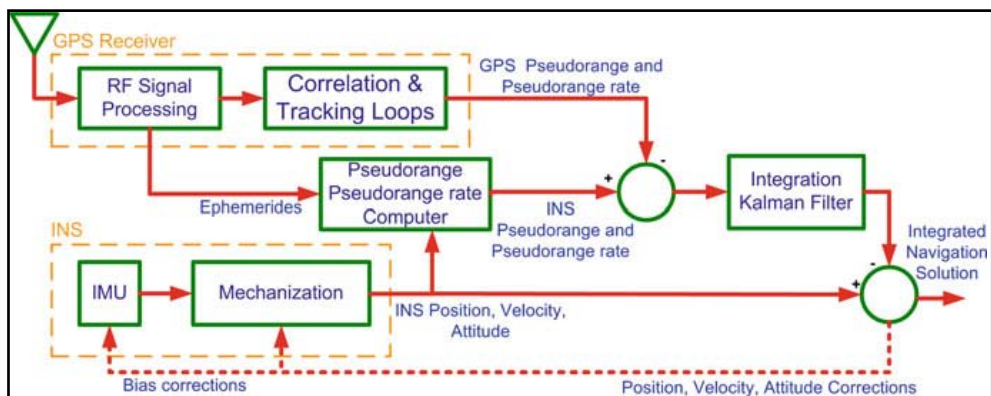
Στη συνεργασία χαλαρού βαθμού, τα σύστημα GNSS και INS λειτουργούν μεμονωμένα. Για την επίτευξη της βελτιωμένης λύσης, τα παραγόμενα αποτελέσματα θέσης και ταχύτητας από τα δύο συστήματα διοχετεύονται στο φίλτρο Kalman, το οποίο υπολογίζει τις διαφορές τους λαμβάνοντας υπόψη τα στατιστικά τους χαρακτηριστικά και υπολογίζει τα σφάλματα του συστήματος INS. Η λύση του συστήματος INS διορθώνεται από τα σφάλματα αυτά, παρέχοντας έτσι μεγαλύτερη ακρίβεια προσδιορισμού θέσης, ταχύτητας και προσανατολισμού. Τα δύο συστήματα μπορεί να περιλαμβάνουν και δικό τους φίλτρο Kalman χωρίς να επηρεάζουν το φίλτρο στο οποίο πραγματοποιείται η συνεργασία. Το Σχήμα 4.2 αναπαριστά το χαλαρό βαθμό συνεργασίας των ολοκληρωμένων συστημάτων εντοπισμού.



Σχήμα 4.2: Χαλαρός βαθμός συνεργασίας (Πηγή: Noureldin et al 2013)
 Figure 4.2: Loosely coupled integration (Source: Noureldin et al 2013)

Σφιχτός βαθμός συνεργασίας (Tightly coupled)

Η διαφορά στη συνεργασία σφιχτού βαθμού, έγκειται στο ότι τα δεδομένα που διοχετεύονται στο φίλτρο Kalman είναι οι πρωτογενείς μετρήσεις των δύο συστημάτων, δηλαδή μετρήσεις φάσεων, ψευδοαποστάσεων, καθώς και επιταχύνσεων και γωνιακών ταχυτήτων. Ο βαθμός συνεργασίας αυτός, επιτρέπει των προσδιορισμό των σφαλμάτων του συστήματος INS ακόμα και όταν το σύστημα GNSS δεν μπορεί να παρέχει λύση, δηλαδή λαμβάνει μετρήσεις από λιγότερους των τεσσάρων δορυφόρων. Το Σχήμα 4.3 αναπαριστά το στενό βαθμό συνεργασίας των ολοκληρωμένων συστημάτων εντοπισμού.



Σχήμα 4.3: Στενός βαθμός συνεργασίας (Πηγή: Noureldin et al 2013)
 Figure 4.3: Tightly coupled integration (Source: Noureldin et al 2013)

Συνεργασία ως ενιαίο σύστημα (Deep integration)

Στη συνεργασία αυτού του βαθμού, τα δύο συστήματα παύουν να λειτουργούν ως αυτόνομες μονάδες εντοπισμού. Οι πληροφορίες από το αδρανειακό και

δορυφορικό σύστημα, χρησιμοποιούνται αναπόσπαστα από το φίλτρο Kalman προκειμένου να παραχθούν οι παράμετροι πλοήγησης. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της συνεργασίας, είναι η ευκολότερη απόκτηση και παρακολούθηση του δορυφορικού σήματος.

4.6. Πλεονεκτήματα Ολοκληρωμένων Συστημάτων Εντοπισμού

Τα ολοκληρωμένα συστήματα εντοπισμού, ανεξαρτήτως του βαθμού συνεργασίας τους, παρέχουν μεγαλύτερη ακρίβεια θέσης, ταχύτητας και προσανατολισμού, καθώς το σύστημα GNSS βοηθά στον περιορισμό της ανεξέλικτης διόγκωσης των σφαλμάτων του συστήματος INS. Επιπλέον, το σύστημα INS έχοντας την ιδιότητα να υπολογίζει τις παραμέτρους του εντοπισμού με πολύ μεγαλύτερη συχνότητα από αυτή του GNSS, μπορεί και γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ των διαδοχικών υπολογισμών, παρέχοντας έτσι συνεχή και αξιόπιστα αποτελέσματα. Ακόμα σε περιπτώσεις που το σύστημα GNSS δεν μπορεί να λειτουργήσει για κάποιο μικρό χρονικό διάστημα, τότε το σύστημα INS παραμένει σε λειτουργία παρέχοντας δυνατότητα πλοήγησης.

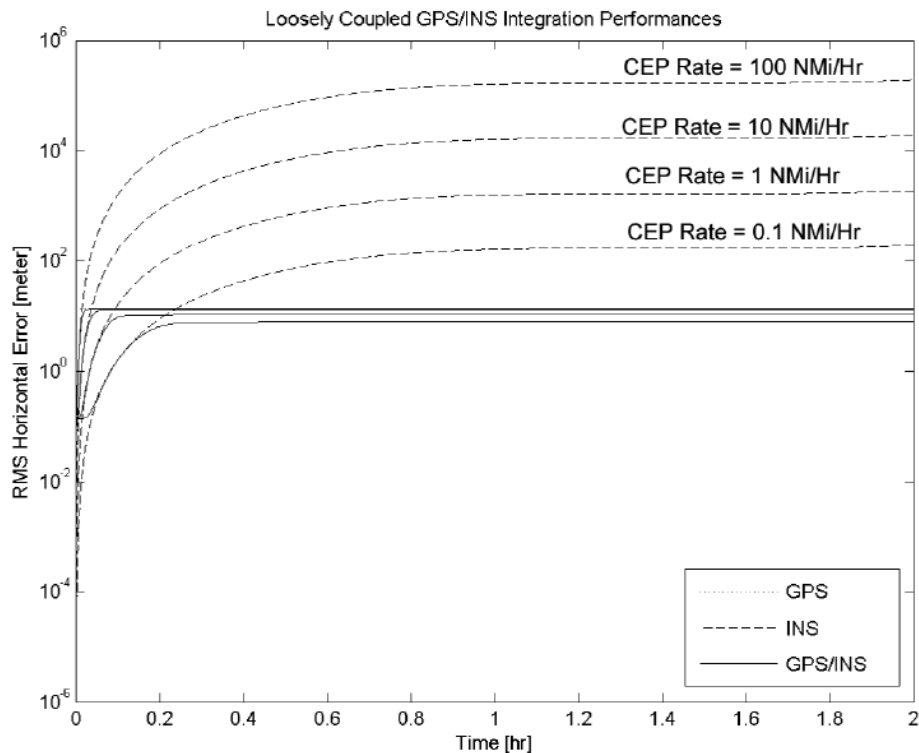
Επιπλέον, μερικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα ολοκληρωμένα συστήματα εντοπισμού στενής συνεργασίας και συνεργασίας ως ενιαίο σύστημα είναι, η παροχή μεγάλης ακρίβειας προσδιορισμού των παραμέτρων εντοπισμού, ακόμα και σε περιπτώσεις που το σύστημα GNSS παρατηρεί λιγότερους από τέσσερις δορυφόρους. Επίσης, η ανάκτηση του δορυφορικού σήματος και η επίλυση των ακέραιων ασαφειών φάσης γίνεται πολύ πιο γρήγορα. Τέλος, η παρακολούθηση του σήματος των δορυφόρων γίνεται δυσκολότερο να χαθεί ακόμα και όταν μεσολαβούν έντονες δυναμικές αλλαγές στην κινητική κατάσταση του σώματος ή παρεμβολή διαφόρων σημάτων.

4.7. Αξιολόγηση Λύσης Πλοήγησης

Η συνεργασία των συστημάτων GNSS, INS και η λειτουργία τους ως ολοκληρωμένο σύστημα εντοπισμού, όπως αναφέρεται παραπάνω, παρέχει πληθώρα πλεονεκτημάτων μεταξύ των οποίων και η βελτίωση της ακρίβειας των στοιχείων πλοήγησης του σώματος, δηλαδή της θέσης, ταχύτητας και προσανατολισμού.

Στα σχήματα που ακολουθούν, παρουσιάζεται η θεωρητική επίδοση ενός συστήματος GNSS/INS όσον αφορά τη οριζοντιογραφική θέση, καθώς και η επίδοση του κάθε συστήματος ξεχωριστά. Η ακρίβεια που επιτυγχάνεται κατά τον προσδιορισμό της θέσης, συνάδει με την ακρίβεια του εκάστοτε συστήματος και τον βαθμό συνεργασίας των δύο συστημάτων που θα επιβληθεί. Έτσι, στο Σχήμα 4.4

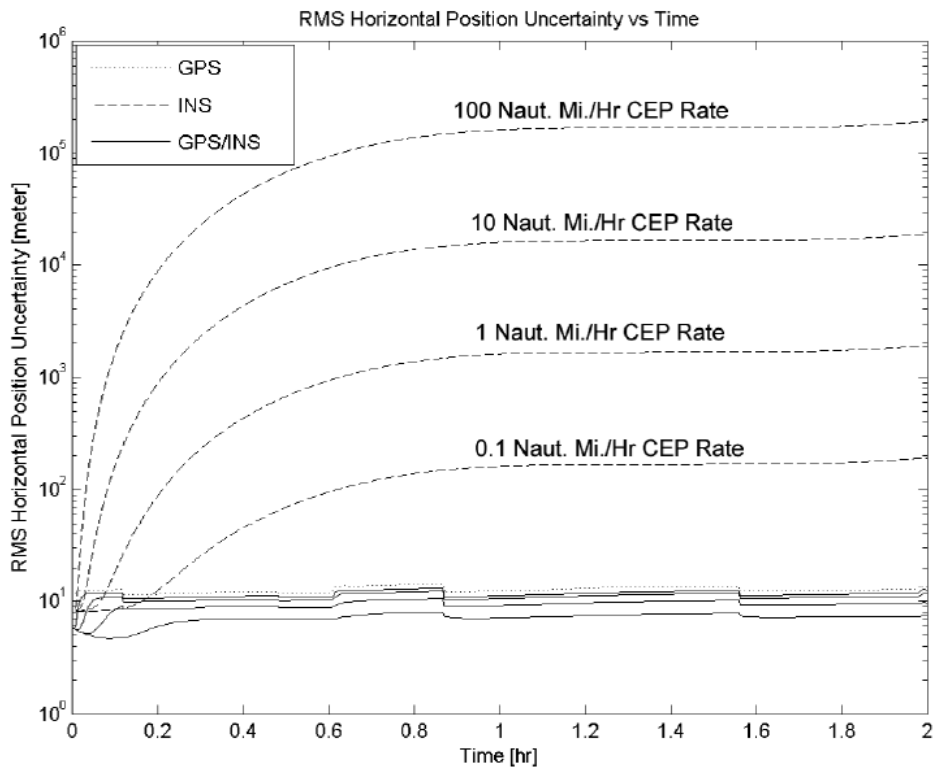
φαίνεται η επίδοση του συστήματος GNSS/INS, σε συνεργασία χαλαρού βαθμού. Η συνεργασία αυτή φαίνεται για συστήματα INS διαφόρων κατηγοριών και συγκεκριμένης ακρίβειας θέση, συστήματος GPS.



Σχήμα 4.4: Επίδοση χαλαρού βαθμού συνεργασίας (Πηγή: Grewal 2007)
 Figure 4.4: Performance of loosely coupled integration (Source: Grewal 2007)

Στο Σχήμα 4.5 φαίνεται η επίδοση του συστήματος GNSS/INS, σε συνεργασία σφιχτού βαθμού. Ομοίως, η συνεργασία απεικονίζεται για διαφόρων κατηγοριών συστήματα INS και δεδομένης ακρίβειας θέση, συστήματος GPS.

Η παρουσίαση της θεωρητικής επίδοσης ενός συστήματος GNSS/INS, δεν έχει μεγάλες ποιοτικές διαφορές ανάμεσα στον χαλαρό και σφιχτό βαθμό συνεργασίας. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η θεωρητική επίδοση, αναφέρεται σε σταθερές συνθήκες, όπως αδιάκοπη λήψη δορυφορικού σήματος.



Σχήμα 4.5: Επίδοση στενού βαθμού συνεργασίας (Πηγή: Grewal 2007)
 Figure 4.5: Performance of tightly coupled integration (Source: Grewal 2007)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ

Το παρόν κεφάλαιο, επικεντρώνεται στην παρουσίαση του εξοπλισμού και του λογισμικού όπως χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται το GNSS/INS σύστημα *NovAtel SPAN* και το λογισμικό *Inertial Explorer* που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή της τροχιάς αναφοράς. Ακόμα, παρουσιάζεται ο χαμηλού κόστους GNSS δέκτης *u-blox EVK-M8/NEO-M8T* και το λογισμικό *RTKLIB* που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των τροχιών ελέγχου. Επίσης, παρουσιάζεται το λογισμικό αξιολόγησης των τροχιών και το χαμηλού κόστους GNSS/INS σύστημα *Advanced Navigation SPATIAL*.

5.1. Ολοκληρωμένο Σύστημα Εντοπισμού *NovAtel SPAN System*

Το ολοκληρωμένο σύστημα εντοπισμού, που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή της τροχιάς αναφοράς στην παρούσα εργασία, είναι το *SPAN System (Synchronized Position Attitude Navigation)*, της εταιρίας *NovAtel®*. Το σύστημα αυτό παρέχει υψηλής ακρίβειας εντοπισμό και πλοήγηση, συνδυάζοντας υψηλής ποιότητας, αδρανειακή μονάδα και δορυφορικούς δέκτες. Το σύστημα *SPAN* μπορεί να χρησιμοποιεί διαφόρου είδους αδρανειακές μονάδες και δέκτες. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο συνδυασμός που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

5.1.1. Σύστημα δορυφορικού εντοπισμού

Το σύστημα *SPAN* που χρησιμοποιήθηκε, αποτελείται από δύο υψηλής ποιότητας, δορυφορικούς δέκτες της εταιρίας *NovAtel®* και της εταιρίας *Leica Geosystems*. Οι δύο δέκτες είναι συμβατοί με τα συστήματα GPS και GLONASS. Ο δέκτης *Leica ATX 1230* διαθέτει ενσωματωμένη κεραία και χειριστήριο (Σχήμα 5.1), τοποθετείται σε θέση γνωστών συντεταγμένων, αποτελεί δηλαδή το σταθμό αναφοράς.



Σχήμα 5.1: Δορυφορικός δέκτης *Leica ATX 1230* (Πηγή: *Leica Geosystems*)
Figure 5.1: GNSS receiver *Leica ATX 1230* (Source: *Leica Geosystems*)

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά που αφορούν την ακρίβεια των παρατηρήσεων που επιτυγχάνει ο δέκτης, φαίνονται στον Πίνακα 5.1.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά Δορυφορικού Δέκτη Leica ATX 1230		
Συμβατότητα	GPS, GLONASS, SBAS	
Ρυθμός Καταγραφής	Έως 20 Hz	
Συχνότητες Λειτουργίας	GPS L1, L2, L2C, L5	GLONASS L1, L2
Οριζοντιογραφική Ακρίβεια (RMS)		
Single Point L1	5-10 m	
Single Point L1/L2	5-10 m	
Ακρίβεια Μετρήσεων		
	GPS	GLONASS
L1 C/A Code	2 cm	-
L1 Carrier Phase	0.2 mm	-
L2 P(Y) Code	2 cm	-
L2 Carrier Phase	0.2 mm	-
Χρόνου	-	
Ταχύτητας	-	

Πίνακας 5.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά δορυφορικού δέκτη Leica ATX 1230
Table 5.1: GNSS receiver Leica ATX 1230 characteristics

Ο δέκτης *NovAtel ProPak-V3* (Σχήμα 5.2), είναι ο κινούμενος δέκτης. Με αυτόν συνδέεται η αδρανειακή μονάδα και επιλέγονται οι παράμετροι της εκάστοτε εφαρμογής. Ακόμα σε αυτόν το δέκτη, πραγματοποιούνται όλοι οι υπολογισμοί πλοήγησης.



Σχήμα 5.2: Δορυφορικός δέκτης NovAtel ProPak-V3 (Πηγή: NovAtel®)
Figure 5.2: GNSS receiver NovAtel ProPak-V3 (Source: NovAtel®)

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά που αφορούν την ακρίβεια των παρατηρήσεων που επιτυγχάνει ο δέκτης, φαίνονται στον Πίνακα 5.2.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά Δορυφορικού Δέκτη ProPak-V3		
Συμβατότητα	GPS, GLONASS, SBAS	
Ρυθμός Καταγραφής	Έως 50 Hz	
Συχνότητες Λειτουργίας	GPS L1, L2, L2C, L5	GLONASS L1, L2
Οριζοντιογραφική Ακρίβεια (RMS)		
Single Point L1	1.5 m	
Single Point L1/L2	1.2 m	
Ακρίβεια Μετρήσεων		
	GPS	GLONASS
L1 C/A Code	4 cm	15 cm
L1 Carrier Phase	0.5 mm	1.5 mm
L2 P(Y) Code	8 cm	8 cm
L2 Carrier Phase	1.0 mm	1.5 mm
Χρόνου	20 ns	
Ταχύτητας	0.03 m/s	

Πίνακας 5.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά δορυφορικού δέκτη ProPak-V3
Table 5.2: GNSS receiver ProPak-V3 characteristics

Ο δέκτης *ProPak-V3* συνδέθηκε με την υψηλής ποιότητας, γεωδαιτικού τύπου κεραία δορυφορικού εντοπισμού *Pinwheel 702-GG* επίσης της εταιρίας *NovAtel*®. Η κεραία αυτή έχει τη δυνατότητα λήψης δύο συχνοτήτων, είναι συμβατή με τα συστήματα GPS και GLONASS και παρουσιάζει εξαιρετική σταθερότητα του κέντρου φάσης της και απόρριψη των πολυανακλάσεων.



Σχήμα 5.3: Κεραία δορυφορικού εντοπισμού Pinwheel 702-GG (Πηγή: NovAtel®)
Figure 5.3: GNSS antenna Pinwheel 702-GG (Source: NovAtel®)

5.1.2. Αδρανειακή μονάδα

Η αδρανειακή μονάδα που πλαισιώνει το συγκεκριμένο σύστημα *SPAN*, είναι η υψηλής ποιότητας αδρανειακή μονάδα *iIMU-FSAS* (Σχήμα 5.4) της εταιρίας *iMAR*. Η μονάδα αυτή, αποτελείται από γυροσκόπια οπτικών ινών και επιταχυνσιόμετρα εξισορρόπησης δυνάμεων. Επιπλέον, έχει τη δυνατότητα να δέχεται δεδομένα από αισθητήρα οδόμετρου.



Σχήμα 5.4: Αδρανειακή μονάδα *iMAR iIMU-FSAS* (Πηγή: *NovAtel*®)
Figure 5.4: Inertial measurement unit *iMAR iIMU-FSAS* (Source: *NovAtel*®)

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά που αφορούν την ακρίβεια που παρέχουν οι αισθητήρες της αδρανειακής μονάδας, φαίνονται στον Πίνακα 5.3.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά Αδρανειακής Μονάδας <i>iMAR iIMU-FSAS</i>			
Ρυθμός Καταγραφής	200 Hz		
	Εύρος Μέτρησης	Αβεβαιότητα	Σφάλμα Κλίμακας
Γυροσκόπια	450 (\pm deg/s)	0.75 (deg/hr)	300 (ppm)
Επιταχυνσιόμετρα	5 (\pm g)	1.0 (mg)	300 (ppm)

Πίνακας 5.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά αδρανειακής μονάδας *iMAR iIMU-FSAS*
Table 5.3: Inertial measurement unit *iMAR iIMU-FSAS* characteristics

5.1.3. Λογισμικό συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων

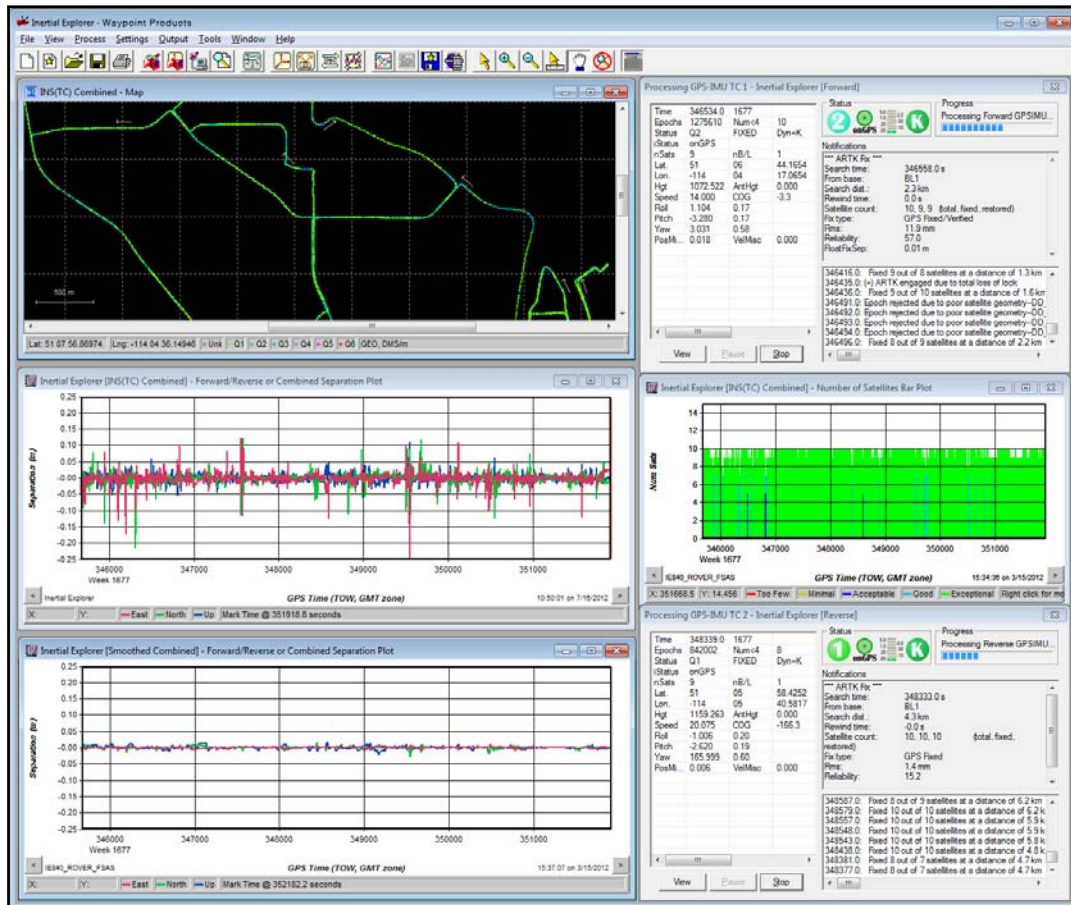
Το λογισμικό *NovAtel Connect™* χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση των δεκτών και τη συλλογή των δεδομένων. Η ρύθμιση ενός δέκτη περιλαμβάνει τον καθορισμό των παραμέτρων (ρυθμός καταγραφής, συχνότητες καταγραφής, δορυφορικό σύστημα κ.α), κάτω από τις οποίες ο δέκτης θα εκτελέσει τις παρατηρήσεις. Επιπλέον, το

λογισμικό *Connect*, παρέχει την εποπτεία διαφορών λειτουργιών του δέκτη όπως, την ορατότητα του δορυφορικού σχηματισμού, τους διάφορους δείκτες DOP, την παρακολούθηση και την ποιότητα του δορυφορικού σήματος, τη θέση, ταχύτητα του δέκτη και πολλά άλλα. Στο Σχήμα 5.5 φαίνεται ένα απόσπασμα από τη λειτουργία του λογισμικού.



