

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



## **Πτυχιακή εργασία**

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΩΝ  
ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΣΤΗΝ ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΟΧΗΜΑΤΩΝ  
ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ  
ΕΞΥΠΝΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ

Θεόδωρος Λαζάρου

Λεμεσός 2016



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

## **Πτυχιακή εργασία**

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΩΝ  
ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΣΤΗΝ ΠΛΟΗΓΗΣΗ  
ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ  
ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΕΞΥΠΝΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ

Θεόδωρος Λαζάρου

Σύμβουλος καθηγητής  
Δρ. Χριστόδουλος Δανέζης

Λεμεσός 2016

## **Πνευματικά δικαιώματα**

Copyright © Θεόδωρος Λαζάρου, 2016

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 τους γονείς μου, για την έμπρακτη στήριξη και βοήθεια τους όλα αυτά τα χρόνια, της διαπαιδαγώγησης και μόρφωσης μου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Δρ. Χριστόδουλο Δανέζη, ο οποίος με καθοδηγούσε και με συμβούλευε καθ' όλη την διάρκεια διεξαγωγής της πτυχιακής μου μελέτης.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε πρώτη φάση συγκρίθηκε ένας γεωδαιτικός δέκτης τεχνολογίας αιχμής (ProPak6), ο οποίος ειδικεύεται και στον κινηματικό εντοπισμό, μ' ένα ολοκληρωμένο σύστημα GPS/INS (SBG Ellipse-N) τύπου MEMS και διερευνήθηκε:

A) Η ακρίβεια του SBG Ellipse-N και του ProPak6

B) Η συνεισφορά της MAM, SBG Ellipse-N στα σημεία όπου δεν ήταν διαθέσιμη λύση GNSS

Σε δεύτερη φάση συγκρίνονται τα αδρανειακά συστήματα τεσσάρων έξυπνων συσκευών με αυτά του SBG και διερευνάτε η δυνατότητα τους να αναγνωρίζουν τη μεταβολή στη δυναμική του οχήματος (στάση, εκκίνηση και στροφές).

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	iv
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	v
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	viii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	x
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ .....	xi
ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ .....	xi
1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση .....	1
2 Αδρανειακοί Αισθητήρες.....	6
2.1 Επιταχυνσιόμετρα .....	8
2.1.1 Εκκρεμές Επιταχυνσιόμετρα .....	10
2.1.2 Επιταχυνσιόμετρο Ακτίνας-Δόνησης .....	12
2.2 Γυροσκόπια .....	13
2.2.1 Γυροσκόπιο Περιστρεφόμενης Μάζας .....	13
2.2.2 Οπτικά Γυροσκόπια .....	16
2.2.2.1 Γυροσκόπιο Ring Laser .....	17
2.2.2.2 Interferometric Fiber-Optic Gyro .....	18
2.2.3 Γυροσκόπια Vibratory .....	18
2.3 Μονάδες Αδρανειακών Μετρήσεων .....	19
2.4 Χαρακτηριστικά Σφαλμάτων .....	22
2.4.1 Biases .....	23
2.4.2 Σφάλματα συντελεστή κλίμακας και εγκάρσιας σύζευξης.....	24
2.4.3 Τυχαίος Θόρυβος .....	26
2.4.4 Περαιτέρω πηγές σφαλμάτων .....	28
2.4.5 Μοντέλα Σφαλμάτων .....	29

3	Μαγνητόμετρα .....	30
3.1	Υπολογισμός Προσανατολισμού .....	30
3.1.1	Επιπεδοποίηση .....	30
3.1.2	Μαγνητικός Προσανατολισμός .....	30
3.1.3	Ολοκληρωμένος Υπολογισμός του Προσανατολισμού.....	32
3.2	Κατηγορίες Μαγνητόμετρων .....	32
3.2.1	Μαγνητόμετρο Πηνίου .....	34
4	Δέκτες και συστήματα GNSS .....	35
4.1	Υφιστάμενα και Αναπτυσσόμενα συστήματα GNSS .....	35
4.1.1	Σύστημα GPS.....	35
4.1.2	Σύστημα GLONASS.....	36
4.1.3	Σύστημα BeiDou ή COMPASS.....	36
4.1.4	Σύστημα GALILEO.....	37
4.2	Δέκτες GNSS .....	37
4.2.1	Η κεραία του δέκτη.....	38
4.2.2	Ο κυρίως δέκτης .....	38
4.2.3	Κατηγορίες δεκτών .....	39
4.3	Κατηγορίες Εντοπισμού.....	40
4.3.1	Στατικός Εντοπισμός .....	40
4.3.2	Κινηματικός Εντοπισμός .....	40
4.4	Μετρήσεις GNSS .....	41
4.4.1	Μέτρηση ψευδοαποστάσεων .....	42
4.4.2	Αποστάσεις μέσω φάσεων.....	44
4.4.3	Γενικές πηγές Σφαλμάτων στις παρατηρήσεις GNSS .....	45
5	Εξοπλισμός .....	47
5.1	Πλατφόρμα.....	47



5.2	SBG Ellipse-N.....	47
5.3	Ρομποτικός Γεωδαιτικός Σταθμός MS05AXII/MS1AXII.....	50
5.4	Κινητά τηλέφωνα.....	50
5.5	Γεωδαιτικός Δέκτης GNSS.....	51
6	Διεξαγωγή μετρήσεων.....	53
6.1	Προγραμματισμός Δρομολογίου.....	53
6.2	Εκτέλεση Πειράματος.....	54
6.2.1	Εκτέλεση Δρομολογίου και καταγραφή μετρήσεων.....	55
7	Προεπεξεργασία δεδομένων.....	56
7.1	Μετατροπή χρόνων.....	56
7.2	Καθαρισμός Δεδομένων.....	56
7.3	Επαναδειγματοληψία μέσω γραμμικής παρεμβολής.....	57
7.4	Μετασχηματισμός Θέσεων.....	58
7.5	Συμπλήρωση Χρονικών Αλμάτων.....	58
7.6	Συγχρονισμός Μετρήσεων.....	59
8	Ανάλυση.....	60
8.1	Σύγκριση Θέσεων.....	60
8.1.1	Στατιστικά στοιχεία.....	61
8.2	Σύγκριση Αδρανειακών αισθητήρων.....	63
8.2.1	Στατιστικά στοιχεία.....	65
9	Συμπεράσματα.....	67
10	Βιβλιογραφία.....	68

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Καταγραφή θέσης και εικόνας σε Video.....	3
Εικόνα 2: 3D απεικόνιση οδοστρώματος.....	3
Εικόνα 3: Στατικές μετρήσεις αδρανειακών αισθητήρων .....	4
Εικόνα 4: Καταγεγραμμένες τροχιές από κάθε αισθητήρα .....	5
Εικόνα 5: Απλό Επιταχυνσιόμετρο.....	8
Εικόνα 6: Εκκρεμές Επιταχυνσιόμετρο Ανοιχτού-Βρόγχου .....	11
Εικόνα 7: Εκκρεμές Μηχανικό Επιταχυνσιόμετρο με δυναμική ανατροφοδότηση ....	11
Εικόνα 8: Επιταχυνσιόμετρο Ακτίνας-Δόνησης.....	12
Εικόνα 9: Φαινόμενο ορθογώνιας ροπής σε ένα περιστρεφόμενο δίσκο .....	14
Εικόνα 10: Γυροσκόπιο ανοιχτού βρόχου με πρώτο βαθμό ελευθερίας .....	15
Εικόνα 11: Αποτέλεσμα περιστροφής κυματοδηγού κλειστού-βρόγχου .....	16
Εικόνα 12: Τυπικό γυροσκόπιο ring laser .....	17
Εικόνα 13: Interferometric Fiber-Optic Gyro.....	18
Εικόνα 14: Άξονες Γυροσκοπίου Δόνησης .....	19
Εικόνα 15: Vibration modes of ring, cylinder, and hemispherical vibratory gyros.....	19
Εικόνα 16: Διαμόρφωση μίας Μονάδας Αδρανειακών Μετρήσεων.....	20
Εικόνα 17: Τοποθέτηση επιταχυνσιομέτρων σε σχέση με το σημείο αναφοράς της MAM.....	21
Εικόνα 18: Σφάλμα Συντελεστή Κλίμακας .....	25
Εικόνα 19: Σφάλμα εγκάρσιας σύζευξης.....	25
Εικόνα 20: Γεωμαγνητικό πεδίο της Γης.....	31
Εικόνα 21: Ροή σε κλειστό πηνίο .....	34
Εικόνα 22: Υπολογισμός θέσης μέσω συστημάτων GNSS.....	37
Εικόνα 23: Ταύτιση Εισερχόμενου Σήματος.....	42

Εικόνα 24: Βασική αρχιτεκτονική βρόγχου PLL .....	42
Εικόνα 25: Μέτρηση Φάσης.....	44
Εικόνα 26: Ιονοσφαιρική επίδραση στο σήμα GPS .....	45
Εικόνα 27: Επίδραση πολυανάκλασης στο σήμα GPS.....	46
Εικόνα 28: Κάτοψη πλατφόρμας .....	47
Εικόνα 29: Τελική όψη πλατφόρμας .....	47
Εικόνα 30: Αισθητήρες SBG Ellipse .....	48
Εικόνα 31: Ακρίβεια οριζόντιας θέσης συνάρτηση του χρόνου.....	49
Εικόνα 32: Ακρίβεια προσανατολισμού θέσης συνάρτηση του χρόνου .....	49
Εικόνα 33: Ακρίβεια ταχύτητας θέσης συνάρτηση του χρόνου .....	49
Εικόνα 34: Ρομποτικός Γεωδαιτικός Σταθμός.....	50
Εικόνα 35: Κεραία GNSS .....	51
Εικόνα 36: Κυρίως Δέκτης GNSS .....	51
Εικόνα 37: Δείκτης Ποιότητας με χρωματική ένδειξη .....	52
Εικόνα 38: Σχεδιασμός Διαδρομής στο Google Maps .....	53
Εικόνα 39 : Προετοιμασία Πλατφόρμας .....	54
Εικόνα 40: Τοποθέτηση εξοπλισμού στην οροφή του I.X. ....	54
Εικόνα 41: Ρομποτικός ολοκληρωμένος γεωδαιτικός σταθμός.....	54
Εικόνα 42: Κυρίως δέκτης GNSS.....	55
Εικόνα 43: Καταγραφή μετρήσεων σε H/Y.....	55
Εικόνα 44: Βιντεογράφιση με ταυτόχρονη εξασφάλιση χρόνου και θέσης .....	55
Εικόνα 45: Ενοποιημένες χρονικές στιγμές.....	56
Εικόνα 46: Χρονικές εγγραφές σε διανυσματική μορφή.....	56
Εικόνα 47: Κάλυψη κενών κατά την αύξηση της συχνότητας .....	57
Εικόνα 48: Μετασχηματισμός συντεταγμένων .....	58
Εικόνα 49: Συναρτήσεις Εντοπισμού και διόρθωσης Χρονικών Αλμάτων .....	59

Εικόνα 50: Πίνακας Συμπληρωμένης χρονο-σειράς .....	59
Εικόνα 51: Συνάρτηση Σύγκρισης των υπολογισμένων Θέσεων .....	61
Εικόνα 52: Διάγραμμα Ορατότητας .....	62
Εικόνα 53: Εντοπισμός Στάσης με την χρήση αδρανειακών αισθητήρων .....	64
Εικόνα 54: Εντοπισμός Στροφών με τη χρήση Αδρανειακών αισθητήρων .....	64

## **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ**

Πίνακας 1: Ακρίβεια μετρήσεων συναρτήσεως του χρόνου .....	2
Πίνακας 2: Bias αδρανειακών αισθητήρων αναλόγως της τάξης.....	24
Πίνακας 3: Ακρίβειες Δεκτών ανά κατηγορία.....	39
Πίνακας 4: Ακρίβειες Εντοπισμού ανά κατηγορία.....	41
Πίνακας 5: Παραδείγματα επηρεασμού ψευδοαπόστασης με μικρό-αλλαγές στον χρόνο.....	43
Πίνακας 6: Διάφορες πηγές σφαλμάτων.....	43
Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά Αδρανειακών Αισθητήρων SBG.....	48
Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά Ενσωματωμένου GNSS.....	48
Πίνακας 9: Μηχανικά Χαρακτηριστικά.....	48
Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά κινητών τηλεφώνων έρευνας.....	50
Πίνακας 11: Συχνότητες και Συστήματα GNSS .....	51
Πίνακας 12: Δείκτες Ποιότητας - Novatel Inertial Explorer .....	52
Πίνακας 13: Χρονικοί Περίοδοι Δεκτών GNSS χωρίς Λύση.....	61
Πίνακας 14: Στατιστικά Στοιχεία Διαφορών κατά Easting και Northing.....	62
Πίνακας 15: Στατιστικά Στοιχεία Γυροσκοπίων.....	65
Πίνακας 16: Στατιστικά Στοιχεία Επιταχυνσιομέτρων.....	66

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

1. IMU ή MAM: Μονάδες Αδρανειακών Μετρήσεων
2. AHRS (Attitude and Heading Reference System)
3. PDR (Pedestrian Dead Reckoning= the dead reckoning position solution is the sum of a series of relative position measurements)
4. MOEMS: Micro-optical-electro-mechanical systems
5. MEMS: Micro-electro-mechanical systems
6. INS: Inertial Navigation System
7. PSD: Power Spectral Density
8. RLG: Ring Laser Gyro
9. ZUPT: Zero Velocity Updates

## ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ

1. Dead reckoning: επίλυση θέσης η οποία αποτελεί άθροισμα μιας σειράς από σχετικές μετρήσεις
2. Pickoff : είδος μεταβλητής αντίστασης της οποίας το μέγεθος αλλάζει κατά την κίνηση των αισθητήρων
3. Coriolis Acceleration
4. Biases: κάθε είδος σφάλματος το οποίο δεν περιγράφεται από τη στατιστική που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τα τυχαία σφάλματα
5. Pitch and roll: κινήσεις ενός αντικειμένου οι οποίες μετρούνται ως γωνίες. Το pitch είναι το πάνω κάτω σαν το καπάκι ενός κουτιού και το roll είναι η περιστροφή
6. Torquer: ρουλεμάν

# 1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Για την ορθή εκπόνηση της εν λόγω έρευνας θεωρήθηκε αναγκαίο η έρευνα και αναζήτηση όμοιων ερευνών, για να υπάρξει μια πιο γενική και καλή εκμάθηση των μεθοδολογιών που ακολουθούνται.

## 1.1 The Promise of MEMS Sensors to the Mapping and Navigation Communities

Σε μια παρουσίαση του, ο El-Sheimy αναφέρει πώς δύο παράμετροι παραμένουν οι ίδιοι εδώ και μια χιλιετία. Οι παράμετροι αυτοί είναι το Dead Reckoning (DR) και το Position Fixing. Το DR ορίζεται από τον ίδιο ως ο υπολογισμός μιας θέσης έχοντας ως γνώση την προηγούμενη θέση, τη μέτρηση της διεύθυνσης της κίνησης και της απόστασης που διανύθηκε (π.χ. INS). Επίσης το Position Fixing ορίζεται από τον ίδιο ως ο υπολογισμός μιας θέσης με μετρήσεις από γνωστά σημεία αναφοράς (π.χ. GPS).

Ακολούθως δίνει τις παρατηρήσεις του σχετικά με τα προβλήματα των υφιστάμενων τεχνολογιών πλοήγησης. Μερικά από αυτά είναι, πως το σήμα GNSS δεν είναι πάντα διαθέσιμο και έχει χαμηλή ακρίβεια λόγω πολυανάκλασης. Τα wireless χρειάζονται μια ακριβή υποδομή και δίνουν χαμηλή ακρίβεια. Στο τέλος αναφέρει και τα συστήματα INS τα οποία είναι πολύ ακριβά, με τα χαμηλού κόστους να είναι ανακριβή.

Βλέποντας όλα αυτά τα προβλήματα ο El-Sheimy αποφάσισε να χρησιμοποιήσει στα πειράματα του κινητά τηλέφωνα τα οποία έχουν ένα ανεκτό κόστος και περιέχουν μέσα τους όλους τους αναγκαίους αισθητήρες. Όπως GPS, βαρόμετρα, γυροσκόπια, Wi-Fi, μαγνητόμετρα και επιταχυνσιόμετρα.

Έτσι διεξήγαγε πολλά πειράματα με διάφορα τηλέφωνα με την ίδια όμως τακτική. Αρχίζει να πλοηγείται σε εξωτερικούς χώρους και ακολούθως περνούσε μέσα σε κτήρια όπου δεν υπήρχε σήμα GPS ή Wi-Fi.

**Πίνακας 1: Ακρίβεια μετρήσεων συναρτήσει του χρόνου**

No	Device	Total travel distance (m)	Indoor Time (min)	Maximum Error	Error of distance travelled
1	Galaxy S III	500	5	6-7	1.5%
2	Galaxy Nexus	450	9	6	1.5%

Επίσης σε άλλα πειράματα του τοποθέτησε πάνω σε κατάλληλα εξοπλισμένο Van με Navigation-grade INS, Dual-frequency GPS και κινητά τηλέφωνα. Με αποτέλεσμα να καταλήξει στο ακόλουθο συμπέρασμα «*With the technology push and the market pull, MEMS inertial systems is going to reach the performance of the high-end Tactical Grade IMU Soon*». (El-Sheimy, 2014)

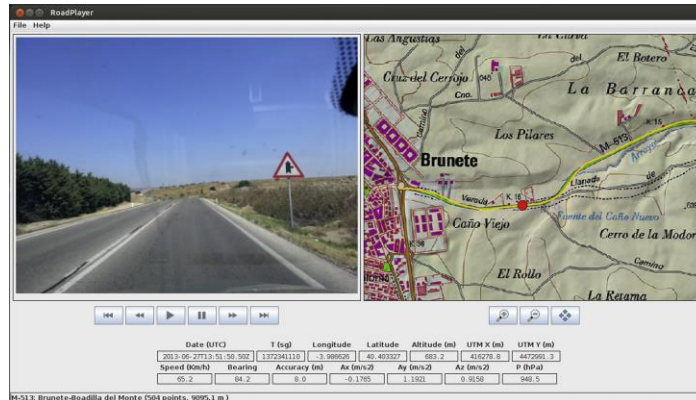
## 1.2 Transportation Research Part C

Οι Higuera και Castro αρχίζουν την αναφορά τους λέγοντας πως για να δημιουργήσεις ένα αποτελεσματικό οδικό δίκτυο για μία περιοχή πρέπει να γνωρίζεις τα αποθέματα του ήδη υπάρχοντος οδικού δικτύου, με όλα του τα χαρακτηριστικά και την κατάσταση του (συντήρηση).

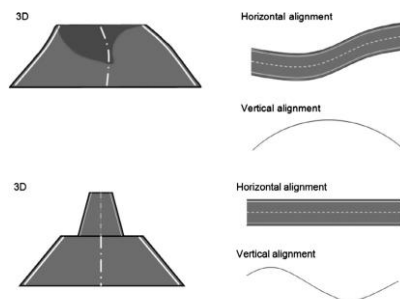
Για το λόγο αυτό χρειαζόταν να γίνει μια μαζική 3D αποτύπωση και καταγραφή του οδικού δικτύου. Αυτό αποφασίστηκε να γίνει με τη χρήση ενός κινητού τηλεφώνου τοποθετημένο στο καθρεφτάκι ενός αυτοκίνητου.

Με τον τρόπο αυτό το τηλέφωνο μπορούσε να βιντεογραφεί την κατάσταση του δρόμου και ταυτόχρονα να καταγράφει τη διαδρομή του οχήματος, με τη χρήση αδρανειακών αισθητήρων.

Στη συνέχεια μπόρεσαν με τη χρήση ενός ειδικού λογισμικού (Road Player) να βλέπουν την πορεία του οχήματος πάνω σ' ένα χάρτη και το πως έμοιαζε ο δρόμος στο κάθε σημείο (Εικόνα 1). Έτσι έχοντας στη διάθεση τους όλη αυτή την πληροφορία μπόρεσαν να δημιουργήσουν ένα τρισδιάστατο μοντέλο, με πληροφορία για την κατάσταση του οδικού δικτύου (Εικόνα 2). (Higuera and Castro, 2013)



**Εικόνα 1: Καταγραφή θέσης και εικόνας σε Video**



**Εικόνα 2: 3D απεικόνιση οδοστρώματος**

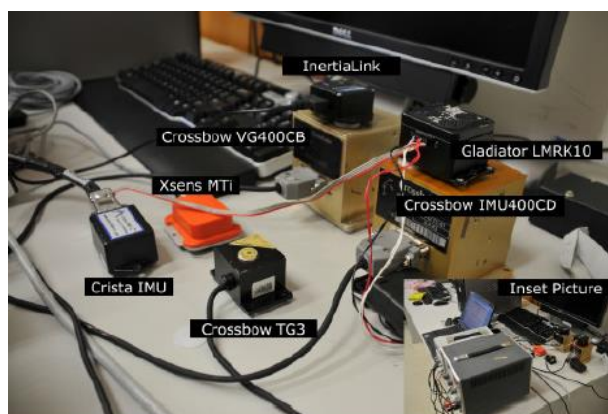
Έτσι με το πέρας της έρευνας τους, κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η προτεινόμενη μέθοδος ήταν χαμηλού κόστους και πολύ αποτελεσματική. Θα είναι ιδιαίτερα βοηθητική σε περιπτώσεις όπου χρειάζεται ταχεία απόκριση ή όταν οι συνθήκες του δρόμου αλλάζουν δυναμικά. Τέτοιες περιπτώσεις είναι οι ανθρωπιστικές επιχειρήσεις μετά από καταστροφές.

### 1.3 Evaluating the performance of mems based inertial navigation sensors for land mobile applications

Στην έρευνα τους είχαν ως σκοπό τη σύγκριση εναλλακτικών μεθόδων εντοπισμού θέσης, με χαμηλό κόστος.

Έτσι άρχισαν να δοκιμάζουν MEMS-based INS σε στατικές μετρήσεις (Εικόνα 3) διάρκειας δώδεκα ωρών. Με τον τρόπο αυτό μπόρεσαν να εντοπίσουν τα συστηματικά τους σφάλματα και τον τυχαίο θόρυβο. Τυχαίος θόρυβος μπορεί να προκληθεί από ηλεκτρικό θόρυβο, μηχανικές αστάθειες και δονήσεις όπως αυτές σε ένα εκκρεμές επιταχυνσιόμετρο ή γυροσκόπιο περιστρεφόμενης μάζας.





Εικόνα 3: Στατικές μετρήσεις αδρανειακών αισθητήρων

Ακολούθως πέρασαν στη δημιουργία μιας πλατφόρμας όπου τοποθέτησαν ένα GPS και τους αδρανειακούς αισθητήρες. Η πρώτη μέτρηση του GPS χρησιμοποιείτο ως reference point και έτσι συνέχιζαν να πλοηγούνται με συνδυασμένες μετρήσεις GPS/INS.

Στη συνέχεια προχώρησαν με τη δημιουργία διαγραμμάτων σφάλματος ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των δορυφόρων σε 2D αλλά και 3D πλοήγηση. Με αυτόν τον τρόπο παρατήρησαν πως οι τεχνολογίες χαμηλού κόστους MEMS είναι πολύ υποσχόμενες και μπορούν να δώσουν καλά αποτελέσματα. Καθώς στις περιπτώσεις χαμηλής διαθεσιμότητας από δορυφόρους, σε σύγκριση με περιπτώσεις υψηλής διαθεσιμότητας τα αποτελέσματα, δεν διέφεραν και πολύ. (Allison et al., 2011)

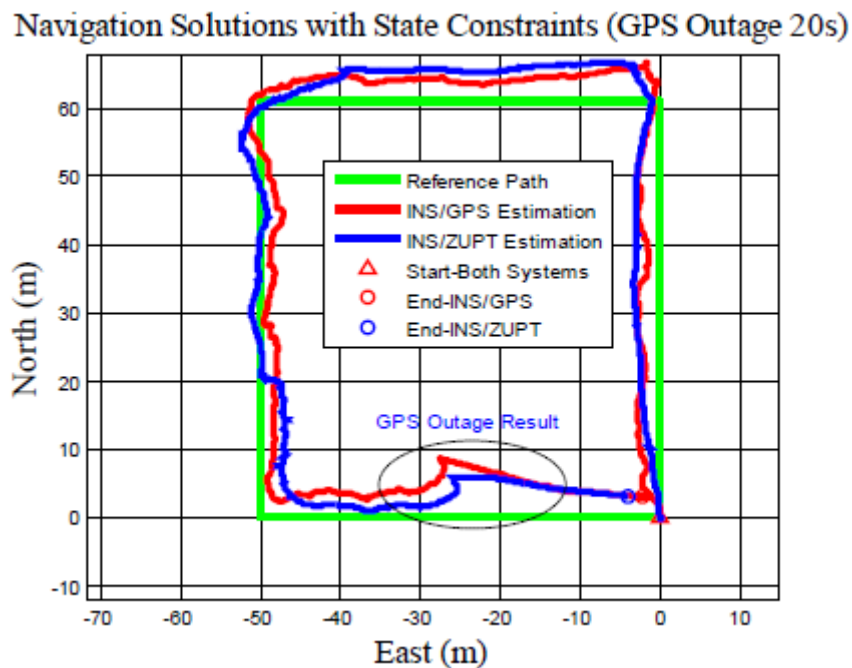
#### **1.4 A State Constraint Kalman Filter for Pedestrian Navigation with Low Cost MEMS Inertial Sensors**

Στο συγκεκριμένο άρθρο έγινε χρήση μιας άλλης μεθόδου από τον El-Sheimy και Haiyu η οποία ονομάζεται ZUPT. Το ακρωνύμιο ZUPT σημαίνει Zero Velocity Updates και έχει να κάνει με το μηδενισμό της ταχύτητας, όταν ο χρήστης πραγματοποιεί στάσεις προκειμένου να μην ξεφεύγουν τα σφάλματα των αδρανειακών αισθητήρων.

Έτσι έχοντας υπόψη αυτή την τεχνική αποφάσισαν να τοποθετήσουν ένα INS στο πόδι ενός χρήστη διότι όταν ένας άνθρωπος περπατά το πόδι του στιγμιαία είναι στάσιμο. Στη συνέχεια για να μπορεί να υπάρχει έλεγχος των μετρήσεων με τη χρήση

της τεχνικής αυτής δημιουργήθηκε στο έδαφος μια ακριβής μετρημένη κλειστή τροχιά, πάνω στην οποία έπρεπε να περπατήσει ο χρήστης με το INS/ZUPT.

Ταυτόχρονα όμως για να μπορέσουν να υπάρξουν πιο ενδιαφέροντα αποτελέσματα, στο χέρι του χρήστη ήταν τοποθετημένο ένα INS/GPS στο οποίο κανόνιζαν σε ένα συγκεκριμένο σημείο της διαδρομής να του διακόπτουν τη βοήθεια από το GPS. Έτσι υπήρχε η δυνατότητα, κάθε φορά που ο χρήστης εκτελούσε τη διαδρομή, σύγκρισης των τεχνικών INS/GPS, INS/ZUPT και INS only.



Εικόνα 4: Καταγεγραμμένες τροχιές από κάθε αισθητήρα

Με το πέρας του πειράματος τα συμπεράσματα τους ήταν πως όταν το GPS ήταν διαθέσιμο τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων ήταν συγκριτικά όμοια μεταξύ τους. Ενώ όταν το GPS δεν ήταν διαθέσιμο οι διαφορές μεταξύ τους αυξάνονταν. (Haiyu and El-Sheimy, 2014)

## 2 Αδρανειακοί Αισθητήρες

Οι αδρανειακοί αισθητήρες περιλαμβάνουν επιταχυνσιόμετρα και γυροσκόπια. Ένα επιταχυνσιόμετρο μετρά μία συγκεκριμένη δύναμη και ένα γυροσκόπιο μια γωνιακή ταχύτητα, χωρίς να έχουν κάποια εξωτερική αναφορά. Συσκευές που μετρούν την ταχύτητα, την επιτάχυνση, ή τη γωνιακή ταχύτητα ενός σώματος χρησιμοποιώντας χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος, δεν θεωρούνται αδρανειακοί δέκτες.

