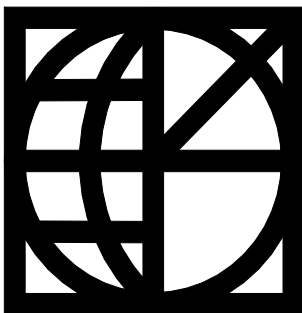


ΚΕΝΤΡΟ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ ΔΙΟΝΥΣΟΥ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΜΠ

DIONYSOS SATELLITE OBSERVATORY
DEPARTMENT OF SURVEYING
NTUA

ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΚΑΙ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ
ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ – ΧΡΗΣΗ ΣΕ ΑΠΟΤΥΠΩΣΕΙΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ

ΙΩΑΝΝΗΣ Γ. ΡΟΔΟΠΟΥΛΟΣ



ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2008

Ευχαριστίες..

Η παρούσα διπλωματική έγινε υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ^ο Παραδείση Δημήτριου και σ' αυτό το σημείο θα ήθελα να τον ευχαριστήσω θερμά για την πολύτιμη βοήθεια και συμπαράστασή του καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να είμαι μαζί με τον συνάδελφο Γκέκα Αθανάσιο οι πρώτοι που ήρθαμε σε επαφή με ένα ολοκληρωμένο δορυφορικό και αδρανειακό σύστημα πλοήγησης.

Περιεχόμενα

Περίληψη	σελ. 1
Abstract	σελ. 2
1. Εισαγωγή	σελ. 3
2. Δορυφορικά συστήματα εντοπισμού θέσης	σελ. 7
3. Αδρανειακά συστήματα πλοήγησης	σελ. 20
4. Συνεργασία αδρανειακών και δορυφορικών συστημάτων	σελ. 70
5. Το INS - GPS σύστημα του εργαστηρίου	σελ. 81
6. Πειραματική Διαδικασία	σελ. 92
7. Συμπεράσματα	σελ. 139
8. Βιβλιογραφία	σελ. 141

Περίληψη

Τα δορυφορικά συστήματα εντοπισμού (GPS) έχουν χρησιμοποιηθεί κατά κόρον τα τελευταία χρόνια όχι μόνο για εντοπισμό θέσης αλλά και σαν ένα σύστημα πλοήγησης, το οποίο εξασφαλίζει για στρατιωτικούς σκοπούς αλλά και σε ιδιώτες χρήστες ακριβή προσδιορισμό της θέσης καθώς και της πορείας.

Το σύστημα έχει εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα όπως σε συστήματα πλοήγησης αυτοκινήτου (car navigation), πλοίου (boat navigation), κινητά τηλέφωνα και υψηλής ακρίβειας γεωδαιτικού εξοπλισμού.

Το σήμα που εκπέμπει ο δορυφόρος προς τους δέκτες είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό σήμα με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η πορεία του από βουνά, δέντρα και κτίρια. Έτσι το σύστημα GPS δεν μπορεί να παρέχει συνεχόμενο και αξιόπιστο προσδιορισμό θέσης άρα ούτε και συνεχόμενη πλοήγηση.

Το αδρανειακό σύστημα πλοήγησης (Inertial Navigation System - INS), σε αντίθεση με το GPS, είναι ένα αυτόνομο, παντός καιρού σύστημα πλοήγησης το οποίο μπορεί να προσφέρει συνεχόμενες πληροφορίες θέσης (position), ταχύτητας (velocity) και κινηματικής συμπεριφοράς (attitude) ασχέτως του περιβάλλοντος. Τα αποτελέσματα του αδρανειακού συστήματος χάνουν την αρχική τους ποιότητα με τον χρόνο και αυτό οφείλεται στην ποιότητα των αισθητήρων που χρησιμοποιεί.

Η χρήση ενός ολοκληρωμένου δορυφορικού και αδρανειακού συστήματος είναι ο ικανότερος τρόπος να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα του αδρανειακού συστήματος χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του GPS όταν αυτό είναι εφικτό για να διορθώσει την θέση και την ταχύτητα που εξάγει το αδρανειακό σύστημα.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι να γίνει μια πλήρης περιγραφή ενός ολοκληρωμένου δορυφορικού και αδρανειακού συστήματος έτσι ώστε να καθοριστούν οι αδυναμίες και των δυο συστημάτων ώστε να γίνει κατανοητό γιατί είναι σημαντική η συνεργασία και για τα δυο συστήματα.

Abstract

The *Global Position System (GPS)* has been commonly used for the last years as a navigation system, that provides both military and private users, with accurate information about their position.

The system has been implemented in a long range of different instruments such as car and boat navigation systems, cell phones and high precision geodetic surveying equipment.

However as the *GPS* signal is an electromagnetic signal, it can be blocked by mountains, dense forests and areas with high buildings. Hence, *GPS* will not always provide a continuous and reliable position all the time.

On the other hand *Inertial Navigation System (INS)* is an autonomous, all weather navigation system that can provide continuous information of position, velocity and attitude regardless of the surroundings. However, the performance of *INS* deteriorates with time due to the aggravation of the inertial navigation sensors performance.

The integration of *GPS* and *INS* is an efficient way of limiting the *INS* derived position, velocity and attitude errors by using the *GPS* measurements as update to the position and velocity, whenever it is available.

The main objective of this diploma thesis is to describe the underlying theory of *INS* and *GPS* in order to emphasize the limitations of both systems and show why their integration can be important.

1 Εισαγωγή

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι να παρουσιάσει ένα ολοκληρωμένο σύστημα δορυφορικού και αδρανειακού συστήματος πλοήγησης και γίνει μια πειραματική δοκιμασία σε αποτύπωση σηράγγων μεγάλου μήκους.

Όταν λέμε ολοκληρωμένο αδρανειακό και δορυφορικό σύστημα πλοήγησης εννοούμε μια διάταξη η οποία αποτελείται από ένα δορυφορικό σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS) και ένα αδρανειακό σύστημα πλοήγησης (Inertial Navigation System - INS).

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.

Τα δορυφορικά συστήματα πλοήγησης είναι διατάξεις από μία ή περισσότερες συσκευές (ανάλογα τον τύπο) οι οποίες έχουν την δυνατότητα να λαμβάνουν σήματα από δορυφόρους και να επικοινωνούν με άλλο δέκτη με αποτέλεσμα, μετά από κατάλληλες επεξεργασίες, να προσδιορίζεται η θέση του δέκτη.

Η ιδέα αυτά τα δυο συστήματα να συνεργαστούν δεν είναι καινούρια αλλά εφαρμόζεται τις τελευταίες δυο δεκαετίες σε πολλούς τομείς. Πλοία, αεροπλάνα και υποβρύχια είναι τομείς που χρησιμοποιούν κατά κόρον ενιαίο σύστημα δορυφορικής και αδρανειακής πλοήγησης.

Το αδρανειακό σύστημα πλοήγησης μπορεί να εξασφαλίσει συνεχόμενη και αξιόπιστη πλοήγηση με τα σφάλματά του όμως να αυξάνονται κατά την διάρκεια του χρόνου λόγω του αλγορίθμου που χρησιμοποιεί.

Το δορυφορικό σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένας τρόπος αναβάθμισης της θέσης και της ταχύτητας όσο συχνά είναι δυνατόν. Ο κύριος λόγος δηλαδή της ενοποίησης είναι να έχουμε συνεχόμενα χωρίς χρονικούς περιορισμούς αξιόπιστα αποτελέσματα θέσης και ταχύτητας.

Δομή της διπλωματικής εργασίας

- Κεφάλαιο 1

Στο πρώτο κεφάλαιο αναπτύσσεται η παρούσα εισαγωγή της διπλωματικής.

- Κεφάλαιο 2

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά για τα δορυφορικά συστήματα (GPS) αρχίζοντας από μια σύντομη ιστορική αναδρομή, συνεχίζοντας με τις αρχές λειτουργίας και τα είδη του συστήματος και στην συνέχεια παραθέτοντας τα σφάλματα των παρατηρήσεων ανά κατηγορίες.

Επειδή ο τρόπος λειτουργίας των δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης είναι γνωστός πλέον έχει γίνει προσπάθεια το κεφάλαιο να είναι όσο το δυνατόν πιο περιεκτικό παραθέτοντας τα απαραίτητα στοιχεία χωρίς ανάλυση.

Ο ρόλος του κεφαλαίου αυτού είναι να αναλύσουμε τα μειονεκτήματα του συστήματος με στόχο να γίνει κατανοητή η αναγκαιότητα της συνεργασίας δορυφορικών και αδρανειακών συστημάτων.

- Κεφάλαιο 3

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στα αδρανειακά συστήματα πλοήγησης καθώς περιγράφονται τα κύρια χαρακτηριστικά τους και οι βασικές αρχές λειτουργίας τους.

Αρχικά δίνονται οι βασικοί νόμοι στους οποίους στηρίζεται η λειτουργία τους, 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.

- Κεφάλαιο 4

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναπτύσσεται η συνεργασία δορυφορικών και αδρανειακών συστημάτων αναλύοντας τις εξισώσεις πλοήγησης που χρησιμοποιούνται, τις τεχνικές ανάμιξης δεδομένων καθώς και τα πλεονεκτήματα που μας προσφέρει η συνεργασία των δυο συστημάτων.

- Κεφάλαιο 5

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μια περιγραφή του συστήματος INS - GPS του εργαστηρίου. Πρόκειται για ένα προϊόν της εταιρίας NOVATEL σειράς SPAN και χρησιμοποιεί το αδρανειακό σύστημα IMU FSAS.

- Κεφάλαιο 6

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το πείραμα του συστήματος. Πρόκειται για μια αποτύπωση της περιφερειακής οδού Υμηττού με χρήση αρχικά μόνο του GPS και στην συνέχεια ολοκληρωμένης λύσης GPS - INS, όπου σχολιάζονται οι διαφορές των εξαγομένων αποτελεσμάτων.

Αξίζει να αναφερθεί εδώ ότι ο στόχος του πειράματος αλλά και της διπλωματικής δεν ήταν το πείραμα να αποφέρει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Στόχος ήταν να δοκιμαστεί το σύστημα, να τεθεί σε λειτουργία και να βγουν κάποια συμπεράσματα από την λειτουργία του μιας και ήταν η πρώτη φορά που ερχόμασταν σε επαφή με σύστημα αυτής της μορφής.

2. ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ

2.1. ΓΕΝΙΚΑ

Στο τρίτο κεφάλαιο θα δοθεί μια σύντομη περιγραφή των Δορυφορικών Συστημάτων Πλοήγησης και Θέσης κάνοντας μια αναδρομή, αναφέροντας την αρχή λειτουργίας τους, τις μεθόδους μέτρησης καθώς και τα σφάλματά τους .

Θα γίνει επίσης μια ανάλυση των μειονεκτημάτων του συστήματος και των σύγχρονων τάσεων που έχουν ως σκοπό την αντιμετώπισή τους.

2.1.1. Ιστορική Αναδρομή

Οι σύγχρονες μη επίγειες μέθοδοι προσδιορισμού θέσης βασίζονται κυρίως σε δορυφορικές τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί μετά το 1957. Σήμερα, τα κυριότερα γεωδαιτικά δορυφορικά συστήματα περιλαμβάνουν το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού GPS, και τα συστήματα GLONASS, DORIS, ARGOS κ.α. τα οποία βασίζονται στην χρήση μικροκυμάτων που εκπέμπονται από δορυφόρους.

Στο παρελθόν χρησιμοποιήθηκαν ποικίλα δορυφορικά συστήματα και τεχνικές, όπως τα οπτικά συστήματα, τα συστήματα ραντάρ σε C- και σε S-band και ειδικά συστήματα μικροκυμάτων όπως το σύστημα GRARR της NASA, το σύστημα Secor και το Minitrak. Τα συστήματα Doppler Transit και Tsicada αποτέλεσαν τα πρόδρομα συστήματα του GPS και του GLONASS αντίστοιχα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι από τα πλέον σύγχρονα γεωδαιτικά δορυφορικά συστήματα είναι τα αλτίμετρα ραντάρ (satellite radar altimeters).

2.1.2. Αρχές Λειτουργίας

Θα περιγραφεί ο τρόπος λειτουργίας του NAVSTAR GPS (NAVigation System with Timing And Ranging - Global Positioning System) ή απλά του γνωστού GPS. Είναι ένα δορυφορικό σύστημα τρισδιάστατου προσδιορισμού θέσης, χρόνου και ταχύτητας σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή και ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες. Το σύστημα σχεδιάστηκε και βρίσκεται υπό τον έλεγχο του Υπουργείου Άμυνας των ΗΠΑ, πρόκειται συνεπώς για στρατιωτικό σύστημα.

Το GPS αποτελείται ουσιαστικά από "πομπούς σε τροχιά" (τεχνητοί δορυφόροι) και δέκτες σε γήινη επιφάνεια (δέκτες GPS) οι οποίοι λαμβάνουν τα ηλεκτρομαγνητικά σήματα που εκπέμπονται από τους δορυφόρους. Το σύστημα διαθέτει σήμερα 28 δορυφόρους σε 6 τροχιακά επίπεδα τροχιάς κλίσης 55° ως προς τον ισημερινό και σε ύψος 20200 km με περίοδο περιστροφής 12 ώρες.

Οι δορυφόροι εκπέμπουν ραδιοσήματα σε δυο συχνότητες: $L_1=1575.42$ MHz και $L_2=1227.6$ MHz. Η φέρουσα συχνότητα L_1 είναι διαμορφωμένη με δυο κώδικες, τον ευρείας λήψης κώδικα C/A (Coarse Acquisition Code) και τον κώδικα P ακριβείας (Precision Code) ο οποίος εκπέμπεται επίσης και στην συχνότητα L_2 .

Και οι δυο συχνότητες φέρουν επίσης το μήνυμα πλοήγησης, που περιέχει μεταξύ άλλων πληροφορίες για τις τροχιές των δορυφόρων, διορθώσεις των ατομικών χρονομέτρων τους και την επίδραση της ατμόσφαιρας στο σήμα, καθώς και πληροφορίες για την γενική κατάσταση της λειτουργίας των δορυφόρων.

Τα δορυφορικά σήματα αναλύονται εσωτερικά στον δέκτη και χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση παρατηρήσεων (ψευδοαποστάσεις και φάσεις) μεταξύ δεκτών - δορυφόρων που ισοδυναμούν με τις αποστάσεις προς τους λαμβανόμενους δορυφόρους κάθε χρονική στιγμή.

2.2. ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΩΝ

Το σύστημα GPS όπως αναφέρθηκε παραπάνω είναι ένα σύστημα παρατηρήσεων δέκτη - δορυφόρου. Έτσι όπως είναι εύκολα κατανοητό στις παρατηρήσεις αυτές υπεισέρχονται σφάλματα. Αν εξαιρέσουμε τα τυχαία σφάλματα, διακρίνουμε τα σφάλματα των παρατηρήσεων σε τρεις κατηγορίες:

- τα σχετιζόμενα με τον δορυφόρο
- τα σχετιζόμενα με τον δέκτη
- τα σχετιζόμενα με την διάδοση του σήματος

2.2.1. Τα σχετιζόμενα με τον δορυφόρο

Τα σφάλματα που σχετίζονται με τον δορυφόρο είναι:

- **τα σφάλματα της εφημερίδας ή της τροχιάς (orbital error)**
Είναι οι διαφορές μεταξύ της πραγματικής θέσης του δορυφόρου και της υπολογιζόμενης από τα τροχιακά στοιχεία που εκπέμπει ο δορυφόρος. Ενδεικτικά για μια απόσταση δέκτη-δορυφόρου της τάξης των 25000km και για μήκος βάσης 10km ένα σφάλμα τροχιάς 2.5m αποδίδει σφάλμα στον προσδιορισμό της βάσης 1mm.
- **το σφάλμα χρονομέτρων δορυφόρου (satellite clock error)**
Είναι οι διαφορές μεταξύ της πραγματικής πορείας του χρονομέτρου του δορυφόρου και της προβλεπόμενης, που υπολογίζεται με βάση τους τρεις συντελεστές a_0 (bias), a_1 (drift), a_2 (drift rate) που περιέχονται στο μήνυμα ναυσιπλοΐας. Επειδή η εκτίμηση αυτή είναι πρόγνωση, το

εναπομείναν σφάλμα απαλείφεται στον σχετικό προσδιορισμό θέσης ή αγνοείται στον απόλυτο προσδιορισμό.

2.2.2. Τα σχετιζόμενα με τον δέκτη

Τα σφάλματα που σχετίζονται με τον δέκτη είναι:

- **οι μεταβολές των κέντρων φάσης της κεραίας**
Πρόκειται για την μη ταύτιση ηλεκτρικού κέντρου της κεραίας με το φυσικό - μηχανικό κέντρο ή αν δεν αποκλίνει κατά μια σταθερή ποσότητα. Για σταθερό, όμοιο προσανατολισμό των κεραιών τα σφάλματα αυτά σχεδόν απαλείφονται κατά τον σχετικό προσδιορισμό.
- **το σφάλμα χρονομέτρων δέκτη (receiver clock error)**
Από την τυπική λύση ο δέκτης υπολογίζει το σφάλμα του χρονομέτρου του με ακρίβεια καλύτερη από 1ms και διορθώνει το χρόνο του ως προς τον χρόνο GPS. Υπολογίζεται σε κάθε εποχή παρατήρησης.
- **το σφάλμα των ηλεκτρικών κυκλωμάτων δέκτη**
Είναι το σφάλμα που εισάγουν τα ηλεκτρονικά κυκλώματα με μέγεθος τάξης 1% του μήκους κύματος της μέτρησης.
- **το σφάλμα πολλαπλών ηλεκτρονικών διαδρομών (σφάλμα πολυανάκλασης - multipath error)**
Οφείλεται σε πολλαπλές ηλεκτρονικές διαδρομές λόγω της ανάκλασης του σήματος σε διάφορες επιφάνειες πριν φτάσει στον δέκτη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η μέτρηση να γίνεται και στο ανακλώμενο σήμα, αντί μόνο σε αυτό που έρχεται κατευθείαν από τον δορυφόρο, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να παρακολουθήσει σωστά το σήμα της κανονικής διαδρομής επειδή δημιουργούνται "παράσιτα" από το "ανακάτεμα" σημάτων. Εκφράζει την καθυστέρηση του σήματος λόγω της διαφορετικής διαδρομής του σε σχέση με την κανονική.

2.2.3. Τα σχετιζόμενα με την διάδοση του σήματος

Τα σφάλματα που σχετίζονται με την διάδοση του σήματος είναι:

- **το ιονοσφαιρικό σφάλμα**

Η ιονόσφαιρα αποτελεί μέσο διασποράς για το σήμα GPS, δηλαδή ο δείκτης διάθλασης εξαρτάται από τη συχνότητα του σήματος, γεγονός το οποίο είναι το αίτιο ύπαρξης δυο συχνοτήτων L_1 και L_2 . Με δέκτες διπλής συχνότητας το ιονοσφαιρικό σφάλμα μπορεί ουσιαστικά να απαλειφθεί αν χρησιμοποιήσουμε έναν κατάλληλο γραμμικό συνδυασμό παρατηρήσεων των δυο φάσεων. Η καθυστέρηση διάδοσης του σήματος λόγω της επίδρασης της ιονόσφαιρας κυμαίνεται από 20-30m κατά την διάρκεια της ημέρας και 3-6m κατά την διάρκεια της νύχτας.

- **το τροποσφαιρικό σφάλμα**

Η τροποσφαιρική διάθλαση δημιουργεί το τροποσφαιρικό σφάλμα με αποτέλεσμα την καθυστέρηση του σήματος στην διαδρομή του. Η καθυστέρηση διάδοσης του σήματος μπορεί να φτάσει τα 30m για δορυφόρους σε χαμηλές γωνίες ύψους. Το τροποσφαιρικό σφάλμα επιδρά το ίδιο στους κώδικες και στις φάσεις ανεξάρτητα από την συχνότητα L_1 και L_2 . Δεν μπορεί να απαλειφθεί με δέκτες δυο συχνοτήτων όπως συμβαίνει στο ιονοσφαιρικό σφάλμα. Μπορεί να υπολογιστεί από γνωστά τυπικά μοντέλα.

- **ολίσθηση κύκλων**

Πρόκειται για απώλεια σήματος λόγω εμποδίου, αδυναμίας των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων του δέκτη ή και υψηλής ιονοσφαιρικής δραστηριότητας που έχουν ως αποτέλεσμα το φαινόμενο της ολίσθησης κύκλων. Από την στιγμή που υπάρξει απώλεια σήματος μέχρι την στιγμή που ο δέκτης επανεγκλωβίσει το σήμα, όλες οι επόμενες μετρήσεις είναι επηρεασμένες κατά τον ίδιο αριθμό ακέραιων κύκλων.

- **ασάφεια φάσης**

Είναι μια παράμετρος που παραμένει σταθερή για κάθε ζευγάρι δορυφόρου - δέκτη (εφόσον δεν υπάρξει απώλεια σήματος) και ο επιτυχής της προσδιορισμός αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα, αλλά και το κλειδί για αξιόπιστα αποτελέσματα.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές των σφαλμάτων.

Πίνακας 2.1 - Τιμές Σφαλμάτων

Πηγή σφάλματος	Τιμή (m)	Τιμή από πειραματικές μετρήσεις	Μετά την χρήση DGPS
Σφάλμα χρονομέτρων δορυφόρου	0 - 3 m	1.75 m	0 m
Σφάλμα εφημερίδας ή τροχιάς	0 - 3 m	0.40 m	~ 0 m
Σφάλμα Ιονόσφαιρας	2 - 20 m	3.10 m	0.05 – 0.20 m
Σφάλμα Τροπόσφαιρας	0.50 - 5 m	4.20 m	0.1 – 1 m
Σφάλμα χρονομέτρων δέκτη	0 - 10 m	-	0 m
Σφάλμα πολυανάκλασης	0 - 5 m	0.38 m	0 - 5 m
Υπόλοιπα σφάλματα (θόρυβος)	0,25- 0.50m	-	0,25- 0.50μ
Σύνολο:	~10 – 15 m	-	0 – 3m

2.3. ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ

2.3.1. Γενικά

Τα Δορυφορικά Συστήματα Προσδιορισμού Θέσης έχουν ως στόχο τον τρισδιάστατο προσδιορισμό θέσης. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού δεν υπάρχει μια μέθοδος, αλλά αναλόγως με τις συνθήκες και την απαιτούμενη ακρίβεια μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε διαφορετική μέθοδο εντοπισμού θέσης.

- ο Γενικά ο προσδιορισμός θέσης μπορεί να διακριθεί σε **στατικό** (Static Positioning) και **κινηματικό** (Kinematic Position) εντοπισμό.
- ο Μια άλλη γενική διάκριση έχει σχέση με το πότε υπολογίζονται οι συντεταγμένες των σημείων σε σχέση με το χρόνο εκτέλεσης των μετρήσεων. Έτσι διακρίνουμε τον **προσδιορισμό σε πραγματικό χρόνο** (Real Time Positioning) την ίδια χρονική στιγμή εκτέλεσης των μετρήσεων και **εκ των υστέρων προσδιορισμό** (post processing) μετά το πέρας των μετρήσεων.
- ο Τέλος μια τρίτη κατηγορία μεθόδων είναι αυτή που αφορά στον **απόλυτο** προσδιορισμό θέσης (Absolute Positioning) και στον **σχετικό** προσδιορισμό θέσης (Relative Positioning) οι οποίες και θα αναλυθούν.

Η διαφορά τους εκτός από τον εξοπλισμό είναι η αξιοποίηση των δεδομένων και ο τρόπος υπολογισμού του επιθυμητού αποτελέσματος. Ο τρόπος υπολογισμού

διακρίνεται στο αν θα χρησιμοποιηθούν εξισώσεις παρατήρησης ψευδοαπόστασης ή εξισώσεις παρατήρησης φάσης.

⇒ **Εξίσωση Παρατήρησης Ψευδοαπόστασης**

Εάν το ρολόι του δέκτη ήταν τέλεια συγχρονισμένο με το ρολόι του δέκτη και επιπλέον το μέσο διάδοσης ήταν το κενό, τότε η ψευδοαπόσταση θα ήταν ίση με την γεωμετρική απόσταση. Η εξίσωση παρατήρησης ψευδοαπόστασης εκφράζει την σχέση ανάμεσα στην ψευδοαπόσταση (παρατήρηση), την γεωμετρική απόσταση και τα σφάλματα. Η μορφή της είναι:

$$pr_r^s = \sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2} - c \cdot (\delta T_r - \delta t^s) + d_{iono} + d_{τροπο}$$

όπου : $\sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2} = \rho_r^s$ η γεωμετρική απόσταση δορυφόρου – δέκτη
 $c \cdot (\delta T_r - \delta t^s)$ συνάρτηση μεταξύ της διαφοράς κλίμακας χρόνου δορυφόρου – δέκτη
 d_{iono} ιονοσφαιρικό σφάλμα (ιονοσφαιρική διάθλαση)
 $d_{τροπο}$ τροποσφαιρικό σφάλμα (τροποσφαιρική διάθλαση)

⇒ **Εξίσωση Παρατήρησης Φάσης**

Όταν ο δέκτης εγκλωβίσει έναν δορυφόρο και κάνει την πρώτη ανάγνωση δεν μπορεί να ξέρει σε ποιον κύκλο βρίσκεται στην απόσταση δορυφόρου-δέκτη παρά μόνον την θέση του μέσα στον κύκλο (στο ένα μήκος κύματος), δηλαδή που βρίσκεται στο διάστημα 0-19cm (αν πρόκειται για την L1) ή 0-360°. Άρα η πρώτη ανάγνωση αποτελείται από το άθροισμα ενός αγνώστου αριθμού ακεραίων κύκλων και ενός τμήματος ενός κύκλου. Έχουμε δηλαδή μια μέτρηση απόστασης που αποτελείται από την μέτρηση της φάσης $\varphi_r^s(r_r)$ συν μια ακέραια ασάφεια φάσης N_r^s . Η εξίσωση παρατήρησης φάσης φέρουσας συχνότητας είναι:

$$\Phi_r^s(r_r) = \frac{f}{c} \cdot \rho_r^s(T^s, T^r) - f \cdot [\delta T_r(r_r) - \delta T^s(T^s)] + N_r^s + d_{τροπο} - d_{iono}$$

με $\rho_r^s = \sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2}$ η γεωμετρική απόσταση δορυφόρου – δέκτη

2.3.2. Είδη Δορυφορικού Εντοπισμού

⇒ **Απόλυτος Εντοπισμός Θέσης**

Με τον όρο απόλυτο προσδιορισμό θέσης (absolute positioning, single-point positioning) εννοούμε τον προσδιορισμό θέσης του δέκτη (X,Y,Z) από τις δικές του μόνο παρατηρήσεις.

Στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης χρησιμοποιούνται συνήθως μόνο παρατηρήσεις ψευδοαποστάσεων. Το αποτέλεσμα της μεθόδου είναι ο διάνυσμα που συνδέει τον παρατηρητή με το κέντρο μάζας της γης. Στην λύση αυτή εμπεριέχονται όλα τα σφάλματα.

⇒ Σχετικός Εντοπισμός Θέσης

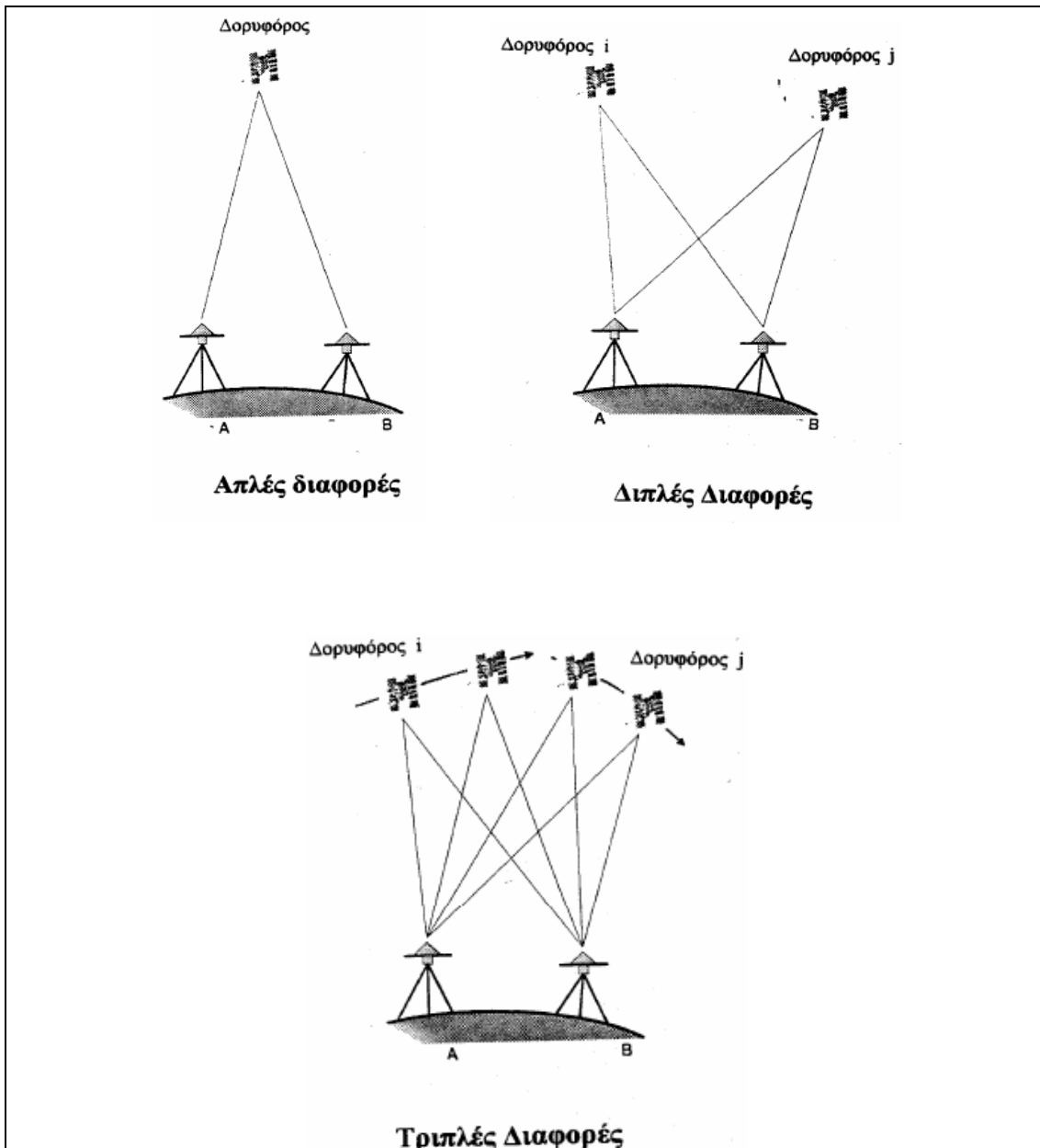
Με τον όρο σχετικό προσδιορισμό θέσης, εννοούμε τον προσδιορισμό του διανύσματος μεταξύ δυο σημείων A και B, δηλαδή των συνιστωσών του $[\Delta X_{AB}, \Delta Y_{AB}, \Delta Z_{AB}]$ (το διάνυσμα αυτό ονομάζεται βάση). Με τον σχετικό προσδιορισμό δηλαδή προσδιορίζονται οι συντεταγμένες ενός σημείου ως προς κάποιο άλλο που θεωρείται γνωστό. (ο προσδιορισμός γίνεται εκ των υστέρων)

Αντί των πρωτογενών παρατηρήσεων GPS χρησιμοποιούνται γραμμικοί συνδυασμοί τους με σημαντικά πλεονεκτήματα. Ο κυριότερος λόγος είναι ότι με αυτόν τον τρόπο, απαλείφονται ή ελαχιστοποιούνται τα περισσότερα από τα συστηματικά σφάλματα.

Οι παρατηρήσεις φάσεις είναι αυτές που χρησιμοποιούνται απαραίτητως στον σχετικό προσδιορισμό θέσης των γεωδαιτικών εφαρμογών ενώ οι παρατηρήσεις ψευδοαποστάσεων χρησιμοποιούνται ως βοηθητικές είτε για τον προσδιορισμό καλύτερων προσεγγιστικών συντεταγμένων και το συγχρονισμό των χρονομέτρων ή για την επίλυση των ασαφειών μαζί με παρατηρήσεις φάσεις.

Οι γραμμικοί συνδυασμοί που χρησιμοποιούνται ονομάζονται απλές, διπλές και τριπλές διαφορές.

- **Απλή διαφορά** δυο δεκτών που παρατηρούν ταυτόχρονα τον ίδιο δορυφόρο ορίζεται η διαφορά των παρατηρήσεων μεταξύ δυο δεκτών ως προς τον ίδιο δορυφόρο. Απαλείφονται τα κοινά σφάλματα που οφείλονται στον δορυφόρο (κυρίως σφάλμα χρονομέτρου) αλλά παραμένουν τα σφάλματα χρονομέτρων δέκτη.
- **Διπλή διαφορά** δυο δεκτών που παρατηρούν ταυτόχρονα δυο δορυφόρους ορίζεται η διαφορά των απλών διαφορών ως προς τους δυο δορυφόρους. (απαλείφονται τα σφάλματα χρονομέτρων του δέκτη)
- **Τριπλή διαφορά** δεκτών που παρατηρούν ταυτόχρονα δυο δορυφόρους σε διαφορετικές χρονικές εποχές ορίζεται η διαφορά μεταξύ των διπλών διαφορών ως προς δυο χρονικές εποχές. Απαλείφονται οι αθέριες ασάφειες φάσης και χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και εντοπισμό της ολίσθησης των κύκλων.



Εικόνα 2.1 - Απλές, Διπλές και Τριπλές Διαφορές (Πικριδής - Φωτίου)

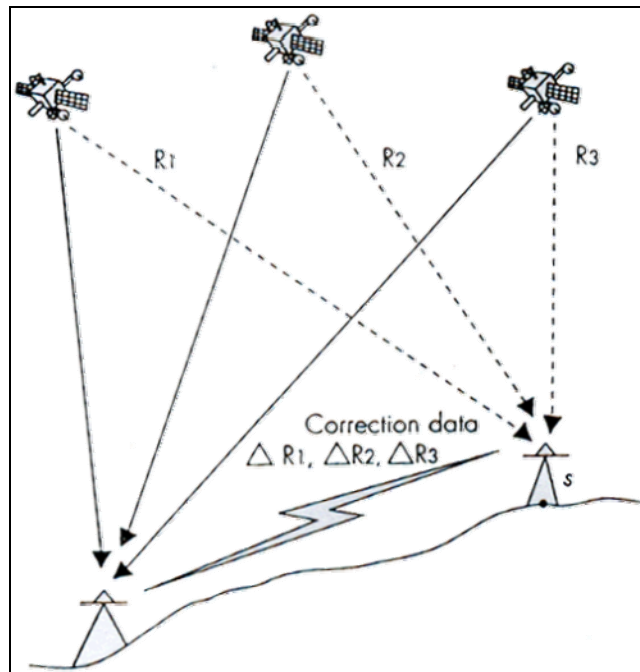
⇒ **Σχετικός Εντοπισμός Θέσης σε πραγματικό χρόνο (DGPS - RTK)**

Ο σχετικός εντοπισμός θέσης διακρίνεται σε σχετικό στατικό προσδιορισμό θέσης, και σε σχετικό κινηματικό προσδιορισμό, ο οποίος διακρίνεται σε σχετικό κινηματικό εκ των υστέρων και σε σχετικό κινηματικό σε πραγματικό χρόνο.

Με τον σχετικό εντοπισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο καταρρίφθηκαν δυο σημαντικά "προβλήματα" του εντοπισμού με μεγάλη επιτυχία. Καταρχήν επειδή είναι σχετικός εντοπισμός αντιμετωπίστηκαν τα σφάλματα που αναφέρθηκαν και τέλος επιτεύχθηκε να έχει ο χρήστης λύση μεγάλης ακριβείας σε πραγματικό χρόνο (εν ώρα εργασίας).

