



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΠΜΣ: ΓΕΩΧΩΡΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία:

Συνδυασμένη Επεξεργασία Δεδομένων GNSS/INS με Έμφαση σε Αερομεταφερόμενα Συστήματα

Χανόπουλος Ιωσήφ – Χρυσόστομος

A.M: GST1610

Τριμελής επιτροπή:

Μιχαήλ Γιαννίου, αναπληρωτής καθηγητής ΠΑΔΑ

Βασίλειος Παγούνης, καθηγητής ΠΑΔΑ,

Βασίλειος Ανδριτσάνος, αναπληρωτής καθηγητής ΠΑΔΑ

ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2019

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω το διδακτικό προσωπικό του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Γεωχωρικές Τεχνολογίες» του Τμήματος μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής για την προσπάθειά τους, την επιστημονική κατάρτιση και τις γνώσεις που μου μετέδωσαν στα πλαίσια ολοκλήρωσης αυτού του κύκλου σπουδών.

Ιδιαίτερα θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα αυτής της εργασίας, αναπληρωτή καθηγητή κ. Μιχαήλ Γιαννίου, για την συνεργασία, την καθοδήγηση και την αμέριστη βοήθειά του η οποία είχε καθοριστική σημασία.

Ευχαριστώ ακόμα την εταιρεία GEOMATICS A.E. και τον διευθύνοντα σύμβουλό της κ. Δημήτριο Τσιβίκη για την παροχή των δεδομένων και των λογισμικών του αερομεταφερόμενου συστήματος.

Ευχαριστώ την εταιρεία JGC Συστήματα Γεωπληροφορικής A.E. και τον εκπρόσωπό της κ. Χρήστο Βάγια, καθώς και την εταιρεία NovAtel για την παροχή δεδομένων και λογισμικού για το επίγειο σύστημα.

Τέλος, τίποτε δεν θα ήταν εφικτό εάν δεν είχα τη στήριξη και την αρωγή της οικογένειάς μου σε αυτήν την προσπάθεια. Ευχαριστώ τη σύζυγό μου Ειρήνη και το γιο μας Θεοδόση για την συμπαράστασή τους, που συνέβαλλε τα μέγιστα ώστε να μπορώ να ανταπεξέλθω στις απαιτήσεις των σπουδών μου.

Στην Ειρήνη και το Θεοδόση

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
ABSTRACT.....	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ – ABBREVIATIONS LIST.....	8
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	10
1.2 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	10
2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ	12
2.1 ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΜΕ ΑΝΑΜΕΤΡΗΣΗ (DEAD RECKONING)	13
2.2 ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΜΕ POSITION FIXING	13
2.3 ΜΕΤΡΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΛΟΗΓΗΣΗ.....	14
3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.....	16
3.1 ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (i-FRAME).....	17
3.2 ΓΕΩΚΕΝΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (e- FRAME).....	17
3.3 ΤΟΠΟΚΕΝΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (ℓ-FRAME ή n-FRAME)	19
3.4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ (b-FRAME)	20
3.5 ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ	20
3.6 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ	22
4. ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ (GNSS)	23
4.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΑΤΩΝ GNSS.....	24
4.2 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ GPS	24
4.2.1 ΕΚΜΟΝΤΕΡΝΙΣΜΟΣ ΤΟΥ GPS	26
4.3 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ GLONASS	27
4.4 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ GALILEO.....	28
4.5 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΒΕΙΔΟΥ.....	29
4.6 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΣΤΑ GNSS	30
4.6.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ GPS (World Geodetic System, WGS-84)	32
4.6.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ GLONASS (Parametry Zemli 1990 ,PZ-90).....	32
4.6.3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ GALILEO (Galileo Terrestrial Reference Frame, GTRF)	32
4.6.4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΒΕΙΔΟΥ (China Geodetic Coordinate System, CGCS2000)	32
4.7 ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΜΕΣΩ GNSS	33
4.7.1 ΑΠΟΛΥΤΟΣ Η ΑΥΤΟΝΟΜΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΜΕΣΩ GNSS	34
4.7.2 ΑΚΡΙΒΗΣ ΑΠΟΛΥΤΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ (PRECISE POINT POSITIONING, PPP).....	35
4.7.3 ΣΧΕΤΙΚΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΜΕΣΩ GNSS	36
4.8 ΠΗΓΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΤΟΝ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ	37
4.9 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΕΡΟΣ.....	40

4.10 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ.....	41
5. ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ (Inertial Navigation Systems, INS).....	42
5.1 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	42
5.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ	42
5.3 ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ	43
5.3.1 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΩΝ	43
5.3.2 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΓΥΡΟΣΚΟΠΙΩΝ	45
5.4 ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΗ ΠΛΟΗΓΗΣΗ	48
5.4.1 ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΗ ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΣΕ ΜΙΑ ΔΙΑΣΤΑΣΗ	48
5.4.2 ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΗ ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΣΕ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	48
5.4.3 ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΗ ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΣΕ ΤΡΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	51
5.5 ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ (IMU).....	51
5.6 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ	52
5.7 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	53
5.8 ΠΗΓΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	54
5.8.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ.....	54
5.8.2 ΤΥΧΑΙΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ	57
5.8.3 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΕ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	57
5.9 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ.....	58
6. ΤΟ ΦΙΛΤΡΟ KALMAN	60
6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	60
6.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΦΑΣΕΙΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	61
6.3 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΦΙΛΤΡΟΥ KALMAN	61
7. ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ GNSS/INS.....	66
7.1 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΣΥΖΕΥΞΗΣ	68
7.1.1 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΥΖΕΥΞΗΣ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΒΡΟΓΧΟΥ (OPEN LOOP ARCHITECTURE)	68
7.1.2 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΥΖΕΥΞΗΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΓΧΟΥ (CLOSED LOOP ARCHITECTURE)	68
7.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΖΕΥΞΗΣ.....	69
7.2.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΧΩΡΙΣ ΣΥΖΕΥΞΗ (UNCOUPLED SYSTEMS)	69
7.2.2 ΧΑΛΑΡΗ ΣΥΖΕΥΞΗ (LOOSELY COUPLED SYSTEMS)	70
7.2.3 ΣΦΙΧΤΗ ΣΥΖΕΥΞΗ (TIGHTLY COUPLED SYSTEMS)	70
7.2.4 ΒΑΘΙΑ ΣΥΖΕΥΞΗ (ULTRA TIGHTLY Ή DEEPLY COUPLED SYSTEMS)	71
7.3 ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	72
7.4 ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	73
7.4.1 Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗΣ RTS (Rauch-Tung-Striebel).....	76
8. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΕΡΟΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ GPS/INS.....	78

8.1 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	83
8.2 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΤΗΣ ΛΥΣΗΣ ΣΧΕΤΙΚΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ GPS ΣΤΗΝ ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΤΗΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΛΥΣΗΣ.....	88
8.3 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΛΥΣΗΣ GPS ΜΕΣΩ PRECISE POINT POSITIONING ΣΤΗΝ ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΤΗΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΛΥΣΗΣ.....	98
8.4 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΗΜΑΣΙΑΣ ΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΛΥΣΗΣ GPS ΜΕΣΩ PRECISE POINT POSITIONING ΣΤΗΝ ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΤΗΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΛΥΣΗΣ.....	103
8.5 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΣΧΕΤΙΚΗ ΛΥΣΗ GPS	110
8.6 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΔΙΑΚΟΠΩΝ ΣΤΗ ΣΧΕΤΙΚΗ ΛΥΣΗ GPS.....	116
9. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	119
9.1 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	120
9.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΣΥΖΕΥΞΗΣ	124
9.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟ ΡΥΘΜΟ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΣΤΗ ΣΧΕΤΙΚΗ ΛΥΣΗ GPS	126
9.4 ΑΠΩΛΕΙΑ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΛΥΣΗΣ GPS	128
9.5 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΛΥΣΗΣ PPP ΑΠΟ GPS ΚΑΙ PPP ΑΠΟ GPS ΚΑΙ GLONASS.....	130
10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΕΤΑΙΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	132
11. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΠΗΓΕΣ.....	135
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	138
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ AEROCNTROL.....	138
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ ΤΥΠΟΥ PIPER NAVAJO 425 PRESSURIZED	139
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΓΚΡΙΣΕΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΕΡΟΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑ ΑΠΟΣΤΟΛΗ	140
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΟΝΑΔΑΣ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	151
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	152

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία αναλύονται και αξιολογούνται τα αδρανειακά και δορυφορικά συστήματα πλοήγησης και κυρίως η συνδυασμένη χρήση τους. Γίνεται εκτενής αναφορά στους παράγοντες από τους οποίους εξαρτώνται τα συστήματα καθώς και στις αρχιτεκτονικές και τις μεθόδους σύζευξής τους.

Αναλύεται σε θεωρητικό επίπεδο η πληροφορία που προκύπτει μέσα από τις παρατηρήσεις των δύο συστημάτων, οι περιορισμοί που προκύπτουν από τη χρήση τους, η σημασία αυτής της πληροφορίας και οι τρόποι με τους οποίους μπορούν τα δύο συστήματα να συνδυαστούν ώστε να παρέχουν μια πλήρη λύση πλοήγησης που να περιέχει πληροφορίες για τη θέση, την ταχύτητα και τον προσανατολισμό ενός σώματος.

Σε πρακτικό επίπεδο, αξιολογούνται και συγκρίνονται αποτελέσματα από εύρωστα συστήματα συλλογής δεδομένων GNSS/INS τα οποία έχουν σχεδιαστεί για να ανταπεξέρχονται σε δυσκολίες που προκύπτουν στα στάδια της συλλογής των δεδομένων και της μετεπεξεργασίας.

Αρχικά εξετάζεται ένα αερομεταφερόμενο σύστημα, το οποίο χρησιμοποιείται για αποστολές αεροφωτογραφήσεων. Πραγματοποιούνται δοκιμές υπό πραγματικές συνθήκες και ρεαλιστικούς περιορισμούς ώστε να εξεταστεί ο βαθμός αξιοπιστίας του. Διερευνάται η συνεισφορά της διάρκειας της σχετικής λύσης δεδομένων δορυφορικού εντοπισμού στην ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων, όπου προκύπτει ότι περιορίζοντας τη διάρκεια της σχετικής λύσης GNSS ώστε να είναι περίπου ίση με τη διάρκεια της λήψης των αεροφωτογραφιών, επηρεάζεται η συνδυασμένη λύση GNSS/INS στο επίπεδο των λίγων εκατοστών, ειδικά για αποστολές με μικρή επιχειρησιακή διάρκεια. Στη συνέχεια, αξιολογείται η συνδυασμένη λύση με χρήση δεδομένων GNSS μέσω Precise Point Positioning και η εφαρμογή της στον ελληνικό χώρο όπου λαμβάνουν χώρα έντονα γεωδυναμικά φαινόμενα και το Εθνικό Σύστημα Αναφοράς είναι μη-δυναμικό. Τέλος, εξετάζεται ο βαθμός αξιοπιστίας του συστήματος κατά την απώλεια δεδομένων GNSS, όπου συμπεραίνεται ότι το σύστημα μπορεί να δώσει αξιόπιστη λύση σε διακοπές δεδομένων GNSS διάρκειας μέχρι περίπου 2 λεπτών.

Στη συνέχεια εξετάζεται ένα σύστημα το οποίο χρησιμοποιείται για επίγειες εφαρμογές. Εξετάζονται οι δυνατότητες του συστήματος με τη χρήση διαφορετικού λογισμικού, η συμπεριφορά του συστήματος με τη χρήση δεδομένων GNSS με χαμηλότερο ρυθμό καταγραφής, όπου οι λύσεις με δεδομένα με ρυθμό καταγραφής GNSS ίσο με 10Hz και 1Hz έδωσαν παρόμοια αποτελέσματα, εξετάζεται η απόδοση του συστήματος κατά την απώλεια δεδομένων σχετικού εντοπισμού GNSS και τέλος, διερευνάται ο ρόλος του GLONASS σε συνδυασμό με το GPS σε μία λύση μέσω Precise Point Positioning.

University of West Attica
School of Engineering
Department of Surveying & Geoinformatics Engineering
Master of Science in Geospatial Technologies
Integrated processing of GNSS/INS data with emphasis on airborne systems
Master Thesis

Chanopoulos Iosif-Chrysostomos
September 2019

ABSTRACT

In this Master thesis the inertial and satellite navigation systems and their integration are described and evaluated. The factors which these systems depend on are thoroughly mentioned, as well as the architectures and methods with which the data from these systems are coupled.

The information that is obtained from these systems is analyzed in theoretical level, along with the limitations that derive from their use, the significance of the aforementioned information and the means via which the two systems can be combined in order to provide a complete navigation solution, containing data about the position, the velocity and the attitude of a body.

Subsequently, the results deriving from robust GNSS/INS platforms, which are designed to overcome difficulties that may occur during the phases of data collection and data post processing are evaluated and compared in practical level.

Firstly, an airborne system used for aerial photogrammetry missions is inspected. The system is tested under real life conditions and realistic limitations in order to evaluate its integrity. The contribution of the duration of relative GNSS observations in the accuracy of the final results is examined. The duration of Relative GNSS positioning when constrained to be almost as equal as the duration of the aerial photographs' capturing time, can affect the combined GNSS/INS solution at the level of a few cm, especially in airborne missions of short duration. Afterwards, the GNSS/INS solution with data that derive from Precise Point Positioning and its applicability in Greece, where a non-dynamic Coordinates Reference System is adopted and intense geodynamical phenomena take place, is evaluated. Finally the system's accuracy is assessed, under the event of GNSS outages. The airborne system's Inertial Navigation System can effectively absorb GNSS outages that last up until 2 minutes.

Consequently, a GNSS/INS system used for terrestrial applications is examined. The system's capabilities are evaluated with the use of a different software package than the ones used for the airborne data. The system's behavior is tested using GNSS data with different sampling rates and with simulated relative GNSS data outages. The different solutions that derived from the datasets of GNSS sampling rates equal to 10Hz and 1Hz, after the data interpolation performed by the software, were similar. Lastly, the role of GLONASS in combination with GPS in Precise Point Positioning is examined.

Keywords: Positioning, GNSS, INS, GPS, Inertial Navigation, Precise Point Positioning, Airborne system, Aerial Photogrammetry

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ – ABBREVIATIONS LIST

ABS	Antilock Breaking System
APC	Antenna Phase Center
ARP	Antenna Reference Point
ARW	Angular Random Walk
BPSK	Binary Phase Shift Key Modulation
CDMA	Code Division Multiple Access
CEP	Circular Error Probable
CGCS2000	China Geodetic Coordinate System 2000
CRF	Celestial Reference Frame
CRS	Celestial Reference System
CS	Commercial Service
CTRF	Conventional Terrestrial Reference Frame
DGNSS	Differential GNSS
DGPS	Differential GPS
DMC	Digital Mapping Camera
DOP	Dilution of Precision
DRMS	Distance RMS
ECEF	Earth Centered Earth Fixed
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay System
EKF	Extended Kalman Filter
ENU	East North UP
ESA	European Space Agency
FARA	Fast Ambiguity Resolution Approach
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FKP	Flächen Korrekturparameter
GGSP	Galileo Geodetic Service Provider
GIS	Geographic Information System
GLONASS	GLOBALnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GTRF	Galileo Terrestrial Reference Frame
HEPOS	HEllenic POsitioning System
ICAO	International Civil Aviation Organization
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service
IGI	Integrated Geospatial Innovations
IGS	International Gns Service
IMU	Inertial Measurements Unit
INS	Inertial Navigation System
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
ITRS	International Terrestrial Reference System

LAMDA	Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment
LIDAR	Lght Detection And Ranging
LOP	Line Of Position
MAC	Master Auxiliary Concept
MEMS	MicroElectroMechanical Systems
MEO	Medium Earth Orbit
NAVSTAR GPS	Navigation Satellite Timing & Ranging Global Positioning System
NED	North East Up
OS	Open Service
PPP	Precise Point Positioning
PPS	Precise Positioning Service
PRN	Pseudo Random Noise
PRS	Public Regulated Service
PZ-90	Parametry Zemli 1990
RTK	Real Time Kinematic
RTS	Rauch Tung Striebel
SAR	Search And Rescue
SMU	Sensors Management Unit
SLAM	Simultaneous Localization And Mapping
SOL	Safety Of Life
SPAN	Synchronized Position and Attitude Navigation
SPS	Standard Positioning Service
UTM	Universal Transverse Mercator
VLBI	Very Long Base Interferometry
VRS	Virtual Reference Station
WGS84	World Geodetic System 1984
ΕΓΣΑ87	Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987
ΣΜΗΕΑ	Συστήματα ΜΗ Επανδρωμένων Αεροσκαφών

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Γεωχωρικές Τεχνολογίες», του τμήματος μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, κατά το ακαδημαϊκό έτος 2018-2019.

Η εργασία πραγματεύεται τη συλλογή, την επεξεργασία και τη συνεπεξεργασία δεδομένων δορυφορικών και αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης, καθώς και την εφαρμογή τους, κυρίως σε αερομεταφερόμενα συστήματα, αλλά και σε επίγεια συστήματα.

1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της εργασίας είναι η πλήρης αποσαφήνιση και η κατανόηση σε βάθος των εννοιών και των μεγεθών που συμμετέχουν στην αδρανειακή πλοήγηση, τον δορυφορικό εντοπισμό και στο συνδυασμό τους, παράλληλα με την πρακτική τους εφαρμογή σε απαιτητικές υλοποιήσεις όπως είναι τα αερομεταφερόμενα συστήματα και επίγεια συστήματα που υποστηρίζουν μεταξύ άλλων και εφαρμογές mobile mapping.

Στόχοι της εργασίας είναι:

1. Η κατανόηση της συνεισφοράς στη λύση πλοήγησης της συνδυασμένης επεξεργασίας δεδομένων από αδρανειακά και δορυφορικά συστήματα.
2. Ο έλεγχος της απόδοσης των συστημάτων κάτω από πραγματικές συνθήκες, με την επιβολή περιορισμών που μπορούν να προκύψουν κατά τα στάδια της συλλογής δεδομένων ή της μετεπεξεργασίας.
3. Η αξιολόγηση των συνδυασμένων αποτελεσμάτων με διαφορετικές μεθόδους επίλυσης των δεδομένων GNSS και η πρακτική τους εφαρμογή στον ελληνικό χώρο.
4. Η απ' ευθείας σύγκριση αποτελεσμάτων από δεδομένα GNSS/INS που έχουν προκύψει από διαφορετικές μεθόδους επεξεργασίας και διαφορετικές μεθόδους σύζευξης.
5. Η γέννηση ερωτημάτων και ζητημάτων τα οποία θα οδηγήσουν σε περαιτέρω έρευνα.

1.2 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η δομή της εργασίας έχει ως εξής:

Τα κεφάλαια 2 έως 7 αποτελούν το θεωρητικό μέρος της εργασίας όπου:

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις βασικές αρχές και έννοιες που αφορούν την πλοήγηση, στις μεθόδους πλοήγησης και στα μέτρα με τα οποία αξιολογείται η λύση πλοήγησης.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται και αναλύονται τα κύρια και συμπληρωματικά συστήματα αναφοράς τα οποία συμμετέχουν στη συνδυασμένη λύση πλοήγησης με δεδομένα GNSS/INS.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται και αναλύονται τα δορυφορικά συστήματα πλοήγησης (GNSS). Παρουσιάζεται η δομή τους, ο τρόπος λειτουργίας τους, οι διαφορετικές μέθοδοι εντοπισμού, οι πηγές σφαλμάτων στον δορυφορικό εντοπισμό και τέλος τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί τους. Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται συνοπτικά και το ελληνικό σύστημα εντοπισμού ΗΕΡΟΣ, του οποίου δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια του πρακτικού τμήματος της εργασίας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύονται αντίστοιχα τα αδρανειακά συστήματα πλοήγησης, οι αισθητήρες και οι παρατηρήσεις που χρησιμοποιούν, οι υπολογισμοί που απαιτούνται για να επιτευχθεί η αδρανειακή λύση πλοήγησης, οι κατηγορίες αδρανειακών συστημάτων, οι πηγές σφαλμάτων στα αδρανειακά συστήματα και τέλος τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί της αδρανειακής πλοήγησης.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το φίλτρο Kalman, τα χαρακτηριστικά και οι φάσεις λειτουργίας του.

Στο έβδομο κεφάλαιο αναφέρονται οι αρχιτεκτονικές και οι μέθοδοι σύζευξης των δεδομένων GNSS/INS, γίνεται μια μικρή αναφορά στην ολοκλήρωση των συστημάτων με δεδομένα από συμπληρωματικούς αισθητήρες και παρουσιάζονται στοιχεία που αφορούν την απόδοση των συστημάτων.

Τα κεφάλαια 8 και 9 αποτελούν το πρακτικό μέρος της εργασίας όπου:

Στο όγδοο κεφάλαιο περιγράφεται και αναλύεται η επεξεργασία δεδομένων ενός αερομεταφερόμενου συστήματος GNSS/INS το οποίο χρησιμοποιείται για εφαρμογές αεροφωτογραφήσεων. Αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος και ο τρόπος επεξεργασίας των δεδομένων. Στη συνέχεια πραγματοποιούνται δοκιμές υπό πραγματικές συνθήκες και ρεαλιστικούς περιορισμούς ώστε να εξεταστεί ο βαθμός αξιοπιστίας του. Διερευνάται η συνεισφορά της διάρκειας της σχετικής λύσης δεδομένων δορυφορικού εντοπισμού στην ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων, αξιολογείται η συνδυασμένη λύση με χρήση δεδομένων GNSS μέσω Precise Point Positioning και η εφαρμογή της στον ελληνικό χώρο και τέλος, εξετάζεται ο βαθμός αξιοπιστίας του συστήματος κατά την απώλεια δεδομένων GNSS.

Στο ένατο κεφάλαιο περιγράφεται και αναλύεται η επεξεργασία δεδομένων ενός συστήματος GNSS/INS το οποίο χρησιμοποιείται για επίγειες εφαρμογές. Εξετάζονται οι διαφορετικές μέθοδοι σύζευξης των δεδομένων, η συμπεριφορά του συστήματος με τη χρήση δεδομένων με χαμηλότερο ρυθμό καταγραφής GNSS, η συμπεριφορά του συστήματος κατά την απώλεια δεδομένων σχετικού εντοπισμού GNSS και τέλος, συγκρίνονται απ' ευθείας δύο λύσεις δορυφορικού εντοπισμού μέσω Precise Point Positioning, μία με την αξιοποίηση μόνο του GPS και μία με την αξιοποίηση και του GPS και του GLONASS.

Στο δέκατο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν μέσα από την παρούσα εργασία και παρουσιάζονται ζητήματα για περαιτέρω έρευνα.

2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ

Η λέξη «πλοήγηση» προέρχεται από τις λέξεις *πλοῦς* και *άγω* και η αρχική της σημασία αφορά στους χειρισμούς που απαιτούνται για να οδηγηθεί ένα πλεύσιμο μέσο. Αντίστοιχα, ο αγγλικός όρος «navigation» προέρχεται από τις λατινικές λέξεις *navis*, η οποία προέρχεται από το ελληνικό «ναῦς» και *agere* η οποία προέρχεται από το ελληνικό «άγω».

Ο παλαιότερος καταγεγραμμένος ναυτικός χάρτης με πληροφορίες πλοήγησης είναι η *Carta Pisana* (βλ. εικόνα 2.1). Ενώ λέγεται ότι δημιουργήθηκε από θαλασσοπόρους στη Μεσόγειο στα 1275, υπάρχουν μελέτες που τοποθετούν τη δημιουργία του έναν αιώνα αργότερα (Pujades i Batallier, 2013). Ο χάρτης ανακαλύφθηκε στην περιοχή της Πίζας και απεικονίζει τη Μεσόγειο θάλασσα, τη Μαύρη θάλασσα και ένα τμήμα των ακτών του Ατλαντικού. Απεικονίζει ακριβείς πληροφορίες πλοήγησης με λεπτομέρειες που αφορούν τις ακτές και τους λιμένες, χωρίς να παρέχει πληροφορία για την τοπογραφία της ενδοχώρας.



Εικόνα 2.1. *Carta Pisana*. (Πηγή: http://expositions.bnf.fr/marine/grand/por_007.htm)

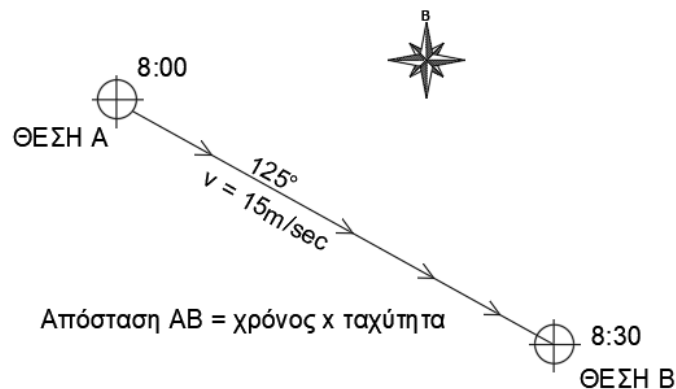
Η έννοια του όρου της πλοήγησης ωστόσο, επεκτείνεται πέρα από τη ναυσιπλοΐα και σε άλλα πεδία. Αφορά εφαρμογές αεροπλοΐας, διαστημικής, επίγειας, θαλάσσιας και υποθαλάσσιας πλοήγησης, καθώς επίσης και συλλογή πληροφοριών για εφαρμογές ασφαλείας, διαχείρισης στόλου, υπηρεσιών με βάση την τοποθεσία (*location based services*), συλλογής δεδομένων αθλητικών δραστηριοτήτων κ.α.

Μέσω της πλοήγησης καθορίζεται η θέση, η ταχύτητα και ο προσανατολισμός ενός κινούμενου μέσου σε σχέση με ένα γνωστό σύστημα αναφοράς. Ένα σύστημα πλοήγησης μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα, να στηρίζεται σε εξωτερικές πηγές πληροφορίας ή να είναι συνδυασμός των ανωτέρω. Ο συνδυασμός των δύο τεχνικών βασίζεται παραδοσιακά στο φίλτρο Kalman (Kalman, 1960), του οποίου η πρώτη εφαρμογή αφορούσε την πλοήγηση της αποστολής Apollo στο διάστημα.

Ο προσδιορισμός της θέσης, της ταχύτητας και του προσανατολισμού αναφέρεται και ως λύση πλοήγησης. Κατά τις περιπτώσεις που προσδιορίζεται η θέση, χρησιμοποιείται ο όρος «εντοπισμός».

2.1 ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΜΕ ΑΝΑΜΕΤΡΗΣΗ (DEAD RECKONING)

Κατά την πλοήγηση με αναμέτρηση (Dead reckoning), το σώμα ξεκινά την πορεία του από ένα σημείο με γνωστό διάνυσμα θέσης. Στη συνέχεια και ενώ το σώμα κινείται, προστίθεται η μεταβολή της θέσης και το αποτέλεσμα είναι η καινούργια του θέση. Η λύση πλοήγησης εξασφαλίζεται με παρατηρήσεις οι οποίες αφορούν τα κινηματικά δεδομένα του αντικειμένου χωρίς να παρέχεται κάποια εξωτερική πληροφορία για τη θέση του. Στην εικόνα 2.2 δίνεται ένα παράδειγμα πλοήγησης με αναμέτρηση με συνυπολογισμό της διεύθυνσης, του χρόνου, της ταχύτητας και της απόστασης που έχει διανυθεί.



Εικόνα 2.2. Πλοήγηση με αναμέτρηση.

Όπως θα αναλυθεί και στα μετέπειτα κεφάλαια, η πλοήγηση με αναμέτρηση χρησιμοποιείται από τα Αδρανειακά Συστήματα Πλοήγησης. Το γεγονός ότι μπορεί να παραχθεί λύση πλοήγησης αποκλειστικά από τις παρατηρήσεις του ίδιου του συστήματος χωρίς να εξαρτάται από εξωγενείς πληροφορίες αποτελεί ένα από τα πλεονεκτήματα στη χρήση τους.

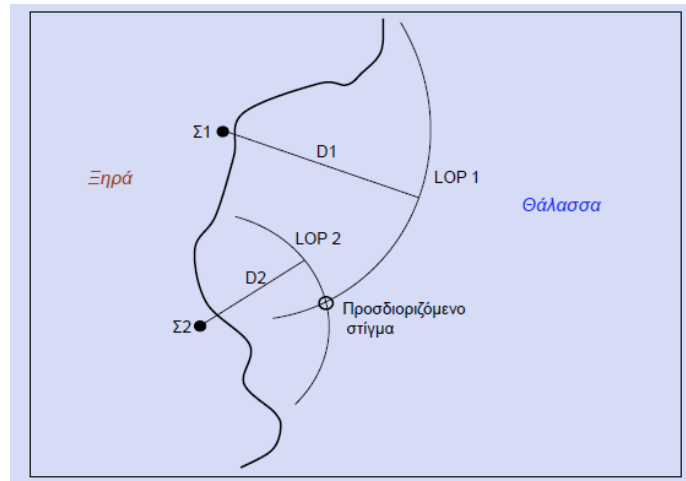
Ωστόσο, κατά την πλοήγηση με αναμέτρηση, η πληροφορία για την προηγούμενη θέση είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της επόμενης και μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτό ότι τα σφάλματα των παρατηρήσεων επιδρούν σωρευτικά καθώς κάθε φορά η νέα θέση προκύπτει από την προηγούμενη (και από τα σφάλματα που έχουν υπεισέλθει για τον προσδιορισμό της).

2.2 ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΜΕ POSITION FIXING

Κατά την πλοήγηση με position fixing, η πληροφορία για το στίγμα του αντικειμένου παρέχεται από εξωτερικές πηγές. Ένα παράδειγμα πλοήγησης με Position Fixing είναι η πλοήγηση με τη χρήση παρατηρήσεων προς γνωστά σημεία αναφοράς.

Μέσω παρατηρήσεων προς σημεία με γνωστές συντεταγμένες προκύπτουν γεωμετρικοί τόποι που βοηθούν στον προσδιορισμό της θέσης του κινούμενου αντικειμένου. Αυτοί οι γεωμετρικοί τόποι ονομάζονται γραμμές θέσης (Line Of Position, LOP). Το σχήμα της γραμμής θέσης εξαρτάται από τον τύπο των παρατηρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί.

Εάν για παράδειγμα ο παρατηρητής έχει υπολογίσει την απόσταση του κινούμενου μέσου από γνωστά τοποσταθερά σημεία, οι γραμμές θέσης είναι οι κύκλοι που δημιουργούνται με κέντρο τα τοποσταθερά σημεία και ακτίνα τις μετρημένες αποστάσεις. Η θέση του αντικειμένου υπολογίζεται από την τομή αυτών των κύκλων (βλ. εικόνα 2.3).



Εικόνα 2.3. Υπολογισμός στίγματος με γραμμές πλευσης. (Γιαννίου, 2016)

Με αυτόν τον τρόπο η θέση του αντικειμένου προσδιορίζεται κάθε φορά χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η προηγούμενη του θέση.

Η πλοήγηση με τη χρήση GNSS είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα πλοήγησης μέσω Position Fixing καθώς για κάθε εποχή το κινούμενο αντικείμενο λαμβάνει πληροφορία για τη θέση και την ταχύτητά του από τεχνητούς δορυφόρους. Η πληροφορία αυτή είναι ξεχωριστή ανά εποχή και τα σφάλματά της δεν δρουν σωρευτικά.

2.3 ΜΕΤΡΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΛΟΗΓΗΣΗ

Τα κυριότερα μέτρα με τα οποία εξετάζεται η ακρίβεια στη λύση πλοήγησης είναι τα εξής:

Για τις δύο διαστάσεις (βλ. και εικόνα 2.4):

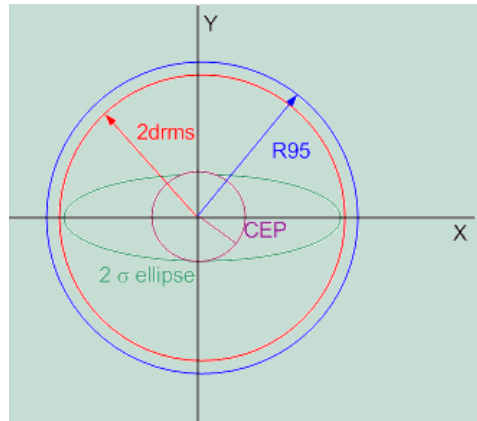
- DRMS (Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα απόστασης)

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (2.1)$$

- 2DRMS (Το διπλάσιο του Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος Απόστασης)

$$2\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (2.2)$$

- **Circular Error Probable:** Ορίζεται ως κύκλος με κέντρο το μέσο στίγμα και ακτίνα τέτοια ώστε να περικλείει το 50% των σιγμάτων.
- **R95:** Ορίζεται ως κύκλος με κέντρο το μέσο στίγμα και ακτίνα τέτοια ώστε να περικλείει το 95% των σιγμάτων.



Εικόνα 2.4. Μέτρα ακρίβειας στις δύο διαστάσεις (Πηγή: https://nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT-KANPUR/ModernSurveyingTech/lectureB_11/B_11_5accuracy.htm)

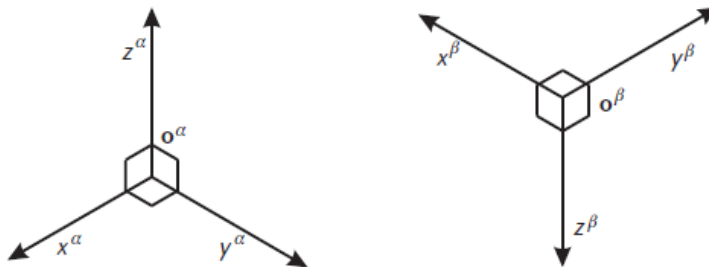
Για τις τρεις διαστάσεις:

- **Spherical Error Probable:** Ορίζεται ως σφαίρα με κέντρο το μέσο τρισδιάστατο στίγμα και όγκο τέτοιο ώστε να περικλείει το 50% των τρισδιάστατων σιγμάτων.
- **Mean Radial Spherical Error:** Ορίζεται ως σφαίρα με κέντρο το μέσο τρισδιάστατο στίγμα και όγκο τέτοιο ώστε να περικλείει το 61% των τρισδιάστατων σιγμάτων.

3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Η πλοήγηση είναι, συν τοις άλλοις, ένα πρόβλημα πολλαπλών συστημάτων αναφοράς. Για να υπάρχει σαφήνεια στη λύση πλοήγησης πρέπει να υπολογιστεί και να μοντελοποιηθεί η σχέση μεταξύ των συστημάτων αναφοράς που εμπλέκονται. Όλα τα προβλήματα πλοήγησης περιλαμβάνουν κατ' ελάχιστον δύο συστήματα: Το σύστημα του αντικειμένου (body frame) και το σύστημα πλοήγησης (navigation frame). Το σύστημα του αντικειμένου περιγράφει το σώμα του οποίου η θέση και ο προσανατολισμός πρέπει να περιγραφεί σε σχέση με το σύστημα αναφοράς, το οποίο περιγράφει ένα γνωστό σώμα (π.χ. τη Γη).

Ένα ορθοκανονικό σύστημα αναφοράς αποτελείται από την αρχή των αξόνων X, Y, Z και τον προσανατολισμό τους (βλ. εικόνα 3.1).



Εικόνα 3.1. Ορθοκανονικά συστήματα αξόνων (Groves, 2008)

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναφέρονται και αναλύονται τα συστήματα αναφοράς που συμμετέχουν στη λύση πλοήγησης μέσω του συνδυασμού δεδομένων αδρανειακής πλοήγησης και πλοήγησης μέσω GNSS.

Στα απλά προβλήματα της μηχανικής, η κίνηση αναπαριστάται σε σχέση με τη Γη, αγνοώντας τις κινήσεις της. Για την πλοήγηση όμως, η περιστροφή της Γης αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα όπως θα αναλυθεί παρακάτω.

Τα κύρια συστήματα αναφοράς τα οποία εμπλέκονται στην λύση πλοήγησης είναι:

- το Αδρανειακό Σύστημα Αναφοράς (Earth Centered Inertial frame, i-frame).
- το Γεωκεντρικό Σύστημα Αναφοράς (Earth Centered Earth Fixed frame, e-frame).
- το Τοποκεντρικό σύστημα (local ή navigation frame, ℓ -frame ή n-frame).
- το σύστημα αναφοράς του σώματος που πραγματοποιεί την κίνηση (body frame, b-frame).

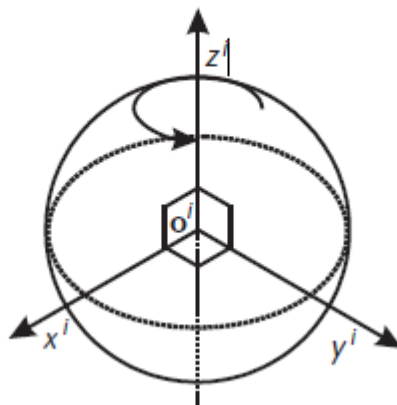
3.1 ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (i-FRAME)

Στη φυσική, ένα αδρανειακό ή νευτώνειο σύστημα αναφοράς είναι ένα σύστημα στο οποίο ισχύουν οι νόμοι του Νεύτωνα και δεν παρουσιάζει επιτάχυνση ή περιστροφή σε σχέση με το κέντρο του και με τους άξονες που το ορίζουν. Οι παρατηρήσεις των αδρανειακών αισθητήρων είναι συσχετισμένες με το αδρανειακό σύστημα αναφοράς και βρίσκουν εφαρμογή μόνο στα πλαίσιά του. Επιπλέον, όπως θα αναλυθεί και σε παρακάτω κεφάλαιο (βλ. παρ. 4.6), ο υπολογισμός των τροχιών των δορυφόρων των GNSS πραγματοποιείται σε ένα σχεδόν αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς μπορεί να οριστεί αναφερόμενο στους απλανείς αστέρες σε μία συγκεκριμένη εποχή αναφοράς και θεωρώντας την αφετηρία του ουσιαστικά ως το κέντρο του σύμπαντος. Αυτό όμως προκαλεί ουσιαστικές δυσκολίες στην περιγραφή της συμπεριφοράς αντικειμένων στην επιφάνεια της Γης ή πλησίον αυτής. Για αυτόν το λόγο απαιτείται η επιλογή ενός συστήματος προσαρμοσμένου στα γήινα δεδομένα.

Ένα τέτοιο σύστημα προκύπτει θεωρώντας ως κέντρο του συστήματος το κέντρο μάζας της Γης και ορίζεται ως εξής:

- Αρχή των αξόνων O^i το κέντρο μάζας της Γης.
- Άξονας Z^i ο άξονας περιστροφής της Γης.
- Άξονας X^i που διέρχεται από το σημείο τομής της Εκλειπτικής (το μέσο επίπεδο της κίνησης της Γης γύρω από τον ήλιο) με τον ουράνιο ισημερινό. Η Εκλειπτική και ο ουράνιος ισημερινός τέμνονται σε δύο σημεία. Το εαρινό ισημερινό σημείο, όπου έχουμε την Εαρινή Ισημερία (Vernal Equinox) και το φθινοπωρινό ισημερινό σημείο όπου έχουμε την Φθινοπωρινή Ισημερία (Autumnal Equinox).
- Άξονας Y^i που συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα.

Στην εικόνα 3.2 απεικονίζεται το αδρανειακό σύστημα αναφοράς.



Εικόνα 3.2. Αδρανειακό σύστημα αναφοράς (Groves, 2008)

3.2 ΓΕΩΚΕΝΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (e- FRAME)

Το Γεωκεντρικό Σύστημα Αναφοράς είναι παρόμοιο με το αδρανειακό σύστημα αναφοράς με τη διαφορά ότι στο αδρανειακό σύστημα αναφοράς οι άξονες παραμένουν αμετάβλητοι σε σχέση με την περιστροφή της Γης. Αντίθετα, στο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς οι άξονες ακολουθούν αυτήν την περιστροφική κίνηση.

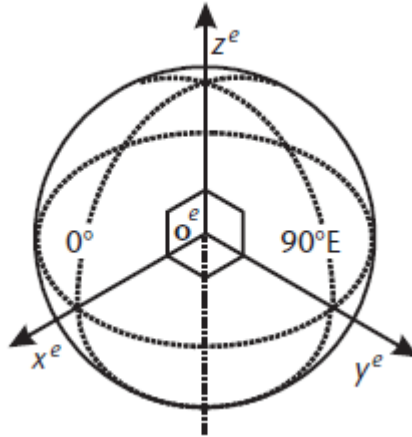
Το Γεωκεντρικό Σύστημα Αναφοράς ορίζεται ως εξής:

- Αρχή των αξόνων O^e το κέντρο μάζας της Γης.

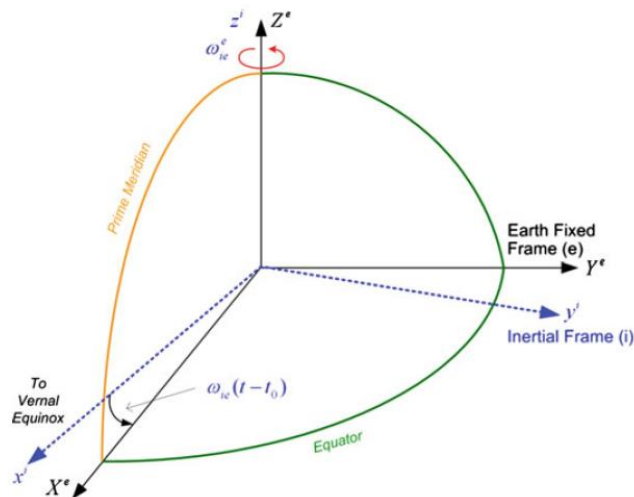
- Άξονας Z^e ο άξονας περιστροφής της Γης.
- Άξονας X^e που διέρχεται από τον μεσημβρινό του Greenwich.
- Άξονας Y^e που συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα.

Η σταθερή γωνιακή περιστροφή που διαφοροποιεί το γεωκεντρικό από το αδρανειακό σύστημα αναφοράς είναι ίση με τη μέση γωνιακή περιστροφή της Γης $\omega^e = 7.292115 \cdot 10^{-5} \text{ rad/sec}$.

Στις εικόνες 3.3 και 3.4 απεικονίζονται το γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς και το γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς σε σχέση με το αδρανειακό σύστημα αναφοράς.



Εικόνα 3.3. Γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς (Groves, 2008)



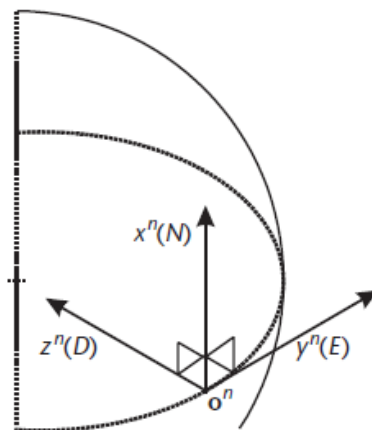
Εικόνα 3.4. Γεωκεντρικό και Αδρανειακό σύστημα αναφοράς (Noureldin et al., 2013)

3.3 ΤΟΠΟΚΕΝΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (ℓ-FRAME ή n-FRAME)

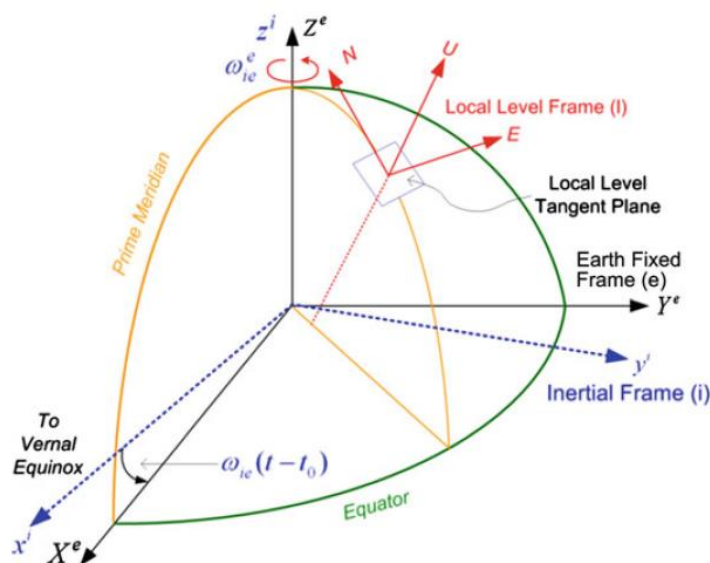
Η χρήση ενός τοποκεντρικού συστήματος αναφοράς αποσκοπεί στην απεικόνιση της θέσης, της ταχύτητας και του προσανατολισμού ενός αντικειμένου κοντά η επί της γήινης επιφάνειας. Ορίζεται ως εξής:

- Αρχή των αξόνων O^n ταυτιζόμενη με το σημείο τομής των αξόνων των αδρανειακών αισθητήρων.
- Άξονας X^n προσανατολισμένος προς την Ανατολή που συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα.
- Άξονας Y^n προσανατολισμένος στον γεωδαιτικό Βορρά.
- Άξονας Z^n προσανατολισμένος με την τοπική κάθετο στο Ελλειψοειδές Εκ Περιστροφής με κατεύθυνση είτε προς τα έξω είτε προς το κέντρο του ελλειψοειδούς.

Στις εικόνες 3.5 και 3.6 απεικονίζονται το τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς και το τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς σε σχέση με το γεωκεντρικό και το αδρανειακό σύστημα αναφοράς.



Εικόνα 3.5. Τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς (Groves 2008)



Εικόνα 3.6. Τοποκεντρικό, Γεωκεντρικό και Αδρανειακό σύστημα αναφοράς (Noureldin et al., 2013)

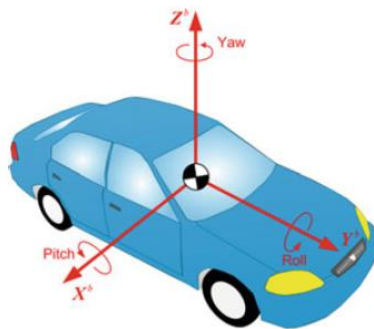
Ανάλογα με την κατεύθυνση του άξονα Z^n σχηματίζονται δύο διαφορετικές διατάξεις αξόνων: Το σύστημα ENU (East North Up) και το σύστημα NED (North East Down), κάθε μία από τις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά περίπτωση.

3.4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ (b-FRAME)

Πρόκειται για το σύστημα αναφοράς του σώματος το οποίο πραγματοποιεί την κίνηση. Ορίζεται ως εξής:

- Αρχή των αξόνων O^b ταυτιζόμενη με το σημείο τομής των αξόνων των αδρανειακών αισθητήρων. (Ομοίως με το Τοποκεντρικό Σύστημα Αναφοράς)
- Άξονας X^b με διεύθυνση κάθετη στη διεύθυνση της κίνησης του σώματος και δεξιόστροφη φορά
- Άξονας Y^b με διεύθυνση τη διεύθυνση της κίνησης του σώματος
- Άξονας Z^b που συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα και κατεύθυνση προς τα πάνω

Στην εικόνα 3.7 απεικονίζεται το σύστημα αναφοράς του σώματος.



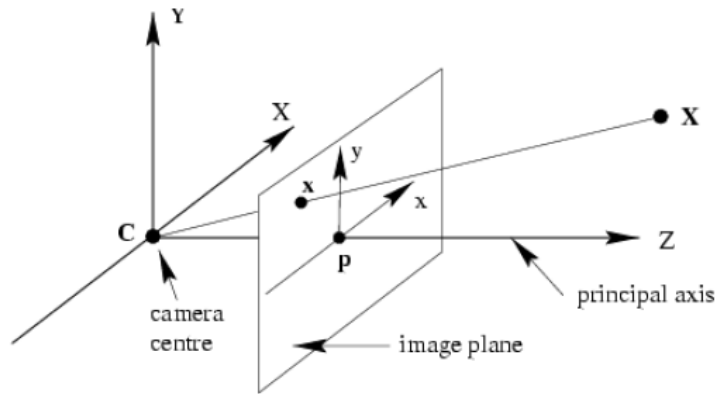
Εικόνα 3.7. Το σύστημα αναφοράς του σώματος (Noureldin et al., 2013)

3.5 ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ

Για τις ανάγκες της εφαρμογής της λύσης πλοήγησης με συνδυασμό συστημάτων GNSS/INS σε αερομεταφερόμενο σύστημα για τη λήψη αεροφωτογραφιών, πραγματοποιούνται και αναγωγές σε συμπληρωματικά συστήματα συντεταγμένων που αφορούν τα χρησιμοποιούμενα συστήματα, τη φωτογραφική μηχανή και τις αρχές λειτουργίας της κεντρικής προβολής.

Τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κεντρικής προβολής είναι (βλ. και εικόνα 3.8):

- Το προβολικό κέντρο C.
- Το επίπεδο της εικόνας (image plane), το επίπεδο στο οποίο βρίσκεται ο αισθητήρας της φωτογραφικής μηχανής και πάνω του σχηματίζεται το είδωλο.
- Πρωτεύων άξονας (Principal Axes): Ο άξονας που σχηματίζεται από το προβολικό κέντρο και τέμνει κάθετα το επίπεδο της εικόνας.
- Πρωτεύον επίπεδο (Principal Plane): Το επίπεδο που περιέχει το προβολικό κέντρο C και είναι παράλληλο με το επίπεδο της εικόνας.



Εικόνα 3.8. Αρχές λειτουργίας της κεντρικής προβολής (Monasse –Tang ,2014)

Η αναγωγή όλων των δεδομένων πραγματοποιείται στο σημείο αναφοράς της Μονάδας Αδρανειακών Μετρήσεων (Inertial Measurements Unit, IMU). Συγκεκριμένα, στο αερομεταφερόμενο σύστημα που εξετάζεται, πρέπει να υπολογιστούν και να προσδιοριστούν οι γεωμετρικές σχέσεις ως προς τις μεταθέσεις (lever arm offset) και τις στροφές (boresight alignment), που συνδέουν το κέντρο φάσης της κεραίας του δέκτη GNSS και το προβολικό κέντρο της φωτογραφικής μηχανής με το σημείο αναφοράς της IMU (βλ. εικόνα 3.9). Στην περίπτωση του προς εξέταση αερομεταφερόμενου συστήματος η κεραία GPS είναι τοποθετημένη στην κορυφή της ατράκτου του αεροσκάφους για την απρόσκοπτη λήψη των σημάτων των δορυφόρων. Η IMU είναι τοποθετημένη εντός του αεροσκάφους και πλησίον της φωτογραφικής μηχανής. Οι εκκεντρότητες της κεραίας GPS σε σχέση με την IMU έχουν υπολογιστεί με τη χρήση τοπογραφικού εξοπλισμού, ενώ οι εκκεντρότητες της IMU σε σχέση με το προβολικό κέντρο της φωτογραφικής μηχανής δίνονται από τον κατασκευαστή.

7.2 DMC together with IMU-Ile: GPS Leverarm:

Since the origin of all measurements is the IMU inside the camera, the GPS leverarm can not be measured directly. For that reason a reference point is defined on the outside of DMC camera:

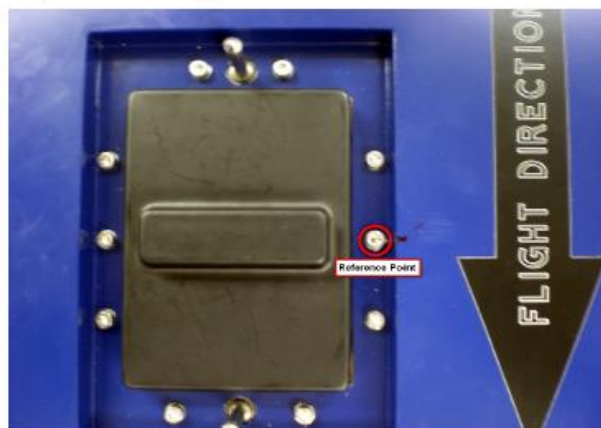


Figure 18 DMC Reference Point

7.3 DMC together with IMU-Ile: Sensor Leverarm:

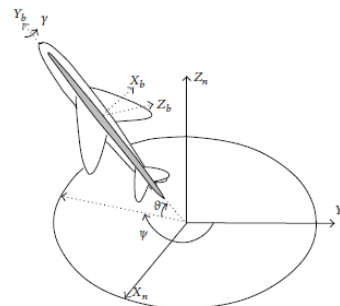
The sensor leverarm is the offset from the origin of the IMU to the projection center of the DMC. The following values can be used in AEROoffice directly:
 x: -0.001 m
 y: -0.036 m
 z: ~0.265 m

Εικόνα 3.9. Σημείο αναφοράς της IMU και τιμές μετάθεσης του προβολικού κέντρου της φωτογραφικής μηχανής προς αυτό. (Πηγή: Aerocontrol SMU Manual, IGI)

3.6 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ

Εκτός από τη θέση και την ταχύτητα του οχήματος, απαιτούνται και οι παράμετροι για την αναπαράσταση του προσανατολισμού του. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση τριών περιστροφών γύρω από μεμονωμένους άξονες στον Ευκλείδειο χώρο. Οι στροφές αυτές ονομάζονται στροφές Tait-Bryan από τους Peter Guthrie Tait (1831-1901) και George Hartley Bryan (1864-1928) ή Cardan από τον Gerolamo Cardano (1501-1576).

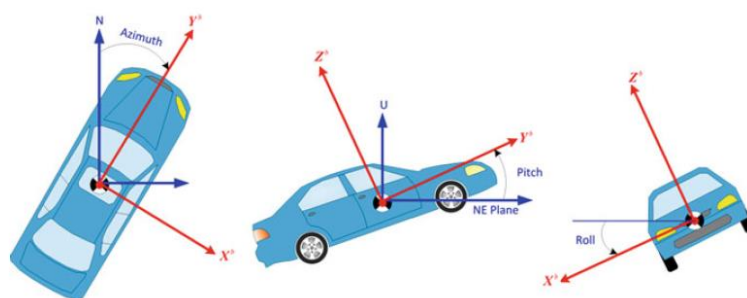
Στην αεροναυπηγική η συνηθέστερη μεθοδολογία που ακολουθείται είναι με τη χρήση των γωνιών πλοήγησης οι οποίες στηρίζονται στις στροφές Cardan. Οι γωνίες πλοήγησης που αναπαριστούν τον προσανατολισμό του συστήματος αναφοράς του σώματος σε σχέση με το τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς ονομάζονται: γωνία κατεύθυνσης (heading ή yaw), γωνία κλίσης (pitch) και γωνία περιστροφής (roll). Η αντιστοίχιση των γωνιών πλοήγησης με το συμβολισμό της μαθηματικής ορολογίας είναι : roll:φ, pitch:θ και yaw:ψ (βλ. εικόνα 3.10), ενώ ο συμβολισμός αυτός διαφέρει ανάλογα με τη βιβλιογραφική αναφορά. Στην περίπτωση του υπολογισμού των χαρακτηριστικών του εξωτερικού προσανατολισμού αεροφωτογραφιών ($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa$), η συνηθέστερη αντιστοίχιση είναι: roll:ω, pitch:φ και yaw:κ.



Εικόνα 3.10. Γωνίες πλοήγησης (Zhao – Wang, 2013)

Αναλυτικότερα (βλ. και εικόνα 3.11):

- Η στροφή γύρω από τον άξονα Z (heading ή yaw) είναι συνήθως η γωνία που σχηματίζει ο Βορράς του επίγειου συστήματος αναφοράς (συνηθέστερα ο άξονας Y) με τον άξονα που αντιστοιχεί στην κατεύθυνση της κίνησης του συστήματος αναφοράς του σώματος.
- Η στροφή γύρω από τον άξονα X του συστήματος αναφοράς του σώματος (pitch) είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην κατεύθυνση της κίνησης και το οριζόντιο επίπεδο.
- Η στροφή γύρω από τον άξονα Y (roll) είναι η γωνία που σχηματίζεται από το οριζόντιο επίπεδο και το επίπεδο που περιέχει τους άξονες X και Y του συστήματος αναφοράς του σώματος.



Εικόνα 3.11. Γωνίες πλοήγησης (Noureldin et al., 2013)

4. ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ (GNSS)

Τα δορυφορικά συστήματα πλοήγησης (Global Navigation Satellite Systems, GNSS), αποτελούν τη μεγαλύτερη τεχνολογική εξέλιξη στον τομέα της πλοήγησης. Η λειτουργία τους βασίζεται στις παρατηρήσεις τεχνητών δορυφόρων οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε τροχιακά επίπεδα γύρω από τη Γη και μέσω της διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων εκπέμπουν πληροφορίες οι οποίες περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων και δεδομένα για τη θέση τους.

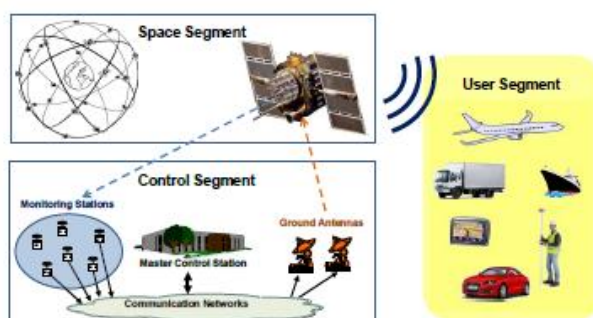
Εκτός από το πλέον διαδεδομένο σύστημα δορυφορικής πλοήγησης, το οποίο είναι το NAVSTAR GPS και άρχισε να αναπτύσσεται από το αμερικανικό υπουργείο εθνικής άμυνας στα μέσα της δεκαετίας του 1970, υπάρχουν και άλλα συστήματα τα οποία επιτρέπουν την πλοήγηση μέσω τεχνητών δορυφόρων και παρέχουν παγκόσμια κάλυψη. Τα συστήματα αυτά είναι το GLONASS (GLObalnaya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema), το οποίο το διαχειρίζεται η Ρωσία και σχεδιάστηκε για να εξυπηρετεί αρχικά στρατιωτικούς σκοπούς, το BEIDOU (παλαιότερα COMPASS) το οποίο διαχειρίζεται η Λαϊκή Δημοκρατία της Κίνας και έχει επίσης σχεδιαστεί για να εξυπηρετεί αρχικά στρατιωτικούς σκοπούς και τέλος, το GALILEO το οποίο αναπτύσσει και διαχειρίζεται η Ευρωπαϊκή Ένωση και είναι το μόνο σύστημα το οποίο έχει σχεδιαστεί με γνώμονα να εξυπηρετήσει αρχικά πολιτικούς και όχι στρατιωτικούς σκοπούς. Εκτός από το GPS, από τα παραπάνω συστήματα το μόνο που είναι αυτή τη στιγμή πλήρως επιχειρησιακό είναι το GLONASS, ενώ τα GALILEO και το BEIDOU έχουν ορίζοντα ολοκλήρωσης το 2020.

Τα συστήματα αποτελούνται από 3 τμήματα: Το τμήμα των δορυφόρων, το επίγειο τμήμα ελέγχου, και το τμήμα των χρηστών (βλ. εικόνα 4.1).

Το τμήμα των δορυφόρων (space segment) αποτελείται από τους δορυφόρους οι οποίοι είναι κατανεμημένοι σε διαφορετικά τροχιακά επίπεδα, επιτυγχάνοντας παγκόσμια κάλυψη.

Το επίγειο τμήμα ελέγχου (control segment) πραγματοποιεί συνεχώς μετρήσεις χρησιμοποιώντας όλους τους διαθέσιμους δορυφόρους. Μέσω αυτών των μετρήσεων υπολογίζονται οι τροχιακές εφημερίδες και οι διορθωτικές παράμετροι μέσω των οποίων μοντελοποιούνται τα σφάλματα των χρονομέτρων των δορυφόρων.

Το τμήμα των χρηστών (user segment) αποτελείται από χρήστες οι οποίοι χρησιμοποιούν τις υπηρεσίες πλοήγησης των συστημάτων. Τα στρατιωτικά συστήματα παρέχουν για επιχειρησιακούς σκοπούς υπηρεσίες αυξημένης ακρίβειας στους στρατιωτικούς χρήστες, ενώ για πολιτικούς σκοπούς παρέχονται σε εκατομμύρια χρήστες ανά τον κόσμο υπηρεσίες που υποστηρίζουν εντοπισμό θέσης με ακρίβεια λίγων μέτρων.



Εικόνα 4.1. Διάρθρωση των τμημάτων των GNSS (Subirana et al., 2013)

4.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΑΤΩΝ GNSS

Οι δορυφόροι των GNSS εκπέμπουν συνεχώς σήματα σε δύο ή περισσότερες συχνότητες. Αυτά τα σήματα περιέχουν κώδικες και δεδομένα πλοήγησης τα οποία επιτρέπουν στους χρήστες να υπολογίσουν το χρόνο που χρειάστηκε το σήμα για να φτάσει από το δορυφόρο στο δέκτη, καθώς επίσης και τις συντεταγμένες του δορυφόρου σε κάθε εποχή. Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτών των σημάτων είναι:

Η φέρουσα συχνότητα: Μια ημιτονοειδής ραδιοσυχνότητα της μπάντας L (1-2GHz) η οποία χρησιμοποιείται για να διαμορφωθούν σε αυτή οι εκπεμπόμενες πληροφορίες.

Οι κώδικες PRN (Pseudo Random Noise): Μια γνωστή αλληλουχία από δυαδικά ψηφία η οποία εκπέμπεται μέσω της φέρουσας συχνότητας.

Το μήνυμα δεδομένων ή μήνυμα πλοήγησης: Επίσης μια δυαδική αλληλουχία από δεδομένα που αφορούν τις προσεγγιστικές θέσεις των δορυφόρων ανά εποχή παρατήρησης, συμπληρωματικές πληροφορίες για την κατάσταση του συστήματος και τις εφημερίδες των δορυφόρων.

4.2 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ GPS

Οι Μέσης Περίγειας Τροχιάς (Medium Earth Orbit, MEO) δορυφόροι του GPS είναι κατανεμημένοι σε έξι ισαπέχοντα τροχιακά επίπεδα, στο καθένα από τα οποία υποστηρίζονται τέσσερις θέσεις για ισάριθμους δορυφόρους. Αυτή η διάταξη των 24 θέσεων εξασφαλίζει παγκόσμια κάλυψη από τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους σε κάθε σημείο του πλανήτη, ανά πάσα στιγμή. Αυτή τη στιγμή το σύστημα αποτελείται από 31 δορυφόρους (οι δορυφόροι μπορούν να φτάσουν τους 30-32), μέσω των οποίων καλύπτονται περιπτώσεις συντήρησης ή μη επιχειρησιακής ικανότητας κάποιων από των 24 δορυφόρων. Παρά το γεγονός ότι οι επιπλέον δορυφόροι μπορούν να αυξήσουν την απόδοση του συστήματος, δεν αποτελούν μέρος του βασικού σχηματισμού.

Οι δορυφόροι είναι τοποθετημένοι σε τροχιές μέσου ύψους ίσο με 20.200Km και υπό κλίση 55° σε σχέση με τον ισημερινό. Οι τροχιές είναι σχεδόν κυκλικές με εκκεντρότητα μικρότερη από 0.02, μεγάλο ημιάξονα ίσο με 26.560Km και ονομαστική περίοδο ίση με 12 αστρικές ώρες (11 ώρες, 58 λεπτά και 2 δευτερόλεπτα). Η γεωμετρική διάταξη των δορυφόρων επαναλαμβάνεται κάθε αστρική ημέρα.

Το σήμα του GPS εκπέμπεται σε δύο ραδιοσυχνότητες της μπάντας L, τις συχνότητες L1 στα 1575.42MHz και L2 στα 1227.60MHz οι οποίες είναι πολλαπλάσιες της θεμελιώδους συχνότητας $f_0=10.23\text{MHz}$ των ατομικών ρολογιών των δορυφόρων. Το GPS χρησιμοποιεί την CDMA (Code Division Multiple Access) τεχνική για την αποστολή πολλαπλών σημάτων από τις ίδιες συχνότητες. Με αυτόν τον τρόπο κάθε δορυφόρος εκπέμπει διαφορετικές αλληλουχίες ψηφίων για τους κώδικες PRN χρησιμοποιώντας τις L1 και L2. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση του σήματος είναι η BPSK (Binary Phase Shift Key Modulation). Οι υπηρεσίες εντοπισμού που παρέχονται από το GPS είναι δύο:

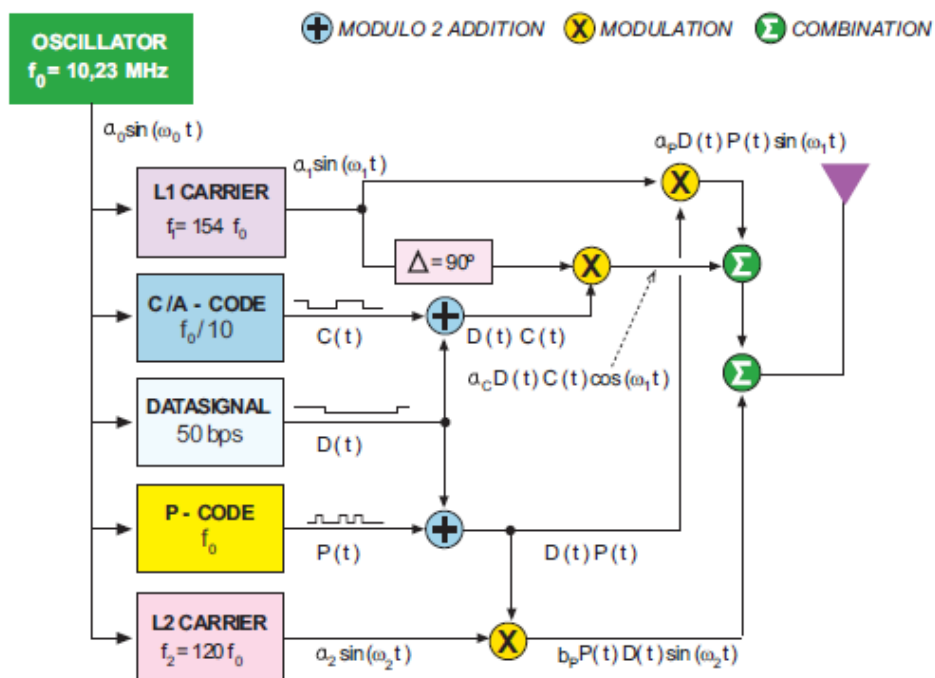
- Η υπηρεσία κανονικού εντοπισμού (Standard Positioning Service, SPS) η οποία είναι ελεύθερη και διατίθεται για όλους τους χρήστες του συστήματος. Η υπηρεσία αφορά μόνο τη συχνότητα L1.

- Η υπηρεσία εντοπισμού ακριβείας (Precise Positioning Service, PPS) η οποία περιορίζεται με κρυπτογραφικές τεχνικές μόνο για στρατιωτικούς σκοπούς και διαπιστευμένους χρήστες. Η υπηρεσία αυτή αφορά την L1 και την L2.

