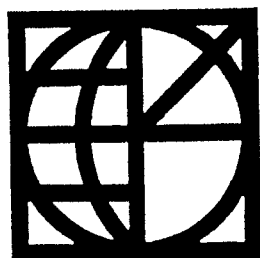


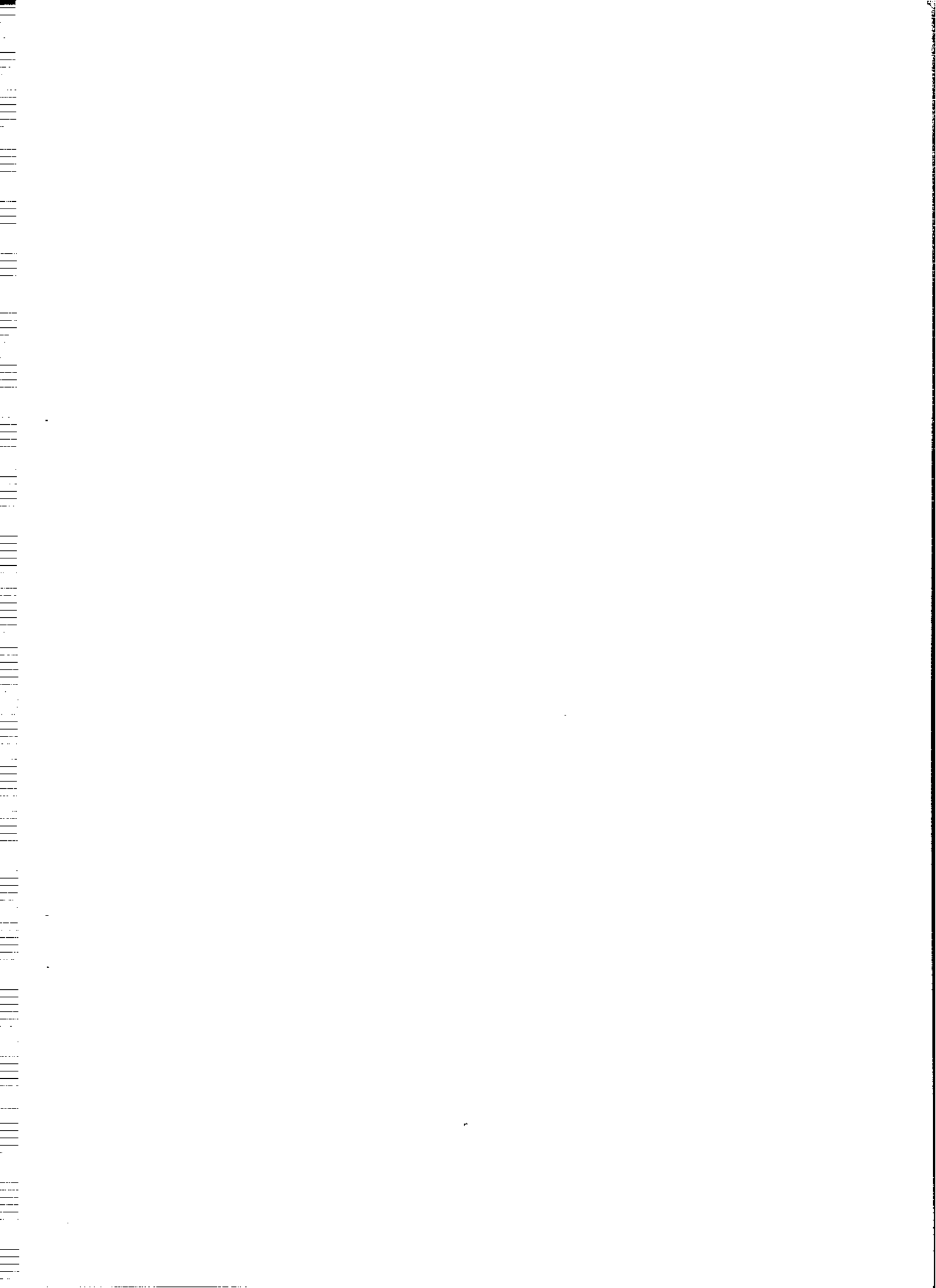
ΚΕΝΤΡΟ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ ΔΙΟΝΥΣΟΥ DIONYSOS SATELLITE OBSERVATORY
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΕΜΠ DEPARTMENT OF SURVEYING NTUA

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

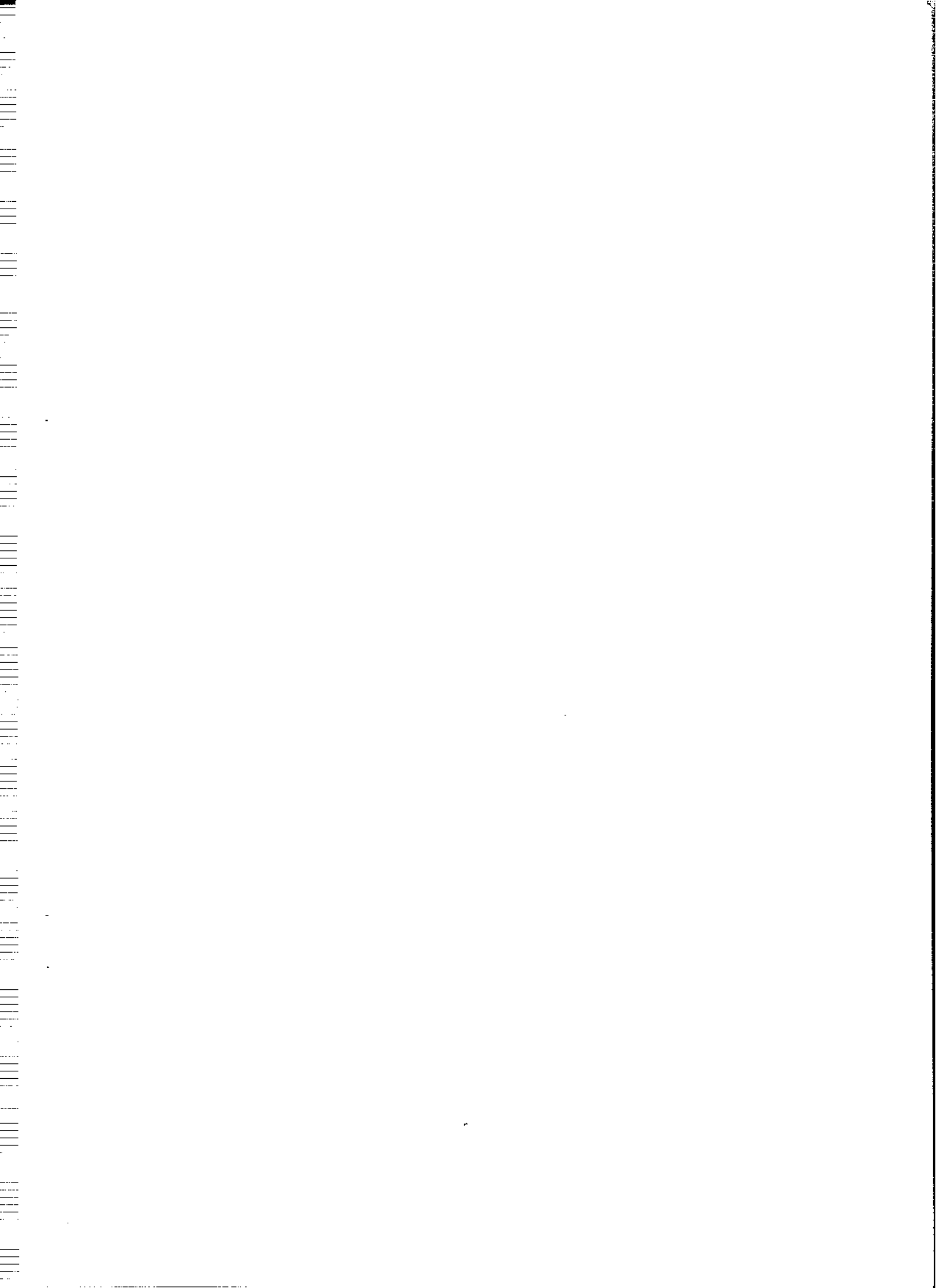
Δ. ΠΑΡΑΔΕΙΣΗΣ



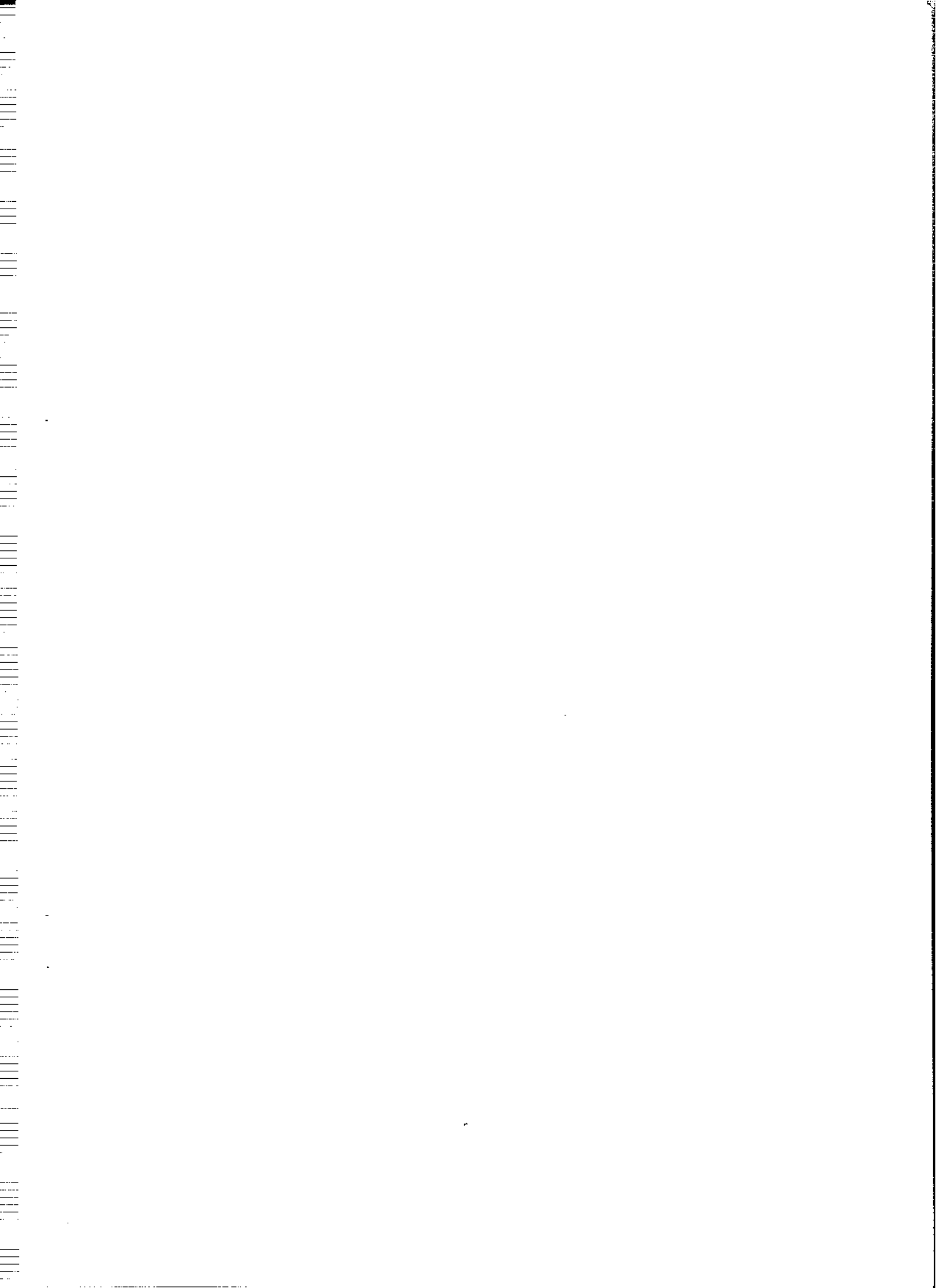
ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2000



ΕΙΣΑΓΩΓΗ



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ



ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑ

Δορυφορική γεωδαισία ονομάζεται η επιστημονική περιοχή της Γεωδαισίας, που καλύπτει τους θεωρητικούς και πρακτικούς στόχους της, χρησιμοποιώντας ένα νέο εργαλείο, τους τεχνητούς δορυφόρους.

Η ιδέα της χρήσης παρατηρήσεων προς ένα αντικείμενο μακριά από τη γη είναι αρκετά παλιά, αλλά ουσιαστικά η εποχή της δορυφορικής γεωδαισίας άρχισε με την εκτόξευση του πρώτου τεχνητού δορυφόρου Sputnik I τον Οκτώβριο 1957 και συνεχίστηκε με την εκτόξευση και καθαρά γεωδαιτικών δορυφόρων.

Ένα άλλο μεγάλο βήμα ήταν η ανάπτυξη και χρήση του Παγκόσμιου Συστήματος Εντοπισμού (Global Positioning System - GPS) από τα μέσα της δεκαετίας του 1980, όχι μόνο για πλοήγηση, αλλά και για τοπογραφικές και γεωδαιτικές εφαρμογές.

Η δεκαετία του 1960 χαρακτηρίστηκε από χρήση των αρχών της αστρομετρίας, που βασίζονται σε φωτογραφικές μεθόδους (φωτογραφίες με ειδικές φωτομηχανές των δορυφόρων με φόντο τα άστρα) και ακρίβεια ± 10 m.

Η δεκαετία του 1970 χαρακτηρίστηκε από μετρήσεις με συστήματα τηλεμετρίας laser (χρονομέτρηση του χρονικού διαστήματος που χρειάζεται ένας παλμός laser για να ταξιδέψει από το σύστημα laser στο δορυφόρο και να επιστρέψει) ακριβείας ± 15 cm και συστήματα υψομετρίας με δορυφόρους για τον προσδιορισμό της θαλάσσιας τοπογραφίας και μέσης στάθμης της θάλασσας ακριβείας ± 25 cm.

Τέλος η δεκαετία του 1980 και οι αρχές της δεκαετίας του 1990 χαρακτηρίζονται από την ανάπτυξη των κινητών συστημάτων τηλεμετρίας laser ακριβείας ± 5 cm και του Παγκόσμιου Συστήματος Εντοπισμού ακριβείας μερικών cm σε αποστάσεις μεταξύ των σημείων εκατοντάδων χιλιομέτρων.

Η δορυφορική γεωδαισία για την επίλυση όλων των προβλημάτων στις επιστημονικές περιοχές που καλύπτει, χρησιμοποιεί ως στόχο ένα πολύ γρήγορα κινούμενο τεχνητό δορυφόρο, που βρίσκεται σε τροχιά γύρω από τη γη.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1, αν είναι γνωστό το διάνυσμα \vec{r} (δηλαδή η θέση του δορυφόρου πάνω στην τροχιά του) και μετρηθεί το διάνυσμα $\vec{\rho}$ (γεωδαιτικές μετρήσεις κυρίως αποστάσεων προς τον δορυφόρο), είναι δυνατόν να προσδιορισθεί το διάνυσμα \vec{R} , που είναι η θέση του παρατηρητή ως προς ένα γήινο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς.

Δύο είναι οι κύριες μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται, η γεωμετρική, που αγνοεί τελείως την τροχιά του δορυφόρου και τον χρησιμοποιεί απλώς σαν (τριγωνομετρικό) στόχο και η δυναμική, που θεωρεί ότι ο δορυφόρος κινείται πάνω στην τροχιά του υπακούοντας σε φυσικούς νόμους.

Όπως είναι φανερό, σε καμμία περίπτωση δεν χρησιμοποιείται η έννοια της φυσικής (πραγματικής) κατακορύφου και επειδή η κίνηση του δορυφόρου σε μεγάλα ύψη επιτρέπει τον σχηματισμό καλής ποιότητας τριδιάστατων δικτύων, το αποτέλεσμα είναι ο προσδιορισμός θέσεων σημείων της φυσικής γήινης επιφάνειας (αλλά και θέσεων στον αέρα και τη θάλασσα) σε τρεις διαστάσεις (μήκος, πλάτος και υψόμετρο) σε ένα ενιαίο παγκόσμιο σύστημα αναφοράς.

Βέβαια για να είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί σαν στόχος ένας δορυφόρος, που κινείται πολύ γρήγορα (με ταχύτητα από 3 km/sec στο ύψος των 20000 km μέχρι 8 km/sec στο ύψος των 1000 km), πρέπει και οι μετρήσεις να γίνονται με μεγάλη ακρίβεια, αλλά και ο χρόνος να μπορεί να μετρηθεί με μεγάλη ακρίβεια.

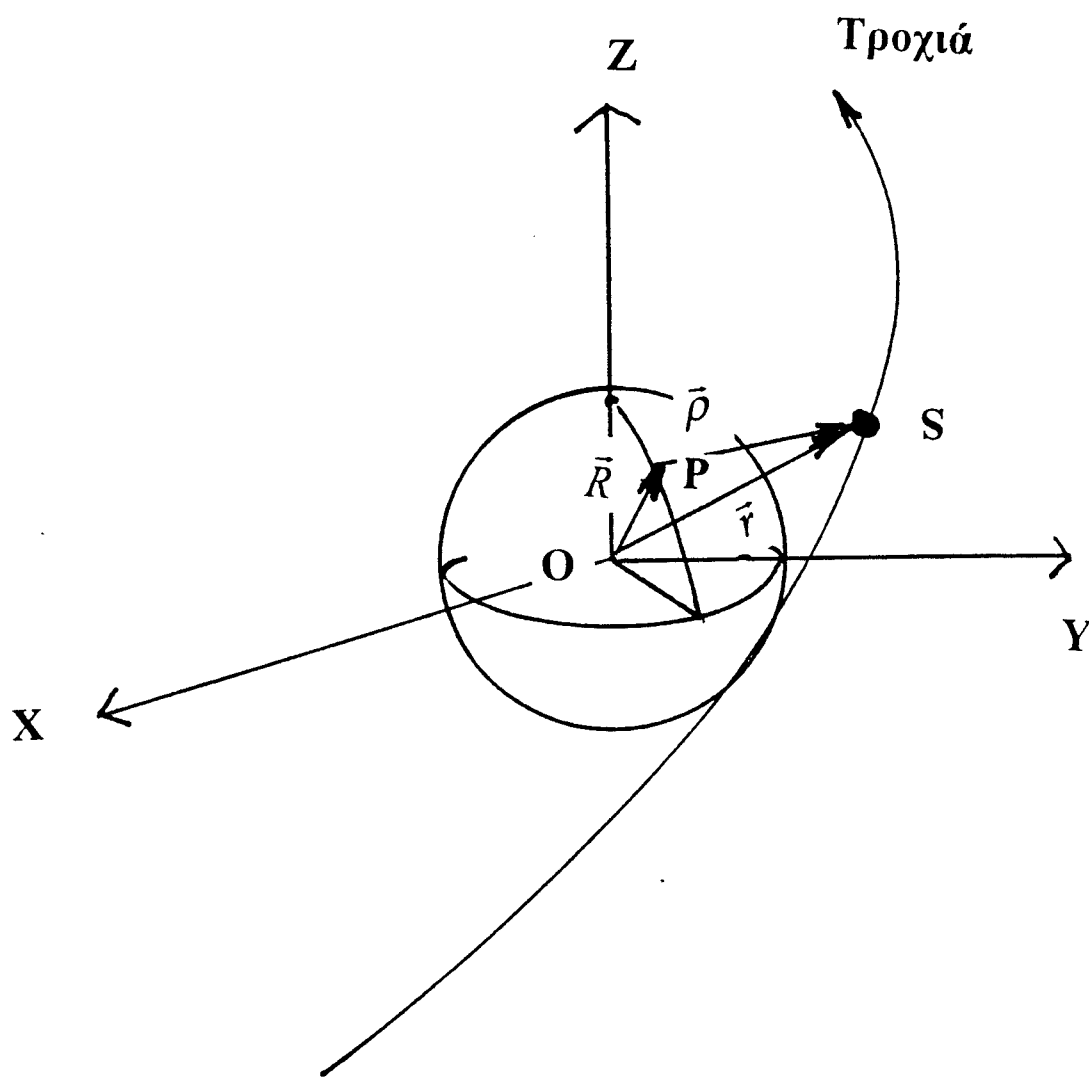
Η αλματώδης ανάπτυξη της διαστημικής τεχνολογίας, των ηλεκτρονικών και των ηλεκτρονικών υπολογιστών παρέχει σήμερα σε κάθε τοπογράφο μηχανικό εκτός από τα παγκόσμια γεωδαιτικά συστήματα αναφοράς, το σχήμα και το μέγεθος της γης και το πεδίο βαρύτητάς της, την δυνατότητα να προσδιορίζει την θέση σημείων, με πολύ μεγάλη ακρίβεια, σε οποιοδήποτε μέρος της γης, με κάθε καιρό, συνεχώς (24 ώρες το 24ωρο).

Ας σημειωθεί εδώ ότι αυτές οι μεγάλες εξελίξεις και δυνατότητες τους υποχρεώνουν ταυτόχρονα να λάβουν υπόψη τους και να μελετήσουν φαινόμενα, που πριν λίγα χρόνια η επίδρασή τους θα θεωρείτο αμελητέα.

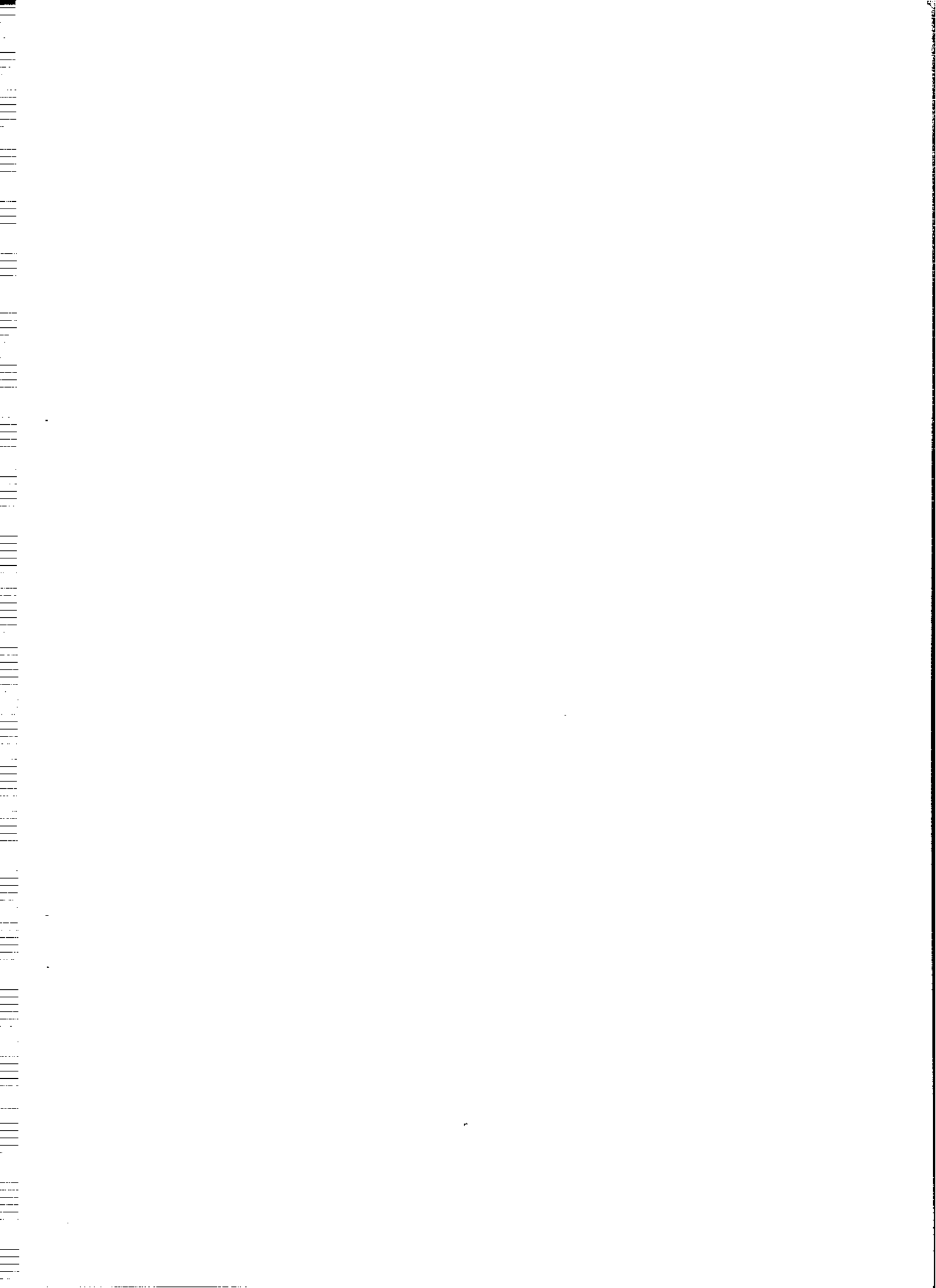
Σήμερα πολλοί από τους γεωδαίτες έχουν στραφεί και προς την γεωδυναμική (την μελέτη της συμπεριφοράς των τεκτονικών πλακών του στερεού φλοιού της γης σε παγκόσμια, αλλά και τοπική κλίμακα), την γεωφυσική, την ωκεανογραφία, την υδρογραφία και την ναυσιπλοία.

Επιπλέον ειδικές εργασίες, όπως η παρακολούθηση των παραμορφώσεων μεγάλων τεχνικών έργων, αλλά και καθημερινές τοπογραφικές εργασίες γίνονται σήμερα με δορυφορικές μεθόδους με μεγάλη ακρίβεια, εύκολα και φθηνά.

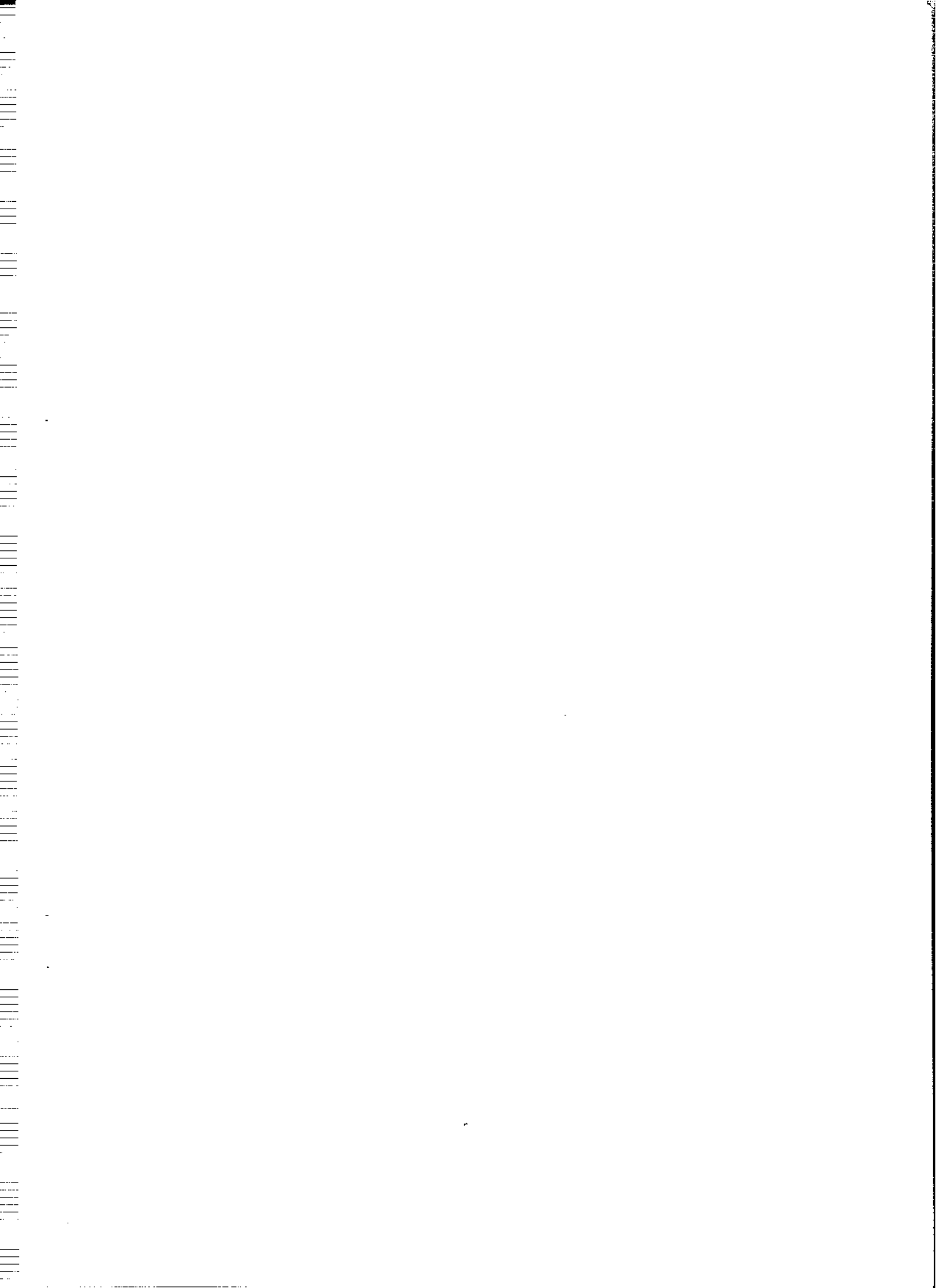
Όλες οι παραπάνω εργασίες -αλλά και πολλές ακόμη- που αφορούν περισσότερο από κάθε άλλο μηχανικό τον Αγρονόμο - Τοπογράφο Μηχανικό γίνονται, εύκολα, γρήγορα και οικονομικά χρησιμοποιώντας το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού (GPS), η χρήση του οποίου είναι και το αντικείμενο του μαθήματος "Δορυφορική Γεωδαισία".



Σχήμα 1



ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ GPS



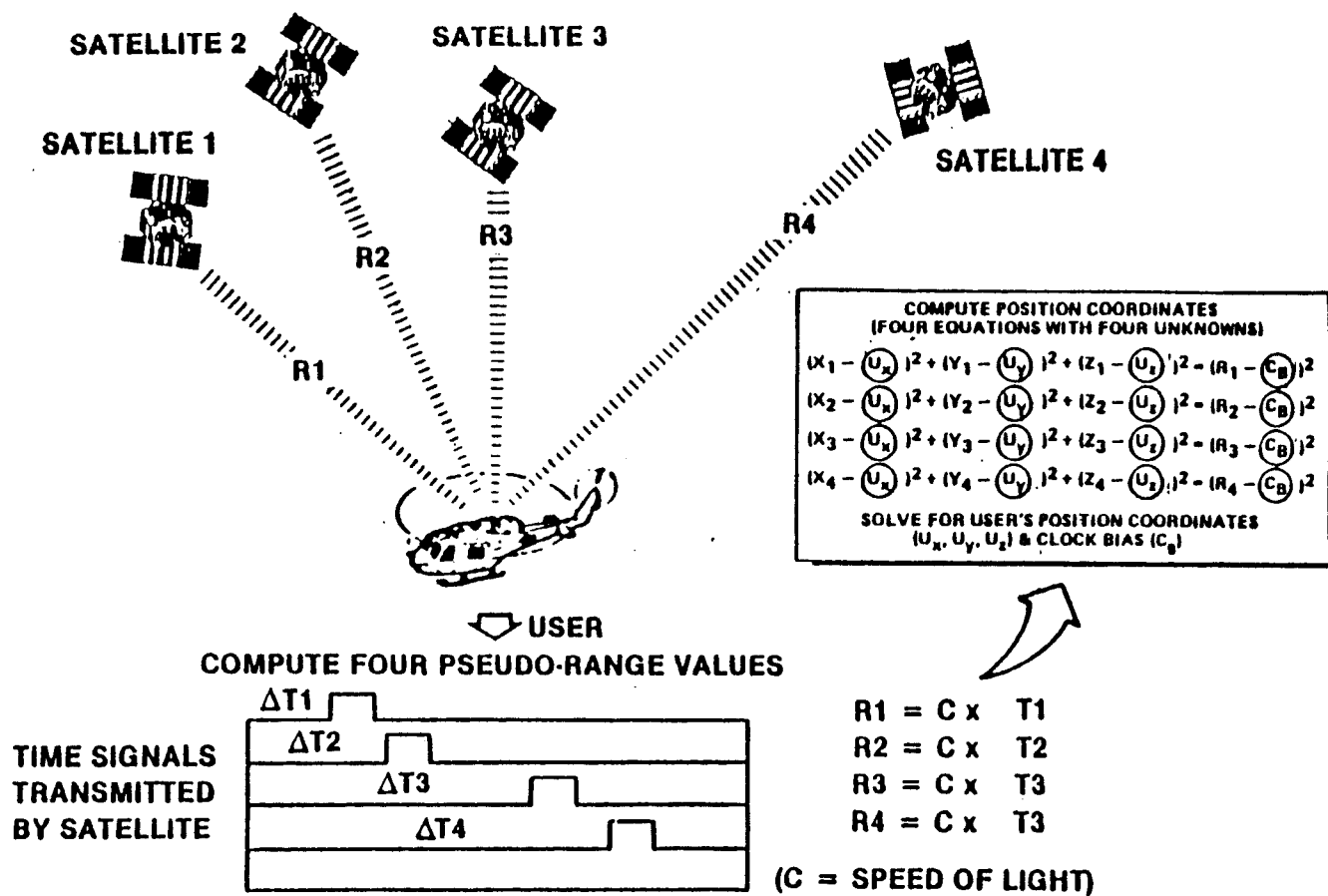
1.0 Γενική περιγραφή του συστήματος GPS

Ο προσδιορισμός θέσεων στην φυσική γήινη επιφάνεια και η ένταξη τους σε ένα κατάλληλο σύστημα αναφοράς είναι ο κύριος σκοπός του εφαρμοσμένου μέρους της Γεωδαισίας. Οι κλασσικές τεχνικές, που εφαρμόζονται, είναι ο τριγωνισμός, ο τριπλευρισμός, ή συνήθως ο συνδυασμός των δύο αυτών μεθόδων, που παρέχουν τις επιφανειακές ελλειψοειδείς συντεταγμένες, και η υψομετρία, που παρέχει την τρίτη παράμετρο τα υψόμετρα.

Η χρήση των τεχνητών δορυφόρων αλλά και η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών έχουν αλλάξει την κατάσταση τελείως, ώστε ο τριδιάστατος εντοπισμός, μεγάλης ακρίβειας, με σύντομες εργασίες υπαίθρου να είναι ένα εύκολο αποτέλεσμα.

Το σύστημα GPS βασίζεται στις αρχές λειτουργίας των παθητικών δορυφορικών συστημάτων ναυσιπλοίας και εξασφαλίζει συνεχή, παγκόσμια, κάτω από οποιεσδήποτε καιρικές συνθήκες, πλοήγηση (τριδιάστατη θέση, ταχύτητα, χρόνο) σε απεριόριστο αριθμό χρηστών. Ταυτόχρονες μετρήσεις αποστάσεων (μαζί με μετρήσεις του φαινομένου doppler) σε τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους (σχήμα 1) χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό αυτών των παραμέτρων με μια τυπική ακρίβεια στιγμιαίου εντοπισμού, καλύτερου των 10 m και ταχύτητας της τάξης των 0.05 m/sec. Για γεωδαιτικές εφαρμογές, η ακρίβεια αυτή είναι δυνατόν να βελτιωθεί πολύ, χρησιμοποιώντας μετρήσεις φάσης του φέροντος κύματος, που δίνουν ακρίβειες της τάξης του 1 ppm (ως και 0.01ppm) στον προσδιορισμό γραμμών βάσης από ένα χιλιόμετρο ως δεκάδων χιλιομέτρων. Αυτό σημαίνει ότι το GPS ανταγωνίζεται και επίγειες μεθόδους και για μικρές αποστάσεις.

Με τις δυνατότητες χρήσης του συστήματος GPS σε εκτεταμένα πεδία εφαρμογής και με τα παραπάνω πλεονεκτήματα, το σύστημα GPS αντικατέστησε όλα τα ηλεκτρονικά συστήματα εντοπισμού (επίγεια ή δορυφορικά) μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1990.



Σχήμα 1

2.0 Περιγραφή του συστήματος GPS και λειτουργικά χαρακτηριστικά

2.1 Γενικά

Το δορυφορικό σύστημα GPS σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε από τις ΗΠΑ για να ικανοποιήσει κυρίως στρατιωτικές ανάγκες ναυσιπλοΐας. Σήμερα (Νοε.'00) έχει επιχειρησιακά ολοκληρωθεί.

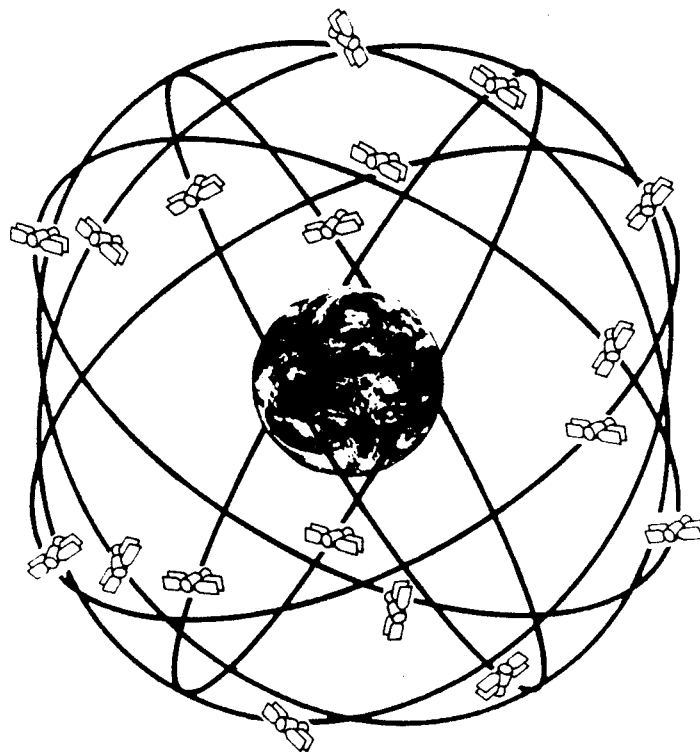
Το GPS αποτελείται από τρία κυρίως λειτουργικά τμήματα. Το τμήμα του διαστήματος αποτελείται από τους δορυφόρους NAVSTAR, που εκπέμπουν σήματα και κωδικοποιημένες πληροφορίες στην περιοχή των μικροκυμάτων (L-band). Το επίγειο τμήμα ελέγχου παρακολουθεί και κατευθύνει την λειτουργία κάθε δορυφόρου του συστήματος. Το τμήμα χρηστών, που παρακολουθεί τα σήματα των δορυφόρων, αποτελείται από όλους τους χρήστες που μπορούν να εκμεταλλευθούν τις δυνατότητες του συστήματος για ναυσιπλοΐα και γεωδαισία ή άλλες χρήσεις.