Για την επίτευξη της μεθόδου αυτής απαιτείται η εκπομπή δεδομένων (διορθώσεων) από ένα δέκτη τοποθετημένο σε σημείο γνωστών συντεταγμένων (παραμένει ακίνητος) σε έναν άλλο δέκτη που μπορεί να κινείται. Υπάρχει ένα σύστημα ασύρματης επικοινωνίας (ραδιοζεύξη) μεταξύ των δυο δεκτών μέσω του οποίου στέλνονται οι διορθώσεις.

Η χρήση ψευδοαπόστασης για σχετικό εντοπισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο λέγεται **DGPS (Differential GPS)** δηλαδή διαφορικός εντοπισμός θέσης ενώ από μετρήσεις φάσης φέροντος κύματος ονομάζεται **RTK (Real Time Kinematic)**.



εικόνα 2.2 - DGPS

Για βάσεις που δεν ξεπερνούν τις μερικές δεκάδες km η εφαρμογή σε πραγματικό χρόνο αποδίδει ικανοποιητικά, ενώ η ακρίβεια μειώνεται σε μεγαλύτερες βάσεις επειδή αλλάζουν οι ατμοσφαιρικές συνθήκες.

2.4. ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ - ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ

2.4.1. Γενικά

Κρίνοντας ένα σύστημα το οποίο έφερε επανάσταση στις γεωδαιτικές εργασίες και γενικότερα στον τομέα του προσδιορισμού θέσης και πλοήγησης είναι λίγο δύσκολο να σταθείς στα μειονεκτήματά του, όμως όπως όλα τα συστήματα σε κάποιες περιπτώσεις υστερεί.

Έχουν αναφερθεί τα σφάλματα τα οποία υπεισέρχονται στον δορυφορικό εντοπισμό θέσης τα οποία όμως με τον σχετικό εντοπισμό έχουν αντιμετωπιστεί σε ικανοποιητικό βαθμό. Με τον σχετικό εντοπισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο αντιμετωπίστηκε και η δυσκολία που υπήρχε στους χρήστες της εκ των υστέρων λύσης.

Με την πάροδο του χρόνου οι συσκευές που αποτελούν το σύστημα έχουν μειωθεί σε όγκο δραματικά καθώς και ο τρόπος λειτουργίας τους έχει απλοποιηθεί. Όμως υπάρχουν τα σύγχρονα προβλήματα του συστήματος τα οποία αναλύονται σε τρεις άξονες.

2.4.2. Ανάλυση (κυριότερων) μειονεκτημάτων

- Ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι χρήστες είναι ότι για ικανοποιητική ακρίβεια χρειάζονται δυο δέκτες με αποτέλεσμα ο χρήστης να πρέπει να έχει μαζί του πληθώρα συσκευών και μάλιστα ο δέκτης που θα στηθεί για base συνήθως δεν βρίσκεται σε πολύ προσιτό σημείο, με αποτέλεσμα ο χρήστης να χάνει πολύ χρόνο για την εύρεση και προσέγγιση του σημείου και το στήσιμο του.
- Μια μεγάλη δυσκολία που αντιμετωπίζουν οι χρήστες του σχετικού εντοπισμού θέσης σε πραγματικό χρόνο είναι "οι περιορισμοί" της ραδιοζεύξης. Μπορεί η απόσταση base και rover να είναι αρκετά μικρή, αλλά λόγω κάποιων εμποδίων φυσικών ή μη (π.χ. να παρεμβάλλεται ένα ύψωμα) να μην λαμβάνει διορθώσεις ο κινητός δέκτης.
- Τέλος το μεγαλύτερο μειονέκτημα του συστήματος που αντιμετωπίζουν οι χρήστες είναι η έλλειψη σήματος υπό κάποιες συνθήκες. Από την φύση του συστήματος όπως είναι εύκολα κατανοητό είναι πολύ εύκολο να μην υπάρχει "ορατότητα" του δέκτη προς τους δορυφόρους με αποτέλεσμα το σύστημα να μην λειτουργεί. Έτσι στην περίπτωση ενός τούνελ όταν εισέρχεται ο δέκτης χάνει αμέσως την επαφή, ή στην περίπτωση ενός μεγάλου δέντρου, όταν ο δέκτης τοποθετηθεί από κάτω χάνει επίσης την επαφή.

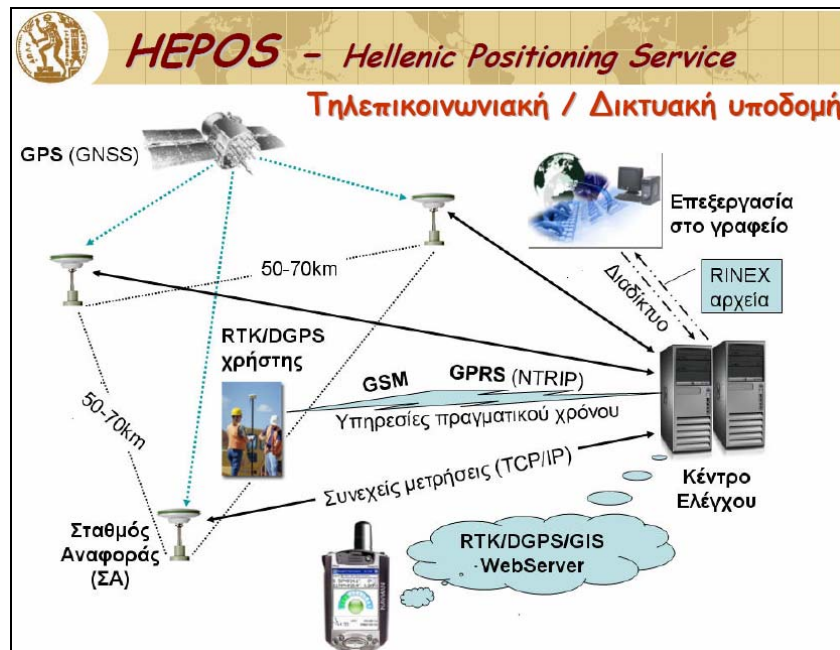
2.4.3. Αντιμετώπιση προβλημάτων - Σύγχρονες τάσεις

Τα δυο πρώτα μειονεκτήματα έχουν αντιμετωπιστεί με ορισμένες μεθόδους οι οποίες είναι τα πρώιμα της μεθόδου **HEPOS** (Hellenic Positioning System). Ο χρήστης σήμερα μπορεί να παίρνει διορθώσεις από τον μόνιμο σταθμό αναφοράς με την βοήθεια της κινητής τηλεφωνίας και του Internet.

Έτσι έχοντας τοποθετήσει ένα μόνιμο σταθμό σε κάποιο σημείο ασφαλές και προσιτό, το οποίο βρίσκεται κοντά στις εργασίες πεδίου (οι εταιρίες δίνουν μέγιστη απόσταση 35km) κερδίζει ο χρήστης χρόνο για την τοποθέτηση του base και απαλλάσσεται από την ραδιοζεύξη και τα τυχόν εμπόδια. Μπορεί δηλαδή ο χρήστης να λαμβάνει διορθώσεις από το κινητό του τηλέφωνο μέσω τηλεφωνική κλήσης και μεταφοράς δεδομένων από το αντίστοιχο modem του base ή μέσω του κινητού του τηλεφώνου και την χρήση του GPRS Internet.

Οι δυο μέθοδοι ονομάζονται **GSM RTK** και **GPRS RTK** αντίστοιχα. Να σημειωθεί εδώ ότι οι εταιρίες πώλησης GPS συστημάτων διαθέτουν μόνιμους σταθμούς τους οποίους μέσω GPRS RTK μπορεί ο χρήστης να χρησιμοποιήσει. Οι μέθοδοι αυτοί είναι αυτοί που θα ισχύουν και με το Herpos.

Το Herpos αποτελεί ένα σύγχρονο σύστημα αντίστοιχο με αυτά που λειτουργούν σε πολλά άλλα κράτη. Αποτελείται από 98 μόνιμους δορυφορικούς σταθμούς αναφοράς και ένα κέντρο ελέγχου. Έτσι με αυτό τον τρόπο υλοποιείται ένα δυναμικό, σύγχρονο σύστημα δορυφορικού εντοπισμού με πολλά πλεονεκτήματα.



Εικόνα 2.3 - Herpos (πηγή: Δ. Δεληκαράογλου)

Έτσι με το HEPOS:

- Μειώνεται το κόστος προμήθειας δέκτη αναφοράς για τον χρήστη. Πλέον χρειάζεται η αγορά ενός μόνο δέκτη.
- Αυξάνει την αμεσότητα, οικονομία και αποδοτικότητα στην καθημερινή τοπογραφική πρακτική.
- Απλοποιεί γενικά την μετρητική διαδικασία.
- Εξασφαλίζει ενιαία ακρίβεια και ομοιογένεια σ' όλη την επικράτεια.

Ένα νέο σύστημα (ευρωπαϊκό εγχείρημα) το οποίο αναμένεται να λειτουργήσει άμεσα (αναμενόταν για το 2008) είναι το ΓΑΛΙΛΑΙΟΣ (**GALILEO**) το οποίο είναι ένα σχεδιασμένο από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (ESA) και είναι μη στρατιωτικών συμφερόντων.

Το νέο σύστημα, που θα αποτελείται από ένα εντελώς νέο δορυφορικό σχηματισμό, θα είναι διαλειτουργικό με το GPS και GLONASS, δηλαδή ο χρήστης του θα είναι σε θέση να εντοπίζει την θέση του με τον ίδιο δέκτη χρησιμοποιώντας οποιουδήποτε δορυφόρους από τα εν λόγω συστήματα.

Με τις νέες τάσεις όμως όσο προοδευτικές και αν είναι δεν λύνεται το πρόβλημα της φύσης του εντοπισμού θέσης. Θα έλεγε κανείς ότι η πλοήγηση μετά την είσοδο του δέκτη σε ένα τούνελ δεν θα ήταν ποτέ εφικτή πράγμα το οποίο ήταν αλήθεια λίγα χρόνια πριν.

Σ' αυτόν τον τομέα τις αδυναμίες του συστήματος εντοπισμού θέσης τις καλύπτει το αδρανειακό σύστημα. Έτσι λοιπόν με την συνεργασία αδρανειακού συστήματος (Inertial Navigation System) και συστήματος εντοπισμού θέσης (GPS) έχουμε το ιδεατό. Ακριβή εντοπισμό σε κανονικές συνθήκες μέσω του GPS και όταν έχουμε απώλεια δορυφορικού σήματος μέσω του αδρανειακού συστήματος αναφοράς συνεχίζει ο ακριβής εντοπισμός. Ή καλύτερα συνεχόμενη ακριβή πλοήγηση μέσω του αδρανειακού συστήματος και διόρθωση αποτελεσμάτων από το GPS όταν αυτό είναι εφικτό (όταν υπάρχει ορατότητα δέκτη - δορυφόρων). Έχουμε δηλαδή λύση **GPS/INS**.

3. ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ (ΑΣΠ)

3.1. 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.

3.2. 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.

3.2.1. 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 κλασσικής 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.

3.2.2. 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 κινηματικής 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.

3.2.3. Η αδρανειακή πλοήγηση και οι νόμοι του Νεύτωνα

Ο πρώτος νόμος του Νεύτωνα σε συνδυασμό με την αδράνεια, η οποία ορίζεται ως την 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 υποθεθεί 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 την μεταβολή της ταχύτητας ενός κινητού σώματος με την δύναμη που επιδρά πάνω του σύμφωνα με την Εξ. 3-1 και είναι η βασική σχέση που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της θέσης στην αδρανειακή πλοήγηση.

$$\vec{F} = m \cdot \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2}$$

(Εξ. 3-1)

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 τα μέτρα των αναπτυσσόμενων δυνάμεων κατά την κίνηση ενός σώματος.

3.3. 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 η περιγραφή της λειτουργίας τους, αντικείμενο που θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα, έχουν παραληφθεί όλες οι πλεονάζουσες μαθηματικές και τεχνικές λεπτομέρειες .

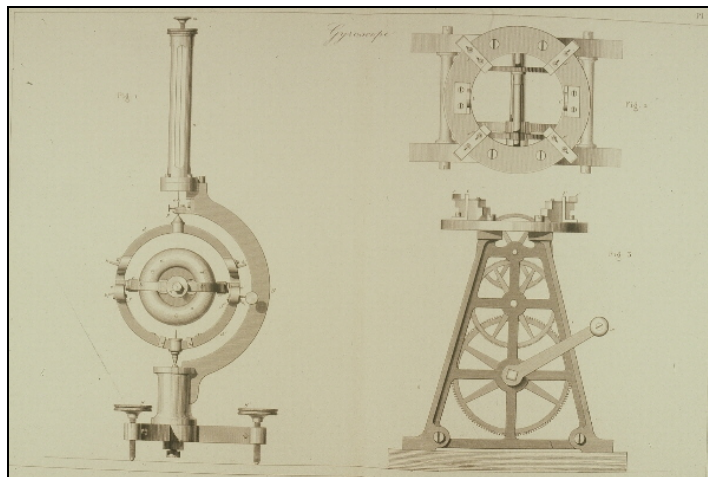
3.3.1. Πρώιμο στάδιο εξέλιξης αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης (ΑΣΠ)

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 περιώνυμο 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 ακρίβειας 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 3.1) με σκοπό μέσω της υλοποίησης των αρχών του Νεύτωνα να προσδιορίσει την ταχύτητα περιστροφής της γης και να επιδείξει ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς.



Εικόνα 3.1 -Γυροσκόπιο του Jean Bernard Leon Foucault (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 3.2-Γυροπυξίδα των αρχών του αιώνα (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 ιζώδους 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 εξίσωση Εξ. 3-2 και είναι ίδια με αυτή ενός εκκρεμούς με μήκος την ακτίνα της γης.

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{R}{g}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{6371000m}{9.81 \frac{m}{\text{sec}^2}}} = 84.4 \text{ min}$$

(Εξ. 3-2)

Όπως είναι εμφανές από την Εξ.3-2 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 εκμεταλλευόμενες 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 Wernher 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.

3.3.2. Η σύγχρονη εποχή 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)- RIPA (Pulsed Integrating Pendulous Accelerometer). Το παραπάνω σύστημα 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, Marconi 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 παρουσιάζει 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 τα γυροσκόπια η ανάπτυξη των υπολογιστών, που εξασφάλιζαν την εκτέλεση πολύπλοκων υπολογισμών, και της τεχνολογίας, που εγγυούνταν 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 εκμεταλλεύονταν 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 επιταχυνσιομέτρων 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.

3.4. Είδη Αδρανειακών Αισθητήρων

Στην συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζονται τα κύρια είδη γυροσκοπίων και επιταχυνσιομέτρων, 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.

3.4.1. 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 ΑΣΤΠ 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 του 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 :

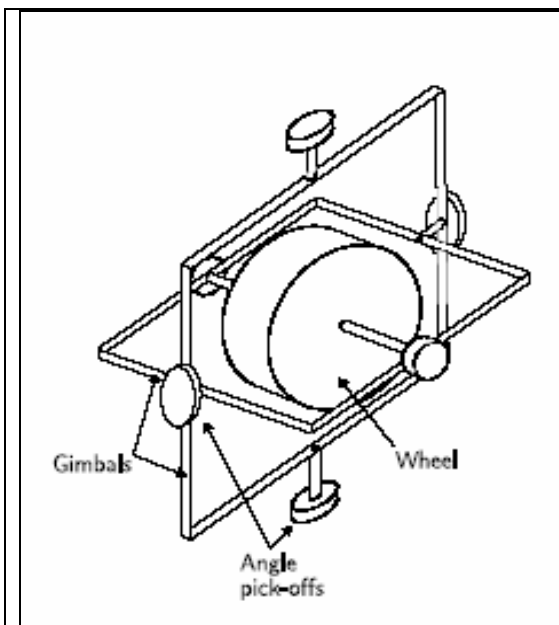
- **Τα μηχανικά γυροσκόπια**

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.

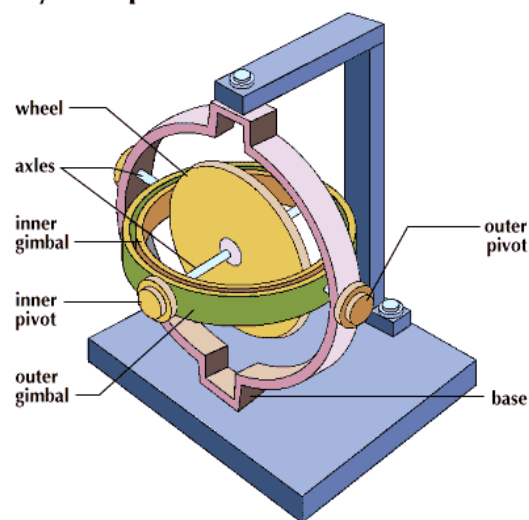
Ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων εδράνων καθορίζει τον αριθμό των αξόνων περί των οποίων ο τροχός μπορεί να περιστραφεί ελεύθερα και άρα και τους βαθμούς ελευθερίας τους συστήματος.

Στις Εικόνες 3.3 και 3.4 που ακολουθούν φαίνονται δύο μηχανικά γυροσκόπια δύο και τριών βαθμών ελευθερίας αντίστοιχα.



Εικόνα 3.3-Μηχανικό γυροσκόπιο 2 βαθμών ελευθερίας
(Titterton, 2004)

Gyroscope



Εικόνα 3.4-Μηχανικό γυροσκόπιο 3 βαθμών ελευθερίας
(: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 παράγουν 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 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 σερβομηχανισμοί 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 μετράνε γωνιακή ταχύτητα.

Στην προσπάθεια τους να διορθώσουν μερικά από τα παραπάνω μειονεκτήματα των μηχανικών γυροσκοπίων με τροχό η 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 3.5 -Γυροσκόπιο με χρήση υγρού (floating gyroscopes)
(Sagem Défense Sécurité)*

Το παραπάνω σύστημα αν και διορθώνει μερικά από τα μειονέκτημα των μηχανικών γυροσκοπίων σχετικά με τις ταχύτητες μετρήσεις, 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**

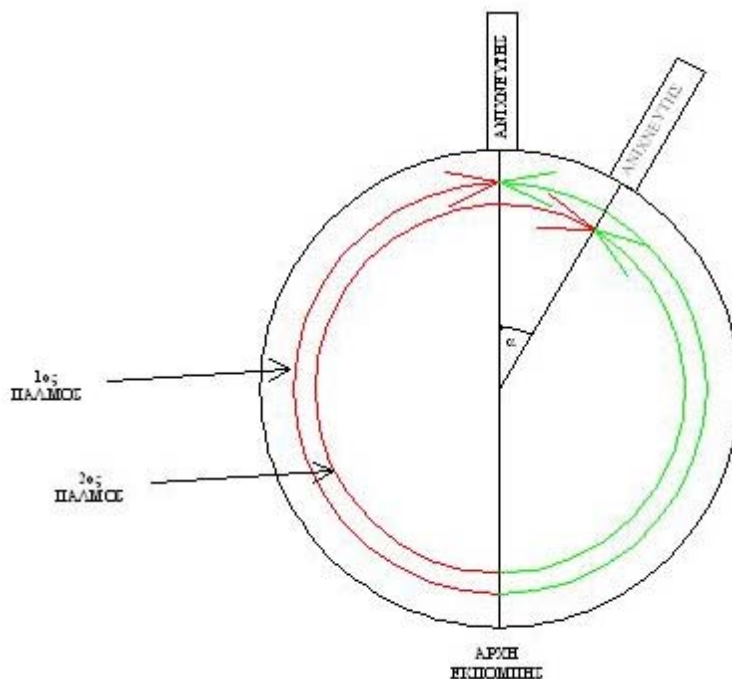
Τα οπτικά γυροσκόπια βασίζονται στην λειτουργία τους στο φαινόμενο Sagnac, το οποίο παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1913 από τον γάλλο φυσικό George Sagnac.

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 περιστροφή

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 3.6, που ακολουθεί, παρουσιάζεται μια σχηματική απεικόνιση του φαινομένου Sagnac.



Εικόνα 3.6-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.

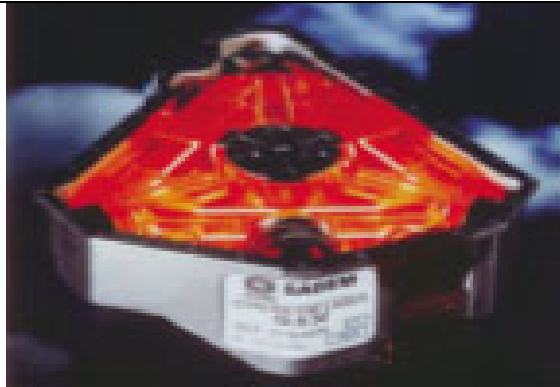
Στην δεύτερη εκπομπή όμως ο δακτύλιος δεν παραμένει ακίνητος αλλά αρχίζει να περιστρέφεται, μαζί με τον προσαρμοσμένο ανιχνευτή, με γωνιακή ταχύτητα ω .

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

Το παραπάνω φαινόμενο ισχύει σε οποιοδήποτε σχήμα βρόχου, είτε κυκλικό είτε πολύεδρο, 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 κάθε 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).

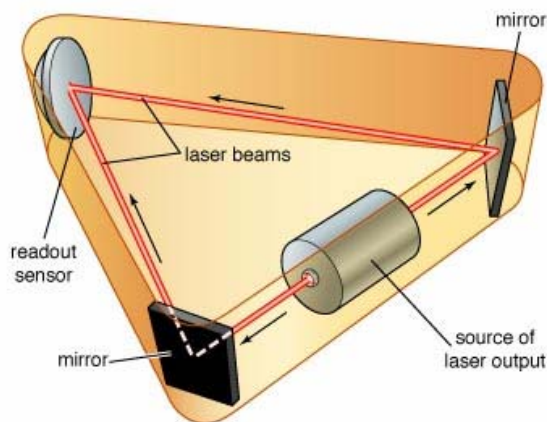


Εικόνα 3.7 -Γυροσκόπιο με δακτύλιο Λείζερ
(Sagem Défense Sécurité)

Εικόνα 3.8 -Γυροσκόπιο οπτικών ινών
(Sagem Défense Sécurité)

Τα ΓΔΛ αποτελούνται από μια γεννήτρια λείζερ, 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.

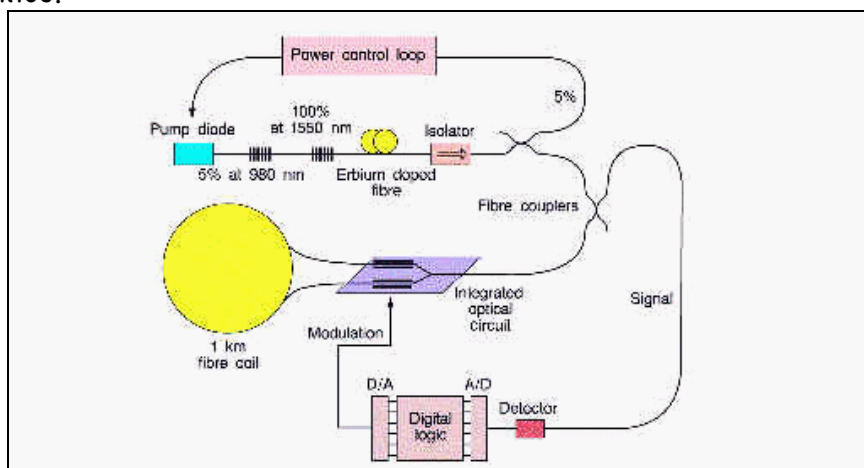
Στην Εικόνα 3.9, που ακολουθεί, φαίνεται σχηματικά η λειτουργία ενός τέτοιου γυροσκοπίου.



Εικόνα 3.9-Αρχή λειτουργίας των Γυροσκοπίων με Δακτύλιο Λείζερ
(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 3.10, που ακολουθεί, φαίνεται σχηματικά η λειτουργία ενός τέτοιου γυροσκοπίου.



Εικόνα 3.10-Αρχή λειτουργίας των Γυροσκοπίων με Δακτύλιο Λείζερ
(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 λειτουργίας 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 τις δύο διαφορετικές υλοποιήσεις των οπτικών γυροσκοπίων τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των ΓΔΛ εστιάζονται στις υψηλότερες ακρίβειες που

επιτυχάνουν 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, με παρουσιαζόμενο Μέσο Χρόνο Μεταξύ Βλαβών (ΜΧΜΒ)- 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, με παρουσιαζόμενο Μέσο Χρόνο Μεταξύ Βλαβών (ΜΧΜΒ)- 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 στην 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 (φωρατές) για την κατάλληλη ανίχνευση και επεξεργασία του σήματος, οι οποίοι και απαιτούν αναπτυγμένη τεχνολογία που δεν έχει ακόμα επιτευχθεί.

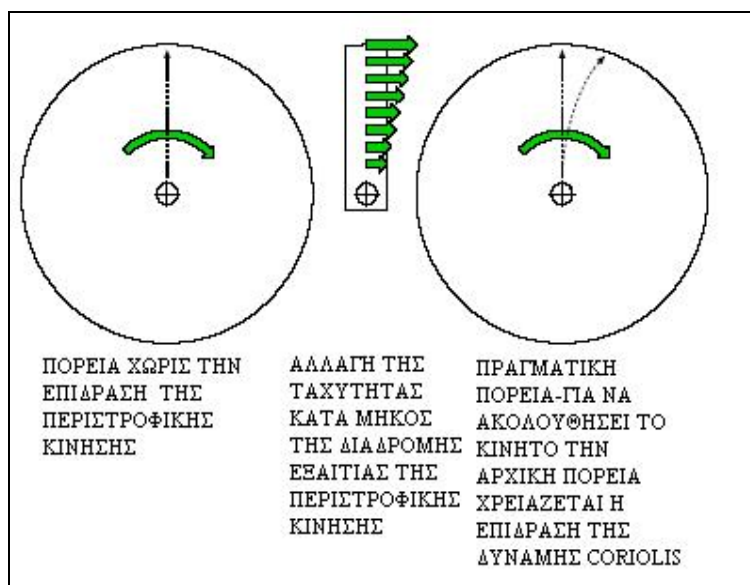
• Τα μικρο ηλεκτρομηχανικά γυροσκόπια

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. 3-3, που ακολουθεί, και στην οποία ω είναι η γωνιακή ταχύτητα και u η γραμμική ταχύτητα του σώματος.

$$F_c = -2 \cdot m \cdot (\omega \times u)$$

(Εξ. 3.3)

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



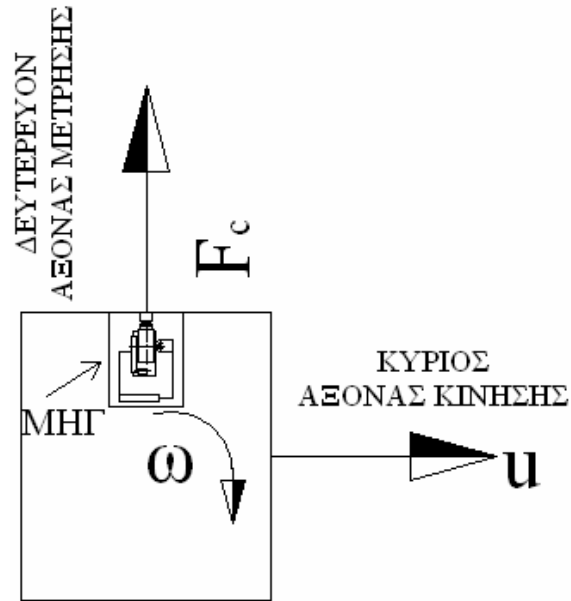
Εικόνα 3.11 -Επίδραση της δύναμης Coriolis

Η παραπάνω Εικόνα 3.11 δείχνει σχηματικά την περιγραφόμενη επίδραση και εξηγεί το αρνητικό πρόσημο της Εξ. 3-3, 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.3-3.

Για να πετύχουν τον παραπάνω προσδιορισμό τα ΜΗΓ χρησιμοποιούν διατάξεις κατασκευασμένες από μικρομηχανισμούς πυριτίου ή χαλάζια τοποθετημένες κάθετα στον κύριο άξονα κίνησης, όπως φαίνεται και στη Εικόνα 3.12 που ακολουθεί.

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



Εικόνα 3.12 - Αρχή λειτουργίας ΜΗΓ

Το κύριο μειονέκτημα των ΜΗΓ είναι η επιτυχανόμενη 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 κάτοπτρων, 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 3.13, όπου εμφανίζεται το ΜΗΓ του ερευνητικού προγράμματος του αμερικάνικου στρατού.



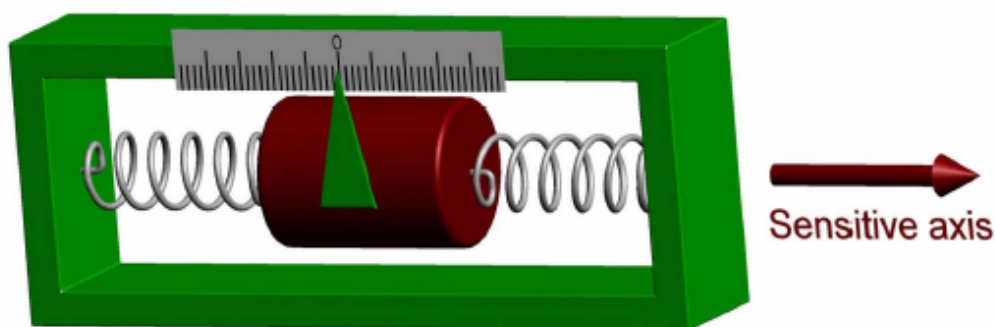
Εικόνα 3.13 - Μικρο ηλεκτρομηχανικό γυροσκόπιο (DARPA)

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.

3.4.2. Είδη επιταχυνσιόμετρων

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 (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 βασίζονται στην αρχή λειτουργίας τους (Εικόνα 3.14) στη χρήση μια δόκιμης μάζας (*proof mass*), η οποία βρίσκεται στερεωμένη στο εσωτερικό τους με ένα σύστημα ελατηρίων.



Εικόνα 3.14 - Αρχή λειτουργίας επιταχυνσιόμετρων (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 συσπίρωση ή η επιμήκυνση των ελατηρίων αυτή από την θέση ισορροπίας είναι σύμφωνα με τον νόμο του Hook (Εξ. 3-4) ανάλογη με την αναπτυσσόμενη δύναμη με αποτέλεσμα να προσδιορίζεται το μέγεθος της ασκούμενης δύναμης.

$$F_k = -k \cdot x$$

(Εξ.3-4)

Από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα (Εξ. 3-1) 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 περιέχει 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. 3-5 που ακολουθεί και στην οποία ο όρος f είναι η δύναμη ανά μονάδα μάζας (specific force).

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} + g = \vec{f} + g$$

(Εξ. 3-5)

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.

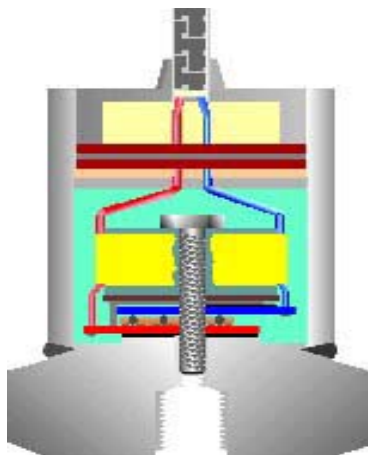
Το σύνολο των επιταχυνσιόμετρων χρησιμοποιούν την δοκιμή μάζα και την παραπάνω περιγραφείσα αρχή λειτουργίας για τον προσδιορισμό των επιταχύνσεων, εκείνο όμως που διαφοροποιεί τις διάφορες υλοποιήσεις και προσδίδει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά σε αυτές είναι ο τρόπος με τον οποίο μετράται η μετατόπιση 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 χαλάζια ή από

κεραμικό υλικό, το οποίο παράγει ένα σήμα ανάλογο της δύναμης που υφίσταται η δόκιμη μάζα λόγω των επιταχύνσεων του φορέα.



Εικόνα 3.15-Αρχή λειτουργίας πιεζοηλεκτρικού επιταχυνσιόμετρου

(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 10000 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 ένα σήμα.

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.



*Εικόνα 3.16 - Επιταχυνσιόμετρο με σερβομηχανισμούς
(Sagem Défense Sécurité)*

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 η οποία ανιχνεύεται με χρήση ενός δευτερεύοντος ηλεκτρικού κυκλώματος που την μετατρέπει σε ψηφιακή ένδειξη επιτάχυνσης.



*Εικόνα 3.17 - Επιταχυνσιόμετρο με ανίχνευση δονήσεων
(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.

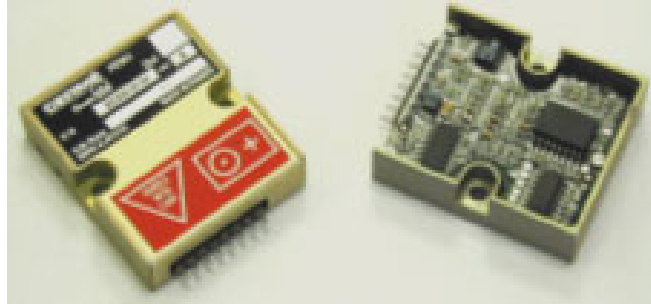
Η παραπάνω κατηγοριοποίηση των επιταχυνσιόμετρων καθιστά πασιφανές ότι στην σύγχρονη αγορά υπάρχουν διαθέσιμοι αρκετοί τύποι επιταχυνσιόμετρων, με διαφορετικά χαρακτηριστικά, επιδόσεις και κόστος ο καθένας, που μπορούν να αποτελέσουν κατάλληλη επιλογή για μια πλειάδα εφαρμογών χωρίς όμως να μπορεί κάποιος 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 εξαρτήματα τους ενώ διατηρούν τις ίδιες αρχές λειτουργίας με τα υπόλοιπα επιταχυνσιόμετρα.



*Εικόνα 3.18- Μίκρο Ηλεκτρομηχανικό Επιταχυνσιόμετρο
(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.

3.5. 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.

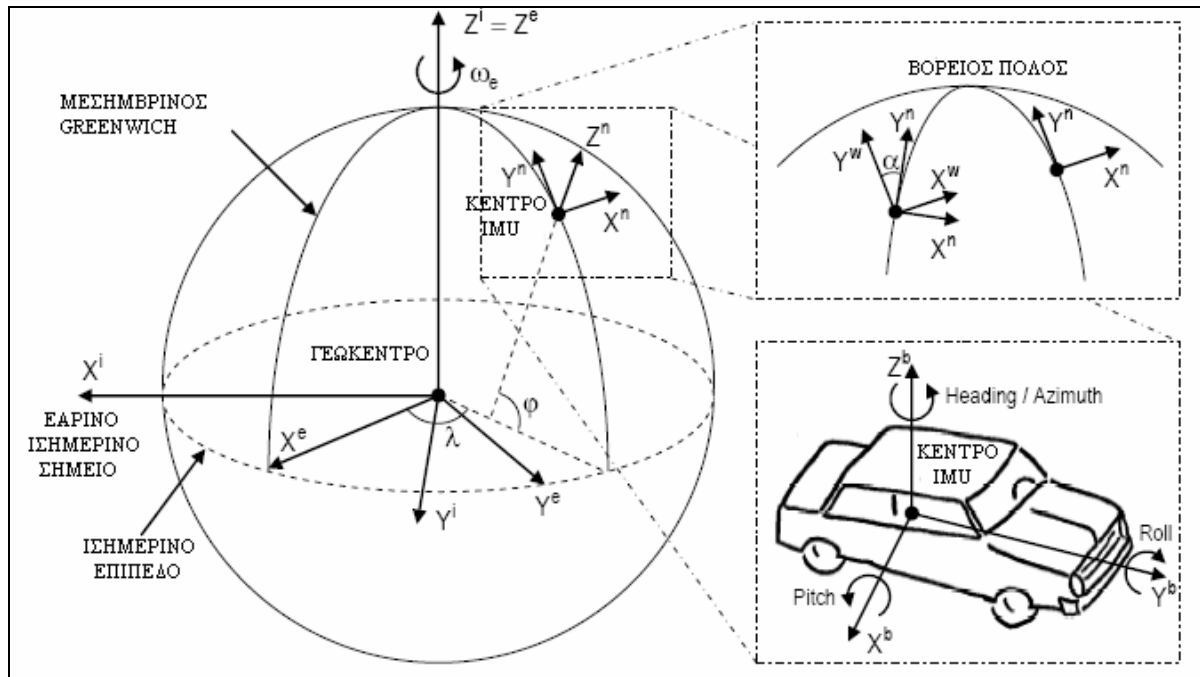
3.5.1. Γενικά στοιχεία

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 (ορθογωνίων) 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 3.19 - 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 3.19 και παρουσιάζονται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

3.5.2. 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

3.5.3. 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 3.19 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)

3.5.4. Το τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς (local level frame, l-frame)

Τα στοιχεία του τοποκεντρικού συστήματος αναφοράς είναι :

- Κέντρο το ιδανικό κέντρο του αδρανειακού συστήματος πλοήγησης, όπως περιγράφεται στην συνέχεια
- Άξονα X_l που συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα (προσανατολισμένο προς την Ανατολή)
- Άξονα Y_l που κατευθύνεται προς τον γεωδαιτικό Βορρά
- Άξονα Z_l 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 ΑΒΕ (Ανατολή-Βορράς-Επάνω) ευρύτερα γνωστό και ως ENU (East-North-Up) και το ΒΑΚ (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 ΑΒΕ έχει το πλεονέκτημα ότι το υψόμετρο αυξάνεται με την κίνηση προς τα πάνω, ακολουθώντας την φυσική σύμβαση, ενώ το ΒΑΚ 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.

