



Τεχνολογικό
Πανεπιστήμιο
Κύπρου

Σχολή Μηχανικής και
Τεχνολογίας

Πτυχιακή εργασία

**ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΕΚΤΩΝ RTK ΝΕΑΣ ΓΕΝΙΑΣ
ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΚΛΙΣΗΣ**

Δημήτρης Κακουλλή

Λεμεσός, Μάιος 2019

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Πτυχιακή εργασία

Σύγκριση δεκτών RTK νέας γενιάς
με και χωρίς υποστήριξη λειτουργίας αντιστάθμισης κλίσης

του

Δημήτρη Κακουλλή

Επιβλέπων Καθηγητής
Δρ. Χριστόδουλος Δανέζης

Λεμεσός, Μάιος 2019

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Δημήτρης Κακουλλή, 2019

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.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επίκουρο καθηγητή Δρ Χριστόδουλο Δανέζη, ο οποίος ήταν ο επιβλέπων καθηγητής μου, με εμπιστεύτηκε και αφιέρωσε πολύτιμο χρόνο και συμβουλές για την αποπεράτωση της παρούσας πτυχιακής. Θερμές ευχαριστίες στους τοπογράφους μηχανικούς κ.κ. Θεοφάνη Νικολάου, Μάριο Χατζηνικολάου και Στέλιο Τσελεπή που αφιέρωσαν χρόνο και τους δέκτες GNSS για την πειραματική διαδικασία.

Τέλος, ευχαριστώ τη σύντροφο μου Χριστίνα για την απέραντη στήριξη και ανοχή που έδειξε κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συνεχώς εξελισσόμενη τεχνολογία της σημερινής εποχής δεν μπορεί να αφήσει ανεπηρέαστη την επιστήμη της Γεωδαισίας και κατ' επέκταση τον κλάδο της Τοπογραφίας. Τα όργανα τα οποία χρησιμοποιούνται εν γένει στην επιστήμη της Γεωδαισίας ως εκ τούτου ομοίως εξελίσσονται ώστε οι σύγχρονες ανάγκες να καλυφθούν με τον αρτιότερα δυνατό τρόπο.

Κατά το παρελθόν οι μετρήσεις με συμβατικούς δέκτες GNSS αντιμετώπιζαν δυσκολίες και γενικά περιορισμούς λόγω εμποδίων στο πεδίο. Τα συγκεκριμένα προβλήματα λύνονται σήμερα με την ενσωμάτωση των αδρανειακών αισθητήρων στους δέκτες GNSS οι οποίοι είναι πλέον ικανοί να αποτυπώνουν απρόσιτα σημεία λόγω της κλίσης που μπορούν να έχουν κατά την διάρκεια της μέτρησης.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως στόχο την εξαγωγή αποτελεσμάτων μέσα από την σύγκριση μετρήσεων από διαφορετικούς δέκτες GNSS. Γίνεται σύγκριση ακρίβειας και ορθότητας των μετρήσεων μεταξύ ενός συμβατικού δέκτη, ενός δέκτη με αδρανειακό σύστημα βασισμένο στο μαγνητόμετρο και ενός δέκτη με αδρανειακό σύστημα IMU/MEMS. Εξετάζεται επίσης η ακρίβεια μέτρησης με κλίση του στυλεού σε διαφορετικές γωνίες μέτρησης καθώς και η μέγιστη γωνιά κλίσης.

Λέξεις κλειδιά: Δέκτες GNSS, RTK, Αδρανειακοί αισθητήρες, Σφάλματα μετρήσεων

ABSTRACT

The same technological advancement of all industries, could not have left unaffected Geodesy and in particular Topography. The equipment used at large in the science of Geodesy, is equally advancing enabling the users to achieve better and more precised results.

In the recent past, measurements with conventional GNSS receivers, presented hardships and related restrictions due to obstacles in the field. The latter are today solved with the integration of inertial sensors at the GNSS receivers, which are now capable observing difficult and elusive points due to the tilt that may have at the time of measurement.

This particular dissertation has as its goal the retrieval of results through the comparison of various GNSS receivers. Accuracy comparison and measurement precision will be analyzed between a conventional GNSS receiver, a receiver with inertial system based in magnetometer along with a receiver carrying an inertial system IMU/MEMS. Furthermore, this paper will examine how accurate is the measurement when a pole is tilted in various angles along with the maximum angle of tiltness.

Keywords: GNSS receivers, RTK, inertial sensors, measurement errors

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	v
ABSTRACT.....	vi
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	x
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	xi
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	xiv
1 Εισαγωγή	1
2 Δορυφορικό σήμα.....	3
2.1 Βασικές έννοιες κυμάτων.....	3
2.2 Ηλεκτρομαγνητικό κύμα.....	6
2.3 Το φαινόμενο Doppler	9
2.3.1 Τυπικές αλλαγές στη μετατόπιση Doppler	12
2.3.2 Συνεχώς ενσωματωμένο Doppler	12
2.4 Διαμόρφωση δορυφορικού σήματος στα συστήματα GNSS.....	13
3 Βασικές αρχές λειτουργίας των συστημάτων GNSS.....	16
3.1 Τα τμήματα των συστημάτων GNSS.....	16
3.2 Δορυφορικός προσδιορισμός θέσης.....	17
3.3 Ο δέκτης των συστημάτων GNSS	18
3.3.1 Η κεραία του δέκτη.....	19
3.3.2 Κυρίως δέκτης	21
3.4 Παρατηρήσεις και σφάλματα ακρίβειας συστημάτων GNSS.....	22
3.4.1 Ψευδοαπόσταση.....	22
3.4.2 Παρατήρηση φάσης	22
3.4.3 Σφάλματα συστημάτων GNSS	24

3.5	Μεθόδοι δορυφορικού προσδιορισμού θέσης.....	27
3.5.1	Σχετικός προσδιορισμός θέσης.....	28
3.5.2	Σχετικός κινηματικός προσδιορισμός θέσης σε πραγματικό χρόνο	29
4	Δέκτες GNSS με ενσωματωμένους αδρανειακούς αισθητήρες.....	32
4.1	Μαγνητόμετρο	36
4.2	Μικρο-ηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS).....	40
4.3	Μετρήσεις με τη μέθοδο RTK	41
5	Μεθοδολογία Έρευνας.....	44
5.1	Περιοχή μελέτης.....	46
5.2	Καθορισμός σημείων	50
5.2.1	Μέθοδος καθορισμού σημείων.....	50
5.3	Προγραμματισμός μετρήσεων	56
5.4	Μετρήσεις	60
5.4.1	Αποτυπώσεις σε ανοικτό πεδίο.....	62
5.4.2	Αποτυπώσεις κοντά σε διάφορες μαγνητικές και άλλες παρεμβολές	63
5.4.3	Μετρήσεις στο αστικό φαράγγι	64
6	Αποτελέσματα.....	68
6.1	Αποτελέσματα μετρήσεων σε ανοικτό πεδίο	68
6.1.1	Οριζοντιογραφικό σφάλμα (2D error)	71
6.1.2	Υψομετρικό σφάλμα (1D error)	74
6.2	Αποτελέσματα μετρήσεων στο αστικό φαράγγι	75
6.2.1	Οριζοντιογραφικό σφάλμα	77
6.2.2	Υψομετρικό σφάλμα.....	78
6.3	Μεμονωμένες αποτυπώσεις κοντά σε διάφορες παρεμβολές.....	80
6.3.1	Οριζοντιογραφικό σφάλμα	81
6.3.2	Υψομετρικό σφάλμα.....	83

6.4	Συνολική σύγκριση σφαλμάτων	85
7	Συμπεράσματα	88
	ΕΠΙΛΟΓΟΣ	90
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	91

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Συντεταγμένες τριγωνομετρικών στο ΚΓΣΑ93	50
Πίνακας 2: Συντεταγμένες σημείων	52
Πίνακας 3: Συντεταγμένες σταθερών σημείων στην επίχωση Λεμεσού	55
Πίνακας 4: Συντεταγμένες Σταθμού Αναφοράς (Δίκτυο CΥΡΟΣ)	57
Πίνακας 5: Συντεταγμένες αποτύπωσης συμβατικού δέκτη σε ανοικτό πεδίο	62
Πίνακας 6: Συντεταγμένες αποτύπωσης δέκτη με IMU/MEMS σε ανοικτό πεδίο	62
Πίνακας 7: Συντεταγμένες αποτύπωσης σε ανοικτό πεδίο του δέκτη βασισμένου σε μαγνητόμετρο	63
Πίνακας 8: Συντεταγμένες αποτύπωσης συμβατικού δέκτη κοντά σε παρεμβολές	63
Πίνακας 9: Συντεταγμένες αποτύπωσης δέκτη με IMU/MEMS κοντά σε παρεμβολές.	63
Πίνακας 10: Συντεταγμένες αποτύπωσης του δέκτη βασισμένου σε μαγνητόμετρο, κοντά σε παρεμβολές	64
Πίνακας 11: Συντεταγμένες αποτύπωσης συμβατικού δέκτη στο αστικό φαράγγι	65
Πίνακας 12: Συντεταγμένες αποτύπωσης δέκτη με IMU/MEMS στο αστικό φαράγγι .	66
Πίνακας 13: Συντεταγμένες αποτύπωσης του δέκτη βασισμένου σε μαγνητόμετρο, στο αστικό φαράγγι	67
Πίνακας 14: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα μετρήσεων	70
Πίνακας 15: Οριζοντιογραφικά σφάλματα στο αστικό φαράγγι	77
Πίνακας 16: Σφάλματα δεκτών κοντά σε διάφορες παρεμβολές	81

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Απομάκρυνση-Χρόνος.....	4
Διάγραμμα 2: Ταχύτητα-Χρόνος.....	4
Διάγραμμα 3: Σύνθεση ταλαντώσεων	5
Διάγραμμα 4: Η ηλεκτρομαγνητική ταλάντωση στον χώρο	7
Διάγραμμα 5: Κατηγορίες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων	9
Διάγραμμα 6: Τυπική μετατόπιση Doppler	11
Διάγραμμα 7: Δορυφορικοί σχηματισμοί συστημάτων GNSS	16
Διάγραμμα 8: Επίγειο τμήμα συστημάτων GNSS.....	17
Διάγραμμα 9: Δορυφορικός προσδιορισμός θέσης στην τομή σφαιρικών επιφανειών .	18
Διάγραμμα 10: Κέντρο φάσης κεραίας (APC) και σημείο αναφοράς (ARP)	19
Διάγραμμα 11: Σφάλμα λόγω πολυανάκλασης	20
Διάγραμμα 12: Βασικές μονάδες δέκτη GNSS	21
Διάγραμμα 13: Εύρος σφαλμάτων στα συστήματα GNSS.....	26
Διάγραμμα 14: Μέθοδος RTK.....	30
Διάγραμμα 15: Παράδειγμα στροφών κατά άξονα	33
Διάγραμμα 16: Σύζευξη GNSS και INS	34
Διάγραμμα 17: Παράδειγμα συνεργασίας GNSS και INS	35
Διάγραμμα 18: Τμήματα της ενσωμάτωσης GPS/INS/Βαρόμετρου/ Μαγνητόμετρου .	37
Διάγραμμα 19: Παραμορφώσεις μαγνητικού πεδίου	38
Διάγραμμα 20: Μείωση της γωνίας ύψους του εισερχόμενου σήματος GNSS κατά την κλίση ενός στυλεού μακριά από το δορυφόρο	42
Διάγραμμα 21: Το αντιστάθμισμα της κλίσης του στυλεού.....	43
Διάγραμμα 22: Οι περιοχές που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.....	47
Διάγραμμα 23: Ά Περιοχή μετρήσεων	47

Διάγραμμα 24: Δυτικό Αστικό Φαράγγι.....	48
Διάγραμμα 25: Δυτικό Αστικό Φαράγγι και μεταλλικές κατασκευές.....	48
Διάγραμμα 26: Ανατολικό Αστικό Φαράγγι	49
Διάγραμμα 27: Ανοιχτός χώρος μετρήσεων και μεμονωμένα σημεία	49
Διάγραμμα 28: Κατανομή τριγωνομετρικών σημείων	51
Διάγραμμα 29: Σημεία Αποτύπωσης.....	53
Διάγραμμα 30: Τοποθέτηση και αποτύπωση σημείων	54
Διάγραμμα 31: Σταθερά σημεία μέτρησης στην επίχωση Λεμεσού	55
Διάγραμμα 32: Εισαγωγή τοποθεσίας και μέρας μετρήσεων.....	56
Διάγραμμα 33: Η γεωμετρία και ο αριθμός των δορυφόρων στην περιοχή μελέτης.....	57
Διάγραμμα 34: Αριθμός δορυφόρων κατά την διάρκεια των μετρήσεων	58
Διάγραμμα 35: Ανάλυση παραμέτρων αβεβαιότητας	59
Διάγραμμα 36: Πληροφορίες σχετικά με την ιονόσφαιρα	59
Διάγραμμα 37: Ταυτόχρονη ενεργοποίηση και σύνδεση δεκτών στο CYPOS	61
Διάγραμμα 38: Μετρήσεις δεκτών σε κατακόρυφη θέση	69
Διάγραμμα 39: Μετρήσεις δεκτών με κεκλιμένο στυλεό	70
Διάγραμμα 40: Οριζοντιογραφική ακρίβεια σε κατακόρυφη θέση στυλεού.....	71
Διάγραμμα 41: Οριζοντιογραφική ακρίβεια Leica GS18 με κεκλιμένο στυλεό.....	72
Διάγραμμα 42: Οριζοντιογραφική ακρίβεια Trimble R10 με κεκλιμένο στυλεό	72
Διάγραμμα 43: Ακρίβεια μετρήσεων στις μέγιστες κλίσεις.....	73
Διάγραμμα 44: Οριζοντιογραφική ακρίβεια όλων των δεκτών	73
Διάγραμμα 45: Υψομετρική ακρίβεια όλων των δεκτών	74
Διάγραμμα 46: Μετρήσεις με το GS18 στο ανοικτό πεδίο	75
Διάγραμμα 47: Μετρήσεις δεκτών σε κατακόρυφη θέση στο αστικό φαράγγι.....	76
Διάγραμμα 48: Μετρήσεις δεκτών με κεκλιμένο στυλεό στο αστικό φαράγγι	76
Διάγραμμα 49: Οριζοντιογραφική ακρίβεια όλων των δεκτών.....	78

Διάγραμμα 50: Υψομετρική ακρίβεια όλων των δεκτών	79
Διάγραμμα 51: Ο Trimble R10 στο αστικό φαράγγι (σημεία 23, 24 και 26).....	79
Διάγραμμα 52: Μετρήσεις δεκτών σε κατακόρυφη θέση στυλεού	80
Διάγραμμα 53: Μετρήσεις δεκτών σε κεκλιμένη θέση στυλεού	81
Διάγραμμα 54: Ακρίβεια μετρήσεων του δέκτη R10 κατά την κλίση του στυλεού.....	82
Διάγραμμα 55: Ακρίβεια μετρήσεων του δέκτη GS18 κατά την κλίση του στυλεού	82
Διάγραμμα 56: Υψομετρική ακρίβεια του δέκτη GS18 κατά την κλίση του στυλεού... 83	
Διάγραμμα 57: Υψομετρική ακρίβεια του δέκτη R10 κατά την κλίση του στυλεού	84
Διάγραμμα 58: Προσπάθεια αποτύπωσης σημείου στον υποσταθμό ΑΗΚ από R10	84
Διάγραμμα 59: Συνολική οριζοντιογραφική σύγκριση δεκτών GNSS	85
Διάγραμμα 60: Συνολική υψομετρική σύγκριση δεκτών GNSS.....	85
Διάγραμμα 61: Συνολική διακύμανση 2D σφάλματος δεκτών GNSS	86
Διάγραμμα 62: Συνολική διακύμανση 1D σφάλματος δεκτών GNSS	86
Διάγραμμα 63: Οριζοντιογραφική διακύμανση σφάλματος.....	87

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

APC: Antenna Phase Center

ARP: Antenna Reference Point

C/A: Coarse/Acquisition code ή Clear Access

CYPOS: Cyprus Positioning System

DGNSS: Differential GNSS

DLL: Delay Lock Loop

GDOP: Geometric Dilution Of Precision

GLONASS: GLObal NAVigation Satellite System

GNSS: Global Navigation Satellite Systems

GPS: Global Positioning System

HDOP: Horizontal Dilution Of Precision

IF: Intermediate Frequency

IMU: Inertial Measurement Unit

INS: Inertial Navigation System

MEMS: Micro Electro Mechanical System

NMEA: National Maritime Electronics Association

P: Precise ή Protected

PLL: Phase Lock Loop

PDOP: Position Dilution Of Precision

PRN: Pseudo Random Noise

RTCM: Radio Technical Commission for Maritime Services

RTK: Real Time Kinematic

TDOP: Time Dilution Of Precision

URE: User Equivalent Range Error

VDOP: Vertical Dilution Of Precision

1 Εισαγωγή

Έχουν δημοσιοποιηθεί κατά καιρούς διάφορα άρθρα τα οποία αναφέρονται στην δυνατότητα εργασιών στο πεδίο με δέκτες GNSS, οι οποίοι πλέον έχουν την δυνατότητα μετρήσεων διαφόρων σημείων χωρίς την υποχρέωση του χρήστη να έχει συνεχώς σε κατακόρυφη θέση τον στυλεό και κατ' επέκταση τον δέκτη. Πλείστα άρθρα έχουν δημοσιοποιηθεί από εταιρείες κατασκευής δεκτών GNSS με σκοπό την προώθηση των προϊόντων τους όσο το δυνατόν καλύτερα, υποστηρίζοντας πως με την ενσωμάτωση των αδρανειακών αισθητήρων στους δέκτες GNSS εκτός των άλλων υπάρχει αισθητή μείωση των σφαλμάτων και αύξηση της ακρίβειας και της ορθότητας των μετρήσεων.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως στόχο να εξετάσει κατά πόσο τα οποιαδήποτε σφάλματα που έχουν οι συμβατικοί δέκτες στον προσδιορισμό θέσης μειώνονται ή όχι με τη χρήση δεκτών με αντιστάθμιση κλίσης και χωρίζεται σε δύο βασικούς κύκλους:

1. Θεωρητικό κομμάτι
2. Έλεγχο ακρίβειας μέσω πειραματικής διαδικασίας μετρήσεων

Αρχικά στο θεωρητικό σκέλος της εργασίας, αναφέρονται βασικές έννοιες για την κατανόηση του δορυφορικού σήματος, για το πως αυτό επηρεάζεται από τις διάφορες ατμοσφαιρικές και άλλες συνθήκες μέχρι τον τελικό του προορισμό στον δέκτη GNSS, και πώς γίνεται η διαμόρφωση του.

Γίνεται εκτενής ανάλυση της λειτουργίας των συστημάτων GNSS όσον αφορά τον δορυφορικό προσδιορισμό θέσης, στοιχεία για τον δέκτη, πως και με ποιο τρόπο λαμβάνεται το δορυφορικό σήμα και πως επηρεάζεται η θέση λήψης από τη συχνότητα του κύματος. Αναλύονται τα σφάλματα στα συστήματα GNSS τα οποία οφείλονται κατά κύριο λόγο στους δορυφόρους, στη διάδοση των δορυφορικών σημάτων και στους δέκτες.

Αναφέρονται επιγραμματικά όλες οι μέθοδοι δορυφορικού προσδιορισμού θέσης, ενώ λόγω του ότι οι αδρανειακοί αισθητήρες στους δέκτες GNSS λειτουργούν μόνο με την μέθοδο του κινηματικού προσδιορισμού θέσης σε πραγματικό χρόνο (RTK) γίνεται εκτενέστερη ανάλυσή της.

Στο τέλος του θεωρητικού σκέλους γίνεται αναφορά στα διάφορα αδρανειακά συστήματα, στις αρχές λειτουργίας τους και ανάλυση της λειτουργίας της μεθόδου RTK με ενσωματωμένο αδρανειακό σύστημα.

Κατά τον έλεγχο μέσω πειραματικής διαδικασίας μετρήσεων, γίνεται σύγκριση ακρίβειας των μετρήσεων μεταξύ ενός συμβατικού δέκτη, ενός δέκτη με αδρανειακό σύστημα βασισμένο στο μαγνητόμετρο και ενός δέκτη με αδρανειακό σύστημα IMU/MEMS. Εξετάζεται επίσης η ακρίβεια μέτρησης με κλίση του στυλεού σε διαφορετικές γωνίες μέτρησης.

Οι δέκτες που χρησιμοποιήθηκαν έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά ανίχνευσης σήματος και ακρίβειας με την μέθοδο RTK ενώ διαφέρουν στο είδος του αδρανειακού συστήματος που βρίσκεται ενσωματωμένο σε αυτούς. Ο δέκτης Leica GS16 είναι συμβατικός, δεν περιέχει δηλαδή τον οποιοδήποτε αδρανειακό αισθητήρα, ο δέκτης Leica GS18T έχει ενσωματωμένο αδρανειακό σύστημα βασισμένο στην ναυτοτεχνολογία (IMU/MEMS) ενώ στο δέκτη Trimble R10 (v1) βρίσκεται ενσωματωμένο αδρανειακό σύστημα βασισμένο στο μαγνητόμετρο. Γίνεται αναφορά στην περιοχή μελέτης και στα διάφορα περιβάλλοντα που δοκιμάστηκαν οι δέκτες, στα σταθερά σημεία αναφοράς των μετρήσεων και στον προγραμματισμό μετρήσεων πριν από τη μέρα της πειραματικής διαδικασίας.

Οι μετρήσεις χωρίζονται σε τρία διαφορετικά περιβάλλοντα:

1. Ανοικτό πεδίο
2. Αστικό φαράγγι
3. Διάφορες μεμονωμένες μετρήσεις κοντά σε μαγνητικές παρεμβολές

Για κάθε ένα από τα ανωτέρω περιβάλλοντα γίνεται σύγκριση ακρίβειας μετρήσεων μεταξύ των τριών δεκτών, σύγκριση μεταξύ των δύο δεκτών με αντιστάθμιση κλίσης που αφορούν κυρίως τις μετρήσεις με κεκλιμένο στυλεό, και εξάγονται χρήσιμες πληροφορίες που αφορούν τις μεμονωμένες αλλά και συνολικές ακρίβειες των δεκτών αλλά και μη αναμενόμενα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την διαδικασία των μετρήσεων.

2 Δορυφορικό σήμα

Για να κατανοηθεί η λειτουργία των συστημάτων προσδιορισμού θέσης, πρέπει πρώτα να αναφερθούν βασικές έννοιες των κυμάτων όπως και ο τρόπος διαμόρφωσης του δορυφορικού σήματος που λαμβάνεται από τους δέκτες GNSS.

2.1 Βασικές έννοιες κυμάτων

Κύμα ονομάζεται μία διαταραχή που διαδίδεται ή ταξιδεύει στο χώρο από σημείο σε σημείο μεταφέροντας ενέργεια και ορμή όχι όμως και ύλη. Για τη διάδοση του κύματος απαιτείται η πηγή η οποία ταλαντώνεται γύρω από μία θέση ισορροπίας και ένα μέσο μέσα στο οποίο θα διαδοθεί η διαταραχή που προκαλείται. Το μέσο μπορεί να είναι υλικό ή και το κενό στο οποίο διαδίδονται μόνο τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Τα κύματα είναι περιοδικά όταν η πηγή εκτελεί περιοδική κίνηση. Όταν η κίνηση της πηγής είναι απλή αρμονική ταλάντωση τότε παράγεται αρμονικό ή ημιτονοειδές κύμα. Μήκος κύματος είναι η σταθερή απόσταση στην οποία διαδίδεται το κύμα σε χρόνο μιας περιόδου (Φωτίου & Πικριδάς, 2006).

Περίοδος είναι το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί μια φορά ένα επαναλαμβανόμενο φαινόμενο, ενώ η συχνότητα ορίζεται σαν το πηλίκο του αριθμού των επαναλήψεων προς το αντίστοιχο χρονικό διάστημα και η μονάδα μέτρησης της είναι τα Hertz (= κύκλος/δευτερόλεπτο) (Φωτίου & Πικριδάς, 2006d).

Ταλάντωση ονομάζεται μια παλινδρομική περιοδική κίνηση. Γραμμική ταλάντωση ονομάζεται η ταλάντωση που εξελίσσεται πάνω σε ευθεία τροχιά. Μια ειδική περίπτωση γραμμικής ταλάντωσης είναι η απλή αρμονική ταλάντωση (Καραδημητρίου Ε. Μιχάλης, 2012).

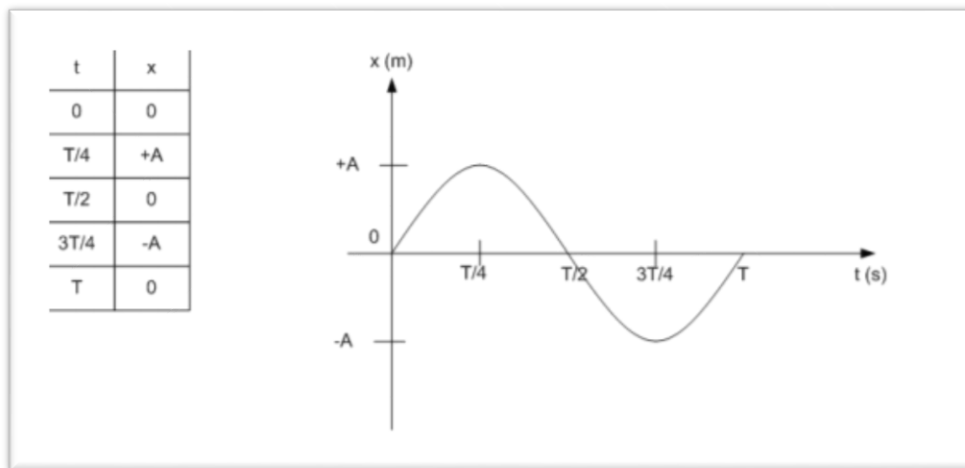
Έστω ένα σώμα που κινείται παλινδρομικά πάνω σε έναν άξονα γύρω από την αρχή O του άξονα, που είναι το μέσον της τροχιάς του. Αν η απομάκρυνση x του σώματος από το σημείο O είναι αρμονική συνάρτηση του χρόνου t , δηλαδή δίνεται από την σχέση : $x = A\eta\mu(\omega t + \varphi_0)$, τότε η κίνηση του σώματος λέγεται απλή αρμονική ταλάντωση. Το A είναι η μέγιστη απομάκρυνση, δηλαδή η μέγιστη απόσταση από το σημείο O στην οποία φτάνει το σώμα και ονομάζεται πλάτος της ταλάντωσης.

Η γωνία $\varphi = \omega t + \varphi_0$ που η τιμή της καθορίζει και την τιμή της απομάκρυνσης x του σώματος την χρονική στιγμή t ονομάζεται *φάση* της ταλάντωσης. Το σημείο O είναι η

Θέση ισορροπίας της ταλάντωσης. Η φάση αυξάνεται συνεχώς με τον χρόνο και σε χρονικό διάστημα $\Delta t = T$ αντιστοιχεί σε αύξηση της φάσης κατά $\Delta\phi = 2\pi\text{rad}$. Η ποσότητα ϕ_0 είναι η φάση της ταλάντωσης για την χρονική στιγμή $t = 0$ και γι' αυτό ονομάζεται *αρχική φάση*. Ουσιαστικά η αρχική φάση καθορίζεται από τις αρχικές συνθήκες της απλής αρμονικής ταλάντωσης (θέση, ταχύτητα, επιτάχυνση). Για την αρχική φάση ισχύει : $0 \leq \phi_0 < 2\pi$ (Καραδημητρίου Ε. Μιχάλης, χ.χ.).

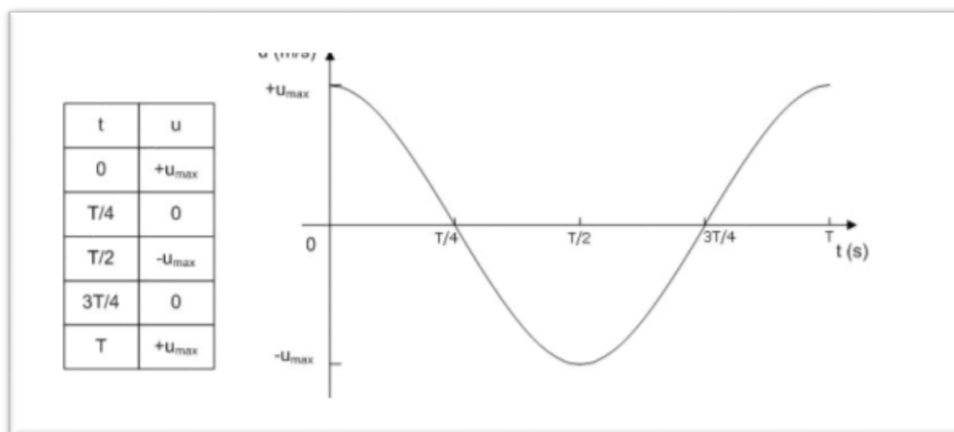
Στα διαγράμματα 1 και 2 αποδίδεται η μεταβολή της απομάκρυνσης και της ταχύτητας σε συνάρτηση με τον χρόνο για ένα σώμα που εκτελεί απλή αρμονική ταλάντωση με $\phi_0 = 0$.

Διάγραμμα 1: Απομάκρυνση-Χρόνος



Πηγή: (Καραδημητρίου Ε. Μιχάλης, χ.χ.)

Διάγραμμα 2: Ταχύτητα-Χρόνος



Πηγή: (Καραδημητρίου Ε. Μιχάλης, χ.χ.)

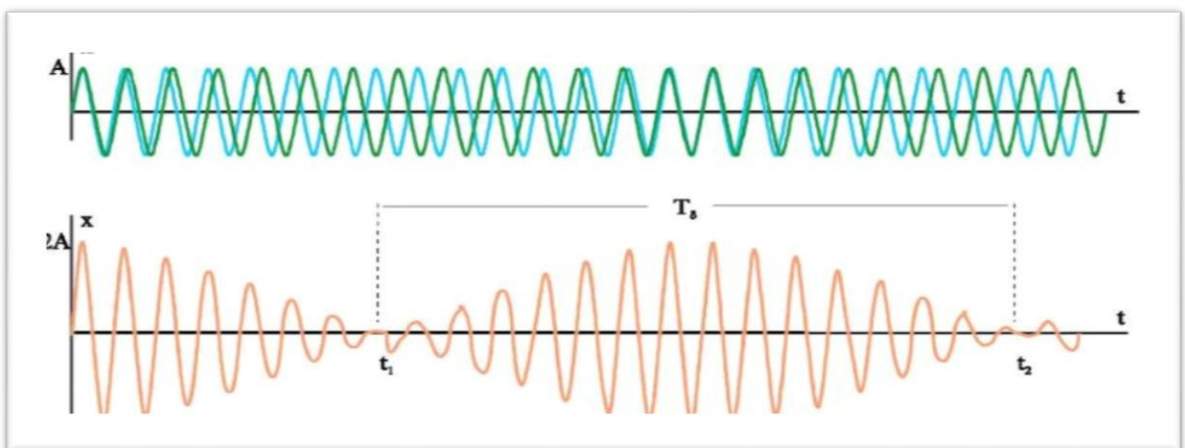
Από τα ανωτέρω διαγράμματα παρατηρείται ότι η χρονική στιγμή $t = 0$ δίνει την αρχική φάση φ_0 και ότι η ταχύτητα του σώματος μηδενίζεται στις ακραίες θέσεις, ενώ μεγιστοποιείται όταν το σώμα διέρχεται από την θέση ισορροπίας.

Η σχέση της φάσης με τον χρόνο είναι άμεση και η σταθερότητα της συχνότητας καθορίζει και την ακρίβεια του χρόνου. Η φάση μπορεί να εκφράζεται σε ακτίνια, κύκλους ή μονάδες απόστασης και εξαρτάται από την απόσταση από την πηγή. Αυτό σημαίνει πως την ίδια χρονική στιγμή τα διάφορα σημεία του μέσου έχουν διαφορετική φάση. Η σχέση της φάσης με τον χρόνο είναι αυτή που αξιοποιείται στις μετρήσεις των δεκτών GNSS όπου οι μετρήσεις φάσεις μεταφράζονται σε απόσταση αν αντιστοιχηθούν σε γνωστές χρονικές εποχές (Φωτίου & Πικριδάς, 2006d).

Σύνθεση απλών αρμονικών ταλαντώσεων είναι η εύρεση της συνισταμένης κίνησης δύο ή περισσότερων ταλαντώσεων που εκτελεί ταυτόχρονα ένα σώμα. Η συνισταμένη απομάκρυνση σε κάθε χρονική στιγμή είναι ίση με το άθροισμα των επιμέρους απομακρύνσεων αν το σώμα έκανε την κάθε κίνηση χωριστά στο ίδιο χρονικό διάστημα (αρχή της επαλληλίας) (Φωτίου & Πικριδάς, 2006d).

Όταν ένα σώμα εκτελεί δύο απλές αρμονικές ταλαντώσεις ίδιας διεύθυνσης, ίδιου πλάτους, γύρω από το ίδιο σημείο ισορροπίας με συχνότητες που να διαφέρουν λίγο, τότε η τελική κίνηση του σώματος είναι μια ιδιόμορφη ταλάντωση, που ονομάζεται διακρότημα, με συχνότητα ίση με τον μέσο όρο των δύο αρχικών συχνοτήτων και μεταβαλλόμενο πλάτος ('Διακροτήματα με τη Χρήση Ηλεκτρονικού Υπολογιστή', χ.χ.).

Διάγραμμα 3: Σύνθεση ταλαντώσεων



Πηγή: ('Διακροτήματα με τη Χρήση Ηλεκτρονικού Υπολογιστή', χ.χ.)

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 3, από τη σύνθεση δύο αρμονικών ταλαντώσεων (πράσινη και γαλάζια γραμμή) με πολύ μικρή διαφορά συχνότητας, παράγεται μια περιοδική κίνηση που παρουσιάζει διακροτήματα. Η συχνότητα του διακροτήματος είναι ίση με την διαφορά των συχνοτήτων των δύο αρχικών ταλαντώσεων.

Οι σειρές Fourier μπορούν να αναπαραστήσουν κάθε σήμα που είναι περιοδικό στο πεδίο του χρόνου ως ένα άθροισμα αρμονικά σχετιζόμενων ημιτονοειδών κυμάτων. Η αναπαράσταση ενός σήματος στο πεδίο του χρόνου με ένα άθροισμα ημιτονικών ή συνημιτονικών όρων αναφέρεται συνήθως ως το φάσμα του σήματος. Η βασική ιδέα του μετασχηματισμού Fourier είναι ότι κάθε αυθαίρετο σήμα (για παράδειγμα του χρόνου) μπορεί πάντα να αναλυθεί σε μια ομάδα ημιτονοειδών καμπύλων διαφορετικών συχνοτήτων. Ο μετασχηματισμός Fourier παράγεται από τη διαδικασία προβολής του σήματος σε μια ομάδα βασικών συναρτήσεων, κάθε μια από τις οποίες είναι μια ημιτονοειδής καμπύλη με μοναδική συχνότητα. Οι προκύπτουσες τιμές προβολής διαμορφώνουν το μετασχηματισμό Fourier (ή το φάσμα συχνότητας) του αρχικού σήματος. Η τιμή του σε μια συγκεκριμένη συχνότητα είναι ένα μέτρο της ομοιότητας του σήματος με την ημιτονοειδή βάση σε εκείνη την συχνότητα. Επομένως, οι φασματικές ιδιότητες του σήματος μπορούν να αποκαλυφθούν μέσω του μετασχηματισμού Fourier. Σε πολλές εφαρμογές εφαρμοσμένης μηχανικής, αυτό έχει αποδειχθεί εξαιρετικά χρήσιμο στο χαρακτηρισμό, την ερμηνεία, και τον προσδιορισμό των σημάτων (Χρήστου Κ, 2006).

2.2 Ηλεκτρομαγνητικό κύμα

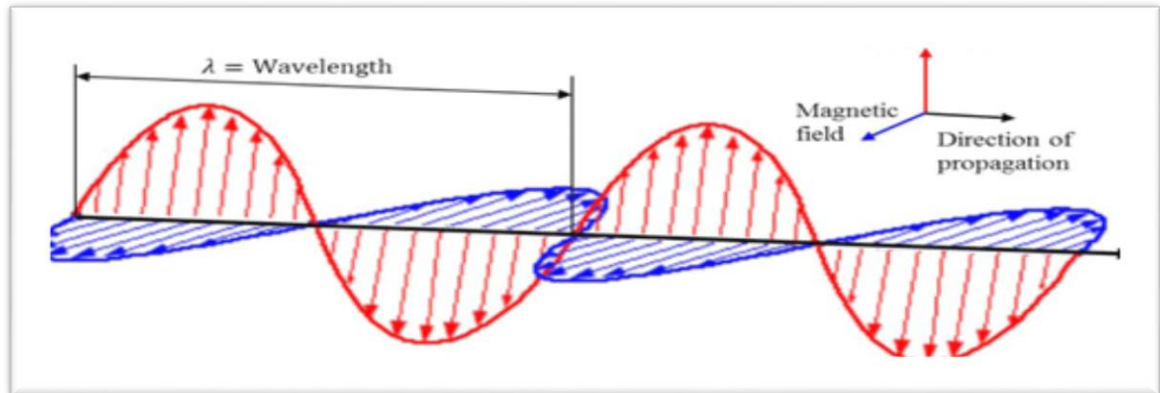
Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα παράγονται από την επιταχυνόμενη κίνηση ηλεκτρικών φορτίων που ταλαντώνονται διαδίδοντας ταυτόχρονα ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό πεδίο.

Το σύνολο των μηκών κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας αποτελεί το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα είναι η ταξινόμηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σύμφωνα με το μήκος κύματος ή με τη συχνότητα ή την ενέργεια (Μερτίκας Π, 2006).

Σύμφωνα με την θεωρία της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, «η ενέργεια μεταδίδεται με τη μορφή αρμονικού ημιτονοειδούς κύματος. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αποτελείται από ένα ηλεκτρικό πεδίο (Electric Field), που αντιπροσωπεύει τις

ηλεκτρικές μεταβολές και το οποίο μεταβάλλεται εγκάρσια προς τη διεύθυνση διάδοσης του (βλ. διάγραμμα 4). Επιπλέον υπάρχει και ένα μαγνητικό πεδίο (Magnetic Field) που είναι αλληλένδετο με το προηγούμενο αλλά είναι προσανατολισμένο κάθετα προς το ηλεκτρικό πεδίο και διαδίδεται με την ίδια φάση» (Μερτίκας Π, 2006)

Διάγραμμα 4: Η ηλεκτρομαγνητική ταλάντωση στον χώρο



Πηγή: ('Figure 1: An EM wave consists of 2 components: electric field and...', χ.χ.)