Οι εκπεμπόμενοι κώδικες PRN που χρησιμοποιεί το GPS είναι:

- Ο κώδικας C/A (Coarse/Acquisition), γνωστός και σαν Civilian code. Η αλληλουχία αυτή αποτελείται από 1023 bits και επαναλαμβάνεται κάθε millisecond. Ο κώδικας έχει μήκος παλμού ίσο με 293.1 μέτρα και διαμορφώνεται μόνο στην L1. Μέσω του κώδικα C/A ορίζεται η υπηρεσία SPS.
- Ο κώδικας P (Precise) ο οποίος χρησιμοποιείται μόνο για στρατιωτικές εφαρμογές. Το μήκος παλμού του κώδικα είναι ίσο με 29.31 μέτρα. Ο κώδικας διαμορφώνεται στην L1 και την L2 και με αυτόν ορίζεται η PPS.

Το εκπεμπόμενο μήνυμα πλοήγησης διαμορφώνεται και στις δύο φέρουσες συχνότητες στα 50bps και περιέχει πληροφορίες για τις τροχιές και τα ρολόγια των δορυφόρων, παράγοντες ιονοσφαιρικών μοντέλων, κατάσταση των δορυφόρων κ.α. Στην εικόνα 4.2 και στον πίνακα 4.1 απεικονίζονται επιπλέον στοιχεία για τα χαρακτηριστικά και τη δομή του σήματος GPS.



Εικόνα 4.2. Δομή του σήματος GPS (Seeber, 1993)

Πίνακας 4.1. Χαρακτηριστικά του σήματος GPS (Seeber, 1993)

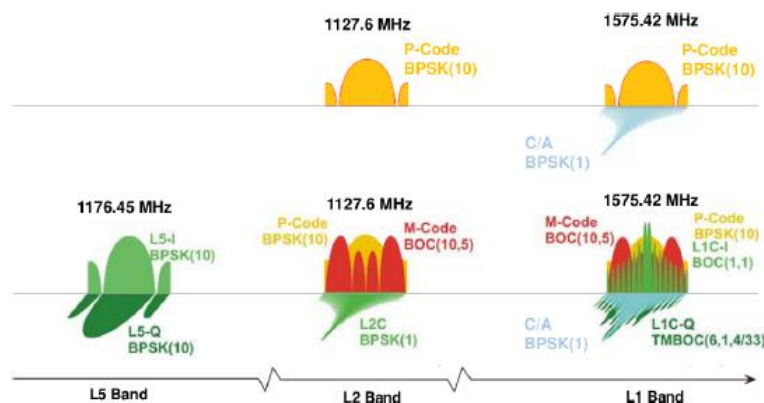
Atomic clock frequency	$f_0 = 10.23 \text{ MHz}$
Frequency L1	$154 \times f_0$ 1575.420 MHz
Wavelength L1	19.03 cm
Frequency L2	$120 \times f_0$ 1227.600 MHz
Wavelength L2	24.42 cm
P code frequency (chipping rate)	$f_0 = 10.23 \text{ MHz (Mbps)}$
P code wavelength	29.31 m
P code period	266 days, 7 days/satellite
C/A code frequency (chipping rate)	$f_0/10 = 1.023 \text{ MHz}$
C/A code wavelength	293.1 m
C/A code period	1 ms
Navigation message frequency	50 bps
Frame length	30 s
Total message length	12.5 min

4.2.1 ΕΚΜΟΝΤΕΡΝΙΣΜΟΣ ΤΟΥ GPS

Ο εκμοντερνισμός του GPS περιλαμβάνει μια επιπλέον φέρουσα συχνότητα, την L5, νέους κώδικες PRN οι οποίοι αναφέρονται σαν πολιτικά (civil) σήματα L2C, L5C και L1C και τον στρατιωτικό κώδικα M (Military). Ο εκμοντερνισμός του συστήματος ξεκίνησε το 2005 με την εκτόξευση του πρώτου IIR-M δορυφόρου. Ο συγκεκριμένος τύπος δορυφόρου υποστηρίζει το νέο στρατιωτικό κώδικα PRN (M) και τον δεύτερο πολιτικό κώδικα PRN L2C, ο οποίος είναι σχεδιασμένος για να καλύψει εμπορικές ανάγκες που αφορούν την ανάπτυξη χαμηλού κόστους δεκτών GPS δύο συχνοτήτων.

Στη συνέχεια, το σχέδιο του εκμοντερνισμού συνεχίστηκε με τους δορυφόρους Block IIF οι οποίοι υποστήριζαν και τη συχνότητα L5 μαζί με τον κώδικα PRN L5C ο οποίος έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει γενικότερα εφαρμογές ασφαλείας ανθρώπινης ζωής (Safety of Life, SoL applications).

Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει τους δορυφόρους Block III οι οποίοι υποστηρίζουν τον τέταρτο κώδικα PRN L1C, ο οποίος έχει σχεδιαστεί για να παρέχεται διαλειτουργικότητα ανάμεσα στο GPS και τα υπόλοιπα GNSS. Στην εικόνα 4.3 απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά του σήματος GPS πριν και μετά τον εκμοντερνισμό του συστήματος.



Εικόνα 4.3. Χαρακτηριστικά του σήματος του GPS πριν και μετά τον εκμοντερνισμό του συστήματος (Subirana et al., 2013)

4.3 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ GLONASS

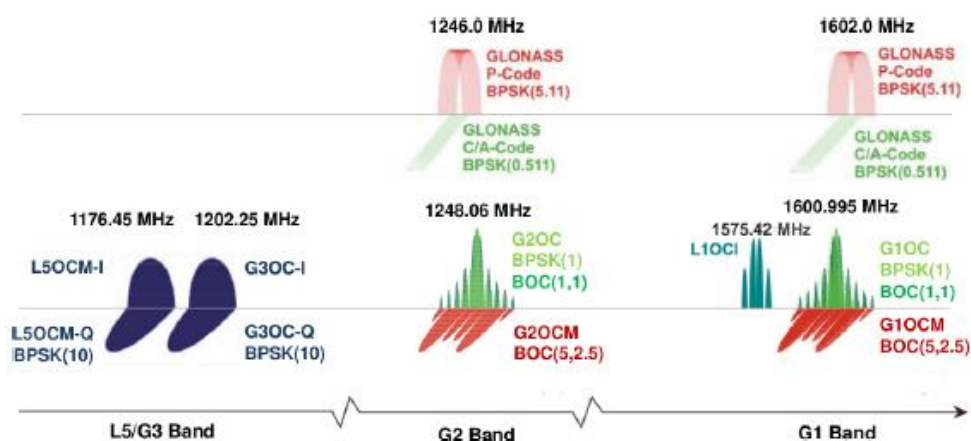
Ο ονομαστικός σχηματισμός του GLONASS αποτελείται από 24 δορυφόρους Μέσης Περίγειας Τροχιάς, τοποθετημένους σε τρία τροχιακά επίπεδα. Κάθε τροχιακό επίπεδο είναι σχεδιασμένο ώστε να φιλοξενεί οκτώ δορυφόρους. Το μέσο ύψος των τροχιών είναι ίσο με 19.100Km και είναι τοποθετημένες υπό γωνία 64.8° από τον ισημερινό. Η ονομαστική περίοδος των τροχιών είναι ίση με 11 ώρες, 15 λεπτά και 44 δευτερόλεπτα και η γεωμετρική διάταξη των δορυφόρων επαναλαμβάνεται κάθε οκτώ αστρικές ημέρες. Ωστόσο, επειδή σε κάθε τροχιακό επίπεδο υπάρχουν οκτώ δορυφόροι, από το ίδιο σημείο διέρχεται ένας δορυφόρος κάθε αστρική ημέρα.

Λόγω προβλημάτων χρηματοδότησης, ο αριθμός των διαθέσιμων δορυφόρων μειώθηκε από 24 το 1996 σε 6 το 2001. Τον Αύγουστο του 2001 η ρωσική κυβέρνηση δεσμεύτηκε να αποκαταστήσει και να εκσυγχρονίσει το σύστημα. Το 2011 ήταν ξανά διαθέσιμοι 24 επιχειρησιακοί δορυφόροι συν δύο εφεδρικοί (Subirana et al., 2013).

Το σήμα του GLONASS σε αντίθεση με το σήμα του GPS εκπέμπεται σε πολλαπλές ραδιοσυχνότητες της μπάντας L οι οποίες κατανέμονται σε τρία φασματικά εύρη. Το πρώτο είναι το G1 με βασική συχνότητα ≈ 1602 MHz και διαιρείται σε συχνότητες ανά 0.511 MHz, το δεύτερο, είναι το G2 με βασική συχνότητα ≈ 1246 MHz και διαιρείται σε συχνότητες ανά 0.511 MHz και το τρίτο, G3, το οποίο είναι διαθέσιμο από τους δορυφόρους προτελευταίας γενιάς και μετά (GLONASS-K1, 2011), έχει βασική συχνότητα ≈ 1201 MHz και διαιρείται σε συχνότητες ανά 0.409 MHz.

Παρόμοια με το GPS οι υπηρεσίες που παρέχονται είναι η SPS και η PPS. Σε αντίθεση με τους δορυφόρους του GPS, κάθε δορυφόρος του GLONASS εκπέμπει τον ίδιο κώδικα σε διαφορετική συχνότητα μέσα στη μπάντα L, χρησιμοποιώντας την τεχνική FDMA (Frequency Division Multiple Access). Έτσι, ο δέκτης αντί να ταυτοποιεί τον εκπεμπόμενο κώδικα για να αντιστοιχίσει το εισερχόμενο σήμα στον ανάλογο δορυφόρο, ταυτοποιεί τη λαμβανόμενη συχνότητα. Στη φέρουσα συχνότητα $f = 1202.025$ MHz της δέσμης G3 έχει διαμορφωθεί σήμα και με την τεχνική CDMA, διερευνώντας της δυνατότητες ένταξής της στο σύστημα.

Οι εκπεμπόμενοι κώδικες PRN C/A και P έχουν μήκος παλμού 586.7 μέτρα και 58.67 μέτρα αντίστοιχα και διαμορφώνονται στις φέρουσες συχνότητες με την μέθοδο BPSK, με τον κώδικα C/A να διαμορφώνεται αρχικά μόνο στις συχνότητες της μπάντας G1. Στην εικόνα 4.4 αναφέρονται τα χαρακτηριστικά του σήματος του GLONASS.



Εικόνα 4.4. Χαρακτηριστικά του σήματος του GLONASS (Subirana et al., 2013)

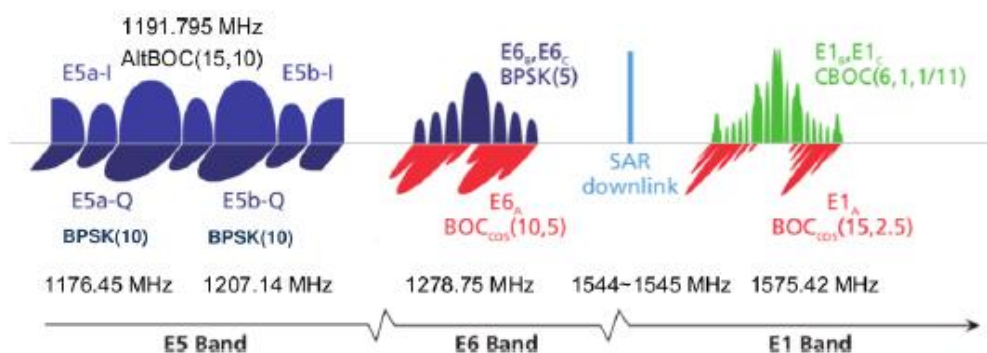
4.4 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ GALILEO

Ο σχεδιασμός για την πλήρως επιχειρησιακή διάταξη των δορυφόρων του GALILEO προβλέπει 27 δορυφόρους Μέσης Περίγειας Τροχιάς και τρεις εφεδρικούς. Το μέσο ύψος των τροχιών έχει σχεδιαστεί να είναι ίσο με 23.222Km και η εκκεντρότητα ίση με 0.002. Τα τροχιακά επίπεδα θα είναι τρία, υπό γωνία κλίσης ίση με 56° σε σχέση με τον ισημερινό. Κάθε τροχιακό επίπεδο φιλοξενεί δέκα δορυφόρους και η ονομαστική περίοδος των τροχιών είναι ίση με 14 ώρες, 4 λεπτά και 45 δευτερόλεπτα. Με αυτόν το σχηματισμό εξασφαλίζεται η διαθεσιμότητα κατ' ελάχιστον έξι δορυφόρων από κάθε σημείο της Γης ανά πάσα χρονική στιγμή και για γωνία αποκοπής μεγαλύτερη από 10° .

Κατά την ολοκλήρωση του προγράμματος, κάθε δορυφόρος του Galileo θα εκπέμπει δέκα μηνύματα πλοήγησης στις συχνότητες E1, E6, E5a και E5b. Ο σχεδιασμός έχει πραγματοποιηθεί με σκοπό να ικανοποιούνται οι ανάγκες των προβλεπόμενων υπηρεσιών οι οποίες είναι:

- Open Service (OS). Πρόκειται για δωρεάν υπηρεσία η οποία θα είναι διαθέσιμη για όλους τους χρήστες ανά τον κόσμο. Η ακρίβειά της θα είναι της τάξης του C/A κώδικα του GPS. Σε συνδυασμό με την υπηρεσία SPS του GPS εκτιμάται ότι θα παρέχονται βελτιωμένες υπηρεσίες εντοπισμού σε απαιτητικά περιβάλλοντα (π.χ. αστικό περιβάλλον).
- Public Regulated Service (PRS). Η υπηρεσία αυτή προβλέπεται να χρησιμοποιηθεί από φορείς ασφαλείας (αστυνομία, στρατός κλπ.) και θα τεθεί υπό κυβερνητικό έλεγχο.
- Commercial Service (CS). Μέσω αυτής της υπηρεσίας προστίθενται δυο επιπλέον σήματα τα οποία θα είναι προστατευμένα με κρυπτογράφηση για εμπορικές εφαρμογές.
- Search And Rescue (SAR). Η υπηρεσία αυτή συνεισφέρει σε αποστολές αναζήτησης και διάσωσης. Οι χρήστες θα μπορούν να εκπέμψουν ένα σήμα κινδύνου το οποίο θα συνδέεται με ένα κέντρο συντονισμού. Στη συνέχεια το σύστημα θα ειδοποιεί τους χρήστες ότι έχει εντοπιστεί η κατάστασή τους.
- Safety of Life (SOL). Η υπηρεσία αυτή είναι ήδη συμβατή με τις απαιτήσεις του διεθνούς οργανισμού πολιτικής αεροπορίας (International Civil Aviation Organization, ICAO) μέσω του συστήματος EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay System). Το GALILEO θα βελτιώσει περαιτέρω την απόδοση του συστήματος.

Παρόμοια με το GPS όλοι οι δορυφόροι μοιράζονται τις ίδιες συχνότητες και τα σήματα διαιρούνται με την τεχνική CDMA. Στην εικόνα 4.5 και στον πίνακα 4.2 απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά του σήματος του GALILEO.



Εικόνα 4.5. Χαρακτηριστικά του σήματος του GALILEO (Subirana et al., 2013)

Πίνακας 4.2. Χαρακτηριστικά του σήματος του GALILEO (Subirana et al., 2013)

Band	Carrier freq. (MHz)	Channel or sig. comp.	Modulation type	Code rate (Mcps)	Data rate (bps)	Services
E1	1575.420	E1-A data	BOC _{cos} (15,2.5)	2.5575	N/A	PRS
		E1-B data	MBOC(6,1,1/11)	1.023	125	OS, CS, SoL
		E1-C pilot			-	
E6	1278.750	E6-A data	BOC _{cos} (10,5)	5.115	N/A	PRS
		E6-B data	BPSK(5)		500	CS
		E6-C pilot			-	
E5a	1176.450	E5a-I data	BPSK(10)	10.23	25	OS
		E5a-Q pilot			-	
E5b	1207.140	E5b-I data	BPSK(10)	10.23	125	OS, CS, SoL
		E5b-Q pilot			-	

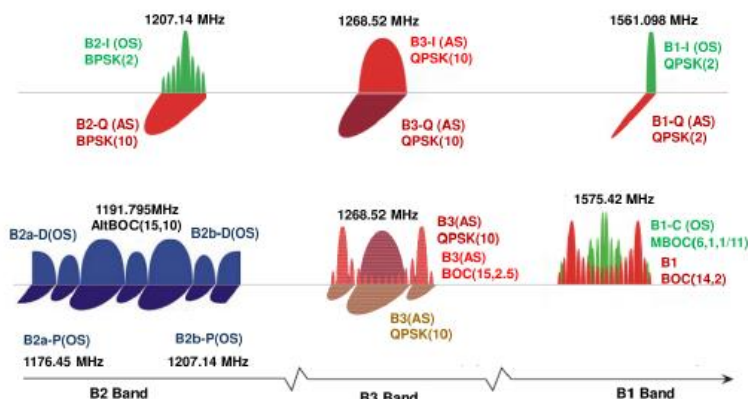
4.5 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΒΕΙΔΟΥ

Η πλήρως επιχειρησιακή διάταξη των δορυφόρων του ΒΕΙΔΟΥ προβλέπει 35 δορυφόρους: 5 δορυφόρους Γεωστατικής Τροχιάς, 3 δορυφόρους Γεωσύγχρονης Τροχιάς με γωνία κλίσης περίπου ίση με 55° από τον ισημερινό και 27 δορυφόρους Μέσης Περίγειας Τροχιάς τοποθετημένους σε τρία τροχιακά επίπεδα με γωνία κλίσης περίπου ίση με 55° από τον ισημερινό, μέσο τροχιακό ύψος ίσο με 21.528km και τροχιακή περίοδο περίπου ίση με 12 ώρες και 53 λεπτά. Ο γεωμετρικός σχεδιασμός προβλέπεται να επαναλαμβάνεται κάθε επτά αστρικές ημέρες. Το τροχιακό ύψος των δορυφόρων Γεωστατικής Τροχιάς είναι της τάξης των 35.786km και είναι τοποθετημένοι στα γεωγραφικά μήκη 58.75°E, 80°E, 110.5°E, 140°E και 160°E.

Οι δορυφόροι των φάσεων II και III του ΒΕΙΔΟΥ επίσης θα εκπέμπουν στη δέσμη L σε τρεις συχνότητες, τις B1, B2 και B3. Ομοίως με το GPS και το GALILEO, το ΒΕΙΔΟΥ χρησιμοποιεί την CDMA μέθοδο. Οι υπηρεσίες που προβλέπονται είναι:

- Open Service. Παρόμοια με την SPS, ελεύθερη για όλους τους χρήστες.
- Authorized Service. Μέσω αυτής της υπηρεσίας παρέχεται ακριβέστερη και αξιόπιστη πληροφορία που αφορά τη θέση, την ταχύτητα και το χρόνο για διαπιστευμένους χρήστες.

Στην εικόνα 4.6 και στους πίνακες 4.3-4.4 απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά του σήματος του ΒΕΙΔΟΥ.



Εικόνα 4.6. Χαρακτηριστικά του σήματος του ΒΕΙΔΟΥ (Subirana et al., 2013)

Πίνακας 4.3. Χαρακτηριστικά του σήματος του BEIDOU (Subirana et al., 2013)

Band	Carrier freq. (MHz)	PRN code	Modulation type	Code rate (Mcps)	Service
B1	1561.098	B1-I	QPSK(2)	2.046	Open
		B1-Q			Authorised
B2	1207.14	B2-I	BPSK(2)	2.046	Open
		B2-Q	BPSK(10)	10.23	Authorised
B3	1268.52	B3	QPSK(10)	10.23	Authorised

Πίνακας 4.4. Χαρακτηριστικά του σήματος του BEIDOU (φάση III) (Subirana et al., 2013)

Band	Carrier freq. (MHz)	PRN code	Modulation type	Code rate (Mcps)	Data rate (bps)	Service
B1	1575.42	B1-C_D	MBOC(6,1,1/11)	1.023	50	Open
		B1-C_P			-	
		B1	BOC(14,2)	2.046	50	Authorised
B2	1191.795	B2-a_D	AltBOC(15,10)	10.23	25	Open
		B2-a_P			-	
		B2-b_D			50	
		B2-b_P			-	
B3	1268.52	B3	QPSK(10)	10.23	500	Authorised
		B3-A_D	BOC(15,2.5)	2.5575	50	
		B3-A_P			-	

4.6 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΣΤΑ GNSS

Οι συντεταγμένες των δορυφόρων και των δεκτών πρέπει να αναφέρονται σε σαφώς ορισμένα συστήματα αναφοράς. Στο κεφάλαιο 3 πραγματοποιήθηκε μια εκτενής περιγραφή των συστημάτων αναφοράς στα οποία αναφέρεται η συνδυασμένη λύση πλοήγησης μέσω GNSS/INS. Σε αυτό το κεφάλαιο η προσοχή εστιάζεται στο Σχεδόν Αδρανειακό και στο Γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς.

Ένα Σχεδόν Αδρανειακό σύστημα αναφοράς κινείται χωρίς να περιστρέφονται οι άξονές του, ωστόσο η αφετηρία του υπόκειται σε επιταχύνσεις, όπως συμβαίνει με το γεώκεντρο καθώς η Γη περιστρέφεται γύρω από τον Ήλιο. Τα στοιχεία της τροχιάς των δορυφόρων των GNSS αναφέρονται σε ένα Σχεδόν Αδρανειακό Σύστημα Αναφοράς.

Το Συμβατικό Ουράνιο Σύστημα Αναφοράς (Conventional Celestial Reference System, CRS) είναι ένα σχεδόν αδρανειακό σύστημα αναφοράς του οποίου η αφετηρία είναι το γεώκεντρο. Ο άξονας των Z είναι κάθετος στο επίπεδο που ορίζεται από τον μέσο ισημερινό κατά την εποχή J2000, ο άξονας των X είναι προσανατολισμένος προς το Μέσο Εαρινό Ισημερινό Σημείο (Mean Vernal Equinox) και ο άξονας των Y συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα.

Το Συμβατικό Επίγειο Σύστημα αναφοράς είναι ένα σύστημα το οποίο περιστρέφεται μαζί με την περιστροφή της Γης και ονομάζεται επίσης Γεωκεντρικό Σύστημα Αναφοράς (Earth Centered-Earth Fixed, ECEF) (βλ. παρ. 3.2). Η υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος ονομάζεται Συμβατικό Επίγειο Πλαίσιο Αναφοράς (Conventional Terrestrial Reference Frame, CTRF) και ορίζεται από τις συντεταγμένες ενός συνόλου σημείων στη γήινη επιφάνεια τα οποία θεωρούνται σημεία αναφοράς. Ένα παράδειγμα Συμβατικού Επιγείου Πλαισίου Αναφοράς είναι το International Terrestrial Reference Frame (ITRF) το οποίο παρουσιάστηκε από την International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) και ενημερώνεται ετησίως.

Τα στοιχεία που αφορούν τις τροχιές των δορυφόρων υπολογίζονται στο Συμβατικό Ουράνιο Σύστημα Αναφοράς και στη συνέχεια μετασχηματίζονται στο Γεωκεντρικό Σύστημα Αναφοράς για να μπορούν να είναι συμβατά με τα επίγεια δεδομένα (βλ. εικόνα 4.7).

Οι παρακάτω εξισώσεις συνοψίζουν αυτόν τον μετασχηματισμό.

Για κάθε εποχή t , ο μετασχηματισμός των συντεταγμένων μπορεί να εκφραστεί ως εξής (Subirana et al., 2013):

$$[\text{TRF}] = R_M(t) R_S(t) N(t) P(t) [\text{CRF}] \quad (4.1)$$

και αντίστροφα

$$[\text{CRF}] = P^T(t) N^T(t) R_S^T(t) R_M^T(t) [\text{TRF}] \quad (4.2)$$

Όπου:

[CRF]: το διάνυσμα των συντεταγμένων στο CRF

[TRF]: το διάνυσμα των συντεταγμένων στο TRF

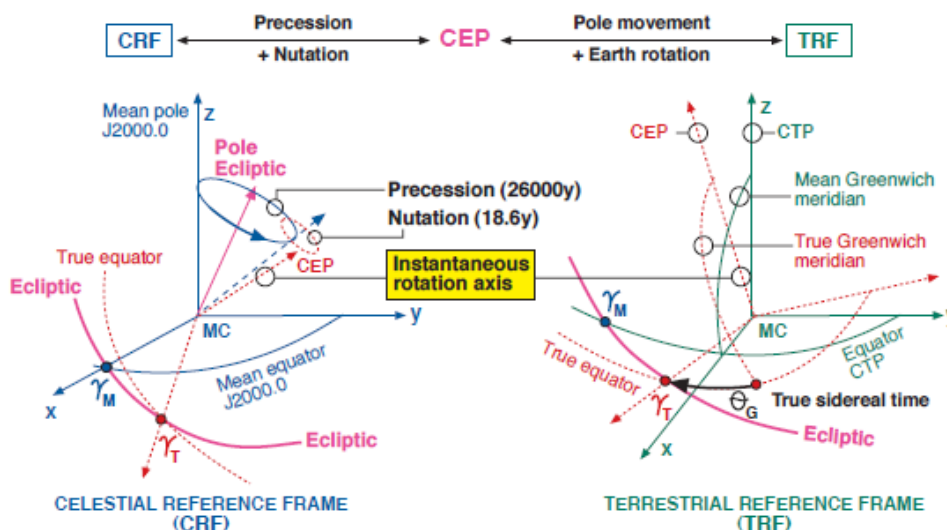
Η συνολική κίνηση του άξονα περιστροφής αναλύεται σε δύο συνιστώσες: Την Μετάπτωση (Precession) και την Κλόνιση (Nutation)

P: Ο πίνακας μετασχηματισμού που σχετίζεται με την Μετάπτωση της εποχής (t) και την εποχή αναφοράς

N: Ο πίνακας μετασχηματισμού που σχετίζεται με την Κλόνιση της εποχής (t) και την εποχή αναφοράς

R_S : Ο πίνακας μετασχηματισμού που σχετίζεται με την περιστροφή της Γης

R_M : Ο πίνακας μετασχηματισμού που σχετίζεται με την κίνηση των πόλων.



Εικόνα 4.7. Μετασχηματισμός ανάμεσα στο CRF και το TRF (Subirana et al., 2013)

4.6.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ GPS (World Geodetic System, WGS-84)

Από το 1987 το GPS χρησιμοποιεί το WGS-84 (βλ. εικόνα 4.8), το οποίο έχει αναπτυχθεί από το αμερικάνικο υπουργείο εθνικής αμύνης. Η αρχική του εφαρμογή πραγματοποιήθηκε μέσω ενός συνόλου άνω των χιλίων επίγειων σημείων. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν συνεχόμενες βελτιώσεις μέσω διαφόρων υλοποιήσεων του ITRF. Για παράδειγμα, οι υλοποιήσεις WGS-84(G730) και WGS-84(G873) αντιστοιχούν στα ITRF92 και ITRF94 αντίστοιχα. Το βελτιωμένο πλαίσιο WGS-84(G1150) παρουσιάστηκε το 2002 και προσεγγίζει το ITRF2000 σε επίπεδο εκατοστού. Αντίστοιχα το WGS-84(G1762) είναι συμβατό με το ITRF08 σε επίπεδο εκατοστού.

Ellipsoid			
Semi-major axis of the ellipse	a		6 378 137.0 m
Flattening factor	f		1/298.257 223 563
Earth's angular velocity	ω_E		$7\,292\,115.0 \cdot 10^{-11}$ rad/s
Gravitational constant	μ		$3\,986\,004.418 \cdot 10^8$ m ³ /s ²
Speed of light in vacuum	c		$2.997\,924\,58 \cdot 10^8$ m/s

Εικόνα 4.8. Παράμετροι του WGS-84 (Subirana et al., 2013)

4.6.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ GLONASS (Parametry Zemli 1990 ,PZ-90)

Τα στοιχεία των εκπεμπόμενων εφημερίδων του GLONASS αναφέρονται στο PZ-90 (βλ. εικόνα 4.9). Όπως και το WGS-84, πρόκειται για ένα γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς. Σύμφωνα με το σχέδιο εκμοντερνισμού του GLONASS, από τις 20 Σεπτεμβρίου 2007 το σύστημα χρησιμοποιεί το PZ-90.02 το οποίο είναι η ενημερωμένη έκδοση του PZ-90 και προσεγγίζει καλύτερα το ITRF2000. Από το 2014 και μετά χρησιμοποιείται η ανανεωμένη έκδοση του PZ-90.2, το PZ-90.11.

Ellipsoid			
Semi-major axis of the ellipse	a		6 378 136.0 m
Flattening factor	f		1/298.257 839 303
Earth's angular velocity	ω_E		$7\,292\,115.0 \cdot 10^{-11}$ rad/s
Gravitational constant	μ		$3\,986\,004.4 \cdot 10^8$ m ³ /s ²
Speed of light in a vacuum	c		$2.997\,924\,58 \cdot 10^8$ m/s
Second zonal harmonic coefficient	J_2^0		$1\,082\,625.75 \cdot 10^{-9}$

Εικόνα 4.9. Παράμετροι των PZ-90 και PZ-90.02. (Subirana et al., 2013)

4.6.3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ GALILEO (Galileo Terrestrial Reference Frame, GTRF)

Βάσει σχεδιασμού, το GTRF πρέπει να είναι συμβατό με το εκάστοτε ITRF σε επίπεδο 3 εκατοστών. Η συντήρησή του είναι η κύρια λειτουργία του Galileo Geodetic Service Provider (GGSP), μιας επιτροπής η οποία απαρτίζεται από επτά ιδρύματα και στην οποία προΐσταται το GeoForschungsZentrum Potsdam. Οι συνδέσεις με το ITRF πραγματοποιούνται και ελέγχονται από σταθμούς αναφοράς που είναι μέρος του ITRF και με άλλες γεωδαιτικές τεχνικές όπως η Very Long Base Interferometry (VLBI).

4.6.4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΒΕΙΔΟΥ (China Geodetic Coordinate System, CGCS2000)

Το σύστημα αναφοράς του Βείδου είναι συνδεδεμένο με το ITRF97 στην εποχή 2000.0. Οι παράμετροι του συστήματος απεικονίζονται στην εικόνα 4.10.

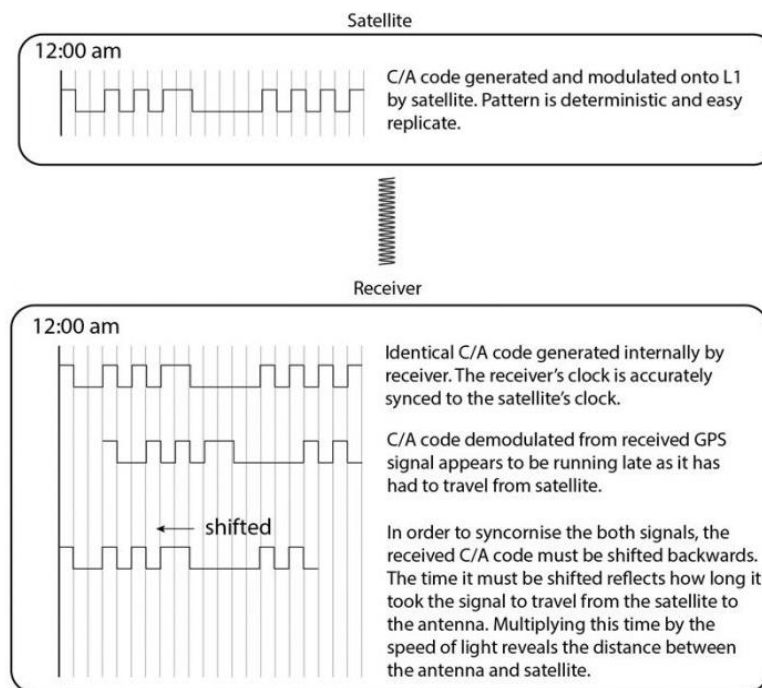
Ellipsoid			
Semi-major axis of the ellipse	a		6 378 137.0 m
Flattening factor	f		1/298.257 222 101
Earth's angular velocity	ω_E		$7\,292\,115.0 \cdot 10^{-11}$ rad/s
Gravitational constant	μ		$3\,986\,004.418 \cdot 10^8$ m ³ /s ²
Speed of light in a vacuum	c		$2.997\,924\,58 \cdot 10^8$ m/s

Εικόνα 4.10. Παράμετροι του CGCS2000. (Subirana et al., 2013)

4.7 ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΜΕΣΩ GNSS

Συνηθέστερα ο εντοπισμός μέσω GNSS επιτυγχάνεται με τη μέθοδο για την οποία έχουν σχεδιαστεί αυτά τα συστήματα, με την ταύτιση δηλαδή του εκπεμπόμενου κώδικα (βλ. εικόνα 4.11).

Οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται με βάση τους μετρητικούς κώδικες βασίζονται στο χρόνο διάδοσης του σήματος. Ο κάθε δορυφόρος εκπέμπει ένα κωδικοποιημένο σήμα και οι δέκτες είναι εξοπλισμένοι με ένα σύστημα αναπαραγωγής του ίδιου κώδικα. Υπολογίζοντας το χρόνο που απαιτείται να διανυθεί για να πραγματοποιηθεί η ταύτιση του εκπεμπόμενου και του αναπαραγόμενου σήματος υπολογίζεται η απόσταση ανάμεσα στο δέκτη και το δορυφόρο. Εξαιτίας όμως του σφάλματος χρονομέτρου του δέκτη η μετρούμενη απόσταση απέχει από την πραγματική, γι' αυτό και ονομάζεται «ψευδοαπόσταση».



Εικόνα 4.11. Ταύτιση κώδικα GPS. (Πηγή: <http://www.oxts.com/what-is-gnss/>)

Μέσω των μετρήσεων κώδικα και λόγω του μεγάλου μήκους παλμού που διαθέτουν οι πολιτικού σκοπού κώδικες PRN, η ακρίβεια του εντοπισμού είναι της τάξεως των λίγων μέτρων. Από τη στιγμή που θα εγκλωβίσει ο δέκτης το σήμα μπορεί να παρακολουθήσει τον παλμό με ακρίβεια ίση με 1/100 του μήκους παλμού. Επομένως μπορεί να παρακολουθήσει την απόσταση με ακρίβεια ≈ 29.3 m για τον κώδικα C/A, στην περίπτωση του GPS.

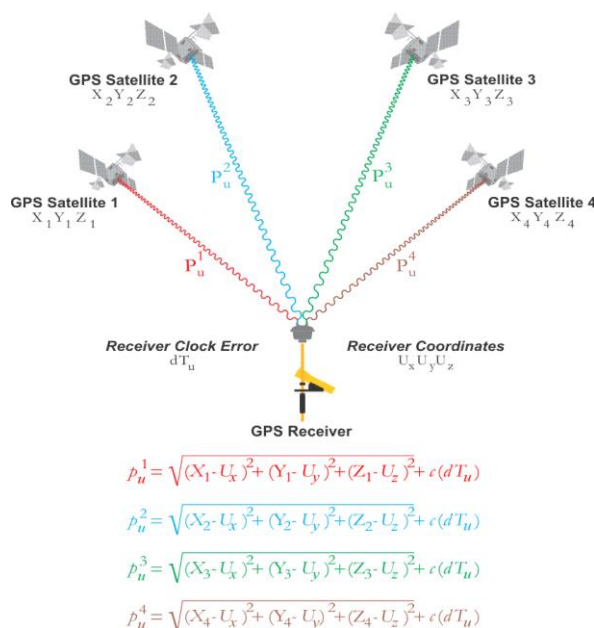
Μια διαφορετική προσέγγιση είναι η παρακολούθηση των ταλαντώσεων των φερουσών συχνοτήτων οι οποίες έχουν μικρό μήκος κύματος και μπορούν να οδηγήσουν σε μεγαλύτερης ακρίβειας εντοπισμό (ταύτιση φάσεων). Για αυτές τις εφαρμογές απαιτείται ειδικός εξοπλισμός ο οποίος δεν απευθύνεται στο μέσο χρήστη του συστήματος και είναι στις περισσότερες περιπτώσεις αρκετά δαπανηρός (γεωδαιτικοί δέκτες και κεραίες GNSS). Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια επικρατεί μια τάση δημιουργίας συστημάτων χαμηλού κόστους, όπως είναι τα u-blox, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται υπό συνθήκες ακρίβεια παραπλήσια με εκείνη των γεωδαιτικών δεκτών (Κωνσταντάς, 2019).

Το πρόβλημα κατά τον εντοπισμό με ταύτιση φάσεων είναι ότι οι φέρουσες συχνότητες είναι αρμονικές ταλαντώσεις. Στην περίπτωση του κώδικα, ο δέκτης μπορεί να αναγνωρίσει ποια ψηφία του κώδικα λαμβάνει ενώ οι ταλαντώσεις της φέρουσας συχνότητας είναι όλες ίδιες μεταξύ τους. Στη συνέχεια θα πρέπει να υπολογιστεί η ασάφεια φάσης (carrier phase ambiguity), ο ακέραιος αριθμός δηλαδή των πλήρων ταλαντώσεων που έχει πραγματοποιήσει το σήμα από τη στιγμή που έφυγε από το δορυφόρο μέχρι τη στιγμή που πραγματοποιήθηκε η λήψη του στο δέκτη. Για λόγους πληρότητας ενδεικτικά αναφέρεται η δυσκολία αυτών των υπολογισμών και κάποιοι αλγόριθμοι υπολογισμού όπως: Sigma-depending rounding, FARA (Fast Ambiguity Resolution Approach), LAMDA (Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment) κ.α.

4.7.1 ΑΠΟΛΥΤΟΣ Η ΑΥΤΟΝΟΜΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΜΕΣΩ GNSS

Οι δύο κύριες κατηγορίες εντοπισμού μέσω GNSS είναι ο απόλυτος και ο σχετικός εντοπισμός. Επίσης υπάρχει διαχωρισμός σε στατικό και κινηματικό εντοπισμό ανάλογα με το εάν ο δέκτης που λαμβάνει τις παρατηρήσεις GNSS είναι σταθερός ή κινείται.

Κατά τον απόλυτο εντοπισμό θέσης, ο δέκτης λαμβάνει και ταυτίζει τα εκπεμπόμενα σήματα και τους μετρητικούς κώδικες από τους δορυφόρους. Πραγματοποιώντας μια οπισθοτομία στο χώρο, απαιτούνται κατ' ελάχιστον τέσσερις δορυφόροι για τον υπολογισμό των αγνώστων μεταβλητών οι οποίες είναι οι συντεταγμένες X,Y,Z και το σφάλμα του χρονομέτρου του δέκτη (βλ. εικόνα 4.12).



Εικόνα 4.12. Αυτόνομος προσδιορισμός θέσης μέσω GNSS. (Πηγή: <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1724>)

Η εξίσωση παρατήρησης της ψευδοαπόστασης είναι (Φωτίου, Πικριδάς 2012):

$$P_A^i = \rho_A^i + c\Delta\tau + c\delta^A - c\delta^i + e_A^i \quad (4.3)$$

Όπου:

ρ_A^i : Η γεωμετρική απόσταση ανάμεσα σε δορυφόρο και δέκτη.

c : Η ταχύτητα διάδοσης του σήματος, ίση με την ταχύτητα του φωτός = 299.792,458 m/sec.

δ^A και δ^i : Τα σφάλματα των ρολογιών του δέκτη και του δορυφόρου.

$\Delta\tau$: Η χρονική καθυστέρηση λόγω μετάδοσης του σήματος στην ατμόσφαιρα, στα εσωτερικά κυκλώματα του δορυφόρου και του δέκτη .

e_A^i : Το τυχαίο σφάλμα της μέτρησης (θόρυβος).

Ενδεικτικά, στον πίνακα 4.5 αναγράφονται οι ακρίβειες που επιτυγχάνονται μέσω του απόλυτου εντοπισμού και παρατηρήσεις μετρητικού κώδικα:

Πίνακας 4.5. Ακρίβειες των GNSS με απόλυτο εντοπισμό και μετρήσεις κώδικα (Subirana et al., 2013)

ΣΥΣΤΗΜΑ	ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑ	ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑ	ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΧΡΟΝΟΥ
GPS (C/A)	13m	22m	40ns
GLONASS (C/A)	28m	60m	1μs
GALILEO (OS, CS), single freq	15m/24m	35m	30ns
GALILEO (OS, CS), dual freq	4m	8m	30ns
GALILEO (PRS), single freq	15m/24m	35m	30ns
GALILEO (PRS), dual freq	6.5m	8m	30ns
BEIDOU (Phase II)	25m	30m	50ns
BEIDOU (Phase III)	10m	n/a	20ns

Οι αναγραφόμενες τιμές αρκετά συντηρητικές. Συγκεκριμένα για το GPS, στην πράξη οι οριζοντιογραφικές και υψομετρικές ακρίβειες είναι της τάξεως των 7m και 12m αντίστοιχα. Μετά την ολοκλήρωση του εκμοντερνισμού του συστήματος και την εισαγωγή της L5, οι οριζοντιογραφικές ακρίβειες για πολιτικές εφαρμογές αναμένεται να είναι της τάξης των 2-3m (Subirana et al., 2013).

4.7.2 ΑΚΡΙΒΗΣ ΑΠΟΛΥΤΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ (PRECISE POINT POSITIONING, PPP)

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί εφαρμογές ακριβούς προσδιορισμού θέσης μέσω των οποίων μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια η θέση ενός δέκτη σε οποιοδήποτε σημείο της γήινης επιφάνειας. Η τεχνική αυτή που ονομάζεται για λόγους συντομίας PPP (Precise Point Positioning), διακρίνεται για την παγκόσμια κάλυψη, την ακρίβεια και τη διαθεσιμότητά της. Μέχρι στιγμής τα προς επεξεργασία δεδομένα μπορούν να προέρχονται από το GPS ή το GPS σε συνδυασμό με το

GLONASS και ο δέκτης μπορεί να βρίσκεται σε διαδικασία μέτρησης στατικού ή κινηματικού εντοπισμού.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι ψευδοαποστάσεις κώδικα και φάσης στις δύο συχνότητες, (όσον αφορά το GPS). Για την επίτευξη της λύσης απαιτείται η χρήση εφημερίδων ακριβείας και διορθώσεων των δορυφορικών χρονομέτρων, όπως εξάγονται από την International Gns Service (IGS). Για τα δεδομένα κώδικα και φάσης από δέκτη δύο συχνοτήτων εφαρμόζονται οι γραμμικοί συνδυασμοί «ελεύθεροι ιονόσφαιρας» (L3 iono-free) για την ελαχιστοποίηση του ιονοσφαιρικού σφάλματος. Ο γραμμικός αυτός συνδυασμός διαμορφώνεται ως εξής:

$$L3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2) \quad (4.4)$$

Αυτός ο γραμμικός συνδυασμός αυξάνει το θόρυβο και δεν πρέπει να χρησιμοποιείται σε μικρές βάσεις. Το γεγονός όμως ότι δεν εξαρτάται από την ιονόσφαιρα τον καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμο.

Οι εκτιμήσεις των συντεταγμένων αναφέρονται στην τρέχουσα εποχή της εφημερίδας ακριβείας που χρησιμοποιείται και μετασχηματίζονται σε άλλα συστήματα, π.χ. στο ITRFyy.

Η ποιότητα της λύσης εξαρτάται από τη διάρκεια και την ποιότητα των δεδομένων, τον αριθμό και τη διάταξη των παρατηρούμενων δορυφόρων και το ρυθμό καταγραφής των παρατηρήσεων. Δεδομένα μεγάλης διάρκειας παρατηρήσεων συνεισφέρουν σημαντικά στην επίλυση των ασαφειών φάσης. Γενικά, η ακρίβεια σε εφαρμογές μετεπεξεργασίας για δεδομένα δύο συχνοτήτων διάρκειας μίας ή δύο ωρών, είναι της τάξης των μερικών cm, ενώ για δεδομένα μίας συχνότητας, η ακρίβεια είναι της τάξης των 20cm χωρίς να βελτιώνεται με αύξηση της διάρκειας του χρόνου παρατήρησης. (Φωτίου-Πικριδάς, 2012).

4.7.3 ΣΧΕΤΙΚΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΜΕΣΩ GNSS

Στο σχετικό εντοπισμό θέσης χρησιμοποιούνται ταυτόχρονες παρατηρήσεις GNSS από τουλάχιστον δύο δέκτες: Ένα δέκτη τοποθετημένο σε σημείο με γνωστές συντεταγμένες (base) και ένα δέκτη τοποθετημένο στο σημείο που πρέπει να εντοπιστεί (rover). Μέσω του σχετικού εντοπισμού υπολογίζονται οι σχετικές διαφορές DX,DY,DZ μεταξύ των base και rover. Για εφαρμογές σχετικού εντοπισμού πραγματικού χρόνου, ο εξοπλισμός που απαιτείται, εκτός από τους δέκτες GNSS, περιλαμβάνει και έναν πομποδέκτη που επιτρέπει μέσω ραδιοζεύξης να επικοινωνούν μεταξύ τους οι δέκτες και να αποστέλλονται οι διορθώσεις στον rover.

Για τις εφαρμογές πραγματικού χρόνου, ο σχετικός εντοπισμός ονομάζεται και διαφορικός εντοπισμός (Differential Positioning, DGPS ή DGNSS) στην περίπτωση που τα παρατηρούμενα μεγέθη είναι οι μετρητικοί κώδικες. Μέσω του DGPS μπορούν υπό συνθήκες να επιτευχθούν οριζοντιογραφικές ακρίβειες της τάξεως του 1m και έχει εφαρμογή στη ναυσιπλοΐα, τη συλλογή δεδομένων για εφαρμογές GIS όπου δεν απαιτείται τοπογραφική ακρίβεια κ.α. Όταν τα παρατηρούμενα μεγέθη είναι οι φάσεις των φερουσών συχνοτήτων, χρησιμοποιείται ο όρος Real Time Kinematic (RTK) (Φωτίου-Πικριδάς, 2012).

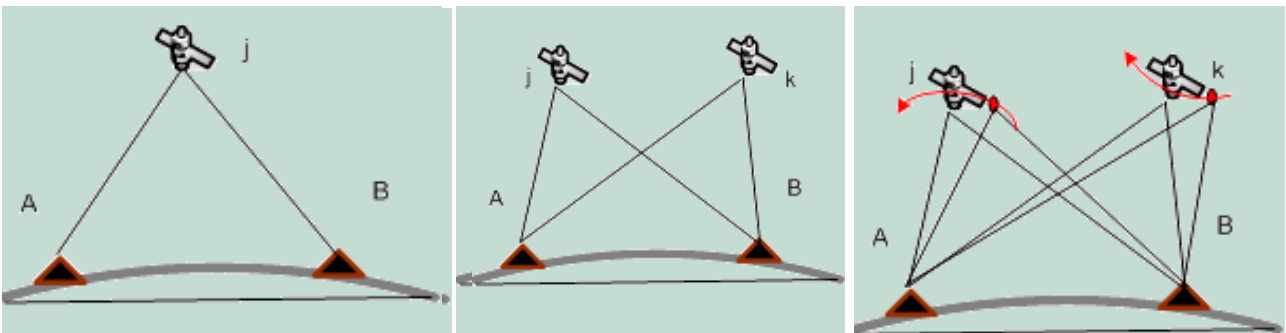
Κατά τον σχετικό εντοπισμό με παρατηρήσεις φάσεων, η ακρίβεια που επιτυγχάνεται στις τρεις διαστάσεις είναι της τάξης των λίγων cm για κινηματικές εφαρμογές, ενώ για στατικές εφαρμογές μπορεί να φτάσει να είναι καλύτερη κι από 1-2cm, με την υψομετρική ακρίβεια να είναι κατά κανόνα 2-3 φορές μικρότερη από την οριζοντιογραφική.

Κατά τον σχετικό εντοπισμό χρησιμοποιούνται γραμμικοί συνδυασμοί αντί των πρωτογενών παρατηρήσεων GNSS. Η χρήση αυτών των γραμμικών συνδυασμών συνεισφέρει στην απαλοιφή ή την ελαχιστοποίηση των περισσότερων από τα συστηματικά σφάλματα, μερικά από τα οποία είναι δύσκολο να περιγραφούν πλήρως μαθηματικά (βλ. εικόνα 4.13).

Απλές διαφορές: Η απλή διαφορά ορίζεται ως η διαφορά των ταυτόχρονων παρατηρήσεων μεταξύ των δύο δεκτών ως προς τον ίδιο δορυφόρο (between receivers difference). Μέσω των απλών διαφορών απαλείφονται τα κοινά σφάλματα που οφείλονται στους δορυφόρους (πρωτίστως το σφάλμα ρολογιού του δορυφόρου και το τροχιακό σφάλμα).

Διπλές διαφορές: Η διπλή διαφορά ορίζεται ως η διαφορά δύο ταυτόχρονων απλών διαφορών δύο δεκτών ως προς δύο δορυφόρους (between receiver-satellite difference). Μέσω των διπλών διαφορών απαλείφονται τα κοινά σφάλματα των δεκτών και κυρίως τα σφάλματα των χρονομέτρων των δεκτών, τα οποία είναι κατά κανόνα αρκετά σημαντικά.

Τριπλές διαφορές: Η τριπλή διαφορά αφορά στις παρατηρήσεις φάσης και ορίζεται από τη διαφορά δύο διπλών διαφορών ως προς δύο διαφορετικές εποχές. Με τις τριπλές διαφορές απαλείφονται οι ακέραιες ασάφειες φάσης και δίνεται η δυνατότητα μιας a-priori εκτίμησης των συντεταγμένων που συνεισφέρει στην επίλυση των ασαφειών φάσης των διπλών διαφορών.



Εικόνα 4.13. Απλές, Διπλές και Τριπλές διαφορές. (Πηγή: https://nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT-KANPUR/ModernSurveyingTech/lectureB_15/B_15_6relative.htm)

4.8 ΠΗΓΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΤΟΝ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ

Τα σφάλματα που σχετίζονται με τον δορυφορικό εντοπισμό μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες:

1. Τα σφάλματα που σχετίζονται με τους δορυφόρους.

Σφάλμα τροχιάς ή δορυφορικής εφημερίδας: Είναι η απόκλιση της θέσης του δορυφόρου από την πραγματική του θέση, όπως προκύπτει από τις δορυφορικές εφημερίδες. Στον απόλυτο εντοπισμό έχει άμεσο αντίκτυπο στον προσδιορισμό της θέσης του δέκτη, ενώ στο σχετικό εντοπισμό και για τις συνήθεις αποστάσεις των λίγων χιλιομέτρων μεταξύ Base και Rover, το σφάλμα είναι κοινό και για τους δύο δέκτες και απαλείφεται. Διακρίνονται δύο είδη εφημερίδων/τροχιών. Η εκπεμπόμενη εφημερίδα (broadcast ephemeris) και η εφημερίδα ακριβείας (precise ephemeris). Για τις διάφορες τροχιές οι ακρίβειες έχουν ως εξής:

- Εκπεμπόμενη τροχιά (broadcast orbit): $\approx 1\text{m}$
- Τελικές τροχιές IGS μετά από 13 ημέρες (IGS final orbits): $\approx 2.5\text{cm}$
- Γρήγορες τροχιές IGS μετά από 17 ώρες (IGS rapid orbits): $\approx 2.5\text{cm}$
- Πολύ γρήγορες τροχιές IGS μετά από 3 ώρες (IGS ultra rapid orbits): $\approx 5\text{cm}$
- Τροχιές IGS σε πραγματικό χρόνο (IGS ultra rapid predicted orbits): $\approx 5\text{cm}$

Σφάλμα ρολογιού του δορυφόρου: Οφείλεται στο μη συγχρονισμό του ατομικού ρολογιού του δορυφόρου με την ενιαία κλίμακα χρόνου του συστήματος. Για κάθε δορυφόρο ο υπολογισμός του σφάλματος υπολογίζεται από παραμέτρους που συμπεριλαμβάνονται στο μήνυμα πλοήγησης με ακρίβεια της τάξης των 5-10 ns. Κατά την περίπτωση μετεπεξεργασίας των δεδομένων του απόλυτου εντοπισμού (πχ PPP), μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκτιμήσεις με παραμέτρους χρόνου της IGS ακριβείας $<0.1\text{ ns}$ (Φωτίου – Πικριδάς, 2012). Στον σχετικό εντοπισμό απαλείφεται με τη χρήση κατάλληλων γραμμικών συνδυασμών.

Σφάλμα επιλεκτικής διαθεσιμότητας (Αφορά το GPS και είναι ανενεργό από τις αρχές του 2000): Πρόκειται για μία μέθοδο σκόπιμης μείωσης της ακρίβειας του σήματος του GPS. Με ενεργή την επιλεκτική διαθεσιμότητα η ακρίβεια του συστήματος κατά τον αυτόνομο εντοπισμό υπολογιζόταν στα 100m οριζοντιογραφικά, 156m υψομετρικά και στα 340ns για τον υπολογισμό του χρόνου.

2. Τα σφάλματα που σχετίζονται με τους δέκτες

Σφάλμα του ρολογιού του δέκτη: Για την παραγωγή των αντιγράφων του κώδικα και την τήρηση της κλίμακας του χρόνου, ο δέκτης χρησιμοποιεί ένα συνηθισμένο ταλαντωτή από κρυστάλλους χαλαζία ο οποίος είναι σαφώς χαμηλότερου κόστους και μικρότερης ακρίβειας από τα ατομικά ρολόγια που χρησιμοποιούνται στους δορυφόρους. Ο μη συγχρονισμός του ρολογιού του δέκτη με το χρόνο GPS οδηγεί σε ένα αρκετά σημαντικό σφάλμα το οποίο δεν πρέπει να αγνοηθεί. Στον απόλυτο προσδιορισμό το σφάλμα υπολογίζεται ταυτόχρονα με τον υπολογισμό της θέσης ενώ στον σχετικό εντοπισμό το σφάλμα σχεδόν απαλείφεται.

Σφάλμα μεταβολής του κέντρου φάσης της κεραίας: Το σημείο αναφοράς της κεραίας (Antenna Reference Point, ARP) ορίζεται ως το μηχανικό, γεωμετρικό ή φυσικό κέντρο της κεραίας. Το ηλεκτρικό κέντρο, ή κέντρο φάσης της κεραίας (Antenna Phase Center, APC) ορίζεται ως το σημείο στο οποίο πραγματοποιείται η λήψη των δορυφορικών σημάτων. Το κέντρο φάσης της κεραίας δεν ταυτίζεται με το μηχανικό κέντρο της κεραίας και δεν είναι ένα σημείο το οποίο μπορεί να μετρηθεί άμεσα. Στην πραγματικότητα είναι διαφορετικό για κάθε φέρουσα συχνότητα και μεταβάλλεται ανάλογα με την κίνηση του δορυφόρου ως προς το δέκτη. Οι μεταβολές των κέντρων φάσης γύρω από μια κρίσιμη θέση είναι της τάξης των λίγων mm και είναι αρκετά σημαντικές σε εφαρμογές ακριβείας. Για την αντιμετώπιση αυτών των σφαλμάτων υπάρχουν διαθέσιμα μοντέλα βαθμονόμησης για τους περισσότερους τύπους κεραιών GNSS.

Τυχαίο σφάλμα της παρατήρησης ή θόρυβος: Είναι αναπόφευκτο σε κάθε διαδικασία παρατηρήσεων όπου χρησιμοποιούνται όργανα μετρήσεων. Ο όρος τυχαίο αποδίδεται για το σφάλμα το οποίο τείνει στο μηδέν όσο αυξάνονται οι επαναλήψεις της παρατήρησης.

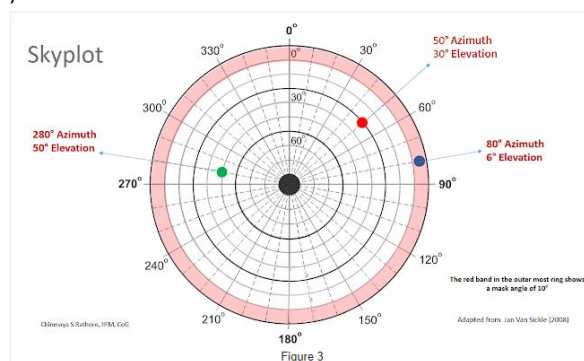
Σφάλμα αβεβαιότητας γνωστού σημείου στον σχετικό εντοπισμό: Τυχόν σφάλμα στις συντεταγμένες του δέκτη αναφοράς (base) στον σχετικό εντοπισμό, σαφώς μεταφέρεται στον υπολογισμό της θέσης του rover.

3. Τα σφάλματα που σχετίζονται με τη διάδοση του σήματος.

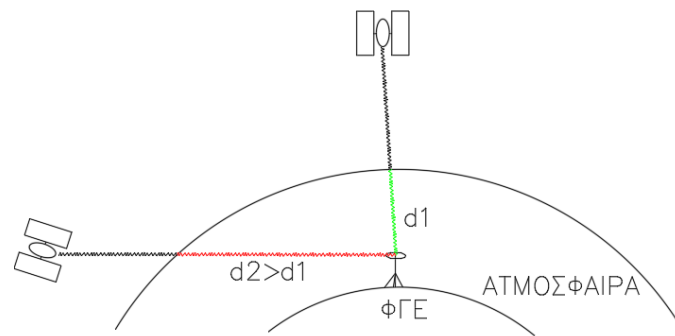
Τροποσφαιρικό σφάλμα: Το τμήμα της τροπόσφαιρας είναι το χαμηλότερο τμήμα της ατμόσφαιρας, έχει μεταβλητό πάχος και εκτείνεται σε ύψος 9Km στους πόλους μέχρι 16Km στον ισημερινό. Το τροποσφαιρικό σφάλμα δημιουργείται λόγω της διάθλασης στο μη ιονισμένο τμήμα της τροπόσφαιρας, όπου του σήμα από τους δορυφόρους παρουσιάζει καθυστερήσεις. Αντίθετα από την ιονόσφαιρα, η καθυστέρηση είναι η ίδια για όλες της συχνότητες των ραδιοκυμάτων μέχρι 15GHz. Το τροποσφαιρικό σφάλμα μπορεί να υπολογιστεί από γνωστά τοπικά μοντέλα με ακρίβεια μερικών cm για μικρές βάσεις.

Ιονοσφαιρικό σφάλμα: Το τμήμα της ιονόσφαιρας εκτείνεται από 50 έως 1000 Km από τη γήινη επιφάνεια και χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη ιόντων και ελεύθερων ηλεκτρονίων. Η ιονόσφαιρα αποτελεί μέσο διασποράς για τα σήματα των παρατηρήσεων GNSS, δηλαδή ο δείκτης διάθλασης εξαρτάται από τη συχνότητα του σήματος. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος της χρήσης δύο τουλάχιστον συχνοτήτων στα GNSS. Με δέκτες διπλής συχνότητας μπορεί να ελαχιστοποιηθεί το ιονοσφαιρικό σφάλμα αν χρησιμοποιηθεί ένας κατάλληλος γραμμικός συνδυασμός πρωτογενών παρατηρήσεων ψευδοαποστάσεων από κώδικες ή φάσεις (βλ. παρ.4.7.2-4.7.3).

Γενικότερα, για την αντιμετώπιση των ατμοσφαιρικών σφαλμάτων συστήνεται η αποκοπή των παρατηρήσεων από δορυφόρους οι οποίοι βρίσκονται σε χαμηλή γωνία ύψους και των οποίων το σήμα ταξιδεύει για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα στα στρώματα της ατμόσφαιρας. Συνήθως επιλέγεται ένα κατώφλι, γνωστό και ως γωνία αποκοπής (cut-off angle ή elevation mask), ίσο με $10^\circ - 15^\circ$ (βλ. εικόνες 4.14-4.15)



Εικόνα 4.14. Απόσπασμα από αναπαράσταση των δορυφόρων στον ουρανό (Skyplot). Η κόκκινη ζώνη υποδεικνύει γωνία αποκοπής ίση με 10° . (Πηγή: <http://graticules.blogspot.com/2017/02/planning-gps-survey-part-3-using-online.html>)



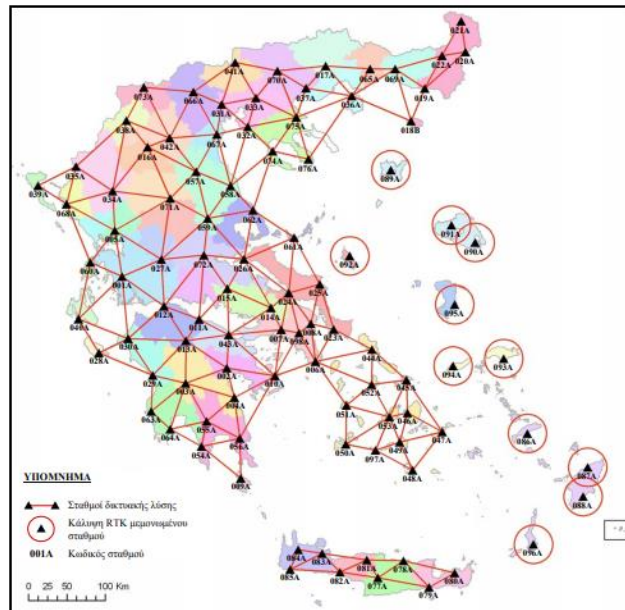
Εικόνα 4.15. Η σχέση της απόστασης που διανύει το σήμα GNSS στα στρώματα της ατμόσφαιρας και της γωνίας ανύψωσης.

Σφάλμα λόγω πολυανάκλασης (multipath): Πρόκειται για το σφάλμα που δημιουργείται λόγω της λήψης του σήματος και από έμμεσες διαδρομές εξ' αιτίας της ανάκλασής του σε γειτονικές επιφάνειες. Ο πιο ασφαλής τρόπος απαλοιφής του σφάλματος λόγω πολυανάκλασης είναι η τοποθέτηση του δέκτη σε σημείο μακριά από ανακλαστικές επιφάνειες και η χρήση ειδικά σχεδιασμένων κατασκευών από σπειροειδείς δακτυλίου στις βάσεις των γεωδαιτικών κεραιών (Choke rings).

Σφάλμα ολίσθησης κύκλων: Το σφάλμα ολίσθησης κύκλων προκύπτει σε περιπτώσεις κατά τις οποίες υπάρχουν εμπόδια στην πορεία του δορυφορικού σήματος με αποτέλεσμα την απώλεια λήψης του σήματος. Ο εντοπισμός του σφάλματος ολίσθησης κύκλων είναι βασικό στάδιο κατά την προεπεξεργασία των παρατηρήσεων.

4.9 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ HEPOS

Το Ελληνικό Σύστημα Εντοπισμού HEPOS (HEllenic POsitioning System) έχει δημιουργηθεί και διαχειρίζεται από την «Ελληνικό Κτηματολόγιο» που είναι ο φορέας του Εθνικού Κτηματολογίου στην Ελλάδα. Αποτελείται από ένα δίκτυο 98 μόνιμων σταθμών αναφοράς και ένα κέντρο ελέγχου. Μέσω του HEPOS επιτυγχάνεται εντοπισμός με υψηλή ακρίβεια μέσω απ' ευθείας παρατηρήσεων από τους μόνιμους σταθμούς αναφοράς ή μέσω των δικτυακών τεχνικών VRS (Virtual Reference Station), FKP (Flächen Korrekturparameter) και MAC (Master-Auxiliary Concept), εντός των περιοχών δικτυακής λύσης του συστήματος. Το σύστημα μέχρι στιγμής αξιοποιεί παρατηρήσεις μόνο από το GPS ενώ υπάρχει πρόβλεψη για την αναβάθμισή του. Στην εικόνα 4.16 απεικονίζεται η διάταξη των μόνιμων σταθμών αναφοράς του συστήματος και τα όρια της παρεχόμενης δικτυακής λύσης.



Εικόνα 4.16. Διάγραμμα των σταθμών αναφοράς του HEPOS. (Πηγή: www.hepos.gr)

4.10 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ

Ανεξάρτητα από το γεγονός ότι ο αρχικός σκοπός λειτουργίας των GNSS ήταν καθαρά για στρατιωτικούς σκοπούς, γρήγορα υιοθετήθηκαν από ένα πλήθος εμπορικών και επιστημονικών εφαρμογών.

Μέσω των GNSS παρέχεται εντοπισμός σε πραγματικό χρόνο για εκατομμύρια χρήστες ενώ υποστηρίζονται και υπηρεσίες εντοπισμού υψηλής ακρίβειας. Μπορούν να λειτουργήσουν όλες τις ώρες και υπό όλες τις καιρικές συνθήκες και μπορούν να συνεργαστούν με πληθώρα άλλων συστημάτων.

Ανάλογα με την εφαρμογή, ένας δέκτης GNSS μπορεί να έχει πολύ μικρές διαστάσεις, να ενσωματώνεται σε ένα κινητό τηλέφωνο ή μια φορητή συσκευή με πολύ χαμηλές απαιτήσεις ενέργειας, προσφέροντας πλήρη φορητότητα και η χρήση του μπορεί να αποβεί σωτήρια σε περιπτώσεις ανάγκης.

Ωστόσο, υπάρχουν και αρκετοί περιορισμοί στη χρήση τους. Απαιτείται ανοιχτός ορίζοντας για την απρόσκοπτη λήψη σήματος από τους δορυφόρους, ενώ η εφαρμογή τους σε πυκνοδομημένα αστικά περιβάλλοντα ή σε δασωμένες περιοχές είναι αρκετά επίφοβη και σε πολλές περιπτώσεις απαγορευτική. Επιπλέον, το σήμα των GNSS φτάνει εξασθενημένο στη γήινη επιφάνεια και είναι ιδιαίτερα ευάλωτο σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές οι οποίες εμποδίζουν την αξιοπιστία και λειτουργία του συστήματος. Τέλος, δεν παρέχει πλήρη κάλυψη σε έντονα δυναμικές κινηματικές εφαρμογές, καθώς ο ρυθμός ανανέωσης της πληροφορίας GNSS είναι σχετικά μικρός. Συχνά η μέγιστη συχνότητα βαθμού καταγραφής που μπορεί να επιτευχθεί από έναν δέκτη GNSS είναι το 1Hz αν και σε σύγχρονους δέκτες η συχνότητα αυτή έχει αυξηθεί (σε ορισμένους σύγχρονους γεωδαιτικούς δέκτες μάλιστα, επιτυγχάνεται συχνότητα στα 100Hz).

5. ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ (Inertial Navigation Systems, INS)

5.1 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Τα αδρανειακά συστήματα πλοήγησης είναι αυτόνομα συστήματα τα οποία παρέχουν πληροφορία για τη θέση, την ταχύτητα και τον προσανατολισμό ενός σώματος με την μέθοδο της πλοήγησης με αναμέτρηση. Η πληροφορία πλοήγησης πηγάζει από τη χρήση επιταχυνσιόμετρων για τον υπολογισμό επιταχύνσεων και γυροσκοπίων για τον υπολογισμό γωνιακών μεταβολών. Η συνδυασμένη χρήση τριών επιταχυνσιόμετρων και τριών γυροσκοπίων κατά μήκος ισάριθμων αξόνων, μαζί με κάποια άλλα στοιχεία εξοπλισμού, σχηματίζει μια διάταξη γνωστή σαν Μονάδα Αδρανειακών Μετρήσεων (Inertial Measurements Unit, IMU), μέσω της οποίας επιτυγχάνεται μια ανεξάρτητη τρισδιάστατη λύση πλοήγησης. Η Μονάδα Αδρανειακών Μετρήσεων αποτελείται από το σύνολο των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για την απόκτηση δεδομένων, ενώ το Αδρανειακό Σύστημα Πλοήγησης (Inertial Navigation System, INS) αποτελεί το ευρύτερο υπολογιστικό σύστημα, του οποίου είναι υποσύνολο η IMU και λαμβάνει, επεξεργάζεται, διορθώνει και χρησιμοποιεί τα πρωτογενή δεδομένα των αισθητήρων για τον υπολογισμό της λύσης αδρανειακής πλοήγησης.