3.5.5. 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 3.19)
- 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 μήκους λ 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. 3-6 που ακολουθεί.

$$\dot{\alpha} = -\dot{\lambda} \cdot \sin \phi$$

(Εξ. 3-6)

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.

3.5.6. 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 επιταχυνσιομέτρων και των γυροσκοπίων της αδρανειακής μονάδας μέτρησης ΑΜΜ- ΙΜU (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 και φορά προς το εμπροσθεν μέρος του κινητού
- 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 το τοποκεντρικό σύστημα και καθορίζουν την κινηματική συμπεριφορά του σώματος γνωστή με τον αγγλικό όρο Attitude.

3.5.7. 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 περιλαμβάνει 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.

3.5.8. 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 συνέχεια 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 :

$$\Omega_{en}^e = \begin{bmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{bmatrix}$$

(Εξ. 3-7)

και ισχύει η Εξ. 3-8 :

$$\omega_{en}^e \otimes a = \Omega_{en}^e \cdot a = \begin{bmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}$$

(Εξ. 3-8)

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 :

$$\omega_{ie}^e = (0, 0, \omega_e)^T$$

(Εξ. 3-9)

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

$$C_e^i = \begin{bmatrix} \cos \omega_e \cdot t & -\sin \omega_e \cdot t & 0 \\ -\sin \omega_e \cdot t & \cos \omega_e \cdot t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Εξ. 3-10)

• **Σχέση γεωκεντρικού και τοπικού συστήματος αναφοράς**

Ο πίνακας μετασχηματισμού μεταξύ των δύο συστημάτων είναι :

$$C_l^e = \begin{bmatrix} -\sin \lambda & -\sin \phi \cdot \cos \lambda & \cos \phi \cdot \cos \lambda \\ \cos \lambda & -\sin \phi \cdot \sin \lambda & \cos \phi \cdot \sin \lambda \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \end{bmatrix}$$

(Εξ. 3-11)

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

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

Ο πίνακας μετασχηματισμού μεταξύ των δύο συστημάτων είναι :

$$C_w^l = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Εξ. 3-12)

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 :

$$C_b^l = \begin{bmatrix} \cos \psi \cdot \cos \phi - \sin \psi \cdot \sin \theta \cdot \sin \phi & \sin \psi \cdot \cos \theta & \cos \psi \cdot \sin \phi + \sin \psi \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi \\ \sin \psi \cdot \cos \phi + \cos \psi \cdot \sin \theta \cdot \sin \phi & \cos \psi \cdot \cos \theta & \sin \psi \cdot \sin \phi - \cos \psi \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi \\ -\cos \theta \cdot \sin \phi & \sin \theta & \cos \theta \cdot \cos \phi \end{bmatrix}$$

(Εξ. 3-13)

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.

3.6. 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

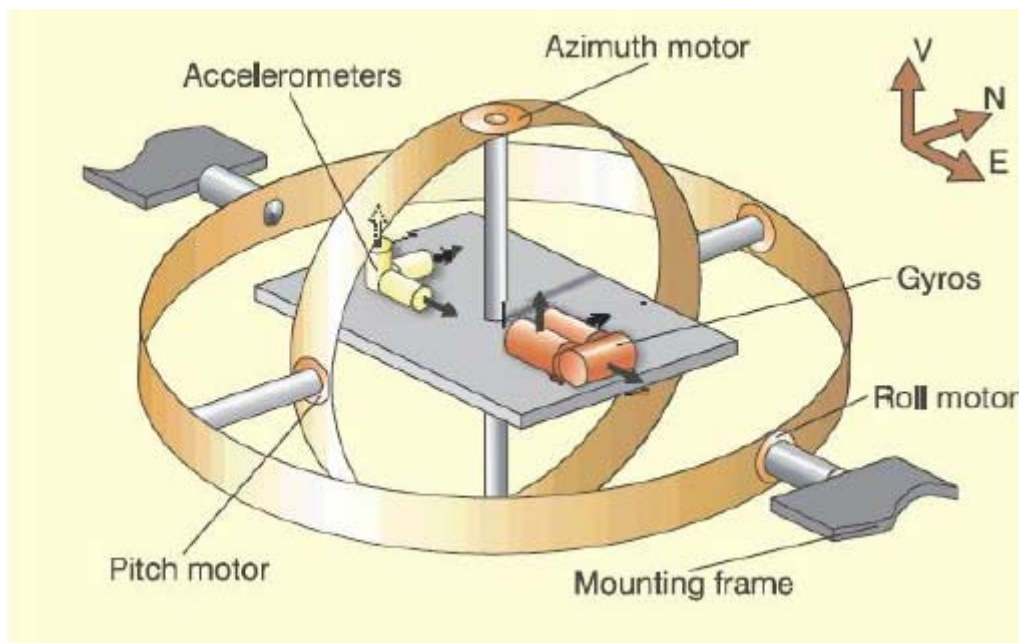
- ο σχεδιασμός του αλγόριθμου που θα χρησιμοποιηθεί για να μετατρέψει τις ενδείξεις των παραπάνω αισθητήρων σε λύση πλοήγησης (τροχιά κίνησης σώματος)

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

- τα ΑΣΠ σταθερής πλατφόρμας (stabilized ή gimbale INS - GINS)
- τα προσκολλημένα ΑΣΠ (strap down INS - SINS)

3.6.1. Τα ΑΣΠ σταθερής πλατφόρμας (stabilized ή gimbale 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 3.20 - Αδρανειακό σύστημα πλοήγησης σταθερής πλατφόρμας (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.

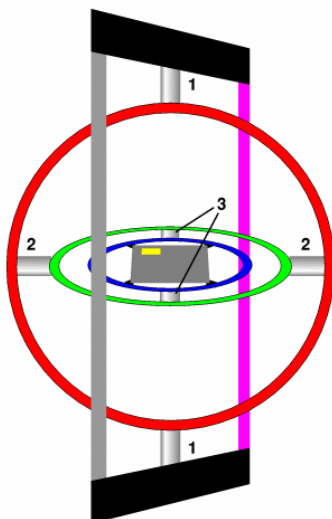
Τα έδρανα σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία ενενήντα μοιρών με το εσωτερικό να είναι προσαρμοσμένο, με την χρήση σερβομηχανισμών, στην πλατφόρμα και το εξωτερικό να είναι στερεωμένο στο σώμα φορέα.

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 3.21- Κλείδωμα της πλατφόρμας (gimbals lock)

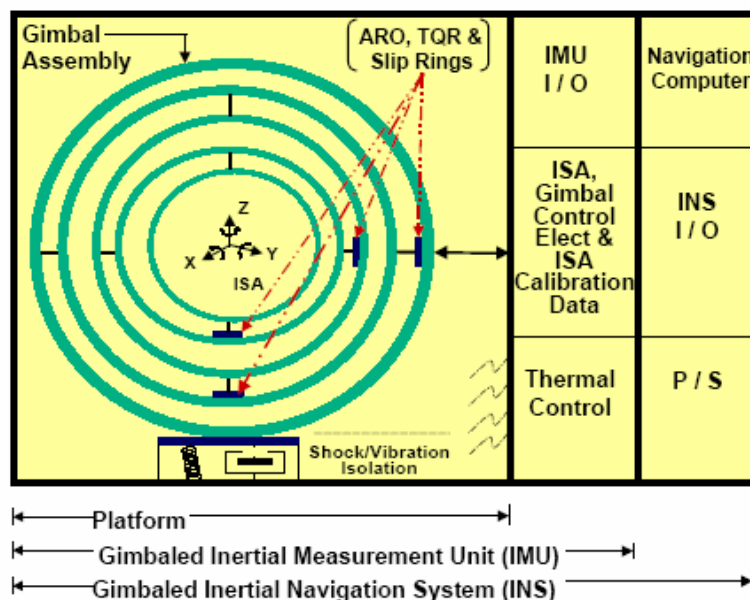
Το φαινόμενο αυτό σταματάει την λειτουργία της συσκευής και δημιουργεί σοβαρά προβλήματα στην διαδικασία πλοήγησης. Για να αντιμετωπιστεί το συγκεκριμένο

πρόβλημα τοποθετούνται στις ενώσεις των εδράνων αναστολείς κίνησης, οι οποίοι απαγορεύουν την κίνηση των εδράνων από μια γωνία και πάνω.

Η πολυπλοκότητα των ΑΣΠ, οδήγησε την ΙΕΕΕ να προχωρήσει στην κατηγοριοποίηση των τμημάτων τους και την τυποποίηση της ορολογίας τους, η οποία κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί και φαίνεται σχηματικά στην Εικόνα 3.22 που ακολουθεί.

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 3.22- Τα τμήματα ενός ΑΣΠ σταθερής πλατφόρμας κατά ΙΕΕΕ (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 από τα πλέον ακριβότερα.

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 .

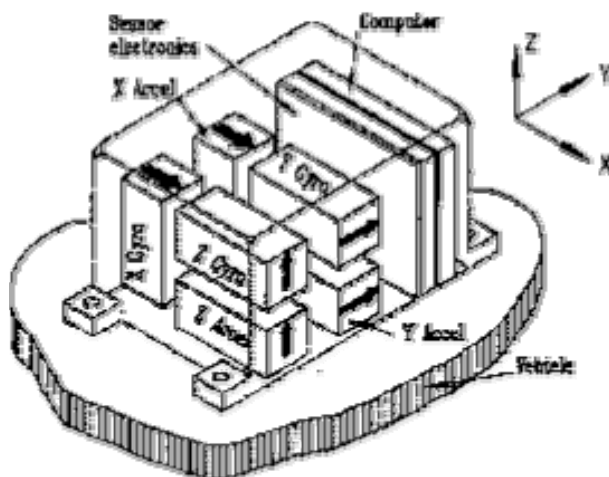
Τέλος η λειτουργία των μηχανισμών αυτών απαιτεί υψηλή παροχή ισχύος ενώ και οι τριβές που αναπτύσσονται κατά την λειτουργία αυτή προκαλούν την έκλυση υψηλών πόσων θερμότητας, τα οποία πρέπει να αντιμετωπιστούν.

3.6.2. Τα προσκολλημένα ΑΣΤΠ (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 ΑΣΤΠ.

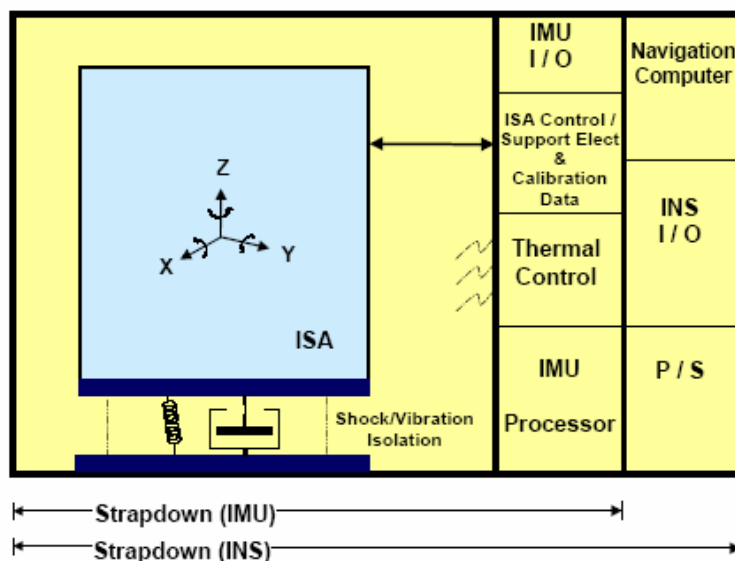
Στα συγκεκριμένα συστήματα οι αδρανειακοί αισθητήρες δεν είναι τοποθετημένοι σε μια απομονωμένη πλατφόρμα αλλά βρίσκονται προσκολλημένοι πάνω στο σύστημα του φορέα, εκτελώντας τις μετρήσεις τους ακολουθώντας συνεχώς την κίνηση του οχήματος-φορέα.

Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 3.23, που ακολουθεί και παρουσιάζει την διάταξη ενός προσκολλημένου ΑΣΤΠ, οι αδρανειακοί αισθητήρες είναι τοποθετημένοι σε ειδική θήκη που στηρίζεται από αποσβεστήρες κραδασμών, σκοπός των οποίων είναι να περιορίσει τις επιδράσεις των δονήσεων που προκαλούνται από την κίνηση του φορέα στις μετρήσεις των επιταχυνσιομέτρων και των γυροσκοπίων.



Εικόνα 3.23 - Προσκολλημένο αδρανειακό σύστημα πλοήγησης
(Massachusetts Institution of Technology)

Κατά αναλογία με τα συστήματα σταθερής πλατφόρμας η προτεινόμενη ορολογία και κατηγοριοποίηση για τα προσκολλημένα συστήματα κατά ΙΕΕΕ φαίνεται στην Εικόνα 3.24 που ακολουθεί.



Εικόνα 3.24 - Τα τμήματα ενός προσκολλημένου ΑΣΤΠ κατά ΙΕΕΕ (IEEE)

Έτσι τα προσκολλημένα συστήματα μπορούν να ταξινομηθούν ως έξης :

- 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 (ΑΣΤΠ) - (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.

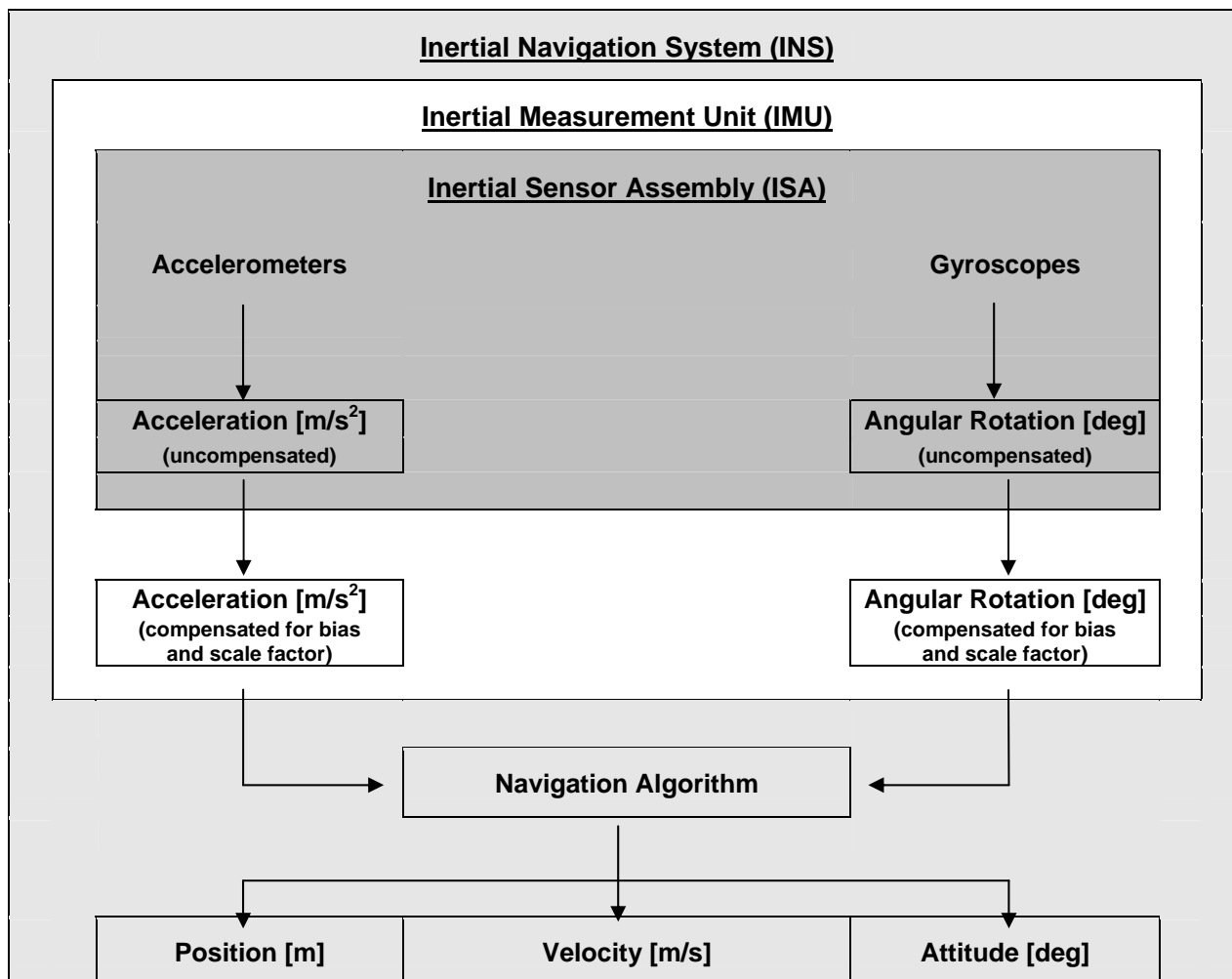
Τα προσκολλημένα συστήματα είναι εύχρηστες συσκευές μικρού μεγέθους και βάρους, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πλήθος εφαρμογών χωρίς να περιορίζονται από τις διαστάσεις τους.

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.

Μια σχηματική αναπαράσταση της ταξινόμησης των προσκολλημένων ΑΣΠ φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

Πίνακας 3.1 - Ταξινόμηση Προσκολλημένων ΑΣΠ



3.7. 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 το πρώτο τμήμα της αρχικοποίησης και το δεύτερο τμήμα της πλοήγησης.

Στην συνέχεια ακολουθεί περιγραφή της λειτουργίας τόσο των συστημάτων σταθερής πλατφόρμας όσο και των προσκολλημένων συστημάτων.

3.7.1. 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 να 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 γνώστες και στο οποίο αφού ο φορέας ακινητεί είναι γνωστή και η ταχύτητα (ίση με μηδέν).

Μια άλλη συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδο 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.

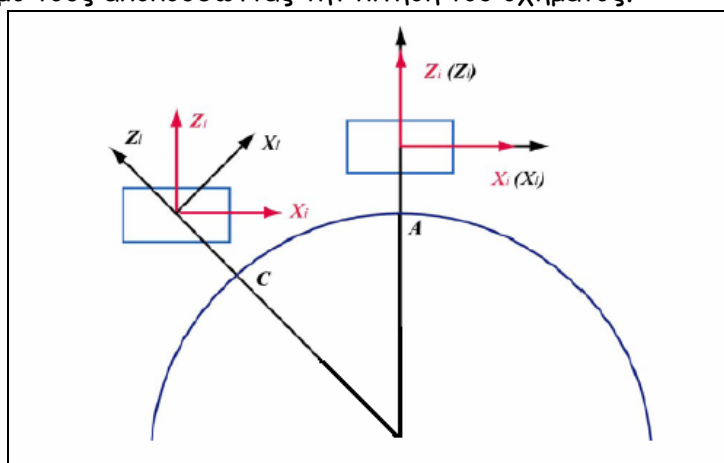
Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συνήθως στις εκτοξεύσεις πύραυλων από υποβρύχια ή αεροσκάφη καθώς και διαστημικών λεωφορείων από κινούμενες εξέδρες εκτόξευσης.

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 3.25 που ακολουθεί.

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



Εικόνα 3.25 - Τα αδρανειακά και τοπικά προσανατολισμένα συστήματα σταθερής πλατφόρμας

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 μήκους 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 θεοδολιχών ή σταθερών σημείων (άστρα)
- αυτό-ευθυγράμμιση, με χρήση των γυροσκοπίων και των επιταχυνσιομέτρων 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.

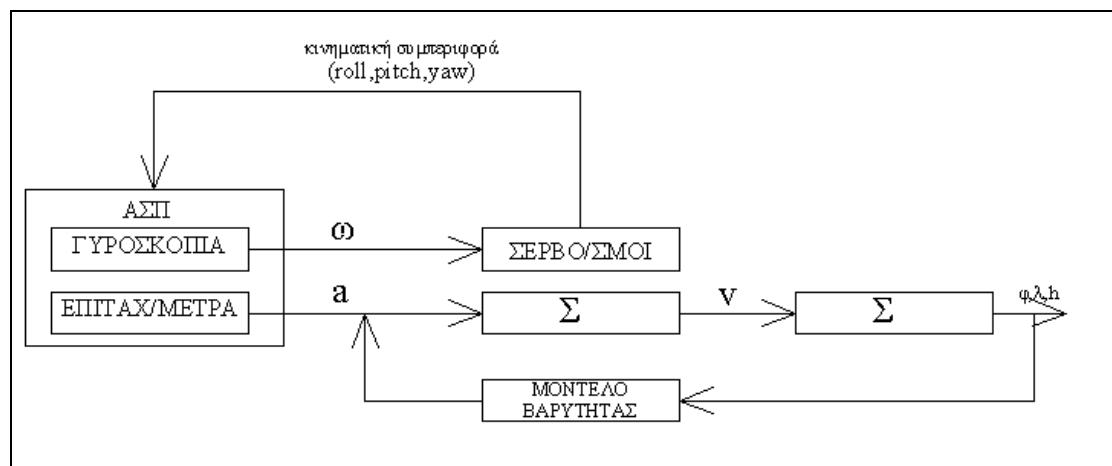
• **Τμήμα Πλοήγησης**

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

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.

Τα παραπάνω φαίνονται σχηματικά στην Εικόνα 3.26 που ακολουθεί :



Εικόνα 3.26 - Λειτουργία των ΑΣΠ σταθερής πλατφόρμας

3.7.2. 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 :

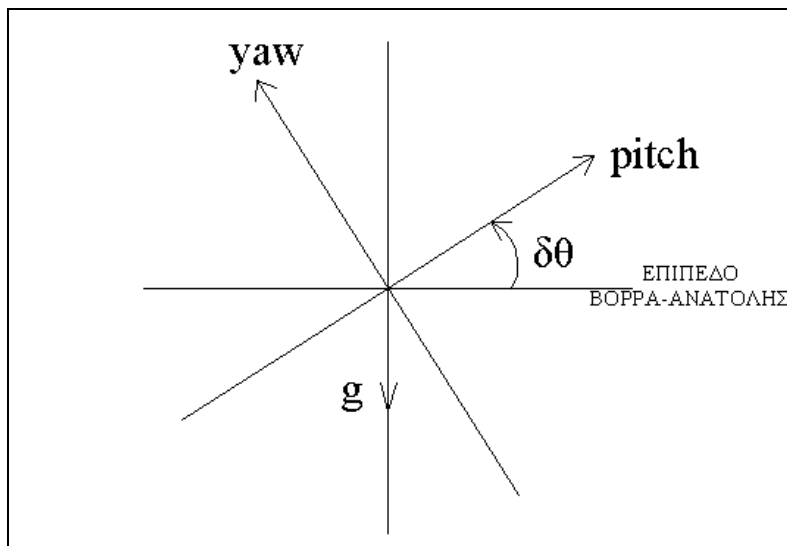
- αυτό-ευθυγράμμιση, με χρήση των γυροσκοπίων και των επιταχυνσιόμετρων σύμφωνα με την διαδικασία που θα περιγραφεί στην επόμενη ενότητα
- με χρήση ΔΣΠ

Στην συνέχεια θα περιγράψει αναλυτικά η μέθοδος της αυτό-ευθυγράμμισης, αφού είναι συχνά χρησιμοποιούμενη και παρουσιάζει αυξημένο ενδιαφέρον. Η μέθοδος αυτή διαιρείται σε 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 min 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 θεωρήσουμε 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 3.27: Ευθυγράμμιση προσκολλημένων ΑΣΤΤ-Βήμα 1ο

Έτσι όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.27, 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 ανίχνευση επιτάχυνση ίση με

$$a_x = -g \cdot \sin(\delta\theta) \Rightarrow roll = \delta\theta = -\sin^{-1}\left(\frac{a_x}{g}\right)$$

(Εξ. 3-14)

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. 3-15 :

$$a_y = -g \cdot \sin(\delta\theta) \Rightarrow pitch = \delta\theta = -\sin^{-1}\left(\frac{a_y}{g}\right)$$

(Εξ. 3-15)

Το δεύτερο βήμα είναι ο προσδιορισμός της γωνίας κατεύθυνσης (ψ -yaw) του κινήτου. Ο προσδιορισμός αυτός (γίνεται, αφού υπολογιστούν οι διορθώσεις των γωνιών roll και pitch με την προηγούμενη διαδικασία, με την χρήση των μετρήσεων των γυροσκοπίων. Όπου επειδή το σύστημα ακινητεί, οι μετρήσεις του θα πρέπει να αντιστοιχούν μόνο στην περιστροφική κίνηση της γης ($\omega=15^\circ/h$).

Το μειονέκτημα της προσεγγιστική ευθυγράμμισης είναι η παραδοχή ότι οι μετρήσεις τόσο των γυροσκοπίων όσο και επιταχυνσιόμετρων είναι χωρίς σφάλμα. Αυτό όπως είναι πολύ καλά γνωστό 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 όλων των πρωτογενών μετρήσεων που έγιναν κατά την διάρκεια της ακινησίας του οχήματος, γίνεται εκ νέου υπολογισμός των γωνιών roll, pitch, yaw.

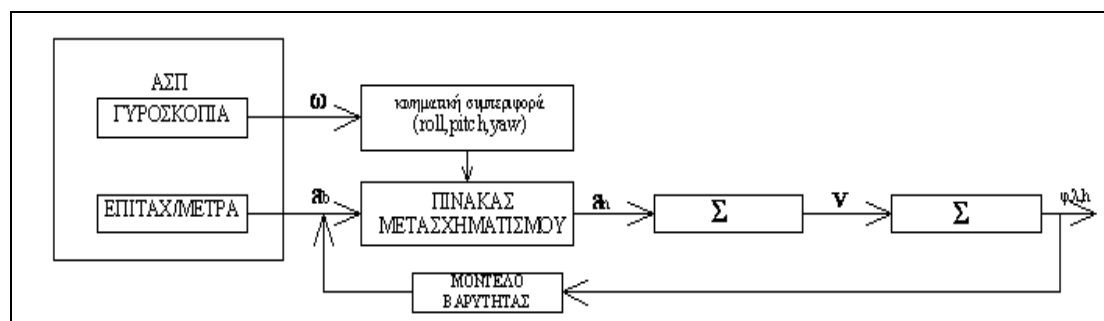
Οι νέες τιμές των γωνιών είναι σε μεγάλο βαθμό απαλλαγμένες από τα σφάλματα των αισθητήρων όμως δεν παύουν να αποτελούν προσεγγιστικές τιμές, για τον λόγο αυτό σχεδόν πάντα την προσεγγιστική ευθυγράμμιση ακολουθεί η ευθυγράμμιση ακριβείας.

Η ευθυγράμμιση αυτή στηρίζεται στην χρήση αλγόριθμων 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, η οποία φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί, διαφέρει από την αντίστοιχη των ΑΣΠ σταθερής πλατφόρμας



Εικόνα 3.28 - 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.

3.8. 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

3.8.1. 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 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 (μοίρα/ περιστροφή).

- **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 τέλειο 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.

3.8.2. 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)).

3.8.3. 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 αλγόριθμων και τεχνικών

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

Οποιαδήποτε 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 οποίο όμως παρουσιάζει μια περιοδικότητα κατά την κίνηση γύρω από την γη με περίοδο ίση με αυτή της ταλάντωσης Schuler ($T=84.4 \text{ min}$) και μπορεί να

διορθωθεί να εφαρμοστεί μια ταλάντωση στην λειτουργία του ΑΣΤΠ 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 .

3.8.4. 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 βαρυτικού 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.

3.9. Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί των ΑΣΤΠ

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

3.9.1. 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 αφού 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.

3.9.2. 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 καθώς μειώνεται και το μέγεθος των συσκευών.

**4. ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

4.1. Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται το αντικείμενο της συνεργασίας των Αδρανειακών Συστημάτων Πλοήγησης με τα Δορυφορικά Συστήματα Πλοήγησης. Η συνεργασία ΑΣΠ και ΔΣΠ χρονολογείται από τα πρώτα στάδια της σχεδίασης, δεκαετία του 1970, του αμερικάνικου συστήματος ΔΣΠ (GPS), όπου εξετάζονταν η χρήση των πρώτων ως βοηθητική πηγή εξάλειψης των σφαλμάτων που πιστεύονταν 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 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.

Η επόμενη ενότητα παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα των ΟΑΔΣΠ 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.

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

4.2. 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 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.

4.2.1. Οι εξισώσεις πλοήγησης των προσκολλημένων ΑΣΤ

Η κίνηση ενός σώματος μπορεί να μοντελοποιηθεί 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 ΑΣΤ 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^c 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 εξισώσεων 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 ΑΣΤ. 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 :

$$x^i = C_c^i \cdot x^c$$

(Εξ.4.1)

η παραγωγή της παραπάνω εξίσωσης δίνει την ταχύτητα :

$$\dot{x}^i = \dot{C}_c^i \cdot x^c + C_c^i \cdot \dot{x}^c = C_c^i \cdot \Omega_{ic}^c \cdot x^c + C_c^i \cdot \dot{x}^c$$

(Εξ.4.2)

ενώ μετά από παραγωγή της Εξ. 4-3 και τις κάτωθι πράξεις

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

προκύπτει η δεύτερη παράγωγος, που δίνει την επιτάχυνση

$$\ddot{x}^i = C_c^i \cdot \ddot{x}^c + 2 \cdot C_c^i \cdot \Omega_{ic}^c \cdot \dot{x}^c + C_c^i \cdot (\Omega_{ic}^c \cdot \Omega_{ic}^c + \dot{\Omega}_{ic}^c) \cdot x^c$$

(Εξ. 4.3)

Αξίζει εδώ να σημειωθεί η χρήση του διαγώνιου συμμετρικού πίνακα όπως αυτός έχει ορισθεί από τις Εξ. 3-7 και 3-8 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_i^c να είναι ορθοκανονικός η Εξ. 4-3 λύνεται ως προς \ddot{x}^c και γίνεται :

$$\ddot{x}^c = C_i^c \cdot \ddot{x}^i - 2 \cdot \Omega_{ic}^c \cdot \dot{x}^c - (\Omega_{ic}^c \cdot \Omega_{ic}^c + \dot{\Omega}_{ic}^c) \cdot x^c$$

(Εξ. 4.4)

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

$$\ddot{x}^i = g^i + f^i$$

(Εξ. 4.5)

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. 4-4 γίνεται :

$$\frac{d}{dt} \dot{x}^c = -2 \cdot \Omega_{ic}^c \cdot \dot{x}^c - (\Omega_{ic}^c \cdot \Omega_{ic}^c + \dot{\Omega}_{ic}^c) \cdot x^c + g^c + f^c$$

(Εξ. 4.6)

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. 4-6 μαζί με την Εξ. 4-7, 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.

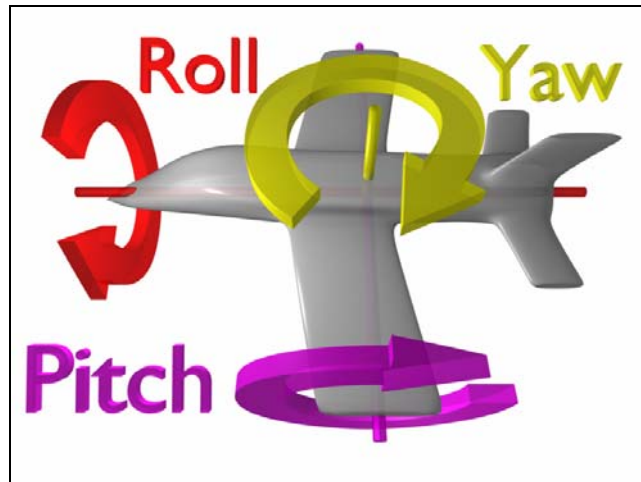
$$\frac{d}{dt} x^c = \dot{x}^c$$

(Εξ. 4.7)

Σε ένα προσκολλημένο ΑΣΤΠ 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 ΑΣΤΠ, 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). (εικόνα 4.1)



εικόνα 4.1 - κινηματική συμπεριφορά κινητού

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 :

$$\omega_{cb}^b = \omega_{ib}^b - C_c^b \cdot \omega_{ic}^c$$

(Εξ. 4.8)

και στην οποία ω_{ib}^i είναι οι μετρήσεις 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

$$f^c = C_b^c \cdot f^b$$

(Εξ. 4.9)

και στην συνέχεια δομούνται οι εξισώσεις πλοήγησης σύμφωνα με τις Εξ. 4-6 και 4-7.

4.3. Τα Πλεονεκτήματα των Ολοκληρωμένων Αδρανειακών και Δορυφορικών Συστημάτων Πλοήγησης

Η χρήση ενός ολοκληρωμένου δορυφορικού και αδρανειακού συστήματος είναι ο ικανότερος τρόπος να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα του αδρανειακού συστήματος χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του GPS όταν αυτό είναι εφικτό για να διορθώσει την θέση και την ταχύτητα που εξάγει το αδρανειακό σύστημα.

Ο κύριος λόγος δηλαδή της ενοποίησης είναι να έχουμε συνεχόμενα χωρίς χρονικούς περιορισμούς αξιόπιστα αποτελέσματα θέσης και ταχύτητας. Έτσι π.χ. σε μια αποτύπωση με όχημα ενός οδικού άξονα θα υπάρχουν τμήματα με ελεύθερο ορίζοντα προς τους δορυφόρους αλλά θα υπάρχουν και τμήματα όπως σήραγγες ή τμήματα με υψηλά κτίρια στα οποία δεν θα υπάρχει ελεύθερος ορίζοντας.

Σ' αυτήν την περίπτωση αν επιλέγαμε η αποτύπωση να γίνει με ένα από τα δυο συστήματα θα είχαμε σε κάθε περίπτωση σημαντικά μειονεκτήματα και λάθη. Με το δορυφορικό σύστημα θα μπορούσαμε να αποτυπώσουμε μόνο τα κομμάτια αυτά που θα είχαν ελεύθερο ορίζοντα με αποτέλεσμα η αποτύπωση να είχε κενά.

Με το αδρανειακό σύστημα από την άλλη θα είχαμε μεν συνεχόμενη αποτύπωση αλλά το σφάλμα του οργάνου θα αυξανόταν με τον χρόνο με αποτέλεσμα τα αποτελέσματά μας να μην ήταν καθόλου αξιόπιστα. Το αδρανειακό σύστημα πλοήγησης μπορεί να εξασφαλίσει συνεχόμενη και αξιόπιστη πλοήγηση με τα σφάλματά του όμως να αυξάνονται κατά την διάρκεια του χρόνου λόγω του αλγορίθμου που χρησιμοποιεί.

