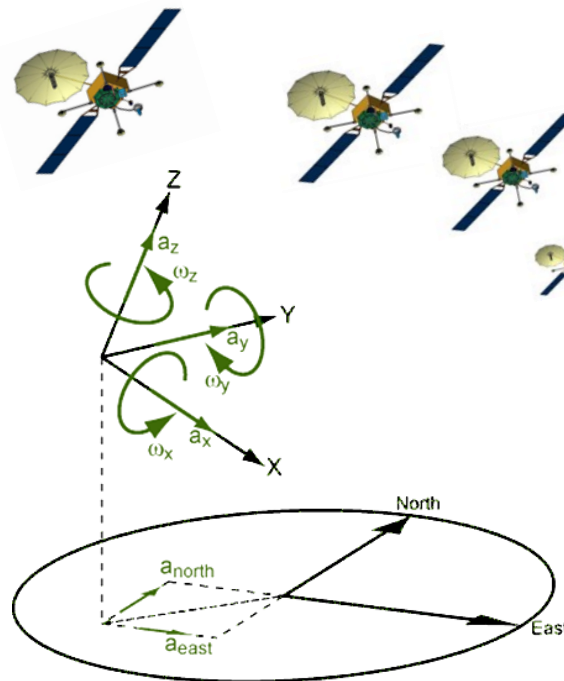




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

## ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ GNSS, GNSS/INS, RTS ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΑΓΩΓΗ ΤΡΟΧΙΑΣ ΠΕΖΩΝ ΣΕ ΔΥΣΚΟΛΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ - ΔΠΜΣ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ  
ΚΑΤΣΙΓΙΑΝΝΗ ΓΕΩΡΓΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΓΚΙΚΑΣ  
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014



Αφιερωμένο στην οικογένειά μου  
και σε όλους αυτούς που μου μεταδίδουν τις γνώσεις τους  
και με κάνουν καλύτερο άνθρωπο.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

---

Η συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. εντός του ακαδημαϊκού έτους 2012-2013 στο πλαίσιο του Διεπιστημονικού Διατμηματικού Πρόγραμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών (ΔΠΜΣ) Γεωπληροφορική υπό την επίβλεψη του αναπληρωτή καθηγητή κ. Βασίλη Γκίκα.

Προσωπικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω πρωτίστως τον καθηγητή μου κ. Β. Γκίκα για την ανάθεση της συγκεκριμένης εργασίας, την πολύτιμη καθοδήγησή του, τις ορθές παρατηρήσεις του, την κατανόηση και την ενθάρρυνση που έδειξε σε πολλές ατυχείς και δύσκολες στιγμές καθώς και την άψογη συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Αθανάσιο Μπίμη (Υποψήφιο Διδάκτορα), τον κ. Γεώργιο Πηνιώτη (Υποψήφιο Διδάκτορα), τον κ. Χρήστο Δανέζη (Μεταδιδακτορικό Ερευνητή), και την κα. Αγγελική Ανδρουλάκη για την βοήθειά τους, η οποία ήταν πολύτιμη για τις εργασίες πεδίου ιδιαίτερα για το πρακτικό μέρος της εργασίας. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές κ. Δημήτρη Δεληκαράογλου και κ. Δημήτρη Παραδείση για την αντικειμενική και αμερόληπτη αξιολόγηση της παρούσας εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη συμπαράσταση, την υποστήριξη και υπομονή που μου έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στη σχολή αλλά και τους φίλους μου για τη συμπαράστασή τους και τις πολύτιμες συμβουλές τους.

Σας ευχαριστώ όλους

Γεωργία Κατσιγιάννη

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	7
ABSTRACT.....	8
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	9
Σκοπός και Στόχοι της Μεταπτυχιακής Εργασίας.....	9
Δομή Διπλωματικής Εργασίας .....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> - Δορυφορικός Προσδιορισμός Θέσης.....	10
1.1 Γενικά.....	10
1.2 Αρχές Δορυφορικού Εντοπισμού (stand-alone GPS) .....	16
1.2.1 Μετρήσεις Δορυφορικού Εντοπισμού.....	17
1.2.2 Κατηγορίες Μεθόδων Προσδιορισμού Θέσης με GPS .....	21
1.3 Πηγές Σφαλμάτων.....	25
1.3.1 Σφάλματα Δορυφόρων .....	25
1.3.2 Σφάλματα Δεκτών .....	26
1.3.3 Σφάλματα Διάδοσης Σήματος .....	27
1.4 Μέτρα Ποιότητας Δορυφορικού Εντοπισμού .....	29
1.4.1 DOP (Dilution of Precision) .....	31
1.4.2 Μέτρα Ακριβείας.....	36
1.4.3 Ακεραιότητα των Συστημάτων.....	38
1.5 Τεχνολογία Δεκτών (stand-alone GPS) .....	38
1.5.1 Επισκόπηση της λειτουργίας των δεκτών .....	39
1.5.2 Κατηγορίες Δεκτών .....	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> - Μέθοδοι Επαύξησης Δορυφορικών Συστημάτων Εντοπισμού .....	43
2.1 Γενικά.....	43
2.2 Διαφορικός Εντοπισμός.....	43
2.2.1 Βασικές αρχές διαφορικού εντοπισμού.....	43
2.2.2 Διαφορικός εντοπισμός με μετρήσεις ψευδοαποστάσεων (τοπικό DGNS, ευρύτερης περιοχής DGNS).....	44
2.2.3 Διαφορικός εντοπισμός με μετρήσεις φάσεων.....	46
2.3 Χρήση Ετερογενών Αισθητήρων Εντοπισμού .....	47
2.3.1 Ολοκλήρωση δορυφορικών / αδρανειακών συστημάτων .....	48
2.3.2 Άλλες Μέθοδοι Ολοκλήρωσης.....	53

2.4 Το φίλτρο Kalman .....	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> - Περιοχή Μελέτης & Προπαρασκευαστικές Εργασίες .....	58
3.1 Γενικά.....	58
3.2 Περιγραφή Περιοχής Μελέτης .....	58
3.3 Εγκατάσταση και Προσδιορισμός Θέσης Σημείων Ελέγχου .....	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> - Εξοπλισμός και Σύστημα Καταγραφής .....	64
4.1 Γενικά.....	64
4.2 Δορυφορικοί Δέκτες Εντοπισμού .....	64
4.2.1 Garmin GPSMap 62s.....	64
4.2.2 Trimble GeoXT .....	65
4.2.3 Novatel Propak .....	66
4.3 Αδρανειακό Σύστημα Εντοπισμού .....	67
4.3.1 iMAR-FSAS-IMU .....	67
4.3.2 Συνδεσμολογία GNSS/INS (SPAN system).....	67
4.4 Σύστημα Γεωδαιτικού Σταθμού Αυτόματης Αναγνώρισης και Παρακολούθησης Στόχου .....	68
4.4.1 Leica TCA1800 .....	68
4.4.2 Το Λογισμικό Leica Tracker .....	68
4.5 Διάταξη Καταγραφής – Προσωπικός Πλοηγός ( <i>personal navigator</i> ).....	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 <sup>ο</sup> - Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων Πεδίου .....	71
5.1 Γενικά.....	71
5.2 Διαδικασία Συλλογής Δεδομένων Πεδίου .....	71
5.3 Επίλυση Παρατηρήσεων Ολοκληρωμένου Συστήματος GNSS/INS .....	73
5.4 Επίλυση Παρατηρήσεων Γεωδαιτικού Σταθμού .....	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 <sup>ο</sup> - Ανάλυση Αποτελεσμάτων .....	77
6.1 Γενικά.....	77
6.2 Διαθεσιμότητα Δορυφόρων .....	77
6.3 Σύγκριση Λύσης Πλοήγησης GPS – Επίλυσης GPS/INS .....	78
6.4 Σύγκριση Λύσης Πλοήγησης GPS – Επίλυσης GPS/INS – Tracking Tacheometer.....	89
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 <sup>ο</sup> - Συμπεράσματα .....	92
7.1 Γενικά.....	92
7.2 Συμπεράσματα .....	92
7.3 Προτάσεις .....	93

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	94
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ .....	97
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	99

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Αντικείμενο της παρούσης μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί η μελέτη, η σύγκριση και η αξιολόγηση της ολοκλήρωσης των Παγκόσμιων Συστημάτων Εντοπισμού (GNSS) με συστήματα αδρανειακού εντοπισμού (INS) και των ρομποτικών ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών (RTS) σε ποικίλα περιβάλλοντα ορατότητας δορυφόρων.

Για τον σκοπό αυτό δημιουργήθηκε μια κατασκευή (*personal navigator*) που να επιτρέπει στον χρήστη την μέτρηση της θέσης του πεζού με διαφορετικούς δέκτες και αισθητήρες εντοπισμού ταυτόχρονα στην ίδια πορεία. Επίσης ιδρύθηκαν σημεία ελέγχου σε περιοχή του όρους Υμηττού, σε δασώδεις περιοχές και περιοχές κοντά σε τεχνικά έργα για την καλύτερη σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφορετικών αισθητήρων.

Αντικείμενο ενδιαφέροντος αποτελούν επίσης και οι διαφορετικές μέθοδοι σύζευξης (χαλαρή/βαθεία) των δύο αυτών αισθητήρων εντοπισμού. Η επεξεργασία της σύζευξης έγινε με χρήση του λογισμικού Inertial Explorer της Novatel. Οι μετρήσεις κατόπιν συγκρίθηκαν με τροχιά παρακολούθησης από ολοκληρωμένο γεωδαιτικό σταθμό με την μέθοδο παρακολούθησης RTS. Οι μετρήσεις αποτυπώθηκαν σε σχέδια του προγράμματος AutoCAD για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Από τα διαγράμματα που προέκυψαν διαπιστώθηκε ότι πρώτα η τροχιά παρακολούθησης εφαρμόζει καλύτερα στα σημεία ελέγχου, ύστερα η ολοκλήρωση GPS/INS με την μέθοδο της χαλαρής σύζευξης υποβοηθούμενη από αρχείο συντεταγμένων των σημείων ελέγχου, κατόπιν με την μέθοδο της χαλαρής σύζευξης και τέλος με την μέθοδο της βαθείας σύζευξης.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

GNSS, GPS, INS, Ολοκλήρωση GPS/INS, Διάταξη Καταγραφής, Μέθοδοι Σύζευξης, Novatel Inertial Explorer, Χαλαρή Σύζευξη, Σφιχτή Σύζευξη, Βαθεία Σύζευξη, Παρακολούθηση Γεωδαιτικού Σταθμού, Φίλτρα Kalman



## ABSTRACT

---

The objective of this postgraduate thesis is the study, comparison and evaluation of Integrated Navigation Systems GNSS/INS and Robotic Total Stations in various environments of satellite visibility.

For this purpose a construction was made (personal navigator) that allows the user to measure position of the pedestrian with different receivers simultaneously for the same track. A closed traverse and tacheometric points were also realized in an area of Mount Hymettus to enable the comparison between the different types of sensors.

Interesting was also the different cases of coupling (deep/loose) these two sensors. The processing of the integration was made with the software Inertial Explorer from Novatel. These measurements were afterwards compared with the track that was measured with the tracking method of a total station RTS (*Robotic Total Station*). All methods were shown in AutoCAD software in order to deduce conclusions.

From the plots and maps that were created, it was deduced that better results are given using robotic tracking, then using GPS/INS integration with customized loose coupling method, loose coupling and finally deep coupling

## KEY WORDS

GNSS, GPS, INS, GPS/INS Integration, Pedestrian Navigation, Coupling Methods, Novatel Inertial Explorer, Loose Coupling, Tight Coupling, Deep Coupling, Total Station Tracking Mode, Kalman Filters

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

## Σκοπός και Στόχοι της Μεταπτυχιακής Εργασίας

Στόχος της μεταπτυχιακής εργασίας είναι η σύγκριση και η παρουσίαση των Παγκόσμιων Συστημάτων Εντοπισμού (GNSS), των αρχών εντοπισμού και των μεθόδων επαύξησης και ολοκλήρωσης με άλλους αισθητήρες. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην διερεύνηση των δυνατοτήτων λειτουργίας του συστήματος GPS σε δασικά περιβάλλοντα και περιβάλλοντα με περιορισμένη ορατότητα δορυφόρων.

Γίνεται επίσης μια παρουσίαση των εργασιών υπαίθρου που έγιναν για τις μετρήσεις και της περιοχής μελέτης. Τέλος περιγράφονται οι διαδικασίες επεξεργασίας των μετρήσεων και των διαγραμμάτων, στατιστικών στοιχείων και σχεδίων που εξήχθησαν και οδήγησαν σε συγκεκριμένα αποτελέσματα.

## Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Για την κάλυψη των παρακάτω στόχων η εργασία χωρίζεται στα παρακάτω επιμέρους κεφάλαια:

Στο πρώτο κεφάλαιο δίνεται μια περιγραφή των συστημάτων εντοπισμού και του δορυφορικού εντοπισμού θέσης. Γίνεται μια περιγραφή των αρχών εντοπισμού: των μετρήσεων και των κατηγοριών προσδιορισμού θέσης. Παρουσιάζονται τα είδη σφαλμάτων καθώς και τα μέτρα ποιότητας και ακρίβειας. Αναφέρονται τα είδη δεκτών και οι βασικές αρχές λειτουργίας τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται οι μέθοδοι επαύξησης των δορυφορικών συστημάτων εντοπισμού με τη μέθοδο του διαφορικού εντοπισμού και της χρήσης ετερογενών αισθητήρων. Έμφαση δίνεται περισσότερο στην μέθοδο ολοκλήρωσης δορυφορικών και αδρανειακών συστημάτων και τους τρόπους σύζευξης, μιας και είναι ο κύριος στόχος της εργασίας. Τέλος περιγράφεται το φίλτρο Kalman το οποίο χρησιμοποιείται εκτενώς σε εφαρμογές ολοκλήρωσης GPS/INS.

Στη συνέχεια στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια περιγραφή της περιοχής μελέτης και των αρχικών εργασιών, όπως η εγκατάσταση των σημείων της κύριας όδευσης και των ταχυμετρικών σημείων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται οι δέκτες και οι αισθητήρες εντοπισμού που χρησιμοποιήθηκαν και εξηγείται η διάταξη καταγραφής.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύονται οι διαδικασίες για την συλλογή και την επεξεργασία των μετρήσεων πεδίου. Στη συνέχεια στο έκτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων, τα στατιστικά διαγράμματα και τα σχέδια που δημιουργήθηκαν.

Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο δίνονται επιγραμματικά τα κυριότερα συμπεράσματα καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα και ανάλυση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> - Δορυφορικός Προσδιορισμός Θέσης

### 1.1 Γενικά

Για αρκετούς αιώνες τα αστέρια παρείχαν στους πρώτους εξερευνητές και στους ναυτικούς που αποτόλμησαν στους άγνωστους κόσμους πέρα από τον ορίζοντα μια αξιόπιστη πηγή πληροφοριών πλοήγησης. Σήμερα, οι ουρανοί προσφέρουν νέα μέσα για πλοήγηση με μια ακρίβεια που οι εξερευνητές μόνο στα όνειρά τους θα μπορούσαν να φανταστούν. Αυτό είναι ο δορυφορικός εντοπισμός: χρησιμοποιώντας τα σήματα που εκπέμπονται από δορυφόρους με τροχιές γύρω από τη Γη μπορούμε να προσδιορίσουμε σε πραγματικό χρόνο τη θέση αεροσκαφών, σκαφών και οχημάτων, μαζί με ένα πλήθος άλλων εφαρμογών, με ακρίβεια μερικών μέτρων. Από την εισαγωγή της δορυφορικής πλοήγησης στη δεκαετία του '70, εφαρμογές για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης έχουν αυξηθεί πέρα από όλες τις προσδοκίες. Σήμερα, εκατομμύρια μικροί φορητοί δεκτές ικανοί να δέχονται δορυφορικά σήματα πωλούνται ετησίως και ικανοποιούν ένα τεράστιο αριθμό εφαρμογών.

Τα Παγκόσμια Δορυφορικά Συστήματα (Εντοπισμού και) Πλοήγησης (GNSS) είναι ο γενικός όρος για τα δορυφορικά συστήματα πλοήγησης που παρέχουν αυτόνομο προσδιορισμό θέσης παγκοσμίως. Τα συστήματα GNSS επιτρέπουν σε μικρούς ηλεκτρονικούς δέκτες τον καθορισμό της γεωγραφικής θέσης τους (γεωγραφικό μήκος, γεωγραφικό πλάτος και υψόμετρο) με ακρίβεια της τάξης μερικών μέτρων. Οι δέκτες υπολογίζουν τον ακριβή χρόνο καθώς επίσης και τη θέση τους στο χώρο, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αναφορά για επιστημονικά πειράματα ή πρακτικές εφαρμογές και άλλες ποικίλες ανάγκες.

Σύστημα	Χώρα	Ύψος Τροχιάς, Περίοδος	Αριθμός Δορυφόρων	Κατάσταση
GPS	ΗΠΑ	20,200km, 12.0h	$\geq 24$	σε λειτουργία
GLONASS	Ρωσία	19,100km, 11.3h	24	σε λειτουργία υπό περιορισμούς
GALILEO	Ευρώπη	23,222km, 14.1h	$\geq 27$	υπό κατασκευή
COMPASS	Κίνα	21,150km, 12.6h	35	Compass-2 υπό κατασκευή

Πίνακας 1.1 : Σύγκριση Συστημάτων GNSS

(Πηγή: [en.wikipedia.org/wiki/GNSS](http://en.wikipedia.org/wiki/GNSS))

Μέχρι σήμερα, το παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα προσδιορισμού θέσης NAVSTAR GPS των Ηνωμένων Πολιτειών είναι το μόνο μέχρι τώρα πλήρως λειτουργικό σύστημα GNSS. Το Ρωσικό GLONASS είναι ένα σύστημα GNSS το οποίο σήμερα μετά από εργασίες αποκατάστασης είναι λειτουργικό με 24 δορυφόρους. Το Ευρωπαϊκό GALILEO είναι ένα σύστημα GNSS στην αρχική φάση ανάπτυξής του, με τέσσερις έως τώρα δορυφόρους. Η Λαϊκή Δημοκρατία της Κίνας

έχει δηλώσει την επέκταση του τοπικού συστήματος Beidou στο παγκόσμιο σύστημα COMPASS από το 2010. Στον Πίνακα 1.1 αναγράφονται τα συστήματα που αναφέρθηκαν με τα επιμέρους χαρακτηριστικά τους, τη χώρα προέλευσης, ύψος τροχιάς, κατάσταση λειτουργίας κ.τ.λ.. (Κατσιγιάννη, 2011)

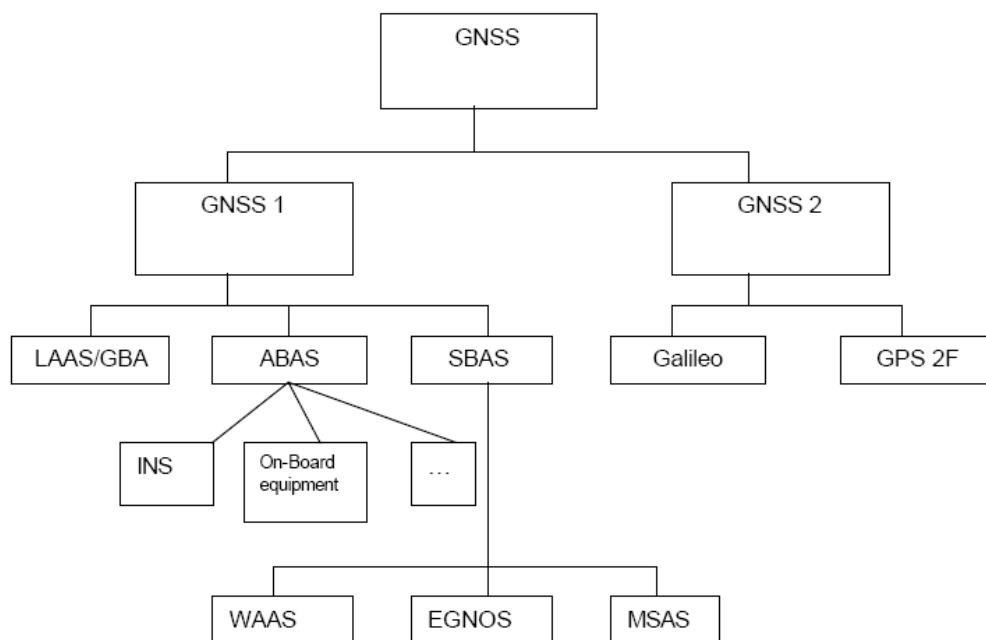
Τα συστήματα GNSS παρέχουν υψηλό έλεγχο της ακρίβειας και της ακεραιότητας ως προς τη λειτουργικότητά τους και είναι ταξινομημένα ως εξής: (Σχήμα 1.1, Πίνακας 1.2)

- GNSS-1 είναι τα συστήματα πρώτης γενιάς και ο συνδυασμός των υπαρχόντων δορυφορικών συστημάτων (GPS και GLONASS), με δορυφορικά συστήματα επαύξησης (SBAS: *Satellite Based Augmentation System*) ή συστήματα επαύξησης στο έδαφος (GBAS: *Ground Based Augmentation System*). Στις ΗΠΑ λειτουργεί το σύστημα διαφορικού GPS ευρείας κάλυψης (WAAS: *Wide Area Augmentation System*), στην Ευρώπη το σύστημα EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), στην Ιαπωνία το σύστημα MSAS (*Multi-Functional Satellite Augmentation System*) και στην Κίνα το σύστημα SNAS (*Satellite Navigation Augmentation System*).
- GNSS-2 είναι η δεύτερη γενιά συστημάτων που παρέχει ανεξάρτητα ένα πλήρες δορυφορικό σύστημα πλοήγησης πολιτικής χρήσης, όπως για παράδειγμα το Ευρωπαϊκό σύστημα GALILEO. Αυτά τα συστήματα θα παρέχουν στον χρήστη τον έλεγχο ακρίβειας και ακεραιότητας απαραίτητο για πολιτικούς σκοπούς. Αυτό το σύστημα αποτελείται από τις συχνότητες L1 και L2 για την πολιτική χρήση και την L5 για εφαρμογές ασφάλειας και αεροπλοήγησης. Σε εξέλιξη είναι η ανάπτυξη των συχνοτήτων L2 και L5 του συστήματος GPS για πολιτική χρήση, καθιστώντας το ένα σύστημα δεύτερης γενιάς.

GNSS components	Name	Nationality	Nature of Control	Technical status
Core systems	GPS	US	Military	Modernisation 2011/2013
	GLONASS	RUS	Military	Inadequate constellation
	Galileo	EUR	Civilian	Operational in 2008
Regional augmentations (SBAS)	WAAS	US	Civilian	Operational in 2003
	EGNOS	EUR	Civilian	Operational in 2004
	MSAS	JAP	Civilian	Operational in 2004
Local Augmentations (GBAS)	LAAS	US	Civilian	Operational between 2005 and 2007
	In Europe	Nationality of the state	Civilian	Starting 2004
Aircraft Based Augmentation Systems (ABAS)	RAIM, inertial navigation, other onboard instruments...	Nationality of the plane	Civilian	Failure detection in operation, failure detection and exclusion as part of Do-229C receivers, AIME and similar FMS/INS/GPS systems operational

Πίνακας 1.2 : Τα Χαρακτηριστικά των GNSS

(Πηγή: [html.rincondelvago.com/amss-applications.html](http://html.rincondelvago.com/amss-applications.html), 2014)

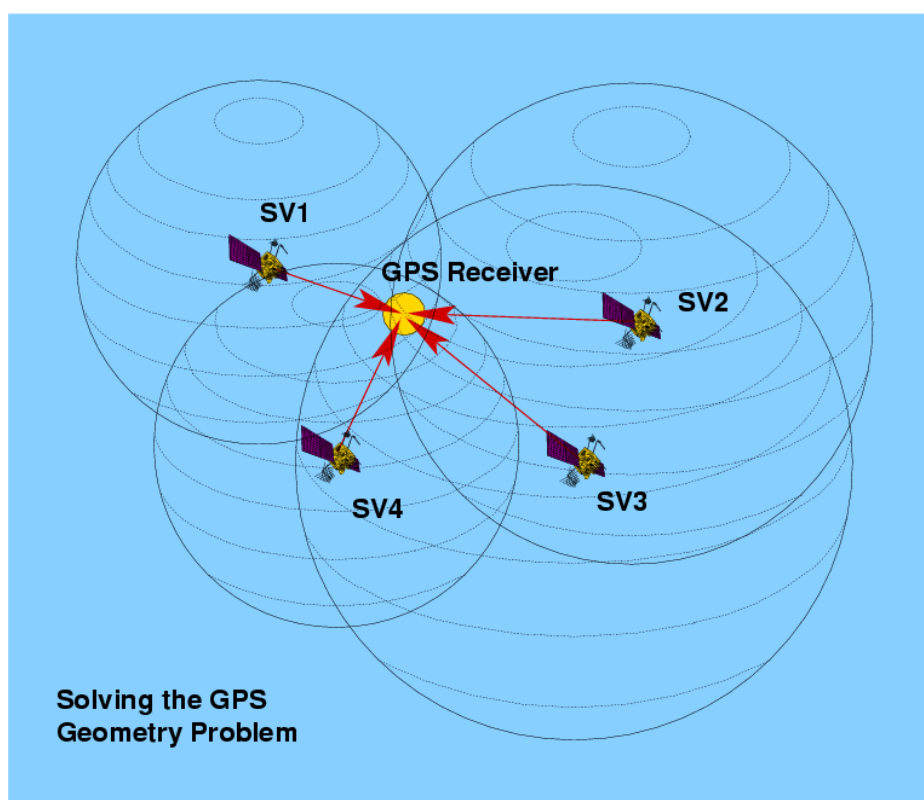


Σχήμα 1.1 : Τα Συστήματα GNSS

(Πηγή: A Beginner's Guide to GNSS in Europe)

Η παγκόσμια κάλυψη για κάθε σύστημα επιτυγχάνεται από ένα σχηματισμό από 20 έως 30 δορυφόρους μέσης γήινης τροχιάς (MEO: *Medium Earth Orbit*) που διανέμονται μεταξύ διάφορων τροχιακών επιπέδων. Τα συστήματα ποικίλλουν, αλλά χρησιμοποιούν κλίσεις τροχιάς μεγαλύτερες από 50° και τροχιακές περιόδους περίπου 10-14 ώρες ανάλογα με το σύστημα.

Η βασική αρχή όλων των συστημάτων GNSS είναι ότι ένας χρήστης καθορίζει την θέση του με ταυτόχρονες μετρήσεις από τουλάχιστον 4 δορυφόρους GNSS. Αυτές οι μετρήσεις δίνουν στο χρήστη 4 μετρήσεις απόστασης μεταξύ αυτού και των 4 δορυφόρων. Με τέσσερις μετρήσεις είναι δυνατόν να επιλυθούν 4 άγνωστες παράμετροι. Αυτές οι άγνωστες παράμετροι είναι τρεις για την θέση του δέκτη (X, Y, και Z) και το σφάλμα του χρονομέτρου του δέκτη GNSS. Γενικά, η αρχή λειτουργίας των GNSS για τον προσδιορισμό της θέσης ενός μεμονωμένου σημείου με έναν δέκτη, αποτελεί μία πλευρική οπισθοτομία στο χώρο όπου τα γνωστά σημεία είναι οι θέσεις των δορυφόρων και παρατηρήσεις οι θέσεις μεταξύ της θέσης του δέκτη και των δορυφόρων (Σχήμα 1.2). Ουσιαστικά η μέτρηση βασίζεται στη θεώρηση ότι οι δορυφόροι στο διάστημα είναι «σημεία αναφοράς» που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό της θέσης από κάποιο δέκτη στη γη με τον χρόνο να παίζει τον πιο σημαντικό ρόλο (Κατσιγιάννη, 2011).



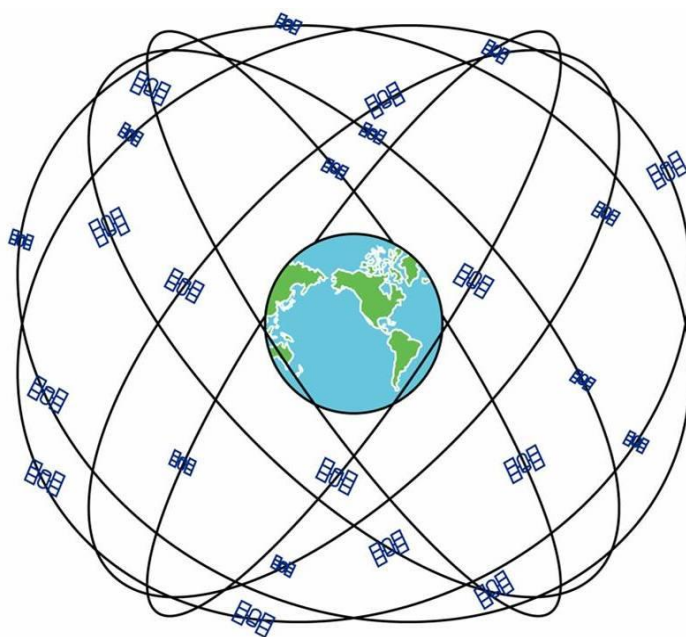
Σχήμα 1.2 : Η Θέση του χρήστη με τομές σφαιρών

(Πηγή: [www.airspacepower.net/TE-GPS-Guided-Weps.html](http://www.airspacepower.net/TE-GPS-Guided-Weps.html), 2014)

Το NAVSTAR GPS (*NAVigation Satellite Timing And Ranging, Global Positioning System*) ή απλά το GPS, είναι το μοναδικό μέχρι σήμερα πλήρως επιχειρησιακό παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα προσδιορισμού θέσης, χρόνου και ταχύτητας. Το σύστημα σχεδιάστηκε στη δεκαετία του 1970, αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1980 και βρίσκεται υπό τον έλεγχο του Υπουργείου Άμυνας των ΗΠΑ. Είναι προσιτό σε κάθε χρήστη με έναν δέκτη GPS. Πρόκειται για ένα στρατιωτικό και πολιτικό σύστημα με πρωταρχικό σκοπό την κάλυψη των στρατιωτικών και στη συνέχεια και πολιτικών αναγκών πλοήγησης.

Το σύστημα GPS αποτελείται από τρία λειτουργικά τμήματα, αυτό του διαστήματος (*space segment*), το επίγειο τμήμα (*control segment*) και το τμήμα των χρηστών (*user segment*).

Το τμήμα του διαστήματος αποτελείται από 28 δορυφόρους κατανεμημένους σε 6 τροχιακά επίπεδα (Σχήμα 1.3) ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη κάλυψη της Γης. Ο αριθμός των δορυφόρων αλλάζει ανά διαστήματα, αφού όποτε απαιτείται εκτοξεύονται καινούριοι δορυφόροι στο διάστημα ή όταν σταματάνε να λειτουργούν οι παλαιοί. Οι δορυφόροι περιστρέφονται σε σχεδόν κυκλικές τροχιές και σε ύψος περίπου 20200 km πάνω από την επιφάνεια της Γης. Ο εξοπλισμός των δορυφόρων αποτελείται από τέσσερα ατομικά χρονόμετρα ρουβιδίου και καισίου, τα οποία παρέχουν ακρίβεια μέτρησης του χρόνου της τάξης  $10^{-12}$  sec.



Σχήμα 1.3 : Ο Δορυφορικός Σχηματισμός GPS

(Πηγή: //140.137.13.100/derceng/Application.htm,2014)

Το επίγειο τμήμα αποτελείται από πέντε σταθμούς παρακολούθησης (*monitor stations*), τρεις σταθμούς επικοινωνίας (*upload ground antennas*) και ένα κεντρικό σταθμό ελέγχου (*master control station – MCS*) (Σχήμα 1.4).

Οι επίγειοι σταθμοί παρακολούθησης πραγματοποιούν συνεχώς μετρήσεις χρησιμοποιώντας όλους τους ορατούς δορυφόρους. Οι μετρήσεις αυτές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των τροχιακών εφημερίδων, καθώς και για τον υπολογισμό των διορθωτικών παραμέτρων για τα μοντέλα που περιγράφουν τα σφάλματα των χρονομέτρων των δορυφόρων. Ο υπολογισμός των τροχιακών εφημερίδων καθώς και η ενημέρωσή τους είναι αρμοδιότητα του κεντρικού σταθμού ελέγχου. Οι τροχιές αυτές προεκτείνονται στο μέλλον, κωδικοποιούνται και μεταδίδονται στους δορυφόρους κάθε 26 h. Όταν απαιτούνται, για παράδειγμα μικρές διορθωτικές ενέργειες, ο κεντρικός σταθμός έχει τη δυνατότητα παρέμβασης στο δορυφορικό εξοπλισμό μεταβάλλοντας τη θέση και τη λειτουργία των δορυφόρων. Οι σταθμοί επικοινωνίας διαθέτουν επίγειες κεραίες που μεταδίδουν δεδομένα στον κάθε δορυφόρο.



Σχήμα 1.4 : Επίγειο Τμήμα GPS

(Πηγή: [http://www.kowoma.de/en/gps/control\\_segment.htm](http://www.kowoma.de/en/gps/control_segment.htm),2014)

Το τμήμα χρηστών αποτελείται από εκατοντάδες χιλιάδες χρήστες των ΗΠΑ που χρησιμοποιούν υπηρεσίες ακριβείας (*precise positioning service*) για στρατιωτικούς σκοπούς και εκατομμύρια χρήστες πολιτικών, εμπορικών και επιστημονικών εφαρμογών που χρησιμοποιούν την τυπική υπηρεσία (*standard positioning service*). Γενικά οι δέκτες GPS αποτελούνται από μια κεραία (*antenna*) που συντονίζεται στις συχνότητες που εκπέμπουν οι δορυφόροι, από δέκτες επεξεργασίας (*receiver-processors*) και ακριβή χρονόμετρα. Ένας δέκτης συχνά περιγράφεται από τον αριθμό των καναλιών του: πόσους δορυφόρους δηλαδή μπορεί



να «παρακολουθεί» ταυτόχρονα. Αρχικά οι δέκτες μπορούσαν να λαμβάνουν σήμα ταυτόχρονα από τέσσερις ή πέντε δορυφόρους, σταδιακά ο αριθμός αυτός αυξήθηκε σε 12 έως 20 κανάλια. Σήμερα διατίθενται στην αγορά δέκτες (κυρίως γεωδαιτικού τύπου) που μπορούν να λαμβάνουν ταυτόχρονα σήματα από 40-50 δορυφόρους GPS, EGNOS και GLONASS και νέες τεχνολογίες δεκτών με δυνατότητες χρήσης μέχρι και 136 κανάλια σχεδιάζονται για το άμεσο μέλλον ώστε να μπορούν να χρησιμοποιούν ταυτόχρονα σήματα από όλα τα διαθέσιμα συστήματα GNSS.

Υπάρχουν πολλά είδη δορυφορικών δεκτών GPS. Κάποιοι για παράδειγμα μπορούν να λαμβάνουν διαφορικές διορθώσεις DGPS (*differential GPS*) ή μπορούν να αναμεταδώσουν τις πληροφορίες θέσης σε ένα H/Y ή κάποια άλλη συσκευή.

Στο Σχήμα 1.5 απεικονίζονται τρεις δέκτες GPS από τους κατασκευαστές Trimble, Garmin και Leica Geosystems (από δεξιά προς αριστερά). Οι δέκτες GPS υπάρχουν σε ποικίλα σχήματα και κάποιοι μπορούν να ενσωματώνονται σε αυτοκίνητα, τηλέφωνα, ακόμα και ρολόγια (Κατσιγιάννη, 2011).



Σχήμα 1.5 : Δέκτες GPS

(Πηγή: [http://en.wikipedia.org/wiki/Global\\_Positioning\\_System,2014](http://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System,2014))

## 1.2 Αρχές Δορυφορικού Εντοπισμού (stand-alone GPS)

Τα δορυφορικά συστήματα βασίζονται στην χρήση δορυφόρων οι οποίοι βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τη γη (Μέση Γήινη Τροχιά – *MEO (Medium Earth Orbit)*) και εκπέμπουν τη θέση τους και άλλες χρήσιμες για τον χρήστη πληροφορίες μέσω της διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Τα δορυφορικά σήματα χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση μετρήσεων από το δέκτη, που ισοδυναμούν σε αποστάσεις μεταξύ δέκτη και δορυφόρου σε κάθε χρονική στιγμή. Οι μετρήσεις καταγράφονται στη μνήμη του δέκτη και επεξεργάζονται είτε εσωτερικά από το λογισμικό του δέκτη σε πραγματικό χρόνο (*real time*) είτε εκ των υστέρων (*post-processing*) οδηγώντας στον υπολογισμό της απόστασης μεταξύ δέκτη και δορυφόρου. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ο δέκτης διαβάζει ένα μήνυμα δεδομένων πλοήγησης (*navigation message*) που περιλαμβάνει τις απαραίτητες πληροφορίες για τον υπολογισμό της θέσης και της ταχύτητας του σε πραγματικό

χρόνο. Οι πληροφορίες αυτές αφορούν τα στοιχεία των τροχιών των δορυφόρων, παραμέτρους διόρθωσης καθώς και άλλα συστηματικά σφάλματα και άλλες χρήσιμες πληροφορίες.

### 1.2.1 Μετρήσεις Δορυφορικού Εντοπισμού

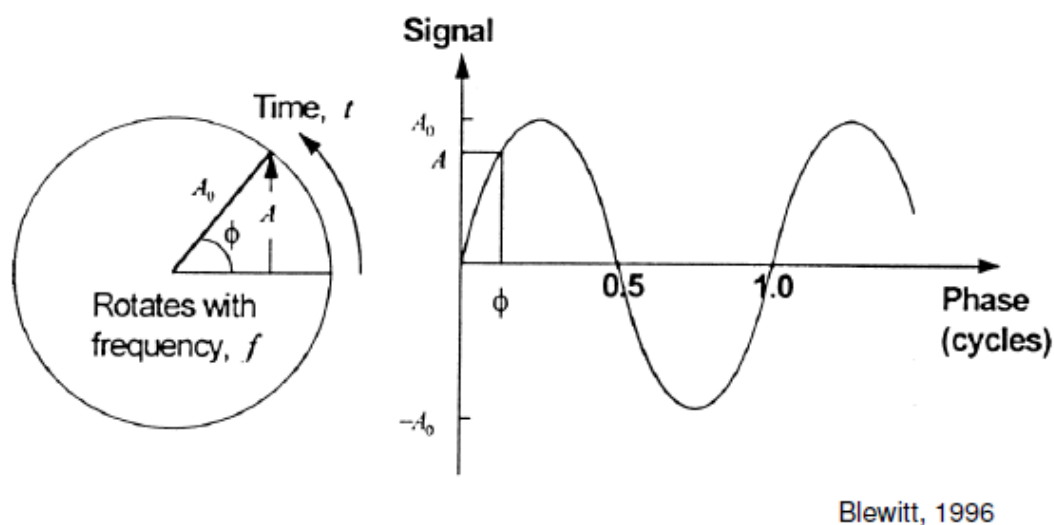
Κάθε ένας από τους δορυφόρους GPS εκπέμπει σήματα τα οποία εμπεριέχουν πληθώρα πληροφοριών. Ανάλογα με τον τύπο και την ακρίβεια του προσδιορισμού της θέσης, ο χρήστης επικεντρώνεται σε ένα κομμάτι αυτών των διαθέσιμων πληροφοριών που του είναι χρήσιμο. Οι πληροφορίες που παρέχονται στα σήματα GPS περιέχουν τη συχνότητα του φέροντος κύματος (*carrier frequencies*), τους κώδικες C/A (*Coarse Acquisition*) και P (*Precise*).