Οι περισσότεροι τύποι επιταχυνσιόμετρων μετρούν μια συγκεκριμένη δύναμη πάνω σ' ένα ευαίσθητο άξονα. Ομοίως, οι περισσότεροι τύποι γυροσκοπίων μετρούν μια συγκεκριμένη γωνιακή ταχύτητα για ένα άξονα. Μία μονάδα αδρανειακών μετρήσεων (IMU, MAM) συνδυάζει πολλαπλά επιταχυνσιόμετρα και γυροσκόπια, συνήθως τρία από το κάθε ένα, για την παραγωγή τρισδιάστατης μέτρησης μίας συγκεκριμένης δύναμης και γωνιακής ταχύτητας. Ένα MAM είναι ο αισθητήρας για ένα αδρανειακό σύστημα πλοήγησης (INS, inertial navigation system), το οποίο παράγει μία ξεχωριστή λύση τρισδιάστατης πλοήγησης. Τα νέα μοντέλα INS υιοθετούν μια διαφορετική αρχιτεκτονική, όπου οι αδρανειακοί αισθητήρες είναι τοποθετημένοι σε σχέση με το κέλυφος του συστήματος πλοήγησης. Οι MAM χαμηλότερης βαθμίδας χρησιμοποιούνται επίσης μέσα σε AHRS (Attitude and Heading Reference System), και για PDR (Pedestrian Dead Reckoning) χρησιμοποιώντας σταδιακό εντοπισμό (step detection). (Johnson, 2013)

Τα περισσότερα επιταχυνσιόμετρα είναι είτε εκκρεμές ή χρησιμοποιούν ακτίνες ταλάντωσης. Και οι δύο τεχνολογίες κάνουν χρήση των ίδιων βασικών αρχών που περιγράφονται στο κεφάλαιο 2.2. Υπάρχουν τρία βασικά είδη γυροσκοπίων: spinning mass, optical, και vibratory, όπου το κάθε ένα είναι βασισμένο σε μια διαφορετική φυσική αρχή. Η περιγραφή τους υπάρχει στο κεφάλαιο 2.2. Το μέγεθος, η μάζα, η απόδοση και το κόστος ενός αδρανειακού αισθητήρα ποικίλει από διάφορες τεχνολογίες. Κατά κόρον, οι αισθητήρες υψηλής απόδοσης είναι μεγαλύτεροι, πιο βαρετοί και πιο ακριβοί.

Η ανάπτυξη των αδρανειακών αισθητήρων επικεντρώνεται στην τεχνολογία MEMS. Αυτό ενεργοποιεί τη μαζική παραγωγή των αισθητήρων χαλαζία και σιλικόνης σε χαμηλό κόστος χρησιμοποιώντας τεχνικές χάραξης με διαφορετικούς αισθητήρες σε

μία πλάκα σιλικόνης. Οι αισθητήρες MEMS είναι μικροί, ελαφριοί και παρουσιάζουν καλύτερη ανοχή σε κρούσεις παρά τα συμβατικά μηχανικά μοντέλα. Παρόλα αυτά, προς το παρόν παρουσιάζουν χαμηλή σχετικά απόδοση. Η τεχνολογία MOEMS (Micro-optical-electro-mechanical systems) αντικαθιστά το pick-off με χωρητικότητα πολλών αισθητήρων MEMS με μία οπτική ανάγνωση (ή ένδειξη), προσφέροντας πιθανές βελτιώσεις στην απόδοση, αλλά παραμένει στο ερευνητικό στάδιο.

Η MAM ρυθμίζει τα τροφοδοτικά των αδρανειακών αισθητήρων. Μετατρέπει τις εξόδους τους σε φυσικές μονάδες (engineering units), και τις μεταφέρει σ' ένα δίαυλο δεδομένων. Οι λειτουργίες των MAM περιγράφονται στο κεφάλαιο 2.3, ενώ το κεφάλαιο 2.4 περιγράφει τη συμπεριφορά των σφαλμάτων στα βαθμονομημένα επιταχυνσιόμετρα και γυροσκόπια.

Δεν υπάρχει προκαθορισμένος διαχωρισμός ανάμεσα σε υψηλή, μεσαία και χαμηλή βαθμίδα των MAM και των αδρανειακών αισθητήρων. Η υψηλή βαθμίδα κάποιου συγγραφέα μπορεί να είναι η μεσαία ή η χαμηλή κάποιου άλλου. Εξαίρεση αποτελεί η τεχνολογία που χρησιμοποιείται στους διηπειρωτικούς βαλλιστικούς πυραύλους, τα MAM, INSs, και οι αδρανειακοί αισθητήρες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε πέντε κατηγορίες με βάση την επίδοσή τους: ναυτικού, αεροπορίας, ενδιάμεσα, τακτικής και των αυτοκινήτων (marine, aviation, intermediate, tactical, and automotive).

Οι αδρανειακοί αισθητήρες υψηλότερης βαθμίδας χρησιμοποιούνται σε πλοία, υποβρύχια και σε μερικά αεροσκάφη. Ένα INS τύπου ναυτικού μπορεί να κοστίζει μέχρι και ένα εκατομμύριο ευρώ και να προσφέρει λύση-πλοήγησης που να ολισθαίνει λιγότερο από 1,8Km μέσα σε μία μέρα. Τα αρχικά συστήματα που πρόσφεραν αυτού του βαθμού ακρίβεια ήταν πολύ μεγάλα, με διάμετρο ενός μέτρου περίπου, ενώ τα σημερινά συστήματα είναι κατά πολύ μικρότερα.

Τα INSs τύπου αεροπορίας ή τύπου πλοήγησης που χρησιμοποιούνται έχουν ολίσθηση περίπου 1,5Km στην πρώτη ώρα λειτουργίας τους. Αυτού του τύπου INSs χρησιμοποιούνται επίσης σε επιβατικά αεροσκάφη και σε στρατιωτικά ανά το παγκόσμιο. Επίσης έχουν κόστος 100.000 ευρώ και σταθερό μέγεθος 178 x 178 x 249 mm. Ένα MAM ενδιάμεσης βαθμίδας είναι μια τάξη μεγέθους πιο χαμηλής ακρίβειας, έτσι χρησιμοποιείται σε πιο μικρά αεροσκάφη και ελικόπτερα και κοστίζει από 20.000 έως 50.000 ευρώ.

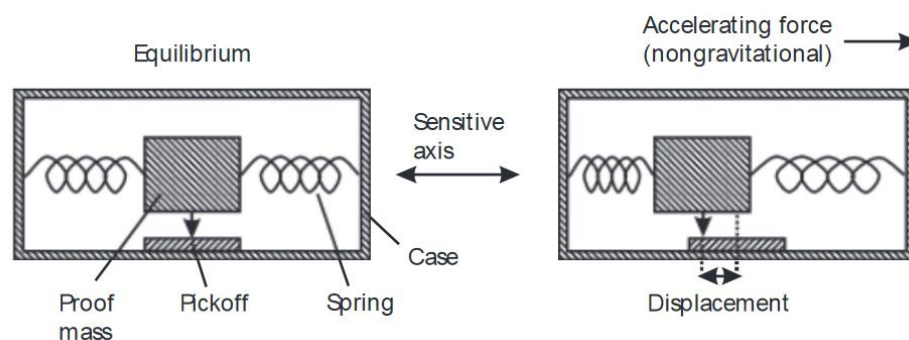
Ένα ΜΑΜ τακτικής βαθμίδας (κατηγορίας) μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για να παρέχει μια χρήσιμη stand-alone (απουσίας του GPS) αδρανειακή επίλυση για μερικά δευτερόλεπτα. Παρόλα αυτά, μια ακριβή μακροπρόθεσμη επίλυση μπορεί να λαμβάνεται με την ενσωμάτωση του με ένα σύστημα εντοπισμού θέσης, όπως ένα GPS. Αυτά τα συστήματα στοιχίζουν από 5.000 έως 20.000 ευρώ και χρησιμοποιούνται συνήθως σε τηλεκατευθυνόμενα όπλα και σε μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAVs).

Οι αδρανειακοί αισθητήρες χαμηλότερης βαθμίδας είναι γνωστοί ως αισθητήρες βαθμίδας αυτοκινήτων. Τείνουν να πωλούνται ως ξεχωριστά επιταχυνσιόμετρα και γυροσκόπια, παρά ως ΜΑΜ και δεν είναι αρκετά ακριβή για αδρανειακή πλοήγηση, ακόμα και όταν ενσωματωθούν με άλλα συστήματα πλοήγησης, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσα σε ένα AHRS (Attitude and Heading Reference System). Τα επιταχυνσιόμετρα κοστίζουν περίπου ένα ευρώ, ενώ οι τιμές των γυροσκοπίων ξεκινούν από 10 ευρώ. Οι ξεχωριστοί αισθητήρες έχουν συνήθως όγκο μερικών κυβικών εκατοστών.

Οι τάξεις των αδρανειακών αισθητήρων, από την τάξη των αυτοκινήτων στην τάξη του ναυτικού, έχουν έξι επίπεδα επιδόσεων από γυροσκόπια, αλλά μόνο τρία από επιταχυνσιόμετρα. Αυτό γίνεται λόγω του ότι η επίδοση των γυροσκοπίων επηρεάζει περισσότερο την ολίσθηση στην πλοήγηση με το πέρασμα του χρόνου λειτουργίας. (Groves, 2007)

## 2.1 Επιταχυνσιόμετρα

Η Εικόνα 5 απεικονίζει ένα απλό επιταχυνσιόμετρο. Μια ενδεικτική μάζα μπορεί να κινείται επάνω στον ευαίσθητο άξονα του επιταχυνσιόμετρου σε σχέση με το κιβώτιο, συγκρατούμενη από ελατήρια.



Εικόνα 5: Απλό Επιταχυνσιόμετρο

Ένα pickoff μετρά τη θέση της ενδεικτικής μάζας. Όταν μια δύναμη εφαρμοστεί κατά μήκος του ευαίσθητου άξονα του κιβώτιου, η ενδεικτική μάζα αρχικά θα συνεχίσει στην προηγούμενη της ταχύτητα, με αποτέλεσμα το κιβώτιο να κινηθεί σε σχέση με τη μάζα, συμπιέζοντας το ένα ελατήριο και επιμηκύνοντας το άλλο. Συμπιέζοντας και επιμηκύνοντας τα ελατήρια, οι δυνάμεις που μεταφέρονται από το κιβώτιο στη μάζα αλλάζουν. Συνεπώς το κιβώτιο να κινείται σε σχέση με τη μάζα μέχρι η επιτάχυνση της μάζας, που προκαλείται από τις ασύμμετρες δυνάμεις των ελατηρίων, να εξισωθεί με την επιτάχυνση του κιβωτίου. Έτσι η θέση της μάζας σε σχέση με το κιβώτιο, είναι ανάλογη της εφαρμοσμένης στο κιβώτιο επιτάχυνσης. Μετρώντας την, μέσω του pickoff, ανακτάτε μια μετρημένη επιτάχυνση. Εξαίρεση σε αυτόν το μηχανισμό αποτελεί η δύναμη της βαρύτητας, η οποία ενεργεί κατευθείαν στη μάζα και όχι μέσω των ελατηρίων. Όμως η δύναμη αυτή επιταχύνει όλα τα μέλη του μηχανισμού κατά τον ίδιο τρόπο με αποτέλεσμα να μην υπάρχει σχετική κίνηση ανάμεσα στη μάζα και το κιβώτιο. Γι' αυτό τον λόγο όλα τα επιταχυνσιόμετρα μετρούν μια συγκεκριμένη δύναμη, τη μη βαρυτική επιτάχυνση και όχι την ολική επιτάχυνση.

Το πλαίσιο των μετρήσεων του επιταχυνσιόμετρου είναι το κιβώτιο, με το πλαίσιο αναφοράς να είναι αδρανειακό και οι μετρήσεις να υπολογίζονται κατά τον ευαίσθητο άξονα. Έτσι μια MAM με μια τριάδα επιταχυνσιόμετρων μετρά μια δύναμη στο σώμα της MAM, σε σχέση με το αδρανειακό πλαίσιο των αξόνων του σώματος, το διάνυσμα  $f_{bi}^b$ .

Το επιταχυνσιόμετρο που απεικονίζεται στην Εικόνα 5, είναι ημιτελές. Η ενδεικτική μάζα χρειάζεται να στηρίζεται στους κάθετους και στον ευαίσθητο άξονα. Επίσης χρειάζεται ένα μέσο απόσβεσης, για περιορισμό της ταλάντωσης της μάζας. Παρόλα αυτά, όλα τα επιταχυνσιόμετρα βασίζονται στο βασικό σχεδιασμό, που απεικονίζεται. Τα εκκρεμή μοντέλα υπάρχουν εδώ και δεκαετίες, ενώ τα επιταχυνσιόμετρα ακτίνας δόνησης υπάρχουν από τη δεκαετία του '80. Και τα δύο είδη επιταχυνσιόμετρων μπορούν να κατασκευαστούν είτε με συμβατικές μηχανικές κατασκευές είτε με τεχνολογία MEMS. Τα επιταχυνσιόμετρα MEMS και των δύο ειδών μπορεί να κατασκευαστούν έχοντας τον ευαίσθητο άξονα στο επίπεδο της συσκευής ή κάθετο σε αυτό. (Groves, 2013)

### 2.1.1 Εκκρεμές Επιταχυνσιόμετρα (pendulous accelerometers)

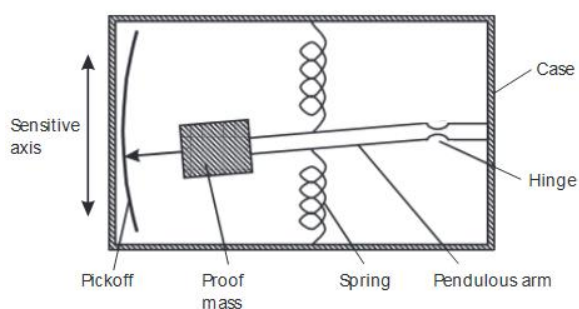
Στην Εικόνα 6 απεικονίζεται ένα μηχανικό, ανοιχτού βρόγχου, εκκρεμές επιταχυνσιόμετρο. Η μάζα είναι στηριγμένη στο κιβώτιο με στήριξη τύπου άρθρωσης, δημιουργώντας ένα εκκρεμές. Έτσι η μάζα είναι σε θέση να κινείται ελεύθερη κατά τον ευαίσθητο άξονα καθώς είναι στηριγμένη σε δύο άλλους άξονες. Για την μεταφορά της δύναμης από το κιβώτιο στο εκκρεμές, επάνω στον ευαίσθητο άξονα, χρησιμοποιούνται ένα ή δύο ελατήρια. Αυτό γίνεται καθώς η άρθρωση παρέχει απόσβεση, η οποία μπορεί να παρέχεται σε μεγαλύτερο βαθμό γεμίζοντας το κιβώτιο με λάδι.

Παρόλο που ο σχεδιασμός ανοιχτού βρόγχου παρέχει ένα πρακτικό επιταχυνσιόμετρο, η απόδοση του περιορίζεται από τρεις παράγοντες. Πρώτον, η κλίμακα του pickoff είναι σχετικά φτωχή. Δεύτερον, η δύναμη που ασκείται από ένα ελατήριο είναι μόνο μια προσέγγιση μίας γραμμικής σχέσης, της συμπίεσης ή επιμήκυνσης του, παρουσιάζοντας υστερήσεις. Τέλος, ο ευαίσθητος άξονα είναι κάθετος σε σχέση με τον βραχίονα του εκκρεμούς, έτσι όταν το εκκρεμές κινείται, ο άξονας κινείται σε σχέση με το κιβώτιο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μη γραμμική ανταπόκριση κατά τον επιθυμητό ευαίσθητο άξονα και την ευαισθησία σε κάθετη δύναμη.

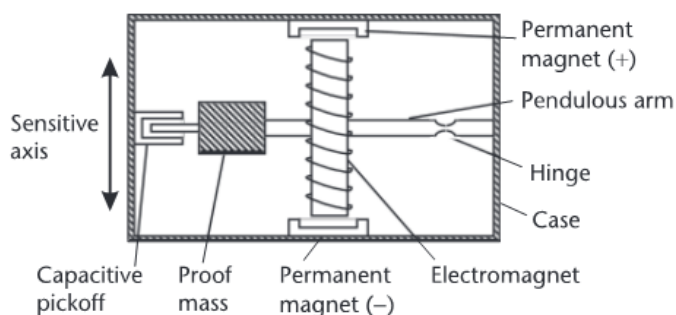
Για την επίλυση αυτών των προβλημάτων, ακριβή επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιούν κλειστό βρόγχο ή δυναμική ανατροφοδότηση. Σε ένα επιταχυνσιόμετρο δυναμικής ανατροφοδότησης, ένα torquer χρησιμοποιείται για να διατηρήσει το βραχίονα του εκκρεμούς σε σταθερή θέση σε σχέση με το κιβώτιο, ανεξάρτητα από τη δύναμη στην οποία υπακούει το επιταχυνσιόμετρο. Το pickoff εντοπίζει τη μετατόπιση από τη θέση ισορροπίας, ενώ το torquer είναι ρυθμισμένο να επαναφέρει το εκκρεμές σε αυτή τη θέση. Σε ένα τέτοιο επιταχυνσιόμετρο, η δύναμη που ασκείται από το torquer είναι αναλογική της εξασκούμενης δύναμης. Η Εικόνα 7 απεικονίζει ένα μηχανικό επιταχυνσιόμετρο δυναμικής ανατροφοδότησης. Το torquer περιλαμβάνει ένα ηλεκτρομαγνήτη εφαρμοσμένο στο εκκρεμές και ένα ζευγάρι από μόνιμους μαγνήτες αντίθετης πολικότητας, έναν σε κάθε πλευρά του κιβωτίου. Στο διάγραμμα απεικονίζεται ένα pickoff με χωρητικότητα, περιλαμβανομένων τεσσάρων πυκνωτών πλάκα, τοποθετημένοι ώστε δύο πυκνωτές να είναι ανάμεσα στο εκκρεμές και το κιβώτιο. Καθώς το εκκρεμές κινείται, η χωρητικότητα ενός ζευγαριού πλακών

(πυκνωτές) αυξάνεται ενώ μειώνεται στο άλλο. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα επαγωγικό ή οπτικό pickoff.

Η διαμόρφωση του κλειστού βρόγχου εξασφαλίζει την ευθυγράμμιση του ευαίσθητου άξονα με το κιβώτιο του επιταχυνσιόμετρου, καθώς το torque προσφέρει μεγαλύτερη δυναμική εμβέλεια και καλύτερη γραμμικοποίηση, από τα ελατήρια και το pickoff των επιταχυνσιόμετρων με ανοιχτό βρόγχο. Παρόλα αυτά, ένα μειονέκτημα είναι ότι το εκκρεμές είναι ελεύθερο όταν δεν εφαρμόζεται δύναμη, που πιθανό να προκαλέσει βλάβη στη διέλευση (transit), ιδιαίτερα όταν το κιβώτιο είναι γεμάτο με γκάζι αντί με λάδι.



**Εικόνα 6: Εκκρεμές Επιταχυνσιόμετρο Ανοιχτού-Βρόγχου**



**Εικόνα 7: Εκκρεμές Μηχανικό Επιταχυνσιόμετρο με δυναμική ανατροφοδότηση**

Ο σχεδιασμός της άρθρωσης, του βραχίονα, της μάζας, του torque και του συστήματος του pickoff επηρεάζουν όλα την απόδοση. Μεταβάλλοντας την ποιότητα των εξαρτημάτων, μπορεί να προσφερθεί μία ποικιλία βαθμίδων απόδοσης σε διάφορες τιμές.

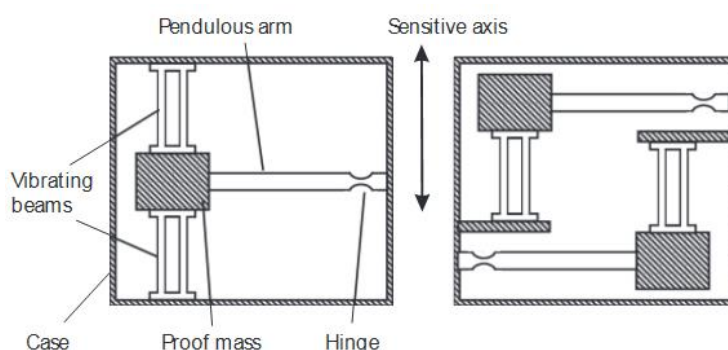


Τα εκκρεμή MEMS επιταχυνσιόμετρα ανοιχτού αλλά και κλειστού βρόγχου, είναι διαθέσιμα με ηλεκτροστατικό torque, αντί του μαγνητικού. Το pickoff μπορεί να έχει και χωρητικότητα, όπως περιγράφεται πιο πάνω, ή μπορεί να είναι απλά μια ωμική μεταβλητή αντίσταση τοποθετημένη στην άρθρωση, της οποίας η αντίσταση μεταβάλλεται καθώς επιμηκύνετε ή συμπιέζεται. (Groves, 2013)

### 2.1.2 Επιταχυνσιόμετρο Ακτίνας-Δόνησης (Vibrating-Beam) (VBA)

Το Επιταχυνσιόμετρο Ακτίνας-Δόνησης (VBA), έχει και αυτό, τη μάζα και τον εκκρεμή βραχίονα, όπως το εκκρεμές επιταχυνσιόμετρο. Παρόλα αυτά, η μάζα στηρίζεται κατά τον ευαίσθητο άξονα από μια ακτίνα δόνησης, περιορίζοντας σε μεγάλο βαθμό την κίνηση του σε σχέση με το κιβώτιο. Όταν μια δύναμη εφαρμοστεί στο κιβώτιο του επιταχυνσιόμετρου, κατά τον ευαίσθητο άξονα, η ακτίνα σπρώχνει και τραβά τη μάζα, προκαλώντας συμπίεση της δέσμης στην πρώτη περίπτωση και επιμήκυνση στη δεύτερη. Η ακτίνα οδηγείται στο να προκαλεί δόνηση στην ηχηρή της συχνότητα από τα ηλεκτρονικά του επιταχυνσιόμετρου. Παρόλα αυτά, με τη συμπίεση της ακτίνας προκαλείται η μείωση στη συχνότητα της, ενώ με την επιμήκυνση της προκαλείται αύξηση. Επομένως, με τη μέτρηση της ηχηρής συχνότητας μπορεί να υπολογιστεί η δύναμη κατά τον ευαίσθητο άξονα.

Η απόδοση μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση ενός ζευγαριού από ακτίνες, τοποθετημένα ώστε το ένα να συμπιέζεται ενώ το άλλο να επιμηκύνεται. Μπορεί να στηρίζουν και τα δύο μία συγκεκριμένη μάζα ή μια μάζα το καθένα ξεχωριστά (και οι δύο διατάξεις απεικονίζονται στην Εικόνα 8).



Εικόνα 8: Επιταχυνσιόμετρο Ακτίνας-Δόνησης (VBA)

## 2.2 Γυροσκόπια

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται οι τρεις βασικοί τύποι γυροσκοπίων: περιστρεφόμενης μάζας, οπτικά, και δονούμενα. Ο ορισμός του γυροσκοπίου αρχικά ήταν περιορισμένος στο τύπο της περιστρεφόμενης μάζας, αλλά τώρα περιέχει όλους τους αισθητήρες γωνιακής ταχύτητας οι οποίοι δεν απαιτούν κάποιο εξωτερικό σημείο αναφοράς. Ο Jean Bernard Leon Foucault εφεύρε το γυροσκόπιο περιστρεφόμενης μάζας το 1852, ενώ ο Charles Stark Draper κατασκεύασε το γυροσκόπιο μεγάλης απόδοσης, του ίδιου τύπου, το 1950.

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι οπτικών γυροσκοπίων. Το RLG που προέρχεται από το 1960 ως τεχνολογία μεγάλης απόδοσης, ενώ το IFOG κατασκευάστηκε το 1970 ως λύση χαμηλού κόστους. Τώρα οι επιδόσεις του RLG και IFOG επικαλύπτονται. Έχουν επίσης κατασκευαστεί ένα resonant fiber-optic gyro (RFOG) και ένα micro-optic gyro (MOG).

Πρακτικά τα γυροσκόπια δόνησης κατασκευάστηκαν από τη δεκαετία του '80. Όλα τα γυροσκόπια MEMS λειτουργούν με τις αρχές της ταλάντωσης, αλλά μεγαλύτερα από τα γυροσκόπια δόνησης είναι επίσης διαθέσιμα και η τεχνική βελτιώνει το εύρος επιδόσεων.

Ένας αριθμός από τεχνικές γυροσκοπίων, συμπεριλαμβανομένου και του πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού, γωνιακά επιταχυνσιόμετρα, και τεχνικές συμβολομετρίας του ατόμου, έχουν επίσης ερευνηθεί.

Το πλαίσιο για τις μετρήσεις του γυροσκοπίου είναι το κιβώτιο του, καθώς το πλαίσιο αναφοράς είναι ο αδρανειακός χώρος, και οι μετρήσεις επιλύονται επάνω στον ευαίσθητο του άξονα. Έτσι μια MAM, που περιέχει μια τριάδα γυροσκοπίων, μετρά τη γωνιακή ταχύτητα του σώματος της MAM σε σχέση με τον αδρανειακό χώρο.

### 2.2.1 Γυροσκόπιο Περιστρεφόμενης Μάζας

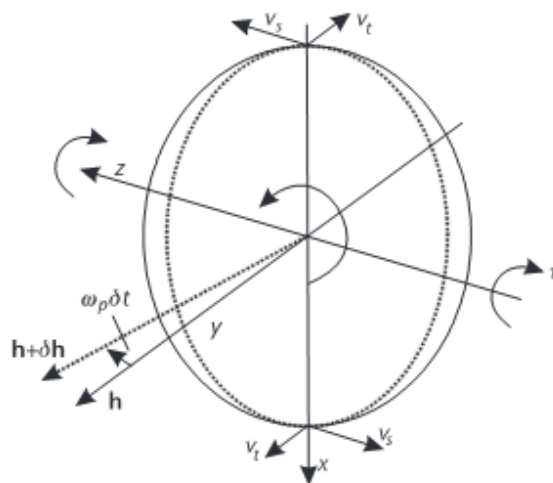
Ένα γυροσκόπιο περιστρεφόμενης μάζας λειτουργεί βάση της αρχής διατήρησης της στροφορμής. Ο δεύτερος νόμος δυναμικής του Νεύτωνα, υποδηλώνει πως η στροφορμή ενός συστήματος παραμένει σταθερή. Επομένως, αν μία περιστρεφόμενη μάζα είναι τοποθετημένη στο κέλυφος ενός οργάνου, έτσι ώστε να είναι ελεύθερη να περιστρέφεται γύρω από τους δύο άξονες, κάθετους προς τη μάζα, θα παραμείνει ευθυγραμμισμένο σε σχέση με τον αδρανειακό χώρο καθώς το κιβώτιο

περιστρέφεται. Τα Pickoffs που μετρούν τον προσανατολισμό της περιστρεφόμενης μάζας σε σχέση με το κιβώτιο παρέχουν μετρήσεις για τον προσανατολισμό του οργάνου σε σχέση με τα όρια του pickoff, χρήσιμο για την αδρανειακή πλοήγηση.