Έτσι με την ενοποίηση των δυο συστημάτων θα είχαμε συνεχόμενα αποτελέσματα και αξιόπιστα, μιας και θα γίνεται ταυτόχρονη αξιοποίηση των δυο συστημάτων.

4.4. Βαθμοί Συνέργιας Αδρανειακών και Δορυφορικών 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 σαν θέμα αναπτυχθεί και αντιμετωπιστεί από πληθώρα συγκραμάτων 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.

4.4.1. Γενικά

Στην βιβλιογραφία έχει επικρατήσει να χρησιμοποιείται ο όρος βαθμός 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 Gautier J.D. (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 επεξεργάζονται 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 σύζευξης (loosely coupled) ,μια ειδική μορφή της οποίας είναι η τελείως χαλαρή σύζευξη (uncoupled systems).

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

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

- τελείως χαλαρής σύζευξης (uncoupled systems)
- χαλαρής σύζευξης (loosely coupled)
- στενής σύζευξης (tightly coupled)
- πλήρως στενής σύζευξης (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 βοήθεια ώστε το ΔΣΠ χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του πρώτου να εντοπίζει πιο γρήγορά το σήμα των δορυφόρων, να προβαίνει σε ταχύτερη και αποτελεσματικότερη επίλυση ασαφειών κα.

- **Συστήματα τελείως χαλαρής σύζευξης (uncoupled systems)**

Σ' αυτήν την περίπτωση δεν λαμβάνεται υπόψη ο προσδιορισμός θέσης από το αδρανειακό σύστημα και αντικαθίσταται από τον προσδιορισμό θέσης του δορυφορικού συστήματος.

- **Συστήματα χαλαρής σύζευξης (loosely coupled)**

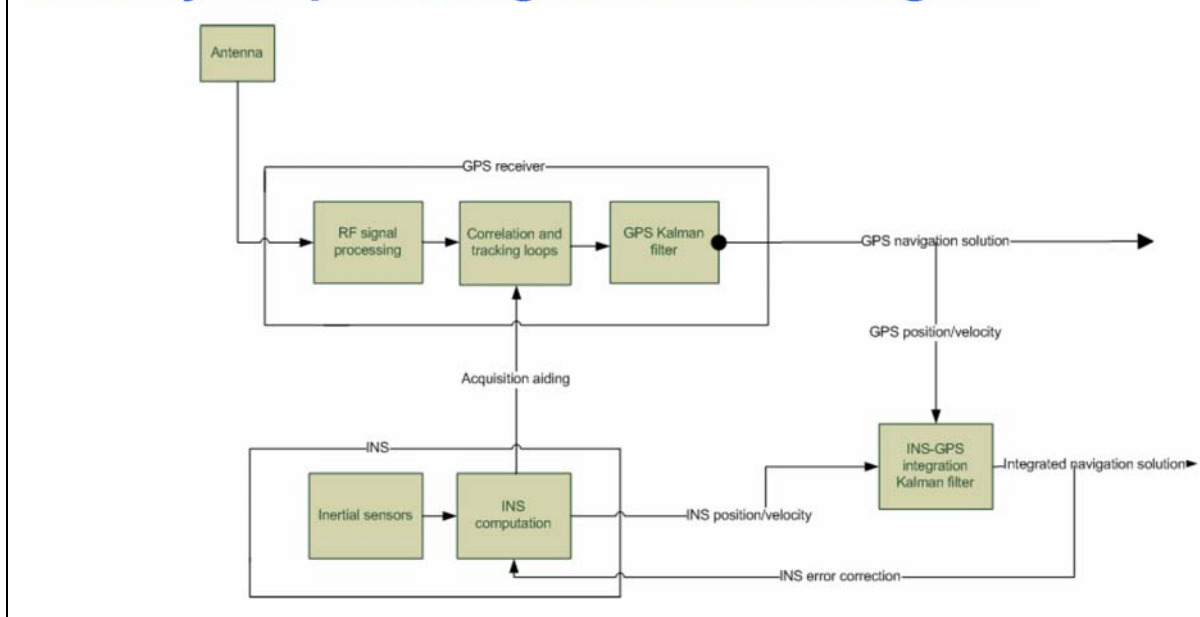
Σ' αυτήν την περίπτωση ακολουθείται η εξής μεθοδολογία:

Υπολογίζονται η ταχύτητα και η θέση από το δορυφορικό σύστημα και από το αδρανειακό σύστημα ξεχωριστά.

Χρησιμοποιώντας το φίλτρο Kalman δημιουργούμε μια ενοποιημένη λύση θέσης και ταχύτητας από τα δυο συστήματα. Το φίλτρο Kalman που χρησιμοποιούμε για την ενοποιημένη λύση είναι άλλο από αυτό που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό θέσης του δορυφορικού συστήματος.

Το πλεονέκτημα των συστημάτων χαλαρής σύζευξης είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιοδήποτε συνδυασμό δορυφορικού - αδρανειακού συστήματος καθώς επίσης ενδείκνυται για σύγκριση αποτελεσμάτων της λύσης του δορυφορικού συστήματος με την λύση του συνδυασμού.

Loosely coupled integration block diagram



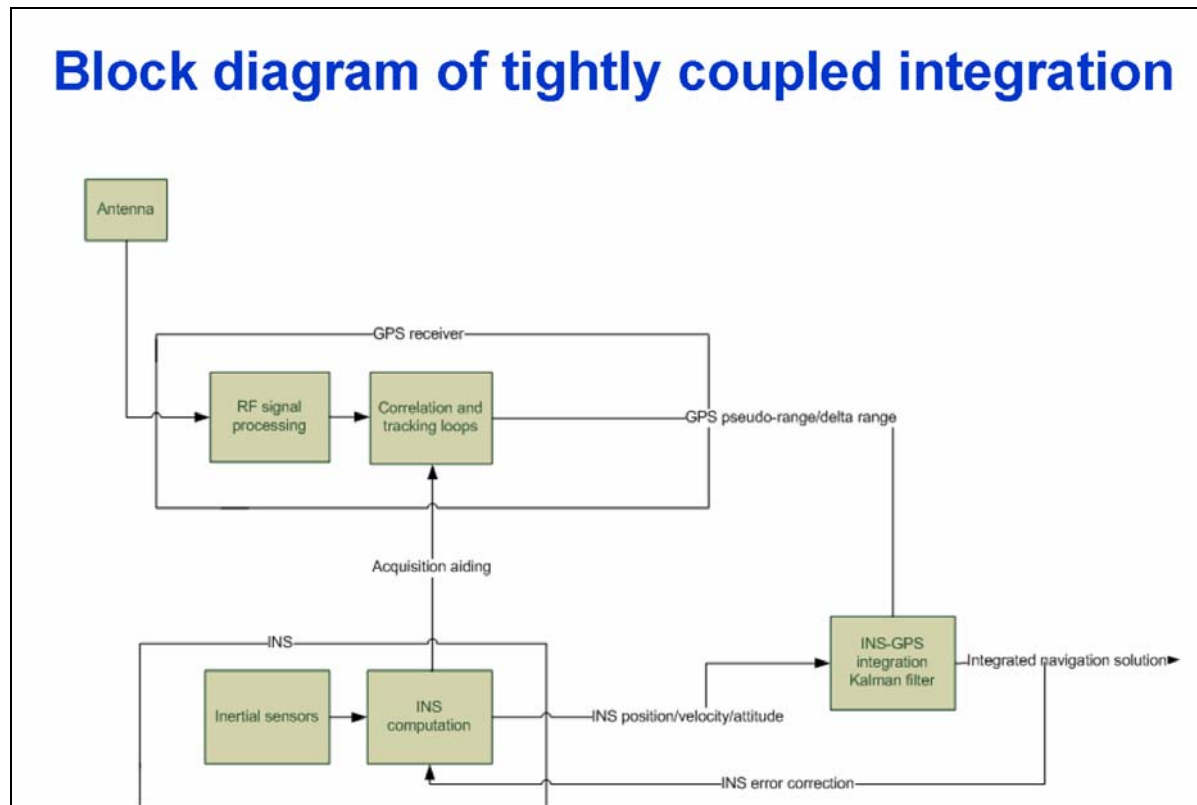
εικόνα 4.2 - μεθοδολογία *loosely coupled integration* (AlttiJokinen)

- **Συστήματα στενής σύζευξης (tightly coupled)**

Τα συστήματα στενής σύζευξης χρησιμοποιούν το φίλτρο Kalman για τον προσδιορισμό θέσης. Το φίλτρο παίρνει τις ψευδοαποστάσεις από το δορυφορικό σύστημα και τις μετρήσεις από το αδρανειακό ως στοιχεία εισαγωγής και προσδιορίζεται η ενοποιημένη λύση πλοήγησης.

Τα πλεονεκτήματα των συστημάτων στενής σύζευξης (tightly coupled) σε σχέση με τα συστήματα χαλαρής σύζευξης (loosely coupled) είναι:

- Χρησιμοποιείται μόνο ένα φίλτρο Kalman και αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί αποφεύγουμε την διαδικασία να χρησιμοποιούμε τα εξαγόμενα του πρώτου φίλτρου Kalman ως στοιχεία εισαγωγής του δεύτερου φίλτρου Kalman.
- Το δορυφορικό σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο βοήθειας και αναβάθμισης του αδρανειακού με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται πλήρης λύση GPS. (αρκεί δηλαδή και με 4 δορυφόρους λύση για την αναβάθμιση λύσης πλοήγησης)



εικόνα 4.3 - μεθοδολογία *tightly coupled integration* (AlttiJokinen)

- Συστήματα πλήρως στενής σύζευξης (*ultra tightly coupled*)

Σε αυτήν την περίπτωση το αδρανειακό σύστημα χρησιμοποιείται ως εξωτερική βοήθεια ώστε το δορυφορικό σύστημα χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του πρώτου να εντοπίζει πιο γρήγορά το σήμα των δορυφόρων, να προβαίνει σε ταχύτερη και αποτελεσματικότερη επίλυση ασαφειών κα.

Η εξίσωση παρατήρησης του δορυφορικού και η ενοποιημένη λύση δορυφορικού - αδρανειακού συνδυάζονται δε έναν αλγόριθμο.

5. ΤΟ INS-GPS ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το σύστημα που θα αναλυθεί παρακάτω ανήκει στην σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου και συγκεκριμένα στο εργαστήριο Δορυφορικής Γεωδαισίας, το οποίο προορίζεται για εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς.

Πρόκειται για ένα προϊόν κατηγορίας Span (Synchronized Position Attitude & Navigation) της εταιρίας Novatel που εδρεύει στον Καναδά και δραστηριοποιείται σε προϊόντα δορυφορικού εντοπισμού και πλοήγησης.

Το σύστημα αποτελείται από δυο κεραίες GPS, από το αδρανειακό σύστημα IMU (Inertial Measurement Unit), από δυο δέκτες (Receiver) και τα παρελκόμενα.



εικόνα 5.1 - συσκευές συστήματος

5.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΚΕΥΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μια σύντομη παρουσίαση και περιγραφή των επιμέρους συσκευών που αποτελούν το σύστημα.

5.2.1. Δέκτης (Receiver)

Το πακέτο αποτελείται από δυο δέκτες receivers έναν για το base και έναν για τον rover, με την διαφορά ότι του base έχει κάρτα μνήμης για καταγραφή μετρήσεων και ασφαλώς πολύ λιγότερες θύρες.

- **Receiver Base**

Ο δέκτης του base ονομάζεται receiver DL V3 ο οποίος είναι εφοδιασμένος με μια θύρα USB και Bluetooth για επικοινωνία με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Επίσης έχει και κάρτα μνήμης (compact flash) χωρητικότητας 2GB για αποθήκευση δεδομένων η οποία έχει την δυνατότητα να εξέρχεται από τον δέκτη, για χρήση σε μηχανήμα ανάγνωσης καρτών.

Είναι συμβατός στα δεδομένα από GPS και GLONASS καθώς επίσης υποστηρίζει την L2 συχνότητα αλλά και την μελλοντική L5. Παρέχει ακρίβεια προσδιορισμού θέσης κάτω του μέτρου με την χρήση διορθώσεων της L-Band χρησιμοποιώντας OMNISTAR ή CDGPS. Με την χρήση της τεχνολογίας RTK παρέχει ακρίβεια εκατοστού και μεταφορά δεδομένων με συχνότητα 50Hz.



εικόνα 5.2 - Receiver base DL V3

Έχει μέγεθος 185*162*76mm και ζυγίζει μόλις 1.3kg, η τροφοδοσία του γίνεται με παροχή +9 ~ +28V ενώ είναι αδιάβροχος και έχει την δυνατότητα να καταγράφει χωρίς πρόβλημα από -50°C έως +95°C.

Πίνακας 5.1 - Χαρακτηριστικά Receiver base

Συχνότητα Μεταφοράς Δεδομένων	Ακρίβεια Θέσης (RMS)		Ακρίβεια Μετρήσεων
Μετρήσεις 50Hz	Single Point L ₁	1.8m	L ₁ C/A Code 4cm (RMS)
Θέση 50Hz	Single Point L ₁ /L ₂	1.5m	L ₁ Carrier Phase 0.50mm (differential channel)
OmniSTAR HP 20Hz	SBAS	0.6m	
	CDGPS	0.6m	L ₂ P(Y) Code 8cm (RMS)
Ακρίβεια Μέτρησης Ταχύτητας	DGPS	0.45m	L ₂ Carrier Phase 1mm (differential channel)
	OmniSTAR VBS	0.70m	
0.03 m/s RMS	OmniSTAR XP	0.15m	
	OmniSTAR HP	0.10m	Ακρίβεια Μέτρησης Χρόνου
Δυναμικότητα	RT-20	0.20m	20ns RMS
Ταχύτητα 515m/s	RT-2	1cm+1ppm	

• **Receiver Rover**

Ο δέκτης του rover ονομάζεται Pro Pak V3 και σ' αυτόν συνδέονται η κεραία GPS, το αδρανειακό σύστημα και ο υπολογιστής. Περιέχει 72 κανάλια, L_1 , L_2 GPS, GLONASS και τεχνολογία RTK. Διαθέτει τρεις σειριακές θύρες υψηλής ταχύτητας. Έχει διαστάσεις 185*160*71mm, ζυγίζει μόλις 1kg ενώ μπορεί να λειτουργεί χωρίς κανένα πρόβλημα από -45°C έως $+95^{\circ}\text{C}$.

Είναι ικανός να δεχθεί διορθώσεις στην L συχνότητα από γεωστατικούς δορυφόρους όπως ο OMNISTAR και CDGPS. Διαθέτει επίσης την απαραίτητη τεχνολογία για υποστήριξη της L_5 συχνότητας όταν αυτή θα είναι διαθέσιμη. Με ένα καλώδιο σύνδεσης Receiver - IMU έχουμε ένα σύστημα ανταλλαγής δεδομένων όπου μεταφέρονται μετρήσεις θέσης σε ταχύτητα 100Hz.



εικόνα 5.3 - Receiver Rover ProPak V3

Πίνακας 5.2 - Χαρακτηριστικά Receiver rover

Channel Configuration	Ακρίβεια Θέσης (RMS)		Ακρίβεια Μετρήσεων	
14 L_1 , 14 L_2 , 6 L_5 GPS	Single Point L_1	1.8m	L_1 C/A Code	6cm (RMS)
12 L_1 , 12 L_2 GLONASS	Single Point L_1/L_2	1.5m	L_1 Carrier Phase (differential channel)	0.75mm
2 SBAND	SBAS	0.6m		
1 L-BAND	CDGPS	0.6m	L_2 P(Y) Code	25cm (RMS)
Ακρίβεια Μέτρησης Χρόνου	DGPS	0.45m	L_2 Carrier Phase (differential channel)	2mm
	OmniSTAR VBS	0.70m		
	OmniSTAR XP	0.15m		
20ns RMS	OmniSTAR HP	0.10m	Ακρίβεια Μέτρησης Ταχύτητας	
	RT-20	0.20m		
	RT-2	1cm+1ppm		
Συχνότητα Μεταφοράς Δεδομένων	Δυναμικότητα		Χρόνος για πρώτη λύση (Time to First Fix)	
Μετρήσεις 50Hz	Ταχύτητα	515m/s	Cold Start	60s
Θέση 50Hz	Vibration	4G	Hot Start	35s
OmniSTAR HP 20Hz	Υψόμετρο ⁽¹⁾	18288m		

(1) Λέγοντας υψόμετρο εννοούμε το απόλυτο υψόμετρο (Altitude)

5.2.2. ΚΕΡΑΙΑ GPS

Πρόκειται για μια κεραία GPS συμβατή με L1 και L2 συχνότητα του GPS και GLONASS η οποία συνδέεται με τον receiver με κοινό καλώδιο δεκτών.

Είναι πολύ εύχρηστη με διάμετρο λιγότερο από 20cm και βάρος 468gr. Περιμετρικά έχει μια προστατευτική ζώνη από λάστιχο η οποία την κάνει πολύ ανθεκτική στις πτώσεις ενώ μπορεί να λειτουργεί χωρίς κανένα πρόβλημα από -55°C έως + 85°C.



εικόνα 5.4 - GPS Antenna

Το πακέτο του εργαστηρίου αποτελείται από δυο κεραίες μια για τον Rover και μια για τον Base.

Τα χαρακτηριστικά της κεραίας φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.3 - Χαρακτηριστικά Δέκτη

Performance	
3 db Pass Band	1.15 - 1.65 GHz
LNA Gain	External Required
Gain at Zenith (90°)	
L1	+6.0 dBic (minimum)
L2	+2.5 dBic (minimum)
L5, E5a	+2.0 dBic (minimum)
E6	+3.0 dBic (minimum)
L-Band	+6.0 dBic (minimum)
Gain Roll-Off (from Zenith to Horizon)	
L1, L-Band	14dB
L2, E6	11dB
L5, E5	11dB
VSWR	≤20:1
Nominal Impedance	50Ω
Attitude	9.000m

5.2.3. ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ - IMU

Πρόκειται για το αδρανειακό σύστημα (Inertial Measurement Unit) IMU-FSAS της Novatel διαστάσεων 128mm*128mm*104mm και βάρους 2.1 kg.



Αποτελείται από τρία οπτικά γυροσκόπια κλάσης 0.75 deg/hr και τρία επιταχυνσιόμετρα κλάσης 1mg, ενώ μπορεί να λειτουργεί χωρίς κανένα πρόβλημα από -40°C έως + 85°C.

εικόνα 5.5 - IMU FSAS

Στην στέψη της συσκευής υπάρχει ένα σύστημα αξόνων όπου το κέντρο των αξόνων X και Y είναι το οριζοντιογραφικό κέντρο της πλοήγησης και όχι το σημείο του Z άξονα που φαίνονται στο ίδιο σημείο αλλά απέχουν περίπου μισό χιλιοστό. Κατά την πλοήγηση ενός οχήματος το IMU θα πρέπει να τοποθετηθεί με τον άξονα Y προς την φορά της κίνησης. Το ύψος του κέντρου πλοήγησης είναι 45.4mm από την βάση της συσκευής.

Το IMU - FSAS μπορεί να εξάγει μετρήσεις στον receiver με ρυθμό 200Hz. Ταχύτητα πολύ εντυπωσιακή η οποία μας δίνει την δυνατότητα να κάνουμε μετρήσεις και σε εφαρμογές με μεγάλη επιτάχυνση και ταχύτητα χωρίς να "χάνουμε" σημαντικά δεδομένα.

Τα χαρακτηριστικά του IMU φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.4 - Χαρακτηριστικά IMU

Gyro Input Range	±500 degrees /s
Gyro Rate Bias	0.75°/hr
Gyro Rate Scale Factor	300 ppm
Angular Random Walk	0.1 degrees / (hr) ^{1/2}
Accelerometer Range	± 5 g
Accelerometer Linearity	-
Accelerometer Scale Factor	400 ppm
Accelerometer Bias	1.0 mg

5.2.4. Ολοκληρωμένο Δορυφορικό και Αδρανειακό Σύστημα (FSAS SPAN)

Σαν συνολικό σύστημα το IMU της Novatel με δέκτη GPS και τον Receiver έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά.

Πίνακας 5.5 - Χαρακτηριστικά FSAS SPAN

Attitude Accuracy ⁽¹⁾ (RMS)	Ακρίβεια Θέσης (RMS)	Συχνότητα Μεταφοράς Δεδομένων
Pitch 0.015°	Single Point L ₁ 1.8m	IMU Measurements 200Hz
Roll 0.015°	Single Point L ₁ /L ₂ 1.5m	INS Position 200Hz
Azimuth 0.041°	WAAS L ₁ only 1.2m	INS Velocity 200Hz
	WAAS L ₁ /L ₂ 0.9m	INS Attitude 200Hz
	DGPS 0.45m	
Ακρίβεια Μέτρησης Ταχύτητας	OmniSTAR VBS 0.70m	Μέγιστη Ταχύτητα
0.02 m/s RMS	OmniSTAR XP 0.15m	514 m/s
	OmniSTAR HP 0.10m	
Ακρίβεια Μέτρησης Επιτάχυνσης	RT-20 0.20m	Μέγιστο Υψόμετρο⁽²⁾
0.03 m/s ² RMS	RT-2 1cm+1ppm	18288m

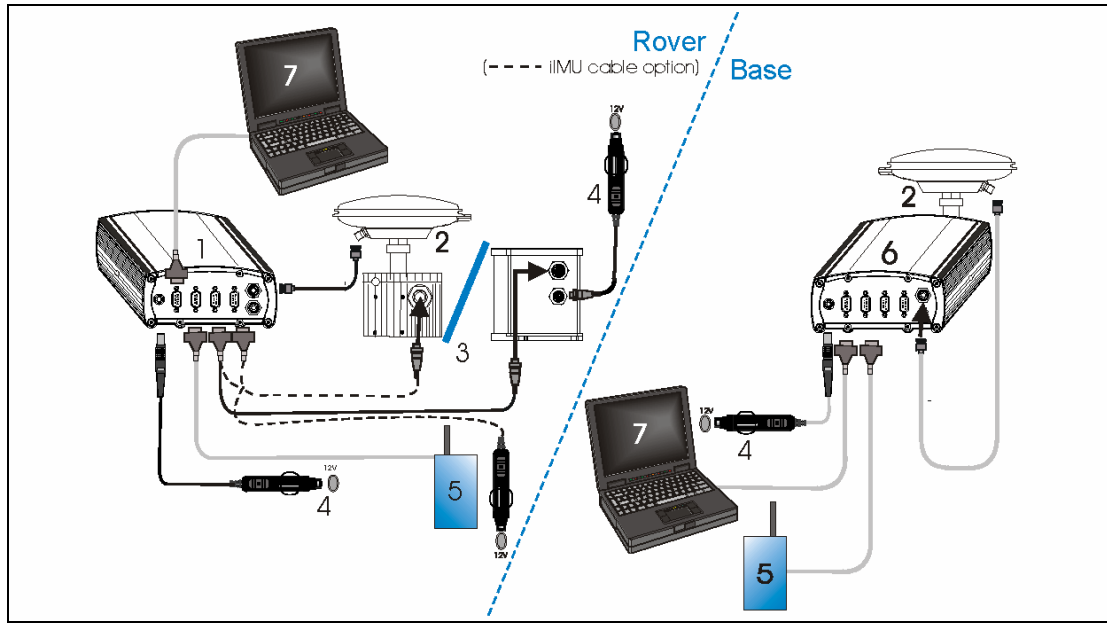
(1) Attitude = κινηματική συμπεριφορά (Pitch, Roll και Azimuth)

(2) Λέγοντας υψόμετρο εννοούμε το απόλυτο υψόμετρο (Altitude)

5.3 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ

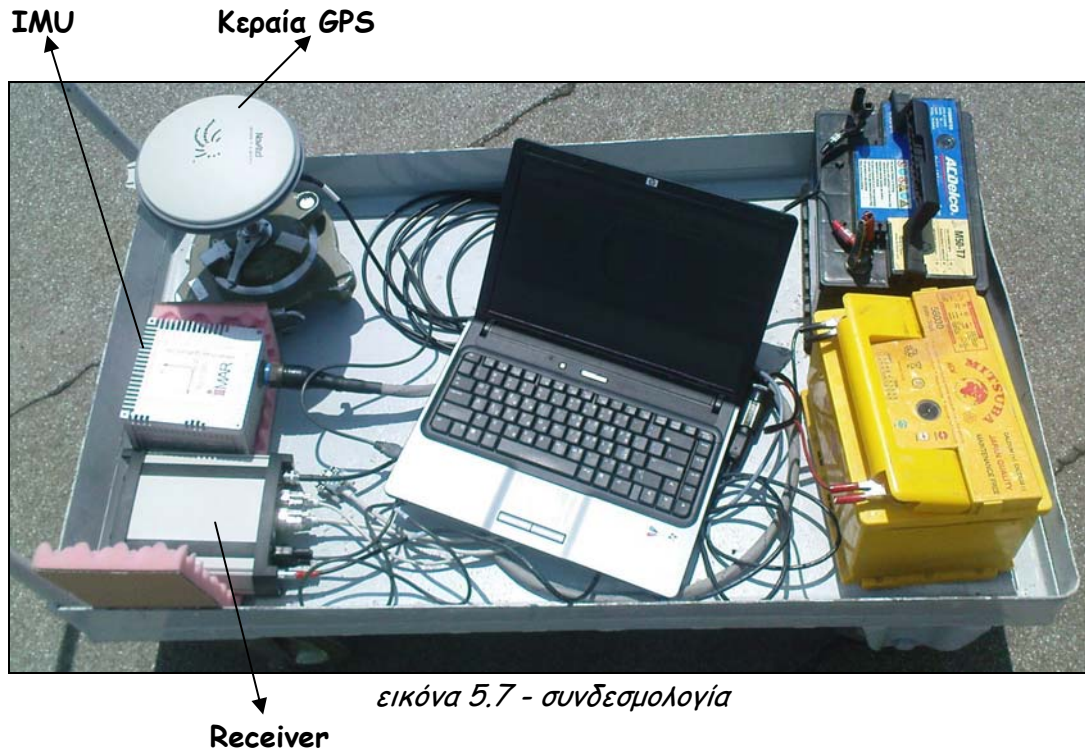
Ο receiver και το IMU θέλουν παροχή 12Volts, έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ειδικές μπαταρίες πολύ μικρού μεγέθους ή μπαταρίες αυτοκινήτου.

Η συνδεσμολογία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



εικόνα 5.6 - συνδεσμολογία

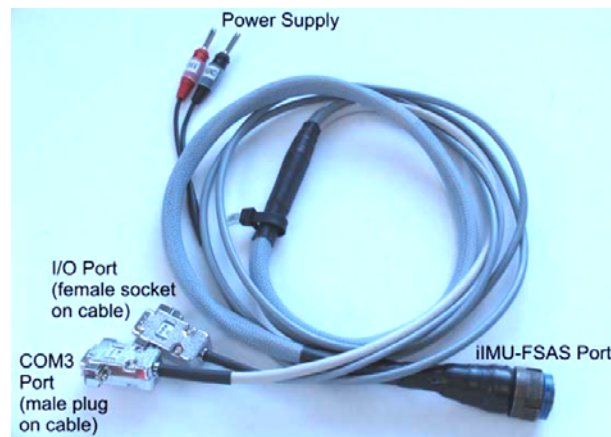
ή στο εργαστήριο:



εικόνα 5.7 - συνδεσμολογία

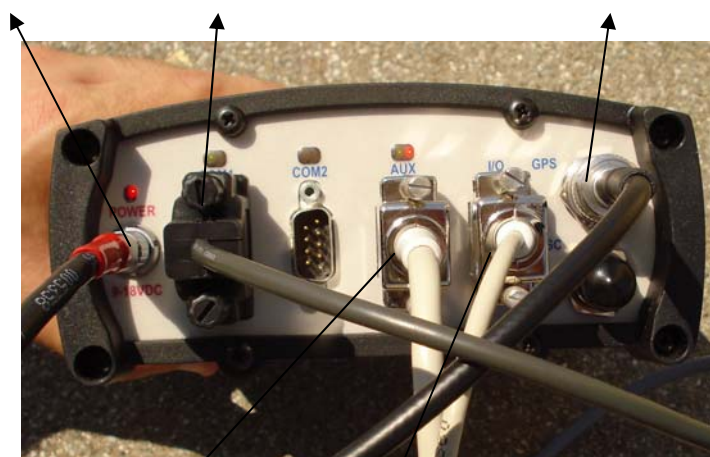
Η συνδεσμολογία του συστήματος αναλύεται ως εξής:

- Για την τροφοδοσία του συστήματος παρέχουμε στο IMU και στον Receiver από 12Volts. (Για τα πειράματα χρησιμοποιήσαμε μπαταρίες αυτοκινήτου)
- Συνδέουμε με το καλώδιο κεραίας την κεραία GPS με τον δέκτη (Receiver).
- Με το καλώδιο του IMU (εικόνα 5.8) συνδέουμε το IMU με την τροφοδοσία του και με δυο σειριακές θύρες συνδέεται με τον Receiver ένα τερματικό στην θύρα Com3 (AUX) και ένα τερματικό στην θύρα I/O. Η άλλη άκρη των καλωδίων καταλήγουν σε μία μεγάλη μεγέθους παροχή η οποία συνδέεται με την θύρα του IMU.
- Με ένα καλώδιο σειριακό - USB συνδέουμε τον Receiver με έναν φορητό υπολογιστή μέσω της θύρας COM1.



εικόνα 5.8 - Καλώδιο IMU FSAS

τροφοδοσία Receiver Σύνδεση με Laptop Σύνδεση με κεραία GPS



εικόνα 5.9- Συνδεσμολογία στις θύρες του Receiver

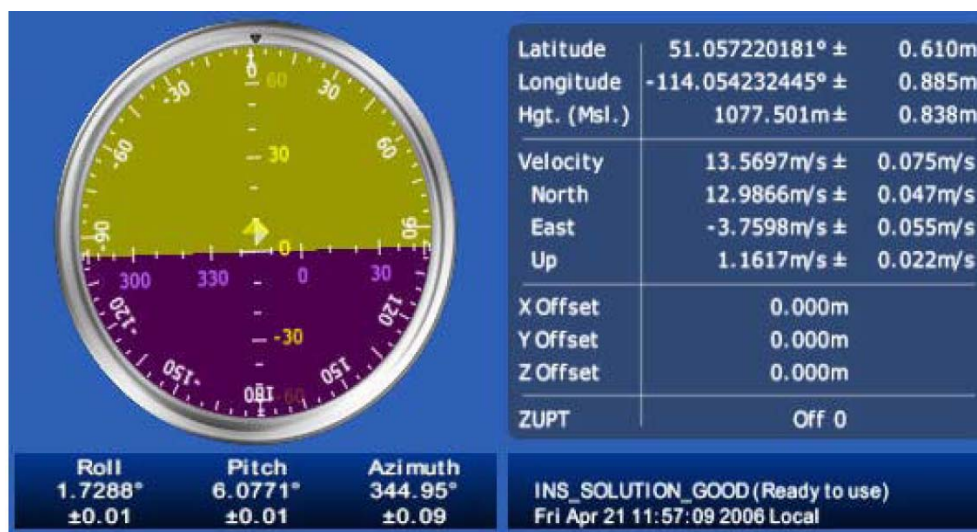
Σειριακές θύρες σύνδεσης Receiver rover

5.4 Λογισμικά Συστήματος

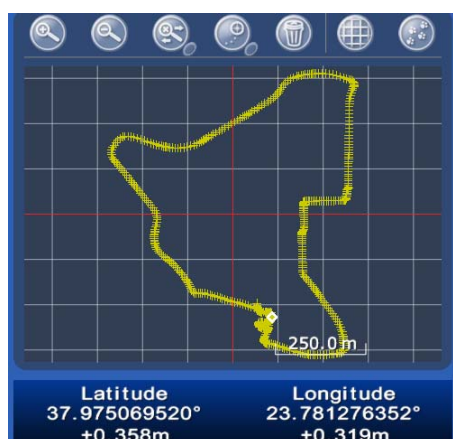
5.4.1 INS Window in CDU

Η επικοινωνία του συστήματος με τον υπολογιστή πραγματοποιείται με το λογισμικό CDU της NovAtel. Είναι μια εφαρμογή 32bit η οποία είναι εφικτή σε περιβάλλον Windows. Παρέχει στον χρήστη ένα παραθυρικό περιβάλλον με γραφήματα και ποικίλες ενδείξεις δίνοντας του την δυνατότητα να μπορεί ανά πάσα στιγμή να ελέγχει την λειτουργία του συστήματος αλλά και να ενημερώνεται για τις τρέχουσες μετρήσεις και αποτελέσματα.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ενδείξεων φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Πρόκειται για ένα χαρακτηριστικό παράθυρο του CDU στο οποίο έχουμε ένδειξη της παρούσας θέσης, ταχύτητας, κινηματικής κατάστασης (roll, pitch, azimuth), της παρούσας κατάστασης του συστήματος (π.χ. INS solution good) καθώς και ένα όργανο ενδείξεων στο οποίο παρατηρούμε κάθε στιγμή τις μεταβολές που έχει το αδρανειακό σύστημα στην κινηματική του κατάσταση.



εικόνα 5.10 - χαρακτηριστικό παράθυρο ενδείξεων CDU



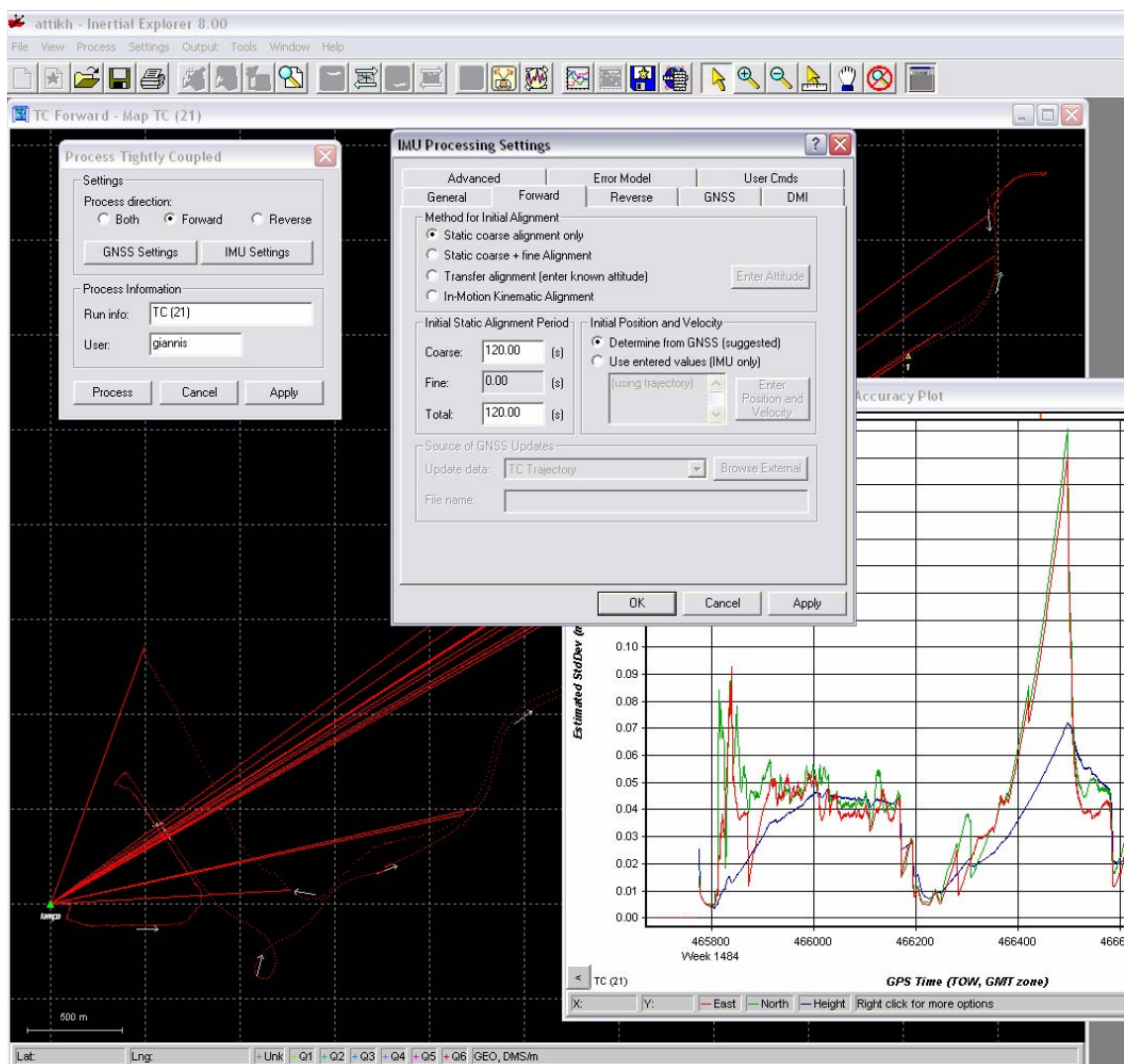
εικόνα 5.10 - χαρακτηριστικό παράθυρο γραφήματος θέσης

5.4.2 Inertial Explorer

Πρόκειται για λογισμικό, προϊόν της εταιρίας Waypoint products Group, με το οποίο πραγματοποιούμε εκ των υστέρων επεξεργασία και επίλυση δεδομένων GNSS και IMU με σκοπό την δημιουργία ενοποιημένης λύσης. Χρησιμοποιεί την πληροφορία των επιταχυνσιομέτρων (Δv) και τον γωνιακό ρυθμό ($\Delta \theta$) για να παράγει υψηλού ρυθμού θέση και κινηματική κατάσταση από μια μεγάλη γκάμα αδρανειακών συστημάτων.

