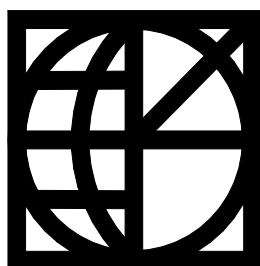


ΚΕΝΤΡΟ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ ΔΙΟΝΥΣΟΥ DIONYSOS SATELLITE OBSERVATORY
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΕΜΠ DEPARTMENT OF SURVEYING NTUA

**ΔΟΚΙΜΕΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΚΑΙ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΟΥ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ**

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΓΚΕΓΚΑΣ



ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2008

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Είναι γνωστό ότι το αντικείμενο του Τοπογράφου Μηχανικού αφορά τον φυσικό χώρο (γη) και τη μέτρηση των χαρακτηριστικών του. Η επιτυχία δε του έργου του εξαρτάται από δύο κυρίως παράγοντες, την επίτευξη της απαιτούμενης για κάθε εφαρμογή ακρίβειας και την τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων.

Στην προσπάθεια του λοιπόν να ικανοποιήσει τους παράγοντες αυτούς ο Τοπογράφος Μηχανικός κάνει χρήση όλων των διαθέσιμων εργαλείων και τεχνικών, που η επιστήμη και η τεχνολογία θέτουν στην διάθεση του.

Τα Ολοκληρωμένα Αδρανειακά και Δορυφορικά Συστήματα Πλοήγησης (ΟΑΔΣΠ) αποτελούν ένα από τα ακριβέστερα και αποδοτικότερα εργαλεία διεξαγωγής μετρήσεων εγγύς και επί της γήινης επιφάνειας και βρίσκουν εφαρμογή σε μια ποικιλία εργασιών γεωδαιτικού και μη ενδιαφέροντος.

Η απόκτηση ενός τέτοιου συστήματος υψηλών επιδόσεων από το εργαστήριο ΚΔΔ της ΣΑΤΜ αναβαθμίζει θεαματικά τον εξοπλισμό και τις δυνατότητες της σχολής και δημιουργεί νέα πεδία έρευνας.

Όντας το πρώτο ανάλογο σύστημα σε χρήση στον ελλαδικό χώρο από ελληνικά χέρια αποτελεί ιδιαίτερη τιμή για εμένα να συμμετέχω στην δοκιμή και τεκμηρίωση αυτού μέσω της διπλωματικής εργασίας, που εκπονώ στα πλαίσια των υποχρεώσεων μου για την λήψη του διπλώματος του Αγρονόμου και Τοπογράφου Μηχανικού.

Θα ήθελα λοιπόν να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ Παραδείση Δημήτριο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, για την βοήθεια που μου παρείχε για την ολοκλήρωση της και για τις γνώσεις που μου έδωσε κατά την διάρκεια της διδασκαλίας των μαθημάτων.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συμφοιτητή μου Ροδόπουλο Ιωάννη για την βοήθεια του στην εκτέλεση των δοκιμών του συστήματος καθώς και το προσωπικό του εργαστηρίου για την βοήθεια και τις γνώσεις που μου προσέφεραν κατά την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας .

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την συνεχή και αμέριστη υποστήριξη που έδειξε καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Αθήνα, 9 Ιουλίου 2008

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

| | |
|--|-----------|
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ | 2 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ | 6 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ | 10 |
| ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ | 11 |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | 13 |
| ABSTRACT | 14 |
| 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 15 |
| 1.1. Συνεργασία Αδρανειακών και Δορυφορικών Συστημάτων | 16 |
| 1.2. Στόχος της Παρούσας Διπλωματικής Εργασίας | 17 |
| 1.3. Δομή της Παρούσας Διπλωματικής Εργασίας | 17 |
| 2. ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ (ΑΣΠ) | 20 |
| 2.1. Γενικά | 21 |
| 2.2. Αρχές και Νόμοι της Κίνησης των Σωμάτων | 21 |
| 2.2.1. Εισαγωγικά στοιχεία | 21 |
| 2.2.2. Οι νόμοι κίνησης του Νεύτωνα..... | 22 |
| 2.2.3. Η αδρανειακή πλοήγηση και οι νόμοι του Νεύτωνα..... | 22 |
| 2.3. Ιστορική Εξέλιξη των Αδρανειακών Συστημάτων Πλοήγησης (ΑΣΠ) | 23 |
| 2.3.1. Πρώιμο στάδιο εξέλιξης των αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης (ΑΣΠ)..... | 24 |
| 2.3.2. Η σύγχρονη εποχή των αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης (ΑΣΠ) | 26 |
| 2.4. Είδη Αδρανειακών Αισθητήρων | 29 |
| 2.4.1. Είδη γυροσκοπίων | 29 |
| 2.4.2. Είδη επιταχυνσιομέτρων | 37 |
| 2.5. Συστήματα Αναφοράς και Μετασχηματισμοί | 42 |
| 2.5.1. Γενικά στοιχεία | 42 |
| 2.5.2. Το αδρανειακό σύστημα αναφοράς (inertial frame, i - frame)..... | 44 |
| 2.5.3. Το γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς (earth centered-earth fixed frame, e -frame)..... | 45 |
| 2.5.4. Το τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς (local level frame, l – frame ή n – frame) | 45 |
| 2.5.5. Το σύστημα αναφοράς της γωνίας α (alpha-wander frame, w - frame)..... | 45 |
| 2.5.6. Το σύστημα αναφοράς του κινούμενου σώματος (body frame, b-frame) | 46 |
| 2.5.7. Το σύστημα αναφοράς των εξισώσεων πλοήγησης (computational frame, c - frame). 47 | |
| 2.5.8. Μετασχηματισμοί και σχέσεις μεταξύ των συστημάτων αναφοράς..... | 47 |
| 2.6. Είδη Αδρανειακών Συστημάτων Πλοήγησης (ΑΣΠ) | 49 |
| 2.6.1. Τα ΑΣΠ σταθερής πλατφόρμας (stabilized ή gimbaled INS – GINS)..... | 50 |
| 2.6.2. Τα προσκολλημένα ΑΣΠ (strap down INS – SINS)..... | 52 |
| 2.7. Βασικές Αρχές Λειτουργίας των ΑΣΠ | 54 |
| 2.7.1. Η λειτουργία των συστημάτων σταθερής πλατφόρμας..... | 54 |

| | |
|---|-----------|
| 2.7.2. Η λειτουργία των προσκολλημένων συστημάτων | 57 |
| 2.8. Τα Κύρια Σφάλματα των ΑΣΠ..... | 60 |
| 2.8.1. Τα σφάλματα των αδρανειακών αισθητήρων | 60 |
| 2.8.2. Τα σφάλματα αρχικοποίησης (initialization errors)..... | 61 |
| 2.8.3. Τα σφάλματα ευθυγράμμισης (alignment errors) | 62 |
| 2.8.4. Τα σφάλματα των μοντέλων βαρύτητας | 63 |
| 2.9. Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί των ΑΣΠ..... | 63 |
| 2.9.1. Τα πλεονεκτήματα των ΑΣΠ | 63 |
| 2.9.2. Οι περιορισμοί των ΑΣΠ..... | 64 |
| 3. ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ (ΔΣΠ)..... | 65 |
| 3.1. Γενικά..... | 66 |
| 3.2. Δορυφορικά Συστήματα Εντοπισμού Θέσης και Πλοήγησης..... | 66 |
| 3.2.1. Γενικές πληροφορίες | 66 |
| 3.2.2. Βασικά τμήματα των ΔΣΠ | 67 |
| 3.2.3. Βασικές αρχές λειτουργίας των ΔΣΠ..... | 68 |
| 3.3. Κύρια Σφάλματα και Αδυναμίες των ΔΣΠ..... | 70 |
| 3.3.1. Το σφάλμα λόγω του χρονομέτρου των δορυφόρων | 70 |
| 3.3.2. Το σφάλμα λόγω της εκπεμπόμενης εφημερίδας (τροχιακό σφάλμα)..... | 71 |
| 3.3.3. Το σφάλμα λόγω του χρονομέτρου του δέκτη | 72 |
| 3.3.4. Το σφάλμα λόγω της ιονόσφαιρας..... | 72 |
| 3.3.5. Το σφάλμα λόγω της τροπόσφαιρας | 73 |
| 3.3.6. Το σφάλμα λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων..... | 73 |
| 3.3.7. Αδυναμίες των ΔΣΠ..... | 74 |
| 3.3.8. Σύνοψη της επίδρασης των σφαλμάτων και αδυναμιών των ΔΣΠ..... | 75 |
| 3.4. Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί των ΔΣΠ..... | 75 |
| 3.4.1. Πλεονεκτήματα των ΔΣΠ | 75 |
| 3.4.2. Περιορισμοί των ΔΣΠ..... | 76 |
| 3.5. Σύγχρονες Τάσεις και Εξελίξεις των ΔΣΠ..... | 77 |
| 3.5.1. Ανάπτυξη βελτιωμένων σημάτων λειτουργίας | 77 |
| 3.5.2. Ανάπτυξη νέων δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης | 78 |
| 4. ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ..... | 80 |
| 4.1. Γενικά..... | 81 |
| 4.2. Τα Πλεονεκτήματα και οι Εφαρμογές των Ολοκληρωμένων Αδρανειακών και Δορυφορικών Συστημάτων Πλοήγησης (ΟΑΔΣΠ)..... | 81 |
| 4.2.1. Πλεονεκτήματα των ΟΑΔΣΠ..... | 81 |
| 4.2.2. Κύριες εφαρμογές των ΟΑΔΣΠ..... | 82 |
| 4.3. Τεχνικές Ανάμιξης Δεδομένων ΔΣΠ-ΑΣΠ..... | 83 |
| 4.3.1. Βασικά στοιχεία της θεωρίας των φίλτρων KALMAN | 84 |
| 4.3.2. Νέες τεχνικές ανάμιξης δεδομένων..... | 86 |
| 4.4. Ο Μηχανισμός των Εξισώσεων Πλοήγησης των Προσκολλημένων ΑΣΠ..... | 88 |
| 4.4.1. Οι εξισώσεις πλοήγησης των προσκολλημένων ΑΣΠ | 88 |
| 4.4.2. Οι εξισώσεις πλοήγησης στο τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς (l-frame) | 91 |

| | |
|--|------------|
| 4.5. Βαθμοί Συνέργιας Αδρανειακών και Δορυφορικών Συστημάτων Πλοήγησης | 92 |
| 4.5.1. Γενικά..... | 93 |
| 4.5.2. Συστήματα τελείως χαλαρής συνέργιας (uncoupled systems) | 94 |
| 4.5.3. Συστήματα χαλαρής συνέργιας (loosely coupled) | 95 |
| 4.5.4. Συστήματα στενής συνέργιας (tightly coupled)..... | 97 |
| 4.5.5. Συστήματα πλήρως στενούς συνέργιας (ultra tightly coupled)..... | 98 |
| 4.5.6. Ειδικά θέματα συνεργασίας αδρανειακών-δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης. | 99 |
| 5. ΤΟ ΟΑΔ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ | 103 |
| 5.1. Γενικά..... | 104 |
| 5.2. Περιγραφή του ΟΑΔΣΠ | 104 |
| 5.2.1. Οι δορυφορικοί δέκτες του συστήματος SPAN..... | 104 |
| 5.2.2. Η αδρανειακή μονάδα μέτρησης του συστήματος SPAN..... | 106 |
| 5.2.3. Το λογισμικό χειρισμού CDU του συστήματος SPAN..... | 107 |
| 5.2.4. Το λογισμικό εκ των υστέρων επίλυσης των μετρήσεων Inertial Explorer..... | 107 |
| 5.3. Διαδικασία Μετρήσεων | 109 |
| 5.3.1. Τα βήματα της διαδικασίας μετρήσεων | 109 |
| 5.4. Δοκιμές του ΟΑΔΣΠ | 112 |
| 5.4.1. Δοκιμή 1 ^η (Έλεγχος λειτουργίας σε ακινησία) | 112 |
| 5.4.2. Δοκιμή 2 ^η (Έλεγχος λειτουργίας σε κίνηση-αποτύπωση διαδρομής) | 123 |
| 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 129 |
| 6.1. Γενικά..... | 130 |
| 6.2. Συμπεράσματα..... | 130 |
| 6.3. Σημεία Ιδιαίτερης Προσοχής | 131 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 133 |

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

| | |
|--|----|
| Εικόνα 2.1 : Σχέδιο του γυροσκοπίου του Jean Bernard Leon Foucault..... | 24 |
| Εικόνα 2.2 : Γυροπυξίδα των αρχών του αιώνα..... | 25 |
| Εικόνα 2.3 : Μηχανικό γυροσκόπιο 2 βαθμών ελευθερίας..... | 30 |
| Εικόνα 2.4 : Μηχανικό γυροσκόπιο 3 βαθμών ελευθερίας..... | 30 |
| Εικόνα 2.5 : Γυροσκόπιο με χρήση υγρού (floating gyroscope)..... | 31 |
| Εικόνα 2.6 : Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου Sagnac | 32 |
| Εικόνα 2.7 : Γυροσκόπιο με δακτύλιο Λέιζερ..... | 33 |
| Εικόνα 2.8 : Γυροσκόπιο οπτικών ινών..... | 33 |
| Εικόνα 2.9 : Αρχή λειτουργίας των Γυροσκοπίων με Δακτύλιο Λέιζερ..... | 33 |
| Εικόνα 2.10 : Αρχή λειτουργίας των Γυροσκοπίων με Οπτικές Ίνες..... | 34 |
| Εικόνα 2.11 : Επίδραση της δύναμης Coriolis | 35 |
| Εικόνα 2.12 : Αρχή λειτουργίας ΜΗΓ | 36 |
| Εικόνα 2.13 : Μίκρο ηλεκτρομηχανικό γυροσκόπιο..... | 37 |
| Εικόνα 2.14 : Αρχή λειτουργίας επιταχυνσιόμετρων | 37 |
| Εικόνα 2.15 : Πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο | 39 |
| Εικόνα 2.16 : Επιταχυνσιόμετρο με σερβομηχανισμούς..... | 40 |
| Εικόνα 2.17 : Επιταχυνσιόμετρο με ανίχνευση δονήσεων | 41 |
| Εικόνα 2.18 : Μίκρο Ηλεκτρομηχανικό Επιταχυνσιόμετρο | 42 |
| Εικόνα 2.19 : Τα χρησιμοποιούμενα συστήματα αναφοράς | 43 |
| Εικόνα 2.20 : Αδρανειακό σύστημα πλοήγησης σταθερής πλατφόρμας | 50 |
| Εικόνα 2.21 : Κλείδωμα της πλατφόρμας (gimbals lock)..... | 51 |
| Εικόνα 2.22 : Τα τμήματα ενός ΑΣΠ σταθερής πλατφόρμας κατά IEEE..... | 52 |
| Εικόνα 2.23 : Προσκολλημένο αδρανειακό σύστημα πλοήγησης | 53 |
| Εικόνα 2.24 : Τα τμήματα ενός προσκολλημένου ΑΣΠ κατά IEEE..... | 53 |
| Εικόνα 2.25 : Τα αδρανειακά και τοπικά προσανατολισμένα συστήματα σταθερής πλατφόρμας | 55 |
| Εικόνα 2.26 : Λειτουργία των ΑΣΠ σταθερής πλατφόρμας | 56 |
| Εικόνα 2.27 : Ευθυγράμμιση προσκολλημένων ΑΣΠ-Βήμα 1ο | 58 |
| Εικόνα 2.28 : Λειτουργία των προσκολλημένων ΑΣΠ | 59 |
| Εικόνα 3.1 : Δορυφόρος GPS (Block IIR) | 67 |
| Εικόνα 3.2 : Δορυφόρος GLONASS..... | 67 |
| Εικόνα 3.3 : Τμήμα ελέγχου GPS..... | 68 |
| Εικόνα 3.4 : Βασικά τμήματα GLONASS | 68 |

| | |
|---|-----|
| Εικόνα 3.5 :Απόλυτος εντοπισμός..... | 69 |
| Εικόνα 3.6 : Σχετικός εντοπισμός..... | 69 |
| Εικόνα 3.7 : Απλή διαφορά | 69 |
| Εικόνα 3.8 : Διπλή διαφορά..... | 69 |
| Εικόνα 3.9 : Τριπλή διαφορά..... | 69 |
| Εικόνα 3.10 : Ο δορυφορικός σχηματισμός του συστήματος GALILEO..... | 78 |
| Εικόνα 3.11 : Δορυφόρος του συστήματος GALILEO | 78 |
| Εικόνα 4.1 : Διαδικασία άμεσης γεωαναφοράς..... | 82 |
| Εικόνα 4.2 : Κάμερα LMK με ενσωματωμένο ΟΑΔΣΠ | 82 |
| Εικόνα 4.3 : Κινητό σύστημα Χαρτογράφησης | 83 |
| Εικόνα 4.4 : Αρχή λειτουργίας ΚΧΣ | 83 |
| Εικόνα 4.5 : Κύκλος ανατροφοδότησης στην διαδικασία του φίλτρου KALMAN.... | 86 |
| Εικόνα 4.6 : Συστήματα τελείως χαλαρής συνέργιας..... | 94 |
| Εικόνα 4.7 : Συστήματα χαλαρής συνέργιας..... | 95 |
| Εικόνα 4.8 : Συστήματα στενής συνέργιας..... | 97 |
| Εικόνα 4.9 : Συστήματα πλήρως στενούς συνέργιας | 99 |
| Εικόνα 4.10 : Εκκεντρότητα κεραίας δέκτη και AMM..... | 101 |
| Εικόνα 4.11 : Συγχρονισμός μετρήσεων ΔΣΠ-AMM | 101 |
| Εικόνα 5.1 : Εμπρόσθια όψη του δέκτη DL-V3 | 105 |
| Εικόνα 5.2 : Οπίσθια όψη του δέκτη DL-V3 | 105 |
| Εικόνα 5.3 : Εμπρόσθια όψη του δέκτη ProPak-V3..... | 105 |
| Εικόνα 5.4 :Η αδρανειακή μονάδα FSAS-EI-SN..... | 106 |
| Εικόνα 5.5 : Κύρια οθόνη του CDU | 107 |
| Εικόνα 5.6 : Παράδειγμα γραφήματος που παράγει η εφαρμογή | 108 |
| Εικόνα 5.7 : Εξαγωγή της προσδιοριζόμενης τροχιάς σε περιβάλλον Google Maps | 108 |
| Εικόνα 5.8 : Συνδεσμολογία συστήματος SPAN | 109 |
| Εικόνα 5.9 : Επιλογή ενεργούς σύνδεσης με την εφαρμογή CDU..... | 110 |
| Εικόνα 5.10 : Ο οδηγός αρχικοποίησης του συστήματος SPAN | 111 |
| Εικόνα 5.11 : Το παράθυρο παρακολούθησης (INS window) του συστήματος SPAN | 111 |
| Εικόνα 5.12 : Το παράθυρο καταγραφής δεδομένων | 111 |
| Εικόνα 5.13 : Ο βασικός σταθμός της δοκιμής | 113 |
| Εικόνα 5.14 : Το σύστημα SPAN της δοκιμής..... | 113 |
| Εικόνα 5.15 : Άποψη της συνδεσμολογίας του συστήματος SPAN κατά την δοκιμή | 113 |

| | |
|---|-----|
| Εικόνα 5.16 : Μεταβολή υψομέτρου-Περίπτωση 1 ^η | 114 |
| Εικόνα 5.17 : Μεταβολή γεωγραφικού πλάτους-Περίπτωση 1 ^η | 114 |
| Εικόνα 5.18 : Μεταβολή γεωγραφικού μήκους-Περίπτωση 1 ^η | 114 |
| Εικόνα 5.19 : Μεταβολή v_N -Περίπτωση 1 ^η | 115 |
| Εικόνα 5.20 : Μεταβολή v_E -Περίπτωση 1 ^η | 115 |
| Εικόνα 5.21 : Μεταβολή v_{Up} -Περίπτωση 1 ^η | 115 |
| Εικόνα 5.22 : Μεταβολή της γωνίας roll-Περίπτωση 1 ^η | 116 |
| Εικόνα 5.23 : Μεταβολή της γωνίας pitch-Περίπτωση 1 ^η | 116 |
| Εικόνα 5.24 : Μεταβολή της γωνίας azimuth-Περίπτωση 1 ^η | 116 |
| Εικόνα 5.25 : Μεταβολή υψομέτρου-Περίπτωση 2 ^η | 117 |
| Εικόνα 5.26 : Μεταβολή γεωγραφικού πλάτους-Περίπτωση 2 ^η | 117 |
| Εικόνα 5.27 : Μεταβολή γεωγραφικού μήκους-Περίπτωση 2 ^η | 117 |
| Εικόνα 5.28 : Μεταβολή v_N -Περίπτωση 2 ^η | 118 |
| Εικόνα 5.29 : Μεταβολή v_E -Περίπτωση 2 ^η | 118 |
| Εικόνα 5.30 : Μεταβολή v_{Up} -Περίπτωση 2 ^η | 118 |
| Εικόνα 5.31 : Μεταβολή της γωνίας roll-Περίπτωση 2 ^η | 119 |
| Εικόνα 5.32 : Μεταβολή της γωνίας pitch-Περίπτωση 2 ^η | 119 |
| Εικόνα 5.33 : Μεταβολή της γωνίας azimuth-Περίπτωση 2 ^η | 119 |
| Εικόνα 5.34 : Μεταβολή υψομέτρου-Περίπτωση 3 ^η | 120 |
| Εικόνα 5.35 : Μεταβολή γεωγραφικού πλάτους-Περίπτωση 3 ^η | 120 |
| Εικόνα 5.36 : Μεταβολή γεωγραφικού μήκους-Περίπτωση 3 ^η | 120 |
| Εικόνα 5.37 : Διασπορά της λύσης μόνο GNSS -Περίπτωση 3 ^η | 121 |
| Εικόνα 5.38 : Μεταβολή των ταχυτήτων (v_N , v_E , v_{Up}) της λύσης μόνο GNSS - Περίπτωση 3 ^η | 121 |
| Εικόνα 5.39 : Μεταβολή του υψόμετρου της λύσης μόνο GNSS -Περίπτωση 3 ^η | 121 |
| Εικόνα 5.40 : Διασπορά της συνδυασμένης λύσης -Περίπτωση 3 ^η | 122 |
| Εικόνα 5.41 : Μεταβολή της γωνίας azimuth της συνδυασμένης λύσης -Περίπτωση 3 ^η | 122 |
| Εικόνα 5.42 : Μεταβολή των γωνιών roll-pitch της συνδυασμένης λύσης -Περίπτωση 3 ^η | 122 |
| Εικόνα 5.43 : Η κεραία του συστήματος SPAN κατά την δεύτερη δοκιμή..... | 124 |
| Εικόνα 5.44 : Η τροφοδοσία του συστήματος SPAN κατά την δεύτερη δοκιμή..... | 124 |
| Εικόνα 5.45 : Το σύστημα SPAN κατά την δεύτερη δοκιμή..... | 124 |
| Εικόνα 5.46 : Λύση πλοήγησης σε πραγματικό χρόνο..... | 126 |
| Εικόνα 5.47 : Λύσεις πλοήγησης με εκ των υστέρων επεξεργασία..... | 126 |
| Εικόνα 5.48 : Διάγραμμα ποιότητας του σήματος των δορυφόρων..... | 127 |

| | |
|---|-----|
| Εικόνα 5.49 : Εκτιμώμενη ακρίβεια της λύσης πλοήγησης του συστήματος χαλαρής συνέργιας | 127 |
| Εικόνα 5.50 : Εκτιμώμενη ακρίβεια της λύσης πλοήγησης του συστήματος στενής συνέργιας | 127 |

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|--|-----|
| Πίνακας 3-1 : Συγκριτικός πίνακας χαρακτηριστικών των συστημάτων GPS και GLONASS..... | 67 |
| Πίνακας 3-2 : Σύνοψη της επίδρασης των κυριότερων σφαλμάτων των ΔΣΠ..... | 75 |
| Πίνακας 4-1 : Διαφορές φίλτρων KALMAN και Νευρωνικών Δικτύων..... | 87 |
| Πίνακας 5-1 : Χαρακτηριστικά λειτουργίας ProPak-V3 και DL-V3 | 105 |
| Πίνακας 5-2 : Χαρακτηριστικά λειτουργίας FSAS-EI-SN..... | 106 |
| Πίνακας 5-3 : Βασικά στοιχεία συνδεσμολογίας συστήματος SPAN..... | 110 |
| Πίνακας 5-4 : Απαιτούμενα δεδομένα για εκ των υστέρων επίλυση | 112 |

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

| | |
|---------|--|
| CDU | Control and Display Unit |
| CODE | Center for Orbit Determination in Europe |
| CUPT | Coordinate Update |
| DGPS | Differential Global Positioning System |
| DOP | Dilution Of Precision |
| DTG | Dynamically Tuned Gyro |
| EKF | Extended KALMAN Filter |
| ENU | East-North-Up |
| ESA | European Space Agency |
| FOG | Fiber Optic Gyro |
| GCP | Ground Control Points |
| GINs | Gimbaled Inertial Navigation System |
| GLONASS | Global Navigation Satellite System |
| GNSS | Global Navigation Satellite System |
| GPS | Global Positioning System |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| IGS | International GPS Service |
| IMU | Inertial Measurement Unit |
| INS | Inertial Navigation System |
| ISA | Inertial System Assembly- |
| LKF | Linear KALMAN Filter |
| MEMS | Micro Electro-Mechanical Sensors |
| MTBF | Mean Time Between Failure |
| NED | North-East-Down |
| PIGA | Pendulous Integrating Gyro Accelerometer |
| PIPA | Pulsed Integrating Pendulous Accelerometer |
| RBA | Resonating Beam Accelerometer |
| RLG | Ring Laser Gyro |
| RTK | Real Time Kinematic |
| RTS | Rauch-Tung-Striebel |
| SINS | Strap down Inertial Navigation System |
| SIRG | Single degree of freedom Integrated Rate Gyro |
| SPAN | Synchronized Position, Attitude, Navigation |
| TEC | Total Electron Count |
| VSA | Vibrating String Accelerometer |
| ZUPT | Zero Velocity Update |
| ABE | Ανατολή– Βορράς–Επάνω |
| AMM | Αδρανειακή Μετρητική Μονάδα |
| ΑΣΠ | Αδρανειακά Συστήματα Πλοήγησης |
| BAK | Βορράς–Ανατολή–Κάτω |
| ΓΔΛ | Γυροσκόπιο με Δακτύλιο Λείζερ |
| ΓΟΙ | Γυροσκοπίων Οπτικών Ινών |
| ΔΣΓ | Δυναμικά Συντονισμένο Γυροσκόπιο Δύο Βαθμών Ελευθερίας |
| ΔΣΠ | Δορυφορικά Συστήματα Πλοήγησης |
| ΕΔΠ | Επιταχυνσιόμετρα με Διόρθωση Παλμών |
| ΚΔΔ | Κέντρου Δορυφόρων Διονύσου |
| ΜΗΑ | Μίκρο Ηλεκτρομηχανικός Αισθητήρας |

| | |
|-------|--|
| ΜΗΓ | Μίκρο Ηλεκτρομηχανικό Γυροσκόπιο |
| ΜΗΕ | Μίκρο Ηλεκτρομηχανικό Επιταχυνσιόμετρο |
| ΜΧΜΒ | Μέσος Χρόνος Μεταξύ Βλαβών |
| ΟΑΔΣΠ | Ολοκληρωμένο Αδρανειακό και Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης |
| ΟΓΕΒΕ | Ολοκληρωμένα Γυροσκόπια Ενός Βαθμού Ελευθερίας |
| ΟΕΕΓ | Ολοκληρωμένο Επιταχυνσιόμετρο με Ενσωματωμένο Γυροσκόπιο |
| ΣΕΕ | Σημεία Επίγειου Ελέγχου |
| ΣΗΦΗ | Συνολικό Ηλεκτρικό Φορτίο Ηλεκτρονίων |

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κατά τις δύο τελευταίες δεκαετίες τα ΔΣΠ (Δορυφορικά Συστήματα Πλοήγησης) έχουν κυριαρχήσει στους τομείς του εντοπισμού της θέσης και της πλοήγησης. Παρέχοντας πληροφορία θέσης και ταχύτητας σε πραγματικό χρόνο και με ακρίβεια που ικανοποιεί τις απαιτήσεις μιας ποικιλίας εφαρμογών τα ΔΣΠ έχουν γίνει ένα ισχυρό εργαλείο στα χέρια των επιστημόνων, των ερευνητών και των μηχανικών. Όμως παρόλα τα πλεονεκτήματά τους τα ΔΣΠ υποφέρουν από προβλήματα παρεμβολών και πολλαπλών ανακλάσεων που μειώνουν την απόδοσή τους.

Τα ΑΣΠ (Αδρανειακά Συστήματα Πλοήγησης) από την άλλη μεριά είναι αυτόνομα συστήματα πλοήγησης ικανά να παρέχουν συνεχή πληροφορία θέσης, ταχύτητας και κινηματικής συμπεριφοράς. Η επιτυγχανόμενη ακρίβεια όμως του συστήματος βασίζεται στην απόδοση των αδρανειακών αισθητήρων, η οποία τείνει να χειροτερεύει με τον χρόνο.

Ο συνδυασμός των δυο συστημάτων (ΔΣΠ-ΑΣΠ) οδηγεί σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα που έχει όλα τα πλεονεκτήματα των δύο συστημάτων και κανένα από τα μειονεκτήματά τους. Η ανάμιξη δεδομένων ΔΣΠ και ΑΣΠ και η χρήση αναλυτικών εργαλείων, όπως το φίλτρο Kalman, για την ανάλυση και αξιολόγηση τους αυξάνει την ακρίβεια της παραγόμενης λύσης ακόμα και στην περίπτωση απώλειας του δορυφορικού σήματος.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία περιγράφει τις βασικές αρχές λειτουργίας της αδρανειακής πλοήγησης ενώ παρουσιάζει και τους κύριους τύπους των αδρανειακών αισθητήρων (γυροσκόπια και επιταχυνσιόμετρα). Επίσης αναφέρει τα κύρια σφάλματα που επιδρούν στην λειτουργία κάθε συστήματος και δημιουργούν την ανάγκη για τον συνδυασμό των δύο συστημάτων.

Επιπλέον περιγράφει τους διαφορετικούς τύπους και τεχνικές συνέργειας ΑΣΠ-ΔΣΠ και σχολιάζει ειδικά θέματα, που προκύπτουν από αυτή την διαδικασία.

Τέλος παρουσιάζει το ΟΑΔΣΠ (Ολοκληρωμένο Αδρανειακό και Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης) του ΚΔΔ (Κέντρου Δορυφόρων Διονύσου), το λογισμικό που συνοδεύει το σύστημα και τις πρώτες δοκιμές αυτού, ενώ σχολιάζει και τα αποτελέσματά τους.

ABSTRACT

Over the last two decades GNSS (Global Navigation Satellite System) or GPS (Global Positioning System) has dominated the area of positioning and navigation. By providing real time accurate information about position and velocity, that meets the demands of various applications, GNSS has become a useful tool for scientists, researchers and engineers as well. However, despite its advantageous nature GNSS suffers from a variety of problems, like interference or multipath, that limit its accuracy.

On the other hand INS (Inertial Navigation System) is an autonomous navigation system able to provide continuous information regarding position, velocity and attitude. The achievable accuracy of the system depends greatly on the performance of its inertial sensors, which tends to deteriorate with time.

The integration of the two systems (GNSS-INS) leads to a system that keeps the advantages of both systems and rejects their limitation. Blending the GNSS and INS data and using analytical tools like a Kalman filter for their analysis, calibration and evaluation increases the accuracy of the solution even in the presence of a GNSS outage.

This thesis demonstrates the basic principles of inertial navigation and presents the most commonly used types of inertial sensors (gyroscopes and accelerometers). Furthermore it summarizes the errors, of both inertial and satellite based systems, that lead to the degradation of their performance and the need for the integration of the two systems.

In addition it describes the different types and techniques of INS-GNSS integration and discusses special topics regarding the integration process.

Finally it presents the INS-GNSS system of Dionysos Satellite Observatory, the software that came with the system and the first trials of the system and analyzes their results.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Συνεργασία Αδρανειακών και Δορυφορικών Συστημάτων

Τα αδρανειακά συστήματα πλοήγησης (ΑΣΠ) είναι συσκευές που κάνουν χρήση των Νόμων της Κίνησης του Νεύτωνα για να προσδιορίσουν την θέση, την ταχύτητα, την επιτάχυνση και την κινηματική συμπεριφορά ενός κινητού σώματος.

Τα ΑΣΠ χρησιμοποιούν συσκευές, όπως τα γυροσκόπια και τα επιταχυνσιόμετρα για να προσδιορίσουν την πληροφορία που θα οδηγήσει στον προσδιορισμό των παραπάνω μεγεθών, με αποτέλεσμα να αποτελούν αυτόνομα συστήματα που δεν επηρεάζονται από παρεμβολές και παρέχουν συνεχή πληροφορία και μάλιστα σε υψηλούς ρυθμούς.

Παρόλα τα πλεονεκτήματα τους όμως τα ΑΣΠ υποφέρουν από πλήθος σφαλμάτων, που οφείλονται στην ποιότητα των αδρανειακών αισθητήρων ενώ απαιτούν και καλή γνώση του βαρυτικού πεδίου της γης καθώς και της περιστροφικής κίνησης της τελευταίας. Τα παραπάνω οδηγούν σε μείωση της ακρίβειας προσδιορισμού της θέσης και της ταχύτητας του κινητού σώματος που επιδεινώνεται με τον χρόνο.

Τα δορυφορικά συστήματα πλοήγησης (ΔΣΠ) είναι συστήματα προσδιορισμού θέσης τα οποία βασίζουν την λειτουργία τους στη χρήση δορυφόρων που κινούνται σε συγκεκριμένες τροχιές γύρω από την γη.

Ο χρήστης χρησιμοποιώντας ειδικούς δέκτες, που λαμβάνουν σήματα από τους δορυφόρους, έχει την δυνατότητα να υπολογίσει την θέση του στον τρισδιάστατο χώρο με ακρίβεια της τάξεως των 2 μέτρων (απόλυτος εντοπισμός, 2008). Αν χρησιμοποιήσει δε διαφορικό εντοπισμό, ο οποίος απαιτεί ένα βασικό δέκτη τοποθετημένο σε μια γνωστή θέση, μπορεί να επιτύχει ακρίβεια της τάξεως των μερικών εκατοστών.

Οι χρήστες των ΔΣΠ επωφελούνται από τον ακριβή προσδιορισμό θέσης και ταχύτητας, που προσφέρει το σύστημα στις περιπτώσεις μεγάλου χρονικού διαστήματος μετρήσεων και χρήσης ειδικών τεχνικών μέτρησης και επεξεργασίας των δεδομένων.

Παρόλα αυτά τα ΔΣΠ αντιμετωπίζουν πληθώρα σφαλμάτων, όπως οι επιδράσεις της ιονόσφαιρας και της τροπόσφαιρας, η περιοδική ή μόνιμη απώλεια σήματος, η ανάκλαση του σήματος σε πολλαπλές επιφάνειες, οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές κ.α, τα οποία μειώνουν την ακρίβεια του και απαιτούν ειδική αντιμετώπιση.

Από τα παραπάνω είναι εμφανές ότι η φύση των δύο συστημάτων, των ΑΣΠ και των ΔΣΠ, είναι συμπληρωματική με αποτέλεσμα να έχουν γίνει πολλές προσπάθειες ώστε τα δύο συστήματα να συνδυαστούν σε ένα, το οποίο θα έχει τα πλεονεκτήματα και των δύο και ταυτόχρονα θα αντιμετωπίζει και θα εξαλείφει και τα μειονεκτήματα τους.

Οι προσπάθειες αυτές έχουν καταλήξει στην δημιουργία των ολοκληρωμένων αδρανειακών και δορυφορικών συστημάτων (integrated GPS-INS systems), τα οποία κάνοντας χρήση ειδικών αλγορίθμων και φίλτρων συνδυάζουν τα δεδομένα των δύο συστημάτων και παρέχουν αποτελέσματα με αυξημένη ακρίβεια και αξιοπιστία.

Το τελευταίο οδήγησε στην χρήση τους σε πλήθος εφαρμογών, στις οποίες ο προσδιορισμός της κινηματικής συμπεριφοράς ενός σώματος αλλά και της θέσης του στο χώρο σε σχέση με τον χρόνο (τροχιά κίνησης-trajectory) είναι μεγάλης σημασίας.

Η μείωση του κόστους των παραπάνω συστημάτων οδήγησε στην ευρύτατη χρησιμοποίησή τους, γεγονός που αποτελεί το κίνητρο για την διεξαγωγή πολλών ερευνητικών προσπαθειών καθώς και την ανάπτυξη πλήθους εμπορικών εφαρμογών στον τομέα των ολοκληρωμένων αδρανειακών και δορυφορικών συστημάτων.

1.2. Στόχος της Παρούσας Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποβλέπει στην εκπλήρωση τριών διαφορετικών στόχων :

Ο πρώτος στόχος είναι να παρουσιάσει τις αρχές της πλοήγησης με χρήση αδρανειακών συστημάτων καθώς και τα βασικά στοιχεία της συνεργασίας των συστημάτων αυτών με τα δορυφορικά συστήματα πλοήγησης και προσδιορισμού θέσης.

Ο δεύτερος στόχος είναι να αξιολογήσει το ολοκληρωμένο αδρανειακό και δορυφορικό σύστημα του εργαστηρίου του Κέντρου Δορυφόρων Διονύσου μέσω της εκτέλεσης πειραμάτων και δοκιμών, τα αποτελέσματα των οποίων αναλύονται και παρουσιάζονται διεξοδικά στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

Ο τρίτος στόχος είναι να αποτελέσει την βάση για μελλοντικές εργασίες και εφαρμογές, που θα έχουν ως αντικείμενο την αδρανειακή πλοήγηση και το ολοκληρωμένο αδρανειακό και δορυφορικό σύστημα πλοήγησης του εργαστηρίου.

1.3. Δομή της Παρούσας Διπλωματικής Εργασίας

Η εργασία αποτελείται από την εισαγωγή και πέντε κεφάλαια. Στην εισαγωγή γίνεται μια σύντομη περιγραφή του αντικειμένου της συνέργειας των αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης (ΑΣΠ)

Στο **πρώτο κεφάλαιο** της εργασίας παρουσιάζονται τα αδρανειακά συστήματα πλοήγησης. Αναλυτικότερα αρχικά γίνεται μια αναφορά στους τρεις Νόμους της Κίνησης του Νεύτωνα, στους οποίους βασίζεται η λειτουργία των ΑΣΠ, καθώς στον τρόπο με τον οποίο επιδρούν στην αδρανειακή πλοήγηση .

Ακολουθεί αναδρομή στην ιστορική εξέλιξη των ΑΣΠ, περιγραφή των κύριων αδρανειακών αισθητήρων (γυροσκόπια και επιταχυνσιόμετρα) και των βασικών αρχών λειτουργίας τους καθώς και ανάλυση των βασικών συστημάτων αναφοράς που χρησιμοποιούνται στην αδρανειακή πλοήγηση και των σχέσεων μετασχηματισμού που τα συνδέουν.

Τελικά το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την περιγραφή των κύριων μορφών υλοποίησης των ΑΣΠ [τα σταθερής πλατφόρμας (stabilized ή gimbaled INS – GINS) και τα προσκολλημένα (strap down INS - SINS)] και των βασικών αρχών

λειτουργίας τους, των κύριων σφαλμάτων τους και των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων τους.

Κύριος στόχος του κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει με εύληπτο και κατανοητό τρόπο την λειτουργία των ΑΣΠ και των πλεονεκτημάτων αλλά και περιορισμών που προκύπτουν από την χρήση τους.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** της εργασίας γίνεται αναφορά στα δορυφορικά συστήματα πλοήγησης. Πιο συγκεκριμένα αρχικά γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των βασικών δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης (ΔΣΠ) και προσδιορισμού θέσης, όπως είναι τα GPS (Global Positioning System) και GLONASS (Global Navigation Satellite System), τα οποία βρίσκονται σε χρήση σήμερα.

Στην συνέχεια το κύριο τμήμα του κεφαλαίου ασχολείται με τα σφάλματα που παρουσιάζονται στην λειτουργία των παραπάνω συστημάτων και τα οποία προκαλούν ανάλογα σφάλματα στον προσδιορισμό της θέσης και της κινηματική συμπεριφοράς ενός σώματος.

Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των ΔΣΠ και με μια σύντομη αναφορά των εξελίξεων στο χώρο αυτών (modernization of GPS).

Κύριος στόχος του κεφαλαίου δεν είναι μια αναλυτική παρουσίαση των ΔΣΠ αλλά μια παρουσίαση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών τους ώστε να γίνει αντιληπτή η σκοπιμότητα και η δυναμική του συνδυασμού τους με τα ΑΣΠ.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** της εργασίας γίνεται περιγραφή της συνέργιας των ΑΣΠ και ΔΣΠ. Πιο συγκεκριμένα αρχικά παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την συνεργασία των δύο αυτών συστημάτων πλοήγησης και οι εφαρμογές που επωφελούνται από αυτή την συνεργασία με έμφαση σε αυτές που παρουσιάζουν γεωδαιτικό ενδιαφέρον

Στη συνέχεια γίνεται μια περιγραφή των τεχνικών και αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται στην σύζευξη και το φιλτράρισμα των δεδομένων που προέρχονται από τα δύο συστήματα δίνοντας κυρίως βάρος στην ευρύτερα χρησιμοποιούμενη τεχνική των φίλτρων KALMAN και των διάφορων υλοποιήσεών τους.

Ακολούθως παρουσιάζεται ο μηχανισμός των εξισώσεων πλοήγησης των προσκολλημένων ΑΣΠ, καθώς αυτά είναι τα πιο διαδεδομένα και έχουν επικρατήσει στο μεγαλύτερο μέρος όλων των εφαρμογών αδρανειακής πλοήγησης και στο σύνολο των επίγειων εφαρμογών.

Τέλος γίνεται μια παρουσίαση των βαθμών συνέργιας των δύο συστημάτων, οι οποίοι διαφοροποιούνται ανάλογα με την χρήση και την μορφή των δεδομένων που χρησιμοποιούν.

Κύριος στόχος του κεφαλαίου είναι η περιγραφή της συνέργιας των ΑΣΠ και ΔΣΠ μέσω της παρουσίασης των χρησιμοποιούμενων επαναληπτικών τεχνικών ανάμιξης δεδομένων και των διαφόρων τύπων συνεργασίας.

Το **τέταρτο κεφάλαιο** της εργασίας περιλαμβάνει την παρουσίαση του ολοκληρωμένου αδρανειακού και δορυφορικού συστήματος του εργαστηρίου του Κέντρου Δορυφόρων Διονύσου.

Στο πρώτο μέρος γίνεται μια περιγραφή του συστήματος και των αισθητήρων του και παρουσιάζονται οι δυνατότητες του για την παραγωγή αποτελεσμάτων τόσο σε πραγματικό χρόνο (on the fly) όσο και με την εκ των υστέρων (post processing) ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων με χρήση εξειδικευμένου λογισμικού που συνοδεύει το σύστημα.

Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζονται τα πειράματα που διεξήχθησαν στα πλαίσια των δοκιμών του συστήματος και αξιολογούνται τα αποτελέσματά τους.

Κύριος στόχος του κεφαλαίου είναι να αποτελέσει ένα εγχειρίδιο αναφοράς και χρήσης του συστήματος που αποκτήθηκε από το εργαστήριο, ικανού να χρησιμοποιηθεί σε μελλοντικές εργασίες.

Το **πέμπτο κεφάλαιο** της εργασίας περιέχει τα συμπεράσματα, τα οποία βγήκαν από την δοκιμή και χρήση του συστήματος. Κύριος στόχος του κεφαλαίου είναι να δώσει μια συνοπτική εικόνα της απόδοσης του συστήματος και να υπογραμμίσει χρήσιμες ενέργειες και τεχνικές, οι οποίες προέκυψαν από την χρήση του συστήματος και βελτιώνουν την απόδοσή του.

2. ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ (ΑΣΠ)

2.1. Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται τα κύρια χαρακτηριστικά των αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης καθώς και οι βασικές αρχές λειτουργίας τους. Αρχικά δίνονται οι βασικοί νόμοι (οι τρεις νόμοι της κίνησης όπως διατυπώθηκαν από τον Ισαάκ Νεύτωνα) στους οποίους στηρίζεται η λειτουργία των αδρανειακών συστημάτων, ακολουθεί μια σύντομη αναδρομή στην εξέλιξη των συστημάτων και μια περιγραφή των κύριων αισθητήρων που χρησιμοποιούνται καθώς και των βασικών κατηγοριών των αδρανειακών συστημάτων.

Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με μια σύντομη αναφορά στα συστήματα αναφοράς συντεταγμένων και τους μετασχηματισμούς αυτών και με την παρουσίαση των βασικών αρχών λειτουργίας, των κύριων σφαλμάτων και των περιορισμών και πλεονεκτημάτων των αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης.

2.2. Αρχές και Νόμοι της Κίνησης των Σωμάτων

Στη συγκεκριμένη ενότητα γίνεται μια αναφορά στις αρχές και τους νόμους της Νευτώνειας μηχανικής και επιχειρείται να δοθεί μια θεωρητική ερμηνεία της επίδρασης και της εφαρμογής τους στην λειτουργία των συστημάτων αδρανειακής πλοήγησης.

2.2.1. Εισαγωγικά στοιχεία

Ο προσδιορισμός της κίνησης των σωμάτων και κατ' επέκταση ο υπολογισμός της θέσης τους απασχολούσε ανέκαθεν την ανθρωπότητα με τον ένα ή άλλο τρόπο. Η πρώτη όμως συστηματική προσπάθεια διατύπωσης θεμελιακών αρχών και νόμων περιγραφής της κίνησης των σωμάτων έλαβε χώρα τον 17ο αιώνα μ.Χ. με την εμφάνιση του Γαλιλαίου και του Ισαάκ Νεύτωνα.

Η ερευνητική προσπάθεια των δύο ανδρών οδήγησε στην θεμελίωση της κλασικής μηχανικής, του τομέα της φυσικής επιστήμης που εξετάζει την κίνηση των σωμάτων και την συμπεριφορά τους στον μακρόκοσμο, και έθεσε τις βάσεις της σύγχρονης αντίληψης της φυσικής και των φυσικών φαινομένων.

Ο Γαλιλαίος μέσα από μια σειρά πειραμάτων και παρατηρήσεων και βασιζόμενος σε αυστηρά μαθηματικές αποδείξεις ανέτρεψε ένα μεγάλο μέρος από τις αντιλήψεις, που μέχρι την εμφάνιση του επικρατούσαν, σχετικά με την κινηματική συμπεριφορά των σωμάτων και των πλανητών.

Έτσι ο Γαλιλαίος ήταν ο πρώτος που εισήγαγε την έννοια της δύναμης ως αίτιου της κίνησης των σωμάτων όπως επίσης και την έννοια των αδρανειακών συστημάτων αναφοράς διατυπώνοντας μάλιστα την περίφημη αρχή της Συμμετρίας γνωστής και ως γαλιλαϊκός μετασχηματισμός, που συνδέει τα διάφορα αδρανειακά συστήματα μεταξύ τους. Το έργο του Γαλιλαίου ολοκληρώθηκε από τον Νεύτωνα ο οποίος με το έργο του στοιχειοθέτησε τα αξιώματα και τις αρχές της κίνησης των σωμάτων.

2.2.2. Οι νόμοι κίνησης του Νεύτωνα

Το 1687 ο Νεύτωνα δημοσίευσε το έργο του «*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica (Μαθηματικές Αρχές της Φυσικής Φιλοσοφίας)*», στο οποίο για πρώτη φορά γίνεται μια συστηματική προσπάθεια περιγραφής της κίνησης των σωμάτων.

Χρησιμοποιώντας την ευκλείδεια γεωμετρία και την μαθηματική θεωρία των ροών, που ίδιος ανέπτυξε και εφάρμοσε, ο Νεύτωνα καθόρισε τα πρώτα αξιώματα για την κίνηση των σωμάτων, συνέδεσε τον χώρο (θέση) με τον χρόνο (ταχύτητα) και έδωσε απάντηση στο βασικό ερώτημα του συστήματος αναφοράς ως προς το οποίο προσδιορίζεται η θέση.

Απόρροια της παραπάνω προσπάθειας του ήταν η διατύπωση των τριών περιώνυμων νόμων της κίνησης του Νεύτωνα, οι οποίοι μέχρι σήμερα αποτελούν τους βασικούς άξονες ερμηνείας της κίνησης των σωμάτων.

Ο πρώτος νόμος του Νεύτωνα (Αρχή της Αδράνειας) δηλώνει ότι κάθε σώμα το οποίο είναι ακίνητο ή κινείται με σταθερή ταχύτητα θα παραμείνει ακίνητο ή θα συνεχίσει να κινείται με την ίδια ταχύτητα εκτός αν ασκηθούν επάνω του δυνάμεις που θα προκαλέσουν την μεταβολή της κινητικής του κατάστασης.

Ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα (Αρχής της Κίνησης) δηλώνει ότι η μεταβολή της κινητικής κατάστασης ενός σώματος είναι ανάλογη με το μέτρο της δύναμης που ασκείται σε αυτό και έχει την διεύθυνση και την φορά αυτής.

Ο τρίτος νόμος του Νεύτωνα (Αρχή της Δράσης-Αντίδρασης) δηλώνει ότι οποτεδήποτε ασκείται μια δύναμη (δράση) σε ένα σώμα τότε αναπτύσσεται μια αντίδραση με ίδιο μέτρο και αντίθετη φορά με την δράση, με αποτέλεσμα οι δυνάμεις να εμφανίζονται ανά ζεύγη.

2.2.3. Η αδρανειακή πλοήγηση και οι νόμοι του Νεύτωνα

Ο πρώτος νόμος του Νεύτωνα σε συνδυασμό με την αδράνεια, η οποία ορίζεται ως η ιδιότητα που έχουν τα σώματα να αντιδρούν στην αλλαγή της κινητικής τους κατάστασης, εισάγουν μια κατηγορία συστημάτων αναφοράς με την ονομασία αδρανειακά συστήματα.

Τα συστήματα αυτά είναι απαραίτητα για την περιγραφή της κίνησης των σωμάτων με βάση τους νόμους του Νεύτωνα αφού οι τελευταίοι έχουν ισχύ μόνο σε αυτά. Έτσι ένα σώμα στο οποίο δεν ασκούνται δυνάμεις θα είναι ακίνητο ή θα κινείται ευθύγραμμα με σταθερή ταχύτητα ως προς ένα όμως αδρανειακό σύστημα αναφοράς.

Θεωρητικά η θεωρία των πεδίων δυνάμεων καθιστά απαγορευτική την ύπαρξη ενός αδρανειακού συστήματος αναφοράς, αφού η δυναμική αλληλεπίδραση των σωμάτων είναι συνεχής. Παρόλα αυτά ένα σύστημα με βάση τους απλανείς αστέρες μπορεί να υποτεθεί με πολύ μεγάλη βεβαιότητα ότι είναι αδρανειακό εξαιτίας των μεγάλων αποστάσεων μεταξύ των αστερών που οδηγούν στην εξασθένηση των δυνάμεων.

Η ύπαρξη του παραπάνω αδρανειακού συστήματος σε συνδυασμό με τον γαλιλαϊκό μετασχηματισμό, που ορίζει ότι κάθε σύστημα αναφοράς που κινείται με σταθερή ταχύτητα ως προς ένα αδρανειακό σύστημα είναι και αυτό αδρανειακό, οδηγεί στην ύπαρξη άπειρων αδρανειακών συστημάτων αναφοράς.

Η κίνηση όμως στον φυσικό κόσμο δεν λαμβάνει πάντα χώρα σε τέτοιες συνθήκες που να μπορεί να περιγραφεί με αδρανειακά συστήματα αναφοράς, με αποτέλεσμα να γίνεται χρήση των λεγόμενων αδρανειακών δυνάμεων ή ψευδοδυνάμεων ώστε να είναι δυνατή η χρήση των νόμων του Νεύτωνα για την διερεύνηση της κινηματικής συμπεριφοράς των σωμάτων.

Τέτοιες δυνάμεις είναι για παράδειγμα η δύναμη d' Alamber, η δύναμη Coriolis και η φυγόκεντρος δύναμη που χρησιμοποιούνται για να εξηγήσουν την κίνηση των σωμάτων σε μη αδρανειακά συστήματα αναφοράς και που η μελέτη τους όπως θα δειχθεί στην συνέχεια είναι απαραίτητη κατά την πλοήγηση με βάση αδρανειακά συστήματα.

Ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα συνδέει τη μεταβολή της ταχύτητας ενός κινητού σώματος με την δύναμη που επιδρά πάνω του σύμφωνα με την Εξ. 2-1 και είναι η βασική σχέση που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της θέσης στην αδρανειακή πλοήγηση.

$$\vec{F} = m \cdot \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \quad (\text{Εξ. 2-1})$$

Η παραπάνω εξίσωση όπου \vec{r} είναι το διάνυσμα θέσης του κινητού και \vec{F} το διάνυσμα της ασκούμενης δύναμης ισχύει, όπως έχει ήδη αναφερθεί, μόνο σε αδρανειακά συστήματα αναφοράς γεγονός που καταδεικνύει την σπουδαιότητα των παραπάνω συστημάτων στην λειτουργία των αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης.