Για να υπάρχει αδρανειακή πλοήγηση, ένα γυροσκόπιο περιστρεφόμενης μάζας πρέπει να μετρά τη γωνιακή ταχύτητα σχετικά με ένα άξονα, τοποθετημένο σε σχέση με το κιβώτιο του οργάνου. Στην Εικόνα 9 απεικονίζεται ένας περιστρεφόμενος δίσκος, κατά τον  $\psi$  άξονα και με στροφορμή το διάνυσμα  $h$ . Μια ροπή,  $\tau$ , εφαρμόζεται στον άξονα  $z$ . Ως αποτέλεσμα της περιστροφής του δίσκου, τα στοιχεία αποκτούν μια ταχύτητα,  $\pm V_s$ , κατά τον  $z$  άξονα. Παρόλα αυτά, λόγω της ροπής στον άξονα  $z$ , τα στοιχεία αποκτούν μία ταχύτητα  $\mp V_t$  κατά τον  $\psi$  άξονα. Εμβαθύνοντας περισσότερο σε αυτό, παρατηρείται η αμοιβαία περιστροφή στον άξονα  $x$ . Αυτή η κίνηση στον  $x$  άξονα είναι γνωστή ως μετάπτωση (precession).

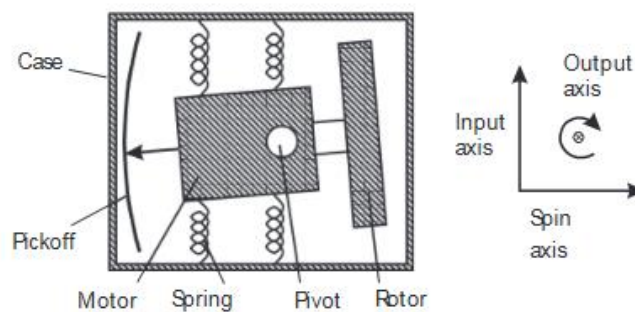
Σκεφτείτε μια μικρή μετάπτωση μέσω μιας γωνίας  $\omega_p \Delta t$  όπου  $\omega_p$  είναι η γωνιακή ταχύτητα της μετάπτωσης και  $\Delta t$  είναι ένα χρονικό βήμα. Η προκύπτουσα μεταβολή στη γωνιακή ορμή φορέα, δη, είναι ανάλογη με το μέγεθος της αρχικής στροφορμής, αλλά είναι αμοιβαία κάθετος. Έτσι,  $dh = \omega_p \wedge h dt$  και η εφαρμοζόμενη ροπή είναι ίση με το ρυθμό μεταβολής της στροφορμής, έτσι  $\tau = \dot{h}$ .

Εφαρμόζοντας αυτό σ' ένα γυροσκόπιο περιστρεφόμενης μάζας, αν το κιβώτιο περιστρέφεται σ' ένα άξονα, πρέπει να εφαρμοστεί μια ροπή κατά τον αμοιβαία κάθετο άξονα ώστε η μάζα να παραμείνει ευθυγραμμισμένη με το κιβώτιο.



Εικόνα 9: Φαινόμενο ορθογώνιας ροπής σε ένα περιστρεφόμενο δίσκο

Η Εικόνα 10 απεικονίζει ένα ανοιχτού βρόγχου με πρώτο βαθμό ελευθερίας γυροσκόπιο περιστρεφόμενης μάζας. Η μάζα (ή rotor) και ο οδηγός του είναι τοποθετημένα επάνω σ' ένα άξονα περιστροφής, στον οποίο ο rotor και ο οδηγός είναι ελεύθεροι να κινηθούν. Αυτός ο άξονας είναι γνωστός ως άξονας εξόδου. Ο κάθετος άξονας στον άξονα εξόδου και στον άξονα περιστροφής, είναι γνωστός ως άξονας εισόδου, καθώς επάνω σε αυτόν μετράτε η στροφή. Η συνδεσμολογία motor/ rotor δεν μπορεί να κινηθεί κατά τον άξονα εισόδου σε σχέση με το κέλυφος. Όταν το κέλυφος του γυροσκοπίου περιστρέφεται κατά τον άξονα εισόδου, εφαρμόζεται μια ροπή κατ' αυτόν τον άξονα στον rotor, προκαλώντας στροφή κατά τον άξονα εξόδου. Χωρίς καμία αντίδραση σ' αυτό, η συνδεσμολογία motor/ rotor θα εκτελεί μετάπτωση έως ότου οι άξονες εισόδου να είναι ευθυγραμμισμένοι. Ένα ή περισσότερα ελατήρια είναι τοποθετημένα ανάμεσα στον οδηγό και στο κιβώτιο. Τα ελατήρια αυτά προκαλούν μια ροπή ισορροπίας κατά τον άξονα εξόδου, η οποία κλονίζει τον rotor κατά τον άξονα εισόδου, διατηρώντας το, ευθυγραμμισμένο με το κιβώτιο. Εναλλακτικά, ο άξονας εξόδου της περιστροφής μπορεί να αντικατασταθεί από μία ράβδο στρέψης. Έτσι, οι άξονες εισόδου και εξόδου μπορούν να λειτουργούν τόσο ως torquing αλλά και ως άξονες μετάπτωσης, με τις ροπές που εφαρμόζονται από το κέλυφος σχετικά με τον άξονα εισόδου, να εξισορροπούνται από τη ροπή που εφαρμόζεται από τα ελατήρια γύρω από τον άξονα εξόδου. Η δύναμη που ασκείται από ένα ελατήριο είναι συνάρτηση της παραμόρφωσης του (συμπίεση ή επιμήκυνση). Κατά συνέπεια, όταν περιστραφεί ο άξονας εισόδου, η συνδεσμολογία του motor/rotor θα περιστραφεί κατά τον άξονα εξόδου ώσπου να ισορροπήσουν οι ροπές που δημιουργούνται. Ο προσανατολισμός της συνδεσμολογίας του motor/rotor σε σχέση με το κιβώτιο είναι αναλογικός με τη γωνιακή ταχύτητα, κατά τον άξονα εισόδου. Έτσι η μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας δίνεται μέσω του pickoff.

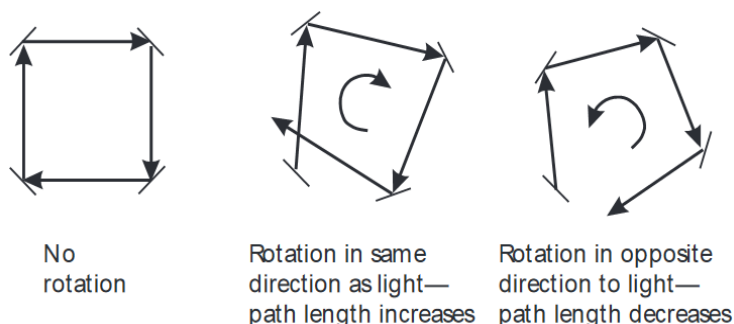


**Εικόνα 10: Γυροσκόπιο ανοιχτού βρόγχου με πρώτο βαθμό ελευθερίας**

Όταν το κιβώτιο περιστραφεί κατά τον άξονα εξόδου, τα ελατήρια παραμορφώνονται, αλλάζοντας τη ροπή κατά αυτόν τον άξονα και τονώνουν τη μετάπτωση κατά τον άξονα εισόδου. Το κιβώτιο στη συνέχεια αποτρέπει την μετάπτωση γύρω από τον άξονα εισόδου εφαρμόζοντας μία αντίθετη ροπή που μεταποιεί τη διάταξη κινητήρα / ρότορα γύρω από τον άξονα εξόδου έτσι ώστε να παραμένει σταθερός ο προσανατολισμός της, σε σχέση με το περίβλημα. Ως εκ τούτου, μόνο περιστροφή γύρω από τον άξονα εισόδου παράγει μια ανάγνωση.

### 2.2.2 Οπτικά Γυροσκόπια

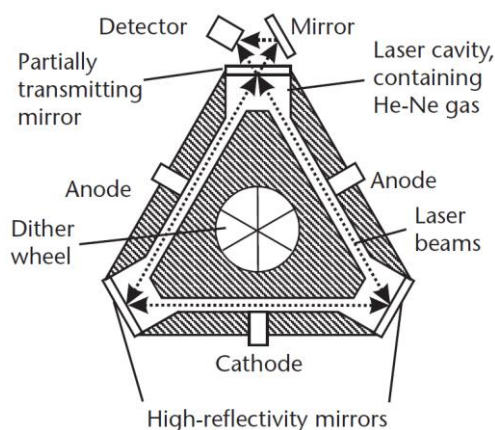
Τα οπτικά γυροσκόπια λειτουργούν με βάση την αρχή ότι το φως ταξιδεύει με σταθερή ταχύτητα μέσα σε ένα αδρανειακό περιβάλλον. Αν σταλεί φως στις δύο κατευθύνσεις μέσα σε ένα μη περιστρεφόμενο κλειστού-βρόγχου κυματοδηγό, φτιαγμένο από καθρέφτες, το μήκος διαδρομής είναι το ίδιο και για τις δύο ακτίνες. Παρόλα αυτά, αν ο κυματοδηγός περιστραφεί κατά ένα άξονα κάθετο ως προς το επίπεδο του, τότε οι ανακλώμενες επιφάνειες απομακρύνονται για τη διαδρομή του φωτός, με την ίδια κατεύθυνση όπως αυτή της περιστροφής, ενώ έρχονται πιο κοντά για τη διαδρομή με αντίθετη κατεύθυνση. Έτσι περιστρέφοντας τον κυματοδηγό στην ίδια κατεύθυνση με τη διαδρομή του φωτός αυξάνεται το μήκος διαδρομής ενώ με περιστροφή σε αντίθετη κατεύθυνση το μήκος διαδρομής μειώνεται. Αυτό είναι γνωστό ως το φαινόμενο Sagnac, που απεικονίζεται στη Εικόνα 11. Μετρώντας, έτσι, τις αλλαγές στο μήκος της διαδρομής του φωτός, μπορεί να προσδιοριστεί η γωνιακή ταχύτητα μέσα στον αδρανειακό χώρο. Να σημειωθεί ότι, από την προοπτική του περιστρεφόμενου πλαισίου, το μήκος διαδρομής παραμένει αμετάβλητο ενώ η ταχύτητα του φωτός μεταβάλλεται.



**Εικόνα 11:** Αποτέλεσμα περιστροφής κυματοδηγού κλειστού-βρόγχου

### 2.2.2.1 Γυροσκόπιο Ring Laser

Στην Εικόνα 12 απεικονίζεται ένα γυροσκόπιο ring laser. Μια κλειστού-βρόγχου σωλήνα με τουλάχιστο τρεις βραχίονες, γεμάτη με μίγμα αερίου ηλίου-νέον (γνωστό ως κοιλότητα laser). Ένας καθρέφτης υψηλής ανακλαστικότητας είναι τοποθετημένος σε κάθε γωνία. Τέλος, κάθοδος και άνοδος χρησιμοποιούνται για να εφαρμοστεί διαφορά δυναμικού σε όλο το αέριο, δημιουργώντας ένα ηλεκτρικό πεδίο.



Εικόνα 12: Τυπικό γυροσκόπιο ring laser

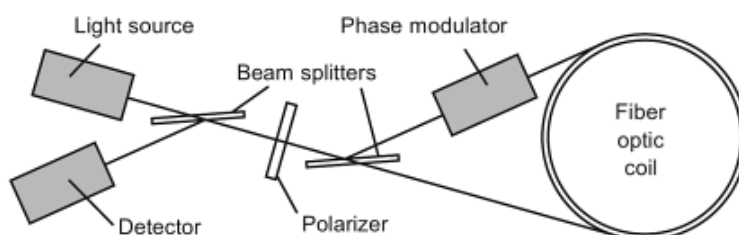
Ένα άτομο αερίου μπορεί, να μπορεί να απορροφήσει ενέργεια από το ενεργειακό πεδίο, δημιουργώντας μια διεγερμένη κατάσταση του ατόμου. Η διεγερμένη κατάσταση είναι ασταμάτητη, και το άτομο τελικά επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση, γνωστή ως ground state, εκπέμποντας τη περίσσια ενέργεια σαν φωτόνια.

Ένα ring laser έχει δύο καταστάσεις laser, μία σε κάθε διεύθυνση. Εάν η κοιλότητα του laser δεν περιστρέφεται, και οι δύο καταστάσεις έχουν το ίδιο μήκος κύματος. Παρόλα αυτά, αν η κοιλότητα του laser περιστραφεί κατά ένα άξονα κάθετο στο επίπεδο του, το μήκος της κοιλότητας αυξάνεται στην κατεύθυνση της περιστροφής (lasing mode) και μειώνεται στην αντίθετη κατεύθυνση. Με αποτέλεσμα, το lasing mode να παρουσιάζει αύξηση του μήκους κύματος στην κατεύθυνση της περιστροφής και μείωση της συχνότητας του, ενώ το αντίστροφο συμβαίνει για την άλλη κατάσταση. Σ' ένα ring laser gyro ένα από τα κάτοπτρα της κοιλότητας μεταδίδει μερικώς, επιτρέποντας στα φωτόνια και από τα δύο laser modes να επικεντρώνεται σε έναν ανιχνευτή. (Groves, 2007)

### 2.2.2.2 Interferometric Fiber-Optic Gyro

Η Εικόνα 13 απεικονίζει τα κύρια στοιχεία ενός Interferometric Fiber-Optic Gyro, το οποίο συνήθως αποκαλείται fiber-optic gyro (FOG). Μια εξωτερική πηγή φωτός διαχωρίζεται, χρησιμοποιώντας ένα διαχωριστή δέσμης, σε δύο ίσα μέρη τα οποία στέλλονται, μέσω ενός fiber-optic coil, σε αντίθετες κατευθύνσεις. Οι διαχωριστές δέσμης συνδυάζουν τις δύο ακτίνες στον ανιχνευτή, όπου παρατηρείται η μεταξύ τους παρεμβολή. Δύο διαχωριστές δέσμης, αντί για ένα, χρησιμοποιούνται έτσι ώστε και οι δύο τροχιές φωτός να περιέχουν ένα ίσο αριθμό μεταδόσεων και αντανακλάσεων. Όταν το fiber-optic coil περιστραφεί κατά ένα άξονα κάθετο στο επίπεδο του, δημιουργείται μια διαφορά φάσης ανάμεσα στις δύο τροχιές.

Ένας διαμορφωτής φάσης τοποθετείται στην είσοδο του πηνίου για τη μία τροχιά φωτός και στην έξοδο για την άλλη. Αυτό δημιουργεί μια μετατόπιση φάσης εξαρτώμενη από το χρόνο, έτσι ώστε το φως να φτάνει στον ανιχνευτή ταυτόχρονα και από τις δύο διευθύνσεις, που υπόκεινται σε διαφορετικές μετατοπίσεις φάσης.



Εικόνα 13: Interferometric Fiber-Optic Gyro

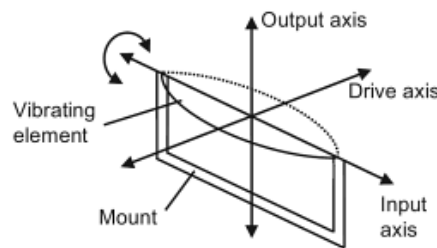
### 2.2.3 Γυροσκόπια Vibratory

Ένα γυροσκόπιο vibratory περιλαμβάνει ένα στοιχείο που εξαναγκάζεται σε απλή αρμονική κίνηση. Το στοιχείο ταλάντωσης μπορεί να είναι μια χορδή, ακτίνα, ζεύγος ακτινών, διαπασών, δακτύλιος, κύλινδρος ή ημισφαίριο. Όλα λειτουργούν με την ίδια αρχή, η οποία είναι ο εντοπισμός της Coriolis Acceleration του δονούμενου στοιχείου καθώς το γυροσκόπιο περιστρέφεται. Αυτό είναι πιο εύκολο να εφαρμοστεί με μια παλλόμενη χορδή.

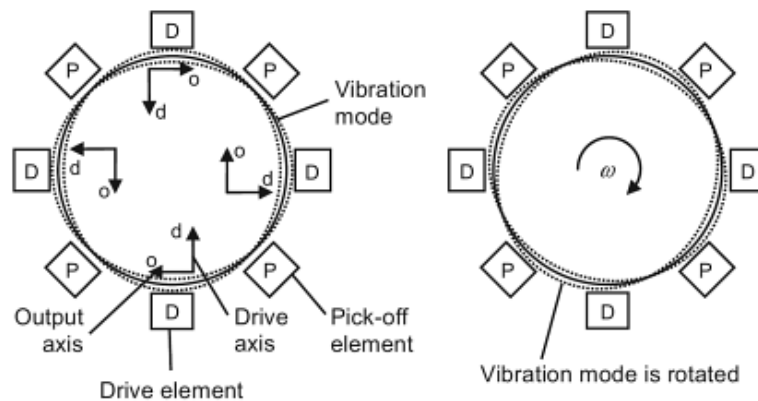
Η επιτάχυνση Coriolis υποκινεί μια απλή αρμονική κίνηση κατά τον κάθετο άξονα στην εξαναγκασμένη δόνηση και στην προβολή του διανύσματος της γωνιακής ταχύτητας, στο κάθετο επίπεδο της εξαναγκασμένης δόνησης. Το εύρος αυτής της κίνησης είναι ανάλογο της γωνιακής ταχύτητας. Περιστροφές κατά τον άξονα

δόνησης δεν δημιουργούν επιτάχυνση Coriolis. Στην πράξη, η κίνηση του στοιχείου δόνησης περιορίζεται σ' ένα από τους άξονες κάθετο κατά την εξαναγκασμένη δόνηση, έτσι ώστε μόνο η περιστροφή σε αυτόν τον άξονα εισόδου να οδηγεί σε ταλάντωση του άξονα εξόδου, αυτό απεικονίζεται στη Εικόνα 14.

Το πώς εντοπίζεται η δόνηση εξαρτάται από την αρχιτεκτονική του γυροσκοπίου. Για γυροσκόπια χορδής και μονής ακτίνας, τα δύο στοιχεία οδηγούνται σε αντίθετη φάση, έτσι ώστε η επαγόμενη δόνηση Coriolis να είναι επίσης σε αντίθετη φάση. Αυτό προκαλεί μια ταλαντευόμενη στρέψη στο στέλεχος, το οποίο μπορεί να εντοπιστεί απευθείας με ένα ζευγάρι από pickoffs. Όταν το γυροσκόπιο δεν περιστρέφεται, οι ανιχνευτές είναι στους κόμβους της δονούμενης κατάστασης, έτσι κανένα σήμα δεν ανιχνεύετε. Όταν μια γωνιακή ταχύτητα εφαρμοστεί, η δονούμενη κατάσταση περιστρέφεται κατά τον άξονα εισόδου, αυτό απεικονίζεται στην Εικόνα 15.



Εικόνα 14: Άξονες Γυροσκοπίου Δόνησης



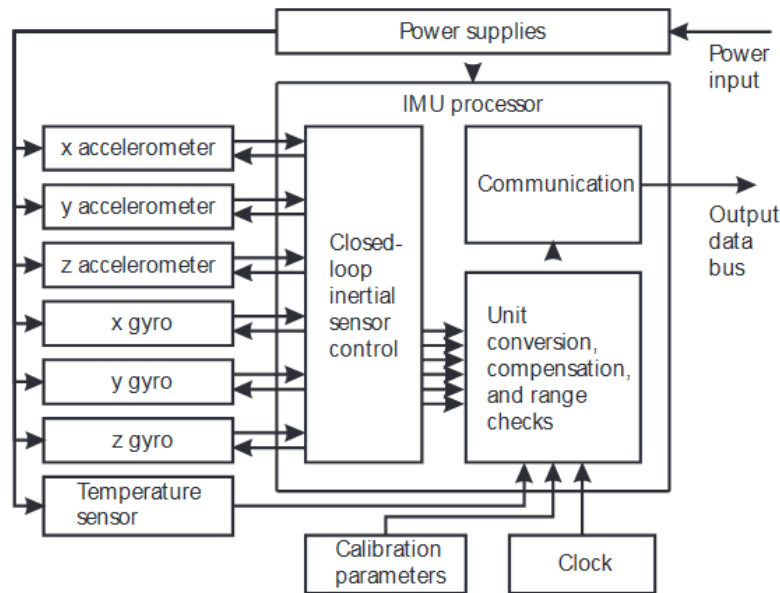
Εικόνα 15: Vibration modes of ring, cylinder, and hemispherical vibratory gyros

### 2.3 Μονάδες Αδρανειακών Μετρήσεων

Η Εικόνα 16 απεικονίζει τα κύρια μέρη μίας τυπικής MAM, επιταχυνσιόμετρον και γυροσκοπίου, τον επεξεργαστή της MAM, την αποθήκευση των παραμέτρων, ένα αισθητήρα θερμοκρασίας και τα σχετικά τροφοδοτικά. Τα περισσότερα MAM έχουν



τρία επιταχυνσιόμετρα και τρία πρώτου βαθμού ελευθερίας γυροσκόπια, τοποθετημένα σε κάθετους άξονες. Παρόλα αυτά κάποιες MAM ενσωματώνουν και επιπλέον αισθητήρες σε λοξή διαμόρφωση για απαλλαγή από τα σφάλματα ενός μοναδικού αισθητήρα.



**Εικόνα 16: Διαμόρφωση μίας Μονάδας Αδρανειακών Μετρήσεων**

Ο επεξεργαστής της MAM προσφέρει μια μετατροπή των μονάδων στις εξόδους των αισθητήρων, καθώς και μία διόρθωση για τα γνωστά σφάλματα των αδρανειακών αισθητήρων και κάνει ανίχνευση των προβλημάτων στους αισθητήρες. Μπορεί επίσης να διαχειριστεί και την ανατροφοδότηση ενός κλειστού βρόχου ή έλεγχο εξισορρόπησης για τα επιταχυνσιόμετρα ή/και για τα γυροσκόπια. Η μετατροπή των μονάδων, μετατρέπει την εξαγόμενη πληροφορία από διαφορά δυναμικού, ρεύματος, ή παλμούς, σε μονάδες δύναμης και γωνιακής ταχύτητας.

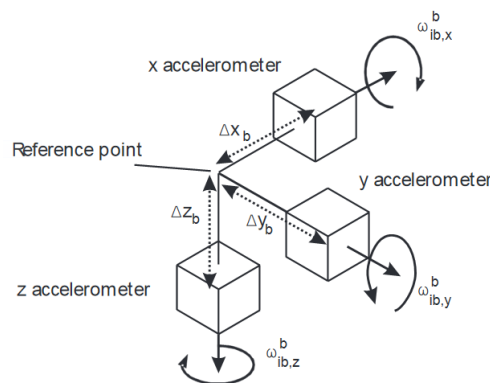
Οι αδρανειακοί αισθητήρες εμφανίζουν σταθερά σφάλματα, τα οποία μπορούν να υπολογιστούν στο εργοστάσιο και να αποθηκευτούν στη μνήμη, επιτρέποντας έτσι τον επεξεργαστή να διορθώνει την έξοδο του αισθητήρα. Οι παράμετροι βαθμονόμησης γενικά περιλαμβάνουν τα biases των επιταχυνσιομέτρων και των γυροσκοπίων, το συντελεστή κλίμακας και σφάλματα εγκάρσιας σύζευξης, και τα biases των γυροσκοπίων που οφείλονται στη βαρύτητα. Αυτά τα σφάλματα διαφέρουν ανάλογα με τη θερμοκρασία, έτσι η βαθμονόμηση εκτελείται σ' ένα εύρος θερμοκρασιών και η MAM εξοπλίζεται με αισθητήρα θερμοκρασίας. Παρόλα αυτά, η θερμοκρασία μέσα σε κάθε ξεχωριστό αισθητήρα δεν ταιριάζει απαραίτητως με την

περιβάλλουσα θερμοκρασία της MAM, έτσι κάποιες MAM υψηλής απόδοσης αντιθέτως χρησιμοποιούν έλεγχο θερμοκρασίας. Το κόστος της βαθμονόμησης μπορεί να μειωθεί εφαρμόζοντας τους ίδιους συντελεστές σε μια ολόκληρη παρτίδα από αισθητήρες. Παρόλα αυτά, μια καλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται με τη βαθμονόμηση του κάθε αισθητήρα ξεχωριστά, σημειώνοντας πως αυτό είναι απαραίτητο για τον πλήρη υπολογισμό του σφάλματος της εγκάρσιας σύζευξης (cross-coupling errors).

Για τον υπολογισμό μιας πλοήγησης σε ένα σημείο, χρειάζεται να εφαρμοστούν μετρήσεις γωνιακής ταχύτητας και δυνάμεις σε ένα σημείο αναφοράς. Παρόλα αυτά, στην πράξη, το μέγεθος των αδρανειακών αισθητήρων απαιτεί, αυτοί να είναι τοποθετημένοι σε κάποια εκατοστόμετρα ο ένας από τον άλλο. Αυτό απεικονίζεται στην Εικόνα 17. Παρόλα αυτά, η περιστροφή ενός επιταχυνσιόμετρου κατά ένα άξονα κάθετο ως προς τον ευαίσθητο του άξονα, το αναγκάζει να αισθανθεί μία κεντρομόλο δύναμη, η οποία είναι ανάλογη της απόστασης από τον άξονα περιστροφής. Έτσι η κεντρομόλος δύναμη στο επιταχυνσιόμετρο είναι διαφορετική από αυτή στο σημείο αναφοράς, με αποτέλεσμα ένα σφάλμα στη μέτρηση της δύναμης στο σημείο αναφοράς.

$$\Delta f_{ib}^b = \begin{pmatrix} [(\omega_{ib,y}^b)^2 + (\omega_{ib,z}^b)^2] \Delta x_b \\ [(\omega_{ib,z}^b)^2 + (\omega_{ib,x}^b)^2] \Delta y_b \\ [(\omega_{ib,x}^b)^2 + (\omega_{ib,y}^b)^2] \Delta z_b \end{pmatrix}$$

Όπου  $\Delta x_b$ ,  $\Delta y_b$  και  $\Delta z_b$  είναι η μετατόπιση κάθε επιταχυνσιόμετρου από το σημείο αναφοράς κατά μήκος του άξονα. Καθώς τα εκτοπίσματα είναι γνωστά από τον σχεδιασμό της Μονάδας Αδρανειακών Μετρήσεων και οι γωνιακές ταχύτητες μετρούνται από τα γυροσκόπια, αυτό αντισταθμίζεται εύκολα μέσα στον επεξεργαστή της MAM.



**Εικόνα 17: Τοποθέτηση επιταχυνσιόμετρων σε σχέση με το σημείο αναφοράς της MAM**

## 2.4 Χαρακτηριστικά Σφαλμάτων

Όλα τα είδη επιταχυνσιόμετρων και γυροσκοπίων παρουσιάζουν biases, συντελεστή κλίμακας, σφάλμα εγκάρσιας σύζευξης και τυχαίο θόρυβο σε ορισμένο βαθμό. Μεγαλύτερου βαθμού σφάλματα και εγκάρσια ευαισθησία σε γωνιακή ταχύτητα-επιτάχυνσης μπορεί να παρουσιαστούν, ανάλογα με τον τύπο του αισθητήρα.

Κάθε πηγή συστηματικών σφαλμάτων έχει τέσσερις συνιστώσες: μία σταθερά (a fixed contribution), η εναλλαγή της θερμοκρασίας (temperature-dependent), a run-to-run variation, και an in-run variation. Η συνεισφορά που παρουσιάζουν κάθε φορά διορθώνεται μέσω του επεξεργαστή της MAM, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα βαθμονόμησης του εργοστασίου. Ο παράγοντας της temperature-dependent μπορεί επίσης να διορθωθεί από τη MAM χρησιμοποιώντας τα δεδομένα βαθμονόμησης του εργοστασίου. Το run-to-run variation έχει σαν συνεισφορά στην πηγή σφάλματος η οποία είναι διαφορετική κάθε φορά που ο αισθητήρας χρησιμοποιείται αλλά παραμένει σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια της χρήσης. Δε μπορεί να διορθωθεί από τον επεξεργαστή της MAM, αλλά μπορεί να βαθμονομηθεί από την ευθυγράμμιση με το INS (Inertial Navigation System) και/ή ενσωματώνοντας αλγόριθμους κάθε φορά που η MAM χρησιμοποιείται. Τέλος, η συνεισφορά του in-run variation αλλάζει σταδιακά κατά τη διάρκεια της χρήσης του αισθητήρα. Δε μπορεί να διορθωθεί από τον επεξεργαστή της MAM ή από κάποια διαδικασία ευθυγράμμισης. Στη θεωρία, μπορεί να διορθωθεί με την ενσωμάτωση άλλων αισθητήρων πλοήγησης, αλλά είναι δύσκολο να τηρηθεί στην πράξη.