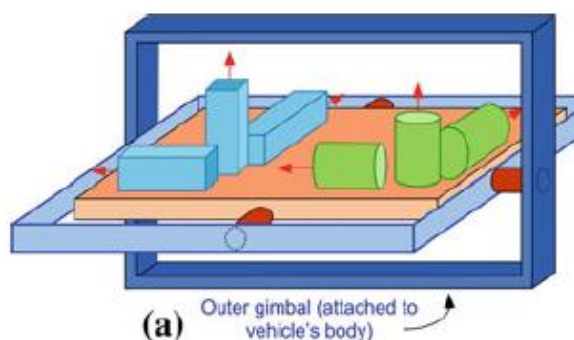
Η υπερισχύουσα φυσική ιδιότητα σε ένα αδρανειακό σύστημα πλοήγησης είναι η επιτάχυνση. Μέσω της επιτάχυνσης μπορούν να υπολογιστούν η ταχύτητα v και η απόσταση s με απλή και διπλή ολοκλήρωση αντίστοιχα.

$$v = \int a \, dt \quad s = \int v \, dt = \iint a \, dt \, dt \quad (5.1-5.2)$$

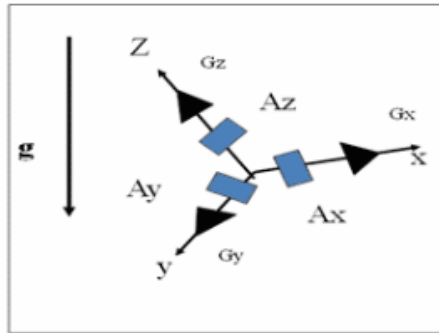
5.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ

Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις για την υλοποίηση των αδρανειακών συστημάτων. Α) Μια σταθερή πλατφόρμα γνωστή σαν gimbal system (βλ. εικόνα 5.1) όπου οι αδρανειακοί αισθητήρες είναι τοποθετημένοι έτσι ώστε ο προσανατολισμός τους να παραμένει παράλληλος στο τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς και Β) μια πλατφόρμα η οποία ακολουθεί τον προσανατολισμό του μέσου πλοήγησης (body frame), γνωστή σαν strapdown system (βλ. εικόνα 5.2).

Στις gimbal system πλατφόρμες οι τιμές των αδρανειακών αισθητήρων αναφέρονται απ'ευθείας στο τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς χωρίς την παρέμβαση κάποιου μετασχηματισμού. Τέτοιες διατάξεις είναι δαπανηρές, μηχανικά περίπλοκες και η χρήση τους είναι περιορισμένη.



Εικόνα 5.1. Gimbal system διάταξη αδρανειακών αισθητήρων (Noureldin et al., 2013)



Εικόνα 5.2. Strapdown διάταξη αδρανειακών αισθητήρων (Πηγή: <https://electricalfundablog.com/strapdown-system/>)

5.3 ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

5.3.1 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΩΝ

Τα μηχανικά επιταχυνσιόμετρα (βλ. εικόνα 5.3) στηρίζουν τη λειτουργία τους στον 2ο νόμο του Νεύτωνα:

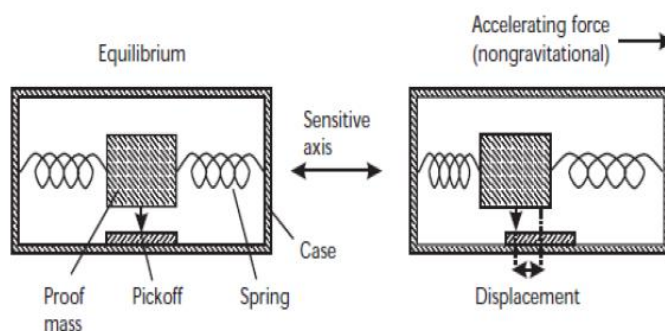
$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (5.3)$$

Όπου \vec{F} : η δύναμη

m: Η μάζα του σώματος

\vec{a} : Η επιτάχυνση του σώματος εξ' αιτίας της \vec{F}

Φέρουν ένα σώμα γνωστής μάζας (proof mass) το οποίο μπορεί να ολισθαίνει απαλλαγμένο από τριβές σε έναν φορέα, με τον οποίο είναι συνδεδεμένο με ένα έλασμα γνωστής σταθεράς. Υπολογίζοντας τη δύναμη που ασκείται στο ελατήριο, προκύπτει η επιτάχυνση.



Εικόνα 5.3. Μηχανικό επιταχυνσιόμετρο (Puro, 2013)

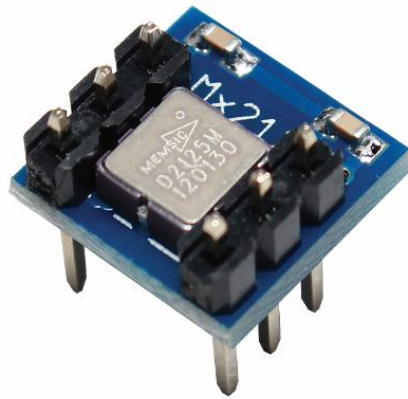
Τα επιταχυνσιόμετρα μπορούν να χωριστούν σε δύο ευρύτερες κατηγορίες: Στα επιταχυνσιόμετρα ανοικτού και κλειστού κύκλου λειτουργίας (open-closed loop).

Στα επιταχυνσιόμετρα ανοικτού κύκλου λειτουργίας προσδιορίζεται η δύναμη που μετατοπίζει τη μάζα από τη θέση ισορροπίας ενώ στα επιταχυνσιόμετρα κλειστού κύκλου προσδιορίζεται το μέτρο της δύναμης που απαιτείται για να διατηρηθεί η μάζα στη θέση ισορροπίας. Τα επιταχυνσιόμετρα

κλειστού κύκλου χρησιμοποιούν ένα σύστημα ανατροφοδότησης το οποίο υπολογίζει τα σφάλματα του συστήματος και της διαδικασίας υπολογισμού, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται ακριβέστερα και πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Εκτός από τα μηχανικά επιταχυνσιόμετρα, οι κύριες κατηγορίες αυτού του τύπου αισθητήρων είναι:

- Πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα. Σε αυτόν τον τύπο των επιταχυνσιομέτρων το σώμα γνωστής μάζας είναι τοποθετημένο πάνω σε έναν πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, συνηθέστερα από χαλαζία ή κεραμικό υλικό, το οποίο παράγει ένα σήμα ανάλογο της δύναμης που παράγεται λόγω των επιταχύνσεων του φορέα. Το σήμα που παράγεται ανιχνεύεται και μετατρέπεται σε ένδειξη της επιτάχυνσης. Αυτά του τύπου οι αισθητήρες εμφανίζουν χαμηλή ευαισθησία και αντοχή στους εξωγενείς παράγοντες, ωστόσο παραμένουν λειτουργικοί σε μεγάλο εύρος τιμών και έχουν υψηλή συχνότητα λειτουργίας (μεγαλύτερη των 10KHz)
- Επιταχυνσιόμετρα που χρησιμοποιούν ηλεκτρικά κυκλώματα. Τα κυριότερα κυκλώματα που χρησιμοποιούνται είναι τα ποτενσιόμετρα, οι γέφυρες Wheatstone και οι συνδυασμοί αντιστάσεων. Χρησιμοποιούνται για να μετατρέψουν τη μηχανική μικρομετακίνηση σε ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο αναλύεται για να προκύψουν οι παρατηρήσεις της επιτάχυνσης.
- Επιταχυνσιόμετρα με πυκνωτές. Σε αυτήν την κατηγορία επιταχυνσιομέτρων χρησιμοποιούνται κυκλώματα πυκνωτών και πηνίων αντί για ηλεκτρικά κυκλώματα. Σε αυτά τα επιταχυνσιόμετρα οι μετακινήσεις του σώματος γνωστής μάζας προκαλούν ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο κύκλωμα, η οποία μπορεί να υπολογιστεί και να οδηγήσει στον προσδιορισμό της επιτάχυνσης.
- Επιταχυνσιόμετρα με σερβομηχανισμούς. Πρόκειται για επιταχυνσιόμετρα όπου η μετατόπιση του σώματος γνωστής μάζας εντοπίζεται από έναν αισθητήρα και μετατρέπεται σε ηλεκτρικό ρεύμα. Το ρεύμα στη συνέχεια διέρχεται σε ένα κύκλωμα ενισχυτών, φιλτράρεται και αφαιρείται ο θόρυβος, διαμορφώνοντας με αυτόν τον τρόπο ένα σήμα διόρθωσης. Το σήμα αυτό εισάγεται ξανά στο σύστημα και με αυτό ανατροφοδοτούνται οι σερβομηχανισμοί ώστε να κάνουν τις απαραίτητες κινήσεις για να διατηρηθεί το σώμα γνωστής μάζας σε ισορροπία. Η συγκεκριμένη κατηγορία αισθητήρων παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία στις παρατηρήσεις ενώ είναι και οι πιο δαπανηροί. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλές επιδόσεις.
- Επιταχυνσιόμετρα μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (Micro Electro Mechanical Systems, MEMS) (βλ. εικόνα 5.4). Πρόκειται για επιταχυνσιόμετρα τα οποία χρησιμοποιούν υλικά όπως ο χαλαζίας ή το πυρίτιο και έχουν ιδιαίτερα πλεονεκτήματα όπως, μικρές διαστάσεις και βάρος, χαμηλές απαιτήσεις σε ενέργεια και μειωμένο κόστος παραγωγής και συντήρησης. Με αυτά τα πλεονεκτήματα η χρήση τους γίνεται ολοένα και πιο διαδεδομένη σε καθημερινές συσκευές όπως κινητά τηλέφωνα, «έξυπνες» συσκευές καθώς και σε Συστήματα ΜΗ Επανδρωμένων Αεροσκαφών (ΣΜΗΕΑ).

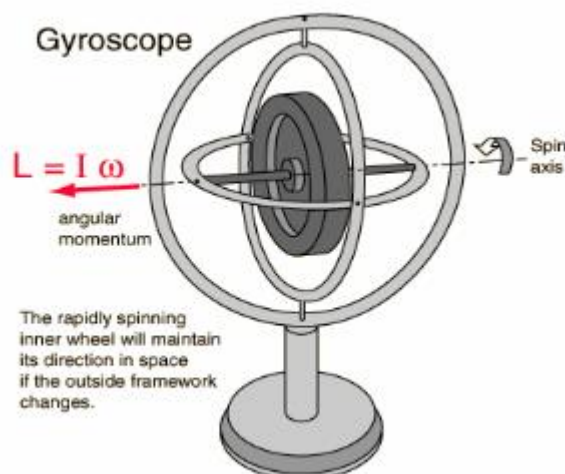


Εικόνα 5.4. Μικροηλεκτρομηχανικό επιταχυνσιόμετρο (Πηγή: <https://www.parallax.com/product/28017>)

5.3.2 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΓΥΡΟΣΚΟΠΙΩΝ

Για να περιγραφεί πλήρως η κίνηση ενός αντικειμένου στον τρισδιάστατο χώρο, πρέπει να υπολογιστεί εκτός από την μετάθεση και η περιστροφική του κίνηση. Οι αισθητήρες οι οποίοι υπολογίζουν το ρυθμό των γωνιακών μεταβολών σε σχέση με ένα αδρανειακό πλαίσιο αναφοράς ονομάζονται γυροσκόπια.

Η λειτουργία των μηχανικών γυροσκοπίων βασίζεται στην αρχή διατήρησης της στροφορμής και στην αρχή της μετάπτωσης. Σύμφωνα με την αρχή της διατήρησης της στροφορμής, μια περιστρεφόμενη μάζα διατηρεί σταθερή την κατεύθυνση του άξονα περιστροφής της ενώ σύμφωνα με την αρχή της μετάπτωσης, ένα περιστρεφόμενο γυροσκόπιο με ελευθερία μετακίνησης κινείται κάθετα ως προς τις εξωτερικές δυνάμεις που του ασκούνται. Το μηχανικό γυροσκόπιο (βλ. εικόνα 5.5) χρησιμοποιήθηκε στα 1852 από τον Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868) ως ένας άλλος τρόπος, εναλλακτικός του εκκρεμούς, για να αποδείξει την περιστροφή της Γης.



Εικόνα 5.5. Μηχανικό γυροσκόπιο

(Πηγή: https://www.globalspec.com/learnmore/sensors_transducers_detectors/tilt_sensing/gyroscopes)

Τα μηχανικά γυροσκόπια χρησιμοποιούν ένα περιστρεφόμενο τροχό ο οποίος στηρίζεται σε μια κατασκευή από βάσεις που του επιτρέπουν να κινείται σε ένα σύστημα αξόνων. Ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων βάσεων καθορίζει και τον αριθμό των αξόνων γύρω από τους οποίους μπορεί να περιστραφεί ο τροχός, άρα και τους βαθμούς ελευθερίας του συστήματος.

Τα γυροσκόπια υπολογίζουν τη γωνιακή μεταβολή ενός σώματος σε σχέση με το τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς, την περιστροφή του τοποκεντρικού συστήματος αναφοράς σε σχέση με το γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς καθώς και την περιστροφή της γης γύρω από τον άξονά της σε σχέση με τον αδρανειακό χώρο (Noureldin et al., 2013).

$$\omega_{ib}^b = \omega_{ie}^b + \omega_{en}^b + \omega_{nb}^b \quad (5.4)$$

Όπου: ω_{ib}^b η γωνιακή μεταβολή του σώματος σε σχέση με τον αδρανειακό χώρο.

ω_{nb}^b η γωνιακή μεταβολή του σώματος σε σχέση με το τοποκεντρικό πλαίσιο αναφοράς.

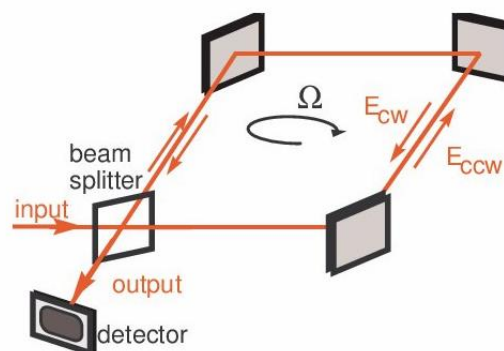
ω_{en}^b η γωνιακή μεταβολή του τοποκεντρικού πλαισίου αναφοράς σε σχέση με τη Γη.

ω_{ie}^b η γωνιακή μεταβολή της Γης σε σχέση με τον αδρανειακό χώρο.

Οι παρατηρήσεις των μηχανικών γυροσκοπίων αφορούν γωνίες περιστροφής, ενώ οι παρατηρήσεις των υπολοίπων κατηγοριών γυροσκοπίων αφορούν πρωτογενώς γωνιακή ταχύτητα περιστροφής.

Εκτός από τα μηχανικά γυροσκόπια, οι κύριες κατηγορίες γυροσκοπίων είναι:

- Οπτικά Γυροσκόπια (βλ. εικόνα 5.6). Στηρίζονται στο φαινόμενο Sagnac (Georges Sagnac, 1869 –1928), σύμφωνα με το οποίο εάν δύο ακτίνες φωτός εκπεμφθούν από την ίδια πηγή και ακολουθήσουν αντίθετες διαδρομές γύρω από ένα δακτύλιο σταθερής ακτίνας R , θα διανύσουν την ίδια αδρανειακή απόσταση και θα συναντηθούν στο ίδιο σημείο. Κατά την περίπτωση όμως που ο δακτύλιος περιστρέφεται τότε η ακτίνα που έχει την ίδια φορά περιστροφής με το δακτύλιο θα διανύσει μεγαλύτερη απόσταση στον ίδιο χρόνο σε σχέση με την ακτίνα που έχει αντίθετη φορά περιστροφής. Το σημείο που θα συναντηθούν οι δύο ακτίνες εξαρτάται άμεσα από τη γωνία περιστροφής του δακτυλίου. Σήμερα υπάρχουν δύο υλοποιήσεις του οπτικού γυροσκοπίου. Πρόκειται για τα Γυροσκόπια με Δακτύλιο Laser (Ring Laser Gyroscopes) και τα Γυροσκόπια Οπτικών Ινών (Fiber Optic Gyroscopes).



Εικόνα 5.6. Σχηματική αναπαράσταση οπτικού γυροσκοπίου (Πηγή: *Controllable steep dispersion with gain in a four-level N-scheme with four-wave mixing*, Phillips et al., 2012)

- Τα Γυροσκόπια με δακτύλιο laser αποτελούνται από μια γεννήτρια laser, η οποία παράγει μια δέσμη φωτός που με τη χρήση κατόπτρων διασπάται σε δύο ακτίνες που ακολουθούν αντίθετες κατευθύνσεις δημιουργώντας κύματα, η σύγκριση των οποίων οδηγεί στον υπολογισμό του ρυθμού γωνιακής μεταβολής της συσκευής.
- Τα Γυροσκόπια οπτικών ινών αντί πρισμάτων χρησιμοποιούν οπτικές ίνες για την κατεύθυνση της δέσμης φωτός. Μέσω των οπτικών ινών γίνεται η δρομολόγηση των ακτίνων της δέσμης φωτός για την παραγωγή του στάσιμου κύματος, μέσω του οποίου υπολογίζεται η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του συστήματος.
- Μικροηλεκτρομηχανικά Γυροσκόπια (βλ. εικόνα 5.7): Βασίζονται στη δύναμη Coriolis (Gaspar-Gustav Coriolis, 1792-1843) μέσω της οποίας περιγράφεται η εμφανής επιτάχυνση σωμάτων που κινούνται με σταθερή ταχύτητα σε ένα σύστημα που περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω . Εμφανίζεται σε όλα τα περιστρεφόμενα συστήματα και είναι η αιτία ύπαρξης πλευρικών επιταχύνσεων σε κινούμενα σώματα (βλ. παρ. 5.8.3). Για να υπολογιστούν οι γωνιακές μεταβολές, τα μικροηλεκτρομηχανικά γυροσκόπια χρησιμοποιούν διατάξεις κατασκευασμένες από μηχανισμούς πυριτίου ή χαλαζία τοποθετημένες κάθετα στον κύριο άξονα της κίνησης. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι κατασκευασμένοι ώστε να ανιχνεύουν τις δονήσεις που προκαλούνται από πλευρικές επιταχύνσεις λόγω της περιστροφικής κίνησης του συστήματος. Τα πλεονεκτήματά τους είναι αντίστοιχα των μικροηλεκτρονικών επιταχυνσιόμετρων και καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.



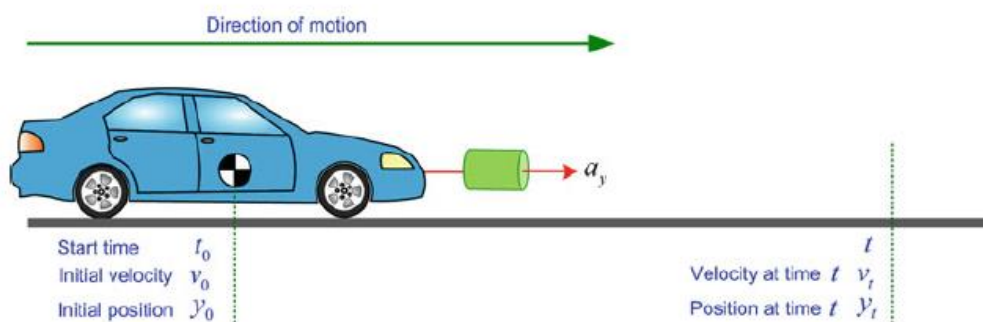
Εικόνα 5.7. Μικροηλεκτρομηχανικό γυροσκόπιο δύο αξόνων
(Πηγή: <https://gr.mouser.com/new/stmicroelectronics/stm-l20g20is-gyroscope/>)

5.4 ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΗ ΠΛΟΗΓΗΣΗ

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, η αδρανειακή πλοήγηση βασίζεται στην αρχή ότι οι διαφορές στη θέση μπορούν να προσδιοριστούν μέσω της διπλής ολοκλήρωσης της επιτάχυνσης. Επίσης, καθώς πρόκειται για πλοήγηση με αναμέτρηση, είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την ορθή λύση πλοήγησης, η γνώση της αρχικής θέσης και του προσανατολισμού του οχήματος.

5.4.1 ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΗ ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΣΕ ΜΙΑ ΔΙΑΣΤΑΣΗ

Σε ένα μονοδιάστατο σύστημα αναφοράς, εάν υποθεθεί ότι ένα όχημα κινείται σε μία ευθεία γραμμή, για να υπολογιστεί η ταχύτητα και η θέση του, το μόνο που απαιτείται είναι ένα επιταχυνσιόμετρο τοποθετημένο παράλληλα με τη διεύθυνση στην οποία κινείται το όχημα (βλ. εικόνα 5.8).



Εικόνα 5.8. Αδρανειακή πλοήγηση σε μία διάσταση με τη χρήση ενός επιταχυνσιομέτρου (Noureldin et al., 2013)

Γνωρίζοντας την αρχική του θέση $y=y_0$ και την αρχική του ταχύτητα $v=v_0$ μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα v_t σε κάθε χρονική στιγμή t , ολοκληρώνοντας τις τιμές του επιταχυνσιομέτρου:

$$v_t = \int a_y dt = a_y t + v_0 \quad (5.5)$$

Με διπλή ολοκλήρωση της επιτάχυνσης (ή αντίστοιχα απλή ολοκλήρωση της ταχύτητας), προκύπτει η θέση y_t του οχήματος σε κάθε χρονική στιγμή t .

$$y_t = \int v_t dt \quad (5.6)$$

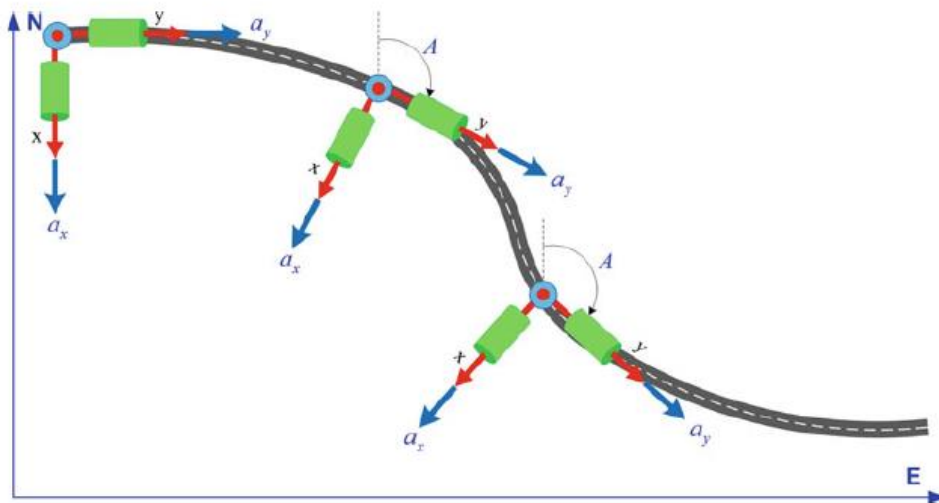
$$y_t = \int (a_y t + v_0) dt \quad (5.7)$$

$$y_t = \frac{1}{2} a_y t^2 + v_0 t + y_0 \quad (5.8)$$

5.4.2 ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΗ ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΣΕ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ

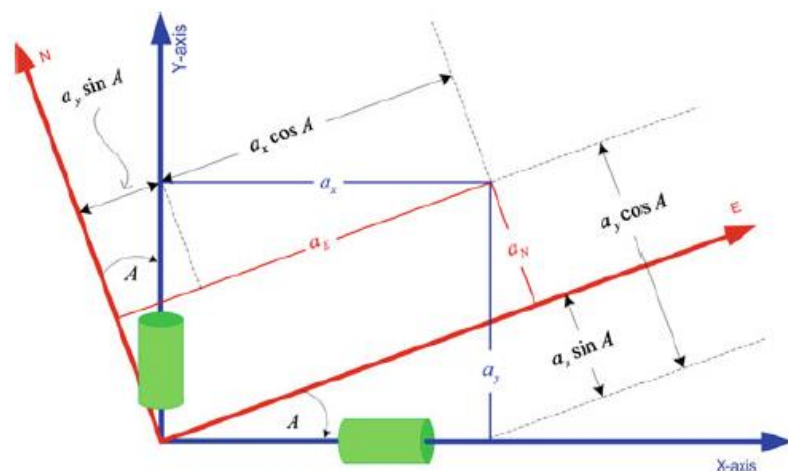
Στη δισδιάστατη αδρανειακή πλοήγηση πρέπει να παρακολουθούνται οι μεταθέσεις του οχήματος σε δύο κατευθύνσεις καθώς και οι γωνιακές μεταβολές οι οποίες δηλώνουν αλλαγή διεύθυνσης. Το σύστημα πρέπει να φέρει δύο επιταχυνσιόμετρα για τον υπολογισμό των επιταχύνσεων και ένα

γυροσκόπιο για τον υπολογισμό των γωνιακών μεταβολών με τον άξονά του κάθετο στο επίπεδο κίνησης (βλ. εικόνα 5.9).



Εικόνα 5.9. Αδρανειακή πλοήγηση σε σύστημα δύο διαστάσεων (Noureldin et al., 2013)

Επεκτείνοντας την προσέγγιση σε ένα διδιάστατο σύστημα αναφοράς, η εφαρμογή γίνεται πιο σύνθετη, κυρίως επειδή η επιτάχυνση θα πρέπει να βρίσκεται στο ίδιο σύστημα αναφοράς με το σύστημα συντεταγμένων. Αυτό απαιτεί το μετασχηματισμό των μετρήσεων των επιταχυνσιομέτρων στο τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς (βλ. εικόνα 5.10).



Εικόνα 5.10. Μετασχηματισμός από το σύστημα αναφοράς του σώματος (b-frame) στο τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς (n-frame) (Noureldin et al., 2013)

Οι άξονες του οχήματος X και Y σχηματίζουν γωνία A με τις διευθύνσεις Easting και Northing και οι επιταχύνσεις a_E και a_N κατά μήκος των διευθύνσεων μπορούν να γραφτούν σαν:

$$a_E = a_Y \sin A + a_X \cos A \quad (5.9)$$

$$a_N = a_Y \cos A - a_X \sin A \quad (5.10)$$

Ή σε μορφή πινάκων:

$$\begin{pmatrix} a_E \\ a_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos A & \sin A \\ -\sin A & \cos A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_X \\ a_Y \end{pmatrix} \quad (5.11)$$

Και σε πιο απλοποιημένη μορφή:

$$a_n = \mathbf{R}^n_b a_b \quad (5.12)$$

Όπου a_n : η επιτάχυνση στο τοπκεντρικό σύστημα αναφοράς (n-frame).

a_b : η επιτάχυνση στο σύστημα αναφοράς του σώματος (b-frame).

\mathbf{R}^n_b : ο πίνακας στροφής που μετασχηματίζει την επιτάχυνση στο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς.

Με δεδομένη την επιτάχυνση, πάλι με απλή και διπλή ολοκλήρωση προκύπτουν οι ταχύτητες και τα διαστήματα αντίστοιχα.

$$v_E = \int (a_X \cos A + a_Y \sin A) dt \quad (5.13)$$

$$v_n = \int (a_Y \cos A - a_X \sin A) dt \quad (5.14)$$

$$x_E = \iint (a_X \cos A + a_Y \sin A) dt dt \quad (5.15)$$

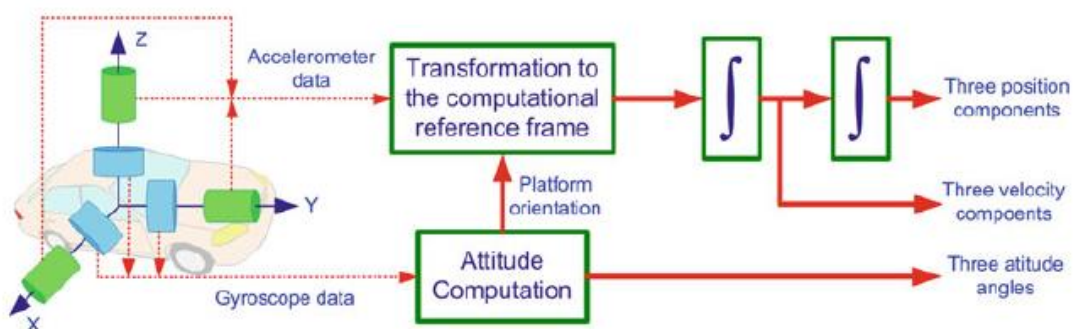
$$y_E = \iint (a_Y \cos A - a_X \sin A) dt dt \quad (5.16)$$

Για να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητοι μετασχηματισμοί είναι απαραίτητο να είναι γνωστή η αζιμουθιακή γωνία A η οποία υπολογίζεται από τις γωνιακές μεταβολές που καταγράφει το γυροσκόπιο. Αυτό προϋποθέτει την ενσωμάτωση των παρατηρήσεων του γυροσκοπίου σε σχέση με το αρχικό αζιμούθιο όπως φαίνεται παρακάτω:

$$A(t) = \int \omega_{gyro} dt + A_0 \quad (5.17)$$

5.4.3 ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΗ ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΣΕ ΤΡΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ

Για την επίτευξη αδρανειακής πλοήγησης σε τρεις διαστάσεις απαιτούνται τρία γυροσκόπια για τον υπολογισμό των στροφών του σώματος Roll, Pitch, Heading ή Yaw και τρία επιταχυνσιόμετρα για τον υπολογισμό των επιταχύνσεων κατά μήκος των τριών αξόνων X,Y,Z (βλ. εικόνα 5.11). Μία ακόμα παράμετρος είναι ο υπολογισμός της επίδρασης της βαρύτητας στα επιταχυνσιόμετρα. Μέσω των επιταχυνσιόμετρων υπολογίζεται η συνολική επιτάχυνση στην οποία υπόκειται το σώμα, η οποία εξαρτάται από τη βαρύτητα και από άλλες εξωτερικές δυνάμεις. Για να απομακρυνθεί η επίδραση της βαρύτητας, πρέπει να υπολογιστεί η απόκλιση του άξονα του επιταχυνσιόμετρου από την τοπική κατακόρυφο, με τη βοήθεια των γυροσκοπίων.



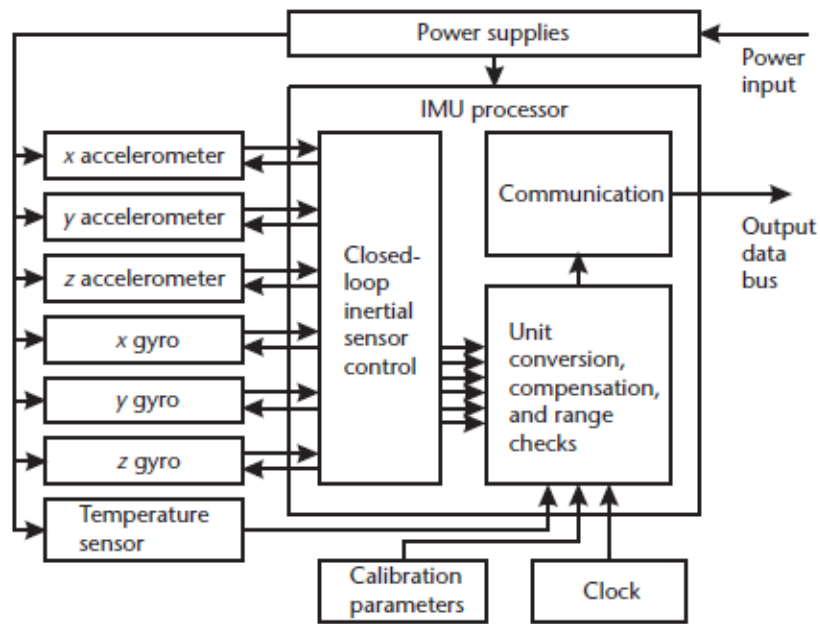
Εικόνα 5.11. Βασική διάταξη για αδρανειακή πλοήγηση σε τρεις διαστάσεις (Noureldin et al., 2013)

Για λόγους γενίκευσης, στα παραπάνω παραδείγματα το σύστημα αναφοράς του σώματος (b-frame) ήταν ευθυγραμμισμένο με το τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς (n-frame). Στην πραγματικότητα όμως, στις strapdown διατάξεις το b-frame έχει συνήθως αυθαίρετο προσανατολισμό, επειδή οι αδρανειακοί αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι στο μέσο πλοήγησης, μπορούν να έχουν τυχαίες διευθύνσεις σε σχέση με το n-frame. Η σχέση μεταξύ του b-frame και του n-frame συνήθως ορίζεται στην αρχή της αποστολής μέσω μια διαδικασίας ευθυγράμμισης. Εάν είναι διαθέσιμη συνεχόμενη πληροφορία για την ταχύτητα από κάποια εξωτερική πηγή (πχ πληροφορία από GNSS) η διαδικασία ευθυγράμμισης μπορεί να πραγματοποιηθεί και κινηματικά. Σε αυτή τη διαδικασία, θα πρέπει να εκτιμηθούν οι τιμές των αρχικών γωνιών του προσανατολισμού (roll, pitch, yaw).

5.5 ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ (IMU)

Τα κυριότερα μέρη μιας τυπικής Αδρανειακής Μονάδας Πλοήγησης είναι (βλ. και εικόνα 5.12):

- Επιταχυνσιόμετρα
- Γυροσκόπια
- Ένας επεξεργαστής
- Ένα αποθηκευτικό μέσο για τις παραμέτρους βαθμονόμησης
- Ένας αισθητήρας θερμοκρασίας
- Οι αντίστοιχες τροφοδοσίες



Εικόνα 5.12. Αδρανειακή μονάδα μετρήσεων (Groves, 2008)

Οι περισσότερες IMUs φέρουν τρία επιταχυνσιόμετρα και τρία, ενός βαθμού ελευθερίας, γυροσκόπια τοποθετημένα σε ένα σύστημα ορθοκανονικών αξόνων. Ωστόσο, κάποιες IMUs φέρουν επιπλέον αδρανειακούς αισθητήρες σε κεκλιμένες διατάξεις για την εξασφάλιση παρατηρήσεων σε περίπτωση αστοχίας κάποιου αισθητήρα.

Οι αδρανειακοί αισθητήρες παρουσιάζουν συστηματικά σφάλματα τα οποία μπορούν να βαθμονομηθούν και να αποθηκευτούν έτσι ώστε να διορθώνονται κατά την εξαγωγή των παρατηρήσεων. Οι παράμετροι της βαθμονόμησης συνήθως περιλαμβάνουν σφάλματα των επιταχυνσιομέτρων και των γυροσκοπίων, σφάλματα του συντελεστή κλίμακας, σφάλματα σύζευξης και σφάλματα των γυροσκοπίων εξ' αιτίας της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Επειδή κάποια από αυτά τα σφάλματα μεταβάλλονται ανάλογα με τη θερμοκρασία, η βαθμονόμηση διεξάγεται εργαστηριακά σε ένα εύρος θερμοκρασιών και η IMU είναι εξοπλισμένη με αισθητήρες θερμοκρασίας. Ωστόσο, η θερμοκρασία σε κάθε αισθητήρα ξεχωριστά δεν ταυτίζεται απαραίτητα με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Για αυτόν το λόγο οι IMUs υψηλής ακρίβειας είναι εξοπλισμένες με μηχανισμούς ελέγχου θερμοκρασίας (climate control).

5.6 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ

Με βάση τα χαρακτηριστικά και τον σκοπό λειτουργίας των αδρανειακών αισθητήρων και των αδρανειακών μονάδων μέτρησης, τα Αδρανειακά Συστήματα Πλοήγησης ταξινομούνται στις παρακάτω κατηγορίες (Πατώνης, 2012):

- Marine Grade: Πρόκειται για την πιο δαπανηρή κατηγορία συστημάτων που είναι εμπορικά διαθέσιμη. Τα συστήματα της κατηγορίας αυτής εγκαθίστανται σε υποβρύχια, πλοία και διαστημόπλοια. Τυπικά μπορούν να παρέχουν πλοήγηση χωρίς τη χρήση εξωτερικών διορθώσεων με σφάλμα μικρότερο από 1.8km/ημέρα. Το κόστος ενός τέτοιου συστήματος μπορεί να ξεπεράσει το \$1.000.000.

- **Navigation Grade:** Τα συστήματα αυτής της κατηγορίας έχουν ελαφρώς χαμηλότερη ακρίβεια από αυτά της κατηγορίας Marine Grade και εγκαθίστανται σε επιβατικά και στρατιωτικά αεροσκάφη. Τυπικά μπορούν να παρέχουν πλοήγηση χωρίς τη χρήση εξωτερικών διορθώσεων με σφάλμα μικρότερο από 1.5Km/ώρα. Το κόστος ενός τέτοιου συστήματος μπορεί να φτάσει τις \$100.000.
- **Tactical Grade:** Τα συγκεκριμένα συστήματα συνήθως αποτελούνται από Γυροσκόπια Οπτικών Ινών και Μικροηλεκτρομηχανικά επιταχυνσιόμετρα. Μπορούν να παρέχουν ακριβή αυτόνομη λύση πλοήγησης για μερικά λεπτά και είναι ευρέως διαδεδομένα λόγω της καλής σχέσης απόδοσης – τιμής. Οι τιμές τους κυμαίνονται από \$10.000 έως \$50.000.
- **Industrial Grade:** Τα συστήματα αυτής της κατηγορίας παρέχουν μικρότερη ακρίβεια από τα συστήματα της κατηγορίας Tactical Grade και αντί για γυροσκόπια οπτικών ινών χρησιμοποιούν μικροηλεκτρομηχανικούς αισθητήρες. Μπορούν να παρέχουν ακριβή αδρανειακή λύση πλοήγησης για μερικά δευτερόλεπτα και οι τιμές τους κυμαίνονται από \$500 έως \$2.000.
- **Automotive - Consumer Grade:** Πρόκειται για τη χαμηλότερη κατηγορία αδρανειακών συστημάτων και στην πλειοψηφία των περιπτώσεων διατίθενται σαν μεμονωμένοι αδρανειακοί αισθητήρες. Τυπικά χρησιμοποιούνται σε συστήματα όπως ο έλεγχος πέδησης των αυτοκινήτων (Antilock Braking System, ABS) και η κύρια διαφορά με τους αισθητήρες της κατηγορίας industrial grade αφορά το επίπεδο της ποιότητας στη βαθμονόμησή τους.

Στον πίνακα 5.1 ταξινομούνται τα συστήματα ανά κατηγορία και τιμές σφαλμάτων των επιταχυνσιόμετρων και του οριζοντιογραφικού προσδιορισμού θέσης.

Πίνακας 5.1. Επίδραση της ολίσθησης των επιταχυνσιόμετρων στον οριζοντιογραφικό προσδιορισμό θέσης ανά κατηγορία IMU. (Πηγή: <https://www.vectornav.com/support/library/imu-and-ins>)

Grade	Accelerometer Bias Error	Horizontal Position Error [m]			
	[mg]	1s	10s	60s	1hr
Navigation	0.025	0.13 mm	12 mm	0.44 m	1.6 km
Tactical	0.3	1.5 mm	150 mm	5.3 m	19 km
Industrial	3	15 mm	1.5 m	53 m	190 km
Automotive	125	620 mm	60 m	2.2 km	7900 km

5.7 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Για την ορθή αξιολόγηση των αδρανειακών αισθητήρων για μια συγκεκριμένη εφαρμογή πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν ορισμένα χαρακτηριστικά. Οι βασικές αρχές αξιολόγησης είναι:

Επαναληψιμότητα (Repeatability): Η ικανότητα του αισθητήρα να εμφανίζει τις ίδιες τιμές εξόδου για επαναλαμβανόμενες εφαρμογές με τις ίδιες τιμές εισόδου, υπό την προϋπόθεση ότι όλοι οι παράγοντες που αφορούν το περιβάλλον λειτουργίας δεν εμφανίζουν μεταβολές. Αναφέρεται στη μέγιστη παρέκκλιση ανάμεσα σε επαναλαμβανόμενες μετρήσεις υπό τις ίδιες συνθήκες σε πολλαπλές δοκιμές.

Σταθερότητα (Stability): Η ικανότητα του αισθητήρα να παρέχει τις ίδιες τιμές εξόδου μετρώντας την ίδια τιμή εισόδου για μια χρονική περίοδο.

Ολίσθηση (Drift): Ο όρος ολίσθηση χρησιμοποιείται συχνά για να περιγράψει τις μεταβολές που υφίστανται οι τιμές εξόδου ενός αισθητήρα όταν οι τιμές εισόδου παραμένουν σταθερές. Χρησιμοποιείται επίσης και για να περιγράψει τις μεταβολές όταν οι τιμές εισόδου είναι μηδενικές.

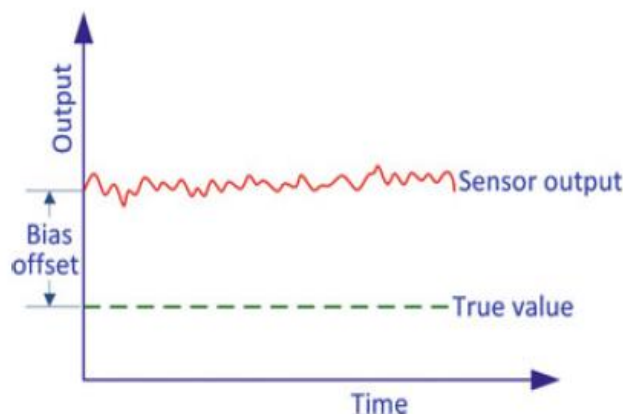
5.8 ΠΗΓΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Παρακάτω αναφέρονται οι κυριότερες πηγές σφαλμάτων οι οποίες επηρεάζουν την απόδοση των αδρανειακών αισθητήρων στη λύση πλοήγησης.

5.8.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ

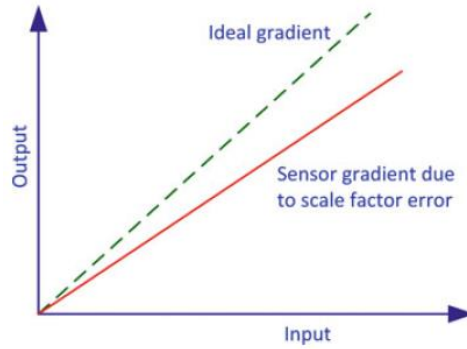
Τα περισσότερα συστηματικά σφάλματα μπορούν να απαλειφθούν με εργαστηριακή βαθμονόμηση, ιδιαίτερα στους αδρανειακούς αισθητήρες υψηλής ακρίβειας. Το σημαντικότερο όμως συστηματικό σφάλμα ενός αδρανειακού συστήματος πλοήγησης, είναι η ολίσθηση λόγω διπλής ολοκλήρωσης της επιτάχυνσης. Πρόκειται για ένα σφάλμα του οποίου η επίδραση είναι σωρευτική, π.χ. 0.01deg/hour.

Σφάλμα συστηματικής μετάθεσης (Systematic bias offset): Πρόκειται για ένα σφάλμα το οποίο παρουσιάζεται σε όλους τους τύπους επιταχυνσιομέτρων και γυροσκοπίων και εκφράζεται με τις τιμές εξόδου όταν οι τιμές εισόδου είναι μηδενικές (βλ. εικόνα 5.13).



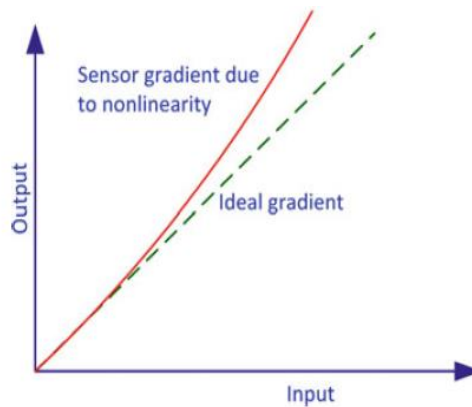
Εικόνα 5.13. Σφάλμα συστηματικής μετάθεσης (Noureldin et al. 2013)

Σφάλμα συντελεστή κλίμακας (Scale factor error): Είναι η απόκλιση της σχέσης των τιμών εισόδου-εξόδου. Οι τιμές εξόδου του επιταχυνσιομέτρου είναι ανάλογες της πραγματικής δύναμης που ασκείται κατά μήκος του άξονά του, ενώ οι τιμές εξόδου του γυροσκοπίου είναι ανάλογες της γωνιακής μεταβολής (βλ. εικόνα 5.14).



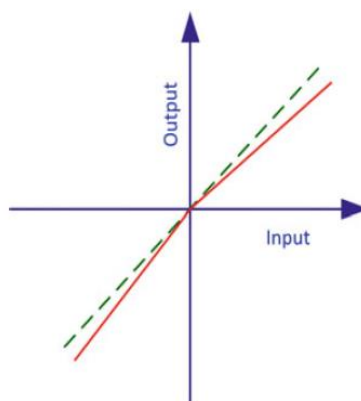
Εικόνα 5.14. Σφάλμα συντελεστή κλίμακας (Noureldin et al. 2013)

Σφάλμα μη γραμμικότητας. (Non linearity): Αφορά την έλλειψη γραμμικότητας ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο (βλ. εικόνα 5.15).



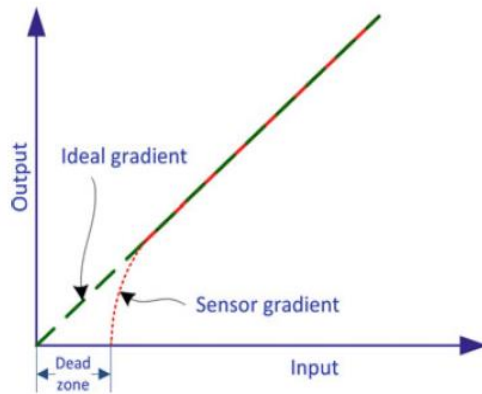
Εικόνα 5.15. Σφάλμα μη γραμμικότητας (Noureldin et al. 2013)

Σφάλμα ασυμμετρίας συντελεστή κλίμακας σήματος (Scale factor sign asymmetry): Οφείλεται στις διαφορετικές τιμές συντελεστή κλίμακας για θετικές και αρνητικές τιμές εισόδου (βλ. εικόνα 5.16).



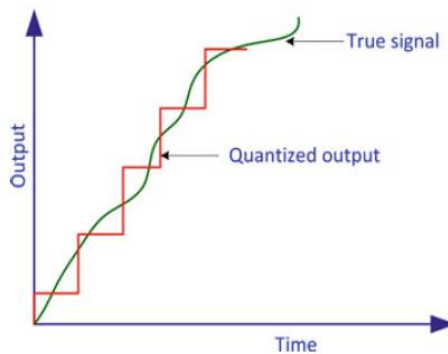
Εικόνα 5.16. Σφάλμα ασυμμετρίας συντελεστή κλίμακας σήματος (Noureldin et al. 2013)

Σφάλμα νεκρής ζώνης (Dead zone): Πρόκειται για το χρονικό διάστημα κατά το οποίο δεν εμφανίζονται τιμές εξόδου ενώ το σύστημα δέχεται δεδομένα (βλ. εικόνα 5.17).



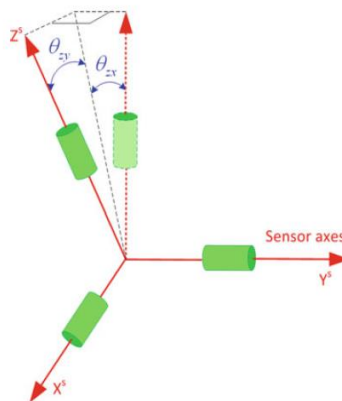
Εικόνα 5.17. Σφάλμα νεκρής ζώνης (Noureldin et al. 2013)

Σφάλμα ψηφιοποίησης (Quantization Error): Αυτός ο τύπος σφάλματος επηρεάζει όλα τα ψηφιακά συστήματα στα οποία μετατρέπεται το αναλογικό σήμα σε ψηφιακό (βλ. εικόνα 5.18).



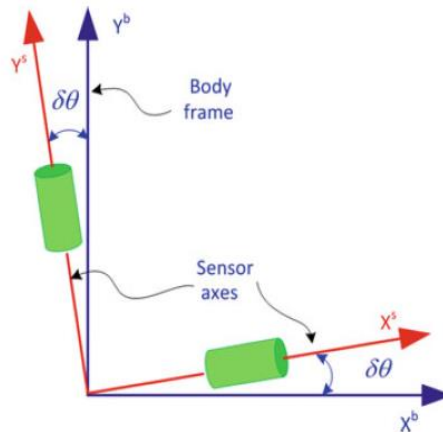
Εικόνα 5.18. Σφάλμα ψηφιοποίησης (Noureldin et al. 2013)

Σφάλμα λόγω έλλειψης ορθοκανονικότητας (Non orthogonality Error): Αφορά την απόκλιση των αξόνων των αισθητήρων από τον ορθοκανονικό τους προσανατολισμό. Συνήθως αυτό το σφάλμα συμβαίνει κατά το στάδιο της κατασκευής της διάταξης (βλ. εικόνα 5.19).



Εικόνα 5.19. Σφάλμα λόγω έλλειψης ορθοκανονικότητας (Noureldin et al. 2013)

Σφάλμα ευθυγράμμισης (Misalignment error): Προκύπτει από την λανθασμένη ευθυγράμμιση του άξονα του αισθητήρα σε σχέση με τον ορθοκανονικό άξονα του body frame. Είναι αποτέλεσμα λανθασμένης τοποθέτησης του αισθητήρα (βλ. εικόνα 5.20).



Εικόνα 5.20. Σφάλμα ευθυγράμμισης (Noureldin et al. 2013)

5.8.2 ΤΥΧΑΙΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ

Οι αδρανειακοί αισθητήρες υπόκεινται σε μια σειρά τυχαίων σφαλμάτων τα οποία στην πλειοψηφία τους μοντελοποιούνται για να ελαχιστοποιηθεί η επίδρασή τους στη λύση πλοήγησης.

Τυχαίο σφάλμα ολίσθησης (Bias Drift): Πρόκειται για μια τυχαία αλλαγή στο μέγεθος της συστηματικής μετάθεσης του συστήματος σε συνάρτηση με το χρόνο κατά τη διάρκεια μιας διαδρομής. Το σφάλμα της συστηματικής μετάθεσης είναι ντετερμινιστικό αλλά η ολίσθησή του στοχαστική. Μια αιτία για την ολίσθηση του σφάλματος είναι οι μεταβολές στη θερμοκρασία.

Μετάθεση από διαδρομή σε διαδρομή (Run to Run Bias Offset): Εμφανίζεται όταν οι τιμές της συστηματικής μετάθεσης είναι διαφορετικές σε διαφορετικές διαδρομές.

Αστάθεια συντελεστή κλίμακας (Scale Factor Instability): Πρόκειται για τυχαίες μεταβολές του συντελεστή κλίμακας κατά τη διάρκεια μιας διαδρομής. Μπορεί να οφείλεται σε μεταβολές στη θερμοκρασία. Ο συντελεστής κλίμακας μπορεί να διαφέρει από διαδρομή σε διαδρομή αλλά να παραμένει σταθερός κατά τη διάρκεια της κάθε διαδρομής ξεχωριστά. Αυτό είναι ένα δείγμα για την ικανότητα της επαναληψιμότητας του συστήματος.

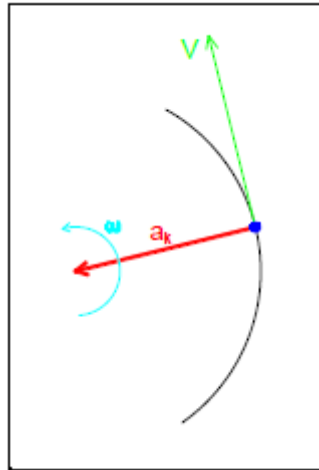
Λευκός θόρυβος (White Noise): Πρόκειται για μια μη συσχετισμένο θόρυβο ο οποίος είναι εξίσου κατανομημένος σε όλες τις συχνότητες. Αυτός ο τύπος του θορύβου συνήθως προκαλείται από τις πηγές ενέργειας του συστήματος αλλά μπορεί να είναι εγγενής σε ημιαγωγούς.

5.8.3 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΕ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Όταν ένα σώμα εκτελεί μια σύνθετη τροχιά, η πραγματική επιτάχυνση που καταγράφεται από τους αισθητήρες δεν είναι μόνο η επιτάχυνση του μέσου, αλλά πρέπει να συνυπολογιστούν η επιτάχυνση της βαρύτητας, η κεντρομόλος επιτάχυνση, η επίδραση Coriolis καθώς και κάποια προστιθέμενη τιμή θορύβου.

Για να υπολογιστεί με ακρίβεια η ταχύτητα και η θέση στο χώρο, αυτές οι επιταχύνσεις πρέπει να υπολογιστούν και να αφαιρεθούν από τις παρατηρήσεις των αισθητήρων.

A. Η κεντρομόλος επιτάχυνση αναπτύσσεται σε σώματα που πραγματοποιούν κίνηση σε καμπύλες τροχιές (βλ. εικόνα 5.21).



Εικόνα 5.21. Κεντρομόλος επιτάχυνση (Πατώνης,2012)

Εάν η διάταξη της IMU είναι τέτοια ώστε η φορά κίνησης να είναι παράλληλη με τον ένα της άξονα, τότε η ταχύτητα μπορεί να θεωρηθεί παράλληλη με τον άξονα αυτό.

Στο οριζόντιο επίπεδο και σε τροχιές όπου το σώμα πραγματοποιεί κίνηση με ταχύτητα v και ρυθμό γωνιακής μεταβολής ω , η επιτάχυνση αναλύεται σε μία ακτινική συνιστώσα και μία συνιστώσα εφαπτομενική στην τροχιά.

B. Η επίδραση Coriolis Πήρε το όνομά της από τον Gaspar-Gustav Coriolis (1792-1843) και είναι η προφανής εκτροπή της κίνησης όταν πραγματοποιείται σε ένα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς. Όταν η τροχιά του μέσου διανύει μεγάλες αποστάσεις, τότε επηρεάζεται από την επιτάχυνση Coriolis που προκαλείται από την περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονά της.

5.9 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ

Παρακάτω αναλύονται επιγραμματικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της λύσης πλοήγησης με τη χρήση αδρανειακών αισθητήρων.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Αυτονομία. Πρόκειται για ένα αυτόνομο σύστημα το οποίο δεν απαιτεί πληροφορία από κάποια εξωτερική πηγή για να παρέχει λύση πλοήγησης. Με αυτόν τον τρόπο δεν είναι ευάλωτο σε παρεμβολές, όπως πχ το σήμα των GNSS.

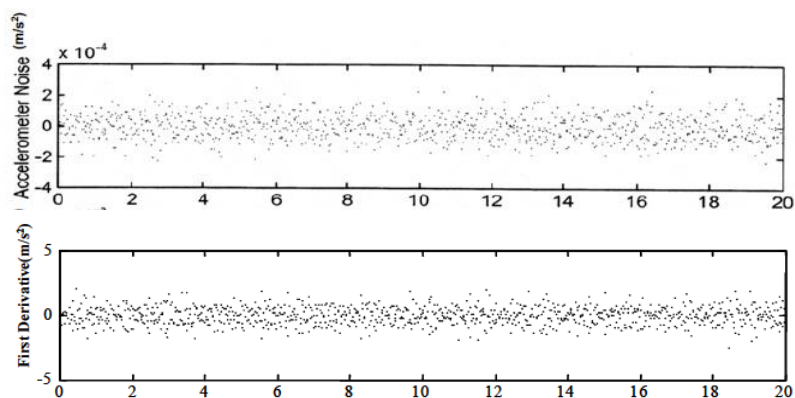
Μεγάλος ρυθμός ανανέωσης. Η τυπική συχνότητα με βάση την οποία μια IMU ανανεώνει την πληροφορία για τη θέση της είναι της τάξεως των 200Hz. Αυτός ο μεγάλος ρυθμός ανανέωσης καλύπτει ένα ευρύ φάσμα κινηματικών εφαρμογών όπως π.χ. αερομεταφερόμενα συστήματα τα οποία διανύουν μεγάλες αποστάσεις σε σύντομο χρόνο.

Πληροφορία για τον προσανατολισμό. Εκτός από τη θέση και την ταχύτητα, μέσω των αδρανειακών αισθητήρων προκύπτει μια ολοκληρωμένη λύση πλοήγησης η οποία αφορά και τον προσανατολισμό ενός σώματος.

Μεγάλη ακρίβεια σχετικών παρατηρήσεων. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, τα αδρανειακά συστήματα πραγματοποιούν πλοήγηση με αναμέτρηση. Δηλαδή με γνωστή την προηγούμενη θέση προκύπτει η επόμενη. Τυπικά, σε ένα αδρανειακό σύστημα η σχετική ακρίβεια μεταξύ των συνεχόμενων παρατηρήσεων είναι αρκετά μεγάλη.

Μικρές τιμές θορύβου. Τα αδρανειακά συστήματα υπερτερούν των GNSS (ειδικά όταν πρόκειται για απλούς δέκτες που χρησιμοποιούν μόνο μετρήσεις κώδικα) ως προς τον θόρυβο των τιμών εξόδου.

Στην εικόνα 5.22 παρουσιάζεται ο θόρυβος στις τιμές επιτάχυνσης ενός αδρανειακού συστήματος και ο θόρυβος στις τιμές επιτάχυνσης από ένα δέκτη GNSS. Η διαφορά στην τάξη μεγέθους είναι σαφής.



Εικόνα 5.22. Τιμές θορύβου INS (πάνω) και GPS (κάτω) (Schmidt - Philips, 2010)

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Μικρή ακρίβεια απόλυτων παρατηρήσεων. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα στην πλοήγηση με αδρανειακά συστήματα είναι η απώλεια της ακρίβειας στις απόλυτες παρατηρήσεις. Ενώ οι σχετικές παρατηρήσεις είναι πολύ ακριβείς, τα σφάλματα στη λύση πλοήγησης και κυρίως η ολίσθηση λόγω διπλής ολοκλήρωσης της επιτάχυνσης δρουν σωρευτικά με αποτέλεσμα οι απόλυτες παρατηρήσεις να υστερούν σε ακρίβεια. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με την τροφοδοσία ορθών συντεταγμένων και ταχύτητας στο σύστημα, ανά τακτά χρονικά διαστήματα (Velocity και Coordinate Updates).

Απαραίτητη η γνώση αρχικών παραμέτρων. Από τη στιγμή που πρόκειται για πλοήγηση με αναμέτρηση, θα πρέπει κατά την αρχικοποίηση της διαδικασίας πλοήγησης το σύστημα να τροφοδοτηθεί με τις σωστές παραμέτρους που αφορούν τη θέση, την ταχύτητα και τον

προσανατολισμό του. Επιπλέον απαιτείται σωστή βαθμονόμηση της αδρανειακής μονάδας μετρήσεων.

6. ΤΟ ΦΙΛΤΡΟ KALMAN

Το φίλτρο Kalman είναι ένας αλγόριθμος ο οποίος χρησιμοποιεί μετρήσεις οι οποίες περιέχουν θόρυβο και προσδιορίζει τις παραμέτρους δυναμικών συστημάτων. Πήρε το όνομά του από τον Rudolf Kalman (1930-2016).

6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

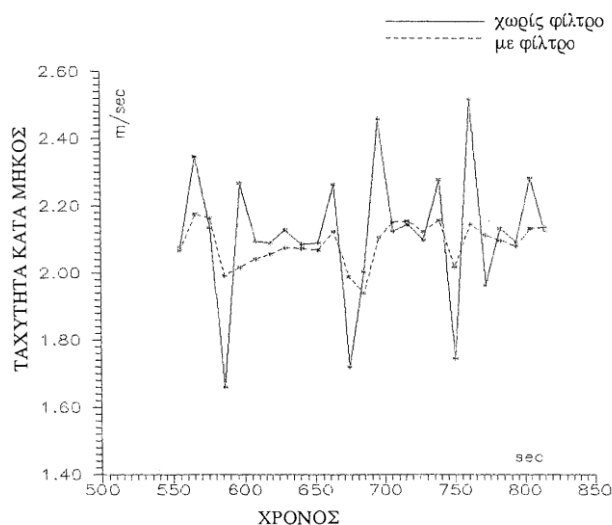
Το φίλτρο Kalman στηρίζεται στη γνώση της δυναμικής του συστήματος και προβλέπει την κατάσταση του συστήματος την επόμενη χρονική στιγμή. Η πρόβλεψη αυτή συμμετέχει μαζί με τις παρατηρήσεις στην επίλυση του συστήματος αυξάνοντας την ακρίβεια σε σχέση με αυτήν που θα προέκυπτε εάν το σύστημα επιλυόταν χρησιμοποιώντας μόνο τις παρατηρήσεις. Πρόκειται ουσιαστικά για έναν στοχαστικό εκτιμητή ο οποίος μπορεί να προσδιορίσει την προηγούμενη, παρούσα και μελλοντική κατάσταση ενός συστήματος (Γκέγκας, 2008).

Το φίλτρο Kalman αποτελεί το πλέον διαδεδομένο μέσο υλοποίησης συνδυασμένης λύσης δεδομένων GPS-INS και χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση με πληροφορίες για τη θέση από το GPS, την εξομάλυνση του θορύβου και την εκτίμηση των σφαλμάτων των αδρανειακών αισθητήρων.

Εκτός από την πλοήγηση έχει εφαρμογή σε ένα μεγάλο εύρος επιστημονικών εφαρμογών που πραγματεύονται δυναμικά συστήματα όπως η οικονομία, η πρόγνωση καιρικών φαινομένων, η επεξεργασία εικόνας κλπ.

Αναφέρεται μάλιστα ότι η πρώτη του πρακτική εφαρμογή ήταν στο πρόγραμμα Apollo κατά τη δεκαετία του 1960 για την πλοήγηση της αποστολής στο διάστημα.

Στην εικόνα 6.1 απεικονίζεται μια εφαρμογή του φίλτρου Kalman σε υδρογραφικό σκάφος.

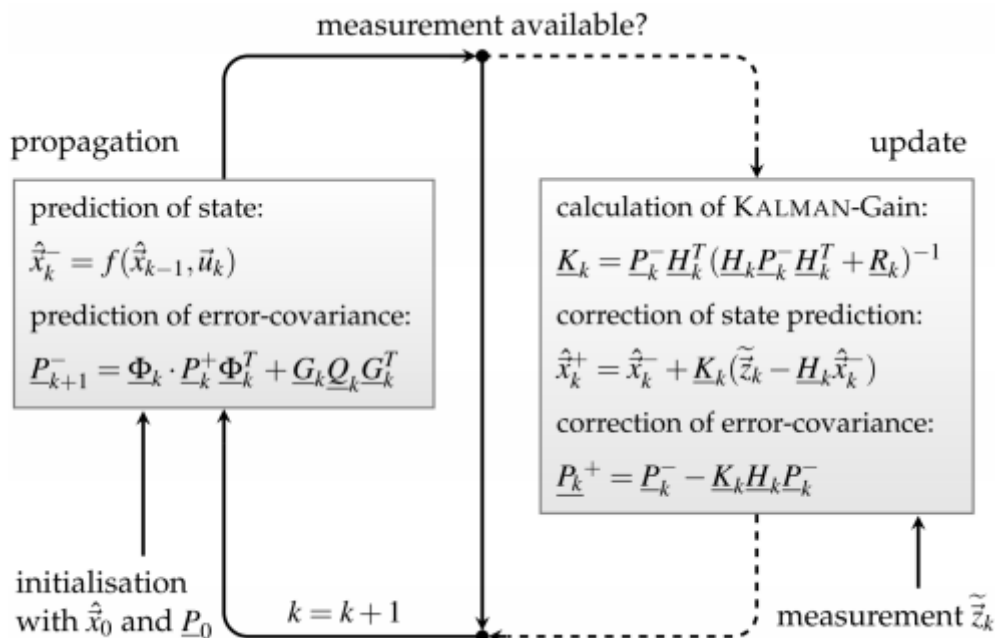


Εικόνα 6.1. Φιλτράρισμα τιμών ταχύτητας από δέκτη GPS σε υδρογραφικό σκάφος. (Γιαννίου, 1992)

6.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΦΑΣΕΙΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η λειτουργία του φίλτρου Kalman περιλαμβάνει τρία στάδια. Το στάδιο της πρόβλεψης, το στάδιο του φιλτραρίσματος και το στάδιο της εξομάλυνσης (βλ. και εικόνα 6.2).

- Κατά το στάδιο της πρόβλεψης γίνεται μια αρχική εκτίμηση για την κατάσταση του συστήματος σε μια μελλοντική στιγμή με χρήση των μέχρι εκείνη τη στιγμή διαθέσιμων δεδομένων.
- Κατά το στάδιο του φιλτραρίσματος, η προηγούμενη εκτίμηση χρησιμοποιείται μαζί με τις καινούργιες μετρήσεις για την εξαγωγή καινούργιας εκτίμησης.
- Τέλος, στο στάδιο της εξομάλυνσης η εκτίμηση της δυναμικής του συστήματος πραγματοποιείται με μετεπεξεργασία, για οποιαδήποτε χρονική στιγμή με χρήση παρατηρήσεων που προηγούνται και που έπονται.



Εικόνα 6.2. Σχηματική αναπαράσταση φίλτρου Kalman (Kruger et al., 2013)

6.3 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΦΙΛΤΡΟΥ KALMAN

Η λειτουργία του φίλτρου Kalman απαιτεί δύο μαθηματικά μοντέλα. Το δυναμικό μοντέλο (State equation-process model) και το μοντέλο παρατήρησης (Observation equation-measurement model).

Το δυναμικό μοντέλο ορίζεται από εξισώσεις μέσω των οποίων εάν είναι γνωστό το διάνυσμα των αγνώστων σε κάποια χρονική στιγμή, τότε μπορεί να προσδιοριστεί το διάνυσμα των αγνώστων σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή.