Τέλος ο τρίτος νόμος του Νεύτωνα βρίσκει εφαρμογή στην κατασκευή των οργάνων (επιταχυνσιόμετρα) που χρησιμοποιούνται από τα συστήματα αδρανειακής πλοήγησης αφού η αρχή λειτουργίας των μετρητικών διατάξεων που διαθέτουν κάνει χρήση της αρχής της δράσης – αντίδρασης ώστε να εξακριβώσει το μέτρο των δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά την κίνηση ενός σώματος.

2.3. Ιστορική Εξέλιξη των Αδρανειακών Συστημάτων Πλοήγησης (ΑΣΠ)

Σκοπός της συγκεκριμένης ενότητας είναι να δώσει μια σύντομη εικόνα της εξέλιξης των αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης. Για το σκοπό αυτό χωρίζεται σε δύο υπο-ενότητες που αναφέρονται στο πρώιμο στάδιο ανάπτυξης και στην σύγχρονες εξελίξεις αντίστοιχα.

Σημειώνεται ότι επειδή κύριος σκοπός της ενότητας είναι να δείξει την πορεία των αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης στο πέρασμα του χρόνου και όχι να

περιγράψει την λειτουργία τους, αντικείμενο που θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα, έχουν παραληφθεί όλες οι πλεονάζουσες μαθηματικές και τεχνικές λεπτομέρειες.

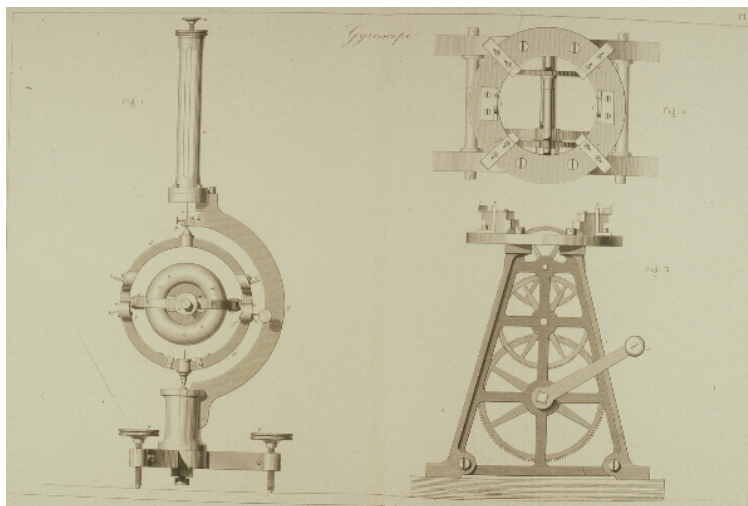
2.3.1. Πρώμο στάδιο εξέλιξης των αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης (ΑΣΠ)

Τα αδρανειακά συστήματα πλοήγησης είναι αυτόνομες συσκευές πλοήγησης οι οποίες χρησιμοποιούν μια σειρά μετρητικών διατάξεων από αισθητήρες, όπως είναι τα γυροσκόπια και τα επιταχυνσιόμετρα, για να προσδιορίσουν την θέση, την ταχύτητα και την κινηματική συμπεριφορά ενός κινητού σώματος κάνοντας χρήση των αρχών της αδράνειας και της νευτώνειας μηχανικής.

Το θεωρητικό δηλαδή υπόβαθρο για την λειτουργία των αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης ήταν ήδη γνωστό από την εποχή που ο Νεύτωνα δημοσίευε το περίωνυμο έργο του «*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*» (1687), στο οποίο διατυπώνονταν οι τρεις νόμοι της κίνησης των σωμάτων.

Η πρακτική υλοποίηση όμως των εν λόγω συστημάτων ήταν ανέφικτη σε τόσο πρώιμο στάδιο, αφού η εκτέλεση μετρήσεων σε ένα τέτοιο σύστημα απαιτεί εξειδικευμένους μηχανισμούς υψηλής ακριβείας και αξιοπιστίας που η τεχνολογία της εποχής δεν επέτρεπε την κατασκευή τους.

Η πρώτη πρακτική εφαρμογή των νόμων του Νεύτωνα έγινε από τον Γάλλο επιστήμονα Jean Bernard Leon Foucault (1819-1868), ο οποίος το 1852 κατασκεύασε το πρώτο γυροσκόπιο (Εικόνα 2.1) με σκοπό μέσω της υλοποίησης των αρχών του Νεύτωνα να προσδιορίσει την ταχύτητα περιστροφής της γης και να επιδείξει ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς.



Εικόνα 2.1 : Σχέδιο του γυροσκοπίου του Jean Bernard Leon Foucault

(Πηγή : www.gyroscopes.org)

Το πρώτο αυτό γυροσκόπιο ήταν στην ουσία ένας γρήγορα κινούμενος τροχός πακτωμένος κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο άξονας περιστροφής του να έχει ελευθερία κινήσεων προς όλες τις διευθύνσεις και να μπορεί, μέσω της αρχής διατήρησης της

στροφορμής, να διατηρεί την ίδια απόλυτη διεύθυνση ανεξαρτήτως των λοιπών κινήσεων του μηχανισμού.

Ο επόμενος μεγάλος σταθμός στην εξέλιξη της αδρανειακής πλοήγησης ήταν η κατασκευή της γυροπυξίδας, η οποία ήταν η πρώτη πρακτική εφαρμογή των αρχών της αδρανειακής πλοήγησης και συγκεκριμένα στον τομέα της ναυσιπλοΐας.

Η πρώτη γυροπυξίδα παρουσιάστηκε το 1885 από τον Ολλανδό Marinus Gerardus van den Bos με πενιχρές όμως επιδόσεις. Παρόλα αυτά οι προσπάθειες για την κατασκευή μιας λειτουργικής γυροπυξίδας συνεχίστηκαν και έτσι το 1908 ένας Γερμανός και ένας Αμερικάνος επιστήμονας ο Hermann Anschütz-Kaempfe και ο Elmer Ambrose Sperry κατοχύρωσαν ταυτόχρονα την ευρεσιτεχνία για την γυροπυξίδα.



Εικόνα 2.2 : Γυροπυξίδα των αρχών του αιώνα

(Πηγή : www.vicnet.net)

Η γυροπυξίδα είναι ένας μηχανισμός που διαθέτει ένα ενσωματωμένο γυροσκόπιο το οποίο αφού διορθωθεί λόγω γεωγραφικού πλάτους και ταχύτητας του πλοίου δίνει μια ένδειξη του γεωγραφικού βορρά, η οποία παραμένει σταθερή αφού μετά τον αρχικό προσανατολισμό της στο γεωγραφικό βορρά κάθε εκτροπή της από αυτόν διορθώνεται λόγω της αρχής διατήρησης της στροφορμής.

Για να είναι όμως μια τέτοια συσκευή λειτουργική και κατάλληλη για ναυσιπλοΐα θα πρέπει να μπορεί να διορθώσει τις επιδράσεις λόγω της περιστροφής της γης καθώς και να προσδιορίσει την διεύθυνση της κατακόρυφου, ώστε να εξασφαλίζει την απαιτούμενη οριζοντίωση.

Το πρώτο επιτυγχάνεται με την χρήση μικρομηχανισμών ή ιξώδους υγρού, τα οποία αναπτύσσουν δυνάμεις τριβών που απαγορεύουν στον άξονα της γυροπυξίδας να ακολουθήσει την περιστροφή της γης ($360^\circ/24 \text{ h}$), ενώ το δεύτερο με την χρήση βαρών που επιτρέπουν την συνεχή οριζοντίωση της πλατφόρμας που περιέχει το επίπεδο διεύθυνσης της συσκευής.

Τέλος αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι όταν οι πρώτες γυροπυξίδες μπήκαν σε χρήση παρατηρήθηκε ότι ήταν τελείως άχρηστες όταν το πλοίο ακολουθούσε μια πορεία ΒΑ-ΝΔ. Μετά από πολλές έρευνες διαπιστώθηκε ότι το πρόβλημα οφείλονταν στις πλευρικές επιταχύνσεις που δέχονταν το πλοίο λόγω της περιστροφής της γης, οι οποίες και προκαλούσαν πρόβλημα στην οριζοντίωση της πλατφόρμας της συσκευής και κατ' επέκταση στον προσδιορισμό της γεωγραφικής θέσης του πλοίου .

Την λύση στο παραπάνω πρόβλημα έδωσε ο Γερμανός επιστήμονας Max Schuler στην κλασική εργασία του 1923, όπου προτείνει τον συντονισμό της γυροπυξίδας σε μια περίοδο 84.4 λεπτών. Η περίοδος αυτή προέρχεται από την Εξ. 2-2 και είναι ίδια με αυτή ενός εκκρεμούς με μήκος την ακτίνα της γης.

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{R}{g}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{6371000m}{9.81 \frac{m}{sec^2}}} = 84.4 \text{ min} \quad (\text{Εξ. 2-2})$$

Όπως είναι εμφανές από την Εξ.2-2 αν η γυροπυξίδα εξαναγκαστεί να εκτελέσει αρμονική ταλάντωση με την παραπάνω περίοδο η πλατφόρμα θα λειτουργεί κάτω από την επίδραση μόνο της βαρυτικής δύναμης του γήινου πεδίου με αποτέλεσμα να παραμένει οριζοντιωμένη συνεχώς και να εκμηδενίζονται οι επιδράσεις των πλευρικών επιταχύνσεων του πλοίου φορέα.

Η παραπάνω ταλάντωση είναι γνωστή ως ταλάντωση Schuler και αποτελεί μια από τις βασικές διορθώσεις που επιβάλλονται στα συστήματα αδρανειακής πλοήγησης προκειμένου να αποκατασταθούν ορισμένα από τα σφάλματα του μοντέλου μετρήσεων.

Ενώ οι γυροπυξίδες συνέχιζαν να αναπτύσσονται εκμεταλλεζόμενες τα συγκριτικά τους πλεονεκτήματα στην πλοήγηση πλοίων έναντι των μαγνητικών πυξίδων η έρευνα στον τομέα των αδρανειακών συστημάτων στράφηκε την δεκαετία του 1930 στην ανάπτυξη συστημάτων ικανών να κατευθύνουν ρουκέτες και πυραύλους.

Πρωτοπόρος στην συγκεκριμένη έρευνα ήταν ο Αμερικάνος επιστήμονας Robert Goddard, την έρευνα του οποίου χρησιμοποίησαν οι Γερμανοί επιστήμονες, όπως ο Werner von Braun, κατά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο για να δημιουργήσουν τα συστήματα κατεύθυνσης των πυραύλων V1 και V2, τα οποία και απέδειξαν την αξιοπιστία τους στους βομβαρδισμούς της πόλης του Λονδίνου κατά τα έτη 1944 και 1945.

2.3.2. Η σύγχρονη εποχή των αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης (ΑΣΠ)

Η αυγή της σύγχρονης εποχής των αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης έρχεται την δεκαετία του 1950 με την πρωτοπόρα έρευνα του Charles Stark Draper διευθυντή του εργαστηρίου οργάνων του MIT, το οποίο σήμερα έχει το όνομα του.

Το αντικείμενο της έρευνας του Draper περιλάμβανε την ανάπτυξη αυτόνομων συστημάτων πλοήγησης, κατεύθυνσης και ελέγχου κατάλληλων να χρησιμοποιηθούν σε μια πλειάδα στρατιωτικών κυρίως, αλλά και εμπορικών εφαρμογών.

Η επισταμένη έρευνα του Draper κατέληξε (1955) σε ένα σύστημα που συνδύαζε μια συστοιχία από Ολοκληρωμένα Γυροσκόπια Ενός Βαθμού Ελευθερίας (ΟΓΕΒΕ)-SIRG (Single degree of freedom Integrated Rate Gyro) με Επιταχυνσιόμετρα με Διόρθωση Παλμών (ΕΔΠ)- PIPA (Pulsed Integrating Pendulous Accelerometer). Το σύστημα αυτό χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο και κατεύθυνση στρατηγικών διηπειρωτικών πυραύλων, που εκτοξεύονταν από υποβρύχια, πετυχαίνοντας αρκετά υψηλές ακρίβειες.

Το παραπάνω αποτέλεσμα αύξησε το ενδιαφέρον για την χρήση των αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης σε μια ευρεία γκάμα πολιτικών (πλοήγηση αεροσκαφών, επίγειες εφαρμογές κ.α.) και στρατιωτικών (υποβρύχια, δορυφόροι, διαστημικά λεωφορεία κ.α.) εφαρμογών με αποτέλεσμα πολλές μεγάλες εταιρίες (Rockwell, Honeywell, General Electric, Markoni κ.α.) να στρέψουν την ερευνητική τους προσπάθεια στον παραπάνω τομέα.

Αποτέλεσμα των παραπάνω προσπαθειών ήταν η κατασκευή (1960) του Δυναμικά Συντονισμένου Γυροσκοπίου Δύο Βαθμών Ελευθερίας (ΔΣΓ) – Dynamically Tuned Gyro (DTG) και του Ολοκληρωμένου Επιταχυνσιόμετρου με Ενσωματωμένο Γυροσκόπιο (ΟΕΕΓ) - Pendulous Integrating Gyro Accelerometer (PIGA).

Το ΔΣΓ παρουσίαζε παραπλήσια ακρίβεια με το ΟΓΕΒΕ , έχοντας όμως πολύ μικρότερο μέγεθος και βάρος, λιγότερες ανάγκες συντήρησης και τροφοδοσίας και φυσικά σημαντικά μικρότερο κόστος με αποτέλεσμα να κατακτήσει το μεγαλύτερο τμήμα της αγοράς των αδρανειακών συστημάτων και να αποτελεί αναπόσπαστο μέρος του συστήματος πλοήγησης του συνόλου σχεδόν των αεροσκαφών της εποχής.

Το ΟΕΕΓ που σχεδιάστηκε από το εργαστήριο του Draper και κατασκευάστηκε από την Honeywell Inc. αποτελεί μέχρι και σήμερα ένα από τα ακριβέστερα αλλά και ακριβότερα επιταχυνσιόμετρα, προορισμένο για εφαρμογές πολύ υψηλής ακρίβειας.

Αφού επιτεύχθηκαν ικανοποιητικά επίπεδα ακρίβειας από τα μέχρι τότε κατασκευαζόμενα όργανα, η έρευνα στράφηκε στην κατασκευή οργάνων με μικρότερο μέγεθος και κόστος αλλά και μεγαλύτερη αξιοπιστία στον τομέα της χρήσης και της συντήρησης.

Όσον αφορά στα γυροσκόπια η ανάπτυξη των υπολογιστών, που εξασφάλιζαν την εκτέλεση πολύπλοκων υπολογισμών, και της τεχνολογίας, που μπορούσε να εγγυηθεί τις απαιτούμενες κατασκευαστικές δυνατότητες, οδήγησε στις αρχές της δεκαετίας του 1980 στην κατασκευή των Γυροσκοπίων με Δακτύλιο Λείζερ (ΓΔΛ) – Ring Laser Gyro (RLG),τα οποία λειτουργούσαν κάνοντας χρήση των αρχών της κυματικής (φαινόμενο Sagnac).

Τα ΓΔΛ αν και έχουν μικρότερη ακρίβεια από τα γυροσκόπια που βασίζονται σε μηχανικά μέρη, εντούτοις έχουν καταφέρει να κυριαρχήσουν στην αγορά αποτελώντας μέρος των προσκολλημένων αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης

(strapdown INS) χάρις στην υψηλή τους αξιοπιστία και στην αντοχή τους στις περιβαλλοντικές επιδράσεις.

Οι υψηλές όμως απαιτήσεις των ΓΔΛ σε εξειδικευμένα μηχανήματα και προσωπικό για την κατασκευή τους οδήγησε στην ανάπτυξη των Γυροσκοπίων Οπτικών Ινών (ΓΟΙ) – Fiber Optic Gyro (FOG) τα οποία κάνουν χρήση των ίδιων αρχών λειτουργίας.

Τα ΓΟΙ αν και δεν έχουν ακόμα προσεγγίσει την ακρίβεια και αξιοπιστία των ΓΔΛ έχουν επιλύσει ορισμένα από τα προβλήματα αυτών, όπως η απόδοση τους σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής, αφήνοντας σημαντικές υποσχέσεις για το μέλλον.

Ομοίως στον τομέα των επιταχυνσιόμετρων η έρευνα οδήγησε στον σχεδιασμό και την κατασκευή συσκευών κυρίως μικρού μεγέθους και υψηλής αξιοπιστίας. Αντίθετα με τα επιταχυνσιόμετρα προηγούμενης γενιάς, που στηρίζονταν στην μέτρηση των επιταχύνσεων που δέχονταν μια δόκιμη μάζα και χρησιμοποιούσαν την αρχή λειτουργίας του εκκρεμούς, τα νέα επιταχυνσιόμετρα εκμεταλλευόταν τις εξελίξεις της τεχνολογίας για να επιτύχουν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα με το μικρότερο δυνατό κόστος και την υψηλότερη αξιοπιστία.

Έτσι εμφανίσθηκαν επιταχυνσιόμετρα που βασίζονταν στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, άλλα που αντικατέστησαν τα κλασικά ελατήρια με πυκνωτές ή πηνία καθώς και επιταχυνσιόμετρα που βασίζονταν στην ανίχνευση των δονήσεων που προκαλούνται κατά την κίνηση της μάζας και είναι γνωστά σαν Vibrating String Accelerometer (VSA) και Resonating Beam Accelerometer (RBA).

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας και η ολοένα και μεγαλύτερη χρήση των αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης σε πλήθος εφαρμογών σε ξηρά, θάλασσα και αέρα οδηγούν πλέον τις εξελίξεις στη ανάπτυξη και κατασκευή των επιταχυνσιόμετρων και των γυροσκοπίων.

Η εξέλιξη των μικρο-κυκλωμάτων πυριτίου, η ευκολία κατεργασίας ορυκτών υψηλής αντοχής όπως ο χαλαζίας και η ανάπτυξη μηχανημάτων που επιτρέπουν την επεξεργασία των υλικών και συσκευών σε επίπεδο κλίμακας μικρομέτρου έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη των Μικρο Ηλεκτρομηχανικών Αισθητήρων (ΜΗΑ) – Micro Electro-Mechanical Sensors (MEMS).

Οι ΜΗΑ χαρακτηρίζονται κυρίως από το πολύ μικρό μέγεθος και την μεγάλη αξιοπιστία που παρουσιάζουν στις περιβαλλοντικές επιδράσεις και έχουν σήμερα (2008) καταλάβει ένα πολύ μεγάλο μέρος της αγοράς των αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης, η οποία δεν απαιτεί υψηλές ακρίβειες.

Η χαμηλή ακρίβεια που επιτυγχάνουν σε σχέση με τα άλλα είδη αισθητήρων οφείλεται κυρίως στις υπάρχουσες δυνατότητες της τεχνολογίας κατασκευής και τους καθιστά απαγορευτικούς για χρήση σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλές επιδόσεις.

Ο συνδυασμός τους όμως με την τεχνολογία του δορυφορικού εντοπισμού θέσης διορθώνει σε μεγάλο βαθμό την κατάσταση και ανοίγει νέους ορίζοντες που αναμένεται να οδηγήσουν στην πλήρη επικράτηση των παραπάνω αισθητήρων μέσα στην επόμενη δεκαετία.

2.4. Είδη Αδρανειακών Αισθητήρων

Στην συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζονται τα κύρια είδη γυροσκοπίων και επιταχυνσιόμετρων, που χρησιμοποιούνται από τα αδρανειακά συστήματα πλοήγησης. Έμφαση δίνεται στην περιγραφή των αρχών λειτουργίας στις οποίες στηρίζονται οι παραπάνω αισθητήρες ώστε να γίνει κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας τους.

Βέβαια η παρούσα ενότητα δεν αποτελεί ένα λεπτομερή κατάλογο των αισθητήρων που έχουν κατασκευαστεί αλλά μια παράθεση των κύριων τύπων αυτών, οι οποίοι δεν διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό από τις παραλλαγές τους.

2.4.1. Είδη γυροσκοπίων

Τα γυροσκόπια είναι συσκευές οι οποίες όπως έχει ήδη αναφερθεί χρησιμοποιούν τις αρχές της αδράνειας και της διατήρησης της στροφορμής για να διατηρήσουν σταθερό τον προσανατολισμό τους σε σχέση με μια αρχικώς καθορισμένη διεύθυνση.

Το παραπάνω χαρακτηριστικό τους κάνει τα γυροσκόπια ιδανικές συσκευές για την μέτρηση των γωνιακών περιστροφών και κατ' επέκταση τον προσδιορισμό των διορθώσεων που πρέπει να επιβληθούν στους φορείς τους, ώστε οι τελευταίοι να διατηρήσουν σταθερή διεύθυνση.

Τα γυροσκόπια λοιπόν αποτελούν βασικά στοιχεία των ΑΣΠ αφού στην ουσία είναι αυτά που με την λειτουργία τους υλοποιούν το αδρανειακό σύστημα αναφοράς (ΑΣΑ).

Τα γυροσκόπια μπορούν να ταξινομηθούν με βάση την αρχή λειτουργίας τους και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τους σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, κάθε μια από τις οποίες περιλαμβάνει πλήθος παραλλαγών που έχουν όμως κοινή βάση λειτουργίας

Έτσι οι κύριες κατηγορίες των γυροσκοπίων είναι :

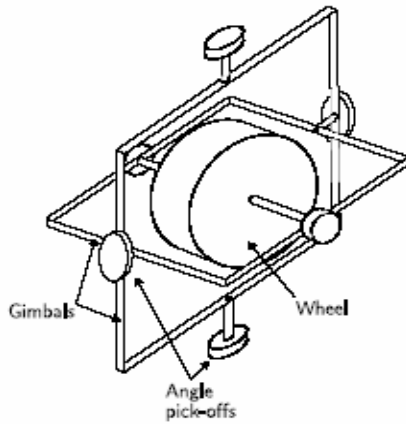
➤ Τα μηχανικά γυροσκόπια

Τα γυροσκόπια αυτά ήταν τα πρώτα που παρουσιάστηκαν (Foucault, 1853) και συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα αποτελώντας μάλιστα, στις σύγχρονες υλοποιήσεις τους, τις ακριβέστερες συσκευές σε χρήση.

Η λειτουργία τους βασίζεται στην χρήση ενός ταχέως περιστρεφόμενου τροχού, ο οποίος στηρίζεται σε μια κατασκευή από έδρανα και πλατφόρμες που του επιτρέπουν να κινείται σε ένα σύστημα αξόνων.

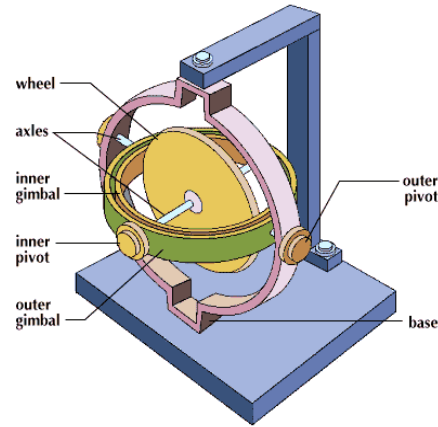
Ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων εδράνων καθορίζει τον αριθμό των αξόνων περί των οποίων ο τροχός μπορεί να περιστραφεί ελεύθερα και άρα και τους βαθμούς ελευθερίας του συστήματος.

Στις Εικόνες 2.3 και 2.4 που ακολουθούν φαίνονται δύο μηχανικά γυροσκόπια δύο και τριών βαθμών ελευθερίας αντίστοιχα.



Εικόνα 2.3 : Μηχανικό γυροσκόπιο 2 βαθμών ελευθερίας
(Πηγή :Titterton, 2004)

Gyroscope



Εικόνα 2.4 : Μηχανικό γυροσκόπιο 3 βαθμών ελευθερίας
(Πηγή :Εγκυκλοπαίδεια Britannica)

Τα γυροσκόπια του παραπάνω τύπου χρησιμοποιούν σερβομηχανισμούς και ρότορες (angle pick-offs), οι οποίοι είναι προσαρμοσμένοι στις βάσεις των διευθύνσεων των εδράνων, ώστε να ανιχνεύσουν την γωνιακή περιστροφή του συστήματος και να παράξουν τα σήματα διόρθωσης του προσανατολισμού της πλατφόρμας.

Αυτοί οι εξαιρετικής ακρίβειας μηχανισμοί, που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή τους, δίνουν στα γυροσκόπια την δυνατότητα να επιτύχουν υψηλές επιδόσεις, όμως από την άλλη μεριά δημιουργούν και τα κυριότερα μειονεκτήματά τους.

Έτσι κατά τις κινήσεις των μηχανικών μερών τους προκαλούνται τριβές, οι οποίες δημιουργούν σφάλματα στα παραγόμενα σήματα διόρθωσης ενώ παράγουν επίσης υψηλά επίπεδα θερμότητας που απαιτούν ειδική κατεργασία των μηχανισμών ώστε να αντεπεξέλθουν.

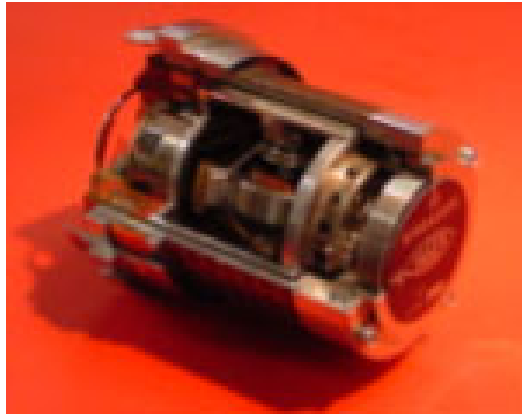
Επίσης οι σερβόμηχανισμοί αν και αρκετά αξιόπιστοι στα συνήθη περιβάλλοντα πλοήγησης παρουσιάζουν αδυναμία παραγωγής διορθώσεων σε περιβάλλοντα υψηλών ταχυτήτων περιστροφών, όπως είναι η πλοήγηση σε περιοχές κοντά στους γήινους πόλους καθώς και ο έλεγχος σύγχρονων μαχητικών αεροσκαφών, με αποτέλεσμα να είναι αναποτελεσματικοί στις παραπάνω εφαρμογές.

Επιπλέον τα μηχανικά γυροσκόπια είναι συνήθως ογκώδη, ακριβά, έχουν μεγάλες ανάγκες τροφοδοσίας και απαιτούν εξαιρετικά μεγάλο χρόνο προθέρμανσης πριν την χρήση με συνέπεια να δυσχεραίνεται ακόμα περισσότερο η χρήση τους σε καθημερινές εφαρμογές που απαιτούν μεσαία επίπεδα ακρίβειας.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι τα μηχανικά γυροσκόπια μετρούν γωνιακή περιστροφή σε αντίθεση με τις κατηγορίες, που ακολουθούν, και οι οποίες μετράνε γωνιακή ταχύτητα.

Στην προσπάθεια τους να διορθώσουν μερικά από τα παραπάνω μειονεκτήματα των μηχανικών γυροσκοπίων με τροχό οι εταιρίες του χώρου ανέπτυξαν νέα είδη γυροσκοπίων (floating gyroscopes).

Οι συγκεκριμένες συσκευές φιλοξενούν το παραπάνω σύστημα του τροχού όχι προσαρμοσμένο σε μια σειρά από έδρανα, αλλά εγκιβωτισμένο μέσα σε ένα θάλαμο που περιέχει κολλώδες υγρό υψηλού ιξώδους, το οποίο και διατηρεί τον προσανατολισμό του συστήματος.



Εικόνα 2.5 : Γυροσκόπιο με χρήση υγρού (floating gyroscope)

(Πηγή : Εταιρία Sagem Défense Sécurité)

Το παραπάνω σύστημα αν και διορθώνει μερικά από τα μειονεκτήματα των μηχανικών γυροσκοπίων σχετικά με τις ταχύτητες μετρήσης, την τροφοδοσία, το μέγεθος και το χρόνο προθέρμανσης εντούτοις δημιουργεί αυξημένα κόστη κατασκευής που κάθε άλλο παρά προσιτό το κάνουν για τις συνήθεις εφαρμογές.

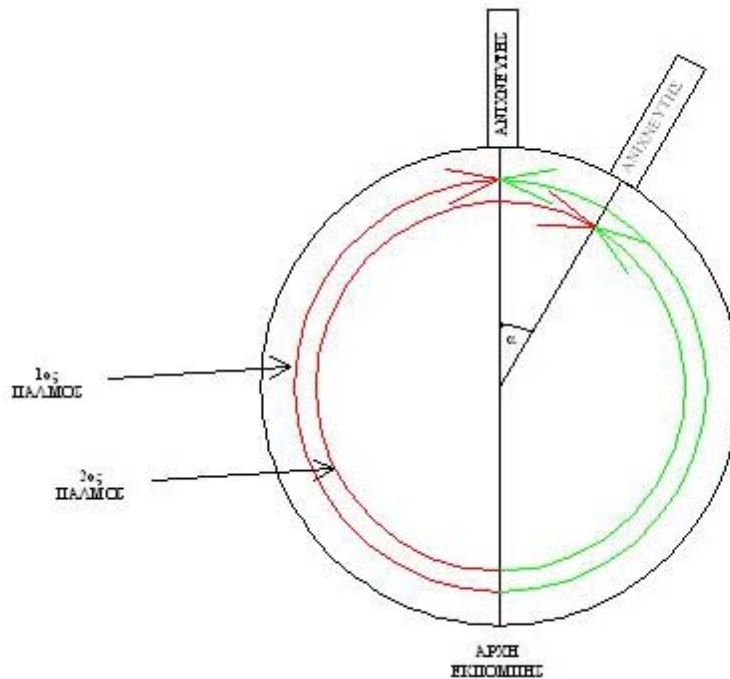
➤ Τα οπτικά γυροσκόπια

Τα οπτικά γυροσκόπια βασίζουν την λειτουργία τους στο φαινόμενο Sagnac, το οποίο παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1913 από τον γάλλο φυσικό George Sagnac.

Σύμφωνα με αυτό αν δυο ακτίνες φωτός εκπνευθούν από μια πηγή και ακολουθήσουν αντίθετες διαδρομές γύρω από ένα σταθερό δακτύλιο ακτίνας R τότε θα καλύψουν την ίδια αδρανειακή απόσταση στον ίδιο χρόνο και θα συναντηθούν στο αυτό σημείο.

Σε περίπτωση όμως που ο δακτύλιος δεν είναι σταθερός αλλά περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω είναι προφανές ότι η ακτίνα που έχει την ίδια φορά περιστροφής με τον δακτύλιο θα διανύσει μεγαλύτερη απόσταση στον ίδιο χρόνο, ενώ το αντίθετο θα συμβεί με την ακτίνα που έχει αντίθετη φορά περιστροφής.

Το αποτέλεσμα είναι οι δύο ακτίνες να συναντηθούν σε διαφορετικό σημείο, η θέση του οποίου εξαρτάται άμεσα από την γωνιακή περιστροφή του δακτυλίου. Στην Εικόνα 2.6, που ακολουθεί, παρουσιάζεται μια σχηματική απεικόνιση του φαινομένου Sagnac.



Εικόνα 2.6 : Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου Sagnac

Η πηγή εκπομπής εκπέμπει αρχικά ένα παλμό από δύο ακτίνες, μια κόκκινη και μια πράσινη, οι οποίες κινούνται αντίθετα σε ένα δακτύλιο που παραμένει ακίνητος και συναντούνται, αφού έχουν διανύσει αποστάσεις ίσες με πR , στον ανιχνευτή που είναι τοποθετημένος αντιδιαμετρικά της πηγή εκπομπής.

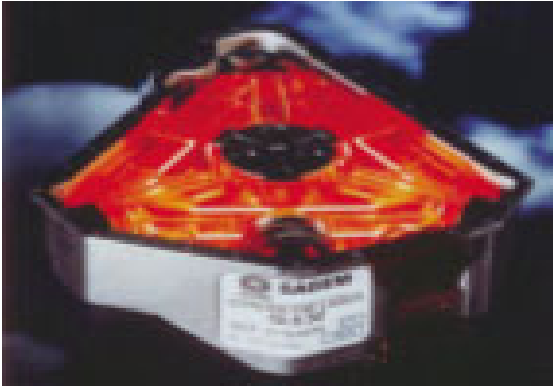
Στην δεύτερη εκπομπή όμως ο δακτύλιος δεν παραμένει ακίνητος αλλά αρχίζει να περιστρέφεται, μαζί με τον προσαρμοσμένο σε αυτό ανιχνευτή, με γωνιακή ταχύτητα ω .

Όπως φαίνεται και από το σχήμα η κόκκινη δέσμη θα διαγράψει μεγαλύτερη απόσταση από την πράσινη μέχρι να συναντηθούν. Το μήκος της απόστασης θα έχει άμεση σχέση με την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δακτυλίου.

Το παραπάνω φαινόμενο ισχύει σε οποιοδήποτε σχήμα βρόχου, είτε κυκλικό είτε πολυέδρο, και αποτελεί την βάση λειτουργίας των οπτικών γυροσκοπίων. Έτσι στα συγκεκριμένα γυροσκόπια η πηγή εκπομπής παράγει δύο ακτίνες φωτός, οι οποίες καθοδηγούνται σε δύο αντίθετες αλλά ίσες διαδρομές δημιουργώντας δύο στάσιμα κύματα.

Η αλλαγή της απόστασης που διανύει κάθε κύμα οδηγεί σε αλλαγή της συχνότητας του κύματος δημιουργώντας μια διαφορά φάσης, η οποία με την σειρά της ανιχνεύεται από την ανιχνευτική διάταξη (φωρατής) και μετατρέπεται σε ψηφιακή ένδειξη της γωνιακής ταχύτητας της διάταξης.

Σήμερα υπάρχουν δύο διαφορετικές υλοποιήσεις των οπτικών γυροσκοπίων, πρόκειται για τα Γυροσκόπια με Δακτύλιο Λείζερ (ΓΔΛ) – Ring Laser Gyro (RLG) και τα Γυροσκόπια Οπτικών Ινών (ΓΟΙ) – Fiber Optic Gyro (FOG).



Εικόνα 2.7 : Γυροσκόπιο με δακτύλιο Λείζερ
(Πηγή : Εταιρία Sagem Défense Sécurité)



Εικόνα 2.8 : Γυροσκόπιο οπτικών ινών
(Πηγή : Εταιρία Sagem Défense Sécurité)

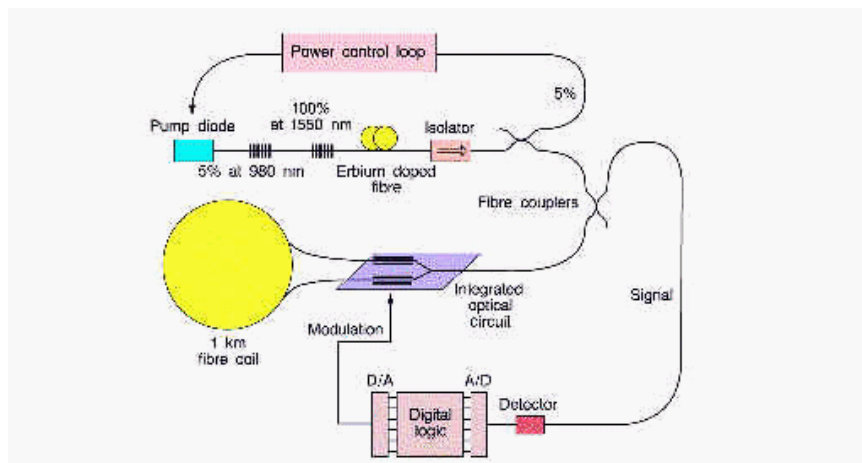
Τα ΓΔΛ αποτελούνται από μια γεννήτρια λέιζερ, η οποία εκπέμπει μια δέσμη φωτός που με την βοήθεια κατάλληλων κατόπτρων διασπάται σε δύο ακτίνες που ακολουθούν αντίθετες πορείες δημιουργώντας κύματα, η σύζευξη των οποίων οδηγεί στην ανίχνευση των ρυθμών γωνιακής περιστροφής της συσκευής.

Στην Εικόνα 2.9, που ακολουθεί, φαίνεται σχηματικά η λειτουργία ενός τέτοιου γυροσκοπίου.

Εικόνα 2.9 : Αρχή λειτουργίας των Γυροσκοπίων με Δακτύλιο Λείζερ
(Πηγή :Εγκυκλοπαίδεια Britannica)

Τα ΓΟΙ αντίθετα δεν χρησιμοποιούν πρίσματα για την κατεύθυνση της δέσμης φωτός αλλά μια σπείρα από οπτικές ίνες, μέσω της οποίας γίνεται η δρομολόγηση των ακτινών φωτός καθώς και η σύζευξη αυτών για την παραγωγή του στάσιμου κύματος η συχνότητα του οποίου προσδιορίζει την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του συστήματος.

Στην Εικόνα 2.10, που ακολουθεί, φαίνεται σχηματικά η λειτουργία ενός τέτοιου γυροσκοπίου.



Εικόνα 2.10 : Αρχή λειτουργίας των Γυροσκοπίων με Οπτικές Ύνες
(Πηγή : European Space Agency)

Τα οπτικά γυροσκόπια προήλθαν από την έρευνα για την εξάλειψη των μειονεκτημάτων των μηχανικών γυροσκοπίων και πράγματι, παρόλο που δεν έχουν φτάσει ακόμα την ακρίβεια των πιο προηγμένων μοντέλων των τελευταίων, έχουν να επιδείξουν σημαντικές βελτιώσεις σε σχέση με αυτά.

Όπως είναι προφανές από τις προηγούμενες εικόνες τα οπτικά γυροσκόπια δεν περιέχουν κινούμενα μέρη με αποτέλεσμα να εκλύουν σαφώς χαμηλότερα επίπεδα θερμότητας κατά την λειτουργία τους, να χρειάζονται λιγότερο χρόνο προθέρμανσης για την έναρξή τους και να έχουν χαμηλότερες ανάγκες τροφοδοσίας σε σχέση με τα μηχανικά γυροσκόπια.

Επίσης η τεχνολογία κατασκευής τους επιτρέπει τον περιορισμό του βάρους και του μεγέθους τους καθώς και την αύξηση της ανθεκτικότητας τους στις επιδράσεις του εξωτερικού περιβάλλοντος, με αποτέλεσμα τα οπτικά γυροσκόπια να αποτελούν την πρώτη λύση στις σύγχρονες υλοποιήσεις των προσκολλημένων αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης και να έχουν κυριαρχήσει στην αγορά των εφαρμογών που απαιτούν μεσαία επίπεδα ακρίβειας .

Όσον αφορά στις δύο διαφορετικές υλοποιήσεις των οπτικών γυροσκοπίων τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των ΓΔΛ εστιάζονται στις υψηλότερες ακρίβειες που επιτυγχάνουν καθώς και στην αυξημένη αντοχή τους έναντι των εξωγενών επιδράσεων που οφείλεται στο γεγονός ότι διατηρούν την οπτική διαδρομή τους εντός αερίου (μίγμα He-Ne).

Τα κύρια μειονεκτήματα των ΓΔΛ αφορούν το υψηλότερο κόστος, απόρροια κυρίως των εξειδικευμένων μηχανημάτων καθώς και των πολύπλοκων διαδικασιών που απαιτούνται για την κατασκευή τους, τις αυξημένες ανάγκες συντήρησης, τα επίπεδα εμπιστοσύνης και αξιοπιστίας [Μέσος Χρόνος Μεταξύ Βλαβών (MXMB)- MTBF (Mean Time Between Failure) περίπου 5000-10000 ώρες] και τέλος την αδυναμία ανίχνευσης των ταχυτήτων περιστροφής σε χαμηλούς ρυθμούς στρέψης, φαινόμενο που οφείλεται στο κλείδωμα των συχνοτήτων των δύο κυμάτων που προκαλεί η κίνηση των χρησιμοποιούμενων πρισμάτων σε αυτούς τους ρυθμούς.

Τα ΓΟΙ από την άλλη μεριά έχουν μικρότερο κόστος αφού έχουν σημαντικά φθηνότερη πρώτη ύλη καθώς και ευκολότερη διαδικασία παραγωγής, παρουσιάζουν μεγαλύτερη αξιοπιστία [Μέσος Χρόνος Μεταξύ Βλαβών (MXMB)- MTBF (Mean Time Between Failure) περίπου 25000-150000 ώρες] και τέλος εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν χρησιμοποιούν κάτοπτρα για τον καθορισμό της οπτικής διαδρομής αποφεύγουν το κλείδωμα των συχνοτήτων και αποδίδουν καλύτερα σε χαμηλούς ρυθμούς περιστροφής.

Το κύριο μειονέκτημα των ΓΟΙ είναι οι χαμηλές επιδόσεις τους, που οφείλονται κατά κύριο λόγο στη μη ωρίμανση της τεχνολογίας κατασκευής τους. Συγκεκριμένα η ευαισθησία και άρα και η ακρίβεια των ΓΟΙ μπορεί να βελτιωθεί με την αύξηση του μήκους της χρησιμοποιούμενης οπτικής ίνας, ενέργεια που όμως οδηγεί σε αύξηση του παραγόμενου θορύβου και σε εξασθένηση του κύματος φάσης.

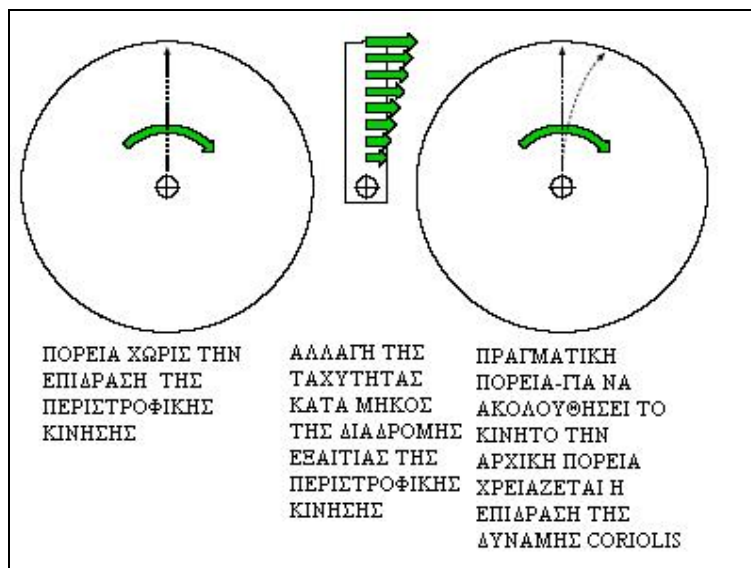
Το αποτέλεσμα είναι να απαιτούνται εξελιγμένοι ανιχνευτές (φορατές) για την κατάλληλη ανίχνευση και επεξεργασία του σήματος, οι οποίοι και απαιτούν αναπτυγμένη τεχνολογία που δεν έχει ακόμα επιτευχθεί.

➤ **Τα μικρο ηλεκτρομηχανικά γυροσκόπια**

Τα Μικρο Ηλεκτρομηχανικά Γυροσκόπια (ΜΗΓ) βασίζονται στην λειτουργία τους στο φαινόμενο της δύναμης Coriolis, η οποία περιγράφει την φαινόμενη επιτάχυνση των σωμάτων που κινούνται με σταθερή ταχύτητα σε ένα σύστημα που περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω . Η δύναμη Coriolis δίνεται από την Εξ. 2-3, που ακολουθεί, και στην οποία ω είναι η γωνιακή ταχύτητα και u η γραμμική ταχύτητα του σώματος.

$$F_c = -2 \cdot m \cdot (\omega \times u) \tag{Εξ. 2-3}$$

Η δύναμη Coriolis όπως αναφέρθηκε εμφανίζεται σε όλα τα περιστρεφόμενα συστήματα και είναι το αίτιο των πλευρικών επιταχύνσεων που ασκούνται στα κινούμενα σώματα .

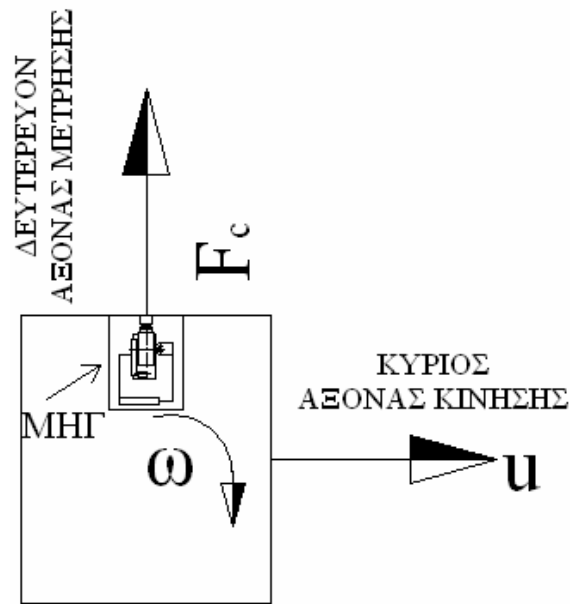


Εικόνα 2.11 : Επίδραση της δύναμης Coriolis

Η Εικόνα 2.11 δείχνει σχηματικά την περιγραφόμενη επίδραση και εξηγεί το αρνητικό πρόσημο της Εξ. 2-3, αφού η δύναμη Coriolis εισάγεται ως αντιστάθμισμα των πλευρικών επιταχύνσεων σε ένα αδρανειακό σύστημα.

Η αρχή λειτουργίας των ΜΗΓ βασίζεται στον προσδιορισμό της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του φορέα μέσω της μέτρηση της επιτάχυνσης που οφείλεται στην δύναμη Coriolis και της χρήσης της Εξ.2-3.

Για να πετύχουν τον παραπάνω προσδιορισμό τα ΜΗΓ χρησιμοποιούν διατάξεις κατασκευασμένες από μικρομηχανισμούς πυριτίου ή χαλαζία τοποθετημένες κάθετα στον κύριο άξονα κίνησης, όπως φαίνεται και στη Εικόνα 2.12.



Εικόνα 2.12 : Αρχή λειτουργίας ΜΗΓ

Οι μικρομηχανισμοί αυτοί είναι κατασκευασμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να ανιχνεύουν τις δονήσεις (vibrations), που είναι αποτέλεσμα των πλευρικών επιταχύνσεων που αναπτύσσονται λόγω της περιστροφικής κίνησης του συστήματος, και να τις μετατρέπουν σε σήμα το οποίο αναλύεται από έναν ψηφιακό ανιχνευτή και μετατρέπεται σε μετρήσεις γωνιακής ταχύτητας περιστροφής.

Το κύριο μειονέκτημα των ΜΗΓ είναι η επιτυγχανόμενη ακρίβεια τους που απέχει πολύ από αυτή των μηχανικών και οπτικών γυροσκοπίων.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των ΜΗΓ είναι το μικρό τους μέγεθος και βάρος, η στιβαρή τους κατασκευή, η απουσία κινούμενων μερών και κατόπτρων, οι χαμηλές ανάγκες τροφοδοσίας, ο σύντομος χρόνος έναρξης λειτουργίας, το χαμηλό τους κόστος σε περίπτωση παραγωγής σε μεγάλους αριθμούς, η υψηλή αξιοπιστία και οι χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης και τέλος η δυνατότητα λειτουργίας σε εχθρικό περιβάλλον.

Πολλά από τα παραπάνω πλεονεκτήματα είναι εμφανή στην Εικόνα 2.13, όπου εμφανίζεται το ΜΗΓ του ερευνητικού προγράμματος του αμερικανικού στρατού.



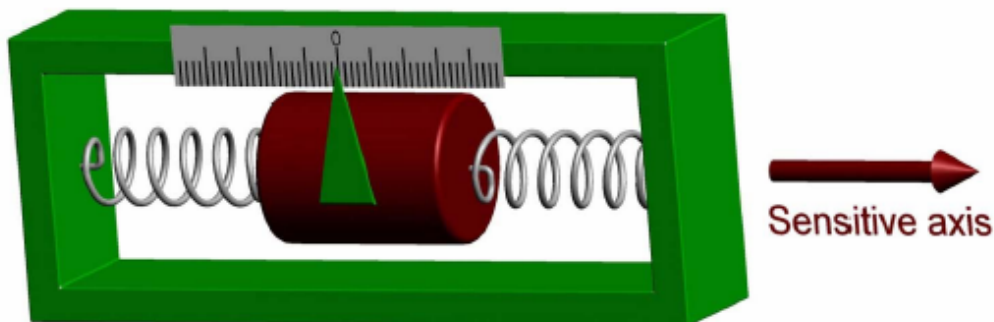
**Εικόνα 2.13 : Μίκρο ηλεκτρομηχανικό γυροσκόπιο
(Πηγή DARPA)**

Το αποτέλεσμα των παραπάνω είναι τα ΜΗΓ να έχουν καταστεί ελκυστικά για μια πλειάδα εφαρμογών πλοήγησης και ναυσιπλοΐας, οι οποίες απαιτούν χαμηλές κυρίως επιδόσεις, και ταυτόχρονα να έχουν κατακτήσει αλλά τμήματα εμπορικών εφαρμογών όπως η χρήση τους σε κινητά τηλέφωνα και ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές για την σταθεροποίηση των αισθητήρων τους.

2.4.2. Είδη επιταχυνσιομέτρων

Τα επιταχυνσιόμετρα είναι ο δεύτερος τύπος αισθητήρων που συνθέτουν τα ΑΣΠ και είναι τα όργανα τα οποία με τις μετρήσεις τους υλοποιούν μια μορφή τυφλής πλοήγησης (στίγμα εξ αναμετρήσεως-πλοήγηση από σε σημείο σε σημείο ευρύτερα γνωστή με τον αγγλικό όρο dead reckoning) και προσδιορίζουν την θέση του φορέα στο αδρανειακό σύστημα που υλοποιείται με την βοήθεια των γυροσκοπίων.

Τα επιταχυνσιόμετρα βασίζουν την αρχή λειτουργίας τους (Εικόνα 2.14) στη χρήση μια δόκιμης μάζας (proof mass), η οποία βρίσκεται στερεωμένη στο εσωτερικό τους με ένα σύστημα ελατηρίων.



**Εικόνα 2.14 : Αρχή λειτουργίας επιταχυνσιομέτρων
(Πηγή : Gade, 2004)**

Η κίνηση του φορέα προκαλεί την ανάπτυξη δυνάμεων που μετατοπίζουν την μάζα, είτε προς την θετική, είτε προς την αρνητική κατεύθυνση του συστήματος, και συσπειρώνουν ή επιμηκύνουν ανάλογα τα ελατήρια .

Η συσπείρωση ή η επιμήκυνση των ελατήριων από την θέση ισορροπίας είναι σύμφωνα με τον νόμο του Hook (Εξ. 2-4) ανάλογη με την αναπτυσσόμενη δύναμη με αποτέλεσμα να προσδιορίζεται το μέγεθος της ασκούμενης δύναμης.

$$F_k = -k \cdot x \quad (\text{Εξ. 2-4})$$

Από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα (Εξ. 2-1) και αφού είναι γνωστή η δόκιμη μάζα προσδιορίζεται η επιτάχυνση στην οποία υπόκειται η μάζα και κατ' επέκταση το κινούμενο σώμα.

Η επιτάχυνση αυτή όμως δεν είναι αυτή που οφείλεται στην κίνηση του σώματος, αλλά εμπεριέχει και άλλες επιδράσεις με κυριότερη την επιτάχυνση της βαρύτητας g , που οφείλεται στην έλξη της γης. Αν η επιτάχυνση της βαρύτητας g είναι γνωστή στη συγκεκριμένη περιοχή, μέσω κάποιου μοντέλου, τότε μπορεί να προσδιοριστεί η πραγματική επιτάχυνση του συστήματος εξαιτίας της κίνησης του με βάση την Εξ. 2-5 που ακολουθεί και στην οποία ο όρος f είναι η δύναμη ανά μονάδα μάζας (specific force).

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} + \vec{g} = \vec{f} + \vec{g} \quad (\text{Εξ. 2-5})$$

Τελικά η διπλή ορισμένη ολοκλήρωση της προσδιοριζόμενης επιτάχυνσης δίνει την διανυθείσα απόσταση και προσδιορίζει την τροχιά της κίνησης του φορέα.

Τα επιταχυνσιόμετρα μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες στα επιταχυνσιόμετρα ανοικτού κύκλου λειτουργίας (open loop) και στα επιταχυνσιόμετρα κλειστού κύκλου λειτουργίας (closed loop). Στα μεν πρώτα γίνεται προσδιορισμός της δύναμης που μετατοπίζει την μάζα από την θέση ισορροπίας ενώ στα δεύτερα της δύναμης που απαιτείται για την διατήρηση της δόκιμης μάζας στην θέση ισορροπίας.

Τα επιταχυνσιόμετρα κλειστού κύκλου λειτουργίας χρησιμοποιούν ένα σύστημα ανατροφοδότησης (feedback loop), το οποίο εκτός από την διατήρηση της δόκιμης μάζας στην θέση της υπολογίζει και εξομαλύνει τα σφάλματα του συστήματος αλλά και της διαδικασίας υπολογισμού με αποτέλεσμα να επιτυγχάνει πιο ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα.