Αναφέροντας την απόδοση των σφαλμάτων διαφορετικών τύπων και βαθμών των αδρανειακών αισθητήρων, η συνεισφορά των βαθμονομημένων σφαλμάτων από το εργοστάσιο, που διορθώνονται μέσα στη MAM, έχουν παραμεληθεί, καθώς υπάρχει η μετά-βαθμονόμηση των αδρανειακών αισθητήρων η οποία είναι κρίσιμη στο καθορισμό της απόδοσης στην αδρανειακή πλοήγηση και στο σχεδιασμό ενός ενσωματωμένου συστήματος πλοήγησης. Να σημειωθεί ότι εκτός από τη συμβολή του run-to-run και του in-run στο σφάλμα, υπάρχει επίσης και η υπολειμματική σταθερά και temperature-dependent που συμβάλουν στα υπόλοιπα που μένουν (ξεφεύγουν, δεν εντοπίζονται) κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης. (Groves, 2013)

### 2.4.1 Biases

Το bias είναι ένα σταθερό σφάλμα που εμφανίζεται σε όλα τα επιταχυνσιόμετρα και γυροσκόπια. Είναι ανεξάρτητο της εφαρμοσμένης δύναμης και της γωνιακής ταχύτητας. Κάποιες φορές αποκαλείται g-ανεξάρτητο bias για να υπάρξει ο διαχωρισμός του από το g-εξαρτημένο bias, όπως αυτό επεξηγεται στο κεφάλαιο 2.4.4. Στις πλείστες των περιπτώσεων, το bias είναι ο πιο βασικός όρος στο ολικό σφάλμα ενός αδρανειακού οργάνου. (UKOOA, 1994)

Το biases του επιταχυνσιόμετρου και του γυροσκοπίου μιας MAM, σύμφωνα με τη βαθμονόμηση των αισθητήρων, συμβολίζεται ως τα διανύσματα  $b_a = (b_{a,x}, b_{a,y}, b_{a,z})$  και  $b_g = (b_{g,x}, b_{g,y}, b_{g,z})$ , αντίστοιχα. Τα σφάλματα μιας MAM εκφράζονται πάντα στους άξονες του σώματος, ούτως ώστε ο εκθέτης  $b$  να μπορεί να παραλείπεται. Όπου  $b_{a,x}$  είναι το biases του επιταχυνσιόμετρου κατά τον άξονα  $x$  του κυρίως σώματος και όπου  $b_{g,y}$  το biases του γυροσκοπίου κατά τον άξονα  $y$  κτλ. Για τους αισθητήρες λοξής διαμόρφωσης, το biases μπορεί και πάλι να εκφραστεί ως διάνυσμα τριών συνιστωσών, αλλά οι συνιστώσες δεν αναφέρονται σε κάποιο ξεχωριστό όργανο.

Κάποιες φορές είναι βολικός ο διαχωρισμός του biases σε στατικό ( $b_{as}, b_{gs}$ ) και δυναμικό ( $b_{ad}, b_{gd}$ ), όπου

$$b_a = b_{as} + b_{ad} \quad b_g = b_{gs} + b_{gd}$$

Η στατική συνιστώσα είναι γνωστή και ως σταθερό bias, turn-on bias ή bias repeatability, συμπεριλαμβανομένου του run-to-run variation of each instrument bias συν το υπόλοιπο bias που απομένει μετά τη βαθμονόμηση. Είναι σταθερό σε ολόκληρη τη διάρκεια χρήσης της MAM, αλλά διαφέρει από χρήση σε χρήση. Η δυναμική συνιστώσα γνωστή και ως in-run bias variation και bias instability (στιγμιαίο bias), αλλάζει κάθε περίοδο της τάξης του λεπτού και ενσωματώνει το υπόλοιπο temperature-dependent bias που απομένει μετά τη βαθμονόμηση. Το δυναμικό bias είναι περίπου δέκα της εκατό του στατικού. (Groves, 2013)

Το biases του επιταχυνσιόμετρου και του γυροσκοπίου συνήθως δεν αναφέρεται σε μονάδες του συστήματος S.I. Τα biases του επιταχυνσιόμετρου εισάγονται μέσα σε όρους της επιτάχυνσης της βαρύτητας ( $g$ ), όπου  $1g = 9.80665 \text{ m s}^{-2}$ , σημειωμένου πως η επιτάχυνση της βαρύτητας αλλάζει αναλόγως με την τοποθεσία. Για το biases του γυροσκοπίου, χρησιμοποιούνται οι μονάδες μετρήσεις, μοίρες ανά ώρα, όπου

$1^\circ/\text{hr} = 4.848 \times 10^{-6} \text{ rad s}^{-1}$ , εκτός από τα γυροσκόπια χαμηλής ακρίβειας όπου χρησιμοποιούνται οι μοίρες ανά δευτερόλεπτο. Ο παρακάτω πίνακας δίνει το biases των επιταχυνσιομέτρων και των γυροσκοπίων αναλόγως της τάξης της MAM.

Τάξη της MAM	Bias Επιταχυνσιόμετρου		Bias Γυροσκοπίου	
	mg	$\text{ms}^{-2}$	$^\circ/\text{hr}$	$\text{rad s}^{-1}$
<b>Marine</b>	0.01	$10^{-4}$	0.001	$5 \times 10^{-9}$
<b>Aviation</b>	0.03–0.1	$3 \times 10^{-4} - 10^{-3}$	0.01	$5 \times 10^{-8}$
<b>Intermediate</b>	0.1–1	$10^{-3} - 10^{-2}$	0.1	$5 \times 10^{-8}$
<b>Tactical</b>	1–10	$10^{-2} - 10^{-1}$	1–100	$5 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-4}$
<b>Automotive</b>	>10	$>10^{-1}$	>100	$>5 \times 10^{-4}$

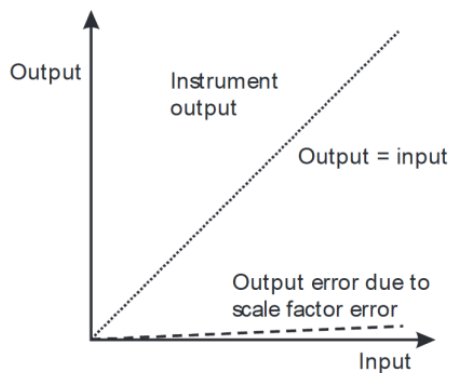
**Πίνακας 2: Bias αδρανειακών αισθητήρων αναλόγως της τάξης**

Τα εκκρεμή επιταχυνσιόμετρα έχουν (ή παίρνουν) ένα μεγάλο εύρος απόδοσης, ενώ τα Επιταχυνσιόμετρα Ακτίνας-Δόνησης (VBA) έχουν ένα biases από 0.1 mg και άνω. Τα επιταχυνσιόμετρα MEMS, που χρησιμοποιούν και τις δύο τεχνικές παρουσιάζουν μεγαλύτερα biases. Τα γυροσκόπια ring laser εκτίθενται σε ένα χαμηλό biases της τάξης του  $0.001^\circ/\text{hr}$ . Τα IFOGs συνήθως έχουν biases από 0.01 έως  $100^\circ/\text{hr}$ . Τα vibratory-γυροσκόπια έχουν biases από  $1^\circ/\text{hr}$  έως  $1^\circ/\text{s}$ , ενώ τα γυροσκόπια περιστρεφόμενης μάζας εκτίθενται σ' όλο το εύρος απόδοσης. (Groves, 2007)

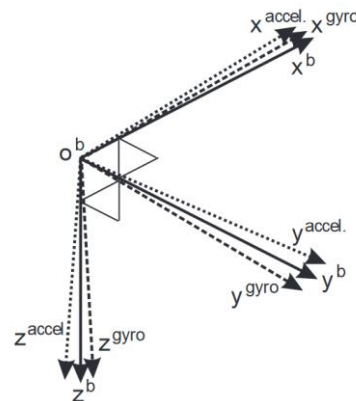
#### 2.4.2 Σφάλματα συντελεστή κλίμακας και εγκάρσιας σύζευξης

Το σφάλμα του συντελεστή κλίμακας εξαρτάται από τις μονάδες εισόδου/εξόδου του οργάνου και από τη μετατροπή των μονάδων μέτρησης από τη MAM. Αυτό απεικονίζεται στην Εικόνα 18. Το σφάλμα του επιταχυνσιομέτρου σε σχέση με το σφάλμα του συντελεστή κλίμακας είναι αναλογικό με την πραγματική δύναμη κατά τον ευαίσθητο άξονα, ενώ το σφάλμα του γυροσκοπίου σε σχέση με το σφάλμα του συντελεστή κλίμακας είναι αναλογικό με τη γωνιακή ταχύτητα κατά τον ευαίσθητο άξονα. Το σφάλμα του συντελεστή κλίμακας των επιταχυνσιομέτρων και των γυροσκοπίων χαρακτηρίζονται από τα διανύσματα  $S_a = (S_{a,x}, S_{a,y}, S_{a,z})$  και  $S_g = (S_{g,x}, S_{g,y}, S_{g,z})$  αντίστοιχα.

Τα σφάλματα εγκάρσιας σύζευξης σε όλες τις ΜΑΜ δημιουργούνται από την κακή ευθυγράμμιση των αξόνων, των αδρανειακών αισθητήρων, σε σχέση με τους ορθογώνιους άξονες του σώματος, λόγω των κατασκευαστικών περιορισμών, όπως απεικονίζεται στη Εικόνα 19. Γι' αυτό το λόγο, κάποιιοι συγγραφείς το αναφέρουν ως σφάλμα κακής ευθυγράμμισης. Αυτό καθιστά το κάθε επιταχυνσιόμετρο ευαίσθητο στη δύναμη που εφαρμόζεται σε ένα άξονα κάθετο στον ευαίσθητο άξονα και κάθε γυροσκόπιο ευαίσθητο στη γωνιακή ταχύτητα κατά του άξονες κάθετους στον ευαίσθητο άξονα. Η κακή ευθυγράμμιση των αξόνων προκαλεί επιπλέον σφάλματα συντελεστή κλίμακας, αλλά αυτά είναι δύο έως τέσσερις φορές μικρότερα από τα σφάλματα εγκάρσιας σύζευξης. Στους αισθητήρες vibratory, σφάλματα εγκάρσιας σύζευξης μπορεί να προκληθούν από τη cross-talk ανάμεσα στους αισθητήρες. Το σύμβολο  $m_{\alpha,\beta}$  χρησιμοποιείται για να αποδώσει το cross-coupling coefficient του άξονα  $\beta$  με την δύναμη μετρημένη από το επιταχυνσιόμετρο του άξονα  $\alpha$ , ενώ το  $m_{g,\beta}$  συμβολίζει τη γωνιακή ταχύτητα του άξονα  $\beta$  κατά το γυροσκόπιο του άξονα  $\alpha$ .



Εικόνα 18: Σφάλμα Συντελεστή Κλίμακας



Εικόνα 19: Σφάλμα εγκάρσιας σύζευξης

Το σφάλμα του συντελεστή κλίμακας και της εγκάρσιας σύζευξης σε ένα ονομαστικά τρις-ορθογώνιο επιταχυνσιόμετρο και γυροσκόπιο μπορεί να εκφραστεί από τους ακόλουθους πίνακες:

$$\mathbf{M}_a = \begin{pmatrix} s_{a,x} & m_{a,xy} & m_{a,xz} \\ m_{a,yx} & s_{a,y} & m_{a,yz} \\ m_{a,zx} & m_{a,zy} & s_{a,z} \end{pmatrix} \quad \mathbf{M}_g = \begin{pmatrix} s_{g,x} & m_{g,xy} & m_{g,xz} \\ m_{g,yx} & s_{g,y} & m_{g,yz} \\ m_{g,zx} & m_{g,zy} & s_{g,z} \end{pmatrix}$$

Τα σφάλματα στη μέτρηση της δύναμης και της γωνιακής ταχύτητας σε σχέση με το συντελεστή κλίμακας και της εγκάρσιας σύζευξης είναι επομένως  $M_a f_{ib}^b$  και  $M_g \omega_{ib}^b$ ,

αντίστοιχα. Αυτού του είδους σφάλματα δεν έχουν μονάδες μέτρησης και συνήθως εκφράζονται σε ppm (part per million) ή σαν ποσοστό.

Για την πλειοψηφία των αδρανειακών αισθητήρων αυτού του είδους τα σφάλματα εκκίνονται στο διάστημα από  $10^{-4}$  έως  $10^{-3}$  (100–1 000 ppm). Η βασική εξαίρεση είναι κάποια γυροσκόπια MEMS και ring laser όπου τα σφάλματα παίρνουν την τιμή  $10^{-2}$  (1%), τα οποία παρουσιάζουν μικρά σφάλματα συντελεστή κλίμακας, τυπικά από  $10^{-5}$  έως  $10^{-4}$  (10–100 ppm). Οι αισθητήρες χαμηλού κόστους παρουσιάζουν σημαντικές ασυμμετρίες συντελεστή κλίμακας, όπου τα σχετικά σφάλματα διαφέρουν από θετικές σε αρνητικές αναγνώσεις.

### 2.4.3 Τυχαίος Θόρυβος

Όλοι οι αδρανειακοί αισθητήρες παρουσιάζουν τυχαίο θόρυβο από ένα αριθμό πηγών. Ο ηλεκτρικός θόρυβος περιορίζει την ανάλυση των αδρανειακών αισθητήρων, ιδιαίτερα των αισθητήρων MEMS, όπου το σήμα είναι πολύ αδύνατο. Τα εκκρεμή επιταχυνσιόμετρα και τα γυροσκόπια περιστρεφόμενης μάζας παρουσιάζουν θόρυβο λόγω των μηχανικών ασταθειών. Τα VBAs και γυροσκόπια vibratory μπορεί να παρουσιάσουν συντονισμό υψηλών συχνοτήτων (=high-frequency resonances). Επιπλέον, οι δονήσεις από τα γυροσκόπια περιστρεφόμενης μάζας και κινητήρες δόνησης του RLG μπορεί να προκαλέσουν θόρυβο επιταχυνσιόμετρο. Ο τυχαίος θόρυβος της κάθε MAM συμβολίζεται από τα διανύσματα  $W_a = (W_{a,x}, W_{a,y}, W_{a,z})$  και  $W_g = (W_{g,x}, W_{g,y}, W_{g,z})$  για τα επιταχυνσιόμετρα και τα γυροσκόπια, αντίστοιχα.

Το φάσμα θορύβου του επιταχυνσιόμετρου και του γυροσκοπίου για συχνότητες κάτω από 1Hz είναι περίπου “λευκό”, έτσι η τυπική απόκλιση του μέσου θορύβου της δύναμης και γωνιακής ταχύτητας είναι αντίστροφος ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του μέσου χρόνου. Ο θόρυβος ενός αδρανειακού αισθητήρα συνήθως περιλαμβάνεται μέσα σε όρους του root PSD, και του χρόνου. Η συνήθης μονάδες για τον τυχαίο θόρυβο του επιταχυνσιόμετρου είναι  $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ , (όπου  $1\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}} = 9.80665 \times 10^{-5} \text{m s}^{-1.5}$ ) και  $^{\circ}/\sqrt{\text{hr}}$  ή  $^{\circ}/\text{hr}/\sqrt{\text{Hz}}$  για τον τυχαίο θόρυβο του γυροσκοπίου,  $1^{\circ}/\sqrt{\text{hr}} = 2.909 \times 10^{-4} \text{rad s}^{-0.5}$  και  $1^{\circ}/\text{hr}/\sqrt{\text{Hz}} = 4.848 \times 10^{-6} \text{rad s}^{-0.5}$ . Τα δείγματα της τυπικής απόκλισης του τυχαίου θορύβου λαμβάνονται πολλαπλασιάζοντας τις αντίστοιχες root PSDs με τη ρίζα του ρυθμού δειγματοληψίας ή διαιρώντας με τη ρίζα του διαστήματος δειγματοληψίας. Ο λευκός τυχαίος θόρυβος δεν μπορεί να

βαθμονομηθεί και να αντισταθμιστεί, καθώς δεν υπάρχει καμία συσχέτιση ανάμεσα στις τιμές του παρελθόντος και του μέλλοντος.

Οι αισθητήρες MEMS μπορεί επίσης να παρουσιάσουν θόρυβο υψηλής συχνότητας. Μέσα στο σώμα της MAM, ο μέσος θόρυβος είναι της τάξης του δευτερολέπτου. Παρόλα αυτά αν η MAM περιστρέφεται, ο θόρυβος δεν θα κυμαίνεται στον ίδιο βαθμό μέσα στο σώμα που χρησιμοποιήθηκε για λύση πλοήγησης. Κατά συνέπεια, πρέπει να δίνεται μεγάλη προσοχή στην επιλογή των αισθητήρων για αυστηρά δυναμικές εφαρμογές. Προβλήματα μπορεί να παρουσιαστούν και σε περιβάλλοντα με δονήσεις. Όπου η συχνότητα της εξωτερικής δόνησης είναι όμοια με την ηχηρή συχνότητα του αδρανειακού αισθητήρα, έτσι θα επακολουθήσουν σφάλματα χρονικής συσχέτισης. Σε κάθε άλλη περίπτωση, η αλληλεπίδραση ανάμεσα στη δόνηση και το θόρυβο υψηλής συχνότητας θα προκαλέσει μια αύξηση στο λευκό θόρυβο που παρουσιάζει ο αισθητήρας. Ο θόρυβος υψηλής συχνότητας μπορεί πιθανόν να μειωθεί χρησιμοποιώντας τεχνικές φιλτραρίσματος wavelet ή ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (Artificial Neural Network, ANN). Παρόλα αυτά, οι τεχνικές αυτές μειώνουν το εύρος ζώνης (=bandwidth) του αισθητήρα.

Οι τυχαίοι θόρυβοι των επιταχυνσιομέτρων και των γυροσκοπίων κάποιες φορές περιγράφονται και ως τυχαίοι περίπατοι, το οποίο μπορεί να αποτελέσει πηγή συγχύσεων. Ο τυχαίος θόρυβος στη μέτρηση μιας δύναμης συμβάλει ώστε να προκύψει το σφάλμα του τυχαίου περιπάτου στην επίλυση της αδρανειακής ταχύτητας. Ομοίως, στη μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας ο τυχαίος θόρυβος συμβάλει ώστε να προκύψει το σφάλμα του τυχαίου περιπάτου. Η τυπική απόκλιση ενός τυχαίου περιπάτου είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου ολοκλήρωσης.

Μια άλλη πηγή θορύβου είναι ο κβαντισμός του δίαυλου εξόδου των δεδομένων της MAM. Λέξεις μήκους 16 bits χρησιμοποιούνται συνήθως στην έξοδο της δύναμης και της στροφής μιας MAM τακτικής βαθμίδας,  $\mathbf{u}_{ib}^b$  και  $\mathbf{a}_{ib}^b$ , δίνοντας κβαντικά επίπεδα της τάξης του  $10^{-4} \text{ m s}^{-1}$  και  $2 \times 10^{-6} \text{ rad}$ , αντίστοιχα. Ο εσωτερικός επεξεργαστής της MAM λειτουργεί συνήθως σε μια υψηλότερη ακρίβεια, ώστε τα υπόλοιπα να μεταφέρονται στην επόμενη επανάληψη. Συνεπώς, η τυπική απόκλιση του κβαντικού θορύβου είναι κατά μέσο όρο πάνω από τις διαδοχικές εξόδους της MAM, που αλλάζουν αντιστρόφως ανάλογα με τον αριθμό των δειγμάτων μέχρι ο εσωτερικός κβαντισμός της MAM να φτάσει στο όριο του.



Ο τυχαίος θόρυβος των επιταχυνσιόμετρων παίρνει τιμές από  $20 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$  για τις MAM aviation-grade,  $100 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$  για τις MAM tactical-grade που χρησιμοποιούν εκκρεμή επιταχυνσιόμετρα ή επιταχυνσιόμετρο ακτίνας-δόνησης και  $1,000 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$  για επιταχυνσιόμετρα ακτίνας-δόνησης σιλικόνης.

Τα γυροσκόπια περιστρεφόμενης μάζας παρουσιάζουν λιγότερο τυχαίο θόρυβο της τάξης  $0.002^\circ/\sqrt{\text{hr}}$  από τα γυροσκόπια aviation-grade, ενώ τα tactical-grade παρουσιάζουν τυχαίο θόρυβο της τάξης των  $0.03\text{--}0.1^\circ/\sqrt{\text{hr}}$  ή και περισσότερο.

#### **2.4.4 Περαιτέρω πηγές σφαλμάτων**

Τα επιταχυνσιόμετρα και τα γυροσκόπια παρουσιάζουν επιπλέον σφάλματα λόγω του σχεδιασμού του αισθητήρα.

Τα γυροσκόπια δόνησης και περιστρεφόμενης μάζας παρουσιάζουν μια ευαισθησία σε μία δύναμη, γνωστή ως g-εξαρτημένο bias, η οποία είναι της τάξης μεγέθους της  $1^\circ/\text{hr}/\text{g}$  ( $4.944 \times 10^{-5} \text{ rad m}^{-1} \text{ s}$ ), αλλά μπορεί να φτάσει μέχρι και  $100^\circ/\text{hr}/\text{g}$  για γυροσκόπια σε μονάδες τύπου MEMS βαθμίδας αυτοκινήτου. Τα γυροσκόπια είναι ευαίσθητα στην επιτάχυνση κατά τους τρεις άξονες, έτσι το g-εξαρτημένο bias για ένα γυροσκόπιο χαρακτηρίζεται από έναν πίνακα  $3 \times 3$ ,  $G_g$ .

Οι αδρανειακοί αισθητήρες μπορεί να παρουσιάσουν και μη γραμμικό συντελεστή κλίμακας, ο οποίος διαφέρει από το σφάλμα του συντελεστή κλίμακας, καθώς ο συντελεστής ποικίλει σε σχέση με τη δύναμη επιτάχυνσης και τη γωνιακή ταχύτητα. Η μη γραμμικότητα εκφράζεται ως η διαφοροποίηση του συντελεστή μέσα στο εύρος λειτουργίας του αισθητήρα. Παρόλα αυτά, οι μεγαλύτερες επιρροές από τη γραμμικότητα του συντελεστή κλίμακας συμβαίνουν σε μεγάλες γωνιακές ταχύτητες και δυνάμεις επιτάχυνσης. Αυτού του είδους σφάλματα είναι της τάξης του  $10^{-5}$  για τα RLGs, από  $10^{-4}$  έως  $10^{-3}$  για τους περισσότερους αδρανειακούς αισθητήρες και  $10^{-2}$  για μερικά γυροσκόπια τύπου MEMS.

Τα γυροσκόπια περιστρεφόμενης μάζας και τα εκκρεμή επιταχυνσιόμετρα παρουσιάζουν επίσης σφάλματα μεγαλύτερης τάξης. Τα γυροσκόπια μπορεί να παρουσιάσουν άνισο-ελαστικά ή εξαρτώμενα από τη βαρύτητα ( $g^2$ -dependent) biases, τα οποία είναι ανάλογα των επιταχύνσεων στους άλλους δύο κάθετους άξονες. Τα εκκρεμή επιταχυνσιόμετρα μπορεί να παρουσιάσουν σφάλματα vibropendulous, τα

οποία είναι ανάλογα των επιταχύνσεων κατά τον εκκρεμές και ευαίσθητο άξονα. Είναι επίσης ευαίσθητα σε γωνιακή επιτάχυνση κατά τον άξονα της άρθρωσης.

#### 2.4.5 Μοντέλα Σφαλμάτων

Οι παρακάτω εξισώσεις δείχνουν πώς οι κύριες πηγές σφαλμάτων συμβάλουν στα αποτελέσματα των επιταχυνσιομέτρων και των γυροσκοπίων:

$$\begin{aligned}\tilde{f}_{ib}^b &= b_a + (I_3 + M_a)f_{ib}^b + w_a \\ \tilde{\omega}_{ib}^b &= b_g + (I_3 + M_g)\omega_{ib}^b + G_g f_{ib}^b + w_g\end{aligned}$$

Όπου  $\tilde{f}_{ib}^b$  και  $\tilde{\omega}_{ib}^b$  είναι τα εξαγόμενα διανύσματα δύναμης και γωνιακής ταχύτητας από τη MAM, τα  $f_{ib}^b$  και  $\omega_{ib}^b$  είναι αληθή ομόλογα και ο  $I_3$  είναι ένας μοναδιαίος πίνακας 3x3. Τα ολικά σφάλματα των επιταχυνσιομέτρων και των γυροσκοπίων είναι:

$$\begin{aligned}\delta f_{ib}^b &= \tilde{f}_{ib}^b - f_{ib}^b \\ \delta \omega_{ib}^b &= \tilde{\omega}_{ib}^b - \omega_{ib}^b\end{aligned}$$

Όπου υπάρχουν εκτιμήσεις για τα biases μπορούν να εφαρμοστούν διορθώσεις:

$$\begin{aligned}\hat{f}_{ib}^b &= +(I_3 + M_a)^{-1}\tilde{f}_{ib}^b - \hat{b}_a \\ \hat{\omega}_{ib}^b &= +(I_3 + M_g)^{-1}\tilde{\omega}_{ib}^b - \hat{b}_g - \hat{G}_g \hat{f}_{ib}^b\end{aligned}$$

το  $\hat{\cdot}$  χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει μια εκτίμηση και εφαρμόζοντας μια δυναμική σειρά

$$(I_3 + \hat{M}_{a/g})^{-1} = I_3 + \sum_r \binom{-1}{r} \hat{M}_{a/g}^r \approx I_3 - \hat{M}_{a/g} + \hat{M}_{a/g}^2$$

Παρόμοιες συναρτήσεις χρησιμοποιούνται κατά τη βαθμονόμηση μέσα στον επεξεργαστή της MAM, σε αυτή τη περίπτωση, τα μετρημένα σφάλματα είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. (Groves, 2007)

### **3 Μαγνητόμετρα**

Ένα μαγνητόμετρο μετρά τη δύναμη του μαγνητικού πεδίου της γης στις τρεις διαστάσεις. Αυτές οι μετρήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προσδιοριστεί η σχέση του μαγνητόμετρου σε σχέση με το μαγνητικό βορρά της Γης.

Οι μονάδες αδρανειακών μετρήσεων καταγράφουν την κίνηση του χρήστη σε σχέση με το περιβάλλον, χωρίς την ανάγκη από σήμα ραδιο-εντοπισμού. Παρόλα αυτά, για να υπάρχει αδρανειακή πλοήγηση πρέπει να παρέχεται μια αρχική θέση υπολογισμένη από ένα άλλο σύστημα.

#### **3.1 Υπολογισμός Προσανατολισμού**

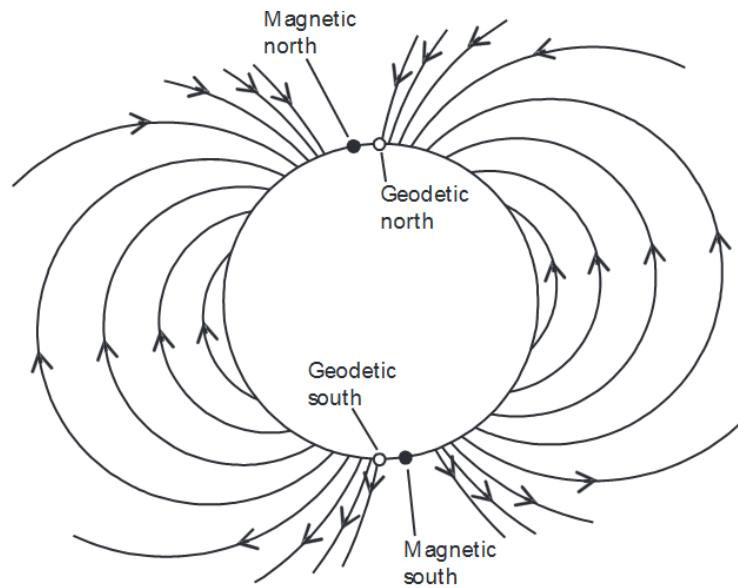
Υπάρχουν πολλοί τρόποι καθορισμού του προσανατολισμού σε μία θέση. Για παράδειγμα ο προσανατολισμός μπορεί να καθοριστεί από τις μετρήσεις της γωνιακής ταχύτητας, έχοντας ένα αρχικό προσανατολισμό από ένα δέκτη GNSS. Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η καταγραφή του roll and pitch με τη χρήση του επιταχυνσιόμετρου, καθώς και ο καθορισμός του προσανατολισμού με τη χρήση ενός μαγνητικού αισθητήρα.

