

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ ΣΧΟΛΗΣ  
ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Πτυχιακή εργασία**

ΣΥΝΟΡΘΩΣΗ ΤΟΠΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΒΑΣΙΛΙΚΟΥ  
ΛΑΡΝΑΚΑΣ

ΓΙΑΝΝΗΣ ΚΑΝΑΡΗΣ



ΛΕΜΕΣΟΣ ΜΑΙΟΣ 2020



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ ΣΧΟΛΗΣ  
ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Πτυχιακή εργασία

Συνόρθωση τοπικού δικτύου στην περιοχή Βασιλικού Λάρνακας

Γιάννης Κανάρης

Επιβλέπων καθηγητής  
Δρ. Χριστόδουλος Δανέζης

Λεμεσός Μάιος 2020

## **Πνευματικά δικαιώματα**

Copyright © Κανάρης Γιάννης, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους ανθρώπους συνέβαλαν ώστε να καταφέρω να διεκπεραιώσω τη πτυχιακή μου εργασία.

Πρώτα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Χριστόδουλο Δανέζη Επίκουρο Καθηγητή στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής ο οποίος μου έδειξε εμπιστοσύνη με το συγκεκριμένο θέμα και για την στήριξη του κατά τη διάρκεια της ολοκλήρωσης των σπουδών και της πτυχιακής μου εργασίας.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Δημήτρη Κακουλλή για την τεράστια βοήθεια που μου έδωσε καθώς και όλους τους καθηγητές της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής του ΤΕ.ΠΑ.Κ, για όλες τις γνώσεις που μου έχουν προσφέρει κατά τη διάρκεια της φοίτησης μου στο ΤΕ.ΠΑ.Κ.

Τέλος θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην οικογένεια μου και τους φίλους μου για την αγάπη και την στήριξη που μου πρόσφεραν όλο αυτό το διάστημα.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η ίδρυση, μέτρηση και συνόρθωση ενός 3Δ γεωδαιτικού δικτύου ελέγχου στην περιοχή του Βασιλικού κοντά στο Μαρί επαρχία Λάρνακας . Το τοπικό δίκτυο υλοποιήθηκε στο πλαίσιο ερευνητικής μελέτης που έλαβε χώρα στις εγκαταστάσεις των ΕΛΠΕ στη βιομηχανική περιοχή της Λάρνακας.

Στα πρώτα δυο κεφάλαια της πτυχιακής μελέτης πραγματοποιείται επισκόπηση των τεσσάρων συστημάτων GNSS με έμφαση στο αμερικανικό GPS.

Στα επόμενα δυο κεφάλαια μαθαίνουμε βασικά χαρακτηριστικά για τις κεραίες των δεκτών που χρησιμοποιούνται για επίγειες μετρήσεις και για τα διαφορά σφάλματα που προκύπτουν κατά την διάρκεια του εντοπισμού.

Εν' συνέχεια τα επόμενα δυο κεφάλαια επεξηγούν τις διάφορες τεχνικές μετρήσεων GPS που υπάρχουν όπως στατικός εντοπισμός, κινηματικός, επίσης ξεκινάμε να μαθαίνουμε περί διαφορικού GPS όπως απλές, δίπλες και τριπλές διάφορες, σταθμούς CORS και CYPOS.

Τα τελευταία κεφάλαια εστιάζονται στην επεξήγηση συνόρθωσης των τοπικών δικτύων, την μεθοδολογία και αποτελέσματα του τοπικού δικτύου που υλοποιήθηκε για σκοπούς της πτυχιακής μελέτης.

Για την ίδρυση τοπικού δικτύου κατασκευάστηκαν πέντε μόνιμοι σταθμοί για την εξυπηρέτηση της ευρύτερης βιομηχανικής περιοχής της Λάρνακας. Με την τεχνική του στατικού εντοπισμού έγινε ο προσδιορισμός της 3Δ τους θέσης, και με την χρήση του μόνιμου σταθμού GNSS CYPOS Λεμεσού είχαμε λύσεις σε πραγματικό χρόνο.

Η μετέπειτα επεξεργασία στο γραφείο για σκοπό συνόρθωσης του δικτύου έγινε με την χρήση του λογισμικού προγράμματος Trimble Business Center και την χρήση δεδομένων από το κτηματολόγιο.

**Λέξεις κλειδιά:** GPS, Συνόρθωση, Δίκτυο, Στατικός εντοπισμός, GNSS

# ABSTRACT

The objective of this dissertation is to establish, measure and adjust a local network in the Vasilikos area near Marie for the purposes of serving surface and aerial geodetic measuring and study instruments. The local network was also set up for immediate service of the Greek construction company that has an active project in installing fuel tanks in the area.

The first two chapters of the dissertation include an introduction to the four GNSS navigation & positioning systems with further information on the American GPS.

In the next two chapters we learn basic features about the antennas of the receivers used for ground measurements and the different errors that occur during tracking.

Then the next two chapters explain the various technical GPS measurements that exist such as static GPS and Real-Time Kinematic, we also start learning about differential GPS like the simple, double and triple difference, CORS stations and the Cypriot station CYPOS.

In the last chapters we learn about the network adjustment of local networks and finally we see the methodology and the results of the local network that was implemented for the purposes of the diplomatic study.

For the establishment of a local network, five permanent stations have been built to serve the wider industrial area of Larnaka. With the technique of static GPS, 3D location has been determined, and with the use of the permanent GPS/GNSS CyPOS stations in Limassol, real-time solution has been achieved.

The Trimble Business Center software has been used for the stations' post processing and the network adjustment.

**Keywords:** GPS, Adjustment, Network, Static GPS, GNSS

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	v
ABSTRACT	vi
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΧΕΟΜΕΝΩΝ	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	ix
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	x
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	xi
1 Εισαγωγή	13
2 Δορυφορικά συστήματα πλοήγησης	14
2.1 Γενικές πληροφορίες για το GPS.....	15
2.2 Η αρχή του GLONASS.....	16
2.3 Εισαγωγή στο Galileo.....	18
2.3.1 Ανάπτυξη του Galileo.....	19
2.4 Η Εμφάνιση του BeiDou.....	20
2.5 Ένα συνδυασμένο παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης (GNSS).....	21
3 Η θεωρία του GPS	23
3.1 Τα στοιχεία του συστήματος GPS.....	23
3.2 Αρχές Λειτουργίας.....	24
3.3 Το Σήμα GPS.....	27
3.4 Το Μήνυμα Πλοήγησης.....	30
4 Δέκτες GPS	33
4.1 Η κεραία του Δεκτή.....	33
5 Σφάλματα GPS	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
5.1 Σφάλματα διάδοσης του δορυφορικού σήματος.....	37
5.1.1 Ιονοσφαιρικά σφάλματα.....	37
5.1.2 Τροποσφαιρικά σφάλματα.....	38
5.1.3 Κύκλοι ολίσθησης.....	38
6 Διαφορικό GPS «DGPS»	39
6.1 GPS Baseline.....	39
6.1.1 Σταθμοί αναφοράς συνεχούς λειτουργίας (CORS).....	41
6.1.2 Κυπριακό CORS CyPOS.....	42
7 Μετρήσεις GPS	44
7.1.1 Στατικός Προσδιορισμός.....	44
7.1.2 Κινηματικός Προσδιορισμός.....	44
7.1.3 Απολυτός Προσδιορισμός.....	44



7.1.4	Σχετικός Προσδιορισμός θέσης .....	45
7.2	Διαφορικός Προσδιορισμός .....	45
7.2.1	Βασικές εξισώσεις παρατήρησης .....	45
7.2.2	Απλές διαφορές μεταξύ δεκτών .....	47
7.2.3	Απλές διαφορές μεταξύ δορυφόρων.....	47
7.2.4	Δίπλες διαφορές μεταξύ δορυφόρων και δεκτών.....	48
7.2.5	Τριπλές διαφορές μεταξύ δορυφόρων, δεκτών και εποχών.....	49
7.3	Τεχνικές μετρήσεων με GPS .....	50
7.3.1	Σχετικός στατικός προσδιορισμός (Static Positioning) .....	50
7.3.2	Σχετικός κινηματικός προσδιορισμός (Kinematic Positioning).....	51
8	Μέτρηση, Επίλυση και Συνόρθωση Γεωδαιτικού Δικτύου	52
8.1	Δίκτυο γεωδαιτικού ελέγχου .....	53
8.1.1	Δομή δικτύου .....	53
8.1.2	Κατασκευή σταθερών σημείων (Control Points).....	53
8.2	Μεθοδολογία Μετρήσεων Στατικού Εντοπισμού.....	53
9	Μεθοδολογία Μετρήσεων και Επίλυσης Δικτύου Ελέγχου	56
9.1	Στατικός εντοπισμός βάθρων βασιλικού.....	58
9.2	Εργαστηριακός εξοπλισμός μελέτης.....	60
9.2.1	Trimble Zephyr 3 Base Antenna .....	60
9.2.2	Trimble Zephyr Geodetic 2 Antenna.....	61
9.3	Συνόρθωση δικτύου στο TBC - Μεθοδολογία .....	62
9.4	Αποτελέσματα συνόρθωσης τοπικού δικτύου .....	71
	Network Adjustment Report .....	71
	Adjustment Settings .....	71
	Adjustment Statistics .....	72
	Control Coordinate Comparisons .....	72
	Control Point Constraints.....	73
	Adjusted Grid Coordinates .....	73
	Adjusted Geodetic Coordinates.....	73
	Adjusted ECEF Coordinates .....	74
	Adjusted GNSS Observations .....	75
	Βιβλιογραφία	81

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Οι εκδόσεις του GLONASS-.....	18
Διάγραμμα 2: Τα μέρη του συστήματος GPS.....	23
Διάγραμμα 3 : Τρισδιάστατη λύση .....	27
Διάγραμμα 4: Κώδικας C / A και ο Κώδικας P .....	29
Διάγραμμα 5: Απεικονίζει το μήνυμα πλοήγησης και τα στοιχεία του.....	31
Διάγραμμα 6: Chock Ring Antenna .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Διάγραμμα 7: Απεικονίζει τη γεωμετρία των δορυφόρων και την αβεβαιότητα της θέσης.....	36
Διάγραμμα 8: Baseline .....	41
Διάγραμμα 9: Δίκτυο Σταθμών αναφοράς συνεχούς λειτουργία GPS « CORS» .....	43
Διάγραμμα 10: Απολυτός προσδιορισμός με GPS.....	45
Διάγραμμα 11: Απλές διαφορές μεταξύ δεκτών. ....	47
Διάγραμμα 12: Απλές διαφορές μεταξύ δορυφόρων. ....	48
Διάγραμμα 13: Δίπλες διαφορές μεταξύ δορυφόρων – δεκτών.....	48
Διάγραμμα 14: Τριπλές διαφορές μεταξύ δορυφόρων – δεκτών – εποχών.....	49
Διάγραμμα 15: Στατικός προσδιορισμός GPS.....	50
Διάγραμμα 16: Υπόβαθρα κατασκευασμένα από μπετό με βιδωτή κορυφή για την προσαρμογή τοπογραφικού εξοπλισμού .....	56
Διάγραμμα 17: Η βάση στην κρυφή του βάρους όπου τοποθετείται ο γεωδαιτικός εξοπλισμός.....	57
Διάγραμμα 18: Zephyr 3 Base .....	61
Διάγραμμα 19: Zephyr Geodetic 2.....	62
Διάγραμμα 20: Χωρική κατανομή τοπικού δικτύου σε περιβάλλον TBC .....	63
Διάγραμμα 21: Χωρική διάταξη σταθμού Cors, Baselines και τοπικού δικτύου σε περιβάλλον TBC.....	64
Διάγραμμα 22: Δορυφόροι κατά την διάρκεια των μετρήσεων χωρίς την διορθώσει των κύκλων ολίσθησης session LEMESOS – T1 .....	65
Διάγραμμα 23: Δορυφόροι κατά την διάρκεια των μετρήσεων με την διορθώσει των κύκλων ολίσθησης session LEMESOS – T1 .....	66
Διάγραμμα 24: Adjust network constrain.....	69
Διάγραμμα 25: Τοπικό δίκτυο μετά την συνόρθωση σε περιβάλλον TBC .....	70

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 : Συχνότητες GNSS .....	22
Πίνακας 2: Ώρες έναρξης, λήξης και διάρκεια στατικού εντοπισμού .....	59
Πίνακας 3: Ώρες έναρξης, λήξης και διάρκεια στατικού εντοπισμού 2 .....	59
Πίνακας 4: Αποστάσεις (Baselines) Σταθμός – Σημείο .....	60
Πίνακας 5: Συντεταγμένες σημείων πριν την συνόρθωση .....	64
Πίνακας 6: Processing Baselines Results .....	67
Πίνακας 7: Αποτελέσματα επεξεργασία γραμμών βάσης εντός του τοπικού δικτύου .....	68
Πίνακας 8: Σύνοψη αποδοχής των επεξεργασμένων γραμμών βάσης εντός του τοπικού δικτύου .....	68
Πίνακας 9: Control Point Constrains.....	69
Πίνακας 10: Set-up Errors .....	71
Πίνακας 11: Covariance Display .....	71
Πίνακας 12: Post Processed Vector Statistics.....	72
Πίνακας 13: Control Point Constrains.....	73
Πίνακας 14: Adjusted Grid Coordinates .....	73
Πίνακας 15: Adjusted Geodetic Coordinates.....	74
Πίνακας 16: Adjusted ECEF Coordinates .....	74
Πίνακας 17: Error Ellipse Components.....	75
Πίνακας 18: Adjusted GNSS Observations .....	76
Πίνακας 19: Covariance Terms.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

<b>AM</b>	<b>Ante Meridem – Before Noon</b>
<b>C/A Code</b>	<b>Coarse and Acquisition Code</b>
<b>CORS</b>	<b>Continuously Operating Reference Station</b>
<b>DGPS</b>	<b>Differential Global Positioning System</b>
<b>ESA</b>	<b>European Space Agency</b>
<b>FKP</b>	<b>Flachen Korrektur Parameter – Spatial</b>
<b>FOC</b>	<b>Full Operational Capability</b>
<b>GCC</b>	<b>Galileo Control Center</b>
<b>GDOP</b>	<b>Geometric Dilution of Precision</b>
<b>GNSS</b>	<b>Global Navigation Satellite System</b>
<b>GPS</b>	<b>Global Positioning System</b>
<b>GSS</b>	<b>Galileo Sensor Station</b>
<b>HDOP</b>	<b>Horizontal Dilution of Precision</b>
<b>IGS</b>	<b>International Geodetic Service</b>
<b>IOC</b>	<b>Initial Operational Capability</b>
<b>IOV</b>	<b>In – Orbit Validation</b>
<b>MAC</b>	<b>Master – Auxiliary Concept</b>
<b>MEO</b>	<b>Medium Earth Orbit</b>
<b>P/Code</b>	<b>Precise Code</b>
<b>PDOP</b>	<b>Position (3D) Dilution of Precision</b>
<b>PM</b>	<b>Post Meridiem – After Noon</b>
<b>PP</b>	<b>Post Processing</b>
<b>PPS</b>	<b>Precise Positioning Service</b>
<b>PRN</b>	<b>Pseudo – Random Noise</b>

<b>PRNu</b>	<b>Pseudo – Range Number</b>
<b>RHCP</b>	<b>Right – Handed Circular Polarization</b>
<b>RMS</b>	<b>Root Mean Square</b>
<b>SAR</b>	<b>Search and Rescue</b>
<b>SPS</b>	<b>Standard Positioning Service</b>
<b>TBC</b>	<b>Trimble Business Center</b>
<b>TDOP</b>	<b>Time Dilution of Precision</b>
<b>UTC</b>	<b>Universal Coordinated Time</b>
<b>VDOP</b>	<b>Vertical Dilution of Precision</b>
<b>VRS</b>	<b>Virtual Reference Station</b>
<b>WGS</b>	<b>World Geodetic System</b>
<b>ΚΓΣΑ</b>	<b>Κυπριακό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς</b>

# 1 Εισαγωγή

Σε αυτήν την έρευνα έγινε μελέτη για την ίδρυση και συνόρθωση ενός τοπικού δικτύου στην περιοχή του Βασιλικού Λάρνακας με σκοπό την εξυπηρέτηση της ευρύτερης περιοχής. Το δίκτυο αυτό φιλοξενεί πέντε κατασκευασμένους μονίμους σταθμούς ειδικών προδιαγραφών οι οποίοι πακτώθηκαν στο έδαφος για την αποφυγή μικρομετακινήσεων στο εγγύς μέλλον.

Επικεντρωθήκαμε στην τεχνική του στατικού εντοπισμού για τον προσδιορισμό της οριζοντιογραφικής και κατακόρυφης θέσης αυτών το πέντε μονίμων σταθμών. Η μέθοδος αυτή επιλέχθηκε έτσι ώστε να επιτευχθεί μεγάλη οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια..

Όλες οι μετρήσεις έχουν προγραμματιστεί να ξεκινήσουν την ίδια ημέρα και περίοδο για μια διάρκεια τεσσάρων με πέντε ωρών, έτσι ώστε το Real Time Solution που προσφέρει το CYPOS του κτηματολογίου να έχει σταθερότητα και συνοχή σε όλες τις μετρήσεις. Επίσης ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι του ιδίου κατασκευαστή με στόχο την αποφυγή κατασκευαστικών σφαλμάτων.

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων και τις εκάστοτε δορυφορικές εφημερίδες και με την χρήση του λογισμικού προγράμματος Trimble Business Center έχουμε όλα τα απαραίτητα δεδομένα για την συνόρθωση του τοπικού δικτύου και την εύρεση των τελικών συντεταγμένων του κάθε μονίμου σταθμού που υλοποιήθηκε κατά την διάρκεια της μελέτης.

Το ερώτημα που προκύπτει σε αυτή τη μελέτη είναι αν οι μετρήσεις και οι ακρίβειες της ίδρυσης και συνόρθωσης του τοπικού δικτύου είναι ικανοποιητικές για την χρήση των μονίμων σταθμών από τοπογράφους μηχανικούς και άλλους. Επίσης θέλουμε να δούμε κατά ποσό τα αποτελέσματα είναι αξιόπιστα για την χρήση τους για περαιτέρω μελέτες από τρίτα πρόσωπα.

## 2 Δορυφορικά συστήματα πλοήγησης

Το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS) είναι ένα σύστημα πλοήγησης βασισμένο επάνω σε δορυφορική τεχνολογία. Η θεμελιώδης τεχνική του GPS περιλαμβάνει μετρήσεις αποστάσεων μεταξύ του δέκτη και των δορυφόρων που παρατηρούνται ταυτόχρονα, και οι θέσεις των δορυφόρων προβάλλονται και μεταδίδονται μαζί με το σήμα GPS στον χρήστη. Μέσω πολλών γνωστών θέσεων (των δορυφόρων) και των μετρημένων αποστάσεων μεταξύ του δέκτη και των δορυφόρων, μπορεί να καθοριστεί η θέση του δέκτη. Η αλλαγή θέσης, η οποία μπορεί επίσης να προσδιοριστεί, είναι η ταχύτητα του δέκτη. Οι πιο σημαντικές εφαρμογές του GPS είναι η εύρεση θέσης και η πλοήγηση (Xu, & Xu, 2016).

Μέσω της εξέλιξής του τις τελευταίες δεκαετίες, το GPS είναι πλέον γνωστό ακόμα και σε παιδιά του σχολείου. Έχει εφαρμοστεί εκτεταμένα σε διάφορους τομείς, όπως αεροδιαστημική, θαλάσσια και χερσαία πλοήγηση, τροχιά χαμηλής γης, προσδιορισμό δορυφορικής τροχιάς, στατική και κινηματική εύρεση θέσης και παρακολούθηση κατάστασης πτήσης, καθώς και τοπογραφική μελέτη. Η ευρεία χρησιμότητά του έχει καταστήσει το GPS απαραίτητο για τη βιομηχανία, την έρευνα, την εκπαίδευση και την καθημερινή ζωή.

Ένα απλό παράδειγμα, οι δρομείς που επιθυμούν να καθορίσουν την τοποθεσία τους χρησιμοποιώντας ένα ρολόι GPS μπορούν να το κάνουν πολύ απλά, απλώς πατώντας ένα πλήκτρο. Οι βασικές αρχές μιας τέτοιας εφαρμογής, ωστόσο, είναι αρκετά πολύπλοκες και περιλαμβάνουν τη γνώση των ηλεκτρονικών, της τροχιακής μηχανικής, της ατμοσφαιρικής επιστήμης, της γεωδαισίας, της θεωρίας της σχετικότητας, των μαθηματικών, της προσαρμογής και του φιλτραρίσματος και της μηχανικής λογισμικού. Πολλοί επιστήμονες και μηχανικοί έχουν αφιερώσει προσπάθειες για να καταστήσουν τη θεωρία GPS ευκολότερη στην κατανόηση και τις εφαρμογές της πιο ακριβείς. (Xu, & Xu, 2016).

Το Galileo είναι το ευρωπαϊκό παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης και το GLONASS είναι το ρωσικό σύστημα. Στην Κίνα, το σύστημα εντοπισμού θέσης και πλοήγησης το BeiDou έχει υποστεί ταχεία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Οι αρχές τοποθέτησης και πλοήγησης αυτών των συστημάτων είναι σχεδόν οι ίδιες με εκείνες του συστήματος GPS των ΗΠΑ. Με πολύ λίγες εξαιρέσεις, η θεωρία GPS και οι αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα για τα συστήματα Galileo, GLONASS και BeiDou. Το παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης (GNSS) του μέλλοντος θα παρουσιάσει πιθανώς ένα συνδυασμό των συστημάτων GPS, GLONASS, Galileo και BeiDou (Xu, & Xu, 2016).

Συνοπτικά, το GPS είναι ένα δορυφορικό σύστημα προσδιορισμού θέσης (3-D), χρόνου και ταχύτητας για ακίνητο και κινούμενο δέκτη σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα (από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι λίγες ώρες ανάλογα με το είδος των εφαρμογών) παραβλέποντας κλασικές επίγειες τεχνικές που εφαρμόζονται όπως ο τριγωνισμός, ο τριπλευρισμός ή συνήθως ο συνδυασμός αυτών των δυο μεθόδων, που παρέχουν τις επιφανειακές ελλειψοειδείς συντεταγμένες και η υψομετρία, που παρέχει την τρίτη παράμετρο, τα υψόμετρα. Βασίζεται στις αρχές λειτουργίας των παθητικών δορυφορικών συστημάτων ναυσιπλοΐας και εξασφαλίζει συνεχή, παγκόσμια πλοήγηση ανεξάρτητα

από τις καιρικές συνθήκες σε απεριόριστο αριθμό χρηστών (Xu, & Xu, 2016). Η βασική αρχή στην οποία στηρίζεται είναι ο προσδιορισμός θέσης με την μέτρηση 4 «ψευδοαποστάσεων» μεταξύ του παρατηρητή και του δορυφόρου.

Για τον λόγο αυτό η σχεδίαση των τροχιών των δορυφόρων έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η παρατήρηση 4 τουλάχιστον δορυφόρων από οποιοδήποτε σημείο της γης για κάθε χρονική στιγμή. Για τον προσδιορισμό της θέσης ενός σημείου άγνωστων συντεταγμένων στο χώρο αρκούν οι μετρήσεις των αποστάσεων από τρία σημεία γνωστών συντεταγμένων (πλευρική οπισθοτομία στο χώρο), συνεπώς θα αρκούσαν και τρεις δορυφόροι για τον προσδιορισμό της θέσης ενός σημείου στο σύστημα αναφοράς των δορυφόρων. Ο λόγος που απαιτούνται τουλάχιστον τέσσερις δορυφόροι (αποστάσεις) είναι για να προσδιορίσουμε τη διαφορά ανάμεσα στην ένδειξη του χρονομέτρου του χρήστη και την ένδειξη του χρονομέτρου του δορυφόρου δηλαδή την καθυστέρηση του χρονομέτρου του δέκτη σε σχέση με το χρόνο αναφοράς του GPS. Ακριβώς για αυτόν τον λόγο της ύπαρξης αυτού του σφάλματος χρησιμοποιούμε και τον όρο ψευδοαπόσταση (Xu, & Xu, 2016).

Ο χρόνος αναφοράς του GPS έχει έναρξη την 00.00 UTC της 5ης Ιαν. 1980. Η προσδιοριζόμενη θέση (X,Y,Z) αναφέρεται στο Παγκόσμιο Γεωκεντρικό Σύστημα Αναφοράς 1984, γνωστό ως WGS 84.

## 2.1 Γενικές πληροφορίες για το GPS

Το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS) σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε, λειτουργεί και συντηρείται από το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ (Parkinson and Spilker, 1996). Ο πρώτος δορυφόρος GPS ξεκίνησε το 1978 και το σύστημα ήταν πλήρως λειτουργικό στα μέσα της δεκαετίας του '90. Ο σχηματισμός GPS αποτελείται από 24 δορυφόρους σε έξι τροχιακά επίπεδα, με τέσσερις δορυφόρους σε κάθε επίπεδο. Οι ανερχόμενοι κόμβοι των τροχιακών επιπέδων απέχουν εξίσου 60 μοίρες και τα τροχιακά επίπεδα είναι κεκλιμένα κατά 55 μοίρες. Κάθε δορυφόρος GPS είναι σε σχεδόν σε κυκλική τροχιά, με ημι-κύριο άξονα 26.578 χιλιομέτρων και περίοδο περίπου 12 ωρών. Οι δορυφόροι συνεχώς προσανατολίζονται για να εξασφαλίσουν ότι οι ηλιακοί συλλέκτες τους παραμένουν στραμμένοι προς τον Ήλιο και οι κεραίες τους προς τη γη. Κάθε δορυφόρος μεταφέρει τέσσερα ατομικά ρολόγια, οπού έχει περίπου το μέγεθος ενός αυτοκινήτου και ζυγίζει κάπου στα 1000 κιλά. Η μακροχρόνια σταθερότητα συχνότητας των ρολογιών φτάνει καλύτερα από μερικά μέρη στα  $10^{-13}$  κατά τη διάρκεια μιας ημέρας (cf. Scherger 1985). Τα ατομικά ρολόγια επί του δορυφόρου παράγουν τη βασική συχνότητα L-band 10.23 MHz.

Οι δορυφόροι GPS παρακολουθούνται από πέντε σταθμούς βάσης. Ο κύριος σταθμός βάσης βρίσκεται στο Colorado Springs. Όλοι οι σταθμοί είναι εξοπλισμένοι με ακριβή ρολόγια και δέκτες καισίου για τον προσδιορισμό των εκπεμπόμενων εφημερίδων και να μοντελοποιήσουν τα ρολόγια δορυφόρων. Εφημερίδες και οι ρυθμίσεις ρολογιών μεταδίδονται στους δορυφόρους, οι οποίοι με τη σειρά τους χρησιμοποιούν αυτές τις ενημερώσεις σε σήματα που στέλνουν στους δέκτες GPS (Xu, & Xu, 2016).

Κάθε δορυφόρος GPS μεταδίδει δεδομένα σε τρεις συχνότητες: L1 (1575.4 MHz), L2 (1227.60 MHz) και L5



(1176.45MHz). Οι συχνότητες φορέων L1, L2 και L5 παράγονται πολλαπλασιάζοντας τη θεμελιώδη συχνότητα κατά 154 120 και 115 αντίστοιχα. Οι κώδικες PRN ψευδοτυχαίου θορύβου, μαζί με τη δορυφορική εφημερίδα, τα ιονόσφαιρά μοντέλα και οι διορθώσεις του δορυφορικού ρολογιού τοποθετούνται πάνω στις συχνότητες φορέων L1, L2 και L5. Οι μετρημένοι χρόνοι μετάδοσης των σημάτων που ταξιδεύουν από τους δορυφόρους στους δέκτες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των ψευδοαποστάσεων. Ο κώδικας course/acquisition (C / A), που μερικές φορές ονομάζεται Standard Positioning Service (SPS), είναι ένας κώδικας σήματος ψευδοτυχαίου θορύβου που διαμορφώνεται στον φορέα L1. Ο κώδικας ακρίβειας (P), που ονομάζεται μερικές φορές Precise Positioning Service (PPS), ρυθμίζεται στους φορείς L1, L2 και L5, επιτρέποντας την απομάκρυνση των σφαλμάτων της ιονόσφαιρας (Xu, & Xu, 2016).

Το GPS σχεδιάστηκε ως ένα σύστημα μέτρησης από γνωστές θέσεις δορυφόρων στο διάστημα σε άγνωστες θέσεις στη ξηρά και τη θάλασσα, καθώς και στον αέρα και το διάστημα. Οι τροχιές των δορυφόρων GPS διατίθενται μέσω αναμετάδοσης ή από την εθνική γεωδαιτική υπηρεσία (IGS). Οι τροχιές IGS είναι μια ακριβές εφημερίδα που προέρχεται μετά από επεξεργασία ή επεξεργασία σχεδόν σε πραγματικό χρόνο. Όλοι οι δέκτες GPS έχουν προγραμματισμένο ημερολόγιο στον υπολογιστή τους, το οποίο τους λέει πού βρίσκεται ο κάθε δορυφόρος ανά πάσα στιγμή. Το ημερολόγιο είναι ένα αρχείο δεδομένων που περιέχει πληροφορίες σχετικά με τις τροχιές και τις διορθώσεις του ρολογιού για όλους τους δορυφόρους. Το GPS λαμβάνει, ανιχνεύει, αποκωδικοποιεί και επεξεργάζεται τα σήματα που λαμβάνονται από τους δορυφόρους για να δημιουργήσει τα δεδομένα κώδικα, φάσης και παρατηρήσεις Doppler. Τα δεδομένα ενδέχεται να είναι διαθέσιμα σε πραγματικό χρόνο ή αποθηκευμένα για λήψη. Το εσωτερικό λογισμικό του δέκτη χρησιμοποιείται συνήθως για την επεξεργασία των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο με τη μέθοδο εντοπισμού ενός σημείου και για την εξαγωγή των πληροφοριών στον χρήστη. Λόγω των περιορισμών του λογισμικού του δέκτη, η ακριβής τοποθέτηση και η πλοήγηση πραγματοποιούνται συνήθως από έναν εξωτερικό υπολογιστή με πιο ισχυρό λογισμικό. Η βασική συμβολή του GPS για τους χρήστες του συστήματος είναι να τους ενημερώνει για τις κινήσεις και το χρονοδιάγραμμα των τοποθεσιών τους (Xu, & Xu, 2016).