Για τον παραπάνω λόγο τα επιταχυνσιόμετρα κλειστού κύκλου λειτουργίας είναι σχετικά πιο ακριβή από τα αντίστοιχα ανοικτού κύκλου λειτουργίας και χρησιμοποιούνται συνήθως σε συστήματα υψηλών απαιτήσεων.

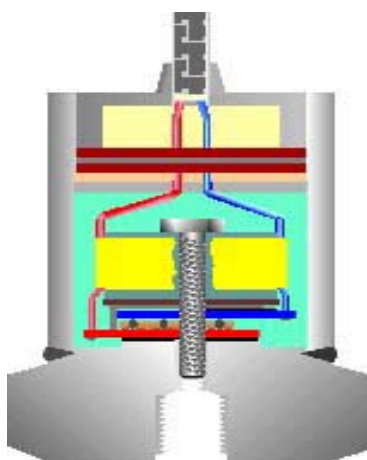
Το σύνολο των επιταχυνσιόμετρων χρησιμοποιούν την δοκιμή μάζα και την παραπάνω περιγραφείσα αρχή λειτουργίας για τον προσδιορισμό των επιταχύνσεων, εκείνο όμως που διαφοροποιεί τις διάφορες υλοποιήσεις και προσδίδει τα ιδιαίτερα

χαρακτηριστικά σε αυτές είναι ο τρόπος με τον οποίο μετράται η μετατόπιση της δόκιμης μάζας και μετατρέπεται σε ένδειξη επιτάχυνσης.

Με βάση την παραπάνω διαφοροποίηση τα επιταχυνσιόμετρα μπορούν να καταταγούν στις παρακάτω κατηγορίες :

➤ Τα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα

Τα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα κάνουν χρήση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Έτσι στα συγκεκριμένα επιταχυνσιόμετρα υπάρχει πάνω στην δόκιμη μάζα προσκολλημένο ένα πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, συνήθως από χαλαζία ή από κεραμικό υλικό, το οποίο παράγει ένα σήμα ανάλογο της δύναμης που υφίσταται η δόκιμη μάζα λόγω των επιταχύνσεων του φορέα.



Εικόνα 2.15 : Πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο

(Πηγή : www.sensorland.com)

Το σήμα που παράγεται από το διηλεκτρικό υλικό ανιχνεύεται και μετατρέπεται σε ψηφιακή ένδειξη της επιτάχυνσης. Η επιλογή του διηλεκτρικού υλικού έχει πολύ μεγάλη σημασία για την αξιοπιστία του αισθητήρα, αφού είναι το μέσο που φιλτράρει τις επιδράσεις των εξωτερικών παραγόντων και διαφοροποιεί τις πραγματικές παραμέτρους που προκαλούν την επιτάχυνση.

Τα επιταχυνσιόμετρα αυτού του τύπου έχουν χαμηλή ευαισθησία και αντοχή στις εξωγενείς επιδράσεις του περιβάλλοντος εντούτοις όμως παρουσιάζουν μεγάλο εύρος μέτρησης, που μπορεί να φτάσει και τα 1000 g αναλόγως του χρησιμοποιούμενου υλικού, καθώς και υψηλή συχνότητα λειτουργίας (πάνω από 10 kHz)

➤ Τα επιταχυνσιόμετρα με χρήση ηλεκτρικών κυκλωμάτων

Τα επιταχυνσιόμετρα αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούν ηλεκτρικά κυκλώματα για τη μέτρηση της μετατόπισης της δόκιμης μάζας και την μετατροπή της σε ένδειξη επιτάχυνσης.

Τα κυριότερα ηλεκτρικά κυκλώματα είναι τα ποτενσιόμετρα, οι γέφυρες Wheatstone και οι συνδυασμοί αντιστάσεων και χρησιμοποιούνται ώστε να μετατρέψουν την

μηχανική μικρομετακίνηση σε ηλεκτρικό ρεύμα, η συχνότητα του οποίου στην συνέχεια αναλύεται παρέχοντας τις απαιτούμενες μετρήσεις επιτάχυνσης.

➤ **Τα επιταχυνσιόμετρα με πυκνωτές**

Τα επιταχυνσιόμετρα αυτής της κατηγορίας διαφέρουν από αυτά της προηγούμενης στο γεγονός ότι αντί για ηλεκτρικά κυκλώματα χρησιμοποιούν κυκλώματα πυκνωτών και πηνίων ως μετρητικές διατάξεις.

Οι μετακινήσεις της δόκιμης μάζας προκαλούν ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο κύκλωμα αλλάζοντας την συχνότητα λειτουργίας του, η οποία δεδομένων των συντελεστών L και C των πηνίων και των πυκνωτών αντίστοιχα μπορεί να προσδιοριστεί και να οδηγήσει στον προσδιορισμό της επιτάχυνσης.

Τόσο τα επιταχυνσιόμετρα που χρησιμοποιούν πυκνωτές όσο και αυτά της προηγούμενης κατηγορίας που κάνουν χρήση ηλεκτρικών κυκλωμάτων είναι πολύ ευαίσθητα στις μεταβολές του ηλεκτρικού ρεύματος και απαιτούν προσεκτικές συνθήκες χειρισμού εξαιτίας των μικροκυκλωμάτων και των συνδέσεων που διαθέτουν.

Τέλος η ακρίβεια τους είναι αντίστοιχη του κόστους τους και ποικίλει ανάλογα με την συχνότητα του παραγόμενου ρεύματος με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές, που χαρακτηρίζονται από μεγάλης χρονικής διάρκειας γεγονότα και χαμηλές συχνότητες με χαμηλά επίπεδα θορύβου όπως οι προσομοιώσεις κίνησης, οι δοκιμές αυτοκινήτων και ο έλεγχος αερόσακων.

➤ **Τα επιταχυνσιόμετρα με σερβομηχανισμούς**

Τα συγκεκριμένα επιταχυνσιόμετρα είναι κλειστού τύπου λειτουργίας και βασίζονται σε ένα σύστημα σερβομηχανισμών. Η μετατόπιση της δοκιμής μάζας εντοπίζεται από ένα αισθητήρα, ο οποίος την μετατρέπει σε σήμα.



Εικόνα 2.16 : Επιταχυνσιόμετρο με σερβομηχανισμούς

(Πηγή : Εταιρία Sagem Défense Sécurité)

Το παραγόμενο σήμα περνάει από ένα κύκλωμα ενισχυτών και φίλτρων, το οποίο το αναλύει και αφαιρεί τον θόρυβο διαμορφώνοντας με αυτό τον τρόπο ένα σήμα διόρθωσης. Το σήμα αυτό επανεισάγεται στο σύστημα και ανατροφοδοτεί τους σερβομηχανισμούς, ώστε οι τελευταίοι να πραγματοποιήσουν τις αναγκαίες

κινήσεις που θα διατηρήσουν την δόκιμη μάζα στην θέση ισορροπίας, ενώ ταυτόχρονα παράγει και μια ένδειξη του αποτελέσματος.

Τα επιταχυνσιόμετρα με σερβομηχανισμούς αποτελούν την κορυφή των συσκευών μέτρησης επιτάχυνσης αφού παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ακρίβεια, αυξημένη ευαισθησία και μεγάλο εύρος μετρήσεων.

Τα πλεονεκτήματα αυτά έχουν όμως το τίμημα του υψηλού κόστους απόκτησης και συντήρησης κάνοντας τα συγκεκριμένα επιταχυνσιόμετρα κατάλληλα μόνο για εφαρμογές που απαιτούν υψηλές επιδόσεις.

➤ Τα επιταχυνσιόμετρα με ανίχνευση δονήσεων

Στα επιταχυνσιόμετρα με ανίχνευση δονήσεων η μετατόπιση της δόκιμης μάζας διεγείρει ένα ηλεκτρικό κύκλωμα που βρίσκεται μέσα σε ένα μόνιμο μαγνητικό πεδίο. Το κυκλοφορούν ρεύμα προκαλεί δονήσεις του ηλεκτρικού κυκλώματος η συχνότητα των οποίων είναι ανάλογη των αναπτυσσομένων επιταχύνσεων και ανιχνεύεται με χρήση ενός δευτερεύοντος ηλεκτρικού κυκλώματος που την μετατρέπει σε ψηφιακή ένδειξη επιτάχυνσης.



Εικόνα 2.17 : Επιταχυνσιόμετρο με ανίχνευση δονήσεων

(Πηγή : Εταιρία Sagem Défense Sécurité)

Τα συγκεκριμένα επιταχυνσιόμετρα έχουν μεγάλη ακρίβεια, η οποία όμως επηρεάζεται από τις απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές. Επιπλέον λόγω των εξειδικευμένων εξαρτημάτων που τα απαρτίζουν παρουσιάζουν σχετικά υψηλό κόστος.

Η παραπάνω κατηγοριοποίηση των επιταχυνσιομέτρων καθιστά προφανές ότι στην σύγχρονη αγορά υπάρχουν διαθέσιμοι αρκετοί τύποι επιταχυνσιομέτρων, με διαφορετικά χαρακτηριστικά, επιδόσεις και κόστος ο καθένας, που μπορούν να αποτελέσουν κατάλληλη επιλογή για μια πλειάδα εφαρμογών χωρίς όμως να μπορεί κάποιος από αυτούς να θεωρηθεί κατάλληλος για όλες.

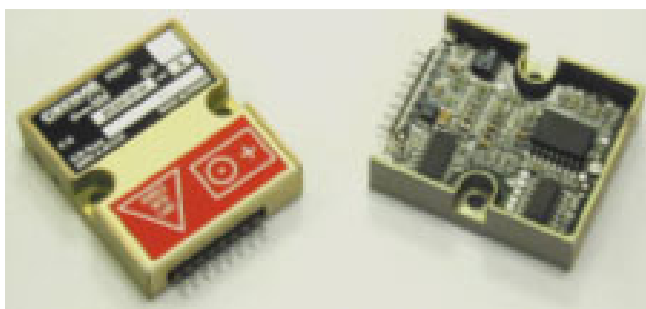
Έτσι υπάρχουν επιταχυνσιόμετρα με μηχανικά μέρη και ελατήρια καθώς και με διαδικασίες ανατροφοδότησης, που προορίζονται για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας έχοντας όμως και υψηλό κόστος .

Από την άλλη υπάρχουν επιταχυνσιόμετρα που χρησιμοποιούν μικροκυκλώματα και μηχανισμούς ακριβείας (solid state accelerometers) και τα οποία μετρούν την

συχνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγουν οι δονήσεις που προκαλούνται από τις επιταχύνσεις του φορέα.

Το μικρό βάρος, η στιβαρή κατασκευή, η αξιοπιστία και το σχετικά μικρό κόστος των συσκευών αυτών τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές με ανάλογες απαιτήσεις.

Τέλος οι σύγχρονες τάσεις στην κατασκευή των επιταχυνσιόμετρων έχουν οδηγήσει όπως και στην περίπτωση των γυροσκοπίων στα Μίκρο Ηλεκτρομηχανικά Επιταχυνσιόμετρα (ΜΗΕ), τα οποία χρησιμοποιούν υλικά όπως ο χαλαζίας ή το πυρίτιο στα εξαρτήματά τους, ενώ διατηρούν τις ίδιες αρχές λειτουργίας με τα υπόλοιπα επιταχυνσιόμετρα.



Εικόνα 2.18 : Μίκρο Ηλεκτρομηχανικό Επιταχυνσιόμετρο

(Πηγή : Εταιρία Sagem Défense Sécurité)

Τα πρωτοποριακά υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των ΜΗΕ τους προσφέρουν ανάλογα πλεονεκτήματα με τα ΜΗΓ, όπως το μικρό μέγεθος και βάρος, η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, ο σύντομος χρόνος έναρξης και το σχετικά χαμηλό κόστος παραγωγής και συντήρησης και ανοίγουν τον δρόμο για την καθιέρωση τους στην παγκόσμια αγορά.

2.5. Συστήματα Αναφοράς και Μετασχηματισμοί

Όπως είναι φανερό από τα προαναφερόμενα η πλοήγηση με την χρήση αδρανειακών συστημάτων βασίζεται στην καθιέρωση και χρήση ενός αριθμού συστημάτων αναφοράς-συντεταγμένων.

Σκοπός της συγκεκριμένης ενότητας είναι περιγράψει τα χαρακτηριστικά των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων συστημάτων αναφοράς καθώς και τις σχέσεις που τα συνδέουν.

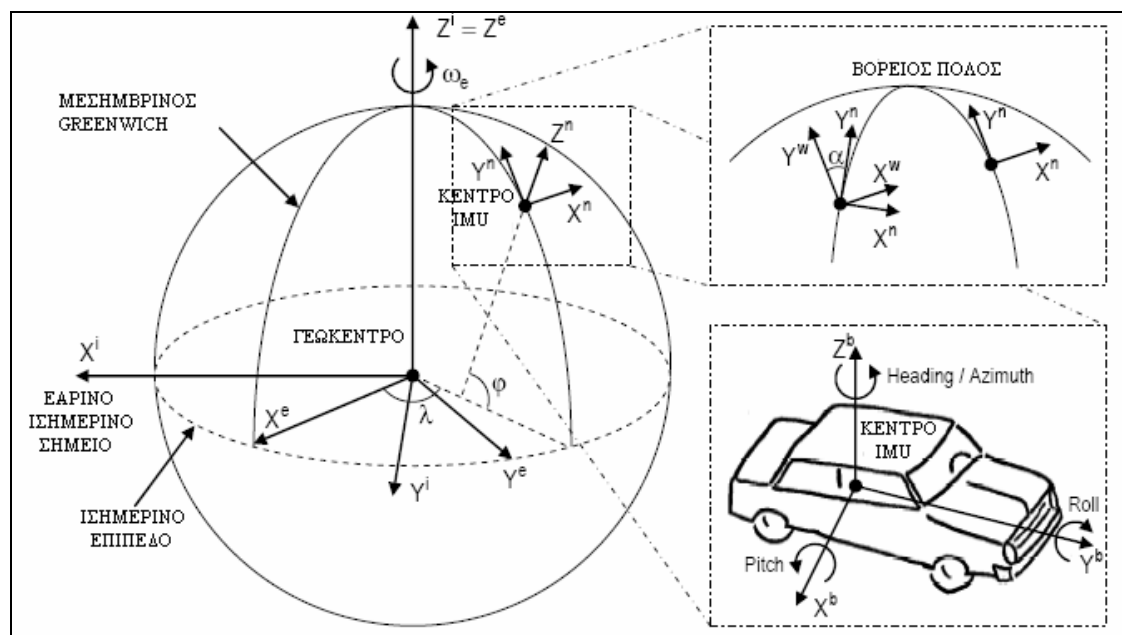
2.5.1. Γενικά στοιχεία

Κύριος στόχος της πλοήγησης είναι ο καθορισμός της πορείας ενός κινητού μέσω του προσδιορισμού της θέσης του στον χώρο σε διάφορες χρονικές στιγμές. Ο προσδιορισμός αυτός όμως στο χώρο προϋποθέτει την ύπαρξη ενός τρισδιάστατου συστήματος αναφοράς-συντεταγμένων.

Το σύστημα αναφοράς έρχεται να δώσει απάντηση στο βασικό ερώτημα «ως προς τι;» που τίθεται κάθε φορά που επιχειρείται να προσδιοριστεί η θέση ενός σημείου με την εκτέλεση μετρήσεων παντός είδους (πχ. επίγειες, δορυφορικές κτλ.) και μπορεί να πάρει διαφορετικές μορφές και υλοποιήσεις που εξαρτώνται τόσο από το είδος των μετρήσεων όσο και από τον επιδιωκόμενο σκοπό.

Στη συνέχεια αναφέρονται μερικοί ορισμοί που κρίνονται απαραίτητοι για την καλύτερη κατανόηση των όσων θα αναφερθούν στη συνέχεια. Έτσι (Κορακίτης, 2002)

- **Πλαίσιο συντεταγμένων (Coordinate frame)** είναι ένα σύνολο (ορθογώνιων) αξόνων συντεταγμένων (ή άλλης γεωμετρικής κατασκευής) ως προς τους οποίους προσδιορίζεται η θέση ενός σημείου.
- **Σύστημα συντεταγμένων (Coordinate system)** είναι μια μέθοδος έκφρασης της θέσης ενός σημείου ως προς ένα καθορισμένο πλαίσιο συντεταγμένων. Η θέση μπορεί να καθοριστεί με ορθογώνιες ή πολικές συντεταγμένες.
- **Σύστημα αναφοράς (Reference system)** είναι η πλήρης προδιαγραφή για το πώς πρόκειται να διαμορφωθεί ένα σύστημα συντεταγμένων. Καθορίζει την προέλευση και τα θεμελιώδη επίπεδα (ή τους άξονες) του συστήματος συντεταγμένων και περιλαμβάνει, επίσης, το σύνολο των διαδικασιών, αλγορίθμων και σταθερών που απαιτούνται για τον μετασχηματισμό μεταξύ των παρατηρήσεων και των μοντέλων που αφορούν το εν λόγω σύστημα.
- **Πλαίσιο αναφοράς (Reference frame)** είναι ένα σύνολο σημείων αναφοράς (fiducial points) και των συντεταγμένων τους, που χρησιμεύει στην πρακτική υλοποίηση ενός συγκεκριμένου συστήματος αναφοράς. Οι συντεταγμένες άλλων σημείων μπορούν να προσδιοριστούν κάνοντας διαφορικές μετρήσεις των θέσεων τους ως προς τα σημεία αναφοράς. Ο όρος «πλαίσιο αναφοράς» συχνά χρησιμοποιείται ως συνώνυμος του πλαισίου συντεταγμένων που καθορίζει.



Εικόνα 2.19 : Τα χρησιμοποιούμενα συστήματα αναφοράς

Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα συστήματα αναφοράς στην αδρανειακή πλοήγηση είναι τα κάτωθι :

- Το αδρανειακό σύστημα αναφοράς (inertial frame, i-frame)
- Το γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς (earth centered-earth fixed frame, e-frame)
- Το τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς (local level frame, l-frame)
- Το σύστημα αναφοράς της γωνίας α (alpha-wander frame, w-frame)
- Το σύστημα αναφοράς του κινούμενου σώματος (body frame, b-frame)
- Το σύστημα αναφοράς των εξισώσεων πλοήγησης (computational frame, c-frame)

Τα παραπάνω συστήματα απεικονίζονται στην Εικόνα 2.19 και παρουσιάζονται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

2.5.2. Το αδρανειακό σύστημα αναφοράς (inertial frame, i - frame)

Το αδρανειακό σύστημα αναφοράς είναι ένα σύστημα στο οποίο ισχύουν οι νόμοι της κίνησης του Νεύτωνα και επομένως πρόκειται για ένα σύστημα το οποίο ούτε επιταχύνεται ούτε περιστρέφεται σε σχέση με το κέντρο του και τους άξονες που το ορίζουν.

Το αδρανειακό σύστημα είναι απαραίτητο στη μελέτη των αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης αφού όπως έχει ήδη αναφερθεί οι βασικές αρχές λειτουργίας των τελευταίων βρίσκουν εφαρμογή μόνο στα πλαίσια του πρώτου.

Ένα αδρανειακό σύστημα μπορεί να οριστεί μόνο αναφερόμενο στους απλανείς αστέρες, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις θέσεις τους σε μια συγκεκριμένη εποχή αναφοράς, και θεωρώντας ως κέντρο ουσιαστικά το κέντρο του σύμπαντος.

Αυτό γίνεται διότι μόνο η θεώρηση αυτού του μοντέλου του μακρόκοσμου μπορεί να θεωρηθεί ως μια αρκετά καλή προσέγγιση του θεωρητικού μοντέλου, το οποίο χρησιμοποίησε ο Νεύτωνας για να αναπτύξει τις αρχές της σύγχρονης μηχανικής.

Η παραπάνω επιλογή του αδρανειακού συστήματος είναι φανερό ότι προκαλεί σημαντικά προβλήματα στην προσπάθεια να περιγραφεί και να προσδιοριστεί η κίνηση ενός σώματος στην επιφάνεια της γης (αυτοκίνητο, πλοίο) ή πλησίον αυτής (αεροπλάνο, πύραυλοι, διαστημόπλοια), που αποτελεί και τον κύριο σκοπό των αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης, με αποτέλεσμα να απαιτείται η επιλογή ενός αδρανειακού συστήματος προσαρμοσμένο στα γήινα δεδομένα.

Ένα τέτοιο σύστημα προκύπτει αν κάνουμε την υπόθεση ότι το κέντρο του συστήματος είναι το κέντρο μάζας της γης (γεώκεντρο), όποτε σε αυτή την περίπτωση μιλάμε για ένα σχεδόν αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Τα στοιχεία ενός τέτοιου συστήματος είναι :

- Κέντρο το κέντρο μάζας της γης
- Άξονα X^i που περνάει από το εαρινό ισημερινό σημείο γ , που είναι το σημείο τομής της Εκλειπτικής με τον ουράνιο ισημερινό.
- Άξονα Y^i που συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα
- Άξονα Z^i που είναι παράλληλος με τον μέσο άξονα περιστροφής της γης

2.5.3. Το γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς (earth centered-earth fixed frame, e - frame)

Τα στοιχεία του γεωκεντρικού συστήματος αναφοράς είναι :

- Κέντρο το κέντρο μάζας της γης
- Άξονα X^e που περνάει από το μεσημβρινό του Greenwich
- Άξονα Y^e που συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα
- Άξονα Z^e που είναι παράλληλος με τον μέσο άξονα περιστροφής της γης

Όπως είναι προφανές από τα παραπάνω αλλά και από την Εικόνα 2.19 το αδρανειακό σύστημα αναφοράς και το γεωκεντρικό διαφέρουν μεταξύ μόνο ως προς μια σταθερή γωνιακή περιστροφή που είναι ίση με τη μέση γωνιακή περιστροφή της γης ω_e ($\omega_e = 7.292115 \cdot 10^{-5}$ rad/sec ή 15.041067 deg/hr)

2.5.4. Το τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς (local level frame, l - frame ή n - frame)

Τα στοιχεία του τοποκεντρικού συστήματος αναφοράς είναι :

- Κέντρο το ιδανικό κέντρο του αδρανειακού συστήματος πλοήγησης, όπως περιγράφεται στην συνέχεια
- Άξονα X^n που συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα (προσανατολισμένο προς την Ανατολή)
- Άξονα Y^n που κατευθύνεται προς τον γεωδαιτικό Βορρά
- Άξονα Z^n που είναι παράλληλος με την κάθετη στο ελλειψοειδές και έχει κατεύθυνση είτε προς τα έξω είτε προς το κέντρο του ελλειψοειδούς

Ανάλογα με την κατεύθυνση του άξονα Z^n , προς τα επάνω ή προς τα κάτω, σχηματίζονται αντίστοιχα δύο διαφορετικά συστήματα αναφοράς το ABE (Ανατολή–Βορράς–Επάνω) ευρύτερα γνωστό και ως ENU (East-North-Up) και το BAK (Βορράς–Ανατολή–Κάτω) ευρύτερα γνωστό και ως NED (North-East-Down).

Κάθε μία από τις παραπάνω δύο υλοποιήσεις έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και χρησιμοποιείται σε διαφορετικές εφαρμογές. Το ABE έχει το πλεονέκτημα ότι το υψόμετρο αυξάνεται με την κίνηση προς τα πάνω, ακολουθώντας την φυσική σύμβαση, ενώ το BAK πλεονεκτεί στο γεγονός ότι οι δεξιές περιστροφές ως προς τον άξονα Z^n έχουν θετικό πρόσημο. Τέλος αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι ο προσανατολισμός του τοποκεντρικού συστήματος αλλάζει από σημείο σε σημείο.

2.5.5. Το σύστημα αναφοράς της γωνίας α (alpha-wander frame, w - frame)

Τα στοιχεία του συστήματος αναφοράς της γωνίας α είναι :

- Κέντρο το ιδανικό κέντρο του αδρανειακού συστήματος πλοήγησης, όπως περιγράφεται στην συνέχεια

- Άξονα X^w που περιστρέφεται στο τοπικό οριζόντιο επίπεδο κατά την γωνία α και κατεύθυνση από Ανατολή προς Βορρά
- Άξονα Y^w που συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα (ή κατά ανάλογο τρόπο περιστρέφεται στο τοπικό οριζόντιο επίπεδο κατά την γωνία α και κατεύθυνση από Βορρά προς Δύση, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.19)
- Άξονα Z^w που είναι παράλληλος με την κάθετη στο ελλειψοειδές και έχει κατεύθυνση είτε προς τα έξω

Είναι φανερό από τα παραπάνω στοιχεία ότι το συγκεκριμένο σύστημα αναφοράς αποτελεί και αυτό ένα σύστημα αναφοράς σε τοπικό επίπεδο με διαφορετικό προσανατολισμό όμως από το προηγούμενο τοποκεντρικό σύστημα.

Η εισαγωγή του ήταν αποτέλεσμα των προβλημάτων που εμφάνιζε η χρήση του τοποκεντρικού συστήματος σε περιοχές μεγάλου γεωγραφικού πλάτους ϕ όπως είναι αυτές κοντά στους πόλους της γης.

Στις περιοχές αυτές η απότομη σύγκλιση των μεσημβρινών προκαλεί υψηλές περιστροφές περί τον άξονα Z^n στην προσπάθεια του άξονα Y^n να διατηρήσει την κατεύθυνση του προς τον γεωδαιτικό Βορρά κατά την εκτέλεση κινήσεων με κατεύθυνση Ανατολή-Δύση ή το αντίστροφο.

Η λύση δόθηκε με την εισαγωγή του συστήματος αναφοράς της γωνίας α , στο οποίο ο άξονας Y^w δεν παραμένει διαρκώς προσανατολισμένος στο γεωδαιτικό Βορρά όπως ο Y^n αλλά σχηματίζει γωνία α με τον τελευταίο. Η γωνία αυτή οποία εξαρτάται από το γεωγραφικό μήκος και πλάτος και ο ρυθμός μεταβολής της δίνεται από την Εξ. 2-6.

$$\dot{\alpha} = -\dot{\lambda} \sin \phi \quad (\text{Εξ. 2-6})$$

Το σύστημα αναφοράς της γωνίας α έχει καθιερωθεί και χρησιμοποιείται ευρύτατα στους υπολογισμούς που έχουν να κάνουν με την χρήση ΑΣΠ αφού πάρα πολλές εφαρμογές (πλοήγηση αεροσκαφών, υποβρυχίων κτλ) που κάνουν χρήση των τελευταίων έχουν αρκετές φορές πεδίο εφαρμογής περιοχές μεγάλου γεωγραφικού μήκους.

2.5.6. Το σύστημα αναφοράς του κινούμενου σώματος (body frame, b-frame)

Τα στοιχεία του συστήματος αναφοράς του κινούμενου σώματος είναι :

- Κέντρο το ιδανικό κέντρο του αδρανειακού συστήματος πλοήγησης, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι το σημείο τομής των αξόνων μέτρησης των επιταχυνσιόμετρων και των γυροσκοπίων της Αδρανειακής Μονάδας Μέτρησης AMM - IMU (Inertial Measurement Unit) διορθωμένο από τα σφάλματα μη ορθοκανονικότητας αυτών
- Άξονα X^b με διεύθυνση κάθετη στην διεύθυνση της κίνησης του σώματος και φορά προς τα δεξιά
- Άξονα Y^b με διεύθυνση την διεύθυνση της κίνησης του σώματος

- Άξονα Z^b που συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα κατευθυνόμενος προς τα επάνω

Το παραπάνω σύστημα είναι το σύστημα που στα σύγχρονα ΑΣΠ, της μορφής των προσκολλημένων συστημάτων (strapdown INS), πραγματοποιούνται οι μετρήσεις των αδρανειακών αισθητήρων (επιταχυνσιόμετρα και γυροσκόπια) ως προς το αδρανειακό σύστημα αναφοράς και οι άξονες του είναι ευρύτερα γνωστοί ως άξονες Yaw (Z^b), Pitch (X^b) και Roll (Y^b).

Ως προς τους παραπάνω άξονες μετρούνται οι αντίστοιχες γωνίες Heading (Κατεύθυνση) ή Azimuth (Αζιμούθιο), Pitch (Κλίση) και Roll (Παρεκτροπή) που είναι οι γωνίες του συστήματος κινούμενου σώματος ως προς το τοποκεντρικό σύστημα και καθορίζουν την κινηματική συμπεριφορά του σώματος γνωστή με τον αγγλικό όρο Attitude.

2.5.7. Το σύστημα αναφοράς των εξισώσεων πλοήγησης (computational frame, c - frame)

Το σύστημα αναφοράς των εξισώσεων πλοήγησης δεν είναι ένα νέο διαφορετικό σύστημα αναφοράς, αλλά το σύστημα αναφοράς στο οποίο επιλέγεται σε κάθε περίπτωση να γίνει η ανάπτυξη του μηχανισμού των εξισώσεων πλοήγησης.

Ο μηχανισμός εξισώσεων περιλαμβάνει εκτός από τις εξισώσεις πλοήγησης το μοντέλο αφομοίωσης σφαλμάτων, τον προσδιορισμό της κινηματικής συμπεριφοράς του κινητού και τέλος τις σχέσεις μετασχηματισμού των μετρήσεων των οργάνων και του προσδιορισμού της ταχύτητας και της θέσης.

Σαν τέτοιο σύστημα μπορεί να επιλέγει οποιοδήποτε από τα παραπάνω αναφερόμενα συστήματα, εκτός από το σύστημα αναφοράς του κινούμενου σώματος. Η επιλογή εξαρτάται από παράγοντες όπως η υλοποίηση του ΑΣΠ, που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί (σταθερής πλατφόρμας ή προσκολλημένα), το είδος της εφαρμογής, η συνεργασία ή μη με άλλα συστήματα (ΔΣΠ, μαγνητόμετρα, κλισίμετρα, οδόμετρα κτλ.) καθώς και ο βαθμός αυτής κα.

2.5.8. Μετασχηματισμοί και σχέσεις μεταξύ των συστημάτων αναφοράς

Οι σχέσεις μετασχηματισμού, οι οποίες συνδέουν τα προηγούμενα συστήματα αναφοράς, είναι σημαντικό στοιχείο για την αδρανειακή πλοήγηση, αφού πολλές φορές κατά την ανάπτυξη του μηχανισμού των εξισώσεων πλοήγησης απαιτείται να συνδεθούν μεταξύ τους δεδομένα και στοιχεία που είναι εκφρασμένα σε διαφορετικά συστήματα αναφοράς.

Οι σχέσεις μεταξύ των συστημάτων εκφράζονται με την βοήθεια της άλγεβρας πινάκων και συγκεκριμένα με την χρήση δύο πινάκων, του πίνακα στροφής και του διαγώνιου συμμετρικού πίνακα περιστροφής (skew symmetric).

Ο πρώτος πίνακας χρησιμοποιείται στην πλειονότητα των μετασχηματισμών και συνδέει μεταξύ τους συστήματα που θεωρείται ότι παραμένουν ακίνητα. Στην

συνεχία ένας τέτοιος πίνακας θα συμβολίζεται ως C_{S1}^{S2} , όπου S1 θα είναι το σύστημα αναφοράς στο οποίο βρίσκονται τα δεδομένα και S2 το σύστημα αναφοράς στο οποίο θα μετασχηματιστούν.

Ο δεύτερος πίνακας χρησιμοποιείται για να συνδέσει δεδομένα μεταξύ συστημάτων αναφοράς που περιστρέφονται μεταξύ τους. Έτσι αν η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής μεταξύ των δύο συστημάτων είναι για παράδειγμα $\omega_{en}^e = (p, q, r)^T$, σχέση που αναπαριστά την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του τοποκεντρικού συστήματος ως προς το γεωκεντρικό εκφρασμένη στο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς, τότε ο διαγώνιος πίνακας περιστροφής είναι :

$$\Omega_{en}^e = \begin{bmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{Εξ. 2-7})$$

και ισχύει η Εξ. 2-8 :

$$\omega_{en}^e \otimes a = \Omega_{en}^e \cdot a = \begin{bmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \quad (\text{Εξ. 2-8})$$

όπου $a = (a_x, a_y, a_z)$ διάνυσμα εκφρασμένο στο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω ο διαγώνιος συμμετρικός πίνακας περιστροφής μετατρέπει το εξωτερικό γινόμενο δύο διανυσμάτων σε μορφή πινάκων, κάτι που είναι πολύ χρήσιμο στην ανάπτυξη του μηχανισμού των εξισώσεων πλοήγησης.

➤ Σχέση αδρανειακού και γεωκεντρικού συστήματος αναφοράς

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η διαφορά των δύο συστημάτων είναι η γωνιακή περιστροφή της γης ως προς το αδρανειακό σύστημα αναφοράς, η οποία είναι :

$$\omega_{ie}^e = (0, 0, \omega_e)^T \quad (\text{Εξ. 2-9})$$

όπου ω_e η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της γης. Έτσι ο πίνακας μετασχηματισμού μεταξύ των δύο συστημάτων για κάθε χρονική στιγμή είναι :

$$C_e^i = \begin{bmatrix} \cos \omega_e \cdot t & -\sin \omega_e \cdot t & 0 \\ -\sin \omega_e \cdot t & \cos \omega_e \cdot t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Εξ. 2-10})$$

➤ Σχέση γεωκεντρικού και τοπικού συστήματος αναφοράς

Ο πίνακας μετασχηματισμού μεταξύ των δύο συστημάτων είναι :

$$C_f^e = \begin{bmatrix} -\sin \lambda & -\sin \phi \cdot \cos \lambda & \cos \phi \cdot \cos \lambda \\ \cos \lambda & -\sin \phi \cdot \sin \lambda & \cos \phi \cdot \sin \lambda \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \end{bmatrix} \quad (\text{Εξ. 2-11})$$

όπου ϕ , λ είναι οι γεωγραφικές συντεταγμένες του σημείου και το τοποκεντρικό σύστημα αναφέρεται στο σύστημα ABΠ (ENU) .

➤ **Σχέση τοπικού συστήματος αναφοράς και συστήματος αναφοράς γωνίας α**

Ο πίνακας μετασχηματισμού μεταξύ των δύο συστημάτων είναι :

$$C_w^l = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Εξ. 2-12})$$

όπου α είναι η γωνία περιστροφής περί τον γεωδαιτικό βορρά..

➤ **Σχέση τοπικού συστήματος αναφοράς και συστήματος αναφοράς του κινούμενου σώματος**

Ο πίνακας μετασχηματισμού μεταξύ των δύο συστημάτων είναι :

$$C_b^l = \begin{bmatrix} \cos \psi \cdot \cos \phi - \sin \psi \cdot \sin \theta \cdot \sin \phi & \sin \psi \cdot \cos \theta & \cos \psi \cdot \sin \phi + \sin \psi \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi \\ \sin \psi \cdot \cos \phi + \cos \psi \cdot \sin \theta \cdot \sin \phi & \cos \psi \cdot \cos \theta & \sin \psi \cdot \sin \phi - \cos \psi \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi \\ -\cos \theta \cdot \sin \phi & \sin \theta & \cos \theta \cdot \cos \phi \end{bmatrix} \quad (\text{Εξ. 2-13})$$

όπου ϕ , θ , ψ είναι οι τρεις γωνίες περιστροφής του τοπικού συστήματος αναφοράς περί τους άξονες roll, pitch και yaw του συστήματος αναφοράς του κινούμενου σώματος.

2.6. Είδη Αδρανειακών Συστημάτων Πλοήγησης (ΑΣΠ)

Στην συγκεκριμένη ενότητα θα γίνει μια παρουσίαση των κύριων υλοποιήσεων των ΑΣΠ και των βασικών διαφορών τους. Με την έννοια υλοποίηση αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης εννοείται :

- ο τρόπος με τον οποίο συνδυάζονται και χρησιμοποιούνται οι αδρανειακοί αισθητήρες (γυροσκόπια και επιταχυνσιόμετρα) και επιπλέον
- ο σχεδιασμός του αλγόριθμου που θα χρησιμοποιηθεί για να μετατρέψει τις ενδείξεις των παραπάνω αισθητήρων σε λύση πλοήγησης (τροχιά κίνησης σώματος)

Με βάση τις παραπάνω δύο παρατηρήσεις όλα τα ΑΣΠ, μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες :

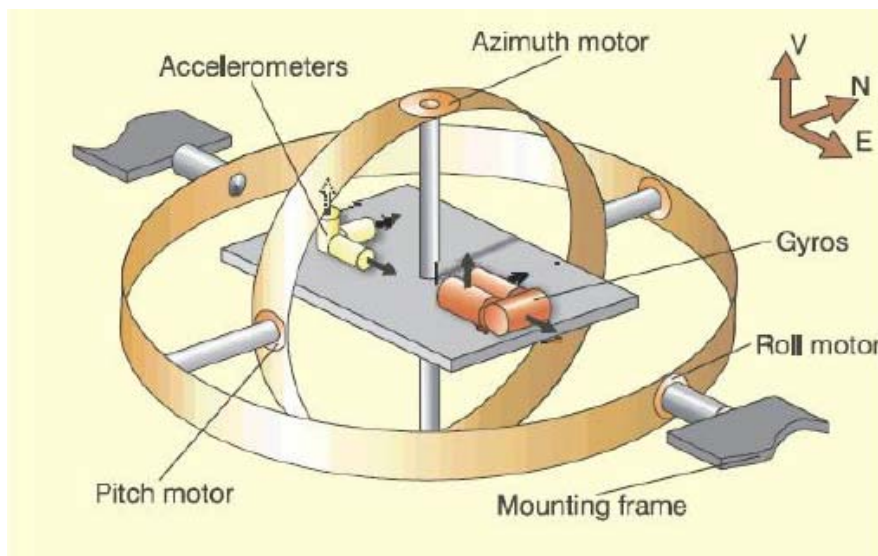
- τα ΑΣΠ σταθερής πλατφόρμας (stabilized ή gimbaled INS – GINS)

➤ τα προσκολλημένα ΑΣΠ (strap down INS - SINS)

Στην συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή των συστημάτων αυτών.

2.6.1. Τα ΑΣΠ σταθερής πλατφόρμας (stabilized ή gimbaled INS – GINS)

Τα συστήματα σταθερής πλατφόρμας είναι η πρώτη υλοποίηση ΑΣΠ και χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια και λειτουργούν σε εξειδικευμένες συνθήκες (συστήματα πλοήγησης πλοίων, υποβρύχιων, διηπειρωτικοί βαλλιστικοί πύραυλοι κα.).



Εικόνα 2.20 : Αδρανειακό σύστημα πλοήγησης σταθερής πλατφόρμας
(Πηγή : King, 1998)

Στα συστήματα σταθερής πλατφόρμας οι αισθητήρες είναι προσαρμοσμένοι σε μια άκαμπτη πλατφόρμα σχηματίζοντας ένα τρισσορθόγωνιο σύστημα αξόνων. Η πλατφόρμα είναι απομονωμένη από τις επιδράσεις του εξωτερικού περιβάλλοντος μέσω της χρήσης ενός συστήματος εδράνων.

Τα έδρανα σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία ενενήντα μοιρών με το εσωτερικό να είναι προσαρμοσμένο, με την χρήση σερβομηχανισμών, στην πλατφόρμα και το εξωτερικό να είναι στερεωμένο στο σώμα φορέα.

Ο αριθμός των εδράνων καθορίζει τους βαθμούς ελευθερίας του συστήματος και έτσι στις συνήθεις υλοποιήσεις χρησιμοποιούνται τρία έδρανα, τα οποία αντιστοιχούν στους τρεις άξονες roll, pitch και yaw του συστήματος αναφοράς του κινούμενου σώματος και είναι αρκετά για να περιγράψουν πλήρως την κίνηση ενός σώματος στον τρισδιάστατο χώρο.

Όταν πρόκειται για πλοήγηση πλοίων και οχημάτων εδάφους μπορούν να χρησιμοποιηθούν και δύο έδρανα, που δεσμεύουν την κίνηση ως προς τους άξονες roll και pitch και επιτρέπουν την ελεύθερη περιστροφή γύρω από τον άξονα yaw, κίνηση που καθορίζει και την κατεύθυνση του φορέα.

Αντίθετα στην πλοήγηση αεροσκαφών υψηλών επιδόσεων καθώς και σε άλλες περιπτώσεις όπου απαιτείται πλήρης έλεγχος της κίνησης χρησιμοποιούνται τέσσερα έδρανα, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα σύστημα που είναι υπερκαθορισμένο.

Η χρήση πλέον των δύο εδράνων μπορεί να οδηγήσει σε ένα πρόβλημα γνωστό και ως κλείδωμα της πλατφόρμας (gimbals lock), το οποίο προκαλείται από τον παραλληλισμό δύο διαφορετικών εδράνων στην περίπτωση που το ένα από τα δύο στραφεί, εξαιτίας των κραδασμών κατά την λειτουργία του συστήματος, κατά μια γωνία ενενήντα μοιρών.

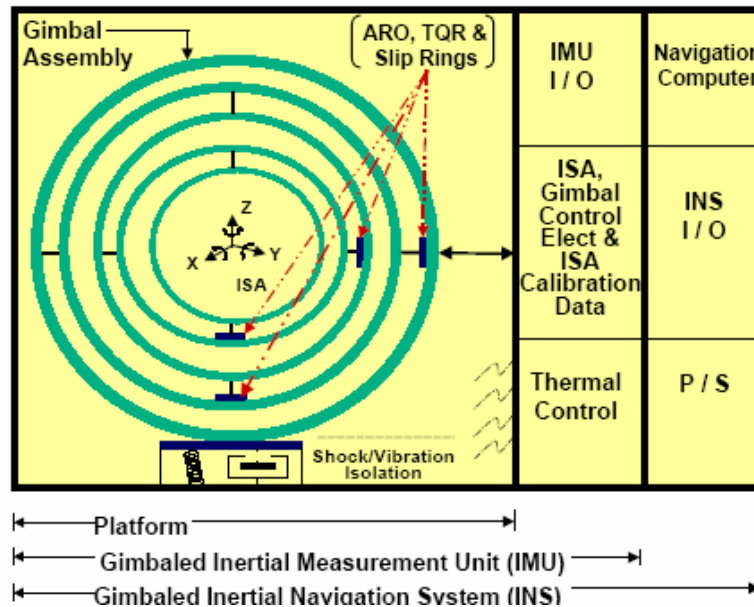
Εικόνα 2.21 : Κλείδωμα της πλατφόρμας (gimbals lock)

Το φαινόμενο αυτό σταματάει την λειτουργία της συσκευής και δημιουργεί σοβαρά προβλήματα στην διαδικασία πλοήγησης. Για να αντιμετωπιστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα τοποθετούνται στις ενώσεις των εδράνων αναστολές κίνησης, οι οποίοι απαγορεύουν την κίνηση των εδράνων από μια γωνία και πάνω.

Η πολυπλοκότητα των ΑΣΠ, οδήγησε το IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) να προχωρήσει στην κατηγοριοποίηση των τμημάτων τους και την τυποποίηση της ορολογίας τους, η οποία κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί και φαίνεται σχηματικά στην Εικόνα 2.22 .

Έτσι τα συστήματα σταθερής πλατφόρμας μπορούν να τμηματοποιηθούν ως εξής :

- στα έδρανα και την πλατφόρμα
- την αδρανειακή μετρητική μονάδα (ΑΜΜ) – (Inertial Measurement Unit-IMU), που εκτός του πρώτου τμήματος περιλαμβάνει τους αδρανειακούς αισθητήρες (Inertial System Assembly-ISA), οι οποίοι παράγουν τις πρωτογενείς μετρήσεις επιταχύνσεων και γωνιακών περιστροφών, την είσοδο-έξοδο των μετρήσεων, τα συστήματα ελέγχου και ρυθμίσεων των αδρανειακών αισθητήρων, τα μοντέλα εξάλειψης και αποκατάστασης των σφαλμάτων των πρωτογενών δεδομένων και τα συστήματα προστασίας από τις επιδράσεις της παραγόμενης θερμότητας.
- το αδρανειακό σύστημα πλοήγησης (ΑΣΠ) - (Inertial Navigation System –INS), το οποίο είναι μια ΑΜΜ σε συνδυασμό με μια μονάδα παροχής ισχύος και με έναν υπολογιστή, ο οποίος αναλαμβάνει να εκτελέσει τον αλγόριθμο πλοήγησης.



Εικόνα 2.22 : Τα τμήματα ενός ΑΣΠ σταθερής πλατφόρμας κατά IEEE

(Πηγή : IEEE)

Τα συστήματα σταθερής πλατφόρμας είναι συσκευές υψηλών επιδόσεων, αφού σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε οι αισθητήρες να λειτουργούν σε πολύ μικρό εύρος κινήσεων με αποτέλεσμα να εξαλείφονται όσο το δυνατόν περισσότερο τα σφάλματα και να αυξάνεται η αξιοπιστία.

Από την άλλη όμως οι εκλεπτυσμένοι μηχανικοί μηχανισμοί τους απαιτούν ειδικές τεχνικές κατασκευής και παραγωγής και εξειδικευμένη συντήρηση, που λαμβάνει χώρα σε αεροστεγές και απομονωμένο περιβάλλον, που οδηγούν σε υψηλά κόστη και καθιστούν τα συστήματα αυτά τα πλέον ακριβά.

Τα μηχανικά μέρη επίσης καταλαμβάνουν ιδιαίτερο χώρο με αποτέλεσμα τα συστήματα σταθερής πλατφόρμας να είναι συνήθως ογκώδη και μεγάλου βάρους και να μην αποτελούν έτσι ιδανικές επιλογές για μια πλειάδα εφαρμογών .

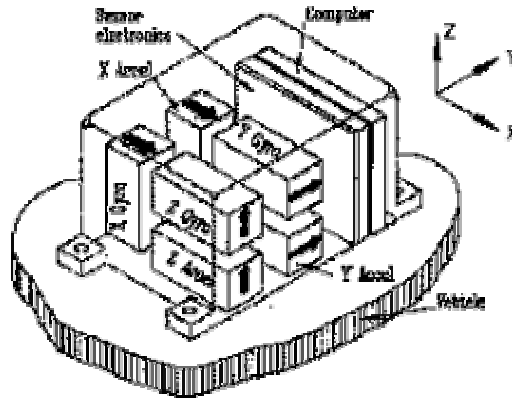
Τέλος η λειτουργία των μηχανισμών αυτών απαιτεί υψηλή παροχή ισχύος ενώ και οι τριβές που αναπτύσσονται κατά την λειτουργία αυτή προκαλούν την έκλυση υψηλών ποσών θερμότητας, τα οποία πρέπει να αντιμετωπιστούν.

2.6.2. Τα προσκολλημένα ΑΣΠ (strap down INS – SINS)

Τα μειονεκτήματα των συστημάτων σταθερής πλατφόρμας και η ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων, που επέτρεψε την εκτέλεση πολύπλοκων υπολογισμών σε ικανοποιητικό χρόνο, οδήγησαν στην ανάπτυξη των προσκολλημένων ΑΣΠ.

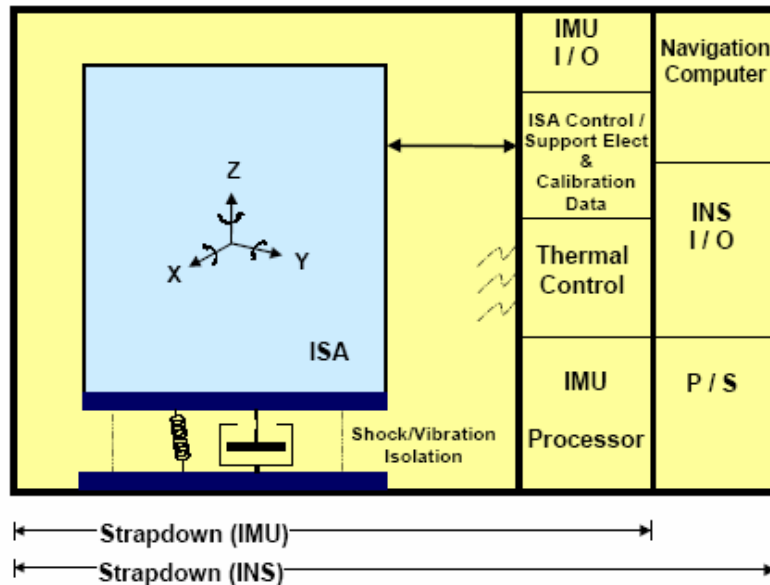
Στα συγκεκριμένα συστήματα οι αδρανειακοί αισθητήρες δεν είναι τοποθετημένοι σε μια απομονωμένη πλατφόρμα αλλά βρίσκονται προσκολλημένοι πάνω στο σύστημα του φορέα, εκτελώντας τις μετρήσεις τους ακολουθώντας συνεχώς την κίνηση του οχήματος-φορέα.

Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 2.23, που ακολουθεί και παρουσιάζει την διάταξη ενός προσκολλημένου ΑΣΠ, οι αδρανειακοί αισθητήρες είναι τοποθετημένοι σε ειδική θήκη που στηρίζεται από αποσβεστήρες κραδασμών, σκοπός των οποίων είναι να περιορίσουν τις επιδράσεις των δονήσεων, που προκαλούνται από την κίνηση του φορέα, στις μετρήσεις των επιταχυνσιομέτρων και των γυροσκοπίων.



Εικόνα 2.23 : Προσκολλημένο αδρανειακό σύστημα πλοήγησης
(Πηγή : Massachusetts Institution of Technology)

Κατά αναλογία με τα συστήματα σταθερής πλατφόρμας η προτεινόμενη ορολογία και κατηγοριοποίηση για τα προσκολλημένα συστήματα κατά IEEE φαίνεται στην Εικόνα 2.24 .



Εικόνα 2.24 : Τα τμήματα ενός προσκολλημένου ΑΣΠ κατά IEEE
(Πηγή : IEEE)

Έτσι τα προσκολλημένα συστήματα μπορούν να τμηματοποιηθούν ως εξής :

- τους αδρανειακούς αισθητήρες (Inertial System Assembly-ISA), οι οποίοι παράγουν μόνο πρωτογενή δεδομένα μετρήσεων επιτάχυνσης και γωνιακής περιστροφής

- την αδρανειακή μετρητική μονάδα (ΑΜΜ) – (Inertial Measurement Unit-IMU), που περιλαμβάνει τον επεξεργαστή της ΑΜΜ, την είσοδο-έξοδο των μετρήσεων, τα συστήματα ελέγχου και ρυθμίσεων των αδρανειακών αισθητήρων, τα μοντέλα εξάλειψης και αποκατάστασης των σφαλμάτων των πρωτογενών δεδομένων και τα συστήματα προστασίας από τις επιδράσεις της παραγόμενης θερμότητας
- το αδρανειακό σύστημα πλοήγησης (ΑΣΠ) - (Inertial Navigation System –INS), το οποίο είναι μια ΑΜΜ σε συνδυασμό με μια μονάδα παροχής ισχύος και με έναν υπολογιστή, ο οποίος αναλαμβάνει να εκτελέσει τον αλγόριθμο πλοήγησης

Τα προσκολλημένα συστήματα είναι εύχρηστες συσκευές μικρού μεγέθους και βάρους, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πλήθος εφαρμογών χωρίς να περιορίζονται από τις διαστάσεις τους.

Επιπλέον η ευκολία κατασκευής τους αλλά και τα υλικά από τα οποία αποτελούνται τους εξασφαλίζουν χαμηλό κόστος σε σχέση με τα συστήματα σταθερής πλατφόρμας, ευκολία συντήρησης αλλά και χαμηλά επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας και εκπομπής θερμότητας.

Βέβαια όλα τα παραπάνω δεν έρχονται χωρίς κόστος αφού η λειτουργία των συγκεκριμένων συστημάτων απαιτεί πολύπλοκους υπολογισμούς σε υψηλούς ρυθμούς με αποτέλεσμα να εξαρτάται από την χρήση υπολογιστών με αυξημένη υπολογιστική ισχύ.

2.7. Βασικές Αρχές Λειτουργίας των ΑΣΠ

Η ενότητα αυτή περιλαμβάνει τις βασικές αρχές λειτουργίας των ΑΣΠ. Η λειτουργία των ΑΣΠ και των δύο μορφών μπορεί να χωριστεί σε δύο τμήματα στο τμήμα της αρχικοποίησης και στο τμήμα της πλοήγησης. Στην συνέχεια ακολουθεί περιγραφή της λειτουργίας τόσο των συστημάτων σταθερής πλατφόρμας όσο και των προσκολλημένων συστημάτων.

2.7.1. Η λειτουργία των συστημάτων σταθερής πλατφόρμας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η λειτουργία οποιασδήποτε υλοποίησης ΑΣΠ, μπορεί να χωριστεί σε δύο βασικά τμήματα το τμήμα της αρχικοποίησης (initialization mode) και το τμήμα της πλοήγησης (navigation mode).

Για τα συστήματα σταθερής πλατφόρμας τα δύο τμήματα έχουν ως εξής :

➤ Τμήμα Αρχικοποίησης

Το τμήμα αυτό της λειτουργίας περιλαμβάνει δύο βασικές διαδικασίες, τον προσδιορισμό των αρχικών συνθηκών λειτουργίας του συστήματος και την ευθυγράμμιση των αξόνων του ΑΣΠ με το σύστημα πλοήγησης που χρησιμοποιείται.