Η ταχύτητα διάδοσης όλων των κυμάτων εξαρτάται από κάποιες φυσικές ιδιότητες του μέσου διάδοσης. Για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα η ταχύτητα διάδοσης εξαρτάται από τη διηλεκτρική σταθερά και μαγνητική διαπερατότητα της ύλης και είναι διαφορετική από την ταχύτητα διάδοσης στο κενό η οποία είναι σταθερή και ίση με 299792458m/s (Φωτίου & Πικριδάς, 2006d).

Με τον όρο διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων εννοείται η πορεία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και η μεταφορά Η/Μ ενέργειας από μια κεραία πομπού σε μια κεραία δέκτη σε περιβάλλον που συμμετέχουν τόσο το έδαφος και η τροπόσφαιρα ή ιονόσφαιρα, όσο και διάφορες φυσικές ή τεχνητές δομές. Οι μηχανισμοί της διάδοσης εξαρτώνται από τη χρησιμοποιούμενη συχνότητα, τα διαγράμματα ακτινοβολίας και τα κέρδη των κεραιών, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του εδάφους και των διάφορων σκεδαστών της Η/Μ ενέργειας, καθώς και από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τη σχετική θέση κεραιών και σκεδαστών στο χώρο (Χρήστου Κ, 2006) .

Η επίδραση όλων αυτών των παραγόντων στο εκπεμπόμενο σήμα γίνεται αντιληπτή ως μεταβολή και πιθανώς παραμόρφωση λαμβανόμενου από το δέκτη σήματος.

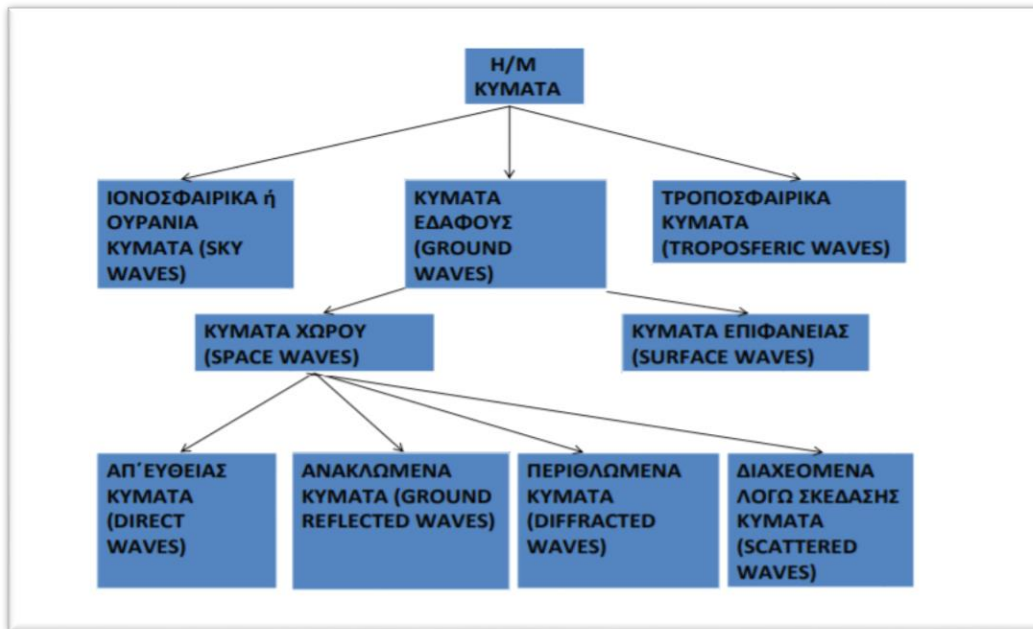
Η λεπτομερής περιγραφή του λαμβανόμενου σήματος και η δυνατότητα πρόβλεψης των μεταβολών και των παραμορφώσεων που υπόκειται στο εκπεμπόμενο σήμα είναι εξαιρετικά μεγάλης σημασίας για όσους ασχολούνται με την κατασκευή των δεκτών GNSS. Ταυτόχρονα όμως είναι μια ιδιαίτερα σύνθετη διαδικασία, αφού οι παράγοντες που επηρεάζουν του μηχανισμούς της διάδοσης μεταβάλλονται με τρόπο τυχαίο, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να γίνει αναλυτική περιγραφή των φαινομένων και ακριβής εκτίμηση των μεγεθών, παρά μόνο με στατιστικούς όρους.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές. Ιδιαίτερα στη μεταφορά πληροφοριών σε μεγάλες αποστάσεις, μεταξύ των οποίων και με το GNSS, όπου χρησιμοποιείται το φάσμα των ραδιοκυμάτων και μικροκυμάτων. Η μετάδοση μιας πληροφορίας και η λήψη της απαιτεί τη χρήση ενός πομπού και ενός δέκτη. Η πληροφορία παράγεται στον πομπό από ένα μηχανισμό και μετατρέπεται σε ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο στη συνέχεια προστίθεται σε μία υψίσυχη συχνότητα (ηλεκτρικό ρεύμα) που καλείται *φέρουσα συχνότητα ή φέρον κύμα*. Η διαδικασία της διαμόρφωσης γίνεται με ψηφιακό τρόπο και το διαμορφωμένο πλέον σήμα οδηγείται στην κεραία εκπομπής η οποία εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα της ίδιας μορφής. Ένας δέκτης λαμβάνει το διαμορφωμένο σήμα, μέσω της κεραίας του, και με την κατάλληλη επεξεργασία αντλεί την μεταφερόμενη πληροφορία (Φωτίου & Πικριδάς, 2006d).

Η ταχύτητα και η διεύθυνση του δορυφορικού σήματος μεταβάλλονται κατά τη διάδοση του στην ατμόσφαιρα και οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις στο σήμα (ροή πληροφορίας) είναι σημαντικές και πρέπει να αντιμετωπίζονται πολύ προσεκτικά (Φωτίου & Πικριδάς, 2006d).

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που μπορεί να καταφθάνουν στον δέκτη χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τους μηχανισμούς διάδοσης, όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα.

Διάγραμμα 5: Κατηγορίες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων



Πηγή: (Χρήστου Κ, 2006)

Τα ιονοσφαιρικά ή ουράνια κύματα είναι κύματα που ανακλώνται ή υπόκεινται σκέδαση από την ιονόσφαιρα. Τα τροποσφαιρικά κύματα, είναι κύματα που ανακλώνται, περιθλώνται ή υπόκεινται σκέδαση από την τροπόσφαιρα. Τα κύματα εδάφους είναι κύματα που μεταδίδονται κοντά στην επιφάνεια της γης και χωρίζονται σε κύματα χώρου και κύματα επιφάνειας. Τα κύματα χώρου με τη σειρά τους περιλαμβάνουν τα απευθείας κύματα, τα ανακλώμενα από το έδαφος κύματα, και τα περιθλώμενα από τα εμπόδια στην επιφάνεια της γης κύματα (Χρήστου Κ, 2006).

2.3 Το φαινόμενο Doppler

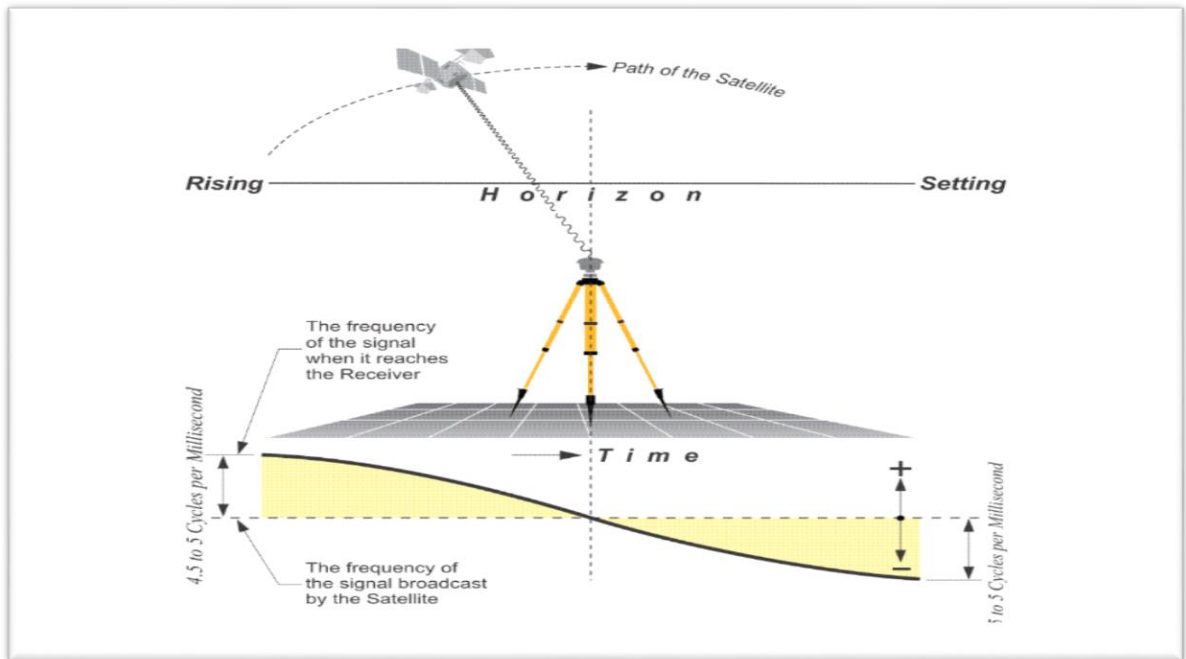
Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ένας παρατηρητής αντιλαμβάνεται διαφορετικά μια εκπεμπόμενη συχνότητα από μια πηγή λόγω της σχετικής κίνησης μεταξύ τους. Το φαινόμενο Doppler ισχύει για όλες τις μορφές κυμάτων και στην περίπτωση του δορυφορικού σήματος (ηλεκτρομαγνητικό κύμα) στα GNSS, ο δέκτης είναι ο παρατηρητής ενώ ο δορυφόρος η πηγή. Αυτή η διαφορά αντίληψης συχνότητας (Συχνότητα πηγής-Συχνότητα που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής) ονομάζεται *μετατόπιση Doppler* (Φωτίου & Πικριδάς, 2006d).

Καθώς ο δορυφόρος βρίσκεται σε τροχιά, η απόσταση μεταξύ του δέκτη και του δορυφόρου αλλάζει και αυτή η σταθερή αλλαγή αντικατοπτρίζεται σε μια ομαλή και

συνεχή κίνηση της φάσης του σήματος που έρχεται στον δέκτη. Ο ρυθμός αυτής της μεταβολής αντικατοπτρίζεται στη σταθερή μεταβολή της μετατόπισης Doppler του σήματος. Αλλά αν η συχνότητα του ταλαντωτή του δέκτη ταιριάζει ακριβώς με αυτές τις παραλλαγές, καθώς συμβαίνουν, θα αντιγράψει τη μετατόπιση και τη φάση Doppler του εισερχόμενου σήματος. Αυτή η στρατηγική λήψης μετρήσεων χρησιμοποιώντας τη φαινομενική φάση του φέροντος φορέα είναι θέμα μέτρησης των κύκλων που έχουν περάσει και προσθήκη της κλασματικής φάσης του ταλαντωτή του δέκτη ('Doppler Shift: GPS and GNSS for Geospatial Professionals', χ.χ.).

Οι πληροφορίες Doppler έχουν ευρείες εφαρμογές στην επεξεργασία σήματος. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διάκριση μεταξύ των σημάτων από διάφορους δορυφόρους, για τον προσδιορισμό ασαφούς ακέραιου αριθμού σε κινηματικές μετρήσεις, ως βοήθεια για την ανίχνευση των χαμένων κύκλων και ως επιπλέον ανεξάρτητο παρατηρήσιμο για αυτόνομο προσδιορισμό θέσης. Αλλά ίσως η πιο σημαντική εφαρμογή των δεδομένων Doppler είναι ο προσδιορισμός του *ρυθμού εμβέλειας* μεταξύ ενός δέκτη και ενός δορυφόρου. Ο ρυθμός εμβέλειας είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να δηλώσει τον ρυθμό με τον οποίο η περιοχή μεταξύ ενός δορυφόρου και ενός δέκτη αλλάζει σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Αυτή η τυπική αλλαγή φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.

Διάγραμμα 6: Τυπική μετατόπιση Doppler



Πηγή: ('Doppler Shift: GPS and GNSS for Geospatial Professionals', χ.χ.)

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 6, καθώς ο δορυφόρος ανεβαίνει ή κινείται προς τον δέκτη, η μετατόπιση Doppler είναι περίπου 4 1/2 έως 5 κύκλοι ανά χιλιοστό του δευτερολέπτου. Στο ζενίθ ή στην πλησιέστερη προσέγγισή του, η μετατόπιση είναι ονομαστικά μηδέν. Στη συνέχεια πηγαίνει από το θετικό σε αρνητικό, επιστρέφοντας ξανά σε περίπου 4 1/2 έως 5 κύκλους ανά χιλιοστό του δευτερολέπτου καθώς απομακρύνεται και πρόκειται να ρυθμιστεί σε σχέση με τον δέκτη.

Η σταθερή μετατόπιση που προκαλείται από τη συνεχή κίνηση του δορυφόρου σε σχέση με τον δέκτη είναι εύκολα προβλέψιμη και αυτό (η σταθερή μεταβολή της μετατόπισης Doppler του σήματος) το καθιστά καλό παρατηρήσιμο. Εάν η συχνότητα του ταλαντωτή του δέκτη είναι ρυθμισμένη ώστε να ταιριάζει ακριβώς με αυτές τις παραλλαγές τη στιγμή που συμβαίνουν, θα αντιγράψει την αλλαγή και τη φάση του εισερχόμενου σήματος. Η εν λόγω στρατηγική λήψης μετρήσεων χρησιμοποιώντας τη φαινομενική φάση του φέροντος φορέα είναι θέμα μέτρησης των κύκλων που έχουν περάσει και προσθήκη της κλασματικής φάσης του ταλαντωτή του δέκτη. Αυτός είναι ένας τρόπος ώστε ο βρόχος κλειδώματος φάσης να διατηρεί την κλειδαριά του επί του σήματος καθώς συμβαίνει η μετατόπιση Doppler με κάθε έναν από τους δορυφόρους που παρακολουθεί ('Doppler Shift: GPS and GNSS for Geospatial Professionals', χ.χ.).

2.3.1 Τυπικές αλλαγές στη μετατόπιση Doppler

Σε σχέση με τον δέκτη, ο δορυφόρος είναι πάντα σε κίνηση ακόμη και αν ο δέκτης είναι στατικός. Αλλά ο δέκτης μπορεί να είναι σε κίνηση με μια άλλη έννοια, όπως είναι στον κινηματικό εντοπισμό. Η ικανότητα προσδιορισμού της στιγμιαίας ταχύτητας ενός κινούμενου οχήματος αποτελούσε πάντοτε πρωταρχική εφαρμογή των συστημάτων προσδιορισμού θέσης και βασίζεται στο γεγονός ότι η συχνότητα μετατόπισης Doppler του σήματος ενός δορυφόρου είναι σχεδόν ανάλογη με την ακτινική ταχύτητα (ρυθμός μεταβολής απόστασης δέκτη-δορυφόρου).

Για να δούμε πώς λειτουργεί, ας δούμε ένα στατικό, δηλαδή σταθερό, δέκτη GPS. Το λαμβανόμενο σήμα θα έχει τη μέγιστη μετατόπιση Doppler, 4,5 έως 5 κύκλους ανά χιλιοστό του δευτερολέπτου, όταν ο δορυφόρος βρίσκεται στη μέγιστη εμβέλειά του. Η μετατόπιση Doppler αλλάζει συνεχώς καθ' όλη τη διάρκεια της εναέριας διέλευσης. Αμέσως μετά την άνοδο του δορυφόρου, σε σχέση με έναν συγκεκριμένο δέκτη, η μετατόπιση του Doppler μειώνεται συνεχώς, μέχρι ο δορυφόρος να φτάσει στην πλησιέστερη προσέγγισή του. Αυτή τη στιγμή η ακτινική ταχύτητά του σε σχέση με τον δέκτη είναι μηδέν, η μετατόπιση Doppler του σήματος είναι επίσης μηδέν. Όμως, καθώς ο δορυφόρος υποχωρεί, αυξάνεται και πάλι, αρνητικά, έως ότου η μετατόπιση Doppler φτάσει και πάλι στη μέγιστη δυνατή έκταση ('Doppler Shift: GPS and GNSS for Geospatial Professionals', χ.χ.)

Η μετατόπιση Doppler μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διάκριση μεταξύ των σημάτων των διαφόρων δορυφόρων για να βοηθήσει στον προσδιορισμό της αβεβαιότητας του ακέραιου αριθμού. Μπορεί να βοηθήσει στην ανίχνευση της απώλειας κλειδώματος λόγω της ολίσθησης του κύκλου.

2.3.2 Συνεχώς ενσωματωμένο Doppler

Η μετατόπιση Doppler και η φάση φορέα μετριοούνται συνδυάζοντας πρώτα τις λαμβανόμενες συχνότητες με την ονομαστικά σταθερή συχνότητα αναφοράς που δημιουργείται από τον ταλαντωτή του δέκτη. Η διαφορά μεταξύ των δύο είναι η *συχνότητα κτύπων*, μια ενδιάμεση συχνότητα, και ο αριθμός των κτύπων σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα, είναι γνωστός ως ο αριθμός Doppler για αυτό το διάστημα. Δεδομένου ότι οι κτύποι μπορούν να μετρηθούν πολύ ακριβέστερα απ' ό, τι μπορεί να μετρηθεί η συνεχώς μεταβαλλόμενη συχνότητα τους, οι περισσότεροι δέκτες

GPS παρακολουθούν απλώς τους συσσωρευμένους κύκλους, τον αριθμό Doppler . Το άθροισμα των διαδοχικών μετρήσεων Doppler από ένα ολόκληρο δορυφορικό πέρασμα αποθηκεύεται συχνά και τα δεδομένα μπορούν στη συνέχεια να αντιμετωπίζονται όπως μια σειρά διαδοχικών προκαταλαμβανόμενων διαφορών. Ο ρυθμός μεταβολής της συνεχώς ενσωματωμένης μετατόπισης Doppler του εισερχόμενου σήματος είναι ο ίδιος με εκείνον της ανακατασκευασμένης φάσης φορέα ('Doppler Shift: GPS and GNSS for Geospatial Professionals', χ.χ.).

Η ενσωμάτωση της μετατόπισης συχνότητας Doppler οδηγεί σε ακριβή μέτρηση της προόδου στη φάση του φορέα μεταξύ των εποχών και χρησιμοποιώντας διπλές διαφορές στην επεξεργασία των φαινομενικών φάσεων φορέα απομακρύνονται οι περισσότερες πηγές σφάλματος εκτός του θορύβου πολλαπλών διαδρομών και δέκτη. Η συνεχής ενσωμάτωση της μετατόπισης Doppler είναι ένας από τους τρόπους με τους οποίους μπορεί να χρησιμοποιηθεί το παρατηρήσιμο για τη βελτίωση της θέσης. Η διαφορά μεταξύ των δύο, δηλαδή η εισερχόμενη συχνότητα και η συχνότητα αναφοράς που παράγεται από τον δέκτη, είναι μια συχνότητα κτύπων σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα γνωστό ως μέτρηση Doppler για αυτό το διάστημα. Δεδομένου ότι οι κτύποι μπορούν να μετρηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια από ό, τι μπορεί να μετρηθεί η συνεχώς μεταβαλλόμενη συχνότητα, οι περισσότεροι δέκτες GNSS παρακολουθούν τους συσσωρευμένους κύκλους ή τον αριθμό Doppler. Η ενσωμάτωση της μετατόπισης Doppler στους δέκτες GNSS είναι μια ευπρόσδεκτη προσθήκη στο πλήρες πλήθος των παρατηρήσεων που χρησιμοποιεί ο δέκτης για να καθορίσει μια θέση ('Doppler Shift: GPS and GNSS for Geospatial Professionals', χ.χ.).

2.4 Διαμόρφωση δορυφορικού σήματος στα συστήματα GNSS

Οι δορυφόροι των συστημάτων GNSS εκπέμπουν συνεχώς κωδικοποιημένα ραδιοσήματα τα οποία λαμβάνονται και επεξεργάζονται στους δορυφορικούς δέκτες για τον υπολογισμό:

- Του χρόνου της διάδοσης των δορυφορικών σημάτων από τον δορυφόρο μέχρι τον δέκτη
- Των συντεταγμένων της θέσης των δορυφόρων σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή.

Ακολούθως, όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 3.2, οι συντεταγμένες της θέσης του δορυφορικού δεκτή προσδιορίζονται στην τομή σφαιρικών επιφανειών που έχουν τα

κέντρα τους στις θέσεις των δορυφόρων και ακτίνες τις απόστασεις του δέκτη από τους δορυφόρους, οι οποίες υπολογίζονται πολλαπλασιάζοντας την ταχύτητα του φωτός με τον χρόνο διάδοσης του δορυφορικού σήματος (*Ναυτικά ηλεκτρονικά όργανα.pdf, χ.χ.*). Τα δορυφορικά σήματα που εκπέμπονται από ένα σύστημα GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, κ.λπ.) αποτελούν σύνθεση των πιο κάτω σημάτων:

1. Ένα συνεχώς ημιτονοειδές σήμα το οποίο μεταφέρει τα υπόλοιπα σήματα (φέρων κύμα)
2. Ένα ψηφιακό σήμα – κώδικα ψευδοτυχαίας σειράς που χρησιμοποιείται για να αναγνωρίσει ο δέκτης τον δορυφόρο που εκπέμπει το σήμα ούτως ώστε να προσδιοριστεί η απόσταση δορυφόρου-δέκτη
3. Ένα ψηφιακό σήμα που ονομάζεται μήνυμα πλοήγησης το οποίο μεταφέρει στους δέκτες βασικές πληροφορίες (ακριβής θέση δορυφόρου, χρόνος εκπομπής σήματος, κατάσταση δορυφόρου)

Ο δέκτης έχει στη μνήμη του καταχωρημένα αντίγραφα των κωδικών ψευδοτυχαίας σειράς όλων των δορυφόρων του συστήματος και μετά την λήψη του σήματος και αποκωδικοποίησή του, προσπαθεί να ταυτίσει, δοκιμάζοντας όλα τα αντίγραφα, το αντίγραφο του κώδικα ψευδοτυχαίας σειράς που ταιριάζει με αυτόν του εκάστοτε λαμβανόμενου δορυφορικού σήματος. Έτσι, ο δέκτης γνωρίζοντας το μέγεθος των παλμών που χρησιμοποιεί ο κώδικας, μετρά τη διαφορά χρόνου η οποία αντιστοιχεί στον χρόνο διάδοσης του δορυφορικού σήματος από τον δορυφόρο στον δέκτη. Η απόσταση δορυφόρου - δέκτη μπορεί να προσδιοριστεί αν πολλαπλασιαστεί η διαφορά χρόνου με την ταχύτητα διάδοσης των ραδιοκυμάτων όμως περιέχει ορισμένα σφάλματα, τα οποία αναλύονται στο υποκεφάλαιο 3.4, και γι' αυτό καλείται *ψευδοαπόσταση* (*Ναυτικά ηλεκτρονικά όργανα.pdf, χ.χ.*).

Οι δορυφόροι των συστημάτων GNSS εκπέμπουν σήματα σε διάφορες συχνότητες, όπως οι συχνότητες του GPS (L1=1575,42Mhz, L2=1227,6Mhz), οι συχνότητες του GLONASS (L1= 1620Mhz, L2=1246Mhz) κ.λπ.

Στο GPS οι κώδικες ψευδοτυχαίας σειράς (PRN) είναι δύο ειδών και διαφορετικοί για κάθε δορυφόρο (Φωτίου & Πικριδάς, 2006d):

- Κώδικας C/A: Προστίθεται μόνο στον φορέα L1 και είναι σε ελεύθερη χρήση.
- Κώδικας P: Προστίθεται και στους δύο φορείς και είναι διαθέσιμος σε εξουσιοδοτημένους χρήστες.

Στο σύστημα GLONASS, οι κωδικοί που μεταδίδονται από τους δορυφόρους είναι διαμορφωμένοι και στις δύο συχνότητες με αποτέλεσμα να προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης σε σχέση με το GPS (Φωτίου & Πικριδάς, 2006d).

Οι εν ενεργεία επιχειρησιακοί δορυφόροι σε ένα συγκεκριμένο σύστημα GNSS εκπέμπουν σε δύο ή περισσότερες συχνότητες από τις προαναφερθείσες αναλόγως της χρονολογίας εκτόξευσης τους και τα χαρακτηριστικά των δορυφορικών σημάτων βελτιώνονται με την εκτόξευση νέων δορυφόρων που αντικαθιστούν παλαιότερους. Τα νέα δορυφορικά σήματα, λόγω της εξέλιξης τους, δεν μπορούν να αξιοποιηθούν από παλαιότερους δέκτες με αποτέλεσμα οι δέκτες αυτοί να έχουν περιορισμένες δυνατότητες. Οι σύγχρονοι δέκτες έχουν τη δυνατότητα, συνήθως, λήψης και επεξεργασίας δορυφορικών σημάτων από περισσότερα του ενός δορυφορικά συστήματα GNSS, δηλαδή μπορούν να λαμβάνουν σήμα τόσο από τους δορυφόρους του GPS όσο και από δορυφόρους Galileo, GLONASS, BeiDou κ.λπ., και αυτό τους καθιστά πιο αξιόπιστους και με αυξημένες δυνατότητες (*Ναυτικά ηλεκτρονικά όργανα.pdf, χ.χ.*).

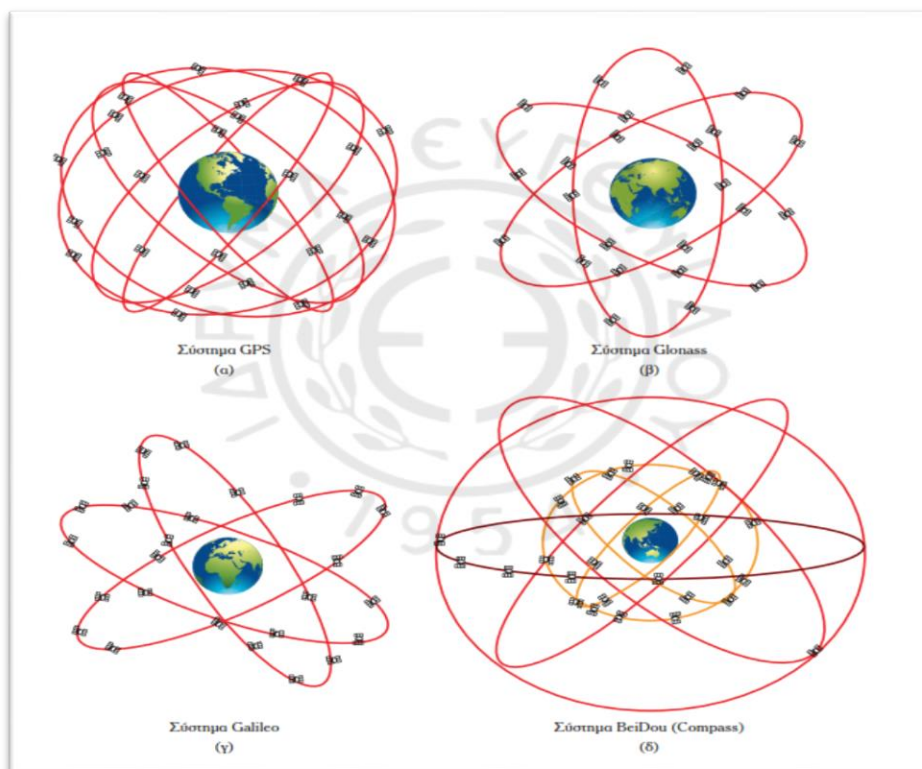
3 Βασικές αρχές λειτουργίας των συστημάτων GNSS

3.1 Τα τμήματα των συστημάτων GNSS

Ένα σύστημα GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, κ.λπ.) αποτελείται από τρία βασικά τμήματα:

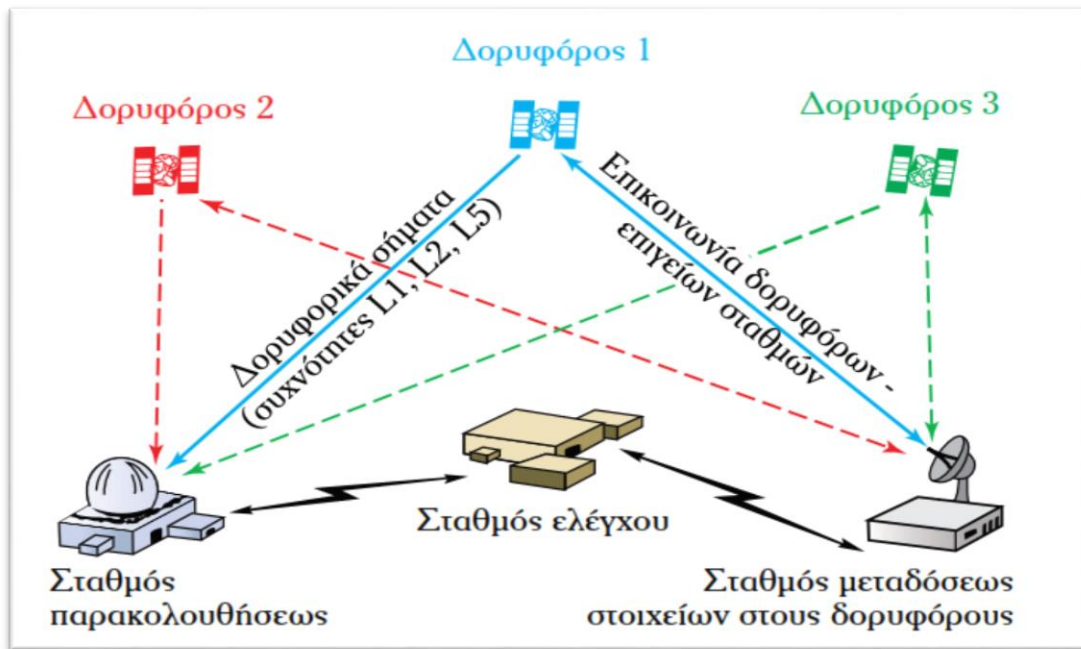
1. *Δορυφορικό τμήμα* το οποίο αποτελείται από τους δορυφόρους του συστήματος για τον προσδιορισμό της θέσης του δέκτη. Κάθε σύστημα GNSS διαθέτει διαφορετικό αριθμό δορυφόρων οι οποίοι κινούνται σε διαφορετική τροχιά και με διαφορετικό σχηματισμό (βλ. διάγραμμα 7)
2. *Επίγειο τμήμα συστημάτων GNSS* το οποίο αποτελείται από σταθμούς ελέγχου, παρακολούθησης και καταγραφής δορυφορικών σημάτων και σταθμούς μετάδοσης επεξεργασμένων στοιχείων προς τους δορυφόρους (βλ. διάγραμμα 8)
3. *Τμήμα χρηστών* που αποτελείται από τους δορυφορικούς δέκτες οι οποίοι λαμβάνουν και επεξεργάζονται τα δορυφορικά σήματα σε διάφορες εφαρμογές.

Διάγραμμα 7: Δορυφορικοί σχηματισμοί συστημάτων GNSS



Πηγή: (Ναυτικά ηλεκτρονικά όργανα.pdf, χ.χ.)

Διάγραμμα 8: Επίγειο τμήμα συστημάτων GNSS



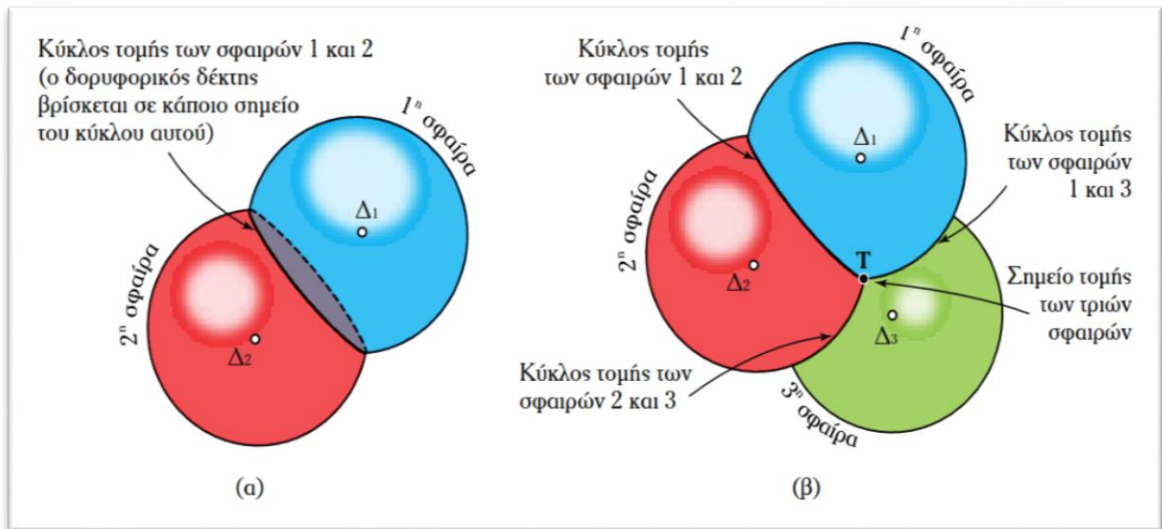
Πηγή: (Ναυτικά ηλεκτρονικά όργανα.pdf, χ.χ.)

3.2 Δορυφορικός προσδιορισμός θέσης

Ο προσδιορισμός της θέσης ενός σημείου πάνω ή κοντά στην επιφάνεια της γής, στα σύγχρονα δορυφορικά συστήματα GNSS, γίνεται με τη μέτρηση αποστάσεων δορυφόρου – δέκτη. Μια απλή επεξήγηση της γεωμετρίας της μεθόδου δορυφορικού προσδιορισμού θέσεως βασίζεται στο ότι η θέση του δέκτη προσδιορίζεται στην τομή σφαιρικών επιφανειών με κέντρα της θέσεις των δορυφόρων και ακτίνες τις αποστάσεις δέκτη – δορυφόρου (Ναυτικά ηλεκτρονικά όργανα.pdf, χ.χ.).

Η θέση του δέκτη σε κάθε χρονική στιγμή ορίζεται από την τομή τριών σφαιρών, αν υποθετικά τα ρολόγια των δεκτών και δορυφόρων είναι τελείως συγχρονισμένα. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 9, από την τομή δύο σφαιρών προκύπτει μια καμπύλη ενώ από την τομή της καμπύλης με την τρίτη σφαίρα προκύπτουν δύο σημεία εκ των οποίων το ένα είναι το ζητούμενο και βρίσκεται πάνω ή κοντά στη γή και άρα εύκολα εντοπίσιμο (Φωτίου & Πικριδάς, 2006ε).

Διάγραμμα 9: Δορυφορικός προσδιορισμός θέσης στην τομή σφαιρικών επιφανειών



Πηγή: (Ναυτικά ηλεκτρονικά όργανα.pdf, χ.χ.)

Με βάση τα ανωτέρω, απαιτούνται τρεις ταυτόχρονες παρατηρήσεις αποστάσεων, όσες δηλαδή και οι άγνωστες συντεταγμένες (X,Y,Z) που εκφράζουν τη θέση. Όμως στην πραγματικότητα τα ρολόγια δορυφόρου – δέκτη ποτέ δεν είναι απόλυτα συγχρονισμένα και άρα πάντα υπάρχουν συστηματικά σφάλματα τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Το σφάλμα του ρολογιού του δορυφόρου υπολογίζεται από τον δέκτη μέσω του μηνύματος πλοήγησης, ενώ άγνωστο παραμένει το σφάλμα του ρολογιού του δέκτη. Έτσι για τον προσδιορισμό θέσης υπάρχει ακόμα μια αγνώστη παράμετρος αυτή της διόρθωσης του χρόνου του δέκτη και ως εκ τούτου, *απαιτούνται τουλάχιστον τέσσερις ταυτόχρονες παρατηρήσεις αποστάσεων προς τέσσερις δορυφόρους αντιστοίχως*. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ο προσδιορισμός θέσης σε πραγματικό χρόνο (Φωτίου & Πικριδάς, 2006ε).

3.3 Ο δέκτης των συστημάτων GNSS

Ένας δέκτης στα συστήματα GNSS είναι μια συσκευή υψηλής τεχνολογίας που χωρίζεται σε δύο βασικά μέρη: Την κεραία για λήψη του δορυφορικού σήματος και τον κυρίως δέκτη για την περαιτέρω επεξεργασία του. Τα δύο μέρη μπορεί να είναι είτε ξεχωριστές μονάδες συνδεδεμένες μεταξύ τους είτε να είναι μια συμπαγής συσκευή (Φωτίου & Πικριδάς, 2006α).

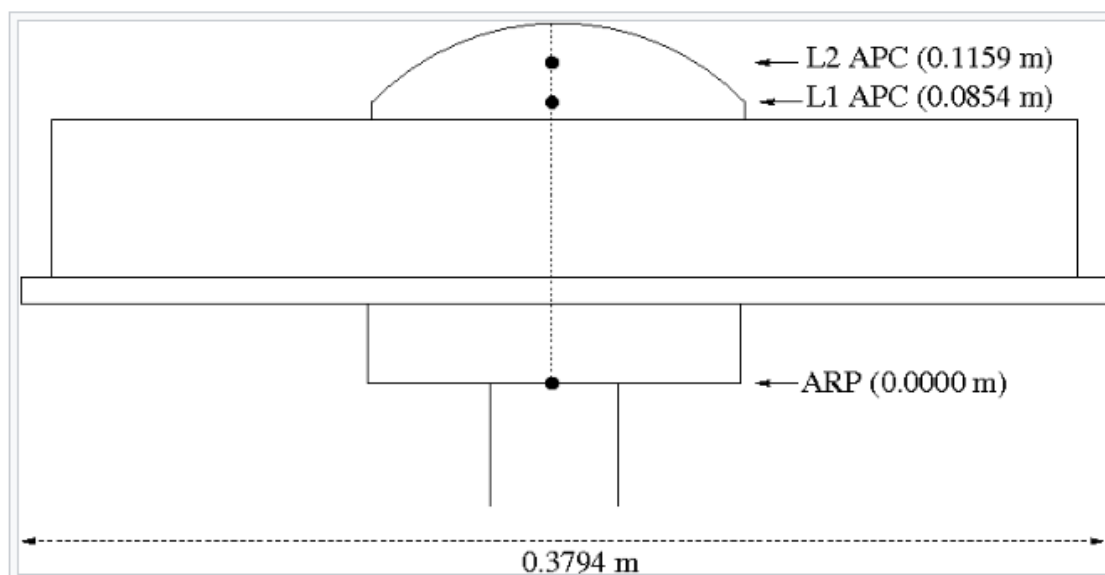
3.3.1 Η κεραία του δέκτη

Επειδή το σήμα που φθάνει στον δέκτη από όλους τους ορατούς δορυφόρους είναι αρκετά εξασθενημένο, ενισχύεται από τον προενισχυτή σήματος, που περιλαμβάνεται στην κεραία, μετατρέπεται από ηλεκτρομαγνητικό κύμα σε ηλεκτρικό ρεύμα και διοχετεύεται στον κυρίως δέκτη για επεξεργασία. Οι γεωδαιτικοί δέκτες έχουν δυνατότητα λήψης και των δύο συχνοτήτων (L1 και L2) και μπορούν να έχουν καλή λήψη σημάτων από δορυφόρους που βρίσκονται χαμηλά στον ορίζοντα (Φωτίου & Πικριδάς, 2006α).

