

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ
ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ (SST) ΜΕ
ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΑΛΤΙΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ GPS**

ΜΕΣΣΑΛΑ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ

ΝΕΣΤΟΡΑ ΑΡΓΥΡΩ

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Σ. ΛΥΚΟΥΡΓΙΩΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ , ΙΟΥΝΙΟΣ 2011

| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ | ΣΕΛΙΔΑ |
|---|---------------|
| Εικόνα 1.1- Η γεωειδής επιφάνεια. | 7 |
| Εικόνα 1.2- Η επιφάνεια της γης σε σχέση, με τη γεωειδή και ελλειψοειδή επιφάνεια. | 8 |
| Εικόνα 1.3 –Φυσική μορφή γήινης επιφάνειας. | 9 |
| Εικόνα 3.1 -Υψομετρητής πίεσης. | 11 |
| Εικόνα 3.2 -Διάφορα είδη υψομετρητών που συναντάμε σε αεροσκάφη. | 12 |
| Εικόνα 3.3 -Το σύστημα laser profiler. | 14 |
| Εικόνα 3.4 –Διαφορετικές τροχιές των δορυφόρων του συστήματος GPS. | 17 |
| Εικόνα 3.5 -Δέκτης GPS της εταιρίας TOPCON. | 18 |
| Εικόνα 3.6 -Κεραία δαχτυλιδίων (choke ring). | 20 |
| Εικόνα 3.7 -Συστοιχία από κεραίες GPS. | 21 |
| Εικόνα 3.8 –Η τομή δύο σφαιρών που αντιστοιχούν στους δορυφόρους Α και Β. | 24 |
| Εικόνα 3.9 -Η τομή των τριών σφαιρών που αντιστοιχούν στους δορυφόρους Α,Β,С . | 25 |
| Εικόνα 3.10 –Ο θέσεις των δορυφόρων και το GDOP. | 29 |

| | |
|---|----|
| Εικόνα 4.1 -Σήματα δορυφορικών υψομέτρων. | 38 |
| Εικόνα 4.2 -Ιονοσφαιρικό και τροποσφαιρικό σφάλμα. | 39 |
| Εικόνα 4.3 –Το σφάλμα πολυανάκλασης (multipath error). | 42 |
| Εικόνα 5.1 –Διαφορικό GPS (DGPS). | 46 |
| Εικόνα 6.1 -EL NINO. | 49 |
| Εικόνα 6.2 -SKYLAB (1973-75). | 50 |
| Εικόνα 6.3 -Συνδιασμός της δορυφορικής αλτιμετρίας με GPS. | 52 |
| Εικόνα 6.4 -TOPEX/ Poseidon : 1992 - | 53 |
| Εικόνα 6.5 -JASON 1 : 2001 – | 54 |
| Εικόνα 6.6 -Αύξηση της μέσης θαλάσσιας στάθμης από το 1993 έως και σήμερα. Η αύξηση είναι περίπου 3,2 χιλιοστά το χρόνο. | 56 |
| Εικόνα 6.7 –Jason-2. | 59 |
| Εικόνα 6.8 –Jason-3. | 60 |
| Εικόνα 6.9 –Η εξέλιξη των δορυφόρων. | 60 |

| | |
|--|----|
| Εικόνα 7.1 -Η τεχνική του kinematic ‘GPS – on boat’. Όπως είναι εμφανές από το σχήμα το GPS λαμβάνει το ύψος με βάση το Ελλειψοειδές Αναφοράς (EA), ενώ επηρεάζεται συνέχεια από τον κυματισμό. (Πηγή: Yabuki, Fujita, 2003). | 69 |
| Εικόνα 7.2 - Μετρήσεις στον Κορινθιακό κόλπο. | 70 |
| Εικόνα 7.3 -Το ιστιοπλοϊκό σκάφος «Άλκηστις» κατά περίοδο αγκυροβολίας στις νήσους Στροφάδες. | 72 |
| Εικόνα 7.3.1 -Διάταξη της συσκευής υποδοχής του δέκτη GPS πάνω στο σκάφος. Η διάταξη αυτή κατασκευάστηκε στο μηχανουργείο του Πανεπιστημίου Πατρών. | 73 |
| Εικόνα 7.4 - Ανεμογεννήτρια τύπου Rutland για την παροχή ενέργειας στους συσσωρευτές του σκάφους αλλά και στο δέκτη GPS κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. | 73 |
| Εικόνα 7.5 -Το δίκτυο των τεσσάρων (4) σταθερών γεωδαιτικών σταθμών από τους οποίους έγινε η επίλυση. (Πηγή google earth). | 74 |
| Εικόνα 7.6 -Χάρτης της περιοχής μελέτης και των ευθύγραμμων θαλάσσιων πορειών σάρωσης του πειράματός. | 75 |
| Εικόνα 7.7 - Εκτίμηση υψομέτρου SST ως προς το ελλειψοειδές αναφοράς. | 77 |

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|-----------|
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ..... | 1 |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ..... | 2 |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 6 |
| 1. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ (SST) και ΓΕΩΕΙΔΕΣ..... | 6 |
| 2.ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ(SST)..... | 10 |
| 3.ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ - ΥΨΟΜΕΤΡΗΤΕΣ (altimeter) . | 10 |
| 3.1 ΟΡΓΑΝΑ ΣΕ ΑΕΡΟΣΚΑΦΗ..... | 11 |
| 3.1.1 Υψομετρητής πίεσης | 12 |
| 3.1.2 Ραντάρ υψομετρικών διακυμάνσεων..... | 12 |
| 3.1.3 Laser Profiler..... | 13 |
| 3.2 GPS..... | 15 |
| 3.2.1 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΤΟ GPS;..... | 16 |
| 3.2.2 ΤΑ ΜΕΡΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ GPS..... | 17 |
| 3.2.3 ΠΩΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙ ΤΟ GPS;..... | 23 |
| 4. ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΗΓΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ GPS..... | 30 |
| 4.1 Το σφάλμα της τροχιάς των δορυφόρων..... | 30 |
| 4.2 Το σφάλμα του ρολογιού του δορυφόρου..... | 31 |
| 4.3 Το σφάλμα του ρολογιού του δέκτη..... | 32 |
| 4.4 Οι μεταβολές του κέντρου φάσης της κεραίας..... | 33 |
| 4.5 Το τυχαίο σφάλμα παρατήρησης..... | 34 |
| 4.6 Το σφάλμα αβεβαιότητας του γνωστού σημείου..... | 34 |
| 4.7 Η δομή της ατμόσφαιρας και τα ατμοσφαιρικά σφάλματα..... | 34 |
| 4.7.1 Το τροποσφαιρικό σφάλμα..... | 35 |

| | |
|---|-----------|
| 4.7.2 Το ιονοσφαιρικό σφάλμα | 37 |
| 4.8 Ο υδρατμός έχει επιπτώσεις επίσης στο σήμα GPS. | 40 |
| 4.9 Το σφάλμα πολυανάκλασης..... | 40 |
| 4.10 Το σφάλμα της ολίσθησης των κύκλων..... | 42 |
| 5. ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ GPS..... | 44 |
| 5.1 Πώς λειτουργεί ένα Διαφορικό GPS; | 45 |
| 6. ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ..... | 47 |
| 6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 47 |
| 6.1.1 TOPEX/Poseidon..... | 51 |
| 6.1.2 JASON -1..... | 53 |
| 6.1.3 JASON-2..... | 58 |
| 6.1.4 JASON-3..... | 59 |
| 6.2 ΠΗΓΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΛΤΙΜΕΤΡΙΑΣ..... | 61 |
| 6.2.1 Σφάλματα του αλτίμετρου..... | 61 |
| 6.2.2 Σφάλματα εξ' αιτίας της ατμόσφαιρας..... | 62 |
| 6.2.3 Σφάλματα των επιδράσεων της Τροπόσφαιρας..... | 62 |
| 6.2.4 Σφάλματα των επιδράσεων της Ιονόσφαιρας..... | 63 |
| 6.2.5 Σφάλματα του γεωειδούς..... | 64 |
| 6.2.6 Σφάλματα χρονικών μεταβολών της επιφάνειας των ωκεανών..... | 65 |
| 6.2.7 Σφάλματα τροχιάς..... | 67 |
| 7. Η ΜΕΘΟΔΟΣ GPS – on boat..... | 68 |
| 7.1 Αναλυτική περιγραφή του πειράματος στο Ιόνιο πέλαγος..... | 72 |
| 7.2 Θαλάσσιες Πορείες..... | 74 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 78 |

Ευχαριστίες

Ευχαριστούμε θερμά τον Καθηγητή κ. Λυκουργιώτη Σωτήρη, για την ανάθεση και την επίβλεψη της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας, καθώς για τη συνεχή παρακολούθηση και τις πολύτιμες συμβουλές του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της.

Αφιερώνουμε την διπλωματική εργασία στις οικογένειές μας που μας στάθηκαν στις δύσκολες στιγμές που συναντήσαμε.

Τέλος, ευχαριστούμε τους φίλους μας για την συμπαράσταση τους όχι μόνο κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής, αλλά και καθόλη την πορεία μας στην Σχολή Πολιτικών Έργων Υποδομής.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρακάτω εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας των φοιτητριών Μεσσαλά Παναγιώτα και Νέστορα Αργυρώ για το τμήμα Πολιτικών Έργων Υποδομής του Ανώτατου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πατρών.

Βασικός στόχος της εργασίας είναι η κατανόηση βασικών αρχών, εννοιών και μεθοδολογιών, μετρήσεων και επεξεργασίας που εμπλέκονται στο πρόβλημα προσδιορισμού της επιφανειακής θαλάσσιας τοπογραφίας (**sea surface topography – SST**) με μεθόδους αλτιμετρίας και GPS. Με έμφαση τις γεωδαιτικές και τοπογραφικές εφαρμογές, όπου η ακρίβεια που απαιτείται ξεπερνά την ακρίβεια πλοήγησης των μερικών μέτρων και φτάνει στην ακρίβεια του εκατοστού του μέτρου ή και καλύτερη. Η ολοένα και αυξανόμενη τεχνολογική πρόοδος στον συγκεκριμένο τομέα, καθιστά το GPS σε ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο στα χέρια του Μηχανικού που στα αμέσως επόμενα χρόνια και με τη βελτίωση της ακρίβειας του, αναμένεται να κυριαρχήσει σε μία εναλλακτική μέθοδο, αυτή του GPS- on boat.

Ωστόσο αξίζει να αναφερθούν και άλλες τεχνικές προσδιορισμού της SST και του γεωειδούς που προϋπήρχαν του GPS- on boat, όπως αρχικά η μέτρησή της βαρύτητας και μετά οι υψομετρητές, τα ραντάρ διακυμάνσεων καθώς και οι δορυφόροι.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της **επιφανειακής θαλάσσιας τοπογραφίας (sea surface topography – SST)**. Η θάλασσα παρά την περί του αντιθέτου κοινή εμπειρία δεν έχει σε όλα τα σημεία της γης την ίδια στάθμη. Οι αιτίες είναι πολλές: οι διαφορές της ατμοσφαιρικής πίεσης, τα θαλάσσια ρεύματα, οι άνεμοι, οι διαφορές στην πυκνότητα από τόπο σε τόπο αλλά και η βαρυτική έλξη που ασκούν τα ουράνια σώματα πάνω στη γη προκαλώντας την παλίρροια. Το σχήμα της γης θα μπορούσε να οριστεί χονδρικά ως ένα ελλειψοειδές εκ περιστροφής. Η υπόθεση της ενός τέλειου σχήματος αναφοράς (Ελλειψοειδές Αναφοράς – ΕΑ) με $f \sim 1/300$ μας βοηθάει για τον προσδιορισμό τόσο του γεωειδούς όσο και της επιφανειακής θαλάσσιας τοπογραφίας σε σχέση με ένα σταθερό σχήμα. Από την παραπάνω υπόθεση προέκυψε η ανάγκη για δημιουργία μιας ισοδυναμικής επιφάνειας που θα ταυτίζεται με τη μέση στάθμη θάλασσας. Η επιφάνεια αυτή ονομάστηκε **γεωειδές**. Το γεωειδές λοιπόν, είναι εκείνη η ισοδυναμική επιφάνεια που θα συνέπιπτε ακριβώς με τη μέση ωκεάνια επιφάνεια της γης, εάν οι ωκεανοί ήταν σε ισορροπία. Σύμφωνα με τον C.F. Gauss, που το περιέγραψε αρχικά, είναι ο "μαθηματικός αριθμός της γης," μια ομαλή αλλά ιδιαίτερα ακανόνιστη επιφάνεια που αντιστοιχεί όχι στην πραγματική επιφάνεια της γήινης κρούστας, αλλά σε μια επιφάνεια που μπορεί μόνο να υπολογιστεί μέσω των εκτενών μετρήσεων βαρύτητας. Παρά το ότι υπήρξε μια σημαντική έννοια για σχεδόν διακόσια έτη στην ιστορία της γεωδαισίας και της γεωφυσικής, έχει καθοριστεί με υψηλή ακρίβεια μόλις τα τελευταία χρόνια.

Ο υπολογισμός του γεωειδούς με μεγάλη ακρίβεια είναι ένα από τα κύρια ζητήματα που απασχολούν τη φυσική γεωδαισία. Ο ακριβής προσδιορισμός του δεν είναι σημαντικός μόνο γιατί το γεωειδές αποτελεί την αρχή όλων των υψομέτρων, αλλά γιατί συνδέεται άμεσα με σύγχρονα πεδία έρευνας και

μελέτης, όπως η αναζήτηση κοιτασμάτων πετρελαίου αλλά και η άνοδος της στάθμης των θαλασσών λόγω **κλιματικής αλλαγής**.

Οι μετρήσεις βαρύτητας ήταν ο πρώτος και πλέον παραδοσιακός τρόπος υπολογισμού του γεωειδούς. Η μελέτη με τη μέθοδο των μετρήσεων βαρύτητας είναι πολύ παλαιά και βασίζεται στον έμμεσο υπολογισμό του γεωειδούς μέσω της συλλογής δεδομένων βαρύτητας από τόπο σε τόπο. Τα δεδομένα μετασχηματίζονται μετά την εισαγωγή τους στα μαθηματικά πρότυπα και έτσι προκύπτει η μορφή του γεωειδούς. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στη θάλασσα όσο και στην ξηρά. Από την άλλη πλευρά, υστερεί στο γεγονός ότι αποτελεί έμμεση μέθοδο προσδιορισμού με πολλές παραδοχές, η ακρίβεια της οποίας δεν κατάφερε ποτέ να προσδιορισθεί με μεγάλη αξιοπιστία. Προσπάθειες βελτίωσης αυτής της μεθόδου έγιναν αρκετές με την ταυτόχρονη μέτρηση, εκτός των στοιχείων βαρύτητας από περιοχή σε περιοχή, και άλλων δεδομένων, όπως η πυκνότητα των εδαφών και του θαλάσσιου νερού αλλά και δεδομένα παλιρροιογράφων.

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες η προσπάθεια για τη μελέτη του γεωειδούς μεταφέρθηκε στο διάστημα. Με την κοινή αποστολή της NASA και του Γαλλικού CNES οι δορυφόροι TOPEX/Poseidon και JASON – 1 εκτέλεσαν μια σειρά μετρήσεων της επιφανειακής θαλάσσιας τοπογραφίας μέσω της τεχνολογίας των ραδιοκυμάτων καθώς και επίγειων laser και κατάφεραν να προσδιορίσουν την επιφανειακή θαλάσσια τοπογραφία της μέσης θαλάσσιας στάθμης με ακρίβεια έως και 2 cm. Οι αποστολές των δορυφόρων δεν περιορίστηκαν όμως μόνο στη μελέτη της στάθμης των ωκεανών, αλλά μας έδωσαν μια σειρά από πολύτιμα στοιχεία για τα θαλάσσια ρεύματα, το κλίμα, τη μεταφορά και συσσώρευση θερμότητας στον ωκεανό αλλά και για την παλίρροια. Το κύριο μειονέκτημα των δορυφόρων αυτών είναι η αδυναμία τους στον προσδιορισμό της θαλάσσιας τοπογραφίας σε μικρές θάλασσες αλλά και

σε περιοχές κοντά στην ακτές. Όπως είναι άλλωστε γνωστό από τη βιβλιογραφία τα τελευταία χρόνια στις περιοχές κοντά στις ακτές το γεωειδές παρουσιάζει αρκετές ανωμαλίες.

Μια μέθοδος που προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια το πρόβλημα του γεωειδούς σε μέσες αποστάσεις από τις ακτές είναι η μέθοδος του **laser profiler** πάνω σε αεροπλάνο. Το σύστημα, που διαθέτει επίσης έναν επιταχυντή τριών (3) βαθμών ελευθερίας και ένα σύστημα GPS για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης του αεροσκάφους, είναι ιδανικό για την αποτύπωση της επιφανειακής θαλάσσιας τοπογραφίας σε μικρές θάλασσες. Η ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί με αυτή τη μέθοδο εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Πάντως, με τη συλλογή και άλλων δεδομένων, όπως καταγραφές από παλιρροιογράφους, η μέθοδος του laser profiler μπορεί να φτάσει την ακρίβεια των 3-5 cm.

Μέχρι και πριν από λίγες δεκαετίες ο ακριβής προσδιορισμός του γεωειδούς δεν απασχολούσε τόσο πολύ τους επιστήμονες. Με την είσοδο όμως της δορυφορικής αλτιμετρίας και ποιο συγκεκριμένα του συστήματος GPS (Global Positioning System) η κατάσταση άρχισε να αλλάζει. Η λειτουργία του GPS στηρίζεται σε 24 γεωδαιτικούς δορυφόρους οι οποίοι βρίσκονται σε σταθερές τροχιές γύρω από τη γη και οι συντεταγμένες τους είναι κάθε στιγμή γνωστές με μεγάλη ακρίβεια. Επειδή η βάση του συστήματος, είναι έξω από τη γη, το σύστημα μας δίνει τις συντεταγμένες (x,y,z) με βάση ένα μαθηματικό σύστημα συντεταγμένων. Το μαθηματικό μηδέν αυτού του συστήματος για τη κάθετη διεύθυνση Z βρίσκεται στο **ελλειψοειδές αναφοράς**. Το GPS αναφέρεται σε ένα θεωρητικό επίπεδο της θάλασσας (EA) που προκύπτει από ένα παγκόσμιο γεωδαιτικό σύστημα (WGS84). Το Ελλειψοειδές που ενυπάρχει σε αυτό το σύστημα (EA) δεν ταυτίζεται με τη μέση θαλάσσια στάθμη. Σε πολλά σημεία οι διαφορές είναι αρκετά μεγάλες και φτάνουν ακόμα και το 100 m. Όπως είναι προφανές, ο ακριβής προσδιορισμός της στάθμης της θάλασσας είναι

επιτακτικός, αλλιώς το GPS θα μας δίνει ένα υψόμετρο χωρίς καμία φυσική σημασία.

Με την είσοδο του GPS στη μελέτη του γεωειδούς έγινε σαφές ότι το γεωειδές παρουσίαζε πολύ μεγαλύτερες ανωμαλίες σε σχέση με αυτές που είχαν αρχικά υποθεθεί. Ακόμα, με η συνεχή βελτίωση της ακρίβειας του συστήματος το κατέστησε ιδανικό εργαλείο για την άμεση μελέτη της επιφανειακής θαλάσσιας τοπογραφίας, ακόμα και στις παράκτιες περιοχές όπου τα άλλα συστήματα παρουσιάζουν αρκετά σφάλματα.

Μία εναλλακτική μέθοδος προσδιορισμού του γεωειδούς και της επιφανειακής θαλάσσιας τοπογραφίας (SST) είναι η μέθοδος GPS- on boat. Η τεχνική αυτή, που είναι ακόμα πολύ καινούργια καθώς έχει εφαρμοστεί ελάχιστες φορές στο πρόσφατο παρελθόν σε πολύ μικρής έκτασης παράκτιες περιοχές, μας έδωσε αποτελέσματα ικανοποιητικής ακρίβειας που συμφωνούσαν με παλαιότερες προσεγγίσεις που είχαν γίνει με άλλες μεθόδους.

1. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ (SST) και ΓΕΩΕΙΔΕΣ

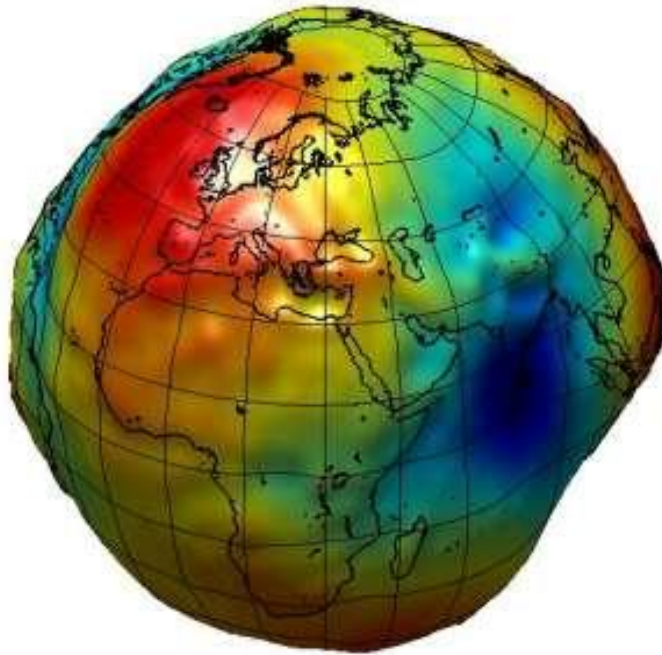
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επιφανειακή θαλάσσια τοπογραφία (Sea Surface Topography - SST) ορίζεται ως η μορφή της επιφάνειας της θάλασσας. Η επιφάνεια αυτή δεν είναι σταθερή καθώς επηρεάζεται από μια σειρά παραγόντων που κάνουν την επιφάνεια του νερού να μεταβάλλεται. Ο άνεμος, τα θαλάσσια ρεύματα, οι διαφορές πυκνότητας, η ατμοσφαιρική πίεση, οι αλλαγές του καιρού, αλλά και η έλξη που ασκούν τα ουράνια σώματα κάνουν την επιφάνεια να μεταβάλλεται συνέχεια. Η προσπάθεια για τον προσδιορισμό της SST επικεντρώνεται, έτσι, στον υπολογισμό σε κάθε σημείο της μέσης θαλάσσιας στάθμης (Mean Sea Level – MSL), που ως τέτοια παίρνουμε συνήθως το μέσο όρο των ωριαίων καταγραφών 19 χρόνων. Σε ένα τέτοιο χρονικό διάστημα θεωρούμε πως έχουν απαλειφθεί όλοι οι παράγοντες που προκαλούν είτε την τυχαία είτε την περιοδική κίνηση του θαλάσσιου ρευστού και, έτσι αυτό βρίσκεται στη θέση ισορροπίας.

Η επιφάνεια της γης δεν είναι παντού ομοιόμορφη. Μόνη εξαίρεση αποτελούν οι ωκεανοί, των οποίων οι επιφάνειες παρουσιάζουν μικρές διακυμάνσεις ως προς το ύψος, αντίθετα από ότι συμβαίνει στην επιφάνεια της ξηράς. Στα βουνά η επιφάνεια ορθώνεται, στα φαράγγια βυθίζεται και μόνο στις κοιλάδες παραμένει επίπεδη. Έτσι, είναι αδύνατο να υπολογιστεί προσεγγιστικά το σχήμα της γης με ένα σχετικά απλό μαθηματικό μοντέλο.

Για να απλοποιήσουμε αυτή την κατάσταση, ας υποθέσουμε ότι προεκτείνουμε τους ωκεανούς κάτω από την επιφάνεια της ξηράς και αφήνουμε το νερό να ρέει ελεύθερα παντού. Αν εμείς θεωρήσουμε ότι δεν υπάρχουν φαινόμενα της παλίρροιας καθώς επίσης και θαλάσσια ρεύματα σε αυτό τον "παγκόσμιο ωκεανό", τότε το σχήμα της υδάτινης επιφάνειάς του θα επηρεάζεται μόνο από τη δύναμη της βαρύτητας. Όμως, καθώς η διεύθυνση της βαρύτητας εξαρτάται από την κατανομή της μάζας στο εσωτερικό της γης και επειδή η κατανομή δεν είναι ομοιόμορφη, η διεύθυνση της βαρύτητας θα

διαφέρει από περιοχή σε περιοχή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η επιφάνεια του υποθετικού "παγκόσμιου ωκεανού" να μην είναι ομαλή αλλά κυματοειδής. Αυτή η επιφάνεια ονομάζεται γεωειδές (geoid), και σε κάθε σημείο της η διεύθυνση της βαρύτητας είναι κάθετη στην επιφάνεια. (Εικόνα 1.1)



Εικόνα 1.1- Η γεωειδής επιφάνεια

Αν η μάζα της γης κατανέμονταν ομοιόμορφα και η επιφάνεια της ξηράς ήταν ομαλή χωρίς να παρουσιάζει υψώματα και κοιλάματα, τότε η γεωειδής επιφάνεια, στην ιδανική αυτή κατάσταση, θα είχε το σχήμα μιας ελλειψοειδούς επιφάνειας πεπλατυσμένης στους πόλους και κεντραρισμένης στο κέντρο μάζας της γης. Δυστυχώς όμως, αυτό δεν ισχύει. Εκεί όπου η μάζα είναι λιγότερη, η γεωειδής επιφάνεια βυθίζεται πιο κάτω από την ελλειψοειδή επιφάνεια της ιδανικής κατάστασης. Αντίθετα, όπου υπάρχει περισσότερη μάζα, η γεωειδής επιφάνεια ανυψώνεται πιο πάνω από την ελλειψοειδή επιφάνεια. Έτσι, το σχήμα της γεωειδούς επιφάνειας αποκλίνει σε πολλά σημεία από το σχήμα της

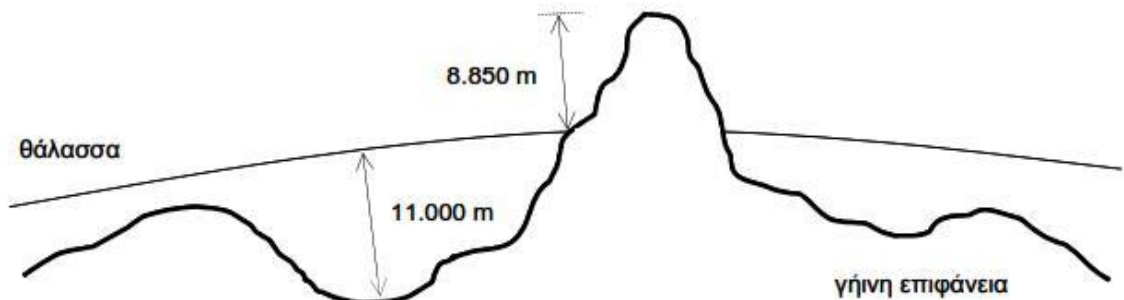
ελλειψοειδούς επιφάνειας. Η απόκλιση αυτή μπορεί να φθάσει +/- 100 μ. και ονομάζεται *γεωειδής κυμάτωση* (geoid undulation).