##### **3.1.1 Επιπεδοποίηση**

Τα συστήματα προσανατολισμού pitch and roll μιας λύσης αδρανειακής πλοήγησης συνήθως προετοιμάζονται με τη χρήση της επιπεδοποίησης. Το τρι-αξονικό επιταχυνσιόμετρο χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό της διεύθυνσης της επιτάχυνσης λόγω της βαρύτητας, το οποίο δηλώνει τον κάθετο άξονα της τοπικής πλοήγησης.

##### **3.1.2 Μαγνητικός Προσανατολισμός**

Το γεωμαγνητικό πεδίο της Γης από το μαγνητικό βόρειο στο μαγνητικό νότιο πόλο, παίρνει την αντίθετη πορεία από ότι τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας (Εικόνα 20). Με αποτέλεσμα το μαγνητικό πεδίο να είναι κάθετο στους πόλους και οριζόντιο στον ισημερινό. Οι μαγνητικοί πόλοι κινούνται αργά με το πέρασμα του χρόνου. Το 2005 ο Βόρειος πόλος είχε γεωγραφικό πλάτος  $82,7^\circ$  και γεωγραφικό μήκος  $-114,4^\circ$ , με τον Νότιο πόλο να έχει γεωγραφικό πλάτος  $-64,5^\circ$  και γεωγραφικό μήκος  $137,9^\circ$ , με αποτέλεσμα το μαγνητικό πεδίο να έχει κλίση  $10^\circ$  σε σχέση με τον άξονα περιστροφής της Γης. (Groves, 2007)



**Εικόνα 20: Γεωμαγνητικό πεδίο της Γης**

Ένα μαγνητικό πεδίο περιγράφεται από το διάνυσμα της ροής, τέτοια ώστε, η δύναμη ανά μονάδα μήκους λόγω της μαγνητικής επαγωγής, είναι προϊόν παραγόμενο από το διάνυσμα της ροής. Η μονάδα μέτρησης στο SI για τη μαγνητική ροή είναι το Tesla (T), όπου  $1\text{T}=1\text{N}/(\text{A}\cdot\text{m})$ . Ο σταθερός συμβολισμός της έντασης της μαγνητικής ροής είναι το  $B$ .

Η πυκνότητα ροής κυμαίνεται από  $30\mu\text{T}$  στον ισημερινό και  $60\mu\text{T}$  στους πόλους, ενώ η “βουτιά” γίνεται στο μαγνητικό πόλο με  $10^\circ$  από τον γεωδαιτικό πόλο. Αυτή η γωνιά απόκλισης δίνει τον φορέα του μαγνητικού πεδίου σε σχέση με τον αληθινό βόρειο πόλο και αποτελεί μόνο μία από τις τρεις παραμέτρους που χρειάζονται για καθορισμό του προσανατολισμού ενός χρήστη μέσω μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου. Μπορεί να υπολογιστεί ως συνάρτηση θέσης και χρόνου χρησιμοποιώντας παγκόσμια μοντέλα, όπως το 195-coefficient International Geomagnetic Reference Field (IGRF) ή το 248-coefficient U.S./U.K. World Magnetic Model (WMM). Τα παγκόσμια μοντέλα έχουν τυπική ακρίβεια της τάξης της  $0,5^\circ$ , αλλά σε κάποια μέρη παρουσιάζουν αποκλίσεις μερικών μοιρών. Υψηλής ακρίβειας εθνικά μοντέλα είναι διαθέσιμα μόνο για μερικές χώρες. Βραχυπρόθεσμα, δημιουργούνται προσωρινές διακυμάνσεις στο μαγνητικό πεδίο λόγω των μαγνητικών καταιγίδων που προκαλούνται από την ηλιακή δραστηριότητα.

Τα μαγνητόμετρα μετρούν την ολική μαγνητική ροή, που υπολογίζεται από το δείκτη  $m$ , ο οποίος επιλύεται κατά τους άξονες του αισθητήρα. Έτσι οι μετρήσεις του μαγνητόμετρου υπολογίζονται από

$$m_m^b = C_n^b \begin{pmatrix} \cos a_{nm} & \cos \gamma_{nm} \\ \sin a_{nm} & \cos \gamma_{nm} \\ & \sin \gamma_{nm} \end{pmatrix} B_m$$

όπου  $B_m$ ,  $a_{nm}$  και  $\gamma_{nm}$  είναι αντίστοιχα η ένταση, κλίση, και βουτιά της συνολικής μαγνητικής ροής. (Groves, 2013)

### 3.1.3 Ολοκληρωμένος Υπολογισμός του Προσανατολισμού

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο μαγνητικός προσανατολισμός είναι αντικείμενο επιρροής σφαλμάτων από τοπικές μαγνητικές ανωμαλίες. Έτσι ένας πιο σταθερός προσανατολισμός μπορεί να επιτευχθεί με την υποβοήθηση της μαγνητικής πυξίδας με ένα γυροσκόπιο ή ένα διαφορικό οδόμετρο. Αυτοί οι αισθητήρες παρέχουν ακριβείς μετρήσεις σε βραχυπρόθεσμες αλλαγές στον προσανατολισμό αλλά είναι επιρρεπείς σε μακροπρόθεσμες ολισθήσεις. Έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εξομαλύνουν το θόρυβο της μαγνητικής πυξίδας, ενώ η μαγνητική πυξίδα βαθμονομεί την ολίσθηση του γυροσκοπίου/odometer.

Οι αισθητήρες μπορούν να υποβοηθηθούν με ένα φίλτρο ομαλοποίησης

$$\hat{\psi}_{nb}(t) = W_m \hat{\psi}_{nb,m}(t) + (1 - W_m) [\hat{\psi}_{nb}(t - T) + \tilde{\omega}_{ib,z}^b \tau]$$

όπου  $\hat{\psi}_{nb}$  είναι integrated heading,  $\hat{\psi}_{nb,m}$  η αληθής ένδειξη προσανατολισμού από τη μαγνητική πυξίδα,  $\tilde{\omega}_{ib,z}^b$  είναι η γωνιακή ταχύτητα από το γυροσκόπιο, και  $W_m$  είναι το βάρος της μαγνητικής πυξίδας.

Ένα γυροσκόπιο μονού άξονα είναι χρήσιμο μόνο για να μετρά τις αλλαγές στον προσανατολισμό όταν ο αισθητήρας είναι επίπεδος.

## 3.2 Κατηγορίες Μαγνητόμετρων

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι μαγνητόμετρων: τα διανυσματικά μαγνητόμετρα, τα οποία μετρούν τις μαγνητικές συνιστώσες ενός μαγνητικού πεδίου, και τα μαγνητόμετρα συνολικού πεδίου ή βαθμωτά μαγνητόμετρα, που μετρούν το μέγεθος του διανύσματος του μαγνητικού πεδίου. Μερικά μαγνητόμετρα, που χρησιμοποιούνται για να μελετήσουν το μαγνητικό πεδίο της Γης, εκφράζουν τις

μαγνητικές συνιστώσες ως όρους απόκλισης (η γωνία μεταξύ της οριζόντιας συνιστώσας, του διανύσματος, και του μαγνητικού βορρά) και κλίσης (η γωνία μεταξύ του πεδίου και της οριζόντιας επιφάνειας).

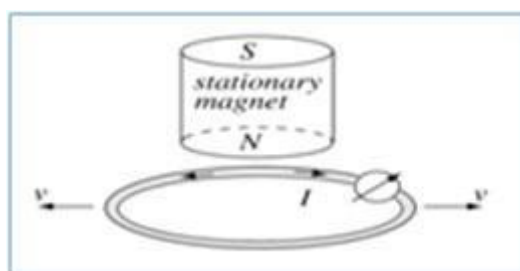
Τα απόλυτα μαγνητόμετρα μετρούν την απόλυτη τιμή του μαγνητικού πεδίου, χρησιμοποιώντας μία εσωτερική βαθμονόμηση ή γνωστές φυσικές σταθερές του μαγνητικού αισθητήρα. Τα σχετικά μαγνητόμετρα μετρούν το μέγεθος του μαγνητικού πεδίου σε σχέση με ένα σταθερό, αλλά μη βαθμονομημένο baseline. Τα σχετικά μαγνητόμετρα, χρησιμοποιούνται για να μετρούν της μεταβολές στο μαγνητικό πεδίο.

Τα μαγνητόμετρα ταξινομούνται επίσης βάση της κατάστασης τους ή της χρήσης τους. Τα σταθερά μαγνητόμετρα, τοποθετούνται σε σταθερή θέση και λαμβάνουν μετρήσεις ενώ είναι αμετακίνητα. Τα φορητά μαγνητόμετρα, κατασκευασμένα για να χρησιμοποιούνται ενώ βρίσκονται σε κίνηση και μπορούν να μεταφέρονται με το χέρι ή με ένα κινούμενο όχημα. Τα μαγνητόμετρα εργαστηρίου χρησιμοποιούνται για να μετρούν το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό τους και είναι τυπικά σταθερά. Τα ερευνητικά μαγνητόμετρα χρησιμοποιούνται στις μετρήσεις των μαγνητικών πεδίων σε γεωμαγνητικές έρευνες, τα οποία μπορεί να είναι σταθερά σε βάσεις ή κινητά.

(Groves, 2013)

### 3.2.1 Μαγνητόμετρο Πηνίου

Σύμφωνα με το νόμο του Faraday, το πηνίο είναι η βασική μέθοδος ανίχνευσης του μαγνητικού πεδίου. Ο νόμος του Faraday, ορίζει ότι η επαγόμενη ηλεκτρομαγνητική δύναμη σε κάθε κλειστό πηνίο (Εικόνα 21) είναι ίση με το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής μέσα από το κύκλωμα.



Εικόνα 21: Ροή σε κλειστό πηνίο

Ένα πηνίο με N σπείρες τοποθετημένες γύρω από ένα μαγνητικό υλικό με μαγνητική διαπερατότητα  $\mu r$  και ροή  $\phi$  μέσα από αυτό, η ηλεκτρομαγνητική δύναμη που επάγεται στο πηνίο είναι:

$$E = -N \frac{d\phi}{dt}, \quad \phi = \int \mu_o * \mu_r * B * A * \sin \theta \, ds$$

Where, B = Flux Density  
A = Area of the coil  
 $\theta$  = Angle between the two

Εάν το μαγνητικό πεδίο έχει αρμονική μεταβολή σε σχέση με το χρόνο, τότε η επαγόμενη τάση είναι ανάλογη προς τη συχνότητα του μαγνητικού πεδίου.

Έτσι, η ηλεκτρομαγνητική δύναμη που προκαλείται εξαρτάται από την περιοχή του πηνίου. Η ευαισθησία ενός μικρού πηνιακού μαγνητόμετρου εξαρτάται από τον αριθμό των σπειρών του. Αυτό χρησιμοποιείται για να ανιχνεύσει μόνο τις μεταβολές στο πεδίο (λόγω κίνησης ή λόγω της AC φύσης του πεδίου). Επειδή συνήθως πρέπει να μετρηθεί το B, αντί το  $dB/dt$ , ένας ολοκληρωτής (integrator) χρησιμοποιείται συνήθως για να ληφθεί σήμα ανάλογο προς το μαγνητικό πεδίο B.

Αυτό είναι χρήσιμο σε τομείς όπως η ανίχνευση ναρκών ή για ανίχνευση θαμμένων αντικειμένων (ανίχνευση σωλήνων, "θησαυρός" κνήγι, κλπ). Χρησιμοποιείται συχνά λόγω της απλότητας του. (EngineersGarage, 2012)

## 4 Δέκτες και συστήματα GNSS

Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από ένα αριθμό δορυφόρων, σε συνεχή τροχιά γύρω από τη γη, οι οποίοι παρέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες για τον υπολογισμό της θέσης ενός χρήστη. Έτσι με αυτές τις αρχές, κατά νου, η επιτροπή του Ο.Η.Ε. για την Εξερεύνηση και τις Ειρηνικές Χρήσεις του Διαστήματος έδωσε τον ακόλουθο ορισμό για τα GNSS: «Δορυφορικά συστήματα ράδιο-εντοπισμού τα οποία παρέχουν 24ωρη πληροφορία 3Δ θέσης, ταχύτητας και χρόνου, κάτω από οποιοσδήποτε καιρικές συνθήκες, σε κατάλληλα εξοπλισμένους χρήστες σε οποιοδήποτε σημείο πάνω στην επιφάνεια της Γης, καθώς και σε χρήστες στον αέρα και στο διάστημα».

Για να χρησιμοποιηθεί ένα GNSS από ένα χρήστη χρειάζεται αυτός να είναι εξοπλισμένος με ένα δέκτη, ο οποίος θα λαμβάνει τα σήματα των δορυφόρων και θα παρέχει στον χρήστη την κατάλληλη πληροφορία. (Φωτίου and Πικριδάς, 2012)

### 4.1 Υφιστάμενα και Αναπτυσσόμενα συστήματα GNSS

Συνολικά σήμερα υπάρχουν τέσσερα GNSS, εκ των οποίων τα δύο είναι πλήρους επιχειρησιακής ικανότητας (Full Operational Capability – FOC), ενώ τα άλλα δύο βρίσκονται ακόμα στο αρχικό τους στάδιο. Τα τέσσερα GNSS αποτελούνται από το Αμερικάνικο GPS, το Ρωσικό GLONASS, το Κινεζικό GOMPASS/BEIDOU και το Ευρωπαϊκό Galileo.

#### 4.1.1 Σύστημα GPS

Το NAVSTAR GPS σχεδιάστηκε κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '70, και αναπτύχθηκε τη δεκαετία του '80, και έγινε πλήρως επιχειρησιακό στα μέσα της δεκαετίας του '90. Αποτελεί κατά κόρων ένα στρατιωτικό σύστημα πλοήγησης το οποίο παρέχει όμως υπηρεσίες χαμηλότερης ακρίβειας για πολιτική χρήση.

Αποτελείται από τρία τμήματα: το τμήμα του διαστήματος, το τμήμα Επίγειου Ελέγχου και το τμήμα των Χρηστών. Το τμήμα του Διαστήματος αποτελείται από 24 δορυφόρους σε συνεχή λειτουργία, οι οποίοι παρέχουν παγκόσμια κάλυψη μέσω 6 τροχιακών επιπέδων (4 δορυφόροι ανά τροχιακό επίπεδο). Οι δορυφόροι αυτοί πετούν με μέση ακτίνα τροχιάς ~26500Km, με μέσο ύψος τροχιάς ~20200Km, με κλίση τροχιακού επιπέδου 55° και έχουν περίοδο τροχιάς 11hr 58'.



Το τμήμα Ελέγχου βρίσκεται σε μία συνεχή αμφίδρομη επικοινωνία με τους δορυφόρους. Μέσο αυτής της επικοινωνίας στέλλονται συνεχώς δεδομένα, από και προς τους δορυφόρους, με αποτέλεσμα ένα καλύτερο υπολογισμό των τροχιών και ο συγχρονισμός των ρολογιών των δορυφόρων. Επίσης γίνεται η μετάδοση διορθώσεων και του μηνύματος πλοήγησης.

Τέλος το τμήμα Χρηστών αποτελείται από εκατοντάδες χιλιάδες χρήστες, της ασφαλούς GPS και Ακριβής Υπηρεσίας Εντοπισμού Θέσης, οι οποίοι είναι στρατιωτικοί των ΗΠΑ και των συμμαχικών κρατών. Επίσης υπάρχουν ακόμα δέκα εκατομμύρια χρήστες της Βασικής Υπηρεσίας Εντοπισμού, οι οποίοι είναι πολίτες και επιστήμονες από όλο τον κόσμο. Όλοι όμως οι πιο πάνω είναι κατάλληλα εξοπλισμένοι με ένα δέκτη GNSS. (“GPS-703-GGG.pdf,” n.d.)

#### **4.1.2 Σύστημα GLONASS**

Το σύστημα GLONASS δημιουργήθηκε παράλληλα και παρόμοια με το GPS, από την τότε Σοβιετική Ένωση, και ελέγχεται από τις Ρωσικές Διαστημικές Αμυντικές Δυνάμεις και την Ομοσπονδιακή Διαστημική Υπηρεσία (Roscosmos) της Ρωσίας. Το πρόγραμμα είχε την έναρξη του το 1976 ως ο αντίποδας του GPS.

Ο GLONASS όπως και το GPS παρέχει συνεχή κάλυψη μέσω 24 δορυφόρων (21 + 3 εφεδρικούς), οι οποίοι βρίσκονται σε τρία τροχιακά επίπεδα και πετούν με μέσο υψόμετρο τροχιάς ~19100Km, με κλίση τροχιακού επιπέδου 64,8° και με περίοδο τροχιάς 1h 15. (“Information analytical center of GLONASS and GPS controlling,” n.d.)

#### **4.1.3 Σύστημα BeiDou ή COMPASS**

Αποτελεί τη παρουσία της Κίνας στην υλοποίηση ενός ανεξάρτητου συστήματος προσδιορισμού θέσης, το οποίο άρχισε το 2000 και θα πραγματοποιηθεί σε τρεις φάσεις. Η πρώτη φάση ολοκληρώθηκε το 2003 με τρεις δορυφόρους σε τροχιά, η δεύτερη φάση ολοκληρώθηκε το 2011 με 10 δορυφόρους, οι οποίοι εξυπηρετούν μόνο τη Κίνα και τις γειτονικές περιοχές. Ενώ η τρίτη φάση που βρίσκεται σε εξέλιξη από το 2013 έχει ως στόχο την παροχή παγκόσμιας κάλυψης.

Ο σχηματισμός των δορυφόρων θα αποτελείται από 35 δορυφόρους εκ των οποίων οι πέντε θα είναι σε γεωστατική τροχιά σε ύψος 35785Km. Ενώ οι υπόλοιποι θα βρίσκονται σε τρία τροχιακά επίπεδα, και θα πετούν με μέσο υψόμετρο τροχιάς ~21500Km και θα έχουν κλίση τροχιακού επιπέδου 55°. (“BeiDou Navigation Satellite System - System Introduction,” n.d.) (Φωτίου and Πικριδάς, 2012)

#### 4.1.4 Σύστημα GALILEO

Αποτελεί ένα Πολιτικό Σύστημα (σε αντίθεση με τα υπόλοιπα), το οποίο διαχειρίζεται η Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος και ελέγχεται από τη Διαχειριστική Αρχή για το Ευρωπαϊκό GNSS (GSA – European GNSS Agency).

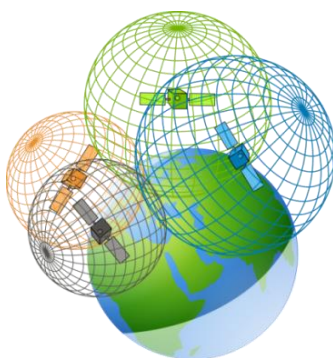
Πρώτο στάδιο για την υλοποίηση του ήταν η απόφαση που είχε ληφθεί το 1999 κατόπιν εισηγήσεων τεσσάρων κρατών μελών της Ε.Ε (Γερμανία, Ιταλία, Γαλλία και Ηνωμένο Βασίλειο). Σε επόμενο στάδιο το 2003 πραγματοποιήθηκε η συμφωνία για τη χρηματοδότηση της πρώτης φάσης του.

Ο σχηματισμός των δορυφόρων θα αποτελείται από 30 δορυφόρους (24 λειτουργικοί + 6 εφεδρικοί). Οι οποίοι θα βρίσκονται σε τρία τροχιακά επίπεδα, και θα πετούν με μέσο υψόμετρο τροχιάς ~23222Km, με κλίση τροχιακού επιπέδου  $55^\circ$ , και με περίοδο τροχιάς 14hr. (esa, n.d.) (Φωτίου and Πικριδάς, 2012)

#### 4.2 Δέκτες GNSS

Ένας δέκτης GNSS αποτελεί μια συσκευή υψηλής τεχνολογίας του οποίου η λειτουργία μπορεί να παρομοιασθεί με αυτή του ραδιοφώνου. Επίσης ο δέκτης αποτελεί τη συσκευή λήψης και καταγραφής των σημάτων των δορυφόρων, καθώς και επεξεργασίας τους για υπολογισμό θέσης και ταχύτητας του χρήστη. Ένα ενιαίο σύστημα δέκτη περιέχει δύο μέρη την κεραία και τον κυρίως δέκτη.

Για τον υπολογισμό θέσης ένας δέκτης, πρέπει να έχει στη διάθεση του τέσσερεις τουλάχιστο δορυφόρους, από τους οποίους θα παίρνει ως δεδομένο τη θέση τους και θα υπολογίζει την απόσταση μεταξύ δέκτη-δορυφόρου για να υπολογίσει τη θέση του ως προϊόν οπισθοτομίας (Εικόνα 22). Δηλαδή η θέση του δέκτη προκύπτει από τη τομή σφαιρών με κέντρα τις θέσεις των δορυφόρων και ακτίνες τις αποστάσεις δορυφόρου-δέκτη.



Εικόνα 22: Υπολογισμός θέσης μέσω συστημάτων GNSS

#### 4.2.1 Η κεραία του δέκτη

Η κεραία μπορεί να είναι εσωτερική, ενσωματωμένη στην ίδια μονάδα με τον κυρίως δέκτη, ή εξωτερική, ανεξάρτητη από τον κυρίως δέκτη. Επίσης κάποιες κεραίες περιλαμβάνουν προενισχυτές χαμηλού θορύβου.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων οι κεραίες δεν πρέπει να επισκιάζονται από φυσικά ή τεχνητά εμπόδια (όπως δέντρα, κτήρια, τοίχους, κάτοπτρα κ.α.). Τα εμπόδια εκτός από την αποκοπή του σήματος βοηθούν στην ανάπτυξη του φαινομένου της πολυανάκλασης, μέσω του οποίου δημιουργούνται λάθος εκτιμήσεις στη θέση του χρήστη. Για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας υπάρχουν ειδικά διαμορφωμένες κεραίες οι οποίες αποκόπτουν το ανακλώμενο σήμα.

Η λειτουργία της κεραίας περιορίζεται στη λήψη του εξασθενημένου δορυφορικού σήματος και την ενίσχυση του μέσω του προενισχυτή, και ακολούθως το διοχετεύει στον κυρίως δέκτη για περαιτέρω επεξεργασία.

#### 4.2.2 Ο κυρίως δέκτης

Στον κυρίως δέκτη γίνεται η συμβολή του εισερχόμενου κύματος με ένα που παράγει ο δέκτης. Έτσι έχουμε τη δημιουργία ενός σήματος με δύο συνιστώσες την  $f_1-f_2$  και την  $f_1+f_2$  από τις οποίες διατηρείτε μόνο η  $f_1-f_2$  που ονομάζεται συχνότητα κτύπων (beat frequency – IF). Στη συνέχεια το IF αποδιαμορφώνεται, για την ανάκτηση των συνιστωσών του, με τη βοήθεια των βρόγχων παρακολούθησης.

Οι βρόγχοι παρακολούθησης έχουν δύο είδη, τους βρόγχους προσδιορισμού καθυστέρησης DLL και τους βρόγχους προσδιορισμού φάσης PLL. Ο DLL με τη συσχέτιση ρεπλικών και με την επίτευξη της συσχέτισης εξάγεται η ψευδοαπόσταση, που αποτελεί μια πρώτη εκτίμηση της απόστασης δέκτη – δορυφόρου, με χαμηλή ακρίβεια. Ακολούθως από το σήμα αφαιρείται ο κώδικας και το εναπομένον σήμα προωθείται στους βρόγχους PLL.

Στους PLL ανακτάται το μήνυμα πλοήγησης το οποίο απομακρύνεται με τη σειρά του και απομένει ο ημιτονοειδής φορέας. Ακόλουθως υπολογίζεται η διαφορά φάσης, και αρχίζει να γίνεται καταμέτρηση ακέραιων κύκλων για υπολογισμό της ασάφειας φάσης και εξαγωγής μίας πιο ακριβής εκτίμησης της απόστασης δέκτη – δορυφόρου.

### 4.2.3 Κατηγορίες δεκτών

Υπάρχουν συνολικά τρία είδη δεκτών ανάλογα με τη χρήση τους και την ακρίβεια τους στο προσδιορισμό θέσης.

Οι δέκτες User ή consumer-grade είναι κινητές μονάδες χειρός οι οποίοι διατίθενται από εμπορικούς λιανοπώλεις και έχουν κατασκευαστεί στην ουσία για αναψυχή ή για γενική εμπορική χρήση. Οι μονάδες αυτές, στην ουσία είναι καλές για εντοπισμό μίας κατά προσέγγιση θέσης για πλοήγηση με μία απλή σήμανση. Το κόστος των μονάδων αυτών κυμαίνεται μέχρι και €600.

Οι δέκτες GIS ή mapping-grade διαφέρουν από τις μονάδες User-grade στο ότι έχουν ενσωματωμένη κεραία υψηλότερης ποιότητας και εφαρμόζουν διαφορικές διορθώσεις που αυξάνουν σημαντικά την ακρίβεια της θέσης. Επίσης μπορεί σε αυτούς να ενωθεί εξωτερική κεραία η οποία μπορεί να λαμβάνει πληροφορίες ταυτόχρονα από περισσότερους δορυφόρους. Κάποιοι από αυτούς μπορούν ακόμα να δέχονται πληροφορίες και σε διαφορετικές συχνότητες (L1 και L2). Οι μονάδες αυτές κυμαίνονται από €500 έως €1000

Τέλος οι δέκτες Geodetic-grade είναι δέκτες που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μεγάλης ακρίβειας. Σε αυτή τη κατηγορία δεκτών υπάρχει η δυνατότητα χρήσης ενός πλήθους μεθόδων και τεχνικών επεξεργασίας των δεδομένων οι οποίες μπορούν να αποδώσουν διάφορες ακρίβειες. Οι δέκτες αυτοί συνήθως πωλούνται σε ζεύγη Base και Rover, για εφαρμογές σχετικού εντοπισμού. Έτσι το κόστος των μονάδων αυτών φτάνει μέχρι και €20 000.

Συνοψίζοντας υπάρχουν οι δέκτες User ή consumer-grade receivers, που είναι δέκτες χαμηλής ακρίβειας μεγαλύτερης από 1 έως 5m. Ακολούθως είναι οι GIS ή mapping-grade receivers με ακρίβεια της τάξης του 1 με 5m. Τέλος είναι οι Geodetic-grade receivers, που είναι δέκτες υψηλής ακρίβειας της τάξης του χιλιοστού. (Φωτίου and Πικριδάς, 2012)

**Πίνακας 3: Ακρίβειες Δεκτών ανά κατηγορία**

<b>Κατηγορία</b>	<b>Ακρίβεια</b>
<b>User or consumer-grade</b>	$\geq 3\text{m}$
<b>GIS or mapping-grade</b>	$\leq 3\text{m}$
<b>Geodetic-grade</b>	$< 1\text{cm}$

(“U.S. Geological Survey - Global Positioning Application and Practice,” n.d.)