2.2 Λειτουργικό τμήμα διαστήματος

Το λειτουργικό τμήμα διαστήματος αποτελείται (ονομαστικά) από 21 δορυφόρους (μαζί με 3 ακόμη σαν ενεργά ανταλλακτικά σε τροχιά), που έχουν τοποθετηθεί σε τέτοια διάταξη, ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη κάλυψη της γης και να εξαλειφθούν σχεδόν οι περιοχές της γης με μειωμένη κάλυψη ή πολύ κακή γεωμετρία.

Σήμερα βρίσκονται σε λειτουργία 28 δορυφόροι (σειρές II, ΠΑ, ΠΡ), με κάθε νέα σειρά να έχει και αυξημένες επιχειρησιακές δυνατότητες.

Ο σχεδιασμός του συστήματος απαιτεί την λειτουργία 4 δορυφόρων ανά τροχιακό επίπεδο και 6 τροχιακά επίπεδα όμοια κατανομημένα ως προς τον ισημερινό της γης. Σε κάθε τροχιακό επίπεδο οι δορυφόροι περιστρέφονται σε σχεδόν κυκλικές τροχιές ($\max e=0.015$), που έχουν γωνία κλίσης 55° ως προς τον Ισημερινό, με περίοδο ολοκλήρωσης μιας περιστροφής γύρω από την γη 12 ωρών



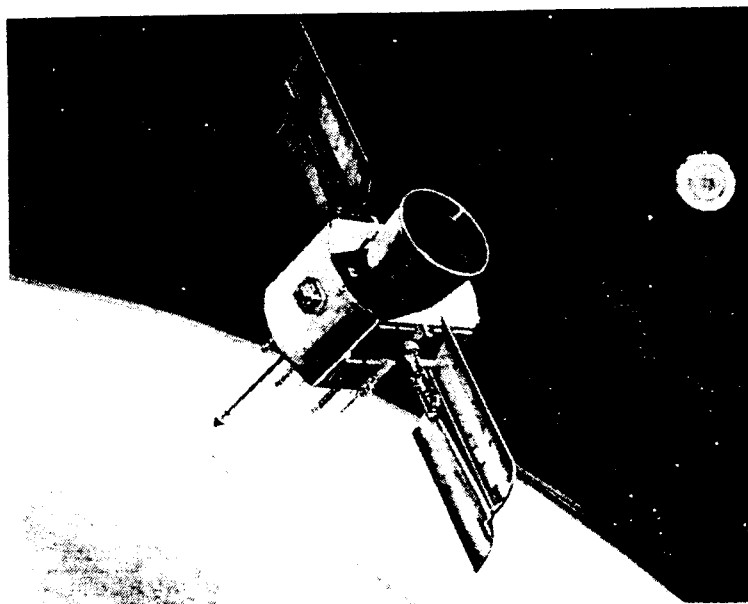
Σχήμα 2

(αστρικός χρόνος). Το ύψος της τροχιάς είναι περίπου 20200 km (σχήμα 2). Ο δορυφορικός αυτός σχηματισμός εξασφαλίζει δυνατότητες ορατότητας τουλάχιστον 4 δορυφόρων από τους χρήστες

οποιαδήποτε χρονική στιγμή, με καλή γεωμετρική διάταξη, 5° ή και υψηλότερα από τον τοπικό ορίζοντα σε (σχεδόν) οποιαδήποτε θέση πάνω στην γη.

Οι δορυφόροι αριθμούνται (ή ξεχωρίζονται) κατά διάφορους τρόπους, πχ, ως προς την σειρά εκτόξευσης, την θέση στην τροχιά, σύμφωνα με τον κώδικα της NASA, τον διεθνή κώδικα, αλλά και με ένα αριθμό, που δείχνει ποια εβδομάδα του κώδικα P εκπέμπει ο δορυφόρος (αριθμός PRN). Ο συμβολισμός που χρησιμοποιείται περισσότερο, είναι ο αριθμός της εβδομάδας του κώδικα P.

Ο τύπος δορυφόρου GPS του σχήματος 3 έχει σχεδιαστική επιδίωξη λειτουργίας 7.5 χρόνων. Στην πράξη αρκετοί δορυφόροι έχουν λειτουργήσει περισσότερο από 7.5 χρόνια και έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αξιόπιστοι. Οι δορυφόροι του GPS έχουν ηλιακές κυψέλες σαν πηγή ηλεκτρικής ενέργειας για να τροφοδοτούν τα συστήματα υψηλής τεχνολογίας με τα οποία είναι εφοδιασμένοι όταν φωτίζονται από τον ήλιο, αλλά και συμβατικές για την τροφοδοσία τους όταν βρίσκονται στην σκιά της γης. Επίσης έχουν αποθηκευμένα καύσιμα, που επιτρέπουν την λειτουργία των συστημάτων ελέγχου της τροχιάς, ακόμα και αλλαγή θέσης (μόνο στο ίδιο τροχιακό επίπεδο) αν απαιτηθεί.



Σχήμα 3

Σαν βασικό εξοπλισμό έχουν τέσσερα ατομικά χρονόμετρα υψηλής σταθερότητας για την μέτρηση του χρόνου και για την παραγωγή σήματος με συχνότητα υψηλής σταθερότητας. Τα δύο είναι χρονόμετρα ρουβιδίου, που έχουν σχετική ακρίβεια της τάξης του 10^{-12} και τα άλλα είναι καισίου με σχετική σταθερότητα 10^{-13} .

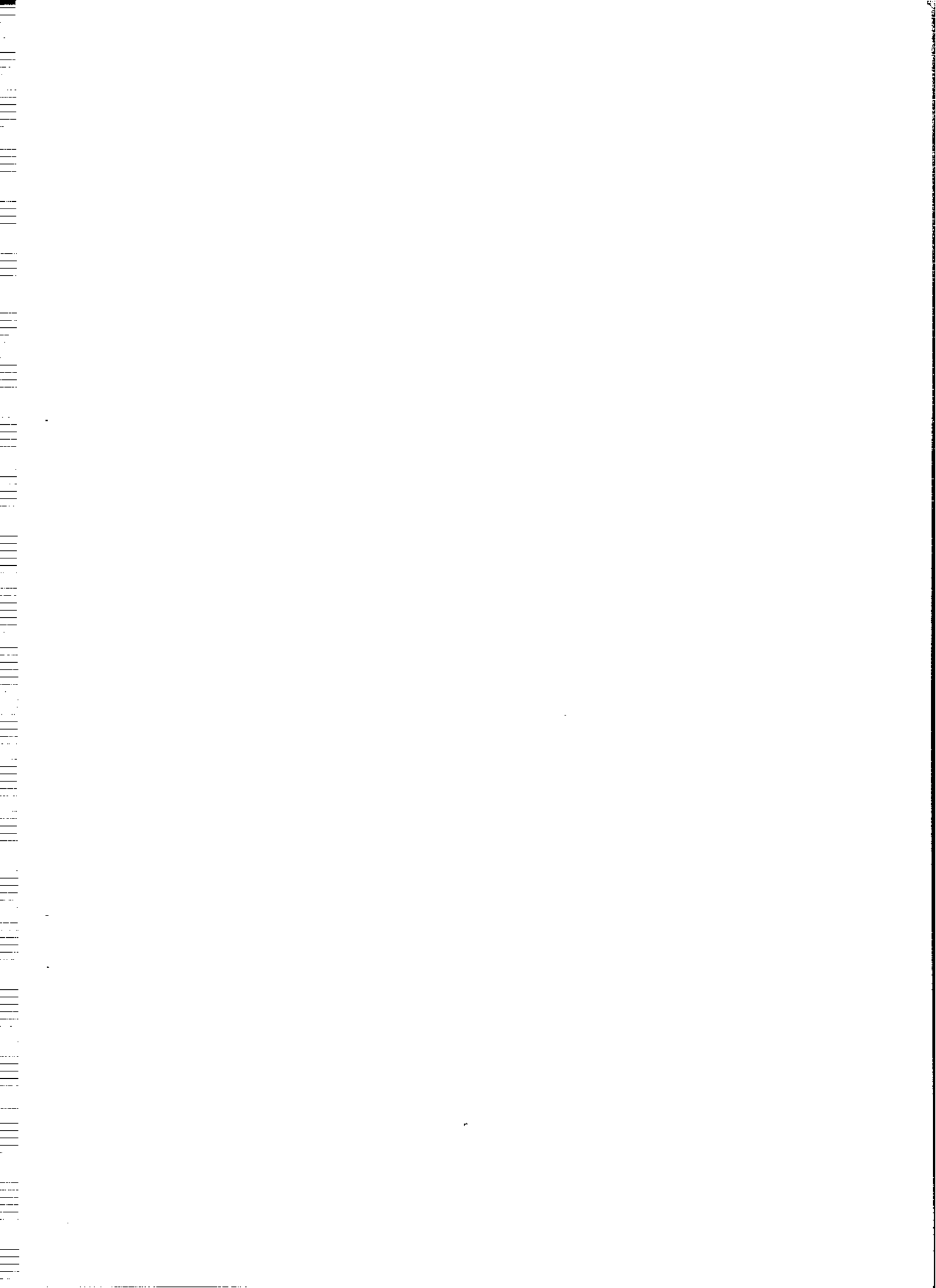
2.3 Λειτουργικό τμήμα εδάφους (σταθμοί ελέγχου, παρακολούθησης και επικοινωνίας)

Το λειτουργικό τμήμα εδάφους που παρακολουθεί, ενημερώνει και ελέγχει το λειτουργικό τμήμα διαστήματος αποτελείται από πέντε αρκετά απομακρυσμένους σταθμούς παρακολούθησης (Monitor Stations), τρεις σταθμούς επικοινωνίας (Upload Ground Antennas) και ένα κεντρικό σταθμό ελέγχου (Master Control Station).

Οι επίγειοι σταθμοί παρακολούθησης πραγματοποιούν συνεχώς μετρήσεις και στις δύο εκπεμπόμενες συχνότητες χρησιμοποιώντας όλους τους δορυφόρους. Η λειτουργία τους είναι απολύτως αυτοματοποιημένη και εξασφαλίζει συνεχή παρακολούθηση των δορυφόρων. Τα δεδομένα των παρατηρήσεων μεταδίδονται στον κεντρικό σταθμό ελέγχου για τον υπολογισμό (πρόβλεψη) των εφημερίδων (τροχιών) των δορυφόρων και των διορθωτικών παραμέτρων για τα μοντέλα των σφαλμάτων των χρονομέτρων των δορυφόρων.

Ο κεντρικός σταθμός ελέγχου, ελέγχει ολοκληρωτικά την λειτουργία του δορυφορικού και του επίγειου σχηματισμού του GPS. Επεξεργάζεται συνεχώς τα δεδομένα παρατηρήσεων, υπολογίζει τις εφημερίδες των δορυφόρων και ενεργοποιεί την διαδικασία ενημέρωσης τους. Έχει δυνατότητα επέμβασης στον δορυφορικό σχηματισμό, τροποποιώντας την θέση και την λειτουργία των δορυφόρων (χρονόμετρα, τροφοδοσία, ηλεκτρονικά συστήματα). Οι διαδικασίες είναι αυτοματοποιημένες και διατίθεται εφεδρικός εξοπλισμός, που λειτουργεί σε περίπτωση βλάβης του συστήματος.

Οι σταθμοί ενημέρωσης είναι επίγειες κεραιές που μεταδίδουν στην περιοχή των κυμάτων S, δεδομένα στον επεξεργαστή και στην μνήμη του δορυφόρου.



Γεωδαιτικά Συστήματα Αναφοράς (ΓΣΑ)

1.0 Συμβατικά Γεωδαιτικά Συστήματα Αναφοράς

Ορίζονται με τις γεωδαιτικές συντεταγμένες, που δίνονται στην αφετηρία (αρχικό σημείο) του συστήματος ($\varphi_0, \lambda_0, h_0$) και με τις παραμέτρους του ελλειψοειδούς αναφοράς (a, f). Δίνεται ακόμα το γεωδαιτικό αζιμούθιο (α_0) μιας γραμμής (και πιθανότερα εκείνο, που συνδέει το αρχικό σημείο με κάποιο άλλο).

Οι συμβατικές τιμές $\varphi_0, \lambda_0, \alpha_0$ λαμβάνονται κατά κανόνα με αστρονομικές παρατηρήσεις και στις πιο πολλές περιπτώσεις ισχύει:

$$\varphi \equiv \Phi, \lambda \equiv \Lambda, \alpha \equiv A$$

όπου Φ, Λ, A τα αστρονομικά πλάτος, μήκος, αζιμούθιο.

Η τρίτη συνιστώσα, το γεωμετρικό υψόμετρο h_0 προσδιορίζεται, από γεωμετρική χωροστάθμηση, από μία υψομετρική αφετηρία, έτσι ώστε να είναι:

$$1 \quad h_0 = H_0$$

Είναι δυνατόν στο αρχικό σημείο να υπάρχει και υψόμετρο του γεωειδούς και απόκλιση της κατακορύφου ξ, η .

Οι συντεταγμένες όλων των άλλων σημείων δίνονται μετά από επίλυση με MET, από παρατηρήσεις γωνιών και αποστάσεων.

Τα συστήματα αυτά υλοποιούνται με τις συντεταγμένες των τριγωνομετρικών σημείων.

Το Γήινο Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς, διαφέρει μόνο στο ότι το ελλειψοειδές του είναι γήινο (δηλαδή το κέντρο μάζας της γής ταυτίζεται με το κέντρο του ελλειψοειδούς).

Τα συμβατικά συστήματα αναφοράς μπορούν επομένως να χαρακτηριστούν από:

- 1) Ένα σημείο αναφοράς, δηλαδή σημείο με προσδιορισμένες συντεταγμένες.
- 2) Το προσδιορισμένο αζιμούθιο μιάς γραμμής στο τοπικό οριζόντιο επίπεδο στο σημείο αναφοράς. Αυτό είναι ταυτόσημο με τον ορισμό του μεσημβρινού στο έδαφος.
- 3) Την απόκλιση της κατακορύφου στο σημείο αναφοράς.
- 4) Δύο σταθερές, τον μεγάλο ημιάξονα a και την επιπλάτυνση f (ή e^2) του ελλειψοειδούς.

Μαζί με το ελλειψοειδές προσδιορίζεται και ένας τύπος τυπικής βαρύτητας, που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του μεγέθους της βαρύτητας.

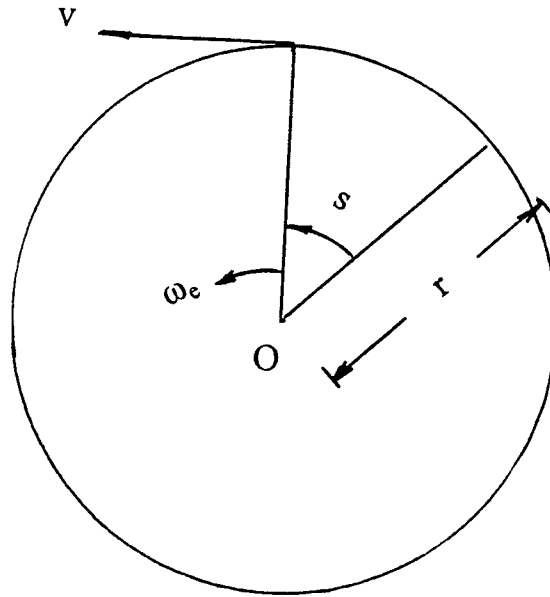
(Πριν από το 1960 δεν λαμβανόταν υπόψη η κίνηση του πόλου (παρ. 2.0) και στις αστρονομικές παρατηρήσεις δινόταν άπειρο βάρος).

2.0 Γεωδαιτικά Συστήματα Αναφοράς (Δορυφορικά)

Είναι γνωστό ότι τοπογραφικές εργασίες με επίγεια μέσα (θεοδόλιχα, EDM), που γίνονται σε σημεία της φυσικής γήινης επιφάνειας, μπορούν να εκτελεσθούν οποιαδήποτε στιγμή και να επαναληφθούν όσες φορές απαιτείται, μια και οι σχετικές θέσεις μεταξύ των σημείων είναι σταθερές, τουλάχιστον για το χρονικό διάστημα, που διαρκούν συνήθως οι τοπογραφικές εργασίες.

Σε αντίθεση με τα παραπάνω τοπογραφικές εργασίες με χρήση τεχνητών δορυφόρων, έχουν ως στόχο τον δορυφόρο, ο οποίος κινείται βεβαίως έξω από την γη και πολύ γρήγορα, αλλά και η ίδια η γη περιστρέφεται και περιφέρεται γύρω από τον ήλιο.

Στο σχήμα 1 φαίνεται ο ισημερινός της γης, ω_e είναι η ταχύτητα περιστροφής της γης, s το τόξο που έχει διαγράψει ένα σημείο του ισημερινού, v η εφαπτομενική γραμμική ταχύτητα, r ($= a$) η ακτίνα του ελλειψοειδούς στον ισημερινό και T η περίοδος περιστροφής.



Σχήμα 1

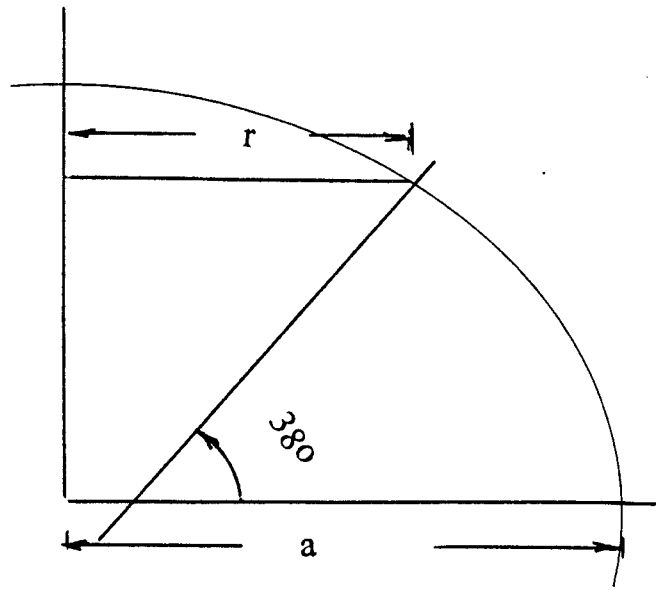
$$2 \quad \omega_e = \frac{s}{T}$$

$$3 \quad v = \frac{2\pi r}{T}$$

$$4 \quad v = \omega_e \cdot r$$

Στο σχήμα 2 φαίνεται μια τομή του ελλειψοειδούς, όπου βεβαίως στο πλάτος $\varphi = 0^\circ$ η ακτίνα r είναι ίση με τον μεγάλο ημιάξονα του ελλειψοειδούς και στο μέσο ελληνικό πλάτος $\varphi = 38^\circ$ έχει μια άλλη τιμή.

Αν χρησιμοποιηθεί, πχ, ως σύστημα αναφοράς το Παγκόσμιο Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1984 (World Geodetic System 1984 - WGS 84) τότε η μέση ταχύτητα περιστροφής της γης είναι $\omega_e = 7292115 \times 10^{-11}$ rad/sec (και επί 206265 = 15"/sec) και ο μεγάλος ημιάξονας είναι $a = 6378137.0$ m.



Σχήμα 2

Οπότε αν

$$\varphi = 0^\circ \quad r = a = 6378137 \text{ m και } v = 465 \text{ m/sec}$$

$$\varphi = 38^\circ \quad r = 5032429 \text{ m και } v = 367 \text{ m/sec}$$

Αρα ένας παρατηρητής στον Ισημερινό περιστρέφεται με 465 m/sec και στην Ελλάδα με 367 m/sec.

Αν τώρα υποθεθεί ότι κάνουμε γεωδαιτικές παρατηρήσεις στο σύστημα GPS, κάθε έστω 15 sec, τότε μεταξύ των παρατηρήσεων ο έλληνας παρατηρητής θα έχει διανύσει απόσταση ~ 5500 m και ο δορυφόρος ~ 3300 m/sec x 15 sec = 49500 m.

Αν δεχθούμε ακόμα ως απόσταση δορυφόρων - δέκτη τα 20000000 m και ως ταχύτητα του φωτός τα 300000000 m/sec, τότε το σήμα για να φθάσει από τον δορυφόρο στο δέκτη θα χρειασθεί περίπου 0.07 sec και στο διάστημα αυτό ο παρατηρητής θα έχει κινηθεί 367 m/sec x 0.07 sec = 25.70 m και ο δορυφόρος 3300 m/sec x 0.07 sec = 231 m.

Είναι φανερό από τα παραπάνω η συνεχής μεταβολή των σχετικών θέσεων παρατηρητή - δορυφόρου (ακόμα και για πολύ μικρά χρονικά διαστήματα, για να φθάσουμε, πχ, σε ακρίβειες της τάξης των ± 25 cm, θα πρέπει να έχουμε ακρίβεια χρόνου της τάξης του 0.07 msec), όλες δε αυτές οι σχετικές θέσεις έχουν μία μόνο αναφορά (ή προσδιορίζονται ως προς), τον στιγμιαίο άξονα περιστροφής της γης (τη στιγμή της μέτρησης), που δίνει και τον προσανατολισμό της στον χώρο.

Η γη λοιπόν περιστρέφεται ως προς στιγμιαίο άξονα περιστροφής, επειδή αυτός ακολουθεί την μετάπτωση, την κλόνηση και την κίνηση του πόλου.

Επειδή ο άξονας αυτός δίνει τον προσανατολισμό της γης στον χώρο και είναι άξονας αδρανείας, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε ένα ΓΣΑ, αλλά αυτό σημαίνει ότι ένα σημείο της φυσικής γήινης επιφάνειας θα είχε συνεχώς άλλες συντεταγμένες! Ας ληφθεί επίσης υπόψη ότι και η ταχύτητα περιστροφής της γης δεν είναι σταθερή, αλλά μειώνεται συνεχώς.

Συμβατικά λοιπόν σε ένα δορυφορικό ΓΣΑ ως άξονας των Z λαμβάνεται ο μέσος πόλος (άξονας περιστροφής) της περιόδου 1900-1905 (CIO - Conventional International Origin), ως κέντρο του συστήματος λαμβάνεται το κέντρο μάζας της γης (όσο καλά το ξέρουμε), ο άξονας των X περνάει από τον μεσημβρινό του Greenwich, ο δε άξονας των Y απλώς συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα και αυτός ακριβώς είναι ο ορισμός ενός δορυφορικού ΓΣΑ.

Για να μπορέσουμε να αναπτύξουμε ένα τέτοιο σύστημα πρέπει να υπάρχουν τα παρακάτω βασικά στοιχεία:

1) Μια σειρά από δορυφόρους, που να εξασφαλίζουν μεγάλη διάρκεια λειτουργίας, εξοπλισμένους με κάποια συστήματα, που να επιτρέπουν μετρήσεις (πχ το σύστημα GPS).

2) Μία ομάδα σταθμών παρακολούθησης, πρέπει να υπάρχει, που να είναι κατανεμημένοι πάνω σε όλη τη γη για να μετράει είτε τη μετατόπιση doppler, είτε ψευδοαποστάσεις και να επικοινωνεί με τον κεντρικό υπολογιστή. (Όταν το σύστημα αναπτυχθεί αυτοί οι σταθμοί δεν είναι απαραίτητοι, γενικά διατηρούνται για την συνεχή παρακολούθηση της καλής λειτουργίας των δορυφόρων και τον υπολογισμό εκπεμπόμενων τροχιών ή τροχιών ακριβείας).

3) Πρέπει να υπάρχουν προσεγγιστικά στοιχεία για τα παρακάτω:

α) Συντεταγμένες των σταθμών παρακολούθησης σε ένα (ενιαίο) γήινο σύστημα αναφοράς.

β) Θέσεις και ταχύτητες δορυφόρων $(X, Y, Z, \dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z})$ σε καθορισμένες χρονικές στιγμές (αρχικές συνθήκες τροχιάς).

γ) Μοντέλο του πεδίου βαρύτητας της γης.

δ) Συχνότητες ταλαντωτών των δορυφόρων και των σταθμών ως προς ένα κοινό πρότυπο.

ε) Χρονικές στιγμές στους σταθμούς παρακολούθησης ως προς ένα κοινό πρότυπο. (Βολικός τρόπος για να γίνει ο συγχρονισμός είναι να χρησιμοποιηθεί το πρότυπο χρόνου στο δορυφόρο).

4) Πρέπει να υπάρχουν για τα παρακάτω ακριβείς τιμές:

α) Ταχύτητα του φωτός ($c = 299792458$ m/sec)

β) $GM \equiv 3986004.418 \times 10^8$ m³ / sec². (Το γινόμενο της βαρυτικής σταθεράς επί την μάζα της γης).

γ) Την κίνηση της γης σε σχέση με το σχεδόν αδρανειακό σύστημα αναφοράς, στο οποίο περιγράφεται η κίνηση των δορυφόρων (μετάπτωση, κλόνηση, περιστροφή, κίνηση του πόλου).

δ) Η ολίσθηση (\dot{f}) της συχνότητας (drift) για όλους τους ταλαντωτές και τα χρονόμετρα σταθμών και δορυφόρων. (Προφανώς χρειάζονται μόνο εκείνα, που έχουν σημαντική τιμή (\dot{f}), συγκρινόμενα στον χρόνο των παρατηρήσεων).

5) Τεχνικές για μέτρηση ή κατασκευή μοντέλου για τις επιδράσεις της ιονόσφαιρας και της τροπόσφαιρας.

6) Μια σειρά προγραμμάτων H/Y για την επεξεργασία και βελτίωση των προσεγγιστικών στοιχείων, που περιγράφονται στην παράγραφο (3) και κυρίως για τον υπολογισμό των τροχιών.

7) Το γεωδαιτικό μήκος λ ενός σταθμού απαιτείται να προσδιορισθεί, όπως γίνεται με κάθε ΓΣΑ.

Η εσωτερική ακρίβεια, αλλά και γενικά η ακρίβεια του ΓΣΑ εξαρτώνται από την φροντίδα σχεδιασμού, ανάλυση και επεξεργασία των παραγράφων (2), (4), (5) και (6). (Για παράδειγμα η όλη τεχνική δεν θα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, αν οι μετρήσεις συχνότητας και όλοι οι υπολογισμοί δεν γίνονται με εσωτερική ακρίβεια τουλάχιστον $10^{-10} f$, όπου f η συχνότητα εκπομπής του δορυφόρου).

Τα στοιχεία της παραγράφου (3) ανανεώνονται και ενημερώνονται χρησιμοποιώντας τις ίδιες τις μετρήσεις του συστήματος. Τα δε στοιχεία των παραγράφων (1) και (7), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βελτιώσουν ακόμα περισσότερο την ακρίβεια του συστήματος.

Ας σημειωθεί τέλος, ότι αν κάποιο από τα στοιχεία των παραγράφων (3) και (4), κάποιο από τα μοντέλα της παραγράφου (5), το μήκος λ ή ακόμα και κάποιο από τα προγράμματα H/Y, που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάπτυξη του δορυφορικού ΓΣΑ, αλλάξουν, τότε θα προκύψει ένα νέο διαφορετικό ΓΣΑ.

Η αρχή του συστήματος αναφοράς προσδιορίζεται από συνθήκες, που επιβάλλονται στο μοντέλο του πεδίου βαρύτητας, που είναι:

$$5 \quad V = -\frac{GM}{R} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} P_n^m(\cos\theta) \cdot \frac{(C_n^m \cdot \cos m\lambda + S_n^m \sin m\lambda)}{R^n}$$

όπου R , θ , λ οι σφαιρικές συντεταγμένες σημείων έξω από την γη. (Ένας πεπερασμένος αριθμός συντελεστών του μοντέλου μπορεί να υπολογισθεί κατά την διαδικασία ανάπτυξης του ΓΣΑ).

Υπάρχουν τέσσερις συντελεστές μαζί με το αρχικό $S_n^{m=0}$, που δεν χρειάζονται προσδιορισμό.

Αν τεθεί $C_0^0 \equiv 1$ και $C_1^0 \equiv C_1^1 \equiv S_1^1 \equiv 0$ τότε υποχρεώνουμε το κέντρο του συστήματος να ταυτισθεί με το κέντρο μάζας της γης. Δύο άλλοι συντελεστές τίθενται ως $C_2^1 \equiv S_2^1 \equiv 0$, έτσι ώστε οι ροπές αδρανείας $I_{xz} = I_{yz}$ να είναι ίσες με το 0, αφήνοντας τον άξονα Z σαν κύριο άξονα αδρανείας (περιστροφής).

Αρα σε μια ταυτόχρονη λύση συντεταγμένων σταθμων, συντελεστών μοντέλου του πεδίου βαρύτητας και αρχικών συνθηκών το να ζητηθεί $C_0^0 \equiv 1$, $C_1^0 \equiv C_1^1 \equiv S_1^1 \equiv 0$ και $C_2^1 \equiv S_2^1 \equiv 0$, υποχρεώνει το κέντρο του συστήματος να ταυτιστεί με το κέντρο μάζας της γης και τον άξονα Z να είναι ο κύριος άξονας αδρανείας. Σε αυτή τη λύση οι συντεταγμένες των σταθμών θεωρούνται ελεύθερες και προσδιορίζονται, διατηρείται σταθερό μόνο το μήκος ενός σταθμού και βεβαίως το να κρατηθεί ένα σταθερό μήκος είναι το ίδιο με το να τοποθετηθεί ο μηδενικός μεσημβρινός στο ΓΣΑ (άξονας X).

Ο άξονας Z είναι ο πόλος CIO.

Ως προς αυτόν τον άξονα δίνονται οι συντεταγμένες του δικτύου των σταθμών παρακολούθησης.

Οι καθημερινές συντεταγμένες (κίνηση) του πραγματικού (στιγμιαίου) πόλου παίρνονται απο το δελτίο του IERS (International Earth Rotation Service), αν και θα μπορούσε να ήταν λύση του ίδιου του συστήματος.

Ο άξονας Y κείται στο ισημερινό επίπεδο και συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα.

Το ελλειψοειδές αναφοράς είναι η μεγάλη διαφορά μεταξύ ενός συμβατικού και ενός δορυφορικού ΓΣΑ. Το δορυφορικό ΓΣΑ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και χωρίς ελλειψοειδές, μόνο με καρτεσιανές συντεταγμένες.

Αν και το ελλειψοειδές αναφοράς δεν είναι απαραίτητο στο δορυφορικό σύστημα αναφοράς, το μέγεθός του εξαρτάται απο το GM, που θα χρησιμοποιηθεί, ενώ η όλη κλίμακα του ΓΣΑ δίνεται απο την ταχύτητα του φωτός. Το ελλειψοειδές εμφανίζεται μόνο στο μοντέλο του πεδίου βαρύτητας, με τη διαφορά ότι στο δορυφορικό σύστημα αναφοράς υπολογίζεται αντί να είναι βασικός παράγοντας του ΓΣΑ. (Το ελλειψοειδές δεν χρησιμοποιείται πουθενά στον υπολογισμό της τροχιάς). Επειδή όμως οι ελλειψοειδείς συντεταγμένες είναι πίο αντιληπτές απο τις καρτεσιανές, όλα τα δορυφορικά ΓΣΑ συνοδεύονται απο ένα ελλειψοειδές.

Μετά τον υπολογισμό του δορυφορικού ΓΣΑ, το ελλειψοειδές προσδιορίζεται απο τα δεδομένα χωροστάθμησης, που γίνεται στο έδαφος συνδέοντας τους σταθμούς παρακολούθησης με την μέση στάθμη θάλασσας. Αν τα ορθομετρικά υψόμετρα αφαιρεθούν απο τα γεωμετρικά υψόμετρα (που

είναι αποτέλεσμα των δορυφορικών παρατηρήσεων - ακτινικές αποστάσεις) μένουν τα υψόμετρα του γεωειδούς και σε αυτές τις τιμές προσαρμόζεται το καλύτερο ελλειψοειδές.

Τα υπόλοιπα υψόμετρα του γεωειδούς, υπολογίζονται απο ανάπτυξη σε σειρά του μοντέλου του πεδίου βαρύτητας γύρω απο το ελλειψοειδές:

$$6 \quad V(r, \theta, \lambda) = V_{ref}(r, \theta, \lambda) + \left. \frac{\partial \bar{V}}{\partial V} \right|_{r, \theta, \lambda} \cdot \Delta r$$

όπου Δr είναι το υψόμετρο του γεωειδούς και V_{ref} το δυναμικό του ελλειψοειδούς.

Απο την στιγμή που έγιναν και αναλύθηκαν οι παρατηρήσεις για την πρώτη λύση και τον καθορισμό του συστήματος αναφοράς, οι γνωστοί πια σταθμοί (με τελικές συντεταγμένες στο ΓΣΑ) χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των τροχιών στο ίδιο, σταθερό πλέον, σύστημα αναφοράς.

Επομένως όλοι οι παρατηρητές, που χρησιμοποιούν αυτές τις τροχιές για εντοπισμό προσδιορίζουν την θέση τους στο ίδιο αυτό σύστημα των τροχιών.

Ενα δορυφορικό ΓΣΑ υλοποιείται λοιπόν μέσω των τροχιών των δορυφόρων ή κατά τα γνωστά μέσω των συντεταγμένων τριγωνομετρικών σημείων.

3.0 Η ανάπτυξη και χρήση Δορυφορικών Γεωδαιτικών Συστημάτων Αναφοράς σήμερα

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο ένα δορυφορικό ΓΣΑ ορίζεται ως εξής:

Κέντρο του είναι το κέντρο μάζας της γης, άξονας Z είναι ο μέσος άξονας περιστροφής της γης και ο άξονας των X περνάει από τον μεσημβρινό του Greenwich.

Η ανάπτυξη του (ο προσδιορισμός του) γίνεται όπως επίσης αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, όμως χρησιμοποιούνται και παρατηρήσεις από άλλες διαστημικές μεθόδους, όπως η τηλεμετρία laser (SLR - Satellite Laser Ranging) και η συμβολομετρία μεγάλων αποστάσεων (VLBI Very Long Baseline Interferometry), με χρήση ραδιοτηλεσκοπίων .

Η συμβολομετρία μεγάλων αποστάσεων δίνει με μεγάλη ακρίβεια (μεγαλύτερη από κάθε άλλη μέθοδο) τον προσανατολισμό και την κλίμακα ενός δορυφορικού ΓΣΑ.

Η τηλεμετρία laser, μετρήσεις αποστάσεων με laser σε καθαρά γεωδαιτικούς δορυφόρους, επειδή παρέχει πολύ ακριβή απόλυτο εντοπισμό θέσης, δίνει στο ΓΣΑ το κέντρο μάζας της γης (την αρχή του), αλλά και την κλίμακά του.

Παρατηρήσεις GPS χρησιμοποιούνται επίσης, επειδή το δίκτυο σταθμών GPS (IGS - International Geodynamics Service) καλύπτει όλη τη γη με πολλούς σταθμούς και ο σχετικός εντοπισμός με το σύστημα GPS είναι ιδιαίτερα ακριβής.

Μόλις το σύστημα αναπτυχθεί, ως προϊόν παρέχονται οι παράμετροι προσανατολισμού της γης στο χώρο (EOP - Earth Orientation Parameter), δηλαδή η κίνηση του άξονα περιστροφής της γης (polar motion) και η ταχύτητα περιστροφής της (earth rotation).

Ένα παράδειγμα ενός τέτοιου συστήματος είναι το Παγκόσμιο Γήινο Σύστημα Αναφοράς (ITRS - International Terrestrial Reference System), που προσδιορίζεται από το IERS (International Earth Rotation Service). Το σύστημα αυτό ορίζεται με κέντρο το γεώκεντρο (κέντρο μάζας της γης), με άξονα τον Z να περνάει από το μέσο πόλο της περιόδου 1900-1906 (εποχή 1903.0), με άξονα τον X να περνάει από τον μεσημβρινό του Greenwich του 1903.0 και ο άξονας των Y να συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα.

Υλοποιείται δε, ((ITRF - International Terrestrial Reference Frame) με τις γεωδαιτικές συντεταγμένες των σταθμών VLBI, SLR και GPS, που συμμετείχαν στις παρατηρήσεις.

Η πρώτη ανάπτυξη ενός τέτοιου συστήματος έγινε το 1989 (ITRF 89) αναφερόμενο στην εποχή 1989.0, το οποίο υλοποιήθηκε με τις καρτεσιανές συντεταγμένες (X, Y, Z) των σταθμών που συμμετείχαν στις παρατηρήσεις. Ήταν όμως γνωστό από τότε ότι η ακρίβεια των μετρήσεων θα επέβαλλε τον συνεχή βέλτιστο προσδιορισμό ενός τέτοιου συστήματος, για αυτό και ακολούθησαν τα ITRF 90, ITRF 91, ..., ITRF 00 (2000.0) με διαφορές στο επίπεδο του ± 1 cm το ένα από το άλλο.

Από το 1993 το σύστημα αυτό υλοποιείται με τις συντεταγμένες (X, Y, Z) και τις ταχύτητες $(\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z})$ των σταθμών, επειδή η ακρίβειά του επέτρεψε να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς και ένα παγκόσμιο μοντέλο για την κίνηση των τεκτονικών πλακών.

Για να μπορέσει βεβαίως ένας χρήστης να χρησιμοποιήσει αυτό το σύστημα, θα πρέπει πρώτα να εξαρτηθεί με μετρήσεις από έναν τουλάχιστον σταθμό με συντεταγμένες στο σύστημα ITRF και να χρησιμοποιήσει επίσης τροχιές ακριβείας, οι οποίες προσδιορίζονται συνεχώς μετά από μετρήσεις GPS σε διάφορα υπολογιστικά κέντρα.

Ένα άλλο σύστημα σήμερα σε χρήση είναι το Παγκόσμιο Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1984 (World Geodetic System 1984), ιδιαίτερα αν χρησιμοποιεί κανείς το σύστημα GPS.

