



**Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό
Εκπαιδευτικό Ίδρυμα
Θεσσαλονίκης**



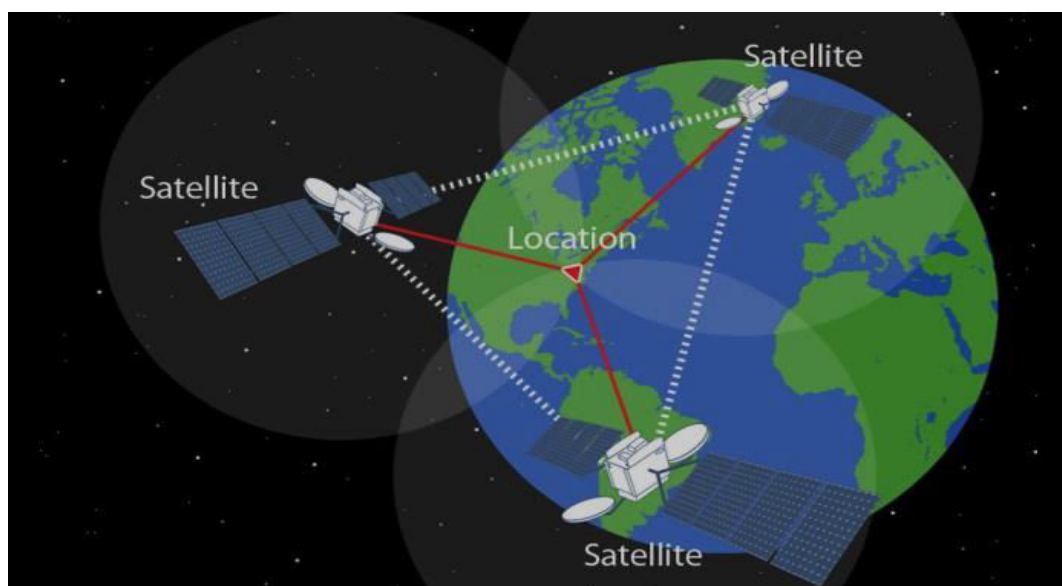
**Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εφαρμογές του G.P.S. στην τοπογραφία

Ελένη Μερτζιάνη 2013/0033

Πολύζου Θεοδώρα 2011/0070



Σίνδος

Σεπτέμβριος, 2018

Εφαρμογές του G.P.S. στην τοπογραφία

Ελένη Μερτζιάνη, Πολύζου Θεοδώρα

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Επιβλέπων καθηγητής : Αναγνωστόπουλος Κωνσταντίνος

Μέλος 1^ο :

Μέλος 2^ο :

Σίνδος

Σεπτέμβριος, 2018

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΝΝΟΙΑΣ ΤΗΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ.....σελ.7
1.2 ΣΤΟΧΟΣ.....σελ.7
1.3 ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ.....σελ.7
1.4 ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΣΤΟΧΟΥ.....σελ.8
1.5 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ.....σελ.8
1.5.1 ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ.....σελ.8
1.5.2 ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑ.....σελ.8
1.5.3 ΑΕΡΟΦΩΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΚΑΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ.....σελ.9
1.5.4 ΡΑΝΤΑΡ ΚΑΙ ΣΟΝΑΡ.....σελ.9
1.6 Η ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΠΙΟ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ.....σελ.9

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....σελ.10
2.2 ΠΡΟΓΟΝΟΙ ΤΟΥ GPS.....σελ.10
2.3 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ GPS.....σελ.11
2.4 ΣΗΜΕΡΙΝΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....σελ.12
2.5 GPS (GLOBAL POSITIONING SYSTEM).....σελ.12
2.5.1 ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....σελ.13

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ GPS ΣΤΗΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ.....σελ.16
3.2 ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΗΓΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ GPSσελ.17

3.2.1 ΤΟ ΣΦΑΛΜΑ ΤΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΤΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ.....σελ.19	σελ.19
3.2.2 ΤΟ ΣΦΑΛΜΑ ΤΟΥ ΡΟΛΟΓΙΟΥ ΤΟΥ ΔΟΡΥΦΟΡΟΥ.....σελ.22	σελ.22
3.2.3 ΤΟ ΣΦΑΛΜΑ ΤΟΥ ΡΟΛΟΓΙΟΥ ΤΟΥ ΔΕΚΤΗ.....σελ.23	σελ.23
3.2.4 ΟΙ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΩΝ ΚΕΝΤΡΩΝ ΦΑΣΗΣ ΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ.....σελ.23	σελ.23
3.2.5 ΤΟ ΤΥΧΑΙΟ ΣΦΑΛΜΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ.....σελ.26	σελ.26
3.2.6 ΤΟ ΣΦΑΛΜΑ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΓΝΩΣΤΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ.....σελ.26	σελ.26
3.2.7 ΤΟ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΣΦΑΛΜΑσελ.27	σελ.27
3.2.8 ΤΟ ΙΝΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΣΦΑΛΜΑσελ.29	σελ.29
3.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΙΝΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ Η ΤΕC.....σελ.36	σελ.36
3.4 ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗ ΤΗΣ ΙΝΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΥΣΗΣ ΑΠΟ ΚΩΔΙΚΑ.....σελ.37	σελ.37
3.5 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ.....σελ.39	σελ.39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 ΓΕΩΜΑΤΙΚΗ (GEOMATICS ENGINEERING)σελ.43	σελ.43
4.2 ΕΦΑΡΜΠΓΕΣ ΤΟΥ GPS ΣΤΗΝ ΓΕΩΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑσελ.44	σελ.44

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΜΕ ΤΟ GPS

5.1 ΑΠΟΛΥΤΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣσελ.45	σελ.45
5.2 ΑΠΟΛΥΤΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ (ΛΥΣΗ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ)σελ.47	σελ.47
5.3 ΑΠΟΛΥΤΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ ΕΚ ΤΩΝ ΥΣΤΕΡΩΝσελ.56	σελ.56
5.4 ΑΠΟΛΥΤΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ ΜΕ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΩΔΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΑΣΕΩΝ.σελ.58	σελ.58
5.5 ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗ ΨΕΥΔΟΑΠΟΣΤΑΣΕΩΝ ΚΩΔΙΚΑ ΑΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΦΑΣΗΣ.....σελ.59	σελ.59

5.6 ΑΚΡΙΒΗΣ ΑΠΟΛΥΤΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ (PRECISE POINT POSITIONING).	σελ.60
5.7 ΣΧΕΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ.....	σελ.65
5.7.1 ΑΠΛΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ (SINGLE DIFFERENCES)	σελ.68
5.7.2 ΔΙΠΛΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ (DOUBLE DIFFERENCES).....	σελ.71
5.7.3 ΤΡΙΠΛΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ (TRIPLE DIFFERENCES).....	σελ.75
5.8 ΣΧΕΤΙΚΟΣ ΣΤΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ.....	σελ.77
5.8.1 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΠΛΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ	σελ.78
5.8.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΕΤΛΟ ΔΙΠΛΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ.....	σελ.79
5.8.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΡΙΠΛΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ	σελ.79
5.9 ΣΧΕΤΙΚΟΣ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ ΕΚ ΤΩΝ ΥΣΤΕΡΩΝ.....	σελ.80
5.10 ΣΧΕΤΙΚΟΣ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ.....	σελ.81
5.10.1 DGPS/DGNSS ΜΕ ΨΕΥΔΟΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΑΠΟ ΚΩΔΙΚΑ PRN.....	σελ.83
5.10.2 RTK ΜΕ ΨΕΥΔΟΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΑΠΟ ΦΑΣΗ.....	σελ.85
5.10.3 ΜΗΝΥΜΑΤΑ RTCM.....	σελ.87

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΓΑΡΜΜΙΚΟΙ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ ΒΑΣΗΣ GPS

6.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ.....	σελ.91
6.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	σελ.92
6.2.1 ΓΡΗΓΟΡΟΣ ΣΤΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ.....	σελ.98
6.2.2 ΨΕΥΔΟΚΟΝΗΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ.....	σελ.98
6.2.3 ΣΧΕΤΙΚΟΣ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ	σελ.99
6.2.4 ΗΜΙΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ (STOP-AND-GO KINEMATIC,INTERMITTED KINEMATIC)	