Καθώς η τεχνολογία GPS έχει μετακινηθεί στον πολιτικό τομέα, οι εφαρμογές της έχουν γίνει σχεδόν απεριόριστες και η κατανόηση του GPS έχει καταστεί αναγκαία.

## **2.2 Η αρχή του GLONASS**

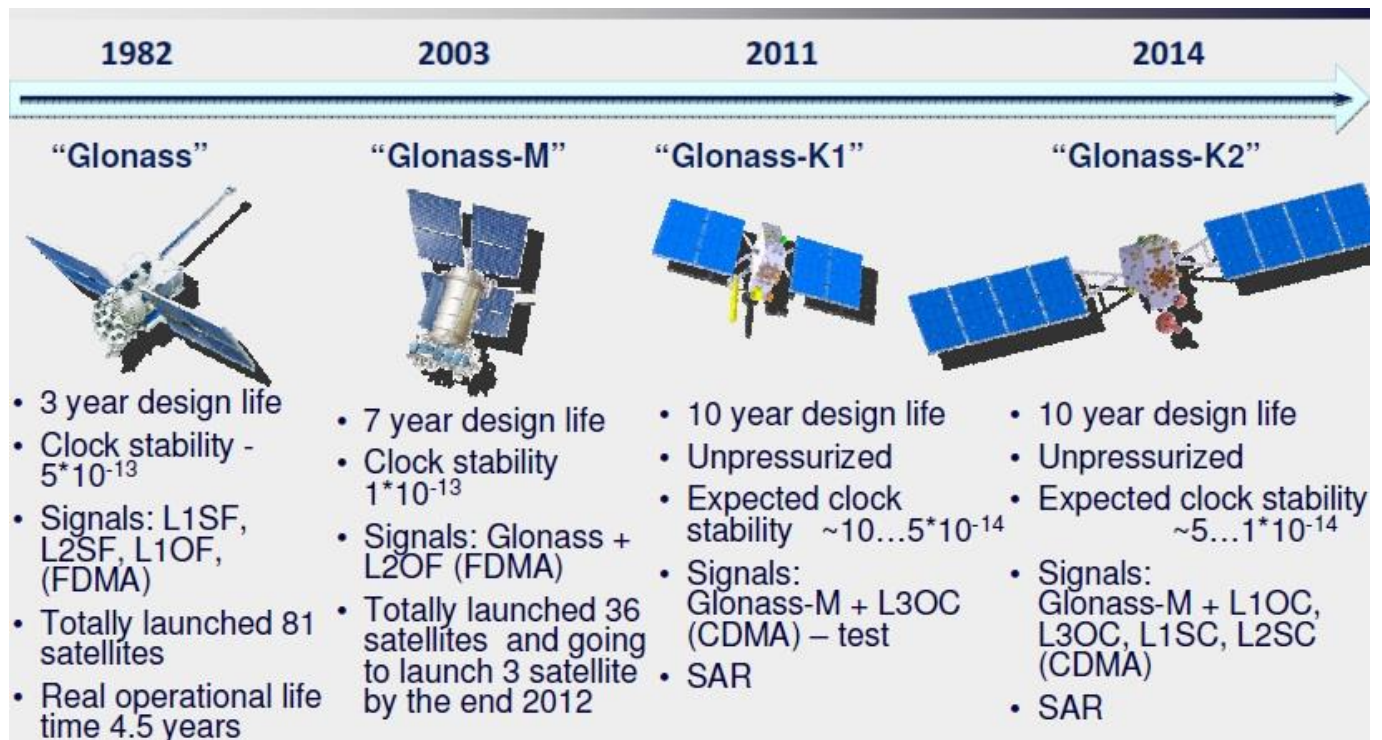
Το GLONASS είναι ένα παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης (GNSS) που βασίζεται στο διάστημα και παρέχει αξιόπιστες υπηρεσίες εντοπισμού θέσης, πλοήγησης και χρονισμού σε χρήστες σε συνεχή, παγκόσμια βάση, ελεύθερα διαθέσιμες σε όλους. Οι δέκτες GLONASS υπολογίζουν τη θέση τους στο σύστημα αναφοράς GLONASS χρησιμοποιώντας δορυφορική τεχνολογία και βασίζονται σε αρχές τριγωνισμού. Πρόκειται για μια εναλλακτική λύση και συμπληρωματική προς άλλα συστήματα GNSS όπως το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (GPS), το κινεζικό σύστημα πλοήγησης BeiDou ή το προγραμματισμένο σύστημα εντοπισμού θέσης Galileo της Ευρωπαϊκής Ένωσης (EE) (GLONASS, χ.χ.).

Το πρώτο σοβιετικό διαστημικό σκάφος πλοήγησης "Cyclone" τέθηκε σε τροχιά το 1967. Αυτή ήταν η αρχή του πρώτου σοβιετικού συστήματος πλοήγησης χαμηλής τροχιάς, που ονομαστικέ "Cicada". Συγκροτήθηκε από τέσσερις δορυφόρους που τοποθετήθηκαν σε κυκλικές τροχιές σε υψόμετρο 1000 χλμ. Και κλίση 83 μοιρών και μπορούσαν να παράσχουν δεδομένα τοποθετήσεως εντός των ορίων αρκετών εκατοντάδων μέτρων. Παρόλα αυτά, οι απαιτήσεις για την διαστημική πλοήγηση αυξάνονταν διαρκώς και τα συστήματα χαμηλής τροχιάς δεν μπορούσαν να συμμορφωθούν με τις απαιτήσεις όλων των πιθανών χρηστών (GLONASS, χ.χ.).

Οι δοκιμές πτήσης του δορυφορικού συστήματος πλοήγησης μεγάλου υψομέτρου (20000 χλμ.), που ονομάζεται GLONASS, ξεκίνησαν στις 12 Οκτωβρίου 1982 με την εκτόξευση των Kosmos-1413, Kosmos-1414 και Kosmos-1415. Μετά τη διάλυση της Σοβιετικής Ένωσης το 1991, το σύστημα συνεχίστηκε από τη Ρωσική Ομοσπονδία, η οποία δήλωσε επισήμως το σύστημα ως λειτουργικό το 1993 και έφερε το βέλτιστο καθεστώς των 24<sup>ov</sup> επιχειρησιακών δορυφόρων το 1995 (GLONASS, χ.χ.; Xu, & Xu, 2016).

Μετά την ολοκλήρωσή του, το σύστημα έπεσε σε παρακμή λόγω της κατάρρευσης της ρωσικής οικονομίας και της μείωσης της χρηματοδότησης για τη διαστημική βιομηχανία. Στις αρχές της δεκαετίας του 2000, υπό την προεδρία του Βλαντιμίρ Πούτιν, η αποκατάσταση του συστήματος έγινε κορυφαία κυβερνητική προτεραιότητα και η χρηματοδότηση αυξήθηκε σημαντικά. Τον Μάιο του 2007, ο Ρώσος πρόεδρος Βλαντιμίρ Πούτιν υπέγραψε διάταγμα για το σύστημα πλοήγησης GLONASS για την παροχή δωρεάν υπηρεσίας στους πελάτες: «Η πρόσβαση στα σήματα πολιτικής πλοήγησης του παγκόσμιου δορυφορικού συστήματος πλοήγησης GLONASS παρέχεται στους Ρώσους και ξένους καταναλωτές δωρεάν και χωρίς περιορισμούς». Η ανάπτυξη και η συντήρηση του συστήματος GLONASS διεξάγεται από τον ομοσπονδιακό διαστημικό οργανισμό. Το 2010 το GLONASS πέτυχε 100% κάλυψη της Ρωσίας και τον Οκτώβριο του 2011 αποκαταστάθηκε ο πλήρης τροχιακός αστερισμός 24<sup>ov</sup> δορυφόρων, ο οποίος επέτρεψε την πλήρη κάλυψη σε παγκόσμιο επίπεδο. Τα σχέδια των δορυφόρων GLONASS έχουν υποστεί αρκετές αναβαθμίσεις, με την τελευταία έκδοση, το GLONASS-K2, που έχει προγραμματιστεί να τεθεί σε λειτουργία το 2019 (GLONASS, χ.χ.).

Οι τρεις L-ζώνες GLONASS έχουν μια σειρά από συχνότητες για την εκχώρηση σε δορυφόρους. Το GLONASS χρησιμοποιεί μεταφορείς σε τρεις περιοχές. Ο πρώτος είναι L1 (~ 1602 MHz), στον οποίο ο διαχωρισμός μεταξύ μεμονωμένων φορέων είναι 0,5625 MHz. Η περιοχή κυμαίνεται μεταξύ ~ 1598.0625 και ~ 1607.0625 MHz. Η δεύτερη είναι L2 (~ 1246 MHz), στην οποία ο διαχωρισμός μεταξύ μεμονωμένων φορέων είναι 0,4375 MHz. Η περιοχή είναι μεταξύ ~ 1242.9375 και ~ 1249.9375 MHz. Το τρίτο είναι το L3 το οποίο είναι διαθέσιμο στους δορυφόρους K και είναι εντός μιας νέας ζώνης συχνοτήτων (~ 1201 MHz) που περιλαμβάνει 1201.743 έως 1208.511 MHz και θα επικαλύπτει το σήμα E5B του Galileo. Στο L3, θα υπάρχει ένας διαχωρισμός μεταξύ των μεμονωμένων φορέων που είναι 0.4375 kHz. Εντούτοις, εντός αυτών των σειρών, μπορούν να υπάρχουν έως και 25 κανάλια σημάτων της L-ζώνης. Προς το παρόν υπάρχουν 16 κανάλια για να φιλοξενήσουν τους διαθέσιμους δορυφόρους (GLONASS, χ.χ.; Xu, & Xu, 2016). Στο παρακάτω **Error! Reference source not found.** φαίνονται οι εκδόσεις του GLONASS και επιπλέον πληροφορίες.



## 2.3 Εισαγωγή στο Galileo

Το Galileo είναι ένα GNSS που δημιουργήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) και τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος ESA για την παροχή εξαιρετικά ακριβούς, εγγυημένης παγκόσμιας υπηρεσίας εντοπισμού θέσης που βρίσκεται υπό τον έλεγχο των πολιτών. Ενώ είναι σχεδιασμένο ως ανεξάρτητο σύστημα πλοήγησης, το Galileo είναι διαλειτουργικό με τα άλλα δύο παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης, το GPS και το GLONASS. Ο χρήστης θα μπορεί να τοποθετεί τον ίδιο δέκτη από οποιονδήποτε από τους δορυφόρους σε οποιονδήποτε συνδυασμό. Το Galileo θα εγγυηθεί τη διαθεσιμότητα των υπηρεσιών με μεγαλύτερη ακρίβεια. Ο πρώτος δορυφόρος Galileo μεγέθους 2.7 x 1.2 x 1.1 μέτρων και βάρους 650kg εγκαινιάστηκε τον Δεκέμβριο του 2005. Ο αστερισμός του Galileo αποτελείται από 30 δορυφόρους μεσαίας γήινης τροχιάς (MEO) σε τρία τροχιακά επίπεδα με εννέα λειτουργικούς δορυφόρους ισαπέχουσων αποστάσεων σε κάθε επίπεδο συν ένα ανενεργό εφεδρικό δορυφόρο. Οι ανερχόμενοι κόμβοι των τροχιακών επιπέδων απέχουν εξίσου κατά 120 μοίρες. Τα τροχιακά επίπεδα έχουν κλίση 56 μοιρών. Κάθε δορυφόρος Galileo βρίσκεται σε σχεδόν κυκλική τροχιά, με ημικυκλικό άξονα 29600 χιλιομέτρων και περίοδο περίπου 14 ωρών. Ο δορυφόρος Galileo περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της γης έτσι ώστε η επίπεδη επιφάνεια της ηλιακής συστοιχίας να βλέπει πάντα τον ήλιο να συλλέγει τη μέγιστη ηλιακή ενέργεια. Μόλις επιτευχθεί το πλήρως αναπτυγμένο σύστημα Galileo, τα σήματα πλοήγησης Galileo θα παρέχουν καλή κάλυψη ακόμη και σε γεωγραφικό πλάτος έως και 75 μοίρες βόρεια. Ο μεγάλος αριθμός δορυφόρων μαζί με τον προσεκτικά βελτιστοποιημένο σχεδιασμό αστερισμού, καθώς και η διαθεσιμότητα των τριών ενεργών εφεδρικών δορυφόρων, θα εξασφαλίσουν ότι η απώλεια ενός δορυφόρου δεν θα έχει καμία αισθητή επίδραση στον χρήστη (*European Space Agency, χ.χ.; ‘Galileo’, 2019; GALILEO | European Global Navigation Satellite System, χ.χ.*).

Ο δορυφόρος Galileo έχει τέσσερα ρολόγια, δύο από κάθε τύπο (παθητική υδρογόνο και ρουβίδιο, σταθερότητα: 0,45 και 1,8 ns σε 12 ώρες αντίστοιχα). Ανά πάσα στιγμή, μόνο ένας από κάθε τύπο λειτουργεί. Το ρολόι υδρογόνου παράγει τη συχνότητα αναφοράς από την οποία παράγεται το σήμα πλοήγησης. Αν το ρολόι του υδρογόνου αποτύχει, το ωρολόγιο ρουβιδίου συνεχίζει στιγμιαία, και ξεκινούν τα δυο εφεδρικά τα ρολόγια. (European Space Agency, χ.χ.), ('Galileo', 2019).

Το Galileo παρέχει δέκα σήματα πλοήγησης με κυκλική πόλωση δεξιά (RHCP) στα εύρη συχνοτήτων 1164-1215 MHz (E5a και E5b), 1215-1300 MHz (E6) και 1559-1592 MHz (E2-L1-E1). Η συμβατότητα του Galileo και του GPS με τη διαλειτουργικότητα επιτυγχάνεται με δύο συχνότητες αισθητήρων στα E5a / L5 και L1, καθώς τα και κατάλληλα πλαίσια γεωδαιτικού συντονισμού και αναφοράς χρόνου (European Space Agency, χ.χ.; 'Galileo', 2019; GALILEO / European Global Navigation Satellite System, χ.χ.).

### 2.3.1 Ανάπτυξη του Galileo

Στις 21 Οκτωβρίου 2011, άρχισαν να λειτουργούν οι πρώτοι δύο από τους τέσσερις δορυφόρους που σχεδιάστηκαν για να επικυρώσουν την έννοια του Galileo τόσο στο διάστημα όσο και στο έδαφος. Δύο άλλα ακολούθησαν στις 12 Οκτωβρίου 2012. Αυτή η φάση επικύρωσης σε τροχιά (IOV) ακολουθείται από πρόσθετες εκτοξεύσεις δορυφόρων για την επίτευξη αρχικής επιχειρησιακής ικανότητας (IOC) μέχρι τα μέσα της δεκαετίας. Οι υπηρεσίες Galileo θα συνοδεύονται από εγγυήσεις ποιότητας και ακεραιότητας, σηματοδοτώντας τη βασική διαφορά αυτού του πρώτου ολοκληρωμένου πολιτικού συστήματος τοποθέτησης από τα στρατιωτικά συστήματα που έχουν έρθει πριν. Ένα φάσμα υπηρεσιών θα επεκταθεί καθώς το σύστημα δημιουργείται από την αρχική επιχειρησιακή ικανότητα για να επιτευχθεί πλήρης ορθολογική ικανότητα (FOC) μέχρι το 2020. (GALILEO / European Global Navigation Satellite System, χ.χ.)

Στην Ευρώπη έχουν υλοποιηθεί δύο κέντρα ελέγχου Galileo (GCC) για τον έλεγχο των δορυφόρων και για τη διαχείριση της αποστολής πλοήγησης. Τα δεδομένα που παρέχονται από το παγκόσμιο δίκτυο σταθμών αισθητήρων Galileo (GSS) στέλνονται στο κέντρο ελέγχου μέσω ενός πλεονάζοντος δικτύου επικοινωνιών. Το κέντρο ελέγχου χρησιμοποιεί τα δεδομένα από τους σταθμούς αισθητήρων για να υπολογίσει τις πληροφορίες ακεραιότητας και να συγχρονίσει το χρονικό σήμα όλων των δορυφόρων με τα ρολόγια σταθμών εδάφους. Η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των κέντρων ελέγχου και των δορυφόρων θα πραγματοποιείται μέσω σταθμών Up-link (GALILEO / European Global Navigation Satellite System, χ.χ.).

Ως πρόσθετο χαρακτηριστικό, το Galileo παρέχει μια παγκόσμια λειτουργία αναζήτησης και διάσωσης (SAR), βασισμένη στο λειτουργικό σύστημα Cospas-Sarsat. Για το σκοπό αυτό, οι δορυφόροι είναι εξοπλισμένοι με αναμεταδότη, ο οποίος είναι σε θέση να μεταφέρει τα σήματα κινδύνου από τους πομπούς των χρηστών στα περιφερειακά κέντρα συντονισμού διάσωσης, τα οποία στη συνέχεια θα ξεκινήσουν την αποστολή διάσωσης. Ταυτόχρονα, το σύστημα θα στείλει ένα μήνυμα ανταπόκρισης στον χρήστη, ενημερώνοντάς το ότι η κατάσταση του έχει εντοπιστεί και ότι η βοήθεια είναι στο δρόμο. Αυτό το τελευταίο χαρακτηριστικό είναι νέο και θεωρείται

σημαντικό (*GALILEO / European Global Navigation Satellite System, χ.χ.*).

## 2.4 Η Εμφάνιση του BeiDou

Το δορυφορικό σύστημα πλοήγησης BeiDou (BDS) είναι ένα κινεζικό σύστημα δορυφορικής πλοήγησης. Αποτελείται από δύο χωριστούς δορυφορικούς αστερισμούς. Το πρώτο σύστημα BeiDou, που ονομάζεται επίσημα το πειραματικό σύστημα δορυφορικής πλοήγησης BeiDou και επίσης γνωστό ως BeiDou-1, αποτελείται από τρεις δορυφόρους οι οποίοι από το 2000 έχουν προσφέρει περιορισμένες υπηρεσίες κάλυψης και πλοήγησης, κυρίως για χρήστες στην Κίνα και τις γειτονικές περιοχές. Το BeiDou-1 παροπλίστηκε στα τέλη του 2012 (*System, χ.χ.*).

Η δεύτερη γενιά του συστήματος, που ονομαζόταν επίσημα το δορυφορικό σύστημα πλοήγησης BDS και επίσης γνωστό ως COMPASS ή BeiDou-2, τέθηκε σε λειτουργία στην Κίνα τον Δεκέμβριο του 2011 με μερική σύνθεση 10 δορυφόρων σε τροχιά. Από τον Δεκέμβριο του 2012, προσφέρει υπηρεσίες σε πελάτες στην περιοχή Ασίας-Ειρηνικού (*System, χ.χ.*).

Το 2015, η Κίνα ξεκίνησε τη συσσώρευση του συστήματος BeiDou τρίτης γενιάς (BeiDou-3) για τον αστερισμό της παγκόσμιας κάλυψης. Ο πρώτος δορυφόρος BDS-3 ξεκίνησε στις 30 Μαρτίου 2015. Από τον Οκτώβριο του 2018 ξεκίνησαν δεκαπέντε δορυφόροι BDS-3. Το BeiDou-3 θα αποτελείται τελικά από 35 δορυφόρους και αναμένεται να παρέχει ολοκληρωμένες υπηρεσίες μετά την ολοκλήρωσή του το 2020. Όταν ολοκληρωθεί, το BeiDou θα παράσχει ένα εναλλακτικό παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης και αναμένεται να έχει μεγαλύτερη ακρίβεια από τα GPS, GLONASS και Galileo. Το 2016 οι κατασκευαστές του BeiDou-3 δήλωσαν ότι θα έχει ακρίβεια χιλιοστών (με μετα-επεξεργασία) (*System, χ.χ.*).

Σύμφωνα με την China Daily, το 2015, δεκαπέντε χρόνια μετά τη δρομολόγηση του δορυφορικού συστήματος, σημείωσε κύκλο εργασιών 31,5 δισεκατομμυρίων δολαρίων ετησίως για μεγάλες εταιρείες όπως η China Aerospace Science and Industry Corp, η AutoNavi Holdings Ltd και η China North Industries Group Corp.

Στις 27 Δεκεμβρίου 2018, το δορυφορικό σύστημα πλοήγησης BeiDou άρχισε να παρέχει παγκόσμιες υπηρεσίες. Υπάρχουν δύο επίπεδα παροχής υπηρεσιών - δωρεάν υπηρεσία σε πολίτες και υπηρεσία με άδεια στην κινεζική κυβέρνηση και στρατιωτική. Η ελεύθερη πολιτική υπηρεσία διαθέτει ακρίβεια εντοπισμού θέσης 10 μέτρων, συγχρονίζει ρολόγια με ακρίβεια 10 νανοδευτερόλεπτα και τα μέτρα ταχύτητας εντός 0,2 m / s. Η περιορισμένη στρατιωτική υπηρεσία έχει ακρίβεια θέσης 10 εκατοστών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επικοινωνία και θα παρέχει στον χρήστη πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του συστήματος (*System, χ.χ.*).

Η BeiDou μεταδίδει σήματα πλοήγησης σε τρεις ζώνες συχνοτήτων: B1, B2 και B3, οι οποίες βρίσκονται στην ίδια περιοχή της ζώνης L όπως με τα άλλα σήματα GNSS (*System, χ.χ.*).

Για να επωφεληθεί από τη διαλειτουργικότητα του σήματος BeiDou με το Galileo και το GPS, η Κίνα ανακοίνωσε τη μετάδοση του αστικού σήματος B1 από 1561.098 MHz σε συχνότητα κεντραρισμένη στα 1575.42 MHz - ίδια με

τα πολιτικά σήματα GPS L1 και Galileo E1 - και τη μετατροπή της από τετραγωνική σε μια διαμόρφωση πολυπλεγμένου φορέα δυαδικής μετατόπισης παρόμοια με το μελλοντικό GPS L1C και το E1 του Galileo. (*System, χ.χ.*).

Η λύση BeiDou GNSS λειτουργεί στις ακόλουθες ζώνες συχνοτήτων:

- Ζώνη B1: 1559.05 MHz έως 1563.15 MHz με κεντρική συχνότητα 1561.1 MHz και εύρος ζώνης 4.092 MHz
- Ζώνη B2: 1195,14 MHz έως 1219,14 MHz με κεντρική συχνότητα 1207,14 MHz και εύρος ζώνης 24 MHz
- Ζώνη B3: 1256,52 MHz έως 1280,52 MHz με κεντρική συχνότητα 1268,52 MHz και εύρος ζώνης 24 MHz

## **2.5 Ένα συνδυασμένο παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης (GNSS)**

Η ανάπτυξη των συστημάτων Galileo και BeiDou, τα συστήματα GPS και τα συστήματα GLONASS αντιμετωπίζουν τώρα άμεσο ανταγωνισμό. Χωρίς αμφιβολία, αυτό έχει θετική επίδραση στον εκσυγχρονισμό του συστήματος GPS και στην περαιτέρω ανάπτυξη του συστήματος GLONASS. Αυτά τα πολλαπλά συστήματα πλοήγησης που λειτουργούν ανεξάρτητα συμβάλλουν στην αύξηση της ευαισθητοποίησης και της ακρίβειας της θέσης σε πραγματικό χρόνο και της πλοήγησης. Το GNSS του μέλλοντος θα περιλαμβάνει αναπόφευκτα ένα συνδυασμένο σύστημα που θα περιλαμβάνει μια συνάθροιση των δορυφορικών συστημάτων GPS, GLONASS, Galileo και BeiDou. Ένας αστερισμός εκατοντάδων δορυφόρων μεταξύ των τεσσάρων συστημάτων αυξάνει σημαντικά την ορατότητα των δορυφόρων, ειδικά σε κρίσιμες περιοχές όπως τα αστικά φαράγγια. Πολλές μελέτες σχετικά με τους συνδυασμούς πολλαπλών GNSS έχουν διεξαχθεί τα τελευταία χρόνια. Αναμένεται ότι οι συνδυασμοί πολλαπλών GNSS θα αυξήσουν σημαντικά τον αριθμό των παρατηρηθέντων δορυφόρων, τη βελτιστοποιημένη χωρική γεωμετρία και θα βελτιώσουν τη σύγκλιση, την ακρίβεια, και την αξιοπιστία. Ωστόσο, η ελάχιστη απαίτηση για τη σύντηξη πολλαπλών δεδομένων GNSS είναι η βαθμονόμηση των διακυμάνσεων μεταξύ των συστημάτων (Hofmann-Wellenhof κ.ά., 1988; Parkinson & Gilbert, 1983).

Επειδή το GPS, το GLONASS, το Galileo και το BeiDou είναι ανεξάρτητα συστήματα, το σύστημα χρόνου και συντεταγμένων τους διαφέρει. Τα τέσσερα συστήματα χρόνου βασίζονται στο UTC, και τα τέσσερα συστήματα συντεταγμένων είναι όλα καρτεσιανά συστήματα, επομένως η σχέση μπορεί να προσδιοριστεί και κάθε σύστημα μπορεί να μετατραπεί από το ένα στο άλλο. Η προέλευση των συντεταγμένων GPS και GLONASS έχουν διαφορά μέτρων μεταξύ τους. Η προέλευση των συντεταγμένων GPS και Galileo έχει διαφορά λίγων εκατοστών. Οι συντεταγμένες GPS και BeiDou έχουν την ίδια προέλευση. Χρησιμοποιούνται πολλές συχνότητες φορέων σε κάθε σύστημα για την απομάκρυνση των αποτελεσμάτων της ιονόσφαιρας. Οι διαφορές συχνοτήτων στο σύστημα GLONASS και μεταξύ των συστημάτων GPS, GLONASS, Galileo και BeiDou γενικά δεν αποτελούν σοβαρό πρόβλημα αν οι παρατηρούμενες φάσεις του φορέα θεωρούνται αποστάσεις με πολλαπλασιασμό του μήκους κύματος (Hofmann-Wellenhof κ.ά., 1988; Parkinson & Gilbert, 1983). Στο πιο κάτω Πίνακας 1 μπορούμε να δούμε τις συχνότητες όλων των GNSS που έχουμε προαναφέρει.

<b>GNSS System</b>	<b>Frequency band</b>	<b>Frequency (MHz)</b>
<b>GPS</b>	<b>L1/L2/L5</b>	<b>1575.42/1227.60/1176.45</b>
<b>GLONASS</b>	<b>G1/G2/G3</b>	<b>1602 + n*9/16</b> <b>1246 + n*7/16</b> <b>1202.025</b> <b>N = -7 ~ +12</b>
<b>GALILEO</b>	<b>E1/E2a/E5b/E5</b> <b>(E5a + E5b)/E6</b>	<b>1575.42/1176.45/1207.140/1191.795/1278.75</b>
<b>BDS</b>	<b>B1/B2/B3</b>	<b>1561.098/1207.14/1268.52</b>

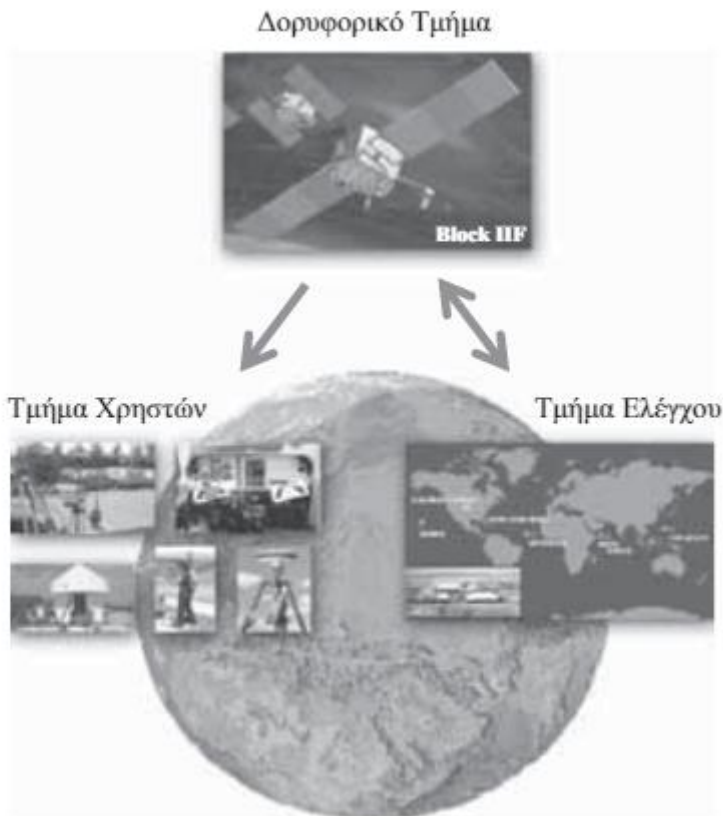
*Πίνακας 1 : Συχνότητες GNSS*

## 3 Η θεωρία του GPS

### 3.1 Τα στοιχεία του συστήματος GPS

Το σύστημα GPS αποτελείται από τρία "τμήματα" που ονομάζονται Τμήμα Ελέγχου, το Διαστημικό Τμήμα και το Τμήμα Χρήστη. Η Αποτελεσματική λειτουργία του καθενός από αυτά τα τρία τμήματα οδηγεί στην ακριβή και αξιόπιστη λειτουργία ολόκληρου του συστήματος όπως φαίνεται και στο πιο κάτω Διάγραμμα 2.

Διάγραμμα 2: Τα μέρη του συστήματος GPS.