#### 1.2.1a Μετρήσεις Φέροντος κύματος (*Carrier Measurements*)

Η συνεχής περιστροφή με συχνότητα  $f$  μπορεί να περιγραφεί ως μία γραμμική αύξηση της γωνίας φάσης  $\Phi$  ως προς τον χρόνο  $t$ .

$$\Phi = f \cdot t + \Phi_0 \quad (1.1)$$

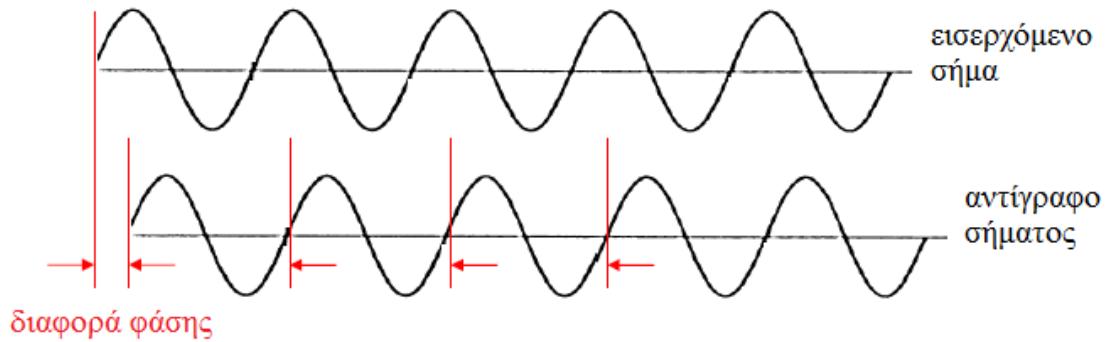
Όπου  $\Phi_0$  είναι η αρχική γωνία φάσης. Η φάση μετρείται σε κύκλους που αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των περιόδων (ταλαντώσεων).



Σχήμα 1.6 : Μετρήσεις Φάσης

(Πηγή: Blewitt,1996)

Στη συνέχεια ο δέκτης υπολογίζει τη διαφορά φάσης μεταξύ του λαμβανόμενου σήματος και του σήματος αναφοράς. Η διαφορά αυτή περιέχει το κλασματικό μέρος ενός κύκλου.



Σχήμα 1.7 : Διαφορά Φάσης

(Πηγή: Hugentobler, 2013)

Η μέτρηση φάσης είναι η διαφορά φάσης ανάμεσα στο σήμα αναφοράς και στο λαμβανόμενο σήμα. Για τη μέτρηση φάσης ισχύει:

$$\varphi_A^j = \Phi_{0,A} - \Phi_{GPS,A}^j \quad (1.2)$$

όπου:

$\varphi_A^j$  η μέτρηση φάσης από τον δορυφόρο  $j$  στον δέκτη  $A$

$\Phi_{0,A}$  η φάση αναφοράς δημιουργούμενη από τον δέκτη  $A$  στην εποχή  $T_A$

$\Phi_{GPS,A}^j$  η φάση του σήματος από τον δορυφόρο GPS  $j$  καταχωρημένη στον δέκτη  $A$  την εποχή  $T_A$

Την πρώτη στιγμή κλειδώματος του σήματος ο δέκτης μετρά το κλασματικό μέρος του κύκλου (φάση). Όμως ο δέκτης να μην μπορεί να μετρά τη στιγμιαία φάση σε κάθε χρονική στιγμή και τις μεταβολές της (μεταβολές φάσης) από την πρώτη στιγμή λήψης και έπειτα (λόγω της αλλαγής απόστασης μεταξύ δέκτη-δορυφόρου), αλλά δεν μπορεί να μετρήσει τον ακέραιο αριθμό κύκλων (ασάφεια φάσης) μεταξύ δέκτη-δορυφόρου. Κατά συνέπεια, στην παρατηρούμενη τιμή θα πρέπει να προστεθεί και ο ακέραιος αριθμός κύκλων (*integer number of cycles*).

$$\Phi_{GPS,A}^j = \Phi_A^{GPS,j} - N_A^j \quad (1.3)$$

όπου:

$\Phi_A^{GPS,j}$  η φάση σήματος από τον δέκτη  $A$  κατά την εποχή  $T_j$  μετρούμενη στο σύστημα χρόνου του δορυφόρου

$N_A^j$  η αρχική ασάφεια φάσης, δηλαδή ο άγνωστος ακέραιος αριθμός κύκλων του φορέα της πρώτης εποχής εγκλωβισμού που αντιστοιχεί στην απόσταση δορυφόρου-δέκτη

Η αρχική ασάφεια φάσης παραμένει σταθερή αρκεί ο δέκτης να μην χάσει τη λήψη του σήματος (*cycle slip*). Σε περίπτωση απώλειας του σήματος, ανάλογα με το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε, ο δέκτης αφού «εγκλωβίσει» το σήμα μετρά πάλι το κλασματικό μέρος της φάσης, έχοντας όμως διαφορετικό ακέραιο αριθμό κύκλων (κύκλοι ολίσθησης). Κατά συνέπεια οι επόμενες μετρήσεις θα παρουσιάζουν μία ασυνέχεια (*jump*) ως προς τις προηγούμενες.

Η φάση του σήματος αναφοράς παραγόμενη από τον δέκτη κατά την εποχή  $T_A$  μπορεί περαιτέρω να εκφραστεί ως:

$$\Phi_{0,A} = f \cdot T_A + a_A \quad (1.4)$$

Η φάση του σήματος GPS παραγόμενη από τον δορυφόρο κατά την εποχή  $T^j$  αντίστοιχα εκφράζεται ως:

$$\Phi_A^{\text{GPS},j} = f \cdot T^j + a^j \quad (1.5)$$

Οι όροι  $a_A$ ,  $a^j$  αναφέρονται σε καθυστερήσεις λόγω καλωδίων, ηλεκτρονικών συσκευών κτλ. που μπορεί να θεωρηθεί ότι αλλάζουν με αργούς ρυθμούς. Επομένως η φάση του λαμβανόμενου σήματος γίνεται:

$$\Phi_{\text{GPS},A}^j = \Phi_A^{\text{GPS},j} - N_A^j = f \cdot T^j + a^j - N_A^j \quad (1.6)$$

Χρησιμοποιώντας όλες τις παραπάνω εξισώσεις βγαίνει η εξίσωση παρατήρησης φάσης:

$$\begin{aligned} \varphi_A^j &= \Phi_{0,A} - \Phi_{\text{GPS},A}^j = (f \cdot T_A + a_A) - (f \cdot T^j + a^j - N_A^j) = \\ & f(T_A - T^j) + (N_A^j - a^j + a_A) \end{aligned} \quad (1.7)$$

Που τέλος πολλαπλασιαζόμενη με το μήκος κύματος  $\lambda=c/f$  δίνει τη φάση εκφρασμένη σε μονάδες απόστασης δηλαδή:

$$L_A^j = \lambda \varphi_A^j = c(T_A - T^j) + \lambda(N_A^j - a^j + a_A) = c(T_A - T^j) + \lambda b_A^j \quad (1.8)$$

Όπου ο όρος  $c(T_A - T^j)$  είναι η ψευδοαπόσταση και  $b_A^j$  είναι ο όρος της ασάφειας φάσης (εξαρτάται από καθυστερήσεις της τροπόσφαιρας, ιονόσφαιρας, κτλ.)

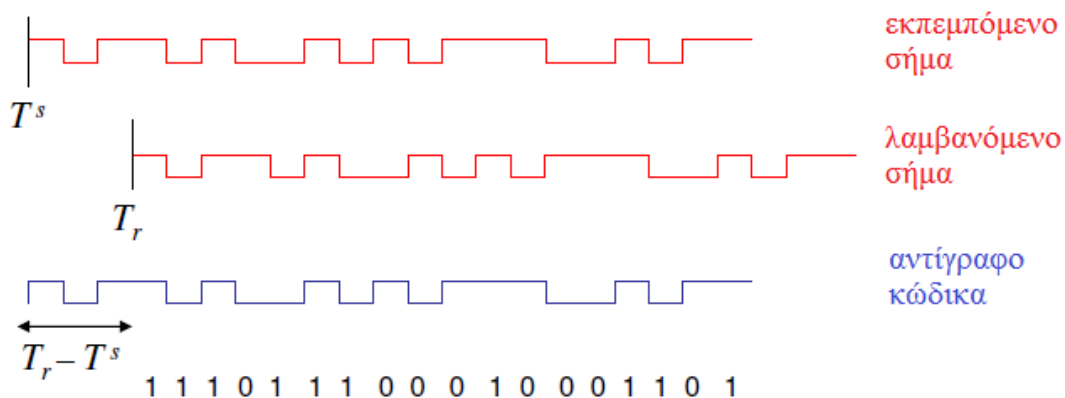
### **1.2.1β Μετρήσεις Κώδικα (Ψευδοαπόστασης) (Code (Pseudorange) Measurements)**

Οι δέκτες του συστήματος GPS, συγκρίνουν τους κώδικες που λαμβάνουν με αντίγραφα που φτιάχνουν οι ίδιοι. Οι κώδικες αυτοί όμως δεν ταυτίζονται ακριβώς κυρίως λόγω του χρόνου διάδοσης σήματος αλλά και μιας διαφοράς χρόνου μεταξύ τους που οφείλεται σε ορισμένα σφάλματα όπως λόγω της ατμοσφαιρικής διάθλασης, και λόγω των σφαλμάτων των χρονομέτρων του δορυφόρου και του δέκτη.

Η διαφορά χρόνου μεταξύ των δύο κωδίκων πολλαπλασιαζόμενη με την ταχύτητα του φωτός (ταχύτητα διάδοσης του κύματος) ονομάζεται ψευδοαπόσταση. (Παραδείσης, 2000)

Έστω ότι ο δορυφόρος  $s$  εκπέμπει ένα συγκεκριμένο τμήμα του κώδικα στη χρονική στιγμή  $T^s$  μετρούμενη από το χρονόμετρο του δορυφόρου. Κατά τον ίδιο τρόπο ο δέκτης λαμβάνει το ίδιο τμήμα του κώδικα στη χρονική στιγμή  $T_r$  μετρούμενη από το χρονόμετρο του δέκτη. Για τη μέτρηση της χρονικής καθυστέρησης ο δέκτης δημιουργεί ένα αντίγραφο τον κώδικα του δορυφόρου το οποίο στη συνέχεια συσχετίζεται με το αρχικό εκπεμπόμενο σήμα. Μετά τη συσχέτιση το σήμα μετατοπίζεται κατά μία χρονική περίοδο  $\tau$ . Η μεγαλύτερη συσχέτιση υπάρχει στην περίπτωση που η περίοδος  $\tau$  αντιστοιχεί με τη χρονική διαφορά  $T_r - T^s$ . Η εξίσωση της ψευδοαπόστασης είναι:

$$P_r^s = c(T_r - T^s) \quad (1.9)$$



Σχήμα 1.8 : Μετρήσεις Ψευδοαπόστασης

(Πηγή: Hugentobler, 2013)

Στην περίπτωση που τα χρονόμετρα του δορυφόρου και του δέκτη είναι απολύτως συγχρονισμένα αυτή η χρονική διαφορά αντιστοιχεί στο χρόνο διάδοσης του σήματος από τον δορυφόρο στον δέκτη που πολλαπλασιαζόμενη με τη ταχύτητα του φωτός δίνει σαν αποτέλεσμα την απόσταση. Επειδή όμως τα χρονόμετρα δεν είναι απολύτως συγχρονισμένα η απόσταση ονομάζεται «ψευδοαπόσταση».

Αν εκφραστούν οι χρόνοι ως προς τον χρόνο GPS η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφτεί:

$$P_r^s = c(T_r - T^s) = c(t_r + \delta t_r - t^s - \delta t^s) = c(t_r - t^s) + c\delta t_r - c\delta t^s = \rho_r^s + c\delta t_r - c\delta t^s \quad (1.10)$$

όπου:

$t_r, t^s$  : οι χρονικές στιγμές της λήψης και της αποστολής του σήματος σε χρόνο GPS

$\delta t_r, \delta t^s$  : οι διορθώσεις χρονομέτρων δέκτη και δορυφόρου

$\rho_r^s$  : η γεωμετρική απόσταση δέκτη-δορυφόρου

Το παραπάνω μοντέλο είναι απλοποιημένο και δεν λαμβάνει υπόψη τις καθυστερήσεις λόγω της ατμόσφαιρας.

Η γεωμετρική απόσταση δορυφόρου-δέκτη μπορεί να γραφτεί περαιτέρω ως εξής χρησιμοποιώντας τα διανύσματα απόστασης του δορυφόρου  $r^s=(x^s, y^s, z^s)$  και του δέκτη  $r_r=(x_r, y_r, z_r)$  :

$$\rho_r^s = \sqrt{(x^s - x_r)^2 + (y^s - y_r)^2 + (z^s - z_r)^2} \quad (1.11)$$

Από τις εξισώσεις 1.10 και 1.11 το διάνυσμα θέσης και το σφάλμα χρονομέτρου του δορυφόρου είναι οι γνωστές πληροφορίες ενώ οι αντίστοιχοι όροι από αφορούν το δέκτη είναι οι άγνωστοι όροι. Για αυτόν τον λόγο χρειάζονται τουλάχιστον τέσσερις εξισώσεις παρατήρησης από τέσσερις διαφορετικούς δορυφόρους.

Στην εξίσωση προστίθενται και άλλοι όροι κυρίως εξαιτίας της καθυστέρησης λόγω της ιονοσφαιρικής και τροποσφαιρικής διάθλασης. Επιπλέον προστίθεται και ένας όρος που εκφράζει το τυχαίο σφάλμα.

$$P_r^s = \rho_r^s + c\delta t_r - c\delta t^s + I_r^s + T_r^s + \varepsilon_r^s \quad (1.12)$$

όπου:

$I_r^s, T_r^s$ : οι όροι της καθυστέρησης λόγω της ιονοσφαιρικής και τροποσφαιρικής διάθλασης αντίστοιχα

$\varepsilon_r^s$ : όρος που εκφράζει το τυχαίο σφάλμα

Αυτή η μορφή αποτελεί την εξίσωση παρατήρησης της ψευδοαπόστασης σε σχεδόν πλήρη ανάπτυξη.

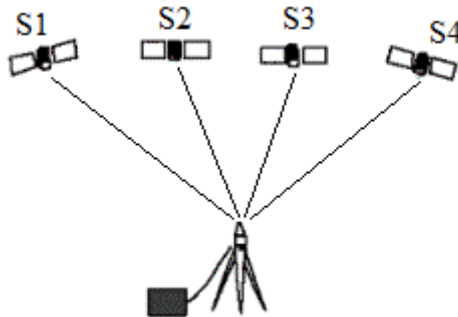
## 1.2.2 Κατηγορίες Μεθόδων Προσδιορισμού Θέσης με GPS

Η μέθοδος μέτρησης και προσδιορισμού θέσης σε μία συγκεκριμένη εφαρμογή εξαρτάται πάρα πολύ από την απαιτούμενη ακρίβεια, γεγονός που οδηγεί και στην κατάλληλη επιλογή των δεκτών. Γενικά ο προσδιορισμός θέσης μπορεί να διακριθεί σε στατικό και κινηματικό προσδιορισμό, σε προσδιορισμό εκ των υστέρων και σε προσδιορισμό σε πραγματικό χρόνο, και τέλος σε απόλυτο και σε σχετικό προσδιορισμό θέσης. Οι κατηγορίες αυτές αποτελούν μεθόδους, τεχνικές ή και διαδικασίες οι οποίες συνδυάζονται μεταξύ τους ανάλογα με την εφαρμογή.

### 1.2.2α Απόλυτος προσδιορισμός και σχετικός προσδιορισμός θέσης

Ένας διαχωρισμός των μεθόδων προσδιορισμού της θέσης είναι αυτός ανάμεσα σε απόλυτο προσδιορισμό (*absolute positioning, point positioning, single point positioning*) και σχετικό προσδιορισμό θέσης (*relative positioning, differential positioning*) που μπορεί να γίνει κατά τη διάρκεια των μετρήσεων (ταυτόχρονα-σε πραγματικό χρόνο (*real time*)).

Με τον απόλυτο προσδιορισμό θέσης εννοείται ο προσδιορισμός της θέσης του δέκτη από δικές του παρατηρήσεις. Οι άγνωστες συντεταγμένες του δέκτη (X,Y,Z) ή (φ,λ,h) υπολογίζονται ως προς το WGS84 ή και σε οποιοδήποτε άλλο γεωδαιτικό datum και προβολικό σύστημα χρησιμοποιώντας τις γνωστές συντεταγμένες των δορυφόρων που παρακολουθούν. (Σχήμα 1.9)

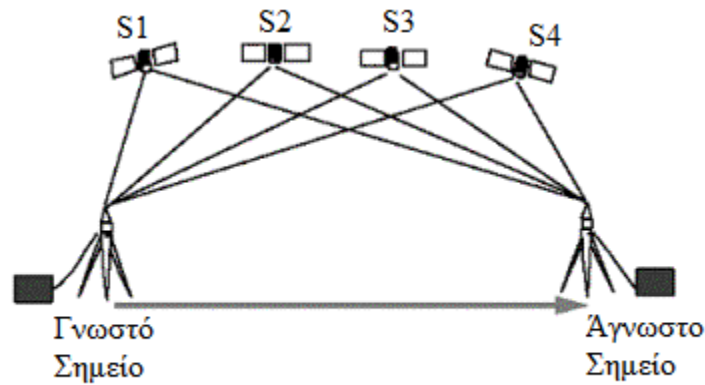


Σχήμα 1.9 : Απόλυτος Προσδιορισμός Θέσης

(Πηγή: GPS POSITIONING GUIDE, 1995)

Στο Σχήμα 1.9 οι s1, s2, s3 και s4 αντιπροσωπεύουν τους τέσσερις διαφορετικούς δορυφόρους που παρακολουθούνται. Οι θέσεις των δορυφόρων αναφέρονται στο κέντρο της γης του συστήματος X, Y, Z. Οι συντεταγμένες του δορυφόρου s1 δίνονται σαν (Xs1, Ys1, Zs1). Οι συντεταγμένες του αγνώστου σημείου r , επίσης ως προς το κέντρο της γης δίνονται σαν (Xr, Yr, Zr).

Στον σχετικό προσδιορισμό θέσης οι συντεταγμένες του δέκτη σε ένα άγνωστο σημείο υπολογίζονται ως προς έναν άλλο δέκτη που συνήθως τοποθετείται σε σημείο γνωστών συντεταγμένων. Η ιδέα του σχετικού προσδιορισμού απεικονίζεται στο Σχήμα 1.10. Σε αυτή την περίπτωση αντί του προσδιορισμού ενός σημείου στη γη από τους δορυφόρους, η θέση ενός σημείου προσδιορίζεται σε σχέση με ένα άλλο γνωστών συντεταγμένων. Το πλεονέκτημα σε αυτή την περίπτωση είναι ότι με αυτή την διαδικασία επιτυγχάνονται μεγαλύτερες ακρίβειες διότι οι παρατηρήσεις από τους δορυφόρους είναι κοινές και στους δύο δέκτες και συνεπώς μειώνονται τα κοινά σφάλματα.

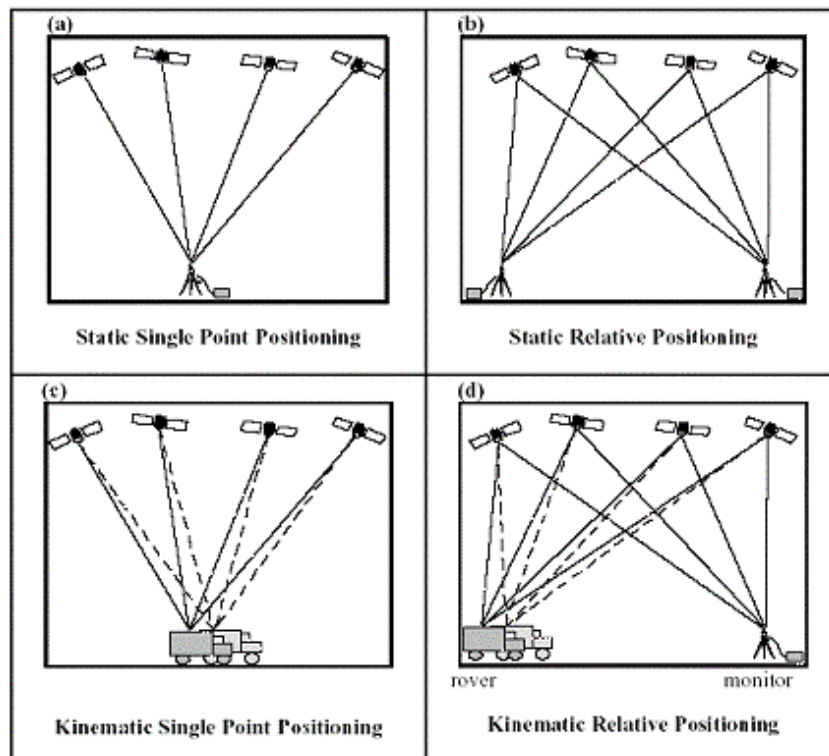


Σχήμα 1.10 : Σχετικός Προσδιορισμός Θέσης

(Πηγή: GPS POSITIONING GUIDE, 1995)

### 1.2.2β Στατικός και Κινηματικός Προσδιορισμός θέσης

Ένας ακόμη διαχωρισμός των μεθόδων προσδιορισμού θέσης είναι αυτός ανάμεσα σε στατικό και κινηματικό προσδιορισμό θέσης. Στη περίπτωση του στατικού προσδιορισμού θέσης ο δέκτης είναι ακίνητος ενώ αντίθετα στην περίπτωση του κινηματικού ο δέκτης λαμβάνει τις απαραίτητες πληροφορίες εν κινήσει. Σε κάθε μία από τις δύο περιπτώσεις διακρίνονται επίσης ο απόλυτος και ο σχετικός προσδιορισμός (Σχήμα 1.11).



Σχήμα 1.11 : Στατικός και Κινηματικός Εντοπισμός

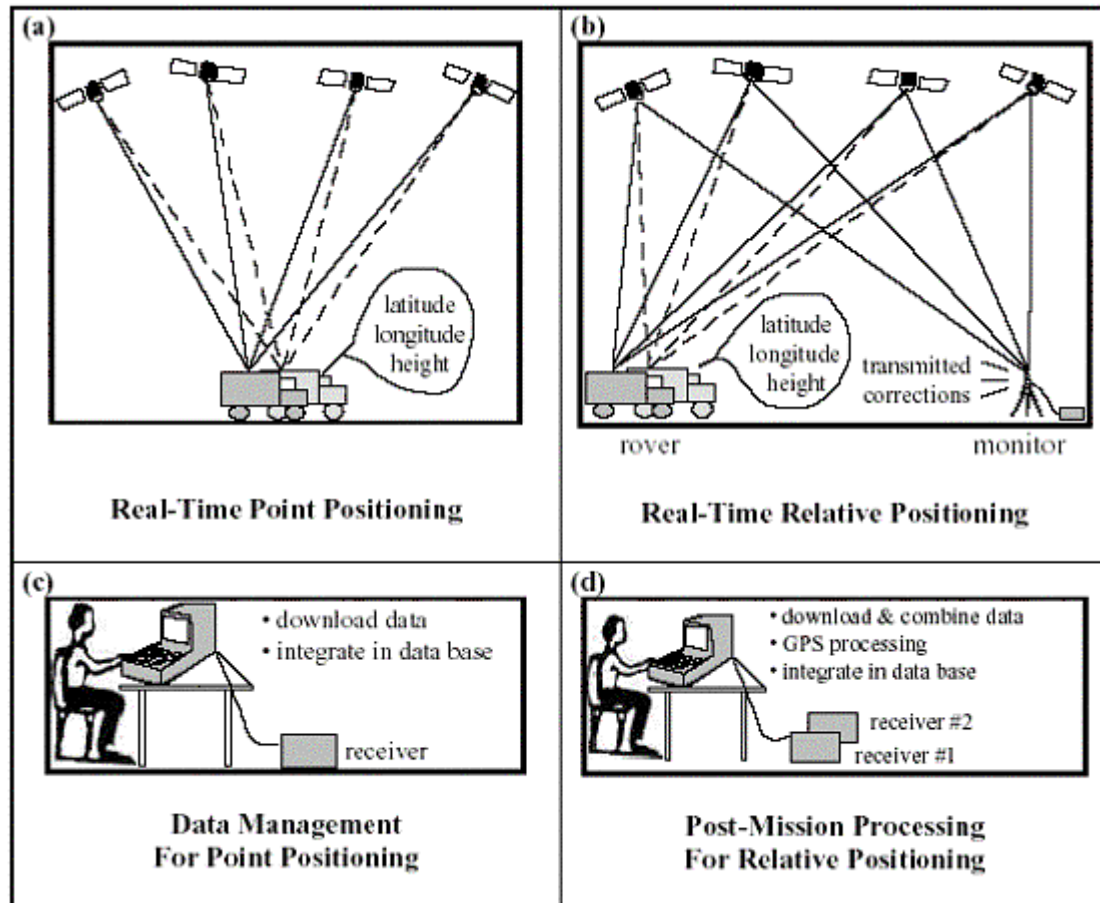
(Πηγή: GPS POSITIONING GUIDE, 1995)



### 1.2.2γ Σε πραγματικό χρόνο και εκ των υστέρων

Οι θέσεις των δεκτών μπορούν να υπολογιστούν είτε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, δηλαδή ταυτόχρονα (*real time*) είτε εκ των υστέρων με υπολογισμούς στο γραφείο.

Στην περίπτωση του πραγματικού χρόνου οι θέσεις υπολογίζονται αμέσως και επί τόπου ενώ αντίθετα στην εκ των υστέρων επεξεργασία τα δεδομένα χρησιμοποιούνται αφότου μαζευτούν όλες οι πληροφορίες.



Σχήμα 1.12 : Μέθοδοι Επεξεργασίας

(Πηγή: GPS POSITIONING GUIDE, 1995)

## 1.3 Πηγές Σφαλμάτων

Τα σφάλματα που επηρεάζουν τη λειτουργία των συστημάτων GNSS τα διακρίνουμε σε συστηματικού κυρίως χαρακτήρα (*systematic errors, biases*) που επηρεάζουν τον προσδιορισμό θέσης (και χρόνου κατά περίπτωση) με παρατηρήσεις GNSS. Τα τυχαία σφάλματα (*random errors*), που προφανώς είναι αναπόφευκτα κατά την εκτέλεση των μετρήσεων, αποκαλούνται συνήθως ως θόρυβος (*noise*). Τα σφάλματα GNSS μπορούν να χωρισθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες με τις επιμέρους υποκατηγορίες τους:

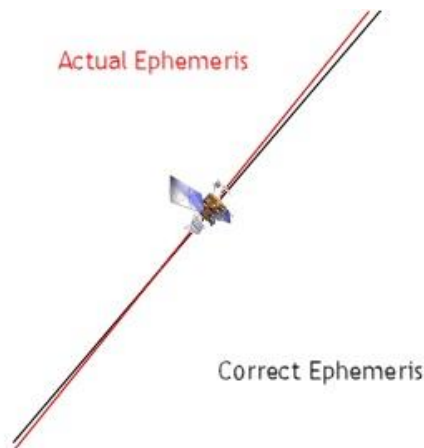
### 1.3.1 Σφάλματα Δορυφόρων

#### 1.3.1α Σφάλμα χρονομέτρου δορυφόρου

Οφείλεται στον μη συγχρονισμό του ατομικού χρονομέτρου του κάθε δορυφόρου ως προς το χρόνο GNSS, που υλοποιεί την κλίμακα χρόνου του συστήματος. Αντί να γίνει διόρθωση του χρόνου στο ατομικό χρονόμετρο του κάθε δορυφόρου, υπολογίζεται το σφάλμα της χρονικής κλίμακας των δορυφόρων από την χρονική κλίμακα GNSS με πρόγνωση για χρήση σε πραγματικό χρόνο.

#### 1.3.1β Σφάλμα τροχιάς δορυφόρου

Είναι η συστηματική παρέκκλιση της θέσης (και της ταχύτητας) του δορυφόρου από την πραγματική θέση, την θέση που είναι γνωστή με βάση τις παρατηρήσεις για τον υπολογισμό τροχιών και των μαθηματικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται (Σχήμα 1.13). Αυτές οι μικρές μετατοπίσεις των τροχιών οφείλονται κυρίως στις διαταρακτικές δυνάμεις του γήινου πεδίου βαρύτητας. Ο Ήλιος και η Σελήνη επίσης ασκούν μια μικρή επιρροή στις τροχιές εξ αιτίας ανάλογων βαρυτικών επιδράσεων. Επομένως, η επιρροή στην ακρίβεια του προσδιορισμού θέσης είναι μάλλον χαμηλή, το σφάλμα που προκύπτει δεν ξεπερνά τα 2 m. Σφάλματα στην ακρίβεια μπορούν να συντεθούν από τις μικρές ανακρίβειες στη τροχιακή εφημερίδα κάθε δορυφόρου. Η εφημερίδα είναι ένας πίνακας που μεταξύ άλλων δίνει τις συντεταγμένες ενός δορυφόρου κατά τη διάρκεια του χρόνου. Εάν η πραγματική πορεία του δορυφόρου παρεκκλίνει από την τροχιά όπως ορίζεται στην εφημερίδα του, η ακρίβεια μπορεί να υποβιβαστεί περαιτέρω. Γενικά, εάν τα σφάλματα μιας τροχιάς υπερβούν καθορισμένα αποδεκτά επίπεδα αποκλίσεων από την εκάστοτε σχεδιασμένη τροχιά, αυτά μπορούν να διορθωθούν με την ενεργοποίηση των μικρών πυραύλων που βρίσκονται στους ίδιους τους δορυφόρους. Οι εντολές για τέτοιες ρυθμίσεις διαβιβάζονται προς τον εκάστοτε συγκεκριμένο δορυφόρο από τον κύριο σταθμό ελέγχου (*Master Control Stations*).



Σχήμα 1.13 : Αποκλίσεις από την Πραγματική Πορεία

(Πηγή: [www.developerfusion.com/article/4652/writing-your-own-gps-applications-part-2/2/](http://www.developerfusion.com/article/4652/writing-your-own-gps-applications-part-2/2/), 2014)

### **1.3.1γ Σφάλμα επιλεκτικής διαθεσιμότητας**

Είναι μια μέθοδος σκόπιμης μείωσης της εγγενούς ακρίβειας του συστήματος, που επιβάλλεται με δυο διαφορετικές τεχνικές - είτε μειώνοντας την ακρίβεια των παραμέτρων της εκπεμπόμενης δορυφορικής εφημερίδας, είτε μέσω μεταβολής της συχνότητας εξόδου του δορυφορικού χρονομέτρου. Αυτή όμως δεν εφαρμόζεται πλέον.

### **1.3.2 Σφάλματα Δεκτών**

#### **1.3.2α Σφάλμα χρονομέτρου δέκτη**

Οφείλεται στον μη συγχρονισμό του χρονομέτρου του δέκτη με την κλίμακα χρόνου GNSS εκφράζεται από το αντίστοιχο σφάλμα που είναι σημαντικό και δεν μπορεί να αγνοηθεί. Το σφάλμα αυτό είναι συνάρτηση του χρόνου, μπορεί να υπολογίζεται σε κάθε εποχή παρατήρησης και σχεδόν απαλείφεται από τις παρατηρήσεις με τις διαδικασίες σχετικού προσδιορισμού θέσης. Στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο υπολογίζεται ταυτόχρονα με τη θέση.

#### **1.3.2β Τυχαίο σφάλμα παρατήρησης**

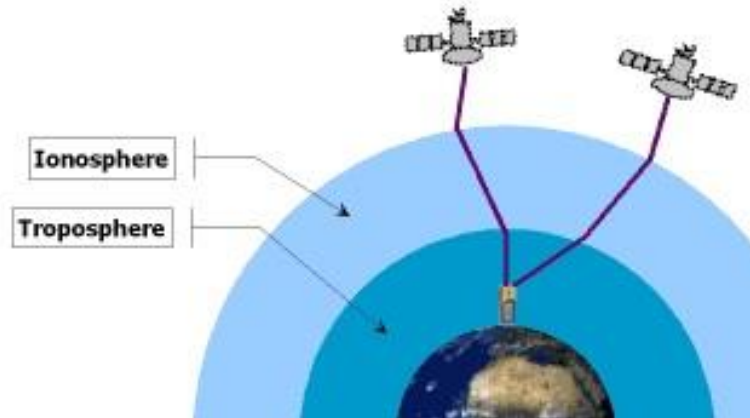
Πρόκειται για αναπόφευκτο σφάλμα το οποίο χαρακτηρίζει κάθε παρατήρηση όπως και σε κάθε είδους μέτρηση κλασικού τύπου τα οποία μπορούν να αντιμετωπιστούν με μοντέλα της στατιστικής και της θεωρίας σφαλμάτων.

#### **1.3.2γ Μεταβολές του κέντρου φάσης της κεραίας**

Το κέντρο φάσης (δηλαδή το σημείο που γίνεται η λήψη δορυφορικών σημάτων στην κεραία) δεν ταυτίζεται με το σημείο αναφοράς ως προς το οποίο προσδιορίζεται το ύψος της κεραίας δεν είναι άμεσα υλοποιήσιμο ώστε να μπορεί να μετρηθεί άμεσα. Η απόκλιση του κέντρου φάσης γύρω από μία μέση θέση είναι της τάξης των λίγων χιλιοστών και αποκτά κρίσιμο χαρακτήρα στις εφαρμογές υψηλής ακρίβειας.

### 1.3.2δ Σφάλμα της αβεβαιότητας του γνωστού σημείου

Στο σχετικό προσδιορισμό θέσης οποιοδήποτε σφάλμα στη θέση του σημείου που διατηρείται σταθερό κατά την επίλυση μιας βάσης επηρεάζει σημαντικά τις εκτιμήσεις των συνιστωσών ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ ) στη λύση της βάσης.



Σχήμα 1.14 : Το Ατμοσφαιρικό Σφάλμα

(Πηγή: <http://www.malfreemaps.com/viewtopic.php?p=18796>,2014)

### 1.3.3 Σφάλματα Διάδοσης Σήματος

#### 1.3.3α Τροποσφαιρικό σφάλμα

Προκύπτει από την επίδραση του χαμηλότερου τμήματος ( $H < 50\text{m}$ ) της ατμόσφαιρας στη διαδρομή του δορυφορικού σήματος (Σχήμα 1.14). Η τροποσφαιρική διάθλαση καθυστερεί χρονικά τη διάδοση του σήματος λόγω αλλαγής της κατεύθυνσης του σήματος σε σχέση με την ευθύγραμμη διαδρομή στο κενό. Η τροποσφαιρική καθυστέρηση εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την πίεση και την υγρασία της ατμόσφαιρας. Το τροποσφαιρικό σφάλμα επιδρά το ίδιο στους κώδικες και στις μετρήσεις φάσεις ανεξάρτητα από τη συχνότητα L1 και L2. Δεν μπορεί να απαλειφθεί με δέκτες δυο συχνοτήτων όπως συμβαίνει με το ιονοσφαιρικό σφάλμα και υπολογίζεται μερικώς από μοντέλα που βασίζονται σε μετρήσεις της θερμοκρασίας, πίεσης και υγρασίας της ατμόσφαιρας στη θέση του εκάστοτε δέκτη.

#### 1.3.3β Ιονοσφαιρικό σφάλμα

Προκύπτει από την επίδραση του τμήματος της ατμόσφαιρας, που εκτείνεται από περίπου 50 έως 1000 km από τη γήινη επιφάνεια, στη διάδοση του δορυφορικού σήματος. Η ύπαρξη ελευθέρων φορτισμένων σωματιδίων στην ιονόσφαιρα μεταβάλλει την ταχύτητα, τη διεύθυνση και την πολικότητα με μεγαλύτερη την επίδραση στην ταχύτητα και συνεπώς στην απόσταση δορυφόρου – δέκτη. Με δέκτες δύο συχνοτήτων το ιονοσφαιρικό σφάλμα μπορεί ουσιαστικά να περιοριστεί αν χρησιμοποιήσουμε κατάλληλο γραμμικό συνδυασμό πρωτογενών παρατηρήσεων των δυο συχνοτήτων. Το μέγεθος του ιονοσφαιρικού σφάλματος, γενικά ποικίλει και

κυμαίνεται από περίπου 1 m έως και πάνω από 100m στον ορίζοντα. Κατά τη διάρκεια της νύκτας το ιονοσφαιρικό σφάλμα μειώνεται πέντε φορές περίπου ή και περισσότερο σε σχέση με τη μέρα.

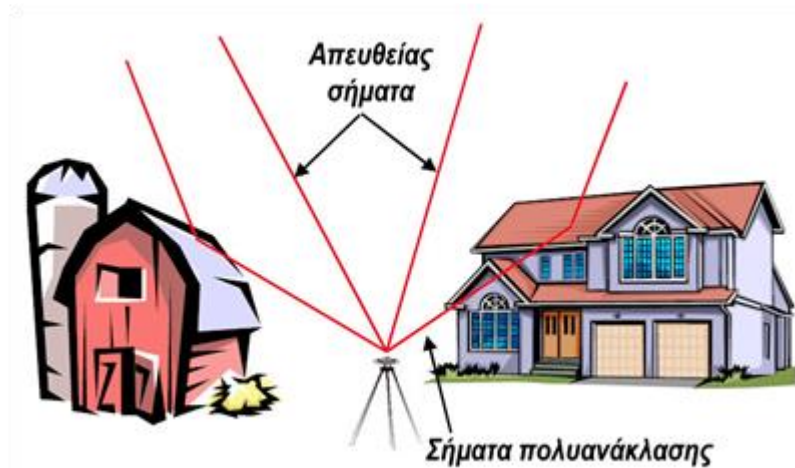
### **1.3.3γ Σφάλμα πολυανάκλασης**

Προκύπτει όταν το ίδιο δορυφορικό σήμα λαμβάνεται και από άλλη ή άλλες έμμεσες διαδρομές εκτός από την κανονική του πορεία, εξαιτίας της ανάκλασής του σε γειτονικές επιφάνειες, π.χ. επιφάνειες κτιρίων, μεγάλες μεταλλικές επιφάνειες, κ.α. (Σχήμα 1.15). Έτσι, το σήμα ακολουθώντας μεγαλύτερη διαδρομή από την κανονική, καθυστερεί και επηρεάζει τις παρατηρήσεις GNSS.