.....σελ.101

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....σελ.103

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν σύγγραμμα αποτελεί πτυχιακή εργασία των φοιτητριών Μερτζιάνης Ελένης και Πολύζου Θεοδώρας του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Θεσσαλονίκης . Η ύλη αλλά και το επίπεδο δυσκολίας συσχετίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι χρήσιμα στον αναγνώστη ο οποίος για πρώτη φορά έρχεται σε επαφή με τα αντίστοιχα αντικείμενα. Κύριο στόχο του συγγράμματος αποτελεί η κατανόηση βασικών αρχών ,εννοιών και μεθοδολογιών για το σχεδιασμό και την εκτέλεση μετρήσεων με τους δορυφορικούς δέκτες,την ανάλυση και επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων και την αξιολόγηση και έλεγχο αποτελεσμάτων ,με σκοπό τον προσδιορισμό συντεταγμένων με τα συστήματα GPS/GNSS. Έμφαση δίνεται στις γεωδαιτικές και τοπογραφικές εφαρμογές όπου η ακρίβεια η οποία απαιτείται ξεπερνά την ακρίβεια της πλοήγησης του ενός ή μερικών μέτρων αλλά φτάνει στην ακρίβεια των μερικών ελατοστών ή και μερικών χιλιοστών του μέτρου. Τα σχήματα και οι εικόνες παρουσιάζονται με τέτοιο τρόπο που βοηθούν σημαντικά στην κατανόηση της ύλης και ταυτόχρονα καθιστούν ευχάριστη την ανάγνωση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΝΝΟΙΑΣ ΤΗΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

Τοπογραφία ονομάζεται η μελέτη του σχήματος και των χαρακτηριστικών της επιφάνειας της Γης ή άλλων παρατηρήσιμων από κοντά ουράνιων σωμάτων (πλανητών, φυσικών δορυφόρων ή αστεροειδών). Πιο συγκεκριμένα, είναι ο επιστημονικός κλάδος που αφορά την περιγραφή και τις μεθόδους για την απεικόνιση και αποτύπωση κάθε τέτοιας επιφάνειας, φυσικής ή διαμορφωμένης από ανθρώπινα έργα πάνω σε έναν τοπογραφικό χάρτη. Κατά μία άλλη έννοια, η τοπογραφία μιας περιοχής αναφέρεται στα ίδια τα σχήματα και τα χαρακτηριστικά της γήινης επιφάνειας στη συγκεκριμένη περιοχή.

Με τη στενότερη έννοια, αφορά την καταγραφή του αναγλύφου μιας περιοχής και την ταυτοποίηση συγκεκριμένων γεωμορφών, πρακτική γνωστή διεθνώς ως γεωμορφομετρία (geomorphometry). Σήμερα πλέον αυτό περιλαμβάνει την παραγωγή υψομετρικών δεδομένων σε ψηφιακή μορφή (DEM).

1.2. ΣΤΟΧΟΣ

Στόχος της τοπογραφίας είναι ο προσδιορισμός της θέσεως του οποιουδήποτε χαρακτηριστικού ή γενικότερα σημείου σε ένα σύστημα οριζόντιων και κάθετων συντεταγμένων, συνήθως του γεωγραφικού πλάτους και μήκους, και του υψομέτρου σε ένα ορισμένο σύστημα αναφοράς. Η ταυτοποίηση χαρακτηριστικών και η αναγνώριση τυπικών γεωμορφών είναι επίσης στόχοι της τοπογραφίας.

1.3 ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ

Μία τοπογραφική μελέτη μπορεί να γίνει για διάφορους λόγους: ο στρατιωτικός σχεδιασμός και η γεωλογική έρευνα υπήρξαν μέχρι και σήμερα βασικά κίνητρα για την έναρξη τέτοιων προγραμμάτων, αλλά η λεπτομερής γνώση του εδάφους και των χαρακτηριστικών της επιφάνειας είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό και την κατασκευή κάθε μεγάλου έργου πολιτικού μηχανικού.

1.4 ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΣΤΟΧΟΥ

Υπάρχει μία ποικιλία προσεγγίσεων στην τοπογραφία. Το ποιες μέθοδοι εφαρμόζονται εξαρτάται από την κλίμακα και το μέγεθος της περιοχής που μελετάται, την προσβασιμότητά της και την ποιότητα των υπαρχουσών επισκοπήσεων μέχρι τη δεδομένη στιγμή.

Οι στόχοι αυτοί επιτυγχάνονται:

- Με τις τεχνικές μετρήσεων κυρίως γεωμετρικών μεγεθών (Γωνιών / Αποστάσεων / Υψομετρικών Διαφορών) σε σημεία ή μεταξύ σημείων στην γήινη επιφάνεια αλλά σε περιορισμένη σχετικά έκταση.
- Με την λειτουργία και χρήση των τοπογραφικών οργάνων με την βοήθεια των οποίων γίνονται οι μετρήσεις.
- Με την επεξεργασία των μετρήσεων και τους υπολογισμούς για τον προσδιορισμό της θέσης των σημείων ως προς κάποιο σύστημα αναφοράς.
- Με την απεικόνιση της γήινης έκτασης σε σμίκρυνση υπό μορφή χάρτη. (Απόδοση / Σύνταξη σχεδίου)

1.5 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΑ ΌΡΓΑΝΑ.

1.5.1 ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Η επισκόπηση βοηθά στον ακριβή προσδιορισμό των θέσεων σημείων στην επιφάνεια ή στον τριδιάστατο χώρο, καθώς και των αποστάσεων και των γωνιών ανάμεσά τους, με τη χρήση οργάνων στάθμης, όπως είναι οι **θεοδόλιχοι, κλισιόμετρα και γεωδαιτικοί σταθμοί**, με τη διαφορά ότι οι τελευταίοι υπολογίζουν απευθείας αποστάσεις που απαλλάσσουν τον τοπογράφο από την καταγραφή των αποτελεσμάτων των μετρήσεων με το χέρι.

Παρά το ότι η τηλεπισκόπηση έχει επιταχύνει κατά πολύ τη διαδικασία της συλλογής δεδομένων και έχει επιφέρει μεγαλύτερο έλεγχο της ακρίβειας σε μεγάλες αποστάσεις, η απευθείας επισκόπηση παρέχει ακόμα τα βασικά σημεία ελέγχου και το πλαίσιο για όλες τις τοπογραφικές εργασίες.

1.5.2 ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑ

Η φωτογραμμετρία είναι μία μετρητική μέθοδος προσδιορισμού των συντεταγμένων και των διαστάσεων αντικειμένων στον τριδιάστατο χώρο με χρήση φωτογραφιών, δύο ή

περισσότερων για την ίδια ομάδα αντικειμένων, που λαμβάνονται από διαφορετικές θέσεις, συνήθως σε διαφορετικές διαβάσεις μιας αεροφωτογραφικής πτήσεως. Στην τεχνική αυτή ταυτοποιούνται τα κοινά σημεία πάνω σε κάθε εικόνα.

1.5.3 ΑΕΡΟΦΩΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΚΑΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ

Οι αεροφωτογραφίες και οι δορυφορικές απεικονίσεις μπορούν να παρέχουν στοιχεία για την ταυτοποίηση και την οριοθέτηση τοπογραφικών χαρακτηριστικών, π.χ. τη μορφή του εδάφους και τη δασοκάλυψη. Ολοένα και περισσότερο αποτελούν τη βάση για διαδραστικές οπτικοποιήσεις με τη χρήση υπολογιστή, είτε με τη μορφή διαδραστικών χαρτών, είτε με τη μορφή GIS. Η απεικόνιση με ψευδοχρώματα σε μη ορατά τμήματα του φάσματος μπορεί επίσης να βοηθήσει στον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών παραμέτρων, δείχνοντας τα όρια της βλάστησης και άλλα δεδομένα για τις χρήσεις γης καθαρότερα.

1.5.4 ΡΑΝΤΑΡ ΚΑΙ ΣΟΝΑΡ

Η δορυφορική χαρτογράφηση με τη χρήση ραντάρ είναι μία από τις κυριότερες μεθόδους για την κατασκευή Ψηφιακών Υψομετρικών Μοντέλων. Παρόμοιες τεχνικές εφαρμόζονται σε βαθυμετρικές επισκοπήσεις με τη χρήση σόναρ για τον προσδιορισμό της μορφολογίας του θαλάσσιου βυθού. Την τελευταία δεκαετία το LIDAR, μία τεχνική τηλεπισκοπήσεως με χρήση λέιζερ αντί ραδιοκυμάτων, εφαρμόζεται όλο και περισσότερο για σύνθετες χαρτογραφικές ανάγκες, όπως η παρακολούθηση παγετώνων.

1.6 ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΠΙΟ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

Από τις παραπάνω μεθόδους, επιτυγχάνεται η συλλογή πολύτιμων στοιχείων, με το μειονέκτημα όμως του ανθρώπινου παράγοντα που είναι η αιτία για σφάλματα (χονροειδή, συστηματικά, τυχαία κ.ά.). Σε όλους τους τομείς της κλασικής τοπογραφίας, τόσο σε επίπεδο καταγραφών και αποτυπώσεων όσο και σε επίπεδο εφαρμογών μπορεί να χρησιμοποιηθεί υψηλής τεχνολογίας εξοπλισμός, όπως είναι οι αποτυπώσεις με χρήση δορυφορικών δεκτών και εφαρμογές σύνθετων έργων με τη χρήση τεχνολογίας G.P.S, αξιοποιώντας τις σύγχρονες εξελίξεις στις τεχνικές της συλλογής και επεξεργασίας μετρητικών πληροφοριών, αποφεύγοντας έτσι και τα λάθη των υποκειμενικών μετρήσεων.