Οι μετρήσεις του GNSS αναφέρονται στο λεγόμενο κέντρο φάσης κεραίας (APC) το οποίο είναι το ηλεκτρικό κέντρο αναφοράς των μετρήσεων, τόσο για την συχνότητα L1 όσο και για την L2, και δεν ταυτίζεται με το μηχανικό ή γεωμετρικό κέντρο της κεραίας (Φωτίου & Πικριδάς, 2006α).

Το κέντρο φάσης ορίζεται ως η προφανής πηγή ακτινοβολίας. Αν η πηγή ήταν ιδανική, θα είχε σφαιρικό περίγραμμα, αλλά η πραγματική περίπτωση είναι ελαφρώς διαφορετική, επειδή το περίγραμμα είναι ακανόνιστο και κάθε τμήμα έχει τη δική του φαινομενική προέλευση ακτινοβολίας. Έτσι, το κέντρο φάσης μιας κεραίας δεν εξαρτάται μόνο από τη γωνία (ύψους και αζιμούθιο) αλλά εξαρτάται επίσης από τη συχνότητα του σήματος ('Antenna Phase Centre - Navipedia', χ.χ.).

Διάγραμμα 10: Κέντρο φάσης κεραίας (APC) και σημείο αναφοράς (ARP)



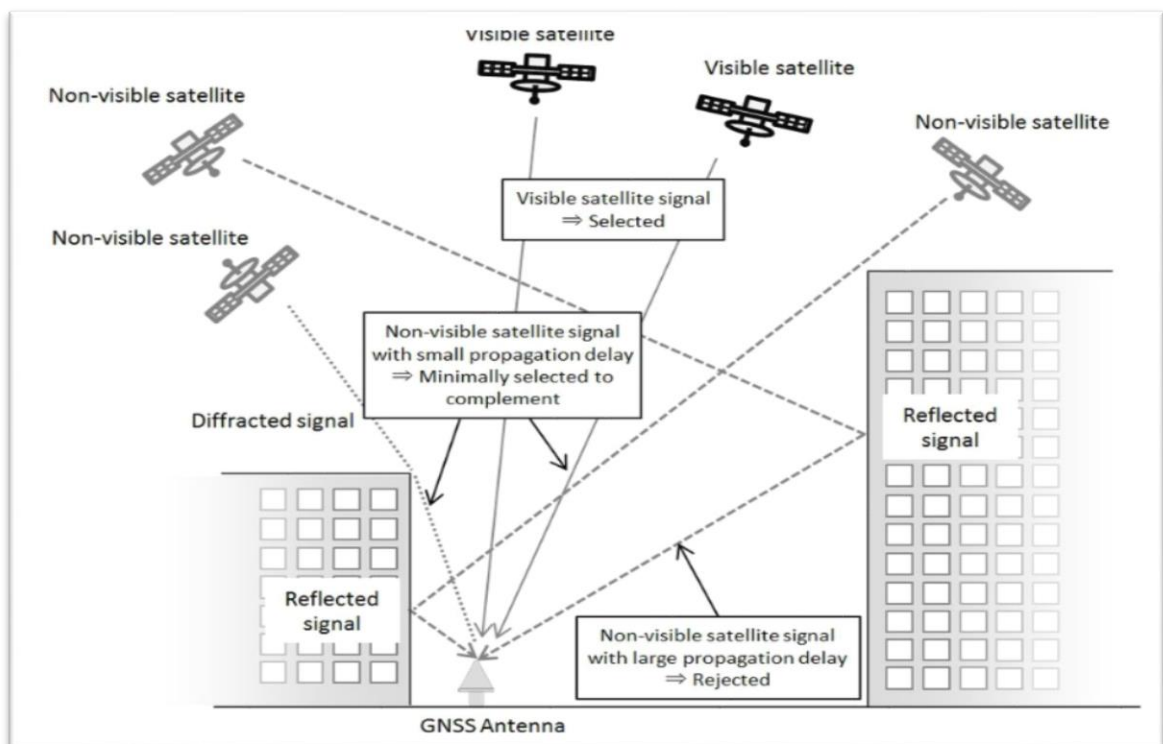
Πηγή: ('Antenna Phase Centre - Navipedia', χ.χ.)

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 10, το κέντρο φάσης είναι διαφορετικό για κάθε φορέα για μια κεραία L1/L2 και μεταβάλλεται συναρτήσει της κατεύθυνσης του δορυφορικού σήματος καθώς ο δορυφόρος κινείται ως προς τον δέκτη. Τα κέντρα αυτά μεταβάλλονται επίσης ανάλογα με τη διεύθυνση λήψης/εκπομπής των σημάτων και τη γωνία ύψους στον δέκτη.

Οι μεταβολές των κέντρων φάσης γύρω από μία μέση θέση είναι της τάξης των λίγων χιλιοστών και αποκτούν κρίσιμο χαρακτήρα στις εφαρμογές υψηλής ακρίβειας. Αν δεν ληφθούν υπόψη, το σφάλμα μπορεί να φτάσει και τα 10cm στην υψομετρική διαφορά ανεξάρτητα από το μήκος της βάσης (Φωτίου & Πικριδάς, 2006b).

Αφού η θέση του κέντρου φάσης εξαρτάται από τη συχνότητα χρειάζεται να υπάρχει ένα σταθερό σημείο αναφοράς. Αυτό είναι το σημείο αναφοράς κεραίας (ARP), το μηχανικό κέντρο της κεραίας, και βρίσκεται συνήθως στη βάση της κεραίας (βλ. διάγραμμα 10). Το ύψος της κεραίας από το σημείο εδάφους (κατά την κατακόρυφο) προσδιορίζεται ως προς το ARP. Οι κατασκευαστές παρέχουν τεχνικές πληροφορίες σχετικά με τη θέση της APC σε σχέση με το ARP ('Receiver Antenna Phase Centre - Navipedia', χ.χ.).

Διάγραμμα 11: Σφάλμα λόγω πολυανάκλασης



Πηγή: ('How To Interface Gps Module Neo 6m With Arduino Hackster Io', χ.χ.)

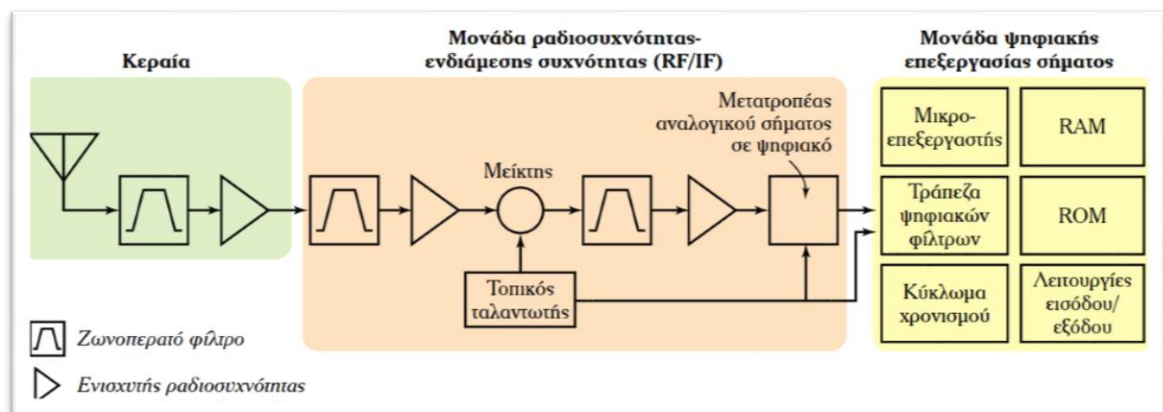
Για τη σωστή λήψη των σημάτων, οι κεραίες δεν πρέπει να επισκιάζονται από γειτονικά αντικείμενα (δέντρα, ψηλά κτήρια κ.λπ.) επειδή το σήμα που φθάνει τελικά στον δέκτη περιέχει σημαντικά σφάλματα (π.χ. αλλαγή πόλωσης σήματος) από την πολυανάκλαση στις γειτονικές επιφάνειες (βλ. διάγραμμα 11) και τη δημιουργία πολλαπλών διαδρομών (Φωτίου & Πικριδάς, 2006α).

3.3.2 Κυρίως δέκτης

Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, ο κυρίως δέκτης αναλαμβάνει την περαιτέρω επεξεργασία του σήματος, μετά την προενίσχυση του από την κεραία και το τμήμα ραδιοσυχνοτήτων μετατρέπει τη συχνότητα του εισερχόμενου σήματος σε μικρότερη συχνότητα για να μπορεί ο δέκτης να την διαχειριστεί. Περιλαμβάνει διάφορες διατάξεις όπως: (Φωτίου & Πικριδάς, 2006α):

- Ταλαντωτές ή ρολόγια χαλαζία, για παραγωγή ημιτονοειδών σημάτων αναφοράς
- Πολλαπλασιαστές, για δημιουργία μεγαλύτερων συχνοτήτων
- Φίλτρα, για απομάκρυνση θορύβων
- Μίκτες, για πολλαπλασιασμό δύο διαφορετικών σημάτων
- Βρόγχοι παρακολούθησης και εξαγωγής μετρήσεων

Διάγραμμα 12: Βασικές μονάδες δέκτη GNSS



Πηγή: (Ναυτικά ηλεκτρονικά όργανα.pdf, χ.χ.)

Από τη συμβολή (εισερχόμενου σήματος και σήματος αναφοράς που παράγεται στον ταλαντωτή) προκύπτει ένα σήμα για κάθε δορυφόρο το οποίο έχει δύο συνιστώσες, το άθροισμα και η διαφορά των συμβαλλόμενων συχνοτήτων. Με φίλτρα διατηρείται μόνο

η διαφορά τους η οποία ονομάζεται ενδιάμεση συχνότητα (IF) που είναι το παρατηρούμενο σήμα στον δέκτη.

Οι δέκτες GNSS διαθέτουν διαύλους (κανάλια), έναν για κάθε δορυφόρο και λειτουργούν ταυτόχρονα. Η IF μεταβιβάζεται σ' αυτούς και με τη βοήθεια των βρόγχων παρακολούθησης γίνεται αποδιαμόρφωση του σήματος για την εξαγωγή των μετρήσεων, των κωδικών και των φάσεων. Υπάρχουν οι βρόγχοι προσδιορισμού καθυστέρησης (DLL) απ' όπου εξάγεται η ψευδοαπόσταση και οι βρόγχοι προσδιορισμού φάσης (PLL) όπου λαμβάνουν το απομένον σήμα και γίνονται οι μετρήσεις φάσεων (Φωτίου & Πικριδάς, 2006a).

3.4 Παρατηρήσεις και σφάλματα ακρίβειας συστημάτων GNSS

Σε όλα τα προβλήματα προσδιορισμού θέσης, οι συντεταγμένες του δορυφόρου είναι γνωστές (στοιχεία εφημερίδας) ενώ οι συντεταγμένες του δέκτη άγνωστες παράμετροι.

3.4.1 Ψευδοαπόσταση

Όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 2.4, η ψευδοαπόσταση ορίζεται σαν τη γεωμετρική απόσταση δορυφόρου – δέκτη η οποία συμπεριλαμβάνει διάφορα συστηματικά αλλά και τυχαία σφάλματα. Τα σημαντικότερα συστηματικά σφάλματα που προκαλούν καθυστέρηση σήματος είναι (Φωτίου & Πικριδάς, 2006b):

- Ιονοσφαιρικό σφάλμα. Εξαρτάται από τη συχνότητα του φορέα
- Τροποσφαιρικό σφάλμα. Είναι ανεξάρτητο της συχνότητας του φορέα
- Σφάλμα πολυανάκλασης. Εξαρτάται από τη συχνότητα, δεν μπορεί να απαλειφθεί ούτε να μοντελοποιηθεί, μπορεί όμως να αποφευχθεί τοποθετώντας την κεραία σε καταλληλότερη θέση.

3.4.2 Παρατήρηση φάσης

Ο δέκτης μπορεί να μετρά τη στιγμιαία κλασματική φάση σε κάθε χρονική στιγμή και τις μεταβολές της από την στιγμή εγκλωβισμού του σήματος και μετά λόγω της αλλαγής απόστασης μεταξύ δορυφόρου – δέκτη. Δεν μπορεί όμως να μετρήσει τον ακέραιο αριθμό κύκλων μεταξύ δέκτη – δορυφόρου (ασάφεια φάσης) κατά την πρώτη στιγμή του εγκλωβισμού έτσι ώστε η μέτρηση να αντιστοιχεί στη διαφορά φάσης μεταξύ του εισερχόμενου φορέα και του παραγόμενου αντιγράφου του. Αυτό έχει ως

συνέπεια την προσθήκη του ακέραιου αριθμού κύκλων στο παρατηρούμενο μέγεθος (Φωτίου & Πικριδάς, 2006b).

Μόλις ο δέκτης κλειδώσει το δορυφορικό σήμα αντιλαμβάνεται όλες τις μεταβολές στη φάση του παρακολουθώντας το συνεχώς. Κατά τη στιγμή του εγκλωβισμού η φάση είναι ίση με το άθροισμα του κλασματικού μέρους του κύκλου (μέτρηση) και του ακέραιου αριθμού κύκλων, ενώ την ίδια στιγμή ένας μετρητής ακέραιων κύκλων στον δέκτη μηδενίζεται αυθαίρετα. Εν τέλει αυτό που καταγράφει ο δέκτης είναι η στιγμιαία αθροιστική φάση (= ακέραια τιμή μετρητή + τρέχουσα κλασματική τιμή) (Φωτίου & Πικριδάς, 2006b).

Όταν υπάρξει απώλεια σήματος και ο δέκτης επανεγκλωβίσει το σήμα, μετρά εκ νέου το κλασματικό μέρος της φάσης, με λάθος ακέραιο στον μετρητή λόγω των κύκλων ολίσθησης (χαμένοι ακέραιοι αριθμοί κύκλων). Οι επηρεασμένες παρατηρήσεις από τους κύκλους ολίσθησης διορθώνονται με διάφορες τεχνικές όπως οι διπλές και τριπλές διαφορές, που θα αναλυθούν σε επόμενο υποκεφάλαιο, αν όμως δεν διορθωθούν τότε εισάγεται νέα ασάφεια φάσης (νέα άγνωστη παράμετρος στη συνόρθωση των παρατηρήσεων) (Φωτίου & Πικριδάς, 2006b).

Όπως και στην παρατήρηση της ψευδοαπόστασης, υπάρχουν και εδώ οι ατμοσφαιρικές καθυστερήσεις. Υπάρχει μια σημαντική διαφορά του επηρεασμού της ιονόσφαιρας στη ψευδοαπόσταση και στην επίδραση της στην παρατήρηση φάσης αφού κατά την διέλευση του φέροντος κύματος η ιονόσφαιρα επιδρά έτσι ώστε η ψευδοαπόσταση, από τη μια, να επιβραδύνεται ενώ οι μετρήσεις φάσης να προηγούνται. Αυτό οφείλεται στο ότι η ταχύτητα μετάδοσης των κωδικών και του μηνύματος πλοήγησης δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός, σε αντίθεση με τη φασική ταχύτητα ενός καθαρού φορέα. Όπως ειπώθηκε ανωτέρω, η ιονοσφαιρική επίδραση εξαρτάται από τη συχνότητα και άρα η επίδραση της στις δύο συχνότητες του σήματος είναι διαφορετική. Αυτό είναι πολύ βολικό σε ένα διπλόσυχο δέκτη GNSS και ουσιαστικά αυτός είναι ο σκοπός της δεύτερης συχνότητας στο σήμα αφού *με δέκτες διπλής συχνότητας το ιονοσφαιρικό σφάλμα μπορεί να απαλειφθεί αν χρησιμοποιηθεί ένας κατάλληλος γραμμικός συνδυασμός πρωτογενών παρατηρήσεων των δύο φορέων*. Έτσι *στις παρατηρήσεις φάσης η ιονοσφαιρική καθυστέρηση αφαιρείται* (Φωτίου & Πικριδάς, 2006b).

3.4.3 Σφάλματα συστημάτων GNSS

Η ακρίβεια θέσεως των δορυφορικών συστημάτων GNSS εξαρτάται από το μέγεθος διαφόρων σφαλμάτων τα οποία κατηγοριοποιούνται πιο κάτω (*Ναυτικά ηλεκτρονικά όργανα.pdf, χ.χ.*):

1. Σφάλματα που οφείλονται στους δορυφόρους
 - Σφάλματα δορυφορικών εφημερίδων
 - Σφάλματα δορυφορικών χρονομέτρων
 - Σφάλματα επιλεκτικής διαθεσιμότητας
2. Σφάλματα που οφείλονται στη διάδοση των δορυφορικών σημάτων
 - Ιονοσφαιρικό σφάλμα
 - Τροποσφαιρικό σφάλμα
 - Σφάλμα πολυανάκλασης
3. Σφάλματα που οφείλονται στους δέκτες
 - Σφάλμα χρονομέτρου του δέκτη

Εκτός των ανωτέρω σφαλμάτων, η ακρίβεια θέσης εξαρτάται επίσης από τη γεωμετρία του δορυφορικού σχηματισμού κατά τον χρόνο των μετρήσεων που πραγματοποιούνται για τον προσδιορισμό της θέσης. Η γεωμετρία του δορυφορικού σχηματισμού εξαρτάται από τη σχετική θέση του δέκτη ως προς τους δορυφόρους από τους οποίους πραγματοποιούνται οι μετρήσεις. Η ιδανική γεωμετρία για μέγιστη πιθανή ακρίβεια είναι όταν οι τέσσερις δορυφόροι σχηματίζουν ένα κανονικό τετράεδρο στο οποίο ένας δορυφόρος βρίσκεται πάνω από την θέση του δέκτη (ζενίθ) και οι άλλοι τρεις είναι συμμετρικά κατανεμημένοι στον ορίζοντα ανά 180° με όσο το δυνατόν χαμηλότερο γωνιακό ύψος (*Ναυτικά ηλεκτρονικά όργανα.pdf, χ.χ.*).

Ο δέκτης επιδιώκει την επιλογή εκείνων των δορυφόρων που βρίσκονται πλησιέστερα στην ιδανική γεωμετρία και όταν λόγω της κινήσεως τους πάνουν να την καλύπτουν, ο δέκτης επιλέγει διαφορετική τετράδα δορυφόρων που ικανοποιούν τις παραπάνω συνθήκες.

Ειδικότερα στα GPS η ακρίβεια θέσης μπορεί να εκτιμηθεί με πολύ καλή προσέγγιση με τον συσχετισμό των παραμέτρων (*Ναυτικά ηλεκτρονικά όργανα.pdf, χ.χ.*):

- *Ισοδύναμη Αβεβαιότητα στην απόσταση (UERE)* που αντιστοιχεί στο μέσο τυπικό σφάλμα στη μέτρηση της ψευδοαπόστασης

- *Ευαισθησία Αβεβαιότητας εντοπισμού (GDOP)* που προσδιορίζει τη γεωμετρία του δορυφορικού σχηματισμού

Η παράμετρος GDOP εκφράζει την αβεβαιότητα στο διάνυσμα θέσεως του δέκτη (X,Y,Z, t) ανά μονάδα αβεβαιότητας των μετρήσεων και δίνεται από τη σχέση

$$GDOP = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_t^2}$$

Τα $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_t$ αντιστοιχούν στα τυπικά σφάλματα της μέτρησης της ψευδοαπόστασης και του χρόνου, τα οποία αντιστοιχούν στις συνιστώσες X,Y,Z,t του διανύσματος της θέσης του δέκτη.

Εκτός του GDOP υπάρχουν για τον προσδιορισμό ακρίβειας GPS και οι εξής παράμετροι ευαισθησίας (*Ναυτικά ηλεκτρονικά όργανα.pdf, χ.χ.*):

- Ευαισθησία θέσεως τριών διαστάσεων (PDOP)
- Ευαισθησία θέσεως δύο διαστάσεων (HDOP)
- Ευαισθησία κατακόρυφης θέσεως (ύψος) (VDOP)
- Ευαισθησία χρόνου (TDOP)

Όλοι οι δέκτες GPS παρέχουν ένδειξη της παραμέτρου GDOP η οποία υπολογίζεται από δορυφορικά στοιχεία, όμως όταν η ύπαρξη φυσικών εμποδίων εμποδίζει τη λήψη σήματος από όλους τους δορυφόρους, η υπολογιζόμενη τιμή του GDOP δεν είναι αντιπροσωπευτική της αντίστοιχης γεωμετρίας στίγματος. Με άλλα λόγια, μια καλή τιμή GDOP έχοντας κακή ορατότητα δορυφόρων, δίνουν κακή γεωμετρία στίγματος.

Διάγραμμα 13: Εύρος σφαλμάτων στα συστήματα GNSS

Contributing Source	Error Range
Satellite Clocks	±2 m
Orbit Errors	±2.5 m
Inospheric Delays	±5 m
Tropospheric Delays	±0.5 m
Receiver Noise	±0.3 m
Multipath	±1 m

Πηγή: ('Chapter 4 - GNSS Error Sources', χ.χ.)

Σύμφωνα με την ιστοσελίδα της Novatel η οποία ανήκει στην Hexagon, και είναι κατασκευάστρια εταιρεία δεκτών GNSS, αν δεν ληφθούν υπόψη τα σφάλματα στα συστήματα GNSS, μπορούν να οδηγήσουν σε λάθος προσδιορισμό θέσης με εύρος αυτό που φαίνεται στο διάγραμμα 13.

Σύμφωνα πάντα με την ίδια ιστοσελίδα:

- Ένα σφάλμα δέκα νανοδευτερολέπτων στο ατομικό ρολόι του δορυφόρου οδηγεί σε σφάλμα προσδιορισμού θέσης τριών μέτρων.
- Ένα ελάχιστο σφάλμα στην τροχιά του δορυφόρου ακόμα και μετά τις διορθώσεις από τους επίγειους σταθμούς ελέγχου μπορεί να προκαλέσει λάθος στον προσδιορισμό θέσης κατά δυόμιση μέτρα.
- Τα ιόντα στην ιονόσφαιρα σε ελάχιστη ιονοσφαιρική δραστηριότητα προκαλούν σφάλμα μέχρι 5 μέτρα.
- Η τροπόσφαιρα είναι το κοντινότερο στρώμα της ατμόσφαιρας στη γη. Οι τροποσφαιρικές καθυστερήσεις προκαλούνται από την αλλαγή της υγρασίας, της θερμοκρασίας και της ατμοσφαιρικής πίεσης τα οποία οι δέκτες GNSS πρέπει να λαμβάνουν υπόψη.
- Ο θόρυβος του δέκτη αναφέρεται στο σφάλμα θέσης που προκαλείται από το υλικό και το λογισμικό του δέκτη GNSS. Οι δέκτες GNSS υψηλής απόδοσης τείνουν να έχουν μικρότερο θόρυβο από τους δέκτες χαμηλού κόστους.

Το σφάλμα πολυανάκλασης (βλ. διάγραμμα 11) οφείλεται στη λήψη δορυφορικών σημάτων τα οποία προέρχονται από διαφορετικές διαδρομές οι οποίες μπορεί να είναι η απευθείας διαδρομή από τον δορυφόρο και η διαδρομή μετά από ανακλάσεις των δορυφορικών σημάτων σε αντικείμενα γειτονικά στην κεραία του δέκτη όπως ψηλά κτήρια, μεταλλικές κατασκευές κ.λπ. Οι πολυανακλάσεις είναι συνάρτηση της θέσης και του ύψους της κεραίας του δέκτη αλλά και του γωνιακού ύψους του δορυφόρου. Μια μέθοδος αποφυγής του φαινομένου είναι ο ορισμός γωνίας αποκοπής για απόρριψη δορυφορικών σημάτων από δορυφόρους με μικρό γωνιακό ύψος (*Ναυτικά ηλεκτρονικά όργανα.pdf, χ.χ.*).

3.5 Μέθοδοι δορυφορικού προσδιορισμού θέσης

Όπως αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 3.2, ο προσδιορισμός της θέσης του δέκτη GNSS προκύπτει στην τομή των σφαιρικών επιφανειών που έχουν κέντρα τις θέσεις των δορυφόρων και ακτίνες τις αποστάσεις τους από τον δέκτη. Αυτή η αρχή εφαρμόζεται με διαφορετικές παραλλαγές ανάλογα με τις χρήσεις του συστήματος. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στις γεωδατικές εφαρμογές για τον προσδιορισμό θέσης είναι:

1. Ο *απόλυτος προσδιορισμός θέσης*, ο προσδιορισμός δηλαδή των συντεταγμένων ενός δέκτη από τις δικές του παρατηρήσεις, ο οποίος διακρίνεται σε απόλυτο προσδιορισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο και εκ των υστέρων
2. *Σχετικός προσδιορισμός θέσης* ο οποίος χωρίζεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:
 - Σχετικός στατικός προσδιορισμός θέσης
 - Σχετικός κινηματικός προσδιορισμός θέσης που και αυτός με τη σειρά του χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες που είναι:
 - Προσδιορισμός θέσης εκ των υστέρων
 - Προσδιορισμός θέσης σε πραγματικό χρόνο

Η ενότητα αυτή εστιάζει στην λειτουργία του σχετικού προσδιορισμού θέσης και ειδικότερα στον *σχετικό κινηματικό προσδιορισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο* αφού, όπως αναλύεται και στο κεφάλαιο 4, οι δέκτες των συστημάτων GNSS με ενσωματωμένο αδρανειακό σύστημα, λειτουργούν μόνο κάτω από συνθήκες του προαναφερθέντος προσδιορισμού θέσης.

3.5.1 Σχετικός προσδιορισμός θέσης

Ο σχετικός προσδιορισμός θέσης ονομάζεται ο προσδιορισμός συντεταγμένων ενός ή και περισσότερων σημείων ως προς κάποιο άλλο που θεωρείται γνωστό αφού ουσιαστικά αυτό που προσδιορίζεται είναι το διάνυσμα με συνιστώσες ΔX , ΔY , ΔZ (ονομάζεται βάση) μεταξύ δύο σημείων. Ο σχετικός προσδιορισμός θέσης προϋποθέτει ταυτόχρονες παρατηρήσεις προς N δορυφόρους από τουλάχιστον δύο δέκτες και χρησιμοποιεί απαραίτητως παρατηρήσεις φάσεις ενώ οι ψευδοαποστάσεις χρησιμοποιούνται ως βοηθητικές παρατηρήσεις.

Στον εκ των υστέρων σχετικό προσδιορισμό θέσης, αντί των πρωτογενών μετρήσεων χρησιμοποιούνται γραμμικοί συνδυασμοί ούτως ώστε να απαλειφθούν ή να ελαχιστοποιηθούν τα περισσότερα από τα συστηματικά σφάλματα και συνδυάζονται μεταξύ τους για την επίλυση του προβλήματος της σωστής εκτίμησης των ακεραίων ασαφειών φάσης.

Μια κατηγορία γραμμικών συνδυασμών αναφέρεται ως διαφορές παρατηρήσεων και οι πρωτογενείς παρατηρήσεις ψευδοαποστάσεων και φάσεων ονομάζονται μηδενικές διαφορές. Οι τελευταίες αναφέρονται σε μετρήσεις του ίδιου τύπου και φορέα αλλά μεταξύ διαφορετικών δεκτών. Ο κυριότερος λόγος χρησιμοποίησης των διαφορών είναι η απαλοιφή κοινών συστηματικών σφαλμάτων ενώ άλλα σφάλματα ανάγονται σε πολύ μικρότερο μέγεθος (Φωτίου & Πικριδάς, 2006c).

Εκτός των μηδενικών διαφορών, υπάρχουν οι πιο κάτω διαφορές που χρησιμοποιούνται για την απαλοιφή σφαλμάτων:

1. *Απλές διαφορές.* Ορίζεται από τη διαφορά ταυτόχρονων παρατηρήσεων μεταξύ δύο δεκτών ως προς τον ίδιο δορυφόρο και με αυτές απαλείφονται τα κοινά σφάλματα που οφείλονται στον δορυφόρο και κυρίως το σφάλμα του ρολογιού του δορυφόρου και η αρχική φάση. Οι απλές διαφορές μεταξύ δύο δεκτών είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους
2. *Διπλές διαφορές.* Είναι η διαφορά δύο ταυτόχρονων απλών διαφορών μεταξύ δύο δεκτών ως προς δύο δορυφόρους και με αυτές απαλείφονται τα κοινά σφάλματα των δεκτών και κυρίως τα σφάλματα των ρολογιών τους και οι αρχικές φάσεις. Οι διπλές διαφορές είναι συσχετισμένες μεταξύ τους ακόμα και για μια βάση και είναι αυτές που χρησιμοποιούνται συνήθως στην τελική

συνόρθωση μιας βάσης ή ενός δικτύου GPS και την επίλυση των ακεραίων ασαφειών.

3. *Τριπλές διαφορές*. Ορίζεται από τη διαφορά δύο διπλών διαφορών ως προς δύο διαφορετικές εποχές και αφορά στις παρατηρήσεις φάσης. Με τις τριπλές διαφορές απαλείφονται οι ακέραιες ασάφειες φάσης και έτσι μπορούν να εντοπιστούν, μετά από μια συνόρθωση, πιθανά προβλήματα ολίσθησης που όταν διορθωθούν προκύπτουν οι καθαρές διπλές διαφορές.

3.5.2 Σχετικός κινηματικός προσδιορισμός θέσης σε πραγματικό χρόνο

Αυτό το είδος προσδιορισμού θέσης προϋποθέτει εκπομπή δεδομένων από έναν δέκτη με γνωστές συντεταγμένες, ο οποίος ονομάζεται δέκτης αναφοράς (reference) και που παραμένει πάντα ακίνητος, στον άλλο δεκτη ο οποίος παραμένει στάσιμος για μερικά δευτερόλεπτα ή συνήθως κινείται σε συγκεκριμένα σημεία και εκτός από τις δικές του μετρήσεις λαμβάνει και τα δεδομένα του δέκτη αναφοράς. Λόγω του ότι ο δεύτερος δέκτης δεν παραμένει σταθερός ονομάζεται στα αγγλικά rover. Οι δύο δέκτες επικοινωνούν μεταξύ τους έχοντας εγκατεστημένο ένα ειδικό λογισμικό καθώς και ένα σύστημα ασύρματης επικοινωνίας το οποίο μπορεί να είναι ένας διαποδιαμορφωτής (radio modem), σύστημα κινητής τηλεφωνίας ή επικοινωνία μέσω διαδικτύου (internet).

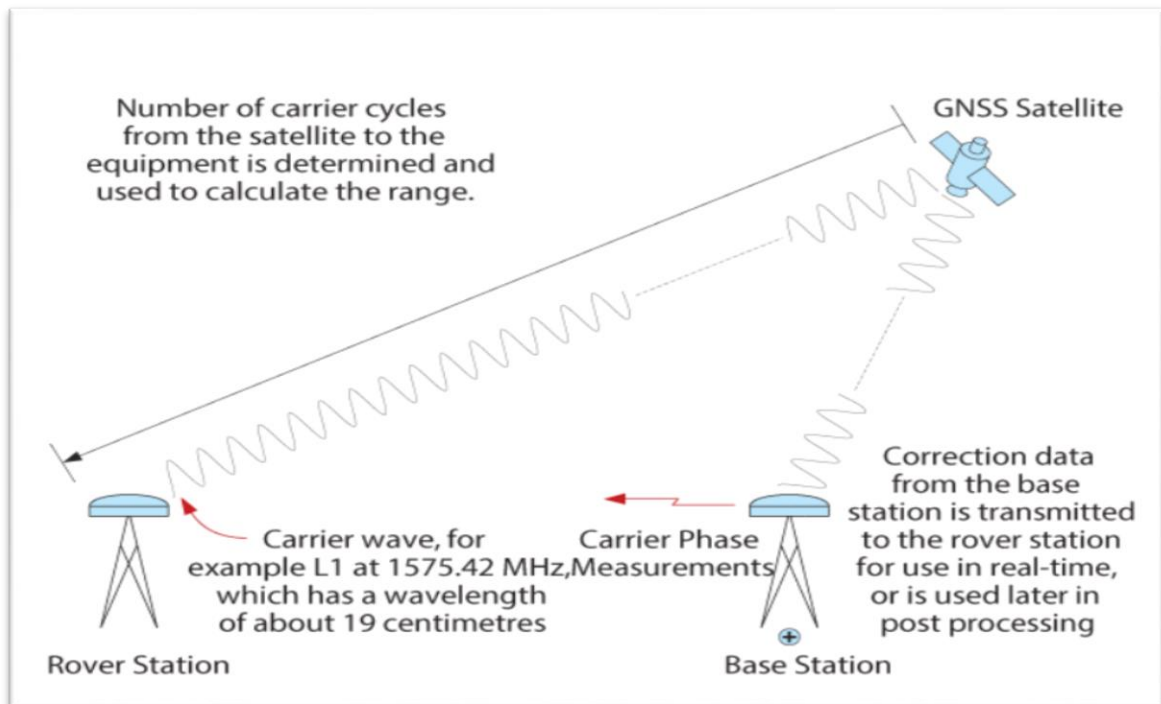
Ο δέκτης αναφοράς παίζει τον ρόλο του ψευδοδορυφόρου που εκπέμπει δεδομένα στον κινούμενο δέκτη τα οποία σχετίζονται με τις ψευδοαποστάσεις ή και τις φάσεις και με ένα μοντέλο διορθώσεων που εφαρμόζει ο κινούμενος δέκτης στις δικές του παρατηρήσεις προσδιορίζεται η θέση του. Ο προσδιορισμός των συντεταγμένων του κινούμενου δέκτη ανάγεται σε κάθε εποχή ενώ για περισσότερες εποχές υπολογίζεται μια καλύτερη λύση. Τα δεδομένα που εκπέμπονται είναι της μορφής RTCM (Φωτίου & Πικριδάς, 2006c).

Όταν στον σχετικό κινηματικό προσδιορισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιούνται ψευδοαποστάσεις, η μέθοδος είναι γνωστή με τον όρο DGNS (διαφορικό GNSS) ενώ όταν χρησιμοποιούνται οι φάσεις, η μέθοδος είναι γνωστή με τον όρο *RTK*.

Η μέθοδος *RTK* είναι μια από τις πιο δημοφιλείς τεχνικές προσδιορισμού θέσης που χρησιμοποιείται στα συστήματα GNSS. Η χρησιμοποίηση των φάσεων είναι ακριβέστερη μέθοδος από την χρησιμοποίηση ψευδοαποστάσεων (από κώδικα). Η

βασική ιδέα είναι η μείωση ή/και εξαλειψή των σφαλμάτων που είναι κοινά σε ένα δέκτη αναφοράς και κινούμενο δέκτη, όπως απεικονίζεται στο διάγραμμα 14.

Διάγραμμα 14: Μέθοδος RTK



Πηγή: ('Real-Time Kinematic (RTK)', χ.χ.)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που χρειάζονται ακρίβεια της τάξης εκατοστού ($1\text{cm}+1\text{ppm}$). Σε ένα πολύ βασικό εννοιολογικό επίπεδο, ο υπολογισμός του εύρους γίνεται με τον προσδιορισμό του αριθμού των κύκλων του φορέα μεταξύ του δορυφόρου και του κινητού δέκτη, πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό αυτό με το μήκος κύματος του φορέα. Τα υπολογιζόμενα εύρη εξακολουθούν να περιλαμβάνουν σφάλματα από πηγές όπως το δορυφορικό ρολόι, τις ιονοσφαιρικές και τροποσφαιρικές καθυστερήσεις. Προκειμένου να εξαλειφθούν αυτά τα σφάλματα και να επωφεληθεί από την ακρίβεια των μετρήσεων που βασίζονται σε φάσεις, το RTK απαιτεί τη μετάδοση μετρήσεων από τον σταθερό δέκτη στον κινητό. Μια περίπλοκη διαδικασία που ονομάζεται «ανάλυση ασάφειας» είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό του πλήθους των κύκλων. Παρά το γεγονός ότι είναι μια πολύπλοκη διαδικασία, οι δέκτες GNSS υψηλής ακρίβειας μπορούν να επιλύσουν τις ασάφειες σχεδόν στιγμιαία ('Real-Time Kinematic (RTK)', χ.χ.).

Τα Rovers καθορίζουν τη θέση τους χρησιμοποιώντας αλγορίθμους που ενσωματώνουν ανάλυση ασάφειας και διαφορική διόρθωση. Όπως και στο DGNSS, η ακρίβεια θέσης

που μπορεί να επιτύχει ο κινητός δέκτης εξαρτάται, μεταξύ άλλων, από την απόσταση του από τον σταθερό δέκτη (βασική γραμμή) και την ακρίβεια των διαφορικών διορθώσεων. Όσον πιο ακριβής είναι η γνωστή θέση του σταθερού δέκτη και η ποιότητα των δορυφορικών παρατηρήσεων του, τόσο ακριβείς είναι οι διορθώσεις. Η επιλογή τοποθεσίας είναι σημαντική για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων όπως είναι το σφάλμα της πολυανάκλασης και σφάλματα άλλων παρεμβολών, όπως και η ποιότητα του σταθερού και κινητού δέκτη ('Real-Time Kinematic (RTK)', χ.χ.).