Οι αρχικές συνθήκες θέσης και ταχύτητας του κινητού είναι απαραίτητο στοιχείο για την έναρξη του αλγόριθμου πλοήγησης, αφού αυτός βασίζεται για την εύρεση της

νέας θέσης και ταχύτητας στην ορισμένη ολοκλήρωση των πρωτογενών μετρήσεων επιτάχυνσης, η οποία και απαιτεί καθορισμό των ορίων της.

Οι αρχικές τιμές της θέσης και της ταχύτητας στα συστήματα σταθερής πλατφόρμας μπορούν να εισαχθούν είτε χειροκίνητα αν είναι γνωστές, είτε να προσδιοριστούν με την χρήση γεωδαιτικού εξοπλισμού.

Τα συστήματα αυτού του τύπου συναντούνται κυρίως σε υποβρύχια, διηπειρωτικούς πυραύλους, αεροσκάφη και διαστημικά οχήματα (space vessels) η πλοήγηση των οποίων απαιτεί από αυτά να μην εξαρτώνται σε κανένα τμήμα της λειτουργίας τους από κανένα άλλο σύστημα.

Έτσι λειτουργούν κατά κύριο λόγο ως αυτόνομα συστήματα, χωρίς την βοήθεια άλλων συστημάτων όπως είναι τα ΔΣΠ, με αποτέλεσμα η κοινή πρακτική είναι να γίνεται η εκκίνηση τους από σημείο όπου οι συντεταγμένες είναι γνωστές και στο οποίο αφού ο φορέας ακινητεί είναι γνωστή και η ταχύτητα (ίση με μηδέν).

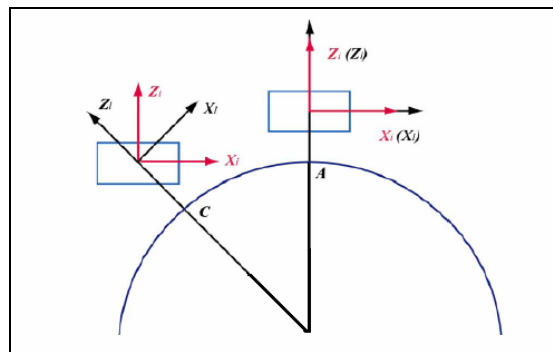
Μια άλλη συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος αρχικοποίησης είναι η λεγόμενη μεταφερομένη αρχικοποίηση, όπου ο φορέας του ΑΣΠ χρησιμοποιεί την ταχύτητα και την θέση μιας άλλης πλατφόρμας για να αρχικοποιήσει την λειτουργία του ΑΣΠ.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συνήθως στις εκτοξεύσεις πύραυλων από υποβρύχια ή αεροσκάφη καθώς και διαστημικών λεωφορείων από κινούμενες εξέδρες εκτόξευσης.

Η ευθυγράμμιση δε των αξόνων του ΑΣΠ με το σύστημα πλοήγησης που χρησιμοποιείται αναφέρεται στην διαδικασία κατά την οποία οι άξονες του συστήματος μέτρησης του ΑΣΠ ευθυγραμμίζονται με το σύστημα αναφοράς στο οποίο αναπτύσσεται ο μηχανισμός των εξισώσεων πλοήγησης.

Τα συστήματα σταθερής πλατφόρμας χρησιμοποιούν δύο διαφορετικά συστήματα αναφοράς στα οποία αναπτύσσονται του αντίστοιχους μηχανισμούς των εξισώσεων πλοήγησης. Τα συστήματα αυτά είναι το αδρανειακό σύστημα αναφοράς (i-frame) και το τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς (l-frame).

Ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο σύστημα αναφοράς διαχωρίζουμε τα συστήματα σταθερής πλατφόρμας σε αδρανειακά προσανατολισμένα και τοποκεντρικά προσανατολισμένα τα οποία φαίνονται και στην Εικόνα 2.25.



Εικόνα 2.25 : Τα αδρανειακά και τοπικά προσανατολισμένα συστήματα σταθερής πλατφόρμας

Τα αδρανειακά προσανατολισμένα συστήματα διατηρούν πάντα παράλληλο στους άξονες του αδρανειακού συστήματος τον προσανατολισμό των αξόνων τους, ενώ τα τοποκεντρικά προσανατολισμένα συστήματα μεταβάλλουν συνεχώς τον προσανατολισμό τους ακολουθώντας την κίνηση του οχήματος.

Το κύριο πλεονέκτημα των αδρανειακά προσανατολισμένων συστημάτων είναι ότι οι μετρήσεις των αισθητήρων πραγματοποιούνται απευθείας στο αδρανειακό σύστημα κάτι όμως που ταυτόχρονα αποτελεί και το κυριότερο μειονέκτημά τους, αφού οι αισθητήρες σε αυτή την περίπτωση υφίστανται τις συνεχείς μεταβολές του γήινου βαρυτικού πεδίου.

Αντίθετα τα τοπικά προσανατολισμένα συστήματα παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της απευθείας παραγωγής των συντεταγμένων της θέσης στο τοποκεντρικό σύστημα όμως από την άλλη οι σερβομηχανισμοί των εδράνων υπόκεινται σε συνεχείς περιστροφές προκειμένου να διατηρήσουν τον προσανατολισμό του συστήματος.

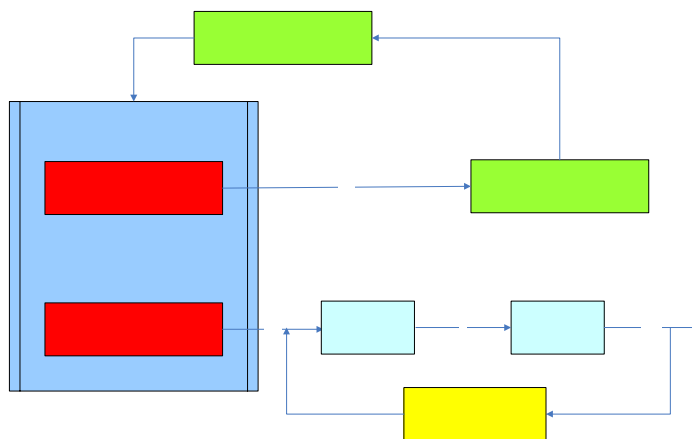
Οι περιστροφές αυτές σε περιοχές μεγάλου γεωγραφικού πλάτους μπορούν να λάβουν εξαιρετικά μεγάλες τιμές εξαιτίας της σύγκλισης των μεσημβρινών με αποτέλεσμα σε αυτές τις περιπτώσεις να απαιτείται η χρησιμοποίηση του συστήματος της γωνίας α αντί του τοποκεντρικού συστήματος.

Η ευθυγράμμιση των συστημάτων σταθερής πλατφόρμας μπορεί να γίνει με έναν από του κάτωθι τρόπους (Grewal, 2001) :

- οπτικά, με χρήση θεοδόλιχων ή σταθερών σημείων (άστρα)
- αυτό-ευθυγράμμιση, με χρήση των γυροσκοπίων και των επιταχυνσιόμετρων σύμφωνα με την διαδικασία που θα περιγραφεί στην επόμενη ενότητα
- με μεταφορά ευθυγράμμισης από άλλο ΑΣΠ, κυρίως όταν πρόκειται για πυράλους
- με χρήση ΔΣΠ, αν είναι διαθέσιμο.

➤ Τμήμα Πλοήγησης

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της αρχικοποίησης το σύστημα μεταβαίνει στο τμήμα πλοήγησης και είναι έτοιμο να ξεκινήσει την πλοήγηση.



Εικόνα 2.26 : Λειτουργία των ΑΣΠ σταθερής πλατφόρμας

Στο τμήμα αυτό οι μετρήσεις των γυροσκοπίων χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν οι αποκλίσεις των αξόνων του ΑΣΠ από το χρησιμοποιούμενο σύστημα πλοήγησης και να παραχθούν οι απαιτούμενες εντολές διόρθωσης προς το σύστημα των σερβομηχανισμών, το οποίο είναι υπεύθυνο για την διατήρηση της πλατφόρμας στον αρχικό προσανατολισμό της.

Οι μετρήσεις δε των επιταχυνσιομέτρων αφού διορθωθούν για την επιτάχυνση της βαρύτητας ολοκληρώνονται μια φορά για να δώσουν την ταχύτητα στο χρησιμοποιούμενο σύστημα πλοήγησης και άλλη μια για να δώσουν την θέση.

2.7.2. Η λειτουργία των προσκολλημένων συστημάτων

Όπως και με τα συστήματα σταθερής πλατφόρμας έτσι και για τα προσκολλημένα συστήματα η λειτουργία τους χωρίζεται σε δύο βασικά τμήματα το τμήμα αρχικοποίησης και το τμήμα πλοήγησης.

➤ Το τμήμα αρχικοποίησης

Σε αυτό το τμήμα πραγματοποιείται ο προσδιορισμός των αρχικών τιμών της θέσης και της ταχύτητας καθώς και τα στοιχεία του πίνακα των συνημίτονων κατεύθυνσης, ο οποίος καθορίζει την σχέση του συστήματος αναφοράς του κινουμένου σώματος (b- frame) με το τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς (l-frame).

Ο προσδιορισμός της αρχικής θέσης και ταχύτητας στα προσκολλημένα συστήματα γίνεται συνήθως με την βοήθεια ΔΣΠ, αφού στο σύνολο σχεδόν των εφαρμογών που χρησιμοποιούν τεχνικές αδρανειακής πλοήγησης και προσκολλημένα ΑΣΠ αυτά συνεργάζονται με ΔΣΠ.

Σε περίπτωση όμως που δεν είναι διαθέσιμο κάποιο ΔΣΠ ή άλλη εξωτερική βοήθεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τεχνικές που αναφέρθηκαν στην περιγραφή των συστημάτων σταθερής πλατφόρμας.

Η ευθυγράμμιση των προσκολλημένων συστημάτων γίνεται κυρίως με τους κάτωθι δύο τρόπους :

- αυτό-ευθυγράμμιση, με χρήση των γυροσκοπίων και των επιταχυνσιομέτρων σύμφωνα με την διαδικασία που θα περιγραφεί στην συνέχεια
- με χρήση ΔΣΠ

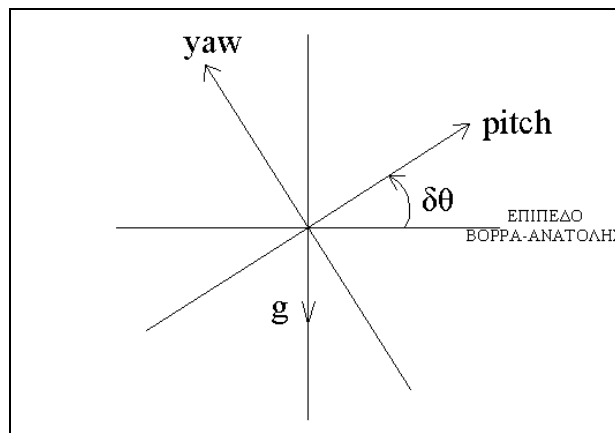
Στην συνέχεια θα περιγραφεί αναλυτικά η μέθοδος της αυτό-ευθυγράμμισης, αφού είναι συχνά χρησιμοποιούμενη και παρουσιάζει αυξημένο ενδιαφέρον. Η μέθοδος αυτή μπορεί να αποτελείται από δύο φάσεις, την αρχική φάση που είναι γνωστή ως προσεγγιστική ευθυγράμμιση (coarse alignment) και την τελική φάση γνωστή ως ευθυγράμμιση ακριβείας (fine alignment).

Κατά την προσεγγιστική ευθυγράμμιση, η οποία λαμβάνει χώρα σε δύο βήματα, το όχημα φορέας παραμένει ακίνητο για ένα χρονικό διάστημα, η διάρκεια του οποίου

κυμαίνεται από 1 έως 3 λεπτά και εξαρτάται από την ποιότητα των αδρανειακών αισθητήρων.

Το πρώτο βήμα είναι ο προσδιορισμός των γωνιών roll και pitch. Έτσι αφού το όχημα είναι ακίνητο τα επιταχυνσιόμετρα που είναι προσανατολισμένα στους άξονες στους roll και pitch, θα πρέπει αν θεωρηθεί ότι δεν έχουν σφάλμα στη μέτρηση τους να έχουν μηδενική μέτρηση αφού η μόνη επιτάχυνση που δέχεται το σώμα είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας g που έχει την διεύθυνση του κατακόρυφου άξονα.

Αν η μέτρηση δεν είναι μηδενική τότε η μετρούμενη επιτάχυνση θα είναι τμήμα της επιτάχυνσης της βαρύτητας και θα οφείλεται στην απόκλιση των αξόνων του συστήματος του κινούμενου σώματος από τους άξονες του τοποκεντρικού συστήματος αναφοράς.



Εικόνα 2.27 : Ευθυγράμμιση προσκολλημένων ΑΣΠ-Βήμα 1ο

Έτσι όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.27, στην οποία ο άξονας roll είναι από τον αναγνώστη προς την σελίδα, αν ο άξονας pitch σχηματίζει γωνία $\delta\theta$ (γωνία roll-παρεκτροπή) με τον άξονα του τοποκεντρικού συστήματος που είναι προσανατολισμένος προς την Ανατολή τότε το επιταχυνσιόμετρο που είναι προσαρμοσμένο σε αυτόν θα ανιχνεύσει επιτάχυνση ίση με

$$a_x = -g \cdot \sin(\delta\theta) \Rightarrow roll = \delta\theta = -\sin^{-1}\left(\frac{a_x}{g}\right) \quad (\text{Εξ. 2-14})$$

Ομοίως μια απόκλιση του άξονα roll από τον αντίστοιχο άξονα του τοποκεντρικού συστήματος κατά μια γωνία $\delta\theta$ (γωνία pitch-κλίση) προσδιορίζει την γωνία pitch του συστήματος του κινούμενου σώματος ως προς το τοποκεντρικό σύστημα σύμφωνα με την Εξ. 2-15 :

$$a_y = -g \cdot \sin(\delta\theta) \Rightarrow pitch = \delta\theta = -\sin^{-1}\left(\frac{a_y}{g}\right) \quad (\text{Εξ. 2-15})$$

Το δεύτερο βήμα είναι ο προσδιορισμός της γωνίας κατεύθυνσης (ψ -yaw) του κινητού. Ο προσδιορισμός αυτός γίνεται, αφού υπολογιστούν οι διορθώσεις των

γωνιών roll και pitch, μέσω των μετρήσεων των γυροσκοπίων που είναι προσαρμοσμένα στους δύο αυτούς άξονες.

Τα γυροσκόπια δεδομένης της ακινησίας του σώματος πρέπει να μετράνε την γωνιακή περιστροφή που οφείλεται μόνο στην περιστροφή της γης. Έτσι από τις μετρήσεις τους προσδιορίζεται η γωνία κατεύθυνσης.

Το μειονέκτημα της προσεγγιστική ευθυγράμμισης είναι η παραδοχή ότι οι μετρήσεις τόσο των γυροσκοπίων όσο και επιταχυνσιομέτρων είναι χωρίς σφάλμα, γεγονός που δεν μπορεί να συμβαίνει αφού δεν υπάρχουν τέλει αισθητήρες.

Το παραπάνω μειονέκτημα αντιμετωπίζεται με ένα αναλυτικό προσδιορισμό των τύπων της προσεγγιστικής ευθυγράμμισης. Συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας ως αρχικές τιμές αυτές που υπολογίστηκαν παραπάνω και μοντελοποιώντας τα σφάλματα των αισθητήρων, με την βοήθεια του μέσου όρου όλων των πρωτογενών μετρήσεων που έγιναν κατά την διάρκεια της ακινησίας του οχήματος, γίνεται εκ νέου υπολογισμός των γωνιών roll, pitch, yaw.

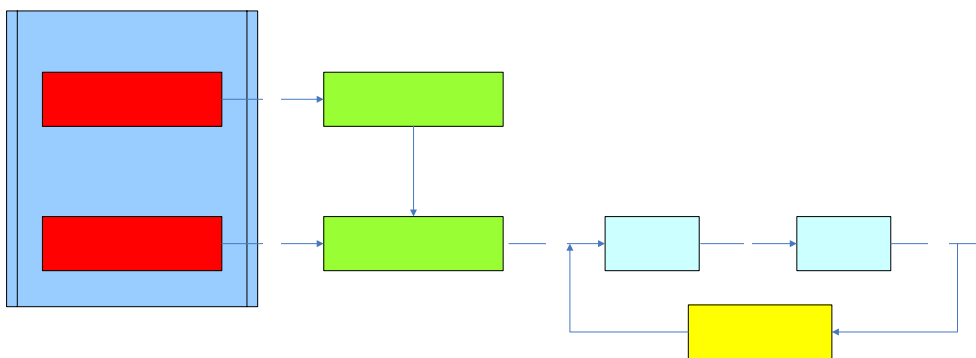
Οι νέες τιμές των γωνιών είναι σε μεγάλο βαθμό απαλλαγμένες από τα σφάλματα των αισθητήρων όμως δεν παύουν να αποτελούν προσεγγιστικές τιμές, για τον λόγο αυτό σε εφαρμογές με μεγάλες απαιτήσεις ακριβείας την προσεγγιστική ευθυγράμμιση σχεδόν πάντα ακολουθεί η ευθυγράμμιση ακριβείας.

Η ευθυγράμμιση αυτή στηρίζεται στην χρήση αλγορίθμων συνόρθωσης δεδομένων σε βήματα, όπως τα φίλτρα KALMAN που θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο. Ουσιαστικά έχει ως σκοπό την εκτίμηση των καλύτερων τιμών των στοιχείων του πίνακα συνημίτονων κατεύθυνσης, μεταξύ του τοποκεντρικού συστήματος αναφοράς και του συστήματος αναφοράς του κινουμένου σώματος, μέσω της χρήσης όλης της διαθέσιμης πληροφορίας.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι στα συστήματα που συνεργάζονται με κάποιο ΔΣΠ, μπορεί να γίνει και η λεγόμενη ευθυγράμμιση εν κινήσει μέσω της πληροφορίας κινηματικής συμπεριφοράς και ταχύτητας του σώματος που παρέχει το ΔΣΠ.

➤ **Το τμήμα πλοήγησης**

Στα προσκολλημένα ΑΣΠ η λειτουργία τους(Εικόνα 2.28) διαφέρει από την αντίστοιχη των ΑΣΠ σταθερής πλατφόρμας



Εικόνα 2.28 : Λειτουργία των προσκολλημένων ΑΣΠ

Όπως φαίνεται στην εικόνα στα προσκολλημένα ΑΣΠ οι μετρήσεις των γυροσκοπίων δεν χρησιμοποιούνται για να διατηρήσουν την πλατφόρμα στη θέση της αλλά για να διατηρήσουν τον μετασχηματισμό των μετρήσεων των επιταχυνσιομέτρων στο σύστημα πλοήγησης (συνήθως το τοποκεντρικό).

Οι δε μετρήσεις των επιταχυνσιομέτρων αφού διορθωθούν λόγω βαρύτητας και μετασχηματιστούν στο επιθυμητό σύστημα συντεταγμένων ολοκληρώνονται διαδοχικά δύο φορές για να δώσουν την ταχύτητα και την θέση του κινητού.

2.8. Τα Κύρια Σφάλματα των ΑΣΠ

Παρακάτω θα αναφερθούν τα κύρια σφάλματα που υπεισέρχονται στην λειτουργία των ΑΣΠ και επηρεάζουν την ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης, της ταχύτητας και της κινηματικής συμπεριφοράς του κινητού. Τα σφάλματα που επηρεάζουν την λειτουργία των ΑΣΠ και καθορίζουν την ακρίβεια τους μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες :

- τα σφάλματα των αδρανειακών αισθητήρων
- τα σφάλματα αρχικοποίησης
- τα σφάλματα ευθυγράμμισης των αξόνων πλοήγησης με τους άξονες μετρήσεων του ΑΣΠ
- τα σφάλματα των χρησιμοποιούμενων μοντέλων βαρύτητας

2.8.1. Τα σφάλματα των αδρανειακών αισθητήρων

Τα κυριότερα σφάλματα που συναντούνται στους αδρανειακούς αισθητήρες είναι :

➤ Το σφάλμα λανθασμένης εκτίμησης (bias)

Το σφάλμα αυτό μπορεί να οριστεί γενικά σαν τιμή μέτρησης που δίνει ο αισθητήρας στην θέση ισορροπίας. Η ιδεατή τιμή στην θέση αυτή θα ήταν μηδέν, γεγονός που λόγω κατασκευαστικών ατελειών και αστοχιών στην βαθμονόμηση του οργάνου δεν συμβαίνει ποτέ ακόμα και στις πιο ακριβές και εξελιγμένες συσκευές.

Το σφάλμα αυτό αποτυπώνει την ασυνέπεια του οργάνου στην σωστή απόδοση της μέτρησης και εκφράζεται σε m/sec^2 ή mg για τα επιταχυνσιόμετρα και σε deg/hr ή deg/s για τα γυροσκόπια.

➤ Το σφάλμα του συντελεστή κλίμακας (scale factor)

Το σφάλμα αυτό αναφέρεται στην αδυναμία του αισθητήρα, επιταχυνσιομέτρου ή γυροσκοπίου, να μετατρέψει την αρχική μέτρηση στην αντίστοιχη τιμή επιτάχυνσης ή γωνιακής περιστροφής ανά περίοδο λειτουργίας .

Εκφράζεται συνήθως σε μέρη ανά εκατομμύριο (ppm- parts per million) και για τα δύο είδη αισθητήρων και είναι χαρακτηριστικό ότι ένα γυροσκόπιο με σφάλμα κλίμακας 300 ppm έχει στις μετρήσεις του σφάλμα ίσο με 0.1 deg/rev.

➤ Το σφάλμα αξόνων μέτρησης (axis misalignment)

Στην περίπτωση που οι άξονες στους οποίους είναι προσαρμοσμένοι οι αισθητήρες δεν είναι πλήρως ευθυγραμμισμένοι ώστε να σχηματίζουν μεταξύ τους ένα τέλει ορθοκανονικό σύστημα (στην περίπτωση όπου έχουμε ένα σύστημα τριών γυροσκοπίων και τριών επιταχυνσιόμετρων προσαρμοσμένων στους τρεις βασικούς άξονες roll-pitch-yaw) τότε εισάγεται σημαντικό σφάλμα λόγω της διασταύρωσης των προς μέτρηση μεγεθών.

Έτσι οι αισθητήρες που είναι προσαρμοσμένοι στην μια διεύθυνση αισθάνονται επιταχύνσεις και περιστροφές που προκαλούνται σε άλλη διεύθυνση με αποτέλεσμα οι μετρήσεις τους να μην ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

Το σφάλμα αυτό μεγαλώνει όσο μεγαλύτερη είναι η απόκλιση των αξόνων από την κανονική τους θέση και χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι απόκλιση των αξόνων ίση με 0.1 mrad από την κανονική τους θέση προκαλεί σφάλμα στις μετρήσεις της γωνίας roll (παρεκτροπή) ίσο με 0.036 deg για κάθε περιστροφή γύρω από τον άξονα yaw.

➤ Το σφάλμα του θορύβου (gyro random walk)

Το συγκεκριμένο σφάλμα αναφέρεται στο σφάλμα που υπεισέρχεται στις μετρήσεις λόγω θορύβου. Αντίθετα από τα προηγούμενα τρία σφάλματα, τα οποία μπορούν να διορθωθούν με χρήση συντελεστών και μοντέλων βαθμονόμησης το σφάλμα αυτό αποτελεί τυχαίο σφάλμα και διορθώνεται με στοχαστικά μοντέλα.

Θεωρείται ότι το σφάλμα αυτό ακολουθεί κανονική κατανομή με μέσο όρο μηδέν και τυπική απόκλιση που μεγαλώνει με τον χρόνο. Το πιο γνωστό σφάλμα θορύβου είναι αυτό που εμφανίζεται στα γυροσκόπια λόγω του εμφανιζόμενου θορύβου στην γωνιακή περιστροφή. Το σφάλμα αυτό εκφράζεται σε $\text{deg}/\sqrt{\text{hr}}$ ή $\text{deg}/\text{hr}/\sqrt{\text{Hz}}$ με τις δύο τιμές να είναι ισοδύναμες αν η δεύτερη διαιρεθεί με 60.

Σφάλμα ίσο με $0.0003 \text{ deg}/\sqrt{\text{hr}}$ προκαλεί σφάλμα στον υπολογισμό της γωνίας περιστροφής ίσο με 0.001 deg μετά από λειτουργία 6 min ή 0.0004 deg μετά από λειτουργία 1 min.

Το σφάλμα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό κυρίως στην φάση της ευθυγράμμισης των ΑΣΠ και του προσδιορισμού της αρχικής τους κατεύθυνσης, αφού εξαρτάται από τον χρόνο και μεγάλες τιμές αυξάνουν δραματικά τον απαιτούμενο χρόνο ευθυγράμμισης.

2.8.2. Τα σφάλματα αρχικοποίησης (initialization errors)

Τα σφάλματα αυτά αναφέρονται στην αβεβαιότητα που εμπεριέχουν οι τιμές της θέσης και της ταχύτητας, οι οποίες αρχικοποιούν το σύστημα. Ως γνωστό η λειτουργία των ΑΣΠ βασίζεται κατά κύριο λόγο στην ολοκλήρωση των μετρήσεων επιτάχυνσης και γωνιακής ταχύτητας που δίνουν αντίστοιχα την ταχύτητα και την κινηματική συμπεριφορά (attitude) του κινητού ενώ μια δεύτερη ολοκλήρωση της ταχύτητας παρέχει και την θέση αυτού.

Οι ολοκληρώσεις αυτές όμως είναι ορισμένες και απαιτούν αρχικές τιμές, η αβεβαιότητα των οποίων υπεισέρχεται στην όλη διαδικασία και αυξάνει συνεχώς την αβεβαιότητα προσδιορισμού των παραπάνω στοιχείων στην περίπτωση που δεν γίνει επαναρχικοποίηση με χρήση εξωτερικών συστημάτων (GPS) ή άλλων μεθόδων (χρήση σημείων μηδενικής ταχύτητας (ZUPT) ή γνωστών συντεταγμένων (CUPT)).

2.8.3. Τα σφάλματα ευθυγράμμισης (alignment errors)

Τα σφάλματα αυτά αναφέρονται στα σφάλματα που απομένουν μετά την διαδικασία ευθυγράμμισης που περιγράφηκε παραπάνω και αφορούν :

- στη μη ευθυγράμμιση των αξόνων του ΑΣΠ σταθερής πλατφόρμας με το σύστημα πλοήγησης που χρησιμοποιείται και
- στο μη ακριβή προσδιορισμό του πίνακα συνημίτονων κατεύθυνσης μεταξύ του συστήματος του κινουμένου σώματος και του συστήματος πλοήγησης που χρησιμοποιείται για τα προσκολλημένα ΑΣΠ.

Τα σφάλματα αυτά μπορούν να διακριθούν :

- στα παραμένοντα μικρά σφάλματα περιστροφής (tilts)

Τα σφάλματα αυτά οφείλονται στους άξονες του συστήματος, προκαλούν λάθους υπολογισμούς και διορθώνονται μέσω της μοντελοποίησης τους

- στα σφάλματα κατεύθυνσης (Αζιμουθίου)

Τα σφάλματα αυτά προκαλούν αποκλίσεις του κινητού από την πραγματική του θέση αλλά διορθώνονται με χρήση αλγορίθμων και τεχνικών

- στα σφάλματα που οφείλονται στην ταλάντωση Schuler και στον λάθος υπολογισμό της δύναμης Coriolis.

Οποιοδήποτε λάθος στον προσδιορισμό της οριζόντιας θέσης ενός σώματος προκαλεί λάθος στην εκτιμώμενη τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας που με την σειρά του προκαλεί αντίθετο σφάλμα στον προσδιορισμό της οριζόντιας θέσης.

Το σφάλμα αυτό παρουσιάζει μια περιοδικότητα κατά την κίνηση γύρω από την γη με περίοδο ίση με αυτή της ταλάντωσης Schuler ($T=84.4$ min) και μπορεί να διορθωθεί αν εφαρμοστεί μια ταλάντωση στην λειτουργία του ΑΣΠ με την ίδια περίοδο.

Επίσης οποιαδήποτε λάθος στον προσδιορισμό της δύναμης Coriolis, δημιουργεί σφάλματα στον υπολογισμό της ταχύτητας του κινητού σώματος τα οποία για την μεν συνιστώσα ως προς τον Βορρά u_N (σε ένα τοποκεντρικό σύστημα) είναι ανάλογα με την μετρούμενη επιτάχυνση ως προς την Ανατολή a_E ενώ για την u_E είναι ανάλογα με την a_N .

2.8.4. Τα σφάλματα των μοντέλων βαρύτητας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα επιταχυνσιόμετρα μετράνε την συνολική επιτάχυνση που δέχεται ένα σώμα δεν μπορούν όμως να την διαχωρίσουν σε αυτή, που οφείλεται στην κίνηση του σώματος και σε αυτή, που οφείλεται στην επίδραση του πεδίου βαρύτητας της γης.

Επειδή την αδρανειακή πλοήγηση την ενδιαφέρει μόνο η επιτάχυνση που οφείλεται στην κίνηση του σώματος χρησιμοποιούνται διάφορα μοντέλα βαρύτητας, όπως οι συναρτήσεις συμμεταβλητότητας κα., έτσι ώστε να γίνει ο διαχωρισμός των δύο επιταχύνσεων.

Τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα όμως λόγω της πολυπλοκότητας του πεδίου βαρύτητας της γης απέχουν πολύ από το να είναι τέλεια με αποτέλεσμα να εισάγουν σφάλματα στον προσδιορισμό της θέσης του κινητού σώματος.

Τα παραπάνω σφάλματα στις περιπτώσεις που μια εργασία λαμβάνει χώρα σε μία επίπεδη μικρή έκταση, όπου το βαρυτικό πεδίο μπορεί να θεωρηθεί ομοιόμορφο, ή στις περιπτώσεις πλοήγησης πλοίων και υποβρυχίων μπορούν να θεωρηθούν αμελητέα.

Στις εργασίες όμως που απαιτείται μεγάλη ακρίβεια και οι οποίες λαμβάνουν χώρα σε δυσμενές περιβάλλον, πχ περιοχές απότομης μεταβολής του υψόμετρου του εδάφους και έντονων κλίσεων, απαιτείται ειδική αντιμετώπιση των εν λόγω σφαλμάτων ώστε να επιτευχθεί η επιδιωκόμενη ακρίβεια.

2.9. Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί των ΑΣΠ

Στην παρούσα ενότητα θα αναφερθούν τα κυριότερα πλεονεκτήματα καθώς και οι βασικοί περιορισμοί των ΑΣΠ, ώστε να γίνει περισσότερο κατανοητή η χρησιμότητα τους αλλά και η δυναμική επιλογής τους ως κύριου ή και μοναδικού συστήματος πλοήγησης σε ορισμένες εφαρμογές .

2.9.1. Τα πλεονεκτήματα των ΑΣΠ

Τα ΑΣΠ παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα ως συσκευές πλοήγησης, τα κυριότερα από τα οποία αναφέρονται στην συνέχεια.

Τα ΑΣΠ είναι αυτόνομα συστήματα πλοήγησης που δεν βασίζονται σε εξωτερικές συσκευές για την λειτουργία τους παρά μόνο για την αρχικοποίηση τους, η οποία και πάλι για ΑΣΠ υψηλών επιδόσεων μπορεί να επιτευχθεί μέσω της ίδιας της λειτουργίας τους χωρίς την χρήση άλλων μέσων και τεχνικών.

Το πλεονέκτημα αυτό δίνει την δυνατότητα στα ΑΣΠ να επιχειρούν σε δύσκολα περιβάλλοντα για την πλοήγηση όπως τα τούνελ, οι σήραγγες, ο βυθός της θάλασσας και ο πυκνός αστικός ιστός.

Τα ΑΣΠ δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές ή άλλου είδους παρεμβολές, αφού δεν λειτουργούν με εκπομπή και λήψη ακτινοβολίας. Το πλεονέκτημα αυτό τους προσδίδει την ευελιξία της συνεχούς λειτουργίας, ενώ τα καθιστά τα πλέον κατάλληλα συστήματα για στρατιωτικές εφαρμογές, επειδή εκτός της συνεχούς λειτουργίας τους προσδίδει και το χαρακτηριστικό της μη ανίχνευσής τους.

Τέλος εξαιτίας του γεγονότος ότι τα ΑΣΠ, παρέχουν προσδιορισμό θέσης, ταχύτητας και κινηματικής συμπεριφοράς και μάλιστα σε υψηλούς ρυθμούς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια πλειάδα εφαρμογών εκτός της πλοήγησης, όπως είναι η κατεύθυνση οχημάτων και πυραύλων κα.

2.9.2. Οι περιορισμοί των ΑΣΠ

Τα σφάλματα στον προσδιορισμό της θέσης, της ταχύτητας και της κινηματικής συμπεριφοράς αυξάνουν με τον χρόνο και μάλιστα χωρίς αυτή η αύξηση να σταματάει αν δεν επιβληθούν εξωτερικές δεσμεύσεις (με χρήση μετρήσεων άλλων αισθητήρων ή με ανανέωση των αρχικών συνθηκών) σε αυτά.

Το κόστος ιδίως των ΑΣΠ υψηλών επιδόσεων παραμένει αρκετά υψηλό, περίπου 70000\$-100000\$, γεγονός που αποτρέπει την χρησιμοποίησή τους σε ευρεία κλίμακα.

Εξαιτίας της δυνατότητας αυτόνομης λειτουργίας τους έχουν επιβληθεί περιορισμοί στις εξαγωγές των συστημάτων κυρίως υψηλών επιδόσεων, με αποτέλεσμα αυτά να μην είναι διαθέσιμα ούτε για ερευνητικούς σκοπούς.

Οι αυξημένες ανάγκες για τροφοδοσία αλλά και τα υψηλά επίπεδα εκπεμπόμενης θερμότητας κατά την λειτουργία τους εξακολουθούν να υπάρχουν και περιορίζουν την ευρεία χρήση τους, μειώνονται όμως όσο μειώνεται και το μέγεθος των συσκευών.

3. ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ (ΔΣΠ)

3.1. Γενικά

Στο κεφαλαίο αυτό γίνεται μια σύντομη αλλά αναγκαία αναφορά στα δορυφορικά συστήματα πλοήγησης και εντοπισμού θέσης (ΔΣΠ). Δεδομένου ότι τόσο στην ξένη αλλά και στην ελληνική βιβλιογραφία (Παραδείσης 2000, Δεληκαράογλου 2005 κα.) η λειτουργία και η χρήση των δορυφορικών συστημάτων έχει καλυφθεί εκτεταμένα στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει αναφορά μόνο στα σημεία της λειτουργίας των ΔΣΠ, που συνδέονται με τον ένα ή άλλο τρόπο με το αντικείμενο της συνεργασίας ΑΣΠ και ΔΣΠ.

Πιο συγκεκριμένα η πρώτη ενότητα του κεφαλαίου περιέχει μια σύντομη περιγραφή των κύριων ΔΣΠ, τα οποία βρίσκονται σε χρήση σήμερα, συνοδευόμενη από μια παρουσίαση του τρόπου λειτουργίας και των μεθόδων χρήσης αυτών.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα κύρια σφάλματα που υπεισέρχονται στην λειτουργία του συστήματος και οδηγούν στην μείωση της ακρίβειας του τόσο στην περίπτωση που χρησιμοποιείται για πλοήγηση ή κατεύθυνση όσο και στην περίπτωση που χρησιμοποιείται για εντοπισμό.

Το κεφάλαιο κλείνει με την παράθεση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών των ΔΣΠ καθώς και με μια σύντομη αναφορά στις τρέχουσες και μελλοντικές εξελίξεις που λαμβάνουν χώρα στον τομέα των δορυφορικών συστημάτων.

3.2. Δορυφορικά Συστήματα Εντοπισμού Θέσης και Πλοήγησης

3.2.1. Γενικές πληροφορίες

Τα δορυφορικά συστήματα εντοπισμού θέσης και πλοήγησης ξεκίνησαν στις αρχές της δεκαετίας του 1970 σαν στρατιωτικές εφαρμογές σχεδόν ταυτόχρονα στις ΗΠΑ και την πρώην ΕΣΣΔ .

Τα υπουργεία άμυνας των δύο χωρών έθεσαν σε εφαρμογή προγράμματα, τα οποία ερευνούσαν την δυνατότητα χρήσης δορυφόρων σε τροχιά γύρω από την γη για τον προσδιορισμό της θέσης σημείων πάνω στην γήινη επιφάνεια και στο διάστημα και τον καθορισμό ακριβούς ένδειξης χρόνου για στρατιωτικές εφαρμογές (Δεληκαράογλου,2005).

Οι προσπάθειες του αμερικάνικου και σοβιετικού υπουργείου άμυνας κατέληξαν στα συστήματα GPS (Global Navigation System) και GLONASS (Global Orbiting Navigation Satellite System) αντίστοιχα.

Τα συστήματα αυτά μετά από μια μακρά περίοδο δοκιμών και εκτοξεύσεων δορυφόρων έγιναν πλήρως επιχειρησιακά στα μέσα της δεκαετίας του 1990 και έκτοτε χρησιμοποιούνται ευρέως σε πλήθος εφαρμογών γεωδαιτικού και μη ενδιαφέροντος.

Μετά την διάλυση της ΕΣΣΔ το σύστημα GLONASS αντιμετώπισε αρκετά προβλήματα λειτουργίας και διαθεσιμότητας. Το 1999 τέθηκε σε εφαρμογή ένα πιλοτικό πρόγραμμα, υπό την αιγίδα του IGS (International GPS Service), συνεργασίας των δύο συστημάτων το οποίο και ολοκληρώθηκε το 2003.

Σήμερα και τα δύο συστήματα είναι λειτουργικά και οι δέκτες που κυκλοφορούν έχουν την δυνατότητα αναζήτησης των σημάτων των δορυφόρων και των δύο συστημάτων με αποτέλεσμα να αυξάνεται η κάλυψη και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά και οι σταθμοί εξέλιξης των δύο συστημάτων :

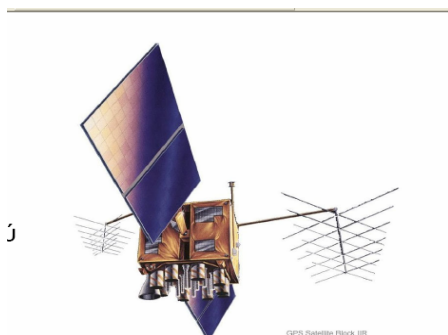
| ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ | GPS | GLONASS |
|--------------------------------|------------------|------------------|
| Δορυφόροι | 24+3 εφεδρικοί | 21+3 εφεδρικοί |
| Τροχιές | 6 | 3 |
| Κλίση τροχιών | 55° | 64.8° |
| Ύψος τροχιών | 20180 km | 19130 km |
| Datum | WGS 84 | PZ 90 |
| Κλίμακα χρόνου | UTC | UTC |
| Συχνότητα L1 | 1575 MHz | 1602-1609 MHz |
| Συχνότητα L2 | 1227 MHz | 1246-1251 MHz |
| 1 ^η εκτόξευση | Φεβρουάριος 1978 | Δεκέμβριος 1982 |
| Έναρξη λειτουργίας | Δεκέμβριος 1993 | Σεπτέμβριος 1993 |
| Δορυφόροι σε λειτουργία (2008) | 25+3 εφεδρικοί | 12 |

Πίνακας 3-1 : Συγκριτικός πίνακας χαρακτηριστικών των συστημάτων GPS και GLONASS

3.2.2. Βασικά τμήματα των ΔΣΠ

Τόσο το GPS όσο και το GLONASS αποτελούνται από τρία βασικά τμήματα :

- το τμήμα διαστήματος
- το τμήμα έλεγχου
- το τμήμα χρηστών



Εικόνα 3.1 : Δορυφόρος GPS (Block IIR)
(Πηγή : Boeing Inc.)



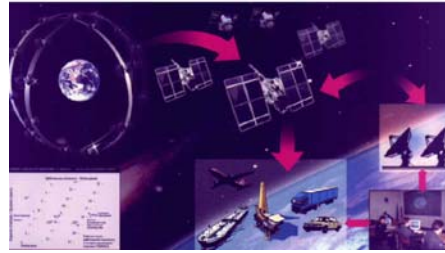
Εικόνα 3.2 : Δορυφόρος GLONASS
(Πηγή : www.rssi.ru)

Το τμήμα του διαστήματος αποτελείται από τους δορυφόρους (Εικόνες 3.1 και 3.2) του κάθε συστήματος που βρίσκονται σε τροχιά γύρω από την γη και εκπέμπουν τα ηλεκτρομαγνητικά σήματα με βάση τα οποία γίνονται οι μετρήσεις από τους δέκτες.

Το τμήμα ελέγχου αποτελεί την καρδιά των δορυφορικών συστημάτων και είναι αυτό που ρυθμίζει την λειτουργία του τμήματος του διαστήματος. Το τμήμα αυτό αποτελείται από σταθμούς παρακολούθησης, τοποθετημένους ομοιόμορφα σε όλη την γη για το σύστημα GPS (Εικόνα 3.3) και σε όλη την επικράτεια της πρώην ΕΣΣΔ για το GLONASS (Εικόνα 3.4), και από τους σταθμούς ελέγχου, ένα για κάθε σύστημα στο Colorado Springs και την Μόσχα αντίστοιχα.



Εικόνα 3.3 : Τμήμα ελέγχου GPS
(Πηγή :GPS review)



Εικόνα 3.4 : Βασικά τμήματα GLONASS
(Πηγή : www.rssi.ru)

Το τμήμα ελέγχου παρακολουθεί διαρκώς την κίνηση των δορυφόρων και υπολογίζει τις εφημερίδες ακριβείας (τροχιακά σφάλματα) και τις διορθωτικές παραμέτρους των χρονομέτρων των δορυφόρων.

Επίσης το τμήμα ελέγχου είναι υπεύθυνο για τον προσδιορισμό της σημαντικής παραμέτρου του χρόνου GPS (GPS time), με βάση τον μέσο όρο των ενδείξεων του συνόλου των ατομικών χρονομέτρων που τηρούνται σε αυτό.

Τέλος το τμήμα χρηστών αποτελείται από το σύνολο των χρηστών, που χρησιμοποιούν το σύστημα σε παγκόσμιο επίπεδο για πλοήγηση ή εντοπισμό θέσης.

3.2.3. Βασικές αρχές λειτουργίας των ΔΣΠ

Η λειτουργία των δορυφορικών συστημάτων βασίζεται στην λήψη και ανάλυση του δορυφορικού σήματος από τους δέκτες. Το σήμα περιέχει πληροφορία κώδικα και φάσης, η οποία αποκωδικοποιείται από τα εσωτερικά κυκλώματα των δεκτών και μετατρέπεται σε μέτρηση ψευδοαπόστασης και φάσης αντίστοιχα.

Οι εξισώσεις παρατήρησης ψευδοαπόστασης (Εξ. 3-1) και φάσης της φέρουσας συχνότητας (Εξ. 3-2) είναι (Παραδείσης, 2001) :

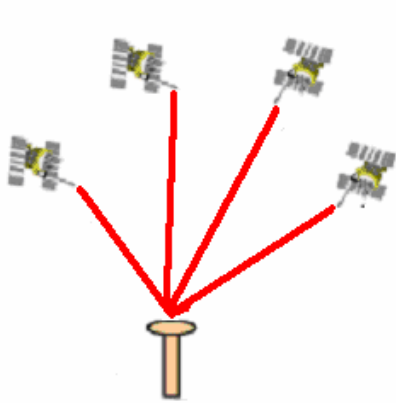
$$p r_r^s = \rho_r^s - c \cdot (\delta \tau_r - \delta t^s) + d_{iono} + d_{tropo} \quad (\text{Εξ. 3-1})$$

και

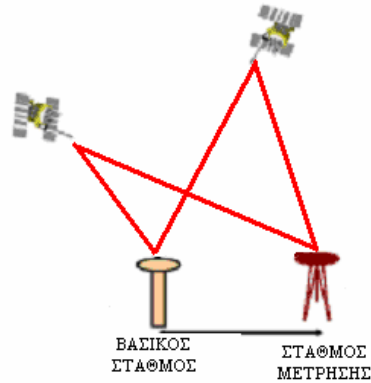
$$\Phi_r^s(\tau_r) = \frac{f}{c} \cdot \rho_r^s(T^s, T_r) - f \cdot (\delta \tau_r(\tau_r) - \delta t^s(t^s)) + N_r^s + d_{iono} + d_{tropo} \quad (\text{Εξ. 3-2})$$

όπου ρ_r^s είναι η γεωμετρική απόσταση δορυφόρου-δέκτη.

Με χρήση των παραπάνω εξισώσεων πραγματοποιείται ο προσδιορισμός θέσης με τα δορυφορικά συστήματα πλοήγησης και εντοπισμού, ο οποίος μπορεί να χωριστεί σε δύο μεγάλες κατηγορίες τον απόλυτο εντοπισμό (Εικόνα 3.5) και τον σχετικό εντοπισμό (Εικόνα 3.6).



Εικόνα 3.5 : Απόλυτος εντοπισμός

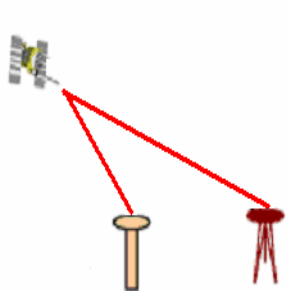


Εικόνα 3.6 : Σχετικός εντοπισμός

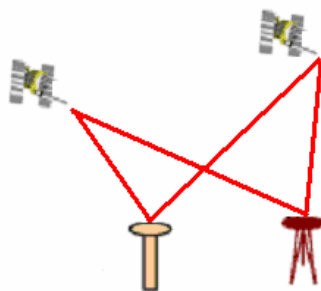
Ο απόλυτος εντοπισμός αναφέρεται στην περίπτωση προσδιορισμού της θέσης του δέκτη μόνο με χρήση των δικών του παρατηρήσεων, γίνεται συνήθως με χρήση παρατηρήσεων ψευδοαπόστασης, απαιτεί την ορατότητα τεσσάρων τουλάχιστον δορυφόρων και οδηγεί στον προσδιορισμό του διανύσματος από το κέντρο της γης μέχρι την θέση του δέκτη.

Ο σχετικός εντοπισμός αναφέρεται στην περίπτωση προσδιορισμού της θέσης του δέκτη με χρήση ταυτόχρονων παρατηρήσεων σε ένα ακόμα σημείο, του οποίου οι συντεταγμένες είναι γνωστές με μεγάλη ακρίβεια. Ο σχετικός εντοπισμός οδηγεί στον προσδιορισμό του διανύσματος μεταξύ των δύο σημείων και από εκεί εξάγονται οι συντεταγμένες του άγνωστου σημείου.

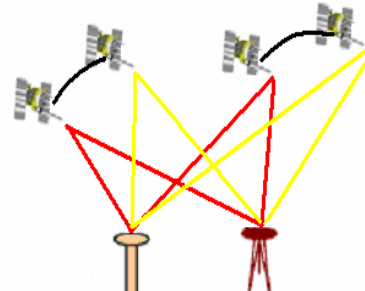
Απαιτεί συνήθως εκ των υστέρων επίλυση των μετρήσεων και παρουσιάζει σημαντικά καλύτερη ακρίβεια από την τεχνική του απόλυτου εντοπισμού. Στην τεχνική αυτή χρησιμοποιούνται μετρήσεις φάσεων και μάλιστα γραμμικοί συνδυασμοί αυτών που αναφέρονται ως απλές, διπλές και τριπλές διαφορές φάσεων.



Εικόνα 3.7 : Απλή διαφορά



Εικόνα 3.8 : Διπλή διαφορά



Εικόνα 3.9 : Τριπλή διαφορά

Κάθε γραμμικός συνδυασμός οδηγεί στην απαλοιφή ορισμένων σφαλμάτων και χρησιμοποιείται αναλόγως. Έτσι οι απλές διαφορές μπορούν να οδηγήσουν σε εξάλειψη των σφαλμάτων του χρονομέτρου του δορυφόρου (απλή διαφορά ως προς δέκτες) ή του δέκτη (απλή διαφορά ως προς δορυφόρους) μειώνουν όμως το πλήθος των παρατηρήσεων στο μισό.

Αντίστοιχα η διπλή διαφορά ως προς δέκτες και δορυφόρους μειώνει τα σφάλματα που οφείλονται στους δορυφόρους και εξαλείφει τελείως τα σφάλματα των χρονομέτρων των δεκτών μειώνει, όμως το πλήθος των παρατηρήσεων στο 25% των πρωτογενών μετρήσεων (Παραδείσης, 2001).

Τέλος οι τριπλές διαφορές έχουν ως κύριο πλεονέκτημα ότι δεν περιέχουν ως αγνώστους τις ασάφειες φάσης μειώνουν όμως το πλήθος των παρατηρήσεων στο 12.5% των αρχικών.

Η παραπάνω τεχνική του σχετικού εντοπισμού αναφέρεται στον στατικό εντοπισμό σημείων στην γήινη επιφάνεια με εκ των υστέρων επεξεργασία των μετρήσεων, όταν όμως ενδιαφέρει ο προσδιορισμός σημείων σε πραγματικό χρόνο τότε η τεχνική ονομάζεται σχετικός προσδιορισμός σε πραγματικό χρόνο.

Η τεχνική αυτή διαιρείται σε δύο μεγάλες κατηγορίες στο διαφορικό εντοπισμό (DGPS -Differential GPS),στην περίπτωση που γίνεται χρήση μετρήσεων κώδικα, και στον κινηματικό εντοπισμό πραγματικού χρόνου (RTK -Real Time Kinematic), στην περίπτωση που γίνεται χρήση μετρήσεων φάσης φέροντος κύματος.

Η πρώτη τεχνική χρησιμοποιείται κυρίως στη πλοήγηση και στις δόκιμες πλοίων ενώ η δεύτερη σε τοπογραφικές εργασίες και αποτυπώσεις οδικών αξόνων. Και οι δύο τεχνικές απαιτούν την χρήση εξοπλισμού ραδιοζεύξης ώστε ο σταθμός βάσης (base station) να μπορεί να εκπέμψει διορθώσεις και ο κινητός σταθμός (rover station) να τις λάβει.

3.3. Κύρια Σφάλματα και Αδυναμίες των ΔΣΠ

Η συγκεκριμένη ενότητα περιέχει τα κύρια σφάλματα που υπεισέρχονται στην λειτουργία των ΔΣΠ καθώς και τις κυριότερες αδυναμίες τους. Τα σφάλματα διακρίνονται γενικά σε τρεις μεγάλες κατηγορίες :

- στα σφάλματα λόγω δορυφόρου
- στα σφάλματα λόγω δέκτη
- στα σφάλματα λόγω της διάδοσης του δορυφορικού σήματος (ή φέροντος κύματος)

3.3.1. Το σφάλμα λόγω του χρονομέτρου των δορυφόρων

Τα χρονόμετρα των δορυφόρων είναι συσκευές ακριβείας ικανές για μετρήσεις χρόνου υψηλής σταθερότητας. Συγκεκριμένα κάθε δορυφόρος διαθέτει τέσσερα ατομικά χρονόμετρα, εκ των οποίων δύο κατασκευασμένα από ρουβίδιο και δύο από

καίσιο που έχουν σχετική ακρίβεια της τάξεως του 10^{-12} και 10^{-13} αντίστοιχα (Παραδείσης, 2000).

Παρόλη την εξαιρετική τους ακρίβεια τα χρονόμετρα αυτά παρουσιάζουν σφάλματα, τα οποία μπορούν γενικά να οριστούν ως η διαφορά του χρόνου που παράγεται από το χρονόμετρο του δορυφόρου με τον χρόνο GPS που αναφέρθηκε παραπάνω.

Τα σφάλματα αυτά δεν έχουν επίδραση στις τεχνικές του σχετικού εντοπισμού (διαφορικό GPS) μπορούν να οδηγήσουν όμως αν δεν διορθωθούν σε σφάλμα αρκετών μέτρων στις μετρήσεις απόλυτου εντοπισμού. Σχετικά αναφέρεται η περίπτωση του δορυφόρου SV 23, ο οποίος την 1 Ιανουαρίου 2004 παρουσίασε σφάλμα στο σύστημα χρονομέτρων του που οδήγησε σε αβεβαιότητα χιλιομέτρων στον εντοπισμό θέσης (GPS support center, 2006).

Τα σφάλματα των χρονομέτρων των δορυφόρων προσδιορίζονται και διορθώνονται από το επίγειο τμήμα ελέγχου της λειτουργίας του συστήματος GPS και στην συνέχεια οι διορθώσεις εκπέμπονται μέσω του μηνύματος ναυσιπλοΐας ανά μερικές ώρες. Μετά την εφαρμογή των διορθώσεων αυτών το σφάλμα που απομένει μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο κατά τις διαδικασίες του απόλυτου εντοπισμού ή της πλοήγησης.