Οι πρώτες σχετικές εφαρμογές εμφανίστηκαν, στις αρχές της δεκαετίας του 1960, με προβλήματα λόγω του εξαιρετικά μεγάλου χρόνου παρατηρήσεων και της χαμηλής ακρίβειας.

Παρόλα τα προβλήματα, οι εφαρμογές αυτές σε γεωδαιτικές εργασίες μεγάλης κλίμακας, κατόρθωσαν να δώσουν λύσεις σε θέματα σχετικά με τη σύνθεση εθνικών τριγωνομετρικών δικτύων και με τον προσδιορισμό της θέσης, της κλίμακας και του προσανατολισμού εθνικών συστημάτων αναφοράς.

Η χρήση των δορυφόρων (σε σχέση με τις παραδοσιακές επίγειες μεθόδους) προσφέρει δύο πολύ

σημαντικά πλεονεκτήματα:

- Οι προσδιορισμοί θέσης είναι αυθεντικά τρισδιάστατοι.
- Δεν υπάρχει καμιά απαίτηση αμοιβαίας ορατότητας μεταξύ των εμπλεκόμενων σε μετρήσεις σταθμών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Η ανθρώπινη ανάγκη να κατευθύνεται σωστά και να βρίσκει τον προσανατολισμό της πηγάζει από τα πρώτα βήματά της. Ανέκαθεν οι άνθρωποι έψαχναν για κάποιο «σημείο αναφοράς» ώστε να βρουν την σωστή πορεία τους. Αρχικά βασιζόνταν σε διάφορους βράχους ή δέντρα, ύστερα σημάδευαν ένα δέντρο στην πορεία τους για να βρουν και πάλι τον δρόμο της επιστροφής. Στη συνέχεια καθώς κατακτούσε την θάλασσα και τα αγαθά της, χρησιμοποιούσε ως «σημείο αναφοράς» τα διάφορα ουράνια σώματα όπως Άστρα, Σελήνη, Ήλιος.

2.2 ΠΡΟΓΟΝΟΙ ΤΟΥ GPS

Με την πάροδο του χρόνου, και εξαιτίας των αναγκών που προέκυπταν, ανακαλύφθηκαν τα πρώτα σύνθετα όργανα, όπως είναι: η πυξίδα και ο εξάντας. Ωστόσο ο εξάντας στην πρώιμη μορφή του είχε τη δυνατότητα να παρέχει πληροφορίες μόνο για το γεωγραφικό πλάτος και όχι για το γεωγραφικό μήκος, γεγονός που αποτελούσε ένα σημαντικό μειονέκτημα, ιδιαίτερα για τους ναυτικούς. Έτσι, αναζητήθηκαν τρόποι εύρεσης και προσδιορισμού και του γεωγραφικού μήκους και οι ναυτικοί κατέληξαν σε ένα νέο εργαλείο, γνωστό με την ονομασία 'octant'. Το Octant τον 17ο αιώνα το Ηνωμένο Βασίλειο συνέστησε ένα συμβούλιο επιστημόνων, το οποίο θα επιβράβευε χρηματικά όποιον θα μπορούσε να εφεύρει ένα όργανο, το οποίο θα επέτρεπε τον ακριβή υπολογισμό και των δύο γεωγραφικών συντεταγμένων, δηλαδή μήκους και πλάτους. Έτσι, το 1761 ο Άγγλος ωρολογοποιός Τζον

Χάρισον (John Harrison), ύστερα από προσπάθειες δώδεκα ετών, κατασκεύασε ένα όργανο, το οποίο δεν ήταν άλλο από το γνωστό σημερινό χρονόμετρο. Σε συνδυασμό με τον εξάντα, το χρονόμετρο επέτρεπε τον υπολογισμό του στίγματος των πλοίων με εξαιρετική ακρίβεια για τα δεδομένα της τότε εποχής. Το χρονόμετρο. Κατόπιν αρκετών χρόνων, και συγκεκριμένα στα μέσα του 20ου αιώνα, άρχισε ο «ραδιεντοπισμός». Το πρώτο σύστημα ραδιεντοπισμού τέθηκε σε λειτουργία το 1950, και είναι γνωστό με την ονομασία LORAN (LOng RAnge Navigation – Πλοήγηση Μακράς Εμβέλειας). Για το LORAN ενδεικτικά αναφέρεται ότι η κάθε αλυσίδα του είχε τουλάχιστον 4 πομπούς και κάλυπτε μια έκταση έως 500km. Έπρεπε λοιπόν να υπάρχουν περισσότερες αλυσίδες για περισσότερη έκταση. Στη συνέχεια επιστρατεύτηκαν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα (γνωστά ως ραντάρ) που χρησιμοποιήθηκαν κατά κόρων στον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, αλλά και σήμερα ακόμα είναι σε δράση. Όλα αυτά τα συστήματα αποτελούνται από πομπούς και δέκτες. Οι πομποί είναι ένα δίκτυο σταθμών βάσεων, οι δέκτες είναι η πυξίδα, ο εξάντας.

2.3 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ GPS

Το BEIDOU (η COMPASS) είναι ένα κινέζικο δορυφορικό σύστημα εντοπισμού, που αναμένεται μέχρι το 2020 να παρέχει παγκόσμια κάλυψη. Σήμερα, η χρήση του περιορίζεται στην Κίνα και τις γειτονικές περιοχές. Οι δορυφόροι του COMPASS θα εκπέμπουν σε 4 συχνότητες, οι οποίες μάλιστα επικαλύπτονται με αυτές του GALILEO. Το GALILEO είναι το αναμενόμενο ευρωπαϊκό παγκόσμιο σύστημα δορυφορικού εντοπισμού. Αναμένεται να παρέχει παγκόσμια κάλυψη το 2019, μέσω ενός σχηματισμού 30 δορυφόρων. Οι δορυφόροι του Galileo θα εκπέμπουν σήμα σε τρεις συχνότητες ενώ θα υπάρχει και δυνατότητα μιας νέας καινοτόμας τεχνολογίας Εύρεσης και Διάσωσης (Search and Rescue (SAR)). Κάθε δορυφόρος θα είναι εξοπλισμένος με έναν αναμεταδότη που είναι σε θέση να μεταφέρει τα σήματα κινδύνου από τους πομπούς του χρήστη στο κέντρο συντονισμού διάσωσης, το οποίο στη συνέχεια θα μπορεί να ξεκινήσει επιχείρηση διάσωσης. Ταυτόχρονα, το σύστημα θα παρέχει ένα σήμα στο χρήστη, ενημερώνοντάς τον ότι η κατάστασή του έχει ανιχνευθεί και ότι η βοήθεια είναι σε εξέλιξη. Στην πραγματικότητα αν δυο δορυφόροι βρίσκονται αντιδιαμετρικά σε σχέση με το κέντρο της γης, τότε μπορούν να εκπέμπουν στην ίδια συχνότητα.

2.4 ΣΗΜΕΡΙΝΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.

Σήμερα υπάρχουν σε χρήση δύο δορυφορικά συστήματα εντοπισμού θέσης: το παλαιότερο, που δεν προσφέρεται για γεωδαιτικές εφαρμογές, σύστημα TRANSIT (ή NAVSAT ή NNSS, Navy Navigation Satellite System) και το νεότερο GPS που καλείται συνήθως Παγκόσμιο Σύστημα Πλοήγησης και Εντοπισμού Θέσης (Global Positioning System ή NAVSTAR/NAVigation System with Time And Ranging), που χρησιμοποιείται πλέον για καθημερινές χαρτογραφικές και γεωδαιτικές εργασίες.

Παρόμοια συστήματα έχουν αναπτυχθεί ή αναπτύσσονται από διάφορες χώρες ανά τον κόσμο. Το GLONASS είναι το ρωσικό αντίστοιχο του GPS. Η ανάπτυξή του ξεκίνησε το 1976 και μετά από πολλές διακυμάνσεις έφτασε το 2011 να παρέχει παγκόσμια κάλυψη, με ένα σχηματισμό 24 δορυφόρων. Η δομή του συστήματος μοιάζει πολύ με αυτή του GPS, με τη διαφορά ότι κάθε δορυφόρος εκπέμπει σε διαφορετική συχνότητα τον ίδιο όμως κώδικα. Αξίζει να σημειωθεί επίσης, ότι το GLONASS χρησιμοποιεί διαφορετικό (χωρικό) σύστημα αναφοράς και σύστημα χρόνου από το GPS. Τέλος, δορυφορικά συστήματα εντοπισμού διαθέτουν και η Ινδία και Ιαπωνία, με τα IRNSS και QZSS αντίστοιχα. Τα συστήματα αυτά όμως, παρέχουν κάλυψη σε περιορισμένες χωρικά περιοχές για να εξυπηρετούν εθνικές κυρίως ανάγκες. Το EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) είναι το ευρωπαϊκό SBAS, τα δορυφορικά συστήματα λειτουργικής επέκτασης SBAS προσβάσιμο από χρήστες σε όλη την Ευρώπη και σε γειτονικές περιοχές. Λειτουργεί συμπληρωματικά με το GPS και μπορεί να ανεβάσει την ακρίβεια προσδιορισμού θέσης στο 1.5 m. Αποτελείται από 3 γεωστατικούς δορυφόρους και ένα εκτενές δίκτυο επίγειων σταθμών έλεγχου, και κέντρων επεξεργασίας. Η λειτουργία του ξεκίνησε το 2005 και αναμένεται τα επόμενα χρόνια να αναβαθμίσει και να επεκτείνει τις δραστηριότητές του.