Το τμήμα ελέγχου αποτελείται από το κύριο κέντρο ελέγχου που βρίσκεται στην αεροναυτική βάση Falcon Base, κοντά στο Colorado Springs, Κολοράντο, στις ΗΠΑ και άλλοι αρκετοί σταθμοί παρακολούθησης και ελέγχου που βρίσκονται σε όλο τον κόσμο. Αυτοί οι σταθμοί παρακολουθούν τους δορυφόρους, αναφέρουν τα αποτελέσματα πίσω στο κεντρικό κέντρο ελέγχου και αναμεταδίδουν τα σήματα ελέγχου που δημιουργούνται στο Κολοράντο πίσω στους δορυφόρους. Οι σταθμοί ελέγχου είναι οι μόνοι που μεταδίδουν στους δορυφόρους. Οι πληροφορίες που στέλνουν στους δορυφόρους παρέχουν την τοποθέτηση των δορυφόρων σε τροχιά, παρέχουν δεδομένα για την μετάδοση των μηνυμάτων πλοήγησης των δορυφόρων και γενικά παρέχουν έλεγχο των δορυφορικών λειτουργιών. Μέρος των δεδομένων της δορυφορικής μετάδοσης περιλαμβάνει και μια αναφορά της κατάσταση υγείας του



δορυφόρου. Το Τμήμα Ελέγχου είναι υπεύθυνο για την ανίχνευση δορυφόρων που δεν μεταδίδουν σωστά ή δεν βρίσκονται στην κατάλληλη τροχιά και διατάσσουν τους δορυφόρους να αναγνωριστούν ως σε κατάσταση ανθυγιεινές ‘‘Unhealthy’’ όταν το δικαιολογούν οι περιστάσεις. Αυτό επιτρέπει στο Τμήμα Ελέγχου να κρατήσει τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη χρήση του συστήματος με συνέπεια να είναι εντός των προδιαγραφών λειτουργίας. (Xu, & Xu, 2016)

Το Διαστημικό Τμήμα αποτελείται από έναν αστερισμό δορυφόρων σε τροχιά περίπου 20.000 χλμ. (Περίπου 12.500 μίλια) πάνω από τη Γη. Ο πλήρης αστερισμός αποτελείται από 24 - 32 δορυφόρους, αλλά ενδέχεται να υπάρχουν περισσότεροι ή λιγότεροι ενεργοί σε οποιαδήποτε στιγμή. Οι δορυφόροι είναι διατεταγμένοι σε 6 ξεχωριστές τροχιές, καθένας με κλίση περίπου 55 ° σε σχέση με τον ισημερινό, και 4<sup>ης</sup> υποδοχές ανά τροχιά που ορίζονται για τη συγκράτηση δορυφόρων. Η τροχιά διασχίζεται σε περίπου 12 ώρες. Με έναν πλήρη αστερισμό, οι δέκτες που βρίσκονται στα περισσότερα σημεία της Γης μπορούν να δουν τουλάχιστον 6, και μερικές φορές έως και 12 από τους δορυφόρους ανά πάσα στιγμή.

Το Τμήμα Χρηστών είναι ο όρος που δίνεται σε όλους τους δέκτες που ακούν τους δορυφόρους ανά πάσα στιγμή. Δεν υπάρχει κάποια σχετική τάξη ή οργάνωση στο Τμήμα Χρήστη, αλλά για οποιονδήποτε χρήστη, αποτελείται από τον υπό χρήση δέκτη και τη σχετική κεραία. Οι δέκτες χρηστών είναι παθητικοί και πρέπει να ακούνε μόνο το Τμήμα Διαστήματος και να μην μεταδίδουν τίποτα, καθιστώντας έτσι το σύστημα προσβάσιμο σε οποιονδήποτε αριθμό χρηστών ταυτόχρονα, χωρίς οι χρήστες να αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Ενώ και τα τρία τμήματα λειτουργούν ταυτόχρονα, ο τυπικός χρήστης αγώνα το Τμήμα Ελέγχου και αλληλοεπιδρά μόνο με τον εαυτό του, με τη λειτουργία του δικού του δέκτη και των δορυφόρων που είναι ορατά στην τοποθεσία του κατά τη διάρκεια χρήσης του. Περαιτέρω, οι περιορισμοί σε μεμονωμένους δέκτες μπορεί να κάνουν τον χρήστη να γνωρίζει μόνο μερικούς από τους δορυφόρους που είναι ορατοί στην τοποθεσία του, δεδομένου ότι ο δέκτης μπορεί να επιλέξει μόνο μερικούς από αυτούς να παρακολουθεί (Xu, & Xu, 2016).

### **3.2 Αρχές Λειτουργίας**

Οι δορυφόροι που βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τη Γη, μεταδίδουν απλώς τη θέση τους και την τρέχουσα ώρα. Οι δέκτες βλέπουν πολλούς δορυφόρους και από τις μεταδόσεις καθορίζεται η ώρα και η θέση εντοπισμού των δεκτών. Οι αρχές, φυσικά, απαιτούν πολύ περισσότερες λεπτομέρειες, αλλά αυτή είναι η ουσία.

Κάθε δορυφόρος εκπέμπει δύο σήματα που αποτελούνται από κύματα φορέα που υφίστανται μεταβολές φάσης που συμβαίνουν σε καθορισμένο μοτίβο με πολύ ακριβείς ρυθμούς και σε ακριβείς χρονικές στιγμές. Ένας δέκτης παράγει ένα αντίγραφο του μοτίβου αλλαγής φάσης και το μετακινεί προς τα εμπρός και προς τα πίσω, προσπαθώντας να το συσχετίσει με τα σήματα που λαμβάνει. Εάν ληφθεί το σήμα με το οποίο προσπαθεί να συσχετιστεί, σε κάποιο σημείο το λαμβανόμενο μοτίβο και το εσωτερικό μοτίβο θα ταιριάξουν. Το κύκλωμα του συσχετιστή θα παράγει τότε μια μεγάλη έξοδο. Αυτή η αντιστοίχιση προτύπου και η συσχετισμένη έξοδος αποτελούν κλειδίωμα σε δορυφόρο και παρέχει μια γεννήτρια μοτίβων στον δέκτη που λειτουργεί ακριβώς σε βήμα με το

λαμβανόμενο σήμα. Η γνώση του πόσο αυτή η γεννήτρια μετατοπίστηκε με το χρόνο λείει στον δέκτη, το πότε το σήμα έφτασε στον δέκτη σε σχέση με το δικό του εσωτερικό ρολόι. Εάν ο δέκτης μπορέσει να καθορίσει το τρόπο οπού ρυθμίστηκε το ρολόι του σε σχέση με την πραγματική ώρα GPS, τότε θα ξέρει ακριβώς το πόσο χρόνο πήρε το σήμα από το δορυφόρο για να φτάσει στον δέκτη. Όταν ο δέκτης πολλαπλασιάζει τον χρόνο με την ταχύτητα του φωτός, ξέρει πόσο μακριά είναι από τον δορυφόρο (Carter, 1997).

Εκτός από τη μετάδοση ενός συγκεκριμένου προτύπου αλλαγής φάσης που είναι μοναδικό για κάθε δορυφόρο, επιπλέον δεδομένα προστίθενται επίσης στο σήμα. Αυτά τα δεδομένα περιλαμβάνουν το μήνυμα πλοήγησης. Περιλαμβάνει τον τρέχοντα χρόνο στο πλησιέστερο δευτερόλεπτο και τις πληροφορίες που απαιτούνται για τον υπολογισμό της θέσης του δορυφόρου κατά τη στιγμή της μετάδοσης. Χρησιμοποιώντας αυτές τις πληροφορίες, ο δέκτης μπορεί να ρυθμίσει το ρολόι του στο σωστό δευτερόλεπτο και να υπολογίσει την τρέχουσα θέση του δορυφόρου. Τώρα ο δέκτης γνωρίζει πόσο μακριά είναι από τον δορυφόρο και πού βρίσκεται ο δορυφόρος. Χρησιμοποιώντας απλή γεωμετρία, ο δέκτης ξέρει τώρα ότι είναι κάπου στην επιφάνεια μιας σφαίρας κεντραρισμένης σε αυτόν τον δορυφόρο με ακτίνα ίση με την απόσταση του από τον δορυφόρο (Carter, 1997).

Διάφοροι δορυφόροι μεταδίδουν τα πρότυπά τους - το καθένα μοναδικό - τα οποία φτάνουν στην κεραία ενός δέκτη. Κάθε μοτίβο φθάνει σε διαφορετικό χρόνο που καθορίζεται από τη σχετική απόσταση μεταξύ του δέκτη και του δορυφόρου που στέλνει το μοτίβο. Ο δέκτης αναζητά συγκεκριμένους δορυφόρους δημιουργώντας και μετατοπίζοντας το πρότυπο για κάθε δορυφόρο που μπορεί να μεταδίδει. Μόλις βρεθούν τα ζευγάρια, ο δέκτης μπορεί να υπολογίσει την απόσταση, που ονομάζεται ψευδοαπόσταση (pseudorange), σε κάθε δορυφόρο. Εάν το ρολόι του δέκτη συντονίζεται ακριβώς με το χρόνο GPS, ο δέκτης θα μπορούσε να υπολογίσει αμέσως τη θέση του χρησιμοποιώντας απλή άλγεβρα (Carter, 1997).

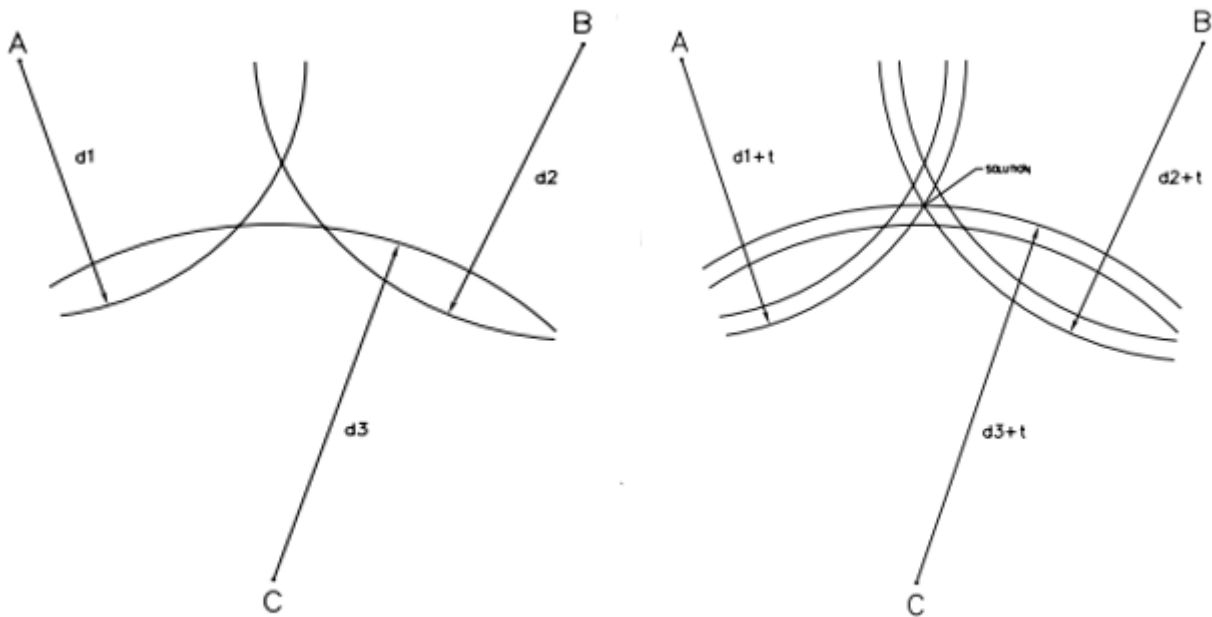
Δυστυχώς, το ρολόι του δέκτη συνήθως δεν ρυθμίζεται ακριβώς σε χρόνο GPS. Έτσι, η ψευδοαπόσταση αποτελείται όχι μόνο από το χρόνο που πήρε το σήμα για να ταξιδέψει στον δέκτη, αλλά και από ένα αντιπροσωπευτικό ποσό του πόσο μακριά διαφέρει το ρολόι του δέκτη και ο χρόνος GPS. Αυτό ονομάζεται μετατόπιση ρολογιού και αντιπροσωπεύει ένα τέταρτο άγνωστο (εκτός από τη θέση x, y και z του δέκτη). Η μετατόπιση ρολογιού μπορεί να είναι θετική ή αρνητική, καθώς το ρολόι του δέκτη μπορεί να είναι είτε μπροστά είτε πίσω από το χρόνο GPS. Η ψευδοαπόσταση μετράτε σε μονάδες χρόνου. Επειδή γνωρίζουμε ότι το σήμα ταξίδεψε στον δέκτη με την ταχύτητα του φωτός (περίπου 300.000.000 μέτρα ανά δευτερόλεπτο), μπορούμε να το μετατρέψουμε σε απόσταση απλά πολλαπλασιάζοντας τον με αυτόν τον αριθμό. Παρομοίως, η μετατόπιση ρολογιού μετριέται σε μονάδες χρόνου και μπορεί επίσης να μετατραπεί σε απόσταση. Αυτή η απόσταση ή χρονικό σφάλμα είναι κοινό σε όλες τις ψευδοαποστάσεις, αφού ο δέκτης χρησιμοποιεί το ίδιο ρολόι για να μετρήσει όλες τις ψευδοαποστάσεις (Carter, 1997).

Όταν ένας δέκτης κλειδώσει έναν δορυφόρο, ο δέκτης παρακολουθεί το μήνυμα πλοήγησης από τον δορυφόρο. Μέρος των δεδομένων που περιέχονται στο μήνυμα πλοήγησης είναι η τρέχουσα ώρα GPS, εκφρασμένη σε δευτερόλεπτα. Η ώρα GPS είναι ο αριθμός των δευτερολέπτων από τα μεσάνυχτα μεταξύ 5 και 6 Ιανουαρίου 1980.

Έτσι, ο δέκτης είναι σε θέση να ρυθμίσει τη δική του ένδειξη χρόνου στο ακριβές ολόκληρο δευτερόλεπτο (ο δέκτης υπολογίζει τα κλάσματα ενός δευτερολέπτου αργότερα). Ένα άλλο μέρος του μηνύματος πλοήγησης είναι ένα σύνολο αριθμών που ονομάζονται εφημερίδα, που μαζί περιγράφουν την τροχιά του δορυφόρου στο διάστημα και το που ο δορυφόρος βρίσκεται σε αυτή την τροχιά σε εκείνη τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Ο δέκτης υπολογίζει την ακριβή θέση του δορυφόρου στο διάστημα από την εφημερίδα και την τρέχουσα ώρα. Το αποτέλεσμα είναι ένα σύνολο  $x$ ,  $y$  και  $z$  συντεταγμένων του δορυφόρου οπου ήταν όταν το σήμα μεταδόθηκε. Αυτές οι τιμές δείχνουν τη θέση του δορυφόρου σε σχέση με ένα σύστημα συντεταγμένων που καθορίζεται από το Παγκόσμιο Γεωδαιτικό Σύστημα 1984 (που αναφέρεται ως WGS84). Η προέλευση αυτού του συστήματος συντεταγμένων είναι κοντά στο κέντρο μαζών της Γης και ο άξονάς του  $z$  αντιστοιχεί στον μέσο άξονα περιστροφής της Γης. Το  $Z$  είναι προς το βόρειο πόλο. Το  $X$  αναδύεται από τη Γη στον μεσημβρινό του Γκρήνουιτς προς στον ισημερινό (νότια της Γκάνας και δυτικά της Γκαμπόν, στον Ατλαντικό Ωκεανό). Ο άξονας  $Y$  αναδύεται στον ισημερινό στον  $90^\circ$  ανατολικό μεσημβρινό (σε ένα σημείο στον Ινδικό Ωκεανό νοτιοανατολικά της Σρι Λάνκα και δυτικά της Σουμάτρα), ορίζοντας έτσι ένα δεξιό σύστημα συντεταγμένων (Carter, 1997).

Σε αυτό το σημείο ο δέκτης έχει τη θέση κάθε δορυφόρου, και την ψευδοαποσταση στον δορυφόρο. Χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα μαθηματικά ο δέκτης υπολογίζει τη θέση του ( $x$ ,  $y$  και  $z$ ) και την μετατόπιση ρολογιού ( $\Delta t$ ). Για να κατανοήσουμε πώς λειτουργεί αυτό, ας το εξετάσουμε γραφικά. Για να γίνει ευκολότερη η απεικόνιση, θα χρησιμοποιήσουμε μια λύση δύο διαστάσεων. Η τρισδιάστατη λύση λειτουργεί ακριβώς το ίδιο, αλλά με τον επιπρόσθετο παράγοντα  $z$ . Τα σημεία A, B και C είναι οι θέσεις των τριών δορυφόρων στον  $x$ ,  $y$  συντεταγμένο χώρο του διαγράμματος. Οι ακτίνες  $d_1$ ,  $d_2$  και  $d_3$  αντιπροσωπεύουν τις ψευδο-οριζόντιες αποστάσεις που μετρούνται από κάθε δορυφόρο (εδώ φαίνεται στη μορφή απόστασης). Έτσι, θα ορίσουμε τη θέση μας ως τοποθετημένη στη διασταύρωση (σημείο που τέμνονται) των τριών κύκλων που επικεντρώνονται σε κάθε δορυφόρο με ακτίνα ίση με τις αντίστοιχες ψευδοαποστάσεις. Αλλά οι τρεις κύκλοι δεν συναντώνται σε κάποιο σημείο. Διασταυρώνονται για να σχηματίσουν ένα τρίγωνο με τόξα για πλευρές (σε ορισμένες περιπτώσεις, θα μπορούσαν ακόμη να χάσουν ο ένας τον άλλον εντελώς) όπως φαίνεται στο πιο κάτω Διάγραμμα 3 (Carter, 1997).

Διάγραμμα 3 : Τρισδιάστατη λύση



Σε αυτή την περίπτωση προστέθηκε μια μικρή ποσότητα,  $t$ , σε κάθε ψευδοαπόσταση. Το αποτέλεσμα είναι η προσαρμογή κάθε ψευδοαπόστασης κατά το ίδιο ποσό  $t$ , προκαλώντας την τομή των κύκλων σε ένα σημείο. Οι συντεταγμένες αυτού του σημείου αντιπροσωπεύουν τη θέση και το  $t$  αντιπροσωπεύει την αντιστάθμιση του ρολογιού. Ως αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, γνωρίζουμε όχι μόνο τη θέση μας, αλλά γνωρίζουμε επίσης το σωστό χρόνο (κλάσματα του δευτερολέπτου) στο πλαίσιο της ανάλυσης του μετατοπισμένου κώδικα. Η χρονική ανάλυση είναι συνήθως σε κλάσματα μικροδευτερολέπτων, με αποτέλεσμα τον προσδιορισμό του χρόνου που είναι ακριβέστερος από οποιαδήποτε άλλη γενικά διαθέσιμη μέθοδο. Στην πραγματικότητα, οι δέκτες GPS που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για την προσαρμογή των ατομικών ρολογιών και αποδίδουν χρονικούς προσδιορισμούς που ταιριάζουν με το UTC σε 10 nanoseconds (Carter, 1997).

### 3.3 Το Σήμα GPS

Όλοι οι δορυφόροι GPS εκπέμπουν στις ίδιες δύο συχνότητες. Το πρωτεύον σήμα μεταδίδεται σε αυτό που αναφέρεται ως συχνότητα L1, το οποίο είναι 1,575,42 MHz. Τα σήματα μεταδίδονται με τη χρήση τεχνικών ευρέος - φάσματος, οι οποίες επιτρέπουν την ύπαρξη πολλών σημάτων για να συνυπάρχουν στην ίδια συχνότητα και για τους δέκτες να ανιχνεύουν και να διαχωρίζουν τα διαφορετικά σήματα μεταξύ τους. Το σήμα L1 ρυθμίζεται με δύο σήματα πληροφοριών που ονομάζονται C / A και P. Επιπλέον, οι δορυφόροι μεταδίδουν επίσης ένα αντίγραφο του κωδικού P στη δεύτερη συχνότητα που ονομάζεται L2, η οποία είναι 1.227,60 MHz. Οι μεταγενέστεροι δορυφόροι μπορούν να προσθέσουν πρόσθετους κωδικούς στο L1 ή / και L2 και μπορεί επίσης να προσθέσουν επιπλέον

συχνότητες (Carter, 1997).

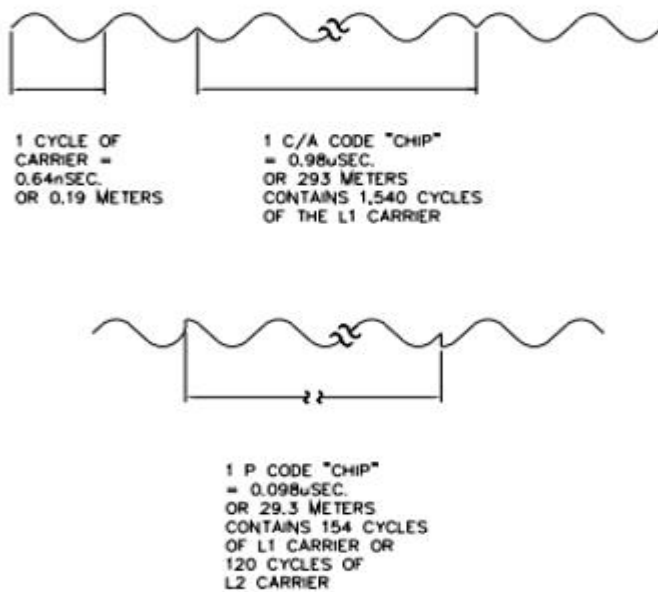
Η διαμόρφωση του φάσματος διάδοσης βασικά συνίσταται στο ότι το φέρον σήμα είναι επανειλημμένα ανεστραμμένο, δηλαδή έχει τη φάση του μετατοπισμένη κατά  $180^\circ$ , σε ένα συγκεκριμένο σχέδιο. Το πρότυπο κώδικα C/A παράγεται από μια γεννήτρια σημάτων υλικού που αποτελείται από ένα ζεύγος καταχωρήσεων μετατόπισης 10bit με συνδέσεις ανατροφοδότησης σε αυτές, των οποίων οι έξοδοι συνδυάζονται από μια αποκλειστική πύλη. Η ψηφιακή ακολουθία που προκύπτει αναφέρεται ως ψευδο-τυχαίος αριθμός, ή, ακολουθία PRNu. Η γεννήτρια παράγει ένα μοτίβο μήκους ακριβώς 1.023 bits, το οποίο στη συνέχεια επαναλαμβάνεται. Με την εκκίνηση τόσο των καταχωρήσεων ολίσθησης σε ένα καθορισμένο σημείο εκκίνησης όσο και με το συνδυασμό των εξόδων που προκύπτουν με μια μετατόπιση φάσης μεταξύ τους (δηλαδή η έξοδος ενός καταχωρητή καθυστερεί με κάποιο αριθμό δυαδικών ψηφίων από την έξοδο του άλλου) μπορούν να δημιουργηθούν κωδικοί. Το σύστημα GPS καθορίζει 36 συγκεκριμένες μετατοπίσεις φάσης, οι οποίες θα οδηγήσουν σε 36 μοναδικούς κωδικούς (καλούμενους χρυσούς κωδικούς που θα μπορούσαν να μεταδοθούν από δορυφόρους. Δεδομένου ότι ο δορυφορικός αριθμός αντιπροσωπεύεται στο μήνυμα πλοήγησης μόνο από 5 bits δεδομένων, χρησιμοποιούνται μόνο 32 από αυτούς τους 36 κωδικούς. Τα υπόλοιπα προορίζονται για άλλες χρήσεις, όπως πομποί εδάφους. Ο ρυθμός δυαδικών ψηφίων της γεννήτριας που χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση του φορέα αναφέρεται ως ρυθμός "Chirping" και κάθε bit αναφέρεται ως "τσιπ". Για τους δορυφόρους GPS, η ταχύτητα αποκοπής του κώδικα C/A είναι 1.023 MHz. Δεδομένου ότι ο κώδικας είναι 1.023 bit πολύ πριν επαναληφθεί, ο κώδικας επαναλαμβάνεται κάθε 1msec (Carter, 1997).

Για να ληφθεί ένα σήμα εξάπλωσης φάσματος, ο δέκτης πρέπει να γνωρίζει την επιθυμητή ακολουθία PRN. Δημιουργεί το δικό του αντίγραφο της ακολουθίας και το εφαρμόζει στην έξοδο ενός μετατροπέα και ενός ανιχνευτή. Ο δέκτης τότε μετατοπίζει το πρότυπο με την πάροδο του χρόνου αναζητώντας ένα ζεύγος με αυτό που φαίνεται να είναι θόρυβος που προέρχεται από τον ανιχνευτή. Το ζευγάρι γίνεται σε ένα κύκλωμα που ονομάζεται συσχετιστής, το οποίο παράγει μια έξοδο που αντιστοιχεί στον βαθμό αντιστοιχίας μεταξύ των δύο σημάτων. Όταν ο κωδικός του δέκτη ταιριάζει με το λαμβανόμενο σήμα, υπάρχει μεγάλη αύξηση στο μέγεθος της εξόδου του συσχετιστή. Για να αναζητηθεί ένας πομπό, ο δέκτης προσαρμόζει πρώτα το εσωτερικά δημιουργούμενο μοτίβο στο χρόνο, chip-by-chip, έως ότου εμφανιστεί μια ένδειξη αντιστοιχίας, και στη συνέχεια μετατοπίζει το μοτίβο ανά κλάσματα ενός τσιπ μέχρις ότου μεγιστοποιηθεί η απόδοση του συσχετιστή. Σε αυτό το σημείο η εσωτερική γεννήτρια μοτίβων παράγει έναν κωδικό σε ακριβή βήμα με το λαμβανόμενο σήμα (Carter, 1997).

Για μεγαλύτερη ακρίβεια στον προσδιορισμό του χρόνου που χρειάζεται ένα σήμα για να ταξιδέψει στον δέκτη, παράγεται και μεταδίδεται ένα δεύτερο σήμα με την ίδια συχνότητα. Αυτός ο δεύτερος φορέας είναι  $90^\circ$  μπροστά από τον φορέα με τον κώδικα C/A, αλλά έχει μικρότερο πλάτος. Είναι διαμορφωμένος με μια ακολουθία PRN που ονομάζεται P κώδικας ο οποίος έχει ρυθμό αποκοπής 10,23 MHz, οπότε είναι 10 φορές ο ρυθμός και, συνεπώς, η ακρίβεια του κωδικού C/A. Επιπλέον, η ακολουθία του κώδικα P είναι πολύ μεγαλύτερη από τον κώδικα C / A – και δεν επαναλαμβάνεται σε μια ολόκληρη εβδομάδα. Αυτό καθιστά πιο δύσκολο να αποκτηθεί χωρίς πρώτα να αποκτηθεί η αρχική ρύθμιση χρόνου που παρέχεται από τον κωδικό C / A (στην πραγματικότητα, αυτός είναι ο λόγος

για τον οποίο ο κωδικός C / A έχει τον όρο "απόκτηση" στο όνομά του). Ένα χαρακτηριστικό που ονομάζεται Anti-Spoofing (A-S) μπορεί να ενεργοποιηθεί από το US DoD για να αποφευχθεί η εκ προθέσεως εξαπάτηση των δεκτών με τη χρήση ενός ψεύτικου ή "spoofing" πομπού. Το αποτέλεσμα της ενεργοποίησης του A-S είναι ότι ο κώδικας P κρύβεται από ένα σχήμα κρυπτογράφησης. Ο κωδικός P που είναι έτσι κρυπτογραφημένος καλείται κώδικας Y. (Carter, 1997)

Διάγραμμα 4: Κώδικας C / A και ο Κώδικας P



Το Διάγραμμα 4 δείχνει πώς ο κώδικας C / A και ο κώδικας P (ή P(Y)) τροποποιούν το ημιτονοειδές κύμα του φορέα. Ενώ ο φορέας του κώδικα P επίσης μετατοπίζεται κατά φάση 180 ° με το μοτίβο των δυαδικών ψηφίων του, καθώς είναι μικρότερο σε πλάτος από τον φορέα κώδικα C / A και 90 ° εκτός φάσης μαζί του, το αποτέλεσμα του συνδυασμού των δύο φορέων είναι για το σήμα έξοδου από τους δορυφόρους να φαίνεται ότι μετατοπίζονται κατά περίπου 70 ° όταν αλλάζουν τα bits κώδικα P (Carter, 1997).

Τα δεδομένα που αποστέλλονται στον φορέα αντιπροσωπεύονται είτε με αναστροφή είτε με την αναστροφή του κώδικα PRN, έτσι ώστε στον δέκτη ο συσχετιστής θα δημιουργήσει είτε θετική είτε αρνητική παραγωγή συσχέτισης. Ο ρυθμός δεδομένων είναι

συνήθως πολύ πιο αργός από τον ρυθμό αποκοπής, έτσι ώστε να μην παρεμβαίνει στην ολοκλήρωση που γίνεται ως μέρος της διαδικασίας συσχέτισης. Τα δεδομένα σχετικά με τα σήματα GPS, που ονομάζονται μηνύματα πλοήγησης, ρυθμίζονται με ονομαστική συχνότητα 50 bits ανά δευτερόλεπτο. (Carter, 1997).