Το δίκτυο RTK βασίζεται στη χρήση πολλών μόνιμων σταθμών που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση. Ανάλογα με την εφαρμογή, τα δεδομένα εντοπισμού από τους μόνιμους σταθμούς μεταδίδονται τακτικά σε έναν κεντρικό σταθμό επεξεργασίας. Κατόπιν αιτήματος από τους χρήστες των κινητών δεκτών, οι οποίοι μεταδίδουν την κατά προσέγγιση θέση τους στον κεντρικό σταθμό, ο κεντρικός σταθμός υπολογίζει και μεταδίδει πληροφορίες διόρθωσης ή διορθωμένη θέση στον χρήστη RTK. Το όφελος αυτής της προσέγγισης είναι η συνολική μείωση του απαιτούμενου αριθμού σταθερών σταθμών. Ανάλογα με την εφαρμογή, τα δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν μέσω κυψελοειδών ραδιοζεύξεων ή άλλων ασύρματων μέσων ('Real-Time Kinematic (RTK)', χ.χ.).

Η μετάδοση των δεδομένων στις εφαρμογές πραγματικού χρόνου μεταξύ σταθερού και κινητού δέκτη γίνεται με τη χρήση διάφορων τύπων του μηνύματος RTCM και αναλόγως του τύπου της εφαρμογής μεταδίδουν και τις αντίστοιχες πληροφορίες. Οι κυριότερες πληροφορίες που μεταδίδουν έχουν να κάνουν με σχετικές διορθώσεις για παρατηρήσεις κώδικα, συντεταγμένες σταθερού δέκτη, πληροφορίες σταθερού δέκτη (πχ όνομα), περιγραφή διαφορών μεταξύ στοιχείων των δορυφορικών εφημερίδων, διορθώσεις για τις μετρήσεις φάσεων, διορθώσεις για τις μετρήσεις κώδικα (Φωτίου & Πικριδάς, 2006c).

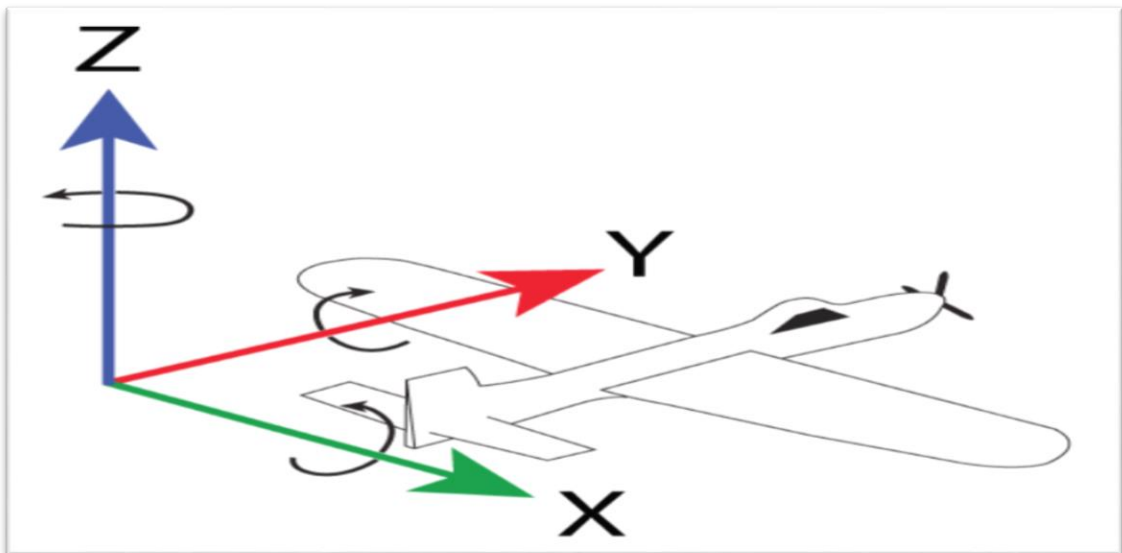
Τα δεδομένα που μεταδίδονται δεν γράφονται τυχαία αλλά ακολουθούν ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας που είναι γνωστό με τον όρο NMEA. Αποτελείται από μια γραμμή δεδομένων που ονομάζεται πρόταση, υπάρχουν αρκετές προτάσεις που χρησιμοποιούνται ως πρότυπα αλλά επίσης παρέχεται και η δυνατότητα στους κατασκευαστές να χρησιμοποιούν και δικές τους, σύμφωνα με τον τύπο κατασκευής. Οι πρότυπες προτάσεις ξεκινούν με δύο γράμματα τα οποία καθορίζουν και το περιεχόμενο της (Φωτίου & Πικριδάς, 2006c).

4 Δέκτες GNSS με ενσωματωμένους αδρανειακούς αισθητήρες

Όπως αναφέρθηκε, οι δέκτες GNSS χρησιμοποιούν δορυφορικά σήματα για τον υπολογισμό της θέσης, του χρόνου και της ταχύτητας. Η πλοήγηση GNSS έχει εξαιρετική ακρίβεια, με την προϋπόθεση ότι η κεραία έχει ορατότητα σε τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους. Όταν η οπτική επαφή με τους δορυφόρους εμποδίζεται από εμπόδια όπως δέντρα ή κτήρια, η πλοήγηση καθίσταται αναξιόπιστη ή αδύνατη.

Ένα σύστημα αδρανειακής πλοήγησης (INS) χρησιμοποιεί πληροφορίες περιστροφής και επιτάχυνσης από μια μονάδα αδρανειακής μέτρησης (IMU) για τον υπολογισμό μιας σχετικής θέσης με την πάροδο του χρόνου. Ένα IMU αποτελείται από έξι συμπληρωματικούς αισθητήρες που είναι διατεταγμένοι σε τρεις ορθογώνιους άξονες. Σε κάθε έναν από τους τρεις άξονες συνδέεται ένα επιταχυνσιόμετρο και ένα γυροσκόπιο. Τα επιταχυνσιόμετρα μετρούν τη γραμμική επιτάχυνση και τα γυροσκόπια μετρούν την περιστροφική επιτάχυνση. Με αυτούς τους αισθητήρες, ένα IMU μπορεί να μετρήσει την ακριβή σχετική κίνηση του στον τρισδιάστατο χώρο. Το INS χρησιμοποιεί αυτές τις μετρήσεις για τον υπολογισμό της θέσης και της ταχύτητας. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα των μετρήσεων IMU είναι ότι παρέχουν μια γωνιακή λύση για τους τρεις άξονες. Το INS μεταφράζει αυτήν τη γωνιακή λύση σε μια λύση τοπικής συμπεριφοράς (στροφή κατά άξονα X, Y και αζιμούθιο) το οποίο μπορεί να παρέχει εκτός από τη θέση και την ταχύτητα ('GNSS+INS Systems', χ.χ.).

Διάγραμμα 15: Παράδειγμα στροφών κατά άξονα



Πηγή: ('GNSS+INS Systems', χ.χ.)

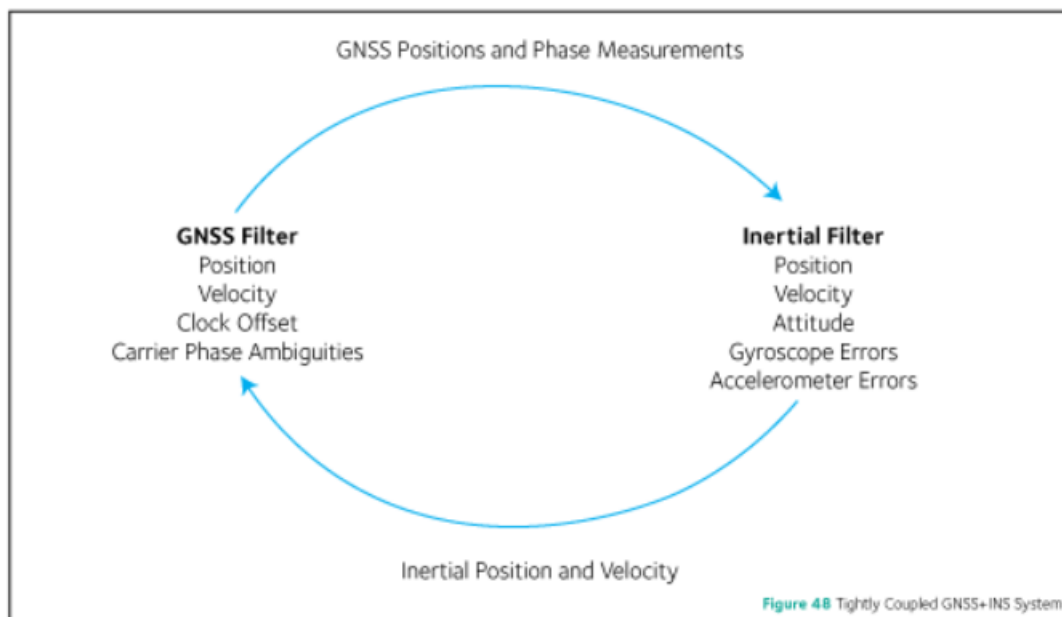
Ένα IMU παρέχει αυτές τις επιταχύνσεις και περιστροφές στο σύστημα INS ως διακριτές μετρήσεις σε συγκεκριμένη συχνότητα. Τυπικά, τα συστήματα INS λειτουργούν με ρυθμούς μεταξύ 50 και 1000 Hz, αν και οι περισσότερες μονάδες IMU είναι σε θέση να λαμβάνουν τα δεδομένα τους με πολύ ταχύτερους ρυθμούς.

Φυσικά, όλα τα συστήματα, συμπεριλαμβανομένου και του IMU και συνεπώς του INS, έχουν τα δικά τους μειονεκτήματα ('GNSS+INS Systems', χ.χ.):

1. Το INS παρέχει μόνο μια σχετική λύση από ένα αρχικό σημείο εκκίνησης. Αυτό το αρχικό σημείο εκκίνησης πρέπει να παρέχεται στο INS.
2. Το πιο σημαντικό είναι ότι οι μετρήσεις υψηλής συχνότητας που παρέχονται από το IMU περιλαμβάνουν διάφορες πηγές σφαλμάτων. Ανάλογα με την ποιότητα του IMU, αυτά τα σφάλματα μπορεί να είναι αρκετά μεγάλα σε σχέση με τις πραγματικές μετρήσεις που καταγράφονται. Η πλοήγηση στον τρισδιάστατο χώρο με ένα IMU είναι αποτέλεσμα μιας άθροισης εκατοντάδων ή χιλιάδων δειγμάτων ανά δευτερόλεπτο, κατά τη διάρκεια των οποίων τα λάθη επίσης συσσωρεύονται. Αυτό σημαίνει ότι ένα μη διορθωμένο σύστημα INS θα ξεφύγει γρήγορα από την πραγματική θέση χωρίς μια εξωτερική αναφορά. Η παροχή εξωτερικής αναφοράς στο INS του επιτρέπει να εκτιμήσει τα σφάλματα στις μετρήσεις IMU χρησιμοποιώντας ένα μαθηματικό φίλτρο και να μειώσει την επίδραση τους στο τελικό αποτέλεσμα .

Αυτή η εξωτερική αναφορά μπορεί να παρέχεται αρκετά αποτελεσματικά από το GNSS. Το GNSS παρέχει ένα απόλυτο σύνολο συντεταγμένων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως το αρχικό σημείο εκκίνησης. Επίσης, το GNSS παρέχει συνεχείς θέσεις και ταχύτητες στη συνέχεια, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την ενημέρωση των εκτιμήσεων του φίλτρου INS. Όταν το GNSS έχει απώλεια σήματος λόγω παρεμποδίσεων, το σύστημα INS μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί αποτελεσματικά για μεγαλύτερες χρονικές περιόδους. Η χρήση των θέσεων και των ταχυτήτων του GNSS για την εκτίμηση των σφαλμάτων INS καλείται σύστημα «χαλαρά συζευγμένο» (loosely coupled). Ωστόσο, τα συνδυασμένα συστήματα GNSS+INS μπορούν να καταστούν πολύ πιο περίπλοκα από αυτό. Μια ποικιλία όρων όπως το «στενά συζευγμένο» (tightly coupled) ή «βαθιά συζευγμένο» (deeply coupled) δείχνουν σαφώς μια πολύ πιο συμβιωτική σχέση μεταξύ των δύο. Σε αυτά τα συστήματα, οι πρωτογενείς μετρήσεις GNSS χρησιμοποιούνται απευθείας για να βοηθήσουν το INS και το INS μπορεί ακόμη και να χρησιμοποιηθεί ως περιορισμός για να βοηθήσει το GNSS να επαναλάβει τα χαμένα σήματα πιο γρήγορα ή να απορρίψει τα κακά σήματα. Το διάγραμμα 16 δείχνει ένα απλοποιημένο διάγραμμα ενός σφιχτά συζευγμένου συστήματος ('GNSS+INS Systems', χ.χ.).

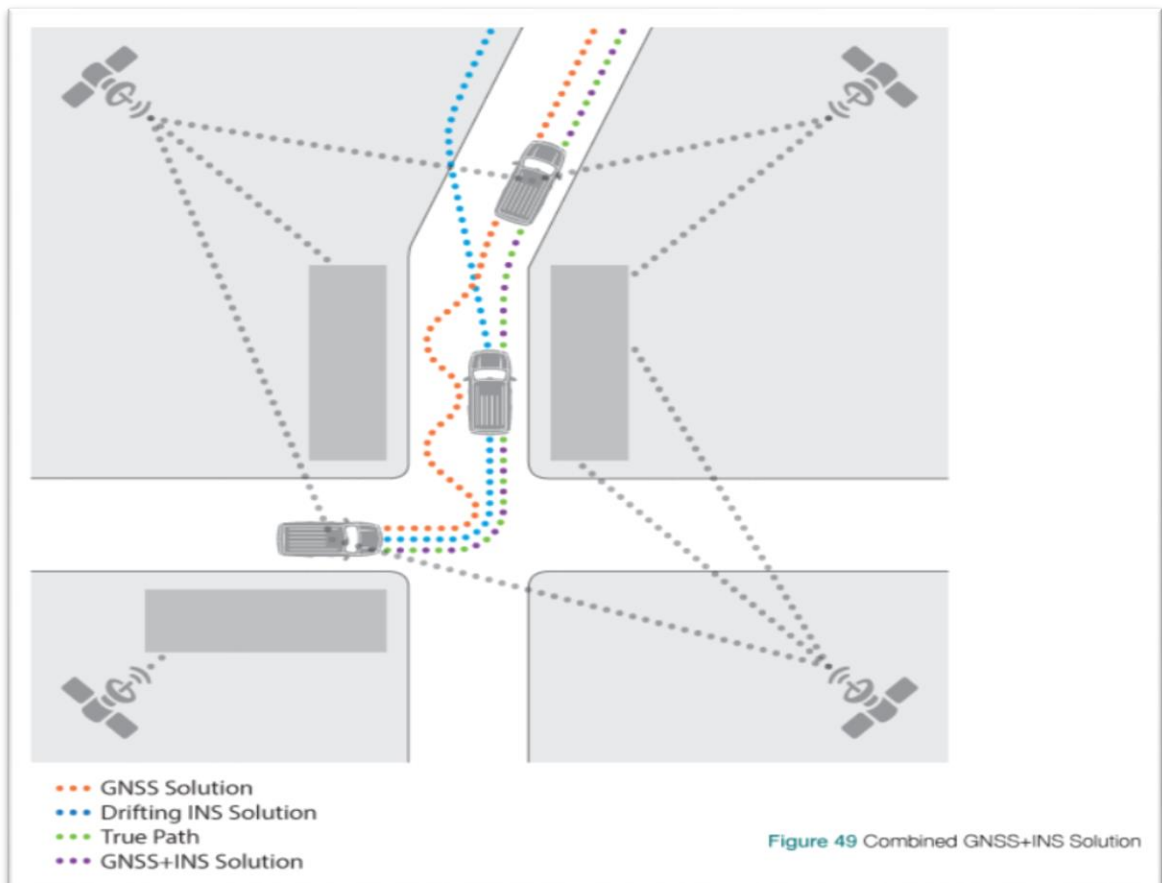
Διάγραμμα 16: Σύζευξη GNSS και INS



Πηγή: ('GNSS+INS Systems', χ.χ.)

Έτσι, όταν συνδυάζονται τα GNSS και INS, οι δύο τεχνικές ενισχύουν η μία την άλλη ούτως ώστε να παρέχουν μια ισχυρή λύση πλοήγησης (διάγραμμα 17). Όταν οι συνθήκες του GNSS είναι καλές (οπτική επαφή με αρκετούς δορυφόρους), ο δέκτης GNSS παρέχει ακριβή θέση και στο σύστημα πλοήγησης. Όταν οι συνθήκες του GNSS καθίστανται φτωχές, το INS παρέχει τη θέση και την πλοήγηση μέχρι να βελτιωθούν οι συνθήκες του GNSS.

Διάγραμμα 17: Παράδειγμα συνεργασίας GNSS και INS



Πηγή: ('GNSS+INS Systems', χ.χ.)

Το ενοποιημένο σύστημα πλοήγησης λειτουργεί σε δύο φάσεις. Κατά τη διάρκεια της πρώτης, το σύστημα ξεκινά τη μεταφορά δεδομένων GNSS που αφορούν γεωγραφικές συντεταγμένες και ταχύτητα. Το επόμενο βήμα είναι η αρχικοποίηση των μπλοκ που χρησιμοποιούνται για τις διορθώσεις των σφαλμάτων των αδρανειακών οργάνων (συστηματικά σφάλματα, σφάλματα συντελεστή κλίμακας κ.λπ.). Ακολουθεί η ευθυγράμμιση στο αζιμούθιο (με τη χρήση της μαγνητικής πυξίδας), η βαθμονόμηση των γυροσκοπίων, η οριζόντια και κατακόρυφη ευθυγράμμιση (με χρήση του βαρόμετρου), η αρχική εκτίμηση της γωνιακής θέσης, ο προσδιορισμός των

παραμέτρων προσανατολισμού και στροφών και ο υπολογισμός του συντελεστή μετασχηματισμού, οι παράγοντες και ο προσδιορισμός των επιδράσεων του επιταχυνσιόμετρου. Το τελευταίο βήμα συνίσταται στην εκκίνηση των φίλτρων Kalman (EKF) το οποίο είναι ένας αλγόριθμος που χρησιμοποιεί μια σειρά μετρήσεων που παρατηρούνται με την πάροδο του χρόνου, που περιέχουν στατιστικό θόρυβο και άλλες ανακρίβειες και παράγει εκτιμήσεις άγνωστων μεταβλητών που τείνουν να είναι ακριβέστερες από εκείνες που βασίζονται σε μία μόνο μέτρηση, εκτιμώντας μια κοινή κατανομή πιθανότητας στις μεταβλητές για κάθε χρονικό πλαίσιο ('(PDF) Integration of INS, GPS, Magnetometer and Barometer for Improving Accuracy Navigation of the Vehicle', χ.χ.).

4.1 Μαγνητόμετρο

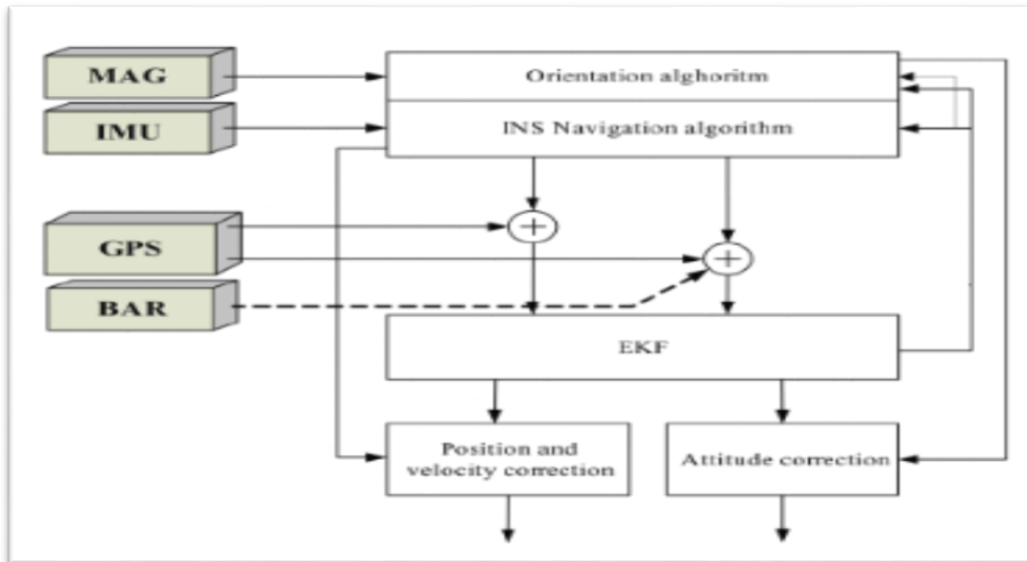
Τα μαγνητόμετρα χρησιμοποιούνται προκειμένου να δείξουν προσανατολισμό με βάση την κατεύθυνση των μαγνητικών πεδίων της γης. Υπάρχουν δύο τύποι μαγνητόμετρων, τα απόλυτα και τα σχετικά. Τα απόλυτα μαγνητόμετρα βαθμονομούνται χρησιμοποιώντας τις δικές τους γνωστές εσωτερικές σταθερές ενώ τα σχετικά μαγνητόμετρα πρέπει να βαθμονομηθούν με αναφορά σε ένα γνωστό, με ακρίβεια μετρημένο μαγνητικό πεδίο, το οποίο συνήθως, είναι ένα παγκόσμιο μαγνητικό μοντέλο ('UAV Navigation in depth: Magnetometers, why are they critical for UAV navigation? | UAV Navigation', χ.χ.).

Δεδομένου του ότι το μαγνητόμετρο έχει δυνατότητα προσανατολισμού (και στους τρεις άξονες), ενσωματώνεται στο αδρανειακό σύστημα των GNSS, κυρίως επειδή οι μετρήσεις γυροσκοπίου περιέχουν ορισμένα γνωστά σφάλματα, τα οποία για να εκτιμηθούν, προκειμένου να οριστεί το οριζόντιο και το κατακόρυφο επίπεδο αναφοράς, χρησιμοποιούνται το μαγνητόμετρο και το επιταχυνσιόμετρο ('(PDF) INS/GPS navigation system based on MEMS technologies', χ.χ.).

Για να αποφευχθούν σφάλματα λόγω κλίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας μαγνητικός αισθητήρας τριών αξόνων με πρόσθετο επιταχυνσιόμετρο. Ο αισθητήρας τριών αξόνων παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις συντεταγμένες μαγνητικών διανυσμάτων της γης και το επιταχυνσιόμετρο μετράει τις γωνίες μεταξύ της πυξίδας και της βαρύτητας έτσι ώστε να μπορούν να εκτιμηθούν τα στοιχεία διανύσματος

κλάσης και να αφαιρεθεί το σφάλμα από την ένδειξη ('UAV Navigation in depth: Magnetometers, why are they critical for UAV navigation? | UAV Navigation', χ.χ.).

Διάγραμμα 18: Τμήματα της ενσωμάτωσης GPS/INS/Βαρόμετρου/ Μαγνητόμετρου



Πηγή: ('(PDF) INS/GPS navigation system based on MEMS technologies', χ.χ.)

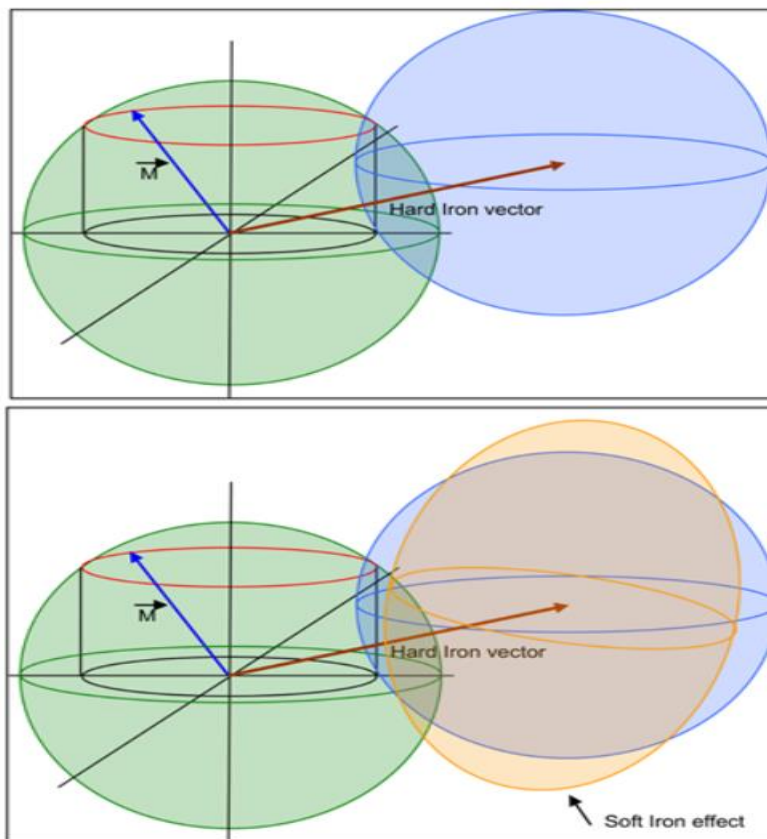
Ο Μαγνητικός Βορράς είναι η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου της γης. Η γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης του τοπικού Μαγνητικού Βορρά και του Αληθινού Βορρά ονομάζεται «μαγνητική απόκλιση». Οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου της γης δεν κινούνται κατευθείαν από πόλο σε πόλο στη συντομότερη δυνατή διαδρομή, όπως πολλοί πιστεύουν, και ούτε η δύναμη των μαγνητικών γραμμών είναι η ίδια γύρω από την περιφέρεια της γης. Στην πραγματικότητα το μαγνητικό πεδίο της γης υποφέρει από πολλές τοπικές παραλλαγές, οι οποίες επιπλέον αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου ('UAV Navigation in depth: Magnetometers, why are they critical for UAV navigation? | UAV Navigation', χ.χ.).

Αν και η μαγνητική πυξίδα είναι γενικά ένα αξιόπιστο όργανο λόγω της απλότητας της, είναι επίσης επιρρεπής σε σφάλματα και μερικές φορές δύσκολο να ερμηνευτεί. Επιπλέον, όπως είναι γνωστό, ο νόμος Biot-Savart ορίζει ότι τα ηλεκτρικά ρεύματα μπορούν να προκαλέσουν τοπική μαγνητική διαταραχή. Για το λόγο αυτό, η παρουσία

ηλεκτρικών συσκευών κοντά σε ένα μαγνητόμετρο μπορεί να προκαλέσει διαταραχές στις ληφθείσες μετρήσεις.

Ένα μαγνητόμετρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συλλογή τοπικών μετρήσεων μαγνητικού πεδίου, περιστρέφοντάς το διαμέσου και των τριών αξόνων για να παράγει μια σφαίρα δεδομένων. Οι τοπικές μετρήσεις σχηματίζουν μια σφαίρα ακτίνας ίση με την τοπική ισχύ του μαγνητικού πεδίου. Η παρουσία ενός επιπρόσθετου σταθερού μαγνητικού πεδίου, γνωστού ως «Σκληρό Σίδηρο» (Hard-Iron), θα παραμορφώσει αυτή τη σφαίρα μεταβάλλοντας την προέλευσή της. Η παρουσία ενός επιπρόσθετου επαγόμενου μαγνητικού πεδίου που εξαρτάται από τον προσανατολισμό του μαγνητόμετρου, γνωστό ως «Μαλακό Σίδηρο» (Soft-Iron), θα παραμορφώσει αυτή τη σφαίρα μετασχηματίζοντάς την σε ένα ελλειψοειδές. Όσο περισσότερα σιδηρομαγνητικά μέρη ή ηλεκτρικά κυκλώματα υπάρχουν κοντά στο μαγνητόμετρο, τόσο μεγαλύτερα θα είναι τα σφάλματα από τις παραμορφώσεις ('UAV Navigation in depth: Magnetometers, why are they critical for UAV navigation? | UAV Navigation', χ.χ.).

Διάγραμμα 19: Παραμορφώσεις μαγνητικού πεδίου



Πηγή: ('UAV Navigation in depth: Magnetometers, why are they critical for UAV navigation? | UAV Navigation', χ.χ.)

Επιπλέον, η κακή ευθυγράμμιση ή η μη ορθογωνικότητα των αισθητήρων μπορεί να μετατοπίζει ή να περιστρέφει τον άξονα μέτρησης. Αυτό συμβαίνει συνήθως λόγω θερμικών βαθμίδων μέσα στο μαγνητόμετρο ή λόγω μηχανικής καταπόνησης της συσκευής. Μη μαγνητικά φαινόμενα, όπως η πολύ γρήγορη περιστροφή του μαγνητόμετρου κατά τη συλλογή των μετρήσεων (γωνιακές ταχύτητες μεγαλύτερες από 150 μοίρες ανά δευτερόλεπτο περίπου) μπορεί να δημιουργήσουν περαιτέρω τοπική παραμόρφωση στο ελλειψοειδές ('UAV Navigation in depth: Magnetometers, why are they critical for UAV navigation? | UAV Navigation', χ.χ.).

Η βαθμονόμηση του μαγνητομέτρου θα εξαλείψει (ιδανικά) ή θα μειώσει σημαντικά (στην πράξη) αυτά τα μαγνητικά σφάλματα.

Η ταχεία ανάπτυξη των συστημάτων GNSS με αδρανειακούς αισθητήρες, προσφέρει τη δυνατότητα κλίσης του στυλεού στις μετρήσεις με τη μέθοδο RTK. Υποθέτοντας ότι το μήκος του στυλεού είναι γνωστό, το σφάλμα θέσης λόγω της κλίσης μπορεί να αντισταθμίζεται αν ο γωνιακός προσανατολισμός του στυλεού μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια. Ενώ η μέτρηση της κλίσης του στυλεού από την αρχική κατακόρυφη του θέση μπορεί να επιτευχθεί με ακρίβεια, μέσω του επιταχυνσιόμετρου για παράδειγμα, η μέτρηση του προσανατολισμού του σε σχέση με τον γεωγραφικό βορρά επιτυγχάνεται πολύ πιο δύσκολα. *Τα προϊόντα RTK με αντιστάθμιση κλίσης χρησιμοποιούν μια ηλεκτρονική πυξίδα, η οποία βασίζεται σε μετρήσεις μαγνητομέτρου και προσανατολίζει τον στυλέο σε σχέση με το μαγνητικό βορρά.* Μια τέτοια προσέγγιση που βασίζεται στο μαγνητόμετρο έχει τα ακόλουθα μειονεκτήματα (Luo, Schaufler, Carrera, & Celebi, χ.χ.):

- Το μαγνητικό πεδίο που μετράται στο μαγνητόμετρο ποικίλει σημαντικά με τη γωνία κλίσης, η οποία θα μπορούσε να περιορίσει την κλίμακα αντιστάθμισης κλίσης.
- Απαιτείται ένα υψηλής πιστότητας και υπολογιστικά ακριβές μαγνητικό μοντέλο. Σε διαφορετική περίπτωση, το σφάλμα στην τοπική μαγνητική απόκλιση μπορεί να φτάσει μέχρι και τρεις μοίρες.
- Οι επιτόπου βαθμονομήσεις είναι απαραίτητες, κάτι το οποίο είναι χρονοβόρο και μειώνει την παραγωγικότητα.
- Οι μετρήσεις μαγνητομέτρου επηρεάζονται από τις μαγνητικές διαταραχές που προκαλούνται από μέταλλα (π.χ. μεταλλικές κατασκευές, αυτοκίνητα, κτήρια με

δομικό χάλυβα) και ηλεκτρικά ρεύματα (π.χ. γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ηλεκτροπαραγωγικές εγκαταστάσεις), οι οποίες και οι δύο υπάρχουν συνήθως, στο πεδίο μετρήσεων με την τεχνική RTK.

4.2 Μικρο-ηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS)

Για να αποφευχθούν τα μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν ανωτέρω, οι καινούργιοι δέκτες GNSS με ενσωματωμένο αδρανειακό σύστημα, χρησιμοποιούν ακριβείς μετρήσεις IMU από μικροηλεκτρο-μηχανικούς αισθητήρες βιομηχανικής ποιότητας (MEMS), οι οποίοι είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για εφαρμογές τοπογραφίας. Αυτή η εφεύρεση εμπνεύστηκε από τεχνολογίες που έχουν χρησιμοποιηθεί στην αεροναυπηγική και ναυσιπλοΐα για χρόνια (Luo κ.ά., χ.χ.).

Τα MEMS είναι μια τεχνολογία που στην πιο γενική της μορφή μπορεί να οριστεί ως μικροσκοπικά μηχανικά και ηλεκτρομηχανικά στοιχεία που κατασκευάζονται με τη χρήση των τεχνικών μικροπαραγωγής. Οι φυσικές διαστάσεις των συσκευών MEMS μπορεί να κυμαίνονται από πολύ μικρότερο από ένα μικρόμετρο ($1 \times 10^{-6} \text{m}$) μέχρι αρκετά χιλιοστά. Ομοίως, οι τύποι συσκευών MEMS μπορεί να ποικίλλουν από σχετικά απλές δομές που δεν έχουν κινούμενα στοιχεία έως εξαιρετικά πολύπλοκα ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα με πολλαπλά κινούμενα στοιχεία υπό τον έλεγχο της ολοκληρωμένης μικροηλεκτρονικής. Οι αδρανειακοί αισθητήρες MEMS, ειδικά τα επιταχυνσιόμετρα και τα γυροσκόπια, έχουν μετατοπίσει τα συμβατικά καταστάοντας δυνατή την ενσωμάτωση του επιταχυνσιόμετρου και των ηλεκτρονικών σε ένα ενιαίο τσιπ πυριτίου. Αυτά τα επιταχυνσιόμετρα MEMS είναι πολύ μικρότερα, πιο λειτουργικά, ελαφρύτερα, πιο αξιόπιστα και παράγονται για ένα κλάσμα του κόστους των συμβατικών επιταχυνσιόμετρων ('MEMS and nanotechnology exchange', χ.χ.).

Μαζί με τις εκτιμήσεις θέσης και ταχύτητας του GNSS, το INS χρησιμοποιεί υψηλές ταχύτητες κατάλληλες επιταχύνσεις και ταχύτητες περιστροφής από το MEMS - IMU για να καθορίσει τη στάση του στυλεού σε πραγματικό χρόνο. Δεδομένου ότι αυτές οι μετρήσεις IMU δεν επηρεάζονται από μαγνητικά πεδία, η προτεινόμενη προσέγγιση αντιστάθμισης κλίσης δεν απαιτεί επιτόπιες βαθμονομήσεις και δεν επηρεάζεται από μαγνητικές διαταραχές. Επιπλέον, δεν υπάρχει όριο στο εύρος αντιστάθμισης κλίσης,

υπό τον όρο ότι ένας επαρκής αριθμός δορυφόρων GNSS παρακολουθείται ώστε να είναι σε θέση να παράγει λύσεις RTK υψηλής ακρίβειας (Luo κ.ά., χ.χ.).

4.3 Μετρήσεις με τη μέθοδο RTK

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο η θέση που μετράται από το δέκτη GNSS δεν βρίσκεται απευθείας στο σημείο μέτρησης, αλλά στο κέντρο φάσης της κεραίας. Για να βελτιστοποιηθεί η λήψη σημάτων, η κεραία είναι συνήθως τοποθετημένη σε έναν στυλεό. Σε συμβατικές μετρήσεις RTK όπου ο δέκτης πρέπει να οριζοντιωθεί, με μια κυκλική φυσαλίδα που βρίσκεται πάνω στον στυλεό, η θέση του κέντρου φάσης μειώνεται στην κορυφή του στυλεού, λαμβάνοντας υπόψη τη μετατόπιση του κέντρου φάσης κεραίας (PCO) και το μήκος του στυλεού. Αυτή η προσέγγιση έχει κάποια μειονεκτήματα που περιορίζουν την παραγωγικότητα, την ακρίβεια και την επίτευξη μέτρησης θέσης με μεγάλη ακρίβεια (Luo κ.ά., χ.χ.):

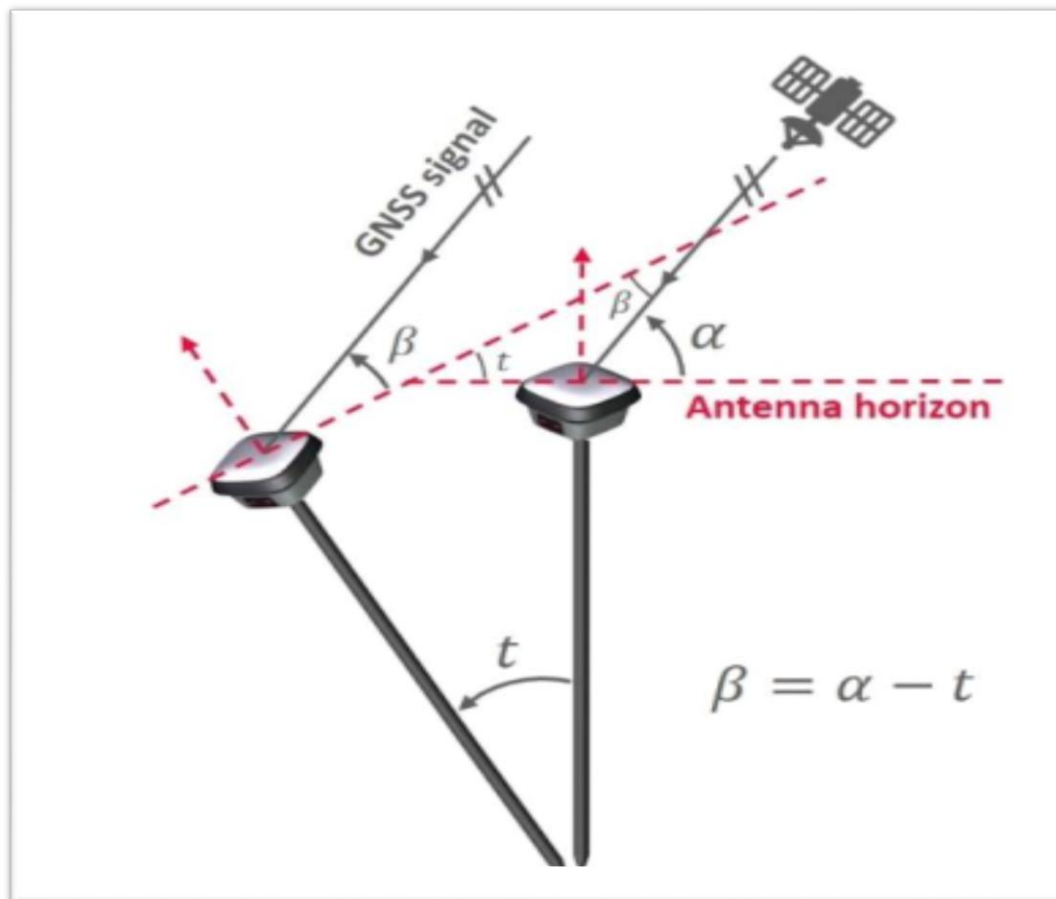
- Η οριζοντίωση του δέκτη απαιτεί χρόνο, ιδιαίτερα σε χαράξεις σημείων όπου η διαδικασία πρέπει να επαναλαμβάνεται.
- Κρατώντας τον στυλεό κατακόρυφα επηρεάζεται από ανθρώπινα λάθη και ατέλειες οργάνων όπως μια λανθασμένη ένδειξη οριζοντίωσης από φυσαλίδα μη βαθμονομημένη.
- Δεν είναι πάντα δυνατό να κρατήσουμε τον στυλεό κατακόρυφα ιδιαίτερα όταν πρόκειται για αποτυπώσεις των γωνιών των κτηρίων.