Το σφάλμα πολυανάκλασης του δέκτη είναι συνάρτηση της γεωμετρίας του περιβάλλοντα χώρου. Επίσης εξαρτάται από την γωνία ύψους του δορυφόρου. Όσο πιο μικρή η γωνία ύψους τόσο περισσότερο πιθανό είναι να εμφανίζεται σφάλμα πολυανάκλασης. Ο πιο ασφαλής τρόπος για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος της πολυανάκλασης είναι η κατάλληλη επιλογή της θέσης του δέκτη (όχι κοντά σε ψηλά γειτονικά κτίρια και γενικά κοντά σε εμπόδια).

Γενικά το σφάλμα της πολυανάκλασης είναι από τα πιο δύσκολα στη μοντελοποίησή του, γιατί είναι αδύνατο να γνωρίζουμε *a priori* την επίδραση των γειτονικών επιφανειών στο σημείο που τοποθετούμε τον δέκτη, με αποτέλεσμα να μην συμπεριλαμβάνεται στο μαθηματικό μοντέλο της συνόρθωσης.

Στις εφαρμογές στατικού τύπου οι επιδράσεις του τείνουν να μειωθούν λόγω της μεταβολής της γεωμετρίας δέκτη-δορυφόρου κατά τη διάρκεια μιας μετρητικής περιόδου που διαρκεί περισσότερο χρόνο, ενδεικτικά πάνω από μια ώρα. Ωστόσο, το σφάλμα πολυανάκλασης είναι το μόνο που δεν εξαλείφεται ακόμη και με διαδικασίες σχετικού εντοπισμού σε μικρές γραμμές βάσης μεταξύ σημείων. Αυτό συμβαίνει επειδή εξαρτάται από τη γεωμετρία και το περιβάλλον κάθε σημείου στο οποίο έχει τοποθετηθεί η κεραία του δέκτη. Ως εκ τούτου, οι πολλαπλές ανακλάσεις αποτελούν σημαντική πηγή εναπομείναντος σφάλματος ακόμα και στις διπλές διαφορές μετρήσεων GPS. Η επίδρασή του στις κινηματικές εφαρμογές είναι μεγαλύτερη, καθώς η συνεχώς (εξ αιτίας της κίνησης) μεταβαλλόμενη συμπεριφορά των σφαλμάτων πολυανάκλασης κάνει το πρόβλημα ακόμα εντονότερο, αφού είναι πολύ δύσκολο να αφαιρεθεί η συγκεκριμένη επίδραση από τα δεδομένα.



Σχήμα 1.15 : Σφάλμα Πολυανάκλασης

### 1.3.3δ Σφάλμα ολίσθησης αέριων ασαφειών φάσης

Είναι χαρακτηριστικό των μετρήσεων φάσης του φέροντος κύματος και οφείλεται σε περιπτώσεις εμποδίων στην πορεία του σήματος, σε αδυναμία των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων του δέκτη ή και υψηλής ιονοσφαιρικής δραστηριότητας, που έχουν ως αποτέλεσμα την στιγμιαία απώλεια λήψης του σήματος. Το συστηματικό αυτό σφάλμα είναι εύκολα ανιχνεύσιμο αλλά δύσκολα προσδιορίσιμο και ο ακριβής υπολογισμός του είναι εφικτός μόνο με τη σύνθεση παραγώγων μετρήσεων (*derived observables*) που αποτελούνται από γραμμικούς συνδυασμούς των πρωτογενών ή/και των απλών ή διπλών διαφορών μετρήσεων φάσης και ενδεχομένως μετρήσεων ψευδοαπόστασης με τη λήψη σημάτων σε δύο ή περισσότερες συχνότητες.

## 1.4 Μέτρα Ποιότητας Δορυφορικού Εντοπισμού

Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά απόδοσης για όλα τα συστήματα GNSS είναι (Σχήμα 1.16):

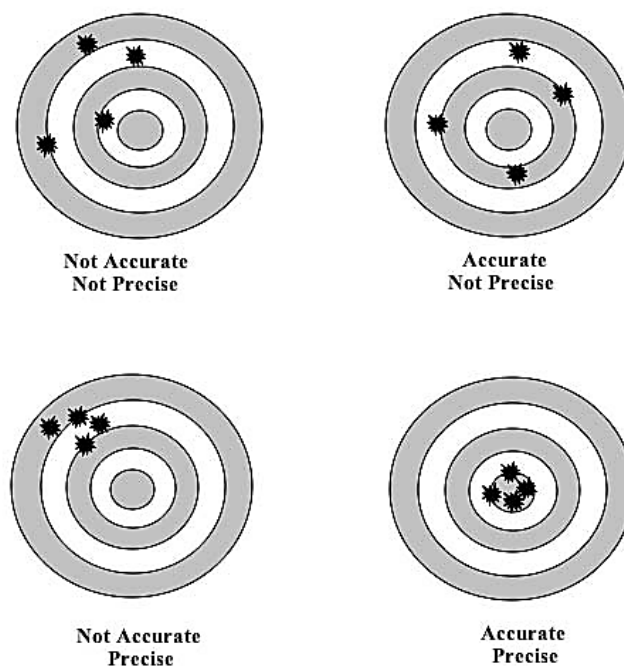
- Ορθότητα – (*accuracy*)
- Ακρίβεια – (*precision*)
- Διαθεσιμότητα – (*availability*)
- Ακεραιότητα – (*integrity*)
- Συνέχεια - (*continuity*)

Η ποιότητα αυτών εξαρτάται από το ίδιο το σύστημα GNSS. Κάθε χαρακτηριστικό καθορίζεται ως (Hynek Mocek, 2008):

**Ορθότητα:** για έναν δεδομένο δορυφορικό σχηματισμό, πόσο κοντά στη θεωρητική αληθινή θέση μπορεί να είναι ο δέκτης στις τρεις διαστάσεις. Η ορθότητα δεν είναι δυνατόν να εκτιμηθεί από μια σειρά μετρήσεων από το ίδιο σύστημα όργανο-παρατηρητής-συνθήκες.

**Ακρίβεια:** Με άλλα λόγια είναι η έννοια που αναφέρεται στο πόσο πλησιάζουν οι μετρήσεις μεταξύ τους. Εξαρτάται από την ευαισθησία του οργάνου και την ικανότητα του παρατηρητή. Η ακρίβεια μπορεί να εκτιμηθεί από μια σειρά μετρήσεων με το ίδιο σύστημα «όργανο-παρατηρητής-συνθήκες». (Αγατζά - Μπαλοδήμου, 2005)

Ο συνδυασμός ορθότητας και ακρίβειας συχνά ονομάζεται **αξιοπιστία** (*reliability*). Στο Σχήμα 1.16 περιγράφονται χηματικά οι διαφορές των δύο αυτών εννοιών.



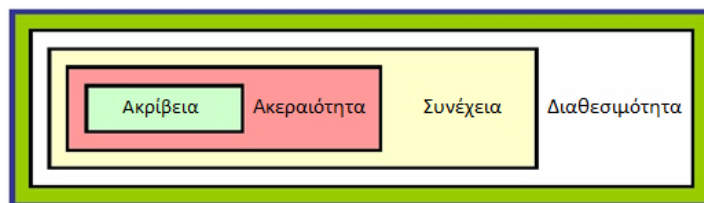
Σχήμα 1.16: Οι έννοιες της ορθότητας και της ακρίβειας

(Πηγή: [http://celebrating200years.noaa.gov/magazine/tct/accuracy\\_vs\\_precision.html](http://celebrating200years.noaa.gov/magazine/tct/accuracy_vs_precision.html))

**Ακεραιότητα:** η δυνατότητα του GNSS να παρέχει έγκαιρες προειδοποιήσεις και συναγερμούς στους χρήστες και συμβουλεύει τότε δεν πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Είναι μέτρο εμπιστοσύνης των πληροφοριών που παρέχονται από το εκάστοτε σύστημα.

**Συνέχεια:** η δυνατότητα του συστήματος να διατηρεί την διευκρινισμένη απόδοση κατά τη διάρκεια μιας εφαρμογής χωρίς προγραμματίστες διακοπές.

**Διαθεσιμότητα:** το ποσοστό του χρόνου που οι υπηρεσίες του συστήματος είναι ικανές προς χρήση κατά τη διάρκεια του οποίου παρέχονται αξιόπιστες πληροφορίες.



Σχήμα 1.17 : Χαρακτηριστικά Απόδοσης Συστημάτων GNSS

(Πηγή: “Galileo as an instrument of unification of the European railway transport”,  
Hynek Mocek, 2008)

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζονται οι έννοιες που αναλύθηκαν προηγουμένως, σε μορφή ιεραρχίας, για παράδειγμα για να επιτύχουμε τη διαθεσιμότητα χρειάζονται επίσης συνέχεια, ακεραιότητα και ακρίβεια κ.ο.κ. με βασική ανάγκη την επίτευξη της ακρίβειας.

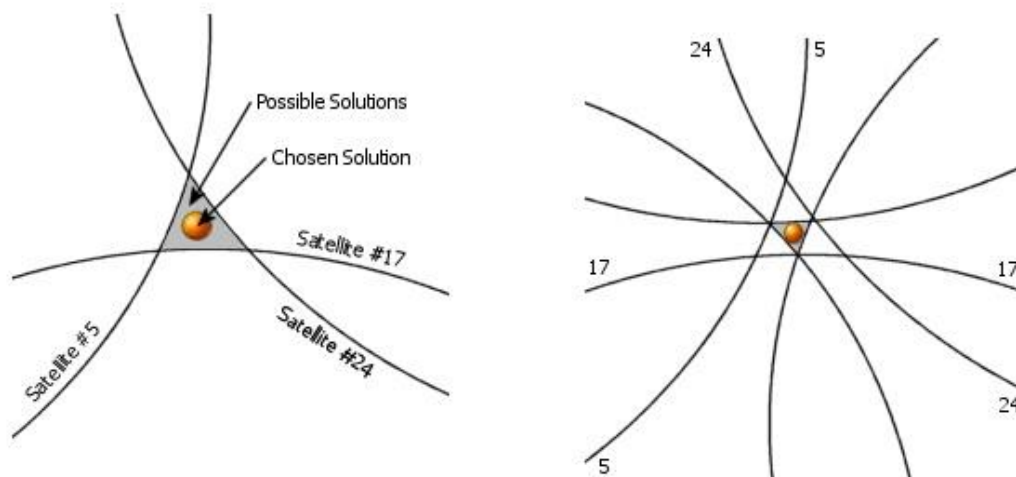
#### 1.4.1 DOP (Dilution of Precision)

Ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την ακρίβεια του προσδιορισμού θέσης είναι η "γεωμετρία των δορυφόρων".

Οι συσκευές GPS υπολογίζουν τη θέση τους χρησιμοποιώντας μια τεχνική αποκαλούμενη "πλευρική οπισθοτομία στο χώρο", η οποία είναι η διαδικασία όπου διάφορες σφαίρες τέμνονται. Στην περίπτωση του GPS, κάθε σφαίρα έχει έναν δορυφόρο στο κέντρο της και η ακτίνα της σφαίρας είναι η υπολογισμένη απόσταση από το δορυφόρο στο δέκτη GPS. Ιδανικά, αυτές οι σφαίρες θα τέμνονταν σε ακριβώς ένα σημείο, με αποτέλεσμα να υπάρχει μόνο μια πιθανή λύση στην τρέχουσα θέση, αλλά στην πραγματικότητα, αυτό δεν συμβαίνει, οι τομές διαμορφώνουν περισσότερο μία περιοχή μορφής σφαιρικού πολύεδρου. Η θέση του δέκτη θα μπορούσε να βρίσκεται μέσα σε οποιοδήποτε σημείο στην περιοχή. Η τρέχουσα θέση θα μπορούσε να είναι οποιοδήποτε σημείο μέσα στην γκριζα χρωματισμένη περιοχή. Η ακρίβεια εξασθενεί όταν η περιοχή γίνεται μεγαλύτερη. Η παρακολούθηση και ο έλεγχος του συντελεστή γεωμετρικής ακρίβειας DOP (*Dilution of Precision*) είναι απαραίτητα σε εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη ακρίβεια.

Στο Σχήμα 1.18 απεικονίζονται στη γκριζα περιοχή οι πιθανές θέσεις του δέκτη. Στο σχήμα αριστερά με τρεις δορυφόρους οι δέκτες θα πρέπει να επιλέξουν μία από τις πολλές πιθανές λύσεις, ενώ δεξιά με ακόμη τρεις δορυφόρους που διανέμονται ομοιόμορφα δημιουργούν ένα μικρότερου μεγέθους σφαιρικό πολύεδρο στο οποίο μπορεί να αναζητηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η λύση για τη θέση του δέκτη (ο δείκτης DOP είναι χαμηλότερος).



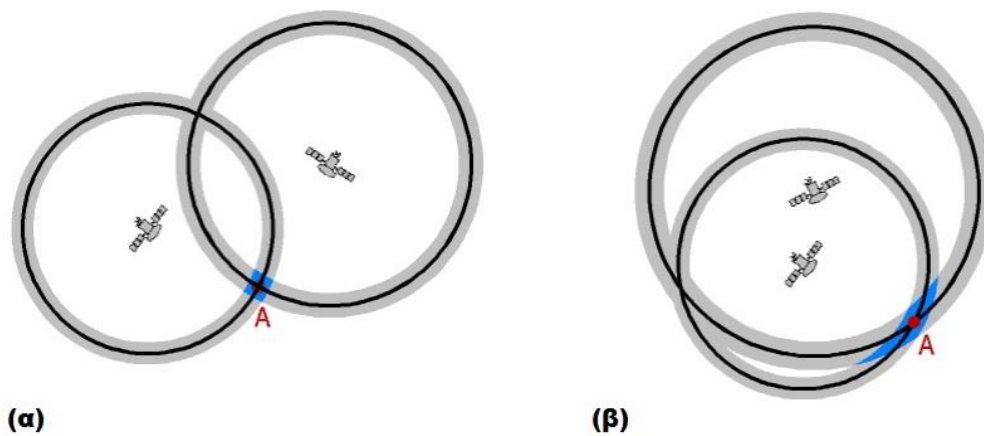


Σχήμα 1.18 : Οι πιθανές Θέσεις του Δέκτη

(Πηγή: [www.developerfusion.com/article/4652/writing-your-own-gps-applications-part-2/2/](http://www.developerfusion.com/article/4652/writing-your-own-gps-applications-part-2/2/))

Ο αριθμός των δορυφόρων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της θέσης και η σχετική γεωμετρία τους ως προς τον ορίζοντα προσδιορίζουν το σφάλμα υπολογισμού της θέσης ενός χρήστη. Για παράδειγμα, αν τέσσερις δορυφόροι είναι συγκεντρωμένοι στην ίδια περιοχή, τότε ένα μέτρο σφάλματος στον υπολογισμό των αποστάσεων προς αυτούς είναι πιθανό να εισάγει δεκάδες ή εκατοντάδες μέτρα σφάλματος στον υπολογισμό της θέσης. Αν όμως αρκετοί δορυφόροι είναι διασκορπισμένοι σε διαφορετικές κατευθύνσεις ως προς τον ορίζοντα τότε το σφάλμα στον υπολογισμό της θέσης είναι πιθανό να είναι μικρότερο από 1.5 m (εκτίμηση για GPS) για κάθε μέτρο σφάλματος στον υπολογισμό των αποστάσεων προς τους δορυφόρους. Η επίδραση της γεωμετρίας των δορυφόρων στο σφάλμα υπολογισμού της θέσης ονομάζεται GDOP (*Geometric Dilution of Precision*) και μπορεί χονδρικά να ερμηνευτεί ως ο λόγος του σφάλματος υπολογισμού της θέσης προς το σφάλμα υπολογισμού των αποστάσεων προς τους δορυφόρους, που περιλαμβάνει και τις επιδράσεις από τη μέτρηση του χρόνου.

Το ακόλουθο σχήμα παρουσιάζει τη περίπτωση δύο δορυφόρων για τη δισδιάστατη περίπτωση. Εάν οι δύο δορυφόροι είναι σε καλή διάταξη όπως στο σχήμα αριστερά, από την άποψη του δέκτη μπορούν να φανούν σε μια γωνία περίπου  $90^\circ$  από τον ένα στον άλλο. Οι πιθανές θέσεις που προκύπτουν από τη μέτρηση των αποστάσεων του δέκτη από κάθε δορυφόρο χαρακτηρίζονται από τους γκριζούς κύκλους όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.19. Το σημείο της διατομής A των δύο κύκλων είναι ένας μικρός, τετραγωνικός τομέας (μπλε) και η καθορισμένη θέση θα είναι σχετικά ακριβής. Ωστόσο εάν οι δορυφόροι τοποθετούνται λίγο πολύ σε μια γραμμή από την άποψη του δέκτη, το επίπεδο της διατομής των πιθανών θέσεων είναι αρκετά μεγαλύτερο και επιμηκυμένο και επομένως ο προσδιορισμός της θέσης είναι λιγότερο ακριβής.

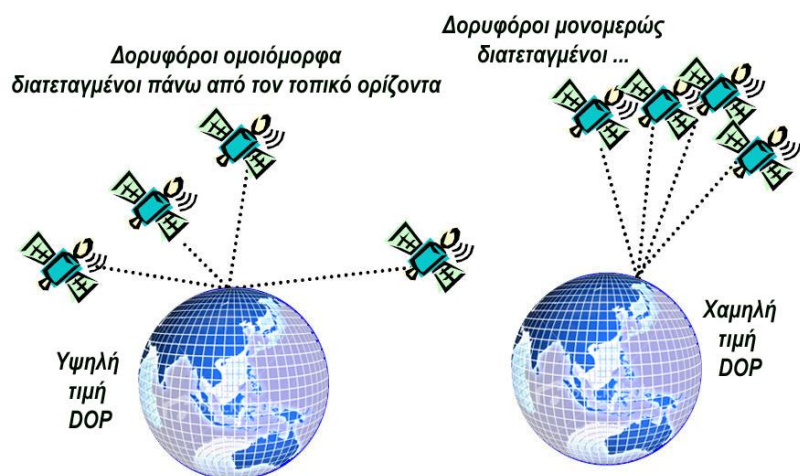


Σχήμα 1.19 : (α) Καλή, (β) Κακή σχετική θέση δύο δορυφόρων

(Πηγή: <http://www.kowoma.de/en/gps/errors.htm>,2014 )

Η ιδανική περίπτωση γεωμετρίας από θεωρητική άποψη και από πρακτική εμπειρία προκύπτει όταν οι τέσσερις επιλεγόμενοι δορυφόροι και το σημείο ενδιαφέροντος σχηματίζουν ένα κανονικό τετράεδρο στο χώρο και βρίσκονται σε τέτοια διάταξη, ώστε ο ένας δορυφόρος να είναι κατευθείαν κατακόρυφα πάνω από την τοποθεσία του δέκτη του χρήστη και οι άλλοι τρεις δορυφόροι να είναι ομοιόμορφα καταναμημένοι στον ορίζοντα του δέκτη (βλ. συγκριτικά την Σχήμα 1.20).

Στη παρακάτω Σχήμα 1.20 απεικονίζονται δυο νοητά τετράεδρα τα οποία σχηματίζονται από τη διάταξη των δορυφόρων στο χώρο πάνω από τον δέκτη. Όσο πιο ομοιόμορφη είναι η κατανομή των δορυφόρων σε όλες τις κατευθύνσεις πάνω από τον τοπικό ορίζοντα του δέκτη, τόσο μικρότερο (καλύτερο) είναι το GDOP. Γενικά όσους περισσότερους δορυφόρους λαμβάνουμε τόσο καλύτερο είναι το GDOP.



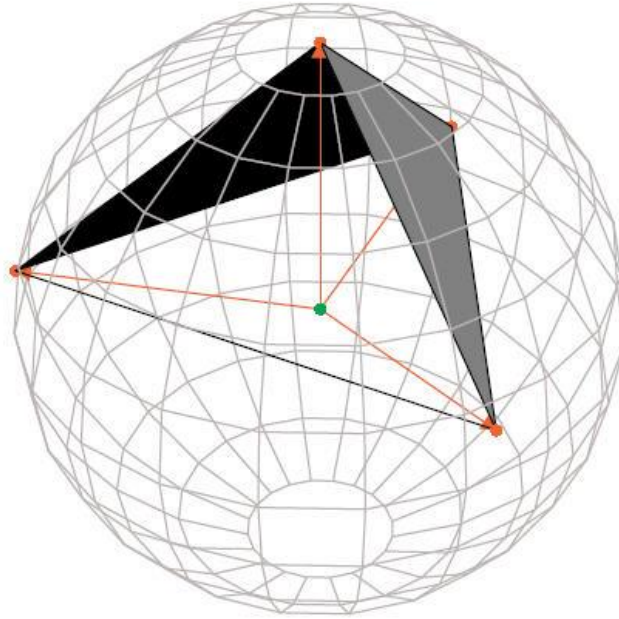
Σχήμα 1.20 : (αριστερά) Καλή, (δεξιά) Κακή Γεωμετρία Δορυφόρων

Στον Πίνακα 1.3 παρουσιάζεται μια κλίμακα ταξινόμησης των τιμών των δεικτών DOP που χρησιμοποιούνται στις διάφορες εφαρμογές. Συνήθως χρησιμοποιούνται τιμές μεταξύ 2 και 8.

<b>ΤΙΜΗ DOP</b>	<b>ΕΚΤΙΜΗΣΗ</b>	<b>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ</b>
<b>1</b>	Ιδανικό	Είναι το πιο υψηλό επίπεδο εμπιστοσύνης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές που απαιτούν την υψηλότερη ακρίβεια κάθε χρονική στιγμή.
<b>2-3</b>	Εξαιρετικό	Σ' αυτό το επίπεδο εμπιστοσύνης, οι μετρήσεις είναι ακριβείς για όλες τις εφαρμογές εκτός από τις πολύ ευαίσθητες
<b>4-6</b>	Καλό	Απεικονίζει το επίπεδο που χαρακτηρίζεται ως λιγότερο κατάλληλο για εκτέλεση εφαρμογών ακριβείας. Οι μετρήσεις θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία αξιόπιστων προτάσεων στις διαδρομές πλοήγησης.
<b>7-8</b>	Μέτριο	Οι μετρήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για υπολογισμούς
<b>9-20</b>	Επαρκές	Αναπαριστά ένα χαμηλό επίπεδο εμπιστοσύνης και θα χρησίμευε σε μία χοντρική εκτίμηση της θέσης.
<b>21-50</b>	Φτωχό	Σε αυτό το επίπεδο, οι μετρήσεις είναι ανακριβείς και πρέπει να απορρίπτονται

Πίνακας 1.3 : Ερμηνεία των Τιμών PDOP

(Πηγή: [www.developerfusion.com/article/4652/writing-your-own-gps-applications-part-2/2/](http://www.developerfusion.com/article/4652/writing-your-own-gps-applications-part-2/2/))



Σχήμα 1.21 : Η Μοναδιαία Σφαίρα & Τέσσερα Διανύσματα

(Πηγή: “Dilution of Precision”, Richard Langley, [www.gpsworld.com](http://www.gpsworld.com))

Αν θεωρήσουμε μία μοναδιαία σφαίρα με κέντρο τον δέκτη, τότε τα διανύσματα από τον δέκτη προς τους τέσσερις δορυφόρους τέμνουν την μοναδιαία σφαίρα σε τέσσερα σημεία. Με κορυφές τα τέσσερα σημεία δημιουργείται ένα τετράεδρο (Σχήμα 1.21). Αποδεικνύεται ότι η τιμή του PDOP είναι ισοδύναμη με την αντίστροφη τιμή του όγκου  $V$  του τετράεδρου. Ισχύει δηλαδή :  $PDOP=1/V$

Η γεωμετρία των δορυφόρων είναι επίσης σχετική όταν χρησιμοποιείται ο δέκτης σε οχήματα ή κοντά σε υψηλά κτήρια. Εάν μερικά από τα σήματα παρεμποδίζονται, οι υπόλοιποι δορυφόροι καθορίζουν την ποιότητα του προσδιορισμού θέσης κατά πόσον ο προσδιορισμός είναι εφικτός. Εάν ο προσδιορισμός θέσης είναι δυνατός σε τέτοια περιβάλλοντα, συνήθως δεν είναι πολύ ακριβής. Όσο μεγαλύτερο είναι το καλυμμένο μέρος του ουρανού, τόσο δυσκολότερος γίνεται και ο προσδιορισμός θέσης του δέκτη.

Οι περισσότεροι δέκτες GPS όχι μόνο δείχνουν τον αριθμό λαμβανόμενων δορυφόρων, αλλά και τη θέση τους στον ουρανό. Αυτό επιτρέπει στο χρήστη να κρίνει, εάν ένας σχετικός δορυφόρος κρύβεται από ένα εμπόδιο και εάν αλλάξει τη θέση του για μερικά μέτρα βελτιώσει την ακρίβειά του.

## 1.4.2 Μέτρα Ακριβείας

Πολλοί και διαφορετικοί δείκτες χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων από GPS. Οι πιο συνηθισμένοι από αυτούς είναι ο δείκτης 2drms (*2-Dimensional Distance Root Mean Square*) και ο δείκτης CEP (*Circular Error Probability*). Υπάρχουν βέβαια και άλλοι δείκτες που περιλαμβάνουν απλές στατιστικές τιμές αλλά δεν θα αναλυθούν στην παρούσα ενότητα.

### 1.4.2α DRMS και 2DRMS

Ο δείκτης DRMS (*Distance Root Mean Square*) είναι ένας αριθμός που εκφράζει την διδιάστατη ακρίβεια. Για τον υπολογισμό των οριζοντιογραφικών σφαλμάτων θέσης ( $\sigma$ ) είναι αναγκαίος ο υπολογισμός από την γνωστή θέση στον ίδιο προσανατολισμό με τους άξονες του συστήματος αναφοράς. Ο δείκτης υπολογίζεται ως η τετραγωνική ρίζα του μέσου όρου των τετραγωνικών σφαλμάτων με τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$DRMS = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (1.13)$$

Τα σφάλματα ( $\sigma$ ) των ποσοτήτων (x,y) από κάθε σημείο μπορούν να προβλεφθούν από τις αντίστοιχες μεταβλητότητες στη διαγώνιο του πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας της λύσης GNSS.

Εκφράζει την πιθανότητα η υπολογιζόμενη θέση να βρίσκεται σε κύκλο ακτίνας ίσης με την τιμή DRMS που κυμαίνεται ανάμεσα σε 63.2% και 68.3%. Ένας άλλος παρόμοιος δείκτης είναι ο 2DRMS που εκφράζει την πιθανότητα ανάμεσα σε 95.4% και 98.2%. Υπολογίζεται ως δύο φορές ο DRMS:

$$2DRMS = 2 \cdot DRMS = 2 \cdot \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (1.14)$$

Τα μειονεκτήματα αυτών των δεικτών είναι ότι δεν υπάρχει σταθερή πιθανότητα που να αναφέρεται σε αυτές τις τιμές και είναι εξαρτημένες από τη γεωμετρία της θέσης της λύσης. Έχει αποδεχθεί ότι οι δείκτες αυτοί είναι συνδεδεμένοι με τον δείκτη DOP σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις (Basic GPS,2014):

$$2DRMS_{Hor} = 2HDOP\sigma_0 \quad (1.15)$$

$$2DRMS_{Ver} = 2VDOP\sigma_0 \quad (1.16)$$

$$2DRMS_{3D} = 2PDOP\sigma_0 \quad (1.17)$$

Όπου  $\sigma_0$  είναι η τυπική απόκλιση του μετρούμενου σφάλματος. Ο δείκτης  $DRMS_{Hor}$  αναφέρεται στις οριζοντιογραφικές συνιστώσες, ο  $DRMS_{Ver}$  αναφέρεται σε κατακόρυφη συνιστώσα, ο  $DRMS_{3D}$  αναφέρεται στην τρισδιάστατη θέση.

### 1.4.2β CEP (Circular Error Probable)

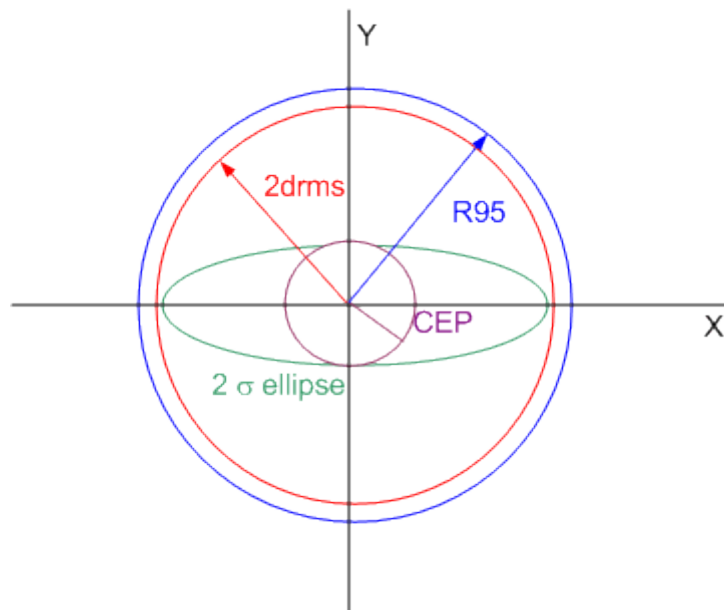
Ένας άλλος δείκτης είναι αυτός του Πιθανού Κυκλικού Σφάλματος που ετυμολογικά σημαίνει "Circle Error Probability" ή εναλλακτικά "Circle of Equivalent Probability". Ο δείκτης CEP αναφέρεται σε μία ακτίνα κύκλου όπου το 50% από τις τιμές που εμφανίζονται. Ορίζεται στον προσδιορισμό του κύκλου όπου κέντρο του είναι η καλύτερη εκτίμηση της θέσης, περιέχοντας το 50% των υπολογιζόμενων τιμών. Για παράδειγμα, ο δείκτης CEP με τιμή 100 m σημαίνει ότι το 50% των λύσεων της θέσης σε οριζοντιογραφία κείται σε κύκλο ακτίνας ίσης προς 100 m.

Η σχέση ανάμεσα στο δείκτη CEP και στον δείκτη 2DRMS δίνεται από την εξίσωση:

$$2DRMS_{Hor} \approx 2,45CEP \quad (1.18)$$

Το μειονέκτημα αυτού του δείκτη είναι ότι δεν δίνει στοιχεία για το υπόλοιπο 50% των μετρήσεων.

Στο Σχήμα 1.22 δίνονται οι τιμές των δεικτών που περιγράφηκαν στη περίπτωση των δύο διαστάσεων σε σύγκριση και με την έλλειψη σφάλματος.



Σχήμα 1.22 : Μέτρα ακριβείας δορυφορικού εντοπισμού

(Πηγή:[nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT-KANPUR/ModernSurveyingTech/lectureB\\_11/B\\_11\\_6accuracy.htm](http://nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT-KANPUR/ModernSurveyingTech/lectureB_11/B_11_6accuracy.htm))

### 1.4.3 Ακεραιότητα των Συστημάτων

Η ακεραιότητα (*Integrity*) είναι η ικανότητα του δορυφορικού συστήματος να παρέχει εγκαίρως προειδοποιήσεις στον χρήστη όταν οι παρατηρήσεις δεν είναι συνετό ή σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν. Η ακεραιότητα σχετίζεται με την εμπιστοσύνη της ορθότητας των πληροφοριών και περιγράφεται από δύο παραμέτρους:

- **Κατώφλι τιμής ή όριο προειδοποίησης (*threshold value or alert limit*):** το μέγιστο επιτρεπόμενο σφάλμα της μετρούμενης θέσης πριν την ενεργοποίηση του συναγερμού.
- **Χρόνος προειδοποίησης (*time-to-alarm*):** ο μέγιστος επιτρεπόμενος χρόνος ανάμεσα σε μία κατάσταση συναγερμού και σε μία κατάσταση εκτός συναγερμού.

Η ακεραιότητα εκφράζεται με τον όρο PHMI (*Probability of Hazardous Misleading Information*) δηλαδή την πιθανότητα επικίνδυνων παραπλανητικών πληροφοριών και εκφράζεται σαν συνάρτηση των οριζοντίων ορίων προειδοποίησης HAL (*Horizontal Alert Limits*) και των κατακόρυφων ορίων προειδοποίησης VAL (*Vertical Alert Limits*).

### 1.5 Τεχνολογία Δεκτών (stand-alone GPS)

Με τον εκσυγχρονισμό των συστημάτων GPS και GLONASS, αλλά και την εμφάνιση καινούργιων συστημάτων GNSS, οι δέκτες εξελίσσονται συνεχώς έτσι ώστε να ανταποκρίνονται στα καινούργια δορυφορικά συστήματα αλλά και στις απαιτήσεις των χρηστών.

Κατά τη δεκαετία του '70, οι δέκτες ήταν μεγάλες αναλογικές συσκευές για στρατιωτικούς σκοπούς. Στις μέρες μας έχουν πλέον εξελιχθεί τόσο ώστε να είναι απλά chip, μικροεπεξεργαστές (*microprocessors*), συσκευές χειρός (*handheld receivers*), λογισμικού (*software receivers*) ακόμα και να βρίσκονται σε κινητά τηλέφωνα. Η τάση προς το μέλλον είναι οι δέκτες να δέχονται και να επεξεργάζονται σήματα περισσότερα του ενός συστήματος GNSS (*multi-constellation receivers*) για χρήση της διαλειτουργικότητας και της συμβατότητας. Τέτοιου είδους δέκτες αναμένεται να έχουν καλύτερη ακρίβεια και διαθεσιμότητα ειδικά σε αστικά περιβάλλοντα.



Σχήμα 1.23 : Διαφορετικοί τύποι δεκτών GNSS: (α) Θαλάσσιος (β) Γεωδαιτικός (γ) Οχήματος (δ) Λογισμικού

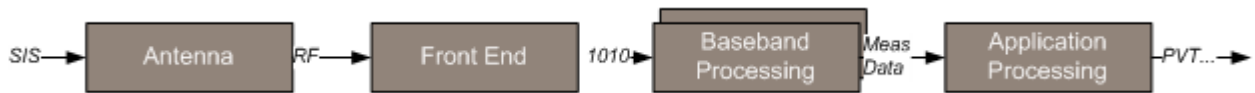
(Πηγή: [http://www.navipedia.net/index.php/GNSS\\_Receivers\\_General\\_Introduction](http://www.navipedia.net/index.php/GNSS_Receivers_General_Introduction))

### 1.5.1 Επισκόπηση της λειτουργίας των δεκτών

Ανεξάρτητα από την αρχιτεκτονική των δεκτών που είναι σχεδιασμένη κάθε φορά για τη χρήση του δέκτη ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία σχεδιάστηκε, οι δέκτες σε γενικές γραμμές περιλαμβάνουν τα επόμενα μέρη (Σχήμα 1.24):

- **Κεραία (Antenna):** Η κεραία λαμβάνει το εξασθενημένο σήμα συχνότητας στην L ζώνη από όλους τους ορατούς δορυφόρους καθώς και πιθανές παρεμβολές και θόρυβο. Συνήθως είναι μικρών διαστάσεων και βάρους ικανή για την λήψη σήματος από όλες τις διευθύνσεις. Σχεδιάζονται έτσι ώστε να λαμβάνουν σήμα είτε στην L1(για δέκτες μίας συχνότητας) είτε στην L2 (για δέκτες δύο συχνοτήτων).
- **Εμπρόσθιο άκρο (Front End):** Το τμήμα αυτό συνήθως μετατρέπει, φιλτράρει, ενισχύει και ψηφιοποιεί τα εισερχόμενα σήματα. Ο προενισχυτής μπορεί να βρίσκεται είτε εσωτερικά είτε εξωτερικά (ως μια ανεξάρτητη μονάδα) συνδεδεμένη με τον κυρίως δέκτη μέσω καλωδίου. Κατόπιν το σήμα διοχετεύεται εσωτερικά στον δέκτη για περαιτέρω επεξεργασία.
- **Μονάδα επεξεργασίας σημάτων (Processing Unit):** Μονάδα στην οποία γίνεται η επεξεργασία του σήματος για την λήψη και το "κλείδωμα" για την παρακολούθηση των εισερχόμενων σημάτων.
- **Επεξεργασία εφαρμογών (Application Processing):** Αναλόγως με την εφαρμογή που είναι σχεδιασμένοι να κάνουν, οι δέκτες εκτελούν τις απαραίτητες ενέργειες ώστε να εκπληρώσουν τον σκοπό τους. Στο τέλος δίνουν στην χρήστη το τελικό αποτέλεσμα της θέσης.





Σχήμα 1.24 : Γενική αρχιτεκτονική των δεκτών

(Πηγή: [http://www.navipedia.net/index.php/Generic\\_Receiver\\_Description](http://www.navipedia.net/index.php/Generic_Receiver_Description))

Η τελική επιλογή και ο σχεδιασμός του κατάλληλου τύπου δέκτη εξαρτάται πάντα από την εξισορρόπηση των απαιτήσεων της εφαρμογής και των δυνατοτήτων των δεκτών ως προς την ακρίβεια, την κατανάλωση ενέργειας και το κόστος.

### 1.5.2 Κατηγορίες Δεκτών

Οι δέκτες GNSS μπορούν να χωριστούν σε κατηγορίες ανάλογα με διάφορα κριτήρια. Για παράδειγμα, μπορούν να χωριστούν ανάλογα με τον αριθμό των συχνοτήτων που λαμβάνουν, το σύστημα GNSS από όπου δέχονται τα σήματα, με το αν δέχονται διορθώσεις ή όχι, το σκοπό τους, κ.τ.λ. Οι βασικότερες κατηγορίες δεκτών αναλύονται παρακάτω:

#### 1.5.2α Δέκτες πολλαπλών σχηματισμών (*Multi-constellation receivers*)

Είναι πλέον γεγονός ότι μελλοντικά θα είναι λειτουργικά περισσότερα του ενός συστήματα δορυφορικής πλοήγησης (τόσο περιφερειακά όσο και παγκόσμια). Αυτό έχει ως συνέπεια και την εμφάνιση καινούργιων δεκτών που να δέχονται και να επεξεργάζονται ταυτόχρονα σήματα από διαφορετικά συστήματα.

Οι δέκτες αυτοί έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι ικανοί να δέχονται σήματα από περισσότερους ορατούς δορυφόρους, που είναι αναγκαίο σε «δύσκολα» περιβάλλοντα όπου η ορατότητα είναι περιορισμένη. Επίσης επιτρέπουν την εφαρμογή αλγορίθμων να εξελιχθούν περαιτέρω ούτως ώστε η τελική λύση να υπολογίζεται με καλύτερες συνθήκες DOP, ακρίβεια και διαθεσιμότητα. (Navipedia)

#### 1.5.2β Δέκτες πολλών συχνοτήτων (*Multi-frequency receivers*)

Τα σήματα GNSS εκπέμπονται σε διαφορετικές συχνότητες όπως η L1 και η L2. Στην περίπτωση χρήσης περισσότερων της μίας συχνότητας οι δέκτες επωφελούνται από τον περιορισμό των σφαλμάτων που οφείλονται στη συχνότητα του σήματος (π.χ. σφάλμα ιονοσφαιρικής καθυστέρησης) και επομένως δίνουν καλύτερη ακρίβεια. Το πιο σημαντικό από τα πλεονεκτήματα είναι η εξάλειψη του σφάλματος της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης, μιας και αποτελεί σημαντική πηγή σφαλμάτων στις μετρήσεις. Επίσης δίνουν την δυνατότητα σχηματισμού γραμμικών συνδυασμών για την εξαγωγή περεταίρω πληροφοριών.