Κάθε δορυφόρος περιέχει πολλά ατομικά ρολόγια, και τα σήματα φορέα και διαμόρφωσης συγχρονίζονται ακριβώς με τα ρολόγια. Έτσι, ακριβώς στην αρχή του δευτερολέπτου όπως ορίζεται από τον κύριο χρονισμό GPS, το σήμα κάθε δορυφόρου διασχίζει το μηδέν ή διέρχεται ένα ακέραιο πολλαπλάσιο μιας από τις αλλαγές φάσης, και η διαμόρφωσή της (και οι δύο κωδικοί C / A και P) είναι επίσης αρχικά bits. Στην πραγματικότητα, οι συχνότητες L1 και L2 έχουν επιλεγεί έτσι ώστε να σχετίζονται μεταξύ τους και με τους συντελεστές απόσπασης με συνεκτικό τρόπο. Ο βασικός χρονισμός παρέχεται από τη συχνότητα 10,23 MHz του κωδικού P. Το L1 είναι ακριβώς 154 φορές μεγαλύτερο από αυτή τη συχνότητα και το L2 είναι ακριβώς 120 φορές μεγαλύτερο από αυτή τη συχνότητα, οπότε ένα ενιαίο τσιπ P αποτελείται από 154 κύκλους του φορέα L1 ή 120 του φορέα L2. Ο ρυθμός τσιπ C / A αποτελείται από 10 τσιπ P και ο πραγματικός ρυθμός δεδομένων των μηνυμάτων πλοήγησης ορίζεται ακριβώς ως 20 αντίγραφα του μοτίβου C / A 1023-bit. Έτσι, ένας δορυφόρος που λειτουργεί σωστά έχει όλα τα στοιχεία του σήματος κλειδωμένα σε μία συχνότητα αναφοράς, και η φάση του φορέα, η φάση των τσιπ και τα δεδομένα ευθυγραμμίζονται

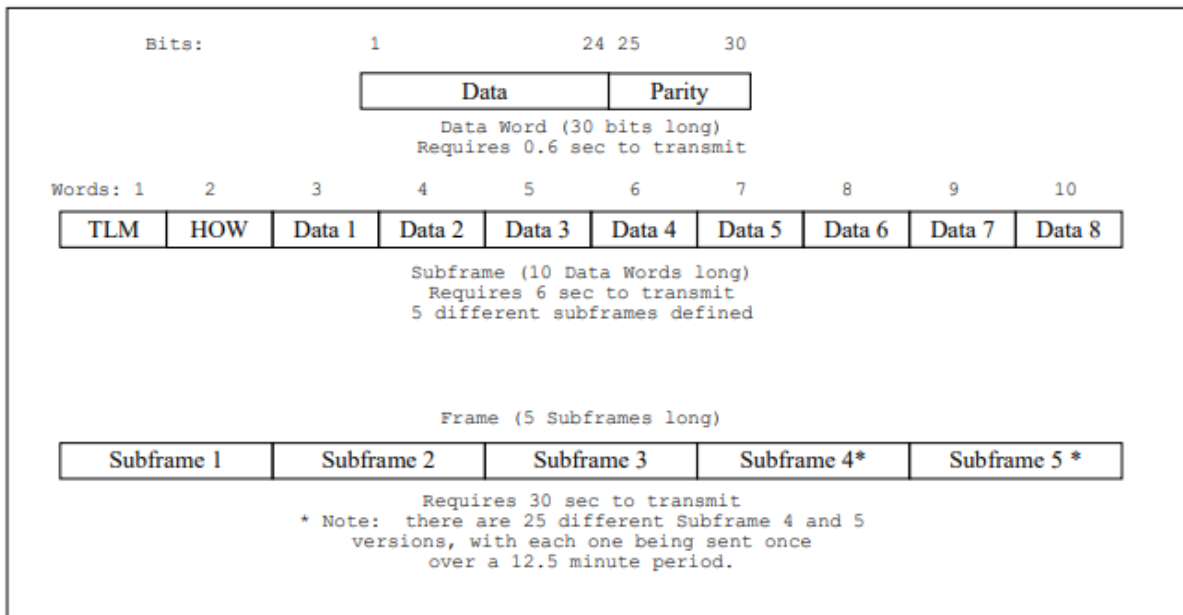
με μεταβάσεις που συμβαίνουν σε  $0^\circ$  όριων των μη διαμορφωμένων φορέων.

Η συνοχή του μεταδιδόμενου σήματος παρέχει μια άλλη μέθοδο για τον προσδιορισμό της ψευδοαπόστασης, αυτό αναφέρεται ως φάση φορέα. Μόλις ο δέκτης καθορίσει τη δική του αντιστοίχιση ρολογιού, μπορεί να καθορίσει την πραγματική έναρξη του δευτερολέπτου. Το λαμβανόμενο σήμα θα διαφέρει από αυτό το χρονικό σημείο, από κάποιο ολοκληρωμένο αριθμό κύκλων μεταφοράς, συν ένα κλασματικό τμήμα ενός κύκλου. Όπως και με τον κώδικα C / A, αυτή η μετατόπιση οφείλεται στο χρόνο που χρειάζεται το σήμα για να ταξιδέψει από τον δορυφόρο στον δέκτη. Ο κλασματικός κύκλος μπορεί συνήθως να προσδιοριστεί σε περίπου 1/1000 (Ένα χιλιοστό) χρησιμοποιώντας την τρέχουσα τεχνολογία. Ο ακέραιος αριθμός κύκλων, ωστόσο, υπόκειται σε κάποια ασάφεια, αλλά μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας μια διαδικασία που ονομάζεται ανάλυση αμφιβολίας (Carter, 1997). Δεδομένου ότι το μήκος κύματος του φορέα είναι περίπου 0,19 μέτρα, η επίλυση αυτού στο 0,1% (ένα χιλιοστό) αποδίδει μια μετρήσιμη ψευδοαπόσταση που έχει ένα ψήφισμα περίπου 0,2 mm. Το μήκος τσιπ κώδικα P (το ισοδύναμο μήκους κύματος) είναι περίπου 29 μέτρα και το μήκος του τσιπ κώδικα C / A είναι περίπου 290 μέτρα. Υποθέτοντας την ίδια ανάλυση 0,1% σε αυτά όπως ήταν στα κύματα φορέα, αυτό σημαίνει ανάλυση 2,9 cm για τον κώδικα P και 29 cm για τον κώδικα C/A (Carter, 1997).

### 3.4 Το Μήνυμα Πλοήγησης

Τα δεδομένα που διαμορφώνονται στους κωδικούς C/A και P αποτελούνται από διάφορους τύπους πληροφοριών. Τα δεδομένα συσκευάζονται σε λέξεις 30-bit που αποτελούνται από 24 bit δεδομένων και 6 δυαδικά ψηφία. Οι λέξεις ομαδοποιούνται σε ομάδες των 10 που ονομάζονται υποπλαίσιο. Κάθε υποπλαίσιο έχει μήκος 300 bits, εκ των οποίων τα 240 bits είναι δεδομένα και τα 60 bits είναι ισότιμα. Τα υποπλαίσια χρειάζονται 6 δευτερόλεπτα για μετάδοση στα 50 bps. Υπάρχουν 5 υποπλαίσια που ορίζονται, αριθμημένα από 1 έως 5. Ο δορυφόρος μεταδίδει ένα σύνολο από τα 5 υποπλαίσια μέσα σε 30 δευτερόλεπτα και στη συνέχεια αρχίζει να μεταδίδει ένα άλλο σετ. Το περιεχόμενο των υποπλαίσιαων αλλάζει με την πάροδο του χρόνου, όπως σημειώνεται στο Διάγραμμα 5 παρακάτω.

Διάγραμμα 5: Απεικονίζει το μήνυμα πλοήγησης και τα στοιχεία του.



Κάθε υπό πλαίσιο ξεκινά με ένα ζευγάρι δεδομένων που ονομάζονται Τηλεμετρία 'Telemetry' (TLM) και το μεταβίβαση 'Handover' (HOW). Το TLM παρέχει ένα τυπικό προοίμιο πρότυπο bit το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση της έναρξης ενός υποπλαισίου, καθώς και ανίχνευσης πληροφοριών διοικητικής κατάστασης, όπως η κατάσταση μεταφόρτωσης δεδομένων. Το HOW περιέχει τον χρόνο του συστήματος GPS που αντιστοιχεί στην εκκίνηση του επόμενου υποπλαισίου καθώς και των προσδιορισμό του αριθμού υποπλαισίου που είναι αυτό. Το TLM και το HOW μαζί παίρνουν τις πρώτες δύο λέξεις κάθε υπό πλαισίου (Carter, 1997).

Το υπό πλαίσιο 1 περιέχει πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό ενός διορθωτικού όρου για το ρολόι του δορυφόρου. Ακόμα κι αν οι δορυφόροι έχουν πολλαπλά ατομικά ρολόγια πάνω τους, τα ρολόγια μετατοπίζονται. Αυτή η μετατόπιση παρακολουθείται από τους σταθμούς του τμήματος ελέγχου και γίνεται μια προσαρμογή καμπύλης δεύτερης τάξης (Carter, 1997). Οι συντελεστές της έκφρασης που περιγράφει αυτή την καμπύλη αναφέρονται στο υπό πλαίσιο 1 έτσι ώστε οι χρήστες να μπορούν να υπολογίσουν το τρέχον μοντέλο ρολογιού και να βελτιώσουν έτσι τη δική τους πλοήγηση.

Τα υπό πλαίσια 2 και 3 περιέχουν τα δεδομένα της εφημερίδας για τον δορυφόρο. Η εφημερίδα παρουσιάζεται σε μια μορφή που ονομάζεται "Keplerian elements" συν όρους κοσμικής μετατόπισης και αρμονικούς συντελεστές. Με αυτές τις παραμέτρους, ο χρήστης είναι σε θέση να υπολογίσει με ακρίβεια τη θέση του δορυφόρου σε συγκεκριμένο χρόνο σε σφάλμα μικρότερο από 0,3 μέτρα. Τα δεδομένα ενημερώνονται περίπου μία φορά την ώρα (μία φορά κάθε 2 ώρες για τους νεότερους δορυφόρους), με τα δεδομένα των εφημερίδων να είναι γνωστό ότι ισχύουν για περίπου τέσσερις ώρες. (Carter, 1997)

Τα υπό πλαίσια 4 και 5 χρησιμοποιούνται με διαφορετικό τρόπο από τα υπό πλαίσια 1-3. Μεταξύ άλλων δεδομένων, περιέχουν και αυτά που ονομάζονται δεδομένα almanac. Τα δεδομένα Almanac αποτελούνται από ένα



ανολοκλήρωτο σύνολο δεδομένων εφημερίδας, έτσι ώστε να ταιριάζει σε ένα μόνο υποπλαίσιο, με αντίστοιχο τίμημα την μείωση της ακρίβειας. Σε αντίθεση με τα άλλα υπό πλαίσια που επαναλαμβάνουν ακριβώς τα ίδια δεδομένα για περίπου μία ή δύο ώρες, αυτά τα δύο υποπλαίσια αλλάζουν κάθε φορά που αποστέλλονται. Και αντί να στέλνουν δεδομένα μόνο για το δορυφόρο που μεταδίδει, αυτά περιέχουν δεδομένα για όλους τους δορυφόρους στον αστερισμό. Ο σκοπός των δεδομένων almanac είναι για να επιτρέψουν σε ένα δέκτη να κλειδωθεί σε ένα δορυφόρο για να μάθει για όλους τους άλλους δορυφόρους στον αστερισμό. Το υπό πλαίσιο 5 περιέχει τα almanac των δορυφόρων 1 έως 24 (οι δορυφορικοί αριθμοί αντιστοιχούν στον συγκεκριμένο κώδικα χρυσού PRN τον οποίο ο δορυφόρος χρησιμοποιεί ως σήμα αποκοπής κώδικα C / A όπως περιγράφεται στην ενότητα III). Μετά την αποστολή 24<sup>ov</sup> almanac, το υπό πλαίσιο 5 περιέχει στη συνέχεια μια σελίδα που αναφέρει την υγεία αυτών των 24<sup>ov</sup> δορυφόρων. Αυτό δημιουργεί 25 μοναδικές σελίδες υποπλαίσιων 5, το καθένα στέλνεται μία φορά σε περίοδο 12,5 λεπτών, μετά την οποία επαναλαμβάνεται. Το υπό πλαίσιο 4 περιέχει σελίδες που περιέχουν τα almanac των δορυφόρων 25 έως 32 και μια σελίδα υγείας για τους δορυφόρους αυτούς. Επιπλέον, έχουν οριστεί 16 άλλες σελίδες για το υπό πλαίσιο 4 οι οποίες χρησιμοποιούνται είτε για άλλους σκοπούς είτε προορίζονται για μεταγενέστερες λειτουργίες που μπορούν να προστεθούν στο σύστημα GPS. Αυτό οδηγεί σε 25 μοναδικές σελίδες για το υπό πλαίσιο 4 επίσης. Τα Almanac μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αρκετές ημέρες, ακόμη και για εβδομάδες, καθώς ο σκοπός τους δεν είναι η πλοήγηση, αλλά απλά η εύρεση των δορυφόρων (Carter, 1997).

## 4 Δέκτες GPS

Δέκτης GPS είναι ένα όργανο – συσκευή ανεπτυγμένης τεχνολογίας που μπορεί και ‘συντονίζεται’ πάνω σε δυο βασικές συχνότητες. Ένας δέκτης χωρίζεται σε δυο βασικά μέρη: την κεραία και τον κυρίως δέκτη. Ο κυρίως δέκτης αποτελείται από διάφορα επιμέρους τμήματα όπως, το τμήμα ραδιοσυχνοτήτων, τους δίαυλους – κανάλια παρακολούθησης του δορυφορικού σήματος με τους βρόγχους παρακολούθησης, το μικροεπεξεργαστή, την τροφοδοσία ( παροχή ισχύος ), την μονάδα αποθήκευσης δεδομένων και την μονάδα επικοινωνίας με τον χρήστη (Φωτίου & Πικριδάς, 2012).

### 4.1 Η κεραία του Δεκτή

Η κεραία παίρνει το πολύ εξασθενημένο σήμα από όλους τους ορατούς δορυφόρους, το ενισχύει με τον προ-ενισχυτή και το διοχετεύει εσωτερικά στο δέκτη για περαιτέρω ενίσχυση και επεξεργασία. Η κεραία μετατρέπει την ενέργεια των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε ηλεκτρικό ρεύμα, δηλαδή μετατρέπει τα δορυφορικά ηλεκτρομαγνητικά σήματα σε ηλεκτρικά σήματα. Αν η κεραία είναι εξωτερική συνδέεται με ένα ειδικό καλώδιο με τον κυρίως δέκτη ή χωρίς καλώδιο με ασύρματη επικοινωνία (Φωτίου & Πικριδάς, 2012).

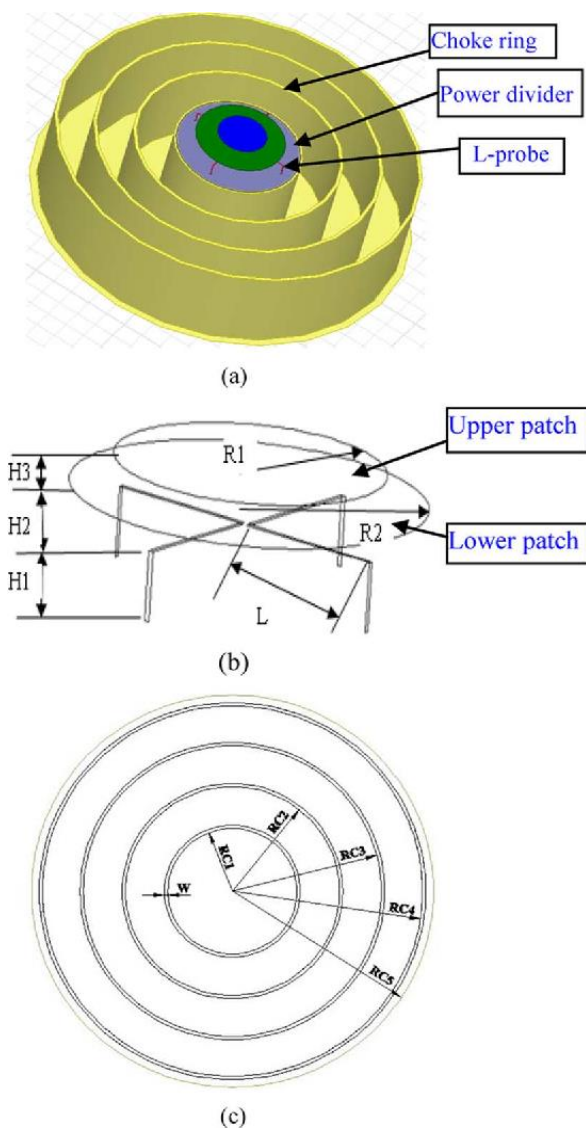
Οι κεραίες είναι μικρών διαστάσεων, μικρού βάρους και συνήθως ικανές για λήψη σημάτων από όλες τις διευθύνσεις. Διακρίνονται σε διάφορους τύπους με πιο διαδεδομένο τον τύπο των ‘μικρολωρίδων’ (microstrip), που έχουν και το πλεονέκτημα καλής λήψης σημάτων από δορυφόρους χαμηλά στον ορίζοντα. Σχεδιάζονται έτσι ώστε να μπορούν να λαμβάνουν είτε το σήμα στην L1 (δέκτες μίας συχνότητας) είτε στην L1 και στην L2 (δέκτες δύο συχνοτήτων). Οι γεωδαιτικοί δέκτες έχουν τη δυνατότητα λήψης και στις δύο συχνότητες (Φωτίου & Πικριδάς, 2012).

Για τη ορθή λήψη των σημάτων οι κεραίες πρέπει να μην επισκιάζονται από γειτονικά αντικείμενα, όπως ψηλά κτίρια, δέντρα κλπ.. Στις περιπτώσεις αυτές δημιουργείτε το φαινόμενο πολλαπλές διαδρομές του σήματος εξαιτίας της ανάκλασής του στις γειτονικές επιφάνειες με αποτέλεσμα τη δημιουργία σημαντικών σφαλμάτων στις παρατηρήσεις (σφάλμα πολυανάκλασης). Το σφάλμα αυτό δύσκολα μπορεί να απαλειφθεί. Η ανάκλαση του δεξιόστροφα κυκλικά πολωμένου δορυφορικού σήματος δημιουργεί σήμα που είναι αριστερόστροφα κυκλικά πολωμένο. Αν ήταν γνωστή η διεύθυνση του ανακλώμενου σήματος θα μπορούσε η κεραία να σχεδιασθεί έτσι ώστε να εμποδίζεται η λήψη του (Φωτίου & Πικριδάς, 2012).

Ιδιαίτερα ανθεκτικές στις πολυανακλάσεις είναι οι κεραίες που συνδυάζονται με μια διάταξη βάσης ‘σπειροειδών δακτυλίων’ (choke ring), διαθέτουν προστατευτικό θόλο (radome), στοιχίζουν πολλαπλάσια από μία κοινή κεραία και χρησιμοποιούνται κυρίως στους μόνιμους σταθμούς. Οι κεραίες τύπου ‘choke ring’ για τους μόνιμους σταθμούς πρέπει να διαθέτουν το διεθνώς αναγνωρισμένο στοιχείο Dorne & Margolin και μοντέλο βαθμονόμησης από κατάλληλους διεθνείς οργανισμούς ή εργαστήρια (Φωτίου & Πικριδάς, 2012).

Αλλα βασικά χαρακτηριστικά μιας κεραίας είναι η ευαισθησία στη λήψη σημάτων διαφορετικής διεύθυνσης και διαφορετικής γωνίας ύψους, καθώς και η σταθερότητα του κέντρου φάσης (APC), δηλαδή του ηλεκτρικού κέντρου αναφοράς των μετρήσεων, τόσο για την L1 όσο και για την L2 συχνότητα. Το ηλεκτρικό με το μηχανικό κέντρο μιας κεραίας δεν ταυτίζονται. Οι πιθανές συστηματικές αποκλίσεις του κέντρου φάσης από το γεωμετρικό ή μηχανικό κέντρο της κεραίας πρέπει να είναι γνωστές στις γεωδαιτικές εφαρμογές υψηλής ακρίβειας. Στην πράξη έχουν παρατηρηθεί αποκλίσεις μέχρι και ένα εκατοστό. Στο **Error! Reference source not found.** φαίνεται η δομή της κεραίας Chock Ring.

Διάγραμμα 6: Chock Ring Antenna



## 5 Σφάλματα GPS

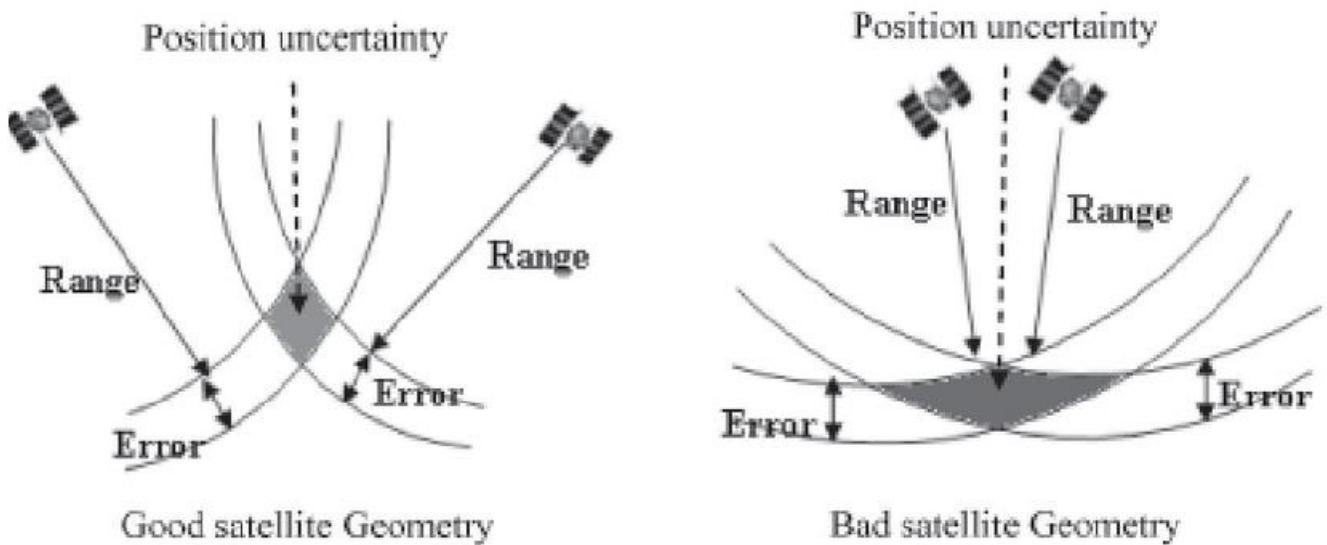
Η διαδικασία μετάδοσης, λήψης και ανίχνευσης του σήματος GPS είναι μια φυσική διαδικασία η οποία, όπως κάθε άλλη φυσική διαδικασία, περιέχει πηγές σφαλμάτων. Μερικά από τα σφάλματα είναι προφανή: το δορυφορικό ρολόι δεν είναι ακριβώς σωστό, ακόμα και όταν χρησιμοποιούνται οι όροι διόρθωσης εκπομπής για την προσαρμογή του. Η θέση του δορυφόρου στο διάστημα δεν είναι κατ'ανάγκη σωστή αφού προσδιορίζεται από τις παρατηρήσεις που έγιναν στο έδαφος και οι τιμές των εφήμερων αποδίδουν μόνο μια λύση με ακρίβεια περίπου 30 cm. Ο δέκτης που υπολογίζει τη δική του θέση μπορεί να επιλύσει μόνο τα λαμβανόμενα σήματα σε κάποια συγκεκριμένη ακρίβεια που καθορίζεται από το μήκος κύματος είτε του φορέα (για τις μετρήσεις της φάσης του φορέα) είτε του μήκους του κώδικα (για την αντιστοίχιση κωδικών) και της ανάλυσης του κώδικα ή φάσης στον δέκτη. Περαιτέρω περιορισμοί συμβαίνουν στον δέκτη με βάση την ακρίβεια των υπολογισμών, όπου οι μαθηματικές διεργασίες μπορούν να περικόψουν ή να στρογγυλοποιήσουν τιμές παρά να τις μεταφέρουν στο τελευταίο δυνατό δεκαδικό ψηφίο τους (Carter, 1997).

Ορισμένες άλλες πηγές σφαλμάτων, εμφανίζονται όταν εξετάζουμε τη φυσική διαδικασία ενός σήματος που ταξιδεύει από το διάστημα στον δέκτη. Για παράδειγμα, το σήμα μεταδίδεται από έναν δορυφόρο που ταξιδεύει με υψηλό ρυθμό ταχύτητας στο διάστημα. Δεδομένου ότι είναι απίθανο ο δέκτης να κινείται στην ίδια κατεύθυνση και ταχύτητα, θα υπάρξει μετατόπιση Doppler του σήματος που επηρεάζει το πραγματικό μήκος κύματος τόσο του κώδικα όσο και των κυμάτων του φορέα. Το σήμα πρέπει να ταξιδέψει μέσα από την ιονόσφαιρα (στρώση της ατμοσφαιράς) που βρίσκεται πάνω από τη Γη, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση του σήματος και την κάμψη της διαδρομής του. Επίσης, ταξιδεύει μέσα και από την τροπόσφαιρα (το χαμηλότερο στρώμα της ατμόσφαιρας όπου συμβαίνουν και η περισσότερες μεταβολές στις καιρικές συνθήκες), το οποίο επίσης επηρεάζει τη διαδρομή και την ταχύτητα του σήματος. Καθώς το σήμα πλησιάζει τον δέκτη, κάποια από αυτά μπορεί να υποστούν αντανάκλαση από το έδαφος, το νερό ή τα κτίρια, κ.λπ. που βρίσκονται κοντά στον δέκτη και φτάνουν στην κεραία αφού ταξιδεύουν σε μεγαλύτερη απόσταση από το σήμα που φτάνει απευθείας από το δορυφόρο (ένα φαινόμενο που ονομάζεται πολλαπλή διαδρομή αλλιώς «Multipath») (Carter, 1997).

Ο δέκτης είναι επίσης επιρρεπής σε σφάλματα που μπορούν να εντοπιστούν. Οι περισσότεροι δέκτες υπολογίζουν την ψευδοανάλυση σε έναν δορυφόρο αρκετές φορές ανά δευτερόλεπτο και υπολογίζουν κατά μέσο όρο τις μετρήσεις. Εάν το ρολόι στον δέκτη είναι "θορυβώδες", δηλαδή δεν σημειώνεται με ενιαίο ρυθμό, ο χρόνος κατά τον οποίο γίνεται κάθε μεμονωμένη μέτρηση μπορεί να ποικίλει. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα κάθε παρατήρηση να γίνει σε χρονικό διάστημα που είναι μοναδικό και ο προκύπτω μέσος όρος θα μπορούσε να περιέχει λάθη που προκαλούνται από αυτό το φαινόμενο. Επιπλέον, όλοι οι δέκτες ανιχνεύουν θόρυβο μαζί με τα πραγματικά σήματα, και αυτό επηρεάζει τα λαμβανόμενα σήματα, υποβαθμίζοντας περαιτέρω. Οι δορυφόροι που βρίσκονται πιο κοντά στον ορίζοντα τείνουν όχι μόνο να είναι ασθενέστεροι και επομένως πιο επιρρεπείς στο θόρυβο, αλλά τα σήματα τους είναι πιο επιρρεπείς σε πολλές διαδρομές. Για το λόγο αυτό, ορισμένοι δέκτες επιτρέπουν στο χρήστη να ορίσει μια μάσκα ανύψωσης, δηλαδή μια γωνία κάτω από την οποία οι δορυφόροι δεν θα παρακολουθούνται. (Carter, 1997)

Το αποτέλεσμα όλων αυτών και άλλων πηγών σφάλματος είναι ότι η υπολογιζόμενη ψευδοαποσταση είναι μια εκτίμηση με ένα πιθανό σφάλμα του οποίου το μέγεθος μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τυποποιημένες στατιστικές μεθόδους. Η πραγματική γεωμετρία των δορυφόρων στον ουρανό επηρεάζει επίσης την ακρίβεια των αποτελεσμάτων (Carter, 1997). Στο Διάγραμμα 6 μπορούμε να δούμε τις διαφορές μιας καλής γεωμετρίας δορυφόρων με μιας κακής γεωμετρίας.

Διάγραμμα 6: Απεικονίζει τη γεωμετρία των δορυφόρων και την αβεβαιότητα της θέσης.



Η επίδραση αυτής της γεωμετρίας στον συνολικό υπολογισμό σφάλματος μας έχει ως αποτέλεσμα αυτό που ονομάζεται Αραίωση Ακρίβειας ή DOP (Dilution of Precision). Αν είχαμε κάτι τέτοιο σαν μια ιδανική γεωμετρία, με δορυφόρους προς όλες τις πιθανές κατευθύνσεις, θα έχουμε τιμή DOP 1,0. Σε μια πιο ρεαλιστική κατάσταση, με 6 έως 12 ορατούς δορυφόρους, και όλοι πάνω από τον ορίζοντα, η τιμή DOP αυξάνεται. Όταν υπολογίζεται η πραγματική θέση και η μετατόπιση του ρολογιού, το σφάλμα σε αυτές τις τιμές και σε άλλες που υπολογίζονται από αυτές μπορεί να προσδιοριστεί πολλαπλασιάζοντας το σύνθετο σφάλμα των παρατηρήσεων με το κατάλληλο DOP (Carter, 1997).

Ο συνολικός όρος DOP ονομάζεται γεωμετρική αραίωση της ακρίβειας ή GDOP. Το GDOP μπορεί να χωριστεί σε δύο συνιστώσες: το ένα σχετίζεται με τη θέση του δέκτη (Position DOP ή PDOP) και το ένα σχετίζεται με τον προσδιορισμό του χρόνου (Time DOP ή TDOP). Ενώ το PDOP σχετίζεται με τη δορυφορική γεωμετρία, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το TDOP εξαρτάται αυστηρά από τις χρονικές βάσεις του δέκτη και όλων των δορυφόρων. Συνεπώς, είναι μια λειτουργία μόνο του αριθμού των δορυφόρων που παρακολουθούνται (Carter, 1997). Τα GDOP, PDOP και TDOP σχετίζονται με:

$$\mathbf{GDOP^2 = PDOP^2 + TDOP^2}$$

Επιπλέον, η τιμή PDOP έχει δύο συστατικά: οριζόντια (HDOP) και κατακόρυφη (VDOP), που σχετίζονται και πάλι

με το PDOP. Εδώ ένας από τους περιορισμούς στο σύστημα GPS γίνεται εμφανής. Το οριζόντιο συστατικό επηρεάζεται βασικά από το πώς οι δορυφόροι διασκορπίζονται σε αζιμούθιο γύρω από τον δέκτη. Αν όλοι οι δορυφόροι είναι συσσωρευμένοι σε μία μόνο κατεύθυνση, το HDOP θα είναι μεγαλύτερο από ό, τι εάν ο ίδιος αριθμός δορυφόρων ήταν ομοιόμορφα τοποθετημένος γύρω από τον ορίζοντα. Αλλά λαμβάνοντας υπόψη το VDOP. Εξαρτάται από την ανύψωση των δορυφόρων. Αλλά δεδομένου ότι οι δορυφόροι κάτω από τον ορίζοντα δεν μπορούν τυπικά να γίνουν αντιληπτοί από έναν δέκτη, κατ'ανάγκη όλοι οι δορυφόροι που χρησιμοποιούμε συσσωρεύονται στο διάστημα από τον ορίζοντα προς τα πάνω. Αυτό το απλό γεγονός εξηγεί γιατί οι κατασκευαστές δεκτών καθορίζουν μεγαλύτερες τιμές σφάλματος για τους δέκτες τους για προσδιορισμούς κατακόρυφης θέσης από ό, τι για τις οριζόντιες θέσεις (Carter, 1997). Για λόγους πληρότητας, εδώ είναι ο τρόπος με τον οποίο τα PDOP, HDOP και VDOP σχετίζονται:

$$\text{PDOP}^2 = \text{HDOP}^2 + \text{VDOP}^2$$

Μια τελευταία πηγή σφάλματος που πρέπει να σημειωθεί. Δεδομένου ότι ο αρχικός σχεδιασμός του συστήματος GPS ήταν για τους αμερικανικούς στρατιωτικούς, υπήρχε ανησυχία ότι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί από έναν αντίπαλο για την καθοδήγηση όπλων. Για το λόγο αυτό, υπήρξε μια απόφαση να τεθεί μια εσκεμμένη πηγή σφάλματος στα μεταδιδόμενα σήματα που θα περιορίζαν τη διαθεσιμότητα του συστήματος στους χρήστες. Αυτό έγινε από παράγοντες όπως η αλλαγή του ρολογιού του δορυφόρου ή η αλλαγή των όρων διόρθωσης του ρολογιού εκπομπής ή άλλων όρων εφημερίδας (Carter, 1997).