Ως εκ τούτου, θα ήταν επιθυμητό να λαμβάνονται μετρήσεις RTK χωρίς την ανάγκη οριζοντίωσης του δέκτη.

Στην τεχνική RTK με αντιστάθμιση κλίσης, η αξιόπιστη και υψηλής ευαισθησίας ανίχνευση των σημάτων GNSS, σε όλες τις ζώνες συχνοτήτων, έχει τεράστια σημασία, ιδιαίτερα σε κλίσεις με μεγάλη γωνία. Όπως απεικονίζεται στο διάγραμμα 20, εάν ο στυλεός είναι κεκλιμένος κατά γωνία t , η γωνία ύψους του εισερχόμενου σήματος σε σχέση με τον ορίζοντα της κεραίας μειώνεται επίσης κατά t , από α (κατακόρυφος στυλεός) στο β (κεκλιμένος στυλεός). Για δεδομένη γωνία ύψους του α , όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση t , τόσο μικρότερη είναι η γωνία β . Αυτό υποδηλώνει ότι ένα σήμα GNSS που λαμβάνεται με μεγάλη γωνία ύψους από την κεραία σε κατακόρυφη θέση του στυλεού, θα μπορούσε να γίνει ένα σήμα χαμηλής γωνίας στην περίπτωση

κλίσης του στυλεού, αναλόγως της γωνίας κλίσης. Επιπλέον, όταν γίνεται αποτύπωση με κεκλειμένο στυλεό σε γωνίες κτηρίων ή κοντά σε περιφράξεις και τοίχους, ο θόρυβος αυξάνεται λόγω του σφάλματος πολλαπλών διαδρομών ή άλλων γειτονικών παρεμβολών (Luo κ.ά., χ.χ.).

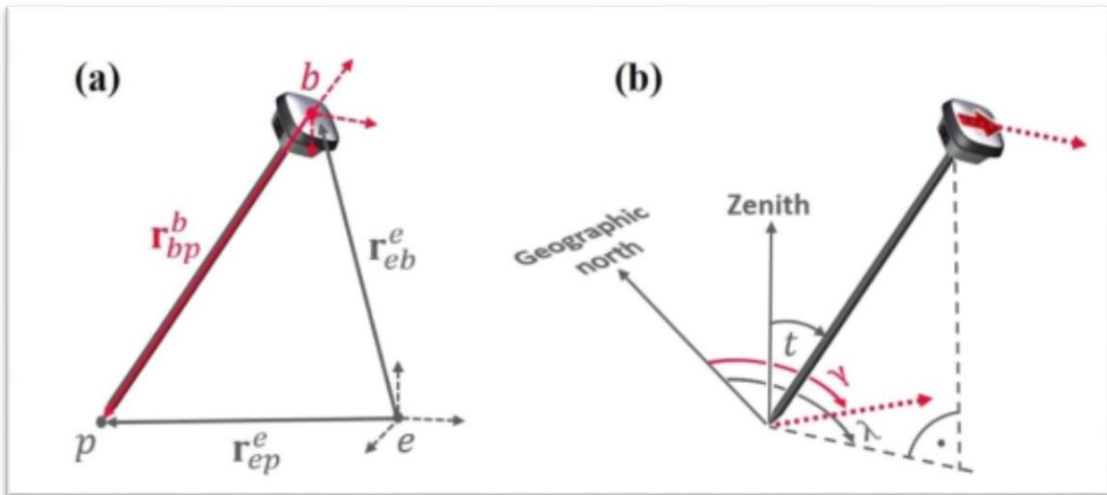
Διάγραμμα 20: Μείωση της γωνίας ύψους του εισερχόμενου σήματος GNSS κατά την κλίση ενός στυλεού μακριά από το δορυφόρο



Πηγή: (Luo κ.ά., χ.χ.)

Υποθέτοντας ότι το μήκος του στυλεού είναι γνωστό, το σφάλμα θέσης λόγω της κλίσης του μπορεί να αντισταθμιστεί με ακριβή καθορισμό της στάσης του στυλεού. Το διάγραμμα 21 δείχνει την αρχή της αντιστάθμισης κλίσης και πώς αυτή ερμηνεύεται και χρησιμοποιείται στα νέα συστήματα GNSS. Στο σκίτσο «α» απεικονίζονται τα κύρια διανύσματα που λαμβάνονται υπόψη για το αντιστάθμισμα κλίσης και στο σκίτσο «β» φαίνεται ο τρόπος ερμηνείας του δέκτη GNSS του οποίου ο στυλεός έχει κλίση «t», κατεύθυνση κλίσης «λ» και «γ» η πορεία του δέκτη.

Διάγραμμα 21: Το αντιστάθμισμα της κλίσης του στυλεού



Πηγή: (Luo κ.ά., χ.χ.)

Το σημείο b απεικονίζει το σταθερό σημείο αναφοράς συντεταγμένων του δέκτη (κέντρο φάσης κεραίας) και το σημείο e απεικονίζει το γεώκεντρο. Το GNSS παρέχει συντεταγμένες σημείου στο σημείο αναφοράς (b) που σημαίνει πώς το διάνυσμα r_{eb}^e είναι γνωστό. Αφού το διάνυσμα r_{bp}^b , με άκρα το σημείο αναφοράς και την ακίδα του στυλεού, είναι επίσης γνωστό (PCO + μήκος στυλεού), η επιθυμητή θέση του διανύσματος r_{ep}^e , με άκρα την ακίδα του στυλεού και το γεώκεντρο, μπορεί να υπολογιστεί με την πιο κάτω εξίσωση (Luo κ.ά., χ.χ.):

$$\mathbf{r}_{ep}^e = \mathbf{r}_{eb}^e + \mathbf{r}_{bp}^b = \mathbf{r}_{eb}^e + \mathbf{R}_b^e \cdot \mathbf{r}_{bp}^b$$

Το \mathbf{R} είναι ο πίνακας στροφής από το b στο e που περιέχει την πληροφορία για τη συμπεριφορά του στυλεού η οποία μπορεί να εξαχθεί χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που φαίνονται στο σκίτσο b . Η γωνία t είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του τοπικού ζενίθ και του στυλεού, η γωνία λ περιγράφει τον γωνιακό προσανατολισμό του ορθογώνιου συστήματος συντεταγμένων του στυλεού (στο οριζόντιο επίπεδο) σε σχέση με τον γεωγραφικό βορρά και η γωνία γ δείχνει προς τα που κατευθύνεται ο δέκτης σε σχέση με τον γεωγραφικό βορρά. Να σημειωθεί ότι εάν ο στυλεός είναι σε κατακόρυφη θέση, η γωνία γ και πάλι μπορεί να καθοριστεί, ενώ η γωνία λ παύει να υφίσταται λόγω του ότι το ορθογώνιο σύστημα του στυλεού σε οριζόντιο επίπεδο μετατρέπεται σε σημείο (Luo κ.ά., χ.χ.).

5 Μεθοδολογία Έρευνας

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζεται η έρευνα που έγινε με σκοπό την εξαγωγή αποτελεσμάτων μέσα από την σύγκριση μετρήσεων ιδίων σημείων από διαφορετικούς δέκτες GNSS. Γίνεται σύγκριση ακρίβειας των μετρήσεων μεταξύ ενός συμβατικού δέκτη, ενός δέκτη με αδρανειακό σύστημα βασισμένο στο μαγνητόμετρο και ενός δέκτη με αδρανειακό σύστημα IMU/MEMS. Εξετάζεται επίσης η ακρίβεια μέτρησης με κλίση του στυλεού σε διαφορετικές γωνίες μέτρησης καθώς και η μέγιστη γωνιά κλίσης.

Η έρευνα διεξάγεται στο ίδιο περιβάλλον κάτω από τις ίδιες συνθήκες και την ίδια ώρα και ημερομηνία ούτως ώστε όλοι οι δέκτες να επηρεάζονται το ίδιο από εξωγενή σφάλματα (ατμόσφαιρα, γεωμετρία δορυφόρων, πολυανάκλαση κ.λπ.).

Όλα τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή της μελέτης εμφανίζονται πιο κάτω:

1. Συμβατικός δέκτης GNSS: Leica GS16



Leica GS16

Ανίχνευση σήματος	Πέραν των δύο συχνοτήτων
Συστήματα GNSS	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS, SBAS
Αντιστάθμιση κλίσης	OXI
RTK μονής βασικής γραμμής(baseline)	Hz 8mm+1ppm / V 15mm+1ppm RMS
Δίκτυο RTK	Hz 8mm+0.5ppm / V 15mm+0.5ppm RMS

2. Δέκτης GNSS με ενσωματωμένο IMU/MEMS: Leica GS18T



Leica GS18 T

Ανίχνευση σήματος	Πέραν των δύο συχνοτήτων
Συστήματα GNSS	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS, SBAS
Αντιστάθμιση κλίσης	NAI
RTK μονής βασικής γραμμής(baseline)	Hz 8mm+1ppm / V 15mm+1ppm RMS
Δίκτυο RTK	Hz 8mm+0.5ppm / V 15mm+0.5ppm RMS

3. Δέκτης GNSS αδρανειακό συστημα βασισμένο σε μαγνητόμετρο: Trimble R10



Ανίχνευση σήματος	Πέραν των δύο συχνοτήτων
Συστήματα GNSS	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS, SBAS
Αντιστάθμιση κλίσης	NAI
RTK μονής βασικής γραμμής(baseline)	Hz8mm+1ppm / V15mm+1ppm RMS
Δίκτυο RTK	Hz8mm+0.5ppm / V15mm+0.5ppm RMS

Λεπτομέρειες ιδιοτήτων των ανωτέρω δεκτών:

- *Ανίχνευση σήματος:* Ο εντοπισμός των δορυφορικών σημάτων γίνεται ταυτόχρονα και περιλαμβάνει τις πιο κάτω συχνότητες
 - GPS: L1C/A, L1C, L2C, L2E, L5
 - GLONASS: L1C/A, L1P, L2C/A, L2P, L3
 - SBAS: L1C/A, L5 (Για δορυφόρους SBAS που παρέχουν την L5)
 - Galileo: E1, E5A, E5B, E5, AltBOC
 - BeiDou: B1, B2, B3
- *Μετρήσεις RTK:*
 - Οι ακρίβειες μονής βασικής γραμμής αναφέρονται σε αποστάσεις από τον σταθερό δέκτη μικρότερες από τριάντα χιλιόμετρα.
 - Οι τιμές ppm στο δίκτυο RTK αναφέρονται στον πλησιέστερο σταθερό δέκτη (base).
 - Η εκκίνηση της μεθόδου απαιτεί δύο με οκτώ δευτερόλεπτα και εξαρτάται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, τα εμπόδια, το φαινόμενο πολυανάκλασης και τη γεωμετρία των δορυφόρων.

5.1 Περιοχή μελέτης

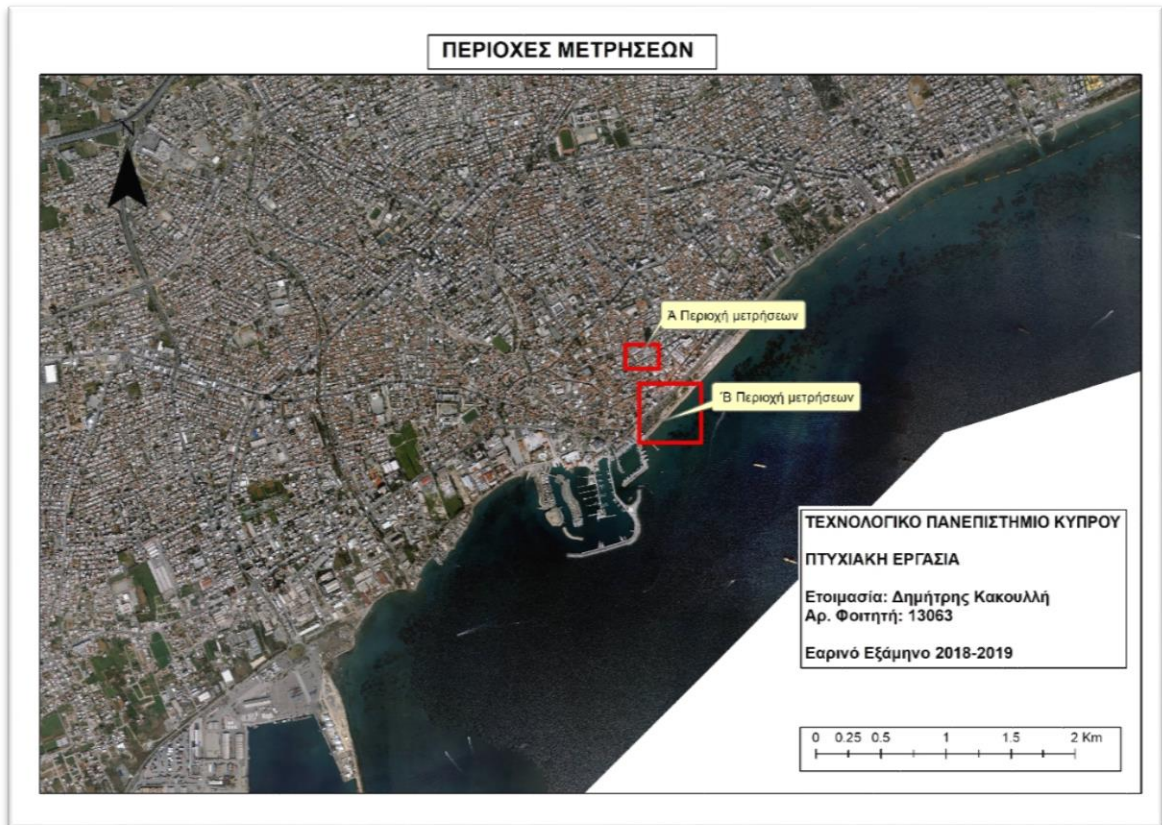
Σκοπός της μελέτης ήταν να ληφθούν μετρήσεις από τους δέκτες σε διάφορα περιβάλλοντα όπως ανοικτοί χώροι, χώροι με δυσκολία λήψης σήματος (π.χ. αστικό φαράγγι), και μεμονωμένες μετρήσεις κάτω από δέντρα, κοντά σε κτήρια, μεταλλικές και ηλεκτρικές κατασκευές.

Λαμβάνοντας υπόψιν και την εγγύτητα της περιοχής στις εγκαταστάσεις του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου, επιλέχθηκε σαν βέλτιστη λύση η χρησιμοποίηση του χώρου γύρω από την Πρυτανεία του πανεπιστημίου και του δημαρχείου Λεμεσού. Μετρήσεις λήφθηκαν και στις οδούς ανατολικά και δυτικά του δημαρχείου αφού είναι χαρακτηριστικά παραδείγματα αστικού φαραγγιού.

Κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθούν μετρήσεις και στην περιοχή της επίχωσης ανατολικά από το παλιό λιμάνι Λεμεσού ούτως ώστε να γίνει σύγκριση μετρήσεων σε μια περιοχή όπου υπάρχουν ελάχιστες παρεμβολές από τεχνητά έργα (open sky area).

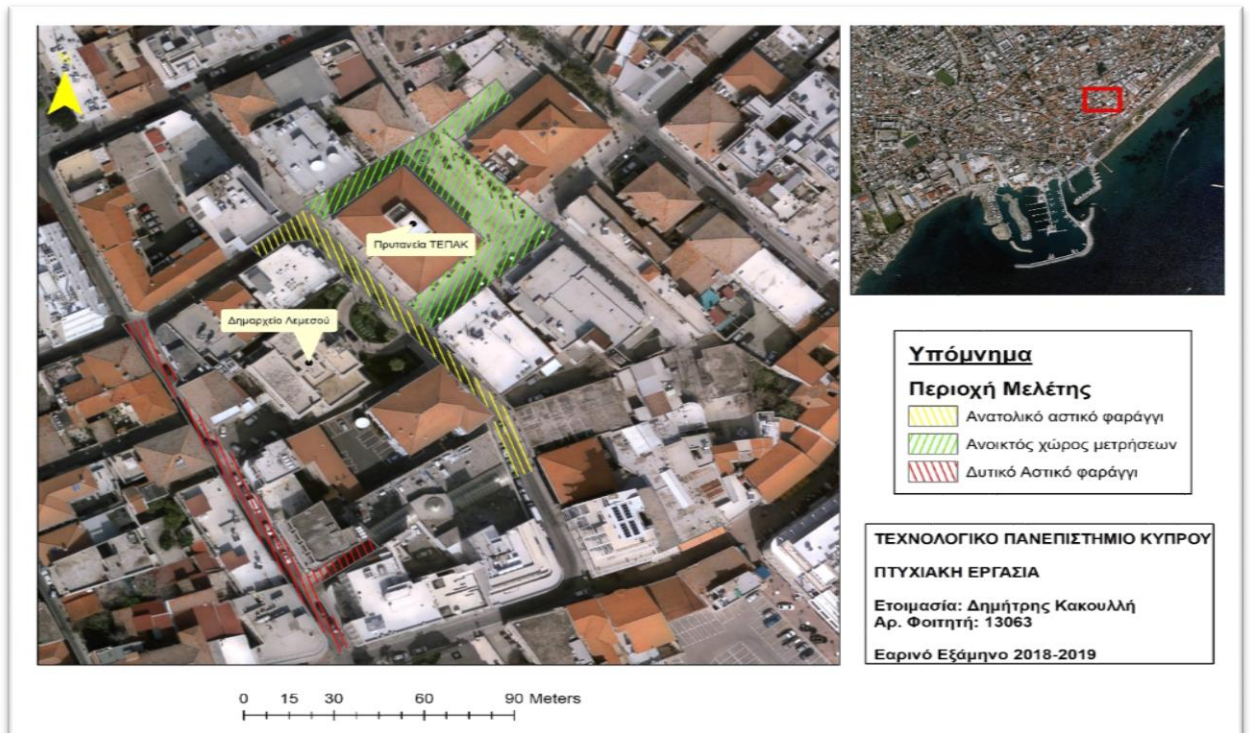
Η περιοχή μελέτης φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν:

Διάγραμμα 22: Οι περιοχές που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις



Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Διάγραμμα 23: A Περιοχή μετρήσεων



Διάγραμμα 24: Δυτικό Αστικό Φαράγγι



Διάγραμμα 25: Δυτικό Αστικό Φαράγγι και μεταλλικές κατασκευές



Διάγραμμα 26: Ανατολικό Αστικό Φαράγγι



Διάγραμμα 27: Ανοιχτός χώρος μετρήσεων και μεμονωμένα σημεία



5.2 Καθορισμός σημείων

Για την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας με τους δέκτες GNSS, κρίθηκε σκόπιμος ο καθορισμός σταθερών σημείων γνωστών συντεταγμένων με σκοπό την αποτύπωση τους από τους δέκτες για να διαφανούν τα σφάλματα και οι αποκλίσεις των μετρήσεων των δεκτών σε σχέση με τις πραγματικές συντεταγμένες.

Για τον καθορισμό των σημείων χρησιμοποιήθηκε ο πιο κάτω γεωδαιτικός εξοπλισμός:

1. Ολοκληρωμένος γεωδαιτικός σταθμός (total station) Leica TCR1203+, 3"
2. Ανακλαστήρας Leica circular prism και στυλός.

5.2.1 Μέθοδος καθορισμού σημείων

Στην περιοχή γύρω από την Πρυτανεία υπάρχουν πέντε τριγωνομετρικά σημεία τα οποία τοποθετήθηκαν από το Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου και είναι ενταγμένα στο Κυπριακό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (CGRS93).

Τα τριγωνομετρικά είναι κατανομημένα γύρω από την Πρυτανεία όπως φαίνεται στο διάγραμμα 27 και έχουν τις πιο κάτω συντεταγμένες:

Πίνακας 1: Συντεταγμένες τριγωνομετρικών στο ΚΓΣΑ93

Point Number	Easting	Northing	Elevation
TP23	204086.8090	338366.4910	18.197
TP29	204079.2180	338408.2680	18.216
TP66	204050.8030	338353.8450	18.147
TP68	204063.3250	338392.5930	18.387
TP69	204082.5350	338387.4780	18.106

Διάγραμμα 28: Κατανομή τριγωνομετρικών σημείων



Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Γνωρίζοντας τις συντεταγμένες των τριγωνομετρικών, έγινε πύκνωση του δικτύου γύρω από την Πρυτανεία στα σημεία ενδιαφέροντος και καθορισμός σημείων κατά μήκος των αστικών φαραγγιών.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η μέθοδος γνωστών συντεταγμένων (Known Back sight Point). Αρχικά το όργανο στήθηκε (κέντρωση και οριζοντίωση) στο τριγωνομετρικό TP68 και έγινε οπισθοσκόπευση, για σκοπούς προσανατολισμού, στο TP29.

Τοποθετήθηκαν επιπλέον άλλες τέσσερις στάσεις πάνω στις οποίες στήθηκε το όργανο (με την ίδια μέθοδο προσανατολισμού), ούτως ώστε να υλοποιηθεί η τοποθέτηση των σημείων στις περιοχές ενδιαφέροντος, με σφάλμα κλεισίματος 6 χιλιοστά.

Συνολικά τοποθετήθηκαν τριάντα έξι σημεία στις θέσεις που φαίνονται στο διάγραμμα 28. Με γαλάζιο χρώμα απεικονίζονται οι επιπλέον στάσεις και με πράσινο τα υπόλοιπα σημεία.

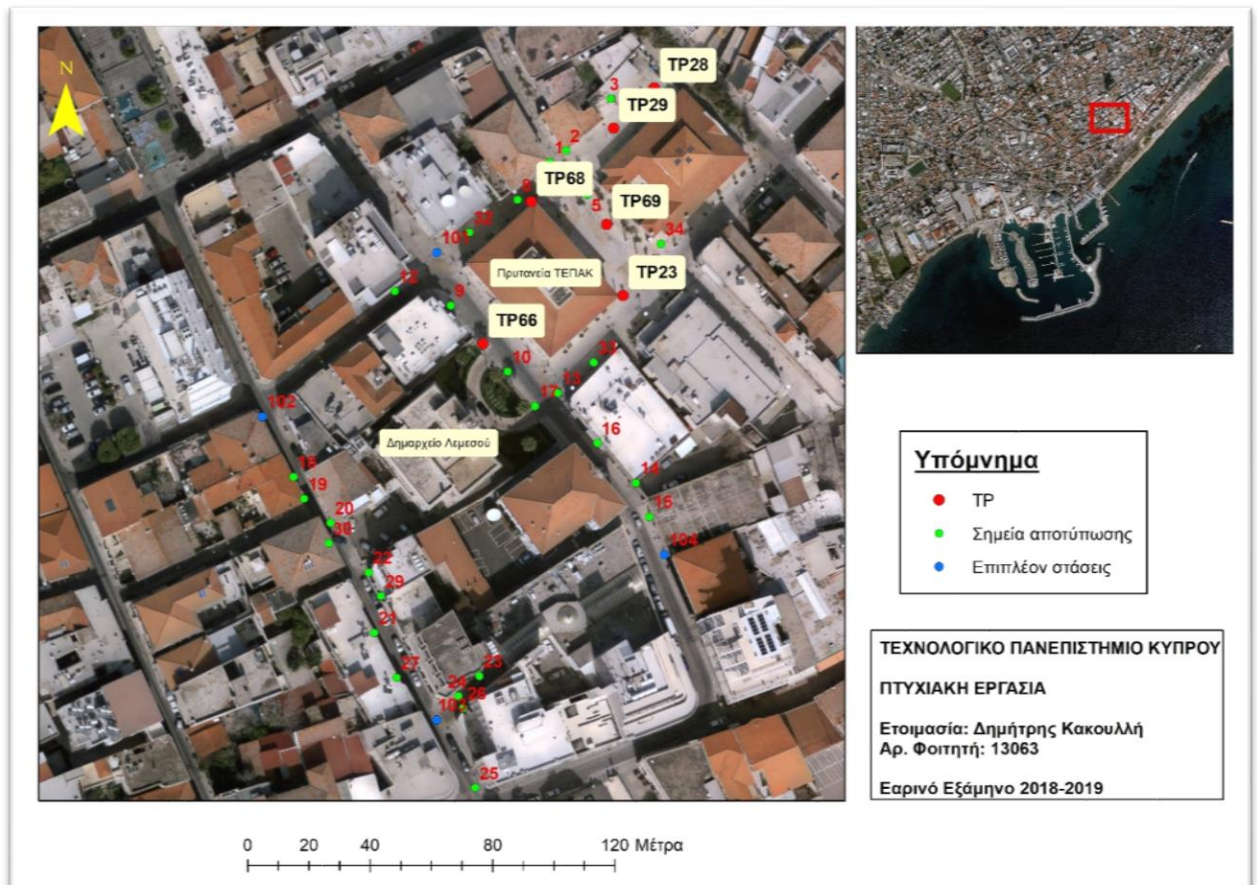
Οι συντεταγμένες των σημείων εμφανίζονται στον πίνακα 2 πιο κάτω:

Πίνακας 2: Συντεταγμένες σημείων

Point Number	Easting	Northing	Elevation
1	204067.4372	338402.6022	19.082
2	204073.8959	338405.4143	18.631
3	204083.634	338414.3619	18.679
5	204079.1549	338394.1749	18.898
6	204094.6801	338371.7946	17.982
8	204059.4985	338393.5967	18.863
9	204041.4158	338363.3349	18.836
10	204055.7599	338348.4361	18.782
11	204073.721	338400.428	18.188
12	204063.906	338338.501	18.449
13	204069.378	338341.547	17.954
14	204084.894	338322.076	17.973
15	204090.652	338315.052	17.803
16	204078.493	338329.887	17.95
17	204063.924	338338.618	18.068
18	203997.352	338321.658	18.74
19	204003.989	338309.486	18.539
20	204010.155	338305.095	18.458
21	204026.39	338273.696	18.314
22	204019.015	338291.856	18.586
23	204049.788	338264.924	18.563
24	204044.664	338259.801	18.961
25	204048.659	338234.95	17.944
26	204046.761	338257.752	18.419
27	204028.704	338262.397	18.49

29	204022.71	338286.782	18.617
30	204010.236	338298.463	18.635
31	204074.1615	338394.1779	18.631
32	204047.4805	338386.2826	X
33	204080.5798	338349.4042	X
34	204092.6655	338377.6481	X
101	204039.141	338379.439	18.826
102	203991.341	338333.492	18.683
103	204038.493	338254.197	18.287
104	204098.664	338299.249	17.785

Διάγραμμα 29: Σημεία Αποτύπωσης



Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Όλα τα σημεία που αποτυπώθηκαν, έχουν σημανθεί στο έδαφος με καρφί

Διάγραμμα 30: Τοποθέτηση και αποτύπωση σημείων



Όσον αφορά τα σημεία μέτρησης στην επίχωση Λεμεσού, συμπεριλήφθηκαν (όπως φαίνεται στο διάγραμμα 31) οκτώ τριγωνομετρικά σημεία καθορισμένα από το Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Διάγραμμα 31: Σταθερά σημεία μέτρησης στην επίχωση Λεμεσού



Πηγή: Google Earth

Πίνακας 3: Συντεταγμένες σταθερών σημείων στην επίχωση Λεμεσού

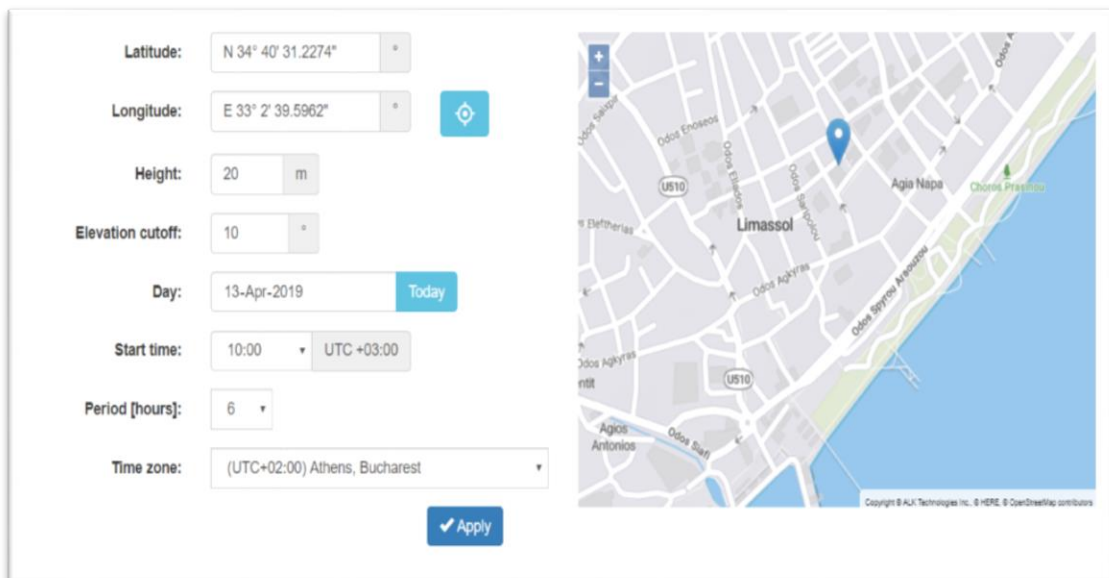
Point Number	Easting	Northing	Elevation
TP18	204037.3024	337940.3776	16.3788
TP19	204168.21600	338093.999	
TP55	204128.3376	338033.7760	16.3646
TP56	204155.8762	338062.9245	16.3259
TP57	204180.8500	338089.1756	16.3464
TP58	204125.678	338072.0202	16.0129
TP59	204151.9376	338103.4319	16.0075
CUT1	204118.183	338025.3	15.739

5.3 Προγραμματισμός μετρήσεων

Όλες οι μετρήσεις λήφθηκαν την 13^η Απριλίου 2019 ούτως ώστε όλοι οι δέκτες να επηρεάζονται το ίδιο από τα διάφορα σφάλματα που προκαλούνται από την ατμόσφαιρα και που αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Για να υπάρχει μια εικόνα των σφαλμάτων κατά την μέρα των αποτυπώσεων, εισήχθησαν τα δεδομένα της περιοχής μελέτης και η διάρκεια των μετρήσεων, στη διαδικτυακή σελίδα www.gnssplanning.com και τα αποτελέσματα φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν

Διάγραμμα 32: Εισαγωγή τοποθεσίας και μέρας μετρήσεων

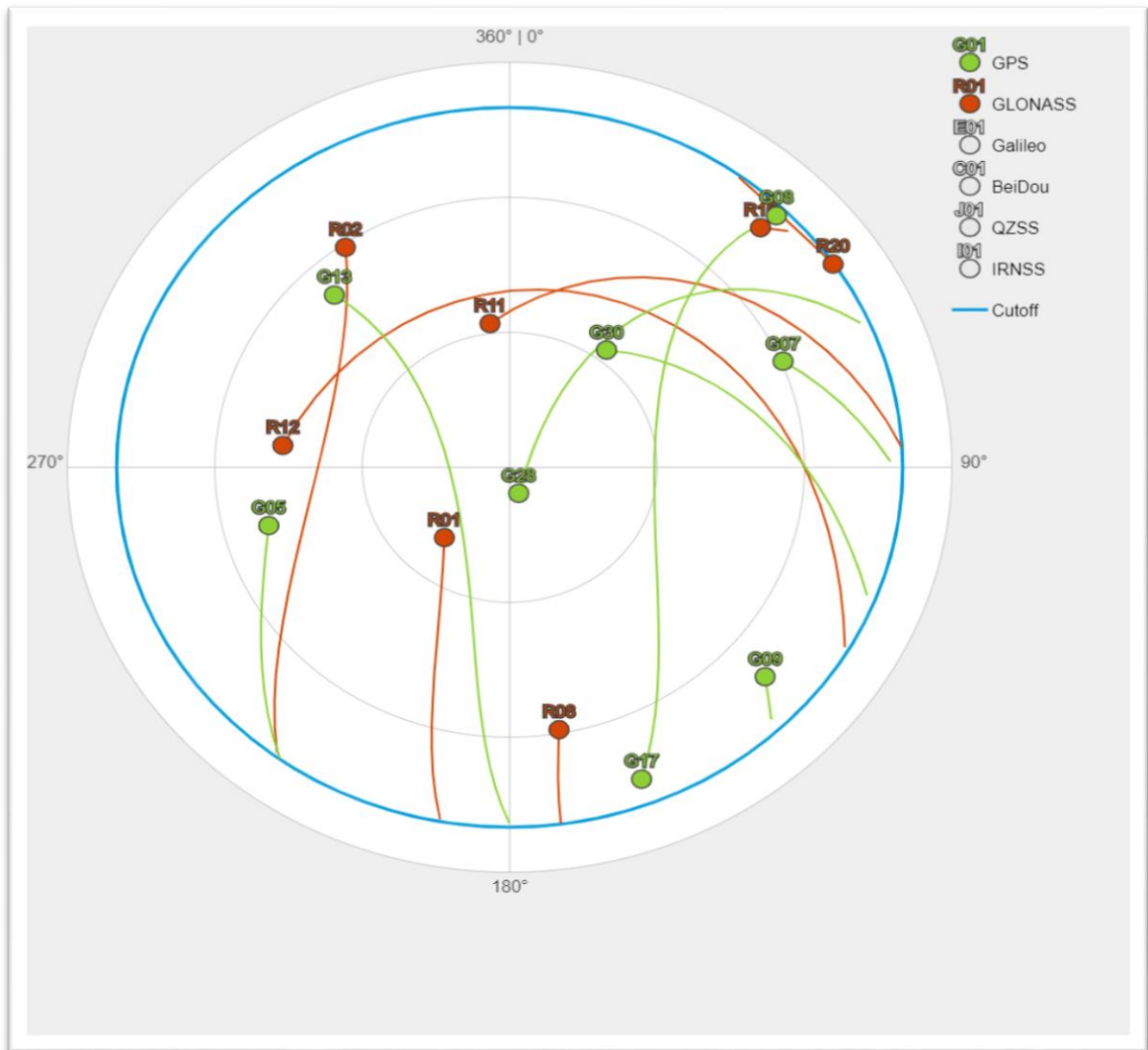


The screenshot displays the 'Trimble GNSS Planning' web interface. On the left, there is a form with the following fields: Latitude (N 34° 40' 31.2274"), Longitude (E 33° 2' 39.5962"), Height (20 m), Elevation cutoff (10'), Day (13-Apr-2019), Start time (10:00 UTC +03:00), Period [hours] (6), and Time zone ((UTC+02:00) Athens, Bucharest). An 'Apply' button is located at the bottom of the form. On the right, a map of Limassol, Cyprus, is shown with a blue location pin. The map includes labels for 'Limassol', 'Agia Napa', 'Chorá Praxias', and 'Agios Antonios'. The map also shows the coastline and the sea.

Πηγή: ('Trimble GNSS Planning', χ.χ.)

Η γωνία αποκοπής (elevation cutoff) ορίστηκε στις 10 μοίρες. Οποιοσδήποτε δορυφόρος με γωνία ύψους κάτω του καθορισμένου ορίου αποκόπτεται λόγω χαμηλής γωνίας ύψους και άρα κακής γεωμετρίας και δεν υπολογίζονται τα σφάλματα του στα διαγράμματα που ακολουθούν. Οι δέκτες κατά την διάρκεια των μετρήσεων καθορίστηκαν στο να έχουν την ίδια γωνία αποκοπής.

Διάγραμμα 33: Η γεωμετρία και ο αριθμός των δορυφόρων στην περιοχή μελέτης



Πηγή: (‘Trimble GNSS Planning’, χ.χ.)

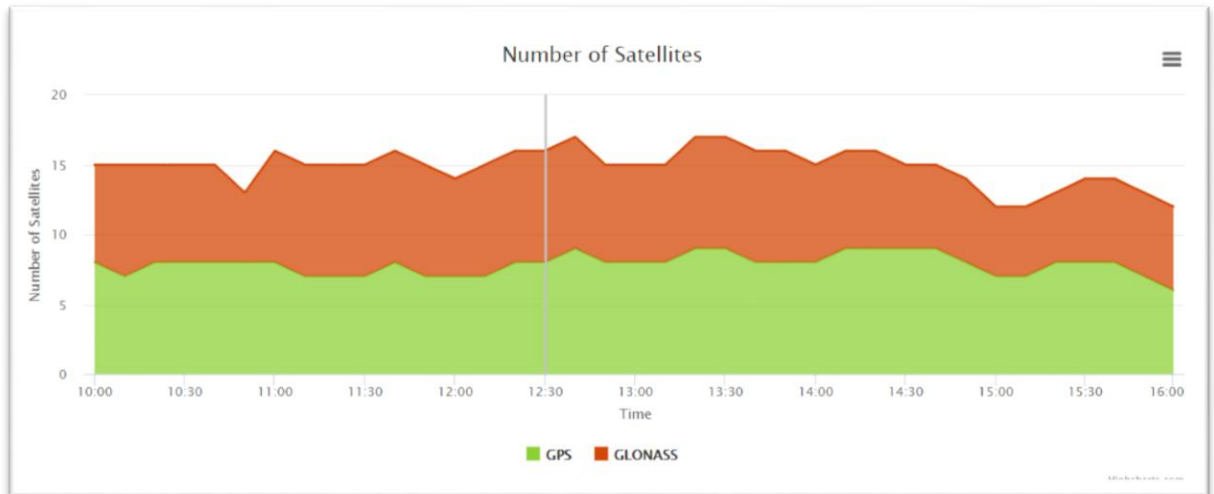
Το πιο πάνω διάγραμμα δείχνει την γεωμετρία, το είδος και τον αριθμό των δορυφόρων στην περιοχή μελέτης κατά την ώρα έναρξης των μετρήσεων. Επιλέχθηκαν μόνο οι δορυφόροι των συστημάτων GPS και GLONASS για τον λόγο ότι οι δέκτες κατά την διάρκεια των μετρήσεων θα έχουν σαν βάση και θα παίρνουν διορθώσεις από σταθερό δέκτη του Τμήματος Κτηματολογίου και Χωρομετρίας, ο οποίος είναι ενταγμένος στο σύστημα CYPOS που λαμβάνει δορυφορικά σήματα μόνο από τα ανωτέρω συστήματα.