Το μήνυμα ναυσιπλοίας (navigation message) των δορυφόρων GPS, αναφέρεται σε αυτό το σύστημα, επομένως όποιος χρήστης χρησιμοποιεί το σύστημα GPS για εντοπισμό εκφράζει υποχρεωτικά την θέση του στο σύστημα WGS 84. Το σύστημα αυτό προήλθε κυρίως από παρατηρήσεις doppler μετά από ταύτιση (όσο καλά μπορούσε να γίνει) του συστήματος αναφοράς των δορυφόρων TRANSIT (doppler) NSWC-9Z2 με το BTS 1984.0 (BTS - Bureau International de l'Heure (BIH) Terrestrial System, ένα σύστημα πρόδρομο του ITRF, BIH πρόδρομος οργανισμός του IERS) στο επίπεδο των 1 με 2 m (σε αντίθεση με το επίπεδο των 1 με 2 cm του ITRF). Το σύστημα αυτό βελτιώθηκε το 1994 με νέες παρατηρήσεις GPS, από τους σταθμούς παρακολούθησης του συστήματος και άλλους σταθμούς του δικτύου IGS. Αναφέρεται στην εποχή 1994.0 και περιλαμβάνει και νέα τιμή για το GM (ίση με $3986004.418 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{sec}^2$). Εκτιμήσεις δίνουν ταύτιση του ITRF 91 και 92 με το WGS 84 στο επίπεδο των $\pm 10 \text{ cm}$.

Το σύστημα αυτό, όπως αναφέρθηκε, υλοποιείται μέσω των εκπεμπόμενων τροχιών των δορυφόρων GPS.

Δεδομένης όμως της ακρίβειας της εκπεμπόμενης τροχιάς και των σφαλμάτων των μετρήσεων, ένας χρήστης δεν μπορεί (εν γένει) να αναμένει υλοποίηση του συστήματος αυτού στην επιφάνεια της γης, σε απόλυτη θέση, καλύτερα από την τάξη των 2 m εκτός και αν το υλοποιήσει μέσω ενός συστήματος ITRF.

4.0 Το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ 87)

4.1 Γενικά

Για τις τοπογραφικές, γεωδαιτικές και χαρτογραφικές εργασίες στην Ελλάδα, έχουν χρησιμοποιηθεί πολλά ΓΣΑ, όλα βασισμένα σε επίγειες μετρήσεις γωνιών και αποστάσεων.

Αν σκεφθεί κανείς ότι οι επίγειες μετρήσεις έγιναν την δεκαετία του '30 και τις δεκαετίες του '50, '60 και '70, αλλά και αν λάβει υπόψη του το γεγονός των τεκτονικών μετατοπίσεων στην Χώρα, που φθάνουν τα μερικά cm/έτος (50% της σεισμικής δραστηριότητας της Ευρώπης εμφανίζεται στην Ελλάδα), γίνεται προφανές ότι θα έπρεπε να ιδρυθεί και χρησιμοποιηθεί ένα νέο σύστημα αναφοράς για να καλύψει τις τοπογραφικές εργασίες.

4.2 Το ΕΓΣΑ 87

Η πρώτη εύλογη απόφαση ήταν να χρησιμοποιηθεί το πρότυπο ελλειψοειδές, το ελλειψοειδές GRS 80, μετατοπισμένο ως προς το σύστημα BTS, έτσι ώστε αφ' ενός μεν να ελαχιστοποιηθούν οι αποχές του γεωειδούς (και η απόκλιση της κατακορύφου) στην ξηρά και αφ' ετέρου να διατηρηθεί παράλληλο και σε κλίμακα με το BTS, καλύτερα από 10^{-6} (η ελαχιστοποίηση των αποχών του γεωειδούς και της απόκλισης της κατακορύφου περιορίζει τις διορθώσεις και αναγωγές των μετρημένων μεγεθών).

Τα δεδομένα, που χρησιμοποιήθηκαν ήταν επίγειες μετρήσεις (διευθύνσεις, αποστάσεις και αζιμούθια Laplace) σε 137 τριγωνομετρικά σημεία I^{ης} τάξης στην περίοδο '65-'85 και συντεταγμένες από τηλεμετρία laser, μετρήσεις doppler και μετρήσεις GPS σε 37 τριγωνομετρικά σημεία I^{ης} τάξης την περίοδο '83-'87. Η πληροφορία του γεωειδούς ελήφθη, από παρατηρήσεις της μέσης στάθμης θάλασσας του δορυφόρου SEASAT, ενώ ως αρχικό σημείο του ΓΣΑ ελήφθη το Κεντρικό Βάθρο στο Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου του ΕΜΠ.

Οι παράμετροι της μετάθεσης ήταν:

$$\Delta X = +199.652 \text{ m}^*$$

$$\Delta Y = -74.759 \text{ m}^*$$

$$\Delta Z = -246.055 \text{ m}^*$$

και το σύστημα ορίζεται πλέον με τις συντεταγμένες του Κεντρικού Βάθρου.

$$\varphi = 38^{\circ} 04' 33.8107''^*$$

$$\lambda = 23^{\circ} 55' 51.0095''^*$$

$$h = 481.743 \text{ m}$$

$$N = 7.000 \text{ m}$$

Όλα τα δορυφορικά δεδομένα ενοποιήθηκαν σε μία ομάδα δεδομένων, ενώ οι επίγειες μετρήσεις συνορθώθηκαν επάνω στο νέο ΓΣΑ.

Η σύγκριση των δύο ομάδων συντεταγμένων έδειξε ότι έπρεπε να επιβληθεί στο επίγειο δίκτυο μία διόρθωση κλίμακας + 1.3 ppm και μία στροφή (κατά αζιμούθιο) - 0.16", ώστε να γίνει παράλληλο και με ίδια κλίμακα με το BTS, στο επίπεδο του 10^{-6} .

Κατόπιν οι συντεταγμένες των τριγωνομετρικών σημείων I^{ης} τάξης, διατηρήθηκαν σταθερές και συνορθώθηκε όλο το υπόλοιπο δίκτυο (σημεία II, III, IV^{ης} τάξης).

Το ΓΣΑ, που προέκυψε καλύπτει τις ανάγκες οποιασδήποτε τοπογραφικής εργασίας, το δε γεγονός ότι τα δορυφορικά δεδομένα προήλθαν από μετρήσεις μίας μικρής σχετικά χρονικής περιόδου, έδωσε στο ΓΣΑ την εποχή 1987.

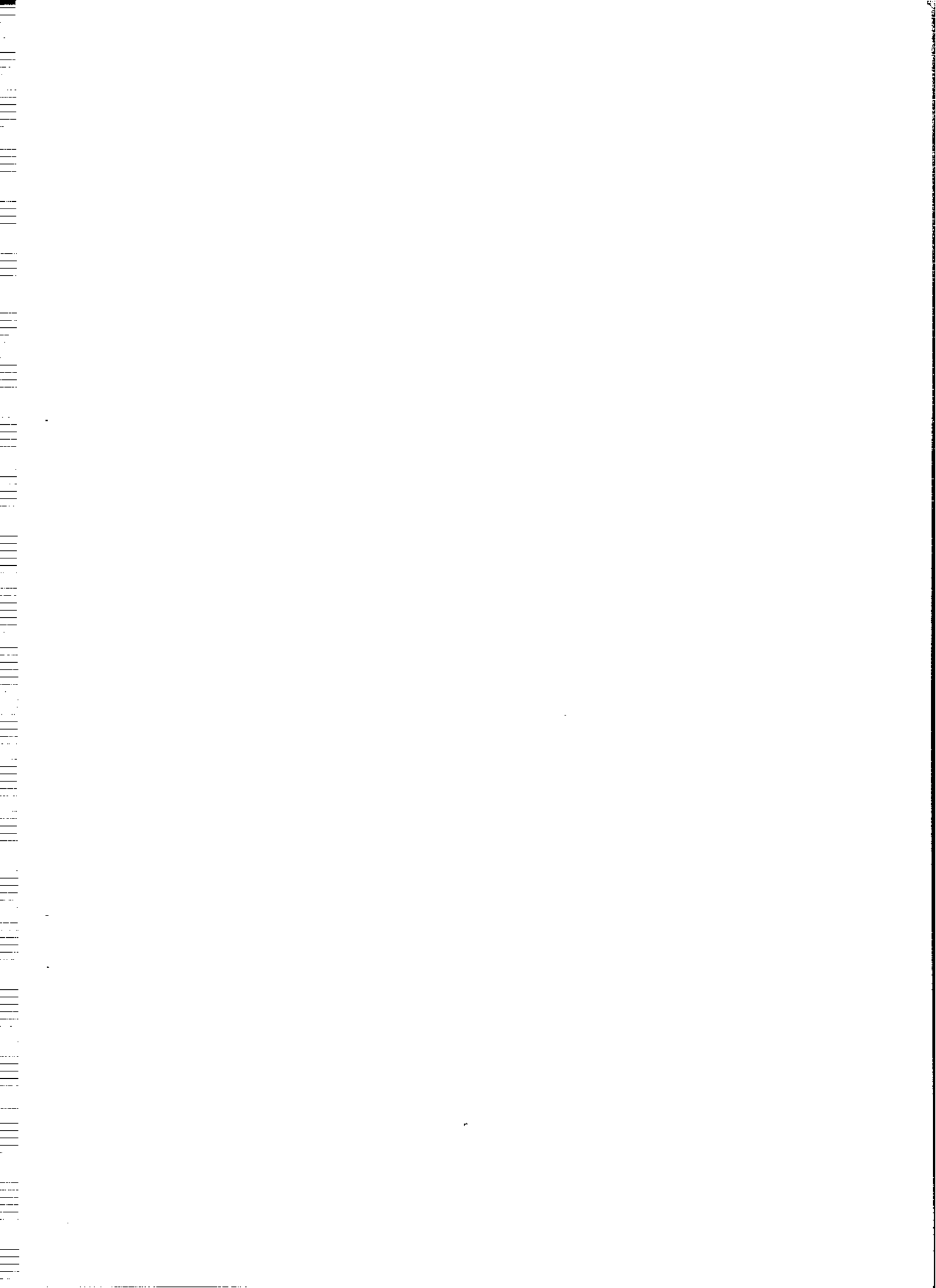
5.0 Συστήματα αναφοράς σε χρήση

ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ	ΟΜΑΔΑ ΣΤΑΘΜΩΝ	a	1/f
ΕΛΛΗΝΙΚΟ			6377397.155	299.153
ΕΥΡΩΠΑΙΚΟ			6378388	297
*ΕΓΣΑ87			6378137	298.2572221
NSWC-9ZE	NSWC-10E1	TRANET	6378145	298.25
BROADCAST	NWL-10D	OPNET	6378135	298.26

* Τιμές υπο αναθεώρηση

WGS72	WGS72		6378135	298.26
WGS84	WGS84	GPS_TRANET	6378137	298.2572235
ITRF89		IGS	6378137	298.2572221
....				
ITRF96		IGS (EPOCH 1997.0)	6378137	298.2572221
....				

ΤΟ ΕΚΠΙΕΜΠΟΜΕΝΟ ΣΗΜΑ ΚΑΙ Η ΤΡΟΧΙΑ ΤΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ GPS



1.0 Το εκπεμπόμενο σήμα του δορυφόρου GPS

Επειδή το GPS είναι ένα παθητικό σύστημα εντοπισμού θέσης, όλη η πληροφορία που απαιτείται για τον εντοπισμό της θέσης του χρήστη παρέχεται μέσω του σήματος του δορυφόρου. Αυτή η πληροφορία περιλαμβάνει σήματα χρόνου, χρόνο στον οποίο αναφέρεται η εκπεμπόμενη πληροφορία και τη θέση του δορυφόρου στο χρόνο εκπομπής.

Κάθε δορυφόρος του συστήματος GPS μεταδίδει ένα “μοναδικό” σήμα που διαμορφώνεται πάνω σε φέρουσες συχνότητες στην περιοχή L του φάσματος των μικροκυμάτων, $L1 = 1575.42$ MHz (μήκος κύματος $\lambda = 19.05$ cm) και $L2 = 1227.60$ MHz ($\lambda = 24.45$ cm), ούτως ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση της ιονοσφαιρικής διάθλασης.

Αυτές οι συχνότητες προκύπτουν από μια βασική συχνότητα 10.23 MHz, δηλαδή $L1 = 10.23$ MHz $\cdot 154 = 1575.42$ MHz και $L2 = 10.23$ MHz $\cdot 120 = 1227.60$ MHz.

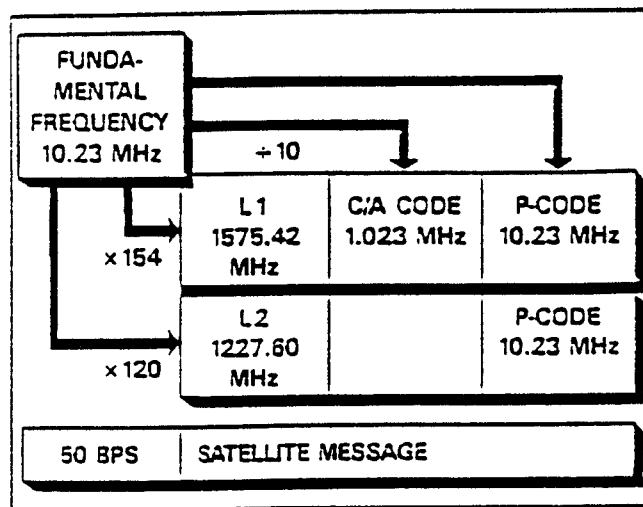
Οι ταλαντωτές σε κατάσταση ηρεμίας (πριν από την εκτόξευση) λειτουργούν (με ένα συντελεστή 445×10^{-12}) χαμηλότερα από την ονομαστική συχνότητα, ούτως ώστε σε τροχιά να έχουν παρθεί υπόψη οι επιδράσεις της ειδικής και γενικής θεωρίας της σχετικότητας, και η εκπεμπόμενη συχνότητα να βρίσκεται πολύ κοντά στην ονομαστική (Milliken and Zoller, 1980).

Οι δύο φέρουσες συχνότητες διαμορφώνονται με αρκετούς τρόπους, όπως φαίνεται στις σχέσεις (1) και (2):

$$L1 = A_P \cdot P_i(t) \cdot D_i(t) \cdot \cos(f_1 t + \varphi(t)) + A_G \cdot G_i(t) \cdot D_i(t) \cdot \sin(f_1 t + \varphi(t)) \quad (1)$$

$$L2 = B_P \cdot P_i(t) \cdot D_i(t) \cdot \cos(f_2 t + \varphi(t)) \quad (2)$$

όπου A_P , A_G , B_P το εύρος του σήματος εκπομπής, $P_i(t)$ ο κώδικας P, $G_i(t)$ ο κώδικας C/A, $D_i(t)$ το μήνυμα, $f_1 = 2\pi\omega_1 = 1575.42$ MHz, $f_2 = 2\pi\omega_2 = 1227.60$, $\varphi(t)$ ο ηλεκτρονικός θόρυβος στην φάση του φέροντος κύματος (σχ. 1).



Σχήμα 1

Ο κώδικας $P_i(t)$ (Precise ή Protected) είναι ένας ψευδοτυχαίος κώδικας (μία σειρά ± 1) με τον οποίο διαμορφώνεται το συνημιτονοειδές μέρος της συχνότητας L1. Αυτός ο κώδικας παράγεται με τη βοήθεια ενός αλγόριθμου που επαναλαμβάνεται κάθε 266.4069 ημέρες (Milliken and Zoller, 1980).

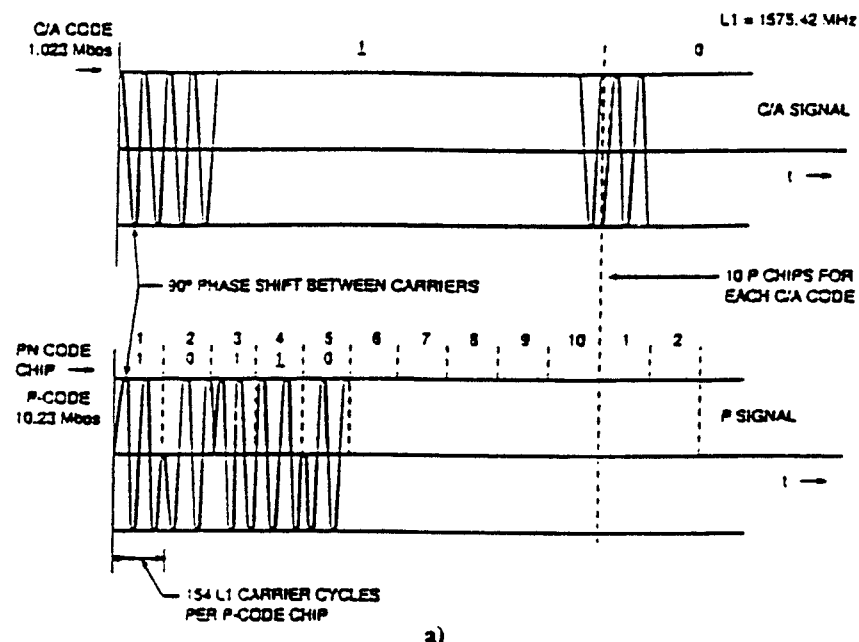
Η συχνότητα του κώδικα P είναι 10.23 MHz, δηλαδή μετά από 154 παλμούς της συχνότητας f_1 , αρχίζει ένας νέος παλμός του κώδικα $P_i(t)$. Το μήκος κύματος του κώδικα αυτού είναι 29.31 m.

Σε κάθε δορυφόρο αντιστοιχίζεται ένα εβδομαδιαίο μοναδικό τμήμα αυτού του κώδικα χωρίς να υπάρχουν επικαλύψεις με τους άλλους δορυφόρους. Κάθε μεσάνυχτα σε χρόνο του συστήματος GPS (GPST) από Σάββατο προς Κυριακή, αυτός ο κώδικας αρχίζει να μεταδίδεται από την αρχή.

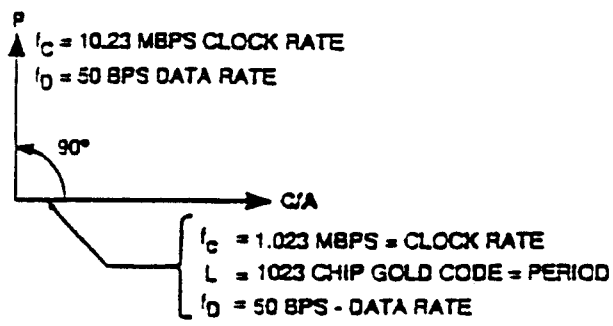
Το ημιτονοειδές μέρος της φέρουσας συχνότητας διαμορφώνεται με τον κώδικα C/A (Coarse/Acquisition). Ο κώδικας $G_i(t)$ βασίζεται στους αλγόριθμους του Gold (Gold, 1967/Spilker, 1980) και επαναλαμβάνεται κάθε msec.

Κατά την διάρκεια ενός msec δημιουργούνται 1023 δυαδικά ψηφία (± 1) στην συχνότητα 1.023 MHz. Έτσι κάθε 1540 φέροντα κύματα της συχνότητας f_1 αρχίζει ένας νέος παλμός G_1 , μήκους κύματος 293.1m.

Και οι δύο κώδικες αποτελούνται από δυαδική διαμόρφωση φάσης +1 ή -1. Το 0 δεν αλλάζει τη φάση του κύματος, το +1 την μεταβάλλει από 0° σε 180° , το -1 αντίστροφα για τον κώδικα P και 90° σε 270° ή αντίστροφα για τον κώδικα C/A (σχ. 2).



GPS SIGNAL



P SIGNAL = LONG CODE WITH 50 BPS DATA = XP_1

C/A SIGNAL = 1023 CHIP GOLD CODE WITH 50 BPS DATA = XG_1

Σχήμα 2

Κώδικας ψευδοτυχαίου θορύβου (PRN-code) είναι οποιαδήποτε σειρά από μια ομάδα δυαδικών σειρών που παρουσιάζει τις ιδιότητες θορύβου, με πιο σημαντική την ιδιότητα, ότι η σειρά παρουσιάζει ελάχιστη αυτοσυσχέτιση (auto-correlation), εκτός από το μηδενικό χρονικό διάστημα.

Δυαδική διαμόρφωση δύο φάσεων πάνω σε φέρον κύμα σταθερής συχνότητας είναι αλλαγές φάσης (πχ από 0° σε 180° , ή αντίστροφα) για να παρασταθούν δυαδικά ψηφία.

Η διαμόρφωση του σήματος με τον κώδικα P ή C/A εξυπηρετεί την χρονομέτρηση. Αν ταυτόχρονα με τον δορυφόρο, το ίδιο σήμα δημιουργείται και στον δέκτη, η διαφορά χρόνου μεταξύ του σήματος που εισέρχεται στο δέκτη και του παραγόμενου στο δέκτη, αντιστοιχεί στο χρόνο που έκανε το σήμα για να καλύψει την απόσταση δορυφόρου-δέκτη.

Ο κώδικας P, λόγω της υψηλότερης συχνότητας δίνει μεγαλύτερη ακρίβεια στην χρονομέτρηση, άρα και στον προσδιορισμό της απόστασης. Ο δέκτης όμως είναι αδύνατο να εντοπίσει σε ποιο σημείο βρίσκεται ο κώδικας P, λόγω της μεγάλης του διάρκειας των 267 ημερών. Χρειάζεται λοιπόν κάποια βοήθεια (HOW word), ώστε να εντοπισθεί για συγκεκριμένη χρονική στιγμή σε ποιο σημείο βρίσκεται ο κώδικας P.

Αντίστοιχα διαμορφώνεται ο κώδικας P και στην f_2 συχνότητα.

Εκτός από τους δύο κώδικες, το ημιτονοειδές και το συνημιτονοειδές σήμα διαμορφώνονται και με ένα κώδικα $D_i(t)$, χαμηλής συχνότητας που περιέχει το μήνυμα του δορυφόρου. Σε αυτό το μήνυμα περιλαμβάνεται και η λέξη HOW (HandOver Word), που επιτρέπει την χρήση του κώδικα P.

Ο κώδικας $D_i(t)$ του μηνύματος είναι και αυτός μία σειρά από δυαδικά ψηφία ± 1 , με συχνότητα 50 bits/sec. Η διάρκεια του κώδικα είναι 30 sec και διαιρείται σε 5 τμήματα των 6 sec ή 300 bits. Η πρώτη λέξη του κάθε μηνύματος πολλαπλασιαζόμενη επί 4 δίνει τον χρόνο του συστήματος GPS του επόμενου τμήματος, που εκφράζεται με ένα μετρητή Z (Z-count, 0 μέχρι 403199). Αυτός ο μετρητής είναι ο ακέραιος αριθμός 1.5 sec, που έχουν περάσει από την αρχή της εβδομάδας (Σάββατο προς Κυριακή τα μεσάνυχτα).

Το ημιτονοειδές και το συνημιτονοειδές σήμα έχουν διαφορετικά εύρη A_G και A_P . Ο κώδικας C/A είναι ισχυρότερος κατά 3 ως 6 db, οπότε πρέπει να λαμβάνεται με καλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο.

Στις σχέσεις 1 και 2 το $\varphi(t)$ είναι ο θόρυβος της φάσης του εκπεμπόμενου σήματος. Ένα απλό μοντέλο για το θόρυβο είναι:

$$\varphi(t) = \delta\varphi(t) + \delta f_1(t) \cdot t \quad (3)$$

όπου $\delta\varphi(t)$ είναι θόρυβος στη φάση και το $\delta f_1(t) \cdot t$ η ολίσθηση του ταλαντωτή (αλλαγή συχνότητας - drift).

Στην δεύτερη συχνότητα L2 δεν εκπέμπεται ο κώδικας C/A και οι χρήστες δεκτών μιας συχνότητας (L1) θα πρέπει να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα της ιονοσφαιρικής διάθλασης, ίσως με κάποιο ιονοσφαιρικό μοντέλο.

Σήμερα (Οκτ. 00), 27 επιχειρησιακοί δορυφόροι (Block II/IIA/IIIR) βρίσκονται σε τροχιά και το σύστημα GPS λειτουργεί με "πλήρη επιχειρησιακή ικανότητα" (Full Operational Capability).

Οι επιχειρησιακοί δορυφόροι εκτός από την μεγαλύτερη αυτονομία σε τροχιά που έχουν (χωρίς επικοινωνία με το σύστημα ελέγχου), έχουν και δύο ακόμα δυνατότητες.

Η πρώτη λέγεται "μη εξαπάτηση" ή "μη παρεμβολή" (Anti-Spoofing) και αφορά την δυνατότητα που παρέχεται στον Κεντρικό Σταθμό Ελέγχου του συστήματος να μετατρέψει τον γνωστό ακριβή κώδικα $P(t)$ σε άγνωστο $Y(t)$, ώστε να αποφευχθούν σκόπιμες παρεμβολές στο εκπεμπόμενο σήμα, απαγορεύοντας όμως ταυτόχρονα την χρήση του για πολιτικές εφαρμογές.

Η δυνατότητα αυτή έχει τεθεί σε χρήση από 31/01/94 συνεχώς, με μικρά χρονικά διαστήματα διακοπής για πειραματικούς σκοπούς.

Η δεύτερη λέγεται “επιλεκτική διαθεσιμότητα” (Selective Availability) και επιτρέπει στον Κεντρικό Σταθμό Ελέγχου να υποβιβάσει την ακρίβεια που παρέχει ο κώδικας C/A, με εισαγωγή θορύβου στο εκπεμπόμενο σήμα και υποβάθμιση της ακρίβειας της εκπεμπόμενης τροχιάς. Αυτή η επιλογή ετέθη σε εφαρμογή την 1 Ιουλίου 1991 υποβιβάζοντας την στιγμιαία παρεχόμενη ακρίβεια του κώδικα C/A σε 100 m για το 95% του χρόνου και σε 300 m για το 99% του χρόνου, από 25 m που ήταν περίπου.

Η χρήση της δυνατότητας αυτής είχε επίσης διακοπεί για πειραματικούς σκοπούς κατά καιρούς. Ομως με προεδρική οδηγία του αμερικανού προέδρου απο τα μεσανυχτα της 01/05/00 η επιβολή της επιλεκτικής διαθεσιμότητας έχει ανασταλεί και ο εντοπισμός με τον κώδικα C/A παρέχεται με την μέγιστη ακρίβεια, που μπορεί να δώσει το σύστημα.

2.0 Η τροχιά των δορυφόρων GPS (εφημερίδες)

2.1 Γενικά

Οι χρήστες του συστήματος GPS, για να υπολογίσουν τη θέση τους χρειάζονται δεδομένα, που περιέχονται στο εκπεμπόμενο από τους δορυφόρους μήνυμα ναυσιπλοίας, που διαμορφώνεται σε δυαδική μορφή δεδομένων πάνω στις φέρουσες συχνότητες.

Τα δεδομένα περιλαμβάνουν πληροφορία για την λειτουργία του δορυφόρου (health status), πληροφορία χρόνου για τη μεταφορά της παρακολούθησης του σήματος από τον κώδικα C/A στον κώδικα P, τις παραμέτρους για τον υπολογισμό της διόρθωσης του χρονόμετρου, τα τροχιακά στοιχεία του δορυφόρου και τις διορθώσεις για την καθυστέρηση της διάδοσης του σήματος λόγω ιονόσφαιρας. Επιπλέον περιέχεται πληροφορία για τις λιγότερο ακριβείς τροχιές και την κατάσταση λειτουργίας όλων των υπόλοιπων δορυφόρων στο σχηματισμό (almanac), που χρειάζεται για τον προγραμματισμό της παρακολούθησης και των άλλων δορυφόρων, ενώ έχει προβλεφθεί χώρος για τη διαμόρφωση και εκπομπή ειδικών μηνυμάτων.

Κάθε δορυφόρος εκπέμπει το μήνυμά του κάθε 30 sec. Αυτό το μήνυμα αποκωδικοποιείται (από τον δέκτη) και μετατρέπεται σε θέση (και ταχύτητα) για τον δορυφόρο για οποιαδήποτε χρονική στιγμή.

Οι εφημερίδες των δορυφόρων προσδιορίζονται από το τμήμα ελέγχου στο έδαφος, με παρατηρήσεις στους δορυφόρους από ένα δίκτυο σταθμών παρακολούθησης γνωστών γήινων συντεταγμένων.

Οι τροχιές που υπολογίζονται προεκτείνονται στο μέλλον, κωδικοποιούνται και φορτώνονται στη μνήμη των δορυφόρων κάθε 26 ώρες.

2.2 Ο υπολογισμός της εκπεμπόμενης εφημερίδας

Η εκπεμπόμενη εφημερίδα είναι η τροχιά κάθε δορυφόρου που περιέχεται στο μήνυμα που εκπέμπεται. Η διαδικασία του υπολογισμού της είναι (Russel and Schaibly, 1980):

1. Μια τροχιά αναφοράς παράγεται για κάθε δορυφόρο GPS, από δεδομένα που έχουν αποκτηθεί στο "άμεσο παρελθόν" και προεκτείνεται στο μέλλον.

2. Τα προβλεπόμενα τροχιακά στοιχεία χρησιμοποιούνται σαν αρχικές συνθήκες (τιμές) με ένα εκτιμητή Kalman, ώστε να υπολογισθούν για τις χρονικές στιγμές που απαιτείται θέσεις και ταχύτητες του δορυφόρου. Πιο αναλυτικά, στο τέλος κάθε μέρας οι παρατηρήσεις GPS από τους σταθμούς παρακολούθησης χρησιμοποιούνται για την ενημέρωση του αντίστοιχου τμήματος της τροχιάς αναφοράς. Σ' αυτό το σημείο τα υπολογιζόμενα τροχιακά στοιχεία των δορυφόρων αντιστοιχούν στο τέλος της κάθε ημέρας.

3. Από τα τελευταία υπολογισμένα τροχιακά στοιχεία γίνεται ξανά επέκταση στο μέλλον για 14 ημέρες.

4. Η πληροφορία για τις τροχιές που εκπέμπεται στο μήνυμα ναυσιπλοίας βασίζεται σε προσαρμογή με καμπύλες στις προβλεπόμενες εφημερίδες για 4 μέχρι 6 ώρες.

5. Αυτά τα μικρά τόξα (των 4 ή 6 ωρών) μετατρέπονται από αδρανειακές καρτεσιανές συντεταγμένες σε κεπλέρια στοιχεία, που μεταδίδονται και αποθηκεύονται στην μνήμη κάθε δορυφόρου. Κάθε ώρα νέα στοιχεία μεταδίδονται (από τον δορυφόρο), αντικαθιστώντας τα παλαιότερα στοιχεία.

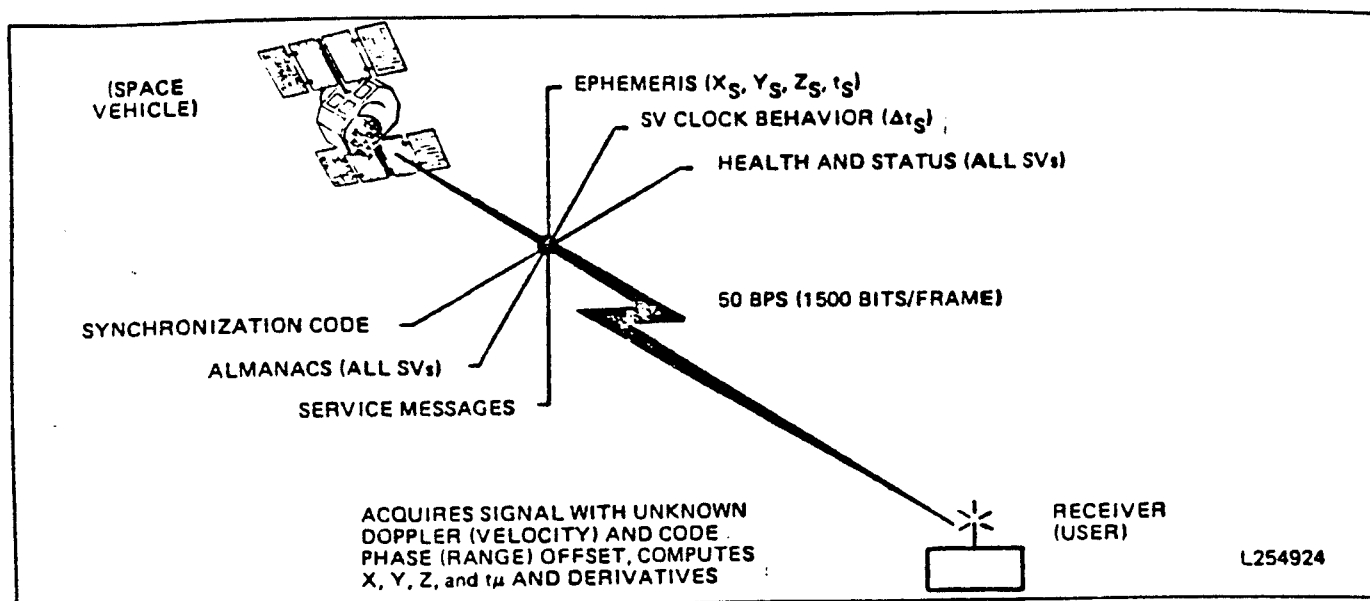
6. Η ενημέρωση είναι (μέχρι σήμερα) ημερήσια. Συνήθως λοιπόν δεν χρησιμοποιούνται τα δεδομένα από την δεύτερη μέχρι την 14η μέρα, εκτός αν δεν είναι δυνατή (για τεχνικούς λόγους), νέα ενημέρωση του δορυφόρου από το έδαφος.

7. Επειδή οι μετρήσεις κάθε ημέρας χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με την τροχιά αναφοράς, για την πρόβλεψη της τροχιάς κάθε ημέρας, η ακρίβεια της εφημερίδας μειώνεται σαν συνάρτηση του χρόνου από την ώρα της ενημέρωσης (αρχή της ημέρας) και σαν συνάρτηση της παλαιότητας της τροχιάς αναφοράς (από την αρχή της εβδομάδας).

8. Αν και η ακρίβεια της εφημερίδας φαίνεται να είναι καλύτερη από μερικά m, σε μερικές περιπτώσεις η ακρίβεια της παρουσιάζεται αρκετά χειρότερη.

2.3 Περιεχόμενο και δομή του μηνύματος ναυσιπλοίας

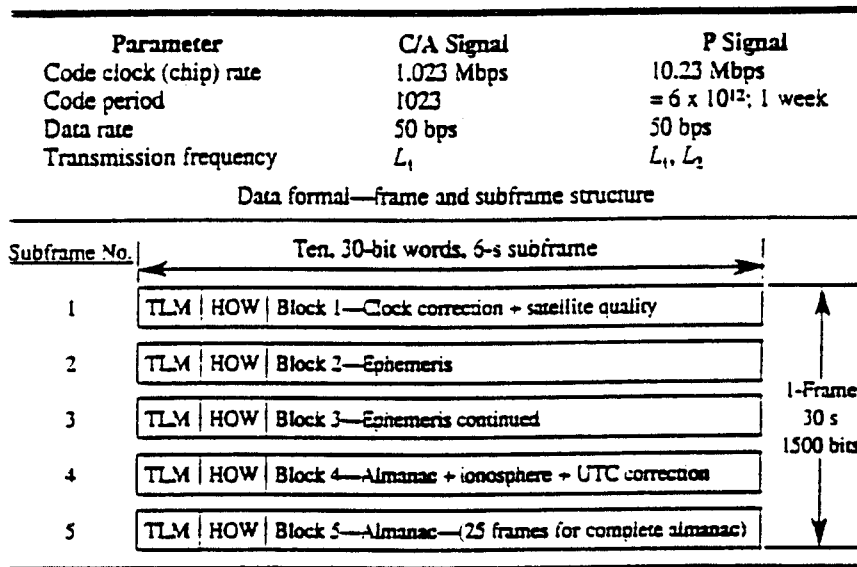
Το μήνυμα ναυσιπλοίας περιέχει τα δεδομένα, που χρειάζεται ένας δέκτης για να λειτουργήσει και για να υπολογίσει την θέση του με την βοήθεια του συστήματος GPS (σχ. 3).



Σχήμα 3

Τα δεδομένα περιλαμβάνουν πληροφορία για την λειτουργία του δορυφόρου, πληροφορία χρόνου, πληροφορία χρόνου για την μεταφορά της παρακολούθησης από τον κώδικα C/A στον κώδικα P, τις παραμέτρους για τον υπολογισμό της διόρθωσης του χρονομέτρου του δορυφόρου, την τροχιά του δορυφόρου και τις διορθώσεις για τον υπολογισμό της καθυστέρησης λόγω ιονόσφαιρας. Επιπλέον υπάρχει πληροφορία για τις προσεγγιστικές τροχιές όλων των υπολοίπων δορυφόρων που λειτουργούν, ενώ υπάρχει και χώρος για ειδικά μηνύματα.

Το μήνυμα (Van Dierendonck et al, 1980) αποτελείται από 5 τμήματα των 6 sec, δηλαδή διαρκεί 30 sec ή 1500 bits (σχ. 4).



Σχήμα 4

Τα δεδομένα εκπέμπονται με ρυθμό 50 bits/sec και είναι κοινά και στον P και στον κώδικα C/A και στις δύο συχνότητες L_1 και L_2 .

1. Το πρώτο τμήμα (Data Block 1) περιέχει τις παραμέτρους διόρθωσης του χρονομέτρου και της ιονοσφαιρικής διάθλασης, όπως υπολογίζονται στο τμήμα ελέγχου.
2. Το δεύτερο και τρίτο τμήμα (Data Block 2) περιέχουν την εφημερίδα του δορυφόρου.
3. Το τέταρτο τμήμα περιέχει αλφαριθμητική πληροφορία για τους χρήστες (Message Block).
4. Το πέμπτο τμήμα (Data Block 5) περιέχει πληροφορίες για προσεγγιστική τροχιά, διόρθωση χρονομέτρων και κατάσταση λειτουργίας για κάθε δορυφόρο (ένα τμήμα για κάθε δορυφόρο).

Ολόκληρο το τμήμα των δεδομένων επαναλαμβάνεται κάθε 30 sec, εκτός από το Block 5, που αλλάζει περιστροφικά (σειριακά) 25 φορές (γιατί κάθε τμήμα περιέχει δεδομένα για ένα δορυφόρο).