Σχήμα 5.5: Λογισμικό συλλογής δεδομένων NovAtel Connect (Πηγή: NovAtel®)
Figure 5.5: Control software NovAtel Connect (Source: NovAtel®)

Το λογισμικό *Inertial Explorer*® (8.60) της εταιρία *NovAtel*®, χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των δεδομένων από τους δορυφορικούς δέκτες και την αδρανειακή μονάδα. Το λογισμικό αυτό, αποτελεί ένα πανίσχυρο εργαλείο για εκ των υστέρων επεξεργασία των μετρήσεων, παρέχοντας πληθώρα μεθοδολογιών επίλυσης και επιτρέποντας τον καθορισμό των παραμέτρων και των τεχνικών, με τις οποίες επεξεργάζονται οι παρατηρήσεις και εξάγεται η λύση. Όσον αφορά την ολοκλήρωση των δεκτών και της αδρανειακής μονάδας που παρουσιάστηκαν παραπάνω, το *Inertial Explorer* παρέχει τον αυτόματο συγχρονισμό των παρατηρήσεων των δύο συστημάτων, τη δυνατότητα επεξεργασίας τους σε φίλτρο χαλαρής ή σφικτής συνεργασίας καθώς και την εξομάλυνση της παραγόμενης τροχιάς. Ακόμα, πλήθος διαγραμμάτων και λεπτομερειών της επίλυσης παρουσιάζονται, προκειμένου να πραγματοποιείται η εποπτεία και η εξαγωγή συμπερασμάτων για τη λύση. Το λογισμικό αυτό, έχει τη δυνατότητα να επεξεργάζεται δεδομένα και από άλλου είδους δορυφορικούς δέκτες και αδρανειακές μονάδες, εκτός των αναφερθέντων. Στο Σχήμα 5.6 φαίνεται ένα απόσπασμα από τη λειτουργία του λογισμικού.



Σχήμα 5.6: Λογισμικό επεξεργασίας δεδομένων Inertial Explorer (Πηγή: NovAtel®)
 Figure 5.6: Processing software Inertial Explorer (Source: NovAtel®)

5.2. Ολοκληρωμένο Σύστημα Εντοπισμού Advanced Navigation SPATIAL

Το ολοκληρωμένο σύστημα εντοπισμού *SPATIAL* της εταιρίας *Advanced Navigation*, αποτελεί ένα οικονομικό σύστημα εντοπισμού και πλοήγησης, παρέχοντας τη θέση, την ταχύτητα και τον προσανατολισμό του κινούμενου σώματος, σε πραγματικό χρόνο. Συνδυάζει MEMS επιταχυνσιόμετρα, γυροσκοπία και μαγνητόμετρα, μαζί με δορυφορικό δέκτη, όλα ενσωματωμένα σε ένα μικροσκοπικό πλαίσιο (Σχήμα 5.7). Το σύστημα αυτό παρέχει την πληροφορία πλοήγησης, διοχετεύοντας τα δεδομένα από τους αισθητήρες, στην ενσωματωμένη υπολογιστική του μονάδα και επεξεργάζοντάς τα, με χρήση αλγορίθμων που βασίζονται στις αρχές του φίλτρου Kalman. Το σύστημα *SPATIAL* έχει τη δυνατότητα να δέχεται διορθώσεις από σταθμούς αναφοράς, ώστε να πραγματοποιεί σχετικό εντοπισμό και να υπολογίζει τη θέση του με μεγαλύτερη ακρίβεια. Στον Πίνακα 5.4 φαίνεται η ακρίβεια των πληροφοριών πλοήγησης, που επιτυγχάνει το σύστημα *SPATIAL*.



Σχήμα 5.7: Ολοκληρωμένο σύστημα εντοπισμού SPATIAL (Πηγή: Advanced Navigation)
 Figure 5.7: Integrated GNSS/INS SPATIAL system (Source: Advanced Navigation)

Parameter	Value
Horizontal Position Accuracy	2.0 m
Vertical Position Accuracy	3.0 m
Horizontal Position Accuracy (with DGNSS)	0.6 m
Vertical Position Accuracy (with DGNSS)	1.0 m
Velocity Accuracy	0.05 m/s
Roll & Pitch Accuracy (Static)	0.1 °
Heading Accuracy (Static)	0.5 °
Roll & Pitch Accuracy (Dynamic)	0.2 °
Heading Accuracy (Dynamic with GNSS)	0.2 °
Heading Accuracy (Dynamic, magnetic only)	0.8 °
Heave Accuracy	5 % or 0.05 m
Orientation Range	Unlimited
Hot Start Time	500 ms
Internal Filter Rate	1000 Hz
Output Data Rate	Up to 1000 Hz

Πίνακας 5.4: Ακρίβεια πλοήγησης συστήματος SPATIAL (Πηγή: Advanced Navigation)
 Table 5.4: SPATIALs navigation accuracy (Source: Advanced Navigation)

5.2.1. Σύστημα δορυφορικού εντοπισμού

Το σύστημα *SPATIAL* περιλαμβάνει δορυφορικό δέκτη *u-blox M8*, μονής συχνότητας, με δυνατότητα παρατηρήσεων μόνο κώδικα, πράγμα που επιτρέπει τη λήψη διορθώσεων μόνο ψευδοαποστάσεων από εξωτερική πηγή και όχι φάσεων. Στον Πίνακα 5.5 φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφορικού δέκτη του συστήματος *SPATIAL*.

Parameter	Value
Supported Navigation Systems	GPS L1 GLONASS L1 GALILEO E1 BeiDou B1
Supported SBAS Systems	WAAS EGNOS MSAS GAGAN QZSS
Update Rate	10 Hz
Cold Start Sensitivity	-148 dBm
Tracking Sensitivity	-167 dBm
Hot Start First Fix	1 s
Cold Start First Fix	26 s
Horizontal Position Accuracy	2.5 m
Horizontal Position Accuracy (with SBAS)	2 m
Velocity Accuracy	0.05 m/s
Timing Accuracy	30 ns
Acceleration Limit	4 g

Πίνακας 5.5: Τεχνικά χαρακτηριστικά δέκτη GNSS SPATIAL (Πηγή: Advanced Navigation)
Table 5.5: SPATIALs GNSS receiver characteristics (Source: Advanced Navigation)

5.2.2. Σύστημα αδρανειακού εντοπισμού

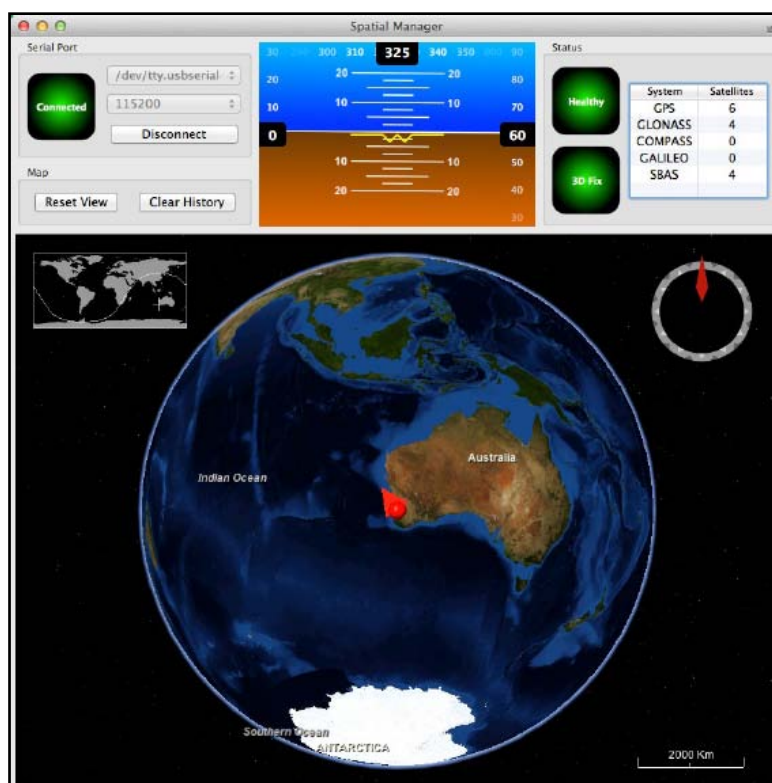
Το σύστημα *SPATIAL* περιλαμβάνει MEMS αισθητήρες αδρανειακού εντοπισμού, καθώς και μαγνητόμετρο και μετρητή πίεσης, τα χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται στον Πίνακα 5.6.

Parameter	Accelerometers	Gyroscopes	Magnetometers	Pressure
Range (dynamic)	2 g 4 g 16 g	250 °/s 500 °/s 2000 °/s	2 G 4 G 8 G	10 to 120 KPa
Noise Density	150 ug/√Hz	0.008 °/s/√Hz	210 uG/√Hz	0.56 Pa/√Hz
Non-linearity	< 0.05 %	< 0.05 %	< 0.05 %	-
Bias Stability	60 ug	3 °/hr	-	100 Pa/yr
Scale Factor Stability	< 0.05 %	< 0.05 %	< 0.05 %	-
Cross-axis Alignment Error	< 0.05 °	< 0.05 °	0.05 °	-
Bandwidth	400 Hz	400 Hz	110 Hz	50 Hz

Πίνακας 5.6: Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρων SPATIAL (Πηγή: Advanced Navigation)
Table 5.6: SPATIALs sensors characteristics (Source: Advanced Navigation)

5.2.3. Λογισμικό συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων

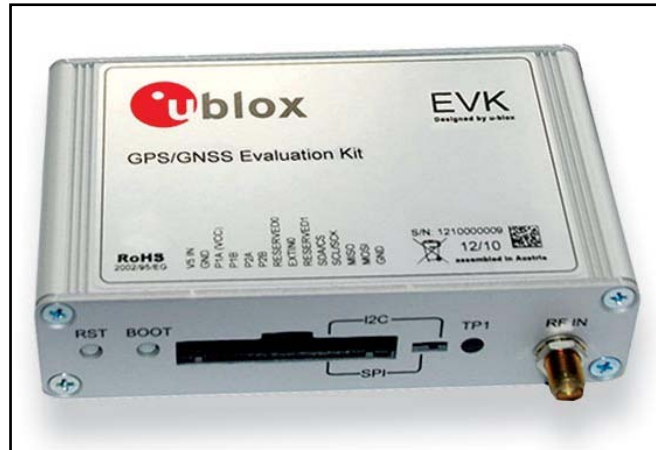
Το λογισμικό συλλογής και επεξεργασίας των παρατηρήσεων του συστήματος *SPATIAL* είναι το *Spatial Manager*. Το λογισμικό αυτό παρέχεται από την *Advanced Navigation* προκειμένου να γίνεται δυνατή, η ρύθμιση των παραμέτρων των αισθητήρων του *SPATIAL*, η εποπτεία της λύσης μέσω διαγραμμάτων και ενδείξεων και πολλά άλλα. Στο Σχήμα 5.8 φαίνεται ένα απόσπασμα από τη λειτουργία του *Spatial Manager*.



Σχήμα 5.8: Λογισμικό συλλογής δεδομένων *Spatial Manager* (Πηγή: *Advanced Navigation*)
Figure 5.8: Control software *Spatial Manager* (Source: *Advanced Navigation*)

5.3. Δέκτης Δορυφορικού Εντοπισμού *u-blox EVK-M8/NEO-M8T*

Ο δέκτης δορυφορικού εντοπισμού *u-blox EVK-M8/NEO-M8T* (Σχήμα 5.9), αποτελεί έναν υψηλής ποιότητας και συνάμα χαμηλού κόστους δορυφορικό δέκτη. Ο δέκτης αυτός έχει τη δυνατότητα εκτέλεσης μετρήσεων ψευδοαποστάσεων και φάσης σε μία συχνότητα και μπορεί να συλλέγει παρατηρήσεις από διάφορα GNSS και SBAS συστήματα. Ακόμα, διαθέτει υψηλής ποιότητας χρονόμετρο. Τα χαρακτηριστικά αυτά, καθιστούν το δέκτη ιδανικό για εφαρμογές χαμηλού κόστους, που διεξάγονται με τη μέθοδο RTK. Στον Πίνακα 5.7 φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δέκτη.



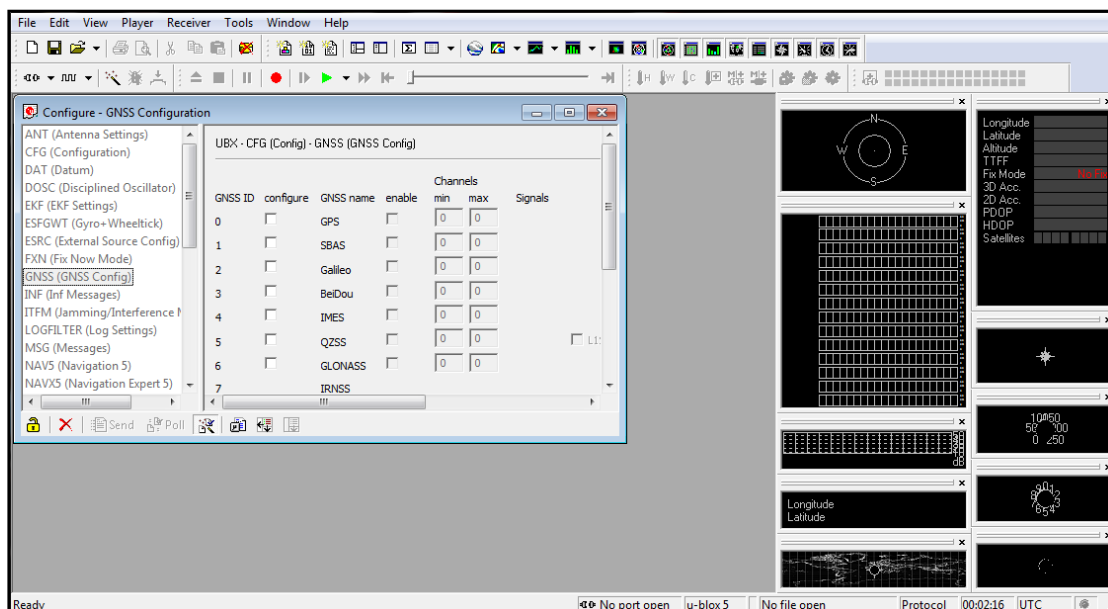
Σχήμα 5.9: Δορυφορικός δέκτης u-blox EVK-M8/NEO-M8T (Πηγή: u-blox®)
 Figure 5.9: GNSS receiver u-blox EVK-M8/NEO-M8T (Source: u-blox®)

Parameter	Specification			
Receiver type	72-channel u-blox M8 engine GPS L1C/A, QZSS L1C/A, SBAS L1C/A, GLONASS L1OF BeiDou B1 Galileo E1B/C ²			
GNSS		GPS & GLONASS	GPS & BeiDou	GPS
Time-To-First-Fix ³	Cold start	26 s	27 s	29 s
	Aided cold start ⁴	2 s	3 ⁵	2 s
	Hot start	1.5 s	1.5 s	1.5 s
Sensitivity ⁶	Tracking & Navigation	-167 dBm	-165 dBm	-166 dBm
	Aided acquisition ⁷	-157 dBm	N/A ⁸	-157 dBm
	Reacquisition	-160 dBm	-160 dBm	-160 dBm
	Cold start	-148 dBm	-148 dBm	-148 dBm
	Hot start	-156 dBm	-156 dBm	-156 dBm
Horizontal position accuracy ⁹	Autonomous	2.5 m	2.5 m	2.5 m
	SBAS	2.0 m	2.0 m	2.0 m
Velocity accuracy ¹⁰		0.05 m/s	0.05 m/s	0.05 m/s
Heading accuracy ¹⁰		0.3 degrees	0.3 degrees	0.3 degrees
Max navigation update rate ¹¹		5 Hz	5 Hz	10 Hz
Time pulse frequency		0.25 Hz... 10 MHz		
Time pulse accuracy	Clear sky	≤ 20 ns		
	Indoor	≤ 500 ns		
Operational limits ¹²	Dynamics	≤ 4 g		
	Altitude	50,000 m		
	Velocity	500 m/s		

Πίνακας 5.7: Τεχνικά χαρακτηριστικά u-blox EVK-M8/NEO-M8T (Πηγή: u-blox®)
 Table 5.7: GNSS receiver u-blox EVK-M8/NEO-M8T characteristics (Source: u-blox®)

Ο δέκτης *ublox M8T*, για τις ανάγκες της εργασίας, συνδέθηκε με την υψηλής ποιότητας, γεωδαιτικού τύπου κεραία δορυφορικού εντοπισμού *Pinwheel 702-GG* που αναφέρθηκε παραπάνω. Όμως, η εταιρία *ublox®* μαζί με το δέκτη παρέχει και κεραία δορυφορικού εντοπισμού χαμηλού κόστους. Η κεραία αυτή δεν παρέχει σταθερότητα του κέντρου φάσης, ούτε προστασία από πολυανακλάσεις, είναι όμως εξαιρετικά ευαίσθητη στη λήψη του σήματος.

Η εταιρία *u-blox*® παρέχει μαζί με το δορυφορικό δέκτη και το λογισμικό για τη ρύθμιση των παραμέτρων του, την καταγραφή των παρατηρήσεων του και τον υπολογισμό της θέσης του δέκτη. Το λογισμικό αυτό είναι το *u-center*, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.10. Το λογισμικό, εκτός των άλλων παρέχει μία σειρά από διαγράμματα και ενδείξεις που επιτρέπουν την εποπτεία της λειτουργία του δέκτη.



Σχήμα 5.10: Λογισμικό συλλογής δεδομένων *u-center* (Πηγή: *u-blox*®)
 Figure 5.10: Control software *u-center* (Source: *u-blox*®)

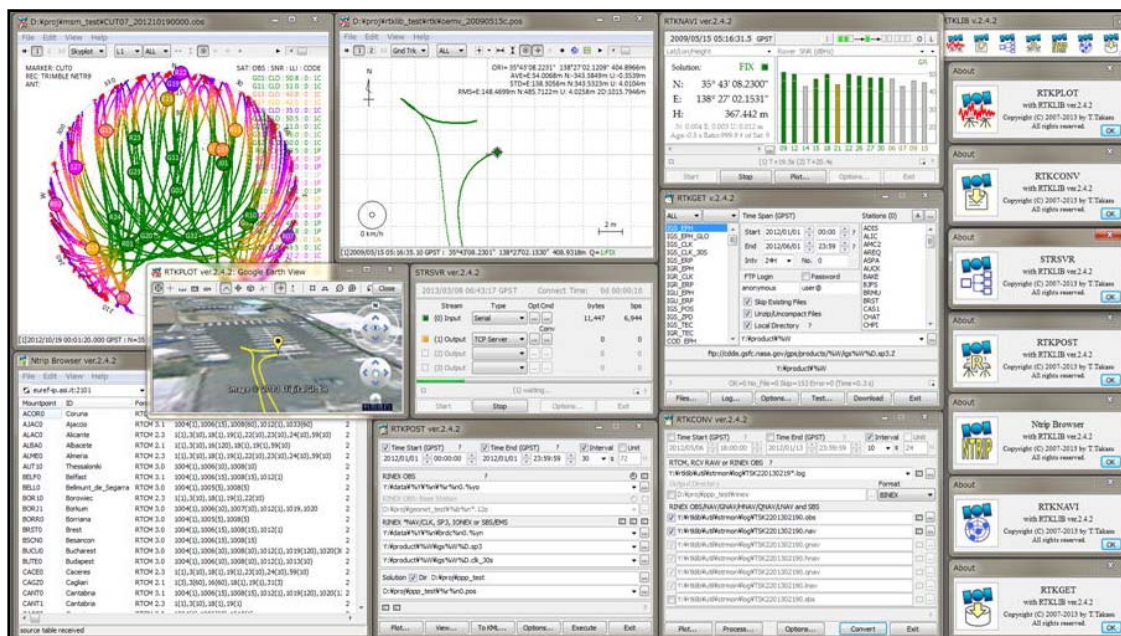
5.4. Λογισμικό Επεξεργασίας Δεδομένων GNSS RTKLIB

Το λογισμικό *RTKLIB* (v.2.4.2), είναι ένα ελεύθερο λογισμικό, ανοικτού κώδικα, που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό θέσης, κάνοντας χρήση τα διάφορα GNSS συστήματα. Το *RTKLIB* περιλαμβάνει μία βιβλιοθήκη προγραμμάτων και μια σειρά από εφαρμογές (*APs*), που βασίζονται στη βιβλιοθήκη. Το λογισμικό αυτό, αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο επεξεργασίας των μετρήσεων, σε πραγματικό χρόνο και σε εκ των υστέρων επεξεργασία, παρέχοντας τη δυνατότητα εφαρμογής μεθοδολογιών όπως, RTK, PPP, κ.α. Με το *RTKLIB* γίνεται καθορισμός των παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψη για την επίλυση με την εκάστοτε μέθοδο και παρουσιάζονται πληθώρα διαγραμμάτων και ενδείξεων που δείχνουν τη λειτουργία του δέκτη και τα χαρακτηριστικά της λύσης. Είναι συμβατό με τα δορυφορικά συστήματα εντοπισμού GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou αλλά και με συστήματα SBAS. Μπορεί και αναγνωρίζει πληθώρα τύπων αρχείων και πρωτοκόλλων, πράγμα που καθιστά εύκολη τη διασύνδεση του με τα διάφορα συστήματα GNSS και τους δέκτες τους.