Η εξίσωση του δυναμικού μοντέλου έχει την παρακάτω μορφή:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A} \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B} \mathbf{u}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \quad (6.1)$$

Όπου

\mathbf{x} : το διάνυσμα των αγνώστων παραμέτρων

\mathbf{A} : ο πίνακας μετάβασης (Transition matrix)

\mathbf{B} : ο πίνακας ελέγχου (control matrix)

\mathbf{u} : Εξωγενή γνωστά δεδομένα

\mathbf{w} : Το διάνυσμα που περιγράφει τον εξωγενή θόρυβο (πχ η ξαφνική μετατόπιση ενός αεροπλάνου λόγω ριπής αέρα ή η ολίσθηση των τροχών ενός αυτοκινήτου)

k : χρονική στιγμή (εποχή)

Ο πίνακας μετάβασης \mathbf{A} , είναι ουσιαστικά η σχέση η οποία επιτρέπει την μετάβαση από μια κατάσταση κατά την εποχή $k-1$ σε μια άλλη κατάσταση κατά την εποχή k . Αυτή η σχέση θα μπορούσε για παράδειγμα να είναι η εξίσωση για τον υπολογισμό της μετατόπισης στην ευθύγραμμη ομαλή κίνηση.

$$\Delta x = u \cdot \Delta t \quad (6.2)$$

Όπου

Δx : το διάστημα που διανύθηκε

u : Η ταχύτητα του οχήματος

Δt : ο χρόνος που πέρασε

Αντίστοιχα, ο πίνακας ελέγχου \mathbf{B} είναι η σχέση που αξιοποιεί τα δεδομένα του διανύσματος \mathbf{u} . Ο πίνακας ελέγχου \mathbf{B} αφορά εξωτερικά γνωστά ή μοντελοποιησιμα δεδομένα σε σχέση με τη δυναμική του συστήματος (όπως πχ η επιτάχυνση ή η πέδηση ενός οχήματος) και μπορούν να υπολογιστούν.

Συνοψίζοντας, με βάση την (6.1), οι εκτιμήσεις για τη νέα κατάσταση του συστήματος είναι μια πρόβλεψη η οποία εξαρτάται από τις προηγούμενες εκτιμήσεις και τη διόρθωση από γνωστούς εξωτερικούς παράγοντες. Η νέα αβεβαιότητα προβλέπεται μέσω της προηγούμενης αβεβαιότητας συν κάποια συμπληρωματική αβεβαιότητα από το περιβάλλον.

Μετά την πάροδο κάποιου χρόνου η δυναμική του συστήματος δεν θα καθίσταται γνωστή με την απαιτούμενη ακρίβεια. Αυτό συμβαίνει επειδή είτε η δυναμική του συστήματος αλλάζει όσο περνάει ο χρόνος, είτε αυξάνονται οι παράγοντες και οι τιμές του θορύβου.

Σε αυτήν την περίπτωση το σύστημα τροφοδοτείται μέσω νέων παρατηρήσεων με εξωτερικά δεδομένα τα οποία σχετίζονται με το διάνυσμα των αγνώστων.

Εάν η συσχέτιση των μετρήσεων με το διάνυσμα των αγνώστων είναι γραμμική, τότε η εξίσωση του μοντέλου παρατήρησης είναι ως εξής:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{z}_k \quad (6.3)$$

Όπου

\mathbf{y} : το διάνυσμα των παρατηρήσεων

\mathbf{H} : ο πίνακας σχεδιασμού (observation matrix)

\mathbf{x} : το διάνυσμα των αγνώστων παραμέτρων

\mathbf{z} : το διάνυσμα του θορύβου των μετρήσεων

k : χρονική στιγμή (εποχή)

Το φίλτρο Kalman αποτελείται από τρεις βασικές εξισώσεις οι οποίες κυρίως περιλαμβάνουν πράξεις πινάκων μεταξύ του πίνακα \mathbf{K} , ο οποίος ονομάζεται πίνακας κέρδους ή Kalman gain και τον πίνακα των εκτιμήσεων των συμμεταβλητοτήτων των σφαλμάτων \mathbf{P} .

Οι εξισώσεις του φίλτρου Kalman έχουν διατυπωθεί σε διάφορες μορφές. Παρακάτω παρατίθεται μία από αυτές η οποία στηρίζεται στους (Welch - Bishop, 2006).

Υπολογισμός των μεταβλητών για την επόμενη εποχή:

Α priori υπολογισμός του πίνακα συμμεταβλητοτήτων των σφαλμάτων στην επόμενη εποχή:

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{A}^T + \mathbf{S}_w \quad (6.4)$$

Α priori υπολογισμός του διανύσματος των αγνώστων παραμέτρων στην επόμενη εποχή:

$$\mathbf{x}_k^- = \mathbf{A} \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B} \mathbf{u}_{k-1} \quad (6.5)$$

Ενημέρωση των μετρήσεων:

Υπολογισμός του πίνακα κέρδους:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{S}_z)^{-1} \quad (6.6)$$

Πραγματική μέτρηση των αγνώστων παραμέτρων και η συνεισφορά τους στον υπολογισμό της a posteriori εκτίμησης των τιμών των αγνώστων.

$$\hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}_k^-) \quad (6.7)$$

Υπολογισμός του πίνακα συμμεταβλητοτήτων των σφαλμάτων:

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_k^- \quad (6.8)$$

Υπολογισμός των πινάκων συμμεταβλητότητας του θορύβου των μετρήσεων: Στη γενική περίπτωση οι μεταβλητές που αναπαριστούν το θόρυβο των μετρήσεων και της διαδικασίας αλλάζουν ανά εποχή. Εντούτοις, συχνά γίνεται η παραδοχή ότι οι συμμεταβλητότητες του θορύβου παραμένουν σταθερές σε όλες τις εποχές. Έτσι έχουμε:

$$\mathbf{S}_w = \mathbf{E} (\mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^T) \quad (6.9)$$

$$\mathbf{S}_z = \mathbf{E} (\mathbf{z}_k \mathbf{z}_k^T) \quad (6.10)$$

Όπου

K: ο πίνακας κέρδους (Kalman gain matrix)

x: το διάνυσμα των αγνώστων παραμέτρων

y: το διάνυσμα των παρατηρήσεων

S_w: ο πίνακας συμμεταβλητοτήτων του θορύβου της διαδικασίας (process noise)

S_z: ο πίνακας συμμεταβλητοτήτων του θορύβου των παρατηρήσεων

A: ο πίνακας μετάβασης (Transition matrix)

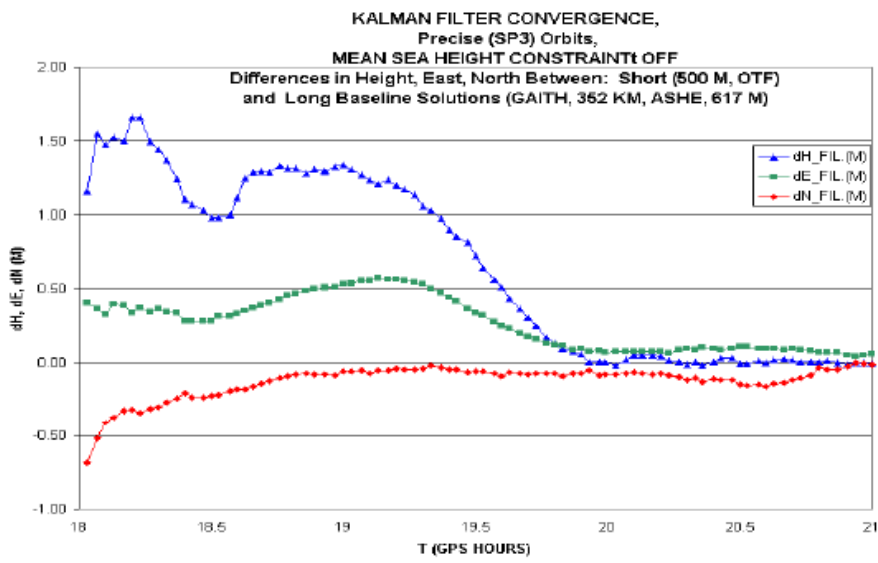
B: ο πίνακας ελέγχου (control matrix)

P: ο πίνακας εκτίμησης των συμμεταβλητοτήτων των σφαλμάτων

k: χρονική στιγμή (εποχή)

Παρατηρούμε ότι όταν ο πίνακας των συμμεταβλητοτήτων του θορύβου των παρατηρήσεων είναι μεγάλος, μέσω της (6.6) ο πίνακας κέρδους **K** έχει μικρές τιμές και η συνεισφορά των μετρήσεων στο τελικό αποτέλεσμα δεν είναι μεγάλη. Αντίθετα, όταν ο θόρυβος είναι μικρός, τότε ο πίνακας κέρδους **K** έχει μεγάλες τιμές και η συνεισφορά των μετρήσεων στο αποτέλεσμα είναι μεγάλη.

Ακόμα, σε πολλές εφαρμογές του φίλτρου Kalman απαιτείται να παρέλθει κάποιος αριθμός εποχών έτσι ώστε το φίλτρο Kalman μέσω διαδοχικών επαναλήψεων να μπορέσει να επεξεργαστεί τα δεδομένα και να συγκλίνει προς την πραγματική λύση, όπως στο παράδειγμα της εικόνας 6.3, όπου απεικονίζονται οι διαφορές στο χρόνο σύγκλισης των δεδομένων σε σχέση με το μήκος βάσης GNSS που χρησιμοποιήθηκε.



Εικόνα 6.3. Παράδειγμα σύγκλισης φίλτρου Kalman (Colombo, 2001)

7. ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ GNSS/INS

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναλύθηκαν εκτενώς τα χαρακτηριστικά των συστημάτων GNSS και INS καθώς και τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί τους.

Όπως φαίνεται στον πίνακα 7.1, τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί των δύο συστημάτων αλληλοσυμπληρώνονται. Επομένως με τον συνδυασμό παρατηρήσεων και από τα δύο συστήματα μπορεί να παραχθεί μια συνεχής, υψηλής συχνότητας πλήρης λύση πλοήγησης με μεγάλη ακρίβεια τόσο στις σχετικές όσο και στις απόλυτες παρατηρήσεις.

Πίνακας 7.1. Πλεονεκτήματα και περιορισμοί INS και GPS (Schmidt - Philips, 2010)

	Attributes	Shortcomings
GPS	Self-initializing Errors are bounded	Low data rate Lower attitude accuracy Susceptible to interference (intentional and unintentional) Expensive infrastructure
INS	High data rate Both translational and rotational information Self-contained (not susceptible to jamming)	Unbounded errors Requires knowledge of gravity field Requires initial conditions

Η ολοκλήρωση των δύο συστημάτων μπορεί να εξυπηρετήσει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών πλοήγησης όπως:

- Πλοήγηση πολιτικών και στρατιωτικών αεροσκαφών
- Πλοήγηση υποβρυχίων
- Πλοήγηση διαστημοπλοίων
- Πλοήγηση πυραύλων
- Συλλογή δεδομένων μέσω αεροφωτογράφησης
- Συλλογή δεδομένων μέσω LIDAR
- Πλοήγηση Συστημάτων ΜΗ Επανδρωμένων Αεροσκαφών (ΣΜΗΕΑ)
- Πλατφόρμες mobile mapping.

Για τους σκοπούς αυτής της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από δύο συστήματα:

Ένα σύστημα το οποίο είναι τοποθετημένο σε ένα όχημα δοκιμών και παρείχε δεδομένα τα οποία χρησιμοποιούνται από την εταιρεία που το αναπτύσσει για λόγους ελέγχου.

Ένα αερομεταφερόμενο σύστημα το οποίο, εκτός από τη λήψη αεροφωτογραφιών, παράγει δεδομένα εξωτερικών προσανατολισμών αεροφωτογραφιών, τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για τη διαδικασία του Αεροτριγωνισμού.

Ο αεροτριγωνισμός ή εν γένει φωτοτριγωνισμός ορίζεται ως μία ενιαία μέθοδος για την ταυτόχρονη εκτίμηση των εσωτερικών και εξωτερικών παραμέτρων της φωτογραφικής μηχανής, καθώς και των τρισδιάστατων συντεταγμένων των σημείων του χώρου με στατιστικά βέλτιστο τρόπο.

Κατά τις συμβατικές επιλύσεις αεροτριγωνισμών, συμμετέχουν μόνο οι φωτογραμμετρικές παρατηρήσεις. Αυτό σημαίνει ότι μέσω απ' ευθείας μετρήσεων των εικονοσυντεταγμένων των κοινών σημείων και των φωτοσταθερών σημείων (σημεία με γνωστές συντεταγμένες) προσδιορίζονται οι συντεταγμένες των άγνωστων σημείων και οι παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων (συντεταγμένες της θέσης του σημείου λήψης X_0, Y_0, Z_0 και στροφές ω, ϕ, κ).

Εκτός από τις φωτογραμμετρικές παρατηρήσεις όμως μπορούν να εισαχθούν και άλλες παρατηρήσεις που να περιλαμβάνουν τις άγνωστες ποσότητες. Έτσι μπορούμε να καταλήξουμε σε συνδυασμένες επιλύσεις αεροτριγωνισμού με τη συνεισφορά δεδομένων μέσω παρατηρήσεων GNSS/INS.

Η χρήση ενός τέτοιου συστήματος είναι πλέον αναπόσπαστο τμήμα της διαδικασίας λήψης αεροφωτογραφιών καθώς, συν τοις άλλοις, επιτυγχάνεται η ακριβής πλοήγηση του αεροσκάφους και η λήψη αεροφωτογραφιών στις επιθυμητές θέσεις, σύμφωνα με το σχέδιο πτήσης (pin point photography). Η ακρίβεια της θέσης αυξάνεται σημαντικά με τη χρήση γεωδαιτικών δεκτών GNSS και την εφαρμογή της μεθόδου του σχετικού κινηματικού εντοπισμού. Έτσι μπορούν να υπολογιστούν με ακρίβεια λίγων cm οι συντεταγμένες X_0, Y_0, Z_0 και να χρησιμοποιηθούν ως παρατηρήσεις με βάρος αντίστροφο της ακρίβειας υπολογισμού τους ως πρόσθετες εξισώσεις παρατήρησης σε μία συνδυασμένη επίλυση αεροτριγωνισμού.

Τα κυριότερα ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι:

- Η συσχέτιση του κέντρου λήψης της κεραίας GNSS με το προβολικό κέντρο της φωτογραφικής μηχανής που πραγματοποιεί την αεροφωτοληψία. Οι διαδικασίες μέσω των οποίων προσδιορίζονται γεωμετρικά αυτές οι σχέσεις έχουν αναλυθεί ήδη σε προηγούμενο κεφάλαιο (βλ. παρ 3.5).
- Η χρονική αναντιστοιχία της μέτρησης GNSS με τη χρονική στιγμή της λήψης της εκάστοτε αεροφωτογραφίας. Η μέγιστη συχνότητα του ρυθμού καταγραφής των γεωδαιτικών δεκτών GNSS συνήθως είναι της τάξεως του 1Hz (μία μέτρηση/δευτερόλεπτο). Σε 1 δευτερόλεπτο όμως ένα αεροσκάφος έχει διανύσει αρκετά μεγάλη απόσταση, άρα η ακρίβεια με την οποία καθορίζεται ο χρόνος της στιγμής όπου το κλείστρο της φωτομηχανής είναι στο μέγιστο άνοιγμά του θα πρέπει να είναι της τάξης του 1msec ή και υψηλότερη. Στις νέες αεροφωτομηχανές πραγματοποιείται απ' ευθείας σύνδεση των δεκτών GNSS με το καταγραφικό σύστημα των εικόνων και ο χρόνος υπολογίζεται μέσω μεθόδων παρεμβολής όπου λαμβάνονται υπ' όψιν οι πλησιέστερες χρονικές μετρήσεις GNSS.

Συμπεριλαμβάνοντας στον εξοπλισμό και μια αδρανειακή μονάδα μέτρησης, μπορούν να υπολογιστούν και τα γωνιακά στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων (στροφές ω, ϕ, κ).

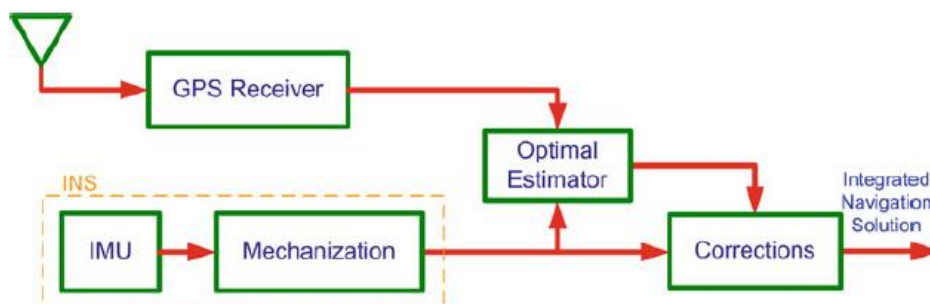
Επομένως συνδυάζοντας τις παρατηρήσεις GNSS με τα δεδομένα του INS μπορεί να υπολογιστεί με αρκετά ικανοποιητική ακρίβεια ο εξωτερικός προσανατολισμός των εικόνων.

7.1 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΣΥΖΕΥΞΗΣ

Οι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται για την ανατροφοδότηση των σφαλμάτων κατά την συνδυασμένη λύση GNSS/INS και βασίζονται σε ένα φίλτρο Kalman υπολογισμού σφαλμάτων (Error state Kalman filter), είναι η αρχιτεκτονική ανοιχτού και κλειστού βρόγχου και χρησιμοποιούν γραμμικό (Linear Kalman Filter) και μη γραμμικό ή εκτεταμένο φίλτρο Kalman (Extended Kalman Filter, EKF) αντίστοιχα.

7.1.1 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΥΖΕΥΞΗΣ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΒΡΟΓΧΟΥ (OPEN LOOP ARCHITECTURE)

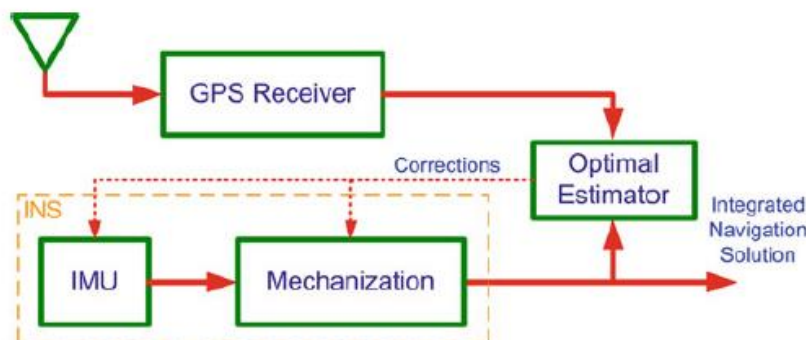
Στην αρχιτεκτονική σύζευξης ανοιχτού βρόγχου (βλ. εικόνα 7.1), οι εκτιμώμενες τιμές για τα σφάλματα που αφορούν τη θέση την ταχύτητα και τον προσανατολισμό χρησιμοποιούνται για να διορθώσουν τις παρατηρήσεις του αδρανειακού συστήματος μέσα στον αλγόριθμο σύζευξης σε κάθε επανάληψη αλλά δεν χρησιμοποιούνται για να επανατροφοδοτήσουν το αδρανειακό σύστημα. Επομένως, μόνο η συνδυασμένη λύση πλοήγησης περιέχει τις διορθωμένες τιμές από το φίλτρο Kalman.



Εικόνα 7.1. Αρχιτεκτονική σύζευξης ανοιχτού βρόγχου (Noureldin et al., 2013)

7.1.2 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΥΖΕΥΞΗΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΓΧΟΥ (CLOSED LOOP ARCHITECTURE)

Στην αρχιτεκτονική σύζευξης κλειστού βρόγχου (βλ. εικόνα 7.2), οι εκτιμώμενες τιμές για τα σφάλματα που αφορούν τη θέση την ταχύτητα και τον προσανατολισμό επανατροφοδοτούνται στον μηχανισμό επεξεργασίας της αδρανειακής πλοήγησης είτε σε κάθε επανάληψη του φίλτρου Kalman είτε περιοδικά και χρησιμοποιούνται για να διορθώσουν την ίδια την αδρανειακή λύση πλοήγησης. Οι εκτιμήσεις του φίλτρου Kalman για τη θέση, την ταχύτητα και τον προσανατολισμό μηδενίζονται μετά την ανατροφοδότηση του κάθε συνόλου διορθώσεων. Αυτό έχει ως συνέπεια την μη ύπαρξη ανεξάρτητης και μη διορθωμένης αδρανειακής λύσης πλοήγησης.



Εικόνα 7.2. Αρχιτεκτονική σύζευξης κλειστού βρόγχου (Noureldin et al., 2013)

Η επιλογή αρχιτεκτονικής εξαρτάται από την ποιότητα των χαρακτηριστικών του αδρανειακού συστήματος και του αλγορίθμου σύζευξης.

Όταν χρησιμοποιούνται χαμηλής ακρίβειας αδρανειακά συστήματα επιλέγεται η αρχιτεκτονική κλειστού βρόγχου, ανεξάρτητα από την ποιότητα του αλγορίθμου σύζευξης. Αυτό συμβαίνει γιατί η πρωτογενής πληροφορία του INS δεν είναι αξιόπιστη και μια προσέγγιση με αρχιτεκτονική ανοιχτού βρόγχου θα οδηγήσει σε μεγάλα σφάλματα λόγω γραμμικοποίησης στο φίλτρο Kalman.

Όταν χρησιμοποιείται ένα αδρανειακό σύστημα υψηλής ακρίβειας και ένας χαμηλής ποιότητας αλγόριθμος σύζευξης, θα πρέπει να επιλεγεί η αρχιτεκτονική ανοιχτού βρόγχου.

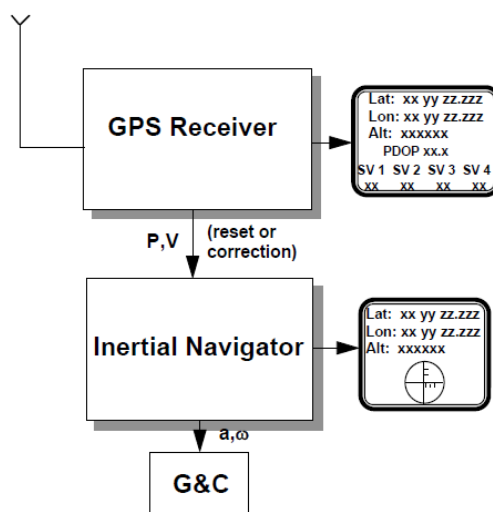
Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται αδρανειακά συστήματα υψηλής ακρίβειας και αλγόριθμοι υψηλής ποιότητας και οι δύο αρχιτεκτονικές είναι κατάλληλες.

7.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΖΕΥΞΗΣ

Παρακάτω αναλύονται οι μέθοδοι μέσω των οποίων πραγματοποιείται η σύζευξη των δύο συστημάτων και η επίτευξη της λύσης πλοήγησης μέσω παρατηρήσεων GNSS/INS.

7.2.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΧΩΡΙΣ ΣΥΖΕΥΞΗ (UNCOUPLED SYSTEMS)

Πρόκειται για την πιο απλή προσέγγιση στην ολοκλήρωση των δύο συστημάτων. Ουσιαστικά τα δύο συστήματα λειτουργούν ανεξάρτητα και οι λύσεις πλοήγησης τροφοδοτούν έναν λογικό ελεγκτή, μέσω του οποίου προσδιορίζεται η βέλτιστη λύση (βλ. εικόνα 7.3).



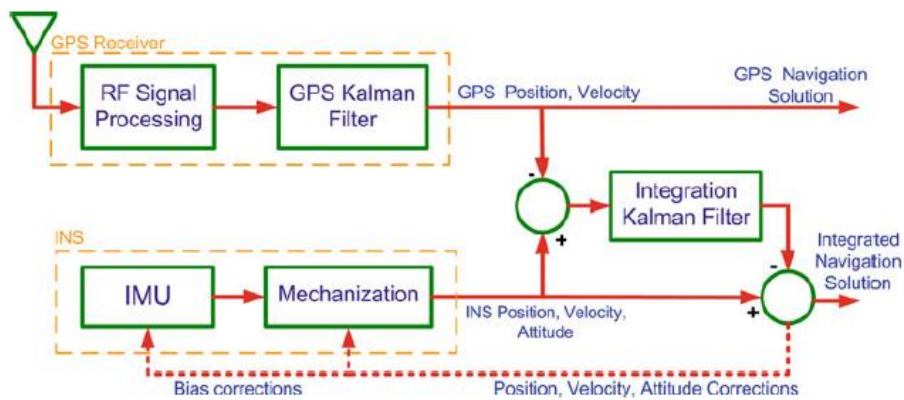
Εικόνα 7.3. Διάταξη συστημάτων χωρίς σύζευξη (Schmidt - Philips, 2010)

Σε αυτήν τη μέθοδο σύζευξης δεν παρέχεται κάποιος τρόπος να αντιμετωπιστεί η ολίσθηση της λύσης πλοήγησης του αδρανειακού συστήματος. Έτσι, όσο περνάει ο χρόνος η λύση του αδρανειακού συστήματος γίνεται ουσιαστικά μη αξιοποιήσιμη. Αυτά τα σφάλματα μπορούν να περιοριστούν χρησιμοποιώντας μία τιμή «αρχικοποίησης» ή διόρθωσης των παρατηρήσεων μέσω του GNSS, αλλά τότε τα δύο συστήματα παύουν να είναι ανεξάρτητα.

Μέσω της συγκεκριμένης μεθόδου δεν εξασφαλίζεται ικανοποιητική ακρίβεια και για αυτόν το λόγο αυτή η μέθοδος δεν έχει ευρύ φάσμα εφαρμογών.

7.2.2 ΧΑΛΑΡΗ ΣΥΖΕΥΞΗ (LOOSELY COUPLED SYSTEMS)

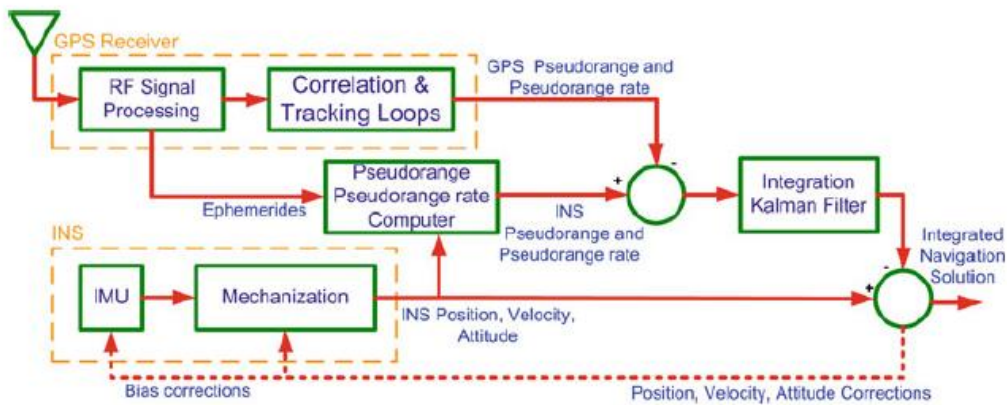
Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, τα δύο συστήματα λειτουργούν ανεξάρτητα και παρέχουν ξεχωριστή λύση πλοήγησης (βλ. εικόνα 7.4). Συνήθως, για τη βελτίωση της λύσης πλοήγησης που αφορά τη θέση ή και την ταχύτητα, οι τιμές εξόδου του GNSS τροφοδοτούνται σε ένα φίλτρο Kalman. Στη συνέχεια τροφοδοτείται σε ένα άλλο φίλτρο Kalman μαζί με τη λύση του INS και με βάση τα μοντέλα σφαλμάτων εκτιμούνται τα σφάλματα του αδρανειακού συστήματος. Η λύση του INS διορθώνεται με βάση τις τιμές εξόδου του φίλτρου Kalman και παράγεται μια ενιαία λύση πλοήγησης με πληροφορία για τη θέση, την ταχύτητα και τον προσανατολισμό. Η συγκεκριμένη διάταξη είναι κλιμακωτή καθώς τα δύο φίλτρα Kalman χρησιμοποιούνται διαδοχικά. Η χαλαρή σύζευξη είναι απλή στην εφαρμογή της και εύρωστη. Το κύριο πρόβλημα είναι ότι δεν μπορεί να παρέχει υποστήριξη μέσω GNSS όταν ο αριθμός των παρατηρούμενων δορυφόρων είναι κάτω από το ελάχιστο και επειδή οι τιμές εξόδου του φίλτρου Kalman που χρησιμοποιείται για το GNSS είναι συσχετισμένες με το χρόνο, επηρεάζεται η πρόβλεψη για ασυσχέτιστο θόρυβο του δεύτερου φίλτρου Kalman, μειώνοντας την απόδοση του συστήματος.



Εικόνα 7.4. Χαλαρή σύζευξη (Noureldin et al., 2013)

7.2.3 ΣΦΙΧΤΗ ΣΥΖΕΥΞΗ (TIGHTLY COUPLED SYSTEMS)

Σε αυτήν την προσέγγιση χρησιμοποιείται ένα κύριο φίλτρο Kalman κοινό και για τα δύο συστήματα (βλ. εικόνα 7.5). Η διαφορά από τις μετρήσεις των ψευδοαποστάσεων και τους ρυθμούς μεταβολής τους από το GNSS και οι αντίστοιχες τιμές του αδρανειακού συστήματος, τροφοδοτούνται στο φίλτρο Kalman για να εκτιμηθούν τα σφάλματα του αδρανειακού συστήματος. Τότε διορθώνονται οι τιμές εξόδου του INS και προκύπτει η συνδυασμένη λύση πλοήγησης. Μέσω της σφιχτής σύζευξης εξαλείφεται το πρόβλημα της συσχέτισης των δεδομένων, το οποίο προκύπτει στη χαλαρή σύζευξη με τη χρήση διαδοχικών φίλτρων Kalman. Επιπλέον, μέσω της σφιχτής σύζευξης το σύστημα μπορεί να παρέχει στίγμα από το GNSS και με λιγότερους από τέσσερις δορυφόρους. Αυτή η δυνατότητα έχει εφαρμογή σε αστικά περιβάλλοντα όπως και σε δασώδεις εκτάσεις ή περιοχές με έντονες υψομετρικές εξάρσεις όπου ο αριθμός των ορατών δορυφόρων περιορίζεται. Τα μειονεκτήματα της σφιχτής σύζευξης είναι ότι απαιτεί μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ καθώς ότι το σύστημα διαχειρίζεται ταυτόχρονα και την επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων του GNSS. Επιπλέον, δεν μπορεί να προκύψει πληροφορία για τη θέση και την ταχύτητα μόνο από το GNSS.



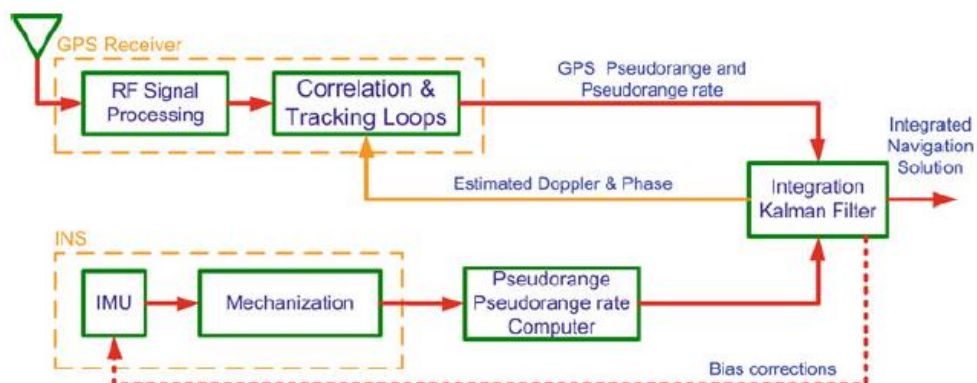
Εικόνα 7.5. Σφιχτή σύζευξη (Noureldin et al., 2013)

7.2.4 ΒΑΘΙΑ ΣΥΖΕΥΞΗ (ULTRA TIGHTLY/H DEEPLY COUPLED SYSTEMS)

Η βαθιά σύζευξη (βλ. εικόνα 7.6), είναι πιο περίπλοκη από τη χαλαρή και τη σφιχτή σύζευξη και απαιτεί ειδικά διαμορφωμένο δέκτη GNSS. Μέχρι στιγμής έχουν αναλυθεί προσεγγίσεις όπου η πληροφορία πλοήγησης που προκύπτει από τις παρατηρήσεις του GNSS χρησιμοποιείται για να εκτιμηθούν οι παράμετροι των σφαλμάτων του αδρανειακού συστήματος. Στην βαθιά σύζευξη, ενώ η συνεισφορά του GNSS είναι η ίδια, μέσω των παρατηρήσεων του αδρανειακού συστήματος επανατροφοδοτούνται οι βρόγχοι παρακολούθησης (tracking loops) για τον λαμβανόμενο κώδικα και τη φάση του GNSS, περιορίζοντας το εύρος τους. Ο επεξεργαστής του GNSS λαμβάνει πληροφορίες για την προσεγγιστική ταχύτητα και τη θέση, περιορίζοντας τον αριθμό των κελιών που χρησιμοποιεί για την εύρεση των στοιχείων του κώδικα που πρέπει να ταυτοποιήσει.

Τα tracking loops εξαρτώνται από την δυναμική ανταπόκριση του συστήματος και την αντίσταση στο θόρυβο. Εάν βοηθηθούν από την λύση αδρανειακής πλοήγησης, τότε θα πρέπει να παρακολουθήσουν μόνο το θόρυβο του ρολογιού του δέκτη και το σφάλμα της λύσης πλοήγησης του INS και όχι τη δυναμική συμπεριφορά της κεραίας του δέκτη. Με αυτό επιτυγχάνονται μικρότερα εύρη παρακολούθησης, καλύτερη αντίσταση στο θόρυβο και ο εντοπισμός παραμένει σε καλύτερες τιμές αναλογίας σηματοθορυβικού λόγου. Ακόμα, μπορεί να λειτουργήσει και με λιγότερους από τέσσερις δορυφόρους για περιορισμένο χρονικό διάστημα.

Το μειονέκτημα της βαθιάς σύζευξης είναι ότι στον αλγόριθμο σύζευξης εισέρχονται μεγαλύτερα σφάλματα συσχέτισης του χρόνου. Αυτό απαιτεί χαμηλότερες τιμές στον πίνακα κέρδους για να αποφευχθεί η αστάθεια. Οι χαμηλές τιμές στον πίνακα κέρδους οδηγούν σε κακή βαθμονόμηση των αδρανειακών αισθητήρων και μεγαλύτερα σφάλματα στη λύση πλοήγησης.



Εικόνα 7.6. Βαθιά σύζευξη (Noureldin et al., 2013)

Στον πίνακα 7.1 πραγματοποιείται μια σύνοψη των πλεονεκτημάτων για εφαρμογή σε αερομεταφερόμενα συστήματα για κάθε μέθοδο σύζευξης.

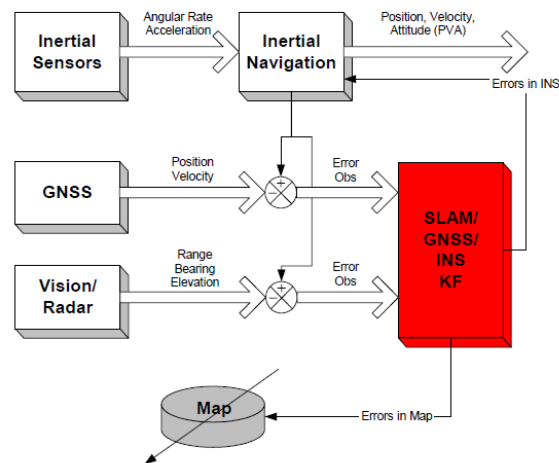
Πίνακας 7.1. Σύνοψη των πλεονεκτημάτων των μεθόδων σύζευξης, Sinoglazov- Zakharin, 2012)

Coupling Level	Benefits
Uncoupled/reset INS to GPS (Sum of system attributes)	Position, velocity, acceleration, attitude, and attitude rate information Redundant systems A drift-free GPS A high-bandwidth INS
Loosely coupled	More rapid GPS acquisition In-flight calibration and alignment Better inertial instrument calibration and alignment Better attitude estimates Longer operation after jamming
Tightly coupled	Better navigation performance Better instrument calibration Reliable tracking under high dynamics Reduced tracking loop bandwidth (jamming resistance) Optimum use of however many SVs available
Deeply integrated	Advantages the single filter removes the problem of the "cascade" filters switching, compactness requirements reduction of power consumption. Disadvantages the state vector contains up to 40 components, that is why the filter is difficult to realize; necessity of development of the special sensors.

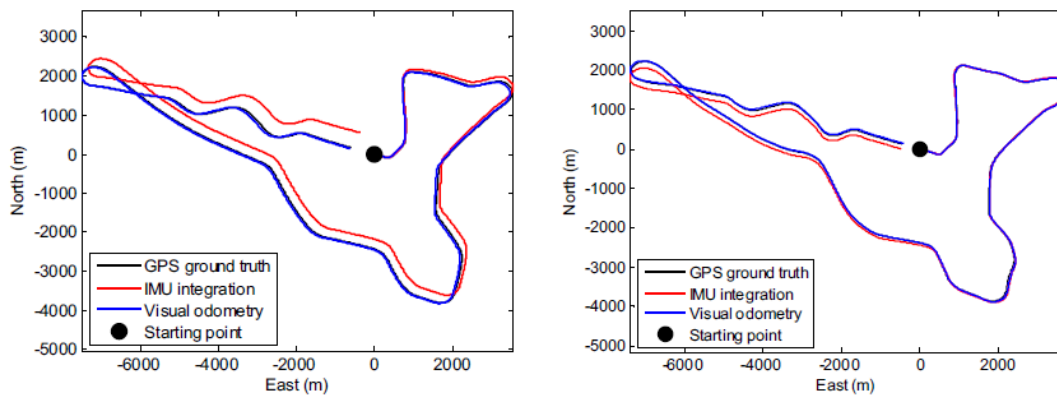
7.3 ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Σε πολλές περιπτώσεις οι διατάξεις των συστημάτων GNSS/INS συμπληρώνονται και με άλλους αισθητήρες. Ενδεικτικά αναφέρεται η χρήση συστημάτων οδομετρίας, αισθητήρων Laser καθώς και συστημάτων επεξεργασίας φωτογραμμετρικών παρατηρήσεων μέσω οπτικής οδομετρίας (visual odometry) ή ταυτόχρονου εντοπισμού και χαρτογράφησης (Simultaneous Localization And Mapping, SLAM) (βλ. εικόνες 7.7-7.8).

Οι παρατηρήσεις από τους επιπλέον αισθητήρες συνεισφέρουν και αυτές στην εκτίμηση της θέσης, κυρίως όταν δεν υπάρχει αξιόπιστη λύση από τα δεδομένα GNSS. Συνηθέστερα εισάγονται σε ένα μη γραμμικό φίλτρο Kalman (Extended Kalman Filter, EKF), το οποίο επεξεργάζεται και στη συνέχεια τροφοδοτεί τον υπολογιστή της αδρανειακής λύσης.



Εικόνα 7.7. Αρχιτεκτονική σύζευξης δεδομένων SLAM/GNSS/INS (Kim-Sukkarieh, 2004)



Εικόνα 7.8. Συγκρίσεις αποτελεσμάτων δοκιμών με και τη χρήση συστήματος οπτικής οδομετρίας με και χωρίς τη χρήση σαρωτή Laser για τον υπολογισμό του ύψους πτήσης και η συνεισφορά τους στις παρατηρήσεις GNSS/INS. (Zhang-Singh, 2015)

7.4 ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Η αξιοπιστία των παρατηρήσεων των συστημάτων GNSS/INS έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας και αναζήτησης κυρίως για πλατφόρμες οι οποίες μπορούν να επιχειρήσουν σε περιβάλλοντα στα οποία δεν ευνοούνται οι παρατηρήσεις GNSS (βλ. εικόνα 7.9).

Όπως είναι αναμενόμενο, η διάρκεια της απώλειας της λύσης GNSS είναι ο πλέον καθοριστικός παράγοντας στην ακρίβεια της λύσης πλοήγησης από το INS, καθώς αυτή εμφανίζει ολίσθηση. Ο δεύτερος παράγοντας είναι η κατηγορία (grade) του αδρανειακού συστήματος που χρησιμοποιείται.

Στην παράγραφο 8.6 πραγματοποιείται μια αξιολόγηση της απόδοσης του αερομεταφερόμενου συστήματος με την εξομοίωση διακοπών στη λύση GPS.

Τα επίγεια συστήματα έχουν κατά καιρούς εξεταστεί και σε ελληνικές δημοσιεύσεις (Γκέγκας, 2008), (Κατσιγιάννη, 2014), ενώ παρακάτω δίνονται στοιχεία από δοκιμαστικές διαδρομές κατά τις οποίες είτε δημιουργούνται κενά στη λύση GNSS λόγω του απαιτητικού περιβάλλοντος όπου το σύστημα επιχειρεί, είτε εξομοιώνονται κενά στη λύση GNSS κατά την μετεπεξεργασία για να εξεταστεί η συνεισφορά στη λύσης πλοήγησης μέσω του Αδραειακού Συστήματος Πλοήγησης.



Εικόνα 7.9. Απαιτητικό περιβάλλον δοκιμών συστήματος GPS/INS για εφαρμογές mobile mapping. (Kennedy et al., 2006)

Στους πίνακες 7.2 και 7.3 παρουσιάζονται τα οριζοντιογραφικά και υψομετρικά σφάλματα τα οποία προκύπτουν κατά τη διάρκεια απουσίας της λύσης μέσω GNSS σε μία αποστολή επίγειου συστήματος. Εξετάζεται ακόμα και το επίπεδο της απώλειας του σήματος των δορυφόρων καθώς πραγματοποιήθηκαν δοκιμές λαμβάνοντας καθόλου παρατηρήσεις φάσης και παρατηρήσεις φάσης από 2 και 3 δορυφόρους αντίστοιχα. Τέλος εξετάζεται και η συνεισφορά παρατηρήσεων από αισθητήρες οδομετρίας τοποθετημένους στους τροχούς του οχήματος.

Πίνακας 7.2. Οριζοντιογραφικά και υψομετρικά σφάλματα στη λύση πλοήγησης και η σχέση τους με το κενό στη διάρκεια λύσης GNSS. (Kennedy et al., 2006)

Aiding Level	GNSS Outage Length							
	10 s		30 s		60 s		100 s	
	2D	H	2D	H	2D	H	2D	H
0 Phase No Wheel	0.150	0.042	0.745	0.153	2.780	0.383	7.849	0.734
1 Phase No Wheel	0.147	0.042	0.670	0.153	2.297	0.380	6.018	0.722
2 Phase No Wheel	0.139	0.041	0.542	0.153	1.513	0.361	3.403	0.720

Πίνακας 7.3. Οριζοντιογραφικά και υψομετρικά σφάλματα στη λύση πλοήγησης με τη συνεισφορά δεδομένων αισθητήρα οδομετρίας και η σχέση τους με το κενό στη διάρκεια λύσης GNSS. (Kennedy et al., 2006)

Aiding Level	GNSS Outage Length							
	10 s		30 s		60 s		100 s	
	2D	H	2D	H	2D	H	2D	H
0 Phase With Wheel	0.144	0.042	0.754	0.154	2.58	0.393	6.783	0.734
1 Phase With Wheel	0.142	0.042	0.713	0.153	2.275	0.380	3.458	0.722
2 Phase With Wheel	0.140	0.042	0.577	0.153	1.570	0.360	2.945	0.720
Smoothed With Wheel	0.014	0.003	0.027	0.006	0.201	0.032	0.363	0.047

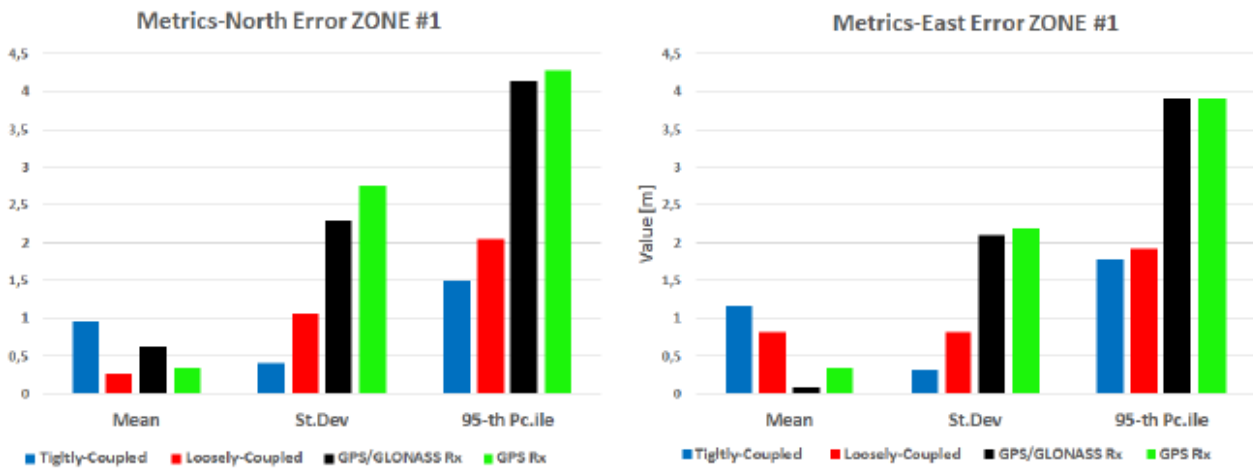
Στον πίνακα 7.4 παρουσιάζονται σφάλματα στις γωνίες πλοήγησης τα οποία προκύπτουν κατά τη διάρκεια απουσίας της λύσης GNSS στην ίδια αποστολή. Παρατηρείται ότι στο συγκεκριμένο σύστημα οι γωνίες πλοήγησης είναι αρκετά ευαίσθητες στην απώλεια λύσης GNSS. Οι αντίστοιχες διαφορές που προκύπτουν κατά την εξέταση των δεδομένων του αερομεταφερόμενου συστήματος που εξετάζεται παρακάτω, παρουσιάζουν αμελητέες διαφορές στις τιμές των γωνιών πλοήγησης σε σχέση με τις οριζοντιογραφικές και υψομετρικές τιμές των διαφορών.

Πίνακας 7.4. Σφάλματα στις γωνίες πλοήγησης και η σχέση τους με το κενό στη διάρκεια λύσης GNSS. (Kennedy et al., 2006)

Aiding Level	GNSS Outage Length											
	10 s			30 s			60 s			100 s		
	Pitch	Roll	Yaw	Pitch	Roll	Yaw	Pitch	Roll	Yaw	Pitch	Roll	Yaw
0 Phase No Wheel	0.005	0.006	0.012	0.009	0.007	0.019	0.012	0.011	0.035	0.012	0.013	0.043
1 Phase No Wheel	0.005	0.006	0.012	0.008	0.007	0.018	0.011	0.009	0.034	0.010	0.010	0.040
2 Phase No Wheel	0.005	0.006	0.012	0.007	0.006	0.016	0.008	0.007	0.032	0.009	0.008	0.038

Εκτός από τη συνεισφορά παρατηρήσεων από συμπληρωματικούς αισθητήρες, σε πολλές περιπτώσεις εξετάζεται και η μέθοδος με την οποία πραγματοποιείται η σύζευξη των παρατηρήσεων των συστημάτων.

Στην εικόνα 7.10 απεικονίζεται η απόδοση ενός συστήματος το οποίο αποτελείται από Μικροηλεκτρομηχανικούς αισθητήρες και δοκιμάζεται σε μια διαδρομή στο κέντρο της πόλης του Τορίνο (βλ. εικόνα 7.11). Οι τελευταίες στήλες (μαύρη και πράσινη) αφορούν συγκρίσεις με παρατηρήσεις αυτόνομου εντοπισμού από GNSS. Εξετάζονται τα στατιστικά στοιχεία των σφαλμάτων που αφορούν συνδυασμένες λύσεις και λύσεις μόνο από τα GNSS. Παρατηρείται ότι οι συνδυασμένες λύσεις έχουν πολύ μικρότερα σφάλματα από τις λύσεις GNSS/INS με τη λύση σφικτής σύζευξης να προσαρμόζεται καλύτερα από την λύση χαλαρής σύζευξης.



Εικόνα 7.10. Οριζοντιογραφικές διαφορές διαφόρων μεθόδων σύζευξης δεδομένων. (Falco et al.,2017)



Εικόνα 7.11. Δοκιμαστική διαδρομή για την διεξαγωγή ελέγχων για την απόδοση συστήματος GNSS/INS στην πόλη του Τορίνο. (Falco et al.,2017)

7.4.1 Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗΣ RTS (Rauch-Tung-Striebel)

Συχνά, σε εφαρμογές παρόμοιες με αυτές που εξετάζονται στη συγκεκριμένη εργασία, πραγματοποιούνται επιπλέον διαδικασίες εξομάλυνσης κατά το στάδιο της μετεπεξεργασίας των δεδομένων.

Μία τέτοια διαδικασία είναι το φίλτρο εξομάλυνσης RTS (Rauch-Tung-Striebel). Πρόκειται για έναν αλγόριθμο ο οποίος λειτουργεί με αμφίδρομη επεξεργασία.

Κατά το στάδιο της μετάβασης εφαρμόζεται ένα μη γραμμικό φίλτρο Kalman (EKF). Το EKF είναι ουσιαστικά ο πλέον διαδομένος αλγόριθμος για την εκτίμηση της δυναμικής ενός συστήματος λόγω της απλότητάς του. Προέρχεται από το τυπικό φίλτρο Kalman και έχουν παρουσιαστεί αρκετές

μορφές του όπως το συνεχές (continuous time EKF), το διακριτού χρόνου (discrete time EKF) και ο συνδυασμός αυτών των δύο.

Κατά το στάδιο της επιστροφής εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος ανάδρομης εξομάλυνσης ο οποίος έχει ως εξής (Chan-Hsiao, 2011):

$$\mathbf{A}_k = \mathbf{P}_{k|k} \mathbf{\Phi}_k^T \mathbf{P}_{k+1|k}^{-1} \quad (7.1)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|n}^- = \hat{\mathbf{x}}_{k|k}^- + \mathbf{A}_k (\hat{\mathbf{x}}_{k+1|n}^- - \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}^-), \quad k = N-1, \dots, 0 \quad (7.2)$$

$$\mathbf{P}_{k|n} = \mathbf{P}_{k|k} + \mathbf{A}_k [\mathbf{P}_{k+1|n} - \mathbf{P}_{k+1|k}] \mathbf{A}_k^T \quad (7.3)$$

Όπου

\mathbf{A} : ο πίνακας κέρδους του αλγορίθμου εξομάλυνσης

$\mathbf{\Phi}$: ο πίνακας μετάβασης

N : η τελευταία εποχή

$\mathbf{P}_{k|n}$: Ο πίνακας συμμεταβλητοτήτων των σφαλμάτων

$\mathbf{x}_{k|n}$: Το εξομαλυμένο διάνυσμα των αγνώστων στην εποχή k .

Με αυτή τη διαδικασία την ανάδρομης εξομάλυνσης σε συνδυασμό με το EKF χρησιμοποιείται όλη η διαθέσιμη πληροφορία και πραγματοποιούνται καλύτερες εκτιμήσεις της δυναμικής του συστήματος σε σχέση με τη χρήση μόνο του EKF.

8. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΕΡΟΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ GPS/INS

Στο παρακάτω κεφάλαιο αναλύεται και τεκμηριώνεται η επεξεργασία δεδομένων GPS/INS ενός αερομεταφερόμενου συστήματος το οποίο χρησιμοποιείται για τη λήψη αεροφωτογραφιών.

Το σύστημα το οποίο εξετάζεται αποτελείται από τη αεροφωτομηχανή DMC (Digital Mapping Camera), η οποία συνδέεται με το Aerocontrol, μια μονάδα η οποία περιλαμβάνει ένα γεωδαιτικό δέκτη GPS δύο συχνοτήτων τύπου NovAtel OEMV-4, μία Αδρανειακή Μονάδα Μετρήσεων τύπου IMU IIf και μία μονάδα διαχείρισης αισθητήρων (Sensor Management Unit, SMU). Αποτελεί μια ολοκληρωμένη λύση για εφαρμογές αεροφωτογραφήσεων, επιτρέποντας παράλληλα και τον υπολογισμό των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού (βλ. εικόνα 8.1). Η αδρανειακή μονάδα μετρήσεων αποτελείται από Γυροσκόπια Οπτικών Ινών και σύμφωνα με τον κατασκευαστή η ολίσθηση των γυροσκοπίων είναι ίση με 0.03 deg/h.

Το σύστημα παρέχεται από την εταιρεία Integrated Geospatial Innovations (IGI) και συνοδεύεται με τα λογισμικά:

- AeroOffice v.5.2.b της IGI για την αποκωδικοποίηση των πρωτογενών δεδομένων και τον συνδυασμό της λύσης GPS με τα δεδομένα του αδρανειακού συστήματος
- GrafNav v.8.50.4320 της NovAtel για την επεξεργασία των δεδομένων του γεωδαιτικού δέκτη GPS.

Στο παράρτημα Α αναφέρονται τα πλήρη χαρακτηριστικά του συστήματος.



Εικόνα 8.1. Φωτομηχανή DMC II (αριστερά) συνοδευόμενη από το σύστημα Aerocontrol (δεξιά).

Στην εικόνα 8.2 φαίνεται το αεροσκάφος τύπου Piper Navajo 425 Pressurized στο οποίο είναι τοποθετημένο το σύστημα και είναι ειδικά διαμορφωμένο για εργασίες αεροφωτογραφήσεων.



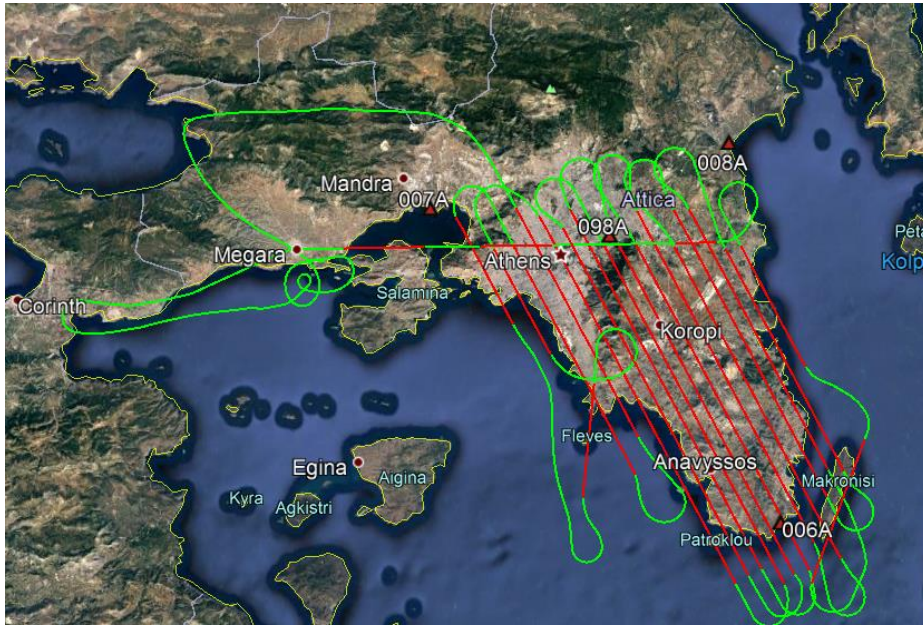
Εικόνα 8.2. Το Αεροσκάφος τύπου Piper Navajo 425 Pressurized στο οποίο είναι τοποθετημένο το σύστημα

Τα δεδομένα τα οποία επεξεργάστηκαν προέρχονται από πέντε διαφορετικές αποστολές. Η επιλογή των αποστολών έχει γίνει με στόχο την ύπαρξη αρκετά αντιπροσωπευτικού δείγματος δεδομένων ενώ έχει συμπεριληφθεί και μια αποστολή με πολύ μικρή επιχειρησιακή διάρκεια για να εξεταστεί η συμπεριφορά του συστήματος όταν περιορίζεται σημαντικά ο χρόνος παρατήρησης (βλ. πίνακα 8.1).

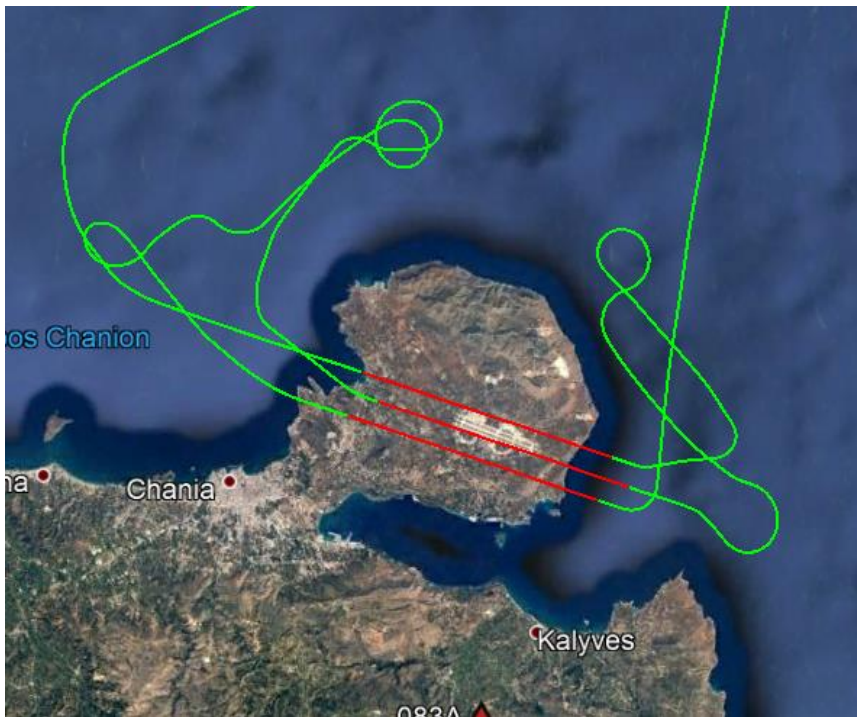
Πίνακας 8.1. Σύνοψη στοιχείων αποστολών

	ΑΤΤΙΚΗ	ΧΑΝΙΑ	ΑΝ. ΑΤΤΙΚΗ	ΣΚΙΑΘΟΣ	ΚΑΒΑΛΑ
Ημερομηνία αποστολής	24-07-15	02-11-16	22-03-16	02-12-16	11-03-18
Μέσο ύψος πτήσης (μ)	2600	1100	3500	1100	1300
Ώρα έναρξης αποστολής	6:39	7:45	11:47	8:34	8:28
Ώρα λήξης αποστολής	11:14	11:07	14:29	10:28	12:55
Διάρκεια αποστολής (ώρες)	4:35	3:22	2:42	1:54	4:27
Ώρα έναρξης καταγραφής events	7:15	9:12	12:27	9:36	10:02
Ώρα λήξης καταγραφής events	10:41	9:50	13:53	9:38	11:34
Διάρκεια φωτοληψίας (ώρες)	3:26	0:38	1:26	0:02	1:32
Αριθμός καταγεγραμμένων events	974	135	258	20	451

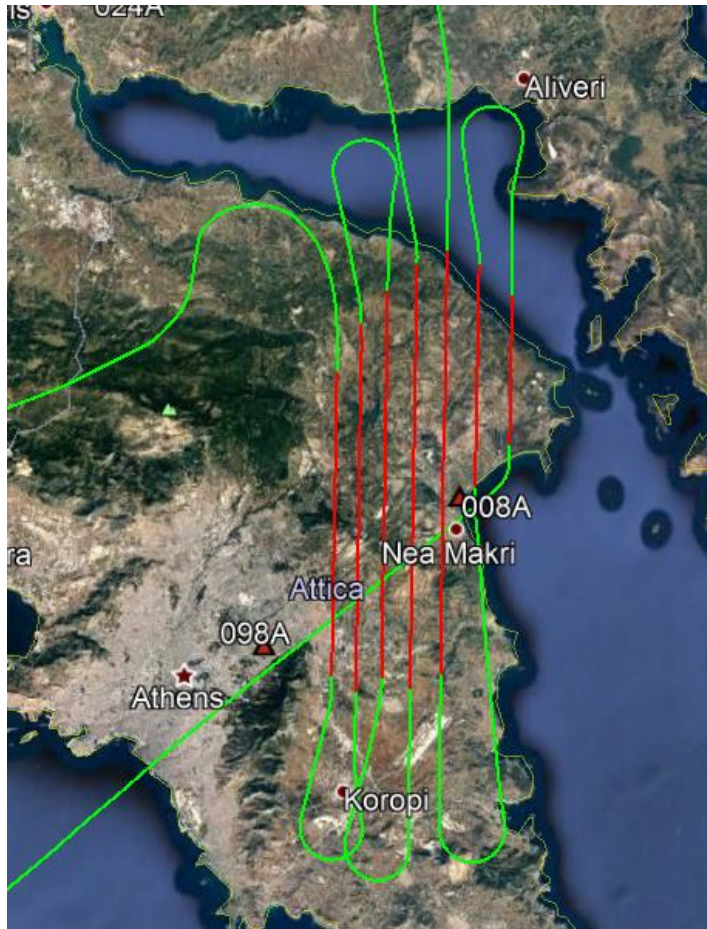
Οι αποστολές έλαβαν χώρα κατά τα έτη 2015, 2016 και 2018 και καλύπτουν τις περιοχές της Αττικής (ολόκληρος ο νομός), των Χανίων, της Ανατολικής Αττικής, της Σκιάθου και της Καβάλας (βλ. εικόνες 8.3-8.7). Με κόκκινο συμβολίζονται οι περιοχές λήψεων των αεροφωτογραφιών.



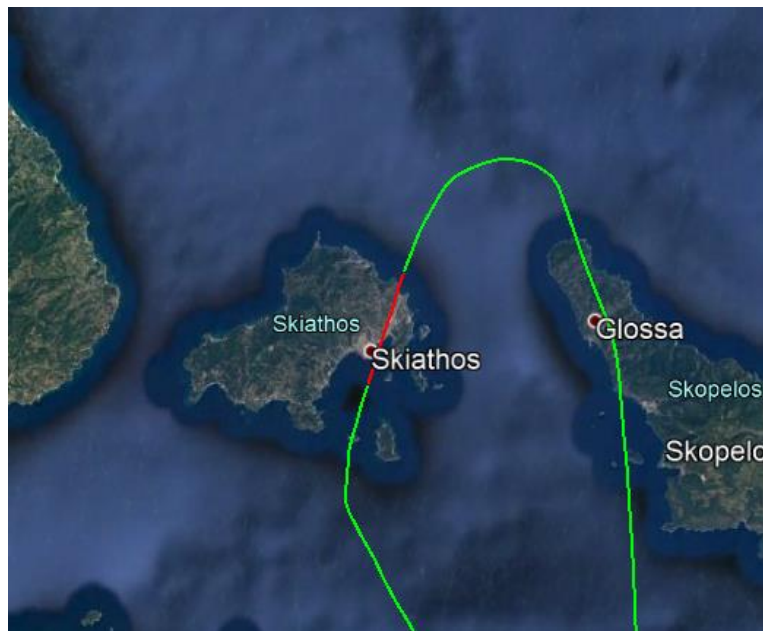
Εικόνα 8.3. Απεικόνιση σε δορυφορική εικόνα της αποστολής στην Αττική



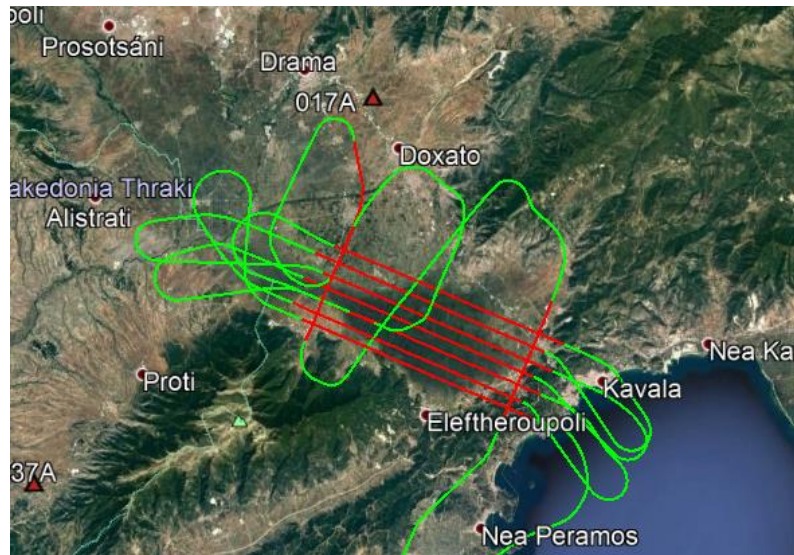
Εικόνα 8.4. Απεικόνιση σε δορυφορική εικόνα της αποστολής στα Χανιά



Εικόνα 8.5. Απεικόνιση σε δορυφορική εικόνα της αποστολής στην Ανατολική Αττική



Εικόνα 8.6. Απεικόνιση σε δορυφορική εικόνα της αποστολής στη Σκιάθο



Εικόνα 8.7. Απεικόνιση σε δορυφορική εικόνα της αποστολής στην Καβάλα

Τα δεδομένα από όλες τις αποστολές επεξεργάστηκαν με τα λογισμικά που συνοδεύουν το σύστημα. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή του τρόπου με τον οποίο τα δεδομένα αποκωδικοποιούνται και επεξεργάζονται.

8.1 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Το σύστημα είναι δομημένο έτσι ώστε να καταγράφει τα δεδομένα και να τα αποθηκεύει ανά ένα λεπτό σε ξεχωριστά συνεχόμενα αρχεία. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει η δυνατότητα εάν υπάρχει μια αστοχία κατά τη διάρκεια μιας αποστολής (π.χ. απώλεια τροφοδοσίας), τα δεδομένα μέχρι τη χρονική στιγμή της αστοχίας να είναι διαθέσιμα. Για την βέλτιστη αρχικοποίηση των τιμών του INS και τη βαθμονόμηση των αδρανειακών αισθητήρων, το σύστημα ενεργοποιείται με το που ενεργοποιούνται οι κινητήρες του αεροσκάφους και απενεργοποιείται αφού το αεροσκάφος προσγειωθεί.

Ο δέκτης GNSS του αερομεταφερόμενου συστήματος καταγράφει δεδομένα GPS με ρυθμό 2 Hz (ανά 0.5 sec) ενώ η IMU με ρυθμό 128Hz.

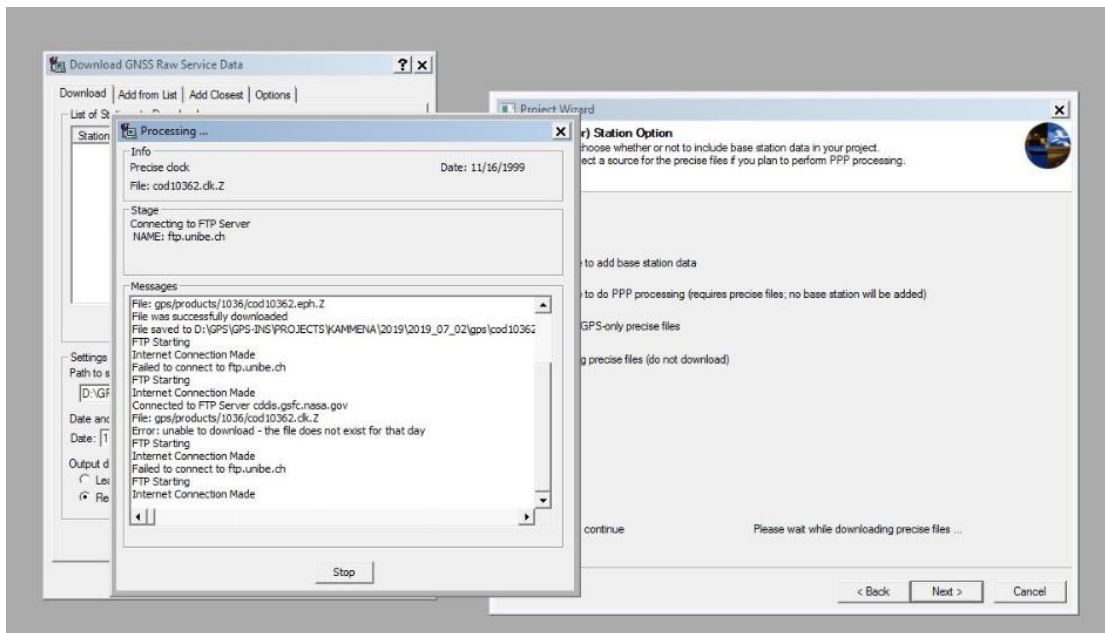
Μετά το πέρας της αποστολής και το κατέβασμα των πρωτογενών δεδομένων, αυτά εισάγονται και αποκωδικοποιούνται στο AeroOffice (βλ. εικόνα 8.8).



