

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ GNSS/INS:
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΑ ΟΔΙΚΑ ΤΜΗΜΑΤΑ
ΕΛΕΥΣΙΝΑ – ΚΟΡΙΝΘΟΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΗ – ΛΟΓΓΟΣ**

ΑΝΤΙΓΟΝΗ Γ. ΜΙΜΙΔΟΥ

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2009



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί η μελέτη και συγκριτική αξιολόγηση των Ολοκληρωμένων Συστημάτων Εντοπισμού σε χερσαίες εφαρμογές. Ειδικότερα, μελετάται η δομή, ο τρόπος ολοκλήρωσης και η λειτουργία συστημάτων, που περιλαμβάνουν δορυφορικούς δέκτες εντοπισμού (GNSS) αδρανειακή μονάδα εντοπισμού (INS) και ψηφιακό οδόμετρο (DMI).

Στο πρακτικό μέρος της εργασίας μελετούνται τα χαρακτηριστικά του συστήματος εντοπισμού POSLV 420 (*Applanix Inc.*), μέσω της επεξεργασίας και αξιολόγησης δεδομένων, που συλλέχθηκαν σε δύο τμήματα του εθνικού οδικού δικτύου.

Η πρώτη ομάδα δεδομένων προέρχεται από το τμήμα της Ε. Ο. Αθηνών – Κορίνθου, λόγω του ξεχωριστού ενδιαφέροντος του, εξ' αιτίας του τμήματος σηράγγων στη θέση "Κακιά Σκάλα", ενώ η δεύτερη ομάδα δεδομένων προέρχεται από το τμήμα της Ε. Ο. στον άξονα Υλίκη – Λογγός. Στο υπόψη τμήμα, εκτός από το σύστημα καταγραφής POSLV 420, υπάρχουν επιπλέον καταγραφές από ανεξάρτητο δέκτη GPS.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων επικεντρώνεται στη μελέτη και συγκριτική αξιολόγηση του συστήματος καταγραφής, με χρήση διαφορετικών σεναρίων. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται οι επιλύσεις και οι δείκτες ποιότητας που προκύπτουν με ή χωρίς σταθμό αναφοράς, η επίδραση της απόστασης του σταθμού αναφοράς από το τμήμα καταγραφής και τα επιμέρους στάδια (επιλογές) επίλυσης, που προσφέρονται από το λογισμικό *PosPac*.

Abstract

The objective of the present postgraduate thesis is the study and the comparative evaluation of Integrated Navigation Systems GNSS/INS in land applications. Particularly, this thesis aims to study the structure, the way of integration and the operation of systems that include antennas of GNSS, inertial navigation system (INS) and distance measuring unit (DMI).

The navigation system POSLV 420 (Applanix Inc.) is used for the experimental process. In order to study and to evaluate the characteristics of this system, data acquired from two segments of the national road network were used.

The first data set is from the Athens – Korinthos national road, because this segment includes tunnels at the location “Kakia Skala” that generate a high research interest. The second data set is from a segment of the national road between Yliki and Loggos. During this process, apart from the POSLV 420 system, independent GPS recordings are also available.

The analysis of the results is focused on the study and comparative evaluation of the recording system using different scenarios. In particular, solutions and quality indicators that result from solving with or without a reference station, the effect of distance to the reference station and the individual solution steps, provided by the PosPac software, are studied.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστώ τον κ Βασίλειο Γκίκα, Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την ανάθεση της μεταπτυχιακής εργασίας, καθώς και την επιμελή του επίβλεψη, κατά την εκπόνησή της.

Τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Κυριάκο Φράγκο, για την ουσιαστική βοήθεια του στο πρακτικό μέρος της εργασίας και τις εποικοδομητικές συζητήσεις.

Τη εταιρία NAMA A.E. που παραχώρησε τον εξοπλισμό, για την εκτέλεση των πειραμάτων και ιδιαίτερος τον κ. Γεώργιο Καλογρίδη.

Ακόμη, τον υποψήφιο διδάκτορα κ Αντώνιο Πρόκο διότι η συμβολή του σε επιστημονικό επίπεδο ήταν σημαντική και η ψυχική του στήριξη καθοριστικής σημασίας για την περάτωση του πονήματός μου.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα το Κοινωνικό Ίδρυμα “Αλέξανδρος Σ. Ωνάσης” για την χορήγηση υποτροφίας, για τις μεταπτυχιακές μου σπουδές κατά το ακαδημαϊκό έτος 2007-2008.

Τέλος, τον πατέρα μου κ. Γεώργιο Μιμίδη για τη αμέριστη συμπαράσταση του, στην πορεία των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Abstract	ii
Ευχαριστίες	iii
Περιεχόμενα	iv
Πίνακας Σχημάτων	vii
Πίνακας Πινάκων	ix
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ	3
1.1 Γενικά	3
1.2 Αρχή Λειτουργίας Δορυφορικών Συστημάτων Εντοπισμού	3
1.3 Μέρη του Συστήματος GPS	4
1.3.1 Τμήμα διαστήματος	5
1.3.2 Τμήμα ελέγχου	6
1.3.3 Τμήμα χρηστών	7
1.4 Μετρήσεις στο σύστημα GPS	7
1.4.1 Μετρήσεις ψευδοαπόστασης	7
1.4.2 Μετρήσεις φάσης φέροντος σήματος	8
1.5 Μέθοδοι Δορυφορικού Εντοπισμού	10
1.5.1 Απόλυτος εντοπισμός	10
1.5.2 Σχετικός εντοπισμός	10
1.6 Μέθοδοι Κινηματικού Εντοπισμού	11
1.6.1 Γενικά	11
1.6.2 Σχετικός κινηματικός εντοπισμός με εκ των υστέρων επεξεργασία	12
1.6.3 Σχετικός εντοπισμός σε πραγματικό χρόνο	13
1.7 Σφάλματα Δορυφορικών Συστημάτων	14
1.7.1 Σφάλματα δορυφόρων	14
1.7.2 Σφάλματα δεκτών	14
1.7.3 Σφάλματα διάδοσης σήματος	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ (INS)	17
2.1 Γενικά	17
2.2 Βασικά Χαρακτηριστικά & Αρχή Λειτουργίας	17
2.3 Συστήματα Αναφοράς και Μετασχηματισμοί	18
2.3.1 Γενικά	18
2.3.2 Συστήματα αναφοράς αδρανειακών συστημάτων εντοπισμού	18
2.3.3 Μετασχηματισμοί συστημάτων αναφοράς	20
2.4 Αισθητήρες Αδρανειακών Συστημάτων	21
2.4.1 Γυροσκόπια	21
2.4.2 Επιταγχνσιόμετρα	24
2.5 Είδη Αδρανειακών Συστημάτων	26
2.5.1 Συστήματα σταθερής πλατφόρμας	26
2.5.2 Προσκολλημένα συστήματα	26
2.6 Σφάλματα Αδρανειακών Συστημάτων	27

2.6.1 Σφάλματα γυροσκοπίων	27
2.6.2 Σφάλματα επιταγχυσιομέτρων	28
2.6.3 Σφάλματα ευθυγράμμισης πλατφόρμας	29
2.7 Πεδία Εφαρμογών & Αξιολόγηση Αδρανειακών Συστημάτων	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ: ΤΟ ΦΙΛΤΡΟ KALMAN	31
3.1 Γενικά	31
3.2 Πρόβλεψη, Φιλτράρισμα & Εξομάλυνση	31
3.3 Φίλτρο Kalman & M.E.T.	33
3.4 Μορφοποίηση Φίλτρου Kalman	34
3.4.1 Πρωτεύον μοντέλο	34
3.4.2 Δευτερεύον ή δυναμικό μοντέλο	34
3.4.3 Στοχαστικό μοντέλο	35
3.5 Εξισώσεις Φίλτρου Kalman	36
3.5.1 Εξισώσεις πρόβλεψης	36
3.5.2 Εξισώσεις φιλτραρίσματος	36
3.5.3 Εξισώσεις εξομάλυνσης	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ: ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ & ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ (GNSS/INS)	38
4.1 Βασικές Αρχές Ολοκλήρωσης Δορυφορικών & Αδρανειακών Συστημάτων Εντοπισμού	38
4.2 Μετασχηματισμοί Συστημάτων Αναφοράς και Υπολογισμός Διανυσμάτων Εκκεντροτήτων	39
4.2.1 Μετασχηματισμοί συστημάτων αναφοράς	39
4.2.2 Υπολογισμός διανυσμάτων εκκεντροτήτων	41
4.3 Εναλλακτικές Μορφές Φίλτρου Kalman	42
4.3.1 Γενικά	42
4.3.2 Φίλτρα χαλαρής σύζευξης	42
4.3.3 Φίλτρα στενής σύζευξης	43
4.4 Αξιολόγηση και Εφαρμογές Δορυφορικών & Αδρανειακών Συστημάτων Εντοπισμού	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ: ΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ POSLV 420	46
5.1 Γενικά	46
5.2 Βασική Αρχή Λειτουργίας & Μέρη του Συστήματος	46
5.2.1 Βασική αρχή λειτουργίας	46
5.2.2 Δέκτες GPS	47
5.2.3 Αδρανειακό σύστημα εντοπισμού (INS)	48
5.2.4 Ψηφιακό οδόμετρο (DMI)	49
5.2.5 Υπολογιστικό σύστημα POS Computer (PCS)	50
5.3 Υπολογισμός Διανυσμάτων Εκκεντροτήτων	51
5.4 Τεχνικές Λειτουργίας & Ακρίβειες	52
5.5 Λογισμικό Επεξεργασίας Δεδομένων Πεδίου	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ: ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ & ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΔΙΟΥ	56
6.1 Εισαγωγικά	56
6.2 Οδικό Τμήμα Ελευσίνα - Κόρινθος	56
6.2.1 Περιγραφή περιοχής μελέτης	56

6.2.2 Προπαρασκευαστικές εργασίες και συλλογή δεδομένων	58
6.3 Οδικό Τμήμα Υλίκη - Λογγός	60
6.3.1 Περιγραφή περιοχής μελέτης	60
6.3.2 Προπαρασκευαστικές εργασίες και συλλογή δεδομένων	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ & ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	63
7.1 Γενικά	63
7.2 Επιλογές Επίλυσης Δεδομένων	63
7.2.1 Οδικό τμήμα Ελευσίνα - Κόρινθος	63
7.2.2 Οδικό τμήμα Υλίκη - Λογγός	64
7.3 Προετοιμασία Επιλύσεων και Εισαγωγή Παραμέτρων	66
7.4 Αποτελέσματα Λογισμικού Επεξεργασίας	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΟ: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	70
8.1 Οδικό Τμήμα Ελευσίνα - Κόρινθος	70
8.1.1 Αξιολόγηση επίδρασης απόστασης του οχήματος από τους σταθμούς αναφοράς	70
8.1.2 Αξιολόγηση της επίδρασης χρήσης σταθμού αναφοράς (επιλύσεις σχετικού και απόλυτου εντοπισμού)	75
8.1.3 Αξιολόγηση ποιότητας λύσεων και σύγκριση με τις προδιαγραφές	78
8.2 Οδικό Τμήμα Υλίκη - Λογγός	81
8.2.1 Αξιολόγηση λύσεων	81
8.2.2 Αξιολόγηση της ποιότητας των λύσεων	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΑΤΟ: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	88
Βιβλιογραφία	90

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1.1:	Τροχιές δορυφόρων	5
Σχήμα 1.2:	Τμήμα ελέγχου GPS	6
Σχήμα 1.3:	Μετρήσεις φάσης φέροντος σήματος	9
Σχήμα 1.4:	Σχετικός στατικός εντοπισμός	11
Σχήμα 1.5:	Φαινόμενο πολυανάκλασης	15
Σχήμα 2.1:	Τρισσορθογώνιο σύστημα κίνησης	19
Σχήμα 2.2:	Γυροσκόπια ενός και δυο βαθμών ελευθερίας	22
Σχήμα 2.3:	Γυροσκόπια με δακτύλιο λείζερ	23
Σχήμα 2.4:	Γυροσκόπια με οπτικών ινών	24
Σχήμα 2.5:	Επιταχυνσιόμετρο με διάταξη ελατηρίου	25
Σχήμα 2.6:	Δονούμενο επιταχυνσιόμετρο κρυστάλλου χαλαζία	25
Σχήμα 2.7:	Σύστημα σταθερής πλατφόρμας	26
Σχήμα 2.8:	Προσκολλημένο σύστημα	27
Σχήμα 2.9:	Θεωρητική λειτουργία INS, λόγω σφάλματος λανθ. εκτ. γυροσκοπίου	28
Σχήμα 2.10:	Θεωρητική λειτουργία INS, λόγω σφάλματος λανθ. εκτ. επιταχ/τρου	28
Σχήμα 3.1:	Παράδειγμα πρόβλεψης, φιλτραρίσματος και εξομάλυνσης	32
Σχήμα 4.1:	Συστήματα Αναφοράς	39
Σχήμα 4.2:	Υπολογισμός εκκεντροτήτων	41
Σχήμα 4.3:	Περιγραφή φίλτρου χαλαρής σύζευξης	43
Σχήμα 4.4:	Περιγραφή φίλτρου στενής σύζευξης	43
Σχήμα 5.1:	Σχέση μεταξύ των ανεξάρτητων στοιχείων του συστήματος POSLV	47
Σχήμα 5.2:	Δέκτης GPS <i>Trimble</i> BD950	48
Σχήμα 5.3:	Μονάδα αδρανειακού εντοπισμού	49
Σχήμα 5.4:	Διάταξη ψηφιακού οδομέτρου στο όχημα	50
Σχήμα 5.5:	Υπολογιστικό σύστημα POS Computer του POSLV	51
Σχήμα 5.6:	Θέσεις γεωδαιτικών αισθητήρων στο όχημα	52
Σχήμα 6.1:	Περιοχή μελέτης Ελευσίνα – Κόρινθος	57
Σχήμα 6.2:	Μεγέθυνση περιοχής σηράγγων	57
Σχήμα 6.3:	Σήραγγες στην περιοχή της Κακιάς Σκάλας	58
Σχήμα 6.4:	Θέση Σταθμών Αναφοράς (Ελευσίνα - Κόρινθος)	58
Σχήμα 6.5:	Όχημα καταγραφής μετρήσεων	59
Σχήμα 6.6:	Σταθμός αναφοράς στους Αγ. Θεοδώρους	59
Σχήμα 6.7:	Περιοχή μελέτης Υλίκη – Λογγός	61
Σχήμα 6.8:	Θέση Σταθμών Αναφοράς (Υλίκη - Λογγός)	62
Σχήμα 7.1:	Επίλυση "Mission 1-EK" (Ελευσίνα - Κόρινθος)	64
Σχήμα 7.2:	Επίλυση "Mission 2-EK" (Ελευσίνα - Κόρινθος)	64
Σχήμα 7.3:	Επίλυση "Stand alone-EK" (Ελευσίνα - Κόρινθος)	64
Σχήμα 7.4:	Επίλυση "Mission 1-ΥΛ" (Υλίκη - Λογγός)	65
Σχήμα 7.5:	Επίλυση "Mission 2-ΥΛ" (Υλίκη - Λογγός)	65
Σχήμα 7.6:	Επίλυση "Mission 3-ΥΛ". (Υλίκη - Λογγός)	65
Σχήμα 7.7:	Επίλυση "Stand alone-ΥΛ" (Υλίκη - Λογγός)	66
Σχήμα 7.8:	Εισαγωγή παραμέτρων για "Mission 1-EK"	67
Σχήμα 7.9:	Χρονοσειρά γεωμετρικού υψομέτρου	68
Σχήμα 7.10:	Διάγραμμα μ. τ. σ. κατά τη συνιστώσα North	69
Σχήμα 7.11:	Διάγραμμα αριθμού δορυφόρων	69
Σχήμα 8.1:	Οριζοντιγραφίες επίλυσεων "Mission 1-EK" και "Mission 2-EK"	70
Σχήμα 8.2:	Απόκλιση οριζοντιογραφιών "Mission 1-EK" και "Mission 2-EK"	71
Σχήμα 8.3:	Διάγραμμα μέσου τετραγωνικού σφάλματος για "Mission 1-EK" και "Mission 2-EK"	73
Σχήμα 8.4:	Χρονοσειρές γεωμετρικών υψόμετρων για "Mission 1-EK" και "Mission 2-EK"	74
Σχήμα 8.5:	Διάγραμμα διαφοράς γεωμετρικών υψόμετρων για "Mission 1-EK" και "Mission 2-EK"	74

Σχήμα 8.6: Διάγραμμα τυπικών αποκλίσεων γεωμετρικών υψόμετρων για "Mission 1-EK" και "Mission 2-EK"	75
Σχήμα 8.7: Επίλυση "Smoothed EK"	76
Σχήμα 8.8: Απόκλιση οριζοντιογραφιών για "Smoothed EK" και "Stand alone EK"	76
Σχήμα 8.9: Χρονοσειρές γεωμετρικών υψόμετρων για "Smoothed EK" και "Stand alone EK"	77
Σχήμα 8.10: Διάγραμμα διαφοράς γεωμετρικών υψόμετρων για "Smoothed EK" και "Stand alone EK"	77
Σχήμα 8.11: Διάγραμμα μέσου τετραγωνικού σφάλματος για "Smoothed EK" και "Stand alone EK"	78
Σχήμα 8.12: Μεγέθυνση διαγράμματος μ.τ.σ. στην περιοχή των σηράγγων	79
Σχήμα 8.13: Διάγραμμα τυπικής απόκλισης για "Smoothed EK" και "Stand alone EK"	80
Σχήμα 8.14: Μεγέθυνση διαγράμματος τυπ. αποκλ. στην περιοχή των σηράγγων	80
Σχήμα 8.15: Επίλυση "Smoothed ΥΛ"	82
Σχήμα 8.16: Γεωμετρία μετασχηματισμού	82
Σχήμα 8.17: Διάγραμμα διαφορών "Smoothed ΥΛ" και "Ανεξ/το GPS"	84
Σχήμα 8.18: Διάγραμμα διαφορών "Smoothed ΥΛ" και "Stand alone ΥΛ"	84
Σχήμα 8.19: Διάγραμμα αξιολόγησης για "Smoothed ΥΛ"	85
Σχήμα 8.20: Διάγραμμα αξιολόγησης για "Ανεξ/το GPS"	86
Σχήμα 8.21: Διάγραμμα αξιολόγησης για "Stand alone ΥΛ"	87

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 5.1: Εκκεντρότητες αισθητήρων	52
Πίνακας 5.2: Πίνακας επιδόσεων του συστήματος POSLV 420	53
Πίνακας 6.1: Συντεταγμένες Σταθμών Αναφοράς διαδρομής Ελευσίνα – Κόρινθος	60
Πίνακας 6.2: Συντεταγμένες Σταθμών Αναφοράς διαδρομής Υλίκη – Λογγός	62
Πίνακας 8.1: Τιμές μέσου τετραγωνικού σφάλματος κατά x,y	81
Πίνακας 8.2: Τιμές τυπικής απόκλισης γεωμετρικού υψομέτρου	81
Πίνακας 8.3: Τιμές ακρίβειας για τις επιλύσεις “Smoothed ΥΛ”, “Ανεξ/το GPS” και “Stand alone ΥΛ”	87

Τα τελευταία χρόνια, οι εξελίξεις στην τεχνολογία των ολοκληρωμένων συστημάτων δορυφορικού και αδρανειακού εντοπισμού έχουν συμβάλει σημαντικά στις μεθόδους γεωδαιτικού εντοπισμού και πλοήγησης. Όπως δηλώνει και η ονομασία, τα συστήματα αυτά ουσιαστικά αποτελούν την ολοκλήρωση των δορυφορικών συστημάτων εντοπισμού (GNSS) και των αδρανειακών συστημάτων εντοπισμού (INS).

Τα συστήματα εντοπισμού GNSS και INS αποτελούν επίσης αυτόματα συστήματα πλοήγησης, με πλήθος προτερημάτων αλλά και μειονεκτημάτων, καθιστώντας σε ορισμένες περιπτώσεις δύσκολο ή και αδύνατο το προσδιορισμό της θέσης. Με την ανάπτυξη των ολοκληρωμένων συστημάτων εντοπισμού προσφέρονται μεγαλύτερες δυνατότητες για την πλοήγηση κινητών μέσων, επιτυγχάνοντας υψηλή ακρίβεια εντοπισμού και προσδιορισμού των κινηματικών χαρακτηριστικών τους.

Τα ολοκληρωμένα συστήματα εντοπισμού δύνανται να εφαρμοστούν σε πλήθος εφαρμογών, δεδομένου ότι προσαρμόζονται σε ποικίλους τύπους κινητών μέσων, όπως οχήματα, γεραμούς, πλοία, αεροσκάφη ή ρομποτικά συστήματα. Οι εφαρμογές που καλύπτουν αφορούν σε εργασίες αποτύπωσης ή χάραξης, σε αυτόματη πλοήγηση οχημάτων είτε σε ψηφιακή καταγραφή οδικού δικτύου. Επίσης, ιδιαίτερα δημοφιλή είναι και σε φωτογραμμετρικές εργασίες.

Αντικείμενο της μεταπτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη των ολοκληρωμένων συστημάτων εντοπισμού GNSS/INS σε χερσαίες εφαρμογές εντοπισμού και πλοήγησης. Ειδικότερα μελετάται η λειτουργία και αξιολογούνται τα αποτελέσματα του ολοκληρωμένου συστήματος εντοπισμού POSLV 420 της κατασκευάστριας εταιρίας *Applanix Corporation*. Το σύστημα, προσαρμοσμένο κατάλληλα σε όχημα, τέθηκε σε λειτουργία κατά μήκος τμημάτων οδικού δικτύου, που περιλαμβάνει σημεία περιορισμένης ορατότητας και τμήματα σηράγγων.

Οι μετρήσεις, που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία, επεξεργάστηκαν με τη βοήθεια αντίστοιχου λογισμικού, για διαφορετικές περιπτώσεις, βάσει των επιλογών που προσφέρονται από το λογισμικό. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα αποτέλεσαν αντικείμενο σύγκρισης και σχολιασμού, ενώ παράλληλα έγινε αξιολόγηση του συστήματος σύμφωνα με τις αναμενόμενες προδιαγραφές ακρίβειας.

Η μεταπτυχιακή εργασία αποτελείται συνολικά από εννέα κεφάλαια, εκ των οποίων τα πέντε αφορούν στο θεωρητικό υπόβαθρο του αντικειμένου. Πιο συγκεκριμένα, στο Πρώτο και Δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται βασικά στοιχεία για την τεχνολογία των δορυφορικών συστημάτων εντοπισμού και των αδρανειακών συστημάτων εντοπισμού αντιστοίχως. Το Τρίτο κεφάλαιο

καλύπτει τη θεωρία του φίλτρου Kalman, που αποτελεί το μαθηματικό υπόβαθρο για τα ολοκληρωμένα συστήματα εντοπισμού. Στο Τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνονται βασικά στοιχεία και προϋποθέσεις λειτουργίας των ολοκληρωμένων συστημάτων εντοπισμού. Στο Πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το ολοκληρωμένο σύστημα POSLV 420 της *Applanix Corporation* και γίνεται περιγραφή των επιμέρους οργάνων και χαρακτηριστικών τους. Επιπλέον, γίνεται μια σύντομη περιγραφή του λογισμικού και των δυνατών επιλογών, που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο χρήστης για την επεξεργασία των δεδομένων.

Το πειραματικό μέρος της εργασίας αναπτύσσεται από το Έκτο μέχρι το Ένατο κεφάλαιο. Το Έκτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την περιγραφή της περιοχής εφαρμογής και των ιδιοτήτων της. Ακολούθως, το Έβδομο κεφάλαιο περιλαμβάνει την διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων και τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται κυρίως με μορφή διαγραμμάτων και σχετική αξιολόγηση και σύγκριση γίνεται στο Όγδοο κεφάλαιο. Τέλος, η μεταπτυχιακή εργασία ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των συμπερασμάτων και των προτάσεων για μελλοντική διερεύνηση στο Ένατο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ

1.1 Γενικά

Τα δορυφορικά συστήματα ξεκινούν την ανάπτυξή τους το 1960, οπότε και υλοποιείται το σύστημα TRANSIT. Το TRANSIT εξυπηρετούσε στρατιωτικούς αλλά και πολιτικούς σκοπούς παρέχοντας εντοπισμό σε δυο διαστάσεις. Σταδιακά αντικαταστάθηκε από το σύστημα NAVSTAR/GPS, το οποίο αναπτύχθηκε και ελέγχεται από το Υπουργείο Εθνικής Άμυνας των ΗΠΑ. Κυρίως, επρόκειτο για ένα στρατιωτικό σύστημα, που εξελίχθηκε να χρησιμοποιείται και για πολιτικές εφαρμογές, με πολύ καλές επιδόσεις σε θέματα ακριβείας. Οι συνεχώς αυξανόμενες περιοχές εφαρμογών, καθώς και λόγοι οικονομικότητας και ευχρηστίας, το έχει καταστήσει το ιδιαίτερος διαδεδομένο στον χώρο των δορυφορικών συστημάτων.

Αντίστοιχο του συστήματος GPS είναι το σύστημα εντοπισμού GLONASS, του οποίου η ανάπτυξη ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του '70 από την Πρώην Σοβιετική Ένωση, επίσης για στρατιωτική χρήση. Παρουσιάζει παρόμοια χαρακτηριστικά με το σύστημα GPS, όσον αφορά στον τρόπο λειτουργίας του, παρ' όλα αυτά δεν έτυχε της ανάλογης αποδοχής και χρήσης, όπως το GPS.

Σήμερα, με ευθύνη της Ευρωπαϊκής Ένωσης αναπτύσσεται το δορυφορικό σύστημα GALILEO, πρόδρομος του οποίου είναι το σύστημα EGNOS. Το GALILEO αποτελεί ένα σύστημα που θα προορίζεται για πολιτικούς σκοπούς, περιορίζοντας τη εξάρτηση από τα συστήματα των ΗΠΑ και Ρωσίας. Ο σχεδιασμός του συστήματος πραγματοποιήθηκε από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (ESA). Θα αποτελείται από νέο δορυφορικό σχεδιασμό, αλλά ωστόσο θα εξασφαλίζεται η διαλειτουργικότητα του με τα συστήματα GPS και GLONASS.

1.2 Αρχή Λειτουργίας Δορυφορικών Συστημάτων Εντοπισμού

Τα δορυφορικά συστήματα εντοπισμού προϋποθέτουν από ένα σύνολο δορυφόρων σε τροχιά γύρω από τη γη. Ο προσδιορισμός της θέσης ενός σημείου απαιτεί την εκτέλεση μετρήσεων προς τους δορυφόρους, με τη χρήση κατάλληλων δεκτών. Η βασική αρχή του δορυφορικού εντοπισμού στηρίζεται στον χρόνο διάδοσης του σήματος, ο οποίος πολλαπλασιαζόμενος με την ταχύτητα του φωτός c , δίνει την απόσταση μεταξύ του δορυφόρου και δέκτη. Συνεπώς, ο

εντοπισμός σε τρεις διαστάσεις απαιτεί τρεις δορυφόρους, ώστε η θέση του σημείου να προκύψει ως η τομή τριών σφαιρών.

Η μέτρηση του χρόνου διάδοσης του σήματος αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τον ακριβή υπολογισμό της απόστασης, όμως σφάλματα κυρίως στο χρονόμετρο του δέκτη, δεν επιτρέπουν κάτι τέτοιο. Προκειμένου να εξαιρεθεί αυτό το σφάλμα, απαιτούνται μετρήσεις σε 4 δορυφόρους, με επιπλέον άγνωστο το σφάλμα στο χρονόμετρο του δέκτη. Επιπρόσθετα επισημαίνεται ότι υπάρχει πλήθος σφαλμάτων που υπεισέρχονται στις μετρήσεις, τα οποία αφορούν είτε στον δέκτη, είτε στους δορυφόρους, είτε στο γεγονός ότι το σήμα επηρεάζεται από την ατμόσφαιρα, μέσω της οποίας μεταδίδεται.

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων απαιτείται να υπάρχει ορατότητα των δορυφόρων από τους δέκτες, ενώ συνήθως γίνονται αποδεκτοί δορυφόροι σε γωνία ύψους πάνω από 15° , ως προς τον ορίζοντα. Η διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί όλη τη διάρκεια του 24ώρου και δεν περιορίζεται από καιρικές συνθήκες ή την έκταση της περιοχής μελέτης.

Για τον προσδιορισμό της θέσης είναι δυνατόν να εφαρμοστούν διάφορες μέθοδοι αναλόγως με τις ανάγκες και απαιτήσεις κάθε εργασίας. Σημαντικό ρόλο στην επιλογή της μεθόδου έχει και η ακρίβεια που επιθυμείται καθώς σχετίζεται άμεσα με αυτή.

Οι συντεταγμένες της θέσης προσδιορίζονται στο Παγκόσμιο Σύστημα Αναφοράς WGS'84 και μπορεί να είναι είτε γεωγραφικές (φ, λ, h), είτε γεωκεντρικές καρτεσιανές (X, Y, Z), με τη δυνατότητα μετατροπής τους σε άλλο σύστημα αναφοράς, με τη χρήση του κατάλληλου μετασχηματισμού.

Η τεχνολογία του εντοπισμού, μέσω των δορυφορικών συστημάτων, έχει άμεσες εφαρμογές στην γεωδαισία και τοπογραφία. Αναλόγως με την περίπτωση, ο εντοπισμός της θέσης με χρήση δορυφορικών συστημάτων παρουσιάζει περισσότερα πλεονεκτήματα και διευκολύνσεις συγκριτικά με τις κλασσικές γεωδαιτικές μεθόδους. Εκτός από τις καθημερινές τοπογραφικές εργασίες, τα δορυφορικά συστήματα χρησιμοποιούνται για ένα πλήθος άλλων εφαρμογών, όπως μελέτες παραμορφώσεων τεκτονικών πλακών ή παρακολούθηση μεγάλων τεχνικών έργων.

1.3 Μέρη του Συστήματος GPS

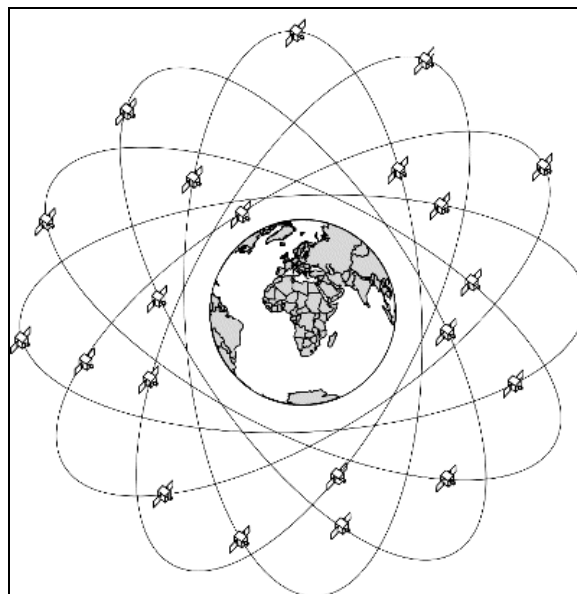
Το δορυφορικό σύστημα GPS αποτελείται από:

- το τμήμα του διαστήματος, που συνίσταται από τους δορυφόρους

- το επίγειο τμήμα σταθμών ελέγχου, που ελέγχει τη λειτουργία των δορυφόρων και των τροχιακών παραμέτρων
- το τμήμα χρηστών, που αποτελούν οι χρήστες του συστήματος GPS

1.3.1 Τμήμα διαστήματος

Το τμήμα διαστήματος αποτελείται σήμερα από 28 δορυφόρους σειρών BLOCK, II, IIA και IIR, οι οποίοι είναι ομοιόμορφα κατανομημένοι, προκειμένου να εξασφαλιστεί βέλτιστη κάλυψη. Οι δορυφόροι κινούνται σε σχεδόν κυκλική τροχιά, σε μέσο ύψος 20200km και περίοδο περιστροφής 12 ώρες σε αστρικό χρόνο. Είναι τοποθετημένοι σε 6 τροχιακά επίπεδα με γωνία κλίσης 55° ως προς τον ισημερινό. Η γεωμετρία του συστήματος είναι τέτοια ώστε να είναι ορατοί τουλάχιστον 4 δορυφόροι από οποιοδήποτε σημείο της γης και σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή.



Σχήμα 1.1: Τροχιές δορυφόρων (πηγή: www.esf.edu)

Figure 1.1: Satellites orbits (source: www.esf.edu)

Οι δορυφόροι έχουν διάρκεια ζωής 7 με 10 χρόνια και είναι εφοδιασμένοι με τέσσερα ατομικά χρονόμετρα ρουβιδίου και καισίου, για τη παραγωγή του δορυφορικού σήματος και την μέτρηση του χρόνου. Στον εξοπλισμό τους επίσης περιλαμβάνονται ηλιακές κυψέλες, ταλαντωτές μεγάλης ακριβείας, υπολογιστές και κεραίες τηλεπικοινωνίας.

Το σήμα, που εκπέμπουν οι δορυφόροι, αποτελείται από φέρουσες συχνότητες (L1 και L2), ενώ οι συχνότητες διαμορφώνονται με δυο κώδικες, τον κώδικα ευρείας λήψης C/A (*Coarse Acquisition*) και τον κώδικα ακριβείας P (*Precise*). Τα σήματα μεταδίδονται με την ταχύτητα του

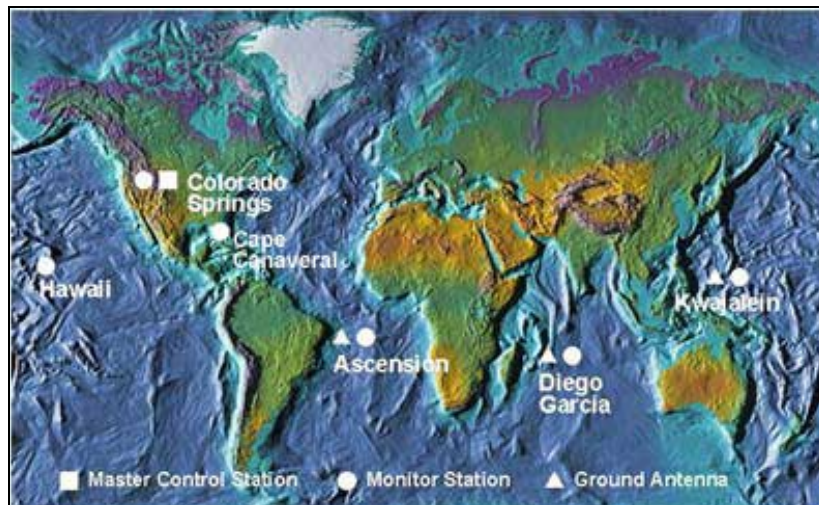
φωτός και η κωδικοποίηση τους επιτρέπει την αναγνώριση από τον δέκτη, του δορυφόρου από τον οποίο προέρχονται.

Η ταξινόμηση και η αρίθμηση των δορυφόρων γίνεται με διάφορους τρόπους, όμως συνήθως χρησιμοποιείται το εβδομαδιαίο τμήμα του κώδικα P, που εκπέμπει ο δορυφόρος (αριθμός PRN).

1.3.2 Τμήμα ελέγχου

Το επίγειο τμήμα ελέγχου (Σχήμα 1.2) έχει σκοπό την παρακολούθηση και ενημέρωση του τμήματος διαστήματος και αποτελείται από:

- έναν κεντρικό σταθμό ελέγχου (*master control station*)
- έξι σταθμούς παρακολούθησης (*monitor stations*) και
- τρεις σταθμούς επικοινωνίας (*upload ground antennas*)



Σχήμα 1.2: Τμήμα ελέγχου GPS (πηγή: www.faa.gov)

Figure 1.2: GPS control part (source: www.faa.gov)

Οι σταθμοί παρακολούθησης εκτελούν μετρήσεις σε όλους τους ορατούς δορυφόρους και τα δεδομένα των παρατηρήσεων αυτών μεταβιβάζονται στον κεντρικό σταθμό ελέγχου.

Ο κεντρικός σταθμός ελέγχου έχει την ευθύνη και τον έλεγχο της ολοκληρωτικής διαχείρισης του δορυφορικού σχηματισμού. Στον κεντρικό σταθμό συλλέγονται οι πληροφορίες, που έχουν αποκτηθεί από τους σταθμούς παρακολούθησης, όπου και επεξεργάζονται κατάλληλα. Με βάση αυτά τα δεδομένα, υπολογίζονται οι τροχιακές παράμετροι των δορυφόρων (εφημερίδες) καθώς και οι παράμετροι που αφορούν στα χρονόμετρα τους. Στη συνέχεια, τα δεδομένα μεταβιβάζονται στους δορυφόρους, μέσω των οποίων ενημερώνονται οι χρήστες. Η ενημέρωση των δορυφόρων γίνεται μέσω των τριών σταθμών επικοινωνίας, ύστερα από τη ενεργοποίηση της διαδικασίας ενημέρωσης από τον κεντρικό σταθμό ελέγχου.

1.3.3 Τμήμα χρηστών

Το τμήμα χρηστών αποτελούν όλοι οι δέκτες GPS, που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της θέσης με το δορυφορικό σύστημα.

1.4 Μετρήσεις στο σύστημα GPS

1.4.1 Μετρήσεις ψευδοαπόστασης

Ψευδοαπόσταση είναι η μέτρηση της απόστασης μεταξύ δορυφόρου και δέκτη, με παρατηρήσεις στον κώδικα C/A ή P. Η απόσταση προκύπτει από την μέτρηση του χρόνου διάδοσης του σήματος από τον δορυφόρο στον δέκτη. Η χρονική διαφορά εκπομπής του σήματος από το δορυφόρο και της λήψης από το δέκτη πολλαπλασιασμένη με την ταχύτητα του φωτός παρέχει τη μέτρηση της ψευδοαπόστασης P_r^s :

$$P_r^s = c(t_r - t_s) \quad (1.1)$$

όπου,

t_r , Χρόνος λήψης σήματος από τον δέκτη στην κλίμακα χρόνου του δέκτη

t_s , Χρόνος εκπομπής σήματος από τον δορυφόρο στην κλίμακα χρόνου του δορυφόρου

c , Ταχύτητα του φωτός στο κενό

Η ψευδοαπόσταση δεν ισούται με τη γεωμετρική απόσταση λόγω του μη συγχρονισμού του ρολογιού του δέκτη με αυτό του δορυφόρου καθώς και των επιδράσεων της ατμόσφαιρας. Επομένως, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη τα σφάλματα των δυο χρονομέτρων και οι διορθώσεις της ιονόσφαιρας και τροπόσφαιρας.