Στον Πίνακα 5.8 φαίνονται οι εφαρμογές από τις οποίες αποτελείται το λογισμικό *RTKLIB* και η λειτουργία τους. Η κάθε εφαρμογή, εκτελεί μία συγκεκριμένη αποστολή. Για παράδειγμα, στην παρούσα εργασία η κύρια εφαρμογή που χρησιμοποιήθηκε είναι η *RTKNAVI*, η οποία χρησιμοποιείται για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, παρέχοντας διάφορες μεθόδους εντοπισμού, στην προκειμένη περίπτωση για εφαρμογή της μεθόδου RTK. Η χρήση της μεθόδου RTK καθιστά απαραίτητη και την εφαρμογή *STRSVR*, η οποία χρησιμοποιείται για την αποστολή δεδομένων από σταθμούς αναφοράς. Στο Σχήμα 5.11 φαίνονται οι εφαρμογές του *RTKLIB* σε λειτουργία.

	Function	GUI AP
(a)	AP Launcher	RTKLAUNCH
(b)	Real-Time Positioning	RTKNAVI
(c)	Communication Server	STRSVR
(d)	Post-Processing Analysis	RTKPOST
(e)	RINEX Converter	RTKCONV
(f)	Plot Solutions and Observation Data	RTKPLOT
(g)	Downloader of GNSS Data	RTKGET
(h)	NTRIP Browser	SRCTBLBROWS

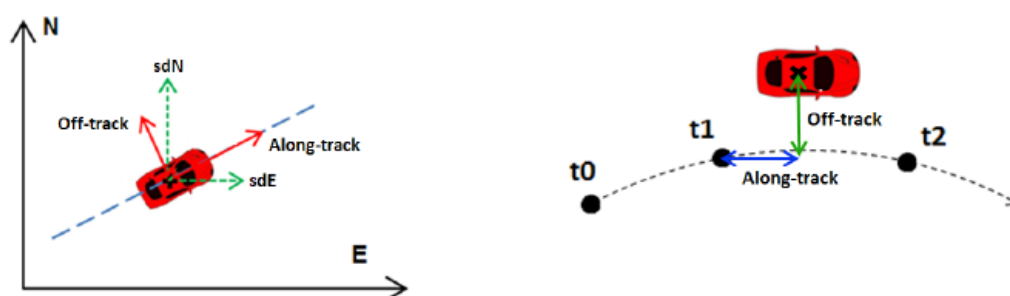
Πίνακας 5.8: Λειτουργία εφαρμογών RTKLIB (Πηγή: RTKLIB)
Table 5.8: RTKLIBs APs (Source: RTKLIB)



Σχήμα 5.11: Λειτουργία εφαρμογών RTKLIB (Πηγή: RTKLIB)
Figure 5.11: RTKLIBs APs (Source: RTKLIB)

5.5. Λογισμικό Υπολογισμού Συμβιβαστότητας και Ορθότητας Τροχιών

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των παραγόμενων τροχιών, αναπτύχθηκε στα πλαίσια του προγράμματος SaPPART της COST Action TU1302 (European Cooperation in Science and Technology). Το λογισμικό πραγματοποιεί την αξιολόγηση λαμβάνοντας υπόψη δύο στατιστικά μεγέθη, την συμβιβαστότητα και την ορθότητα της τροχιάς. Με τον όρο συμβιβαστότητα της τροχιάς εννοείται η γνώση της, βασιζόμενη στις εκτιμήσεις σφάλματος που παράγει ο δέκτης που την υπολογίζει. Με τον όρο ορθότητα της τροχιάς εννοείται η γνώση της, βασιζόμενη στις εκτιμήσεις της αποχής της, από την τροχιά αναφοράς (θεωρείται πως πλησιάζει την πραγματική τροχιά). Το λογισμικό μετατρέπει τα μεγέθη συμβιβαστότητας και ορθότητας, από ένα χαρτογραφικό σύστημα αναφοράς στο σύστημα αναφοράς του οχήματος, κατά μήκος (along-track) και κάθετα (off-track) στη διεύθυνση της κίνησης του, προκειμένου να διευκολύνεται η διαισθητική αντίληψη των μεγεθών και η αξιολόγηση τους για τις εφαρμογές πλοήγησης. Για την μετατροπή της συμβιβαστότητας, κατά μήκος και κάθετα στη διεύθυνση της κίνησης του οχήματος, απαιτείται η γνώση του προσανατολισμού του οχήματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.12 (αριστερά). Για τον υπολογισμό της ορθότητας, κατά μήκος και κάθετα στη διεύθυνση της κίνησης του οχήματος, απαιτείται η γνώση της τροχιάς αναφοράς, με την οποία θα συγκριθεί η τροχιά του οχήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.12 (δεξιά).



Σχήμα 5.12: Κατά μήκος και εγκάρσιο διάνυσμα συμβιβαστότητας (αριστερά) και ορθότητας (δεξιά) (Πηγή: Perakis et al 2015)

Figure 5.12: Along and Off track vector of precision (left) and trueness (right) (Source: Perakis et al 2015)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΥΛΛΟΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι ενέργειες και οι διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν κατά τον σχεδιασμό και τη διεξαγωγή του πειράματος, προκειμένου να γίνει η συλλογή των δεδομένων.

6.1. Σχεδιασμός Πειράματος

Σε συνέχεια της επιλογής του πειραματικού εξοπλισμού όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5, ακολούθησε η επιλογή της περιοχής διεξαγωγής του πειράματος, των συνθηκών και της διαδρομής που θα ακολουθήσει το όχημα. Η περιοχή αυτή πρέπει να πληροί διάφορα κριτήρια, ώστε ο εξοπλισμός ελέγχου να λειτουργεί σε ιδανικές αλλά και δυσμενείς συνθήκες παρατήρησης. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ολοκληρωμένος έλεγχος των δυνατοτήτων του εξεταζόμενου εξοπλισμού σε διαφορετικές συνθήκες. Βασικά κριτήρια σε αυτή τη διαδικασία αποτελεί η ένταξη τμημάτων κατά μήκος της διαδρομής με ανοιχτό και περιορισμένο ορίζοντα προς τον δορυφορικό σχηματισμό, καθώς και η ύπαρξη σταθμού αναφοράς σε κοντινή απόσταση προκειμένου να είναι δυνατή η εφαρμογή της τεχνικής εντοπισμού RTK-GNSS.

Η περιοχή και η διαδρομή που επιλέχθηκε για τη διεξαγωγή του πειράματος φαίνεται στο Σχήμα 6.1. Πρόκειται για τον χώρο της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, όπου στην οροφή του κτηρίου της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών (ΣΑΤΜ) τοποθετήθηκε ο σταθμός αναφοράς. Η διαδρομή όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2, εναλλάσσεται από τμήματα με ανοιχτό ορίζοντα σε τμήματα ανάμεσα σε ψηλή βλάστηση και κτήρια, καθώς και υπόγεια τμήματα χωρίς ορατότητα στον δορυφορικό σχηματισμό.



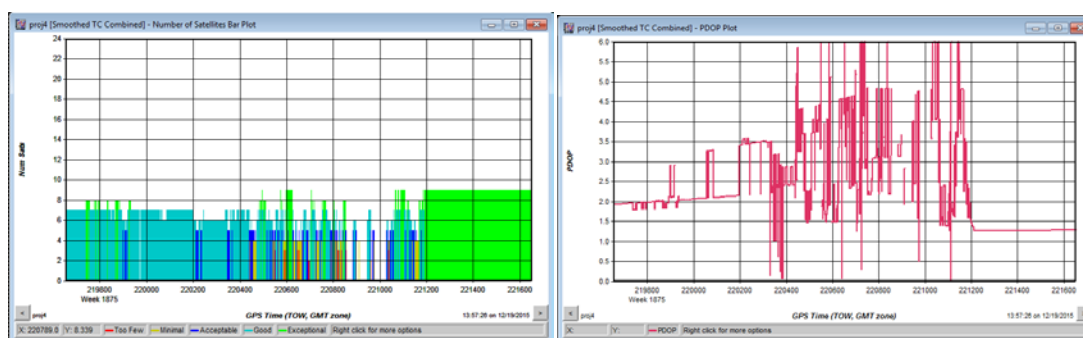
Σχήμα 6.1: Περιοχή διεξαγωγής πειράματος (Πηγή: Google Earth)
 Figure 6.1: Field test area (Source: Google Earth)



Σχήμα 6.2: Τμήματα διαδρομής με ανοικτής, περιορισμένης λόγω δένδρων, περιορισμένης λόγω κτηρίων και καθόλου ορατότητας στον δορυφορικό σχηματισμό
 Figure 6.2: Field test areas with open, obstructed from trees, obstructed from buildings and no view at the satellite constellation

Στη συνέχεια φαίνεται ο αριθμός των ορατών δορυφόρων από τους δορυφορικούς δέκτες και οι τιμές του δείκτη ποιότητας *PDOP*. Αρχικά παρατηρείται πως για ένα μεγάλο διάστημα στην αρχή και στο τέλος, το πλήθος των διαθέσιμων δορυφόρων δεν παρουσιάζει ουσιώδεις αυξομειώσεις όπως και οι τιμές του δείκτη *PDOP*. Το

γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι εκείνες τις χρονικές περιόδους το όχημα παραμένει ακινητοποιημένο σε περιοχή με ανοιχτό ορίζοντα προκειμένου να πραγματοποιηθεί η διαδικασία αρχικοποίησης των αδρανειακών αισθητήρων. Καθώς το όχημα ξεκινά την πορεία του, παρατηρείται κυρίως μείωση των δορυφόρων και κατ' επέκταση αύξηση των τιμών του δείκτη *PDOP*, καθώς και διαστήματα με λιγότερους από τέσσερις δορυφόρους έως και καθόλου. Έτσι, γίνεται αντιληπτό πώς η επιλογή της περιοχής διεξαγωγής του πειράματος επηρεάζει τη λειτουργία των δορυφορικών δεκτών και κατ' επέκταση τα αποτελέσματα της πλοήγησης που παρέχουν.



Σχήμα 6.3: Αριθμός παρατηρούμενων δορυφόρων (αριστερά) και τιμές δείκτη *PDOP* (δεξιά)
Figure 6.3: Number of satellites observed (left) and *PDOP* values (right)

6.2. Συλλογή Δεδομένων

Πριν ξεκινήσει η συλλογή των δεδομένων, απαραίτητη είναι η σωστή προετοιμασία και τοποθέτηση του εξοπλισμού.

Πρώτο βήμα αποτελεί η τοποθέτηση του σταθμού αναφοράς σε γεωδαιτικό βάθρο γνωστών συντεταγμένων. Η θέση αυτή υλοποιείται από βάθρο στην οροφή της ΣΑΤΜ. Στη συνέχεια ο σταθμός αναφοράς τίθεται σε λειτουργία και συνδέεται μέσω ασύρματης επικοινωνίας με κινητό τηλέφωνο, το οποίο έχει πρόσβαση στο διαδίκτυο προκειμένου να αποστέλλονται οι παρατηρήσεις στους κινούμενους δέκτες.



Σχήμα 6.4: Σταθμός αναφοράς GNSS
Figure 6.4: GNSS base station

Επόμενο βήμα αποτελεί η τοποθέτηση του εξοπλισμού αισθητήρων στο όχημα. Στην οροφή του οχήματος τοποθετούνται οι δύο κεραίες (*NovAtel Pinwheel 702-GG*) των δύο δεκτών GNSS (*NovAtel®* και *ublox®*) προκειμένου να μη παρεμποδίζεται η λήψη του δορυφορικού σήματος, καθώς και η αδρανειακή μονάδα *iMAR* και το ολοκληρωμένο σύστημα GNSS/INS *SPATIAL* ώστε να εδράζονται κατά το δυνατόν σε οριζόντια επιφάνεια. Ο δέκτης *ublox M8T*, για τις ανάγκες της εργασίας, συνδέθηκε με την υψηλής ποιότητας, γεωδαιτικού τύπου κεραία δορυφορικού εντοπισμού *Novatel Pinwheel 702-GG*, παρόλο που η εταιρία *ublox®* μαζί με το δέκτη παρέχει και κεραία δορυφορικού εντοπισμού χαμηλού κόστους. Η κεραία χαμηλού κόστους δεν παρέχει σταθερότητα του κέντρου φάσης, ούτε προστασία από πολυανακλάσεις σε αντίθεση με τη γεωδαιτικού τύπου, είναι όμως εξαιρετικά ευαίσθητη στη λήψη του σήματος. Ακόμα, οι αποστάσεις (*leverarms*) μεταξύ του αδρανειακού συστήματος και των άλλων συστημάτων μετρώνται, προκειμένου να γίνει αναφορά των μετρήσεων στην αρχή των αξόνων του αδρανειακού συστήματος.



Σχήμα 6.5: Κεραίες GNSS, αδρανειακή μονάδα SPAN και σύστημα GNSS/INS Advance Navigation SPATIAL επί του οχήματος

Figure 6.5: GNSS antennas, SPANs IMU and GNSS/INS Advance Navigation SPATIAL mounted on the vehicle

Στο εσωτερικό του οχήματος βρίσκονται οι μονάδες ρευματοληψίας των δορυφορικών δεκτών, οι δέκτες δορυφορικού εντοπισμού καθώς και δύο φορητοί ηλεκτρονικοί υπολογιστές. Ο ένας εξ αυτών έχει εγκατεστημένο το λογισμικό που διαχειρίζεται τη λειτουργία και τη συλλογή των παρατηρήσεων του συστήματος GNSS/INS SPAN. Στον άλλον υπολογιστή υπάρχουν εγκατεστημένα τα λογισμικά που διαχειρίζονται τη λειτουργία και τη συλλογή των παρατηρήσεων του δέκτη GNSS *ublox* και του συστήματος GNSS/INS SPATIAL. Ακόμα διαθέτει την εφαρμογή *RTKLIB* στην οποία μεταφέρονται τα δεδομένα του *ublox* δέκτη, προκειμένου να υλοποιηθεί η μέθοδος δορυφορικού εντοπισμού RTK. Και οι δύο υπολογιστές είναι συνδεδεμένοι στο διαδίκτυο μέσω κινητού τηλεφώνου που χρησιμοποιείται ως *WiFi Hotspot*, έτσι ώστε να λαμβάνονται οι παρατηρήσεις που αποστέλλει ο σταθμός αναφοράς.



Σχήμα 6.6: Δορυφορικοί δέκτες NovAtel® και ublox® M8T

Figure 6.6: GNSS receiver NovAtel® and ublox® M8T



Σχήμα 6.7: Φορητοί υπολογιστές με λογισμικό συλλογής δεδομένων των δορυφορικών δεκτών
Figure 6.7: Laptop equipped with the data acquisition software

Τέλος, ακολουθεί η επιλογή των παραμέτρων και λειτουργιών των δεκτών μέσω των λογισμικών τους. Πριν ξεκινήσει το όχημα να κινείται στην διαδρομή που επιλέχθηκε και αφού όλοι οι δέκτες έχουν τεθεί σε λειτουργία, το όχημα παραμένει ακινητοποιημένο για ένα διάστημα περίπου 6 min προκειμένου το σύστημα *SPAN* να εκτελέσει την λειτουργία αρχικοποίησης του (*initialization*). Η διαδικασία της αρχικοποίησης πραγματοποιείται και αφού το όχημα ολοκληρώσει τη διαδρομή. Το όχημα είναι πλέον έτοιμο να διανύσει τη διαδρομή.



Σχήμα 6.8: Το όχημα συλλογής δεδομένων του πειράματος και γεωδαιτικός εξοπλισμός
Figure 6.8: Experimental vehicle equipped with geodetic sensors

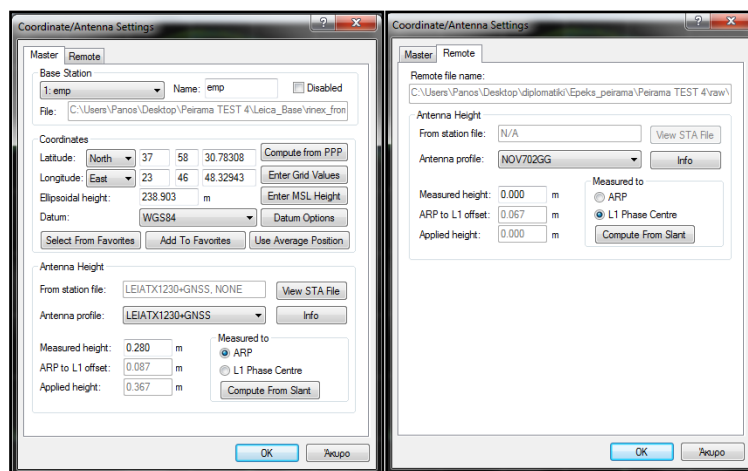
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΙ ΕΞΑΓΩΓΗ ΤΡΟΧΙΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μεθοδολογίες και οι παράμετροι της επεξεργασίας των παρατηρήσεων, προκειμένου να εξαχθεί η τροχιά του οχήματος, από το εκάστοτε σύστημα.

7.1. Εξαγωγή Τροχιάς Αναφοράς Οχήματος Ελέγχου

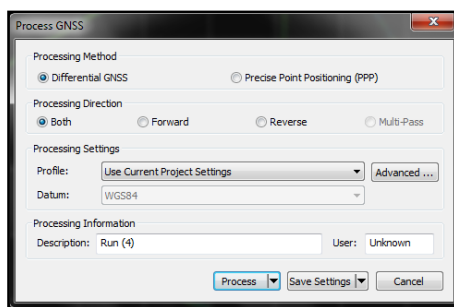
Η εξαγωγή της τροχιάς αναφοράς του οχήματος ελέγχου προέκυψε από τα δεδομένα GNSS/INS του συστήματος SPAN με τη χρήση του λογισμικού *Inertial explorer*® 8.60 της εταιρείας *NovAtel*®. Το συγκεκριμένο λογισμικό εφαρμόζει εξελιγμένες μεθόδους και τεχνικές ανάλυσης που στηρίζονται στη θεωρία του φίλτρου Kalman προκειμένου να παράγει υψηλής ποιότητας αποτελέσματα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα επιμέρους στάδια επεξεργασίας των παρατηρήσεων όπως υλοποιήθηκαν κατά τη χρήση του λογισμικού.

Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την εισαγωγή των παρατηρήσεων στο λογισμικό. Αρχικά δηλώνεται ο τύπος και το μοντέλο του κάθε δέκτη προκειμένου να αναγνωριστεί το είδος του αρχείου που παράγουν, αλλά και προκειμένου να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια της επεξεργασίας, καθώς το λογισμικό διαθέτει αποθηκευμένα τα τεχνικά χαρακτηριστικά πληθώρας δεκτών GNSS. Τα αρχεία των παρατηρήσεων από τον σταθμό αναφοράς GNSS και τους κινούμενους δέκτες GNSS μετατρέπονται από το λογισμικό σε μορφή συμβατή με αυτό. Στη συνέχεια δηλώνονται τα χαρακτηριστικά του σταθμού αναφοράς και του κινούμενου δέκτη, όπως οι συντεταγμένες του, ο τύπος κεραίας που φέρει, το ύψος κεραίας, κ.α. προκειμένου να εκτελεστεί σωστά η διαδικασία επίλυσης.



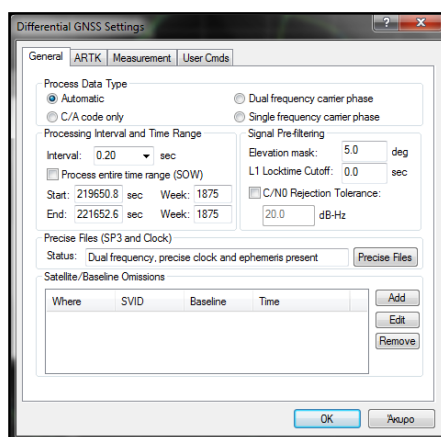
Σχήμα 7.1: Εισαγωγή στοιχείων σταθμού αναφοράς και κινούμενου δέκτη GNSS
 Figure 7.1: GNSS base station and rover receiver data input

Το επόμενο βήμα είναι η επίλυση των παρατηρήσεων GNSS με τη μέθοδο του εκ των υστέρων κινηματικού σχετικού εντοπισμού σε παρατηρήσεις φάσης στις δύο συχνότητες του δορυφορικού σήματος. Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή και ως GNSS *post process kinematic* (GNSS PPK) και υπό προϋποθέσεις μπορεί να υπολογίσει την τροχιά του κινούμενου οχήματος με ακρίβεια λίγων εκατοστών. Ο εντοπισμός του οχήματος από μετρήσεις GNSS επεξεργάζεται από κοινού με τις αδρανειακές μετρήσεις του συστήματος προκειμένου να προκύψει η τελική λύση (τροχιά αναφοράς) του οχήματος.



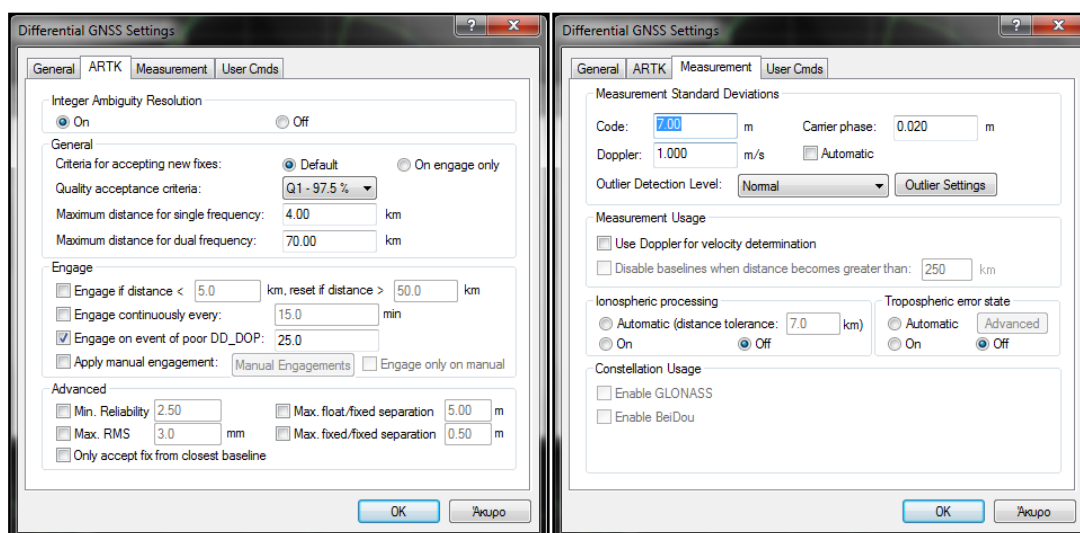
Σχήμα 7.2: Επίλυση δορυφορικών παρατηρήσεων με τη μέθοδο PPK
Figure 7.2: GNSS processing using PPK positioning method

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία υπολογισμού επιλέγονται οι παράμετροι εισόδου που θα ληφθούν υπόψη. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει τιμές για διαφορετικές παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη κατά την επίλυση των παρατηρήσεων. Μεταξύ των παραμέτρων αυτών είναι το είδος των παρατηρήσεων που θα χρησιμοποιηθούν, η γωνία αποκοπής των δορυφόρων, το διάστημα επεξεργασίας των παρατηρήσεων, κ.α. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα λήψης μέσω του διαδικτύου, αρχείων τροχιών ακριβείας και σφαλμάτων των χρονομέτρων των δορυφόρων, τα οποία βελτιώνουν περαιτέρω τα αποτελέσματα της επεξεργασίας.