Εικόνα 8.8. Αποκωδικοποιημένα πρωτογενή δεδομένα της αποστολής της Αν. Αττικής στο περιβάλλον του AeroOffice

Στη συνέχεια, από τα αποκωδικοποιημένα πρωτογενή δεδομένα προκύπτει το αρχείο με τα δεδομένα του γεωδαιτικού δέκτη GPS το οποίο χρησιμοποιείται για να προσδιοριστούν οι θέσεις ανά εποχή στο GrafNav.

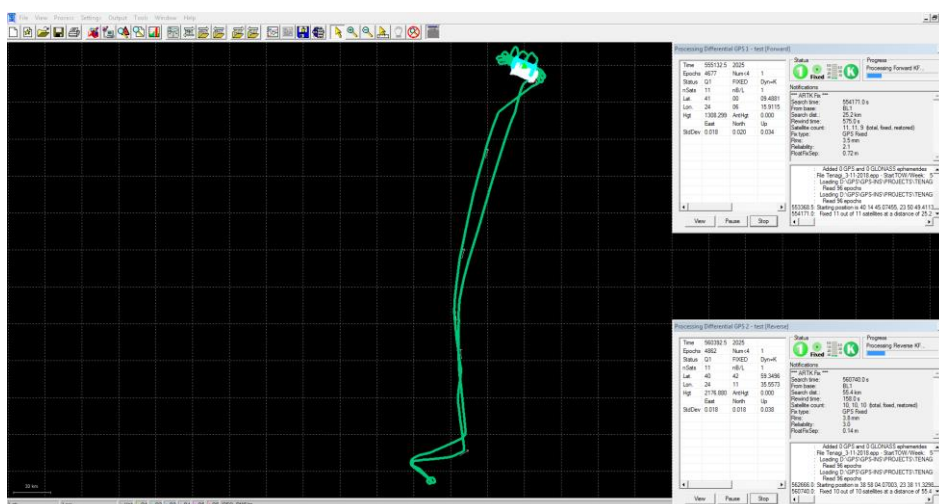
Τα δεδομένα εισάγονται και μετά ορίζεται ο σταθμός ή οι σταθμοί αναφοράς εάν πρόκειται για σχετική λύση GPS. Διαφορετικά, το λογισμικό κατεβάζει δεδομένα χρόνου και τροχών ακριβείας για λύση μέσω Precise Point Positioning (βλ. εικόνα 8.9).



Εικόνα 8.9. Διαδικασία απόκτησης δεδομένων τροχιών ακριβείας για Precise Point Positioning

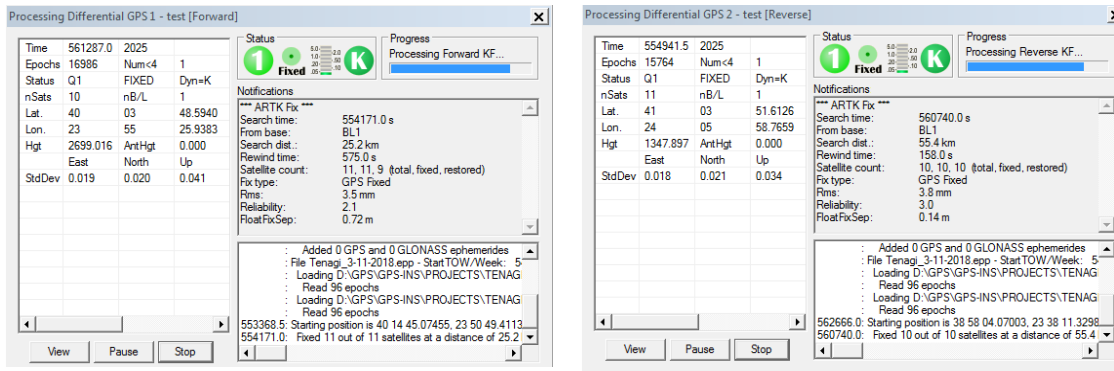
Οι επιλογές που είναι διαθέσιμες στο χρήστη για την επίλυση των δεδομένων GPS είναι οι συνήθεις των επιλυτικών λογισμικών για GNSS και αφορούν παραμέτρους όπως τον ορισμό της γωνίας αποκοπής των παρατηρήσεων, τον αποκλεισμό παρατηρήσεων από συγκεκριμένους δορυφόρους, την επιλογή ιονοσφαιρικού μοντέλου κλπ. Επιλέγοντας προφίλ επεξεργασίας δεδομένων με τις ρυθμίσεις που αφορούν αερομεταφερόμενα συστήματα, ορίζονται και οι προεπιλεγμένες παράμετροι για αυτές τις επιλογές. Κατά τη σχετική λύση, επειδή τα δεδομένα που παρέχονται από τα συστήματα σταθμών αναφοράς όπως είναι το Heros ή από γεωδαιτικούς δέκτες GNSS οι οποίοι χρησιμοποιούνται σαν σταθμοί αναφοράς και έχουν κατά κύριο λόγο μέγιστο ρυθμό καταγραφής το 1Hz, το λογισμικό μέσω παρεμβολής τα γεφυρώνει με τα δεδομένα του γεωδαιτικού δέκτη του συστήματος, ο οποίος καταγράφει δεδομένα στα 2Hz.

Τα δεδομένα επιλύονται με αμφίδρομη επεξεργασία (forward - reverse processing) για τις επιλύσεις με σχετικό εντοπισμό και με πολλαπλή επεξεργασία (multipass) για τις επιλύσεις με Precise Point Positioning (βλ. εικόνα 8.10).



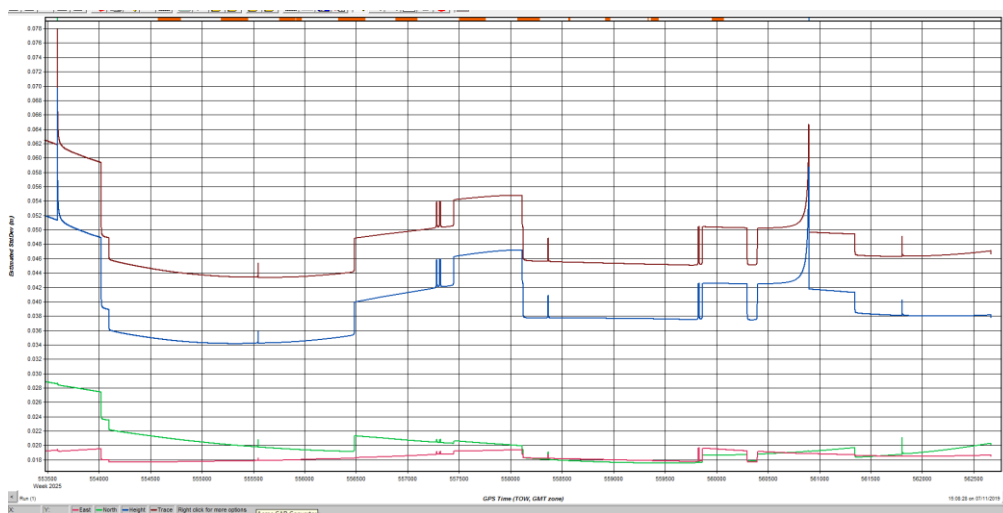
Εικόνα 8.10. Επεξεργασία δεδομένων GPS αερομεταφερόμενου συστήματος

Κατά την επίλυση, τα δεδομένα εξομαλύνονται με τη χρήση ενός φίλτρου Kalman (βλ. εικόνα 8.11).



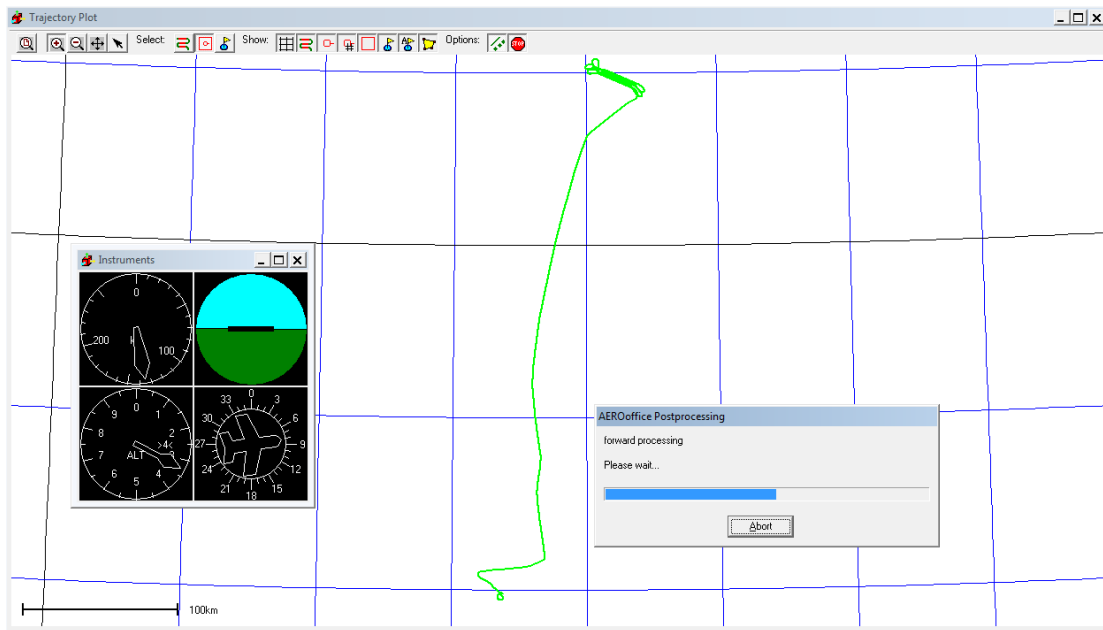
Εικόνα 8.11. Φιλτράρισμα δεδομένων GPS αερομεταφερόμενου συστήματος. Αριστερά forward processing, δεξιά reverse processing

Αφού ολοκληρωθεί η επεξεργασία των δεδομένων GPS στο GrafNav, ο χρήστης μπορεί να συμβουλευτεί μια σειρά από διαγράμματα τα οποία αφορούν ποιοτικά χαρακτηριστικά της λύσης, αριθμό ορατών δορυφόρων, δείκτες DOP κλπ (βλ. εικόνα 8.12).



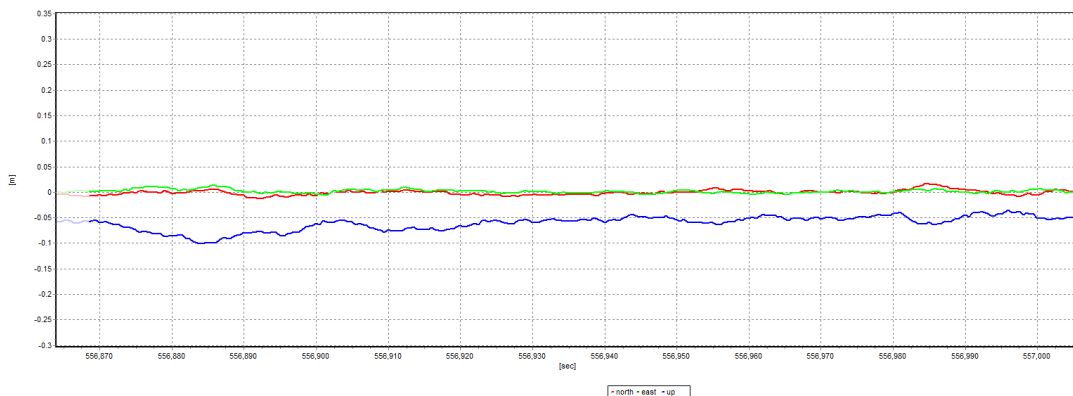
Εικόνα 8.12. Διάγραμμα με την εκτιμώμενη ακρίβεια της λύσης GPS για την αποστολή της Καβάλας κατά Easting (κόκκινη γραμμή), Northing (πράσινη γραμμή), Elevation (μπλε γραμμή) και υπολογισμό τροχιάς (καφέ γραμμή).

Τα δεδομένα στη συνέχεια εξάγονται ανά εποχή σε σειριακό αρχείο συγκεκριμένης δομής και εισάγονται στο AeroOffice για να πραγματοποιηθεί η συνδυασμένη λύση με τα δεδομένα του αδρανειακού συστήματος. Επομένως πρόκειται για μια αμιγώς χαλαρή σύζευξη (loosely coupled), όπου η λύση GPS παρέχεται αυτούσια στο σύστημα από διαφορετικό λογισμικό. Στην εικόνα 8.13 απεικονίζεται ένα στιγμιότυπο οθόνης κατά τη διάρκεια της επίλυσης των δεδομένων GPS/INS.



Εικόνα 8.13. Συνδυασμός δεδομένων GPS/INS στο AeroOffice

Μετά την επεξεργασία, το λογισμικό Aerooffice διαθέτει μια σειρά διαγραμμάτων μέσω των οποίων ο χρήστης μπορεί να αξιολογήσει την ποιότητα της λύσης (βλ. εικόνα 8.14.).



Εικόνα 8.14. Διαφορές λύσης σχετικού εντοπισμού GPS με συνδυασμένη λύση GPS/INS κατά Easting (πράσινη γραμμή), Northing (κόκκινη γραμμή) και Elevation (μπλε γραμμή).

Αφού ολοκληρωθεί ο συνδυασμός των δεδομένων, τότε εξάγονται σε σειριακό αρχείο οι παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού ($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa$) σε αντιστοιχία με τις λήψεις (events) που πραγματοποίησε η φωτομηχανή, αφού συνυπολογιστούν και οι συντελεστές των εκκεντροτήτων του γεωδαιτικού δέκτη GPS, της IMU και του αισθητήρα της φωτομηχανής (Lever arm offsets και boresight alignment) (βλ. εικόνα 8.15).

```

*
* Infos from the postprocessing logfile:
* AEROoffice V5.2b 2011-03-23 .
* Dongle-ID: 2-1364931 .
* 07-Nov-18 3:14:45 PM .
* Header of imported GPS File .
* Project: Tenagi_3-11-2018_T5 .
* Program: GrafNav Version 8.50.4320 .
* Profile: IGI AEROCTRL .
* Source: GNSS Epochs(Combined) .
* ProcessInfo: Run (1) by Unknown on 11/07/2018 at 15:07:37 .
* Datum: ETRS89, (processing datum) .
* Master 1: Name T5, Status ENABLED .
* GPS-Leverarm: -0.357m 0.025m -1.142m .
* GPS-Leverarm: variable .
* Mount-Center-Leverarm: -0.016m 0.000m 0.219m .
*
* *****
*
* Selected Units:
* Angular Units: Grad/Gon (0..400)
* Length Units: Meter
*
* Format:
* ID Easting Northing Height Omega Phi Kappa
*
* Output of event data
* File will contain 451 online Events
*
# LINE 000
2 528278.914 2529717.897 1352.489 2.11347 2.41584 165.58474
3 528030.556 2529821.683 1359.275 -0.55211 5.17365 163.99856
4 527773.968 2529935.788 1366.718 0.00746 3.50696 162.01045
5 527565.266 2530033.030 1369.543 3.76770 0.83117 161.14365
6 527344.507 2530134.091 1373.441 7.16693 1.03695 162.83850
7 527134.376 2530223.589 1380.801 6.54648 0.23664 164.96428
8 526907.669 2530313.948 1385.084 3.95845 1.54511 166.21911
9 526666.666 2530407.763 1388.602 1.55532 2.86117 166.11340
10 526431.209 2530501.761 1392.007 0.72492 3.04760 165.06864
11 526165.390 2530612.963 1394.538 0.40900 2.61968 163.99742
12 525897.750 2530730.082 1394.597 2.06443 0.84036 163.21450
13 525622.045 2530851.833 1393.460 3.78497 -0.38794 164.10559
14 525350.739 2530967.373 1392.644 3.71177 -0.77914 165.42053
15 525071.452 2531081.509 1390.221 2.82337 -0.39065 166.20947

```

Εικόνα 8.15. Απόσπασμα από εξαγόμενο αρχείο του AeroOffice

Σε όλες τις συγκριτικές δοκιμές που θα ακολουθήσουν εξετάζονται τα δεδομένα που αφορούν τη θέση και όχι τον προσανατολισμό του αερομεταφερόμενου συστήματος, καθώς οι συγκρίσεις των στροφών ω, ϕ, κ (οι οποίες περιλαμβάνονται στο παράρτημα) έδειξαν πάρα πολύ μικρές διαφορές.

8.2 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΤΗΣ ΛΥΣΗΣ ΣΧΕΤΙΚΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ GPS ΣΤΗΝ ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΤΗΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΛΥΣΗΣ

Η πρώτη δοκιμή που πραγματοποιήθηκε, εξετάζει τη σημασία της διάρκειας της λύσης GPS σχετικού εντοπισμού κατά την αποστολή και το κατά πόσο περιορίζοντας την, μπορούν να προκύψουν δεδομένα υψηλής ακρίβειας.

Σαν βέλτιστη λύση θεωρείται η συνδυασμένη λύση GPS/INS η οποία τροφοδοτείται με δεδομένα από λύση σχετικού εντοπισμού GPS καθ' όλη τη διάρκεια της αποστολής, καθώς με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μεγαλύτερος αριθμός παρατηρήσεων και μεγαλύτερος χρόνος λειτουργίας του φίλτρου Kalman, άρα και καλύτερη σύγκλιση.

Στην πράξη όμως δεν είναι πάντα εφικτό να υπάρχει υποστήριξη με λύση σχετικού εντοπισμού GPS καθ' όλη τη διάρκεια της αποστολής, καθώς υπάρχουν περιορισμοί σε αποστολές όπου η περιοχή ενδιαφέροντος απέχει μακριά από το αεροδρόμιο από το οποίο επιχειρεί το αεροσκάφος και η διάταξη των Μονίμων Σταθμών Αναφοράς ενός συστήματος (όπως πχ του HEPOS) μπορεί να μην επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση του αερομεταφερόμενου δέκτη. Ένα άλλο ενδεχόμενο το οποίο απαντάται συχνά στην Ελλάδα, είναι ανάμεσα στην περιοχή ενδιαφέροντος και το αεροδρόμιο να παρεμβάλλεται θάλασσα (περιοχή που δεν μπορεί να καλυφθεί από κάποιο δίκτυο Σταθμών αναφοράς). Επίσης αναφέρεται ότι η συγκεκριμένη έκδοση του GrafNav περιορίζει τον μέγιστο αριθμό Σταθμών Αναφοράς που μπορεί να εισάγει ο χρήστης στους 8 ανά αποστολή. Ακόμα, σημαντικός παράγοντας είναι και το κόστος απόκτησης μεγάλης διάρκειας δεδομένων υψηλού ρυθμού καταγραφής από ένα σύστημα Μονίμων Σταθμών Αναφοράς.

Τέλος, μπορεί κατά τον σχεδιασμό να αποφασιστεί να μην επιλεγεί κάποιο δίκτυο Σταθμών Αναφοράς και η υποστήριξη της εναέριας αποστολής να πραγματοποιηθεί με έναν γεωδαιτικό δέκτη GNSS ο οποίος θα λειτουργεί σαν Σταθμός Αναφοράς, τοποθετημένος σε ένα σημείο γνωστών συντεταγμένων όπου ευνοούνται οι παρατηρήσεις GNSS (περιοχή με ανοιχτό ορίζοντα και μακριά από πηγές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας), κοντά στην περιοχή ενδιαφέροντος.

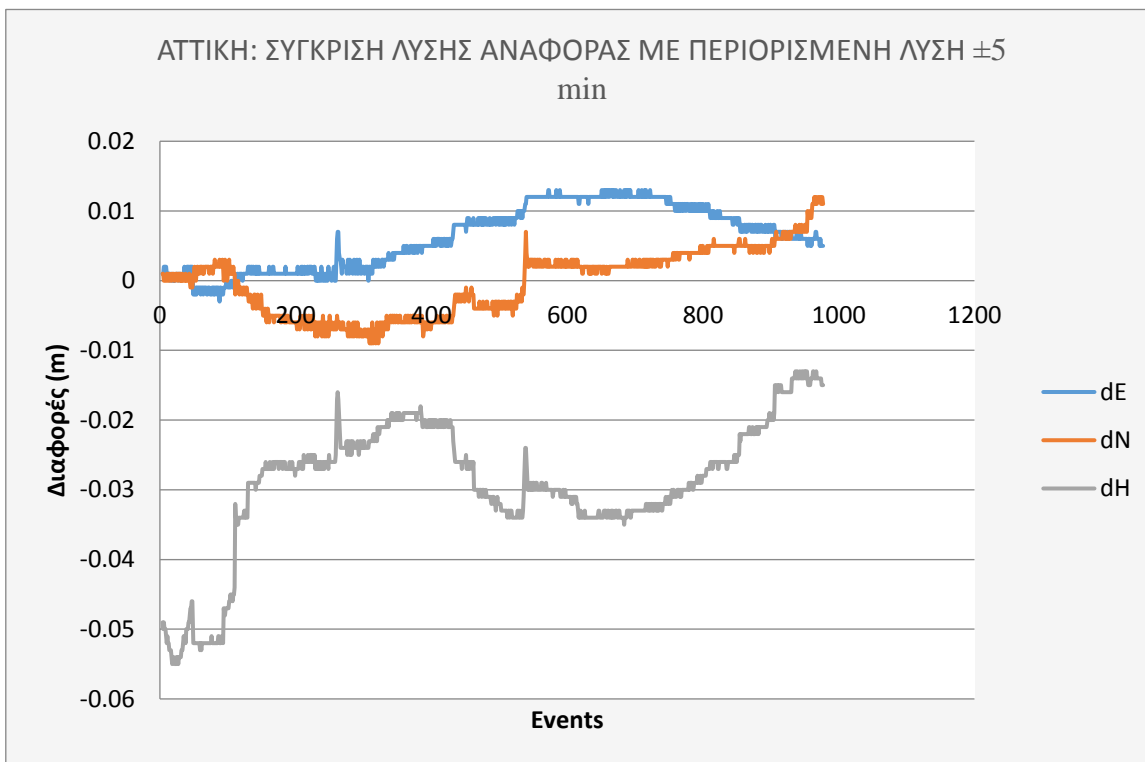
Με βάση τα παραπάνω λοιπόν, πραγματοποιήθηκαν για τις 5 αποστολές δοκιμές θέτοντας τη συνδυασμένη λύση δεδομένων GPS/INS που υποστηρίζεται με τη μεγαλύτερη διάρκεια παρατηρήσεων σχετικής λύσης GPS ως Λύση Αναφοράς και συγκρίνοντάς τις με δύο λύσεις:

A. Μια συνδυασμένη λύση δεδομένων GPS/INS όπου τα δεδομένα του σταθμού αναφοράς αρχίζουν 5 λεπτά πριν την έναρξη και τελειώνουν 5 λεπτά μετά τη λήξη της λήψης των αεροφωτογραφιών.

B. Μια συνδυασμένη λύση δεδομένων GPS/INS όπου τα δεδομένα του σταθμού αναφοράς αρχίζουν 1 λεπτό πριν την έναρξη και τελειώνουν 1 λεπτό μετά τη λήξη της λήψης των αεροφωτογραφιών..

Παρακάτω αναλύεται η σύγκριση της Λύσης Αναφοράς για την αποστολή της Αττικής με τις λύσεις A και B.

Αρχικά συγκρίνεται η Λύση Αναφοράς με τη συνδυασμένη λύση όπου η λύση σχετικού εντοπισμού GPS αρχίζει 5 λεπτά πριν την έναρξη και τελειώνει 5 λεπτά μετά τη λήξη της λήψης των αεροφωτογραφιών (βλ. εικόνα 8.16).



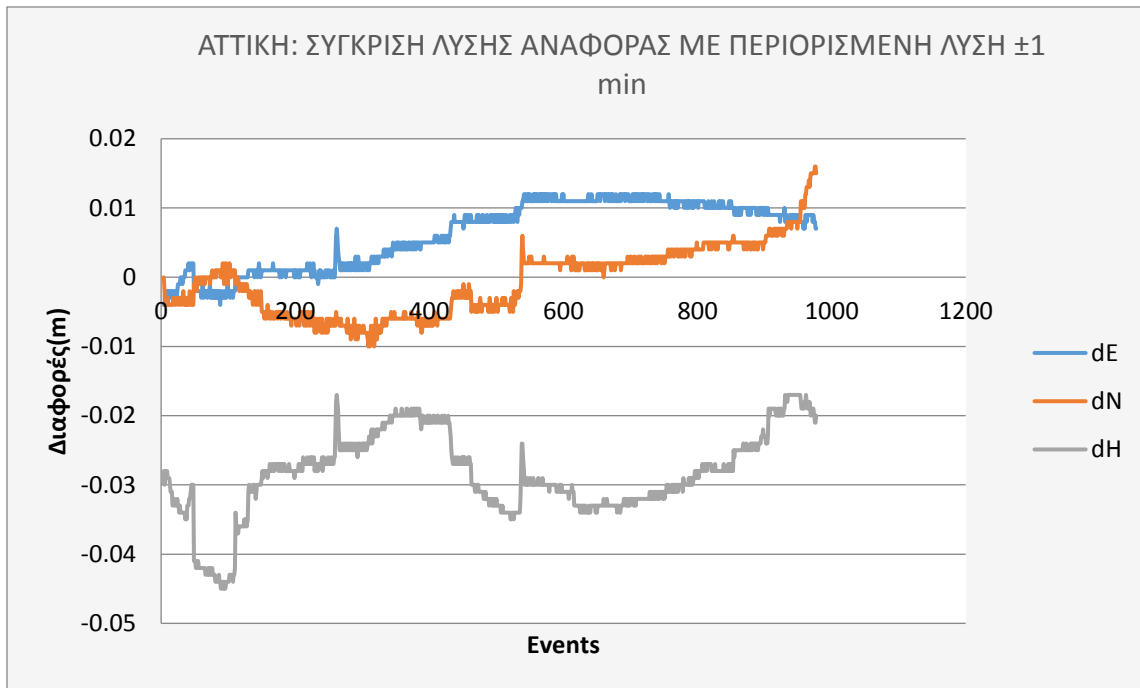
Εικόνα 8.16. Σύγκριση Λύσης Αναφοράς με τη λύση περιορισμένης διάρκειας (± 5 min) για την αποστολή της Αττικής.

Τα κύρια στατιστικά στοιχεία των διαφορών ανάμεσα στις δύο λύσεις δίνονται στον πίνακα 8.2:

Πίνακας 8.2. Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης Λύσης Αναφοράς και περιορισμένης λύσης (± 5 min) για την αποστολή της Αττικής.

ΑΤΤΙΚΗ: Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης λύσης αναφοράς με περιορισμένη λύση ± 5 min			
	dE	dN	dH
Min	-0.003	-0.009	-0.055
Max	0.013	0.012	-0.013
Average	0.006	0.000	-0.029
St. Dev	0.005	0.005	0.009

Στη συνέχεια συγκρίνεται η Λύση Αναφοράς με τη συνδυασμένη λύση όπου η λύση σχετικού εντοπισμού GPS αρχίζει 1 λεπτό πριν την έναρξη και τελειώνει 1 λεπτό μετά την λήξη της λήψης των αεροφωτογραφιών (βλ. εικόνα 8.17).



Εικόνα 8.17. Σύγκριση Λύσης Αναφοράς με τη λύση περιορισμένης διάρκειας (± 1 min) για την αποστολή της Αττικής.

Τα κύρια στατιστικά στοιχεία των διαφορών ανάμεσα στις δύο λύσεις δίνονται στον πίνακα 8.3:

Πίνακας 8.3. Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης Λύσης Αναφοράς και περιορισμένης λύσης (± 1 min) για την αποστολή της Αττικής.

ΑΤΤΙΚΗ: Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης λύσης αναφοράς με περιορισμένη λύση ± 1 min			
	dE	dN	dH
Min	-0.004	-0.010	-0.045
Max	0.012	0.016	0.006
Average	0.006	-0.001	-0.028
St. Dev	0.005	0.005	0.006

Τα αναλυτικά διαγράμματα και στατιστικά στοιχεία για τις υπόλοιπες αποστολές περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Β.

Παρατηρώντας τα στοιχεία που προκύπτουν από τις συγκρίσεις των λύσεων για την αποστολή της Αττικής δεν προκύπτουν σημαντικές διαφορές στις συντεταγμένες των ορθοφωτοκέντρων περιορίζοντας τη διάρκεια της σχετικής λύσης GPS. Όπως είναι αναμενόμενο, οι τιμές κατά elevation δείχνουν να είναι πιο ευαίσθητες στις μεταβολές, ωστόσο τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι διαφορές περιορίζονται στα λίγα cm.

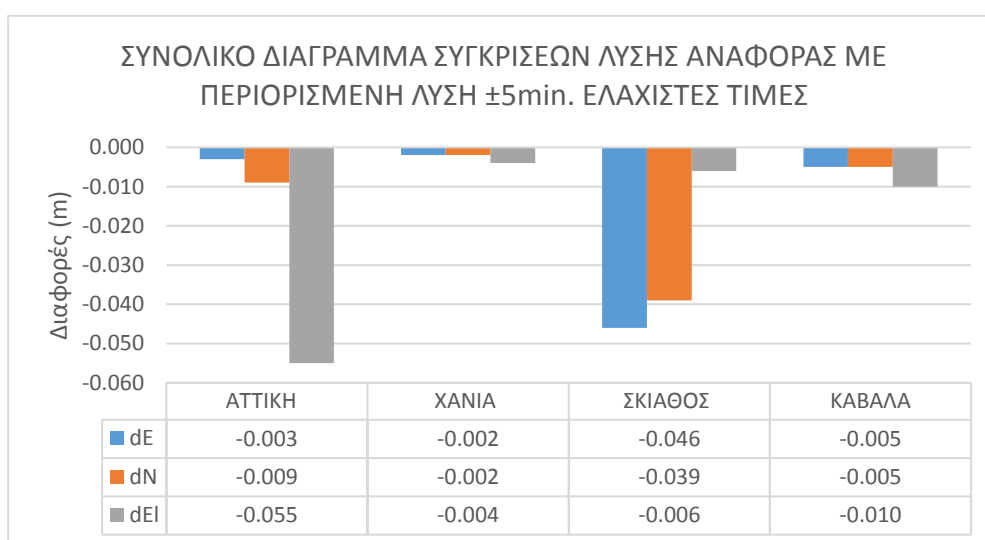
Στη συνέχεια εξετάζονται συνολικά τα δεδομένα και για τις πέντε αποστολές. Οι χρόνοι διάρκειας της σχετικής λύσης GPS που συνεισφέρει για τη δημιουργία της λύσης αναφοράς και οι χρόνοι διάρκειας των περιορισμένων λύσεων GPS σχετικού εντοπισμού αναφέρονται στον πίνακα 8.4:

Πίνακας 8.4. Στοιχεία διάρκειας σχετικών λύσεων GPS των αποστολών

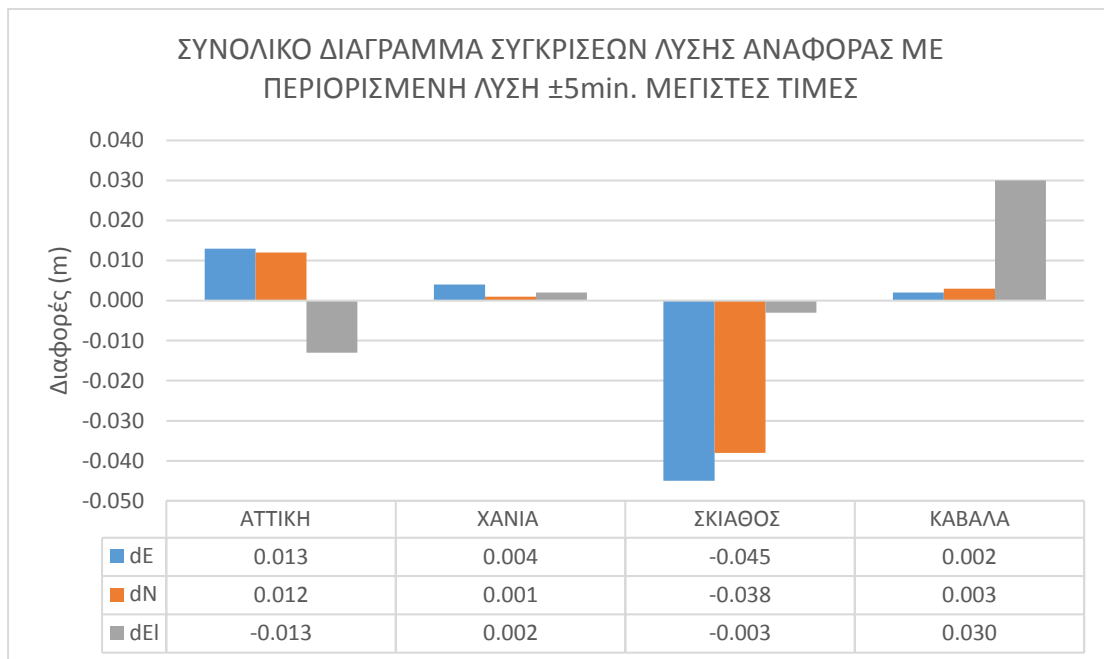
	ΑΤΤΙΚΗ	ΧΑΝΙΑ	ΑΝ. ΑΤΤΙΚΗ	ΣΚΙΑΘΟΣ	ΚΑΒΑΛΑ
Διάρκεια Λύσης Αναφοράς (ώρες)	4:35	1:12	1:39	0:38	2:45
Διάρκεια περιορισμένης λύσης ± 5min (ώρες)	3:36	0:48	-	0:12	1:42
Διάρκεια περιορισμένης λύσης ± 1min (ώρες)	3:28	0:40	1:28	0:04	1:34

Αρχικά εξετάζεται η σύγκριση των δεδομένων των Λύσεων Αναφοράς για όλες τις αποστολές, πλην της αποστολής της Ανατολικής Αττικής, με τα δεδομένα που προέρχονται από την περιορισμένη λύση σχετικού εντοπισμού GPS ± 5 λεπτών (βλ. εικόνες 8.18-8.22).

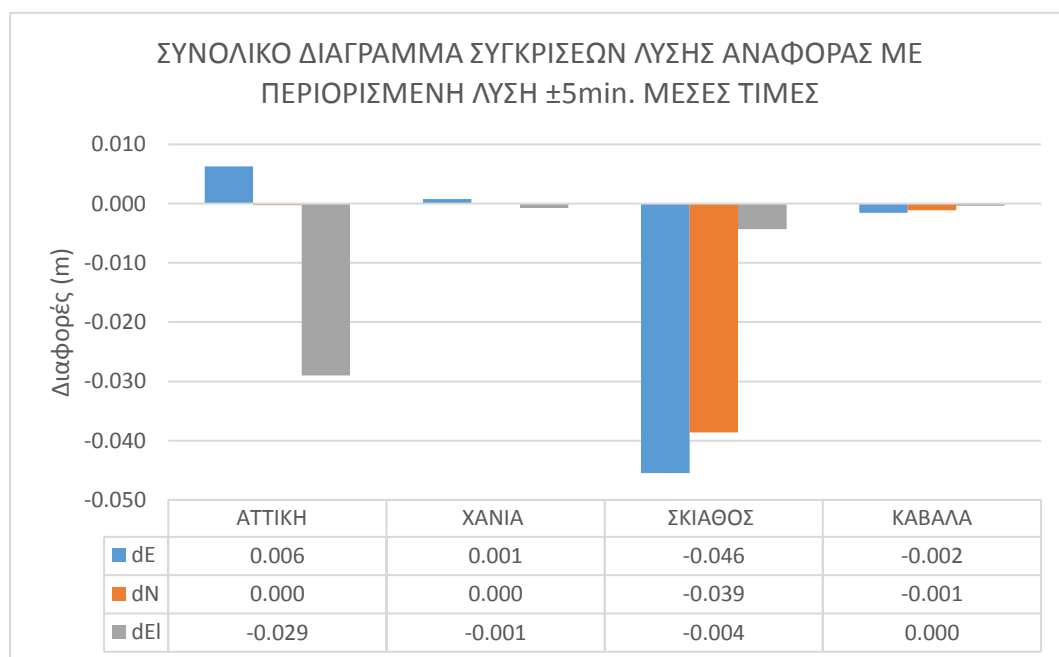
Για την αποστολή της Ανατολικής Αττικής δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα από Σταθμό Αναφοράς για διάστημα μεγαλύτερο των 5 λεπτών πριν την έναρξη λήψης αεροφωτογραφιών και 5 λεπτών μετά τη λήξη. Για αυτόν το λόγο τα συνδυασμένα δεδομένα που προήλθαν από τη συνεισφορά της λύσης σχετικού εντοπισμού GPS αποτέλεσαν τη Λύση Αναφοράς και πραγματοποιήθηκε σύγκριση μόνο με τα δεδομένα που δημιουργήθηκαν με τη συνεισφορά της περιορισμένης λύσης σχετικού εντοπισμού GPS ± 1min.



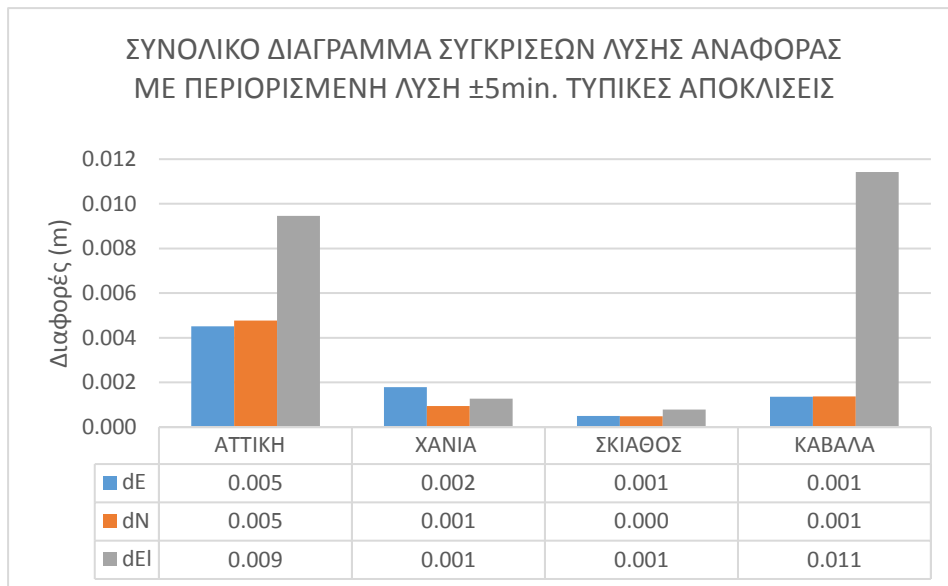
Εικόνα 8.18. Συνολικό διάγραμμα ελάχιστων τιμών διαφορών μεταξύ της Λύσης Αναφοράς και της περιορισμένης λύσης ±5 min.



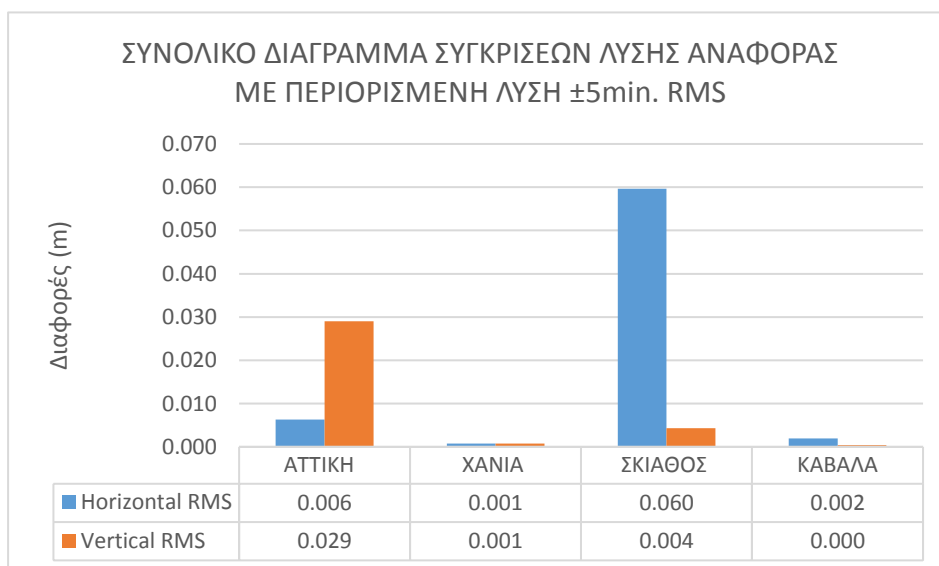
Εικόνα 8.19. Συνολικό διάγραμμα μέγιστων τιμών διαφορών μεταξύ της Λύσης Αναφοράς και της περιορισμένης λύσης ±5 min.



Εικόνα 8.20. Συνολικό διάγραμμα μέσων τιμών διαφορών μεταξύ της Λύσης Αναφοράς και της περιορισμένης λύσης ±5 min.



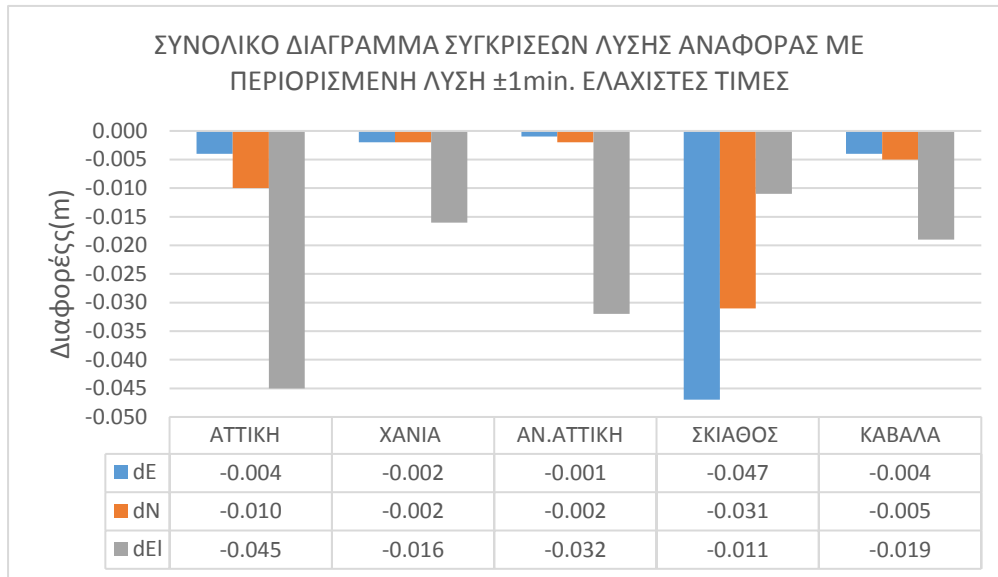
Εικόνα 8.21. Συνολικό διάγραμμα τυπικών αποκλίσεων διαφορών μεταξύ της Λύσης Αναφοράς και της περιορισμένης λύσης ±5 min.



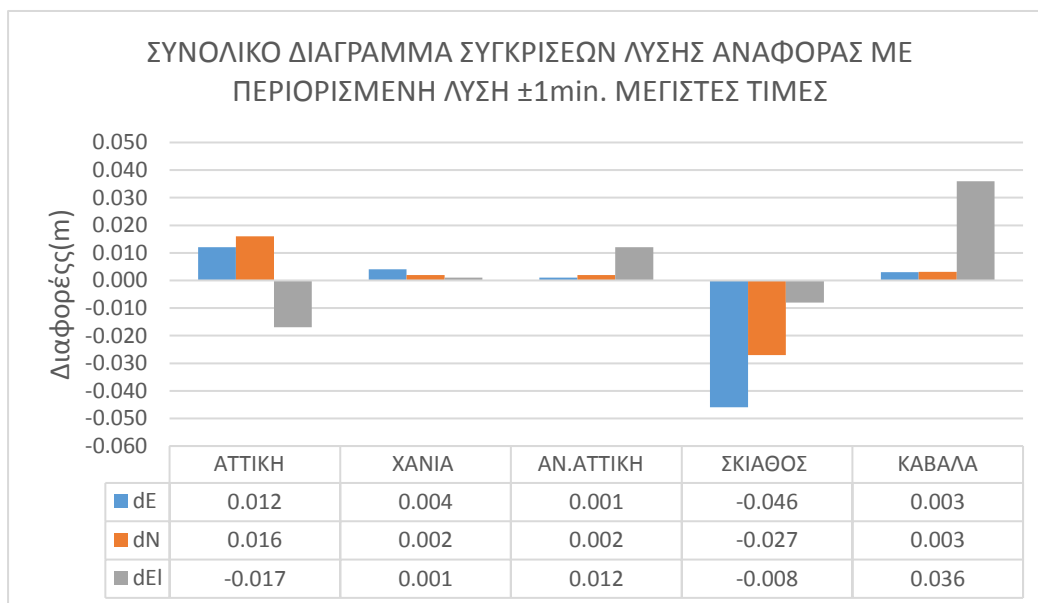
Εικόνα 8.22. Συνολικό διάγραμμα τιμών RMS διαφορών μεταξύ της Λύσης Αναφοράς και της περιορισμένης λύσης ±5 min.

Παρατηρώντας τα στοιχεία που προκύπτουν από τις συγκρίσεις των λύσεων για όλες τις αποστολές, συμπεραίνεται ότι οι διαφορές που προκύπτουν είναι πάρα πολύ μικρές. Οριζοντιογραφικά δεν υπάρχουν ουσιαστικές μεταβολές, με εξαίρεση την αποστολή της Σκιάθου και υψομετρικά οι μέγιστες διαφορές είναι της τάξεως των 5cm.

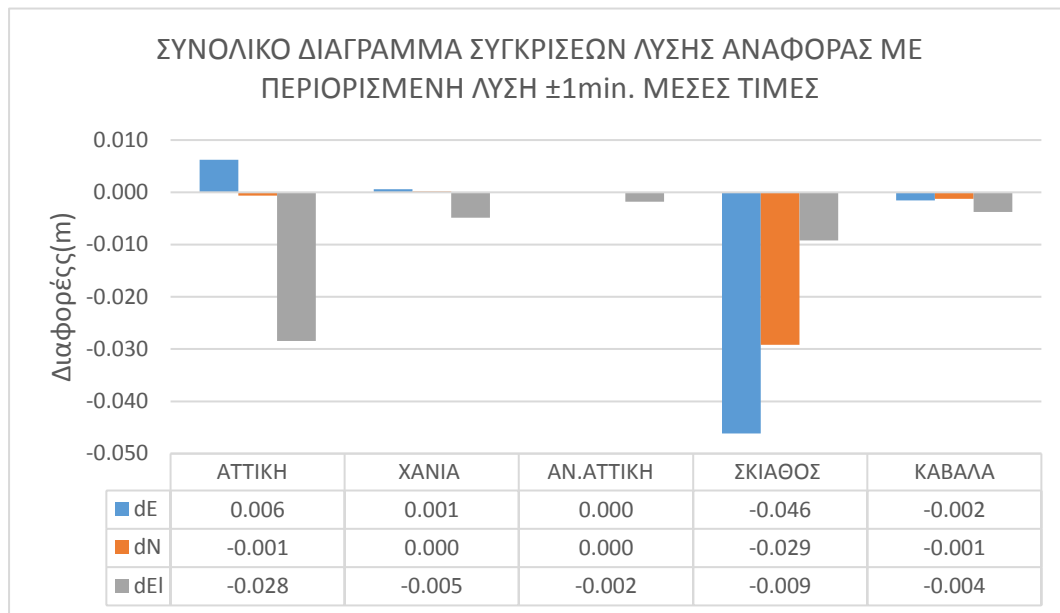
Στη συνέχεια εξετάζεται η σύγκριση των δεδομένων των λύσεων Αναφοράς για όλες τις αποστολές, με τα δεδομένα που προέρχονται από την περιορισμένη λύση σχετικού εντοπισμού GPS $\pm 1\text{min}$ (βλ. εικόνες 8.23-8.27).



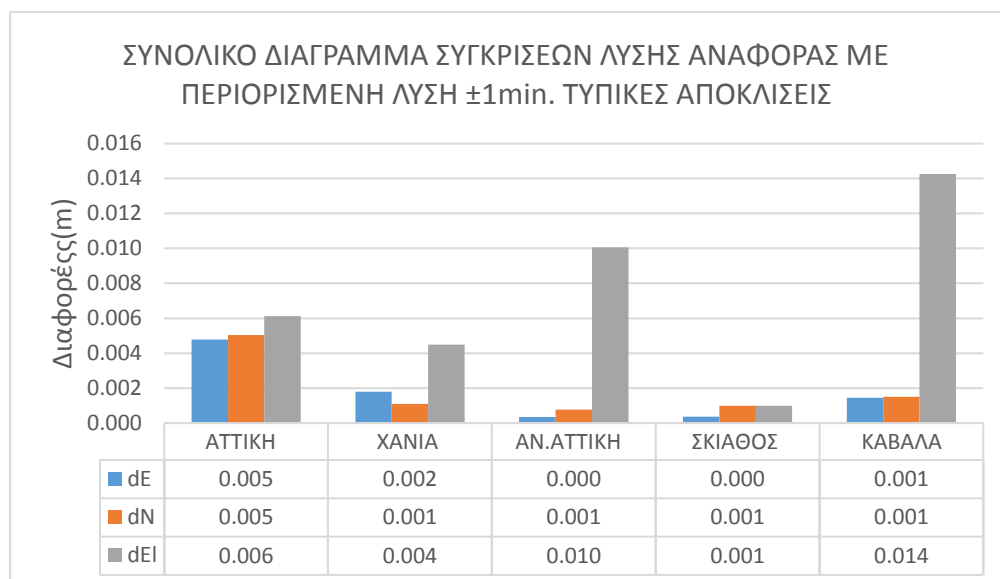
Εικόνα 8.23. Συνολικό διάγραμμα ελάχιστων τιμών διαφορών μεταξύ της Λύσης Αναφοράς και της περιορισμένης λύσης $\pm 1\text{ min}$



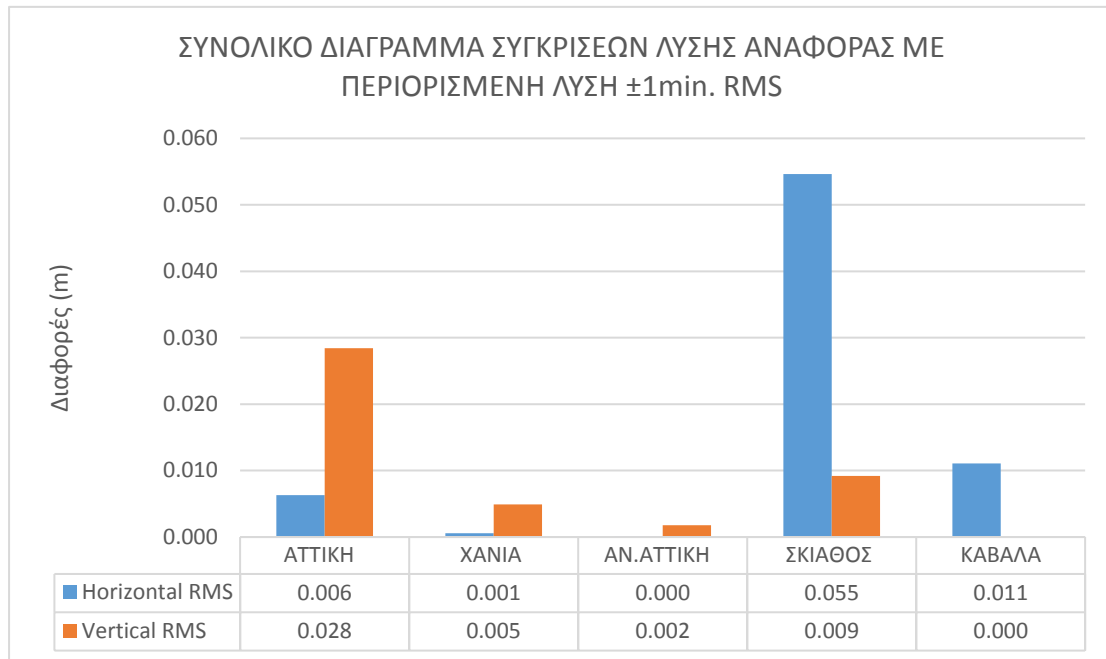
Εικόνα 8.24. Συνολικό διάγραμμα μέγιστων τιμών διαφορών μεταξύ της Λύσης Αναφοράς και της περιορισμένης λύσης $\pm 1\text{ min}$



Εικόνα 8.25. Συνολικό διάγραμμα μέσων τιμών διαφορών μεταξύ της Λύσης Αναφοράς και της περιορισμένης λύσης ±1 min



Εικόνα 8.26. Συνολικό διάγραμμα τυπικών αποκλίσεων διαφορών μεταξύ της Λύσης Αναφοράς και της περιορισμένης λύσης ±1 min



Εικόνα 8.27. Συνολικό διάγραμμα τιμών RMS διαφορών μεταξύ της Λύσης Αναφοράς και της περιορισμένης λύσης ±1 min.

Με βάση τα στοιχεία και αυτών των συγκρίσεων προκύπτει ότι για την περιορισμένη λύση ± 1 min τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με την περιορισμένη λύση ± 5 min. Παρατηρήθηκε μια μικρή αύξηση στα σφάλματα κατά Η στην αποστολή των Χανίων. Τα σφάλματα στην αποστολή της Σκιάθου, η οποία έχει και τη μικρότερη επιχειρησιακή διάρκεια., παρέμειναν περίπου ίδια και στις δύο περιορισμένες λύσεις.

Στον πίνακα 8.5 συνοψίζονται τα κύρια στατιστικά στοιχεία των διαφορών για όλες τις αποστολές.

Πίνακας 8.5. Συνολικά στατιστικά στοιχεία (m) διαφορών λύσεων Αναφοράς με περιορισμένες λύσεις Σχετικού Εντοπισμού GPS

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΑΥΞΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ - ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΑΥΞΕΩΝ ΣΧΕΤΙΚΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ GPS															
ΣΥΓΚΡΙΣΗ	ΑΥΞΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ - ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗ ΑΥΞΗ ± 5 min														
	ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ			ΜΕΤΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ			ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ			ΤΥΠΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ			RMS		
ΑΠΟΣΤΟΛΗ	DE	DN	DEI	DE	DN	DEI	DE	DN	DEI	DE	DN	DEI	Hor. RMS	Ver. RMS	
	ΑΤΤΙΚΗ	-0.003	-0.009	-0.055	0.013	0.012	-0.013	0.006	0.000	-0.029	0.005	0.005	0.005	0.009	0.006
ΧΑΝΙΑ	-0.002	-0.002	-0.004	0.004	0.001	0.002	0.001	0.000	-0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
ΣΚΙΑΘΟΣ	-0.046	-0.039	-0.006	-0.045	-0.038	-0.003	-0.046	-0.039	-0.004	0.001	0.000	0.001	0.001	0.060	0.004
ΚΑΒΑΛΑ	-0.005	-0.005	-0.010	0.002	0.003	0.030	-0.002	-0.001	0.000	0.001	0.001	0.011		0.002	0.000
ΣΥΓΚΡΙΣΗ	ΑΥΞΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ - ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗ ΑΥΞΗ ± 1 min														
ΑΠΟΣΤΟΛΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ			ΜΕΤΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ			ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ			ΤΥΠΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ			RMS		
	DE	DN	DEI	DE	DN	DEI	DE	DN	DEI	DE	DN	DEI	Hor. RMS	Ver. RMS	
ΑΤΤΙΚΗ	-0.004	-0.010	-0.045	0.012	0.016	-0.017	0.006	-0.001	-0.028	0.005	0.005	0.006	0.006	0.028	
ΧΑΝΙΑ	-0.002	-0.002	-0.016	0.004	0.002	0.001	0.001	0.000	-0.005	0.002	0.001	0.004	0.001	0.005	
ΑΝ.ΑΤΤΙΚΗ	-0.001	-0.002	-0.032	0.001	0.002	0.012	0.000	0.000	-0.002	0.000	0.001	0.010	0.000	0.002	
ΣΚΙΑΘΟΣ	-0.047	-0.031	-0.011	-0.046	-0.027	-0.008	-0.046	-0.029	-0.009	0.000	0.001	0.001	0.001	0.055	0.009
ΚΑΒΑΛΑ	-0.004	-0.005	-0.019	0.003	0.003	0.036	-0.002	-0.001	-0.004	0.001	0.001	0.014	0.011	0.000	

8.3 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΛΥΣΗΣ GPS ΜΕΣΩ PRECISE POINT POSITIONING ΣΤΗΝ ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΤΗΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΛΥΣΗΣ

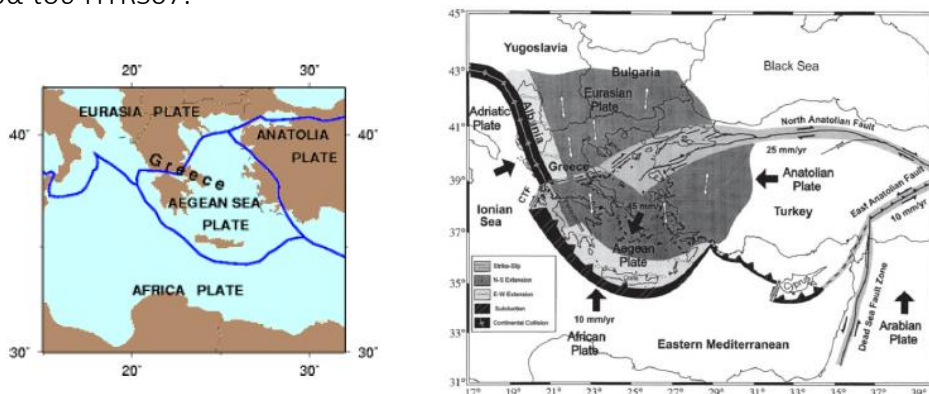
Η επόμενη σειρά δοκιμών διερευνά την ακρίβεια μιας συνδυασμένης λύσης δεδομένων GPS/INS και για τις πέντε αποστολές, όπου τα δεδομένα GPS προέρχονται από λύση μέσω Precise Point Positioning. Η Λύση Αναφοράς παραμένει η ίδια όπως και στην παράγραφο 8.2 και για τις πέντε αποστολές.

Για να πραγματοποιηθεί όμως αυτή η σύγκριση, θα πρέπει να γίνουν κάποιες παραδοχές. Τα δεδομένα των Λύσεων Αναφοράς έχουν υπολογιστεί μέσω του HEPOS στο Σύστημα Αναφοράς του, το οποίο είναι το HTRS07 (Hellenic Terrestrial Reference System 2007) και αποτελεί μια υλοποίηση του ETRS89 (European Terrestrial Reference System) κατά την εποχή 2007.5. Στη συνέχεια, τα δεδομένα μετασχηματίζονται στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ87) μέσω ενός επταπαραμετρικού μετασχηματισμού με κάρναβο διορθώσεων και βήμα 2.5Km x 2.5Km. Η παραπάνω διαδικασία έχει σχεδιαστεί και προτείνεται από την «Ελληνικό Κτηματολόγιο» που διαχειρίζεται το HEPOS για να αντιμετωπιστούν οι εσωτερικές ανομοιογένειες που εμφανίζονται στο ΕΓΣΑ87 όπως αυτό υλοποιείται με τα βάρη του τριγωνομετρικού δικτύου.

Η λύση μέσω Precise Point Positioning που πραγματοποιείται στο περιβάλλον του λογισμικού GrafNav, αναφέρεται στο ITRS, το οποίο υλοποιείται από το εκάστοτε ITRF και στη συνέχεια μετασχηματίζεται στο ETRS89. Τα δεδομένα στη συνέχεια συνδυάζονται στο AeroOffice με τα δεδομένα του αδρανειακού συστήματος και μετασχηματίζονται με την ίδια διαδικασία που ακολουθείται για τα δεδομένα που προέρχονται από Σταθμούς Αναφοράς του HEPOS στο ΕΓΣΑ87, για να είναι δυνατή η άμεση σύγκριση με τα δεδομένα των Λύσεων Αναφοράς.

Το ζήτημα που προκύπτει είναι ότι το σύστημα αναφοράς του HEPOS έχει σχεδιαστεί ώστε να μην είναι δυναμικό, σε αντίθεση με το ITRS το οποίο μεταβάλλεται και επαναπροσδιορίζεται με βάση το εκάστοτε ITRF.

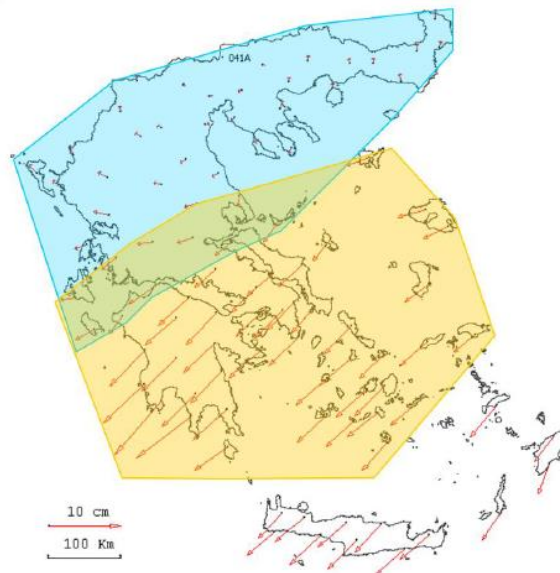
Λαμβάνοντας υπ' όψιν την έντονη τεκτονική δραστηριότητα στην Ελλάδα, η οποία εξαρτάται από τη συμπεριφορά της τεκτονικής μικροπλάκας του Αιγαίου, που ακολουθεί μια νοτιοδυτική κίνηση δημιουργώντας δύο υποπεριοχές του ελληνικού χώρου με διαφορετικές τεκτονικές μεταθέσεις και ταχύτητες (βλ. εικόνα 8.28), είναι αναμενόμενο στους υπολογισμούς να έχουν υπεισέλθει συστηματικές διαφορές που οφείλονται στο δυναμικό χαρακτήρα του ITRS και στο στατικό χαρακτήρα του HTRS07.



Εικόνα 8.28. Η τεκτονική μικροπλάκα του Αιγαίου και η Νοτιοδυτική της Κίνηση (δεξιά). (Gianniou et al. 2013)

Αυτό το ζήτημα προκύπτει και στην εσωτερική επίλυση του δικτύου του HEPOS, όπου συνυπολογίζονται οι τιμές των μεταθέσεων και των ταχυτήτων σχηματίζοντας δύο υποδίκτυα τα οποία λύνονται κατ' αρχήν ξεχωριστά και στη συνέχεια σχηματίζουν ένα ενιαίο δίκτυο μέσω μιας ζώνης όπου υπάρχουν κοινές παρατηρήσεις. Η διαδικασία αυτή είναι διαφανής για τον τελικό χρήστη καθώς δεν μεταβάλλονται οι δημοσιευμένες συντεταγμένες των Σταθμών Αναφοράς του συστήματος (Gianniou et al., 2013).

Στην εικόνα 8.29 παρατηρείται ότι η περιοχή της ηπειρωτικής Ελλάδας από τη Θράκη μέχρι περίπου και τη Θεσσαλία έχει εντελώς διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με τον υπόλοιπο ελλαδικό χώρο και πραγματοποιεί πολύ μικρότερες τεκτονικές κινήσεις. Θεωρητικά, οι συστηματικές μεταθέσεις οι οποίες αναμένονται κατά τη σύγκριση των δύο λύσεων θα πρέπει να είναι πιο έντονες στις τέσσερις αποστολές που έλαβαν χώρα στο Νότιο τμήμα της χώρας ενώ στην αποστολή της Καβάλας οι τιμές των διαφορών θα πρέπει να είναι μικρότερες.

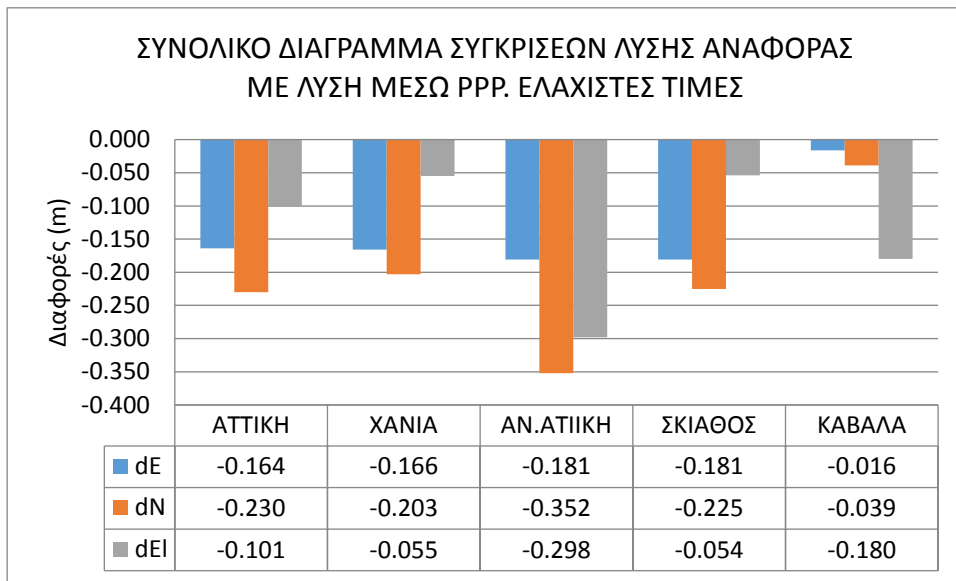


Εικόνα 8.29. Οι οριζόντιες μεταθέσεις σε σχέση με ένα σταθμό αναφοράς του HEPOS στη Β. Ελλάδα και τα δύο υποδίκτυα που δημιουργούνται. (Gianniou et al. 2013)

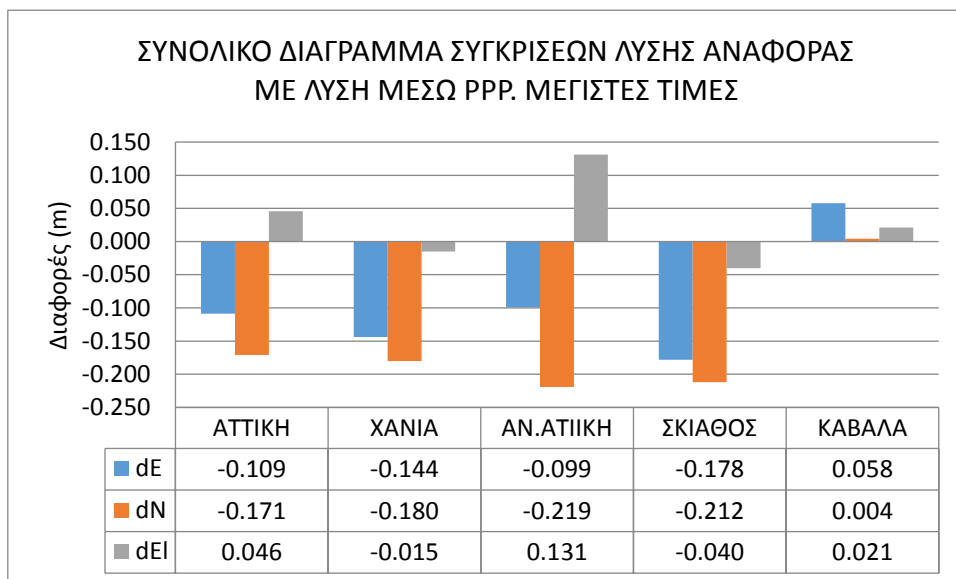
Οι συγκρίσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούν και για τις πέντε αποστολές τη Λύση Αναφοράς και τη λύση όπου τα δεδομένα GPS υπολογίστηκαν μέσω Precise Point Positioning.