Στις περιπτώσεις που τίθενται ζητήματα προσδιορισμού και μεταφοράς χρόνου μπορεί να γίνει ακριβέστερος προσδιορισμός του σφάλματος με εκ των υστέρων επίλυση των μετρήσεων και χρήση επικαιροποιημένων στοιχείων και εφημερίδων ακριβείας.

3.3.2. Το σφάλμα λόγω της εκπεμπόμενης εφημερίδας (τροχιακό σφάλμα)

Το σφάλμα της εκπεμπόμενης από τον δορυφόρο εφημερίδας ή αλλιώς σφάλμα της δορυφορικής τροχιάς αναφέρεται στην διαφορά της εκπεμπόμενης θέσης του δορυφόρου από την θέση που αυτός πραγματικά βρίσκεται.

Οι εκπεμπόμενες από τους δορυφόρους εφημερίδες περιέχουν στοιχεία για την κίνηση του δορυφόρου (θέση και ταχύτητα), που οδηγούν στον προσδιορισμό της τροχιάς του με ακρίβεια που προσεγγίζει το μέτρο.

Η χρήση των εκπεμπόμενων εφημερίδων μπορεί να οδηγήσει σε αβεβαιότητα της τάξεως των 3-4 μέτρων στον απόλυτο εντοπισμό της θέσης ενώ δεν επηρεάζει την διαδικασία του σχετικού εντοπισμού εκτός και αν το μήκος της μετρούμενης βάσης είναι αρκετά μεγάλο, όποτε και αλλάζει η γεωμετρία του σχηματισμού των δορυφόρων που ανιχνεύουν οι δύο δέκτες .

Τα σφάλματα τροχιάς αντιμετωπίζονται με την εκ των υστέρων επίλυση των μετρήσεων με χρήση εφημερίδων ακριβείας, οι οποίες παράγονται από τα διάφορα κέντρα του IGS (International GPS Service), όπως το CODE (Center for Orbit Determination in Europe) που εδρεύει στο Αστρονομικό Ινστιτούτο της Βέρνης και είναι διαθέσιμες από τον δικτυακό τους τόπο.

Η ακρίβεια των παραπάνω εφημερίδων είναι της τάξεως των 5-20 εκατοστών αναλόγως του είδους της εφημερίδας ταχεία [(rapid) ή ακριβής (precise)] (δικτυακός τύπος IGS).

3.3.3. Το σφάλμα λόγω του χρονομέτρου του δέκτη

Οι δέκτες χρησιμοποιούν χρονόμετρα χαλάζια (σχετική ακρίβεια 10^{-8}) τα οποία παρουσιάζουν μειωμένη ακρίβεια σε σχέση με τα αντίστοιχα συστήματα των δορυφόρων.

Το αποτέλεσμα είναι ο χρόνος που παράγεται από τους δέκτες να διαφέρει αρκετά σε σχέση με τον χρόνο GPS με αποτέλεσμα η μη διόρθωση του να εισάγει σημαντική αβεβαιότητα (Jekeli, 2001) στον προσδιορισμό της θέσης (1 msec σφάλματος αντιστοιχεί σε λάθος 300 km στη μέτρηση της απόστασης).

Το σφάλμα του χρονομέτρου του δέκτη μπορεί να διαφέρει από μερικά μέτρα μέχρι μερικές δεκάδες μέτρα και εξαρτάται από την ποιότητα του εσωτερικού χρονομέτρου του δέκτη (Godha, 2006).

Το συγκεκριμένο σφάλμα αντιμετωπίζεται είτε με την εισαγωγή του ως αγνώστου στις εξισώσεις παρατήρησης κώδικα και φάσης ή με την χρήση σχετικού εντοπισμού και με την τεχνική των διπλών διαφορών φάσης.

3.3.4. Το σφάλμα λόγω της ιονόσφαιρας

Η ιονόσφαιρα αποτελεί το τμήμα της ατμόσφαιρας, το οποίο εκτείνεται από τα 50 χιλιόμετρα πάνω από την επιφάνεια της γης μέχρι τα 1600 χιλιόμετρα. Οφείλει το όνομά της στο γεγονός ότι στην περιοχή αυτή τα μόρια του αέρα ιονίζονται, λόγω της υπερϊώδους ακτινοβολίας του ηλίου και απελευθερώνουν ηλεκτρόνια και ιόντα.

Το αποτέλεσμα αυτής της δραστηριότητας είναι η ιονόσφαιρα να παρουσιάζει διαταραχές, οι οποίες μεταβάλλονται απότομα και εξαρτώνται από το Συνολικό Ηλεκτρικό Φορτίο Ηλεκτρονίων (TEC- Total Electron Count) που με την σειρά του εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία και τις μαγνητικές καταιγίδες.

Οι διαταραχές της ιονόσφαιρας έχουν σημαντική επίδραση στην διάδοση του δορυφορικού σήματος και αποτελούν τον κυριότερο παράγοντα σφάλματος στις μετρήσεις με ΔΣΠ (Παραδείσης, 2001).

Η παραπάνω επίδραση ποικίλει αναλόγως της συχνότητας του σήματος και έχει διαφορετικά αποτελέσματα στις μετρήσεις κώδικα και φάσης. Έτσι οι μετρήσεις κώδικα καθυστερούν με αποτέλεσμα να υπολογίζονται αυξημένες ψευδοαποστάσεις σε σχέση με την διάδοση στο κενό ενώ οι μετρήσεις φάσης προηγούνται με αποτέλεσμα να δίνουν μικρότερες αποστάσεις σε σχέση με το κενό.

Το σφάλμα στον προσδιορισμό της θέσης λόγω της ιονόσφαιρας μπορεί να φτάσει και τα μερικά μέτρα αναλόγως του μήκους της βάσης και της επιτυχούς ή μη αντιμετώπισης του.

Κύριοι τρόποι αντιμετώπισης του συγκεκριμένου σφάλματος είναι οι κάτωθι (Παραδείσης, 2001) :

- η χρήση μαθηματικών μοντέλων (κυρίως χρησιμοποιείται το μοντέλο του Klobuchar)
- η χρήση διαφορών φάσης μεταξύ δεκτών
- η χρήση μετρήσεων και στις δύο συχνότητες (L1 και L2) και ο σχηματισμός γραμμικών συνδυασμών τους, πχ η L3 που χαρακτηρίζεται ως ελεύθερη ιονόσφαιρας (iono free)
- η μέτρηση μικρών βάσεων (μέχρι 15 χιλιόμετρα)

3.3.5. Το σφάλμα λόγω της τροπόσφαιρας

Η τροπόσφαιρα αποτελεί το τμήμα της ατμόσφαιρας, το οποίο εκτείνεται από τα 0 χιλιόμετρα πάνω από την επιφάνεια της γης μέχρι τα 40 χιλιόμετρα. Η τροπόσφαιρα σε αντίθεση με την ιονόσφαιρα είναι ουδέτερη και για αυτό τον λόγο δεν εκτρέπει τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εκπέμπουν οι δορυφόροι.

Παρόλα αυτά ο ξηρός αέρας αλλά και η υγρασία που επικρατούν στο συγκεκριμένο τμήμα της ατμόσφαιρας, προκαλούν καθυστέρηση του σήματος λειτουργώντας ως εμπόδια στην την διαδρομή του.

Το 90% της καθυστέρησης οφείλεται στον ξηρό αέρα, η συμπεριφορά του οποίου μπορεί σχετικά εύκολα να μοντελοποιηθεί, ενώ το υπόλοιπο 10% οφείλεται στην υγρασία, η οποία παρουσιάζει απρόβλεπτη συμπεριφορά που εξαρτάται από τα σύννεφα και άλλα μετεωρολογικά φαινόμενα με συνέπεια να είναι δύσκολη η μαθηματική αντιμετώπιση της.

Έτσι η χρήση μοντέλων με κυριότερα τα μοντέλα των Saastamoinen και Hopfield, αποκαθιστά σε μεγάλο βαθμό την επίδραση της τροπόσφαιρας, η οποία μειώνεται ακόμα περισσότερο με την μέτρηση μικρών βάσεων (μέχρι 100 km) όπου θεωρείται ότι η επίδραση της είναι ομοιόμορφη.

Ένας ακόμα παράγοντας που μειώνει την επίδραση της τροπόσφαιρας είναι η χρήση υψηλών γωνιών θέασης (elevation mask) στις μετρήσεις, επειδή τα σήματα των δορυφόρων που βρίσκονται σε χαμηλά σημεία ως προς τον ορίζοντα έχουν μεγαλύτερη διαδρομή στην περιοχή της τροπόσφαιρας.

3.3.6. Το σφάλμα λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων

Το σφάλμα λόγω πολλαπλών ανακλάσεων λαμβάνει χώρα όταν το δορυφορικό σήμα φτάνει στον δέκτη όχι μόνο απευθείας από τον δορυφόρο, αλλά και μέσω διαφορετικών διαδρομών που οφείλονται σε ανακλάσεις του σήματος σε γειτονικές επιφάνειες από μέταλλο και γυαλί (πχ κτίρια, κεραίες κτλ).

Το σφάλμα αυτό είναι καθαρά αποτέλεσμα της θέσης της κεραίας του δέκτη και έτσι το μέγεθος του διαφέρει ανάλογα με την τοποθεσία και το γειτονικό της περιβάλλον.

Η αντιμετώπισή του γίνεται με διάφορους τρόπους, που σχετίζονται τόσο με το χρησιμοποιούμενο λογισμικό όσο και με την κατασκευή της κεραίας και του δέκτη.

Έτσι αρκετοί γεωδαιτικοί δεκτές χρησιμοποιούν ένα ειδικά κατασκευασμένο φίλτρο (Bhatti, 2007) που παρεμβάλλεται μεταξύ του τμήματος λήψης του σήματος και του τμήματος αποκωδικοποίησης αυτού και απορρίπτει τα σήματα που προέρχονται από ανακλάσεις .

Επιπλέον αρκετές κεραίες χρησιμοποιούν ένα ειδικό πιάτο (choke ring antenna), το οποίο έχει ως σκοπό την απόρριψη των παραπάνω σημάτων, ενώ και η χρήση υψηλών γωνιών θέασης (elevation mask $>15^{\circ}$) βοηθάει αρκετά προς αυτό τον σκοπό.

Η καλύτερη όμως αντιμετώπιση του φαινόμενου των πολλαπλών ανακλάσεων γίνεται με την κατάλληλη επιλογή του σημείου μετρήσεων, ώστε να αποφεύγονται ανάλογες επιδράσεις οι οποίες μπορούν να εισάγουν σημαντικό σφάλμα μη αντιμετώπισιμο ακόμα και από μια εκ των υστέρων επεξεργασία των μετρήσεων.

3.3.7. Αδυναμίες των ΔΣΠ

Εκτός από τα παραπάνω σφάλματα η λειτουργία των ΔΣΠ παρουσιάζει μερικές εγγενείς αδυναμίες, οι οποίες οφείλονται στην κατασκευή του εξοπλισμού μετρήσεων (δέκτες και κεραίες), στην λειτουργία του συστήματος καθώς και στην διαδικασία εκτέλεσης των μετρήσεων, που αναφέρονται συνοπτικά στην συνέχεια.

Έτσι οι δέκτες παρουσιάζουν εκ κατασκευής ορισμένα σφάλματα, τα οποία οφείλονται στα ηλεκτρονικά κυκλώματα που διαθέτουν. Τέτοια σφάλματα όπως οι καθυστερήσεις, η αβεβαιότητα και ο θερμικός θόρυβος αναφέρονται γενικά στην βιβλιογραφία ως θόρυβος μετρήσεων.

Οι κεραίες από την άλλη παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις του πραγματικού κέντρου μέτρησης του σήματος με το γεωμετρικό κέντρο της κεραίας. Το πρόβλημα αυτό αναφέρεται γενικά σαν εκκεντρότητα της κεραίας και διορθώνεται με χρήση τιμών που δίνονται από τους κατασκευαστές και τα κέντρα του IGS.

Όσον αφορά την λειτουργία του συστήματος έχει ήδη αναφερθεί ότι η κατανομή των δορυφόρων γύρω από την γη έχει γίνει με γνώμονα την παροχή της δυνατότητας για ταυτόχρονη παρατήρηση τουλάχιστον πέντε δορυφόρων από κάθε σημείο της γης.

Το πρόβλημα που τίθεται σε αυτή την περίπτωση είναι η καλή γεωμετρία των προς παρατήρηση δορυφόρων. Η καλή γεωμετρία των παρατηρούμενων δορυφόρων δίνει ακριβέστερο προσδιορισμό θέσης και περιγράφεται από την λεγόμενη ανάλυση της εσωτερικής ακρίβειας ευρύτερα γνωστή ως DOP (Dilution Of Precision).

Τέλος η αδυναμία που παρουσιάζουν τα ΔΣΠ κατά την εκτέλεση των μετρήσεων οφείλεται στην απώλεια του σήματος ενός ή περισσότερων δορυφόρων λόγω κάποιας αιτίας (πχ. παρεμβολή εμποδίου μεταξύ δέκτη και δορυφόρων, χαμηλός λόγος σήματος προς θόρυβο κα.) και αναφέρεται ως απώλεια κύκλων (cycle slip).

Η απώλεια αγνώστου αριθμού ακέραιων κύκλων της φέρουσας συχνότητας πρέπει να αποκατασταθεί με κάποιο τρόπο αλλιώς οδηγεί σε σημαντικό σφάλμα ή ακόμα και σε αδυναμία επεξεργασίας των μετρήσεων (Παραδείσης, 2001) .

3.3.8. Σύνοψη της επίδρασης των σφαλμάτων και αδυναμιών των ΔΣΠ

Η επίδραση των κυριότερων σφαλμάτων και αδυναμιών των ΔΣΠ στην αβεβαιότητα προσδιορισμού θέσης φαίνεται συγκεντρωτικά στον πίνακα που ακολουθεί :

| ΣΦΑΛΜΑ | ΑΠΟΛΥΤΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ (ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΩΔΙΚΑ) | ΣΧΕΤΙΚΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ (ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΦΑΣΗΣ) |
|-------------------------|--|---|
| χρονόμετρο δορυφόρου | 0-3 m | 0 m |
| εκπεμπόμενες εφημερίδες | 0-1 m | ~ 0 m |
| χρονόμετρο δέκτη | 0-10 m | 0 m |
| ιονόσφαιρα | 2-20 m | 0.05-0.20 m |
| τροπόσφαιρα | 0.5-5 m | 0.1-1 m |
| ανακλάσεις | 0-5 m | 0-5 m |
| Θόρυβος μετρήσεων | 0.25-0.5 m | 0-0.002 m |

Πίνακας 3-2 : Σύνοψη της επίδρασης των κυριότερων σφαλμάτων των ΔΣΠ

(Πηγή : Godha, 2006 και Jekeli, 2001)

3.4. Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί των ΔΣΠ

Στο τμήμα αυτό γίνεται αναφορά στα πλεονεκτήματα αλλά και τους περιορισμούς, που παρουσιάζουν τα ΔΣΠ κατά την λειτουργία τους ως συστήματα εντοπισμού θέσης και πλοήγησης.

3.4.1. Πλεονεκτήματα των ΔΣΠ

Παρόλο το γεγονός ότι τα ΔΣΠ ξεκίνησαν σαν συστήματα αμιγώς στρατιωτικών εφαρμογών ναυσιπλοΐας και πλοήγησης, πολύ γρήγορα έγινε αντιληπτό ότι τα πλεονεκτήματα που παρουσίαζαν σε σχέση με άλλες δορυφορικές και επίγειες μεθόδους τα έκαναν ιδανικά και για πλήθος εμπορικών και επιστημονικών εφαρμογών. Τα πλεονεκτήματα αυτά αναλύονται στην συνέχεια :

Τα ΔΣΠ παρέχουν απευθείας συντεταγμένες της θέσης του μετρούμενου σημείου δίνοντας την δυνατότητα στον χρήστη για άμεση γνώση της θέσης αλλά και της ταχύτητας του (σε περίπτωση κίνησης).

Επιτυγχάνουν αρκετά μεγάλη ακρίβειας και δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα ακόμα και για βάσεις αρκετών χιλιομέτρων (500 km). Η ακρίβεια αυτή αυξάνεται με την αύξηση του χρόνου μετρήσεων ενώ η αξιοπιστία της λύσης βελτιώνεται κατά πολύ με εκ των υστέρων επίλυση των μετρήσεων με λογισμικό υψηλής ακριβείας

(Bernese 5.0) και χρήση προϊόντων ακριβείας (εφημερίδες ακριβείας, σταθμοί γνωστών συντεταγμένων κτλ).

Μπορούν να λειτουργήσουν σε όλες τις καιρικές συνθήκες ενώ η διαδικασία τόσο των μετρήσεων όσο και των επιλύσεων αυτών είναι απλή και δεν απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό.

Δεν απαιτούν την αμοιβαία ορατότητα των προς μέτρηση σημείων εξασφαλίζοντας έτσι την διεξαγωγή των μετρήσεων σε δύσκολα περιβάλλοντα ενώ είναι ιδανικά για μέτρηση δικτύων, που καλύπτουν μεγάλες περιοχές και αποτελούνται από πολλά σημεία και βάσεις.

Είναι ευέλικτα και μπορούν να συνεργαστούν με πλήθος άλλων συστημάτων, όπως τα αδρανειακά συστήματα, για να επιτύχουν την επιδιωκόμενη ακρίβεια και αποτέλεσμα. Η ευελιξία τους αυτή τα κάνει επίσης κατάλληλα για χρήση σε πλήθος εφαρμογών όπως η γεωδαισία, η τοπογραφία, η φωτογραμμετρία, τα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών κ.α.

Έχουν μικρές διαστάσεις και βάρος καθώς και σχετικά μικρό κόστος, τα οποία μειώνονται συνεχώς με την εξέλιξη της τεχνολογίας.

3.4.2. Περιορισμοί των ΔΣΠ

Μπορεί τα όσα έχουν προαναφερθεί να αναγάγουν τα δορυφορικά συστήματα ως το ιδανικό σύστημα για χρήση σε εφαρμογές πλοήγησης και εντοπισμού θέσης τα πράγματα δεν είναι όμως τόσο απλά. Τα ΔΣΠ από την φύση τους “υποφέρουν” από αριθμό περιορισμών που μειώνουν την ακρίβειά τους και τα καθιστούν ακατάλληλα για συγκεκριμένες εφαρμογές.

Συγκεκριμένα τα ΔΣΠ μπορεί να μην απαιτούν αμοιβαία ορατότητα μεταξύ των προς μέτρηση σημείων άλλα απαιτούν ανοικτό ορίζοντα και καθαρό ουρανό ώστε οι δέκτες να έχουν ορατότητα προς τους δορυφόρους. Έτσι η χρήση των ΔΣΠ στον πυκνοκατοικημένο αστικό ιστό ή σε δασωμένες περιοχές καθίσταται προβληματική ή και απαγορευτική.

Το γεγονός ότι οι αστικές περιοχές αποτελούν τα κύρια σημεία εφαρμογής των διαδικασιών πλοήγησης στην ξηρά καθώς και ότι η κίνηση σε δασωμένες περιοχές απαιτεί αρκετές φορές τον εντοπισμό θέσης εντείνουν ακόμα περισσότερο την συγκεκριμένη αδυναμία των ΔΣΠ.

Επιπλέον τα ΔΣΠ είναι ευάλωτα σε ηλεκτρονικές παρεμβολές σκόπιμες ή μη, οι οποίες μειώνουν την αξιοπιστία του συστήματος ή και εμποδίζουν τελείως την λειτουργία του.

Οι σκόπιμες παρεμβολές προέρχονται από τον διαχειριστή του συστήματος, πχ η κατάσταση Επιλεκτικής Διαθεσιμότητας ή η πλήρης παύση της λειτουργίας του συστήματος για πολιτική χρήση για ένα εικοσιτετράωρο μετά τα γεγονότα της 11^{ης} Σεπτεμβρίου του 2001, ενώ οι μη σκόπιμες οφείλονται στην παρουσία κοντά στους

σταθμούς μέτρησης έντονου ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος, πχ παρουσία κεραιών.

Τέλος τα ΔΣΠ παρουσιάζουν ακόμα υψηλό κόστος σχετικά με άλλες μεθόδους (επίγειες), που τα καθιστά απαγορευτικά για χρήση σε απλές εφαρμογές.

3.5. Σύγχρονες Τάσεις και Εξελίξεις των ΔΣΠ

Η ταχεία διάδοση και χρήση των ΔΣΠ σε πλήθος εφαρμογών και από εκατομμύρια χρηστών έχει οδηγήσει στην έρευνα και ανάπτυξη νέων τεχνικών, συστημάτων, εξοπλισμού και λογισμικού, που προορίζονται να ενισχύουν τις επιδόσεις και την αξιοπιστία των δορυφορικών συστημάτων που έχουν ήδη αναφερθεί.

Η παραπάνω έρευνα και η ανάπτυξη έχουν κατευθυνθεί σε δύο κυρίως τομείς, τον τομέα της ανάπτυξης και χρήσης βελτιωμένων εκπεμπόμενων σημάτων που χρησιμοποιούν νέες συχνότητες και τον τομέα της ανάπτυξης και υλοποίηση νέων συστημάτων δορυφορικού εντοπισμού.

3.5.1. Ανάπτυξη βελτιωμένων σημάτων λειτουργίας

Στον τομέα της ανάπτυξης βελτιωμένων σημάτων με χρήση νέων συχνοτήτων δύο είναι οι κυριότερες εξελίξεις, η ανάπτυξη της συχνότητας L5 και η αναβάθμιση της συχνότητας L2 σε L2C.

Η συχνότητα L2C είναι διαθέσιμη στους χρήστες από τους δορυφόρους της σειράς IIR-M του συστήματος GPS, ο πρώτος εκ των οποίων εκτοξεύτηκε στις 26 Σεπτεμβρίου 2005.

Η συχνότητα L5 είναι διαθέσιμη, σε πειραματικό στάδιο, στους χρήστες από τους δορυφόρους της σειράς IIF του συστήματος GPS, ο πρώτος εκ των οποίων εκτοξεύτηκε το 2005. Σε αρχική επιχειρησιακή χρήση σχεδιάζεται να είναι με τους δορυφόρους της σειράς III του συστήματος GPS, που προγραμματίζεται να τεθούν σε τροχιά από το 2012 (Bhatti, 2007).

Η νέα συχνότητα L5 (1176.45 MHz) θα έχει νέο ενισχυμένο σήμα, διπλάσια σχεδόν ισχύ από την L1, και ειδική διαμόρφωση που θα επιτρέπει την εκπομπή επιπλέον μηνυμάτων και πληροφορίας. Επιπλέον η συγκεκριμένη συχνότητα είναι ήδη δεσμευμένη για σκοπούς αεροναυσιπλοΐας και για το λόγο αυτό δεν επηρεάζεται από παρεμβολές.

Οι νέες συχνότητες προορίζονται για χρήση από μη στρατιωτικούς χρήστες και αναμένεται να είναι όλες πλήρως επιχειρησιακά διαθέσιμες από το έτος 2015 (Federal Aviation Administration, 2006).

Είναι σχεδιασμένες να προσφέρουν αξιοπιστία μέσω της βελτίωσης του λόγου σήμα προς θόρυβο, αντοχή στο φαινόμενο των πολλαπλών ανακλάσεων λόγω της αυξημένης ισχύς τους και καλύτερα αποτελέσματα στην αντιμετώπιση των

επιδράσεων της ιονόσφαιρας, επειδή πλέον οι διαθέσιμοι γραμμικοί συνδυασμοί συχνοτήτων αυξάνονται κατά πολύ.

3.5.2. Ανάπτυξη νέων δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης

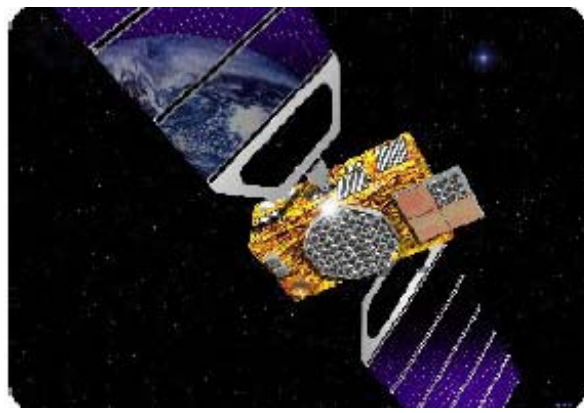
Στον συγκεκριμένο τομέα κυριαρχεί το δορυφορικό σύστημα GALILEO. Το σύστημα αυτό αποτελεί μια κοινή προσπάθεια της Ευρωπαϊκής Ένωσης και Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος (European Space Agency- ESA).

Πρόκειται για ένα εντελώς νέο σύστημα δορυφορικού εντοπισμού, το οποίο θα βασίζεται σε ένα νέο σχηματισμό δορυφόρων, οι οποίοι στην πλήρη ανάπτυξη του συστήματος θα αριθμούν τους 30 (27 σε χρήση και 3 εφεδρικοί) και θα κινούνται σε τροχιές μεσαίου ύψους με κλίση 55° - 60° σε σχέση με το επίπεδο του Ισημερινού.



Εικόνα 3.10 : Ο δορυφορικός σχηματισμός του συστήματος GALILEO

(Πηγή : www.europa.eu)



Εικόνα 3.11 : Δορυφόρος του συστήματος GALILEO

(Πηγή : www.europa.eu)

Το σύστημα GALILEO είναι εξ αρχής σχεδιασμένο για χρήση από μη στρατιωτικούς χρήστες και για το λόγο αυτό προσφέρει εγγύηση αξιοπιστίας, η οποία διευρύνεται ακόμα περισσότερο από την εσωτερική λειτουργία που ενσωματώνει το σύστημα και η οποία εγγυάται την άμεση ενημέρωση (εντός 6 sec) των χρηστών σε περίπτωση λειτουργικών ανωμαλιών του συστήματος ή κάποιου δορυφόρου (Δεληκαράογλου, 2005).

Θα διαθέτει την ίδια δομή με το σύστημα NAVSAT-GPS, έχοντας τμήμα διαστήματος, τμήμα ελέγχου και τμήμα χρηστών ενώ σχεδιάζεται να προσφέρει υπηρεσίες διαρθρωμένες σε τρία βασικά επίπεδα :

- μια βασική υπηρεσία που θα είναι διαθέσιμη δωρεάν σε όλους τους χρήστες, θα έχει παγκόσμια κάλυψη και θα προσφέρει ακρίβεια απόλυτου εντοπισμού 10 m (οριζοντιογραφικά)
- μια υπηρεσία υψηλού επιπέδου, η οποία θα απαιτεί συνδρομή και θα προσφέρει ακρίβεια απόλυτου εντοπισμού 4 m (υψομετρικά)
- μια υπηρεσία υψηλής ακριβείας και ελεγχόμενης πρόσβασης, η οποία θα είναι διαθέσιμη στις δημόσιες αρχές των κρατών-μελών του προγράμματος για εφαρμογές αυξημένων επιχειρησιακών απαιτήσεων

Πέραν των άλλων το σύστημα GALILEO θα προσφέρει πλήρη διασύνδεση με τα ήδη υπάρχοντα ΔΣΠ, ανεβάζοντας έτσι τον αριθμό των διαθέσιμων δορυφόρων σε 60-90, εκ των οποίων οι 30 θα είναι συνεχώς ορατοί με αποτέλεσμα την δραματική βελτίωση της ακρίβειας προσδιορισμού της θέσης ενός σημείου αλλά και της αξιοπιστίας.

**4. ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

4.1. Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται το αντικείμενο της συνέργιας των Αδρανειακών Συστημάτων Πλοήγησης με τα Δορυφορικά Συστήματα Πλοήγησης. Η συνεργασία ΑΣΠ και ΔΣΠ χρονολογείται από τα πρώτα στάδια της σχεδίασης του αμερικάνικου συστήματος ΔΣΠ (NAVSTAR-GPS), όπου εξεταζόταν η χρήση των πρώτων ως βοηθητική πηγή εξάλειψης των σφαλμάτων που πιστευόταν ότι θα έχει η λειτουργία των δευτέρων.

Βέβαια από τότε έχει περάσει πολύς καιρός και τα δύο συστήματα έχουν αναπτυχθεί και ωριμάσει σε τέτοιο βαθμό ώστε η συνεργασία τους, στις διάφορες μορφές και διαβαθμίσεις της, να οδηγεί σε ένα από τα ακριβέστερα και αξιόπιστα συστήματα πλοήγησης και όχι μόνο, ικανό να χρησιμοποιηθεί από τις πιο απλές μέχρι και τις πιο πολύπλοκες εφαρμογές.

Το παρόν κεφάλαιο ξεκινάει με μια παρουσίαση των πλεονεκτημάτων των ΟΑΔΣΠ ενώ περιέχει επίσης μια σύντομη περιγραφή των κύριων εφαρμογών, γεωδαιτικού κυρίως ενδιαφέροντος, που κάνουν χρήση αυτών.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι μέθοδοι και οι τεχνικές με τις οποίες γίνεται η ανάμιξη των δεδομένων των δύο συστημάτων και καθίσταται δυνατή η επίτευξη της συνεργασίας τους. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην παρουσίαση των φίλτρων KALMAN, τα οποία αποτελούν την πιο διαδεδομένη τεχνική συνέργιας των ΑΣΠ και των ΔΣΠ που βρίσκεται σε χρήση σήμερα.

Ακολουθεί μια παρουσίαση του μηχανισμού των εξισώσεων πλοήγησης των προσκολλημένων ΑΣΠ, δεδομένου ότι αυτά αποτελούν σήμερα την κυρίαρχη μορφή υλοποίησης ΑΣΠ αλλά και τον κύριο εταίρο των ΟΑΔΣΠ.

Το κεφάλαιο τελειώνει με μια περιγραφή των κύριων μορφών και βαθμών συνέργιας των ΑΣΠ με τα ΔΣΠ, στην οποία δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην ανάλυση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων κάθε περίπτωσης.

4.2. Τα Πλεονεκτήματα και οι Εφαρμογές των Ολοκληρωμένων Αδρανειακών και Δορυφορικών Συστημάτων Πλοήγησης (ΟΑΔΣΠ)

Στο συγκεκριμένο τμήμα του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα κύρια πλεονεκτήματα των ΟΑΔΣΠ σε σχέση με τα άλλα συστήματα πλοήγησης ενώ γίνεται και μια σύντομη παρουσίαση των κυριότερων εφαρμογών, γεωδαιτικού ενδιαφέροντος, οι οποίες κάνουν χρήση ΟΑΔΣΠ.

4.2.1. Πλεονεκτήματα των ΟΑΔΣΠ

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των ΟΑΔΣΠ είναι ένας συνδυασμός των πλεονεκτημάτων των ΑΣΠ και ΔΣΠ και συνοψίζονται στα κάτωθι :

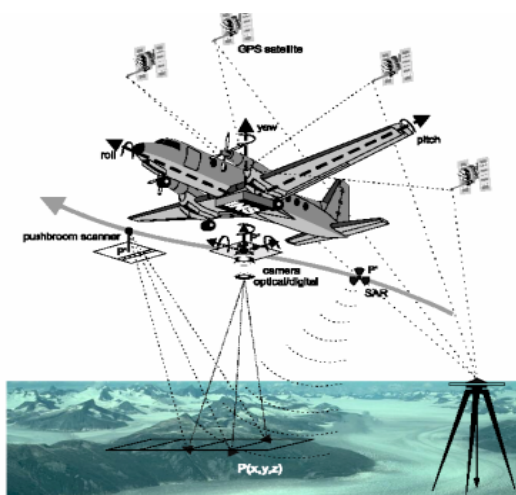
- Πραγματοποιούν συνεχή προσδιορισμό τη θέσης, ταχύτητας και κινηματικής συμπεριφοράς με μεγάλη ακρίβεια καθ' όλη την διάρκεια των μετρήσεων.
- Η ακρίβεια της προσδιοριζόμενης από αυτά τροχιάς είναι καλύτερη από αυτή που παρέχουν τα ΑΣΠ και ΔΣΠ, όταν λειτουργούν ανεξάρτητα.
- Παρέχουν λύση έξι βαθμών ελευθερίας
- Έχουν την δυνατότητα να παρέχουν αποτελέσματα, ακόμα και σε περιπτώσεις όπου δεν είναι δυνατή η ορατότητα προς δορυφόρους, η ακρίβεια και η διάρκεια των οποίων εξαρτώνται από την ποιότητα του ΑΣΠ.
- Αποδίδουν καλύτερα σε περιβάλλον έντονων παρεμβολών και αντιμετωπίζουν αποδοτικότερα το θόρυβο των μετρήσεων χάρις στην δυαδική φύση των μετρήσεων τους.
- Παρέχουν την δυνατότητα για προσδιορισμό του διανύσματος της βαρύτητας και κατ' επέκταση βαρυτικών μοντέλων.

4.2.2. Κύριες εφαρμογές των ΟΑΔΣΠ

Τα πλεονεκτήματα των ΟΑΔΣΠ, όπως παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο τα έχουν καταστήσει τα πλέον κατάλληλα συστήματα για πλήθος γεωδαιτικών εφαρμογών, οι οποίες μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες :

- Στην κατηγορία των συστημάτων αεροφωτογράφισης, τα οποία κάνουν χρήση των ΟΑΔΣΠ για να πραγματοποιήσουν γεωαναφορά (direct georeference) των αεροφωτογραφιών και
- Στην κατηγορία των Συστημάτων Κινητής Χαρτογράφησης (ΣΚΧ)- (Mobile Mapping Systems-MMS), τα οποία χρησιμοποιούν τα ΟΑΔΣΠ για προσδιορισμό των συντεταγμένων και όχι μόνο.

Στα συστήματα αεροφωτογράφισης χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές στρατηγικές συμμετοχής της λύσης των ΟΑΔΣΠ στην γεωαναφορά των αεροφωτογραφιών.



Εικόνα 4.1 : Διαδικασία άμεσης γεωαναφοράς
(Πηγή : Skaloud, 1999)



Εικόνα 4.2 : Κάμερα LMK με ενσωματωμένο ΟΑΔΣΠ
(Πηγή : Novatel Inc.)

Η πρώτη στρατηγική, γνωστή ως άμεση γεωαναφορά (direct georeference), πραγματοποιεί την γεωαναφορά των αεροφωτογραφιών μέσω του προσδιορισμού των παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού και των συντεταγμένων του κέντρου προβολής με χρήση μόνο της τροχιάς που παρέχει το ΟΑΔΣΠ .

Η στρατηγική αυτή δεν απαιτεί την ύπαρξη Σημείων Επίγειου Ελέγχου (ΣΕΕ) (Ground Control Points-GCP) η ακρίβεια της όμως είναι δύο με τρεις φορές χειρότερη αυτής που επιτυγχάνεται με τις κλασσικές μεθόδους αεροτριγωνισμού (Heipke et al., 2002).

Η δεύτερη στρατηγική χρησιμοποιεί την λύση του ΟΑΔΣΠ σε συνδυασμό με τα δεδομένα των ΣΕΕ, για να υπολογίσει τα στοιχεία της γεωαναφοράς. Η στρατηγική αυτή επιτυγχάνει εφάμιλλη ακρίβεια με την κλασσική διαδικασία αεροτριγωνισμού ενώ περιορίζει τον αριθμό των απαιτούμενων ΣΕΕ.

Την τελευταία δεκαετία μεγάλη ανάπτυξη παρουσιάζουν και τα επίγεια Συστήματα Κινητής Χαρτογράφησης (ΣΚΧ)- (Mobile Mapping Systems-MMS). Το πρώτο επίγειο ΣΚΧ παρουσιάστηκε από το Πανεπιστήμιο του Οχάιο (Ohio State University-OSU) και από τότε πολλά πανεπιστημιακά ιδρύματα αλλά και εταιρίες έχουν παρουσιάσει τις δικές τους υλοποιήσεις ΣΚΧ.



Εικόνα 4.3 : Κινητό σύστημα Χαρτογράφησης

(Πηγή : Πανεπιστήμιο Ν. Ουαλίας)



Εικόνα 4.4 : Αρχή λειτουργίας ΚΧΣ

(Πηγή : μερικώς από Πανεπιστήμιο Ν. Ουαλίας)

Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν ΟΑΔΣΠ και βοηθητικούς αισθητήρες (οδόμετρα, κλισίμετρα κτλ)σε συνδυασμό με ψηφιακές κάμερες, τοποθετημένα όλα σε ένα όχημα, με σκοπό την αποτύπωση κυρίως οδικών αξόνων.

Το κύριο χαρακτηριστικό των συστημάτων αυτών είναι η δυνατότητα τους για εξαγωγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των οδών που χαρτογραφούνται καθώς και για χαρτογράφηση σημείων ενδιαφέροντος (πινακίδες ΣΕΑ, σταθμοί ανεφοδιασμού βενζίνης κτλ.).

4.3. Τεχνικές Ανάμιξης Δεδομένων ΔΣΠ-ΑΣΠ

Τα Ολοκληρωμένα Αδρανειακά και Δορυφορικά Συστήματα Πλοήγησης είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού των μετρήσεων των δύο συστημάτων που τα αποτελούν, των δορυφορικών και των αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης.

Δεδομένου του υψηλού ρυθμού μετρήσεων στον οποίο λειτουργούν τα δύο συστήματα, ο συνδυασμός των δεδομένων τους μπορεί να χαρακτηριστεί σαν ένα δυναμικό σύστημα.

Η ανάλυση κι ο έλεγχος δυναμικών συστημάτων αποτελεί μέρος της θεωρίας ελέγχου. Η θεωρία ελέγχου συστημάτων έχει στην διάθεσή της πολλές τεχνικές και μοντέλα για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς και των σφαλμάτων ενός συστήματος δυναμικά μεταβαλλόμενου με τον χρόνο, όπως είναι η λειτουργία ενός ΟΑΔΣΠ.

Τα φίλτρα KALMAN αποτελούν σήμερα τον κυρίαρχο τρόπο υλοποίησης των διαφόρων τεχνικών συνεργασίας ΑΣΠ και ΔΣΠ για την δημιουργία ΟΑΔΣΠ και την παραγωγή συνδυαστική λύσης πλοήγησης.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της θεωρίας των φίλτρων KALMAN ενώ γίνεται και μια αναφορά σε νέες τεχνικές ανάμιξης δεδομένων αδρανειακών αισθητήρων και δορυφορικών δεκτών, οι οποίες βρίσκονται σε ερευνητικό ακόμα επίπεδο.

4.3.1. Βασικά στοιχεία της θεωρίας των φίλτρων KALMAN

Το 1960 ο R.E. KALMAN παρουσίασε μια νέα τεχνική ανάλυσης δεδομένων. Η τεχνική αυτή αποτελείτο από έναν επαναληπτικό αλγόριθμο ο οποίος προσδιόριζε την κατάσταση ενός γραμμικού συστήματος, που μεταβαλλόταν με τον χρόνο, με βάση την αρχή των ελαχίστων τετραγώνων.

Από τότε και μέχρι σήμερα η τεχνική αυτή έχει γίνει αντικείμενο έρευνας αρκετών επιστημονικών πεδίων, που περιέχουν συστήματα δυναμικά μεταβαλλόμενα με τον χρόνο, και χάρις στην ανάπτυξη της τεχνολογίας και της υπολογιστικής ισχύος των ηλεκτρονικών υπολογιστών έχει αποτελέσει την βάση για πάρα πολλές εφαρμογές.

Πρόκειται στην ουσία για έναν αποτελεσματικό στοχαστικό εκτιμητή, ο οποίος μπορεί να προσδιορίσει την προηγούμενη, παρούσα και επόμενη κατάσταση ενός συστήματος, για μια δεδομένη χρονική στιγμή, ακόμα και αν τα δεδομένα υποφέρουν από μεγάλο θόρυβο ή αν η ακριβής φύση του μοντέλου του συστήματος είναι σε μεγάλο βαθμό άγνωστη.

Τα φίλτρα KALMAN ταξινομούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες :

- Τα διακριτά ή γραμμικά φίλτρα KALMAN (Discrete/Linear KALMAN Filter- LKF), για αντιμετώπιση γραμμικών συστημάτων
- Τα μη γραμμικά φίλτρα KALMAN (Extended KALMAN Filter- EKF), για αντιμετώπιση μη γραμμικών συστημάτων

Ενώ και η λειτουργία τους μπορεί να χωριστεί σε δύο στάδια :

- Το στάδιο της πρόγνωσης (prediction)
- Το στάδιο της διόρθωσης (correction)

Στην συνέχεια δίνεται μια σύντομη μαθηματική περιγραφή της ανάλυσης ενός γραμμικού συστήματος με χρήση φίλτρων KALMAN (LKF).

Έτσι

αν η λειτουργία ενός συστήματος $x_k \in R^n$ χαρακτηρίζεται από την γραμμική εξίσωση :

$$x_k = A_k \cdot x_{k-1} + w_{k-1} \quad (\text{Εξ. 4-1})$$

και οι μετρήσεις $z_k \in R^m$ αυτού δίνονται από την εξίσωση :

$$z_k = H \cdot x_k + v_k \quad (\text{Εξ. 4-2})$$

όπου w , v αποτελούν τον λευκό θόρυβο της διαδικασίας και των μετρήσεων αντίστοιχα και μπορεί να θεωρηθούν ότι είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους και ότι ακολουθούν την κανονική κατανομή με μέσο όρο μηδέν και μεταβλητότητα, η οποία δίνεται από του πίνακες συμμεταβλητότητας Q_k , R_k αντίστοιχα, που μεταβάλλονται σε κάθε νέο βήμα μέτρησης.

Τότε

Αν x_k, \hat{x}_k είναι η a priori και η a posteriori κατάσταση του συστήματος στο χρονικό βήμα k , σκοπός του φίλτρου KALMAN είναι να υπολογίσει την a posteriori κατάσταση του συστήματος ως γραμμικό συνδυασμό της a priori κατάστασης και της διαφοράς της πραγματικής μέτρησης από την μέτρηση που προήλθε από το βήμα της πρόγνωσης, δηλαδή :

$$\hat{x}_k = x_k + K_k \cdot (z_k - H \cdot x_k) \quad (\text{Εξ. 4-3})$$

όπου K ($n \times m$) είναι ο λεγόμενος πίνακας Κέρδους του συστήματος, ο οποίος κάνοντας χρήση των μετρήσεων και των τιμών της πρόγνωσης ελαχιστοποιεί την a posteriori μεταβλητότητα του συστήματος, και μπορεί να προσδιορισθεί με πολλούς τρόπους ο πιο δημοφιλής είναι όμως (Welch and Bishop, 2006):

$$K_k = P_k \cdot H^T \cdot (H \cdot P_k \cdot H^T + R_k)^{-1} \quad (\text{Εξ. 4-4})$$

όπου P_k , R_k είναι οι a priori πίνακες συμμεταβλητότητας του συστήματος και των μετρήσεων αντίστοιχα.

Όπως φαίνεται από την Εξ. 4-4, όταν ο a priori πίνακας συμμεταβλητότητας του συστήματος πλησιάζει το μηδέν το φίλτρο εμπιστεύεται πιο πολύ την πρόγνωση από την μέτρηση, ενώ το αντίθετο συμβαίνει όταν στο μηδέν πλησιάζει ο a priori πίνακας συμμεταβλητότητας των μετρήσεων.

Η παραπάνω διαδικασία μπορεί, όπως έχει ειπωθεί, να χωριστεί σε δύο στάδια το στάδιο της πρόγνωσης και το στάδιο της διόρθωσης. Το φίλτρο εκτιμά σε κάποια χρονική στιγμή k την κατάσταση του συστήματος και στην συνέχεια με την μορφή ενός κύκλου ανατροφοδότησης (Εικόνα 4.5) επιστρέφει και διορθώνει τον θόρυβο των μετρήσεων.

Έτσι οι εξισώσεις πρόγνωσης είναι υπεύθυνες για την πρόγνωση της κατάστασης του συστήματος στην επόμενη χρονική στιγμή (*a priori* τιμές) ενώ οι εξισώσεις διόρθωσης είναι υπεύθυνες με την ενσωμάτωση νέων μετρήσεων στις *a priori* τιμές να υπολογίσουν βελτιωμένες *a posteriori* τιμές.

Εικόνα 4.5 : Κύκλος ανατροφοδότησης στην διαδικασία του φίλτρου KALMAN

Στην περίπτωση που το προς μελέτη σύστημα χαρακτηρίζεται από μη γραμμικές εξισώσεις, η αντιμετώπιση παραμένει η ίδια και το μόνο που αλλάζει είναι ότι η οι εξισώσεις γραμμικοποιούνται κατά Taylor στην προσωρινή κατάσταση του συστήματος, ενώ γίνεται και χρήση των Ιακωβιανών πινάκων.

4.3.2. Νέες τεχνικές ανάμιξης δεδομένων

Παρόλα τα πλεονεκτήματα που επιδεικνύει το φίλτρο KALMAN στην αντιμετώπιση συστημάτων που χαρακτηρίζονται από δυναμικές μεταβολές και υψηλό θόρυβο μετρήσεων εντούτοις υποφέρει από δύο σημαντικά μειονεκτήματα.

Το πρώτο και κυριότερο είναι ότι η λύση του συστήματος εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τα προκαθορισμένα μοντέλα σφάλματος, που δίνονται από τους πίνακες συμμεταβλητότητας Q και R του συστήματος και των μετρήσεων, (Noureldin et al, 2003). Αν επιλεγεί λάθος μοντέλο σφάλματος τότε η λύση του συστήματος είναι απρόβλεπτη και δεν χαρακτηρίζεται από αξιοπιστία.

Το δεύτερο είναι το γεγονός ότι αν κάποιες από τις μεταβλητές του συστήματος δεν καταστεί δυνατόν να μετρηθούν τότε επηρεάζεται η όλη διαδικασία της πρόγνωσης-διόρθωσης και το φίλτρο οδηγείται σε αστάθεια.

Τα παραπάνω μειονεκτήματα είναι πολύ πιο έντονα στην περίπτωση της χρήσης του φίλτρου KALMAN, ως αλγόριθμου ανάμιξης δεδομένων αδρανειακών και δορυφορικών συστημάτων καθόσον τα συστήματα αυτά, ιδίως τα πρώτα, χαρακτηρίζονται από υψηλή δυναμική σφαλμάτων, τα οποία αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου λειτουργίας.

Στην προσπάθεια να αντιμετωπιστούν τα παραπάνω προβλήματα στην χρήση του φίλτρου KALMAN στην ανάμιξη δεδομένων αδρανειακών και δορυφορικών συστημάτων παρουσιάστηκε το 2003 (Noureldin et al, 2003) μια νέα τεχνική, η οποία βασίζεται στην χρήση των αρχών της ανάλυσης με κυματίδια (wavelets) και των νευρωνικών δικτύων (neural network).

Η τεχνική αυτή βασίζεται στην ανάλυση των δεδομένων στο πεδίο της συχνότητας και όχι του χρόνου, όπως γίνεται με τα φίλτρα KALMAN. Αρχικά λοιπόν χρησιμοποιείται ένας μετασχηματισμός κυματιδίων για να μεταφέρει τις μετρήσεις από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας. Ο μετασχηματισμός αυτός είναι προτιμότερος από τον αντίστοιχο μετασχηματισμό Fourier, επειδή αντίθετα με αυτόν διατηρεί την πληροφορία του χρόνου και μετά τον μετασχηματισμό.

Στην συνέχεια τα δεδομένα επεξεργάζονται από ένα νευρωνικό δίκτυο σε δύο φάσεις, την φάση της εκπαίδευσης και την φάση της πρόγνωσης. Στην φάση της εκπαίδευσης το νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύεται με βάση τα δεδομένα εισόδου και με χρήση ενός αλγόριθμου εκπαίδευσης (Levenberg – Marquardt). Κυρίαρχο ρόλο στην φάση αυτή παίζουν κυρίως τα δεδομένα από τον δορυφορικό δέκτη, που θεωρούνται τα πλέον αξιόπιστα.

Στην συνέχεια (φάση πρόγνωσης), τα δεδομένα αναλύονται από το νευρωνικό δίκτυο με βάση την αποκτηθείσα γνώση και παράγονται τα σφάλματα στον υπολογισμό της θέσης, της ταχύτητας και τη ευθυγράμμισης από την AMM. Τα σφάλματα αυτά αφαιρούνται από την υπολογισμένη θέση και ταχύτητα και προκύπτει η τροχιά ακριβείας.

Η παραπάνω τεχνική παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα φίλτρα KALMAN, τα οποία φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί :

| ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ | ΦΙΛΤΡΟ KALMAN | ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ |
|----------------|--|-----------------------|
| Μοντέλο | μαθηματικό | εμπειρικό |
| Προϋποθέσεις | γνώση μοντέλου σφαλμάτων (πίνακες R,Q) | καμία |
| Σύστημα | η σχεδίαση του εξαρτάται από το είδος του συστήματος (ΑΣΠ-ΔΣΠ) | ανεξάρτητο συστήματος |

Πίνακας 4-1 : Διαφορές φίλτρων KALMAN και Νευρωνικών Δικτύων

(Πηγή : Noureldin et al, 2003)

4.4. Ο Μηχανισμός των Εξισώσεων Πλοήγησης των Προσκολλημένων ΑΣΠ

Η συγκεκριμένη ενότητα έχει ως σκοπό την παρουσίαση των εξισώσεων πλοήγησης των προσκολλημένων ΑΣΠ. Επιλέχθηκαν για να παρουσιαστούν οι συγκεκριμένες εξισώσεις διότι τα προσκολλημένα ΑΣΠ είναι τα πλέον διαδεδομένα συστήματα για χρήση σε εμπορικές εφαρμογές στη σημερινή εποχή και επίσης χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε συνδυασμό με τα ΔΣΠ.

Επιπλέον επιλέχθηκε η παρουσίασή τους στα πλαίσια του συγκεκριμένου κεφαλαίου ώστε να γίνει πιο κατανοητή η επίδραση των ΔΣΠ στον προσδιορισμό της κίνησης (θέση, ταχύτητα, κινηματική συμπεριφορά) του κινητού και κατ' επέκταση στην πλοήγηση αυτού με χρήση ΟΑΔΣΠ .

4.4.1. Οι εξισώσεις πλοήγησης των προσκολλημένων ΑΣΠ

Η κίνηση ενός σώματος μπορεί να εκφραστεί ως μοντέλο από έναν συνδυασμό διαφορικών εξισώσεων δευτέρας και πρώτης τάξεως, οι οποίες περιγράφουν την κινηματική κατάσταση του σώματος στην πάροδο του χρόνου.

Στην πλοήγηση με χρήση προσκολλημένων ΑΣΠ οι παραπάνω εξισώσεις δομούνται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μετατρέπουν τις μετρήσεις των επιταχυνσιόμετρων (δύναμη ανά δόκιμη μάζα f^b) και των γυροσκοπίων (γωνιακή ταχύτητα ω_{ib}^i), που γίνονται στο σύστημα αναφοράς του κινούμενου σώματος σε σχέση με το αδρανειακό σύστημα αναφοράς σε θέση, ταχύτητα και κινηματική συμπεριφορά.

Η θέση και ταχύτητα δίνονται από τα διανύσματα r και v αντίστοιχα ενώ η κινηματική συμπεριφορά προσδιορίζεται από τον πίνακα στροφής C_b^s μεταξύ του συστήματος αναφοράς του κινούμενου σώματος και του συστήματος αναφοράς που επιλέγεται κάθε φορά, ώστε να αναπτυχθεί ο μηχανισμός των εξισώσεων πλοήγησης

Ο μηχανισμός των εξισώσεων πλοήγησης είναι στην ουσία η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων της κίνησης ενός κινητού, δηλαδή ο προσδιορισμός των διανυσμάτων της θέσης και της ταχύτητας και του πίνακα στροφής, τα στοιχεία του οποίου προσδιορίζουν την κινηματική συμπεριφορά του κινητού.

Επειδή ακριβώς κατά την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων της κίνησης προσδιορίζονται τα παραπάνω στοιχεία, τα οποία υλοποιούν την τροχιά (trajectory) ενός κινητού καθώς και την συμπεριφορά του κατά την κίνηση επί αυτής της τροχιάς και τα οποία δίνουν την δυνατότητα για πλήρη πλοήγηση-κατεύθυνση του κινητού, κρίνεται πιο ορθή η χρήση των όρων εξισώσεις πλοήγησης και μηχανισμός των εξισώσεων πλοήγησης αντί των όρων εξισώσεις της κίνησης και μηχανισμός των εξισώσεων της κίνησης.

Οι παραπάνω όροι προσεγγίζουν καλύτερα την έννοια των όρων navigation equation και mechanization equations, οι οποίοι έχουν επικρατήσει ευρύτερα στη διεθνή βιβλιογραφία και οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν τη μαθηματική

μοντελοποίηση της πλοήγησης με χρήση ΑΣΠ. Ως τέτοιοι θα χρησιμοποιηθούν οι παραπάνω όροι στην συνέχεια της εργασίας.

Στην συνέχεια θα αναπτυχθούν οι εξισώσεις πλοήγησης σε ένα οποιοδήποτε σύστημα αναφοράς υπολογισμού των εξισώσεων πλοήγησης (c-frame) το οποίο περιστρέφεται σε σχέση με το αδρανειακό σύστημα αναφοράς με γωνιακή ταχύτητα ίση με ω_{ic}^c (Jekeli, 2001).