Η ψευδοαπόσταση P_r^s μεταξύ δορυφόρου s και δέκτη r συνδέεται με την γεωμετρική απόσταση και τα σφάλματα των ρολογιών και της ατμόσφαιρας με την εξίσωση:

$$P_r^s = \rho_r^s - c(\delta t_r - \delta t_s) + \delta_{ion} + \delta_{tro} \quad (1.2)$$

όπου,

ρ_r^s , Γεωμετρική απόσταση δορυφόρου δέκτη, όπως προκύπτει από τις γνωστές συντεταγμένες του δορυφόρου και τις ζητούμενες του δέκτη

δt_r , Αποχή χρονομέτρου δέκτη από την κλίμακα χρόνου GPS

δt_s , Αποχή χρονομέτρου δορυφόρου από την κλίμακα χρόνου GPS

δ_{ion} , Ιονοσφαιρική διόρθωση

δ_{tro} , Τροποσφαιρική διόρθωση

Η γεωμετρική απόσταση ρ_r^s περιγράφεται από τη σχέση:

$$\rho_r^s = \sqrt{(X_s - X_r)^2 + (Y_s - Y_r)^2 + (Z_s - Z_r)^2} \quad (1.3)$$

όπου,

(X_s, Y_s, Z_s) , Συντεταγμένες δορυφόρου στο σύστημα αναφοράς WGS'84

(X_r, Y_r, Z_r) , Συντεταγμένες δέκτη στο σύστημα αναφοράς WGS'84

Το παρατηρούμενο μέγεθος είναι η ψευδοαπόσταση P_r^s και οι άγνωστες παράμετροι οι τρεις συντεταγμένες του δέκτη και η αποχή του χρονομέτρου του δέκτη δt_r . Επομένως, για τον προσδιορισμό της θέσης σημείου χρειάζονται παρατηρήσεις σε τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους.

Οι δέκτες έχουν τη δυνατότητα να μετρούν με σφάλμα 1% του μήκους κύματος, οπότε στον κώδικα C/A, με μήκος κύματος 300m, το μετρημένο μέγεθος έχει ακρίβεια περίπου 3m και στον κώδικα P, με μήκος κύματος 30m, έχει ακρίβεια περίπου 0.3m. Προφανώς, η τελική ακρίβεια στον προσδιορισμό θέσης ενός σημείου μπορεί να είναι αρκετά χειρότερη και εξαρτάται από αρκετές παραμέτρους, όπως για παράδειγμα την ατμόσφαιρα ή τη γεωμετρία των δορυφόρων.

1.4.2 Μετρήσεις φάσης φέροντος σήματος

Ο προσδιορισμός της απόστασης με μετρήσεις φάσεων γίνεται με τις φέρουσες συχνότητες L1 και L2. Η συχνότητα L1 έχει μήκος κύματος 0.19m και η L2 0.24m, δηλαδή πολύ μικρότερο από το μήκος κύματος του κώδικα C/A και P.

Ο δέκτης, κατά την πρώτη εποχή εγκλωβισμού του σήματος από τον δορυφόρο (Σχήμα 1.2), καταγράφει έναν ακέραιο αριθμό κύκλων N_r^s και το τμήμα ενός κύκλου $\phi_r^s(0)$:

$$\Phi_r^s(0) = N_r^s + \phi_r^s(0) \quad (1.4)$$

Σε επόμενη εποχή εγκλωβισμού i , η μετρημένη φάση Φ_r^s θα ισούται με τον άθροισμα του ακέραιου αριθμού κύκλων N_r^s , των επιπλέον κύκλων $I_r^s(i)$ και του τμήματος του κύκλου $\phi_r^s(i)$:

$$\Phi_r^s(i) = N_r^s + I_r^s(i) + \phi_r^s(i) \quad (1.5)$$

Ο ακέραιος αριθμός κύκλων N_r^s καλείται ασάφεια φάσης (*phase ambiguity*) και είναι σταθερός για το ίδιο σύστημα δορυφόρου δέκτη, με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει απώλεια σήματος. Η ασάφεια φάσης είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί προκειμένου να προκύψουν ακριβή

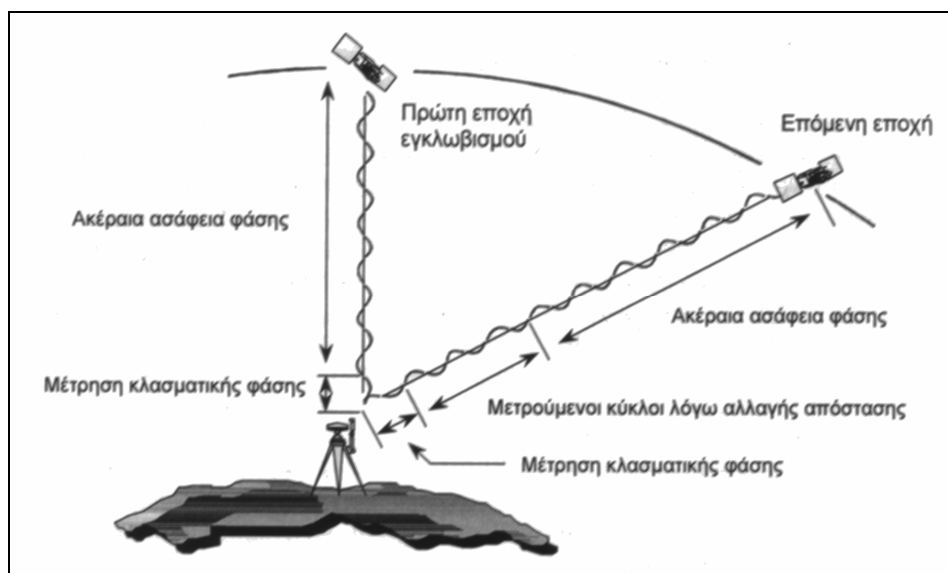
αποτελέσματα στον προσδιορισμό της θέσης. Αντιθέτως, το κλασματικό μέρος του κύκλου ϕ_r^s είναι μέγεθος μετρήσιμο από τον δέκτη.

Στην εξίσωση (1.4) θεωρείται ότι το μέσο διάδοσης είναι το κενό και ότι δεν υπάρχουν συστηματικά σφάλματα. Στην πραγματικότητα αυτό δεν συμβαίνει, επομένως για την διατύπωση της εξίσωσης είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη τα σφάλματα των χρονομέτρων δορυφόρου και δέκτη και οι επιδράσεις της ατμόσφαιρας (ιονόσφαιρα και τροπόσφαιρα). Η τελική μορφή της εξίσωσης, που συνδέει την μετρημένη φάση με τη γεωμετρική απόσταση και τα συστηματικά σφάλματα είναι:

$$\lambda\Phi_r^s = \rho_r^s - c(\delta t_r - \delta t_s) + \lambda N_r^s - \delta_{ion} + \delta_{tro} \quad (1.5)$$

όπου,

λ , Μήκος κύματος συχνότητας L1 ή L2



Σχήμα 1.3: Μετρήσεις φάσης φέροντος σήματος (πηγή: Φωτίου, Πικριδής, 2004)

Figure 1.3: Carrier phase measurements (source:Fotiu, Pikridas, 2004)

Η εξίσωση παρατήρησης (1.5), για το ίδιο σύστημα δορυφόρου – δέκτη, έχει πέντε άγνωστες παραμέτρους, τις συντεταγμένες του σημείου, το σφάλμα του χρονομέτρου του δέκτη και την ασάφεια φάσης. Αν αλλάξει το ζεύγος δορυφόρου – δέκτη προστίθεται νέα ασάφεια φάσης, που πρέπει να προσδιοριστεί, καθώς αναφέρεται στο συγκεκριμένο ζεύγος. Συνεπώς, η παρατήρηση σε περισσότερους δορυφόρους δεν συνεπάγεται προσδιορισμός των αγνώστων παραμέτρων. Για την επίλυση της ασάφειας φάσης, καθώς και των υπολοίπων αγνώστων, χρειάζεται η παρατήρηση των ίδιων δορυφόρων από περισσότερους του ενός δέκτες. Για το

σκοπό αυτό μορφοποιούνται εξισώσεις διαφορών μετρήσεων (μονές, διπλές, τριπλές), μέσω των οποίων μειώνεται το πλήθος των αγνώστων και προσδιορίζονται οι ασάφειες.

Ο προσδιορισμός της απόστασης με μετρήσεις φάσεων αποτελεί ακριβέστερη μέθοδο, συγκριτικά με τις μετρήσεις κώδικα, αφού η ακρίβεια της μετρημένης φάσης είναι το 1% του κύκλου, δηλαδή περίπου 2mm.

1.5 Μέθοδοι Δορυφορικού Εντοπισμού

1.5.1 Απόλυτος εντοπισμός

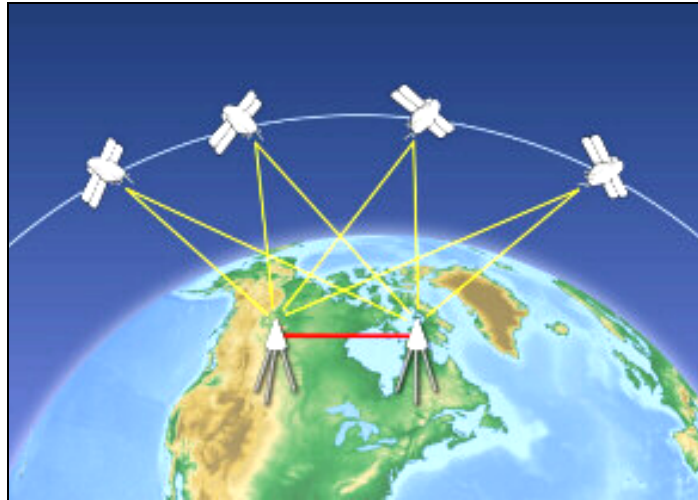
Ο απόλυτος εντοπισμός αναφέρεται σε εντοπισμό θέσης με τη χρήση ενός μόνο δέκτη και μετρήσεις κώδικα, για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων του σημείου ως προς το γεωκεντρικό καρτεσιανό σύστημα αναφοράς. Αυτή η μέθοδος εντοπισμού είναι μειωμένης ακρίβειας της τάξης μερικών μέτρων, αν πρόκειται για στατικό εντοπισμό σε πραγματικό χρόνο και 2m περίπου, αν πρόκειται για στατικό εντοπισμό με εκ των υστέρων επεξεργασία.

Εφαρμόζεται σήμερα σε πολλές περιπτώσεις, λόγω και του χαμηλού κόστους δεκτών, που απαιτεί. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται στα συστήματα πλοήγησης, που διαθέτουν διάφοροι τύποι οχημάτων και σκαφών ή κινητά τηλέφωνα, ενώ έχει εφαρμογή και σε τοπογραφικές εργασίες με χαμηλές απαιτήσεις σε ακρίβεια, όπως για παράδειγμα αναγνώριση σημείων.

1.5.2 Σχετικός εντοπισμός

Στον σχετικό εντοπισμό, ο προσδιορισμός της θέσης σημείου γίνεται με τη χρήση δυο δεκτών, ο ένας τοποθετείται σε σημείο με γνωστές συντεταγμένες και ο άλλος στο άγνωστο σημείο. Σε αυτήν την περίπτωση, υπολογίζεται η μεταξύ τους βάση (ΔX , ΔY , ΔZ), η οποία προστιθέμενη στις συντεταγμένες του γνωστού σημείου (X_γ , Y_γ , Z_γ) δίνει τη ζητούμενη θέση (X_α , Y_α , Z_α) (Σχήμα 1.4).

Η διαδικασία στηρίζεται ως επί το πλείστον σε μετρήσεις φάσης και απαιτείται να υπάρχει ταυτόχρονη παρακολούθηση των δορυφόρων από τους δυο δέκτες, για το διάστημα των μετρήσεων. Γενικά, χρησιμοποιούνται δέκτες μονής συχνότητας, για επίλυση μικρών βάσεων και διπλής συχνότητας, για επίλυση βάσεων μήκους πολλών χιλιομέτρων (μείωση επίδραση της ιονόσφαιρας), ενώ ο χρόνος παρατήρησης ποικίλει και εξαρτάται κυρίως από το μήκος της βάσης.



Σχήμα 1.4: Σχετικός στατικός εντοπισμός (πηγή: www.geodetic.gov.hk)

Figure 1.4: Static positioning (source: www.geodetic.gov.hk)

Οι ακρίβειες της μεθόδου είναι πολύ καλύτερες, συγκριτικά με τον απόλυτο εντοπισμό, και δύναται να φτάσουν και τα μερικά χιλιοστά (αναλόγως με τον τύπο δεκτών, την διάρκεια των μετρήσεων και τον αριθμό των δορυφόρων), για τον στατικό εντοπισμό, ενώ στο κινηματικό είναι λίγο χειρότερες.

Ο σχετικός εντοπισμός, λόγω των ακριβειών που μπορεί να πετύχει, εφαρμόζεται σε γεωδαιτικές εργασίες υψηλής ακρίβειας, όπως υπολογισμό γεωδαιτικών δικτύων και παρακολούθηση τεχνικών έργων.

1.6 Μέθοδοι Κινηματικού Εντοπισμού

1.6.1 Γενικά

Οι μέθοδοι εντοπισμού μπορούν να κατηγοριοποιηθούν αναλόγως με την κινητική κατάσταση του δέκτη, επομένως διαχωρίζονται σε Στατικό εντοπισμό και Κινηματικό εντοπισμό. Δεδομένου ότι η παρούσα εργασία αφορά σε εφαρμογές κινηματικού εντοπισμού, δίνονται σχετικά περισσότερες λεπτομέρειες.

Ο κινηματικός εντοπισμός μπορεί να διακριθεί σε απόλυτο κινηματικό και σχετικό κινηματικό, ενώ τα αποτελέσματα ενδέχεται να προκύπτουν σε πραγματικό χρόνο ή με εκ των υστέρων επεξεργασία. Οι μετρήσεις, που πραγματοποιούνται, είναι φάσεων (όχι απαραίτητως και στις δυο συχνότητες) αλλά και κώδικα.

Στην περίπτωση του σχετικού κινηματικού, απαιτούνται δύο δέκτες. Ο σταθερός δέκτης, σταθμός αναφοράς (*base*), τοποθετείται σε σημείο γνωστών συντεταγμένων, ενώ ο κινητός δέκτης (*rover*) επισκέπτεται τα προς αποτύπωση σημεία. Είναι απαραίτητο, καθ' όλη τη διάρκεια

του εντοπισμού, οι δέκτες να παρακολουθούν τουλάχιστον 4 δορυφόρους, κοινούς για κάθε χρονική στιγμή. Για αυτό το λόγο, η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε εύρος περίπου 20km, ώστε να υπάρχουν κοινοί δορυφόροι αλλά και να μην μεταβάλλεται σημαντικά η ιονόσφαιρά.

1.6.2 Σχετικός κινηματικός εντοπισμός με εκ των υστέρων επεξεργασία

Ο σχετικός κινηματικός εντοπισμός με μετρήσεις φάσεων εφαρμόζεται με την μέθοδο του ημικινηματικού εντοπισμού (*stop and go kinematic*) ή με τη μέθοδο του συνεχούς κινηματικού εντοπισμού (*continuous kinematic*). Οι μέθοδοι χρησιμοποιούν δυο δέκτες, τον σταθερό και τον κινητό και η βασική διαφορά τους είναι ότι στον ημικινηματικό εντοπισμό γίνεται διακριτή αποτύπωση των σημείων, σε αντίθεση με τον συνεχή κινηματικό, όπου η καταγραφή σημείων είναι συνεχής. Αυτό συνεπάγεται ότι ο χρόνος παραμονής στα σημεία διαφέρει από μέθοδο σε μέθοδο. Επομένως, στον ημικινηματικό απαιτείται χρόνος περίπου 30sec, ενώ στον συνεχή ο κινητός δέκτης βρίσκεται σε διαρκή κίνηση. Οι ακρίβειες των δυο μεθόδων για την μετρημένη βάση είναι της τάξης των 1-3cm.

Ο κινηματικός εντοπισμός καλύπτει ανάγκες όπου απαιτείται ο εντοπισμός να πραγματοποιηθεί εν κινήσει. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο δεκτής εφαρμόζεται είτε σε οροφή οχήματος, είτε σε στυλαίο, ώστε να καταγραφεί η πορεία του κινούμενου στόχου. Τυπικό παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου αποτελεί η καταγραφή οδικού δικτύου.

Απαραίτητη προϋπόθεση, για την έναρξη των εργασιών με τη μέθοδο του σχετικού εντοπισμού με φάσεις, είναι η επίλυση των ασαφειών φάσης. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται έναρξη (*initialization*) και μπορεί να πραγματοποιηθεί με τέσσερις τρόπους:

1. Μέτρηση γνωστής βάσης: Ο κινητός δέκτης τοποθετείται σε σημείο γνωστών συντεταγμένων και πραγματοποιούνται μετρήσεις μερικών δευτερολέπτων.
2. Μέτρηση άγνωστης βάσης: Ο κινητός δέκτης τοποθετείται σε άγνωστο σημείο και παραμένει για μερικά λεπτά, ώστε να συλλεχθεί ικανοποιητικός αριθμός παρατηρήσεων. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται όταν είναι διαθέσιμοι δέκτες δυο συχνοτήτων.
3. Εναλλαγή κεραιών: Οι δυο δέκτες τοποθετούνται σε τρίποδες σε απόσταση μερικών μέτρων και μετρούν για λίγα λεπτά. Στη συνέχεια, οι κεραιές εναλλάσσονται και μετά από μετρήσεις ίδιου χρονικού διαστήματος, γίνεται πάλι εναλλαγή των κεραιών. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται όταν είναι διαθέσιμοι δέκτες μιας συχνότητας.
4. Επίλυση εν κινήσει (*On The Fly*): Ο κινητός δέκτης δεν χρειάζεται να παραμείνει σταθερός, για την επίλυση της ασάφειας, αλλά γίνεται κατά τη διάρκεια της αποτύπωσης των σημείων. Για την επίλυση απαιτούνται μετρήσεις κάποιων λεπτών, αναλόγως με τον αριθμό των δορυφόρων και χρήση δεκτών δύο συχνοτήτων.

Καθ' όλη τη διαδικασία επιβάλλεται οι δέκτες να παρακολουθούν πάνω από 4 δορυφόρους, ενώ σε περίπτωση απώλειας σήματος (για παράδειγμα περίπτωση που ο κινητός δέκτης διέρχεται μέσα από σήραγγα) η διαδικασία της έναρξης πρέπει να επαναληφθεί, ώστε να λυθούν εκ νέου οι ασάφειες φάσης. Η επανέναρξη (*reinitialization*) εφαρμόζεται είτε με επίσκεψη του τελευταίου γνωστού σημείου, που μετρήθηκε πριν την απώλεια του σήματος, είτε με μέτρηση του επομένου προς αποτύπωση σημείου, είτε με την επίλυση εν κινήσει (*OTF*).

1.6.3 Σχετικός εντοπισμός σε πραγματικό χρόνο

Ο σχετικός κινηματικός εντοπισμός σε πραγματικό χρόνο εφαρμόζεται με τις μεθόδους RTK (*Real Time Kinematic*) και DGPS (*Differential GPS*). Εφόσον πρόκειται για σχετικό εντοπισμό, χρησιμοποιούνται δύο δέκτες, ο σταθερός τοποθετείται σε γνωστό σημείο και ο κινητός επισκέπτεται τα σημεία προς αποτύπωση. Επίσης, απαιτείται ασύρματη επικοινωνία μεταξύ του σταθερού και κινητού δέκτη, καθώς και ειδικό λογισμικό για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Η μέθοδος RTK πραγματοποιείται με μετρήσεις φάσεων, για αυτό και απαιτείται αρχικά να γίνει έναρξη προς επίλυση των ασαφειών, με τους τρόπους που περιγράφηκαν στην υποενότητα 1.6.2. Από τη στιγμή που έχουν επιλυθεί οι ασάφειες, ο κινητός δέκτης είναι έτοιμος να ξεκινήσει την αποτύπωση. Μέσω της επικοινωνίας μεταξύ των δεκτών, ο σταθμός αναφοράς στέλνει τις μετρήσεις στον κινητό δέκτη, ο οποίος με τη βοήθεια του λογισμικού και τις μετρήσεις και των δυο δεκτών, προσδιορίζει τις συντεταγμένες του σημείου που βρίσκεται. Ο χρόνος παραμονής σε κάθε σημείο είναι μερικά δευτερόλεπτα. Η τεχνική εφαρμόζεται για μικρές βάσεις, περίπου μέχρι 20km, και η αναμενόμενη ακρίβεια της υπολογιζόμενης βάσης είναι της τάξης των $1\text{cm} \pm 1\text{ppm}$.

Η μέθοδος DGPS πραγματοποιείται με μετρήσεις κώδικα και στηρίζεται στο γεγονός ότι ορισμένα από τα σφάλματα στην μετρημένη ψευδοαπόσταση είναι ίδια για τον σταθμό αναφοράς και τον κινούμενο δέκτη, εφόσον η βάση είναι έως και μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα. Ο σταθερός δέκτης πραγματοποιεί μετρήσεις κώδικα προς τους ορατούς δορυφόρους και επειδή είναι τοποθετημένος σε γνωστό σημείο είναι γνωστή και η πραγματική απόσταση δορυφόρου – δέκτη. Συνεπώς, η διαφορά της υπολογισμένης απόστασης και της μετρημένης είναι τα σφάλματα των ψευδοαποστάσεων. Αυτά τα σφάλματα μεταδίδονται στον κινητό δέκτη, ως διορθώσεις για τις μετρημένες ψευδοαποστάσεις, ώστε οι διορθωμένες ψευδοαποστάσεις να χρησιμοποιηθούν για την υπολογισμό των συντεταγμένων του κινητού δέκτη. Η αναμενόμενη ακρίβεια της μεθόδου DGPS είναι της τάξης του μέτρου ή καλύτερη και επομένως η μέθοδος RTK αποτελεί την ακριβέστερη μέθοδο εντοπισμού σε πραγματικό χρόνο.

Οι τεχνικές εντοπισμού σε πραγματικό χρόνο έχουν εφαρμογή στις περιπτώσεις που απαιτείται να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες του σημείου ή των σημείων τη στιγμή της μέτρησης,

εφόσον το επιτρέπουν οι προδιαγραφές σε ακρίβεια. Εντούτοις, με τις μεθόδους αυτές ενδέχεται να προκύψουν προβλήματα στην ασύρματη επικοινωνία των δεκτών, ενώ οι χρήστες θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα προσεκτικοί στην εισαγωγή των σταθερών παραμέτρων (π.χ. ύψος κεραίας δέκτη), ώστε τυχόν σφάλματα να μην μεταδοθούν στις τελικές συντεταγμένες.

1.7 Σφάλματα Δορυφορικών Συστημάτων

Στο δορυφορικό σύστημα GPS, η κύρια πηγή σφαλμάτων αφορούν σε σφάλματα συστηματικού χαρακτήρα. Αυτά προέρχονται από:

- τους δορυφόρους
- τους δέκτες
- τη διάδοση του σήματος

1.7.1 Σφάλματα δορυφόρων

Τα σφάλματα, που σχετίζονται με τους δορυφόρους, αφορούν στην τροχιά τους και στα χρονόμετρα τους.

Τα σφάλματα της τροχιάς ή της εφημερίδας υπάρχουν διότι ο δέκτης, μέσω του σήματος, λαμβάνει την εκπεμπόμενη τροχιά και όχι η πραγματική. Η ακρίβεια στην εκπεμπόμενη τροχιά επηρεάζει την ποιότητα των τελικών αποτελεσμάτων και είναι της τάξης των μερικών μέτρων. Ωστόσο, όταν πρόκειται για γεωδαιτικές εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων σε ακρίβεια, υπάρχει η δυνατότητα να ληφθούν οι πραγματικές παράμετροι της τροχιάς, ύστερα από μια ή περισσότερες μέρες. Σε αυτήν την περίπτωση, η ακρίβεια της τροχιάς κυμαίνεται μεταξύ 5 έως 10cm.

Τα σφάλματα των χρονομέτρων περιέχονται στο εκπεμπόμενο μήνυμα και μπορούν να αφαιρεθούν από τον αναφερόμενο χρόνο διάδοσης.

1.7.2 Σφάλματα δεκτών

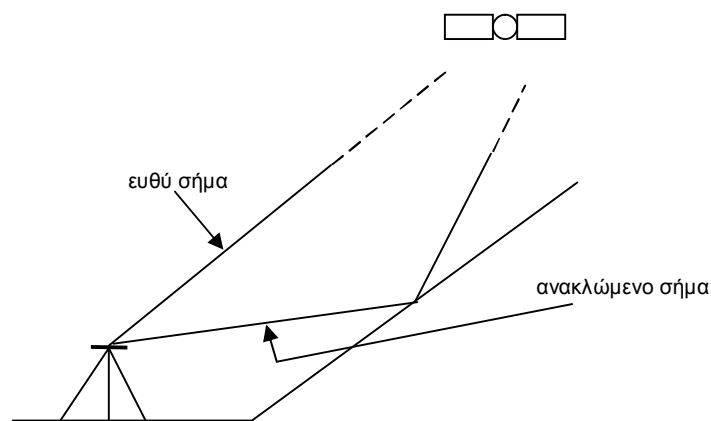
Τα σφάλματα των δεκτών οφείλονται στην ακρίβεια των χρονομέτρων και στο φαινόμενο των πολλαπλών διαδρομών.

Τα χρονόμετρα, που διαθέτουν οι δέκτες, είναι χαμηλότερης ακρίβειας, από αυτά των δορυφόρων και είναι προφανές ότι σφάλμα του χρονομέτρου μεταφράζεται σε σφάλμα προσδιορισμού της θέσης. Συνεπώς, ο προσδιορισμός αυτού του σφάλματος είναι ιδιαίτερα σημαντικός, γι' αυτό και εισέρχεται ως τέταρτος άγνωστος, συμπεριλαμβανομένων των τριών συντεταγμένων θέσης, στο σύστημα των εξισώσεων παρατήρησης.

Το σφάλμα των πολλαπλών διαδρομών ή πολυανάκλασης (*multipath error*) προκύπτει όταν ο δέκτης δεν λαμβάνει το εκπεμπόμενο σήμα απ' ευθείας από τον δορυφόρο αλλά κάποιο ανακλώμενο σε επιφάνεια. Σε αυτήν την περίπτωση, το λαμβανόμενο σήμα έχει διανύσει μεγαλύτερη διαδρομή από την πραγματική, με συνέπεια την εισαγωγή σφάλματος στον προσδιορισμό της θέσης. Ωστόσο, το φαινόμενο της πολυανάκλασης είναι δυναμικό με τον χρόνο καθώς για το ίδιο σύστημα δέκτη - δορυφόρου είναι δυνατό να υπάρχει ανακλώμενο σήμα, για μικρή γωνία ύψους του δορυφόρου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.5, κατά την κίνηση του δορυφόρου και αναλόγως με τη θέση του, ο δέκτης λαμβάνει ευθύ αλλά και ανακλώμενο σήμα.

Το σφάλμα που υπεισέρχεται είναι διαφορετικό για μετρήσεις με φάσεις και για μετρήσεις με κώδικα και είναι της τάξης των μερικών εκατοστών, για μετρήσεις με φάσεις και μερικών μέτρων ή και δεκάδων μέτρων, για μετρήσεις με κώδικα P και C/A αντιστοίχως (Φωτίου, Πικριδάς, 2004).

Αποφυγή τέτοιων σφαλμάτων επιτυγχάνεται με τοποθέτηση των δεκτών σε σημεία με ανοιχτό ορίζοντα, ώστε να μην περιβάλλονται από ανακλαστικές επιφάνειες (για παράδειγμα ψηλά κτήρια). Επίσης, συνιστάται η χρήση δεκτών που να αποτρέπουν την λήψη σημάτων, με αρνητική προς των δέκτη γωνία καθώς και η απόρριψη από την διαδικασία της επίλυσης των δορυφόρων με μικρή γωνία ύψους.



Σχήμα 1.5: Φαινόμενο πολυανάκλασης

Figure 1.5: Multipath effect

1.7.3 Σφάλματα διάδοσης σήματος

Το σήμα, που εκπέμπεται από τον δορυφόρο, διέρχεται από τα στρώματα της ιονόσφαιρας και τροπόσφαιρας προκειμένου να καταλήξει στον δέκτη. Η μετάδοση του σήματος, δια μέσω αυτών των στρωμάτων, εισάγει σφάλματα ιονοσφαιρικής και τροποσφαιρικής διάθλασης, τα οποία πρέπει να προσδιοριστούν.

Η ιονοσφαιρική διάθλαση προκαλείται από την ύπαρξη των ιόντων και των ελεύθερων ηλεκτρονίων, που βρίσκονται στην ιονόσφαιρα. Αυτό επιδρά ως καθυστέρηση για μετρήσεις ψευδοαποστάσεων και ως επιτάχυνση για μετρήσεις φάσεων.

Το ιονοσφαιρικό σφάλμα είναι της τάξης μερικών μέτρων έως δεκάδων μέτρων την ημέρα, ενώ κατά την νύχτα οι αντίστοιχες τιμές είναι μειωμένες περίπου κατά πέντε φορές. Επίσης, παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές για περιοχές κοντά στους πόλους ή τον Ισημερινό, λόγω της ύπαρξης μεγάλων ιονοσφαιρικών διαταραχών.

Στην περίπτωση που πραγματοποιούνται μετρήσεις με δέκτες δυο συχνοτήτων L1 και L2, το ιονοσφαιρικό σφάλμα απαλείφεται με τη χρήση γραμμικών συνδυασμών, ενώ για δέκτες μονής συχνότητας και για βάσεις μήκους έως 20km, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιο ιονοσφαιρικό μοντέλο. Επιπλέον, το σφάλμα μπορεί να αντιμετωπιστεί με χρήση κατάλληλων διαφορών. Εντούτοις, για μικρές βάσεις το ιονοσφαιρικό σφάλμα απαλείφεται καθώς παρουσιάζει την ίδια τιμή στα άκρα της βάσης.

Όσον αφορά στην τροποσφαιρική διάθλαση, πρόκειται για καθυστέρηση στη διαδρομή του σήματος και εξαρτάται από τη πίεση, τη θερμοκρασία και την υγρασία. Επίσης, σημαντικοί παράγοντες είναι η γωνία ύψους του δορυφόρου (το σφάλμα είναι της τάξης των 2m περίπου και αυξάνει κατά πολύ αν η γωνία ύψους είναι μικρή) και το υψόμετρο του δέκτη (το σφάλμα αυξάνει για μεγάλα υψόμετρα).

Το σφάλμα της τροποσφαιρικής διάθλασης μπορεί να περιγραφεί, κατά ένα μεγάλο ποσοστό, με χρήση μοντέλων, που είτε προκύπτουν από μετρήσεις στις παραμέτρους υγρασίας, θερμοκρασίας και πίεσης, είτε από μετρήσεις με χρήση του συστήματος GPS, με εξαγωγή των απαιτούμενων παραμέτρων από τη διαδικασία της συνόρθωσης. Τα μοντέλα, που έχουν αναπτυχθεί, για την περιγραφή της καθυστέρησης του σήματος, λόγω της τροπόσφαιρας, είναι τα *Saastamoinen Model* (Saastamoinen, 1972, 1973) και *Hopfield Model* (Hopfield, 1969, 1970, 1972). Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι το τροποσφαιρικό σφάλμα δεν μπορεί να απαλειφθεί με τη χρήση των συχνοτήτων L1 και L2, κάτι που συμβαίνει στην περίπτωση του ιονοσφαιρικού σφάλματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ (INS)

2.1 Γενικά

Η μέθοδος αδρανειακού εντοπισμού παρέχει τη δυνατότητα πλοήγησης και προσδιορισμού θέσης ενός κινούμενου σώματος. Διαφέρει από τις άλλες μεθόδους γεωδαιτικού εντοπισμού, καθώς πρόκειται για μια αυτοτελή μέθοδο, με εφαρμογή ανεξαρτήτως χρόνου και καιρικών συνθηκών. Επίσης, σε αντίθεση με το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού GNSS, για την εφαρμογή της μεθόδου, δεν απαιτείται η λήψη σήματος ή η ύπαρξη επίγειων σταθμών αναφοράς και δεν επηρεάζεται από παρεμβολές ή από περιορισμούς στον χώρο λειτουργίας του (π.χ. σήραγγες).

Τέτοια συστήματα αναπτύχθηκαν για πλοήγηση ρουκετών αρχικά από τον Robert Goddard και στη συνέχεια από τον Wernher von Braun.

2.2 Βασικά Χαρακτηριστικά & Αρχή Λειτουργίας

Στη βασική του δομή, ένα σύστημα αδρανειακού εντοπισμού αποτελείται από:

- 3 γυροσκόπια, για την μέτρηση των στοιχείων στροφής (γωνιακή ταχύτητα) και κατά συνέπεια παρέχει έλεγχο προσανατολισμού του κινητού,
- 3 επιταχυνσιόμετρα, για τον προσδιορισμό της ανηγμένης δύναμης, που επενεργεί στο κινούμενο σώμα, με βάση την οποία υπολογίζεται η επιτάχυνση του κινητού και
- μια υπολογιστική μονάδα, για την εκτέλεση των απαραίτητων μετατροπών και υπολογισμών.

Τα γυροσκόπια και τα επιταχυνσιόμετρα αποτελούν τους αδρανειακούς αισθητήρες του συστήματος και είναι σταθερά τοποθετημένα σε κοινή πλατφόρμα.

Η αρχή λειτουργίας των αδρανειακών συστημάτων στηρίζεται στον 2^ο νόμο του Νεύτωνα, σύμφωνα με τον οποίο η δύναμη F , που ενεργεί σε ένα σώμα μάζας m , είναι ανάλογη της επιτάχυνσής του a :

$$F = ma \tag{2.1}$$

Για τον εντοπισμό της θέσης ενός κινητού μέσου απαιτείται η γνώση αρχικών τιμών για την ταχύτητα και θέση του κινητού και οι μετρήσεις των επιταχύνσεων, που αποτελούν και τις

πρωτογενείς μετρήσεις του αδρανειακού συστήματος. Η σχετική θέση του κινητού προκύπτει ύστερα από διπλή ολοκλήρωση των επιταγών ως προς το χρόνο. Επομένως, αν $x(t)$ και $a(t)$ είναι το διάνυσμα θέσης ενός οχήματος και η επιτάγυνσή του, για τη χρονική στιγμή t , και τότε η ταχύτητά του $\dot{x}(t)$ είναι:

$$\dot{x}(t) = \int_{t_0}^t a(t)dt + \dot{x}_0 \quad (2.2)$$

όπου,

\dot{x}_0 , Ταχύτητα οχήματος τη χρονική στιγμή $t_0 = 0$

Τελικά, η θέση του οχήματος προκύπτει από την εξίσωση:

$$x(t) = \int_{t_0}^t \dot{x}(t)dt + x_0 \quad (2.3)$$

όπου,

x_0 , Διάνυσμα θέσης οχήματος τη χρονική στιγμή $t_0 = 0$

Αυτό συνεπάγεται ότι η ακρίβεια στον προσδιορισμό της θέσης χειροτερεύει με την πάροδο του χρόνου, λόγω των λανθασμένων ενδείξεων των αδρανειακών αισθητήρων.

Πριν την έναρξη λειτουργίας ενός αδρανειακού συστήματος, είναι σημαντική η διαδικασία της ευθυγράμμισης των αξόνων της πλατφόρμας, με αυτούς του συστήματος όπου ανάγονται όλοι οι υπολογισμοί. Η διαδικασία αυτή είναι μηχανική, αν πρόκειται για αδρανειακά συστήματα σταθερής πλατφόρμας και αναλυτική, με την εισαγωγή των κατάλληλων αρχικών τιμών για την μετατροπή των δυο συστημάτων, αν πρόκειται για προσκολλημένα συστήματα.

2.3 Συστήματα Αναφοράς και Μετασχηματισμοί

2.3.1 Γενικά

Δεδομένου ότι η λειτουργία των αδρανειακών συστημάτων εντοπισμού στηρίζεται σε μετρήσεις, που αναφέρονται του νόμους του Νεύτωνα (φυσικό σύστημα), η περιγραφή των κινηματικών χαρακτηριστικών του σώματος προϋποθέτει τη χρήση διαφορετικών συστημάτων αναφοράς και την εφαρμογή των ανάλογων μετασχηματισμών.

2.3.2 Συστήματα αναφοράς αδρανειακών συστημάτων εντοπισμού

Τα βασικά συστήματα αναφοράς, που προϋποθέτουν τη λειτουργία των αδρανειακών συστημάτων εντοπισμού είναι:

- Αδρανειακό σύστημα αναφοράς (Inertial frame)

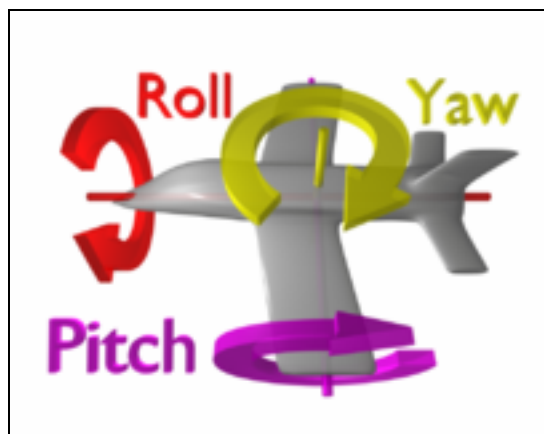
Το αδρανειακό σύστημα αναφοράς ορίζεται καθώς σε αυτό έχουν ισχύ νόμοι του Νεύτωνα, συνεπώς οι βασικές αρχές λειτουργίας των αδρανειακών συστημάτων εντοπισμού μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα τέτοιο σύστημα.

Κέντρο του αδρανειακού συστήματος είναι το κέντρο μάζας της Γης. Ο άξονας X ορίζεται από το σημείο τομής της Εκλειπτικής με τον ουράνιο ισημερινό, ορίζοντας το εαρινό ισημερινό σημείο, ο άξονας Z είναι παράλληλος με τον μέσο άξονα περιστροφής της Γης και ο άξονας Y συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα.

▪ Σύστημα αναφοράς κινητού μέσου (Body frame)

Κινητό μέσο, στο οποίο προσαρμόζονται οι αισθητήρες, μπορεί να είναι αυτοκίνητο, πλοίο, αεροπλάνο ή δορυφόρος. Ως κέντρο του συστήματος ορίζεται το κέντρο μάζας του κινητού μέσου, όμως σε αρκετές περιπτώσεις η αρχή του συστήματος υλοποιείται από κάποιο άλλο σημείο, που είναι σαφέστερα ορισμένο στο κινητό μέσο. Συχνά η αρχή του συστήματος αναφοράς του οχήματος αποτελεί το κέντρο της αδρανειακής μονάδας μέτρησης (IMU).

Ο άξονας X είναι κατά τον διαμήκη άξονα του οχήματος, ο άξονας Y είναι εγκάρσιος στο κινούμενο σώμα και ο άξονας z συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα (Σχήμα 2.1). Η κινηματική συμπεριφορά του σώματος καθορίζεται από τις γωνίες στροφής διατοιχισμός, πρόνευση, αζιμούθιο (*roll, pitch, yaw*), κατά τον διαμήκη άξονα κίνησης, τον εγκάρσιο άξονα του οχήματος και τον κατακόρυφο άξονα αντιστοίχως.



Σχήμα 2.1: Τρισσορθογώνιο σύστημα κίνησης (πηγή: www.wikipedia.org)

Figure 2.1: Roll, pitch, yaw motion's axes set (source: www.wikipedia.org)

▪ Τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς (Local level frame)

Το τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς ουσιαστικά αναφέρεται στο σύστημα πλοήγησης του κινητού μέσου και ορίζεται προκειμένου να περιγραφεί η κίνηση του μέσου, ως προς τον τόπο που βρίσκεται. Επομένως, το κέντρο του τοποκεντρικού συστήματος πρόκειται για ένα σημείο

πάνω στην επιφάνεια της Γης. Ο άξονας Z συμπίπτει με την κάθετο στο ελλειψοειδές, στο συγκεκριμένο τόπο, ο άξονας Y είναι στραμμένος προς τον γεωδαιτικό Βορρά και ο άξονας X συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα.

▪ Γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς (*Earth centered-Earth fixed frame*)

Το γεωκεντρικό σύστημα είναι το τελικό σύστημα, όπου μετασχηματίζονται οι πρωτογενείς μετρήσεις, προκειμένου να είναι δυνατή η περαιτέρω επεξεργασία τους (για παράδειγμα με τον μετασχηματισμό τους σε κάποιο προβολικό σύστημα).

Κέντρο του γεωκεντρικού συστήματος είναι το κέντρο μάζας της Γης, ενώ ο άξονας X διέρχεται από το σημείο τομής του ισημερινού επιπέδου με τον μεσημβρινό του *Greenwich*, ο άξονας Z είναι παράλληλος με τον μέσο άξονα περιστροφής της Γης και ο άξονας Y συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα.

2.3.3 Μετασχηματισμοί συστημάτων αναφοράς

▪ Μετασχηματισμός από το αδρανειακό σύστημα αναφοράς στο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς

Για το λόγο ότι η διαδικασία των μετρήσεων και των περαιτέρω υπολογισμών γίνεται σε ένα σύστημα αναφοράς, το οποίο δεν είναι αδρανειακό, είναι αναγκαίο να μετατραπούν οι συντεταγμένες από το αδρανειακό σύστημα αναφοράς στο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς.

Τα δυο συστήματα αναφοράς διαφέρουν ως προς μια γωνία στροφής, γύρω από τον άξονα Z, $\omega_e t$, όπου ω_e είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της Γης, την χρονική στιγμή t . Η γωνία στροφής, που συνδέει τα δυο συστήματα είναι η γωνία στροφής της Γης. Επομένως, ο πίνακας στροφής από το αδρανειακό σύστημα αναφοράς στο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς είναι:

$$R_i^e = \begin{pmatrix} \cos \omega_e t & \sin \omega_e t & 0 \\ -\sin \omega_e t & \cos \omega_e t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

▪ Μετασχηματισμός από το τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς στο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς

Το τοποκεντρικό σύστημα ή το σύστημα πλοήγησης διαφέρει από το γεωκεντρικό σύστημα, για κάθε χρονική στιγμή, κατά γεωγραφικό πλάτος και μήκος ϕ, λ . Επομένως ο πίνακας μετασχηματισμού είναι:

$$R_l^e = \begin{pmatrix} -\sin \lambda & -\sin \phi \cos \lambda & \cos \phi \cos \lambda \\ \cos \lambda & -\sin \phi \sin \lambda & \cos \phi \sin \lambda \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

- Μετασχηματισμός από το σύστημα αναφοράς του κινητού μέσου στο τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς

Τα δυο συστήματα αναφοράς συσχετίζονται με τις γωνίες στροφής του οχήματος διατοιχισμός, πρόνευση και αζιμούθιο, ως προς το τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς. Συνεπώς, αν οι γωνίες ω, ϕ, κ αντιστοιχούν με τις γωνίες διατοιχισμός, πρόνευση και αζιμούθιο, τότε ο πίνακας μετασχηματισμού των δυο συστημάτων είναι:

$$R_b^l = \begin{pmatrix} \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \phi \sin \kappa & -\sin \kappa \cos \phi & \cos \kappa \sin \omega + \sin \kappa \sin \phi \cos \omega \\ \sin \kappa \cos \omega + \cos \kappa \sin \phi \sin \omega & \cos \kappa \cos \phi & \sin \kappa \sin \omega - \cos \kappa \sin \phi \cos \omega \\ -\cos \kappa \sin \omega & \sin \phi & \cos \phi \cos \omega \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

2.4 Αισθητήρες Αδρανεϊκών Συστημάτων

2.4.1 Γυροσκόπια

Τα γυροσκόπια είναι αισθητήρες που καταγράφουν τις αλλαγές στον προσανατολισμό του συστήματος, με την μέτρηση των γωνιακών ταχυτήτων του κινητού, ως προς το αδρανεϊκό σύστημα αναφοράς. Κατά αυτό τον τρόπο ο προσανατολισμός του συστήματος είναι γνωστός κάθε χρονική στιγμή και παρέχει τα απαραίτητα στοιχεία σύνθεσης (γωνίες στροφής) του φυσικού συστήματος αναφοράς με το γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς.

- Μηχανικά γυροσκόπια (*Mechanical Gyroscopes*)

Τα μηχανικά γυροσκόπια χρησιμοποιούνται κυρίως σε αδρανεϊκά συστήματα σταθερής πλατφόρμας (βλ. Ενότητα 2.5). Η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στο ότι η περιστρεφόμενη μάζα που διαθέτουν, ορίζει σαφώς μια διεύθυνση στο χώρο. Αυτό παρομοιάζεται με την περιστροφή μιας σβούρας, κατά την κίνηση της οποίας ο άξονας περιστροφής της, παραμένει συνεχώς στην ίδια διεύθυνση στον χώρο.

Ο 2^{ος} νόμος του Νεύτωνα περιγράφει ότι η στοφορμή της μάζας αυτής θα παραμείνει σταθερή εκτός κι αν ασκηθεί πάνω της μία ροπή και τότε ο ρυθμός μεταβολής της στοφορμής ισούται με το μέγεθος της ροπής:

$$\frac{dH}{dt} = L \quad (2.7)$$

όπου,

L , Ορμή του σώματος

H , Στροφορμή του σώματος

ενώ για τη στροφορμή ισχύει:

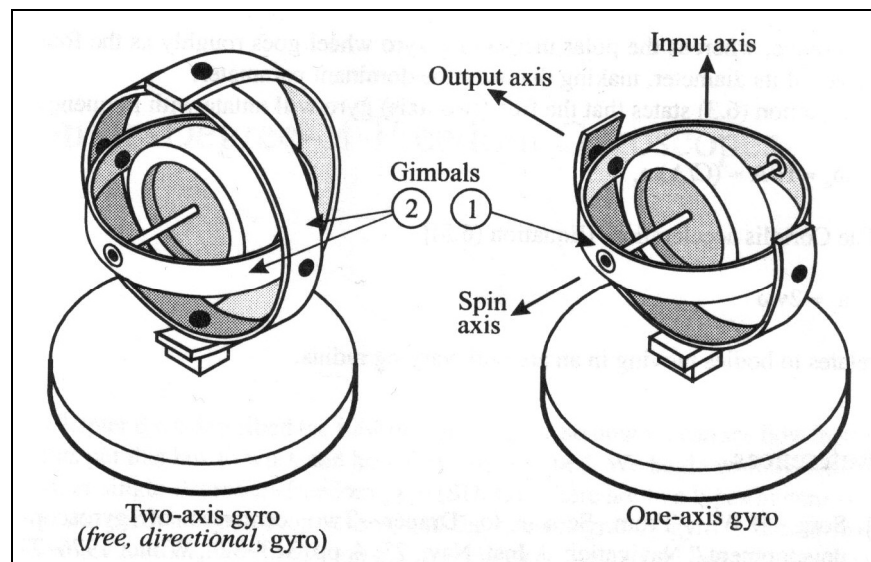
$$H = I\omega \quad (2.8)$$

όπου,

I , Ροπή αδρανείας ως προς τον άξονα

ω , Γωνιακή ταχύτητα του γυροσκοπίου

Οι βαθμοί ελευθερίας ενός γυροσκοπίου καθορίζονται από τον αριθμό των εδράνων, που χρησιμοποιούνται για τη στήριξη της περιστρεφόμενης μάζας και επομένως των αξόνων γύρω από τους οποίους μπορεί το γυροσκόπιο να περιστραφεί. Επίσης, Αναλόγως με τον τρόπο κατασκευής τους, τα μηχανικά γυροσκόπια διαχωρίζονται σε γυροσκόπια ενός βαθμού ελευθερίας (*Single Degree of Freedom - SDF*) και δύο βαθμών ελευθερίας (*Two Degree of Freedom - TDF*) (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2: Γυροσκόπια ενός και δυο βαθμών ελευθερίας (πηγή: Lawrence, 1998)

Figure 2.2: SDF and TDF Gyroscopes (source:Lawrence, 1998)

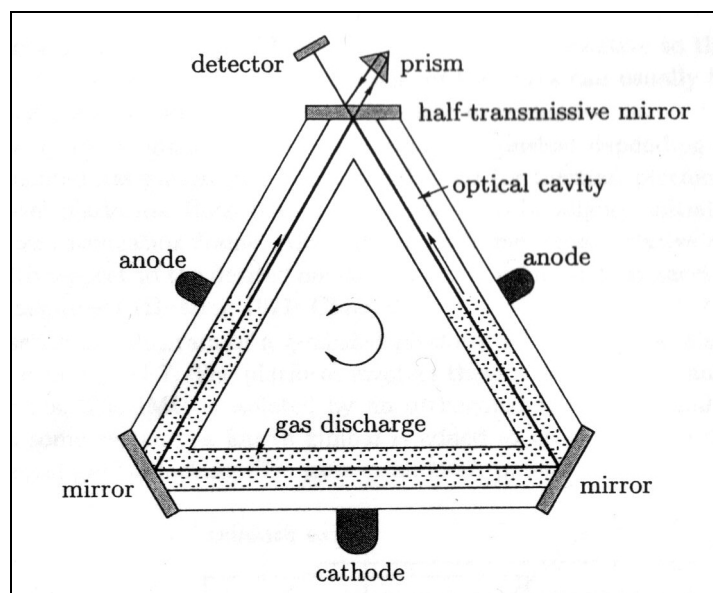
Προκειμένου να είναι δυνατός ο προσδιορισμός των στροφών στους τρεις άξονες ενός τρισσορθογώνιου συστήματος, απαιτούνται είτε τρία γυροσκόπια ενός βαθμού ελευθερίας (ένα σε κάθε άξονα του συστήματος) είτε δύο γυροσκόπια δύο βαθμών ελευθερίας, με μια πλεονάζουσα πληροφορία.

- Οπτικά γυροσκόπια (*Optical Gyroscopes*)

Η αρχή λειτουργίας των οπτικών γυροσκοπίων στηρίζεται στη συμβολή κυμάτων *Sagnac*. Αν από μια πηγή φωτός εκπέμπονται δύο ακτίνες, οι οποίες κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις, τότε σε κατάσταση ηρεμίας οι δύο ακτίνες διανύουν την ίδια απόσταση για να επιστρέψουν στην πηγή. Αν η πηγή φωτός περιστραφεί κατά γωνία ω , τότε η μια ακτίνα θα επιστρέψει πιο γρήγορα στην πηγή απ' ό,τι η άλλη.

Τα οπτικά γυροσκόπια είναι κατάλληλα για προσκολλημένα αδρανειακά συστήματα (βλ. Ενότητα 2.5) και έχουν ένα βαθμό ελευθερίας, επομένως απαιτούνται τρία γυροσκόπια ένα σε κάθε άξονα, για τη μέτρηση σε τρεις διαστάσεις. Υπάρχουν δυο είδη τοπικών γυροσκοπίων. τα γυροσκόπια με δακτύλιο λέιζερ (*Ring Laser Gyroscopes*) και τα γυροσκόπια οπτικών ινών (*Fiber Optic Gyroscopes*).

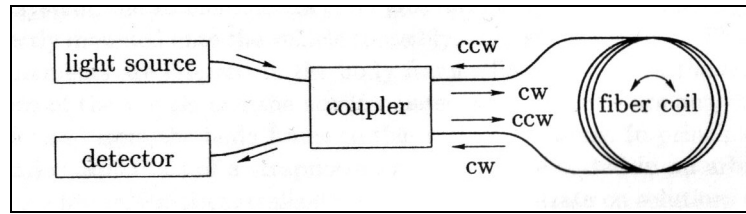
Η αρχή λειτουργίας του δακτύλιου λέιζερ φαίνεται στο Σχήμα 2.3 και η τυπική διάταξη λειτουργίας του είναι με τρεις ή τέσσερις καθρέπτες για την ανάκλαση της οπτικής ακτίνας και τη δημιουργία του βρόχου.



Σχήμα 2.3: Γυροσκόπια με δακτύλιο λέιζερ (πηγή: *Hofmann-Wellenhof, Negat, Wieser, 2003*)

Figure 2.3: Ring Laser Gyroscope (source: *Hofmann-Wellenhof, Negat, Wieser, 2003*)

Αντιθέτως, τα γυροσκόπια οπτικών ινών σχηματίζουν το βρόχο, επιβάλλοντας στις ακτίνες να διέρχονται μέσα από οπτική ίνα σε σχήμα πηνίου (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4: Γυροσκόπια με οπτικών ινών (πηγή: Hofmann-Wellenhof, Negat, Wieser, 2003)

Figure 2.4: Fiber Optic Gyroscope (source: Hofmann-Wellenhof, Negat, Wieser, 2003)

2.4.2 Επιταχυνσιόμετρα

Τα επιταχυνσιόμετρα είναι αισθητήρες για τη μέτρηση της δύναμης, που ενεργεί σε κινούμενο σώμα και σύμφωνα με τον 2^ο νόμο του Νεύτωνα με τη μέτρηση της δύναμης προκύπτει η επιτάχυνση.

Στο αδρανειακό σύστημα τοποθετούνται τρία επιταχυνσιόμετρα, ένα σε κάθε άξονα, ώστε να προσδιορίζεται η επιτάχυνση ως προς κάθε διεύθυνση του αδρανειακού συστήματος αναφοράς.

Η επιτάχυνση, που αντιστοιχεί στη μετρούμενη δύναμη, περιλαμβάνει μια συνιστώσα, λόγω της κίνησης αλλά και μια συνιστώσα, λόγω του πεδίου βαρύτητας της γης. Ο διαχωρισμός αυτών των συνιστωσών δεν είναι δυνατός, επομένως ο προσδιορισμός της επιτάχυνσης, που οφείλεται στην κίνηση του σώματος, μπορεί να προσδιοριστεί αν είναι γνωστή η ένταση του βαρυτικού πεδίου στην περιοχή μελέτης.

Παρακάτω παρουσιάζονται δύο βασικά είδη επιταχυνσιομέτρων:

- Επιταχυνσιόμετρα εξισορρόπησης δυνάμεων (*Force rebalance Accelerometer*)

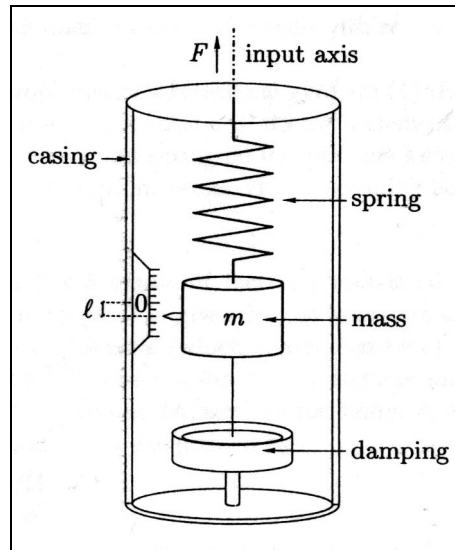
Πρόκειται για μηχανικά επιταχυνσιόμετρα και χρησιμοποιούν διάταξη ελατηρίων ή εκκρεμών. Η συνηθέστερη διάταξη αυτού του είδους επιταχυνσιομέτρων είναι μια μάζα, η οποία ισορροπεί πάνω σε ελατήριο, η κίνηση της οποία καταγράφεται από γραμμικό μετρητή απόστασης. Η μετάθεση της μάζας είναι ανάλογη της εφαρμοσμένης δύναμης F , μέσω του νόμου του Hooke και επομένως ανάλογη και της επιτάχυνσης (Σχήμα 2.5).

$$F = -k_{ελ} l \quad (2.9)$$

όπου,

$k_{ελ}$, Σταθερά του ελατηρίου

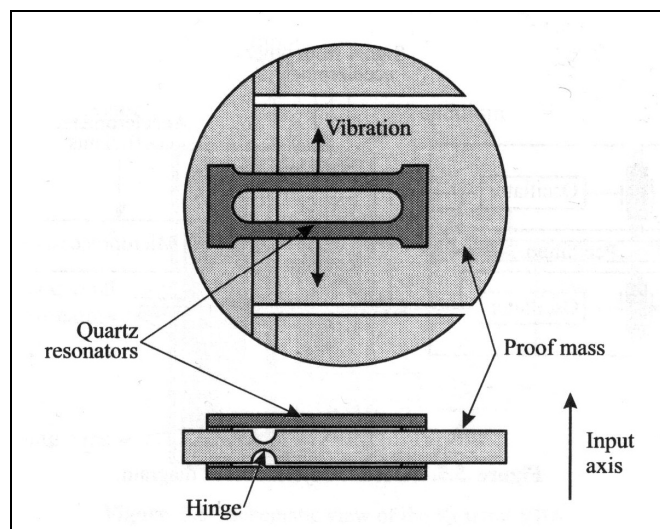
l , Σχετική μετάθεση της μάζας



Σχήμα 2.5: Επιταχυνσιόμετρο με διάταξη ελατηρίου (πηγή: Hofmann-Wellenhof, Negat, Wieser, 2003)
Figure 2.5: Spring accelerometer (source: Hofmann-Wellenhof, Negat, Wieser, 2003)

- Δονούμενα επιταχυνσιόμετρα (*Vibrating Beam Accelerometer*)

Λειτουργούν βάσει της αρχής ότι η συχνότητα συντονισμού μιας μάζας, που κρέμεται από ένα σύρμα διαφοροποιείται, όταν δρα μια δύναμη στη μάζα αυτή, κατά την διεύθυνση του σύρματος. Ειδική περίπτωση των δονούμενων επιταχυνσιομέτρων αποτελούν τα δονούμενα επιταχυνσιόμετρα κρυστάλλου χαλαζία (*Quartz Vibrating Beam Accelerometer*). Σε αυτά δεν χρησιμοποιείται σύρμα, αλλά ζεύγος κρυστάλλων χαλαζία, οι οποίοι παρουσιάζουν μεγαλύτερη μηχανική και θερμική σταθερότητα, ενώ η μάζα αντικαθίσταται από αρθρωτό εκκρεμές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Από τη διαφορά στη συχνότητα συντονισμού των δύο κρυστάλλων προκύπτει η εφαρμοζόμενη δύναμη και άρα η επιτάγχυση.

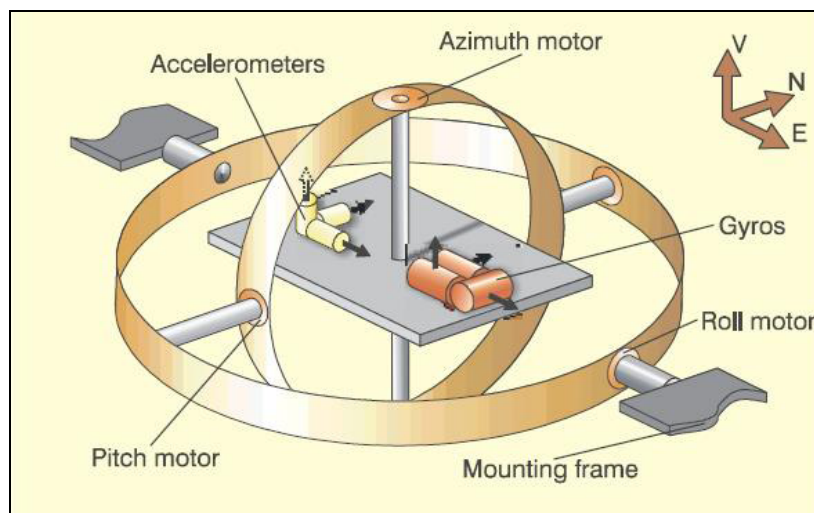


Σχήμα 2.6: Δονούμενο επιταχυνσιόμετρο κρυστάλλου χαλαζία (πηγή: Lawrence, 1998)
Figure 2.6: Quartz Vibrating Beam Accelerometer (source: Lawrence, 1998)

2.5 Είδη Αδρανειακών Συστημάτων

2.5.1 Συστήματα σταθερής πλατφόρμας

Τα αδρανειακά συστήματα σταθερής πλατφόρμας (*gimballed systems*) αποτελούνται από μια διάταξη, όπου οι αισθητήρες είναι τοποθετημένοι σε πλατφόρμα (Σχήμα 2.7) και ένα σύστημα σερβομηχανισμών. Με αυτή τη διάταξη, η πλατφόρμα απομονώνεται από τις στροφές του οχήματος, οπότε ο τρισδιάστατος προσανατολισμός του συστήματος παραμένει σταθερός. Επίσης, τα γυροσκόπια καταγράφουν τις στροφές της πλατφόρμας και με τη βοήθεια των σερβομηχανισμών η πλατφόρμα επανέρχεται στον καθορισμένο της προσανατολισμό.



Σχήμα 2.7: Σύστημα σταθερής πλατφόρμας (πηγή: www.tkt.cs.tut.fi)

Figure 2.7: Gimballed system (source: www.tkt.cs.tut.fi)

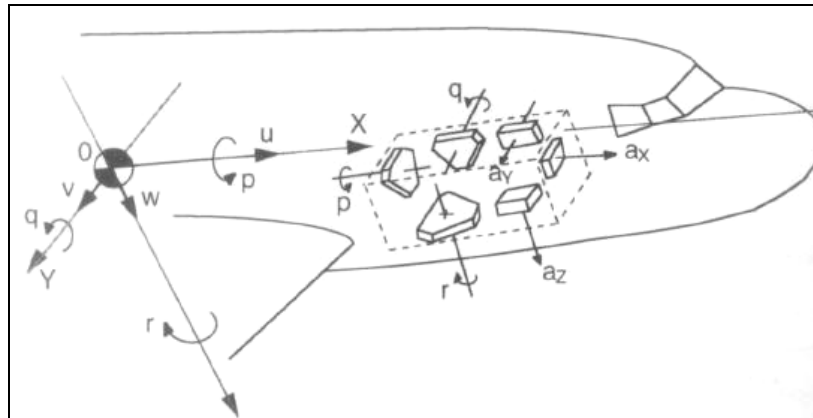
Τα συστήματα σταθερής πλατφόρμας είναι σχεδιασμένα ώστε να παρέχουν μετρήσεις ακριβείας. Ωστόσο, το μηχανικό τους μέρος αποτελείται από ογκώδη και μεγάλου βάρους τμήματα, ενώ για την κατασκευή τους απαιτούνται ειδικές τεχνικές, καθιστώντας τα αφενός περίπλοκα, από μηχανικής πλευράς και αφετέρου συστήματα μεγάλου κόστους. Επίσης, για την λειτουργία τους απαιτείται μεγάλη κατανάλωση ισχύος.

Η αρχική ευθυγράμμιση (*initial alignment*) των συστημάτων σταθερής πλατφόρμας, δηλαδή ο προσδιορισμός των αρχικών τιμών θέσης και ταχύτητας, καθώς και του προσανατολισμού της, γίνεται μηχανικά. Στην περίπτωση αυτή η πλατφόρμα ευθυγραμμίζεται με βάση το τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς κάτι που απαιτεί την ακριβή γνώση των διευθύνσεων των αξόνων του.

2.5.2 Προσκολλημένα συστήματα

Στα προσκολλημένα συστήματα (*strapdown systems*) οι αισθητήρες τοποθετούνται απ' ευθείας πάνω στο όχημα και επομένως το σύστημα ακολουθεί τις κινήσεις του οχήματος. Οι μετρήσεις των γωνιακών κινήσεων του οχήματος, από τα γυροσκόπια και των επιταχύνσεων από τα

επιταγχνισιόμετρα πρέπει να μετατραπούν από το σύστημα αναφοράς του οχήματος στο τοπικό σύστημα αναφοράς (ή σύστημα αναφοράς πλοήγησης), προκειμένου να γίνει προσδιορισμός της θέσης ενός σημείου. (Σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.8: Προσκολλημένο σύστημα (πηγή: www.tkt.cs.tut.fi)

Figure 2.8: Strapdown system (source: www.tkt.cs.tut.fi)

Αυτά τα συστήματα δεν αποτελούνται από πολύπλοκα μηχανικά μέρη, κάτι που τα καθιστά πιο απλά στην κατασκευή τους και επομένως πιο οικονομικά. Συγκριτικά με τα συστήματα σταθερής πλατφόρμας, τα προσκολλημένα συστήματα χρησιμοποιούνται περισσότερο λόγω του χαμηλού κόστους τους, παρ' όλο που δεν παρέχουν την ακρίβεια των συστημάτων σταθερής πλατφόρμας.

Σε αντίθεση με τα συστήματα σταθερής πλατφόρμας, στα προσκολλημένα συστήματα η αρχική ευθυγράμμιση πραγματοποιείται με αναλυτικό τρόπο, με τον υπολογισμό του πίνακα μετασχηματισμού από το σύστημα αναφοράς του οχήματος στο τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς.

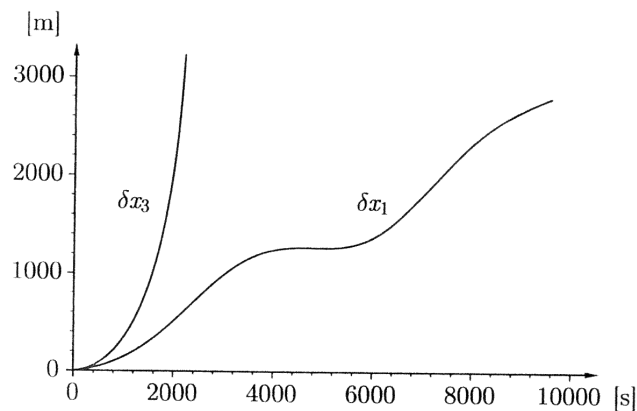
2.6 Σφάλματα Αδρανειακών Συστημάτων

2.6.1 Σφάλματα γυροσκοπίων

Τα γυροσκόπια, εκ κατασκευής τους, παρουσιάζουν σφάλματα στη λειτουργία τους, με αποτέλεσμα να επηρεάζονται οι μετρήσεις. Ωστόσο, η συμπεριφορά των σφαλμάτων διαφέρει, αν πρόκειται για μηχανικά ή οπτικά γυροσκόπια. Τα συστηματικά σφάλματα που εισάγονται αφορούν στο σφάλμα λανθασμένης μέτρησης (*bias*) και στο σφάλμα κλίμακας – βαθμονόμησης οργάνου (*scale factor*).

Το σφάλμα λανθασμένης εκτίμησης πρόκειται για την ένδειξη στην τιμή του γυροσκοπίου όταν αυτό βρίσκεται σε ακινησία. Σε ιδανικές συνθήκες η ένδειξη θα ήταν μηδενική, κάτι που δεν

συμβαίνει λόγω κατασκευαστικών ατελειών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του σφάλματος στον οριζοντιογραφικό προσδιορισμό θέσης, ενώ το αντίστοιχο σφάλμα στον προσδιορισμό της υψομετρικής πληροφορίας αυξάνει με μεγαλύτερο ρυθμό (Σχήμα 2.9).



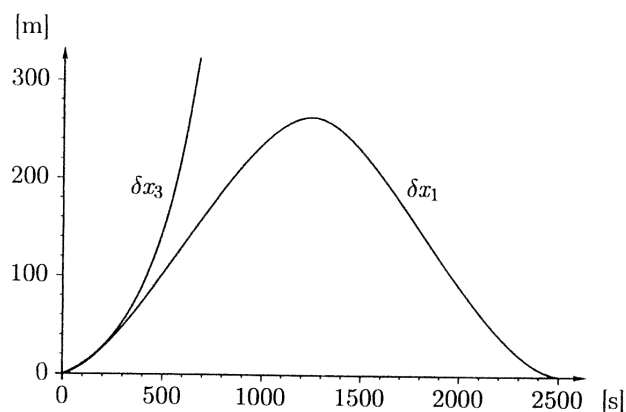
Σχήμα 2.9: Θεωρητική λειτουργία INS, λόγω σφάλματος λανθ. εκτ. γυροσκοπίου (πηγή: Hofmann-Wellenhof, Negat, Wieser, 2003)

Figure 2.9: Theoretical INS performance due to a gyroscope bias (source: Hofmann-Wellenhof, Negat, Wieser, 2003)

Το σφάλμα στην βαθμονόμηση του οργάνου είναι σημαντικό κυρίως στα προσκολλημένα συστήματα, σε αντίθεση με τα συστήματα σταθερής πλατφόρμας.

2.6.2 Σφάλματα επιταχυνσιομέτρων

Η απόδοση των επιταχυνσιομέτρων επηρεάζεται από κατασκευαστικούς παράγοντες, όπως είναι η θερμική ευαισθησία ή η πιθανή αστάθεια των αξόνων του αισθητήρα, κάτι που οδηγεί σε συστηματικά σφάλματα. Όπως και στην περίπτωση των γυροσκοπίων πρόκειται για τα συστηματικά σφάλματα λανθασμένης εκτίμησης και συντελεστή κλίμακας.



Σχήμα 2.10: Θεωρητική λειτουργία INS, λόγω σφάλματος λανθ. εκτ. επιταχ/τρου (πηγή: Hofmann-Wellenhof, Negat, Wieser, 2003)

Figure 2.10: Theoretical INS performance due to an accelerometer bias (πηγή: Hofmann-Wellenhof, Negat, Wieser, 2003)

Η επίδραση του σφάλματος λανθασμένης εκτίμησης, ως προς το σφάλμα σε οριζοντιογραφία και υψομετρία παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.10.

2.6.3 Σφάλματα ευθυγράμμισης πλατφόρμας

Η σωστή ευθυγράμμιση της πλατφόρμας πρέπει να ελέγχεται και να ανανεώνεται τακτικά, με τη χρήση εξωτερικής πληροφορίας για την ταχύτητα και θέση. Αυτό γίνεται με τον έλεγχο μηδενικής ταχύτητας (στην ξένη βιβλιογραφία αναφέρεται ως *Zero Velocity Updates - ZUPT*). Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, το όχημα πρέπει να ακινητοποιηθεί για κάποιο χρονικό διάστημα και να ελεγχθεί η ένδειξη των δυο επιταχυσιομέτρων, που καταγράφουν οριζόντια επιτάχυνση. Θα πρέπει να έχουν μηδενική ένδειξη, ενώ σε αντίθετη περίπτωση, η πλατφόρμα δεν είναι ευθυγραμμισμένη. Οι μετρήσεις αυτές αποτελούν τα σφάλματα της πλατφόρμας. και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την διόρθωση των συντεταγμένων στη συγκεκριμένη θέση. Ομοίως, το γυροσκόπιο κατά τον ανατολικό άξονα δεν πρέπει να καταγράφει στροφή.

Όταν δεν είναι δυνατό να εφαρμοστεί η διαδικασία *ZUPT*, σε αεροσκάφη ή πλοία (όπου δηλαδή δεν είναι δυνατό να ακινητοποιηθεί το όχημα), ο προσδιορισμός της θέσης πραγματοποιείται με κάποιο άλλο σύστημα εντοπισμού, γι' αυτό και τα αδρανειακά συστήματα συνήθως συνδυάζονται με δορυφορικό σύστημα, π.χ. το GPS.

2.7 Πεδία Εφαρμογών & Αξιολόγηση Αδρανειακών Συστημάτων

Τα αδρανειακά συστήματα χρησιμοποιούνται για εφαρμογές εντοπισμού θέσης, πλοήγησης, ναυσιπλοΐας και αεροπλοΐας, ενώ μπορούν να προσαρμοστούν σε διάφορους τύπους οχημάτων, συμπεριλαμβανομένων και αεροσκαφών, υποβρυχίων, διαστημοπλοίων και κατευθυνόμενων πυραύλων.

Πρόκειται για αυτοτελή συστήματα εντοπισμού, δεν προϋποθέτουν χρήση εξωτερικής κεραίας και η λειτουργία τους δεν βασίζεται στη λήψη κάποιου σήματος. Παρέχουν τη δυνατότητα εντοπισμού ενός κινητού μέσου, υπό υποιεσδήποτε συνθήκες, χωρίς περιορισμούς στην ορατότητα, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των GNSS. Ο προσδιορισμός της θέσης επιτυγχάνεται με μεγάλη ακρίβεια, αν πρόκειται για μετρήσεις σε σύντομο χρονικό διάστημα. Ωστόσο, τα σφάλματα στη θέση του οχήματος αυξάνουν τετραγωνικά ως προς το χρόνο, αν το σύστημα δεν δέχεται ανανέωση των μετρήσεων από εξωτερικές πηγές πληροφόρησης.

Σημαντικό είναι το γεγονός ότι τα αδρανειακά συστήματα συνδυάζονται και με άλλα συστήματα πλοήγησης, όπως το σύστημα GNSS, με σκοπό την βελτιστοποίηση των δυνατοτήτων και των τελικών αποτελεσμάτων.

Τα μειονεκτήματα τους έγκεινται στο μεγάλο μέγεθος και βάρος τους, κάτι που συνεχώς μειώνεται, αλλά κυρίως στο μεγάλο κόστος απόκτησης και λειτουργίας τους. Επίσης, παρουσιάζει μεγάλες απαιτήσεις σε ενέργεια, οι οποίες συνεχώς μειώνονται αλλά είναι ακόμη υψηλότερες από τις αντίστοιχες των δεκτών GPS. Επιπλέον, οι μετρήσεις των επιταχυνσιομέτρων είναι επηρεασμένες από την βαρυτική έλξη της γης, κάτι που απαιτεί την γνώση της έντασης του βαρυτικού πεδίου στη συγκεκριμένη περιοχή, ώστε να είναι εφικτός ο διαχωρισμός των ασκούμενων δυνάμεων.

3.1 Γενικά

Με την γενική έννοια του φίλτρου δηλώνεται μια διαδικασία, που σκοπό έχει τον διαχωρισμό μη επιθυμητών στοιχείων από τη χρήσιμη πληροφορία. Ειδικότερα, ένα μαθηματικό φίλτρο συνδυάζει και συμπληρώνει πληροφορία με τη βοήθεια μετρήσεων και γνώσεων χαρακτηριστικών για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Το φίλτρο Kalman αναπτύχθηκε από τον μαθηματικό Rudolf Kalman την περίοδο 1960/61 και ουσιαστικά αποτελεί την εφαρμογή διαδοχικών συνορθώσεων, που επιτρέπει την εκτίμηση της δυναμικής κατάστασης ενός συστήματος, υπολογίζοντας τις καλύτερες τιμές των παραμέτρων, που διαφοροποιούνται με το χρόνο. Αυτό αφορά σε μετρήσεις κάθε χρονικής στιγμής και μεταξύ δυο χρονικών στιγμών, χρησιμοποιώντας όλες τις προηγούμενες παρατηρήσεις, που ενδεχομένως να είναι ελλιπείς είτε/ και να περιέχουν θόρυβο.

Το εύρος των εφαρμογών, που επιλύονται με φίλτρο Kalman, είναι μεγάλο και μπορεί να περιλαμβάνει προβλήματα μηχανικού υπολογιστών, γεωδαισίας και τοπογραφίας.

Μια πρακτική εφαρμογή του φίλτρου Kalman είναι η περίπτωση ενός οχήματος, για το οποίο ζητείται η συνεχής εκτίμηση των παραμέτρων της θέσης και της ταχύτητας του, βάσει παρατηρήσεων. Με τη βοήθεια του φίλτρου, επιτυγχάνεται απαλλαγή των θορύβων από τις μετρήσεις και γίνεται ακριβής εκτίμηση της θέσης του οχήματος σε παρούσα χρονική στιγμή (μέθοδος φιλτραρίσματος), σε μελλοντική χρονική στιγμή (μέθοδος πρόβλεψης) ή σε χρονική στιγμή του παρελθόντος (μέθοδος εξομάλυνσης).

3.2 Πρόβλεψη, Φιλτράρισμα & Εξομάλυνση

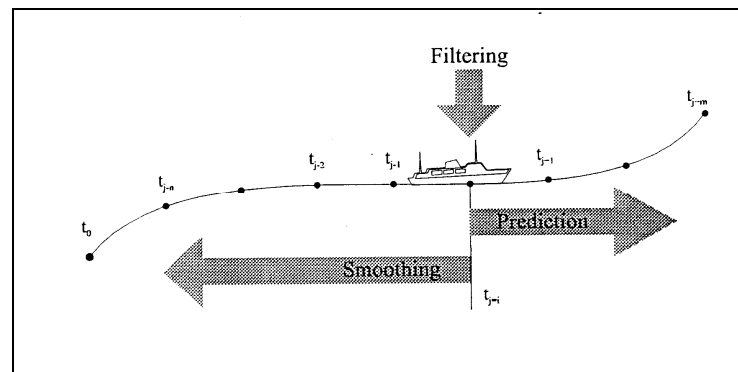
Τα τρία στάδια, από τα οποία αποτελείται το πρόβλημα εκτίμησης με το φίλτρο Kalman, είναι η πρόβλεψη, το φιλτράρισμα και η εξομάλυνση. Αυτοί σχετίζονται με την εκτίμηση των παραμέτρων του διανύσματος κατάστασης x , ενός προβλήματος όπου οι παράμετροί του μεταβάλλονται συναρτήσει κάποιας μεταβλητής, αναλόγως με το είδος του προβλήματος.

Στο στάδιο της πρόβλεψης εκτιμάται η θέση ενός κινητού σε μεταγενέστερη χρονική στιγμή, από αυτή που βρίσκεται το κινητό. Σε αυτή την περίπτωση είναι διαθέσιμες οι μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή και όχι μέχρι τη χρονική στιγμή που πρόκειται

να γίνει η εκτίμηση. Επομένως, υπολογίζεται ένα προβλεπόμενο διάνυσμα κατάστασης x , το οποίο αναφέρεται στη μελλοντική χρονική στιγμή. Αυτό το διάνυσμα χρησιμοποιείται, σε συνδυασμό με τις νέες μετρήσεις, για να προκύψει η νέα εκτίμηση. Αυτή είναι η περίπτωση του φιλτραρίσματος, κατά την οποία, ο χρόνος της τελευταίας μέτρησης (ή μετρήσεων) συμπίπτει με το χρόνο εκτίμησης.

Στο στάδιο της εξομάλυνσης, οι παράμετροι του διανύσματος κατάστασης x μπορούν να υπολογιστούν για οποιαδήποτε χρονική στιγμή t_j , όπου χρησιμοποιούνται οι παρατηρήσεις για κάποιο χρονικό διάστημα πριν και μετά της t_j . Η συγκεκριμένη λύση πραγματοποιείται σε εκ των υστέρων επεξεργασία, γι' αυτό και μπορεί να είναι διαθέσιμη με κάποια καθυστέρηση. Συνήθως, στις περισσότερες γεωδαιτικές εφαρμογές πραγματικού χρόνου, εφαρμόζονται μόνο τα στάδια της πρόβλεψης και φιλτραρίσματος, καθώς τα αποτελέσματα προκύπτουν άμεσα.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα απλό παράδειγμα των τριών τύπων προβλημάτων: Αν έχουμε ένα κινούμενο σκάφος και τις χρονικές στιγμές t_1, t_2, \dots, t_n βρίσκεται αντιστοίχως στις θέσεις $1, 2, \dots, n$ και θεωρήσουμε ως t_i την παρούσα στιγμή και ως t_j τη στιγμή που θέλουμε να εκτιμήσουμε τη θέση του σκάφους, τότε (σχήμα 3.1)



Σχήμα 3.1: Παράδειγμα πρόβλεψης, φιλτραρίσματος και εξομάλυνσης (πηγή: Gikas, 1996)

Figure 3.1: Prediction, filtering and smoothing example (source: Gikas, 1996)

αν $t_i < t_j$, έχουμε πρόβλεψη (*prediction*)

αν $t_i = t_j$, έχουμε φιλτράρισμα (*filtering*)

αν $t_i > t_j$, έχουμε εξομάλυνση (*smoothing*)

3.3 Φίλτρο Kalman & M.E.T.

Το φίλτρο Kalman και η Μεθόδος των Ελαχίστων Τετραγώνων (M.E.T.) διαφοροποιούνται σε ορισμένα σημεία. Η βασική τους διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι το φίλτρο Kalman έχει το πλεονέκτημα να συνδυάζει το μοντέλο παρατήρησης (αφορά στις μετρήσεις) με το δυναμικό μοντέλο (αφορά στη συμπεριφορά του συστήματος συναρτήσει του χρόνου), προκειμένου να προσδιοριστεί η βέλτιστη λύση.

Λόγω αυτής της διαφοράς είναι κατανοητό ότι η M.E.T., εφόσον δεν περιέχει το δυναμικό μοντέλο, δεν λαμβάνει υπόψη την πληροφορία από την δυναμική κατάσταση του συστήματος, με συνέπεια να επιλύει κάθε εποχή ξεχωριστά και ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες. Αντιθέτως, το φίλτρο Kalman λαμβάνει πληροφορίες τόσο από το μοντέλο παρατήρησης όσο και από το δυναμικό μοντέλο. Επιπλέον, παρουσιάζει το πλεονέκτημα να δίνει αποτελέσματα σε πραγματικό χρόνο, με εκπόνηση απλών υπολογισμών.

Το φίλτρο Kalman δύναται να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της κινητικής κατάστασης ενός συστήματος, ακόμη και στην περίπτωση που οι παρατηρήσεις δεν αρκούν για τον προσδιορισμό των παραμέτρων, για κάποια χρονική στιγμή. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αποτελεί ο προσδιορισμός της θέσης ενός οχήματος από μετρήσεις GPS, με δεδομένα από λιγότερους από τέσσερις δορυφόρους. Εντούτοις, κάτι τέτοιο μπορεί να εφαρμοστεί για περιορισμένα χρονικά διαστήματα, σε διαφορετική περίπτωση τα αποτελέσματα χαρακτηρίζονται από χαμηλή ακρίβεια.

Επίσης, τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται και επεξεργάζονται με τη M.E.T., πρέπει να αναφέρονται σε συγκεκριμένη εποχή. Επομένως, όταν είναι διαθέσιμη επιπλέον πληροφορία δεν μπορεί να αξιοποιηθεί με τη M.E.T., καθώς δεν θα ανήκουν σε κάποια εποχή παρατήρησης. Αντιθέτως, το φίλτρο Kalman είναι σχεδιασμένο ώστε να δέχεται και να αξιοποιεί δεδομένα από συνεχείς παρατηρήσεις.

Τέλος, η χρήση του φίλτρου Kalman ενδείκνυται όταν η εφαρμογή απαιτεί τον συνδυασμό παρατηρήσεων διαφορετικών τύπων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η εφαρμογή του φίλτρου Kalman στα ολοκληρωμένα συστήματα πλοήγησης GNSS/INS. Ειδικότερα, στην περίπτωση που δεν υπάρχει ικανοποιητικός αριθμός δορυφόρων από το σύστημα GNSS, δεν είναι δυνατός ο ασφαλής προσδιορισμός της θέσης του κινητού. Ωστόσο, η προσδιορισμένη θέση βελτιώνεται σημαντικά όταν χρησιμοποιηθούν οι παρατηρήσεις από το αδρανειακό σύστημα εντοπισμού (INS). Ανάλογες εφαρμογές, όπου απαιτείται η χρήση παρατηρήσεων διαφορετικών τύπων, η M.E.T. μπορεί να υποστηρίξει υπό ορισμένες προϋποθέσεις, που εξαρτώνται από τον τύπο των μετρήσεων.

3.4 Μορφοποίηση Φίλτρου Kalman

Τρία είναι τα μαθηματικά μοντέλα που συντελούν στην εφαρμογή του φίλτρου Kalman. Το Πρωτεύον μοντέλο, το οποίο συσχετίζει τις παραμέτρους του διανύσματος κατάστασης με τις μετρήσεις, το Δευτερεύον ή Δυναμικό μοντέλο, το οποίο συσχετίζει τις παραμέτρους μια εποχής με αυτές μια μεταγενέστερης εποχής και τέλος το Στοχαστικό μοντέλο, το οποίο περιγράφει την ποιότητα του Πρωτεύοντος και Δευτερεύοντος μοντέλου.

3.4.1 Πρωτεύον μοντέλο

Πρωτεύον μοντέλο καλείται το συναρτησιακό μοντέλο που δημιουργείται κάθε χρονική στιγμή t_i που γίνονται μετρήσεις, για τον προσδιορισμό των αγνώστων παραμέτρων του διανύσματος κατάστασης \hat{x}_i .

Αν το διάνυσμα των αληθινών τιμών είναι \hat{x}_i και το διάνυσμα των μετρήσεων και των υπολοίπων είναι αντιστοίχως l_i και v_i , τότε για το Πρωτεύον μοντέλο ισχύει:

$$F_i(\hat{x}_i) = l_i + v_i \quad (3.1)$$

$$\text{Σε γραμμική μορφή } A_i \hat{x}_i = l_i + v_i \quad (3.2)$$

όπου,

A_i , Πίνακας σχεδιασμού

Να σημειωθεί ότι το Πρωτεύον μοντέλο, για γεωδαιτικές εργασίες, δεν είναι επαρκές, προκειμένου να υπολογιστούν οι άγνωστες παράμετροι του διανύσματος κατάστασης. Συνεπώς, απαιτείται η εφαρμογή του Δευτερεύοντος μοντέλου, το οποίο σχετίζεται άμεσα με τη δυναμική του συστήματος, ώστε να επιλυθούν οι όροι για την ταχύτητα και την επιτάχυνση.

3.4.2 Δευτερεύον ή δυναμικό μοντέλο

Ακολούθως, θεωρείται και ένα συναρτησιακό μοντέλο που συνδέει τις τιμές των παραμέτρων μεταξύ των δύο χρονικών στιγμών, το οποίο καλείται Δευτερεύον ή Δυναμικό μοντέλο.

$$\text{Σε διακριτή μορφή } \Phi_{i,i+1}(x_i, x_{i+1}, \Delta t) = 0 \quad (3.3)$$

$$\text{Σε γραμμική μορφή } x_{i+1} = x_i + M_i x_i + y_i, \quad (3.4)$$

όπου,

x_i , Διάνυσμα Κατάστασης, δηλαδή το διάνυσμα των παραμέτρων προς εκτίμηση

M , Πίνακας μετάβασης από τη χρονική στιγμή t_{i-1} μέχρι την t_i

y , Διάνυσμα αγνώστων σφαλμάτων (ατελειών) του Δευτερεύοντος μοντέλου (δεν είναι σφάλματα που οφείλονται σε μετρήσεις αλλά σε δυναμική του σκάφους).

Για το διάνυσμα αγνώστων σφαλμάτων y_i ισχύει:

$$y_i = T_i g_i \quad (3.5)$$

όπου,

g , Διάνυσμα μεγεθών που προκαλούν σφάλματα στο Δευτερεύον μοντέλο

T , Πίνακας επιλεγμένων συντελεστών ώστε το γινόμενο Tg να εκφράζει την επίδραση στο διάνυσμα κατάστασης x_i .

Το διάνυσμα y_i συνοδεύεται από τον πίνακα βαρών του Δευτερεύοντος μοντέλου P_y , για τον οποίο ισχύει:

$$P_y = Q_y^{-1} \quad (3.6)$$

όπου,

Q_y τον πίνακα συντελεστών βάρους του Δευτερεύοντος μοντέλου.

3.4.3 Στοχαστικό μοντέλο

Το Στοχαστικό μοντέλο αποτελούν οι πίνακες μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας (ή πίνακες συντελεστών βάρους) του Πρωτεύοντος και Δευτερεύοντος μοντέλου. Επομένως:

- Για το Πρωτεύον μοντέλο είναι ο πίνακας Q_i , που συνοδεύει το διάνυσμα των μετρήσεων l_i και τα στοιχεία του ανταποκρίνονται στην ακρίβεια με την οποία έχουν προσδιοριστεί οι μετρήσεις, τη χρονική στιγμή i .
- Για το Δευτερεύον μοντέλο είναι ο πίνακας Q_{y_i} , που συνοδεύει το διάνυσμα αγνώστων σφαλμάτων y_i και περιγράφει την ακρίβεια του Δευτερεύοντος μοντέλου. Για τον πίνακα Q_{y_i} ισχύει:

$$Q_{y_i} = T_i Q_{g_i} T_i^T \quad (3.7)$$

Ο προσδιορισμός του Στοχαστικού μοντέλου είναι απαραίτητος προκειμένου να υλοποιηθεί το φίλτρο Kalman, καθώς η συμπεριφορά του φίλτρου εξαρτάται από τη σχέση μεταξύ των βαρών των μοντέλων Q_i και $Q_{y_i} = T_i Q_{g_i} T_i^T$. Ουσιαστικά, αυτό αφορά την «ρύθμιση» του φίλτρου ή εναλλακτικά στην ξένη βιβλιογραφία αναφέρεται ως *“tuning” of the filter*. Αν τα βάρη των παρατηρήσεων θεωρηθούν μεγάλα, σε σχέση με τα βάρη του Δευτερεύοντος μοντέλου, τότε από την εφαρμογή του φίλτρου προκύπτει ανώμαλη τροχιά, με τη δυνατότητα να εντοπίζονται γρήγορα απότομες αλλαγές στην πορεία του σκάφους. Αντιθέτως, αν θεωρηθεί ότι το Δευτερεύον μοντέλο έχει προσδιοριστεί με μεγάλη ακρίβεια, προκύπτει ομαλή τροχιά του σκάφους, χωρίς όμως τη δυνατότητα ανταπόκρισης σε απότομες αλλαγές πορείας.

3.5 Εξισώσεις Φίλτρου Kalman

3.5.1 Εξισώσεις πρόβλεψης

Στο στάδιο της πρόβλεψης υπολογίζεται το διάνυσμα κατάστασης x , μιας μελλοντικής χρονικής στιγμής, χωρίς να διατίθενται μετρήσεις για τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Με βάση τον πίνακα μετάβασης του Δευτερεύοντος μοντέλου το προβλεπόμενο διάνυσμα κατάστασης $\hat{x}_{i/i-1}$, για τη χρονική στιγμή t_i είναι

$$\hat{x}_{i/i-1} = M_{i-1} \hat{x}_{i-1} \quad (3.8)$$

και συνοδεύεται από τον πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας

$$Q_{\hat{x}_{i/i-1}} = Q_{M_{i-1} \hat{x}_{i-1}} + Q_{y_{i-1}} = M_{i-1} Q_{\hat{x}_{i-1}} M_{i-1}^T + T_{i-1} Q_{g_i} T_{i-1}^T \quad (3.9)$$

Να σημειωθεί ότι στις παραπάνω εξισώσεις έχει γίνει χρήση του διανύσματος κατάστασης \hat{x}_{i-1} και του πίνακα $Q_{\hat{x}_{i-1}}$, όπως έχει προκύψει από παρατηρήσεις τη χρονική στιγμή t_{i-1} .

3.5.2 Εξισώσεις φιλτραρίσματος

Στο στάδιο του φιλτραρίσματος υπολογίζεται το διάνυσμα κατάστασης x , για τη δεδομένη χρονική στιγμή. Κατά συνέπεια, ο υπολογισμός γίνεται με βάσει όλες τις προηγούμενες μετρήσεις, που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή.

Το διάνυσμα κατάστασης \hat{x}_i προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$\hat{x}_i = \hat{x}_{i/i-1} + G_i w_i \quad (3.10)$$

όπου,

w_i , Διάνυσμα κλεισίματος

G_i , Πίνακας κέρδους, ο οποίος εξισορροπεί την επίδραση του Πρωτεύοντος μοντέλου (παρατηρήσεις) και του Δυναμικού μοντέλου (κίνηση οχήματος).

Για τα μεγέθη w_i και G_i ισχύει:

$$w_i = l_i - A_i \hat{x}_{i/i-1} \quad (3.11)$$

$$G_i = Q_{\hat{x}_{i/i-1}} A_i^T (Q_i + A_i Q_{\hat{x}_{i/i-1}} A_i^T)^{-1} \quad (3.12)$$

Το διάνυσμα κατάστασης \hat{x}_i συνοδεύεται από τον πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας

$$Q_{\hat{x}_i} = (I - G_i A_i) Q_{\hat{x}_{i/i-1}} \quad (3.13)$$

Για τις παραπάνω εξισώσεις, ο πίνακας $Q_{\hat{x}_{i/i-1}}$ χρησιμοποιείται, όπως έχει προκύψει από το στάδιο της πρόβλεψης.

3.5.3 Εξισώσεις εξομάλυνσης

Το στάδιο της εξομάλυνσης λαμβάνει χώρα μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων και το διάνυσμα κατάστασης, για μια χρονική στιγμή i , υπολογίζεται σύμφωνα με τις παρατηρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί πριν και μετά αυτή τη χρονική στιγμή.

Το διάνυσμα κατάστασης $\hat{x}_{i-1}(s)$ προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$\hat{x}_{i-1}(s) = \hat{x}_{i-1} + S_i(\hat{x}_i(s) - \hat{x}_{i/i-1}) \quad (3.14)$$

και συνοδεύεται από τον πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας

$$Q_{\hat{x}_{i-1}(s)} = Q_{\hat{x}_{i-1}} + S_i(Q_{\hat{x}_i}(s) - Q_{\hat{x}_{i/i-1}})S_i^T \quad (3.15)$$

όπου,

$$S_i = Q_{\hat{x}_{i-1}} M_{i-1}^T Q_{\hat{x}_{i/i-1}}^{-1} \quad (3.16)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ & ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ (GNSS/INS)

4.1 Βασικές Αρχές Ολοκλήρωσης Δορυφορικών & Αδρανειακών Συστημάτων Εντοπισμού

Όπως έχει αναλυθεί και στο Πρώτο και Δεύτερο κεφάλαιο, η μεμονωμένη λειτουργία των συστημάτων GPS και INS παρέχει πλήθος πλεονεκτημάτων αλλά και σημαντικών μειονεκτημάτων. Με την ενοποίηση των δυο συστημάτων επιτυγχάνεται συνδυασμός των επιμέρους χαρακτηριστικών τους, με συμπληρωματικό τρόπο. Τελικά, το ολοκληρωμένο σύστημα εντοπισμού GNSS/INS που προκύπτει, με τη εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων επεξεργασίας των πρωτογενών μετρήσεων, παρέχει βελτιωμένες επιδόσεις ως προς την ακρίβεια και την αξιοπιστία, καθώς αξιοποιεί τις δυνατότητες των GNSS και INS, ώστε να περιοριστούν οι ατέλειες λειτουργίας, που παρουσιάζει κάθε σύστημα χωριστά.

Στα ολοκληρωμένα συστήματα GNSS/INS, για την εκτίμηση της κινηματικής συμπεριφοράς του οχήματος, χρησιμοποιείται ως βασικό μαθηματικό υπόβαθρο το φίλτρο Kalman, όπου επεξεργάζονται οι μετρήσεις από τα δύο παραπάνω συστήματα, λαμβάνοντας παράλληλα υπ' όψη τις μεταβολές στη δυναμική κατάσταση του κινητού μέσου. Σε αυτή την περίπτωση, το διάλυμα κατάστασης του συστήματος περιλαμβάνει τις παραμέτρους θέσης, ταχύτητας και επιτάχυνσης, προσανατολισμού του οχήματος, καθώς και τα σφάλματα των γυροσκοπίων και επιταχυνσιομέτρων.

Η λειτουργία του συστήματος GNSS/INS απαιτεί μια σειρά διαδικασιών, προκειμένου να διασφαλιστεί η σωστή απόδοση του συστήματος, καθώς και η ακρίβεια που παρέχει. Αρχικά, πρέπει να τοποθετηθούν οι αισθητήρες στο μέσο καταγραφής. Εφόσον πρόκειται για το δορυφορικό σύστημα GNSS, είναι προφανές ότι η θέση της(των) κεραίας(ων) δορυφορικών δεκτών, πρέπει να είναι στην οροφή του κινητού μέσου, προκειμένου να διασφαλίζεται η οπτική επαφή με τους δορυφόρους. Αναφορικά με την τοποθέτηση της αδρανειακής μονάδας μέτρησης θα πρέπει να εξασφαλίζει σταθερότητα ως προς την έδραση. Επίσης, είναι σημαντικό να εξασφαλίζεται παραλληλία στον προσανατολισμό της ως προς τον διαμήκη άξονα το οχήματος.

Μετά την τοποθέτηση των αισθητήρων στο μέσο καταγραφής είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί η σχετική θέση των αισθητήρων μεταξύ τους αλλά και ως προς το σύστημα

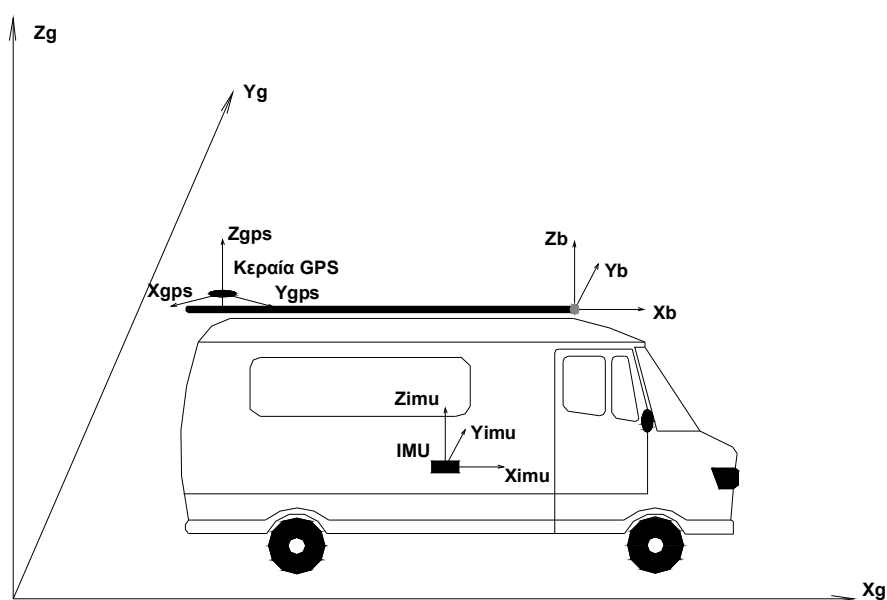
αναφοράς του οχήματος, με τον υπολογισμό των διανυσμάτων εκκεντροτήτων (βλ. Ενότητα 4.2.2).

Τέλος, για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων πρέπει να συγχρονιστούν οι αισθητήρες ώστε να λειτουργούν σε ενιαίο σύστημα χρόνου. Αυτό είναι απαραίτητο, για την σωστή διαχείριση των πρωτογενών μετρήσεων από τους δυο αισθητήρες και ιδιαίτερα όταν ζητείται να προσδιοριστεί η θέση και ο προσανατολισμός του οχήματος με μεγάλη ακρίβεια. Λόγω ότι τα συστήματα GNSS και INS λειτουργούν σε διαφορετικά συστήματα χρόνου, ως καλύτερη αναφορά χρόνου είναι αυτή που παρέχει το σύστημα GNSS, μέσω της χρονικής αναφοράς PPS (Pulse Per Second). Το ενδεχόμενο σφάλμα, λόγω μη σωστού συγχρονισμού, εισάγει σφάλμα στον προσδιορισμό της θέσης και του προσανατολισμού του κινητού μέσου.

4.2 Μετασχηματισμοί Συστημάτων Αναφοράς και Υπολογισμός Διανυσμάτων Εκκεντροτήτων

4.2.1 Μετασχηματισμοί συστημάτων αναφοράς

Ο υπολογισμός της θέσης και των κινηματικών χαρακτηριστικών του οχήματος σε γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς (όπως στο ΕΓΣΑ'87 ή στο αντίστοιχο προβολικό) προϋποθέτει το μετασχηματισμό συντεταγμένων από το σύστημα αναφοράς κάθε αισθητήρα, στο σύστημα αναφοράς του οχήματος και τέλος στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς. Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζονται τα συστήματα αναφοράς της κεραίας GPS και της αδρανειακής μονάδα μέτρησης (IMU), το σύστημα αναφοράς του οχήματος (*b frame*) και το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς (*g frame*).



Σχήμα 4.1: Συστήματα Αναφοράς

Figure 4.1: Coordinate Systems

Το σύστημα αναφοράς του οχήματος είναι αυτό στο οποίο πρέπει να αναφέρονται οι μετρήσεις από όλους τους αισθητήρες. Επομένως, για τον μετασχηματισμό απαιτείται να είναι γνωστό το διάνυσμα εκκεντρότητας της αρχής του συστήματος αναφοράς κάθε αισθητήρα ως προς την αρχή του συστήματος αναφοράς του οχήματος, καθώς και οι γωνίες στροφής, ώστε οι άξονες του συστήματος αναφοράς του αισθητήρα να συμπίπτουν με τους άξονες του συστήματος αναφοράς του οχήματος.

Συνεπώς, οι συντεταγμένες x^b ενός σημείου στο σύστημα αναφοράς του οχήματος προσδιορίζονται από τη σχέση:

$$x^b = x_s^b + R_s^b x^s \quad (4.1)$$

όπου,

x_s^b , Διάνυσμα εκκεντρότητας της αρχής του συστήματος αναφοράς του αισθητήρα ως προς την αρχή του συστήματος αναφοράς του οχήματος

R_s^b , Πίνακας στροφής από το σύστημα αναφοράς του αισθητήρα προς το σύστημα αναφοράς του οχήματος

x^s , Συντεταγμένες σημείου στο σύστημα αναφοράς του αισθητήρα

Ακολούθως, οι συντεταγμένες από το σύστημα αναφοράς του οχήματος μετασχηματίζονται στο τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς, με την εφαρμογή ενός πίνακα στροφής, από το σύστημα αναφοράς του οχήματος στο τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς. Οι γωνίες του πίνακα στροφής είναι οι γωνίες διατοιχισμού, πρόνευση και αζιμούθιο (*roll, pitch, heading*), κατά την κίνηση του οχήματος. Λόγω της συνεχούς κίνησης του οχήματος, είναι προφανές ότι οι παραπάνω γωνίες μεταβάλλονται για με τον χρόνο, οπότε οι συντεταγμένες ενός σημείου στο τοποκεντρικό σύστημα αναφέρονται σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή i .

Επομένως, οι συντεταγμένες x_i^t ενός σημείου στο τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς, για τη χρονική στιγμή i , είναι:

$$x_i^t = R_{b,i}^t x^b \quad (4.2)$$

όπου $R_{b,i}^t$ ο πίνακας στροφής από το σύστημα αναφοράς του οχήματος προς το τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς.

Τέλος, οι συντεταγμένες από το τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς μετασχηματίζονται στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς. Για τον μετασχηματισμό απαιτείται η γνώση της αρχής του συστήματος αναφοράς του οχήματος στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς και ο προσδιορισμός ενός πίνακα στροφής από το τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς στο γεωδαιτικό σύστημα

αναφοράς. Οι γωνίες του πίνακα στροφής είναι οι τιμές για το γεωγραφικό πλάτος ϕ_i και μήκος λ_i , για την χρονική στιγμή i .

Οι συντεταγμένες x_i^g ενός σημείου στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς, για τη χρονική στιγμή i , είναι:

$$x_i^g = x_{b,i}^g + R_{t,i}^g x_i^t \quad (4.3)$$

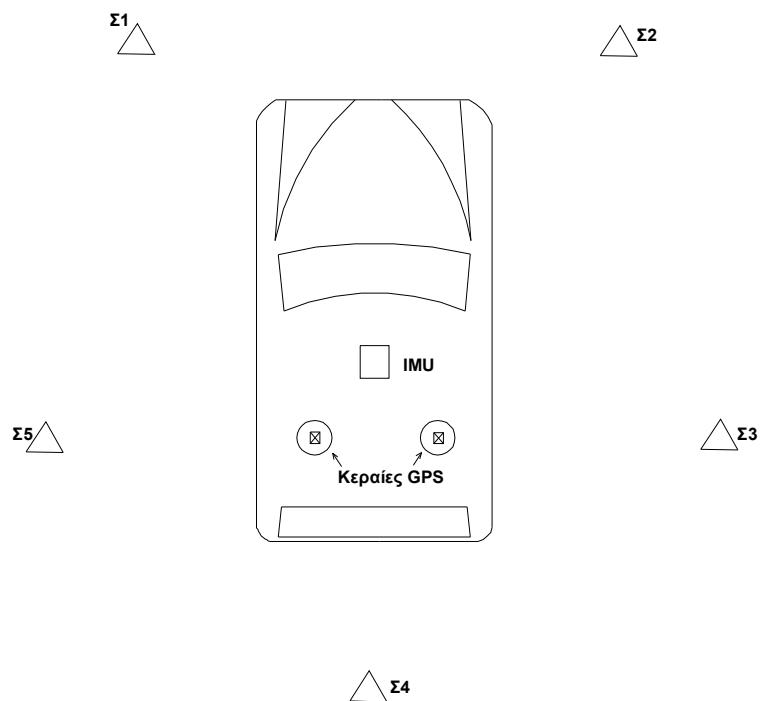
όπου,

$x_{b,i}^g$, Συντεταγμένες της αρχής του συστήματος αναφοράς του οχήματος

$R_{t,i}^g$, Πίνακας στροφής από το τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς

4.2.2 Υπολογισμός διανυσμάτων εκκεντροτήτων

Τα διανύσματα εκκεντροτήτων (*lever arms*) αφορούν στη θέση των αισθητήρων (κεραία GNSS και αδρανειακή μονάδα μέτρησης) του ολοκληρωμένου συστήματος εντοπισμού ως προς το σύστημα αναφοράς του οχήματος. Μπορούν να υπολογιστούν με διάφορους τρόπους, που κυρίως εξαρτώνται από την ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων, ωστόσο παρακάτω αναπτύσσεται η μέθοδος που εφαρμόζεται συχνότερα και πρόκειται για μετρήσεις με μεθόδους κλασσικής γεωδαισίας.



Σχήμα 4.2: Υπολογισμός εκκεντροτήτων

Figure 4.2: Lever arms estimation

Σκοπός της διαδικασίας είναι ο προσδιορισμός των συντεταγμένων των κέντρων των αισθητήρων στο σύστημα αναφοράς του οχήματος. Αυτό απαιτεί αρχικά την ίδρυση ενός δικτύου σταθμών, γύρω από το όχημα καταγραφής και των προσδιορισμό των συντεταγμένων αυτών των σημείων, με την τεχνική της οπισθοτομίας. Ακολούθως, με γνωστές τις συντεταγμένες των στάσεων, υπολογίζονται οι συντεταγμένες των κέντρων κάθε αισθητήρα, με τη μέθοδο της εμπροσθοτομίας (Σχήμα 4.2).

4.3 Εναλλακτικές Μορφές Φίλτρου Kalman

4.3.1 Γενικά

Ο τρόπος λειτουργίας του φίλτρου Kalman και η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων των GNSS και INS μπορεί να διακριθεί σε δυο βασικές κατηγορίες:

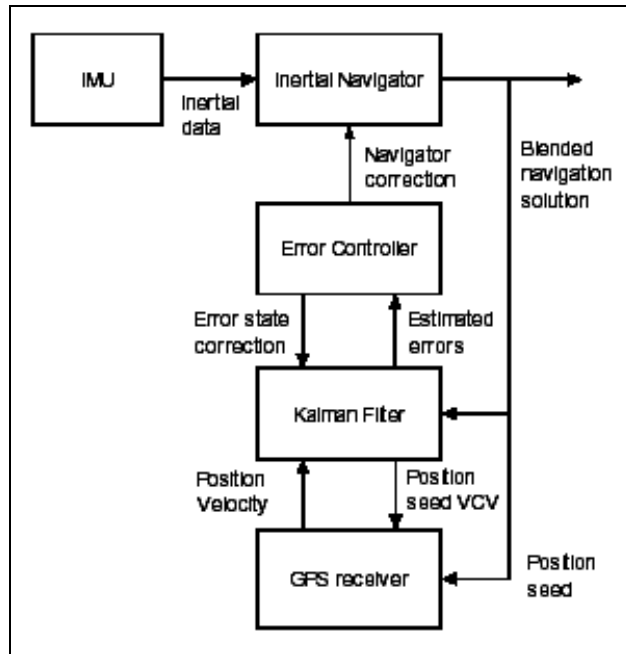
1. Τα φίλτρα χαλαρής σύζευξης (*loosely coupled Kalman filters*) και
2. Τα φίλτρα στενής σύζευξης (*tightly coupled Kalman filters*)

4.3.2 Φίλτρα χαλαρής σύζευξης

Το φίλτρο χαλαρής σύζευξης αποτελεί την ενοποίηση των λύσεων πλοήγησης από τα συστήματα GNSS και το INS στο φίλτρο Kalman. Σε αυτή την περίπτωση, τα δεδομένα από τα δυο συστήματα GNSS και INS επεξεργάζονται με ξεχωριστό αλγόριθμο και παρέχουν την υπολογισμένη θέση και τα κινηματικά χαρακτηριστικά του οχήματος. Σύμφωνα με αυτά τα αποτελέσματα εκτιμούνται τα σφάλματα για την πλοήγηση.

Το κύριο πλεονέκτημα του φίλτρου έγκειται στο γεγονός ότι γίνεται μια σχετικά απλή μορφή ενοποίησης. Αυτό συνεπάγεται ότι τα εξαγόμενα αποτελέσματα από τα GNSS και INS, οδηγούνται σε ένα φίλτρο Kalman, επεξεργάζονται και συνδυάζονται με απλά υπολογιστικά βήματα, χωρίς να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους οι πρωτογενείς μετρήσεις. Πρόκειται για ένα φίλτρο με μικρές απαιτήσεις σε χωρητικότητα, κάτι που το καθιστά ιδιαίτερος προσιτό σε μεγάλο πλήθος εφαρμογών.

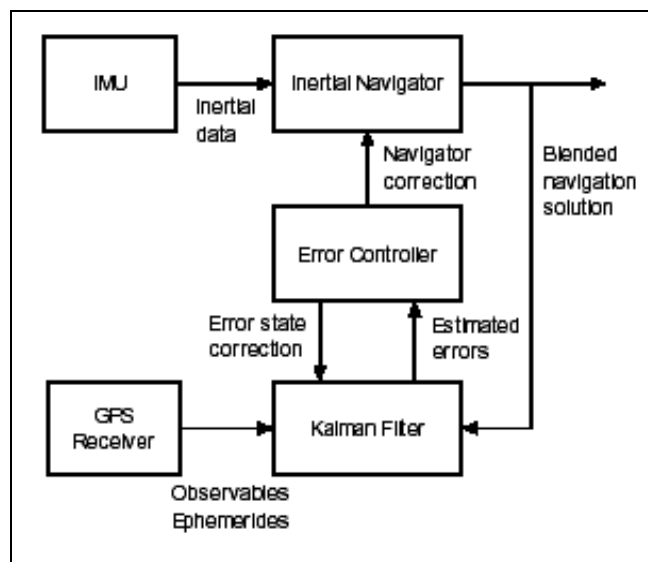
Ωστόσο, οι απλές υπολογιστικές διαδικασίες του φίλτρου δεν του επιτρέπουν να λειτουργεί με τη βέλτιστη απόδοση, χρειάζονται πάνω από τέσσερις δορυφόροι, ώστε να προκύψει μια σταθερή λύση.



Σχήμα 4.3: Περιγραφή φίλτρου χαλαρής σύζευξης (πηγή: Scherzinger)
Figure 4.3: Loosely coupled architecture (source: Scherzinger)

4.3.3 Φίλτρα στενής σύζευξης

Στο φίλτρο τα στοιχεία εισαγωγής αποτελούν οι πρωτογενείς μετρήσεις από το GNSS και το INS, οι οποίες επεξεργάζονται ταυτόχρονα με τη χρήση του φίλτρου Kalman, για τον προσδιορισμό της ενιαίας λύσης πλοήγησης. Με αυτόν τον τρόπο, οι διαφορετικού τύπου αισθητήρες συμπεριφέρονται, στο φίλτρο, σαν να ανήκουν σε ξεχωριστά συστήματα, που παράγουν συμπληρωματικού τύπου δεδομένα.



Σχήμα 4.4: Περιγραφή φίλτρου στενής σύζευξης (πηγή: Scherzinger)
Figure 4.4: Tightly coupled architecture (source: Scherzinger)

Σε αυτήν την περίπτωση είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν μετρήσεις από τα συστήματα GNSS, ακόμα και όταν ο αριθμός των δορυφόρων είναι μικρότερος από τέσσερις, ενώ ο προσδιορισμός των ασαφειών φάσης πραγματοποιείται πιο γρήγορα. Με τη χρήση αυτού του φίλτρου προκύπτει βέλτιστη λύση για τον προσδιορισμό της των στοιχείων πλοήγησης.

Παρόλα αυτά, το φίλτρο στενής σύζευξης απαιτεί πιο πολύπλοκες διαδικασίες επεξεργασίας των δεδομένων και επομένως μεγαλύτερες απαιτήσεις σε υπολογιστική δύναμη. Αυτό αποτελεί ένα σημαντικό μειονέκτημα, όσον αφορά στην επιλογή του κατάλληλου φίλτρου, αν και τα τελευταία χρόνια προτιμάται όλο και περισσότερο και αυτό γιατί η τεχνολογία των υπολογιστών έχει αναπτυχθεί και μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερες δυνατότητες.

4.4 Αξιολόγηση και Εφαρμογές Δορυφορικών & Αδρανειακών Συστημάτων Εντοπισμού

Όπως έχει αναφερθεί και στην αρχή του κεφαλαίου, η ενοποίηση του αδρανειακού συστήματος εντοπισμού και του GNSS έχει ως αποτέλεσμα την αξιοποίηση των χαρακτηριστικών του κάθε συστήματος. Το κύριο πλεονέκτημα του συστήματος είναι η συνεχής παροχή δεδομένων πλοήγησης, με υψηλή ακρίβεια.

Στα συστήματα GNSS/INS τα δεδομένα για την πλοήγηση είναι συνεχή, καθώς δεν διακόπτονται λόγω απώλειας σήματος του GNSS. Σε αυτό συντελεί η λειτουργία του συστήματος INS, το οποίο τροφοδοτεί με δεδομένα πλοήγησης καθ' όλη τη διάρκεια διακοπής του σήματος, βοηθώντας την ταχεία επανάκτησή του. Επίσης, με το σύστημα εξασφαλίζεται υψηλή ακρίβεια για τη θέση και την ταχύτητα για μεγάλα χρονικά διαστήματα, ενώ η ακρίβεια δεν μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου, όπως συμβαίνει στο σύστημα INS. Από την ενοποίηση των δύο συστημάτων τα δεδομένα συλλέγονται με υψηλό ρυθμό. Στην περίπτωση του GPS τα δεδομένα συλλέγονται με λιγότερο από 20Hz, ενώ το αδρανειακό σύστημα συλλέγει με υψηλότερη συχνότητα, που μπορεί να είναι και μεγαλύτερη από 100Hz.

Ιδιαίτεροι περιορισμοί του συστήματος GNSS/INS δεν εντοπίζονται, όμως θα πρέπει να δοθεί προσοχή στον ακριβή συγχρονισμό των αισθητήρων του.

Τα ολοκληρωμένα συστήματα εντοπισμού GNSS/INS, λόγω των χαρακτηριστικών και των πλεονεκτημάτων που έχει, καθίσταται ιδιαίτερος διαδεδομένο για εφαρμογές προσδιορισμού ή εντοπισμού θέσης, σε κινηματικές εφαρμογές. Το σύστημα μπορεί να προσαρμοστεί σε διαφορετικού τύπου πλατφόρμες, όπως αεροσκάφη, οχήματα ή πλοία και να χρησιμοποιηθεί σε ποικίλες εφαρμογές.

Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα GNSS/INS προσφέρεται για λειτουργία εντός του αστικού ιστού, για εργασίες αποτύπωσης και χάραξης (αν πρόκειται για σύστημα που λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο). Η επιλογή του ενοποιημένου συστήματος είναι ιδανική καθώς οι συνθήκες ορατότητας ενδεχομένως να περιορίζουν τη χρήση GPS ή και κλασσικών γεωδαιτικών μεθόδων.

Επιπλέον, το σύστημα GNSS/INS χρησιμοποιείται για ψηφιακή καταγραφή οδικού δικτύου εντός ή εκτός αστικής περιοχής, όπου η χρήση δεκτών GNSS θα ήταν απαγορευτική, αν στον περιβάλλοντα χώρο βρίσκονται υψηλά κτήρια ή βλάστηση ή ακόμη και στην περίπτωση που τμήμα του οδικού δικτύου αποτελείται από σήραγγες. Τα δεδομένα, που προκύπτουν από συνεχή καταγραφή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή διαγραμμάτων μηκοτομής, οριζοντιγραφίας, επικλίσεων της οδού και αζιμουθίου του κινούμενου οχήματος και την εξαγωγή των γεωμετρικών στοιχείων της οδού.

Επίσης, τα συστήματα GNSS/INS έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν στο αναπτυσσόμενο τεχνολογικό πεδίο των “έξυπνων” μεταφορών. Με αυτόν τον τρόπο παρέχονται συνεχή δεδομένα θέσης και προσανατολισμού, για αυτόματη πλοήγηση οχημάτων ή σκαφών.

Τα τελευταία χρόνια, το σύστημα GNSS/INS έχει ευρύτατη εφαρμογή και σε φωτογραμμετρικές εργασίες, με σκοπό τη παραγωγή ψηφιακών μοντέλων εδάφους (DTM) ορθοφωτογραφιών και ορθοφωτοχαρτών. Τα αεροσκάφη εφοδιάζονται με ψηφιακές κάμερες, ψηφιακούς σαρωτές και συστήματα SAR, ενώ η γεωαναφορά των αεροφωτογραφιών δεν απαιτεί τη διαδικασία του αεροτριγωνισμού ή σημείων σύνδεσης, παρά μόνο τον απαραίτητο αριθμό επίγειων φωτοσταθερών σημείων.

ΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ POSLV 420

5.1 Γενικά

Το ολοκληρωμένο σύστημα εντοπισμού POSLV 420 της εταιρίας *Applanix Corporation* είναι ένα σύνθετο σύστημα εντοπισμού κατάλληλο για κινηματικές εφαρμογές στην ξηρά, σχεδιασμένο ώστε να παρέχει τα κινηματικά χαρακτηριστικά του οχήματος (θέση, ταχύτητα και προσανατολισμός) στο χώρο.

Αποτελείται από ανεξάρτητα όργανα καταγραφής, των οποίων τα πρωτογενή δεδομένα συλλέγονται και επεξεργάζονται από μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας. Σε συνδυασμό με το κατάλληλο λογισμικό της ίδιας εταιρίας γίνεται η τελική επεξεργασία των δεδομένων, ώστε να προκύψει η βέλτιστη δυνατή λύση.

Το σύστημα POSLV μπορεί να εφαρμοστεί προκειμένου να καλύψει ανάγκες χαρτογράφησης οδικού δικτύου. Στη διαδικασία χαρτογραφείται η υφιστάμενη κατάσταση, όπως τα γεωμετρικά στοιχεία της οδού (ευθείες, κυκλικά τόξα, κλωθοειδείς). Επίσης, μπορούν να αναφερθούν και εφαρμογές ερευνητικού ενδιαφέροντος, όπως η αυτόματη πλοήγηση ρομποτικών οχημάτων, με τη βοήθεια των υπάρχοντων αισθητήρων για θέση και προσανατολισμό.

5.2 Βασική Αρχή Λειτουργίας & Μέρη του Συστήματος

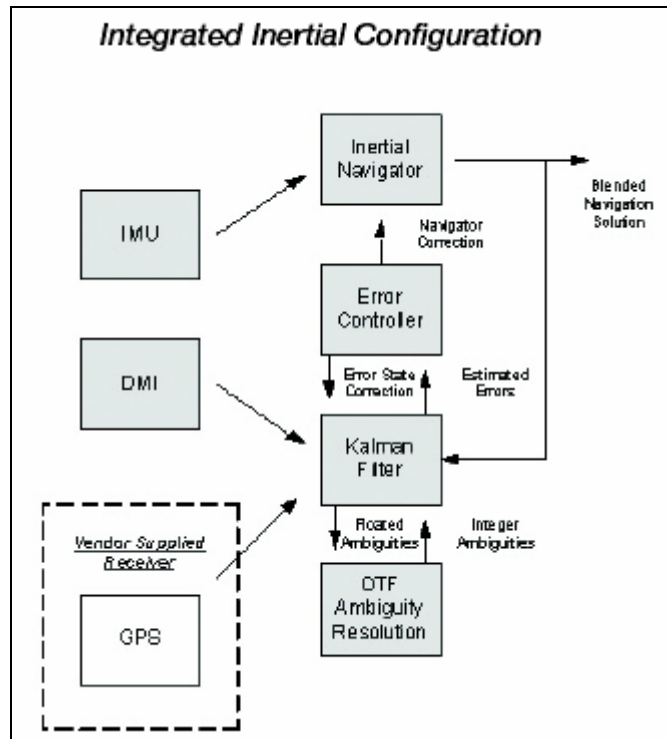
5.2.1 Βασική αρχή λειτουργίας

Το ολοκληρωμένο σύστημα POSLV 420 συνδυάζει τα πρωτογενή δεδομένα από τα ανεξάρτητα όργανα καταγραφής προκειμένου να δώσει τη βέλτιστη δυνατή λύση. Είναι προσαρμοσμένο κατάλληλα σε όχημα και αποτελείται από τρεις τύπους αισθητήρων καταγραφής:

- δύο δέκτες GPS δύο συχνοτήτων (L1/L2)
- αδρανειακό σύστημα εντοπισμού (INS)
- ψηφιακό οδόμετρο (DMI)

καθώς και από υπολογιστικό σύστημα (*POS Computer*), το οποίο λειτουργεί ως σύστημα επικοινωνίας και ολοκλήρωσης των επιμέρους αισθητήρων του συστήματος POSLV 420.

Η λειτουργία του POSLV στηρίζεται σε φίλτρο στενής σύζευξης (*tightly-coupled*), ενώ η αλληλεπίδραση μεταξύ των ανεξάρτητων οργάνων απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1. Σύμφωνα με την αρχιτεκτονική του φίλτρου στενής σύζευξης, οι πρωτογενείς μετρήσεις από τους αισθητήρες επεξεργάζονται ταυτόχρονα.



Σχήμα 5.1: Σχέση μεταξύ των ανεξάρτητων στοιχείων του συστήματος POSLV
(πηγή: Artes, Nastro, 2005)

Figure 5.1: Relationship between the individual components within POSLV system
(source:Artes, Nastro, 2005)

5.2.2 Δέκτες GPS

Οι δέκτες GPS, που ενσωματώνονται στο σύστημα POSLV 420, διαφέρουν ανάλογα με την εφαρμογή. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την εργασία περιλαμβάνει δύο δέκτες GPS BD950 της εταιρίας *Trimble*, συνοδευόμενοι από κεραίες τύπου *Zephyr* της ίδιας κατασκευάστριας εταιρίας. Είναι δέκτες δύο συχνοτήτων L1/L2, κάτι που επιτρέπει την ασφαλή επίλυση των ακεραίων ασαφειών φάσης.



Σχήμα 5.2: Δέκτης GPS *Trimble* BD950

Figure 5.2: Trimble GPS receiver BD950

Η συχνότητα καταγραφής των δεκτών είναι 10Hz, χαρακτηριστικό που εξυπηρέτησε στην καταγραφή οδικού τμήματος, για την ταχύτητα κίνησης του οχήματος. Σημειώνεται ότι ο συνδυασμός των μετρήσεων από τους δύο δέκτες GPS επιτρέπουν τον υπολογισμό του αζιμουθίου του οχήματος, που χρησιμοποιείται ως επιπλέον πληροφορία από τον επεξεργαστή *POS Processor*.

5.2.3 Αδρανειακό σύστημα εντοπισμού (INS)

Το αδρανειακό σύστημα, που ενσωματώνεται στο POSLV, συμβάλει στην ακρίβεια εντοπισμού του οχήματος, με παροχή των παραμέτρων για θέση, ταχύτητα και προσανατολισμό, κυρίως στις περιπτώσεις που δεν υπάρχει ο απαιτούμενος αριθμός δορυφόρων για την λειτουργία του GPS ή ακόμη και στην περίπτωση απώλειας του δορυφορικού σήματος.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μονάδας αδρανειακού εντοπισμού είναι:

- μέγιστο σφάλμα γυροσκοπίων της τάξης των 2°/ώρα
- μέγιστο συντελεστή κλίμακας γυροσκοπίων 100 ppm
- μέγιστο σφάλμα επιταχυνσιόμετρων 100 mg
- μέγιστο συντελεστή κλίμακας επιταχυνσιόμετρων 1200ppm

Επιπλέον, τα δεδομένα από το αδρανειακό σύστημα μπορούν να επεξεργαστούν με δεδομένα μετρήσεων φάσης του GPS και δεδομένα του ψηφιακού οδομέτρου, ενώ υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης τους στο σύστημα POSLV.



Σχήμα 5.3: Μονάδα αδρανειακού εντοπισμού

Figure 5.3: Inertial measurement unit

5.2.4 Ψηφιακό οδόμετρο (DMI)

Η εκτίμηση για την χιλιομέτρηση και τη γραμμική αναφορά των θεματικών στοιχείων της οδού προκύπτει με χρήση ψηφιακού οδόμετρου, η λειτουργία του οποίου στηρίζεται στην επεξεργασία κατάλληλα διαμορφωμένων ηλεκτρικών παλμών που συσχετίζονται με την περιστροφή των τροχών του οχήματος κατά την κίνησή του. Γενικά υπάρχουν διάφοροι τύποι ψηφιακών οδομέτρων, ωστόσο ενδέχεται τα αποτελέσματα που δίνουν να είναι περιορισμένης ακρίβειας, για λόγους που σχετίζονται με την θερμοκρασία και την πίεση των ελαστικών, την ταχύτητα του οχήματος, καθώς επίσης και με τη δυσκολία στη σήμανση (υλοποίηση) με ακρίβεια των θέσεων αφετηρίας και πέρατος των μετρήσεων.

Το σύστημα POSLV ενσωματώνει μετρήσεις από ψηφιακό οδόμετρο (DMI) με την εφαρμογή κατάλληλων βαρών κατά την επεξεργασία των μετρήσεων. Με αυτό τον τρόπο, κάθε τύπος μέτρησης (GPS, IMU, DMI) συνεισφέρει στον εντοπισμό του οχήματος ανάλογα με την ακρίβεια των πρωτογενών δεδομένων, που παρέχει το αντίστοιχο όργανο μέτρησης. Πιο συγκεκριμένα, όταν το όχημα βρίσκεται σε κατάσταση κίνησης και το σύστημα GPS λειτουργεί ικανοποιητικά, οι μετρήσεις από το ψηφιακό οδόμετρο συνήθως χαρακτηρίζονται από μικρότερο βάρος, συγκριτικά με τις μετρήσεις από τα συστήματα GPS και IMU. Αντιθέτως, όταν το όχημα βρίσκεται σε στάση, οι μετρήσεις από το ψηφιακό οδόμετρο αποκτούν μεγαλύτερο βάρος έναντι των μετρήσεων GPS και καθορίζουν ουσιαστικά τα κινηματικά χαρακτηριστικά του οχήματος (θέση, ταχύτητα, προσανατολισμός και χιλιομέτρηση). Η παραπάνω διαδικασία είναι γνωστή ως διαδικασία ZUPT (*zero velocity update*).

Το ψηφιακό οδόμετρο τοποθετείται σε έναν από τους οπίσθιους τροχούς του οχήματος (Σχήμα 5.4) και παρουσιάζει τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά:

- λειτουργεί με ταχύτητα περιστροφής 6000 RPM maximum
- έχει δυνατότητα αριστερόστροφης και δεξιόστροφης περιστροφής
- παρέχει ακρίβεια μέτρησης μιας πλήρους περιστροφής είναι $\pm 0.1^\circ$

- είναι ανθεκτικό σε συνθήκες αυξημένης υγρασίας στην ατμόσφαιρα



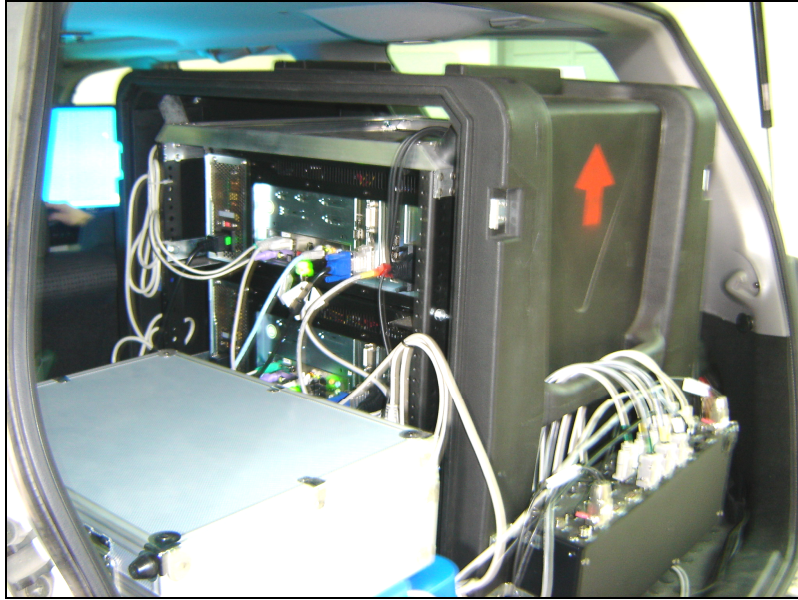
Σχήμα 5.4: Διάταξη ψηφιακού οδομέτρου στο όχημα

Figure 5.4: Arrangement of distance measuring unit on the vehicle

5.2.5 Υπολογιστικό σύστημα POS Computer (PCS)

Το υπολογιστικό σύστημα POS *Computer* (Σχήμα 5.5) είναι τοποθετημένο στο πίσω μέρος του οχήματος και λειτουργεί με εξωτερική τροφοδοσία 12V ή 24V. Τα μέρη, από το οποία αποτελείται είναι:

- ο επεξεργαστής POS *Processor*, στον οποίο επεξεργάζονται οι μετρήσεις που συλλέγονται από όλους τους αισθητήρες του POSLV. Επίσης, υλοποιείται το φίλτρο επεξεργασίας των μετρήσεων, μέσω του φίλτρου Kalman,
- το ηλεκτρονικό μέρος επικοινωνίας της αδρανειακής μονάδας (IMU) και του ψηφιακού οδομέτρου (DMI),
- φορητός εξωτερικός δίσκος αποθήκευσης της κατάστασης του συστήματος και των δεδομένων θέσης, ταχύτητας, επιτάχυνσης και προσανατολισμού του οχήματος, με γραμμική αναφορά απόστασης και χρόνου.



Σχήμα 5.5: Υπολογιστικό σύστημα POS *Computer* του POSLV

Figure 5.5: POS Computer system of POSLV

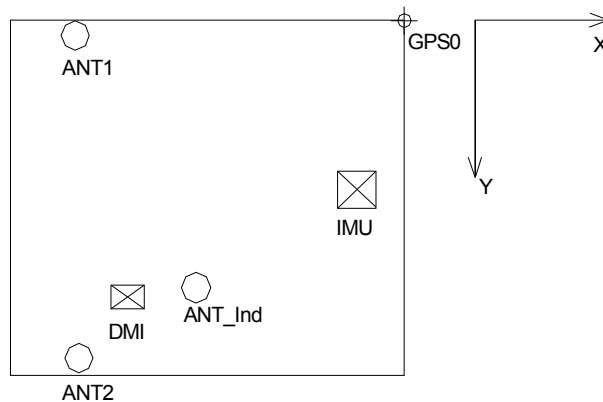
5.3 Υπολογισμός Διανυσμάτων Εκκεντροτήτων

Ο προσδιορισμός των εκκεντροτήτων κάθε αισθητήρα συνίσταται στον υπολογισμό των συντεταγμένων του σημείου αναφοράς του, όπως ορίζεται από τον κατασκευαστή του γεωδαιτικού οργάνου, ως προς το σημείο αναφοράς του οχήματος. Στο προκειμένη περίπτωση, ως αρχή του συστήματος αναφοράς στο όχημα καταγραφής επιλέχθηκε η κεφαλή του ακραίου αριστερού κοχλία στήριξης της πλάκας αλουμινίου στο όχημα.

Η διαδικασία υπολογισμού των εκκεντροτήτων περιλαμβάνει αρχικά την ίδρυση και μέτρηση τεσσάρων κορυφών όδευσης, περιμετρικά του οχήματος καταγραφής. Για την μέτρηση των σημείων, εφαρμόστηκε η μέθοδος του σχετικού στατικού εντοπισμού θέσης GPS. Στη συνέχεια, με γνωστές τις συντεταγμένες των αυτών των στάσεων, προσδιορίζεται η θέση του σημείου αναφοράς κάθε αισθητήρα στο σύστημα αναφοράς του οχήματος, με την μέθοδο της πολλαπλής εμπροσθοτομίας.

Από τις στάσεις της όδευσης έγιναν παρατηρήσεις προς τα σημεία αναφοράς:

- της αρχής (μηδενικό σημείο) του συστήματος αναφοράς στο όχημα κίνησης (GPS₀),
- της αδρανειακής μονάδας εντοπισμού (IMU),
- των δυο κεραιών GPS (ANT₁, ANT₂),
- του συστήματος ψηφιακού οδομέτρου (DMI) και
- της ανεξάρτητης κεραίας GPS (ANT_{IND})



Σχήμα 5.6: Θέσεις γεωδαιτικών αισθητήρων στο όχημα
Figure 5.6: Positions of geodaitic sensors on the vehicle

Οι εκκεντρότητες για κάθε αισθητήρα στο σύστημα αναφοράς του οχήματος δίνονται στον επόμενο Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Εκκεντρότητες αισθητήρων

Table 5.1: Sensors lever arms

Αισθητήρας	x (m)	y (m)	z (m)
GPS ₀	0.000	0.000	0.000
IMU	-0.167	0.564	-1.216
ANT ₁	-1.145	0.015	0.165
ANT ₂	-1.149	1.142	0.125
ANT _{IND}	-0.731	0.890	0.211
DMI	-0.973	0.927	-1.318

5.4 Τεχνικές Λειτουργίας & Ακρίβειες

Οι τεχνικές λειτουργίας του συστήματος POSLV ποικίλουν αναλόγως με τον τρόπο διαμόρφωσής του και μπορεί να είναι:

- σε πραγματικό χρόνο, με μετρήσεις φάσεων στις δύο συχνότητες (L1/L2) του σήματος GPS – IARTK (*Inertially Aided Real Time Kinematic*),
- σε εκ των υστέρων επεξεργασία, με μετρήσεις φάσεων στις δύο συχνότητες (L1/L2) του σήματος GPS – PP (*Post Processed*),
- σε πραγματικό χρόνο με τη μέθοδο του διαφορικού GPS – Real Time DGPS (*Real Time Differential GPS*).

Στην παρούσα εφαρμογή, για την τελική λύση, έχει χρησιμοποιηθεί η εκ των υστέρων επεξεργασία των δεδομένων, με μετρήσεις φάσεων στις συχνότητες L1/L2, καθώς εξασφαλίζει μεγάλη ακρίβεια στον εντοπισμό του οχήματος διότι κατά την εφαρμογή της χρησιμοποιούνται

υπολογιστικές τεχνικές εξομάλυνσης (*smoothing*) για την απόρριψη εσφαλμένων πρωτογενών μετρήσεων, κυρίως στα δεδομένα GPS.

Στον Πίνακα 5.2, όπου παρουσιάζονται οι ακρίβειες εντοπισμού του οχήματος για τις διάφορες τεχνικές λειτουργίας σε συνάρτηση με τη χρονική διάρκεια απώλειας του σήματος των δορυφόρων. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι οι δηλούμενες ακρίβειες επιτυγχάνονται δύσκολα για μεγάλα χρονικά διαστήματα ακόμη και σε ευνοϊκές συνθήκες παρατήρησης.

Πίνακας 5.2: Πίνακας επιδόσεων του συστήματος POSLV 420 (πηγή: www.applanix.com)

Table 5.2: Table of expected accuracy of POSLV 420 system (source: www.applanix.com)

	GPS Outage Duration (IARTK/PP/DGPS)															
	0 sec			15 sec			30 sec			60 sec			120 sec			
	IARTK	PP	DGPS	IARTK	PP	DGPS	IARTK	PP	DGPS	IARTK	PP	DGPS	IARTK	PP	DGPS	
X, Y Position (m)	0.035	0.02	1.0	0.07	0.05	1.13	1.13	0.07	1.25	0.20	0.12	1.5	0.30	0.27	1.63	
Z Vertical Position (m)	0.05	0.03	1.5	0.07	0.06	1.62	0.10	0.09	1.75	0.15	0.15	2.0	0.20	0.35	2.13	
Roll & Pitch (deg)	0.02	0.005	0.02	0.02	0.005	0.02	0.02	0.005	0.02	0.02	0.005	0.02	0.02	0.005	0.02	
True Heading (deg)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03

Σημ.: Η ακρίβεια στη θέση αναφέρεται σε τιμές RMS. Οι παραπάνω τιμές προϋποθέτουν καλή γεωμετρία δορυφόρων (όταν είναι διαθέσιμη η χρήση GPS). Η αποδόσεις ακριβείας για την λειτουργία IARTK ισχύουν για βάσεις μέχρι 40km.

5.5 Λογισμικό Επεξεργασίας Δεδομένων Πεδίου

Το λογισμικό για την εκ των υστέρων επεξεργασία των μετρήσεων του συστήματος POSLV είναι το *Post-Processing Package (PosPac) Land* της εταιρίας *Applanix*. Πρόκειται για ένα λογισμικό στενής σύζευξης για εκ των υστέρων επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων εντοπισμού, το οποίο παρέχει αποτελέσματα υψηλής ακρίβειας. Λειτουργεί σε περιβάλλον *Windows*, διαθέτει φιλικό περιβάλλον προς τον χρήστη και περιλαμβάνει πλήθος επιλογών και εργαλείων.

Με το λογισμικό *PosPac Land* επιτυγχάνεται:

- ✓ εφαρμογή τεχνικών επεξεργασίας φιλτραρίσματος (*filtering*) και εξομάλυνσης (*smoothing*) για τις μετρήσεις, οι οποίες βελτιώνουν την ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος,
- ✓ σταθερή και αξιόπιστη λύση, απαλλαγμένη από χοντροειδή σφάλματα, για όλες τις παραμέτρους εντοπισμού του οχήματος (θέση ταχύτητα και προσανατολισμός) και
- ✓ περιορισμό προβληματικών δεδομένων GPS, λόγω εμποδίων, βλάστησης ή του φαινομένου πολλαπλών ηλεκτρονικών διαδρομών (*multipath*)

Το περιβάλλον εργασίας αποτελείται από το κυρίως παράθυρο, το οποίο είναι χωρισμένο σε δύο τμήματα, το αριστερό, όπου παρουσιάζεται η κατάσταση των επιλύσεων και το δεξί, όπου εμφανίζεται η κατάσταση των αρχείων.

Για την επεξεργασία των δεδομένων το λογισμικό διαθέτει 6 διαφορετικές υπομονάδες:

- Υπομονάδα σχεδιασμού (*planning*), η οποία αφορά στο σχεδιασμό επεξεργασίας των διάφορων μορφών δεδομένων,
- Υπομονάδα εξαγωγής (*extraction*), η οποία αφορά στην εξαγωγή των δεδομένων των αισθητήρων από το σύστημα POSLV,
- Υπομονάδα πλοήγησης (*navigate*), στην οποία εισάγονται τα δεδομένα από την προηγούμενη διαδικασία και γίνεται η επεξεργασία. Το λογισμικό *PosPac* διαθέτει τέσσερις επιλογές ως προς το είδος της επίλυσης: *Forward*, *Backward*, *Combined* και *Smoothed*. Οι παραπάνω επιλογές διαφοροποιούνται ως προς τον τρόπο εκτέλεσης του φίλτρου, με την πιο απλή επιλογή να αποτελεί η επίλυση *Forward* και την βέλτιστη η επίλυση *Smoothed*, η οποία στηρίζεται στα εξαγόμενα αποτελέσματα όλων των προηγούμενων επιλύσεων.
- Υπομονάδα εξόδου (*output*), η οποία αφορά στην εξαγωγή και μετασχηματισμό των αποτελεσμάτων εντοπισμού,
- Υπομονάδα οπτικοποίησης (*display*), η οποία αφορά στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων με τη βοήθεια διαγραμμάτων και
- Υπομονάδα προγραμματισμού ενεργειών (*batch*), στην οποία δύνεται ή δυνατότητα συνδυασμού επιλογών επεξεργασίας.

Ο ορισμός μιας εργασίας περιλαμβάνει την ονομασία της επίλυσης, την εισαγωγή των πρωτογενών δεδομένων από το σύστημα POSLV, μέσω των αντίστοιχων αρχείων και την εισαγωγή των δεδομένων του σταθερού δέκτη GPS συμπεριλαμβανομένων των συντεταγμένων του, στο σύστημα αναφοράς WGS84.

Για την εκτέλεση της επίλυσης ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

1. Εξαγωγή δεδομένων από τα όργανα καταγραφής (*data extraction*),
2. Έλεγχος συνέχειας δεδομένων από το αδρανειακό σύστημα (IMU) και το ψηφιακό οδόμετρο (DMI) (*data continuity checking*),
3. Αποκωδικοποίηση των πρωτογενών δεδομένων GPS σε μορφή αρχείου κατάλληλη για επεξεργασία στενής σύζευξης (*primary GPS data conversion*),
4. Αποκωδικοποίηση των δευτερογενών δεδομένων GPS (αν είναι διαθέσιμα) σε μορφή αρχείου κατάλληλη για επεξεργασία στενής σύζευξης (*secondary GPS data conversion*),
5. Αποκωδικοποίηση των πρωτογενών διορθώσεων για DGPS και RTK (αν είναι διαθέσιμα) σε μορφή αρχείου κατάλληλη για επεξεργασία στενής σύζευξης (*differential corrections data conversion*),
6. Αποκωδικοποίηση των πρωτογενών δεδομένων για το σταθερό δέκτη GPS (αν δεν έχει ήδη γίνει) σε μορφή αρχείου κατάλληλη για επεξεργασία στενής σύζευξης (*base GPS data conversion*),

7. Απόδοση των δεδομένων GPS σε συχνότητα 1Hz για επεξεργασία στενής σύζευξης (*base GPS data interpolation*),
8. Εκτέλεση επεξεργασίας σε κανονικό χρόνο (*forward time processing*),
9. Εκτέλεση επεξεργασίας σε ανάδρομο χρόνο (*backward time processing*) και
10. Εκτέλεση επεξεργασίας εξομάλυνσης (*forward-backward smoothing*)

Τα παραπάνω βήματα εκτελούνται το καθένα ξεχωριστά. Ωστόσο υπάρχει η δυνατότητα να εκτελεστούν όλες οι διαδικασίες αυτόματα με την επιλογή *Batch*. Εναλλακτικά γίνεται επιλογή από τον χρήστη των βημάτων που επιθυμεί, κάτι που απαιτεί την πλήρη κατανόηση της λειτουργίας τους.

Σημειώνεται ότι μια εργασία ενδέχεται να αποτελείται από επιμέρους επίλυσεις, κάτι που εξαρτάται από τον αριθμό των αρχείων του POSLV για τα πρωτογενή δεδομένα και τον αριθμό των σταθερών σταθμών αναφοράς GPS. Επομένως, για κάθε επιμέρους επίλυση πρέπει να εφαρμόζεται η παραπάνω διαδικασία.

ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ & ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΔΙΟΥ

6.1 Εισαγωγικά

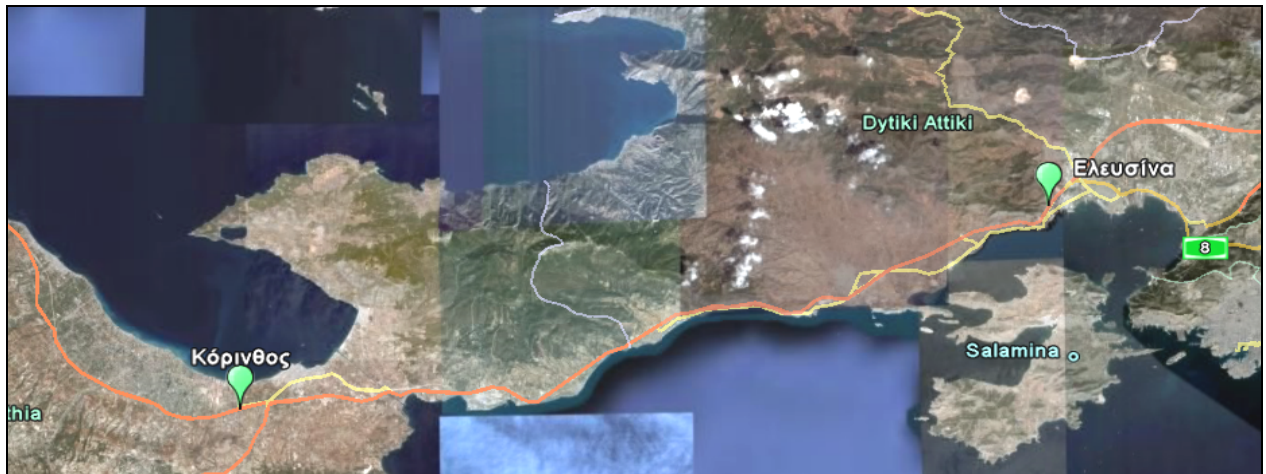
Η περιοχή εφαρμογής του ολοκληρωμένου συστήματος εντοπισμού επικεντρώνεται σε δύο τμήματα του εθνικού οδικού δικτύου. Το πρώτο τμήμα βρίσκεται στον οδικό άξονα Αθήνα – Πάτρα (τμήμα Ελευσίνα – Κόρινθος, συνολικού μήκους 55km) και το δεύτερο στον οδικό άξονα Αθήνα – Λαμία (τμήμα Υλίκη – Λογγός, συνολικού μήκους 65km). Η επιλογή των υπόψη τμημάτων έγινε με γνώμονα τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού τους (για παράδειγμα σήραγγες), καθώς και τις συνθήκες καταγραφής των αισθητήρων (διαθεσιμότητα μετρήσεων με το σύστημα GPS, ανεξαρτήτως του ολοκληρωμένου συστήματος εντοπισμού).

Σκοπός του πειράματος είναι ο υπολογισμός της τροχιάς και των κινηματικών χαρακτηριστικών του οχήματος και η εξαγωγή συγκριτικών παράγωγων διαγραμμάτων. Παράλληλα γίνεται η αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος στις διαφορετικές συνθήκες παρατήρησης και κατά πόσο τα τελικά αποτελέσματα είναι σύμφωνα με τις προδιαγραφές ακριβείας, που τίθενται από την κατασκευάστρια εταιρία *Applanix*.

6.2 Οδικό Τμήμα Ελευσίνα - Κόρινθος

6.2.1 Περιγραφή περιοχής μελέτης

Το οδικό τμήμα Ελευσίνα – Κόρινθος πρόκειται για οδό ταχείας κυκλοφορίας, με δυο (τρεις, σε ορισμένες θέσεις) λωρίδες ανά κατεύθυνση και λωρίδα έκτακτης ανάγκης (ΛΕΑ). Έχει συνολικό μήκος 55km. Συνεπώς, το πείραμα καλύπτει συνολικά διαδρομή μήκους περίπου 110km σε μετάβαση και επιστροφή (Σχήμα 6.1).

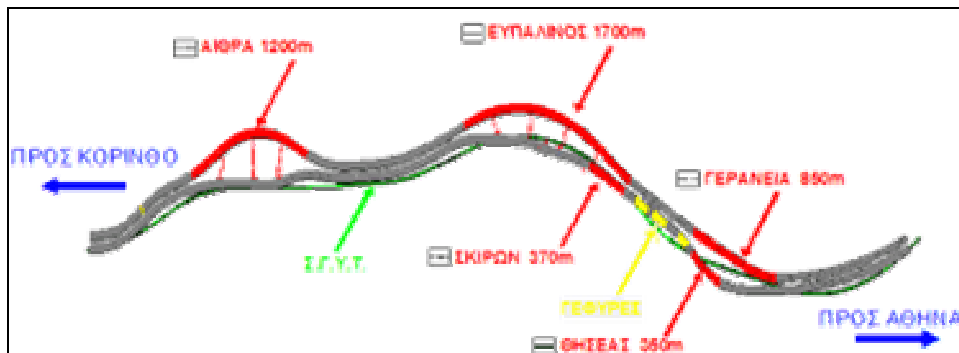


Σχήμα 6.1: Περιοχή μελέτης Ελευσίνα - Κόρινθος (πηγή: *maps.google.com*)
Figure 6.1: Eleusina – Korinthos study area (source: *maps.google.com*)

Η διαδρομή περιλαμβάνει τρεις σήραγγες στην κατεύθυνση προς Κόρινθο (“Γεράνεια” μήκους 850m, “Ευπαλίνος” μήκους 1700m και “Αίθρα” μήκους 1200m) και δυο στην κατεύθυνση προς Ελευσίνα (“Σκίρων” μήκους 370m και “Θησέας” μήκους 350m), όπως περιγράφεται στα Σχήματα 6.2 και 6.3.



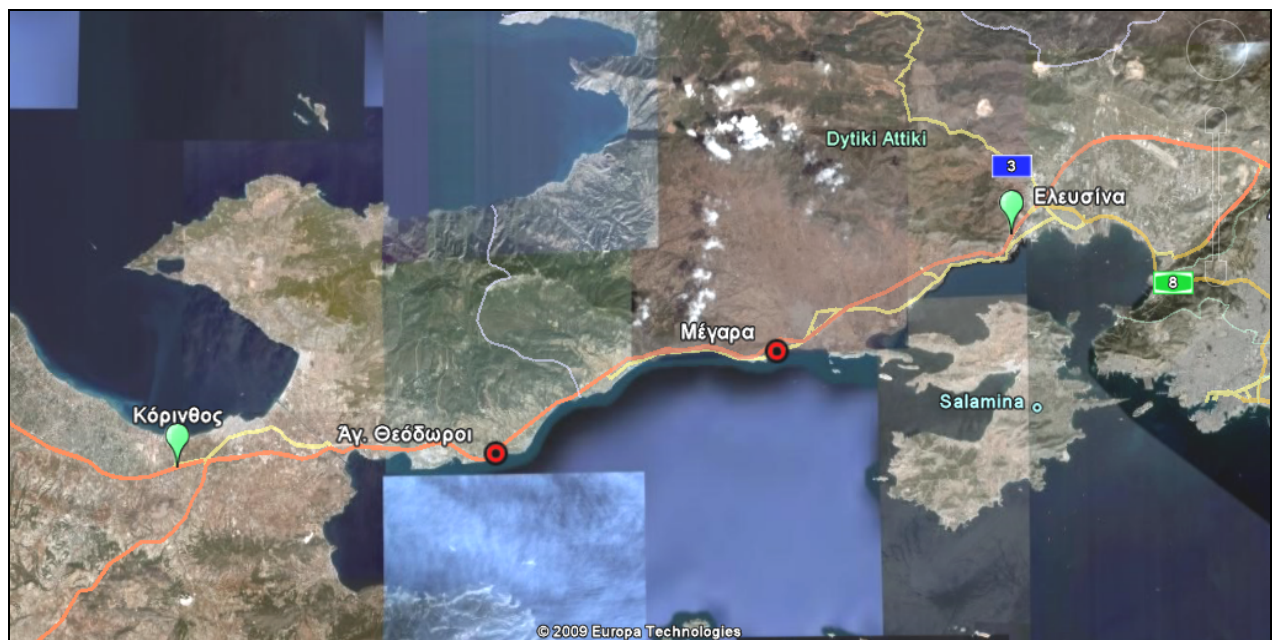
Σχήμα 6.2: Μεγέθυνση περιοχής σηράγγων (πηγή: *maps.google.com*)
Figure 6.2: Tunnels area magnification (source: *maps.google.com*)



Σχήμα 6.3: Σήραγγες στην περιοχή της Κακιάς Σκάλας (πηγή: www.myphone.gr)
Figure 6.3: Tunnels at Kakia Skala (source: www.myphone.gr)

6.2.2 Προπαρασκευαστικές εργασίες και συλλογή δεδομένων

Η τεχνική μέτρησης, που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί στην εφαρμογή, είναι η μέθοδος του σχετικού κινηματικού εντοπισμού με εκ των υστέρων επεξεργασία. Επομένως, για το μήκος κίνησης του οχήματος τοποθετήθηκαν δύο σταθμοί αναφοράς, ένας στην περιοχή των Μεγάρων και ένας στους Αγίους Θεοδώρους (Σχήμα 6.4).



Σχήμα 6.4: Θέση Σταθμών Αναφοράς (Ελευσίνα - Κόρινθος) (πηγή: maps.google.com)
Figure 6.4: Reference stations position (Eleusina - Korinthos) (source: maps.google.com)

Οι συγκεκριμένοι σταθμοί εξασφαλίζουν ότι το μήκος της βάσης μεταξύ του κινητού δέκτη και του σταθερού, σε όλη τη διαδρομή, δεν υπερβαίνει τα 15km, προκειμένου οι ακρίβειες εντοπισμού του οχήματος να είναι της τάξης λίγων εκατοστών.

Για την συλλογή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν:

- Ειδικά διαμορφωμένο όχημα (Σχήμα 6.5), το οποίο είναι εξοπλισμένο με δυο δέκτες και κεραίες GPS της *Trimble*, σύστημα αδρανειακού εντοπισμού, ψηφιακό οδόμετρο και υπολογιστική μονάδα.



Σχήμα 6.5: Όχημα καταγραφής μετρήσεων

Figure 6.5: Vehicle for measurements recording

- Δυο δέκτες και κεραίες GPS της *Trimble*, για τη συλλογή δεδομένων στους σταθμούς αναφοράς στα Μέγαρα και τους Αγίους Θεοδώρους, κατά μήκος της διαδρομής (Σχήμα 6.6).



Σχήμα 6.6: Σταθμός αναφοράς στους Αγ. Θεοδώρους

Figure 6.6: Reference station at Ag. Theodoroi

- Ένας επιπλέον δέκτης GPS της *Trimble*, εκτός από αυτόν που έφερε το όχημα, ώστε να συλλεχθούν δεδομένα, ανεξαρτήτως των δεδομένων από το σύστημα POSLV.

Σύμφωνα με τη διαδικασία συλλογής δεδομένων πεδίου, το όχημα POSLV παρέμεινε ακινητοποιημένο για το απαιτούμενο χρονικό διάστημα (περίπου 5min) με τους σταθερούς δέκτες στα Μέγαρα και τους Αγίους Θεοδώρους σε ταυτόχρονη λειτουργία, προκειμένου να επιλυθούν οι ασάφειες φάσης των μετρήσεων GPS.

Από τη στιγμή που οι ασάφειες φάσης επιλύθηκαν, ξεκίνησε κανονικά η διαδικασία συλλογής δεδομένων. Η ταχύτητα του οχήματος, κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν περίπου 60km/h. Η διάρκεια του πειράματος, για το ζητούμενο οδικό τμήμα σε μετάβαση και επιστροφή, ήταν περίπου 4.5 ώρες, με λήψη δεδομένων για χρονικό διάστημα περίπου 2.5 ωρών.

Οι σταθεροί δέκτες στα Μέγαρα και τους Αγίους Θεοδώρους λειτουργούσαν καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος, καθώς ήταν απαραίτητη η συλλογή παρατηρήσεων για επαναπροσδιορισμό των συντεταγμένων τους, ύστερα από επίλυση με στατικό εντοπισμό από τον μόνιμο σταθμό GPS του Κέντρου Δορυφόρων Διονύσου του Ε. Μ. Πολυτεχνείου. Οι συντεταγμένες των σταθμών αναφοράς δίνονται στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Συντεταγμένες Σταθμών Αναφοράς διαδρομής Ελευσίνα - Κόρινθος

Table 6.1: Base stations coordinates of Eleusina – Korinthos route

Σταθμός Αναφοράς “Μέγαρα”	Σταθμός Αναφοράς “Αγ. Θεόδωροι”
Συντεταγμένες (WGS'84)	Συντεταγμένες (WGS'84)
$\varphi = 37^{\circ} 58' 38''.660196$	$\varphi = 37^{\circ} 55' 18''.592287$
$\lambda = 23^{\circ} 19' 26''.82102$	$\lambda = 23^{\circ} 07' 09''.72228$
$h = 56.784\text{m}$	$h = 50.006\text{m}$
Ύψος κεραίας: 1.644m	Ύψος κεραίας: 1.454m

Η διεξαγωγή του πειράματος δεν παρουσίασε κάποιο πρόβλημα, ωστόσο κατά την επεξεργασία των δεδομένων διαπιστώθηκε ότι ο επιπλέον δέκτης GPS, που είχε τοποθετηθεί στο όχημα, δεν λειτούργησε με ομαλό τρόπο, πιθανώς λόγω σφαλμάτων στις ρυθμίσεις και επομένως δεν ήταν δυνατή η επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων.

6.3 Οδικό Τμήμα Υλίκη - Λογγός

6.3.1 Περιγραφή περιοχής μελέτης

Το οδικό τμήμα Υλίκη – Λογγός πρόκειται για οδό ταχείας κυκλοφορίας, με δυο λωρίδες ανά κατεύθυνση και λωρίδα έκτακτης ανάγκης (ΛΕΑ). Έχει συνολικό μήκος 65km. Συνεπώς, το

πείραμα καλύπτει συνολικά διαδρομή μήκους περίπου 130km σε μετάβαση και επιστροφή (Σχήμα 6.7).



Σχήμα 6.7: Περιοχή μελέτης Υλίκη - Λογγος (πηγή: maps.google.com)

Figure 6.7: Yliki – Loggos study area (source: maps.google.com)

6.3.2 Προπαρασκευαστικές εργασίες και συλλογή δεδομένων

Η τεχνική μέτρησης, που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί στην εφαρμογή, είναι η μέθοδος του σχετικού κινηματικού εντοπισμού με εκ των υστέρων επεξεργασία. Επομένως, για το μήκος κίνησης του οχήματος τοποθετήθηκαν τρεις σταθμοί αναφοράς S12, S14 και S16 (Σχήμα 6.8). Η επιλογή των θέσεων των σταθμών έγινε με σκοπό να εξασφαλίζεται ότι το μήκος της βάσης μεταξύ του κινητού δέκτη και του σταθερού, σε όλη τη διαδρομή, δεν υπερβαίνει τα 15km, προκειμένου οι ακρίβειες εντοπισμού του οχήματος να είναι της τάξης λίγων εκατοστών.

Για την συλλογή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν:

- Ειδικά διαμορφωμένο όχημα, το οποίο είναι εξοπλισμένο με δυο δέκτες και κεραίες GPS της *Trimble*, σύστημα αδρανειακού εντοπισμού, ψηφιακό οδόμετρο και υπολογιστική μονάδα.
- Τρεις δέκτες και κεραίες GPS της *Trimble*, για τη συλλογή δεδομένων στους σταθμούς αναφοράς S12, S14 και S16, κατά μήκος της διαδρομής.
- Ένας επιπλέον δέκτης GPS της *Trimble*, εκτός από αυτόν που έφερε το όχημα, ώστε να συλλεχθούν δεδομένα, ανεξαρτήτως των δεδομένων από το σύστημα POSLV.



Σχήμα 6.8: Θέση Σταθμών Αναφοράς (Υλίκη - Λογγός) (πηγή: *maps.google.com*)

Figure 6.8: Reference stations position (Yliki - Loggos) (source: *maps.google.com*)

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, το όχημα POSLV παρέμεινε ακινητοποιημένο για το απαιτούμενο χρονικό διάστημα (περίπου 5min), προκειμένου να επιλυθούν οι ασάφειες φάσης των μετρήσεων GPS. Ύστερα από τη διαδικασία της έναρξης, ξεκίνησε η συλλογή δεδομένων. Η ταχύτητα του οχήματος, κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν κατά μέσο όρο 55km/h. Η διάρκεια του πειράματος, για το ζητούμενο οδικό τμήμα σε μετάβαση και επιστροφή, ήταν περίπου 3.5 ώρες, με λήψη δεδομένων για χρονικό διάστημα περίπου 3 ωρών.

Οι συντεταγμένες των σταθμών αναφοράς S12, S14 και S16 προσδιορίστηκαν, ύστερα από επίλυση με στατικό εντοπισμό από τον μόνιμο σταθμό GPS του Κέντρου Δορυφόρων Διονύσου του Ε. Μ. Πολυτεχνείου (Πίνακας 6.2).

Πίνακας 6.2: Συντεταγμένες Σταθμών Αναφοράς διαδρομής Υλίκη - Λογγός

Table 6.2: Base stations coordinates of Yliki - Loggos route

Σταθμός Αναφοράς "S12" Συντεταγμένες (WGS'84)	Σταθμός Αναφοράς "S14" Συντεταγμένες (WGS'84)	Σταθμός Αναφοράς "S16" Συντεταγμένες (WGS'84)
$\varphi = 38^{\circ} 37' 04''.1896$	$\varphi = 38^{\circ} 43' 22''.6489$	$\varphi = 38^{\circ} 45' 12''.4394$
$\lambda = 23^{\circ} 10' 44''.8931$	$\lambda = 23^{\circ} 03' 06''.3416$	$\lambda = 22^{\circ} 51' 59''.5167$
$h = 155.725m$	$h = 64.395m$	$h = 40.804m$
Ύψος κεραίας: 1.062m	Ύψος κεραίας: 1.174m	Ύψος κεραίας: 1.350m

7.1 Γενικά

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βήματα επεξεργασίας και τα αποτελέσματα, που προέκυψαν, για τα δεδομένα ψηφιακής καταγραφής, όπως παρουσιάστηκαν στο Έκτο κεφάλαιο. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο *PosPac*, που συνοδεύει το σύστημα POSLV 420. Ειδικότερα το λογισμικό *PosPac* χρησιμοποιήθηκε για εξαγωγή τροχιών και κινηματικών χαρακτηριστικών του οχήματος για δυο διαδρομές, στο οδικό τμήμα Ελευσίνα – Κόρινθος και στο οδικό τμήμα Υλίκη – Λογγός. Οι επίλυσεις, για τα δυο οδικά τμήματα, αφορούν στην κίνηση του οχήματος μόνο σε μετάβαση, η οποία επιλύεται ξεχωριστά για κάθε σταθμό αναφοράς. Επίσης, γίνεται και μια επίλυση, χωρίς τη χρήση σταθμού αναφοράς, για σύγκριση των αποτελεσμάτων. Συνεπώς, για το οδικό τμήμα Ελευσίνα – Κόρινθος προκύπτουν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις επίλυσης, ενώ για το οδικό τμήμα Υλίκη – Λογγός τέσσερις, όπως αναλύονται στην Ενότητα 7.2.

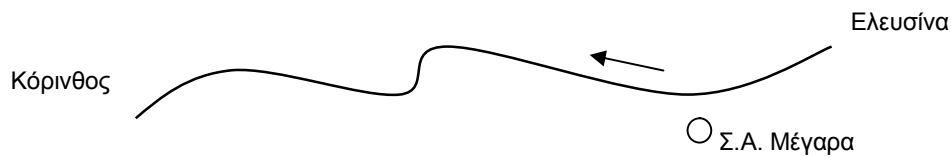
Στην παρούσα εργασία, οι παραπάνω περιπτώσεις επιλύθηκαν σε πλοήγηση *Smoothed*, που αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή επίλυσης των πρωτογενών δεδομένων. Ωστόσο, εκτελέστηκαν επίλυσεις χρησιμοποιώντας και τις υπόλοιπες επιλογές πλοήγησης, για καλύτερη κατανόηση της μεθοδολογίας του λογισμικού. Για τον ίδιο λόγο, πραγματοποιήθηκαν επιπλέον επίλυσεις των διαδρομών με κίνηση του οχήματος σε επιστροφή.

7.2 Επιλογές Επίλυσης Δεδομένων

7.2.1 Οδικό τμήμα Ελευσίνα - Κόρινθος

Στο οδικό τμήμα Ελευσίνα – Κόρινθος τοποθετήθηκαν δυο σταθμοί αναφοράς (Μέγαρα, Άγιοι Θεόδωροι). Επομένως η επίλυση της διαδρομής σε μετάβαση γίνεται με τρεις τρόπους, μια για κάθε σταθμό αναφοράς και μια χωρίς κανένα σταθμό αναφοράς:

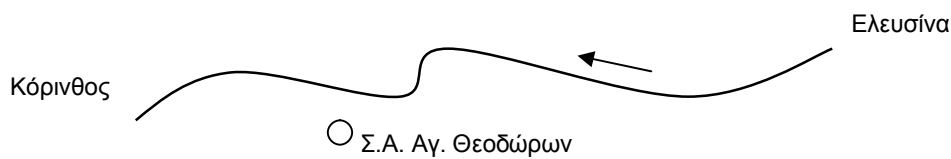
1. “Mission 1-EK”. Αφορά στην επίλυση της διαδρομής Ελευσίνα - Κόρινθος, με σταθμό αναφοράς τα Μέγαρα (Σχήμα 7.1).



Σχήμα 7.1: Επίλυση “Mission 1-EK” (Ελευσίνα - Κόρινθος)

Figure 7.1: “Mission 1-EK” solution (Elefsina - Korinthos)

2. “Mission 2-EK”. Αφορά στην επίλυση της διαδρομής Ελευσίνα - Κόρινθος, με σταθμό αναφοράς τους Αγ. Θεοδώρους (Σχήμα 7.2).



Σχήμα 7.2: Επίλυση “Mission 2-EK” (Ελευσίνα - Κόρινθος)

Figure 7.2: “Mission 2-EK” solution (Elefsina - Korinthos)

3. “Stand alone-EK”. Αφορά στην επίλυση της διαδρομής Ελευσίνα - Κόρινθος, χωρίς σταθμό αναφοράς (Σχήμα 7.3).



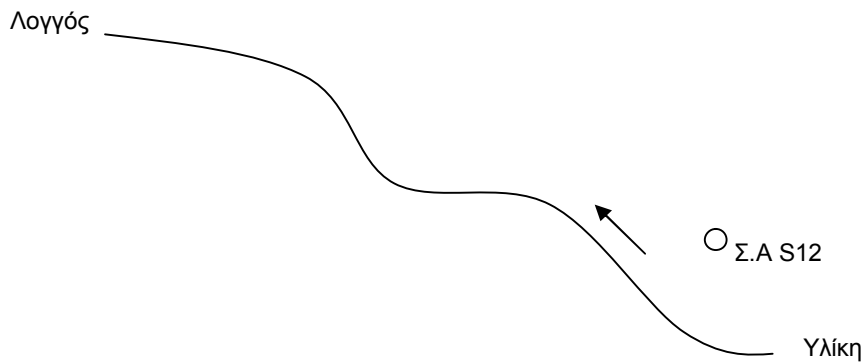
Σχήμα 7.3: Επίλυση “Stand alone-EK” (Ελευσίνα - Κόρινθος)

Figure 7.3: “Stand alone-EK” solution (Elefsina - Korinthos)

7.2.2 Οδικό τμήμα Υλίκη - Λογγός

Στο οδικό τμήμα Υλίκη - Λογγός τοποθετήθηκαν τρεις σταθμοί αναφοράς (S12, S14 και S16). Επομένως η επίλυση της διαδρομής σε μετάβαση γίνεται με τέσσερις τρόπους, μια για κάθε σταθμό αναφοράς και μια χωρίς κανένα σταθμό αναφοράς:

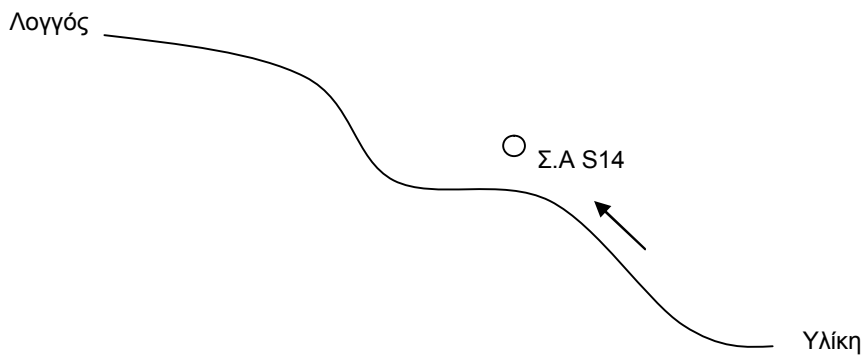
1. “Mission 1-ΥΛ”. Αφορά στην επίλυση της διαδρομής Υλίκη - Λογγός, με σταθμό αναφοράς τον S12 (Σχήμα 7.4).



Σχήμα 7.4: Επίλυση “Mission 1-ΥΛ” (Υλίκη - Λογγός)

Figure 7.4: “Mission 1-YL” solution (Yliki - Loggos)

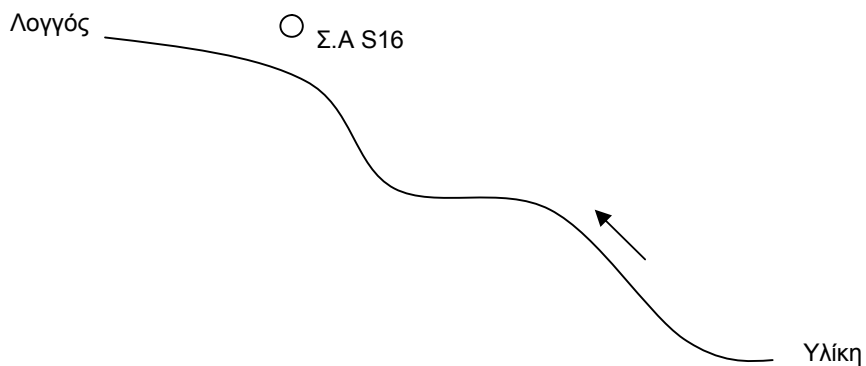
2. “Mission 2-ΥΛ”. Αφορά στην επίλυση της διαδρομής Υλίκη - Λογγός, με σταθμό αναφοράς τον S14 (Σχήμα 7.5).



Σχήμα 7.5: Επίλυση “Mission 2-ΥΛ” (Υλίκη - Λογγός)

Figure 7.5: “Mission 2-YL” solution (Yliki - Loggos)

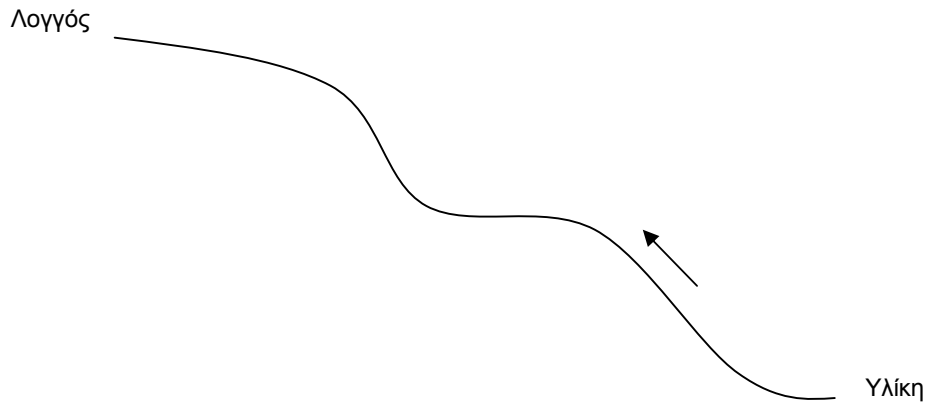
3. “Mission 3-ΥΛ”. Αφορά στην επίλυση της διαδρομής Υλίκη - Λογγός, με σταθμό αναφοράς τον S16 (Σχήμα 7.6).



Σχήμα 7.6: Επίλυση “Mission 3-ΥΛ”. (Υλίκη - Λογγός)

Figure 7.6: “Mission 3-YL” solution (Yliki - Loggos)

4. “Stand alone-ΥΛ”. Αφορά στην επίλυση της διαδρομής Υλίκη - Λογγός, χωρίς σταθμό αναφοράς (Σχήμα 7.7).



Σχήμα 7.7: Επίλυση “Stand alone-ΥΛ” (Υλίκη - Λογγός)

Figure 7.7: “Stand alone-YL” solution (Yliki - Loggos)

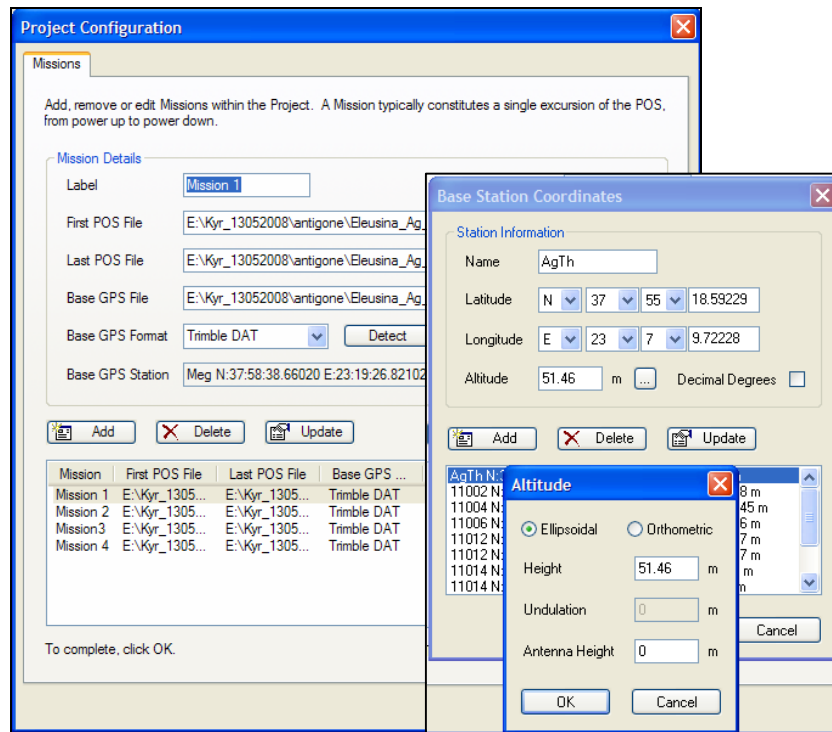
7.3 Προετοιμασία Επιλύσεων και Εισαγωγή Παραμέτρων

Προκειμένου να επιλυθεί ο εντοπισμός του οχήματος είναι απαραίτητο προηγουμένως να εισαχθούν τα δεδομένα πεδίου και οι αντίστοιχες παράμετροι. Αυτές είναι το αρχείο δεδομένων εντοπισμού του οχήματος, που πρόκειται για την μετάβαση σε όλες τις περιπτώσεις, το αρχείο των δεδομένων GPS του σταθμού αναφοράς και οι συντεταγμένες του, που διαφοροποιούνται ανάλογα με την περίπτωση.

Οι τιμές των συντεταγμένων των σταθμών αναφοράς, καθώς και τα ύψη των κεραιών, που εισήχθησαν στο λογισμικό παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.1 και 6.2.

Επίσης, για τις περιπτώσεις επίλυσης χωρίς τη χρήση σταθμού αναφοράς (επιλύσεις *Stand alone*) εισάγεται μόνο το αρχείο δεδομένων εντοπισμού του οχήματος σε μετάβαση, ενώ τα υπόλοιπα αφήνονται κενά. Η επίλυση αυτή δίνει αποτελέσματα χρησιμοποιώντας τα πρωτογενή δεδομένα από τους δέκτες GPS και το αδρανειακό σύστημα.

Για παράδειγμα, στο αντίστοιχο παράθυρο ορισμού της επίλυσης “Mission 1-EK” (Ελευσίνα - Κόρινθος), εισάγεται το αρχείο δεδομένων εντοπισμού του οχήματος σε μετάβαση, *sections 1-2 (First POS File)*, το αρχείο των δεδομένων GPS του σταθμού αναφοράς στα Μέγαρα (*Base GPS File*), οι συντεταγμένες του (φ,λ,η) στο παγκόσμιο σύστημα WGS 84 και το κατακόρυφο ύψος της κεραίας (βλ. Πίνακα 6.1).



Σχήμα 7.8: Εισαγωγή παραμέτρων για “Mission 1-EK”

Figure 7.8: Parameters input for “Mission 1-EK”

7.4 Αποτελέσματα Λογισμικού Επεξεργασίας

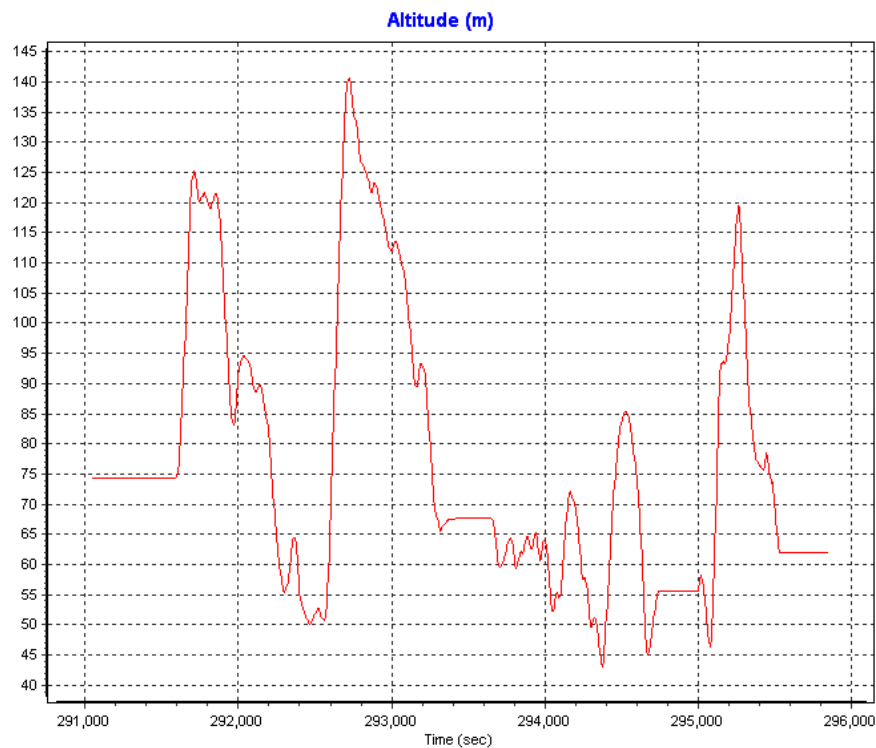
Κάθε ένα από τα παραπάνω “Mission” επιλύεται με την επιλογή επίλυσης *Smoothed*, η οποία αφορά στην βέλτιστη επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων. Τα αποτελέσματα, που παρέχονται στον χρήστη ύστερα από την επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων, δίνονται με τη μορφή διαγραμμάτων αλλά και με καταγραφή των αποτελεσμάτων σε αρχείο εξαγωγής, μορφής ASCII.

Τα διαγράμματα, που παρέχει το λογισμικό αφορούν:

- στην βέλτιστη επίλυση της τροχιάς και των κινηματικών χαρακτηριστικών του οχήματος, όπου περιλαμβάνονται διαγράμματα μηκοτομής, οριζοντιογραφίας, αζιμουθίου και γωνιών στροφής
- στα σφάλματα θέσης, κατά *North*, *East* και *Down* και γωνιών στροφής (διατοιχισμός, πρόνευσης και αζιμουθίου)
- στην λειτουργία των αισθητήρων του αδρανειακού εντοπισμού, καθώς και του ψηφιακού οδομέτρου,
- στον αριθμό των δορυφόρων, για τη συγκεκριμένη επίλυση και τη γεωμετρία τους, με διαγράμματα αζιμουθίου και γωνιών ύψους για κάθε δορυφόρο.

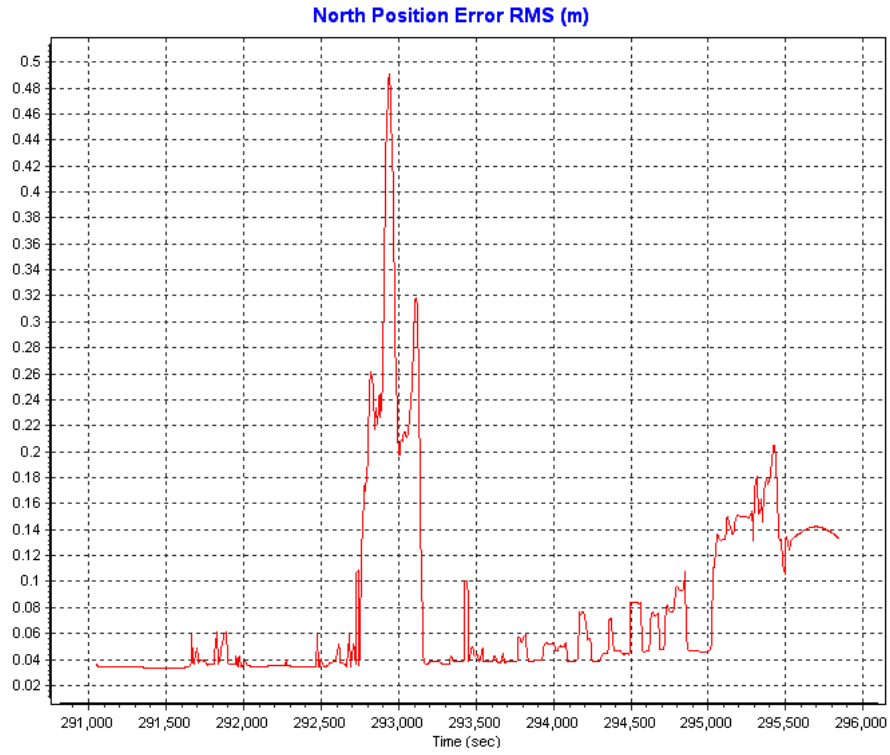
Για κάθε περίπτωση επίλυσης, η καταγραφή των αποτελεσμάτων σε αρχείο εξαγωγής περιλαμβάνει αποτελέσματα για κάθε σημείο καταγραφής και είναι: ο χρόνος, η διανυόμενη απόσταση, οι συντεταγμένες (x,y) στην επιλεγμένη προβολή, οι ελλειψοειδείς συντεταγμένες φ,λ,h, οι γωνίες στροφής και τέλος οι τυπικές αποκλίσεις για τις συντεταγμένες και τις γωνίες στροφής. Αυτή η εναλλακτική μορφή παρουσίασης των αποτελεσμάτων δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να διαχειριστεί τα αποτελέσματα, εξάγοντας παράγωγα διαγράμματα.

Στη συνέχεια παραθέτονται ορισμένα ενδεικτικά διαγράμματα (Σχήματα 7.9, 7.10 και 7.11), όπως προκύπτουν από το λογισμικό.

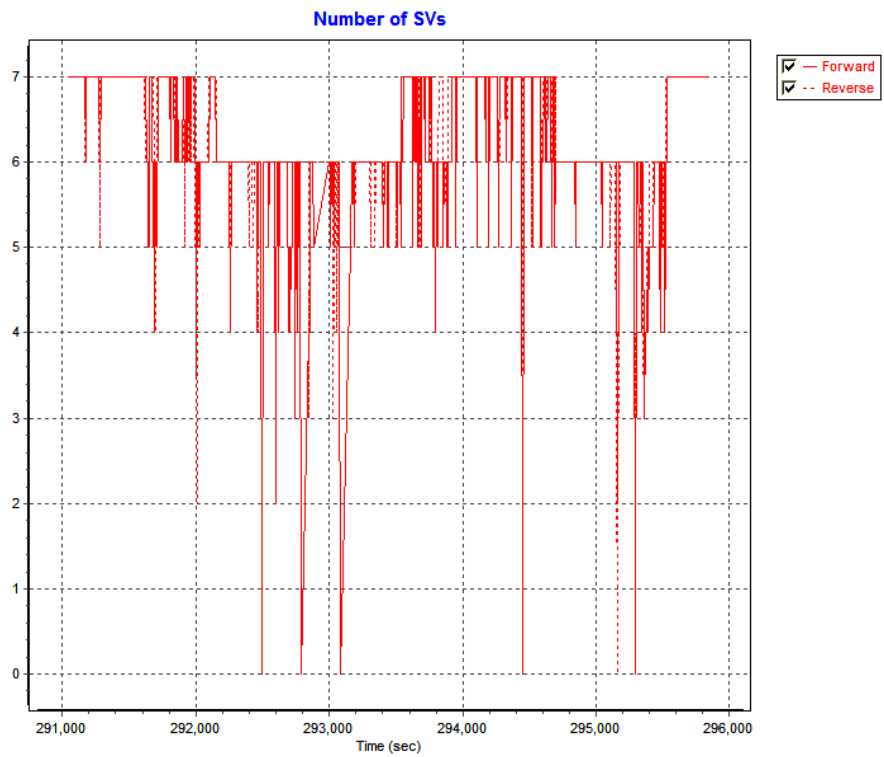


Σχήμα 7.9: Χρονοσειρά γεωμετρικού υψομέτρου

Figure 7.9: Timeseries for geometric height



Σχήμα 7.10: Διάγραμμα μ. τ. σ. κατά τη συνιστώσα North
Figure 7.10: North position RMS diagramm

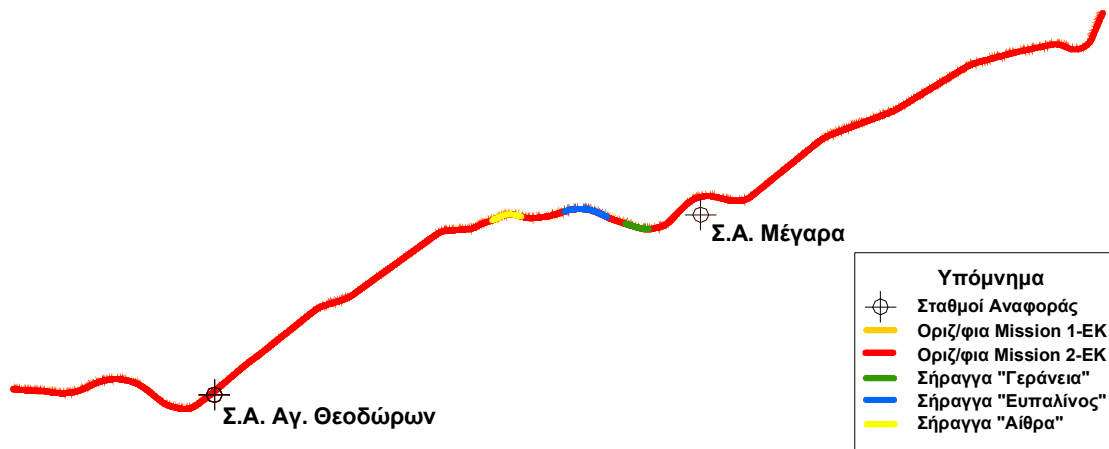


Σχήμα 7.11: Διάγραμμα αριθμού δορυφόρων
Figure 7.11: Satellites availability diagramm

8.1 Οδικό Τμήμα Ελευσίνα - Κόρινθος

8.1.1 Αξιολόγηση επίδρασης απόστασης του οχήματος από τους σταθμούς αναφοράς

Για το οδικό τμήμα Ελευσίνα – Κόρινθος, η τροχιά κίνησης επιλύεται από τους σταθερούς σταθμούς των Μεγάρων (“Mission 1-EK”) και των Αγίων Θεοδώρων (“Mission 2-EK”). Οι οριζοντιογραφίες, που προκύπτουν για τις δύο επιλύσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.1. Εντούτοις, λόγω της μικρής κλίμακας απεικόνισης, φαίνεται οι δυο τροχιές να συμπίπτουν, κάτι που δεν ισχύει στην πραγματικότητα.



Σχήμα 8.1: Οριζοντιογραφίες επιλύσεων “Mission 1-EK” και “Mission 2-EK”

Figure 8.1: Top view for “Mission 1-EK” and “Mission 2-EK” solutions

Η απόκλιση d στις οριζοντιογραφίες των επιλύσεων “Mission 1-EK” και “Mission 2-EK”, για κάθε χρονική στιγμή, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$d_{M_1, M_2} = \sqrt{(x_{M_1} - x_{M_2})^2 + (y_{M_1} - y_{M_2})^2} \quad (8.1)$$

όπου,

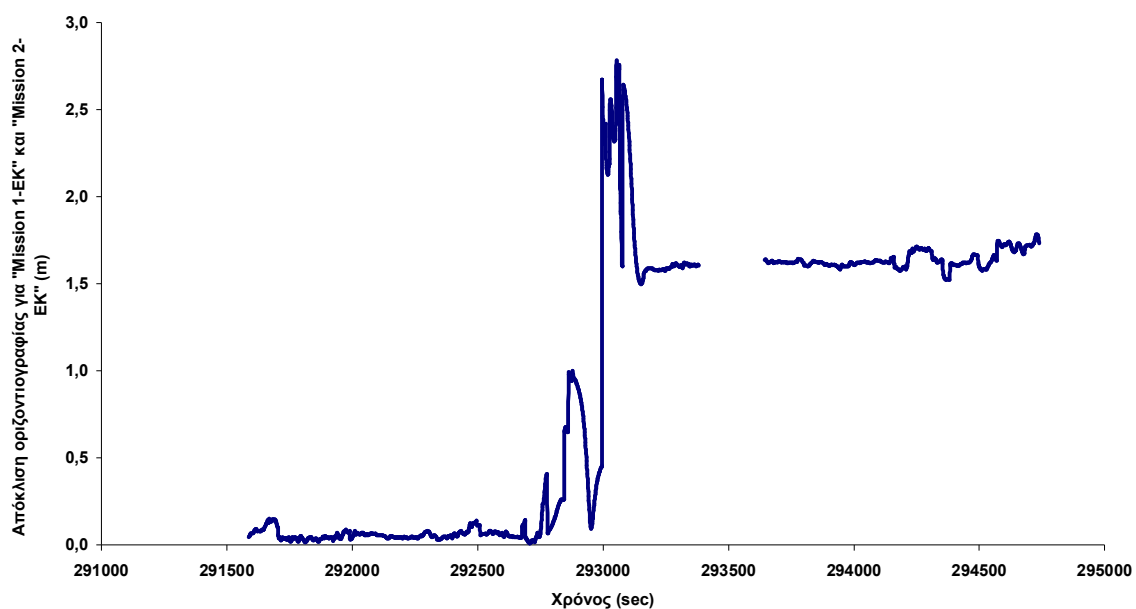
(x_{M_1}, y_{M_1}) , Συντεταγμένες των σημείων για την επίλυση “Mission 1-EK”

(x_{M_2}, y_{M_2}) , Συντεταγμένες των σημείων για την επίλυση “Mission 2-EK”

Οι παραπάνω συντεταγμένες έχουν προκύψει από τα αντίστοιχα αρχεία εξαγωγής για τις δυο περιπτώσεις.

Η απόκλιση μεταξύ των δύο οριζοντιογραφιών, ως προς τον χρόνο, φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 8.2. Όπως προκύπτει από την μελέτη του διαγράμματος μέχρι τη χρονική στιγμή $t=292700\text{sec}$ περίπου, η απόκλιση δεν υπερβαίνει τα 0.15m , κάτι που είναι αναμενόμενο. Στο χρονικό διάστημα από $t=292700\text{sec}$ έως $t=293200\text{sec}$ παρουσιάζεται αύξηση στην μεταξύ τους απόκλιση, με μέγιστη τιμή περί τα 2.7m . Σε αυτό το χρονικό διάστημα το όχημα διέρχεται από τις τρεις σήραγγες στη θέση “Κακιά Σκάλα”, συνολικού μήκους 3650m , και συνεπώς το ολοκληρωμένο σύστημα εντοπισμού POSLV δεν λαμβάνει πληροφορία από το GPS, λόγω διακοπής του δορυφορικού σήματος.

Ωστόσο, ύστερα από την έξοδο του οχήματος από την τελευταία σήραγγα, όπου επανέρχεται το σήμα GPS, δεν παρατηρείται μείωση στην απόκλιση και παρουσιάζει σταθερή τιμή της τάξης των 1.6m , μέχρι τη χρονική στιγμή $t=294160\text{sec}$. Στη συνέχεια, φαίνεται να υπάρχει διακύμανση, μέχρι το τέλος της διαδρομής, κάτι που πιθανόν να οφείλεται ότι σε εκείνη τη θέση του οχήματος, το μήκος βάσης από το σταθμό αναφοράς “Μέγαρα” είναι μεγάλο. Για τον ίδιο λόγο παρατηρείται ανάλογο φαινόμενο για το πρώτο τμήμα της κίνησης του οχήματος και συγκεκριμένα μέχρι $t=291700\text{sec}$.



Σχήμα 8.2: Απόκλιση οριζοντιογραφιών “Mission 1-EK” και “Mission 2-EK”

Figure 8.2: Distance between “Mission 1-EK” and “Mission 2-EK” top views

Η μεγάλη απόκλιση που παρουσιάζεται, μετά την έξοδο του οχήματος από την τελευταία σήραγγα πιθανόν ενέχει σφάλμα στην επίλυση ή τον υπολογισμό και δεν μπορεί να

δικαιολογηθεί, είναι όμως αξιοσημείωτο ότι παρουσιάζει συστηματική διαφορά από την τιμή της απόκλισης, πριν την έναρξη των σηράγγων.

Προκειμένου να αξιολογηθούν περαιτέρω τα αποτελέσματα σε οριζοντιογραφία, υπολογίστηκε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα κατά x, y $rms_{x,y}$, για κάθε χρονική στιγμή των επιλύσεων “Mission 1-EK” και “Mission 2-EK”:

$$rms_{x,y} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (8.2)$$

όπου,

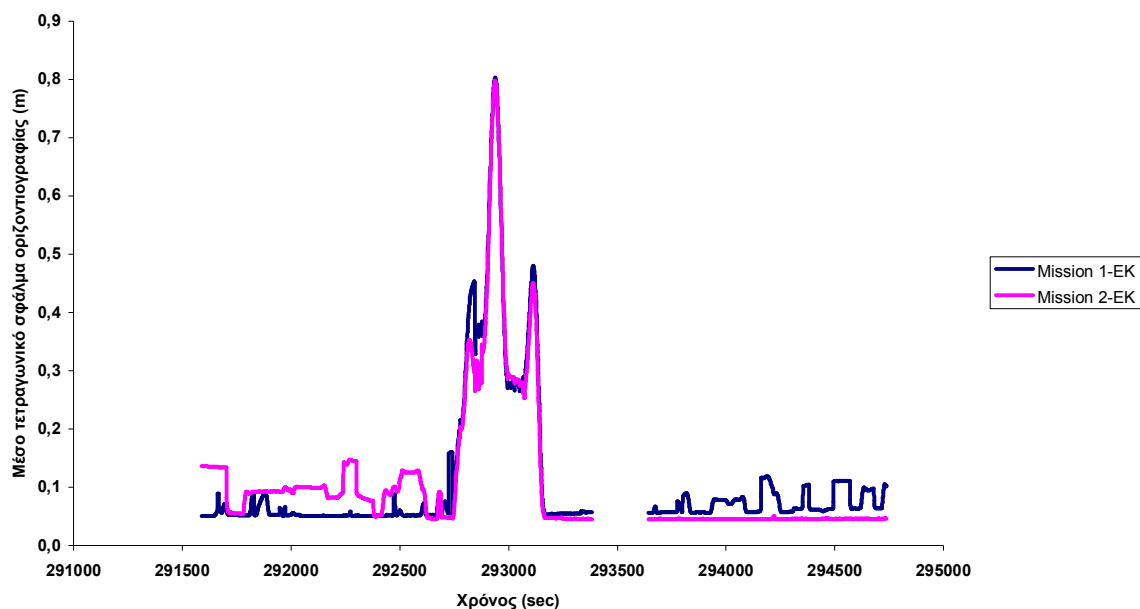
σ_x , Τυπική απόκλιση κατά x

σ_y , Τυπική απόκλιση κατά y

Η απεικόνιση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος των δύο επιλύσεων σε κοινό διάγραμμα (Σχήμα 8.2) δείχνει ότι πριν και μετά τη διέλευση του οχήματος από τις σήραγγες το μέσο τετραγωνικό σφάλμα της θέσης είναι της τάξης των λίγων εκατοστών. Πιο συγκεκριμένα, πριν τις σήραγγες, η επίλυση “Mission 1-EK” εμφανίζεται να έχει μικρότερο σφάλμα, της τάξης των 0.060m, συγκριτικά με την επίλυση “Mission 2-EK”, που παρουσιάζει σφάλμα κατά μέσο όρο 0.10m. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι σε εκείνη την περιοχή το μήκος της βάσης από τον σταθμό “Μέγαρα” είναι μικρότερο των 15km και άρα ο προσδιορισμός της τροχιάς γίνεται με πολύ καλή ακρίβεια. Αντιθέτως, ο σταθμός “Αγ. Θεόδωροι” απέχει αισθητά από τον κινητό δέκτη, κάτι που μειώνει την ποιότητα της επίλυσης.

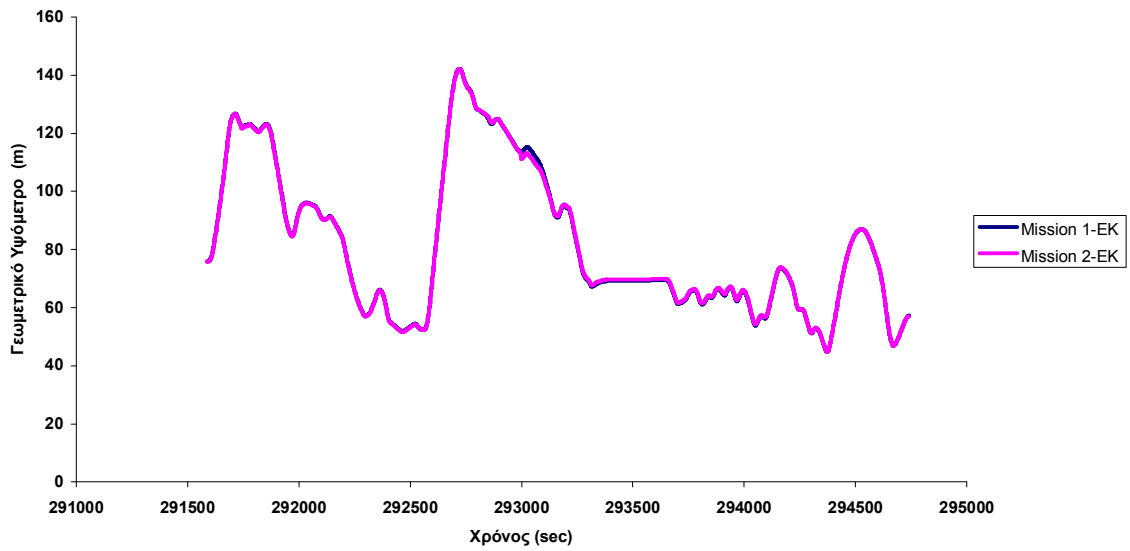
Μετά το τέλος των σηράγγων, εμφανίζεται παρόμοια συμπεριφορά. Το σφάλμα της επίλυσης “Mission 1-EK” μεταβάλλεται ελάχιστα στην τιμή (0.057m), διότι το μήκος της βάσης, σε εκείνη τη θέση του οχήματος, είναι εντός των ορίων για τον κινηματικό εντοπισμό. Εντούτοις, το σφάλμα αυξάνει προς το τέλος της διαδρομής και είναι της τάξης των 0.075m, όπου ο κινητός δέκτης έχει τη μεγαλύτερη απόσταση από τον σταθμό αναφοράς. Αναφορικά στην επίλυση “Mission 2-EK”, η συγκεκριμένη περιοχή κίνησης του οχήματος βρίσκεται σε κοντινή απόσταση (μικρότερη των 15km) από τον σταθμό αναφοράς “Αγ. Θεόδωροι”, οπότε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι της τάξης των 0.045m. Συνεπώς, προκύπτει ότι μετά τέλος των σηράγγων το μέσο τετραγωνικό σφάλμα θέσης, για τις δυο περιπτώσεις, κυμαίνεται σε τέτοιες τιμές που δεν δικαιολογεί την απόκλιση των 1.6m στις δύο οριζοντιογραφίες.

Επίσης, στην περιοχή εντός των σηράγγων παρατηρείται αύξηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, λόγω της απώλειας σήματος, οι τιμές του οποίου αξιολογούνται στην Ενότητα 8.1.3.

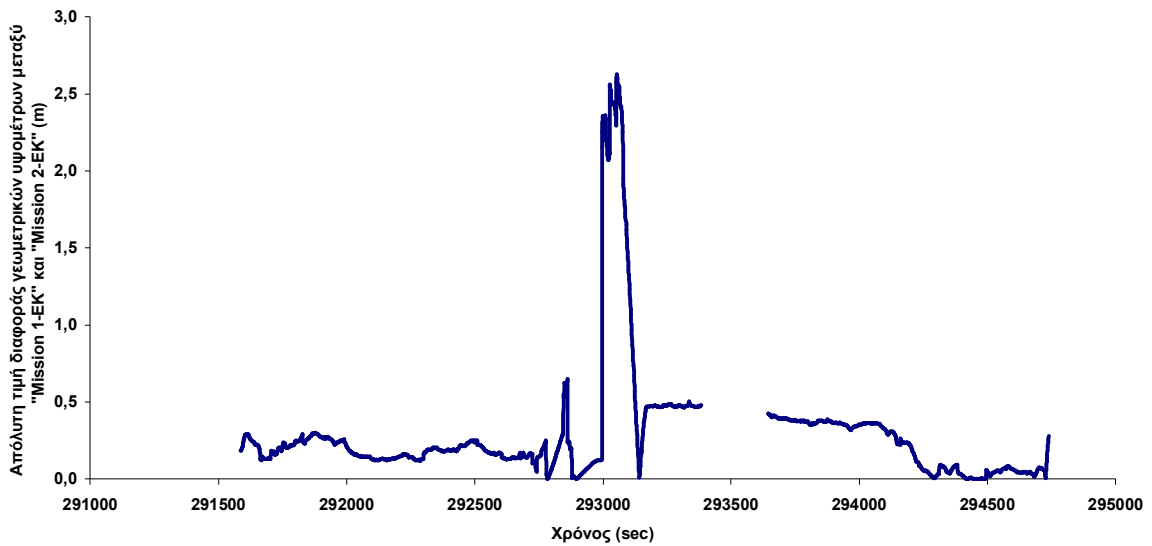


Σχήμα 8.3: Διάγραμμα μέσου τετραγωνικού σφάλματος για “Mission 1-EK” και “Mission 2-EK”
Figure 8.3: RMS diagramm for “Mission 1-EK” and “Mission 2-EK”

Ο προσδιορισμός της υψομετρικής πληροφορίας για τις δύο επιλύσεις τροχιών φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 8.4, όπου απεικονίζεται το γεωμετρικό υψόμετρο συναρτήσεως του χρόνου. Όπως προκύπτει από το διάγραμμα, δεν παρουσιάζεται σημαντική διαφορά μεταξύ των δυο περιπτώσεων, κάτι που διαπιστώνεται καλύτερα στο διάγραμμα του Σχήματος 8.5, με την απεικόνιση της απόκλισης, σε απόλυτη τιμή, των δυο χρονοσειρών. Η απόκλιση αυτή κυμαίνεται στα 0.15m πριν την περιοχή των σηράγγων, ενώ μετά από αυτές η τιμή είναι της τάξης των 0.40m με μείωση στα 0.05m, στο τέλος της διαδρομής. Επιπλέον, η τιμή αυξάνεται σημαντικά κατά τη διέλευση του οχήματος από τις σήραγγες, δηλαδή για το χρονικό διάστημα από $t=292700\text{sec}$ έως $t=293200\text{sec}$, όπου σημειώνεται μέγιστη τιμή τα 2.65m. Επίσης, από το Σχήμα 8.5 φαίνεται ότι η απόκλιση αυξομειώνεται συνεχώς, χωρίς να παρουσιάζει σταθερή τιμή, όπως συμβαίνει στην αντίστοιχη περίπτωση της οριζοντογραφίας (Σχήμα 8.2).



Σχήμα 8.4: Χρονοσειρές γεωμετρικών υψόμετρων για "Mission 1-EK" και "Mission 2-EK"
Figure 8.4: Geometric Height timeseries for "Mission 1-EK" and "Mission 2-EK"

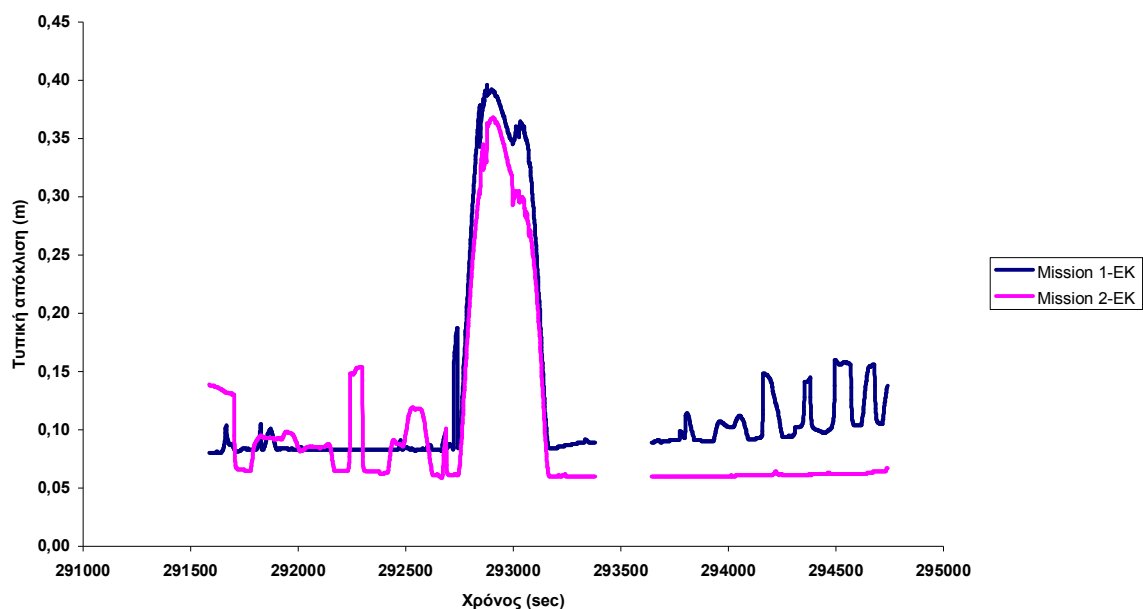


Σχήμα 8.5: Διάγραμμα διαφοράς γεωμετρικών υψόμετρων για "Mission 1-EK" και "Mission 2-EK"
Figure 8.5: Geometric Height variance diagramm for "Mission 1-EK" and "Mission 2-EK"

Ο προσδιορισμός του υψόμετρου, για τις δύο επιλύσεις, έχει προκύψει με τυπικές αποκλίσεις που απεικονίζονται στο Σχήμα 8.6. Οι διακυμάνσεις στην τιμή έχουν παρόμοια συμπεριφορά με αυτή τη μέσου τετραγωνικού σφάλματος κατά x,y (Σχήμα 8.3).

Για την επίλυση "Mission 1-EK", η τιμή της τυπικής απόκλισης, πριν την περιοχή των σηράγγων, είναι της τάξης των 0.083m, ενώ μετά τις σήραγγες το σφάλμα κυμαίνεται στα 0.09m, μέχρι τη χρονική στιγμή $t=293750\text{sec}$ και στη συνέχεια παρουσιάζει αύξηση, που φτάνει κατά μέσο όρο τα 0.13m.

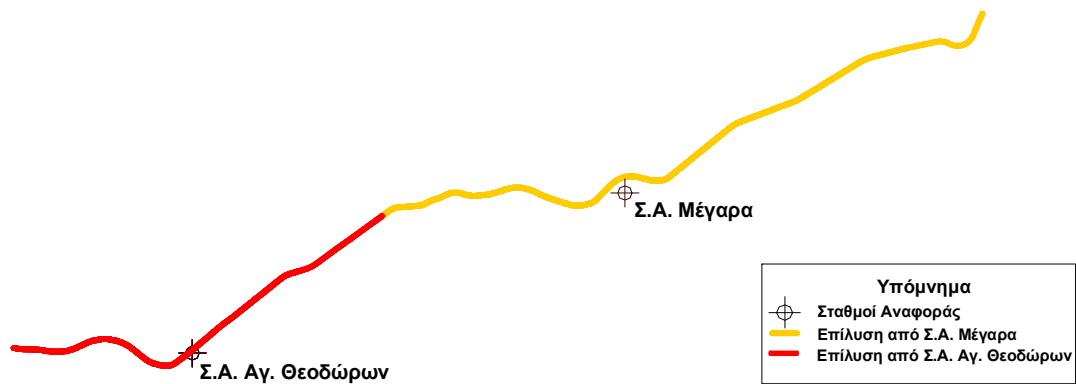
Για την επίλυση "Mission 2-EK", η τυπική απόκλιση, πριν την περιοχή των σηράγγων, εμφανίζει αυξομειώσεις και έχει τιμή κατά μέσο όρο 0.10m, ωστόσο μετά τις σήραγγες η τιμή σταθεροποιείται στα 0.06m.



Σχήμα 8.6: Διάγραμμα τυπικών αποκλίσεων γεωμετρικών υψόμετρων για "Mission 1-EK" και "Mission 2-EK"
Figure 8.6: Geometric Height standard deviation diagramm for "Mission 1-EK" and "Mission 2-EK"

8.1.2 Αξιολόγηση της επίδρασης χρήσης σταθμού αναφοράς (επιλύσεις σχετικού και απόλυτου εντοπισμού)

Η ολοκληρωμένη λύση "Smoothed EK" για τη τροχιά και τα κινηματικά χαρακτηριστικά του οχήματος, προκύπτει ως συνδυασμός των επιλύσεων "Mission 1-EK" και "Mission 2-EK", με βάση τα αρχεία καταγραφής. Όπως έχει περιγραφεί στην Ενότητα 7.2.1, οι δυο περιπτώσεις αντιστοιχούν στη χρήση δεδομένων από διαφορετικούς σταθμούς αναφοράς. Συνεπώς, τα αποτελέσματα, που παρέχουν είναι επηρεασμένα από το μήκος της βάσης, μεταξύ του κινητού δέκτη από τον εκάστοτε σταθμό αναφοράς, για κάθε χρονική στιγμή. Το παραγόμενο αρχείο περιέχει τις συντεταγμένες και τα κινηματικά χαρακτηριστικά του οχήματος, ύστερα από συνδυασμό των αποτελεσμάτων των επιλύσεων "Mission 1-EK" και "Mission 2-EK", όπως περιγράφεται στο Σχήμα 8.7.

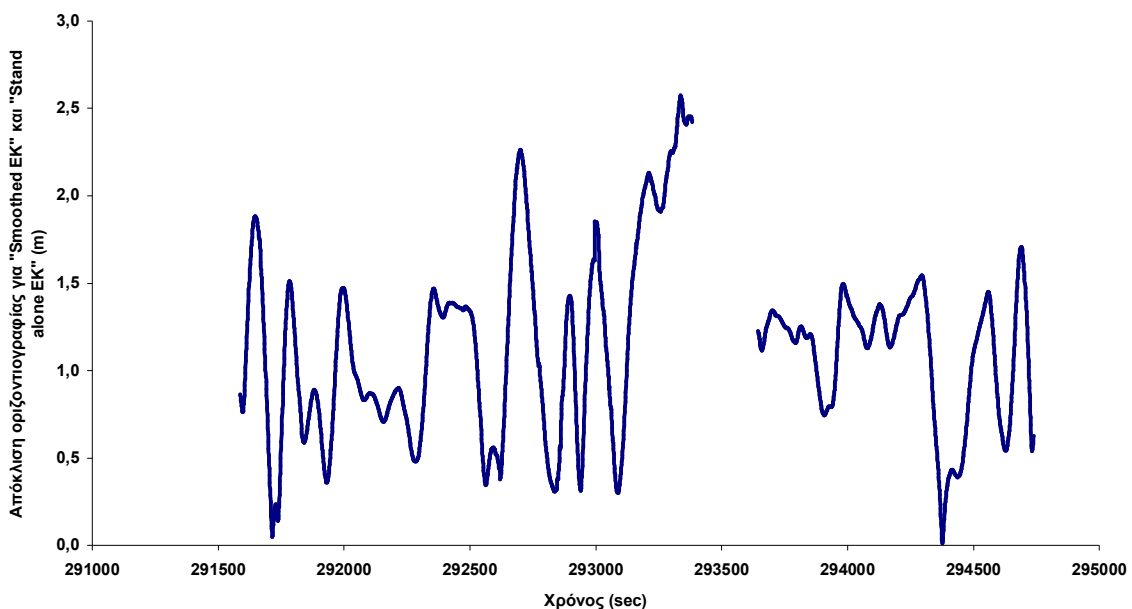


Σχήμα 8.7: Επίλυση “Smoothed EK”

Figure 8.7: “Smoothed EK” solution

Η επίλυση απόλυτου εντοπισμού “Stand alone EK” αναφέρεται στον προσδιορισμό των αποτελεσμάτων, χωρίς τη συμβολή κάποιου σταθμού αναφοράς, χρησιμοποιώντας δηλαδή τα πρωτογενή δεδομένα του αδρανειακού συστήματος εντοπισμού και του εντοπισμού με GPS.

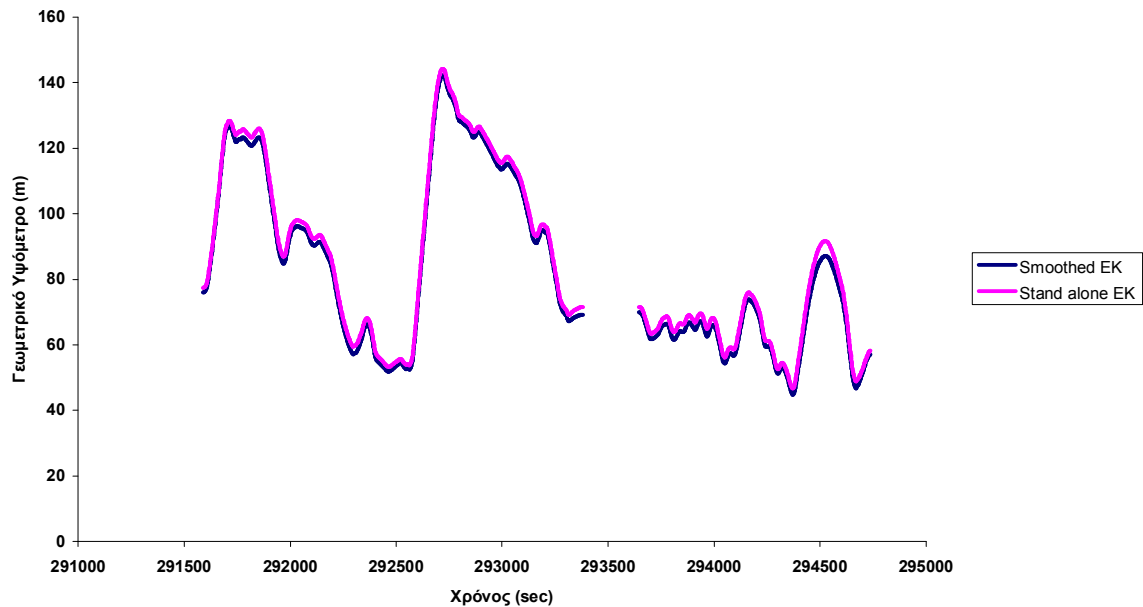
Κατά την απεικόνιση των δύο οριζοντιογραφιών, δεν διακρίνεται διαφορά, λόγω της μικρής κλίμακας, γι’ αυτό το λόγο αξιολογείται το διάγραμμα απόκλισης (Σχήμα 8.8). Όπως προκύπτει από το διάγραμμα, η απόκλιση παρουσιάζει συνεχή μεταβολή και συγκεκριμένα οι αυξομειώσεις εμφανίζονται για μικρά χρονικά διαστήματα. Η ελάχιστη τιμή είναι της τάξης των 0.04m και η μέγιστη των 2.5m. Παρόλα αυτά μπορεί να θεωρηθεί ότι η μέση απόκλιση είναι της τάξης των 0.012m.



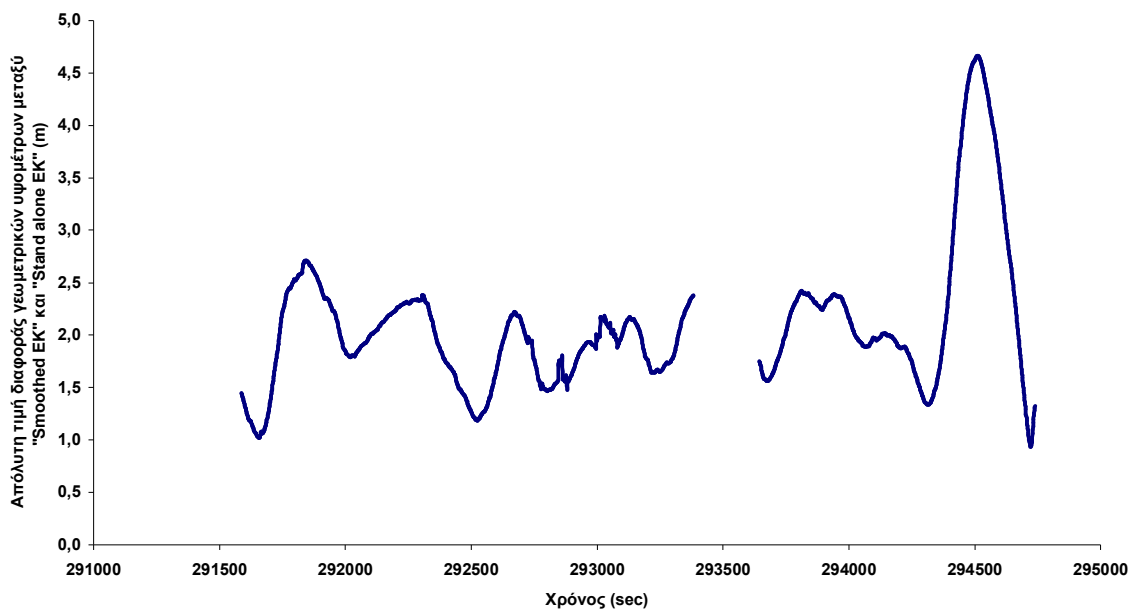
Σχήμα 8.8: Απόκλιση οριζοντιογραφιών για “Smoothed EK” και “Stand alone EK”

Figure 8.8: Distance between “Smoothed EK” and “Stand alone EK” top views

Όσον αφορά στον προσδιορισμό των γεωμετρικών υψόμετρων, με βάση της δύο μεθόδους, προκύπτει το διάγραμμα του Σχήματος 8.9. Για την κατανόηση της διαφοράς κατά το υψόμετρο, βοηθά η μελέτη του Σχήματος 8.10, όπου απεικονίζεται η απόκλιση μεταξύ των γεωμετρικών υψόμετρων, ως συνάρτηση του χρόνου.



Σχήμα 8.9: Χρονοσειρές γεωμετρικών υψόμετρων για “Smoothed EK” και “Stand alone EK”
Figure 8.9: Geometric Height timeseries for “Smoothed EK” and “Stand alone EK”



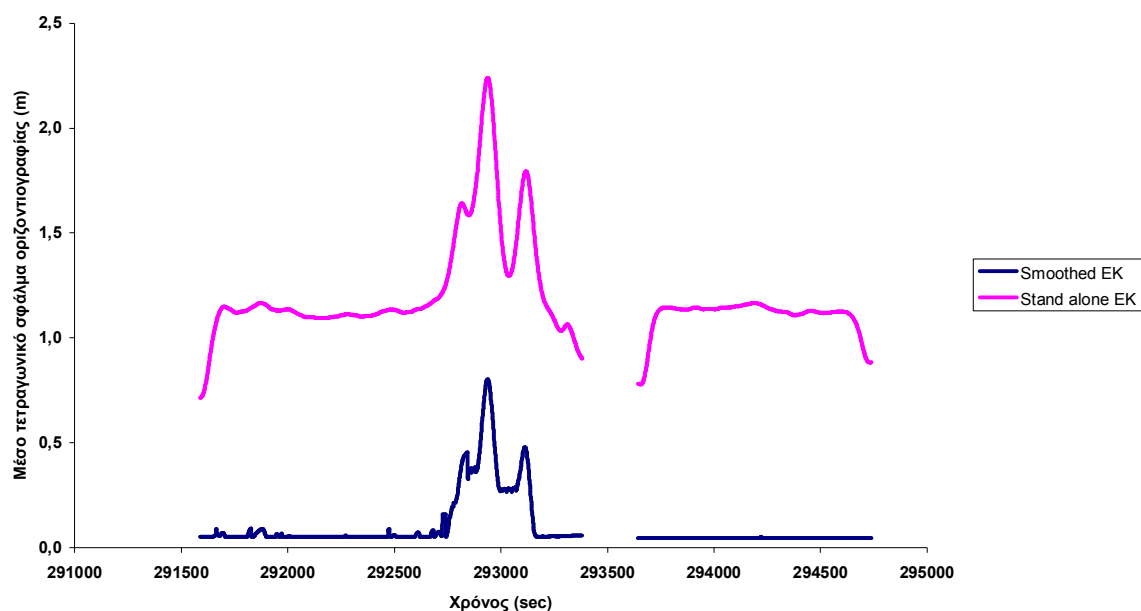
Σχήμα 8.10: Διάγραμμα διαφοράς γεωμετρικών υψόμετρων για “Smoothed EK” και “Stand alone EK”
Figure 8.10: Geometric Height variance diagramm for “Smoothed EK” and “Stand alone EK”

Όπως και στην περίπτωση της οριζοντιογραφίας (Σχήμα 8.8), η διαφορά δεν παρουσιάζει σταθερή τιμή, καθώς μεταβάλλεται συνεχώς, με ελάχιστη τιμή το 1m και μέγιστη τα 4.6m. Ωστόσο, οι αυξομειώσεις αναφέρονται σε μεγάλα χρονικά διαστήματα και παρουσιάζουν σταθερή συμπεριφορά, για το μεγαλύτερο τμήμα της διαδρομής.

8.1.3 Αξιολόγηση ποιότητας λύσεων και σύγκριση με τις προδιαγραφές

Οι λύσεις, που αξιολογούνται ως προς τα ποιοτικά τους χαρακτηριστικά, είναι η επίλυση “Smoothed EK” και η επίλυση “Stand alone EK”, ενώ στη συνέχεια συγκρίνονται οι τιμές της λύσης “Smoothed EK” με τις προδιαγραφές ακριβείας, όπως δίνονται από την εταιρία *Applanix*, για ορισμένες καταστάσεις του οχήματος.

Στο Σχήμα 8.11 απεικονίζεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα κατά x,y, για τις επιλύσεις “Smoothed EK” και “Stand alone EK”. Η μεγάλη διαφορά, που παρουσιάζεται, οφείλεται στις ιδιαιτερότητες κάθε επίλυσης, καθώς η επίλυση “Smoothed EK” αφορά στην βέλτιστη λύση, από τους δυο σταθμούς αναφοράς, ενώ η επίλυση “Stand alone EK” αφορά σε λύση, χωρίς τη συμβολή σταθμών αναφοράς. Η διαφορά αυτή κυμαίνεται στα 0.80m με 1m. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι η μεταβολή του σφάλματος εμφανίζει κοινά χαρακτηριστικά στις δύο περιπτώσεις, γεγονός που επιβεβαιώνει την ορθότητα εφαρμογής στη διαδικασία επίλυσης.

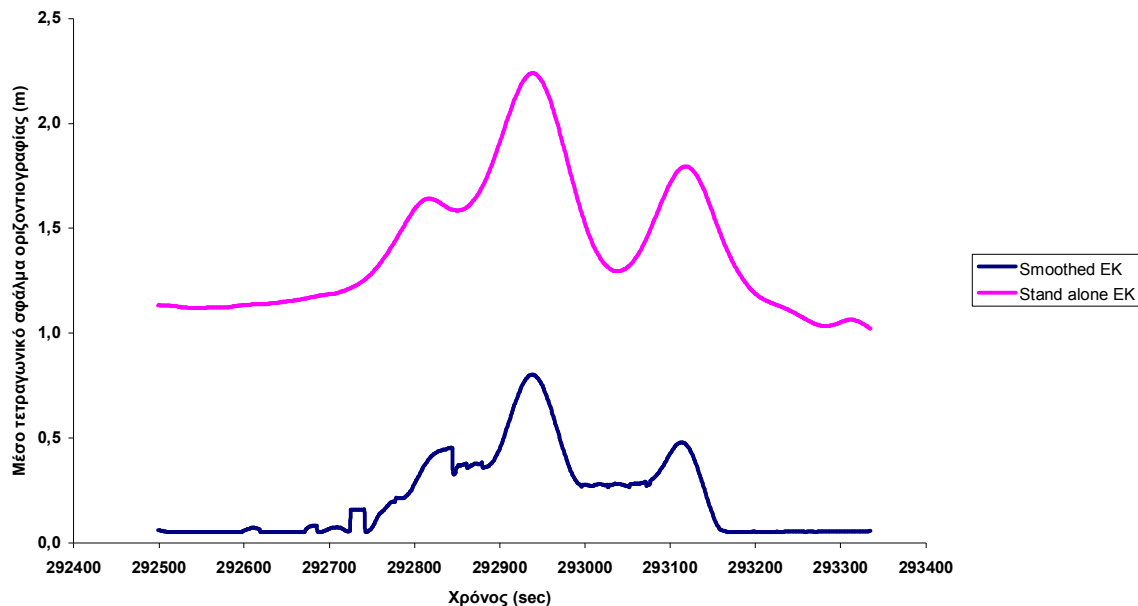


Σχήμα 8.11: Διάγραμμα μέσου τετραγωνικού σφάλματος για “Smoothed EK” και “Stand alone EK”

Figure 8.11: RMS diagramm for “Smoothed EK” and “Stand alone EK”

Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα κατά x,y για την επίλυση “Smoothed EK”, σε θέσεις του οχήματος εκτός της περιοχής των σηράγγων είναι της τάξης των 0.05m. Η τιμή αυτή αυξάνεται για το διάστημα που διανύονται οι σηράγγες και είναι (Σχήμα 8.12):

1. Στην 1^η σήραγγα “Γεράνεια” (χρονικό διάστημα από $t=292785\text{sec}$ μέχρι $t=292840\text{sec}$), ελάχιστη τιμή τα 0.22m και μέγιστη τα 0.45m,
2. Στην 2^η σήραγγα “Ευπαλίνος” (χρονικό διάστημα από $t=292880\text{sec}$ μέχρι $t=292980\text{sec}$), ελάχιστη τιμή τα 0.36m και μέγιστη τα 0.803m,
3. Στην 3^η σήραγγα “Αίθρα” (χρονικό διάστημα από $t=293080\text{sec}$ μέχρι $t=293150\text{sec}$), ελάχιστη τιμή τα 0.31m και μέγιστη τα 0.48m.

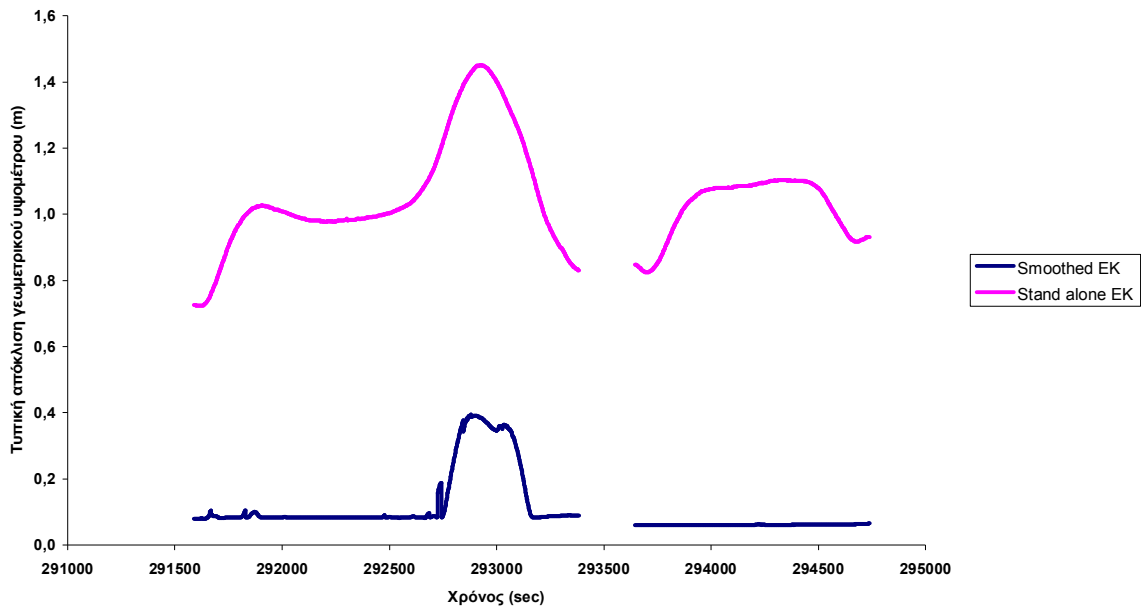


Σχήμα 8.12: Μεγέθυνση διαγράμματος μ.τ.σ. στην περιοχή των σηράγγων
Figure 8.12: RMS diagramm magnification for tunnel area

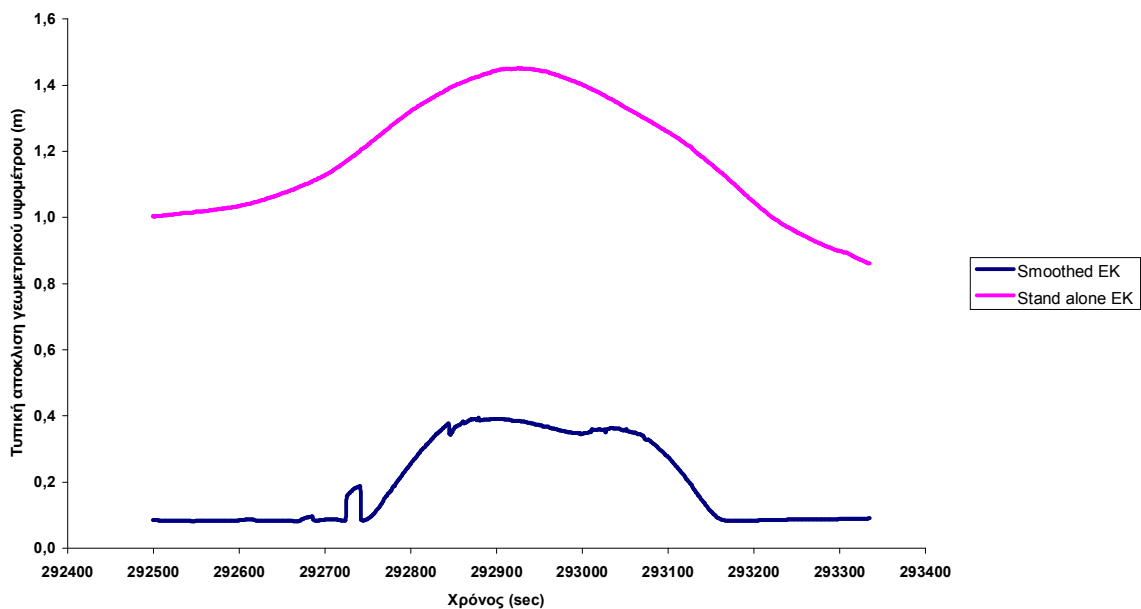
Η τυπική απόκλιση στον προσδιορισμό των γεωμετρικών υψομέτρων, για τις επιλύσεις “Smoothed EK” και “Stand alone EK” παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.13. Η διαφορά μεταξύ των δυο καμπυλών είναι κατά μέσο όρο 0.90m.

Η τυπική απόκλιση του γεωμετρικού υψομέτρου για την επίλυση “Smoothed EK”, σε θέσεις του οχήματος εκτός της περιοχής των σηράγγων είναι της τάξης των 0.06-0.08m. Η τιμή αυτή αυξάνεται για το διάστημα που διανύονται οι σήραγγες και είναι (Σχήμα 8.14):

1. Στην 1^η σήραγγα “Γεράνεια” (χρονικό διάστημα από $t=292785\text{sec}$ μέχρι $t=292840\text{sec}$), ελάχιστη τιμή τα 0.19m και μέγιστη τα 0.37m,
2. Στην 2^η σήραγγα “Ευπαλίνος” (χρονικό διάστημα από $t=292880\text{sec}$ μέχρι $t=292980\text{sec}$), ελάχιστη τιμή τα 0.35m και μέγιστη τα 0.39m,
3. Στην 3^η σήραγγα “Αίθρα” (χρονικό διάστημα από $t=293080\text{sec}$ μέχρι $t=293150\text{sec}$), ελάχιστη τιμή τα 0.11m και μέγιστη τα 0.33m.



Σχήμα 8.13: Διάγραμμα τυπικής απόκλισης για “Smoothed EK” και “Stand alone EK”
Figure 8.13: Standard deviation diagramm for “Smoothed EK” and “Stand alone EK”



Σχήμα 8.14: Μεγέθυνση διαγράμματος τυπ. αποκλ. στην περιοχή των σηράγγων
Figure 8.14: St. dev. diagramm magnification for tunnel area

Συγκρίνοντας τις τιμές των μέσων τετραγωνικών σφαλμάτων κατά x,y και των τυπικών αποκλίσεων του γεωμετρικού υψομέτρου, με τις αντίστοιχες των προδιαγραφών της εταιρείας (Πίνακες 8.1, 8.2), προκύπτει ότι η λειτουργία του συστήματος POSLV έδωσε αποτελέσματα χαμηλότερης ακρίβειας, από τις τιμές των προδιαγραφών. Αυτό ισχύει για το χρονικό διάστημα,

που το όχημα βρίσκεται εκτός σηράγγων, αλλά και για τις χρονικές στιγμές διέλευσης από τις σήραγγες, όπου υπάρχει απώλεια του δορυφορικού σήματος GPS.

Πίνακας 8.1: Τιμές μέσου τετραγωνικού σφάλματος κατά x,y

Table 8.1: Position RMS values

Θέση οχήματος	Απώλεια σήματος	rms επιλ. "Smoothed EK"	rms προδ/φών <i>Applanix</i>
Εκτός σηράγγων	0sec	0.05m	0.02m (για απ. σημ. 0sec)
"Γεράνεια"	55sec	0.22-0.45m	0.12m (για απ. σημ. 60sec)
"Ευπαλίνος"	100sec	0.36-0.80m	0.27m (για απ. σημ. 120sec)
"Αίθρα"	70sec	0.31-0.48m	0.12m (για απ. σημ. 60sec)

Πίνακας 8.2: Τιμές τυπικής απόκλισης γεωμετρικού υψομέτρου

Table 8.2: Standard deviation values for h

Θέση οχήματος	Απώλεια σήματος	sd επιλ. "Smoothed EK"	sd προδ/φών <i>Applanix</i>
Εκτός σηράγγων	0sec	0.06-0.08m	0.03m (για απ. σημ. 0sec)
"Γεράνεια"	55sec	0.19-0.37m	0.15m (για απ. σημ. 60sec)
"Ευπαλίνος"	100sec	0.35-0.39m	0.35m (για απ. σημ. 120sec)
"Αίθρα"	70sec	0.11-0.33m	0.15m (για απ. σημ. 60sec)

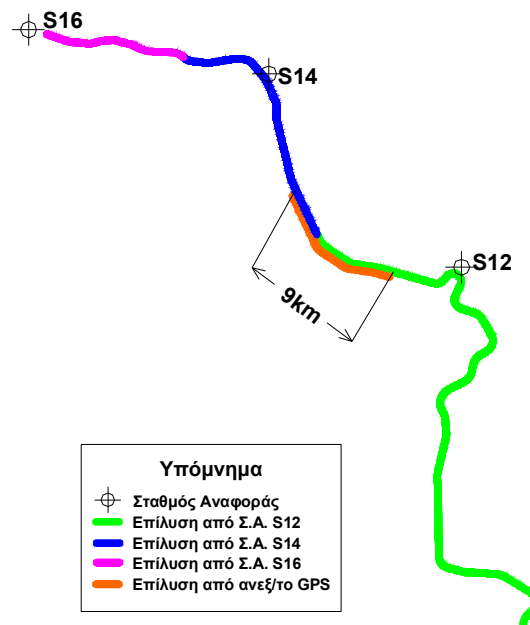
Όπως φαίνεται και στους Πίνακες 8.1 και 8.2, στην περίπτωση απώλειας σήματος, οι προδιαγραφές δίνουν τιμές, που εξαρτώνται από τη χρονική διάρκεια της απώλειας σήματος. Οι τιμές αυτές για τις ακρίβειες κατά x,y και κατά h, σε ορισμένες περιπτώσεις, εμφανίζονται να είναι μέχρι και διπλάσιες των προδιαγραφών.

8.2 Οδικό Τμήμα Υλίκη - Λογγός

8.2.1 Αξιολόγηση λύσεων

Για το οδικό τμήμα Υλίκη – Λογγός επιλέχθηκε να γίνει συγκριτική μελέτη για τις επιλύσεις "Smoothed ΥΛ", "Stand alone ΥΛ" και "Ανεξ/το GPS". Όπως και στην περίπτωση του τμήματος Ελευσίνα – Κόρινθος, η βέλτιστη λύση "Smoothed ΥΛ προέρχεται ύστερα από συνδυασμό των αρχείων από τις τρεις επιμέρους επιλύσεις. Να σημειωθεί ότι σε αυτό το οδικό τμήμα οι σταθμοί αναφοράς είναι τρεις, γι' αυτό και η διαδρομή επιλύεται για κάθε σταθμό ξεχωριστά, προκειμένου να προκύψει το τελικό αρχείο της βέλτιστης τροχιάς, από τον εγγύτερο σταθμό. (Σχήμα 8.15). Επίσης, η επίλυση "Stand alone ΥΛ" αναφέρεται στην επίλυση της διαδρομής Υλίκη – Λογγός, χωρίς τη συμβολή σταθμών αναφοράς. Οι παραπάνω περιπτώσεις επιλύονται με τη βοήθεια του λογισμικού *PosPac*, ωστόσο η επίλυση "Ανεξ/το GPS", που προκύπτει από τον ανεξάρτητο δέκτη GPS, επιλύεται με χρήση του λογισμικού *Grafnav* και αφορά σε οδικό τμήμα μήκους περίπου 9km. Το συγκεκριμένο οδικό τμήμα των 9km επιλύθηκε με σταθμό

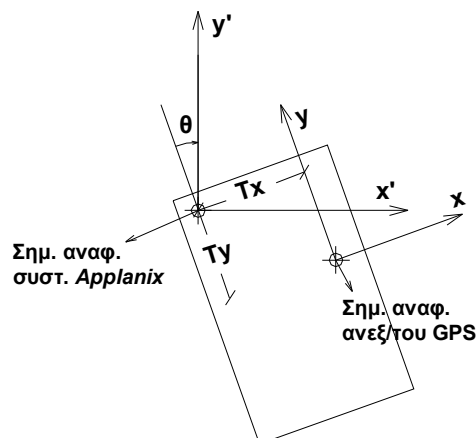
αναφοράς το σημείο S12. Ακόμη, από τις τρεις περιπτώσεις θεωρείται ότι η λύση “Smoothed YL” αποτελεί μέσο σύγκρισης και αξιολόγησης για τις υπόλοιπες δυο, ενώ η αξιολόγηση περιορίζεται στο οδικό τμήμα των 9km, το οποίο αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα από $t=392021\text{sec}$ έως $t=392898\text{sec}$.



Σχήμα 8.15: Επίλυση “Smoothed YL”

Figure 8.15: “Smoothed YL” solution

Για τη σύγκριση της λύσης οριζοντιογραφίας από τις επιλύσεις “Smoothed YL” και “Ανεξ/το GPS”, απαιτείται η επιβολή άκαμπτου μετασχηματισμού (μια στροφή και τρεις μεταθέσεις). Αυτό είναι απαραίτητο, καθώς οι δύο τροχιές αναφέρονται σε διαφορετικά σημεία στην οροφή του οχήματος και προκειμένου να γίνει η σύγκρισή τους, πρέπει οι συντεταγμένες της λύσης “Ανεξ/το GPS” να μετασχηματιστούν, ώστε να έχουν ως αρχή τις συντεταγμένες της επίλυσης “Smoothed YL”. Η σχετική γεωμετρία παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.16.



Σχήμα 8.16: Γεωμετρία μετασχηματισμού

Figure 8.16: Transformation geometry

Συνεπώς, οι προβολικές συντεταγμένες (x', y', h') της επίλυσης “Ανεξ/το GPS”, ανηγμένες στο σημείο επίλυσης (μηδενικό σημείο) του συστήματος POSLV 420, είναι:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ h' \end{pmatrix}_i = \begin{pmatrix} -(T_X \cos \theta_i + T_Y \sin \theta_i) \\ -T_X \sin \theta_i + T_Y \cos \theta_i \\ -T_Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x \\ y \\ h \end{pmatrix}_i, \text{ για κάθε χρονική στιγμή } i \quad (8.3)$$

όπου,

$(T_X, T_Y, T_Z) = (0.731, 0.890, 0.211)m$, Διανύσμα εκκεντροτήτας μεταξύ του ανεξάρτητου δέκτη GPS και του μηδενικού σημείου του συστήματος POSLV 420.

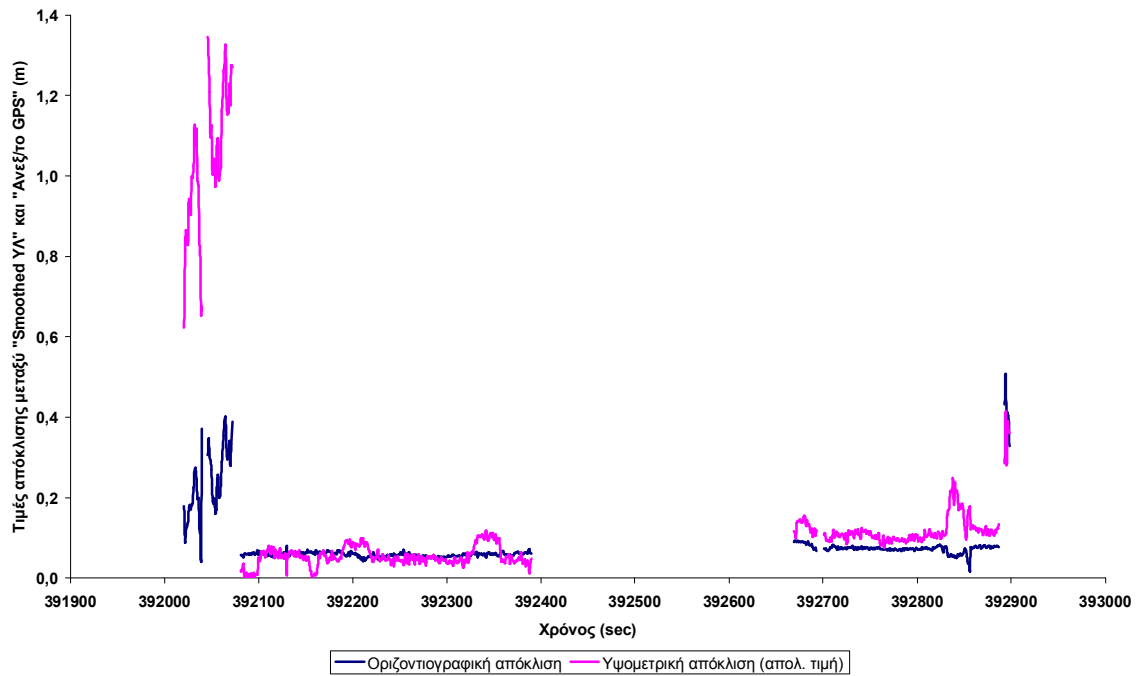
(x, y, h) , Προβολικές συντεταγμένες σημείων του ανεξάρτητου GPS (πριν το μετασχηματισμό).

θ , Παραπληρωματική γωνία του αζιμουθίου.

Έχοντας μετατρέψει τις συντεταγμένες της τροχιάς του ανεξάρτητου GPS στη θέση επίλυσης του συστήματος POSLV 420, υπολογίζεται η απόκλιση d , σχέση 8.1, μεταξύ των περιπτώσεων “Smoothed ΥΛ” και των μετασχηματισμένων αποτελεσμάτων από την περίπτωση “Ανεξ/το GPS” (Σχήμα 8.17). Η απόκλιση d αφορά στην οριζοντιογραφία, ωστόσο στο ίδιο διάγραμμα απεικονίζεται και η διαφορά στα γεωμετρικά υψόμετρα των δυο επιλύσεων.

Από το διάγραμμα του Σχήματος 8.17 παρατηρείται ότι στα πρώτα και τα τελευταία δευτερόλεπτα, του υπό μελέτη διαστήματος, η απόκλιση παρουσιάζει αυξομειώσεις, κάτι που συμβαίνει διότι η ποιότητα της επίλυσης “Ανεξ/το GPS”, σε αυτά τα χρονικά διαστήματα, έχει μειωμένη ποιότητα. Εκτός αυτών των χρονικών διαστημάτων, η τιμή της απόκλισης, για τις δυο περιπτώσεις, δεν παρουσιάζει αυξομειώσεις και δεν υπερβαίνουν τα 0.06-0.07m, κάτι που είναι οριακά αποδεκτό.

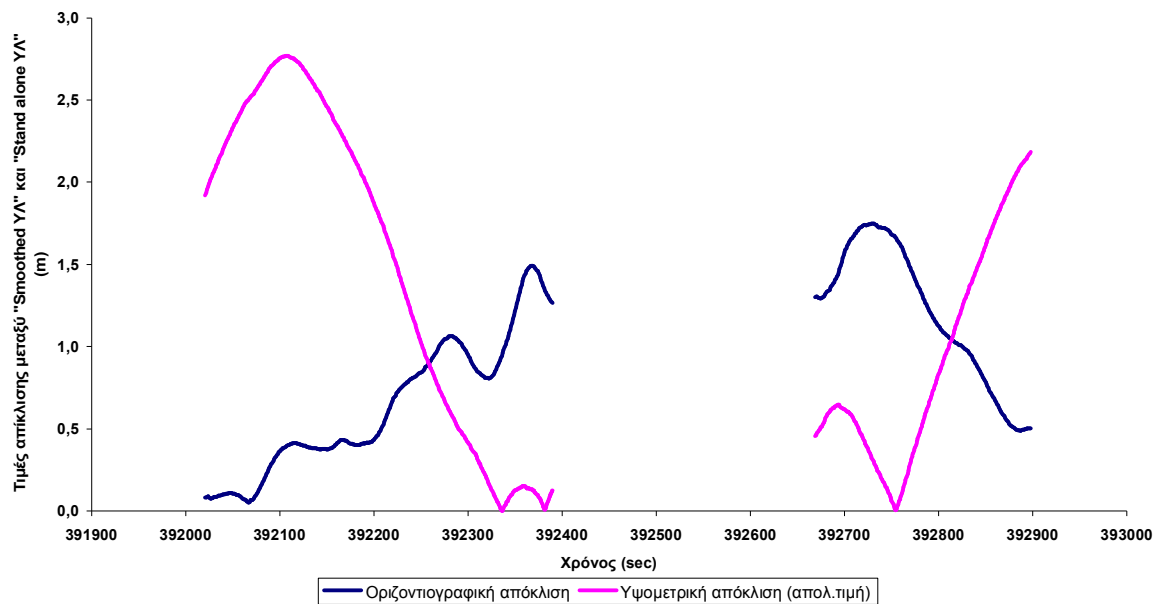
Σε αντιστοιχία με την οριζοντιογραφία, η υψομετρική διαφορά των δυο επιλύσεων για τα χρονικά διαστήματα από $t=392021\text{sec}$ έως $t=392072\text{sec}$ και από $t=392893\text{sec}$ έως $t=392898\text{sec}$ εμφανίζει έντονες αυξομειώσεις στην τιμή, λόγω της μειωμένης ποιότητας των αποτελεσμάτων της επίλυσης “Ανεξ/το GPS”. Αν εξαιρεθούν αυτά τα διαστήματα η υψομετρική διαφορά παρουσιάζει τιμή της τάξης των 0.07m, για το χρονικό διάστημα $t=392081\text{sec}$ έως $t=392390\text{sec}$ και 0.12m, για το χρονικό διάστημα $t=392669\text{sec}$ έως $t=392887\text{sec}$. Οι τιμές αυτές είναι πιο αυξημένες, συγκριτικά με αυτές της οριζοντιογραφικής απόκλισης, καθώς η υψομετρική πληροφορία προσδιορίζεται, από τα δορυφορικά συστήματα GNSS, με χαμηλότερη ακρίβεια.



Σχήμα 8.17: Διάγραμμα διαφορών “Smoothed YL” και “Ανεξ/το GPS”

Figure 8.17: Diagramm of distance between “Smoothed YL” and “GPS Indep”

Για την σύγκριση των επιλύσεων “Smoothed YL” και “Stand alone YL”, υπολογίζεται η οριζοντιγραφική απόκλιση d , σύμφωνα με τη σχέση 8.1 και η υψομετρική απόκλιση, από τη διαφορά των γεωμετρικών υψομέτρων.



Σχήμα 8.18: Διάγραμμα διαφορών “Smoothed YL” και “Stand alone YL”

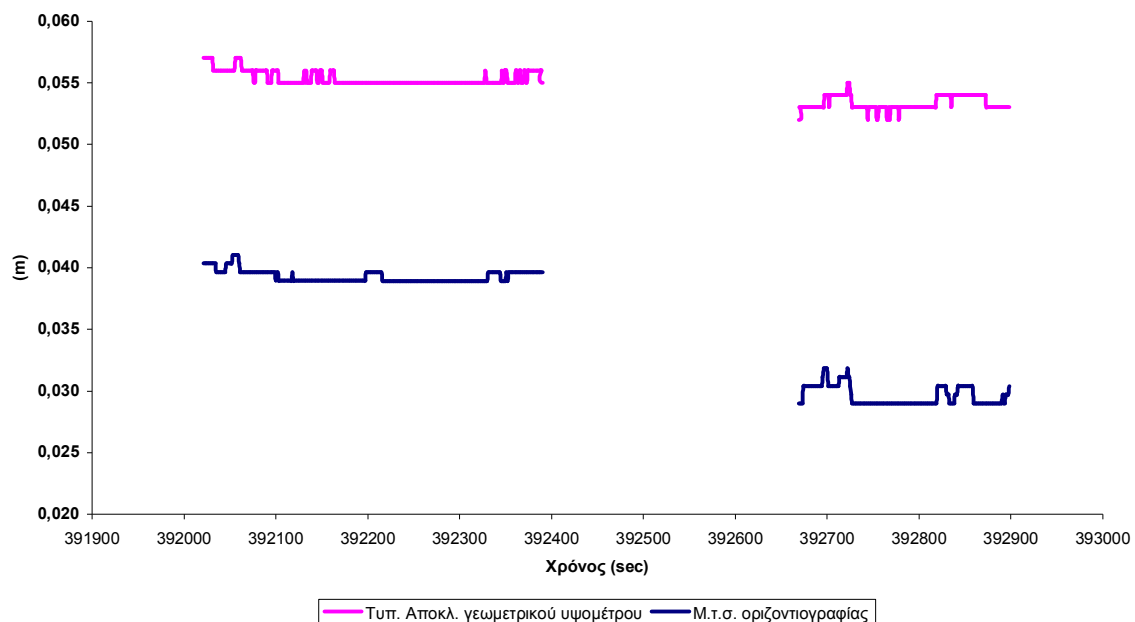
Figure 8.18: Diagramm of distance between “Smoothed YL” and “Stand alone YL”

Από το διάγραμμα του Σχήματος 8.18 προκύπτει ότι για την οριζοντιογραφική και υψομετρική διαφορά παρουσιάζονται αυξομειώσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η επίλυση “Stand alone ΥΛ” δεν χρησιμοποιεί σταθμό αναφοράς και επομένως, η τροχιά παρουσιάζει αυτή τη μορφή, κάτι που είναι αναμενόμενο.

8.2.2 Αξιολόγηση της ποιότητας των λύσεων

Οι τρεις επίλυσεις “Smoothed ΥΛ”, “Ανεξ/το GPS” και “Stand alone ΥΛ” αξιολογούνται ως προς την ποιότητα τους, με την βοήθεια συγκριτικών διαγραμμάτων.

Η επίλυση “Smoothed ΥΛ” αξιολογείται οριζοντιογραφικά με τον υπολογισμό του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, σύμφωνα με τη σχέση 8.2, και υψομετρικά με την τυπική απόκλιση στον προσδιορισμό του γεωμετρικού υψομέτρου. Όπως προκύπτει και από το διάγραμμα του Σχήματος 8.19, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα κατά x,y δεν παρουσιάζει μεταβολές και είναι της τάξης των 0.03-0.04m. Ωστόσο, η υψομετρική πληροφορία έχει προσδιοριστεί με τυπική απόκλιση της τάξης των 0.055m. Δεδομένου ότι το σφάλμα για το υψόμετρο είναι περίπου 50% φορά μεγαλύτερο από της οριζοντιογραφίας, οι τιμές που προκύπτουν είναι μέσα στα αναμενόμενα πλαίσια.



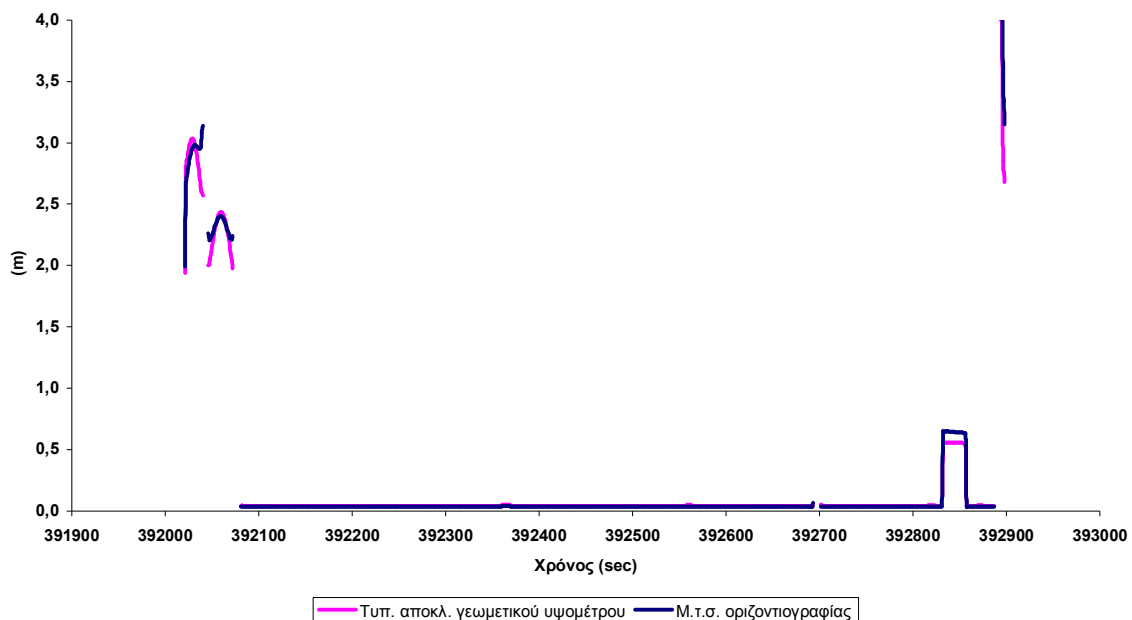
Σχήμα 8.19: Διάγραμμα αξιολόγησης για “Smoothed ΥΛ”

Figure 8.19: Evaluation diagram for “Smoothed YL”

Στο Σχήμα 8.20 παρουσιάζεται το διάγραμμα τυπικών αποκλίσεων σε οριζοντιογραφία και υψομετρία, για την επίλυση “Ανεξ/το GPS”. Οι υψηλές τιμές για τα χρονικά διαστήματα $t=392021\text{sec}$ έως $t=392072\text{sec}$ και από $t=392893\text{sec}$ έως $t=392898\text{sec}$, οφείλονται στη μειωμένη ποιότητα λύσης, κάτι που συνεπάγεται τον προσδιορισμό των συντεταγμένων με

χαμηλή ακρίβεια. Άλλωστε αυτό επιβεβαιώνεται και από τη μελέτη των διαγραμμάτων διαφορών (Σχήμα 8.17) στην Ενότητα 8.2.1.

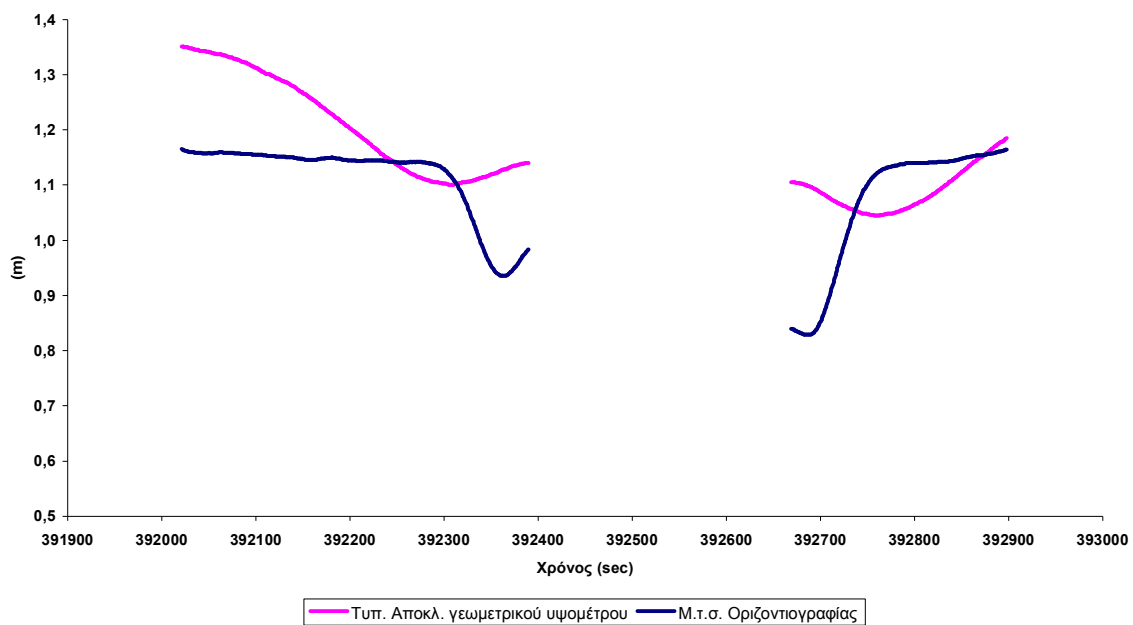
Οι τυπικές αποκλίσεις, για τα συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, έχουν μέγιστη τιμή περί τα 3m και 4m οριζοντιογραφικά και υψομετρικά αντιστοίχως, καθώς στα συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα η ποιότητα της λύσης, τόσο οριζοντιογραφικά όσο και υψομετρικά είναι μειωμένης ακριβείας. Εντούτοις, οι τυπικές αποκλίσεις ομαλοποιούνται για το υπόλοιπο χρονικό διάστημα και έχουν μέση τιμή 0.035m, για οριζοντιογραφία και 0.040m για υψομετρία.



Σχήμα 8.20: Διάγραμμα αξιολόγησης για “Ανεξ/το GPS”

Figure 8.20: Evaluation diagramm for “GPS Indep”

Η επίλυση “Stand alone ΥΛ”, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.21, παρουσιάζει υψηλές τιμές για την ακρίβεια στον προσδιορισμό τόσο της οριζοντιογραφίας, όσο και της υψομετρίας. Οι τιμές αυτές, για το μέσο τετραγωνικό σφάλμα στην οριζοντιογραφία αυξομειώνονται από 0.84m έως 1.16m και για την υψομετρία η τυπική απόκλιση κυμαίνεται από 1.05m έως 1.35m.



Σχήμα 8.21: Διάγραμμα αξιολόγησης για “Stand alone ΥΛ”

Figure 8.21: Evaluation diagram for “Stand alone YL”

Από τα παραπάνω προκύπτει ο Πίνακας 8.3, όπου παρουσιάζονται οι τιμές των μέσω τετραγωνικών σφαλμάτων και τυπικών αποκλίσεων, για κάθε επίλυση. Όπως προκύπτει, οι επίλυσεις “Ανεξ/το GPS” και “Smoothed ΥΛ” παρουσιάζουν ίδια τιμή μέσου τετραγωνικού σφάλματος σε οριζοντιογραφία, ενώ η τυπική απόκλιση για το γεωμετρικό υψόμετρο είναι καλύτερο για την επίλυση “Ανεξ/το GPS” σε σύγκριση με την επίλυση “Smoothed ΥΛ”.

Πίνακας 8.3: Τιμές ακρίβειας για τις επιλύσεις “Smoothed ΥΛ”, “Ανεξ/το GPS” και “Stand alone ΥΛ”

Table 8.3: Accuracy values for “Smoothed YL”, “GPS Indep” and “Stand alone YL”

	“Smoothed ΥΛ”	“Ανεξ/το GPS”	“Stand alone ΥΛ”
Μ.τ.σ. οριζ/φίας	0.035m	0.035m	0.84m έως 1.16m
Τυπ. αποκλ. γεωμ. υψομέτρου	0.055m	0.040m	1.05m έως 1.35m

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΑΤΟ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Έχοντας ολοκληρωθεί η διαδικασία των επιλύσεων και η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, προκύπτουν ορισμένα συμπεράσματα, τα οποία επισημαίνονται στη συνέχεια.

Αξιολόγηση λογισμικού *PosPac*

Η χρήση του λογισμικού *PosPac*, για τον υπολογισμό της τροχιάς, έδωσε την ευκαιρία γνωριμίας με ένα περιβάλλον φιλικό προς τον χρήστη. Έχει το πλεονέκτημα ότι η επίλυση πραγματοποιείται σε σύντομο χρονικό διάστημα, ενώ παρέχει ποικίλα διαγράμματα για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Επίσης, είναι εύχρηστο στον ορισμό των επιλογών επίλυσης και την εισαγωγή των παραμέτρων. Σε γενικές γραμμές, ένας νέος χρήστης μπορεί εύκολα να εγκλιματιστεί με το περιβάλλον του λογισμικού, ακόμα και αν δεν έχει χρησιμοποιήσει ανάλογο λογισμικό παλαιότερα.

Παρ' όλα αυτά το λογισμικό *PosPac* δεν προσφέρει στον χρήστη τα πρωτογενή δεδομένα, όπως συλλέγονται από τους αισθητήρες. Επιπλέον, πρόκειται για ένα “κλειστό” σύστημα, καθώς ο χρήστης δεν έχει τη δυνατότητα εποπτείας της επίλυσης και επέμβασης σε αυτή, ενώ το εγχειρίδιο χρήστη περιορίζεται στη περιγραφή της μεθοδολογίας επίλυσης, χωρίς να δίνονται περαιτέρω διευκρινίσεις. Ωστόσο, η αξιοπιστία του λογισμικού έγκειται σε πειραματικούς ελέγχους και δοκιμές, που έχουν πραγματοποιηθεί από την κατασκευάστρια εταιρία *Applanix*.

Επίδραση χρήσης σταθμών αναφοράς

- Επίδραση απόστασης σταθμού αναφοράς από το τμήμα καταγραφής

Ο προσδιορισμός της τροχιάς από διαφορετικούς σταθμούς αναφοράς έδειξε ότι η απόσταση μεταξύ του σταθμού αναφοράς και του κινητού δέκτη έχει άμεση επίδραση στην ποιότητα της λύσης. Αυτό επιβεβαιώνεται από το διάγραμμα μέσων τετραγωνικών σφαλμάτων των δύο διαφορετικών επιλύσεων, όπου το μέσο τετραγωνικό σφάλμα παρουσιάζεται μεγαλύτερο, όσο η απόσταση κινητού δέκτη και σταθμού αναφοράς μεγαλώνει και αντιστρόφως. Πιο συγκεκριμένα, όταν ο κινητός δέκτης έχει την κοντινότερη απόσταση από τον εκάστοτε σταθμό αναφοράς το μέσο τετραγωνικό σφάλμα κυμαίνεται από 0.045-0.060m, ενώ όταν ο κινητός δέκτης απέχει τη μέγιστη απόσταση από τον σταθμό αναφοράς το μέσο τετραγωνικό σφάλμα αυξάνεται στα 0.075-0.100m.

Ωστόσο, κατά την επίλυση της τροχιάς από δύο διαφορετικούς σταθμούς αναφοράς, παρουσιάστηκε το φαινόμενο οι δύο τροχιές να έχουν μια σταθερή διαφορά της τάξης των 1.6m.

Όμως, από τη μελέτη των διαγραμμάτων των μέσων τετραγωνικών σφαλμάτων, για τις δύο επιλύσεις, δεν διαπιστώθηκε μειωμένη ακρίβεια στα αποτελέσματα κάποιας από τις δύο, καθώς οι τιμές κυμαίνονται σε αναμενόμενα επίπεδα. Ακόμη, από τη μελέτη της γεωμετρίας των δορυφόρων για τους σταθμούς αναφοράς ή των κινητών δεκτών δεν προέκυψε κάτι το αξιοσημείωτο. Στην εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων θα βοηθούσε αν υπήρχαν δεδομένα από τον επιπλέον δέκτη GPS, που τοποθετήθηκε στο όχημα. Αυτό όμως δε συνέβη, καθώς ο συγκεκριμένος δέκτης δεν λειτούργησε με ορθό τρόπο, όπως διαπιστώθηκε εκ των υστέρων.

- Επίδραση χρήσης σταθμού αναφοράς για την επίλυση της τροχιάς

Η εκάστοτε τροχιά επιλύθηκε είτε με τη χρήση σταθμών αναφοράς είτε χωρίς. Η διαφορά που παρουσιάζεται κατά την σύγκριση των δύο τροχιών είναι σημαντική και κατά μέσο όρο της τάξης των 1-2m. Αυτό άλλωστε θεωρείται αναμενόμενο, καθώς η επίλυση της τροχιάς, χωρίς τη χρήση σταθμών αναφοράς, παρέχει ακρίβεια μερικών μέτρων.

Συγκριτική αξιολόγηση συστήματος εντοπισμού POSLV 420 και ανεξάρτητου δέκτη GPS

Από την σύγκριση του ολοκληρωμένου συστήματος εντοπισμού με τον εντοπισμό από τον ανεξάρτητο δέκτη GPS, προέκυψε ότι και τα δύο συστήματα προσφέρουν αποτελέσματα ικανοποιητικής ακρίβειας. Μεταξύ των δύο συστημάτων, η λύση από το ανεξάρτητο GPS παρέχει καλύτερη ακρίβεια στον προσδιορισμό του γεωμετρικού υψομέτρου, σε σύγκριση με το ολοκληρωμένο σύστημα, ενώ οριζοντιογραφικά το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι το ίδιο και για τις δύο περιπτώσεις.

Αξιολόγηση προδιαγραφών ακριβείας για το σύστημα εντοπισμού POSLV 420

Η σύγκριση των προδιαγραφών σε ακρίβεια, που προτείνονται από την εταιρία, με αυτές που προέκυψαν από την καταγραφή πραγματοποιήθηκε για τα χρονικά διαστήματα, που το όχημα διέρχεται από τις σήραγγες, οπότε υπάρχει απώλεια δορυφορικού σήματος, και όταν είναι έξω από αυτές. Από τη σύγκριση φαίνεται ότι η κατασκευάστρια εταιρία δίνει ακρίβειες πολύ καλύτερες από αυτές που επιτεύχθηκαν, κατά την πειραματική εφαρμογή.

Βιβλιογραφία

Ελληνική

Αγατζά-Μπαλοδήμου Α-Μ., “Στατιστικές Μέθοδοι Γεωπληροφορικής”, Σημειώσεις παραδόσεων, ΔΠΜΣ Γεωπληροφορική, Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π., 2005-06.

Δεληκαράογλου Δ. (2002), “Ειδικά Θέματα Δορυφορικής Γεωδαισίας”, Σημειώσεις μαθήματος 8^{ου} εξαμήνου, Αθήνα.

Δερμάνης Αθ. (1999), “Διαστημική Γεωδαισία & Γεωδυναμική - GPS”, Εκδόσεις Ζήτη.

Ζησόπουλος Αθ., Μπαλής Β., Λιαπάκης Χρ., Κολοβός Αλ. (1992), “Το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού NAVSTAR/GPS”, Περιοδικές Μελέτες, Μελέτη Νο. 4, Εθνικό Κέντρο Διαστημικών Ερευνών, Γενικό Επιτελείο Αεροπορίας, Ελευσίνα.

Παραδείσης Δ. (2000), “Σημειώσεις Δορυφορικής Γεωδαισίας”, Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου, Τομέας Τοπογραφίας, Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Φράγκος Κ. (2001), “Έλεγχος της κίνησης και πλοήγηση ρομποτικού μηχανισμού με ανάλυση δεδομένων δορυφορικού και αδρανειακού εντοπισμού”, Διπλωματική Εργασία.

Φωτίου Α., Πικριδάς Χ. (2004), “Το δορυφορικό σύστημα GPS”, Τομέας Γεωδαισίας και Τοπογραφίας, Τ.Α.Τ.Μ., Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.

Ξενόγλωσση

Artes F., Nastro L. (2005), “Generating continuous positioning accuracy in the absence of GPS reception”, Applanix Corporation.

Cramer M, “GPS/INS Intergration”, Wishmann Verlag, Heidelberg, Photogrammetric Week '97.

Cross P.A. “Advanced least squares applied to position-fixing”, Working Paper No.6, School of Surveying, University of East London, January 1994.

Gikas V. (1996), “Least Squares Filtering and Testing for Positioning and Quality Control during 3D Marine Seismic Surveys”, Thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy, Department of Surveying, University of Newcastle upon Tyne, August.

- Graefe G. (2007), "High precision kinematic surveying with laser scanners", Journal of Applied Geodesy I, 185-199 de Gruyter.
- Hofmann-Wellenhof B., Negat K., Wieser M. (2003), "Navigation – Principles of Positioning and Guidance", Springer.
- Ingensand H., Kocaman S. (2003), "GPS and INS Integration with Kalman Filtering for Direct Georeferencing of Airborne Imagery", Geodetic Seminar Report, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Hoenggerberg, Zuerich.
- Jekeli Chr. (2001), "Inertial Navigation Systems with Geodetic Applications", Walter de Gruyter
- Lawrence A. (1998), "Modern Inertial Technology – Navigation, Guidance and Control", Second Edition, Mechanical Engineering Series.
- Lithopoulos E., "The Applanix Approach to GPS/INS Intergration", Wishmann Verlag, Heidelberg, Photogrammetric Week '99.
- Rappany A., "Introduction to GPS – The Global Positioning System", GNSS Technology and Application Series, Second Edition.
- Scherzinger B., "Precise Robust Positioning with Inertial/GPS RTK", Applanix Corporation, Richmond Hill, Ontario ,Canada.
- Schofield W, Breach M. (2007), "Engineering Surveying", Sixth Edition.
- Sickle J. (2001), "GPS for Land Surveyors", Second Edition. Printed by Taylor & Francis.
- Tao C. V., Li J. (2007), "Advances in Mobile mapping Technology", Taylor & Francis Group, London.
- Teunissen P.J.G. (2001), "Dynamic data processing", Department of Mathematical Geodesy and Positioning, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft University Press.
- User's Manual, "POSPac Land Quick Start Guide", Applanix Corporation, 2005.
- Wolf R, Eissfeller B., Hein G., "A Kalman Filter for the Intergration of a low cost and an Attitude GPS", Institute of Geodesy and Navigation (IfEN), University FAF Munich.
- Xu G. (2003), "GPS Theory, Algorithms and Applications", Springer.

Πηγές στο διαδίκτυο

- <http://www.applanix.com> (τελευταία πρόσβαση 03/10/2008)
- <http://en.wikipedia.org/>(τελευταία πρόσβαση 22/07/2008).
- <http://www.faa.com> (τελευταία πρόσβαση: 12/11/2008)
- <http://www.kowoma.de> (τελευταία πρόσβαση: 12/11/2008)
- <http://www.jgc.gr> (τελευταία πρόσβαση: 28/10/2008)
- <http://www.esf.edu> (τελευταία πρόσβαση: 15/01/2009)
- <http://www.geodetic.gov.hk> (τελευταία πρόσβαση: 15/01/2009)
- <http://maps.google.com> (τελευταία πρόσβαση 01/12/ 2008)
- <http://www.myphone.gr> (τελευταία πρόσβαση 01/12/2008)
- <http://www.tkt.cs.tut.fi/kurssit/9628/Intro.pdf> (τελευταία πρόσβαση 16/12/2008)
- http://www.survey.ntua.gr/main/courses/general/sigproc/files/Kalman_Lect%20I.pdf
(τελευταία πρόσβαση 15/07/2008)