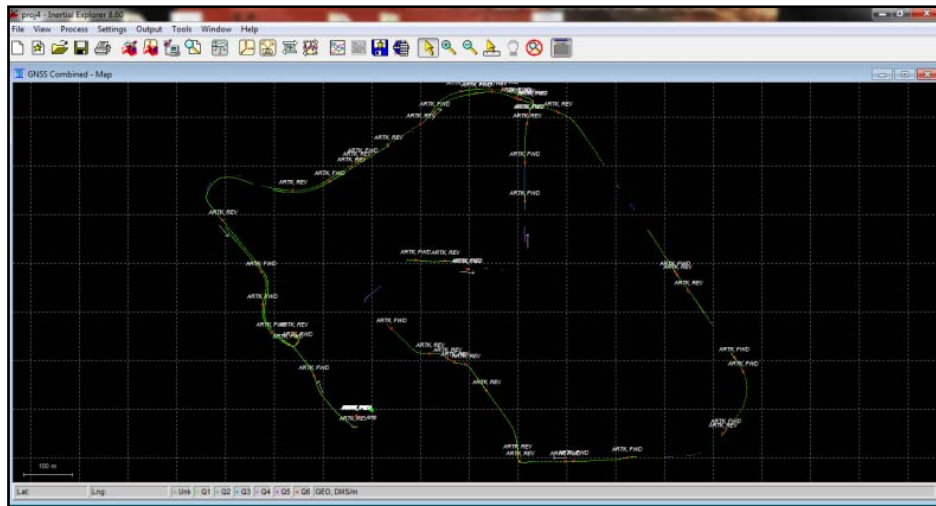
Σχήμα 7.3: Επιλογή τιμών παραμέτρων επίλυσης GNSS
Figure 7.3: Selecting GNSS processing parameter values

Το λογισμικό διαθέτει ακόμα μία μέθοδο που διευκολύνει την επίλυση των ασαφειών φάσης, σε περίπτωση απώλειας του δορυφορικού σήματος. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται *ARTK*, ενώ τα κριτήρια ενεργοποίησης της επιλέγονται από τον χρήστη και, εν γένει βελτιώνει σημαντικά τα παραγόμενα αποτελέσματα της επίλυσης. Ακόμη, το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα να απορρίπτονται παρατηρήσεις με μεγάλο σφάλμα, καθώς και την επιλογή υπολογισμού των ατμοσφαιρικών σφαλμάτων μέσω των παρατηρήσεων.



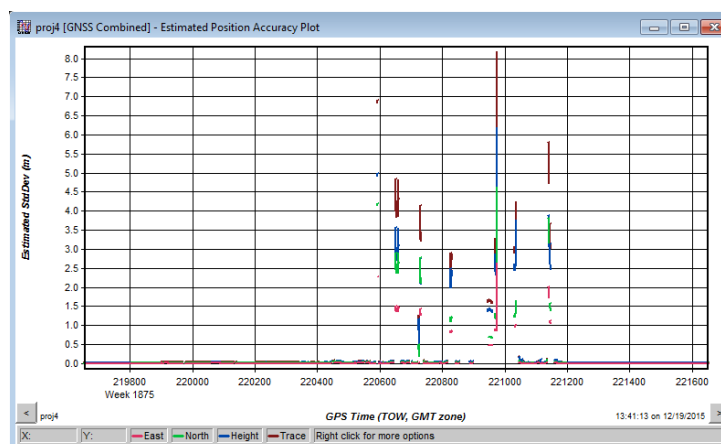
Σχήμα 7.4: Επιλογή τιμών παραμέτρων GNSS επεξεργασίας
Figure 7.4: Selecting GNSS processing parameter values

Στα Σχήματα 7.5 και 7.6 φαίνονται τα αποτελέσματα και η ακρίβεια υπολογισμού της τροχιάς αναφοράς του οχήματος ελέγχου, για τη διαδρομή όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 6. Γίνεται αντιληπτό πως η τροχιά του οχήματος διακόπτεται συνεχώς, καθώς το όχημα περνά από περιοχές με ψηλά δένδρα, κτήρια, αλλά και σε υπόγειους χώρους, με αποτέλεσμα ο δέκτης να χάνει το δορυφορικό σήμα και να μη μπορεί να εκτελεστεί η μέθοδος του σχετικού εντοπισμού αδιάκοπα. Ακόμη, παρατηρείται πως όταν επανακτάται το δορυφορικό σήμα ή γίνεται η λήψη του σε περιοχές με έντονες πολυανακλάσεις και κοντά/κάτω από δένδρα, η ακρίβεια του εντοπισμού μειώνεται δραστικά.



Σχήμα 7.5: Τροχιά οχήματος από τις μετρήσεις GNSS. Τα διακοπτόμενα τμήματα μπλε χρώματος αντιστοιχούν σε κίνηση του οχήματος με περιορισμένη ή ολοκληρωτική έλλειψη σήματος GNSS

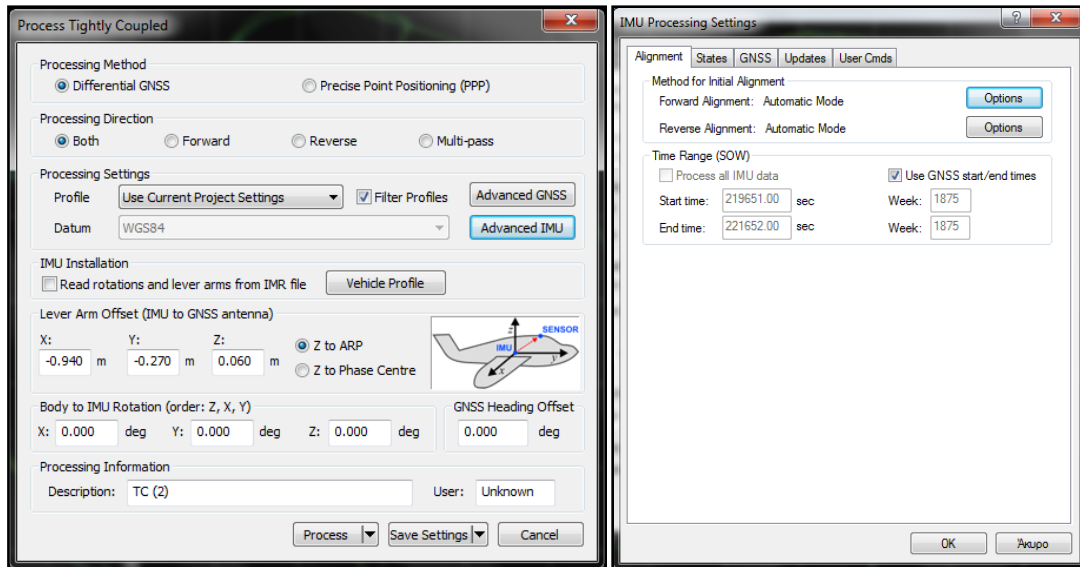
Figure 7.5: Test vehicle trajectory based only on GNSS observables. Dash sections in blue refer to sections of limited or complete inability of GNSS signal reception



Σχήμα 7.6: Οριζοντιογραφική ακρίβεια τροχιάς οχήματος από μετρήσεις GNSS

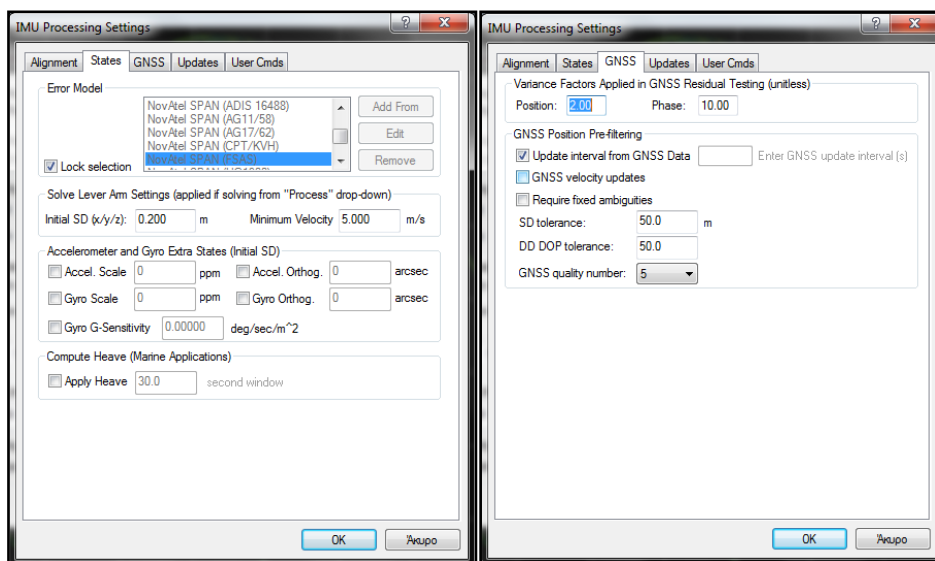
Figure 7.6: Estimated position accuracy based solely on GNSS data

Αφού ολοκληρωθεί η επεξεργασία των δορυφορικών παρατηρήσεων, ξεκινά η επεξεργασία των αποτελεσμάτων της, από κοινού με τις παρατηρήσεις του αδρανειακού συστήματος. Αρχικά επιλέγεται η μέθοδος (βαθμός συνεργασίας) της επεξεργασίας των δύο τύπων παρατηρήσεων. Η μέθοδος που επιλέχθηκε στην παρούσα εργασία είναι ο σφιχτός βαθμός συνεργασίας (*Tightly coupled*). Επιπρόσθετα των πρωτογενών παρατηρήσεων, το λογισμικό *Inertial Explorer*[®] λαμβάνει υπόψη του και τις θέσεις του συστήματος GNSS όταν αυτές υπάρχουν στην επίλυση που πραγματοποιεί με τη μέθοδο *tightly coupled*, γιατί προηγήθηκε ο σχετικός εντοπισμός, προκειμένου οι θέσεις που λαμβάνονται υπόψη στην επεξεργασία να είναι μεγάλης ακρίβειας.



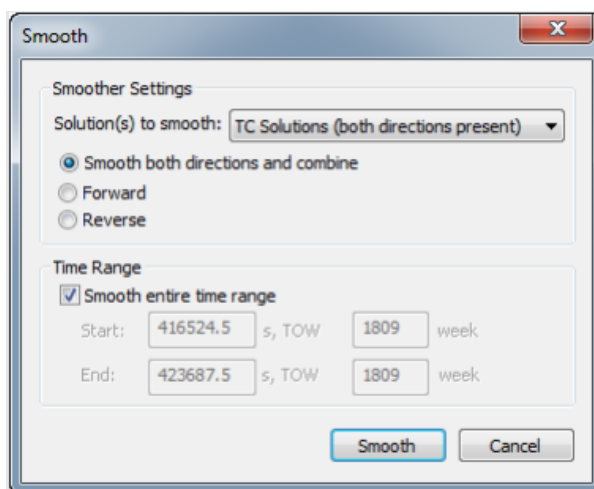
Σχήμα 7.7: Επεξεργασία GNSS/INS δεδομένων και επιλογή παραμέτρων επίλυσης
Figure 7.7: Selecting GNSS/INS processing features

Εφόσον επιλεγθεί η μέθοδος επίλυσης των παρατηρήσεων, το λογισμικό επιτρέπει στον χρήστη να επιλέξει τιμές για παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη κατά την επίλυση και θα προσδιορίζουν τα αποτελέσματά της. Τέτοιες παράμετροι είναι οι απόσταση των κέντρων φάσης των δύο δεκτών, προκειμένου η λύση να παραχθεί με βάση την αρχή των αξόνων του αδρανειακού συστήματος. Ακόμα, η μέθοδος ευθυγράμμισης (*Alignment*), τα κριτήρια για τη συμμετοχή στη λύση των δορυφορικών παρατηρήσεων, όπως η ακρίβειά τους και η ποιότητα των δεκτών του αδρανειακού συστήματος, η οποία είναι καταχωρημένη εφόσον έχει δηλωθεί στην εισαγωγή των δεδομένων ο τύπος του αδρανειακού συστήματος κ.α.



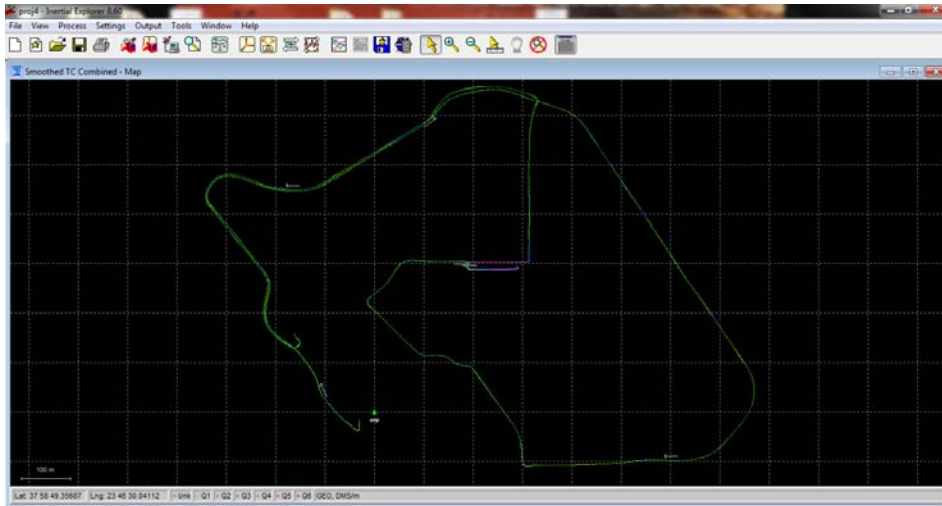
Σχήμα 7.8: Επιλογή τιμών παραμέτρων επεξεργασίας GNSS/INS
Figure 7.8: Selecting values for GNSS/INS processing parameters

Το λογισμικό *Inertial explorer*[®] πραγματοποιεί επεξεργασία των παρατηρήσεων και κατά την αντίθετη φορά της πορείας που ακολούθησε το όχημα με εφαρμογή αλγορίθμων εξομάλυνσης του φίλτρου Kalman. Η επεξεργασία αυτή βοηθά στο να ανιχνεύονται και στη συνέχεια να εξαλείφονται τα σφάλματα που προέρχονται μετά από μεγάλης διάρκειας απώλεια του δορυφορικού σήματος. Τέλος, οι δύο παραγόμενες τροχιές (προς τις δύο φορές κίνησης του οχήματος) συνδυάζονται και προκύπτει η τελική εξομαλυμένη τροχιά κίνησης του οχήματος.



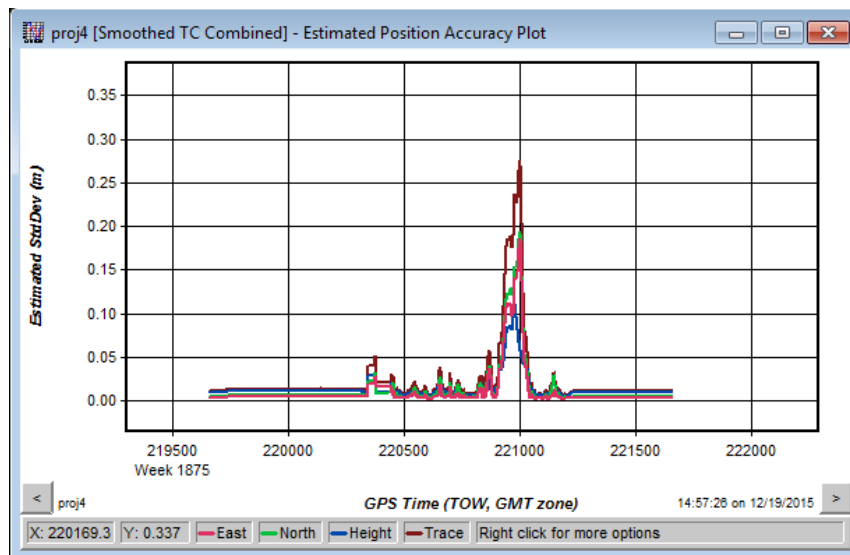
Σχήμα 7.9: Εφαρμογή αλγορίθμου εξομάλυνσης τροχιάς
Figure 7.9: Applying trajectory smoothing filtering

Ακολούθως φαίνεται η τροχιά που προέκυψε μετά από την εκτέλεση όλων των σταδίων επεξεργασίας των δεδομένων, η οποία αποτελεί την τροχιά αναφοράς. Γίνεται αντιληπτό πως για τα διαστήματα που δεν υπήρχε GNSS εντοπισμός έχουν υπολογιστεί τα σημεία της τροχιάς με τη βοήθεια των αδρανειακών παρατηρήσεων. Η ακρίβεια υπολογισμού των σημείων της τροχιάς είναι μεγαλύτερη για αυτά που απεικονίζονται με πράσινο χρώμα και μειώνεται όσο η απεικόνιση τους πλησιάζει το κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται πως στις περιοχές που δεν ήταν εφικτός ο δορυφορικός εντοπισμός το χρώμα της τροχιάς δεν είναι πράσινο, αλλά και στις περιοχές που υπήρχε, η ακρίβεια του έχει βελτιωθεί. Ακόμα, παρουσιάζεται το διάγραμμα της εκτιμώμενης ακρίβειας των σημείων που συνιστούν την τροχιά κίνησης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.10, η συντριπτική πλειοψηφία των σημείων παρουσιάζουν σφάλμα (τυπική απόκλιση 1σ) κάτω των 0.05 m, ενώ το μέγιστο σφάλμα που συναντάται είναι της τάξεως των 0,3 m και αναφέρεται σε σημεία που βρίσκονται σε παντελή αδυναμία λήψης του δορυφορικού σήματος. Επομένως, εξάγεται το συμπέρασμα πως η τροχιά που προέκυψε από το σύστημα *SPAN*, έχει ικανοποιητική ακρίβεια ώστε να χρησιμοποιηθεί ως τροχιά αναφοράς.



Σχήμα 7.10: Τροχιά αναφοράς οχήματος ελέγχου όπως προέκυψε από επίλυση συστήματος GNSS/INS NovAtel SPAN

Figure 7.10: Test vehicle reference trajectory obtained using GNSS/INS SPAN NovAtel system



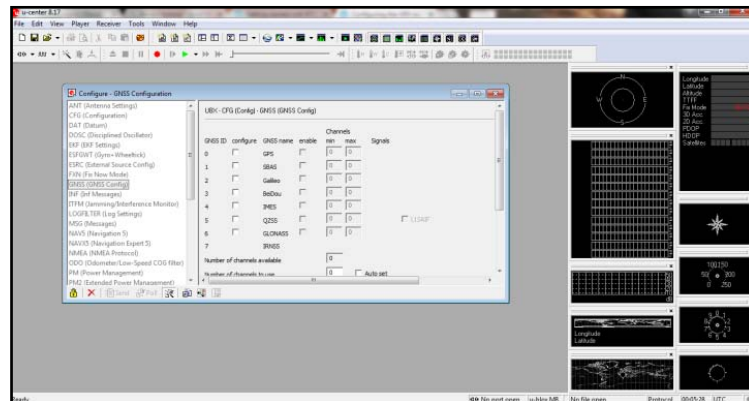
Σχήμα 7.11: Ακρίβεια εντοπισμού σε οριζοντιογραφία τροχιάς αναφοράς

Figure 7.11: Estimated position accuracy of reference trajectory

7.2. Εξαγωγή Τροχιάς με Χρήση Δέκτη GNSS Χαμηλού Κόστους (u-blox M8T)

Η τροχιά του οχήματος ελέγχου προέκυψε σε πραγματικό χρόνο με χρήση μετρήσεων ψευδοαποστάσεων του δορυφορικού δέκτη χαμηλού κόστους *u-blox M8T*. Η εξαγωγή της τροχιάς κίνησης πραγματοποιήθηκε από το λογισμικό του δέκτη λαμβάνοντας υπόψη τις εργοστασιακές ρυθμίσεις των παραμέτρων επεξεργασίας. Οι επιλογές παραμέτρων λειτουργίας που έγιναν από πλευράς χειριστή αφορούσαν την επιλογή των GNSS συστημάτων που θα χρησιμοποιήσει ο

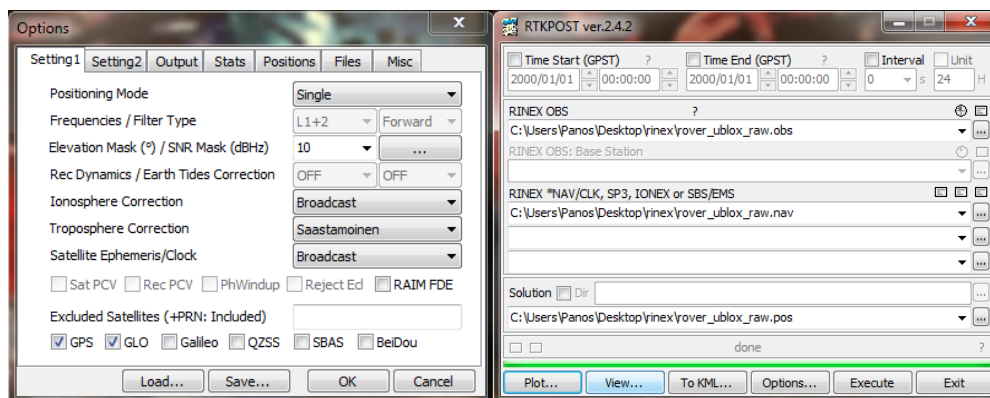
δέκτης, στον οποίο επιλέχθηκε να συμπεριλάβει παρατηρήσεις του συστήματος GPS και του συστήματος GLONASS.