Μειονεκτούν όμως στο γεγονός ότι οι δέκτες αυτοί απαιτούν αρκετή υπολογιστική δύναμη, καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια και κοστίζουν περισσότερο.

### **1.5.2γ Δέκτες που δέχονται διορθώσεις (Augmentation receivers)**

Οι δέκτες μπορούν ακόμη και να δέχονται διορθώσεις ή μετρήσεις προερχόμενες από συστήματα επαύξησης (*Augmentation Systems*) για να βελτιώσουν την ακρίβειά τους και τις επιδόσεις τους. Παραδειγματικά αναφέρονται τέτοιου είδους δέκτες από αντίστοιχες υπηρεσίες:

- Δέκτες EGNOS
- Δέκτες WAAS

### **1.5.2δ Δέκτες διαφορικού εντοπισμού (Differential receivers)**

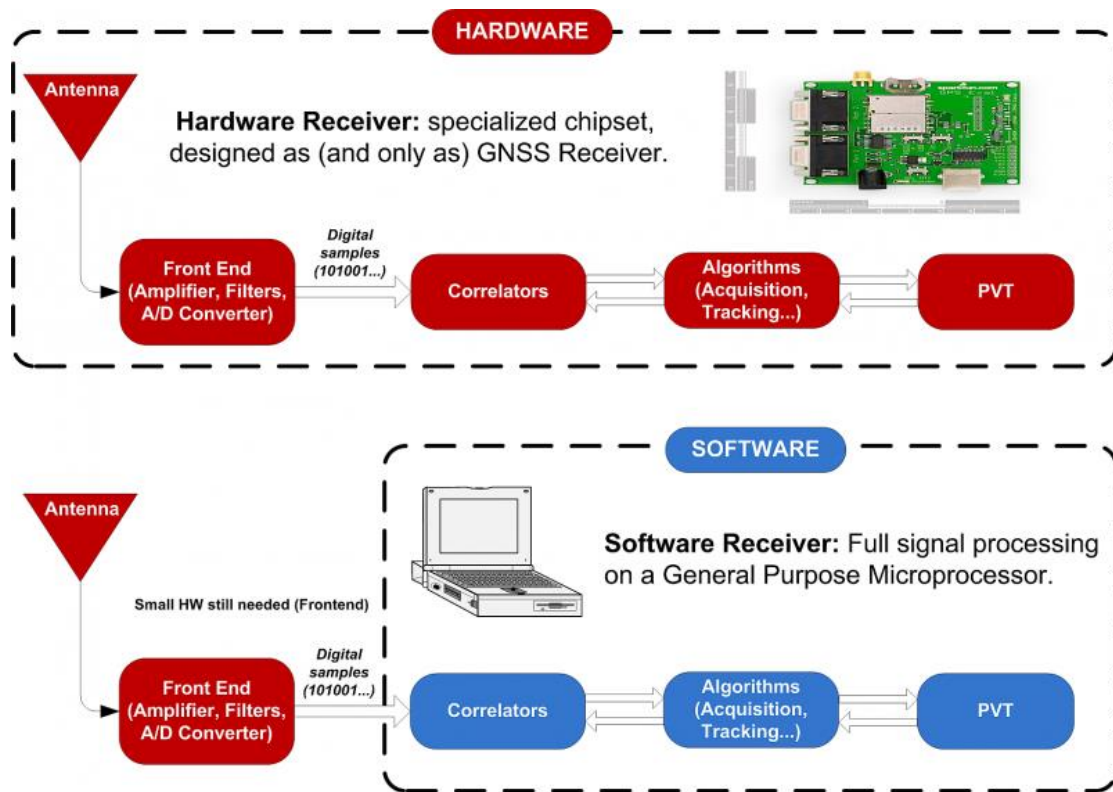
Οι διαφορικές μέθοδοι επιτρέπουν μία πιο ακριβή λύση με τον συνδυασμό μετρήσεων και επιπρόσθετων πληροφοριών όπως για παράδειγμα διορθώσεων που να έχουν υπολογιστεί ανεξάρτητα. Οι δέκτες αυτοί δηλαδή υποστηρίζουν τη διαφορική πλοήγηση (*Differential Navigation*). Κάποιες τεχνικές που υποστηρίζονται είναι οι ακόλουθες:

- DGNSS - Differential GNSS
- PPP - Precise Point Positioning
- RTK - Real-Time Kinematics

### **1.5.2ε Δέκτες λογισμικού (Software receivers)**

Πέραν από τους κοινούς δέκτες (*hardware receivers*), οι δέκτες λογισμικού δίνουν την δυνατότητα επεξεργασίας των σημάτων με διαφορετικούς αλγορίθμους σε ένα λογισμικό πακέτο που είναι εύκολο να τροποποιηθούν ανάλογα με τις επιθυμίες του χρήστη και τις συνθήκες εργασίας. Επιπλέον το λογισμικό μπορεί εύκολα να αναβαθμιστεί.

Το μειονέκτημα σε αυτή την περίπτωση είναι ο περιορισμός της υπολογιστικής δύναμης και επεξεργαστή των φορητών ηλεκτρονικών υπολογιστών.



Σχήμα 1.25 : Η αρχιτεκτονική των δεκτών και των δεκτών λογισμικού.

(Πηγή: [http://www.navipedia.net/index.php/Receiver\\_Types](http://www.navipedia.net/index.php/Receiver_Types) )

### 1.5.2στ Δέκτες χειρός (*Handheld receivers*)

Εκτός από τους γεωδαιτικούς και τους άλλους δέκτες που προαναφέρθηκαν, υπάρχουν και οι δέκτες χειρός (*handheld receivers*). Είναι σχετικά μικρότεροι σε μέγεθος και χρησιμοποιούνται για εφαρμογές χαμηλότερης ακρίβειας (της τάξης του μέτρου ή μερικών μέτρων).



Σχήμα 1.26 : Δέκτες χειρός

(Πηγή: [en.wikipedia.org/wiki/File:GPS\\_Receivers\\_2007.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:GPS_Receivers_2007.jpg) )

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> - Μέθοδοι Επαύξησης Δορυφορικών Συστημάτων Εντοπισμού

---

### 2.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι μεθοδολογίες επαύξησης συστημάτων GNSS με στόχο την βελτίωση των παραμέτρων ποιότητας του κινηματικού εντοπισμού κυρίως σε περιοχές με περιορισμένη ή κακή λήψη σήματος. Ειδικότερα, του διαφορικού εντοπισμού (*differential GPS*) καθώς και των συστημάτων που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τους δέκτες GPS για την βελτίωση των αποτελεσμάτων τους. Τα συστήματα αυτά είναι είτε διαφόρων τύπων αισθητήρες είτε δίκτυα επικοινωνιών. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται συχνότερα είναι τα αδρανειακά συστήματα και τα συστήματα καταγραφής διευθύνσεων, αποστάσεων, μαγνητόμετρα, βαρυτήμετρα κα. Στην παρούσα εργασία έγιναν μετρήσεις με την ολοκλήρωση δορυφορικών και αδρανειακών συστημάτων (*GPS/INS integration*).

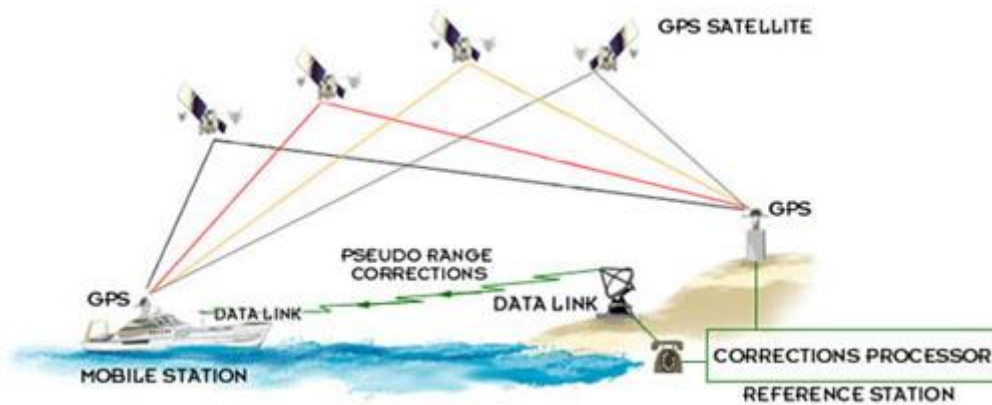
### 2.2 Διαφορικός Εντοπισμός

#### 2.2.1 Βασικές αρχές διαφορικού εντοπισμού

Η αρχή λειτουργίας του διαφορικού GNSS (*Differential GNSS*) απορρέει από το γεγονός ότι τα περισσότερα σφάλματα είναι κατά ένα μεγάλο μέρος κοινά για όλους τους χρήστες που βρίσκονται στην ίδια περιοχή και παρακολουθούν ταυτόχρονα τους ίδιους δορυφόρους. Κατά συνέπεια το μεγαλύτερο μέρος των σφαλμάτων οφείλεται στο τμήμα ελέγχου, στο τμήμα διαστήματος και στην επίδραση της ατμόσφαιρας. Οι εξισώσεις παρατήρησης διαμορφώνονται έτσι ώστε τα κοινά σφάλματα να απαλείφονται. Τα μόνα σφάλματα που απομένουν είναι τα σφάλματα χρονομέτρων των δορυφόρων και τα σφάλματα των τροχιακών εφημερίδων.

Οι μετρήσεις ψευδοαποστάσεων είναι διαφορετικές μιας και οι χρήστες βρίσκονται σε διαφορετικές τοποθεσίες με διαφορετικές σχετικές ταχύτητες ως προς τους δορυφόρους. Τα σφάλματα λόγω διάδοσης του σήματος στην ατμόσφαιρα είναι κοινά όταν οι δέκτες βρίσκονται κοντά μεταξύ τους, αλλά όταν η απόσταση μεταξύ τους αυξάνεται, τότε τα σφάλματα αυτά δεν συσχετίζονται και γίνονται ανεξάρτητα μεταξύ τους.

Η τυπική διάταξη κατά τον διαφορικό εντοπισμό απεικονίζεται στην εικόνα που ακολουθεί. Η διάταξη αποτελείται από έναν δέκτη αναφοράς τοποθετημένο σε γνωστό σταθερό σημείο (από τοπογραφικές μετρήσεις) και από έναν δέκτη (που να υποστηρίζει την μέθοδο DGNS). Η κεραία του δέκτη αναφοράς και το σύστημα ζεύξης δεδομένων επικοινωνίας (*data link*) αποτελούν τον σταθμό αναφοράς (*reference Station*). Οι διορθώσεις διαβιβάζονται στους χρήστες συνήθως σε μια μορφή γνωστή ως πρωτόκολλο RTCM SC.



Σχήμα 2.1 : Η αρχή του διαφορικού εντοπισμού

(Πηγή: [what-isthe.blogspot.gr/2010/04/what-is-accuracy-of-dgps.html](http://what-isthe.blogspot.gr/2010/04/what-is-accuracy-of-dgps.html),2014)

Κατά την μέθοδο αυτή ένας ή περισσότεροι σταθμοί αναφοράς εκπέμπουν διορθώσεις στον δέκτη. Οι διορθώσεις αυτές υπολογίζονται από τις θέσεις που υποδεικνύονται από τα δορυφορικά συστήματα και από γνωστές σταθερές θέσεις. Οι διαφορικές διορθώσεις μπορούν να βελτιώσουν την ποιότητα των μετρήσεων και μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε σε πραγματικό χρόνο (*real time*) είτε στο γραφείο με μετεπεξεργασία (*post-processed*) με διαφορετικές ακρίβειες. Οι δύο αυτοί τρόποι μπορούν να συνδυαστούν διότι βασίζονται στην ίδια αρχή.

Υπάρχουν δύο περιπτώσεις διαφορικών εξισώσεων παρατήρησης. Η μία περίπτωση βασίζεται στη χρήση ψευδοαποστάσεων (κώδικα) και η δεύτερη στη χρήση φέρουσας συχνότητας (φάση). Επίσης, τα συστήματα DGNSS μπορούν να εξυπηρετήσουν μια μικρή περιοχή με τη χρήση ενός μόνο δέκτη αναφοράς ή να εξυπηρετήσουν μια ευρύτερης περιοχής έκταση με τη δημιουργία ενός δικτύου σταθμών αναφοράς. Ως αποτέλεσμα, υπάρχουν αρκετές επιλογές που μπορούν να συνδυαστούν για τη χρήση ενός συστήματος DGNSS.

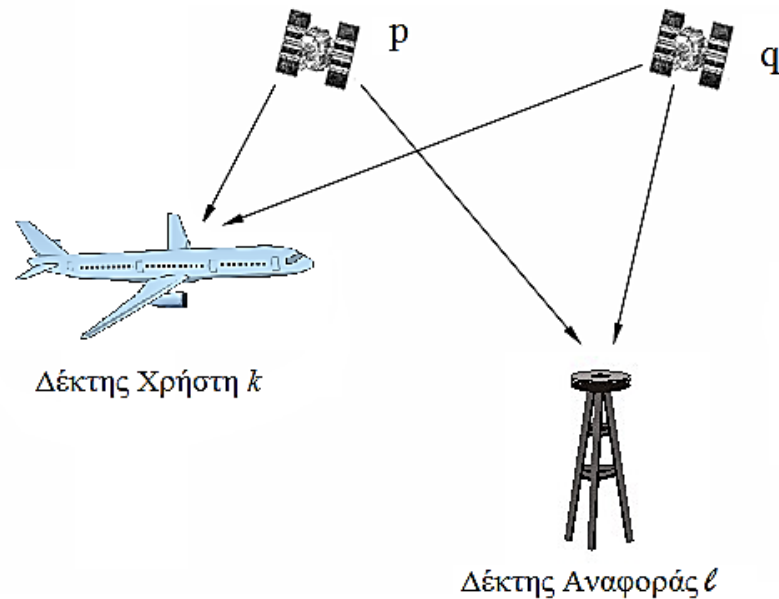
### 2.2.2 Διαφορικός εντοπισμός με μετρήσεις ψευδοαποστάσεων (τοπικό DGNSS, ευρύτερης περιοχής DGNSS)

Υπάρχουν δύο περιπτώσεις στις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν μετρήσεις ψευδοαποστάσεων. Το επονομαζόμενο τοπικό DGNSS ή LADGNSS (*local area DGNSS*) που καλύπτει περιοχές μέχρι ακτίνα μερικών δεκάδων χιλιομέτρων και το ευρύτερης περιοχής DGNSS ή WADGNSS (*wide area DGNSS*) που καλύπτει ακτίνα μέχρι εκατοντάδες χιλιόμετρα εφαρμόζοντας μια πιο πολύπλοκη τεχνική.

Η τεχνική χρήσης των ψευδοαποστάσεων παίρνει τις μετρήσεις ψευδοαποστάσεων του δέκτη αναφοράς και υπολογίζει τις διορθώσεις θέσεων για να τις στείλει στον χρήστη. Ο σταθμός αναφοράς υπολογίζει διορθώσεις για κάθε ορατό δορυφόρο ξεχωριστά αφαιρώντας την τιμή από την κάθε φορά μετρούμενη τιμή. Κατόπιν ο δέκτης του χρήστη λαμβάνει τις διορθώσεις για κάθε δορυφόρο και αφαιρεί αντίστοιχα από τις δικές του μετρούμενες τιμές.

Οι διορθώσεις που στέλνονται έχουν χρονική αναφορά (*time tags*) και στην περίπτωση των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο παρέχεται και η πληροφορία του ρυθμού μεταβολής των διορθώσεων έτσι ώστε ο χρήστης να μπορεί να μεταβιβάσει τις διορθώσεις ανάλογα με το χρόνο.

Υπάρχουν δυο περιπτώσεις χρήσης ψευδοαποστάσεων: σε πραγματικό χρόνο και με μετεπεξεργασία. Στην πρώτη περίπτωση τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για εφαρμογές πλοήγησης ενώ με μετεπεξεργασία μπορούν να είναι πιο ακριβή μιας και μπορούν να διαπιστωθούν τυχόν λάθη και να αποφευχθούν.



Σχήμα 2.2 : Απλές διαφορές ως προς δέκτες και δορυφόρους

Στην περίπτωση των απλών διαφορών μεταξύ δύο δεκτών ( $k, l$ ) και δύο δορυφόρων ( $p, q$ ) οι ψευδοαποστάσεις αφαιρούνται και έτσι τα σφάλματα λόγω των χρονομέτρων και των τροχιών των δορυφόρων απαλείφονται. Επιπλέον, τυχόν σφάλματα λόγω της ατμόσφαιρας μειώνονται σημαντικά αφού οι δύο δέκτες βρίσκονται κοντά μεταξύ τους κάτω από το ίδιο τμήμα ατμόσφαιρας.

Οι εξίσωση στην περίπτωση αυτή των απλών διαφορών δίνεται παρακάτω:

$$P_k^p - P_l^p = \rho_k^p - \rho_l^p - (dt_k - dt_l) \cdot c + d_{k,p} - d_{l,p} + d_{k,p}^p - d_{l,p}^p + \Delta \epsilon_p \quad (2.1)$$

όπου:

- $P$  η ψευδοαπόσταση,  $\rho$  η γεωμετρική απόσταση,  $dt$  είναι το σφάλμα χρονομέτρου του δέκτη,  $d_{\dots,p}$  οι καθυστερήσεις των δεκτών,  $d_{\dots,p}^p$  τα σφάλματα πολυανάκλασης και  $\Delta \epsilon_p$  ο θόρυβος των μετρήσεων.

Στην εξίσωση (2.1) υπάρχουν τέσσερις άγνωστοι αν θεωρηθεί ότι οι συντεταγμένες του σταθμού αναφοράς και το σφάλμα χρονομέτρου είναι γνωστά. Συνεπώς τέσσερις δορυφόροι απαιτούνται για την επίλυση των παραπάνω αγνώστων. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι απλές διαφορές χρησιμοποιούνται στον σχετικό προσδιορισμό θέσης. Μια άλλη περίπτωση είναι η χρήση των διπλών διαφορών. Οι εξισώσεις είναι:

$$P_k^p - P_l^p - (P_k^q - P_l^q) = \rho_k^p - \rho_l^p - (\rho_k^q - \rho_l^q) + D \quad (2.2)$$

$$\sigma_{DD} = \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_p^2 + \sigma_p^2 \sigma_p^2} = 2\sigma_p \quad (2.3)$$

Όπου D το συνολικό σφάλμα πολυανάκλασης. Αυτή η προσέγγιση περιορίζει σημαντικά τα σφάλματα που σχετίζονται με τους δορυφόρους, τους δέκτες και τα ατμοσφαιρικά σφάλματα. Στην εξίσωση υπάρχουν τρεις άγνωστοι, οι συντεταγμένες του δέκτη του χρήστη. Χρειάζονται λοιπόν κατ ελάχιστον τέσσερις δορυφόροι για την δημιουργία τριών διπλών διαφορών για την επίλυση των αγνώστων. Η δεύτερη εξίσωση (2.3) είναι εφαρμογή του νόμου μετάδοσης των σφαλμάτων, που δείχνει ότι τυχόν σφάλματα διπλασιάζονται σε σχέση με τις απλές ψευδοαποστάσεις.

### 2.2.3 Διαφορικός εντοπισμός με μετρήσεις φάσεων

Οι μετρήσεις φάσης ανάμεσα σε δέκτη αναφοράς και δέκτη χρήστη αποτελούν εξίσου μια τεχνική διαφορικού εντοπισμού. Η λογική των απλών και διπλών διαφορών είναι και σε αυτή την περίπτωση η ίδια. Οι δίπλες διαφορές χρησιμοποιούνται για την απαλοιφή των σφαλμάτων των χρονομέτρων των δορυφόρων και των δεκτών. Αντίθετα οι απλές διαφορές χρησιμοποιούνται για την απαλοιφή των σφαλμάτων των χρονομέτρων των δορυφόρων. Οι εξισώσεις στην περίπτωση των απλών διαφορών είναι οι ακόλουθες:

$$\Phi_{AB}^i(\tau) = \Phi_B^i(\tau) - \Phi_A^i(\tau) \quad (2.4)$$

$$\Phi_{AB}^i(\tau) = \left(\frac{f}{c}\right) \cdot \rho_{AB}^i(t) + \Phi_{AB}^i(\tau) - N_{AB}^i \quad (2.5)$$

Στην περίπτωση των διπλών διαφορών οι εξισώσεις γίνονται:

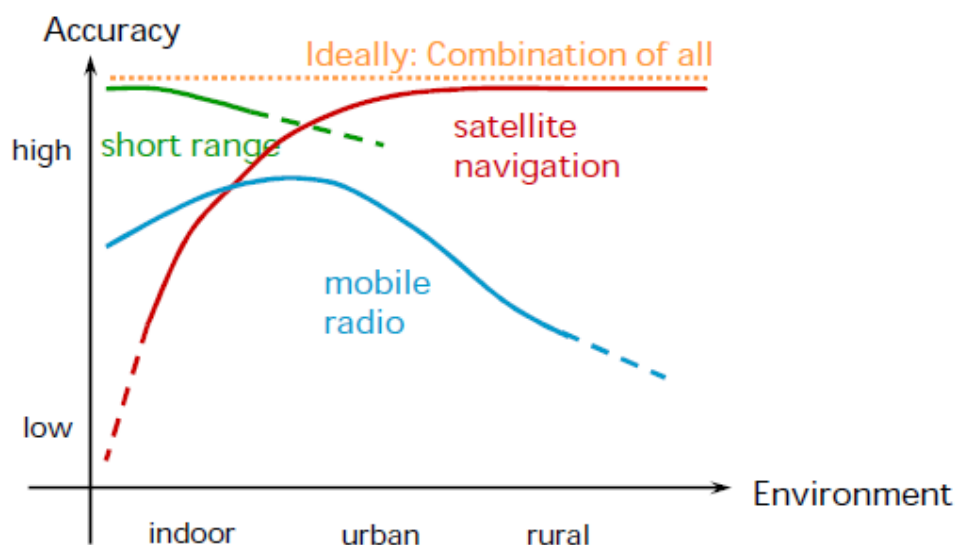
$$\Phi_{AB}^{ij}(\tau) = \Phi_B^{ij}(\tau) - \Phi_A^{ij}(\tau) \quad (2.6)$$

$$\Phi_{AB}^{ij}(\tau) = \left(\frac{f}{c}\right) \cdot \rho_{AB}^{ij}(t) - N_{AB}^{ij} \quad (2.7)$$

όπου:  $\Phi$  η διαφορά φάσης,  $N$  ο αριθμός ακέραιων κύκλων (άγνωστος αριθμός),  $\rho$  η ψευδοαπόσταση,  $f$  η συχνότητα του φέροντος σήματος (DGPS, 2010).

## 2.3 Χρήση Ετερογενών Αισθητήρων Εντοπισμού

Η απαίτηση συνδυασμού διαφορετικών αισθητήρων εντοπισμού εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το είδος και τις ανάγκες της εφαρμογής και από το περιβάλλον στο οποίο η εφαρμογή λαμβάνει χώρα. Συγκεκριμένα, το είδος της εφαρμογής καθορίζει τις απαιτήσεις των παραμέτρων ποιότητας του εντοπισμού (ακρίβεια, αξιοπιστία, διαθεσιμότητα, κ.α.) και το περιβάλλον τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος εντοπισμού (ανοικτοί, κλειστοί χώροι, κ.α.) και συνεπώς το είδος και τις προδιαγραφές των μετρημένων μεγεθών.



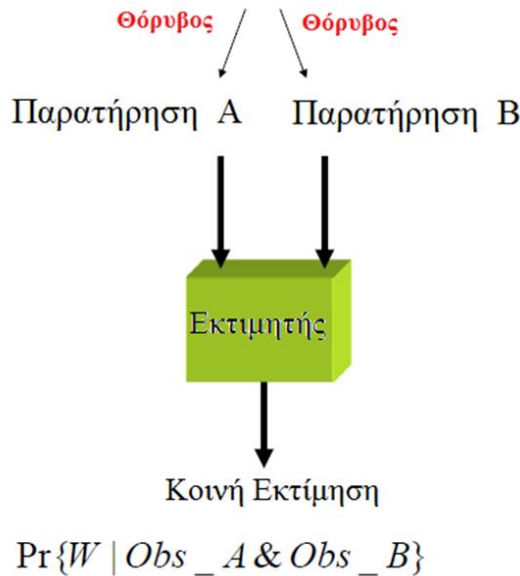
Σχήμα 2.3 : Διάγραμμα ακρίβειας και περιβάλλοντος για διαφορετικούς αισθητήρες

(Πηγή: Robertson, 2014)

Στο Σχήμα 2.3 απεικονίζονται οι ακρίβειες που επιτυγχάνονται από διαφορετικούς τύπους αισθητήρων για διαφορετικά περιβάλλοντα. Όπως είναι γνωστό, οι δέκτες GPS έχουν περιορισμένη ακρίβεια σε εσωτερικούς χώρους και σε αστικά περιβάλλοντα. Η σκέψη πίσω από τον συνδυασμό αισθητήρων είναι μία κοινή εκτίμηση που θα προέρχεται από δύο ή περισσότερες διαφορετικές παρατηρήσεις.

Στο Σχήμα 2.4 δίνεται οπτικά μια περιγραφή της κεντρικής ιδέας της κοινής εκτίμησης από δύο τύπους αισθητήρων. Ο σκοπός του συνδυασμού των αισθητήρων που δίνουν διαφορετικές παρατηρήσεις είναι η κοινή εκτίμηση της μεταβλητής W.





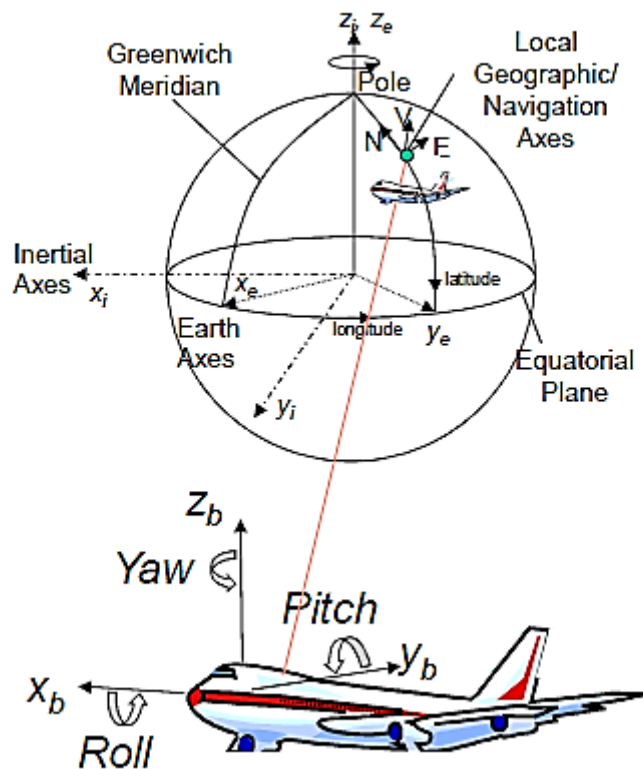
Σχήμα 2.4 : Ο συνδυασμός διαφορετικών αισθητήρων με σκοπό την εξαγωγή μίας κοινής εκτίμησης

### 2.3.1 Ολοκλήρωση δορυφορικών / αδρανειακών συστημάτων

Η χρήση ενός δέκτη GNSS σε συνδυασμό με ένα αδρανειακό σύστημα INS έχει ως στόχο την αλληλοσυμπλήρωση των δυο αυτών συστημάτων. Τα αδρανειακά συστήματα παρέχουν την θέση και τα κινηματικά χαρακτηριστικά μιας κινούμενης πλατφόρμας με ακρίβεια αλλά για σύντομο χρονικό διάστημα. Τα συστήματα αυτά διαθέτουν γυροσκόπια και επιταχυνσιόμετρα σε τρεις διευθύνσεις και δίνουν πληροφορίες για τα κινηματικά χαρακτηριστικά.

Το πλεονέκτημα αυτού του συνδυασμού είναι ότι τα αδρανειακά συστήματα εντοπισμού μπορούν να αποκαταστήσουν τις διαλείψεις του δορυφορικού σήματος GPS και παράλληλα παρέχουν πληροφορίες θέσης και κινητικών παραμέτρων με υψηλό ρυθμό σε σχέση με τις μετρήσεις δορυφορικού εντοπισμού.

Για τον υπολογισμό της εκάστοτε θέσης στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς χρησιμοποιούνται οι αναγκαίοι μετασχηματισμοί συντεταγμένων από το σύστημα αναφοράς του αισθητήρα (*sensor frame: s-frame*), στο σύστημα αναφοράς του οχήματος (*body frame: b-frame*) και τέλος στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς (που γυρίζει γύρω από τον άξονα της γης) (*navigation frame: n-frame*). Στο Σχήμα 2.5 απεικονίζονται τα τέσσερα είδη συστημάτων αναφοράς, το αδρανειακό σύστημα αναφοράς (*inertial frame: i-frame*), το γήινο σύστημα αναφοράς (που γυρίζει γύρω από τον ήλιο) (*earth frame: e-frame*), το γεωδαιτικό και του οχήματος.



Σχήμα 2.5 : Τα συστήματα αναφοράς

(Πηγή: Robertson, 2014)

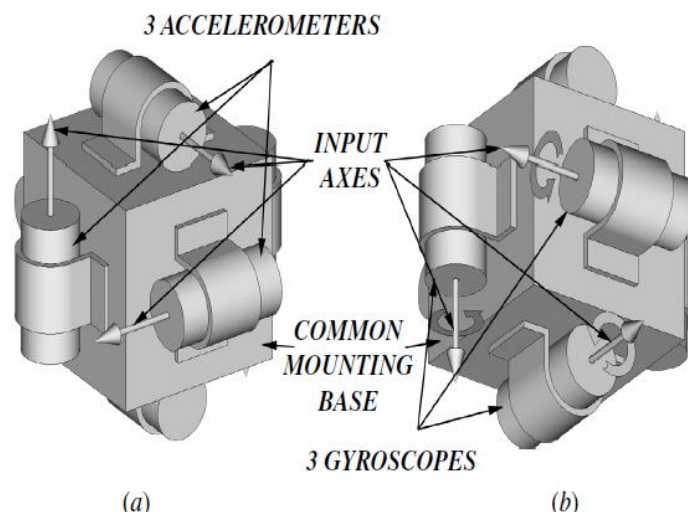
Οι μετασχηματισμοί που χρειάζονται για την μετατροπή των θέσεων από το σύστημα αναφοράς του οχήματος στο γεωδαιτικό σύστημα ακολουθούν την παρακάτω εξίσωση:

$$f^n = f_s^b + C_b^n f^b \quad (2.8)$$

όπου:  $f^n, f^b$  οι συντεταγμένες στα αντίστοιχα συστήματα,  $f_s^b$  το διάνυσμα εκκεντρότητας της αρχής από το σύστημα αναφοράς του αισθητήρα στο σύστημα αναφοράς του οχήματος και  $C_b^n$  ο πίνακας στροφών.

Οι αδρανειακές μονάδες που συνδυάζονται με τους δέκτες GPS αποτελούνται από τα εξής τμήματα:

- Τα επιταχυνσιόμετρα που μετρούν την αδρανειακή επιτάχυνση.
- Τα γυροσκόπια είναι αισθητήρες που μετρούν γωνιακές ταχύτητες. Σημαντικό είναι κατά την εκκίνηση η αποθήκευση των αρχικών τιμών (θέσεων και προσανατολισμού) σε αδρανειακές συντεταγμένες.
- Οι άξονες που ορίζουν την ορθή φορά των γυροσκοπίων.



Σχήμα 2.6 : Αδρανειακή μονάδα (a) μπροστινή (b) πίσω όψη

(Πηγή: Grewal, Weill, & Andrews, 2007)

Τα αδρανειακά συστήματα βασίζονται στους τρεις νόμους κίνησης του Νεύτωνα (Newton, 1729):

- Η αρχή της αδράνειας: δηλώνει ότι κάθε σώμα, που βρίσκεται μέσα σε ένα αδρανειακό σύστημα, διατηρεί την κατάσταση ηρεμίας του, ή ευθύγραμμης και ομαλής κίνησής του, εφόσον καμία εξωτερική δύναμη δεν επιδρά για τη μεταβολή της ή η συνισταμένη των δυνάμεων ισούται με μηδέν.
- Η αρχή της κίνησης: Η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται σε ένα σώμα, ισούται με το ρυθμό μεταβολής της ορμής του σώματος.
- Η αρχή της δράσης - αντίδρασης: Οι δυνάμεις που εξασκούνται από την αλληλεπίδραση δύο σωμάτων (1 και 2) είναι πάντα ίσες κατά το μέτρο και αντίθετες κατά τη φορά.

Οι κυριότερες πηγές σφαλμάτων των αδρανειακών συστημάτων κατηγοριοποιούνται σε: σφάλματα των αδρανειακών αισθητήρων (επιταχυνσιομέτρων και γυροσκοπίων), σφάλματα αρχικοποίησης και σφάλματα ευθυγράμμισης του συστήματος αναφοράς (κινητού οχήματος σε σχέση με την αδρανειακή μονάδα).

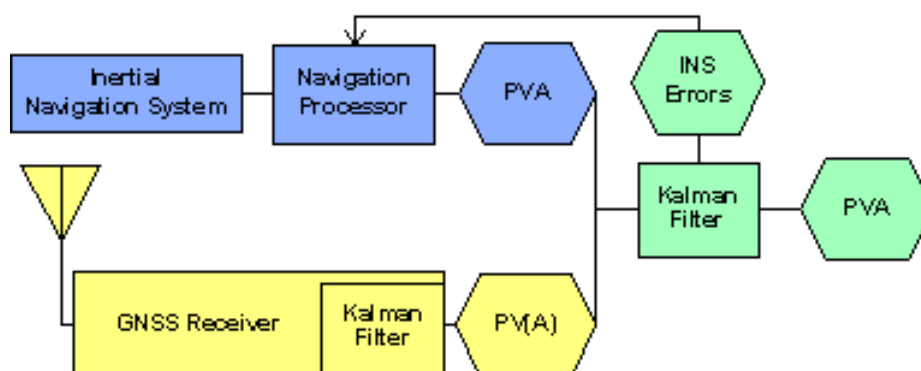
Στα σφάλματα των γυροσκοπίων εμπεριέχονται σφάλματα λανθασμένης μέτρησης και σφάλματα της κλίμακας βαθμονόμησης. Το πρώτο πρόκειται για την τιμή που δίνει το γυροσκόπιο σε κατάσταση αδράνειας, η οποία λόγω κατασκευαστικών ατελειών του οργάνου δεν είναι απόλυτα μηδενική. Το δεύτερο πρόκειται για σφάλματα κατά την διαδικασία βαθμονόμησης του οργάνου.

Στα σφάλματα επιταχυνσιομέτρων εμπεριέχονται σφάλματα λόγω θερμικής ευαισθησίας και σφάλματα λόγω αστάθειας των αξόνων. Και τα δύο επηρεάζονται από κατασκευαστικούς παράγοντες.

Κατά την επεξεργασία των μετρήσεων, επειδή υπάρχουν διαφορετικές πηγές σφαλμάτων που βασίζονται στο τμήμα διαστήματος, στη διάδοση του σήματος, στην τεχνολογία του δέκτη ή στο περιβάλλον του δέκτη, η ακρίβεια των συστημάτων GNSS δεν είναι επαρκής για εφαρμογές ακρίβειας (γεωδαισίας και πλοήγησης). Για αυτό τον λόγο η ολοκλήρωση αδρανειακών συστημάτων και συστημάτων εντοπισμού συνδυάζει την σύντομη χρονικά σταθερότητα των αδρανειακών δεκτών με την μακράς διάρκειας σταθερότητα (αλλά θορυβώδη) σταθερότητα των GNSS δεκτών.

Τα συστήματα GNSS/INS χαρακτηρίζονται από τον τρόπο σύζευξης μεταξύ τους (*coupling principle*). Υπάρχουν τρεις μέθοδοι σύζευξης: η χαλαρή σύζευξη (*loosely coupled*), η σφιχτή σύζευξη (*tightly coupled*) και η βαθιά σύζευξη (*deeply coupled*).

Τα περισσότερα συστήματα ολοκλήρωσης GNSS/INS εφαρμόζουν την τεχνική χαλαρής σύζευξης σύμφωνα με την οποία οι εκτιμήσεις της θέσης και της ταχύτητας του οχήματος όπως προέρχονται από την λύση GNSS χρησιμοποιούνται ως παρατηρήσεις στο φίλτρο που χρησιμοποιούνται από τους αδρανειακούς δέκτες για την εκτίμηση των σφαλμάτων INS και τη μείωση του θορύβου GNSS. Η αρχή της χαλαρής σύζευξης παρουσιάζεται σχηματικά στην παρακάτω εικόνα.

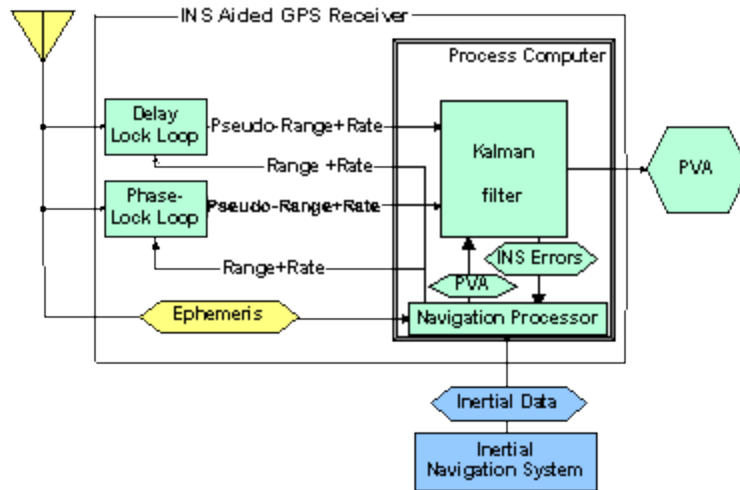


Σχήμα 2.7 : Η αρχή της χαλαρής σύζευξης

(Πηγή: <http://ifen.bauw.unibw-muenchen.de/research/coupling.htm>, 2014)

Στο Σχήμα 2.7, ο δέκτης GPS διαθέτει ένα δικό του φίλτρο Kalman για τον υπολογισμό της ψευδοαπόστασης και των μετρήσεων Doppler που χρησιμεύουν στον υπολογισμό της θέσης, της ταχύτητας και ενίοτε της επιτάχυνσης ( $PV(A)$ : *Position Velocity Acceleration*). Οι διαφορές στους υπολογισμούς μεταξύ του GPS και INS χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου σε ένα δεύτερο φίλτρο Kalman όπου υπολογίζονται οι εκτιμήσεις των σφαλμάτων INS που χρησιμοποιούνται σε βρόγχο για την διόρθωση των πρωτογενών μετρήσεων αλλά και στην διόρθωση των τελικών αποτελεσμάτων (Solimeno, 2007).