Κάθε μια ώρα ονομαστικά ανανεώνεται η πληροφορία στα Block 1 και 2. Τα Block 3 και Message Block ανανεώνονται μόνο μετά από νέα ενημέρωση από το έδαφος.

Κάθε τμήμα των δεδομένων αρχίζει με μια λέξη τηλεμετρίας (TLM) και την λέξη HOW, που παράγονται σε κάθε ένα δορυφόρο. Η λέξη TLM (Telemetry Word) περιλαμβάνει μήνυμα για την ενημέρωση των τροχιακών στοιχείων (πχ αν βρίσκεται εκείνη τη στιγμή σε εξέλιξη) και άλλα διαγνωστικά μηνύματα.

Η λέξη HOW (Handover Word - λέξη μεταφοράς) περιλαμβάνει τον μετρητή Z (Z- Count Word) και την πληροφορία της μεταφοράς από τον κώδικα C/A στον κώδικα P.

Οι παράμετροι της τροχιάς δίνονται σαν κεπλέρια στοιχεία μαζί με τις παρέλξεις, ως προς τον χρόνο αναφοράς της εφημερίδας t_{oe} , ονομαστικά στο κέντρο του χρόνου μετάδοσης.

Ο χρόνος του συστήματος GPS, όπως βγαίνει από την αποκωδικοποίηση των σημάτων, και η παράμετρος t_{oe} μετρούνται σε δευτερόλεπτα (sec) από την αρχή της εβδομάδας (Σάββατο/Κυριακή τα μεσάνυχτα).

Τα κεπλέρια στοιχεία συμπληρώνονται με τις παρακάτω μεταβλητές για τον υπολογισμό και των παρέλξεων.

- | | |
|---|---|
| α) Δn | η αλλαγή στη μέση ανωμαλία |
| β) $\dot{\Omega}$ | η μετατόπιση(ταχύτητα) του ανιόντος δεσμού |
| γ) $C_{uc}, C_{us}, C_{tc}, C_{rs}, C_{ic}, C_{is}$ | τα εύρη για τις αρμονικές διορθώσεις (στο cos και sin)
στον εφαπτομενικό όρο της τροχιάς, στον ακτινικό και την κλίση της. |

Η εφημερίδα δίνεται με τη μορφή κεπλέριων στοιχείων, ενώ τα περιοδικά φαινόμενα με την μορφή διορθώσεων πάνω στα κεπλέρια στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά θεωρούνται ακριβή για ένα διάστημα μιας ώρας από το χρόνο στον οποίο αναφέρονται, ενώ θεωρούνται επαρκούς ακρίβειας και για την επόμενη μισή ώρα.

Συνολικά 16 παράμετροι περιγράφουν τα κεπλέρια στοιχεία και τις παρέλξεις στην εφημερίδα. Επειδή τα κεπλέρια στοιχεία μεταβάλλονται συνεχώς, μία απαραίτητη

παράμετρος για τον προσδιορισμό της τροχιάς, είναι ο χρόνος, που δίνεται στην ποσότητα t_{oe} (time of ephemeris) εκφρασμένη σε δευτερόλεπτα από την αρχή της εβδομάδας.

Η τροχιά του δορυφόρου περιγράφεται από τις εξής παραμέτρους (Van Dierendonck, 1980):

M_0	Μέση ανωμαλία στο χρόνο αναφοράς
Δ_n	Αλλαγή στη μέση κίνηση του δορυφόρου από την υπολογισμένη τιμή
e	Εκκεντρότητα της ελλειπτικής τροχιάς
\sqrt{A}	Τετραγωνική ρίζα του μεγάλου ημιάξονα
Ω_0	Ορθή αναφορά ανιόντος δεσμού στο χρόνο αναφοράς
i_0	Κλίση στο χρόνο αναφοράς
ω	Στοιχείο περιγείου
$\dot{\Omega}$	Γωνιακή ταχύτητα μετατόπισης του ανιόντος δεσμού
c_{uc}	Πλάτος αρμονικής διόρθωσης στο (cos) του εφαπτομενικού όρου της τροχιάς
c_{us}	Πλάτος αρμονικής διόρθωσης στο (sin) του εφαπτομενικού όρου της τροχιάς
c_{rc}	Πλάτος αρμονικής διόρθωσης στο (cos) του ακτινικού όρου της τροχιάς
c_{rs}	Πλάτος αρμονικής διόρθωσης στο (sin) του ακτινικού όρου της τροχιάς
c_{ic}	Πλάτος αρμονικής διόρθωσης στο (cos) της κλίσης της τροχιάς
c_{is}	Πλάτος αρμονικής διόρθωσης στο (sin) της κλίσης της τροχιάς
t_{oe}	Χρόνος αναφοράς της εφημερίδας
IODE	Εποχή αναφοράς των δεδομένων της εφημερίδας

Η θέση του κάθε δορυφόρου, που παρακολουθείται από το δέκτη, μπορεί να υπολογιστεί στο γεωκεντρικό γήινο σύστημα αναφοράς WGS'84 χρησιμοποιώντας τις 16 παράμετρους της τροχιάς και τις παρακάτω εξισώσεις (Van Dierendonck et al, 1980).

$$\mu = 3.986004418 \cdot 10^{14} m^3 / sec^2 \quad (I)$$

$$\dot{\Omega}_e = 7.2921151467 \cdot 10^{-5} rad / sec \quad (II)$$

$$A = (\sqrt{A})^2 \quad (1)$$

$$n_0 = \sqrt{\frac{\mu}{A^3}} \quad (2)$$

$$t_k = t - t_{oe} \quad (3)$$

$$n = n_0 + \Delta n \quad (4)$$

$$M_k = M_0 + n \cdot t_k \quad (5)$$

$$M_k = E_k - e \cdot \sin E_k \quad (6)$$

$$v_k = \tan^{-1} \left\{ \frac{\sin v_k}{\cos v_k} \right\} = \tan^{-1} \left\{ \frac{(\sqrt{1-e^2} \cdot \sin E_k / (1-e \cdot \cos E_k))}{(\cos E_k - e) / (1-e \cdot \cos E_k)} \right\} \quad (7)$$

$$E_k = \cos^{-1} \left\{ \frac{e + \cos v_k}{1 + e \cdot \cos v_k} \right\} \quad (8)$$

$$\Phi_k = v_k + \omega \quad (9)$$

$$\delta u_k = c_{us} \cdot \sin 2\Phi_k + c_{uc} \cdot \cos 2\Phi_k \quad (10)$$

$$\delta r_k = c_{rc} \cdot \cos 2\Phi_k + c_{rs} \cdot \sin 2\Phi_k \quad (11)$$

$$\delta i_k = c_{ic} \cdot \cos 2\Phi_k + c_{is} \cdot \sin 2\Phi_k \quad (12)$$

$$u_k = \Phi_k + \delta u_k \quad (13)$$

$$r_k = A(1 - e \cdot \cos E_k) + \delta r_k \quad (14)$$

$$i_k = i_0 + \delta i_k + (IDOT)t_k \quad (15)$$

$$x'_k = r_k \cdot \cos u_k \quad (16)$$

$$y'_k = r_k \cdot \sin u_k \quad (17)$$

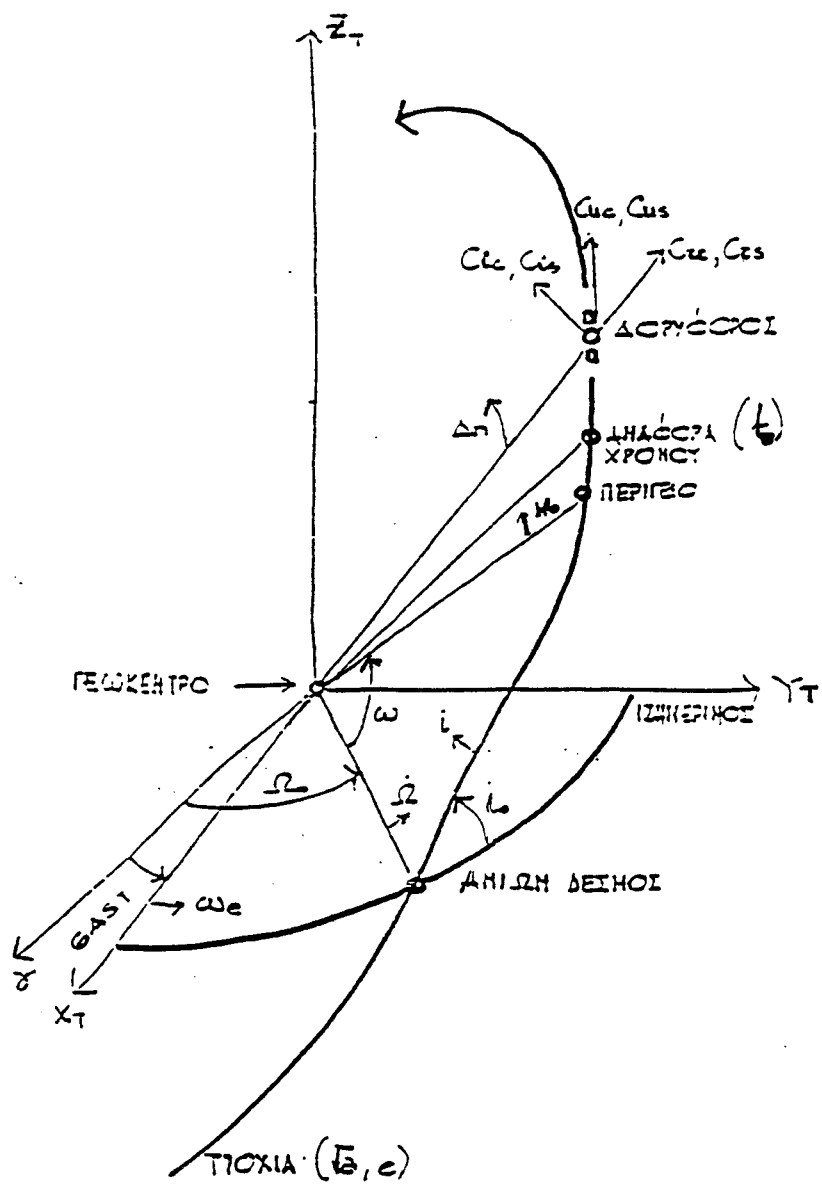
$$\Omega_k = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_e)t_k - \dot{\Omega}_e \cdot t_{oe} \quad (18)$$

$$x_k = x'_k \cdot \cos \Omega_k - y'_k \cdot \cos i_k \cdot \sin \Omega_k \quad (19)$$

$$y_k = x'_k \cdot \sin \Omega_k + y'_k \cdot \cos i_k \cdot \cos \Omega_k \quad (20)$$

$$z_k = y'_k \cdot \sin i_k \quad (21)$$

- (I) Παγκόσμια βαρυτική σταθερά επι την μάζα της γής (σύστημα αναφοράς WGS84)
- (II) Ταχύτητα περιστροφής της γής (σύστημα αναφοράς WGS84)
 - (1) Μεγάλος ημιάξονας της τροχιάς
 - (2) Υπολογισμένη μέση κίνηση του δορυφόρου
 - (3) Χρόνος απο την εποχή αναφοράς της εφημερίδας, χρόνος του συστήματος GPS κατά την ώρα της εκπομπής, δηλαδή διορθωμένος για τον χρόνο διαδρομής (απόσταση / ταχύτητα του φωτός). Επιπλέον το t_k πρέπει να είναι η συνολική χρονική διαφορά μεταξύ του χρόνου t και της εποχής t_{oe} λαμβάνοντας υπόψη την αρχή ή το τέλος της εβδομάδας. Έτσι αν το t_k είναι μεγαλύτερο απο 302400 sec πρέπει να αφαιρεθούν 604800 sec απο το t_k . Αν το t_k είναι μικρότερο απο -302400 sec τότε πρέπει να προστεθούν 604800 sec στο t_k .
 - (4) Διορθωμένη μέση κίνηση
 - (5) Μέση Ανωμαλία
 - (6) Εξίσωση του Kepler για την έκκεντρη ανωμαλία (λύνεται με επαναλήψεις)
 - (7) Αληθής Ανωμαλία
 - (8) Εκκεντρη Ανωμαλία (χρησιμοποιείται για έλεγχο)
 - (9) Στοιχείο (γωνία) του πλάτους
 - (10) Διόρθωση στο στοιχείο του πλάτους (λόγω παρέλξεων)
 - (11) Διόρθωση στην ακτίνα (λόγω παρέλξεων)
 - (12) Διόρθωση στην κλίση (λόγω παρέλξεων)
 - (13) Διορθωμένο στοιχείο του πλάτους
 - (14) Διορθωμένη ακτίνα
 - (15) Διορθωμένη κλίση
 - (16) Συντεταγμένη x του δορυφόρου στο τροχιακό επίπεδο
 - (17) Συντεταγμένη y του δορυφόρου στο τροχιακό επίπεδο
 - (18) Διορθωμένο μήκος του ανιόντος δεσμού
 - (19) Συντεταγμένη x του δορυφόρου στο WGS84
 - (20) Συντεταγμένη y του δορυφόρου στο WGS84
 - (21) Συντεταγμένη z του δορυφόρου στο WGS84

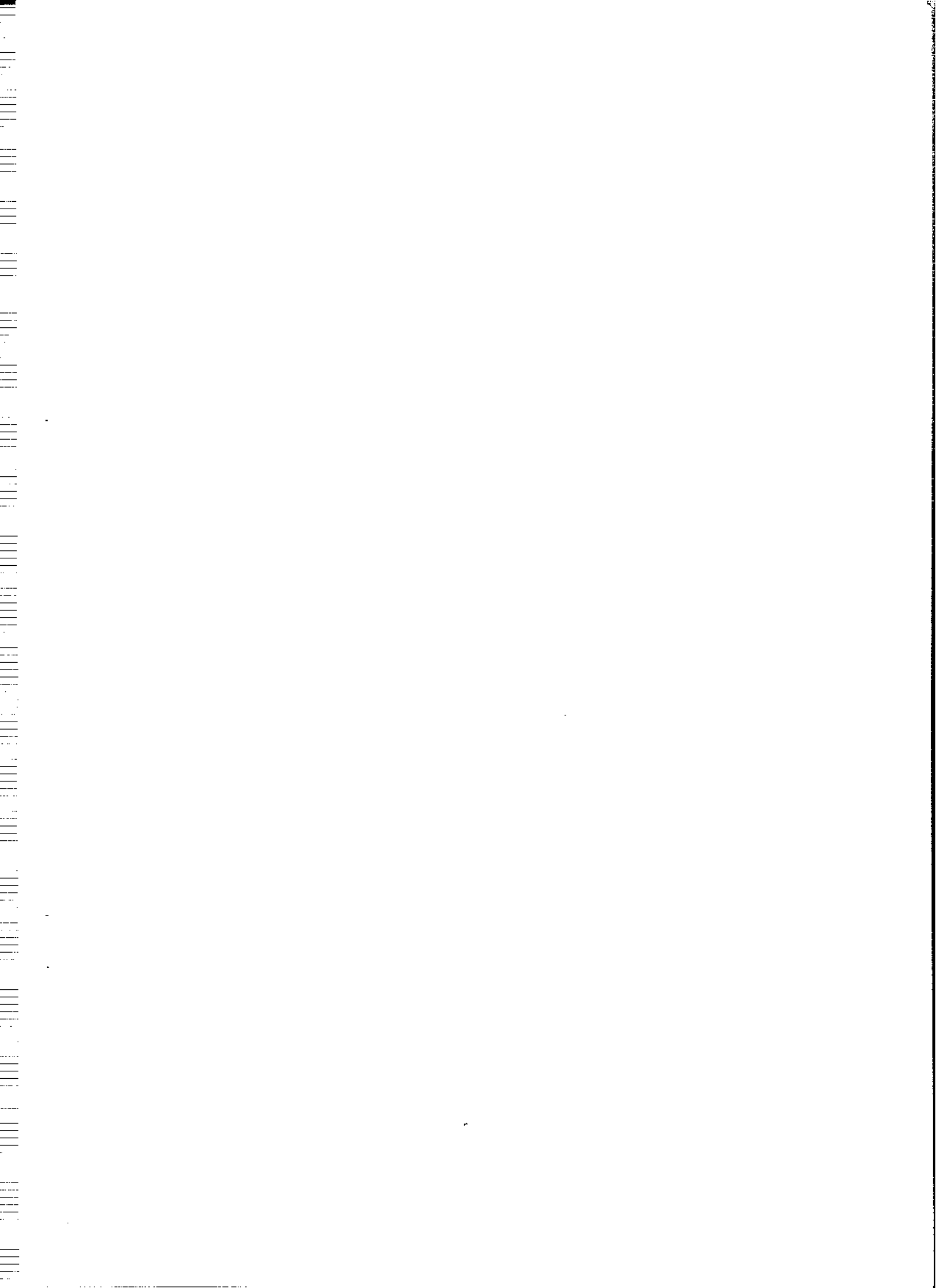


Σχήμα 5

Βιβλιογραφία

- Gold R., (1967): "Optimal Binary Sequences for Spread Spectrum Multiplexing", IEEE Transactions on Information Theory, 619-621.
- Milliken R., C. Zoller, (1980): "Principle of Operation of NAVSTAR and System Characteristics", Global Positioning System papers published in Navigation, Vol I, 1980.
- Russell S., J. Schaibly, (1980): "Control Segment and User Performance", Global Positioning System papers published in Navigation, Vol I, 1980.
- Spilker J., (1980): "GPS Signal Structure and Performance Characteristics", Global Positioning System papers published in Navigation, Vol I, 1980.
- Van Dierendonck A, S. Russell, E. Kopitzke, M. Birnbaum, (1980): "The GPS Navigation Message", Global Positioning System papers published in Navigation, Vol I, 1980.

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ GPS



1.0 Η μέτρηση της ψευδοαπόστασης

Οι δέκτες του συστήματος GPS, συγκρίνουν τους λαμβανόμενους κώδικες (που εκπέμπονται από τους δορυφόρους) με αντίγραφα που φτιάχνουν οι ίδιοι. Αυτοί οι κώδικες (δορυφόρων και δεκτών) αν και παράγονται κατά όμοιο ακριβώς τρόπο, δεν ταυτίζονται σε χρόνο και η διαφορά χρόνου μεταξύ τους, πολλαπλασιαζόμενη με την ταχύτητα του φωτός στο κενό c , δίνει την απόσταση δορυφόρου – δέκτη. Αυτή η μέτρηση περιέχει ορισμένα σφάλματα, όπως την ατμοσφαιρική διάθλαση, αλλά και τα σφάλματα χρονομέτρων δορυφόρων και δέκτη, για αυτό και ονομάζεται ψευδοαπόσταση.

Αυτή η σύγκριση, μπορεί να γίνει από υψηλής ποιότητας δέκτες με σφάλμα της τάξης του 1/100 του κύκλου. Στη συχνότητα του κώδικα C/A, $f_{C/A}=1.023$ MHz, το μήκος κύματος (λ) είναι περίπου 300 m, άρα η καθαρή μέτρηση γίνεται με αβεβαιότητα περίπου ± 3 m, ενώ στη συχνότητα του κώδικα P, $f_P=10.23$ MHz, το μήκος κύματος είναι περίπου 30 m και η αβεβαιότητα θα είναι περίπου ± 0.30 m ($\lambda = c / f$). Επομένως, αν συμπεριληφθούν και οι υπόλοιπες πηγές σφαλμάτων, η αναμενόμενη ακρίβεια του εντοπισμού θα είναι της τάξης των μερικών μέτρων. Με μετρήσεις ψευδοαποστάσεων προσδιορίζουμε το διάνυσμα από το κέντρο μάζας της γης μέχρι τον παρατηρητή.

Ως γνωστόν, ο χρόνος του συστήματος GPS (GPST), ορίζεται από τον μέσο όρο αρκετών ατομικών χρονομέτρων στο κέντρο ελέγχου του συστήματος, αλλά η κλίμακα αυτή του χρόνου (T) είναι διαφορετική από:

α) Την κλίμακα χρόνου (λόγω του χρονομέτρου) κάθε δορυφόρου (t^S). Αν και στον δορυφόρο λειτουργούν ατομικά χρονόμετρα και αυτά παρουσιάζουν σφάλματα.

β) Την κλίμακα χρόνου (λόγω του χρονομέτρου) κάθε δέκτη (τ_r). Οι δέκτες χρησιμοποιούν σχετικά φθηνά χρονόμετρα χαλαζία, τα οποία παρουσιάζουν σφάλματα.

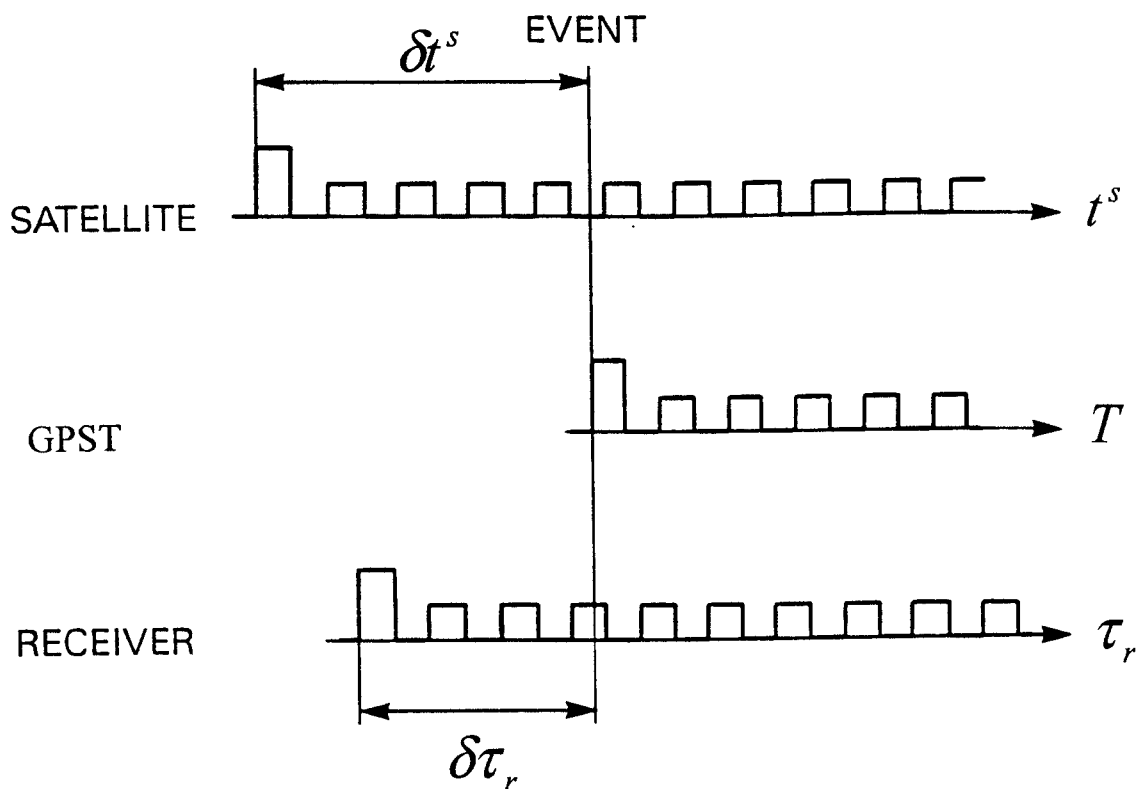
Οι παραπάνω κλίμακες χρόνου σχετίζονται μεταξύ τους με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$1.1 \quad T = t^s + \delta t^s$$

$$1.2 \quad T = \tau_r + \delta \tau_r$$

όπου δt^s είναι η αποχή (offset) του χρονομέτρου του δορυφόρου και $\delta \tau_r$ η αποχή του χρονομέτρου του δέκτη (σχήμα 1.1).

ΚΛΙΜΑΚΕΣ ΧΡΟΝΟΥ

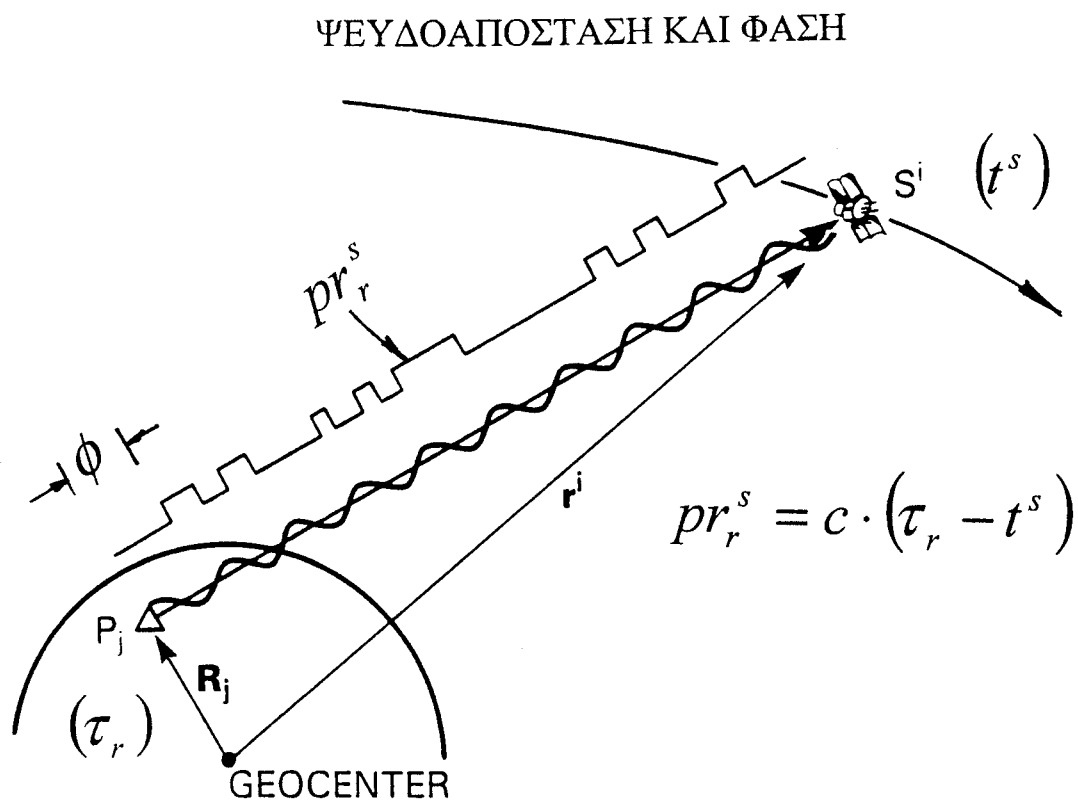


Σχήμα 1.1

Επομένως, με βάση τα παραπάνω μπορούμε να ορίσουμε ως:

α) Ψευδοαπόσταση (pseudorange - pr) την διαφορά μεταξύ του χρόνου εκπομπής μιας πληροφορίας του σήματος του GPS στην κλίμακα χρόνου του δορυφόρου (t^s) και του χρόνου λήψης της πληροφορίας αυτής από τον δέκτη, στη κλίμακα χρόνου του δέκτη (τ_r), πολλαπλασιασμένη με την ταχύτητα του φωτός στο κενό (c), δηλαδή (σχήμα 1.2):

$$1.3 \quad pr_r^s = c \cdot (\tau_r - t^s)$$



Σχήμα 1.2

β) Γεωμετρική απόσταση (geometrical range - ρ), την διαφορά μεταξύ του χρόνου εκπομπής μιας πληροφορίας του σήματος GPS (T^s), στην κλίμακα χρόνου του συστήματος GPS (GPST) και του χρόνου λήψης της πληροφορίας αυτής στο δέκτη (T_r), στην κλίμακα χρόνου του GPS, πολλαπλασιασμένη με την ταχύτητα του φωτός στο κενό (c), δηλαδή:

$$1.4 \quad \rho_r^s = c \cdot (T_r - T^s)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (1.1) και (1.2) η γεωμετρική απόσταση μπορεί να γραφεί ως:

$$1.5 \quad \rho_r^s = c \cdot (\tau_r + \delta\tau_r) - (t^s + \delta t^s)$$

Οπότε:

$$1.6 \quad \rho_r^s = c \cdot (\tau_r - t^s) + c \cdot (\delta\tau_r - \delta t^s)$$

Αν λάβουμε υπόψη και τη σχέση (1.3), τότε προκύπτει η εξίσωση:

$$1.7 \quad \rho_r^s = \rho_r^s - c \cdot (\delta\tau_r - \delta t^s) \quad \text{ή}$$

$$1.8 \quad \rho_r^s(\tau_r) = \rho_r^s(T_r, T^s) - c \cdot (\delta\tau_r(\tau_r) - \delta t^s(t^s))$$

η οποία είναι και η βασική εξίσωση παρατήρησης της ψευδοαπόστασης.

Υπάρχουν και άλλοι όροι που είναι δυνατόν να προστεθούν στην εξίσωση (1.7), κυρίως όμως προστίθενται δύο όροι, ώστε να ληφθεί υπόψη η ιονοσφαιρική και τροποσφαιρική διάθλαση. Έτσι:

$$1.9 \quad \rho r_r^s = \rho_r^s - c \cdot (\delta \tau_r - \delta \alpha^s) + d_{iono} + d_{tropo}$$

Επιπλέον η γεωμετρική απόσταση ρ είναι προφανώς:

$$1.10 \quad \rho_r^s = \sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2}$$

Οπότε τελικά:

$$1.11 \quad \rho r_r^s = \sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2} - c \cdot (\delta \tau_r - \delta \alpha^s) + d_{iono} + d_{tropo}$$

Στην πράξη και ιδιαίτερα στην περίπτωση του κινηματικού εντοπισμού, όπου χρειαζόμαστε τον προσδιορισμό της θέσης στιγμιαία (σε πραγματικό χρόνο), τα d_{iono} , d_{tropo} υπολογίζονται με την χρήση μοντέλων για την ατμόσφαιρα, ή δεν λαμβάνονται υπόψη, τα δt^s και X^s , Y^s , Z^s τα λαμβάνουμε από το εκπεμπόμενο μήνυμα ναυσιπλοΐας του δορυφόρου, οπότε αν παρατηρούμε τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους, έχουμε τέσσερις εξισώσεις της μορφής (1.11) ως προς τέσσερις αγνώστους X_r , Y_r , Z_r και $\delta \tau_r$. Αν παρατηρούμε περισσότερους από τέσσερις δορυφόρους, τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και την MET.

Ο προσδιορισμός του σφάλματος του χρονομέτρου του δέκτη δt_r , είναι ιδιαίτερα κρίσιμος (1 msec σφάλματος στη μέτρηση του χρόνου αντιστοιχεί σε απόσταση 300 km) και ο χρόνος είναι στην ουσία η μετρούμενη ποσότητα.

Στην περίπτωση όμως ενός πλοίου, που κινείται στην επιφάνεια της θάλασσας, ο προσδιορισμός δύο συντεταγμένων, του μήκους (λ) και του πλάτους (φ) θα ήταν αρκετός. Στην περίπτωση αυτή θα χρειαστούμε μόνον τρεις δορυφόρους επάνω από τον ορίζοντα του δέκτη, όπου υποχρεωτικά στις άγνωστες παραμέτρους θα συμπεριληφθεί το σφάλμα χρονομέτρου του δέκτη, και όχι το γεωμετρικό υψόμετρό του (h), που μπορούμε να το δεχτούμε και ως σταθερό.

2.0 Η μέτρηση doppler

Είναι γνωστό το φαινόμενο doppler (doppler shift) κατά το οποίο η εκπεμπόμενη συχνότητα από μία πηγή αλλάζει ανάλογα με την κίνησή της ως προς τον παρατηρητή ή την κίνηση του παρατηρητή ή και των δύο. Το ίδιο ακριβώς φαινόμενο παρατηρείται και στην περίπτωση των μετρήσεων στους δορυφόρους GPS.

Αν λ^s είναι το εκπεμπόμενο μήκος κύματος (πχ 0.19 m για την L1) και δεν λάβουμε υπόψη μας άλλες επιδράσεις (όπως την ατμοσφαιρική διάθλαση), τότε το λαμβανόμενο μήκος κύματος θα είναι:

$$2.1 \quad \lambda_r = \lambda^s \left(1 + \frac{\dot{S}}{c} \right)$$

οπου \dot{S} είναι η αλλαγή στην (ακτινική) απόσταση δορυφόρου – παρατηρητή και c η ταχύτητα του φωτός. Αν αντικαταστήσουμε τα μήκη κύματος με τις συχνότητες τότε:

$$2.2 \quad f_r = \frac{2\pi}{\lambda^s \left(1 + \frac{\dot{S}}{c} \right)} = f^s \left(1 - \frac{\dot{S}}{c} \right)$$

οπότε

$$2.3 \quad f^s - f_r = \Delta f = f^s \cdot \frac{\dot{S}}{c}$$

και

$$2.4 \quad \dot{S} = \frac{dS}{dt} = \frac{c}{f^s} \cdot \Delta f$$

και επομένως η διαφορά αποστάσεων μεταξύ δύο χρονικών στιγμών t_j , t_k θα είναι:

$$2.5 \quad S_k - S_j = \frac{c}{f^s} \int_{t_j}^{t_k} \Delta f \cdot dt$$

Αν η αλλαγή της συχνότητας Δf είναι δυνατόν να μετρηθεί, τότε μπορεί να υπολογισθεί βεβαίως και η διαφορά των αποστάσεων $S_k - S_j$, (σχήμα 2.1).

Στο σχήμα 2.2 φαίνεται η ονομαστικά σταθερή εκπεμπόμενη συχνότητα του δορυφόρου f^s , η λαμβανόμενη f_T (υψηλότερη της f^s όσο ο δορυφόρος πλησιάζει τον παρατηρητή, ίση με την f^s στην εγγύτερη απόσταση και χαμηλότερη όσο ο δορυφόρος απομακρύνεται από τον παρατηρητή) και η ονομαστικά σταθερή συχνότητα του παρατηρητή f_g .

Η συχνότητα αυτή f_g είναι κατά 5 ως 10 MHz υψηλότερη της συχνότητας f^s και πάντοτε υψηλότερη της μέγιστης αναμενόμενης f_T (που εξαρτάται από την κίνηση του δορυφόρου και την μέγιστη δυνατή ταχύτητα κίνησης του συγκεκριμένου δέκτη).

Τότε η μέτρηση doppler I θα είναι:

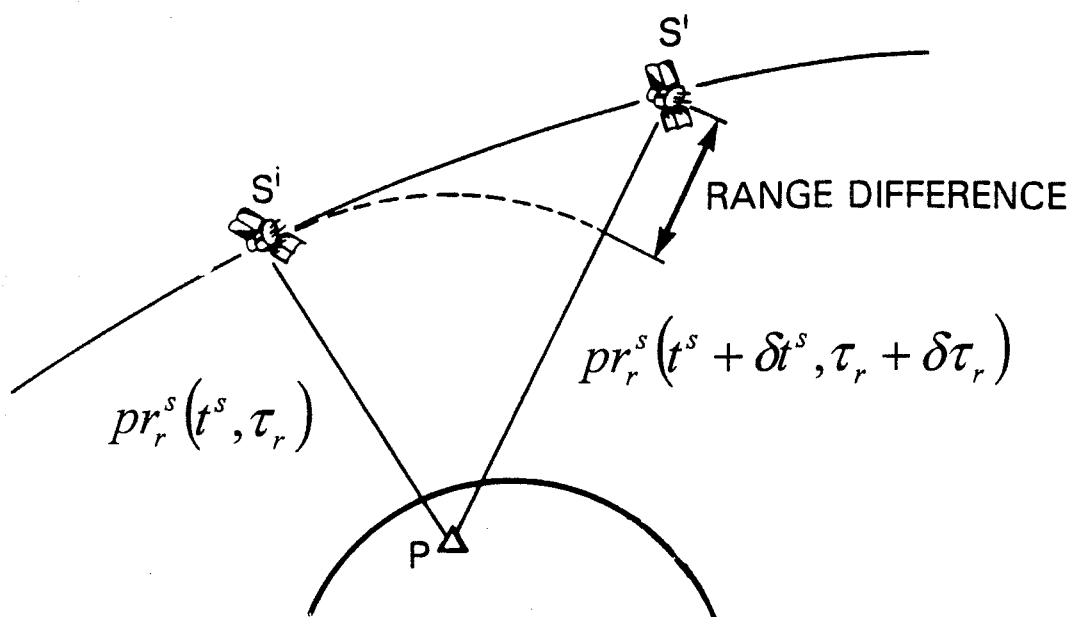
$$2.6 \quad I = \int_{t_{g1}}^{t_{g2}} (f_g - f_r) \cdot dt_g$$

όπου t_g είναι η κλίμακα χρόνου του δέκτη.