Έστω το διάνυσμα της θέσης ενός κινητού στο σύστημα αναφοράς c είναι x^c , τότε η θέση του κινητού ως προς το αδρανειακό σύστημα αναφοράς θα είναι :

$$x^i = C_c^i \cdot x^c \quad (\text{Εξ. 4-5})$$

η παραγωγή της παραπάνω εξίσωσης δίνει την ταχύτητα :

$$\dot{x}^i = \mathcal{C}_c^i \cdot \dot{x}^c + C_c^i \cdot \dot{x}^c = C_c^i \cdot \Omega_{ic}^c \cdot x^c + C_c^i \cdot \dot{x}^c \quad (\text{Εξ. 4-6})$$

ενώ μετά από παραγωγή της Εξ. 4-6 και τις κάτωθι πράξεις

$$\begin{aligned} \ddot{x}^i &= \mathcal{C}_c^i \cdot \Omega_{ic}^c \cdot \dot{x}^c + C_c^i \cdot \mathcal{C}_{ic}^i \cdot \dot{x}^c + C_c^i \cdot \Omega_{ic}^c \cdot \dot{x}^c + \mathcal{C}_c^i \cdot \dot{x}^c + C_c^i \cdot \ddot{x}^c \Rightarrow \\ \ddot{x}^i &= C_c^i \cdot \Omega_{ic}^c \cdot \Omega_{ic}^c \cdot x^c + C_c^i \cdot \mathcal{C}_{ic}^i \cdot \dot{x}^c + C_c^i \cdot \Omega_{ic}^c \cdot \dot{x}^c + C_c^i \cdot \Omega_{ic}^c \cdot \dot{x}^c + C_c^i \cdot \ddot{x}^c \end{aligned}$$

προκύπτει η δεύτερη παράγωγος, που δίνει την επιτάχυνση

$$\ddot{x}^i = C_c^i \cdot \ddot{x}^c + 2 \cdot C_c^i \cdot \Omega_{ic}^c \cdot \dot{x}^c + C_c^i \cdot (\Omega_{ic}^c \cdot \Omega_{ic}^c + \mathcal{C}_{ic}^i) \cdot x^c \quad (\text{Εξ. 4-7})$$

Αξίζει εδώ να σημειωθεί η χρήση του διαγώνιου συμμετρικού πίνακα όπως αυτός έχει οριστεί από τις Εξ. 2-7 και 2-8 και ο οποίος χρησιμοποιείται για να μετατρέψει το εξωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων, που προέρχεται από την χρήση της γωνιακής ταχύτητας, σε πράξεις πινάκων.

Κάνοντας χρήση της ιδιότητας του πίνακα C_c^i να είναι ορθοκανονικός η Εξ. 4-7 λύνεται ως προς \ddot{x}^c και γίνεται :

$$\ddot{x}^c = C_i^c \cdot \ddot{x}^i - 2 \cdot \Omega_{ic}^c \cdot \dot{x}^c - (\Omega_{ic}^c \cdot \Omega_{ic}^c + \mathcal{C}_{ic}^i) \cdot x^c \quad (\text{Εξ. 4-8})$$

και επειδή η επιτάχυνση ως προς το αδρανειακό σύστημα μπορεί να γραφεί σύμφωνα με την Εξ. 2-5 :

$$\ddot{x}^c = g^i + f^i \quad (\text{Εξ. 4-9})$$

όπου g^i και f^i είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και η μέτρηση του επιταχυνσιομέτρου αντίστοιχα, εκφρασμένες στο αδρανειακό σύστημα αναφοράς.

Έτσι η Εξ. 4-8 γίνεται :

$$\frac{d}{dt} \mathcal{X} = -2 \cdot \Omega_{ic}^c \cdot \mathcal{X} - (\Omega_{ic}^c \cdot \Omega_{ic}^c + \mathcal{G}_{ic}^c) \cdot x^c + g^c + f^c \quad (\text{Εξ. 4-10})$$

Ο πρώτος και δεύτερος όρος της παραπάνω εξίσωσης αντιστοιχούν στην επιτάχυνση λόγω της δύναμης Coriolis και στην φυγόκεντρο επιτάχυνση και είναι οι όροι που εισάγονται, ώστε να έχουν ισχύ οι νόμοι της κίνησης του Νεύτωνα στο μη αδρανειακό σύστημα υπολογισμού των εξισώσεων πλοήγησης (c-frame), το οποίο περιστρέφεται ως προς το αδρανειακό σύστημα αναφοράς.

Η Εξ. 4-10 μαζί με την Εξ. 4-11, η οποία ακολουθεί αποτελούν τις διαφορικές εξισώσεις πλοήγησης σε ένα οποιοδήποτε σύστημα αναφοράς το οποίο περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ως προς το αδρανειακό σύστημα αναφοράς.

$$\frac{d}{dt} x^c = \mathcal{X} \quad (\text{Εξ. 4-11})$$

Σε ένα προσκολλημένο ΑΣΠ όμως οι μετρήσεις των επιταχυνσιομέτρων και των γυροσκοπίων είναι αντίστοιχα f^b και ω_{ib}^i , αφού όπως είναι γνωστό οι μετρήσεις των οργάνων γίνονται στο σύστημα αναφοράς του κινούμενου σώματος (b-frame).

Σύμφωνα με τα όσα έχουν αναφερθεί στο 2^ο κεφάλαιο σχετικά με τις βασικές αρχές λειτουργίας των προσκολλημένων ΑΣΠ, οι μετρήσεις των γυροσκοπίων χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του πίνακα των συνημίτονων κατεύθυνσης μεταξύ του συστήματος του κινούμενου σώματος και του συστήματος αναφοράς στο οποίο αναπτύσσεται ο μηχανισμός των εξισώσεων πλοήγησης.

Ο πίνακας αυτός χρησιμοποιείται για τον μετασχηματισμό των μετρήσεων των επιταχυνσιομέτρων στο σύστημα αναφοράς, στο οποίο αναπτύσσεται ο μηχανισμός των εξισώσεων πλοήγησης, ενώ επιπλέον τα στοιχεία του προσδιορίζουν και την κινηματική συμπεριφορά του κινητού μέσω των τριών γωνιών κατεύθυνση, κλίση και παρεκτροπή (yaw, pitch, roll).

Ο πίνακας μετασχηματισμού C_b^c υπολογίζεται από την ολοκλήρωση της γωνιακής ταχύτητας ω_{cb}^b , η οποία προκύπτει από την διαφορική εξίσωση που ακολουθεί :

$$\omega_{cb}^b = \omega_{ib}^b - C_c^b \cdot \omega_{ic}^c \quad (\text{Εξ. 4-12})$$

και στην οποία ω_{ib}^i είναι η μέτρηση των γυροσκοπίων και ω_{ic}^i η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του τυχόντος συστήματος αναφοράς σε σχέση με το αδρανειακό σύστημα αναφοράς.

Αφού προσδιοριστεί ο C_b^c μετασχηματίζονται οι μετρήσεις των γυροσκοπίων στο τυχόν σύστημα αναφοράς με βάση την ακόλουθη εξίσωση

$$f^c = C_b^c \cdot f^b \quad (\text{Εξ. 4-13})$$

και στην συνέχεια δομούνται οι εξισώσεις πλοήγησης σύμφωνα με τις Εξ. 4-10 και 4-11.

4.4.2. Οι εξισώσεις πλοήγησης στο τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς (l-frame)

Η υλοποίηση των εξισώσεων πλοήγησης στο τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς είναι μια από τις πιο συχνά συναντούμενες στην βιβλιογραφία. Ενδιαφέρον στην συγκεκριμένη υλοποίηση παρουσιάζει το γεγονός ότι από αυστηρά μαθηματική προσέγγιση δεν υφίσταται λύση πλοήγησης στο τοποκεντρικό σύστημα αφού αυτό αλλάζει από σημείο σε σημείο και έτσι δεν λαμβάνει χώρα κίνηση στο οριζόντιο επίπεδο (Jekeli, 2001).

Παρόλα αυτά το συγκεκριμένο πλαίσιο αναφοράς αποτελεί ιδιαίτερα χρήσιμη επιλογή για την απεικόνιση των συνιστωσών της ταχύτητας (Ανατολικά, Βόρεια, Πάνω ABΠ-ENU) της κίνησης που λαμβάνει χώρα σε σχέση με το γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς.

Έτσι για τις εξισώσεις πλοήγησης στο τοποκεντρικό σύστημα ισχύει :

Το διάνυσμα θέσης σε γεωδαιτικές συντεταγμένες δίνεται από :

$$r^l = (\phi, \lambda, h)^T \quad (\text{Εξ. 4-14})$$

και η πρώτη παραγωγός αυτού συνδέεται με τις συνιστώσες της ταχύτητας στο τοποκεντρικό σύστημα ως εξής :

$$\dot{r}^l = \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\lambda} \\ \dot{h} \end{pmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{M+h} & 0 \\ \frac{1}{(N+h) \cdot \cos \phi} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_E \\ v_N \\ v_{Up} \end{bmatrix} = P \cdot v^l \quad (\text{Εξ. 4-15})$$

όπου M, N οι ακτίνες καμπυλότητας της μεσημβρινής και της κύριας κάθετης τομής, που δίνονται αντίστοιχα από τις Εξ. 4-16, 4-17 (Βέης, Μπιλλήρης και Παπαζήση, 2006)

$$M = \frac{a \cdot (1 - e^2)}{(1 - e^2 \cdot \sin^2 \phi)^{3/2}} \quad (\text{Εξ. 4-16})$$

$$N = \frac{a}{(1 - e^2 \cdot \sin^2 \phi)^{1/2}} \quad (\text{Εξ. 4-17})$$

όπου a , e ο μεγάλος ημιάξονας και η εκκεντρότητα του ελλειψοειδούς.

Η δε ταχύτητα περιστροφής ω_{el}^l του τοποκεντρικού συστήματος αναφοράς ως προς το γεωκεντρικό σύστημα εκφρασμένη στο τοποκεντρικό σύστημα δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (Stovall, 1997)

$$\omega_{el}^l = \begin{bmatrix} -\phi \\ \mathcal{R} \cos \phi \\ \mathcal{R} \sin \phi \end{bmatrix} \quad (\text{Εξ. 4-18})$$

και προέρχεται από την σχέση

$$\mathcal{C}_l^e = C_l^e \cdot \Omega_{el}^l = \begin{bmatrix} -\sin \lambda & -\sin \phi \cdot \cos \lambda & \cos \phi \cdot \cos \lambda \\ \cos \lambda & -\sin \phi \cdot \sin \lambda & \cos \phi \cdot \sin \lambda \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & \mathcal{R} \sin \phi & -\mathcal{R} \cos \phi \\ -\mathcal{R} \sin \phi & 0 & -\phi \\ \mathcal{R} \cos \phi & \phi & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{Εξ. 4-19})$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω οι εξισώσεις πλοήγησης στο τοποκεντρικό σύστημα θα δίνονται (Jekeli, 2001) από την παρακάτω εξίσωση

$$\mathcal{X} = \begin{bmatrix} \mathcal{X} \\ \mathcal{Y} \\ \mathcal{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P \cdot v^l \\ C_b^l \cdot f^b - (2 \cdot \Omega_{ie}^l + \Omega_{el}^l) \times v^l + g^l \\ C_b^l \cdot \Omega_{ib}^l \end{bmatrix} \quad (\text{Εξ. 4-20})$$

4.5. Βαθμοί Συνέργιας Αδρανειακών και Δουρυφορικών Συστημάτων Πλοήγησης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι διάφορες τεχνικές συνέργιας, οι οποίες χρησιμοποιούνται στην συνεργασία των ΑΣΠ και των ΔΣΠ. Οι τεχνικές αυτές αποτελούν άλλο ένα ενδιαφέρον πεδίο έρευνας στο τομέα των ΟΑΔΣΠ και έχουν ως θέμα αναπτυχθεί και αντιμετωπιστεί από πληθώρα συγγραμμάτων και ερευνητικών προγραμμάτων.

Σήμερα οι τεχνικές αυτές έχουν πλέον τυποποιηθεί και κατηγοριοποιηθεί μετατοπίζοντας το πεδίο της έρευνας περισσότερο προς την ανάπτυξη νέων αλγορίθμων υλοποίησης τους, παρά προς την ανάπτυξη νέων αρχιτεκτονικών συνέργιας.

Στην συνέχεια θα γίνει μια σύντομη περιγραφή των κριτηρίων κατηγοριοποίησης των παραπάνω τεχνικών, θα ακολουθήσει ανάλυση των κυριότερων μορφών συνέργιας και τέλος θα γίνει αναφορά σε ειδικά θέματα που προκύπτουν κατά την συνεργασία των δύο συστημάτων πλοήγησης.

4.5.1. Γενικά

Στην βιβλιογραφία έχει επικρατήσει να χρησιμοποιείται ο όρος επίπεδο συνέργιας (level of integration), ο οποίος και εκφράζει τον βαθμό στον οποίο έχουν συνδυαστεί τα δύο συστήματα.

Στην πράξη η συνέργια των δύο συστημάτων καθορίζεται από δύο βασικά χαρακτηριστικά (Jekeli, 2001) :

- από τον βαθμό στον οποίο αναμιγνύονται τα δεδομένα των δύο συστημάτων για να εξαχθεί μια συνδυαστική λύση και ο οποίος χαρακτηρίζεται από την δομή του αλγορίθμου που χρησιμοποιείται για την σύζευξη των δεδομένων
- από τον βαθμό στον οποίο οι μετρήσεις του ενός συστήματος χρησιμοποιούνται για να υποβοηθήσουν την λειτουργία του άλλου

Η κατηγοριοποίηση με βάση τα παραπάνω κριτήρια έχει απασχολήσει εκτεταμένα την διεθνή βιβλιογραφία με αποτέλεσμα να συναντάται πληθώρα όρων, που δεν αντιστοιχούν όμως κατ' ανάγκη σε διαφορετικούς βαθμούς συνέργιας.

Μια καλή αντιμετώπιση του παραπάνω θέματος γίνεται από την J.D.Gautier (Gautier, 2003) και είναι αυτή που θα ακολουθηθεί στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας με ταυτόχρονη προσπάθεια να αποδοθούν οι όροι και στα ελληνικά.

Έτσι στην περίπτωση όπου οι πρωτογενείς μετρήσεις από τα δύο συστήματα αναλύονται ανεξάρτητα και στην συνέχεια τα παραγόμενα αποτελέσματα συνδυάζονται με χρήση τεχνικών, οι οποίες έχουν ήδη αναφερθεί (πχ φίλτρα KALMAN), για να παραχθεί μια συνδυαστική λύση ο βαθμός συνέργιας χαρακτηρίζεται ως χαλαρής συνέργιας (loosely coupled), μια ειδική μορφή της οποίας είναι η τελείως χαλαρή συνέργια (uncoupled systems).

Αντίθετα στην περίπτωση όπου οι πρωτογενείς μετρήσεις από τα δύο συστήματα συνδυάζονται και αναλύονται σε ένα βήμα για να παραχθεί μια συνδυαστική λύση ο βαθμός συνέργιας χαρακτηρίζεται ως στενής συνέργιας (tightly coupled), μια ειδική μορφή της οποίας είναι η πλήρως στενή συνέργια (ultra tightly coupled).

Συγκεντρωτικά οι διάφοροι βαθμοί συνέργιας, που απαντώνται στα σύγχρονα ΟΑΔΣΠ είναι :

- τελείως χαλαρής συνέργιας (uncoupled systems)
- χαλαρής συνέργιας (loosely coupled)
- στενής συνέργιας (tightly coupled)
- πλήρως στενής συνέργιας (ultra tightly coupled)

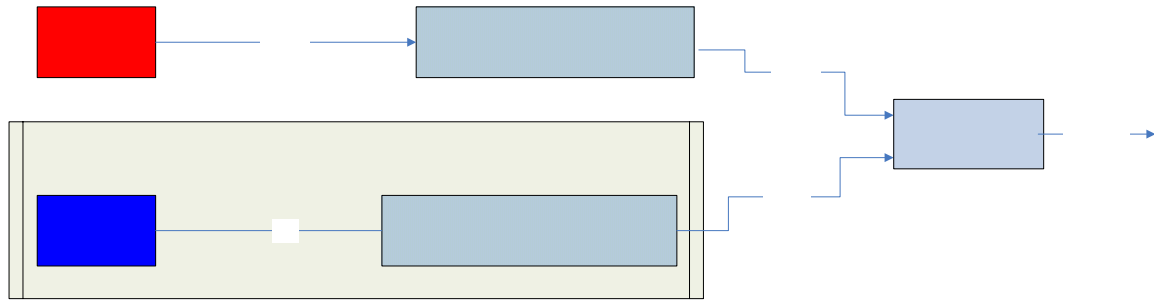
Οι τρεις πρώτοι βαθμοί συνέργιας χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις όπου το ΑΣΠ χρησιμοποιείται σαν κύριο σύστημα προσδιορισμού της τροχιάς του κινητού ενώ το ΔΣΠ χρησιμοποιείται για την παροχή δεδομένων με σκοπό τον περιορισμό των σφαλμάτων του ΑΣΠ και την βελτίωση της λύσης του ΟΑΔΣΠ.

Ο τέταρτος βαθμός συνέργιας, στις διάφορες υλοποιήσεις του, χρησιμοποιείται όταν το ΑΣΠ χρησιμοποιείται ως βοηθητικό σύστημα στην λειτουργία του ΔΣΠ. Το ΑΣΠ

χρησιμοποιείται ως εξωτερική πηγή πληροφορίας, ώστε το ΔΣΠ να προσδιορίζει πιο γρήγορα την θέση του, να εντοπίζει ταχύτερα το σήμα των δορυφόρων, να προβαίνει σε αποτελεσματικότερη επίλυση ασαφειών κα.

4.5.2. Συστήματα τελείως χαλαρής συνέργιας (uncoupled systems)

Πρόκειται για τον πιο απλό βαθμό συνεργασίας μεταξύ των δύο συστημάτων, των ΑΣΠ και των ΔΣΠ. Στην ουσία τα δύο συστήματα λειτουργούν τελείως ανεξάρτητα και οι παραγόμενες λύσεις διαβιβάζονται σε ένα λογικό ελεγκτή, ο οποίος έχει δομηθεί με απλή αρχιτεκτονική, για να προσδιοριστεί η βέλτιστη λύση.



Εικόνα 4.6 : Συστήματα τελείως χαλαρής συνέργιας

Έτσι το ΑΣΠ χρησιμοποιεί τα δεδομένα των επιταχυνσιόμετρων (Δv) και των γυροσκοπίων ($\Delta \theta$) για να προσδιορίσει την θέση ($\phi_{\text{ΑΣΠ}}, \lambda_{\text{ΑΣΠ}}, h_{\text{ΑΣΠ}}$), την ταχύτητα (V_N, V_E, V_{UP}) και την κινηματική συμπεριφορά (C_b^n) του κινητού δεν παρέχει όμως την αβεβαιότητα προσδιορισμού των παραπάνω στοιχείων, ούτε χρησιμοποιεί κάποια τεχνική ανατροφοδότησης για τον έλεγχο και την διόρθωση των σφαλμάτων λειτουργίας του με αποτέλεσμα αυτά να αυξάνονται πολλαπλασιαστικά με τον χρόνο.

Ομοίως το ΔΣΠ χρησιμοποιεί τις μετρήσεις ψευδοαποστάσεων (ρ) και φάσεων (ϕ) για να προσδιορίσει την θέση ($\phi_{\text{ΔΣΠ}}, \lambda_{\text{ΔΣΠ}}, h_{\text{ΔΣΠ}}$) και την ταχύτητα του κινητού (V_N, V_E, V_{UP}) ενώ παρέχει και μια εκτίμηση των αβεβαιοτήτων των παραπάνω μεγεθών.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω συστημάτων εισάγονται σε ένα απλό αλγόριθμο επιλογής, όπως αυτός της Εξ. 4-10 (Jekeli, 2001), με χρήση του οποίου προκρίνεται η βέλτιστη λύση .

$$\begin{bmatrix} \phi_k \\ \lambda_k \\ h_k \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} \phi_{\text{ΔΣΠ}t_k} \\ \lambda_{\text{ΔΣΠ}t_k} \\ h_{\text{ΔΣΠ}t_k} \end{bmatrix} & \text{εάν ΔΣΠ διαθέσιμο} \\ \begin{bmatrix} \phi_{\text{ΑΣΠ}t_k} + (\phi_{\text{ΑΣΠ}t_0} - \phi_{\text{ΑΣΠ}t_0}) \\ \lambda_{\text{ΑΣΠ}t_k} + (\lambda_{\text{ΑΣΠ}t_0} - \lambda_{\text{ΑΣΠ}t_0}) \\ h_{\text{ΑΣΠ}t_k} + (h_{\text{ΑΣΠ}t_0} - h_{\text{ΑΣΠ}t_0}) \end{bmatrix} & \text{εάν ΔΣΠ δεν είναι διαθέσιμο} \end{cases} \quad (\text{Εξ. 4-21})$$

όπου t_0 είναι η τελευταία χρονική στιγμή που το ΔΣΠ ήταν διαθέσιμο.

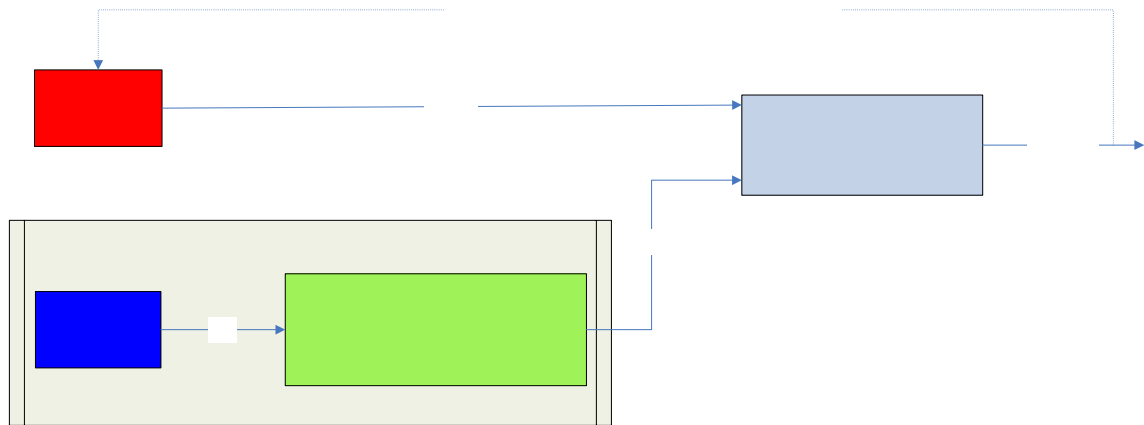
Όπως είναι φανερό από την παραπάνω εξίσωση, η συγκεκριμένη τεχνική συνεργασίας δίνει περισσότερο βάρος στα αποτελέσματα του ΔΣΠ από ότι στα αποτελέσματα του ΑΣΠ και αυτό λόγω του γεγονότος ότι τα τελευταία προέρχονται από επεξεργασία των μετρήσεων του ΔΣΠ με κάποιο μοντέλο ελέγχου δυναμικών καταστάσεων, όπως τα φίλτρα KALMAN, το οποίο εξασφαλίζει σε μεγάλο βαθμό την ακεραιότητα αυτών.

Η συγκεκριμένη τεχνική δεν εξασφαλίζει ικανοποιητική ακρίβεια και δεν χρησιμοποιείται συχνά. Μπορεί να συναντηθεί σε συστήματα πλοήγησης αεροσκαφών, τα οποία βρίσκονται σε δοκιμαστική φάση, και πάντα σε συνδυασμό με ένα σύστημα που θα βοηθάει την λύση του ΑΣΠ στην τρίτη διάσταση (πχ βαρυτομετρικοί αισθητήρες) όταν δεν είναι διαθέσιμο το ΔΣΠ, αφού εκεί τα σφάλματα του πρώτου αυξάνουν ραγδαία χωρίς εξωτερικές δεσμεύσεις.

4.5.3. Συστήματα χαλαρής συνέργειας (loosely coupled)

Όπως και στην προηγούμενη κατηγορία έτσι και σε αυτή τα δύο συστήματα λειτουργούν ανεξάρτητα, χρησιμοποιώντας τις πρωτογενείς μετρήσεις τους για να υπολογίσουν την θέση (P), την ταχύτητα (V) και την κινηματική συμπεριφορά (C_b^n) του κινητού.

Η διαφορά τους από τα συστήματα τελείως χαλαρής συνέργειας έγκειται στην χρησιμοποίηση ενός πολύ πιο εξελιγμένου μοντέλου για την επιλογή της βέλτιστης λύσης στην θέση του απλού αλγόριθμου επιλογής που χρησιμοποιούν τα τελευταία.



Εικόνα 4.7 : Συστήματα χαλαρής συνέργειας

Όπως φαίνεται κι την Εικόνα 4.7, τα ΔΣΠ χρησιμοποιούν τον εσωτερικό αλγόριθμο πλοήγησης, που συνήθως αποτελεί υλοποίηση ενός φίλτρου KALMAN, για να μετατρέψουν τις μετρήσεις ψευδοαποστάσεων (ρ) και φάσεων (ϕ) σε θέση ($P_{\Delta\Sigma\Pi}$), ταχύτητα ($V_{\Delta\Sigma\Pi}$) και χρόνο (T).

Ομοίως τα ΑΣΠ χρησιμοποιούν τα δεδομένα των επιταχυνσιόμετρων (Δv) και των γυροσκοπίων ($\Delta\theta$) για να προσδιορίσουν την θέση ($P_{\Delta\Sigma\Pi}$), την ταχύτητα ($V_{\Delta\Sigma\Pi}$) και τη κινηματική συμπεριφορά (C_b^n).

Στην συνέχεια οι διαφορές της θέσης (Δr) και της ταχύτητας (Δv), που προκύπτουν από τους παραπάνω υπολογισμούς χρησιμοποιούνται ως είσοδος στον αλγόριθμο πλοήγησης, ο οποίος παράγει μια εκτίμηση του σφάλματος στον υπολογισμό της θέσης (δr), της ταχύτητας (δv) και της αρχικής ευθυγράμμισης ($\delta\epsilon$) του ΑΣΠ.

Ο αλγόριθμος πλοήγησης που χρησιμοποιείται είναι συνήθως ένα εκτεταμένο φίλτρο KALMAN (EKF) και για τον λόγο αυτό τα συστήματα αυτής της μορφής ονομάζονται και συστήματα φίλτρων σε σειρά ή σε παράθεση.

Τα συστήματα αυτής της κατηγορίας παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της απλότητας στον σχεδιασμό του αλγόριθμου πλοήγησης, επειδή γίνεται χρήση των αποτελεσμάτων και όχι των πρωτογενών μετρήσεων των ΔΣΠ και δεν απαιτείται γνώση του εσωτερικού αλγόριθμου πλοήγησης αυτών.

Επιπλέον των παραπάνω τα συστήματα χαλαρής συνέργειας προσφέρουν ευελιξία στην επιλογή και χρήση των αδρανειακών και δορυφορικών συστημάτων που πρόκειται να συνεργαστούν, επειδή η συνεργασία αυτή λαμβάνει χώρα σε επίπεδο λογισμικού και όχι υλικού.

Δίνεται έτσι η δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει διάφορους τύπους δορυφορικών δεκτών και να τους συνδυάσει επίσης με διάφορους τύπους αδρανειακών μονάδων μέτρησης, εφόσον βρίσκονται μέσα στις προδιαγραφές που απαιτούνται από τον αλγόριθμο πλοήγησης, εξασφαλίζοντας έτσι την απαιτούμενη ακρίβεια για την εργασία που εκτελεί. Πέρα αυτού κάθε σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτόνομα και να παράξει δεδομένα από μόνο του είτε για ερευνητικούς σκοπούς, είτε στην περίπτωση βλάβης του άλλου συστήματος.

Τα συστήματα χαλαρής συνέργειας παρουσιάζουν όμως και μειονεκτήματα, το σπουδαιότερο από τα όποια είναι ή αδυναμία τους να παράξουν συνδυασμένη λύση στην περίπτωση, όπου υπάρχει απώλεια δορυφορικού σήματος.

Τα συγκεκριμένα συστήματα βασίζονται στην υποτιθέμενη ακριβέστερα υπολογισμένη λύση από τα ΔΣΠ, για να ελέγξουν τα συνεχώς αυξανόμενα σφάλματα στην λειτουργία των ΑΣΠ και να υπολογίσουν την βέλτιστη λύση (P , V , C_b^n). Έτσι όταν είναι ορατοί λιγότεροι από τέσσερις δορυφόροι τότε το ΔΣΠ δεν μπορεί να παρέχει λύση με αποτέλεσμα τα σφάλματα του ΑΣΠ να μη μπορούν να ελεγχθούν και η ακρίβεια της λύσης να χειροτερεύει με τον χρόνο.

Άλλο ένα μειονέκτημα των συστημάτων αυτής της κατηγορίας είναι η προγραμματιστική αρχιτεκτονική που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή της βέλτιστης λύσης και η οποία προβλέπει την χρήση δύο φίλτρων KALMAN σε σειρά, ένα για την λύση του ΔΣΠ και ένα για την συνδυαστική λύση ΑΣΠ-ΔΣΠ. Το μειονέκτημα αυτό έχει δύο σοβαρές συνέπειες.

Η πρώτη αναφέρεται στο γεγονός ότι τα αποτελέσματα του ΔΣΠ προέρχονται από ανάλυση των μετρήσεων από το εσωτερικό φίλτρο KALMAN με αποτέλεσμα να αποτελούν συνάρτηση της δυναμικής και των συσχετίσεων που λαμβάνουν χώρα κατά την εφαρμογή του φίλτρου. Έτσι ο εκτιμώμενος θόρυβος που τα συνοδεύει δεν είναι τυχαίος (λευκός θόρυβος) αλλά αποτέλεσμα στατιστικής επεξεργασίας.

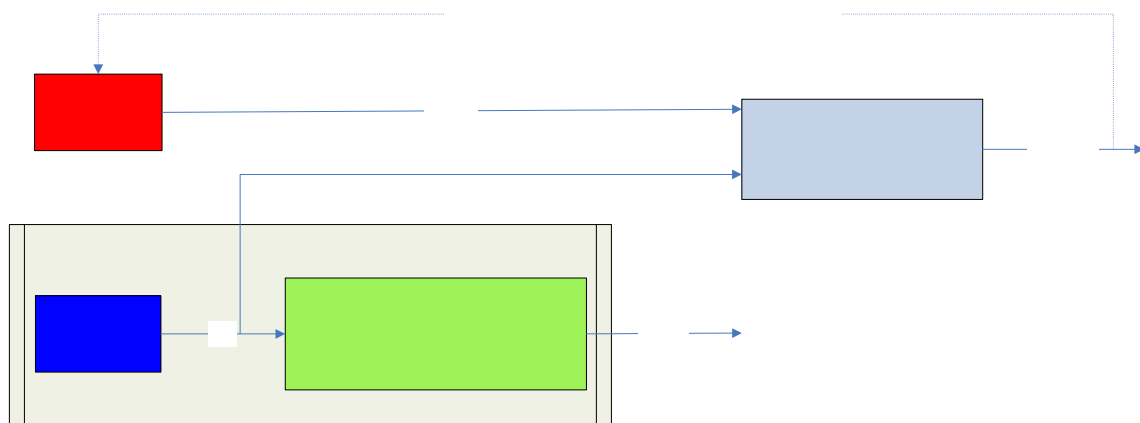
Όταν λοιπόν αυτά χρησιμοποιούνται ως είσοδος στο δεύτερο φίλτρο KALMAN, που δομεί τον αλγόριθμο πλοήγησης, παραβιάζεται μια από τις βασικές συνθήκες εφαρμογής των φίλτρων KALMAN, η οποία απαιτεί τα εισερχόμενα δεδομένα να χαρακτηρίζονται από λευκό θόρυβο. Συνέπεια του παραπάνω γεγονότος είναι η απαίτηση για επιπλέον έλεγχο και συντονισμό του βασικού αλγόριθμου πλοήγησης, ώστε να αποφευχθεί αστοχία αυτού (Gautier, 2003).

Η δεύτερη σοβαρή συνέπεια του παραπάνω μειονεκτήματος συνίσταται στο ότι σε πολλές περιπτώσεις οι σχεδιαστές του βασικού αλγόριθμου πλοήγησης δεν γνωρίζουν την δομή και λειτουργία του εσωτερικού μοντέλου του ΔΣΠ, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται δυσχέρειες στην ενσωμάτωση των αποτελεσμάτων του δεύτερου στο πρώτο.

Τα συστήματα αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις, όπου δεν αναμένεται να υπάρξουν σοβαρές και μεγάλης διάρκειας διακοπές στην ορατότητα των δορυφόρων. Έτσι βρίσκουν εφαρμογή συχνά στην πλοήγηση αεροσκαφών, πύραυλων κτλ.

4.5.4. Συστήματα στενής συνέργιας (tightly coupled)

Τα συστήματα στενής συνέργιας κάνουν και αυτά χρήση ενός αλγόριθμου πλοήγησης βασισμένου στα φίλτρα KALMAN, μόνο που σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται ένα μόνο φίλτρο το οποίο επεξεργάζεται όλες τις πρωτογενείς μετρήσεις και από τα δύο συστήματα για να εξάγει την βέλτιστη συνδυαστική λύση.



Εικόνα 4.8 : Συστήματα στενής συνέργιας

Η Εικόνα 4.8 παρουσιάζει την δομή ενός συστήματος στενής συνέργιας. Ο αλγόριθμος πλοήγησης στην περίπτωση αυτή είναι ένα πολύ πιο πολύπλοκο φίλτρο

KALMAN το οποίο δέχεται σαν είσοδο τις μετρήσεις (Δv) και ($\Delta \theta$) του ΑΣΠ και (ρ) και (φ) του ΔΣΠ και παράγει ως έξοδο τις διορθώσεις για την θέση (δr), την ταχύτητα (δv) και την αρχική ευθυγράμμιση (δe), οι οποίες ανανεώνουν την λύση του ΑΣΠ και δίνουν την τελική λύση (P, V, c_b^T, T).

Το μειονέκτημα ενός τέτοιου συστήματος είναι άμεσα εμφανές και έγκειται στο γεγονός της πολυπλοκότητας σχεδιασμού του φίλτρου και του υπολογιστικού φόρτου που συνεπάγεται η εφαρμογή του.

Ο αλγόριθμος πλοήγησης σε αυτή την περίπτωση εκτός από τον υπολογισμό της τελικής λύσης καλείται ταυτόχρονα να διαχειριστεί και τις πρωτογενείς μετρήσεις του ΔΣΠ με αποτέλεσμα να απαιτεί την χρήση επιπλέον μεταβλητών, όπως του σφάλματος του χρονομέτρου του δέκτη και της εκπεμπόμενης τροχιάς των δορυφόρων, καλή γνώση εκ μέρους των σχεδιαστών του της δομής και των αρχών λειτουργίας των ΔΣΠ και πολύ περισσότερο χρόνο υπολογισμών (Gautier, 2003 και Bhatti, 2007).

Ένα επίσης μεγάλο μειονέκτημα των συστημάτων στενής συνέργιας είναι ότι η κεντρική δομή έλεγχου, με την χρήση ενός και μόνο φίλτρου, που ακολουθούν δεν επιτρέπει την ανεξάρτητη χρήση των ΑΣΠ και ΔΣΠ ούτε όμως και την χρήση αισθητήρων, διαφορετικού τύπου από αυτούς με τους οποίους δομήθηκε αρχικά το σύστημα, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται άμεσα η ευελιξία του συστήματος.

Το μεγάλο πλεονέκτημα των συστημάτων αυτού του είδους είναι η δυνατότητα τους να παράγουν συνδυαστική λύση ΑΣΠ-ΔΣΠ με ικανοποιητική ακρίβεια ακόμα και αν οι διαθέσιμοι ορατοί δορυφόροι είναι λιγότεροι των τεσσάρων.

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο αλγόριθμος πλοήγησης κάνει χρήση των πρωτογενών μετρήσεων του συστήματος ΔΣΠ και όχι πλήρους λύσης με αποτέλεσμα να μπορεί να λειτουργήσει με τα ελάχιστα δυνατά δεδομένα.

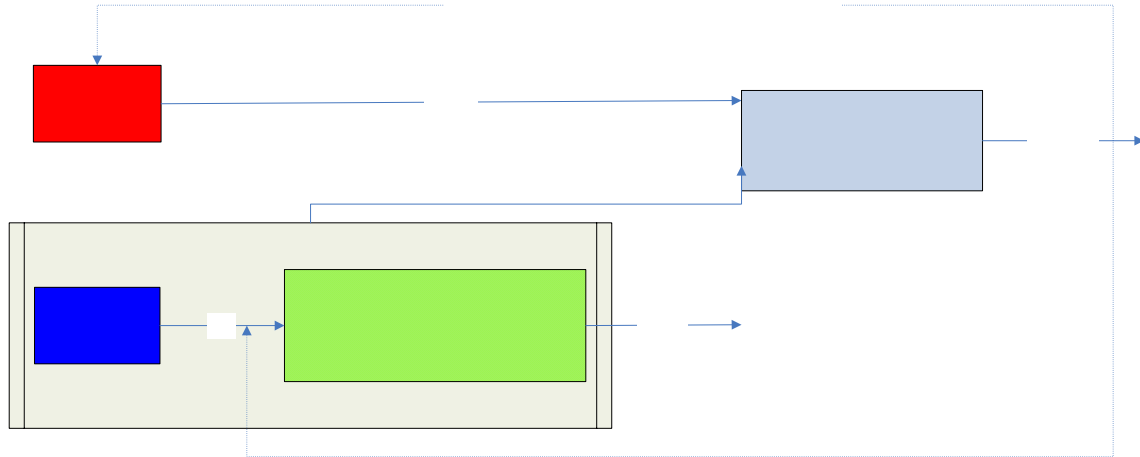
Δεδομένων των παραπάνω τα συστήματα στενής συνέργιας είναι κατάλληλα για χρήση σε δύσκολα περιβάλλοντα, όπου αναμένονται συχνές και μεγάλες διακοπές στην δυνατότητα λήψης σήματος από δορυφόρους. Έτσι τέτοια συστήματα είναι σαφώς κατάλληλα για χρήση σε εφαρμογές πλοήγησης σε αστικά κέντρα και δασικές και δύσκολης μορφολογίας περιοχές.

4.5.5. Συστήματα πλήρως στενοῦς συνέργιας (ultra tightly coupled)

Τα συστήματα της συγκεκριμένης κατηγορίας διαφέρουν από τα συστήματα στενής συνέργιας στο ότι ενσωματώνουν ένα επιπλέον κύκλο ανατροφοδότησης από το κεντρικό αλγόριθμο πλοήγησης προς τον δέκτη του ΔΣΠ. Σκοπός της ανατροφοδότησης αυτής είναι η υποβοήθηση της λειτουργίας του δέκτη μέσω της χρήσης της συνδυαστικής λύσης ΑΣΠ-ΔΣΠ.

Η Εικόνα 4.9, που ακολουθεί, παρουσιάζει την τυπική διάταξη ενός συστήματος πλήρως στενής συνέργιας.

Αρχικά ένα τέτοιο σύστημα δεν φαίνεται να διαφέρει σημαντικά από ένα σύστημα της προηγούμενης κατηγορίας στην πράξη όμως παρουσιάζει αρκετές δυσχέρειες στην εφαρμογή του καθώς απαιτεί πρόσβαση στην εσωτερική λειτουργία του δέκτη και για αυτό πραγματοποιείται κυρίως από κατασκευαστές δεκτών.



Εικόνα 4.9 : Συστήματα πλήρως στενούς συνέργιας

Διάφορα μοντέλα συστημάτων πλήρως στενούς συνεργασίας έχουν προταθεί κατά καιρούς από διάφορους επιστήμονες και εταιρίες και ο αναγνώστης μπορεί να αναζητήσει μια καλή ανάλυση αυτών στο (Bhatti, 2007).

Οι διαφορές των προτεινόμενων συστημάτων έγκεινται στην επιλογή των μοντέλων σφαλμάτων που χρησιμοποιεί κάθε σύστημα, του φίλτρου που εφαρμόζεται, του τρόπου με τον οποίο χρησιμοποιείται η πληροφορία των ΑΣΠ και του είδους της βοήθειας που προσφέρει στην λειτουργία του ΔΣΠ.

Τέτοιου είδους συστήματα χρησιμοποιούνται συνήθως για την βελτίωση της ικανότητας λήψης και ανάλυσης του δορυφορικού σήματος, την προστασία από τις παρεμβολές, την εξάλειψη του θορύβου των μετρήσεων και την υποβοήθηση στην επίλυση των ασαφειών φάσης.

Παρόλη την προφανή χρησιμότητα τους τα συστήματα αυτής της κατηγορίας πάσχουν σοβαρά από το πρόβλημα της έλλειψης αξιοπιστίας της παρεχόμενης λύσης επειδή χρησιμοποιούν πολύπλοκους αλγόριθμους που εφαρμόζονται στην εσωτερική δομή των κυκλωμάτων του δέκτη και είναι δύσκολο να ελεγχθούν έστω και πειραματικά (Bhatti, 2007).

4.5.6. Ειδικά θέματα συνεργασίας αδρανειακών-δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης.

Κατά την συνέργια των αδρανειακών και δορυφορικών συστημάτων εμφανίζονται ορισμένα ζητήματα, τα οποία επηρεάζουν τον σχεδιασμό του αλγορίθμου πλοήγησης

και την πολυπλοκότητα των υπολογισμών και αναφέρονται περιληπτικά στην συνέχεια.

Ένα κύριο ζήτημα που τίθεται κατά τον σχεδιασμό των αλγορίθμων πλοήγησης, κυρίως όταν αυτοί δομούνται με χρήση φίλτρων KALMAN, είναι αυτό της επιλογής των μεταβλητών ενδιαφέροντος του δυναμικού συστήματος το οποίο αναλύεται. Είναι προφανές ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των μεταβλητών τόσο αυξάνεται και η πολυπλοκότητα σχεδιασμού και εφαρμογής του αλγόριθμου πλοήγησης.

Τα πιο συνηθισμένα μοντέλα, τα οποία είναι και τα πιο απλά, αποτελούνται από δεκαπέντε μεταβλητές που αντιστοιχούν σε τρεις μεταβλητές για την θέση, τρεις για την ταχύτητα, τρεις για την ευθυγράμμιση, τρεις για τα σφάλματα των γυροσκοπίων και τρεις για τα σφάλματα των επιταχυνσιομέτρων. Τα συγκεκριμένα μοντέλα δέχονται ως αξιόπιστη την πληροφορία από τα ΔΣΠ και χρησιμοποιούνται συνήθως σε συστήματα χαλαρής συνέργειας.

Υπάρχουν όμως και μοντέλα που είναι πολύ πιο πολύπλοκα όπως το μοντέλο των σαράντα πέντε μεταβλητών (Grewal, 2001), που αντιστοιχούν σε εννιά μεταβλητές θέσης, ταχύτητας και ευθυγράμμισης λόγω AMM, σε έξι μεταβλητές για τα σφάλματα λόγω γυροσκοπίων και επιταχυνσιομέτρων, σε έξι μεταβλητές θέσης και ταχύτητας λόγω ΔΣΠ και εικοσιτέσσερις μεταβλητές λόγω των χρονομέτρων των εικοσιτεσσάρων δορυφόρων του συστήματος NAVSTAR-GPS.

Είναι προφανές ότι οι μεταβλητές του παραπάνω μοντέλου αλλάζουν δυναμικά με βάση τον αριθμό των ορατών κάθε στιγμή δορυφόρων. Μοντέλα αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται κυρίως σε συστήματα στενής συνέργειας.

Ένα ακόμα ζήτημα που εμφανίζεται κατά την συνεργασία των αδρανειακών και δορυφορικών συστημάτων είναι τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα σφάλματος. Ο όρος μοντέλα σφάλματος αναφέρεται στις τιμές των μεταβλητών και των a priori μεταβλητοτήτων τους με τις οποίες αρχικοποιείται ο αλγόριθμος πλοήγησης.

Η επιλογή του σωστού μοντέλου σφάλματος είναι ουσιώδους σημασίας αφού τα φίλτρα KALMAN είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στις μεταβολές με αποτέλεσμα λανθασμένες αρχικές τιμές να οδηγούν σε αύξηση του χρόνου υπολογισμών και σε διαφοροποιήσεις των αποτελεσμάτων.

Η επίδραση της λάθους επιλογής μοντέλου σφάλματος αυξάνει με την μείωση της ποιότητας των αδρανειακών αισθητήρων. Έτσι στην περίπτωση της χρήσης αισθητήρων χαμηλής ακρίβειας η σωστή επιλογή του μοντέλου σφάλματος αποκτά ακόμα μεγαλύτερη σημασία, επειδή τα σφάλματα που αυτό εισάγει είναι δύσκολο να διορθωθούν κατά την υλοποίηση του επαναληπτικού αλγόριθμου πλοήγησης, εξαιτίας του μεγάλου θορύβου που περιέχουν οι μετρήσεις.

Δύο ακόμα ζητήματα τα οποία σχετίζονται με την διεξαγωγή των μετρήσεων και όχι με τον σχεδιασμό του αλγόριθμου πλοήγησης είναι το θέμα της εκκεντρότητας μεταξύ της κεραίας του δέκτη του ΔΣΠ και της AMM (Αδρανειακή Μετρητική Μονάδα) καθώς και το θέμα της συσχέτισης των δεδομένων του ΔΣΠ με αυτά που παράγει η AMM.

Το πρώτο θέμα αναφέρεται στο γεγονός ότι σε πολλές περιπτώσεις οι δύο αισθητήρες, κεραία δέκτη ΔΣΠ και ΑΜΜ, δεν είναι τοποθετημένες στο ίδιο σημείο κατά την εκτέλεση των μετρήσεων αφού η μεν πρώτη απαιτεί ανοικτό ορίζοντα (πχ οροφή αυτοκινήτου) η δε δεύτερη βρίσκεται συνήθως στερεωμένη σε μια σταθερή βάση (πχ. στο εσωτερικό του αυτοκινήτου).

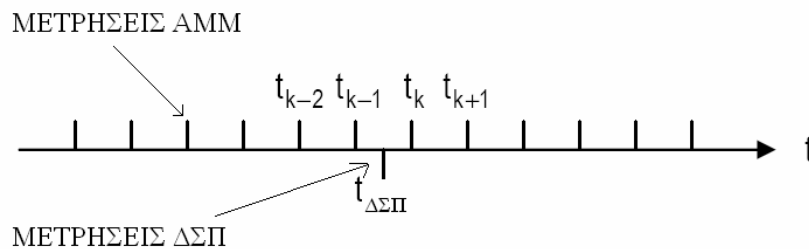


Εικόνα 4.10 : Εκκεντρότητα κεραίας δέκτη και ΑΜΜ

Το φαινόμενο της έκκεντρης τοποθέτησης (lever arm effect) αντιμετωπίζεται είτε με την εκ των προτέρων μέτρηση της εκκεντρότητας ($\delta\epsilon$) με χρήση τοπογραφικού εξοπλισμού (πχ ολοκληρωμένος γεωδαιτικός σταθμός) είτε με την εισαγωγή της ως αγνώστου στον αλγόριθμο πλοήγησης (φίλτρο KALMAN).

Η πρώτη μέθοδος είναι προτιμότερη για εφαρμογές ακριβείας αφού μπορεί να εγγυηθεί την ακρίβεια προσδιορισμού της εκκεντρότητας. Η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου δεν είναι δυνατή η μέτρηση της εκκεντρότητας εκ των προτέρων και απαιτεί την επαναληπτική εκτέλεση του αλγόριθμου, με χρήση των υπολογισμένων κάθε φορά νέων τιμών, μέχρι να μην παρουσιάζεται σημαντική αλλαγή.

Το δεύτερο θέμα αναφέρεται στον συγχρονισμό των μετρήσεων του ΔΣΠ με αυτές της ΑΜΜ, ώστε να γίνει δυνατή η συνδυαστική αξιοποίηση τους. Δεδομένου ότι οι ΑΜΜ πραγματοποιούν μετρήσεις με συχνότητα 50-400Hz ενώ οι δορυφορικοί δέκτες με συχνότητα 1-10Hz (Εικόνα 4.6), είναι φανερό ότι απαιτείται κάποιου είδους παρεμβολή, ώστε όλα τα δεδομένα της ΑΜΜ να συνδεθούν σωστά με τα κατάλληλα δεδομένα ΔΣΠ.



Εικόνα 4.11 : Συγχρονισμός μετρήσεων ΔΣΠ-ΑΜΜ

Για εφαρμογές χαμηλών δυναμικών μεταβολών, όπως η πλοήγηση εδάφους, μια απλή γραμμική παρεμβολή, όπως δίνεται από την Εξ. 4-11 (Shin, 2001), είναι αρκετή για να μετατρέψει τις μετρήσεις της ΑΜΜ στο χρόνο του ΔΣΠ.

$$x^{\text{AMM}}(t_{\Delta\text{ΣΠ}}) = \frac{t_k - t_{\Delta\text{ΣΠ}}}{t_k - t_{k-1}} \cdot x^{\text{AMM}}(t_{k-1}) + \frac{t_{\Delta\text{ΣΠ}} - t_{k-1}}{t_k - t_{k-1}} \cdot x^{\text{AMM}}(t_k) \quad (\text{Εξ. 4-22})$$

Σε περιπτώσεις υψηλών δυναμικών μεταβολών άλλου είδους παρεμβολή, όπως η παρεμβολή Lagrange, μπορεί και πρέπει να χρησιμοποιηθεί.

Τέλος είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ο συγχρονισμός των δεδομένων των δύο συστημάτων είναι ουσιώδους σημασίας αντικείμενο στα ΟΑΔΣΠ. Αυτός γίνεται συνήθως από τον αλγόριθμο πλοήγησης χρησιμοποιώντας τον χρόνο GPS, που παράγουν τα ΔΣΠ (για αυτό και η παρουσία του στα στοιχεία εξόδου των διαγραμμάτων λειτουργίας των διαφόρων συστημάτων συνέρχεται).

5. ΤΟ ΟΑΔ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ

5.1. Γενικά

Το παρόν κεφάλαιο έχει ως στόχο την παρουσίαση του ΟΑΔΣΠ του Κέντρου Δορυφόρων Διονύσου της ΣΑΤΜ.

Αρχικά γίνεται μια παρουσίαση των τεχνικών χαρακτηριστικών του συστήματος, αλλά και μια σύντομη περιγραφή των λογισμικών χειρισμού σε πραγματικό χρόνο και εκ των υστέρων επίλυσης των μετρήσεων που το συνοδεύουν.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι πρώτες δοκιμές έλεγχου του συστήματος και σχολιάζονται τα αποτελέσματα αυτών.

5.2. Περιγραφή του ΟΑΔΣΠ

Στα πλαίσια του προγράμματος ανάπτυξης εργαστηριακής υποδομής της ΣΑΤΜ για το έτος 2007, το εργαστήριο του Κέντρου Δορυφόρων Διονύσου (ΚΔΔ) του Τομέα Τοπογραφίας προχώρησε στην προμήθεια ενός Ολοκληρωμένου Αδρανειακού και Δορυφορικού Συστήματος Πλοήγησης, το οποίο και παραλήφθηκε τον Μάιο του 2008.

Πρόκειται για το σύστημα SPAN (Synchronized Position, Attitude, Navigation) της Καναδικής εταιρίας Novatel Inc. Το σύστημα SPAN συνδυάζει τις δύο διαφορετικές αλλά συμπληρωματικές τεχνολογίες πλοήγησης και προσδιορισμού θέσης, των ΔΣΠ και ΑΣΠ, σε ένα σύστημα στενής συνέργειας (tightly coupled) και καταφέρνει να παρέχει αξιόπιστα και ακριβή αποτελέσματα ακόμα και σε περιπτώσεις απώλειας του σήματος του ΔΣΠ.

Το σύστημα που παραδόθηκε στο ΚΔΔ αποτελείται από δύο δέκτες GNSS, με τις αντίστοιχες κεραίες και εξοπλισμό ραδιοζεύξης, από την AMM της γερμανικής εταιρίας iMAR FSAS-EI-SN και από ένα οδόμετρο iMWS .

Επίσης το σύστημα συνοδεύεται από λογισμικό για τον έλεγχο της λειτουργίας του συστήματος (CDU) και για την εκ των υστέρων επίλυση των μετρήσεων (Inertial Explorer version 8.0).

Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των τμημάτων του συστήματος .

5.2.1. Οι δορυφορικοί δέκτες του συστήματος SPAN

Το σύστημα SPAN του ΚΔΔ περιλαμβάνει δύο δέκτες ΔΣΠ, έναν για χρήση μαζί με την AMM (rover) και έναν για χρήση ως βασικού σταθμού (master station) όταν το σύστημα λειτουργεί στις καταστάσεις DGPS και RTK.