Το σχήμα, λοιπόν της γης θα μπορούσε να οριστεί χονδρικά ως ένα ελλειψοειδές εκ περιστροφής. Η υπόθεση ενός τέλειου σχήματος αναφοράς (Ελλειψοειδές Αναφοράς – ΕΑ) με $f \sim 1/300$ μας βοηθάει για τον προσδιορισμό τόσο του γεωειδούς όσο και της επιφανειακής θαλάσσιας τοπογραφίας σε σχέση με ένα σταθερό σχήμα. Στην (Εικόνα 1.2), απεικονίζεται η σχέση μεταξύ των επιφανειών της γης, της γεωειδούς και της ελλειψοειδούς καθώς και η γεωειδής κυμάτωση (N).



Εικόνα 1.2- Η επιφάνεια της γης σε σχέση, με τη γεωειδή και ελλειψοειδή επιφάνεια.

Η μεγαλύτερη αρνητική γεωειδής κυμάτωση είναι στον Ινδικό Ωκεανό με $N = -100$ μέτρα και η μεγαλύτερη θετική στο βόρειο τμήμα του Ατλαντικού Ωκεανού με $N = +70$ μέτρα. Όπως αναφέραμε, η επιφάνεια του γεωειδούς είναι ανώμαλη, αντίθετα με του ελλειψοειδούς αναφοράς που συχνά χρησιμοποιείται για να προσεγγίσει τη μορφή της φυσικής γήινης επιφάνειας. Η επιφάνεια του γεωειδούς όμως, είναι αρκετά ομαλότερη από τη φυσική γήινη επιφάνεια, (Εικόνα 1.3) καθώς παρουσιάζει εξάρσεις + 8.850 μέτρα (‘‘Εβερεστ’’) και - 11.0000 μέτρα (‘‘τάφος Μαριανιτών’’). Η συνολική απόκλιση Γεωειδούς-Ελλειψοειδούς είναι λιγότερο από 200 μέτρα (-106 έως +85 μ).



Εικόνα 1.3 –Φυσική μορφή γήινης επιφάνειας

Συνεπώς, εάν η στάθμη της θάλασσας ήταν απαλλαγμένη από τις παλίρροιες και τον καιρό, θα ταυτιζόταν με το γεωειδές. Καθώς, εάν και οι ηπειρωτικές μάζες ήταν διάτρητες από μια σειρά σηράγγων ή στενών καναλιών, η στάθμη της θάλασσας σε αυτά τα κανάλια θα συνέπιπτε επίσης με το γεωειδές. Στην πραγματικότητα το γεωειδές δεν έχει καμία φυσική σημασία στις ηπειρωτικές μάζες, αλλά τα γεωδαιτικά όργανα είναι σε θέση να υπολογίζουν τα ύψη των ηπειρωτικών σημείων επάνω από αυτή τη φανταστική, αλλά φυσικά καθορισμένη επιφάνεια, με μια τεχνική που ονομάζεται spirit leveling.

2.ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ(SST).

Ο υπολογισμός της επιφανειακής θαλάσσιας τοπογραφίας με κάποια ακρίβεια είναι μία πολύ πρόσφατη κατάκτηση της επιστήμης και της τεχνολογίας. Παρότι για πάνω από 200 χρόνια οι άνθρωποι γνώριζαν πως η στάθμη της θάλασσας δεν ήταν παντού η ίδια αλλά διαφέρει από τόπο σε τόπο, δεν είχαν την δυνατότητα να μετρήσουν αυτή τη μεταβολή. Μόνο τα τελευταία χρόνια με την ανακάλυψη των εναέριων αλτιμέτρων, αλλά και των δορυφορικών γεωδαιτικών συστημάτων (GPS, TOPEX/Poseidon κ.α.) έγινε δυνατή μια λεπτομερής παρατήρηση της θαλάσσιας τοπογραφίας. Τα πρόσφατα πειράματα μας έφεραν μπροστά σε πολλές μεγάλες εκπλήξεις καθώς κανένας δεν είχε προβλέψει πόσο μεγάλες μεταβολές παρουσιάζει η επιφανειακή τοπογραφία των ωκεανών. Αν και στις μεγάλες θάλασσες η έρευνα των δορυφορικών προγραμμάτων μας έδωσε εντυπωσιακά και ακριβή αποτελέσματα, σε μικρές θάλασσες αλλά και σε παράκτιες περιοχές η έρευνα είναι ακόμα σε αρκετά πρώιμο στάδιο. Σε αντίθεση με το γεωειδές η μέτρηση της επιφανειακής θαλάσσιας τοπογραφίας (SST) γίνεται παραδοσιακά «από αέρος». Τα κυριότερα όργανα για αυτό είναι οι υψομετρητές.

3.ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ - ΥΨΟΜΕΤΡΗΤΕΣ (altimeter)

Ο υψομετρητής μετρά την κάθετη ανύψωση ενός αντικειμένου επάνω από ένα δεδομένο σημείο αναφοράς. Η αναφορά μπορεί να είναι η επιφάνεια της γης, η μέση στάθμη της θάλασσας (MSL), ή κάποιο άλλο σημείο. Η μέτρηση του ύψους καλείται, υψομέτρηση. Ο όρος είναι αντίστοιχος με τον όρο βαθομέτρηση που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις βαθών από τα υποβρύχια.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι υψών, ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο σημείο αναφοράς. Ο υψομετρητής δείχνει το ύψος επάνω από το επίπεδο βαρομετρικής πίεσης που τίθεται στο παράθυρο υψομετρητών.

3.1 ΟΡΓΑΝΑ ΣΕ ΑΕΡΟΣΚΑΦΗ

3.1.1 Υψομετρητής πίεσης

Ένας υψομετρητής πίεσης (ή αλλιώς βαρομετρικός υψομετρητής) είναι ο υψομετρητής που χρησιμοποιούν τα περισσότερα αεροσκάφη. Η αρχή λειτουργίας του έχει ως εξής: Ένα βαρόμετρο μετρά την ατμοσφαιρική πίεση από ένα σταθερό σημείο (κοντά στη θάλασσα) έξω από το αεροσκάφος. Η πίεση αέρα μειώνεται με την αύξηση του ύψος περίπου 100 millibars ανά 800 μέτρα ή μια ίντσα στήλης υδραργύρου ανά 1000.



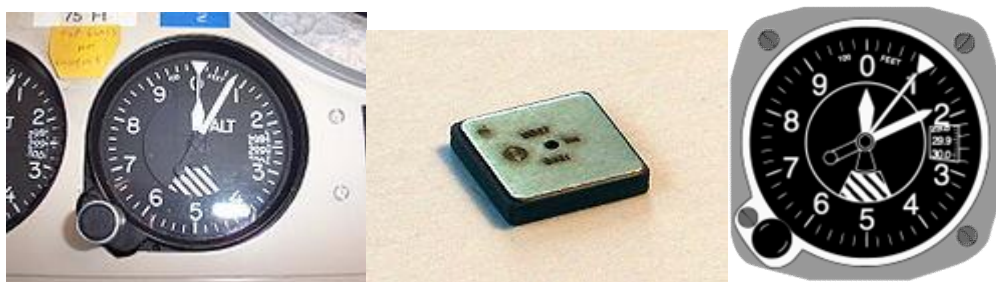
Εικόνα 3.1 -Υψομετρητής πίεσης

Ο υψομετρητής είναι βαθμονομημένος κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να παρουσιάσει την πίεση άμεσα ως ύψος επάνω από τη μέση στάθμη θάλασσας, σύμφωνα με ένα μαθηματικό πρότυπο για την γήινη ατμόσφαιρα (ISA). Τα

παλαιότερα αεροσκάφη χρησιμοποίησαν ένα απλό βαρόμετρο όπου η βελόνα έκανε λιγότερο από μια περιστροφή γύρω από το μηδέν. Τα σύγχρονα αεροσκάφη χρησιμοποιούν έναν ευαίσθητο υψομετρητή (Sensitive Altimeter), του οποίου η βελόνα διαγράφει πολλαπλάσιες περιστροφές, ενώ περιέχει και μία ή περισσότερες δευτερεύουσες βελόνες που καταγράφουν τον αριθμό των περιφορών. Με αυτά τα όργανα η ακρίβεια στη μέτρηση του ύψους αγγίζει τα πολύ λίγα μέτρα (2-5 m).

Σε έναν ευαίσθητο υψομετρητή, η πίεση αναφοράς σταθμών θάλασσας μπορεί να ρυθμιστεί από ένα δίκτυο σταθερών σταθμών ανά τη γη. Αυτό συμβαίνει καθώς η πίεση αναφοράς στις ίντσες της στήλης υδραργύρου διαφέρει από τόπο σε τόπο, ενώ επηρεάζεται από την συνεχή μετακίνηση των συστημάτων πίεσης και τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας.

Στην αεροπορία η περιφερειακή ή τοπική πίεση αέρα μετριέται με βάση τη μέση στάθμη θάλασσας (MSL) και ονομάζεται το QNH ή "υψομέτρηση υποβάθρου". Η πίεση που θα δοθεί τον υψομετρητή για να υπολογίσει το ύψος επάνω από το έδαφος σε ένα δεδομένο σημείο ονομάζεται QFE του τομέα. Ένας υψομετρητής δεν μπορεί παρόλα αυτά να ρυθμιστεί για τις αλλαγές στη θερμοκρασία του αέρα.



Εικόνα 3.2 -Διάφορα είδη υψομετρητών που συναντάμε σε αεροσκάφη .

3.1.2 Ραντάρ υψομετρικών διακυμάνσεων

Ένα ραντάρ υψομετρικών διακυμάνσεων μετρά το ύψος αμεσότερα, χρησιμοποιώντας το χρόνο που λαμβάνεται για ένα σήμα που αντανακλάται από

την επιφάνεια πίσω στα αεροσκάφη. Το ραντάρ υψομετρικών διακυμάνσεων χρησιμοποιείται για να μετρήσει το ύψος επάνω από το γήινο επίπεδο κατά τη διάρκεια της προσγείωσης στα αεροσκάφη. Η τεχνολογία υψομετρητών ραντάρ χρησιμοποιείται επίσης, για να επιτρέπει στα μαχητικά αεροσκάφη να πετάνε σε πολύ χαμηλό ύψος.

3.1.3 Laser Profiler

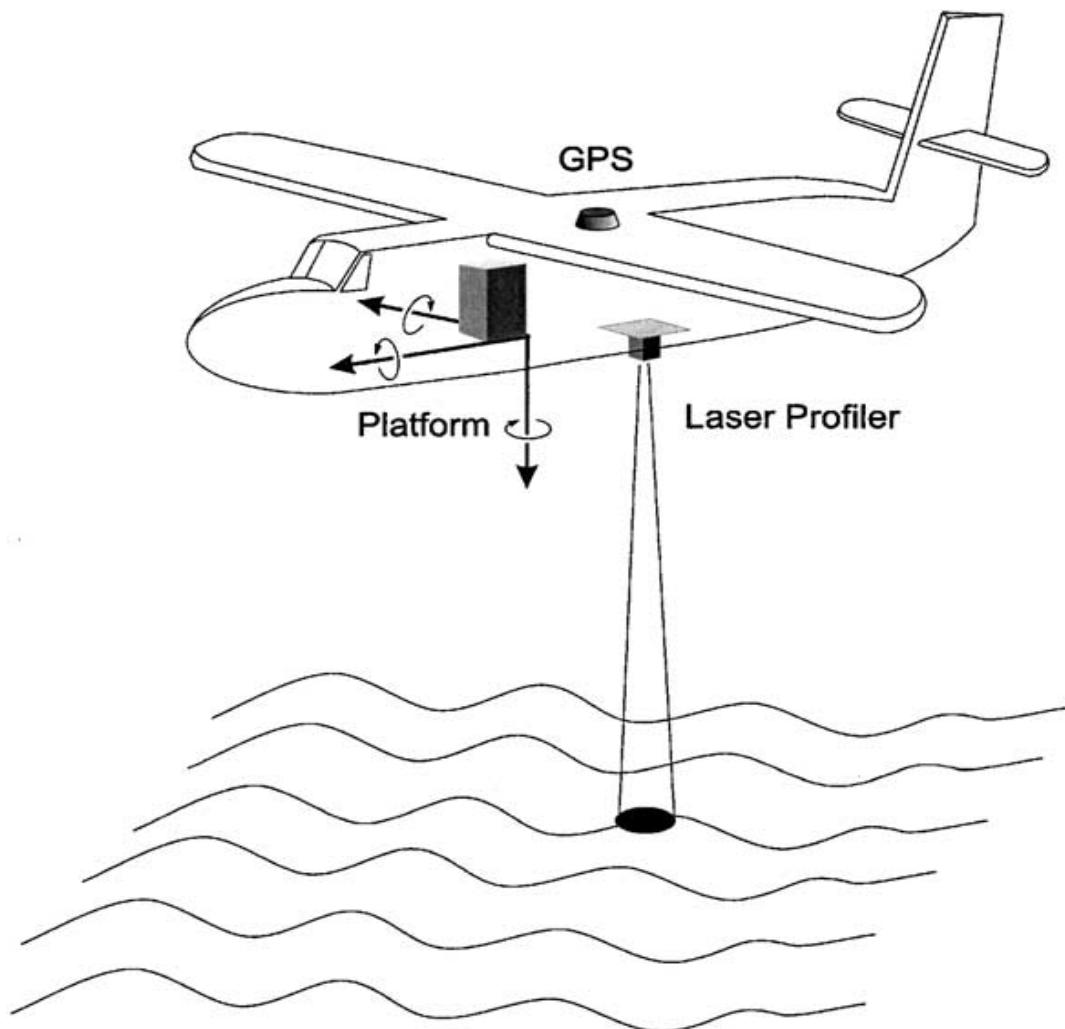
Μια σύγχρονη μέθοδος προσδιορισμού της επιφανειακής θαλάσσιας τοπογραφίας (SST) είναι αυτή της τοποθέτησης μιας συσκευής laser profiler σε αεροσκάφος .

Οι αερομεταφερόμενες τεχνικές λέιζερ έχουν εξελιχθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών και έχουν εξεταστεί σε διάφορα πειραματικά προγράμματα που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα των γεωδαιτικών εφαρμογών.

Σε αυτό το πρόγραμμα, ο αερομεταφερόμενος υψομετρητής λέιζερ χρησιμοποιήθηκε για να καθορίσει το επίπεδο της θάλασσας στις παράκτιες περιοχές και να συνδέσει τα αποτελέσματα των δορυφορικών ραντάρ υψομετρίας, πέρα από τα μεγάλα θαλάσσια βάθη με τους σταθμούς μετρητών παλίρροιας στην ακτή. Επειδή το αερομεταφερόμενο λέιζερ είναι ικανό για να παρέχει τα ύψη της επιφάνειας της θάλασσας στο δέκατο μέτρου σε εκατοστά ύψους, καθιστούν δυνατή την ύπαρξη της ανεξάρτητης αξιολόγησης των αποτελεσμάτων της διαστημικής υψομετρίας ραντάρ.

Το σύστημα, διαθέτει επίσης έναν επιταχυντή τριών (3) βαθμών ελευθερίας και ένα σύστημα GPS για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης του αεροσκάφους, που είναι ιδανικό για την αποτύπωση της επιφανειακής θαλάσσιας τοπογραφίας σε μικρές θάλασσες. Η ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί με αυτή τη μέθοδο εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Πάντως, με

τη συλλογή και άλλων δεδομένων όπως καταγραφές από παλιρροιογράφους ,η μέθοδος του laser profiler μπορεί να φτάσει την ακρίβεια των 3-5 cm. Στην (Εικόνα 3.3) βλέπουμε σχηματικά το σύστημα αυτό. Μετρήσεις με το σύστημα laser profiler έχουν γίνει κατά το παρελθόν.



Εικόνα 3.3 -Το σύστημα laser profiler.

3.2 GPS

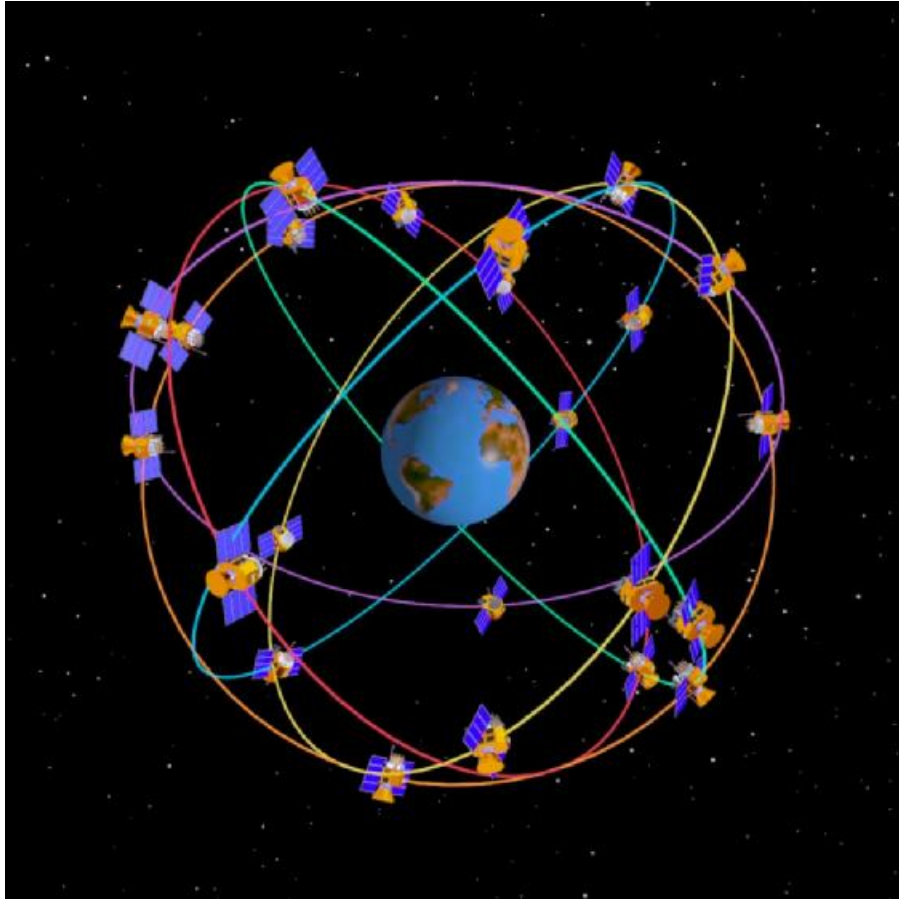
Η προσπάθεια του ανθρώπου να υπολογίσει τη γεωγραφική θέση στην οποία βρίσκεται πάνω στη γη και την κατεύθυνση προς την οποία κινείται, ξεκινάει από αρχαιοτάτων χρόνων. Ο ακριβής προσδιορισμός της γεωγραφικής θέσης είναι πολύ σημαντικός για πολλές δραστηριότητες. Για το λόγο αυτό, ο άνθρωπος δημιούργησε από παλιά, ένα πλέγμα από παράλληλες και κάθετες προς τον Ισημερινό νοητές γραμμές, οι οποίες περιβάλλουν ολόκληρη τη γη χαρακτηρίζοντας με αυτό τον τρόπο, κάθε σημείο στην επιφάνειά της με μία μοναδική ταυτότητα. Έτσι, μπορούσε να προσδιορίζει ένα σημείο στην επιφάνεια της γης με μεγάλη ακρίβεια. Σήμερα, όλοι οι τοπογραφικοί χάρτες χρησιμοποιούν δύο συστήματα πλέγματος. Το ένα είναι το πλέγμα του γεωγραφικού πλάτους και μήκους, και το άλλο είναι το πλέγμα UTM. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών πολλά είδη τεχνολογιών εφαρμόστηκαν για τον προσδιορισμό της γεωγραφικής θέσης, αλλά το καθένα είχε τα δικά του μειονεκτήματα.

Πριν μερικές δεκαετίες, το αμερικανικό Υπουργείο Άμυνας αποφάσισε ότι ο στρατός πρέπει να διαθέτει μία συσκευή με την οποία να μπορεί να προσδιορίζει με ακρίβεια τη θέση των σημείων πάνω στη γη, ανεξάρτητα των καιρικών συνθηκών που επικρατούν στα σημεία αυτά, με σκοπό να τη χρησιμοποιήσει στα οπλικά της συστήματα. Διαθέτοντας ένα μεγάλο ποσό χρημάτων για την έρευνα αυτή (12 δισεκατομμύρια δολάρια!) κατασκεύασαν το παγκόσμιο σύστημα προσδιορισμού γεωγραφικής θέσης ή GPS (Global Positioning System), ένα σύστημα που άλλαξε για πάντα την πλοήγηση και θεωρείται σήμερα το πιο επαναστατικό όργανο προσανατολισμού που δημιουργήθηκε μετά την πυξίδα.

3.2.1 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΤΟ GPS;

Το παγκόσμιο σύστημα προσδιορισμού γεωγραφικής θέσης ή GPS (Global Positioning System) είναι ένα σύστημα ράδιο-πλοήγησης, το οποίο αποτελείται από ένα δίκτυο 24 δορυφόρων και από επίγειους σταθμούς κατανεμημένους σε όλο τον κόσμο. Οι δορυφόροι βρίσκονται σε ύψος περίπου 20 χιλιομέτρων από την επιφάνεια της γης και περιφέρονται γύρω από τη γη ακολουθώντας έξι διαφορετικές τροχιές. Κινούνται με ταχύτητα περίπου 2,6 χλμ. το δευτερόλεπτο, διαγράφοντας μέσα σε ένα εικοσιτετράωρο, δύο πλήρεις κύκλους γύρω από τη γη. Οι δορυφόροι αυτοί αναφέρονται και σαν NAVSTAR δορυφόροι και ο πρώτος GPS δορυφόρος εκτοξεύτηκε το Φεβρουάριο του 1978. Κάθε δορυφόρος ζυγίζει περίπου 1 τόνο και το μήκος του, όταν τα πλαίσια με τα ηλιακά φωτοστοιχεία είναι ανοικτά, φθάνει περίπου στα 5 μέτρα. Η ισχύς μετάδοσης των σημάτων είναι το πολύ 50 Watt. Κάθε δορυφόρος μεταδίδει σήματα σε τρεις συχνότητες από τις οποίες μόνο μία (αυτή στα 1575,42 MHz) χρησιμοποιείται για τους πολίτες, γνωστή και ως "L1". Οι άλλες δύο συχνότητες χρησιμοποιούνται για στρατιωτικούς σκοπούς. Η διάρκεια ζωής κάθε δορυφόρου υπολογίζεται σε 10 περίπου έτη. Κάθε τόσο κατασκευάζονται νέοι δορυφόροι για να αντικαταστήσουν τους παλιούς.

Το GPS χρησιμοποιεί τους 24 δορυφόρους και τους επίγειους σταθμούς ως σημεία αναφοράς για να υπολογίσει τη θέση που βρισκόμαστε με ακρίβεια λίγων μέτρων. Σήμερα, υπάρχουν εξελιγμένα GPS συστήματα, όπως το Differential GPS, το Augmented GPS κ.ά., τα οποία μπορούν να φθάσουν σε ακρίβεια καλύτερη του ενός μέτρου! Έτσι, ουσιαστικά είναι σαν να δίνουμε σε κάθε τετραγωνικό μέτρο του πλανήτη μας μία . μοναδική διεύθυνση.



Εικόνα 3.4 – Διαφορετικές τροχιές των δορυφόρων του συστήματος GPS

3.2.2 ΤΑ ΜΕΡΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ GPS

- **Δέκτες GPS**

Ο δέκτης GPS (Εικόνα 3.5) είναι μια συσκευή-όργανο πολύ υψηλής τεχνολογίας που μπορεί να συντονίζεται πάνω σε δυο βασικές συχνότητες. Ένας δέκτης χωρίζεται σε δυο βασικά μέρη που είναι η κεραία και ο κυρίως δέκτης. Η κεραία συνήθως περιλαμβάνει και τον προενισχυτή του σήματος και μπορεί να είναι εξωτερική (ανεξάρτητη μονάδα συνδεδεμένη με τον κυρίως δέκτη μέσω καλωδίου) ή εσωτερική ώστε όλο το σύστημα δέκτης-κεραία να είναι μια συμπαγής συσκευή. Ο κυρίως δέκτης αποτελείται από διάφορα επιμέρους τμήματα: το τμήμα των ραδιοσυχνοτήτων, τους διαύλους (κανάλια) παρακολούθησης του δορυφορικού σήματος με τους βρόγχους

παρακολούθησης, τον μικροεπεξεργαστή και τη μονάδα επικοινωνίας με τον χρήστη.

Οι δέκτες του συστήματος GPS λαμβάνουν τα σήματα των δορυφόρων και στη συνέχεια υπολογίζουν την απόσταση μεταξύ δορυφόρου-δέκτη είτε με τη μέτρηση ψευδοαποστάσεων (χρήση κώδικα) είτε με τη μέτρηση της διαφοράς φάσης της φέρουσας συχνότητας μεταξύ δορυφόρου-δέκτη, δηλαδή ανάλογα με τη μέθοδο μέτρησης που θα χρησιμοποιήσουμε.



Εικόνα 3.5 -Δέκτης GPS της εταιρίας TOPCON

- **Η κεραία του δέκτη**

Η κεραία λαμβάνει το αρκετά εξασθενημένο δορυφορικό σήμα από όλους τους ορατούς δορυφόρους, το ενισχύει με τον προενισχυτή και το διοχετεύει εσωτερικά στο δέκτη για περαιτέρω επεξεργασία. Η κεραία μετατρέπει στην ουσία την ενέργεια των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε ηλεκτρικό ρεύμα, δηλαδή μετατρέπει τα δορυφορικά ηλεκτρομαγνητικά σήματα σε ηλεκτρικά σήματα. Αν η κεραία είναι εξωτερική συνδέεται με ένα ειδικό καλώδιο με τον κυρίως δέκτη ή χωρίς καλώδιο με ασύρματη επικοινωνία (π.χ. Bluetooth).

Οι κεραίες είναι μικρών διαστάσεων, μικρού βάρους και συνήθως πολυκατευθυντήριες για λήψη σημάτων από όλες τις διευθύνσεις. Διακρίνονται σε διάφορους τύπους, με πιο διαδεδομένο για τις γεωδαιτικές και τοπογραφικές εφαρμογές τον τύπο των ‘μικρολωρίδων’ (microstrip), που έχουν και το πλεονέκτημα καλής λήψης σημάτων από δορυφόρους χαμηλά στον ορίζοντα. Σχεδιάζονται έτσι ώστε να μπορούν να λαμβάνουν είτε το σήμα στην L1 (δέκτες μιας συχνότητας) είτε και στην L2 (δέκτες δυο συχνοτήτων). Οι γεωδαιτικοί δέκτες έχουν τη δυνατότητα λήψης και στις δυο συχνότητες. Για τη σωστή λήψη των δορυφορικών σημάτων οι κεραίες δεν πρέπει να επισκιάζονται από γειτονικά αντικείμενα, όπως μεγάλα κτίρια, δέντρα κλπ. Στις περιπτώσεις αυτές δημιουργούνται πολλαπλές διαδρομές του σήματος εξαιτίας της ανάκλασης του στις γειτονικές επιφάνειες με αποτέλεσμα τη δημιουργία σημαντικών σφαλμάτων στις παρατηρήσεις (σφάλμα πολυανάκλασης, multipath error). Παρόμοια επίδραση δημιουργεί και η επιφάνεια του εδάφους κάτω από την κεραία, ωστόσο το σφάλμα αυτό είναι δύσκολο να απαλειφθεί. Για την περίπτωση των ανακλάσεων του σήματος κάτω από το έδαφος οι κεραίες ανθίστανται ικανοποιητικά.

Ιδιαίτερα ανθεκτικές στις πολυανακλάσεις είναι οι κεραίες που συνδυάζονται με μια διάταξη βάσης σπειροειδών δακτυλίων (choke ring),

διαθέτουν προστατευτικό θόλο (dome, radome), στοιχίζουν πολλαπλάσια από μια κοινή κεραία και χρησιμοποιούνται κυρίως στους μόνιμους σταθμούς (Εικόνα 3.6).



Εικόνα 3.6 -Κεραία δαχτυλιδίων (choke ring).

Άλλα βασικά χαρακτηριστικά μιας κεραίας είναι η ευαισθησία στη λήψη σημάτων διαφορετικής διεύθυνσης (gain pattern) και διαφορετικής γωνίας ύψους, καθώς και η σταθερότητα του κέντρου φάσης, δηλαδή του ηλεκτρικού κέντρου αναφοράς των μετρήσεων, τόσο για την L1 όσο και για την L2 συχνότητα. Το ηλεκτρικό με το μηχανικό μέρος μιας κεραίας δεν ταυτίζονται. Οι πιθανές συστηματικές αποκλίσεις του κέντρου φάσης από το γεωμετρικό ή μηχανικό κέντρο της κεραίας πρέπει να είναι γνωστές στις γεωδαιτικές εφαρμογές υψηλής ακρίβειας. Στην πράξη έχουν παρατηρηθεί αποκλίσεις μέχρι και ένα εκατοστό. Κεραίες του ίδιου κατασκευαστή έχουν την ίδια συμπεριφορά στη μεταβολή του κέντρου φάσης και έτσι οι επιδράσεις ελαχιστοποιούνται εάν οι κεραίες προσανατολίζονται στην ίδια περίπου κατεύθυνση, π.χ. πάντα προς το βορρά. Απαιτείται, λοιπόν, προσοχή όταν σε μια εργασία υψηλής ακρίβειας χρησιμοποιούνται δέκτες διαφορετικών εταιριών.



Εικόνα 3.7 -Συστοιχία από κεραίες GPS

- **Ο κύριος δέκτης**

Το πρώτο τμήμα του δέκτη που αναλαμβάνει την επεξεργασία του εισερχόμενου δορυφορικού σήματος, μετά την προενίσχυση, είναι το τμήμα των ραδιοσυχνοτήτων (RF section), το οποίο περιλαμβάνει διάφορες διατάξεις όπως είναι οι ταλαντωτές ή ρολόγια χαλαζιακού τύπου για την παραγωγή των ημιτονοειδών σημάτων αναφοράς, οι πολλαπλασιαστές για τη δημιουργία μεγαλύτερων συχνοτήτων, τα φίλτρα για την απομάκρυνση ανεπιθύμητων συχνοτήτων και οι μίκτες για τον πολλαπλασιασμό δυο διαφορετικών σημάτων και οι βρόγχοι παρακολούθησης και εξαγωγής μετρήσεων. Η βασική παρέμβαση του τμήματος των ραδιοσυχνοτήτων είναι η μετατροπή της συχνότητας του εισερχόμενου σήματος σε μικρότερη συχνότητα για να είναι εύκολα διαχειρίσιμο από το δέκτη.

Ο μικροεπεξεργαστής του δέκτη ελέγχει όλες τις λειτουργίες του, από τον εγκλωβισμό των δορυφόρων και την επεξεργασία του σήματος μέχρι τον υπολογισμό της θέσης σε πραγματικό χρόνο και την επικοινωνία με το χρήστη. Εκτελείται κάθε φορά που ο δέκτης τίθεται σε λειτουργία. Είναι σαφές ότι ένας καλός και ταχύς μικροεπεξεργαστής, εγγυάται την καλή λειτουργία του δέκτη και προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα.

Η πηγή τροφοδοσίας του δέκτη είναι πάντοτε κάποιου είδους μπαταρίες (συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα, DC) και κατά περίπτωση και μετασχηματιστής για τροφοδοσία από μια πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Πολλές εταιρίες δεκτών προσφέρουν δικές τους μπαταρίες και ειδικά καλώδια συνδέσεων. Η διάρκεια των παρατηρήσεων με μπαταρίες είναι των μερικών ωρών. Κατά τη διάρκεια των παρατηρήσεων είναι δυνατή η αλλαγή ή προσθήκη επιπλέον μπαταριών χωρίς να διακόπτονται οι παρατηρήσεις.

- **Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής**

Η μονάδα αποθήκευσης δεδομένων (παρατηρήσεις και άλλα δεδομένα ή πληροφορίες που εισάγονται από τον χρήστη όπως ύψος κεραίας) είναι στην ουσία μνήμη κάποιου τύπου, και ο σκληρός δίσκος ενός υπολογιστή όταν υπάρχει σύνδεση. Η χωρητικότητα της μνήμης αρκεί για πολλές ώρες παρατηρήσεων έως και μερικούς μήνες ανάλογα με τον τύπο μνήμης και την εφαρμογή του GPS. Το κατέβασμα των δεδομένων σε ένα PC είναι μια απλή διαδικασία (μέσω ειδικού ή όχι προγράμματος και σύνδεση με θύρες επικοινωνίας τύπου COM, USB).

3.2.3 ΠΩΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙ ΤΟ GPS;

Παρακάτω περιγράφεται η λειτουργία του GPS σε πέντε βήματα:

1ο βήμα- Διαδικασία “τριγωνισμού” (triangulation) από τους δορυφόρους.

2ο βήμα- Μέτρηση απόστασης από τους δορυφόρους χρησιμοποιώντας τον χρόνο μετάδοσης των ράδιο-σημάτων.

3ο βήμα- Συγχρονισμός ρολογιών δέκτη – δορυφόρου.

4ο βήμα- Εύρεση θέσης των δορυφόρων στον ουρανό.

5ο βήμα- Διόρθωση καθυστερήσεων στις οποίες υπόκειται το σήμα καθώς αυτό μεταδίδεται μέσω της ατμόσφαιρας και αντανακλάται σε διάφορα εμπόδια στην επιφάνεια της γης.

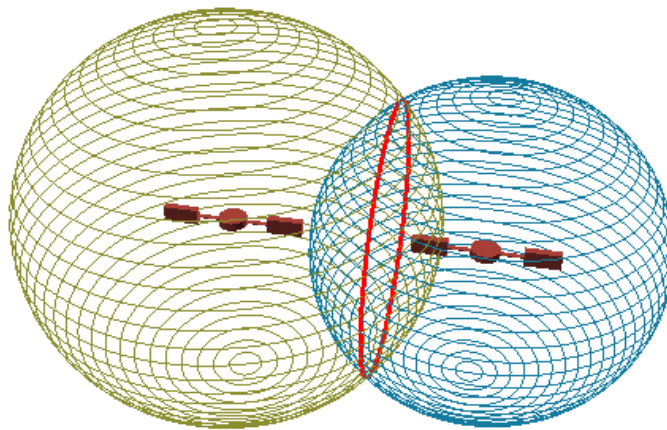
Βήμα 1: Τριγωνισμός από τους δορυφόρους

Αν και φαίνεται περίεργο, η βασική ιδέα στην οποία στηρίζεται το GPS είναι η χρήση δορυφόρων στο διάστημα για τον προσδιορισμό σημείων πάνω στη γη. Πράγματι, μετρώντας με πολύ μεγάλη ακρίβεια την απόσταση που έχουμε από τρεις δορυφόρους μπορούμε να "τριγωνοποιήσουμε" τη θέση μας οπουδήποτε πάνω στη γη. Προς το παρόν θα εξετάσουμε γεωμετρικά, πώς η μέτρηση των αποστάσεων από τρεις δορυφόρους καθορίζει με ακρίβεια τη θέση μας.

Ας υποθέσουμε ότι μετράμε την απόσταση που έχουμε από έναν δορυφόρο και βρίσκουμε ότι αυτή είναι 17.000 χλμ. Γνωρίζοντας ότι βρισκόμαστε 17.000 χλμ. μακριά από ένα συγκεκριμένο δορυφόρο, οι πιθανές θέσεις που θα μπορούσαμε να είμαστε στο σύμπαν περιορίζονται στην επιφάνεια μιας σφαίρας με κέντρο το δορυφόρο και ακτίνα την απόσταση από αυτόν.

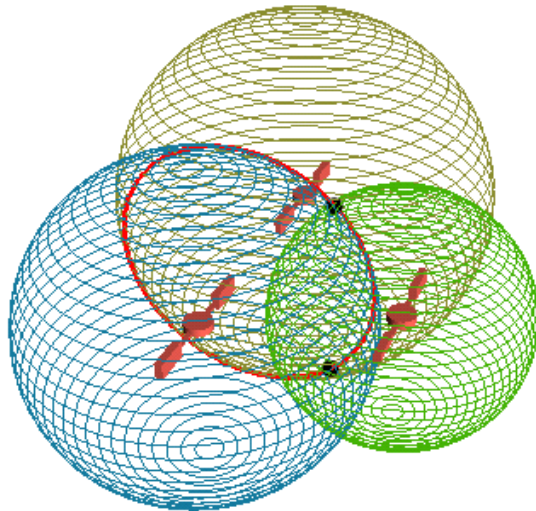
Κατόπιν, μετράμε την απόστασή μας από ένα δεύτερο δορυφόρο και βρίσκουμε ότι αυτή είναι 20.000 χλμ. Αυτό μας λέει ότι, εκτός από την επιφάνεια της πρώτης σφαίρας βρισκόμαστε επίσης και στην επιφάνεια μιας

δεύτερης σφαίρας, η οποία ως κέντρο έχει το δεύτερο δορυφόρο και ακτίνα την απόσταση που απέχουμε από αυτόν. Δηλαδή, με άλλα λόγια, βρισκόμαστε κάπου στην τομή των δύο αυτών σφαιρών. Επειδή όμως η τομή δυο σφαιρών σχηματίζει κύκλο, ουσιαστικά βρισκόμαστε κάπου επάνω στην περιφέρεια ενός κύκλου (Εικόνα 3.8).



Εικόνα 3.8 – Η τομή δύο σφαιρών που αντιστοιχούν στους δορυφόρους Α και Β.

Εάν πάρουμε και μία ακόμη μέτρηση από έναν τρίτο δορυφόρο, τότε εκτός από τον κύκλο που σχηματίζεται από την τομή των δύο πρώτων σφαιρών, βρισκόμαστε και στην επιφάνεια μιας τρίτης σφαίρας, η οποία ως κέντρο έχει τον τρίτο δορυφόρο και ακτίνα την απόσταση που απέχουμε από αυτόν. Επειδή όμως η επιφάνεια μιας σφαίρας τέμνεται με την περιφέρεια ενός κύκλου σε δύο μόνο σημεία, ουσιαστικά βρισκόμαστε επάνω στα δύο αυτά σημεία (Εικόνα 3.9).



Εικόνα 3.9 -Η τομή των τριών σφαιρών που αντιστοιχούν στους δορυφόρους A,B,C .

Έτσι, με τρεις δορυφόρους μπορούμε να περιορίσουμε τη θέση μας σε ακριβώς δύο σημεία. Για να αποφασίσουμε ποιο από τα δύο αυτά σημεία είναι η πραγματική μας θέση, θα μπορούσαμε να κάνουμε και μία τέταρτη μέτρηση. Αλλά, συνήθως είναι προφανές, ότι αποκλείεται να βρισκόμαστε σε ένα από τα δύο σημεία (είτε γιατί αυτό βρίσκεται στο άλλο ημισφαίριο, είτε γιατί αυτό βρίσκεται πολύ μακριά από τη γη) και έτσι μπορούμε να το απορρίψουμε χωρίς να κάνουμε καμία επιπλέον μέτρηση.

Βήμα 2 : Μετρώντας την απόσταση από έναν δορυφόρο

Στην προηγούμενη παράγραφο, είδαμε πώς μπορούμε να προσδιορίσουμε τη θέση μας γνωρίζοντας την απόσταση που έχουμε από τρεις τουλάχιστον δορυφόρους. Αλλά πώς γίνεται να μετρήσουμε την απόσταση από ένα δορυφόρο, ο οποίος περιφέρεται στο διάστημα γύρω από τη γη; Αυτό επιτυγχάνεται μετρώντας το χρόνο που χρειάζεται ένα ραδιο-σήμα να φθάσει από το δορυφόρο στο δέκτη. Ο χρόνος αυτός πολλαπλασιαζόμενος με την ταχύτητα μετάδοσης του ραδιο-σήματος (ως ηλεκτρομαγνητικό σήμα, η ταχύτητά του ισούται με την ταχύτητα του φωτός, δηλ. περίπου με 300.000 χλμ.

το δευτερόλεπτο) μας δίνει, σύμφωνα με το μαθηματικό τύπο (1), την απόσταση που απέχει ο δορυφόρος από το δέκτη.

$$\text{Απόσταση} = \text{Ταχύτητα} \times \text{Χρόνος} \quad (1)$$

Συγκεκριμένα, ο χρόνος αυτός μπορεί να είναι πάρα πολύ μικρός (π.χ. 0,06 δευτ.), ειδικά αν ο δορυφόρος βρίσκεται κοντά μας. Έτσι, χρειαζόμαστε ρολόγια με μεγάλη ακρίβεια.

Βήμα 3: Επιτυγχάνοντας τον τέλειο συγχρονισμό

Εάν η μέτρηση του χρόνου μετάδοσης ενός ραδιο-σήματος είναι το κλειδί για να μετρηθεί η ακριβής απόσταση από τους δορυφόρους, τότε τα χρονόμετρά μας θα πρέπει να είναι υπερβολικά ακριβή, ώστε να είναι τέλεια συγχρονισμένα. Μία λανθασμένη χρονομέτρηση, έστω και ενός χιλιοστού του δευτερολέπτου, με την ταχύτητα του φωτός, μεταφράζεται σε 300 χλμ. σφάλμα!

Στους δορυφόρους, η χρονομέτρηση είναι σχεδόν τέλεια, επειδή αυτοί διαθέτουν ρολόγια μεγάλης ακρίβειας, τα *ατομικά ρολόγια*. Εάν οι δέκτες μας είχαν και αυτοί ατομικά ρολόγια τότε δεν θα υπήρχε κανένα πρόβλημα χρονικού συγχρονισμού μεταξύ των δορυφόρων και των δεκτών. Σε αυτή την περίπτωση όμως, το GPS θα ήταν μία τεχνολογία που δε θα είχε μεγάλη εφαρμογή, λόγω υπερβολικού κόστους. Το τέχνασμα που βρήκαν οι σχεδιαστές του GPS είναι να γίνεται μία επί πλέον μέτρηση απόστασης από ένα τέταρτο δορυφόρο. Η τέταρτη μέτρηση θεωρείται μία από τις θεμελιώδεις λειτουργίες του GPS, εφ' όσον με αυτό τον τρόπο κάθε GPS δέκτης συγχρονίζεται με τον παγκόσμιο χρόνο. Με τη λήψη μιας επί πλέον δορυφορικής μέτρησης και με λίγη άλγεβρα ένας GPS δέκτης μπορεί να απαλείψει οποιεσδήποτε ανακρίβειες που πιθανόν να υπάρχουν στο ρολόι του.

Βήμα 4 : Βρίσκοντας τη θέση των δορυφόρων στον ουρανό

Εκτός από την απόσταση από ένα δορυφόρο, ένας δέκτης πρέπει να ξέρει την ακριβή θέση του δορυφόρου στον ουρανό. Μέχρι τώρα έχουμε υποθέσει ότι γνωρίζουμε πού βρίσκονται οι GPS δορυφόροι και έτσι μπορούμε να τους χρησιμοποιήσουμε ως σημεία αναφοράς. Αλλά, πώς εμείς ξέρουμε πού ακριβώς βρίσκονται αυτοί όταν περιφέρονται στο διάστημα περίπου 20.000 χλμ. μακριά από τη γη;

Οι δορυφόροι σε μεγάλο ύψος

Το ύψος των 20.000 χλμ. προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα στις τροχιές των δορυφόρων. Ένα από τα πλεονεκτήματα αυτά είναι ότι στο ύψος αυτό δεν υπάρχει ατμόσφαιρα, οπότε δεν υπάρχει αντίσταση στην κίνηση του δορυφόρου από τον αέρα. Επίσης, ο χρόνος ζωής των δορυφόρων αυξάνεται και μπορούν, σε αυτό το ύψος, να τεθούν εύκολα σε σταθερή τροχιά με απλά μαθηματικά.

Η Πολεμική Αεροπορία των Ηνωμένων Πολιτειών έχει θέσει κάθε GPS δορυφόρο σε τροχιά με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Οι GPS δέκτες, που βρίσκονται στο έδαφος, έχουν ένα ημερολόγιο (almanac) στους υπολογιστές τους, στο οποίο καταχωρούνται δεδομένα σχετικά με τα ακριβή σημεία στα οποία βρίσκονται οι δορυφόροι στον ουρανό. Οι βασικές τροχιές είναι αρκετά ακριβείς, αλλά για να γίνονται όλα σωστά οι GPS δορυφόροι ελέγχονται συνεχώς από το Υπουργείο Άμυνας, το οποίο χρησιμοποιεί ραντάρ μεγάλης ακρίβειας για να ελέγχει το ακριβές ύψος κάθε δορυφόρου, τη θέση και την ταχύτητά του. Ελέγχονται τα σφάλματα, τα οποία προκαλούνται από τα πεδία βαρύτητας της σελήνης και του ήλιου και από την πίεση της ηλιακής ακτινοβολίας στους δορυφόρους. Τα σφάλματα αυτά, συνήθως, είναι πολύ μικρά αλλά εάν θέλουμε να έχουμε μεγάλη ακρίβεια πρέπει αυτά να ληφθούν υπόψη.

Όταν ανιχνευτεί κάποιο σφάλμα στα δεδομένα που στέλνει ο δορυφόρος στη γη, μετράει την ακριβή θέση του στον ουρανό και μεταδίδει την πληροφορία αυτή στον δορυφόρο. Ο δορυφόρος διορθώνει τα δικά του δεδομένα και τα περιλαμβάνει στα ραδιο-σήματα που μεταδίδει. Έτσι, το σήμα κάθε δορυφόρου δεν περιέχει μόνο έναν ψευδο-τυχαίο κώδικα συγχρονισμού. Αυτό μεταφέρει, επίσης, πληροφορίες ημεροδεικτών σχετικές με την ακριβή τροχιακή θέση του (ephemeris).

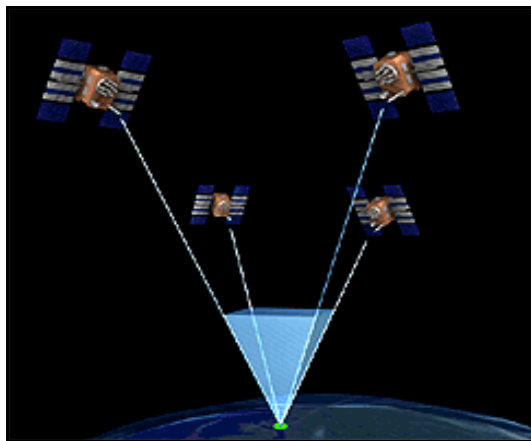
Ακολούθως, ο GPS δέκτης ενημερώνει συνεχώς το ημερολόγιό του (almanac), καθώς λαμβάνει αυτές τις πληροφορίες και κατόπιν τις χρησιμοποιεί για να καθορίσει την ακριβή θέση του δορυφόρου.

Βήμα 5: Διόρθωση Λαθών

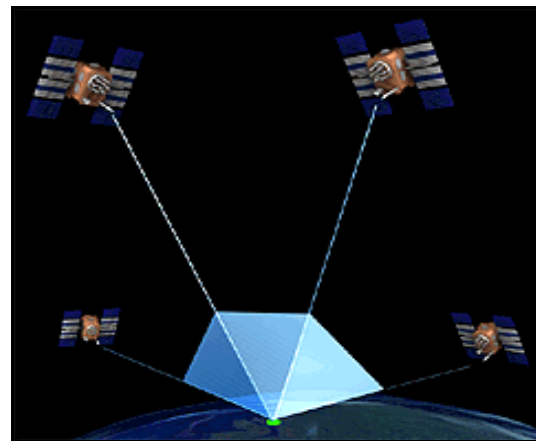
Μέχρι τώρα έχουμε μεταχειριστεί τους υπολογισμούς στο GPS πολύ αφηρημένα. Στην πραγματικότητα, υπάρχουν αρκετά πράγματα που μπορούν να συμβούν σε ένα GPS σήμα, τα οποία μπορούν να το αλλοιώσουν ή να του αλλάξουν την πορεία. Ένας καλός GPS δέκτης, για να αξιοποιήσει στο μέγιστο τις δυνατότητες του συστήματος, θα πρέπει να λάβει υπόψη ένα πλήθος λαθών που ενδεχομένως προκύψουν.

Ένας σημαντικός παράγοντας, ο οποίος καθορίζει την ακρίβεια στις μετρήσεις ενός δέκτη, είναι η γεωμετρία που έχει η ομάδα των δορυφόρων από την οποία δέχεται ο δέκτης τα σήματα. Ένας δείκτης της ποιότητας της γεωμετρίας του δορυφορικού αστερισμού είναι η "Γεωμετρική Απώλεια της Ακρίβειας" ή GDOP (Geometric Dilution of Precision). Το GDOP εξαρτάται από το πλήθος των δορυφόρων που χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις. Βασικά, όμως, εξαρτάται από τη θέση των δορυφόρων, δηλαδή από το ύψος και τη θέση που βρίσκονται αυτοί στον ουρανό. Αυτό αναφέρεται συχνά και ως γεωμετρία των δορυφόρων.

Ανάλογα με τη γεωμετρία που έχουν οι δορυφόροι, είναι δυνατόν να αυξηθεί ή να ελαττωθεί το λάθος θέσης στις μετρήσεις. Μία μεγάλη γωνία μεταξύ των δορυφόρων χαμηλώνει το GDOP, και παρέχει μία καλύτερη μέτρηση. Αντίθετα, μία μικρή γωνία μεταξύ των δορυφόρων δίνει υψηλότερο GDOP (κακή γεωμετρία δορυφόρων) με αποτέλεσμα οι μετρήσεις να είναι χειρότερες. Εάν ο δέκτης επιλέξει δορυφόρους οι οποίοι είναι ευρέως διασκορπισμένοι στον ουρανό τότε το GDOP είναι χαμηλό, ενώ αν επιλέξει δορυφόρους οι οποίοι βρίσκονται κοντά ο ένας στον άλλον, τότε το GDOP είναι υψηλό (Εικόνα 3.10). Οι καλοί δέκτες προσδιορίζουν τους δορυφόρους που θα δώσουν το χαμηλότερο GDOP.



Υψηλό GDOP



Χαμηλό GDOP

Εικόνα 3.10 -Οι θέσεις των δορυφόρων και το GDOP

Τέλος, το GDOP ή DOP (Dilution of precision) είναι ένα μέτρο της ποιότητας των δεδομένων που λαμβάνονται από τους δορυφόρους και μετρά τη συνολική απόκλιση από την πραγματική θέση ενός GPS συστήματος. Μία αποδεκτή τιμή του GDOP είναι μικρότερη από 5.

4. ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΗΓΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ GPS

Διακρίνουμε μια σειρά σφαλμάτων, συστηματικού κυρίως χαρακτήρα (systematic errors), που επηρεάζουν τον προσδιορισμό θέσης με παρατηρήσεις GPS. Τα τυχαία σφάλματα (random errors), που προφανώς είναι αναπόφευκτα, κατά την εκτέλεση των μετρήσεων, ονομάζονται συνήθως ως θόρυβος (noise).

Τα σφάλματα GPS μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Στα σφάλματα που σχετίζονται με τους δορυφόρους: το σφάλμα της δορυφορικής εφημερίδας ή τροχιάς, το σφάλμα του ρολογιού του δορυφόρου και το σφάλμα της επιλεκτικής διαθεσιμότητας

- Στα σφάλματα που σχετίζονται με τους δέκτες: το σφάλμα του ρολογιού του δέκτη, το σφάλμα της μεταβολής του κέντρου φάσης της κεραίας, το τυχαίο σφάλμα παρατήρησης ή ο θόρυβος, το σφάλμα εξαιτίας της αβεβαιότητας του γνωστού σημείου κατά την επίλυση μιας βάσης.

- Στα σφάλματα που σχετίζονται με τη διάδοση του σήματος: τα ατμοσφαιρικά σφάλματα (τροποσφαιρικό και ιονοσφαιρικό σφάλμα), το σφάλμα πολυανάκλασης καθώς και το σφάλμα της ολίσθησης των κύκλων.

4.1 Το σφάλμα της τροχιάς των δορυφόρων

Η ποιότητα των παραμέτρων της τροχιάς των δορυφόρων επηρεάζει άμεσα την ποιότητα των αποτελεσμάτων σε κάθε εφαρμογή GPS. Το σφάλμα της τροχιάς είναι η συστηματική παρέκκλιση της θέσης και της ταχύτητας του δορυφόρου από την πραγματική θέση, την θέση με βάση τις παρατηρήσεις για τον υπολογισμό των τροχιών και των μαθηματικών μοντέλων που

χρησιμοποιούνται. Αν δε πολλαπλασιαστεί με τον συντελεστή PDOP δίνει την επίδραση στο σφάλμα θέσης του δέκτη.

Για τον ακριβή προσδιορισμό της δορυφορικής τροχιάς, υπάρχουν διασκορπισμένοι στη Γη διάφοροι σταθμοί που είναι επιφορτισμένοι, μεταξύ των άλλων, με το να προσδιορίσουν με μεγάλη ακρίβεια τα διάφορα στοιχεία της τροχιάς των δορυφόρων του συστήματος GPS. Αφού επιτευχθεί ο υπολογισμός της τροχιάς, αυτή η λύση μεταδίδεται από τους σταθμούς στους δορυφόρους και στη συνέχεια στους δέκτες GPS μέσω του μηνύματος ναυσιπλοΐας. Όπως είναι φυσικό, μιας και δεν υπάρχει μέτρηση που να μην περιέχει σφάλματα, οι μεταδιδόμενες εφημερίδες των δορυφόρων για την τροχιά τους δεν παρέχουν την πραγματική θέση του δορυφόρου, αλλά κάποια διαφορετική που προσεγγίζει την αληθή με κάποιο σφάλμα. Είναι προφανές ότι τη ακτινική συνιστώσα του σφάλματος τροχιάς αλλοιώνει τον προσδιορισμό της απόστασης και ως εκ τούτου τη θέση του χρήστη σε μεγαλύτερο βαθμό κατά τον προσδιορισμό της θέσης μονού σταθμού (single station) παρά σε σχετικό προσδιορισμό (differential GPS). Για γειτονικούς σταθμούς, τα περισσότερα από τα λάθη της τροχιάς απαλείφονται κατά τον διαφορικό προσδιορισμό.

4.2 Το σφάλμα του ρολογιού του δορυφόρου

Το σφάλμα αυτό οφείλεται στο μη συγχρονισμό του ατομικού ρολογιού του κάθε δορυφόρου ως προς το χρόνο GPS που αποτελεί την κλίμακα χρόνου του συστήματος. Αντί να γίνει διόρθωση του χρόνου στο ατομικό ρολόι του κάθε δορυφόρου, έγινε η επιλογή της ελεύθερης ροής χρόνου, με αποτέλεσμα την απόκλιση των ονομαστικών κλιμάκων των δορυφόρων από την κλίμακα του GPS και τον υπολογισμό των αντίστοιχων σφαλμάτων με πρόγνωση για χρήση σε πραγματικό χρόνο. Για κάθε δορυφόρο, το σφάλμα υπολογίζεται από μια πολυωνυμική σχέση με βάση τρεις συντελεστές a_0 (bias, clock offset), a_1 (drift,

scale), a_2 (drift rate) που εκπέμπονται με το μήνυμα πλοήγησης και με ακρίβεια της τάξης των 20 ns ή 6 μέτρων. Στο σχετικό προσδιορισμό θέσης, το σφάλμα αυτό απαλείφεται από τις παρατηρήσεις. Αυτό δεν σημαίνει ότι στη διαδικασία του σχετικού προσδιορισμού θέσης δεν μας απασχολεί. Στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο το σφάλμα μετά τη διόρθωση αγνοείται.

4.3 Το σφάλμα του ρολογιού του δέκτη

Για την παραγωγή των σημάτων-αντιγράφων και τη διατήρηση της ονομαστικής του κλίμακας χρόνου, ο δέκτης χρησιμοποιεί έναν συνηθισμένο ταλαντωτή ή ρολόι τύπου κρυστάλλου χαλαζία, προφανώς λιγότερο ακριβές από τα ατομικά χρονόμετρα, καθώς αυτό θα σήμαινε την κατακόρυφη αύξηση του κόστους τους.

Ο μη συγχρονισμός του ρολογιού του δέκτη με την κλίμακα χρόνου του GPS εκφράζεται από το αντίστοιχο σφάλμα που είναι σημαντικό και δεν μπορεί να αγνοηθεί. Από την τυπική λύση πλοήγησης ο δέκτης υπολογίζει το σφάλμα του ρολογιού του με ακρίβεια καλύτερη από 1 μ s (δεκάδες μέτρα) και διορθώνει το χρόνο του ως προς το χρόνο GPS. Το σφάλμα αυτό είναι συνάρτηση του χρόνου, μπορεί να υπολογίζεται σε κάθε εποχή παρατήρησης και σχεδόν απαλείφεται από τις παρατηρήσεις στο σχετικό προσδιορισμό θέσης. Στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο υπολογίζεται ταυτόχρονα με τη θέση.

4.4 Οι μεταβολές του κέντρου φάσης της κεραίας

Το μηχανικό ή γεωμετρικό ή φυσικό κέντρο της κεραίας ενός δέκτη GPS είναι το σημείο αναφοράς ARP (ARP: Antenna Reference Point) ως προς το οποίο προσδιορίζεται το ύψος της κεραίας από το σημείο εδάφους, συνήθως κατά την κατακόρυφο, παρόμοια με τη μέτρηση του ύψους οργάνου ή πρίσματος σε ένα EDM. Το ηλεκτρικό κέντρο της κεραίας ή αλλιώς το κέντρο φάσης είναι το σημείο όπου γίνεται η λήψη των δορυφορικών σημάτων και στο οποίο αναφέρονται οι μετρήσεις GPS. Τα άκρα μιας βάσης GPS ορίζονται αρχικά από τα αντίστοιχα κέντρα φάσης των κεραιών. Το κέντρο φάσης δεν ταυτίζεται με το μηχανικό κέντρο και λόγω των χαρακτηριστικών της κεραίας δεν είναι ένα φυσικό και σταθερό σημείο που μπορεί να μετρηθεί άμεσα. Στην πραγματικότητα, το κέντρο φάσης είναι διαφορετικό για κάθε φορέα για μια κεραία L1/L2 και μεταβάλλεται συναρτήσει της κατεύθυνσης του δορυφορικού σήματος καθώς ο δορυφόρος κινείται ως προς τον δέκτη. Οι μεταβολές των κέντρων φάσης γύρω από μια μέση θέση είναι της τάξης των λίγων χιλιοστών και αποκτούν κρίσιμο χαρακτήρα στις εφαρμογές υψηλής ακρίβειας. Αν δεν ληφθούν υπόψη, το σφάλμα μπορεί να φτάσει και τα 10 cm στην υψομετρική διαφορά, ανεξάρτητα από το μήκος της βάσης.

Για διαφορετικούς τύπους κεραιών και μάλιστα διαφορετικού κατασκευαστή, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη η διόρθωση των παρατηρήσεων λόγω της μεταβολής των κέντρων φάσης, έτσι ώστε να είναι δυνατή η μεταφορά των κέντρων φάσης στα αντίστοιχα ARP και στη συνέχεια στα σημεία εδάφους.

4.5 Το τυχαίο σφάλμα παρατήρησης

Το τυχαίο σφάλμα ή θόρυβος είναι αναπόφευκτο σε κάθε παρατήρηση GPS όπως άλλωστε και σε κάθε παρατήρηση κλασσικού τύπου, όπου χρησιμοποιούνται όργανα μετρήσεων. Ο όρος τυχαίο παραπέμπει στο σφάλμα που κατά μέσο όρο τείνει στο μηδέν όσο αυξάνονται οι επαναλήψεις της μέτρησης κάτω από τις ίδιες συνθήκες.

4.6 Το σφάλμα αβεβαιότητας του γνωστού σημείου

Οποιοδήποτε σφάλμα στη θέση του σημείου που διατηρείται σταθερό κατά την επίλυση μιας βάσης (σχετικός προσδιορισμός), επηρεάζει συστηματικά τις εκτιμήσεις των συνιστωσών ($_X$, $_Y$, $_Z$). Γενικά, η ακρίβεια των προσεγγιστικών συντεταγμένων του σημείου αναφοράς (λαμβανόμενου ως σταθερού) δεν πρέπει να ξεπερνά τα περίπου 10 m για τις συνήθεις γεωδαιτικές και τοπογραφικές εφαρμογές. Στις εργασίες υψηλής ακρίβειας επιδιώκεται ακρίβεια των συντεταγμένων του σταθερού σημείου όσο γίνεται μεγαλύτερη. Η επίδραση του σφάλματος αυτού στη σχετική θέση είναι παρόμοια με την επίδραση του σφάλματος τροχιάς.

4.7 Η δομή της ατμόσφαιρας και τα ατμοσφαιρικά σφάλματα

Η περιοχή των αερίων που περιβάλλει τη γη είναι γνωστή σαν ατμόσφαιρα. Εξαιτίας της ύπαρξης της ατμόσφαιρας είναι δυνατή και η ύπαρξη ζωής στη Γη, καθώς και η δημιουργία των γνωστών μετεωρολογικών φαινομένων όπως η βροχή, το χιόνι κτλ. Η γήινη ατμόσφαιρα διακρίνεται σε ομόκεντρα, σχεδόν σφαιρικά στρώματα τα οποία χωρίζονται από στενές ζώνες μεταβίβασης από το ένα στο άλλο. Το τελευταίο όριο της ατμόσφαιρας, πέρα από το οποίο τα

ατμοσφαιρικά αέρια διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα, βρίσκεται σε ένα υψόμετρο περίπου 1000 Km πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, ενώ περισσότερο από το 99% των αερίων εντοπίζεται στα πρώτα 40 Km από την επιφάνεια της Γης. Η διακριτοποίηση των στρωμάτων γίνεται βάσει των διαφορών στη χημική σύσταση που έχουν σαν συνέπεια, μεταξύ των άλλων, και μεταβολές στη θερμοκρασία. Έτσι η ατμόσφαιρα της γης διακρίνεται στις:

- **Τροπόσφαιρα**, που εκτείνεται από την επιφάνεια της θάλασσας μέχρι και ύψος 14 Km πάνω από αυτή.
- **Στρατόσφαιρα**, που εκτείνεται από 18-50 Km πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας.
- **Μεσόσφαιρα**, που εκτείνεται από 50-80 Km πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας.
- **Ιονόσφαιρα**, που εκτείνεται από 80-350 Km πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας.
- **Εξώσφαιρα**, που εκτείνεται από 350-1000 Km πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας.

Μετά την εξώσφαιρα βρίσκεται ο διαπλανητικός χώρος. Διακρίνουμε δυο ειδών ατμοσφαιρικά σφάλματα, το ιονοσφαιρικό και το τροποσφαιρικό σφάλμα.

4.7.1 Το τροποσφαιρικό σφάλμα

Τα τμήματα της ατμόσφαιρας τα οποία επηρεάζουν ουσιαστικά και κατά διαφορετικό τρόπο τη διαδρομή του δορυφορικού (ηλεκτρομαγνητικού) σήματος, με αποτέλεσμα χρονικές καθυστερήσεις λόγω της επιβράδυνσης της ταχύτητας διάδοσης και την καμπυλότητα της τροχιάς λόγω αλλαγής κατεύθυνσης σε σχέση με την ευθύγραμμη διαδρομή στο κενό, είναι η

τροπόσφαιρα και η ιονόσφαιρα. Η διαφορετική σύσταση και επίδραση της τροπόσφαιρας και ιονόσφαιρας χαρακτηρίζονται με τους όρους τροποσφαιρικό και ιονοσφαιρικό σφάλμα ή τροποσφαιρική και ιονοσφαιρική καθυστέρηση.

Για τη μείωση των σφαλμάτων της ατμόσφαιρας λαμβάνουμε ή χρησιμοποιούμε κατά την επεξεργασία μετρήσεις προς δορυφόρους που έχουν γωνία ύψους πάνω από ένα όριο, συνήθως πάνω από 15° . Η γωνία αυτή, γνωστή και ως γωνία αποκοπής (cut off angle, elevation mask) είναι συνήθως 10° ή 15° .

Η τροπόσφαιρα είναι μεταβλητού πάχους το χαμηλότερο τμήμα της ατμόσφαιρας που εκτείνεται σε ύψος 9 Km στους πόλους και μέχρι 16 Km στον ισημερινό. Συνήθως περιλαμβάνει και ένα τμήμα της στρατόσφαιρας το οποίο επιδρά κατά πολύ λιγότερο και έτσι η τροπόσφαιρα θεωρείται ότι εκτείνεται μέχρι τα περίπου 50 Km.

Η τροποσφαιρική διάθλαση στην ουδέτερη (μη ιονισμένη) τροπόσφαιρα δημιουργεί το τροποσφαιρικό σφάλμα με αποτέλεσμα την καθυστέρηση του σήματος στη διαδρομή του. Η τροπόσφαιρα για τα ραδιοκύματα μέχρι και 15 GHz (1.5GHz στο GPS) δεν αποτελεί μέσο διασποράς, δηλαδή η μεταβολή του δείκτη διάθλασης δεν είναι συναρτήσει της συχνότητας του σήματος, αντίθετα με την ιονόσφαιρα. Η καθυστέρηση ομάδας και φάσης είναι ίδιες.

Η τροποσφαιρική καθυστέρηση εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την πίεση και την υγρασία ή όπως λέγεται από τον ξηρό παράγοντα και από τον υγρό παράγοντα. Είναι επίσης συνάρτηση της απόστασης που διανύει το σήμα στην τροπόσφαιρα, της ζενίθιας γωνίας του δορυφόρου (μειώνεται για μεγάλες ζενίθειες γωνίες) και του υψομέτρου του δέκτη (αυξάνεται με αύξηση του ύψους). Με τη χρήση ατμοσφαιρικών μοντέλων, π.χ. Saastamoinen, Hopfield υπολογίζεται περίπου το 90% του τροποσφαιρικού σφάλματος. Το υπόλοιπο 10% οφείλεται κυρίως στον υγρό παράγοντα.

Το τροποσφαιρικό σφάλμα επιδρά το ίδιο στους κώδικες και στις φάσεις ανεξάρτητα από τη συχνότητα L1 και L2. Δεν μπορεί να απαλειφθεί με δέκτες δυο συχνοτήτων όπως συμβαίνει με το ιονοσφαιρικό σφάλμα. Μπορεί να υπολογισθεί σε ικανοποιητικό βαθμό από γνωστά τυπικά μοντέλα για μικρές βάσεις ή και να μοντελοποιηθεί το εναπομείναν σφάλμα για μεγαλύτερες βάσεις (tropospheric site parameters). Το μέγεθος του τροποσφαιρικού σφάλματος είναι της τάξης των 2 έως 2.5 m. Γενικά μπορούμε να διακρίνουμε το σχετικό τροποσφαιρικό σφάλμα λόγω των διάφορων επιδράσεων της τροπόσφαιρας μεταξύ δυο σημείων (συνήθως για σημεία με σημαντική υψομετρική διαφορά) και το οποίο επηρεάζει μόνο τη σχετική υψομετρική διαφορά και το απόλυτο λόγω της κοινής επίδρασης των δυο σημείων που επηρεάζει την κλίμακα βάσης. Για τοπικές εφαρμογές, το σχετικό τροποσφαιρικό σφάλμα είναι το πιο σημαντικό και δύσκολα μοντελοποιήσιμο. Το απόλυτο τροποσφαιρικό σφάλμα έχει νόημα να λαμβάνεται υπόψη για βάσεις μεγαλύτερες των περίπου 20 Km.

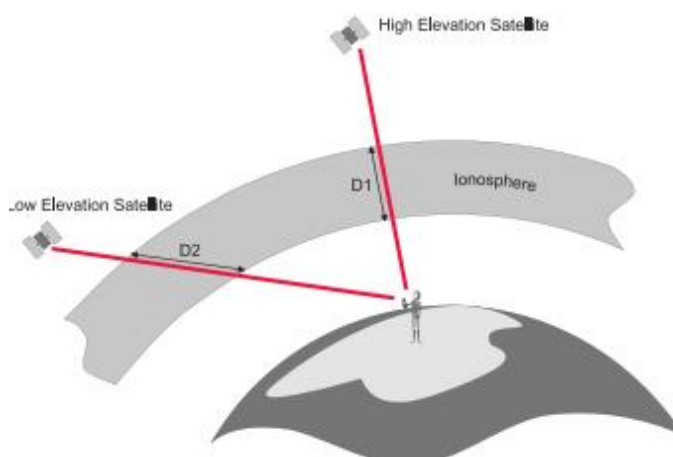
4.7.2 Το ιονοσφαιρικό σφάλμα

Η ιονόσφαιρα αποτελεί μέσο διασποράς για το σήμα GPS, δηλαδή ο δείκτης διάθλασης εξαρτάται από τη συχνότητα του σήματος, και το γεγονός αυτό είναι “βολικό” για παρατηρήσεις GPS και στις δυο φέρουσες συχνότητες L1 και L2. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος της δεύτερης συχνότητας στο σήμα GPS. Με δέκτες διπλής συχνότητας το ιονοσφαιρικό σφάλμα μπορεί ουσιαστικά να απαλειφτεί αν χρησιμοποιήσουμε έναν κατάλληλο γραμμικό συνδυασμό πρωτογενών παρατηρήσεων των δυο φορέων. Η ύπαρξη των ελεύθερων φορτισμένων σωματιδίων, κυρίως των ηλεκτρονίων από άτομα οξυγόνου, προκαλείται από την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία. Η οποία ανάλογα με τη δραστηριότητά της καθορίζει και το βαθμό ιονισμού (πυκνότητας) της ιονόσφαιρας. Τα ηλεκτρόνια, που ελευθερώνονται από άτομα και μόρια των αερίων της ιονόσφαιρας, επηρεάζουν τη διάδοση του σήματος, δηλαδή,

μεταβάλλουν την ταχύτητα, τη διεύθυνση και την πολικότητα με τη μεγαλύτερη επίδραση στην ταχύτητα και συνεπώς στην απόσταση δέκτη-δορυφόρου.

Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν το ποσό της καθυστέρησης που προκαλείται από την ιονόσφαιρα:

Δορυφορικό υψόμετρο. Σήματα από τα χαμηλά δορυφορικά υψόμετρα επηρεάζονται περισσότερο από σήματα με υψηλά υψόμετρα. Αυτό οφείλεται στην αυξημένη απόσταση, όπου το σήμα περνά μέσα από την ατμόσφαιρα.



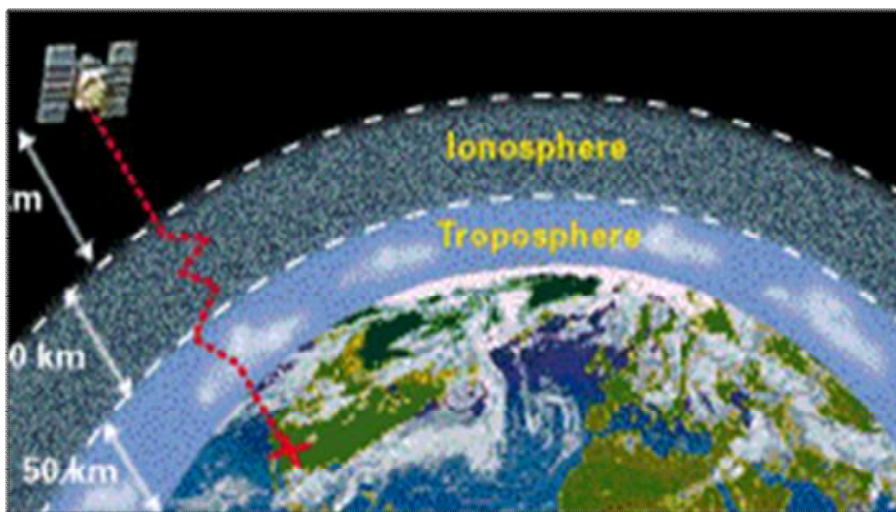
Εικόνα 4.1 -Σήματα δορυφορικών υψομέτρων

Η πυκνότητα της ιονόσφαιρας επηρεάζεται από τον ήλιο. Τη νύχτα, υπάρχουν πολύ λίγες ιονοσφαιρικές επιρροές. Την ημέρα, ο ήλιος αυξάνει την επίδραση του στην ιονόσφαιρα και επιβραδύνει το σήμα. Το ποσό κατά το οποίο η πυκνότητα της ιονόσφαιρας είναι αυξημένη ποικίλλει ανάλογα με τους ηλιακούς κύκλους (δραστηριότητας των ηλιακών κηλίδων). Η ηλιακή δραστηριότητα της κηλίδας μεγιστοποιείται περίπου κάθε 11 χρόνια. Εκτός από αυτό, ηλιακές εκλάμψεις μπορεί να συμβαίνουν και επίσης έχουν επίδραση στην ιονόσφαιρα.

Ιονοσφαιρικά λάθη μπορεί να αντιμετωπιστούν χρησιμοποιώντας μία από τις δύο μεθόδους:

- Η πρώτη μέθοδος περιλαμβάνει τη λήψη ενός μέσου όρου των αποτελέσματα της μείωσης της ταχύτητας του φωτός προκαλούμενη από την ιονόσφαιρα. Αυτός ο διορθωτικός παράγοντας μπορεί στη συνέχεια να εφαρμοστεί στους ευρείς υπολογισμούς. Εντούτοις, αυτό στηρίζεται σε έναν μέσο όρο και προφανώς αυτός ο μέσος όρος δεν εμφανίζει όλο το χρόνο. Η μέθοδος αυτή, συνεπώς, δεν είναι η βέλτιστη λύση για τα Ιονοσφαιρικά σφάλματα.

- Η δεύτερη μέθοδος περιλαμβάνει τη χρησιμοποίηση δεικτών GPS διπλής-συχνότητας. Τέτοιοι δέκτες μετρούν τις L1 και L2 συχνότητες του σήματος GPS. Είναι γνωστό ότι όταν ταξιδεύει ένα ραδιοσήμα μέσω της ιονόσφαιρας επιβραδύνει ένα ποσοστό αντιστρόφως ανάλογο προς την κάθε συχνότητα. Ως εκ τούτου, εάν οι χρόνοι άφιξης των δύο σημάτων συγκριθούν, μπορεί να γίνει η ακριβής εκτίμηση της καθυστέρησης. Σημειώστε ότι αυτό είναι μόνο δυνατό με τους διπλούς δέκτες συχνότητας GPS.



Εικόνα 4.2 -Ιονοσφαιρικό και τροποσφαιρικό σφάλμα

4.8 Ο υδρατμός έχει επιπτώσεις επίσης στο σήμα GPS.

Υδρατμοί που περιλαμβάνονται στην ατμόσφαιρα μπορεί επίσης να έχουν επιπτώσεις στο σήμα GPS. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να μειωθεί με τη χρησιμοποίηση των ατμοσφαιρικών προτύπων. Το μέγεθος του ιονοσφαιρικού σφάλματος, γενικά ποικίλλει και κυμαίνεται από περίπου 1 m έως και πάνω από 100 m στον ορίζοντα.

4.9 Το σφάλμα πολυανάκλασης

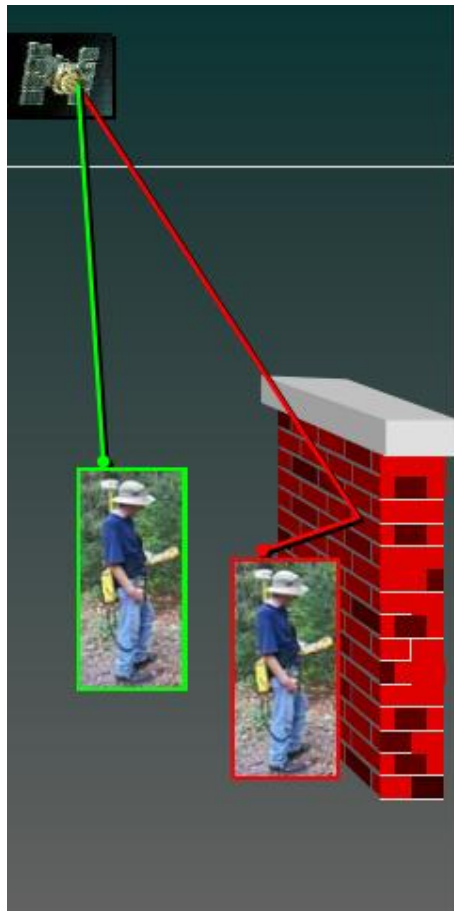
Πολυανάκλαση είναι το φαινόμενο, όπου το δορυφορικό σήμα λαμβάνεται και από άλλη ή άλλες έμμεσες διαδρομές εκτός από την κανονική του πορεία εξαιτίας της ανάκλασής του σε γειτονικές επιφάνειες, π.χ. επιφάνειες κτιρίων. Με αυτόν τον τρόπο, το σήμα ακολουθεί μεγαλύτερη διαδρομή από την κανονική και η άφιξη του σήματος στην κεραία του δέκτη γίνεται ύστερα από πολλές ανακλάσεις. Η επίδραση αυτή ονομάζεται σφάλμα πολυανάκλασης (multipath error). Είναι φανερό ότι το σφάλμα πολυανάκλασης του δέκτη είναι συνάρτηση του περιβάλλοντος χώρου.

Στην περίπτωση πολλαπλών διαδρομών του σήματος, ο δέκτης δεν μπορεί να παρακολουθήσει σωστά το σήμα της κανονικής διαδρομής, επειδή δημιουργούνται παράσιτα και από το ανακάτεμα των σημάτων (φαινόμενο που παρατηρείται και στις τηλεοράσεις). Έτσι οι μετρήσεις χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερο θόρυβο και είναι συστηματικά επηρεασμένες από κάποιο σφάλμα. Το σφάλμα πολυανάκλασης είναι συνάρτηση του μήκους κύματος των φορέων για τις φάσεις και του μήκους παλμού για τους κώδικες. Επίσης, εξαρτάται από την γωνία ύψους του δορυφόρου. Όσο πιο μικρή η γωνία ύψους, τόσο μεγαλύτερο το σφάλμα πολυανάκλασης. Το ανακλώμενο σήμα έχει διαφορετική πολικότητα και με κατάλληλο σχεδιασμό των κεραιών (microstrip antenna)

περιορίζεται αρκετά. Το ανακλώμενο σήμα παραποιεί όχι μόνο τους κώδικες, αλλά και τις φάσεις. Τιμές της τάξης των μερικών εκατοστών για τις φάσεις, των μερικών μέτρων για τον κώδικα P και των μερικών δεκάδων μέτρων για τον κώδικα C/A είναι πολύ πιθανές. Κάτω από άσχημες συνθήκες η ανάκλαση μπορεί να επιφέρει μέχρι και χάσιμο του σήματος (loss of lock). Η υποβάθμιση στις ψευδοαποστάσεις συμβαίνει εξαιτίας της παραποίησης της μέγιστης τιμής (κορυφής) της συνάρτησης συσχέτισης, μεταξύ του δορυφορικού σήματος και του αντιγράφου που παράγεται στο δέκτη, λόγω της ύπαρξης του ανακλώμενου σήματος.

Τα λάθη της πολυανάκλασης μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις τάξεις: (1) όταν το δορυφορικό σήμα διέρχεται μέσα σε ένα χώρο όπου βρίσκονται αρκετές μεταλλικές κατασκευές γύρω από την κεραία. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να εισαχθεί σφάλμα μέχρι και 10 m στην απόσταση δορυφόρου-δέκτη, (2) ανακλάσεις από τα κτίρια που βρίσκονται κοντά στην κεραία, όπου το σφάλμα που υπεισέρχεται μπορεί να φτάσει μέχρι τα 6 m και (3) ανακλάσεις από χαμηλής συχνότητας σήματα που συνήθως περιέχονται στο δορυφορικό σήμα όταν αυτό διέρχεται πάνω από υδάτινες επιφάνειες. Στην περίπτωση αυτή το σφάλμα μπορεί να φτάσει πάλι τα 10 m.

Ο πιο ασφαλής τρόπος για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος πολυανάκλασης είναι η κατάλληλη επιλογή της θέσης του δέκτη για τις στατικές εφαρμογές (όχι κοντά σε ψηλά γειτονικά κτίρια και γενικά κοντά σε εμπόδια). Η επίδραση του συγκεκριμένου σφάλματος στις κινηματικές εφαρμογές είναι μεγαλύτερη από ότι στις εφαρμογές στατικού τύπου. Στις τελευταίες, οι επιδράσεις του σφάλματος πολυανάκλασης τείνουν να εξουδετερωθούν λόγω της μεταβολής της γεωμετρίας δέκτη-δορυφόρου κατά τη διάρκεια μιας μετρητικής περιόδου που διαρκεί περισσότερο χρόνο, ενδεικτικά πάνω από μια ώρα.



Εικόνα 4.3 –Το σφάλμα πολυανάκλασης (multipath error).

4.10 Το σφάλμα της ολίσθησης των κύκλων

Όταν ένας δέκτης GPS μπαίνει σε λειτουργία, τότε παρατηρείται το κλασματικό μέρος της φάσης, δηλαδή η διαφορά μεταξύ δορυφορικού σήματος και του αντιγράφου που παράγεται στο δέκτη, ενώ ένας μετρητής ακέραιων τιμών είναι έτοιμος για να αρχίσει να μετρά. Κατά τη διάρκεια της παρατήρησης ο μετρητής αυξάνει κατά ένα κύκλο, οπότε η παρατηρούμενη διαφορά φάσης $\Delta\phi$ αλλάζει από 2π σε 0. Επομένως, σε μια εποχή η παρατηρούμενη (συσσωρευμένη) φάση $\Delta\phi$ θα είναι το άθροισμα των κλασματικών διαφορών φάσης και των ακέραιων τιμών του μετρητή. Η αρχική τιμή, τη στιγμή της πρώτης παρατήρησης, των ακέραιων κύκλων N μεταξύ

δορυφόρου-δέκτη παραμένει άγνωστη. Αυτή η ασάφεια φάσης N παραμένει σταθερή από τη στιγμή που δεν υπάρχει απώλεια του δορυφορικού σήματος. Περιπτώσεις εμποδίων στην πορεία του δορυφορικού σήματος, αδυναμίας των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων του δέκτη ή και υψηλής ιονοσφαιρικής δραστηριότητας, έχουν σαν αποτέλεσμα την απώλεια λήψης και συνεπώς το φαινόμενο ολίσθησης των κύκλων ανεξάρτητα ,είτε στην L1 είτε στην L2 ή και στις δυο συχνότητες. Στην περίπτωση αυτή ο μετρητής αρχίζει να μετράει ξανά από την αρχή. Αυτή η ολίσθηση των κύκλων παρατηρείται μόνο στις μετρήσεις φάσης.

Οι αιτίες που προκαλούν το φαινόμενο της ολίσθησης των ακέραιων κύκλων μπορούν να συνοψιστούν σε τρεις: Πρώτη είναι η αιτία της ύπαρξης φυσικών και τεχνητών εμποδίων μεταξύ δορυφόρου-δέκτη που είναι και η πιο συνηθισμένη. Η δεύτερη αιτία είναι ο χαμηλός λόγος σήματος προς θόρυβο εξαιτίας άσχημων ιονοσφαιρικών συνθηκών, ανακλάσεων του σήματος ή λόγω χαμηλού ύψους διέλευσης του δορυφόρου.

Τέλος, η ολίσθηση κύκλων μπορεί να προκύψει από κάποιο πρόβλημα στο λειτουργικό πρόγραμμα του δέκτη και έτσι να μην έχουμε σωστή επεξεργασία στο σήμα. Για την ανίχνευση και διόρθωση του φαινομένου ολίσθησης των κύκλων, πρέπει να είναι γνωστή η χρονική στιγμή που αυτή έλαβε χώρα και πιο το μέγεθος των χαμένων κύκλων.

5. ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ GPS

Το σύστημα GPS είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να μπορεί να προσδιορίζει την θέση σημείου στο χώρο είτε αυτό είναι σταθερό είτε αυτό κινείται. Ο προσδιορισμός αυτός μπορεί να γίνει με δύο μεθόδους:

- **Με την μέθοδο «stand-alone»** όπου έχουμε τις καταγραφές μόνο ενός GPS τοποθετημένου σε συγκεκριμένου σημείου. Στην περίπτωση αυτή η ακρίβεια δεν μπορεί να πέσει κάτω από τα 5 μέτρα (Smith, 1997). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για την ναυσιπλοΐα κλπ. (Moore, Roberts, 1999).

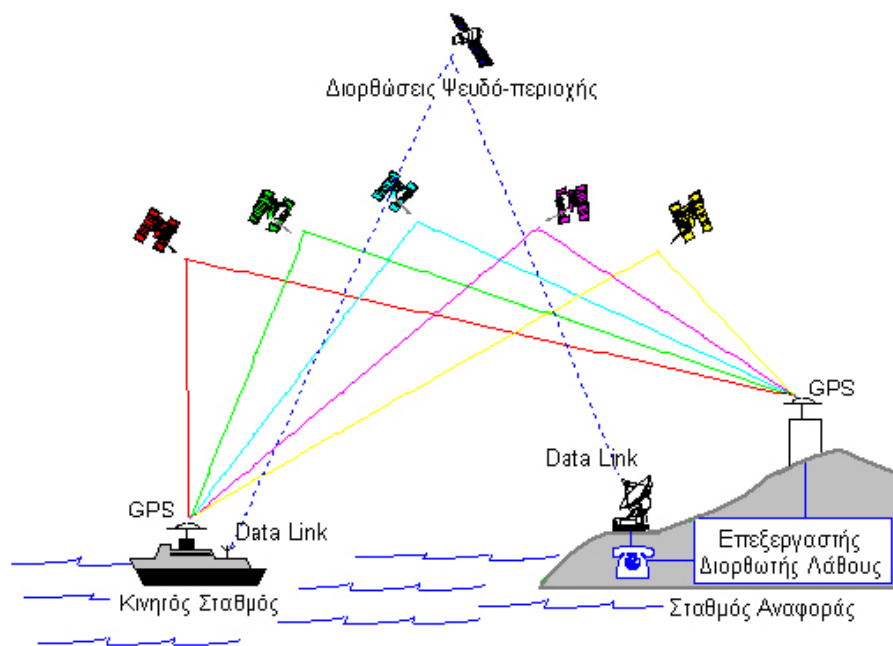
- **Με την μέθοδο «differential», ευρύτερα γνωστή ως DGPS**

Το Διαφορικό GPS (Differential GPS) διορθώνει τις διαφορές ανακρίβειες που υπάρχουν στο απλό σύστημα GPS, αυξάνοντας ακόμη περισσότερο την ακρίβειά του. Το Διαφορικό GPS ή DGPS είναι ένα παγκόσμιο σύστημα μέτρησης ικανό να δώσει μετρήσεις με ακρίβεια μερικών μέτρων σε κινούμενα μέσα (πλοία, αεροπλάνα) και να προσδιορίζει στάσιμες γεωγραφικές θέσεις πάνω στη γη με πολύ μεγάλη ακρίβεια.

5.1 Πώς λειτουργεί ένα Διαφορικό GPS;

Η βασική ιδέα πάνω στην οποία στηρίζεται το DGPS είναι ότι τα σφάλματα που γίνονται για τον προσδιορισμό της θέσης ενός σημείου σε μία περιοχή, είναι παρόμοια με τα σφάλματα για όλα τα σημεία που βρίσκονται μέσα σε αυτή την (τοπική) περιοχή. Έτσι, σε ένα σταθερό σημείο του οποίου οι συντεταγμένες έχουν μετρηθεί με ακρίβεια και η πραγματική του θέση είναι γνωστή, στήνεται ένας DGPS σταθμός αναφοράς (reference station). Ο σταθμός αναφοράς δέχεται και αυτός τα ίδια σήματα που δέχονται και οι GPS δέκτες από τους δορυφόρους. Κατόπιν, υπολογίζεται η θέση του σταθμού μέσω των σημάτων αυτών, και συγκρίνεται με την πραγματική θέση η οποία, όπως αναφέραμε, είναι εκ των προτέρων γνωστή. Καθώς τα σήματα επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες, σχεδόν πάντα θα υπάρχει μία διαφορά μεταξύ της πραγματικής θέσης και της θέσης που δίνει το GPS σύστημα. Η διαφορά που προκύπτει ονομάζεται *παράγοντας διόρθωσης λάθους* και, όπως είναι φυσικό, η ίδια διαφορά θα ισχύει και για όλα τα συστήματα GPS που κινούνται (mobile stations) μέσα σε μία μεγάλη περιοχή (εκατοντάδων χιλιομέτρων) γύρω από το σταθμό αναφοράς. Έτσι, ο DGPS σταθμός αναφοράς μεταδίδει τον παράγοντα αυτό στους χρήστες των GPS που κινούνται μέσα στην περιοχή αυτή, οι οποίοι τον χρησιμοποιούν για να διορθώσουν τις μετρήσεις τους. Βέβαια, απαραίτητη προϋπόθεση για να γίνει αυτό, αποτελεί η δυνατότητα των GPS δεκτών των χρηστών να λαμβάνουν σήματα από έναν DGPS σταθμό αναφοράς.

Αυτό επιτυγχάνεται με το σύνδεσμο δεδομένων, ο οποίος παρέχει τη σύνδεση μεταξύ του σταθμού αναφοράς με τον κινητό σταθμό.



Εικόνα 5.1 – Διαφορικό GPS (DGPS)

Το πρόβλημα που προκύπτει εδώ είναι ότι ο σταθμός αναφοράς δε γνωρίζει ποιους δορυφόρους χρησιμοποιεί ο κινούμενος GPS δέκτης για τον προσδιορισμό της θέσης των σημείων πάνω στη γη, και έτσι δεν μπορεί να υπολογίσει τον παράγοντα διόρθωσης λάθους για κάποιον δέκτη. Θυμηθείτε ότι οι GPS δέκτες χρησιμοποιούν τα ραδιο-σήματα από τέσσερις τουλάχιστον δορυφόρους για να προσδιορίσουν τη γεωγραφική τους θέση. Για το λόγο αυτό, ο σταθμός αναφοράς υπολογίζει τα σφάλματα καθυστέρησης του σήματος για όλους τους δορυφόρους που ανιχνεύει, και ακολούθως μεταδίδει κωδικοποιημένη αυτή την πληροφορία, μέσω ειδικών συσκευών εκπομπής σημάτων, στους GPS δέκτες που κινούνται στην περιοχή. Επίσης, μαζί με τα σφάλματα καθυστέρησης των σημάτων από τους δορυφόρους, ο σταθμός αναφοράς μεταδίδει και το ρυθμό μεταβολής των σφαλμάτων αυτών. Οι δέκτες λαμβάνουν όλα αυτά τα δεδομένα και κάνουν τις κατάλληλες διορθώσεις ανάλογα με τους δορυφόρους που χρησιμοποιούν.

6. ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από τη δεκαετία του 1970, η άφιξη νέων δορυφορικών συστημάτων, που επέτρεπαν τη συλλογή εκτεταμένων δεδομένων τηλεπισκόπησης των ωκεανών, έδωσε νέες δυνατότητες συστηματικής μελέτης του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Εξειδικευμένες δορυφορικές αποστολές μετέφεραν ποικίλα πρωτοποριακά όργανα μέτρησης της θερμοκρασίας, τις συγκεντρώσεις χλωροφύλλης και της ταχύτητας των ανέμων στην επιφάνεια της θάλασσας κ.ά. Αλλά το πραγματικά σημαντικό επίτευγμα των νέων δορυφορικών τεχνολογιών συνεχούς παρατήρησης των ωκεανών ήταν τα ραντάρ αλτιμετρίας, τα οποία έκαναν πραγματικότητα τη συστηματική και αποτελεσματική μελέτη της δυναμικής κατάστασης των ωκεανών και συνεχίζουν να συντελούν στην καλύτερη κατανόηση των ωκεάνιων φαινομένων και του ρόλου των ωκεανών στις μέχρι σήμερα και μελλοντικές αλλαγές του κλίματος σε παγκόσμιο επίπεδο.

Σήμερα με τη διεθνή συνεργασία, και την πρόοδο στις πρακτικές και επιστημονικές εφαρμογές της διαστημικής ωκεανογραφίας και της θαλάσσιας γεωδαισίας, είναι ρεαλιστικό να μιλάει κανείς για την αναμενόμενη μοναδική συνεισφορά των δορυφόρων αλτιμετρίας σε δύο κύριους τομείς:

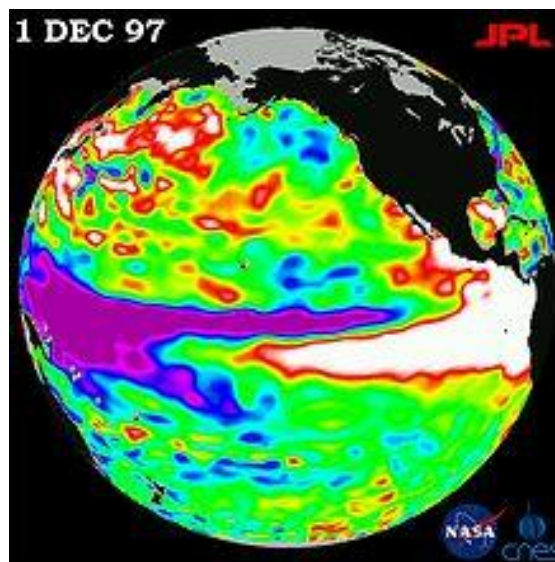
- (i) στη μελέτη της Γης ως ενιαίο σύστημα που περιλαμβάνει τη στεριά, τους ωκεανούς, την ατμόσφαιρα και τη βιόσφαιρα, και
- (ii) στην αξιόπιστη πρόβλεψη της κατάστασης των ωκεανών.

Τα δορυφορικά αλτίμετρα ραντάρ ανήκουν στην κατηγορία των ενεργών συστημάτων τηλεπισκόπησης, από τα οποία εκπέμπονται μικρής διάρκειας παλμοί μικροκυμάτων, κατακόρυφα προς την επιφάνεια της Γης, προκειμένου να μετρηθεί η ηχώ από τους παλμούς που ανακλώνται από την επιφάνεια του

ωκεανού και παραλαμβάνονται πίσω στο δορυφόρο. Τα ανακλώμενα σήματα από τις ωκεάνιες περιοχές παρέχουν πληροφορίες για το ύψος των κυμάτων, την ισχύ, την κατεύθυνση και την ταχύτητα των ανέμων πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και την απόσταση του δορυφόρου από την επιφάνεια της θάλασσας ακριβώς κάτω από τον δορυφόρο. Δεδομένου ότι πρόκειται για ενεργά συστήματα, οι τεχνολογικές προκλήσεις για την κατασκευή και λειτουργία τους είναι ιδιαίτερα υψηλές, γεγονός που απαιτεί και ιδιαίτερη προσοχή κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις τους. Τα δορυφορικά αλτίμετρα παρέχουν τη δυνατότητα μετρήσεων υψηλής ακρίβειας και ανάλυσης, που σχεδόν καλύπτουν τη συνολική επιφάνεια ωκεανών, σε τακτά και μακροχρόνια χρονικά διαστήματα, μια δυνατότητα που λείπει από τις συμβατικές τεχνικές παρατήρησης των ωκεανών από πλοία, πλωτήρες ή άλλες πλατφόρμες. Οι εν λόγω μετρήσεις προσφέρουν μια μοναδική δυνατότητα για να μελετηθούν συνεχώς και συστηματικά η κατάσταση και η συμπεριφορά της κυκλοφορίας των θαλασσών (π.χ. παλίρροιες, ρεύματα, eddies) σε παγκόσμιο επίπεδο. Επιπλέον, λόγω της ειδικής φύσης των τροχιών στις οποίες κινούνται οι δορυφόροι με αλτίμετρα ραντάρ, οι επαναλαμβανόμενες (μέσα σε μερικές μέρες) μετρήσεις που εκτελούν πάνω από τις ίδιες θαλάσσιες περιοχές, επιτρέπουν τη συνεχή παρακολούθηση των αλλαγών στη στάθμη, τους κυματισμούς και τα ρεύματα των θαλασσών σε τοπική κλίμακα, παρέχοντας έτσι μοναδικές νέες δυνατότητες για ποικίλες εφαρμογές ενδιαφέροντος για τη θαλάσσια γεωδαισία, την ωκεανογραφία, την μετεωρολογία κ.ά.

Σήμερα, οι ήδη εν ενεργεία και οι στο άμεσο μέλλον προγραμματισμένοι νέοι αλτιμετρικοί δορυφόροι, που πρόκειται να τεθούν σε λειτουργία, αναμένεται να επαυξήσουν ακόμα περισσότερο τις δυνατότητες για την συνεχή παρατήρηση των θαλασσών, ώστε να είναι δυνατόν να μελετηθούν με ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια οι θαλάσσιες μεταβολές συνοπτικού (σε σχεδόν πραγματικό χρόνο), περιοδικού (εποχικού) ή διαχρονικού χαρακτήρα, π.χ.

κύματα και παλίρροιες, άνοδος της μέσης στάθμης της θάλασσας, αλλαγές στη κυκλοφορία των ρευμάτων, μεταφορά θαλασσίων υδάτινων μαζών, μελέτη και πρόβλεψη ζημιογόνων κλιματικών φαινομένων όπως τα El Nino (Εικόνα 6.1) και La Nina, κ.ά. καθώς και να διαχωριστούν ή να συσχετισθούν οι επιδράσεις σε αυτές τις μεταβολές των διαφόρων αιτίων που τις προκαλούν (π.χ., πίεση των ανέμων, ατμοσφαιρικές συνθήκες, παλίρροιες, φαινόμενο του θερμοκηπίου κλπ.). Με τον τρόπο αυτό αναμένεται να βελτιωθούν περαιτέρω οι σύγχρονες μεθοδολογίες παρακολούθησης και πρόγνωσης της κατάστασης των θαλασσών και για την καλύτερη εξυπηρέτηση της δορυφορικής αλτιμετρίας.



Εικόνα 6.1-EL NINO

Το 1973, από το διαστημικό εργαστήριο SKYLAB της NASA, το πρώτο δορυφορικό αλτίμετρο ραντάρ έκανε τις πρώτες πειραματικές μετρήσεις στην επιφάνεια της θάλασσας από το διάστημα, πετώντας σε ένα χαμηλό ύψος περίπου 435 km. Με μια ακρίβεια του αλτίμετρου της τάξης ± 1 m και μια ακρίβεια της τάξης των δεκάδων μέτρων στον υπολογισμό της τροχιάς, οι αλτιμετρικές μετρήσεις του SKYLAB (Εικόνα 6.2) είχαν μικρή πρακτική

χρησιμότητα. Ωστόσο, κατέδειξαν τις δυνατότητες της τεχνικής της δορυφορικής αλτιμετρίας, για τη γεωδαισία και την ωκεανογραφία.



Εικόνα 6.2 -SKYLAB (1973-75)

Στη συνέχεια ακολούθησε η εκτόξευση του GEOS-3 (*Geodynamics Experimental Satellite*), που οδήγησε στη χρήση ενός σημαντικά βελτιωμένου ως προς την ακρίβειά του αλτίμετρου, αλλά χωρίς αντίστοιχες σημαντικές βελτιώσεις στην ακρίβεια του υπολογισμού της τροχιάς του δορυφόρου.

Τον Αύγουστο του 1978 ακολούθησε η εκτόξευση του SEASAT, του πρώτου ειδικά αφιερωμένου για ωκεανογραφικούς σκοπούς.

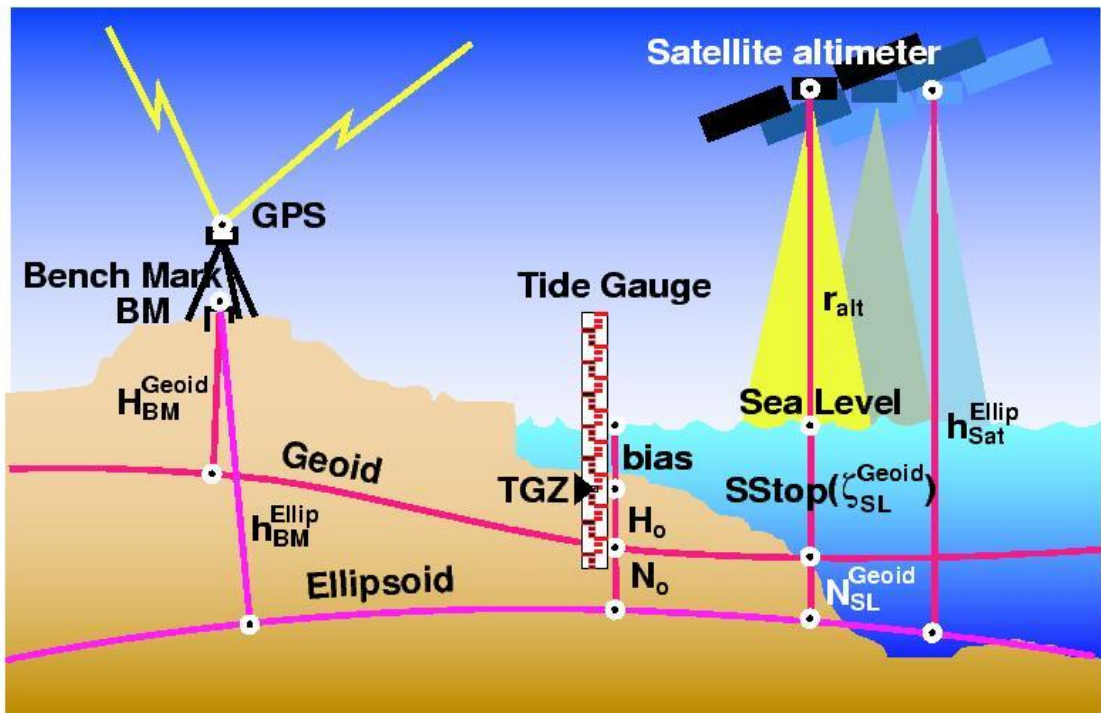
Ο επόμενος αλτιμετρικός δορυφόρος GEOSAT (*GEOdetic SATellite*), του αμερικανικού Ναυτικού, εκτοξεύθηκε το 1985 σε ένα ύψος 785 km και τροχιακή κλίση 108 μοιρών. Αυτή η τροχιά παρήγαγε ένα σύνολο αλτιμετρικών δεδομένων που παραμένει ακόμα και σήμερα απαράμιλλο, από την άποψη της χωρικής κάλυψης που παρείχαν.

Μια δεύτερη αποστολή ενός παρόμοιου δορυφόρου GEOSAT, με την ονομασία "*GEOSAT Follow On*" ή **GFO**, ακολούθησε το 1998 και συνεχίζει

να λειτουργεί μέχρι σήμερα, αν και αντιμετωπίζει σημαντικές δυσκολίες ορισμένων οργάνων του (π.χ. του συστήματος GPS).

6.1.1 TOPEX/Poseidon

Ο πρώτος στην επόμενη γενιά των αλτιμετρικών δορυφόρων, ο TOPEX/Poseidon, τοποθετήθηκε τον Αύγουστο του 1992, σε ύψος 1335 km και τροχιακή κλίση περίπου 66μοίρες, σε 10ήμερη επαναληπτική τροχιά. Ο δορυφόρος περιλαμβάνει ουσιαστικά τρία διαφορετικά αλτίμετρα ραντάρ. Το πρώτο, ένα αλτίμετρο κατασκευασμένο από τη NASA, είναι διπλής συχνότητας (Ku- και C-band) και επιτρέπει τον υπολογισμό ακριβέστερων διορθώσεων για τις επιδράσεις της ιονόσφαιρας στη μέτρηση του αλτίμετρου. Το δεύτερο αλτίμετρο, από τη γαλλική Υπηρεσία Διαστήματος CNES, απαιτεί λιγότερη ενέργεια για τη λειτουργία του και είναι αρκετά ελαφρύτερο και μικρότερο, και κατά συνέπεια χαμηλότερου κόστους. Η δορυφορική πλατφόρμα περιλαμβάνει τρία διαφορετικά συστήματα για την παρακολούθηση του δορυφόρου: ανακλαστήρες για δορυφορικά τηλέμετρα SLR, και τα συστήματα εντοπισμού DORIS και GPS. Το τρίτο σύστημα χρησιμοποίησε δέκτη GPS πάνω στο σκάφος για να καθορίσει ακριβώς τη θέση του δορυφόρου κάθε στιγμή, με την ανάλυση των σημάτων που λαμβάνονταν από το δίκτυο δορυφόρων GPS της Πολεμικής Αεροπορίας των ΗΠΑ. Το TOPEX/POSEIDON ήταν η πρώτη αποστολή που απέδειξε ότι το σύστημα GPS μπορεί να προσδιορίσει με ακρίβεια τόσο τη θέση όσο και την τροχιά. Η γνώση της θέσης των δορυφόρων με ακρίβεια 2 cm ήταν ο κύριος παράγοντας που έκανε δυνατό τον ακριβή υπολογισμό της επιφανειακής θαλάσσιας τοπογραφίας.



Εικόνα 6.3 -Συνδιασμός της δορυφορικής αλτιμετρίας με GPS

Η παρακολούθηση του δορυφόρου με συστήματα SLR γίνεται με τον ίδιο τρόπο όπως και για άλλους δορυφόρους, χρησιμοποιώντας το ίδιο παγκόσμιο δίκτυο των επίγειων σταθμών με δορυφορικά τηλέμετρα λέιζερ. Το σύστημα DORIS βασίζεται στη μέτρηση της μετατόπισης Doppler ενός πανκατευθυντικού (*omni directional*) σήματος μικροκυμάτων, από έναν αναμεταδότη στο δορυφόρο ή από ένα δίκτυο αναμεταδοτών στο έδαφος. Λόγω του ύψους του TOPEX/Poseidon, ο ακριβής προσδιορισμός της τροχιάς του είναι λιγότερο επηρεασμένος από τα ατμοσφαιρικά σφάλματα και τα σφάλματα των μοντέλων της έλξης του πεδίου βαρύτητας, σε σχέση με τους χαμηλότερους δορυφόρους .

Ο TOPEX/Poseidon παρέχει μοναδικές δυνατότητες διαχρονικής παρατήρησης των μεταβολών μεσαίας κλίμακας (*mesoscale variations*) και της δυναμικής τοπογραφίας της επιφάνειας θάλασσας. Ωστόσο, η απόσταση μεταξύ των επίγειων ιχνών του δορυφόρου είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με τους

άλλους αλτιμετρικούς δορυφόρους μέχρι σήμερα. Αυτό οφείλεται στην περίοδο επανάληψης της τροχιάς των 9.97 ημερών, κατά τη διάρκεια των οποίων ο TOPEX/Poseidon ολοκληρώνει ακριβώς 127 τροχιές, που αντιστοιχεί σε μια απόσταση μεταξύ διαδοχικών επίγειων ιχνών του δορυφόρου στον ισημερινό πάνω από 300 km. Η εν λόγω χωρική κάλυψη είναι, εντούτοις, επαρκής για τους στόχους της συγκεκριμένης αποστολής που δίνει στον TOPEX το όνομά της, δηλαδή το ωκεάνιο *TOPO*graphy *EX*periment.

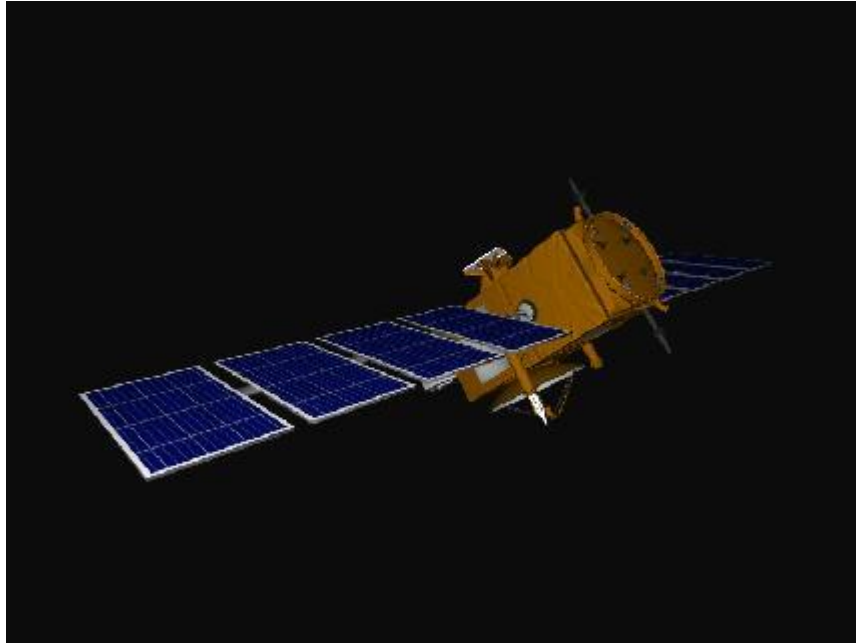


Εικόνα 6.4 -TOPEX/ Poseidon : 1992 -

6.1.2 JASON -1

Ο JASON-1 είναι ο πρώτος σε μια νέα σειρά δορυφόρων με αλτίμετρα ραντάρ, που αποσκοπούν να εξασφαλίσουν τη συνεχή παρατήρηση των ωκεανών για τις επόμενες δεκαετίες. Η αποστολή του αποτελεί συνέχιση εκείνης του TOPEX/Poseidon, του οποίου έχει κληρονομήσει και τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά (π.χ., τροχιά, όργανα, ακρίβεια μέτρησης, κλπ.) και αναπτύσσεται επίσης από κοινού από τη CNES και την NASA. Τοποθετήθηκε το 2001 σε τροχιά ύψους 1300 km, με ένα κύκλο επανάληψης 10 ημερών, και είναι εφοδιασμένος με πέντε βασικά όργανα: αλτίμετρο ραντάρ, ραδιόμετρο

υδρατμών και τα συστήματα DORIS, GPS και SLR για την παρακολούθηση της τροχιάς του.



Εικόνα 6.5 -JASON 1 : 2001 –

Τα βασικά όργανα του Jason-1:

Poseidon 2 – TOPEX. Υψομετρητής ραντάρ που χρησιμοποιεί τεχνολογία περιοχής C (5,3 GHz) και Ku (13,6 GHz) για τη μέτρηση του ύψους επάνω από την επιφάνεια θάλασσας.

Ραδιόμετρο Μικροκυμάτων Jason (JMR). Το όργανο μετρά υδρατμούς κατά μήκος της πορείας για να διορθώσει τις καθυστερήσεις του σήματος.

DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning). Ενσωματώνεται στο δορυφόρο και έχει τη δυνατότητα προσδιορισμού της τροχιάς με ακρίβεια <10 cm.

GPS τύπου BlackJack. Παρέχει ακριβή στοιχεία για την τροχιά του δορυφόρου.

Μια ομάδα ανακλαστήρων λέιζερ (SLR) που λειτουργούν σε συνδυασμό με τους επίγειους σταθμούς για τη διόρθωση των μετρήσεων των υψομέτρων.

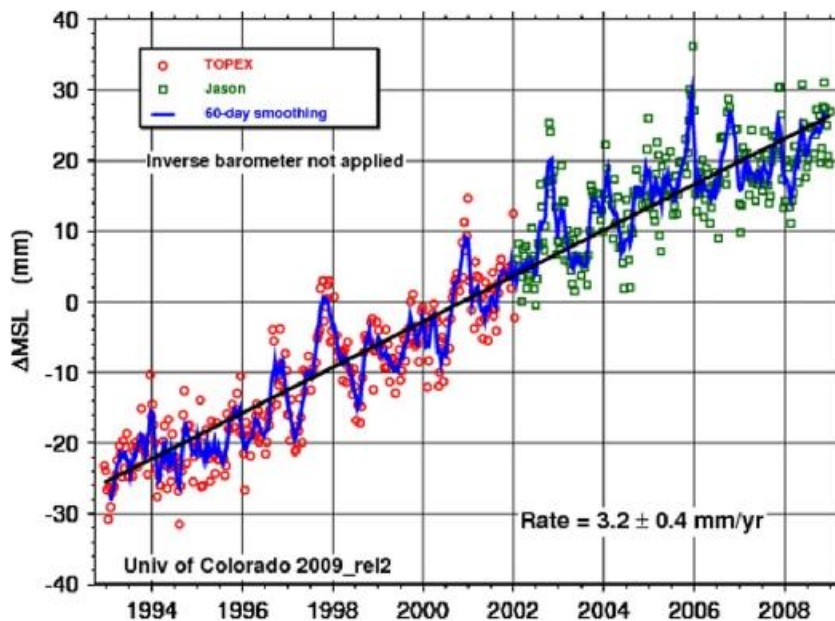
Ο TOPEX/Poseidon και Ο Jason 1 μας έχουν βοηθήσει αρκετά στην κατανόηση της:

- **ωκεάνιας μεταβλητότητας**

Οι αποστολές αποκάλυψαν την εκπληκτική μεταβλητότητα του ωκεανού, πόσο αλλάζει από εποχή σε εποχή, σε ετήσια βάση, από δεκαετία σε δεκαετία και ακόμα για πιο μεγάλα χρονικά διαστήματα. Διέλυσαν την παραδοσιακή εικόνα ενός quasi-steady προτύπου ωκεάνιας κυκλοφορίας με παρουσίαση αποδείξεων πως ο ωκεανός αλλάζει γρήγορα σε όλες τις κλίμακες, από τα τεράστια χαρακτηριστικά γνωρίσματα όπως το Ελ Νίνιο και το Λα Νίνια, τα οποία μπορούν να εκτείνονται σε ολόκληρο ισημερινό Ειρηνικό, έως τους μικροσκοπικούς στροβίλους που στροβιλίζονται από το μεγάλο ρεύμα του Περσικού Κόλπου στον Ατλαντικό.

- **Αλλαγής στάθμης θάλασσας**

Οι μετρήσεις από τον TOPEX/Poseidon και τον JASON-1 δείχνουν ότι η μέση στάθμη θάλασσας έχει αυξηθεί περίπου τρία χιλιοστόμετρα από το 1993. Αυτό μας δείχνει μια αύξηση δύο φορές πιο μεγάλη από τις εκτιμήσεις που είχαμε για τον προηγούμενο αιώνα. Αυτά τα δεδομένα μας δείχνουν μια πιθανή επιτάχυνση της ανόδου της στάθμης των θαλασσών (Εικόνα 6.6)



Εικόνα 6.6 -Αύξηση της μέσης θαλάσσιας στάθμης από το 1993 έως και σήμερα. Η αύξηση είναι περίπου 3,2 χιλιοστά το χρόνο

• Πλανητικά κύματα

Οι αποστολές του TOPEX/Poseidon και του JASON-1 κατέστησαν σαφή τη σημασία των κυμάτων πλανητικής κλίμακας, όπως τα κύματα Rossby και Kelvin. Κανένας δεν είχε συνειδητοποιήσει πόσο διαδεδομένα ήταν αυτά τα κύματα. Χιλιάδες χιλιόμετρα πλάτους αυτά τα κύματα κινούνται από τον αέρα κάτω από την επίδραση της γήινης περιστροφής και είναι σημαντικοί παράγοντες για το σχηματισμό του κλίματος στις μεγάλες ωκεάνιες λεκάνες.

• Ωκεάνιες παλίρροιες

Οι ακριβείς μετρήσεις του TOPEX/Poseidon και του JASON-1 έχουν φέρει τη γνώση των ωκεάνιων παλιρροιών σε ένα πρωτοφανές επίπεδο. Η αλλαγή της στάθμης του νερού, λόγω της παλιρροιακής κίνησης στον ωκεανό, είναι γνωστή παντού στη γη με ακρίβεια 2,5 εκατοστόμετρα (cm). Αυτή η νέα ανακάλυψη έχει αναθεωρήσει την ιδέα πως οι παλίρροιες διαλύονταν στον μεγάλους ωκεανούς. Αντί να χάνεται όλη η ενέργεια της παλίρροιας στις ρηχές θάλασσες και κοντά στις ακτές, όπως πιστεύαμε στο παρελθόν, η αποστολή έδειξε ότι το ένα τρίτο (1/3) της παλιρροιακής ενέργειας χάνεται στα μεγάλα βάθη. Εκεί, η

ενέργεια καταναλώνεται με τη μίξη του νερού διαφορετικής πυκνότητας, ένας θεμελιώδης μηχανισμός στη φυσική που κυβερνά τη γενική κυκλοφορία του ωκεανού και αποκαλύφθηκε με τις αποστολές αυτές.

• Ωκεάνια πρότυπα

Ο TOPEX/Poseidon και οι παρατηρήσεις του JASON-1 παρείχαν τα πρώτα παγκόσμια στοιχεία για τη βελτίωση της απόδοσης των αριθμητικών ωκεάνιων προτύπων που είναι ένα βασικό συστατικό των προτύπων πρόβλεψης κλίματος.

Εκτός από την έρευνα του κλίματος, τις προβλέψεις τυφώνων και μεγάλων καιρικών φαινομένων, έρευνα των δύο δορυφορικών αποστολών μας έδωσε μια σειρά από άμεσες εφαρμογές. Η καλύτερη πλοήγηση των σκαφών μέσω της κατάρτισης ακριβέστερων χαρτών ρευμάτων και στροβίλων, οι έρευνες για μεγάλα θαλάσσια θηλαστικά, όπως οι φάλαινες, είναι κάποιες από τις εφαρμογές.

Τα δεδομένα της επιφανειακής θαλάσσιας τοπογραφίας που αρχίζουν να συγκεντρώνονται με τον TOPEX/Poseidon και συνεχίστηκαν με τον JASON-1 θα συνεχίσουν να συλλέγονται και στο μέλλον, αφού η NASA ξεκίνησε ήδη από το 2008 την έναρξη του προγράμματος JASON-2, ενώ προγραμματίζει για το μέλλον και την αποστολή και άλλου δορυφόρου. . Αυτοί οι δορυφόροι παρέχουν μια μοναδική σφαιρική αποτύπωση των ωκεανών τόσο μεγάλης ακρίβειας που είναι αδύνατον να προέκυπτε από τη χρησιμοποίηση της παραδοσιακής ship-based δειγματοληψίας.

6.1.3 JASON-2

Ο Jason -2 όπως και οι προκάτοχοί του , χρησιμοποιεί υψηλής ακρίβειας ωκεάνια υψομετρία για να μετρήσει την απόσταση μεταξύ του δορυφόρου και της επιφάνειας των ωκεανών με ακρίβεια μερικών εκατοστών. Αυτές οι πολύ εύστοχες παρατηρήσεις των μεταβολών στο ύψος της επιφάνειας της θάλασσας, γνωστό και ως ωκεάνια τοπογραφία , παρέχει πληροφορίες σχετικά με την παγκόσμια στάθμη της θάλασσας , την ταχύτητα και την κατεύθυνση των ωκεάνιων ρευμάτων , καθώς και τη θερμότητα που αποθηκεύεται στον ωκεανό.

Ο Jason-2 δημιουργήθηκε από το Thales Alenia Space χρησιμοποιώντας την πλατφόρμα Proteus, βάσει μιας σύμβασης από το CNES. Οι επιστήμονες θεωρούν ότι τα επόμενα 15 χρόνια από τα καταγεγραμμένα κλιματικά στοιχεία , ότι αυτή η αποστολή θα επεκτείνει την κριτική κατανόηση του τρόπου με τον οποίο τα ωκεάνια ρεύματα , συνδέονται με την παγκόσμια κλιματική αλλαγή .

Ο Jason-2 ξεκίνησε στις 20 Ιουνίου 2008, από την Καλιφόρνια των ΗΠΑ. Βρίσκεται σε υψόμετρο 1336 χιλιομέτρων , σε κυκλική-σύγχρονη τροχιά με κλίση 66 μοιρών ως προς τον ισημερινό της Γης, επιτρέποντας στην Επιτροπή να παρακολουθεί το 95 τοις εκατό της ελεύθερης ωκεάνιας επιφάνειας της Γης που καλύπτεται με πάγο κάθε 10 ημέρες. Ο Jason-1 έχει μετακινηθεί προς την αντίθετη πλευρά της Γης και τώρα πετά πάνω από την ίδια περιοχή του ωκεανού ,που ο Jason-2 πέταξε πάνω από εκεί πέντε ημέρες νωρίτερα. Αυτή η αποστολή παράλληλα προβλέπει διπλάσιες σε αριθμό μετρήσεις της επιφάνειας του ωκεανού, παρέχοντας μικρότερες δυνατότητες, όπως την ορατότητα των στον ωκεανό. Η αποστολή παράλληλα προετοιμάζει το έδαφος για μια μελλοντική αποστολή ωκεάνιας αλτιμετρίας που θα συλλέγει πολύ πιο λεπτομερή στοιχεία. Με την αποστολή του Jason-2 βελτιώνονται οι μετρήσεις των μεταβολών της παγκόσμιας στάθμης της θάλασσας, προσδιορίζεται η

μεταβλητότητα της ωκεάνιας κυκλοφορίας και επεκτείνεται η χρονική σειρά των μετρήσεων της επιφανειακής ωκεάνιας τοπογραφίας υπερβαίνοντας τον TOPEX / Poseidon και τον Jason-1, για την εκπλήρωση των παρατηρήσεων δύο δεκαετιών.

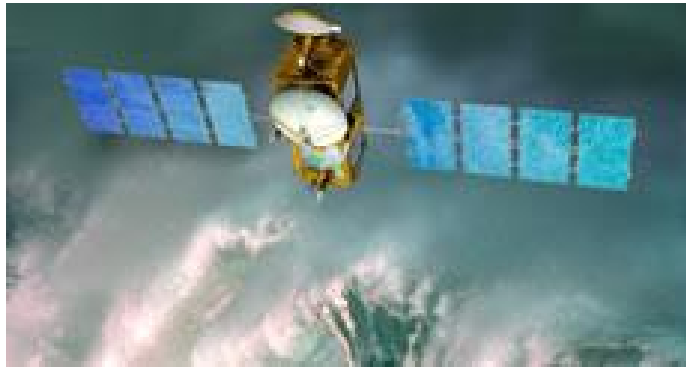


Εικόνα 6.7 –Jason-2

6.1.4 JASON-3

Ο δορυφόρος Jason-3 θα τεθεί στην ίδια τροχιά με τον Jason-2, σε υψόμετρο 1.336 χιλιομέτρων με κλίση 66 μοιρών, για να παρέχουν σχεδόν γενική κάλυψη του συνόλου των ελεύθερων επιφανειών των ωκεανών που καλύπτονται με πάγο. Το βάρος του κατά την έναρξη θα είναι 553 κιλά και με ισχύ 550 W . Η έναρξη λειτουργίας του αναμένεται στα μέσα του 2013, για μια αποστολή των 3 ετών.

Ο Jason-3 θα επιτρέψει τη συνέχιση των μετρήσεων υψηλής ακρίβειας της ωκεάνιας τοπογραφίας, πέραν του TOPEX / Poseidon, Jason-1 και του Jason-2, οι οποίες είναι πλέον σε τροχιά λειτουργίας. Επίσης θα προσφέρει την ίδια ακρίβεια μετρήσεων των ωκεανών όπως ο Jason 2, συμπεριλαμβανομένων των παράκτιων ζωνών, καθώς των λιμνών και των ποταμών.



Εικόνα 6.8 –Jason-3

Στην παρακάτω φωτογραφία απεικονίζονται οι δορυφόροι που συμβάλουν στην μελέτη της υψομέτρησης της επιφανειακής θαλάσσιας τοπογραφίας.



Εικόνα 6.9 –Η εξέλιξη των δορυφόρων.

6.2 ΠΗΓΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΛΤΙΜΕΤΡΙΑΣ

Προκειμένου να αξιοποιηθεί η πλήρης δυνατότητα των μετρήσεων ενός αλτίμετρου ραντάρ, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη διάφορες πηγές σφαλμάτων και να εφαρμοστούν οι σχετικές διορθώσεις τους με μια ακρίβεια που θα πρέπει να είναι συμβατή με την ακρίβεια μέτρησης του εκάστοτε αλτίμετρου. Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες σφαλμάτων που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην επεξεργασία του αλτιμετρικού σήματος και των αντιστοιχών μετρήσεων:

- Σφάλματα που επηρεάζουν τη μέτρηση του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας.
- Σφάλματα που επηρεάζουν την ερμηνεία των μετρήσεων.

Η προέλευση αυτών των σφαλμάτων και των αντίστοιχων διορθώσεών τους μπορεί να χωριστούν σε πέντε κατηγορίες όπως:

- i) Σφάλματα του αλτίμετρου.
- ii) Σφάλματα εξ αιτίας του μέσου διάδοσης των σημάτων, δηλαδή της ατμόσφαιρας.
- iii) Σφάλματα του γεωειδούς.
- iv) Μεταβολές χρονικού χαρακτήρα των ωκεανών.
- v) Σφάλματα προσδιορισμού της δορυφορικής τροχιάς.

6.2.1 Σφάλματα του αλτίμετρου

Τα σφάλματα αυτά έχουν να κάνουν με τη λειτουργία του εκάστοτε αλτίμετρου και τις τυχόν ατέλειες ή περιορισμούς της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του. Οι κυριότερες αιτίες είναι οι εξής:

- Συστηματικά σφάλματα του μηχανισμού ανίχνευσης του παλμού.
- Σφάλματα δειγματοληψίας του σχήματος του ανακλώμενου παλμού.
- Σφάλματα κατεύθυνσης του ραντάρ.
- Θόρυβοι από την ανάλυση της μορφής του παλμού και χρονικές αβεβαιότητες.

6.2.2 Σφάλματα εξ' αιτίας της ατμόσφαιρας

Ο παλμός ενός αλτιμέτρου ραντάρ που εκπέμπεται από έναν δορυφόρο πρέπει να ταξιδέψει μέσω της γήινης ατμόσφαιρας πριν ανακλαστεί στην επιφάνεια της θάλασσας για να επιστρέψει μέσω της ατμόσφαιρας στο δορυφόρο. Ωστόσο, καθώς τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ταξιδεύουν μέσω της ατμόσφαιρας, επιβραδύνονται από τους υδρατμούς της τροπόσφαιρας ή από τα ιονισμένα μόρια της ιονόσφαιρας. Κατά συνέπεια η πρώτη απαίτηση της λειτουργίας των αλτιμέτρων ραντάρ, όπως και για οποιοδήποτε όργανο τηλεπισκόπησης που αποσκοπεί να παρατηρήσει τη γήινη επιφάνεια, είναι ότι η ατμοσφαιρική μείωση του ηλεκτρομαγνητικού σήματος να είναι αρκετά μικρή ώστε η ανίχνευση της επιστροφής του παλμού να είναι δυνατή. Στο μεγαλύτερο μέρος της υπέρυθρης περιοχής του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, η μείωση των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων είναι μεγάλη οφειλόμενη στον ατμοσφαιρικό υδρατμό και αέρια όπως το διοξείδιο του άνθρακα και το οξυγόνο.

6.2.3 Σφάλματα των επιδράσεων της Τροπόσφαιρας

Η τροπόσφαιρα είναι το χαμηλότερο μέρος της ατμόσφαιρας, που επεκτείνεται από το επίγειο επίπεδο μέχρι ένα ύψος περίπου 11 km και περιέχει περίπου το 90% της ατμοσφαιρικής μάζας, παρουσιάζοντας τη μεγαλύτερη οπτική καθυστέρηση ενός σήματος μικροκυμάτων εξ αιτίας δύο κυρίων

παραγόντων: αρχικά μέσω της μάζας και της πυκνότητας του ξηρού αέρα, και αφετέρου μέσω της καθυστέρησης του παλμού από τους ατμοσφαιρικούς υδρατμούς. Η επίδραση του ξηρού μέρους της τροπόσφαιρας μπορεί να εκτιμηθεί από τη μάζα και την πυκνότητα της στήλης του αέρα μέσω της οποίας διέρχεται ο παλμός.

6.2.4 Σφάλματα των επιδράσεων της Ιονόσφαιρας

Η ιονόσφαιρα αποτελείται από διάφορα ιονισμένα στρώματα μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα, που επεκτείνονται από το ύψος των 70 km μέχρι και αρκετά χιλιόμετρα. Οι ακραίες ακτινοβολίες των υπεριωδών ακτίνων και των ακτίνων-X από τον Ήλιο, που προσκρούουν στα στρώματα της ιονόσφαιρας, έχουν ικανή ενέργεια ώστε να ελευθερώνουν ηλεκτρόνια από τα άτομα που βρίσκονται σε αυτό το ύψος της γήινης ατμόσφαιρας. Τα μικροκύματα αλληλεπιδρούν έντονα με αυτά τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, προκαλώντας την καθυστέρηση των σημάτων. Ο δείκτης διάθλασης των ιονισμένων στρωμάτων της ιονόσφαιρας είναι συνάρτηση του αριθμού (της πυκνότητας) των ελεύθερων ηλεκτρονίων, του λεγόμενου *Total Electron Content (TEC)*, που υπολογίζεται από μοντέλα βασισμένα σε ραδιοσήματα σε δύο συχνότητες. Στο παρελθόν όλοι οι αλτιμετρικοί δορυφόροι, εκτός του TOPEX/Poseidon δεν διέθεταν τη δυνατότητα μέτρησης της ιονοσφαιρικής διόρθωσης από δύο συχνότητες. Με το δορυφόρο TOPEX/Poseidon και τους μετέπειτα δορυφόρους, η σύγκριση των μετρήσεων του αλτιμέτρου στις συχνότητες Ku και C, παρέχει αξιόπιστες διορθώσεις της παραπάνω επίδρασης.

6.2.5 Σφάλματα του γεωειδούς

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για να ληφθούν πληροφορίες για τη δυναμική κατάσταση των ωκεανών από τις μετρήσεις της αλτιμετρίας για το ύψος της θαλάσσιας επιφάνειας, απαιτείται η λεπτομερής γνώση της μορφής του γεωειδούς. Οι χωρικές αλλαγές του γεωειδούς μπορεί να ποικίλουν κατά αρκετά μέτρα σε αποστάσεις μερικών χιλιομέτρων, ιδιαίτερα στις περιοχές όπου υπάρχουν υποθαλάσσιες τάφροι ή κορυφογραμμές, σε αντίθεση με τις μεταβολές της τοπογραφίας της επιφάνειας της θάλασσας που δεν υπερβαίνουν το 1-1.5 m. Προκειμένου να καθοριστεί η τοπογραφία της θαλάσσιας επιφάνειας, με ακρίβεια αντίστοιχη εκείνης των αλτιμετρικών μετρήσεων, είναι απαραίτητο να είναι γνωστή η μορφή του γεωειδούς με ακρίβεια τουλάχιστον 10 cm στις χωρικές κλίμακες που αντιστοιχούν στα μήκη των ωκεάνιων χαρακτηριστικών που επιζητείται να υπολογιστούν από τις μετρήσεις αλτιμετρίας.

Τα σημερινά μοντέλα του γεωειδούς ικανοποιούν αυτή την απαίτηση για χαρακτηριστικά γνωρίσματα του γεωειδούς που εκτείνονται σε μήκη μεγαλύτερα από περίπου 1600 km. Τα ομαλοποιημένα υψόμετρα του γεωειδούς σε αποστάσεις μεγαλύτερες από περίπου 1600 km είναι γνωστά με ακρίβεια περίπου ± 15 cm. Σε τοπικές κλίμακες, τα υψόμετρα του γεωειδούς είναι λιγότερο γνωστά, με ακρίβειες ± 50 cm. Ως εκ τούτου, οι δορυφόροι με αλτίμετρα ραντάρ τοποθετούνται σε επαναλαμβανόμενες τροχιές, όπως ήδη αναφέρθηκε. Το γεγονός αυτό επιτρέπει παίρνοντας τη διαφορά των υψομέτρων της επιφάνειας της θάλασσας στα σημεία κατά μήκος ενός επίγειου ίχνους από τα αντίστοιχα υψόμετρα της επιφάνειας της θάλασσας στα σχεδόν ίδια σημεία κατά μήκος ενός επαναλαμβανόμενου επίγειου ίχνους, να παρατηρηθούν οι αλλαγές στη τοπογραφία της επιφάνειας της θάλασσας χωρίς να απαιτείται η

γνώση του γεωειδούς. Με τον τρόπο αυτό παρατηρούνται οι αποκλίσεις από τη μέση στάθμη των θαλασσών, που με τη σειρά τους αν αφαιρεθούν οι επιδράσεις των παλιρροιών από κατάλληλα μοντέλα εκφράζουν τη λεγόμενες θαλάσσιες μεταβολές μεσαίας κλίμακας που οφείλονται κυρίως στα θαλάσσια ρεύματα και άλλες δυναμικές μεταβολές όπως οι στροβιλισμοί που επεκτείνονται στην θαλάσσια επιφάνεια σε αποστάσεις από 20 μέχρι 500 km και διαρκούν από μερικές μέρες μέχρι μερικές εβδομάδες.

6.2.6 Σφάλματα χρονικών μεταβολών της επιφάνειας των ωκεανών

Σφάλματα της επίδρασης της ατμοσφαιρικής πίεσης

Το φαινόμενο της αντίστροφης επίδρασης της ατμοσφαιρικής πίεσης είναι απλά η συμπίεση της επιφάνειας της θάλασσας από το βάρος της στήλης του αέρα που στηρίζεται σε αυτή, κατ' αναλογία περίπου 10 mm στην αλλαγή του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας ανά mbar αλλαγής της ατμοσφαιρικής πίεσης στην επιφάνεια της θάλασσας. Η στιγμιαία ατμοσφαιρική πίεση στο σημείο μιας αλτιμετρικής μέτρησης μπορεί να ληφθεί από μοντέλα της επίδρασης της ξηρής τροπόσφαιρας.

Προβλήματα στην παραπάνω προσέγγιση μπορούν να προκύψουν όταν το αλτίμετρο κάνει μετρήσεις σε θαλάσσιες περιοχές κοντά σε θύελλες ή κοντά στις ακτές όπου άλλες επιδράσεις όπως η κατάσταση των ανέμων συσχετίζονται με την ατμοσφαιρική πίεση.

Σφάλματα εξ αιτίας της κατάστασης της θάλασσας

Ένας αλτίμετρο ραντάρ μετρά τη απόσταση από το δορυφόρο στην επιφάνεια της θάλασσας. Η τιμή που υπολογίζεται είναι μια εκτίμηση της απόστασης της μέσης επιφάνειας ανάκλασης του παλμού, η οποία είναι γενικά

διαφορετική από τη μέση επιφάνεια της θάλασσας. Οι παράγοντες που συμβάλουν σε αυτό το σφάλμα είναι δύο: το λεγόμενο ηλεκτρομαγνητικό συστηματικό σφάλμα, και τα σφάλματα των διαφόρων μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία του σήματος ραντάρ στον δορυφόρο. Το ηλεκτρομαγνητικό συστηματικό σφάλμα συνδέεται με το σημαντικό ύψος των κυμάτων στην επιφάνεια θάλασσας. Οι παρυφές των κυμάτων είναι γενικά επίπεδες σε σύγκριση με τις κορυφές των κυμάτων, γεγονός που προκαλεί ισχυρότερη αντανάκλαση του παλμού από τις παρυφές των κυμάτων παρά από τις κορυφές των κυμάτων. Κατά την επεξεργασία του ανακλώμενου παλμού στον δορυφόρο, χρησιμοποιούνται πολύπλοκα μοντέλα που υποθέτουν μια κανονική στατιστική κατανομή των γωνιών πρόσπτωσης του παλμού, γεγονός που έχει ως συνέπεια την εισαγωγή ενός συστηματικού σφάλματος στις μετρήσεις με μέγεθος ανάλογο του σημαντικού ύψους των κυμάτων SWH. Η υπολογισμένη ταχύτητα των ανέμων επηρεάζεται επίσης από το εν λόγω σφάλμα εξ αιτίας των διαφορών στην τραχύτητα της θαλάσσιας επιφάνειας μεταξύ των παρυφών και των κορυφών των κυμάτων.

Σφάλματα της επίδρασης των παλιρροιών

Η μεγαλύτερη δυναμική μεταβολή της επιφάνειας της θάλασσας αποδίδεται στην παλιρροιακή έλξη τρίτων σωμάτων (δηλ. της Σελήνης και των άλλων πλανητών), τα αποτελέσματα της οποίας πρέπει να εξαλειφθούν από τις αλτιμετρικές μετρήσεις προκειμένου να ερευνηθούν τα στατικά και τα μη-παλιρροιακά δυναμικά φαινόμενα και χαρακτηριστικά των ωκεανών. Υπάρχουν δύο ελαφρώς διαφορετικές παλιρροιακές κινήσεις στην επιφάνεια θάλασσας: οι ρευστές παλίρροιες των ωκεανών και οι κατακόρυφες μετατοπίσεις του στερεού φλοιού της Γης εξ αιτίας των παλιρροιών. Οι παλίρροιες στον ανοικτό ωκεανό γεωγραφική θέση. Αντίθετα, οι παλίρροιες του στερεού φλοιού της Γης έχουν μέγεθος λιγότερο από 10 cm.

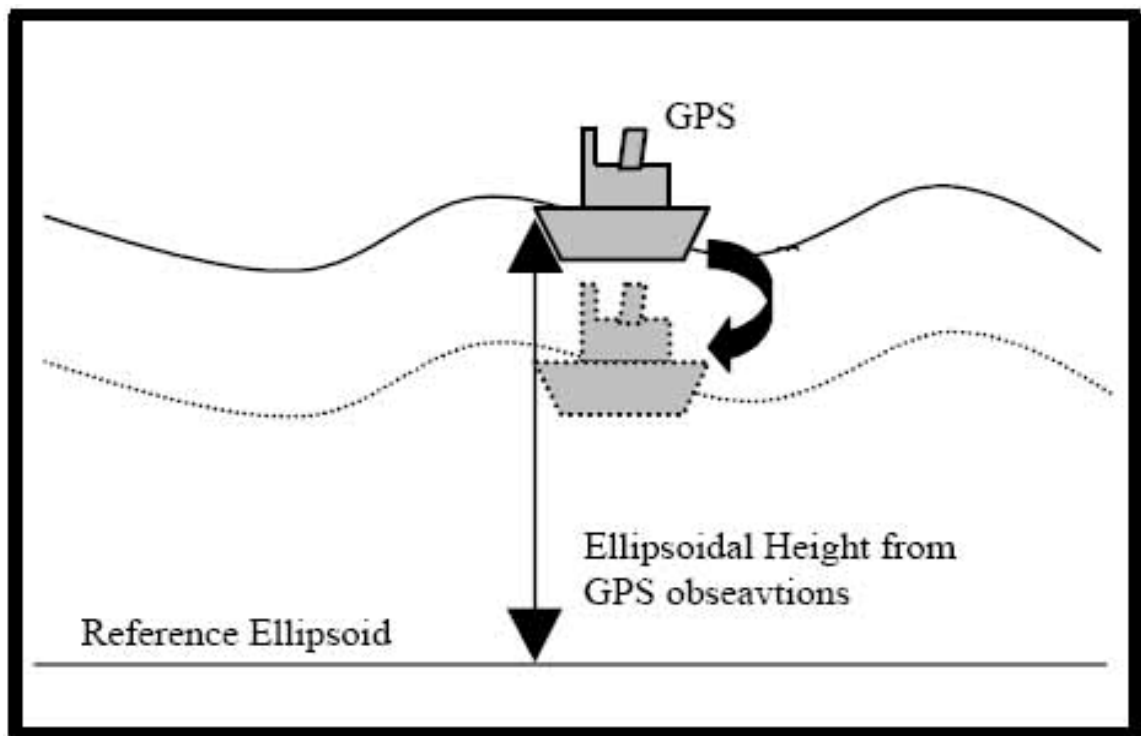
6.2.7 Σφάλματα τροχιάς

Ο ακριβής προσδιορισμός της τροχιάς, από την ανάλυση δορυφορικών δεδομένων παρακολούθησης του δορυφόρου (π.χ. SLR, GPS, DORIS) είναι απαραίτητος, προκειμένου να μπορεί να υπολογισθεί η θέση του δορυφόρου στη δεδομένη στιγμή κάθε αλτιμετρικής μέτρησης. Αυτές οι τροχιακές πληροφορίες είναι κρίσιμες για την ορθή ερμηνεία των αλτιμετρικών δεδομένων του ραντάρ, δεδομένου ότι στην πράξη αντιπροσωπεύουν τη μεγαλύτερη πηγή σφάλματος, ιδιαίτερα για αλτιμετρικούς δορυφόρους, όπως ο ERS-1, που είναι τοποθετημένος σε χαμηλή τροχιά σε ύψος λιγότερο από 800 km, σε αντιδιαστολή με δορυφόρους όπως οι TOPEX/Poseidon και JASON-1 που είναι τοποθετημένοι σε τροχιές περίπου σε ύψος 1300 km. Τυπικά, τα σφάλματα της τροχιάς οφείλονται κυρίως στα σφάλματα των μοντέλων που χρησιμοποιούνται (π.χ. εξ αιτίας της ατελούς γνώσης του πεδίου βαρύτητας της Γης), καθώς και στα σφάλματα των συντεταγμένων των επίγειων σταθμών παρακολούθησης των δορυφόρων. Στην πραγματικότητα, εξ αιτίας των παρέλξεων της Γης (π.χ. παλίρροιες) και άλλες δυνάμεις που ασκούνται στην επιφάνεια του δορυφόρου (π.χ. τριβή) καθώς επίσης και η ανισότροπη φύση του πεδίου της γήινης βαρύτητας στα ύψη μικρότερα ή συγκρίσιμα με το μέγεθος της Γης διαταράσσουν την ιδανική ελλειπτική δορυφορική τροχιά, που περιγράφουν τα γνωστά Κεπλέρια στοιχεία, από την ονομαστική (πραγματική) τροχιά που ακολουθούν οι δορυφόροι.

7. Η ΜΕΘΟΔΟΣ GPS – on boat

Μία εναλλακτική μέθοδος προσδιορισμού του γεωειδούς και της επιφανειακής θαλάσσιας τοπογραφίας (SST) είναι η μέθοδος GPS- on boat. Η μέθοδος αυτή αποτελεί την πλέον σύγχρονη προσέγγιση για τη μελέτη της επιφανειακής θαλάσσιας τοπογραφίας και κατ' επέκταση και του γεωειδούς. Το κύριο πλεονέκτημά της είναι ότι μπορεί να βρει εφαρμογή σε παράκτιες περιοχές, σε κόλπους και μικρά κανάλια, εκεί όπου οι περισσότερες από τις τεχνικές που αναλύθηκαν παραπάνω αποτυγχάνουν να δώσουν αποτελέσματα μεγάλης ακρίβειας. Η μέθοδος 'GPS – on boat' στηρίζεται στην μέθοδο του κινηματικού (kinematic) GPS που βασίζεται, εκτός της συλλογής δεδομένων από δέκτες GPS πάνω σε κινούμενο σκάφος, και στη συλλογή δεδομένων από σταθερούς δέκτες της ξηράς. Επίσης, σχετίζεται με την άμεση μέτρηση της απόστασης της επιφάνειας της θάλασσας από το Ελλειψοειδές Αναφοράς, δηλαδή του (N) και επιτυγχάνει ακρίβεια μερικών εκατοστών (<10 cm).

Στη βιβλιογραφία δεν έχουμε ακόμα παρά ελάχιστες αναφορές για αυτή την τεχνική, με εξαίρεση μια ολοκληρωμένη μελέτη που έγινε το 2003 σε κόλπο της Κορσικής και πέτυχε ακρίβεια 1,3 cm. (Bonnetfond, Exertier, Laurain, Ménard, Orsoni, Jeansou, Haines, Kubitschek, Born, 2003). Η τεχνική αυτή βρίσκεται ακόμα σε αρκετά πειραματικό στάδιο καθώς παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες κατά την εφαρμογή. Μόνο τα τελευταία χρόνια με τη βελτίωση της ακρίβειας των GPS έχει γίνει δυνατή η αποτελεσματική εφαρμογή αυτής της τεχνικής. Στην (Εικόνα 7.1) παρουσιάζεται σχηματικά αυτή η τεχνική.



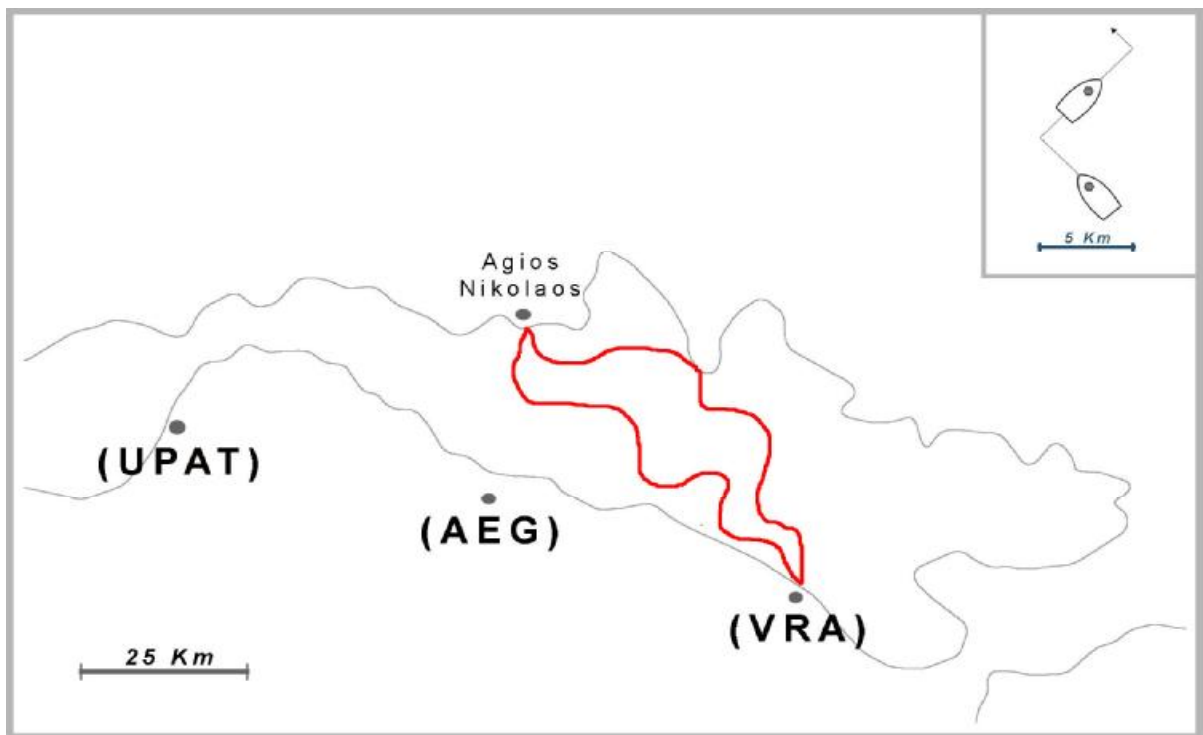
Εικόνα 7.1 -Η τεχνική του kinematic ‘GPS – on boat’. Όπως είναι εμφανές από το σχήμα το GPS λαμβάνει το ύψος με βάση το Ελλειψοειδές Αναφοράς (ΕΑ), ενώ επηρεάζεται συνέχεια από τον κυματισμό. (Πηγή: Yabuki, Fujita, 2003).

Τα επόμενα χρόνια ακολούθησαν και άλλες εφαρμογές αυτής της μεθόδου, από μια σειρά πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν σε διάφορα μέρη της Ελλάδας. Συγκεκριμένα, τα πειράματα διεξήχθησαν το 2008 στην περιοχή του νότιου και κεντρικού Ιονίου πελάγους, αλλά και του Πατραϊκού κόλπου.

Η μέθοδος GPS – on boat εξελίχθηκε με ακρίβεια 15 cm σε πρώτη εφαρμογή στο Ιόνιο Πέλαγος, όπου ένας δέκτης GPS τοποθετήθηκε πάνω σε ένα ιστιοφόρο καθώς και τέσσερις γεωδαιτικοί σταθμοί βάσης, στην ξηρά (παρακάτω θα ακολουθήσει ανάλυση του πειράματος). Τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά την εκτέλεση του πειράματος ήταν η κλίση του ιστιοφόρου, η μεγάλη απόσταση που υπήρχε μεταξύ του δέκτη και των σταθερών σταθμών. Επίσης, παρουσιάστηκε το σφάλμα πολυανάκλασης

(multipath error) στον δέκτη του GPS , που οφείλεται στην άφιξη του σήματος στην κεραία του δέκτη μετά από πολλές ανακλάσεις σε γειτονικές επιφάνειες.

Η επόμενη εφαρμογή διεξήχθη στην περιοχή του Κορινθιακού κόλπου, όπου σε αυτή τη διαδικασία τοποθετήθηκαν δύο δέκτες GPS πάνω σε ταχύπλοο και τρεις σταθεροί σταθμοί βάσης. Οι δυσκολίες που προέκυψαν ήταν ο έντονος κυματισμός της θάλασσας , καθώς και η μεγάλη απόσταση από τους σταθμούς της βάσης. Η εκτίμηση της ακρίβειας αυτού του πειράματος βελτιώθηκε αφού έφτασε τα 5cm.



Εικόνα 7.2 - Μετρήσεις στον Κορινθιακό κόλπο.

Στη συνέχεια η τρίτη εφαρμογή έλαβε χώρα στην περιοχή της Αδριατικής με ένα δέκτη πάνω στο καράβι Ionian Queen, με διάρκεια παρατηρήσεων έξι μηνών. Η τέταρτη και τελευταία εφαρμογή πραγματοποιήθηκε στον Πατραϊκό κόλπο, με τέσσερις δέκτες GPS τοποθετημένους πάνω σε ειδική σχεδία, ενώ οι σταθμοί βάσης ήταν τρεις.

Σε όλες τις παραπάνω εφαρμογές της μεθόδου GPS-on boat για την καλύτερη επεξεργασία των δεδομένων αλλά και για την αποφυγή σφαλμάτων, εκτός του GPS καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων συλλέγονταν και καταγράφονταν παράλληλα και τα εξής πειραματικά δεδομένα με ειδικά όργανα εντός του σκάφους.

- **Ανεμολογικά δεδομένα.** Ένταση και κατεύθυνση του ανέμου καθώς και έντονες μεταβολές του κατά διαστήματα

- **Ατμοσφαιρική πίεση.** Η μέτρηση γινόταν κάθε μία ώρα με ποτενσιόμετρο καθώς η ατμοσφαιρική πίεση είναι βασικός παράγοντας που επηρεάζει τη θαλάσσια στάθμη.

- **Θερμοκρασία της ατμόσφαιρας.** Η μέτρηση γινόταν κάθε μία ώρα με θερμόμετρο.

- **Ποσοστιαία Ατμοσφαιρική Υγρασία.** Ωριαίες μετρήσεις καθ' όλη της διάρκεια των πειραματικών πορειών.

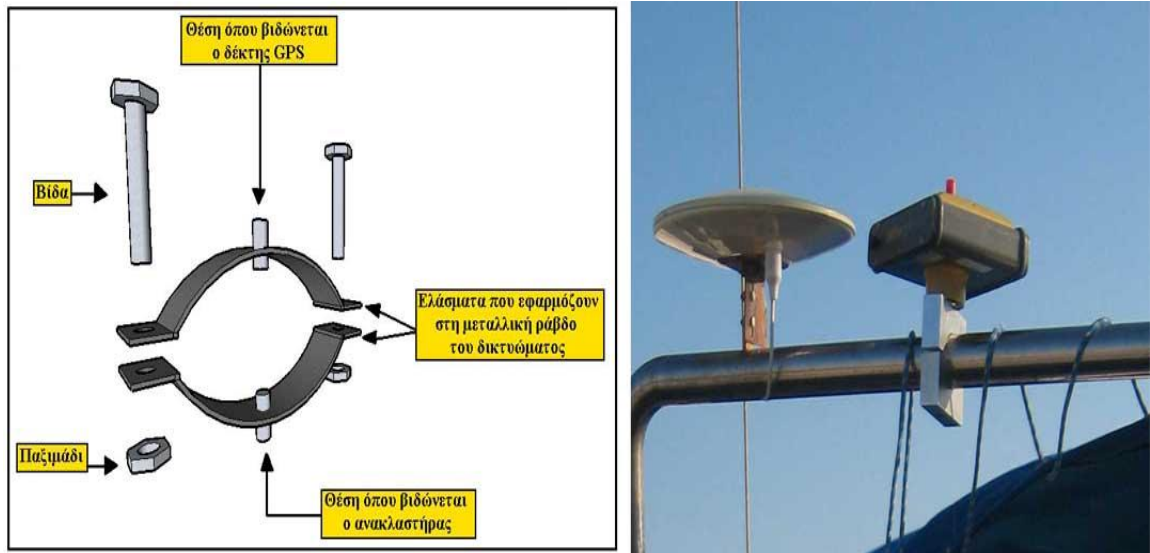
- **Κλίση του σκάφους.** Η κλίση καταγραφόταν στις περιόδους που το σκάφος κινείτο με πανιά τα οποία προκαλούσαν την κλίση. Η καταγραφή γινόταν με ειδικό κλισίμετρο που διέθετε το σκάφος. Η καταγραφή της κλίσης ήταν πολύ σημαντική τόσο γιατί επηρεάζει το ύψος του δέκτη GPS από την επιφάνεια της θάλασσας, όσο και γιατί αλλάζει τον προσανατολισμό του δέκτη, άρα και των δορυφόρων από τους οποίους συλλέγει δεδομένα.