## **5.1 Σφάλματα διάδοσης του δορυφορικού σήματος.**

Σφάλματα εμφανίζονται κατά τη διάδοση του δορυφορικού σήματος. Τα σφάλματα αυτά χωρίζονται στα ιονοσφαιρικά σφάλματα, τροποσφαιρικά σφάλματα, σφάλμα ολίσθησης κύκλων και σφάλμα λόγω της πολυανάκλασης.

### **5.1.1 Ιονοσφαιρικά σφάλματα**

Η υπεριώδης ακτινοβολία που προέρχεται από τον ήλιο προκαλεί τη δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια αυτά βρίσκονται στην αέρια μάζα της ατμόσφαιρας και συνεπώς προκαλούν το φαινόμενο του ιονισμού. Η ζώνη αυτή ονομάζεται ιονόσφαιρα και βρίσκεται σε ύψος 60-100km από την επιφάνεια της γης. Η ιονόσφαιρα απαρτίζει το μέσο επίδρασης, τόσο στην ταχύτητα διάδοσης, όσο και στο σχηματισμό εκτροπών των σημάτων από την ευθεία πορεία μεταξύ δορυφορου-δέκτη. Για να είναι γνωστή η επίδραση της ιονόσφαιρας χρειάζεται να γίνει η χρήση σημάτων σε δύο συχνότητες. Για αυτό το λόγο όλα τα συστήματα GNSS εκπέμπουν το λιγότερο σε δύο συχνότητες. Το μήνυμα πλοήγησης, το οποίο μας εξασφαλίζει τη δορυφορική θέση και τα σφάλματα των ρολογιών μας δίνει επιπλέον ένα μοντέλο για την διόρθωση του ιονόσφαιρικού σφάλματος, που ονομάζεται Klobuchar μοντέλο. Οι ιονοσφαιρικές καθυστερήσεις στο σήμα είναι της τάξης δεκάδων μέτρων. Το μοντέλο Klobuchar μπορεί να καταγράψει τα αποτελέσματα με μεγάλη ακρίβεια στο επίπεδο του μετρητή. Το ιονοσφαιρικό σφάλμα

μεταβάλλεται σημαντικά και γρηγορά κατά τη διάρκεια μιας ημέρας. Έχει σφάλματα που ξεκινάνε από 1m μέχρι αρκετές δεκάδες μέτρα ενώ στον ορίζοντα μπορεί να ξεπεράσει τα 100m. Για την ελαχιστοποίηση του ιονοσφαιρικού σφάλματος είναι βέλτιστο όλες οι μετρήσεις να γίνονται κατά τις απογευματινές προς νυχτερινές ώρες και να χρησιμοποιείτε μία γωνία αποκοπής πάνω από 15 μοίρες για μείωση του ιονισμού (Φωτίου & Πικριδάς, 2012).

### **5.1.2 Τροποσφαιρικά σφάλματα**

Η τροπόσφαιρα έχει ύψος έως 50km από τη γήινη επιφάνεια. Η τροποσφαιρική καθυστέρηση υπόκειται από τις ατμοσφαιρικές παραμέτρους όπου είναι η θερμοκρασία, η πίεση και η υγρασία. Είναι επίσης συνάρτηση της απόστασης που καλύπτει το σήμα στην τροπόσφαιρα δηλαδή ελαχιστοποιείτε όσο αυξάνετε το υψόμετρο. Για μια μέτρηση στο ζενίθ η τροποσφαιρική καθυστέρηση είναι της τάξης των 2 μέτρων. Για μετρήσεις χαμηλής ανύψωσης αυτή η επίδραση αυξάνεται στο επίπεδο των 10 μέτρων, λόγω του μεγαλύτερου χρόνου το σήμα πρέπει να ταξιδεύει μέσω της τροπόσφαιρας. Η κύρια άγνωστη στην τροποσφαιρική καθυστέρηση είναι το ποσοστό των υδρατμών που υπάρχει στον αέρα. Ωστόσο, με ένα σχετικά απλό μοντέλο το αποτέλεσμα της τροπόσφαιρας μπορεί να μοντελοποιηθεί. Το σφάλμα αυτό ελαττώνεται με την χρήση των διπλών διαφορών ή με τη δημιουργία τοπικών μοντέλων τροποσφαιρικής επίδρασης (Φωτίου & Πικριδάς, 2012).

### **5.1.3 Κύκλοι ολίσθησης**

Όταν υπάρχουν εμπόδια κατά τη διάρκεια της μετάδοσης του δορυφορικού σήματος (Ψηλά κτίρια, δέντρα, θάμνοι κτλ) τότε μπορεί να πρόκυψη απώλεια λήψης και επομένως σφάλμα ολίσθησης κύκλων. Μετά την απώλεια της λήψης του δορυφορικού σήματος, από τη στιγμή του επανεγκλωβισμού του σήματος από τον δέκτη όλες οι επόμενες μετρήσεις είναι επηρεασμένες κατά τον ίδιο ακέραιο αριθμό κύκλων που μεσολάβησαν στο διάστημα της αδυναμίας λήψης. Το σφάλμα αυτό ανιχνεύεται εύκολα αλλά δύσκολα προσδιορίζεται (Φωτίου & Πικριδάς, 2012).

## 6 Διαφορικό GPS «DGPS»

Το Differential GPS αναπτύχθηκε ως μέσο παροχής διορθώσεων σε πραγματικό χρόνο πολλών από αυτά τα σφάλματα. Εξετάζοντας τη σύσταση μιας μέτρησης ψευδοαποστάσεων σε ένα δέκτη. Ο δέκτης έχει καθορίσει τη χρονική διαφορά μεταξύ της στιγμής που ένα σήμα έφυγε από ένα δορυφόρο και όταν αυτό λήφθηκε από τον δέκτη. Αυτό περιλαμβάνει τον πραγματικό χρόνο μετακίνησης του σήματος, καθώς και τα αποτελέσματα σφάλματος όπως αυτά που προέρχονται από τον δορυφόρο, η διαδρομή του σήματος από τον δορυφόρο στον δέκτη.

Η διαδικασία προσδιορισμού θέσης του δέκτη, ο δέκτης χρησιμοποιεί τη εκπεμπόμενη εφημερίδα για να καθορίσει τη θέση του δορυφόρου. Όπως σημειώθηκε προηγουμένως, αυτή η τιμή υπόκειται επίσης σε λάθη. Ορίζοντας έτσι μία πρόσθετη πηγή σφάλματος. Επομένως, ακόμη και αν όλα τα σφάλματα στη μέτρηση της ψευδοαποστασης θα μπορούσαν να διορθωθούν με κάποιο τρόπο, θα υπήρχε ακόμα ένα στοιχείο σφάλματος στην προκύπτουσα θέση.

Σε κανονικές εφαρμογές έρευνας, τα δεδομένα από τον δέκτη αναφοράς και από τον δέκτη ή τους δέκτες που εξετάζουν τα σημεία ενδιαφέροντος συνδυάζονται σε ένα περιβάλλον post-processing και χρησιμοποιούνται μαθηματικές τεχνικές για την αφαίρεση των κοινών σφαλμάτων. Το αποτέλεσμα είναι μια θέση που μπορεί να επαναληφθεί έως και 1 ή 2 mm σφαλμα. Αλλά αυτό είναι μόνο μετά τη συγκέντρωση ενός μεγάλου αριθμού παρατηρήσεων και την εκτέλεση εκτενών μαθηματικών. Υπάρχει μια εναλλακτική λύση που λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο, αλλά με λιγότερα θεαματικά αποτελέσματα (Carter, 1997).

Η διαδικασία διαφορικού GPS (DGPS) λειτουργεί με τη χρήση ενός δέκτη αναφοράς «Baseline», όπως στην παραπάνω τεχνική μετα-επεξεργασίας «PP». Αυτός ο δέκτης τοποθετείται σε μια τοποθεσία που είναι γνωστή πολύ καλά. Ο δέκτης αναφοράς κάνει κανονικές παρατηρήσεις και υπολογίζει τις ψευδοαποστασεις όπως θα έκανε οποιοσδήποτε άλλος δέκτης. Ακούει επίσης στις εκπεμπόμενες εφημερίδες και συνδυάζει την τρέχουσα ώρα μαζί με τις εκπεμπόμενες εφημερίδες για τον υπολογισμό της θέσης του δορυφόρου. Χρησιμοποιώντας την υπολογισμένη δορυφορική θέση και τη δική της γνωστή θέση, υπολογίζει το μαθηματικό εύρος ή το εύρος του μοντέλου στον δορυφόρο. Ο δέκτης αναφοράς υπολογίζει αυτή τη διαφορά για κάθε δορυφόρο και αναφέρει όλες τις τιμές ως διορθώσεις σε οποιονδήποτε άλλο δέκτη θέλει να τις χρησιμοποιήσει. Οι άλλοι δέκτες, που ονομάζονται "δέκτες χρηστών" ή απλώς χρήστες, παίρνουν τις τιμές και τις εφαρμόζουν στις δικές τους παρατηρήσεις ψευδοαποστασης πριν υπολογίσουν τη δική τους θέση (Carter, 1997).

### 6.1 GPS Baseline

Οι δέκτες GPS/GNSS που χρησιμοποιούνται για την τοπογραφία είναι γενικά πιο περίπλοκοι και ακριβοί από αυτούς που χρησιμοποιούνται στην καθημερινή ζωή. Χρησιμοποιούν τις δύο συχνότητες «Dual Frequency» που εκπέμπουν οι δορυφόροι GPS. Το φυσικό χαρακτηριστικό του σήματος GPS (η φάση) και οι εξελιγμένες μέθοδοι υπολογισμού βελτιώνουν σημαντικά την ακρίβεια των θέσεων που επιτυγχάνονται. Αυτοί οι δέκτες διαθέτουν συνήθως ξεχωριστή κεραία υψηλής ποιότητας. Μια βασική γραμμή GPS χρησιμοποιεί δύο δέκτες GPS ποιότητας ερευνας.

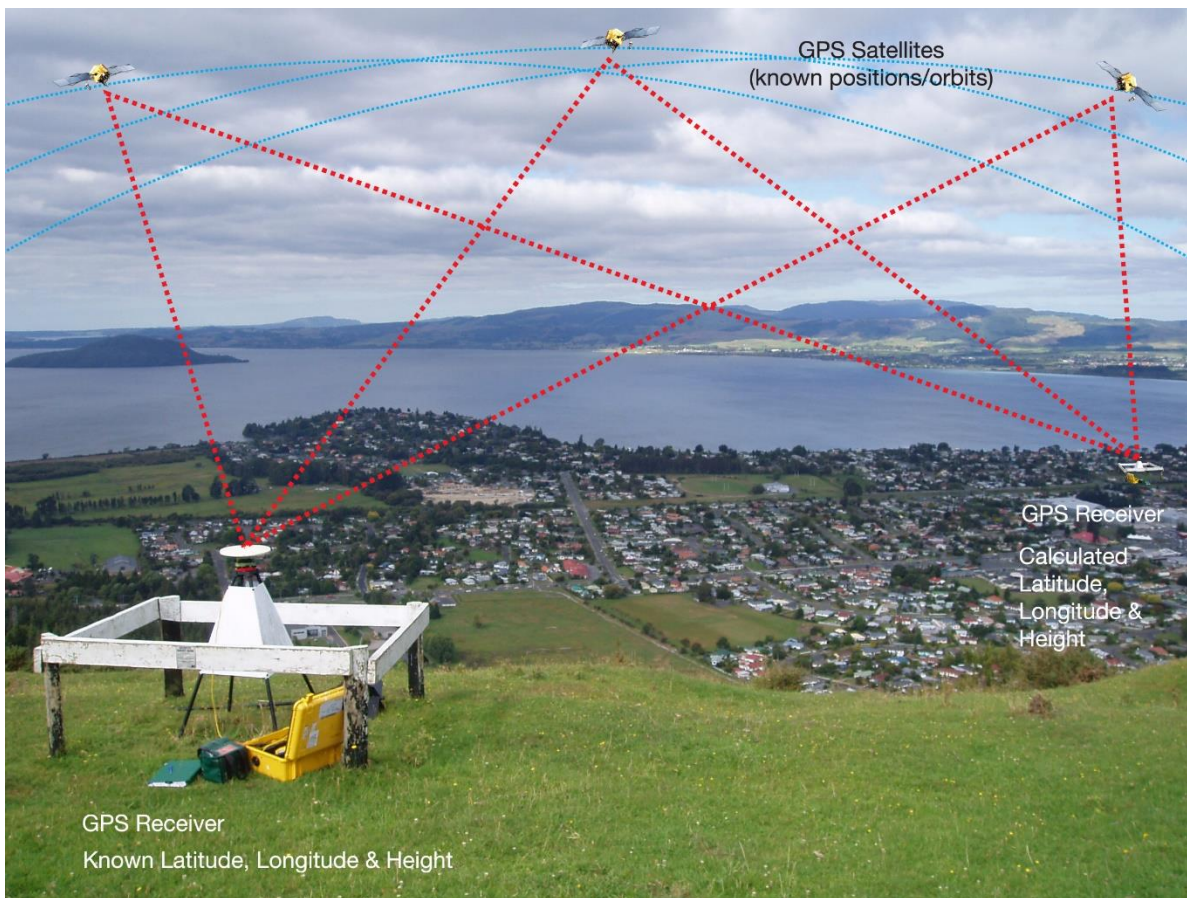


Συλλέγουν ταυτόχρονα δεδομένα από τους ίδιους δορυφόρους GPS. Η διάρκεια αυτών των ταυτόχρονων παρατηρήσεων ποικίλλει ανάλογα με το μήκος της γραμμής και την απαιτούμενη ακρίβεια. Όταν τα δεδομένα και από τα δύο σημεία συνδυάζονται αργότερα, η διαφορά στη θέση (Γεωγραφικό πλάτος, μήκος και ύψος) μεταξύ των δύο σημείων υπολογίζεται με ειδικό λογισμικό. Πολλές από τις αβεβαιότητες της τοποθέτησης GPS ελαχιστοποιούνται σε αυτούς τους υπολογισμούς επειδή οι παραμορφώσεις στις παρατηρήσεις είναι παρόμοιες σε κάθε άκρο της γραμμής της βάσης και ακυρώνονται (*Surveying Using GPS and Conclusion / Intergovernmental Committee on Surveying and Mapping, χ.χ.*).

Η ακρίβεια που επιτυγχάνεται με αυτή τη μέθοδο εξαρτάται από τη διάρκεια των παρατηρήσεων, αλλά είναι συνήθως περίπου 1 μέρος ανά εκατομμύριο (1 χιλιοστό ανά χιλιόμετρο), έτσι ώστε η διαφορά στη θέση να μπορεί να μετρηθεί σε 30 χιλιόμετρα με αβεβαιότητα περίπου 30 mm ή περίπου 100 mm πάνω από 100 χιλιόμετρα. Επειδή οι δορυφόροι GPS βρίσκονται σε πολύ μεγάλη τροχιά (20.000 χλμ.), Τα άκρα της γραμμής της βάσης GPS μπορούν να είναι εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες χιλιόμετρα και να τηρούν τους ίδιους δορυφόρους.

Παρόλο που μια μοναδική γραμμή βάσης από μια γνωστή θέση είναι αρκετή για να δώσει τη θέση στο άλλο άκρο της γραμμής βάσης, συχνά μετρούνται επιπρόσθετες γραμμές βάσης GPS σε άλλα σημεία, ώστε να υπάρχει έλεγχος των αποτελεσμάτων και εκτίμηση της αβεβαιότητας της υπολογιζόμενης θέσης. Στο **Error! Reference source not found.** φαίνεται η σχέση του Baseline – Δορυφόρος – Δέκτης GPS (*Surveying Using GPS and Conclusion / Intergovernmental Committee on Surveying and Mapping, χ.χ.*).

## Διάγραμμα 7: Baseline



### 6.1.1 Σταθμοί αναφοράς συνεχούς λειτουργίας (CORS)

Ένας δέκτης GPS/GNSS ερευνητικής ποιότητας μπορεί να εγκατασταθεί μόνιμα σε μια βολική τοποθεσία με μια γνωστή θέση, που θα χρησιμοποιηθεί ως σημείο εκκίνησης για οποιοσδήποτε μέτρηση GPS/GNSS στην περιοχή.

Αυτοί οι σταθμοί αναφοράς συνεχούς λειτουργίας (CORS) χρησιμοποιούνται για:

- Συλλογή παρατηρήσεων GPS/GNSS οπουδήποτε στη γύρω περιοχή και χρησιμοποιώντας τις αποθηκευμένες παρατηρήσεις CORS για την διόρθωση των παρατηρήσεων κάποια στιγμή αργότερα στο γραφείο.
- Χρησιμοποίηση οργάνων GPS/GNSS με ενσωματωμένη πρόσβαση στο διαδίκτυο που είναι σε θέση να έχουν πρόσβαση στα δεδομένα της CORS και να διορθώνουν παρατηρήσεις σε σχεδόν πραγματικό χρόνο δίνοντας πολύ ακριβείς θέσεις εντός ενός λεπτού ή δύο.
- Εάν υπάρχουν περισσότερες από μία CORS διαθέσιμες, η άγνωστη θέση μπορεί να υπολογιστεί σε σχέση με αυτές τις πολλαπλές γνωστές θέσεις, δίνοντας μεγαλύτερη εμπιστοσύνη στα αποτελέσματα.

Πολλές χώρες διαθέτουν δίκτυο CORS που καλύπτει ολόκληρο το έθνος, επιτρέποντας ακριβή τοποθέτηση GPS/GNSS οπουδήποτε στη χώρα τους. Επίσης, ο CORS συνεισφέρει δεδομένα σε παγκόσμιες παρατηρήσεις που καθιστούν το σύστημα GPS πιο αξιόπιστο και ακριβές. Παρέχουν επίσης στοιχεία για επιστημονικές μελέτες, όπως μελέτες της τεκτονικής πλάκας και μετεωρολογίας. Για να είναι χρήσιμη για τη μελέτη της τεκτονικής, τα μόνιμα σήματα που χρησιμοποιούνται για τους σταθμούς CORS πρέπει να είναι γεωλογικά σταθερά και οι παρατηρήσεις θα πρέπει να είναι συνεχείς και για πολλά χρόνια. Συνήθως τα δίκτυα CORS τοποθετούνται σε σκληρό υπέδαφος (Βράχους) για την αποφυγή μικρομετακινήσεων ή αν είναι για σκοπούς εξυπηρέτησης τοπογράφων (τοπογραφικές μελέτες όπως αποτυπώσεις και χαράξεις) τοποθετούνται και σε οροφές κτιρίων με ειδικές προδιαγραφές (Intergovernmental Committee on Surveying and Mapping, χ.χ.).

### **6.1.2 Κυπριακό CORS CyPOS**

Στην Κύπρο ο CORS με όνομα CyPOS, λειτουργεί και συντηρείται από τη Κυπριακή Δημοκρατία, Υπουργείο Εσωτερικών Τμήμα Κτηματολογίου και Χωρομετρίας. Το Κυπριακό Σύστημα Εντοπισμού (CYPOS) είναι ένα δίκτυο 7 σταθμών GNSS (Global Navigational Satellite System), το οποίο τέθηκε σε πλήρη λειτουργία το 2010. Οι σταθμοί βρίσκονται στις ελεύθερες περιοχές της Κύπρου (Λευκωσία - Λεμεσός - Λάρνακα - Πάφος - Παραλίμνι - Πόλις - Ευρύχου). Το δίκτυο βρίσκεται σε συνεχή λειτουργία (24/7). Το δίκτυο του CYPOS, στοχεύει στη συνεχή παροχή υπηρεσίας δορυφορικών παρατηρήσεων υψηλής ακρίβειας μέσω λύσεων Web σε πραγματικό χρόνο (*CYPOS Network*, χ.χ.).

#### **6.1.2.1 CYPOS Web Solutions**

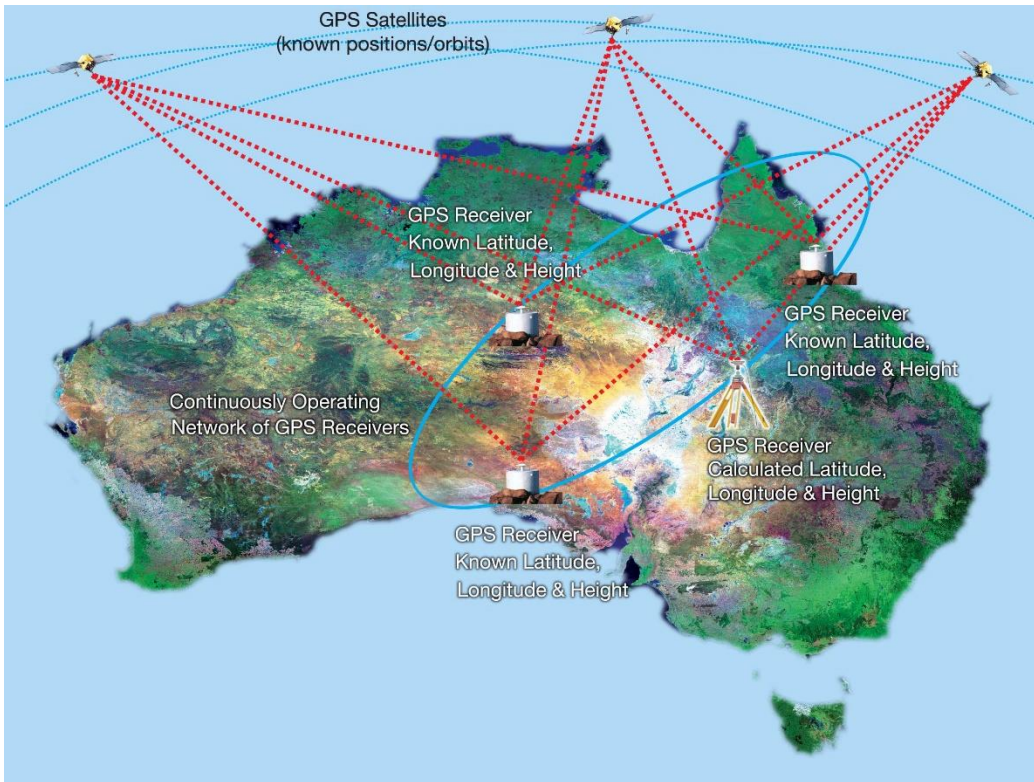
*Το δίκτυο παρέχει τις ακόλουθες λύσεις Web, εξασφαλίζοντας ομοιόμορφη ακρίβεια για όλες τις πραγματοποιηθείσες μετρήσεις:*

- 1. VRS (Virtual Reference Station)**
- 2. iMAX**
- 3. FKP (Flächen Korrektur Parameter - Spatial Correction Parameter)**
- 4. MAC (Master-Auxiliary Concept)**

Επίσης, το CYPOS μπορεί να παρέχει δεδομένα για μετρήσεις μετ' επεξεργασία «PP» (*CYPOS Network*, χ.χ.).

Στο **Error! Reference source not found.** βλέπουμε ένα δίκτυο CORS και τη σχέση του με του δορυφόρους και Δέκτες GPS στα πεδία.

Διάγραμμα 8: Δίκτυο Σταθμών αναφοράς συνεχούς λειτουργία GPS « CORS»



## 7 Μετρήσεις GPS

Η μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της θέσης με το GPS εξαρτάται κυριότερα από την ακρίβεια όπου και απαιτείται σε κάθε εφαρμογή και τον συνολικό χρόνο όπου χρειάζεται η παρατήρηση.

Οι τρόποι μέτρησης γενικά κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το αν ο δέκτης παραμένει ακίνητος είτε κινητό από σημείο σε σημείο, εάν προσδιορίζουμε τις συντεταγμένες των σημείων έμμεσα ως προς ένα άλλο γνωστό σημείο ή απευθείας στο WGS'84 ή αν υπολογίζονται σε πραγματικό χρόνο οι συντεταγμένες ή εκ των υστέρων.

Ένα ο δέκτης μένει ακίνητος η όχι στο σημείο ενδιαφέροντος έχουμε δυο βασικές κατηγορίες για το προσδιορισμό της θέσης, το κινηματικό και τον στατικό προσδιορισμό.

### 7.1.1 Στατικός Προσδιορισμός

Στον Στατικό προσδιορισμό (Static Positioning) οι δέκτες GPS μένουν ακίνητοι στα σημεία κατ' όλη την διάρκεια των μετρήσεων. Ο δέκτης δεν είναι υποχρεωτικό/απαραίτητο να έχει συνεχή επαφή με τους δορυφόρους κατά μετάβαση από σημείο σε σημείο.

### 7.1.2 Κινηματικός Προσδιορισμός

Στον Κινηματικό προσδιορισμό (Kinematic Positioning) οι δέκτες GPS κινούνται και υπολογίζουν συντεταγμένες σε 'τυχαία σημεία' κατά μήκος μιας διαδρομής. Οι δέκτες υπολογίζουν σημεία ανά χρονικά διαστήματα που έχουν οριστεί από τον χρήστη. Ο δεκτή GPS πρέπει να έχει συνεχή επαφή με το δορυφόρο κατά όλη την διάρκεια της κίνησης.

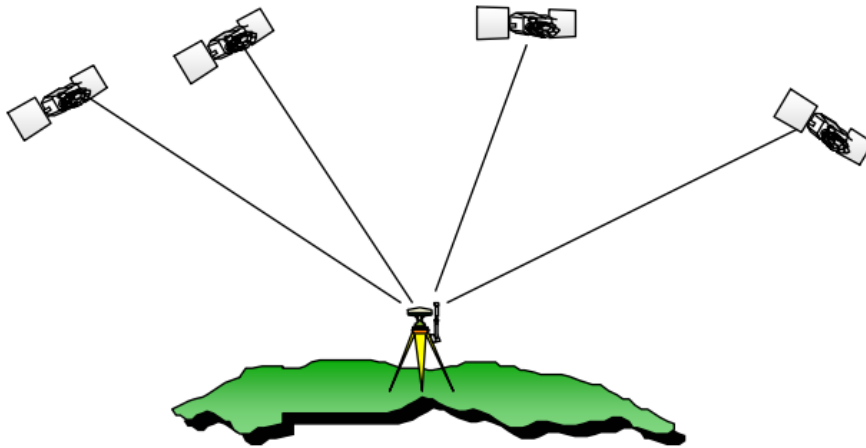
Ανάλογα με το αν ο προσδιορισμός του σημείου γίνεται απευθείας στο σύστημα αναφοράς του GPS ή προσδιορίζετε η σχετική του θέση ως προς ένα άλλο σημείο το οποίο είναι γνωστό, διακρίνουμε δυο μεθόδους προσδιορισμού, τον Σχετικό και Απολυτό προσδιορισμό.

### 7.1.3 Απολυτός Προσδιορισμός

Ο Απολυτός Προσδιορισμός της θέσης σχετίζεται με την εύρεση/προσδιορισμό ενός σημείου μόνο ή μιας διαδρομής με την χρήση δεδομένων που λαμβάνει μόνο από ένα δεκτή. Σε τέτοιου είδους περίπτωση οι συντεταγμένες (X,Y,Z) του σημείου υπολογίζονται απευθείας στο γεωδαιτικό σύστημα WGS'84, χρησιμοποιώντας μετρήσεις ψευδοαποστάσεων ( με το λιγότερο τέσσερις δορυφόρους) και έχει ακρίβεια μερικές δεκάδες μετρά. Στο **Error! Reference source not found.** φαίνεται η συσχέτιση του δεκτή GPS/GNSS με τους

δορυφόρους που το παρακολουθούν.

Διάγραμμα 9: Απολυτός προσδιορισμός με GPS



#### 7.1.4 Σχετικός Προσδιορισμός θέσης

Ο Σχετικός Προσδιορισμός θέσης σχετίζεται με την εύρεση/προσδιορισμό ενός σημείου ως προς ένα άλλο σημείο (Προσδιορισμός των συνιστωσών βάσης  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ ), για την χρήση αυτής της μεθόδου απαιτείται οι μετρήσεις να είναι ταυτόχρονες από δυο ή περισσότερους δέκτες GPS/GNSS σε δύο ή περισσότερα σημεία αντίστοιχα. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιούνται μετρήσεις φάσεων.

Ακόμη μια γενική διάκριση σχετίζεται με το ποτέ γίνεται ο υπολογισμός των συντεταγμένων σε κάθε σημείο σε σχέση με το χρόνο εκτέλεσης των μετρήσεων. Έτσι έχουμε τον προσδιορισμό σε άμεσο/πραγματικό χρόνο (Real Time Positioning) την ίδια ή σχεδόν την ίδια χρονική στιγμή και τον εκ των υστέρων προσδιορισμό (Post Processing).