Πίνακας 4: Συντεταγμένες Σταθμού Αναφοράς (Δίκτυο CYPOS)

Point Number	Easting	Northing	Elevation
Ref 0003	202303.778	337522.877	50.195

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί, από την ώρα έναρξης μέχρι την ώρα αποπεράτωσης των αποτυπώσεων, δεν υπάρχουν σοβαρές αυξομειώσεις στον αριθμό των δορυφόρων. Ο συνολικός αριθμός τους κατά την ώρα έναρξης (10:00) είναι δεκαπέντε και κατά την ώρα αποπεράτωσης (12:30) ανέρχεται στους δεκαέξι.

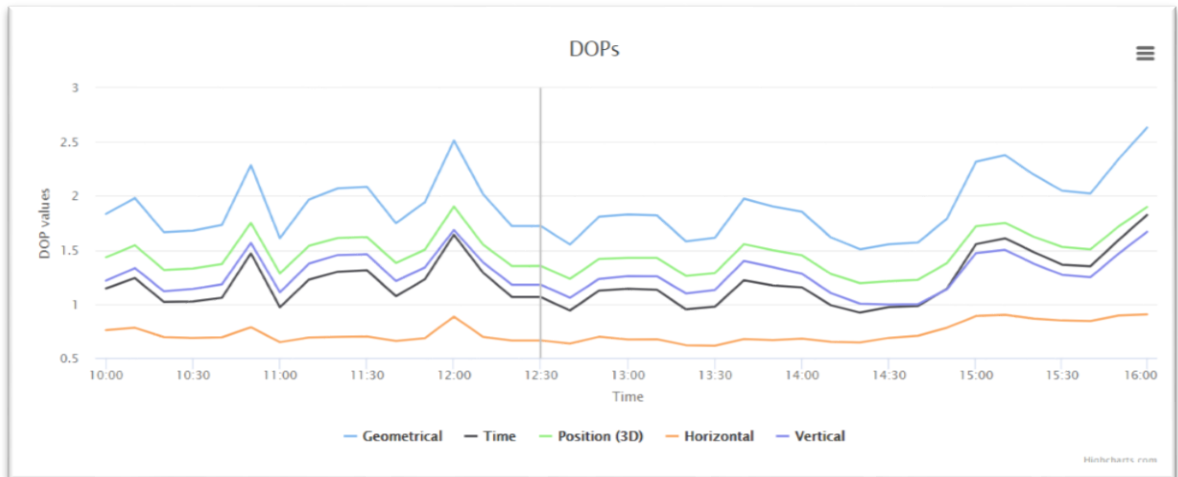
Διάγραμμα 34: Αριθμός δορυφόρων κατά την διάρκεια των μετρήσεων



Πηγή: ('Trimble GNSS Planning', χ.χ.)

Οι παράμετροι αβεβαιότητας DOPs (βλ. κεφάλαιο 3.4.3) εμφανίζονται στο διάγραμμα 35. Η ευαισθησία της δισδιάστατης θέσης φαίνεται σταθερή και σε χαμηλά επίπεδα ενώ, όπως ήταν αναμενόμενο η ευαισθησία κατακόρυφης θέσης παραμένει ψηλότερη από την HDOP αλλά με σημαντικές αυξομειώσεις. Η μεγαλύτερη αβεβαιότητα στον προσδιορισμό θέσεως (GDOP) εντοπίζεται στις 12:00.

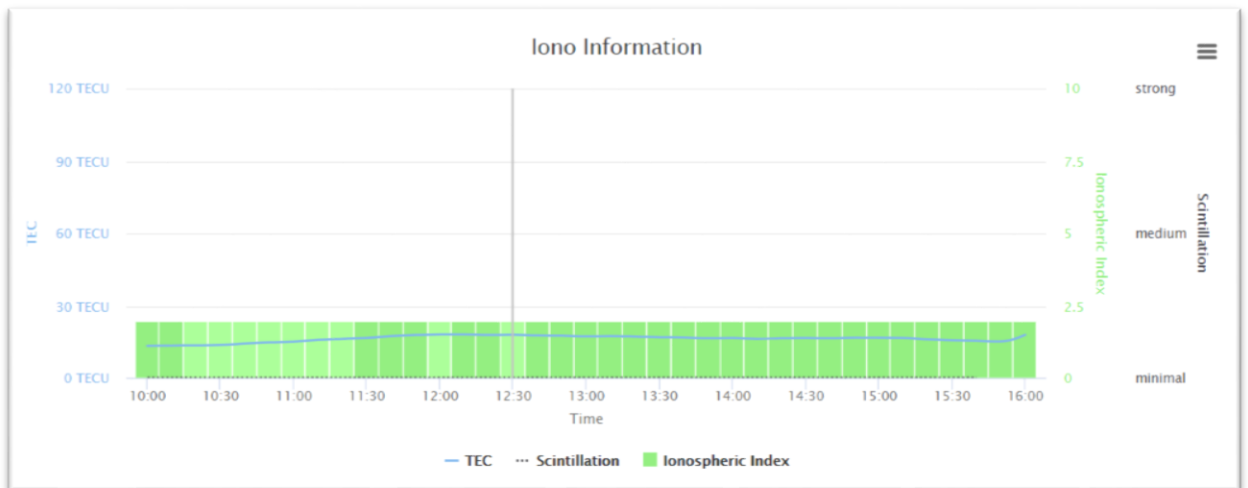
Διάγραμμα 35: Ανάλυση παραμέτρων αβεβαιότητας



Πηγή: ('Trimble GNSS Planning', χ.χ.)

Η τελευταία παράμετρος που ελέγχθηκε είναι η ποσότητα ιονιζόμενων ατόμων λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας στην ιονόσφαιρα η οποία προκαλεί καθυστερήσεις σήματος. Όπως είναι αναμενόμενο, η μεγαλύτερη παρουσία ιονιζόμενων ατόμων εμφανίζεται κατά τις ώρες όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι εντονότερη (11:30 – 13:00).

Διάγραμμα 36: Πληροφορίες σχετικά με την ιονόσφαιρα



Πηγή: ('Trimble GNSS Planning', χ.χ.)

5.4 Μετρήσεις

Το σύνολο των σημείων αναφοράς ανέρχεται στα πενήντα ένα και κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τη θέση τους και τον βαθμό δυσκολίας σταθερής επίλυσης των δεκτών σε:

- Σημεία σε ανοικτό πεδίο: 14
- Σημεία κοντά σε μαγνητικές παρεμβολές και κτήρια: 6
- Σημεία σε αστικό φαράγγι: 31

Κρίθηκε σκόπιμη η τοποθέτηση πολλών σημείων στο αστικό φαράγγι αφενός λόγω της δυσκολίας αποτύπωσης τους από τους δέκτες (φαινόμενα πολυανάκλασης, αποκοπή σήματος λόγω ψηλών κτηρίων) και αφετέρου η εξακρίβωση της ακρίβειας λειτουργίας των δεκτών GNSS με ενσωματωμένους αδρανειακούς αισθητήρες, σε τέτοιο περιβάλλον.

Οι μετρήσεις των δεκτών έγιναν με την μέθοδο RTK και χωρίζονται ως:

1. Μετρήσεις με κατακόρυφο στυλεό
2. Μετρήσεις με κεκλιμένο στυλεό σε δύο διαφορετικές θέσεις

Σε όλες τις περιπτώσεις, οι δέκτες με αντιστάθμιση κλίσης είχαν ενεργοποιημένους τους αδρανειακούς αισθητήρες με σκοπό την σύγκριση των μετρήσεων τους σε κατακόρυφη θέση στυλεού με αυτές του συμβατικού δέκτη.

Αφού πραγματοποιήθηκε η ταυτόχρονη ενεργοποίηση των δεκτών και η σύνδεση τους στο δίκτυο CYPOS (βλ. διάγραμμα 37), ο δέκτης με αδρανειακό σύστημα βασισμένο στο μαγνητόμετρο (Trimble R10-v1) χρειάστηκε να περιστραφεί χειροκίνητα και στους τρεις άξονες για να βαθμονομηθεί ούτως ώστε να γίνει ο απαραίτητος προσανατολισμός του. Αυτή η διαδικασία δεν χρειάστηκε να πραγματοποιηθεί στον δέκτη με αδρανειακούς αισθητήρες IMU/MEMS (Leica GS18).

Η σειρά που ακολουθήθηκε για αποτύπωση κάθε σταθερού σημείου ήταν η παρακάτω:

Ο κάθε δέκτης αποτύπωνε το σταθερό σημείο περιμένοντας την ολοκλήρωση της διαδικασίας και από τους υπόλοιπους δέκτες. Στην συνέχεια προχωρούσαν στο επόμενο σημείο αποτύπωσης επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία. Ο πρώτος δέκτης που πραγματοποιούσε την αποτύπωση ήταν ο συμβατικός δέκτης (Leica GS16), μετά

ακολουθούσε ο Leica GS18 σε τρεις διαφορετικές θέσεις στυλεού και τέλος ο Trimble R10 πάλι σε τρεις διαφορετικές θέσεις στυλεού.

Αποφασίστηκε οι δέκτες με αντιστάθμιση κλίσης να αποτυπώνουν σε κατακόρυφη θέση στυλεού, σε ενδιάμεση και μεγάλη γωνία κλίσης η οποία θα ήταν κοινή και για τους δύο δέκτες, όμως από την πρώτη κιάλας μέτρηση διαπιστώθηκε πως ο R10 δεν επέτρεπε την αποτύπωση σημείου αν η γωνία ξεπερνούσε τις 8° ενώ ο GS16 είχε απεριόριστη κλίση. Έτσι αποφασίστηκε πως ο R10 θα αποτυπώνει σε 0, 4 και 8 μοίρες ενώ ο GS18 σε 0, 15 και 30 μοίρες.

Διάγραμμα 37: Ταυτόχρονη ενεργοποίηση και σύνδεση δεκτών στο CYPOS



5.4.1 Αποτυπώσεις σε ανοικτό πεδίο

Οι αποτυπώσεις σε ανοικτό πεδίο είχαν ως στόχο την αντικειμενικότερη σύγκριση των δεκτών σε χώρους χωρίς ιδιαίτερες παρεμβολές και σφάλματα και με όσο το δυνατόν περισσότερους διαθέσιμους δορυφόρους. Εντούτοις προέκυψαν κάποια ιδιαίτερα αποτελέσματα τα οποία αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Οι μετρήσεις του κάθε δέκτη φαίνονται στους πίνακες που ακολουθούν:

Πίνακας 5: Συντεταγμένες αποτύπωσης συμβατικού δέκτη σε ανοικτό πεδίο

Leica GS16			
Number	Easting	Northing	Elevation
9	204041.435	338363.331	18.853
TP29	204079.210	338408.264	18.828
TP23	204086.812	338366.524	18.849
TP69	204082.534	338387.458	18.729
TP18	204037.320	337940.377	16.372
TP56	204155.868	338062.931	16.32
TP57	204180.85	338089.18	16.343
TP55	204128.326	338033.789	16.361
TP19	204168.189	338094.011	15.91
CUT1	204118.197	338025.306	15.736
TP59	204151.931	338103.421	16.022
TP58	204125.661	338072.017	15.99

Πίνακας 6: Συντεταγμένες αποτύπωσης δέκτη με IMU/MEMS σε ανοικτό πεδίο

Leica GS18									
Number	0°			15°			30°		
	Easting	Northing	Elevation	Easting	Northing	Elevation	Easting	Northing	Elevation
9	204041.430	338363.3	18.850	204041.428	338363.325	18.872	204041.392	338363.289	18.849
TP29	204079.2047	338408.263	18.8323	204079.2081	338408.259	18.8291	204079.210	338408.263	18.8296
TP23	204086.792	338366.47	18.8172	204086.7988	338366.481	18.8061	204086.784	338366.469	18.7994
TP69	204082.5292	338387.45	18.7186	204082.540	338387.456	18.7314	204082.535	338387.456	18.7241
TP18	204037.3076	337940.38	16.3486	204037.3167	337940.378	16.3693	204037.317	337940.371	16.3707
TP56	204155.8714	338062.92	16.321	204155.8712	338062.920	16.3292	204155.875	338062.920	16.3304
TP57	204180.8448	338089.17	16.3409	204180.8484	338089.176	16.343	204180.853	338089.184	16.3334
TP55	204128.3305	338033.78	16.3606	204128.3366	338033.776	16.3617	204128.335	338033.782	16.3597
TP19	204168.1893	338094.01	15.9103	204168.1855	338094.026	15.9186	204168.188	338094.024	15.9143
CUT1	204118.1871	338025.31	15.7426	204118.1846	338025.312	15.739	204118.189	338025.308	15.7537
TP59	204151.930	338103.43	16.007	204151.9372	338103.430	16.0235	204151.935	338103.425	16.0198
TP58	204125.6579	338072.02	15.9758	204125.666	338072.02	15.9792	204125.662	338072.025	15.9845

Πίνακας 7: Συντεταγμένες αποτύπωσης σε ανοικτό πεδίο του δέκτη βασισμένου σε μαγνητόμετρο

Trimble R10									
Number	0°			4°			8°		
	Easting	Northing	Elevation	Easting	Northing	Elevation	Easting	Northing	Elevation
9	204041.403	338363.3	18.882	204041.377	338363.277	18.844	204041.376	338363.275	18.879
TP29	204079.2	338408.258	18.848	204079.194	338408.268	18.843	204079.192	338408.271	18.846
TP23	204086.813	338366.48	18.808	204086.793	338366.475	18.797	204086.794	338366.479	18.804
TP69	204082.531	338387.45	18.732	204082.533	338387.451	18.724	204082.542	338387.449	18.713
TP18	204037.305	337940.36	16.355	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
TP56	204155.869	338062.93	16.338	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
TP57	204180.827	338089.14	16.344	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
TP55	204128.348	338033.79	16.358	204128.332	338033.795	16.356	204128.329	338033.797	16.35
TP19	204168.204	338094.03	15.955	204168.177	338094.028	15.931	204168.177	338094.026	15.921
CUT1	204118.182	338025.32	15.744	204118.162	338025.287	15.732	204118.167	338025.27	15.737
TP59	204151.951	338103.43	16.034	204151.938	338103.441	16.024	204151.934	338103.444	16.019
TP58	204125.656	338072.02	15.989	204125.661	338072.025	15.99	204125.665	338072.028	15.978

5.4.2 Αποτυπώσεις κοντά σε διάφορες μαγνητικές και άλλες παρεμβολές

Τα εν λόγω σημεία τοποθετήθηκαν σκόπιμα και αποτυπώθηκαν κατά την διάρκεια των μετρήσεων με σκοπό την εξακρίβωση της ακρίβειας αποτυπώσεων και του αληθούς των βιβλιογραφικών αναφορών (π.χ. ευαισθησία δέκτη βασισμένου στο μαγνητόμετρο σε μαγνητικές παρεμβολές). Οι συντεταγμένες αποτύπωσης φαίνονται πιο κάτω:

Πίνακας 8: Συντεταγμένες αποτύπωσης συμβατικού δέκτη κοντά σε παρεμβολές

Leica GS16				
Number	Description	Easting	Northing	Elevation
1	Building corner	204067.432	338402.36	18.844
2	Wall corner	204073.666	338405.413	18.964
3	EAC substation	204083.773	338414.087	18.898
5	Metallic pole	204079.145	338394.142	18.94
11	tree	204073.713	338400.398	18.723

Πίνακας 9: Συντεταγμένες αποτύπωσης δέκτη με IMU/MEMS κοντά σε παρεμβολές

Leica GS18										
Number	Description	0°			15°			30°		
		Easting	Northing	Elevation	Easting	Northing	Elevation	Easting	Northing	Elevation
1	Building corner	204067.365	338402.39	18.837	204067.404	338402.357	18.895	204067.465	338402.337	18.961
2	Wall corner	204073.7479	338405.418	19.0251	204073.746	338405.404	19.0243	204073.750	338405.401	19.0199
3	EAC substation	204083.8239	338414.25	18.7981	204083.8329	338414.284	18.8129	204083.823	338414.302	18.8258
5	Metallic pole	204079.0881	338394.2	19.0422	204079.102	338394.212	19.045	204079.108	338394.209	19.0419
11	tree	204073.703	338400.42	18.7489	204073.6369	338400.797	18.7262	204073.576	338400.889	18.7514

Πίνακας 10: Συντεταγμένες αποτύπωσης του δέκτη βασισμένου σε μαγνητόμετρο, κοντά σε παρεμβολές

Trimble R10										
Number	Description	0°			4°			8°		
		Easting	Northing	Elevation	Easting	Northing	Elevation	Easting	Northing	Elevation
1	Building corner	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
2	Wall corner	204073.723	338405.414	18.987	204073.739	338405.418	18.991	204073.739	338405.419	18.99
3	EAC substation	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
5	Metallic pole	204079.169	338394.144	18.84	204079.173	338394.174	18.837	204079.173	338394.179	18.829
11	tree	204073.699	338400.425	18.728	204073.729	338400.416	18.802	204073.732	338400.431	18.838

5.4.3 Μετρήσεις στο αστικό φαράγγι

Όπως ήταν αναμενόμενο, οι περισσότερες αποτυχίες αποτύπωσης σημείων σημειώθηκαν στο αστικό φαράγγι λόγω έλλειψης δορυφορικών σημάτων και οι περισσότερες των μετρήσεις που λήφθηκαν περιείχαν μεγάλα σφάλματα. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων εμφανίζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Από τον συμβατικό δέκτη GS16 αποτυπώθηκαν 21 από τα 31 σημεία, ο δέκτης GS18 στις θέσεις 0, 15 και 30 μοιρών αποτύπωσε 14, 13 και 8 σημεία αντίστοιχα ενώ ο R10 στις θέσεις 0, 4 και 8 μοιρών αποτύπωσε 11, 7 και 7 σημεία αντίστοιχα.

Στους πίνακες που ακολουθούν φαίνονται οι συντεταγμένες αποτύπωσης των σημείων στο αστικό φαράγγι όπως και τα σημεία τα οποία δεν κατέστη δυνατόν να αποτυπωθούν.

Πίνακας 11: Συντεταγμένες αποτύπωσης συμβατικού δέκτη στο αστικό φαράγγι

Leica GS16			
Number	Easting	Northing	Elevation
6	FAIL	FAIL	FAIL
8	204062.974	338389.173	22.425
10	204055.743	338348.422	18.731
12	204063.942	338338.598	18.659
13	204069.392	338341.531	18.555
14	204077.419	338315.846	20.063
15	204090.653	338315.04	18.425
16	204078.348	338329.765	18.603
17	FAIL	FAIL	FAIL
18	FAIL	FAIL	FAIL
19	204006.44	338306.786	33.548
20	204009.68	338304.201	19.442
21	204026.159	338274.058	21.469
22	FAIL	FAIL	FAIL
23	204047.838	338275.028	-3.519
24	204045.57	338257.313	33.955
25	FAIL	FAIL	FAIL
26	204049.214	338262.06	41.848
27	FAIL	FAIL	FAIL
29	FAIL	FAIL	FAIL
30	FAIL	FAIL	FAIL
31	204074.187	338394.163	18.815
32	204052.289	338376.83	19.249
33	204080.579	338349.377	18.747
34	FAIL	FAIL	FAIL
101	204039.141	338379.405	18.831
102	203995.063	338334.166	25.454
103	FAIL	FAIL	FAIL
104	204090.947	338294.726	28.805
TP68	204063.553	338393.914	20.521
TP66	204050.787	338353.82	18.777

Πίνακας 12: Συντεταγμένες αποτύπωσης δέκτη με IMU/MEMS στο αστικό φαράγγι

Leica GS18									
Number	0°			15°			30°		
	Eastng	Northing	Elevation	Eastng	Northing	Elevation	Eastng	Northing	Elevation
6	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
8	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
10	204055.749	338348.404	18.764	204055.765	338348.411	18.722	204055.759	338348.416	18.719
12	204063.9353	338338.595	18.6371	204063.929	338338.599	18.6547	FAIL	FAIL	FAIL
13	204069.385	338341.529	18.5561	204069.3787	338341.529	18.5595	204069.377	338341.52	18.5382
14	204078.5261	338316.689	20.8662	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
15	204090.6478	338315.045	18.4268	204090.6605	338315.041	18.4249	204090.669	338315.039	18.4338
16	204078.5133	338329.903	18.5582	204078.4525	338329.851	18.582	204078.383	338329.78	18.5872
17	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
18	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
19	204006.462	338306.536	33.382	204006.375	338306.402	29.501	FAIL	FAIL	FAIL
20	204003.9499	338309.159	28.9148	204009.7077	338302.177	19.0787	FAIL	FAIL	FAIL
21	204025.1283	338271.408	19.5745	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
22	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
23	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
24	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
25	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
26	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
27	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
29	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
30	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
31	204074.1824	338394.164	18.8167	204074.1773	338394.159	18.801	204074.18	338394.172	18.8131
32	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
33	204080.5859	338349.387	18.7393	204080.5714	338349.386	18.7704	204080.574	338349.374	18.7352
34	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
101	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
102	FAIL	FAIL	FAIL	203992.3502	338334.158	23.6825	FAIL	FAIL	FAIL
103	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
104	204060.7458	338249.635	31.7834	204053.2273	338248.131	64.5776	FAIL	FAIL	FAIL
TP68	204063.3155	338392.559	19.0173	204063.4255	338392.92	19.0191	204063.662	338392.469	18.9913
TP66	204050.78	338353.827	18.8151	204050.7871	338353.835	18.7848	204050.79	338353.836	18.7728

Πίνακας 13: Συντεταγμένες αποτύπωσης του δέκτη βασισμένου σε μαγνητόμετρο, στο αστικό φαράγγι

Trimble R10									
Number	0°			4°			8°		
	Easting	Northing	Elevation	Easting	Northing	Elevation	Easting	Northing	Elevation
6	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
8	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
10	204055.769	338348.404	18.721	204055.760	338348.407	18.725	204055.761	338348.402	18.726
12	204063.952	338338.61	18.694	204063.948	338338.607	18.704	204063.941	338338.591	18.69
13	204069.403	338341.539	18.555	204069.401	338341.549	18.554	204069.401	338341.551	18.562
14	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
15	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
16	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
17	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
18	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
19	204006.064	338306.986	28.199	204005.166	338307.764	23.767	204005.241	338307.989	24.806
20	204010.314	338304.244	16.704	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
21	204025.095	338272.122	18.595	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
22	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
23	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
24	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
25	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
26	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
27	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
29	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
30	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
31	204074.184	338394.155	18.816	204074.178	338394.161	18.815	204074.169	338394.16	18.815
32	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
33	204080.574	338349.395	18.732	204080.591	338349.424	18.767	204080.503	338349.359	18.842
34	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
101	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
102	203992.917	338333.273	24.431	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
103	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
104	204090.572	338291.542	26.038	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
TP68	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL
TP66	204050.804	338353.806	18.827	204050.8	338353.82	18.78	204050.8	338353.82	18.786

6 Αποτελέσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων. Η στατιστική ανάλυση των μετρήσεων έγινε στο πρόγραμμα Microsoft Excel 2016®.

Παρουσιάζονται ξεχωριστά τα αποτελέσματα για κάθε περιβάλλον μέτρησης ενώ στη συνέχεια γίνεται μια συνολική σύγκριση όλων των αποτελεσμάτων.

Αφού εισήχθησαν οι μετρήσεις στο ανωτέρω πρόγραμμα, υπολογίστηκαν το υψομετρικό (1D) σφάλμα μέτρησης (μετρούμενη τιμή – πραγματική τιμή) από κάθε σταθερό σημείο και το δυσδιάστατο (2D) σφάλμα μέσω της εξίσωσης της ευκλείδειας απόστασης: $\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$

Στην συνέχεια, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων, ταξινομήθηκαν οι διαφορές των αποστάσεων ανάλογα με την ακρίβεια τους και την συχνότητα μέτρησης και δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα που φαίνονται στις ενότητες που ακολουθούν.

6.1 Αποτελέσματα μετρήσεων σε ανοικτό πεδίο

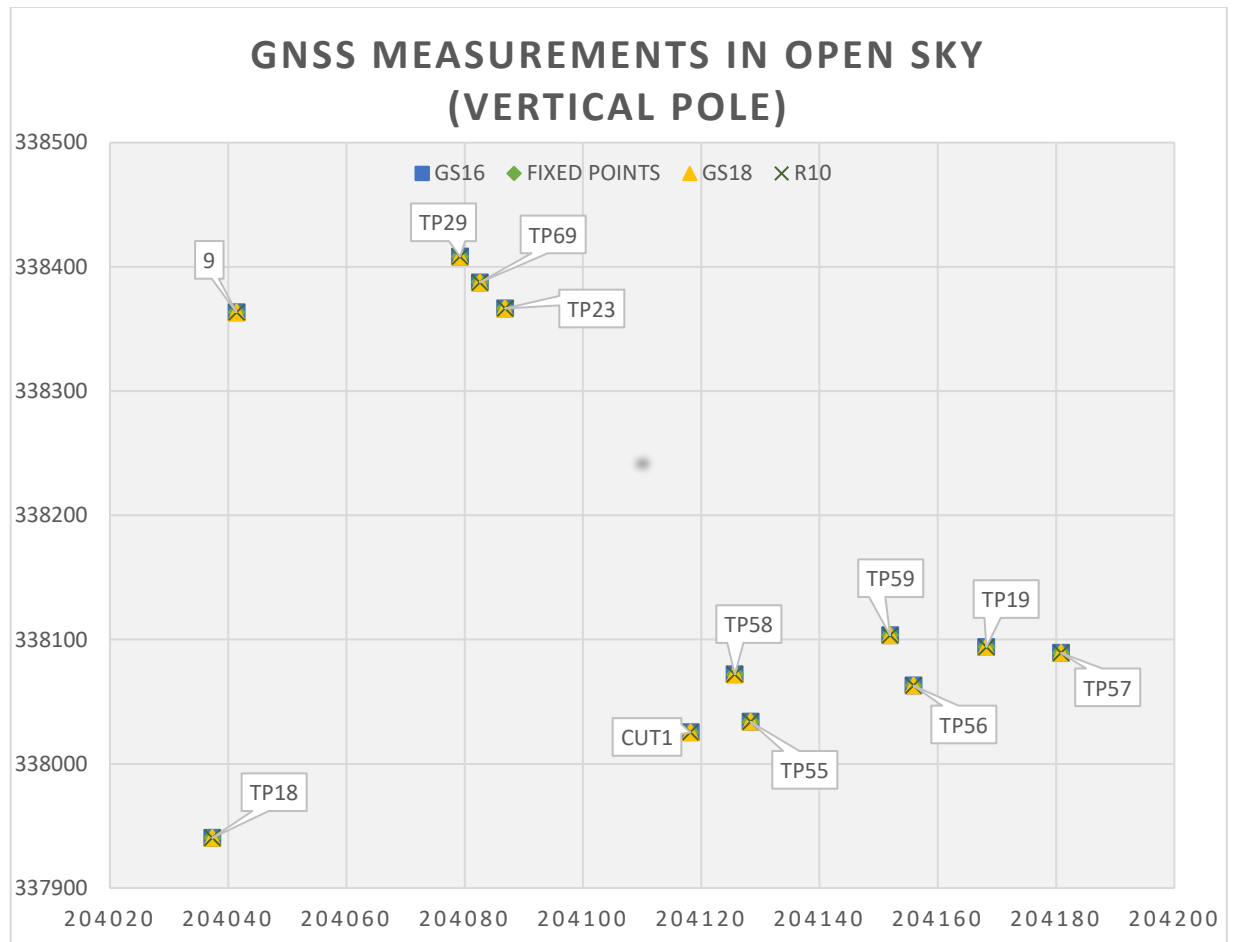
Λόγω της υψηλής ακρίβειας των μετρήσεων (ακρίβεια δεκτών GNSS με την μέθοδο RTK) σε τέτοιου είδους περιβάλλοντα τα σφάλματα ταξινομήθηκαν σε:

- 0
- >0 – 0.005m
- >0.005 – 0.01m
- >0.01 – 0.05m
- >0.05 – 0.1m
- >0.1 – 0.5m
- >0.5m

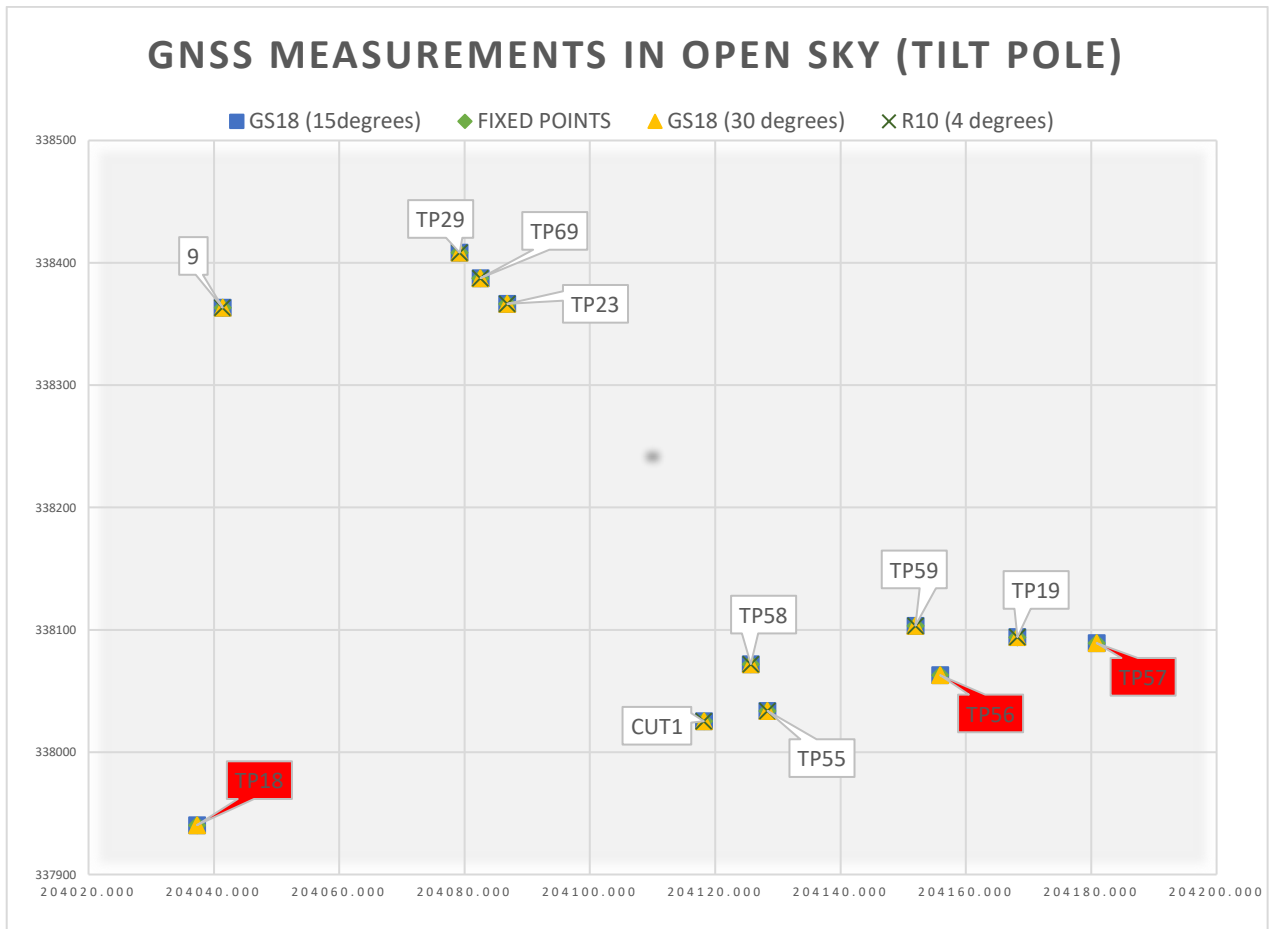
Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε πως η μεγαλύτερη συγκέντρωση μετρήσεων βρίσκεται στην κατηγορία >0.01 – 0.05m ενώ στο υψομετρικό σφάλμα βρέθηκαν και αποκλείσεις ενός μέτρου και στους δύο δέκτες με αντιστάθμιση κλίσης, στις μετρήσεις με κεκλειμένο στυλεό.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως σε τρεις περιπτώσεις ο δέκτης Trimble R10 δεν αποτύπωνε το σημείο λόγω μαγνητικών παρεμβολών. Αυτό που διαπιστώθηκε αργότερα ήταν ότι η παρουσία των άλλων δεκτών κοντά στον R10 τον εμπόδιζε στο να αποτυπώσει έχοντας ενεργοποιημένο το αδρανειακό σύστημα το οποίο είναι βασισμένο στο μαγνητόμετρο. Με την απομάκρυνση των άλλων δεκτών, ο R10 λειτούργησε κανονικά.

Διάγραμμα 38: Μετρήσεις δεκτών σε κατακόρυφη θέση



Διάγραμμα 39: Μετρήσεις δεκτών με κεκλιμένο στυλό



Στο διάγραμμα 39 φαίνονται με κόκκινο χρώμα οι θέσεις των σημείων που δεν μπορούσαν να αποτυπωθούν με κεκλιμένο στυλό από τον δέκτη R10.

Πίνακας 14: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα μετρήσεων

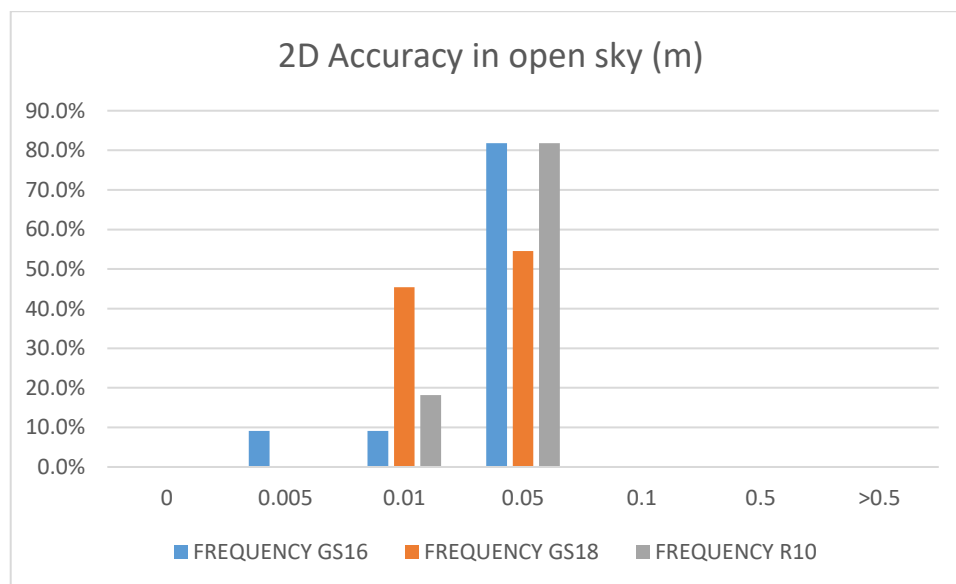
	RMSE (m) in open sky			
	Easting	Northing	1D	2D
GS16	0.015	0.008	0.014	0.019
GS18 (0°)	0.013	0.007	0.019	0.020
GS18 (15°)	0.013	0.011	0.014	0.017
GS18 (30°)	0.013	0.011	0.015	0.023
R10 (0°)	0.014	0.019	0.018	0.024
R10 (4°)	0.021	0.017	0.014	0.034
R10 (8°)	0.020	0.021	0.018	0.036

Στον πίνακα 14 φαίνεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα μετρήσεων για κάθε δέκτη τόσο οριζοντιογραφικά όσο και υψομετρικά. Το μικρότερο RMSE εμφανίζεται στον δέκτη με ενσωματωμένο IMU/MEMS όταν αυτός βρίσκεται σε κλίση 15° κατά την διαδικασία αποτύπωσης. Οριζοντιογραφικά, το μεγαλύτερο RMSE φαίνεται να έχει ο δέκτης με ενσωματωμένο σύστημα μαγνητόμετρου όταν αυτός βρίσκεται σε κλίση 8° (μέγιστη κλίση) κατά την διαδικασία αποτύπωσης, ενώ το μεγαλύτερο υψομετρικό RMSE έχει ο δέκτης με IMU/MEMS σε κατακόρυφη θέση αποτύπωσης.