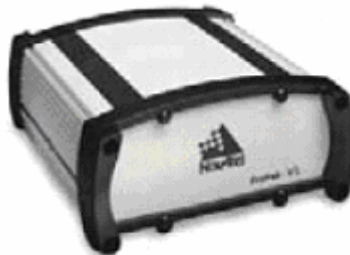
Ως βασικός σταθμός χρησιμοποιείται ο δέκτης DL-V3, ενώ ο δέκτης ProPak-V3 χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την αδρανειακή μονάδα. Και οι δύο δέκτες χρησιμοποιούν κεραία του ίδιου τύπου (702-GG).



Εικόνα 5.1 : Εμπρόσθια όψη του δέκτη DL-V3
(Πηγή : Novatel Inc.)



Εικόνα 5.2 : Οπίσθια όψη του δέκτη DL-V3
(Πηγή : Novatel Inc.)



Εικόνα 5.3 : Εμπρόσθια όψη του δέκτη ProPak-V3
(Πηγή : Novatel Inc.)

Οι δύο δέκτες έχουν κοινά χαρακτηριστικά λειτουργίας, τα οποία φαίνονται στον Πίνακα 5.1, ενώ η διαφορά τους εστιάζεται κυρίως στο γεγονός ότι ο ProPak-V3 περιλαμβάνει στο ενσωματωμένο λογισμικό του τους αναγκαίους αλγόριθμους για τον έλεγχο και συγχρονισμό της AMM και για τον υπολογισμό σε πραγματικό χρόνο της λύσης πλοήγησης.

Επιπλέον ο ProPak-V3 δεν διαθέτει εσωτερική μνήμη για την αποθήκευση των δεδομένων με αποτέλεσμα να στηρίζεται πλήρως στην χρήση φορητού ηλεκτρονικού υπολογιστή. Ο DL-V3 αντίθετα εκτός από την αποσπώμενη μνήμη CF (Compact Flash), που διαθέτει, προσφέρει και μεγάλες δυνατότητες δικτύωσης αφού περιλαμβάνει θύρα USB και θύρα δικτύου (ETHERNET) ενώ διαθέτει και ασύρματη σύνδεση BLUETOOTH.

| ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ | ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ |
|--------------------------|--|
| Συχνότητα λειτουργίας | GPS: L1 C/A, L2C, L2 P(Y) , (με αναβάθμιση L5) GLONASS : L1, L2 |
| Συχνότητα μετρήσεων | Εως 20Hz |
| Ακρίβεια | 2 cm (RTK mode) |
| Συστήματα λειτουργίας | GPS-GLONASS |
| Συστήματα διαφορικού GPS | CDGPS, OmniSTAR(με συνδρομή), WAAS, EGNOS, |
| Εξωτερικό χρονόμετρο | Ναι |
| Κανάλια λειτουργίας | 72 |

Πίνακας 5-1 : Χαρακτηριστικά λειτουργίας ProPak-V3 και DL-V3

5.2.2. Η αδρανειακή μονάδα μέτρησης του συστήματος SPAN

Η Αδρανειακή Μονάδα Μέτρησης (ΑΜΜ), που περιλαμβάνει το σύστημα SPAN του ΚΔΔ, είναι η FSAS-EI-SN της γερμανικής εταιρίας iMAR. Πρόκειται για μια μονάδα υψηλών επιδόσεων, που περιλαμβάνει τρία ΓΟΙ και τρία επιταχυνσιόμετρα με σερβομηχανισμούς προσαρμοσμένα σε ένα τρισσορθογώνιο σύστημα..



Εικόνα 5.4 :Η αδρανειακή μονάδα FSAS-EI-SN

(Πηγή : Novatel Inc.)

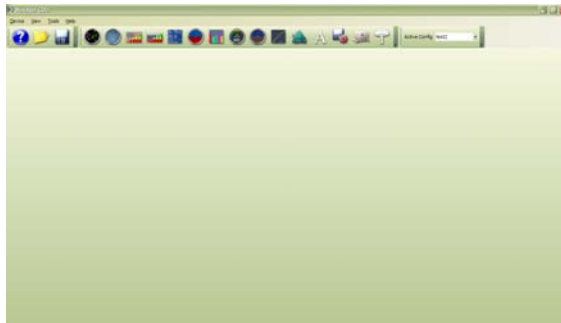
Η συγκεκριμένη μονάδα κατασκευάζεται σε ευρωπαϊκό έδαφος (Γερμανία) με αποτέλεσμα εκτός των υψηλών επιδόσεων, που επιτυγχάνει και οι οποίες είναι εφάμιλλες αντιστοιχών μονάδων Αμερικάνικων εταιριών (Honeywell, Litton Inc.), να προσφέρει σημαντικά συντομότερους χρόνους παράδοσης, επειδή δεν απαιτεί ειδική αδειοδότηση για την εξαγωγή της. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι επιδόσεις της μονάδας φαίνονται στον Πίνακα 5.2.

| ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ | ΕΠΙΔΟΣΗ |
|--|----------------------------------|
| Αβεβαιότητα γυροσκοπίου (bias) | <0.75deg/hr |
| Σφάλμα κλίμακας γυροσκοπίου | 300 ppm |
| Θόρυβος γυροσκοπίου | 0.1 deg/ \sqrt{hr} |
| Εύρος μέτρησης γυροσκοπίου | ± 500 deg/sec |
| Αβεβαιότητα επιταχυνσιομέτρου (bias) | 1 mg |
| Σφάλμα κλίμακας επιταχυνσιομέτρου | 400 ppm |
| Εύρος μέτρησης επιταχυνσιομέτρου | ± 5 g |
| Μέγεθος | 128x128x104 mm |
| Βάρος | 2.1 kg |
| Μέσος Χρόνος μεταξύ Βλαβών | 35000 hr |
| Συχνότητα μέτρησης | 200 Hz |
| Ακρίβεια προσδιορισμού θέσης | 1.8 m rms (SPP)-0.45 m (DGPS) |
| Ακρίβεια προσδιορισμού ταχύτητας | 0.02 m/sec rms |
| Ακρίβεια προσδιορισμού επιτάχυνσης | 0.03 m/sec ² rms |
| Ακρίβεια προσδιορισμού κιν. συμπεριφοράς | 0.015° (roll-pitch)-0.041° (yaw) |

Πίνακας 5-2 : Χαρακτηριστικά λειτουργίας FSAS-EI-SN

5.2.3. Το λογισμικό χειρισμού CDU του συστήματος SPAN

Το λογισμικό χειρισμού του συστήματος είναι το CDU (Control and Display Unit) και είναι μια δωρεάν εφαρμογή, που διατίθεται από τον δικτυακό τόπο της Novatel Inc.



Εικόνα 5.5 : Κύρια οθόνη του CDU

Η συγκεκριμένη εφαρμογή δίνει την δυνατότητα στον χειριστή να ρυθμίσει την λειτουργία του συστήματος SPAN, να καταγράψει τις μετρήσεις και να παρακολουθήσει την λύση πλοήγησης, την οποία παράγει σε πραγματικό χρόνο ο εσωτερικός υπολογιστής του ProPak-V3.

Ο χρήστης έχει την δυνατότητα μέσω των εντολών του προγράμματος να :

- δημιουργήσει διάφορες συνδέσεις με το SPAN , αναλόγως της αποστολή που έχει να εκτελέσει
- να παρακολουθήσει την λειτουργία του συστήματος σε πραγματικό χρόνο
- να επιλέξει και να καταγράψει διαφόρων ειδών δεδομένα, τόσο του συστήματος GPS όσο και του συστήματος INS (logging command)
- να ρυθμίσει και να επιλέξει το είδος των δεδομένων που πρόκειται να καταγραφούν από τον δορυφορικό δέκτη της βάσης DL-V3 (DL EXPLORER)

5.2.4. Το λογισμικό εκ των υστέρων επίλυσης των μετρήσεων Inertial Explorer

Το σύστημα SPAN συνοδεύεται από το λογισμικό εκ των υστέρων επίλυσης (post processing) των μετρήσεων Inertial Explorer version 8.0, το οποίο αποτελεί προϊόν της Waypoint Inc. θυγατρικής της Novatel Inc.

Το Inertial Explorer ενσωματώνει τους αλγόριθμους για επεξεργασία μετρήσεων GNSS του γνωστού προγράμματος επίλυσης GrafNav, της ίδιας εταιρίας, και παράλληλα παρέχει την δυνατότητα πλήρους επεξεργασίας και ανάλυσης μετρήσεων που προέρχονται από προσκολλημένα αδρανειακά συστήματα.

Το περιβάλλον επεξεργασίας απαιτεί πρώτα την επεξεργασία των δεδομένων GNSS και μετά προχωρά στην επεξεργασία των μετρήσεων της AMM, εξάγοντας τελικά την βέλτιστη συνδυαστική λύση.

Μερικά από τα κύρια χαρακτηριστικά της εφαρμογής είναι :

- Αναλύει τις μετρήσεις τόσο του GNSS όσο και του SPAN σε μετάβαση και επιστροφή και συνδυάζει τις δύο λύσεις για καλύτερα αποτελέσματα.
- Κάνει χρήση του ειδικού αλγόριθμου ομαλοποίησης (smoother) RTS (Rauch-Tung-Striebel), ο οποίος εγγυάται την βελτίωση της ακρίβειας της παραγόμενης λύσης πλοήγησης.
- Αναλύει τις μετρήσεις είτε ως σύστημα χαλαρής συνέργειας, είτε ως σύστημα στενής συνέργειας. Το πρώτο είναι κατάλληλο για αποστολές αεροφωτογράφισης, ενώ το δεύτερο για επίγειες αποστολές, όπου παρατηρούνται σημαντικά κενά στις μετρήσεις GNSS .
- Διαθέτει δεκάδες ενσωματωμένα μοντέλα σφαλμάτων, κατάλληλα για κάθε είδους αισθητήρα αλλά και για κάθε χρήση ενώ δίνει και στον χρήστη την δυνατότητα δημιουργίας μοντέλων σφαλμάτων.
- Κάνει χρήση αλγόριθμου βασισμένου στο φίλτρο KALMAN (15 παραμέτρων), ο οποίος όμως μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον υπολογισμό της εκκεντρότητας κεραίας-AMM σε περίπτωση που αυτή δεν είναι γνωστή.
- Δίνει την δυνατότητα δημιουργίας δεκάδων διαφορετικών γραφημάτων κατάλληλων για τον έλεγχο της αξιοπιστίας της λύσης και την ανάλυση των μετρήσεων και των σφαλμάτων των οργάνων.

Εικόνα 5.6 : Παράδειγμα γραφήματος που παράγει η εφαρμογή

- Δίνει την δυνατότητα εξαγωγής των αποτελεσμάτων σε διάφορες μορφές όπως αρχεία κειμένου (ASCII) με τις προβολικές ή ελλειψοειδείς συντεταγμένες σε διαφορές προβολές και συστήματα, αρχεία σχεδίων (dxf) κατάλληλα για χρήση από σχεδιαστικά προγράμματα, αρχεία δεδομένων (kml) αξιοποιήσιμα από την υπηρεσία Google Maps κ.α.

Εικόνα 5.7 : Εξαγωγή της προσδιοριζόμενης τροχιάς σε περιβάλλον Google Maps

(Πηγή: Novatel Inc.)

- Διευκολύνει την λήψη και εισαγωγή στοιχείων που βελτιώνουν την ακρίβεια της λύσης, όπως εφημερίδες ακριβείας, στοιχεία συντεταγμένων σταθμών του IGS κτλ.
- Παρέχει την δυνατότητα για ακριβή προσδιορισμό σημείων χωρίς την χρήση δεδομένων βασικού σταθμού μέσω της διαδικασίας PPP.
- Υποστηρίζει τα δεδομένα που προέρχονται από το σύστημα GLONASS και χρησιμοποιεί νέες τεχνικές που βελτιώνουν την ακρίβεια της παρεχόμενης από αυτά λύσης.

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι η εφαρμογή Inertial Explorer αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την αξιοποίηση και ανάλυση των μετρήσεων του συστήματος SPAN και όχι μόνο.

5.3. Διαδικασία Μετρήσεων

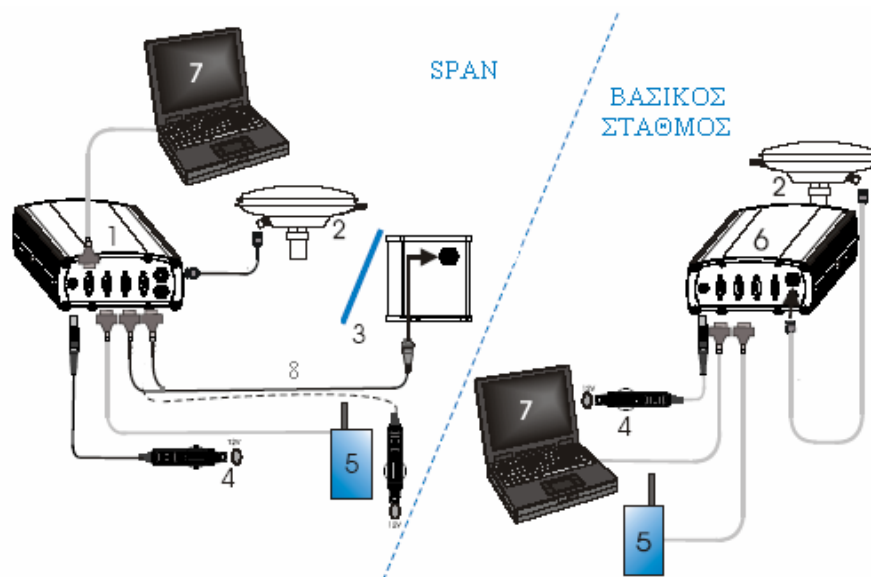
Στην συγκεκριμένη ενότητα θα περιγράψει η διαδικασία μετρήσεων, μέσω παράθεσης των βημάτων που ακολουθούνται, όπως αυτή προέκυψε από τις δοκιμές που διεξήχθησαν στο σύστημα κατά τους μήνες Μάιο και Ιούνιο του 2008.

5.3.1. Τα βήματα της διαδικασίας μετρήσεων

Τα βήματα που ακολουθούνται για την έναρξη της λειτουργίας και την καταγραφή των μετρήσεων είναι τα κάτωθι :

- Σύνδεση εξοπλισμού

Η βασική συνδεσμολογία των τμημάτων του συστήματος SPAN φαίνεται στην Εικόνα 5.8 και αναλύεται στον πίνακα που την συνοδεύει :



Εικόνα 5.8 : Συνδεσμολογία συστήματος SPAN
(Πηγή : μερικώς τροποποιημένο από Novatel Inc.)

| ΑΡΙΘΜΟΣ | ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ |
|---------|---|
| 1 | Δέκτης ProPak-V3 |
| 2 | Κεραία δέκτη |
| 3 | Αδρανειακή μονάδα FSAS-EI-SN |
| 4 | Παροχή ισχύος δέκτη (τάση +9 έως +18 V DC) |
| 5 | Εξοπλισμός ραδιοζεύξης (σύνδεση στην θύρα COM 2 του δέκτη) |
| 6 | Δέκτης βάσης DL-V3 |
| 7 | Φορητοί υπολογιστές (σύνδεση στην θύρα COM 1 του δέκτη ProPak-V3 και USB/BLUETOOTH του DL-V3) |
| 8 | Καλώδιο σύνδεσης αδρανειακή μονάδας [σύνδεση στις θύρες COM 3(AUX),I/O του δέκτη ProPak-V3 καθώς και στην πηγή τροφοδοσίας (τάση +10 έως +34 V DC)] |

Πίνακας 5-3 : Βασικά στοιχεία συνδεσμολογίας συστήματος SPAN

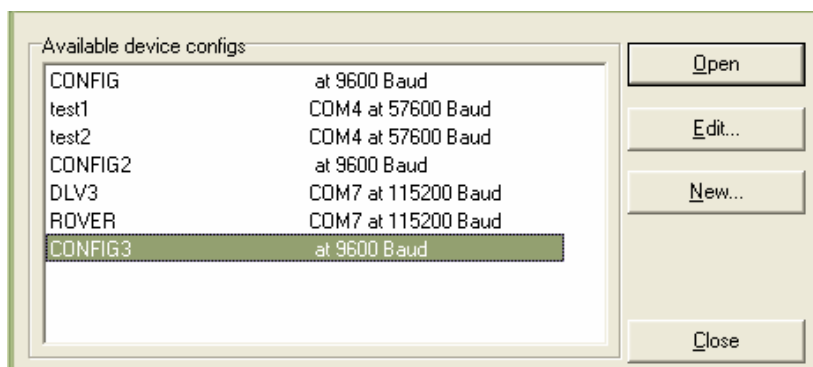
➤ Επικοινωνία του συστήματος με την εφαρμογή CDU

Μόλις πραγματοποιηθούν όλες οι αναγκαίες συνδέσεις και το σύστημα τροφοδοτηθεί ενεργοποιείται η εφαρμογή CDU και δημιουργείται η αναγκαία σύνδεση μέσω των κάτωθι εντολών :

- Εντολή **Device | Open**
- Επιλογή της εντολής **New...** στο πλαίσιο διαλόγου **Open** που εμφανίζεται.
- Εισαγωγή του ονόματος της σύνδεσης, πχ test1
- Επιλογή της εντολής Settings
- Επιλογή της θύρας στην οποία είναι συνδεδεμένο το σύστημα (πχ COM 5), ρύθμιση του Baud Rate σε 57600 και αποεπιλογή του Use hardware handshaking checkbox.
- Επιλογή OK για να σωθούν οι ρυθμίσεις και OK για να κλείσει το πλαίσιο διαλόγου

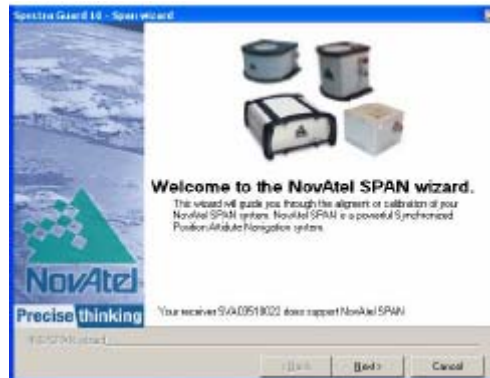
➤ Σύνδεση του συστήματος με την εφαρμογή CDU και έναρξη μετρήσεων

Αφού δημιουργηθεί η επικοινωνία του συστήματος με την εφαρμογή πραγματοποιείται η σύνδεση με αυτή μέσω της εντολής **Device | Open**



Εικόνα 5.9 : Επιλογή ενεργούς σύνδεσης με την εφαρμογή CDU

Όταν αποκατασταθεί η σύνδεση του συστήματος με την εφαρμογή ο χρήστης πρέπει να πιστοποιήσει το είδος του αισθητήρα και ο πιο εύκολος τρόπος να το κάνει είναι μέσω της εντολής **Tools / SPAN Alignment Wizard** η οποία οδηγεί και στην αρχική ευθυγράμμιση της AMM.



Εικόνα 5.10 : Ο οδηγός αρχικοποίησης του συστήματος SPAN

Αφού ολοκληρωθεί και αυτό το βήμα ο χρήστης περιμένει τον αναγκαίο χρόνο για την ολοκλήρωση της αρχικοποίησης του συστήματος, συνήθως 1 με 2 λεπτά αλλά ποικίλει αναλόγως με το είδος της επιλεγόμενης αρχικοποίησης (coarse, moving κτλ), και όταν εμφανισθεί στην οθόνη λειτουργίας του SPAN (INS window) η ένδειξη **INS_ALIGNMENT_COMPLETE** μπορεί να κινηθεί και να αρχίσει να καταγράφει δεδομένα για την παραγωγή λύσης σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 5.11 : Το παράθυρο παρακολούθησης (INS window) του συστήματος SPAN

➤ Καταγραφή των μετρήσεων

Η καταγραφή των μετρήσεων γίνεται μέσω της εντολής **Tools | Logging Control Window**.



Εικόνα 5.12 : Το παράθυρο καταγραφής δεδομένων

Η εντολή αυτή προσφέρει πληθώρα επιλογών τόσο για το είδος των μετρήσεων, όπως πρωτογενή δεδομένα GNSS, INS, δεδομένα θέσης, ταχύτητας και κινηματικής συμπεριφοράς κα, όσο και για τις επιλογές αυτών, όπως συχνότητα καταγραφής μορφή δεδομένων(binary-ascii) κτλ.

Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί στην περίπτωση κατά την οποία καταγράφονται δεδομένα, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν σε εκ των υστέρων επίλυση με το λογισμικό Inertial Explorer . Σε αυτή την περίπτωση σύμφωνα με τον κατασκευαστή απαιτείται να γίνει καταγραφή των δεδομένων που περιέχονται στον Πίνακα 5-4

| ΔΕΔΟΜΕΝΑ | ΤΥΠΟΣ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΥ | ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ |
|----------------------|--------------------|--------------------|
| ΣΤΑΘΜΟΣ ΒΑΣΗΣ | | |
| RANGECMPB | ONTIME | 1 Hz |
| RAWEPHEMB | ONNEW | |
| ΣΤΑΘΜΟΣ SPAN | | |
| RANGECMPB | ONTIME | 1 Hz |
| RAWEPHEMB | ONNEW | |
| RAWIMUSB | ONNEW | |

Πίνακας 5-4 : Απαιτούμενα δεδομένα για εκ των υστέρων επίλυση

5.4. Δοκιμές του ΟΑΔΣΠ

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται οι πρώτες δόκιμες που έγιναν με το σύστημα SPAN και σχολιάζονται τα αποτελέσματά τους.

5.4.1. Δοκιμή 1^η (Έλεγχος λειτουργίας σε ακινησία)

➤ Περιγραφή δοκιμής

Η πρώτη δοκιμή αφορούσε τον έλεγχο της λειτουργίας του συστήματος SPAN, όταν αυτό βρίσκεται ακίνητο σε σταθερή θέση. Έτσι το σύστημα τοποθετήθηκε στο βάθρο LAMG, που βρίσκεται στην ταράτσα του κτιρίου Λαμπαδάρου, και αξιολογήθηκε η απόδοση του σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις.

- Η πρώτη περίπτωση αφορά την ανεξάρτητη λειτουργία της αδρανειακής μονάδας χωρίς την υποστήριξη των μετρήσεων του συστήματος GNSS.
- Η δεύτερη περίπτωση αφορά την λειτουργία της αδρανειακής μονάδας με την υποστήριξη των μετρήσεων του συστήματος GNSS.
- Η τρίτη περίπτωση αφορά την λειτουργία της αδρανειακής μονάδας με την υποστήριξη των μετρήσεων του συστήματος GNSS. Σε αυτή την περίπτωση όμως ένας δεύτερος σταθμός GNSS έχει τοποθετηθεί στο βάθρο LAMA, που βρίσκεται και αυτό στην ίδια ταράτσα, με σκοπό την παροχή δεδομένων για την εκ των υστέρων επίλυση των μετρήσεων με το λογισμικό Inertial Explorer .



Εικόνα 5.13 : Ο βασικός σταθμός της δοκιμής



Εικόνα 5.14 : Το σύστημα SPAN της δοκιμής



Εικόνα 5.15 : Άποψη της συνδεσμολογίας του συστήματος SPAN κατά την δοκιμή

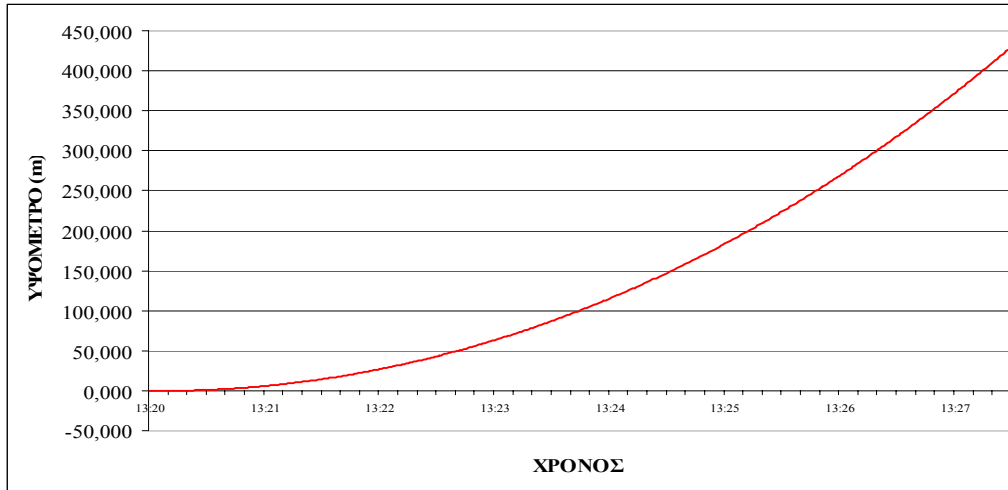
Κατά την εκτέλεση των δοκιμών η εκκεντρότητα της AMM με την κεραία του δέκτη ήταν $\delta e = (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z) = (0.08, 0, 0.07 \text{ m})$ ενώ τα δεδομένα τόσο της AMM όσο και των δεκτών GNSS κατεγράφησαν με συχνότητα 1Hz, εκτός της τρίτης περίπτωσης όπου τα δεδομένα της AMM κατεγράφησαν με συχνότητα 200Hz όπως απαιτείται από τον κατασκευαστή.

➤ Αποτελέσματα δοκιμής

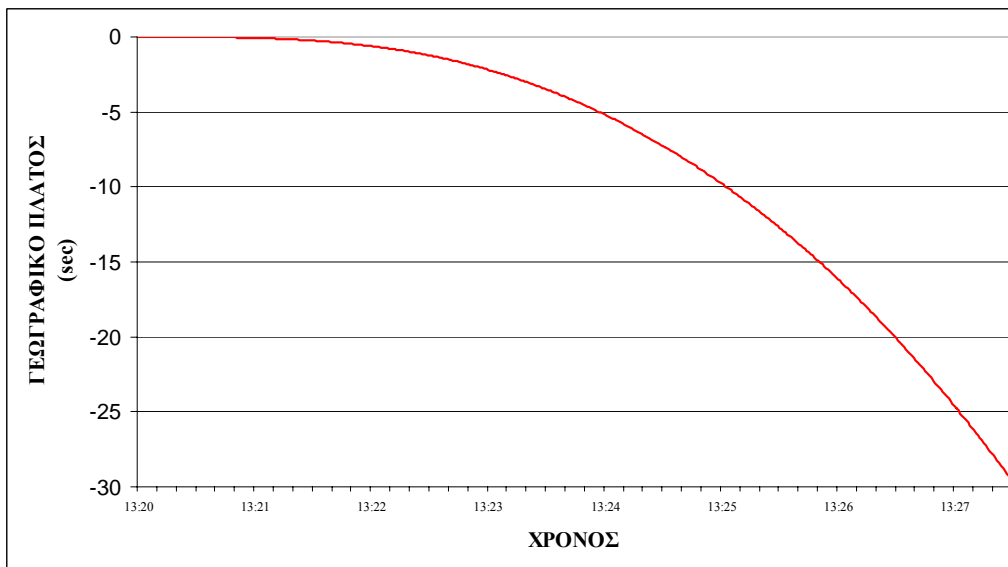
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του συστήματος στην πρώτη περίπτωση (ανεξάρτητη χρήση) παρουσιάζονται στα πρώτα εννιά γραφήματα που ακολουθούν. Στα γραφήματα αυτά παρουσιάζεται η μεταβολή της θέσης (ϕ, λ, h), της ταχύτητας (v_N, v_E, v_{Up}) και της κινηματικής συμπεριφοράς (roll, pitch, azimuth) ανά δευτερόλεπτο σε σχέση με την πρώτη μέτρηση.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του συστήματος στην δεύτερη περίπτωση (χρήση μετρήσεων AMM και GNSS σε απόλυτο εντοπισμό) παρουσιάζονται στα επόμενα εννιά γραφήματα που ακολουθούν. Στα γραφήματα αυτά παρουσιάζεται η μεταβολή της θέσης (ϕ, λ, h), της ταχύτητας (v_N, v_E, v_{Up}) και της κινηματικής συμπεριφοράς (roll, pitch, azimuth) ανά δευτερόλεπτο σε σχέση με την πρώτη μέτρηση. Στις περιπτώσεις της θέσης και της ταχύτητας εκτός από τα αποτελέσματα της συνδυαστικής λύσης (κόκκινο χρώμα) παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα της λύσης μόνο με μετρήσεις GNSS (μπλε χρώμα).

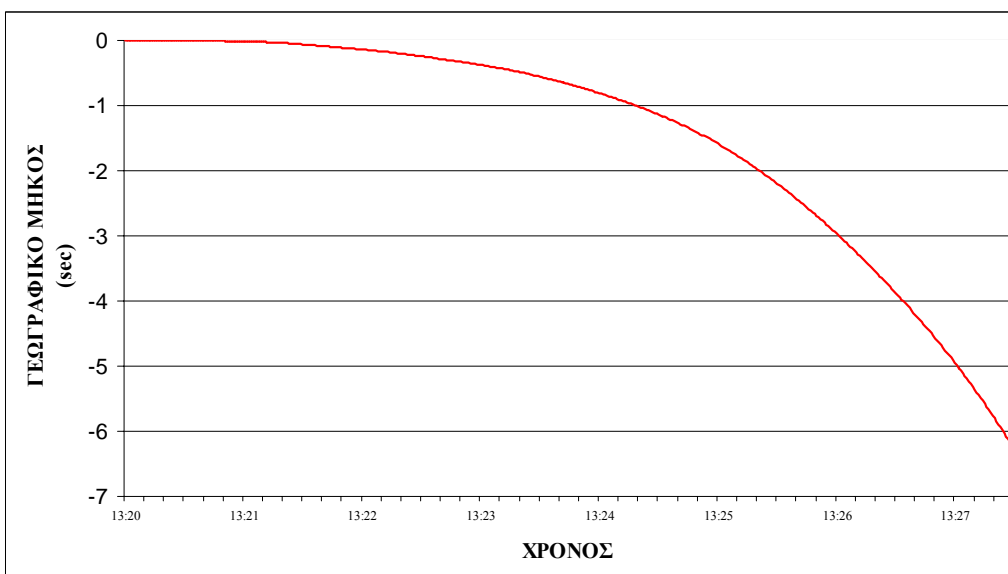
Τα τελευταία γραφήματα αντιστοιχούν στην τρίτη περίπτωση και περιλαμβάνουν γραφήματα της απόλυτης μεταβολή της θέσης (ϕ, λ, h) καθώς και γραφήματα που παρήγαγε το λογισμικό Inertial Explorer και καταδεικνύουν την ποιότητα της λύσης.



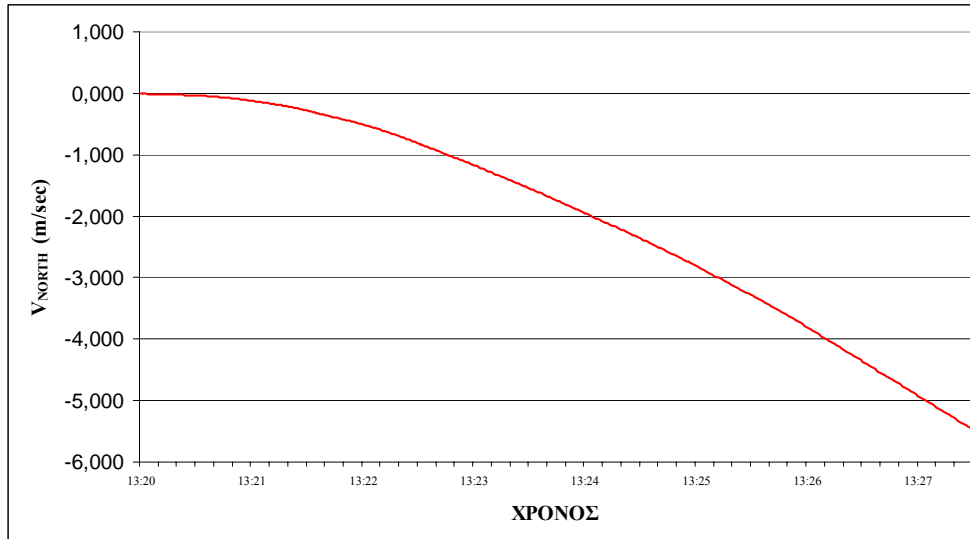
Εικόνα 5.16 : Μεταβολή υψομέτρου-Περίπτωση 1^η



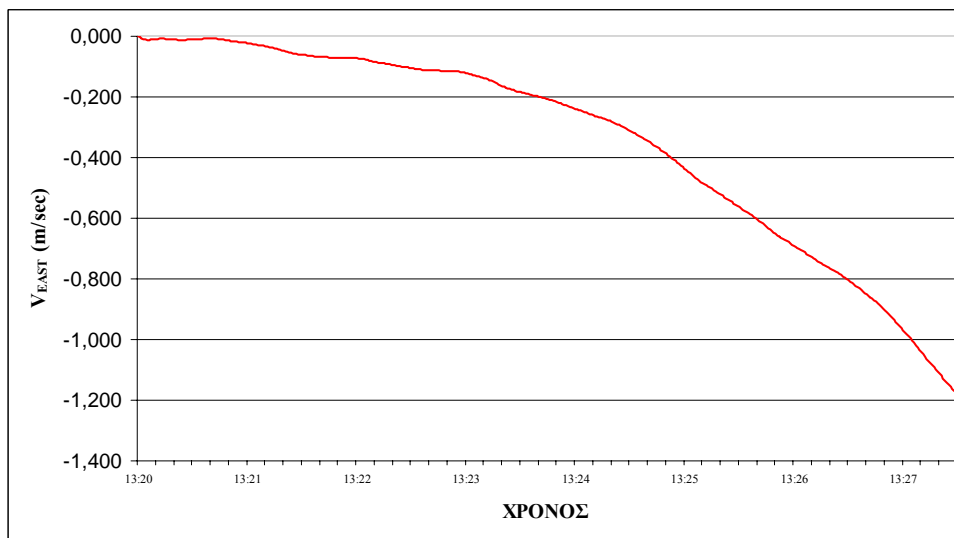
Εικόνα 5.17 : Μεταβολή γεωγραφικού πλάτους-Περίπτωση 1^η



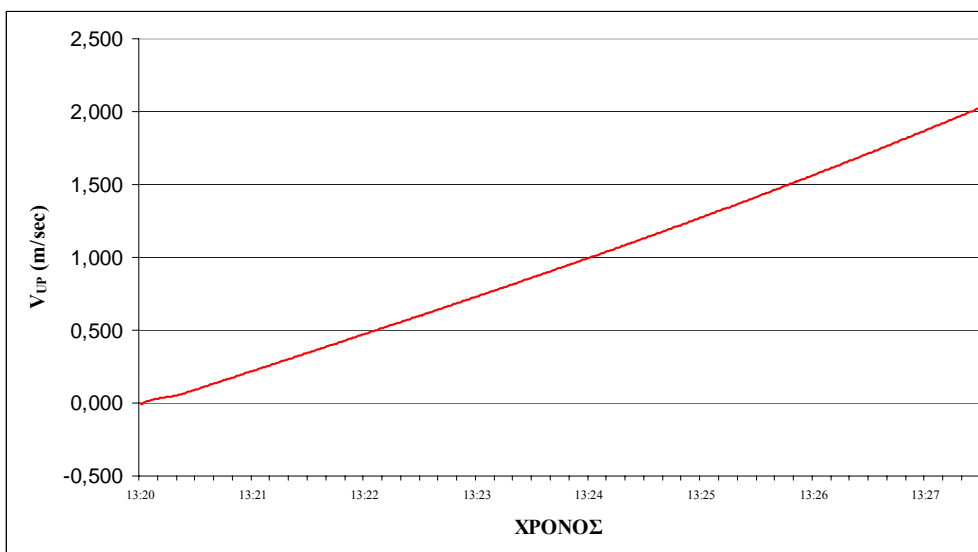
Εικόνα 5.18 : Μεταβολή γεωγραφικού μήκους-Περίπτωση 1^η



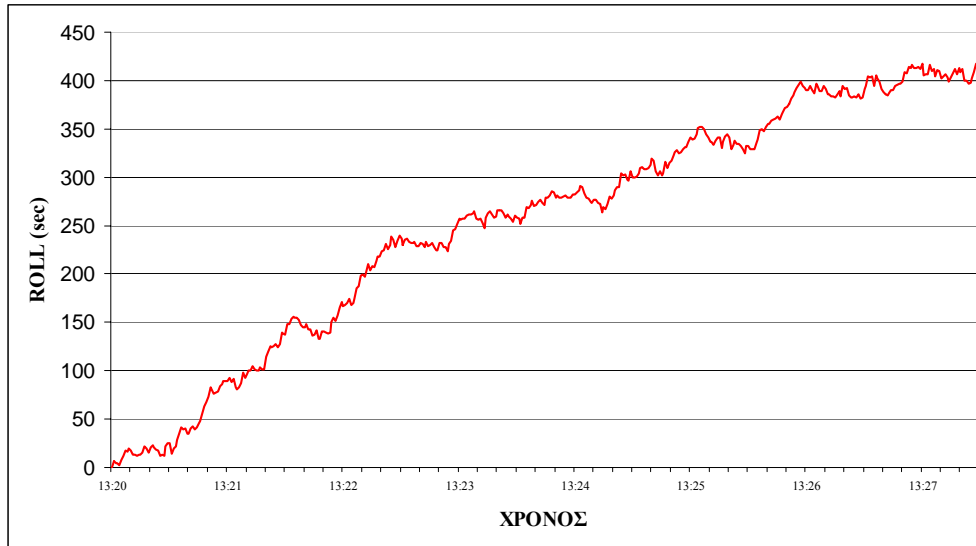
Εικόνα 5.19 : Μεταβολή v_N -Περίπτωση 1^η



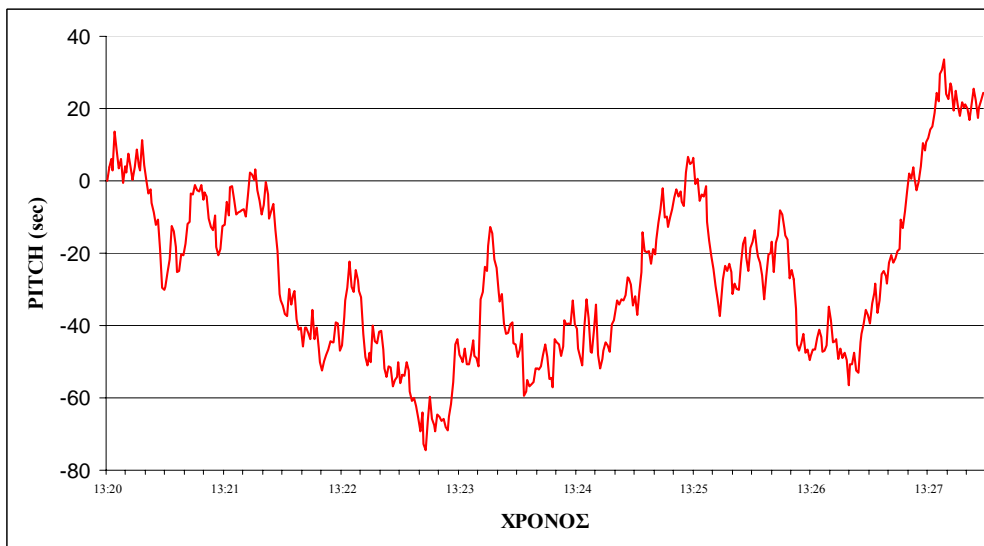
Εικόνα 5.20 : Μεταβολή v_E -Περίπτωση 1^η



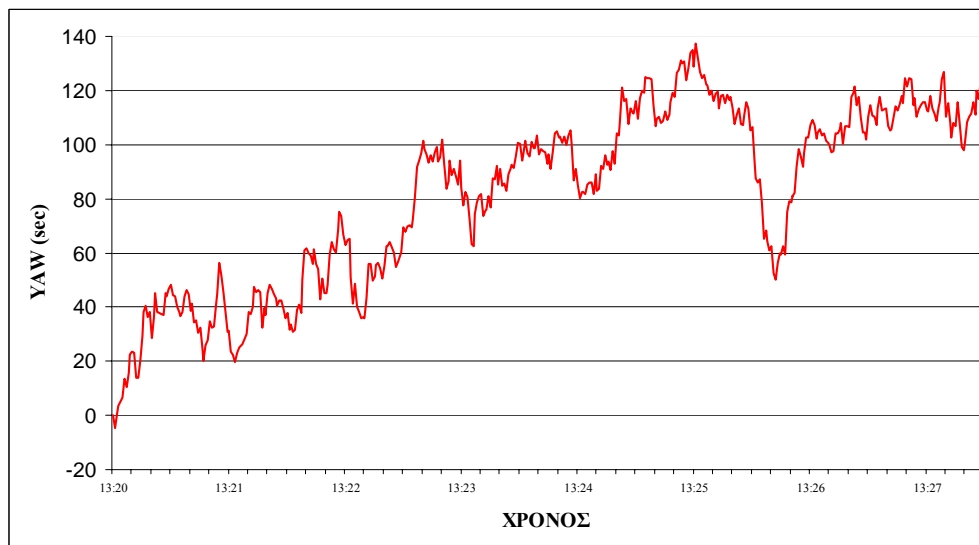
Εικόνα 5.21 : Μεταβολή v_{UP} -Περίπτωση 1^η



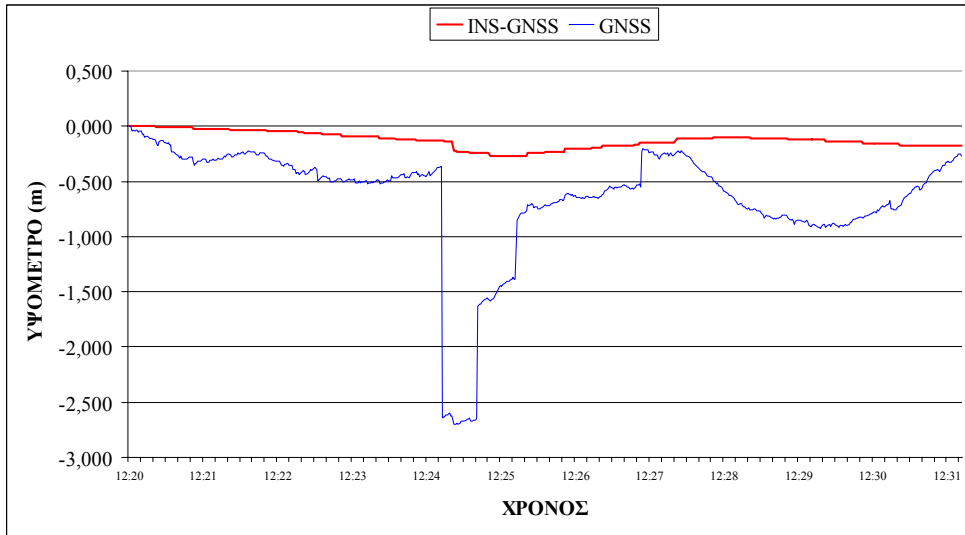
Εικόνα 5.22 : Μεταβολή της γωνίας roll-Περίπτωση 1^η



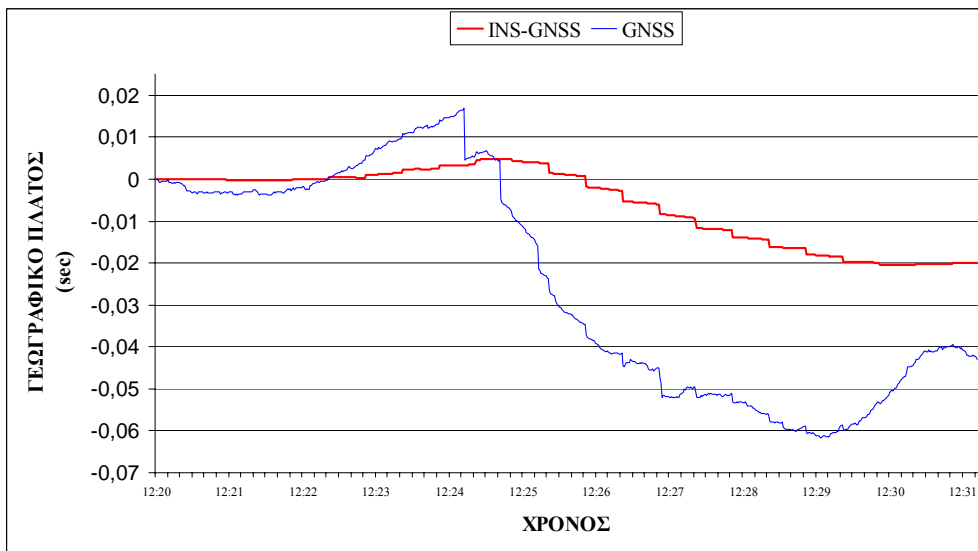
Εικόνα 5.23 : Μεταβολή της γωνίας pitch-Περίπτωση 1^η



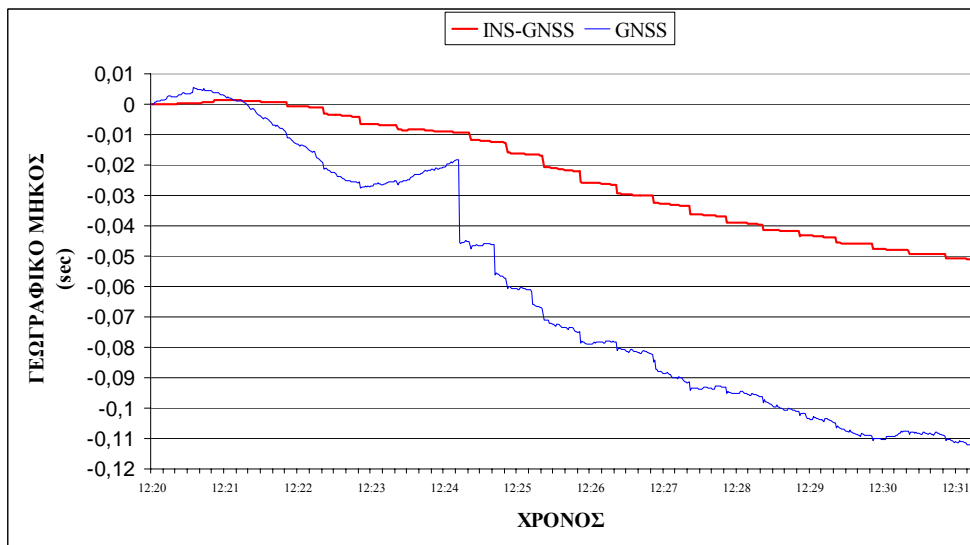
Εικόνα 5.24 : Μεταβολή της γωνίας azimuth-Περίπτωση 1^η



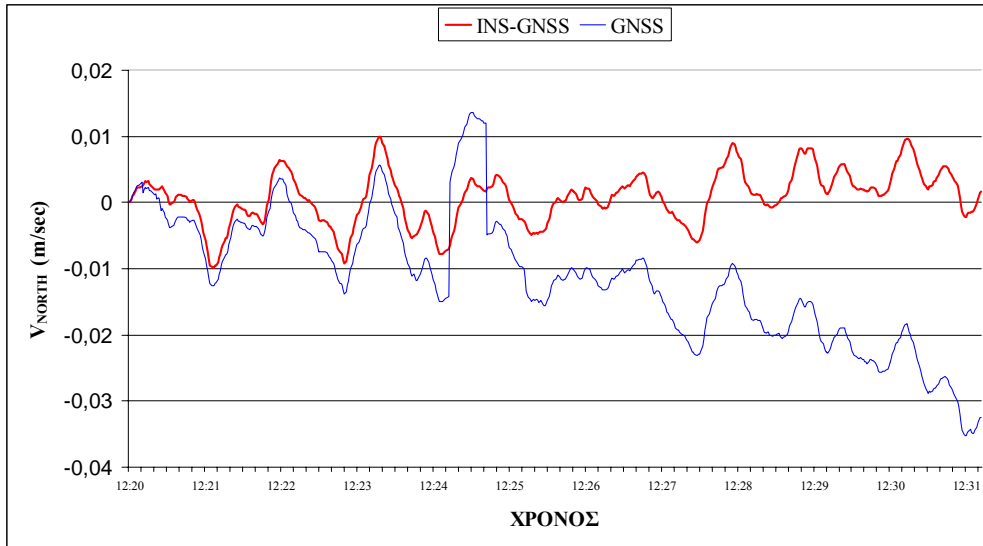
Εικόνα 5.25 : Μεταβολή υψομέτρου-Περίπτωση 2^η



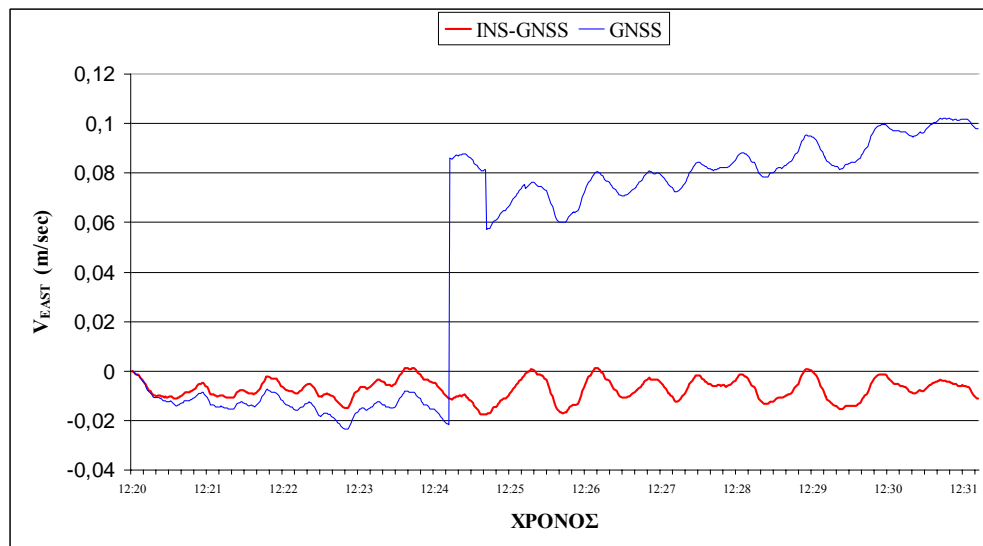
Εικόνα 5.26 : Μεταβολή γεωγραφικού πλάτους-Περίπτωση 2^η



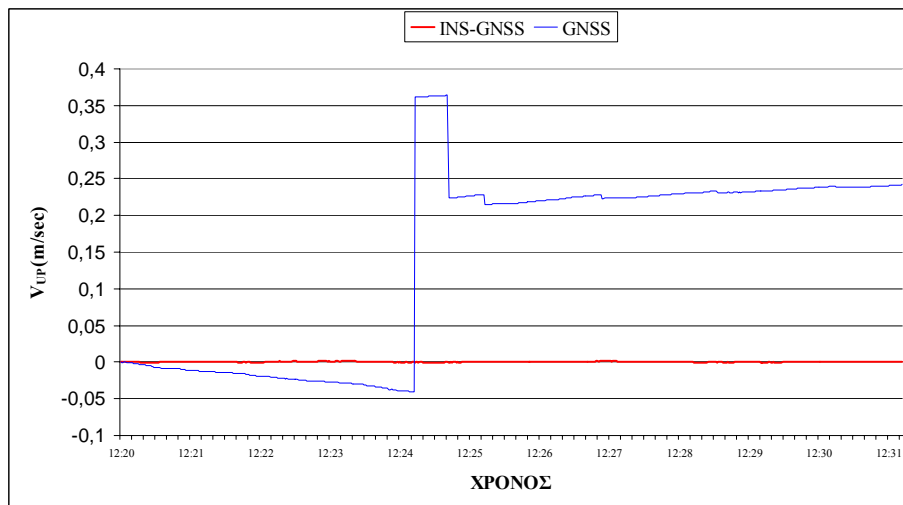
Εικόνα 5.27 : Μεταβολή γεωγραφικού μήκους-Περίπτωση 2^η



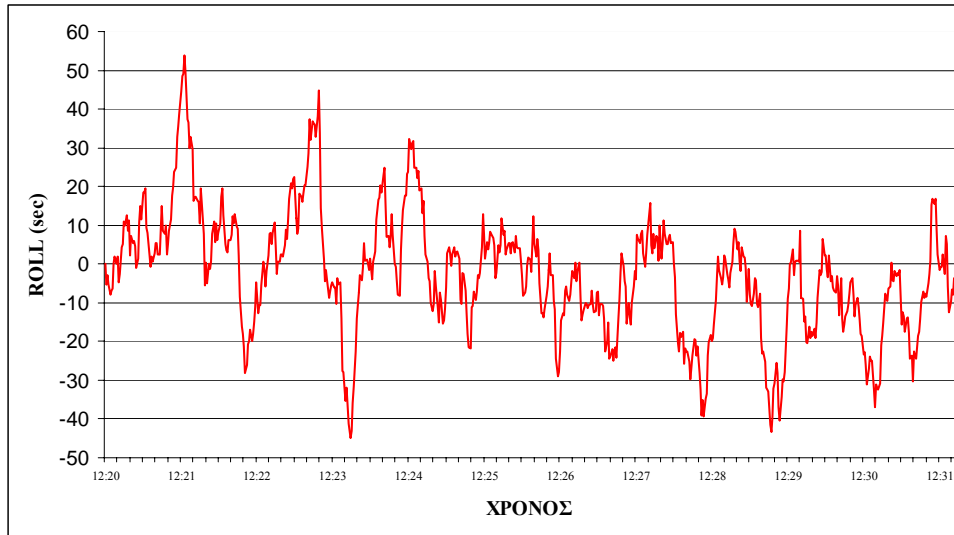
Εικόνα 5.28 : Μεταβολή v_N -Περίπτωση 2^η