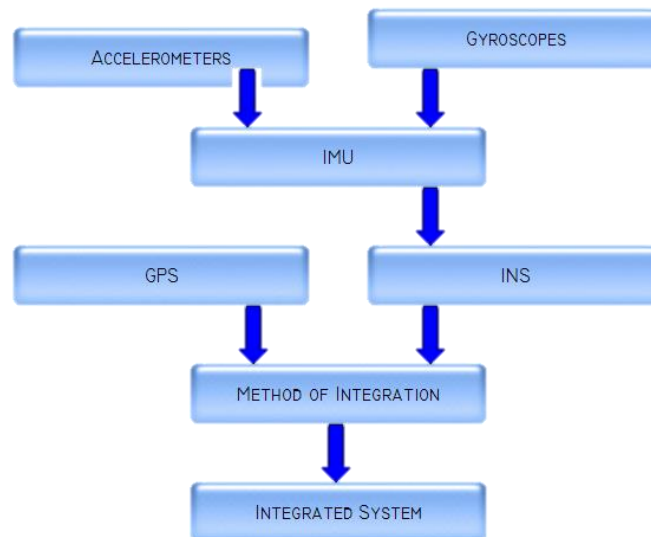
Η δεύτερη περίπτωση ολοκλήρωσης είναι αυτή της σφιχτής σύζευξης. Σε αυτή την περίπτωση οι πρωτογενείς μετρήσεις από τον δέκτη GPS και από το δέκτη INS, συγκρίνονται και χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου σε ένα φίλτρο Kalman που λαμβάνει υπ' όψιν τις εξισώσεις των σφαλμάτων πλοήγησης και δεκτών και για τους δύο δέκτες. Η αρχή της σφιχτής σύζευξης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8 : Η αρχή της σφιχτής σύζευξης

(Πηγή: <http://ifen.bauw.unibw-muenchen.de/research/coupling.htm>, 2014)

Στο διάγραμμα που ακολουθεί δίνονται σχηματικά τα επιμέρους μέρη κάθε ολοκληρωμένου συστήματος GPS/INS.



Σχήμα 2.9 : Ολοκλήρωση GPS/INS

(Πηγή: Vonk)

### 2.3.2 Άλλες Μέθοδοι Ολοκλήρωσης

#### 2.3.2α Ολοκλήρωση δορυφορικών συστημάτων / μετρήσεων διεύθυνσης – απόστασης

Μια άλλη μέθοδος σύνθεσης ετερογενών μετρήσεων είναι αυτή με μετρήσεις διεύθυνσης και απόστασης. Τα συστήματα γνωστά με τον αγγλικό όρο “*dead-reckoning*” είναι συσκευές σχετικά χαμηλού κόστους καταγραφής αποστάσεων (οδόμετρα σε συνδυασμό με γυροσκόπια). Τέτοια συστήματα GPS/DR (*GPS/dead-reckoning integration*) χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές σχετικές με την αυτόματη τοποθέτηση οχημάτων (*automatic vehicle location - AVL*), που είναι μία εφαρμογή κατά την οποία η γεωγραφική θέση ενός οχήματος προσδιορίζεται αυτόματα και αποστέλλεται σε κάποια υπηρεσία παρακολούθησης του οχήματος.

Οι πληροφορίες για την απόσταση που διανύθηκε δίνονται από τα οδόμετρα ενώ οι πληροφορίες για την κατεύθυνση και την αλλαγή της κατεύθυνσης δίνονται από τα γυροσκόπια. Κατά την εκκίνηση του οχήματος η αρχική θέση θα πρέπει να είναι γνωστή έτσι ώστε οι παρεχόμενες πληροφορίες από τους αισθητήρες να παρέχονται σε κάθε χρονική στιγμή.

Σήμερα τα οδόμετρα είναι πλέον εγκατεστημένα σε όλα τα οχήματα για να παρέχουν πληροφορίες σχετικές με την απόσταση που έχει διανυθεί. Οι αισθητήρες τους τοποθετούνται στους τροχούς των οχημάτων για να υπολογίζουν την απόσταση που έχει διανυθεί.

Τα γυροσκόπια, είναι αισθητήρες χαμηλού κόστους και μετρούν την γωνιακή ταχύτητα. Οι πληροφορίες αυτές χρησιμοποιούνται στις αλλαγές της γωνίας πορείας του οχήματος.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την συμπλήρωση και την επέκταση του GPS σε περιοχές χαμηλής ορατότητας δορυφόρων (π.χ. σε αστικά περιβάλλοντα, υπόγειες σήραγγες) βελτιώνοντας την ακρίβεια. Τα δύο συστήματα αλληλοσυμπληρώνονται. Το μεν GPS δεν έχει πανταχού κάλυψη σε χαμηλής ορατότητας περιβάλλοντα και το σύστημα DR «χάνει» χρονικά. Κατά συνέπεια ο καλύτερος τρόπος χρήσης της μεθόδου είναι με την χρήση των φίλτρων Kalman. (El-Rabbany, 2002)

#### 2.3.2β Ολοκλήρωση δορυφορικών / laser, radar συστημάτων

Μια άλλη μέθοδος ολοκλήρωσης είναι αυτή του συστήματος πλοήγησης και άλλων τύπων laser και radar συστημάτων (*GPS/image-based sensors integration*). Η ολοκλήρωση αυτή έχει εφαρμογές για παράδειγμα, σε πλοήγηση μη επανδρωμένων οχημάτων (*Unmanned Aerial Vehicles-UAVs*), όπου βιντεοκάμερες (*Charge-Coupled Device-CCD*) και laser συστήματα χρησιμοποιούνται για την διαίσθηση του περιβάλλοντος και για την εξαγωγή πληροφοριών αναφορικά με σχετικές οριζόντιες και κατακόρυφες κινήσεις του οχήματος σε σχέση με το έδαφος. Κατά τον σχεδιασμό

τέτοιων εφαρμογών γίνεται επίσης η χρήση φίλτρων Kalman (Wang, Garratt, & Lambert, 2008).

### 2.3.2γ Αξιοποίηση Δικτύων Επικοινωνίας

Μια άλλη μέθοδος που υπάρχει είναι αυτή της αξιοποίησης των δικτύων επικοινωνίας (*network assisted GPS*). Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε ούτως ώστε να μειωθεί ο χρόνος που χρειάζεται για την παραγωγή μιας λύσης πλοήγησης και να αυξηθεί η ευαισθησία του δέκτη GNSS.

Ένα παράδειγμα αυτής της μεθόδου είναι ο συνδυασμός των δικτύων επικοινωνίας μέσω των κινητών τηλεφώνων. Οι πληροφορίες που ανταλλάσσονται από τα δίκτυα είναι οι ορατοί δορυφόροι, οι προβλέψεις των ρυθμών Doppler των δορυφόρων, αζιμούθια και γωνίες ορατότητας των δορυφόρων, τροχιακές εφημερίδες, διορθώσεις των χρονομέτρων των δορυφόρων, ο χρόνος GPS κτλ.

## 2.4 Το φίλτρο Kalman

Το φίλτρο Kalman χρησιμοποιείται για διάφορες εφαρμογές παρακολούθησης, πρόβλεψης και εξομάλυνσης των τιμών θέσης και κινηματικών χαρακτηριστικών (ταχύτητα, επιτάχυνση, κτλ.) σε διακριτές μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο και με μετεπεξεργασία. Γενικά χρησιμοποιείται σε εφαρμογές προβλημάτων μηχανικού υπολογιστών, γεωδαισίας, τοπογραφίας και πλοήγησης. Κάποιες εφαρμογές που χρησιμοποιούν το φίλτρο Kalman είναι ενδεικτικά: πρόβλεψη δορυφορικών τροχιών, πλοήγηση οχημάτων, δημιουργία μοντέλων ατμόσφαιρας κτλ. Σε γενικές γραμμές το φίλτρο χρησιμοποιείται δηλαδή στην περίπτωση ενός οχήματος όπου ζητούνται η εκτίμηση των παραμέτρων θέσης και ταχύτητας βάσει προηγούμενων παρατηρήσεων και γνώσεων της κινηματικής του κατάστασης για κάθε χρονική στιγμή.

Το φίλτρο Kalman χρησιμοποιείται επίσης σε εφαρμογές συνδυασμού παρατηρήσεων διαφορετικών αισθητήρων. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι εφαρμογές ολοκλήρωσης GPS/INS.

Το φίλτρο αποτελείται από τρία στάδια: το στάδιο της πρόβλεψης, του φιλτραρίσματος και της εξομάλυνσης. Κατά το στάδιο της πρόβλεψης γίνεται μια εκτίμηση της θέσης του οχήματος σε μια μελλοντική στιγμή με χρήση των διαθέσιμων μετρήσεων μέχρι εκείνη τη στιγμή. Η προβλεπόμενη εκτίμηση χρησιμοποιείται έπειτα μαζί με τις νέες μετρήσεις για την εξαγωγή της νέας εκτίμησης κ.ο.κ. Αυτό είναι το στάδιο του φιλτραρίσματος. Κατά το στάδιο της εξομάλυνσης, η εκτίμηση της θέσης γίνεται για οποιαδήποτε χρονική στιγμή με χρήση παρατηρήσεων πριν και μετά εκείνη τη στιγμή. Σε αυτή την περίπτωση η λύση επιτυγχάνεται με εκ των υστέρων επεξεργασία.

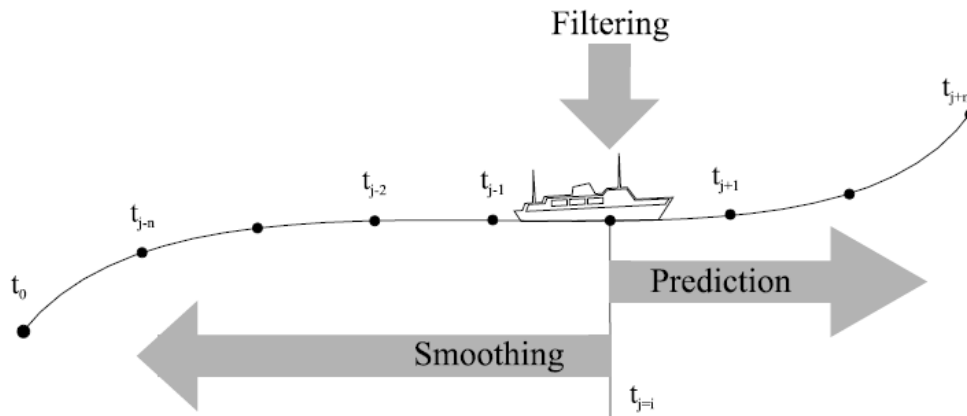
Στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζονται γραφικά αυτά τα τρία στάδια. Έστω ότι το κινούμενο όχημα (σκάφος) στις χρονικές στιγμές  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$  βρίσκεται στις αντίστοιχες θέσεις. Επίσης, έστω ότι  $t_i$  είναι η παρούσα χρονική στιγμή και  $t_j$  είναι η

χρονική στιγμή στην οποία γίνεται η εκτίμηση. Τα τρία αυτά στάδια μπορούν να περιγραφούν με τις ακόλουθες ιδιότητες και ανισότητες:

$$t_i < t_j, \text{ πρόβλεψη (prediction)} \quad (2.9)$$

$$t_i = t_j, \text{ φιλτράρισμα (filtering)} \quad (2.10)$$

$$t_i > t_j, \text{ εξομάλυνση (smoothing)} \quad (2.11)$$



Σχήμα 2.10 : Παράδειγμα πρόβλεψης, φιλτραρίσματος και εξομάλυνσης

(Πηγή: Gikas, 1996)

Το φίλτρο Kalman συντελείται από τρία μοντέλα. Το πρωτεύον μοντέλο συσχετίζει τις παραμέτρους του διάνυσματος κατάστασης με τις μετρήσεις. Το δευτερεύον μοντέλο (ή δυναμικό μοντέλο) συσχετίζει τις παραμέτρους μιας εποχής με αυτές μιας μεταγενέστερης εποχής. Δηλαδή, συνδέει τις τιμές των παραμέτρων μεταξύ δύο χρονικών στιγμών. Το στοχαστικό μοντέλο, τέλος, περιγράφει την ποιότητα των άλλων δύο. Αποτελείται από πίνακες μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος μοντέλου.

Οι παράμετροι προς εκτίμηση, οι μετρήσεις και οι εκτιμήσεις είναι συναρτήσεως του χρόνου. Το διάνυσμα των παραμέτρων  $x_k$  (για τα φίλτρα Kalman ονομάζεται διάνυσμα κατάστασης-*state vector*) περιέχει τις παραμέτρους θέσης ( $x, y, z$ ) και ταχύτητας ( $v_x, v_y, v_z$ ) του κινούμενου οχήματος.

Το φίλτρο Kalman υπολογίζει και εκτιμά το διάνυσμα κατάστασης  $x$  έχοντας υπ' όψιν:

-το διάνυσμα κατάστασης της προηγούμενης χρονικής στιγμής:  $x_{k-1}$

-το διάνυσμα μετρήσεων:  $y_k$

Η εξίσωση που ισχύει για το διάνυσμα κατάστασης και το διάνυσμα μετρήσεων είναι:

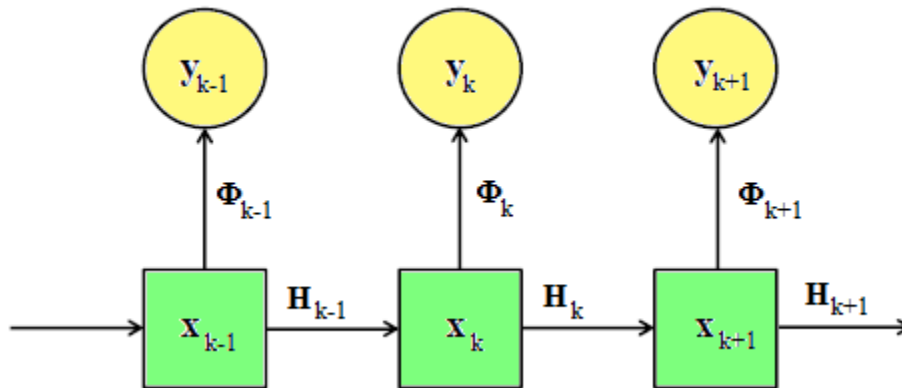
$$x_k = \Phi_{k-1}x_{k-1} + G_{k-1}w_{k-1} \quad (2.12)$$

$$y_k = H_k x_k + v_k \quad (2.13)$$



όπου  $w_k : N(0, Q_k)$  και  $v_k : N(0, R_k)$  είναι το σφάλμα της διαδικασίας και περιγράφει την αβεβαιότητα του μοντέλου, και το σφάλμα των μετρήσεων αντίστοιχα,  $\Phi_k$  είναι ο πίνακας μετάβασης της κατάστασης και  $H_k$  είναι ο πίνακας μετρήσεων.

Στο Σχήμα 2.11 περιγράφεται γραφικά το φίλτρο Kalman για τρία βήματα. Το διάνυσμα κατάστασης εξελίσσεται και περιγράφεται από τις εξισώσεις της μετάβασης της κατάστασης (2.12) και οι μετρήσεις εξαρτώνται από το διάνυσμα κατάστασης μέσω των εξισώσεων μέτρησης (2.13).



Σχήμα 2.11 : Η διαδικασία του φίλτρου Kalman

Κατά το πέρας των βημάτων υπολογίζονται επίσης ο πίνακας μεταβλητότητας - συμμεταβλητότητας και ο πίνακας κέρδους που συμβάλλουν στον υπολογισμό της κατάστασης του επόμενου βήματος από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$K_k = P_k H_k^T (H_k P_k H_k^T + R_k)^{-1} \quad (2.14)$$

όπου:  $P_k$  είναι ο πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας που υπολογίζεται από ένα βήμα πριν, από την εξίσωση:

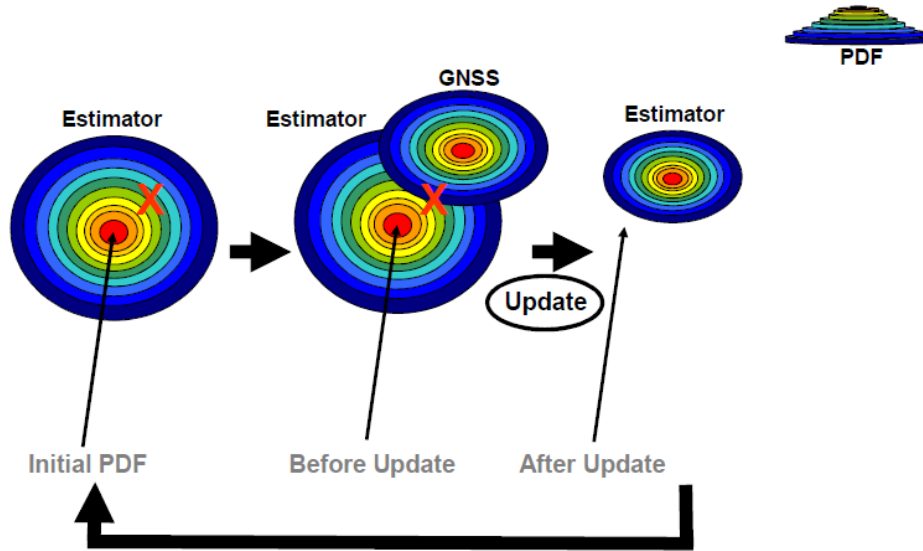
$$P_k = \Phi_{k-1} P_{k-1} \Phi_{k-1}^T + G_{k-1} Q_{k-1} G_{k-1}^T \quad (2.15)$$

έτσι ώστε όλη η διαδικασία να αποτελεί έναν βρόγχο βημάτων επεξεργασίας μέχρι την τελική χρονική στιγμή.

Η εκτίμηση της κατάστασης του επόμενου βήματος υπολογίζεται από την εξίσωση:

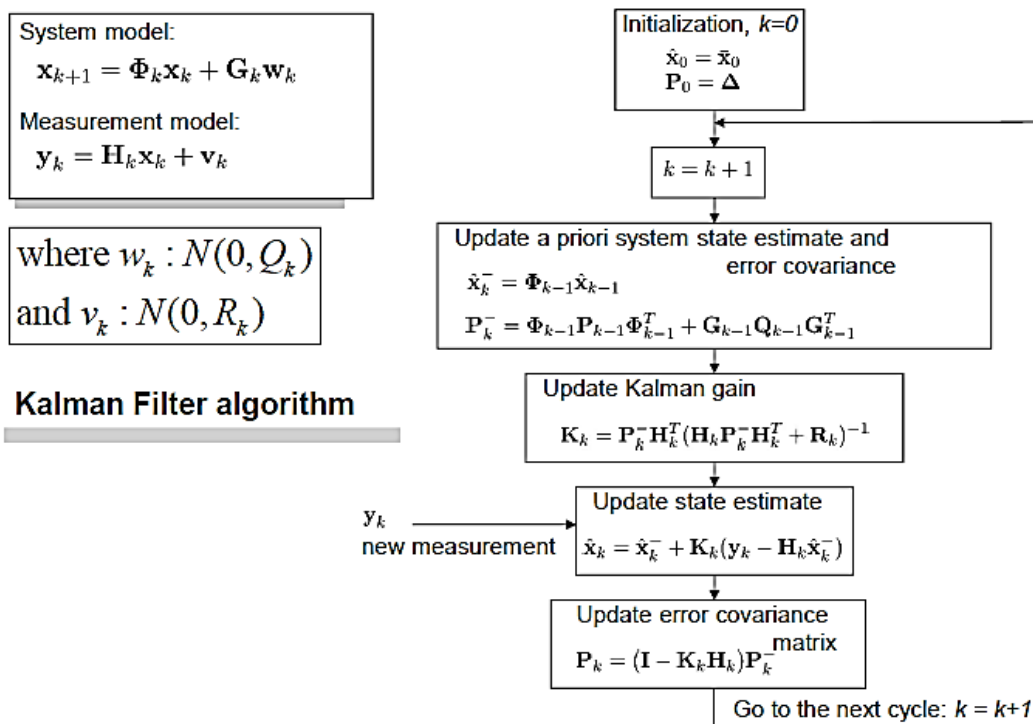
$$\hat{x}_k = x_k + K_k (y_k - H_k x_k) \quad (2.16)$$

Στο Σχήμα 2.12 περιγράφεται η διαδικασία του φίλτρου Kalman με έναν γραφικό τρόπο με έμφαση στα βήματα πριν και μετά την ενημέρωσης των διανυσμάτων κατάστασης, ενώ τα βήματα δίνονται περιληπτικά στο Σχήμα 2.13 απεικονιζόμενα σαν βρόγχος.



Σχήμα 2.12 : Η διαδικασία του φίλτρου Kalman με γραφικό παράδειγμα

(Πηγή: Robertson, 2014)



Σχήμα 2.13 : Η διαδικασία του φίλτρου Kalman απεικονιζόμενη σαν βρόγχος

(Πηγή: Robertson, 2014)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> - Περιοχή Μελέτης & Προπαρασκευαστικές Εργασίες

### 3.1 Γενικά

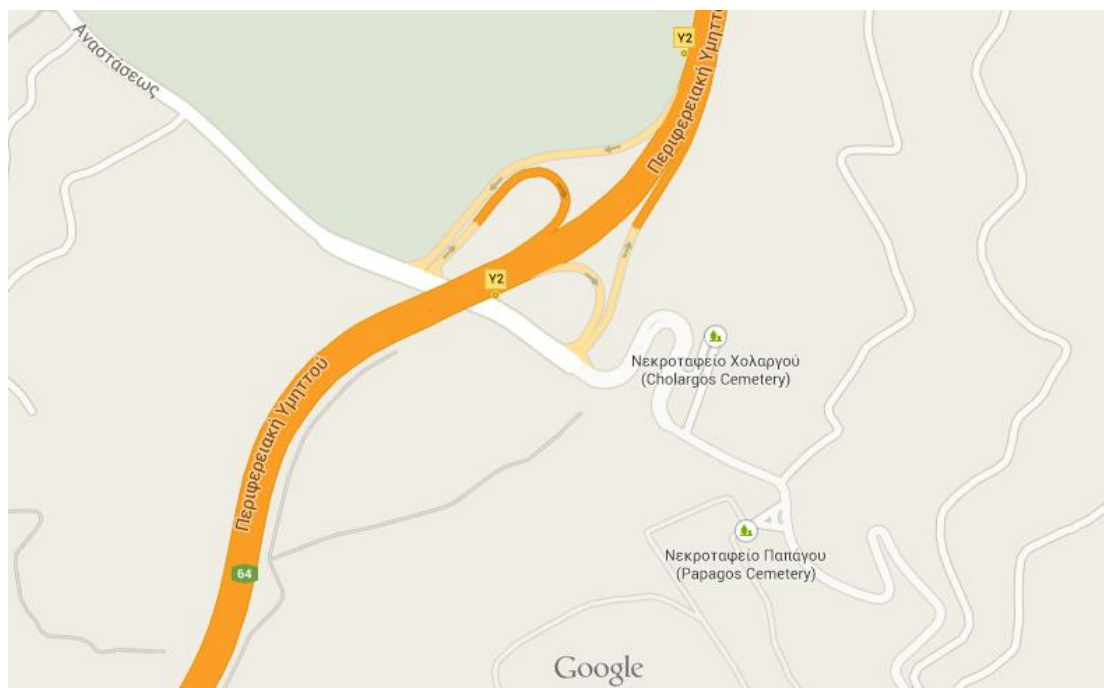
Στο παρόν κεφάλαιο δίνεται η περιγραφή της περιοχής μελέτης όπου διεξήχθησαν οι εργασίες πεδίου καθώς και οι απαραίτητες ενέργειες που προηγήθηκαν.

### 3.2 Περιγραφή Περιοχής Μελέτης

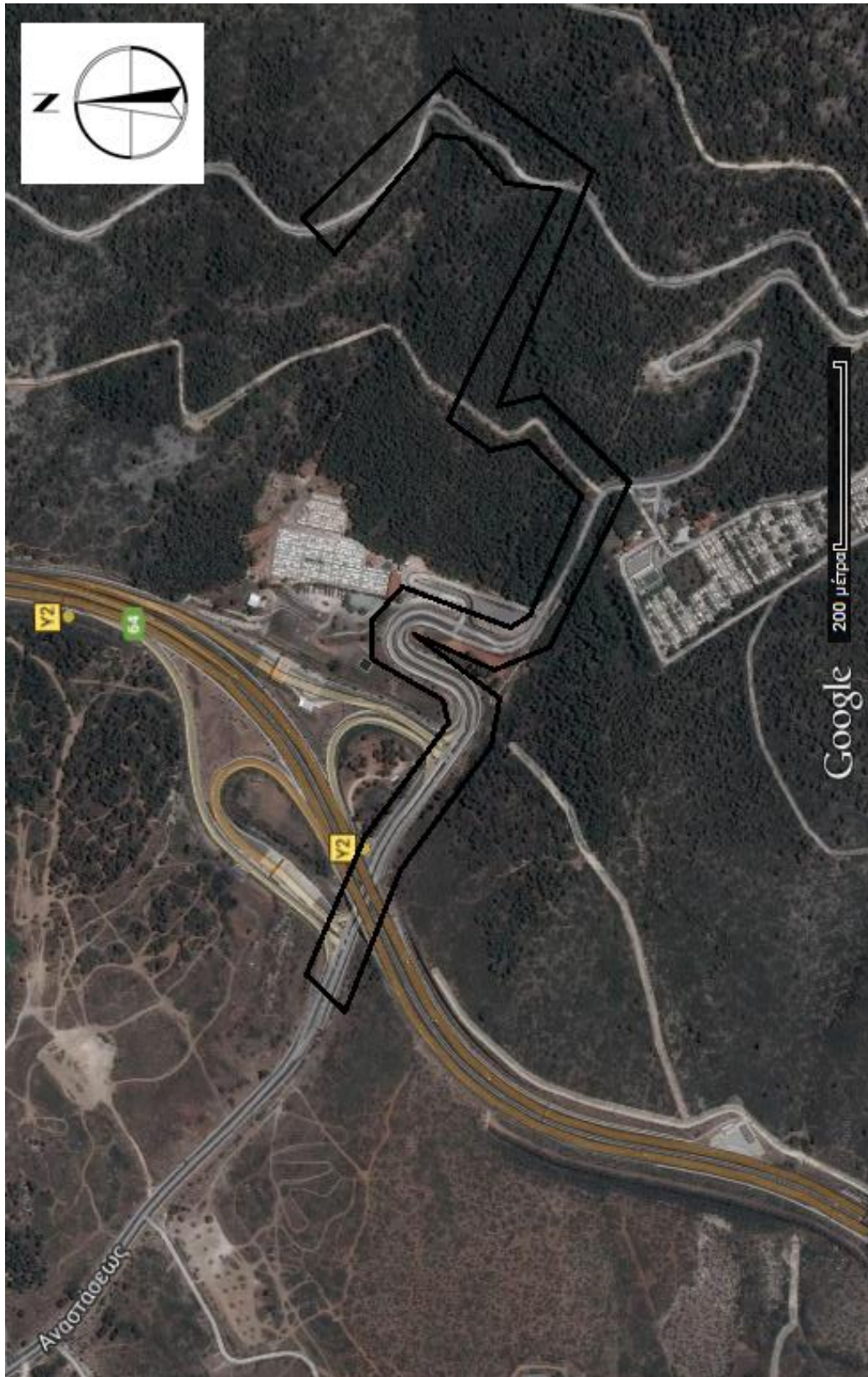
Η περιοχή μελέτης που βρίσκεται στους πρόποδες του όρους Υμηττός στην θέση της οδού Αναστάσεως (Δήμου Παπάγου) και της Περιφερειακής Υμηττού. Η συγκεκριμένη περιοχή παρουσιάζει εναλλαγές στα περιβάλλοντα και στις συνθήκες ορατότητας του ουράνιου θόλου (άρα και δορυφόρων) πράγμα ιδιαίτερα ευνοϊκό για τα συγκεκριμένα πειράματα.

Υπάρχουν τμήματα στα οποία η βλάστηση είναι αρκετά πυκνή με ψηλά δένδρα (χαμηλή – περιορισμένη ορατότητα), τμήματα με εμπόδια λόγω τεχνικών έργων (πχ. τοίχοι αντιστήριξης, φράχτες, υπερκείμενη γέφυρα) καθώς και τμήματα με ικανοποιητική έως πολύ καλή ορατότητα.

Η περιοχή είναι έκτασης της τάξης των 250.000 m<sup>2</sup>, καλύπτεται κυρίως από πεύκα, κυπαρίσσια, κουκουναριές και θάμνους. Η περιοχή μελέτης απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1 και 3.2:



Σχήμα 3.1 : Χάρτης περιοχής μελέτης



Σχήμα 3.2 : Αεροφωτογραφία περιοχής μελέτης

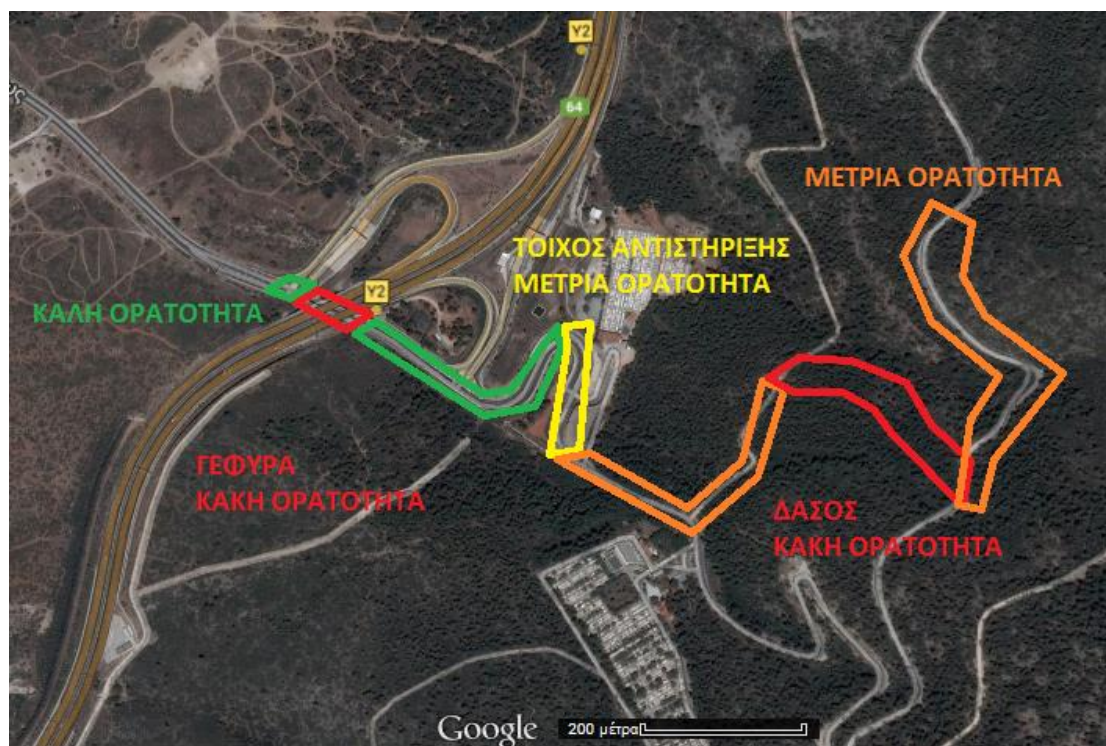
(Πηγή: Google Maps)

Κάποιες από τις φωτογραφίες κατά τη περίοδο των μετρήσεων δίνονται για την καλύτερη απεικόνιση των διαφορετικών συνθηκών παρατήρησης στις επιμέρους περιοχές.

	Περιορισμένη Ορατότητα (διαδρομή διαμέσου πυκνής βλάστησης)
	Μέτρια Ορατότητα (διαδρομή δίπλα σε τοίχο αντιστήριξης)
	Καλή Ορατότητα (διαδρομή σε «ανοιχτό» ουρανό)
	Περιορισμένη/Μηδαμινή Ορατότητα (διαδρομή κάτω από γέφυρα)

Σχήμα 3.3 : Θέσεις της διαδρομής με αντίστοιχες ορατότητες

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζονται τα τμήματα της διαδρομής των πειραμάτων με τους αντίστοιχους σε κάθε ένα από αυτά χαρακτηρισμούς ορατότητας. Παρατηρούνται αρκετές εναλλαγές στην ορατότητα των δορυφόρων που εξαρτώνται από το αντίστοιχο κάθε φορά περιβάλλον.

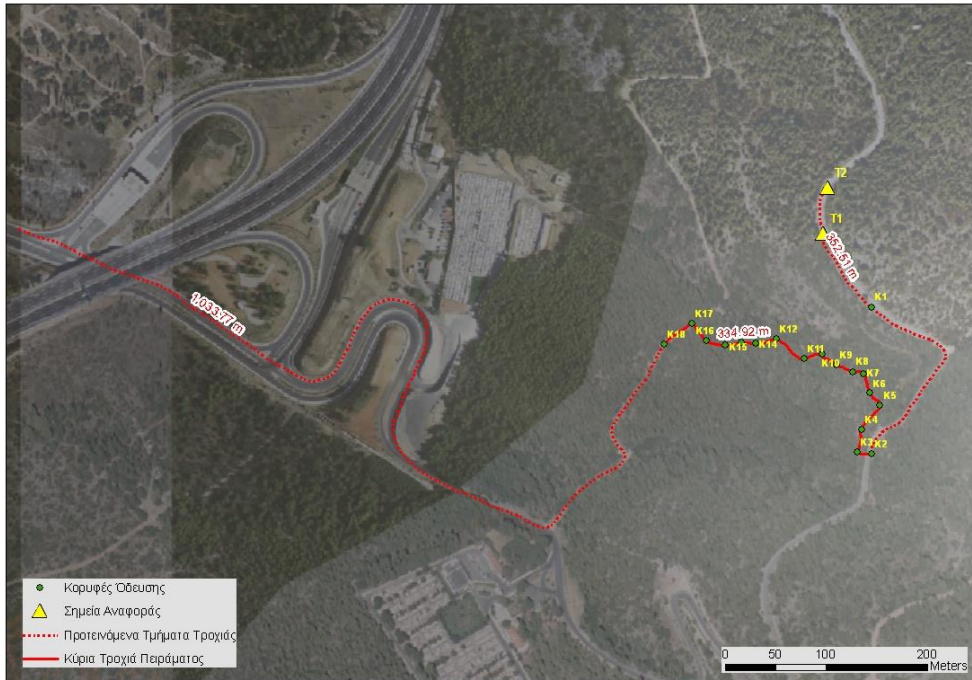


Σχήμα 3.4 : Χαρακτηρισμοί ορατότητας δορυφόρων κατά μήκος της τροχιάς κίνησης

### 3.3 Εγκατάσταση και Προσδιορισμός Θέσης Σημείων Ελέγχου

Η εγκατάσταση και η επιλογή των σημείων της κύριας όδευσης και των σημείων ελέγχου έγινε κατά κύριο λόγο με βάση την ορατότητα και την μορφολογία της περιοχής. Επειδή σκοπός της συγκεκριμένης μελέτης είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων διαφόρων δεκτών και μεθόδων μετρήσεων σε περιβάλλοντα με μεταβαλλόμενη ορατότητα, τα σημεία όπου υπήρχε καλή ορατότητα οι μετρήσεις έγιναν με GPS και αντίθετα όπου η ορατότητα ήταν περιορισμένη έγινε με συμβατικά μέσα. Λόγω της περιορισμένης ορατότητας και μεταξύ των σημείων της όδευσης, τα σημεία βρίσκονται αρκετά κοντά μεταξύ τους σε απόσταση περίπου 10-20m (σημεία K2-K18).

Η όδευση επιλύθηκε ως κλειστή. Το γωνιακό σφάλμα κλεισίματος ήταν 0,0014 grad και το γραμμικό σφάλμα ήταν 0,005 m. Τα γεωδαιτικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση ήταν ο ολοκληρωμένος γεωδαιτικός σταθμός Leica Geosystems 303. Η γωνιακή εξάρτηση της όδευσης έγινε στην κορυφή K1 από το τριγωνομετρικό σημείο T1 (Σχήμα 3.5-3.6). Στα Σχήματα 3.5, 3.6, και 3.7 δίνονται τα σημεία της κύριας όδευσης, τα σημεία αναφοράς καθώς και η αλληλουχία των ταχυμετρικών σημείων γύρω από τα τεχνικά έργα και τους τοίχους αντιστήριξης.



Σχήμα 3.5 : Η αλληλουχία κορυφών όδευσης



Σχήμα 3.6 : Σημεία ελέγχου Κ1 έως Κ18 (κορυφές όδευσης)

Εκτός από την κύρια όδευση υλοποιήθηκαν στο έδαφος και αρκετά ταχυμετρικά σημεία (B1-B34) για την σύγκριση των μετρήσεων κοντά σε τεχνικά έργα (δρόμους, γέφυρες και τοίχους αντιστήριξης). Τα σημεία αυτά στην πλειονότητά τους λήφθηκαν με την μέθοδο RTK-GNSS, αντίθετα, όπου δεν υπήρχε καλή ορατότητα (πχ. κάτω από την γέφυρα) τα σημεία πυκνώθηκαν με γεωδαιτικές μεθόδους από τις πλησιέστερες κορυφές.



Σχήμα 3.7 : Σημεία ελέγχου B1 έως B034



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> - Εξοπλισμός και Σύστημα Καταγραφής

---

### 4.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο δίνεται μια περιγραφή των δεκτών, του γεωδαιτικού σταθμού και του ολοκληρωμένου συστήματος GNSS/INS που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις μετρήσεις, καθώς και της διάταξης καταγραφής (*personal navigator*) που κατασκευάστηκε έτσι ώστε όλα τα όργανα καταγραφής να καταγράφουν τις πορείες ταυτόχρονα, ούτως ώστε να είναι δυνατή η αντικειμενική σύγκριση των αποτελεσμάτων τους.

### 4.2 Δορυφορικοί Δέκτες Εντοπισμού

#### 4.2.1 Garmin GPSMap 62s

Πρόκειται για έναν δέκτη χειρός (*handheld receiver*) της εταιρίας Garmin με μεγάλη έγχρωμη οθόνη και ενσωματωμένη ηλεκτρονική πυξίδα τριών αξόνων (ακρίβειας  $\pm 5^\circ$ , ανάλυσης  $\pm 1^\circ$ ), βαρομετρικό αλτίμετρο, υποδοχή για σύνδεση με εξωτερική κεραία GPS και δυνατότητα ανταλλαγής δεδομένων ασύρματα. Διαθέτει ένα πολύ ευαίσθητο ενσωματωμένο δέκτη GPS 12 καναλιών με ενσωματωμένη κεραία.