Το λογισμικό έχει την δυνατότητα να εφαρμόσει είτε συστήματα στενής σύζευξης (tightly coupled) για την χρησιμοποίηση ενός φίλτρου Kalman είτε συστήματα χαλαρής σύζευξης (loosely coupled) για τον υπολογισμό θέσης και ταχύτητας από το δορυφορικό και αδρανειακό σύστημα ξεχωριστά.

Πρόκειται για ένα λογισμικό πολύ εύχρηστο, το οποίο εκτός από τις επιλύσεις εξάγει ποικίλα γραφήματα καθώς και έχει πολλές τεχνικές επεξεργασίας και μετατροπές αρχείων.



εικόνα 5.11 - περιβάλλον Inertial Explorer

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

6.1. Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Το πείραμα έλαβε χώρα στην περιφερειακή οδό Υμηττού τον μήνα Ιούνιο 2008.

Αρχικά θα γίνει μια περιγραφή του σκοπού του πειράματος, στην συνέχεια θα παρουσιαστεί η περιοχή μελέτης και έπειτα θα αναλυθεί η μεθοδολογία του πειράματος καθώς και τα αποτελέσματα του.

Στην συνέχεια στο επόμενο κεφάλαιο ακολουθούν τα συμπεράσματα και οι προσωπικές κρίσεις - εντυπώσεις που μας άφησε η εργασία μας με το συγκεκριμένο σύστημα.

6.2. Σκοπός του πειράματος

Ο σκοπός του πειράματος ήταν να γίνει μια πρώτη προσέγγιση του τρόπου λειτουργίας του συστήματος και ο τρόπος που αντιδρά σε κάποιες καταστάσεις. Σαν προτεραιότητα δηλαδή είχε τεθεί να θέσουμε σε λειτουργία το σύστημα, να καταλάβουμε τι εξαγόμενα στοιχεία μπορεί να μας δώσει και να βρούμε έναν τρόπο επίλυσης και επεξεργασίας των στοιχείων αυτών.

Ως τρόπος επίτευξης των παραπάνω ήταν η επιλογή της αποτύπωσης μιας οδού με τμήματα τα οποία εκ των πραγμάτων δεν θα μπορούσαμε να έχουμε λύση από το δορυφορικό σύστημα.

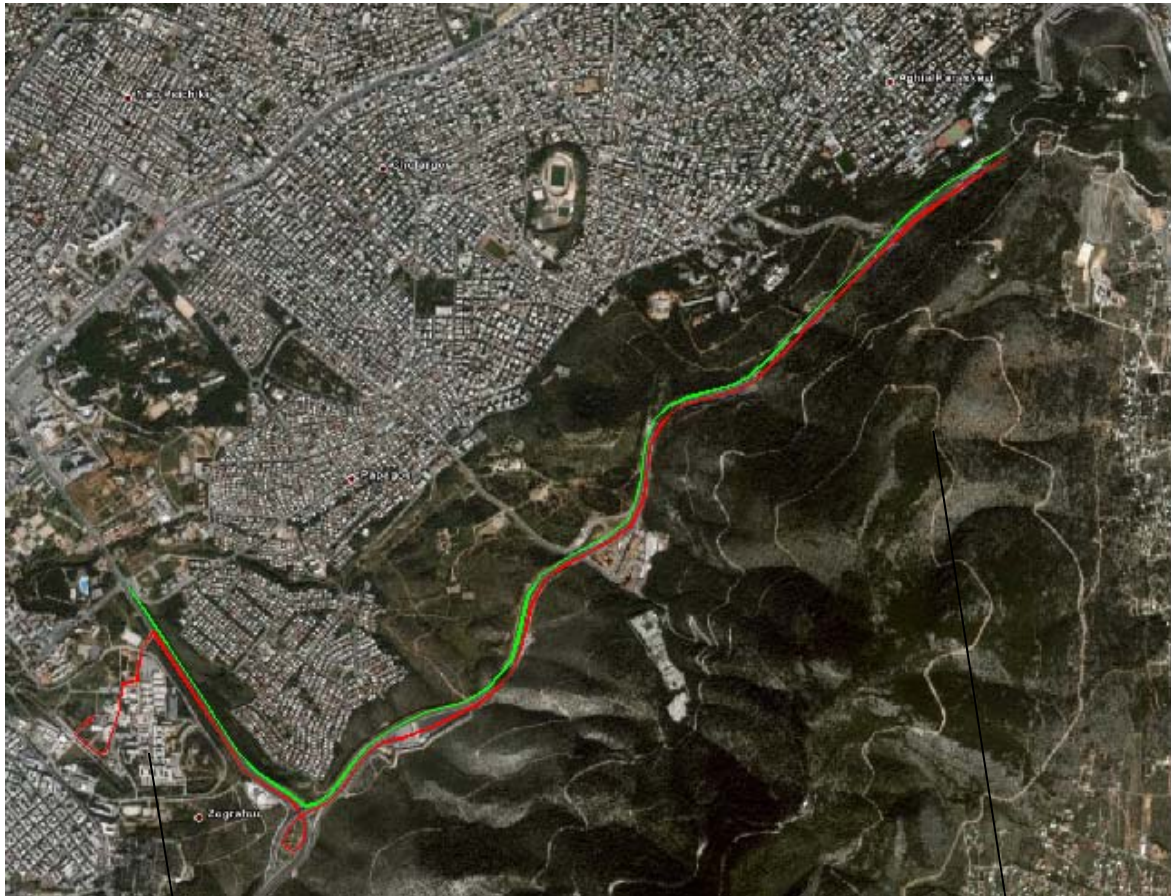
Έτσι το πείραμα έγινε περισσότερο με γνώμονα να δοκιμάσουμε "τις αντοχές" του συστήματος παρά να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουμε τα καλύτερα ποιοτικά αποτελέσματα (όσον αφορά απαιτήσεις ακρίβειας, π.χ. θέσης).

6.3. Περιοχή μελέτης (Study Area)

Η περιοχή μελέτης ήταν η περιφερειακή οδός Υμηττού. Πρόκειται για έναν δρόμο μήκους 12,9χλμ ο οποίος ανά σύντομα διαστήματα έχει σήραγγες σχετικά μεγάλου μήκους (αυτός ήταν και ο λόγος που επιλέξαμε την συγκεκριμένη οδό).

Η πορεία που ακολουθήθηκε ήταν από χώρο του Πολυτεχνείου (κτίριο Λαμπαδάριο) οδός Κατεχάκη, είσοδος στην περιφερειακή Υμηττού, έξοδος στα Γλυκά Νερά, αναστροφή και η αντίστροφη πορεία προς Πολυτεχνείο.

Η πορεία που ακολουθήθηκε φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



εικόνα 6.1 - περιοχή μελέτης

Πολυτεχνείο

Υμηττός

Με κόκκινο χρώμα φαίνεται η πορεία που ακολουθήθηκε κατά την μετάβαση του πειράματος και με πράσινο χρώμα η πορεία της επιστροφής. Το μήκος της διαδρομής είναι περίπου 13 χλμ και κατά την διάρκεια της διαδρομής διασχίσαμε 6 σήραγγες.

Η διαδρομή αυτή επιλέχθηκε καταρχήν γιατί είναι κοντά στο Πολυτεχνείο. Αυτό ήταν σημαντικό για εμάς γιατί έχουμε στην ταράτσα του Λαμπαδαρίου βάθρο με γνωστές συντεταγμένες, οπότε μπορούσαμε να έχουμε και έναν σταθερό δέκτη με αποτέλεσμα να είναι εφικτή η διαδικασία επίλυσης εκ των υστέρων.

Από την άλλη από θέμα μορφής της συγκεκριμένης οδού ήταν ότι ακριβώς χρειαζόμασταν για την επίτευξη του πειράματος. Ένας δρόμος στον οποίο μπορούσαμε να αναπτύξουμε ταχύτητα για να διαπιστώσουμε πως ανταποκρίνεται το σύστημα και φυσικά είχαμε εναλλαγές σε περιοχές όπου το GPS είχε ορίζοντα και περιοχές (σήραγγες) όπου δεν είχε ορίζοντα, οπότε είχαμε λύση μόνο αδρανειακού συστήματος.

Υπήρχε όμως ένα μεγάλο μειονέκτημα. Λόγω της γεωμορφολογίας της περιοχής είχαμε σε ελάχιστες περιπτώσεις ορατότητα σε πολλούς δορυφόρους (περισσότερους από 4) και εκτός αυτού λόγω των κεραιών που βρίσκονται στον Υμηττό υπήρχαν παρεμβολές σήματος με αποτέλεσμα να μειώνεται η ποιότητα στην λύση.

6.4. Μεθοδολογία Πειράματος

Σ' αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί αναλυτικά η μεθοδολογία που ακολουθήσαμε για το πείραμα χωρίζοντας το σε περιπτώσεις, αφού πρώτα γίνει μια αναφορά στην πρώτη απόπειρα να τεθεί σε λειτουργία το σύστημα.

6.4.1. Απόπειρα σε αυτοσχέδιο όχημα

Αξίζει να αναφερθεί η πρώτη απόπειρα δοκιμασίας του συστήματος του εργαστηρίου. Έγινε η κατάλληλη συνδεσμολογία και σαν όχημα επιλέχθηκε ένα αυτοσχέδιο καρότσι με το οποίο οι κινήσεις μπορούσαν να πραγματοποιηθούν με την κίνηση του καρτσιού από άνθρωπο.

Έτσι λοιπόν δίνοντας κίνηση στο καρότσι περιμέναμε την ένδειξη *solution good - move the vehicle* δηλαδή την ένδειξη που θα σήμαινε ότι το σύστημα θα είχε ολοκληρώσει την διαδικασία *aligning* και θα ήταν έτοιμο για μετρήσεις.

Από τις οδηγίες που είχαμε από την γερμανική εταιρία που έχει δημιουργήσει το λογισμικό του συστήματος γνωρίζαμε ότι το όχημα (καρότσι στην συγκεκριμένη περίπτωση) έπρεπε να φτάσει την ταχύτητα των 5m/s ώστε να είναι έτοιμο για πλοήγηση.

Όσο και αν προσπαθήσαμε δεν μπορέσαμε να φτάσουμε την ταχύτητα των 5m/s με αποτέλεσμα το πρώτο πείραμα να στεφθεί με πλήρη αποτυχία.

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο έγινε πραγματικότητα το παραπάνω πείραμα.



εικόνα 6.2 - Αυτοσχέδιο όχημα, Πρώτη απόπειρα

6.4.2. Πειραματική διαδικασία περιφερειακής Υμηττού

Το πείραμα στην περιφερειακή οδό Υμηττού έλαβε χώρα τον Ιούνιο του έτους 2008 και χωρίζεται σε δυο στάδια. Σαν πρώτο στάδιο είναι η επίλυση των μετρήσεων μόνο με τις μετρήσεις του GPS, στην συνέχεια δεύτερο στάδιο η επίλυση των μετρήσεων του αδρανειακού συστήματος με την βοήθεια του GPS (π.χ. για τον προσδιορισμό της θέσης) αλλά και παρουσίαση των αποτελεσμάτων του αδρανειακού ως μοναδικό σύστημα μέτρησης (π.χ. ταχύτητα, επιτάχυνση) και η επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού επιλύσεων και ενοποιημένης λύσης GPS/INS.

Οι κύριες αυτές κατηγορίες χωρίζονται και σε υποκατηγορίες. Έτσι για την επίλυση του δορυφορικού συστήματος θα παρουσιαστούν αποτελέσματα ξεχωριστά της μετάβασης, ξεχωριστά της επιστροφής και του συνδυασμού αυτών. Ομοίως θα παρουσιαστούν η μετάβαση και η επιστροφή του αδρανειακού.

Όταν αναφέρουμε μετάβαση (forward) εννοούμε την επίλυση ακολουθώντας την επίλυση με αφετηρία την θέση που αντιστοιχεί στον χρόνο μηδέν και τελικό σημείο το σημείο που αντιστοιχεί στον χρόνο t_{tel} .

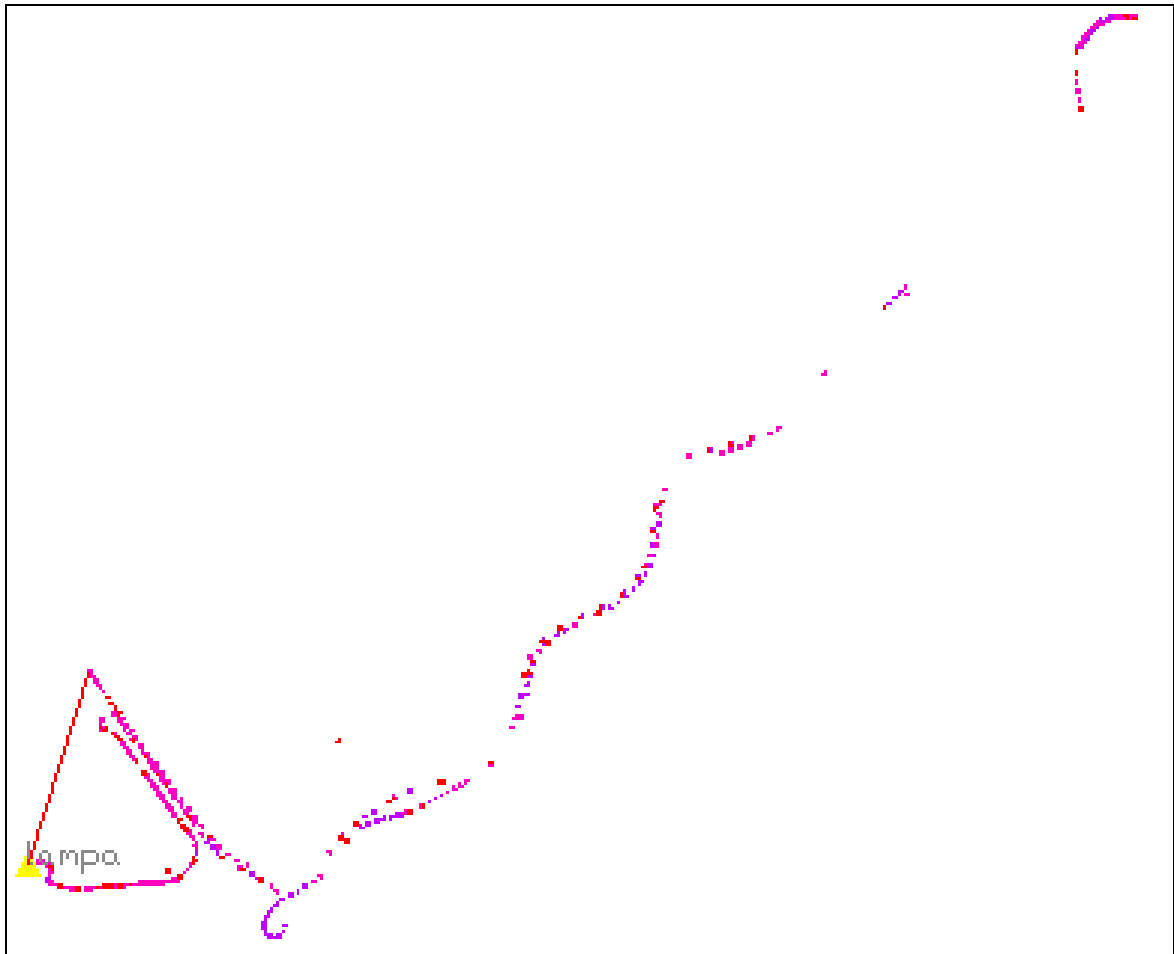
Όταν αναφέρουμε επιστροφή (reverse) εννοούμε την επίλυση ακολουθώντας την επίλυση με αφετηρία την θέση που αντιστοιχεί στον χρόνο t_{tel} και τελικό σημείο το σημείο που αντιστοιχεί στον χρόνο μηδέν.

Αυτό έχουμε την δυνατότητα να το κάνουμε γιατί το σύστημα απαιτεί πριν την εκκίνηση του οχήματος να μείνει σταθερό ένα χρονικό διάστημα, ώστε να μπορεί να κάνει το δικό του initialization και αντιστοίχως στο τέλος της πορείας να μείνει πάλι σταθερό για αντίστοιχο χρόνο. Οπότε υπάρχουν δυο τρόποι (αφού μπορούμε να θεωρήσουμε δυο αφετηρίες) να επιλύσουμε.

❶ Επιλύσεις GPS

• Επίλυση Μετάβασης (Forward GPS)

Το πρώτο στάδιο ήταν να επιλυθεί η πορεία με την λύση του δορυφορικού συστήματος χρησιμοποιώντας φυσικά και το σταθερό δέκτη. Έτσι λοιπόν η λύση του post processing μας έδωσε το αποτέλεσμα που φαίνεται παραστατικά στο παρακάτω σχήμα.



εικόνα 6.3 - Σχηματική αναπαράσταση επίλυσης fwd-gps

Παρατηρώντας το σχήμα μπορούμε να διακρίνουμε αφενός τους διαφορετικούς χρωματισμούς του κάθε σημείου και αφετέρου τα κενά τα οποία προδίδουν τις περιοχές όπου το όχημα βρισκόταν σε σήραγγα.

Οι διαφορετικοί χρωματισμοί αντιστοιχούν σε μια τιμή κλίμακας 1-6 και προδίδουν την ακρίβεια επίλυσης κάθε σημείου (πίνακας 6.1). Παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των σημείων είναι χρώματος magenta το οποίο βάσει του πίνακα αντιστοιχεί στην τιμή Q5 με ακρίβεια 1-5m.

Πίνακας 6.1 - Περιγραφή τιμών και χρωμάτων ποιότητας

Quality	Color	Description	Accuracy
1	Green	Fixed integer	0.00 – 0.15
2	Cyan	Converged float or noisy fixed integer	0.05 – 0.40
3	Blue	Converging float	0.20 – 1.00
4	Purple	Converging float	0.50 – 2.00
5	Magenta	DGPS	1.00 – 5.00
6	Red	DGPS	2.00 – 10.00
Unprocessed	Grey	Has not been processed	N/A

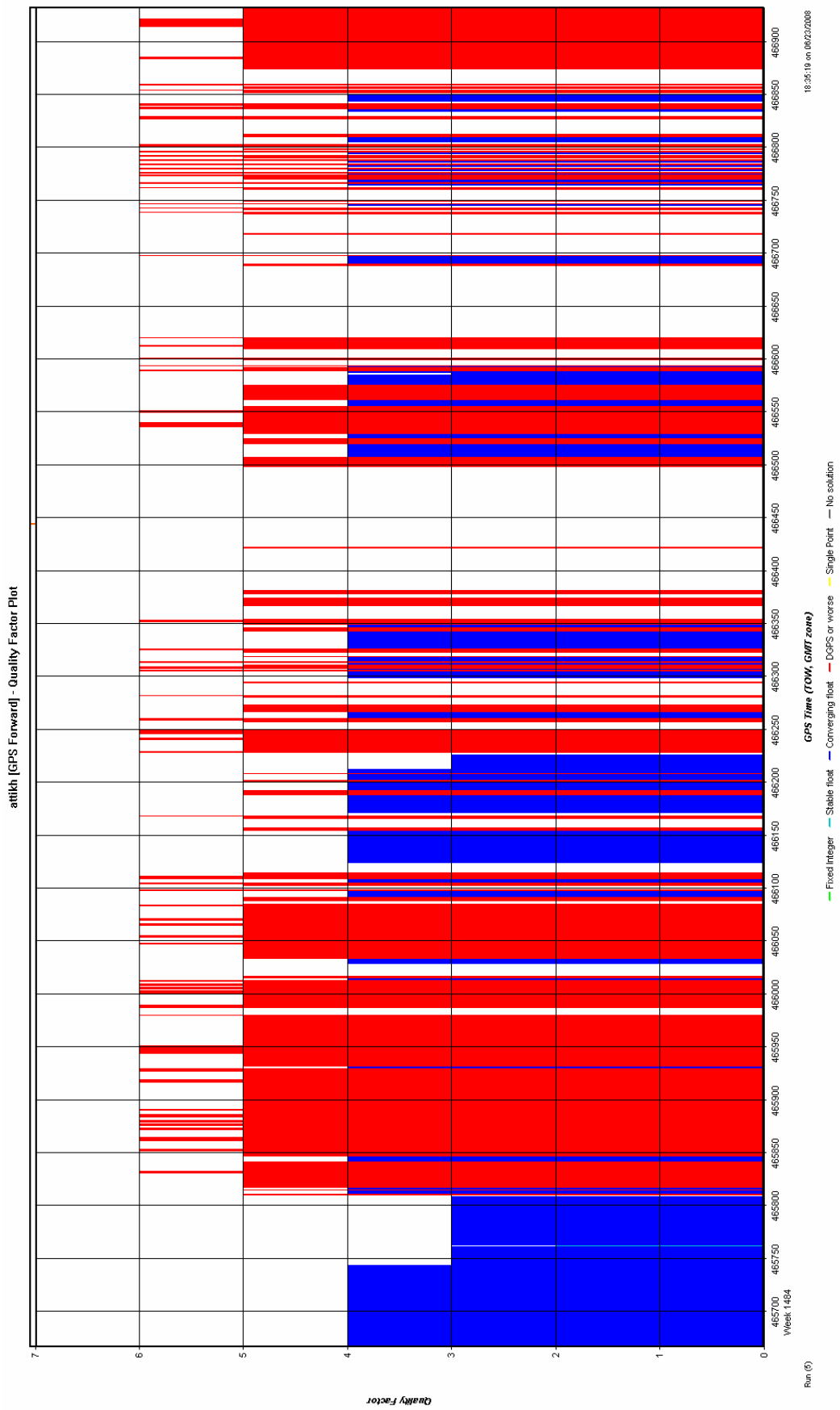
Στην συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα:

- Quality factor
- Position Accuracy
- Velocity Profile
- Velocity Accuracy

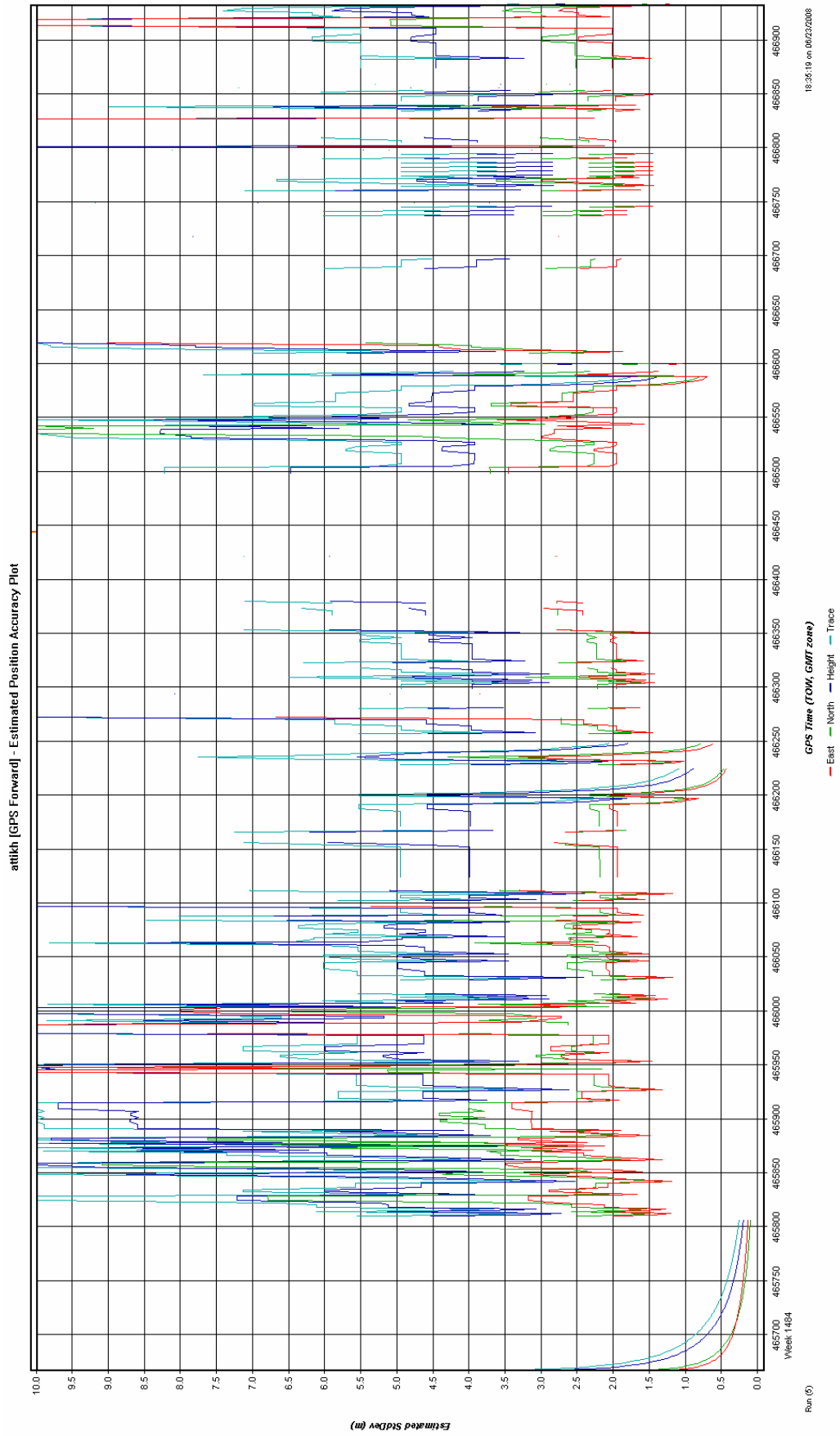
και έπειτα ακολουθεί σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

Όλες οι επιλύσεις, επεξεργασία και οι δημιουργία των παρακάτω διαγραμμάτων δημιουργήθηκαν με την βοήθεια του λογισμικού Inertial Explorer 8.00.

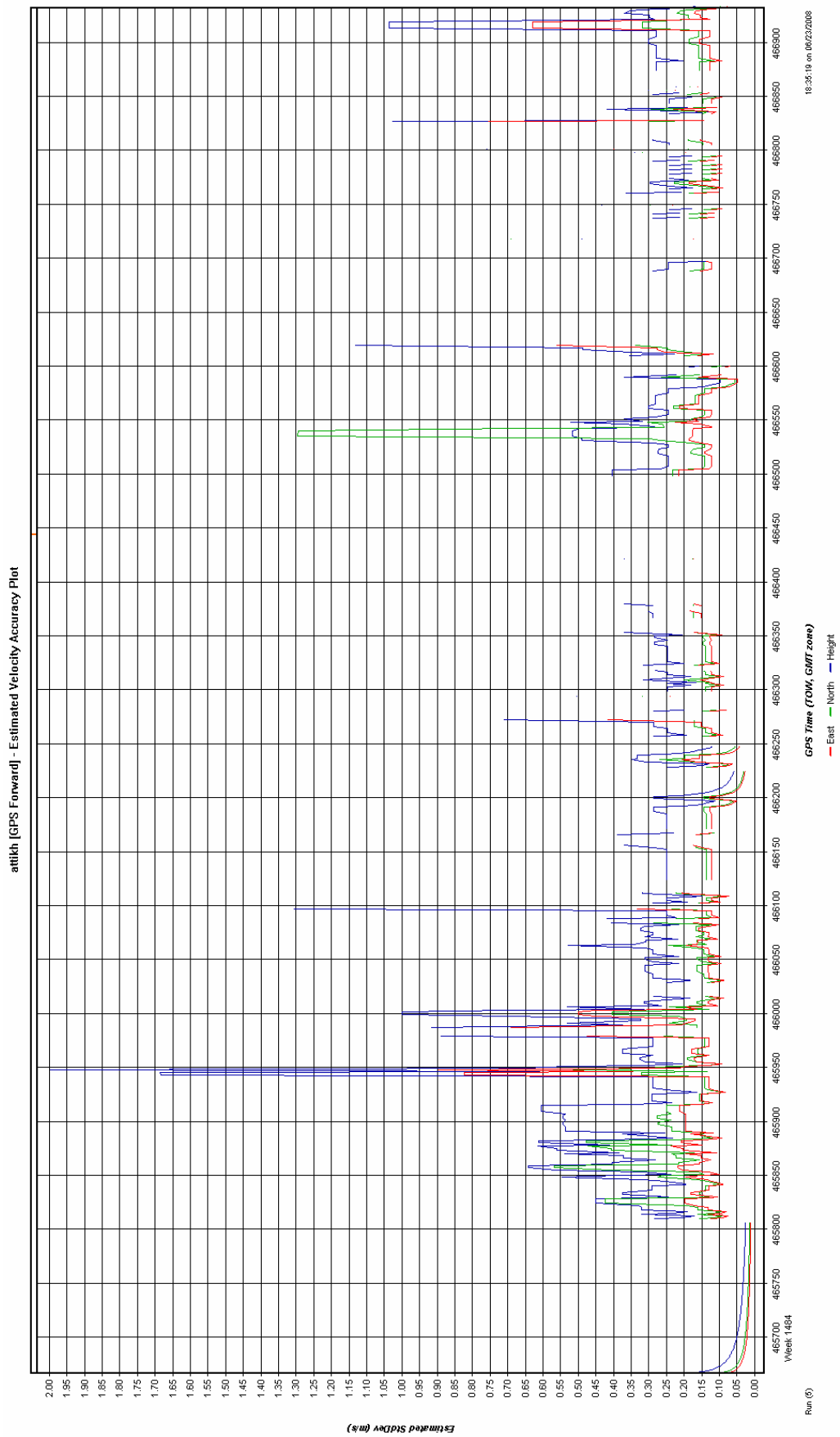
Διάγραμμα 6.1 - Quality Factor (fwd GPS)



Διάγραμμα 6.2 - Position Accuracy (fwd GPS)



Διάγραμμα 6.3 - Velocity Accuracy (fwd GPS)



Παρατηρώντας το διάγραμμα 6.1 παρατηρούμε ότι η επίλυση των περισσότερων σημείων ανήκει στην κατηγορία *DGPS*, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό των σημείων ανήκουν στην κατηγορία *Converging Float*.

Αναλυτικά τα αποτελέσματα της επίλυσης είναι:

Processing Summary Information

Program: Inertial Explorer
Version: 8.00.1003

Solution Type: **Forward**

Number of Epochs:

Total in GPB file:	1270
No processed position:	686
With bad C/A code:	0
With bad L1 Phase:	0

Measurement RMS Values:

L1 Phase:	0.5424 (m)
C/A Code:	35.82 (m)
L1 Doppler:	0.995 (m/s)

Quality Number Percentages:

Q 1:	0.0 %
Q 2:	0.2 %
Q 3:	13.5 %
Q 4:	32.4 %
Q 5:	38.7 %
Q 6:	15.2 %

Position Standard Deviation Percentages:

0.00 - 0.10 m:	0.0 %
0.10 - 0.30 m:	3.8 %
0.30 - 1.00 m:	15.9 %
1.00 - 5.00 m:	38.2 %
5.00 m + over:	42.1 %

Percentages of epochs with DD_DOP over 10.00:

DOP over Tol: 6.8 %

Baseline Distances:

Maximum: 6.983 (km)

Minimum: 0.047 (km)

Average: 1.658 (km)

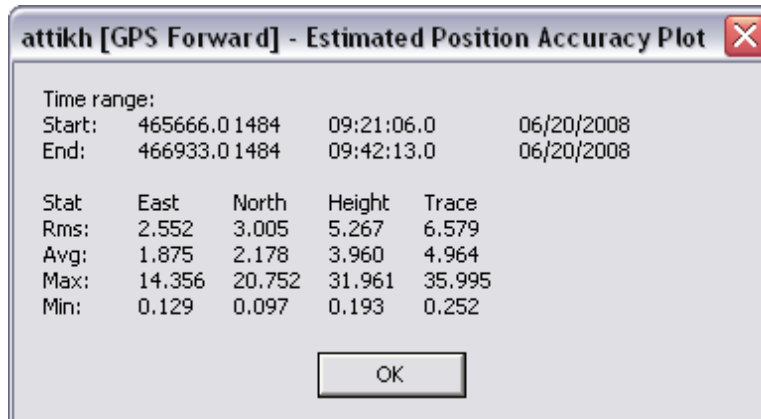
First Epoch: 0.047 (km)

Last Epoch: 0.943 (km)

Παρατηρούμε ότι υπάρχει μια κατανομή των σημείων στις Quality κατηγορίες με το μεγαλύτερο ποσοστό να βρίσκεται στις κατηγορίες Q4 και Q5 ενώ έχουμε σχεδόν μηδενικό ποσοστό στην κατηγορία Q2 (0.2%) και μηδενικό στην Q1.

Αυτό οριζοντιογραφικά μεταφράζεται ότι ο προσδιορισμός θέσης έγινε για το 16% των σημείων με ακρίβεια από 0.30-1.00m, για το 38% των σημείων με ακρίβεια από 1.00-5.00m ενώ για το 42% των σημείων με ακρίβεια 5.00m και άνω.

Τα στατιστικά της ακρίβειας εντοπισμού θέσης είναι:



εικόνα 6.4 - στατιστικά εκτίμησης ακρίβειας εντοπισμού θέσης

Παρατηρούμε ότι οριζοντιογραφικά οι τιμές East και North κυμαίνονται στα ίδια περίπου επίπεδα. Ενώ οι τιμές του υψομέτρου και trace είναι σε υψηλότερα επίπεδα.

Παρατηρώντας το διάγραμμα της ακρίβειας εντοπισμού θέσης (διάγραμμα 6.2) έχουμε ότι η τυπική απόκλιση ξεκινάει από μια τιμή 3.00m περίπου ενώ μειώνεται και σε 120sec έχει φτάσει 0.20m για το east και north και 0.30m για το height και trace.