### **4.3 Κατηγορίες Εντοπισμού**

Για τον εντοπισμό μιας θέσης με τη χρήση ενός δέκτη GNSS υπάρχουν πολλοί τρόποι και μέθοδοι οι οποίοι εκτελούνται αναλόγως των απαιτήσεων της εργασίας σε ακρίβεια και από τον διαθέσιμο εξοπλισμό. Έτσι υπάρχουν τρεις κατηγοριοποιήσεις: αναλόγως της σχεσιακής κατάστασης του δέκτη όπου έχουμε τους απόλυτους και σχετικούς εντοπισμούς, αναλόγως του χρόνου επίλυσης των μετρήσεων του δέκτη σε πραγματικό χρόνο ή με μετεπεξεργασία και τέλος αναλόγως της κινηματικής κατάστασης του δέκτη όπου έχουμε τους στατικούς και κινηματικούς εντοπισμούς.

Στον εντοπισμό δεν υπάρχει κάποιος κανόνας για το ποια μέθοδος πρέπει να χρησιμοποιείται. Όλες οι πιο πάνω κατηγορίες χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό ώστε να έχουμε εντοπισμό της θέσης έτσι ο κάθε μηχανικός επιλέγει ποια μέθοδο θα εκτελέσει αναλόγως των απαιτήσεων της εργασίας.

#### **4.3.1 Στατικός Εντοπισμός**

Ο στατικός εντοπισμός ήταν η πρώτη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στο πεδίο και εξακολουθεί να είναι μία από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές που χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα.

Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την επίλυση συστηματικών σφαλμάτων μέσω συστηματικών μετρήσεων σε σταθερό σημείο για μία εκτεταμένη χρονική περίοδο. Σε ένα στατικό-σχετικό εντοπισμό όπου έχουμε δύο δέκτες σε ταυτόχρονη λειτουργία η περίοδος αυτή είναι από 30 λεπτά έως 4 ώρες, αναλόγως του μεγέθους της βάσης (το διάστημα που συνδέει τους δύο δέκτες).

Επίσης υπάρχει και γρήγορος στατικός εντοπισμός όπου χρειάζονται λίγες χρονικές περίοδοι σε αντίθεση με άλλες στατικές μεθόδους. (El-Rabbany;, 2006) (“U.S. Geological Survey - Global Positioning Application and Practice,” n.d.)

#### **4.3.2 Κινηματικός Εντοπισμός**

Σε κινηματικό εντοπισμό η πιο διαδεδομένη μέθοδος είναι η RTK (Real Time Kinematic) όπου ο δέκτης χρησιμοποιεί σχετικό εντοπισμό και βρίσκεται σε κίνηση. Αυτή η μέθοδος απαιτεί τουλάχιστο ένα στατικό δέκτη αναφοράς και ένα δέκτη σε κίνηση, ο οποίος ονομάζεται Rover. Επίσης με αυτή τη διαδικασία δεν χρειάζεται η μετεπεξεργασία των δεδομένων για επίλυση θέσης.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων με RTK ένας πομπός ο οποίος είναι ενωμένος με τον δέκτη αναφοράς αναμεταδίδει τη θέση του στο Rover δίνοντας του τη δυνατότητα να ελέγξει την ποιότητα των μετρήσεων του και να τις διορθώσει.

Όπως έχει προαναφερθεί οι εντοπισμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε όποιο συνδυασμό χρειάζεται. Έτσι σε κινηματικό εντοπισμό υπάρχουν πολλές μέθοδοι όπως την RTK. Όμως υπάρχει ακόμα μία διαδεδομένη μέθοδος κινηματικού εντοπισμού, η PPK (Post-Processed Kinematic), η οποία είναι όμοια με τη RTK, με τη διαφορά ότι αυτή χρησιμοποιεί πιο ακριβείς εφημερίδες για την τροχιά του δορυφόρου, οι οποίες δεν είναι άμεσα διαθέσιμες. Επίσης η PPK χρησιμοποιεί ένα πιο ακριβές μοντέλο επίλυσης των μετρήσεων, το οποίο χρειάζεται αρχικά τουλάχιστο 8 λεπτά στατικών μετρήσεων ούτως ώστε να γίνει η λεγόμενη αρχικοποίηση (initialization), η οποία βοηθά σε καλύτερο προσδιορισμό της ασάφειας φάσης. Στο σημείο αυτό να σημειωθεί πως κάθε φορά που γίνεται αποκοπή του σήματος κατά την κίνηση του δέκτη χρειάζεται νέα αρχικοποίηση.

**Πίνακας 4: Ακρίβειες Εντοπισμού ανά κατηγορία**

<b>Positioning Mode</b>	<b>Typical Horizontal Accuracy (5 SVs, PDOP&lt;4)</b>	<b>Maximum Operating Range</b>
<b>Static</b>	Horizontal: 5mm + 1 ppm Vertical: 10 mm + 1 ppm	Several 100 km depending on satellite geometry
<b>Real-time Kinematic</b>	Horizontal 1 cm + 2 ppm Vertical: 2 cm + 2 ppm	Recommended: <10 km Maximum: 40 km Usually dependent on communication link

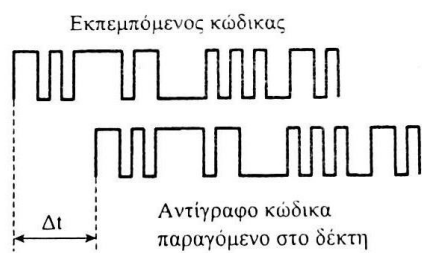
(“U.S. Geological Survey - Global Positioning Application and Practice,” n.d.)

## 4.4 Μετρήσεις GNSS

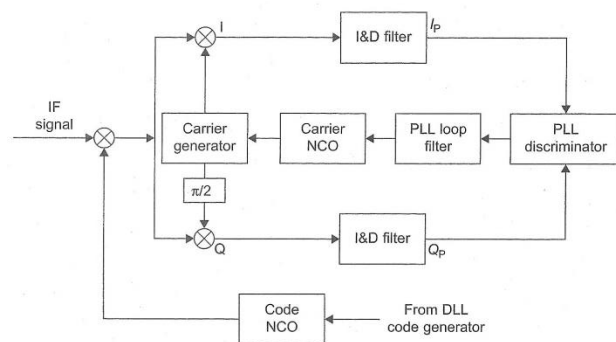
Όπως έχει προαναφερθεί για να υπάρξει εντοπισμός θέσης χρειάζεται η μετρημένη απόσταση του δέκτη από τέσσερις τουλάχιστο δορυφόρους. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους είτε μέσω των ψευδοαποστάσεων είτε μέσω των φάσεων.

#### 4.4.1 Μέτρηση ψευδοαποστάσεων

Η μέτρηση των ψευδοαποστάσεων όπως έχει προαναφερθεί στο Κεφάλαιο 4.2.2 γίνεται στους βρόγχους DLL μέσω σύγκρισης με ένα αντίγραφο του κώδικα (Εικόνα 23). Σε κάθε βρόγχο παράγεται αντίγραφο του κώδικα και μετατοπίζεται σε σχέση με το χρόνο έως ότου να δημιουργηθεί μια πλήρης ταύτιση, με το εισερχόμενο σήμα. Δηλαδή η σύγκριση αποτελεί μία επαναλαμβανόμενη και κυκλική διαδικασία, αυτό επιτρέπεται μέσω της βασικής αρχιτεκτονικής του βρόγχου DLL, όπως αυτή φαίνεται στην Εικόνα 24.



Εικόνα 23: Ταύτιση Εισερχόμενου Σήματος



Εικόνα 24: Βασική αρχιτεκτονική βρόγχου PLL (Dardari et al., 2011)

Το δορυφορικό σήμα όμως διανύει από 20000 έως 26000 km (70 έως 90 επανάληψης του C/A κώδικα), έτσι τη στιγμή λήψης δεν θα ταυτίζεται με την ρεπλίκα. Γι' αυτό το λόγο ο δέκτης καθυστερεί, το δικό του αντίγραφο, χρονικά για να ταυτίζεται με το εισερχόμενο σήμα. Ο C/A κώδικας όμως επαναλαμβάνεται κάθε 1ms, δηλ. μέσα σε 5ms έχουμε πέντε επαναλήψεις, έτσι η ταύτιση γίνεται σε μία υποδιαίρεση του 1ms. Έτσι απομένει να υπολογιστεί ο ακέραιος αριθμός ms ώστε να υπολογιστεί ο χρόνος ταξιδιού. Μέσω δηλαδή του αριθμού επαναλήψεων του κώδικα υπολογίζεται η απόσταση δέκτη-δορυφόρου. (Φωτίου and Πικριδάς, 2012)

Όπως είναι φανερό ο υπολογισμός της Ψευδοαπόστασης είναι πολύ επιρρεπής στο χρόνο ταξιδιού του σήματος στην ατμόσφαιρα. Αυτό φαίνεται πιο καθαρά στον Πίνακα 5, όπου δύνονται παραδείγματα διαφοροποίησης της υπολογισμένης ψευδοαπόστασης με μικρό-αλλαγές στο χρόνο. Στον ίδιο πίνακα επίσης φαίνεται πως μόνο με 5ms διαφορά έχουμε αλλαγή περίπου 1000 km, που αποτελεί ένα μεγάλο αριθμό.

Ακολούθως στον Πίνακα 6 δίνονται άλλοι σημαντικοί παράμετροι επηρεασμού των ψευδοαποστάσεων (όπως η σταθερότητα του ρολογιού του δορυφόρου κ.α.). Στον

ίδιο πίνακα δίνονται επίσης τα ίδια σφάλματα με και χωρίς επιλεκτική διαθεσιμότητα δορυφόρων. Με την επιλεκτική διαθεσιμότητα μειώνεται ο αριθμός των δορυφόρων με αποτέλεσμα το συνολικό RMS να τετραπλασιάζεται.

**Πίνακας 5: Παραδείγματα επηρεασμού ψευδοαπόστασης με μικρό-αλλαγές στον χρόνο**

CH	Received Time	Transit time	Pseudorange
1	0	70 ms	21,000 km
2	$0 + \Delta t_2 = 5 \text{ ms}$	75 ms	22,500 km
3	$0 + \Delta t_2 = 5 \text{ ms}$	77 ms	23,100 km
4	$0 + \Delta t_2 = 5 \text{ ms}$	82 ms	24,600 km

(Dardari et al., 2011)

**Πίνακας 6: Διάφορες πηγές σφαλμάτων**

Segment	Error Source	1 $\sigma$ Error (m) with SA	1 $\sigma$ Error (m) without SA
Space	Satellite clock stability	3.0	3.0
	Satellite perturbation	1.0	1.0
	Satellite availability (no longer active)	32.3	-
	Other (theme radiation)	0.5	0.5
Control	Ephemeris prediction error	4.2	4.2
	Other (thrusters, etc.)	0.9	0.9
User	Ionospheric Delay	5.0	5.0
	Tropospheric Delay	1.5	1.5
	Receiver Noise and resolution	1.5	1.5
	Multipath	2.5	2.5
	Other (interchannel bias, etc.)	0.5	0.5
<b>UERE</b>	Total (RMS)	33.3	8.0

(Dardari et al., 2011)

SA= Selective Availability | SPS= Standard Positioning Service

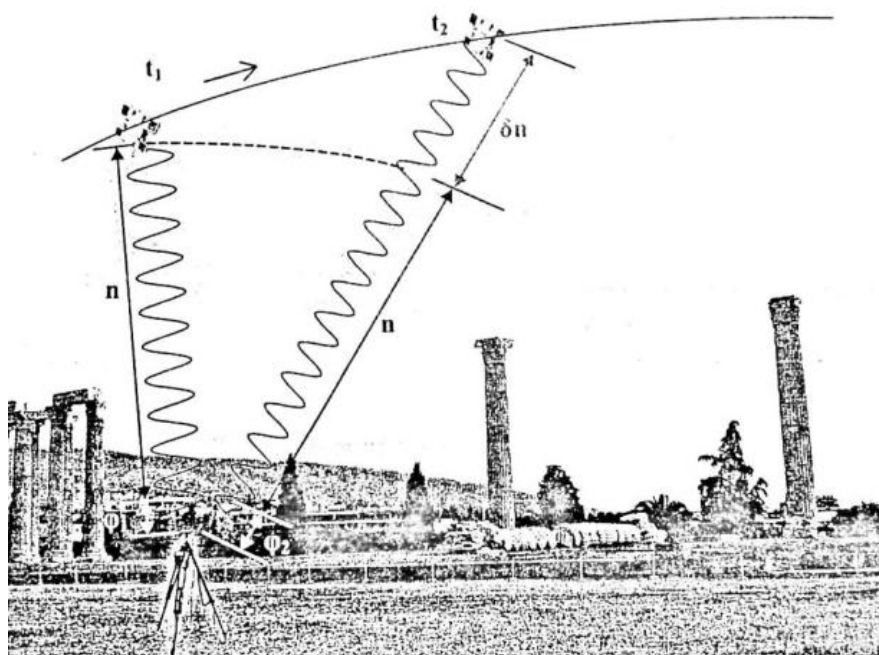


#### 4.4.2 Αποστάσεις μέσο φάσεων

Όπως έχει προαναφερθεί στο Κεφάλαιο 4.2.2 αφού αφαιρεθεί από το σήμα ο C/A κώδικας και το μήνυμα πλοήγησης επαναυπολογίζεται η απόσταση δέκτη δορυφόρου μέσω του ημιτονοειδής φορέα. Η απόσταση αυτή αποτελεί ένα πιο σωστό και ακριβές προϊόν, μίας πιο περίπλοκης και χρονοβόρας διαδικασίας.

Ο υπολογισμός της απόστασης αρχίζει και πάλι με τη δημιουργία ενός αντίγραφου το οποίο συγκρίνεται και αυτό με τη σειρά του μέχρι να ταυτιστεί στον πρώτο ακέραιο κύκλο. Με αυτό εξάγεται το πρώτο απαραίτητο στοιχείο, που χρειάζεται, που είναι ένα κλασματικό μέρος του κύκλου ( $\phi$ ) και ακολούθως το σήμα κλειδώνει και αρχίζει η μέτρηση της φάσης (βλέπε Εικόνα 25).

Η φάση μετριέται σε καθαρό φορέα, ο οποίος δεν έχει τη δυνατότητα να φέρει οποιοδήποτε στοιχείο χρόνου, έτσι ο δέκτης δεν μπορεί να ξεχωρίσει έναν κύκλο από έναν άλλο. Γι' αυτό το λόγο όταν το σήμα κλειδωθεί ο δέκτης δεν μπορεί να γνωρίζει τον αριθμό των ατέραιων κύκλων (ή αρχική ασάφεια φάσης  $n$ ) που υπάρχουν ανάμεσα σε δορυφόρο και δέκτη, όπως στην περίπτωση του κώδικα. Αν ο ατέραιος αριθμός ήταν γνωστός τότε η απόσταση θα μπορούσε να υπολογιστεί σε αυτό το σημείο προσθέτοντας σε αυτόν το κλασματικό μέρος και πολλαπλασιάζοντας με το μήκος κύματος.

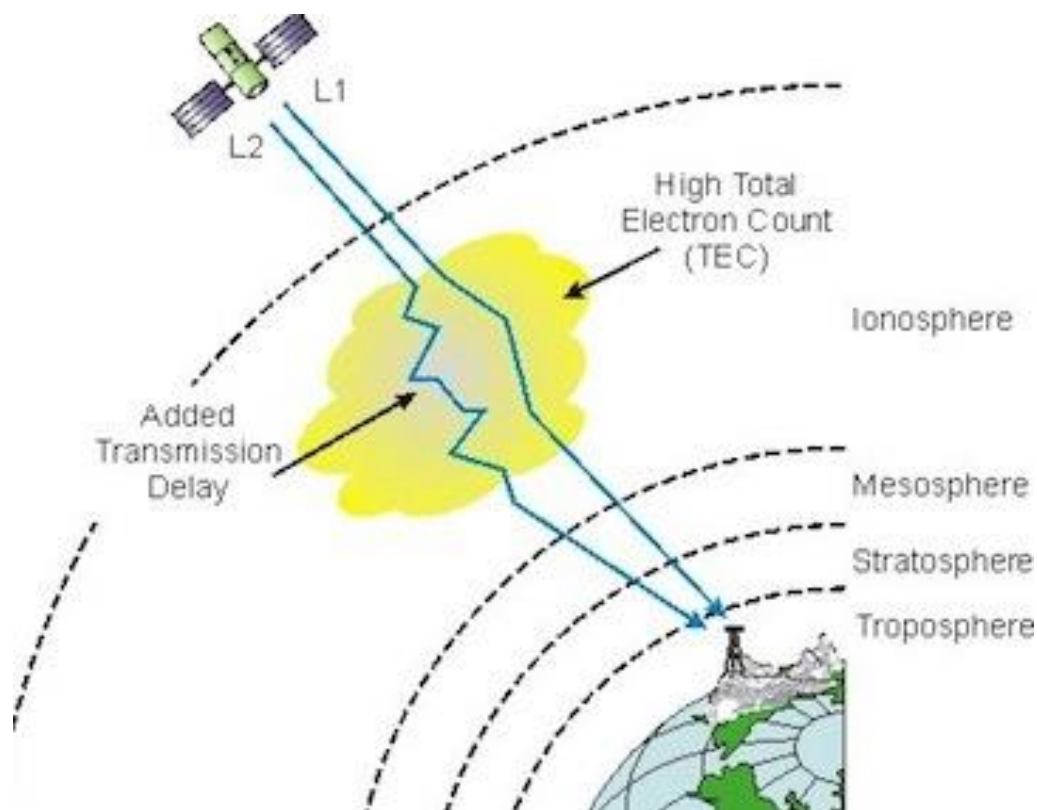


Εικόνα 25: Μέτρηση Φάσης

Στη συνέχεια ο δέκτης συνεχίζει να μετρά την αθροιστική φάση, δηλ. μετρά ακέραιους κύκλους από το κλείδωμα του σήματος μέχρι την τρέχουσα εποχή, που είναι συστηματικά επηρεασμένοι από την ασάφεια φάσης. Έτσι η ασάφεια φάσης αποτελεί μια σταθερή άγνωστη παράμετρο στις εξισώσεις, εφόσον το σήμα δεν χαθεί κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, η οποία αν εκτιμηθεί σωστά μπορεί να αποδώσει την απαιτούμενη γεωδαιτική ακρίβεια. (Φωτίου and Πικριδάς, 2012)

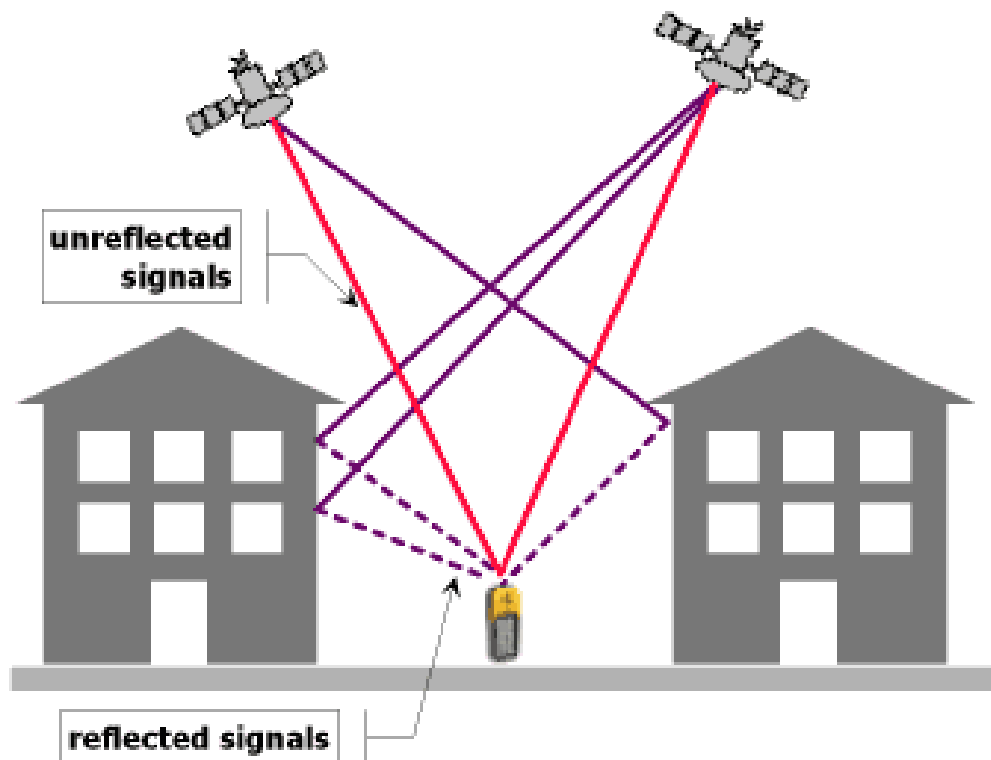
#### 4.4.3 Γενικές πηγές Σφαλμάτων στις παρατηρήσεις GNSS

Ένα βασικό παράγοντα επηρεασμού, του σήματος GPS, αποτελούν τα ανώτερα στρώμα της ατμόσφαιρας της γης που αποτελείται από την Ιονόσφαιρα και την Τροπόσφαιρα (Εικόνα 26). Οι δυο αυτές στρώσεις της ατμόσφαιρας αποτελούν ένα μεγάλο μέσο διασποράς το οποίο καθυστερεί και αλλάζει τη διεύθυνση του σήματος. Για το λόγο αυτό οι μετρήσεις με GPS αποφεύγονται κατά το μεσημέρι όπου η ηλιακή έξαρση είναι πιο έντονη με αποτέλεσμα τον πιο έντονο ιονισμό της ατμόσφαιρας. (“Ionospheric Effects on GPS - Innov.1991.04.pdf,” n.d.)



Εικόνα 26: Ιονοσφαιρική επίδραση στο σήμα GPS

Μια ακόμα βασική πηγή σφαλμάτων είναι αυτή των πολλαπλών διαδρομών που δημιουργούνται από κοντινές επιφάνειες στην περιοχή των μετρήσεων (Εικόνα 27). Η πολυανάκλαση και αυτή με τη σειρά της αυξάνει τη διαδρομή και αλλάζει τη διεύθυνση του σήματος. Έτσι σε τοπογραφικές εργασίες τα πολύ εξασθενημένα σήματα καθώς και τα σήματα που έρχονται από χαμηλές γωνίες ύψους απορρίπτονται καθώς πολύ πιθανό να είναι προϊόν πολυανάκλασης. Το σφάλμα δημιουργείται λόγω της άφιξης στο δέκτη του απευθείας και του ανακλώμενου σήματος.



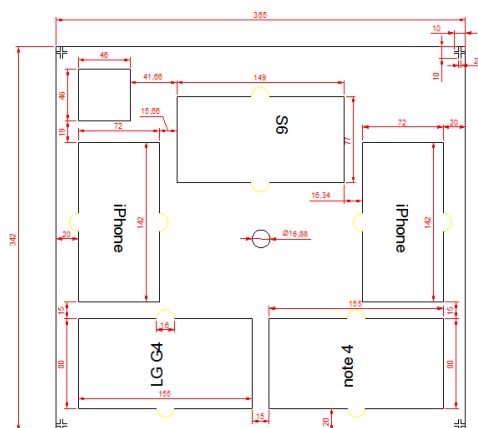
Εικόνα 27: Επίδραση πολυανάκλασης στο σήμα GPS

## 5 Εξοπλισμός

Στη συγκεκριμένη έρευνα έχουν χρησιμοποιηθεί πολλά όργανα διαφορετικής ακρίβειας τοποθετημένα όλα πάνω σε μία πλατφόρμα. Ακολούθως περιγράφονται όλα αυτά όργανα.

### 5.1 Πλατφόρμα

Η πλατφόρμα σχεδιάστηκε μέσα σε δισδιάστατο περιβάλλον AutoCAD (Εικόνα 28). Στην πλατφόρμα υπάρχουν εσοχές σε κατάλληλες διαστάσεις ούτως ώστε σε αυτές να χωράει το αντίστοιχο κινητό τηλέφωνο ή αισθητήρας INS. Οι διαστάσεις των κινητών μετρήθηκαν με παχύμετρο ενώ αυτά φορούσαν τη θήκη ασφαλείας τους, αυτό έγινε γιατί για λόγους ασφαλείας έπρεπε να τοποθετηθούν με τη θήκη τους στη πλατφόρμα. Η πλατφόρμα κατασκευάστηκε από δύο επίπεδα ξύλου, το ένα είχε τις εσοχές και το άλλο λειτουργούσε απλά ως πάτος. Στο κάτω μέρος των θέσεων κάθε αισθητήρα υπάρχει τοποθετημένο αυτοκόλλητο το οποίο συγκρατεί τον αισθητήρα στη θέση του (Εικόνα 29).



Εικόνα 28: Κάτοψη πλατφόρμας

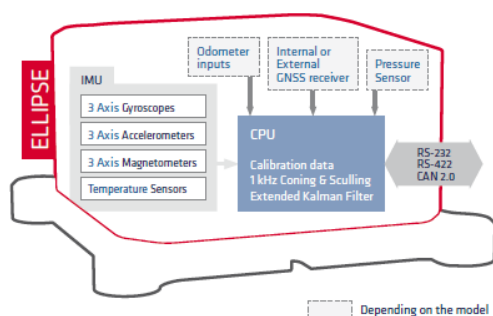


Εικόνα 29: Τελική όψη πλατφόρμας

### 5.2 SBG Ellipse-N

Το SBG αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα GPS/INS. Στο Ellipse-N περιέχονται όλα τα απαραίτητα γυροσκόπια, επιταχυνσιόμετρα, μαγνητόμετρα καθώς και ενσωματωμένος δέκτης GNSS. Στον Πίνακα 7 εμφανίζονται όλες οι πληροφορίες σχετικά με τις ακρίβειες των αισθητήρων της MAM (IMU) , όπως αυτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 30. Στον Πίνακα 9 παρουσιάζονται οι διαστάσεις και το

βάρος του Ellipse και στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται οι πληροφορίες για τον ενσωματωμένο δέκτη GNSS.



Εικόνα 30: Αισθητήρες SBG Ellipse

Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά Αδρανειακών Αισθητήρων SBG

Inertial Sensors			
	Accelerometers	Gyroscopes	Magnetometers
<b>Range</b>	± 8 g	± 450 °/s	± 8 Gauss
<b>Gain stability</b>	< 0.1 %	< 0.05 %	< 0.5 %
<b>Non-linearity</b>	< 0.2 % FS	< 0.05 % FS	< 0.1 % FS
<b>Bias stability</b>	± 5 mg	± 0.2 °/s	± 0.5 mGauss
<b>Random walk/ Noise density</b>	100 µg/√Hz (X,Y) 150 µg/√Hz (Z)	0.18 °/√hr	200 µg/√Hz
<b>Bias in-run instability*</b>	20 µg 8 °/h -	8 °/h	-
<b>VRE</b>	7 mg/g2 RMS	0.001 °/s/g2 RMS	-
<b>Alignment error</b>	< 0.05 °	< 0.05 °	< 0.1 °

Πίνακας 9: Μηχανικά Χαρακτηριστικά

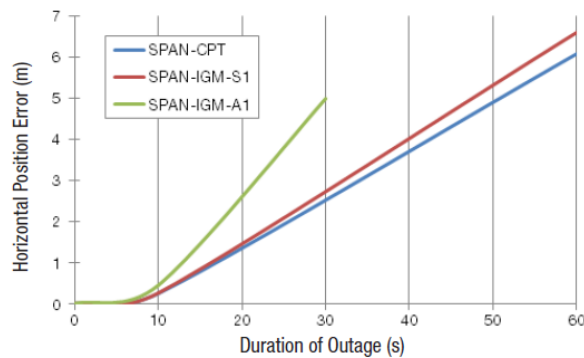
MECHANICAL		
	Box	OEM model
<b>Size</b>	46 x 45 x 24 mm	34 x 34 x 13 mm
<b>Weight</b>	47 g / 0.1 lb	12 g / 0.02 lb

Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά Ενσωματωμένου GNSS

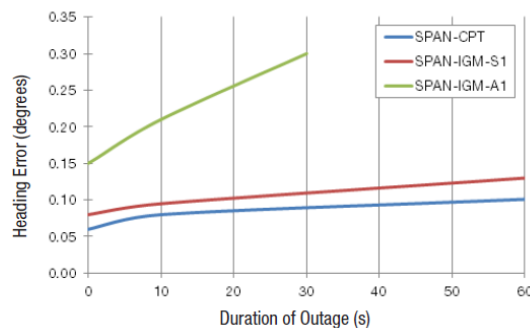
INTERNAL GNSS		
Engine, update rate	Cold start	Hot start
<b>72-channel, 10 Hz, L1 C/A</b>		
<b>GPS, GLONASS, QZSS, BeiDou, SBAS</b>	26 s	< 1 s

(“Ellipse\_Series\_Leaflet.pdf,” n.d.)