Για να επιτευχθεί καλύτερη σύγκλιση και κατά συνέπεια μεγαλύτερη ακρίβεια, η διάρκεια της λύσης μέσω PPP ταυτίζεται με την επιχειρησιακή διάρκεια των αποστολών, δηλαδή από τη στιγμή της αναχώρησης από το αεροδρόμιο μέχρι τη στιγμή της προσγείωσης του αεροσκάφους.

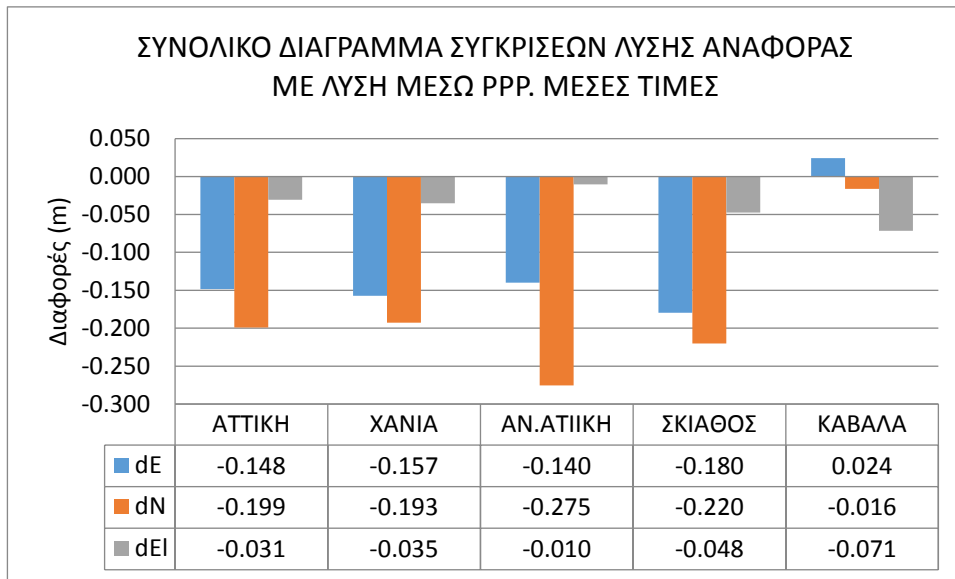
Στη συνέχεια παρατίθενται τα συνολικά αποτελέσματα των συγκρίσεων (βλ. εικόνες 8.30-8.33).



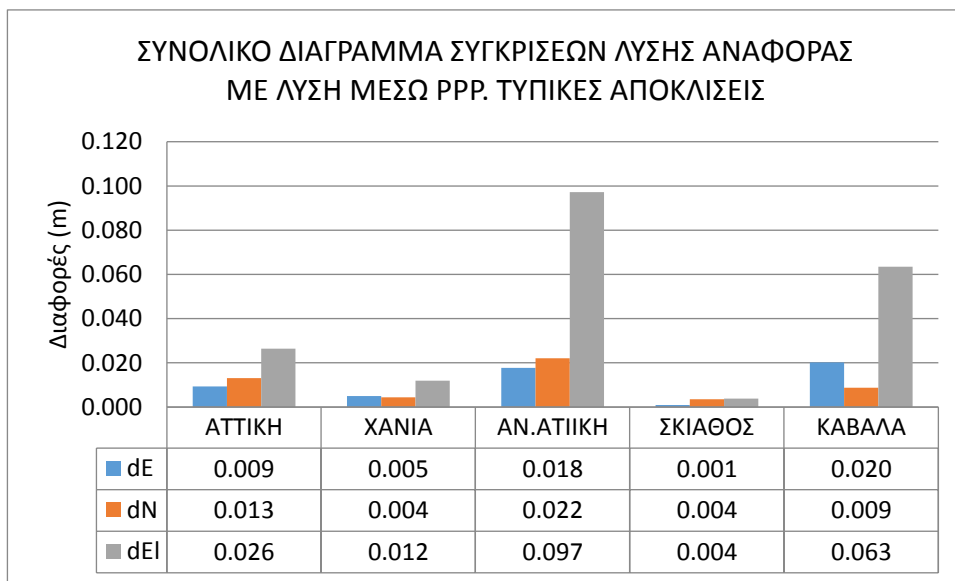
Εικόνα 8.30. Συνολικό διάγραμμα ελαχίστων τιμών διαφορών μεταξύ της Λύσης Αναφοράς και της λύσης μέσω PPP.



Εικόνα 8.31. Συνολικό διάγραμμα μέγιστων τιμών διαφορών μεταξύ της Λύσης Αναφοράς και της λύσης μέσω PPP.



Εικόνα 8.32. Συνολικό διάγραμμα μέσων τιμών διαφορών μεταξύ της Λύσης Αναφοράς και της λύσης μέσω PPP.



Εικόνα 8.33. Συνολικό διάγραμμα τυπικών αποκλίσεων διαφορών μεταξύ της Λύσης Αναφοράς και της λύσης μέσω PPP.

Όπως αποτυπώνεται και στα παραπάνω διαγράμματα, πράγματι η σύγκριση των δεδομένων φανερώνει μια διαφορετική συμπεριφορά των οριζοντιογραφικών διαφορών στην αποστολή της Καβάλας όπου οι τιμές της λύσης μέσω PPP προσαρμόζονται πολύ καλύτερα στη Λύση Αναφοράς σε σχέση με τις υπόλοιπες αποστολές.

Στις υπόλοιπες αποστολές εμφανίζονται συστηματικά οριζοντιογραφικές διαφορές περίπου ίσες με 25cm. Οι τιμές των υψομετρικών διαφορών δεν επηρεάζονται τόσο από τη συστηματική διαφορά των δύο συστημάτων αναφοράς και αποτελούν, μαζί με τις οριζοντιογραφικές διαφορές της αποστολής της Καβάλας, μια ένδειξη για το πραγματικό μέτρο της ακρίβειας που μπορεί να επιτευχθεί μέσω Precise Point Positioning.

Ακόμα και έτσι όμως, κατά την περίπτωση απουσίας σχετικής λύσης GPS, η ακρίβεια της λύσης GPS μέσω PPP μπορεί υπό προϋποθέσεις οι οποίες εξαρτώνται από τις απαιτήσεις του έργου, (πχ ύψος πτήσης - επιθυμητό μέγεθος εικονοστοιχείου αεροφωτογραφιών) να καλύψει τις ανάγκες του αεροτριγωνισμού.

Σημαντικό ρόλο φυσικά παίζει και η περιοχή ενδιαφέροντος καθώς στη Βόρεια Ελλάδα και τη Θεσσαλία οι συστηματικές διαφορές είναι πολύ μικρότερες από ότι στον υπόλοιπο ελληνικό χώρο.

Στον πίνακα 8.6 αναγράφονται τα κύρια στατιστικά στοιχεία των διαφορών ανάμεσα στις Λύσεις Αναφοράς και τις λύσεις μέσω PPP για όλες τις αποστολές.

Πίνακας 8.6. Συνολικά στατιστικά στοιχεία (m) διαφορών Λύσεων Αναφοράς με λύση μέσω PPP

ΑΠΟΣΤΟΛΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ			ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ			ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ			ΤΥΠΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ		
	dE	dN	dEI	dE	dN	dEI	dE	dN	dEI	dE	dN	dEI
ΑΤΤΙΚΗ	-0.164	-0.230	-0.101	-0.109	-0.171	0.046	-0.148	-0.199	-0.031	0.009	0.013	0.026
ΧΑΝΙΑ	-0.166	-0.203	-0.055	-0.144	-0.180	-0.015	-0.157	-0.193	-0.035	0.005	0.004	0.012
ΑΝ.ΑΤΤΙΚΗ	-0.181	-0.352	-0.298	-0.099	-0.219	0.131	-0.140	-0.275	-0.010	0.018	0.022	0.097
ΣΚΙΑΘΟΣ	-0.181	-0.225	-0.054	-0.178	-0.212	-0.040	-0.180	-0.220	-0.048	0.001	0.004	0.004
ΚΑΒΑΛΑ	-0.016	-0.039	-0.180	0.058	0.004	0.021	0.024	-0.016	-0.071	0.020	0.009	0.063

8.4 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΗΜΑΣΙΑΣ ΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΛΥΣΗΣ GPS ΜΕΣΩ PRECISE POINT POSITIONING ΣΤΗΝ ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΤΗΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΛΥΣΗΣ

Στη συγκεκριμένη ενότητα διερευνάται η σημασία της διάρκειας της λύσης GPS μέσω Precise Point Positioning και η επίδρασή της στα τελικά δεδομένα της επίλυσης GPS/INS. Πλέον ως Λύση Αναφοράς χρησιμοποιείται η λύση κατά την οποία τα δεδομένα GPS/INS έχουν λυθεί με τη συνεισφορά των δεδομένων GPS τα οποία προήλθαν μέσω της λύσης PPP με την πλήρη διάρκεια παρατηρήσεων, καθ' όλο δηλαδή το χρονικό διάστημα λειτουργίας του συστήματος για την κάθε αποστολή. Η λύση αυτή όπως και με τα δεδομένα του σχετικού εντοπισμού GPS συγκρίνεται με δύο λύσεις:

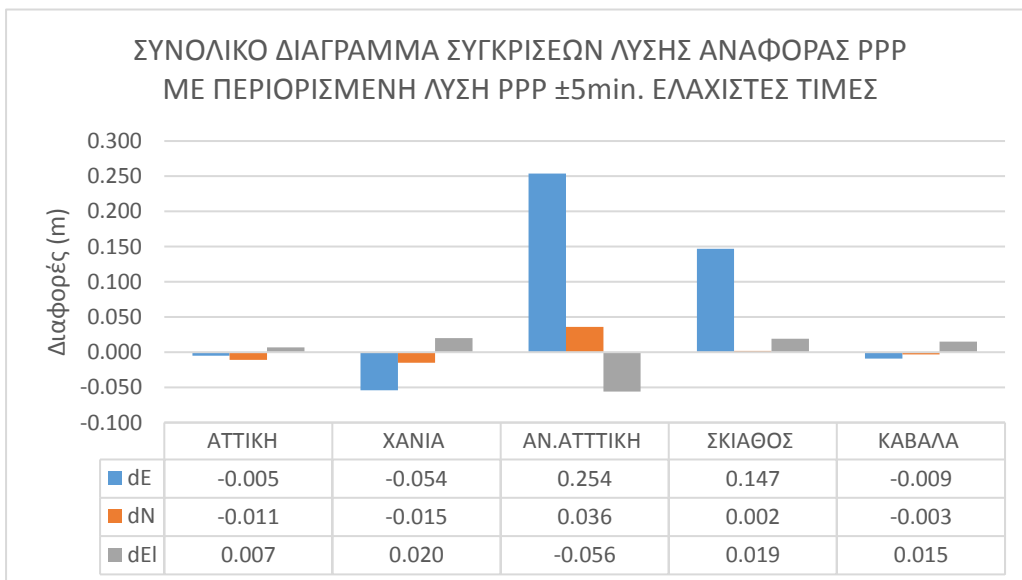
- A. Μια συνδυασμένη λύση όπου η λύση μέσω PPP αρχίζει 5 λεπτά πριν την έναρξη και τελειώνει 5 λεπτά μετά την λήξη της λήψης των αεροφωτογραφιών
- B. Μια συνδυασμένη λύση όπου η λύση μέσω PPP αρχίζει 1 λεπτό πριν την έναρξη και τελειώνει 1 λεπτό μετά την λήξη της λήψης των αεροφωτογραφιών

Οι χρόνοι διάρκειας των λύσεων μέσω PPP αναφέρονται στον πίνακα 8.7:

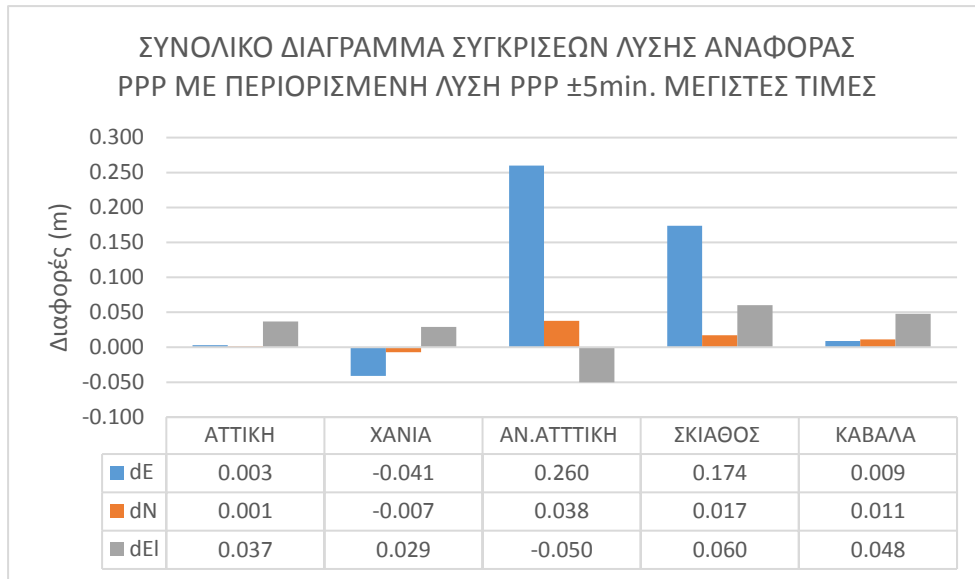
Πίνακας 8.7. Στοιχεία διάρκειας λύσεων μέσω PPP των αποστολών

	ΑΤΤΙΚΗ	ΧΑΝΙΑ	ΑΝ. ΑΤΤΙΚΗ	ΣΚΙΑΘΟΣ	ΚΑΒΑΛΑ
Διάρκεια Λύσης Αναφοράς PPP (ώρες)	4:35	3:22	2:42	1:54	4:27
Διάρκεια περιορισμένης λύσης PPP ± 5min (ώρες)	3:36	0:48	1:39	0:12	1:42
Διάρκεια περιορισμένης λύσης PPP ± 1min (ώρες)	3:28	0:40	1:28	0:04	1:34

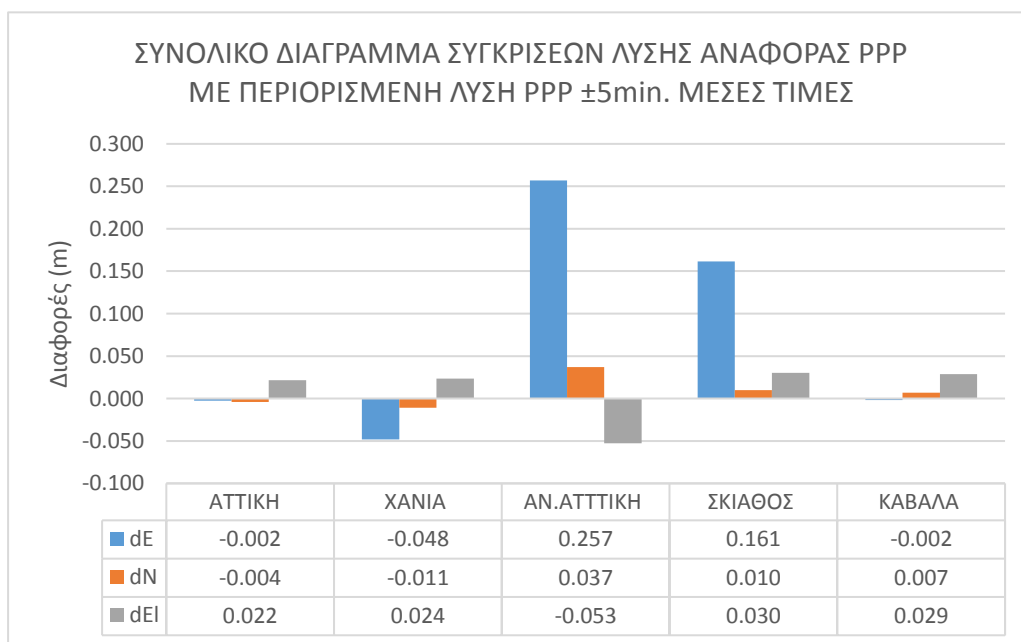
Αρχικά συγκρίνεται η Λύση Αναφοράς PPP με την περιορισμένη λύση PPP ±5min (βλ. εικόνες 8.34-8.38).



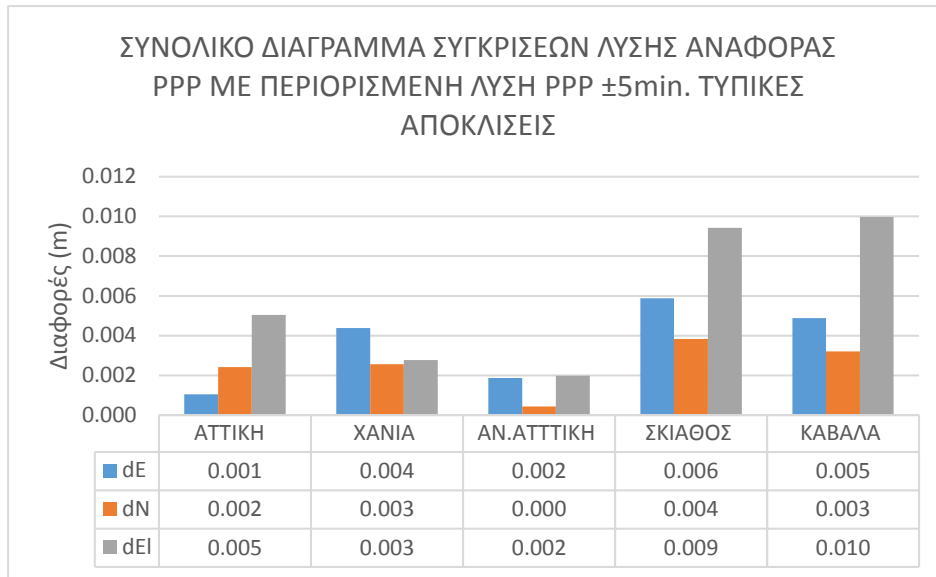
Εικόνα 8.34. Συνολικό διάγραμμα ελάχιστων τιμών διαφορών μεταξύ της Λύσης Αναφοράς και της περιορισμένης λύσης ±5 min.



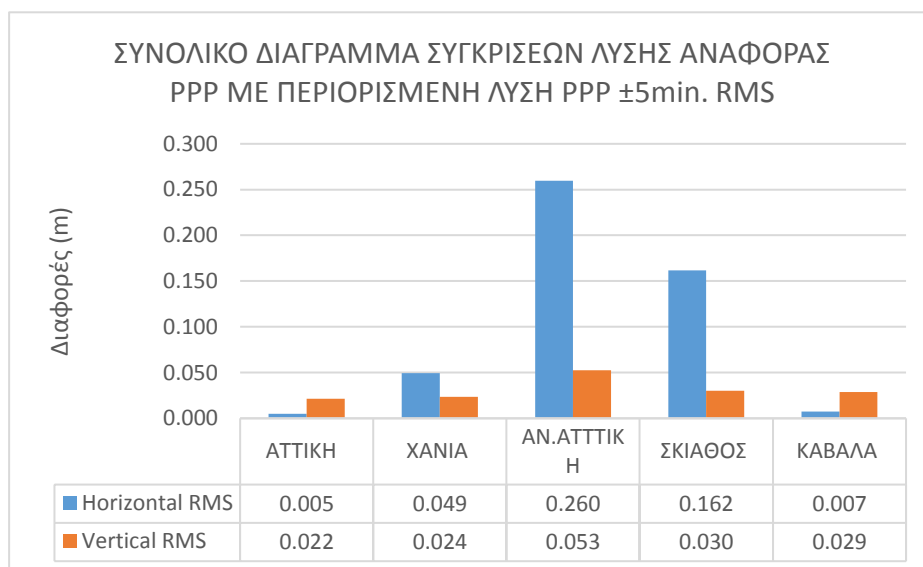
Εικόνα 8.35. Συνολικό διάγραμμα μέγιστων τιμών διαφορών μεταξύ της Λύσης Αναφοράς και της περιορισμένης λύσης ±5 min.



Εικόνα 8.36. Συνολικό διάγραμμα μέσων τιμών διαφορών μεταξύ της Λύσης Αναφοράς και της περιορισμένης λύσης ±5 min.



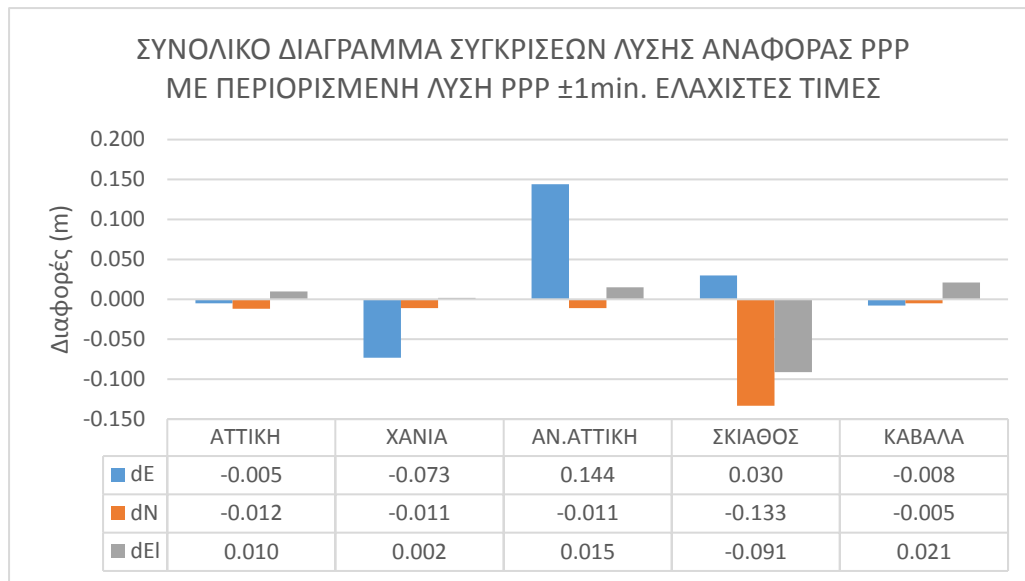
Εικόνα 8.37. Συνολικό διάγραμμα τυπικών αποκλίσεων διαφορών μεταξύ της Λύσης Αναφοράς και της περιορισμένης λύσης ±5 min.



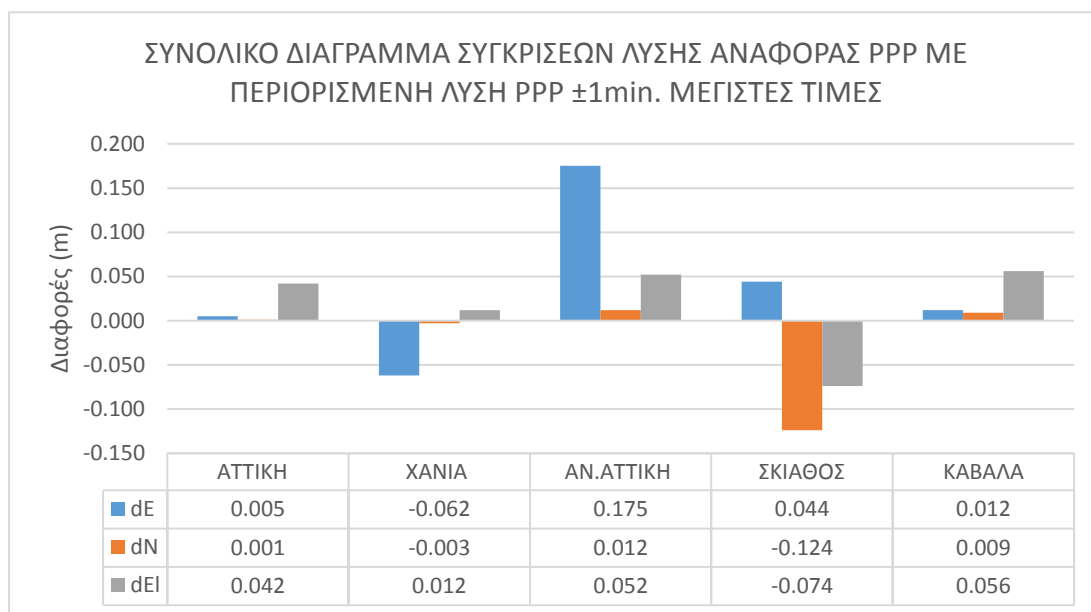
Εικόνα 8.38. Συνολικό διάγραμμα τιμών RMS διαφορών μεταξύ της Λύσης Αναφοράς και της περιορισμένης λύσης ±5 min

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα των συγκρίσεων, διαπιστώνεται ότι στις αποστολές της Αν.Αττικής και της Σκιάθου προκύπτουν μεγάλες οριζοντιογραφικές διαφορές της τάξεως των 15cm και 25cm αντίστοιχα. Κάτι τέτοιο θα ήταν αναμενόμενο για την αποστολή της Σκιάθου με δεδομένο το πολύ μικρό χρονικό διάστημα παρατηρήσεων. Η αποστολή της Αν. Αττικής όμως στην περιορισμένη λύση των ± 5 λεπτών έχει αρκετά μεγαλύτερο χρόνο παρατήρησης, παρόμοιο με εκείνον των αποστολών των Χανίων και της Καβάλας όπου όμως δεν εμφανίζονται τόσο έντονες μεταβολές. Παρόλα αυτά φαίνεται να επηρεάζεται αρκετά η λύση μέσω PPP.

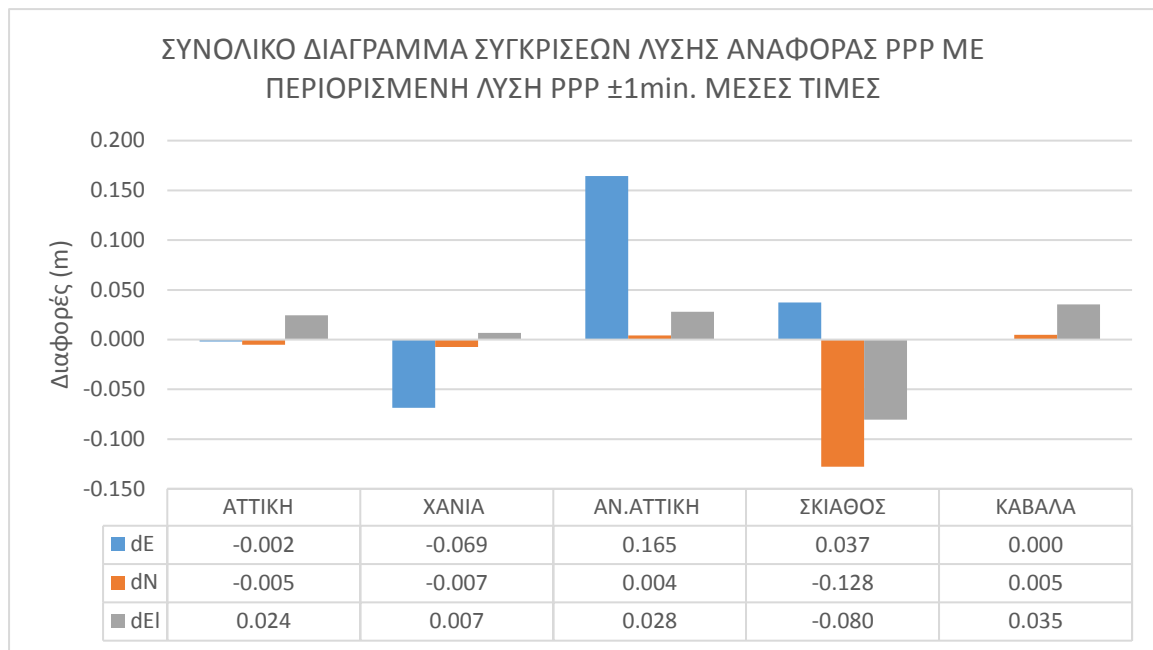
Στη συνέχεια συγκρίνεται η Λύση Αναφοράς PPP με την περιορισμένη λύση PPP ±1min (βλ. εικόνες 8.39-8.43).



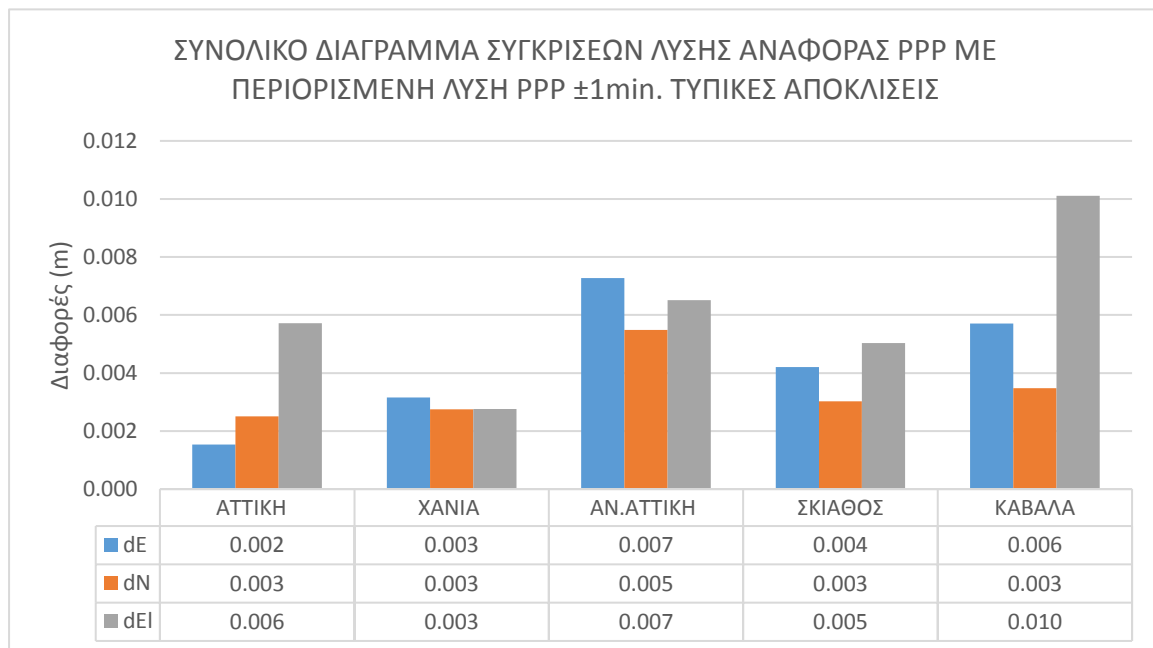
Εικόνα 8.39. Συνολικό διάγραμμα ελάχιστων τιμών διαφορών μεταξύ της Λύσης Αναφοράς και της περιορισμένης λύσης ±1 min.



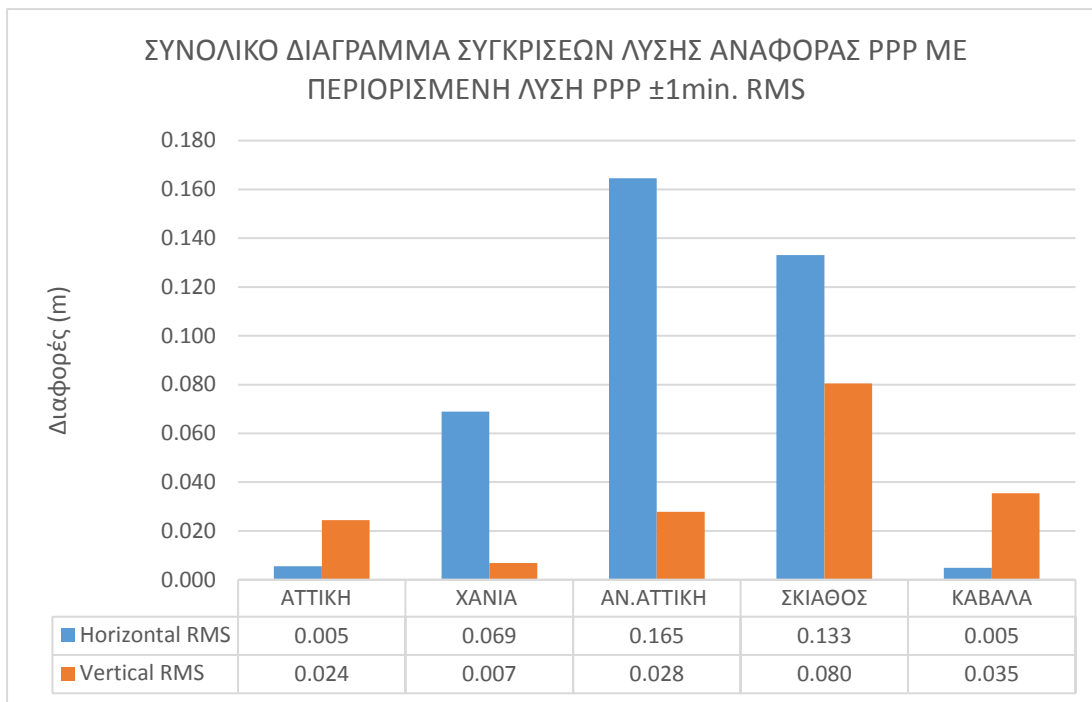
Εικόνα 8.40. Συνολικό διάγραμμα μέγιστων τιμών διαφορών μεταξύ της Λύσης Αναφοράς και της περιορισμένης λύσης ±1 min.



Εικόνα 8.41. Συνολικό διάγραμμα μέσων τιμών διαφορών μεταξύ της Λύσης Αναφοράς και της περιορισμένης λύσης ±1 min.



Εικόνα 8.42. Συνολικό διάγραμμα τυπικών αποκλίσεων διαφορών μεταξύ της Λύσης Αναφοράς και της περιορισμένης λύσης ±1 min.



Εικόνα 8.43. Συνολικό διάγραμμα τιμών RMS διαφορών μεταξύ της Λύσης Αναφοράς και της περιορισμένης λύσης ±1 min.

Περιορίζοντας ακόμη περισσότερο τη διάρκεια της λύσης GPS μέσω PPP παρατηρείται ότι οι διαφορές με τη λύση αναφοράς στις αποστολές της Αν. Αττικής και της Σκιάθου αυξάνονται, ενώ αυξάνεται και η οριζοντιογραφική διαφορά στην αποστολή των Χανίων, ξεπερνώντας τα 6cm. Διαπιστώνεται και πάλι ότι η λύση PPP είναι αρκετά ευαίσθητη και παίζει πολύ σημαντικό ρόλο η διάρκεια του χρόνου παρατήρησης.

Στον πίνακα 8.8 αναγράφονται τα κύρια στατιστικά στοιχεία των διαφορών ανάμεσα στις Λύσεις Αναφοράς PPP και στις περιορισμένες λύσεις PPP για όλες τις αποστολές.

Πίνακας 8.8. Συνολικά στατιστικά στοιχεία διαφορών (m) λύσεων Αναφοράς PPP με περιορισμένες λύσεις PPP

ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΛΥΣΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ PPP ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΕΣ ΛΥΣΕΙΣ PPP																
ΛΥΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ PPP - ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗ ΛΥΣΗ PPP ± 5 min																
ΣΥΓΚΡΙΣΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ			ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ			ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ			ΤΥΠΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ			RMS			
	dE	dN	dEI	dE	dN	dEI	dE	dN	dEI	dE	dN	dEI	dE	dN	dEI	Hor. RMS Ver. RMS
ΑΠΟΣΤΟΛΗ																
ΑΤΤΙΚΗ	-0.005	-0.011	0.007	0.003	0.001	0.037	-0.002	-0.004	0.022	0.001	0.002	0.005	0.005	0.005	0.022	
ΧΑΝΙΑ	-0.054	-0.015	0.020	-0.041	-0.007	0.029	-0.048	-0.011	0.024	0.004	0.003	0.003	0.049	0.024	0.024	
ΑΝ.ΑΤΤΙΚΗ	0.254	0.036	-0.056	0.260	0.038	-0.050	0.257	0.037	-0.053	0.002	0.000	0.002	0.260	0.053	0.053	
ΣΚΙΑΘΟΣ	0.147	0.002	0.019	0.174	0.017	0.060	0.161	0.010	0.030	0.006	0.004	0.009	0.162	0.030	0.030	
ΚΑΒΑΛΑ	-0.009	-0.003	0.015	0.009	0.011	0.048	-0.002	0.007	0.029	0.005	0.003	0.010	0.007	0.029	0.029	
ΣΥΓΚΡΙΣΗ	ΛΥΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ PPP - ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗ ΛΥΣΗ PPP ±1 min															
ΑΠΟΣΤΟΛΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ			ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ			ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ			ΤΥΠΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ			RMS			
	dE	dN	dEI	dE	dN	dEI	dE	dN	dEI	dE	dN	dEI	Hor. RMS	Ver. RMS		
ΑΤΤΙΚΗ	-0.005	-0.012	0.010	0.005	0.001	0.042	-0.002	-0.005	0.024	0.002	0.003	0.006	0.005	0.024	0.024	
ΧΑΝΙΑ	-0.073	-0.011	0.002	-0.062	-0.003	0.012	-0.069	-0.007	0.007	0.003	0.003	0.003	0.069	0.007	0.007	
ΑΝ.ΑΤΤΙΚΗ	0.144	-0.011	0.015	0.175	0.012	0.052	0.165	0.004	0.028	0.007	0.005	0.007	0.165	0.028	0.028	
ΣΚΙΑΘΟΣ	0.030	-0.133	-0.091	0.044	-0.124	-0.074	0.037	-0.128	-0.080	0.004	0.003	0.005	0.133	0.080	0.080	
ΚΑΒΑΛΑ	-0.008	-0.005	0.021	0.012	0.009	0.056	0.000	0.005	0.035	0.006	0.003	0.010	0.005	0.035	0.035	

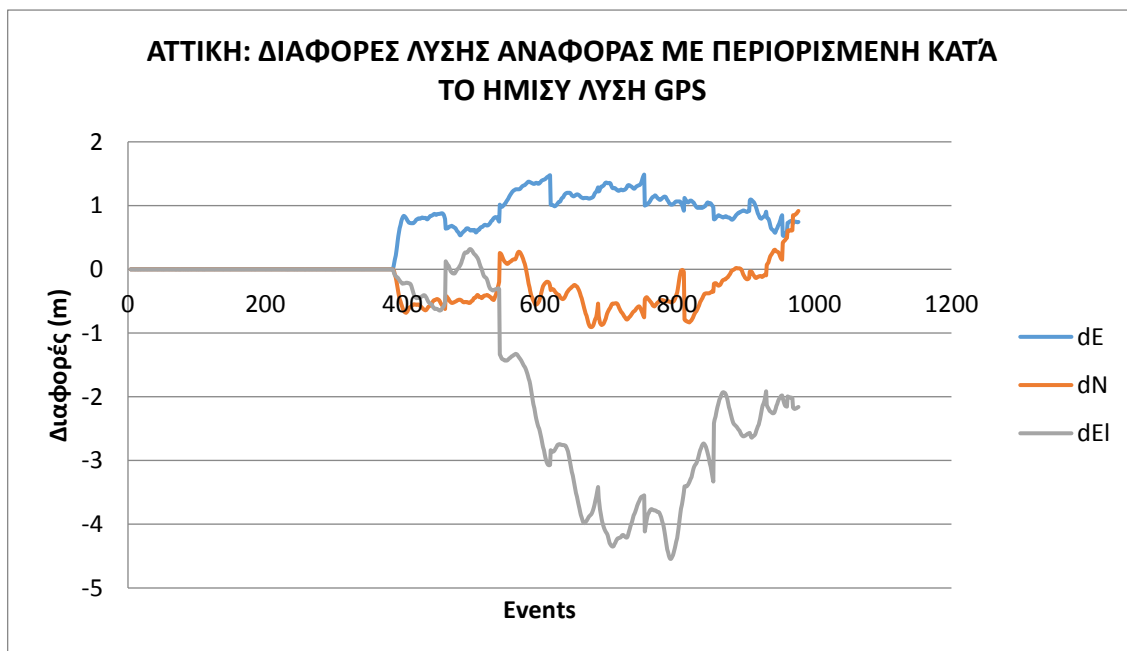
8.5 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΣΧΕΤΙΚΗ ΛΥΣΗ GPS

Μια από τις πρώτες δοκιμές που είχε σχεδιαστεί να πραγματοποιηθεί ήταν αυτή του ελέγχου της συμπεριφοράς του συστήματος χωρίς αυτό να έχει τροφοδοτηθεί με μια εξωτερική λύση για τα δεδομένα GPS.

Όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο 8.1, η επίλυση των συνδυασμένων δεδομένων GPS/INS πραγματοποιείται στο περιβάλλον του AeroOffice, αφού ζητηθεί από το χρήστη να τροφοδοτήσει το σύστημα με τη λύση GPS όπως αυτή προέκυψε μέσω του GrafNav.

Το κύριο ερώτημα που δημιουργείται αφορά τη συμπεριφορά των δεδομένων του αδρανειακού συστήματος και το πώς θα αντιμετωπιστεί η έλλειψη εξωτερικών ενημερώσεων της δυναμικής κατάστασης του αεροσκάφους. Χωρίς την ύπαρξη πληροφορίας πλοήγησης, το αδρανειακό σύστημα καλείται να παρέχει πληροφορία για τις ταχύτητες και τις μεταθέσεις μέσω απλής και διπλής ολοκλήρωσης της επιτάχυνσης, μιας διαδικασίας η οποία καταλήγει σε μια σωρευτική ολίσθηση που επηρεάζει άμεσα τις απόλυτες τιμές των αποτελεσμάτων. Η αρχικοποίηση των τιμών του INS πραγματοποιείται με την ενεργοποίηση του συστήματος, χωρίς να εμπλακεί κάπου η μετεπεξεργασμένη λύση GPS και θεωρείται ότι οι αρχικές τιμές του αδρανειακού συστήματος είναι ανεπηρέαστες από τις μετέπειτα επιλύσεις.

Για την πρώτη δοκιμή χρησιμοποιήθηκε μόνο η αποστολή της Αττικής η οποία έχει και τον μεγαλύτερο επιχειρησιακό χρόνο. Η λύση του σχετικού εντοπισμού GPS περιορίστηκε στο πρώτο μισό της αποστολής. Με αυτόν τον τρόπο έγινε μια προσπάθεια εξομοίωσης μιας αστοχίας στο δέκτη GPS η οποία θα μπορούσε να λάβει χώρα κατά τη διάρκεια της αποστολής. Η περιορισμένη κατά το ήμισυ λύση GPS τροφοδοτήθηκε στο σύστημα, όπου στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ο συνδυασμός με τα δεδομένα της IMU και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τη Λύση Αναφοράς. Οι διαφορές απεικονίζονται στην εικόνα 8.44.



Εικόνα 8.44. Διαφορές της Λύσης Αναφοράς με την περιορισμένη κατά το ήμισυ λύση GPS για την αποστολή της Αττικής.

Τα κύρια στατιστικά στοιχεία των διαφορών απεικονίζονται στον πίνακα 8.9.

Πίνακας 8.9. Στατιστικά στοιχεία διαφορών (m) της Λύσης Αναφοράς με την περιορισμένη κατά το ήμισυ λύση GPS για την αποστολή της Αττικής.

ΑΤΤΙΚΗ: Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης λύσης αναφοράς με περιορισμένη κατά το ήμισυ λύση GPS			
	dE	dN	dH
Min	-0.001	-0.907	-4.545
Max	1.487	0.916	0.318
Average	0.591	-0.204	-1.354
St. Deviation	0.001	0.000	0.001

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, η συμπεριφορά του συστήματος είναι διαφορετική από την αναμενόμενη. Οι διαφορές δεν ολισθαίνουν σταδιακά από τη μέση της αποστολής και έπειτα όπου σταματάει να παρέχεται η λύση σχετικού εντοπισμού GPS. Αντίθετα, οι διαφορές κατά Easting και κατά Northing περιορίζονται σε 1 και 0.5 μέτρο περίπου αντίστοιχα.

Η μόνη ερμηνεία που μπορεί να δοθεί είναι ότι σαν ένα επιπλέον μέτρο εξασφάλισης των δεδομένων, το σύστημα κατά την αποκωδικοποίηση των πρωτογενών δεδομένων αποθηκεύει την πληροφορία της αυτόνομης λύσης εντοπισμού του GPS και απουσία ακριβέστερης λύσης GPS, χρησιμοποιείται ο αυτόνομος εντοπισμός για να πραγματοποιηθεί ο συνδυασμός με τα δεδομένα του INS.

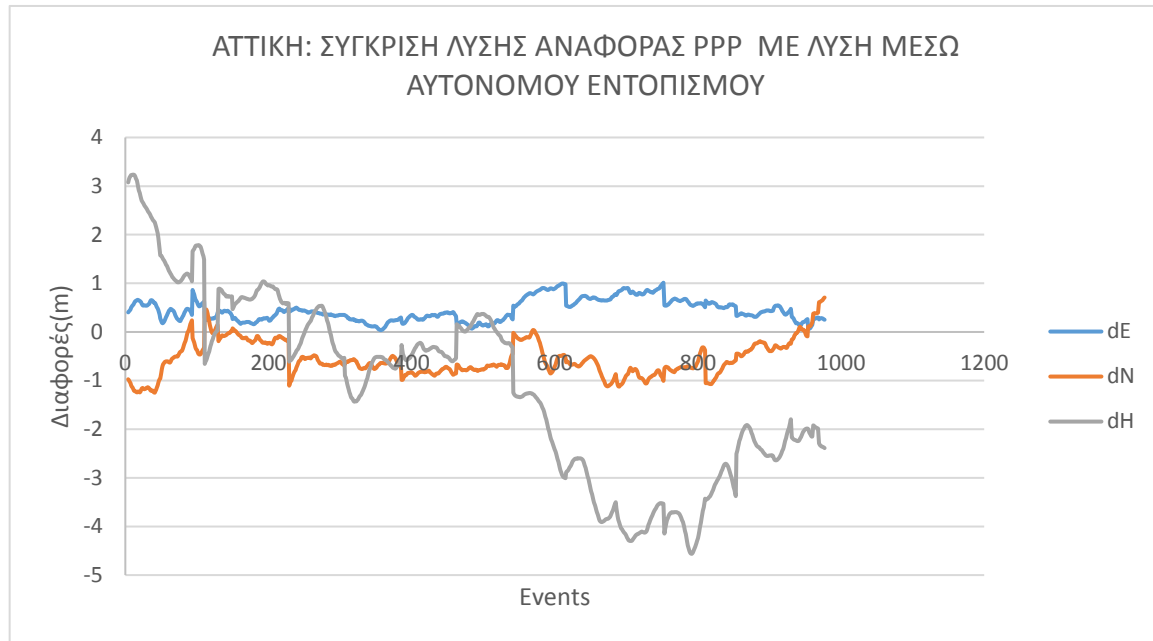
Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται κατ' ελάχιστον μια συνδυασμένη λύση δεδομένων GPS/INS η οποία μπορεί να φανεί χρήσιμη, με κόστος την μέτρηση περισσότερων φωτοσταθερών σημείων στο έδαφος για την ορθή επίλυση του αεροτριγωνισμού, χωρίς να χρησιμοποιείται η πληροφορία πλοήγησης η οποία μπορεί να προέλθει αποκλειστικά από τους αδρανειακούς αισθητήρες και υπόκειται σε ολίσθηση.

Για να εξεταστεί η αξιοπιστία του συστήματος όταν χρησιμοποιούνται δεδομένα αυτόνομου εντοπισμού GPS, πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις και για τις πέντε αποστολές.

Οι λύσεις αναφοράς όμως έχουν προκύψει με δεδομένα του συστήματος HEPOS, ενώ οι λύσεις του αυτόνομου εντοπισμού αναφέρονται στο WGS-84. Συγκρίνοντας τις λύσεις αναφοράς με τις λύσεις του αυτόνομου εντοπισμού GPS σημαίνει ότι και πάλι θα υπεισέλθουν στα αποτελέσματα συστηματικές μεταθέσεις που οφείλονται στις διαφορές των δύο συστημάτων αναφοράς.

Για να αντιμετωπιστεί αυτό το ζήτημα, επιλέγεται σαν Λύση Αναφοράς η λύση που προκύπτει μέσω Precise Point Positioning για την πλήρη επιχειρησιακή διάρκεια της κάθε αποστολής πριν μετασχηματιστεί στο ETRS89. Οι συστηματικές διαφορές που προκύπτουν είναι σαφώς μικρότερες έως αμελητέες και κάνοντας την παραδοχή ότι η λύση μέσω PPP δεν είναι εξίσου ακριβής με τη λύση μέσω σχετικού εντοπισμού GPS, τα αποτελέσματα μπορούν να καταστούν άμεσα συγκρίσιμα.

Αρχικά παρουσιάζονται τα δεδομένα που αφορούν την αποστολή της Αττικής (βλ. εικόνα 8.45) και στη συνέχεια τα συνολικά δεδομένα που αφορούν και τις πέντε αποστολές.



Εικόνα 8.45. Διαφορές της Λύσης Αναφοράς PPP με την λύση μέσω αυτόνομου εντοπισμού για την αποστολή της Αττικής.

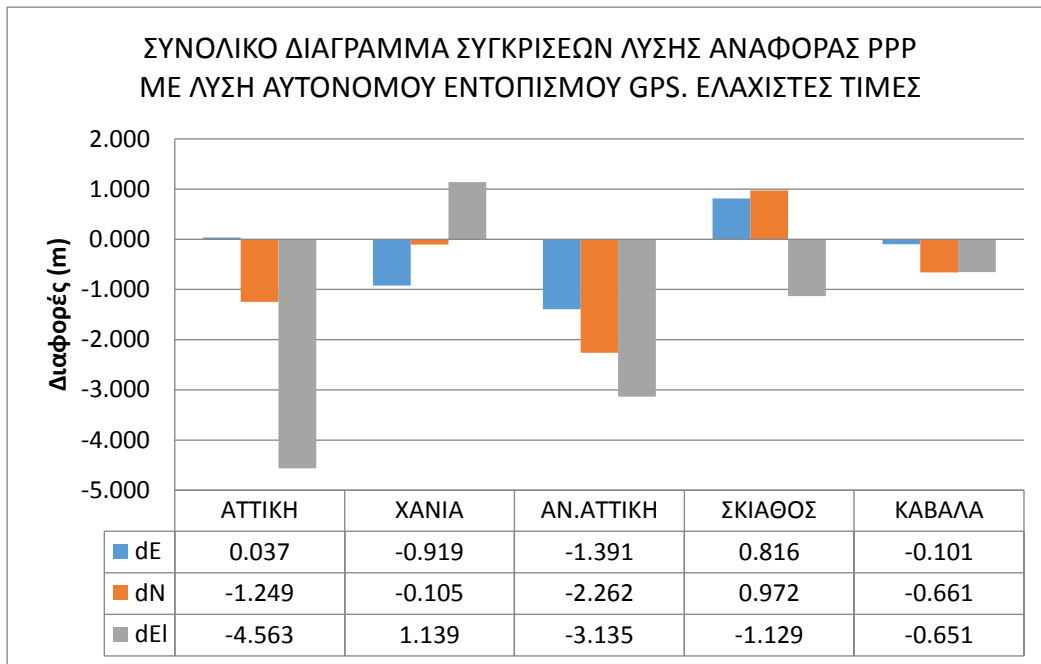
Τα κύρια στατιστικά στοιχεία των διαφορών αναγράφονται στον πίνακα 8.10:

Πίνακας 8.10. Στατιστικά στοιχεία (m) διαφορών της Λύσης Αναφοράς PPP με την λύση μέσω αυτόνομου εντοπισμού για την αποστολή της Αττικής.

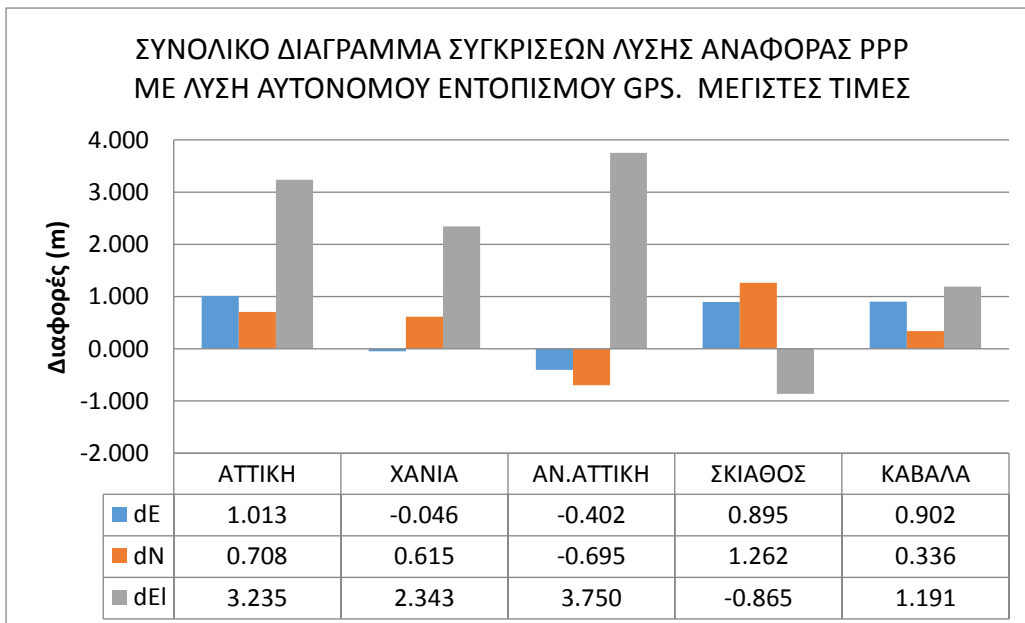
ΑΤΤΙΚΗ: Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης λύσης αναφοράς PPP με λύση μέσω Αυτόνομου εντοπισμού GPS			
	dE	dN	dH
Min	0.037	-1.249	-4.563
Max	1.013	0.708	3.235
Average	0.448	-0.552	-1.130
St. Dev	0.226	0.363	1.864

Παρατηρείται ότι οι διαφορές περιορίζονται κατά μέσο όρο στο 0.5m περίπου κατά Easting και Northing ενώ οι διαφορές κατά Elevation έχουν μεγαλύτερη διακύμανση και φτάνουν μέχρι και τα 4.5m.

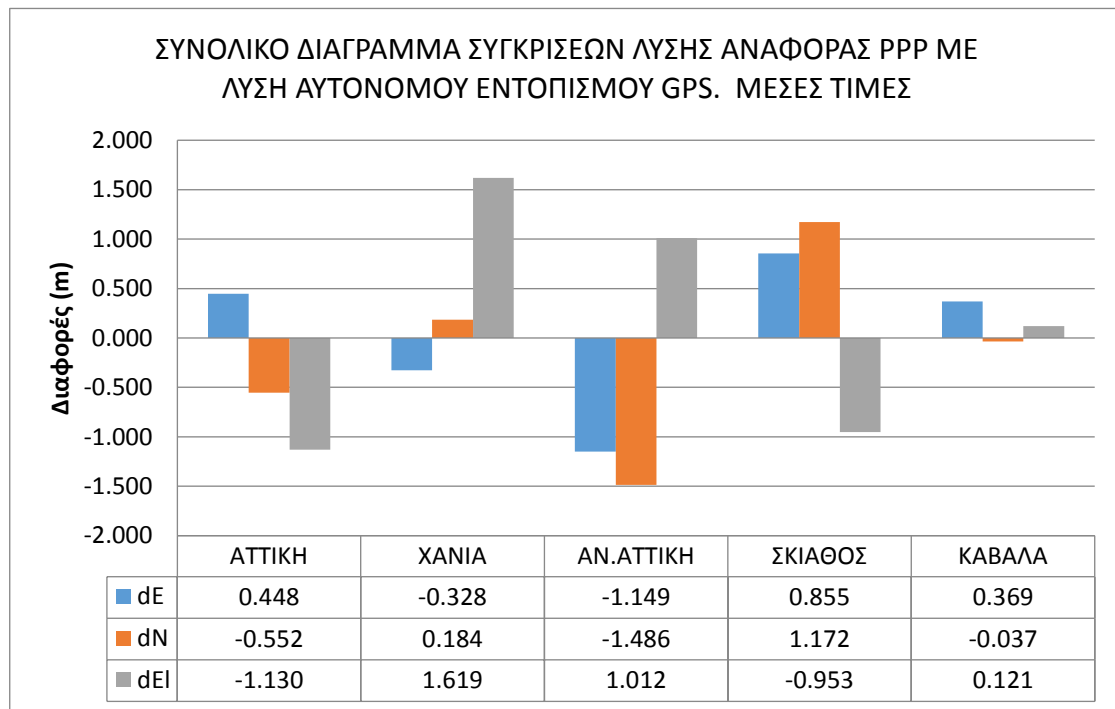
Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνολικά τα αποτελέσματα και για τις πέντε αποστολές (βλ. εικόνες 8.46-8.50).



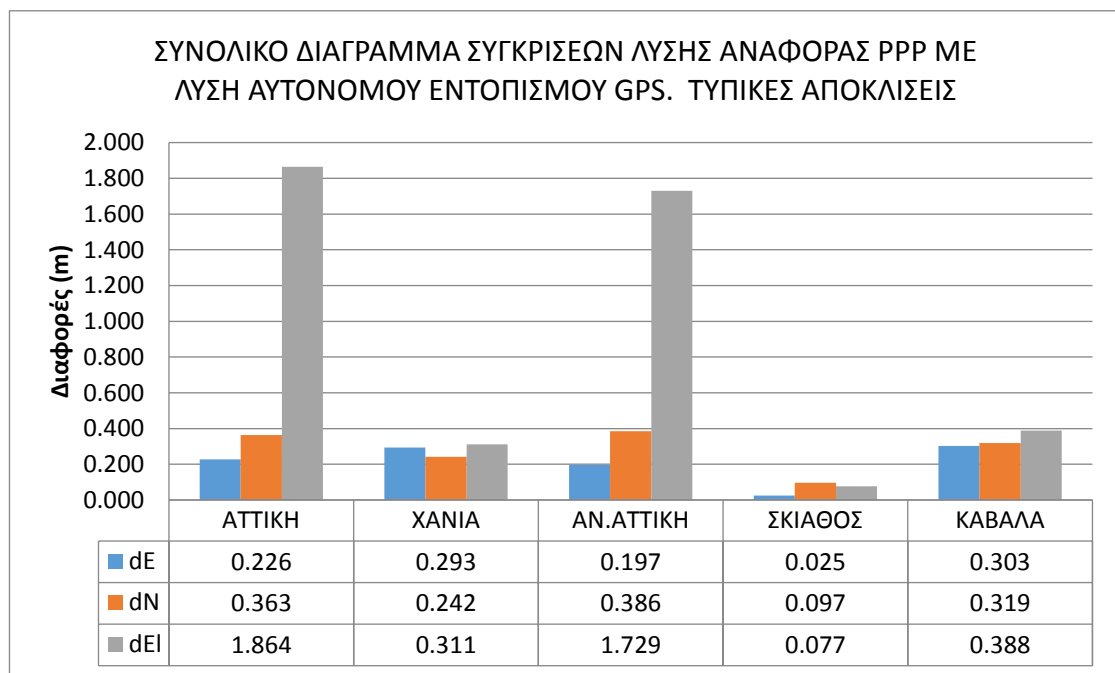
Εικόνα 8.46. Συνολικό διάγραμμα ελάχιστων τιμών διαφορών μεταξύ της Λύσης Αναφοράς PPP και της λύσης μέσω αυτόνομου εντοπισμού GPS



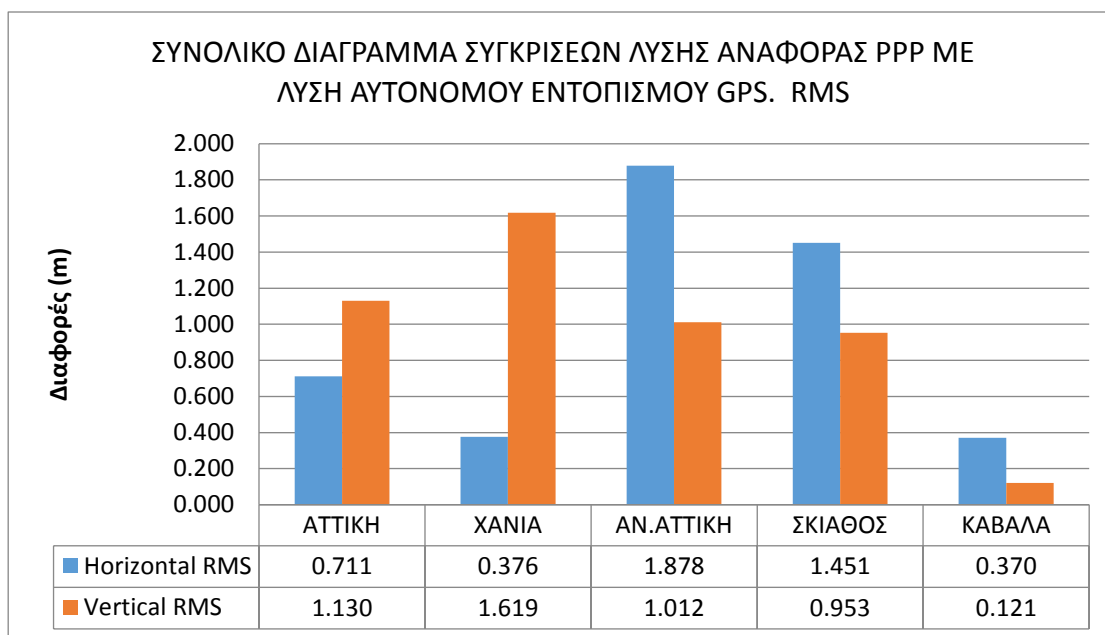
Εικόνα 8.47. Συνολικό διάγραμμα μέγιστων τιμών διαφορών μεταξύ της Λύσης Αναφοράς PPP και της λύσης μέσω αυτόνομου εντοπισμού GPS



Εικόνα 8.48. Συνολικό διάγραμμα μέσων τιμών διαφορών μεταξύ της λύσης Αναφοράς PPP και της λύσης μέσω αυτόνομου εντοπισμού GPS



Εικόνα 8.49. Συνολικό διάγραμμα τιμών τυπικών αποκλίσεων διαφορών μεταξύ της λύσης Αναφοράς PPP και της λύσης μέσω αυτόνομου εντοπισμού GPS



Εικόνα 8.50. Συνολικό διάγραμμα τιμών RMS διαφορών μεταξύ της Λύσης Αναφοράς PPP και της λύσης μέσω αυτόνομου εντοπισμού GPS

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω διαγράμματα, αυτό το επιπλέον μέτρο εξασφάλισης των δεδομένων μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμο, καθώς η ποιότητα των λύσεων GPS μέσω αυτόνομου εντοπισμού η οποία είναι τυπικά της τάξεως των λίγων μέτρων, βελτιώνεται αισθητά λόγω της χρήσης γεωδαιτικού δέκτη και του συνδυασμού των μετρήσεων με τις παρατηρήσεις των αδρανειακών αισθητήρων. Σε περιπτώσεις αστοχιών κατά τις οποίες δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια ακριβέστερη λύση GPS (λύση σχετικού εντοπισμού ή λύση PPP) όπως π.χ. την αδυναμία της ορθής ανάγνωσης των δεδομένων GPS από εκδόσεις του GrafNav προγενέστερες της 8.6 λόγω του μηδενισμού της εβδομάδας GPS που συνέβη τον Απρίλιο του 2019 (GPS week rollover), (NovAtel, 2017), η λύση αυτή είναι υπό συνθήκες ικανή να δώσει ένα αποτέλεσμα το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τα μετέπειτα βήματα του αεροτριγωνισμού.

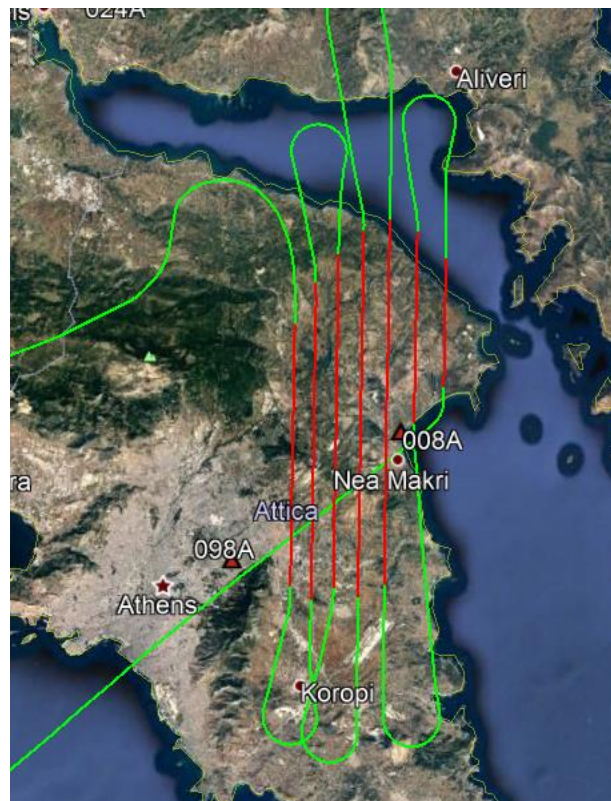
Στον πίνακα 8.11 αναγράφονται τα στατιστικά στοιχεία των διαφορών ανάμεσα στις Λύσεις Αναφοράς μέσω PPP και των λύσεων με στοιχεία αυτόνομου εντοπισμού GPS για όλες τις αποστολές.