Σχήμα 4.1 : Garmin GPSMap 62s

(Πηγή: [www.schoenebergtouren.de](http://www.schoenebergtouren.de), 2014)

Επιπλέον χαρακτηριστικά είναι ο περιορισμένος χρόνος για τον αρχικό εντοπισμό (*Time to first fix-TTFF*). Υποστήριξη υπηρεσιών Augmentation και 100 διαφορετικών γεωδαιτικών datum. Οι ακρίβειες που δίνει ο κατασκευαστής είναι: <10 m για επίλυση σε απόλυτο εντοπισμό (με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%), 3-5 m για επίλυση με DGPS (με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%). Οι διαστάσεις του είναι 61x160x36 mm και ζυγίζει 260 g.

#### 4.2.2 Trimble GeoXT



Σχήμα 4.2 : Trimble GeoExplorer XT

(Πηγή: <http://www.geoplane.com/trimble/pdfs/geoxt2005.pdf>, 2014)

Πρόκειται για έναν επίσης δέκτη χειρός ο οποίος δίνει την δυνατότητα σύνδεσης και ενημέρωσης των GIS χαρτών σε πραγματικό χρόνο. Διαθέτει την επονομαζόμενη τεχνολογία EVEREST™ που βοηθά στην εξομάλυνση των σφαλμάτων λόγω της πολυανάκλασης (*multipath*).

Ο δέκτης μπορεί να λάβει και να επεξεργαστεί τις διορθώσεις από συστήματα SBAS (π.χ. EGNOS). Το λειτουργικό σύστημα που χρησιμοποιεί είναι το Windows Mobile 5.0. Διαθέτει 12 κανάλια (L1 κώδικα και φάσης).

Οι ακρίβειες που δίνει ο κατασκευαστής είναι: <1 m για επίλυση GPS σε πραγματικό χρόνο και μετεπεξεργασία (με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%). Οι διαστάσεις του είναι 21.5 × 9.9 × 7.7 cm και ζυγίζει 0.78 kg.

### 4.2.3 Novatel Propak



Σχήμα 4.3 : Novatel Propak-V3

(Πηγή: <http://www.novatel.com> )

Πρόκειται για έναν δέκτη GNSS που υποστηρίζει το σύστημα SPAN (Synchronized Position Attitude Navigation) το οποίο επιτυγχάνει τη στενή συνεργασία – συνέργεια μεταξύ ενός GNSS δέκτη της NovAtel και μίας αδρανειακής μονάδας, Inertial Measurement Unit (IMU). Το σύστημα είναι σχεδιασμένο για συνεχή λειτουργία, ακόμη και ύστερα από απώλειες του σήματος GNSS, παρέχοντας ακριβείς πληροφορίες θέσης και συμπεριφοράς κίνησης. Σχεδιασμένο για δυναμικές εφαρμογές, το SPAN παρέχει επίσης με ακρίβεια μετρήσεις ταχύτητας, επιτάχυνσης και περιστροφών.

Ο ProPak-V3 είναι δέκτης με 72 κανάλια, με ικανότητα να λάβει σήματα GPS και GLONASS. Παρέχει ακρίβεια 2 cm RTK εντοπισμό, δέχεται διορθώσεις L-Band από γεωσύγχρονους δορυφόρους OmniSTAR HP/XP και CDGPS ενώ υποστηρίζει και τους δορυφόρους SBAS. Με αναβαθμίσεις, ο δέκτης είναι σε θέση να παρακολουθεί και την L5 συχνότητα όταν αυτή θα είναι διαθέσιμη.

Ο GNSS δέκτης ProPak-V3 υποστηρίζει την ύπαρξη ξεχωριστών μονάδων GPS και IMU ούτως ώστε να επιτυγχάνεται απλούστερη και πιο ευέλικτη διαμόρφωση και εγκατάσταση του συστήματος. Σε περιπτώσεις που επιθυμητή είναι η GPS λειτουργία, ο SPAN δέκτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και εντελώς ανεξάρτητα. Συμπερασματικά, η τεχνολογία SPAN παρέχει σε ένα σύστημα αφενός σταθερή - αξιόπιστη GPS και αδρανειακή λύση, και αφ' ετέρου ένα φορητό υψηλής απόδοσης GPS δέκτη.

Οι ακρίβειες που δίνει ο κατασκευαστής είναι: ~1.5 m για επίλυση GPS L1, ~1.2 m για επίλυση GPS L1/L2, <1 m για επίλυση με DGPS / SBAS.

Οι διαστάσεις του είναι 185x160x71 mm και ζυγίζει 1 kg.

## 4.3 Αδρανειακό Σύστημα Εντοπισμού

### 4.3.1 iMAR-FSAS-IMU



Σχήμα 4.4 : iMAR-FSAS-IMU

(Πηγή: <http://www.autonomoustuff.com/novatel-imu-fsastrade.html>)

Η αδρανειακή μονάδα iMAR-FSAS-IMU που περιλαμβάνει το σύστημα SPAN είναι η FSAS της Γερμανικής εταιρίας iMAR. Η υπόψη μονάδα καθοδηγείται από το δέκτη ProPak-V3 της NovAtel ώστε όλες οι αδρανειακές μετρήσεις να είναι συγχρονισμένες με τις αντίστοιχες GNSS.

Τα δεδομένα της τεχνολογίας SPAN είναι διαθέσιμα σε πραγματικό χρόνο μέσω του λογισμικού CDU. Επιπλέον, η θυγατρική της NovAtel, Waypoint, έχει αναπτύξει ειδικό λογισμικό για λειτουργία σε εκ των υστέρων επεξεργασία, το Inertial Explorer.

### 4.3.2 Συνδεσμολογία GNSS/INS (SPAN system)

Η συνεργασία του δέκτη ProPak-V3 με τη μονάδα IMU ενσύρματα. Συνδυάζοντας τις δορυφορικές και αδρανειακές μετρήσεις, η τεχνολογία SPAN παρέχει με σταθερό τρόπο εντοπισμό θέσης, ακόμη και σε δύσκολα περιβάλλοντα μετρήσεων όπου η λύση δορυφορικού εντοπισμού από μόνη της είναι σαφώς λιγότερο αξιόπιστη ή όπου το σήμα GPS είναι εξασθενημένο ή ανύπαρκτο.

Κατά τη διάρκεια σύντομων χρονικά πλήρων απωλειών του σήματος GNSS ή σε περιπτώσεις που λαμβάνεται σήμα από λιγότερους από 4 δορυφόρους, η τεχνολογία SPAN παρέχει αδιαλείπτως πληροφορίες θέσης και συμπεριφοράς κίνησης. Η στενή συνεργασία - συνέργεια μεταξύ της μονάδας IMU και του δέκτη GNSS παρέχει επιπλέον σημαντικά ταχύτερο χρόνο επανάκτησης του σήματος και ταχύτερο χρόνο επίλυσης των ασαφειών φάσης κατά τον RTK εντοπισμό. Αντίστροφα, ακόμα και όταν δεν υπάρξει λύση δορυφορικού εντοπισμού, η χρήση έστω και ενός, δύο ή τριών παρατηρούμενων δορυφόρων, συμβάλλει αποφασιστικά στη βελτίωση της σταθερότητας της IMU μονάδας στο χρόνο και, υπό συνθήκες, την δυνατότητα επίλυσης.

## 4.4 Σύστημα Γεωδαιτικού Σταθμού Αυτόματης Αναγνώρισης και Παρακολούθησης Στόχου

### 4.4.1 Leica TCA1800



Σχήμα 4.5 : Leica TCA1800

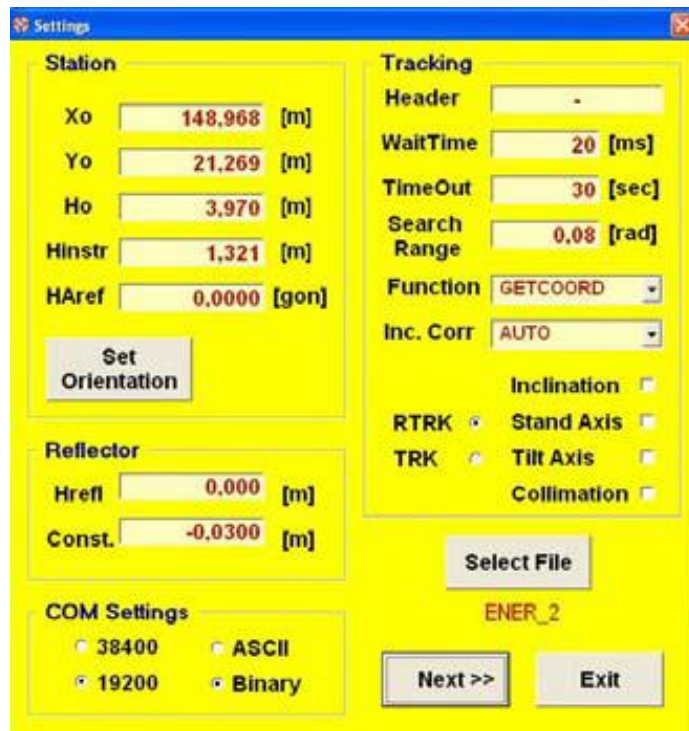
(Πηγή: [http://hds.leica-geosystems.com/en/System-2000\\_5253.htm](http://hds.leica-geosystems.com/en/System-2000_5253.htm) )

Πρόκειται για έναν ολοκληρωμένο ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό (*robotic total station - RTS*) της εταιρίας Leica. Ο συγκεκριμένος τύπος υποστηρίζει την τεχνολογία της αυτόματης αναγνώρισης στόχου (*Automatic Target Recognition – ATR*). Σύμφωνα με την τεχνολογία αυτή το όργανο «κλειδώνει» τον στόχο-πρίσμα και το ακολουθεί αυτόματα κατά την διάρκεια της κίνησής του, εξοικονομώντας έτσι χρόνο. Είναι εφοδιασμένο με σερβομηχανισμό ο οποίος περιστρέφει αυτόματα το όργανο γύρω από τον πρωτεύοντα (κατακόρυφο) άξονά του και επιπλέον με μηχανισμό αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου.

Κατά τη εφαρμογή της τεχνικής παρακολούθησης (ATR) οι ακρίβειες που δίνονται από τον κατασκευαστή είναι  $\pm 5\text{mm}$  ( $< 400\text{ m}$ , πρίσμα  $360^\circ$ ) και  $\pm 2\text{mm}$  (κυκλικό πρίσμα) και συχνότητα μέτρησης είναι 1s. Ενώ για κανονικές μετρήσεις  $1\text{mm}+1\text{ppm}$  και ακρίβεια μέτρησης γωνιών  $1''$ . Για παρακολούθηση (tracking) :  $5\text{mm}+2\text{ppm}$  και η συχνότητα μέτρησης είναι 0.3s. Ζυγίζει 7.1 kg.

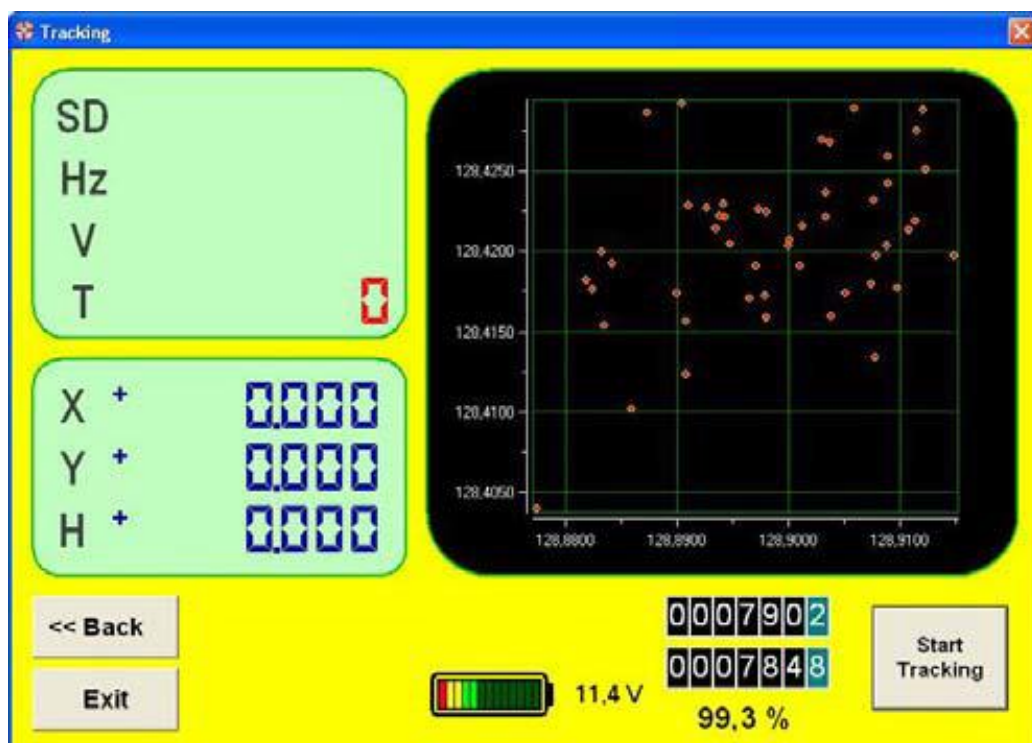
### 4.4.2 Το Λογισμικό Leica Tracker

Κατά τις μετρήσεις, έγινε χρήση του λογισμικού πακέτου «Leica Tracking Controller v.2.2.3.» που δημιουργήθηκε στο πλαίσιο προηγούμενης διπλωματικής εργασίας, για την σύνδεση του ολοκληρωμένου γεωδαιτικού σταθμού με έναν φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή ούτως ώστε οι πληροφορίες να καταγράφονται όταν είναι σε λειτουργία η επιλογή «Tracking Mode». Αυτό έγινε συνδέοντας το όργανο με τον Η/Υ μέσω ενός σειριακού καλωδίου. Στη συνέχεια δίνονται κάποιες εικόνες του λογισμικού:



Σχήμα 4.6 : Αρχικό Παράθυρο Ρυθμίσεων

(Πηγή: Gikas, 2008)

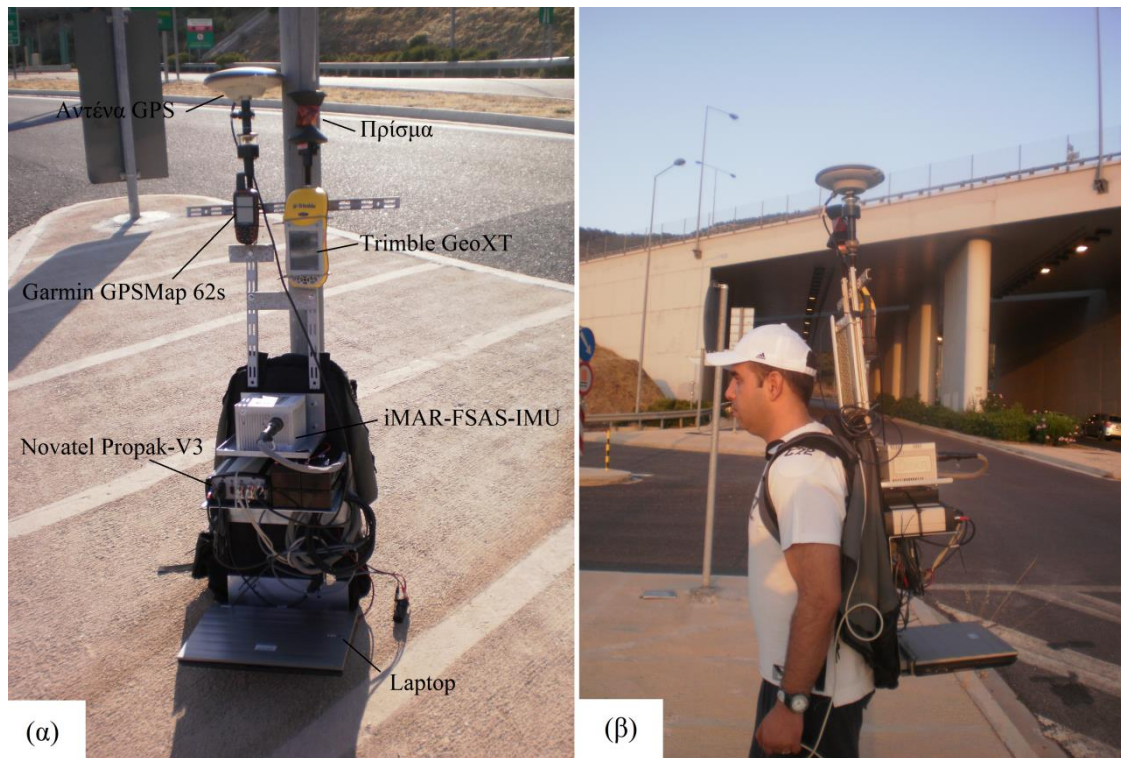


Σχήμα 4.7 : Απεικόνιση μετρήσεων κατά τη διάρκεια της παρακολούθησης

(Πηγή: Gikas, 2008)

#### 4.5 Διάταξη Καταγραφής – Προσωπικός Πλοηγός (*personal navigator*)

Η διάταξη των δεκτών με τον συγκεκριμένο τρόπο που έγινε είχε ως στόχο την λήψη μετρήσεων σε ακριβώς τον ίδιο χρόνο και τόπο, για να είναι ορθότερη η σύγκριση τους κατά την τελική επεξεργασία. Κατασκευάστηκε η διάταξη που φαίνεται στη εικόνα με σκοπό να είναι όσο γίνεται πιο ελαφριά για να μπορεί κάποιος να την φέρει στην πλάτη. Η διάταξη και οι επιμέρους δέκτες δίνονται στο Σχήμα 4.8 που ακολουθεί:



Σχήμα 4.8 : Διάταξη Καταγραφής: (α) Δέκτες, (β) Personal Navigator

Στη διάταξη καταγραφής εκτός από τους δέκτες που αναλύθηκαν παραπάνω, χρησιμοποιήθηκαν και διάφορα παρελκόμενα όπως ένας φορητός Η/Υ για την καταγραφή των μετρήσεων, πρίσμα 360°, αντένα GNSS, άλλη συνδεσμολογία, κ.α.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> - Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων Πεδίου

---

### 5.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται οι σειρές μετρήσεων και εργασιών πεδίου που έγιναν για την λήψη δεδομένων που στη συνέχεια επεξεργάστηκαν. Στη συνέχεια δίνεται μια περιγραφή των επιλύσεων των δορυφορικών παρατηρήσεων, των παρατηρήσεων GNSS/INS και των παρατηρήσεων του γεωδαιτικού σταθμού. Οι επιλύσεις χρησιμοποιούνται στα επόμενα κεφάλαια για την ανάλυση και τον σχολιασμό των αποτελεσμάτων.

### 5.2 Διαδικασία Συλλογής Δεδομένων Πεδίου

Η εργασίες πεδίου έγιναν κατά τις καλοκαιρινές περιόδους 2012 και 2013 και περιλαμβάνουν:

- Αναγνώριση περιοχής
- Εγκατάσταση κορυφών όδευσης (σημεία ελέγχου)
- Μέτρηση όδευσης και εγκατάσταση σημείων ελέγχου B1-B34
- Μέτρηση και επίλυση όδευσης (K1-K18)
- Ίδρυση και μέτρηση ταχυμετρικών σημείων Δ1-Δ4
- Μέτρηση ταχυμετρικού σημείου TRK και σημείων B1-B34
- Κατασκευή του συστήματος συλλογής
- Μετρήσεις με το σύστημα καταγραφής (*Pedestrian Navigator Aller – Retour*) και Γεωδαιτικό Σταθμό

Τα σημεία της όδευσης επιλέχθηκαν έτσι ώστε η ορατότητα των δορυφόρων να είναι κατά κύριο λόγο περιορισμένη (μέσα σε δασική έκταση) αλλά και να εναλλάσσεται (στη περιοχή των τεχνικών έργων). Η γωνία αποκοπής ορίστηκε στις 15°.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της όδευσης και των υπόλοιπων δεκτών υπολογίστηκαν στο σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ '87.

Η επιλογή της θέσης του γεωδαιτικού σταθμού έγινε σε σημείο πλησίον της τροχιάς μελέτης σε τοίχο αντιστήριξης. Αυτό είχε ως στόχο την σύγκριση των μετρήσεων από τον γεωδαιτικό σταθμό με τις μετρήσεις των δορυφορικών δεκτών σε περιβάλλον περιορισμένης ορατότητας (η διαδρομή στο τοίχο αντιστήριξης έχει ορατότητα μόνο από την μία πλευρά).





Σχήμα 5.1 : Εργασίες Υπαίθρου - Μέτρηση Όδευσης

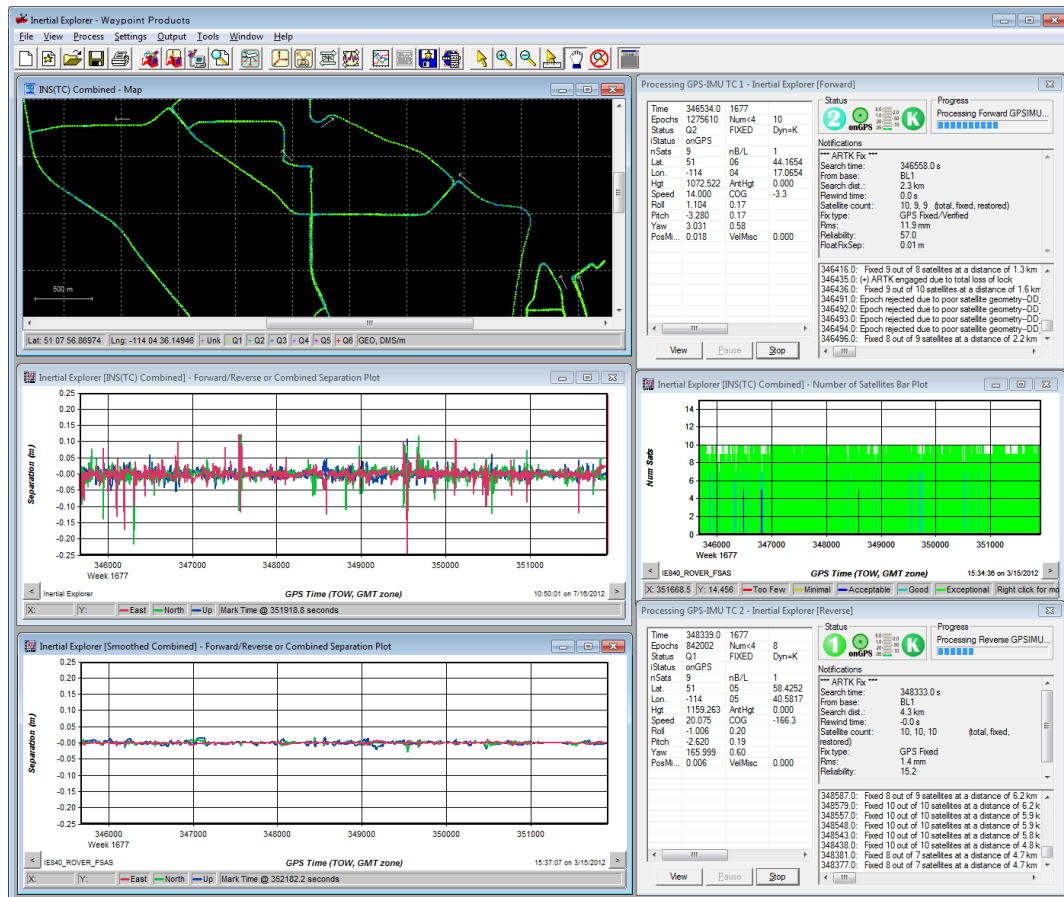


Σχήμα 5.2 : Μετρήσεις με το σύστημα καταγραφής και γεωδαιτικό σταθμό

Κατά τη διάρκεια των εργασιών υπαίθρου παρουσιάστηκαν αρκετά τεχνικά προβλήματα. Έγινε προσπάθεια συλλογής των μετρήσεων δύο φορές. Την πρώτη φορά υπήρξε πρόβλημα στην σύνδεση των δεκτών με τον φορητό Η/Υ και δεν ήταν δυνατή η καταγραφή των μετρήσεων. Την δεύτερη φορά υπήρξαν προβλήματα κατά την κατάβαση και οι μετρήσεις δεν είναι δυνατόν να επιλυθούν. Επίσης τα δεδομένα των δεκτών Garmin GPSMap 62s και Trimble GeoXT δεν είναι διαθέσιμα.

## 5.3 Επίλυση Παρατηρήσεων Ολοκληρωμένου Συστήματος GNSS/INS

Η επίλυση των παρατηρήσεων του ολοκληρωμένου συστήματος GNSS/INS έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού Inertial Explorer της Novatel. Πρόκειται για ένα λογισμικό επίλυσης μετρήσεων GPS με συνδυασμό μετρήσεων INS.



Σχήμα 5.3 : Γραφικό Περιβάλλον του Novatel Inertial Explorer

(Πηγή: <http://www.novatel.com/products/software/inertial-explorer/>)

Το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα συνθετικής επίλυσης των μετρήσεων GPS με INS με την εφαρμογή ενός αλγορίθμου φίλτρου Kalman βάσει των τεχνικών επίλυσης Tightly Coupled και Loosely Coupled. Επίσης, δίνει την δυνατότητα εφαρμογής φίλτρων εξομάλυνσης (smoothing). Οι μετρήσεις επιλύθηκαν και με τρεις μεθόδους που το λογισμικό προσφέρει.

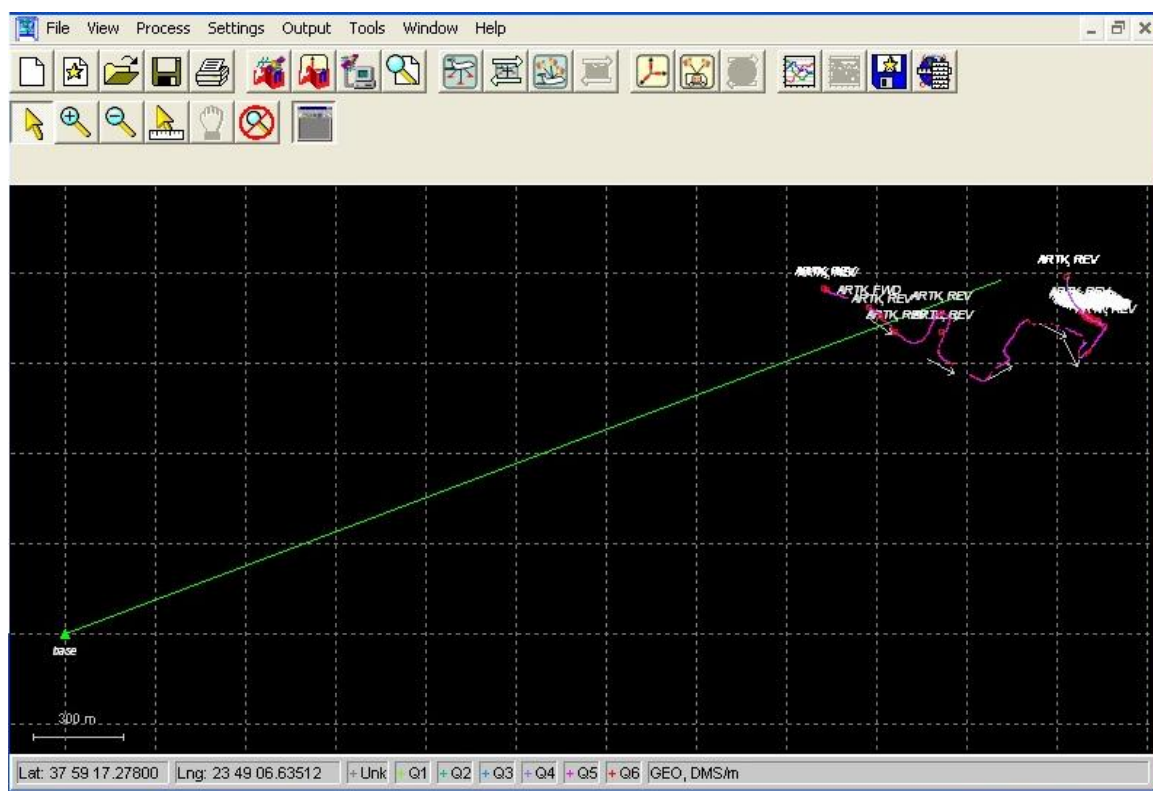
Η πρώτη επίλυση έγινε με την αρχή του Tightly Coupled. Κατά την επίλυση χρησιμοποιήθηκε και εφαρμόστηκε ένας αλγόριθμος εξομάλυνσης (smoothing algorithm).

Η δεύτερη επίλυση έγινε με την αρχή της τεχνικής Loosely Coupled χρησιμοποιώντας επίσης και τον αλγόριθμο εξομάλυνσης. Τέλος, η τρίτη επίλυση αφορά μία πιο εξειδικευμένη εφαρμογή της αρχής Loosely Coupled, χρησιμοποιώντας ένα αρχείο ως υποβοήθηση που περιέχει τις ακριβείς συντεταγμένες από τις κορυφές της όδευσης και τον ακριβή χρόνο όπου διήλθε ο δέκτης SPAN.

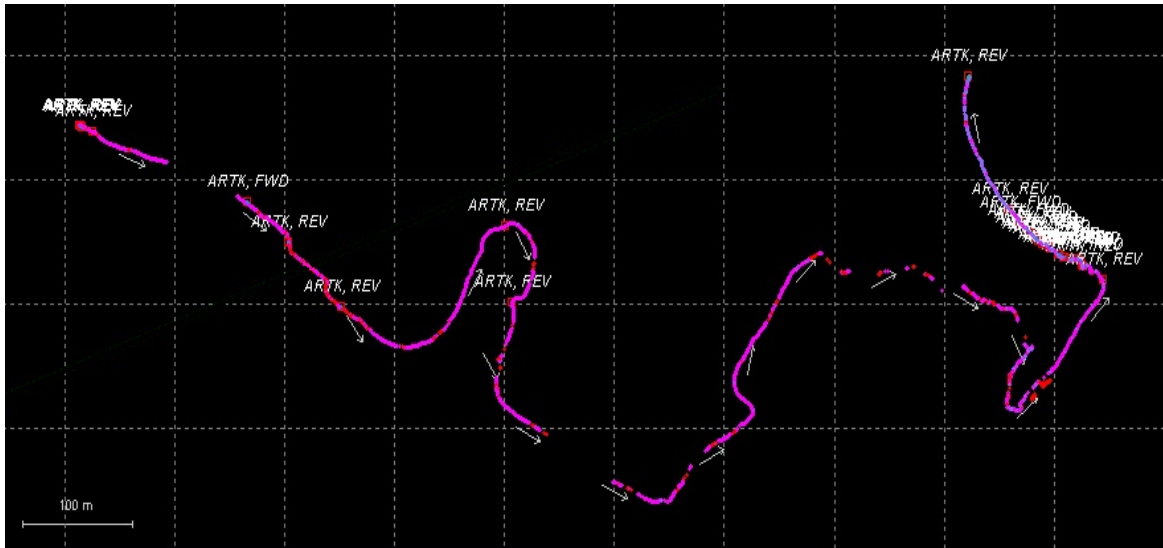
Μετά την επεξεργασία των τριών αυτών σεναρίων, το λογισμικό δίνει την δυνατότητα εξαγωγής των συντεταγμένων σε κάποιο σύστημα αναφοράς που επιλέγει ο χρήστης, αρχείων εμφάνισης στο πρόγραμμα Google Earth και άλλων.

Για την καλύτερη σύγκριση ανάμεσα στις τρεις λύσεις και τα σημεία ελέγχου δημιουργήθηκαν σχέδια στο λογισμικό AutoCAD. Επίσης το ίδιο το λογισμικό δίνει την δυνατότητα εξαγωγής στατιστικών διαγραμμάτων (ακρίβειας, DOP, ορατότητας, κτλ).

Στα παρακάτω δύο σχήματα απεικονίζεται η πορεία στο λογισμικό κατά την αρχική επεξεργασία (της δημιουργίας του έργου και της εμφάνισης των αρχικών δεδομένων της μονάδας INS και του δέκτη GPS). Πρώτη απεικονίζει ευρέως την περιοχή και τον σταθμό Base (τοποθετημένο στην ταράτσα του κτιρίου Λαμπαδαρίου της Σ.Α.Τ.Μ.) και η δεύτερη εστιάζει στην πορεία. Η πορεία αυτή προκύπτει μόνο από τις μετρήσεις GPS.



Σχήμα 5.4 : Η πορεία στο Novatel Inertial Explorer (ευρύτερη περιοχή)



Σχήμα 5.5 : Η πορεία στο Novatel Inertial Explorer (μεγέθυνση στην περιοχή μελέτης)

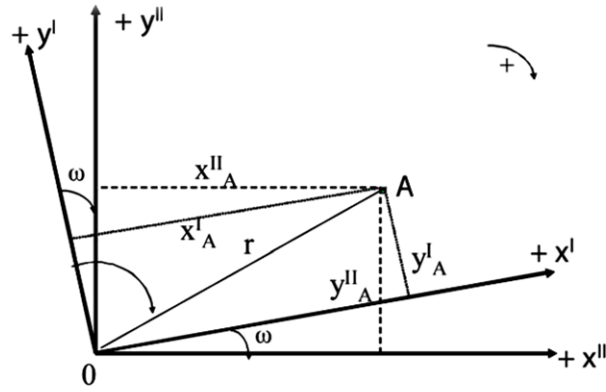
Από τα παραπάνω Σχήματα 5.4 και 5.5 παρατηρούνται κάποιες ασυνέχειες που οφείλονται στην διακοπή της ορατότητας των δορυφόρων (για παράδειγμα κάτω από την γέφυρα, στην πυκνή δασώδη περιοχή κτλ.).

#### 5.4 Επίλυση Παρατηρήσεων Γεωδαιτικού Σταθμού

Ο προσδιορισμός των θέσεων που μετρήθηκαν από τον γεωδαιτικό σταθμό με παρακολούθηση του πρίσματος έγινε με τη βοήθεια ενός λογιστικού φύλλου Excel. Οι υπολογισμοί περιελάμβαναν: Παράλληλη μετατόπιση (Σχήμα 5.7) και στροφή των αξόνων (Σχήμα 5.6), από το σύστημα αναφοράς του γεωδαιτικού σταθμού στο ΕΓΣΑ'87. Χρησιμοποιήθηκε ο τύπος του γενικού μετασχηματισμού μετατροπής συντεταγμένων.

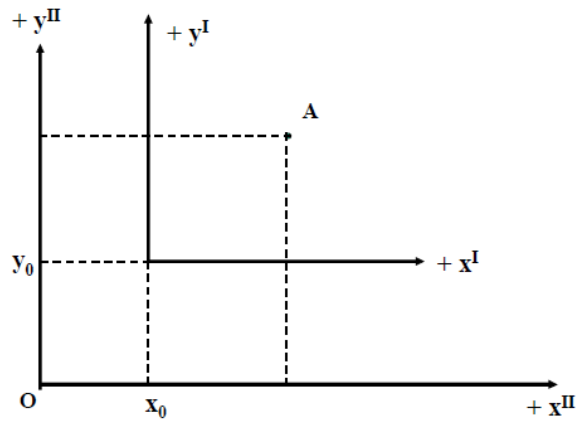
$$\begin{bmatrix} x^{II} \\ y^{II} \end{bmatrix} = mR \begin{bmatrix} x^I \\ y^I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0^{II} \\ y_0^{II} \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} \cos \omega & -\sin \omega \\ \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^I \\ y^I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0^{II} \\ y_0^{II} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

όπου:  $x^I, y^I$  οι συντεταγμένες ενός σημείου στο πρώτο σύστημα αναφοράς,  $x^{II}, y^{II}$  οι συντεταγμένες του ίδιου σημείου στο δεύτερο σύστημα αναφοράς,  $m$  ο συντελεστής κλίμακας,  $R$  ο πίνακας στροφών και  $x_0^{II}, y_0^{II}$  οι συντεταγμένες του σημείου αρχής των αξόνων στο δεύτερο σύστημα αναφοράς.



Σχήμα 5.6 : Στροφή δύο συστημάτων συντεταγμένων με ίδια αρχή

(Πηγή: Μ. Τσακίρη, Εισαγωγή στη Γεωδαισία, 2007)



Σχήμα 5.7 : Μετάθεση της αρχής συντεταγμένων

(Πηγή: Μ. Τσακίρη, Εισαγωγή στη Γεωδαισία, 2007)

Η αρχή του συστήματος αναφοράς του γεωδαιτικού σταθμού είναι το σημείο TRK με μηδενισμό στο σημείο B024. Οι συντεταγμένες των σημείων αυτών στο ΕΓΣΑ '87 δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Σημείο	x[m]	y[m]	H[m]
TRK	483411.729	4203697.016	335.627
B024	483435.1752	4203774.8008	327.805

Πίνακας 5.1 : Συντεταγμένες σημείων TRK και B024 στο ΕΓΣΑ '87

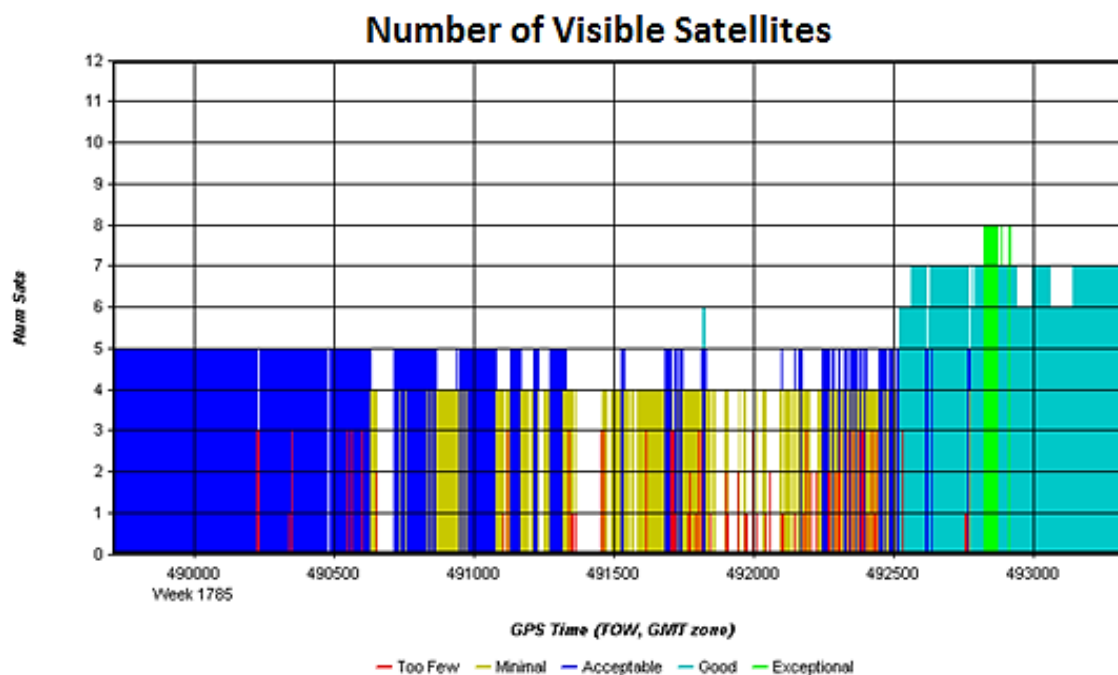
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup> - Ανάλυση Αποτελεσμάτων

### 6.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται τα αποτελέσματα των διαδικασιών ανάλυσης που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 5. Έμφαση δόθηκε στις αναλύσεις του ολοκληρωμένου συστήματος GNSS/INS και στις τρεις περιπτώσεις σύζευξης των δύο τύπων αισθητήρων που συζητήθηκαν στην Ενότητα 2.3.1. Οι αναλύσεις, τα διαγράμματα και οι παρατηρήσεις αφορούν μόνο την πορεία ανάβασης, μιας και τα δεδομένα της κατάβασης δεν ήταν δυνατό να επιλυθούν.