Σχήμα 7.12: Επιλογή τιμών παραμέτρων λειτουργίας δέκτη GNSS u-blox M8T
Figure 7.12: Selecting operating parameter values for u-blox M8T GNSS receiver

7.3. Εξαγωγή Τροχιάς με Χρήση Δέκτη GNSS Χαμηλού Κόστους και Ελεύθερου Λογισμικού (u-blox M8T, RTKLIB SPP RTKPOST)

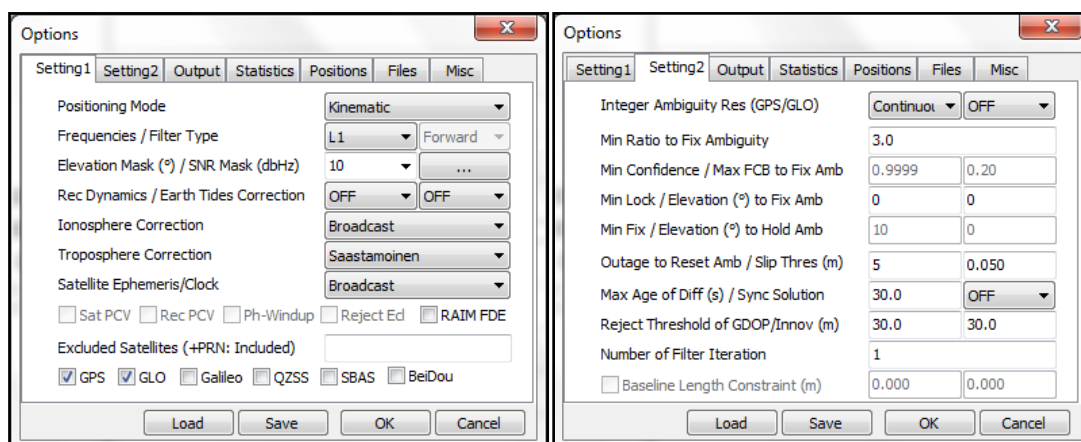
Επιπρόσθετα της αυτόνομης λύσης που προέκυψε από το λογισμικό του δέκτη, οι πρωτογενείς παρατηρήσεις του δέκτη u-blox M8T χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της τροχιάς του οχήματος κάνοντας χρήση του ελεύθερου λογισμικού *RTKLIB*. Ειδικότερα, οι παρατηρήσεις του δέκτη αφού μετατράπηκαν σε αρχείο μορφής *RINEX* με τη βοήθεια της εφαρμογής *RTKCONV*, διοχετεύτηκαν στην εφαρμογή *RTKPOST* όπου πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία τους. Η μέθοδος εντοπισμού που επιλέχθηκε ήταν και πάλι ο απόλυτος εντοπισμός με παρατηρήσεις κώδικα, ενώ οι παράμετροι επεξεργασίας επιλέχθηκε να είναι ίδιες με αυτές που εφαρμόστηκαν στην επεξεργασία που εκτελέστηκε στην περίπτωση εφαρμογής του λογισμικού του δέκτη.



Σχήμα 7.13: Επιλογή τιμών παραμέτρων και εκτέλεση SPP επεξεργασίας ελεύθερου λογισμικού RTKLIB
Figure 7.13: Selecting processing parameters and execution RTKLIB SPP software

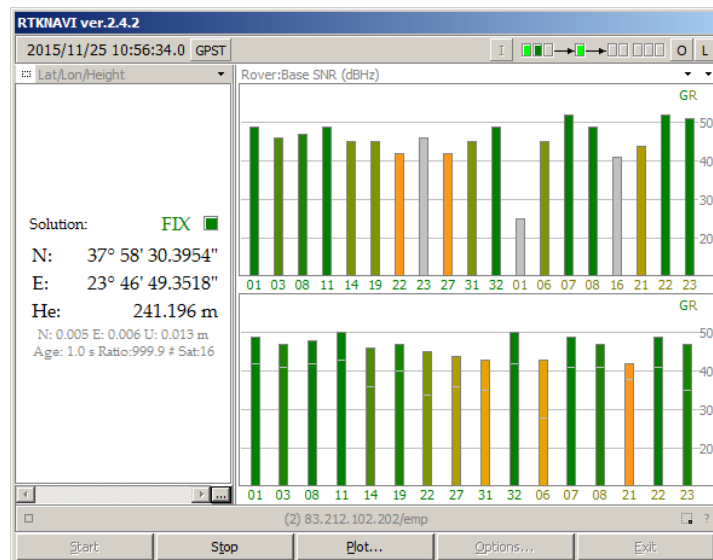
7.4. Εξαγωγή Τροχιάς με Χρήση Δέκτη GNSS Χαμηλού Κόστους και Ελεύθερου Λογισμικού (u-blox M8T, RTKLIB RTK-GNSS RTKNAVI)

Η εξαγωγή της τροχιάς από τις παρατηρήσεις του δέκτη *u-blox M8T*, έγινε σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια κίνησης του οχήματος, με τη μέθοδο σχετικού εντοπισμού RTK και με τη χρήση του ελεύθερου λογισμικού *RTLIB* και πιο συγκεκριμένα της εφαρμογής *RTKNAVI*, για την υλοποίηση της μεθόδου. Εφόσον η τροχιά προέκυψε σε πραγματικό χρόνο, δεν χρειάστηκε περαιτέρω επεξεργασία των παρατηρήσεων. Οι ενέργειες που χρειάστηκαν είναι η ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας του δέκτη, όπως ο ρυθμός καταγραφής των παρατηρήσεων, διάφορα στατιστικά μεγέθη για την αποδοχή τους (π.χ., ο δείκτης SNR), η χρήση ή μη όλων των διαθέσιμων GNSS συστημάτων, κ.α. Η ρυθμίσεις αυτές γίνονται με τη βοήθεια του λογισμικού *uCenter*. Ακόμα, η επιλογή των παραμέτρων που θα λάβει υπόψη το λογισμικό *RTKLIB* προκειμένου να εφαρμοστεί η μέθοδος RTK έπρεπε να επιλεγούν. Αυτές οι παράμετροι επιλέγονται μέσα από την εφαρμογή *RTKNAVI* και περιλαμβάνουν την τροφοδότηση της εφαρμογής με τις παρατηρήσεις του σταθμού αναφοράς και του δέκτη *u-blox M8T*, την επιλογή των κριτηρίων αποδοχής παρατηρήσεων, όπως η γωνία αποκοπής δορυφόρων, στατιστικοί δείκτες, σύστημα από το οποίο προέρχονται οι παρατηρήσεις, κ.α. Παρακάτω, φαίνονται μερικά από τα παράθυρα επιλογής παραμέτρων λειτουργίας του δέκτη και του λογισμικού.



Σχήμα 7.14: Επιλογή παραμέτρων λειτουργίας λογισμικού RTKNAVI
Figure 7.14: Selecting RTKNAVIs processing parameters

Εφόσον πραγματοποιήθηκαν όλες οι επιλογές των παραμέτρων επεξεργασίας, το λογισμικό τέθηκε σε λειτουργία και ξεκίνησε η διεξαγωγή εντοπισμού με τη μέθοδο GNSS RTK. Στο Σχήμα 7.15 φαίνεται ένα απόσπασμα από τη διαδικασία εντοπισμού κατά το οποίο το λογισμικό επιλύει τις ακέραιες ασάφειες φάσης και παρέχει 'fixed' λύση.



Σχήμα 7.15: Ποιότητα λύσης εντοπισμού και λήψης δορυφορικού σήματος εφαρμογής RTKNAVI
 Figure 7.15: Positioning solution quality figures including satellite SNR indicators using RTKNAVI

7.5. Εξαγωγή Τροχιάς με Χρήση Δέκτη GNSS Χαμηλού Κόστους και Συστήματος GNSS/INS Χαμηλού Κόστους (u-blox M8T, SPATIAL RTK-GNSS/MEMS-IMU)

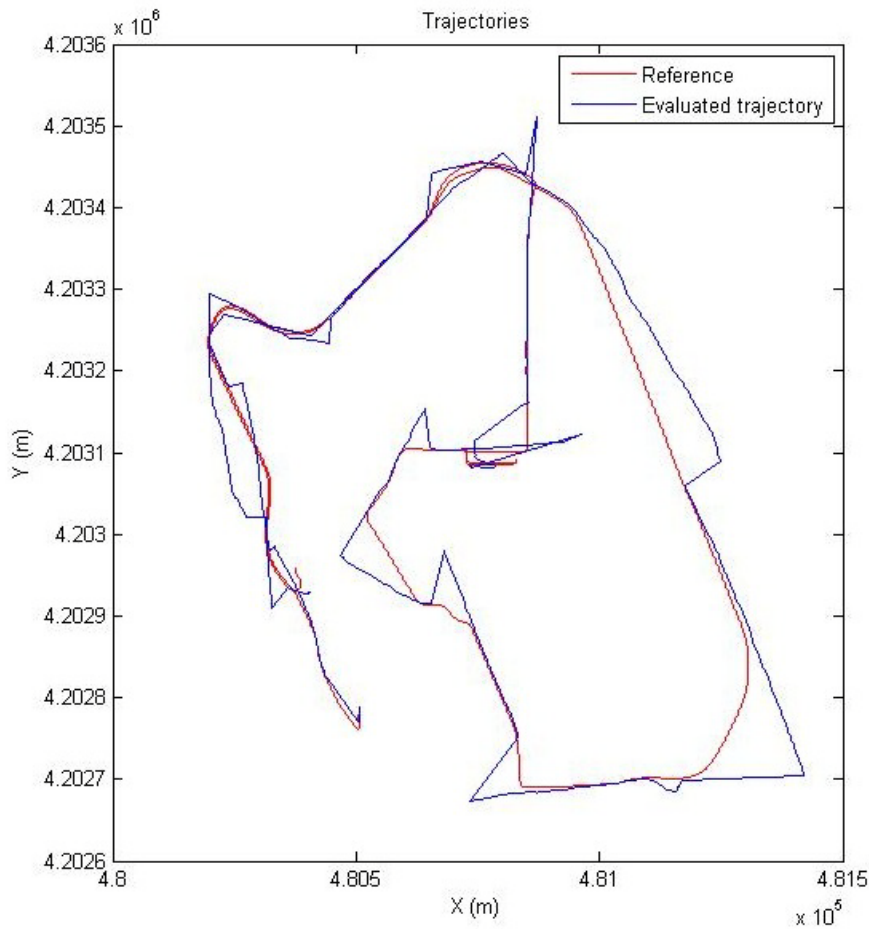
Η εξαγωγή της τροχιάς του οχήματος από το ολοκληρωμένο σύστημα χαμηλού κόστους GNSS/INS *SPATIAL* της *Advanced Navigation*[®], γίνεται σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια κίνησης του οχήματος. Επομένως, δεν χρειάστηκε επεξεργασία των παρατηρήσεων, ωστόσο χρειάστηκε η επιλογή των τιμών των παραμέτρων λειτουργίας του δέκτη, όπως ο ρυθμός καταγραφής των παρατηρήσεων. Οι ρυθμίσεις αυτές γίνονται με τη βοήθεια του λογισμικού *Spatial Manager*. Η σημαντικότερη επιλογή που έγινε πρώτου ξεκινήσει η καταγραφή της τροχιάς ήταν η εισαγωγή της λύσης GNSS RTK στο σύστημα *SPATIAL*, όπως υπολογίστηκε από το λογισμικό *RTKLIB* με τις παρατηρήσεις του δέκτη *u-blox M8T*. Έτσι οι θέσεις GNSS RTK και τα δεδομένα από τους αδρανειακούς αισθητήρες του GNSS/INS *SPATIAL*, επεξεργάστηκαν από την ενσωματωμένη υπολογιστική μονάδα του συστήματος, με τη χρήση των μεθοδολογιών και αλγορίθμων που διαθέτει και εξήχθη η τροχιά του οχήματος. Το σύστημα *SPATIAL* όπως αναφέρθηκε διαθέτει δέκτη GNSS ο οποίος εκτελεί παρατηρήσεις κώδικα, επομένως δεν δύναται να πραγματοποιήσει τη μέθοδο GNSS RTK με επεξεργασία παρατηρήσεων φάσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΡΟΧΙΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ της τροχιάς του οχήματος ελέγχου όπως προέκυψε με δέκτες GNSS και GNSS/INS χαμηλού κόστους και διαφορετικές διαδικασίες επεξεργασίας, σε σχέση με την τροχιά αναφοράς. Συγκεκριμένα, συνοψίζονται τα αποτελέσματα, της λύσης απόλυτου εντοπισμού από το λογισμικό του δορυφορικού δέκτη χαμηλού κόστους, της λύσης απόλυτου και σχετικού εντοπισμού με χρήση του λογισμικού ανοικτού κώδικα και της λύσης με το ολοκληρωμένο σύστημα εντοπισμού χαμηλού κόστους.

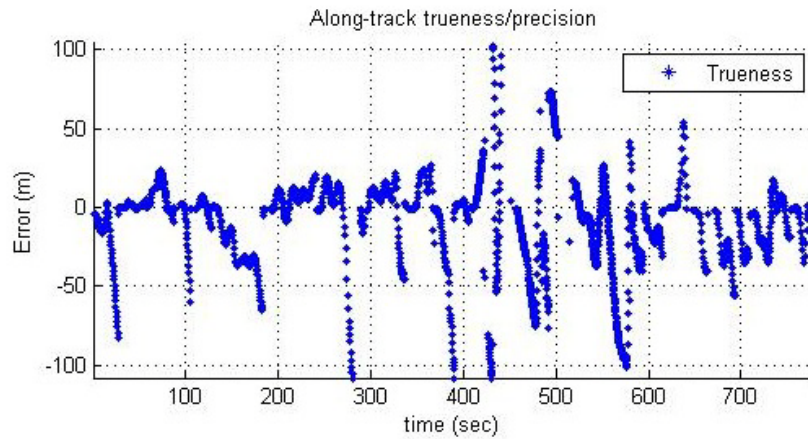
8.1. Αυτόνομη Λύση Εντοπισμού Δέκτη GNSS Χαμηλού Κόστους (u-blox M8T)

Στο Σχήμα 8.1 φαίνεται η σχέση της τροχιάς αναφοράς και της τροχιάς (*u-blox SPP*) που παράχθηκε εξολοκλήρου από τον δορυφορικό δέκτη *u-blox M8T* σε απόλυτο εντοπισμό, συνδεδεμένος με τη γεωδαιτικού τύπου κεραία *NovAtel Pinwheel 702-GG*. Γίνεται αντιληπτό πως η παραγόμενη τροχιά αποκλίνει σε πολλά σημεία της με την τροχιά αναφοράς. Παρουσιάζονται μεγάλες αποκλίσεις κυρίως στις περιοχές, όπως φαίνονται στην Ενότητα 6.1, όπου η ορατότητα στον δορυφορικό σχηματισμό είναι περιορισμένη λόγω των ψηλών δέντρων, κτηρίων και υπογείων κατά μήκος της διαδρομής αλλά και σε τμήματα που η ορατότητα στο σχηματισμό δεν επηρεάζεται. Παρόλα αυτά, η δυνατότητα υπολογισμού λύσης εντοπισμού δεν πραγματοποιήθηκε σε ελάχιστα τμήματα της διαδρομής. Παρατηρείται ακόμα δυσκολία του δέκτη *u-blox M8T* να υπολογίσει με ακρίβεια τη λύση εντοπισμού στις θέσεις στροφών κατά μήκος της διαδρομής του πειράματος.

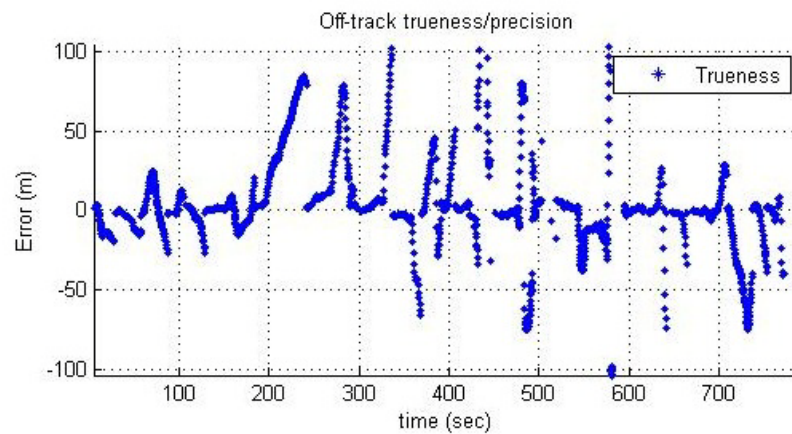


Σχήμα 8.1: Τροχιά οχήματος όπως προέκυψε από τη λύση απόλυτου εντοπισμού του δέκτη χαμηλού κόστους u-blox M8T (μπλε) και τροχιά αναφοράς (κόκκινο)
Figure 8.1: Vehicle trajectory obtained using u-blox M8T absolute positioning solution (blue) and reference trajectory (red)

Στη συνέχεια εξετάζεται η ορθότητα της τροχιάς κίνησης στις διευθύνσεις κατά μήκος και εγκάρσια σε αυτή. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μεγάλη διακύμανση των τιμών της ορθότητας των σημείων της τροχιάς, που κυμαίνεται από 1 έως και 100m. Δεν παρουσιάζονται οι τιμές της συμβιβαστότητας του εντοπισμού, λόγω μη δυνατότητας παροχής τους από το λογισμικό. Ακόμα, παρατηρείται πως τα διαστήματα που ο εντοπισμός δεν έχει πραγματοποιηθεί είναι ελάχιστα με τη διαθεσιμότητα να φθάνει στο 97%. Ακόμα και στο υπόγειο τμήμα έχει εκτελεσθεί εντοπισμός έχοντας όμως πολύ μειωμένες τιμές ορθότητας. Οι τιμές της ορθότητας της τροχιάς δεν παρουσιάζουν κάποια συστηματική τάση ως προς το πρόσημο, ωστόσο υποδεικνύουν την αδυναμία του δέκτη να παράγει αξιόπιστη λύση υπό αυτές τις συνθήκες.

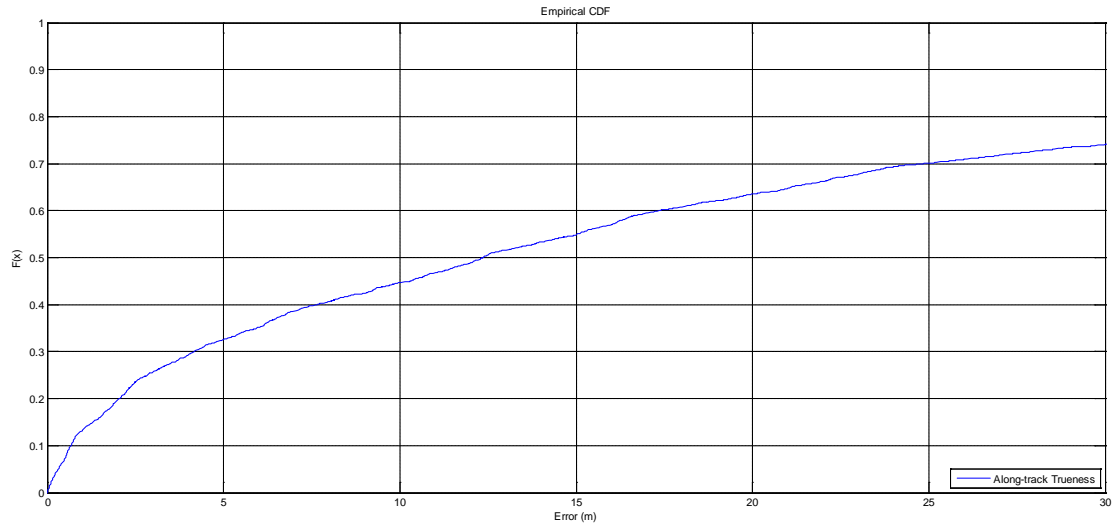


Σχήμα 8.2: Κατά μήκος ορθότητα τροχιάς u-blox SPP
Figure 8.2: Along track trueness of u-blox SPP trajectory

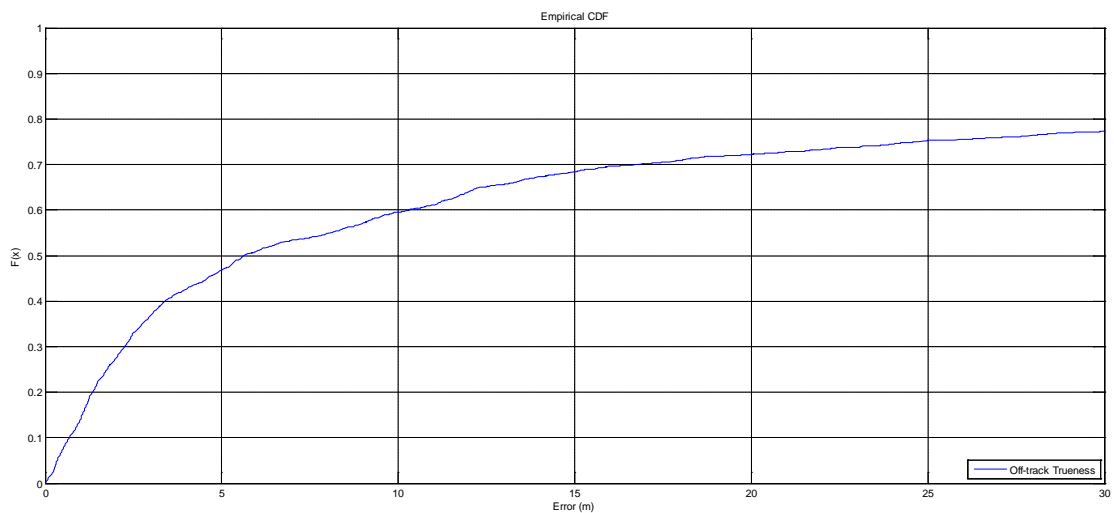


Σχήμα 8.3: Εγκάρσια ορθότητα τροχιάς u-blox SPP
Figure 8.3: Off track trueness of u-blox SPP trajectory

Τα Σχήματα 8.4 και 8.5 παρουσιάζουν το ποσοστό εμφάνισης των τιμών ορθότητας για το σύνολο του μήκους της διανυθείσης τροχιάς. Συμπερασματικά, μόλις το 45% των σημείων κατά μήκος της τροχιάς παρουσιάζει τιμές ορθότητας καλύτερες από 10 m, ενώ η αντίστοιχη τιμή σε διεύθυνση εγκάρσια της κίνησης ανέρχεται στο 60%.