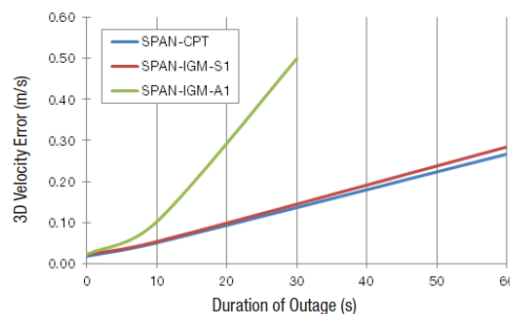
Στις πιο κάτω εικόνες απεικονίζεται η ακρίβεια μιας αδρανειακής επίλυσης χωρίς σήμα GNSS (stand-alone solution). Τα πιο κάτω διαγράμματα βασίζονται σε μετρήσεις που έγιναν σε συστήματα GPS/INS ίδιας βαθμίδας και δυνατοτήτων με το SBG Ellipse-N. Ο λόγος που οι ακρίβειες δύνονται συνάρτηση του χρόνου είναι γιατί μια MAM για την επίλυση της θέσης χρησιμοποιεί τη μέθοδο Dead reckoning. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί το άθροισμα όλων των προηγούμενων σχετικών λύσεων, πράγμα που αυξάνει το σφάλμα με την πάροδο του χρόνου, σύμφωνα με το νόμο μετάδοσης σφαλμάτων.



**Εικόνα 31: Ακρίβεια οριζόντιας θέσης συνάρτηση του χρόνου**



**Εικόνα 32: Ακρίβεια προσανατολισμού θέσης συνάρτηση του χρόνου**



**Εικόνα 33: Ακρίβεια ταχύτητας θέσης συνάρτηση του χρόνου**

(NovAtel, 2015)

### 5.3 Ρομποτικός Γεωδαιτικός Σταθμός MS05AXII/MS1AXII

Ο Ρομποτικός Γεωδαιτικός Σταθμός αποτελεί ένα Γεωδαιτικό Σταθμό ο οποίος έχει τη δυνατότητα να ακολουθεί και να καταγράφει τη θέση του στόχου αυτόνομα χωρίς να χρειάζεται παρατηρητής. Ο συγκεκριμένος σταθμός έχει ακρίβεια 0.5mm + 1ppm, που τον καθιστά όργανο υψηλής ακρίβειας. Επίσης υπάρχει δυνατότητα παρακολούθησης του μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, μέσω καλωδίου αλλά και του διαδικτύου. Στην Εικόνα 34 απεικονίζεται ο Ρομποτικός Γεωδαιτικός Σταθμός μαζί με όλες του τις λειτουργίες. (TOPCON, 2014)



Εικόνα 34: Ρομποτικός Γεωδαιτικός Σταθμός

### 5.4 Κινητά τηλέφωνα

Όπως έχει προαναφερθεί στη συγκεκριμένη έρευνα έχει γίνει χρήση κινητών τηλεφώνων τα οποία περιέχουν όλους τους απαραίτητους αισθητήρες και είναι σε προσιτές τιμές για όλους τους χρήστες. Στον Πίνακα 10 παρουσιάζονται όλα τα κινητά τηλέφωνα που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και οι διαστάσεις και το βάρος τους.

Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά κινητών τηλεφώνων έρευνας

A/A	Συσκευή	Διαστάσεις	Βάρος
1	iPhone 6	138.1 x 67 x 6.9 mm	129 g
2	iPhone 6S	138.3 x 67.1 x 7.1 mm	143 g
3	Samsung Galaxy S6	143.4 x 70.5 x 6.8 mm	138 g
4	LG G4	148.9 x 76.1 x 6.3 - 9.8 mm	155 g
5	Samsung Galaxy Note 4	153.5 x 78.6 x 8.5 mm	176 g

## 5.5 Γεωδαιτικός Δέκτης GNSS

Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε η κεραία GNSS 703-GGG (Εικόνα 35) αυτή η κεραία είναι τύπου Choke ring και μπορεί να ανιχνεύσει σχεδόν όλες τις συχνότητες από τα πλείστα συστήματα GNSS (Πίνακας 11). Επίσης η κεραία αυτή έχει σαν πλεονέκτημα από άλλες το ότι το κέντρο φάσης είναι σταθερό καθώς αλλάζει το αζιμούθιο και η γωνία ύψους των δορυφόρων. Η κεραία ήταν συνδεδεμένη με τον κυρίως δέκτη ProPak6 (Εικόνα 36) ο οποίος με τη σειρά ήταν συνδεδεμένος με ένα φορητό υπολογιστή για καταγραφή των μετρήσεων. Ο ProPak6 αποτελεί ένα γεωδαιτικό δέκτη τεχνολογίας αιχμής, ο οποίος εξειδικεύεται και στο κινηματικό εντοπισμό. (“GPS-703-GGG.pdf,” n.d.)



**Εικόνα 35: Κεραία  
GNSS**



**Εικόνα 36: Κυρίως Δέκτης  
GNSS**

**Πίνακας 11: Συχνότητες και Συστήματα GNSS**

No	GNSS System	Frequencies
1	GPS	L1, L2, L5
2	GLONASS	L1, L2, L3
3	BeiDou	B1, B2
4	Galileo	E1, E5a/b

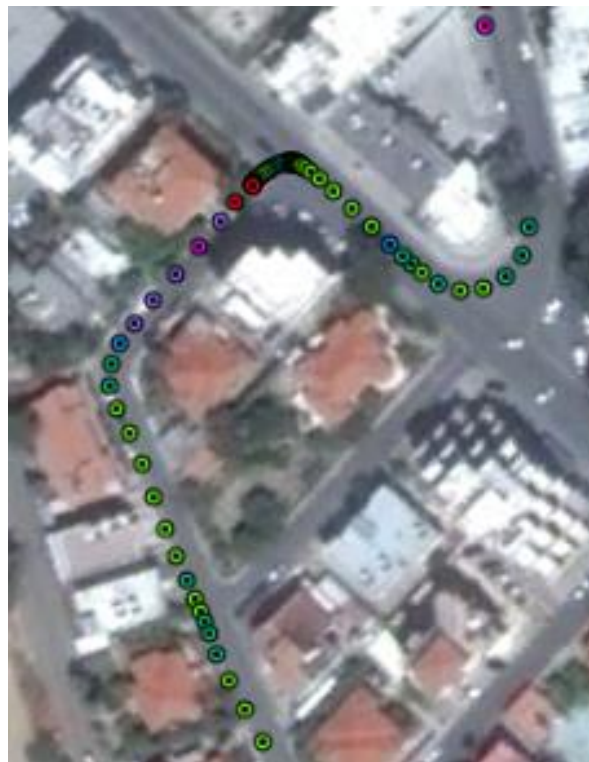
Ο γεωδαιτικός δέκτης ProPak6 κατά την έξοδο των σημείων τα οποία έχει μετρήσει προσθέτει σε αυτά ένα χρωματικό χαρακτηρισμό (Εικόνα 37) ανάλογα του επιπέδου εμπιστοσύνης για το κάθε σημείο (Πίνακας 12). Με χαμηλό quality criteria σημαίνει



υψηλή πιθανότητα αποδοχής μιας λύσης (αύξηση αριθμού λύσεων), με μεγαλύτερη πιθανότητα σφαλμάτων.

**Πίνακας 12: Δείκτες Ποιότητας - Novatel Inertial Explorer**

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



**Εικόνα 37: Δείκτης Ποιότητας με χρωματική ένδειξη**

## 6 Διεξαγωγή μετρήσεων

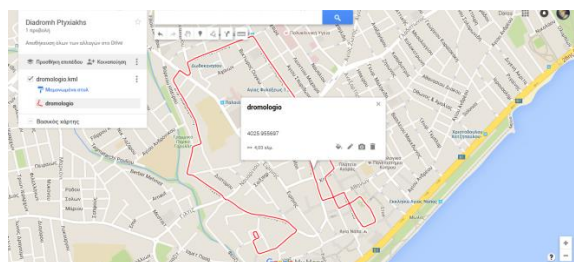
Για την εκτέλεση της εν λόγω μελέτης ήταν απαραίτητος ο σωστός προγραμματισμός, πριν από την έξοδο στο πεδίο. Έτσι έγινε μια προσεκτική επιλογή του απαραίτητου εξοπλισμού, ο οποίος θα μεταφερόταν στο πεδίο. Επίσης στα πλαίσια της προετοιμασίας ήταν και ο σχεδιασμός του κατάλληλου δρομολογίου καθώς και η σωστή τοποθέτηση των αισθητήρων στο όχημα.

### 6.1 Προγραμματισμός Δρομολογίου

Ο προγραμματισμός του δρομολογίου έγινε με σκοπό την επιλογή ενός “δύσκολου” δρομολογίου με ψηλά κτήρια. Για τους δέκτες GPS δύσκολα περιβάλλοντα θεωρούνται αυτά με πολλά και ψηλά εμπόδια τα οποία προκαλούν χαμηλή διαθεσιμότητα σε δορυφόρους και εντείνουν το φαινόμενο της πολυανάκλασης.

Κατά την εξαγωγή κάθε νέου δρομολογίου γινόταν υπολογισμός του μήκους του και δημιουργείτο νέο δρομολόγιο μέχρι αυτό να ξεπερνά του τουλάχιστο τα 15 λεπτά σε χρόνο οδήγησης, μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα συμπεριλαμβάνονται και τα 8 λεπτά των στατικών μετρήσεων για επίλυση του PPK. Με τον τρόπο αυτό ήταν πλέον βέβαιο ότι θα υπήρχε μεγάλο πλήθος τιμών μέσω των οποίων θα μπορούν να εξαχθούν καλά και πιο ασφαλή συμπεράσματα.

Το δρομολόγιο σχεδιάστηκε μέσω του λογισμικού Google Maps (Εικόνα 38) το οποίο παρείχε και ταυτόχρονη μέτρηση της απόστασης μέσω της οποίας μπορούσε να υπολογιστεί χονδρικά ο χρόνος, μέσω της παραδοχής ότι ένα όχημα μέσα σε ένα αστικό περιβάλλον κινείται με μία μέση ταχύτητα των 30Km/h, δηλαδή το συνολικό μήκος της διαδρομής έπρεπε να ξεπερνά τα 3.5Km. Επίσης ένα άλλο πλεονέκτημα του Google Maps ήταν πως έδινε και την πληροφορία των υποχρεωτικών κατευθύνσεων για κάθε δρόμο, για αποφυγή αδυναμίας στην εκτέλεση του.



Εικόνα 38: Σχεδιασμός Διαδρομής στο Google Maps

## 6.2 Εκτέλεση Πειράματος

Για την εκτέλεση του πειράματος πραγματοποιήθηκε μελέτη και σχεδιασμός για τον τρόπο τοποθέτησης των αισθητήρων πάνω στο όχημα. Σε αυτό το στάδιο όπως αναλύεται στο κεφάλαιο του Εξοπλισμού, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μια πλατφόρμα κατάλληλη για ασφαλή εφαρμογή και μεταφορά των έξυπνων συσκευών.

Έτσι σε πρώτο στάδιο στο πεδίο τοποθετήθηκαν οι έξυπνες συσκευές πάνω στην πλατφόρμα (Εικόνα 39). Ακολούθως τοποθετήθηκε στην οροφή του αμαξιού κατάλληλη μπάρα, η οποία είχε εκ των προτέρων τροποποιηθεί ώστε η πλατφόρμα να μπορεί να βιδωθεί σε αυτήν (Εικόνα 40). Σε αυτό το στάδιο έλαβε χώρα η μέτρηση των σχετικών συντεταγμένων των κέντρων των αισθητήρων, σε σχέση με το κέντρο της πλατφόρμας. Η διαδικασία αυτή έγινε με τη χρήση του ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού Topcon MS05AXII (Εικόνα 41). Αυτή η πληροφορία ήταν χρήσιμη στο στάδιο της επεξεργασίας των μετρήσεων, κατά το οποίο πραγματοποιήθηκε αναγωγή των υπολογισμένων θέσεων στο κέντρο της πλατφόρμας προκειμένου να είναι εφικτή η σύγκρισή τους.



Εικόνα 39 : Προετοιμασία



Εικόνα 40: Τοποθέτηση εξοπλισμού στην οροφή του Ι.Χ.



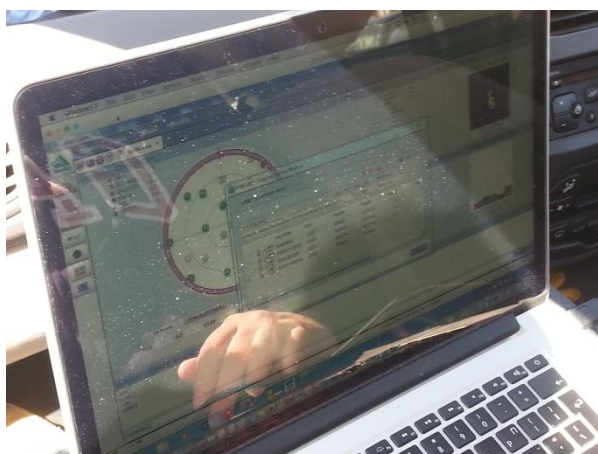
Εικόνα 41: Ρομποτικός ολοκληρωμένος γεωδαιτικός σταθμός

Αφού τελειώσει η τοποθέτηση των έξυπνων συσκευών τοποθετήθηκαν η κεραία και ο δέκτης GNSS, στην οροφή (Εικόνα 40) και στο εσωτερικό (Εικόνα 42) του οχήματος αντίστοιχα.

Για την καταγραφή των μετρήσεων του γεωδαιτικού δέκτη GNSS και του ολοκληρωμένου συστήματος GPS/INS έγινε η χρήση Η/Υ (Εικόνα 43), στον οποίο συνδέθηκαν μέσω κατάλληλης καλωδίωσης.



Εικόνα 42: Κυρίως δέκτης GNSS



Εικόνα 43: Καταγραφή μετρήσεων σε Η/Υ

### 6.2.1 Εκτέλεση Δρομολόγιου και καταγραφή μετρήσεων

Για την εκτέλεση του δρομολόγιου οι έξυπνες συσκευές ρυθμίστηκαν να λαμβάνουν μετρήσεις κάθε 0,02 s δηλαδή σε συχνότητα 50Hz. Στη συνέχεια το όχημα αφήθηκε σε πλήρη ηρεμία για 8 λεπτά για να γίνει η αρχικοποίηση όπως αναλύεται πιο πάνω.

Με το πέρας των 8 λεπτών άρχισε η εκτέλεση του δρομολογίου με ταυτόχρονη βιντεογράφιση με χρήση ειδικού λογισμικού χρονοσήμανσης (Εικόνα 44). Με αυτό τον τρόπο κατέστη δυνατή η σύγκριση του βίντεο και των γραφημάτων των αδρανειακών αισθητήρων.



Εικόνα 44: Βιντεογράφιση με ταυτόχρονη εξασφάλιση χρόνου και θέσης

## 7 Προεπεξεργασία δεδομένων

Η επόμενη φάση αφορά την προεπεξεργασία των παρατηρήσεων που εξάχθηκαν από τις έξυπνες συσκευές για να εξαλειφθούν πλεονάζοντα δεδομένα, να έχουν την ίδια συχνότητα, να διορθωθούν οι μονάδες μέτρησης και να συγχρονιστούν τα διαστήματα καταγραφής.

### 7.1 Μετατροπή χρόνων

Αρχικά για να είναι συμβατές οι χρονικές στιγμές με το πρόγραμμα επεξεργασίας, οι εγγραφές διαχωρίστηκαν σε διανύσματα χρόνου με την εντολή `datevec()` του MatLab (Εικόνα 46). Στη συνέχεια τα στοιχεία του διανύσματος ενοποιήθηκαν σε μία στήλη χρόνου με την χρήση της εντολής `detatime()` (Εικόνα 45).

17 h	18 m	19 s	20 ms
13	36	40	35.0000
13	36	40	75
13	36	40	95.0000
13	36	40	115
13	36	40	136
13	36	40	155
13	36	40	175.0000
13	36	40	195

Εικόνα 46: Χρονικές εγγραφές σε διανυσματική μορφή

24 time
03-Mar-2016 13:36:40
03-Mar-2016 13:36:40
03-Mar-2016 13:36:40
03-Mar-2016 13:36:40
03-Mar-2016 13:36:40
03-Mar-2016 13:36:40
03-Mar-2016 13:36:40
03-Mar-2016 13:36:40

Εικόνα 45: Ενοποιημένες χρονικές στιγμές

### 7.2 Καθαρισμός Δεδομένων

Λόγω σφάλματος των χρονομέτρων των έξυπνων συσκευών παρατηρήθηκε πως σε κάποιες από αυτές υπήρχαν διπλές εγγραφές χρόνου οι οποίες έπρεπε να καθαριστούν προκειμένου οι χρονοσειρές να είναι γνησίως αύξουσες και οι εγγραφές τους μοναδικές. Επίσης σε αυτό το στάδιο έγινε αποκοπή των πλεονάζοντων χρονικών περιόδων και έμειναν μόνο αυτές που αναφέρονται στο πείραμα όπως αυτές φαίνονται στο βίντεο. Οι πλεονάζουσες χρονικές περίοδοι δημιουργήθηκαν γιατί οι εγγραφές από τους αισθητήρες ήταν αδύνατον να σταματήσουν και να ξεκινήσουν ταυτόχρονα.

### 7.3 Επαναδειγματοληψία μέσω γραμμικής παρεμβολής

Λόγο της διαγραφής των διπλών εγγραφών υπήρχαν πλέον κενά στις χρονοσειρές τα οποία έπρεπε να καλυφτούν μέσω επαναδειγματοληψίας. Στο σημείο αυτό κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθεί μείωση της συχνότητας και όχι η αύξηση, διότι με την αύξηση δημιουργούνται επιπλέον λανθασμένες τιμές σε περιοχές που δεν υπήρχαν μετρήσεις (Εικόνα 47). Παράλληλα με την μείωση της συχνότητας έλαβε χώρα ταυτόχρονη μείωση και απομάκρυνση του θορύβου των μετρήσεων.

Μετά από δοκιμές εντοπίστηκε πως η πιο εφικτή συχνότητα η οποία εμφάνιζε τον λιγότερο θόρυβο και περιέγραφε ικανοποιητικά τις στροφές και τις στάσεις ήταν τα 10Hz. Σημειώνεται ότι στο επίπεδο των αδρανειακών αισθητήρων η συχνότητα του 1Hz απέτυχε να απεικονίσει τα παραπάνω στοιχεία.

Επειδή όμως οι πρωτογενείς μετρήσεις του γεωδαιτικού δέκτη GNSS ήταν σε 1Hz αναγκαστικά πραγματοποιήθηκαν δύο επαναδειγματοληψίες. Μια σε συχνότητα 1Hz για σύγκριση των θέσεων και μια στα 10Hz για σύγκριση των αδρανειακών παρατηρήσεων.



Εικόνα 47: Κάλυψη κενών κατά την αύξηση της συχνότητας



## 7.4 Μετασχηματισμός Θέσεων

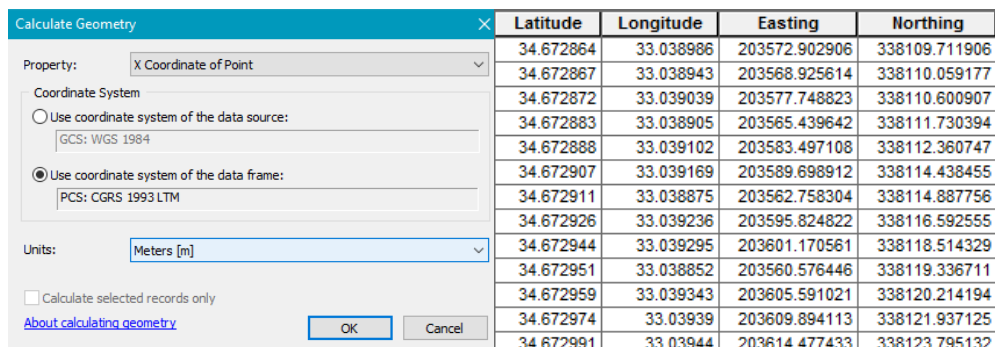
Το σύστημα αναφοράς των μετρήσεων ήταν το World Geodetic System (WGS84). Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ουσιαστική σύγκριση των αποτελεσμάτων, έλαβε χώρα μετασχηματισμός των συντεταγμένων στο CGRS93 και συγκεκριμένα στην προβολή LTM93. Αναφέρεται ότι η σχέση για την μετάβαση από το WGS84 στο

$$\text{CGRS93 είναι } \begin{bmatrix} X^a \\ Y^a \\ Z^a \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} 1 & \varepsilon_z & -\varepsilon_y \\ -\varepsilon_z & 1 & \varepsilon_x \\ \varepsilon_y & -\varepsilon_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^b \\ y^b \\ z^b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$$

Όπου:

1.  $t_x=8.846$ ,  $t_y=-4.394$ ,  $t_z=-1.122$  (Μεταθέσεις)
2.  $\varepsilon_x=0.00237$ ,  $\varepsilon_y=0.146528$ ,  $\varepsilon_z=-0.130428$  (Στροφές)
3.  $m=0.783926$  (Κλίμακα)

Έτσι έγινε πρώτα η μετατροπή τους σε δεκαδικές μοίρες και ακολούθως η προβολή τους μέσα στο ArcMap, όπου έγινε ο μετασχηματισμός τους, μέσω του Calculate Geometry σε μέτρα (Εικόνα 48).



	Latitude	Longitude	Easting	Northing
	34.672864	33.038986	203572.902906	338109.711906
	34.672867	33.038943	203568.925614	338110.059177
	34.672872	33.039039	203577.748823	338110.600907
	34.672883	33.038905	203565.439642	338111.730394
	34.672888	33.039102	203583.497108	338112.360747
	34.672907	33.039169	203589.698912	338114.438455
	34.672911	33.038875	203562.758304	338114.887756
	34.672926	33.039236	203595.824822	338116.592555
	34.672944	33.039295	203601.170561	338118.514329
	34.672951	33.038852	203560.576446	338119.336711
	34.672959	33.039343	203605.591021	338120.214194
	34.672974	33.03939	203609.894113	338121.937125
	34.672991	33.03944	203614.477433	338123.795132

Εικόνα 48: Μετασχηματισμός συντεταγμένων

## 7.5 Συμπλήρωση Χρονικών Αλμάτων

Όταν έγινε η επαναδειγματοληψία στο 1Hz παρατηρήθηκε πως οι εγγραφές του γεωδαιτικού δέκτη GNSS – ProPak6 για το ίδιο χρονικό διάστημα ήταν πιο λίγες από αυτές των υπόλοιπων. Αυτό έγινε διότι το λογισμικό του δέκτη δεν δημιουργεί εγγραφές όταν δεν υπάρχει επίλυση θέσης ή όταν αυτή απορρίπτεται.

Αυτό θα δημιουργούσε πρόβλημα σε επόμενο στάδιο όπου θα χρειαζόταν να γίνει η αφαίρεση των υπολογισμένων συντεταγμένων για τη κάθε θέση. Έτσι δημιουργήθηκε

μια συνάρτηση η οποία δημιουργούσε μια πλήρη (συνεχή) χρονοσειρά και την συνέκρινε με την αρχική (Εικόνα 49). Ταυτόχρονα με την σύγκριση λαμβάνει χώρα η αποθήκευση των χρονικών στιγμών των αλμάτων και υπολογίζεται η χρονική διάρκεια του κάθε άλματος σε δευτερόλεπτα.

Ακολούθως δημιουργήθηκε μια νέα συνάρτηση η οποία έπαιρνε τα αποτελέσματα της προηγούμενης και συμπλήρωνε τον πίνακα με μία συνεχή χρονοσειρά και με μηδενικές εγγραφές στις περιοχές όπου αρχικά υπήρχε άλμα (Εικόνα 50). Συνολικά όλα τα άλματα του ProPak που βρέθηκαν ήταν 3 λεπτά και 14 δευτερόλεπτα.

```

1 function [ gap, timejump ] = gap_loc( ct )
2     n=length(ct);
3     ii=1;
4     i=1;
5     t1=ct';
6     t=t1(1):t1(end);
7     for q=1(1):t1(end)
8     while t(i)<t1(ii)
9         i=i+1;
10    end
11    while t(i)==t1(ii)
12        ii=ii+1;
13        i=i+1;
14        if (ii==size(t,2)) || (ii==size(t1,2))
15            i=i-2;
16            ii=ii-1;
17        end
18        if ii==(size(t1,2)-1)
19            gap(n)=ii;
20        end
21    end
22    if t(i)<t1(ii)
23        n=n+1;
24    end
25 end
26 gap(end)=size(t1,2);
27 timejump(1:size(gap,2))=t(t(gap(1:end))-t(gap(1:end)-1));
28 timejump(1:end)=timejump(1:end)-1;
29 end

```

```

1 function [ P ] = gap_correct( E,N,t,jump,gap )
2
3     E=E';
4     N=N';
5     t=t';
6     e=E(1:gap(1)-1);
7     n=N(1:gap(1)-1);
8     T=t(1:gap(1)-1);
9     for i=2:size(gap,2)
10        e=[e zeros(1,jump(i-1)) E(gap(i-1):gap(i)-1)];
11        n=[n zeros(1,jump(i-1)) N(gap(i-1):gap(i)-1)];
12        T=[T zeros(1,jump(i-1)) t(gap(i-1):gap(i)-1)];
13    end
14 end
15 P=[T' e' n'];
16 P=array2table(P,'VariableNames',{'time' 'Easting' 'Northing'});
17 t=P.time(1):1:P.time(end);
18 P.time10=datetime(t,'ConvertFrom','posixtime');
19 end

```

**Εικόνα 49: Συναρτήσεις Εντοπισμού και διόρθωσης Χρονικών Αλμάτων**

	1 time	2 Easting	3 Northing	4 Satellites	5 time1
115	1.4570e+09	2.0371e+05	3.3819e+05	5	03-Mar-2016 13:38:34
116	0	0	0	0	03-Mar-2016 13:38:35
117	0	0	0	0	03-Mar-2016 13:38:36
118	0	0	0	0	03-Mar-2016 13:38:37
119	0	0	0	0	03-Mar-2016 13:38:38
120	0	0	0	0	03-Mar-2016 13:38:39
121	0	0	0	0	03-Mar-2016 13:38:40
122	0	0	0	0	03-Mar-2016 13:38:41
123	0	0	0	0	03-Mar-2016 13:38:42
124	1.4570e+09	2.0374e+05	3.3822e+05	5	03-Mar-2016 13:38:43
125	1.4570e+09	2.0374e+05	3.3822e+05	6	03-Mar-2016 13:38:44
126	1.4570e+09	2.0374e+05	3.3822e+05	7	03-Mar-2016 13:38:45
127	1.4570e+09	2.0374e+05	3.3822e+05	0	03-Mar-2016 13:38:46

**Εικόνα 50: Πίνακας Συμπληρωμένης χρονο-σειράς**

## 7.6 Συγχρονισμός Μετρήσεων

Τελευταίο βήμα στο στάδιο της προεπεξεργασίας ήταν ο συγχρονισμός όλων των εγγραφών, όλων των αισθητήρων για να είναι δυνατή η σύγκρισή τους. Σε πρώτη φάση χρησιμοποιήθηκαν έτοιμες συναρτήσεις της MatLab (συναρτήσεις



ετεροσυσχέτισης), οι οποίες αναγνωρίζουν ως κοινά σημεία τα μέγιστα και τα ελάχιστα για να υπολογίσουν τις χρονικές μετατοπίσεις (time lags).