2.5 G.P.S (GLOBAL POSITIONING SYSTEM)

Το G.P.S (Global Positioning System), Παγκόσμιο Σύστημα Στιγματοθέτησης, ή Θεσιθεσίας είναι παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού γεωγραφικής θέσης, ακίνητου ή κινούμενου χρήστη, το οποίο βασίζεται σε ένα "πλέγμα" εικοσιτεσσάρων δορυφόρων της Γης, εφοδιασμένων με ειδικές συσκευές εντοπισμού, οι οποίες ονομάζονται "πομποδέκτες GPS". Οι πομποδέκτες αυτοί παρέχουν ακριβείς πληροφορίες για τη θέση ενός σημείου, το υψόμετρό του, την

ταχύτητα και την κατεύθυνση της κίνησης του. Επίσης, σε συνδυασμό με ειδικό λογισμικό χαρτογράφησης μπορούν να απεικονίσουν γραφικά τις πληροφορίες αυτές.

Το σύστημα ξεκίνησε από το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ και ονομάστηκε NAVSTAR GPS (Navigation Signal Timing and Ranging Global Positioning System). Το δορυφορικό αυτό σύστημα ρυθμίζεται καθημερινά από τη Βάση Πολεμικής Αεροπορίας Σρίβερ (Schriever) με κόστος 400 εκατομμύρια δολάρια το χρόνο.

2.5.1 ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Το σύστημα εντοπισμού θέσης GPS σχηματίζει ένα παγκόσμιο δίκτυο, με εμβέλεια που καλύπτει ξηρά, θάλασσα και αέρα. Εξαιτίας αυτής της έκτασής του, είναι απαραίτητος ο διαχωρισμός του σε επιμέρους τμήματα όπου πραγματοποιούνται όλες οι λειτουργίες του αλλά και ο συντονισμός του. Αναλυτικά, τα τμήματα αυτά είναι:

➤ Διαστημικό τμήμα:

Αποτελείται από το δίκτυο των 24 δορυφόρων που ήδη αναφέραμε. Οι δορυφόροι αυτοί «σκεπάζουν» ομοιόμορφα με το σήμα τους ολόκληρο τον πλανήτη, γεγονός που αποδεικνύει τη φιλοσοφία που κρύβεται πίσω από τη λειτουργία του συστήματος GPS, δηλαδή τη διαθεσιμότητά του σε κάθε σημείο της Γης, ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος να αποπροσανατολιστεί κανείς ποτέ και πουθενά.

Όλοι οι δορυφόροι βρίσκονται σε ύψος 12.552 μιλίων (20.200 χιλιομέτρων) πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και εκτελούν δύο περιστροφές γύρω από τη Γη κάθε 24ωρο. Η κατασκευάστρια εταιρεία είναι η Rockwell International, η εκτόξευσή τους πραγματοποιήθηκε από το ακρωτήριο Canaveral, ενώ η τροφοδοσία τους με ηλεκτρική ενέργεια πραγματοποιείται μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων που διαθέτουν.

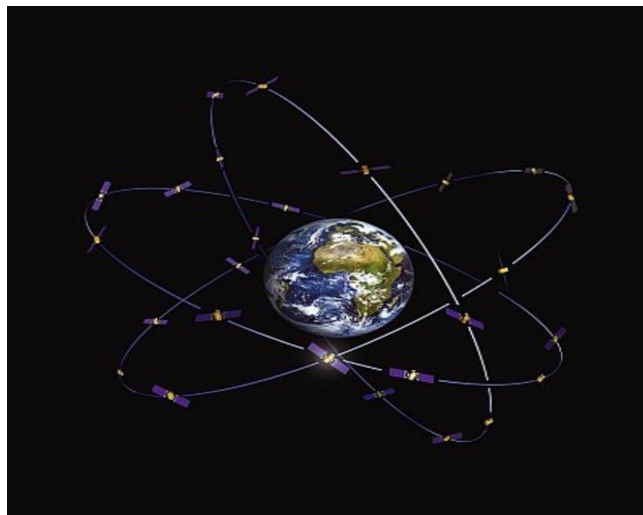
➤ Επίγειο τμήμα ελέγχου:

Οι δορυφόροι, όπως είναι αναμενόμενο, είναι πολύ πιθανό να αντιμετωπίσουν ανά πάσα στιγμή προβλήματα στη σωστή λειτουργία τους. Οι έλεγχοι που πραγματοποιούνται σε αυτούς αφορούν στη σωστή τους ταχύτητα και υψόμετρο και στην κατάσταση της επάρκειάς τους σε ηλεκτρική ενέργεια. Παράλληλα, εφαρμόζονται όλες οι διορθωτικές ενέργειες που αφορούν στο σύστημα χρονομέτρησης των δορυφόρων, ώστε να αποτρέπεται η παροχή

λανθασμένων πληροφοριών στους χρήστες του συστήματος. Το τμήμα επίγειου ελέγχου αποτελείται από ένα επανδρωμένο και τέσσερα μη επανδρωμένα κέντρα, εγκατεστημένα σε ισάριθμες περιοχές του πλανήτη.

Οι περιοχές αυτές είναι οι εξής: α) Κολοράντο (ΗΠΑ) β) Χαβάη (Ανατολικός Ειρηνικός Ωκεανός) γ) Ascension Island (Ατλαντικός Ωκεανός) δ) Diego Garcia (Ινδικός Ωκεανός) ε) Kwajalein (Δυτικός Ειρηνικός Ωκεανός)

Ο κυριότερος σταθμός βάσης είναι αυτός του Κολοράντο, ο οποίος είναι μάλιστα και ο μοναδικός που βρίσκεται στην ξηρά. Αναλαμβάνει τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας των εναπομεινάντων τεσσάρων σταθμών, καθώς και τον συντονισμό τους. Σημειώνοντας τη θέση των σταθμών αυτών πάνω σε έναν παγκόσμιο χάρτη, παρατηρεί κανείς ότι η διάταξή τους δεν είναι τυχαία, αλλά ακολουθούν μια γραμμή παράλληλη με τα γεωγραφικά μήκη της Γης.



Εικόνα 1 :Δορυφόροι GPS γύρω από τη γη.

➤ Το τμήμα τελικού χρήστη:

Αυτό αποτελείται από διάφορους στρατιωτικούς και ιδιωτικούς (εμπορικούς) τύπους δεκτών GPS. Ένας δέκτης GPS στη Γη, λαμβάνοντας το ραδιοσήμα από τρεις τουλάχιστον δορυφόρους συγχρόνως (διεργασία γνωστή ως trilateration), μπορεί ακριβώς να εντοπίσει την θέση του στην επιφάνεια της Γης. Αυτή η θέση εκφράζεται σε γεωγραφικό μήκος (Γ.Μ) και πλάτος (Γ.Π). Ευτυχώς, για τους χρήστες GPS, δεν χρειάζεται να γνωρίζουν πολλά για τους δορυφόρους και τους σταθμούς παρακολούθησης. Όπως ακριβώς τα ραδιοφωνικά και τηλεοπτικά σήματα, τα λαμβανόμενα σήματα GPS, σήμερα, είναι διαθέσιμα σε οποιονδήποτε διαθέτει μία συσκευή