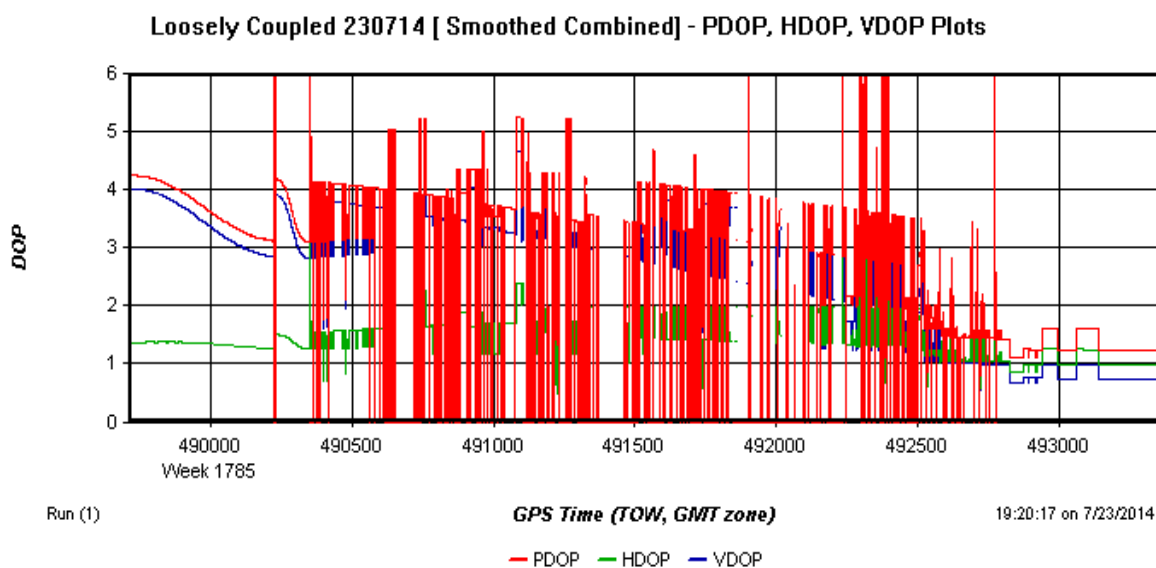
### 6.2 Διαθεσιμότητα Δορυφόρων

Από διάγραμμα (Σχήμα 6.1) που δημιουργήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού Novatel Inertial Explorer βλέπουμε ότι ο αριθμός των ορατών δορυφόρων κατά τη διάρκεια της πορείας κυμαίνεται από 0 έως 8.



Σχήμα 6.1 : Διάγραμμα πλήθους ορατών δορυφόρων

Στην αρχή της πορείας, κοντά στο τμήμα τεχνικών έργων 5 δορυφόροι ήταν ορατοί. Η ορατότητα διακόπηκε στο πέρασμα κάτω από τη γέφυρα και επανήλθε ξανά. Μεταξύ των χρονικών διαστημάτων 491000 και 492500 οι δέκτες βρισκόντουσαν στην πυκνή δασική περιοχή. Παρατηρείται από το διάγραμμα ότι η ορατότητα ήταν πολύ χαμηλή έως ανύπαρκτη. Υπάρχουν στιγμές όπου η ορατότητα διακόπτεται εντελώς. Ο αριθμός των ορατών δορυφόρων κυμαίνεται από 0 έως 4 (κάποιες στιγμές 5). Μετά την έξοδο από την δασώδη περιοχή, κατά την ανάβαση στο τμήμα K2-K1 οι συνθήκες ορατότητας ήταν καλύτερες. Οι ορατοί δορυφόροι ήταν 7 έως 8.



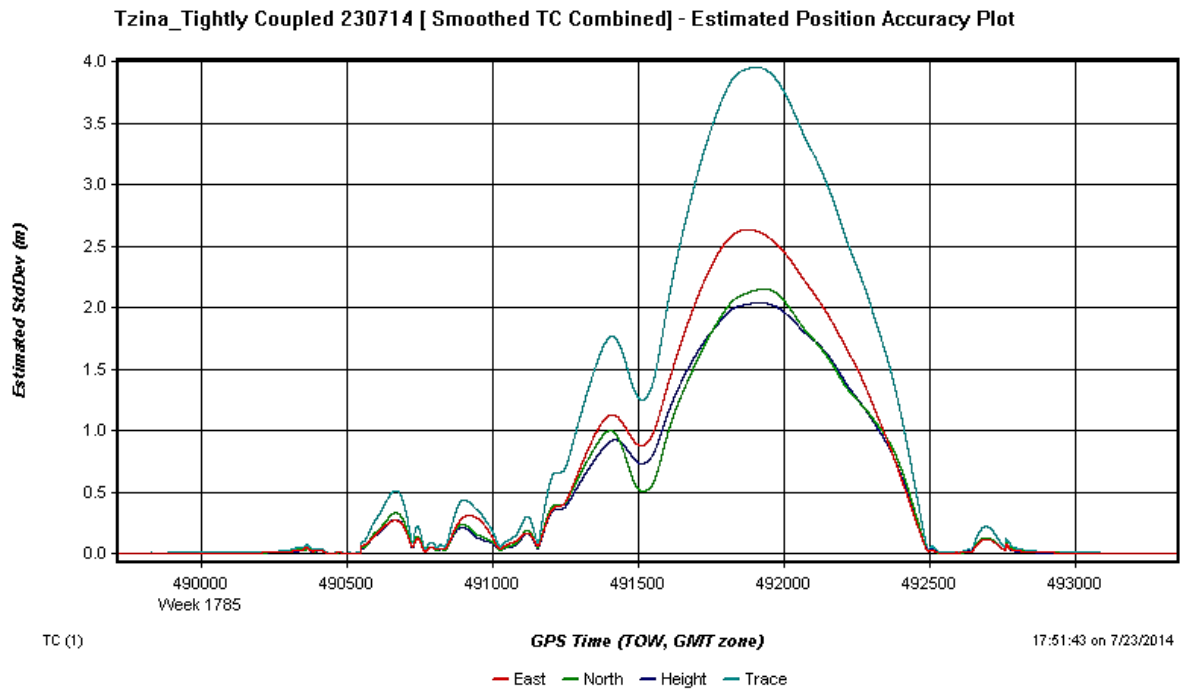
Σχήμα 6.2 : Διάγραμμα DOP πορείας κίνησης

Από το διάγραμμα DOP (Σχήμα 6.2) παρατηρούνται τιμές κατά μέσο όρο κοντά στο 3 για το VDOP και PDOP ενώ 1,5 για HDOP. Οι τιμές όλων πλησιάζουν στην τιμή 1 κατά τη διάρκεια του τέλους της διαδρομής (492550 έως τέλος).

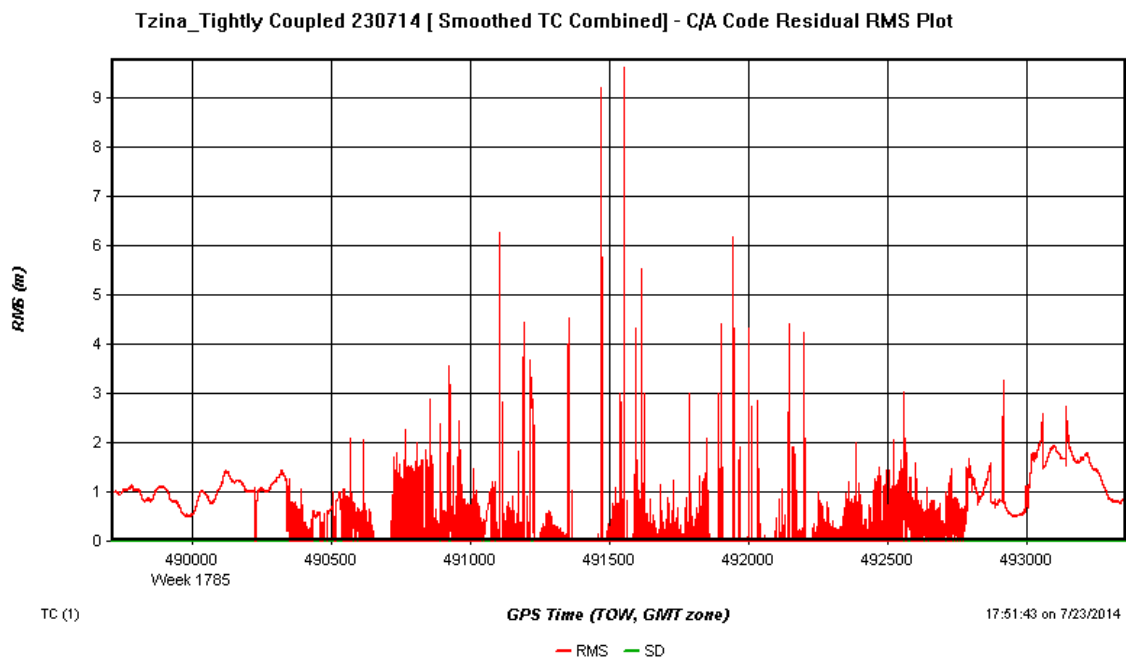
### 6.3 Σύγκριση Λύσης Πλοήγησης GPS – Επίλυσης GPS/INS

Μετά από την επεξεργασία των συνδυασμένων επιλύσεων GPS/INS με τρεις διαφορετικές μεθόδους σύζευξης, παραθέτονται τα στατιστικά και τα διαγράμματα που εξήχθησαν από το πρόγραμμα Inertial Explorer.

Η πρώτη περίπτωση είναι αυτή της σφιχτής σύζευξης. Το διάγραμμα ορατότητας των δορυφόρων είναι το ίδιο για όλες της περιπτώσεις σύζευξης (Σχήμα 6.1). Από το διάγραμμα της τυπικής απόκλισης (Σχήμα 6.3) της ακρίβειας των εκτιμώμενων θέσεων, παρατηρείται ότι οι τιμές κατά τη διάρκεια της πορείας μέσα στην δασική έκταση (491000 s και 492500 s) αυξάνονται πολύ δίνοντας τιμές έως και 4 m στην περίπτωση του ίχνους τροχιάς. Στα υπόλοιπα τμήματα της πορείας οι τιμές είναι μέχρι 0.5 m.



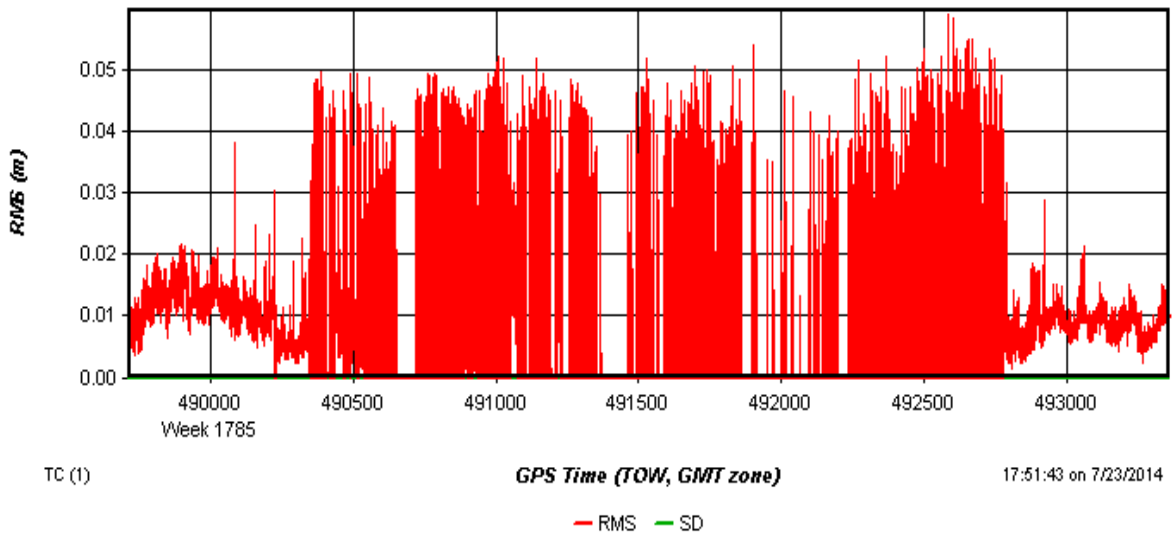
Σχήμα 6.3 : Διάγραμμα τυπικής απόκλισης σφικτής σύζευξης



Σχήμα 6.4 : RMS των υπολοίπων κώδικα σφικτής σύζευξης



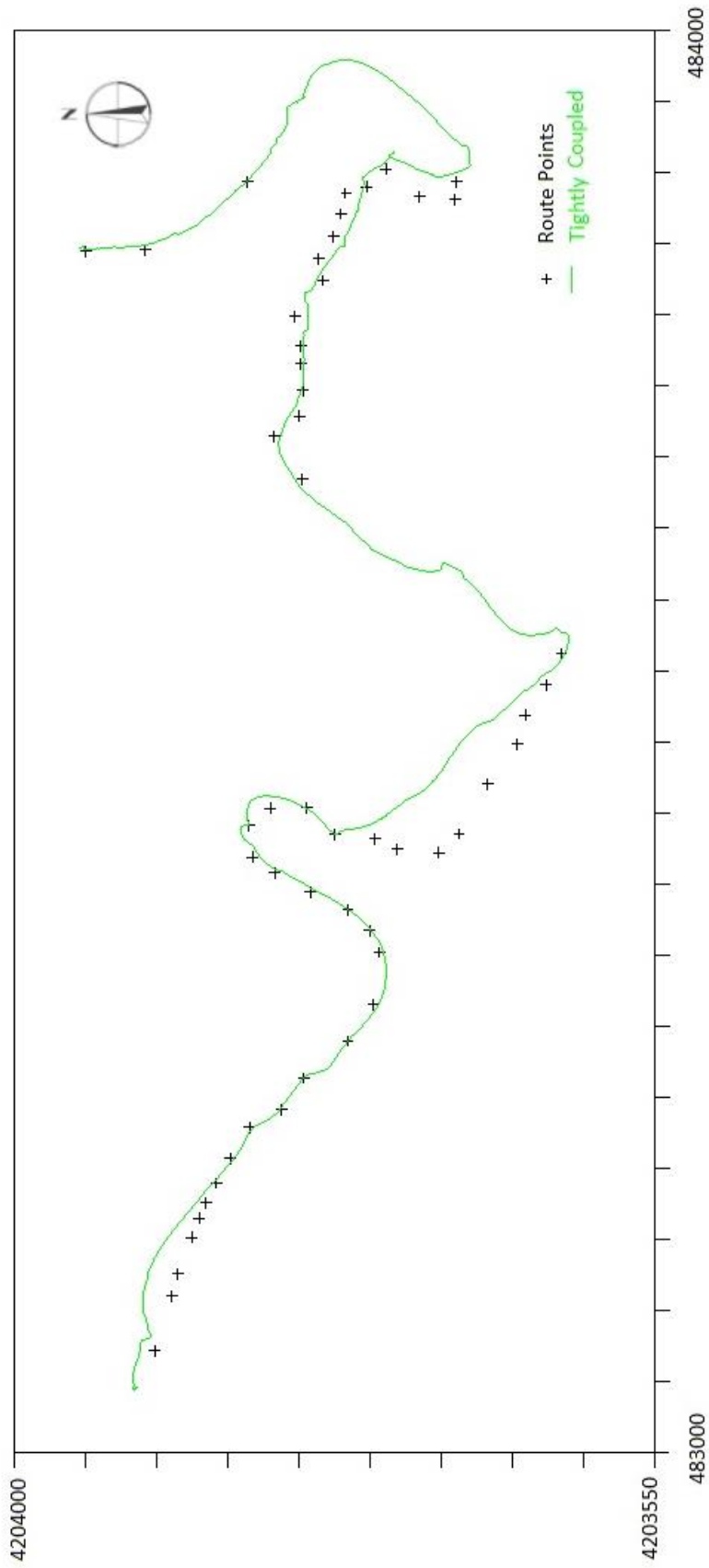
### Tzina\_Tightly Coupled 230714 [ Smoothed TC Combined] - Carrier Residual RMS Plot



Σχήμα 6.5 : RMS των υπολοίπων φάσης σφικτής σύζευξης

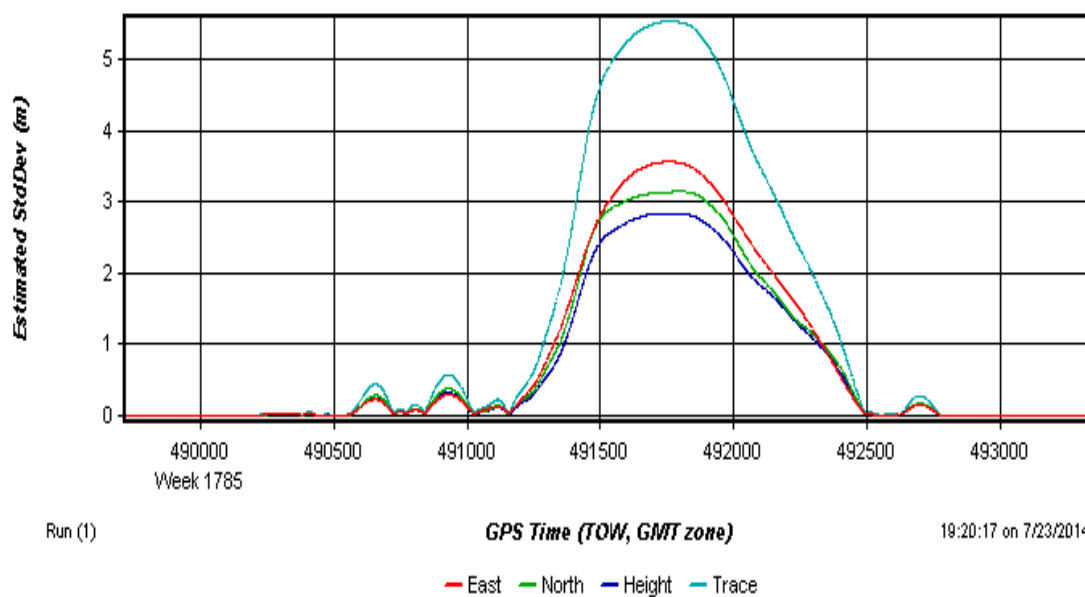
Από τα παραπάνω διαγράμματα της μέσης τετραγωνικής ρίζας (*root mean square – RMS*) των σφαλμάτων θέσης, παρατηρούνται μεγάλες διακυμάνσεις στον C/A κώδικα που φτάνουν μέχρι και 9 m ενώ στην περίπτωση της φάσης μέχρι 0.05 m. Στο Σχήμα 6.6 απεικονίζονται τα σημεία K1-K18 και B1-B34 και η μέθοδος της σφικτής σύζευξης. Παρατηρούνται αποκλίσεις ιδιαίτερα στη περιοχή του τοίχου αντιστήριξης και στο τμήμα της δασώδους περιοχής. Αυτό εξηγείται λόγω της χαμηλής ορατότητας δορυφόρων και του χαμηλού DOP.

Η δεύτερη περίπτωση είναι αυτή της χαλαρής σύζευξης. Στα αντίστοιχα διαγράμματα και με την περίπτωση της σφικτής σύζευξης παρουσιάζονται περίπου οι ίδιες καμπύλες με διαφορετικές τιμές. Στην περίπτωση της τυπικής απόκλισης, οι τιμές φτάνουν στην μέγιστη τιμή 5.5 m. Επίσης και σε αυτή την περίπτωση οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται κατά το χρονικό διάστημα από 491000 s έως 492500 s.



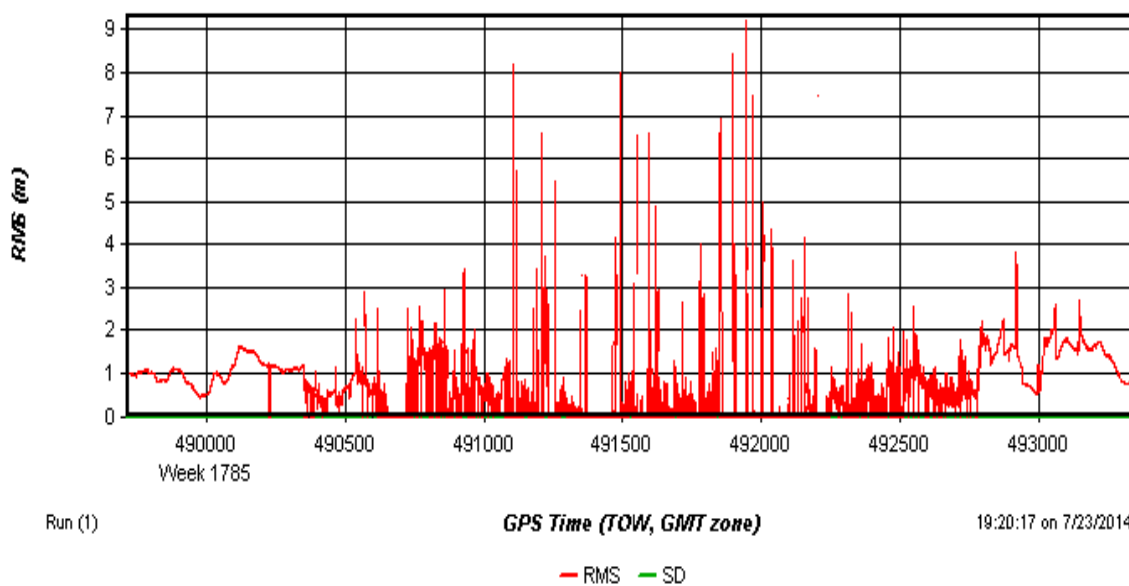
Σχήμα 6.6 : Σχέδιο σημείων πορείας και σφιχτής σύζευξης

### Loosely Coupled 230714 [ Smoothed Combined] - Estimated Position Accuracy Plot



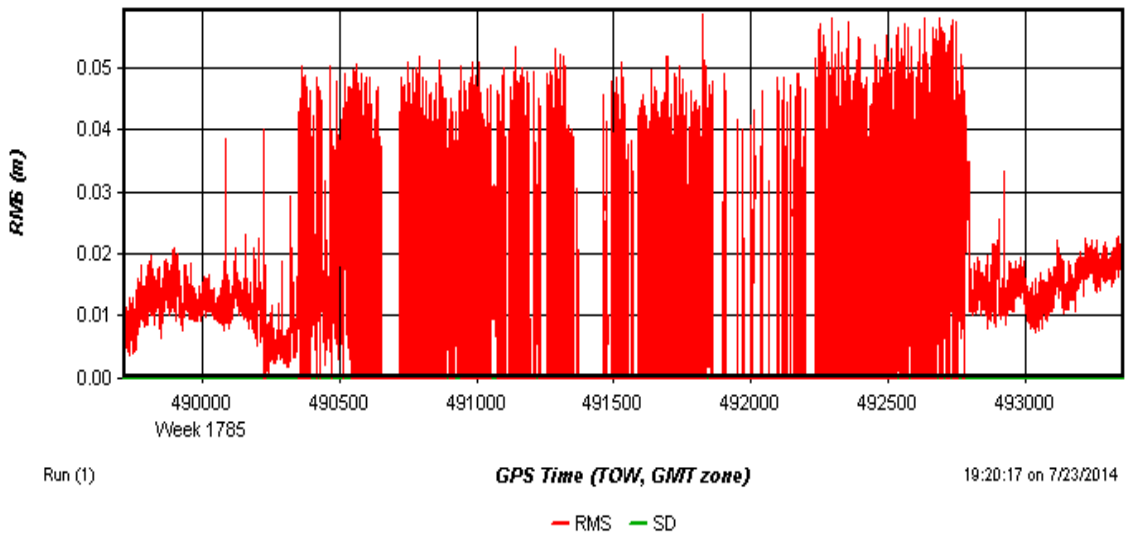
Σχήμα 6.7 : Διάγραμμα τυπικής απόκλισης χαλαρής σύζευξης

### Loosely Coupled 230714 [ Smoothed Combined] - C/A Code Residual RMS Plot



Σχήμα 6.8 : Διάγραμμα μέσης τετραγωνικής ρίζας των υπολοίπων κώδικα χαλαρής σύζευξης

Loosely Coupled 230714 [ Smoothed Combined] - Carrier Residual RMS Plot



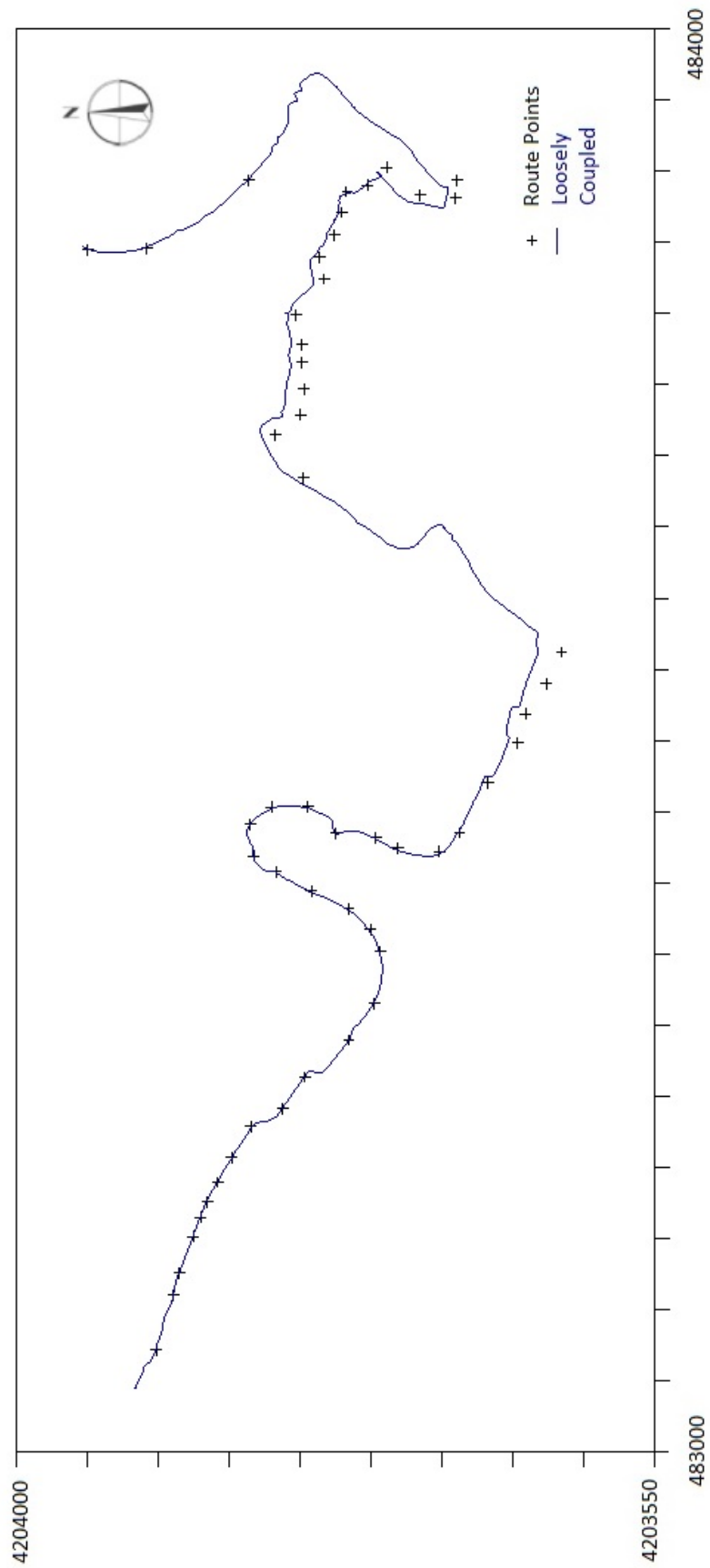
Σχήμα 6.9 : Διάγραμμα μέσης τετραγωνικής ρίζας των υπολοίπων φάσης χαλαρής σύζευξης

Στα αντίστοιχα διαγράμματα της μέσης τετραγωνικής ρίζας των υπολοίπων κώδικα και φάσης, παρατηρούνται επίσης διακυμάνσεις. Οι τιμές στον κώδικα φτάνουν μέχρι 9 m ενώ αντίστοιχα για την φάση είναι επίσης στο 0.05 m. Τα δύο αυτά διαγράμματα μοιάζουν πολύ με την σφιχτή σύζευξη με ελάχιστες λεπτομέρειες.

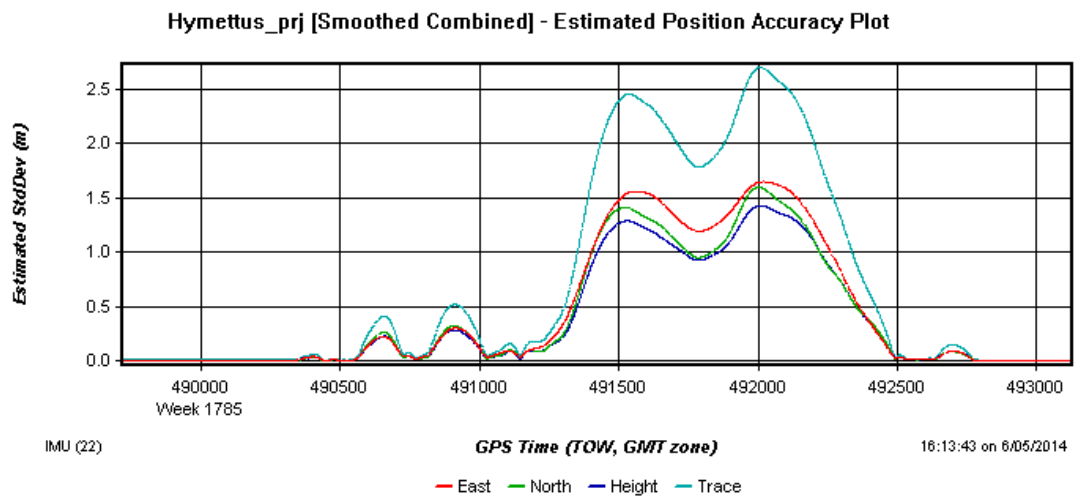
Στο Σχήμα 6.10 απεικονίζονται όπως και στην προηγούμενη περίπτωση τα σημεία ελέγχου όπως μετρήθηκαν από γεωδαιτικές μεθόδους και η μέθοδος της χαλαρής σύζευξης για σύγκριση. Παρατηρούνται κάποιες αποκλίσεις στο τμήμα της δασώδους περιοχής, αλλά καλύτερη εφαρμογή στο τμήμα του τοίχου αντιστήριξης και στις υπόλοιπες περιοχές των τεχνικών έργων σε σύγκριση με την προηγούμενη περίπτωση.

Η τρίτη περίπτωση είναι αυτή της υποβοηθούμενης χαλαρής σύζευξης από ένα αρχείο συντεταγμένων. Τα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 6.11 και 6.12) είναι αρκετά διαφορετικά από τις προηγούμενες μεθόδους σύζευξης. Αυτό οφείλεται στην διαφορετική διαδικασία εφαρμογής των δύο τρόπων σύζευξης και χρήσης των φίλτρων Kalman (Ενότητα 2.3.1).

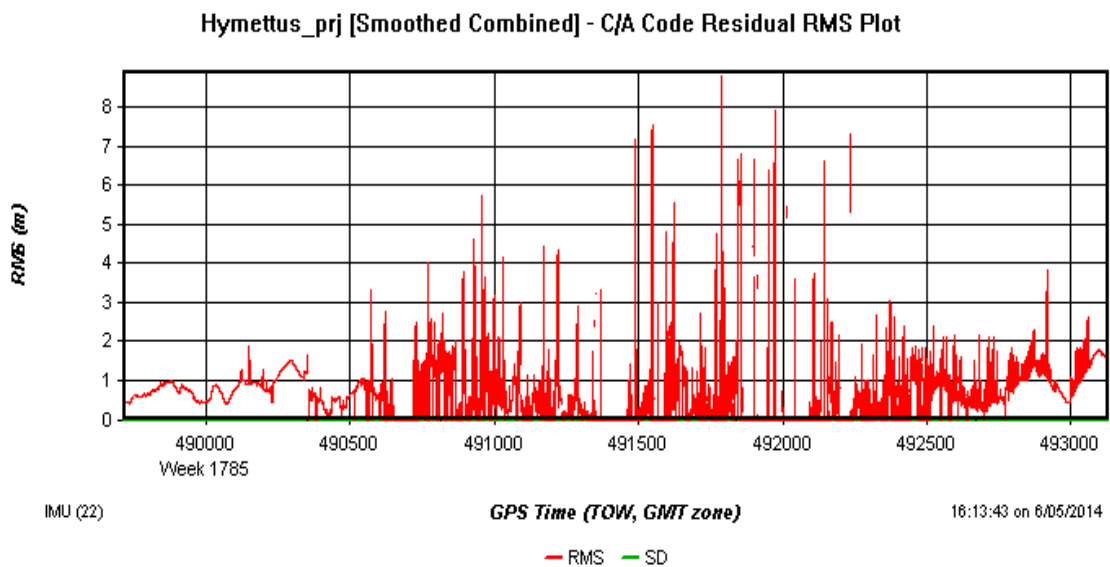
Στο διάγραμμα της τυπικής απόκλισης (Σχήμα 6.11) παρατηρούνται δύο μέγιστα για το τμήμα της δασώδους περιοχής, ενώ οι τιμές είναι πολύ χαμηλότερες. Η μέγιστη τιμή φτάνει στα 2.5 m, σχεδόν το μισό από τις αντίστοιχες χρονικές στιγμές στις άλλες περιπτώσεις.



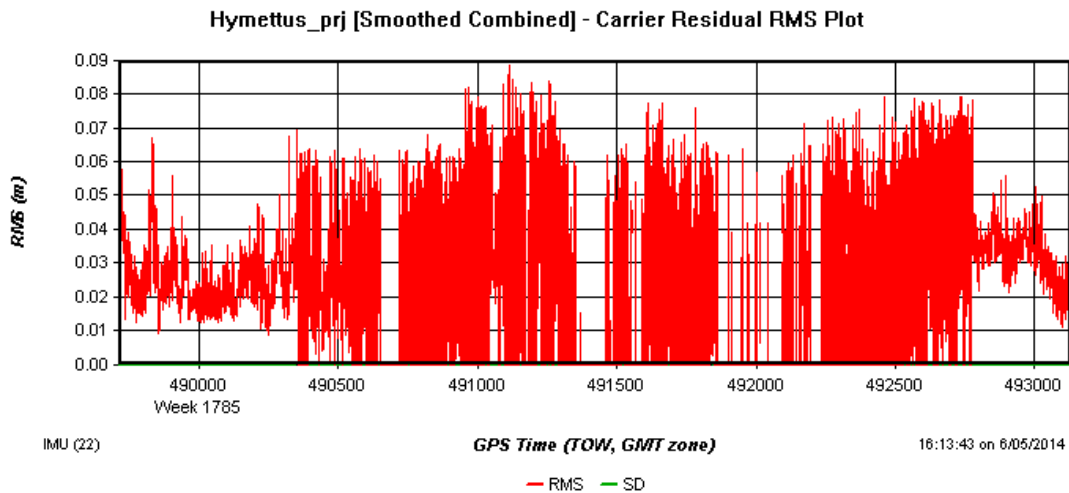
Σχήμα 6.10 : Σχέδιο σημείων ελέγχου και χαλαρής σύζευξης



Σχήμα 6.11 : Διάγραμμα τυπικής απόκλισης υποβοηθούμενης χαλαρής σύζευξης



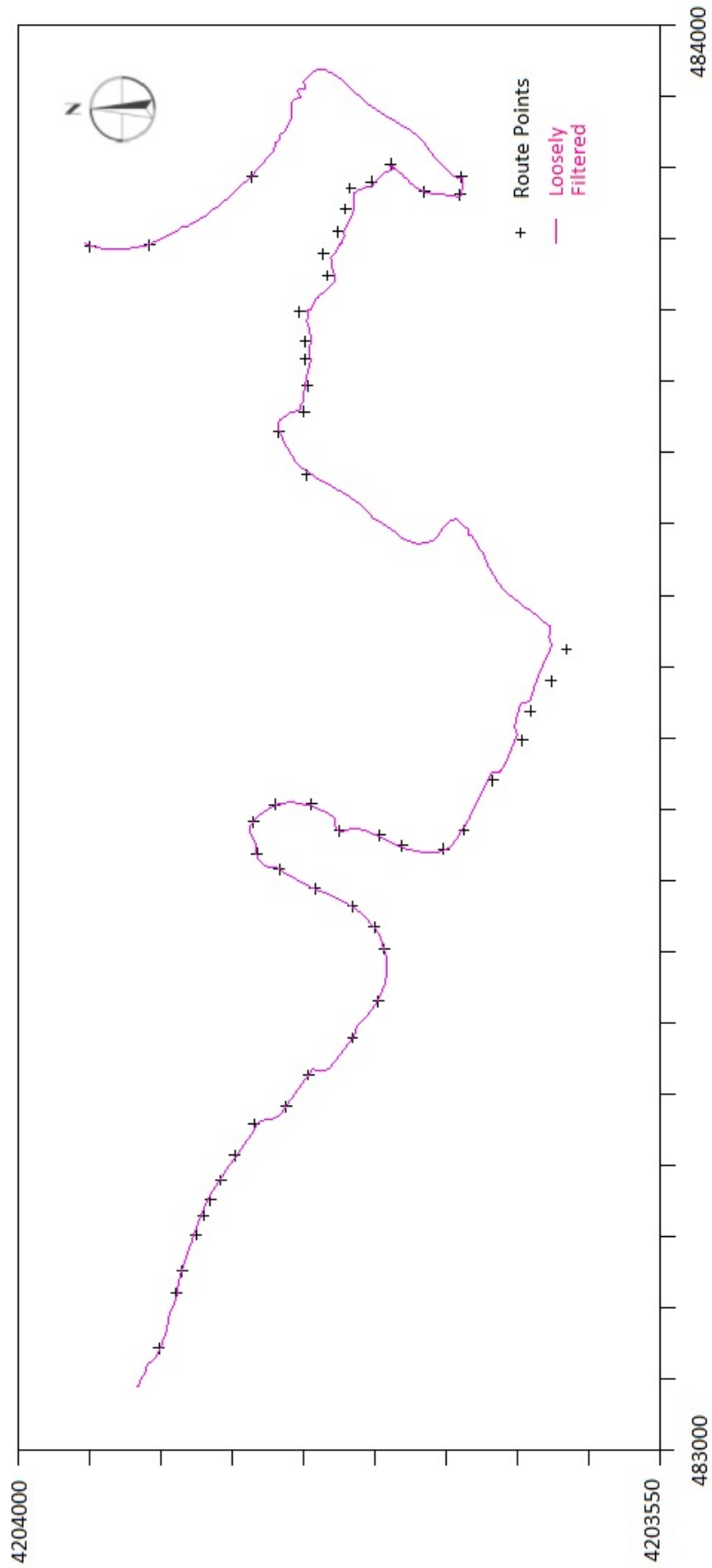
Σχήμα 6.12 : Διάγραμμα μέσης τετραγωνικής ρίζας των υπολοίπων φάσης υποβοηθούμενης χαλαρής σύζευξης



Σχήμα 6.13 : Διάγραμμα μέσης τετραγωνικής ρίζας των υπολοίπων φάσης υποβοηθούμενης χαλαρής σύζευξης

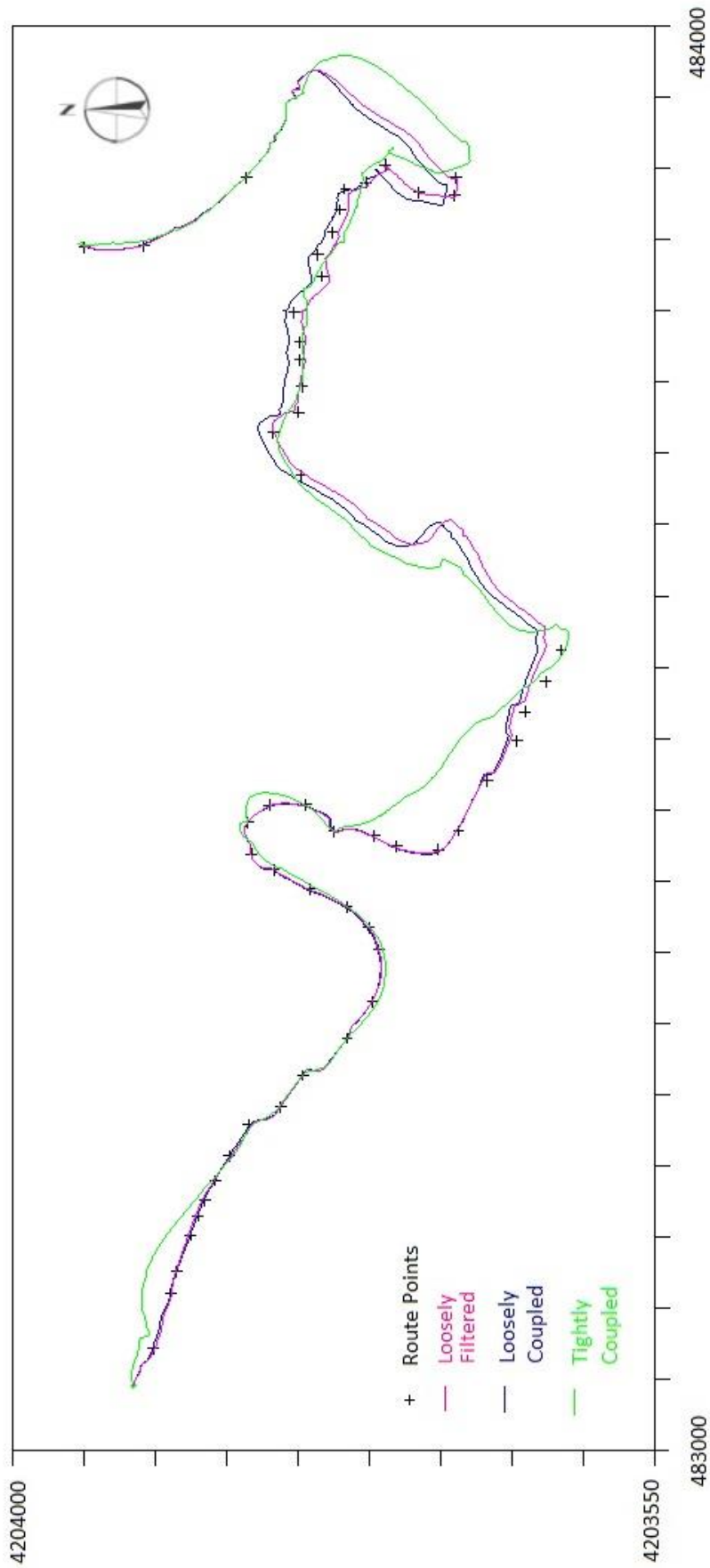
Τα διαγράμματα της τετραγωνικής ρίζας των υπολοίπων κώδικα και φάσης είναι παρόμοια με των άλλων περιπτώσεων, με διακυμάνσεις. Στην περίπτωση του κώδικα οι τιμές φτάνουν μέχρι και 8 m και στην περίπτωση της φάσης μέχρι και 0.8 m.