6.1.1 Οριζοντιογραφικό σφάλμα (2D error)

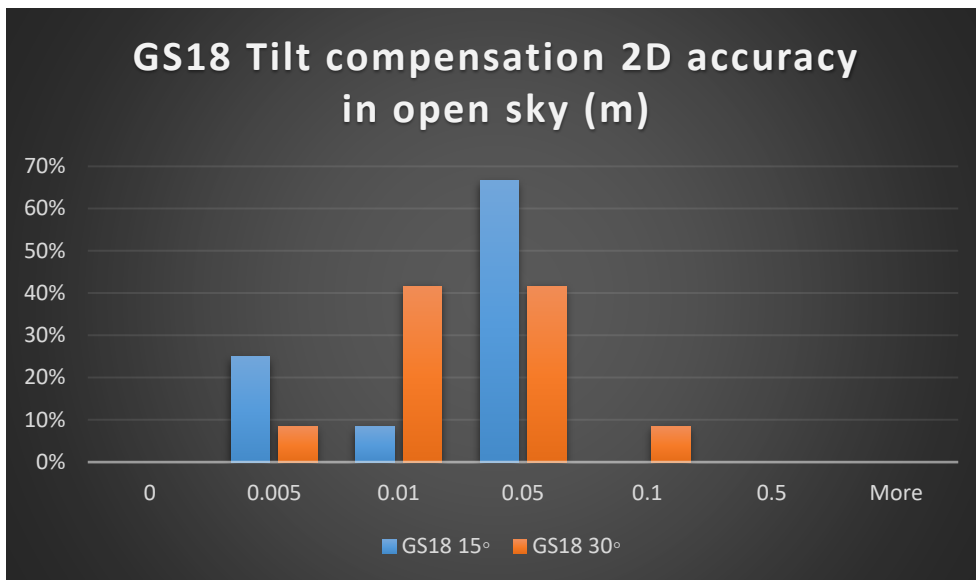
Συγκρίνοντας την ποσοστιαία οριζοντιογραφική ακρίβεια των δεκτών σε κατακόρυφη θέση στυλεού (βλ. διάγραμμα 40), βρέθηκε πως το 82% των μετρήσεων του συμβατικού δέκτη και του R10 ήταν ακρίβειας 5 εκατοστών ενώ όλες οι μετρήσεις του GS18 ήταν ακρίβειας μέχρι 1 (45%) και μέχρι 5 εκατοστών (55%)

Διάγραμμα 40: Οριζοντιογραφική ακρίβεια σε κατακόρυφη θέση στυλεού

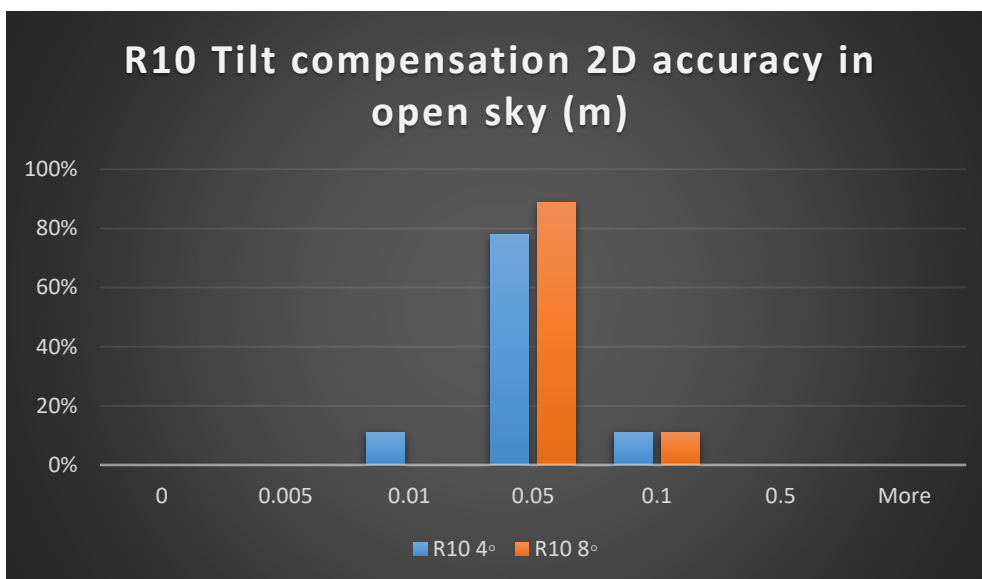


Συγκρίνοντας τις ακρίβειες μετρήσης με διαφορετικές κεκλεισμένες θέσεις στυλεών, δημιουργήθηκαν τα πιο κάτω διαγράμματα

Διάγραμμα 41: Οριζοντιογραφική ακρίβεια Leica GS18 με κεκλιμένο στυλό



Διάγραμμα 42: Οριζοντιογραφική ακρίβεια Trimble R10 με κεκλιμένο στυλό

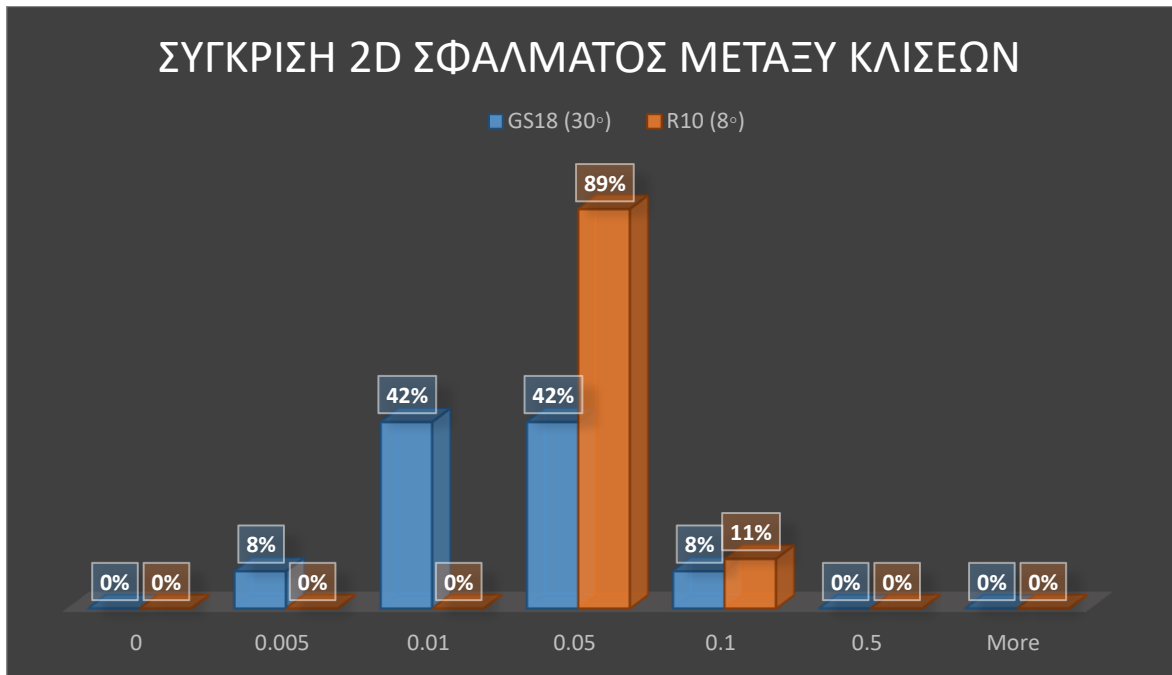


Στο διάγραμμα 41 παρατηρούμε πως στις 15° οι περισσότερες συγκεντρώσεις των μετρήσεων βρίσκονται στις ακρίβειες των 5 χιλιοστών και των 5 εκατοστών ενώ στις 30° αυτές οι συγκεντρώσεις μειώνονται και παρατηρείται αύξηση συγκεντρώσεων στις ακρίβειες του ενός εκατοστού ενώ ένα ποσοστό του 9% εμφανίζει οριζοντιογραφικό σφάλμα 10 εκατοστών.

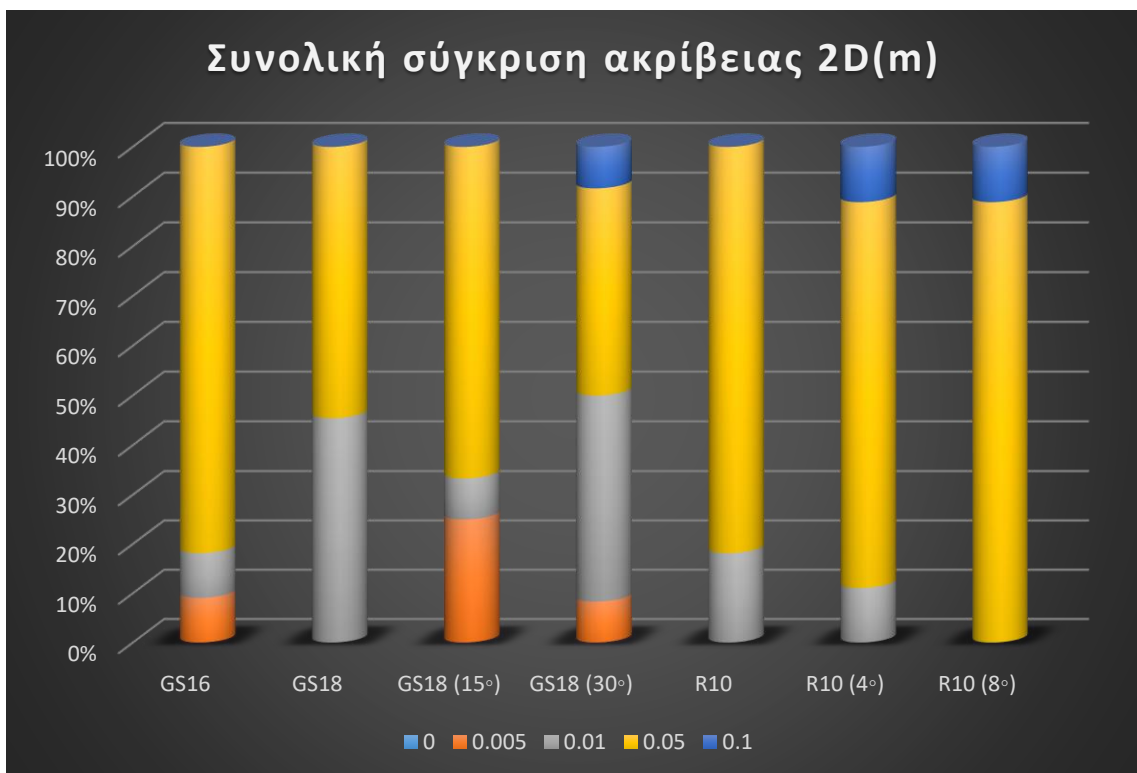
Όσον αφορά τον δέκτη R10 το οριζοντιογραφικό σφάλμα κυμαίνεται περίπου στα ίδια επίπεδα μεταξύ των κλίσεων 4° και 8°.

Συγκρίνοντας τις μετρήσεις των δύο δεκτών στις μέγιστες κλίσεις παρατηρούμε πώς ο δέκτης με ενσωματωμένο IMU/MEMS έχει σαφώς μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τον δέκτη που είναι βασισμένος σε μαγνητόμετρο.

Διάγραμμα 43: Ακρίβεια μετρήσεων στις μέγιστες κλίσεις



Διάγραμμα 44: Οριζοντιογραφική ακρίβεια όλων των δεκτών

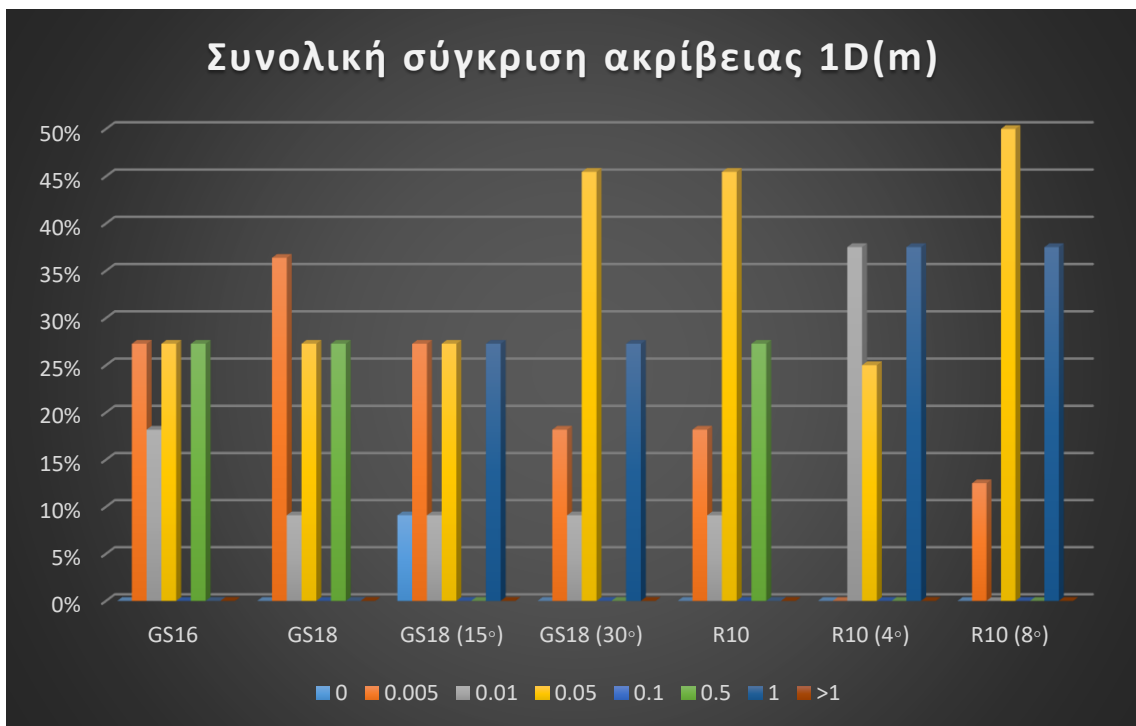


Αναλύοντας το διάγραμμα 44, εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο δέκτης GS18 έχοντας κλίση στυλεού 15 μοιρών έχει την μεγαλύτερη ακρίβεια μετρήσεων από όλες τις υπόλοιπες μετρήσεις ενώ το οριζοντιογραφικό σφάλμα στον δέκτη R10 αυξάνεται όσο μεγαλώνει η κλίση του στυλεού.

6.1.2 Υψομετρικό σφάλμα (1D error)

Στην περίπτωση των υψομετρικών σφαλμάτων παρατηρήθηκε ποικιλομορφία όσον αφορά τις ακρίβειες (σε σχέση με τα γεωμετρικά υψόμετρα των σταθερών σημείων) οι οποίες ξεκινούσαν από μηδαμινό σφάλμα και κατέληγαν σε σφάλματα ενός μέτρου.

Διάγραμμα 45: Υψομετρική ακρίβεια όλων των δεκτών



Στο διάγραμμα 45, στο οποίο εμφανίζονται οι ακρίβειες μέτρησεις για όλους τους δέκτες και σε όλες τις θέσεις στυλεού, παρατηρείται πως οι μεγαλύτερες ακρίβειες εμφανίζονται όταν οι δέκτες βρίσκονται σε κατακόρυφη θέση στυλεού, με τον δέκτη με IMU/MEMS να υπερέχει και τον συμβατικό δέκτη να ακολουθεί, ενώ όσο αυξάνεται η κλίση του στυλεού τα υψομετρικά σφάλματα μεγαλώνουν.

Διάγραμμα 46: Μετρήσεις με το GS18 στο ανοικτό πεδίο

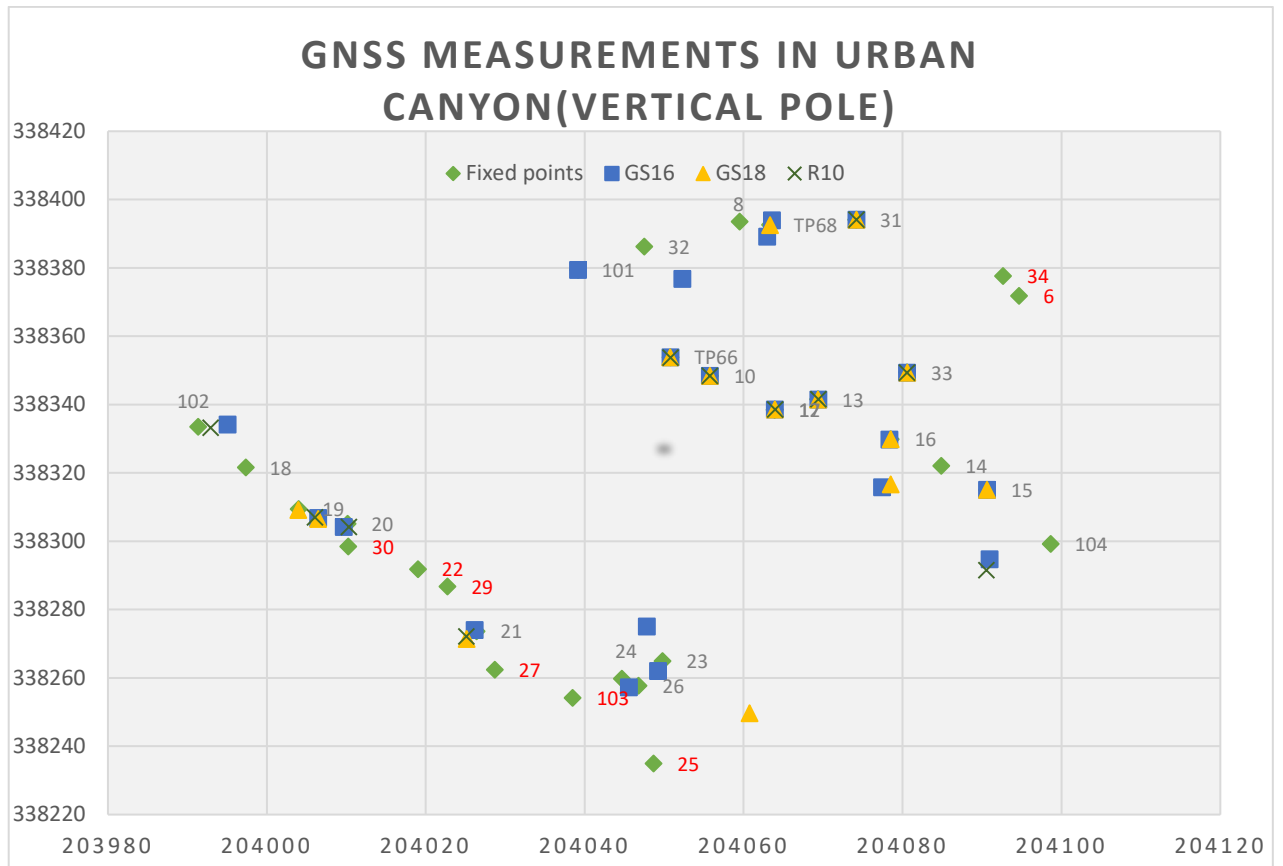


6.2 Αποτελέσματα μετρήσεων στο αστικό φαράγγι

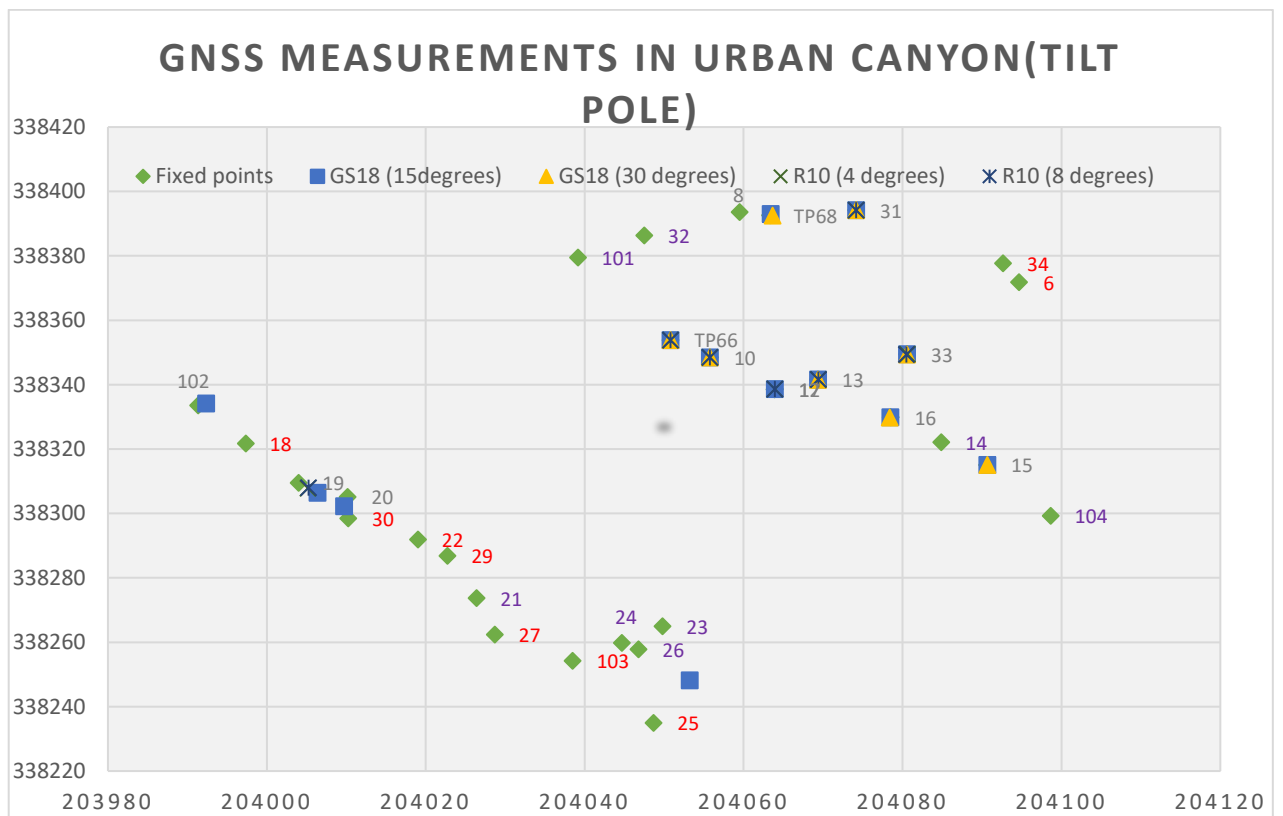
Σε ένα πολύ εχθρικό περιβάλλον για τους δέκτες GNSS έγινε προσπάθεια αποτύπωσης σταθερών σημείων με σκοπό την εξακρίβωση της συμπεριφοράς των δεκτών GNSS με ενσωματωμένους αδρανειακούς αισθητήρες. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν πως οι τελευταίοι δεν παύουν να είναι δέκτες GNSS και να συμπεριφέρονται σαν αυτούς.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται ξεκάθαρα η υπεροχή της ακρίβειας των μετρήσεων σε κατακόρυφη θέση στυλεού αλλά και η ανικανότητα λήψης μέτρησης λόγω έλλειψης δορυφορικού σήματος, κατά την κλίση του στυλεού.

Διάγραμμα 47: Μετρήσεις δεκτών σε κατακόρυφη θέση στο αστικό φαράγγι



Διάγραμμα 48: Μετρήσεις δεκτών με κεκλιμένο στυλό στο αστικό φαράγγι



Στα πιο πάνω διαγράμματα φαίνονται οι θέσεις των σταθερών σημείων σε σχέση με τις μετρήσεις των δεκτών που έγιναν. Οι αριθμοί με κόκκινο χρώμα αντιπροσωπεύουν σημεία τα οποία δεν μετρήθηκαν λόγω αδυναμίας λήψης σήματος ενώ στο διάγραμμα 48 φαίνονται τα επιπλέον σημεία που δεν μετρήθηκαν από κανένα δέκτη με αντιστάθμιση κλίση, κατά την διαδικασία αποτύπωσης με κλίση του στυλεού.

Σε πολλά από τα αποτυπωμένα σημεία παρατηρούνται μεγάλα οριζοντιογραφικά σφάλματα.

6.2.1 Οριζοντιογραφικό σφάλμα

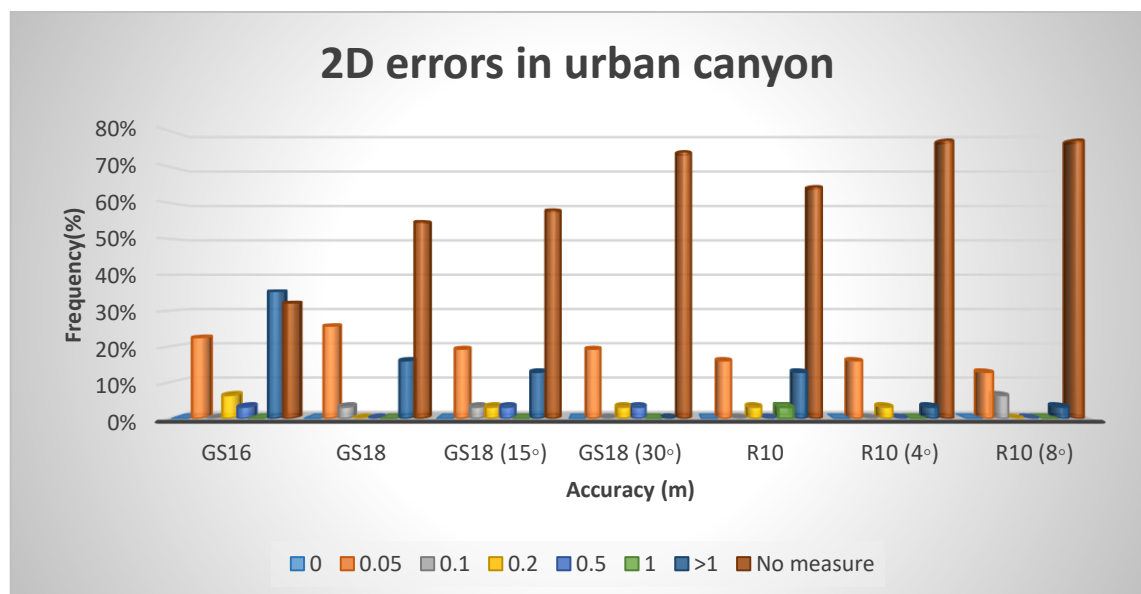
Πίνακας 15: Οριζοντιογραφικά σφάλματα στο αστικό φαράγγι

2D							
Number	Κατακορυφος Στυλεός			Κεκλειμμένος στυλεός			
	GS16	GS18	R10	GS18 (15°)	GS18 (30°)	R10 (4°)	R10 (8°)
	Residuals (m)			Residuals (m)			
6							
8	5.626						
10	0.022	0.033	0.033	0.025	0.020	0.029	0.034
12	0.103	0.098	0.118	0.101		0.114	0.097
13	0.021	0.019	0.026	0.018	0.027	0.023	0.023
14	9.731	8.341					
15	0.012	0.008		0.014	0.021		
16	0.189	0.026		0.054	0.154		
17							
18							
19	3.647	3.849	3.249	3.899		2.086	1.952
20	1.012	7.418	0.866	2.952			
21	0.429	2.613	2.038				
22							
23	10.290						
24	2.648						
25							
26	4.957						
27							
29							
30							
31	0.030	0.025	0.032	0.024	0.020	0.024	0.019
32	10.605						
33	0.027	0.019	0.011	0.020	0.030	0.023	0.089
34							
101	0.034						
102	3.783		1.591	1.209			
103							
104	8.945	62.445	11.175	68.392			
TP68	1.341	0.036		0.342	0.359		
TP66	0.030	0.029	0.039	0.019	0.016	0.025	0.025

Στον πίνακα 15 φαίνονται τα οριζοντιογραφικά σφάλματα καθώς και τα σημεία που δεν μετρήθηκαν. Με κόκκινο χρώμα σημειώθηκαν όλα τα σημεία με σφάλμα άνω του ενός μέτρου που στην περίπτωση της αποτύπωσης του σημείου 104 αγγίζουν σχεδόν τα 70 μέτρα. Παρατηρείται επίσης πως ενώ σε κάποια σημεία η αποτύπωση σε κατακόρυφη θέση στυλεού ήταν σχετικά καλής ακρίβειας, δεν μπορούσαν να αποτυπωθούν σε κεκλιμένη θέση στυλεού.

Αξιοσημείωτη είναι και η αναφορά στα σημεία 15 και 16 που ενώ ο συμβατικός δέκτης και ο δέκτης με IMU/MEMS είχαν μικρό σφάλμα μέτρησης, ο δέκτης βασισμένος στο μαγνητόμετρο, δεν μπόρεσε να αποτυπώσει σε καμία θέση στυλεού λόγω μαγνητικών παρεμβολών.

Διάγραμμα 49: Οριζοντιογραφική ακρίβεια όλων των δεκτών



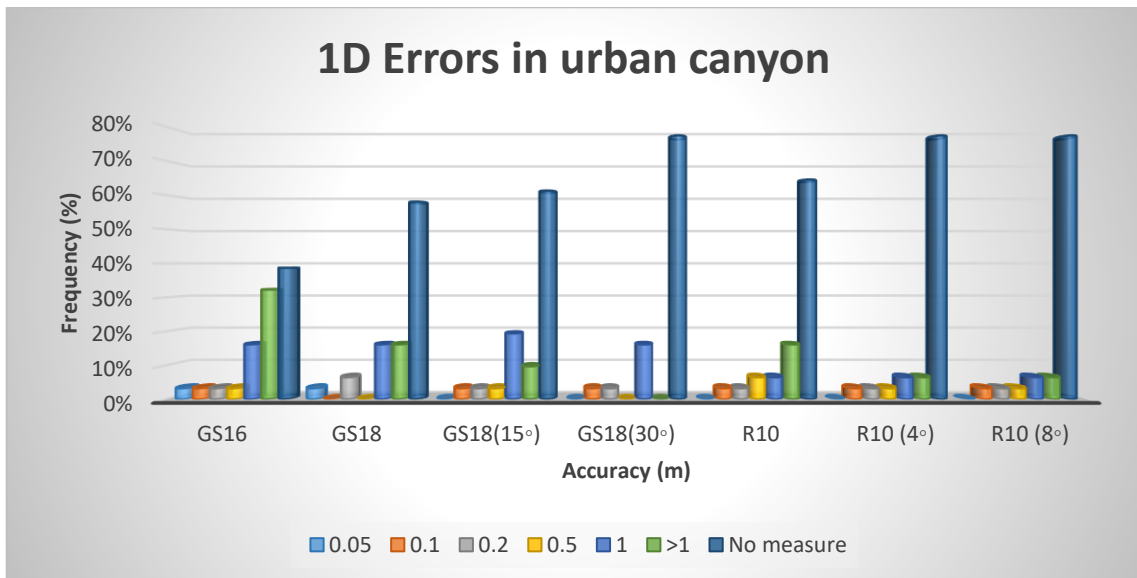
Συγκρίνοντας τις μετρήσεις των δεκτών μεταξύ τους παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η κλίση του στυλεού στο αστικό φαράγγι τόσο μεγαλώνουν οι αποκλίσεις από την αληθή τιμή και τόσο αυξάνεται η συχνότητα μη παρατηρούμενων σημείων.

6.2.2 Υψομετρικό σφάλμα

Τα υψομετρικά σφάλματα στις μετρήσεις των δεκτών έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με τα οριζοντιογραφικά, με τους δέκτες να αποτυπώνουν στις κατακόρυφες θέσεις με μεγαλύτερη ακρίβεια από ότι με κεκλιμένο στυλεό (βλ. διάγραμμα 50). Το μέγιστο

σφάλμα μέτρησης είναι 47 μέτρα (GS18 στις 15 μοίρες) ενώ το ελάχιστο σφάλμα είναι τα 5 εκατοστά (κατακόρυφος στυλεός GS18 και συμβατικός δέκτης)

Διάγραμμα 50: Υψομετρική ακρίβεια όλων των δεκτών



Διάγραμμα 51: Ο Trimble R10 στο αστικό φαράγγι (σημεία 23, 24 και 26)

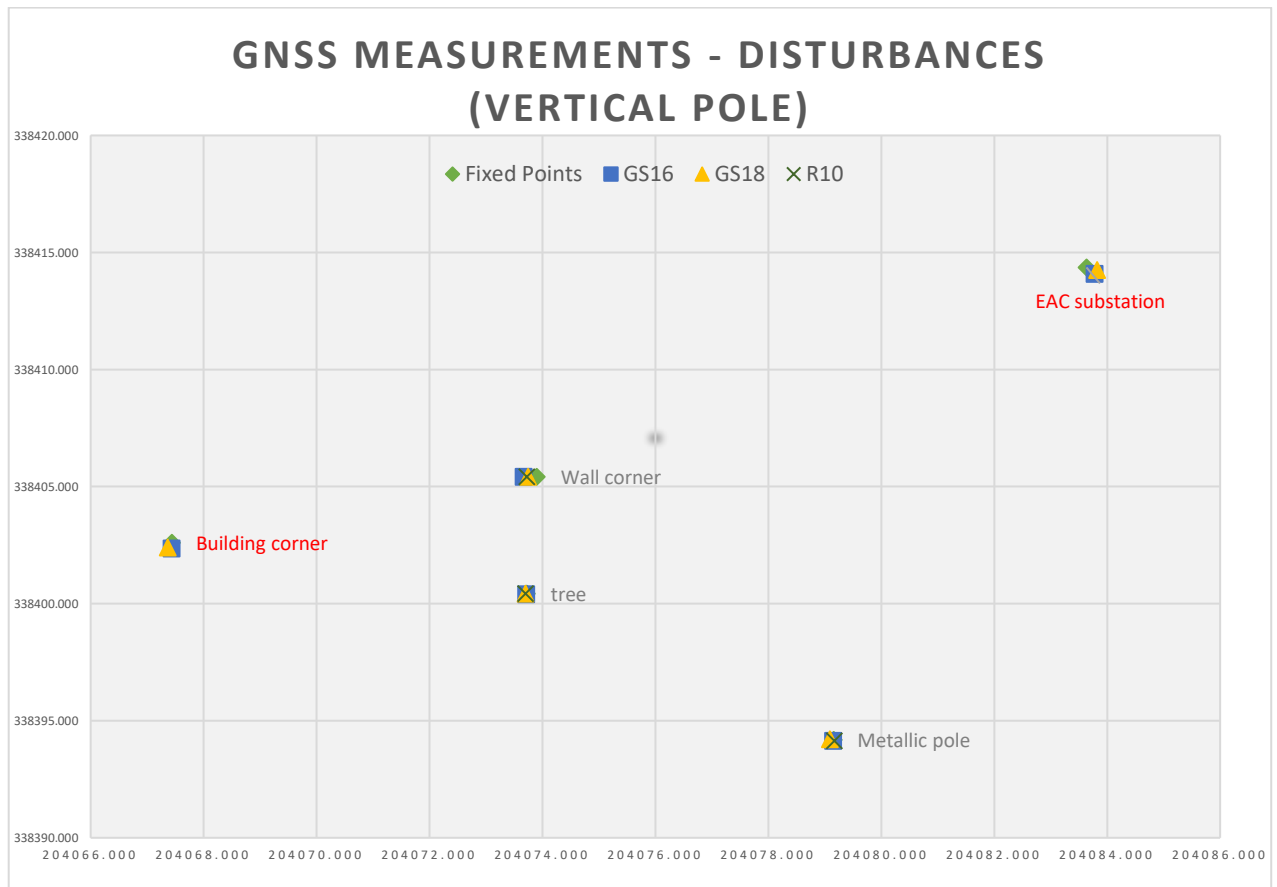


6.3 Μεμονωμένες αποτυπώσεις κοντά σε διάφορες παρεμβολές

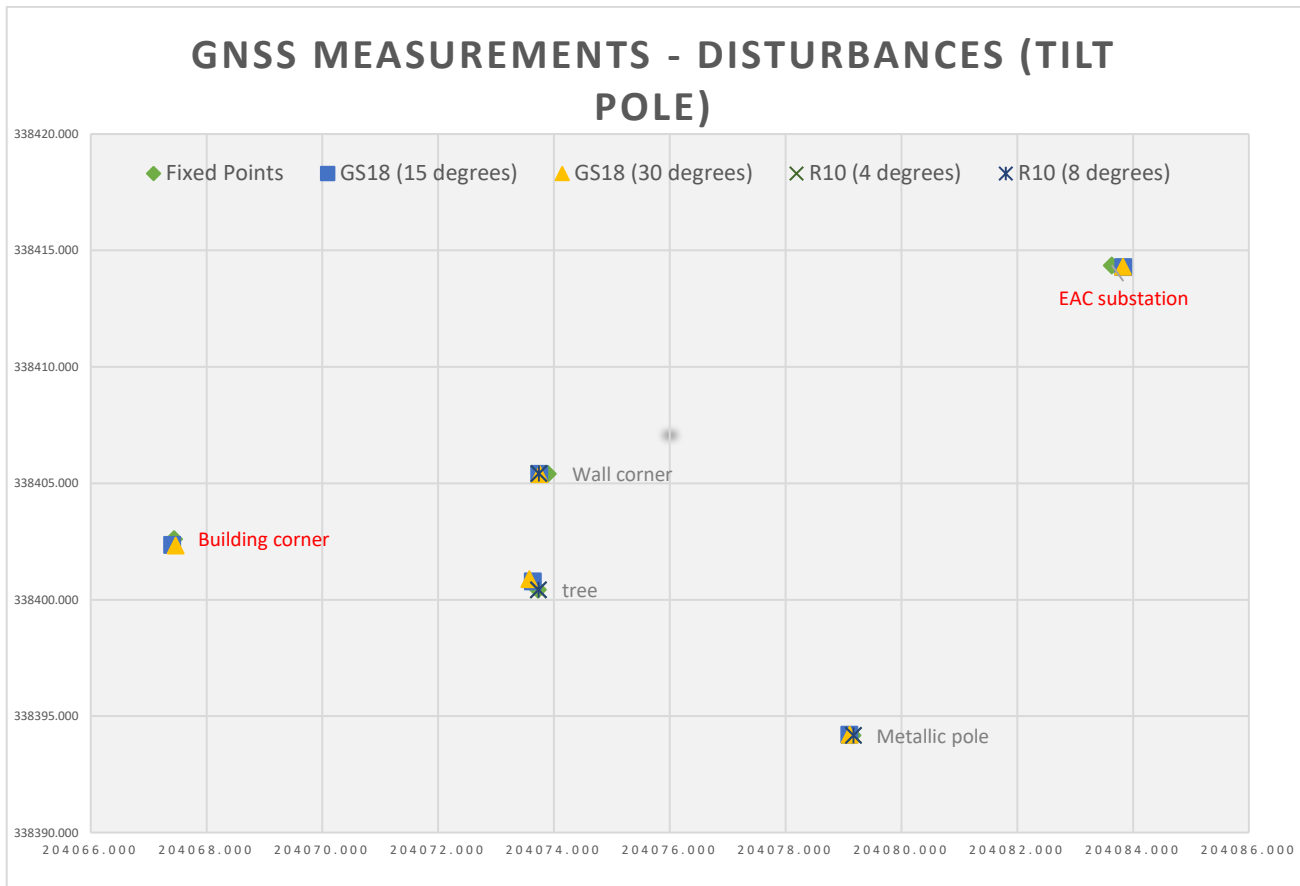
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι ο δέκτης με ενσωματωμένο αδρανειακό σύστημα βασισμένο στο μαγνητόμετρο είναι πολύ ευαίσθητος σε μαγνητικές παρεμβολές. Αυτό φάνηκε με τις διάφορες μετρήσεις που έγιναν σε ανοικτό πεδίο και επιβεβαιώθηκε με 2 επιπλέον μεμονωμένες μετρήσεις, μία σε γωνία κτηρίου όπου στεγάζεται υποσταθμός της Αρχής Ηλεκτρισμού Κύπρου και άλλη μια μέτρηση σε γωνία κτηρίου πάνω από το οποίο περνάνε ηλεκτρικά καλώδια. Σε όλες τις ανωτέρω περιπτώσεις ο R10 αδυνατούσε να αποτυπώσει το σημείο, με ένδειξη στο καταγραφικό «magnetic disturbances» (μαγνητικές παρεμβολές).

Στα διαγράμματα 52 και 53 φαίνονται οι θέσεις των σταθερών σημείων σε σχέση με τις μετρήσεις των δεκτών που έγιναν. Οι αριθμοί με κόκκινο χρώμα αντιπροσωπεύουν σημεία τα οποία δεν μετρήθηκαν από τον R10 λόγω μαγνητικών παρεμβολών.