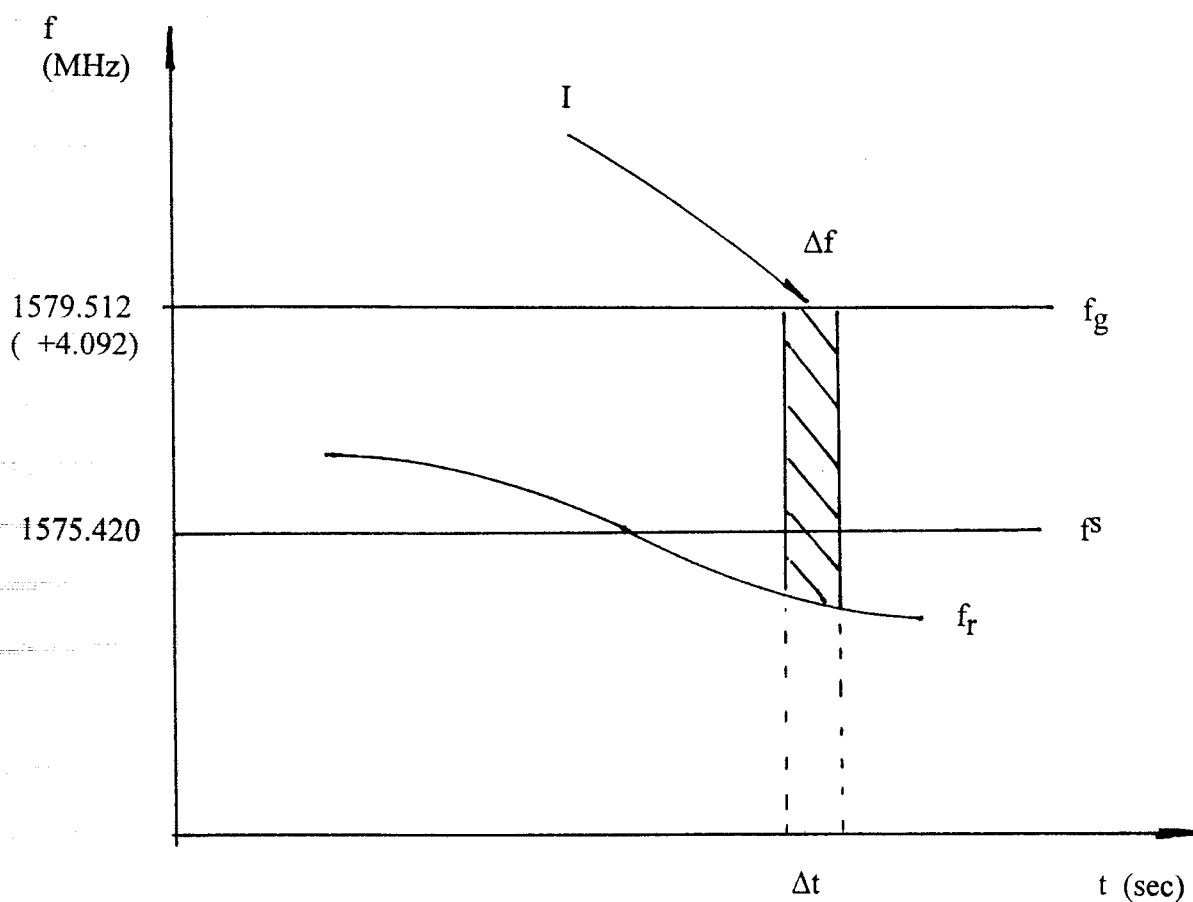
Αν το f_g είναι (ονομαστικά) σταθερό τότε:

$$2.7 \quad I = f_g (t_{g2} - t_{g1}) - \int_{t_{g1}}^{t_{g2}} f_r \cdot dt_g$$

ΜΕΤΡΗΣΗ DOPPLER



Σχήμα 2.1



Σχήμα 2.2

Επειδή ο αριθμός των κύκλων, που δέχεται ο δέκτης στο διάστημα $(t_{g2} - t_{g1})$, πρέπει να είναι ο ίδιος με τον αριθμό που εξεπεμψε ο δορυφόρος το διάστημα $t^{s1} = t_{g1} - S_1/c$ και $t^{s2} = t_{g2} - S_2/c$ τότε:

$$2.8 \int_{t_{g1}}^{t_{g2}} f_r \cdot dt_g = \int_{t^{s1}}^{t^{s2}} f^s \cdot dt^s$$

όπου dt^s η κλίμακα χρόνου του δορυφόρου.

Αν υποθέσουμε ότι και η f^s είναι (ονομαστικά) σταθερή τότε:

$$2.9 I = (f_g - f^s) \cdot (t_{g2} - t_{g1}) + (S_2 - S_1) \cdot \frac{f^s}{c}$$

Αν τεθεί $t_{g1} = t^{s1} + S_1/c$ και $t_{g2} = t^{s2} + S_2/c$ τότε θα ισχύει:

$$2.10 I = (f_g - f^s) \cdot (t^{s2} - t^{s1}) + (S_2 - S_1) \cdot \frac{f_g}{c}$$

Η σχέση (2.9) αντιστοιχίζει την μέτρηση I του φαινομένου doppler με την διαφορά των αποστάσεων στην κλίμακα χρόνου του δέκτη και η (2.10) στην κλίμακα χρόνου του δορυφόρου. Οι δύο αυτές σχέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για εντοπισμό.

Στην πράξη ένας δέκτης GPS μετράει τους κύκλους της φέρουσας I (με ένα μετρητή - counter), όπως στην σχέση (2.6) πάνω σε μία συχνότητα 5 ως 10 MHz, που προκύπτει από την συμβολή των συχνοτήτων f_g και f_r .

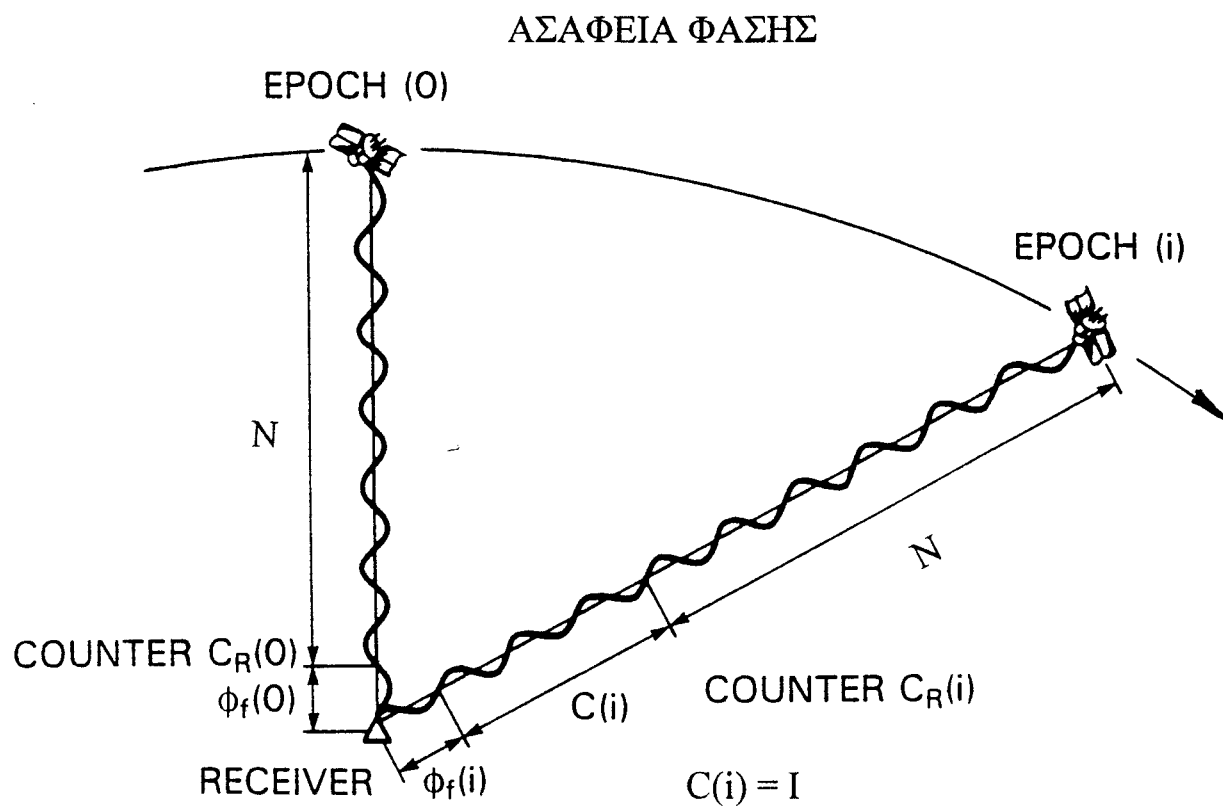
3.0 Η μέτρηση φάσης του φέροντος κύματος

Η μέτρηση της φάσης του φέροντος κύματος (ή της φέρουσας συχνότητας) είναι η βασική μέτρηση για τοπογραφικές και γεωδαιτικές εργασίες. Η φέρουσα L1 με συχνότητα 1575.42 MHz, έχει μήκος κύματος 0.19 m περίπου και η L2 με συχνότητα 1227.60 MHz έχει μήκος κύματος 0.24 m περίπου. Άρα αν και στην περίπτωση αυτή, όπως και στην περίπτωση των ψευδοαποστάσεων, μετράμε με ακρίβεια 1/100 του κύκλου, τότε η απόσταση δορυφόρου – δέκτη μετράται με ακρίβεια ± 2 mm και επομένως μπορούμε να αναμένουμε εντοπισμό με ακρίβεια επαρκή για τις τοπογραφικές και γεωδαιτικές εργασίες.

Οι μετρήσεις της φάσης είναι δυσκολότερες από τις μετρήσεις του κώδικα. Αν φανταστούμε την απόσταση δορυφόρου – δέκτη χωρισμένη σε τμήματα ίσα το μήκος κύματος της L1 των 19 cm, όλα αυτά τα τμήματα αυτά θα είναι όμοια μεταξύ τους σε αντίθεση με τα τμήματα πχ των 300 m του κώδικα C/A, όπου το κάθε ένα είναι ξεχωριστό και γνωστό και ο δέκτης μπορεί να τα αναγνωρίσει και να τα χρησιμοποιήσει για την μέτρηση.

Όταν λοιπόν ο δέκτης εγκλωβίσει ένα δορυφόρο και κάνει την πρώτη ανάγνωση (η πρώτη ανάγνωση δεν καταγράφεται κατ' ανάγκη και ως μέτρηση), δεν μπορεί να ξέρει σε ποιόν κύκλο βρίσκεται στην απόσταση δορυφόρου – δέκτη, επειδή όλοι είναι όμοιοι μεταξύ τους, παρά μόνον την θέση του μέσα στον κύκλο (στο ένα μήκος κύματος), δηλαδή που βρίσκεται στο διάστημα μεταξύ 0 ως 19 cm, ή 0 ως 360°. Άρα η πρώτη ανάγνωση της απόστασης δορυφόρου – δέκτη αποτελείται από το άθροισμα ενός άγνωστου αριθμού ακεραίων κύκλων και ενός τμήματος ενός κύκλου, (σχήμα 1.2).

Από την στιγμή της πρώτης ανάγνωσης μέχρι τη στιγμή της εντολής της πρώτης μέτρησης από τον μικροεπεξεργαστή του δέκτη, ο δέκτης καταγράφει, με ένα μετρητή, τους ακέραιους κύκλους, δηλαδή όσες φορές συνέβη η αλλαγή από 359° σε 0° μεταξύ των δύο χρονικών στιγμών (που είναι το φαινόμενο doppler και αντιστοιχεί στην διαφορά των αποστάσεων) και ακολούθως αυτό επαναλαμβάνεται συνεχώς μεταξύ των εντολών μέτρησης, (σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1

Επομένως την πρώτη ανάγνωση την ορίζουμε ως:

$$3.1 \quad \Phi_r^s = N_r^s + 0 + \phi_r^s$$

και όλες τις επόμενες ως:

$$3.2 \quad \Phi_r^s = N_r^s + I_r^s + \phi_r^s$$

Συνοψίζοντας στη περίπτωση των μετρήσεων της φάσης του φέροντος κύματος:

1) Έχουμε μια μέτρηση απόστασης, που αποτελείται από την μέτρηση φάσης $\phi_r^s(\tau_r)$ συν μια ακέραια ασάφεια φάσης N_r^s .

2) Η ακέραια ασάφεια φάσης είναι ο άγνωστος (αλλά γεωμετρικά ορθός) ακεραίος αριθμός κύκλων (μηκών κύματος) μεταξύ ενός δορυφόρου s και ενός δέκτη r , την στιγμή της πρώτης ανάγνωσης στο εκπεμπόμενο σήμα του δορυφόρου. (Ο σωστός (ακριβής) προσδιορισμός των ακεραίων ασαφειών φάσης είναι ιδιαίτερα κρίσιμος. Σφάλμα ενός κύκλου, σημαίνει συστηματικό σφάλμα 19 cm σε όλες τις μετρήσεις).

3) Η μέτρηση φάσης $\Phi_r^s(\tau_r)$ ουσιαστικά αποτελείται κάθε φορά από τμήμα ενός κύκλου συν την μεταβολή σε ακεραίους κύκλους μεταξύ δύο χρονικών στιγμών (αναγνώσεων ή μετρήσεων).

Όπως έχουμε αναφέρει η εξίσωση της ψευδοαπόστασης είναι:

$$3.3 \quad pr_r^s(\tau_r) = \rho_r^s(T_r, T^s) - c \cdot (\delta\tau_r(\tau_r) - \delta^s(t^s))$$

Αν αντικαταστήσουμε την ψευδοαπόσταση με την μέτρηση φάσης και την ασάφεια και αλλάξουμε τις μονάδες της σχέσης (3.3) από μέτρα σε κύκλους πολλαπλασιάζοντας με την συχνότητα f και διαιρώντας με την ταχύτητα του φωτός c τότε:

$$3.4 \quad \Phi_r^s(\tau_r) = \frac{f}{c} \cdot \rho_r^s(T_r, T^s) - f \cdot [\delta\tau_r(\tau_r) - \delta^s(t^s)] + N_r^s$$

Αυτή είναι και η βασική εξίσωση παρατήρησης της φάσης της φέρουσας συχνότητας.

Στην πράξη ο δέκτης στην πρώτη ανάγνωση αντιστοιχίζει μια εκτίμηση της ασάφειας N_r^s και έτσι στην εξίσωση (3.4) αυτό που ζητάμε να προσδιορίσουμε είναι η διαφορά μεταξύ της εκτίμησης του δέκτη για την ασάφεια N_r^s και της πραγματικής τιμής της.

Άλλοι όροι επίσης μπορούν να προστεθούν στην (3.4) κυρίως όμως προστίθεται η επίδραση της ιονόσφαιρας και της τροπόσφαιρας και έτσι γίνεται:

$$3.5 \quad \Phi_r^s(\tau_r) = \frac{f}{c} \cdot \rho_r^s(T_r, T^s) - f \cdot [\delta\tau_r(\tau_r) - \delta^s(t^s)] + N_r^s + d_{τροπο} - d_{iono}$$

ενώ και σε αυτή την περίπτωση

$$3.6 \quad \rho_r^s = \sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2}$$

Ας υποθέσουμε, όπως και στην περίπτωση των ψευδοαποστάσεων, ότι έχουμε τέσσερις παρατηρήσεις φάσης προς τέσσερις δορυφόρους. Στην περίπτωση αυτή θα έχουμε τέσσερις εξισώσεις παρατήρησης με οκτώ αγνώστους (την θέση του δέκτη, το σφάλμα του χρονομέτρου του και τις τέσσερις ασάφειες), οπότε το σύστημα δεν λύνεται και άρα στιγμιαίο - σε πραγματικό χρόνο - εντοπισμό, σε αντίθεση με τις ψευδοαποστάσεις, δεν μπορούμε να έχουμε. Χρειάζεται να αναλύσουμε δεδομένα από δύο ή περισσότερους δέκτες, που παρατηρούν τους ίδιους δορυφόρους ταυτόχρονα, ώστε να προσδιορίσουμε πέραν των αγνώστων του εντοπισμού, που χρειαζόμαστε για τις τοπογραφικές εργασίες και τις ασάφειες φάσης.

Με την επεξεργασία των μετρήσεων φάσης προσδιορίζουμε το διάνυσμα από τον ένα δέκτη στον άλλο.

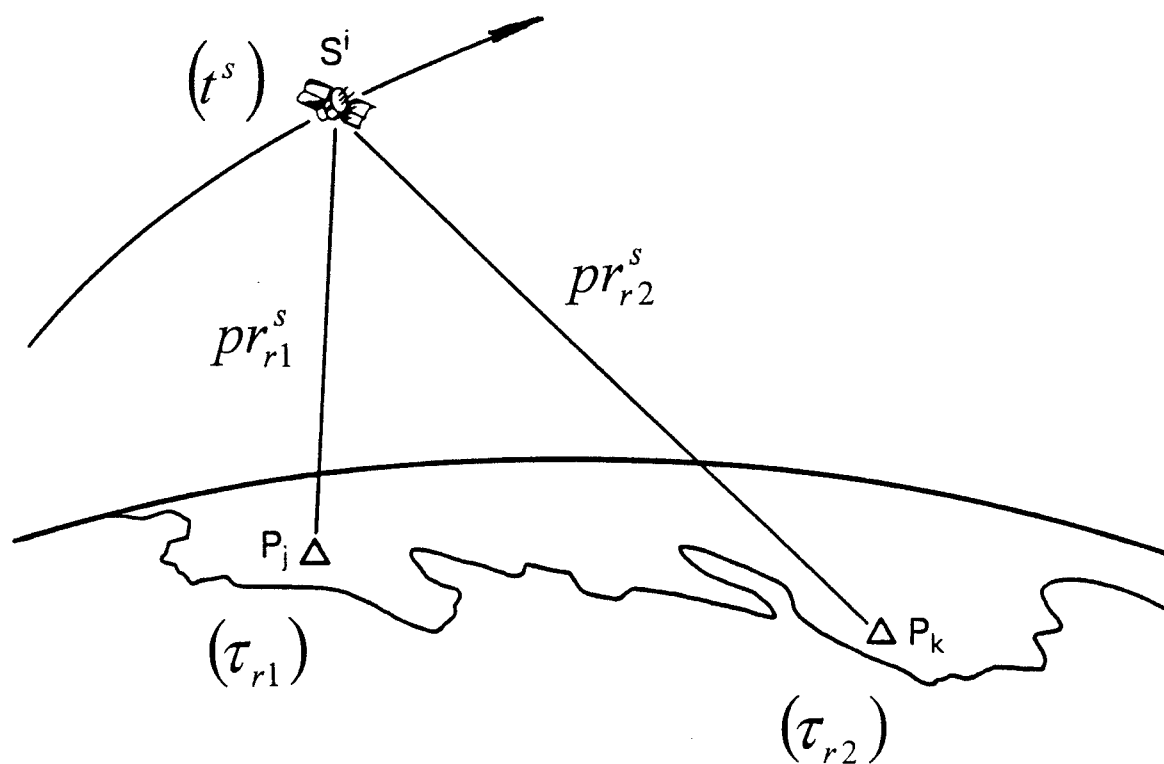
4.0 Διαφορές φάσεων

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο, η επεξεργασία των μετρήσεων φάσης, απαιτεί και τον προσδιορισμό των ακεραίων ασαφειών ως επιπλέον αγνώστων, προκειμένου να προσδιορισθούν με ικανοποιητική ακρίβεια για τοπογραφικές ή γεωδαιτικές εργασίες, τα διανύσματα μεταξύ των δεκτών, που παρατηρούν ταυτόχρονα. Ο τρόπος, με τον οποίο το είδος αυτό της μέτρησης μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα είναι με χρήση γραμμικών συνδυασμών ή εικονικών (μαθηματικών) παρατηρήσεων, που έχουν προέλθει ως αριθμητικό αποτέλεσμα (διαφορές) μεταξύ των πρωτογενών μετρήσεων.

4.1 Απλές διαφορές

Ως διαφορά φάσης μεταξύ δεκτών (σχήμα 4.1) ορίζουμε την στιγμιαία διαφορά στις μετρήσεις φάσης, που γίνονται από δύο δέκτες, που παρακολουθούν ταυτόχρονα το ίδιο σήμα (ίδιο δορυφόρο, ίδια συχνότητα).

ΑΠΛΗ ΔΙΑΦΟΡΑ (ΩΣ ΠΡΟΣ ΔΕΚΤΕΣ)



Σχήμα 4.1

Αντίστοιχα ως διαφορά φάσης μεταξύ δορυφόρων ορίζουμε την στιγμιαία διαφορά στις μετρήσεις φάσης, που γίνονται από τον ίδιο δέκτη, που παρακολουθεί δύο σήματα δορυφόρων ταυτόχρονα (ίδια συχνότητα).

Αν χρησιμοποιήσουμε ως έκφραση της μέτρησης φάσης την σχέση

$$4.1 \quad \Phi_r^s = N_r^s + I_r^s + \phi_r^s$$

τότε για την περίπτωση του σχήματος 4.1 θα έχουμε

$$4.2A \quad \Phi_{r1}^{s1} = N_{r1}^{s1} + I_{r1}^{s1} + \phi_{r1}^{s1}$$

$$4.2B \quad \Phi_{r2}^{s1} = N_{r2}^{s1} + I_{r2}^{s1} + \phi_{r2}^{s1}$$

και η απλή διαφορά μεταξύ δεκτών θα είναι

$$4.3 \quad \Phi_{r1}^{s1} - \Phi_{r2}^{s1} = (N_{r1}^{s1} - N_{r2}^{s1}) + (I_{r1}^{s1} - I_{r2}^{s1}) + (\phi_{r1}^{s1} - \phi_{r2}^{s1})$$

(από ποια μέτρηση θα αφαιρεθεί η άλλη δεν έχει καμμία σημασία).

Αν ως έκφραση της μέτρησης φάσης χρησιμοποιήσουμε την σχέση

$$4.4 \quad \Phi_r^s(\tau_r) = \frac{f}{c} \cdot \rho_r^s(T^s, T_r) - f \cdot [\delta\tau_r(\tau_r) - \delta^s(t^s)] + N_r^s + d_{atm}$$

θα έχουμε ως απλή διαφορά μεταξύ δεκτών την σχέση:

$$4.5 \quad \Phi_{r1,r2}^{s1}(\tau_{r1}, \tau_{r2}) = \frac{f}{c} \cdot \rho_{r1,r2}^{s1}(T^{s1}, T_{r1}, T_{r2}) - f [\delta\tau_{r1,r2}(\tau_{r1}, \tau_{r2})] + N_{r1,r2}^{s1} + d_{atm}$$

Αντίστοιχες εξισώσεις της μορφής 4.3 και 4.5 μπορούμε να σχηματίσουμε και για την απλή διαφορά μεταξύ δορυφόρων.

$$4.6 \quad \Phi_{r1}^{s1,s2}(\tau_{r1}) = \frac{f}{c} \cdot \rho_{r1}^{s1,s2}(T^{s1}, T^{s2}, T_{r1}) + f[\alpha^{s1,s2}(t^{s1}, t^{s2})] + N_{r1}^{s1,s2} + d_{atm}$$

Στις εξισώσεις παρατήρησης της μορφής 4.5, τα σφάλματα χρονομέτρων των δορυφόρων έχουν εξαλειφθεί, ενώ μειώνονται και τα άλλα σφάλματα τα σχετιζόμενα με τον δορυφόρο, δηλαδή της τροχιάς και της ατμόσφαιρας, τόσο περισσότερο, όσο μικρότερη είναι η βάση μεταξύ των δεκτών, συγκρινόμενη με το ύψος των 20000 km της τροχιάς των δορυφόρων.

Στις εξισώσεις της μορφής 4.6, το σφάλμα του χρονομέτρου του παρατηρητή έχει εξαλειφθεί, ενώ και οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις επίσης μειώνονται.

Ας σημειωθεί εδώ ότι αν χρησιμοποιήσουμε εξισώσεις παρατήρησης της μορφής 4.5 ή 4.6, τότε θα χρησιμοποιήσουμε το 1/2 των πρωτογενών μετρήσεων, ενώ θα έχουμε επίσης αυξησει το επίπεδο του θορύβου λόγω των μαθηματικών διαφορών.

4.2 Διπλές διαφορές

Ως διπλή διαφορά φάσης μεταξύ δεκτών και δορυφόρων (σχήμα 4.2) ορίζεται η διαφορά μεταξύ μιας απλής διαφοράς ως προς δέκτες και μίας απλής διαφοράς ως προς δορυφόρους.

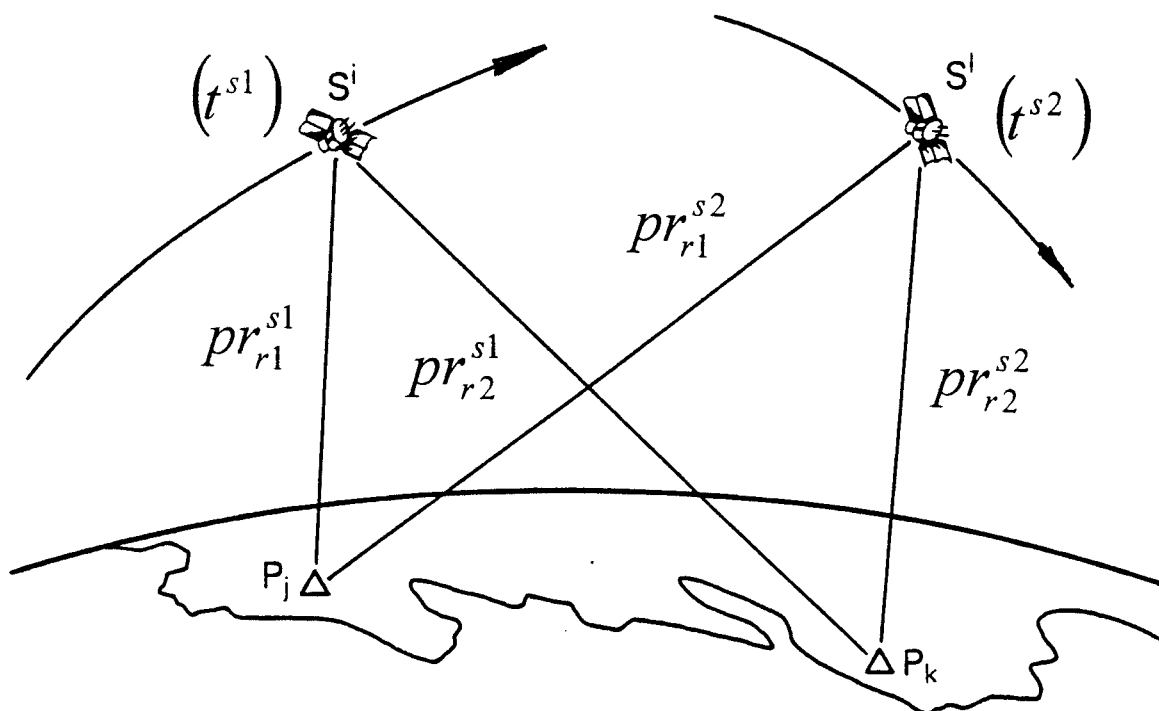
Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 4.5 και 4.6 έχουμε:

$$4.7 \quad \Phi_{r1,r2}^{s1,s2}(\tau_{r1}, \tau_{r2}) = \frac{f}{c} \cdot \rho_{r1,r2}^{s1,s2}(T^{s1}, T^{s2}, T_{r1}, T_{r2}) + N_{r1,r2}^{s1,s2} + d_{atm}$$

Όπως και οι απλές διαφορές, η διπλή διαφορά ως προς δέκτες και δορυφόρους εξαλείφει ή μειώνει τα σφάλματα τα σχετιζόμενα με τους δορυφόρους (σφάλματα λόγω χρονομέτρων, τροχιών, ατμόσφαιρας) και εξαλείφει τα σφάλματα λόγω των χρονομέτρων των δεκτών.

Όμως παραμένει προς επεξεργασία το 1/4 των πρωτογενών μετρήσεων, με ακόμα πιο αυξημένο επίπεδο θορύβου λόγω των μαθηματικών διαφορών.

ΔΙΠΛΗ ΔΙΑΦΟΡΑ



Σχήμα 4.2

4.3 Τριπλές διαφορές

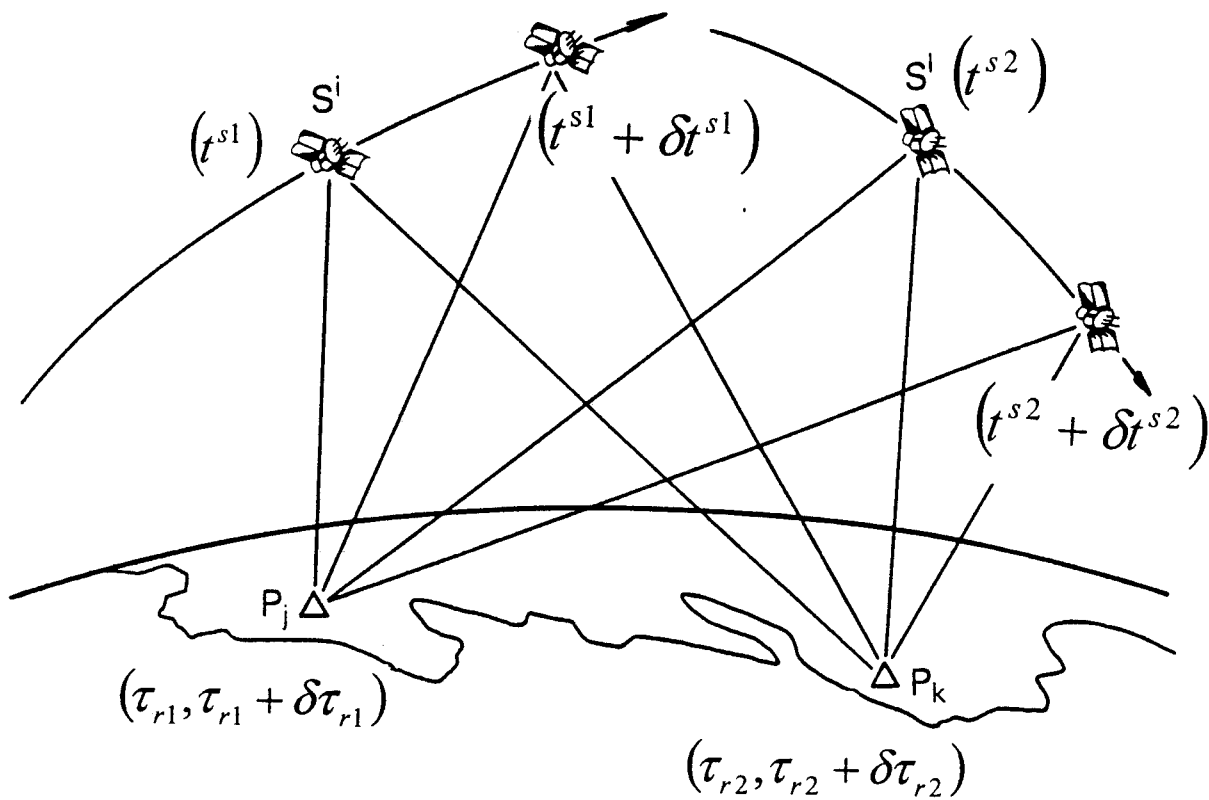
Ως τριπλή διαφορά μεταξύ δεκτών, δορυφόρων και χρόνου (σχήμα 4.3) ορίζεται η διαφορά δύο διπλών διαφορών ως προς δύο διαδοχικές χρονικές στιγμές.

Λαμβάνοντας την διαφορά δύο εξισώσεων της μορφής 4.7 σε δύο διαδοχικές χρονικές στιγμές i, j έχουμε:

$$4.8 \quad \Phi_{r1,r2}^{s1,s2}(\tau_{r1}, \tau_{r2})_{i,j} = \frac{f}{c} \cdot \rho_{r1,r2}^{s1,s2}(T^{s1}, T^{s2}, T_{r1}, T_{r2})_{i,j} + d_{atm}$$

Τα σφάλματα, που εξαλείφονται ή μειώνονται στις διπλές διαφορές, εξαλείφονται ή μειώνονται και στις τριπλές διαφορές. Η εξίσωση 4.8 έχει ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα, δεν περιέχει ως

ΤΡΙΠΛΗ ΔΙΑΦΟΡΑ



Σχήμα 4.3

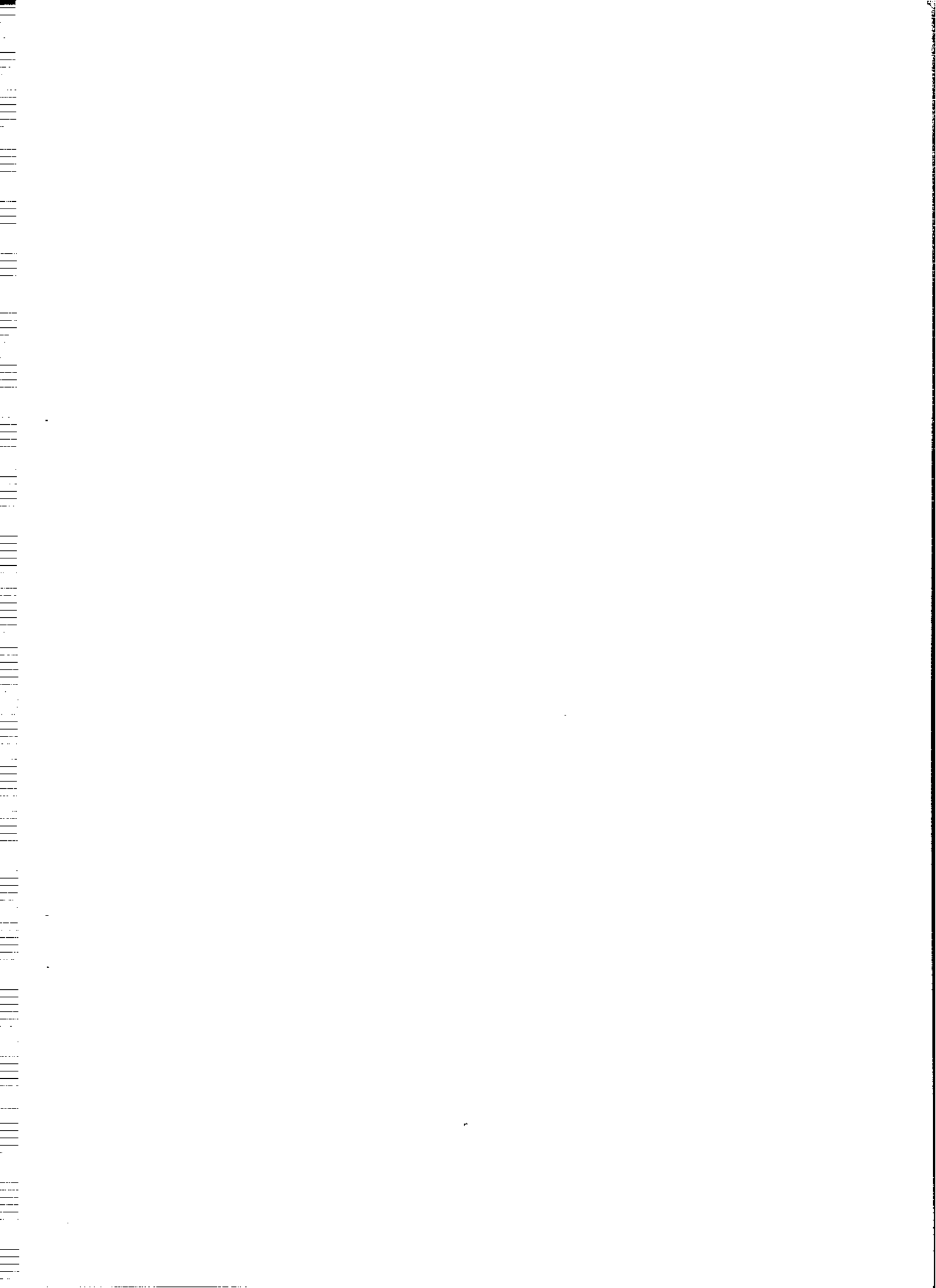
επιπλέον αγνώστους τις ασάφειες φάσης. Δυστυχώς όμως ως παρατηρήσεις παραμένει μόνο το 1/8 των πρωτογενών, με αρκετά υψηλό επίπεδο θορύβου λόγω των συνεχών διαφορών.

4.4 Απώλειες κύκλων

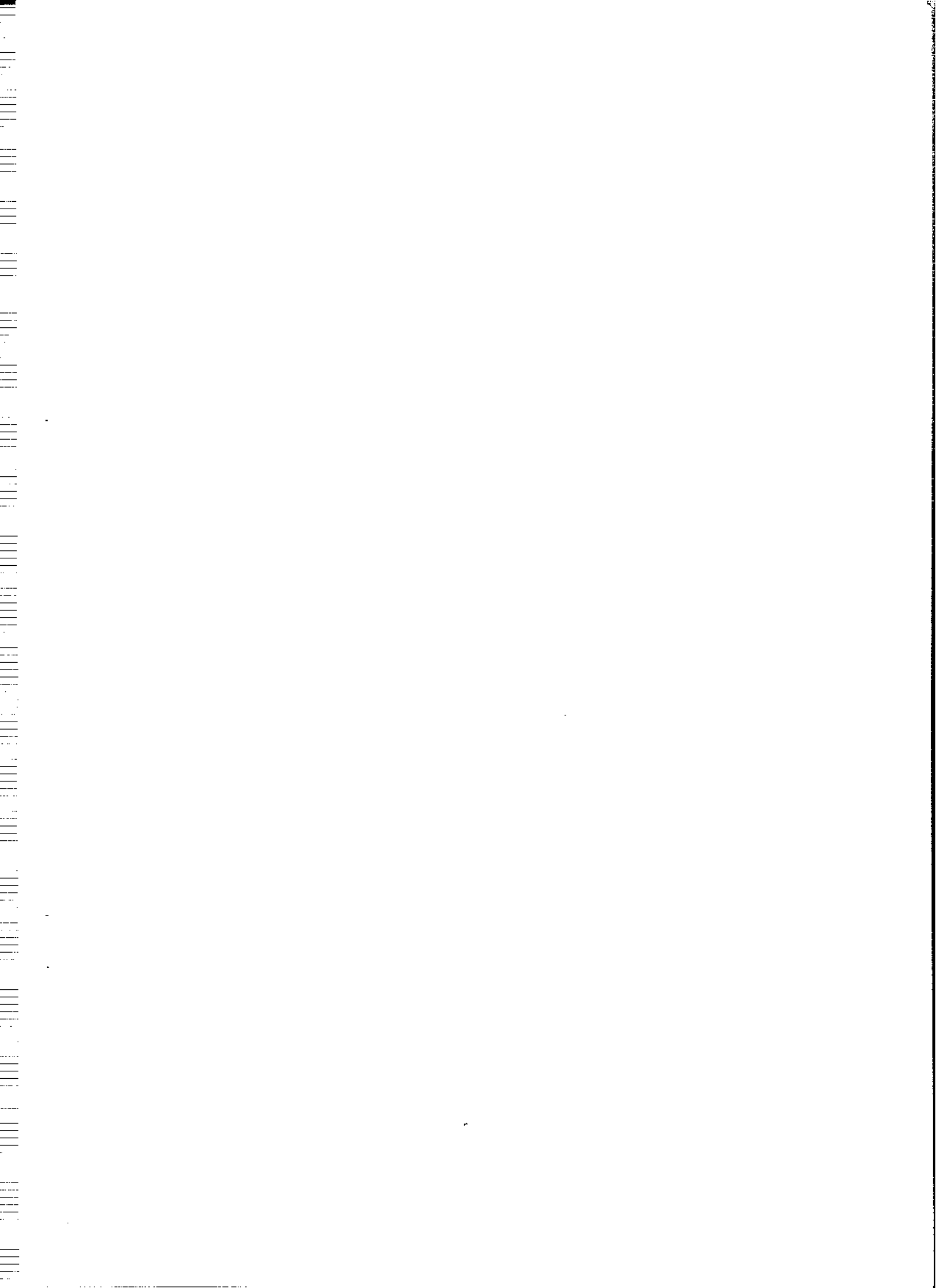
Απώλεια κύκλων στις μετρήσεις φάσης ονομάζεται η απώλεια ενός αγνώστου ακέραιου αριθμού κύκλων της φέρουσας συχνότητας (η κλασματική φάση διατηρείται), όταν διακοπεί η συνεχής παρακολούθηση ενός ή περισσότερων δορυφόρων από τον δέκτη λόγω οποιασδήποτε αιτίας (πχ λόγω παρεμβολής κάποιου εμποδίου στην διαδρομή του σήματος από τον δορυφόρο στον δέκτη).