GPS και τις κατάλληλες γνώσεις χρήσης του. Οι 24 ενεργοί δορυφόροι (οι άλλοι 3 είναι εφεδρικοί), είναι «αναπτυγμένοι» σε 6 τροχιακά επίπεδα (ομαλά κατανεμημένες τροχιές) με τέτοια ταχύτητα ώστε ο κάθε δορυφόρος να περνά πάνω από κάθε επίγειο σταθμό παρακολούθησης κάθε 12 ώρες. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν πάντοτε περισσότεροι από 4 δορυφόροι ορατοί στον ουρανό από κάθε σημείο του πλανήτη. Οι δορυφόροι συνεχώς μεταδίδουν σήματα σε δύο συχνότητες της φασματικής ζώνης L (L-band frequencies/390-1550MHz) και συγκεκριμένα στις συχνότητες L1= 1575,42 MHz (19cm) και L2=1227,6 (24cm) MHz. Οι επίγειοι σταθμοί παρακολούθησης στέλνουν διορθωμένα δεδομένα για να κρατούν τους δορυφόρους σε ετοιμότητα και ακριβώς στην θέση που προγραμματίστηκαν να βρίσκονται (Steede-Terry, 2000). Κάθε δορυφόρος χαρακτηρίζεται με δύο αριθμούς (ταυτότητες). Ο πρώτος είναι ο αύξων αριθμόςεκτόξευσης και ο δεύτερος είναι ο αριθμός ασφαλείας (security) PRN (Pseudo Random Noise), που είναι ένας ειδικός κωδικός αριθμός ο οποίος σχετίζεται με τον κώδικα ακρίβειας P (Precision Code/Κώδικας Ακρίβειας). Ο στρατιωτικός Κώδικας Ακρίβειας P (Precision Code/10,23 MHz) χρησιμοποιεί τα σήματα L1 και L2 για τον ακριβή προσδιορισμό της απόστασης του δορυφόρου από το δέκτη GPS. Το σήμα L1 περιέχει, εκτός από τον κώδικα ακρίβειας P, και τον πολιτικό (εμπορικό) κώδικα C/A (Coarse/Acquisition-Code/10,23 MHz), ο οποίος περιέχει δεδομένα για τα χαρακτηριστικά του κώδικα P. Χρησιμοποιείται για την διόρθωση της καθυστέρησης των σημάτων, που οφείλεται στην ιονόσφαιρα. Στον κωδικό C/A μπορούν να γίνουν ταχύτερες τηλεχειριζόμενες επεμβάσεις, οι οποίες έχουν σαν αποτέλεσμα την αλλοίωση της ακρίβειας εντοπισμού του στίγματος (κάτι που έγινε στον πόλεμο της Γιουγκοσλαβίας, από το Υπουργείο Άμυνας των Η.Π.Α.). Εκτός από τους δύο προηγούμενους κώδικες, υπάρχει και ο κώδικας δεδομένων ή D-κώδικας (Data-Code) που υπερτίθεται στα σήματα L1 και L2 και περιέχει διάφορες πληροφορίες όπως, π.χ., για την ακριβή θέση του δορυφόρου σε κάθε χρονική στιγμή, χρονικές καθυστερήσεις των δορυφορικών χρονομέτρων κλπ. (Μπαντέλας κ.α., 1995). Η ακρίβεια των δύο κωδικών (C/A και P) είναι διαφορετική και αυτό γιατί ο πολιτικός δέκτης GPS δε μπορεί να αποκρυπτογραφήσει τον στρατιωτικό κωδικό P, όταν το καθεστώς ασφαλείας (security status) μέσω της “επιλεκτικής διαθεσιμότητας” (Selective Availability) είναι απαγορευτικό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ GPS ΣΤΗΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ

Μέσα στην ευρύτερη έννοια της "Τοπογραφίας με χρήση GPS", οι κατηγορίες των τοπογραφικών εφαρμογών που εντάσσονται δεν περιορίζονται μόνο στη στεριά αλλά και στη θάλασσα (π.χ. υδρογραφία, γεωφυσικές εργασίες) ή και στον αέρα (π.χ. χαρτογράφηση από αεροπλάνο). Τα κριτήρια που γενικά χαρακτηρίζουν ως «τοπογραφική» μια εφαρμογή είναι:

- Η εφαρμογή να είναι σχετικά μεγάλης ακρίβειας.
- Απαιτεί την χρήση μοναδικών τεχνικών και διαδικασιών μέτρησης και ανάλυσης δεδομένων.
- Δεν απαιτείται εντοπισμός θέσης απαραίτητα σε πραγματικό χρόνο (όπως η πλοήγηση) και έτσι γίνεται εκ των υστέρων επεξεργασία των δεδομένων για να επιτευχτεί η καλύτερη δυνατή ακρίβεια.
- Γενικά χρησιμοποιείται ο στατικός εντοπισμός (υπάρχει όμως ισχυρή τάση προς τη χρήση κινηματικών μεθόδων εντοπισμού θέσης).
- Τα σημεία για τα οποία γίνεται ο εντοπισμός είναι γενικά σταθερά.
- Ανάλογα με την ακρίβεια που ζητείται να επιτευχτεί, η συλλογή των δεδομένων γίνεται κατά τη διάρκεια κάποιας "περιόδου παρατήρησης", η οποία μπορεί να κυμαίνεται σε διάρκεια από αρκετά δευτερόλεπτα μέχρι πολλές ώρες ή ακόμα και ημέρες.
- Χρησιμοποιείται σχετικός εντοπισμός θέσης.
- Γενικά, χρησιμοποιούνται οι μετρήσεις των φάσεων του φέροντος κύματος και όχι των μετρήσεων ψευδοαπόστασης και επομένως υπάρχει ανάγκη για χρήση εξειδικευμένου λογισμικού αλλά και οργάνων.

Συνήθως οι GPS εφαρμογές ταξινομούνται βάσει ενός διαστήματος σχετικών ακριβειών (δηλ. ως προς το μετρημένο μήκος της βάσης) που κυμαίνονται από χαμηλής ακριβείας (1 μέρος στα 104) ως υψηλής ακριβείας (1 μέρος στα 107).

Έτσι διακρίνονται τρεις κατηγορίες:

- Η Επιστημονική, η οποία παρέχει ακρίβεια καλύτερη από 1 ppm.
- Η Γεωδαιτική, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 1 και 10 ppm.

- Τέλος, η Τοπογραφική, με ακρίβεια μικρότερη των 10 ppm.

3.2 ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΗΓΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ GPS

Παρόλο που οι υποστηρικτές του συστήματος συχνά ισχυρίζονται ότι το GPS υπερτερεί έναντι πολλών, συμβατικών τοπογραφικών μεθόδων αναφορικά με την λειτουργικότητα του, το πιο βασικό θέμα για τους χρήστες είναι η ακρίβεια που προσφέρει. Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια εντοπισμού θέσης είναι:

- Τα σφάλματα των παρατηρήσεων
- Η τεχνική των μετρήσεων (απόλυτος ή σχετικός εντοπισμός)
- Η γεωμετρία των δορυφόρων-δεκτών
- Οι αλγόριθμοι επεξεργασίας των δεδομένων

Τα σφάλματα διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: σε χονδροειδή, συστηματικά και τυχαία.

- Τα τυχαία σφάλματα, όπως φαίνεται και από την ονομασία τους, είναι μη προβλεπόμενα (σε μέγεθος και πρόσημο) και οφείλονται κυρίως σε τυχαίες εσωτερικές επιδράσεις των δεκτών/κεραιών GPS ή σε κάποιες εξωτερικές αλλά πολύ τοπικές επιδράσεις όπως μικρο-μετεωρολογικές συνθήκες, ηλεκτρικές συνδέσεις μεταξύ των καλωδίων, τοπική παρεμβολή σημάτων κλπ.. Όλα αυτά, στην πραγματικότητα, αποτελούν αυτό που λέμε «θορύβους οργάνου». Στην κλασική Στατική θεωρία η συμπεριφορά των τυχαίων σφαλμάτων μπορεί να μελετηθεί βάσει της θεωρίας των πιθανοτήτων και για τις περισσότερες των περιπτώσεων τέτοια σφάλματα θεωρούνται ως «λευκός θόρυβος» ή έχουν κατανομή Gauss.

- Τα συστηματικά σφάλματα έχουν συνήθως σταθερή τιμή και πρόσημο, μπορεί να προέρχονται από τον δέκτη, ή τις φυσικές και περιβαλλοντικές συνθήκες ή και να είναι το αποτέλεσμα μιας λανθασμένης παραμέτρου εισαγωγής στο μαθηματικό μοντέλο της επεξεργασίας των GPS παρατηρήσεων. Τα παραδείγματα των συστηματικών σφαλμάτων περιλαμβάνουν την επίδραση της ατμόσφαιρας στις μετρήσεις, την λανθασμένη χρήση παραμέτρων όπως την σταθερά της ταχύτητας του φωτός, παραμέτρους της τροχιάς των δορυφόρων, κλπ..

- Τέλος, τα χονδροειδή σφάλματα έχουν μεγάλη τιμή και είναι εύκολο να εντοπιστούν και να απαλειφτούν από τις παρατηρήσεις. Αυτή η διαδικασία ενώ είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ορθή επεξεργασία των παρατηρήσεων, δεν είναι πάντοτε εύκολο να εντοπιστούν όλα τα

χονδροειδή σφάλματα και μπορεί μερικά να παραμείνουν και να αλλοιώσουν τις τελικές τιμές. Όταν τα συστηματικά και χονδροειδή σφάλματα έχουν απομακρυνθεί, η ακρίβεια της τελικής θέσης που δίνεται με το GPS είναι θεωρητικά συνάρτηση μόνο του μεγέθους των τυχαίων σφαλμάτων.

Παρατηρείται μια σειρά από σφάλματα, κυρίως συστηματικού χαρακτήρα (systematic error, biases), που επηρεάζουν τον προσδιορισμό της θέσης (και του χρόνου κατά περίπτωση) με παρατηρήσεις GPS. Τα τυχαία σφάλματα (random errors), τα οποία προφανώς είναι αναπόφευκτα, κατά την εκτέλεση των μετρήσεων, ονομάζονται και θόρυβος (noise, white noise).