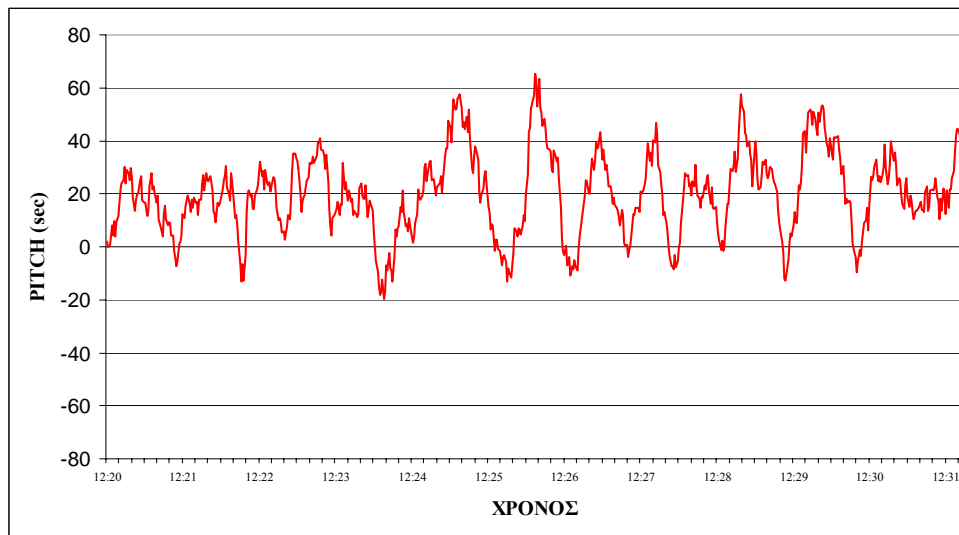
Εικόνα 5.29 : Μεταβολή v_E -Περίπτωση 2^η



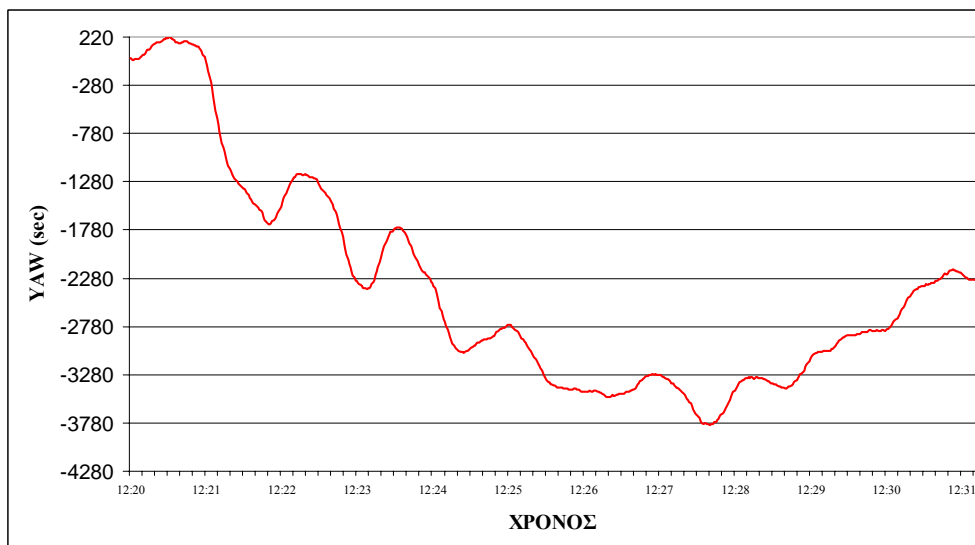
Εικόνα 5.30 : Μεταβολή v_{UP} -Περίπτωση 2^η



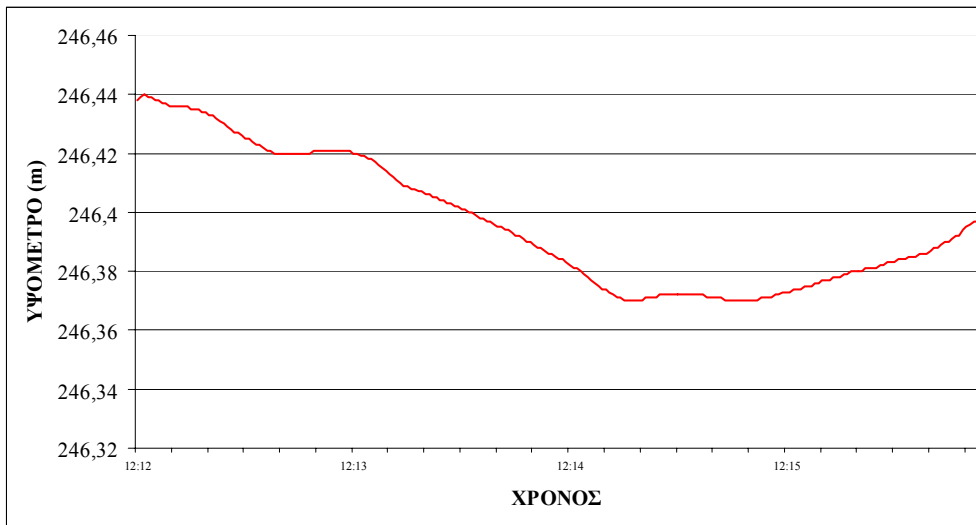
Εικόνα 5.31 : Μεταβολή της γωνίας roll-Περίπτωση 2^η



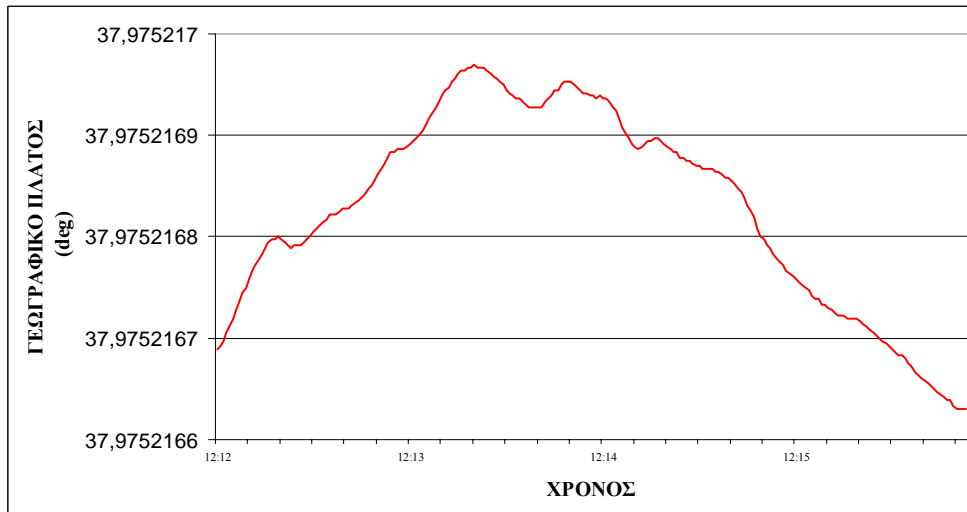
Εικόνα 5.32 : Μεταβολή της γωνίας pitch-Περίπτωση 2^η



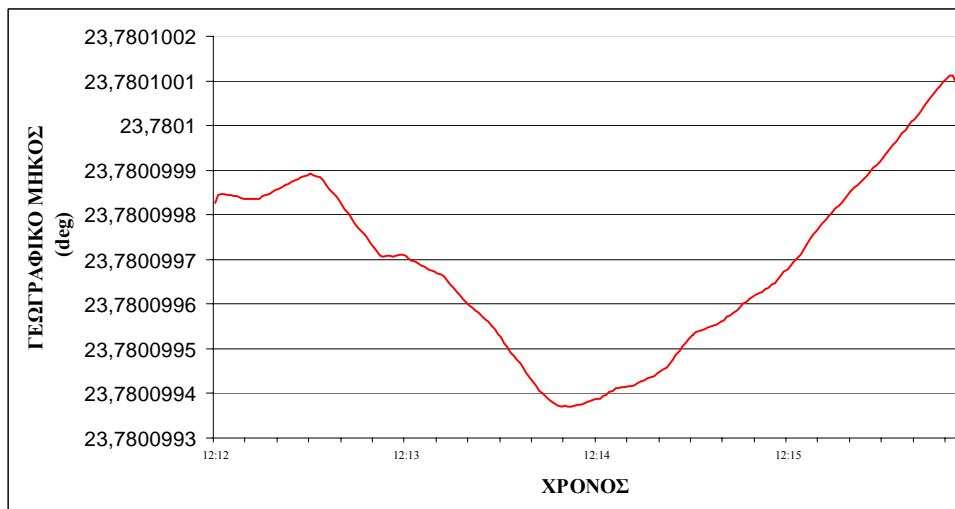
Εικόνα 5.33 : Μεταβολή της γωνίας azimuth-Περίπτωση 2^η



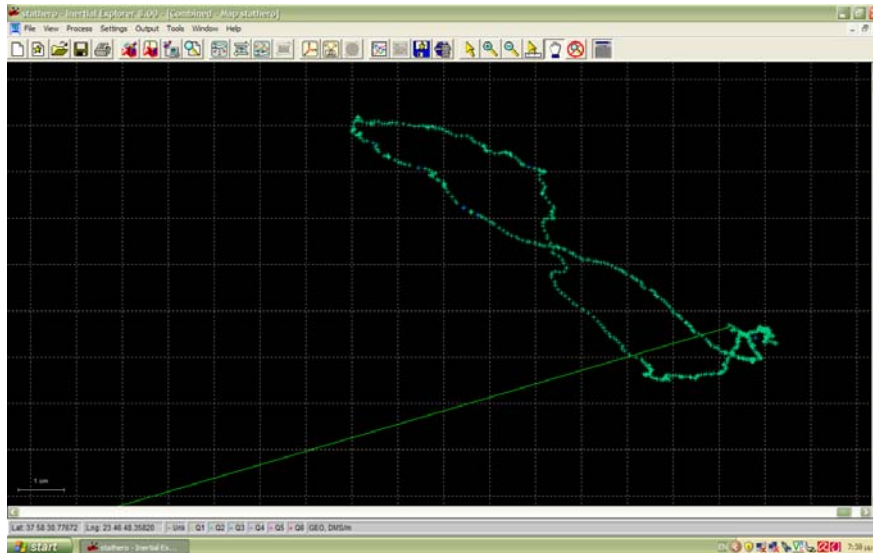
Εικόνα 5.34 : Μεταβολή υψομέτρου-Περίπτωση 3^η



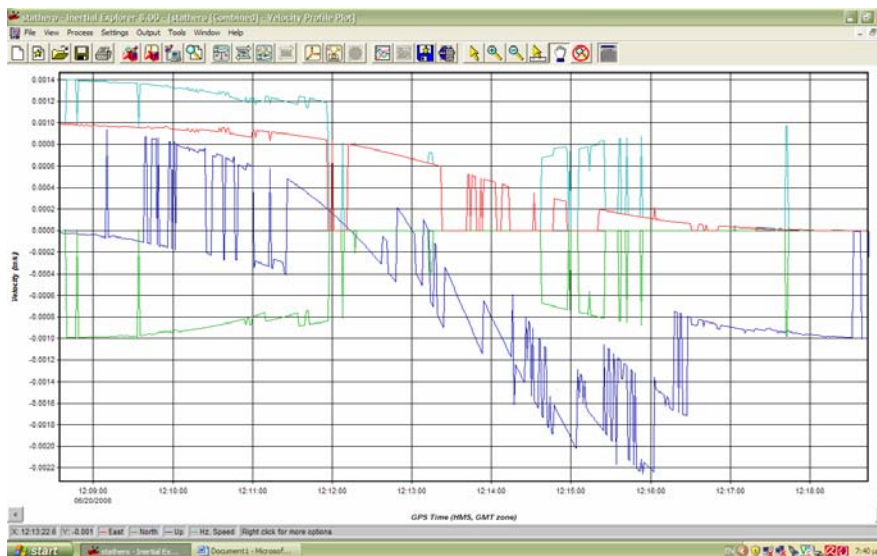
Εικόνα 5.35 : Μεταβολή γεωγραφικού πλάτους-Περίπτωση 3^η



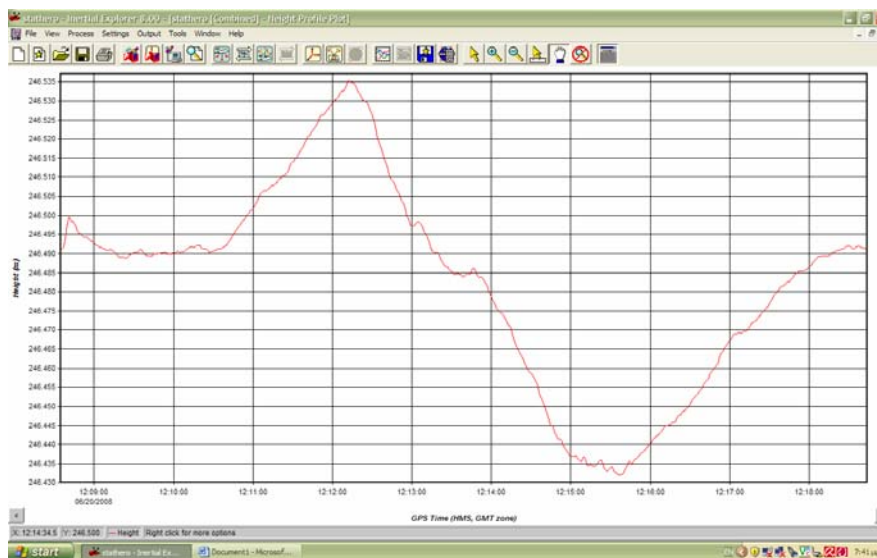
Εικόνα 5.36 : Μεταβολή γεωγραφικού μήκους-Περίπτωση 3^η



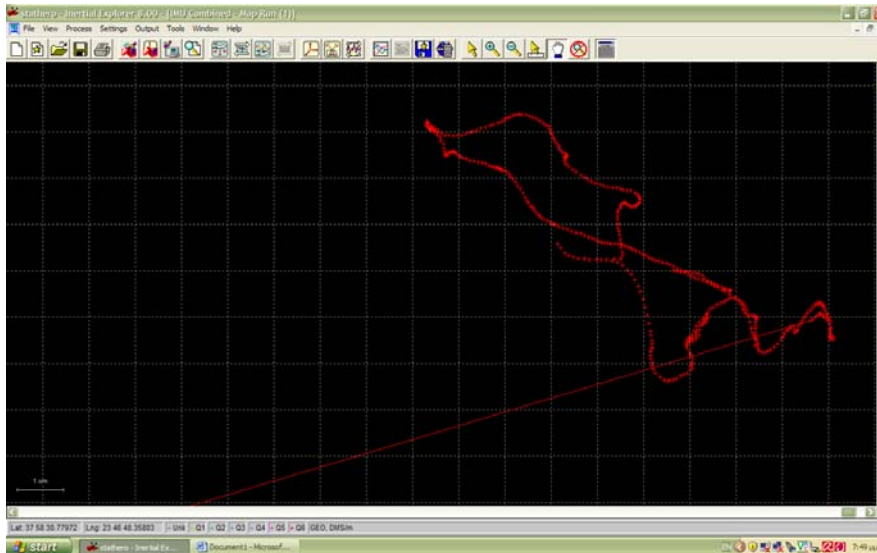
Εικόνα 5.37 : Διασπορά της λύσης μόνο GNSS -Περίπτωση 3^η



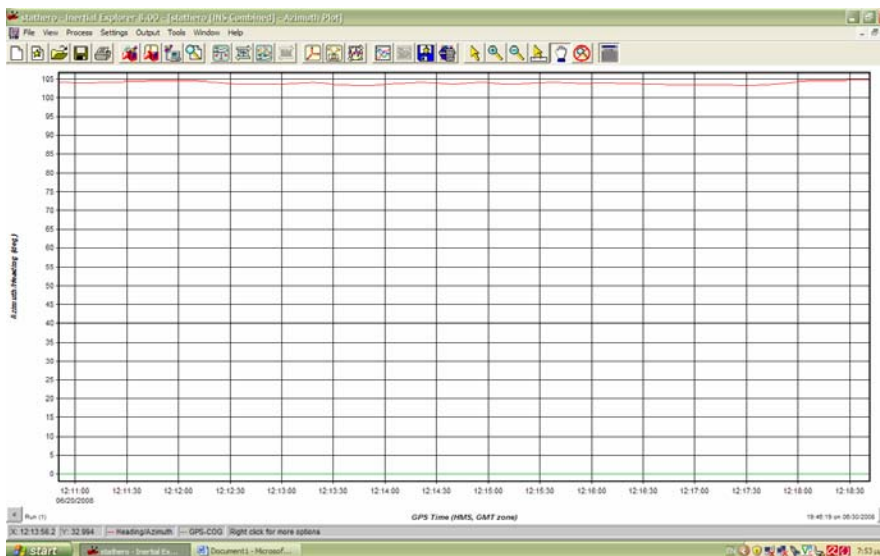
Εικόνα 5.38 : Μεταβολή των ταχυτήτων (v_N , v_E , v_{UD}) της λύσης μόνο GNSS -Περίπτωση 3^η



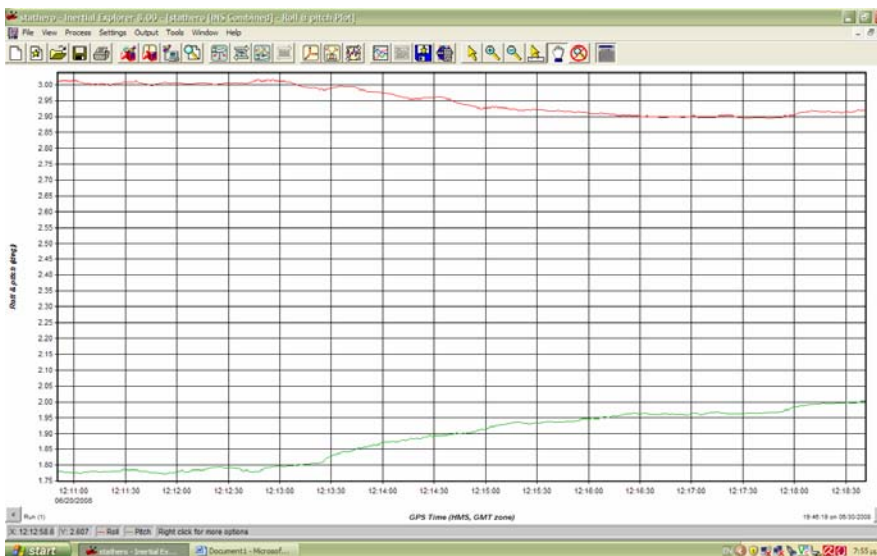
Εικόνα 5.39 : Μεταβολή του υψόμετρου της λύσης μόνο GNSS -Περίπτωση 3^η



Εικόνα 5.40 : Διασπορά της συνδυασμένης λύσης -Περίπτωση 3^η



Εικόνα 5.41 : Μεταβολή της γωνίας azimuth της συνδυασμένης λύσης -Περίπτωση 3^η



Εικόνα 5.42 : Μεταβολή των γωνιών roll-pitch της συνδυασμένης λύσης -Περίπτωση 3^η

➤ Ανάλυση αποτελεσμάτων δοκιμής

Όπως είναι φανερό και από τα γραφήματα το σύστημα μετά από 8 σχεδόν λεπτά ανεξάρτητης λειτουργίας παρουσιάζει σημαντικές διαφορές στον προσδιορισμό της θέσης, που στην περίπτωση του υψομέτρου φτάνουν τα 427 μέτρα. Το ίδιο είναι και η συμπεριφορά στον τομέα της ταχύτητας, όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο.

Όσον αφορά στην κινηματική συμπεριφορά το σύστημα παρουσιάζει τις μεγαλύτερες διαφορές στο προσδιορισμό της γωνίας roll, ενώ στον προσδιορισμό των δύο άλλων γωνιών (pitch, yaw) παρουσιάζει ανακατατάξεις.

Όλα τα παραπάνω επιβεβαιώνουν τα όσα μέχρι τώρα έχουν αναφερθεί και αφορούν την ανεξέλεγκτη αύξηση των σφαλμάτων της AMM, ακόμα και μονάδων όπως το SPAN του εργαστηρίου που περιέχει ποιοτικά εξελιγμένους αισθητήρες, με την πάροδο του χρόνου, όταν δεν παρέχεται κάποιου είδους εξωτερική βοήθεια.

Αντίθετα από τα γραφήματα της δεύτερης περίπτωσης προκύπτει ότι ο συνδυασμός των μετρήσεων INS και GNSS βελτιώνει κατά πολύ την αξιοπιστία της λύσης. Η συνδυαστική λύση θέσης και ταχύτητας είναι πολύ πιο σταθερή από την λύση της προηγούμενης περίπτωσης αλλά και από την λύση με χρήση μόνο μετρήσεων GNSS.

Μάλιστα στην τελευταία περίπτωση η συνδυαστική λύση καταφέρνει να αφομοιώσει κάποια υπερβολικά σφάλματα που εμφανίζονται την λύση με χρήση μόνο μετρήσεων GNSS, πιθανότατα λόγω παρεμβολών.

Ενδιαφέρον σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζει η σταθερότητα στην λύση του υψόμετρου και της ταχύτητας v_{UP} , που είναι κατά πολύ καλύτερη από ότι στην λύση της προηγούμενης περίπτωσης, αλλά και η λύση της γωνίας azimuth η οποία φτάνει και σε διαφορές της τάξεως των έξι μοιρών από την αρχική τιμή, τιμές που δεν παρατηρούνται σε καμία περίπτωση στην λύση της προηγούμενης περίπτωσης.

Τέλος όλα τα παρουσιαζόμενα γραφήματα των αποτελεσμάτων της τρίτης περίπτωσης συνηγορούν στο συμπέρασμα ότι η εκ των υστέρων επίλυση των μετρήσεων με χρήση δεδομένων βασικού σταθμού μέσω του περιβάλλοντος της εφαρμογής Inertial Explorer προσφέρει λύση πλοήγησης σαφώς καλύτερης ακρίβειας.

5.4.2. Δοκιμή 2^η (Έλεγχος λειτουργίας σε κίνηση-αποτύπωση διαδρομής)

➤ Περιγραφή δοκιμής

Η δεύτερη δοκιμή αφορούσε την αξιολόγηση του συστήματος σε κίνηση και την αποτύπωση μιας διαδρομής μικρού μεγέθους, η οποία περιλάμβανε ένα μικρό τμήμα όπου οι δορυφόροι δεν ήταν ορατοί.

Η διαδρομή που επιλέχθηκε ήταν εντός του χώρου της Πολυτεχνειούπολης και ακολουθούσε τα εξής χαρακτηριστικά σημεία :

Προαύλιος χώρος ΣΑΤΜ –Κτήριο Διοίκησης ΕΜΠ-υπόγειος χώρος στάθμευσης της σχολής ΗΜΜΗΥ (απώλεια σήματος GPS)-Πύλη Κατεγάκη-Νέο Κτήριο Εστίας-Προαύλιος χώρος ΣΑΤΜ.

Σκοπός της συγκεκριμένης δόκιμης ήταν περισσότερο ο προσδιορισμός του τρόπου λειτουργίας του συστήματος εν κινήσει και λιγότερο η αξιολόγηση των επιδόσεων του στην παραγωγή λύσης πλοήγησης και θέσης.

Παρόλα αυτά επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί μια διαδρομή, όπου υπάρχει απώλεια σήματος GPS, ενώ επιπλέον στην ανάλυση των αποτελεσμάτων γίνεται και μια αναφορά στην ποιότητα της παραγόμενης λύσης από το λογισμικό Inertial Explorer .

Για της ανάγκες αυτής της δόκιμης χρησιμοποιήθηκε και πάλι ο βασικός σταθμός, ο οποίος τοποθετήθηκε στο βάθρο LAMA που βρίσκεται στην ταράτσα του κτιρίου Λαμπαδάριου, ώστε τα δεδομένα του να χρησιμοποιηθούν στην εκ των υστέρων επίλυση των μετρήσεων με το λογισμικό Inertial Explorer.

Το σύστημα SPAN τοποθετήθηκε σε όχημα με ορισμένες όμως παραδοχές που περιορίζουν την ακρίβεια της λύσης και άρα της απαιτήσεις της δοκιμής. Συγκεκριμένα η AMM τοποθετήθηκε στο πίσω κάθισμα του αυτοκινήτου και όχι σε μια σταθερή βάση, με αποτέλεσμα παρ' όλες τις επιδόσεις της στην απορρόφηση κραδασμών αυτοί να υπεισέρχονται στην λειτουργία της.

Επιπλέον η εκκεντρότητα κεραίας δέκτη και AMM δεν προσδιορίστηκε με χρήση τοπογραφικού εξοπλισμού αλλά έγινε κατά προσέγγιση με χρήση μετροταινίας [δε = $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z) = (-0.09, 0, 1.00 \text{ m})$]



Εικόνα 5.43 :Η κεραία του συστήματος SPAN κατά την δεύτερη δοκιμή



Εικόνα 5.44 :Η τροφοδοσία του συστήματος SPAN κατά την δεύτερη δοκιμή



Εικόνα 5.45 :Το σύστημα SPAN κατά την δεύτερη δοκιμή

Η δοκιμή έλαβε χώρα την Παρασκευή 20 Ιουνίου 2008 κατά το χρονικό διάστημα 10:57 με 11:08.

➤ Αποτελέσματα δοκιμής

Τα αποτελέσματα της δόκιμης χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες :

- Στα αποτελέσματα που παρήχθησαν σε πραγματικό χρόνο
- Στα αποτελέσματα που παρήχθησαν με εκ των υστέρων επίλυση από το λογισμικό Inertial Explorer και αντιμετωπίζοντας το σύστημα ως χαλαρής συνέργιας (loosely coupled)
- Στα αποτελέσματα που παρήχθησαν με εκ των υστέρων επίλυση από το λογισμικό Inertial Explorer και αντιμετωπίζοντας το σύστημα ως στενής συνέργιας (tightly coupled)

Για την πρώτη περίπτωση θα παρουσιαστεί μόνο η σε πραγματικό χρόνο προσδιοριζόμενη διαδρομή, όπως δίνεται από την εφαρμογή CDU, χωρίς όμως να γίνει περαιτέρω ανάλυση.

Η δεύτερη περίπτωση, όπως είναι γνωστό δεν ενδείκνυται για περιπτώσεις όπου υπάρχουν συχνές και μεγάλες διακοπές στην ορατότητα των δορυφόρων. Δεδομένου όμως ότι στην συγκεκριμένη δόκιμη η απώλεια σήματος δεν ξεπερνάει το λεπτό επιλέχθηκε να γίνει η επίλυση και με αυτή την μέθοδο, ώστε να υπάρχουν συγκριτικά στοιχεία.

Επιπλέον στη συγκεκριμένη περίπτωση εφαρμόστηκε και ο ενσωματωμένος αλγόριθμος ομαλοποίησης RTS, ο οποίος είναι κατάλληλος σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρία για περιπτώσεις απώλειας σήματος δορυφόρων.

Τα γραφήματα που αναφέρονται στην λύση αυτής της περίπτωσης προέρχονται από την λύση που προέκυψε με την χρήση του παραπάνω αλγορίθμου.

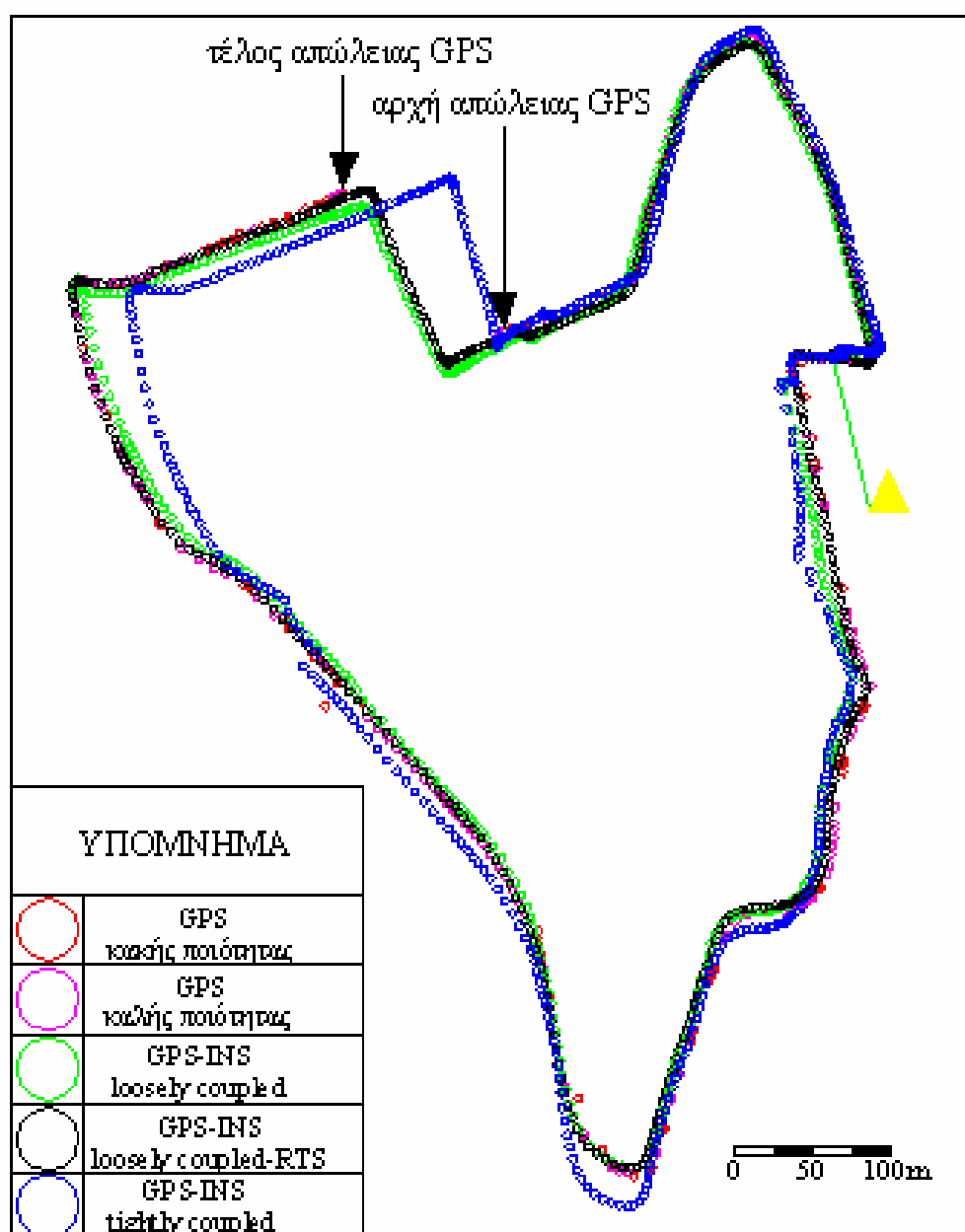
Τέλος η τρίτη περίπτωση θεωρείται η πλέον κατάλληλη για περιπτώσεις επίγειας πλοήγησης σε δύσκολα περιβάλλοντα και προτείνεται από την κατασκευάστρια εταιρία σε περιπτώσεις, όπου υπάρχουν μεγάλες διακοπές στο σήμα των δορυφόρων.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής με την έξης σειρά :

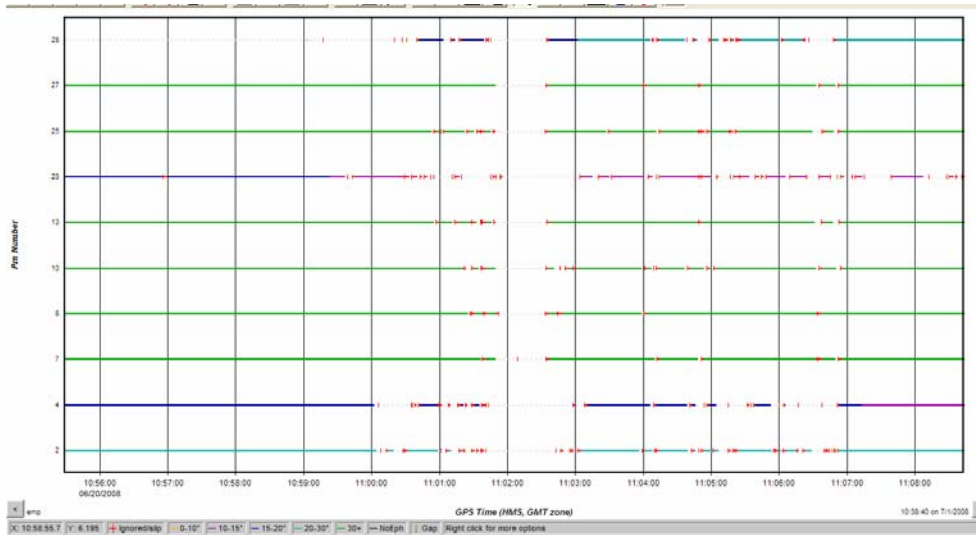
- αρχικά παρουσιάζεται η λύση πλοήγησης της πρώτης περίπτωσης, στο περιβάλλον της εφαρμογής CDU
- ακολουθεί ένα διάγραμμα που περιέχει όλες τις λύσεις που παρήγαγε η εφαρμογή Inertial Explorer, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση αυτών
- στην συνέχεια παρατίθεται ένα γράφημα με την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος από τους δορυφόρους με σκοπό να καταδειχθούν τα χρονικά σημεία της απώλειας του σήματος
- και τέλος ακολουθούν τα γραφήματα που απεικονίζουν την ποιότητα της λύσης πλοήγησης, όπως προκύπτει από την επίλυση χαλαρής και στενής συνέργιας αντίστοιχα.



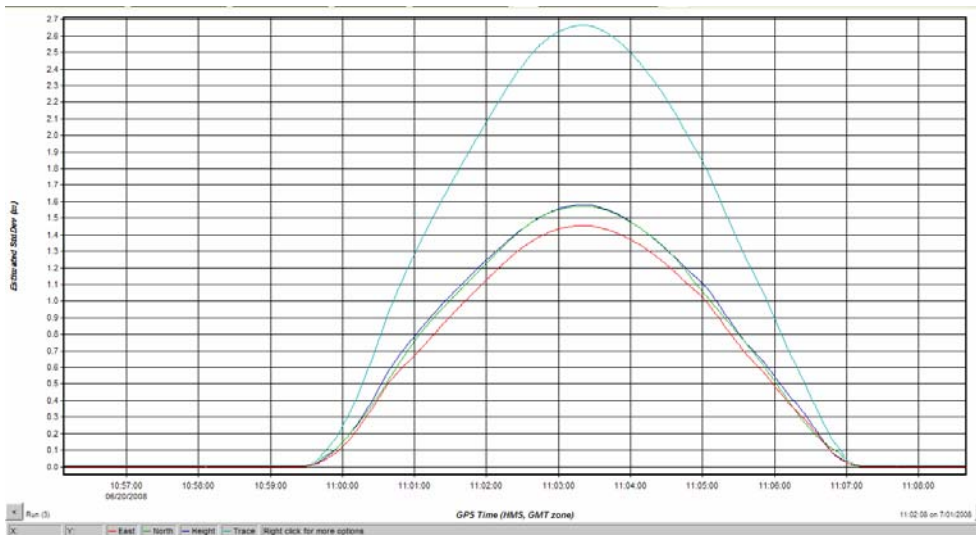
Εικόνα 5.46 : Λύση πλοήγησης σε πραγματικό χρόνο



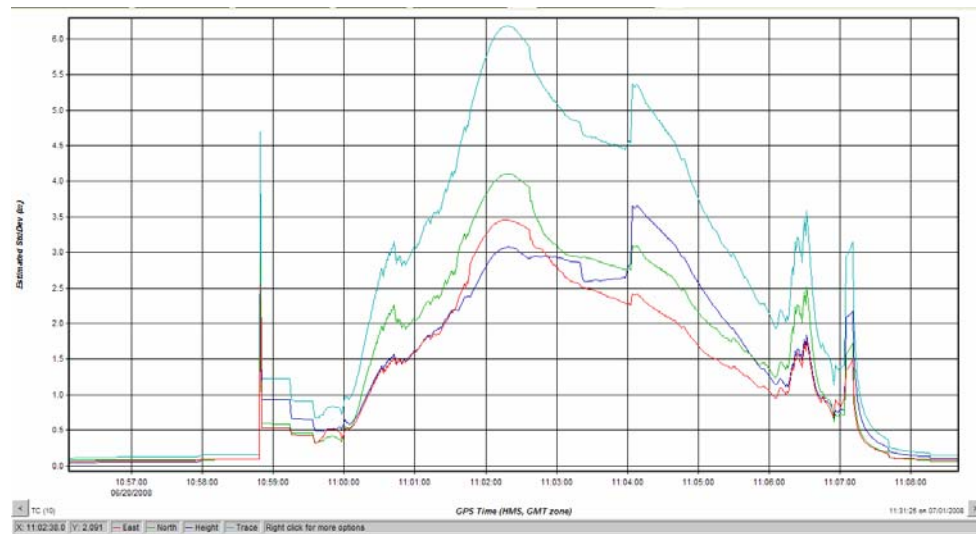
Εικόνα 5.47 : Λύσεις πλοήγησης με εκ των υστέρων επεξεργασία



Εικόνα 5.48 : Διάγραμμα ποιότητας του σήματος των δορυφόρων



Εικόνα 5.49 : Εκτιμώμενη ακρίβεια της λύσης πλοήγησης του συστήματος χαλαρής συνέργειας



Εικόνα 5.50 : Εκτιμώμενη ακρίβεια της λύσης πλοήγησης του συστήματος στενής συνέργειας

➤ Ανάλυση αποτελεσμάτων δοκιμής

Από την ανάλυση των παραπάνω σχημάτων και γραφημάτων προκύπτουν τα κάτωθι συμπεράσματα :

- Και οι τρεις παραγόμενες, από το λογισμικό, λύσεις διαφέρουν μεταξύ τους. Ιδιαίτερα κατά την απώλεια του δορυφορικού σήματος η λύση στενής συνέργειας παράγει διαφορετικό αποτέλεσμα από την λύση χαλαρής συνέργειας και την λύση που προκύπτει από την ομαλοποίηση (RTS) της τελευταίας. Οι διαφορές σε αυτή την περίπτωση αγγίζουν τα πενήντα μέτρα.
- Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο διαφορετικός προσδιορισμός της μεγάλης στροφής στο κάτω μέρος της διαδρομής, όπου χωρίς να υπάρχει απώλεια σήματος (το αντίθετο μάλιστα συμβαίνει αφού η λύση του GPS είναι καλής ποιότητας) η λύση του συστήματος στενής συνέργειας αποκλίνει από αυτή των άλλων δύο. Οι διαφορές σε αυτή την περίπτωση αγγίζουν τα εικοσιπέντε μέτρα.
- Η ομαλοποιημένη λύση φαίνεται να ακολουθεί την λύση που προέρχεται μόνο από τις μετρήσεις του GPS και να γεφυρώνει τα κενά χρησιμοποιώντας τον εσωτερικό αλγόριθμο και κάνοντας αυτό που λέει το όνομα της (ομαλοποίηση).
- Η λύση στενής συνέργειας παρουσιάζει την χειρότερη ακρίβεια στον προσδιορισμό της λύσης και μάλιστα το μέγεθος αυτής υφίσταται απότομες μεταβολές, παρουσιάζοντας την μεγαλύτερη τιμή του όπως ήταν αναμενόμενο στην περίοδο της απώλειας του δορυφορικού σήματος.
- Η ομαλοποιημένη λύση χαλαρής συνέργειας παρουσιάζει σαφώς καλύτερη ακρίβεια στον προσδιορισμό της λύσης ενώ το μέγεθος αυτής ακολουθεί μια ομαλή μεταβολή. Παρουσιάζει δε την μεγαλύτερη τιμή του στην περίοδο που ακολουθεί αυτήν της απώλειας του δορυφορικού σήματος, που και αυτό ήταν αναμενόμενο επειδή ο αλγόριθμος ομαλοποίησης έχει φορά από πίσω προς τα εμπρός και χρησιμοποιεί τα στοιχεία της προηγούμενης περιόδου για να διορθώσει την επόμενη μεταφέροντας έτσι και όλα τα σφάλματα της πρώτης στην δεύτερη.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1. Γενικά

Στις ενότητες, οι οποίες ακολουθούν, γίνεται μια ανακεφαλαίωση των συμπερασμάτων, που προέκυψαν από τις εκτελεσθείσες δόκιμες, ενώ παρουσιάζονται και ορισμένες χρήσιμες παρατηρήσεις, που αφορούν την λειτουργία του συστήματος και την βελτίωση της απόδοσης του.

Έτσι το κεφάλαιο χωρίζεται σε δυο κύρια τμήματα, τα οποία αναφέρονται αντίστοιχα στα εξαγόμενα συμπεράσματα και στα σημεία ιδιαίτερης προσοχής.

6.2. Συμπεράσματα

Αυτό που μπορεί να εξαχθεί, από το σύνολο των δοκιμών, ως γενικό συμπέρασμα είναι ότι τα αποτελέσματά τους επιβεβαιώνουν όσα έχουν περιγράψει στο θεωρητικό τμήμα της εργασίας (κεφάλαια 2 και 4).

Έτσι όταν η αδρανειακή μονάδα αφήνεται να λειτουργήσει αυτόνομα, χωρίς την παροχή στοιχείων από το δορυφορικό σύστημα, η ακρίβεια και η αξιοπιστία των μετρήσεων που παράγει μειώνονται με τον χρόνο δημιουργώντας εύλογα ερωτηματικά για την απόδοση της συσκευής.

Τα ερωτηματικά αυξάνονται αν ληφθεί υπ' όψιν πρώτον ότι η μονάδα βρισκόταν σε ακινησία σε σταθερό βάθος και δεύτερον ότι αποτελείται από αισθητήρες (γυροσκόπια και επιταχυνσιόμετρα) υψηλής ποιότητας και επιδόσεων, που κατατάσσουν τη μονάδα στην κατηγορία των τακτικών συστημάτων υψηλών επιδόσεων.

Στην ουσία όμως τα παραπάνω ερωτηματικά δεν είναι τίποτα περισσότερο παρά η επιβεβαίωση του κύριου περιορισμού, που παρουσιάζουν τα ΑΣΠ και ο οποίος είναι η ραγδαία μείωση της ακρίβειας τους λόγω της σωρευτικής αύξησης των σφαλμάτων των αισθητήρων.

Όταν γίνεται συνδυασμός των μετρήσεων της αδρανειακής μονάδας με τις μετρήσεις του δορυφορικού δέκτη τα αποτελέσματα βελτιώνονται κατά πολύ. Το ολοκληρωμένο σύστημα λειτουργεί πολύ πιο αξιόπιστα και καταφέρνει να περιορίσει όχι μόνο τα σφάλματα των αδρανειακών αισθητήρων αλλά και των δορυφορικών μετρήσεων, δεδομένου ότι αυτές ελάμβαναν χώρα σε ένα επιβαρημένο ηλεκτρομαγνητικά περιβάλλον.

Όπως φαίνεται από την σύγκριση των γραφημάτων η απόδοση του ολοκληρωμένου συστήματος είναι πολύ πιο καλή από τις αποδόσεις και των δύο υποσυστημάτων όταν αυτά λειτουργούν ανεξάρτητα. Η παραπάνω απόδοση αυξάνεται ακόμα περισσότερο με την χρήση διαφορικού GPS και με εκ των υστέρων επίλυση των μετρήσεων.

Όσον αφορά την λειτουργία του συστήματος εν κινήσει με σκοπό την αποτύπωση οδού και την εξαγωγή γεωμετρικών χαρακτηριστικών αυτής, η δοκιμή κατάφερε να

καταδειξεί τις δυνατότητές του παρόλη την χαμηλή ακρίβεια που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα.

Πρέπει να τονιστεί εδώ ότι η χαμηλή ακρίβεια των αποτελεσμάτων της δεύτερης δοκιμής ήταν λίγο πολύ αναμενόμενη, δεδομένου ότι τόσο η τοποθέτηση των συσκευών όσο και η διαδικασία μέτρησης απείχαν πολύ από το να χαρακτηριστούν κατάλληλες για την εκτέλεση εργασιών ακρίβειας.

Επιπλέον και η περιοχή της δοκιμής δεν προσφερόταν για την εκτέλεση δοκιμών, που περιλαμβάνουν δορυφορικές μετρήσεις, λόγω των έντονων ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών που προκαλούν οι κεραίες που βρίσκονται στον Υμηττό.

Παρόλα αυτά η απόδοση του συστήματος κρίνεται ικανοποιητική, δεδομένου ότι κατέστη δυνατόν να αναδειχθούν τα κύρια χαρακτηριστικά του. Συγκεκριμένα η δοκιμή πέτυχε να παρουσιάσει την δυνατότητα του συστήματος να παράγει λύση πλοήγησης σε πραγματικό χρόνο, ακόμα και στην περίπτωση απώλειας του σήματος GNSS για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα (κοντά στο ένα λεπτό).

Επίσης η δοκιμή κατέδειξε την ευελιξία του συστήματος στην συλλογή και επεξεργασία δεδομένων, καθώς και τις δυνατότητες του προγράμματος εκ των υστέρων επίλυσης των μετρήσεων.

Ανακεφαλαιώνοντας το σύστημα SPAN είναι ένα ΟΑΔΣΠ, το οποίο μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά ακόμα και στο πιο δύσκολο περιβάλλον, όπως πχ ο αστικός ιστός ή ένας δρόμος με συνεχόμενες και μεγάλες σήραγγες, χάρις στις πολλαπλές δυνατότητες που ενσωματώνει.

6.3. Σημεία Ιδιαίτερης Προσοχής

Στην ενότητα αυτή προτείνονται ορισμένες ενέργειες, οι οποίες προέκυψαν μέσα από τις διαδικασίες των δοκιμών και της εκ των υστέρων επίλυσης των μετρήσεων, με σκοπό την βελτίωση της απόδοσης του συστήματος.

Έτσι :

Ένα σημείο ιδιαίτερης προσοχής είναι ο χρόνος και η τεχνική της αρχικής ευθυγράμμισης του συστήματος, όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί διαφορικό GPS και να γίνει εκ των υστέρων επίλυση των μετρήσεων.

Στην περίπτωση αυτή απαιτείται επιπλέον χρόνος ακινησίας, περίπου δύο με τρία λεπτά, σε σχέση με αυτόν που απαιτείται για την παραγωγή της λύσης σε πραγματικό χρόνο. Έτσι το όχημα πρέπει να παραμείνει ακίνητο για το παραπάνω χρονικό διάστημα και αφού έχει εμφανισθεί η ένδειξη INS_ALIGNMENT_COMPLETE.

Το παραπάνω ισχύει στην περίπτωση που θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της προσεγγιστικής ευθυγράμμισης και πρέπει να γίνεται τόσο κατά την έναρξη της αποστολής όσο και κατά την λήξη, ώστε να είναι δυνατή η επίλυση σε μετάβαση και επιστροφή. Αν δε το απαιτεί η ακρίβεια της αποστολής τότε το χρονικό διάστημα

ευθυγράμμισης μπορεί να αυξηθεί σε οκτώ με δέκα λεπτά και να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της ευθυγράμμισης ακριβείας.

Στη περίπτωση που δεν είναι δυνατόν το όχημα να παραμείνει για τόσο μεγάλο χρονικό διάστημα ακίνητο, τότε ακινητεί για τέσσερα με δέκα δευτερόλεπτα και χρησιμοποιείται η μέθοδος της εν κινήσει ευθυγράμμισης.

Ένα δεύτερο σημείο που χρήζει προσοχής είναι ο προσδιορισμός της εκκεντρότητας της κεραίας και της αδρανειακής μονάδας, ο οποίος είναι προτιμότερο να γίνεται στο πεδίο με την χρήση μεθόδου που εγγυάται την ακρίβεια προσδιορισμού που απαιτείται για την κάθε αποστολή.

Το πρόγραμμα εκ των υστέρων επίλυσης των μετρήσεων δίνει βέβαια την δυνατότητα προσδιορισμού της εκκεντρότητας σε περίπτωση που αυτή δεν είναι γνωστή, με ακρίβεια όμως που περιορίζεται στα πέντε με δέκα εκατοστά.

Επιπλέον για να επιτευχθεί η παραπάνω ακρίβεια απαιτούνται καλές αρχικές προσεγγιστικές τιμές αλλά και επανάληψη των επιλύσεων μέχρις ότου οι νέες προσδιοριζόμενες τιμές να μην διαφέρουν ουσιαστικά από τις προηγούμενες.

Ένα τρίτο σημείο προσοχής είναι το επιλεγόμενο μοντέλο σφαλμάτων καθώς και το είδος της αποστολής. Το πρόγραμμα προσφέρει την δυνατότητα χρήσης αρκετών μοντέλων σφαλμάτων και ειδών αποστολής. Κατά την εκτέλεση των δοκιμών της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο σφαλμάτων που αντιστοιχεί στην AMM (FSAS-EI-SN) ενώ ως είδος αποστολής επιλέχθηκε η πλοήγηση εδάφους (land application).

Τέλος σημείο που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής είναι και η επιλογή του ρυθμού καταγραφής των δεδομένων καθώς και του τύπου συγχρονισμού τους. Σημειώνεται ότι ενώ η αδρανειακή μονάδα μετράει με συχνότητα που φτάνει το 200 Hz, το σύστημα μπορεί να καταγράψει ταυτόχρονα μόνο ένα είδος μέτρησης με αυτή την συχνότητα.

Έτσι αν ζητηθεί η καταγραφή των πρωτογενών μετρήσεων (raw data) της AMM με την παραπάνω συχνότητα τότε όλες οι άλλες μετρήσεις της AMM, όπως πχ η θέση ή η ταχύτητα, μπορούν να καταγράψουν με συχνότητα όχι μεγαλύτερη των 50 Hz.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Bhatti U.I., Improved integrity algorithms for integrated GPS/INS systems in the presence of slowly growing errors, PhD, Imperial College London, 2007

Britting K. R., Inertial Navigation Systems Analysis, John Wiley & Sons Inc., 1971

Gautier D.J., GPS/INS Generalized Evaluation Tools (GIGET) for the Design and Testing of Integrated Navigation System, Ph.D., Stanford University, 2003

Grewal M. S., Weill L. R., and Andrews A. P. , Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration, John Wiley & Sons, Inc, 2001

Heipke et al, Test Goals and Test Set Up for the OEEPE Test: Integrated Sensor Orientation, OEEPE Integrated Sensor Orientation Test Report and Workshop Proceedings, Official Publication No. 43, pp. 11-18, July 2002.

Hofmann-Wellenhof B., Legat B., Wieser M., Navigation-Principles of Positioning and Guidance, Springer Inc., 2003

Jekeli C., Inertial Navigation System with Geodetic Application, Walther de Gruyter GmbH, 2001

King A. D., Inertial Navigation- Forty Years of Evolution, GEC Review Volume 13, No. 3, 1998

Maybeck, P. S., Stochastic Models, Estimation, and Control: Volume 1, Academic Press Inc., 1979

Noureldin A., Osman A., El-Sheimy N., A neuro-wavelet method for multi-sensor system integration for vehicular navigation, Institute of Physics Publishing, 2003

Novatel Inc., SPAN Technology for OEMV User Manual, Novatel Inc., 2007

Scultz E. Casper, INS and GPS Integration, Msc Thesis, Technical University of Denmark, 2006

Shin Eun-Hwan, Accuracy Improvement of Low Cost for Land Application, UCGE Reports Number 20156, The University of Calgary, 2001

Skaloud J., Optimizing Georeferencing of Airborne Survey Systems by INS/DGPS, Ph.D. Thesis, The University of Calgary, 1999.

Stovall H. S., Basic Inertial Navigation, Naval Air Warfare Center Weapons Division, 1997

Titterton D. H. and Weston J. L., Strapdown Inertial Navigation Technology, The American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004

Waypoint Inc., GrafNav/GrfNet User Guide, Waypoint Inc., 2007

Waypoint Inc., Inertial Explorer User Guide, Waypoint Inc., 2007

Welch G., Bishop G., An introduction to the Kalman filter, University of North Carolina,2006

Woodman J.O., An introduction to inertial navigation, University of Cambridge,2007

Βεης Γ., Μπιλληρης Χ., Παπαζήση Κ., Κεφάλαια Ανώτερης Γεωδαισίας, Εκδόσεις ΕΜΠ,2006

Δεληκαράογλου Δ., Ειδικά Θέματα Δορυφορικής Γεωδαισίας, Εκδόσεις ΕΜΠ,2005

Κορακίτης Ρ., Γεωδαιτική Αστρονομία, Εκδόσεις ΕΜΠ,2004

Παραδείσης Δ., Σημειώσεις Δορυφορικής Γεωδαισίας, Εκδόσεις ΕΜΠ,2000