## 7.2 Διαφορικός Προσδιορισμός

### 7.2.1 Βασικές εξισώσεις παρατήρησης

Για Ψευδοαποστάσεις:

$$p = \rho + d_{orb} + c(d_t - d_T) + d_{ion} + \lambda_N - d_{ion} + d_{trop} + \varepsilon_p$$

οπού:

$\rho$  είναι η παρατηρηθείσα απόσταση,

$\rho$  είναι η αληθής απόσταση μεταξύ του δορυφόρου και δεκτή,

$d_{orb}$  τροχιακά σφάλματα,

$d_t$  σφάλμα συγχρονισμού του ρολογιού του δορυφόρου με το χρόνο του GPS,

$d_T$  σφάλμα συγχρονισμού των δυο ρολογιών δορυφόρου - δεκτή,

$c$  ταχύτητα φωτός,

$d_{trop}$  τροποσφαιρική καθυστέρηση,

$d_{ion}$  ιονοσφαιρική καθυστέρηση,

$\varepsilon_p$  θόρυβος παρατήρησης ( τυχαίο σφάλμα),

Για μετρήσεις φάσεως:

$$\rho = -\lambda_{\Phi'} = \Phi + d_{orb} + c(d_t - d_T) + \lambda_N - d_{ion} + d_{trop} + \varepsilon_{\Phi}$$

οπού:

$\rho$  είναι η μετρηθείσα απόσταση μεταξύ του δορυφόρου και δεκτή,

$\Phi'$  η μετρηθείσα διαφορά φάσεως μεταξύ δορυφόρου και δεκτή (Κύκλος),

$\Phi$  η αληθής δεκαδική διαφορά φάσης,

$\lambda$  μήκος κύματος,

$N$  ο ακέραιος αριθμός κύκλων για κάθε ζεύγος δεκτή – δορυφόρου,

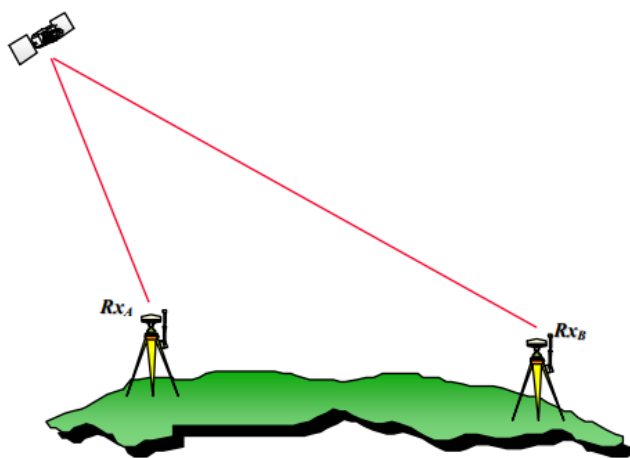
$\epsilon\Phi$  θόρυβος παρατήρησης ( τυχαίο σφάλμα),

Η βελτίωση της ακρίβειας στον προσδιορισμό του διανύσματος θέσης με τη χρήση φάσεων είτε ψευδοαποστάσεων επιτυγχάνεται με τη χρήση των πρώτων, δευτέρων ή και τρίτων διαφορών των πρωτογενών παρατηρήσεων κατά την επεξεργασία. Ο σκοπός που γίνεται η χρήση διαφορών των πρωτογενών παρατηρήσεων είναι ότι στον προσδιορισμό θέσης με το σχετικό εντοπισμό, πολλά από τα σφάλματα μεταξύ των μετρήσεων είναι συσχετισμένα και έτσι απαλείφονται ή ελαχιστοποιούνται οι κοινές τους ποσότητες με την χρήση των διαφορών. Για την μείωση της επίδρασης των σφαλμάτων στα τελικά αποτελέσματα μπορεί να επιτευχθεί μέσω του σχηματισμού απλών, διπλών ή και τριπλών διαφορών μεταξύ δεκτών, δορυφόρων, εποχών μέτρησης και των συχνοτήτων.

### 7.2.2 Απλές διαφορές μεταξύ δεκτών

Είναι η διαφορά μεταξύ των φάσεων ή ψευδοαποστασεων που καταγράφονται ταυτόχρονα από δυο δέκτες προς τον ίδιο δορυφόρο (ίδιο σήμα, ίδια συχνότητα) (Βλ. **Error! Reference source not found.**).

*Διάγραμμα 10: Απλές διαφορές μεταξύ δεκτών.*



Αυτές οι διαφορές αναμεσα των δεκτών τείνουν να ελαχιστοποιούν ή και να εξαλείφουν την επίδραση σφάλματος του χρονομέτρου του δορυφόρου. Ομοίως αυτές οι διαφορές ελαχιστοποιούν σημαντικά τις ατμοσφαιρικές και τροχιακές αβεβαιότητες για μικρές βάσεις (μικρό μήκος).

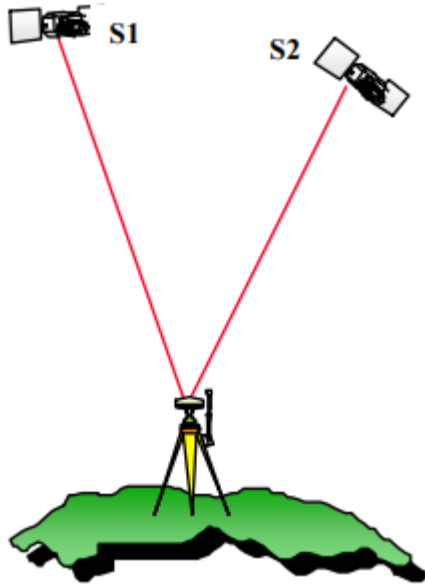
### 7.2.3 Απλές διαφορές μεταξύ δορυφόρων.

Η διαφορά όπου συμβαίνει μεταξύ ψευδοαποστάσεων – φάσεων από τον εκάστοτε δεκτή παράλληλα προς δυο διαφορετικούς δορυφόρους (δυο σήματα, ίδια συχνότητα). Επιπρόσθετα οι διαφορές αυτές ελαττώνουν ή και εξαλείφουν την επίδραση των αβεβαιοτήτων που προκύπτουν από το χρονόμετρο του δεκτή (βλ. **Error! Reference**



ource not found.).

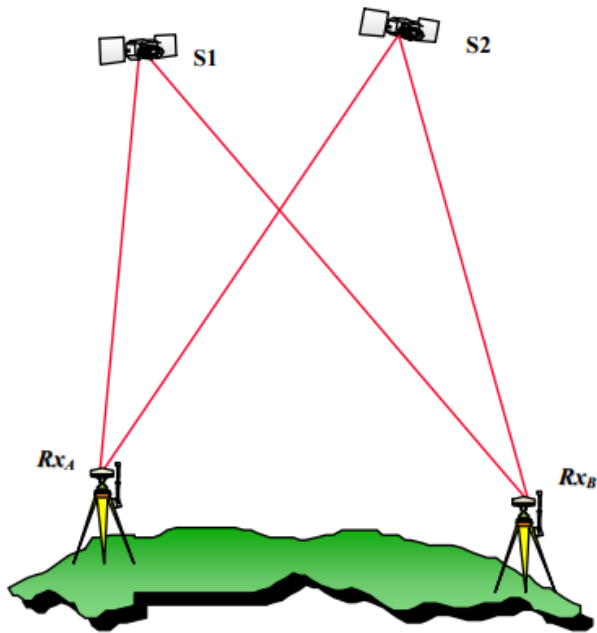
*Διάγραμμα 11: Απλές διαφορές μεταξύ δορυφόρων.*



#### **7.2.4 Δίπλες διαφορές μεταξύ δορυφόρων και δεκτών.**

Ο σχηματισμός των διπλών διαφορών προέρχεται από τις προαναφερθείσες απλές διαφορές με τους ανάλογους συνδυασμούς. Υπολογίζοντας από τις απλές διαφορές μεταξύ των δορυφόρων τις απλές διαφορές των προηγούμενων αναμεσά στους δέκτες, τότε οι δίπλες διαφορές αναμεσά στους δορυφόρους και δέκτες. Αυτές οι διαφορές και ελαττώνουν τα σφάλματα που προκύπτουν από την ατμόσφαιρα και τροχιά, και ακόμη εξαλείφουν τις αβεβαιότητες των χρονομέτρων δορυφόρων – δεκτών (βλ. Διάγραμμα 12).

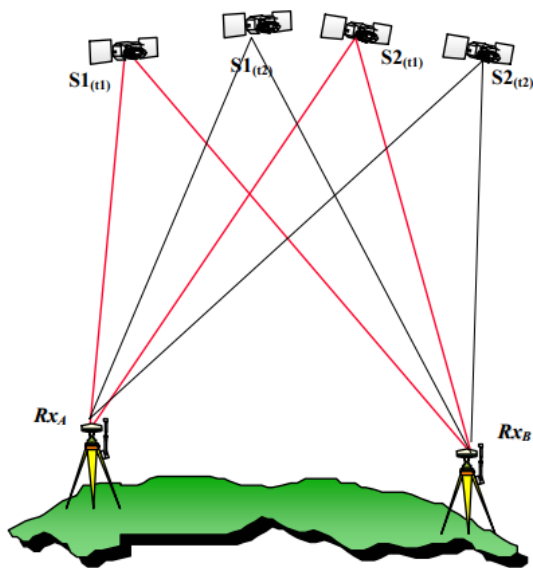
*Διάγραμμα 12: Δίπλες διαφορές μεταξύ δορυφόρων – δεκτών.*



### 7.2.5 Τριπλές διαφορές μεταξύ δορυφόρων, δεκτών και εποχών.

Ο σχηματισμός των τριπλών διαφορών προέρχεται από τις δίπλες διαφορές οπού έχουμε αναφερθεί πιο πάνω, θεωρώντας επιπρόσθετα και διαφορές ως προς την εποχή της μέτρησης. Επόμενος οι τριπλές διαφορές ελαχιστοποιούν τα ατμοσφαιρικά και τροχιακά σφάλματα, εξαλείφουν τις αβεβαιότητες των χρονομέτρων δορυφόρων και δεκτών και επιπρόσθετα εξαλείφεται η απώλεια κύκλων (βλ. **Error! Reference source not found.**).

Διάγραμμα 13: Τριπλές διαφορές μεταξύ δορυφόρων – δεκτών – εποχών.



### Παρατηρήσεις

Αξιοσημείωτο είναι να αναφέρουμε πως οι τριπλές διάφορες δεν έχουν κάποιο σχετικό πλεονέκτημα έναντι των διπλών διάφορων σε περίπτωση ψευδοαποστασεων. Σε μετρήσεις φάσεως όμως εξαλείφεται ο ορός της ολίσθησης. Επιπλέον κατά τον σχηματισμό των τριπλών διάφορων ελαχιστοποιούνται οι παρατηρήσεις όπως και ο πίνακας σχεδιασμού των κανονικών εξισώσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την γρηγορότερη συνόρθωση.

### 7.3 Τεχνικές μετρήσεων με GPS

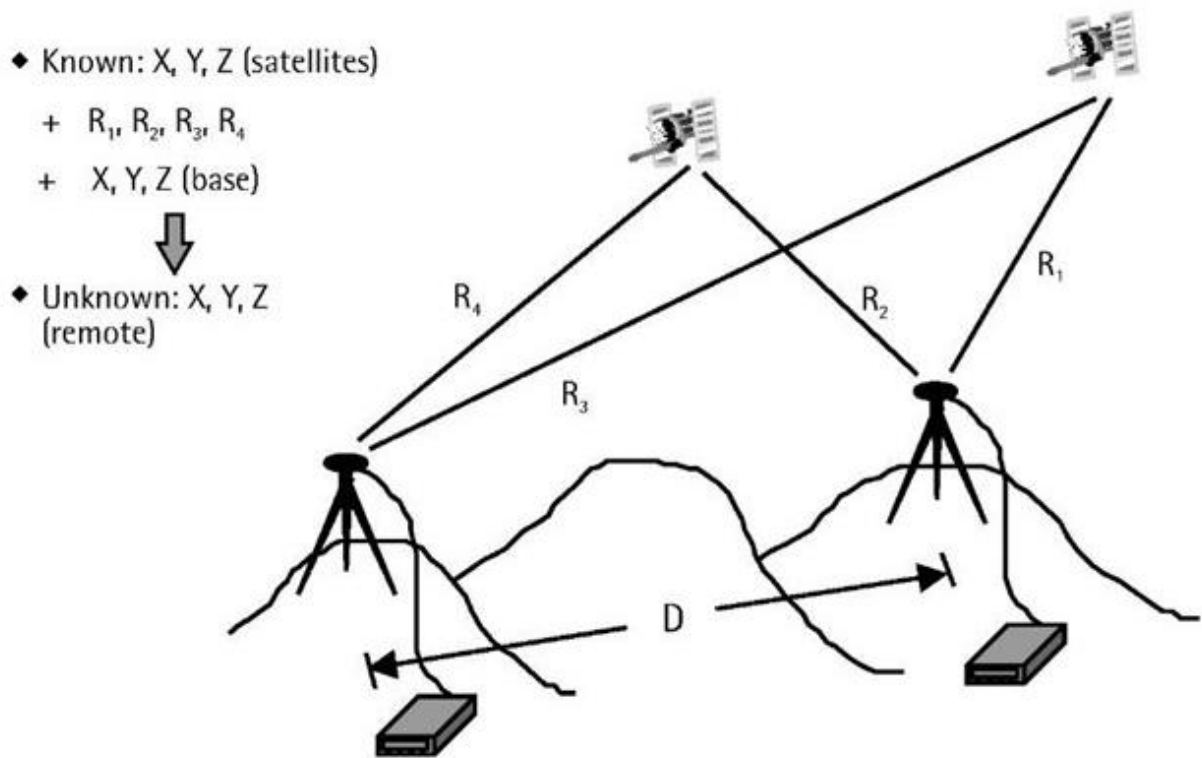
Οι ανάγκες που υπάρχουν σε ακρίβεια και σε ταχύτητα στις εφαρμογές στο χώρο, οδήγησαν σε μια πληθώρα σειρά από τεχνικές που συσχετίζουν μεθόδους του διαφορικού GPS (DGPS) στον σχετικό προσδιορισμό θέσης. Οι πιο κλασικές και διαδεδομένες τεχνικές μέτρησης που χρησιμοποιούνται ευρύτερα είναι δυο: Ο σχετικός στατικός προσδιορισμός και ο σχετικός κινηματικός προσδιορισμός. Υπάρχουν και άλλες ενδιάμεσες τεχνικές που δημιουργήθηκαν πέραν αυτών των δυο, με σκοπό την βελτίωση της απόδοσης του GPS στις Τοπογραφικές εφαρμογές. Οι τεχνικές αυτές είναι: Ο γρήγορος στατικός προσδιορισμός (Rapid Static) , ο ψευδοκινηματικός και ο ημι-κινηματικός.

#### 7.3.1 Σχετικός στατικός προσδιορισμός (Static Positioning)

Ο Σχετικός στατικός προσδιορισμός GPS είναι μια σχετική τεχνική τοποθέτησης που εξαρτάται από τις μετρήσεις φάσης φορέα. Χρησιμοποιεί δύο (ή περισσότερους) σταθερούς δέκτες που παρακολουθούν ταυτόχρονα τους ίδιους δορυφόρους (βλ. **Error! Reference source not found.**). Ένας δέκτης, ο δέκτης βάσης, είναι τοποθετημένος σε ένα σημείο με επακριβώς γνωστές συντεταγμένες (αναφέρεται ως το γνωστό σημείο). Ο άλλος δέκτης, ο απομακρυσμένος δέκτης, είναι τοποθετημένος σε ένα σημείο του οποίου οι συντεταγμένες αναζητούνται (μερικές φορές αναφέρεται ως άγνωστο σημείο). Ο δέκτης βάσης μπορεί να υποστηρίξει οποιονδήποτε αριθμό απομακρυσμένων δεκτών, εφόσον είναι ορατοί από τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους τόσο στη βάση όσο και στις απομακρυσμένες τοποθεσίες (J.G.Teunissen & Kleusberg, 1998).

Κατ' αρχήν, αυτή η μέθοδος βασίζεται στη συλλογή ταυτόχρονων μετρήσεων τόσο σε βάση όσο και στους απομακρυσμένους δέκτες για μια ορισμένη χρονική περίοδο, η οποία, μετά την επεξεργασία, αποδίδει τις συντεταγμένες του άγνωστου σημείου. Ο χρόνος παρατήρησης κυμαίνεται από περίπου 20 λεπτά έως και μερικές ώρες, ανάλογα με την απόσταση μεταξύ της βάσης και των απομακρυσμένων δεκτών (δηλαδή το μήκος γραμμής βάσης), τον αριθμό των ορατών δορυφόρων και τη δορυφορική γεωμετρία. Οι μετρήσεις συνήθως λαμβάνονται σε διάστημα εγγραφής 15 ή 20 δευτερολέπτων. Η γωνιά αποκοπής (Cut-off angle) ορίζεται στις 15° μοίρες (είναι η γωνιά κάτω από την οποία δεν καταγράφονται οι μετρήσεις) (J.G.Teunissen & Kleusberg, 1998).

*Διάγραμμα 14: Στατικός προσδιορισμός GPS*



Ο Στατικός προσδιορισμός GPS με μετρήσεις φάσης φορέα είναι η πιο ακριβής τεχνική τοποθέτησης. Αυτό οφείλεται κυρίως στη σημαντική αλλαγή στη γεωμετρία του δορυφόρου κατά τη διάρκεια του μακρού χρονικού διαστήματος παρατήρησης. Παρόλο που και οι δύο δέκτες μονής και διπλής συχνότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη στατική τοποθέτηση, ο τελευταίος χρησιμοποιείται συχνά, ειδικά για γραμμές βάσης που υπερβαίνουν τα 20 km.

Η αναμενόμενη ακρίβεια από έναν δέκτη γεωδαιτικής ποιότητας είναι τυπικά  $5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$  (rms). Δηλαδή, για μια γραμμή βάσης 10 χιλιομέτρων, για παράδειγμα, η αναμενόμενη ακρίβεια του στατικού GPS τοπογραφίας είναι 1,5 cm (rms). Μεγαλύτερη ακρίβεια μπορεί να επιτευχθεί, για παράδειγμα, με την εφαρμογή της ακριβούς εφημερίδας. Η διαδικασία αυτή είναι κατάλληλη για μετρήσεις δικτύων, μικρομετακινήσεων τεχνικών έργων κ.λ.π και γενικά όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια στις συντεταγμένες των σημείων μας. (J.G.Teunissen & Kleusberg, 1998).

### 7.3.2 Σχετικός κινηματικός προσδιορισμός (Kinematic Positioning)

Υπάρχουν δυο δέκτες. Ο κινητός δέκτης Rover και ο ακίνητος δέκτης Base. Ο ακίνητος δέκτης μένει σταθερός στο γνωστό σημείο και ο κινητός δέκτης εφόσον μείνει ακίνητος για μερικά λεπτά μέχρι να συλλεχθούν ικανοποιητικές μετρήσεις για την επίλυση των ασαφειών, ξεκινά να κινείται. Ο δέκτης Rover μπορεί να έχει αρχική θέση είτε ένα γνωστό σημείο, είτε να ξεκινάει από ένα τυχαίο σημείο κοντά στον μόνιμο σταθμό, ώστε να εφαρμοστεί η τεχνική της εναλλαγής των κεραιών (Antenna Swapping) ή μπορεί να ξεκινήσει από ένα άγνωστο σημείο για να εφαρμοστεί η τεχνική του στατικού σχετικού προσδιορισμού. Επομένως ο κινούμενος δέκτης Rover αρχίζει να λαμβάνει μετρήσεις καθώς κινείται ανά κάποια χρονικά διαστήματα π.χ 5 δευτερόλεπτα, και με αυτό το τρόπο μπορεί να γίνει

ο προσδιορισμός της σχετικής θέσης του, με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει καμία απώλεια του δορυφορικού σήματος. Αν σε οποιαδήποτε περίπτωση υπάρξει απώλεια σήματος (που υπάρχει πάντα αν π.χ., ο δέκτης διαβεί κάτω από πυκνή βλάστηση ή γέφυρα) ή οι δορυφόροι είναι λιγότεροι από 4, η επίλυση της ασάφειας πρέπει να επαναληφθεί, ακριβώς όπως στην αρχή της διαδικασίας. Δεν υπάρχει η ανάγκη ο κινούμενος δέκτης να επιστρέψει πίσω στο αρχικό σημείο εκκίνησης, αλλά να παραμείνει ακίνητος σε μια θέση ούτως ώστε να γίνει η συλλογή ενός ικανοποιητικού αριθμού μετρήσεων. Στην εκάστοτε περίπτωση προσδιορισμού θέσης, οι ακρίβειες με την μέτρηση των φάσεων είναι πολύ υψηλές, λίγο μικρότερες από αυτές του στατικού σχετικού προσδιορισμού, της τάξης των 1 έως και 10ppm, και ανάλογα με τις δυνατότητες του δέκτη, της τάξης του 1μ από μετρήσεις ψευδοποστασέων (J.G.Teunissen & Kleusberg, 1998).

## **8 Μέτρηση, Επίλυση και Συνόρθωση Γεωδαιτικού Δικτύου**

Τα δίκτυα GPS σε σύγκριση με τα κλασικά δίκτυα έχουν ένα μεγάλο αριθμό παρατηρήσεων, το οποίο οφείλεται στον ομοίως μεγάλο αριθμό παραμέτρων που είναι άγνωστοι και πρέπει απαλειφθούν ή να εκτιμηθούν, για να βρεθεί μια λύση. Σε ένα δίκτυο GPS, η διαδικασία της συνόρθωσης περιλαμβάνει όλα εκείνα τα απαραίτητα βήματα για την επεξεργασία των αρχικών μετρήσεων, τα οποία θα προχωρήσουν στον υπολογισμό των συντεταγμένων των σημείων του δικτύου και των μεταβλητοτήτων τους. Για την ορθή ανάλυση των διαθέσιμων παρατηρήσεων, την απαλοιφή συστηματικών σφαλμάτων (ιονοσφαιρικών, τροποσφαιρικών, ρολογιών δορυφόρων κλπ.), την επίλυση ασαφειών φάσης και τελικά τον υπολογισμό των βάσεων, χρειάζεται ένα κατάλληλο λογισμικό.

Στο πλαίσιο των σημείων ελέγχου (Control Points), ο πρωταρχικός σκοπός της προσαρμογής των ελάχιστων τετραγώνων είναι για την εκτίμηση των συντεταγμένων των σημείων ελέγχου της έρευνας από ένα σύνολο μετρήσεων. Εκτός από αυτό, τα λιγότερα τετράγωνα παρέχουν τα ακόλουθα πρόσθετα αποτελέσματα:

- την αβεβαιότητα των εκτιμώμενων συντεταγμένων,
- την ποιότητα του δικτύου ελέγχου της έρευνας και
- τα απαραίτητα στατιστικά στοιχεία για την αξιολόγηση της ποιότητας των μετρήσεων και των εκτιμώμενων συντεταγμένων.

Η ποιότητα των εκτιμώμενων συντεταγμένων εκφράζεται σε όρους αβεβαιότητας ( Intergovernmental Committee

on Surveying and Mapping, 2014.).

## 8.1 Δίκτυο γεωδαιτικού ελέγχου

### 8.1.1 Δομή δικτύου

Το δίκτυο είναι κατασκευασμένο από σημεία ελέγχου υψηλότερης κλάσης τα οποία είναι χτισμένα σε ζεύγη. Τα ζευγάρια πρέπει να απέχουν περίπου 1,5 - 2,0 χλμ. μεταξύ τους κατά μήκος της γραμμής. Τα σημεία ζεύγους συνήθως απέχουν μεταξύ τους από 350 έως 500 μέτρα. Επίσης πρέπει να διασφαλιστεί η ορατότητα μεταξύ των σημείων ζεύγους. Τα σημεία ελέγχου υψηλής κατηγορίας μετρώνται με σχετικές στατικές μετρήσεις. Τα σημεία χαμηλότερης κλάσης απέχουν μια απόσταση 150 - 200 μέτρων μεταξύ τους κατά μήκος της γραμμής (Anton, 2017.).

### 8.1.2 Κατασκευή σταθερών σημείων (Control Points)

Για να υπάρξει ένα ποιοτικό δίκτυο γεωδαιτικού ελέγχου, τα σταθερά σημεία πρέπει να είναι στατικά. Εάν τα σημεία κινούνται, τα σημεία μπορούν να θεωρηθούν κατεστραμμένα και δεν χρησιμεύουν στον έλεγχο της θέσης. Επομένως, οι ακόλουθοι κανονισμοί πρέπει να τηρούνται προσεκτικά:

#### Κατασκευή πλατφόρμας:

- Βάση από σπλισμένο σκυρόδεμα ή βραχώδες έδαφος
- Εάν δεν είναι δυνατόν, τα σημεία πρέπει να οδηγούνται προς το υπόστρωμα

#### Δομή των σημείων:

- Μεταλλικοί σωλήνες, ράβδοι ή μπουλόνια (διάτρητα σε βάθρα) με σαφή κεντρικό σταυρό
- Για να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα βανδαλισμού, όλα τα σημεία πρέπει να μην βρίσκονται σε κοινή θέα, να είναι πακτωμένα στο έδαφος και να αφομοιώνονται ενα με το περιβάλλον.
- Εύκολοι εντοπισμοί πολύχρωμων πλαστικών σωλήνων που είναι στερεωμένοι στα σταθερά σημεία (μήκους 1 m) διευκολύνουν την εύρεση των σταθερών σημείων (μόνο σε περιοχές όπου δεν υπάρχει κίνδυνος βανδαλισμού)

## 8.2 Μεθοδολογία Μετρήσεων Στατικού Εντοπισμού

Τα GPS/GNSS δίκτυα ποικίλουν σημαντικά αντίστοιχα με την απόσταση αναμεσα των σημείων ή και τη σχετική τους ακρίβεια. Τα κρατικά τριγωνομετρικά δίκτυα είναι Α' (1<sup>ης</sup>), Β' (2<sup>ης</sup>), Γ' (3<sup>ης</sup>) και Δ' (4<sup>ης</sup>) τάξης. Κάθε χώρα έχει την δυνατότητα να οικοδομήσει ένα πρωταρχικό δίκτυο μηδενικής ή και πρώτης τάξης όπου και θα αποτελείται από λίγα μόνο σημεία τα οποία θα απέχουν μεταξύ τους μια απόσταση αρκετών δεκάδων χιλιομέτρων, και ένα δεύτερο δίκτυο πύκνωσης όπου οι αποστάσεις θα είναι μικρότερες μεταξύ σημείων, ανά λίγες δεκάδες χιλιόμετρα ώστε κάθε χρήστης να έχει την δυνατότητα να πυκνώσει τα κρατικά δίκτυα.

Σε ένα δίκτυο που αποτελείται από  $N$  σημεία σχηματίζονται δυνατές βάσεις.

$$\binom{N}{2} = \frac{N(N-1)}{2}$$

Ο γεωμετρικός χαρακτήρας του δικτύου ορίζεται από το άθροισμα των μετρημένων σημείων ή βάσεων σε μία ή περισσότερες μετρητικές περιόδους. Ο σκοπός του ορθού προγραμματισμού για την οργάνωση και εφαρμογή των παρατηρήσεων σε συνδυασμό με έναν επαρκή σχεδιασμό του δικτύου είναι πάρα πολύ σημαντικός και υλοποιείται με κριτήρια ακρίβειας, αξιοπιστίας και προπάντων οικονομικού κόστους.

- **Περίπτωση 1<sup>η</sup>**: Χρησιμοποιούνται δύο GPS δέκτες. Όλες οι βάσεις που θα επιλυθούν δεν είναι εξαρτημένες μεταξύ τους (ανεξάρτητες). Για την χρήση της τεχνικής αυτής απαιτείτε μεγάλο χρόνο διάστημα εργασιών στο πεδίο και συνήθως χρησιμοποιείται για συνήθη δίκτυα πύκνωσης με μόνο λίγα σημεία.
- **Περίπτωση 2<sup>η</sup>**: Χρησιμοποιούνται παραπάνω από δύο GPS δέκτες αλλά λιγότεροι από το συνολικό αριθμό των σημείων του δικτύου. Οι δέκτες μετρούν ομόχρονα κάθε περίοδο ένα αριθμό  $\frac{R(R-1)}{2}$  βάσεων από τις οποίες (R-1) δεν είναι εξαρτημένες μεταξύ τους. Βάσεις με το μικρότερο μήκος είναι προτιμότερες επειδή επιλύονται πολύ πιο ευκολά. Για να περατωθεί η μέτρηση του δικτύου χρειάζεται ένας αριθμός μετρητικών περιόδων. Σε κάθε περίοδο παίρνουν (R-1) ανεξάρτητες ή και περισσότερες αλλά εξαρτημένες βάσεις. Ένας αριθμός σημείων πρέπει να διαμένει κοινός από περίοδο σε περίοδο για να έχουν την δυνατότητα να σχετίζονται οι περίοδοι μεταξύ τους και να εκπληρώνετε ο έλεγχος της ποιότητας του ολικού δικτύου. Η επίλυση κάθε περιόδου γίνεται χωριστά από όπου και ανακύπτουν οι συντεταγμένες των σημείων της κάθε περιόδου και ο πίνακας συμμεταβλητότητας τους. Η τελική συνόρθωση του δικτύου γίνεται από την συνόρθωση των επιμέρους περιόδων.
- **Περίπτωση 3<sup>η</sup>**: Ο αριθμός των GPS δεκτών που χρησιμοποιούνται είναι όσα και τα σημεία του δικτύου. Ένας αριθμός (R-1) βάσεων είναι μη εξαρτημένες μεταξύ τους. Η χρήση της τεχνικής αυτή γίνεται συνήθως στα ηπειρωτικά και παγκόσμια δίκτυα μόνιμων σταθμών και σε μελέτες μικρομετακινήσεων ή γεωδυναμικές εφαρμογές. Η διάρκεια των μετρήσεων αυτών ξεκινάει από μερικές μέρες ώστε η περίοδος μέτρησης να θεωρείται κάθε ημέρα ξεχωριστή.

Η συνόρθωση του δικτύου με βάση του σύνολού των βάσεων που επιλέγονται, δημιουργούν και τον γεωμετρικό χαρακτήρα του δικτύου GPS. Σε κάθε περίοδο παράγονται επιμέρους γεωμετρικά σχήματα. Παραδειγματικά εάν θεωρήσουμε ότι έχουμε τρεις δέκτες GPS Α, Β, και Γ οπού συλλέγουν μέτρησης ομόχρονα για μία (τ) χρονική περίοδο τότε θα δούμε ότι σχηματίζεται ένα τρίγωνο το ΑΒΓ. Στην προκειμένη περίπτωση υπάρχουν 3 δυνατές

βάσεις αλλά η δύο από αυτές δεν είναι εξαρτημένες μεταξύ τους (ανεξάρτητες). Ο προσδιορισμός της κάθε εξαρτημένης βάσης μπορεί να υλοποιηθεί από τη διαφορά των παρατηρήσεων των δύο άλλων ανεξαρτήτων βάσεων. Η επιλογή των ανεξάρτητων βάσεων γίνεται με βασικότερο κριτήριο επιλογής να είναι βάσεις με το μικρότερο μήκος ή βάσεις με το μέγιστο αριθμό παρατηρήσεων.