Λόγω όμως του θορύβου των μετρήσεων ο εντοπισμός των κοινών σημείων με αυτοματοποιημένο τρόπο δεν έδινε σωστά αποτελέσματα. Έτσι έγινε η δημιουργία γραφημάτων με “συγχρονισμένους” άξονες, έτσι ώστε να κινούνται παράλληλα κατά την μετάθεση των διαγραμμάτων και να μπορούν να εντοπιστούν οπτικά τα κοινά σημεία. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίστηκαν οι χρονικές μετατοπίσεις σε σχέση με την χρονοσειρά του SBG. Συγκεκριμένα οι μετατόπιση του Note4 ήταν 3s ενώ του S6 2s. Επίσης χρειάστηκε χρονική μετάθεση των μετρήσεων του ProPak κατά 17s που η χρονική διαφορά ανάμεσα σε GPS Time και UTC.

## **8 Ανάλυση**

Για την αυτοματοποίηση των διαδικασιών προεπεξεργασίας, ανάλυσης και εξαγωγής στατιστικών στοιχείων έγινε η δημιουργία πακέτου συναρτήσεων συνολικού μεγέθους 3800 γραμμών.

### **8.1 Σύγκριση Θέσεων**

Σε αυτή τη φάση πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των λύσεων πλοήγησης που παρείχαν ο γεωδαιτικός δέκτης GNSS τεχνολογίας αιχμής ProPak6, με το ολοκληρωμένο σύστημα GNSS/INS SBG Ellipse-N, καθώς και με τις έξυπνες συσκευές Galaxy S6, LG G4 και το iPhone 6s

Στα πλαίσια αυτής της φάσης, ως αναφορά χρησιμοποιήθηκε η λύση του ProPak6 για υπολογισμό των διαφορών και των αποχών που έδωσαν τα υπόλοιπα. Για να γίνει αυτό δημιουργήθηκε μια νέα συνάρτηση η οποία σύγκρινε τις μετρήσεις αγνοώντας τις περιοχές όπου το ProPak δεν είχε δώσει λύση.

Όμως οι έξυπνες συσκευές καθώς και το GNSS/INS όταν δεν χρησιμοποιούσαν τα αδρανειακά για τον υπολογισμό λύσης (unfused solution) παρουσίαζαν και αυτά ασυνέχειες στη διαθεσιμότητα λύσης. Σε αντίθεση όμως με τον γεωδαιτικό δέκτη σε αυτές τις περιπτώσεις το λογισμικό τους αντί να δημιουργεί χρονικά άλματα, έκανε επανάληψη της τελευταίας λύσης μέχρι να υπολογιστεί νέα θέση. Κατά συνέπεια όλες οι χρονικές στιγμές όπου είχαν ακριβώς τις ίδιες συντεταγμένες, πλην αυτών που

αφορούσαν διαστήματα στάσης του οχήματος, αφαιρέθηκαν και δεν λήφθηκαν υπόψη. Σε αυτό το στάδιο χρησιμοποιήθηκαν και πάλι οι συναρτήσεις εντοπισμού και διόρθωσης των χρονικών αλμάτων. Ως εκ τούτου μπόρεσαν και υπολογίστηκαν τα χρονικά διαστήματα όπου ο κάθε δέκτης δεν είχε δώσει λύση και συγκριθήκαν ποσοστιαία σε σχέση με το συνολικό χρόνο της διαδρομής (Πίνακας 13) η οποία είχε διάρκεια 20 λεπτών και 17 δευτερολέπτων.

Πίνακας 13: Χρονικοί Περίοδοι Δεκτών GNSS χωρίς Λύση

Δέκτης	Χρονικό Διάστημα (mm:ss)	Ποσοστό Διαστήματος
<b>ProPak6</b>	03:14	15.9%
<b>S6</b>	12:02	59.3%
<b>SBG</b>	03:30	17.3%
<b>G4</b>	04:43	23.3%
<b>iPhone 6s</b>	04:00	19.7%
<b>SBG Fused Solution</b>	00:00	00.0%

### 8.1.1 Στατιστικά στοιχεία

Για την εξαγωγή ορθών στατιστικών στοιχείων για τη σύγκριση των υπολογισμένων θέσεων σε σχέση με αυτές που έδωσε το ProPak, δημιουργήθηκε μία συνάρτηση η οποία υπολόγιζε τη διαφορά θέσης για κάθε χρονική περίοδο. Επίσης στη συνάρτηση γινόταν ταυτόχρονος έλεγχος για τις περιοχές όπου δεν υπήρχε λύση και έδινε στις διαφορές την τιμή NaN (Εικόνα 51), ώστε αυτές να μην ληφθούν υπόψη κατά τον υπολογισμό των στατιστικών στοιχείων.

```

1 function [ ans2, ans3 ] = Location_compare( Ec, Nc, E, N)
2     ans2=zeros(size(Ec,1),1);
3     ans3=zeros(size(Ec,1),1);
4     for i=1:size(Ec,1)
5         if Ec(i)>0
6             ans2(i)=Ec(i)-E(i);
7             ans3(i)=Nc(i)-N(i);
8         end
9         if Ec(i)==0 || E(i)==0
10            ans2(i)=NaN;
11            ans3(i)=NaN;
12        end
13    end

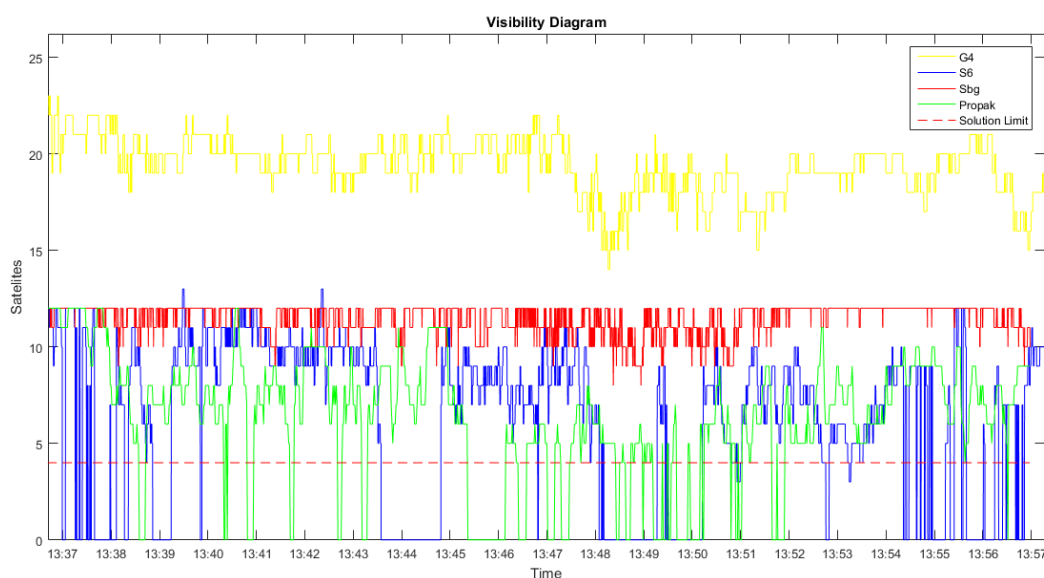
```

Εικόνα 51: Συνάρτηση Σύγκρισης των υπολογισμένων Θέσεων

Κατά τον υπολογισμό των στατιστικών στοιχείων (Πίνακας 14) παρατηρήθηκε πως το SBG κατά την συγχωνευμένη λύση είχε βελτίωση κατά 6,5%. Επίσης στα στατιστικά στοιχεία παρατηρείται πως την χειρότερη ακρίβεια δίνει το Galaxy S6 το οποίο είχε συνεχώς λιγότερη διαθεσιμότητα σε δορυφορικό σήμα και κοντά στο όριο των τεσσάρων δορυφόρων, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 52.

**Πίνακας 14: Στατιστικά Στοιχεία Διαφορών κατά Easting και Northing**

Sensor	Delta Easting (m)				Delta Northing (m)			
	max	min	mean	std	max	min	mean	std
<b>Sbg</b>	9.882	-2.686	3.314	1.668	3.257	-7.235	-2.829	1.629
<b>Sbg-fused</b>	9.258	-1.811	3.313	1.443	0.904	-6.072	-2.615	1.639
<b>ip6s</b>	11.741	-7.497	2.884	3.606	5.027	-17.002	-4.812	4.091
<b>s6</b>	51.032	-46.541	3.918	13.912	29.158	-65.368	-2.500	11.280
<b>g4</b>	6.526	-0.043	2.927	1.298	-1.355	-8.036	-4.107	1.075



**Εικόνα 52: Διάγραμμα Ορατότητας**

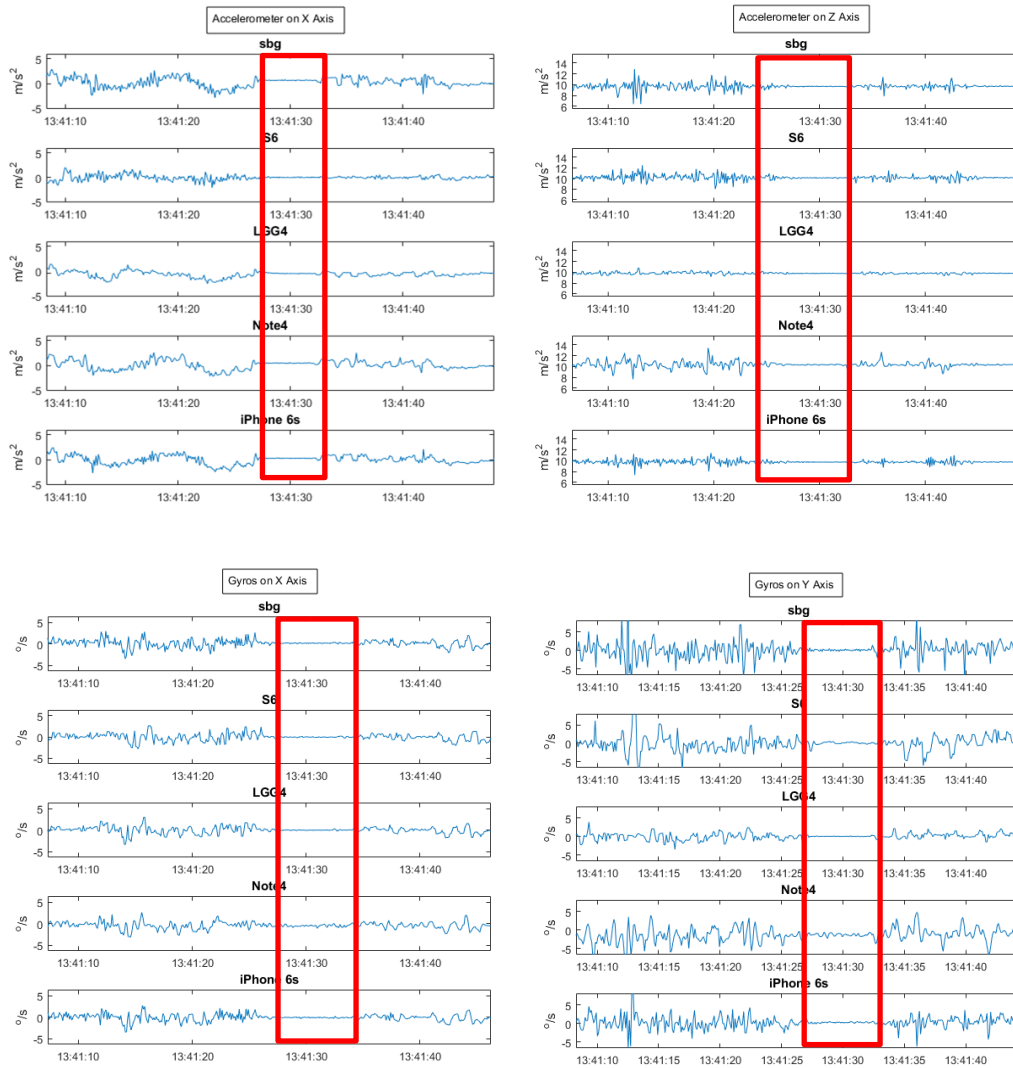
## 8.2 Σύγκριση Αδρανειακών αισθητήρων

Σε αυτή τη φάση πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των αδρανειακών των τεσσάρων έξυπνων κινητών συσκευών με αυτά του SBG Ellipse-N και διερευνάται η δυνατότητα τους να αναγνωρίσουν τη μεταβολή στη δυναμική κατάσταση του οχήματος (στάση, εκκίνηση, στροφές).

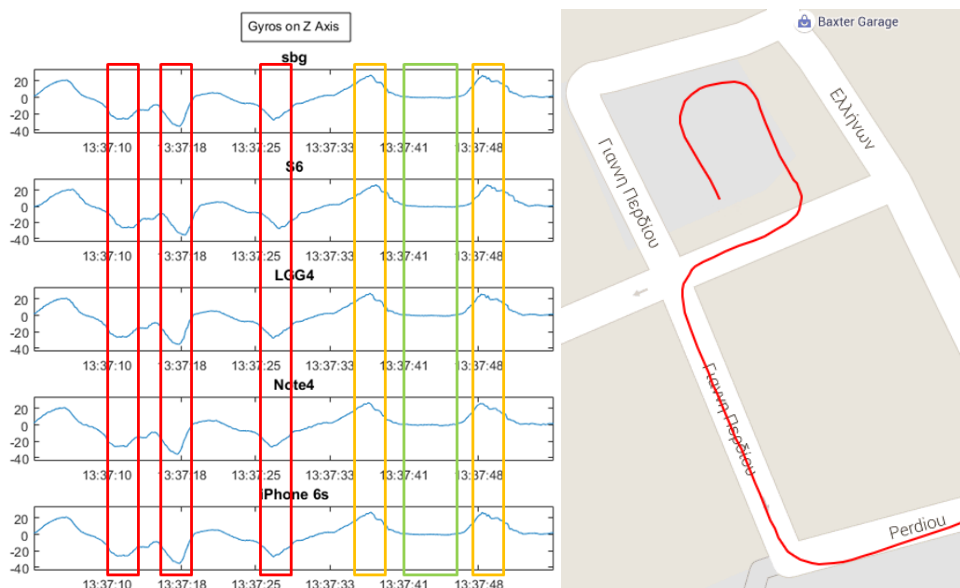
Στα πλαίσια αυτής της φάσης, δημιουργήθηκαν τα γραφήματα όλων των αισθητήρων για όλους τους άξονες σε αντιπαράθεση με τους αντίστοιχους αισθητήρες των υπόλοιπων συσκευών. Ακολουθώντας με τη χρήση του βίντεο του πειράματος εντοπίστηκαν οι χρονικές περίοδοι αλλαγής της κινηματικής κατάσταση του οχήματος και έγινε αναγνώριση τους στα γραφήματα.

Στην Εικόνα 53 απεικονίζεται το φαινόμενο της στάσης του οχήματος όπως αυτό αποδίδεται από τους αδρανειακούς αισθητήρες. Στα επιταχυνσιόμετρα κατά τον άξονα X, ο οποίος είναι παράλληλος με τη διεύθυνση της κίνησης του οχήματος, παρατηρείται η καταγραφή αρνητικών επιταχύνσεων. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς εκείνη τη χρονική περίοδο η ταχύτητα του οχήματος μειωνόταν. Στο ίδιο γράφημα παρατηρείται πως το ίδιο φαινόμενο είναι πιο αισθητό από κάποιες συσκευές σε σχέση με τις υπόλοιπες.

Αντίστοιχα στην Εικόνα 54 απεικονίζονται οι στροφές του οχήματος όπως αυτό αποδίδεται από τα γυροσκόπια κατά τον άξονα Z σε αντιπαράθεση με τη διαδρομή που υπολογίστηκε από το δορυφορικό εντοπισμό. Στο γράφημα επισημαίνονται με κόκκινο χρώμα οι δεξιές στροφές, με κίτρινο οι αριστερές και με πράσινο οι περιοχές όπου το όχημα κινείται σε ευθεία πορεία. Συγκριτικά όλες οι συσκευές φαίνεται να αποδίδουν το ίδιο αισθητά τις στροφές.



**Εικόνα 53: Εντοπισμός Στάσης με την χρήση αδρανειακών αισθητήρων**



**Εικόνα 54: Εντοπισμός Στροφών με τη χρήση Αδρανειακών αισθητήρων**

### 8.2.1 Στατιστικά στοιχεία

Μετά από την οπτική σύγκριση των αδρανειακών αισθητήρων, μέσω των διαγραμμάτων, έλαβε χώρα και η αριθμητική τους σύγκριση με τη χρήση των στατιστικών τους στοιχείων.

Όπως φαίνεται και στα διαγράμματα αλλά και στον Πίνακα 15 τα γυροσκόπια των έξυπνων συσκευών δεν αποκλίνουν πολύ από αυτά του SBG, ιδίως τα γυροσκόπια κατά τον άξονα Z.

Αντιθέτως τα επιταχυνσιόμετρα των κινητών τηλεφώνων φαίνεται να είναι χαμηλότερης ευαισθησίας από αυτά του SBG, καθώς τα μέγιστα και τα ελάχιστα τους σε απόλυτες τιμές είναι πιο μικρά.

Πίνακας 15: Στατιστικά Στοιχεία Γυροσκοπίων

Sensor	X-Axis (°/s)				Y-Axis (°/s)			
	max	min	mean	std	max	min	mean	std
<b>SBG</b>	11.564	-8.430	0.166	1.063	43.892	-62.172	0.0916	3.294
<b>Note4</b>	7.932	-5.918	-0.440	0.944	32.273	-37.333	-1.362	2.929
<b>iPhone 6s</b>	11.224	-10.405	-0.079	1.024	28.908	-40.268	0.214	2.429
<b>Galaxy S6</b>	11.597	-10.743	-0.020	1.040	33.140	-36.560	0.197	2.989
<b>LG G4</b>	8.829	-5.919	0.001	0.932	11.0123	-10.141	0.026	1.061

Sensor	Z-Axis (°/s)			
	max	min	mean	std
<b>SBG</b>	32.800	-36.611	0.0722	6.213
<b>Note4</b>	32.410	-35.891	0.184	6.154
<b>iPhone 6s</b>	36.236	-32.397	-0.179	6.154
<b>Galaxy S6</b>	32.349	-36.440	-0.010	6.155
<b>LG G4</b>	32.630	-36.285	-0.003	6.158

Πίνακας 16: Στατιστικά Στοιχεία Επιταχυνσιμέτρων

Sensor	X-Axis (m/s <sup>2</sup> )				Y-Axis (m/s <sup>2</sup> )			
	max	min	mean	std	max	min	mean	std
<b>SBG</b>	10.263	-7.243	0.148	1.009	8.398	-7.975	0.105	0.746
<b>Note4</b>	8.193	-6.913	-0.058	0.892	5.227	-5.965	0.067	0.667
<b>iPhone 6s</b>	8.834	-7.006	0.0717	0.836	5.988	-6.599	-0.071	0.676
<b>Galaxy S6</b>	5.038	-9.311	0.0015	0.673	8.313	-7.956	0.013	0.715
<b>LG G4</b>	2.814	-3.391	0.022	0.501	3.864	-2.114	0.101	0.555

Sensor	Z-Axis (m/s <sup>2</sup> )			
	max	min	mean	std
<b>SBG</b>	16.628	4.181	9.709	0.664
<b>Note4</b>	20.599	3.226	10.324	0.789
<b>iPhone 6s</b>	14.411	6.011	9.754	0.511
<b>Galaxy S6</b>	18.321	-0.529	10.128	0.681
<b>LG G4</b>	12.477	7.814	9.808	0.252

## 9 Συμπεράσματα

Κατά την πρώτη φάση της μελέτης, συγκρίθηκε ένας γεωδαιτικός δέκτης τεχνολογίας αιχμής (ProPak6), ο οποίος ειδικεύεται και στον κινηματικό εντοπισμό, με ένα ολοκληρωμένο σύστημα GPS/INS (SBG Ellipse-N) τύπου MEMS και διερευνήθηκε:

A) Η ακρίβεια εντοπισμού θέσης του SBG Ellipse-N σε σχέση με το ProPak6

B) Η συνεισφορά της MAM, SBG Ellipse-N στα σημεία όπου δεν ήταν διαθέσιμη λύση GNSS

Κατά την δεύτερη φάση της μελέτης, συγκρίθηκαν τα αδρανειακά συστήματα τεσσάρων έξυπνων συσκευών με αυτά του SBG και διερευνάται η δυνατότητα τους να αναγνωρίζουν τη μεταβολή στη δυναμική του οχήματος (στάση, εκκίνηση και στροφές).

Με το πέρας του πρώτου μέρους, φάνηκε πώς τη πιο χαμηλή ακρίβεια και το πιο μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς λύση είχε το Galaxy S6 του οποίου η διαθεσιμότητα σε δορυφορικό σήμα ήταν κατά μέσο όρο η χαμηλότερη από όλους τους δέκτες και πολύ κοντά στο όριο των τεσσάρων δορυφόρων. Ένας δέκτης GNSS για να δώσει επίλυση θέσης χρειάζεται τουλάχιστο τέσσερεις δορυφόρους, αλλά για να υπάρξει συνόρθωση της θέσης και καλύτερη ακρίβεια χρειάζονται από πέντε και πάνω. Σε καμία περίπτωση όμως δεν σημαίνει πως όσο περισσότεροι τόσο το καλύτερο, καθώς το επιπλέον δορυφορικό σήμα μπορεί να είναι προϊόν πολυανάκλασης ή εξασθενημένο και ιονοσφαιρικά επηρεασμένο.

Επίσης στο πείραμα παρατηρήθηκε πώς μέσω της συγχωνευμένης λύσης το SBG είχε 6.5% βελτίωση στην επίλυση της θέσης. Να σημειωθεί πως στη συγχωνευμένη λύση παρατηρήθηκε ένα διάστημα 30s κατά το οποίο σημειώθηκε διακοπή στη λήψη του εισερχόμενου δορυφορικού σήματος και όπως έχει αναφερθεί τα INS αυτής της βαθμίδας σε Stand Alone λύση, αυτής της διάρκειας, έχουν αποκλίσεις μέχρι και 5m, πράγμα που μειώνει την ακρίβεια που θα μπορούσε να δώσει η συγχωνευμένη λύση.

Επιπρόσθετα, οι δέκτες GNSS δεν έδωσαν λύση για το 27% της διαδρομής κατά μέσο όρο. Ο μόνος δέκτης που είχε 100% διαθεσιμότητα σε λύση ήταν το SBG κατά την συγχωνευμένη λύση GPS/INS. Σε αυτό το σημείο παρατηρείται η σημαντική



προσφορά της MAM κατά την πλοήγηση ενός οχήματος σε “δύσκολα” περιβάλλοντα.

Κατά το δεύτερο μέρος της μελέτης φάνηκε πώς οι MAM των έξυπνων συσκευών περιέχουν πολύ καλά γυροσκόπια, καθώς οι μετρήσεις τους αποκλίνουν λίγο από τις αντίστοιχες του SBG. Τα επιταχυνσιόμετρα των κινητών συσκευών κατά την σύγκριση τους έδειξαν μεγαλύτερες αποκλίσεις από ότι τα γυροσκόπια, όπως φαίνεται στο κεφάλαιο 8, στους Πίνακες 15 και 16. Σε αυτούς τους πίνακες παρατηρείται πως για τα σημεία των μέγιστων και ελαχίστων εγγραφών, οι αποκλίσεις των γυροσκοπίων σε απόλυτες τιμές κυμαίνονται από 0,02 έως 3,9, ενώ για τα επιταχυνσιόμετρα από 0,033 έως 32,9. Εικάζεται ότι οι αποκλίσεις αυτές μπορεί να οφείλονται σε μη ακριβή υπολογισμό του συντελεστή κλίμακας κατά τη βαθμονόμηση των αισθητήρων ή φθηνότερη ποιότητα κατασκευής.

Παρόλα αυτά οι έξυπνες συσκευές είναι βέβαιο πως θα μπορούσαν να δώσουν μία καλή συγχωνευμένη λύση καθώς σε μια αδρανειακή πλοήγηση η ακρίβεια των επιταχυνσιομέτρων δεν έχει μεγάλο αντίκτυπο (Groves, 2007).

## 10 Βιβλιογραφία

- [1] Allison, K., Gunther, R., Dorota, G., Gikas, V., Roberts, G., 2011. Evaluating the performance of mems based inertial navigation sensors for land mobile applications.
- [2] BeiDou Navigation Satellite System - System Introduction [WWW Document], n.d. URL <http://www.beidou.gov.cn/2012/12/14/201212142e8f29c30e0d464c9b34d6828706f81a.html> (accessed 2.28.16).
- [3] Dardari, D., Luise, M., Falletti, E., 2011. Satellite and Terrestrial Radio Positioning Techniques: A signal processing perspective, 1 edition. ed. Academic Press.
- [4] Ellipse\_Series\_Leaflet.pdf, n.d.
- [5] El-Rabbany, A., 2006. Introduction to GPS: The Global Positioning System, Second Edition by Ahmed El-Rabbany, 2 edition. ed. Artech House.
- [6] El-Sheimy, N., 2014. The Promise of MEMS Sensors to the Mapping and Navigation.
- [7] EngineersGarage, 2012. Magnetometers [WWW Document]. URL <http://www.engineersgarage.com/articles/magnetometer> (accessed 1.2.16).

- [8] esa, n.d. What is Galileo? [WWW Document]. Eur. Space Agency. URL [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/The\\_future\\_-\\_Galileo/What\\_is\\_Galileo](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/What_is_Galileo) (accessed 4.28.16).
- [9] GPS-703-GGG.pdf, n.d.
- [10] Groves, P.D., 2013. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, 2 Rev ed. ed. Artech House Publishers, Boston.
- [11] Groves, P.D., 2007. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. Artech House Inc, London ; Sterling, VA.
- [12] Haiyu, L., El-Sheimy, N., 2014. A State Constraint Kalman Filter for Pedestrian Navigation with Low Cost MEMS Inertial Sensors.
- [13] Higuera, F., Castro, M., 2013. Using smartphones as a very low-cost tool for road inventories.
- [14] Information analytical center of GLONASS and GPS controlling [WWW Document], n.d. URL <https://www.glonass-iac.ru/en/index.php> (accessed 4.28.16).
- [15] Ionospheric Effects on GPS - Innov.1991.04.pdf, n.d.
- [16] Johnson, C., 2013. Pedestrian Dead Reckoning Enables Indoor Navigation Without WiFi | EE Times [WWW Document]. EETimes. URL [http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1320391](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1320391) (accessed 4.28.16).
- [17] NovAtel, 2015. NOVATEL'S SPAN TECHNOLOGY PROVIDES CONTINUOUS 3D POSITIONING, VELOCITY AND ATTITUDE DETERMINATION EVEN WHEN SATELLITE RECEPTION MAY BE COMPROMISED FOR SHORT PERIODS OF TIME.
- [18] TOPCON, 2014. MS05AXII / MS1AXII.
- [19] UKOOA, 1994. The use of differential G.P.S. in offshore Surveying.
- [20] U.S. Geological Survey - Global Positioning Application and Practice, n.d.
- [21] U.S. Geological Survey - Global Positioning Application and Practice [WWW Document], n.d. URL <http://water.usgs.gov/osw/gps/> (accessed 11.18.15b).
- [22] Φωτίου, Α.Ι., Πικριδάς, Χ.Κ., 2012. GPS και γεωδαιτικές εφαρμογές. Θεσσαλονίκη : Ζήτη, 2012.