Διάγραμμα 52: Μετρήσεις δεκτών σε κατακόρυφη θέση στυλεού



Διάγραμμα 53: Μετρήσεις δεκτών σε κεκλιμένη θέση στυλεού



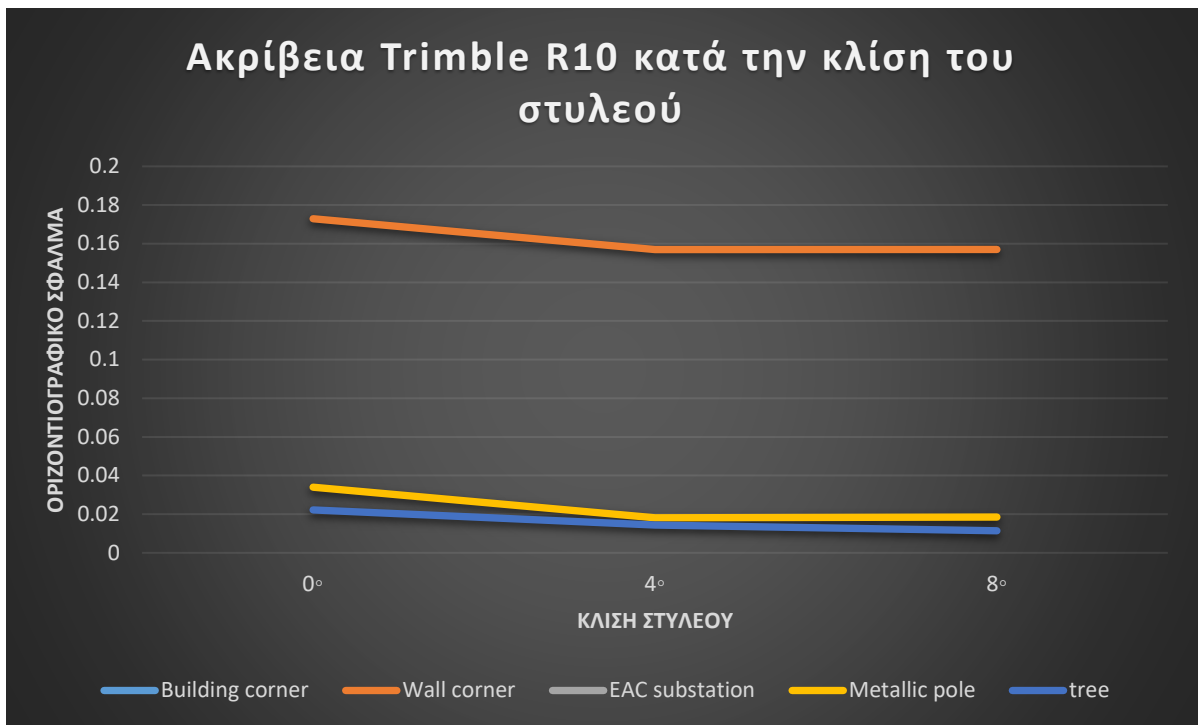
6.3.1 Οριζοντιογραφικό σφάλμα

Εξετάζοντας το οριζοντιογραφικό σφάλμα στους δέκτες με αντιστάθμιση κλίσης, διαπιστώθηκε πως με την κλίση του στυλεού στην σωστή κατεύθυνση, προς το μέρος δηλαδή που ο δέκτης απομακρύνεται από παρεμβολές και έχει ανοικτό πεδίο, το σφάλμα μέτρησης μειώνεται ελαφρά, δεν πάει όμως να υφίσταται. Στα διαγράμματα 54 και 55 φαίνεται η αυξομείωση του σφάλματος κατά τη διαδικασία κλίσης του στυλεού.

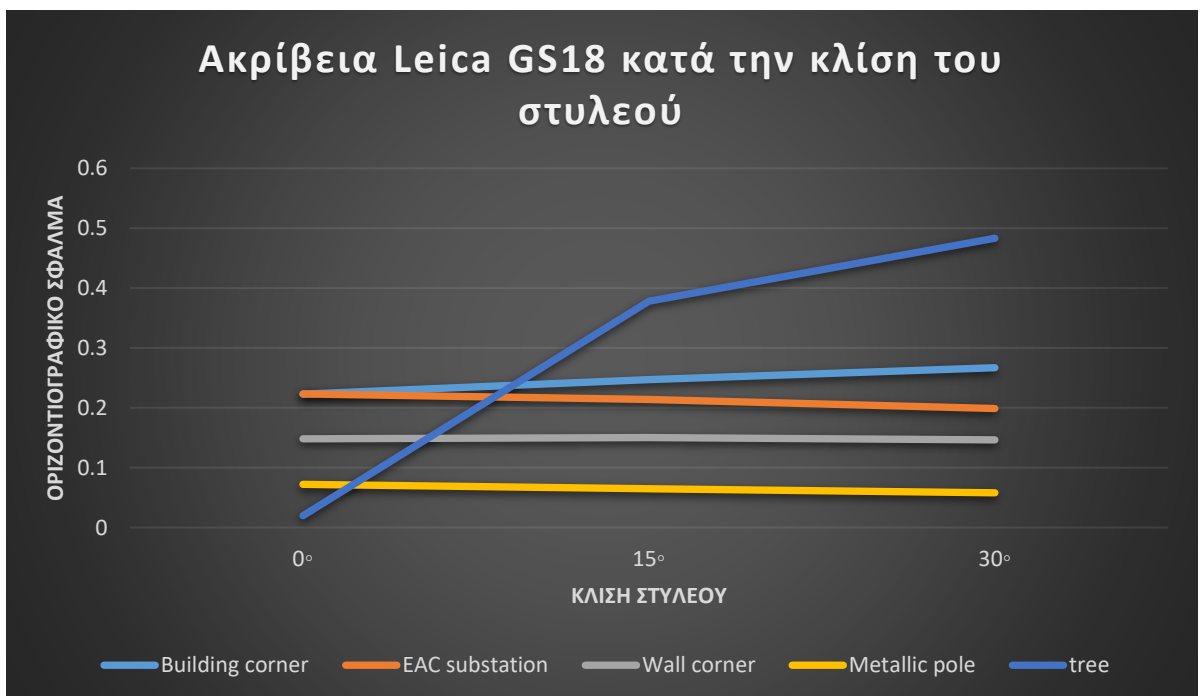
Πίνακας 16: Σφάλματα δεκτών κοντά σε διάφορες παρεμβολές

2D errors								
Number	Description	Κατακορυφος Στυλεός			Κεκλιμένος στυλεός			
		GS16	GS18	R10	GS18 (15°)	GS18 (30°)	R10 (4°)	R10 (8°)
		Residuals (m)			Residuals (m)			
1	Building corner	0.242256	0.222792	FAIL	0.2471671	0.2669307	FAIL	FAIL
2	Wall corner	0.229904	0.148039	0.1729	0.1502603	0.1463873	0.156944	0.15697
3	EAC substation	0.308134	0.223167	FAIL	0.2138336	0.1987977	FAIL	FAIL
5	Metallic pole	0.034357	0.072125	0.033965	0.0645555	0.0580022	0.018122	0.018559
11	tree	0.031048	0.01978	0.022204	0.3781699	0.4832255	0.014422	0.011402

Διάγραμμα 54: Ακρίβεια μετρήσεων του δέκτη R10 κατά την κλίση του στυλεού



Διάγραμμα 55: Ακρίβεια μετρήσεων του δέκτη GS18 κατά την κλίση του στυλεού



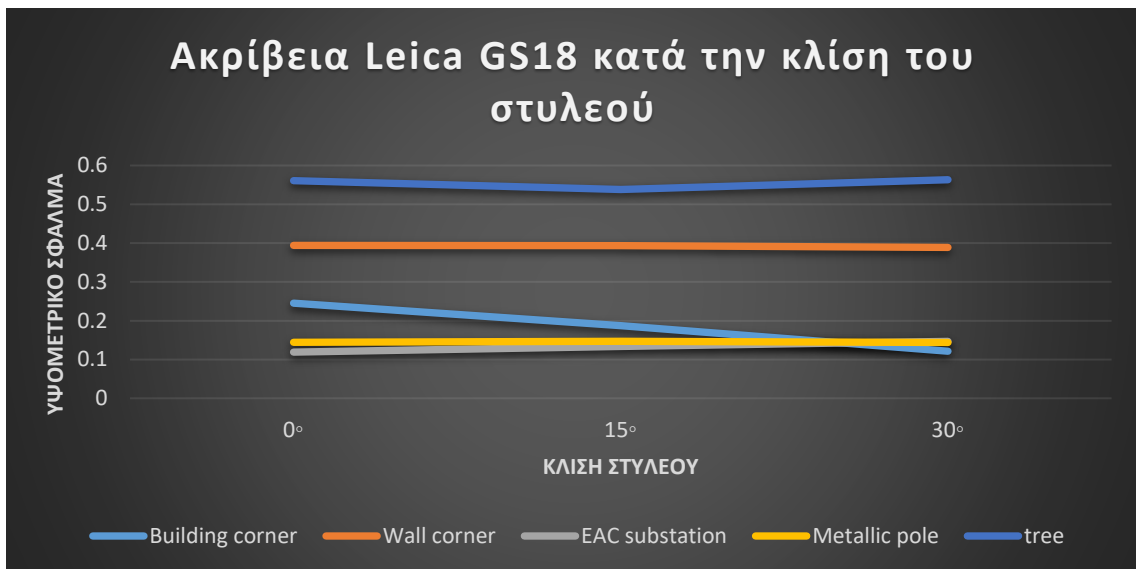
Στο διάγραμμα 54, φαίνεται η ελαφριά μείωση του σφάλματος κατά την κλίση του δέκτη R10, σε όλες τις περιπτώσεις πλην του σημείου στον υποσταθμό ΑΗΚ και της γωνιάς του κτηρίου τα οποία δεν μετρήθηκαν.

Στο διάγραμμα 55 φαίνεται η διακύμανση του σφάλματος κατά την κλίση του δέκτη GS18. Στην περίπτωση της γωνιάς του κτηρίου πάνω από το οποίο περνούν ηλεκτρικά καλώδια, το σφάλμα αυξάνεται γραμμικά κατά την κλίση. Στην περίπτωση της μέτρησης του σημείου κάτω από το δέντρο, η κλίση του στυλεού πραγματοποιήθηκε σε λάθος κατεύθυνση, με τον δέκτη να μπαίνει κάτω από πυκνό φύλλωμα. Έτσι η ακρίβεια του δέκτη μειώθηκε ραγδαία λόγω των σφαλμάτων που προκλήθηκαν από την παρεμπόδιση του δορυφορικού σήματος.

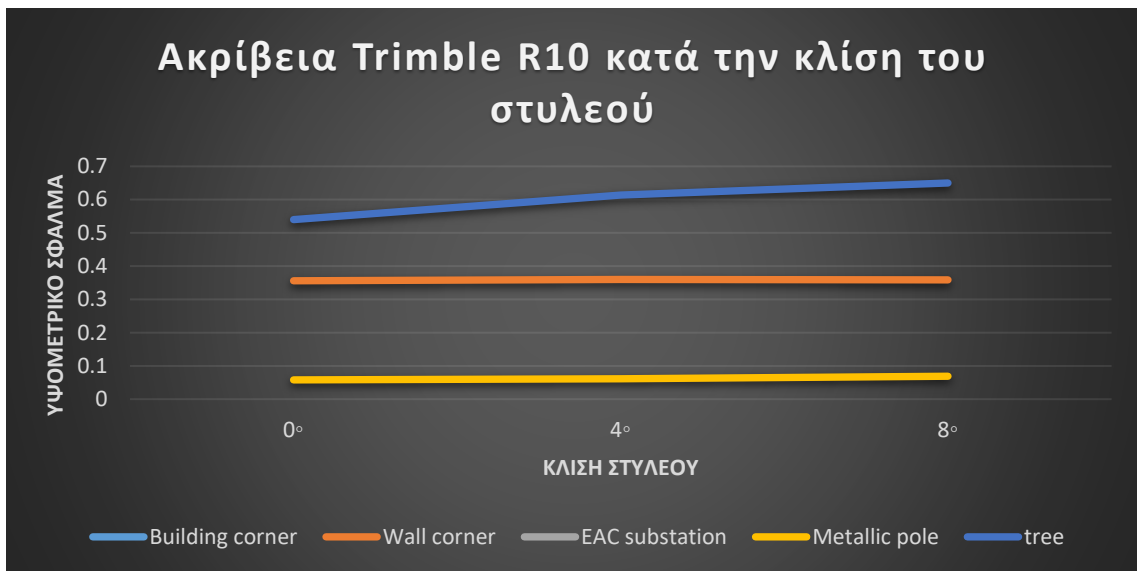
6.3.2 Υψομετρικό σφάλμα

Το υψομετρικό σφάλμα διατηρήθηκε σε υψηλά επίπεδα κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Σε γενικές γραμμές παρατηρείται σταθερότητα στο σφάλμα κατά την κλίση των δεκτών με αντιστάθμιση κλίσης (βλ. Διαγράμματα 56 και 57). Αξιοσημείωτο είναι η αύξηση της υψομετρικής ακρίβειας κατά την κλίση του δέκτη GS18 στην γωνιά του κτηρίου όταν την ίδια στιγμή η οριζοντιογραφική αυξάνεται. Επίσης κατά την ραγδαία αύξηση του οριζοντιογραφικού σφάλματος στο σημείο κάτω από το δέντρο, το υψομετρικό σφάλμα παραμένει σχεδόν στα ίδια επίπεδα.

Διάγραμμα 56: Υψομετρική ακρίβεια του δέκτη GS18 κατά την κλίση του στυλεού



Διάγραμμα 57: Υψομετρική ακρίβεια του δέκτη R10 κατά την κλίση του στυλεού



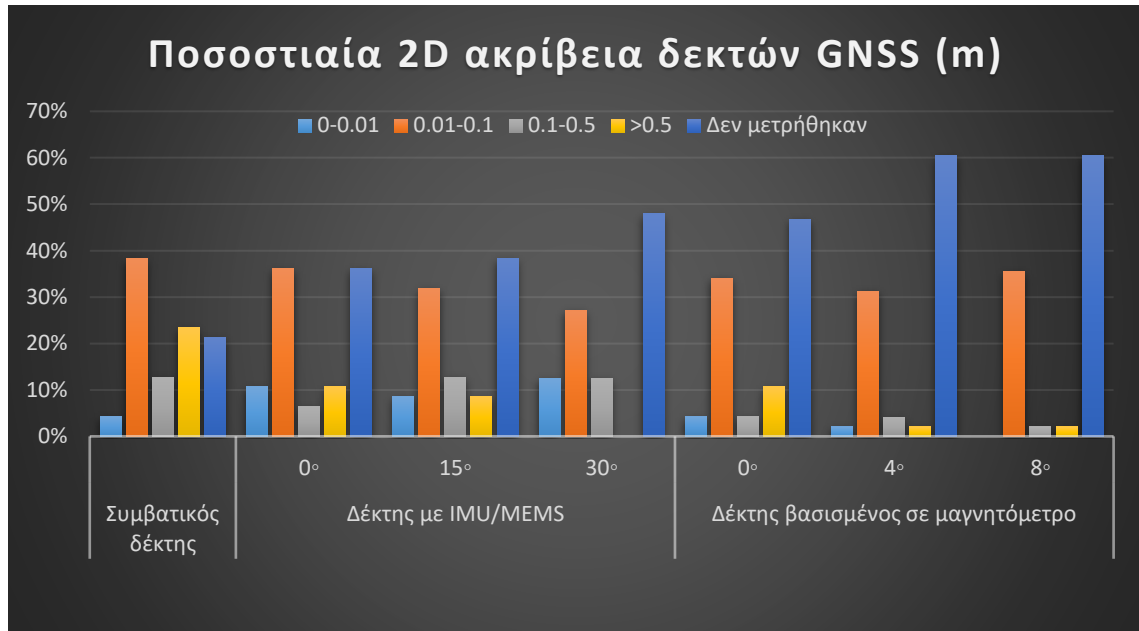
Διάγραμμα 58: Προσπάθεια αποτύπωσης σημείου στον υποσταθμό ΑΗΚ από R10



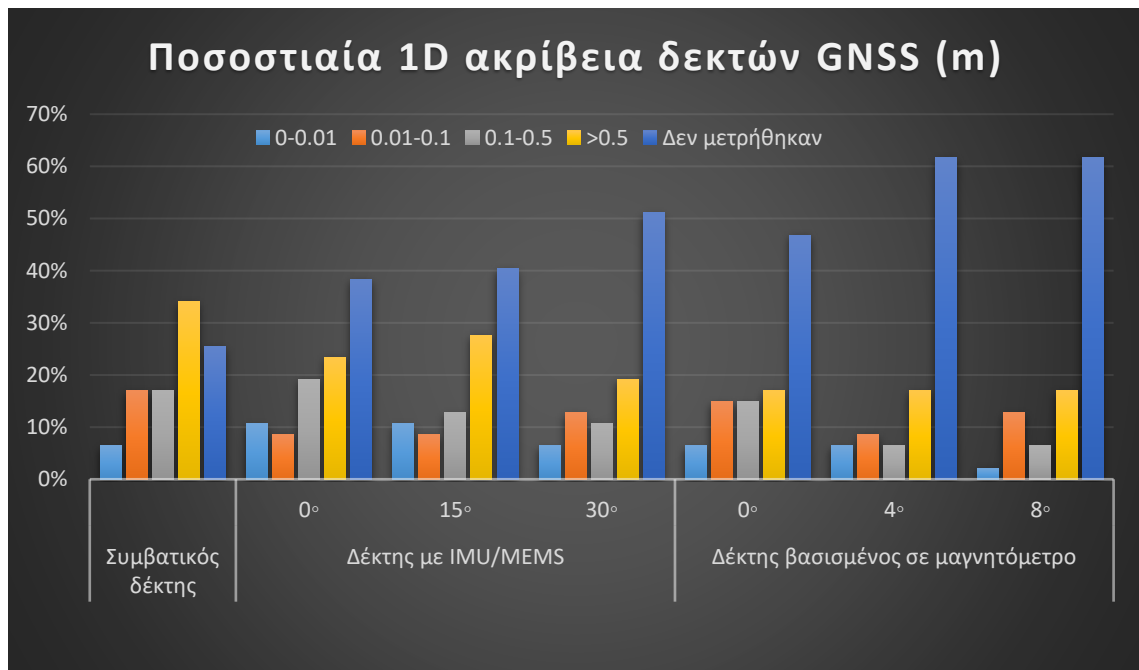
6.4 Συνολική σύγκριση σφαλμάτων

Στην ενότητα αυτή γίνεται προσπάθεια συνολικής σύγκρισης οριζοντιογραφικού και υψομετρικού σφάλματος μεταξύ των δεκτών. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στα διαγράμματα 59 και 60.

Διάγραμμα 59: Συνολική οριζοντιογραφική σύγκριση δεκτών GNSS



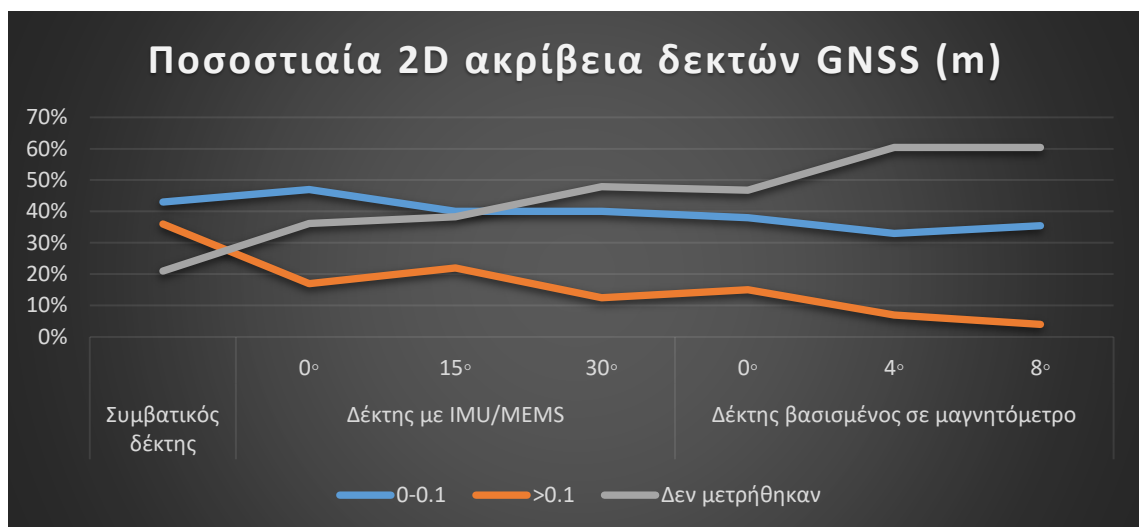
Διάγραμμα 60: Συνολική υψομετρική σύγκριση δεκτών GNSS



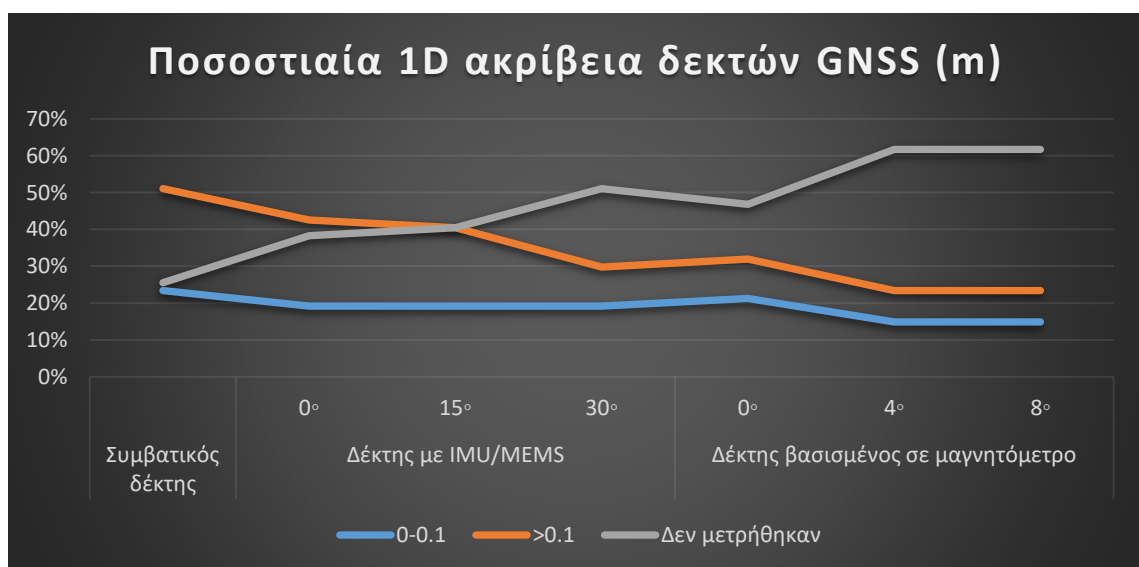
Από τα ανωτέρω διαγράμματα μπορεί να ειπωθεί εκ πρώτης όψεως πως όταν οι δέκτες βρίσκονται σε κατακόρυφη θέση στυλεού έχουν μικρότερα σφάλματα τα οποία αυξάνονται με την αύξηση της γωνίας κλίσης του στυλεού. Με τον ίδιο τρόπο αυξάνονται και τα μη παρατηρούμενα σημεία.

Ταξινομώντας τα σφάλματα σε 3 κατηγορίες, από 0-0.1m, >0.1m και μη παρατηρούμενα σημεία, δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα 61 και 62 τα οποία παραθέτουν μια πιο ξεκάθαρη εικόνα για τις διαφορές στην συχνότητα εμφάνισης των μετρήσεων. Οι εν λόγω κατηγορίες χωρίστηκαν έτσι λόγω του ότι τα σφάλματα μέχρι 10 εκατοστά είναι αποδεκτά σε μια συνήθους τοπογραφική εργασία (πχ οριοθέτηση, αποτύπωση οικοδομικού τετραγώνου κ.α).

Διάγραμμα 61: Συνολική διακύμανση 2D σφάλματος δεκτών GNSS



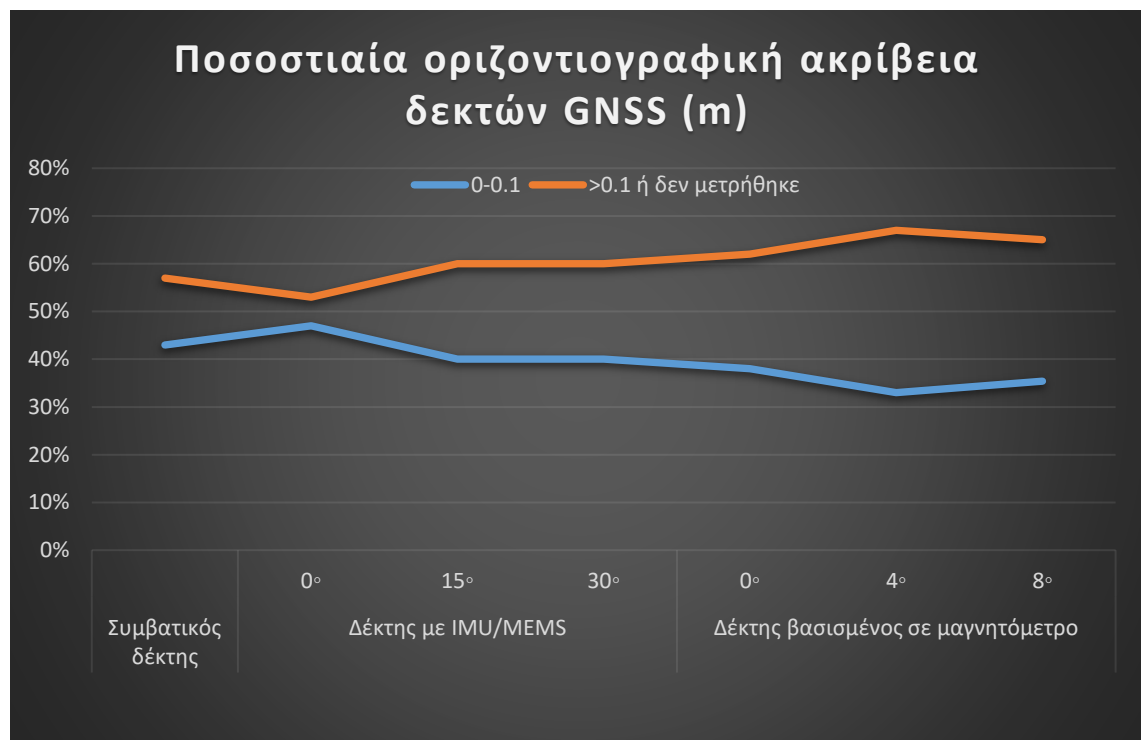
Διάγραμμα 62: Συνολική διακύμανση 1D σφάλματος δεκτών GNSS



Τα διαγράμματα 61 και 62 επιβεβαιώνουν την μεγαλύτερη ακρίβεια που υπάρχει στην κατακόρυφη θέση αποτύπωσης καθώς και την μεγαλύτερη πιθανότητα απώλειας σήματος κατά την κλίση του στυλεού είτε σε δύσκολα περιβάλλοντα είτε σε λάθος κατεύθυνση.

Αποκλείοντας όλες τις άλλες τιμές πλην των ακριβειών μέχρι 10 εκατοστά (βλ. διάγραμμα 63), φαίνεται ότι ο δέκτης βασισμένος στο IMU/MEMS σε κατακόρυφη θέση στυλεού δίνει τις ακριβέστερες μετρήσεις, μετά ακολουθεί ο συμβατικός δέκτης ενώ ο δέκτης με μαγνητόμετρο δίνει τα μεγαλύτερα σφάλματα. Συγκρίνοντας τις ακρίβειες των δύο δεκτών με αντιστάθμιση κλίσης, φαίνεται ξεκάθαρα η υπεροχή του GS18 έναντι του R10.

Διάγραμμα 63: Οριζοντιογραφική διακύμανση σφάλματος



7 Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής ήταν η μελέτη και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την ακρίβεια μετρήσεων των δεκτών GNSS με αντιστάθμιση κλίσης. Συγκρίθηκαν οι μετρήσεις ενός συμβατικού δέκτη, ενός δέκτη με αδρανειακό σύστημα βασισμένο στο μαγνητόμετρο και ενός δέκτη με αδρανειακό σύστημα IMU/MEMS.

Κατά την μελέτη χωρίστηκε η διαδικασία μετρήσεων σε διάφορα τμήματα με σκοπό την δοκιμασία των δεκτών σε διάφορα περιβάλλοντα. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως οι δέκτες με αντιστάθμιση κλίσης δεν παύουν να είναι δέκτες GNSS και να συμπεριφέρονται σαν αυτούς αφού σε δύσκολα περιβάλλοντα για έναν συμβατικό δέκτη είχαν την ίδια συμπεριφορά και όσο αυξάνόταν η κλίση του στυλεού στο αστικό φαράγγι τόσο οι αποκλίσεις από την αληθή τιμή μεγάλωναν και τόσο αυξάνόταν η συχνότητα μη παρατηρούμενων σημείων.

Σε ανοικτό πεδίο, χωρίς την ύπαρξη σημαντικών παρεμβολών, ο δέκτης με ενσωματωμένο IMU/MEMS είχε τα μικρότερα σφάλματα ιδιαίτερα με κλίση στυλεού στις 15°.

Συγκρίνοντας τις ακρίβειες των δύο δεκτών με αντιστάθμιση κλίσης, φαίνεται ξεκάθαρα η υπεροχή του δέκτη με ενσωματωμένο IMU/MEMS έναντι του δέκτη βασισμένου σε μαγνητόμετρο. Ο τελευταίος, είναι υπερβολικά ευαίσθητος στην παρουσία μαγνητικών παρεμβολών ενώ και η παρουσία άλλων δεκτών κοντά του τον εμπόδιζε στο να αποτυπώσει έχοντας ενεργοποιημένο το αδρανειακό σύστημα.

Επίσης, φάνηκε από τις μετρήσεις πως ο δέκτης βασισμένος σε μαγνητόμετρο έχει μέγιστη γωνιά κλίσης τις 8 μοίρες και όχι τις 15 όπως αναφέρεται στην βιβλιογραφία ενώ ο δέκτης με IMU/MEMS έχει πράγματι απεριόριστη κλίση όπως σωστά αναφέρεται σε άρθρο της Leica για το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε, δίνει όμως, όσο αυξάνεται η κλίση πέραν των 15°, υψηλότερα οριζοντιογραφικά και υψομετρικά σφάλματα.

Συμπερασματικά, ο δέκτης βασισμένος στο IMU/MEMS σε κατακόρυφη θέση στυλεού δίνει τις ακριβέστερες μετρήσεις, μετά ακολουθεί ο συμβατικός δέκτης ενώ ο δέκτης με μαγνητόμετρο δίνει τα μεγαλύτερα σφάλματα. *Η ορθή κλίση του στυλεού, προς το μέρος δηλαδή που ο δέκτης απομακρύνεται από παρεμβολές και έχει ανοικτό πεδίο, μειώνει ελαφρά το σφάλμα μέτρησης.*

Τα ανωτέρω συμπεράσματα ήταν αποτέλεσμα πειραματικών μετρήσεων σε στοχευμένα αστικά περιβάλλοντα δύσκολα για ένα δέκτη GNSS και στα οποία ο τοπογράφος μηχανικός έρχεται αντιμέτωπος. Απόρροια αυτών ήταν (ειδικότερα στο αστικό φάραγγι) πολλά σταθερά σημεία να μην αποτυπωθούν, παρά των προσπαθειών που έγιναν, λόγω αποκοπής δορυφορικού σήματος ενώ άλλα σημεία που αποτυπώθηκαν εμπεριείχαν μεγάλες αποκλείσεις λόγω των συστηματικών σφαλμάτων πολυανάκλασης και πολλαπλών διαδρομών του σήματος.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Στην πορεία εξέλιξης των συμβατικών δεκτών GNSS, η τεχνολογία ενσωμάτωσε σε αυτούς αδρανειακούς αισθητήρες βασισμένους στο μαγνητόμετρο, σε μια προσπάθεια διευκόλυνσης των χρηστών κατά την διαδικασία τοπογραφικών εργασιών. Στην συνέχεια, βλέποντας τους περιορισμούς και τις αδυναμίες των δεκτών, εισήγαγαν σε αυτούς την νανοτεχνολογία, αφαιρώντας έτσι από την εξίσωση τους περιορισμούς που είχε το μαγνητόμετρο.

Οι δέκτες GNSS με ενσωματωμένο αδρανειακό σύστημα βασισμένο στη νανοτεχνολογία (MEMS) δίνουν τη δυνατότητα στον χρήστη της αποτύπωσης και της χάραξης σημείων χωρίς την υποχρέωση κατακορύφωσης του στυλεού και χωρίς περιορισμό στην κλίση του.

Η παρούσα μελέτη παρουσίασε πως αυτό το απεριόριστο της κλίσεως του δέκτη, επιφέρει σφάλματα τα οποία πρέπει να προσεχθούν κατά τη διαδικασία των μετρήσεων γιατί παρά την σημαντική εξέλιξη των δεκτών με αντιστάθμιση κλίσης, οι τελευταίοι δεν παύουν να είναι δέκτες GNSS και να συμπεριφέρονται σαν αυτούς.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διακροτήματα με τη Χρήση Ηλεκτρονικού Υπολογιστή. (χ.χ.). Ανακτήθηκε 4 Φεβρουάριος 2019, από <http://users.sch.gr/razoulis/e-ergastirio/diakr-computer/diakr-computer.htm>

Καραδημητρίου Ε. Μιχάλης. (χ.χ.). Ανακτήθηκε από <https://perifysikhs.files.wordpress.com/2011/05/oscillations-part1.pdf>

Μερτίκας Π, Σ. (2006). *Τηλεπισκόπηση και ψηφιακή ανάλυση εικόνας*. Αθήνα: Ίων.

Ναυτικά ηλεκτρονικά όργανα.pdf. (χ.χ.). Ανακτήθηκε από http://www.eugenfound.edu.gr/appdata/documents/books_pdf/%CE%BD%CE%B1%CF%85%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%B1%20%CE%B7%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%BF%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CE%B1%20%CE%BF%CF%81%CE%B3%CE%B1%CE%BD%CE%B1.pdf

Φωτίου, Α., & Πικριδάς, Χ. (2006a). Δέκτες GPS. Στο *GPS και Γεωδαιτικές Εφαρμογές* (1η Έκδοση, σσ. 71–86). Θεσσαλονίκη: ΖΗΤΗ.

Φωτίου, Α., & Πικριδάς, Χ. (2006b). Εξισώσεις Παρατηρήσεων και Σφάλματα. Στο *GPS και Γεωδαιτικές Εφαρμογές* (1η Έκδοση, σσ. 105–136). Θεσσαλονίκη: ΖΗΤΗ.

Φωτίου, Α., & Πικριδάς, Χ. (2006c). Μαθηματικά μοντέλα προσδιορισμού θέσης με το GPS. Στο *GPS και Γεωδαιτικές Εφαρμογές* (1η Έκδοση, σσ. 137–163). Θεσσαλονίκη: ΖΗΤΗ.

- Φωτίου, Α., & Πικριδάς, Χ. (2006d). Το δορυφορικό σήμα. Στο *GPS και Γεωδαιτικές Εφαρμογές* (1η Έκδοση, σσ. 37–70). Θεσσαλονίκη: ΖΗΤΗ.
- Φωτίου, Α., & Πικριδάς, Χ. (2006ε). *GPS και Γεωδαιτικές εφαρμογές* (1η έκδοση). Θεσσαλονίκη: ΖΗΤΗ.
- Χρήστου Κ, Χ. (2006). *Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων υπεράνω επιπέδου εδάφους με απώλειες, για εφαρμογές στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες : ακριβής διατύπωση και επίλυση του προβλήματος στον φασματικό χώρο* (Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών). Ανακτήθηκε από <http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/9018/1/PD2016-0004.pdf>
- Antenna Phase Centre - Navipedia. (χ.χ.). Ανακτήθηκε 5 Μάρτιος 2019, από https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Antenna_Phase_Centre
- Chapter 4 - GNSS Error Sources. (χ.χ.). Ανακτήθηκε 10 Μάρτιος 2019, από NovAtel website: <https://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-4-gnss-error-sources/>
- Doppler Shift | GEOG 862: GPS and GNSS for Geospatial Professionals. (χ.χ.). Ανακτήθηκε 11 Φεβρουάριος 2019, από <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1786>
- Figure 1: An EM wave consists of 2 components: electric field and... (χ.χ.). Ανακτήθηκε 5 Φεβρουάριος 2019, από ResearchGate website:

https://www.researchgate.net/figure/An-EM-wave-consists-of-2-components-electric-field-and-magnetic-field-oscillating-in_fig8_280872394

GNSS+INS Systems. (χ.χ.). Ανακτήθηκε 10 Μάρτιος 2019, από NovAtel website:

<https://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-6-gnss-ins/gnss-ins-systems/>

How To Interface Gps Module Neo 6m With Arduino Hackster Io. (χ.χ.). Ανακτήθηκε 5

Μάρτιος 2019, από <https://www.mejorimagen.eu/how-to-interface-gps-module-neo-6m-with-arduino-hackster-io.html>

Luo, X., Schaufler, S., Carrera, M., & Celebi, I. (χ.χ.). *High-Precision RTK Positioning with Calibration-Free Tilt Compensation*. 17.

MEMS and nanotechnology exchange. (χ.χ.). Ανακτήθηκε 13 Μάρτιος 2019, από

<https://www.mems-exchange.org/MEMS/what-is.html>

(PDF) INS/GPS navigation system based on MEMS technologies. (χ.χ.).

<http://dx.doi.org/10.5545/sv-jme.2014.2372>

(PDF) Integration of INS, GPS, Magnetometer and Barometer for Improving Accuracy

Navigation of the Vehicle. (χ.χ.). <http://dx.doi.org/10.14429/dsj.63.4534>

Real-Time Kinematic (RTK). (χ.χ.). Ανακτήθηκε 10 Μάρτιος 2019, από NovAtel

website: <https://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-5-resolving-errors/real-time-kinematic-rtk/>

Receiver Antenna Phase Centre - Navipedia. (χ.χ.). Ανακτήθηκε 5 Μάρτιος 2019, από

https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Receiver_Antenna_Phase_Centre

Trimble GNSS Planning. (χ.χ.). Ανακτήθηκε 12 Απρίλιος 2019, από

<https://www.gnssplanning.com/#/settings>

UAV Navigation in depth: Magnetometers, why are they critical for UAV navigation? |

UAV Navigation. (χ.χ.). Ανακτήθηκε 13 Μάρτιος 2019, από

<https://www.uavnavigation.com/company/blog/uav-navigation-depth-magnetometers-why-are-they-critical-uav-navigation>