Πίνακας 8.11. Συνολικά στατιστικά στοιχεία (m) διαφορών Λύσεων Αναφοράς PPP με λύση αυτόνομου εντοπισμού GPS

ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΛΥΣΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ PPP ΜΕ ΛΥΣΗ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ														
ΑΠΟΣΤΟΛΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ			ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ			ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ			ΤΥΠΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ			RMS	
	dE	dN	dEl	dE	dN	dEl	dE	dN	dEl	dE	dN	dEl	Hor. RMS	Ver. RMS
ΑΤΤΙΚΗ	0.037	-1.249	-4.563	1.013	0.708	3.235	0.448	-0.552	-1.130	0.226	0.363	1.864	0.711	1.130
ΧΑΝΙΑ	-0.919	-0.105	1.139	-0.046	0.615	2.343	-0.328	0.184	1.619	0.293	0.242	0.311	0.376	1.619
ΑΝ.ΑΤΤΙΚΗ	-1.391	-2.262	-3.135	-0.402	-0.695	3.750	-1.149	-1.486	1.012	0.197	0.386	1.729	1.878	1.012
ΣΚΙΑΘΟΣ	0.816	0.972	-1.129	0.895	1.262	-0.865	0.855	1.172	-0.953	0.025	0.097	0.077	1.451	0.953
ΚΑΒΑΛΑ	-0.101	-0.661	-0.651	0.902	0.336	1.191	0.369	-0.037	0.121	0.303	0.319	0.388	0.370	0.121

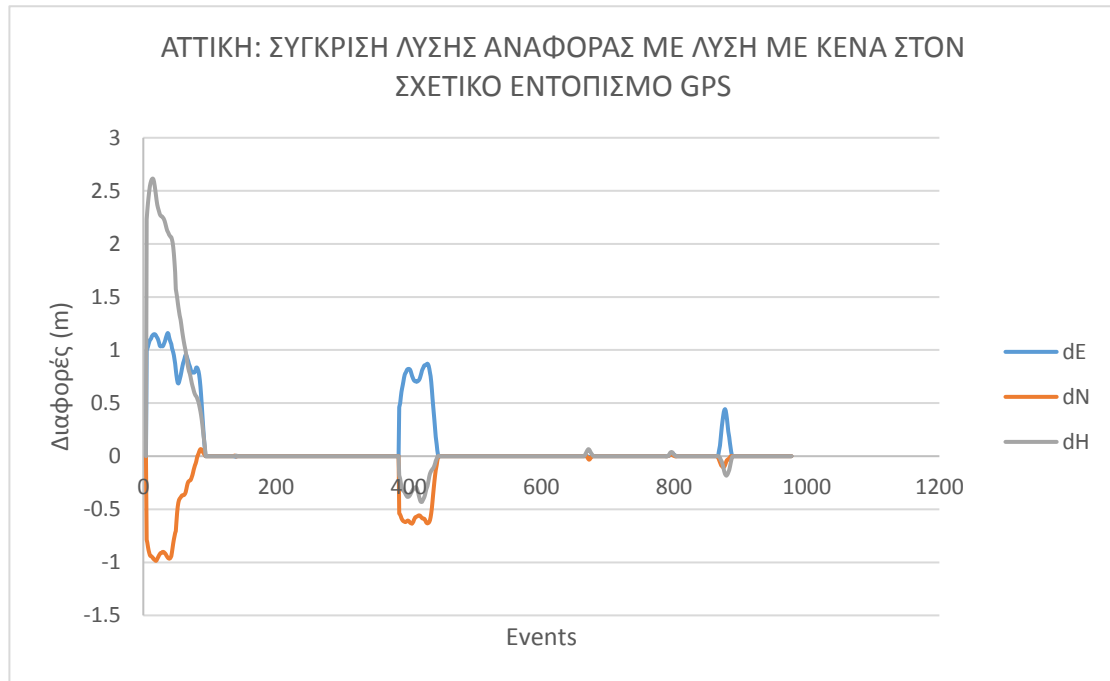
8.6 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΔΙΑΚΟΠΩΝ ΣΤΗ ΣΧΕΤΙΚΗ ΛΥΣΗ GPS

Παρακάτω εξετάζεται η συμπεριφορά του συστήματος όταν η σχετική λύση GPS εμφανίζει κενά τα οποία μπορεί να οφείλονται σε κάποια αστοχία του συστήματος ή στην έλλειψη κοινών παρατηρήσεων μεταξύ του δέκτη του αεροσκάφους και του σταθμού αναφοράς. Το μοτίβο με το οποίο ακολουθούνται οι γραμμές λήψης των αεροφωτογραφιών φαίνεται στην εικόνα 8.51 και κατά τη διάρκεια μιας αποστολής, ο χειριστής του αεροσκάφους θα πρέπει να είναι προσεκτικός όταν εξέρχεται και πριν εισέλθει σε μια γραμμή λήψης αεροφωτογραφιών, καθώς εκτελώντας αυτούς τους ελιγμούς μπορεί η γωνία στροφής του αεροσκάφους κατά Roll να είναι έντονη και ο γεωδαιτικός δέκτης GPS ο οποίος είναι τοποθετημένος στην κορυφή της ατράκτου να χάσει παρατηρήσεις από δορυφόρους με σχετικά μικρή γωνία ανύψωσης.



Εικόνα 8.51. Απεικόνιση της αποστολής της Αν.Αττικής σε δορυφορική εικόνα. Διακρίνεται το μοτίβο της πτήσης του αεροσκάφους.

Οι δοκιμές αφορούν την αποστολή της Αττικής και έχουν δημιουργηθεί με την αφαίρεση εποχών από το αρχείο με την λύση του σχετικού εντοπισμού GPS. Δημιουργήθηκαν πέντε διακοπές το χρονικό εύρος των οποίων είναι από 58.88 έως 1218.42 δευτερόλεπτα. Στην εικόνα 8.52 απεικονίζονται οι διαφορές της Λύσης Αναφοράς και της λύσης με διακοπές στα δεδομένα GPS.

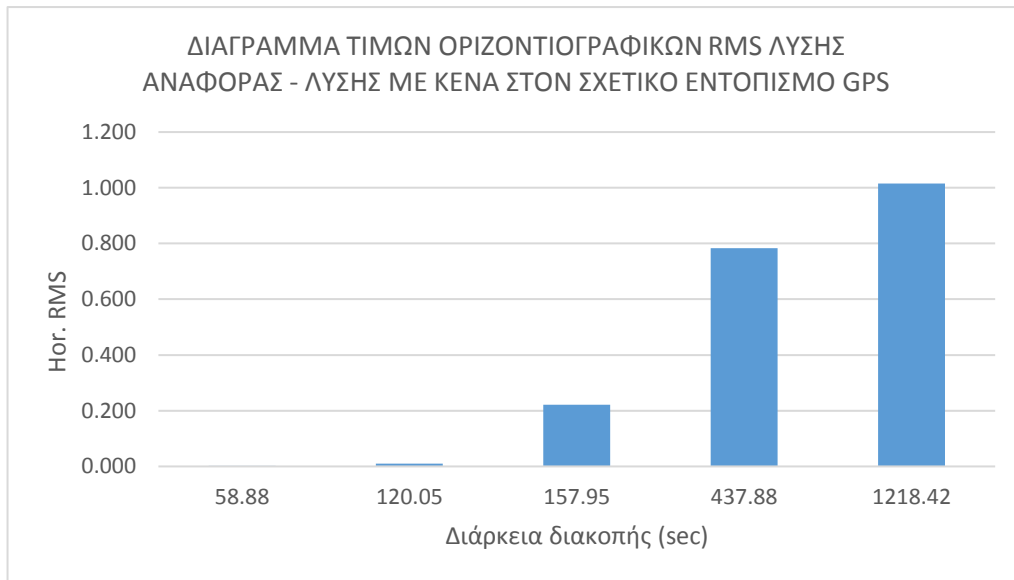


Εικόνα 8.52. Διάγραμμα σύγκρισης της Λύσης Αναφοράς με τη λύση με κενά στον σχετικό εντοπισμό GPS

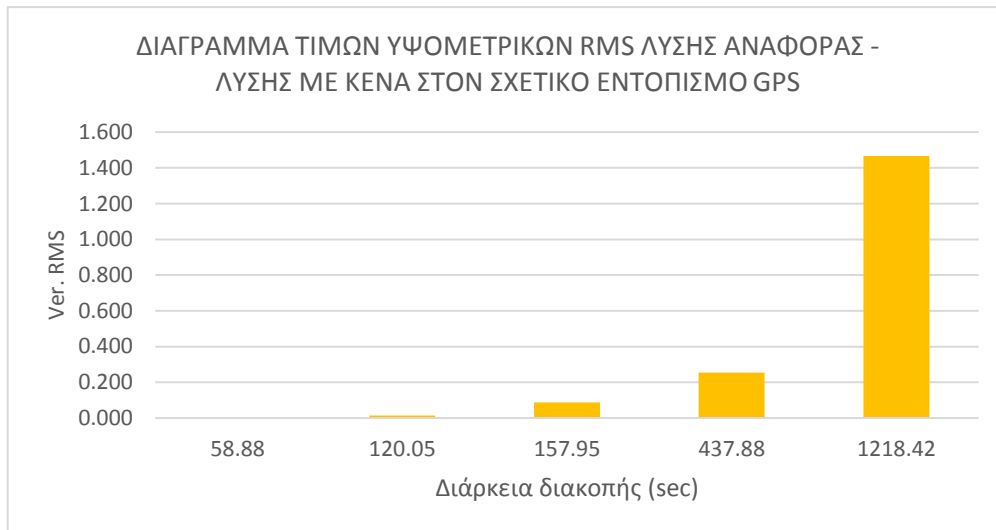
Οι τιμές των οριζοντιογραφικών και υψομετρικών διαφορών φαίνεται ότι αυξάνονται όσο αυξάνεται η διάρκεια του κενού στη λύση σχετικού εντοπισμού GPS. Αναλυτικά οι τιμές των διαφορών αναγράφονται στον πίνακα 8.12 και στις εικόνες 8.53-8.54.

Πίνακας 8.12. Πίνακας τιμών οριζοντιογραφικών και υψομετρικών RMS σε σχέση με το χρόνο διάρκειας της διακοπής στη λύση σχετικού εντοπισμού GPS.

Διάρκεια (sec)	Hor. RMS	Ver. RMS
58.88	0.002	0.002
120.05	0.010	0.014
157.95	0.221	0.087
437.88	0.783	0.254
1218.42	1.015	1.466



Εικόνα 8.53. Διάγραμμα τιμών οριζοντιογραφικών RMS σε σχέση με το χρόνο διάρκειας των διακοπών στη λύση σχετικού εντοπισμού GPS.



Εικόνα 8.54. Διάγραμμα τιμών υψομετρικών RMS σε σχέση με το χρόνο διάρκειας των διακοπών στη λύση σχετικού εντοπισμού GPS.

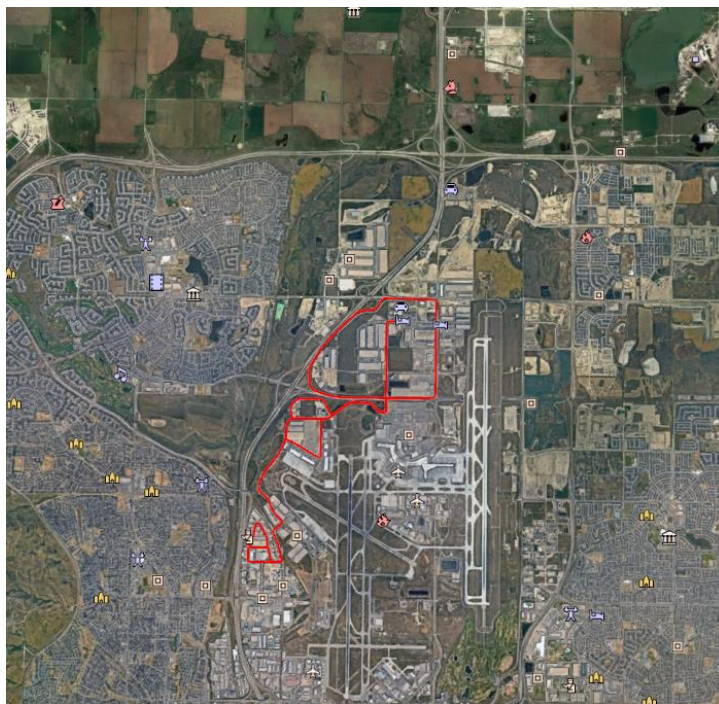
Το σύστημα μετά το στάδιο της μετεπεξεργασίας των δεδομένων φαίνεται να είναι σε θέση να αντιμετωπίσει κενά διάρκειας μέχρι περίπου 120 με αρκετά αποτελεσματικό τρόπο και η λύση που παρέχει προσεγγίζει τη λύση αναφοράς σε επίπεδο εκατοστού.

9. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Το επόμενο σύνολο δεδομένων που επεξεργάστηκαν αφορά δεδομένα επίγειου συστήματος, τα οποία χορηγήθηκαν σαν δοκιμαστικά δεδομένα στα πλαίσια της χορήγησης δοκιμαστικής άδειας για τη χρήση του λογισμικού Inertial Explorer v.8.80.2035 από την εταιρεία NovAtel.

Τα δεδομένα χρησιμοποιούνται από την εταιρεία για διαδικασίες ελέγχου και ανάπτυξης και συλλέχθηκαν από μια πλατφόρμα που έφερε σύστημα SPAN (Synchronized Position and Attitude Navigation) (βλ. εικόνα 9.2) τοποθετημένη σε αυτοκίνητο.

Η αποστολή πραγματοποιήθηκε στις 23-5-2018 από τις 19:49:33 έως τις 21:30:34 (διάρκεια περίπου 2h11min). Η διαδρομή της μονάδας πραγματοποιήθηκε στην περιοχή Calgary του Καναδά, σε περιβάλλον το οποίο δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα εμπόδια στη λήψη σήματος GNSS (βλ. εικόνα 9.1).



Εικόνα 9.1. Διαδρομή επίγειου συστήματος

Το σύστημα αποτελείται από την IMU ISA-100C η οποία παράγει δεδομένα με συχνότητα 200Hz και ένα γεωδαιτικό δέκτη που λάμβανε όλα τα σήματα GNSS ο οποίος παράγει δεδομένα με συχνότητα 20Hz. Η μονάδα αδρανειακών μετρήσεων αποτελείται από γυροσκόπια οπτικών ινών και μικροηλεκτρομηχανικά επιταχυνσιόμετρα με σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας. Το σύνολο των δεδομένων συνοδευόταν από δεδομένα ενός δέκτη GNSS - σταθμού αναφοράς, με συχνότητα 10Hz, τοποθετημένου πλησίον της περιοχής, για την επίλυση σχετικού εντοπισμού για τα δεδομένα GNSS.

Λόγω του περιορισμένου χρόνου ισχύος της άδειας χρήσης του λογισμικού (μία εβδομάδα) οι συγκρίσεις που πραγματοποιήθηκαν περιορίστηκαν στις οριζοντιογραφικές και υψομετρικές διαφορές και δεν επεκτάθηκαν στη διερεύνηση διαφορών στον προσανατολισμό.

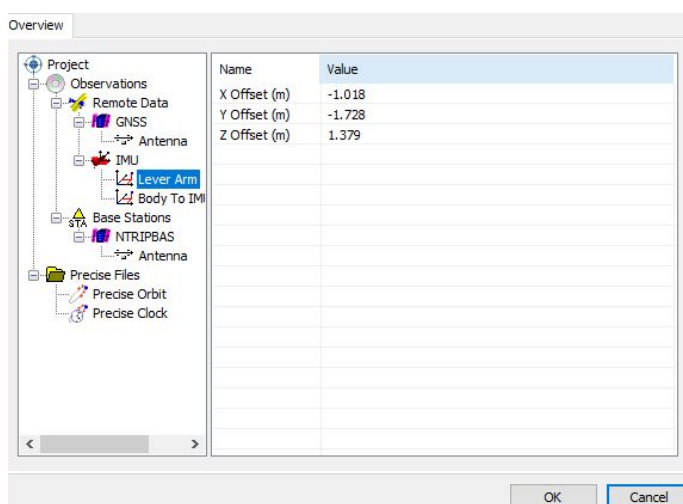


Εικόνα 9.2. Η IMU ISA-100C. (Πηγή: <https://www.NovAtel.com/products/span-gnss-inertial-systems/span-imus/imu-isa-100c/>)

9.1 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

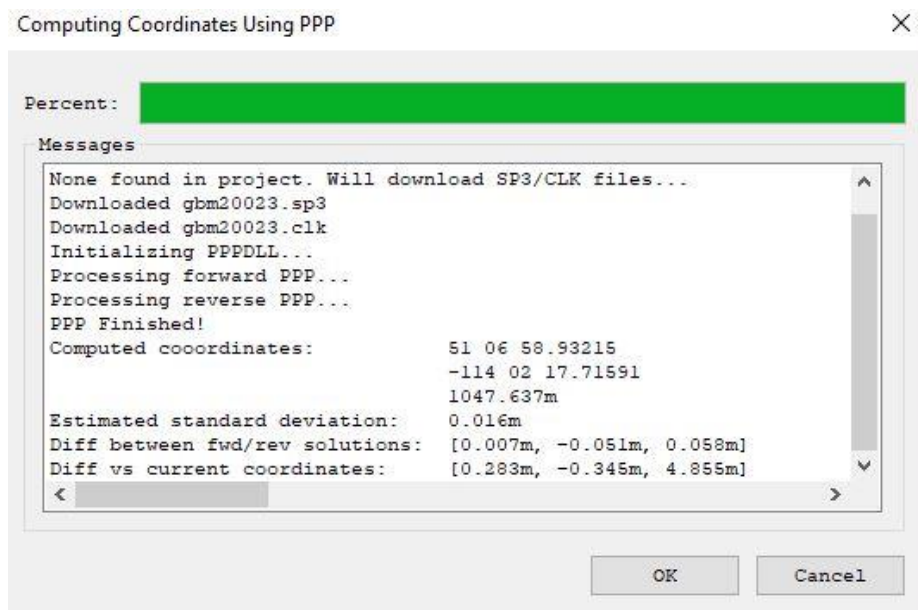
Παρακάτω ακολουθεί μια σύνοψη της διαδικασίας αποκωδικοποίησης και επεξεργασίας των δεδομένων μέσω του λογισμικού Inertial Explorer.

Τα πρωτογενή δεδομένα του συστήματος SPAN αποκωδικοποιήθηκαν στο περιβάλλον του λογισμικού. Κατά την αλληλογραφία με τους εκπροσώπους της εταιρείας είχε αποσαφηνιστεί ότι οι τιμές που αφορούσαν τις εκκεντρότητες της κεραίας GNSS και το σημείο αναφοράς της IMU (lever arm offset) είχαν ήδη υπολογιστεί και εισαχθεί στα δεδομένα, επομένως δε χρειαζόταν να πραγματοποιηθεί κάποια επιπλέον ενέργεια (βλ. εικόνα 9.3).



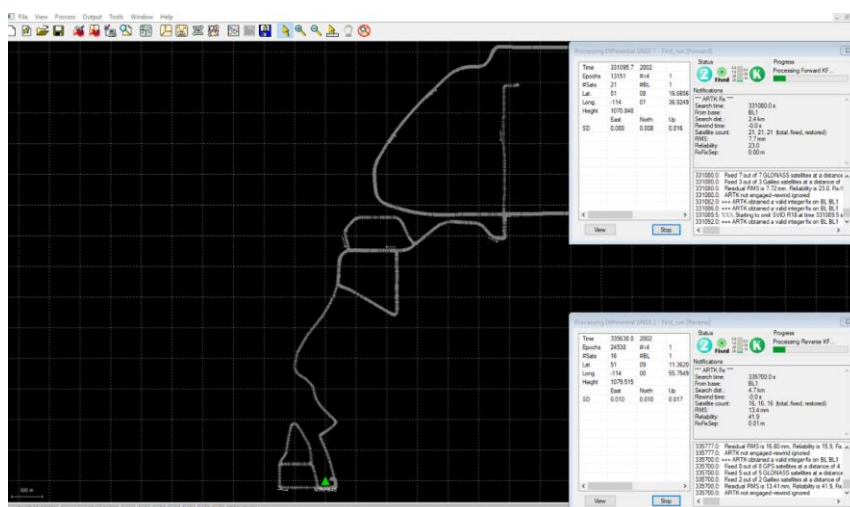
Εικόνα 9.3. Τιμές του lever arm offset κατά την αποκωδικοποίηση των πρωτογενών δεδομένων.

Το αρχείο με τις παρατηρήσεις του σταθμού αναφοράς δεν συνοδεύεται από κάποιο συμπληρωματικό αρχείο με τις ακριβείς συντεταγμένες του. Κατά τις πρώτες δοκιμές διαπιστώθηκε ότι το λογισμικό όριζε τις συντεταγμένες του σταθμού αναφοράς χρησιμοποιώντας το μέσο όρο που προέκυπτε από την ανάγνωση των πρωτογενών δεδομένων. Για να εξασφαλιστεί μια συνάφεια και εξωτερική ακρίβεια στις επιλύσεις μέσω σχετικού κινηματικού εντοπισμού θέσης, προτιμήθηκε να υπολογιστούν εξ' αρχής οι συντεταγμένες του σταθμού αναφοράς μέσω PPP και στη συνέχεια να τίθενται ως σταθερές σε όλες τις δοκιμές που ακολούθησαν (βλ. εικόνα 9.4).



Εικόνα 9.4. Υπολογισμός των συντεταγμένων του σταθμού αναφοράς μέσω Precise Point Positioning.

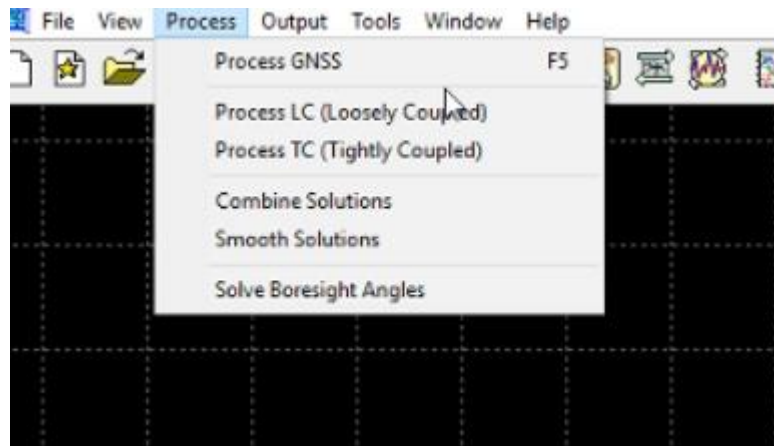
Το γραφικό περιβάλλον του λογισμικού είναι παρόμοιο με αυτό του GrafNav, καθώς αναπτύσσεται από την ίδια εταιρεία. Έτσι, οι επιλογές και οι λειτουργίες που είναι διαθέσιμες για τα δεδομένα GNSS είναι παρόμοιες με εκείνες που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 8 και αφορούσαν τα δεδομένα GPS του αερομεταφερόμενου συστήματος (βλ. εικόνα 9.5).



Εικόνα 9.5. Επίλυση των δεδομένων GNSS μέσω σχετικού εντοπισμού.

Εκεί που διαφοροποιείται η διαδικασία της επεξεργασίας των παρατηρήσεων είναι στην σύζευξη των δεδομένων GNSS με τα δεδομένα του Αδρανειακού Συστήματος Πλοήγησης, η οποία πραγματοποιείται στο ίδιο λογισμικό πακέτο και δεν περιορίζεται μόνο στο Loose Coupling όπως στην περίπτωση του αερομεταφερόμενου συστήματος.

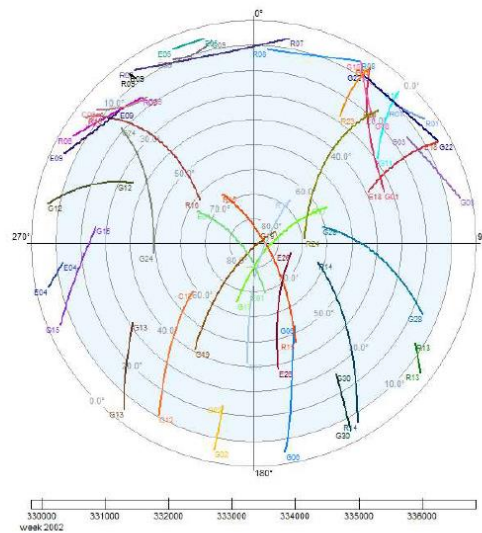
Συγκεκριμένα το λογισμικό υποστηρίζει Loose Coupling, Tight Coupling, συνδυασμό λύσεων και υποβοήθηση της λύσης με αρχείο συντεταγμένων που αφορούν την τροχιά του οχήματος (βλ. εικόνα 9.6).



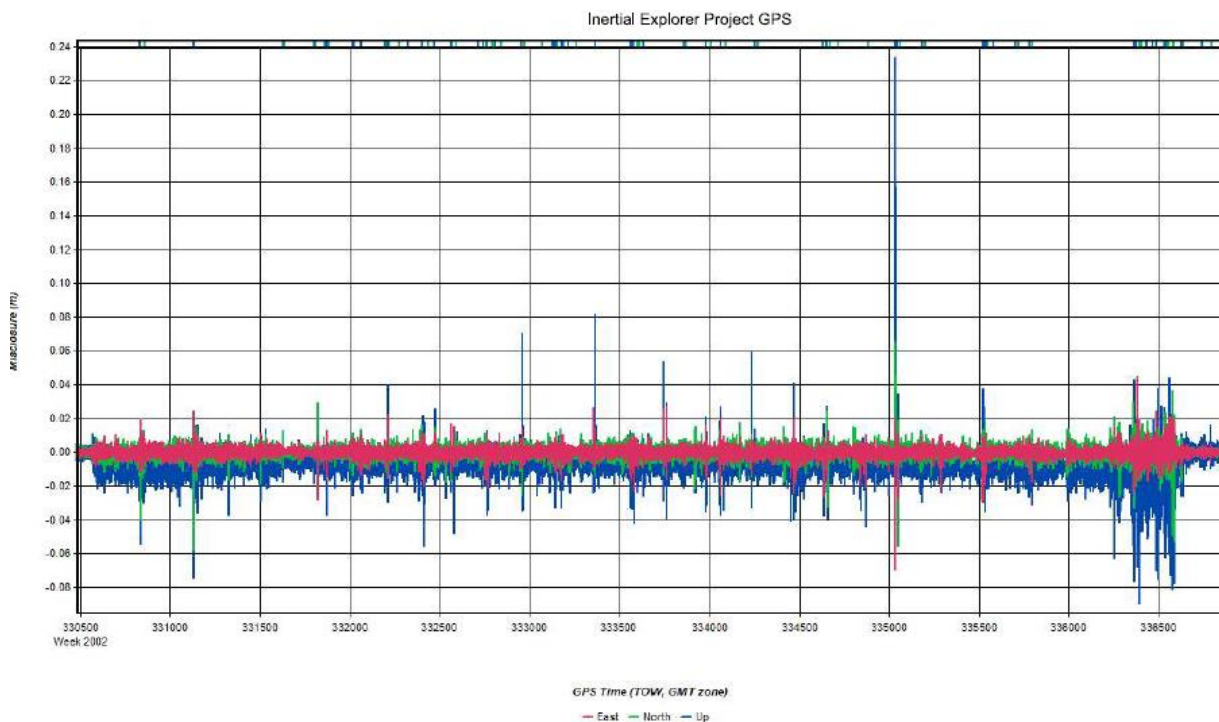
Εικόνα 9.6. Διαθέσιμες επιλογές επεξεργασίας δεδομένων.

Μια ακόμα λειτουργία η οποία είναι προεπιλεγμένη, είναι η χρήση ενός αλγορίθμου εξομάλυνσης για τα αποτελέσματα. Παρότι δεν γίνεται σαφής αναφορά στις δημοσιεύσεις της NovAtel για τη λειτουργία του αλγορίθμου εξομάλυνσης, υπάρχουν δημοσιεύσεις που έχουν ασχοληθεί με το ζήτημα και αναλύουν τη λειτουργία του (Kennedy et al., 2006). Ουσιαστικά πρόκειται για έναν αλγόριθμο εξομάλυνσης Rauch-Tung-Striebel (βλ. παρ. 7.4.1).

Μετά το πέρας της διαδικασίας της επεξεργασίας των δεδομένων, ο χρήστης μπορεί να συμβουλευτεί μια σειρά από διαγράμματα και γραφήματα που αφορούν την ποιότητα των λύσεων, τις διαφορές ανάμεσα στη λύση GNSS/INS και τη λύση GNSS κ.α. Στην εικόνα 9.7 για παράδειγμα, απεικονίζονται οι διαθέσιμοι δορυφόροι από τα GNSS, ενώ στην εικόνα 9.8 οι διαφορές ανάμεσα στη λύση GPS και τη λύση GPS/INS.



Εικόνα 9.7. Διάγραμμα με τους διαθέσιμους δορυφόρους κατά τη διάρκεια της αποστολής.



Εικόνα 9.8. Διάγραμμα με τις διαφορές της λύσης GPS σε σχέση με τη λύση GPS/INS με Loose Coupling και τη χρήση του αλγορίθμου εξομάλυνσης κατά East (κόκκινη γραμμή), North (Πράσινη γραμμή) και Up (μπλε γραμμή).

Όλοι οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν στο WGS-84 ενώ για την εξαγωγή και την ευκολότερη επεξεργασία των αποτελεσμάτων επιλέχθηκε η εγκάρσια μερκατορική προβολή UTM zone 11. Τα υψόμετρα που αναφέρονται είναι ελλειψοειδή καθώς δεν πραγματοποιήθηκε η αναγωγή τους σε ορθομετρικά με κάποιο μοντέλο γεωειδούς. Η ύπαρξη μοντέλου γεωειδούς θα μπορούσε να αποδώσει μια φυσική σημασία στα ελλειψοειδή υψόμετρα που εξάγονται από τις παρατηρήσεις GNSS (Μαβινάκη-Σοφιού-Χανόπουλος, 2010). Ωστόσο, η φυσική αυτή σημασία των υψομέτρων δεν παίζει ουσιαστικό ρόλο σε αυτές τις συγκρίσεις καθώς τα δεδομένα εξετάζονται ως προς τις σχετικές διαφορές τους.

9.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΣΥΖΕΥΞΗΣ

Στο πρώτο σύνολο επιλύσεων που πραγματοποιήθηκε, εξετάζονται οι διαθέσιμες επιλογές επίλυσης. Αρχικά αναφέρεται ότι τα δεδομένα δεν εξετάζονται πλέον σε επίπεδο παλμών (events) όπως στο αερομεταφερόμενο σύστημα, αλλά σε επίπεδο εποχών. Λόγω της μεγάλης συχνότητας καταγραφής των δεδομένων τόσο του αδρανειακού συστήματος που είναι της τάξης των 200Hz, όσο και του δέκτη GNSS που είναι της τάξης των 20Hz, επιλέχθηκε η εξαγωγή των δεδομένων να πραγματοποιείται ανά 1 sec. Με αυτόν τον τρόπο μειώθηκε ο όγκος των δεδομένων και κατέστη ευκολότερος ο χρονικός συσχετισμός που είναι απαραίτητος για την σύγκρισή τους.

Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιήθηκε επεξεργασία των δεδομένων με τη χρήση σχετικού εντοπισμού GPS και οι επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν ήταν:

1. Loose Coupling
2. Loose Coupling με τη χρήση του αλγορίθμου εξομάλυνσης
3. Tight Coupling
4. Tight Coupling με τη χρήση του αλγορίθμου εξομάλυνσης

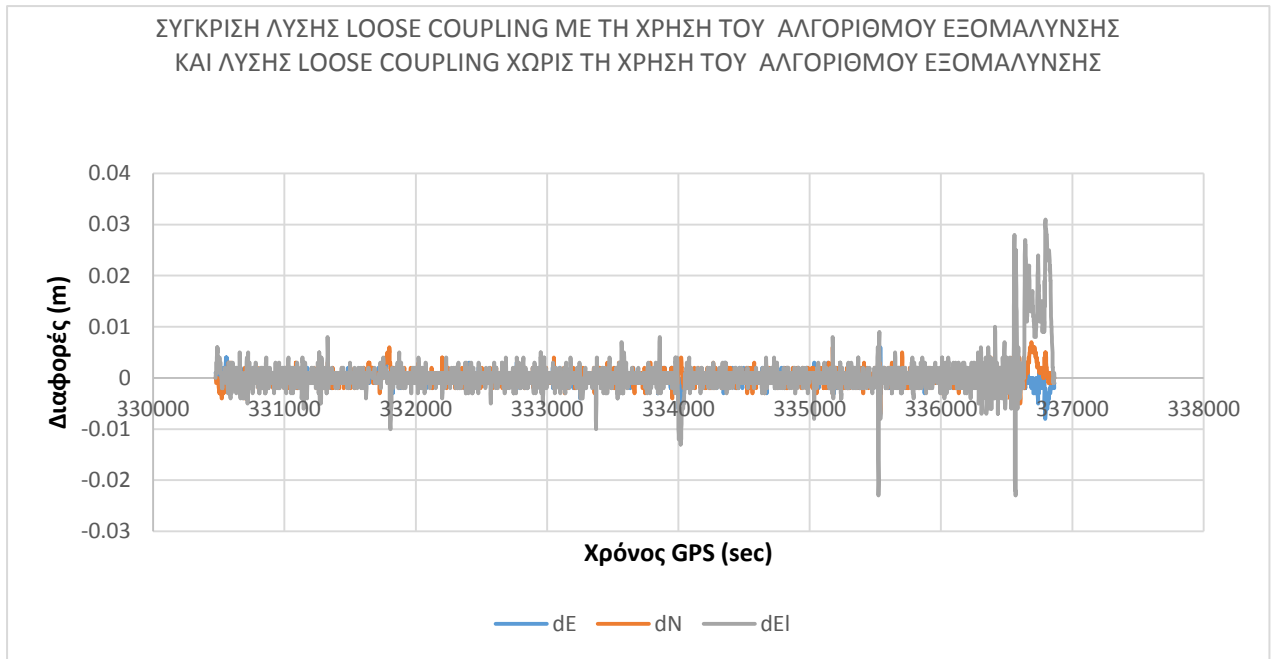
Σαν κριτήριο για την επιλογή της βέλτιστης λύσης ορίστηκε αυθαίρετα ο Μέσος Όρος των τιμών των τυπικών αποκλίσεων των παρατηρήσεων, όπως αυτές προέκυψαν από τις επιλύσεις (βλ. πίνακα 9.1).

Πίνακας 9.1. Προσδιορισμός βέλτιστης λύσης.

Μέσος όρος τιμών τυπικών αποκλίσεων ανά επίλυση (m)			
Τύπος επίλυσης	Avg sdE	Avg sdN	Avg sdEI
Loosely Coupled	0.00156	0.00208	0.00250
Loosely Coupled με εξομάλυνση	0.00108	0.00129	0.00206
Tightly Coupled	0.00203	0.00235	0.00314
Tightly Coupled με εξομάλυνση	0.00110	0.00206	0.00217

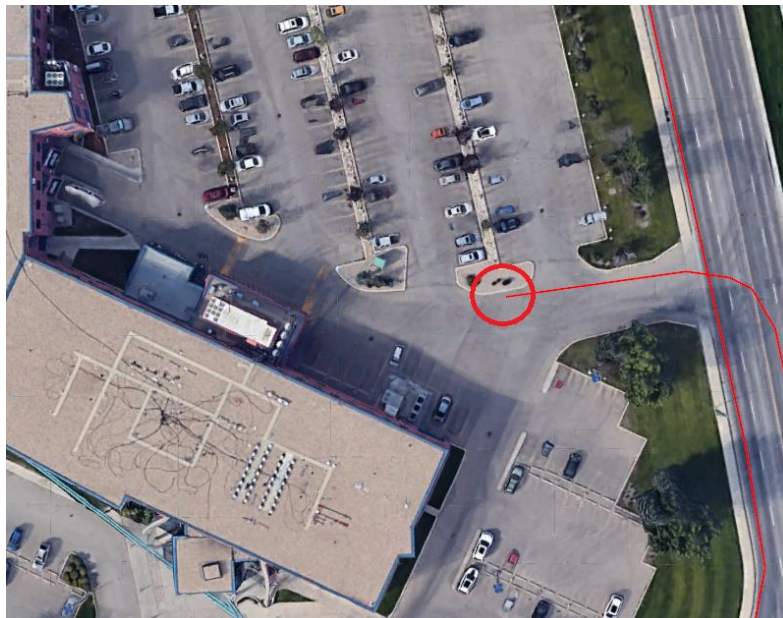
Όπως φαίνεται από τα ανωτέρω, για τα συγκεκριμένα δεδομένα η λύση η οποία καλύπτει το αυθαίρετο κριτήριο είναι εκείνη του Loose Coupling με τη χρήση του αλγορίθμου εξομάλυνσης,

Ωστόσο, συγκρίνοντας απ' ευθείας τα δεδομένα των ξεχωριστών επιλύσεων με τη λύση αναφοράς, δεν διαπιστώνονται ουσιαστικές οριζοντιογραφικές και υψομετρικές διαφορές. Στην εικόνα 9.9 φαίνονται οι διαφορές ως προς τη θέση του συστήματος οι οποίες είναι πολύ μικρές.



Εικόνα 9.9. Σύγκριση λύσεων Loose Coupling με τη χρήση του αλγορίθμου εξομάλυνσης και Loose Coupling χωρίς τη χρήση του αλγορίθμου εξομάλυνσης.

Παρατηρείται προς το τέλος της αποστολής μια έξαρση της τάξης των 3cm κατά elevation η οποία όμως δεν μπορεί να αξιολογηθεί περαιτέρω, καθώς κατά τη διάρκεια αυτών των εποχών το όχημα δείχνει να βρίσκεται στατικό σε ανοιχτό χώρο στάθμευσης, οπότε είναι πιθανό να αποβιβάζονται επιβάτες ή να απομακρύνονται αντικείμενα από τους αποθηκευτικούς του χώρους, οπότε να υπόκειται σε κραδασμούς που επηρεάζουν τα αποτελέσματα (βλ. εικόνα 9.10).



Εικόνα 9.10. Απεικόνιση της θέσης του οχήματος κατά τη διάρκεια των τελευταίων καταγεγραμμένων εποχών.

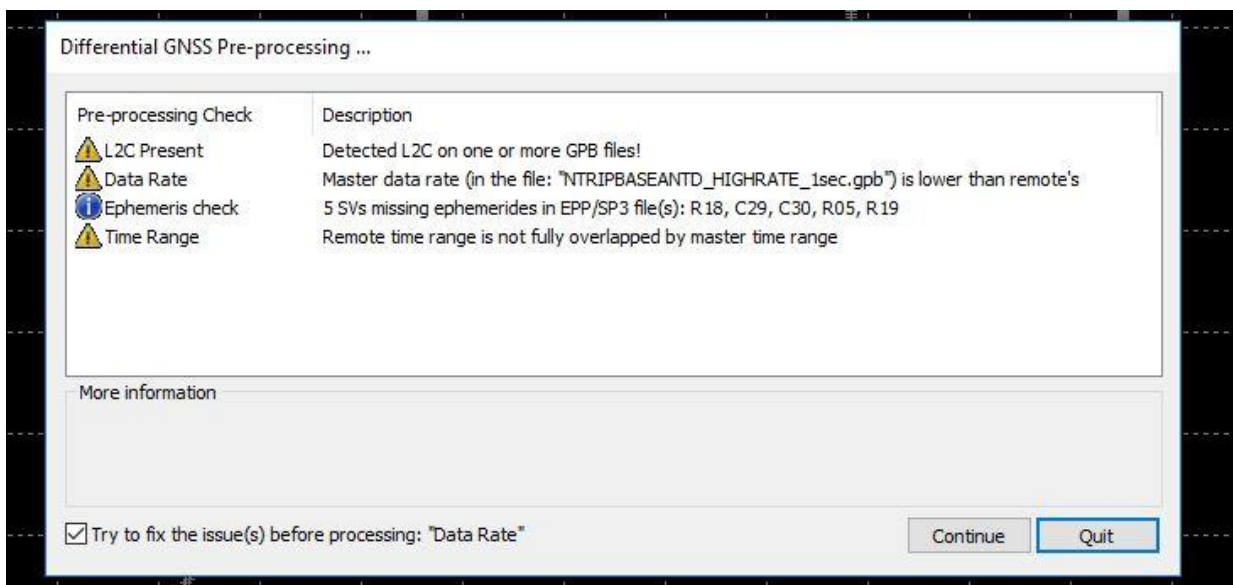
Η απ' ευθείας σύγκριση των δεδομένων της λύσης αναφοράς με τις λύσεις μέσω Tight Coupling με και χωρίς τη χρήση του αλγορίθμου εξομάλυνσης είχε παρόμοια αποτελέσματα.

9.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟ ΡΥΘΜΟ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΣΤΗ ΣΧΕΤΙΚΗ ΛΥΣΗ GPS

Τα δεδομένα που εξετάζονται έχουν δημιουργηθεί με σχετικό εντοπισμό GPS με τα δεδομένα του σταθμού αναφοράς που περιέχονταν στο δείγμα δεδομένων που εστάλη από τη NovAtel. Ο σταθμός αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε έχει ρυθμό καταγραφής τα 10Hz και ενδείκνυται για δυναμικές κινηματικές εφαρμογές.

Παρακάτω εξετάζεται η απόδοση του συστήματος όταν τα δεδομένα του σταθμού αναφοράς έχουν μικρότερο ρυθμό καταγραφής. Θεωρώντας ότι πολλοί δέκτες μπορούν να λειτουργήσουν με μέγιστο ρυθμό καταγραφής το 1Hz, πραγματοποιήθηκε resampling στα δεδομένα του σταθμού αναφοράς στο 1Hz και 0.5Hz (καταγραφή πληροφορίας ανά 2 second).

Κατά την εισαγωγή των δεδομένων από το σταθμό αναφοράς, το λογισμικό αντιλαμβάνεται τη διαφορά στο ρυθμό καταγραφής ανάμεσα στο σταθμό αναφοράς και το μεταφερόμενο δέκτη και στο στάδιο της προεπεξεργασίας γεφυρώνει τα κενά στα δεδομένα μέσω παρεμβολής (βλ. εικόνα 9.11).

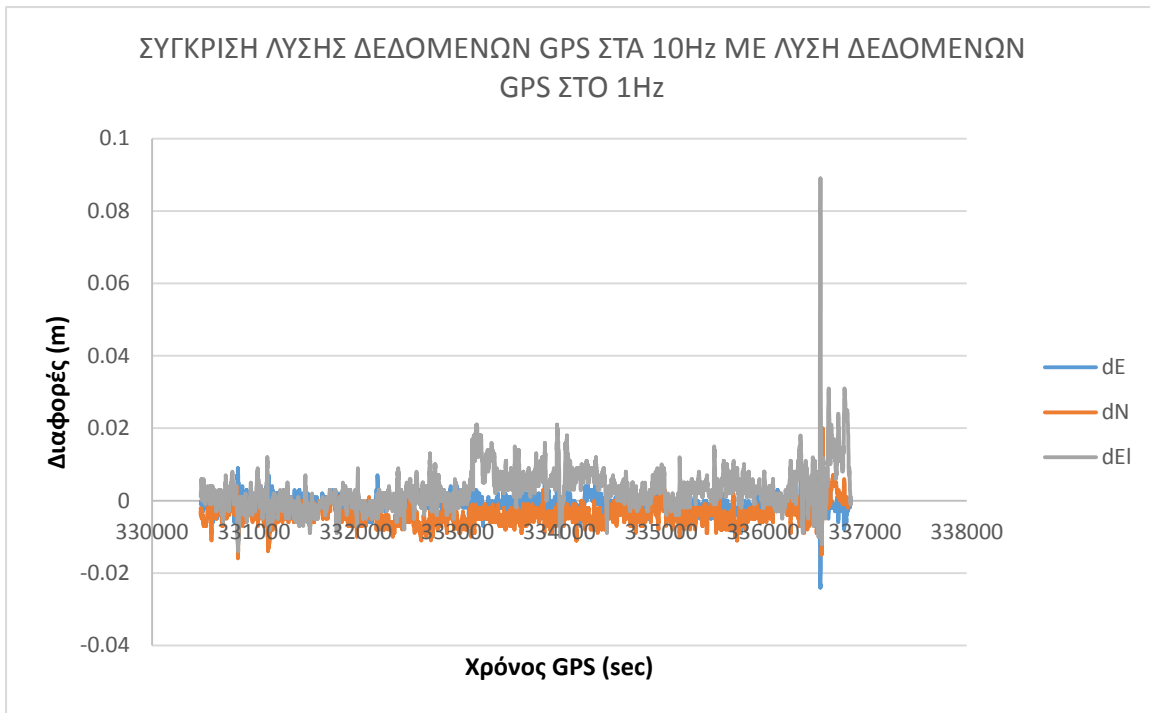


Εικόνα 9.11. Μηνύματα κατά τη διάρκεια της προεπεξεργασίας των δεδομένων. Το δεύτερο μήνυμα αναφέρει τη διαφορά στο ρυθμό καταγραφής των δεδομένων ανάμεσα σε Base και Rover.

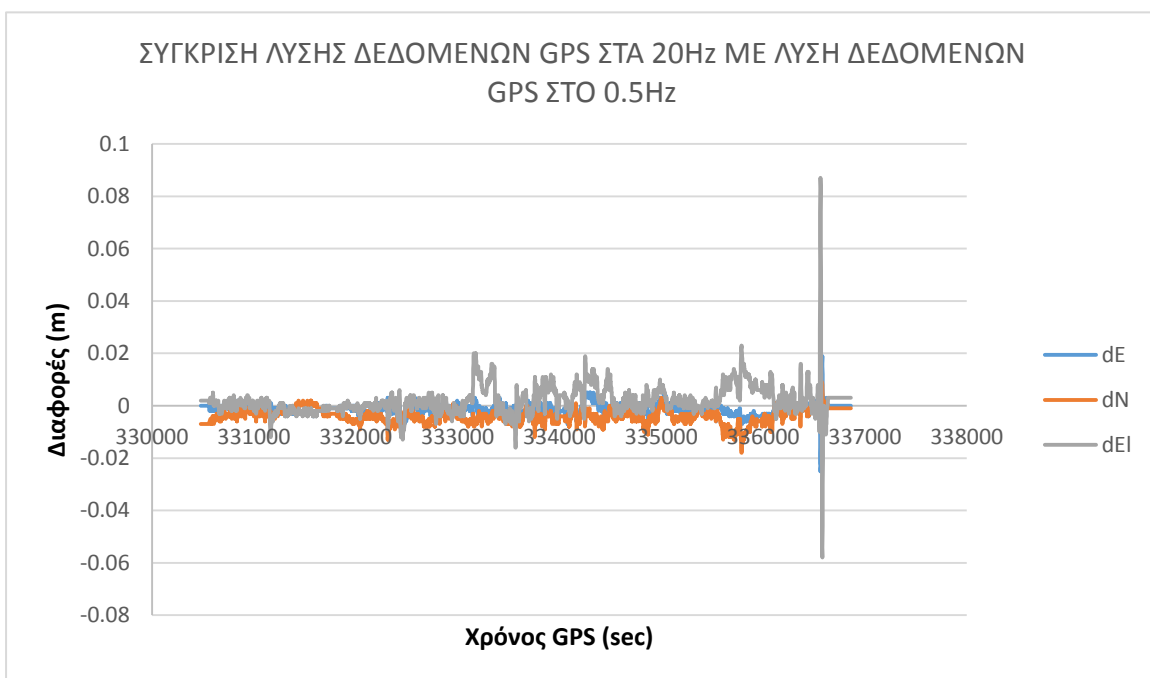
Μετά την προεπεξεργασία των δεδομένων, πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις της λύσης αναφοράς με τις λύσεις των 1Hz και 0.5Hz.

Οι λύσεις που εξετάζονται είναι λύσεις που έχουν προκύψει μέσω Loose Coupling με τη χρήση του αλγορίθμου εξομάλυνσης.

Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στις εικόνες 9.12-9.13:



Εικόνα 9.12. Σύγκριση δεδομένων λύσης αναφοράς με λύση δεδομένων με ρυθμό ανανέωσης δεδομένων GPS ίσο με 1hz



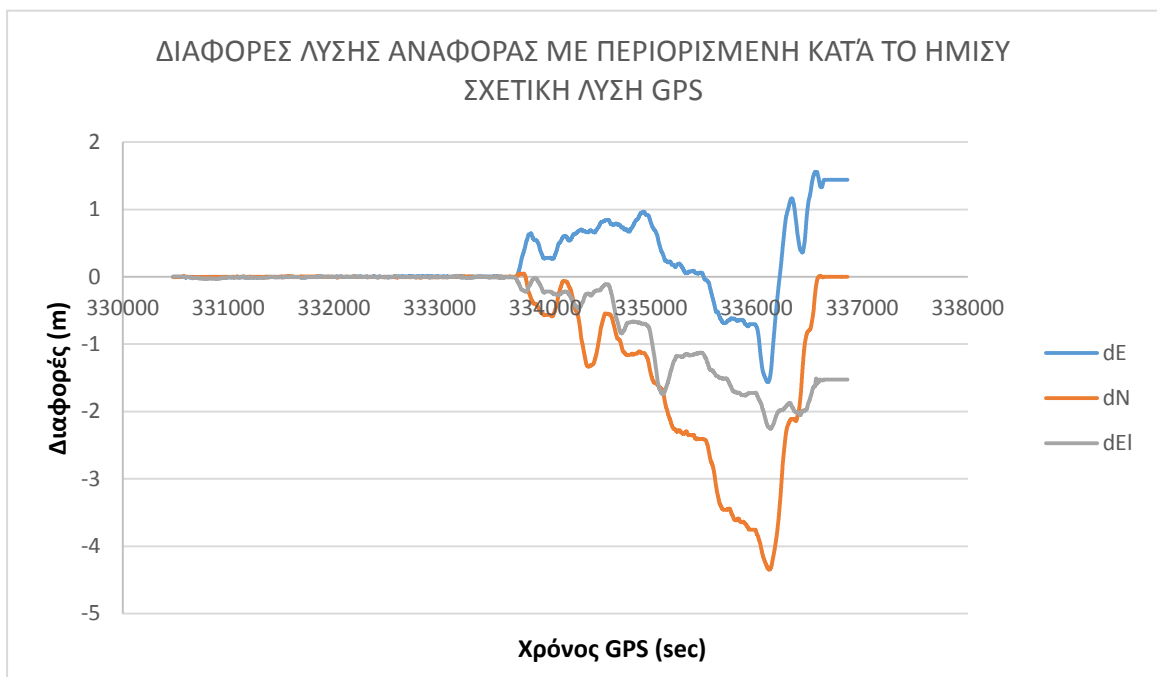
Εικόνα 9.13. Σύγκριση δεδομένων λύσης αναφοράς με λύση δεδομένων με ρυθμό ανανέωσης δεδομένων GPS ίσο με 0.5hz

Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων δείχνουν ότι το σύστημα μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα με τη χρήση δεδομένων GPS 1Hz και 0.5Hz με τις διαφορές να περιορίζονται στα 1-2cm, μη λαμβάνοντας υπ' όψιν την έξαρση των τιμών στο τέλος της αποστολής για τους λόγους που έχουν αναφερθεί παραπάνω.

9.4 ΑΠΩΛΕΙΑ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΛΥΣΗΣ GPS

Σε αυτή τη δοκιμή προσομοιώνεται το ενδεχόμενο απώλειας της σχετικής λύσης GPS από το μέσο της αποστολής και μετά.

Πραγματοποιείται σύγκριση ανάμεσα στη λύση αναφοράς και τη λύση που προκύπτει μέσω Loose Coupling με τη χρήση του αλγορίθμου εξομάλυνσης και περιλαμβάνει δεδομένα σχετικής λύσης GPS μόνο για το πρώτο μισό της διαδρομής. Ο αποκλεισμός των δεδομένων πραγματοποιήθηκε μέσω λειτουργίας του λογισμικού που επιτρέπει στο χρήστη να ορίσει τη διάρκεια στο χρόνο επεξεργασίας των δεδομένων GNSS. Στην εικόνα 9.14 περιγράφονται αυτές οι διαφορές.



Εικόνα 9.14. Σύγκριση δεδομένων λύσης αναφοράς με λύση δεδομένων με περιορισμένη κατά το ήμισυ σχετική λύση GPS.

Τα κύρια στατιστικά στοιχεία των διαφορών αναφέρονται στον πίνακα 9.2.

Πίνακας 9.2. Στατιστικά στοιχεία διαφορών λύσης αναφοράς με περιορισμένη κατά το ήμισυ λύση σχετικού εντοπισμού GPS.

Στατιστικά στοιχεία σύγκρισης λύσης αναφοράς με περιορισμένη κατά το ήμισυ λύση σχετικού εντοπισμού GPS			
	dE	dN	dEI
Min	-1.564	-4.351	-2.258
Max	1.560	0.050	0.016
Average	0.177	-0.797	-0.543
St. Deviation	0.530	1.228	0.724

Παρατηρείται ότι η ολίσθηση που εμφανίζεται στα αποτελέσματα είναι παρόμοια με την ολίσθηση των δεδομένων του αερομεταφερόμενου συστήματος. Οι διαφορές ωστόσο είναι σημαντικά μεγαλύτερες, πράγμα που καταδεικνύει τη σημασία της κατηγορίας του INS το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν μπορεί να περιορίσει τα σφάλματα εξίσου καλά με εκείνο του αερομεταφερόμενου συστήματος. Ένας ακόμα παράγοντας που πρέπει να εξεταστεί είναι και το γεγονός ότι το αερομεταφερόμενο σύστημα επιχειρεί σε περιβάλλον απαλλαγμένο από εμπόδια στη λήψη του σήματος GNSS. Η πορεία του επίγειου συστήματος, ακόμα κι αν δεν πραγματοποιήθηκε σε πυκνό αστικό περιβάλλον, είναι σίγουρα πιο εκτεθειμένη σε παράγοντες που μπορούν να εμποδίσουν τη λήψη του σήματος GNSS.

Επομένως και σε αυτήν την περίπτωση είναι πολύ πιθανόν το σύστημα να έχει διαθέσιμα δεδομένα αυτόνομου εντοπισμού σαν ένα μέτρο εξασφάλισης της αποστολής ή μέσω της μεθόδου αποκλεισμού των παρατηρήσεων που ακολουθήθηκε να μην αποκλείονται οι παρατηρήσεις του αυτόνομου εντοπισμού. Παρόμοια με την περίπτωση του αερομεταφερόμενου συστήματος, η καταλληλότητα των δεδομένων εξαρτάται από τη φύση του έργου για το οποίο προορίζονται. Εφ' όσον όμως πρόκειται συνήθως για έργα μικρότερης κλίμακας, τα δεδομένα που προκύπτουν χωρίς τη σχετική λύση GPS πολύ πιθανό να είναι ακατάλληλα.

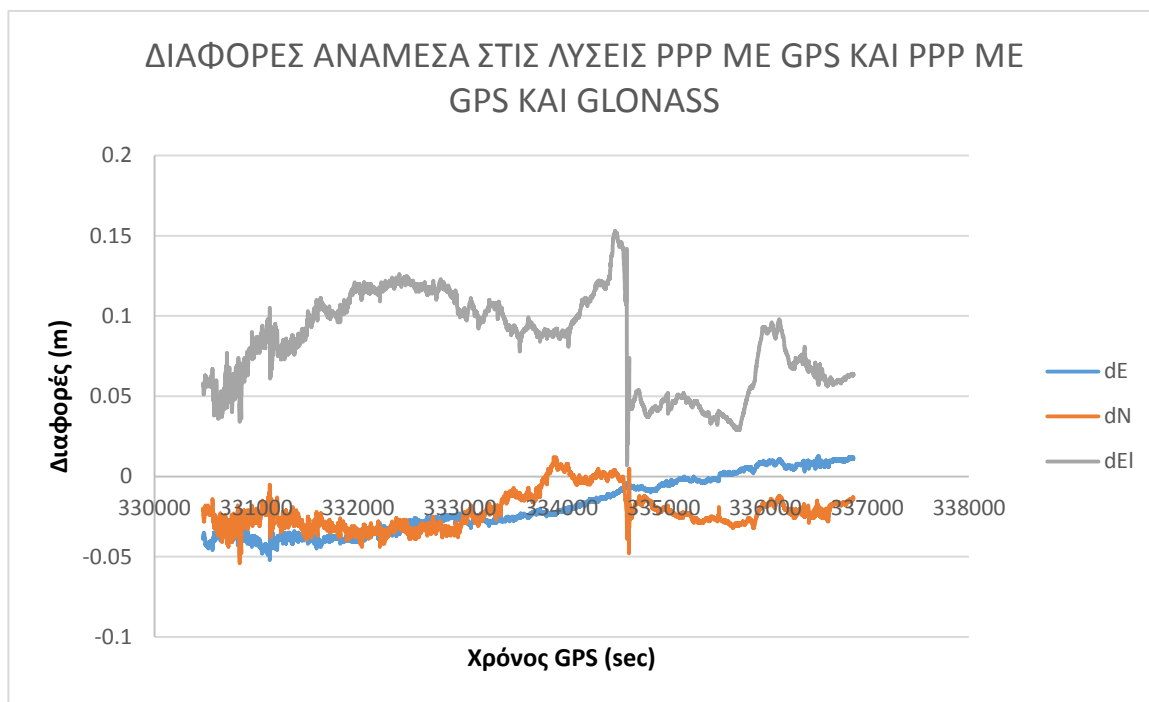
Μία μέθοδος βελτιστοποίησης των αποτελεσμάτων, αντίστοιχη με εκείνη της εισαγωγής επιπλέον φωτοσταθερών σημείων για την περίπτωση του αερομεταφερόμενου συστήματος, θα μπορούσε να είναι η τροφοδότηση δεδομένων ακριβείας που αφορούν την τροχιά του οχήματος το οποίο φέρει το σύστημα. Αυτή η δυνατότητα παρέχεται από το επιλυτικό λογισμικό αλλά τέτοια δεδομένα δεν συμπεριλαμβάνονταν στο σετ δεδομένων που παρείχε η NovAtel.

9.5 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΛΥΣΗΣ PPP ΑΠΟ GPS ΚΑΙ PPP ΑΠΟ GPS ΚΑΙ GLONASS

Η τελευταία δοκιμή που πραγματοποιήθηκε αφορά μόνο δεδομένα GNSS και όχι συνδυασμένα δεδομένα GNSS/INS.

Αρχικά τα δεδομένα επιλύθηκαν μέσω Precise Point Positioning με τη χρήση μόνο του GPS και στη συνέχεια επιλύθηκαν μέσω Precise Point Positioning με τη χρήση του GPS και του GLONASS.

Οι διαφορές που προέκυψαν απεικονίζονται στην εικόνα 9.15.



Εικόνα 9.15. Σύγκριση διαφορετικών λύσεων μέσω Precise Point Positioning

Τα κύρια στατιστικά στοιχεία των διαφορών αναγράφονται στον πίνακα 9.3.

Πίνακας 9.3. Στατιστικά στοιχεία διαφορών λύσης PPP με τη χρήση του GPS και λύσης PPP με τη χρήση των GPS και GLONASS

Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης λύσεων PPP			
	dE	dN	dEI
Min	-0.052	-0.054	0.007
Max	0.013	0.012	0.153
Average	-0.019	-0.022	0.084
St. Deviation	0.017	0.011	0.029

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα και τα στατιστικά στοιχεία των διαφορών, οι δύο λύσεις είναι αρκετά κοντά, στο επίπεδο των λίγων cm οριζοντιογραφικά ενώ υψομετρικά οι διαφορές αγγίζουν μέχρι και τα 15cm. Αυτές οι διαφορές μπορεί να οφείλονται σε παράγοντες όπως η γεωμετρία των δορυφόρων στις δύο περιπτώσεις και εν γένει στη χρήση GNSS με διαφορετικά χαρακτηριστικά.

10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΕΤΑΙΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Το παρόν κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν καθώς επίσης και κάποια αντικείμενα για περαιτέρω έρευνα.

Αρχικά, από το θεωρητικό τμήμα της εργασίας συμπεραίνεται η κρισιμότητα στην κατανόηση όλων των συνιστωσών μέσω των οποίων καθίσταται δυνατή η πλοήγηση με το συνδυασμό παρατηρήσεων GNSS/INS όπως:

- Η κατανόηση των μερών των συστημάτων.
- Η γεωμετρική αντίληψη των εμπλεκόμενων συστημάτων αναφοράς για τον προσδιορισμό της θέσης και του προσανατολισμού ενός σώματος σε σχέση με ένα γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς και η σημασία των επί μέρους βημάτων και μετασχηματισμών που πραγματοποιούνται.
- Η αντίληψη των πλεονεκτημάτων και των αδυναμιών του κάθε συστήματος.
- Η ανάγκη για κριτική σκέψη και ανάλυση των συστημάτων για την αξιοποίηση των δυνατοτήτων τους σε νέα προβλήματα.

Από το πρακτικό τμήμα της εργασίας και μετά από την επεξεργασία των δεδομένων που αφορούν στο αερομεταφερόμενο σύστημα και το επίγειο σύστημα, τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

Για το αερομεταφερόμενο σύστημα:

Διαπιστώθηκε ότι για να υπάρχει πλήρης ακρίβεια στην τελική λύση θα πρέπει η λύση σχετικού εντοπισμού GNSS να μην περιορίζεται στο διάστημα έναρξης-λήξης της λήψης των αεροφωτογραφιών, αλλά να έχει μεγαλύτερη διάρκεια. Διαφορετικά, περιορίζοντας τη λύση υπεισέρχονται σφάλματα. Συγκεκριμένα, για την περίπτωση της λύσης με έναρξη του σχετικού εντοπισμού GPS 5 λεπτά πριν την έναρξη της λήψης των αεροφωτογραφιών και λήξη του σχετικού εντοπισμού GPS 5 λεπτά μετά τη λήξη της λήψης των αεροφωτογραφιών, οι μέγιστες οριζοντιογραφικές διαφορές εντοπίστηκαν στην αποστολή της Σκιάθου και ήταν της τάξης των 4.5cm. Ωστόσο, η αποστολή της Σκιάθου είχε πολύ μικρότερη διάρκεια χρόνου λήψης αεροφωτογραφιών από τη συνηθισμένη διάρκεια παρόμοιων αποστολών. Για τις υπόλοιπες αποστολές, οι μέγιστες οριζοντιογραφικές διαφορές εντοπίστηκαν στην αποστολή της Αττικής και ήταν της τάξης του 1.5cm.

Ειδικότερα, αν αντί για σχετικός εντοπισμός GNSS χρησιμοποιείται λύση PPP, για να εξασφαλίζονται ακρίβειες λίγων cm θα πρέπει η συνολική διάρκεια της λύσης να είναι διάρκειας τουλάχιστον των 2 ωρών. Σημειώνεται ότι ακόμα και με διάρκεια λύσης μεγαλύτερης της 1.5 ώρας εντοπίστηκαν μεμονωμένες περιπτώσεις (Αν. Αττική), όπου τα σφάλματα ξεπέρασαν τα 20 cm.

Η τεχνική PPP έχει εν γένει την ικανότητα να εξασφαλίζει ακρίβειες λίγων cm (υπό την αίρεση της προηγούμενης παραγράφου). Ωστόσο, ειδικά για την Ελλάδα όπου λαμβάνουν χώρα έντονα γεωδυναμικά φαινόμενα και λόγω του δυναμικού χαρακτήρα του ITRS και του στατικού χαρακτήρα των ETRS και HTRS07, προκύπτουν σφάλματα λόγω του μετασχηματισμού, ειδικότερα στις περιοχές που επηρεάζονται από την τεκτονική μικροπλάκα του Αιγαίου. Συγκεκριμένα για τις αποστολές της Αττικής, των Χανίων, της Αν. Αττικής και της Σκιάθου, οι μέσες τιμές των διαφορών αυτών ήταν της

τάξης των 15cm κατά Easting και 20cm κατά Northing, με τα υψόμετρα να μην επηρεάζονται αισθητά από το μετασχηματισμό. Αντίθετα, για την αποστολή της Καβάλας η οποία βρίσκεται μακριά από την τεκτονική μικροπλάκα του Αιγαίου, οι αντίστοιχες τιμές ήταν της τάξης των 2.5cm κατά Easting, 1.5cm κατά Northing και υψομετρικά της τάξης των 6cm.

Όσον αφορά την αντιμετώπιση περιπτώσεων κατά τις οποίες προκύπτουν διακοπές στα δεδομένα του σχετικού εντοπισμού, εάν η διάρκεια αυτών των διακοπών είναι μέχρι 2 λεπτά, το σύστημα μπορεί να τις αντιμετωπίσει αποτελεσματικά με τις τιμές RMS να είναι της τάξης του 1 cm οριζοντιογραφικά και υψομετρικά.

Για το επίγειο σύστημα:

Διαπιστώθηκε ότι η λύση μέσω Loose Coupling με τη χρήση του αλγορίθμου εξομάλυνσης (Rauch-Tung-Striebel smoother) έχει παρόμοια αποτελέσματα με τη λύση μέσω Tight Coupling με τη χρήση του αλγορίθμου εξομάλυνσης. Οι μέγιστες τιμές των διαφορών αυτών ήταν της τάξης των 2cm υψομετρικά και μικρότερες από 1 cm κατά Easting και Northing. Έτσι, για πιο μεγάλες εφαρμογές όπου πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν το υπολογιστικό κόστος, μια επίλυση μέσω loose coupling είναι λιγότερο χρονοβόρα και η εξοικονόμηση χρόνου θα μπορούσε να συνεισφέρει θετικά.

Ο αλγόριθμος εξομάλυνσης, η χρήση του οποίου απαιτεί μετεπεξεργασία, έδειξε να επηρεάζει επίσης πολύ λίγο τα αποτελέσματα με τις μέγιστες διαφορές να είναι πάλι της τάξης των 2cm υψομετρικά και μικρότερες από 1cm κατά Easting και κατά Northing. Επομένως, για παρόμοιες εφαρμογές, θα μπορούσε να υποστηριχθεί λύση GNSS/INS σε πραγματικό χρόνο εάν υπήρχε διαθέσιμη λύση RTK από το δέκτη GNSS.

Το σύστημα έδειξε να ανταποκρίνεται αρκετά καλά στην καταγραφή των μεταβολών της πορείας του αυτοκινήτου με τη χρήση δεδομένων με ρυθμό καταγραφής 1Hz και 0.5Hz. Συγκεκριμένα οι μέγιστες διαφορές της λύσης με ρυθμό καταγραφής 10Hz σε σχέση με τη λύση με ρυθμό καταγραφής 1Hz ήταν μικρότερες του 1cm κατά Easting, της τάξης του 1.6 cm κατά Northing και της τάξης των 2 cm κατά Elevation. Αντίστοιχα για τη λύση με ρυθμό καταγραφής ίσο με 0.5Hz οι μέγιστες διαφορές ήταν μικρότερες του 1 cm κατά Easting, 1.8 cm κατά Northing και 2 cm κατά elevation.

Στη σύγκριση των δύο διαφορετικών λύσεων PPP (GPS, GPS+GLONASS), παρουσιάστηκαν μέγιστες διαφορές της τάξης των 5cm κατά Easting και κατά Northing και της τάξης των 15 cm κατά elevation. Αυτές οι διαφορές οφείλονται στη συνδυασμένη επίλυση διαφορετικών GNSS με διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Συμπεράσματα που αφορούν και τα δύο συστήματα:

Τα λογισμικά με τα οποία έγινε η επεξεργασία των δεδομένων συνοδεύονται από εγχειρίδια που παρέχουν λεπτομερή τεκμηρίωση όσον αφορά τις διαδικασίες που ακολουθούνται. Ωστόσο δεν περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος επεξεργασίας των δεδομένων όπως για παράδειγμα οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται, ενώ δεν αφήνουν πολλά περιθώρια παρέμβασης.