Στο Σχήμα 6.14 παρατηρείται ότι η περίπτωση αυτή εφαρμόζει καλύτερα και στις περιοχές των τεχνικών έργων αλλά και στο δασώδες μονοπάτι. Στο Σχήμα 6.15 απεικονίζονται όλες οι περιπτώσεις για την καλύτερη σύγκριση μεταξύ τους. Είναι φανερό ότι η περίπτωση της υποβοηθούμενης χαλαρής σύζευξης εφαρμόζει καλύτερα στα ταχυμετρικά σημεία και στα σημεία της κλειστής όδευσης. Όπως εξηγήθηκε και στην ενότητα 5.3, χρησιμοποιήθηκε ένα αρχείο που περιελάμβανε τις ακριβείς συντεταγμένες από τις κορυφές της όδευσης. Αυτή η πληροφορία χρησιμοποιήθηκε και συνδυάστηκε με τις παρατηρήσεις από το πρόγραμμα.



Σχήμα 6.14 : Σχέδιο σημείων ελέγχου και υποβοηθούμενης χαλαρής σύζευξης

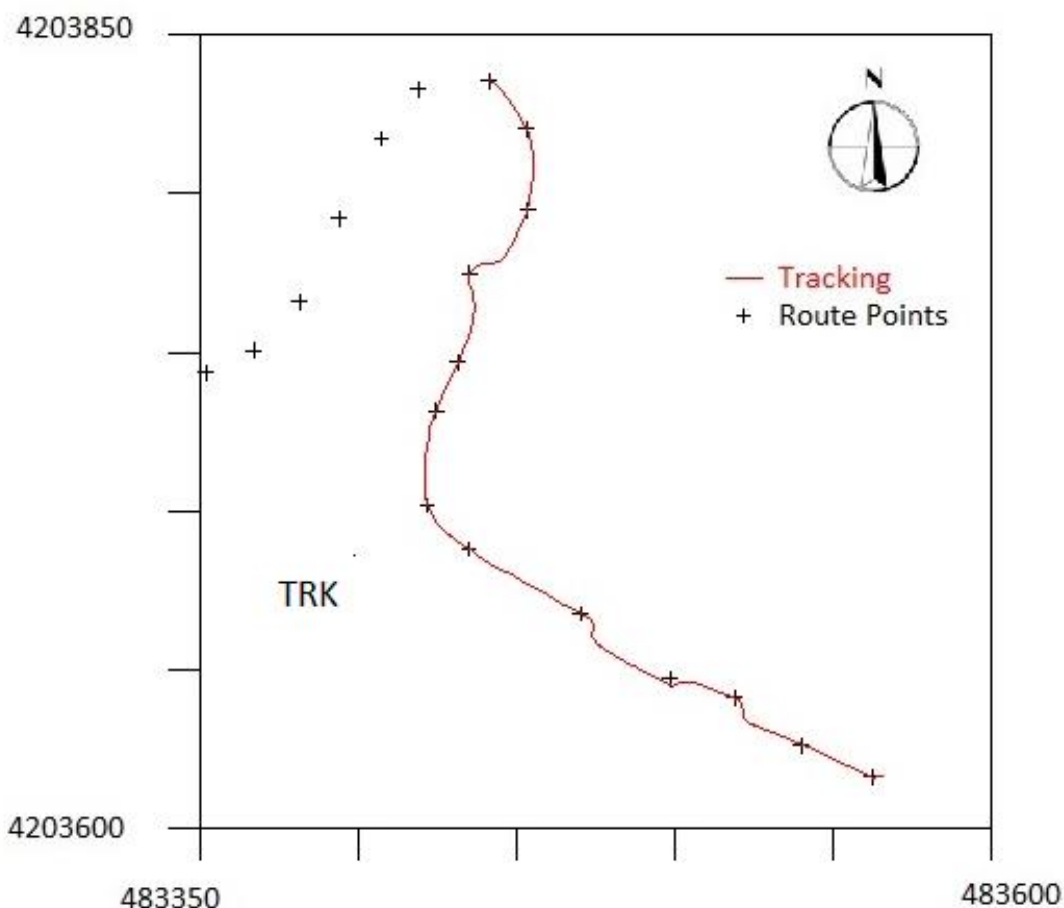




Σχήμα 6.15 : Σχέδιο σημείων ελέγχου όλων των περιπτώσεων σύζευξης

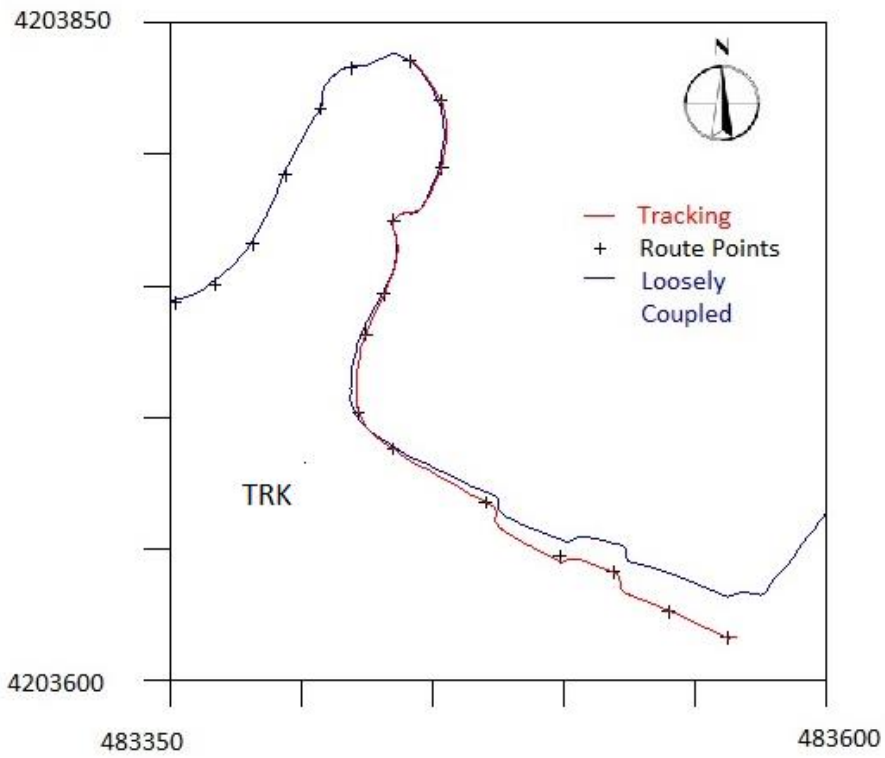
## 6.4 Σύγκριση Λύσης Πλοήγησης GPS – Επίλυσης GPS/INS – Tracking Tacheometer

Για καλύτερη σύγκριση των σημείων ελέγχου με την επίλυση GPS/INS και την επίλυση του γεωδαιτικού σταθμού με παρακολούθηση (tracking), δημιουργήθηκαν επίσης κάποια σχέδια στο AutoCAD. Τα παρακάτω σχήματα δείχνουν την κάθε πορεία σε σύγκριση με τα σημεία ελέγχου.

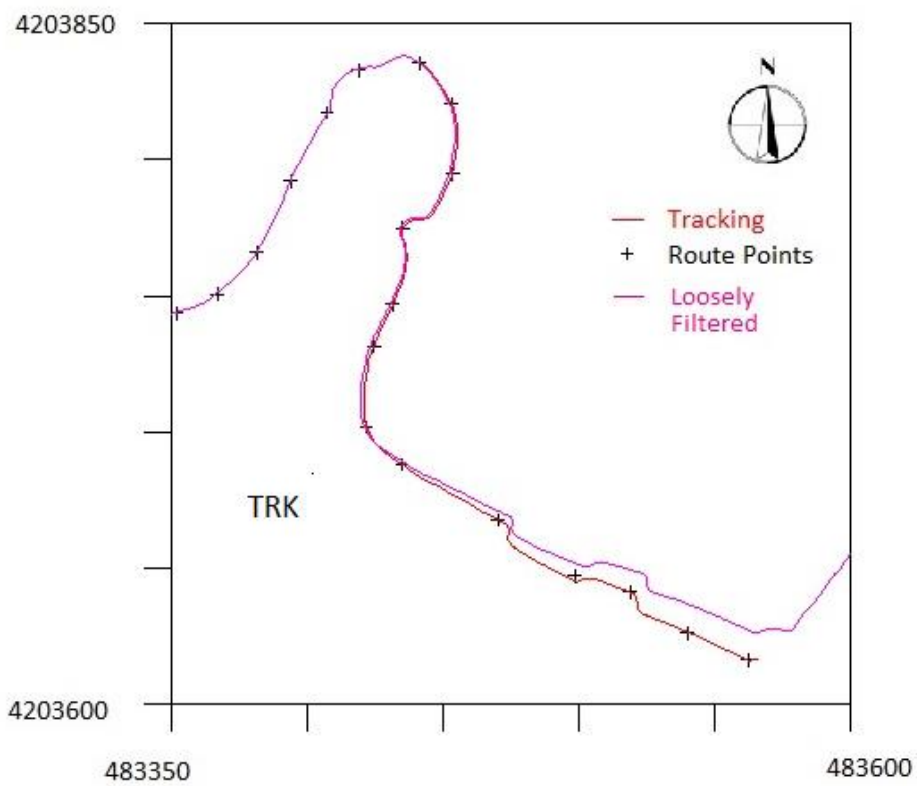


Σχήμα 6.16 : Σχέδιο σημείων ελέγχου και σημείων παρακολούθησης

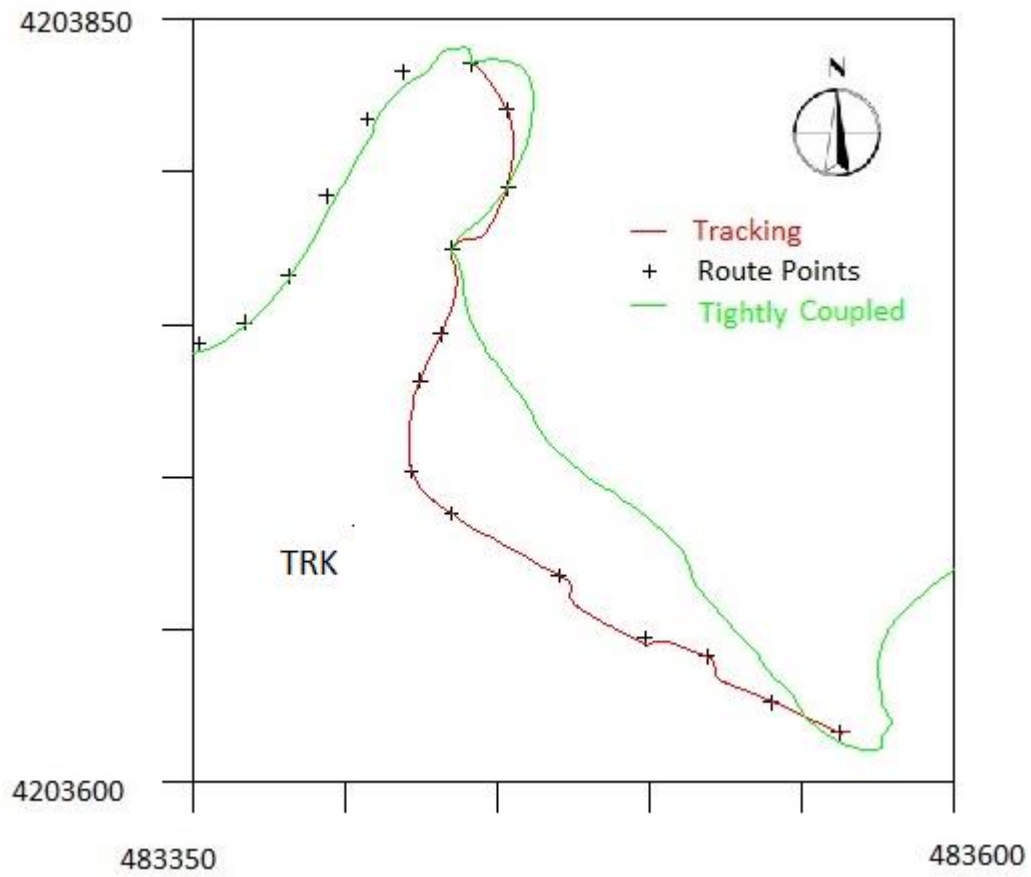
Παρατηρείται ότι η τροχιά από τον ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό ταιριάζει αρκετά καλά με τα αντίστοιχα σημεία ελέγχου. Τα Σχήματα 6.17 έως 6.19 δημιουργήθηκαν για μια καλύτερη σύγκριση των σημείων παρακολούθησης με τις τρεις περιπτώσεις σύζευξης GNSS/INS. επίσης, και σε αυτή την περίπτωση καλύτερη εφαρμογή στα σημεία ελέγχου είναι η περίπτωση της υποβοηθούμενης χαλαρής σύζευξης. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρουσιάζονται στην σφιχτή σύζευξη που μπορεί να φτάσουν και τα 50 m περίπου στον άξονα των x.



Σχήμα 6.17 : Σύγκριση σημείων ελέγχου και χαλαρής σύζευξης



Σχήμα 6.18 : Σύγκριση σημείων ελέγχου και υποβοηθούμενης χαλαρής σύζευξης



Σχήμα 6.19 : Σύγκριση σημείων ελέγχου και σφιχτής σύζευξης

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup> - Συμπεράσματα

---

### 7.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα που απορρέουν από το θεωρητικό και το ερευνητικό μέρος της εργασίας.

### 7.2 Συμπεράσματα

Από το θεωρητικό μέρος της εργασίας προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα συστήματα GNSS εξελίσσονται με ταχύτετους ρυθμούς. Μαζί με τις εξελίξεις των συστημάτων αυτών εξελίσσονται και οι μέθοδοι προσδιορισμού θέσης, οι μέθοδοι επαύξησης και οι μέθοδοι ολοκλήρωσής τους με άλλους τύπους αισθητήρων.

Μια από τις σημαντικότερες μεθόδους ολοκλήρωσης είναι αυτή της ολοκλήρωσης των συστημάτων εντοπισμού με αδρανειακούς αισθητήρες, ή αλλιώς η ολοκλήρωση GPS/INS. Αυτού του τύπου η ολοκλήρωση χρησιμοποιεί για την σύζευξη των δύο αυτών αισθητήρων τα επονομαζόμενα φίλτρα Kalman. Υπάρχουν τρεις μέθοδοι σύζευξης (χαλαρή / σφιχτή / βαθιά).

Η χαλαρή σύζευξη αναφέρεται στην χρήση των GNSS πληροφοριών για την ενημέρωση του φίλτρου Kalman της αδρανειακής μονάδας IMU. Στην συνέχεια η μονάδα IMU χρησιμοποιεί τις πληροφορίες αυτές για την ενημέρωση της θέσης του οχήματος. Αντίθετα, η σφιχτή σύζευξη χρησιμοποιεί τις πληροφορίες προερχόμενες και από τους δύο αισθητήρες σε ένα μόνο φίλτρο Kalman.

Από το πρακτικό μέρος της εργασίας, τις εργασίες υπαίθρου και τα αποτελέσματα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Το λογισμικό Inertial Explorer της εταιρίας Novatel παρέχει στον χρήστη αρκετά χρήσιμα εργαλεία για την επεξεργασία των μετρήσεων ολοκλήρωσης GPS/INS καθώς και την δυνατότητα εξαγωγής διαγραμμάτων, αρχείων συντεταγμένων και χαρτών για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Είναι αρκετά φιλικό και εύχρηστο προς τον χρήστη και η επίλυση πραγματοποιείται απλά και σε σύντομο χρονικό διάστημα.
- Η διάταξη καταγραφής – προσωπικός πλοηγός που κατασκευάστηκε επιτρέπει την λήψη πληροφοριών θέσης του πεζού, από πολλούς δέκτες ταυτόχρονα καθιστώντας έτσι δυνατή την σύγκριση των αποδόσεών τους σε μια κοινή πορεία.
- Η επίδοση των αποτελεσμάτων της ολοκλήρωσης GPS/INS εξαρτάται από τον αριθμό των ορατών δορυφόρων, το DOP και την μέθοδο σύζευξης. Στην παρούσα εφαρμογή η μέθοδος της υποβοηθούμενης χαλαρής σύζευξης εμφάνισε καλύτερα στα σημεία ελέγχου που ιδρύθηκαν.

- Από την σύγκριση των μεθόδων σύζευξης και της μεθόδου παρακολούθησης από ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό, βγαίνει το συμπέρασμα ότι στην δεύτερη περίπτωση η τροχιά παρακολούθησης εφαρμόζει καλύτερα στα σημεία ελέγχου. Αυτό συμβαίνει διότι η μέθοδος παρακολούθησης δεν εξαρτάται από την ορατότητα δορυφόρων.
- Στην επίλυση των μετρήσεων με την μέθοδο της χαλαρής υποβοηθούμενης από αρχείο συντεταγμένων σύζευξης και στην συγκεκριμένη τροχιά εφαρμογής η τυπική απόκλιση των θέσεων έφτανε έως 2.5 m.
- Αντίστοιχα, στην επίλυση των μετρήσεων με την μέθοδο της χαλαρής σύζευξης η τυπική απόκλιση των θέσεων έφτανε έως 5.5 m. Και τέλος με την μέθοδο σφιχτής σύζευξης έως 4 m.
- Στην περίπτωση της παρακολούθησης από τον ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό οι ακρίβειες που επιτεύχθηκαν ήταν τις τάξης των μερικών cm. Η μέθοδος υπερτερεί των υπολοίπων σε ακρίβεια αλλά έχει το μειονέκτημα ότι ο γεωδαιτικός σταθμός μπορεί να παρακολουθήσει τον στόχο μόνο όταν αυτός είναι ορατός και κινείται με ταχύτητα που να μπορεί να αντιληφθεί.

### 7.3 Προτάσεις

Η έρευνα πάνω στις επιδόσεις συνδυασμού διαφορετικών τύπων αισθητήρων και διαφορετικών τύπων δεκτών δεν σταματά εδώ. Ο τομέας της δορυφορικής πλοήγησης και εντοπισμού θέσης με χρήση μεθόδων επαύξησης φαίνεται να είναι εξαιρετικά υποσχόμενος και εξελίσσεται ραγδαία με την εισαγωγή νέων εφαρμογών και με την αποδοχή από τους χρήστες.

Για κάποιον που ενδιαφέρεται για την πραγματοποίηση περαιτέρω έρευνας στο αντικείμενο αυτό προτείνονται τα εξής:

- Σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με τους δέκτες Garmin GPSMap 62s και Trimble GeoXT με τους οποίους δεν ήταν δυνατόν οι παρατηρήσεις να χρησιμοποιηθούν στην ίδια περιοχή μελέτης ή σε παρόμοια περιοχή όπου να εναλλάσσονται οι συνθήκες ορατότητας των δορυφόρων.
- Μελέτη και εξέταση και άλλων μεθόδων ολοκλήρωσης και σύγκρισή τους με την μέθοδο ολοκλήρωσης GPS/INS. Δημιουργία αντίστοιχων διαγραμμάτων και σχεδίων για εξαγωγή συμπερασμάτων.
- Σύγκριση των δυνατοτήτων του λογισμικού προγράμματος Inertial Explorer της Novatel με άλλα αντίστοιχα άλλων εταιριών που επεξεργάζονται μετρήσεις συστημάτων ολοκλήρωσης GPS/INS.

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

---

Σχήμα 1.1 : Τα Συστήματα GNSS .....	12
Σχήμα 1.2 : Η Θέση του χρήστη με τομές σφαιρών .....	13
Σχήμα 1.3 : Ο Δορυφορικός Σχηματισμός GPS .....	14
Σχήμα 1.4 : Επίγειο Τμήμα GPS.....	15
Σχήμα 1.5 : Δέκτες GPS .....	16
Σχήμα 1.6 : Μετρήσεις Φάσης.....	17
Σχήμα 1.7 : Διαφορά Φάσης.....	18
Σχήμα 1.8 : Μετρήσεις Ψευδοαπόστασης .....	20
Σχήμα 1.9 : Απόλυτος Προσδιορισμός Θέσης.....	22
Σχήμα 1.10 : Σχετικός Προσδιορισμός Θέσης.....	23
Σχήμα 1.11 : Στατικός και Κινηματικός Εντοπισμός .....	23
Σχήμα 1.12 : Μέθοδοι Επεξεργασίας .....	24
Σχήμα 1.13 : Αποκλίσεις από την Πραγματική Πορεία .....	26
Σχήμα 1.14 : Το Ατμοσφαιρικό Σφάλμα .....	27
Σχήμα 1.15 : Σφάλμα Πολυανάκλασης .....	29
Σχήμα 1.16: Οι έννοιες της ορθότητας και της ακρίβειας .....	30
Σχήμα 1.17 : Χαρακτηριστικά Απόδοσης Συστημάτων GNSS.....	31
Σχήμα 1.18 : Οι πιθανές Θέσεις του Δέκτη .....	32
Σχήμα 1.19 : (α) Καλή, (β) Κακή σχετική θέση δύο δορυφόρων.....	33
Σχήμα 1.20 : (αριστερά) Καλή, (δεξιά) Κακή Γεωμετρία Δορυφόρων.....	33
Σχήμα 1.21 : Η Μοναδιαία Σφαίρα & Τέσσερα Διανύσματα.....	35
Σχήμα 1.22 : Μέτρα ακριβείας δορυφορικού εντοπισμού.....	37
Σχήμα 1.23 : Διαφορετικοί τύποι δεκτών GNSS: (α) Θαλάσσιος (β) Γεωδαιτικός (γ) Οχήματος (δ) Λογισμικού.....	39
Σχήμα 1.24 : Γενική αρχιτεκτονική των δεκτών .....	40
Σχήμα 1.25 : Η αρχιτεκτονική των δεκτών και των δεκτών λογισμικού. ....	42
Σχήμα 1.26 : Δέκτες χειρός.....	42
Σχήμα 2.1 : Η αρχή του διαφορικού εντοπισμού.....	44
Σχήμα 2.2 : Απλές διαφορές ως προς δέκτες και δορυφόρους.....	45
Σχήμα 2.3 : Διάγραμμα ακρίβειας και περιβάλλοντος για διαφορετικούς αισθητήρες .....	47
Σχήμα 2.4 : Ο συνδυασμός διαφορετικών αισθητήρων με σκοπό την εξαγωγή μίας κοινής εκτίμησης .....	48
Σχήμα 2.5 : Τα συστήματα αναφοράς.....	49
Σχήμα 2.6 : Αδρανειακή μονάδα (α) μπροστινή (β) πίσω όψη.....	50
Σχήμα 2.7 : Η αρχή της χαλαρής σύζευξης .....	51
Σχήμα 2.8 : Η αρχή της σφιχτής σύζευξης .....	52
Σχήμα 2.9 : Ολοκλήρωση GPS/INS .....	52
Σχήμα 2.10: Παράδειγμα πρόβλεψης, φιλτραρίσματος και εξομάλυνσης .....	55
Σχήμα 2.11 : Η διαδικασία του φίλτρου Kalman .....	56
Σχήμα 2.12 : Η διαδικασία του φίλτρου Kalman με γραφικό παράδειγμα.....	57

Σχήμα 2.13 : Η διαδικασία του φίλτρου Kalman απεικονιζόμενη σαν βρόγχο.....	57
Σχήμα 3.1 : Χάρτης περιοχής μελέτης.....	58
Σχήμα 3.2 : Αεροφωτογραφία περιοχής μελέτης.....	59
Σχήμα 3.3 : Θέσεις της διαδρομής με αντίστοιχες ορατότητες .....	60
Σχήμα 3.4 : Χαρακτηρισμοί ορατότητας δορυφόρων κατά μήκος της τροχιάς κίνησης .....	61
Σχήμα 3.5 : Η αλληλουχία κορυφών όδευσης .....	62
Σχήμα 3.6 : Σημεία ελέγχου K1 έως K18 (κορυφές όδευσης) .....	62
Σχήμα 3.7 : Σημεία ελέγχου B1 έως B034.....	63
Σχήμα 4.1 : Garmin GPSMap 62s.....	64
Σχήμα 4.2 : Trimble GeoExplorer XT .....	65
Σχήμα 4.3 : Novatel Propak-V3.....	66
Σχήμα 4.4 : iMAR-FSAS-IMU .....	67
Σχήμα 4.5 : Leica TCA1800 .....	68
Σχήμα 4.6 : Αρχικό Παράθυρο Ρυθμίσεων.....	69
Σχήμα 4.7 : Απεικόνιση μετρήσεων κατά τη διάρκεια της παρακολούθησης.....	69
Σχήμα 4.8 : Διάταξη Καταγραφής: (α) Δέκτες, (β) Personal Navigator.....	70
Σχήμα 5.1 : Εργασίες Υπαίθρου - Μέτρηση Όδευσης .....	72
Σχήμα 5.2 : Μετρήσεις με το σύστημα καταγραφής και γεωδαιτικό σταθμό .....	72
Σχήμα 5.3 : Γραφικό Περιβάλλον του Novatel Inertial Explorer.....	73
Σχήμα 5.4 : Η πορεία στο Novatel Inertial Explorer (ευρύτερη περιοχή).....	74
Σχήμα 5.5: Η πορεία στο Novatel Inertial Explorer (μεγέθυνση στην περιοχή μελέτης) .....	75
Σχήμα 5.6 : Στροφή δύο συστημάτων συντεταγμένων με ίδια αρχή.....	76
Σχήμα 5.7 : Μετάθεση της αρχής συντεταγμένων.....	76
Πίνακας 5.1 : Συντεταγμένες σημείων TRK και B024 στο ΕΓΣΑ '87.....	76
Σχήμα 6.1 : Διάγραμμα πλήθους ορατών δορυφόρων.....	77
Σχήμα 6.2 : Διάγραμμα DOP πορείας κίνησης.....	78
Σχήμα 6.3 : Διάγραμμα τυπικής απόκλισης σφικτής σύζευξης .....	79
Σχήμα 6.4 : RMS των υπολοίπων κώδικα σφικτής σύζευξης.....	79
Σχήμα 6.5 : RMS των υπολοίπων φάσης σφικτής σύζευξης .....	80
Σχήμα 6.6 : Σχέδιο σημείων πορείας και σφικτής σύζευξης .....	81
Σχήμα 6.7 : Διάγραμμα τυπικής απόκλισης χαλαρής σύζευξης .....	82
Σχήμα 6.8 : Διάγραμμα μέσης τετραγωνικής ρίζας των υπολοίπων κώδικα χαλαρής σύζευξης.....	82
Σχήμα 6.9 : Διάγραμμα μέσης τετραγωνικής ρίζας των υπολοίπων φάσης χαλαρής σύζευξης.....	83
Σχήμα 6.10 : Σχέδιο σημείων ελέγχου και χαλαρής σύζευξης .....	84
Σχήμα 6.11 : Διάγραμμα τυπικής απόκλισης υποβοηθούμενης χαλαρής σύζευξης....	85
Σχήμα 6.12 : Διάγραμμα μέσης τετραγωνικής ρίζας των υπολοίπων φάσης υποβοηθούμενης χαλαρής σύζευξης.....	85
Σχήμα 6.13 : Διάγραμμα μέσης τετραγωνικής ρίζας των υπολοίπων φάσης υποβοηθούμενης χαλαρής σύζευξης.....	86
Σχήμα 6.14 : Σχέδιο σημείων ελέγχου και υποβοηθούμενης χαλαρής σύζευξης.....	87



Σχήμα 6.15 : Σχέδιο σημείων ελέγχου όλων των περιπτώσεων σύζευξης .....	88
Σχήμα 6.16 : Σχέδιο σημείων ελέγχου και σημείων παρακολούθησης .....	89
Σχήμα 6.17 : Σύγκριση σημείων ελέγχου και χαλαρής σύζευξης .....	90
Σχήμα 6.18 : Σύγκριση σημείων ελέγχου και υποβοηθούμενης χαλαρής σύζευξης ...	90
Σχήμα 6.19 : Σύγκριση σημείων ελέγχου και σφιχτής σύζευξης .....	91

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

---

ABAS	Aircraft-based Augmentation System
Acc	Accuracy
ARNS	Aeronautical Radio Navigation Service
AS	Anti-Spoofing
C/A	Clear Access code ή Coarse Acquisition Code
CDMA	Code Division Multiple Access
C/Nav	Commercial Navigation
CS	Commercial Services
DOP	Dilution of Precision
EC	European Commission
ENT	EGNOS Network Time
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay System
ESA	European Space Agency
ETRF	EGNOS Terrestrial Frame
EU	European Union
GBAS	Ground Based Augmentation System
GCCs	Galileo Control Centers
GDOP	Geometric Dilution of Precision
GEO	Geostationary Orbit
GIOVE	Galileo In-Orbit Validation Element
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GRAS	Ground Based Regional Augmentation System
GSSs	Galileo Sensor Stations
GSSF	Galileo System Simulation Facility
GTS	Galileo System Time
GTRF	Galileo Terrestrial Reference Frame
GUS	Galileo Up-link Station
HAL	Horizontal Alert Limit
HNSP	Horizontal Navigation System Precision
IERS	International Earth Rotation Service
I/Nav	Integrity Navigation
Int	Integrity
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
ITRS	International Terrestrial Reference System
IRNSS	Indian Regional Navigational Satellite System
LAAS	Local Area Augmentation System
LEO	Low Earth Orbit
MBOC	Multiplexed Binary Offset Carrier
MCC	Mission Control Centers

MCS	Master Control Station
MEO	Medium Earth Orbit
MS	Monitor Stations
MSAS	Multi-Functional Satellite Augmentation System
NLES	Navigation Land Earth Stations
NMEA	National Maritime Electronics Association
NSP	Navigation System Precision
OD&TS	Orbit Time and Time Synchronization
OS	Open Services
QZSS	Quasi-Zenith
PHMI	Probability of Hazardous Misleading Information
PRS	Public Regulated Service
RAIM	Receiver Autonomous Integrity Monitoring
RDOP	Relative Dilution of Precision
RIMS	Ranging and Integrity Monitoring Stations
SA	Selective Availability
SAR	Search and Rescue
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SNAS	Satellite Navigation Augmentation System
SoL	Safety of Life
TAI	International Atomic Time
UERE	User Equivalent Range Error
UGA	Upload Ground Antennas
ULS	Up-Link Stations
UTC	Universal Time Coordinated
UT	Universal Time
WAAS	Wide Area Augmentation System
WGS84	World Geodetic System

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

[en.wikipedia.org/wiki/GNSS](http://en.wikipedia.org/wiki/GNSS).

[html.rincondelvago.com/amss-applications.html](http://html.rincondelvago.com/amss-applications.html).

[www.ausairpower.net/TE-GPS-Guided-Weps.html](http://www.ausairpower.net/TE-GPS-Guided-Weps.html).

[//140.137.13.100/derceng/Application.htm](http://140.137.13.100/derceng/Application.htm).

[www.kowoma.de/en/gps/control\\_segment.htm](http://www.kowoma.de/en/gps/control_segment.htm).

[http://en.wikipedia.org/wiki/Global\\_Positioning\\_System](http://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System).

*A Beginner's Guide to GNSS in Europe*. (n.d.). Ανάκτηση από [www.ifatca.org/docs/gnss.pdf](http://www.ifatca.org/docs/gnss.pdf).

*Basic GPS*. (n.d.). Ανάκτηση από [http://nptel.ac.in:8001/courses/Webcourse-contents/IIT-KANPUR/ModernSurveyingTech/recap/B\\_11\\_Recap.htm](http://nptel.ac.in:8001/courses/Webcourse-contents/IIT-KANPUR/ModernSurveyingTech/recap/B_11_Recap.htm)

*DGPS*. (n.d.). Ανάκτηση από [what-isthe.blogspot.gr/2010/04/what-is-accuracy-of-dgps.html](http://what-isthe.blogspot.gr/2010/04/what-is-accuracy-of-dgps.html).

El-Rabbany. (2002). *Introduction to GPS*. Boston.

Gikas, V. (1996). *Least Squares Filtering and Testing for Positioning and Quality Control during 3D Marine Seismic Surveys*. University of Newcastle.

Gkikas, V. (2008, June). Monitoring Highly Dynamic Structures - Smart RTS. 22, σσ. 44-45.

*GNSS/INS Coupling University FAF Munich*. (n.d.). Ανάκτηση από <http://ifen.bauw.unibw-muenchen.de/research/coupling.htm>

*GPS POSITIONING GUIDE*. (1995). Ottawa, Canada: Natural Resources Canada.

Grewal, M., Weill, L., & Andrews, A. (2007). *Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration*.

Hugentobler, U. (2013). *Introduction to Satellite Navigation-Lecture Notes*. Munich, Germany: TUM-MSc ESPACE.

*Navipedia*. (n.d.). Ανάκτηση από <http://www.navipedia.net>.

Newton, S. (1729). *The Mathematical Principle of Natural Philosophy*.

Robertson, P. (2014). *Indoor Navigation*. Oberpfaffenhofen: Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR).

- Solimeno, A. (2007). *Low-Cost INS/GPS Data Fusion with Extended Kalman Filter for Airbone Applications*. Lisbon: Instituto Superior Tecnico.
- Thompson, B. (2006). *Global Positioning System Handbook*.
- Vonk, D. (n.d.). *Performance Evaluation of Integrated INS/GPS Systems-Daniel Vonk*. Ανάκτηση 2014, από <http://www.gmat.unsw.edu.au/currentstudents/ug/projects/Vonk/index.htm>
- Wang, J., Garratt, M., & Lambert, A. (2008). Integration of GPS/INS/Vision sensors to navigate unmanned aerial vehicles.
- what-isthe.blogspot.gr/2010/04/what-is-accuracy-of-dgps.html*. (n.d.).
- Αγατζά - Μπαλοδήμου, Α. (2005). *Θεωρία Σφαλμάτων & Συνορθώσεις I*. Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ.
- Εισαγωγή στη Γεωδαισία*. (2007). Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ.
- Κατσιγιάννη, Γ. (2011). *Ανάλυση Επιδόσεων των Επερχόμενων Συστημάτων GNSS για Κινηματικές Εφαρμογές Εντοπισμού στον Ελλαδικό Χώρο*. Αθήνα.
- Παραδείσης, Δ. (2000). *Σημειώσεις Δορυφορικής Γεωδαισίας*. Αθήνα.
- Φωτίου, Α., & Πικριδάς, Χ. (2006). *GPS και Γεωδαιτικές Εφαρμογές*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΖΗΤΗ.