



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ-ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ

Μιχάλης Γιαννίου

Αναπληρωτής Καθηγητής Παν/μίου Δυτικής Αττικής

ΑΘΗΝΑ

Ιανουάριος 2019

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί τη δεύτερη έκδοση των διδακτικών σημειώσεων για το κατ' επιλογή μάθημα «Πλοήγηση και Εφαρμογές» του 6ου εξαμήνου του Τμήματος Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Το μάθημα αυτό στοχεύει στο να δώσει στους φοιτητές του Τμήματος τις βασικές γνώσεις που σχετίζονται με την πλοήγηση, ένα αντικείμενο που μπαίνει με ραγδαίους ρυθμούς στην καθημερινή ζωή μας και στο οποίο ο ρόλος του Τοπογράφου Μηχανικού είναι πολυδιάστατος.

Για τους μη ειδικούς η έννοια της πλοήγησης έχει να κάνει αποκλειστικά με θέματα που σχετίζονται με τη ναυσιπλοΐα. Όσοι έχουν περισσότερη επαφή με τα θέματα αυτά γνωρίζουν ότι η πλοήγηση δεν περιορίζεται μόνο σε σκάφη που κινούνται σε κάποια υδάτινη επιφάνεια (θάλασσα, λίμνη, ποταμός) αλλά αναφέρεται γενικότερα σε οποιοδήποτε κινούμενο σώμα. Η κίνηση αυτή μπορεί να πραγματοποιείται κυριολεκτικά οπουδήποτε: στην ξηρά, σε υδάτινη επιφάνεια (ή και κάτω από αυτή) στον αέρα, ακόμα και στο διάστημα.

Οι τεχνικές πλοήγησης που έχουν αναπτυχθεί εξειδικεύονται ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής τους. Σκοπός του παρόντος εγχειριδίου είναι να αντιμετωπίσει το αντικείμενο της πλοήγησης συνολικά. Για το λόγο αυτό εξειδικεύσεις στις επιμέρους κατηγορίες πλοήγησης γίνονται μόνο όταν αυτό κρίνεται σκόπιμο.

Οι συνεχείς τεχνολογικές εξελίξεις στο χώρο της πλοήγησης επιβάλλουν τη συχνή ενημέρωση και επέκταση των διδακτικών σημειώσεων. Το παρόν τεύχος συντάχθηκε με γνώμονα να κινήσει το ενδιαφέρον των φοιτητών για το τόσο δυναμικά εξελισσόμενο αντικείμενο της πλοήγησης και να διευρύνει το επιστημονικό τους πεδίο.

Για την κατανόηση του μαθήματος είναι σημαντικό οι φοιτητές να έχουν αφομοιώσει τις βασικές έννοιες του Δορυφορικού Εντοπισμού, οι οποίες στο παρόν εγχειρίδιο θεωρούνται γνωστές.

Αθήνα, Ιανουάριος 2019

Μ. Γιαννίου
Αναπληρωτής Καθηγητής Παν/μίου Δυτικής Αττικής

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	iii
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ.....	2
2.1 Βασικές έννοιες.....	2
2.2 Τεχνικές πλοήγησης - ιστορική εξέλιξη.....	4
3. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ.....	6
3.1 Θεμελιώδεις σχέσεις κυματικής.....	6
3.2 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και φαινόμενα μετάδοσης Η/Μ κυμάτων.....	6
3.3 Τρόποι διάδοσης Η/Μ κυμάτων.....	10
3.4 Το Φαινόμενο Doppler.....	13
4. ΟΥΡΑΝΙΑ ΠΛΟΗΓΗΣΗ.....	14
4.1 Βασικές αρχές.....	14
4.2 Όργανα και μέθοδοι μετρήσεων.....	16
4.3 Σύγχρονες εφαρμογές της ουράνιας πλοήγησης.....	17
5. ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΧΑΡΤΩΝ.....	19
5.1 Ορθοδρομία - λοξοδρομία.....	19
5.2 Μερκατορική προβολή.....	19
6. ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΥΞΙΔΑΣ.....	23
6.1 Γήινο μαγνητικό πεδίο.....	23
7. ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΜΕ ΕΠΙΓΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	26
7.1 Αρχή λειτουργίας.....	26
7.2 Ραδιοφάροι.....	26
7.3 Κυκλικά, υπερβολικά και αζιμουθιακά συστήματα.....	27
7.3.1 Κυκλικά συστήματα.....	27
7.3.2 Υπερβολικά συστήματα.....	28
7.3.2.1 LORAN-C.....	28
7.3.2.2 OMEGA.....	29
8. ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΜΕ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	31
8.1 Αρχή λειτουργίας.....	31
8.2 Ιστορική αναδρομή.....	31
8.3 TRANSIT.....	32
8.4 GPS.....	32
8.4.1 Τεχνικές εντοπισμού με GPS.....	32
8.4.1.1 Αυτόνομος εντοπισμός.....	34
8.4.1.2 DGPS.....	36
9. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ.....	40
9.1 Επίγεια συστήματα εκπομπής διορθωτικών σημάτων.....	40
9.2 Δορυφορικά συστήματα εκπομπής διορθωτικών σημάτων.....	40
9.2.1 Αρχή λειτουργίας.....	41
9.2.2 WAAS.....	41
9.2.3 EGNOS.....	42
10. ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ.....	44
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	49

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

Ελληνικές συντομογραφίες

H/M ηλεκτρομαγνητικός

Ξενόγλωσσες συντομογραφίες

DGPS	Differential GPS
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
ESA	European Space Agency
FAA	Federal Aviation Administration
FOC	Full Operational Capability
GAGAN	GPS and GEO Augmented Navigation
GBAS	Ground-Based Augmentation System
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GOCE	Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer
GPS	Global Positioning System
INS	Inertial Navigation System
LF	Low Frequency
LOP	Line of Position
LORAN	LOng RAnge Navigation
MF	Medium Frequency
MSAS	<u>M</u> SAT <u>S</u> atellite-based <u>A</u> ugmentation <u>S</u> ystem
NDB	Non-Directional Beacon
PR	Pseudorange
RTK	Real-Time Kinematic
SBAS	Satellite-Based Augmentation System
UHF	Ultra High Frequency
VHF	Very High Frequency
VLF	Very Low Frequency
VOR	VHF Omnidirectional Range

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αναζητώντας την ετυμολογία της λέξης πλοηγός, βλέπουμε ότι αυτή δημιουργείται από την αρχαία λέξη *πλους* και την κατάληξη *-ηγός*, από το *άγω* κατά το *στρατ-ηγός*, *οδ-ηγός* κλπ (Τεγόπουλος-Φυτράκης, 1993) και σημαίνει αυτόν που καθοδηγεί την πλεύση. Η λέξη πλοήγηση λοιπόν προέρχεται από το χώρο της πλεύσης στη θάλασσα, δηλαδή τη ναυσιπλοΐα. Το ίδιο ισχύει και για τον αγγλικό όρο που χρησιμοποιείται για την πλοήγηση, τη λέξη «navigation», η οποία προέρχεται από το λατινικό «navigare», το οποίο υποδηλώνει ναυτικό ταξίδι.

Πολύ συνοπτικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι το αντικείμενο της πλοήγησης είναι να προσδιορίσει τη θέση μίας κινούμενης πλατφόρμας (π.χ. πλοίο, αεροπλάνο, αυτοκίνητο) και να μας καθοδηγήσει στον τελικό μας προορισμό. Παρόλο λοιπόν που η λέξη «πλοήγηση» προέρχεται από τον θαλάσσιο χώρο η έννοια της πλοήγησης προϋπήρχε των θαλάσσιων ταξιδιών. Πριν ακόμα αρχίσουν τα ναυτικά ταξίδια, οι άνθρωποι ανέπτυξαν τεχνικές πλοήγησης για να πραγματοποιούν μακρινά ταξίδια στην στεριά.

Μέχρι τον 19^ο αιώνα οι μετακινήσεις του ανθρώπου περιορίζονταν στην ξηρά και στη θάλασσα. Τον 20^ο αιώνα κατασκευάζονται τα πρώτα αεροπλάνα και σύντομα αναπτύσσεται η αεροναυτιλία. Νέες μέθοδοι και τεχνικές πλοήγησης αναπτύσσονται για την κάλυψη των αναγκών της αεροπλοΐας. Παράλληλα με τις πρώτες πτήσεις αεροπλάνων, κατασκευάζονται και τα πρώτα υποβρύχια, για την πλοήγηση των οποίων αναπτύσσονται νέες τεχνικές. Οι τεχνικές αυτές επεκτείνονται για την κάλυψη όλο και πιο εξειδικευμένων αναγκών όπως π.χ. η πλοήγηση μη επανδρωμένων υποβρύχιων σκαφών, τα οποία μπορούν με τηλεχειρισμό να εκτελούν σύνθετες εργασίες σε μεγάλα βάθη.

Ένας τομέας με ακόμα μεγαλύτερες απαιτήσεις σε θέματα πλοήγησης είναι οι διαστημικές εφαρμογές. Τα διαστημικά οχήματα βρίσκονται σε ένα τελείως διαφορετικό περιβάλλον από το Γήινο, όπου ακόμα και η ροή του χρόνου είναι διαφορετική λόγω των υψηλών ταχυτήτων και του εξασθενημένου βαρυτικού δυναμικού.

Η περίπτωση της καθοδήγησης ενός διαστημικού λεωφορείου από το σημείο εκτόξευσης μέχρι ένα διαστημικό σταθμό και η πρόσδεσή του σε αυτόν, αποτελεί ένα καλό παράδειγμα για να συνειδητοποιήσει κάποιος πόσο απαιτητικό μπορεί να είναι το αντικείμενο της πλοήγησης, τόσο από θεωρητική όσο και από τεχνολογική πλευρά.

Για την ανάπτυξη και υλοποίηση των σύγχρονων τεχνικών πλοήγησης είναι απαραίτητη η συνεργασία πολλών κλάδων της επιστήμης και της τεχνολογίας. Ενδεικτικά μπορούν να αναφερθούν η Φυσική, η Μηχανολογία, η Ρομποτική, οι επιστήμες της θάλασσας και του διαστήματος. Ποιος είναι όμως ο ρόλος του Τοπογράφου Μηχανικού ανάμεσα στους άλλους κλάδους επιστημόνων. Χωρίς καμία υπερβολή μπορούμε να πούμε ότι ο ρόλος του Τοπογράφου Μηχανικού είναι όχι μόνο ουσιαστικός αλλά και πολυδιάστατος. Εξ ορισμού ο Τοπογράφος είναι ο «Μηχανικός του χώρου». Πραγματεύεται και μελετά το χώρο. Η πλοήγηση αποτελεί λοιπόν αντικείμενο του Τοπογράφου, αφού προϋποθέτει τη διεξαγωγή μετρήσεων και την επεξεργασία αυτών για τον προσδιορισμό, σε ένα κατάλληλο σύστημα αναφοράς συντεταγμένων, της θέσης και της κίνησης ενός αντικειμένου.

Πέρα όμως από αυτό η πλοήγηση εμπεριέχει την έννοια της απεικόνισης του κινούμενου σώματος σε κάποια αναπαράσταση του χώρου, όπως π.χ. σε ψηφιακά 3D μοντέλα εδάφους/πόλεων προκειμένου να προσδιοριστεί ο τρόπος μετάβασης σε ένα άλλο σημείο. Η αναπαράσταση του χώρου μπορεί γενικά να υλοποιείται με έναν αναλογικό χάρτη, ένα ψηφιακό χάρτη σε διανυσματική μορφή, ένα ψηφιακό 3D μοντέλο εδάφους ή πόλης. Η παραγωγή αυτών των υποβάθρων αλλά και η ένταξη τους μέσα σε ολοκληρωμένα συστήματα πλοήγησης αποτελούν πεδία εφαρμογών του Τοπογράφου Μηχανικού.

2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ

2.1 Βασικές έννοιες

Ξεκινώντας το κεφάλαιο αυτό θα περιγράψουμε τις βασικότερες έννοιες που σχετίζονται με το αντικείμενο την πλοήγησης. Όπως θα διαπιστώσει ο αναγνώστης, οι έννοιες δεν προσδιορίζονται μέσω κάποιων «ορισμών», αλλά επεξηγούνται με περιγραφικό τρόπο επισημαίνοντας παράλληλα τα σημεία που αποτελούν ειδοποιητές διαφορές. Αυτό γίνεται για δύο βασικούς λόγους. Ο πρώτος και κυριότερος λόγος είναι ότι σπάνια μπορεί ένας ορισμός λίγων γραμμών να προσδιορίσει απόλυτα μία έννοια τέτοιου είδους. Ο δεύτερος λόγος σχετίζεται με το γεγονός ότι καθώς η τεχνολογία και η επιστήμη εξελίσσονται τα όρια μεταξύ των επιστημονικών και τεχνολογικών τομέων γίνονται όλο και λιγότερο ευδιάκριτα.

Επειδή το εγχειρίδιο αυτό αντιμετωπίζει την πλοήγηση συνολικά, όταν για μία έννοια χρησιμοποιούνται περισσότεροι του ενός όροι, τότε θα αναφέρονται οι σημαντικότεροι από αυτούς. Λόγω της ολοένα αυξανόμενης σημασίας της αγγλικής ορολογίας, κρίθηκε σκόπιμο να δίνονται εντός παρενθέσεως και οι διεθνώς χρησιμοποιούμενοι αγγλικοί όροι.

Οι βασικότερες έννοιες που σχετίζονται με την πλοήγηση είναι οι ακόλουθες:

Προσδιορισμός θέσης (position determination ή positioning)

Ο προσδιορισμός θέσης συνίσταται στον υπολογισμό των συντεταγμένων ενός σώματος (ή ενός σημείου) σε ένα σαφώς καθορισμένο σύστημα αναφοράς συντεταγμένων. Το σύστημα αυτό μπορεί να είναι καρτεσιανό ή σύστημα καμπυλόγραμμων συντεταγμένων (π.χ. γεωγραφικό πλάτος και μήκος). Ο προσδιορισμός θέσης συχνά αναφέρεται και ως **εντοπισμός**. Ειδικότερα στη ναυσιπλοΐα χρησιμοποιείται ο όρος **προσδιορισμός στίγματος**.

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι η έννοια του προσδιορισμού θέσης σχετίζεται με το ερώτημα «που βρίσκομαι;» ή «ποια είναι η θέση μου;» (Hofmann-Wellenhof et al. 2003).

Γραμμή θέσης (LOP: Line Of Position)

Ο προσδιορισμός θέσης γίνεται μέσω μετρήσεων διαφόρων μεγεθών (αποστάσεων, γωνιών κ.α.) μεταξύ σημείων γνωστών συντεταγμένων και του υπό προσδιορισμό σημείου. Από κάθε μέτρηση προκύπτει ένας γεωμετρικός τύπος για τη θέση του άγνωστου σημείου. Αυτός ο γεωμετρικός τύπος ονομάζεται **γραμμή θέσης**. Η γραμμή θέσης μπορεί να έχει οποιοδήποτε σχήμα, ανάλογα με το είδος της μέτρησης που έχουμε κάνει. Για παράδειγμα έχοντας μετρήσει απόσταση από ένα γνωστό σημείο, η γραμμή θέσης που προκύπτει είναι ένα κύκλος με κέντρο το γνωστό σημείο και ακτίνα την μετρηθείσα απόσταση. Από την τομή δύο ή περισσότερων γραμμών θέσης προκύπτει το στίγμα.

Χάραξη πορείας - δρομολόγηση (routing)

Η έννοια της χάραξης πορείας είναι ευρέως γνωστή από τη ναυσιπλοΐα. Στην πιο απλή μορφή της, όπου το πλοίο μπορεί να ξεκινήσει από το σημείο αναχώρησης και να φθάσει στο σημείο άφιξης κινούμενο με σταθερή πορεία, η χάραξη πορείας συνίσταται στον προσδιορισμό της γωνίας ως προς τον Βορρά με την οποία πρέπει να κινηθεί το πλοίο. Η γωνία αυτή ονομάζεται **πορεία** ή **πλεύση** (Δημαράκης, 1995). Στην πράξη όμως τα πράγματα είναι πιο σύνθετα. Συνήθως το πλοίο δεν μπορεί να φτάσει στον προορισμό του διατηρώντας σταθερή πορεία. Στη γενική αυτή

περίπτωση πρέπει να καθοριστούν τα ενδιάμεσα σημεία αλλαγής πορείας και να προσδιοριστούν οι επιμέρους πορείες.

Κάτι αντίστοιχο με τη χάραξη πορείας είναι και η έννοια της δρομολόγησης, η οποία χρησιμοποιείται περισσότερο όταν η κίνηση γίνεται μέσω ενός οδικού δικτύου. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να καθοριστεί το δρομολόγιο (route). Χαρακτηριστικό παράδειγμα δρομολόγησης έχουμε σε ένα σύστημα πλοήγησης αυτοκινήτου, όπου ορίζουμε τον προορισμό μας και το σύστημα στη συνέχεια εφαρμόζει αλγόριθμους δρομολόγησης προκειμένου να προσδιορίσει το συντομότερο δρομολόγιο. Σήμερα εφαρμόζονται σύνθετοι αλγόριθμοι οι οποίοι βελτιστοποιούν τη δρομολόγηση λαμβάνοντας υπόψη πολλαπλά κριτήρια και μπορούν να σταθμίζουν δυναμικές παραμέτρους (π.χ. κυκλοφοριακός φόρτος) ώστε να τροποποιούν όταν χρειάζεται το υπολειπόμενο δρομολόγιο.

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι οι έννοιες της χάραξης πορείας και της δρομολόγησης σχετίζονται με το ερώτημα «πώς θα πάω στο σημείο που θέλω;» (Hofmann-Wellenhof et al. 2003).

Καθοδήγηση (guidance-pilotage)

Έχοντας χαράξει την επιθυμητή πορεία (ή έχοντας κάνει τη δρομολόγηση) η καθοδήγηση συνίσταται στο σύνολο των ενεργειών που θα κάνουν το κινούμενο μέσο να ακολουθήσει την επιθυμητή πορεία ή δρομολόγιο. Στην απλή περίπτωση ενός σκάφους η καθοδήγηση συνίσταται στην τοποθέτηση του πηδαλίου κατά τρόπο ώστε το σκάφος να ακολουθήσει την επιθυμητή πορεία. Στην περίπτωση ενός δορυφόρου που βρίσκεται σε τροχιά και πρέπει να εκτελέσει μία διορθωτική μανούβρα (orbital manuever) η καθοδήγηση συνίσταται στο να δοθούν με τηλεχειρισμό από το κέντρο ελέγχου οι κατάλληλες εντολές στους μηχανισμούς πρόωσης.

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι η έννοια της καθοδήγησης σχετίζεται με το ερώτημα «τι πρέπει να κάνω τώρα για να ακολουθήσω την πορεία που έχω χαράξει;» (Hofmann-Wellenhof et al. 2003).

Πλοήγηση (navigation)

Η έννοια της πλοήγησης περιγράφεται τελευταία καθώς είναι ευρύτερη και περιλαμβάνει και έννοιες που περιγράφηκαν παραπάνω. Ο όρος «πλοήγηση» αναφέρεται σε κινούμενα σώματα και περιλαμβάνει τις διαδικασίες:

- της χάραξης πορείας
- του προσδιορισμού της κίνησης, δηλαδή προσδιορισμού:
 - της θέσης
 - της ταχύτητας (velocity)
 - του προσανατολισμού (attitude)
- της καθοδήγησης

κινούμενων αντικειμένων (οχημάτων, σκαφών κ.λ.π.).

Κλείνοντας την παράγραφο αυτή, πρέπει να αναφερθεί ότι οι παραπάνω όροι δεν χρησιμοποιούνται πάντοτε με τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Για παράδειγμα στον τομέα της αυτοματοποιημένης καθοδήγησης, ο όρος «καθοδήγηση» (guidance) χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για αυτοματοποιημένη διαδικασία καθοδήγησης, ενώ όταν πρόκειται για καθοδήγηση που γίνεται με ανθρώπινη παρέμβαση χρησιμοποιείται ο όρος «πλοήγηση» (navigation).

2.2 Τεχνικές πλοήγησης - ιστορική εξέλιξη

Η ιστορία της πλοήγησης είναι στενά συνδεδεμένη με την πορεία του ανθρώπου πάνω στη Γη. Ο άνθρωπος ανέκαθεν χρειαζόταν να εφαρμόζει κάποιους τρόπους πλοήγησης προκειμένου να κινείται από το ένα μέρος στο άλλο. Αρχικά επρόκειτο για μετακινήσεις στην ξηρά, στη συνέχεια στη θάλασσα, αργότερα στον αέρα και υποβρυχίως και τα τελευταία χρόνια στο διάστημα. Στη συνέχεια παρατίθενται οι κυριότερες τεχνικές πλοήγησης. Η σειρά με την οποία δίνονται οι τεχνικές αυτές αντικατοπτρίζει εν γένει και τη χρονική σειρά με την οποία αναπτύχθηκαν. Έτσι η παράγραφος αυτή υπέχει και θέση ιστορικής αναδρομής της εξέλιξης της πλοήγησης.

Χρήση ουράνιων σωμάτων

Ο όρος *ουράνια πλοήγηση* (celestial navigation ή astronavigation) περιγράφει την πλοήγηση που γίνεται με χρησιμοποιώντας τα ουράνια σώματα και κυρίως τα άστρα, τον ήλιο και τους πλανήτες. Η πιο απλή μορφή της ουράνιας πλοήγησης είναι γνωστή σε όλους: Πρόκειται για την εύρεση της διεύθυνσης του Βορρά παρατηρώντας τον πολικό αστέρα.

Η ουράνια πλοήγηση μπορεί να θεωρηθεί ως η παλαιότερη τεχνική πλοήγησης. Με χρήση των άστρων γινόταν η πλοήγηση των πλοίων από τα αρχαία χρόνια. Σχετικές αναφορές υπάρχουν σε αρχαία κείμενα όπως η Οδύσσεια του Ομήρου. Η θεωρία της περιστροφής της Γης γύρω από τον άξονά της αλλά και γύρω από τον Ήλιο μαζί με τους άλλους πλανήτες είχε διατυπωθεί από τον Αρίσταρχο το Σάμιο (310-230 π.Χ.).

Χρήση χαρτών

Σημαντική ώθηση στην πλοήγηση δίνεται από την εφεύρεση των χαρτών. Το 225 π.Χ. ο Ερατοσθένης παρήγαγε ένα χάρτη χρησιμοποιώντας παρατηρήσεις του Πυθέα, ο οποίος βάσει του μήκους της σκιάς ενός γνώμονα προσδιόριζε το γεωγραφικό πλάτος. Τον δεύτερο αιώνα π.Χ. ο Ίππαρχος προτείνει το σύστημα των μεσημβρινών και παραλλήλων. Ο Πτολεμαίος (100-160 μ.Χ.) δημιούργησε το πρώτο είδος ενός «παγκόσμιου» χάρτη. Οι διαθέσιμοι χάρτες χρησιμοποιούνταν ευρύτατα για να καταγράφονται οι πορείες των πλοίων.

Χρήση μαγνητικής πυξίδας

Αρχικά η πλοήγηση με χρήση χαρτών γινόταν κυρίως μέσω οπτικών παρατηρήσεων χαρακτηριστικών σημείων της ξηράς και ουράνιων σωμάτων. Κατά τα τέλη του 12^{ου} αιώνα π.Χ. εφευρίσκεται η μαγνητική πυξίδα. Η χρησιμοποίησή της (magnetic compass navigation) σηματοδοτεί ένα ιστορικό ορόσημο στην εξέλιξη των τεχνικών πλοήγησης. Πλέον, ο προσανατολισμός κατά τη ναυσιπλοΐα μπορεί να γίνεται ανά πάσα στιγμή, ακόμα και στην ανοιχτή θάλασσα (απουσία οποιωνδήποτε χαρακτηριστικών σημείων ξηράς) ακόμα και όταν δεν μπορεί να εφαρμοστεί ουράνια πλοήγηση.

Η μαγνητική πυξίδα αποτελεί ένα εξαιρετικό εργαλείο για τον προσδιορισμό της διεύθυνσης του Βορρά και κατά συνέπεια της πορείας ενός κινούμενου σώματος. Για τον προσδιορισμό όμως της θέσης (π.χ. στίγμα με τη μορφή φ,λ) απαιτούνται περισσότερα στοιχεία. Συχνά η πυξίδα χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με μία διάταξη μέτρησης της διανυόμενης απόστασης, όπως ένα οδόμετρο (odometer) ή δρομόμετρο. Έτσι, γνωρίζοντας τη θέση αναχώρησης, το στίγμα μπορεί να προσδιορίζεται ανά πάσα στιγμή μέσω της διεύθυνσης και της απόστασης.

Χρήση ραδιοκυμάτων επίγειων σταθμών

Οι εξελίξεις των τηλεπικοινωνιών στις αρχές του 20^{ου} αιώνα επιτρέπουν τον προσδιορισμό διευθύνσεων και αποστάσεων μέσω ηλεκτρομαγνητικών σημάτων που εκπέμπονται από κατάλληλες κεραίες. Το 1945 αναπτύσσεται το σύστημα LORAN (Long Range Navigation).

Αποτελείται από ένα δίκτυο σταθμών ξηράς, οι οποίοι εκπέμπουν κατάλληλα σήματα μέσω των οποίων ένας δέκτης μπορεί να προσδιορίζει το στίγμα του. Γενικότερα η χρήση ραδιοκυμάτων (ηλεκτρομαγνητικά σήματα συγκεκριμένων συχνοτήτων) περιγράφεται συνήθως με τον όρο *ραδιοπλοήγηση* (radio navigation).

Χρήση δορυφόρων

Η χρήση ραδιοκυμάτων από επίγειους πομπούς επέτρεψε τον άμεσο προσδιορισμό στίγματος στις δύο ή τις τρεις διαστάσεις. Για πρώτη φορά κάποια συσκευή έδινε απευθείας τις συντεταγμένες της θέσης της. Τα συστήματα αυτά όμως μειονεκτούσαν λόγω της εξάρτησής τους από τους επίγειους σταθμούς. Όσο η απόσταση πομπών-δέκτη μεγάλωνε, η ακρίβεια σταδιακά μειώνονταν και από ένα όριο και μετά ο προσδιορισμός στίγματος ήταν ανέφικτος. Η λύση στο πρόβλημα δίνεται τη δεκαετία του 1960, όταν κατασκευάζεται το πρώτο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης (satellite navigation system). Σήμερα, το γνωστότερο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης είναι το σύστημα GPS.

3. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ

Η ενασχόληση με την πλοήγηση προϋποθέτει την ύπαρξη βασικών γνώσεων άλλων επιστημών και κυρίως της Φυσικής και των Τηλεπικοινωνιών. Το παρόν κεφάλαιο περιλαμβάνει τις απαραίτητες γνώσεις, οι οποίες παρουσιάζονται με συνοπτικό τρόπο και υπό το πρίσμα της εφαρμογής τους στην πλοήγηση.

3.1 Θεμελιώδεις σχέσεις κυματικής

Οι τεχνικές πλοήγησης με επίγειους σταθμούς εκπομπής ραδιοκυμάτων και με δορυφορικά συστήματα στηρίζονται στην εκπομπή και λήψη ηλεκτρομαγνητικών (H/M) κυμάτων. Για το λόγο αυτό είναι σημαντική η κατανόηση των βασικών αρχών που διέπουν τη διάδοση και χρήση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Η **συχνότητα** f ενός κύματος συνδέεται με το **μήκος κύματος** λ και την ταχύτητα διάδοσής του v μέσω της σχέσης:

$$v = \lambda f \quad (3.1)$$

Η παραπάνω σχέση ισχύει γενικά στην κυματική, είτε πρόκειται για H/M κύμα είτε για κύμα άλλου είδους όπως π.χ. ακουστικό ή σεισμικό. Στην περίπτωση των H/M κυμάτων που μεταδίδονται στο κενό η σχέση 3.1 γίνεται:

$$c = \lambda f \quad (3.2)$$

όπου c είναι η **ταχύτητα του φωτός στο κενό**. Η τιμή του c που κατά κανόνα χρησιμοποιείται είναι:

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/sec} \quad (3.3)$$

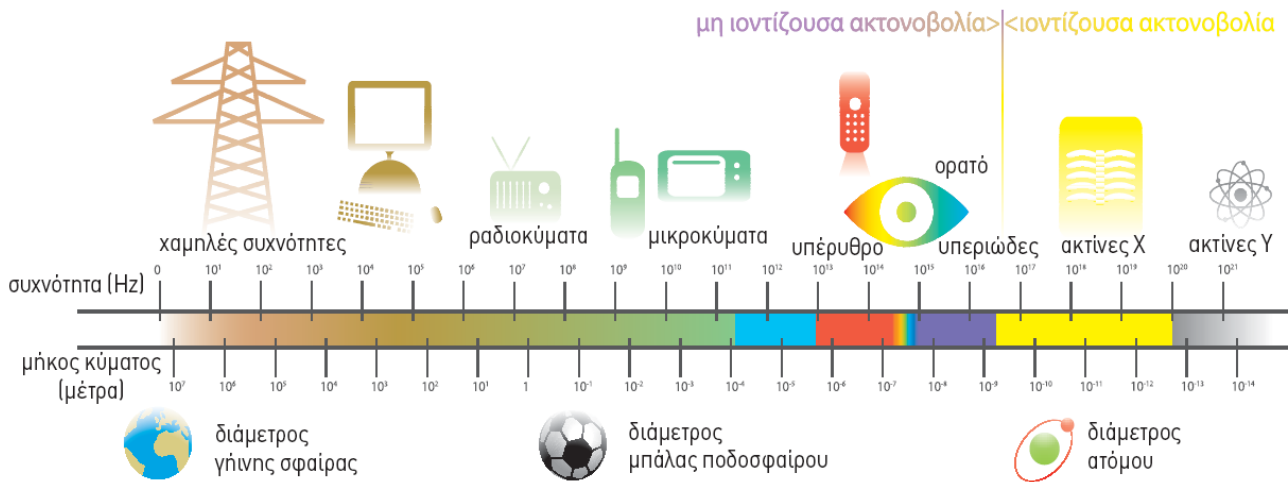
Η συχνότητα f ενός κύματος συνδέεται με την **περίοδο** T μέσω της σχέσης:

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.4)$$

και έχει μονάδα μέτρησης το Hz (Hertz) που ισούται με μία πλήρη ταλάντωση ανά 1 sec.

3.2 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και φαινόμενα μετάδοσης H/M κυμάτων

Οι ιδιότητες μετάδοσης ενός H/M κύματος σε ένα συγκεκριμένο μέσο εξαρτώνται από τη συχνότητά του, ή ισοδύναμα (βλ. σχέση 3.2) από το μήκος κύματος. Τα H/M κύματα κατηγοριοποιούνται συνήθως με βάση την προέλευσή τους και το μήκος κύματος. Στην εικόνα 3.1 δίνεται μία συνοπτική απεικόνιση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Στον πίνακα 3.1 δίνονται οι διάφορες ζώνες συχνοτήτων (frequency bands) του H/M φάσματος και επισημαίνονται αυτές που σχετίζονται με τις τεχνολογίες πλοήγησης.



Εικόνα 3.1: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (ΕΕΤΤ, 2008).

Πίνακας 3.1: Ζώνες συχνοτήτων και χρήσεις τους σε εφαρμογές πλοήγησης

Ζώνη συχνοτήτων	f	λ	Εφαρμογές πλοήγησης
ELF Extremely Low Frequency	3-30 Hz	100000-10000Km	
SLF Super Low Frequency	30-300 Hz	10000-1000Km	
ULF Ultra Low Frequency	300-3000 Hz	1000-100Km	
VLF Very Low Frequency	3-30 KHz	100-10Km	Σύστημα Omega
LF Low Frequency	30-300 KHz	10-1Km	Σύστημα Loran-C
MF Medium Frequency	300-3000 KHz	1000-100m	Ραδιοφάροι NDB
HF High Frequency	3-30 MHz	100-10m	
VHF Very High Frequency	30-300 MHz	10-1m	Ραδιοφάροι VOR
UHF Ultra High Frequency	300-3000 MHz	100 – 10 cm	Δορυφορικά συστήματα πλοήγησης/τηλεπικοινωνιών Radio link GNSS-RTK Κινητά τηλέφωνα 2 ^{ης} γενιάς
SHF Super High Frequency	3-30 GHz	10 – 1 cm	

Κατά τη μετάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μπορούν να λάβουν χώρα διάφορα φαινόμενα¹. Πέραν των γνωστών φαινομένων της ανάκλασης, διάθλασης και διάχυσης, υπάρχουν και κάποια φαινόμενα που έχουν ενδιαφέρον στις εφαρμογές πλοήγησης. Στη συνέχεια περιγράφονται τρία από αυτά τα φαινόμενα. Σημειώνεται ότι η προσέγγιση των φαινομένων γίνεται με περιγραφικό τρόπο, χωρίς να χρησιμοποιούνται εξειδικευμένες έννοιες από τη θεωρία πεδίων, οι οποίες είναι απαραίτητες για τον αυστηρό θεωρητικό ορισμό των φαινομένων.

¹ Μία εκτενής περιγραφή των φαινομένων διάδοσης δίνεται από τον Laurila (1976).

Εξασθένηση

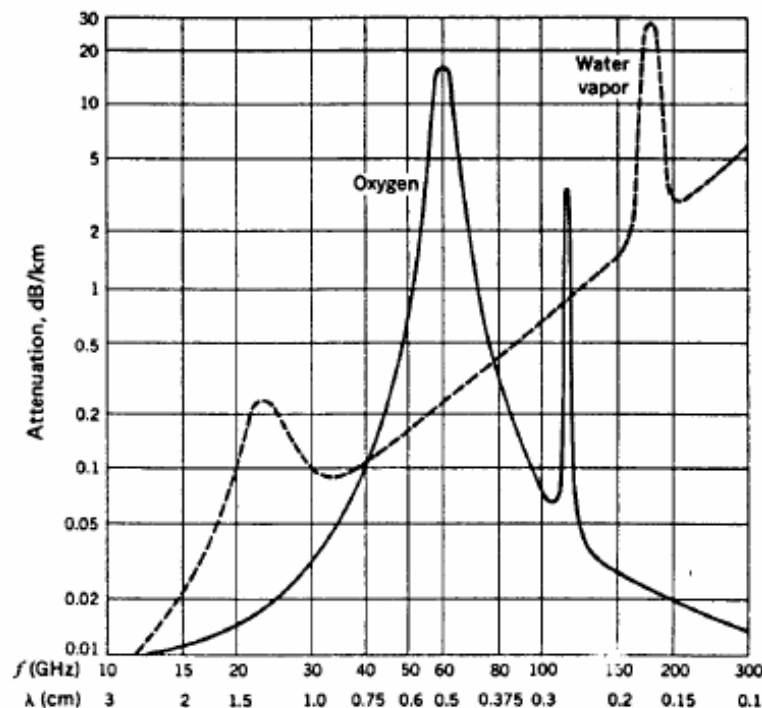
Στη γενική περίπτωση της εκπομπής ενός Η/Μ κύματος από μία σημειακή πηγή στον ελεύθερο χώρο, η ακτινοβολούμενη ισχύς μεταδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, να μειώνεται η ισχύς του σήματος που φτάνει σε μία κεραία λήψης, σε αναλογία με την απόσταση μεταξύ πηγής εκπομπής και κεραίας λήψης. Το φαινόμενο αυτό καλείται εξασθένηση (attenuation).

Απορρόφηση

Στο κενό η διάδοση των Η/Μ κυμάτων γίνεται ανεμπόδιστα (Αλεξίου, 2004). Όταν όμως τα Η/Μ κύματα διέρχονται μέσα από ένα μέσο διάδοσης, όπως π.χ. η ατμόσφαιρα της Γης, ένα μέρος της ενέργειάς τους απορροφάται από το μέσο διάδοσης, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ισχύς του σήματος. Το φαινόμενο αυτό καλείται απορρόφηση (absorption)¹.

Το πόσο έντονο θα είναι το φαινόμενο της απορρόφησης κατά τη διέλευση των κυμάτων από την ατμόσφαιρα, εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη συχνότητα της Η/Μ ακτινοβολίας. Στην εικόνα 3.2 δίνεται η απορρόφηση που προκαλούν το οξυγόνο και οι υδρατμοί κατά τη διάδοση του Η/Μ κύματος σε ένα Km ατμόσφαιρας σαν συνάρτηση της συχνότητας του κύματος. Για συχνότητες χαμηλότερες από τα 3 GHz η απορρόφηση είναι ασήμαντη, εκτός εάν η απόσταση διάδοσης είναι πολύ μεγάλη.

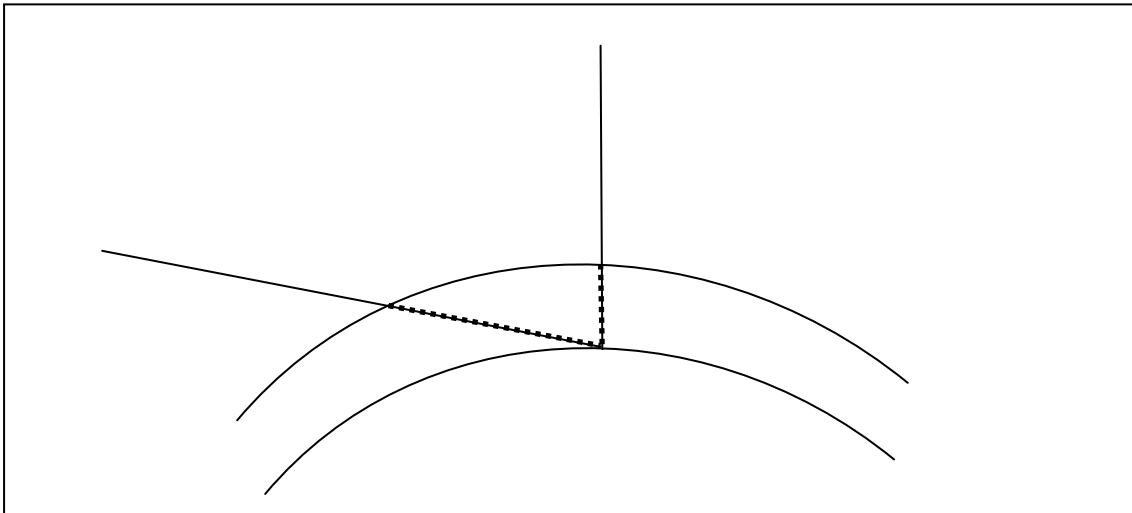
Για τα σήματα των δορυφόρων GPS (1.57542 GHz και 1.22760 GHz) η απορρόφηση είναι τέτοια ώστε να φτάνει στη Γη επαρκής ισχύς του σήματος για τη λειτουργία των δεκτών. Τα σήματα όμως των δορυφόρων με μικρές γωνίες ανύψωσης, τα οποία διανύουν μεγάλη απόσταση μέσα στην ατμόσφαιρα είναι σημαντικά ασθενέστερα από τα σήματα των δορυφόρων με μεγάλες γωνίες ανύψωσης (εικόνα 3.3.). Το φαινόμενο αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό και κατά τη διάρκεια



Εικόνα 3.2: Απορρόφηση των Η/Μ κυμάτων στην ατμόσφαιρα ως συνάρτηση της συχνότητας του κύματος (Αλεξίου, 2004)

¹ Η ορολογία που χρησιμοποιείται δεν είναι ενιαία. Κάποιοι συγγραφείς χρησιμοποιούν τον όρο εξασθένηση για να περιγράψουν την απορρόφηση της Η/Μ ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα.

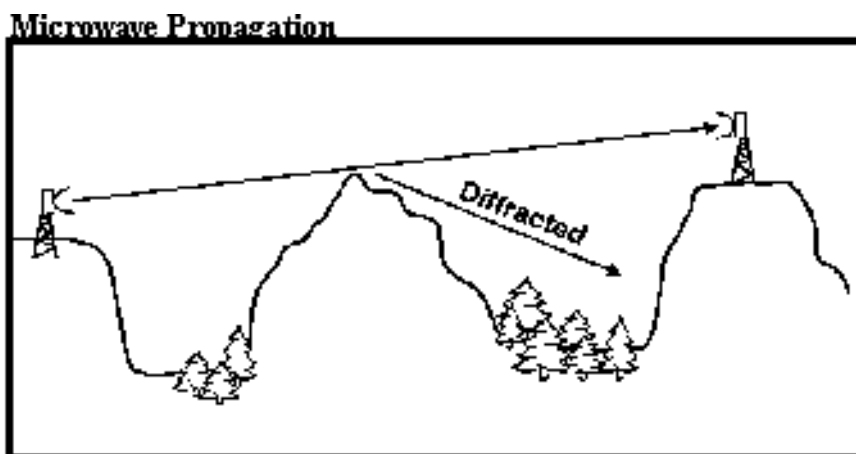
των μετρήσεων από τη μείωση της ισχύος του σήματος των δορυφόρων GPS (SNR L1, SNR L2). Η εξασθένηση των σημάτων αυξάνει ραγδαία για γωνίες ανύψωσης μικρότερες από περίπου 30° . Για την απόρριψη των σημάτων δορυφόρων με πολύ μικρές γωνίες ανύψωσης, χρησιμοποιούνται γωνίες αποκοπής (elevation mask ή cut-off angle) από 5° έως 20° ανάλογα με την εφαρμογή.



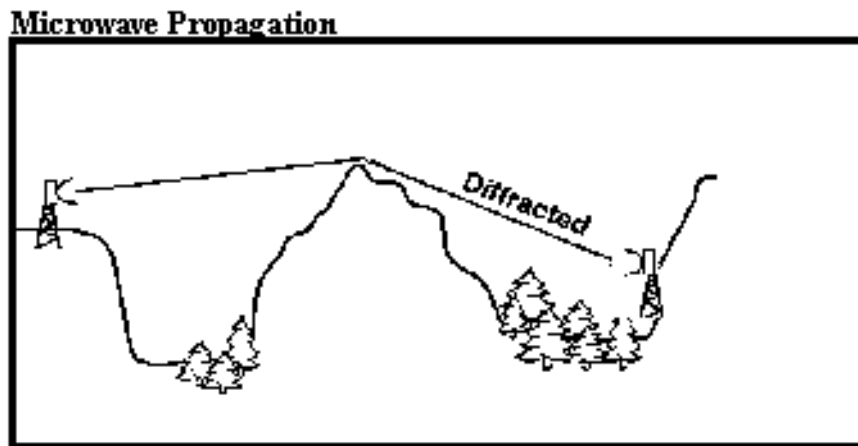
Εικόνα 3.3: Αύξηση της διαδρομής που διανύουν τα δορυφορικά σήματα μέσα στην ατμόσφαιρα, όταν η γωνία ανύψωσης είναι μικρή.

Περίθλαση

Το φαινόμενο της περίθλασης (diffraction) μπορεί να προκληθεί από ένα εμπόδιο το οποίο διακόπτει εν μέρει τη διάδοση του σήματος. Σε αυτή την περίπτωση, το σώμα καθίσταται δευτερογενής πηγή εκπομπής (αρχή του Huygens) και μεταδίδει το σήμα και σε άλλες διευθύνσεις (βλ εικόνα 3.4). Το φαινόμενο της περίθλασης μπορεί να φανεί χρήσιμο, καθώς μπορεί να εξασφαλίσει ζεύξη σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει οπτική επαφή (εικόνα 3.5).



Εικόνα 3.4: Διάδοση σήματος και προς άλλες κατευθύνσεις λόγω περίθλασης.



Εικόνα 3.5: Εξασφάλιση ζεύξης μέσω περίθλασης.

3.3 Τρόποι διάδοσης Η/Μ κυμάτων

Ανάλογα με τον τρόπο μετάδοσής τους, τα Η/Μ κύματα διακρίνονται σε¹:

- κατευθείαν κύματα (ή οπτικής επαφής) (direct waves, line-of-sight waves)
- επιφανειακά κύματα (ή εδάφους) (ground waves)
- ουράνια κύματα (sky waves).

Στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά οι τρεις κατηγορίες κυμάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο τρόπος διάδοσης ενός κύματος εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το μήκος κύματος. Είναι συνεπώς αυτονόητο ότι τα όρια μεταξύ των κατηγοριών δεν μπορεί να είναι απόλυτα σαφή.

Κατευθείαν κύματα

Ως κατευθείαν κύματα χαρακτηρίζονται αυτά, για τα οποία μπορούμε με καλή προσέγγιση να θεωρήσουμε ότι μεταδίδονται κατά μήκος της ευθείας γραμμής που συνδέει την κεραία εκπομπής με την κεραία λήψης. Για τα κατευθείαν κύματα σημειώνονται τα εξής:

- στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα κύματα με συχνότητες ίσες και μεγαλύτερες των VHF
- απαιτούν ορατότητα μεταξύ των σημείων εκπομπής και λήψης²

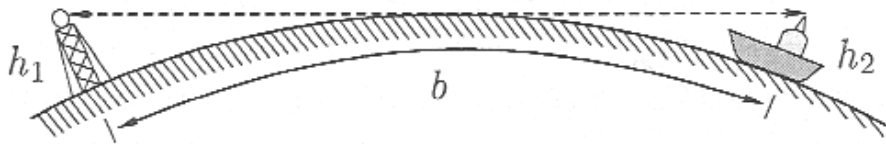
Ο κύριος περιοριστικός παράγοντας για την εμβέλεια των κυμάτων χώρου είναι η καμπυλότητα της Γης. Σε μία καθαρά γεωμετρική θεώρηση του θέματος, η μέγιστη απόσταση b στην οποία μπορούμε να λάβουμε ένα κύμα χώρου καλείται **γεωμετρικός ορίζοντας** και δίνεται από τον προσεγγιστικό τύπο:

$$b = 3569(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (3.5)$$

όπου h_1 και h_2 τα ύψη (σε m) των κεραιών εκπομπής και λήψης, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.6.

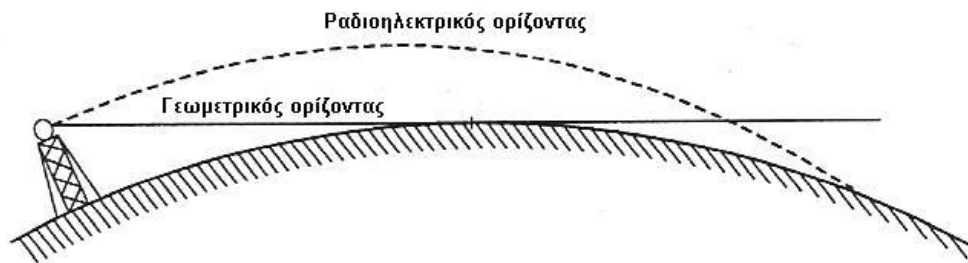
¹ Σημειώνεται ότι οι παραπάνω όροι χρησιμοποιούνται μερικές φορές στη βιβλιογραφία και με διαφορετικές έννοιες, κυρίως όταν πρόκειται για εξειδικευμένες θεωρήσεις.

² Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο δεν πρέπει να υπάρχουν εμπόδια μεταξύ του δορυφόρου και του δέκτη GNSS και μεταξύ πομπού-δέκτη για τη μετάδοση διορθώσεων μέσω UHF για εφαρμογές DGPS και RTK.



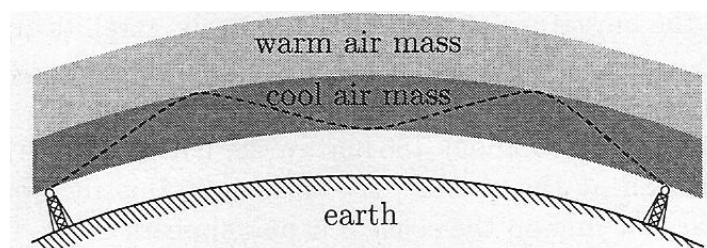
Εικόνα 3.6: Μετάδοση απευθείας κύματος: Γεωμετρικός ορίζοντας (Hofmann-Wellenhof et al. 2003).

Στην πραγματικότητα το κύμα δεν μεταδίδεται σε απόλυτα ευθεία γραμμή, αλλά ακολουθεί μία καμπυλωμένη τροχιά. Η καμπύλη αυτή στρέφει κατά κανόνα τα κοίλα προς την επιφάνεια της Γης με συνέπεια η απόσταση που μπορεί να φτάσει ένα κύμα να είναι μεγαλύτερη από το γεωμετρικό ορίζοντα. Η απόσταση αυτή καλείται **ραδιοηλεκτρικός ορίζοντας** και υπό συνηθισμένες συνθήκες υπερβαίνει το γεωμετρικό ορίζοντα κατά περίπου 15%-25% (εικόνα 3.7)¹. Το φαινόμενο της καμπύλωσης μπορεί επίσης να παρακάμψει ένα χαμηλό εμπόδιο και να εξασφαλίσει ζεύξη σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει οπτική επαφή της κεραίας λήψης με τον πομπό.



Εικόνα 3.7: Γεωμετρικός και ραδιοηλεκτρικός ορίζοντας για απευθείας κύματα.

Τέλος, ένα άλλο φαινόμενο που μπορεί να αυξήσει την εμβέλεια των μικροκυμάτων είναι η λεγόμενη υπερδιάθλαση (superrefraction) γνωστή και ως κυματοδήγηση (ducting) (Αλεξίου, 2004). Το φαινόμενο αυτό προϋποθέτει τη διαστρωμάτωση της τροπόσφαιρας, έτσι ώστε ένα στρώμα θερμού αέρα να βρίσκεται πάνω από ένα ψυχρότερο στρώμα (εικόνα 3.8). Πρόκειται στην ουσία για την περίπτωση της θερμοκρασιακής αναστροφής, η οποία αποτελεί εξαίρεση. Υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις μπορεί ένα κύμα να μεταδοθεί λόγω της υπερδιάθλασης σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 1000Km.



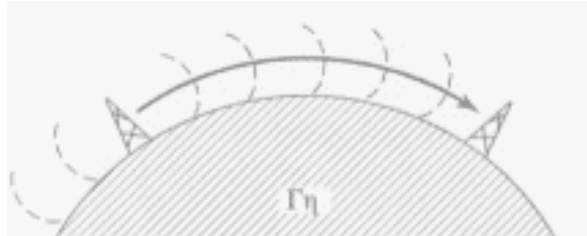
Εικόνα 3.8: Το φαινόμενο της υπερδιάθλασης στην τροπόσφαιρα (Hofmann-Wellenhof et al. 2003).

¹ Σημειώνεται ότι η εμβέλεια μίας ζεύξης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως τα χαρακτηριστικά των κεραιών που χρησιμοποιούνται, το είδος της πληροφορίας που μεταφέρεται, την τεχνική διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης κλπ.

Επιφανειακά κύματα

Ως επιφανειακά κύματα χαρακτηρίζονται αυτά τα οποία διαδίδονται ακολουθώντας την καμπυλότητα της Γης (εικόνα 3.9). Για τα επιφανειακά κύματα σημειώνονται τα εξής:

- στην κατηγορία αυτή ανήκουν κυρίως τα κύματα VLF, LF και MF
- προσφέρονται για μετάδοση σημάτων σε μεγάλες αποστάσεις¹.

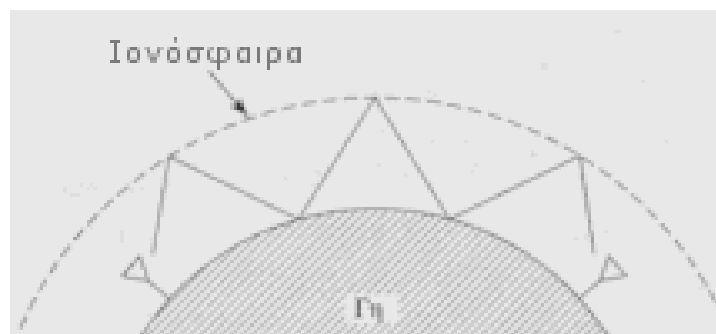


Εικόνα 3.9: Μετάδοση επιφανειακού κύματος.

Ουράνια κύματα

Ως ουράνια κύματα χαρακτηρίζονται αυτά τα οποία μετά την εκπομπή τους από την επίγεια κεραία ανακλώνται από την ιονόσφαιρα. πίσω στη Γη (εικόνα 3.10). Για τα ουράνια κύματα σημειώνονται τα εξής:

- στην κατηγορία αυτή ανήκουν κυρίως τα κύματα με συχνότητα μικρότερη των 30 MHz
- η επίδραση της ιονόσφαιρας (απορρόφηση, ανάκλαση) εξαρτάται σημαντικά από την ηλιακή δραστηριότητα η οποία καθορίζει το βαθμό φόρτισης των ιονοσφαιρικών στιβάδων (D,E, F1 και F2) και κατά συνέπεια από την ώρα της ημέρας
- με μία μόνο ανάκλαση στην ιονόσφαιρα μπορεί να καλυφθεί απόσταση μέχρι 4000Km. (Αλεξίου, 2004).

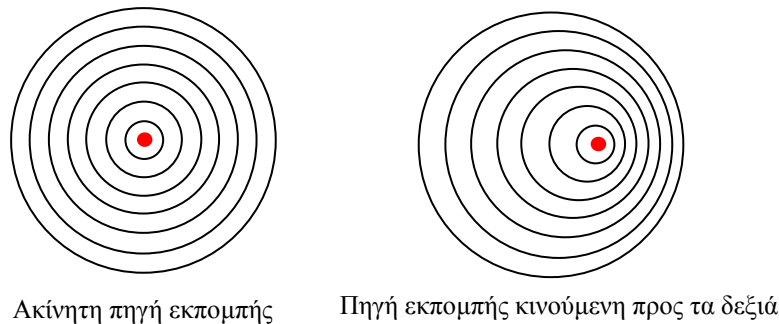


Εικόνα 3.10: Μετάδοση ουράνιου κύματος.

¹ Χαρακτηριστική περίπτωση χρήσης επιφανειακών κυμάτων αποτελεί το σύστημα Loran-C, όπου τα κύματα LF των σταθμών ξηράς λαμβάνονται σε αποστάσεις μέχρι 2000 Km στη θάλασσα.

3.4 Το Φαινόμενο Doppler

Το φαινόμενο Doppler γίνεται εύκολα αντιληπτό όταν μία ηχητική πηγή βρίσκεται σε κίνηση ως προς έναν ακίνητο παρατηρητή. Κατά τη φάση που η πηγή πλησιάζει προς τον παρατηρητή ο ήχος (εκτός από δυνατότερος) γίνεται και οξύτερος, έχει δηλαδή μεγαλύτερη συχνότητα (εικόνα 3.11). Μόλις περάσει μπροστά από τον παρατηρητή και αρχίσει να απομακρύνεται, ο ήχος γίνεται λιγότερο οξύς καθώς η συχνότητα του μικραίνει. Γενικά το φαινόμενο Doppler λαμβάνει χώρα οποτεδήποτε υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ του παρατηρητή και της πηγής εκπομπής. Επίσης δεν αφορά μόνο τα ηχητικά κύματα αλλά γενικότερα όλες τις περιπτώσεις μετάδοσης ενέργειας μέσω κυμάτων. Το φαινόμενο μελετήθηκε από τον αυστριακό φυσικό Doppler το 1842.



Εικόνα 3.11: Φαινόμενο Doppler: Πύκνωση των μετώπων του κύματος προς την κατεύθυνση κίνησης της πηγής εκπομπής.

Εάν η εκπεμπόμενη συχνότητα είναι f_e και η συχνότητα η οποία λαμβάνεται είναι f_r , τότε η διαφορά μεταξύ των δύο συχνοτήτων Δf ονομάζεται μετατόπιση Doppler (Doppler shift) και προσεγγιστικά δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta f = f_r - f_e = \frac{f_e}{c} \frac{d\rho}{dt} \quad (3.6)$$

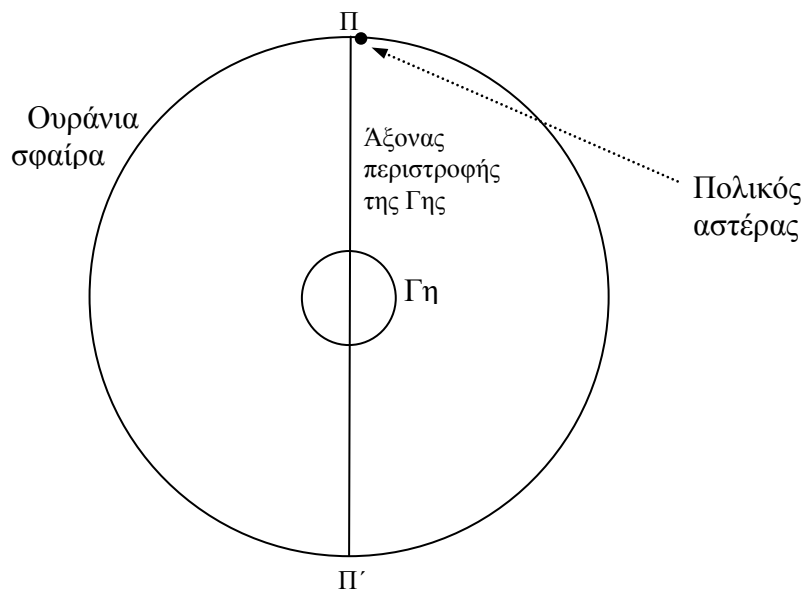
όπου c η ταχύτητα διάδοσης του κύματος στο συγκεκριμένο μέσο, ρ η απόσταση μεταξύ σημείου εκπομπής και σημείου λήψης και $d\rho/dt$ η σχετική ακτινική ταχύτητα. Τονίζεται ότι ο παραπάνω τύπος είναι προσεγγιστικός και έχει απλοποιηθεί θεωρώντας ότι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος είναι πολύ μεγαλύτερη από την ακτινική ταχύτητα $d\rho/dt$. Αυτό ισχύει γενικά για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα όπου διαδίδονται περίπου με την ταχύτητα του φωτός (περίπου 3×10^8 m/sec). Στην περίπτωση όμως των ηχητικών κυμάτων δεν ισχύει γενικά αυτό, όπως εύκολα γίνεται αντιληπτό εάν σκεφτούμε την περίπτωση υπερηχητικών αεροσκαφών.

4. ΟΥΡΑΝΙΑ ΠΛΟΗΓΗΣΗ

Η ουράνια πλοήγηση, μπορεί να θεωρηθεί ως η παλαιότερη τεχνική πλοήγησης. Στηρίζεται στη χρήση του ήλιου, της σελήνης, των πλανητών και συγκεκριμένων φωτεινών και χαρακτηριστικών αστερών (navigational stars)¹. Στο παρόν κεφάλαιο εξηγούνται συνοπτικά οι βασικές αρχές της ουράνιας πλοήγησης.

4.1 Βασικές αρχές

Γνωστή σε όλους είναι η χρήση του πολικού αστέρα. Πρόκειται για τον αστέρα α της Μικρής Άρκτου, δηλαδή τον λαμπρότερο αστέρα αυτού του αστερισμού, ο οποίος φέρει και το όνομα Polaris (Μαυρίδης, 1985)². Ο πολικός αστέρας έχει το χαρακτηριστικό ότι είναι το πιο φωτεινό (και συνεπώς εύκολα αναγνωρίσιμο) άστρο που βρίσκεται κοντά στον βόρειο πόλο του ουρανού, δηλαδή στο σημείο που ο άξονας περιστροφής της Γης συναντά την ουράνια σφαίρα³ (Εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1: Ουράνια σφαίρα, βόρειος (Π) και νότιος (Π') πόλος του ουρανού.

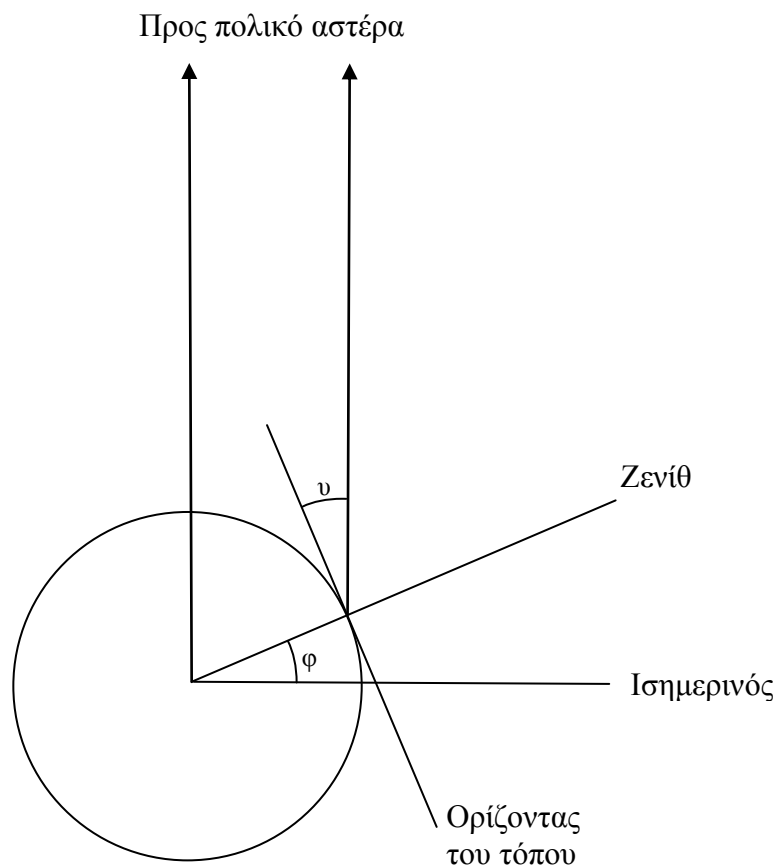
¹ Υπενθυμίζεται ότι οι απλανείς αστέρες ή απλά αστέρες είναι αυτόφωτα σώματα όπως ο Ήλιος. Οι πλανήτες ανήκουν στην κατηγορία των ετερόφωτων σωμάτων, όπως και οι δορυφόροι των πλανητών, οι αστεροειδείς κλπ.

² Κατά αντίστοιχο τρόπο, ο αστέρας α του αστερισμού της Λύρας είναι γνωστός ως Vega. Ο α του Κενταύρου βρισκόμενος σε απόσταση τεσσάρων ετών φωτός από τη Γη, είναι ο πλησιέστερος στη Γη αστέρας και για το λόγο αυτό ονομάστηκε Εγγύτατος του Κενταύρου (Proxima Centauri).

³ Ουράνια σφαίρα: πρόκειται για μία ιδεατή σφαίρα με τη βοήθεια της οποίας μελετάμε τα ουράνια σώματα θεωρώντας τα ως μαθηματικά σημεία προσκολλημένα στην εσωτερική της επιφάνεια. Λόγω της περιστροφής της Γης γύρω από τον άξονά της, η σφαίρα αυτή φαίνεται να περιστρέφεται προκαλώντας τη λεγόμενη «φαινόμενη περιστροφή της ουράνιας σφαίρας».

Με χρήση του πολικού αστέρα μπορεί να προσδιοριστεί:

- με καλή προσέγγιση η διεύθυνση του αληθούς Βορρά¹
- το γεωγραφικό πλάτος του τόπου. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2, η γωνία ανύψωσης ν του πολικού αστέρα ισούται με το γεωγραφικό πλάτος φ του τόπου. Για πιο ακριβείς υπολογισμούς πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι ο πολικός αστέρας δε βρίσκεται ακριβώς στο βόρειο πόλο του ουρανού (διαφορά 42' το έτος 2006).



Εικόνα 4.2: Προσδιορισμός του γεωγραφικού πλάτους μέσω της γωνίας ύψους του πολικού αστέρα.

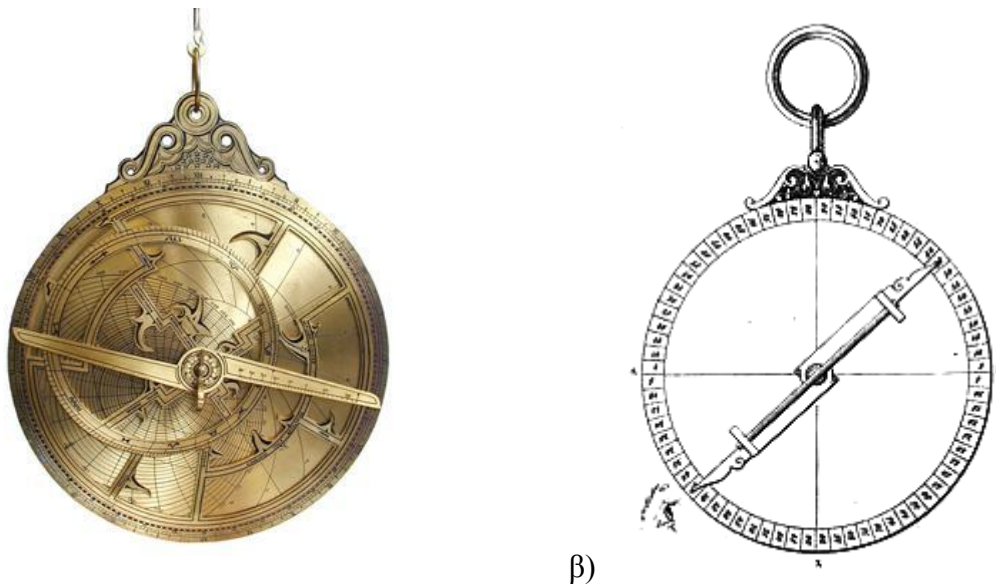
Το γεωγραφικό πλάτος ενός τόπου μπορεί να προσδιοριστεί και από παρατηρήσεις άλλων ευδιάκριτων αστερών των οποίων γνωρίζουμε τις ουρανογραφικές συντεταγμένες. Οι απαιτούμενες παρατηρήσεις όμως είναι περισσότερες και πιο σύνθετες. Αντίστοιχα οι υπολογισμοί προϋποθέτουν την επίλυση του σφαιρικού τριγώνου που δημιουργείται μεταξύ του πόλου του Ουρανού, του Ζενίθ του τόπου και του αστέρα. Η παράθεση των σχετικών εξισώσεων ξεφεύγει από τους σκοπούς του παρόντος εγχειριδίου.

¹ Υπενθυμίζεται ότι ο Βορράς που δείχνει η μαγνητική πυξίδα είναι ο μαγνητικός Βορράς, ο οποίος μπορεί να απέχει αισθητά από τον αληθή Βορρά (βλ και κεφάλαιο 6).

Σε αντίθεση με το γεωγραφικό πλάτος που μπορεί να προσδιοριστεί σχετικά εύκολα, ο αστρονομικός προσδιορισμός του γεωγραφικού μήκους είναι πιο σύνθετος, κυρίως λόγω της άμεσης εξάρτησης του από το χρόνο παρατήρησης. Κατά το χρόνο παρατήρησης πρέπει να είναι γνωστός με ακρίβεια ο χρόνος. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ένα χρονικό σφάλμα ίσο με 4 sec αντιστοιχεί περίπου σε σφάλμα 1' στην εκτίμηση του γεωγραφικού μήκους¹.

4.2 Όργανα και μέθοδοι μετρήσεων

Η μέτρηση της γωνίας ύψους των ουράνιων σωμάτων γινόταν από τα αρχαία χρόνια με διάφορες τεχνικές. Η πιο γνωστή από αυτές είναι η χρήση του αστρολάβου, ενός οργάνου που χρησιμοποιούνταν από την αρχαιότητα για τη μέτρηση γωνιών στον ουρανό² (Εικόνα 4.3).



α)

β)

Εικόνα 4.3: Αστρολάβος (α) και σχηματική αναπαράσταση μέτρησης της γωνίας ύψους ενός αστέρα με αστρολάβο (β).

Πιο εξελιγμένο όργανο για τη μέτρηση γωνιών είναι ο εξάντας (sextant), ο οποίος ονομάζεται έτσι γιατί δεν περιλαμβάνει ένα πλήρη αριθμημένο κύκλο, αλλά το ένα έκτο αυτού³.

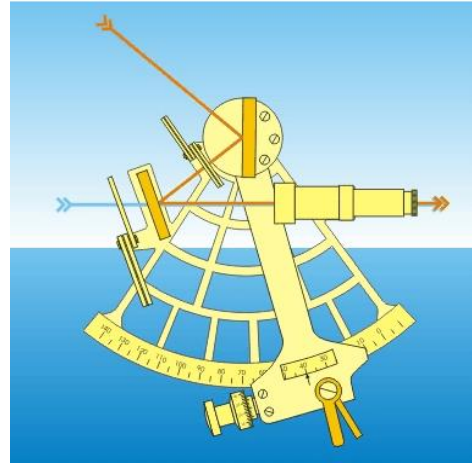
¹ Η ανάγκη ακριβούς προσδιορισμού του γεωγραφικού μήκους στα μεγάλα ναυτικά ταξίδια οδήγησε στην εφεύρεση των χρονομέτρων ακριβείας. Τα πρώτα τέτοια χρονόμετρα κατασκευάστηκαν από τον Βρετανό John Harrison (Harrison's marine chronometers) μεταξύ 1730 και 1750. Ενδεικτικό της σημασίας τους είναι ότι η Βρετανική Βουλή προσέφερε σε όποιον θα έλυne το πρόβλημα του ακριβούς προσδιορισμού του χρόνου στη θάλασσα το ποσό των £20.000 (σημερινή αντιστοιχία σε μερικά εκατομμύρια Ευρώ).

² Με χρήση κάποιας μορφής αστρολάβων συντάχθηκαν οι κατάλογοι αστέρων από τον Ίππαρχο και τον Πτολεμαίο.

³ Αντίστοιχα υπάρχει και τετράντας (quadrant) και οκτάντας (octant).



α)



β)

Εικόνα 4.4: Σύγχρονος εξάντας (α) και σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας εξάντα (β).

Στην Εικόνα 4.4 φαίνεται διαγραμματικά ή αρχή λειτουργίας του εξάντα. Ο παρατηρητής μπορεί να παρατηρεί στο μισό οπτικό πεδίο του τηλεσκοπίου τον ορίζοντα και στο άλλο μισό την εικόνα του ουρανίου σώματος η οποία εισέρχεται στο τηλεσκόπιο μετά από ανάκλαση στο άνω κάτοπτρο. Το άνω κάτοπτρο είναι στερεωμένο στην άντυγα του οργάνου, την οποία πρέπει να μετακινήσει ο χειριστής μέχρι το είδωλο του ουρανίου σώματος να μετατοπιστεί και να παρατηρείται δίπλα στον ορίζοντα. Στη συνέχεια διαβάζει πάνω στο στέλεχος του εξάντα τη γωνία ύψους του ουρανίου σώματος. Οι ανακλάσεις των ειδώλων που γίνονται στα κάτοπτρα του εξάντα είναι τέτοιες ώστε η άντυγα να μετακινείται κατά το μισό της μετρούμενης γωνίας. Με τον τρόπο αυτό, ο εξάντας μπορεί να μετρήσει γωνίες διπλάσιες από τη γωνία που αντιστοιχεί στο 1/6 του κύκλου, δηλαδή μέχρι 120° . Με τον εξάντα μπορεί να μετρηθούν και οριζόντιες γωνίες. Για το λόγο αυτό ο εξάντας χρησιμοποιούνταν εντατικά στο παρελθόν για τον καθορισμό στίγματος στη ναυτιλία και κατά τις υδρογραφικές αποτυπώσεις.

4.3 Σύγχρονες εφαρμογές της ουράνιας πλοήγησης

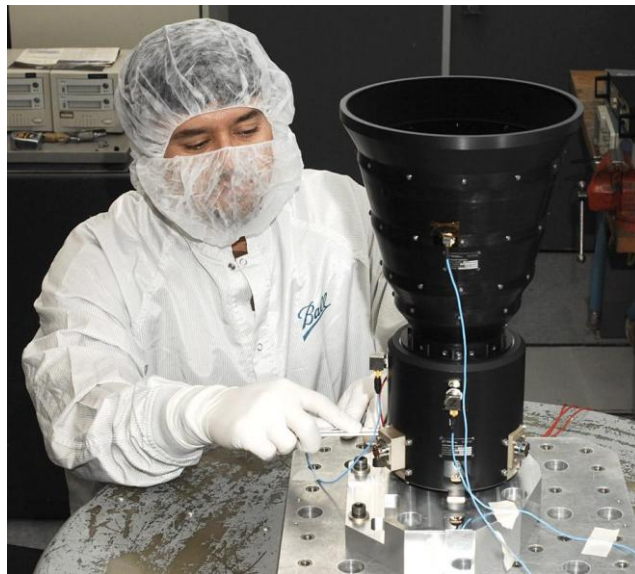
Μετά την εξάπλωση των επίγειων συστημάτων ραδιοπλοήγησης (Loran-C, OMEGA κλπ) και ειδικότερα των δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης, οι τεχνικές ουράνιας πλοήγησης έπαψαν σχεδόν να χρησιμοποιούνται. Η ουράνια πλοήγηση όμως δεν αποτελεί σήμερα μία νεκρή επιστήμη.

Οι τεχνικές της ουράνιας πλοήγησης εξακολουθούν να διδάσκονται στις ναυτικές σχολές καθώς στα μακρόχρονα ταξίδια μακριά από την ξηρά αποτελεί συχνά τη μόνη εναλλακτική σε περίπτωση αστοχίας των βασικών συστημάτων πλοήγησης. Για το σκοπό αυτό εξακολουθεί να εκδίδεται ο ετήσιος κατάλογος με τις θέσεις συγκεκριμένων ουράνιων σωμάτων¹ (Nautical Almanac) από εξειδικευμένες Υπηρεσίες (Nautical Almanac Offices) στην Μ. Βρετανία και στις ΗΠΑ. Στις στρατιωτικές σχολές, η ουράνια πλοήγηση έχει βαρύνουσα σημασία ως εναλλακτική λύση καθώς στην περίπτωση πολεμικών επιχειρήσεων τα συστήματα ραδιοπλοήγησης μπορούν να αχρηστευθούν από εσκεμμένες Η/Μ παρεμβολές (ηλεκτρονικός πόλεμος).

Η ουράνια πλοήγηση βρίσκει επίσης εφαρμογή στη διαστημική. Ειδικές συσκευές (star trackers) που λαμβάνουν ψηφιακές εικόνες των άστρων χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του προσανατολισμού (attitude) διαστημικών οχημάτων, τα οποία βρίσκονται εκτός της εμβέλειας οποιουδήποτε δορυφορικού συστήματος πλοήγησης. Η τεχνική αυτή που εφαρμόστηκε από τις πρώτες κιόλας διαστημικές πτήσεις, βελτιώνεται συνεχώς και αποτελεί σήμερα τεχνολογία αιχμής

¹ Πρόκειται για τον Ήλιο, τη Σελήνη, τους πλανήτες του Ηλιακού μας συστήματος και 57 επιλεγμένους αστέρες (navigational stars).

που χρησιμοποιείται σε μεγάλο αριθμό διαστημοπλοίων και δορυφόρων, όπως πχ ο δορυφόρος GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) (Visser, 2008).



Εικόνα 4.5: Προετοιμασία τοποθέτησης συσκευής star-tracker σε δορυφόρο.

5. ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΧΑΡΤΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο εξηγούνται συνοπτικά οι βασικές αρχές της πλοήγησης με χρήση χαρτών, δίνοντας έμφαση στους ναυτικούς χάρτες και τις ιδιότητές τους.

5.1 Ορθοδρομία - λοξοδρομία

Για τη μετακίνηση από ένα σημείο αναχώρησης σε ένα σημείο άφιξης είναι κατά κανόνα επιθυμητή η επιλογή του συντομότερου δρόμου. Στην ξηρά μετακινούμαστε συνήθως δια μέσου οδών ή μονοπατιών και ως εκ τούτου για να διανύσουμε μία μεγάλη απόσταση απαιτείται να αλλάζουμε συχνά κατεύθυνση κίνησης.

Αντίθετα, στην ανοιχτή θάλασσα και στον αέρα που δεν υπάρχουν εμπόδια μπορούμε να κινούμαστε για μεγάλες αποστάσεις χωρίς αλλαγές κατεύθυνσης. Το ζήτημα που τίθεται είναι ποια πορεία (βλ. ορισμό στην παρ. 2.1) πρέπει να ακολουθήσουμε ώστε να διανύσουμε τη μικρότερη απόσταση. Αν θέλουμε να κινηθούμε μεταξύ δύο σημείων ενός Μεσημβρινού τότε η μικρότερη διαδρομή επιτυγχάνεται εάν κινηθούμε κατά μήκος του Μεσημβρινού. Αντίθετα, αν θέλουμε να κινηθούμε μεταξύ δύο σημείων ενός Παραλλήλου τότε η μικρότερη διαδρομή δεν επιτυγχάνεται εάν κινηθούμε κατά μήκος του συγκεκριμένου Παραλλήλου. Αυτό ισχύει μόνο στην περίπτωση που κινούμαστε στον Ισημερινό, ο οποίος αποτελεί ειδική περίπτωση Παράλληλου κύκλου. Γενικά, στην περίπτωση μίας σφαίρας η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο σημείων είναι αυτή που θα διανύσουμε εάν κινηθούμε κατά μήκος του μέγιστου κύκλου που περνάει από τα δύο σημεία. **Μέγιστος κύκλος** μίας σφαίρας είναι αυτός που προκύπτει από την τομή της επιφάνειας της σφαίρας με ένα επίπεδο το οποίο διέρχεται από το κέντρο της¹. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, οι Μεσημβρινοί και ο Ισημερινός είναι μέγιστοι κύκλοι.

Παραμένοντας στη σφαιρική προσέγγιση της Γης, **ορθοδρομία** ονομάζεται η πλευση μεταξύ δύο σημείων κατά μήκος του μέγιστου κύκλου που διέρχεται από τα σημεία αυτά (Κιουσόπουλος, 1993). Όπως υποδηλώνει και η ονομασία της, η ορθοδρομία αποτελεί τον ορθό δρόμο που πρέπει να ακολουθήσουμε, ώστε να πάμε από ένα σημείο σε ένα άλλο διανύοντας τη μικρότερη δυνατή απόσταση.

Για πολλούς αιώνες, η πλοήγηση στη θάλασσα στηρίζονταν κατά κύριο λόγο στη μαγνητική πυξίδα. Έχοντας επιλέξει την επιθυμητή πορεία, το πλοίο κινούνταν προς αυτή την κατεύθυνση διατηρώντας σταθερή ένδειξη στην πυξίδα (πορεία). Η πλευση μεταξύ δύο σημείων με σταθερή πορεία ονομάζεται **λοξοδρομία**. Με εξαίρεση την κίνηση σε Μεσημβρινό (πορεία = 0° ή 180°) ή στον Ισημερινό (πορεία 90° ή 270°), η λοξοδρομία έχει σαν αποτέλεσμα να διανύουμε μεγαλύτερη απόσταση από την ελάχιστη δυνατή (ορθοδρομία).

5.2 Μερκατορική προβολή

Λόγω της σημασίας της μαγνητικής πυξίδας για τη ναυσιπλοΐα, έχει μεγάλο πρακτικό ενδιαφέρον η ύπαρξη μιας χαρτογραφικής προβολής, στην οποία η λοξοδρομία απεικονίζεται ως ευθεία γραμμή. Αυτή την ιδιότητα έχει η **Μερκατορική προβολή**, η οποία επινοήθηκε από το Φλαμανδό χαρτογράφο Gerardus Mercator², ο οποίος και την παρουσίασε το 1569 (Robinson et al, 2002).

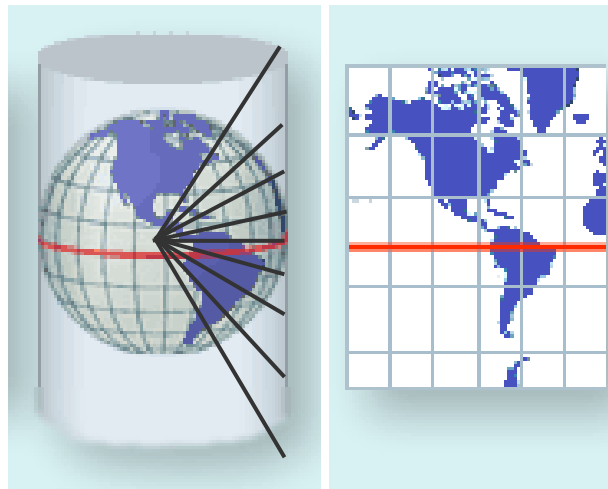
¹ Στην περίπτωση ενός ελλειψοειδούς εκ περιστροφής, η συντομότερη διαδρομή είναι αυτή που αντιστοιχεί στη γεωδαισιακή γραμμή (βλ. Φωτίου και Λιβιεράτος, 2000).

² Ο Mercator χαρακτήρισε το νέο χάρτη «Nova et Aucta Orbis Terrae Descriptio ad Usum Navigatium Emendate» δηλαδή νέα και επαυξημένη περιγραφή της Γης διορθωμένη για χρήση στη ναυσιπλοΐα.

Η Μερκατορική προβολή είναι μία ορθή κυλινδρική προβολή η οποία έχει τροποποιηθεί κατάλληλα ώστε οι λοξοδρομίες να απεικονίζονται ως ευθείες γραμμές¹.

Για τη Μερκατορική προβολή σημειώνονται τα εξής:

- Οι Μεσημβρινοί και οι Παράλληλοι κύκλοι απεικονίζονται ως ευθείες οι οποίες τέμνονται κάθετα (εικόνα 5.1).
- Η λοξοδρομία απεικονίζεται ως ευθεία γραμμή (εικόνα 5.2).
- Η ορθοδρομία απεικονίζεται ως καμπύλη που στρέφει τα κοίλα προς τον Ισημερινό (εικόνα 5.2). Εξαιρέση αποτελούν προφανώς οι Μεσημβρινοί και ο Ισημερινός.
- Η κλίμακα δεν είναι σταθερή. Όσο πλησιάζουμε προς τους πόλους οι παραμορφώσεις γίνονται υπερβολικά μεγάλες (εικόνα 5.3)². Για το λόγο αυτό η Μερκατορική προβολή δεν είναι σκόπιμο να χρησιμοποιείται για περιοχές με γεωγραφικό πλάτος μεγαλύτερο από περίπου 60°.

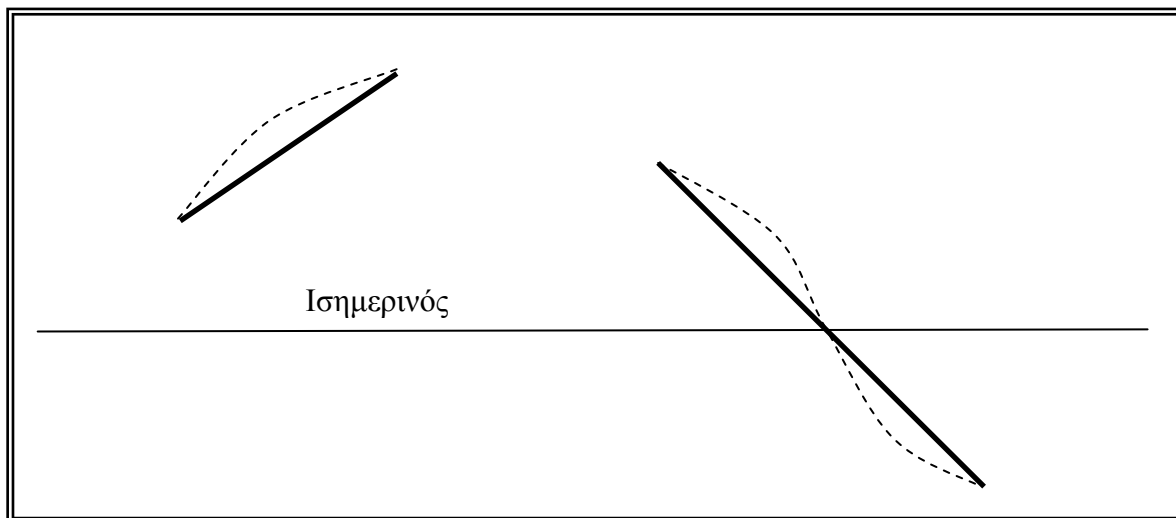


Εικόνα 5.1: Η Μερκατορική προβολή είναι μία ειδική περίπτωση ορθής κυλινδρικής προβολής.

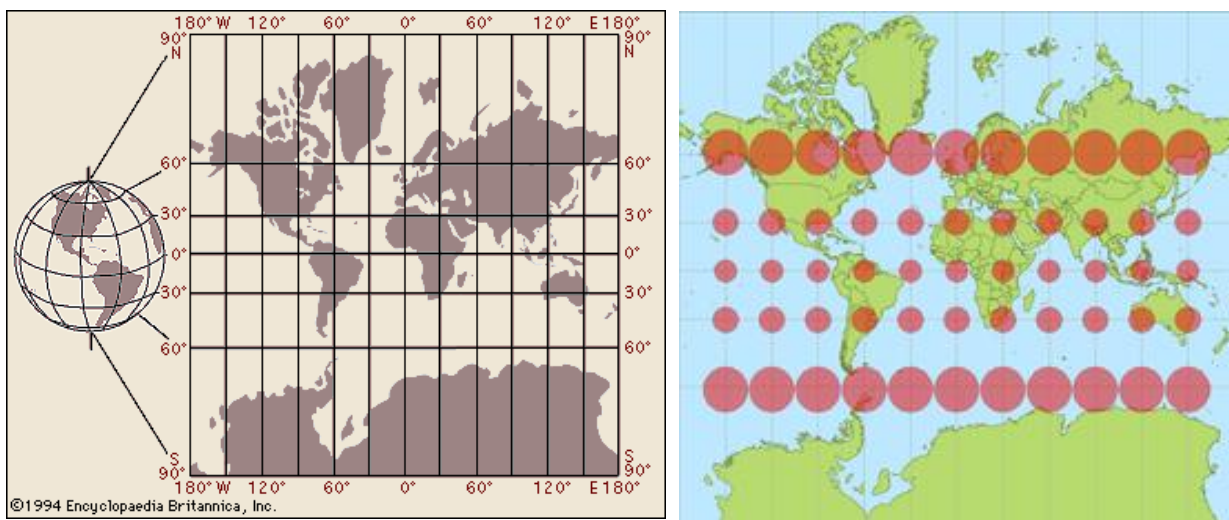
¹ Σχετικά με την τροποποίηση που έχει υποστεί η ορθή κυλινδρική προβολή προκειμένου να γίνει Μερκατορική αναφέρονται τα εξής: Η ορθή κυλινδρική προβολή δημιουργείται τοποθετώντας γύρω από τη Γη ένα κύλινδρο, έτσι ώστε ο άξονάς του να ταυτίζεται με τον άξονα περιστροφής της Γης και ο κύλινδρος να εφάπτεται στη Γη κατά μήκος του Ισημερινού. Με κέντρο προβολής το γεώκεντρο προβάλλονται τα σημεία της Γήινης επιφάνειας στον κύλινδρο (εικόνα 5.1). Έτσι, ο Ισημερινός απεικονίζεται χωρίς γραμμική παραμόρφωση. Οι Παράλληλοι κύκλοι όμως απεικονίζονται και αυτοί με μήκος ίδιο με αυτό του Ισημερινού, παρόλο που η περιφέρειά τους μειώνεται, αφού μειώνεται η ακτίνα τους όσο αυξάνεται το γεωγραφικό τους πλάτος ($r_{\text{παραλλήλου}} = R \cos \varphi$). Επομένως για το μέτρο γραμμικής παραμόρφωσης κατά παράλληλο έχουμε $m_{\lambda} = 1/\cos\varphi$. Τα μήκη όμως κατά μεσημβρινό αυξάνουν ανάλογα με την εφαπτομένη του γεωγραφικού πλάτους ($\tan\varphi$). Για να επιτευχθεί η ιδιότητα της συμμορφίας θα πρέπει η γραμμική παραμόρφωση κατά μεσημβρινό και κατά παράλληλο να είναι ίσες. Στη Μερκατορική προβολή αυτό επιτυγχάνεται αντικαθιστώντας το $\tan\varphi$, που ισχύει στην περίπτωση της ορθής κυλινδρικής, με το ολοκλήρωμα του $1/\cos\varphi$ κατά μήκος του Μεσημβρινού. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζονται ίσες παραμορφώσεις κατά μεσημβρινό και παράλληλο, δηλαδή $m_{\varphi} = m_{\lambda} = 1/\cos\varphi$.

Για τον προσδιορισμό της απόστασης ενός παραλλήλου πλάτους φ από τον Ισημερινό, χρησιμοποιείται η έννοια του αυξομερούς πλάτους, το οποίο εκφράζει την απόσταση με βάση πρώτα λεπτά του Ισημερινού (meridional parts). Το αυξομερές πλάτος δίνεται σε πίνακες ανά 1 πρώτο λεπτό γεωγραφικού πλάτους. Με τη βοήθεια των πινάκων αυτών είναι δυνατή η κατασκευή Μερκατορικού χάρτη και η επίλυση προβλημάτων πλοήγησης όταν χρησιμοποιείται Μερκατορικός χάρτης.

² Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στο Μερκατορικό χάρτη η Αλάσκα εμφανίζεται να έχει περίπου την ίδια έκταση με την Βραζιλία παρόλο που η Βραζιλία είναι σε έκταση περισσότερο από πέντε φορές μεγαλύτερη από την Αλάσκα (Robinson, et al, 2002).

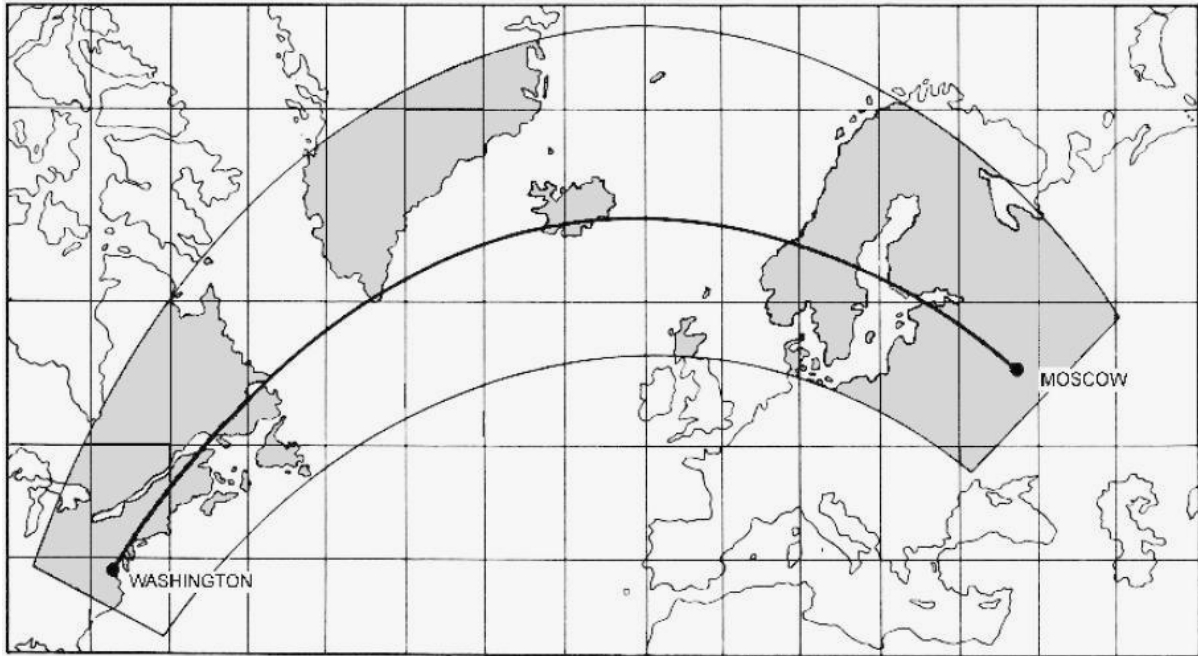


Εικόνα 5.2: Απεικόνιση της λοξοδρομίας (έντονες γραμμές) και της ορθοδρομίας (διακεκομμένες) στη Μερκατορική προβολή.

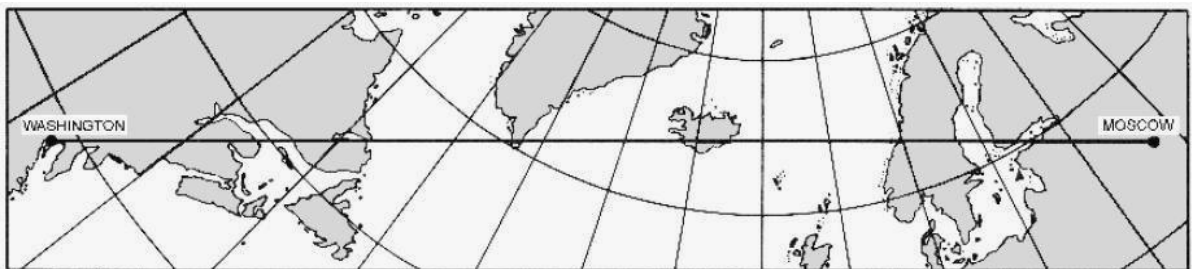


Εικόνα 5.3: Παραμόρφωση των μηκών στη Μερκατορική προβολή όσο πλησιάζουμε προς τους πόλους της Γης.

Στις εικόνες 5.4 και 5.5 αναπαρίσταται μία συγκεκριμένη ορθοδρομία σε δύο διαφορετικές προβολές. Στη Μερκατορική προβολή η ορθοδρομία εμφανίζεται ως καμπύλη με τα κοίλα προς τον Ισημερινό. Σε μία πλάγια κυλινδρική προβολή, με τον κύλινδρο να εφάπτεται κατά μήκος του μέγιστου κύκλου μεταξύ των δύο σημείων, η ορθοδρομία εμφανίζεται ως ευθεία γραμμή.



Εικόνα 5.4: Η απεικόνιση του μέγιστου κύκλου που περνά από Ουάσιγκτον και Μόσχα, σε Μερκατορική προβολή (Bowditch, 2002).

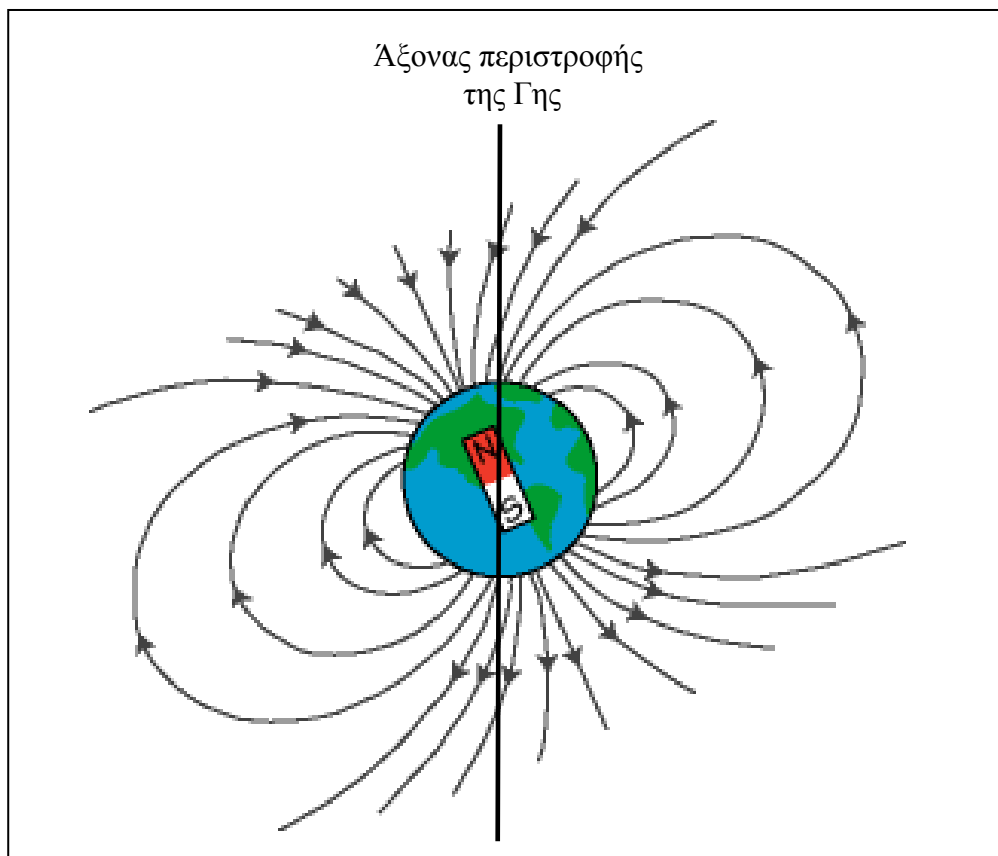


Εικόνα 5.5: Η απεικόνιση του μέγιστου κύκλου που περνά από Ουάσιγκτον και Μόσχα, σε μία πλάγια κυλινδρική προβολή όπου ο κύλινδρος εφάπτεται κατά μήκος του μέγιστου κύκλου που περνά από τις δύο πόλεις (Bowditch, 2002).

6. ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΥΞΙΔΑΣ

6.1 Γήινο μαγνητικό πεδίο

Η Γη παρουσιάζει ένα μαγνητικό πεδίο, το οποίο μπορεί προσεγγιστικά να περιγραφεί από ένα μαγνητικό δίπολο. Σύμφωνα με τις επικρατούσες θεωρίες, το Γήινο μαγνητικό πεδίο οφείλεται κατά κύριο λόγο σε ηλεκτρικά ρεύματα που διαρρέουν τον ρευστό, πλούσιο σε σίδηρο, πυρήνα της Γης. Στη διαμόρφωση του Γήινου μαγνητικού πεδίου συνεισφέρουν επίσης ο φυσικός μαγνητισμός πετρωμάτων και μεταλλικών κοιτασμάτων καθώς και ρεύματα στα ιονισμένα στρώματα της ατμόσφαιρας προκαλούμενα από την ηλιακή δραστηριότητα (Δερμάνης, 1999). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.1, οι μαγνητικοί πόλοι δεν συμπίπτουν με τους γεωγραφικούς πόλους¹. Επιπλέον, ο Βόρειος και ο Νότιος μαγνητικός πόλος δε βρίσκονται σε απόλυτα αντιδιαμετρικές θέσεις. Τέλος, οι μαγνητικοί πόλοι δεν είναι σταθεροί, αλλά παρουσιάζουν μετατοπίσεις που ανέρχονται σε μερικά Km ανά έτος (Τσιούμης, 1990). Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 6.1, η γωνία μεταξύ του οριζοντα ενός τόπου και της αντίστοιχης δυναμικής γραμμής του μαγνητικού πεδίου δεν είναι σταθερή. Η γωνία αυτή ονομάζεται **έγκλιση** ή **κλίση** (inclination). Γίνεται αντιληπτό ότι όσο πλησιάζουμε προς τους μαγνητικούς πόλους, όπου η κλίση παίρνει τιμές κοντά στις 90° , η απλή μαγνητική πυξίδα δεν μπορεί να παρέχει αξιόπιστη ένδειξη (erratic zones).



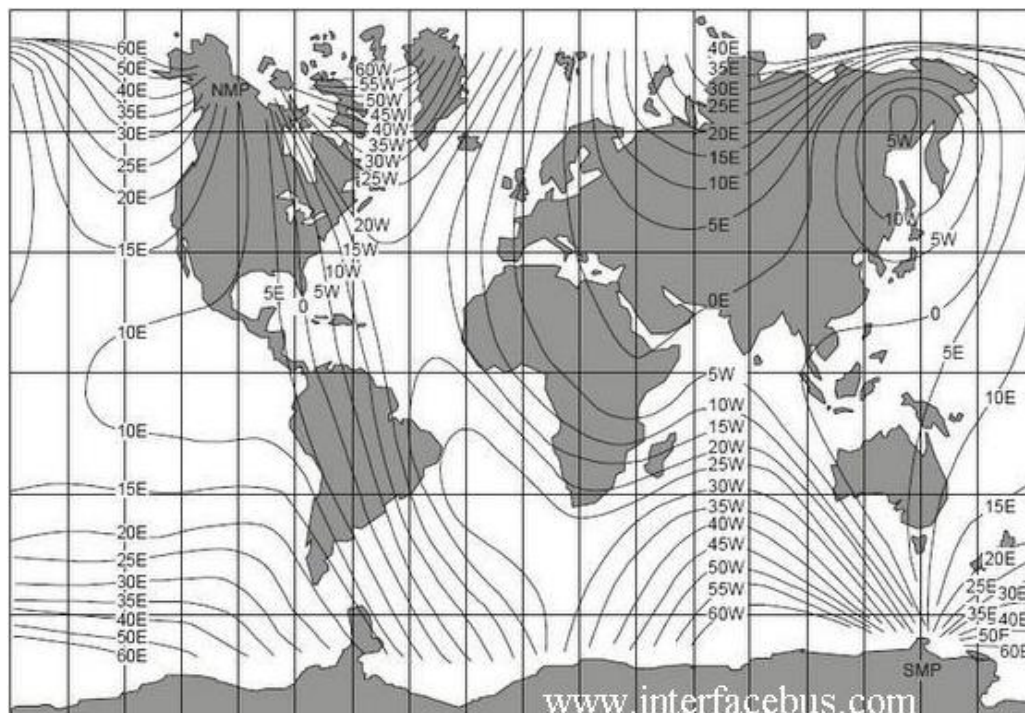
Εικόνα 6.1: Το Γήινο μαγνητικό πεδίο, όπως προσεγγίζεται από ένα μαγνητικό δίπολο.

¹ Το 2001 ο Βόρειος μαγνητικός πόλος βρισκόταν στη θέση 81.3N, 110.8W.

Πιο σημαντική για εφαρμογές πλοήγησης είναι η γωνία που σχηματίζει η οριζόντια συνιστώσα της έντασης του μαγνητικού πεδίου με τη διεύθυνση του γεωγραφικού Βορρά. Η γωνία αυτή ονομάζεται **μαγνητική απόκλιση** (magnetic declination)¹. Είναι ευνόητο ότι η τιμή της μαγνητικής απόκλισης σε κάποιο σημείο της Γης εξαρτάται από τη σχετική θέση του γεωγραφικού και μαγνητικού πόλου ως προς το σημείο αυτό. Επιπλέον επειδή το γεωμαγνητικό πεδίο διαμορφώνεται και από τοπικούς παράγοντες (μαγνητισμός πετρωμάτων κ.λ.π.) η μαγνητική απόκλιση καθορίζεται και από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής. Για τους δύο αυτούς λόγους η μαγνητική απόκλιση μεταβάλλεται από τόπο σε τόπο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.2.

Προφανώς η εξάρτηση της μαγνητικής μεταβολής από τη γεωγραφική θέση του σημείου δυσχεραίνει την πλοήγηση με πυξίδα αφού ο πλοηγός θα πρέπει πάντα να γνωρίζει την τιμή της απόκλισης και να κάνει τη σχετική αναγωγή. Εντούτοις, αυτή η ιδιότητα της μαγνητικής απόκλισης αξιοποιήθηκε πριν από αιώνες για να διευκολύνει την πλοήγηση. Πιο συγκεκριμένα ο Edmond Halley (γνωστότερος για τον υπολογισμό της τροχιάς του ομώνυμου κομήτη) κατασκεύασε το 1701 ένα χάρτη στον οποίο απεικονίζονται μέσω ισογώνιων γραμμών οι τιμές της μαγνητικής απόκλισης² (Εικόνα 6.3). Μέσω του χάρτη αυτού μπορούσε να προσδιοριστεί το γεωγραφικό μήκος (το γεωγραφικό πλάτος μπορούσε εύκολα να προσδιοριστεί από τα ουράνια σώματα) αν κάποιος προσδιόριζε την τιμή της μαγνητικής απόκλισης.

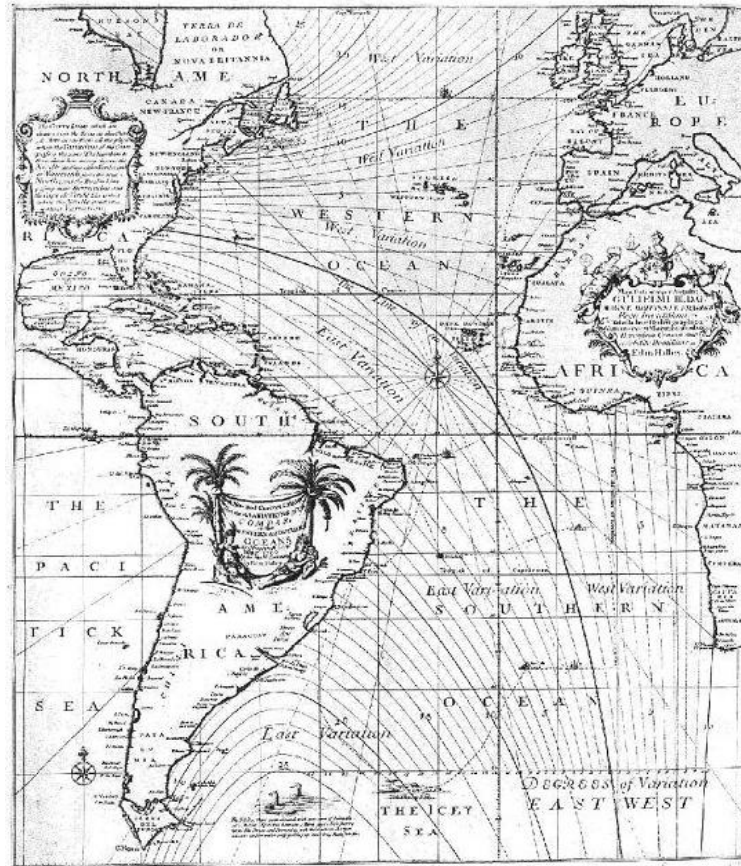
Στους ναυτικούς χάρτες η τιμή της μαγνητικής απόκλισης (για κάποιο συγκεκριμένο έτος) σημειώνεται πάνω στο λεγόμενο ανεμολόγιο μαζί με την τιμή της ετήσιας μεταβολής της (Εικόνα 6.4).



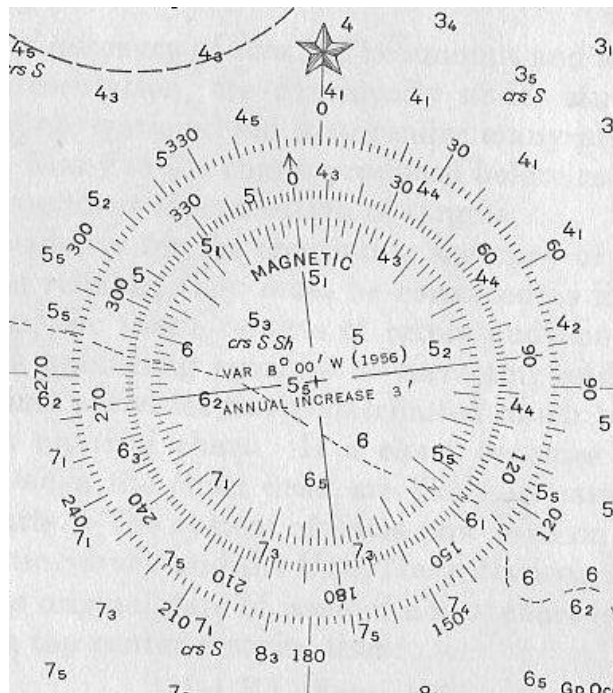
Εικόνα 6.2: Παγκόσμιος χάρτης τιμών μαγνητικής απόκλισης.

¹ Η μαγνητική απόκλιση χαρακτηρίζεται ως ανατολική (ή θετική) όταν ο μαγνητικός Βορράς βρίσκεται ανατολικά του αληθούς Βορρά και δυτική (ή αρνητική) όταν ο μαγνητικός Βορράς βρίσκεται δυτικότερα του αληθούς Βορρά.

² Ο χάρτης αυτός του Halley θεωρείται ο πρώτος θεματικός χάρτης στην ιστορία της χαρτογραφίας (Ρωσσικόπουλος, 2009).



Εικόνα 6.3: Ο χάρτης τιμών μαγνητικής απόκλισης του Halley (1701).



Εικόνα 6.4: Ανεμολόγιο ναυτικού χάρτη, όπου σημειώνεται η μαγνητική απόκλιση (Var. $8^{\circ} 00' W$ (1956)) και η ετήσια μεταβολή της (Annual Increase $3'$).

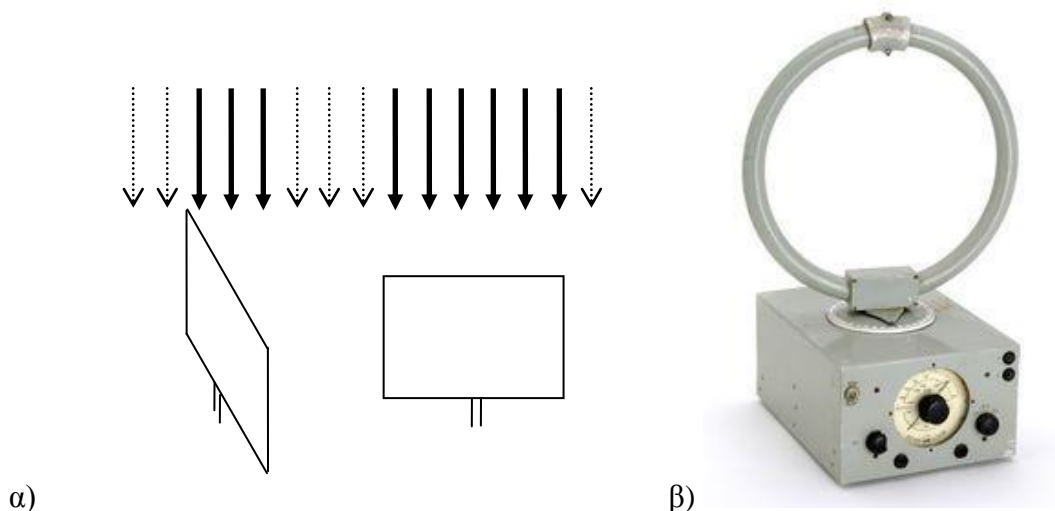
7. ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΜΕ ΕΠΙΓΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

7.1 Αρχή λειτουργίας

Η βασική αρχή λειτουργίας των επίγειων συστημάτων πλοήγησης στηρίζεται στη μέτρηση αποστάσεων ή διευθύνσεων μεταξύ του κινούμενου σώματος (π.χ. πλοίο, αεροπλάνο) και κάποιων επίγειων σταθμών, οι οποίοι βρίσκονται σε γνωστές θέσεις. Η μέτρηση των αποστάσεων (ή διευθύνσεων) γίνεται με τη χρήση ραδιοκυμάτων και για το λόγο αυτό η τεχνική εντοπισμού με χρήση αυτών των συστημάτων αναφέρεται και ως ραδιοεντοπισμός.

7.2 Ραδιοφάροι

Οι ραδιοφάροι (radio-beacons) είναι σταθμοί εκπομπής ραδιοκυμάτων, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τον προσανατολισμό αεροπλάνων και σκαφών. Οι ραδιοφάροι εκπέμπουν ένα περιοδικό σήμα, το οποίο μεταφέρει και στοιχειώδη πληροφορία όπως τον κωδικό του ραδιοφάρου ή τη θέση του. Χρησιμοποιώντας ένα ραδιογωνιόμετρο (RDF radio direction finder) προσδιορίζεται η διεύθυνση του ραδιοφάρου. Στην απλούστερή του μορφή, ένα ραδιογωνιόμετρο αποτελείται από μία περιστρεφόμενη κεραία. Η λειτουργία του ραδιογωνιόμετρου στηρίζεται στο γεγονός ότι η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος εξαρτάται από τη γωνία με την οποία το σήμα φθάνει στην κεραία (εικόνα 7.1). Όταν το επίπεδο της κεραίας ταυτιστεί με τη διεύθυνση του εισερχόμενου σήματος (άρα και τη διεύθυνση του πομπού), η τάση που παράγεται στην κεραία πρακτικά μηδενίζεται. Αντίθετα, όταν το επίπεδο της κεραίας είναι κάθετο στη διεύθυνση του πομπού η τάση παίρνει τη μέγιστη τιμή. Το επίπεδο της κεραίας ταυτίζεται με τη διεύθυνση του πομπού σε δύο θέσεις που διαφέρουν κατά 180° . Για το λόγο αυτό πρέπει να είναι γνωστή η προσεγγιστική θέση του χρήστη¹.



Εικόνα 7.1: Αρχή λειτουργίας του ραδιογωνιόμετρου (α) και κλασική μορφή ραδιογωνιόμετρου με περιστρεφόμενη κεραία (β).

¹ Στα σύγχρονα ραδιογωνιόμετρα αντί μίας περιστρεφόμενης κεραίας, χρησιμοποιούνται δύο σταθερές κεραίες κάθετες μεταξύ τους (Παλληκάρης και Κατσούλης, 2008).

7.3 Κυκλικά, υπερβολικά και αζιμουθιακά συστήματα

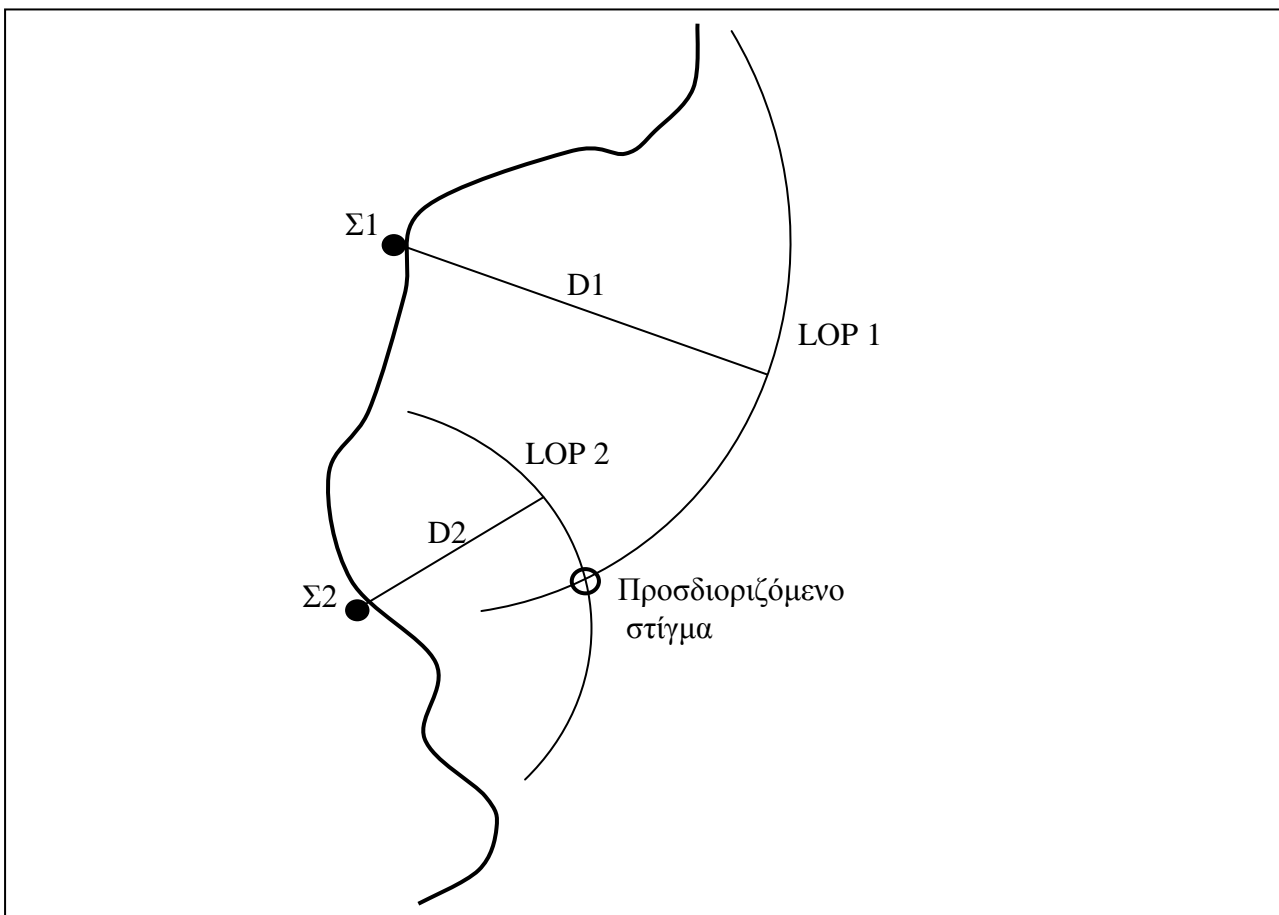
Με τη χρήση των επίγειων συστημάτων ραδιοεντοπισμού προκύπτει το στίγμα ως τομή δύο ή περισσότερων γραμμών θέσης (βλ. ορισμό στην παρ. 2.1). Ανάλογα με το είδος των γραμμών θέσης (LOP) διακρίνουμε τις εξής κατηγορίες συστημάτων:

- κυκλικά
- υπερβολικά
- αζιμουθιακά

Στις επόμενες ενότητες θα παρουσιαστούν σύντομα τα κυκλικά και τα υπερβολικά συστήματα, τα οποία παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον.

7.3.1 Κυκλικά συστήματα

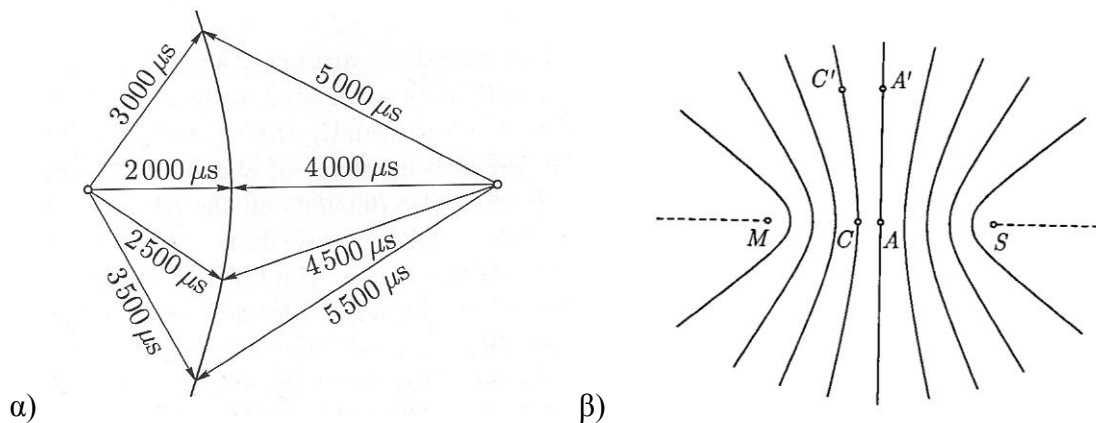
Στα κυκλικά συστήματα οι γραμμές θέσης είναι κύκλοι. Κάθε μέτρηση απόστασης από ένα σταθμό οδηγεί σε μία κυκλική γραμμή θέσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.2. Έχοντας δύο κυκλικές γραμμές θέσης, η ζητούμενη θέση πρέπει να επιλεγεί μεταξύ των δύο σημείων τομής των δύο κύκλων. Συνήθως το πρόβλημα λύνεται εύκολα καθώς τα δύο σημεία τομής απέχουν πολύ μεταξύ τους, οπότε το ένα από αυτά μπορεί να αποκλειστεί εάν γνωρίζουμε χονδρικά τη θέση μας. Στην πράξη εάν υπάρχουν τρεις γραμμές θέσης, το στίγμα προσδιορίζεται μονοσήμαντα. Στα κυκλικά συστήματα η εκπομπή του σήματος γίνεται από το σκάφος και για το λόγο αυτό ο αριθμός των πλοίων που μπορούν να χρησιμοποιούν ταυτόχρονα το σύστημα είναι περιορισμένος (Παλληκάρης, 1988).



Εικόνα 7.2: Σχηματική αναπαράσταση καθορισμού στίγματος με κυκλικό σύστημα ραδιοεντοπισμού.

7.3.2 Υπερβολικά συστήματα

Σε αντίθεση με τα κυκλικά συστήματα, τα υπερβολικά συστήματα είναι παθητικά, δηλαδή ο χρήστης δεν εκπέμπει κάποιο σήμα, αλλά μόνο λαμβάνει. Επιπλέον, το στίγμα προκύπτει από την τομή γραμμών θέσης, οι οποίες δεν είναι κύκλοι αλλά υπερβολές. Η αρχή λειτουργίας των υπερβολικών συστημάτων στηρίζεται στην ταυτόχρονη λήψη σημάτων από δύο σταθμούς: ενός κύριου σταθμού (master station) και ενός δευτερεύοντος (secondary station). Από τη χρονική διαφορά με την οποία λαμβάνονται τα σήματα του κύριου και ενός δευτερεύοντος σταθμού προκύπτει η διαφορά των αποστάσεων του δέκτη από τους δύο σταθμούς. Με τον τρόπο αυτό ο χρήστης γνωρίζει ότι βρίσκεται σε μία γραμμή θέσης, η οποία είναι υπερβολή με τις δύο εστίες της να υλοποιούνται από τον κύριο και δευτερεύοντα σταθμό. Στην εικόνα 7.3α δίνεται η υπερβολή που προκύπτει όταν η χρονική διαφορά λήψης των σημάτων κύριου και δευτερεύοντα σταθμού είναι 2000 μsec . Στην εικόνα 7.3β δίνονται οι υπερβολικές γραμμές που προκύπτουν για διάφορες τιμές της χρονικής διαφοράς. Όπως γίνεται αντιληπτό, ένα ζεύγος σταθμών δεν αρκεί για τον προσδιορισμό στίγματος. Απαιτούνται τουλάχιστον δύο υπερβολικές γραμμές θέσης για να προκύψει το στίγμα ως τομή αυτών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.4.



Εικόνα 7.3: α) Υπερβολική γραμμή θέσης που αντιστοιχεί σε διαφορά χρόνου λήψης 2000 μsec (Tetley και Calcutt, 1991) και β) υπερβολικές γραμμές μεταξύ κύριου και δευτερεύοντα σταθμού στη γενική περίπτωση (Hofmann-Wellenhof et al. 2003).

7.3.2.1 LORAN-C

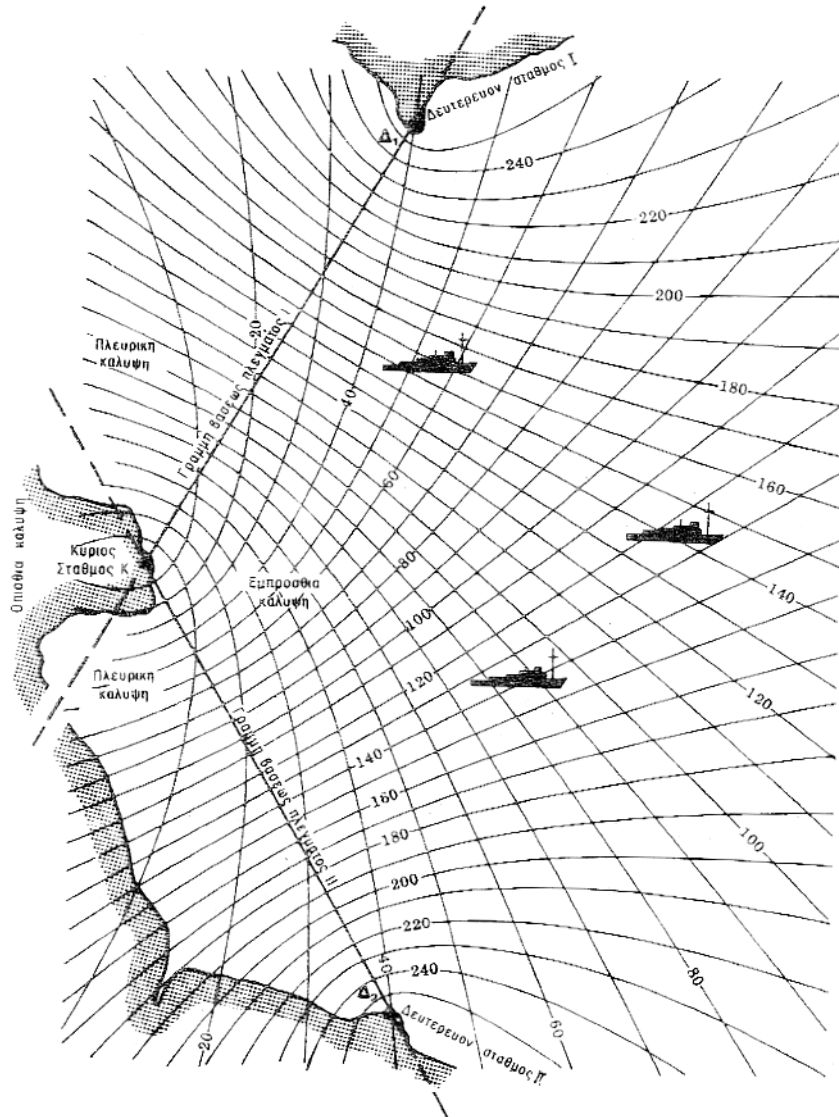
Το σύστημα LORAN-C είναι το πιο γνωστό υπερβολικό σύστημα ραδιοεντοπισμού¹. Μπορεί να χρησιμοποιείται για καθορισμό στίγματος σε ξηρά, θάλασσα και αέρα. Το σύστημα μπορεί να καλύπτει μία ευρύτερη περιοχή χρησιμοποιώντας μία αλυσίδα σταθμών, δηλαδή έναν κύριο σταθμό μαζί με (συνήθως τρεις) βοηθητικούς σταθμούς. Οι αποστάσεις μεταξύ των σταθμών είναι της τάξης των πολλών εκατοντάδων Km έως περίπου 1200 Km. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η κάλυψη μίας μεγάλης περιοχής με τη χρήση ενός μικρού αριθμού σταθμών. Το δίκτυο των σταθμών του LORAN-C φαίνεται στην Εικόνα 7.5.

Λόγω της ανάπτυξης του GPS, είχε αποφασιστεί ο τερματισμός της λειτουργίας του LORAN-C². Ο προγραμματισμός αυτός ματαιώθηκε ενώ παράλληλα ξεκίνησε και ένα πρόγραμμα

¹ LORAN: LOng RAnge Navigation. Το LORAN-C ξεκίνησε να χρησιμοποιείται το 1958. Αποτελεί εξέλιξη του LORAN-A, το οποίο αναπτύχθηκε κατά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο από το MIT για το Αμερικάνικο Ναυτικό.

² Αρχικά προβλέπονταν τερματισμός λειτουργίας το 2015 ενώ στη συνέχεια επιστεύσθηκε για το 2000.

εκμοντερνισμού του συστήματος με αναβάθμιση της υποδομής των σταθμών. Καθοριστικό ρόλο έπαιξε η απόφαση της FAA να μην εγκρίνει το GPS ως αποκλειστικό σύστημα πλοήγησης και να απαιτεί ένα δευτερεύον σύστημα που θα εξασφαλίζει διαθεσιμότητα στίγματος του αεροπλάνου σε περίπτωση αστοχίας του GPS. Οι ενέργειες αυτές οδήγησαν στην ανάπτυξη του συστήματος eLORAN (Enhanced LORAN) (DoD et al. 2008).



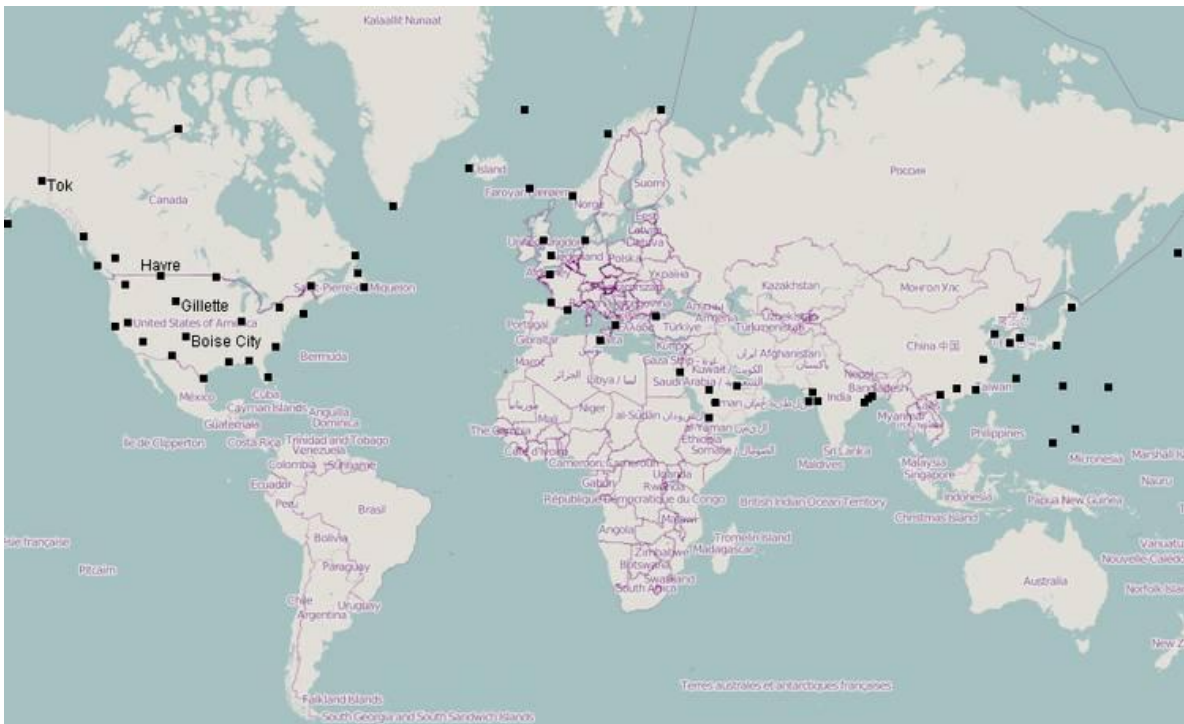
Εικόνα 7.4: Καθορισμός στίγματος από την τομή δύο υπερβολικών γραμμών θέσης (Παλληκάρης, 1988).

7.3.2.2 OMEGA

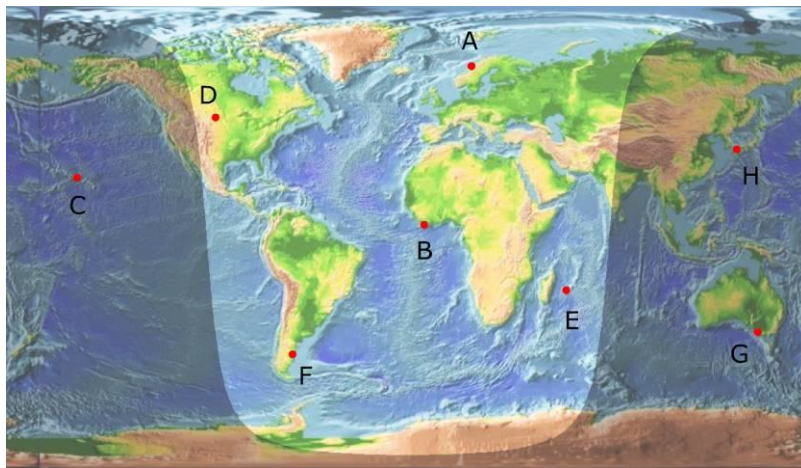
Το σύστημα OMEGA είναι ένα υπερβολικό σύστημα ραδιοεντοπισμού, το οποίο ξεκίνησε να λειτουργεί το 1971. Είναι το μοναδικό σύστημα στην κατηγορία του που παρέχει παγκόσμια κάλυψη. Το σύστημα χρησιμοποιεί πολύ χαμηλές συχνότητες (VLF). Λόγω των ιδιοτήτων μετάδοσης των VLF (βλ. παράγρ. 3.3) επιτυγχάνεται παγκόσμια κάλυψη χρησιμοποιώντας μόνο 8 σταθμούς (Εικόνα 7.6)¹. Μία άλλη απόρροια της χρήσης κυμάτων VLF είναι ότι το σύστημα εκτός

¹ Για την αύξηση της εμβέλειας των σταθμών (βλ. παρ. 3.3), οι κεραιές είχαν τοποθετηθεί σε μεγάλο ύψος, μερικές φορές μεγαλύτερο από 400m.

από την ξηρά, τη θάλασσα και τον αέρα μπορεί να χρησιμοποιείται ακόμα και υποβρυχίως (Enge et al. 1995). Το τίμημα όμως της χρήσης πολύ χαμηλής συχνότητας είναι η μειωμένη ακρίβεια του συστήματος. Στον πίνακα 7.1 αντιπαραβάλλονται τα χαρακτηριστικά των συστημάτων LORAN-C και OMEGA.



Εικόνα 7.5: Οι σταθμοί εκπομπής του συστήματος LORAN-C.



Εικόνα 7.6: Οι 8 σταθμοί εκπομπής του συστήματος OMEGA που εξασφαλίζουν παγκόσμια κάλυψη.

Πίνακας 7.1: Σύγκριση χαρακτηριστικών LORAN-C και OMEGA.

Σύστημα	Ζώνη συχνότητας	Κάλυψη	Τυπική ακρίβεια	Κατάσταση λειτουργίας
LORAN-C	LF	1600 Km	100m	Σε λειτουργία
OMEGA	VLF	Παγκόσμια	2000m	Διακοπή λειτουργίας το 1997

8. ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΜΕ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται τα Παγκόσμια Δορυφορικά Συστήματα Πλοήγησης (GNSS: Global Navigation Satellite Systems) υπό το πρίσμα της χρήσης τους για εφαρμογές πλοήγησης. Για την κατανόηση του παρόντος κεφαλαίου είναι απαραίτητη η γνώση της θεωρίας του γεωδαιτικού εντοπισμού με GNSS, αντικείμενο που καλύπτεται πλήρως από τους *Φωτίου και Πικριδά* (2006).

8.1 Αρχή λειτουργίας

Η βασική αρχή λειτουργίας των σύγχρονων GNSS στηρίζεται στη μέτρηση αποστάσεων μεταξύ ενός δέκτη και συγκεκριμένων δορυφόρων που εκπέμπουν κατάλληλα ραδιοκύματα. Κάνοντας μία ευρύτερη θεώρηση, η αρχή λειτουργίας των δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης είναι κοινή με αυτή των επίγειων συστημάτων πλοήγησης. Η ειδοποιός διαφορά μεταξύ των δύο κατηγοριών είναι ότι στην περίπτωση των δορυφορικών συστημάτων τα σήματα δεν εκπέμπονται από επίγειους σταθμούς αλλά από δορυφόρους. Άμεση συνέπεια αυτού είναι ότι στην περίπτωση των δορυφορικών συστημάτων, τα σημεία εκπομπής δεν είναι σταθερά αλλά βρίσκονται σε κίνηση. Αυτό διαφοροποιεί ουσιαστικά τον τρόπο λειτουργίας των δορυφορικών συστημάτων, η αρχή λειτουργίας όμως παραμένει επί της ουσίας κοινή με τα επίγεια συστήματα.

8.2 Ιστορική αναδρομή

Ο πρώτος τεχνητός δορυφόρος, ο Sputnik, τέθηκε σε τροχιά γύρω από τη Γη το 1957. Το 1969 μέσω του προγράμματος Apollo, ο άνθρωπος πάτησε στο φεγγάρι. Η εξέλιξη της δορυφορικής τεχνολογίας υπήρξε ραγδαία αν αναλογιστούμε ότι από τότε μέχρι σήμερα έχουν βρεθεί σε τροχιά γύρω από τη Γη περίπου 26.000 αντικείμενα (δορυφόροι, πύραυλοι εκτόξευσης, διαστημικοί σταθμοί κλπ). Σήμερα βρίσκονται σε τροχιά περίπου 8.000 αντικείμενα, από τα οποία περισσότερα από 500 είναι δορυφόροι που βρίσκονται σε κατάσταση λειτουργίας. Οι δορυφόροι αυτοί, ανάλογα με τις εφαρμογές που εξυπηρετούν μπορούν να είναι τηλεπικοινωνιακοί, μετεωρολογικοί, στρατιωτικοί, περιβαλλοντικής παρατήρησης, πλοήγησης, επιστημονικής έρευνας κ.α.

Αμέσως μετά την εκτόξευση του πρώτου τεχνητού δορυφόρου το 1957, αρχίζουν να υλοποιούνται τα πρώτα δορυφορικά συστήματα πλοήγησης. Η αρχή γίνεται με το σύστημα TRANSIT. Ο πρώτος δοκιμαστικός δορυφόρος (satellite prototype) του συστήματος TRANSIT τίθεται σε τροχιά το 1960 (Parkinson et al., 1995). Τη δεκαετία του 1970 ξεκινά ο σχεδιασμός των πρώτων Παγκόσμιων Δορυφορικών Συστημάτων Εντοπισμού: του Αμερικάνικου συστήματος GPS και του Σοβιετικού συστήματος GLONASS. Από τότε μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί ή βρίσκονται στο στάδιο της ανάπτυξης και άλλα συστήματα εντοπισμού όπως π.χ. το ευρωπαϊκό σύστημα GALILEO.

Έχει ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι τα δορυφορικά συστήματα πλοήγησης αναπτύχθηκαν πρωταρχικά για στρατιωτική χρήση. Η παράλληλη διάθεση τους και για πολιτικές εφαρμογές ήρθε σε μεταγενέστερο χρόνο και συχνά συνοδεύονταν από περιορισμούς στην ακρίβεια εντοπισμού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα συστήματος που αναπτύσσεται κατ' εξοχήν για πολιτική χρήση είναι το Ευρωπαϊκό σύστημα GALILEO.

8.3 TRANSIT

Όπως αναφέρθηκε, το σύστημα TRANSIT (γνωστό και ως NAVSAT: Navy Navigation Satellite System) ήταν το πρώτο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης. Το σύστημα αναπτύχθηκε από το Αμερικάνικο πολεμικό ναυτικό για να υποστηρίξει την εκτόξευση πυραύλων από υποβρύχια. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο τρόπος που οι επιστήμονες οδηγήθηκαν στο σχεδιασμό του συστήματος. Η ιστορία ξεκινά στα εργαστήρια APL (Applied Physics Laboratory) του Πανεπιστημίου Johns Hopkins, όπου δυο ερευνητές μελετούσαν τη μετατόπιση που προκαλείτο στη συχνότητα των σημάτων του πρώτου τεχνητού δορυφόρου, του Sputnik, λόγω του φαινομένου Doppler (βλ. παρ. 3.4). Ανέπτυξαν ένα λογισμικό το οποίο με βάση την παρατήρηση της μετατόπισης Doppler μπορούσε να υπολογίζει την τροχιά του δορυφόρου (Parkinson et al., 1995). Στη συνέχεια ο πρόεδρος του ερευνητικού κέντρου, αντιστρέφοντας τη συλλογιστική, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι εάν είναι γνωστή η τροχιά ενός δορυφόρου, είναι δυνατόν παρατηρώντας με ένα δέκτη τη μετατόπιση λόγω Doppler να προσδιοριστεί η θέση του δέκτη πάνω στη Γη. Τα δορυφορικά συστήματα πλοήγησης μόλις είχαν γεννηθεί!

Το σύστημα TRANSIT τέθηκε σε λειτουργία το 1964. Ο προσδιορισμός θέσης στηριζόταν στο γεγονός ότι η καμπύλη της λαμβανόμενης συχνότητας είναι μοναδική για κάθε σημείο εξαιτίας του φαινομένου Doppler. Το σύστημα παρείχε μία ακρίβεια της τάξης των 200 m. Ο αριθμός των δορυφόρων και οι τροχιές τους δεν εξασφάλιζαν συνεχή κάλυψη σε ολόκληρη τη Γη. Το σύστημα τέθηκε εκτός λειτουργίας το 1996¹. Αντίστοιχο με το TRANSIT ήταν το Σοβιετικό σύστημα TSIKADA.

8.4 GPS

Το Παγκόσμιο Σύστημα Προσδιορισμού Θέσης (GPS: Global Positioning System) είναι το μοναδικό σύστημα GNSS, το οποίο βρίσκεται σήμερα σε πλήρη ανάπτυξη. Το GPS βρίσκεται σε πλήρη λειτουργία (FOC: Full Operational Capability) από τον Απρίλιο του 1995 και για το λόγο αυτό είναι σήμερα το πλέον διαδεδομένο σύστημα GNSS.

8.4.1 Τεχνικές εντοπισμού με GPS

Στην παράγραφο αυτή εξετάζονται τα βασικότερα είδη εντοπισμού με GPS που παρουσιάζουν ιδιαίτερη σημασία σε εφαρμογές πλοήγησης. Οι ορισμοί ισχύουν και στην περίπτωση των άλλων GNSS (GLONASS, GALILEO κλπ). Η κατηγοριοποίηση γίνεται με βάση διάφορες παραμέτρους ως εξής:

Διάκριση τεχνικών ανάλογα με τον αριθμό των δεκτών που χρησιμοποιούνται:

Αυτόνομος ή απόλυτος εντοπισμός (autonomous ή absolute positioning)

Στην περίπτωση του αυτόνομου εντοπισμού το στίγμα (X, Y, Z) (ή ισοδύναμα (φ, λ, h)) προσδιορίζεται αποκλειστικά από τις μετρήσεις που πραγματοποιεί ένας μόνο δέκτης. Ο όρος «αυτόνομος» πλεονεκτεί έναντι του όρου «απόλυτος» επειδή υποδηλώνει καλύτερα ότι χρησιμοποιούνται μόνο οι παρατηρήσεις που κάνει ο δέκτης προς τους δορυφόρους GPS. Όπως θα φανεί παρακάτω, και στην περίπτωση του DGPS χρησιμοποιείται ένας μόνο δέκτης GPS. Το στίγμα όμως προκύπτει αξιοποιώντας, εκτός από τις μετρήσεις του δέκτη GPS, και άλλα στοιχεία (διορθώσεις DGPS) κάτι που οδηγεί σε αυξημένη ακρίβεια σε σχέση με τον αυτόνομο εντοπισμό.

¹ Από το 1997 οι δορυφόροι του TRANSIT αξιοποιούνται στο πλαίσιο ενός προγράμματος μελέτης της ιονόσφαιρας (Navy's Ionospheric Monitoring System).

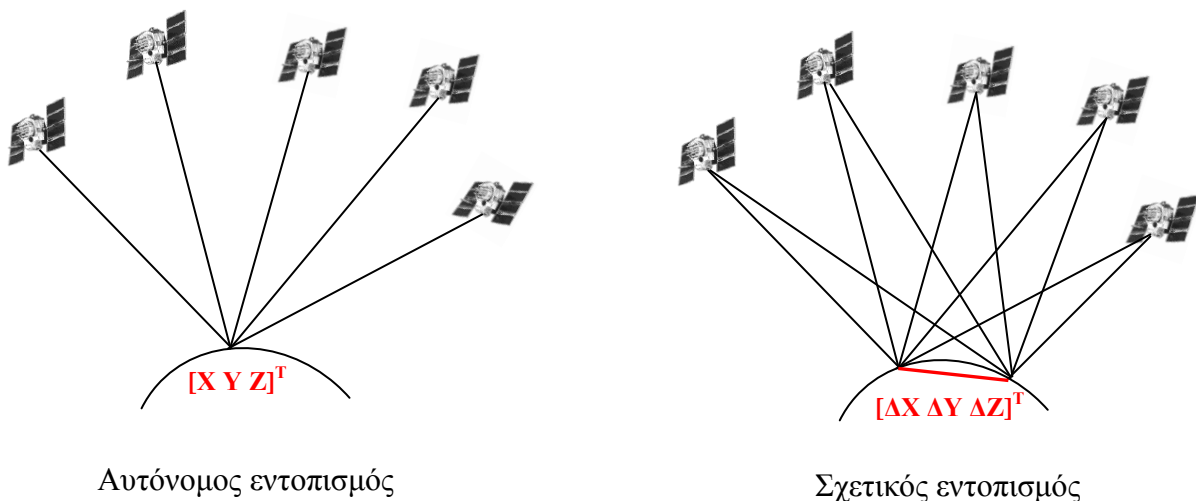
Σχετικός εντοπισμός (relative positioning)

Στην περίπτωση του σχετικού εντοπισμού χρησιμοποιούνται δύο δέκτες οι οποίοι μετράνε ταυτόχρονα. Από την επεξεργασία των μετρήσεων των δύο δεκτών προσδιορίζεται η σχετική θέση των δύο δεκτών $[\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z]^T$. Εάν ο ένας δέκτης βρίσκεται σε σημείο γνωστών συντεταγμένων τότε η θέση του άγνωστου σημείου προσδιορίζεται από τον τύπο:

$$[X_B \ Y_B \ Z_B]^T = [X_A \ Y_A \ Z_A]^T + [\Delta X_{AB} \ \Delta Y_{AB} \ \Delta Z_{AB}]^T \quad (8.1)$$

Χαρακτηριστική περίπτωση σχετικού εντοπισμού αποτελεί ο γεωδαιτικός εντοπισμός όπου χρησιμοποιώντας δύο γεωδαιτικούς δέκτες (μετρήσεις φάσης) προσδιορίζεται με υψηλή ακρίβεια (λίγα mm έως λίγα cm) η θέση ενός σημείου.

Ο αυτόνομος και ο σχετικός εντοπισμός περιγράφονται σχηματικά στην εικόνα 8.1.



Αυτόνομος εντοπισμός

Σχετικός εντοπισμός

Εικόνα 8.1: Αυτόνομος και σχετικός εντοπισμός.**Διάκριση τεχνικών ανάλογα με το χρόνο υπολογισμού των τελικών αποτελεσμάτων:**Εντοπισμός σε πραγματικό χρόνο (real-time positioning)

Η έννοια του πραγματικού χρόνου (real-time) αναφέρεται στα υπολογιστικά συστήματα γενικότερα. Στην περίπτωση των συστημάτων εντοπισμού, περιγράφει την περίπτωση όπου τα αποτελέσματα (θέση, προσανατολισμός) είναι διαθέσιμα κατά τη διαδικασία των μετρήσεων. Χαρακτηριστική περίπτωση εντοπισμού σε πραγματικό χρόνο είναι ο αυτόνομος εντοπισμός με δέκτη GPS χειρός, όπου το στίγμα προκύπτει άμεσα, χωρίς δηλαδή κάποια ουσιαστική καθυστέρηση. Στις τοπογραφικές και γεωδαιτικές εφαρμογές, έχουμε εντοπισμό σε πραγματικό χρόνο όταν χρησιμοποιούνται οι τεχνικές DGPS και RTK.

Εντοπισμός με μετεπεξεργασία (post-processing)

Σε αντίθεση με τον εντοπισμό σε πραγματικό χρόνο, στην περίπτωση της μετεπεξεργασίας (post-processing) τα δεδομένα αποθηκεύονται στο όργανο και τα αποτελέσματα προκύπτουν από επεξεργασία που γίνεται συνήθως μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων. Χαρακτηριστική

περίπτωση εντοπισμού με μετεπεξεργασία είναι οι στατικές μετρήσεις GPS για την ίδρυση σημείων ελέγχου (τριγωνομετρικά σημεία, στάσεις κλπ).

Διάκριση τεχνικών ανάλογα με τη δυναμική του δέκτη:

Στατικός εντοπισμός (static positioning)

Για τον ορισμό του στατικού εντοπισμού πρέπει να διακρίνουμε ανάμεσα στον αυτόνομο και στο σχετικό εντοπισμό: Ο αυτόνομος εντοπισμός ονομάζεται στατικός όταν ο δέκτης βρίσκεται σε ακινησία. Ο σχετικός εντοπισμός ονομάζεται στατικός όταν και οι δύο δέκτες της βάσης (baseline) βρίσκονται σε ακινησία.

Κινηματικός εντοπισμός (kinematic positioning)

Ο αυτόνομος εντοπισμός ονομάζεται κινηματικός όταν ο δέκτης βρίσκεται σε κίνηση. Ο σχετικός εντοπισμός ονομάζεται κινηματικός όταν ο δέκτης *rover* βρίσκεται σε κίνηση, ενώ ο σταθμός αναφοράς παραμένει σταθερός¹. Σημαντικό είναι ότι κατά τον κινηματικό εντοπισμό, για κάθε εποχή παρατηρήσεων υπολογίζεται μία νέα θέση. Ακόμα και αν ο κινούμενος δέκτης παραμένει για λίγο ακίνητος, υπολογίζονται πολλά διακριτά στίγματα.

RTK

Η τεχνική RTK (Real-Time Kinematic), παρά την ονομασία της, δεν είναι μία καθαρά κινηματική τεχνική, γιατί προσφέρει τη δυνατότητα, όταν ο δέκτης παραμένει ακίνητος, να υπολογίζεται μία λύση για τη θέση του χρησιμοποιώντας όλες τις παρατηρήσεις που έγιναν εν στάσει.

Άλλες τεχνικές

Υπάρχουν διάφορες άλλες τεχνικές, όπως ο ψευδοκινηματική και η ημικινηματική. Δεν εξετάζονται εδώ καθώς η σημασία τους για εφαρμογές πλοήγησης είναι μικρή. Για αναλυτικά στοιχεία ο αναγνώστης παραπέμπεται στους *Φωτίου και Πικριδά* (2006).

Κλείνοντας την παράγραφο αυτή σημειώνεται ότι κάθε τεχνική εμπίπτει συνήθως σε περισσότερες από μία κατηγορίες. Για παράδειγμα η τεχνική RTK είναι σχετικός εντοπισμός, ο οποίος γίνεται σε πραγματικό χρόνο.

8.4.1.1 Αυτόνομος εντοπισμός

Στον αυτόνομο εντοπισμό το στίγμα προσδιορίζεται μέσω των μετρήσεων ψευδοαποστάσεων. Ψευδοαπόσταση (pseudorange) είναι η μέτρηση της απόστασης δορυφόρου-δέκτη, η οποία γίνεται από το δέκτη χρησιμοποιώντας τον κώδικα (C/A, P(Y) ή L2C) του σήματος. Η εξίσωση παρατήρησης για την περίπτωση της συχνότητας L1 είναι:

$$PR_{1A}^i = \rho_A^i + c \cdot \delta t_A - c \cdot \delta t^i + \delta orb_A^i + \delta I_{1A}^i + \delta I_A^i + \delta mu_{1A}^i + \delta int_{1A}^i + e_{1A}^i \quad (8.2)$$

όπου²:

¹ Έχουν αναπτυχθεί τεχνικές σχετικού γεωδαιτικού εντοπισμού, όπου τόσο ο δέκτης αναφοράς όσο και ο κινούμενος δέκτης βρίσκονται σε κίνηση (Luo and Lachapelle, 1999). Οι τεχνικές αυτές βρίσκουν εφαρμογή σε ειδικές περιπτώσεις όπως ο εναέριος ανεφοδιασμός αεροσκαφών κλπ.

² Ο δείκτης “i” στα PR_{1A}^i , δI_{1A}^i , δmu_{1A}^i , δint_{1A}^i , e_{1A}^i υποδηλώνει ότι τα μεγέθη αυτά αναφέρονται σε μετρήσεις ψευδοαπόστασης στη συχνότητα L1.

PR_{1A}^i : η μετρούμενη ψευδοαπόσταση μεταξύ του δέκτη A και του δορυφόρου i.

ρ_A^i : η γεωμετρική απόσταση δέκτη-δορυφόρου $\left(\sqrt{(X^i - X_A)^2 + (Y^i - Y_A)^2 + (Z^i - Z_A)^2} \right)$

c : η ταχύτητα του φωτός στο κενό (299792458 m/sec)

δt_A : το σφάλμα του χρονομέτρου του δέκτη A

δt^i : το σφάλμα του χρονομέτρου του δορυφόρου i

δorb_A^i : η συνιστώσα του τροχιακού σφάλματος του δορυφόρου i κατά διεύθυνση δορυφόρου - δέκτη A

δI_{1A}^i : το ιονοσφαιρικό σφάλμα κατά τη διεύθυνση δορυφόρου i - δέκτη A

δT_A^i : το τροποσφαιρικό σφάλμα κατά τη διεύθυνση δορυφόρου i - δέκτη A

δmu_{1A}^i : το σφάλμα λόγω του φαινομένου multipath (εάν υπάρχει)

δint_{1A}^i : το σφάλμα λόγω H/M παρεμβολών (εάν υπάρχει)

e_{1A}^i : ο θόρυβος της μέτρησης και τα υπόλοιπα μη μοντελοποιούμενα σφάλματα

Κατά τον αυτόνομο εντοπισμό οι εξισώσεις των παρατηρούμενων ψευδοαποστάσεων γραμμικοποιούνται και επιλύονται. Συνήθως, οι διαθέσιμες παρατηρήσεις είναι περισσότερες από τους αγνώστους και η λύση προκύπτει με εφαρμογή της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων. Για τους όρους της εξίσωσης 8.2 ισχύουν τα εξής:

- Το σφάλμα του χρονομέτρου του δέκτη δεν είναι γνωστό. Για το λόγο αυτό προστίθεται στο διάνυσμα των αγνώστων, το οποίο παίρνει τη μορφή:

$$\mathbf{X} = [X \ Y \ Z \ \delta t_A]^T \quad (8.3)$$

- Το σφάλμα του χρονομέτρου του δορυφόρου εμπεριέχεται στην εκπεμπόμενη εφημερίδα (broadcast ephemeris).
- Το τροχιακό σφάλμα είναι η διαφορά μεταξύ πραγματικής θέσης του δορυφόρου κάποια χρονική στιγμή και της αντίστοιχης θέσης που υπολογίζεται με βάση τη χρησιμοποιούμενη εφημερίδα. Όσο ήταν σε ισχύ η Επιλεκτική Διαθεσιμότητα (5/2000) το σφάλμα αυτό μπορούσε να ανέλθει σε 130m (Breuer et al., 1993). Σήμερα η ακρίβεια της εκπεμπόμενης τροχιάς είναι περίπου 2 m (Φωτίου και Πικριδάς, 2006). Το τροχιακό σφάλμα δεν είναι γνωστό. Το σφάλμα που εισάγεται είναι ίσο με τη συνιστώσα του σφάλματος κατά τη διεύθυνση δορυφόρου-δέκτη.
- Το ιονοσφαιρικό σφάλμα εξαρτάται από το επίπεδο φόρτισης της ιονόσφαιρας και από τη γωνία ανύψωσης του παρατηρούμενου δορυφόρου. Τιμές σφάλματος 20-30 m είναι συνηθισμένες, ενώ υπό ακραίες συνθήκες το ιονοσφαιρικό σφάλμα μπορεί να ξεπεράσει τα 100m (RTCM, 1994). Κατά τον αυτόνομο εντοπισμό σε πραγματικό χρόνο, γίνεται χρήση του εκπεμπόμενου ιονοσφαιρικού μοντέλου (broadcast ionospheric model). Οι παράμετροι αυτού του μοντέλου αποστέλλονται από το δορυφόρο μαζί με την εκπεμπόμενη εφημερίδα. Το μοντέλο αυτό περιορίζει το σφάλμα κατά 50-60% (Leick, 1995). Σημειώνεται πάντως ότι σε περίπτωση αδυναμίας του Κέντρου Ελέγχου του GPS να επικαιροποιήσει τις παραμέτρους του εκπεμπόμενου μοντέλου, η χρήση του εκπεμπόμενου μοντέλου μπορεί να οδηγήσει σε απρόβλεπτα αποτελέσματα.
- Το τροποσφαιρικό σφάλμα εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την πίεση και την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υδρατμούς. Το τροποσφαιρικό σφάλμα αυξάνεται

εκθετικά για γωνίες ανύψωσης μικρότερες από περίπου 30° (βλ. και Εικόνα 3.3). Συνηθισμένες τιμές του τροποσφαιρικού σφάλματος είναι 3 m στο ζενίθ και 50 m για γωνία ανύψωσης 3° (RTCM, 1994). Το σφάλμα περιορίζεται σημαντικά με χρήση μοντέλων (π.χ. Hopfield). Το σφάλμα που παραμένει, είναι μικρότερο από 1 m για γωνίες ανύψωσης μεγαλύτερες από 5° .

- Τα σφάλματα λόγω multipath και H/M παρεμβολών δεν μοντελοποιούνται¹. Ο περιορισμός τους γίνεται κυρίως μέσω του hardware των δεκτών. Για κινηματικές εφαρμογές ο δέκτης πρέπει να τοποθετείται, όταν είναι εφικτό, σε θέση που να προφυλλάσσεται από ανακλώμενα σήματα.
- Ο θόρυβος της μέτρησης εξαρτάται από την ποιότητα του δέκτη. Η τυπική ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί στη μέτρηση της ψευδοαπόστασης αντιστοιχεί στο 1% του μήκους του παλμού του κώδικα². Έτσι η χρήση του κώδικα C/A οδηγεί σε ακρίβεια ψευδοαποστάσεων στο επίπεδο των 3 m ενώ του κώδικα P(Y) σε ακρίβεια επιπέδου 30 cm. Μέσω διάφορων τεχνικών επιτυγχάνονται στην πράξη καλύτερα αποτελέσματα. Όσο ήταν σε ισχύ η Επιλεκτική Διαθεσιμότητα (έως τον Μάιο του 2000) εισάγονταν σκόπιμα θόρυβος στο δορυφορικό σήμα με αποτέλεσμα το σφάλμα στη μέτρηση της απόστασης με τον κώδικα C/A να έφτανε μέχρι 60m (Γιαννίου, 2000).

8.4.1.2 DGPS

Όπως προκύπτει από τη σύντομη ανάλυση των όρων της εξίσωσης (8.2), η σημαντικότερη πηγή σφαλμάτων στον αυτόνομο εντοπισμό ήταν η Επιλεκτική Διαθεσιμότητα. Για να αντιμετωπιστεί η μείωση της ακρίβειας που προκαλούσε η Επιλεκτική Διαθεσιμότητα αναπτύχθηκε η τεχνική του DGPS (Differential GPS). Αν και η Επιλεκτική Διαθεσιμότητα δεν είναι πλέον σε ισχύ, η τεχνική του DGPS εξακολουθεί να χρησιμοποιείται γιατί περιορίζει και άλλες πηγές σφαλμάτων, όπως θα φανεί στη συνέχεια.

Η βασική αρχή λειτουργίας του DGPS είναι η εξής:

- Τοποθετείται ένας δέκτης σε σημείο γνωστών συντεταγμένων και πραγματοποιεί μετρήσεις ψευδοαποστάσεων.
- Υπολογίζει τη γεωμετρική απόσταση ρ_A^i (βλ. εξίσωση 8.2) μεταξύ δορυφόρου και δέκτη.
- Υπολογίζει για κάθε δορυφόρο τη διαφορά μεταξύ γεωμετρικής απόστασης και ψευδοαπόστασης (διορθωμένης για τα σφάλματα χρονομέτρου δέκτη και δορυφόρου). Σύμφωνα με την εξίσωση (8.2) αν θεωρήσουμε ότι δεν υπάρχουν σφάλματα από την Επιλεκτική διαθεσιμότητα, από multipath και παρεμβολές, η διαφορά αυτή οφείλεται στα σφάλματα ιονόσφαιρας-τροπόσφαιρας και στο τροχιακό σφάλμα.
- Αποστέλλει αυτές τις διαφορές (διορθώσεις) στους χρήστες οι οποίοι τις χρησιμοποιούν για να διορθώσουν τις μετρούμενες ψευδοαποστάσεις τους από τα αντίστοιχα σφάλματα.
- Η χρήση αυτών των διορθωμένων ψευδοαποστάσεων από το χρήστη οδηγεί σε αυξημένη ακρίβεια εντοπισμού.

Σύμφωνα με τα παραπάνω η διόρθωση στην ψευδοαπόσταση PRC (Pseudorange Correction) υπολογίζεται στο σταθμό αναφοράς ως εξής:

¹ Έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων του multipath, όμως τα μοντέλα αυτά δε βρίσκουν σημαντική εφαρμογή στην περίπτωση του αυτόνομου εντοπισμού που γίνεται σε πραγματικό χρόνο.

² Στην πράξη το μήκος του παλμού του κώδικα (chip length) μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας τη χρονική διάρκεια ενός bit του κώδικα επί την ταχύτητα διάδοσης του σήματος (c).

$$PRC_{1A}^i = PR_{1A}^i - \rho_A^i - c \cdot \delta t_A + c \cdot \delta t^i = \delta orb_A^i + \delta I_{1A}^i + \delta T_A^i + \delta mu_{1A}^i + \delta int_{1A}^i + e_{1A}^i \quad (8.4)$$

Για να έχουν ακρίβεια οι παραπάνω διορθώσεις πρέπει αυτές να επικαιροποιούνται συνεχώς και ο χρήστης να λαμβάνει συνεχώς τις νέες διορθώσεις. Αυτό μπορεί να παρακαμφτεί εάν είναι γνωστός ο ρυθμός μεταβολής των διορθώσεων RRC (Range Rate Correction). Ο ρυθμός μεταβολής των διορθώσεων υπολογίζεται από το σταθμό αναφοράς και αποστέλλεται στο χρήστη μαζί με τις διορθώσεις¹. Ο χρήστης υπολογίζει τη διόρθωση ως εξής:

$$PRC_{1A}^i(t) = PRC_{1A}^i(t_o) + RRC_{1A}^i(t - t_o) \quad (8.5)$$

Η διορθωμένη λοιπόν ψευδοαπόσταση υπολογίζεται από το χρήστη B ως εξής:

$$PRcorrected_{1B}^i(t) = PR_{1B}^i(t) + PRC_{1A}^i(t) \quad (8.6)$$

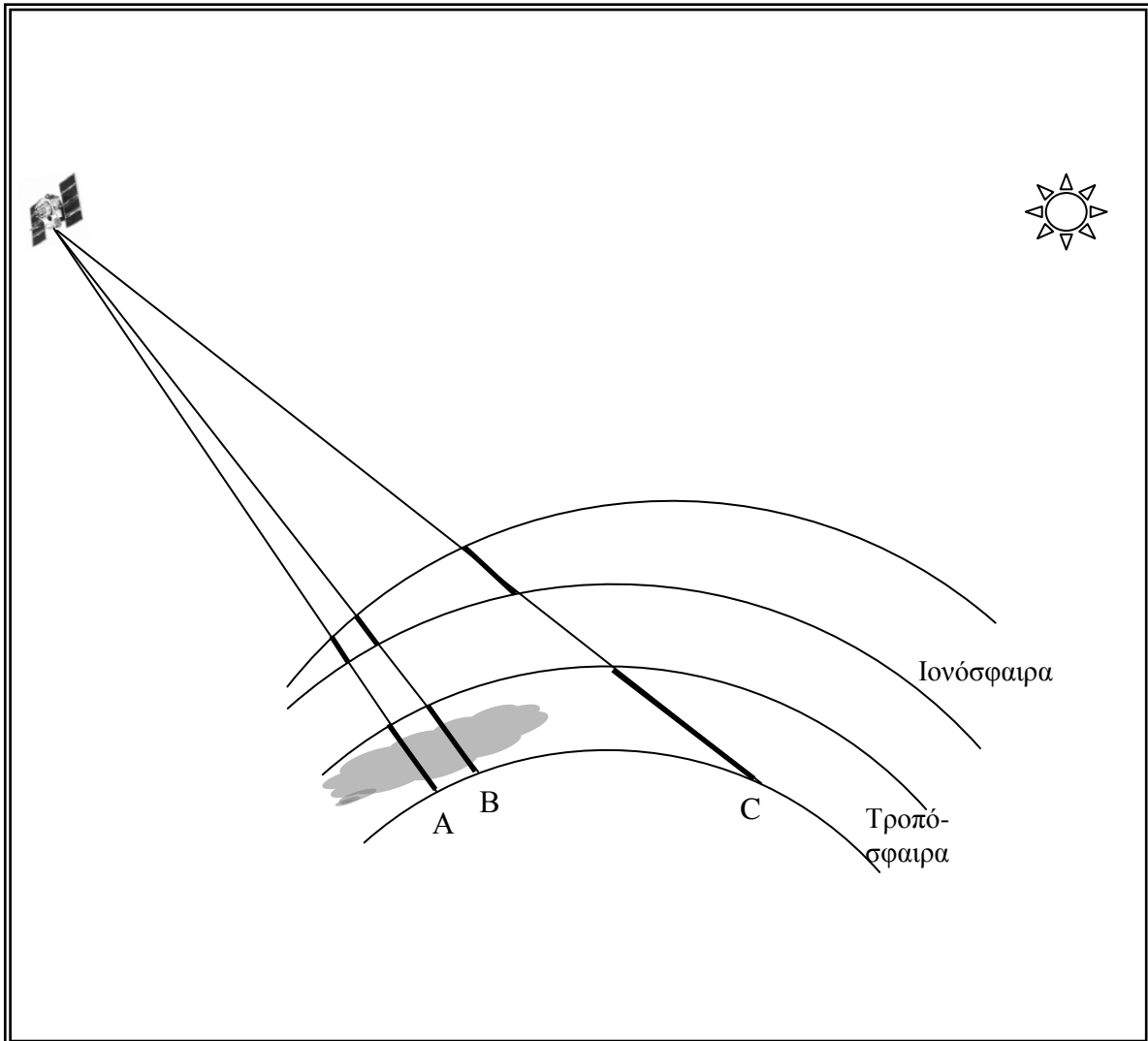
Όπως φαίνεται από την εξίσωση (8.6) ο χρήστης εφαρμόζει για τη θέση B στην οποία βρίσκεται, τις διορθώσεις που υπολογίστηκαν για τη θέση A του σταθμού αναφοράς. Όσο τα σημεία A και B βρίσκονται κοντά (δηλ. ο χρήστης βρίσκεται κοντά στο σταθμό αναφοράς) το ιονοσφαιρικό και το τροποσφαιρικό σφάλμα δεν διαφοροποιούνται ουσιαστικά. Όταν όμως ο χρήστης βρίσκεται σε ένα απομακρυσμένο σημείο C (βλ. Εικόνα 8.2) το δορυφορικό σήμα διέρχεται από διαφορετικές περιοχές της Ιονόσφαιρας και της Τροπόσφαιρας, με αποτέλεσμα οι διορθώσεις PRC_{1A}^i να μην διορθώνουν ακριβώς την ψευδοαπόσταση PR_{1C}^i .

Για την τεχνική DGPS σημειώνονται τα εξής:

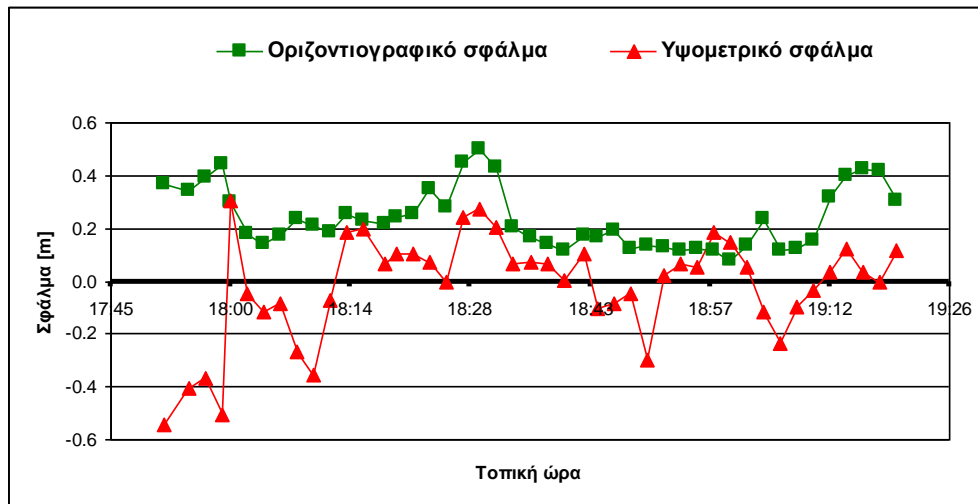
- Είναι μία ειδική τεχνική εντοπισμού που δεν αποτελεί ούτε αυτόνομο εντοπισμό (καθώς δεν χρησιμοποιούνται μόνο οι μετρήσεις ενός δέκτη, αλλά χρειάζονται επιπλέον και οι διορθώσεις PRC) αλλά ούτε και σχετικό (καθώς το διάνυσμα των αγνώστων δεν περιλαμβάνει τη σχετική θέση $\Delta X \Delta Y \Delta Z$ μεταξύ σταθμού αναφοράς και χρήστη).
- Όταν χρησιμοποιούνται σύγχρονοι δέκτες επιτυγχάνεται ακρίβεια καλύτερη από 1 m (sub-meter accuracy) οριζοντιογραφικά. Συχνά μάλιστα η ακρίβεια αυτή κυμαίνεται στα επίπεδα 0.20 – 0.50 m (Gianniou et al. 2009), όπως φαίνεται και στην εικόνα 8.3.
- Στην Ελλάδα διορθώσεις DGPS παρέχονται από το Ελληνικό Σύστημα Εντοπισμού HEPOS. Οι διορθώσεις καλύπτουν ολόκληρη τη χώρα και η αποστολή τους γίνεται μέσω GSM/GPRS (Εικόνα 8.4).
- Η απόσταση μεταξύ σταθμού αναφοράς και χρήστη επηρεάζει την ακρίβεια εντοπισμού. Δεν υφίσταται όμως ο περιορισμός των λίγων δεκάδων km (τυπικά 20-30km) πέρα από τα οποία η τεχνική RTK αντιμετωπίζει δυσκολίες. Στην περίπτωση του DGPS, ο χρήστης μπορεί να απέχει εκατοντάδες Km από το σταθμό αναφοράς και η ακρίβεια εντοπισμού να διατηρείται εντός των επιθυμητών ορίων. Για παράδειγμα, από τους 98 σταθμούς αναφοράς του HEPOS, οι 7 σταθμοί της εικόνας 8.4 επαρκούν για την κάλυψη της χώρας με διορθώσεις Single-Base DGPS.
- Παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτεί επίλυση ασαφειών φάσης. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε κινηματικές συνθήκες όπου η διέλευση από εμπόδια προκαλεί διακοπές στη λήψη της φάσης εισάγοντας την ανάγκη για εκ νέου επίλυση ασαφειών.
- Εξασφαλίζει την ακεραιότητα της επίλυσης καθώς ο σταθμός αναφοράς μπορεί να εντοπίσει χονδροειδή σφάλματα στις εκπεμπόμενες τροχιές ή στον εκπεμπόμενο κώδικα

¹ Με τον τρόπο αυτό οι διορθώσεις μπορούν να εκπέμπονται π.χ. κάθε 10sec.

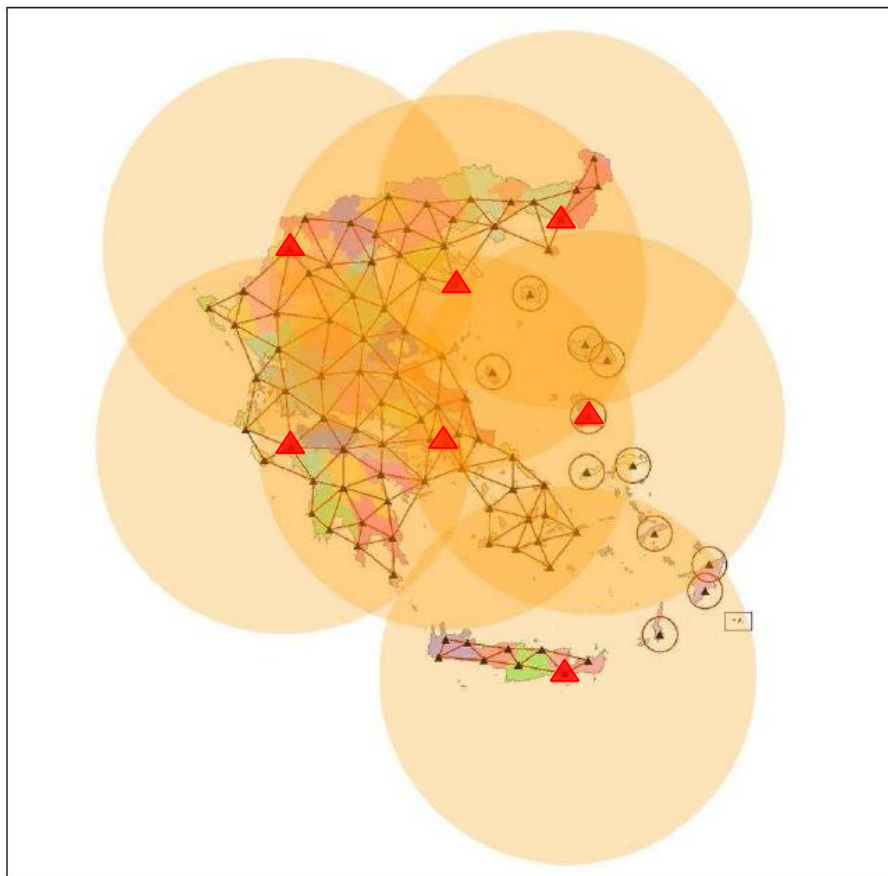
(integrity monitoring). Η περίπτωση τέτοιων σφαλμάτων είναι σπάνια, όχι όμως αδύνατη. Ο χρήστης που χρησιμοποιεί αυτόνομο εντοπισμό συνήθως δεν έχει δυνατότητα εντοπισμού του σφάλματος. Έχουν διαπιστωθεί σχετικές περιπτώσεις λανθασμένου αυτόνομου εντοπισμού. Για το λόγο αυτό ακόμα και όταν η ακρίβεια του αυτόνομου εντοπισμού είναι επαρκής για κάποιες εφαρμογές, απαιτείται η χρήση DGPS για να εξασφαλίζεται η ορθότητα της λύσης.



Εικόνα 8.2: Διαφοροποίηση του τροποσφαιρικού και ιονοσφαιρικού σφάλματος όσο μεγαλώνει η απόσταση από τον σταθμό Α στον οποίο υπολογίζονται οι διορθώσεις DGPS.



Εικόνα 8.3: Οριζοντιογραφικό και υψομετρικό σφάλμα εντοπισμού με DGPS.



Εικόνα 8.4: Οι 7 σταθμοί αναφοράς του HEPOS που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή διορθώσεων Single-Base DGPS (ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε., 2008). Οι κύκλοι συμβολίζουν μία ενδεικτική ακτίνα κάλυψης της τάξης των 250 km γύρω από κάθε σταθμό.

9. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ

Στην περίπτωση του αυτόνομου εντοπισμού το στίγμα προκύπτει αποκλειστικά από τις μετρήσεις του δέκτη. Τα συστήματα εκπομπής διορθωτικών σημάτων αποσκοπούν στην αύξηση της ακρίβειας εντοπισμού που επιτυγχάνεται με χρήση ενός δέκτη GPS. Όταν ένας χρήστης λαμβάνει τα διορθωτικά σήματα των συστημάτων αυτών, μπορεί να περιορίζει την επίδραση πολλών σφαλμάτων βελτιώνοντας την ακρίβεια εντοπισμού. Πρόκειται για τη ίδια λογική στην οποία στηρίζεται η τεχνική DGPS που εξετάστηκε στο κεφάλαιο 8. Διακρίνουμε δύο κατηγορίες συστημάτων εκπομπής διορθωτικών σημάτων: τα επίγεια και τα δορυφορικά, τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια.

9.1 Επίγεια συστήματα εκπομπής διορθωτικών σημάτων

Ως επίγειο σύστημα εκπομπής διορθωτικών σημάτων (GBAS: Ground-Based Augmentation System) χαρακτηρίζεται το σύστημα που εκπέμπει διορθώσεις μέσω επίγειων σταθμών. Πολλά από τα συστήματα εκπομπής διορθωτικών σημάτων, αποστέλλουν διορθώσεις DGPS. Για την εκπομπή των σημάτων χρησιμοποιούνται διάφορα μέσα. Για παράδειγμα, στην Αμερική χρησιμοποιούνται οι ραδιοφάροι (βλ. παρ. 7.2) για εφαρμογές ναυτιλίας και πομποί VHF στην περίπτωση του συστήματος LAAS (Local Area Augmentation System) που χρησιμοποιείται στα αεροδρόμια για την προσέγγιση των αεροσκαφών. Το σύστημα EUROFIX εκπέμπει τα διορθωτικά σήματα μέσω των σταθμών του συστήματος LORAN-C (βλ. παρ. 7.3.2.1) (Offermans et al., 1999). Μία ιδιαίτερη περίπτωση αποτελούν οι *pseudolites*. Πρόκειται για επίγειους πομπούς οι οποίοι στέλνουν σήματα παρόμοια με αυτά των κανονικών δορυφόρων (GPS-like signals) (Pullen et al. 2002), τα οποία χρησιμοποιούνται ως επιπλέον παρατηρήσεις αποστάσεων από γνωστά σημεία. Οι *pseudolites* μπορούν να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με το σύστημα LAAS, χωρίς όμως να είναι απαραίτητο. Μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η χρήση *pseudolites* για την πλοήγηση σε κλειστούς χώρους (indoor navigation) (Stone, 1999)¹.

Η περαιτέρω ανάλυση των παραπάνω επίγειων συστημάτων εκπομπής διορθωτικών σημάτων ξεφεύγει από τους σκοπούς του παρόντος εγχειριδίου καθώς τα συστήματα αυτά είναι περιορισμένου ενδιαφέροντος για τον Ελλαδικό χώρο. Διορθώσεις DGPS με πανελλαδική κάλυψη παρέχει το σύστημα HEPOS (βλ. παρ. 8.4.1.2).

9.2 Δορυφορικά συστήματα εκπομπής διορθωτικών σημάτων

Ως δορυφορικό σύστημα εκπομπής διορθωτικών σημάτων (SBAS: Satellite-Based Augmentation System) χαρακτηρίζεται εκείνο όπου οι διορθώσεις εκπέμπονται από δορυφόρους. Στα συστήματα SBAS η εκπομπή των διορθωτικών σημάτων γίνεται κατά κανόνα από γεωστατικούς δορυφόρους, δηλαδή από δορυφόρους οι οποίοι βρίσκονται συνεχώς πάνω από το ίδιο σημείο της Γης. Τα συστήματα SBAS παρουσιάζουν δύο βασικά πλεονεκτήματα:

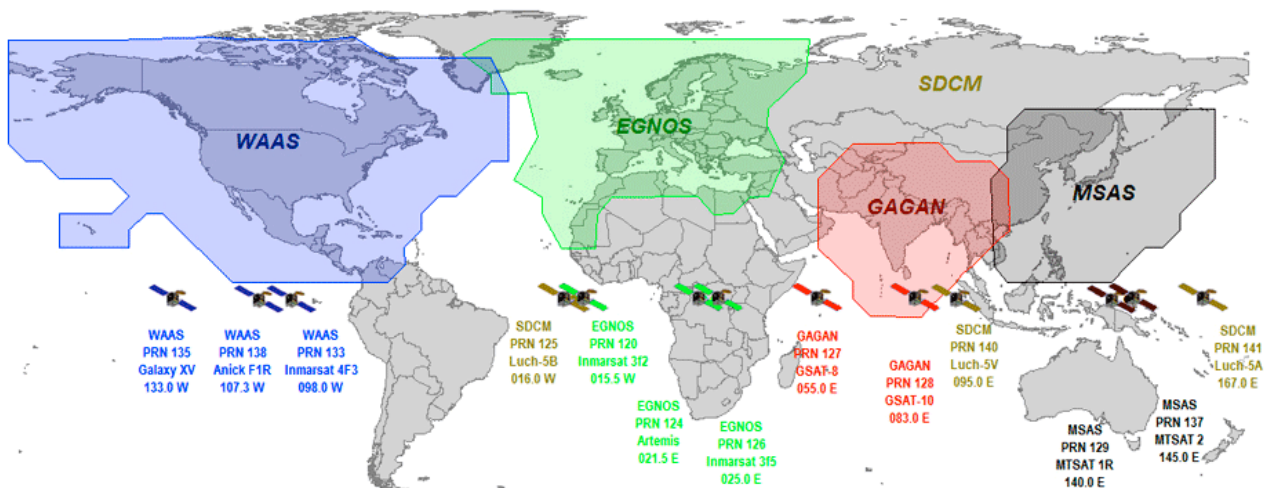
- Δεν απαιτούν πυκνό δίκτυο επίγειων σταθμών εκπομπής διορθώσεων, αφού ένας μόνο γεωστατικός δορυφόρος μπορεί να καλύπτει μία ολόκληρη ήπειρο.
- Ο χρήστης δεν χρειάζεται ειδικό εξοπλισμό. Οι συχνότητες των σημάτων των γεωστατικών δορυφόρων είναι παραπλήσιες με αυτές του GPS. Ως εκ τούτου, η λήψη και των δύο σημάτων (σήματα GPS και διορθωτικά σήματα) μπορεί να γίνεται από την ίδια κεραία.

¹ Οι *pseudolites* χρησιμοποιούνται επίσης σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει κάλυψη GNSS, όπως π.χ. στην περίπτωση διαστημικών αποστολών σε άλλους πλανήτες (LeMaster and Rock, 2001).

9.2.1 Αρχή λειτουργίας

Στην περίπτωση του DGPS, οι διορθώσεις υπολογίζονται σε ένα σταθμό αναφοράς και χρησιμοποιούνται από τους χρήστες που βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή του σταθμού. Όπως είναι γνωστό, καθώς αυξάνει η απόσταση σταθμού-χρήστη οι ατμοσφαιρικές συνθήκες διαφοροποιούνται με αποτέλεσμα να μειώνεται η ακρίβεια του DGPS. Η τυπική ακρίβεια του DGPS (sub-meter) επιτυγχάνεται όταν η απόσταση σταθμού-δέκτη δεν υπερβαίνει τις λίγες εκατοντάδες Km. Γίνεται εύκολα αντιληπτό, ότι οι διορθώσεις που στέλνουν τα συστήματα SBAS με σκοπό την κάλυψη μίας ολόκληρης ηπείρου δεν μπορούν να υπολογίζονται με βάση έναν μόνο σταθμό αναφοράς. Η λογική που ακολουθείται είναι η εξής: Χρησιμοποιείται ένα δίκτυο μόνιμων σταθμών αναφοράς και έτσι υπολογίζονται τα διάφορα σφάλματα, όπως το τροχιακό σφάλμα κάθε δορυφόρου και τα ατμοσφαιρικά (κυρίως ιονοσφαιρικά) σφάλματα σε κάθε σταθμό. Στη συνέχεια παράγονται τα αντίστοιχα μοντέλα, όπως αυτά για τη διόρθωση της τροχιάς κάθε δορυφόρου και τον υπολογισμό του ιονοσφαιρικού σφάλματος. Τα μοντέλα αυτά είναι κοινά για όλους τους χρήστες. Ο δέκτης του κάθε χρήστη, χρησιμοποιώντας τα μοντέλα αυτά, υπολογίζει την τιμή του κάθε σφάλματος για τη συγκεκριμένη περιοχή που βρίσκεται.

Στην εικόνα 9.1 δίνονται οι περιοχές που καλύπτει το ιονοσφαιρικό μοντέλο που εκπέμπεται από τα τέσσερα συστήματα SBAS που βρίσκονται σε λειτουργία: το Αμερικάνικο WAAS, το Ευρωπαϊκό EGNOS, το Ιαπωνικό MSAS και το Ινδικό GAGAN. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται το WAAS το EGNOS, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στο τελευταίο.



Εικόνα 9.1: Οι περιοχές κάλυψης (προσεγγιστικά) των ιονοσφαιρικών μοντέλων των 4 συστημάτων SBAS (πηγή: GENEQ Inc. 2013).

9.2.2 WAAS

Το πρώτο σύστημα SBAS ήταν το Αμερικάνικο σύστημα WAAS (Wide Area Augmentation System). Το σύστημα αναπτύχθηκε από την FAA για την υποβοήθηση της προσγείωσης των αεροσκαφών στα αεροδρόμια (FAA, 2007). Οι σταθμοί αναφοράς του συστήματος δίνονται στην Εικόνα 9.2.



Εικόνα 9.2: Οι σταθμοί αναφοράς που χρησιμοποιούνται (2007) για την παραγωγή των διορθώσεων που εκπέμπονται από το σύστημα WAAS.

9.2.3 EGNOS

Το σύστημα EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) αποτελεί την πρώτη κίνηση της Ευρώπης στον τομέα της σχεδίασης και ανάπτυξης δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης. Από άποψη απόκτησης τεχνογνωσίας αποτέλεσε τον πρόδρομο για την ανάπτυξη του συστήματος GALILEO. Το σύστημα βρισκόταν σε δοκιμαστική λειτουργία από τις αρχές του 2000, ενώ τον Οκτώβριο του 2009 κηρύχθηκε λειτουργικό σε ότι αφορά την υπηρεσία *Open Service* και τον Μάρτιο του 2011 σε ότι αφορά την υπηρεσία *Safety of Life*¹.

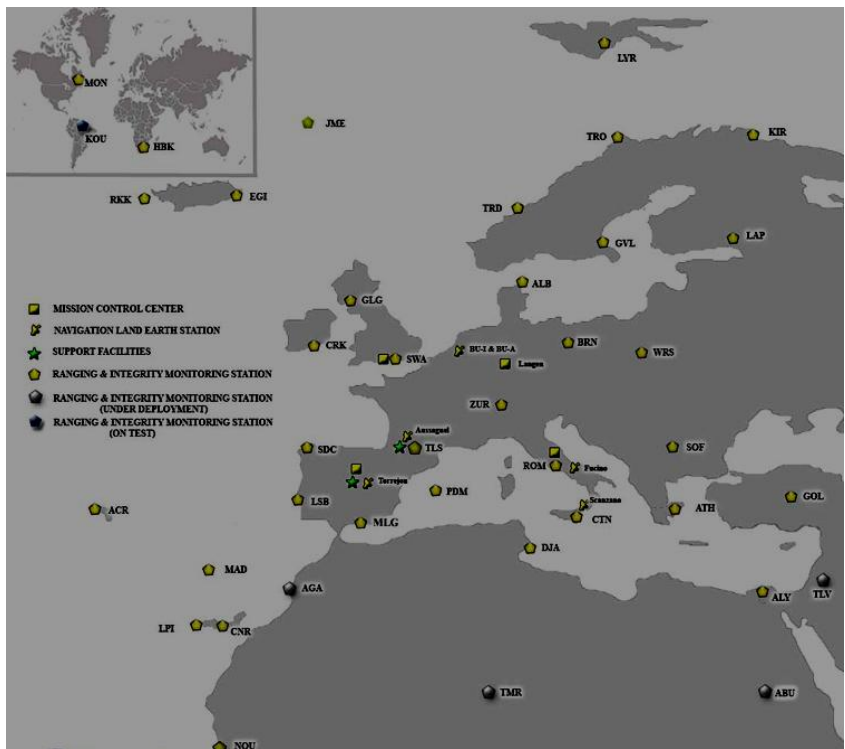
Για το σύστημα EGNOS σημειώνονται τα εξής:

- Μέχρι πρόσφατα δεν υπήρχε στην Ελλάδα σταθμός αναφοράς για τον υπολογισμό των διορθωτικών μοντέλων. Σήμερα λειτουργεί στην Αθήνα σταθμός αναφοράς (εικόνα 9.3).
- Αποτέλεσμα της έλλειψης σταθμών σε περιοχές όπως η Ελλάδα, ήταν να μην επιτυγχάνεται ενιαία ακρίβεια σε όλη την Ευρώπη. Στην Εικόνα 9.4 διακρίνεται η μειωμένη οριζοντιογραφική απόδοση του συστήματος στην περιοχή της Ελλάδας το 2009 καθώς και η σαφής βελτίωση της κατάστασης το 2012 μετά την προσθήκη του σταθμού στην Αθήνα. Σε ότι αφορά την ακρίβεια προσδιορισμού του υψομέτρου, η κατάσταση είναι δυσμενέστερη.
- Το EGNOS, όπως και όλα τα συστήματα SBAS, εκπέμπει τα διορθωτικά σήματα μέσω γεωστατικών δορυφόρων. Οι δορυφόροι αυτοί βρίσκονται κοντά στο επίπεδο του Ισημερινού με αποτέλεσμα η γωνία ανύψωσής τους να μικραίνει όσο αυξάνει το γεωγραφικό πλάτος του τόπου. Στην περιοχή της Ελλάδας οι σχετικές γωνίες κυμαίνονται μεταξύ 30° και 47° και τα σήματά τους μπορεί να παρεμποδίζονται από εμπόδια σε αυτές τις γωνίες αποκοπής.

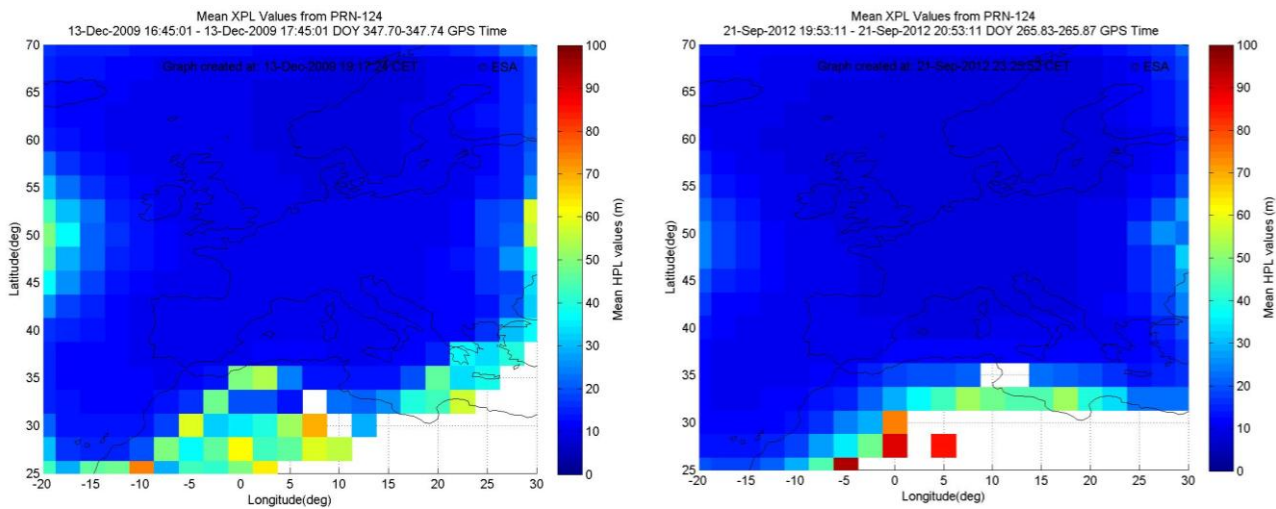
¹ Το σύστημα θα παρέχει 3 επίπεδα υπηρεσιών:

- *Open Service*, στο οποίο η πρόσβαση είναι ελεύθερη
- *EGNOS Data Access Service (EDAS)*, στο οποίο η πρόσβαση είναι ελεγχόμενη (π.χ μέσω internet) σε όσους χρειάζονται αυξημένη απόδοση
- *Safety of Life Service*, για εφαρμογές ζωτικής σημασίας όπως η πολιτική αεροπορία.

- Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί κάποιοι αλγόριθμοι για το σχετικό γεωδαιτικό εντοπισμό (μετρήσεις φάσης ταυτόχρονα από δύο δέκτες), οι οποίοι χρησιμοποιούν τα σήματα του EGNOS για να επιτύχουν αποτελεσματικότερη επίλυση ασαφειών φάσης (Magellan, 2008). Η περίπτωση αυτή δεν πρέπει να συγχέεται με τον κατεξοχήν στόχο του EGNOS, δηλαδή την αύξηση της ακρίβειας όταν χρησιμοποιείται ένας μόνο δέκτης.



Εικόνα 9.3: Οι σταθμοί αναφοράς που χρησιμοποιούνται (2012) για την παραγωγή των διορθώσεων που εκπέμπονται από το σύστημα EGNOS.



Εικόνα 9.4: Απόδοση¹ του EGNOS στον οριζοντιογραφικό εντοπισμό τον Δεκ. του 2009 (αριστερά) και τον Σεπτ. του 2012 (δεξιά), σύμφωνα με τον επίσημο ιστοχώρο της ESA.

¹ Πρόκειται για το δείκτη HPL (Horizontal Protection Level). Ο δείκτης υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την ακρίβεια οριζοντιογραφικού εντοπισμού με ένα συντελεστή.

10. ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ

Τα **αδρανειακά συστήματα πλοήγησης** (INS: Inertial Navigation Systems ή αλλιώς IMU: Inertial Measurement Units) αξιοποιούν επιταχυνσιόμετρα και γυροσκοπία για να προσδιορίσουν τη θέση, την ταχύτητα και τον προσανατολισμό ενός κινούμενου σώματος. Το βασικότερο πλεονέκτημά τους είναι ότι μπορούν να προσδιορίζουν τα παραπάνω στοιχεία χωρίς να απαιτείται κάποιου είδους επικοινωνία με εξωτερικά συστήματα. Για παράδειγμα, τα δορυφορικά συστήματα πλοήγησης GPS προϋποθέτουν την ύπαρξη δορυφόρων, τα επίγεια συστήματα την ύπαρξη σταθμών εκπομπής όπως οι ραδιοφάροι κλπ. Αντίθετα, ένα σώμα εφοδιασμένο με INS μπορεί να προσδιορίζει τη θέση του αυτόνομα, χωρίς να επικοινωνεί με κανένα εξωτερικό σύστημα.

Τα αδρανειακά συστήματα χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά κατά το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο για την πλοήγηση πυραύλων. Από τη δεκαετία του 1950 άρχισαν να χρησιμοποιούνται ευρύτατα για την πλοήγηση αεροσκαφών. Ενδεικτική των εφαρμογών τους είναι η περίπτωση του πυρηνικού υποβρυχίου Nautilus, το οποίο το 1958 πραγματοποίησε για πρώτη φορά υποβρύχια διάβαση του Βόρειου Πόλου κινούμενο κάτω από τους πάγους. Από το 1970 τα αδρανειακά συστήματα πλοήγησης χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για τοπογραφικές εφαρμογές.

Αρχή λειτουργίας

Ένα τυπικό σύγχρονο αδρανειακό σύστημα αποτελείται από τρία επιταχυνσιόμετρα και τρία γυροσκοπία. Μέσω κάθε **επιταχυνσιόμετρου** (accelerometer) προσδιορίζεται η επιτάχυνση κατά μήκος του άξονα του επιταχυνσιόμετρου (στην περίπτωση του σχήματος 10.1, όπου οι άξονες των επιταχυνσιόμετρων έχουν ευθυγραμμιστεί με τους άξονες του αεροσκάφους, οι μετρούμενες επιταχύνσεις είναι οι a_x , a_y και a_z). Μέσω κάθε **γυροσκοπίου** (gyroscope) προσδιορίζεται η γωνία στροφής γύρω από τον άξονα του γυροσκοπίου (στην περίπτωση του σχήματος 10.1 οι γωνίες αυτές είναι οι p (roll), q (pitch) και r (yaw)¹).

Τα αδρανειακά συστήματα πλοήγησης βασίζονται στο 2^ο νόμο του Νεύτωνα (θεμελιώδης νόμος της Μηχανικής) (Kahmen, 2006):

$$\mathbf{f}_I = m \mathbf{a}_I \quad (10.1)$$

όπου \mathbf{f}_I το διάνυσμα της δύναμης, \mathbf{a}_I το διάνυσμα της επιτάχυνσης και m η μάζα σε ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς συντεταγμένων. Μετρώντας μέσω ενός επιταχυνσιόμετρου τη δύναμη που ασκείται σε ένα σώμα γνωστής μάζας (εικόνα 10.2) μπορεί να υπολογιστεί η επιτάχυνση. Εφόσον είναι γνωστή η επιτάχυνση, τότε ολοκληρώνοντας μία φορά την επιτάχυνση ως προς το χρόνο προκύπτει το διάνυσμα της ταχύτητας:

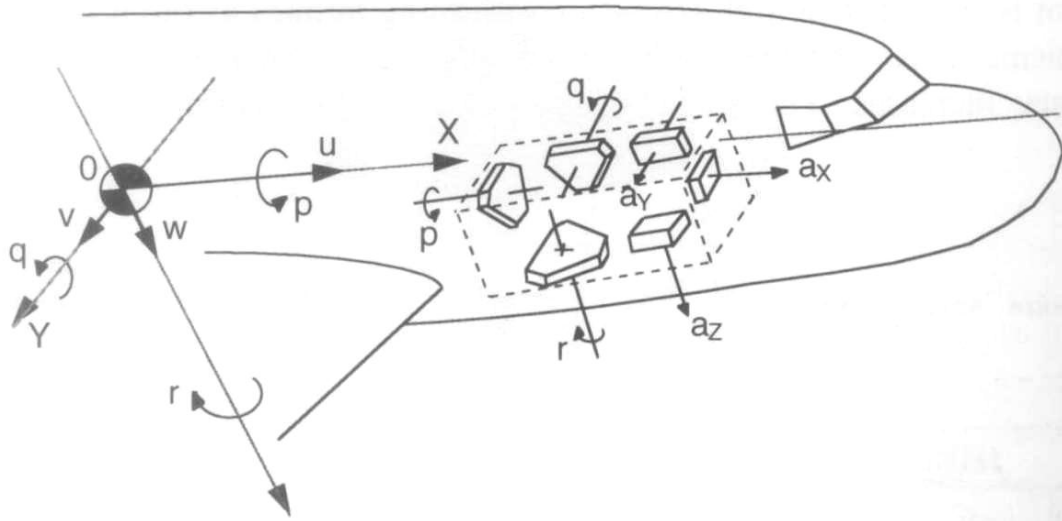
$$\mathbf{v}_I = \mathbf{v}(t_0) + \int_{t_0}^t \mathbf{a}_I dt \quad (10.2)$$

όπου $\mathbf{v}(t_0)$ η αρχική ταχύτητα, δηλαδή η ταχύτητα του σώματος κατά τη χρονική στιγμή t_0 . Με διπλή ολοκλήρωση της επιτάχυνσης προκύπτει το διάνυσμα θέσης:

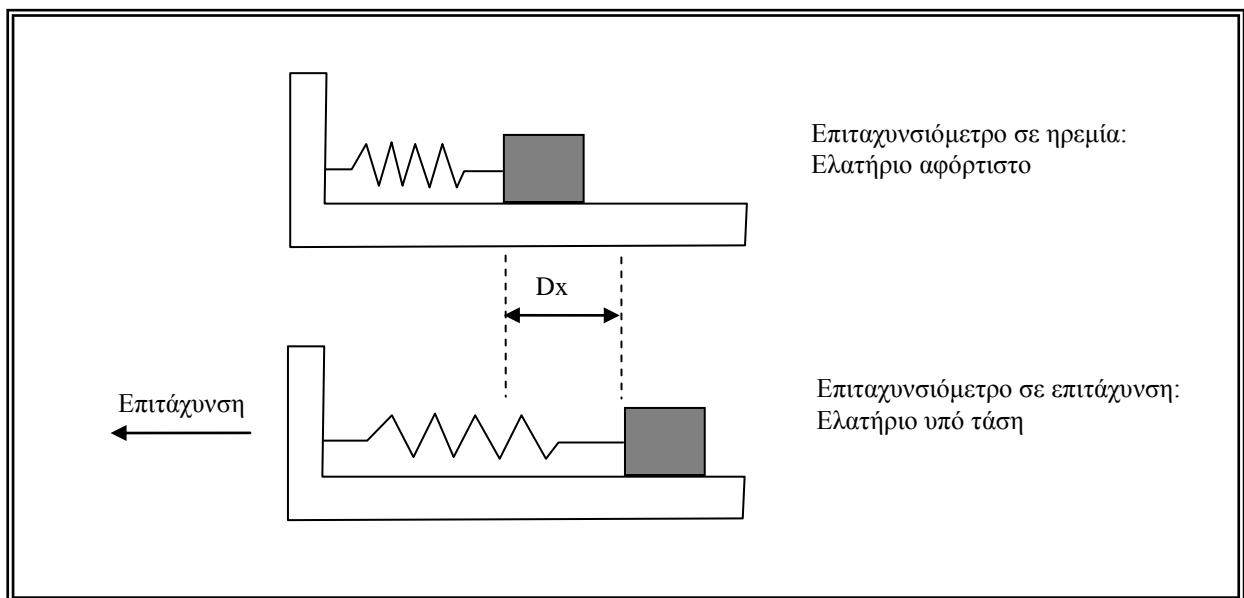
¹ Ανάλογα με τον προσανατολισμό των αξόνων των γυροσκοπίων και των επιταχυνσιόμετρων διακρίνουμε τρεις κατηγορίες INS (Heinze, 1996): α) space stabilized systems, όπου οι άξονες είναι παράλληλοι με του (ψευδο)αδρανειακού συστήματος αναφοράς συντεταγμένων που υλοποιείται στη Γη, β) local-level systems, όπου οι άξονες υλοποιούν ένα τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς συντεταγμένων και γ) strapdown systems, όπου οι άξονες των γυροσκοπίων είναι σταθερά προσανατολισμένοι σε σχέση με το όχημα στο οποίο είναι τοποθετημένα, όπως στο παράδειγμα της εικόνας 10.1.

$$\mathbf{x}_I = \mathbf{x}(t_0) + \int_{t_0}^t \mathbf{v}_I dt \tag{10.3}$$

όπου $\mathbf{x}(t_0)$ η αρχική θέση, δηλαδή η θέση του σώματος κατά τη χρονική στιγμή t_0 .



Εικόνα 10.1: Σχηματική αναπαράσταση ενός αδρανειακού συστήματος πλοήγησης τοποθετημένου σε ένα αεροσκάφος.



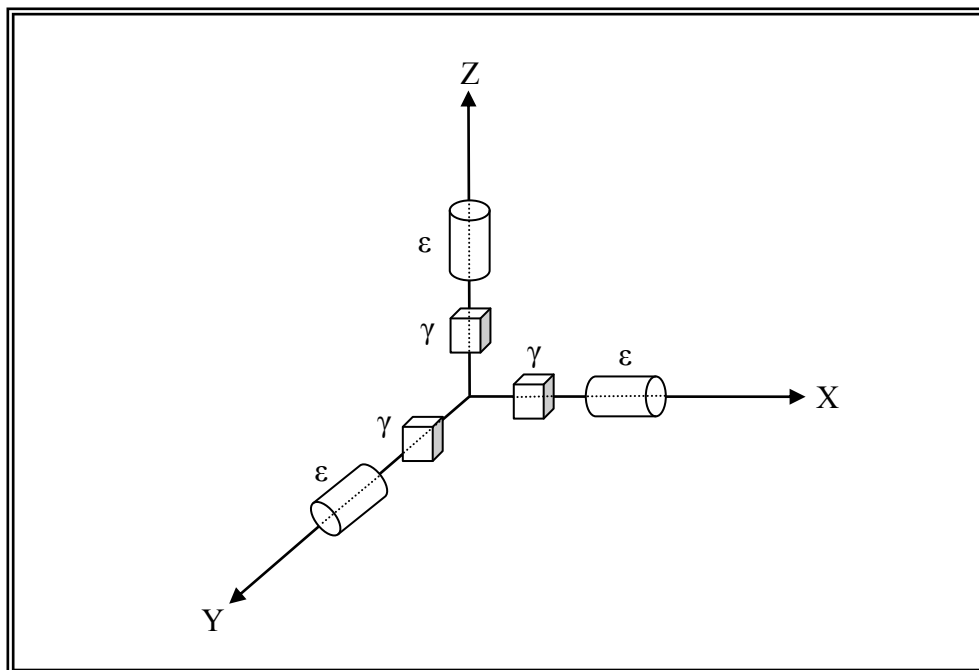
Εικόνα 10.2: Αρχή λειτουργίας του μηχανικού επιταχυνσιόμετρου: από την τάση που ασκείται στο ελατήριο υπολογίζεται η δύναμη που ασκείται στο σώμα και από αυτή (μέσω του θεμελιώδους νόμου της Μηχανικής, σχέση (10.1)) η επιτάχυνση του σώματος.

Σε ένα σώμα που κινείται πάνω στη Γη με επιτάχυνση \mathbf{a} , η δύναμη \mathbf{f}_i προκαλείται από:

- την επιτάχυνση \mathbf{a} της σχετικής κίνησης του σώματος ως προς τη Γη
- την επιτάχυνση \mathbf{s} λόγω της σχετικής κίνησης της Γης ως προς το αδρανειακό σύστημα αναφοράς συντεταγμένων
- την επιτάχυνση \mathbf{k} λόγω του βαρυτικού πεδίου της Γης.

Κατά τη χρήση των αδρανειακών συστημάτων, το ενδιαφέρον έγκειται στον προσδιορισμό της επιτάχυνσης \mathbf{a} και συνεπώς η συνεισφορά των επιταχύνσεων \mathbf{s} και \mathbf{k} πρέπει να αφαιρεθεί από το διάνυσμα \mathbf{a}_i .

Συνήθως η τοποθέτηση ενός αδρανειακού συστήματος σε ένα όχημα γίνεται με τρόπο ώστε οι τρεις άξονες των επιταχυνσιόμετρων να έχουν τη διεύθυνση των τριών αξόνων του οχήματος, όπως π.χ. στην περίπτωση της Εικόνας 10.1. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζονται οι συνιστώσες της επιτάχυνσης κατά τις διευθύνσεις αυτών των αξόνων και μέσω των εξισώσεων (10.2) και (10.3) προκύπτουν οι διανυόμενες αποστάσεις κατά τις διευθύνσεις αυτές. Στην πράξη όμως αυτό που ενδιαφέρει είναι να γνωρίζουμε την κίνηση του οχήματος σε ένα άλλο σύστημα αναφοράς όπως π.χ. ένα τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς συντεταγμένων. Συνεπώς χρειάζεται να γνωρίζουμε τις γωνίες στροφής των αξόνων των επιταχυνσιόμετρων σε σχέση με το σύστημα αναφοράς που μας ενδιαφέρει. Για το σκοπό αυτό τα αδρανειακά συστήματα πλοήγησης εκτός από τα επιταχυνσιόμετρα είναι εφοδιασμένα και με γυροσκόπια. Κατά κανόνα τοποθετείται ένα γυροσκόπιο σε κάθε άξονα επιταχυνσιόμετρου έτσι ώστε οι άξονες επιταχυνσιόμετρου-γυροσκόπιου να συμπίπτουν (βλ. Εικόνα 10.3) ή να είναι παράλληλοι.



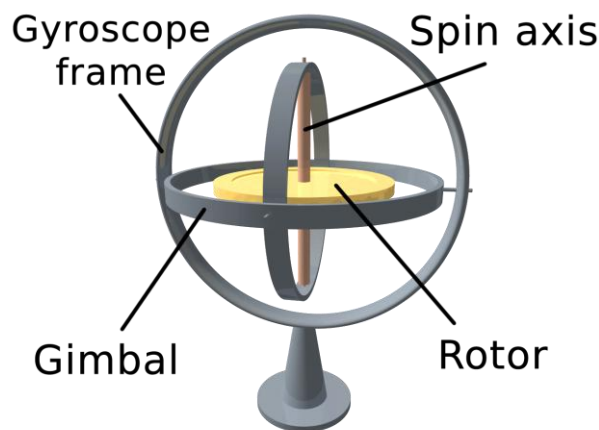
Εικόνα 10.3: Τυπική διάταξη επιταχυνσιόμετρων (ε) και γυροσκοπίων (γ) σε ένα αδρανειακό σύστημα πλοήγησης.

Γυροσκοπικά συστήματα

Τα γυροσκοπικά συστήματα είναι διατάξεις που επιτρέπουν τη μέτρηση του ρυθμού περιστροφής γύρω από έναν άξονα και κατ' επέκταση και της σχετικής γωνίας στροφής. Τα γυροσκοπικά συστήματα στηρίζονται στα γυροσκόπια. Διακρίνονται δύο κατηγορίες γυροσκοπίων:

- Μηχανικά
- Οπτικά

Στην πιο απλή του μορφή ένα μηχανικό γυροσκόπιο αποτελείται από ένα στερεό σώμα το οποίο εμφανίζει συμμετρία γύρω από άξονα. Αν αυτό το σώμα βρίσκεται σε περιστροφική κίνηση γύρω από τον άξονα συμμετρίας του, τότε έχει την τάση να διατηρεί σταθερό τον προσανατολισμό αυτού του άξονα¹. Στην Εικόνα 10.4 φαίνεται ένα γυροσκόπιο όπου το περιστρεφόμενο σώμα (rotor) έχει αναρτηθεί διαδοχικά σε τρία πλαίσια έτσι ώστε να μπορεί να διατηρεί τον προσανατολισμό του άξονά του (spin axis) ανεξάρτητα από την οποιαδήποτε κίνηση που μπορεί να κάνει το σύστημα ανάρτησης. Όταν ένα τέτοιο γυροσκόπιο τοποθετηθεί σταθερά σε ένα όχημα και τεθεί σε περιστροφή, οποιαδήποτε μεταβολή στον προσανατολισμό του οχήματος μπορεί διαπιστωθεί άμεσα από τη μεταβολή μεταξύ των γωνιών των τριών αξόνων των πλαισίων ανάρτησης.

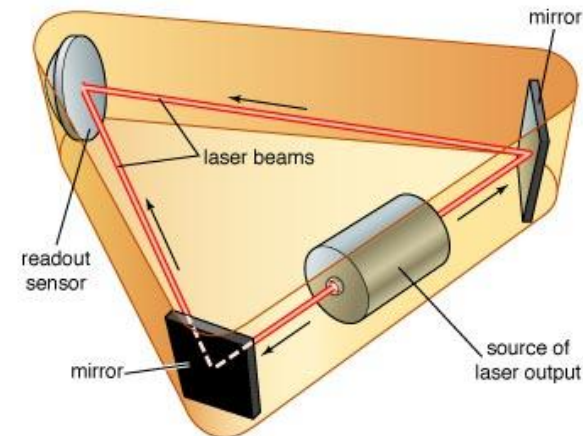


Εικόνα 10.4: Γυροσκόπιο με δυνατότητα περιστροφής γύρω από τρεις άξονες.

Σήμερα τα μηχανικά γυροσκόπια τείνουν να αντικατασταθούν από τα οπτικά. Τα οπτικά γυροσκόπια στηρίζονται στο φαινόμενο του Sagnac. Η βασική αρχή μέτρησης μπορεί να γίνει αντιληπτή με τη βοήθεια της εικόνας 10.5, στην οποία απεικονίζεται ένα γυροσκόπιο δακτυλίου laser². Αν ηλεκτρομαγνητικά κύματα, όπως οι ακτίνες laser, εκπέμπονται προς δύο αντίθετες κατευθύνσεις εντός του δακτυλίου, τότε θα φτάσουν στον αισθητήρα (readout sensor) την ίδια χρονική στιγμή, εφόσον το σύστημα βρίσκεται σε ακινησία. Εάν όμως το σύστημα περιστρέφεται γύρω από τον άξονα συμμετρίας του, τότε οι δύο ακτίνες θα φθάσουν στον αισθητήρα με διαφορά φάσης, η οποία είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής. Μετρώντας τη διαφορά φάσης κατά την άφιξη των δύο ακτίνων, υπολογίζεται ο ρυθμός περιστροφής και κατά συνέπεια και η γωνία στροφής γύρω από τον άξονα του δακτυλίου.

¹ Εάν ασκηθεί μία εξωτερική δύναμη κάθετα στον άξονα περιστροφής, τότε το περιστρεφόμενο γυροσκόπιο αντιδρά σε αυτή την εξωτερική δύναμη με μία κίνηση του άξονά του κάθετη στην κατεύθυνση της εξωτερικής δύναμης και κάθετη στον άξονα περιστροφής. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως μετάπτωση (precession).

² Τα οπτικά γυροσκόπια είναι δύο τύπων: δακτυλίου laser (RLG: ring-laser gyro) και οπτικών ινών (FOG: fiber optic gyro)



© 2004 Encyclopædia Britannica, Inc.

Εικόνα 10.5: Αρχή λειτουργίας γυροσκοπίου δακτυλίου laser.

Σφάλματα των γυροσκοπικών και αδρανειακών συστημάτων

Επειδή τα αδρανειακά συστήματα στηρίζονται σε διαδικασία ολοκλήρωσης (σχέσεις (10.2) και (10.3)) τα σφάλματα στη μέτρηση των επιταχύνσεων και των γωνιών δρουν σωρευτικά. Κατά συνέπεια με την πάροδο του χρόνου το σφάλμα της θέσης αυξάνεται σημαντικά. Ουσιαστική συνεισφορά στο σφάλμα θέσης έχουν τα σφάλματα των γυροσκοπικών συστημάτων. Η απόδοση ενός γυροσκοπικού συστήματος προσδιορίζεται, μεταξύ άλλων, από το ρυθμό ολίσθησης (drift rate) που εμφανίζει, δηλαδή το ρυθμό μεταβολής του σφάλματος στον προσδιορισμό της γωνίας. Ο ρυθμός ολίσθησης δίνεται συνήθως σε deg/hour¹.

Από τα τέλη της δεκαετίας του 1980 άρχισε να μελετάται συστηματικά η συνδυασμένη χρήση GPS/INS. Στα υβριδικά αυτά συστήματα, μέσω του INS προσδιορίζεται ο προσανατολισμός της πλατφόρμας και μέσω του GPS το στίγμα. Επίσης τα εξαγόμενα από το GPS και το INS χρησιμοποιούνται συνδυαστικά² και με τον τρόπο αυτό ανάμεσα σε δύο διαδοχικά στίγματα του GPS η θέση της πλατφόρμας μπορεί να προσδιορίζεται από το INS³. Τέλος, σε περιπτώσεις απώλειας λήψης του GPS για μικρά χρονικά διαστήματα, το στίγμα μπορεί να προσδιορίζεται αποκλειστικά από το INS χωρίς απώλεια ακρίβειας. Αυτή η τελευταία δυνατότητα καθιστά τα συστήματα GPS/INS πολύτιμα σε επίγειες εφαρμογές (π.χ. mobile mapping) όπου η λήψη GPS μπορεί να διακόπτεται λόγω εμποδίων όπως τούνελ, ψηλά κτίρια, δέντρα κλπ.

Εφαρμογές αδρανειακών συστημάτων

Τα αδρανειακά συστήματα βρίσκουν σήμερα πλήθος εφαρμογών σε ποικίλους τομείς όπως:

- η πλοήγηση πολιτικών και στρατιωτικών αεροσκαφών
- η πλοήγηση υποβρυχίων, πυραύλων και διαστημοπλοίων
- η σταθεροποίηση του προσανατολισμού δορυφόρων
- οι υδρογραφικές αποτυπώσεις
- η συλλογή δεδομένων από αέρος (αεροφωτογράφιση με αναλογικές και ψηφιακές μηχανές, LIDAR και SAR).

¹ Για εφαρμογές συλλογής δεδομένων από αέρος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν INS με ρυθμό ολίσθησης 0.5, 0.1 ή 0.01 deg/hour. Τα INS που χρησιμοποιούνται για πλοήγηση αεροσκαφών έχουν συνήθως ρυθμό ολίσθησης της τάξης των 0.01 deg/hour (Kayton and Fried, 1997).

² Συνήθως η συνδυασμένη χρήση των συστημάτων αυτών γίνεται με χρήση του φίλτρου Kalman.

³ Τα INS έχουν πολύ υψηλό ρυθμό εξόδου αποτελεσμάτων, π.χ. 100Hz.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική βιβλιογραφία

- Αλεξίου Γ. (2004): «Ασύρματα Ηλεκτρονικά Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα», Πανεπιστημιακές Σημειώσεις για το ΜΔΕ «Επιστήμη και Τεχνολογία των Υπολογιστών», Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής Πανεπιστημίου Πάτρας.
- Γιαννίου, Μ. (2000): «Τερματισμός της Επιλεκτικής Διαθεσιμότητας στο GPS: Τι αλλάζει στις εφαρμογές του συστήματος», Δελτίο Πανελληνίου Συλλόγου Διπλωματούχων Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Τεύχος 147, σελ. 46-55.
- Δερμάνης, Α. (1999): «Διαστημική Γεωδαισία και Γεωδυναμική - GPS», Εκδόσεις Ζήτη, ISBN 960-431-504-8.
- Δημαράκης Α. (1995): «Αρμενιστής Σκαφών Αναψυχής», ISBN 960-90117-0-5
- Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων (2008): «Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία και Κινητή Τηλεφωνία – Τα επιστημονικά δεδομένα», <http://www.eett.gr>
- Κιουσόπουλος Ι. (1993): «Σημεία Υδρογραφίας και Ωκεανογραφίας», ΤΕΙ Αθήνας.
- ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. (2008): «Οδηγίες χρήσης των υπηρεσιών πραγματικού χρόνου του HEPOS», Έκδοση 1.1
- Μαυρίδης, Λ. (1985): «Αστρονομικοί Προσδιορισμοί Θέσεως», Εκδόσεις Ζήτη
- Παλληκάρης Α. (1988): «Υδρογραφία» Έκδοση Δεύτερη, Υδρογραφική Υπηρεσία Πολεμικού Ναυτικού.
- Παλληκάρης Α. και Γ. Κατσούλης (2008): «Ιστορική Εξέλιξη και Προοπτικές της Ηλεκτρονικής Ναυτιλίας» Ναυσίβιος Χώρα, Περιοδική Ναυτικών Επιστημών, Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Τεύχος 2/2008.
- Ρωσσικόπουλος Δ. (2009): «Το Γεωγραφικό Μήκος Ιστορίες με αστέρια, μεσημβρινούς και χάρτες», Εκδόσεις Ζήτη, ISBN 978-960-456-175-9.
- Τεγόπουλος-Φυτράκης (2003): «Ελληνικό Λεξικό», Εκδόσεις Αρμονία, ISBN 960-7598-00-8.
- Τσιούμης, Α. (1990): «Αρχαιολογικές Διασκοπήσεις», ΤΑΤΜ-ΑΠΘ.
- Φωτίου Α και Ε. Λιβιεράτος (2000): «Γεωμετρική Γεωδαισία και Δίκτυα», Εκδόσεις Ζήτη, ISBN 960-431-612-5.
- Φωτίου Α και Χ. Πικριδάς (2006): «GPS και Γεωδαιτικές Εφαρμογές», Εκδόσεις Ζήτη, ISBN 960-456-004-2.

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

- Breuer B., J. Campbell and A. Müller (1993): «GPS-Mess- und Auswerteverfahren unter Operationellen GPS-Bedingungen», SPN Journal for Satellite-Based Positioning, Navigation and Communication, 3/93, Wichmann Verlag, Karlsruhe.
- Bowditch N. (2002): «The American Practical Navigator», National Imagery and Mapping Agency, Maryland USA.

- Department of Defense, Department of Homeland Security, and Department of Transportation: «2008 Federal Radionavigation Plan» U.S. National Technical Information Service, Springfield, Virginia DOT-VNTSC-RITA-08-02/DoD-4650.5
- Enge, P., E. Swanson, R. Mullin, K. Ganther, A. Bommarito, and R. Kelly (1995): «Terrestrial Radio Navigation Technologies», *Navigation, Journal of the Institute of Navigation*, Vol. 41 No. 1, pp. 61-108.
- Federal Aviation Administration (2007): «Maximizing Airport Operations Using the Wide Area Augmentation System (WAAS)», <http://gps.faa.gov>.
- Gianniou, M., K. Katsampalos, C. Kotsakis. (2009): «Real-time Positioning in ETRS89 using the Hellenic Positioning System», *EUREF 2009 Symposium*, May 27-30 2009, Florence Italy.
- Heinze, O. (1996): «Aufbau eines operablen inertialen Vermessungssystem zur Online-Verarbeitung on der Geodäsie auf Basis eines kommerziellen Strapdown Inertialsystems», *Geutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Dissertationen, Heft Nr. 459*.
- Hofmann-Wellenhof, B., K. Legat and M. Wieser (2003): «Navigation – Principles of Positioning and Guidance», Springer Wien New York.
- Kahmen, H. (2006): «Angewandte Geodäsie: Vermessungskunde», Walter de Gruyter.
- Kayton, M. and Fried W. (1997): «Avionics Navigation Systems», John Willey and Sons
- Leick, A. (1995): «GPS Satellite Surveying», John Willey and Sons.
- Laurila, S. (1976): «Electronic Surveying and Navigation», John Willey and Sons.
- LeMaster E. and S. Rock (2001): «A Local-Area GPS Pseudolite-Based Mars Navigation System», *IEEE 10th International Conference on Advanced Robotics*, Budapest, Hungary, August 2001.
- Luo, N. and G. Lachapelle (1999): «Centimeter-level Relative Positioning of Distributed Moving Platforms Using GPS Carrier Phase Observables», *Proceedings of ION Annual Meeting, the Institute of Navigation, Alexandria, VA*: 307-313
- Magellan Navigation Inc. (2008): «Magellan's BLADE™ Technology, What It Means to GNSS Users – White Paper» www.pro.magellanGPS.com.
- Offermans G., A. Helwig and D. Willigen (1999): «Eurofix System and its Development», *The Journal of Navigation*, 52(2), pp. 163-175.
- Parkinson B., T. Stansell, R. Beard, K. Gromov 1995. «A History of Satellite Navigation. *NAVIGATION: Journal of Institute of Navigation*», Vol. 42, No 1 Special Issue, pp. 109-164.
- Pullen, S., T. Walter and P. Enge (2002): «System Overview, Recent Developments, and Future Outlook for WAAS and LAAS », *GPS Symposium*, November 11 - 13, 2002, Tokyo University of Mercantile Marine, Tokyo, Japan.
- Radio Technical Commission for Maritime Services – Special Commission No. 104, «RTCM Recommended Standards for Differential Navstar GPS Services Version 2.1», Washington D.C. 200005 USA.
- Robinson, A., J. Morrison, P. Muehrcke, A. Kimerling, S. Guptill (2002): «Στοιχεία Χαρτογραφίας», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ.
- Stone, J., E. LeMaster, D. Powell, S. Rock (1999): «GPS Pseudolite Transceivers and their Applications», *Proceedings of the ION National Technical Meeting San Diego, California, January 25-27 1999*.
- Tetley, L. and D. Calcutt, (1991): «Electronic aids to navigation – position fixing», Arnold London.

Visser, P. N. A. M., (2008): «Exploring the possibilities for star-tracker assisted calibration of the six individual GOCE accelerometers», Journal of Geodesy, Vol. 82, No 10, pp. 591-600.

Tucker, A. (1998): «Computerized Ionospheric Tomography», Johns Hopkins APL Technical Digest, Vol. 19, No 1, pp. 66-71.