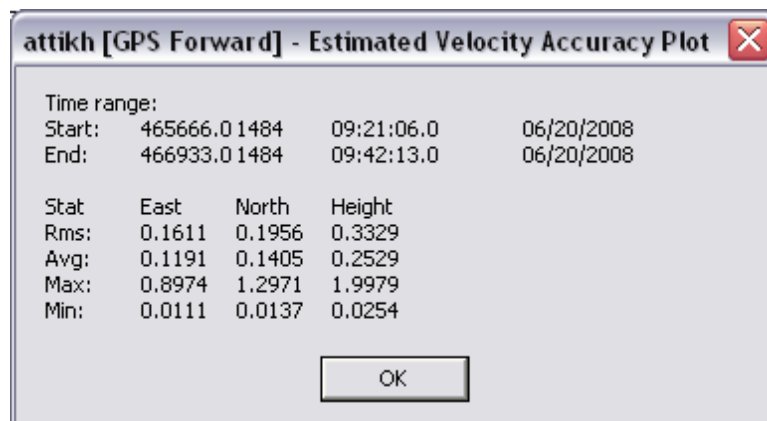
Παρατηρούμε δε ότι μετά από αυτές τις τιμές οι τυπικές αποκλίσεις εκτοξεύονται σε ένα εύρος τιμών από 1.5m έως και 10.00m οι οποίες εναλλάσσονται συνεχώς και σε πάρα πολύ μικρά διαστήματα.

Να σημειωθεί ότι τα πρώτα 120sec που παρατηρείται αυτή η μείωση των τυπικών αποκλίσεων είναι το διάστημα που το όχημα ήταν ακίνητο.

Ίδιας μορφής είναι και το διάγραμμα εκτίμησης ακρίβειας προσδιορισμού ταχύτητας (διάγραμμα 6.4). Γενικώς εκτός από ελάχιστες περιοχές τις περισσότερες χρονικές στιγμές η τυπική απόκλιση των τιμών, εκτός του εύρους των πρώτων 120sec, βρίσκεται σε πολύ καλά επίπεδα και κυμαίνεται από 0.10m/s έως 0.60m/s.

Καθ' όλη την διάρκεια της πορείας έχει σταθερά μεγαλύτερη ακρίβεια ο προσδιορισμός της ταχύτητας κατά east μετά κατά north και ακολουθεί ο προσδιορισμός κατά height.

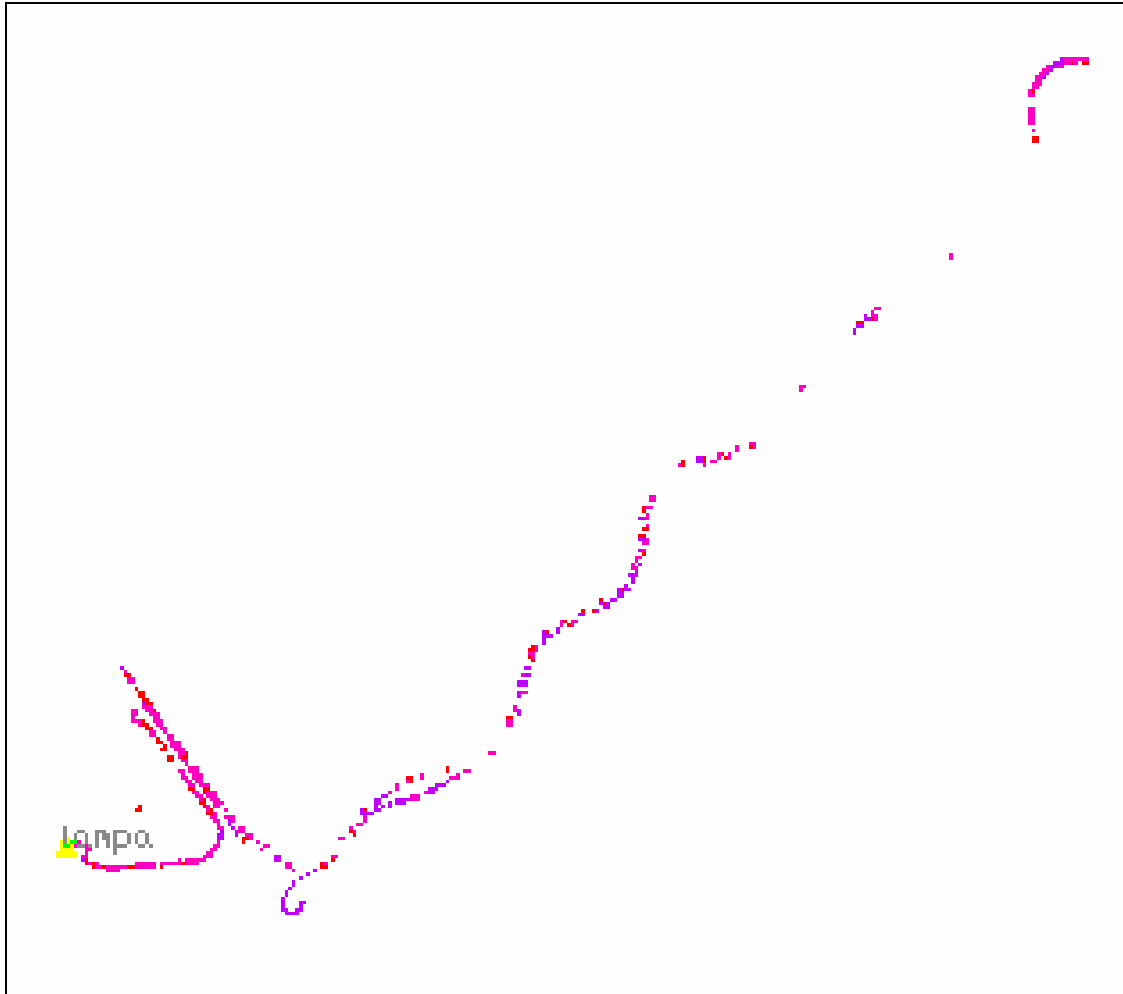
Αυτό φαίνεται και στα στατιστικά του προσδιορισμού της ταχύτητας στην παρακάτω εικόνα.



εικόνα 6.5 - στατιστικά εκτίμησης ακρίβειας προσδιορισμού θέσης

- **Επίλυση Επιστροφής (Revision GPS)**

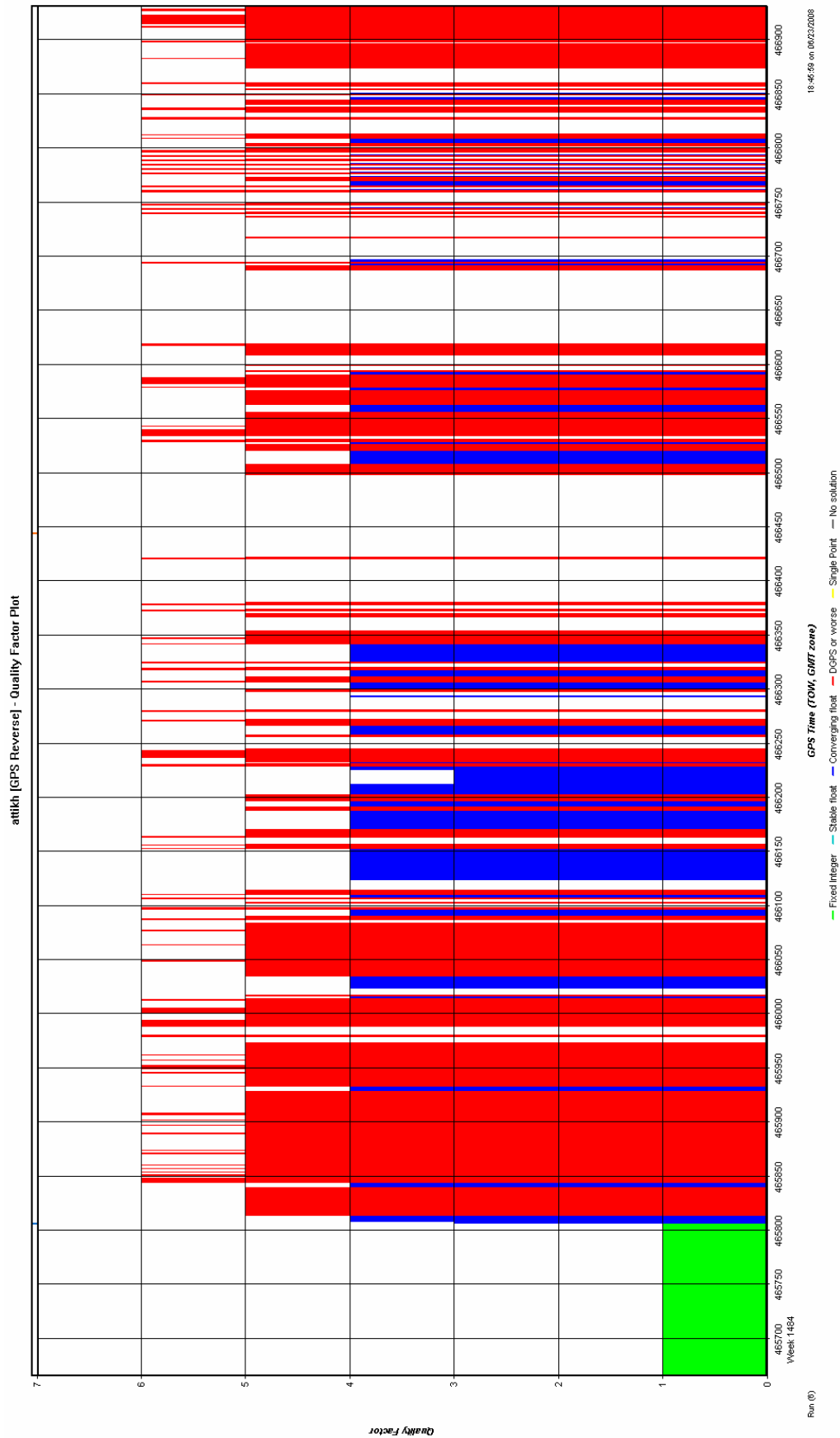
Το επόμενο στάδιο ήταν να επιλυθεί η ίδια πορεία με την μέθοδο της επιστροφής. Έτσι λοιπόν έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:



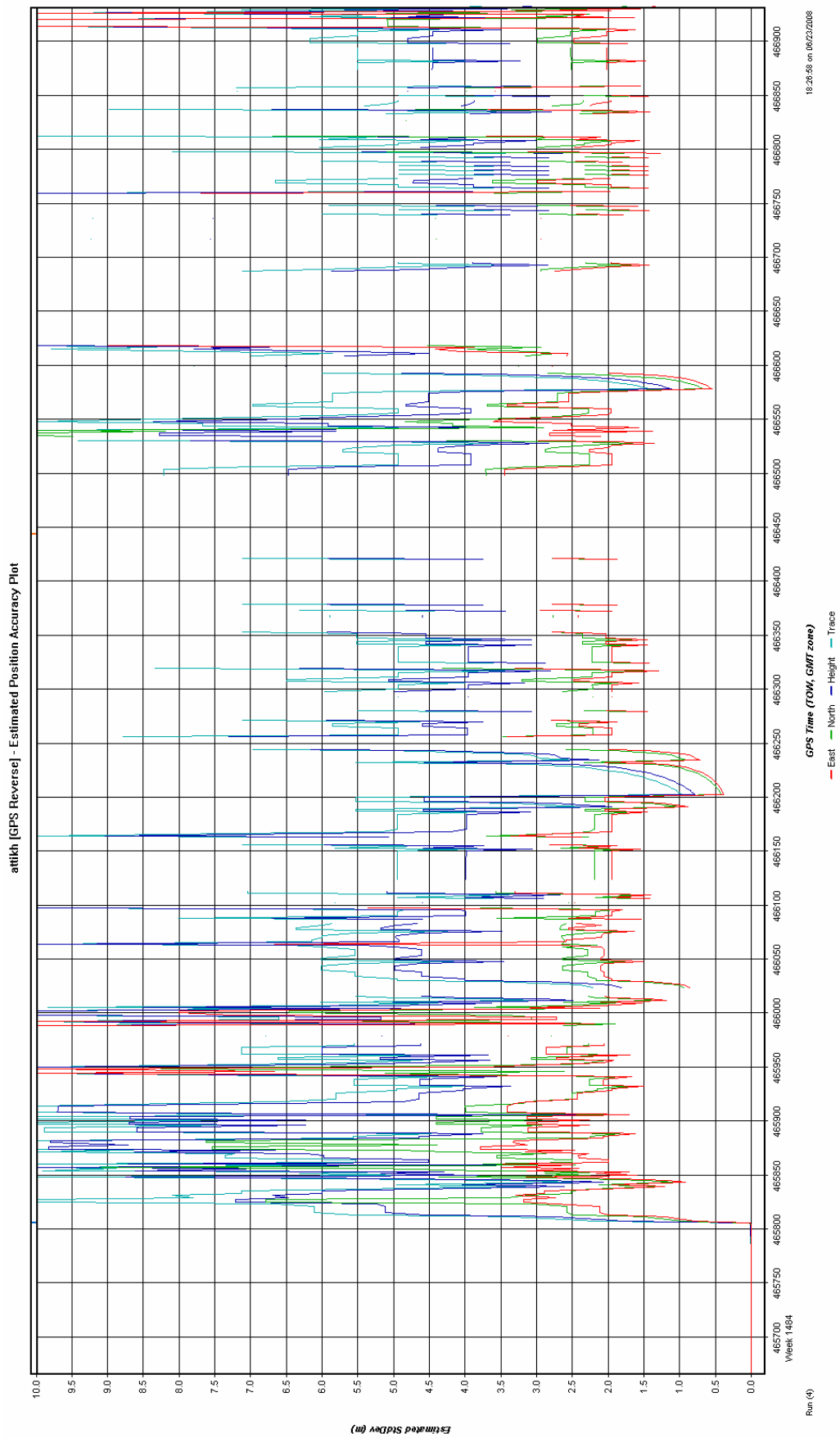
εικόνα 6.6 - Σχηματική αναπαράσταση επίλυσης rev-gps

Με μια πρώτη ματιά της εικόνας φαίνεται οι δυο λύσεις να έχουν περίπου την ίδια ακρίβεια (ίδιοι χρωματισμοί). Ακολουθούν τα διαγράμματα αντιστοίχως με την λύση fwd-gps και στην συνέχεια σχολιασμός αποτελεσμάτων και σύγκριση μεταξύ τους.

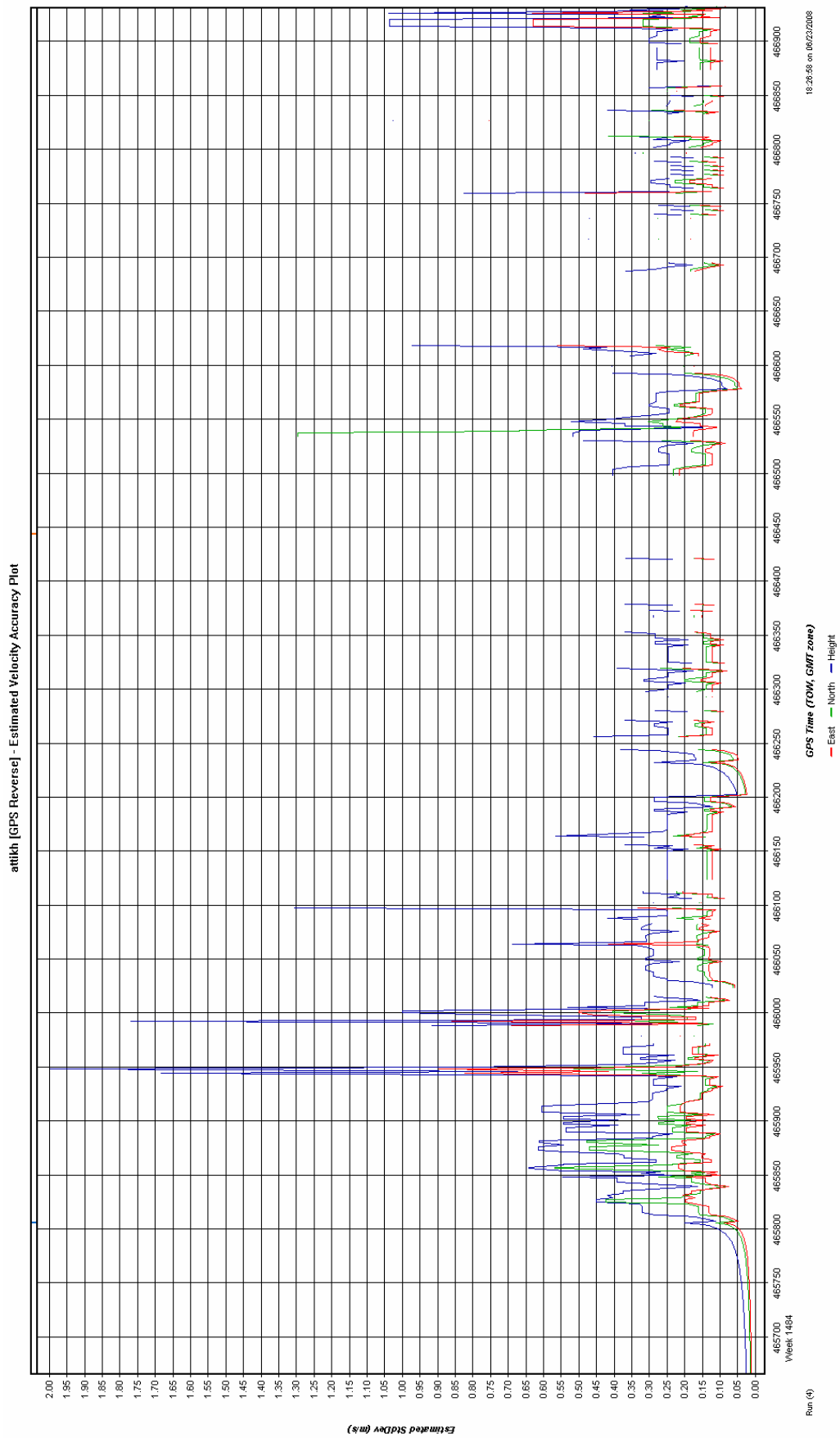
Διάγραμμα 6.4 - Quality Factor (rev GPS)



Διάγραμμα 6.5- Position Accuracy (rev GPS)



Διάγραμμα 6.6- Velocity Accuracy (rev GPS)



Παρατηρώντας το διάγραμμα 6.5 παρατηρούμε ότι στα πρώτα 120 sec είχαμε λύση *Fixed Integer* (την καλύτερη δυνατή), κατά το μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου η λύση μας ήταν της κατηγορίας DGPS με ένα μικρό ποσοστό διαστημάτων να ανήκει στην κατηγορία επίλυσης *Converging Float*.

Αναλυτικά τα αποτελέσματα της επίλυσης είναι:

Processing Summary Information

Solution Type: **Reverse**

Number of Epochs:

Total in GPB file: 1270

No processed position: 678

With bad C/A code: 0

With bad L1 Phase: 0

Measurement RMS Values:

L1 Phase: 0.0094 (m)

C/A Code: 24.79 (m)

L1 Doppler: 0.556 (m/s)

Quality Number Percentages:

Q 1: 23.8 %

Q 2: 0.0 %

Q 3: 2.4 %

Q 4: 19.4 %

Q 5: 36.1 %

Q 6: 18.2 %

Position Standard Deviation Percentages:

0.00 - 0.10 m: 24.0 %

0.10 - 0.30 m: 0.0 %

0.30 - 1.00 m: 0.3 %

1.00 - 5.00 m: 34.8 %

5.00 m + over: 40.9 %

Percentages of epochs with DD_DOP over 10.00:

DOP over Tol: 6.4 %

Baseline Distances:

Maximum: 6.499 (km)

Minimum: 0.047 (km)

Average: 1.643 (km)

First Epoch: 0.048 (km)

Last Epoch: 0.944 (km)

Παρατηρούμε ότι υπάρχει μια κατανομή των σημείων στις Quality κατηγορίες με το μεγαλύτερο ποσοστό να βρίσκεται στις κατηγορίες Q4 και Q5 ενώ έχουμε σχεδόν μηδενικό ποσοστό στην κατηγορία Q3 (0.3%) και μηδενικό στην Q2 και σε αντίθεση με την μετάβαση αρκετά μεγάλο ποσοστό στην κατηγορία Q1(24.00%).

Αυτό οριζοντιογραφικά μεταφράζεται ότι ο προσδιορισμός θέσης έγινε για το 24% των σημείων με ακρίβεια από 0.00-0.10μ, για το 35% των σημείων με ακρίβεια από 1.00-5.00m ενώ για το 41% των σημείων με ακρίβεια 5.00m και άνω.

Τα στατιστικά της ακρίβειας εντοπισμού θέσης είναι:

attikh [GPS Reverse] - Estimated Position Accuracy Plot				
Time range:				
Start:	465665.01484	09:21:05.0	06/20/2008	
End:	466932.01484	09:42:12.0	06/20/2008	
Stat	East	North	Height	Trace
Rms:	2.540	2.807	5.200	6.432
Avg:	1.775	2.019	3.744	4.669
Max:	14.356	20.752	31.961	35.995
Min:	0.001	0.001	0.002	0.003

εικόνα 6.4 - στατιστικά εκτίμησης ακρίβειας εντοπισμού θέσης

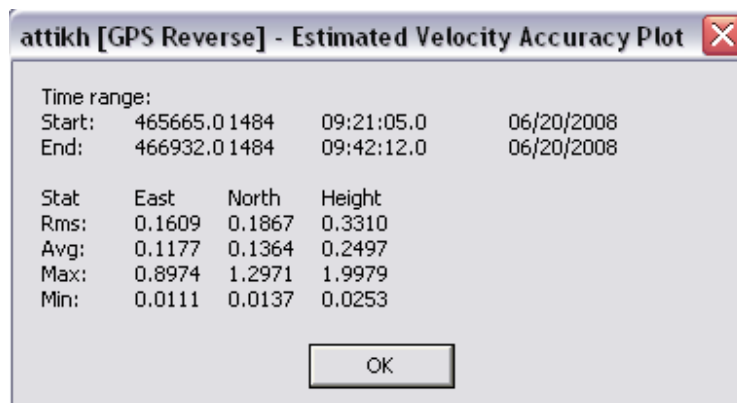
Παρατηρούμε ότι οριζοντιογραφικά οι τιμές East και North κυμαίνονται στα ίδια περίπου επίπεδα. Ενώ οι τιμές του υψομέτρου και trace είναι σε υψηλότερα επίπεδα.

Παρατηρώντας το διάγραμμα της ακρίβειας εντοπισμού θέσης (διάγραμμα 6.6) βλέπουμε τα αποτελέσματα που αναμέναμε. Η τυπική απόκλιση για east, north, height και trace ξεκινάει από τιμή μηδενική και μετά τα 120sec οι τυπικές αποκλίσεις εκτοξεύονται σε ένα εύρος τιμών από 1.5m έως και 10.00m οι οποίες εναλλάσσονται συνεχώς και σε πάρα πολύ μικρά διαστήματα.

Ίδιας μορφής είναι και το διάγραμμα εκτίμησης ακρίβειας προσδιορισμού ταχύτητας (διάγραμμα 6.8). Γενικώς εκτός από ελάχιστες περιοχές τις περισσότερες χρονικές στιγμές η τυπική απόκλιση των τιμών, εκτός του εύρους των πρώτων 120sec, βρίσκεται σε πολύ καλά επίπεδα και κυμαίνεται από 0.10m/s έως 0.60m/s.

Καθ' όλη την διάρκεια της πορείας έχει σταθερά μεγαλύτερη ακρίβεια ο προσδιορισμός της ταχύτητας κατά east μετά κατά north και ακολουθεί ο προσδιορισμός κατά height.

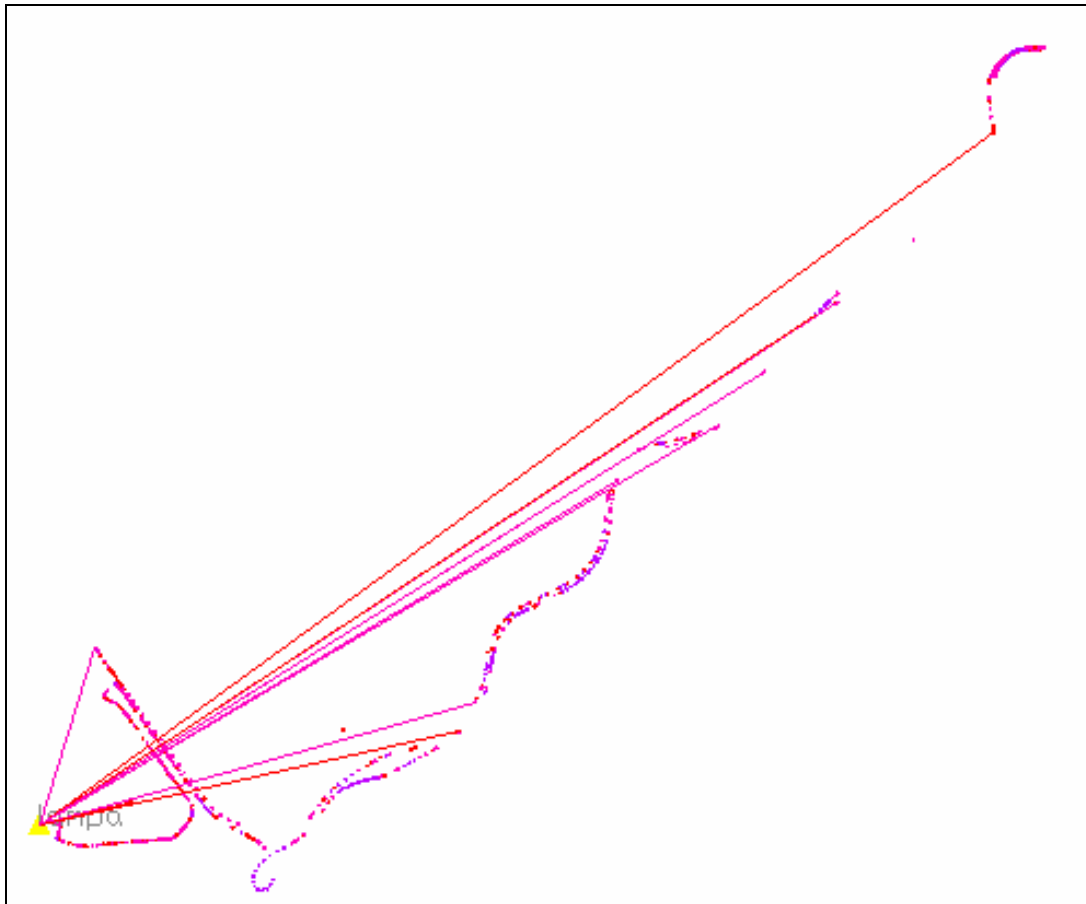
Αυτό φαίνεται και στα στατιστικά του προσδιορισμού της ταχύτητας στην παρακάτω εικόνα. Παρατηρούμε ότι τα στατιστικά της επιστροφής είναι σχεδόν όμοια με τα στατιστικά της μετάβασης.



εικόνα 6.7 - στατιστικά εκτίμησης ακρίβειας προσδιορισμού θέσης

- **Επίλυση συνδυασμού (Combined GPS)**

Το επόμενο στάδιο ήταν να επιλυθεί η ίδια πορεία με την μέθοδο του συνδυασμού μετάβασης και επιστροφής. Έτσι λοιπόν έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

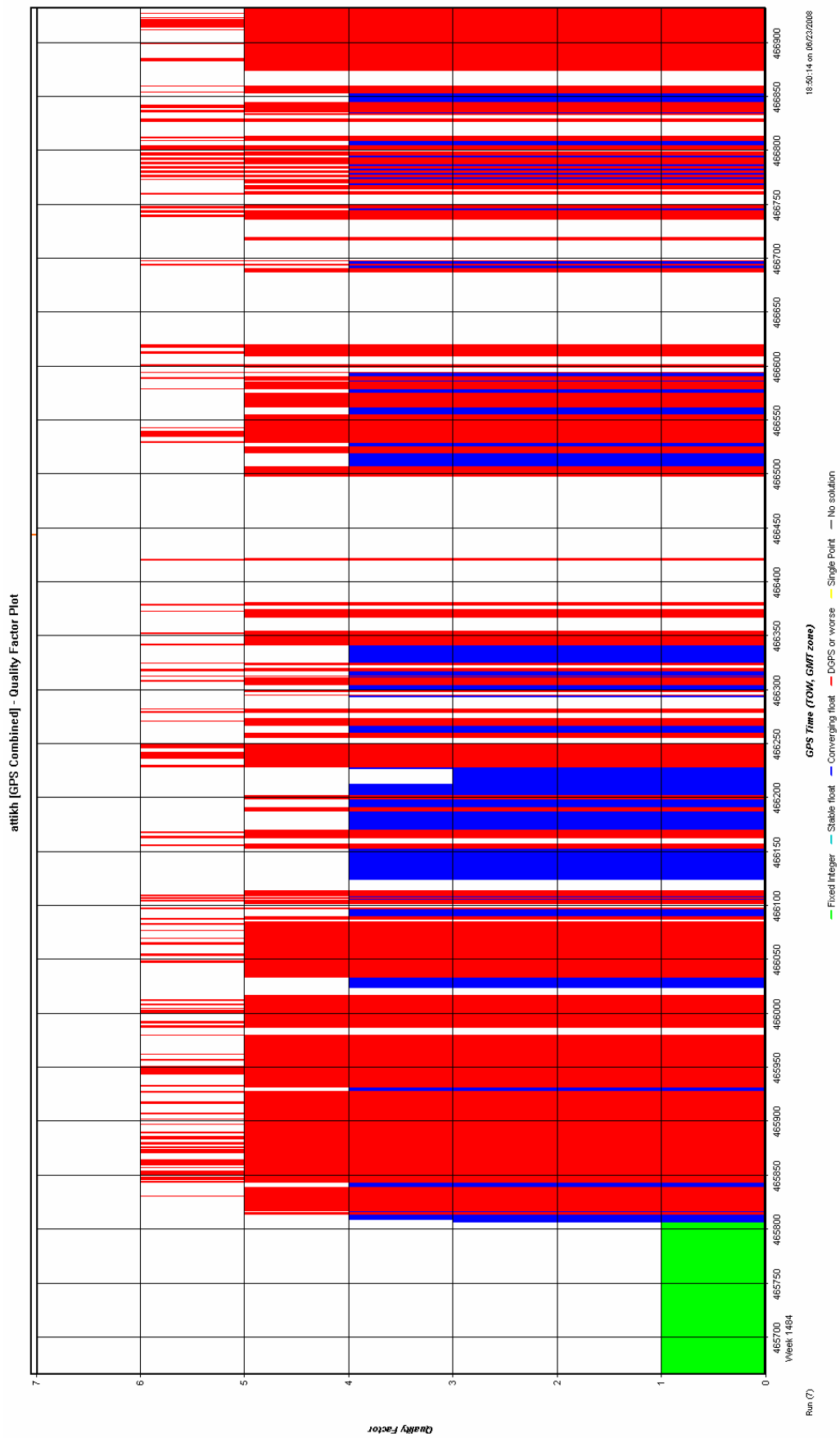


εικόνα 6.8 - Σχηματική αναπαράσταση επίλυσης combined-gps

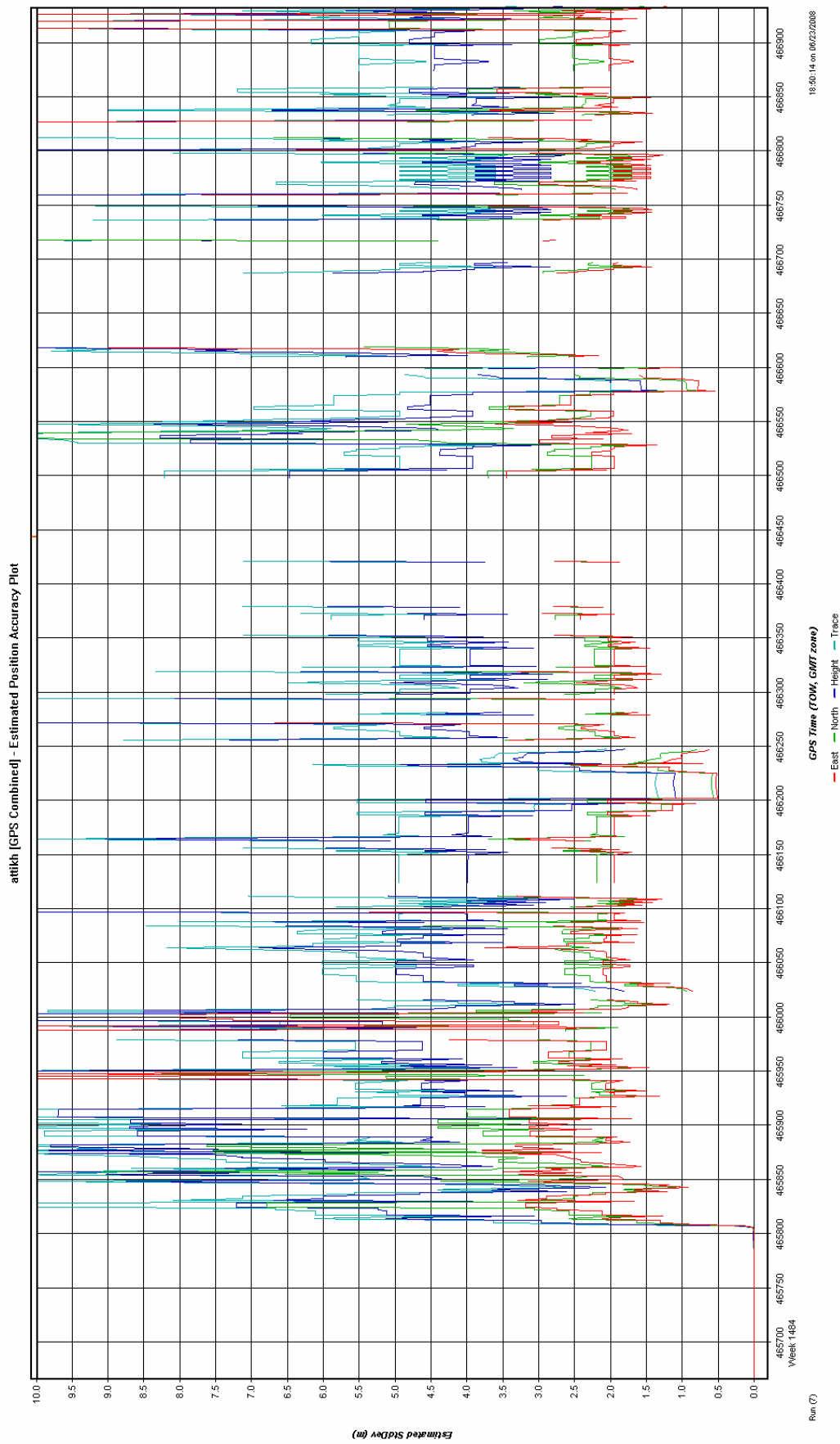
Με μια πρώτη ματιά της εικόνας φαίνεται ότι και η λύση του συνδυασμού έχει περίπου την ίδια ακρίβεια (ίδιοι χρωματισμοί) με τις επιμέρους επιλύσεις. Παρατηρούμε βέβαια ότι έχουν επιλυθεί αρκετές βάσεις από το σταθερό δέκτη του πολυτεχνείου και αυτό μας κάνει να αναμένουμε καλύτερα αποτελέσματα από τις δυο προηγούμενες επιλύσεις.