Τα σφάλματα GPS χωρίζονται σε **τρεις βασικές κατηγορίες** :

- **Σφάλματα που σχετίζονται με τους δορυφόρους** : το σφάλμα της δορυφορικής εφημερίδας ή και σφάλμα της τροχιάς, το σφάλμα του ρολογιού του δορυφόρου και το σφάλμα της επιλεκτικής διαθεσιμότητας (SA).
- **Σφάλματα που σχετίζονται με τους δέκτες** : το σφάλμα ρολογιού του δέκτη, το σφάλμα της μεταβολής του κέντρου φάσης της κεραίας, το τυχαίο σφάλμα παρατήρησης, ή ο θόρυβος, το σφάλμα της αβεβαιότητας του γνωστού σημείου κατά τη διαδικασία επίλυσης μιας βάσης GPS.
- **Σφάλματα που σχετίζονται με τη διάδοση του σήματος**: τα ατμοσφαιρικά σφάλματα (τροποσφαιρικό και ιονοσφαιρικό σφάλμα, ατμοσφαιρικές καθυστερήσεις), το σφάλμα πολυανάκλασης, το σφάλμα ολίσθησης των κύκλων, καθυστερήσεις στα κυκλώματα του δορυφόρου και του δέκτη.

Σημαντικά μεγάλη προσπάθεια έχει καταβληθεί για τη μοντελοποίηση και τον έλεγχο των συστηματικών σφαλμάτων του GPS. Η εκτίμησή τους πριν από τη συνόρθωση δεν είναι δυνατό να γίνει πάντα με την απαιτούμενη ακρίβεια για το σχετικό προσδιορισμό θέσης. Η μαθηματική τους περιγραφή δηλαδή η μοντελοποίησή τους, αν και είναι αρκετά ικανοποιητική στις περισσότερες περιπτώσεις, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του αριθμού των αγνώστων παραμέτρων στα μοντέλα συνόρθωσης και μείωση της ισχύος της λύσης. Οι κατάλληλες επιλογές γραμμικών συνδυασμών των παρατηρήσεων και μοντέλων μπορούν και ξεπερνούν, συνήθως με επιτυχία, το πρόβλημα, είτε μέσω της απαλοιφής τους είτε μέσω απαλοιφής του μεγαλύτερου μέρους τους και μοντελοποίησης του υπολοίπου. Πέρα από τα παραπάνω σφάλματα, ο προσδιορισμός της θέσης και του χρόνου επηρεάζονται και από τη γεωμετρική μορφή του δορυφορικού σχηματισμού, ιδίως όταν οι λαμβανόμενοι δορυφόροι δεν είναι πολλοί.

3.2.1 ΤΟ ΣΦΑΛΜΑ ΤΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΤΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ

Η ποιότητα όλων των παραμέτρων της τροχιάς των δορυφόρων επηρεάζει άμεσα την ποιότητα των αποτελεσμάτων σε κάθε εφαρμογή του GPS. Σφάλμα της τροχιάς των δορυφόρων σημαίνει η συστηματική παρέκκλιση της ταχύτητας και της θέσης του δορυφόρου από την πραγματική του θέση, την θέση δηλαδή με βάση τις παρατηρήσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των τροχιών και των μαθηματικών μοντέλων. Τονίζεται ότι έχει σημασία η συνιστώσα του σφάλματος κατά τη διεύθυνση της απόστασης δέκτη-δορυφόρου.

Κατά τον απόλυτο προσδιορισμό της θέσης, το σφάλμα της τροχιάς επηρεάζει τον προσδιορισμό της θέσης με τον εξής τρόπο : Εάν πολλαπλασιαστεί με δείκτη ακρίβειας της θέσης PDOP, ο οποίος έχει σχέση με τη γεωμετρία των λαμβανόμενων δορυφόρων ,δίνει την επίδραση στο σφάλμα θέσης του δέκτη π.χ. για ένα σφάλμα τροχιάς 1m και PDOP= 3, το σφάλμα στην απόλυτη θέση είναι 3m. Στο σχετικό προσδιορισμό θέσης, το πιο μεγάλο μέρος του σφάλματος της τροχιάς απαλείφεται, ιδιαίτερα για τις βάσεις της τάξεως μερικών χιλιομέτρων.

Στο σχετικό προσδιορισμό θέσης και για τις συνήθεις αποστάσεις μεταξύ των σημείων, οι οποίες μπορεί να είναι μέχρι μερικές δεκάδες km, το τροχιακό σφάλμα επηρεάζει σχεδόν το ίδιο και απαλείφεται με χρήση των διαφορών των πρωτογενών παρατηρήσεων (από το δορυφόρο προς τους δέκτες οι διευθύνσεις σχεδόν πάντα ταυτίζονται, η γωνία στο δορυφόρο προς σημεία που απέχουν 100 km είναι ίση με 0,2°-0,3°). Ένας κανόνας εμπειρικός ο οποίος συνδέει το σφάλμα db μίας μετρημένης βάσης GPS μήκους b ,συναρτήσσει ενός σφάλματος dρ του δορυφόρου, δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{db}{b} \leq \frac{d\rho}{b}$$

Για απόσταση ρ δέκτη-δορυφόρου της τάξης των 25.000 km και για διάφορα μήκη βάσεων προκύπτουν ενδεικτικά τα σφάλματα. Διακρίνουμε κυρίως δύο είδη εφημερίδων/τροχών : την εκπεμπόμενη εφημερίδα (broadcast ephemeris, broadcast orbit) η οποία διατίθεται σε πραγματικό χρόνο και την εκ των υστέρων εφημερίδα ακριβείας (precise ephemeris, precise orbit). Οι ακριβείς εφημερίδες δίνονται σε format SP3 ως συντεταγμένες (X,Y,Z) για κάθε ένα δορυφόρο ανά 15 λεπτά, από όπου προκύπτουν οι συντεταγμένες, με μεθόδους παρεμβολής ,για τις χρονικές περιόδους που αφορούν και ενδιαφέρουν τις παρατηρήσεις.

Σφάλμα τροχιάς dp (m)	Βάση (km)	db/b(ppm)	db(mm)
25	1	1	1
25	10	1	10
25	100	1	100
2,5	1	0,1	<<1
2,5	10	0,1	1
2,5	100	0,1	10
2,5	1000	0,1	100
0,25	10	0,01	<<1
0,25	100	0,01	1
0,1	1	0,004	<<1
0,1	10	0,004	<<1
0,1	100	0,004	0,4
0,1	1000	0,004	4

Πίνακας 1: Η επίδραση του τροχιακού σφάλματος συναρτήσει της βάσης.

Η εκπεμπόμενη εφημερίδα που περιέχεται στο μήνυμα πλοήγησης αποτελείται από ένα σύνολο Κεπλέριων στοιχείων και με τις διαταράξεις και τις εποχές αναφοράς τους. Αποτελεί πρόγνωση που έχει ισχύ μερικές ώρες και μπορεί να εξυπηρετεί τον προσδιορισμό της θέσης σε πραγματικό χρόνο. Μπορεί πάραυτα να χρησιμοποιηθεί και εκ των υστέρων για τις συνήθεις τοπογραφικές εργασίες όμως, είναι ασφαλέστερο και άρα προτιμότερο, σε επεξεργασία εκ των υστέρων και οπωσδήποτε για υψηλής ακρίβειας εργασίες, να γίνεται χρήση των ακριβής εφημερίδων, οι οποίες λαμβάνονται από διάφορα υπολογιστικά κέντρα διαμέσω του διαδικτύου και χαρακτηρίζονται από σημαντικά αυξημένη ακρίβεια.

Για τις διάφορες τροχιές έχουμε τις παρακάτω ακρίβειες :

- εκπεμπόμενες τροχιές (broadcast orbits) → ακρίβεια 1m
- τελικές τροχιές IGS, ύστερα από 13 ημέρες (IGS final orbits) → ακρίβεια 2,5 cm.

- γρήγορες τροχιές IGS, ύστερα από 17 ώρες (IGS rapid orbits) → ακρίβεια 2,5 cm.
- πολύ γρήγορες τροχιές IGS, ύστερα από 3 ώρες (IGS ultra rapid orbits) → ακρίβεια 5 cm.
- τροχιές IGS σε πραγματικό χρόνο (IGS ultra rapid predicted orbits) → ακρίβεια περίπου 5cm.

Τις τελικές τροχιές χαρακτηρίζουν η μεγαλύτερη ακρίβεια σε σύγκριση με όλες τις άλλες τροχιές της IGS. Διατίθενται κάθε Παρασκευή, σε εβδομαδιαία βάση με μία καθυστέρηση από 12 μέχρι 20 ημερών από το τέλος εκείνης της ημέρας που έχουμε μετρήσει και για την οποία μας ενδιαφέρουν οι τροχιές. Οι τελικές εφημερίδες ακριβείας καθορίζουν στην πράξη τα συστήματα ITRF.