7.1 Αναλυτική περιγραφή του πειράματος στο Ιόνιο πέλαγος

Η συλλογή γεωδαιτικών δεδομένων έγινε με τη βοήθεια ενός ιστιοπλοϊκού σκάφους 45 ποδιών (Εικόνα 7.3). Στο σκάφος τοποθετήθηκε μια συσκευή που κατασκευάστηκε ειδικά για το πείραμα για την υποδοχή του δέκτη GPS. Η απόσταση της κεραίας από την επιφάνεια της θάλασσας (ύψος vertical) μετρήθηκε στα 3 m. Στην εικόνα βλέπουμε τη διάταξη της συσκευής υποδοχής αλλά και της κεραίας του GPS. Για την συνεχή τροφοδοσία της συσκευής με ρεύμα χρησιμοποιήθηκε μπαταρία του σκάφους που φορτιζόταν από την ανεμογεννήτρια (Εικόνα 7.4).



Εικόνα 7.3 -Το ιστιοπλοϊκό σκάφος «Άλκηστis» κατά περίοδο αγκυροβολίας στις νήσους Στροφάδες.

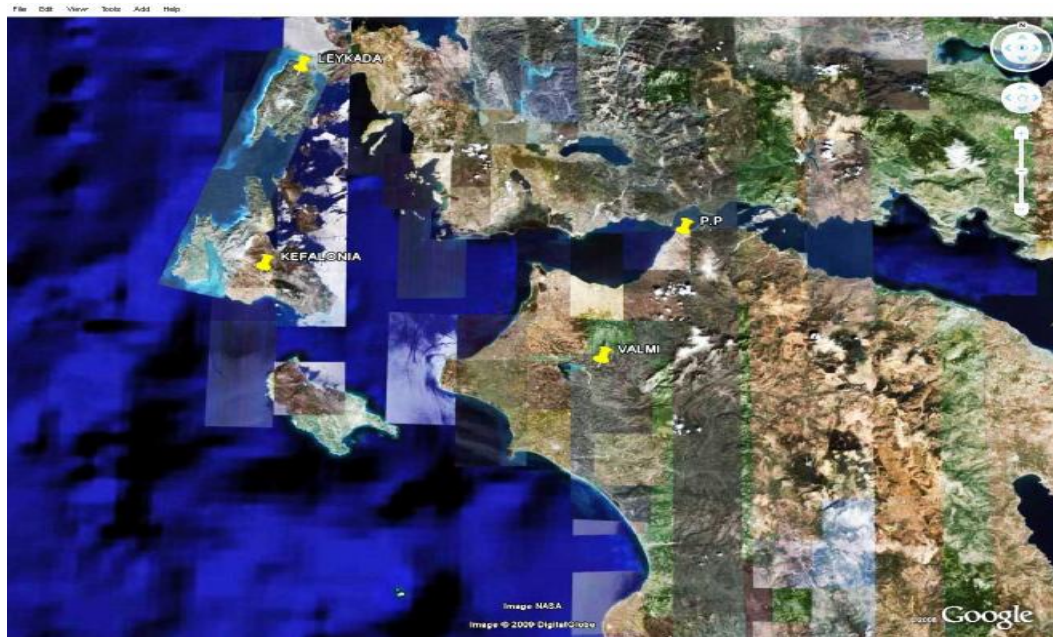


Εικόνα 7.3.1 -Διάταξη της συσκευής υποδοχής του δέκτη GPS πάνω στο σκάφος. Η διάταξη αυτή κατασκευάστηκε στο μηχανουργείο του Πανεπιστημίου Πατρών.



Εικόνα 7.4- Ανεμογεννήτρια τύπου Rutland για την παροχή ενέργειας στους συσσωρευτές του σκάφους αλλά και στο δέκτη GPS κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Λόγω των λίγων εφαρμογών στις κινηματικές εφαρμογές του GPS και ορισμένες αδυναμίες του οργάνου η ταχύτητα καθ' όλη τη διάρκεια των καταγραφών ήταν αρκετά μικρή. Οι μετρήσεις παίρνονταν ανά δεκαπέντε (15) δευτερόλεπτα. Η επίλυση των κινηματικών καταγραφών του οργάνου έγινε από ένα δίκτυο τεσσάρων σταθερών GPS τα οποία βρίσκονταν στις εξής θέσεις (Εικόνα 7.5):



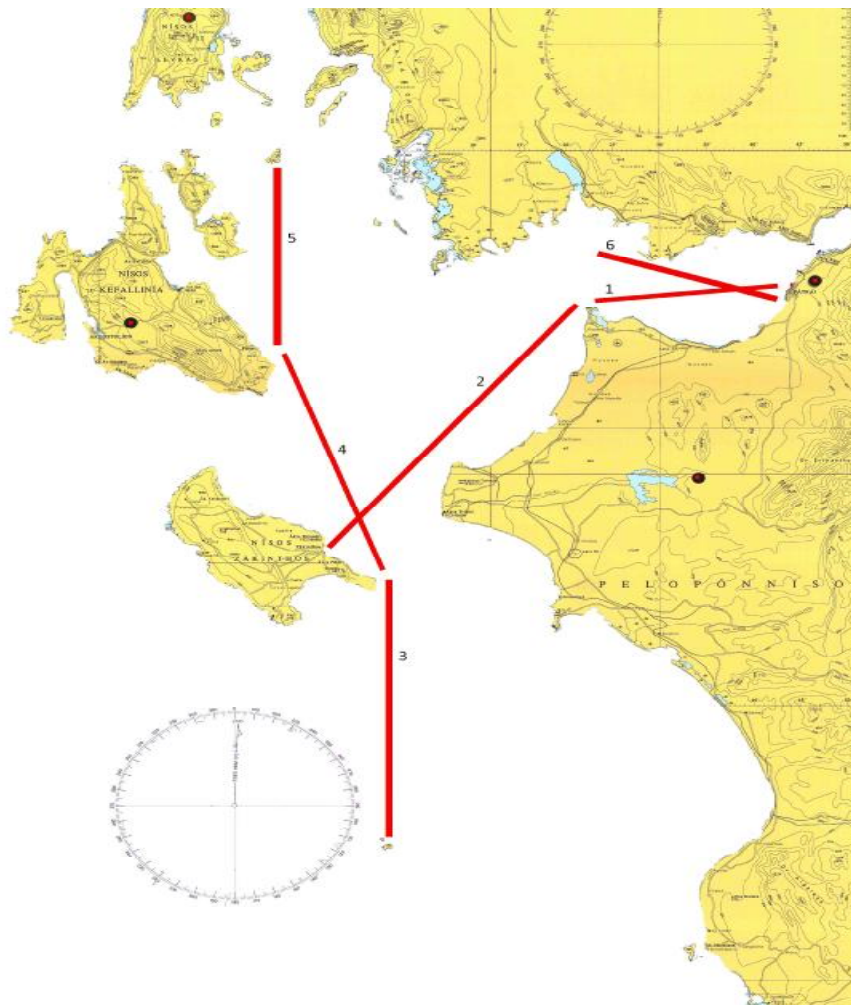
Εικόνα 7.5 -Το δίκτυο των τεσσάρων (4) σταθερών γεωδαιτικών σταθμών από τους οποίους έγινε η επίλυση. (Πηγή google earth)

- **Πανεπιστήμιο Πατρών.** Δέκτης GPS στην οροφή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών που τοποθετήθηκε για τη διάρκεια των πειραμάτων.
- **Χωρίο Βάλμη Ηλείας.** Δέκτης GPS που ήταν εγκατεστημένος στην περιοχή για την παρακολούθηση των γεωμορφολογικών μεταβολών μετά το σεισμό της 8^{ης} Ιουλίου 2008 στην περιοχή. (Feng, Psimoulis, Newman, Stiros, Farmer, Moschas, Lycourghiotis, 2008).
- **Σταθερός γεωδαιτικός σταθμός GPS στη Λευκάδα**
- **Σταθερός γεωδαιτικός σταθμός GPS στην Κεφαλονιά**

7.2 Θαλάσσιες Πορείες

Για λόγους ευκολίας στην επεξεργασία των στοιχείων, αλλά και για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων χωρίστηκε η «σάρωση» της περιοχής

μελέτης σε έξι (6) διακριτές πορείες (Εικόνα 7.6). Οι πορείες αυτές έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη μελέτη καθώς αποτελούν μεγάλα σκέλη της όλης διαδρομής (πάνω από 15 ναυτικά μίλια η κάθε μία) αλλά και είναι εν γένει ευθείες τομές της **επιφανειακής θαλάσσιας τοπογραφίας (SST)**, η μελέτη της οποίας είναι και ο κύριος στόχος της παρούσας έρευνας.



Εικόνα 7.6 -Χάρτης της περιοχής μελέτης και των ευθύγραμμων θαλάσσιων πορειών σάρωσης του πειράματός .

Οι έξη (6) διακριτές κύριες πορείες καθώς και κάποιες πρώτες συνθήκες που επικρατούσαν σε αυτές ήταν οι εξής:

• 1^η πορεία: (31,91 Km) **από Πάτρα έως φάρο του Πάπα**. Πορεία Δυτική. Άνεμος σχεδόν μηδενικός (0-1), πίεση (999-996), θερμοκρασία (25-28), υγρασία (55-60%). Η καταγραφή έγινε στις 25/6 από τις 9:00 έως τις 12:00.

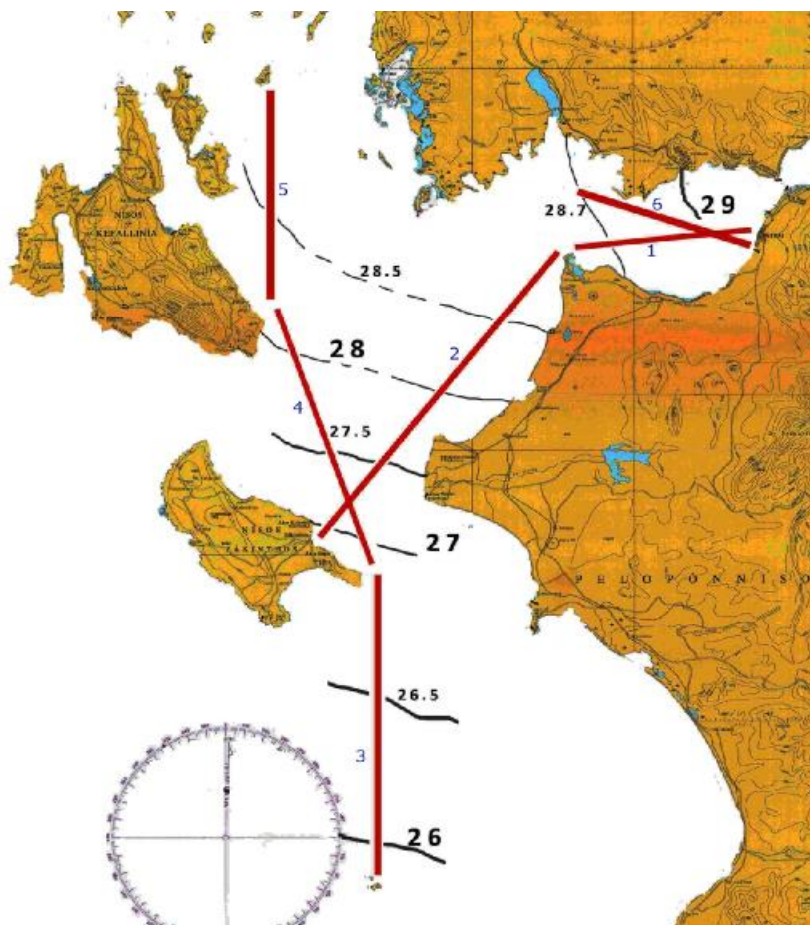
• 2^η πορεία: (68,09 Km) **από Πάπα έως Ζάκυνθο**. Πορεία Νότιο-Δυτική. Άνεμος (2-4 Δ), πίεση (992-990), θερμοκρασία (30-32), υγρασία (55-60%). Η καταγραφή έγινε στις 25/6 από τις 12:00 έως τις 23:30.

• 3^η πορεία: (53,19 Km) **από Ζάκυνθο έως νήσους Στροφάδες**. Πορεία Νότια. Άνεμος (1-3 ΒΑ), πίεση (991-995), θερμοκρασία (29-31), υγρασία (57-66%). Η καταγραφή έγινε στις 26/6 από τις 10:00 έως τις 17:20.

• 4^η πορεία: (56,38 Km) **από νήσους Στροφάδες έως Κεφαλονιά (Λιμάνι Πόρου)**. Πορεία Βόρια. Άνεμος (2-3 ΒΔ), πίεση (990-996), θερμοκρασία (29-31), υγρασία (58-61%). Η καταγραφή έγινε στις 28/6 από τις 12:00 έως τις 24:30.

• 5^η πορεία: (43,61 Km) **Κεφαλονιά (Πόρος) έως νήσος Άτοκος**. Πορεία Βόρια. Άνεμος (0-1), πίεση (987-992), θερμοκρασία (20-34), υγρασία (54-63%). Η καταγραφή έγινε στις 29/6 από τις 14:00 έως τις 17:00.

• 6^η πορεία: (32,97 Km) **Μεσολόγγι έως Πάτρα**. Άνεμος (0-1), πίεση (990-996), θερμοκρασία (29-31), υγρασία (60-63%). Η καταγραφή έγινε στις 3/7 από 12:00 έως 15:10



Εικόνα 7.7 - Εκτίμηση υψομέτρου SST ως προς το ελλειψοειδές αναφοράς

Τέλος, σύμφωνα με παλαιότερες μελέτες οδηγούμαστε στη βεβαιότητα χρήσης της μεθόδου GPS-on boat, καθώς και στην ακρίβεια με την οποία καταφέρνουμε να υπολογίσουμε τον υψομετρικό χάρτη είναι αρκετά σημαντική και βελτιώνεται συνεχώς. Επίσης, η εφαρμογή αυτής της μεθόδου ανοίγει ένα νέο πεδίο έρευνας για το γεωειδές και όχι μόνο, κυρίως στις παράκτιες περιοχές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

Κατσάμπαλος Κ.Ε, Τζιαβός Η.Ν (1991), “Φυσική γεωδαισία”, *Εκδόσεις Ζήση, Θεσσαλονίκη*.

Λυκουργιώτης Σ., Στείρος Ε., (2008), “Μετεωρολογική Παλίρροια και Κίνδυνος Πλημμυρών Παράκτιων Περιοχών του Αιγαίου”, *Τέταρτο Πανελλήνιο Συνέδριο Διαχείρισης & Βελτίωσης παράκτιων ζωνών, Μυτιλήνη 2008*

Τζιαβός Η.Ν., (1984) “Μελέτη του βέλτιστου συνδυασμού ετερογενών δεδομένων για τον προσδιορισμό του Γεωειδούς με εφαρμογές στον Ελλαδικό χώρο”, *Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Α.Π.Θ, Θεσσαλονίκη, 1984*

Φωτίου Α., Πικριδάς Χ. (2006), “GPS και Γεωδαιτικές Εφαρμογές”, *Θεσσαλονίκη 2006, Εκδόσεις Ζήτη*

Ξενόγλωσση

Andritsanos V., Hryssomalidis H., Kappos G, Kechaidou E, C.K. Pikridas, D.V. Tsoulis, (1995), “Orthometric Height Determination from a Combination of GPS and Gravity Data”. *Paper submitted to the ION GPS-95 student competition, 1995.*

Barlier, F. and M. Lefebvre. (2001), “A new look at planet Earth: Satellite geodesy and geosciences” .pp. 1623–1651, *in the Century of Space Science. Netherlands: Kluwer Ac. Pub.*

Bertiger, W. I., et al., (1994) «GPS precise tracking of TOPEX/POSEIDON: Results and Implications», *J. Geophys. Res.*, 99, C12, 24,449-24464, 1994.

- Bonnefond P, P. Exertier ,O. Laurain ,Y. Ménard , A. Orsoni , E. Jeansou , B. J. Haines , D. G.Kubitschek , G. Born f, (2008), “Leveling the Sea Surface Using a GPS-Catamaran”, *Marine Geodesy*, 2008
- Christensen, E. J., B. J. Haines, S. J.Keihm, C. S. Morris, R. A. Norman, G. H. Purcell, B. G.Williams, B. D. Wilson, G. H. Born, M. E. Parke, S. K. Gill, C. K. Shum, B. D. Tapley, R. Kolenkiewicz, and R. S. Nerem. (1994), “Calibration of TOPEX/POSEIDON”. *J. Geophys. Res.* 99(C12):24465–24485
- Cocard M., Geiger A., Kahle H.-G., Veis G., (2002) “Airborne laser altimetry in the Ionian Sea, Greece”, *Global and Planetary Change* 34 (2002) 87–96
- Colombo, O. L., (1981), “Numerical methods for harmonic analysis on the sphere”, *Report 310, Department of Geodetic Sciencand Surveying, The Ohio State University, Columbus, Ohio, 1981.*
- Feng L., Psimoulis P., Newman A., Stiros S., Farmer G., Moschas F., Lycourghiotis S., (2008), “Strong Rupture and Postseismic Response of the June, 2008 Kalivakia-Andravida Earthquake in Western Peloponnese, Greece”, *Eos Trans. AGU*, **89**(53), Fall Meet. Suppl., Abstract T41A-1939.
- Heiskanen, W. and H. Moritz, (1967) “Physical Geodesy”, *W. H. Freeman and Co., San Francisco, 1967.*
- Hernandez, W. (2001). “Improving the responses of several accelerometers using in a car under performance tests by using Kalman filtering”, *Sensors*, Vol. 1, pp. 38-52.
- Hipkin R., K. Haines, C. Beggan, R. Bingley, F. Hernandez, J. Holt, T. Baker, (2004) “The geoid EDIN2000 and mean sea surface topography around the British Isles”, *Geophys. J. Int.* (2004) 157, 565–577

- Hipkin R., (2000), "Modelling the Geoid and Sea-Surface-Topography in Coastal areas", *Phys. Chem. Earth (A)*, 2000
- Kaula, William M., (1967) "Theory of Satellite Geodesy", *Blaisdell Publishing Company, Waltham, Mass., 1967.*
- Kenyon S. C., and N. K. Pavlis, (1996), "The development for a global surface gravity data base to be used in the joint DMA/GSFC geopotential model", in *Global Gravity Field and Its Temporal Variations*, 1996
- Lerch, F. J., (1991), "Optimum data weighting and error calibration for estimation of gravitational parameters", *Bull. Geodesique* , 64, 1991.
- Lerch F. J., et al., (1994), "A geopotential model from satellite tracking, altimeter and surface gravity observations: GEM T3", *J. Geophys. Res.*, 99, B2, 1994.
- Li Ye Cai (1993) "Optimized Spectral Geoid Determination". *M.Sc. Thesis, UCGE Rep. No 20050, Department of Geomatics Engineering, Calgary, 1993.*
- Lohmann, K., Latif, M., (2007), "Influence of El Nino on the upper-ocean circulation in the tropical Atlantic Ocean", *Journal of Climate* 20 (19), pp. 5012-5018
- Mangiarotti, S., (2008) "Surface pressure and wind stress effects on sea level change estimations from TOPEX/Poseidon satellite altimetry in the Mediterranean Sea", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 25 (3), pp. 464-474
- Matsumoto, K., (2000), "Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global

- Model and a Regional Model around Japan”, *Journal of Oceanogr.*, 56, 567-581, (2000)
- Marsh, J. G., et al., (1990), “The GEM-T2 gravitational model”, *J. Geophys. Res.*, , 95, B13, 1990.
- Marshall, J. A., et al., (1995) “The temporal and spatial characteristics of TOPEX/POSEIDON radial orbit error”, *J. Geophys. Res.* , 100, 25331-25352, 1995.
- Nerem, R. S., et al., (1994), “Gravity Model Development for TOPEX/POSEIDON: Joint Gravity Models 1 and 2”, *J. Geophys. Res.*, , 24,421-24,447, 1994.
- Pavlis, N. K., J. C. Chan, F. J. Lerch, (1996), “Alternative Estimation Technique for Global High-Degree Gravity Modeling”, *Global Gravity Field and Its Temporal Variations* , Springer Verlag, Heidelberg, 1996.
- Psimoulis, P., Pytharouli, S., Karambalis, D. and Stiros, S. (2008). “Potential of Global Positioning System (GPS) to measure frequencies of oscillations of engineering structures”, *Journal of Sound and Vibration*, 318(8), 606-623.
- Pytharouli, S., Stiros, S., (2008). “Spectral analysis of unevenly spaced or discontinuous data using the «normperiod» code», *Computers and Structures*, 86(1-2), 190-196.
- Rapp, R. H., and R. S. Nerem, A Joint GSFC/DMA Project for Improving the Model of the Earth's Gravitational Field, In Suenkel H(ed), *Gravity and Geoid*, International Association of Geodesy Symposia, vol. 113, Springer Verlag, New York, 1994.

- Rapp, R. H., (1996), "Use of potential coefficient models for geoid undulation determinations using a spherical harmonic representation of the height anomaly/geoid undulation difference", *in press, the Journal of Geodesy* , 1996.
- Rapp, R. H., C. Zhang, and Y. Yi, (1996), "Analysis of Dynamic Ocean Topography using TOPEX Data and Orthonormal Functions", *J. Geophys. Res.*, , 101, 22583-22598, 1996.
- Trimmer, R. Manning D., (1996), "The altimetry derived gravity anomalies to be used in computing the DMA/NASA Earth gravity model": *Global Gravity Field and Its Temporal Variations*, R. H. Rapp, R. S. Nerem, and A. A. Cazenave (editors), IAG Symposia, Vol. 116, Springer-Verlag, Heidelberg, 1996.
- Tziavos I.N, Sideris M.G, Sunkel H., (1996), "The effect of surface density variation on terrain modeling - A case study in Austria. Presented at the XXI EGS General Assembly, The Hague", *The Netherlands, 6-10 May 1996. Session G7 .Techniques for local geoid determination., 1996*
- Tziavos, I.N.(1993), "Numerical Considerations of FFT Methods in Gravity Field Modelling". *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universitat Hannover, No 188, Hannover, 1993*
- Tziavos, I.N. (1996), "Comparisons of spectral techniques for geoid computations over large regions". *Journal of Geodesy*, 70, pp. 357-373, 1996.
- Schrama, E.,Ray R., (1994), "A preliminary tidal analysis of TOPEX/POSEIDON altimetry", *J. Geophys. Res.*, 99, C12, 24799-24808, 1994.

- Sideris, M.G.: (1993), “Test of a Gravimetric Geoid in GPS Networks”. *Paper presented in the 60th Meeting of the FIG Permanent Committee, New Orleans, Louisiana, U.S.A.*
- Stammer, D. et al., (1996) “How well does a 1/4 degree global circulation model simulate large-scale oceanic circulation” *J. Geophys Res.*, 101, C11, 25799-25812, 1996
- Stewart, R. (2003). “Introduction to physical oceanography”. *Texas A&M University.*
- Stiros C., “Geodetic evidence for mobilization of evaporites during the 1997 Strophades (W Hellenic Arc) Mw 6.5 earthquake”, *J. Geophys. Eng.* 2 (2005) 111–117
- Yabuki T., Fujita M., (2003), “Kinematic GPS positioning on sea surface and sea surface heights”, 2003
- Zhang, J., Lu, X., (2008), “On the simulation of M2 tide in the Bohai, Yellow, and East China Seas with TOPEX/Poseidon altimeter data”, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* 19 (1-2), pp. 173-181
- Zuo, J., Zhang, J., Du, L., Li, P., Li, L., (2009) “Global sea level change and thermal contribution”, *Journal of Ocean University of China* 8 (1), pp. 1-8

Διαδικτυακή

- <http://en.wikipedia.org/wiki/Altimeter>
- <http://www.geo.auth.gr/322/chapter023.html>
- <http://www.esri.com/news/arcuser/0703/geoid1of3.html>
- <http://www.esri.com/news/arcuser/0703/geoid2of3.html>
- <http://www.esri.com/news/arcuser/0703/geoid3of3.html>
- http://www.wileynautical.com/details/feature/109902/GPS_Marine_Navigation_Systems_-_An_Overview.html
- <http://www.nasa.gov/ostm>
- <http://www.nasa.gov/centers/jpl/home/>
- http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%AD%CF%83%CE%B7_%CF%83%CF%84%CE%AC%CE%B8%CE%BC%CE%B7_%CE%B8%CE%AC%CE%BB%CE%B1%CF%83%CF%83%CE%B1%CF%82
- http://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System
- <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%93%CE%B5%CF%89%CE%B4%CE%B1%CE%B9%CF%83%CE%AF%CE%B1>

- <http://www.mediafire.com/?bnngmlefnj1>
- [http://www.teiath.gr/userfiles/...26_05.../TEI_26052010_MINTOURAKI S.pdf](http://www.teiath.gr/userfiles/...26_05.../TEI_26052010_MINTOURAKI_S.pdf)
- [http://www.teiath.gr/userfiles/topoadmin/...26.../TEI_26052010_VERGO S.pdf](http://www.teiath.gr/userfiles/topoadmin/...26.../TEI_26052010_VERGO_S.pdf)