Με την χρήση τριών δεκτών το δίκτυο μπορεί να μετρηθεί σε τέσσερις περιόδους, με την ευχέρεια να διατηρούνται δύο κοινά σημεία από περίοδο σε περίοδο και κάθε φορά να γίνεται η επιλογή μόνο των ανεξάρτητων βάσεων. Η διαδρομή την οποία θα ακολουθήσουν οι δέκτες όταν εναλλάσσονται μεταξύ των σημείων για την δημιουργία των περιόδων βασίζεται από:

- την επιλογή των βάσεων που πρέπει να μετρηθούν,
- τα εμπόδια που υπάρχουν σε κάθε σημείο
- το χρόνο προσέγγισης της κάθε βάσης.

Δίκτυο με N σημεία τα οποία θα μετρηθούν από M=2 φορές τότε έχοντας r δέκτες ο αριθμός των περιόδων S θα είναι :

$$S = N * \frac{M}{r}$$

Αυξάνοντας τον αριθμό των μετρήσεων στο κάθε σημείο θα έχουμε και καλύτερο έλεγχο της ποιότητας του δικτύου.

Η συνόρθωση του δικτύου μπορεί να υλοποιηθεί σε ένα άλλο σύστημα, εκτός από αυτό που αναγράφονται οι βάσεις (π.χ. σ' ένα τοπικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς). Οι x, y γνωστές συντεταγμένες πάνω στο προβολικό επίπεδο, ενός ή περισσοτέρων κορυφών μέσω των οποίων θα γίνει η ένταξη του δικτύου GPS, καθώς και το ορθομετρικό τους υψόμετρο H, μετασχηματίζονται σε γεωδαιτικές συντεταγμένες φ, λ, h στο συγκεκριμένο σύστημα αναφοράς και στη συνέχεια υπολογίζονται οι συντεταγμένες X, Y, Z στο τοπικό γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς. Αν το τοπικό σύστημα είναι πολύ κοντά στο WGS84 (π.χ. ΚΓΣΑ'93), τότε, από τις εκάστοτε συντεταγμένες, γίνεται η χρήση ορισμένων κατάλληλα επιλεγμένων βάσεων, υπολογίζονται οι προσεγγιστικές συντεταγμένες των υπολοίπων κορυφών του δικτύου. Διαφορετικά, υπολογίζονται οι παράμετροι του μετασχηματισμού ομοιότητας στις τρεις διαστάσεις από τη βέλτιστη προσαρμογή των συντεταγμένων (X, Y, Z) GPS του συστήματος WGS84, στις συντεταγμένες (X, Y, Z) του τοπικού συστήματος, όπου γίνεται η συνόρθωση. Με βάση τις παραμέτρους μετασχηματισμού όπου έγιναν οι υπολογισμοί από τα κοινά σημεία, μετασχηματίζονται οι προσεγγιστικές συντεταγμένες των υπολοίπων σημείων από το σύστημα WGS' 84 στο σύστημα της συνόρθωσης. Στο σύστημα των εξισώσεων παρατηρήσεων προστίθενται και οι άγνωστες παράμετροι μετασχηματισμού των συντεταγμένων από το σύστημα GPS στο σύστημα που γίνεται η συνόρθωση του δικτύου.



Το διάνυσμα βάσης  $rij^b$  συνδέεται με τις συντεταγμένες στο σύστημα αναφοράς της συνόρθωσης μέσω της σχέσης:

$$rij^{GPS} = \lambda R(ex, ey, ez)(rj - ri) = \lambda R1(ex)R2(ey)R3(ez)(rj - ri)$$

όπου  $ex, ey, ez$  είναι οι γωνίες στροφής μεταξύ των δύο συστημάτων, οι οποίες εμφανίζονται ως νέες άγνωστες παράμετροι στη συνόρθωση. Ο πίνακας στροφής  $R = R(ex, ey, ez)$  έχει την αναλυτική μορφή:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos(ey) \cos(ez) & \cos(ey) \sin(ez) & -\sin(ey) \\ \sin(ex) \sin(ey) \cos(ez) - \cos(ex) \sin(ez) & \sin(ex) \sin(ey) \cos(ez) + \cos(ex) \sin(ez) & \sin(ex) \cos(ey) \\ \cos(ex) \sin(ey) \cos(ez) + \sin(ex) \sin(ez) & \cos(ex) \sin(ey) \cos(ez) - \sin(ex) \sin(ez) & \cos(ex) \cos(ey) \end{bmatrix}$$

## 9 Μεθοδολογία Μετρήσεων και Επίλυσης Δικτύου Ελέγχου

Ο σκοπός της πτυχιακής αυτής μελέτης είναι η ίδρυση, μέτρηση και επίλυση τοπικού τρισδιάστατου γεωδαιτικού δικτύου ακριβείας και η συνόρθωση του δικτύου στην περιοχή του Βασιλικού Μαρί επαρχίας Λάρνακας. Το τοπικό αυτό δίκτυο υλοποιήθηκε ώστε να μπορεί να εξυπηρετήσει την εκάστοτε εργοληπτική εταιρία που είχε ως project την αναδόμηση υποδομών αποθήκευσης και διαχείρισης υγρών καυσίμων.

Σε αρχικό στάδιο έγινε η κατασκευή πέντε υποβάθρων τα οποία τοποθετήθηκαν περιμετρικά του χώρου εργασίας. Τα υπόβαθρα αυτά κατασκευάστηκαν από μπετό και παχτώθηκαν βαθιά στο έδαφος ούτως ώστε να αποφευχθεί η εσκεμμένη μετακίνηση των υποβάθρων ή και η πιθανότητα μικρομετακίνησης τους από φυσικές αιτίες όπως σεισμικές δονήσεις σε επίπεδο όπου η ακρίβεια του τοπικού δικτύου δεν είναι σε αποδεκτά όρια. Τα υπόβαθρα αυτά κατασκευαστήκαν με συγκεκριμένη δομή ώστε να είναι εφικτή η βέλτιστη προσαρμογή του εργαστηριακού εξοπλισμού πάνω σε αυτά. Ο λόγος της προσαρμογής των οργάνων στην κορυφή των υποβάθρων είναι για να μπορεί να υλοποιηθεί ο απαραίτητος στατικός εντοπισμός της τρισδιάστατης θέσης τους (X,Y,Z) στο Κυπριακό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς (CGRS 93). Στο ποιο κάτω **Error! Reference source not found.** μπορούμε να παρατηρήσουμε ένα από τα υπόβαθρα που κατασκευάστηκαν για την προκυμμένη μελέτη. Επίσης μπορούμε να διακρίνουμε τη δομή των υποβάθρων και το υλικό κατασκευής τους.

*Διάγραμμα 15: Υπόβαθρα κατασκευασμένα από μπετό με βιδωτή κορυφή για την προσαρμογή τοπογραφικού εξοπλισμού*



Στο επόμενο **Error! Reference source not found.** φαίνεται η βάση η οποία τοποθετείτε το όργανο επάνω στα ροκατασκευασμένα υπόβαθρα. Το όργανο που παρατηρείτε είναι ένα Total Station MS05AXII από την εταιρεία Topcon. Χρησιμοποιήθηκε για μέτρηση αποστάσεων μεταξύ των βάθρων. Η φωτογραφίες αυτές πάρθηκαν στο πεδίο μελέτης ημερομηνία 5/24/2019.

*Διάγραμμα 16: Η βάση στην κρυφή του βάρου όπου τοποθετείται ο γεωδαιτικός εξοπλισμός*



## 9.1 Στατικός εντοπισμός βάθρων βασιλικού

Η επόμενη ημέρα είχε προγραμματιστεί ως ημερομηνία μετάβασης μας στο πεδίο μελέτης και εκκίνησης των επίγειων μετρήσεων εντοπισμού θέσης. Ο στατικός εντοπισμός είχε διάρκεια τριών μέχρι τεσσάρων ωρών ανά σημείο. Οι μετρήσεις ξεκίνησαν όλες την ίδια ημέρα (5/25/2019) και ώρα (χρόνος εκκίνησης  $\pm 30$  λεπτά απόκλιση μεταξύ των σημείων). Ο στατικός εντοπισμός στο πεδίο πραγματοποιήθηκε πρωινές ώρες (10:30 AM) και ολοκληρώθηκε κατά την απογευματινή περίοδο (15:00 PM). Στους πιο κάτω

Πίνακας 2 και

Πίνακας 3 αναγράφονται αναλυτικά οι ώρες έναρξης, λήξης και διάρκεια των μετρήσεων ανά σημείο.

<i><b>Κωδικός Σημείου</b></i>	<i><b>Ώρα έναρξης</b></i>	<i><b>Διάρκεια</b></i>	<i><b>Ώρα Λήξης</b></i>
<i><b>LEMESOS--T1</b></i>	10:35:40	03:59:51	14:35:31
<i><b>LEMESOS--T2</b></i>	10:47:50	04:09:45	14:57:35
<i><b>LEMESOS--T3</b></i>	10:59:31	04:05:04	15:04:35
<i><b>LEMESOS--T4</b></i>	11:11:46	03:58:59	15:10:45

**LEMESOS--T5**

11:28:41

03:50:03

15:18:44

*Πίνακας 2: Ώρες έναρξης, λήξης και διάρκεια στατικού εντοπισμού*

<b>Κωδικός Σημείου</b>	<b>Ώρα έναρξης</b>	<b>Διάρκεια</b>	<b>Ώρα Λήξης</b>
<b>T2—T1</b>	10:47:50	03:47:41	14:35:31
<b>T3—T1</b>	10:59:31	03:36:00	14:35:31
<b>T2—T3</b>	10:59:31	03:58:04	14:57:35
<b>T1—T4</b>	11:11:46	03:23:45	14:35:31
<b>T2—T4</b>	11:11:46	03:45:49	14:57:35
<b>T3—T4</b>	11:11:46	03:52:49	15:04:35
<b>T1—T5</b>	11:28:41	03:06:50	14:35:31
<b>T4—T5</b>	11:28:41	03:42:04	15:10:45
<b>T2—T5</b>	11:28:41	03:28:54	14:57:35
<b>T3—T5</b>	11:28:41	03:35:54	15:04:35

*Πίνακας 3: Ώρες έναρξης, λήξης και διάρκεια στατικού εντοπισμού 2*

Ο σταθμός Cors που χρησιμοποιήθηκε σαν Base για την λήψη διορθώσεων (Εφημερίδες, Rinex) των μετρήσεων που προέκυψαν από το στατικό εντοπισμό που πραγματοποιήθηκε στο βασιλικό, είναι τοποθετημένος στην Λεμεσό. Οι μετρήσεις έγιναν κάτω από την παρατήρηση 13<sup>ov</sup> – 15 δορυφόρων και με μέσο ορό τους 14 δορυφόρους να βλέπουν τα πλείστα σημεία. Οι αποστάσεις (Baselines) που υπάρχουν μεταξύ του σταθμού Cors της Λεμεσού και των σημείων (T1, T2, T3, T4, T5) οπου έγινε η μελέτη, έχει σημαντική βαρύτητα στο επίπεδο σφάλματος που προέκυψε στις μετρήσεις. Στο πιο κάτω

Πίνακας 4 αναγράφονται οι αποστάσεις (Baselines) του σταθμού Cors Λεμεσού προς στα σημεία μελέτης.

<i>Σταθμός -- Σημείο</i>	<i>Απόσταση (μέτρα)</i>
<i>LEMESOS—T1</i>	27039.516
<i>LEMESOS—T2</i>	27019.659
<i>LEMESOS—T3</i>	26958.706
<i>LEMESOS—T4</i>	26899.971
<i>LEMESOS—T5</i>	26828.245

*Πίνακας 4: Αποστάσεις (Baselines) Σταθμός – Σημείο*

## **9.2 Εργαστηριακός εξοπλισμός μελέτης**

Ο κλάδος των Τοπογράφων Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Τεχνολογικού Πανεπιστήμιου Κύπρου έχει στην διάθεση του μια μεγάλη γκάμα εργαστηριακού εξοπλισμού προερχόμενο από διάφορους κατασκευαστές. Στην διάθεση μας είχαμε όλα τα απαραίτητα εργαλεία, από μηχανήματα έως και λογισμικά προγράμματα για την αποπεράτωση της προκείμενης μελέτης.

Στην κατοχή μας για την υλοποίηση της εκάστοτε μελέτης, χρησιμοποιήθηκαν δυο κεραίες από το κατασκευαστή Trimble και το λογισμικό πρόγραμμα TBC (Trimble Business Centre). Οι κεραίες που χρησιμοποιήθηκαν είναι η Trimble Zephyr 3 Base Antenna και Trimble Zephyr Geodetic 2 Antenna.

### **9.2.1 Trimble Zephyr 3 Base Antenna**

Η Zephyr 3 Base χρησιμοποιείται σαν κεραία σταθμού (Base), επίσης είναι κατάλληλη ως και σταθερή κεραία rover για χρήση σε περιβάλλοντα όπου το φαινόμενο multipath είναι αισθητό. Η ποιότητα και η ακρίβεια της κεραίας Zephyr 3 Base μειώνουν σημαντικά το σφάλμα που προκύπτει από το φαινόμενο multipath που προέρχεται από το εδάφος.

### 9.2.1.1 Βασικά χαρακτηριστικά της Zephyr 3 Base

- Βελτιστοποιημένη για εφαρμογές σταθμών βάσης GNSS.
- Ισχυρή δορυφορική παρακολούθηση χαμηλής ανύψωσης.
- Μεγάλο επίπεδο εδάφους για καλύτερη απόρριψη πολλαπλών διαδρομών (Multipath).
- Επαναληψιμότητα στο κέντρο φάσης υπο-χιλιοστών.
- Ιδανικό για σταθερούς σταθμούς αναφοράς και δίκτυα υποδομών GNSS.
- Φιλτράρισμα Iridium και Ιαπωνικά LTE

Στο πιο κάτω **Error! Reference source not found.** φαίνεται η κεραία Zephyr 3 Base.

Διάγραμμα 17: Zephyr 3 Base



### 9.2.2 Trimble Zephyr Geodetic 2 Antenna

Η κεραία Trimble Zephyr Geodetic 2 είναι ιδανική για εργασίες ελέγχου. Το Zephyr Geodetic 2 ενσωματώνει ένα μεγάλο Trimble Stealth™ Ground Plane, το οποίο καίει ενέργεια multipath χρησιμοποιώντας τεχνολογία παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται από τα αεροσκάφη Stealth για να κρυφτούν από τα ραντάρ. Η ποιότητα και η εξαιρετική ακρίβεια της κεραίας Zephyr Geodetic 2 επιτυγχάνονται μέσω επαναληψιμότητας στο κέντρο φάσης των υπομετρητών, ισχυρής ανίχνευσης χαμηλής ανύψωσης και σημαντικά μειωμένης πολλαπλής διαδρομής εδάφους (Ground Multipath). Η Zephyr Geodetic 2 είναι εξαιρετικά τραχύ. Είναι προστατευμένη από υλικά ανθεκτικά στις καιρικές συνθήκες, οπότε όταν η κεραία χρησιμοποιείται για μόνιμη εγκατάσταση, μπορεί να υπολογίζει σε πολυετή συνεχή λειτουργία.



### 9.2.2.1 Βασικά χαρακτηριστικά της Zephyr Geodetic 2

- Εφαρμογές σταθμών βάσης.
- Σταθερή κεραία rover.
- Υψηλό περιβάλλον πολλαπλών διαδρομών

Στο πιο κάτω **Error! Reference source not found.** φαίνεται η κεραία Zephyr Geodetic 2.

*Διάγραμμα 18: Zephyr Geodetic 2.*

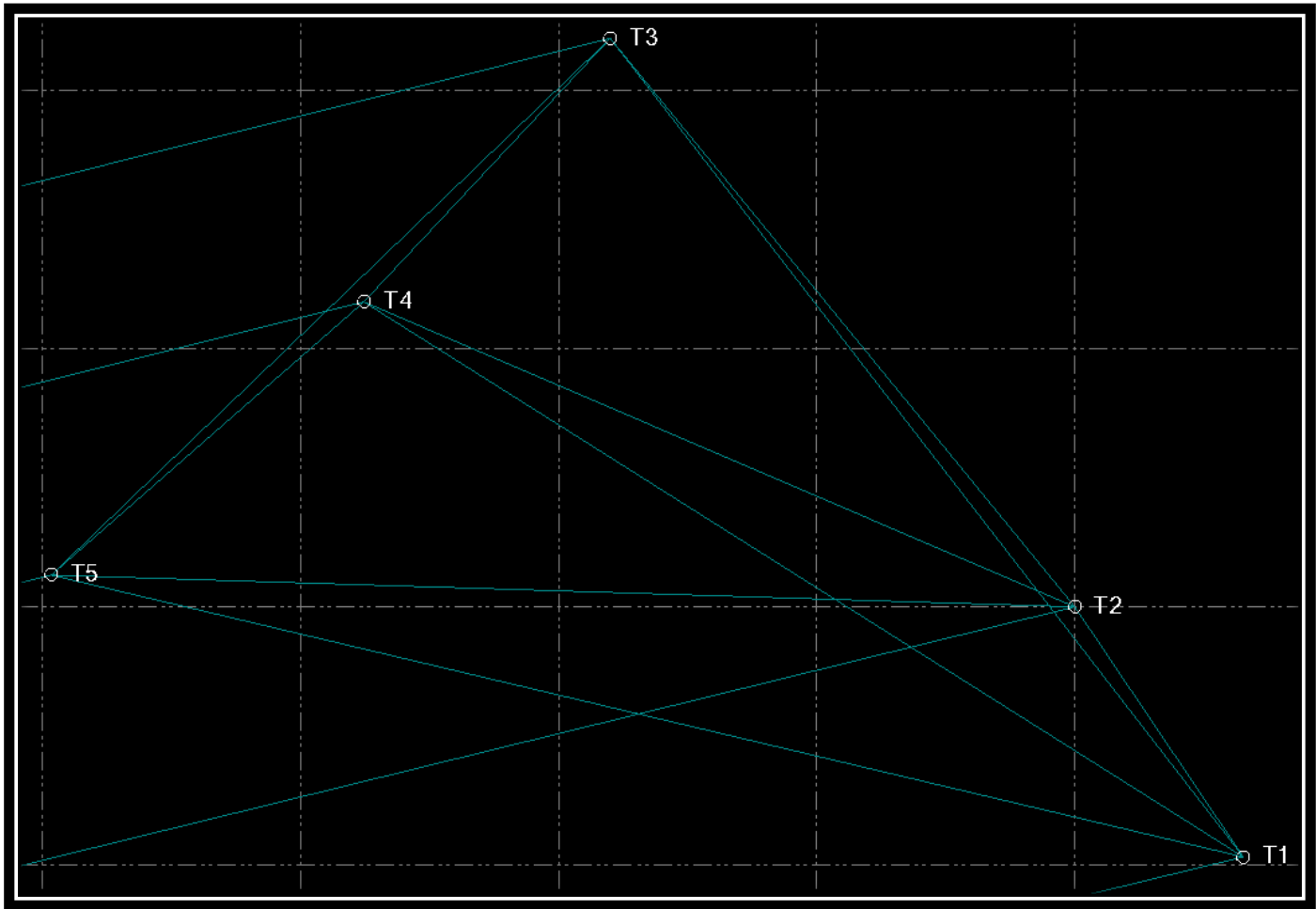


## 9.3 Συνόρθωση δικτύου στο TBC - Μεθοδολογία

Το λογισμικό πρόγραμμα Trimble Business Centre είναι κατάλληλο για ένα μεγάλο φάσμα εργασιών όπως το Survey CAD Software, Network Adjustment, Surface Modelling, Point Cloud Tools, Data Traceability, Photogrammetry and UAS και Esri Integration. Η TBC για την συνόρθωση δικτύων διαθέτει μια σειρά εργαλείων για τον έλεγχο της επεξεργασίας, την εκτέλεση ρυθμίσεων μετατόπισης και το συνδυασμό όλων των πηγών δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων των μετρήσεων του GNSS, του Χωροβάτη (level) και του Γεωδαιτικού Σταθμού (Total Station). Το TBC μπορεί να εκτέλεση ισχυρούς υπολογισμούς, συμπεριλαμβανομένων των προσαρμογών ελαχίστων τετραγώνων εντός της μηχανής επεξεργασίας, ώστε το δίκτυο να είναι όσο ακριβές.

Τα δεδομένα που παρήχθησαν από το στατικό εντοπισμό, καταχωρήθηκαν μέσα στο λογισμικό TBC για την επίλυση και συνόρθωση του δικτύου. Για την μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν 5 αρχεία GNSS, 2 Εφημερίδες και 1 αρχείο Rinex. Στο πιο κάτω **Error! Reference source not found.** μπορούμε να διακρίνουμε την χωρική κατανομή των σημείων (βάθρα) μέσα στο περιβάλλον TBC.

Διάγραμμα 20: Χωρική κατανομή τοπικού δικτύου σε περιβάλλον TBC



Η συντεταγμένες η οποίες καταγραφήκαν από το στατικό εντοπισμό των σταθερών σημείων (βάθρων) αναγράφονται στον πιο κάτω Πίνακας 5.

#	Global Coordinates			ECEF Coordinates		
	Latitude	Longitude	Height	X	Y	Z
T1	N34°18'42.29491''	E33°18'42.29291''	59.077	4385625.035m	2882104.671m	3612918.470m
T2	N34°43'33.56536''	E33°18'41.01191''	61.906	43855621.833m	2882063.507m	3612959.913m
T3	N34°43'37.14137''	E33°18'37.47412''	71.121	4385625.820m	2881958.422m	3613056.302m
T4	N34°43'35.48365''	E33°18'35.59730''	70.780	4385675.441m	2881933.893m	3613013.553m

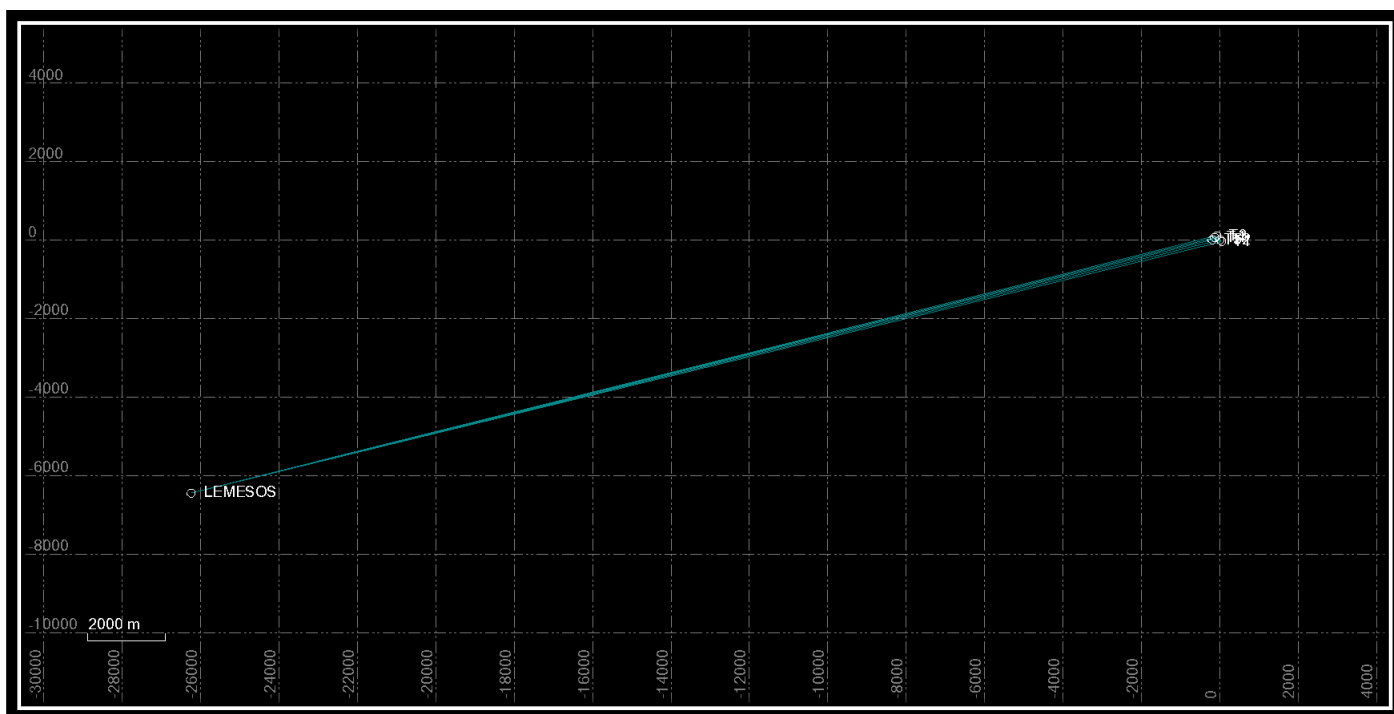


T5	N34°43'33.76538''	E33°18'33.21688''	70.375	4385733.630m	2881899.661m	3612969.804m
----	-------------------	-------------------	--------	--------------	--------------	--------------

Πίνακας 5: Συντεταγμένες σημείων πριν την συνόρθωση

Στο επόμενο **Error! Reference source not found.** παρατηρούμε τις αποστάσεις (Baselines) που έχει ο Σταθμός εμεσού με τα σημεία T1,T2,T3,T4 και T5 στην χωρική τους διάταξη εντός του περιβάλλοντος TBC.

Διάγραμμα 21: Χωρική διάταξη σταθμού CORS, Baselines και τοπικού δικτύου σε περιβάλλον TBC



Το TBC μας δίνει την δυνατότητα να κατεβάσουμε από το διαδίκτυο και να χρησιμοποιήσουμε αυτόματα δορυφορικές εφημερίδες για την ημέρα που είχαν γίνει οι μετρήσεις στο πεδίο. Στην περίπτωση της μελέτης αυτής, έχουμε κατεβάσει τις εξής δορυφορικές παραμέτρους:

- IGS Final Orbit
- IGS Final GLONASS Orbit
- IGS Final Earth Rotation Parameters

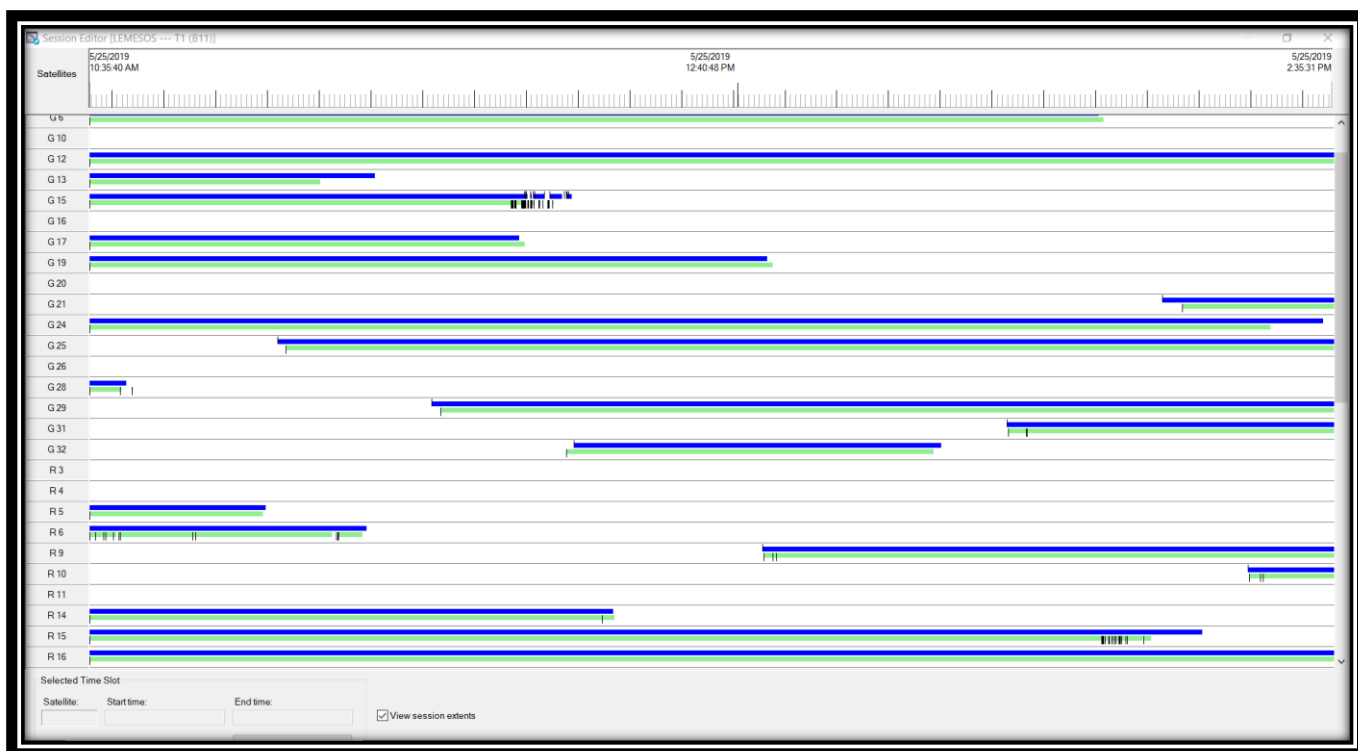
Αφότου εγκαταστάθηκαν οι δορυφορικές παρατηρήσεις στο τοπικό μας δίκτυο, προχωρήσαμε στην επόμενη φάση της μελέτης η οποία απαιτεί να γίνει το Process των Baselines.