Ακολουθούν τα διαγράμματα επίλυσης και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

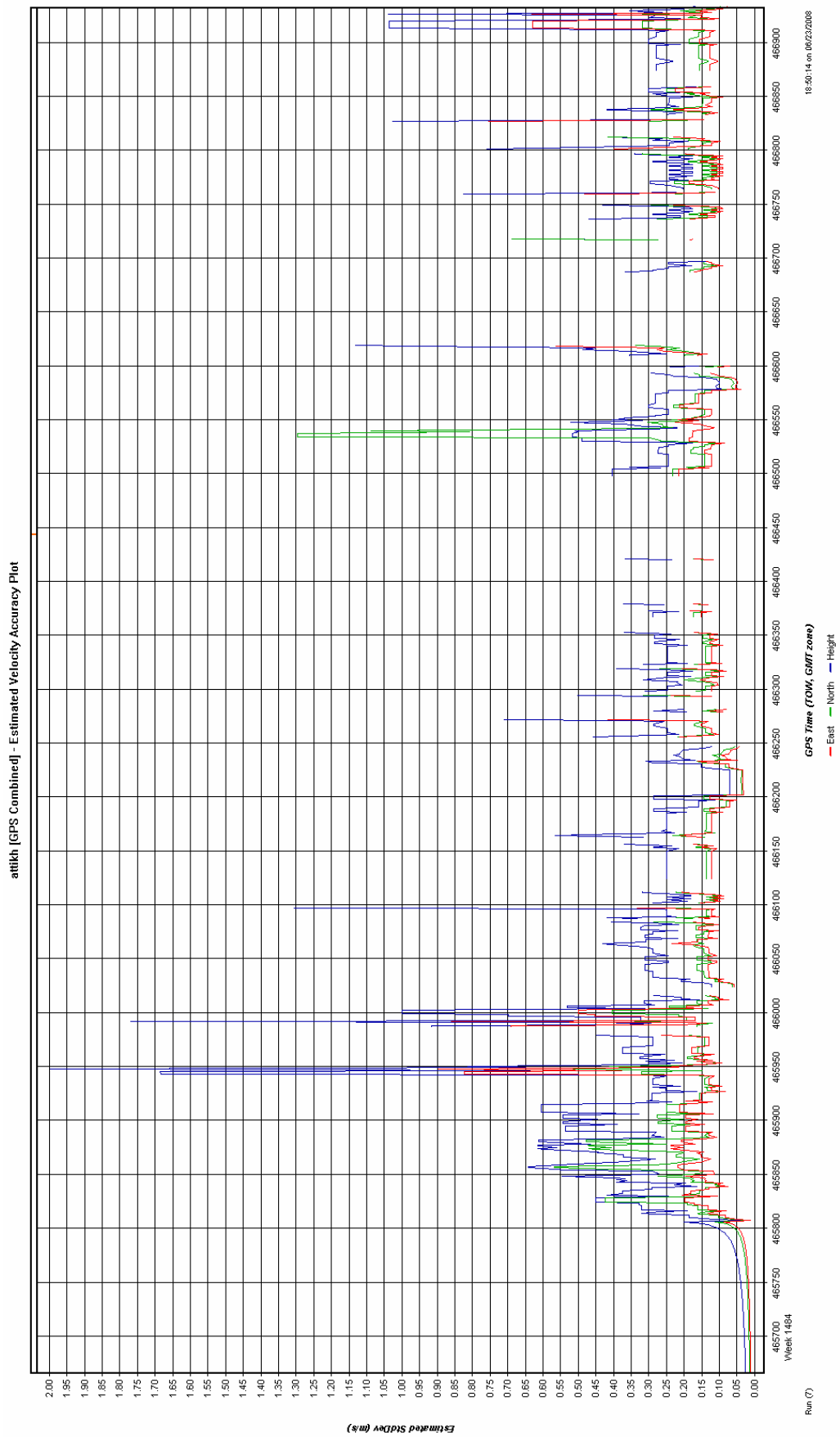
Διάγραμμα 6.7 - Quality Factor (combined GPS)



Διάγραμμα 6.8- Position Accuracy (combined GPS)



Διάγραμμα 6.9 - Velocity Accuracy (combined GPS)



Παρατηρώντας το διάγραμμα 6.5 παρατηρούμε ότι στα πρώτα 120sec της ακινησίας του οχήματος η επίλυση των σημείων ανήκει στην κατηγορία *Fixed Integer*, ένα μικρό ποσοστό ανήκει στην κατηγορία *Converging Float* ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό των επιλύσεων ανήκει στην κατηγορία DGPS.

Αναλυτικά τα αποτελέσματα της επίλυσης είναι:

Processing Summary Information	
Program: Inertial Explorer	
Solution Type: <u>Combined Fwd/Rev</u>	
Number of Epochs:	
Total in GPB file:	1270
No processed position:	478
Missing Fwd or Rev:	408
With bad C/A code:	0
With bad L1 Phase:	0
Measurement RMS Values:	
L1 Phase:	0.2819 (m)
C/A Code:	25.39 (m)
L1 Doppler:	0.648 (m/s)
Fwd/Rev Separation RMS Values:	
East:	19.647 (m)
North:	17.237 (m)
Height:	351.892 (m)
Fwd/Rev Sep. RMS for 25%-75% weighting (215 occurrences):	
East:	26.238 (m)
North:	23.008 (m)
Height:	470.274 (m)

Quality Number Percentages:

Q 1:	17.8 %
Q 2:	0.0 %
Q 3:	2.0 %
Q 4:	20.7 %
Q 5:	38.9 %
Q 6:	20.6 %

Position Standard Deviation Percentages:

0.00 - 0.10 m:	17.9 %
0.10 - 0.30 m:	0.0 %
0.30 - 1.00 m:	0.1 %
1.00 - 5.00 m:	37.8 %
5.00 m + over:	44.2 %

Percentages of epochs with DD_DOP over 10.00:

DOP over Tol:	7.3 %
---------------	-------

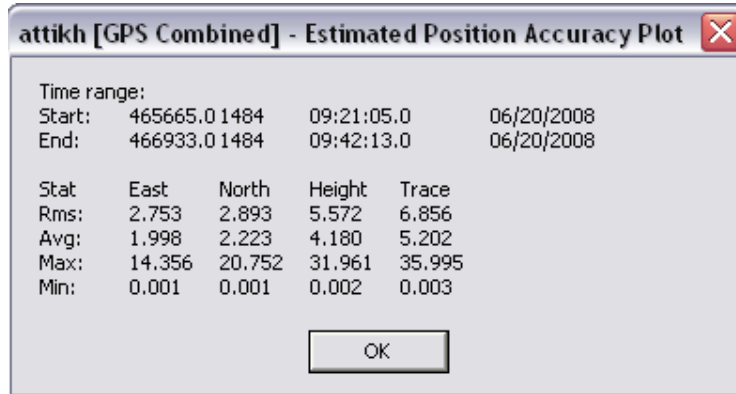
Baseline Distances:

Maximum:	6.499 (km)
Minimum:	0.047 (km)
Average:	1.820 (km)
First Epoch:	0.048 (km)
Last Epoch:	0.944 (km)

Παρατηρούμε ότι υπάρχει μια κατανομή των σημείων στις Quality κατηγορίες με το μικρότερο ποσοστό να βρίσκεται στην κατηγορία Q3 ενώ έχουμε μηδενικό ποσοστό στην κατηγορία Q2.

Αυτό οριζοντιογραφικά μεταφράζεται ότι ο προσδιορισμός θέσης έγινε για το 18% των σημείων με ακρίβεια από 0.00-0.10m, για το 38% των σημείων με ακρίβεια από 1.00-5.00m ενώ για το 44% των σημείων με ακρίβεια 5.00m και άνω.

Τα στατιστικά της ακρίβειας εντοπισμού θέσης είναι:



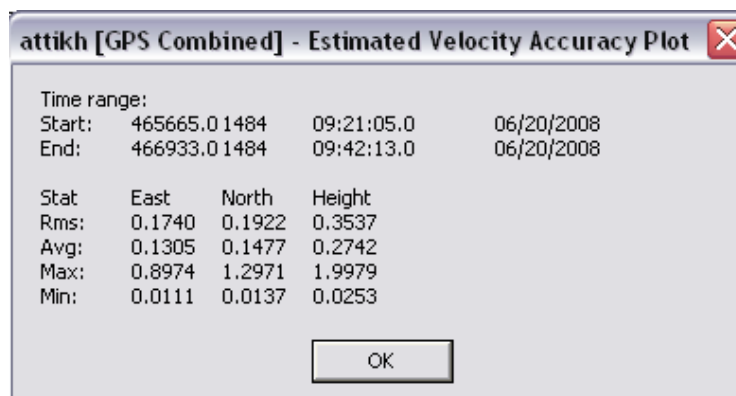
εικόνα 6.9 - στατιστικά εκτίμησης ακρίβειας εντοπισμού θέσης

Παρατηρούμε ότι οριζοντιογραφικά οι τιμές East και North κυμαίνονται στα ίδια περίπου επίπεδα. Ενώ οι τιμές του υψομέτρου και trace είναι σε υψηλότερα επίπεδα.

Παρατηρώντας το διάγραμμα της ακρίβειας εντοπισμού θέσης (διάγραμμα 6.10) βλέπουμε τα αποτελέσματα που αναμέναμε. Η τυπική απόκλιση για east, north, height και trace ξεκινάει από τιμή μηδενική και μετά τα 120sec οι τυπικές αποκλίσεις ακολουθούν τις τιμές των δυο πρώτων επιλύσεων και κυμαίνονται σε ένα εύρος τιμών από 1.5m έως και 10.00m.

Ίδιας μορφής είναι και το διάγραμμα εκτίμησης ακρίβειας προσδιορισμού ταχύτητας (διάγραμμα 6.12). Αναμενόμενο και το διάγραμμα αυτό, ακολουθεί φυσικά την μορφή των αντίστοιχων διαγραμμάτων των δυο προηγούμενων επιλύσεων. Έτσι εκτός από ελάχιστες περιοχές τις περισσότερες χρονικές στιγμές η τυπική απόκλιση των τιμών, εκτός του εύρους των πρώτων 120sec, βρίσκεται σε πολύ καλά επίπεδα και κυμαίνεται από 0.10m/s έως 0.60m/s.

Καθ' όλη την διάρκεια της πορείας όπως φαίνεται και στα στατιστικά που ακολουθούν έχει σταθερά μεγαλύτερη ακρίβεια ο προσδιορισμός της ταχύτητας κατά east μετά κατά north και ακολουθεί ο προσδιορισμός κατά height.

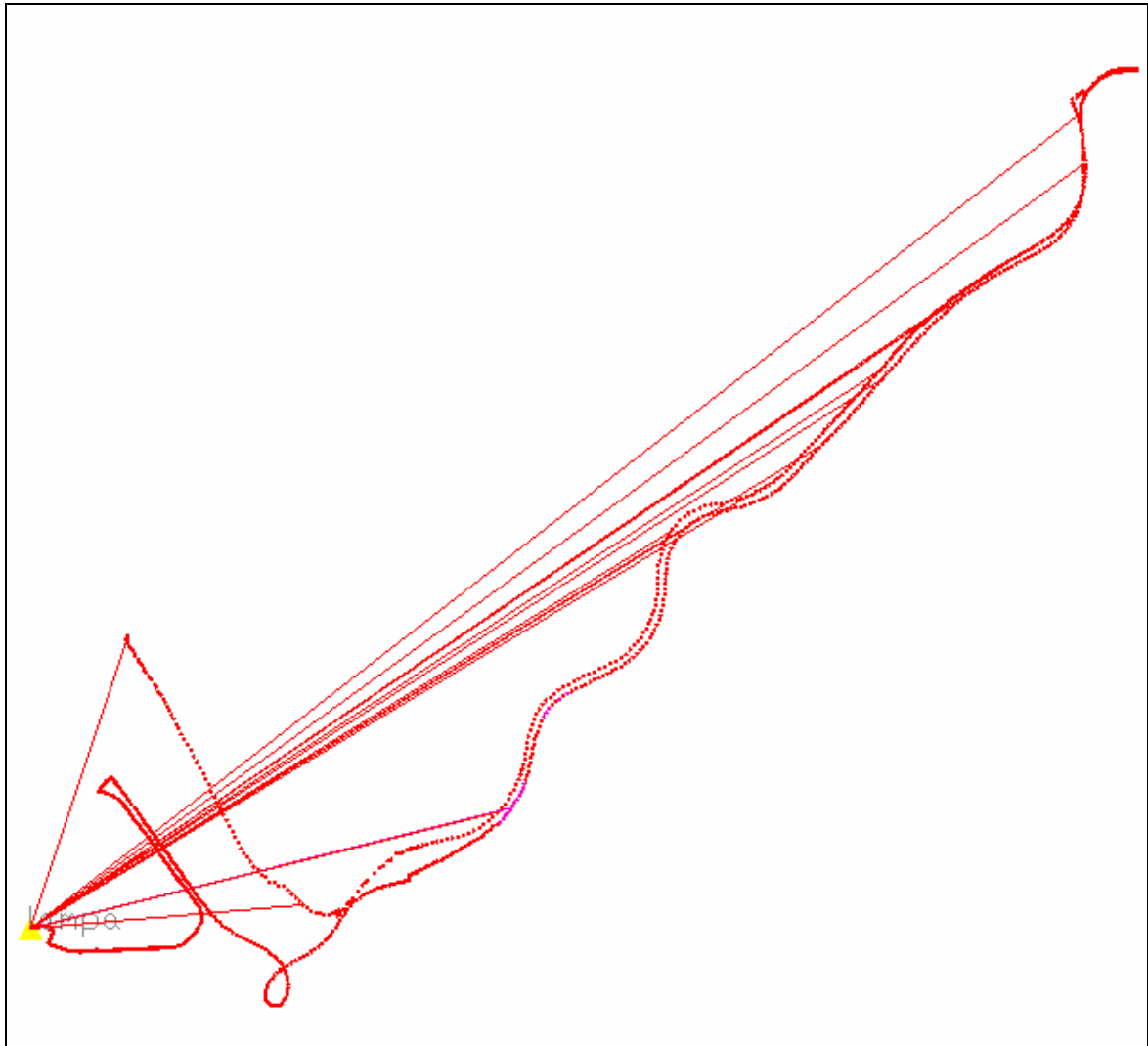


εικόνα 6.10 - στατιστικά εκτίμησης ακρίβειας προσδιορισμού θέσης

② Επιλύσεις GPS/IMU

- Επίλυση Μετάβασης (Forward IMU)

Το πρώτο στάδιο ήταν να επιλυθεί η πορεία με την λύση του αδρανειακού συστήματος και η λύση του μας έδωσε το αποτέλεσμα που φαίνεται παραστατικά στο παρακάτω σχήμα.

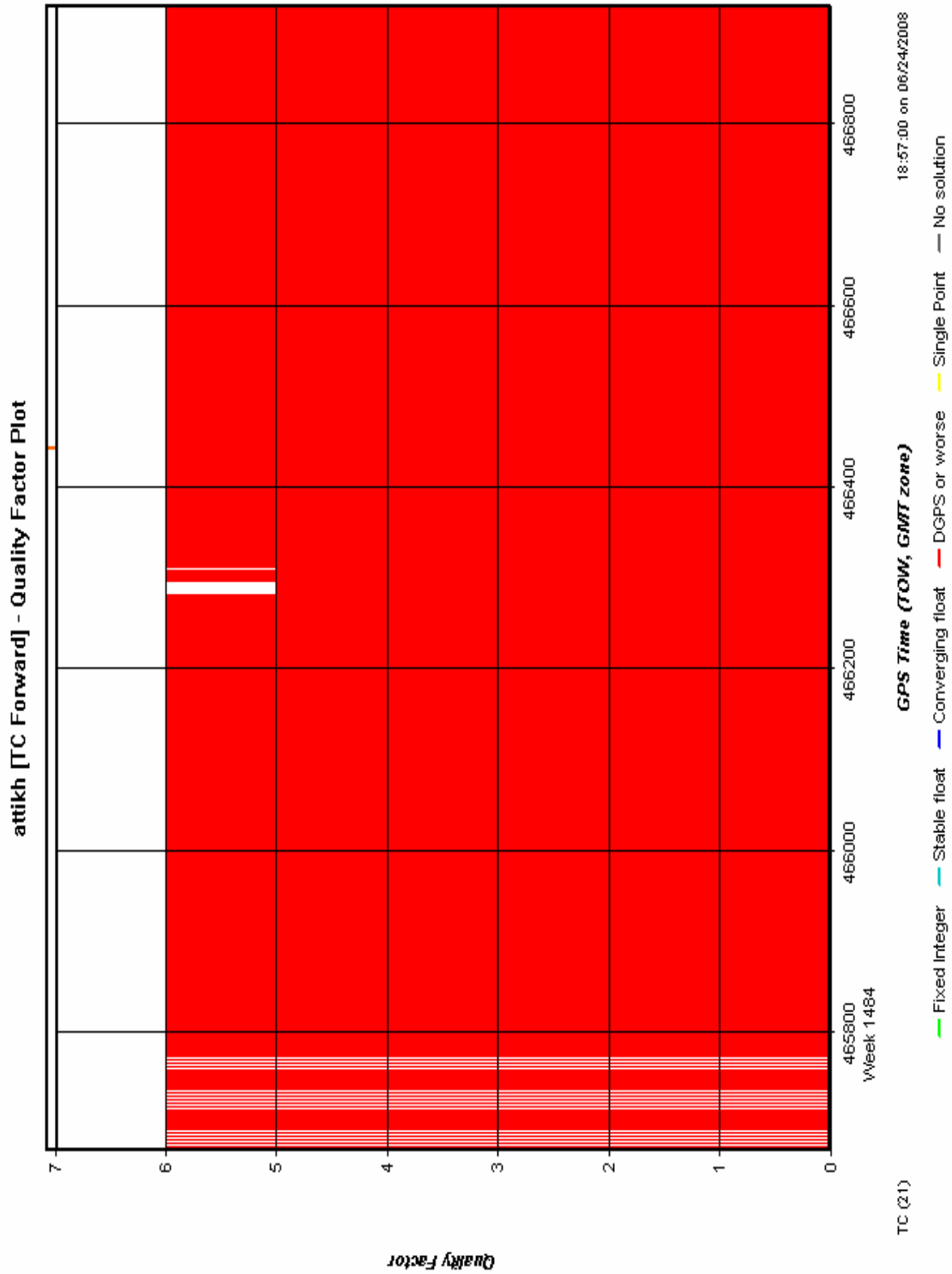


εικόνα 6.11 - Σχηματική αναπαράσταση επίλυσης fwd_IMU

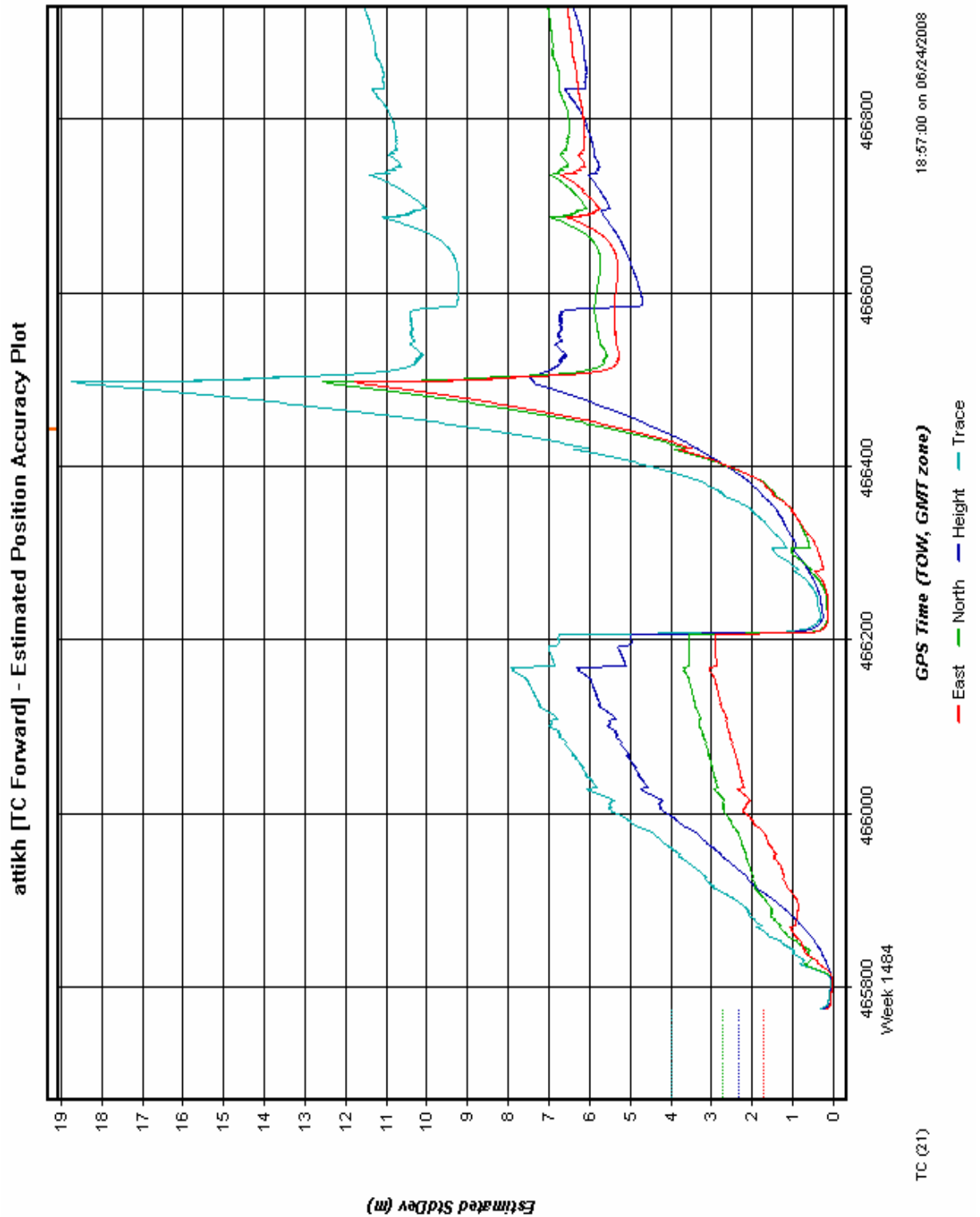
Με μια πρώτη ματιά διακρίνουμε καταρχήν ότι η λύση είναι συνεχόμενη χωρίς κενά άρα το αδρανειακό κατέγραφε χωρίς πρόβλημα. Παρατηρούμε επίσης ποιότητα μετρήσεων περίπου της ίδιας ακρίβειας με την λύση του δορυφορικού συστήματος.

Ακολουθούν τα διαγράμματα επίλυσης και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

Διάγραμμα 6.10 - Quality Factor (fwd IMU)

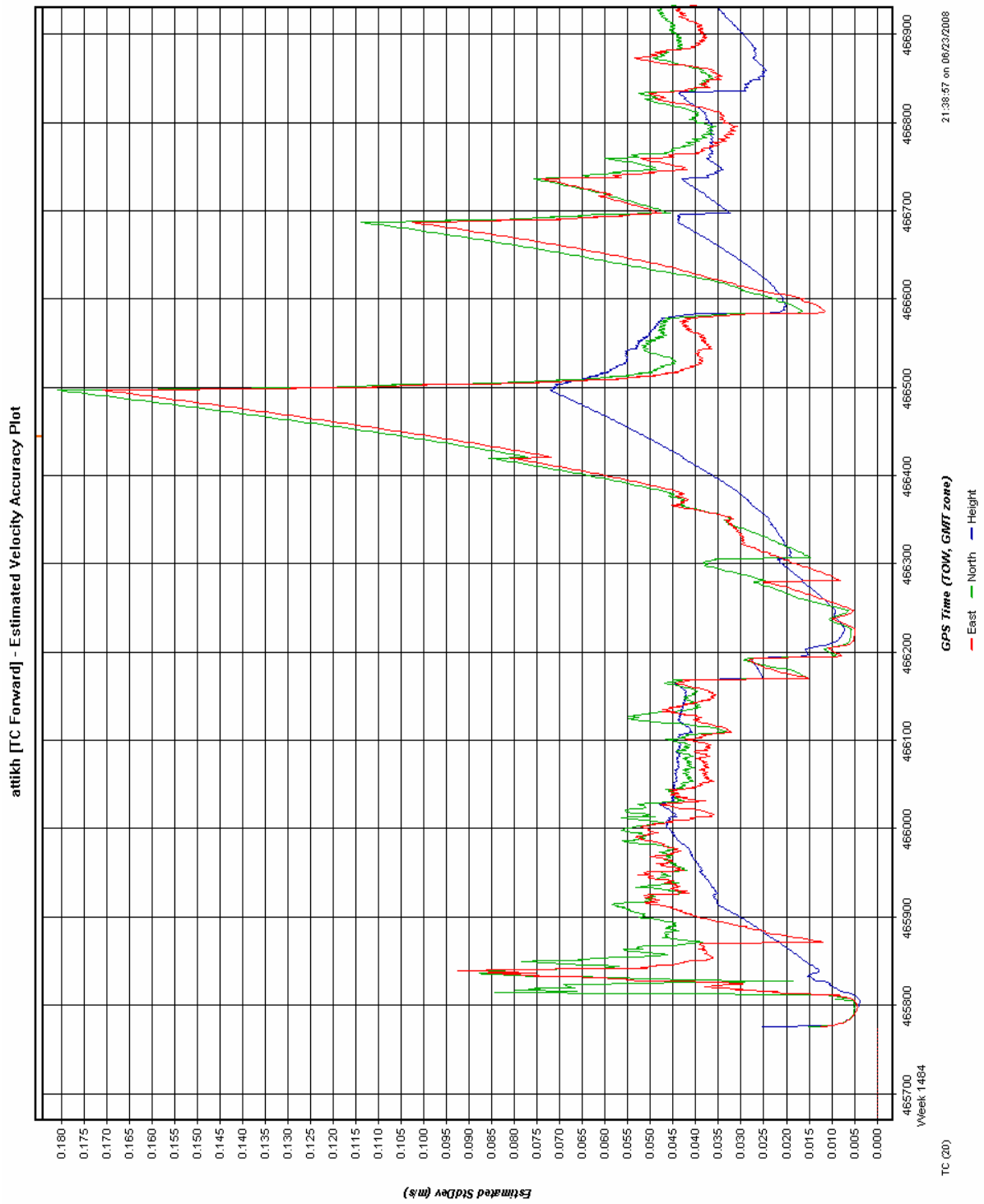


Διάγραμμα 6.11 - Position Accuracy (fwd IMU)

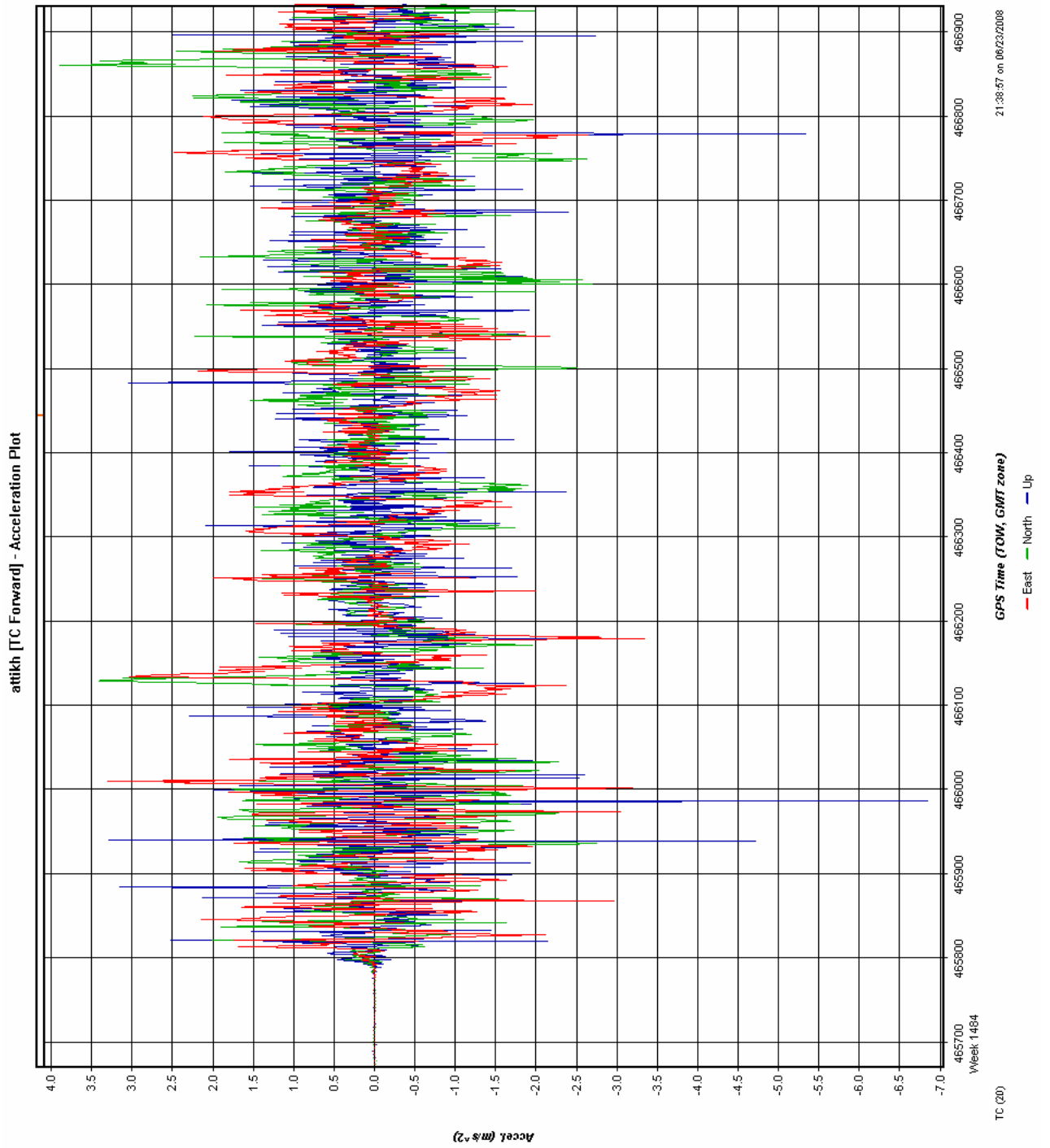


TC (21)

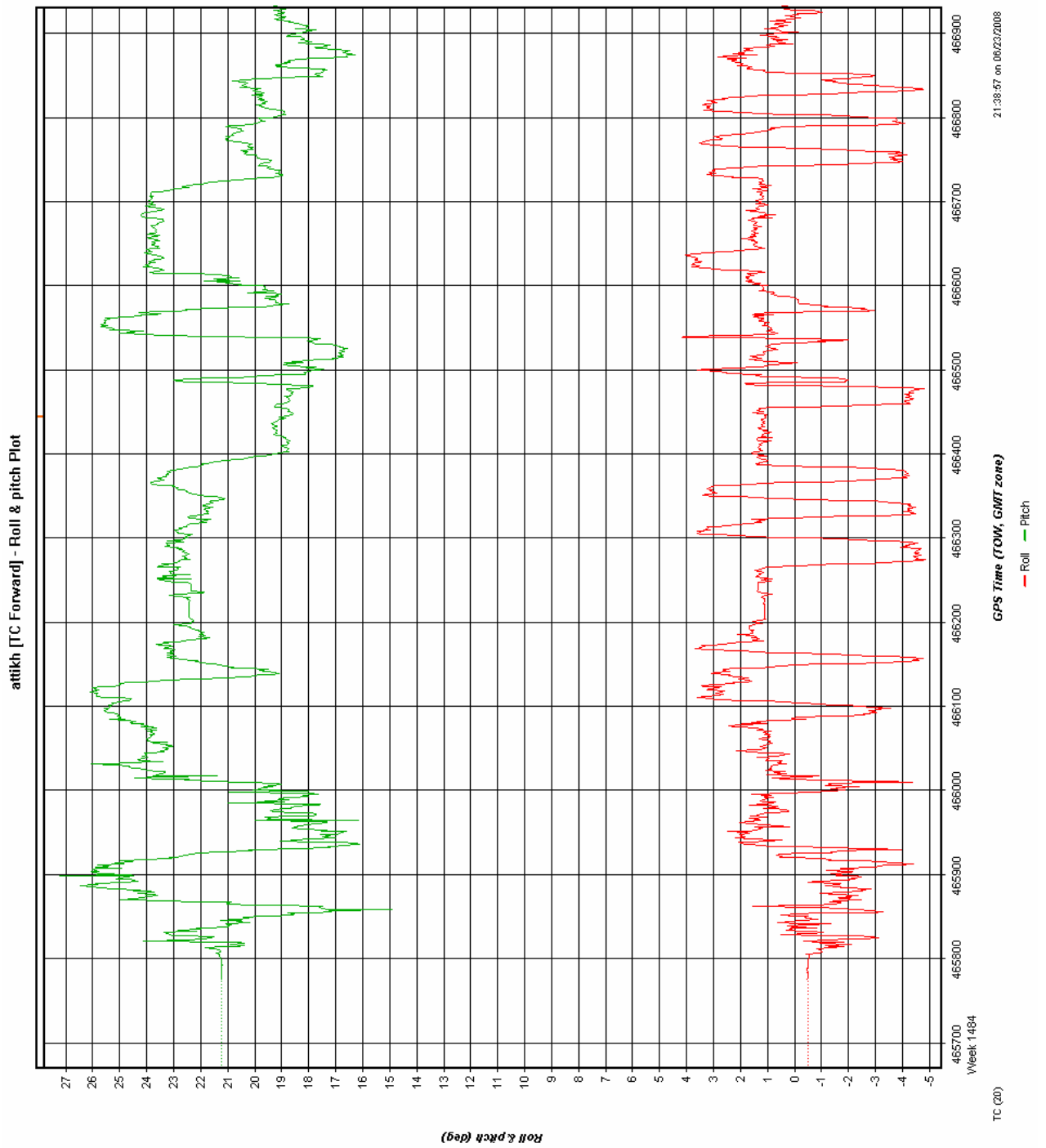
Διάγραμμα 6.12 - Velocity Accuracy (fwd IMU)



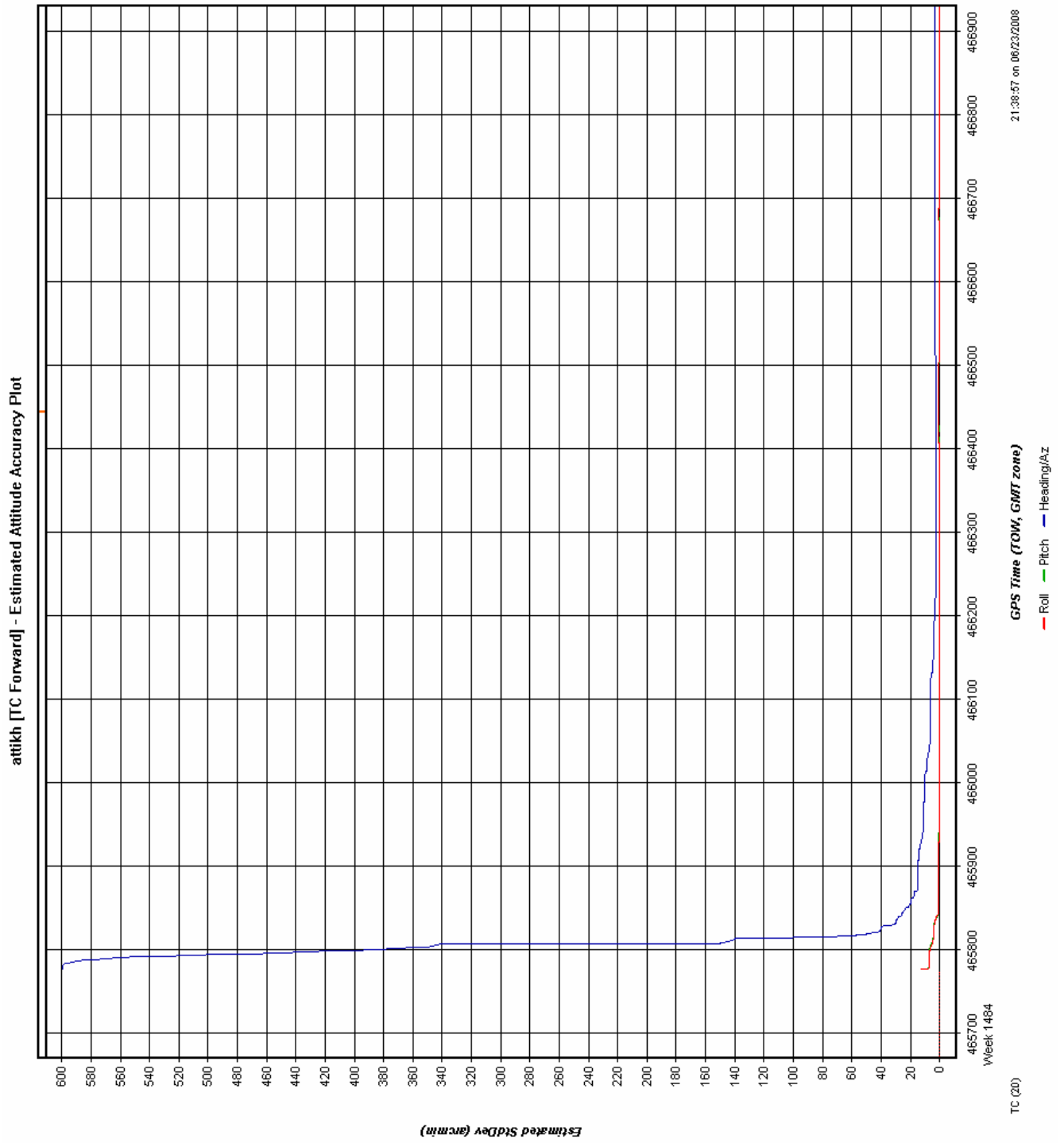
Διάγραμμα 6.13- Acceleration (fwd IMU)



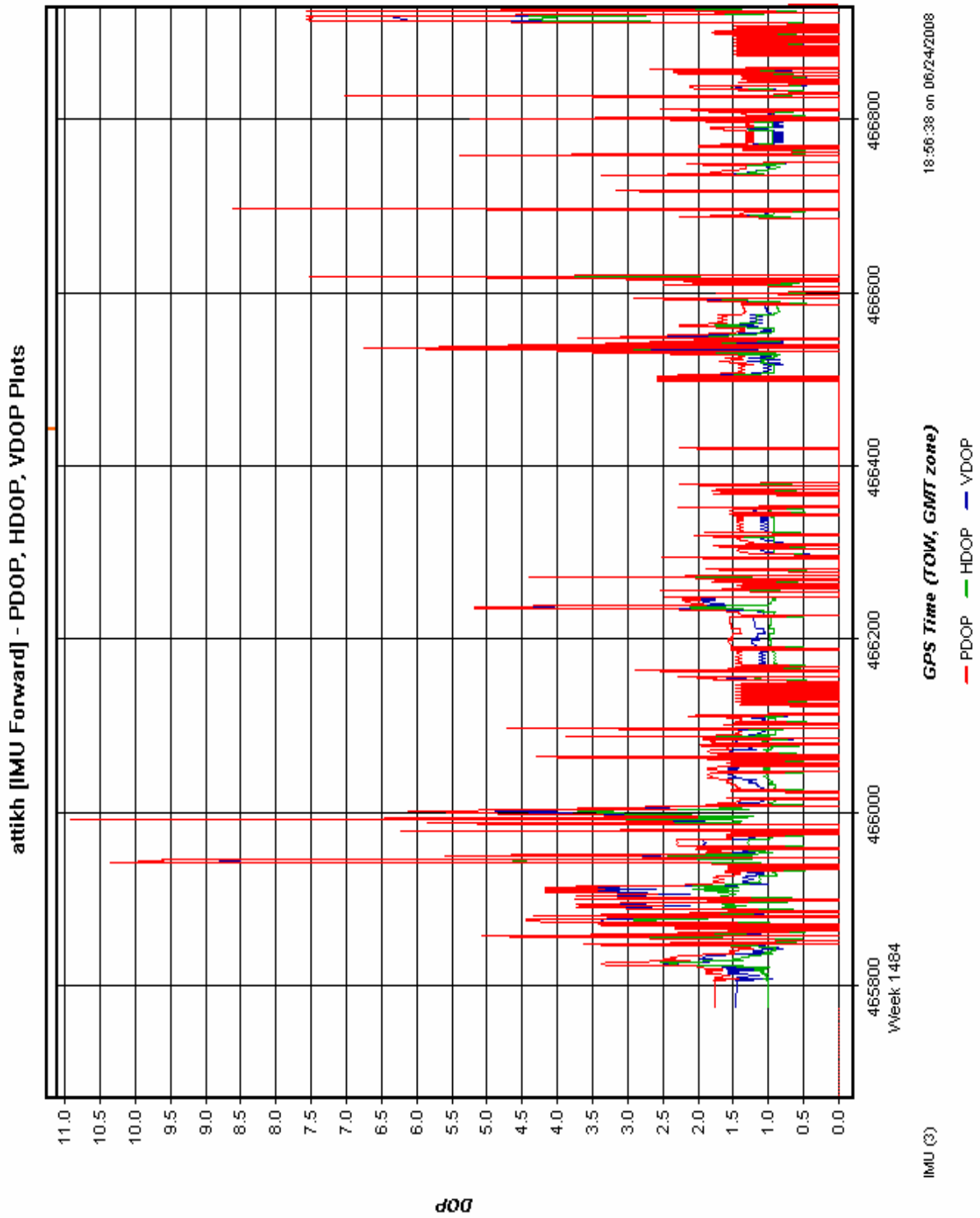
Διάγραμμα 6.14 - Roll and Pitch (fwd IMU)



Διάγραμμα 6.15- Attitude Accuracy (fwd IMU)



Διάγραμμα 6.16- Dop (fwd IMU)



Παρατηρώντας το διάγραμμα 6.10 παρατηρούμε ότι οι επιλύσεις των σημείων, σε αντίθεση με τις επιλύσεις του δορυφορικού, ανήκουν σε μια μόνο κατηγορία (DGPS).