Η συνέχεια αυτή των μετρήσεων πρέπει να αποκατασταθεί διότι αλλιώς η επεξεργασία τους είναι αδύνατη. Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι, αλλά ιδιαίτερα χρήσιμες είναι οι τριπλές διαφορές.

Ας σημειωθεί όμως ότι αν το χρονικό διάστημα των διακοπών των μετρήσεων είναι μεγάλο, τότε θα πρέπει να εισαχθούν νέες ασάφειες φάσης, αυξάνοντας κατά πολύ τον αριθμό των αγνώστων και αδυνατίζοντας την τελική λύση.



**ΟΙ ΕΙΔΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ GPS ΚΑΙ Ο
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΣΑΦΕΙΩΝ ΦΑΣΗΣ**



1.0 Οι ειδικές τεχνικές χρήσης του Παγκόσμιου Συστήματος Εντοπισμού

1.1 Γενικά

Οι ειδικές τεχνικές, που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια είναι οι εξής:

Η τεχνική του ταχέως στατικού εντοπισμού (Fast Static).

Η τεχνική του κινηματικού εντοπισμού (Kinematic) με τις μορφές του

Ημικινηματικού εντοπισμού (Stop and Go Kinematic).

Συνεχούς κινηματικού εντοπισμού (Continuous Kinematic).

Κινηματικού εντοπισμού σε πραγματικό χρόνο (Real Time Kinematic - RTK).

1.2 Η τεχνική του ταχέως στατικού εντοπισμού (Fast Static)

Η μέθοδος του ταχέως στατικού εντοπισμού χρησιμοποιείται για να δώσει αποτελέσματα μεγάλης ακρίβειας σε μικρό χρονικό διάστημα παρατηρήσεων. Απαιτεί δύο ή περισσότερους δέκτες δύο συχνοτήτων, εφοδιασμένους με την συγκεκριμένη τεχνική (fast static capable). Η μεθοδολογία είναι παρόμοια με την τεχνική του στατικού εντοπισμού, όπου κάθε ένας από τους δέκτες μένει σταθερός σε ένα σημείο για κάποιο χρονικό διάστημα. Το χρονικό αυτό διάστημα στην περίπτωση του ταχέως εντοπισμού είναι σαφώς μικρότερο. Κυμαίνεται από 8 έως 20 min ανάλογα με τον αριθμό των "υγιών" δορυφόρων, στους οποίους έχει ορατότητα ο δέκτης.

Ετσι αν παρακολουθεί 6 δορυφόρους, ο απαιτούμενος χρόνος παρατηρήσεων είναι 8 min. Με 5 δορυφόρους ο χρόνος είναι 15 min και τέλος με 4 είναι 20 min. Στην περίπτωση, που ενώ παρακολουθεί 5, εντοπίσει και έκτο, ο χρόνος μειώνεται αυτόματα στα 8 min και το αντίθετο.

Με την παρέλευση του διαστήματος των παρατηρήσεων, ο δέκτης δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να διακόψει τις παρατηρήσεις, εμφανίζοντας στην οθόνη την κατάλληλη εντολή, δίπλα σε αντίστοιχο πλήκτρο. Ο δέκτης φυσικά συνεχίζει να μετρά, μέχρι να πάρει την εντολή να σταματήσει. Όσο μεγαλύτερο είναι το διάστημα παρατηρήσεων, τόσο πιο αξιόπιστα φυσικά είναι και τα αποτελέσματα.

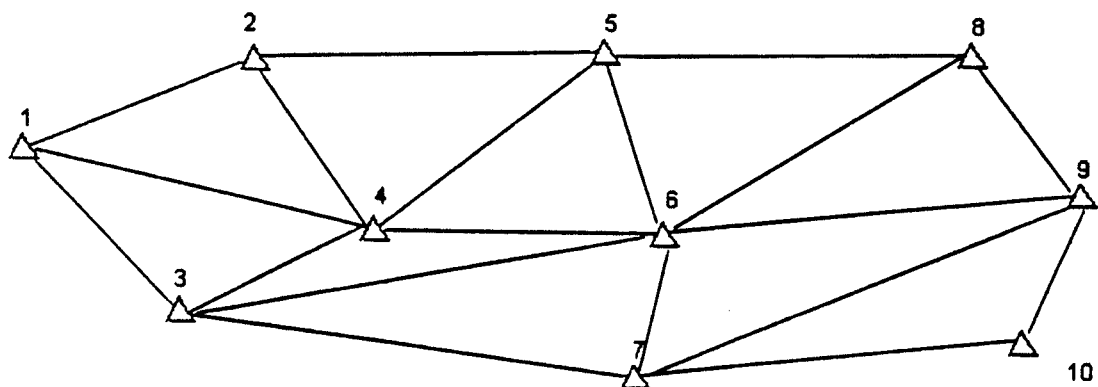
Η επεξεργασία των μετρήσεων γίνεται με το κατάλληλο λογισμικό.

Η αρχή της μεθόδου είναι η γρήγορη επίλυση των ασαφειών φάσης, με χρήση των φερουσών συχνοτήτων και των κωδίκων και στις δύο συχνότητες L1 και L2. Η τεχνική αυτή θα αναπτυχθεί στην επόμενη παράγραφο.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για επίλυση βάσεων μέχρι 15-20 km, εκεί όπου απαιτούνται αξιόπιστα αποτελέσματα σε μικρό χρονικό διάστημα. Η ακρίβεια επίλυσης θεωρείται ότι είναι της τάξης του 1ppm. Οπότε η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τριγωνισμούς I^{ης} και II^{ας} τάξης και κάτω, επιλύσεις φωτοσταθερών σημείων, επίλυση πολυγωνικών οδεύσεων και για άλλες εφαρμογές.

Η χρήση της δεν είναι δυνατή σε περιπτώσεις, όπου η απαίτηση σε ακρίβεια είναι μεγαλύτερη από αυτή που παρέχει και κυρίως σε περιπτώσεις όπου οι βάσεις είναι πολύ μεγάλες. Αυτό συμβαίνει επειδή σε μεγάλη απόσταση μεταξύ των δεκτών, οι τελευταίοι δεν έχουν όλες τις παρατηρήσεις τους κοινές προς κάποιους δορυφόρους, όπως απαιτεί η μέθοδος και ακόμη κι αν αυτό συμβαίνει η γεωμετρία των δορυφόρων, αλλά και η επίδραση της ιονόσφαιρας θα είναι αρκετά διαφορετική, οπότε δεν είναι δυνατή η γρήγορη επίλυση των ασαφειών.

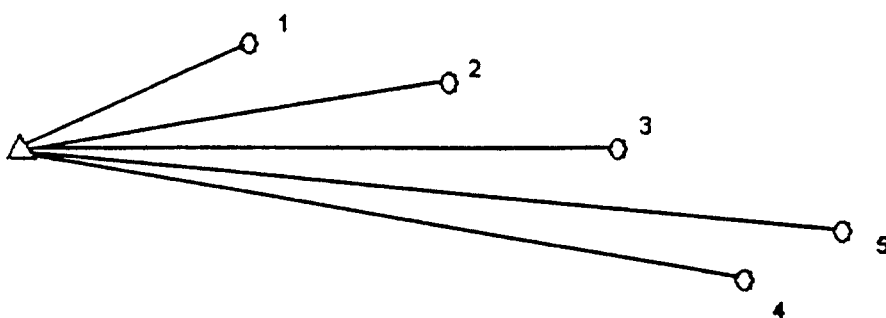
Όσον αφορά στην εφαρμογή της μεθόδου στην πράξη, αυτή ποικίλει ανάλογα με το είδος της εργασίας, που προκειται να εκτελεστεί. Στο σχήμα 1.1 φαίνεται η μέτρηση ενός υποθετικού δικτύου ενώ στα σχήματα 1.2 και 1.3 η μέτρηση μίας οδεύσης.



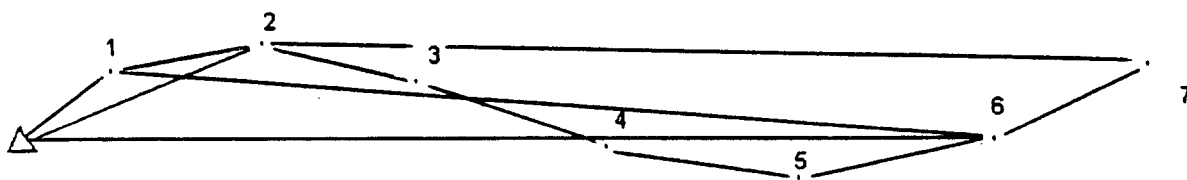
Σχήμα 1.1

Στην μέτρηση του δικτύου, όπου οι προδιαγραφές του απαιτούν επίλυση όλων των βάσεων μεταξύ των σημείων (έτσι ώστε να σχηματιστούν κατά το δυνατόν ισόπλευρα τρίγωνα) οι δέκτες μπορούν να ξεκινήσουν ταυτόχρονα από τα αριστερά προς τα δεξιά, είτε να διαγράψει ο ένας κύκλο γύρω από τον άλλο. Ο ένας δέκτης βρίσκεται στο σημείο 1, ενώ ο δεύτερος ξεκινάει από το 2, πάει στο 4 και καταλήγει στο 3. Ο πρώτος πηγαίνει στο 4, μετά μετακινούνται και οι δύο, ο πρώτος στο 2, ο δεύτερος ξανά στο 4 και ούτω καθ' εξής; διατηρώντας πάντοτε σημεία σύνδεσης.

Στην περίπτωση της όδευσης, η μέτρηση μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος θα είναι ο ένας δέκτης να παραμείνει στο πλησιέστερο τριγωνομετρικό και ο δεύτερος να μετρήσει όλα τα σημεία της όδευσης. Αυτός ο τρόπος δίνει και την μεγαλύτερη ακρίβεια (σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.2



Σχήμα 1.3

Ο δεύτερος τρόπος είναι να μετρήσουν, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3, ο πρώτος το τριγωνομετρικό και ο δεύτερος στο 1 ή και στο 6, ή το 7. Κατόπιν οι δέκτες να προχωρούν από το

1 μέχρι το 7, έτσι ώστε να μετρηθεί η κάθε πλευρά. Τέλος μπορεί να μετρηθεί και η πλευρά 1-7 (ή και η 2 - 7), έτσι ώστε να υπολογισθούν σφάλματα κλεισίματος.

1.3 Ο κινηματικός εντοπισμός θέσης

1.3.1 Γενικά

Η κινηματική τεχνική χρησιμοποιείται για την τοπογραφική αποτύπωση περιοχών εύρους περίπου 10-15 km, στις οποίες δεν υπάρχουν πολλά φυσικά ή τεχνητά στοιχεία, που να εμποδίζουν το σήμα των δορυφόρων. Για την εφαρμογή της απαιτούνται δέκτες μίας συχνότητας, οι οποίοι βεβαίως πρέπει να την περιλαμβάνουν στις επιλογές εργασιών, που διαθέτουν.

Στην περίπτωση όπου είναι διαθέσιμοι δέκτες δύο συχνοτήτων, μπορούν φυσικά να χρησιμοποιηθούν, παρέχοντας ακόμη περισσότερες ευκολίες, (οι οποίες όμως δεν απαιτούνται για την εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνικής).

Στην περίπτωση της μίας συχνότητας οι δέκτες χρησιμοποιούν μετρήσεις φάσης για την μέτρηση αποστάσεων και μετρήσεις κώδικα C/A για την μέτρηση ψευδοαποστάσεων. Στην περίπτωση όπου χρησιμοποιηθούν δέκτες δύο συχνοτήτων, πραγματοποιούνται μετρήσεις φάσης και στις δύο συχνότητες L1 και L2 για την μέτρηση αποστάσεων και μετρήσεις κώδικα P για την μέτρηση ψευδοαποστάσεων.

Ο ένας δέκτης μένει πάντα σταθερός και ονομάζεται σταθμός αναφοράς (Base ή Reference) και τοποθετείται σε σημείο με γνωστές συντεταγμένες. Ο δεύτερος (ή οι υπόλοιποι) είναι κινητός (rover) και επισκέπτεται τα σημεία που λαμβάνονται για την αποτύπωση.

Η φιλοσοφία της μεθόδου είναι ότι από την στιγμή, που οι ασάφειες φάσης επιλυθούν αρχικά, ο ένας από τους δύο δέκτες μπορεί να μετακινηθεί και να επισκεφθεί άλλα σημεία, με μοναδικό περιορισμό το ότι πρέπει να παρακολουθεί (locked) συνεχώς τουλάχιστον 4 δορυφόρους. Οι δορυφόροι δεν είναι απαραίτητο να μείνουν οι ίδιοι μέχρι το τέλος της εργασίας, αρκεί οι δύο (ή περισσότεροι) δέκτες να παρατηρούν σε κάθε στιγμή τους ίδιους. Αυτός είναι ο ένας λόγος για τον οποίο περιορίζεται το εύρος χρήσης της τεχνικής και ο άλλος είναι η επίδραση της ιονόσφαιρας.

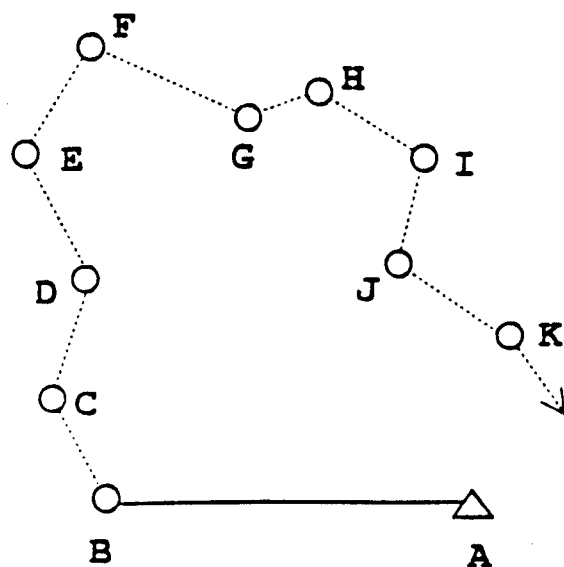
Σε περίπτωση όπου ο κινητός παρακολουθεί λιγότερους από τέσσερις δορυφόρους, ή χάνει το σήμα έστω για μία εποχή, οι ασάφειες φάσης πρέπει να επιλυθούν ξανά και μετά να συνεχιστεί η εργασία. Αν για οποιοδήποτε λόγο ο σταθμός αναφοράς χάνει το σήμα, πρέπει να σταματήσουν όλοι οι κινητοί δέκτες, έτσι ώστε να επιλυθούν οι ασάφειες φάσης ξανά.

1.3.2 Οι μέθοδοι του κινηματικού εντοπισμού

Ο κινηματικός εντοπισμός εφαρμόζεται με δύο μεθόδους, την μέθοδο του ημικινηματικού εντοπισμού (Stop and Go Kinematic) και την μέθοδο του συνεχούς κινηματικού εντοπισμού (Continuous Kinematic).

Στην πράξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνδυασμός και των δύο. Υπάρχει και η δυνατότητα να αλλάζουν οι ρόλοι του σταθερού και του κινητού δέκτη, οπότε πραγματοποιείται η σταδιακή κινηματική τεχνική (Leapfrog Kinematic). Η ακρίβεια με την οποία εκτιμάται ότι προσδιορίζεται το διάνυμα μεταξύ του σταθερού δέκτη και του κάθε σημείου, που αποτυπώνει ο κινητός, είναι $\pm 1 \text{ cm} \pm 2 \text{ ppm}$ για όποια από τις μεθόδους ακολουθηθεί.

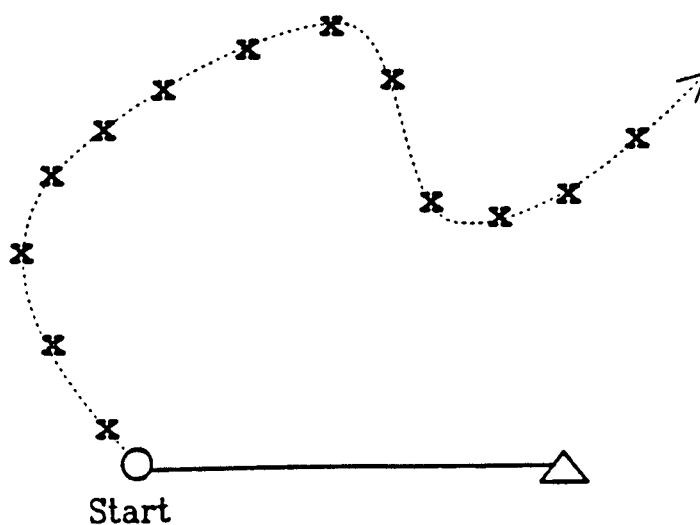
Στην ημικινηματική μέθοδο ο σταθμός αναφοράς μένει σταθερός σε ένα σημείο μέχρι το τέλος της εργασίας. Ο κινητός επισκέπτεται τα σημεία που χρειάζεται να αποτυπωθούν. Ο χρόνος που μένει στο κάθε σημείο κυμαίνεται από λίγα sec, μέχρι 1 - 2 min (σχήμα 1.4).



Σχήμα 1.4

Η κεραία του δέκτη αναφοράς τοποθετείται σε τρίποδα ή βάθρο και η κεραία του κινητού σε στυλαίο του οποίου το ύψος να είναι δυνατό να μετρηθεί. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την λήψη χαρακτηριστικών σημείων, όπως η ταχυμετρία στην κλασσική τοπογραφία.

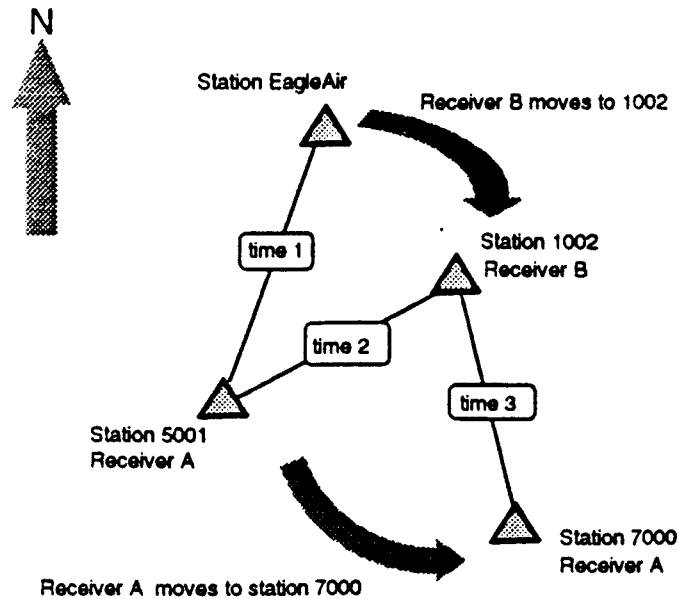
Η μέθοδος του συνεχούς κινηματικού εντοπισμού απαιτεί τον ένα δέκτη σταθερό σε γνωστό σημείο και τον δεύτερο σε διαρκή κίνηση (σχήμα 1.5).



Σχήμα 1.5

Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται συνεχής λήψη σημείων, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απόδοση της φυσικής γήινης επιφάνειας ή για οποιαδήποτε άλλη εφαρμογή. Ο κινητός μπορεί να φέρεται από άτομο που περπατά, είτε να βρίσκεται πάνω σε κινούμενο όχημα, ανάλογα με την εργασία.

Στην πράξη, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται μαζί. Δηλαδή κατά το διάστημα, όπου ο κινητός δέκτης κινείται ανάμεσα στα σημεία του ημικινηματικού εντοπισμού λαμβάνει συνεχώς νέα σημεία. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται πλήρης αποτύπωση μιάς περιοχής. Στην σταδιακή κινηματική τεχνική, όπως αναφέρθηκε, ο σταθερός και ο κινητός εναλλάσσονται. Στην αρχή παραμένει ο ένας σταθερός και ο δεύτερος κινείται και κατόπιν ο δεύτερος μένει σταθερός και κινείται ο πρώτος (σχήμα 1.6). Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η λήψη των σημείων είναι οι δύο προηγούμενες μέθοδοι (Ημικινηματικός και Συνεχής Κινηματικός Εντοπισμός). Αυτό που αλλάζει είναι ότι με την εναλλαγή του ρόλου των δεκτών μετατίθεται το πεδίο εργασίας και έτσι παύει να υπάρχει όριο στο εύρος της προς αποτύπωση περιοχής.



Σχήμα 1.6

1.3.3. Η διαδικασία της έναρξης (Initialization)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω στην αρχή της κινηματικής τοπογραφικής εργασίας απαιτείται η επίλυση των ασαφειών φάσης. Αυτό επιτυγχάνεται με την διαδικασία της έναρξης (ενεργοποίησης - initialization). Η έναρξη μπορεί να πραγματοποιηθεί με τους ακόλουθους τέσσερις τρόπους, μέτρηση γνωστής βάσης, μέτρηση άγνωστης βάσης, εναλλαγή κεραιών και εν κινήσει (αυτόματη) επίλυση των ασαφειών (On The Fly).

1.3.3.1 Μέτρηση γνωστής βάσης

Εκτός από τον σταθμό αναφοράς τοποθετείται και ο κινητός σε σημείο του οποίου οι συντεταγμένες είναι γνωστές με ακρίβεια καλύτερη από $\pm 5\text{cm}$. Όσο ακριβέστερες είναι οι συντεταγμένες των σταθερών σημείων, άρα και η τιμή του μεταξύ τους διανύσματος, τόσο ακριβέστερες συντεταγμένες για τα μετρημένα σημεία θα προσδιοριστούν από την εργασία. Ο κινητός πρέπει να μείνει στο γνωστό σημείο τουλάχιστον 30 sec, ή όσο υποδείξει το σύστημα στον χρήστη.

1.3.3.2. Μέτρηση άγνωστης βάσης

Αν οι δέκτες που χρησιμοποιούνται είναι δύο συχνοτήτων μπορεί ο κινητός να τοποθετηθεί σε ένα οποιοδήποτε σημείο και να μετρηθεί η βάση μεταξύ αυτού και του σταθμού αναφοράς χρησιμοποιώντας την τεχνική του ταχέως στατικού εντοπισμού. Ο χρόνος που απαιτείται είναι από 8 έως 20 min ανάλογα με τον αριθμό και την γεωμετρία των δορυφόρων. Στην περίπτωση δεκτών μιάς συχνότητας το άγνωστο σημείο μπορεί να προσδιοριστεί με χρήση στατικού εντοπισμού και μετά να χρησιμοποιηθεί η προηγούμενη μέθοδος.

1.3.3.3 Εναλλαγή κεραιών (Antenna Swap)

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται στην περίπτωση όπου διατίθενται δέκτες μιάς συχνότητας. Η κεραία του κινητού τοποθετείται σε τρίποδα σε σημείο δύο - τρία μέτρα μακρύτερα από τον σταθμό αναφοράς. Οι δέκτες μετρούν για δύο min και μετά η κεραία του ενός τοποθετείται στον τρίποδα του άλλου. Μετά απο άλλα 2 min μετρήσεων, οι κεραιές τοποθετούνται στην αρχική τους θέση. Με το πέρας της διαδικασίας αυτής ο κινητός δέκτης είναι έτοιμος να ξεκινήσει. Η διαδικασία αυτή είναι δυνατό να μειωθεί σε χρόνο και βεβαίως να γίνει ευκολότερη αν οι κεραιές των δύο οργάνων τοποθετηθούν σε ειδική βάση η μία δίπλα στην άλλη και η απόσταση μεταξύ τους είναι γνωστή.

1.3.3.4 Εν κινήσει επίλυση ασαφειών (On The Fly)

Η τεχνική αυτή απαιτεί δέκτες δύο συχνοτήτων. Οι ασάφειες φάσης επιλύονται απο μετρήσεις μέσα σε χρονικό διάστημα το οποίο κυμαίνεται από 8 - 20 min, ανάλογα με τον αριθμό των δορυφόρων. Η διαφορά της τεχνικής αυτής από την χρήση της στον ταχύ στατικό εντοπισμό, είναι ότι ο κινητός δέκτης δεν απαιτείται να παραμένει σταθερός σε ένα σημείο, αλλά είναι δυνατόν να κινείται και να αποτυπώνει σημεία με χρήση είτε της ημικινηματικής, είτε της συνεχούς κινηματικής μεθόδου. Οπότε το διάστημα των μετρήσεων, που απαιτείται κατόπιν για την επίλυση των ασαφειών και την πραγματοποίηση της έναρξης εισέρχεται στο χρόνο της εργασίας. Τα σημεία που αποτυπώνονται κατά το διάστημα αυτό μόλις πραγματοποιηθεί η έναρξη είναι δυνατόν να επιλυθούν και να αποδωθούν.

Ο βασικός περιορισμός που υπάρχει είναι ότι αν κατά το διάστημα αυτό, λόγω της κίνησης του κινητού δέκτη υπάρξει απώλεια των δορυφόρων, η έναρξη πρέπει να πραγματοποιηθεί από την αρχή και όσα σημεία ή διαστήματα είχαν αποτυπωθεί στο μεταξύ χάνονται. Επίσης, αν ενώ ο κινητός παρακολουθεί έξι δορυφόρους απωλέσει τον ένα, οπότε πλέον παρακολουθεί πέντε, το απαιτούμενο διάστημα θα ανέβει από τα 8 στα 20min, ή το αντίστροφο. Συνεπώς κατά την εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνικής έναρξης, απαιτείται μεγάλη προσοχή.

1.3.4 Η διαδικασία της επανέναρξης (Reinitialization)

Στην περίπτωση, όπου κατά την διάρκεια της εργασίας ο κινητός δέκτης χάνει το σήμα πρέπει να ξαναγίνει έναρξη (initialization), ώστε να επιλυθούν πάλι οι ασάφειες φάσης, όπως προαναφέρθηκε. Η διαδικασία αυτή καλείται επανέναρξη (reinitialization). Η επανέναρξη πραγματοποιείται με τους εξής τρόπους:

α. Με την επιστροφή του κινητού στο προηγούμενο ημικινηματικό σημείο και την επαναμέτρησή του. Απαιτείται προσοχή, ώστε να τοποθετηθεί ο στυλαιός του κινητού δέκτη στο ίδιο ακριβώς σημείο, όπου είχε τοποθετηθεί κατά την προηγούμενη μέτρηση του σημείου αυτού. Το σφάλμα που ενδεχομένως προκύψει κατά την διαδικασία αυτή από μη ακριβή τοποθέτηση του στυλαιού (πχ 1-2 cm) θα εισέλθει σαν συστηματικό σε όλα τα επόμενα σημεία.

β. Με την μέτρηση κάποιου επόμενου σημείου με την τεχνική του ταχέως στατικού εντοπισμού. Αυτό συμφέρει αν στην διαδρομή μεταξύ του σημείου που πρόκειται να μετρηθεί και του προηγούμενου ημικινηματικού σημείου παρεμβάλλεται κάποιο εμπόδιο (πχ ο δέκτης περνάει κάτω από γέφυρα), λόγω του οποίου χάνεται το σήμα των δορυφόρων.

γ. Με την εφαρμογή της ψευδοστατικής τεχνικής (Pseudostatic). Απαιτείται μέτρηση του σημείου για 10 min και επαναμέτρησή του για άλλα 10 min ύστερα από μία τουλάχιστον ώρα, ώστε η γεωμετρία των δορυφόρων να έχει αλλάξει. Το μειονέκτημα είναι ότι η ακρίβεια της μεθόδου είναι της τάξης του 10^{-5} , μικρότερη από τις άλλες και έτσι όλα τα σημεία που θα μετρηθούν μετά, θα έχουν το πολύ αυτή την ακρίβεια. Η μέθοδος αυτή θεωρείται πλέον ξεπερασμένη και πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο ως έσχατη λύση.

δ. Εν κινήσει επίλυση ασαφειών. Η εν κινήσει επίλυση των ασαφειών πραγματοποιείται ακριβώς όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κατά την διαδικασία της έναρξης, με τους ίδιους ακριβώς περιορισμούς. Για την περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται δέκτες δύο συχνοτήτων είναι η συνηθισμένη και ακριβέστερη μέθοδος. Αν υπάρχει δυνατότητα έναρξης με μέτρηση γνωστής βάσης καλό είναι να χρησιμοποιείται αυτός ο τρόπος, γιατί αφενός είναι ταχύτερος και αφετέρου τα δεδομένα που λαμβάνονται από την επεξεργασία των στοιχείων είναι στατιστικώς καλύτερα. Στην περίπτωση όπου αυτό δεν είναι δυνατό η δυνατότητα της εν κινήσει επίλυσης των ασαφειών (on the fly) αποφέρει πολύτιμο χρόνο ως κέρδος για την εργασία.

1.4 Κινηματικός εντοπισμός σε πραγματικό χρόνο (Real Time Kinematic - RTK)

1.4.1 Γενικά

Η τεχνική του κινηματικού εντοπισμού πραγματικού χρόνου είναι η ακριβέστερη μέθοδος αποτύπωσης χρησιμοποιώντας το σύστημα GPS σε πραγματικό χρόνο και είναι επίσης η μοναδική μέθοδος της δορυφορικής γεωδαισίας που μπορεί να δώσει τόσο ακριβή αποτελέσματα σε πραγματικό χρόνο. Η ακρίβεια της μετρούμενης βάσης εκτιμάται ότι είναι $\pm 1 \text{ cm} \pm 2 \text{ ppm}$ και ο συνήθης χρόνος μετρήσεων 10 - 30 sec. Από αυτό φαίνεται ότι τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι και αρκετά ακριβή και απαιτείται ελάχιστος χρόνος για την πραγμάτωσή τους.

Για την λειτουργία της μεθόδου απαιτείται εκτός από τους δύο δέκτες GPS και μία ασύρματη ζεύξη μεταξύ τους (radio link). Η ζεύξη πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας δύο συσκευές - μία με τον κάθε δέκτη - οι οποίες αποτελούνται από 1 modem και ένα πομποδέκτη.

1.4.2 Περιγραφή της μεθόδου

Η τεχνική πραγματοποιείται όπως ακριβώς και η εκ των υστέρων κινηματική τεχνική, με την μόνη διαφορά ότι ο σταθμός αναφοράς συνδέεται με τον ένα πομποδέκτη και εκπέμπει διορθώσεις, τις οποίες λαμβάνει ο δεύτερος πομποδέκτης που είναι συνδεδεμένος με τον κινητό δέκτη και τις μεταφέρει σε αυτόν. Ο κινητός με την σειρά του, χρησιμοποιεί τις διορθώσεις αυτές για να επιλύσει επιτόπου τις ασάφειες φάσης και να δώσει αποτελέσματα την ίδια στιγμή. Οι δύο μέθοδοι του κινηματικού εντοπισμού πραγματικού χρόνου, όπως και στα προηγούμενα είναι ο ημικινηματικός εντοπισμός πραγματικού χρόνου και ο συνεχής εντοπισμός πραγματικού χρόνου.

Για την εφαρμογή τους ισχύει ότι έχει αναφερθεί παραπάνω με την διαφορά της ασύρματης ζεύξης και των αποτελεσμάτων σε πραγματικό χρόνο, έτσι ώστε ο χρήστης να γνωρίζει ανά πάσα στιγμή το τι ακριβώς έχει κάνει και αν και που υπάρχει κάποιο πρόβλημα.

1.4.3 Έναρξη - Επανέναρξη (Initialization - Reinitialization)

Για να αρχίσει η μέθοδος να λειτουργεί απαιτείται η διαδικασία της έναρξης, όπως και στην εκ των υστέρων κινηματική μέθοδο. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να επιλυθούν οι αρχικές ασάφειες φάσης και μετά ο κινητός είναι έτοιμος να αποτυπώσει σημεία. Στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται δέκτες μία συχνότητας η έναρξη πραγματοποιείται, όπως ακριβώς στην κινηματική μέθοδο, δηλαδή με μέτρηση γνωστής βάσης ή με εναλλαγή κεραιών. Όταν χρησιμοποιούνται δέκτες δύο συχνοτήτων η έναρξη πραγματοποιείται εν κινήσει (αυτόματα), είτε ο δέκτης είναι σταθερός είτε κινείται, με την εν κινήσει επίλυση των ασαφειών (OTF). Η εν κινήσει έναρξη πραγματοποιείται μόλις ο κινητός δέκτης εγκλωβίσει την συχνότητα L2 σε πέντε τουλάχιστον δορυφόρους.

Στην συνέχεια μπορεί να αποτυπώσει σημεία, όσο παρακολουθεί τέσσερις τουλάχιστον δορυφόρους. Στην περίπτωση όπου απωλέσει το σήμα τους, η εν κινήσει έναρξη επαναλαμβάνεται αυτόματα χωρίς να χρειάζεται ούτε καν να το ζητήσει ο χρήστης. Όπως έχει αναφερθεί στα προηγούμενα, όταν χρησιμοποιούνται δέκτες μίας συχνότητας σε κινηματική μέθοδο και χαθεί το σήμα των δορυφόρων πρέπει να γίνει επανέναρξη της διαδικασίας, είτε με επιστροφή του κινητού δέκτη στο προηγούμενο μετρημένο σημείο, ή με εγκατάστασή του σε νέο σημείο γνωστών συντεταγμένων. Εδώ φαίνεται και η σαφής υπεροχή της εν κινήσει επίλυσης των ασαφειών (OTF) και του κινηματικού εντοπισμού πραγματικού χρόνου (RTK) με χρήση δεκτών δυο συχνοτήτων. Ο κινητός δέκτης είναι δυνατόν να εισέρχεται σε περιοχές όπου υπάρχει περιορισμένη ορατότητα σε δορυφόρους, είτε λόγω φυσικών, είτε λόγω τεχνητών εμποδίων και να αποτυπώνει χωρίς να χάνεται χρόνος για επανέναρξη. Ο μόνος περιορισμός της μεθόδου είναι ότι πρέπει η ασύρματη ζεύξη να παραμένει σε λειτουργία, συνεχώς. Δηλαδή δεν είναι δυνατόν να αποτυπωθούν σημεία όπου οι δέκτες δεν μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους. Αλλά και στην περίπτωση αυτή, μόλις η επικοινωνία ανακτηθεί, ο κινητός συνεχίζει κανονικά να αποτυπώνει, χωρίς να χρειάζεται έναρξη. Αυτό σημαίνει ότι η απώλεια της ζεύξης δεν σημαίνει και απώλεια της έναρξης. Επίσης υπάρχει και η δυνατότητα οι δέκτες να στρέφονται αυτόματα σε εκ των υστερών κινηματικό εντοπισμό, μέχρι να ανακτήσουν την επικοινωνία.

1.4.4 Παρατηρήσεις

Συνοψίζοντας, το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι το ότι ο χρήστης βλέπει την λύση την στιγμή ακριβώς των παρατηρήσεων. Ετσι, είναι αδύνατον να υπάρξει οποιοδήποτε πρόβλημα, το οποίο θα μπορούσε να συμβεί σε μία εκ των υστέρων κινηματική εφαρμογή, όπως για παράδειγμα ο σταθμός αναφοράς να έχει χάσει το σήμα και ο κινητός να μη το έχει αντληφθεί και να συνεχίζει να αποτυπώνει. Οπότε, αφενός είναι μέθοδος η οποία μπορεί να εφαρμοσθεί από ένα μόνο άτομο, χωρίς να απαιτείται συνεργείο και αφετέρου ο χρήστης μπορεί να παίρνει και πληροφορίες για την ποιότητα της λύσης του την στιγμή που αυτή πραγματοποιείται, έτσι ώστε να μπορεί να κρίνει αν ενδεχομένως θα πρέπει να αποτυπωθούν κάποια σημεία για περισσότερη ώρα, ή και για περισσότερες από μία φορές. Ετσι, ο χρήστης είναι σε θέση να ξέρει πότε η λύση που έχει είναι ικανοποιητική και να είναι σίγουρος φεύγοντας από το πεδίο, ότι η αποτύπωση έχει πετύχει 100% χωρίς να υπάρχουν αμφιβολίες. Σε μία εκ των υστέρων ανάλυση κινηματικής αποτύπωσης, ο χρήστης είναι σε θέση να γνωρίζει την επιτυχία ή την αποτυχία της, όπως και την ποιότητά της, μόνο μετά την επεξεργασία των μετρήσεων.

2.0 Ο προσδιορισμός των ασαφειών φάσης στις ειδικές τεχνικές

2.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα, για να επιτευχθεί λύση ακριβείας της τάξης του 1 cm ή των μερικών mm, πρέπει να επιλυθούν οι ασάφειες φάσης, δηλαδή να προσδιορισθούν οι ορθοί ακέραιοι αριθμοί. Η λύση στην περίπτωση αυτή (fixed solution) είναι και η καλύτερη. Σε περίπτωση όπου δεν επιλυθούν οι ασάφειες φάσης, είτε επειδή δεν είναι δυνατόν, είτε επειδή δεν ενδιαφέρει, η λύση αυτή (float solution) είναι μειωμένης ακρίβειας της τάξης των 2 - 3 cm, πιθανώς όμως για αρκετές εφαρμογές να είναι επαρκής.

Για την επίλυση των ασαφειών φάσης έχουν αναπτυχθεί διάφορες υπολογιστικές διαδικασίες με δύο κριτήρια, την απαιτούμενη ακρίβεια και τον απαιτούμενο χρόνο (μετρήσεων ή και υπολογισμών). Βέβαια, τα κριτήρια ακρίβειας και χρόνου είναι αλληλένδετα. Ετσι, οποιαδήποτε διαδικασία επίλυσης και να επιλεγεί, είναι σαφές ότι μεγαλύτερη ακρίβεια (και αξιοπιστία) δίνει η λύση, που βασίζεται σε μεγαλύτερο αριθμό παρατηρήσεων.