Οι γρήγορες εφημερίδες ακριβείας είναι ποιοτικά συγκρίσιμες με τις τελικές. Διατίθενται σε καθημερινή βάση με μία καθυστέρηση 17 ωρών μετά το πέρας της προηγούμενης ημέρας. Πιο συγκεκριμένα η εφημερίδα κάθε ημέρας είναι διαθέσιμη την επόμενη ημέρα στις 17:00 UTC. Σε αρκετές εφαρμογές ο συγκεκριμένος τύπος εφημερίδας δεν αποδίδει σημαντικές διαφορές αποτελεσμάτων σε σχέση με τη χρήση των τελικών εφημερίδων ακριβείας. Η IGS ξεκίνησε και την παραγωγή των πολύ γρήγορων εφημερίδων ακριβείας, με σκοπό να μειωθεί η διάρκεια ισχύος των εφημερίδων πρόγνωσης (predicted orbits), οι οποίες διατίθενται σε πραγματικό χρόνο και παρέχονται στις 3:00 UTC και στις 15:00 UTC. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μείωση της μέσης διάρκειας της πρόγνωσης στις 9 ώρες συγκρινόμενη με τις 36 ώρες που έχουν οι ήδη υπάρχουσες εφημερίδες πρόγνωσης άλλων υπολογιστικών κέντρων. Αντίθετα με τους άλλους τύπους τροχιών, αυτός ο τύπος περιλαμβάνει 48 ώρες τροχιάς των δορυφόρων δηλαδή 2 ημέρες, ενώ όλοι οι άλλοι περιλαμβάνουν μόνο 24 ώρες. Οι πρώτες 24 ώρες είναι βασισμένες σε πραγματικά δεδομένα και μετρήσεις τα οποία προέρχονται από μόνιμους σταθμούς GPS του δικτύου IGS οι οποίοι στέλνουν τα δεδομένα τους στο αντίστοιχο υπολογιστικό κέντρο και ανά ώρα. Οι επόμενες 24 ώρες είναι μόνο πρόγνωση. Εικάζεται πολύ πιθανό οι γρήγορες δορυφορικές εφημερίδες να αντικατασταθούν στο μέλλον από τις πολύ γρήγορες εφημερίδες ακριβείας. Είναι προφανές ότι για προσδιορισμούς πολύ μεγάλης υψηλής ακριβείας πρέπει να γίνεται χρήση των ακριβείων τροχιών της IGS των οποίων οι τιμές προκύπτουν από τον κεντροβαρικό μέσο όρο οκτώ κέντρων ανάλυσης (CODE, EMR, ESA, GFZ, JPL, NGS, SIO, USN). Λαμβάνεται υπ' όψη ότι οι τροχιές όλων των υπολογιστικών κέντρων έχουν την ίδια τάξη ακριβείας και μπορούν κάλλιστα να χρησιμοποιούνται με τον ίδιο τρόπο που χρησιμοποιούνται και οι τροχιές της IGS.

Για παράδειγμα, το υπολογιστικό κέντρο CODE (Center for orbit Determination in Europe) της IGS για την Ευρώπη, που βρίσκεται στο Αστρονομικό Ινστιτούτο της Βέρνης, υπολογίζει από το 1992 τις τροχιές των δορυφόρων GPS σε συνεργασία με άλλα Ευρωπαϊκά Ινστιτούτα,

εκφρασμένες στο τρέχον ITRF συλλέγοντας δεδομένα από ένα υποδίκτυο της IGS το οποίο περιλαμβάνει περισσότερους από 140 μόνιμους σταθμούς . Υπολογίζει παραμέτρους προσανατολισμού της γης, χρονικές παραμέτρους, συντεταγμένες και ταχύτητες θεμελιωδών σημείων με ακρίβεια της τάξης των 5 mm για την οριζόντια θέση και 1 cm για την κατακόρυφη θέση. Η ακρίβεια της τροχιάς είναι καλύτερη από 20 cm για 2-4 ώρες ή 50 cm για 48 ώρες. Επίσης, το ερευνητικό κέντρο GFZ (GeoForschungsZentrum) που βρίσκεται στο Potsdam της Γερμανίας είναι και αυτό ένα από τα υπολογιστικά κέντρα της IGS που παρέχουν προϊόντα GPS υψηλής ποιότητας στη διεθνή κοινότητα.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ο χρήστης GPS διαθέτει τροχιές πολύ υψηλής ακρίβειας και μάλιστα σε αρκετά σύντομο χρονικό διάστημα, ακόμα και σε πραγματικό χρόνο. Έτσι, το πρόβλημα επίδρασης των σφαλμάτων των τροχιών στην ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης παύει στην ουσία να μας απασχολεί σε αντίθεση με τα πρώτα χρόνια λειτουργίας του συστήματος GPS.

3.2.2 ΤΟ ΣΦΑΛΜΑ ΤΟΥ ΡΟΛΟΓΙΟΥ ΤΟΥ ΔΟΡΥΦΟΡΟΥ

Το σφάλμα αυτό οφείλεται στο μη συγχρονισμό του ατομικού ρολογιού του κάθε δορυφόρου ως προς το χρόνο GPS (GPST) το οποίο αποτελεί την ενιαία κλίμακα χρόνου του συστήματος. Ενώ θα μπορούσε να γίνει διόρθωση του χρόνου στο ατομικό ρολόι κάθε δορυφόρου, έγινε επιλογή της ελεύθερης ροής του χρόνου, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απόκλιση των ονομαστικών κλιμάκων των δορυφόρων από την κλίμακα του GPS και τον υπολογισμό των αντίστοιχων σφαλμάτων με πρόγνωση για χρήση του σε συνθήκες πραγματικού χρόνου. Για κάθε ένα δορυφόρο, το σφάλμα ,μπορεί και υπολογίζεται σύμφωνα με μία πολυωνυμική σχέση βασιζόμενη σε τρεις συντελεστές a_0 (bias, clock offset), a_1 (drift, scale), a_2 (drift rate) οι οποίοι εκπέμπονται μαζί με το μήνυμα πλοήγησης και με ακρίβεια της τάξης των 5-10 ns ή 1,5-3 m(rms). Στο σχετικό προσδιορισμό της θέσης, αυτό το σφάλμα απαλείφεται για τις περισσότερες εφαρμογές από τις παρατηρήσεις με χρήση κατάλληλων γραμμικών συνδυασμών. Δεν σημαίνει όμως ότι αυτό, κατά την διαδικασία του σχετικού προσδιορισμού θέσης δεν μας απασχολεί επειδή γίνεται χρήση του π.χ. κατά το στάδιο της προεπεξεργασίας παρατηρήσεων. Στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο το σφάλμα αγνοείται αφού διορθωθούν οι ψευδοαποστάσεις. Σε μία επεξεργασία μπορεί να γίνει χρήση καλύτερων εκτιμήσεων π.χ. με παραμέτρους χρόνου της IGS (ακρίβειας <0,1 ns ή <5 ns σε πραγματικό χρόνο) οπότε συνδυαστικά με ακριβείς εφημερίδες (ακρίβειας <5 cm και σε

πραγματικό χρόνο) αυξάνεται σημαντικά η ακρίβεια του απόλυτου προσδιορισμού της θέσης. Συνδυαστικά με τις μεθόδους του διαφορικού προσδιορισμού της θέσης (DGPS, RTK) η ακρίβεια θέσης μπορεί να φτάσει στο επίπεδο του 1 cm και να μπορούμε να αναφερθούμε πλέον σε ακριβή απόλυτο προσδιορισμό θέσης (precise point positioning).

3.2.3 ΤΟ ΣΦΑΛΜΑ ΤΟΥ ΡΟΛΟΓΙΟΥ ΤΟΥ ΔΕΚΤΗ

Για να παράγει σήματα-αντίγραφα και να διατηρήσει την ονομαστική του κλίμακα χρόνου, ο δέκτης κάνει χρήση ενός συνηθισμένου ταλαντωτή ή ρολογιού τύπου κρυστάλλου χαλαζία (TCOX) ή ακόμα και καλύτερης ποιότητας (OCXO) προφανώς πολύ μικρότερου κόστους και λιγότερο ακριβές από τα ατομικά χρονόμετρα. Η μη ικανότητα συγχρονισμού του ρολογιού του δέκτη με την κλίμακα χρόνου του GPS ,εκφράζεται από το αντίστοιχο σφάλμα το οποίο είναι πολύ σημαντικό και πρέπει οπωσδήποτε να ληφθεί υπόψη. Σύμφωνα με την τυπική λύση πλοήγησης, ο δέκτης μπορεί να υπολογίσει το σφάλμα του ρολογιού με ακρίβεια καλύτερη από 1 μs (μερικά μέτρα ή δεκάδες μέτρα) και να διορθώσει το χρόνο του ως προς το χρόνο του GPS. Αυτό το σφάλμα είναι συνάρτηση του χρόνου, μπορεί να υπολογιστεί σε κάθε εποχή παρατήρησης και σχεδόν μπορεί να απαλειφθεί από τις παρατηρήσεις κατά τον σχετικό προσδιορισμό θέσης. Στον απόλυτο προσδιορισμό της θέσης και σε πραγματικό χρόνο, υπολογίζεται ταυτόχρονα με τη θέση, έτσι ο δέκτης μπορεί να διορθώσει το ρολόι του και να διατηρεί το χρόνο του αρκετά κοντά στο χρόνο του GPS. Έτσι γίνεται εξασφάλιση και του ταυτόχρονου των μετρήσεων όταν διάφοροι άλλοι δέκτες μετρούν ταυτόχρονα στο σχετικό προσδιορισμό θέσης π.χ. μέτρηση δικτύου.