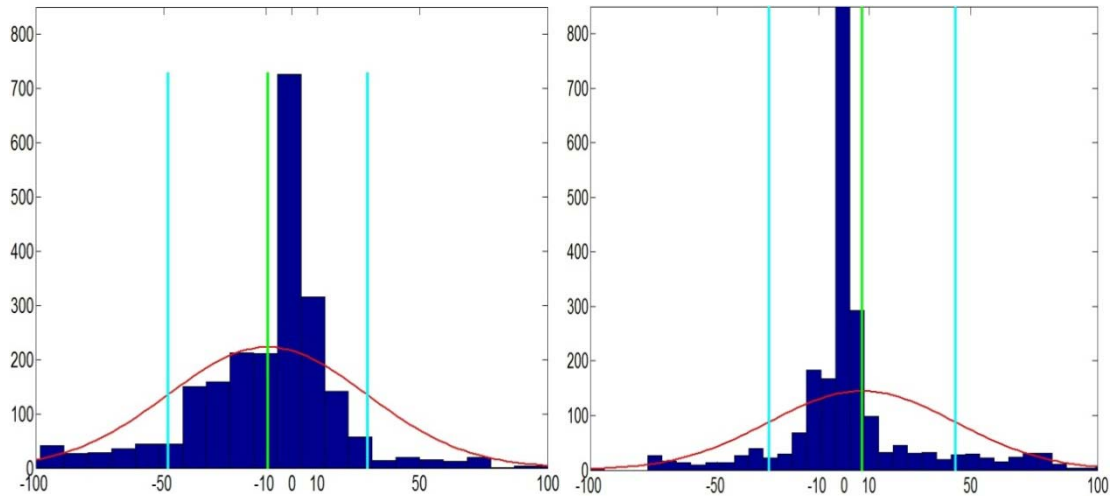


Σχήμα 8.4: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής ορθότητας κατά μήκος της διεύθυνσης κίνησης της τροχιάς αυτόνομης λύσης πλοήγησης u-blox SPP
Figure 8.4: Cumulative distribution of positioning trueness for u-blox SPP trajectory along track direction



Σχήμα 8.5: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής ορθότητας εγκάρσια της διεύθυνσης κίνησης της τροχιάς αυτόνομης λύσης πλοήγησης u-blox SPP
Figure 8.5: Cumulative distribution of positioning trueness for u-blox SPP trajectory off track direction

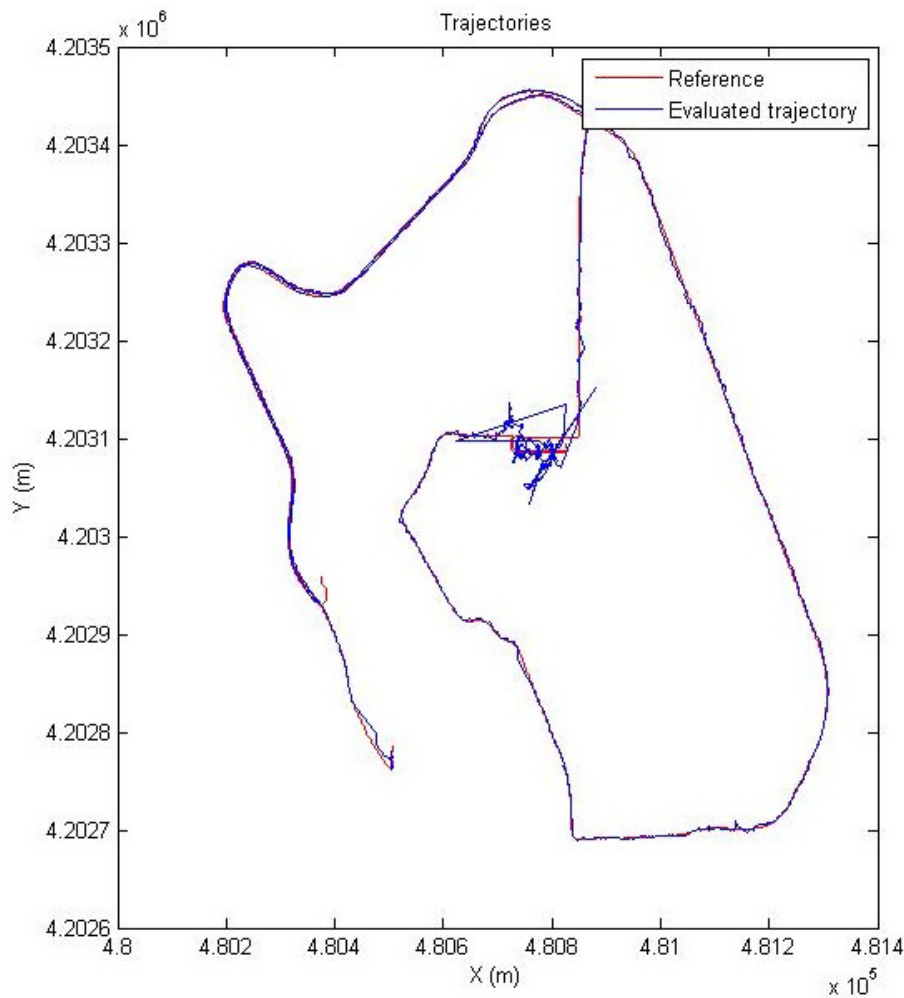
Τα ιστογράμματα των τιμών της ορθότητας της τροχιάς *u-blox SPP* παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση και υψηλές συχνότητες εμφάνισης τιμών μακριά από τη μηδενική τιμή που αντιπροσωπεύει την ταύτιση με την τροχιά αναφοράς. Ο μέσος όρος των τιμών της ορθότητας (πράσινη γραμμή) κατά μήκος της τροχιάς είναι 10m ενώ εγκάρσια αυτής είναι 7m. Η τυπική απόκλιση των τιμών της ορθότητας (κυανές γραμμές) κατά μήκος της τροχιάς είναι 39m ενώ εγκάρσια αυτής είναι 37m.



Σχήμα 8.6: Ιστόγραμμα κατανομής ορθότητας κατά μήκος (αριστερά) και εγκάρσια (δεξιά) της διεύθυνσης κίνησης της τροχιάς αυτόνομης λύσης πλοήγησης *u-blox SPP*
Figure 8.6: Probability density histogram of positioning trueness along (left) and off (right) track for *u-blox SPP* trajectory

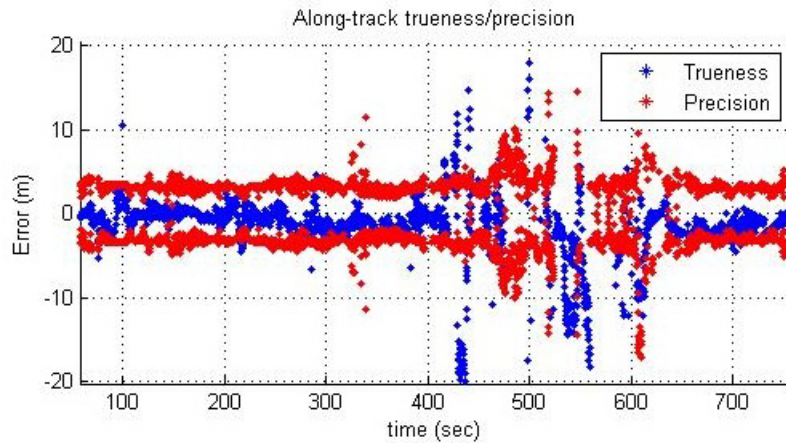
8.2. Λύση Εντοπισμού Δέκτη GNSS Χαμηλού Κόστους και Ελεύθερου Λογισμικού (*u-blox M8T*, *RTKLIB SPP* *RTKPOST*)

Στο Σχήμα 8.7 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η τροχιά αναφοράς και η τροχιά (*RTKLIB SPP*) του οχήματος ελέγχου όπως παράχθηκε από την επεξεργασία των πρωτογενών παρατηρήσεων του δορυφορικού δέκτη *u-blox M8T*, με χρήση του ελεύθερου λογισμικού *RTKLIB* σε απόλυτο εντοπισμό. Γίνεται αντιληπτό πως η παραγόμενη τροχιά παρουσιάζει μικρές αποκλίσεις με την τροχιά αναφοράς στο μεγαλύτερο μήκος της. Επιπλέον, οι περιοχές όπου δεν υπάρχει εντοπισμός είναι ελάχιστες. Παρατηρείται πως ακόμα και στην υπόγεια περιοχή έχουν υπολογιστεί κάποια σημεία της τροχιάς παρόλο που η ακρίβεια τους είναι κατά πολύ μειωμένη. Στις περιοχές με κτήρια και ψηλά δέντρα κατά μήκος της διαδρομής παρουσιάζεται διακύμανση στην ακρίβεια του εντοπισμού που αναγκάζει την παραγόμενη τροχιά να παρουσιάζει ανωμαλίες.

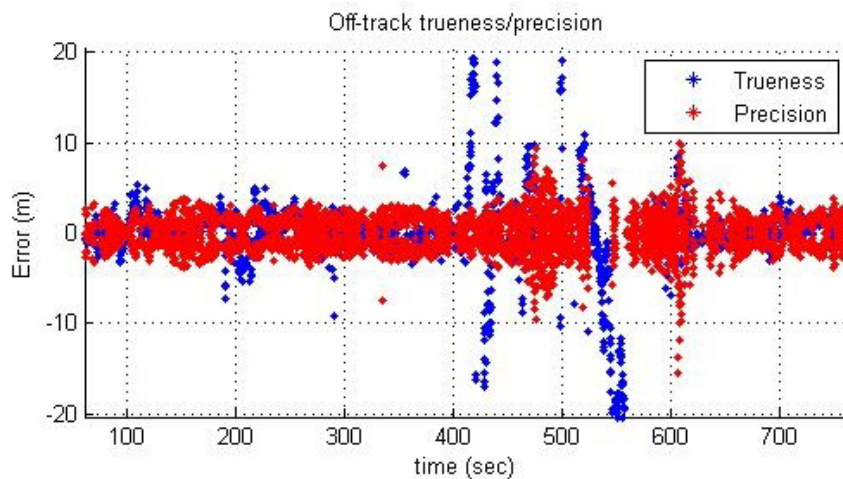


Σχήμα 8.7: Τροχιά οχήματος όπως προέκυψε από τη λύση απόλυτου εντοπισμού του δέκτη u-blox M8T και του λογισμικού RTKLIB (μπλε) και τροχιά αναφοράς (κόκκινο)
Figure 8.7: Vehicle trajectory obtained using u-blox M8T and RTKLIB absolute positioning solution (blue) and reference trajectory (red)

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η συμβιβαστικότητα και ορθότητα εντοπισμού του οχήματος κατά μήκος και εγκάρσια της διεύθυνσης κίνησης. Η διακύμανση των τιμών της ορθότητας των σημείων της τροχιάς είναι αρκετά μεγάλη και κυμαίνεται από ένα μέχρι και είκοσι μέτρα. Ο κύριος όγκος των τιμών της ορθότητας βρίσκεται εντός των ορίων των τιμών της συμβιβαστικότητας που έχει υπολογίσει το λογισμικό για τα σημεία της τροχιάς. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι το λογισμικό έχει παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα. Ακόμα τα διαστήματα που ο εντοπισμός δεν έχει πραγματοποιηθεί είναι ελάχιστα με τη διαθεσιμότητα να φθάνει στο 95%.

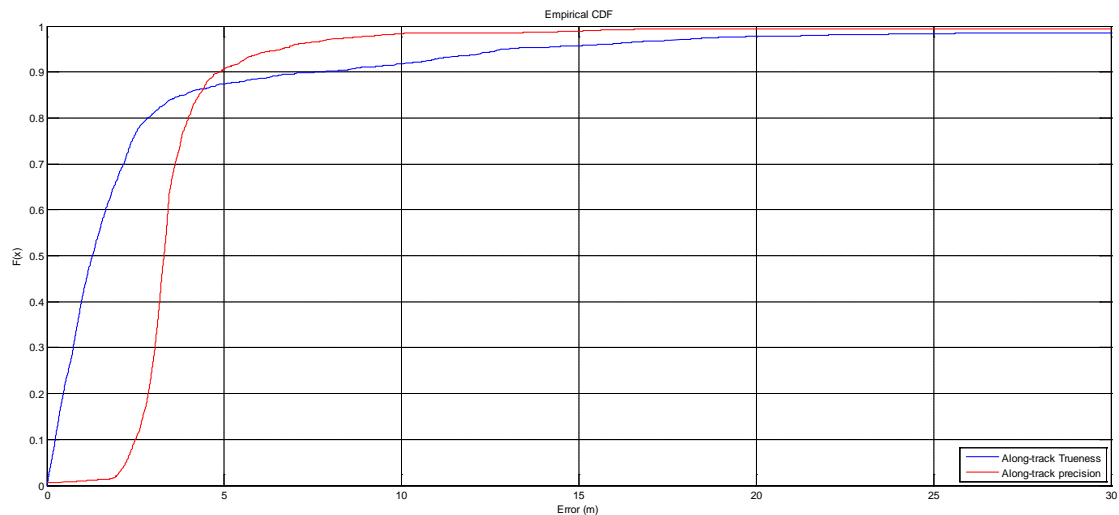


Σχήμα 8.8: Κατά μήκος συμβιβαστότητα και ορθότητα εντοπισμού δέκτη u-blox M8T όπως προέκυψε από την λύση απόλυτου εντοπισμού με χρήση του λογισμικού RTKLIB
Figure 8.8: Along track precision and trueness time series obtained for the u-blox M8T and RTKLIB SPP position solutions

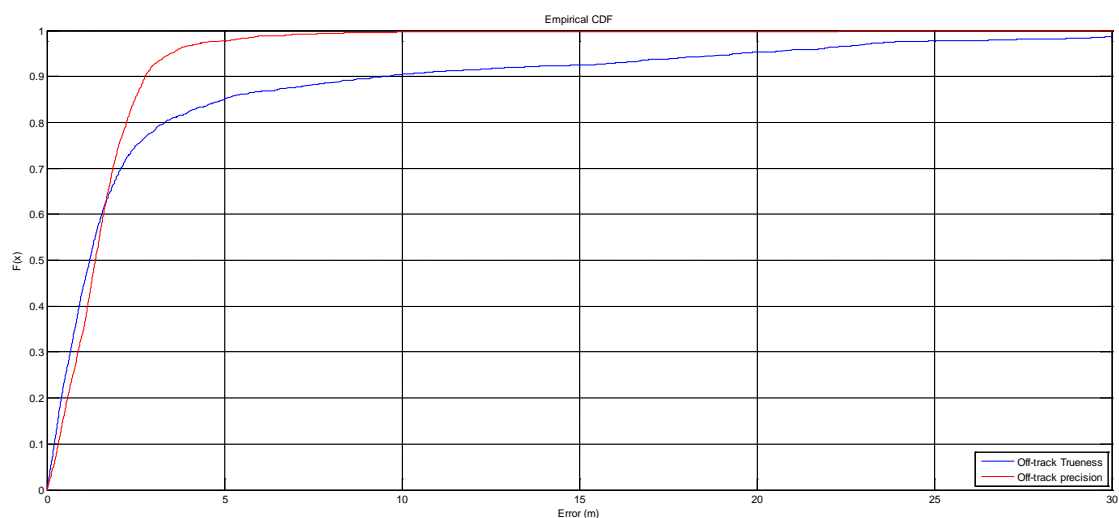


Σχήμα 8.9: Εγκάρσια συμβιβαστότητα και ορθότητα εντοπισμού δέκτη u-blox M8T όπως προέκυψε από τη λύση απόλυτου εντοπισμού με χρήση του λογισμικού RTKLIB
Figure 8.9: Off track precision and trueness time series obtained for the u-blox M8T and RTKLIB SPP position solutions

Τα Σχήματα 8.10 και 8.11 παρουσιάζουν το ποσοστό εμφάνισης των τιμών συμβιβαστότητας και ορθότητας των σημείων της τροχιάς. Το 85% των σημείων κατά μήκος και εγκάρσια της τροχιάς παρουσιάζει τιμή ορθότητας κάτω των 5m.

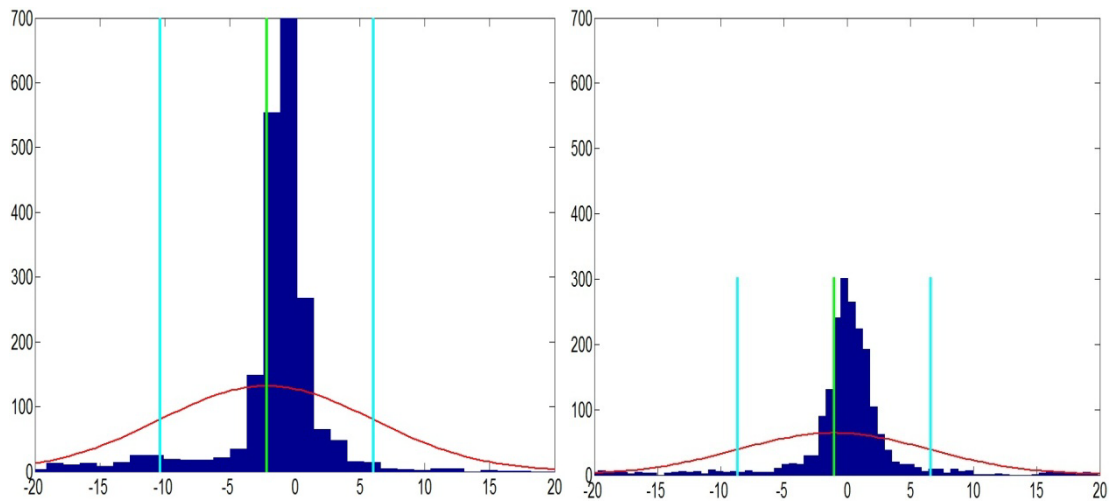


Σχήμα 8.10: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής συμβιβαστότητας και ορθότητας κατά μήκος της διεύθυνσης κίνησης της τροχιάς u-blox M8T, RTKLIB SPP
Figure 8.10: Cumulative distribution of positioning precision and trueness for u-blox M8T, RTKLIB SPP trajectory along track direction



Σχήμα 8.11: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής συμβιβαστότητας και ορθότητας εγκάρσια της διεύθυνσης κίνησης της τροχιάς u-blox M8T, RTKLIB SPP
Figure 8.11: Cumulative distribution of positioning precision and trueness for u-blox M8T, RTKLIB SPP trajectory off track direction

Τα ιστογράμματα των τιμών της ορθότητας της τροχιάς *u-blox M8T, RTKLIB SPP* παρουσιάζουν πολύ μικρή διακύμανση και υψηλές συχνότητες εμφάνισης τιμών κοντά στη μηδενική τιμή που αντιπροσωπεύει την ταύτιση με την τροχιά αναφοράς. Ο μέσος όρος των τιμών της ορθότητας (πράσινη γραμμή) κατά μήκος της τροχιάς είναι -2m ενώ εγκάρσια αυτής είναι -1m. Η τυπική απόκλιση των τιμών της ορθότητας (κυανές γραμμές) κατά μήκος της τροχιάς είναι 8m ενώ εγκάρσια αυτής είναι 7m.

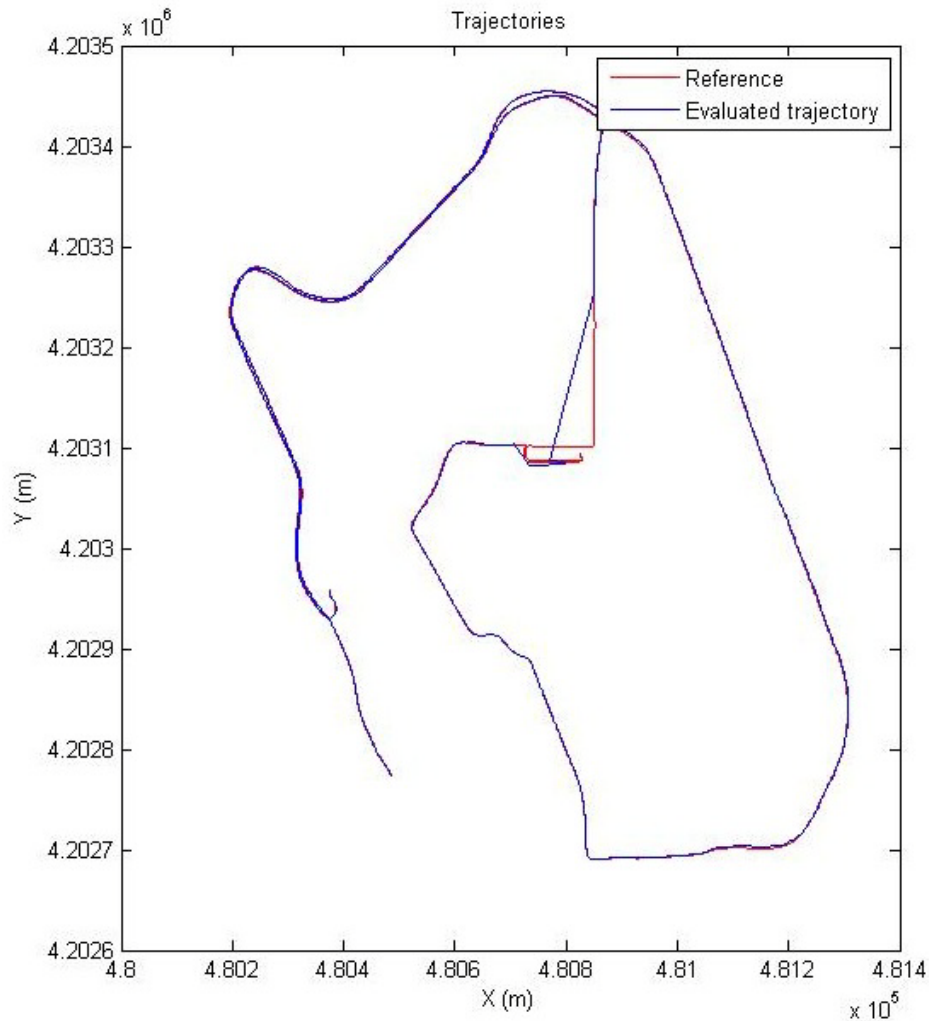


Σχήμα 8.12: Ιστόγραμμα κατανομής ορθότητας κατά μήκος (αριστερά) και εγκάρσια (δεξιά) της διεύθυνσης κίνησης της τροχιάς u-blox M8T, RTKLIB SPP

Figure 8.12: Probability density histogram of positioning trueness along (left) and off (right) track for u-blox M8T, RTKLIB SPP trajectory

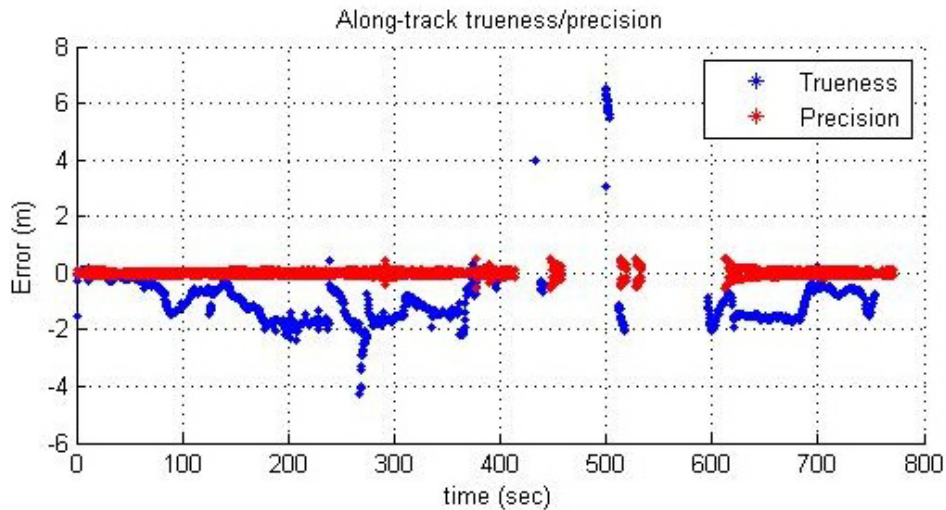
8.3. Λύση Εντοπισμού Δέκτη GNSS Χαμηλού Κόστους και Ελεύθερου Λογισμικού (u-blox M8T, RTKLIB RTK-GNSS RTKNAVI)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται η τροχιά (RTK-GNSS) του οχήματος όπως προέκυψε από τη λύση σχετικού εντοπισμού, με τη χρήση του δέκτη *u-blox M8T* και του λογισμικού *RTKLIB* και η τροχιά αναφοράς. Από το Σχήμα 8.13 συνάγεται ότι οι πρωτογενείς μετρήσεις φάσεων του φέροντος κύματος, μέσω της επεξεργασίας τους από το λογισμικό *RTKLIB* οδηγούν σε ιδιαίτερα ικανοποιητική λύση. Μικρές αποκλίσεις από την τροχιά αναφοράς παρατηρούνται σε διάφορα σημεία που η ορατότητα στον δορυφορικό σχηματισμό είναι περιορισμένη. Ωστόσο, οι περιοχές που δεν υπάρχει λύση εντοπισμού είναι αρκετές και σε μερικές περιπτώσεις μεγάλης διάρκειας με χαρακτηριστικό παράδειγμα την περιοχή του υπόγειου τμήματος. Σε αυτό το τμήμα προκύπτει λύση κακής ποιότητας εντοπισμού, για κάποια μόνο ελάχιστα σημεία της τροχιάς. Στις περιοχές με κτήρια και ψηλά δέντρα κατά μήκος της διαδρομής η διακύμανση στην ακρίβεια του εντοπισμού είναι μικρή εφόσον δεν διακοπεί, πράγμα που κάνει την παραγόμενη τροχιά να μην παρουσιάζει ιδιαίτερες ανωμαλίες.