Η επίλυση των ασαφειών φάσης μπορεί να γίνει εκ των υστέρων, με επεξεργασία των παρατηρήσεων σε υπολογιστή, αλλά και σε πραγματικό χρόνο στο πεδίο, χρησιμοποιώντας μία ταχεία μέθοδο (On The Fly - OTF).

Η εκ των υστέρων επίλυση συνήθως γίνεται σε δύο βήματα. Κατά το πρώτο βήμα πραγματοποιείται ένας συνδυασμένος προσδιορισμός συντεταγμένων, παραμέτρων των χρονομέτρων και ασαφειών, χρησιμοποιώντας κάποια από τις γνωστές μεθόδους συνόρθωσης (MET, φίλτρο Kalman). Τα αποτελέσματα είναι δεκαδικές τιμές (real) των ασαφειών και μία βελτιωμένη εκτίμηση της θέσης των δεκτών, ως προς ένα σημείο αναφοράς.

Το δεύτερο βήμα αποτελείται από προσπάθεια μετατροπής των δεκαδικών τιμών των ασαφειών σε ακέραιες τιμές. Στην περίπτωση όπου η προσπάθεια πετύχει, οι ακέραιες τιμές εισάγονται ως γνωστές σε μία ακόμη συνόρθωση με αγνώστους μόνο τις συντεταγμένες, η οποία δίνει και τις τελικές συντεταγμένες υψηλής ακρίβειας.

Για την μετατροπή των δεκαδικών ασαφειών φάσης σε ακέραιες χρησιμοποιούνται διάφοροι τρόποι. Ο απλούστερος είναι να γίνει στρογγύλευση στον πλησιέστερο ακέραιο αριθμό. Η διαδικασία αυτή είναι κατάλληλη για μεγάλες περιόδους παρατηρήσεων, χωρίς συστηματικά σφάλματα, όπως σφάλματα ατμόσφαιρας, τροχιών και πολλαπλών διαδρομών (multipath).

Η συνηθέστερα ακολουθούμενη διαδικασία είναι η ονομαζόμενη ως Γενική Έρευνα (General Search). Για την κάθε ασάφεια φάσης ορίζεται μία ακτίνα έρευνας (συνήθως 3-σ), η οποία βασίζεται σε στατιστικές θεωρήσεις. Όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί των ακέραιων ασαφειών, που μπορούν να σχηματιστούν μέσα στην ακτίνα έρευνας πρέπει να αναλυθούν και να υπολογιστεί το a posteriori μέσο τετραγωνικό σφάλμα της μονάδας βάρους (rms) για κάθε συνδυασμό. Ως καλύτερο αποτέλεσμα θεωρείται η ομάδα των ακέραιων ασαφειών, που δίνει το μικρότερο σφάλμα.

Η διαδικασία αυτή βασίζεται επίσης στην υπόθεση, ότι η συνόρθωση έχει απαλλαγεί από όλα τα συστηματικά σφάλματα (κατά το δυνατόν). Σε διαφορετική περίπτωση, το a posteriori σφάλμα της μονάδας βάρους θα μπορούσε να είναι ένα λανθασμένο κριτήριο για την επιλογή της σωστής λύσης. Το σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου της γενικής έρευνας, έγκειται στο γεγονός ότι απαιτείται μεγάλη υπολογιστική ισχύς για την ανάλυση όλων των πιθανών συνδυασμών των ακέραιων ασαφειών, που δεν είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί σε σύντομο χρονικό διάστημα και

πόσο μάλλον σε περιβάλλον πραγματικού χρόνου. Το δεύτερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι απαιτεί μεγάλες περιόδους παρατήρησης, κάτι που συνεπάγεται μεγαλύτερη διάρκεια των εργασιών υπαίθρου.

Τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκαν και άλλοι αλγόριθμοι και τεχνικές επίλυσης των ασαφειών σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, με μικρό αριθμό παρατηρήσεων, σχεδόν σε πραγματικό χρόνο.

Στις επόμενες παραγράφους θα περιγραφούν ως παράδειγμα δύο από αυτές τις μεθόδους, όπως χρησιμοποιούνται από δύο εταιρείες κατασκευής δεκτών GPS, της εταιρείας LEICA (Frei and Schubertnigg, 1992) και της εταιρείας TRIMBLE (Trimble Navigation, 1992).

Η μέθοδος της LEICA ονομάζεται "Fast Ambiguity Resolution Approach" (FARA), δηλαδή "Ταχεία Μέθοδος Επίλυσης Ασαφειών". Χρησιμοποιεί μετρήσεις φάσης και στις δύο συχνότητες και είναι δυνατόν να δώσει αποτελέσματα είτε εκ των υστέρων, για μικρά χρονικά διαστήματα παρατηρήσεων, με την τεχνική του ταχέως εντοπισμού, είτε σε πραγματικό χρόνο, με την τεχνική στιγμιαίου (εν κινήσει) εντοπισμού πραγματικού χρόνου (On The Fly).

Η μέθοδος της TRIMBLE (ταχεία μέθοδος επίλυσης ασαφειών φάσης ευρείας και βραχείας ζώνης) χρησιμοποιεί επίσης και τις δύο συχνότητες L1 και L2, με μετρήσεις φάσης και κώδικα (C/A και P) και δίνει αποτελέσματα για εργασίες στατικού εντοπισμού και ταχέως στατικού εντοπισμού. Για τις εργασίες πραγματικού χρόνου (RTK) με την στιγμιαία (εν κινήσει) τεχνική δεν είναι γνωστό ποιά ακριβώς μέθοδος επίλυσης χρησιμοποιείται, ωστόσο μπορεί να υποθεθεί ότι η μέθοδος αυτή θα είναι παρόμοια με την μέθοδο FARA και με την μέθοδο προσδιορισμού των ασαφειών φάσης, που χρησιμοποιείται στον ταχύ στατικό εντοπισμό.

2.2 Η ταχεία μέθοδος επίλυσης ασαφειών φάσης (FARA)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το ζητούμενο είναι η ανάπτυξη μίας μεθόδου επίλυσης των ασαφειών, που αφενός να απαιτεί μικρό χρονικό διάστημα παρατηρήσεων και αφετέρου να δίνει αποτελέσματα, ύστερα από σύντομο διάστημα υπολογισμών, πάντοτε με αξιοπιστία και ακρίβεια.

Έτσι αναπτύχθηκε η τεχνική FARA, που βασίζεται στην γενική έρευνα και έχει τρία κύρια χαρακτηριστικά, η συνολική ακτίνα ανίχνευσης προσδιορίζεται από την χρήση της στατιστικής

πληροφορίας, που παρέχεται από την αρχική συνόρθωση, η περιεχόμενη στον πίνακα μεταβλητότητας - συμμεταβλητότητας πληροφορία χρησιμοποιείται στην απόρριψη ομάδων ασαφειών, που δεν μπορούν να θεωρηθούν σαν στατιστικά έγκυρη εναλλακτική λύση και επιπλέον εφαρμόζεται η μέθοδος του ελέγχου στατιστικών υποθέσεων για την επιλογή της σωστής ομάδας ασαφειών, ή για την ακύρωση της προσπάθειας επίλυσης των ασαφειών σε περίπτωση, που δεν υπάρχει πλεονάζουσα πληροφορία.

Η πραγματοποίηση πειραμάτων έδειξε ότι η μέθοδος FARA μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα για μετρήσεις και στις δύο συχνότητες από 1 - 3 min και για βάσεις μέχρι 15 km, με τον περιορισμό ότι συστηματικά σφάλματα, όπως της επίδρασης της ιονόσφαιρας, να μπορούν να εισαχθούν σε μοντέλο επιτυχώς. Σε περίπτωση, που η εισαγωγή σε μοντέλο των σφαλμάτων δεν είναι δυνατή, η ικανότητα επίλυσης ασαφειών μειώνεται σημαντικά, ακόμα και σε μικρότερες βάσεις.

2.2.1 Η λειτουργία της FARA

Η μέθοδος ξεκινάει με τα αποτελέσματα μίας "συμβατικής" συνόρθωσης που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των αγνώστων παραμέτρων χρησιμοποιώντας όλες τις διαθέσιμες παρατηρήσεις, μέχρι μία συγκεκριμένη εποχή μετρήσεων.

Τα αποτελέσματα αυτά είναι:

- α. Το διάνυσμα λύσης \mathbf{x} που περιλαμβάνει την εκτίμηση για τις συντεταγμένες και επιπλέον τουλάχιστον την εκτίμηση των ασαφειών

$$\mathbf{x} = (x, y, z, N_f^{rk}) \quad 2.1$$

όπου

x, y, z οι συντεταγμένες

N_f^{rk} η ασάφεια από διπλές διαφορές φάσης για την συχνότητα f , δορυφόρο αναφοράς r και δορυφόρο k .

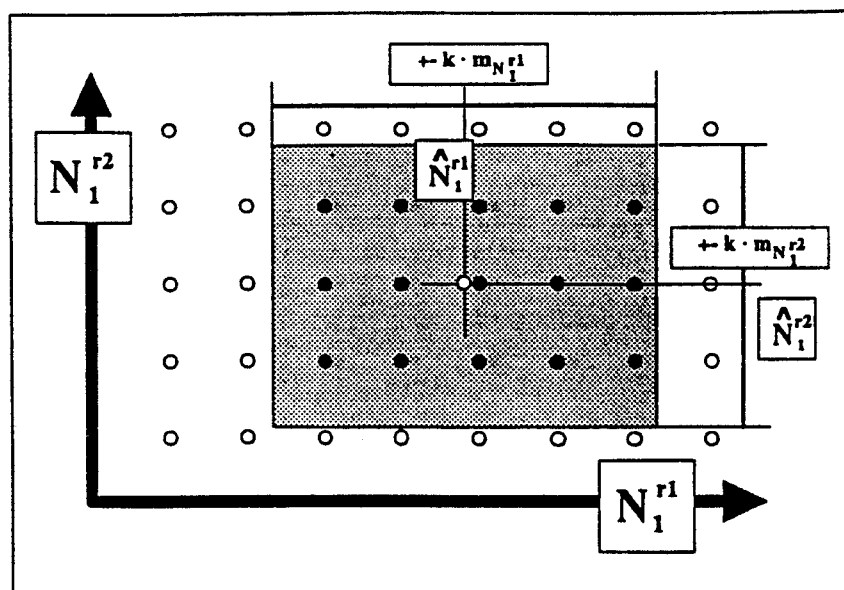
β. Q_{xx} ο πίνακας συντελεστών βάρους των άγνωστων παραμέτρων.

γ. σ_o^2 η a posteriori μεταβλητότητα της μονάδας βάρους (m_o^2 στα σχήματα).

Ο στόχος είναι να ερευνηθεί για κάθε ξεχωριστή δεκαδική ασάφεια N_f^{rk} η πλησιέστερη ακέραιη τιμή I_f^{rk} .

Βάσει της πληροφορίας που περιέχεται στον πίνακα Q_{xx} η ακτίνα έρευνας προσδιορίζεται για κάθε ξεχωριστή ασάφεια (σχήμα 2.1). Η ακτίνα έρευνας προσδιορίζεται από $\pm (k \cdot \sigma_f^{rk})$, όπου k είναι ένας συντελεστής πολλαπλασιασμού που προκύπτει από στατιστικές θεωρήσεις (πχ βαθμός ελευθερίας) και το σ_f^{rk} (m_f^{rk} στα σχήματα) δηλώνει την τυπική απόκλιση μίας συγκεκριμένης τιμής ασάφειας. Αυτές οι δύο ακτίνες έρευνας, σχηματίζουν μία περιοχή έρευνας (γραμμοσκιασμένη περιοχή στο σχήμα 2.1).

Κάθε συνδυασμός ακέραιων ασαφειών στην περιοχή έρευνας (μαύρες τελείες στο σχήμα 2.1) πρέπει να αναλυθεί με συνόρθωση για να υπολογιστεί το a posteriori μέσο τετραγωνικό σφάλμα της μονάδας βάρους.

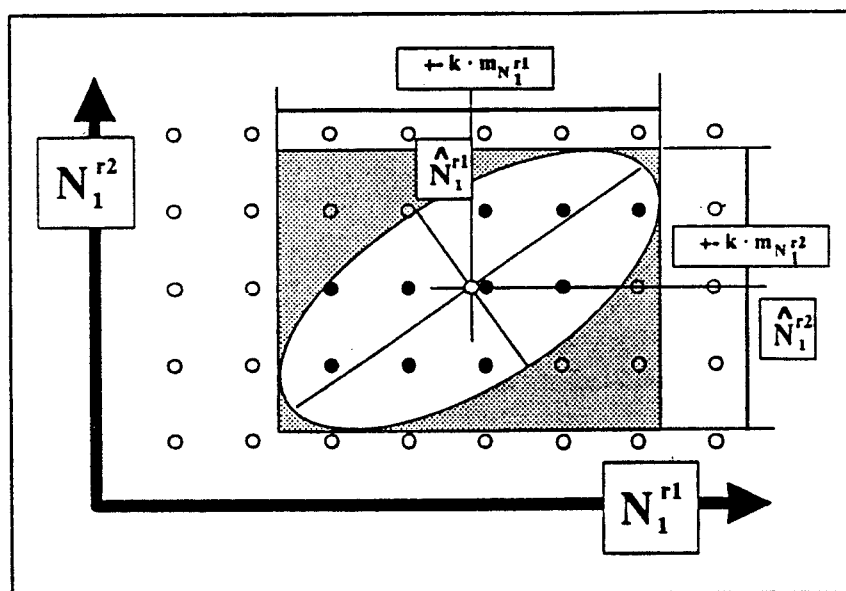


Σχήμα 2.1

Η ομάδα ασαφειών με το μικρότερο σφάλμα της μονάδας βάρους επιλέγεται για την τελική λύση, όταν και μόνο όταν πληρεί κάποιες βασικές προϋποθέσεις.

Η κατάσταση του σχήματος 2.1 δίνει εύκολα την εντύπωση ότι ο υπολογισμός των a posteriori σφαλμάτων όλων των συνδυασμών ασαφειών είναι κάτι εύκολο, στην πραγματικότητα όμως υπάρχει περίπτωση να πρέπει να αναλυθούν εκατομμύρια συνδυασμών. Αυτό οφείλεται στο ότι μία πραγματική εργασία εκτελείται σε πολλές διαστάσεις και όχι μόνο σε δύο όπως στο σχήμα.

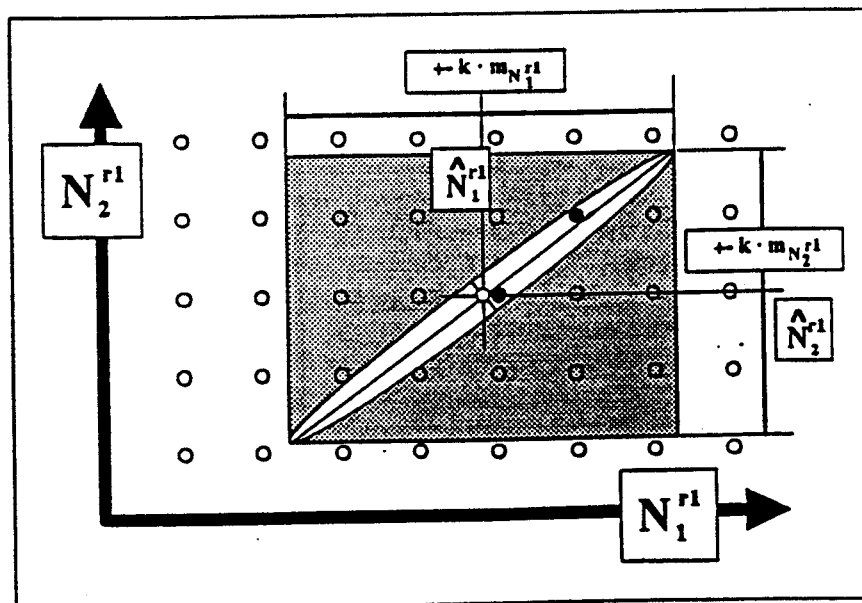
Ετσι, ο βασικός στόχος τώρα είναι η μείωση των προς ανάλυση συνδυασμών. Αυτό πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας πρόσθετη πληροφορία από τον πίνακα των συντελεστών βάρους, δηλαδή των συσχετίσεων μεταξύ των ασαφειών. Στο σχήμα 2.2 φαίνεται πως μικραίνει η ακτίνα έρευνας χρησιμοποιώντας αυτή την πρόσθετη πληροφορία, όταν είναι διαθέσιμες παρατηρήσεις μόνο από δέκτες μίας συχνότητας.



Σχήμα 2.2

Ιδιαίτερα σημαντική μείωση της ακτίνας έρευνας μπορεί να πραγματοποιηθεί όταν υπάρχουν ταυτόχρονες μετρήσεις φάσης και στις δύο συχνότητες L1 και L2 (σχήμα 2.3).

Λόγω της γεωμετρίας, όπως και της αναίρεσης των σφαλμάτων των χρονομέτρων των δεκτών, συνδυασμοί ασαφειών στις L1 και L2 μπορούν να εκτιμηθούν με πολύ υψηλά επίπεδα ακρίβειας. Αυτό το γεγονός κυρίως χρησιμοποιείται από την μέθοδο FARA. Η μείωση που πραγματοποιείται στην ακτίνα έρευνας μπορεί να φτάσει από 10^{11} συνδυασμούς της μεθόδου της γενικής έρευνας, σε 20 με 40 συνδυασμούς χρησιμοποιώντας την FARA. Οι σημαντικότερες αυτές μειώσεις στον αριθμό των συνδυασμών των ακεραίων ασαφειών, επιτρέπουν πολύ μικρά διαστήματα παρατηρήσεων.



Σχήμα 2.3

2.2.2 Βασικές ιδιότητες της μεθόδου FARA

Περίληπτικά, η μέθοδος FARA έχει τις παρακάτω ιδιότητες:

1. Βασίζεται στα αποτελέσματα μίας αρχικής συνόρθωσης που δίνει το διάνυσμα των αγνώστων, τον πίνακα συντελεστών βάρους και το a posteriori μέσο τετραγωνικό σφάλμα της μονάδας βάρους.
2. Με στατιστικές μεθόδους καθορίζει την ακτίνα έρευνας, ώστε να ισχυροποιείται η τελική λύση.
3. Ο αριθμός των διαφορετικών συνδυασμών ακεραίων ασαφειών φάσης προς επεξεργασία, εξαρτάται από την ποιότητα της αρχικής λύσης.

4. Δεν εξαρτάται από την επιλογή του δορυφόρου αναφοράς.
5. Δεν απαιτεί περαιτέρω πληροφορία από αυτή που αναφέρεται παραπάνω στο (1), ώστε να προσδιορίσει την τελική λύση.
6. Αποφασίζει αυτόνομα αν υπάρχει επαρκής πληροφορία, ώστε να επιλύσει τις ασάφειες ή όχι.
7. Ακριβείς μετρήσεις κώδικα (μετρήσεις κώδικα P) δεν απαιτούνται.
8. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε μετρήσεις με τετραγωνισμό της συχνότητας L2.
9. Η ίδια μέθοδος χρησιμοποιείται για την εν κινήσει επίλυση ασαφειών (on the fly).
10. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιαδήποτε τεχνική μέτρησης με το σύστημα GPS, όταν ζητείται η επίλυση της αρχικής ασάφειας φάσης.

2.2.3 Παρατηρήσεις και περιορισμοί

1. Η επίδραση της ιονόσφαιρας

Οι ταχείες διαταραχές της ιονόσφαιρας αποτελούν τον μεγαλύτερο παράγοντα σφάλματος στις μετρήσεις με GPS. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα κατά την διάδοσή τους καθυστερούν, λόγω των ελεύθερων ηλεκτρονίων και ιόντων που περιέχονται στην ιονόσφαιρα, η οποία περιβάλλει ό την γη από ύψος 90km μέχρι 1000km.

Το πρόβλημα της ιονόσφαιρας αντιμετωπίζεται με τρεις τρόπους :

- α. Διόρθωση των παρατηρήσεων χρησιμοποιώντας ένα μαθηματικό μοντέλο της ιονόσφαιρας. Η επιτυχία ή όχι της διόρθωσης εξαρτάται από την δυνατότητα του μοντέλου να αντιπροσωπεύσει την πραγματικότητα.
- β. Ο δεύτερος τρόπος είναι να χρησιμοποιηθούν διαφορές φάσης μεταξύ δεκτών, οι οποίες μειώνουν πάρα πολύ τα σφάλματα και από τους δύο σταθμούς.
- γ. Ο τρίτος τρόπος είναι ο σχηματισμός γραμμικών συνδυασμών των L1 και L2, χρησιμοποιώντας την ιδιότητα της ιονόσφαιρας να επηρεάζει διαφορετικά τις διάφορες συχνότητες.

Οι πρώτοι δύο τρόποι χρησιμοποιούνται κυρίως για τον υπολογισμό της επίδρασης της ιονόσφαιρας για βάσεις μικρού μήκους, ενώ ο τρίτος τρόπος χρησιμοποιείται για βάσεις μεσαίου και μεγάλου μήκους. Βάσεις μέχρι 15 km μπορούν να επιλυθούν σωστά χρησιμοποιώντας απλά ιονοσφαιρικά μοντέλα, αρκεί να βρίσκονται σε περιοχές μεσαίου γεωγραφικού πλάτους. Σε

περιοχές κοντά στον Ισημερινό, ή στους πόλους τα πράγματα δυσκολεύουν λόγω των μεγαλύτερων ιονοσφαιρικών διαταραχών.

2. Η γεωμετρία των δορυφόρων

Εφόσον έχουν εξαλειφθεί τα υπόλοιπα συστηματικά σφάλματα, η γεωμετρία των δορυφόρων είναι ο σημαντικότερος παράγοντας, που επηρεάζει τον προσδιορισμό των ασαφειών σε μικρές βάσεις. Πέντε ομοιόμορφα κατανεμημένοι δορυφόροι αποτελούν ένα πολύ καλό σχηματισμό. Κάθε επιπλέον δορυφόρος παρέχει πλεονάζουσα πληροφορία, η οποία επιταχύνει τη διαδικασία επίλυσης και βελτιώνει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Σε περίπτωση, που οι δορυφόροι είναι μόνο τέσσερις, είναι δυνατή η επίλυση των ασαφειών, απαιτείται όμως αύξηση του χρόνου παρατηρήσεων, προκειμένου να αυξηθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

2.3 Η ταχεία μέθοδος επίλυσης ασαφειών φάσης ευρείας και βραχείας ζώνης

2.3.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, για την επιλογή των παρατηρήσεων φάσης που θα χρησιμοποιηθούν στην τελική ανάλυση και επεξεργασία, είναι σημαντικό να εκτιμηθούν οι παρακάτω παράγοντες:

Το πραγματικό (ουσιαστικό) μήκος κύματος

Το επίπεδο θορύβου

Το συστηματικό σφάλμα λόγω ιονόσφαιρας

Η ακέραια φύση των ασαφειών φάσης

Οι καλύτερες προφανώς παρατηρήσεις θα ήταν εκείνες με μεγάλο μήκος κύματος, χαμηλό επίπεδο θορύβου, την ελάχιστη επίδραση της ιονόσφαιρας και με ακέραια ασάφεια φάσης. Επειδή κάτι τέτοιο δεν υφίσταται, θα πρέπει να γίνουν κάποιοι συμβιβασμοί.

2.3.2 Τα τέσσερα μεγέθη του συστήματος GPS που μετρούνται

Είναι γνωστό ότι για τις γεωδαιτικές (μεγάλης κλίμακας) και τις τοπογραφικές (μικρής κλίμακας) εργασίες υψηλής ακρίβειας είναι απαραίτητες οι μετρήσεις φάσης στην L1 και L2 συχνότητα, όπως και οι μετρήσεις στους κώδικες C/A και P επίσης και στις δύο συχνότητες.

Αυτές οι τέσσερις μετρήσεις περιέχουν όλη την απαραίτητη πληροφορία, για τον ακριβέστερο δυνατό προσδιορισμό των βάσεων που μετρούνται. Επιπλέον είναι δυνατοί και διάφοροι γραμμικοί συνδυασμοί τους με διάφορα πλεονεκτήματα, όπως την ιδιαίτερα σημαντική μείωση των σφαλμάτων λόγω τροχιάς, χρονομέτρων δορυφόρων, χρονομέτρων δεκτών και ατμόσφαιρας.

Θεωρούνται γνωστοί οι γραμμικοί συνδυασμοί των απλών, διπλών και τριπλών διαφορών φάσης γι' αυτό στις επόμενες παραγράφους θα περιγραφούν μόνο οι συνδυασμοί ευρείας ζώνης (wide lane, $\lambda \approx 86$ cm), βραχείας ζώνης (narrow lane, $\lambda \approx 11$ cm) και ο ελεύθερος ιονόσφαιρας συνδυασμός (ionofree).

Σήμερα (Νοέμβριος 2000) ο εκπεμπόμενος κώδικας P έχει αντικατασταθεί από τον Y και έτσι πολλά όργανα μπορούν να μετρήσουν μόνο τρία μεγέθη:

ψευδοαποστάσεις στον κώδικα C/A ($\lambda \approx 300$ m)

φάσεις στην L1 συχνότητα ($\lambda \approx 0.19$ m)

φάσεις στην L2 συχνότητα ($\lambda \approx 0.12$ m) με τεχνικές τετραγωνισμού, χρησιμοποιώντας την διπλάσια από την εκπεμπόμενη συχνότητα, αλλά και με το τετράγωνο του θορύβου της συχνότητας L2.

Η σημερινή τεχνολογία επιτρέπει όμως την μέτρηση της πλήρους συχνότητας L2 ($\lambda \approx 0.24$ m) με διάφορες τεχνικές διασυσχέτισης (cross - correlation) μία από τις οποίες είναι και η ακόλουθη :

Το κατάλληλο όργανο μετράει κανονικά ψευδοαποστάσεις στον κώδικα C/A και την πλήρη φάση στην συχνότητα L1 και συσχετίζει τον άγνωστο κώδικα Y στην L1 με τον επίσης άγνωστο, αλλά όμοιο κώδικα Y στην L2 μετρώντας ουσιαστικά την καθυστέρηση ομάδας στις ψευδοαποστάσεις και φάσης στις φέρουσες συχνότητες. Προσθέτοντας στον κώδικα C/A την καθυστέρηση ομάδας

λαμβάνει την ψευδοαπόσταση στην συχνότητα L2 και μέσω της διασυσχέτισης λαμβάνει την πλήρη συχνότητα L2 άμεσα.

2.3.3 Οι παρατηρήσεις στο σύστημα GPS

Τα απλοποιημένα μοντέλα των μετρήσεων φάσης είναι :

$$\varphi_{L1} = -\rho - \frac{a}{f_{L1}} \lambda_{L1} + \lambda_{L1} \cdot N_{L1} \quad (\text{m}) \quad 2.2$$

$$\varphi_{L2} = -\rho - \frac{a}{f_{L2}} \lambda_{L2} + \lambda_{L2} \cdot N_{L2} \quad (\text{m}) \quad 2.3$$

όπου

$\varphi_{L1}, \varphi_{L2}$	οι μετρήσεις στις φέρουσες L1 και L2 σε m.
ρ	η γεωμετρική απόσταση δορυφόρου - δέκτη που περιέχει τις συντεταγμένες δορυφόρου και δέκτη
a	όρος σφάλματος λόγω ιονόσφαιρας
f_{L1}, f_{L2}	οι φέρουσες συχνότητες ($f_{L1} = 1565.42$ MHz, $f_{L2} = 1227.60$ MHz). Αν η πληροφορία της συχνότητας L2 προέρχεται από τετραγωνισμό τότε $f_{L2} = 2455.20$ MHz.
$\lambda_{L1}, \lambda_{L2}$	τα μήκη κύματος των φερουσών συχνοτήτων L1 και L2 (0.19 m και 0.24 m αντίστοιχα). Το μήκος κύματος της L2 από τετραγωνισμό είναι περίπου 0.12 m.
N_{L1}, N_{L2}	οι ακέραιες ασάφειες φάσης στην L1 και L2 συχνότητα

Οι εξισώσεις (2.2) και (2.3) είναι στην μορφή των διπλων διαφορών, επειδή αυτές μειώνουν σημαντικά τα σφάλματα λόγω δορυφόρων και δεκτών και οι μαθηματικές εκφράσεις τους είναι σχετικά απλές.

Οι διπλές διαφορές στις μετρήσεις κώδικα είναι τελείως αντίστοιχες με τις διπλές διαφορές στις μετρήσεις φάσεις, αλλά δεν περιέχουν τους όρους των ακέραιων ασαφειών φάσης.

$$p_{L1} = \rho - \frac{a}{f_{L1}} \lambda_{L1} \quad (\text{m}) \quad 2.4$$

$$p_{L2} = \rho - \frac{a}{f_{L2}} \lambda_{L2} \quad (\text{m}) \quad 2.5$$

όπου

p_{L1}, p_{L2} οι ψευδοαποστάσεις στις L1 και L2

2.3.4 Γραμμικοί συνδυασμοί

Για την ανάλυση των παρατηρήσεων GPS μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλοί γραμμικοί συνδυασμοί των μετρήσεων $\varphi_{L1}, \varphi_{L2}, p_{L1}, p_{L2}$. Για παράδειγμα πολλές φορές χρησιμοποιείται ο συνδυασμός της ευρείας ζώνης ($\lambda = 0.86\text{m}$) για την επίλυση των ασαφειών φάσης, ενώ σε μεγάλου μήκους βάσεις χρησιμοποιείται ο ελεύθερος ιονόσφαιρας συνδυασμός, επειδή σ' αυτές τις αποστάσεις η επίδραση της ιονόσφαιρας είναι ιδιαίτερα σημαντική και ίσως ο καθοριστικός παράγοντας στην τελική ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Υπάρχουν και συνδυασμοί μεταξύ μετρήσεων φάσης και κώδικα, ενώ οι συνδυασμοί των μετρήσεων φάσης ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της προκύπτουσας "μέτρησης", που απαιτούνται δίνονται από τη σχέση :

$$\varphi_i = \left(a \frac{\varphi_{L1}}{\lambda_{L1}} + \beta \frac{\varphi_{L2}}{\lambda_{L2}} \right) \cdot \lambda_i \quad (\text{m}) \quad 2.6$$

όπου οι συντελεστές a και β επιλέγονται έτσι, ώστε να δώσουν στη νέα μέτρηση φ_i τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται και το λ_i αναφέρεται στο μήκος κύματος που προκύπτει από τον συνδυασμό.

Ανάλογη έκφραση ισχύει και για τις μετρήσεις κώδικα :

$$p_i = \left(c \frac{P_{L1}}{\lambda_{L1}} + d \frac{P_{L2}}{\lambda_{L2}} \right) \cdot \lambda_i \quad (\text{m}) \quad 2.7$$

Ο παρακάτω πίνακας 2.1 παρουσιάζει μερικούς συνδυασμούς μετρήσεων φάσης και κώδικα απο τους οποίους ξεχωρίζουν οι συνδυασμοί των σχέσεων 2.8 και 2.9.

Ο γραμμικός συνδυασμός της ευρείας ζώνης δίνεται από την σχέση:

$$\varphi_{\Delta W} = \left(\frac{\varphi_{L1}}{\lambda_{L1}} - \frac{\varphi_{L2}}{\lambda_{L2}} \right) \cdot \lambda_{\Delta W} = -\rho - \alpha \cdot \left(\frac{1}{f_{L1}} - \frac{1}{f_{L2}} \right) \cdot \lambda_{\Delta W} + \lambda_{\Delta W} \cdot N_{\Delta W} \quad (\text{m}) \quad 2.8$$

όπου

$$\lambda_{\Delta W} = \frac{c}{(f_{L1} - f_{L2})} = 86.2 \text{ cm, το μήκος κύματος}$$

$$N_{\Delta W} = N_{L1} - N_{L2} \quad \text{η ασάφεια φάσης}$$

Ο γραμμικός συνδυασμός της βραχείας ζώνης δίνεται από την σχέση:

$$\varphi_{\Delta N} = \left(\frac{\varphi_{L1}}{\lambda_{L1}} + \frac{\varphi_{L2}}{\lambda_{L2}} \right) \cdot \lambda_{\Delta N} = -\rho - \alpha \cdot \left(\frac{1}{f_{L1}} + \frac{1}{f_{L2}} \right) \cdot \lambda_{\Delta N} + \lambda_{\Delta N} \cdot N_{\Delta N} \quad (\text{m}) \quad 2.9$$

όπου

$$\lambda_{\Delta N} = \frac{c}{(f_{L1} + f_{L2})} = 10.7 \text{ cm, το μήκος κύματος}$$

$$N_{\Delta N} = N_{L1} + N_{L2} \quad \text{η ασάφεια φάσης}$$

Σύμβολο	Συνδυασμός	Συντελεστές		Μήκος κύματος		Σφάλμα Ιονόσφαιρας ¹	Θόρυβος ² (mm)
		α	β	Πλήρεις κύκλοι L1 και L2 (cm)	Πλήρεις κύκλοι- 0.5 L2 ³ (cm)		
φ_{L1}	L1	+1	0	19.0	19.0	0.779	3.0
φ_{L2}	L2	0	+1	24.4	12.2	1.283	3.9
$\varphi_{\Delta W}$	Ευρείας Ζώνης	+1	-1	86.2	43.1	-1.000	19.4
$\varphi_{\Delta N}$	Βραχείας Ζώνης	+1	+1	10.7	5.4	+1.000	2.4
φ_0	Ελεύθερος Ιονόσφαιρας	$\approx +9$	≈ -7	≈ 5.4	≈ 2.7	0.0000	10.3
Κώδικες		c	d				(m)
P_{L1}	L1	+1	0			-0.779	0.47
P_{L2}	L2	0	+1			-1.283	0.47
$P_{\Delta W}$	Ευρείας Ζώνης	+1	-1			+1.000	2.68
$P_{\Delta N}$	Βραχείας Ζώνης	+1	+1			-1.000	0.33
P_0	Ελεύθερος Ιονόσφαιρας	$\approx +9$	≈ -7			0.000	1.4
¹ Με το "σφάλμα ιονόσφαιρας" εννοείται η ενίσχυση του ιονοσφαιρικού σφάλματος στις παρατηρήσεις.							
² Οι τιμές του θορύβου είναι στο επίπεδο του 1-σίγμα, για δεδομένα πριν από τις διαφορές και με τις υποθέσεις:							
• Τα σφάλματα φάσης στις L1 και L2 είναι ασυσχέτιστα και ίσα με 0.1 radians							
• Τα σφάλματα κώδικα στις L1 και L2 είναι ασυσχέτιστα και ίσα με 0.47 m							
³ Προυποτίθεται ότι η έξοδος της L2 έχει διαρθεθεί με το 2, λόγω τετραγωνισμού δηλαδή αναζητούνται κατά την επεξεργασία ασάφειες μισού κύκλου.							

Πίνακας 2.1

2.3.5 Παρατηρήσεις για τον προσδιορισμό ασαφειών φάσης

Ο συνδυασμός φάσεων ευρείας ζώνης είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για τον προσδιορισμό των ασαφειών φάσης, επειδή το πραγματικό μήκος κύματος είναι 86.2 cm, τέσσερις φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της L1, το επίπεδο θορύβου είναι χαμηλό ποσοστό του μήκους κύματος, ιδιαίτερα αν το συγκρίνει κανείς με το αντίστοιχο της L3 (συνδυασμός ελεύθερος ιονόσφαιρας) και

το σφάλμα λόγω ιονόσφαιρας είναι αντίστοιχο με αυτό των L1 και L2. Επιπλέον ο συνδυασμός αυτός έχει ακέραιο παράγοντα συστηματικού σφάλματος, δηλαδή ακέραιες ασάφειες φάσης.

Η ασάφεια φάσης βραχείας ζώνης προκύπτει από το άθροισμα των ασαφειών L1 και L2, ενώ της ευρείας ζώνης από την διαφορά τους. Αυτό οδηγεί σε ένα σημαντικό συμπέρασμα, δηλαδή αν η ευρείας ζώνης ακέραια ασάφεια φάσης είναι άρτια/περιττή, τότε και η βραχείας ζώνης ακέραια ασάφεια θα είναι επίσης άρτια / περιττή.

Οπότε αν $(\pi\chi)$ η ευρείας ζώνης ακέραια ασάφεια φάσης έχει επιλυθεί σωστά για μία συγκεκριμένη διπλή διαφορά, τότε το (ουσιαστικό) μήκος κύματος της παρατήρησης βραχείας ζώνης (υπολογισμένου μεγέθους) θα είναι το διπλάσιο, λόγω της σχέσης άρτιου / περιττού. Αν τέλος δοθεί η σωστή λύση και για τις δύο (ευρείας και βραχείας ζώνης) ασάφειες, μπορεί να διαμορφωθεί απ' ευθείας κάθε άλλη ασάφεια φάσης, για κάθε συνδυασμό μετρήσεων φάσης L1 και L2.

Επιπλέον, οι ψευδοαποστάσεις βραχείας ζώνης έχουν μερικές σημαντικές ιδιότητες, όπως ότι το επίπεδο θορύβου είναι χαμηλότερο από ότι στις μετρήσεις κώδικα στις L1 και L2 ξεχωριστά, (υποθέτοντας ότι δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των μετρήσεων κώδικα) και το σφάλμα λόγω ιονόσφαιρας είναι ίδιου μεγέθους με αυτό της παρατήρησης φάσης ευρείας ζώνης.

Το μοντέλο της μέτρησης κώδικα για την ψευδοαπόσταση βραχείας ζώνης δίνεται από την εξίσωση:

$$P_{\Delta N} = \left(\frac{P_{L1}}{\lambda_{L1}} + \frac{P_{L2}}{\lambda_{L2}} \right) \cdot \lambda_{\Delta N} = +\rho - \alpha \cdot \left(\frac{1}{f_{L1}} + \frac{1}{f_{L2}} \right) \cdot \lambda_{\Delta N} \quad (\text{m}) \quad 2.10$$

Η εξίσωση φάσης ευρείας ζώνης (2.8) μπορεί να εξισωθεί με το μοντέλο μέτρησης κώδικα βραχείας ζώνης (2.10), προκειμένου να γίνει μία απευθείας εκτίμηση της ασάφειας φάσης ευρείας ζώνης $N_{\Delta W}$.

$$N_{\Delta W} = \frac{P_{\Delta N} + \varphi_{\Delta N}}{\lambda_{\Delta W}} \quad (\text{cycles}) \quad 2.11$$

Η εξίσωση (2.11) είναι απαλλαγμένη από σφάλματα λόγω ατμόσφαιρας, εφημερίδων δορυφόρων, καθώς και λόγω χρονομέτρων των δορυφόρων και των δεκτών.