Πριν από αυτή την διαδικασία έπρεπε να ελέγξουμε για τυχόν κύκλους ολίσθησης κατά την διάρκεια των μετρήσεων που είχαν γίνει στο πεδίο. Ο λόγος που γίνεται αυτός ο έλεγχος είναι ούτως ώστε να πετάξουμε έξω

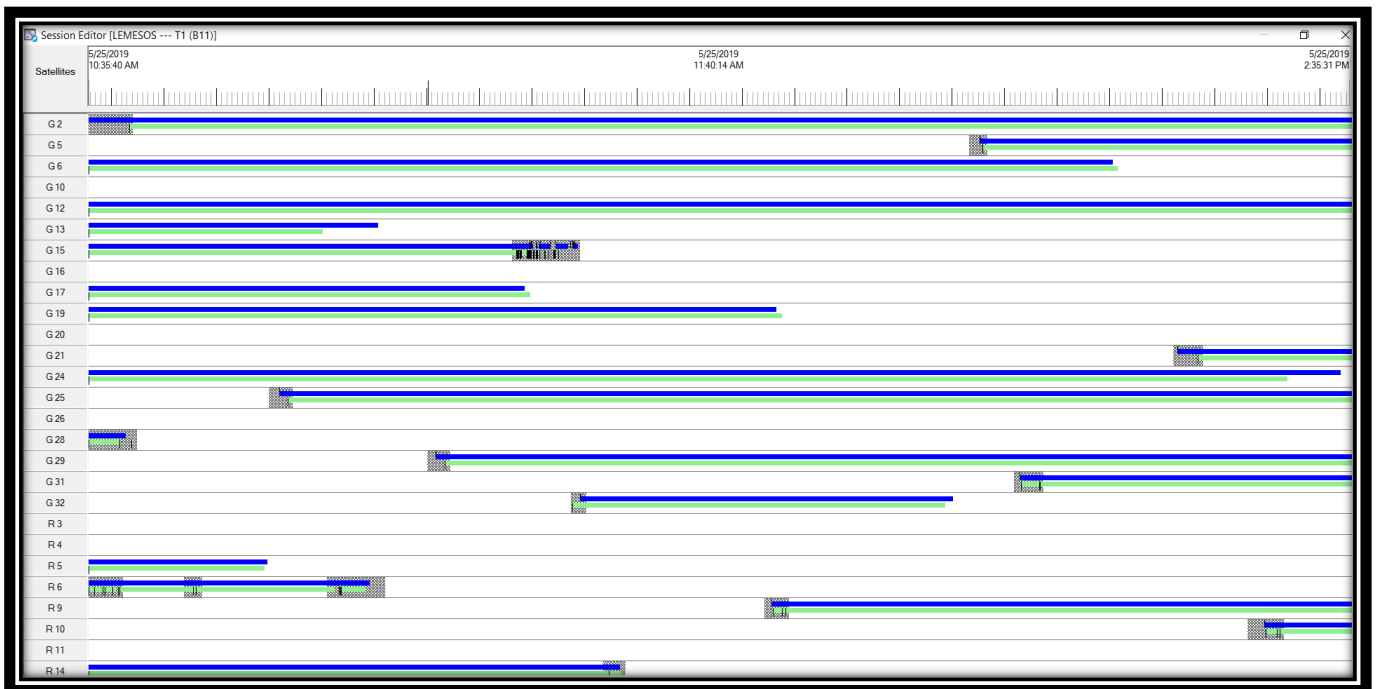
από την λύση τα οποία σφάλματα που μπορεί να προέκυψαν από του κύκλους ολίσθησης. Τα Sessions που υπάρχουν στο project μας, πρέπει να ελεγχθούν ένα προς ένα με το εργαλείο Session Editor. Στο πιο κάτω **Error! Reference source not found.** και

Διάγραμμα φαίνονται οι ώρες και τα ονόματα των δορυφόρων οπου βλέπει το GPS κατά την περίοδο του στατικού εντοπισμού (Session LEMESOS – T1). Επίσης μπορούμε να διακρίνουμε τα σημεία τα οποία υπάρχουν οι κύκλοι ολίσθησης. Σε μερικά σημεία το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο από άλλα σημεία.

Διάγραμμα 22: Δορυφόροι κατά την διάρκεια των μετρήσεων χωρίς την διορθώσει των κύκλων ολίσθησης session LEMESOS – T1



Διάγραμμα 23: Δορυφόροι κατά την διάρκεια των μετρήσεων με την διορθώσει των κύκλων ολίσθησης session LEMESOS – T1



Η αφαίρεση των κύκλων ολίσθησης υλοποιήθηκε και στα 15 Sessions. Εφόσον έχει απαλειφθεί η πιθανότητα σφάλματος από τους κύκλους ολίσθησης, προχωρήσαμε στην επόμενη διαδικασία οπού είναι η επεξεργασία των γραμμών βάσης (Process Baselines). Ο σκοπός που εφαρμόζεται αυτή η επεξεργασία είναι τον προσδιορισμό της καλύτερης γραμμής βάσης οριζοντιογραφικά, υψομετρικά και RMS. Στόχος μας είναι η συνόρθωση του τοπικού δικτύου στο βασιλικό μ' όσο χαμηλότερα σφάλματα μας επιτρέπει η μελέτη αυτή. Επομένως η επιλογή της γραμμής βάσης οπού κουβαλάει το μικρότερο σφάλμα προς το τοπικό δίκτυο, είναι η βέλτιστη για την εξυπηρέτηση του σκοπού μας. Στον πιο κάτω **Error! Reference source not found.** παρατηρούμε τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των γραμμών βάσης.

*Processing Results*

<i>Observation</i>	Solution Type	Horiz.Precision (meter)	Vert.Precision (meters)	RMS	Length (meter)
<i>LEMESOS---T2</i>	Fixed	0.009	0.038	0.030	27019.659
<i>LEMESOS---T3</i>	Fixed	0.004	0.017	0.012	26958.706
<i>LEMESOS---T5</i>	Fixed	0.005	0.023	0.016	26828.245
<i>LEMESOS---T1</i>	Fixed	0.005	0.021	0.016	27039.516
<i>LEMESOS---T4</i>	Fixed	0.004	0.019	0.014	26899.971

*Πίνακας 6: Processing Baselines Results*

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από τον **Error! Reference source not found.**, η γραμμή βάσης LEMESOS---T3 έχει τα μικρότερα σφάλματα οριζοντιογραφικά, υψομετρικά και RMS. Επομένως αποθηκεύεται η λύση με βάση την γραμμή βάσεως LEMESOS---T3. Το μέγεθος των σφαλμάτων της επεξεργασίας είναι σε πάρα πολύ ικανοποιητικά επίπεδα, έχουν τάξη μεγέθους το χιλιοστό. Επίσης μπορούμε να διακρίνουμε ότι η οριζοντιογραφική ακρίβεια είναι πολύ καλύτερη από την υψομετρική ακρίβεια σε όλες τις περιπτώσεις. Ο λόγος που η υψομετρική ακρίβεια είναι χειρότερη από την οριζόντια είναι επειδή ο δέκτης GNSS δεν μπορεί να δει κάτω από τον ορίζοντα. Με οριζόντιες μετρήσεις, ο δέκτης έχει δορυφόρους ορατούς σε όλα τα τεταρτημόρια του οριζόντιου επιπέδου που παράγει ισχυρή γεωμετρία για τους οριζόντιους υπολογισμούς. Εντούτοις, στη κατακόρυφη ακρίβεια, ο δέκτης GNSS μπορεί να παρακολουθεί μόνο δορυφόρους σε δύο τεταρτημόρια του κατακόρυφου επιπέδου του, το οποίο δεν παρέχει την ίδια δύναμη των γεωμετρικών υπολογισμών.

Το σημείο T3 εν 'συνέχεια το μετατρέπεται σε Control Point και απενεργοποιούνται οι γραμμές βάσης από LEMESOS. Από αυτό το σημείο γίνεται αποκλειστικά επεξεργασία εντός του τοπικού δικτύου για την εφαρμογή της συνόρθωσης. Επεξεργασία γραμμών βάσης (Process Baselines) πραγματοποιείτε για ακόμη μια φορά εντός του τοπικού δικτύου και εφαρμόζεται η λύση σε όλα τα εντός σημεία. Στο πιο κάτω Πίνακας 7 και Πίνακας 8 εμφανίζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας και τα επιτυχημένα ή αποτυχημένα επεξεργασμένα baselines.



**Processing Summary**

<b>Observation</b>	<b>From</b>	<b>To</b>	<b>Solution Type</b>	<b>H. Prec. (Meter)</b>	<b>V. Prec. (Meter)</b>	<b>Geodetic Az.</b>	<b>Ellipsoid Dist.</b>	<b>ΔHeight (Meter)</b>
--------------------	-------------	-----------	----------------------	-------------------------	-------------------------	---------------------	------------------------	------------------------

							(Meter)	
T2 --- T3 (B1)	T3	T2	Fixed	0.001	0.002	140°47'37"	142.797	-6.162
T3 --- T5 (B2)	T3	T5	Fixed	0.002	0.003	226°08'25"	150.442	-1.799
T2 --- T5 (B3)	T2	T5	Fixed	0.002	0.003	271°50'52"	198.842	4.365
T4 --- T5 (B4)	T4	T5	Fixed	0.001	0.002	228°44'18"	80.726	0.462
T3 --- T4 (B5)	T3	T4	Fixed	0.001	0.002	223°08'21"	69.895	-2.258
T2 --- T4 (B6)	T2	T4	Fixed	0.002	0.003	293°22'03"	150.391	3.906
T1 --- T4 (B7)	T1	T4	Fixed	0.002	0.003	302°25'35"	201.858	7.740
T1 --- T5 (B8)	T1	T5	Fixed	0.002	0.003	283°23'21"	237.524	8.199
T3 --- T1 (B9)	T3	T1	Fixed	0.001	0.002	142°24'30"	200.963	-9.998
T2 --- T1 (B10)	T2	T1	Fixed	0.001	0.002	146°21'43"	58.362	-3.833

Πίνακας 7: Αποτελέσματα επεξεργασία γραμμών βάσης εντός του τοπικού δικτύου

### Acceptance Summary

Processed	Passed	Flag 	Fail 
10	10	0	0

Πίνακας 8: Σύνοψη αποδοχής των επεξεργασμένων γραμμών βάσης εντός του τοπικού δικτύου

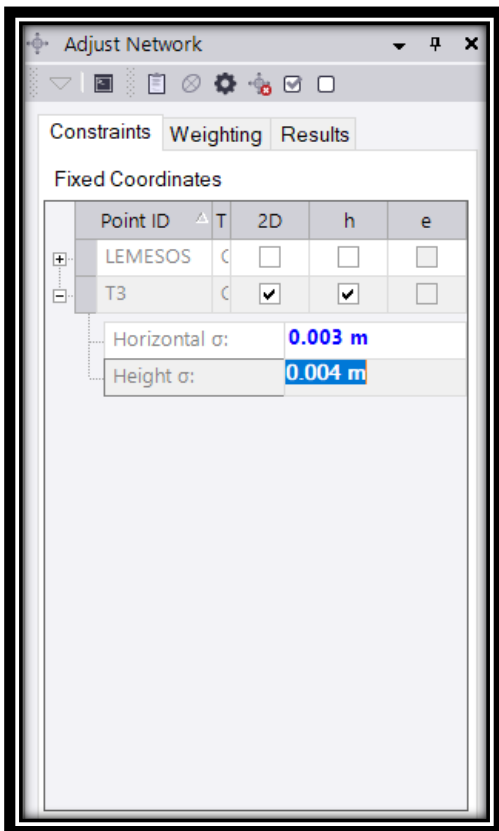
Με το τέλος της επεξεργασίας των γραμμών βάσης εσωτερικά του τοπικού δικτύου και την εφαρμογή τους σε αυτό, απομένει το τελευταίο σκέλος της πρακτικής μελέτης. Σε αυτό σημείο πλέον ξεκινάει η συνόρθωση του δικτύου (Network Adjustment). Επιλέγοντας όλο το τοπικό δίκτυο (σημεία και baselines), γίνεται η εφαρμογή της συνόρθωσης. Πριν τρέξει η διεργασία Adjust πρέπει να εισαχθούν κάποια Control Point Constrains (Περιορισμοί). Οι περιορισμοί αυτοί έχουν να κάνουν με την οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια του οργάνου που έχει μετρηθεί το Control Point. Στην δική μας περίπτωση αυτό είναι μια προαιρετική διαδικασία την οποία έχουμε εφαρμόσει. Στον πιο κάτω Πίνακας 9 και **Error! Reference source not found.** μπορούμε να διακρίνουμε τα Control Constrains που έχουν εφαρμοστή στην συνόρθωση.

### Control Point Constrains

Point ID	Type	East $\sigma$ (μετρά)	North $\sigma$ (μετρά)	Height $\sigma$ (μετρά)	Elevation $\sigma$ (μετρά)
T3	Global	0,0030	0,0030	0,0035	
Fixed = 0,000001 (μετρά)					

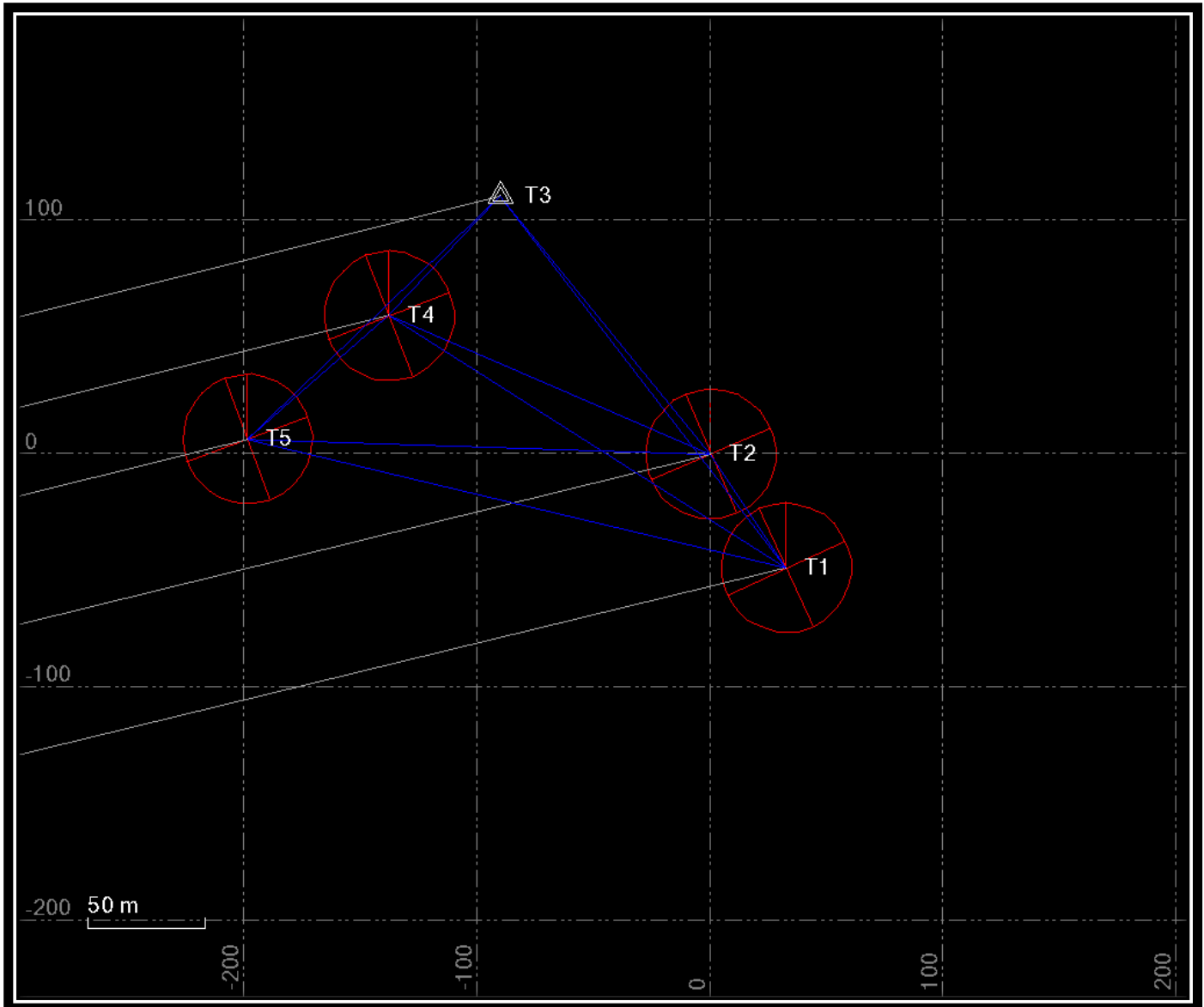
Πίνακας 9: Control Point Constrains

Διάγραμμα 24: Adjust network constrain



Τέλος γίνεται η συνόρθωση του τοπικού δικτύου (Network Adjustment). Στο πιο κάτω **Error! Reference source not found.** φαίνεται το τοπικό δίκτυο μετ'επεξεργασίας στο περιβάλλον TBC.

Διάγραμμα 25: Τοπικό δίκτυο μετά την συνόρθωση σε περιβάλλον TBC



## 9.4 Αποτελέσματα συνόρθωσης τοπικού δικτύου

### Network Adjustment Report

---

#### Adjustment Settings

##### SET-UP ERRORS

GNSS	
ERROR IN HEIGHT OF ANTENNA:	0,0000 m
CENTERING ERROR:	0,0000 m

Πίνακας 10: Set-up Errors

##### COVARIANCE DISPLAY

HORIZONTAL:	
PROPAGATED LINEAR ERROR [E]:	U.S.
CONSTANT TERM [C]:	0,0000 m
SCALE ON LINEAR ERROR [S]:	1,960
THREE-DIMENSIONAL	
PROPAGATED LINEAR ERROR [E]:	U.S.
CONSTANT TERM [C]:	0,0000 m
SCALE ON LINEAR ERROR [S]:	1,960

---



## Adjustment Statistics

NUMBER OF ITERATIONS FOR SUCCESSFUL ADJUSTMENT: **2**

NETWORK REFERENCE FACTOR:	1,00
CHI SQUARE TEST (95%):	Passed
PRECISION CONFIDENCE LEVEL:	95%
DEGREES OF FREEDOM:	18

## POST PROCESSED VECTOR STATISTICS

REFERENCE FACTOR:	1,00
REDUNDANCY NUMBER:	18,00
A PRIORI SCALAR:	3,58

*Πίνακας 12: Post Processed Vector Statistics*

## Control Coordinate Comparisons

Values shown are control coordinates minus adjusted coordinates.

Point ID	$\Delta$ Easting (Meter)	$\Delta$ Northing (Meter)	$\Delta$ Elevation (Meter)	$\Delta$ Height (Meter)
T3	0,0000	0,0000	?	0,0000

### Control Point Constraints

Point ID	Type	East $\sigma$ (Meter)	North $\sigma$ (Meter)	Height $\sigma$ (Meter)	Elevation $\sigma$ (Meter)
T3	Global	0,0030	0,0030	0,0035	
Fixed = 0,000001(Meter)					

Πίνακας 13: Control Point Constrains

### Adjusted Grid Coordinates

Point ID	Easting (Meter)	Easting Error (Meter)	Northing (Meter)	Northing Error (Meter)	Elevation (Meter)	Elevation Error (Meter)	Constraint
T1	228555,193	0,0060	343997,465	0,0060	39,478	0,0072	
T2	228522,715	0,0059	344045,952	0,0060	43,303	0,0072	
T3	228432,113	?	344156,319	?	49,442	?	LLh
T4	228384,480	0,0060	344105,172	0,0060	47,203	0,0072	
T5	228323,965	0,0060	344051,748	0,0060	47,670	0,0072	

Πίνακας 14: Adjusted Grid Coordinates

### Adjusted Geodetic Coordinates

Point ID	Latitude	Longitude	Height (Meter)	Height Error (Meter)	Constraint
----------	----------	-----------	-------------------	-------------------------	------------

T1	N34°43'31,96263"	E33°18'42,40953"	54,276	0,0072	
T2	N34°43'33,53942"	E33°18'41,13884"	58,113	0,0072	
T3	N34°43'37,13017"	E33°18'37,59100"	64,280	?	LLh
T4	N34°43'35,47509"	E33°18'35,71252"	62,030	0,0072	
T5	N34°43'33,74741"	E33°18'33,32741"	62,487	0,0072	

*Πίνακας 15: Adjusted Geodetic Coordinates*

### Adjusted ECEF Coordinates

Point ID	X (Meter)	X Error (Meter)	Y (Meter)	Y Error (Meter)	Z (Meter)	Z Error (Meter)	3D Error (Meter)	Constraint
T1	4385620,576	0,0066	2882105,231	0,0062	3612914,975	0,0064	0,0111	
T2	4385617,835	0,0066	2882064,744	0,0062	3612957,096	0,0064	0,0111	
T3	4385618,965	?	2881957,476	?	3613051,551	?	?	LLh
T4	4385667,947	0,0066	2881932,476	0,0062	3613008,351	0,0064	0,0111	
T5	4385726,932	0,0066	2881898,624	0,0062	3612964,855	0,0064	0,0111	

*Πίνακας 16: Adjusted ECEF Coordinates*

### Error Ellipse Components

Point ID	Semi-major axis (Meter)	Semi-minor axis (Meter)	Azimuth
T1	0,0075	0,0074	157°

T2	0,0074	0,0074	158°
T4	0,0074	0,0074	159°
T5	0,0075	0,0074	159°

*Πίνακας 17: Error Ellipse Components*

## **Adjusted GNSS Observations**

Observation ID		Observation	A-posteriori Error	Residual	Standardized Residual
T3 --> T2 (PV1)	<b>Az.</b>	140°47'37,1"	1,288 sec	-0,003 sec	-0,004
	<b>ΔHt.</b>	-6,1666 m	0,0021 m	0,0028 m	2,403
	<b>Ellip Dist.</b>	142,7975 m	0,0010 m	0,0001 m	0,134
T2 --> T1 (PV10)	<b>Az.</b>	146°21'43,6"	3,288 sec	0,217 sec	0,116
	<b>ΔHt.</b>	-3,8369 m	0,0022 m	0,0031 m	2,376
	<b>Ellip Dist.</b>	58,3618 m	0,0010 m	0,0001 m	0,155
T1 --> T4 (PV7)	<b>Az.</b>	302°25'34,9"	1,021 sec	0,004 sec	0,006
	<b>ΔHt.</b>	7,7537 m	0,0023 m	0,0039 m	2,366
	<b>Ellip Dist.</b>	201,8582 m	0,0010 m	-0,0001 m	-0,119
T3 --> T5 (PV2)	<b>Az.</b>	226°08'25,0"	1,390 sec	0,089 sec	0,100
	<b>ΔHt.</b>	-1,7924 m	0,0022 m	-0,0033 m	-2,355
	<b>Ellip Dist.</b>	150,4421 m	0,0009 m	0,0001 m	0,120
T4 --> T5 (PV4)	<b>Az.</b>	228°44'17,5"	2,571 sec	-0,034 sec	-0,025
	<b>ΔHt.</b>	0,4574 m	0,0022 m	0,0022 m	1,886
	<b>Ellip Dist.</b>	80,7261 m	0,0009 m	0,0000 m	0,047
T1 --> T5 (PV8)	<b>Az.</b>	283°23'20,7"	0,919 sec	0,030 sec	0,044
	<b>ΔHt.</b>	8,2111 m	0,0024 m	0,0020 m	1,168
	<b>Ellip Dist.</b>	237,5238 m	0,0010 m	-0,0001 m	-0,111

T3 --> T4 (PV5)	<b>Az.</b>	223°08'20,8"	2,887 sec	0,186 sec	0,108
	<b>ΔHt.</b>	-2,2497 m	0,0021 m	-0,0013 m	-1,038
	<b>Ellip Dist.</b>	69,8949 m	0,0009 m	0,0001 m	0,100
T3 --> T1 (PV9)	<b>Az.</b>	142°24'29,8"	0,959 sec	-0,108 sec	-0,185
	<b>ΔHt.</b>	-10,0034 m	0,0022 m	0,0012 m	0,865
	<b>Ellip Dist.</b>	200,9637 m	0,0010 m	0,0000 m	0,078
T2 --> T4 (PV6)	<b>Az.</b>	293°22'03,2"	1,336 sec	0,031 sec	0,036
	<b>ΔHt.</b>	3,9168 m	0,0022 m	0,0012 m	0,836
	<b>Ellip Dist.</b>	150,3913 m	0,0010 m	0,0000 m	-0,016
T2 --> T5 (PV3)	<b>Az.</b>	271°50'51,9"	1,070 sec	0,034 sec	0,047
	<b>ΔHt.</b>	4,3742 m	0,0023 m	-0,0010 m	-0,663
	<b>Ellip Dist.</b>	198,8424 m	0,0010 m	0,0000 m	-0,071

### Covariance Terms

From Point	To Point		Components	A-posteriori Error	Horiz. Precision (Ratio)	3D Precision (Ratio)
------------	----------	--	------------	--------------------	-----------------------------	-------------------------

T2	T1	<b>Az.</b>	146°21'43,6"	3,287 sec	1 : 57264	1 : 57185
		<b>ΔHt.</b>	-3,8369 m	0,0022 m		
		<b>ΔElev.</b>	-3,8256 m	0,0022 m		
		<b>Ellip Dist.</b>	58,3618 m	0,0010 m		
T2	T3	<b>Az.</b>	320°47'39,1"	1,288 sec	1 : 148139	1 : 148302
		<b>ΔHt.</b>	6,1666 m	0,0021 m		
		<b>ΔElev.</b>	6,1391 m	0,0021 m		
		<b>Ellip Dist.</b>	142,7975 m	0,0010 m		
T2	T4	<b>Az.</b>	293°22'03,2"	1,339 sec	1 : 154418	1 : 154688
		<b>ΔHt.</b>	3,9168 m	0,0022 m		
		<b>ΔElev.</b>	3,8993 m	0,0022 m		
		<b>Ellip Dist.</b>	150,3913 m	0,0010 m		
T2	T5	<b>Az.</b>	271°50'51,9"	1,073 sec	1 : 205236	1 : 205582
		<b>ΔHt.</b>	4,3742 m	0,0023 m		
		<b>ΔElev.</b>	4,3667 m	0,0023 m		
		<b>Ellip Dist.</b>	198,8424 m	0,0010 m		
T3	T1	<b>Az.</b>	142°24'29,8"	0,959 sec	1 : 197383	1 : 197333

		<b>ΔHt.</b>	-10,0034 m	0,0022 m		
		<b>ΔElev.</b>	-9,9647 m	0,0022 m		
		<b>Ellip Dist.</b>	200,9637 m	0,0010 m		
T3	T4	<b>Az.</b>	223°08'20,8"	2,888 sec	1 : 75668	1 : 75391
		<b>ΔHt.</b>	-2,2497 m	0,0021 m		
		<b>ΔElev.</b>	-2,2398 m	0,0021 m		
		<b>Ellip Dist.</b>	69,8949 m	0,0009 m		

Πίνακας 19: Covariance Terms



T3	T5	<b>Az.</b>	226°08'25,0"	1,391 sec	1 : 158314	1 : 158139
		<b>ΔHt.</b>	-1,7924 m	0,0022 m		
		<b>ΔElev.</b>	-1,7724 m	0,0022 m		
		<b>Ellip Dist.</b>	150,4421 m	0,0010 m		
T4	T1	<b>Az.</b>	122°25'31,1"	1,023 sec	1 : 195282	1 : 195478
		<b>ΔHt.</b>	-7,7537 m	0,0023 m		
		<b>ΔElev.</b>	-7,7249 m	0,0023 m		
		<b>Ellip Dist.</b>	201,8582 m	0,0010 m		
T5	T1	<b>Az.</b>	103°23'15,6"	0,921 sec	1 : 230882	1 : 231188
		<b>ΔHt.</b>	-8,2111 m	0,0024 m		
		<b>ΔElev.</b>	-8,1923 m	0,0024 m		
		<b>Ellip Dist.</b>	237,5238 m	0,0010 m		
T5	T4	<b>Az.</b>	48°44'16,2"	2,572 sec	1 : 85991	1 : 86053
		<b>ΔHt.</b>	-0,4574 m	0,0022 m		
		<b>ΔElev.</b>	-0,4674 m	0,0022 m		
		<b>Ellip Dist.</b>	80,7261 m	0,0009 m		

## Βιβλιογραφία

Φωτίου, Α., & Πικριδάς, Χ. (2012). *GPS και Γεωδαιτικές Εφαρμογές* (2ο έκδ.). ΖΗΤΗ.

<https://docplayer.gr/1030781-Aristeidis-fotioy-hristos-pikridas-copyright-2012-a-fotioy-h-pikridas-gps-kai-geodaitikes-efarmoges-deyteri-ekdosi>

Anton, A. (χ.χ.). *Geodetic Reference System Geodetic Control Network and Rail Construction Measurements\_20171114*. 8.

Carter, C. (1997). *Principles of GPS*. 44.

*CYPOS Network*. (χ.χ.). CYPOS Network. Ανακτήθηκε 9 Φεβρουάριος 2020, από <https://portal.dls.moi.gov.cy/en-us/cypos-network>

*European Space Agency*. (χ.χ.). Ανακτήθηκε 11 Νοέμβριος 2019, από <http://www.esa.int/>

*GALILEO | European Global Navigation Satellite System*. (χ.χ.). Ανακτήθηκε 11 Νοέμβριος 2019, από <https://galileognss.eu/>

*GLONASS*. (χ.χ.). NovAtel. Ανακτήθηκε 11 Νοέμβριος 2019, από <https://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-3-satellite-systems/glonass/>

*Guideline-for-Adjustment-and-Evaluation-of-Survey-Control\_v2.1.pdf*. (χ.χ.). Ανακτήθηκε 30 Απρίλιος 2020, από [https://www.icsm.gov.au/sites/default/files/2018-02/Guideline-for-Adjustment-and-Evaluation-of-Survey-Control\\_v2.1.pdf](https://www.icsm.gov.au/sites/default/files/2018-02/Guideline-for-Adjustment-and-Evaluation-of-Survey-Control_v2.1.pdf)

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Collins, J. (1988). *Global Positioning System: Theory and Practice* (4ο έκδ.). Springer-Verlag Wien.

Intergovernmental Committee on Surveying and Mapping, I. (χ.χ.). *Surveying Using GPS and Conclusion*.

Ανακτήθηκε 7 Μάρτιος 2020, από <https://www.icsm.gov.au/education/fundamentals-mapping/surveying->

[mapping/surveying-using-gps-and-conclusion](#)

J.G.Teunissen, P., & Kleusberg, A. (1998). *GPS for Geodesy* (2ο έκδ., τ. 60). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

<http://what-when-how.com/gps/gps-positioning-modes-part-1/>

Parkinson, B. W., & Gilbert, S. W. (1983). NAVSTAR: Global positioning system—Ten years later. *Proceedings of the IEEE*, 71(10), 1177–1186. <https://doi.org/10.1109/PROC.1983.12745>

*Surveying Using GPS and Conclusion | Intergovernmental Committee on Surveying and Mapping.* (χ.χ.).

Ανακτήθηκε 9 Φεβρουάριος 2020, από <https://www.icsm.gov.au/education/fundamentals-mapping/surveying-mapping/surveying-using-gps-and-conclusion>

*System.* (χ.χ.). Ανακτήθηκε 3 Φεβρουάριος 2020, από <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/System/>

Xu, G., & Xu, Y. (2016). *GPS: Theory, Algorithms and Applications* (3ο έκδ.). Springer. h