Όσον αφορά τα συστήματα, αυτά είναι αρκετά εύρωστα και σχεδιασμένα να ανταπεξέλθουν σε πιθανές δυσκολίες. Αυτό προκύπτει από όλες τις σειρές δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν, καθώς και τα δύο συστήματα έδειξαν μεγάλο βαθμό σταθερότητας και επαναληψιμότητας. Με αυτόν τον

τρόπο τα δεδομένα από κάθε δοκιμή μπορούσαν να συγκριθούν απ' ευθείας χωρίς να υπάρχει ο κίνδυνος επιπλέον συστηματικών σφαλμάτων.

Η ευρωστία των συστημάτων διαπιστώνεται και με την πρόβλεψη των εταιρειών που τα αναπτύσσουν, ώστε να υπάρχει διαθέσιμη κατ' ελάχιστον η πληροφορία του αυτόνομου εντοπισμού GNSS, ώστε με κάποιο κόστος να μπορούν να αξιοποιηθούν τα δεδομένα μιας αποστολής.

Κατά τις συγκρίσεις των λύσεων αναφοράς με τις λύσεις με αυτόνομο εντοπισμό GPS, το αερομεταφερόμενο σύστημα έδειξε να ανταποκρίνεται καλύτερα και να συγκλίνει περισσότερο στη λύση αναφοράς σε σχέση με το επίγειο σύστημα, γεγονός που αποδίδεται κυρίως στις διαφορές στα χαρακτηριστικά των δύο υπό εξέταση αδρανειακών συστημάτων. Συγκεκριμένα, το αδρανειακό σύστημα πλοήγησης του αερομεταφερόμενου συστήματος έχει πολύ καλύτερη απόδοση σε σχέση με αυτή του επίγειου συστήματος. Οι τιμές ολίσθησης που δίνει ο κατασκευαστής για το αερομεταφερόμενο σύστημα είναι 0.03 deg/h ενώ για το επίγειο σύστημα είναι ≥ 0.5 deg/h. Ακόμα, οι τιμές που δίνουν οι κατασκευαστές για την επίδραση του θορύβου των γυροσκοπίων στην τελική λύση (Angular Random Walk, ARW) είναι $0.005 \text{ deg}/\sqrt{h}$ για το αερομεταφερόμενο σύστημα και $0.012 \text{ deg}/\sqrt{h}$ για το επίγειο σύστημα.

Κάποια ζητήματα για περαιτέρω έρευνα είναι τα ακόλουθα:

- Αξιολόγηση της συμπεριφοράς του αερομεταφερόμενου συστήματος όχι μόνο με δεδομένα GPS αλλά με multi-GNSS προσέγγιση.
- Αξιολόγηση της ακρίβειας της συνδυασμένης λύσης GNSS/INS σε σχέση με το μήκος βάσης GNSS.
- Διερεύνηση στην επίδραση των τιμών των γωνιών πλοήγησης σε αντίστοιχες δοκιμές στο επίγειο σύστημα.
- Περαιτέρω εξέταση της αξιοπιστίας της λύσης μέσω Precise Point Positioning με διαφορετικά χρονικά εύρη παρατηρήσεων.
- Εξέταση της αξιοπιστίας της λύσης μέσω Precise Point Positioning σε διαφορετικές περιοχές της Ελλάδας, διερεύνηση για δημιουργία μοντέλου παραμέτρων μετασχηματισμού.
- Διεξαγωγή αεροτριγωνισμών με τις ίδιες παραμέτρους (π.χ. ίδιος αριθμός και διάταξη φωτοσταθερών σημείων) με τα διαθέσιμα δεδομένα από τις δοκιμές του αερομεταφερόμενου συστήματος και σύγκριση των επί μέρους τελικών αποτελεσμάτων.
- Αξιολόγηση μη εμπορικών συστημάτων – εφαρμογών και διατάξεων χαμηλού κόστους σε αντίστοιχες δοκιμές.

11. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΠΗΓΕΣ

- Angrisano A., GNSS/INS Integration Methods, PhD, Universita degli studi di Napoli “Perthenope”, 2017.
- Chan W.L., Hsiao F.B., Implementation of the Rauch-Tung-Striebel Smoother for sensor compatibility. Correction of a fixed-wing unmanned air vehicle, *Sensors*, 2011.
- Colombo O., Speeding Up The Estimation Of Floated Ambiguities For Sub-Decimeter Kinematic Positioning At Sea, Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, 2001.
- Falco G., Pini M., Loose and tight GNSS/INS Integrations: Comparison of performance assessed in real urban scenarios, *Sensors*, 2017.
- Gianniou M. et al., Dealing with significant differential tectonic plate velocities within an RTK-network: The case of HEPOS, EUREF Symposium, 2013.
- Grewal M., Weill L.R., Andrews P., Global positioning systems, inertial navigation and integration, John Wiley and sons, 2001.
- Groves P.D., Principles of GNSS, Inertial and Multisensor Integrated Navigation Systems, 2008, Artech House, 2008.
- Hess B.L., Challenges and consequences of a poor position update of a submarine in the littorals, MSc thesis, The University of Nottingham, 2015.
- Hun L.C. et al., Kalman Filtering and its real time applications, INTECH, 2016.
- IGI, Aerocontrol SMU manual quick start guide, 2010.
- IGI, Aerocontrol user manual, 2007.
- Kalman R.E., A new approach to linear filtering and prediction problems, ASME, Journal of basic engineering, 1960.
- Kennedy S. et al., Architecture and system performance of SPAN NovAtel’s GPS/INS solution, 2006 IEEE/ION Position, Location, And Navigation Symposium, 2006.
- Kennedy S. et al., GPS/INS Integration with the iMAR-FSAS IMU, XXIII FIG Congress, 2006.
- Kim J, Sukkarieh S., SLAM aided GPS/INS Navigation in GPS Denied and Unknown Environments, The 2004 International Symposium on GNSS/GPS, 2004.
- Krüger T. et al., Single-layer laser scanner for detection and localization of unmanned swarm members, ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W2, pp.229-234, 2013.
- Monasse P., et al., Epipolar rectification, 2010.
- Noureldin A., Karamat T.B , Georgy J., Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their Integration, Springer, 2013.
- NovAtel publication, IMU errors and their effects, 2014.
- NovAtel service bulletin, GPS Era Issue for OEMV, 2017.
- Omerbashich M. et al., Integrated INS/GPS Navigation from a popular perspective, *Journal of Air Transportation*, 2002.
- Philips N. et al., Controllable steep dispersion with gain in a four-level N-scheme with four-wave mixing, *Journal of Modern Optics*, 60(1), pp.64-72.
- Pujades i Bataller R.J., The pisana chart, really a primitive portolan chart made in the 13th Century?, *Comité Français de Cartographie [París]*, núm. 216, p. 17-32.

- Pupo L.B., Characterization of errors and noises in MEMS Inertial sensors using allan variance method, Master thesis, Universitat politecnica de Catalunya, Barcelonatech, 2016.
- Schmidt G.T., Philips R.E., INS/GPS Integration Architecture Performance Comparisons, NATO, 2011.
- Schmidt G.T., Philips R.E., INS/GPS Integration Architectures, NATO, 2010.
- Seeber G., Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications, Walter de Gruyter, Berlin, Germany, 1993.
- Sineglazov V.M., Zakharin F.M., peculiarities of future air navigation system based on inertial navigation systems/global positioning system, Electronics And Control Systems, 2012.
- Subirana J.S., Zornoza J.M.J, Hernandez – Pajares M., GNSS data processing Volume I: Fundamentals and Algorithms, ESA, 2013.
- Waypoint, Inertial explorer 8.70. user manual, 2018.
- Welch G., Bishop G., An introduction to the Kalman filter, University of North Carolina at Chapel Hill, 2006.
- Zhang J., Singh S., Visual-Inertial Combined Odometry System for Aerial Vehicles, Journal of Field Robotics, 2015.
- Zhao L., Wang Q.Y., Design of an Attitude and Heading Reference System based on Distributed Filtering for small UAV, Mathematical Problems in Engineering, 2013.
- Γιαννίου Μ., Διαλέξεις μαθήματος Τεχνολογίες GNSS και πλοήγηση, ΠΜΣ "Γεωχωρικές Τεχνολογίες", ΠΑΔΑ. Τμήμα μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής, 2016.
- Γιαννίου Μ, Η Χρησιμοποίηση του Φίλτρου Kalman στον Υδρογραφικό εντοπισμό θέσης με το GPS, Διπλωματική εργασία, ΑΠΘ Πολυτεχνική σχολή, τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, 1992.
- Γεωργόπουλος Α., Φωτογραμμερτία II Αεροτριγωνισμός και ακρίβειες, 2014.
- Γκέγκας Α., Δοκιμές ολοκληρωμένου δορυφορικού και αδρανειακού συστήματος πλοήγησης, Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, τομέας Τοπογραφίας, 2008.
- Κατσιγιάννη Γ., Συγκριτική αξιολόγηση συστημάτων GNSS, GNSS/INS, RTS για την εξαγωγή τροχιάς πεζών σε δύσκολα περιβάλλοντα, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, 2014.
- Κωνσταντάς Γ., Μετρολογικός Έλεγχος Δεκτών GNSS Χαμηλού Κόστους για Εφαρμογές RTK, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, ΠΑΔΑ, 2019.
- Μαβινάκη Σ., Σοφιού Ι., Χανόπουλος Ι.Χ, Μελέτη των χωρικών μεταβολών του γεωειδούς στη περιοχή των Μεσογείων Αττικής, Πτυχιακή εργασία, ΤΕΙ Αθήνας, Τμήμα Τοπογραφίας, 2010.
- Πατώνης Φ., Συνδυασμός των τεχνολογιών χαμηλού κόστους αδρανειακών μονάδων μέτρησης και του παγκοσμίου συστήματος πλοήγησης σε εφαρμογές φωτογραμμετρίας, Διδακτορική διατριβή, ΑΠΘ Πολυτεχνική σχολή, τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, 2012.
- Φωτίου, Α., Πικριδάς, Χ. GPS και Γεωδαιτικές Εφαρμογές β έκδοση, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2012.

ΠΗΓΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

http://expositions.bnf.fr/marine/grand/por_007.htm

https://nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT-KANPUR/ModernSurveyingTech/lectureB_11/B_11_5accuracy.htm

<https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1724>

<http://www.oxts.com/what-is-gnss/>

https://nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT-KANPUR/ModernSurveyingTech/lectureB_15/B_15_6relative.htm

<http://graticules.blogspot.com/2017/02/planning-gps-survey-part-3-using-online.html>

www.hepos.gr

<https://electricalfundablog.com/strapdown-system/>

<https://www.parallax.com/product/28017>

https://www.globalspec.com/learnmore/sensors_transducers_detectors/tilt_sensing/gyroscopes





<https://gr.mouser.com/new/stmicroelectronics/stm-l20g20is-gyroscope/>

<https://www.vectornav.com/support/library/imu-and-ins>

http://dev.ipol.im/~morel/Dossier_MVA_2010_Cours_Transparents_Documents/



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ AEROCONTROL

PERFORMANCE AEROcontrol SMU				
Performance*	AEROcontrol-m	AEROcontrol-I**	AEROcontrol-II**	AEROcontrol-III
Position [m]	0.05 	0.05 	0.05 	0.05 
Velocity [m/s]	0.005	0.005	0.005	0.005
Roll / Pitch [deg]	0.01	0.008	0.004	0.003
True heading [deg]	0.02	0.015	0.01	0.007
Available data rates	400 Hz	128 Hz or 256 Hz	128 Hz or 256 Hz	400 Hz

* Post Processing

** Upgrades to AEROcontrol-II or -III possible at any time

PERFORMANCE	IMU-m	IMU-IIf
Gyro-Bias [deg / h]	2 	0.03 
Gyro-RW (Random Walk) [deg / sqrt(h)]	0.07	0.005
Accelerometer Bias [mg]	0.1	0.3
Update and transmission rate	400 Hz	128, 256 or 400 Hz

INTERFACES
GNSS Receiver Internal: NovAtel OEMV-3 or Septentrio AsteRx2e OEM / AsteRx3 OEM
Communication Ethernet: Gigabit Ethernet LAN Port Serial Ports: 2 x RS232, 1 x RS422 Discretes: PPS Output, 3 x Event Mark Input
Options <ul style="list-style-type: none"> • Combination with flight management system CCNS-5 or as stand-alone system • GLONASS • DIA - Direct Inertial Aiding to assist in areas of poor GPS reception • DIA+ - Direct Inertial Aiding Plus to assist in areas of poor GPS + GLONASS reception • Precise Levelling for stabilized mounts
Processing Software AEROoffice for INS post-processing, incl. GrafNav & BINGO30 for GNSS post-processing & aerial triangulation
Data storage 8 (default), 16 or 32 GB ExpressCard

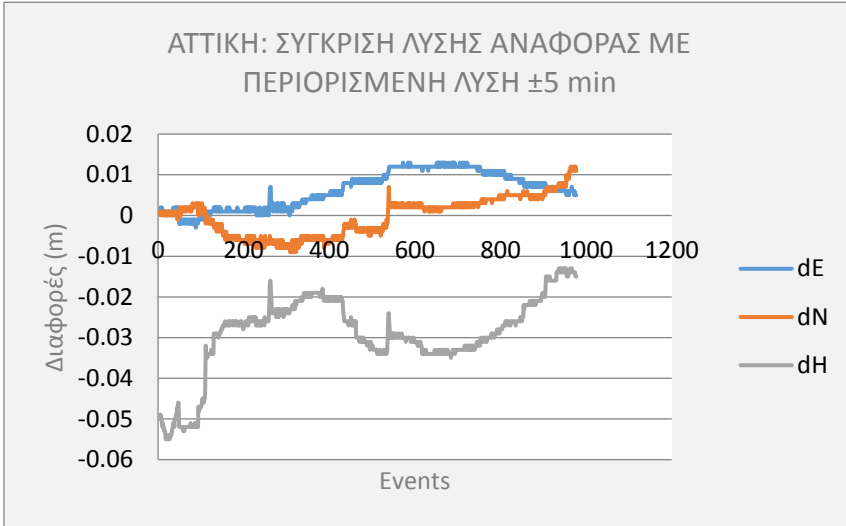
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ ΤΥΠΟΥ PIPER NAVAJO 425 PRESSURIZED

EQUIPMENT TYPE	CHARACTERISTICS
Aircraft Type	PIPER NAVAJO 425 Pressurized
Number of Engines	2
Type of Engines	Lycoming TIGO-541-E1A
Type of fuel	AVGAS 100LL
Engines' Horsepower	2X425 HP
Maximum Take-Off Weight (MTOW)	7.800 lbs
Usefull Weight	2.958 lbs
Capacity	8 seats
Endurance	6:45 hours plus VFR reserves
Air Speed	243 knots at 18:000ft
Best Rate of Climb (ft per min)	1.740 ft / min
Pressurization	YES
Service Ceiling	29.000 ft
Absolute Ceiling (ft)	29.000 ft
Certification	IFR Certification
Navigation	Two (2) Garmin 430, Garmin 296, CCNS 4 Flight Management System / Fully IFR & VFR
Modification	Modified for aerial photography – Equipped with certified optical glass – 50 mm thickness.
Transponder	Mode S with ID
GPS/INS	IGI Aerocontrol
Flight Management System	IGI CCNS 4
Type of Aerial GPS antennas	Sensor Systems L1/L2, NovAtel L1/L2

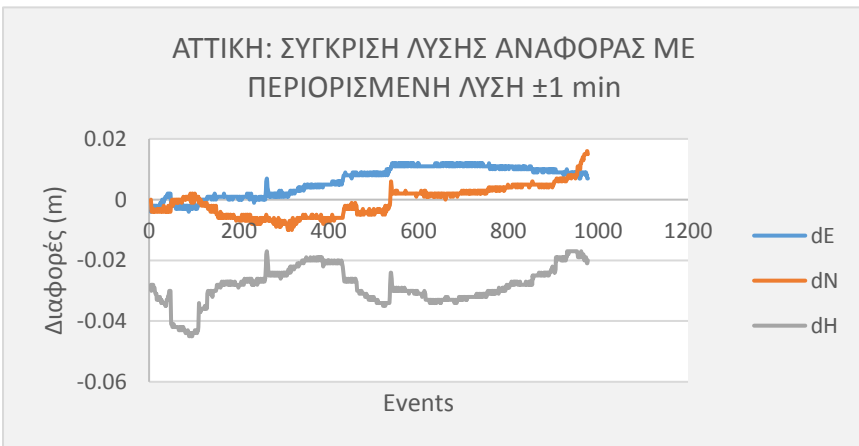
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΓΚΡΙΣΕΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΕΡΟΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑ ΑΠΟΣΤΟΛΗ

Γ1. Σύγκριση δεδομένων Λύσης Αναφοράς με περιορισμένες λύσεις σχετικού εντοπισμού GPS.

Γ1.1 Αττική:

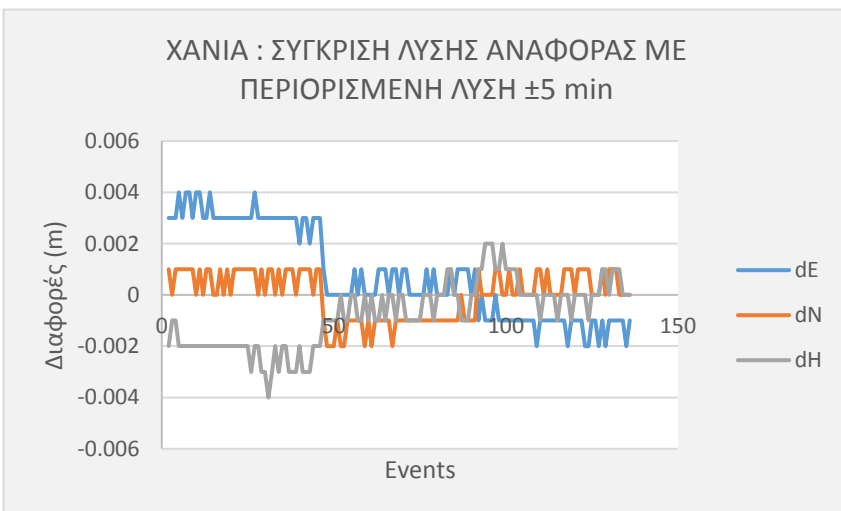


ΑΤΤΙΚΗ: Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης λύσης αναφοράς με περιορισμένη λύση ± 5 min			
	dE	dN	dH
Min	-0.003	-0.009	-0.055
Max	0.013	0.012	-0.013
Average	0.006	0.000	-0.029
St. Dev	0.005	0.005	0.009

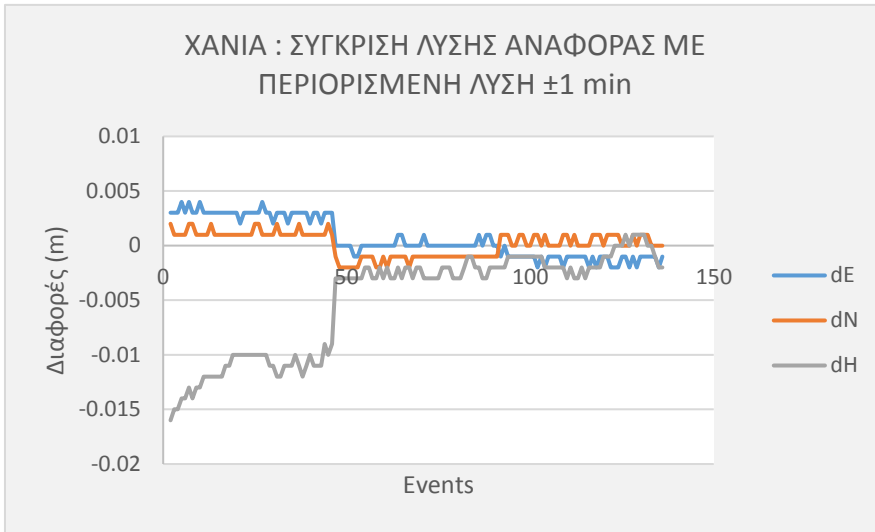


ΑΤΤΙΚΗ: Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης λύσης αναφοράς με περιορισμένη λύση ± 1 min			
	dE	dN	dH
Min	-0.004	-0.010	-0.045
Max	0.012	0.016	-0.017
Average	0.006	-0.001	-0.028
St. Dev	0.005	0.005	0.006

Γ1.2 Χανιά:



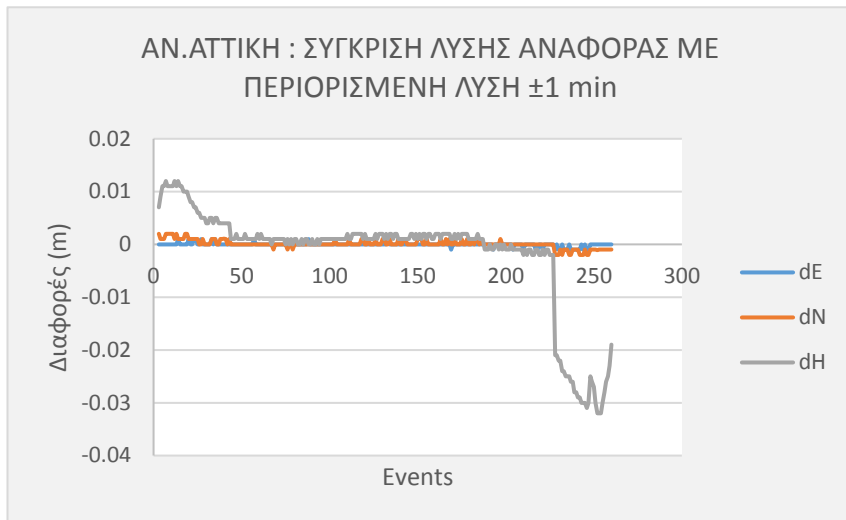
ΧΑΝΙΑ: Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης λύσης αναφοράς με περιορισμένη λύση ± 5 min			
	dE	dN	dH
Min	-0.002	-0.002	-0.004
Max	0.004	0.001	0.002
Average	0.001	0.000	-0.001
St. Dev	0.002	0.001	0.001



ΧΑΝΙΑ: Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης λύσης αναφοράς με περιορισμένη λύση ± 1 min

	dE	dN	dH
Min	-0.002	-0.002	-0.016
Max	0.004	0.002	0.001
Average	0.001	0.000	-0.005
St. Dev	0.002	0.001	0.004

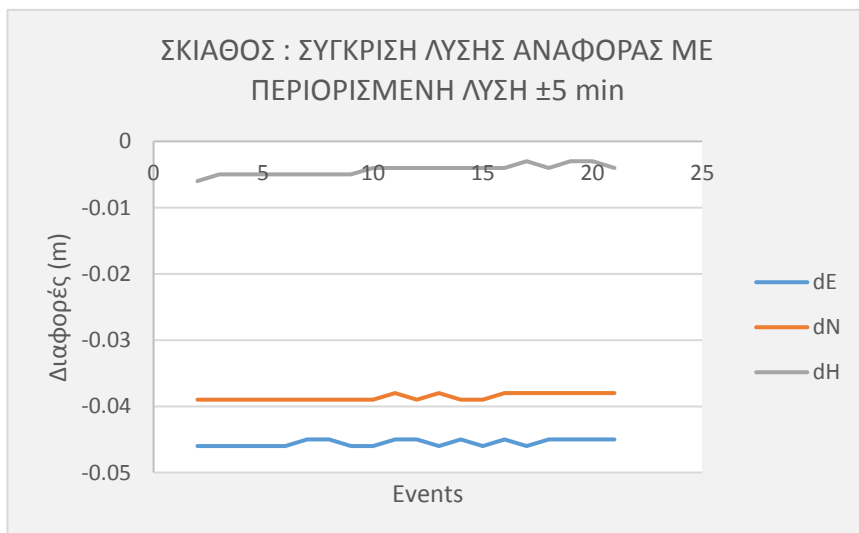
Γ1.3 Αν. Αττική:



ΑΝ.ΑΤΤΙΚΗ: Στατιστικά στοιχεία(m) σύγκρισης λύσης αναφοράς με περιορισμένη λύση ± 1 min

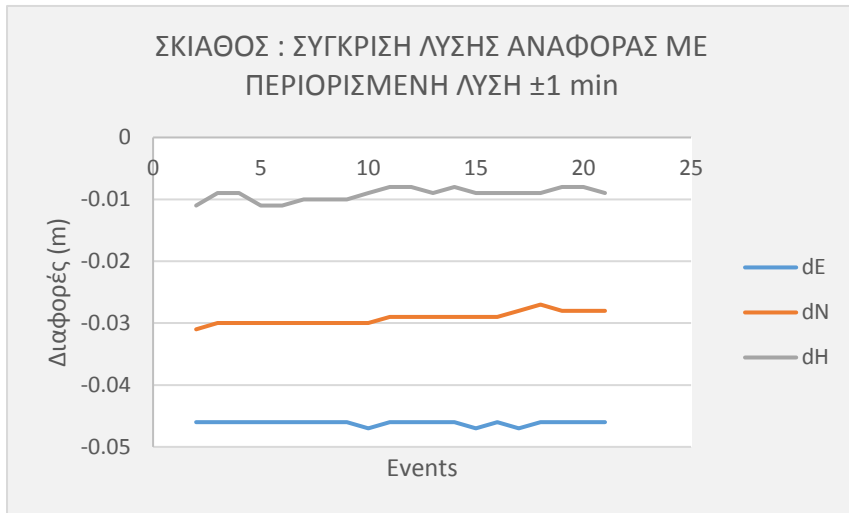
	dE	dN	dH
Min	-0.001	-0.002	-0.032
Max	0.001	0.002	0.012
Average	0.000	0.000	-0.002
St. Dev	0.000	0.001	0.010

Γ1.4 Σκιάθος:



ΣΚΙΑΘΟΣ: Στατιστικά στοιχεία(m) σύγκρισης λύσης αναφοράς με περιορισμένη λύση ± 5 min

	dE	dN	dH
Min	-0.046	-0.039	-0.006
Max	-0.045	-0.038	-0.003
Average	-0.046	-0.039	-0.004
St. Dev	0.001	0.000	0.001



ΣΚΙΑΘΟΣ: Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης λύσης αναφοράς με περιορισμένη λύση ± 1 min

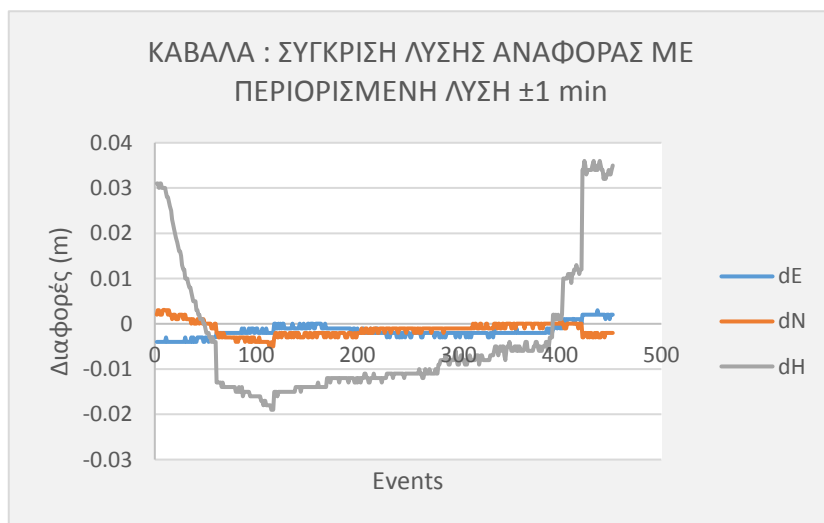
	dE	dN	dH
Min	-0.047	-0.031	-0.011
Max	-0.046	-0.027	-0.008
Average	-0.046	-0.029	-0.009
St. Dev	0.000	0.001	0.001

Γ1.5 Καβάλα:



ΚΑΒΑΛΑ: Στατιστικά στοιχεία(m) σύγκρισης λύσης αναφοράς με περιορισμένη λύση ± 5 min

	dE	dN	dH
Min	-0.005	-0.005	-0.010
Max	0.002	0.003	0.030
Average	-0.002	-0.001	0.000
St. Dev	0.001	0.001	0.011

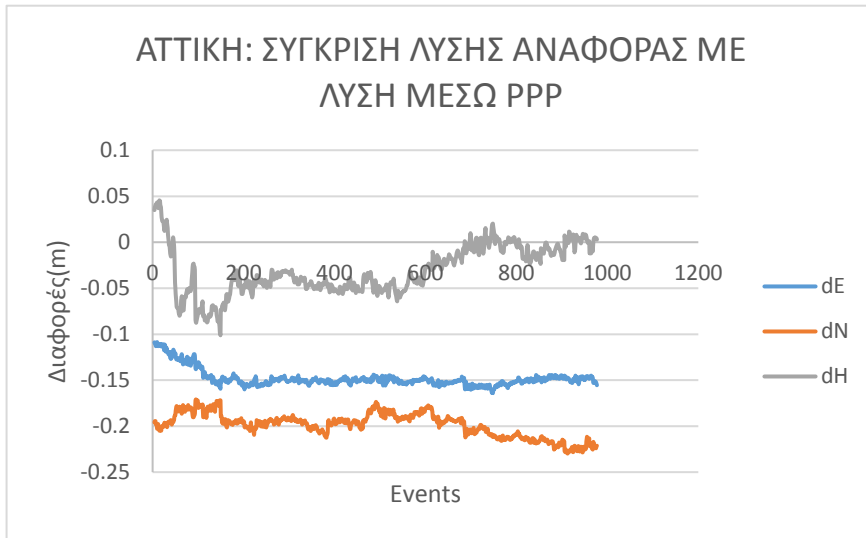


ΚΑΒΑΛΑ: Στατιστικά στοιχεία(m) σύγκρισης λύσης αναφοράς με περιορισμένη λύση ± 1 min

	dE	dN	dH
Min	-0.005	-0.005	-0.010
Max	0.002	0.003	0.030
Average	-0.002	-0.001	0.000
St. Dev	0.001	0.001	0.011

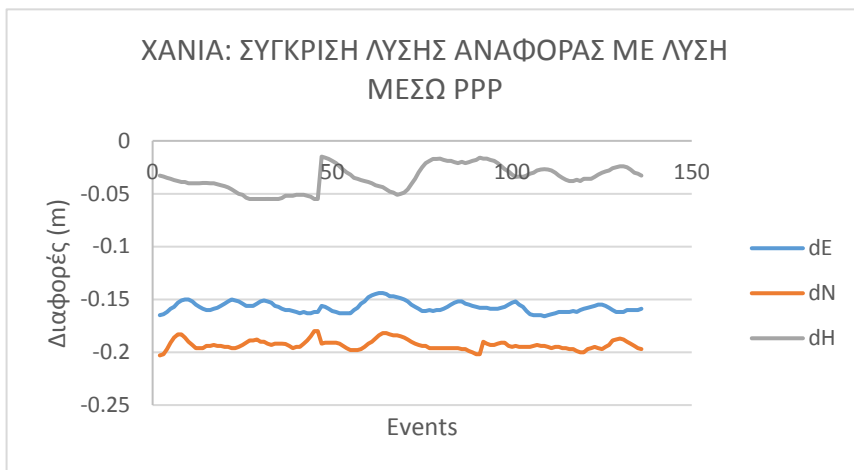
Γ2. Σύγκριση δεδομένων Λύσης Αναφοράς με λύση μέσω Precise Point Positioning

Γ.2.1. Αττική



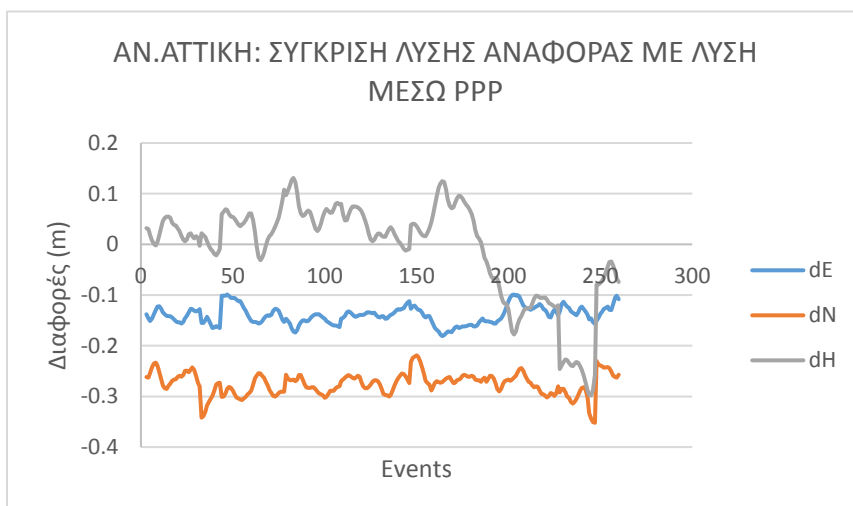
ΑΤΤΙΚΗ: Στατιστικά στοιχεία(m) σύγκρισης λύσης αναφοράς με λύση μέσω PPP			
	dE	dN	dH
Min	-0.164	-0.230	-0.101
Max	-0.109	-0.171	0.046
Average	-0.148	-0.199	-0.031
St. Dev	0.009	0.013	0.026

Γ.2.2. Χανιά



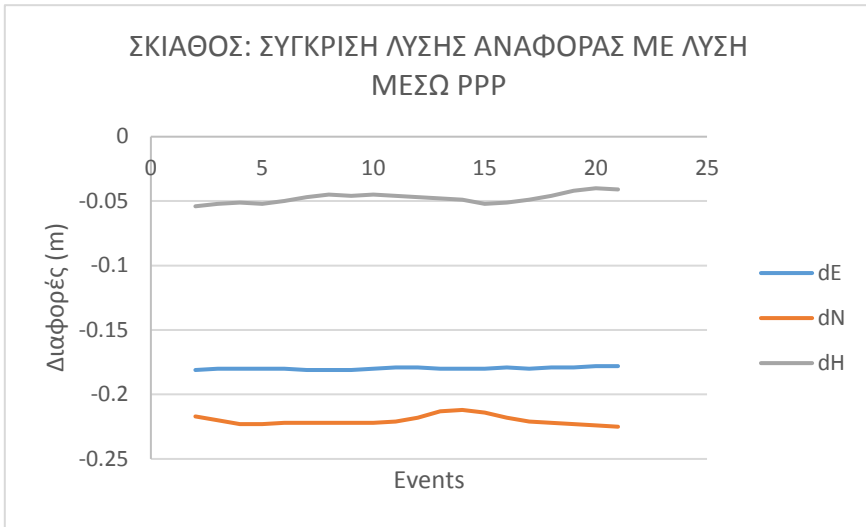
ΧΑΝΙΑ: Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης λύσης αναφοράς με λύση μέσω PPP			
	dE	dN	dH
Min	-0.166	-0.203	-0.055
Max	-0.144	-0.180	-0.015
Average	-0.157	-0.193	-0.035
St. Dev	0.005	0.004	0.012

Γ.2.3. Αν.Αττική



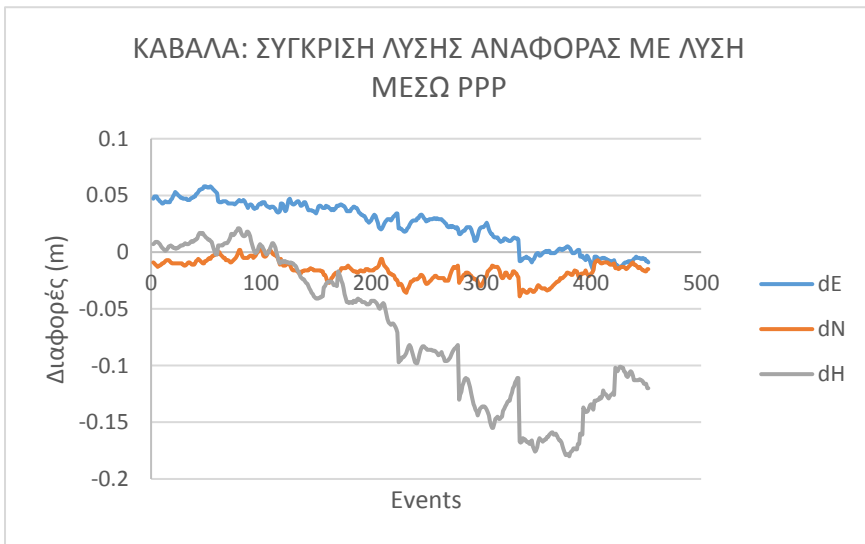
ΑΝ.ΑΤΤΙΚΗ: Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης λύσης αναφοράς με λύση μέσω PPP			
	dE	dN	dH
Min	-0.181	-0.352	-0.298
Max	-0.099	-0.219	0.131
Average	-0.140	-0.275	-0.010
St. Dev	0.018	0.022	0.097

Γ.2.4. Σκιάθος



ΣΚΙΑΘΟΣ: Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης λύσης αναφοράς με λύση μέσω PPP			
	dE	dN	dH
Min	-0.181	-0.225	-0.054
Max	-0.178	-0.212	-0.040
Average	-0.180	-0.220	-0.048
St. Dev	0.001	0.004	0.004

Γ.2.5. Καβάλα



ΚΑΒΑΛΑ: Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης λύσης αναφοράς με λύση μέσω PPP			
	dE	dN	dH
Min	-0.016	-0.039	-0.18
Max	0.058	0.004	0.021
Average	0.024	-0.016	0.071
St. Dev	0.020	0.009	0.063

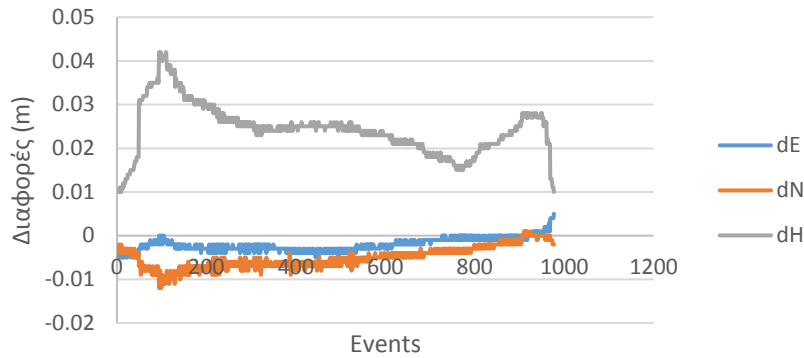
Γ3. Σύγκριση δεδομένων Λύσης Αναφοράς PPP με περιορισμένες λύσεις PPP.

Γ.3.1. Αττική



ΑΤΤΙΚΗ: Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης λύσης αναφοράς PPP με περιορισμένη λύση PPP ± 5 min			
	dE	dN	dH
Min	-0.005	-0.011	0.007
Max	0.003	0.001	0.037
Average	-0.002	-0.004	0.022
St. Dev	0.001	0.002	0.005

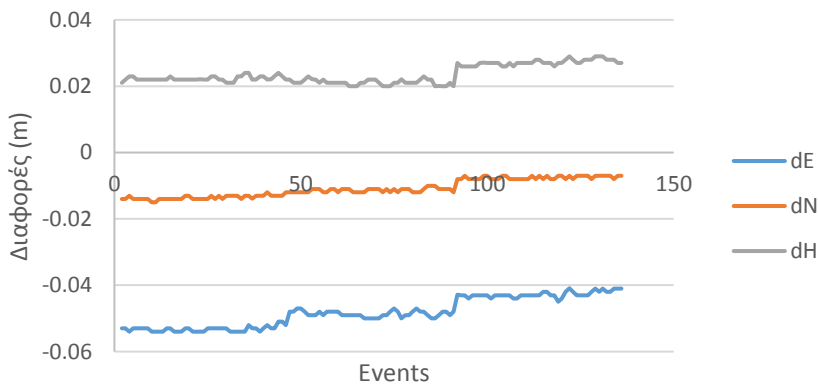
ΑΤΤΙΚΗ: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΛΥΣΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ PPP ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗ ΛΥΣΗ PPP ±1min



ΑΤΤΙΚΗ: Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης λύσης αναφοράς PPP με περιορισμένη λύση PPP ± 1 min			
	dE	dN	dH
Min	-0.005	-0.011	0.007
Max	0.003	0.001	0.037
Average	-0.002	-0.004	0.022
St. Dev	0.001	0.002	0.005

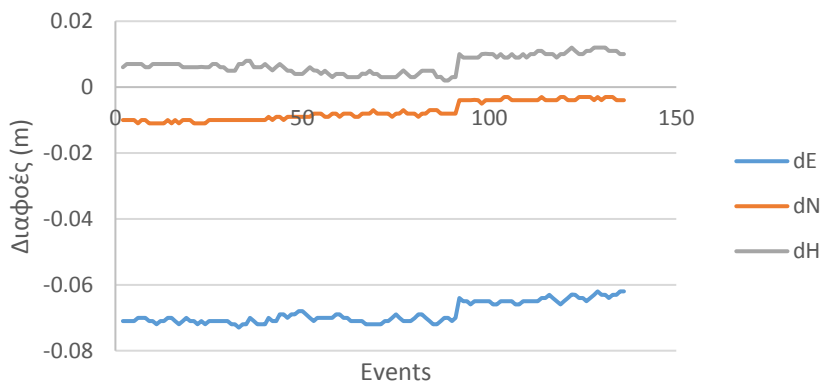
Γ.3.2. Χανιά

ΧΑΝΙΑ: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΛΥΣΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ PPP ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗ ΛΥΣΗ PPP ±5 min



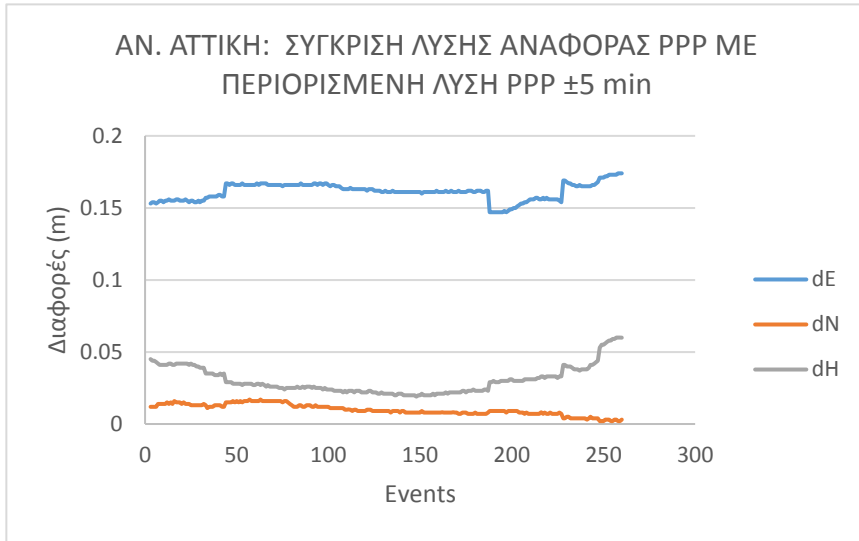
ΧΑΝΙΑ: Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης λύσης αναφοράς PPP με περιορισμένη λύση PPP ± 5 min			
	dE	dN	dH
Min	-0.054	-0.015	0.020
Max	-0.041	-0.007	0.029
Average	-0.048	-0.011	0.024
St. Dev	0.004	0.003	0.003

ΧΑΝΙΑ: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΛΥΣΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ PPP ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗ ΛΥΣΗ PPP ±1 min

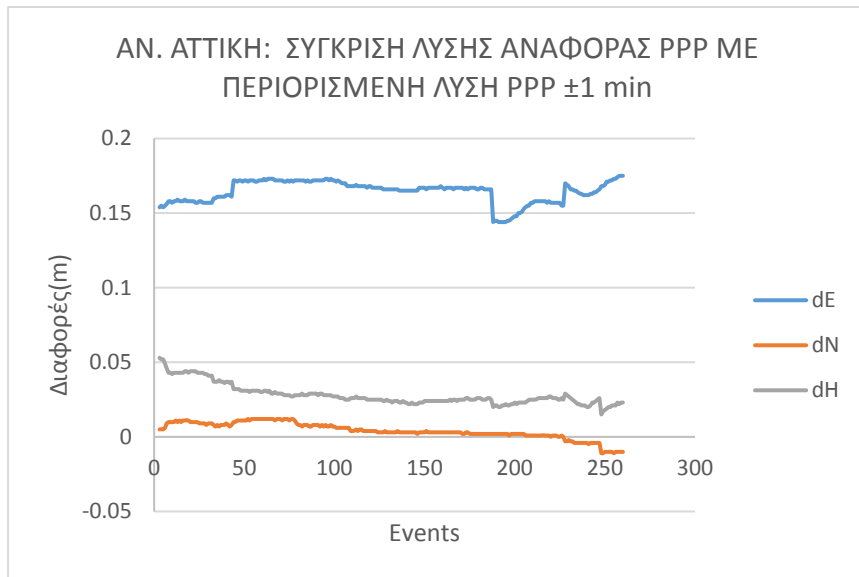


ΧΑΝΙΑ: Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης λύσης αναφοράς PPP με περιορισμένη λύση PPP ± 1 min			
	dE	dN	dH
Min	-0.073	-0.011	0.002
Max	-0.062	-0.003	0.012
Average	-0.069	-0.007	0.007
St. Dev	0.003	0.003	0.003

Γ.3.3. Αν.Αττική

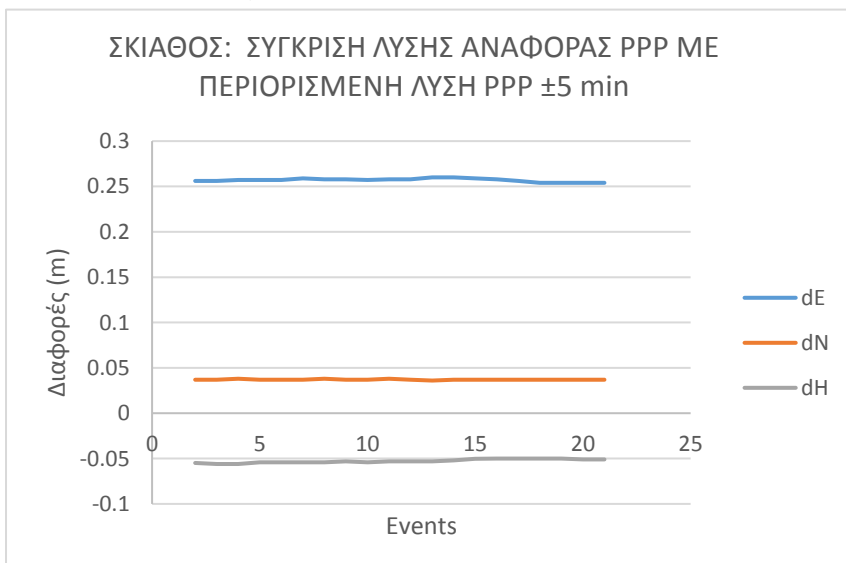


ΑΝ.ΑΤΤΙΚΗ: Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης λύσης αναφοράς PPP με περιορισμένη λύση PPP ± 5 min			
	dE	dN	dH
Min	0.147	0.002	0.019
Max	0.174	0.017	0.060
Average	0.161	0.010	0.030
St. Dev	0.006	0.004	0.009

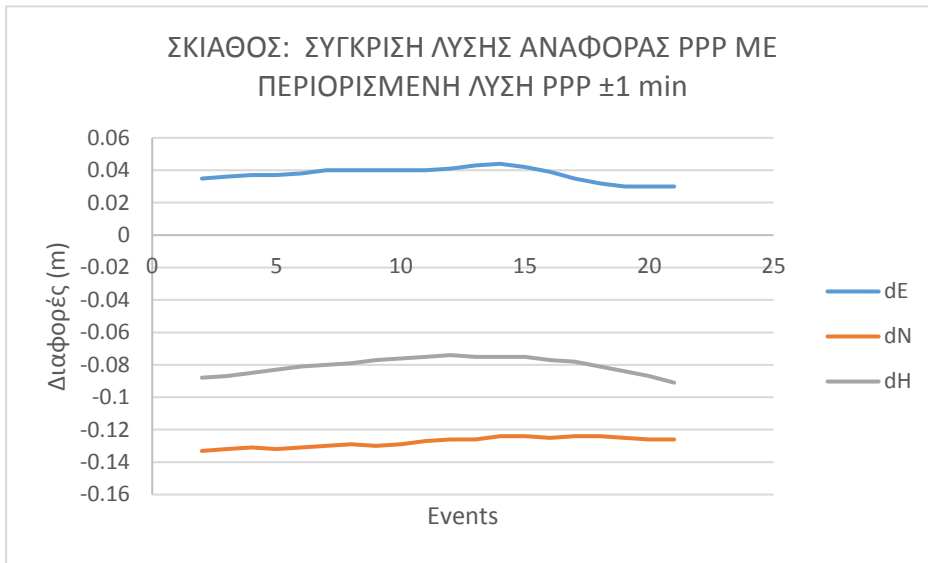


ΑΝ.ΑΤΤΙΚΗ: Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης λύσης αναφοράς PPP με περιορισμένη λύση PPP ± 1 min			
	dE	dN	dH
Min	0.144	-0.011	0.015
Max	0.175	0.012	0.052
Average	0.165	0.004	0.028
St. Dev	0.007	0.005	0.007

Γ.3.4. Σκιάθος

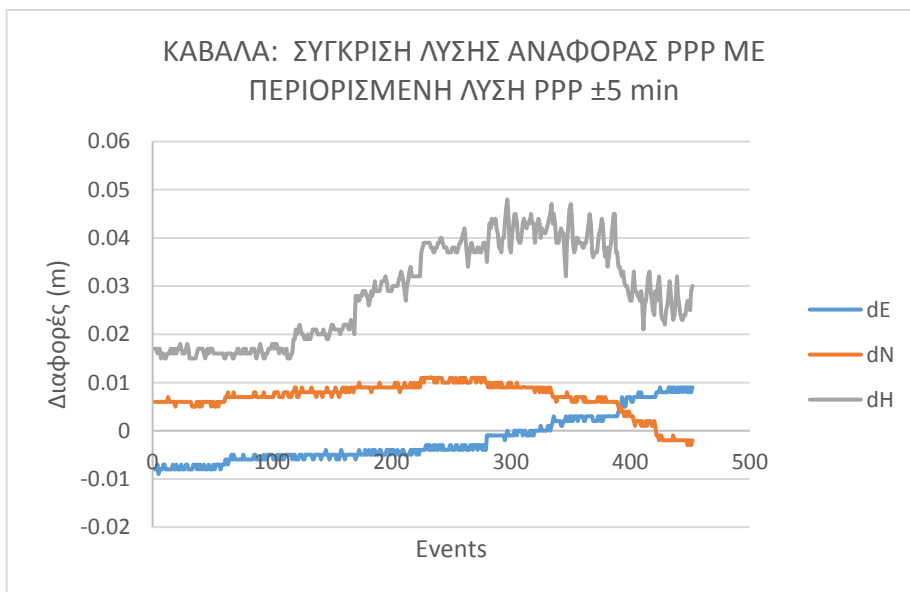


ΣΚΙΑΘΟΣ: Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης λύσης αναφοράς PPP με περιορισμένη λύση PPP ± 5 min			
	dE	dN	dH
Min	0.254	0.036	-0.056
Max	0.260	0.038	-0.050
Average	0.257	0.037	-0.053
St. Dev	0.002	0.000	0.002

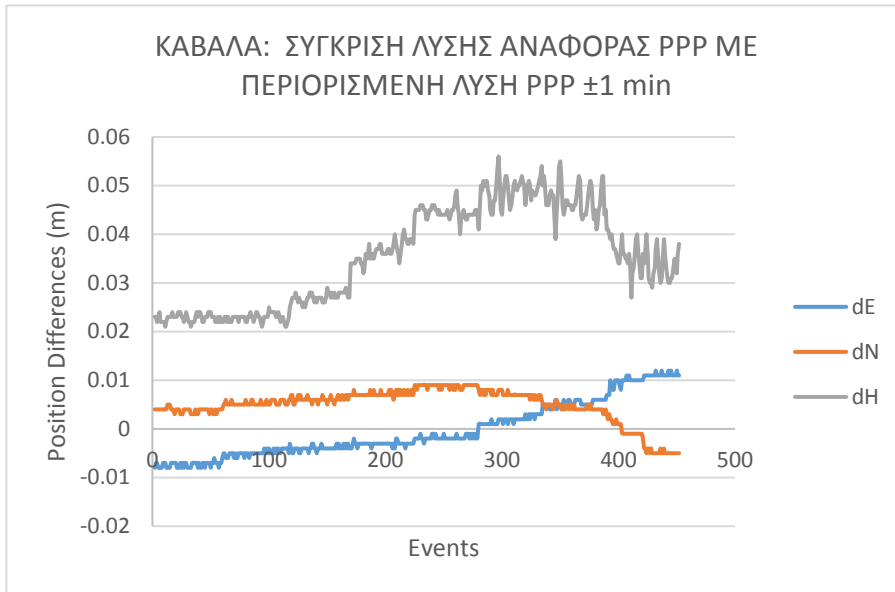


ΣΚΙΑΘΟΣ: Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης λύσης αναφοράς PPP με περιορισμένη λύση PPP ± 1 min			
	dE	dN	dH
Min	0.030	-0.133	-0.091
Max	0.044	-0.124	-0.074
Average	0.037	-0.128	-0.080
St. Dev	0.004	0.003	0.005

Γ.3.5. Καβάλα



ΚΑΒΑΛΑ: Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης λύσης αναφοράς PPP με περιορισμένη λύση PPP ± 5 min			
	dE	dN	dH
Min	-0.009	-0.003	0.015
Max	0.009	0.011	0.048
Average	-0.002	0.007	0.029
St. Dev	0.005	0.003	0.010

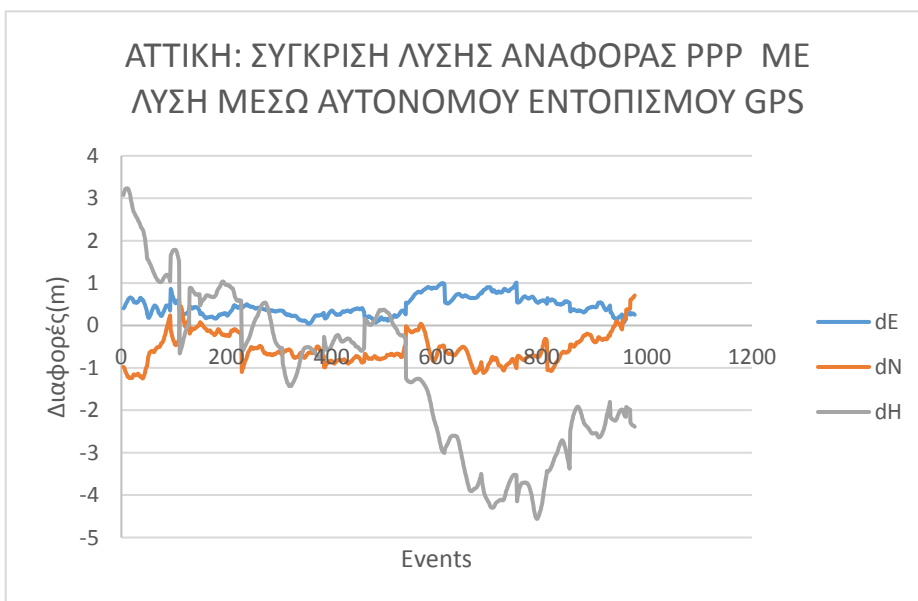


ΚΑΒΑΛΑ: Στατιστικά στοιχεία σύγκρισης (m) λύσης αναφοράς PPP με περιορισμένη λύση PPP ± 1 min

	dE	dN	dH
Min	-0.008	-0.005	0.021
Max	0.012	0.009	0.056
Average	0.000	0.005	0.035
St. Dev	0.006	0.003	0.010

Γ4. Σύγκριση δεδομένων Λύσης Αναφοράς PPP με λύση αυτόνομου εντοπισμού GPS.

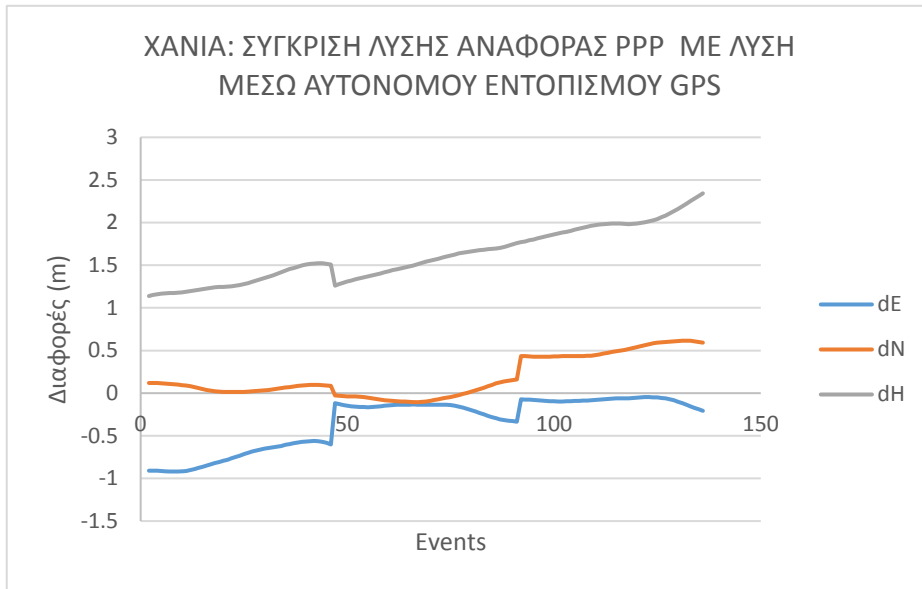
Γ.4.1. Αττική



ΑΤΤΙΚΗ: Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης λύσης αναφοράς PPP με λύση μέσω αυτόνομου εντοπισμού GPS

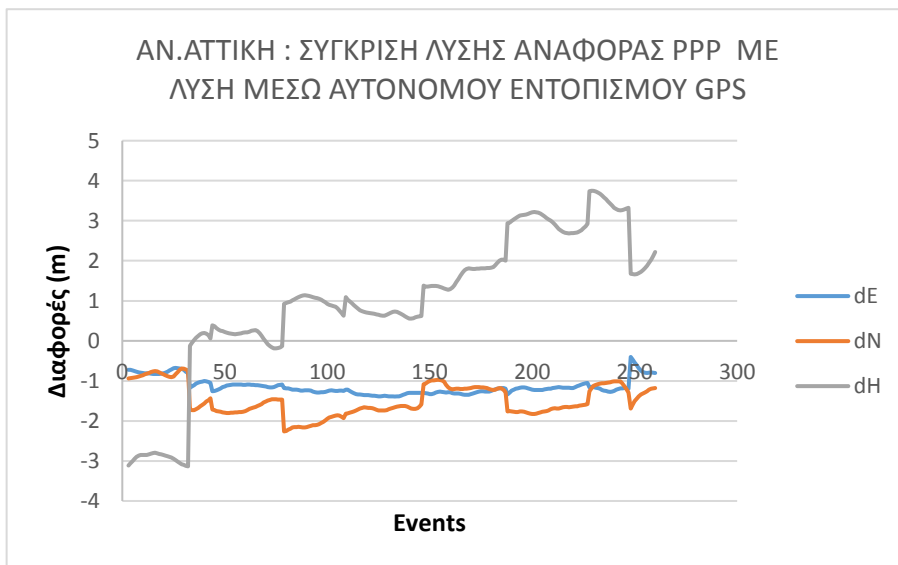
	dE	dN	dH
Min	0.037	-1.249	-4.563
Max	1.013	0.708	3.235
Average	0.448	-0.552	-1.130
St. Dev	0.226	0.363	1.864

Γ.4.2. Χανιά



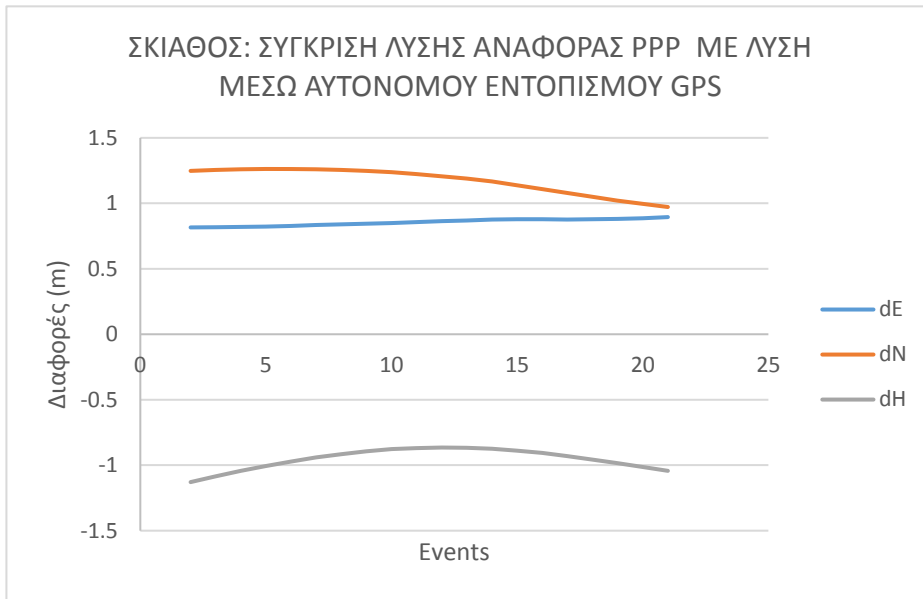
ΧΑΝΙΑ: Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης λύσης αναφοράς PPP με λύση μέσω αυτόνομου εντοπισμού GPS			
	dE	dN	dH
Min	-0.919	-0.105	1.139
Max	-0.046	0.615	2.343
Average	-0.328	0.184	1.619
St. Dev	0.293	0.242	0.311

Γ.4.3. Αν. Αττική



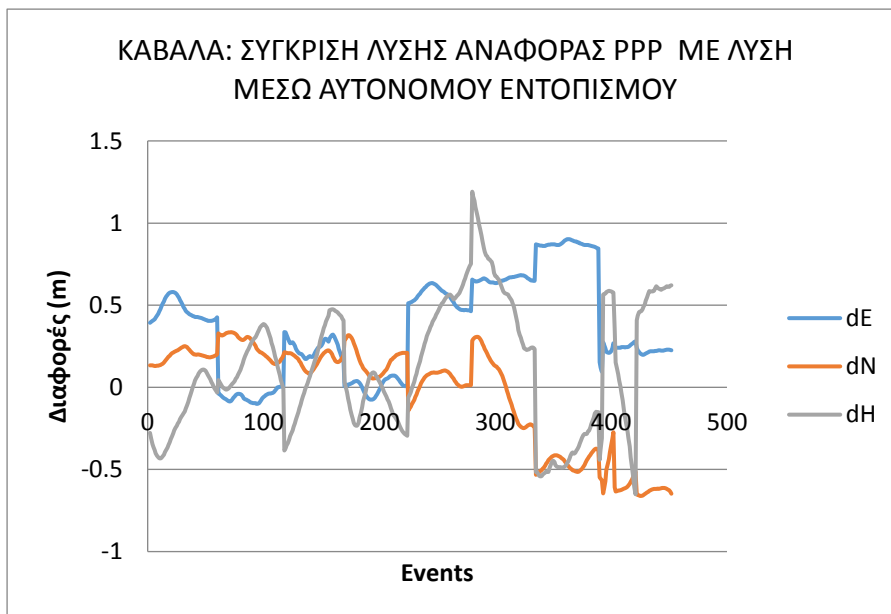
ΑΝ.ΑΤΤΙΚΗ: Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης λύσης αναφοράς PPP με λύση μέσω αυτόνομου εντοπισμού GPS			
	dE	dN	dH
Min	-1.391	-2.262	-3.135
Max	-0.402	-0.695	3.750
Average	-1.149	-1.486	1.012
St. Dev	0.197	0.386	1.729

Γ.4.4. Σκιάθος



ΣΚΙΑΘΟΣ: Στατιστικά στοιχεία(m) σύγκρισης λύσης αναφοράς PPP με λύση μέσω αυτόνομου εντοπισμού GPS			
	dE	dN	dH
Min	0.816	0.972	-1.129
Max	0.895	1.262	-0.865
Average	0.855	1.172	-0.953
St. Dev	0.025	0.097	0.077

Γ.4.5. Καβάλα



ΚΑΒΑΛΑ: Στατιστικά στοιχεία (m) σύγκρισης λύσης αναφοράς PPP με λύση μέσω αυτόνομου εντοπισμού			
	dE	dN	dH
Min	-0.101	-0.661	-0.651
Max	0.902	0.336	1.191
Average	0.369	-0.037	0.121
St. Dev	0.303	0.319	0.388

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΟΝΑΔΑΣ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

IMU-ISA-100C

IMU-ISA-100C

Overview Supporting Alternate Add-ons

The IMU-ISA-100C features Northrop-Grumman Litef GmbH's proven inertial measurement technology offering exceptional performance when paired with a NovAtel SPAN receiver. The IMU-ISA-100C is a near navigation grade sensor containing fiber optic gyros and fully temperature compensated Micro Electromechanical Systems (MEMS) accelerometers. The IMU design offers compact size, low power consumption and low weight and features an extensive set of built in tests. The IMU-ISA-100C operates from 9-34 VDC and interfaces with NovAtel's FlexPak^δ™ or ProPak^δ™ through a highly reliable IMU interface. IMU measurements are used by the SPAN receiver to compute a blended GNSS+INS position, velocity and attitude solution at rates up to 200 Hz.

Features

- Low noise fiber optic gyros and MEMS accelerometers
- 200 Hz data rate
- SPAN INS functionality

Benefits

- High performance IMU
- Commercially exportable
- Easy integration with NovAtel's SPAN capable GNSS+INS receivers
- Ideal for aerial and hydrographic survey as well as industrial applications

Attributes

General Info	Length (mm)	180.00
	Width/Diameter (mm)	150.00
	Height (mm)	137.00
	Weight (g)	5000.00
	Typical Power Consumption (W)	18.00
IMU Data Rate	200 Hz	
IMU Info	Wheel Sensor Input	
Performance	Input range	±495 deg/sec
	Bias stability	≥0.5 deg/hr
	Angular random walk	0.012 deg/√hr
	Accelerometer Range	±10 g
	Bias repeatability	≥1250 µg

ADVANTAGES OF IMU-ISA-100C

The IMU-ISA-100C offers extremely high performance and precise accuracy at an affordable price point. It is commercially exportable and offers an ideal solution for applications such as platform stabilization, general purpose navigation, photogrammetry, remote sensing and ground mobile mapping.

IMPROVE SPAN IMU-ISA-100C ACCURACY

Take advantage of NovAtel CORRECT™ to receive your choice of accuracy and performance, from decimetre to RTK-level positioning. For more demanding applications, Inertial Explorer® post-processing software from our Waypoint® Products Group can be used to post-process SPAN IMU-ISA-100C data for the highest level of system accuracy.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