Αναλυτικά τα αποτελέσματα της επίλυσης είναι:

Processing Summary Information

Program: Inertial Explorer

Solution Type: **Forward IMU**

Number of Epochs:

Total in GPB file: 1270

No processed position: 86

With bad C/A code: 0

With bad L1 Phase: 0

Measurement RMS Values:

L1 Phase: 0.3809 (m)

C/A Code: 25.15 (m)

L1 Doppler: 0.698 (m/s)

Quality Number Percentages:

Q 1: 0.0 %

Q 2: 0.0 %

Q 3: 0.0 %

Q 4: 0.0 %

Q 5: 1.4 %

Q 6: 98.6 %

Position Standard Deviation Percentages:

0.00 - 0.10 m: 1.7 %

0.10 - 0.30 m: 1.9 %

0.30 - 1.00 m: 8.4 %

1.00 - 5.00 m: 25.4 %

5.00 m + over: 62.7 %

Percentages of epochs with DD_DOP over 10.00:

DOP over Tol: 3.3 %

Baseline Distances:

Maximum: 6.464 (km)

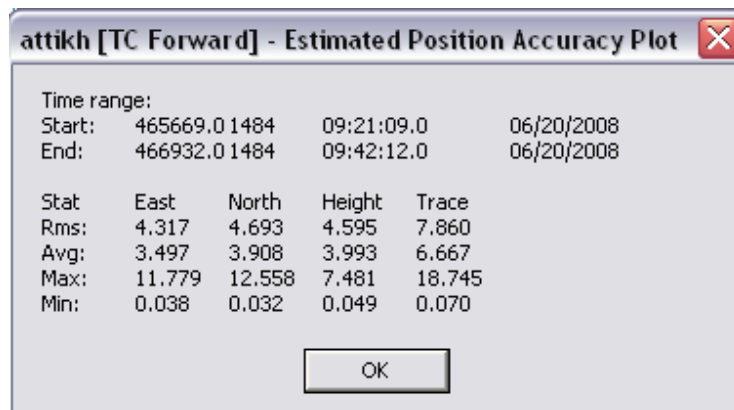
Minimum: 0.001 (km)

Average: 2.667 (km)

First Epoch: 0.001 (km)

Last Epoch: 2.392 (km)

Παρατηρούμε ότι το 98.6% των σημείων ανήκουν στην κατηγορία Q6 και μόλις το 1.4% ανήκει στην κατηγορία Q5. Αυτό οριζοντιογραφικά μεταφράζεται ότι ο προσδιορισμός θέσης έγινε για το 1.7% των σημείων με ακρίβεια από 0.00-0.10m, για το 1.9% των σημείων με ακρίβεια από 0.10-0.30, για το 8.4% από 0.30-1.00m, για το 25.4% από 1.00-5.00m ενώ για το 62.7% των σημείων με ακρίβεια 5.00m και άνω. Τα στατιστικά της ακρίβειας εντοπισμού θέσης είναι:



εικόνα 6.12 - στατιστικά εκτίμησης ακρίβειας εντοπισμού θέσης

Παρατηρούμε ότι οριζοντιογραφικά οι τιμές East και North και Height κυμαίνονται στα ίδια περίπου επίπεδα σε αντίθεση με τις προηγούμενες επιλύσεις όπου η λύση του υψομέτρου είχε αισθητή διαφορά.

Παρατηρώντας το διάγραμμα της ακρίβειας εντοπισμού θέσης (διάγραμμα 6.11) βλέπουμε τα αποτελέσματα που αναμέναμε από την βιβλιογραφία. Η ακρίβεια προσδιορισμού θέσης όσο καταγράφει μόνο το IMU (σήραγγα) μειώνεται με την πάροδο του χρόνου ενώ έρχεται σε καλά επίπεδα όταν έχει παρατηρήσεις από το GPS. Έτσι διακρίνουμε στο διάγραμμα αυτό με πολύ παραστατικό τρόπο τον τρόπο συνεργασίας των δυο συστημάτων.

Η τυπική απόκλιση για την οριζοντιογραφία ξεκινάει από τιμή μηδενική και φτάνει έως την τιμή 12m. Σταθερά έχουμε μικρότερη τυπική απόκλιση κατά east από την κατά north ενώ η τυπική απόκλιση του υψομέτρου ακολουθεί δική της πορεία, πότε μικρότερη από την οριζοντιογραφία και πότε μεγαλύτερη.

Το διάγραμμα εκτίμησης ακρίβειας προσδιορισμού ταχύτητας (διάγραμμα 6.12) ακολουθεί το διάγραμμα 6.11 όσον αφορά τα μέγιστα και τα ελάχιστα. Αν συγκρίνουμε το διάγραμμα αυτό με το αντίστοιχο διάγραμμα των επιλύσεων του δορυφορικού συστήματος παρατηρούμε ότι ο προσδιορισμός της ταχύτητας από το αδρανειακό σύστημα είναι κατά πολύ ακριβέστερος του δορυφορικού.

Στις επιλύσεις GPS η ελάχιστη τιμή που είχαμε ήταν ~0.10 m/s ενώ στις επιλύσεις του IMU αυτή η τιμή είναι εκτός ακραίων περιπτώσεων η μέγιστη. Στην επίλυση του IMU έχουμε μέση τιμή τυπικής απόκλισης 0.05m/s και αν εξαιρέσουμε δυο μέγιστα η μέση τιμή γίνεται 0.035m/s.

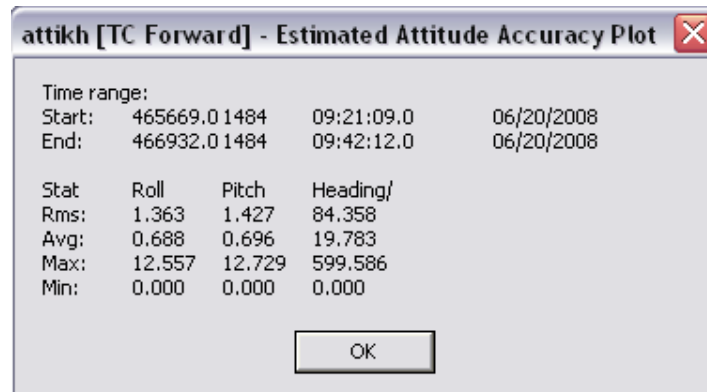
Καθ' όλη την διάρκεια της πορείας όπως φαίνεται και στα στατιστικά που ακολουθούν ο προσδιορισμός της ταχύτητας κατά east και κατά north βρίσκονται σε ίδια επίπεδα ενώ σε αντίθεση με τα δορυφορικά ο προσδιορισμός κατά height έχει μικρότερο RMS.

Time range:			
Start:	465669.01484	09:21:09.0	06/20/2008
End:	466932.01484	09:42:12.0	06/20/2008
Stat	East	North	Height
Rms:	0.0516	0.0566	0.0364
Avg:	0.0432	0.0481	0.0330
Max:	0.1710	0.1808	0.0721
Min:	0.0000	0.0000	0.0000

εικόνα 6.13 - στατιστικά εκτίμησης ακρίβειας προσδιορισμού ταχύτητας

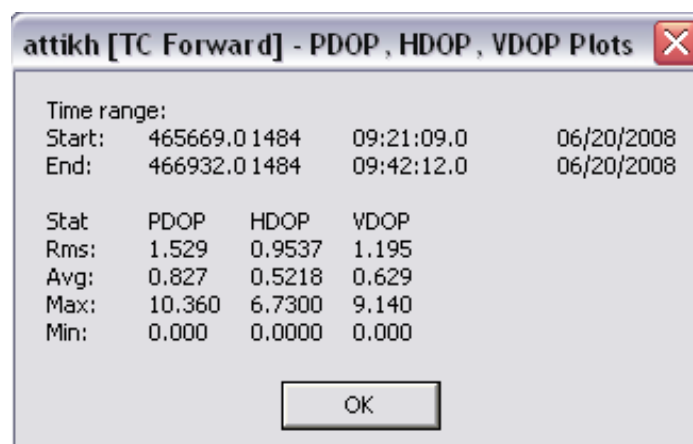
Ακολουθούν τα διαγράμματα 6.13 (επιτάχυνσης) και 6.14 (Roll and Pitch) τα οποία παραθέτονται ως ενδεικτικά για τα αποτελέσματα που μπορεί να μας εξάγει το πρόγραμμα από μια επίλυση αδρανειακού συστήματος.

Το επόμενο διάγραμμα (6.15) που παρουσιάζεται είναι το διάγραμμα εκτίμησης ακρίβειας προσδιορισμού κινηματικής συμπεριφοράς (Attitude) στο οποίο εμφανίζεται η τυπική απόκλιση του Attitude σε arcmin. Παρατηρούμε ότι έχουμε τιμές για roll και pitch σχεδόν μηδενικές ενώ για το Heading/Az έχουμε μια αρχική τιμή 600arcmin αλλά σε 20sec περίπου έχει πέσει στα 20arcmin και ακολούθως λογαριθμικά ακολουθεί τις τιμές των roll και pitch. Τα στατιστικά της εκτίμησης ακρίβειας προσδιορισμού κινηματικής συμπεριφοράς φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



εικόνα 6.14 - στατιστικά εκτίμησης ακρίβειας προσδιορισμού attitude

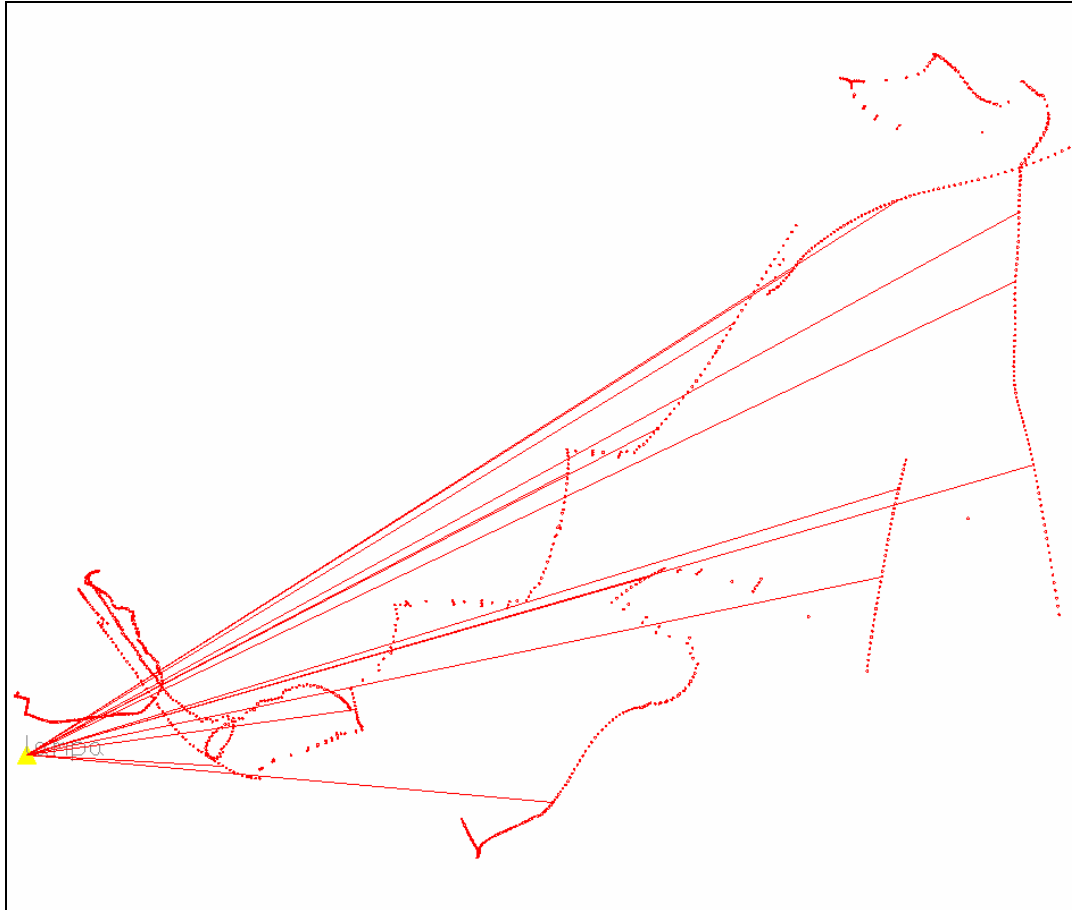
Ακολουθεί το διάγραμμα 6.16 το οποίο είναι μια εκτύπωση των DOP και συγκεκριμένα των PDOP (position), HDOP (horizontal), VDOP (vertical). Το HDOP, που έχει και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον κυμαίνεται σε πολύ καλά επίπεδα με το μεγαλύτερο εύρος των τιμών του να βρίσκονται στην τιμή 0.8 ενώ το VDOP και κατά συνέπεια το PDOP έχουν μεγάλη διακύμανση τιμών και παίρνουν τιμές έως και 10. Τα στατιστικά των DOP φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



εικόνα 6.15 - στατιστικά DOP

- **Επίλυση Επιστροφής (Revision IMU)**

Το επόμενο στάδιο ήταν να επιλυθεί η πορεία με την λύση της επιστροφής του αδρανειακού συστήματος και η λύση του μας έδωσε το αποτέλεσμα που φαίνεται παραστατικά στο παρακάτω σχήμα.



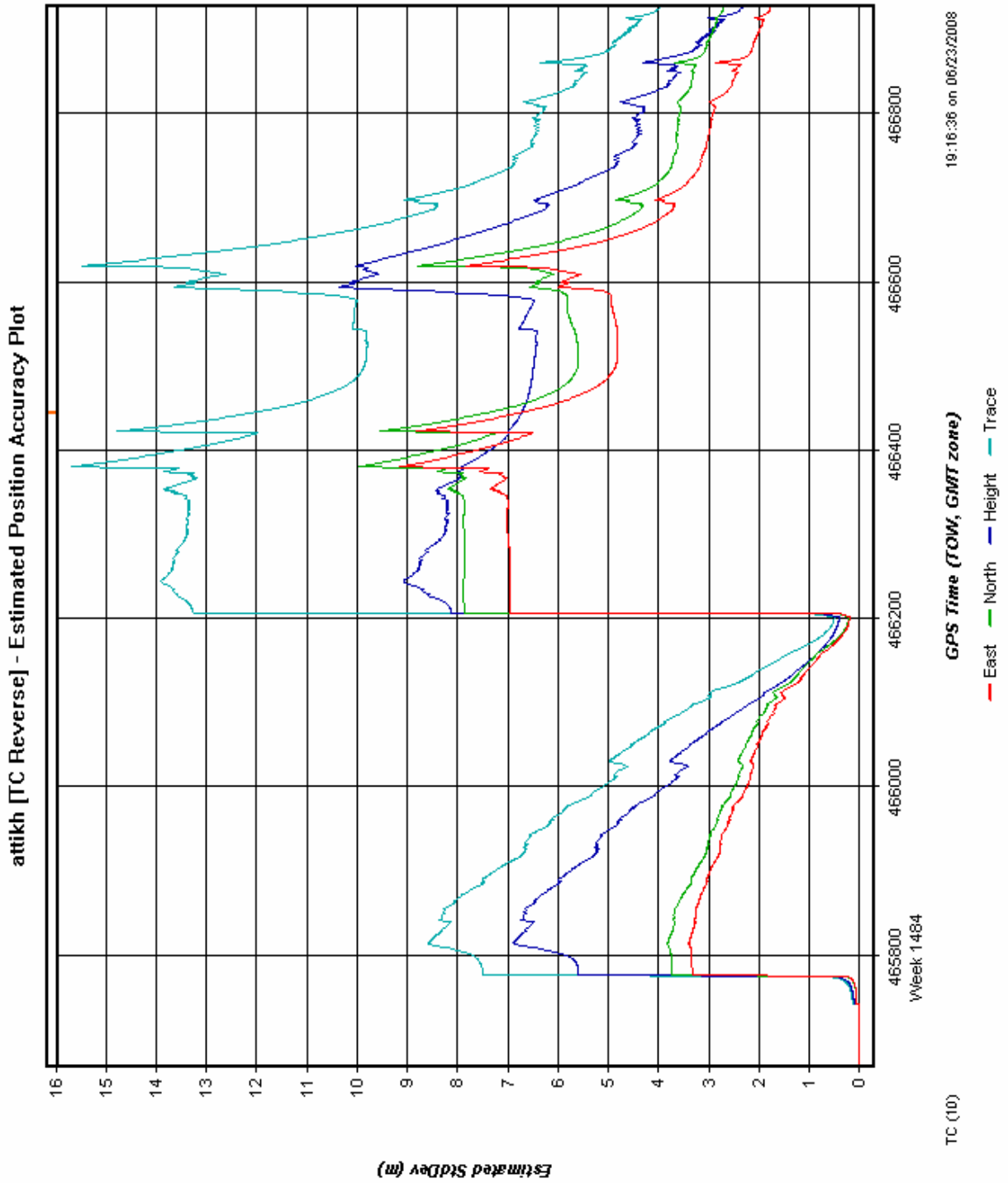
εικόνα 6.16 - Σχηματική αναπαράσταση επίλυσης *rev_IMU*

Όπως παρατηρούμε η επίλυση είναι τελείως λανθασμένη με το μεγαλύτερο πληθυσμό σημείων να βρίσκονται κατανεμημένα στον χώρο σε τυχαία θέση. Η επίλυση της επιστροφής δεν έγινε με επιτυχία και οφείλεται στο εξής:

Κατά το τέλος του πειράματος, (λόγω κάποιου προβλήματος που εμφανίστηκε στον υπολογιστή ο οποίος κατέγραφε τις μετρήσεις), δεν είχαμε καταγραφή μετρήσεων σε στάση 30~120sec που απαιτούνται για την μέθοδο *static coarse alignment* λύση αλλά αντί αυτού είχαμε μόλις 20sec.

Έτσι η επίλυση της επιστροφής έγινε με την μέθοδο *In-Motion Kinematic Alignment* η οποία απαιτεί μόλις 4~40sec μετρήσεις σε στάση και κινήσεις έντονης εναλλαγής από την ευθεία πορεία, π.χ. για αεροπλάνο loops και S-turn. Επειδή το όχημά μας δεν είχε φυσικά την δυνατότητα αυτών των ελιγμών (χρησιμοποιήθηκε αυτοκίνητο) η επίλυση της επιστροφής είχε τα παραπάνω αποτελέσματα.

Διάγραμμα 6.17 - Position Accuracy (rev IMU)



Λόγω της λανθασμένης επίλυσης δεν θα παρουσιαστούν τα αντίστοιχα διαγράμματα των άλλων λύσεων. Αναλυτικά τα στοιχεία της επίλυσης φαίνονται παρακάτω.

Processing Summary Information

Program: Inertial Explorer

Solution Type: **Reverse IMU**

Number of Epochs:

Total in GPB file: 1270

No processed position: 5

With bad C/A code: 0

With bad L1 Phase: 0

Measurement RMS Values:

L1 Phase: 0.0063 (m)

C/A Code: 16.96 (m)

L1 Doppler: 0.380 (m/s)

Quality Number Percentages:

Q 1: 0.0 %

Q 2: 0.0 %

Q 3: 0.0 %

Q 4: 0.0 %

Q 5: 0.0 %

Q 6: 100.0 %

Position Standard Deviation Percentages:

0.00 - 0.10 m: 6.0 %

0.10 - 0.30 m: 2.1 %

0.30 - 1.00 m: 3.3 %

1.00 - 5.00 m: 17.5 %

5.00 m + over: 71.0 %

Percentages of epochs with DD_DOP over 10.00:

DOP over Tol: 2.9 %

Baseline Distances:

Maximum: 6.000 (km)

Minimum: 0.001 (km)

Average: 2.391 (km)

First Epoch: 0.920 (km)

Last Epoch: 0.001 (km)

Έτσι όλες οι μετρήσεις ανήκουν στην κατηγορία Q6 και το 71% των σημείων έχουν προσδιοριστεί με ακρίβεια 5.00m και άνω.

Να σημειωθεί εδώ ότι οι επιλύσεις των μετρήσεων του δορυφορικού - αδρανειακού έγιναν με την μέθοδο *tightly-coupled processing* και όχι με την μέθοδο *loosely coupled processing* που όπως έχουμε αναφέρει και στο 4^ο κεφάλαιο με την πρώτη μέθοδο χρησιμοποιούμε ένα φίλτρο Kalman, ενώ με την δεύτερη χρησιμοποιούμε δυο φίλτρα Kalman.

Επιλέξαμε αυτήν την μέθοδο γιατί χρησιμοποιείται μόνο ένα φίλτρο Kalman και αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί αποφεύγουμε την διαδικασία να χρησιμοποιούμε τα εξαγόμενα του πρώτου φίλτρου Kalman ως στοιχεία εισαγωγής του δεύτερου φίλτρου Kalman.

Με αυτήν την μέθοδο επίσης το δορυφορικό σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο βοήθειας και αναβάθμισης του αδρανειακού με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται πλήρης λύση GPS. (αρκεί δηλαδή και με 4 δορυφόρους λύση για την αναβάθμιση λύσης πλοήγησης)

Λαμβάνοντας υπόψη τις προηγούμενες επιλύσεις ως καταλληλότερος συνδυασμός επίλυσης επιλέχθηκε η χρησιμοποίηση της συνδυασμένης λύσης του δορυφορικού συστήματος (*post processing combined GPS*) και της μετάβασης του αδρανειακού (*fwd IMU*) δηλαδή της επίλυσης που παρουσιάστηκε με τον αριθμό 2 στην σελίδα 117.

6.5. Φωτογραφίες πειραματικής διαδικασίας



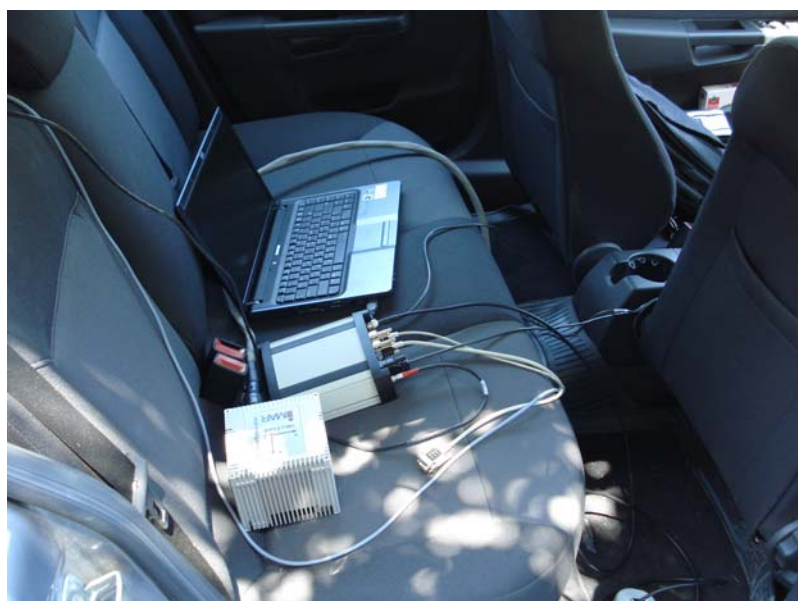
εικόνα 6.17 - τροφοδοσία συστήματος



εικόνα 6.18 - δέκτης rover



εικόνα 6.19 - δέκτης rover



εικόνα 6.20 - IMU, Receiver και υπολογιστής



εικόνα 6.21 - συνδεσμολογία



εικόνα 6.22 - ενδείξεις συστήματος



εικόνα 6.23 - base στο Λαμπαδάριο (Ε.Μ.ΤΤ.)

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7. Συμπεράσματα - Προσωπικές κρίσεις

Οι εντυπώσεις που μας άφησε το σύστημα του εργαστηρίου ήταν σε γενικές γραμμές πολύ καλές. Λόγω της φύσης του πειράματος δεν είμαστε σε θέση να κρίνουμε αν ανταποκρίνεται στις ονομαστικές ακρίβειες που αναφέρει η κατασκευάστρια εταιρία, αλλά από την σύντομη χρήση του μπορούμε να αναφέρουμε ως πλεονεκτήματα τα εξής:

- Πολύ μεγάλη ταχύτητα καταγραφής δεδομένων από το αδρανειακό σύστημα. Σίγουρα μια συχνότητα της τάξης των 200Hz που μας προσφέρει το συγκεκριμένο όργανο (FSAS IMU) είναι εντυπωσιακή. Εκτός του αδρανειακού και οι άλλες συσκευές παρέχουν μεγάλη ταχύτητα αφού π.χ. ο δέκτης GPS μπορεί να ανταλλάσσει δεδομένα θέσης με συχνότητα 20Hz.
- Πολύ καλής ποιότητας κατασκευής όλες οι συσκευές με έμφαση από την εταιρία να είναι ανθεκτικές και υψηλών αντοχών στις καιρικές συνθήκες
- Πολύ εύκολη συνδεσμολογία και πολύ απλή η χρήση των συσκευών καθώς και μικρές διαστάσεις και μικρό βάρος σε κάθε συσκευή.
- Αρκετά εύχρηστο το λογισμικό και κατά την διάρκεια της χρήσης των συσκευών, αλλά και κατά την επεξεργασία των μετρήσεων.

Από την άλλη εκτός αυτών που μας άφησαν καλή εντύπωση υπάρχουν και κάποιες κατηγορίες όπου η προσωπική μου κρίση δεν είναι και η καλύτερη. Έτσι ως μειονεκτήματα του συστήματος μπορούν να αναφερθούν τα εξής:

- Θα έπρεπε ίσως το σύστημα να δίνει την δυνατότητα να μπορεί να λειτουργεί χωρίς την χρήση υπολογιστή κατά την διάρκεια του πειράματος, έτσι ώστε να δίνει μεγαλύτερη ελευθερία κινήσεων και να μειωθεί ο όγκος των συσκευών που απαιτούνται.

Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί αν συνδεόταν ο υπολογιστής για την εκκίνηση της διαδικασίας μόνο ή να μην ήταν αναγκαίος παρά μόνο για την επίλυση των μετρήσεων. Για να μπορεί να γίνει βέβαια αυτό θα έπρεπε ο rover δέκτης να έχει κάρτα μνήμης όπως ο δέκτης του base.

- Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι χρειάζεται ξεχωριστή τροφοδοσία το IMU και ξεχωριστή ο receiver. Θα ήταν πολύ χρήσιμο να υπάρχει δυνατότητα να τροφοδοτείται το IMU από τον δέκτη.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα που παρέχει το σύστημα θα λέγαμε ότι αναλόγως με την μέθοδο μέτρησης οι κρίσεις ποικίλουν.

Έτσι αν χρησιμοποιηθεί μόνο ως δορυφορικό σύστημα θα το χαρακτηρίζαμε ως δύσχρηστο. Δύσχρηστο γιατί οι δέκτες δεν έχουν κάρτα μνήμης με αποτέλεσμα ο χρήστης να πρέπει να χρησιμοποιεί και υπολογιστή.

Επίσης το γεγονός ότι ούτε ο δέκτης του base ούτε ο δέκτης του rover έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιούν ενσωματωμένα μπαταρία ενισχύουν τον παραπάνω χαρακτηρισμό αφού ο χρήστης αναγκάζεται να εφοδιάζεται με έξτρα καλώδια και μπαταρίες.

Από την άλλη ο δορυφορικός εντοπισμός γίνεται με την μέθοδο GNSS καθώς επίσης οι δέκτες είναι εφοδιασμένοι με όλη την κατάλληλη τεχνολογία, ώστε να υποστηρίζουν τις τεχνολογίες του μέλλοντος. Αν τα παραπάνω συνδυαστούν με το γεγονός ότι έχουμε δυνατότητα μέτρησης με ταχύτητα 20Hz βγάζουμε το τελικό συμπέρασμα ότι το δορυφορικό σύστημα είναι δύσχρηστο ως σύνολο συσκευών, αλλά ως τρόπος μέτρησης και τεχνολογίας είναι άριστο.

Αν χρησιμοποιηθεί ως ολοκληρωμένο δορυφορικό και αδρανειακό σύστημα, το οποίο θα εφαρμοστεί ή σε περιπτώσεις πλοήγησης ή σε περιπτώσεις αποτύπωσης με όχημα, το μειονέκτημα των πολλών συσκευών και καλωδίων περνάει απαρατήρητο και τα αποτελέσματα της χρήσης του μπορεί να είναι εντυπωσιακά.

Ο χρήστης μπορεί να έχει συνεχόμενα αξιόπιστα αποτελέσματα χωρίς να εξαρτάται από την ορατότητα του δέκτη προς τους δορυφόρους καθώς επίσης μπορεί να έχει και καταγραφές μετρήσεων σε μεγάλες ταχύτητες και επιτάχυνσης χωρίς να αντιμετωπίζει πρόβλημα αφενός γιατί η ποιότητα κατασκευής του IMU επιτρέπει την αναγνώριση πολύ μικρών μεταβολών και αφετέρου γιατί λόγω της υψηλής συχνότητας καταγραφής ακόμα και με μεγάλη ταχύτητα ο χρήστης δεν έχει απώλεια περιοχής αποτύπωσης.

Βιβλιογραφία

1. Novatel Span user manual
2. Inertial Explorer user manual
3. Δ. Παραδείσης - Σημειώσεις Δορυφορικής Γεωδαισίας
4. Δ. Παραδείσης - Σημειώσεις Δορυφορικής Γεωδαισίας και Πλοήγησης
5. Δ. Δεληκαράογλου - Ειδικά θέματα Δορυφορικής Γεωδαισίας
6. Α. Φωτίου - Χ. Πικριδάς - Το Δορυφορικό σύστημα GPS
7. Casper Ebbesen Schultz - INS and GPS Integration (2006)
8. Oliver J. Woodman - An Introduction To Inertial navigation, University of Cambridge
9. GPS and INS Integration with Kalman Filtering for Direct Georeferencing of Airborne Imagery - Sultan Kocaman
10. A GPS/INS Integration System with New Orientation Measurement Scheme for Land Vehicle Application - Nguyen Ho Quoc Phuong Hee - Jun Kang Young - Soo Suh Young - Shick Ro Kyu - Chan Lee
11. Basic Principles of Inertial Navigation, Seminar on inertial navigation systems - Tampere University of Technology
12. AlttiJokinen - Integrated Navigation Systems
13. Eun-Hwan Shin - Accuracy Improvement of Low Cost INS/GPS for Land Applications, 2001
14. Designing a neural Network for GPS/INS/PL Integration - Jianguo Jack Wang, Jinling Wang, David Sinclair, Leo Watts
15. Inertial Navigation - Kevin J Walchko1
16. The Application of Integrated GPS and Dead Reckoning Positioning in Automotive Intelligent Navigation System - Qingquan Li - Zhixiang Fang - Hanwu Li