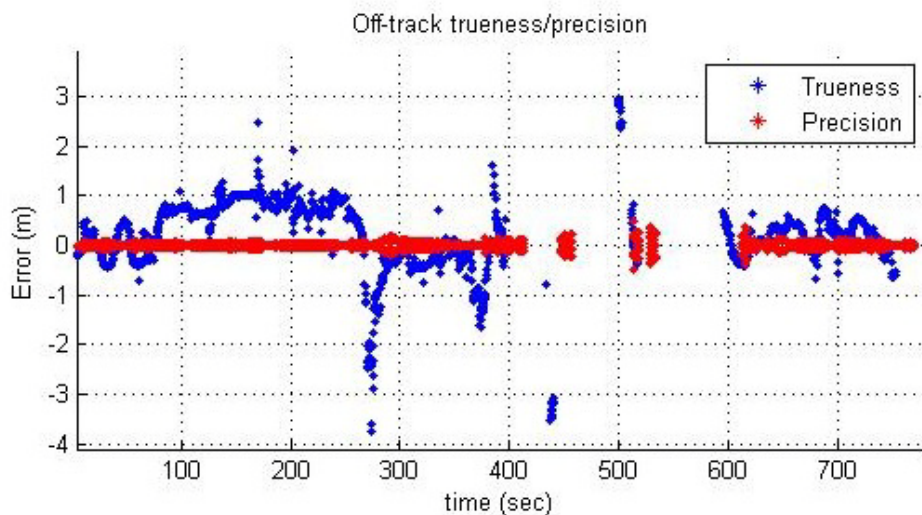


Σχήμα 8.13: Τροχιά οχήματος όπως προέκυψε από τη λύση σχετικού εντοπισμού του δέκτη u-blox M8T και του λογισμικού RTKLIB (μπλε) και τροχιά αναφοράς (κόκκινο)
Figure 8.13: Vehicle trajectory obtained using u-blox M8T and RTKLIB relative positioning solution (blue) and reference trajectory (red)

Ακολουθεί η κατά μήκος και εγκάρσια συμβιβαστότητα και ορθότητα της τροχιάς. Επισημαίνεται ότι, η διακύμανση των τιμών της ορθότητας της λύσης εντοπισμού είναι μεταξύ λίγων εκατοστών και φθάνει τα 2 m. Σε λίγες περιπτώσεις, μετά από διακοπή της λύσης εντοπισμού ή στο υπόγειο τμήμα, η διακύμανση ανέρχεται έως 6 m. Η συντριπτική πλειοψηφία των τιμών ορθότητας βρίσκεται εκτός των πλαισίων των τιμών της συμβιβαστότητας που έχει υπολογίσει το λογισμικό *RTKLIB* για τα σημεία της τροχιάς. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι το υπόψη λογισμικό αδυνατεί να παραγάγει ρεαλιστικά αποτελέσματα. Τέλος, τα διαστήματα που ο εντοπισμός δεν έχει πραγματοποιηθεί είναι συχνά και σε αρκετές περιπτώσεις μεγάλα με τη διαθεσιμότητα να φθάνει στο 75%.

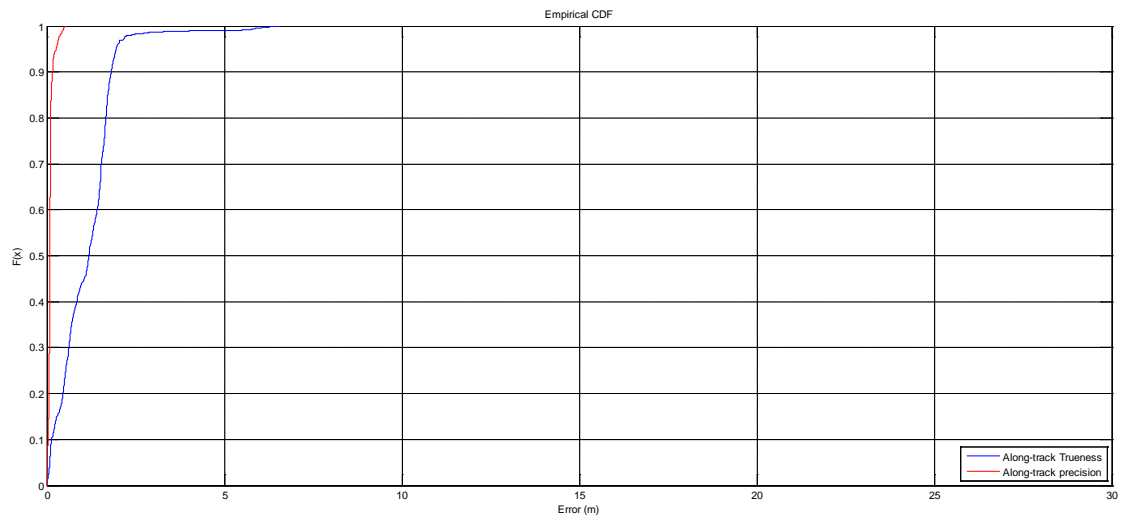


Σχήμα 8.14: Κατά μήκος συμβιβαστότητα και ορθότητα εντοπισμού δέκτη u-blox M8T όπως προέκυψε από τη λύση σχετικού εντοπισμού με χρήση του λογισμικού RTKLIB
Figure 8.14: Along track precision and trueness time series obtained for the u-blox M8T and RTKLIB RTK position solutions

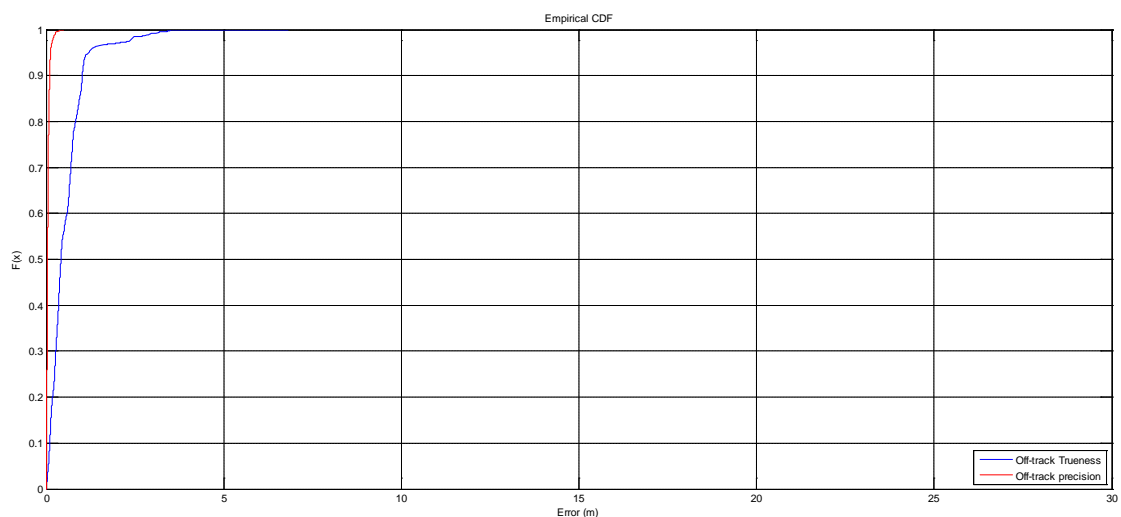


Σχήμα 8.15: Εγκάρσια συμβιβαστότητα και ορθότητα εντοπισμού δέκτη u-blox M8T όπως προέκυψε από τη λύση σχετικού εντοπισμού με χρήση του λογισμικού RTKLIB
Figure 8.15: Off track precision and trueness time series obtained for the u-blox M8T and RTKLIB RTK position solutions

Το ποσοστό εμφάνισης των τιμών συμβιβαστότητας και ορθότητας των σημείων της τροχιάς φαίνεται στα Σχήματα 8.16 και 8.17. Το 90% των σημείων κατά μήκος και εγκάρσια της τροχιάς παρουσιάζει τιμή ορθότητας κάτω των δύο μέτρων.

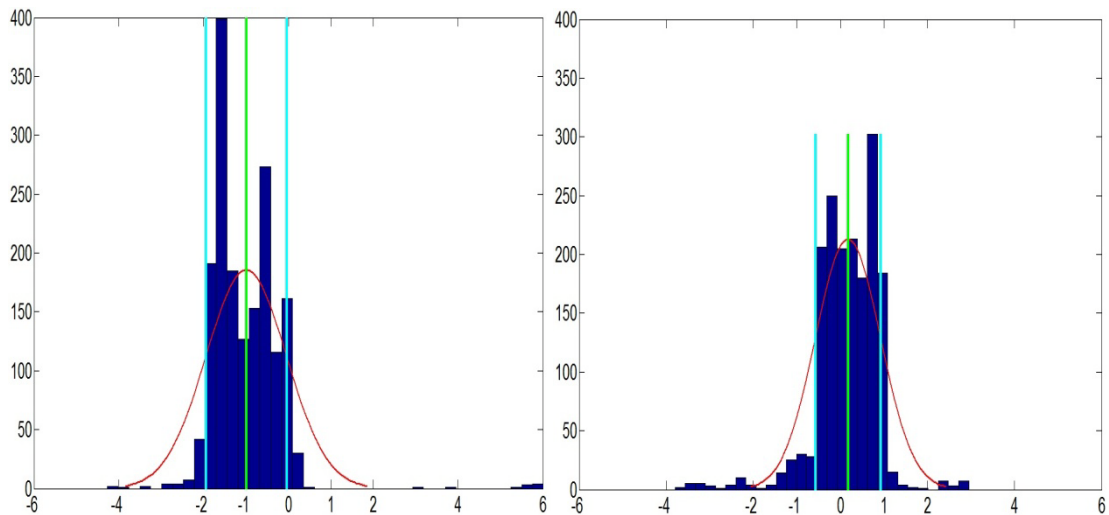


Σχήμα 8.16: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής συμβιβαστότητας και ορθότητας κατά μήκος της διεύθυνσης κίνησης της τροχιάς u-blox M8T, RTKLIB RTK
Figure 8.16: Cumulative distribution of positioning precision and trueness for u-blox M8T, RTKLIB RTK trajectory along track direction



Σχήμα 8.17: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής συμβιβαστότητας και ορθότητας εγκάρσια της διεύθυνσης κίνησης της τροχιάς u-blox M8T, RTKLIB RTK
Figure 8.17: Cumulative distribution of positioning precision and trueness for u-blox M8T, RTKLIB RTK trajectory off track direction

Τα ιστογράμματα των τιμών της ορθότητας της τροχιάς *u-blox M8T, RTKLIB RTK* παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση αλλά υψηλές συχνότητες εμφάνισης τιμών κοντά από τη μηδενική τιμή που αντιπροσωπεύει την ταύτιση με την τροχιά αναφοράς. Ο μέσος όρος των τιμών της ορθότητας (πράσινη γραμμή) κατά μήκος της τροχιάς είναι -1m ενώ εγκάρσια αυτής είναι 0,20m. Η τυπική απόκλιση των τιμών της ορθότητας (κυανές γραμμές) κατά μήκος και εγκάρσια της τροχιάς είναι 1m.



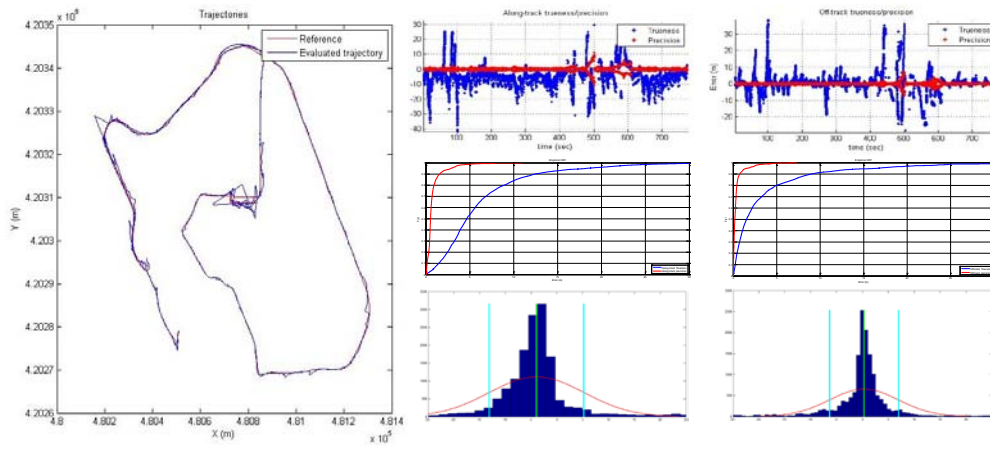
Σχήμα 8.18: Ιστόγραμμα κατανομής ορθότητας κατά μήκος (αριστερά) και εγκάρσια (δεξιά) της διεύθυνσης κίνησης της τροχιάς u-blox M8T, RTKLIB RTK

Figure 8.18: Probability density histogram of positioning trueness along (left) and off (right) track for u-blox M8T, RTKLIB RTK trajectory

8.4. Λύση Εντοπισμού Δέκτη GNSS Χαμηλού Κόστους και Συστήματος GNSS/INS Χαμηλού Κόστους (u-blox M8T, SPATIAL RTK-GNSS/MEMS-IMU)

Επιπρόσθετα των λύσεων εντοπισμού που επιχειρήθηκαν με τις τεχνικές που παρουσιάστηκαν στις Ενότητες 8.1 έως 8.3, σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προήλθαν με σύντηξη της λύσης RTK GNSS του δορυφορικού δέκτη *u-blox M8T*, όπως υπολογίστηκε από το λογισμικό *RTKLIB* με τις αδρανειακές μετρήσεις *MEMS-IMU* του συστήματος *SPATIAL* της *Advanced Navigation®*.

Τα αποτελέσματα που παρατίθενται σε αυτή την ενότητα αποτελούν κατ' αρχάς προσπάθεια προς αυτή την κατεύθυνση. Ωστόσο, εγγενή προβλήματα στην εφαρμογή της διαδικασίας δεν επιτρέπουν την εξαγωγή ουσιαστικών συμπερασμάτων. Συγκεκριμένα, η τροφοδότηση της λύσης RTK GNSS στο φίλτρο επεξεργασίας του συστήματος GNSS/INS *SPATIAL* έγινε με χρήση του πρωτόκολλου επικοινωνίας *NMEA*. Το πρωτόκολλο αυτό μεταξύ άλλων, παρέχει στοιχεία της επίλυσης του σχετικού εντοπισμού, όχι όμως την ακρίβεια των θέσεων έτσι όπως υπολογίστηκαν από τη μέθοδο RTK GNSS. Συγκεκριμένα, προσδιορίζει κατά πόσο το εκάστοτε σημείο της τροχιάς κίνησης υπολογίστηκε με γνώση των ακέραιων ασαφειών φάσης (*fixed solution*) ή όχι. Ωστόσο, δεν παρέχει την ακρίβεια υπολογισμού κάθε σημείου. Το γεγονός αυτό οδήγησε σε αποσταθεροποίηση του φίλτρου επεξεργασίας του συστήματος GNSS/INS *SPATIAL* με αποτέλεσμα, τη μη φυσιολογική του συμπεριφορά και χαμηλή απόδοσή του.



Σχήμα 8.19: Στοιχεία επεξεργασίας τροχιάς RTK-GNSS/MEMS-IMU
Figure 8.19: Process information of RTK-GNSS/MEMS-IMU trajectory

9.1 Συμπεράσματα

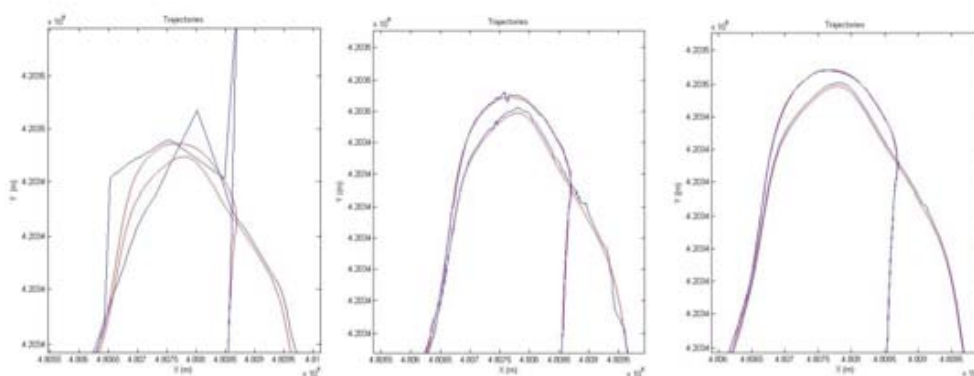
Η τροχιά *u-blox SPP*, παρουσιάζει μεγάλες αποκλείσεις από την τροχιά αναφοράς στο μεγαλύτερο μήκος της. Μόλις το 45% των σημείων κατά μήκος της τροχιάς παρουσιάζει τιμές ορθότητας μικρότερες από 10m, ενώ η αντίστοιχη τιμή σε διεύθυνση εγκάρσια της κίνησης ανέρχεται στο 60%. Παρουσιάζονται μεγάλες αποκλείσεις και σε τμήματα που η ορατότητα στον δορυφορικό σχηματισμό δεν επηρεάζεται. Το γεγονός αυτό, οδηγεί στο συμπέρασμα πως η λειτουργία του εσωτερικού λογισμικού του δέκτη *ublox M8T*, επηρεάστηκε από τη σύνδεση του δέκτη με την γεωδαιτικού τύπου κεραία, αντί αυτής που παρέχει η κατασκευάστρια εταιρία. Παρόλο που η γεωδαιτικού τύπου κεραία προστατεύει από την παρακολούθηση λιγότερο ποιοτικών δορυφορικών σημάτων, φαίνεται πως το εσωτερικό λογισμικό του δέκτη έχει ρυθμιστεί έτσι ώστε να κάνει χρήση όλης της διαθέσιμης πληροφορίας και να τη φιλτράρει ανάλογα. Παρ' όλα αυτά, η διαθεσιμότητα του εντοπισμού φθάνει στο 97%. Συμπερασματικά, γίνεται αντιληπτό πως ο συγκεκριμένος συνδυασμός εξοπλισμού-λογισμικού δεν προσφέρει βελτίωση του απόλυτου εντοπισμού ως προς την ορθότητα, την συμβιβαστότητα ή την διαθεσιμότητα, σε σχέση με τον απόλυτο εντοπισμό που παρουσιάζουν οι τυπικοί συνδυασμοί χαμηλού κόστους (δέκτης-κεραία-λογισμικό που παρέχει η εκάστοτε εταιρία). Επομένως, δεν ενδείκνυται η χρήση του σε εφαρμογές συστημάτων έξυπνων μεταφορών, καθώς η χρήση κεραίας γεωδαιτικού τύπου ανεβάζει το κόστος χωρίς να προσφέρει βελτίωση του εντοπισμού.

Η τροχιά *RTKLIB SPP*, παρουσιάζει μικρές αποκλίσεις από την τροχιά αναφοράς στο μεγαλύτερο μήκος της. Το 85% των σημείων κατά μήκος και εγκάρσια της τροχιάς παρουσιάζει τιμή ορθότητας κάτω των 5m. Ο κύριος όγκος των τιμών της ορθότητας βρίσκεται εντός των ορίων των τιμών της συμβιβαστότητας γεγονός που δείχνει ότι το λογισμικό έχει παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα. Η διαθεσιμότητα του εντοπισμού φθάνει στο 95%. Συμπερασματικά, ο συγκεκριμένος συνδυασμός εξοπλισμού-λογισμικού προσφέρει ικανοποιητική υλοποίηση του απόλυτου εντοπισμού ως προς την ορθότητα, τη συμβιβαστότητα και τη διαθεσιμότητα, χωρίς όμως να διαφέρει ουσιαστικά σε σχέση με τον απόλυτο εντοπισμό που παρουσιάζουν οι τυπικοί συνδυασμοί χαμηλού κόστους (δέκτης-κεραία-λογισμικό που παρέχει η εκάστοτε εταιρία). Επομένως, φαίνεται πως το ελεύθερο λογισμικό και ο χαμηλού κόστους δέκτης, μπορούν να φέρουν εις πέρας εφαρμογές συστημάτων έξυπνων μεταφορών που δεν απαιτούν υψηλή ακρίβεια όπως υπηρεσίες καθοδήγησης προορισμού, διαχείριση στόλου, ανάκτηση κλεμμένου οχήματος κ.α. Όμως, η χρήση γεωδαιτικού τύπου κεραίας δεν προσέφερε κάποια

ουσιαστική βελτίωση στην ποιότητα του εντοπισμού και επομένως δεν ενδείκνυται λόγω αύξησης του κόστους.