Τα σφάλματα που κυριαρχούν στο $N_{\Delta W}$ είναι ο θόρυβος και το σφάλμα λόγω πολλαπλών διαδρομών στις μετρήσεις ψευδοαποστάσεων βραχείας ζώνης. Γενικά, χρησιμοποιείται ένας χρονικός μέσος όρος για να βελτιώνεται η εκτίμηση του $N_{\Delta W}$.

Αν εξετασθεί η επίδραση του τετραγωνισμού της L2 στον προσδιορισμό του όρου $N_{\Delta W}$ μέσω της σχέσης 2.11, φαίνεται ότι αν το μήκος κύματος της ευρείας ζώνης $\lambda_{\Delta W}$ υποδιπλασιασθεί, τότε το σφάλμα της εκτίμησης του όρου $N_{\Delta W}$, σε κύκλους, διπλασιάζεται, άρα ο χρονικός μέσος όρος τετραπλασιάζεται.

Ετσι γίνεται σαφές ότι ο χρόνος παρατηρήσεων ταχέως στατικού εντοπισμού θέσης σ' ένα σημείο θα πρέπει να αυξάνεται αρκετά, όταν χρησιμοποιείται τετραγωνισμός της L2, με την υπόθεση ότι ο θόρυβος των μετρήσεων έχει μέσο μηδέν και ακολουθεί την κατανομή του Gauss.

Το σφάλμα λόγω πολλαπλών διαδρομών είναι ο κύριος παράγοντας σφάλματος στην σχέση 2.11 και μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με μέσο όρο από επαρκείς χρονικά μετρήσεις επειδή κορυφώνεται περιοδικά.

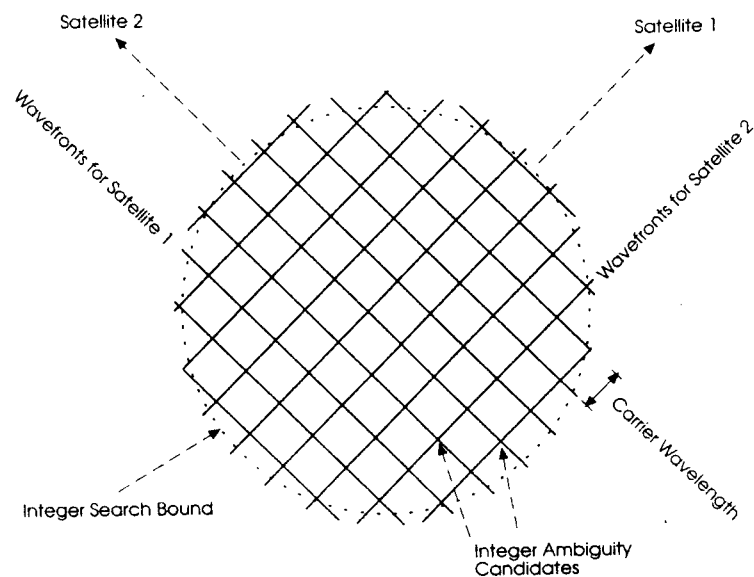
2.3.6 Ο προσδιορισμός των ασαφειών χρησιμοποιώντας γεωμετρική πληροφορία

Η μέθοδος προσδιορισμού των ασαφειών φάσης, που περιγράφηκε μέχρι τώρα, επικεντρώθηκε στη χρήση της πληροφορίας από τις μετρήσεις κώδικα για να "βαθμονομηθούν" οι ασάφειες φάσης.

Βεβαίως και η γεωμετρία των παρατηρήσεων προς τους δορυφόρους παίζει ένα ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο, που για ευκολία παρουσιάζεται στις επόμενες παραγράφους σε διδιάστατο χώρο.

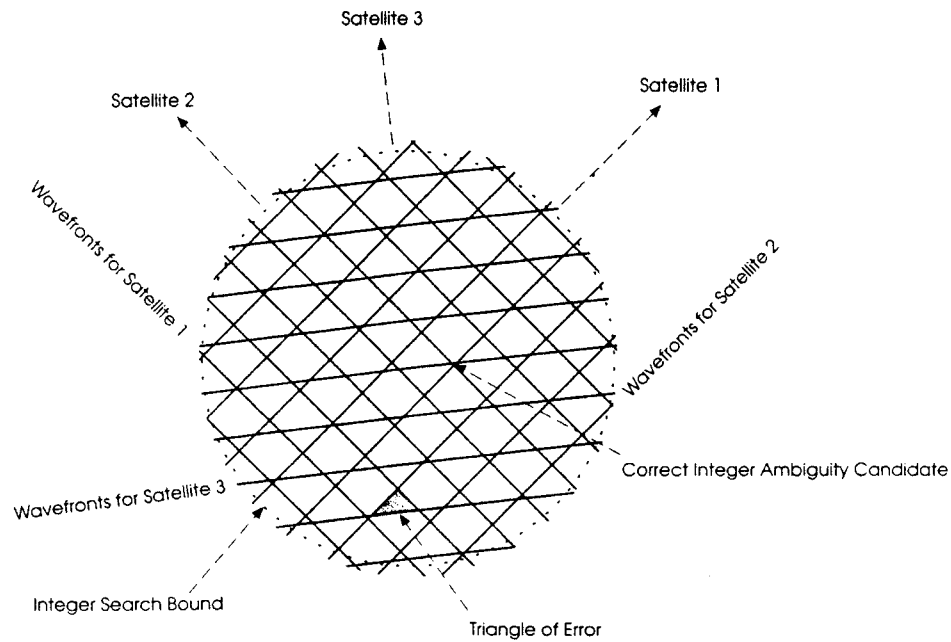
Ας υποθεθεί η περίπτωση, όπου ένας δέκτης (άγνωστης θέσης), βλέπει δύο δορυφόρους υπό ορθή γωνία. Τα μέτωπα των εκπεμπόμενων κυμάτων από τους δορυφόρους μπορούν να θεωρηθούν ως κάθετες γραμμές στο διάνυσμα δορυφόρου - δέκτη και άρα σε διδιάστατο χώρο μπορούν να παρουσιασθούν ως κάρναβος (σχήμα 2.4).

Η διάσταση του καννάβου καθορίζεται προφανώς από το εκπεμπόμενο μήκος κυματος, που θα είναι περίπου 86 cm για μετρήσεις ευρείας ζώνης και περίπου 10 cm για μετρήσεις βραχείας ζώνης. Οπως φαίνεται και στο σχήμα 2.4 κάθε σημείο τομής, αντιπροσωπεύοντας ένα αριθμό (διαφορετικό) ακέραιων κύκλων από κάθε δορυφόρο, είναι υποψήφιο για να δώσει την ακέραια ασάφεια φάσης. Είναι επίσης σαφές από το σχήμα 2.4, ότι το πρόβλημα του προσδιορισμού των ασαφειών φάσης με μετρήσεις σε δύο δορυφόρους δεν μπορεί να επιλυθεί γιατί οποιαδήποτε κορυφή του καννάβου και να επιλεγεί θα είναι εξίσου σωστή με τις άλλες.



Σχήμα 2.4

Αν εισαχθούν παρατηρήσεις και προς τρίτο δορυφόρο στο ίδιο διάγραμμα (σχήμα 2.5), φαίνεται αμέσως ότι είναι εύκολο να απορριφθούν κορυφές του καννάβου, εξετάζοντας μόνο το τρίγωνο σφάλματος και ο σωστός συνδυασμός ακεραίων θα είναι προφανώς εκείνος όπου το συνολικό σφάλμα (μέσω των τριγώνων σφάλματος) θα είναι ελάχιστο.



Σχήμα 2.5

Η αναλυτική έκφραση του τριγώνου σφάλματος είναι μέσω των Ελαχίστων Τετραγώνων, ο ελάχιστος όρος $v^T P v$ των υπολοίπων των μετρήσεων, που στη θεωρητική περίπτωση μετρήσεων χωρίς σφάλμα θα είναι μηδέν. Ακόμη όμως και στην θεωρητική αυτή περίπτωση μία μοναδική σειρά ακεραίων ασαφειών φάσης μπορεί να είναι δύσκολο να προσδιορισθεί.

Ο αριθμός των λανθασμένων συνδυασμών θα μειωθεί σημαντικά με επιπλέον παρατηρήσεις και σε άλλους δορυφόρους, αλλά και με την αύξηση της στατιστικής σημαντικότητας του $v^T P v$ με τον χρόνο, μέσω της συνεχούς αλλαγής της γεωμετρίας των δορυφόρων.

Ενας ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας είναι επίσης ο χώρος έρευνας των ασαφειών φάσης (ambiguity search domain), που όσο μικρότερος είναι, τόσο ταχύτερος είναι ο προσδιορισμός της σωστής σειράς των ακεραίων.

Σε μερικές περιπτώσεις, όταν δεν απαιτείται η μέγιστη δυνατή ακρίβεια και το σφάλμα των ασαφειών (από τα Ελάχιστα Τετράγωνα) είναι μικρότερο από μισό κύκλο, είναι δυνατόν να στρογγυλευθούν οι ασάφειες στον πλησιέστερο ακέραιο άμεσα.

Στην πράξη το σύστημα σχηματίζει τις μετρήσεις της ευρείας και βραχείας ζώνης, επιλύει με στατιστικούς ελέγχους τις ασάφειες της ευρείας ζώνης, που είναι σχετικά εύκολο λόγω του μεγάλου μήκους κύματος, προσδιορίζει τις ασάφειες βραχείας ζώνης με στατιστικούς επίσης ελέγχους, αλλά και μέσω της σχέσης άρτιος / περιττός ακέραιος, όπως προαναφέρθηκε και τέλος μέσω αυτών προσδιορίζει τις ασάφειες φάσης της L1, L2 ή και άλλων συνδυασμών, με ακρίβεια και γρήγορα.

Μία ένδειξη της επιτυχίας του προσδιορισμού αυτού είναι και ο λόγος ποιότητας (quality ratio) του καλύτερου (ελάχιστου) v^{TPN} , από μία σειρά ακεραίων, προς το αμέσως επόμενο σε μέγεθος από μία άλλη σειρά ακεραίων (συνδυασμό). Αν ο λόγος αυτός είναι μεγάλος (συνήθως λαμβάνεται μεγαλύτερος του 3), αυτό σημαίνει ότι η καλύτερη τιμή (σειρά ακεραίων) απέχει πολύ από την αμέσως επόμενη τιμή (άλλη σειρά ακεραίων), άρα με υψηλό επίπεδο εμπιστοσύνης αυτή είναι και η καλύτερη σειρά ακεραίων ασαφειών φάσης. Στην αντίθετη περίπτωση, οι δύο λύσεις είναι πάρα πολύ κοντά, δεν υπάρχει αξιόπιστα μία και μόνο σειρά ακεραίων ασαφειών φάσης και στην περίπτωση αυτή η λύση με δεκαδικές ασάφειες φάσης είναι η καλύτερη.

3.0 Βιβλιογραφία

Γυφτοδής Ε., (1997): "Νέες Τεχνικές Μετρήσεων με το Σύστημα GPS". Διπλωματική Εργασία, ΚΔΔ, ΕΜΠ.

Frei E., M. Schubberning, (1992): "GPS Surveying Techniques Using the Fast Ambiguity Resolution Approach (FARA)". Technical Report, LEICA.

Hatch R., (1992): "The Synergism of GPS Code and Carrier Measurements". Proc. 3^d Intern. Symposium on Satellite Doppler Positioning, Vol. 2, pp 1213-1231.

Trimble Navigation, (1992): "Recent Advances in GPS Hardware and Software". Application and Technical Notes.

ΟΡΟΛΟΓΙΑ GPS

Ορολογία GPS

Ambiguity Ασάφεια

Ασάφεια φάσης στην συχνότητα συμβολής είναι η αβεβαιότητα της αρχικής μέτρησης (άγνωστος ακέραιος αριθμός κύκλων), που εισάγεται σαν συστηματικό σφάλμα, σε όλες τις συνεχείς μετρήσεις και μέχρι κάποια διακοπή. Η ασάφεια φάσης αποτελείται από τρεις παράγοντες.

$$a_i + b^j + N_i^j$$

όπου

a_i είναι η δεκαδική αρχική φάση στον δέκτη

b^j είναι η δεκαδική αρχική φάση στον δορυφόρο (και οι δύο λόγω ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και άγνωστης φάσης στο χρονόμετρο)

N_i^j είναι ένας άγνωστος ακέραιος αριθμός κύκλων στην αρχική μέτρηση

Ambiguity function method Μέθοδος συνάρτησης ασάφειας

Μία μέθοδος για τον προσδιορισμό αυτών των ασαφών τιμών που κάνει ελάχιστο το συντελεστή μεταβολής της λύσης για το διάνυσμα της βάσης ενός ζεύγους δεκτών.

Anti-spoofing (A-S) Κρυπτογράφηση (ή μη εξαπάτηση)

Είναι η δυνατότητα, που παρέχεται στους χειριστές του συστήματος GPS, να μετατρέψουν τον γνωστό ακριβή κώδικα $P(t)$ σε κάποιο άγνωστο $Y(t)=P(t) \cdot W(t)$, ώστε να αποφεύγεται σκόπιμη παρεμβολή θορύβου στο εκπεμπόμενο σήμα. Με αυτό τον τρόπο διακόπτεται η παροχή ακριβούς εντοπισμού από το σύστημα GPS σε πραγματικό χρόνο, σε όλους τους χρήστες, που δεν έχουν την κατάλληλη "εξουσιοδότηση" χρήσης του κώδικα.

Bandwidth Εύρος σήματος

Μία μέτρηση του εύρους του φάσματος ενός σήματος - όταν το σήμα παρουσιάζεται ως προς τη συχνότητα - που εκφράζεται σε Hz.

Baseline Βάση

Η βάση αποτελείται από ένα ζεύγος σταθμών από τους οποίους έχουν γίνει ταυτόχρονες παρατηρήσεις GPS.

Beat frequency Συχνότητα συμβολής

Η μία ή η άλλη (οποιαδήποτε) από τις δύο πρόσθετες συχνότητες, που λαμβάνονται όταν σήματα δύο συχνοτήτων αναμιγνύονται, ίσες προς το άθροισμα ή τη διαφορά των αρχικών συχνοτήτων. Για παράδειγμα στην ταυτότητα $\cos A \cos B = (\cos(A+B) + \cos(A-B))/2$ τα αρχικά σήματα είναι τα A και B και τα συμβαλλόμενα είναι τα A+B και A-B. Ο όρος συχνότητα συμβολής αναφέρεται κυρίως στη διαφορά A-B, όπου A είναι το εισερχόμενο σήμα (με την αλλαγή στην συχνότητα λόγω φαινομένου doppler) και B είναι το (ονομαστικά) σταθερό σήμα, που παράγεται στον δέκτη.

Between-epoch difference Διαφορά ως προς τον χρόνο

Διαφορά ως προς τον χρόνο είναι η διαφορά δύο πλήρων στιγμιαίων μετρήσεων φάσης, που γίνονται από τον ίδιο δέκτη πάνω στο ίδιο σήμα (ίδιος δορυφόρος, ίδια συχνότητα).

Between-frequency difference Διαφορά ως προς την συχνότητα

Διαφορά ως προς την συχνότητα είναι η στιγμιαία διαφορά (ή πιο γενικά οποιοσδήποτε γραμμικός συνδυασμός) μεταξύ των πλήρων στιγμιαίων μετρήσεων φάσης που γίνονται από δέκτη, που παρακολουθεί σήματα από τον ίδιο δορυφόρο σε δύο (ή περισσότερες) διαφορετικές συχνότητες.

Between-receiver difference Διαφορά μεταξύ δεκτών

Διαφορά μεταξύ δεκτών είναι η στιγμιαία διαφορά στις πλήρεις στιγμιαίες μετρήσεις φάσης, που γίνονται από δύο δέκτες, που παρακολουθούν ταυτόχρονα το ίδιο σήμα (ίδιο δορυφόρο, ίδια συχνότητα).

Between-satellite difference Διαφορά μεταξύ δορυφόρων

Διαφορά μεταξύ δορυφόρων είναι η στιγμιαία διαφορά στις πλήρεις στιγμιαίες μετρήσεις φάσης, που γίνονται από τον ίδιο δέκτη, που παρατηρεί δύο σήματα δορυφόρων ταυτόχρονα (ίδια συχνότητα).

Binary pulse code modulation Διαμόρφωση κώδικα δυαδικών παλμών

Διαμόρφωση παλμών χρησιμοποιώντας μια σειρά (κώδικα) δυαδικών αριθμών. Αυτή η κωδικοποίηση συνήθως παρίσταται με 0 και 1 (ή -1 και +1) στα οποία αντιστοιχίζονται σαφείς έννοιες, όπως αλλαγή στη φάση ή τη διεύθυνση ενός σήματος.

Binary biphas modulation Δυαδική διαμόρφωση δύο φάσεων

Αλλαγή φάσης ενός φέροντος σήματος σταθερής συχνότητας ή 0° ή 180° (για να παρασταθεί το δυαδικό 0 ή 1 αντίστοιχα). Ένα μοντέλο αυτών των αλλαγών φάσης είναι το $y=A(t)\cdot\cos(ft+\varphi)$ όπου η συνάρτηση του πλάτους $A(t)$ είναι μια σειρά τιμών +1 ή -1 (για να αντιπροσωπευθούν οι αλλαγές φάσης 0° ή 180° αντίστοιχα).

C/A-code ή S-code Κώδικας C/A

Είναι κώδικας μετάδοσης του συστήματος GPS, μια σειρά από 1023 ψευδοτυχαίες δυαδικές διαμορφώσεις δύο φάσεων πάνω στο φέρον κύμα του GPS με ρυθμό 1.023 MHz, έχοντας μια περίοδο επανάληψης ενός χιλιοστού του δευτερολέπτου.

Carrier Φέρον κύμα

Ενα ηλεκτρομαγνητικό κύμα που ένα του τουλάχιστον χαρακτηριστικό (συχνότητα, πλάτος, φάση) μπορεί να μεταβάλλεται από μια γνωστή τιμή αναφοράς με διαμόρφωση.

Carrier beat phase Φάση σήματος συμβολής

Η φάση του σήματος, που παραμένει, όταν το εισερχόμενο σήμα (που έχει επηρεαστεί από το φαινόμενο doppler) συμβάλλει με το σήμα, που παράγεται στον δέκτη.

Carrier frequency Συχνότητα φέροντος κύματος

Η συχνότητα της βασικής αδιαμόρφωτης εξόδου ενός ραδιοπομπού.

Channel Κανάλι (διάυλος)

Ενα κανάλι ενός δέκτη GPS αποτελείται από την συχνότητα, τα ψηφιακά ηλεκτρονικά και τα προγράμματα, που απαιτούνται για τον εγκλωβισμό και την παρακολούθηση του σήματος ενός δορυφόρου GPS σε μια από τις δύο συχνότητες.

Chip ????

Το ελάχιστο χρονικό διάστημα ενός δυαδικού 0 ή 1 στη διαμόρφωση κώδικα δυαδικών παλμών.

Code Κώδικας

Ενα σύστημα που χρησιμοποιείται για επικοινωνία, όπου σε αυθαίρετα επιλεγμένες σειρές από 0 και 1 αντιστοιχίζονται τελείως καθορισμένες έννοιες.

Complete instantaneous phase measurement Πλήρεις στιγμιαίες μετρήσεις φάσης

Μία μέτρηση της φάσης του φέροντος κύματος, που περιλαμβάνει τον ακέραιο αριθμό κύκλων από την αρχική (πρώτη) μέτρηση φάσης.

Correlation type channel Κανάλι συσχέτισης

Κανάλι στο δέκτη GPS, που χρησιμοποιεί ένα κύκλωμα εγκλωβισμού, της καθυστέρησης χρόνου, για να διατηρήσει μία ευθυγράμμιση (αιχμή συσχέτισης) μεταξύ του αντιγράφου του κώδικα του GPS, που παράγεται στο δέκτη και του εισερχόμενου κώδικα.

Cycle slip Απώλεια κύκλων

Απώλεια κύκλων στις μετρήσεις φάσης ονομάζεται η απώλεια ενός άγνωστου ακέραιου αριθμού κύκλων της φέρουσας συχνότητας, όταν διακοπεί η συνεχής παρακολούθηση ενός ή περισσότερων δορυφόρων από τον δέκτη για οποιαδήποτε αιτία (πχ λόγω της παρεμβολής κάποιου εμποδίου στην διαδρομή του σήματος από τον δορυφόρο στον δέκτη).

Delay lock Εγκλωβισμός καθυστέρησης (χρόνου)

Η τεχνική, όπου ο λαμβανόμενος κώδικας (που παράγεται από τον ταλαντωτή του δορυφόρου) συγκρίνεται με τον εσωτερικό κώδικα (που παράγεται από τον ταλαντωτή του δέκτη) και ο τελευταίος ολισθαίνει κατά το χρόνο, ώστε οι δύο κώδικες να ταιριάσουν. Κυκλώματα εγκλωβισμού καθυστέρησης εφαρμόζονται με πολλούς τρόπους.

Delta pseudorange Δέλτα ψευδοαπόσταση

Η διαφορά μεταξύ δύο μετρήσεων φάσης, που ταυτίζονται σε εποχή (χρόνο) με τις μετρήσεις ψευδοαποστάσεων.

Denial of access Αρνηση πρόσβασης

[Κρυπτογράφηση]

Denial of accuracy Αρνηση ακρίβειας

[Επιλεκτική διαθεσιμότητα]

Differenced measurements Διαφορές μετρήσεων

[Διαφορές στις μετρήσεις]

Αν και πολλοί συνδυασμοί είναι δυνατοί, η μέχρι τώρα πρακτική για τις διαφορές στις μετρήσεις φάσης του GPS είναι να παίρνονται οι διαφορές με την ακόλουθη σειρά, πρώτα ως προς τους δέκτες, κατόπιν ως προς τους δορυφόρους και τέλος ως προς το χρόνο. Η μέτρηση απλής διαφοράς (**single difference**) (ως προς δέκτες) είναι η στιγμιαία διαφορά στη φάση ενός λαμβανομένου σήματος που μετριέται από δύο δέκτες που παρατηρούν ταυτόχρονα ένα δορυφόρο. Η μέτρηση διπλής διαφοράς (**double difference**) (ως προς δέκτες και δορυφόρους) λαμβάνεται με τη διαφορά, της απλής διαφοράς για ένα δορυφόρο ως προς την αντίστοιχη απλή διαφορά για ένα επιλεγμένο δορυφόρο αναφοράς. Η μέτρηση τριπλής διαφοράς (**triple difference**) (ως προς δέκτες, δορυφόρους και χρόνο) είναι η διαφορά μεταξύ δύο διπλών διαφορών ως προς δύο διαδοχικές χρονικές στιγμές.

Differential positioning Διαφορικός εντοπισμός θέσης

[Σχετικός εντοπισμός θέσης]

Dilution of precision - DOP Ανάλυση της εσωτερικής ακρίβειας

Μία περιγραφή της συνεισφοράς της γεωμετρίας των παρατηρήσεων στην αβεβαιότητα κινηματικού εντοπισμού θέσης, που δίνεται από την έκφραση $DOP = \sqrt{\text{TRACE}(A^T A)^{-1}}$, όπου A είναι ο πίνακας σχεδιασμού για τη στιγμιαία λύση (που εξαρτάται από τη γεωμετρία δορυφόρου-δέκτη). Ο συντελεστής DOP εξαρτάται από τις παραμέτρους της λύσης του εντοπισμού. Καθορισμένοι όροι στην περίπτωση του GPS είναι:

GDOP (τρεις συντεταγμένες θέσης και η διαφορά χρονόμετρου στη λύση)

PDOP (τρεις συντεταγμένες)

HDOP (δύο οριζόντιες συντεταγμένες)

VDOP (μόνο ύψος)

TDOP (μόνο διαφορά χρονόμετρου)

HTDOP (οριζόντια θέση και χρόνος)

Doppler shift Μετατόπιση doppler

Η φαινόμενη αλλαγή στη συχνότητα ενός λαμβανόμενου σήματος εξαιτίας του ρυθμού αλλαγής της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη.

Dynamic positioning Δυναμικός εντοπισμός θέσης

[Κινηματικός εντοπισμός θέσης]

Failure Αστοχία

Η αδυναμία ενός συστήματος σαν το GPS, να καλύψει για κάποιο χρονικό διάστημα μια περιοχή.

Fast switching channel Γρήγορα εναλλασσόμενο κανάλι

Ενα εναλλασσόμενο κανάλι με ρυθμό εναλλαγής αρκετά σύντομο, ώστε να ανακτά (μέσω πρόβλεψης από το πρόγραμμα λειτουργίας) το ακέραιο μέρος της μέτρησης φάσης.

Fractional instantaneous phase measurement Τμηματικές στιγμιαίες μετρήσεις φάσης

Μια μέτρηση της φάσης του φέροντος, που δεν περιλαμβάνει μέτρηση του ακέραιου αριθμού κύκλων και έχει τιμή μεταξύ 0 και 1, ή 0° και 360° .

Frequency band Ζώνη συχνοτήτων

Μία σειρά συχνοτήτων σε μια ορισμένη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Frequency spectrum Φάσμα συχνοτήτων

Η κατανομή του πλάτους των κυμάτων σαν συνάρτηση της συχνότητας των συνιστώντων κυμάτων σ' ένα σήμα.

Handover word - HOW Λέξη μεταφοράς

Μία λέξη στο μήνυμα του GPS που περιέχει πληροφορία συγχρονισμού για τη μεταφορά από τον κώδικα C/A στον κώδικα P.

Independent baselines Ανεξάρτητες βάσεις

Βάσεις, που έχουν προσδιορισθεί από ανεξάρτητα διαστήματα παρατήρησης.

Independent observing sessions Ανεξάρτητα διαστήματα παρατήρησης

Διαστήματα παρατήρησης, όπου είναι δυνατό να αγνοηθούν τα κοινά συστηματικά σφάλματα, που επηρεάζουν τις μετρήσεις.

Ionospheric refraction (delay) Ιονοσφαιρική διάθλαση (καθυστέρηση)

Ένα κύμα που διαδίδεται μέσω της ιονόσφαιρας (που είναι ένα ανομοιογενές και διαχωριστικό μέσο) υφίσταται καθυστερήσεις. Η καθυστέρηση φάσης εξαρτάται από τον αριθμό ελεύθερων ηλεκτρονίων και επηρεάζει τις φέρουσες συχνότητες. Η καθυστέρηση ομάδας εξαρτάται και από τη διασπορά στην ιονόσφαιρα και επηρεάζει τη διαμόρφωση των σημάτων (κώδικες). Οι καθυστερήσεις φάσης και ομάδας έχουν το ίδιο μέγεθος, αλλά αντίθετο πρόσημο.

Instantaneous positioning Στιγμιαίος εντοπισμός θέσης

[Εντοπισμός θέσης σε πραγματικό χρόνο]

Interferometry Συμβολομετρία

[Σχετικός εντοπισμός θέσης]

Intermittent static positioning Διακοπτόμενος στατικός εντοπισμός θέσης

[Ψευδοστατικός εντοπισμός θέσης]

Kinematic positioning Κινηματικός εντοπισμός θέσης

Ο κινηματικός εντοπισμός θέσης αναφέρεται στις εφαρμογές, όπου προσδιορίζεται μια πορεία (ενός πλοίου, αεροπλάνου, τεκτονικής πλάκας κ.λπ.).

L-Band Ζώνη L-BAND

Η ζώνη ραδιοκυμάτων που εκτείνεται από τα 390 MHz μέχρι τα (ονομαστικά) 1550 MHz.

Multichannel receiver Δέκτης πολλών καναλιών

Ενας δέκτης που περιέχει ένα αριθμό ανεξάρτητων καναλιών ίσο με τον αριθμό των δορυφορικών σημάτων που πρέπει να παρακολουθήσει συνεχώς και ταυτόχρονα.

Multipath error Σφάλμα λόγω πολλαπλών διαδρομών

Ενα σφάλμα εντοπισμού, που είναι αποτέλεσμα της παρεμβολής μεταξύ των ραδιοκυμάτων, που ταξίδεψαν από τον πομπό μέχρι το δέκτη από διαδρομές διαφορετικού ηλεκτρικού μήκους.

Multiplexing receiver Δέκτης πολλαπλών καναλιών - (πολυπλεκτικός δέκτης)

Ενας δέκτης που περιέχει ένα ή περισσότερα κανάλια, καθένα από τα οποία μπορεί πολύ γρήγορα και διαδοχικά να παρακολουθήσει έναν αριθμό δορυφορικών σημάτων από καθορισμένο δορυφόρο και συχνότητα, με ρυθμό σύγχρονο προς τον ρυθμό μετάδοσης του μηνύματος (50 bits/sec ή 20 msec/bit).

Observing session Διάστημα παρατήρησης

Το χρονικό διάστημα, όπου δύο ή περισσότεροι δέκτες παρακολουθούν ταυτόχρονα τα σήματα του GPS.

Outage Ανεπάρκεια

Η εμφάνιση στο χώρο και το χρόνο μιας τιμής της ανάλυσης της εσωτερικής ακρίβειας του GPS (DOP), που υπερβαίνει ένα καθορισμένο μέγιστο.

P-code Κώδικας P

Είναι ο ακριβής (ή προστατευόμενος) κώδικας του GPS, μια πολύ μακριά σειρά (10^{14} δυαδικά ψηφία) ψευδοτυχαίας δυαδικής διαμόρφωσης δύο φάσεων πάνω στο φέρον κύμα του GPS, με ρυθμό 10.23 MHz, που δεν επαναλαμβάνεται για - περίπου - 267 μέρες. Κάθε κομμάτι (για μια εβδομάδα) του κώδικα P είναι μοναδικό για κάθε δορυφόρο και επαναλαμβάνεται από την αρχή κάθε εβδομάδας.

Phase lock Εγκλωβισμός φάσης

Με την τεχνική αυτή η φάση του σήματος ενός ταλαντωτή ακολουθεί ακριβώς τη φάση ενός σήματος αναφοράς με μηδενική διαφορά φάσης. Πρώτα συγκρίνονται οι φάσεις των δύο σημάτων και μετά το σήμα λόγω διαφοράς φάσης χρησιμοποιείται για να ρυθμιστεί η συχνότητα του ταλαντωτή, ώστε να μηδενιστεί η διαφορά, που προκύπτει από την σύγκριση των δύο σημάτων.

Phase observable Παρατήρηση (μέτρηση) φάσης

[Φάση σήματος συμβολής]

Post mission positioning Εντοπισμός θέσης εκ των υστέρων

Εντοπισμός θέσης από μία ή περισσότερες παρατηρήσεις εκ των υστέρων.

Precise positioning service -PPS Παροχή ακριβούς εντοπισμού

Το υψηλότερο επίπεδο της ακρίβειας κινηματικού εντοπισμού θέσης, που θα προσφέρει το GPS, βασισμένο στον κώδικα P στις δύο συχνότητες.

Pseudolite Ψευδοδορυφόρος

Ενας σταθμός εδάφους του GPS (για κινηματικό εντοπισμό θέσης), που εκπέμπει ένα σήμα παρόμοιας δομής με το σήμα ενός πραγματικού δορυφόρου GPS.

Pseudorandom noise code - PRN Κώδικας ψευδοτυχαίου θορύβου

Οποιαδήποτε σειρά από μια ομάδα δυαδικών σειρών, που παρουσιάζει τις ιδιότητες θορύβου, με πιο σημαντική ιδιότητα, ότι η σειρά παρουσιάζει ελάχιστη αυτοσυσχέτιση, εκτός από το μηδενικό χρονικό διάστημα.

Pseudorange Ψευδοαπόσταση

Η διαφορά χρόνου, που απαιτείται για να συσχετισθεί (ευθυγραμμισθεί) το αντίγραφο του κώδικα του GPS, που παράγεται στον δέκτη, με τον λαμβανόμενο κώδικα, που μετατρέπεται σε απόσταση αφού πολλαπλασιασθεί με την ταχύτητα του φωτός.

Pseudorange difference Διαφορά ψευδοαπόστασης

[Φάση σήματος συμβολής]

Pseudostatic positioning Ψευδοστατικός εντοπισμός θέσης

Με αυτό τον τρόπο μέτρησης, τα σημεία καλύπτονται με μετρήσεις ξανά μετά από 1 ώρα τουλάχιστον, ώστε να είναι δυνατό να επιλυθούν οι ασάφειες φάσης και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων να είναι μεγαλύτερη.

Rapid (fast) static positioning Ταχύς σχετικός εντοπισμός θέσης

Μέθοδοι εντοπισμού που χρησιμοποιούν συνδυασμούς μετρήσεων φάσης και κώδικα σε στατικό εντοπισμό θέσης για να υπολογισθούν οι ασάφειες φάσης. Αυτό απαιτεί μετρήσεις κώδικα και φάσης και στις δύο συχνότητες. Παρατηρήσεις 5 έως 10 min μπορούν να δώσουν ακρίβεια 1 ppm.

Real time positioning Εντοπισμός θέσης σε πραγματικό χρόνο

Σε εντοπισμό θέσης μέσω του συστήματος GPS σε πραγματικό χρόνο, τα αποτελέσματα πρέπει να παρέχονται στο πεδίο ή όταν ο δέκτης είναι ακόμα στο σημείο, μετά από μία ή περισσότερες εποχές μετρήσεων. Όταν ο εντοπισμός θέσης είναι στιγμιαίος (instantaneous), τα αποτελέσματα παρέχονται μετά από μία μόνο εποχή μετρήσεων.

Relative positioning Σχετικός εντοπισμός θέσης

Ο προσδιορισμός των σχετικών θέσεων μεταξύ ενός ή περισσότερων δεκτών, που παρακολουθούν ταυτόχρονα τα ίδια σήματα του GPS. Στην περίπτωση του διαφορικού εντοπισμού θέσης (Differential GPS - DGPS), υπονοείται και η ύπαρξη ενός συστήματος επικοινωνίας για μετάδοση διορθώσεων σε πραγματικό χρόνο.

Satellite constellation Διάταξη των δορυφόρων

Η διάταξη στον χώρο της πλήρους ομάδας των δορυφόρων ενός συστήματος σαν το GPS.

Satellite configuration Σχηματισμός των δορυφόρων

Η διάταξη των δορυφόρων μια καθορισμένη στιγμή ως προς ένα ορισμένο χρήστη ή μια ομάδα χρηστών.

Selective availability (SA) Επιλεκτική διαθεσιμότητα

Είναι η σκόπιμη υποβάθμιση της παρεχόμενης από το σύστημα ακρίβειας μέσω εισαγωγής θορύβου στο εκπεμπόμενο σήμα και μείωσης της ακρίβειας της εκπεμπόμενης εφημερίδας του δορυφόρου.

Semikinematic positioning Ημικινηματικός εντοπισμός θέσης

Ο ημικινηματικός εντοπισμός θέσης είναι ένας συνδυασμός στατικού και κινηματικού εντοπισμού θέσης, όπου ο ένας δέκτης κινείται και σταματάει επάνω σε σημεία που ενδιαφέρουν. Η ακρίβεια αυξάνεται αν σε κάθε στάση γίνονται περισσότερες από μία μετρήσεις και χρησιμοποιείται ο μέσος όρος.

Simultaneous measurements Ταυτόχρονες μετρήσεις

Μετρήσεις, που αναφέρονται σε χρονικά διαστήματα είτε απολύτως ίσα, είτε με τόσο μικρή διαφορά, ώστε αυτό να αντιμετωπίζεται με διορθωτικούς όρους στις εξισώσεις παρατήρησης και όχι με ξεχωριστές παραμέτρους.

Slow switching channel Αργά εναλλασσόμενο κανάλι

Ενα εναλλασσόμενο κανάλι με ρυθμό εναλλαγής πολύ αργό, ώστε να μη ανακτά το ακέραιο μέρος της μέτρησης φάσης.

Spread spectrum systems Συστήματα εκτεταμένου φάσματος

Ενα σύστημα στο οποίο το εκπεμπόμενο σήμα εκτείνεται σε μια ζώνη συχνοτήτων πολύ ευρύτερη, από την ελάχιστη που θα χρειαζόταν για να μεταδοθεί η πληροφορία που εκπέμπεται.

Squaring type channel Κανάλι τετραγωνισμού

Κανάλι ενός δέκτη GPS, που πολλαπλασιάζει το λαμβανόμενο σήμα με τον εαυτό του για να παράγει μια δεύτερη αρμονική του φέροντος κύματος, που δεν περιέχει τον κώδικα.

Standard positioning service - SPS Παροχή συνήθους υπηρεσίας

Το επίπεδο της ακρίβειας σε κινηματικό εντοπισμό θέσης, που θα προσφέρεται από το GPS σε μια συχνότητα από τον κώδικα C/A.

Static positioning Στατικός εντοπισμός θέσης

Προσδιορισμός μιάς ομάδας συντεταγμένων για ένα δέκτη (πιθανά υψηλότερης ακρίβειας από όσο στον κινηματικό εντοπισμό θέσης) από σειρά παρατηρήσεων, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη αν ο δέκτης κινείται ή δεν κινείται.

Stop and go (positioning) Εντοπισμός θέσης με κίνηση και στάση

[Ημικινηματικός εντοπισμός θέσης]

Translocation Διεντοπισμός

[Σχετικός εντοπισμός θέσης]

User equivalent range error Ισοδύναμο σε απόσταση σφάλμα του χρήστη

Η συμμετοχή στα σφάλματα της μέτρησης της απόστασης, κάποιου σφάλματος από ανεξάρτητη πηγή σφαλμάτων (αφού μετατραπεί σε μονάδες απόστασης), υποθέτοντας ότι η πηγή του σφάλματος είναι ασυσχέτιστη με όλες τις άλλες πηγές σφαλμάτων.

Z-count word Μετρητής Z

Ο χρόνος του χρονόμετρου του δορυφόρου του GPS, στην άκρη (που προηγείται) του επόμενου τμήματος των δεδομένων του μηνύματος, που εκπέμπεται (συνήθως εκφράζεται σαν ένας ακέραιος αριθμός περιόδων 1.5 sec).