Η τροχιά *RTK-GNSS*, παρουσιάζει πολύ μικρές αποκλίσεις από την τροχιά αναφοράς στο μεγαλύτερο μήκος της. Το 90% των σημείων κατά μήκος και εγκάρσια της τροχιάς παρουσιάζει τιμή ορθότητας κάτω των 2m. Η συντριπτική πλειοψηφία των τιμών ορθότητας βρίσκεται εκτός των πλαισίων των τιμών της συμβιβαστότητας για τα σημεία της τροχιάς. Το γεγονός αυτό, δείχνει ότι το λογισμικό δεν απέδωσε ρεαλιστικά αποτελέσματα. Αρκετά συχνή ήταν η διακοπή του εντοπισμού, με την διαθεσιμότητα να φθάνει στο 75%. Το πρόβλημα αυτό βεβαίως, παρουσιάζεται και στους γεωδαιτικού τύπου δέκτες που χρησιμοποιούνται μαζί με εμπορικά λογισμικά. Συμπερασματικά, γίνεται αντιληπτό πως ο συγκεκριμένος συνδυασμός εξοπλισμού-λογισμικού προσφέρει ικανοποιητική υλοποίηση του σχετικού εντοπισμού ως προς την ορθότητα και τη διαθεσιμότητα σε σχέση με τον σχετικό εντοπισμό που παρουσιάζουν οι τυπικοί συνδυασμοί (δέκτης-κεραία-λογισμικό που παρέχει η εκάστοτε εταιρία), με βασικό πλεονέκτημα τη μεγάλη μείωση του κόστους. Επομένως, ενδείκνυται για τη χρησιμοποίησή του σε εφαρμογές συστημάτων έξυπνων μεταφορών που έχουν μεγαλύτερες απαιτήσεις ακρίβειας, όπως η χρέωση χρήσης δρόμου, αλλά όχι μεγάλες απαιτήσεις διαθεσιμότητας.

Στο Σχήμα 9.1, απεικονίζεται ένα χαρακτηριστικό τμήμα των τροχιών *u-blox SPP*, *RTKLIB SPP* και *RTK-GNSS*, σε σχέση με την τροχιά αναφοράς, που αναδεικνύει τις ποιοτικές διαφορές τους. Η διαφορά ανάμεσα στις τροχιές *u-blox SPP*, *RTKLIB SPP*, όπου και οι δύο παρήχθησαν με τη μέθοδο του απόλυτου εντοπισμού και τις ίδιες πρωτογενείς παρατηρήσεις, είναι προφανής. Αποτυπώνει την αδυναμία του εσωτερικού λογισμικού του δέκτη, να διαχειριστεί παρατηρήσεις από γεωδαιτικού τύπου κεραίες, αλλά και την ικανότητα του ελεύθερου λογισμικού, να παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα. Η διαφορά ανάμεσα στις τροχιές *RTKLIB SPP*, *RTK-GNSS* αναδεικνύει την υπεροχή της μεθόδου σχετικού εντοπισμού όσον αφορά την ακρίβεια, αλλά και την ικανότητα επιτυχούς πραγματοποίησης της μεθόδου, με μειωμένο κόστος.



Σχήμα 9.1: Τροχιές *u-blox SPP*, *RTKLIB SPP*, *RTK-GNSS* σε σχέση με τροχιά αναφοράς
Figure 9.1: *u-blox SPP*, *RTKLIB SPP*, *RTK-GNSS* trajectories with respect to reference trajectory

Η τροχιά *RTK-GNSS/MEMS-IMU*, παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις από την τροχιά αναφοράς στο μεγαλύτερο μήκος της. Η χρήση του πρωτόκολλου επικοινωνίας *NMEA* προκειμένου να τροφοδοτηθεί η λύση RTK στο GNSS/INS σύστημα *Advance Navigation SPATIAL*, οδήγησε στην αποσταθεροποίηση του φίλτρου του συστήματος, διότι το πρωτόκολλο *NMEA* παρέχει στοιχεία της επίλυσης του σχετικού εντοπισμού, όχι όμως την ακρίβεια των θέσεων έτσι όπως υπολογίστηκαν από τη μέθοδο RTK GNSS. Ως αποτέλεσμα, η παραγωγή της τροχιάς *RTK-GNSS/MEMS-IMU*, πραγματοποιήθηκε με εξαιρετικά χαμηλή απόδοση, πράγμα που δεν επιτρέπει την εξαγωγή ουσιαστικών συμπερασμάτων ως προς την ορθότητα, συμβιβαστικότητα και διαθεσιμότητα του συστήματος. Συμπερασματικά, δεν ενδείκνυται η τροφοδότηση της λύσης RTK στο σύστημα, με τη χρήση του πρωτόκολλου *NMEA*.

9.2 Προτάσεις για περεταίρω διερεύνηση

Δεδομένων των αποτελεσμάτων της εργασίας κρίνεται δόκιμο να διερευνηθεί περεταίρω η λειτουργία και συνεργασία των χαμηλού κόστους συστημάτων εντοπισμού και ελεύθερων λογισμικών. Η παραγωγή των τροχιών *u-blox SPP*, *RTKLIB SPP* και *RTK-GNSS* έχοντας συνδέσει τον δέκτη με χαμηλού κόστους κεραία, θα παρείχε πολύτιμη πληροφορία για τη συμπεριφορά του δέκτη και την ικανότητα πραγματοποίησης των μεθόδων απόλυτου και RTK εντοπισμού, με ακόμα χαμηλότερο κόστος. Ακόμα, η διοχέτευση της λύσης RTK με binary αρχείο στο GNSS/INS σύστημα *Advance Navigation SPATIAL*, θα παρείχε πολύτιμη πληροφορία για τη λειτουργία των χαμηλού κόστους ολοκληρωμένων συστημάτων εντοπισμού.

Ανάλογα με τις απαιτήσεις μίας εφαρμογής, ο GNSS δέκτης που θα επιλεγεί να τη φέρει εις πέρας, θα πρέπει να έχει συγκεκριμένες επιδόσεις συνηθέστερα ως προς την ακρίβεια και διαθεσιμότητα του εντοπισμού. Όταν η εφαρμογή αποκτά κρίσιμο χαρακτήρα όπως αποφυγή σύγκρουσης, υποβοήθηση οδήγησης, διαχείριση έκτακτων συμβάντων και μεταφορά επικινδύνων φορτίων κ.α, η ακεραιότητα (*integrity*) του εντοπισμού, αποτελεί τη σημαντικότερη παράμετρο για την επιλογή του κατάλληλου συστήματος που θα τον παρέχει. Έτσι, κρίνεται απαραίτητο να διερευνηθεί η ακεραιότητα του εντοπισμού, που παρέχουν τα δορυφορικά συστήματα εντοπισμού χαμηλού κόστους.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Δεληκαράογλου Δ. (2015), “Σημειώσεις Μαθήματος Αναλυτικές Μέθοδοι στη Γεωπληροφορική”, ΕΜΠ
- Παραδείσης Δ. (2000), “Σημειώσεις Δορυφορικής Γεωδαισίας”, Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου ΕΜΠ
- Φωτίου Α., Πικριδάς Χ. (2006), “GPS και Γεωδαιτικές Εφαρμογές”, Εκδόσεις ΖΗΤΗ
- Cramer M. (1997), “GPS/INS Integration”, Photogrammetric Week
- SaPPART White paper (2015), “Satellite Positioning Performance Assessment for Road Transport”, COST Action
- El-Rabbany A. (2006), “Introduction to GPS The Global Positioning System”, Artech House, 2nd Edition
- FIG Commission 5 Publication (2010), “Cost Effective GNSS Positioning Techniques”, FIG PUBLICATION NO 49
- Gikas V. et al. (2013), “Cooperative Positioning using GPS, Low-cost INS and Dedicated Short Range Communications”, The Institute of Navigation
- Gikas V. (1996), “Least Squares Filtering and Testing for Positioning and Quality Control during 3D Marine Seismic Surveys”, PhD thesis, University of Newcastle upon Tyne
- Gikas V., Perakis H. (2016), “Rigorous performance evaluation of smartphone GNSS/IMU sensors for ITS applications”, MDPI Sensors
- Grewal M., Weill L., Andrews A. (2007), “Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration”, Wiley, 2nd Edition
- Groves P. (2008), “Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems”, Artech House
- Kelly A. (2005), “Mobile Robot Systems, Position Estimation 4: Inertial Navigation Systems”
- Kennedy S., Hamilton J., Martell H., “Architecture and System Performance of SPAN-NovAtel’s GPS/INS Solution”, NovAtel Inc.
- Kennedy S., Hamilton J., Martell H. (2006), “GPS/INS Integration with the iMAR-FSAS IMU”, NovAtel Inc.
- Noureldin A., Karamat T., Geogry J. (2013), “Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their Integration”, Springer
- Perakis H., Clausen P., Gikas V., Gillieron P-Y., Spyropoulou I. (2015), “Positioning Accuracy of Vehicle Trajectories for Road Applications”, ITS World Congress
- Public Release Version (1996), “NAVSTAR GPS USER EQUIPMENT INTRODUCTION”
- Scherzinger B., “Precise Robust Positioning with Inertial/GPS RTK”, Applanix Corporation
- Schmidt G., Phillips R. (2010), “INS/GPS Integration Architectures”, RTO Lecture series
- Wells D. et al. (1986), “GUIDE TO GPS POSITIONING”, CANADIAN GPS ASSOCIATES
- Welch G., Bishop G. (2001), “An Introduction to the Kalman Filter”, ACM Inc.

Σχήμα 1.α: Σχηματική απεικόνιση των βημάτων πειραματικής διερεύνησης της εργασίας.....	9
Σχήμα 1.β: Σχηματική απεικόνιση των βημάτων πειραματικής διερεύνησης της εργασίας.....	10
Σχήμα 1.1: Κατηγορίες δορυφορικών δεκτών εντοπισμού(Πηγή: Schwieger, 2010)	14
Σχήμα 1.2: Δέκτης GNSS χαμηλού (αριστερά) και υψηλού (δεξιά) κόστους	14
Σχήμα 1.3: Κεραίες GNSS χαμηλού (αριστερά) και υψηλού (δεξιά) κόστους	15
Σχήμα 1.4: Κατηγορίες συστημάτων INS (Πηγή: tut.fi)	16
Σχήμα 1.5: Διαφορά μεταξύ συμβιβαστότητας και ορθότητας εντοπισμού (Πηγή:Perakis et al 2015)	17
Σχήμα 2.1: Τμήματα συστημάτων GNSS (Πηγή: Charles Jeffrey)	20
Σχήμα 2.2: Γεωμετρία δορυφορικού σχηματισμού (Πηγή: Ahmed El Rabbany 2006)	29
Σχήμα 2.3: Απόλυτος εντοπισμός (Πηγή: Leica Geosystems)	31
Σχήμα 2.4: Σχετικός εντοπισμός (Πηγή: Leica Geosystems).....	32
Σχήμα 2.5: Απλές, διπλές και τριπλές διαφορές (Πηγή: GPS Tutor 1998)	33
Σχήμα 2.6: Τεχνική σχετικού εντοπισμού σε πραγματικό χρόνο (Πηγή: Ahmed El Rabbany 2006)	34
Σχήμα 3.1: Σχέση μεταξύ συστημάτων αναφοράς (Πηγή: Noureldin et al 2013)	40
Σχήμα 3.2: Γωνίες στροφής κατά τους άξονες Z,X,Y (Πηγή: Noureldin et al 2013).....	41
Σχήμα 3.3: Αδρανειακή μονάδα (IMU) (Πηγή: Noureldin et al 2013).....	43
Σχήμα 3.4: Κύρια μέρη συστήματος INS (Πηγή: Noureldin et al 2013).....	43
Σχήμα 3.5: Σύστημα INS σταθερής πλατφόρμας (Πηγή: globalspec)	44
Σχήμα 3.6: Επίδραση σφαλμάτων INS κατά το πέρας του χρόνου (Πηγή: Alonzo Kelly 2005).....	46
Σχήμα 4.1: Πρόβλεψη, φιλτράρισμα και εξομάλυνση (Πηγή: Β. Γκίκας 1996)	51
Σχήμα 4.2: Χαλαρός βαθμός συνεργασίας (Πηγή: Noureldin et al 2013).....	55
Σχήμα 4.3: Στενός βαθμός συνεργασίας (Πηγή: Noureldin et al 2013)	55
Σχήμα 4.4: Επίδοση χαλαρού βαθμού συνεργασίας (Πηγή: Grewal 2007)	57
Σχήμα 4.5: Επίδοση στενού βαθμού συνεργασίας (Πηγή: Grewal 2007)	58
Σχήμα 5.1: Δορυφορικός δέκτης Leica ATX 1230 (Πηγή: Leica Geosystems).....	59
Σχήμα 5.2: Δορυφορικός δέκτης NovAtel ProPak-V3 (Πηγή: NovAtel®).....	60
Σχήμα 5.3: Κεραία δορυφορικού εντοπισμού Pinwheel 702-GG (Πηγή: NovAtel®).....	61
Σχήμα 5.4: Αδρανειακή μονάδα iMAR iIMU-FSAS (Πηγή: NovAtel®).....	62
Σχήμα 5.5: Λογισμικό συλλογής δεδομένων NovAtel Connect (Πηγή: NovAtel®).....	63
Σχήμα 5.6: Λογισμικό επεξεργασίας δεδομένων Inertial Explorer (Πηγή: NovAtel®)	64
Σχήμα 5.7: Ολοκληρωμένο σύστημα εντοπισμού SPATIAL (Πηγή: Advanced Navigation).....	65
Σχήμα 5.8: Λογισμικό συλλογής δεδομένων Spatial Manager (Πηγή: Advanced Navigation).....	67
Σχήμα 5.9: Δορυφορικός δέκτης u-blox EVK-M8/NEO-M8T (Πηγή: u-blox®)	68
Σχήμα 5.10: Λογισμικό συλλογής δεδομένων u-center (Πηγή: u-blox®)	69
Σχήμα 5.11: Λειτουργία εφαρμογών RTKLIB (Πηγή: RTKLIB).....	70
Σχήμα 5.12: Κατά μήκος και εγκάρσιο διάνυσμα συμβιβαστότητας (αριστερά) και ορθότητας (δεξιά) (Πηγή: Perakis et al 2015).....	71
Σχήμα 6.1: Περιοχή διεξαγωγής πειράματος (Πηγή: Google Earth)	73
Σχήμα 6.2: Τμήματα διαδρομής με ανοικτής, περιορισμένης λόγω δένδρων, περιορισμένης λόγω κτηρίων και καθόλου ορατότητας στον δορυφορικό σχηματισμό	73
Σχήμα 6.3: Αριθμός παρατηρούμενων δορυφόρων (αριστερά) και τιμές δείκτη PDOP (δεξιά)	74
Σχήμα 6.4: Σταθμός αναφοράς GNSS.....	75
Σχήμα 6.5: Κεραίες GNSS, αδρανειακή μονάδα SPAN και σύστημα GNSS/INS Advance Navigation SPATIAL επί του οχήματος.....	76
Σχήμα 6.6: Δορυφορικοί δέκτες NovAtel® και ublox® M8T.....	76
Σχήμα 6.7: Φορητοί υπολογιστές με λογισμικό συλλογής δεδομένων των δορυφορικών δεκτών	77
Σχήμα 6.8: Το όχημα συλλογής δεδομένων του πειράματος και γεωδαιτικός εξοπλισμός	77
Σχήμα 7.1: Εισαγωγή στοιχείων σταθμού αναφοράς και κινούμενου δέκτη GNSS	78
Σχήμα 7.2: Επίλυση δορυφορικών παρατηρήσεων με τη μέθοδο PPK	79
Σχήμα 7.3: Επιλογή τιμών παραμέτρων επίλυσης GNSS	79
Σχήμα 7.4: Επιλογή τιμών παραμέτρων GNSS επεξεργασίας	80

Σχήμα 7.5: Τροχιά οχήματος από τις μετρήσεις GNSS. Τα διακοπτόμενα τμήματα μπλε χρώματος αντιστοιχούν σε κίνηση του οχήματος με περιορισμένη ή ολοκληρωτική έλλειψη σήματος GNSS	81
Σχήμα 7.6: Οριζοντιογραφική ακρίβεια τροχιάς οχήματος από μετρήσεις GNSS	81
Σχήμα 7.7: Επεξεργασία GNSS/INS δεδομένων και επιλογή παραμέτρων επίλυσης.....	82
Σχήμα 7.8: Επιλογή τιμών παραμέτρων επεξεργασίας GNSS/INS	82
Σχήμα 7.9: Εφαρμογή αλγορίθμου εξομάλυνσης τροχιάς.....	83
Σχήμα 7.10: Τροχιά αναφοράς οχήματος ελέγχου όπως προέκυψε από επίλυση συστήματος GNSS/INS NovAtel SPAN	84
Σχήμα 7.11: Ακρίβεια εντοπισμού σε οριζοντιογραφία τροχιάς αναφοράς.....	84
Σχήμα 7.12: Επιλογή τιμών παραμέτρων λειτουργίας δέκτη GNSS u-blox M8T.....	85
Σχήμα 7.13: Επιλογή τιμών παραμέτρων και εκτέλεση SPP επεξεργασίας ελεύθερου λογισμικού RTKLIB	85
Σχήμα 7.14: Επιλογή παραμέτρων λειτουργίας λογισμικού RTKNAVI.....	86
Σχήμα 7.15: Ποιότητα λύσης εντοπισμού και λήψης δορυφορικού σήματος εφαρμογής RTKNAVI ..	87
Σχήμα 8.1: Τροχιά οχήματος όπως προέκυψε από τη λύση απόλυτου εντοπισμού του δέκτη χαμηλού κόστους u-blox M8T (μπλε) και τροχιά αναφοράς (κόκκινο)	89
Σχήμα 8.2: Κατά μήκος ορθότητα τροχιάς u-blox SPP	90
Σχήμα 8.3: Εγκάρσια ορθότητα τροχιάς u-blox SPP	90
Σχήμα 8.4: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής ορθότητας κατά μήκος της διεύθυνσης κίνησης της τροχιάς αυτόνομης λύσης πλοήγησης u-blox SPP	91
Σχήμα 8.5: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής ορθότητας εγκάρσια της διεύθυνσης κίνησης της τροχιάς αυτόνομης λύσης πλοήγησης u-blox SPP	91
Σχήμα 8.6: Ιστόγραμμα κατανομής ορθότητας κατά μήκος (αριστερά) και εγκάρσια (δεξιά) της διεύθυνσης κίνησης της τροχιάς αυτόνομης λύσης πλοήγησης u-blox SPP.....	92
Σχήμα 8.7: Τροχιά οχήματος όπως προέκυψε από τη λύση απόλυτου εντοπισμού του δέκτη u-blox M8T και του λογισμικού RTKLIB (μπλε) και τροχιά αναφοράς (κόκκινο)	93
Σχήμα 8.8: Κατά μήκος συμβιβαστότητα και ορθότητα εντοπισμού δέκτη u-blox M8T όπως προέκυψε από τη λύση απόλυτου εντοπισμού με χρήση του λογισμικού RTKLIB	94
Σχήμα 8.9: Εγκάρσια συμβιβαστότητα και ορθότητα εντοπισμού δέκτη u-blox M8T όπως προέκυψε από την λύση απόλυτου εντοπισμού με χρήση του λογισμικού RTKLIB.....	94
Σχήμα 8.10: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής συμβιβαστότητας και ορθότητας κατά μήκος της διεύθυνσης κίνησης της τροχιάς u-blox M8T, RTKLIB SPP	95
Σχήμα 8.11: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής συμβιβαστότητας και ορθότητας εγκάρσια της διεύθυνσης κίνησης της τροχιάς u-blox M8T, RTKLIB SPP	95
Σχήμα 8.12: Ιστόγραμμα κατανομής ορθότητας κατά μήκος (αριστερά) και εγκάρσια (δεξιά) της διεύθυνσης κίνησης της τροχιάς u-blox M8T, RTKLIB SPP	96
Σχήμα 8.13: Τροχιά οχήματος όπως προέκυψε από τη λύση σχετικού εντοπισμού του δέκτη u-blox M8T και του λογισμικού RTKLIB (μπλε) και τροχιά αναφοράς (κόκκινο).....	97
Σχήμα 8.14: Κατά μήκος συμβιβαστότητα και ορθότητα εντοπισμού δέκτη u-blox M8T όπως προέκυψε από τη λύση σχετικού εντοπισμού με χρήση του λογισμικού RTKLIB.....	98
Σχήμα 8.15: Εγκάρσια συμβιβαστότητα και ορθότητα εντοπισμού δέκτη u-blox M8T όπως προέκυψε από την λύση σχετικού εντοπισμού με χρήση του λογισμικού RTKLIB.....	98
Σχήμα 8.16: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής συμβιβαστότητας και ορθότητας κατά μήκος της διεύθυνσης κίνησης της τροχιάς u-blox M8T, RTKLIB RTK.....	99
Σχήμα 8.17: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής συμβιβαστότητας και ορθότητας εγκάρσια της διεύθυνσης κίνησης της τροχιάς u-blox M8T, RTKLIB RTK.....	99
Σχήμα 8.18: Ιστόγραμμα κατανομής ορθότητας κατά μήκος (αριστερά) και εγκάρσια (δεξιά) της διεύθυνσης κίνησης της τροχιάς u-blox M8T, RTKLIB RTK.....	100
Σχήμα 8.19: Στοιχεία επεξεργασίας τροχιάς RTK-GNSS/MEMS-IMU	101
Σχήμα 9.1: Τροχιές u-blox SPP, RTKLIB SPP, RTK-GNSS σε σχέση με τροχιά αναφοράς	103

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 5.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά δορυφορικού δέκτη Leica ATX 1230	60
Πίνακας 5.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά δορυφορικού δέκτη ProPak-V3.....	61
Πίνακας 5.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά αδρανειακής μονάδας iMAR iIMU-FSAS	62
Πίνακας 5.4: Ακρίβεια πλοήγησης συστήματος SPATIAL (Πηγή: Advanced Navigation).....	65
Πίνακας 5.5: Τεχνικά χαρακτηριστικά δέκτη GNSS SPATIAL (Πηγή: Advanced Navigation)	66
Πίνακας 5.6: Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρων SPATIAL (Πηγή: Advanced Navigation)	66
Πίνακας 5.7: Τεχνικά χαρακτηριστικά u-blox EVK-M8/NEO-M8T (Πηγή: u-blox®).....	68
Πίνακας 5.8: Λειτουργία εφαρμογών RTKLIB (Πηγή: RTKLIB).....	70