3.2.4 ΟΙ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΩΝ ΚΕΝΤΡΩΝ ΦΑΣΗΣ ΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ.

Ορίζεται ως μηχανικό ή φυσικό ή γεωμετρικό κέντρο της κεραίας ενός δέκτη GPS (συνήθως στη βάση της κεραίας) το σημείο αναφοράς της κεραίας (ARP:Antenna Reference Point) ως προς το οποίο προσδιορίζεται, από το σημείο εδάφους ,το ύψος της κεραίας, συνήθως κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, παρόμοια της μέτρησης του ύψους πρίσματος ή οργάνου με ένα EDM ή total station. Θεωρείται ως σημείο εδάφους , το μαθηματικό εκείνο σημείο,το οποίο υλοποιούμε με τέτοιο τρόπο σήμανσης όπως π.χ. το κέντρο μεταλλικής πλάκας επάνω σε βάθρο, στο οποίο αναφέρονται οι συντεταγμένες που προσδιορίζονται (πολλές φορές χρησιμοποιούμε τις εκφράσεις «θέση δέκτη» ή «θέση κεραίας»).

Το σημείο εκείνο στο οποίο πραγματοποιείται η λήψη των δορυφορικών σημάτων και στο οποίο αναφέρονται οι μετρήσεις του GPS, είναι το ηλεκτρικό κέντρο της κεραίας ή αλλιώς το κέντρο φάσης της κεραίας (APC : Antenna Phase Center). Τα ακραία σημεία μιας βάσης GPS αρχικά ορίζονται από τα αντίστοιχα κέντρα φάσης των κεραιών των δεκτών. Το κέντρο φάσης είναι τελείως διαφορετικό από το μηχανικό σημείο και εξ'αιτίας των χαρακτηριστικών της κεραίας και της δυσκολίας κατασκευής της δεν είναι σταθερό και φυσικό σημείο το οποίο μπορεί να μετρηθεί απ'ευθείας. Στην πραγματικότητα, το κέντρο φάσης για κάθε φορέα L1, L2 διαφέρει και μεταβάλλεται μάλιστα σε συναρτήση με την κατεύθυνση λήψης του δορυφορικού σήματος (γωνία ύψους και αζιμούθιο) ενώ ο δορυφόρος κινείται ως προς τον δέκτη. Οι μεταβολές-αλλαγές των κέντρων φάσης γύρω από μία μέση θέση είναι της τάξης των μερικών χιλιοστών και τείνουν να γίνουν κρίσιμες σε εφαρμογές υψηλής ακρίβειας. Αν μείνουν απαρατήρητες, το σφάλμα μπορεί να φτάσει περίπου στα 10 cm στην υψομετρική διαφορά, ανεξάρτητα από το μήκος βάσης.

Οι μεταβολές των κέντρων φάσης (PCV : Phase Center Variations) εξαρτώνται κυρίως από τη γωνία ύψους και πολύ λιγότερο από το αζιμούθιο αφού περίπου οι περισσότερες σύγχρονες κεραίες παρουσιάζουν συμμετρία ως προς το αζιμούθιο. Για συνήθεις εφαρμογές και για μικρές συνήθως βάσεις, απαλείφεται η δράση της μεταβολής των κέντρων φάσης σε περίπτωση που χρησιμοποιηθούν όμοιες κεραίες στα ακραία σημεία της βάσης του GPS και με τον ίδιο προσανατολισμό π.χ. με το ίδιο μαγνητικό αζιμούθιο με τη βοήθεια μιας πυξίδας (οι κεραίες φέρουν ενδεικτικό σημείο έτσι ώστε να στραφεί η κεραία κατά το βορρά).

Δε θα πρέπει να αμελείται η διόρθωση των παρατηρήσεων που οφείλονται στη μεταβολή των κέντρων φάσης, για τους διαφορετικούς τύπους κεραιών και διαφορετικού κατασκευαστή, ούτως ώστε να μπορούν να μεταφορθούν τα κέντρα φάσης στα αντίστοιχα σημεία ARP και στη συνέχεια στα σημεία εδάφους. Η διαφορά μεταξύ μηχανικού κέντρου και κέντρου φάσης μπορεί να προσδιοριστεί με διάφορες τεχνικές βαθμονόμησης κεραιών και μεθοδολογίες, οι οποίες γίνονται από Υπηρεσίες όπως η IGS και η NGS ή ακόμα και από Πανεπιστημιακά εργαστήρια. Από τη βαθμονόμηση προκύπτουν τόσο οι μέσες τιμές των μετατοπίσεων κέντρων φάσης (antenna offsets) ως προς το ARP, ξεχωριστά για κάθε μία φέρουσα συχνότητα, σύμφωνα με τις διευθύνσεις των αξόνων του αριστερόστροφου τοποκεντρικού γεωδαιτικού συστήματος (north-east-up) ή ισοδύναμα (dφ,dλ, dh) όσο και οι μεταβολές τους (PCV) που δίνονται από 90 μοίρες έως 0 με βήμα 5 μοίρες ,ανάλογα με τη γωνία ύψους ή και με το αζιμούθιο. Οι μέσες τιμές των μετατοπίσεων των κέντρων της φάσης πρέπει πάντοτε να χρησιμοποιούνται κατά τις συνήθεις γεωδαιτικές και τοπογραφικές

εφαρμογές, ενώ παράλληλα για να επιτευχθεί η μέγιστη ακρίβεια είναι απαραίτητη προϋπόθεση και η χρήση των μεταβολών των κέντρων της φάσης. Ενδεικτικά ,οι τρεις μέσες μεταθέσεις (εκκεντρότητα) είναι της τάξης των λίγων εκατοστών π.χ. 10 cm κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, η οποία επηρεάζει άμεσα το υψόμετρο και πολύ λιγότερο έως και καθόλου τις οριζόντιες συνιστώσες οι οποίες επηρεάζουν κυρίως την οριζόντια θέση.

Κάθε κατασκευάστρια εταιρεία ή και διεθνείς υπηρεσίες πρέπει να παρέχει τις αντίστοιχες μεταθέσεις του κέντρου της φάσης και τις μεταβολές του για όλους τους τύπους κεραιών. Οι τιμές αυτές εισάγονται κατά την διάρκεια της επεξεργασίας των παρατηρήσεων στο λογισμικό ή έχουν εισαχθεί ήδη και επιλέγονται αυτομάτως από το πρόγραμμα βάσει των τύπων των κεραιών οι οποίοι χρησιμοποιούνται και των χαρακτηριστικών τους (π.χ. ύπαρξη προστατευτικού καλύμματος /radome), επίσης γίνεται εισαγωγή τους και στο δέκτη ώστε να προσδιοριστεί η θέση σε πραγματικό χρόνο. Πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή ούτως ώστε τα δεδομένα που εισάγονται να έχουν προκύψει βάσει της ίδιας διαδικασίας βαθμονόμησης. Η βαθμονόμηση μπορεί και να είναι σχετική έτσι, όλες οι τιμές έχουν προσδιοριστεί ως προς μία κεραία αναφοράς (Dome Margoline T) ή απόλυτη, με την απόλυτη βαθμονόμηση να είναι καθιερωμένη τα τελευταία χρόνια μιας και είναι αυτή είναι η σωστότερη. Στις πιο σύνηθες εργασίες η χρήση των δεδομένων από σχετική βαθμονόμηση ή απόλυτη φέρει όμοιο αποτέλεσμα ενώ σε αρκετά μεγάλες βάσεις θα πρέπει να γίνεται χρήση δεδομένων απόλυτης βαθμονόμησης, διότι η αύξηση της καμπυλότητας της γης προκαλεί σε βάσεις μεγάλου μήκους, για τον ίδιο δορυφόρο, σημαντικά διαφορετική γωνία ύψους στα ακραία σημεία της βάσης. Όλες οι πρωτογενείς παρατηρήσεις του GPS γίνεται να διορθωθούν αν χρησιμοποιηθούν οι μεταβολές των κέντρων φάσης, με την αφαίρεση της τιμής PCV από την παρατήρηση, τιμή που προκύπτει από παρεμβολή αναλόγως την γωνία ύψους καθενός δορυφόρου (ή και το αζιμούθιο) την αντίστοιχη εποχή μέτρησης. Οι μέσες τιμές της εκκεντρότητας ή των μεταθέσεων των κέντρων φάσης επίσης χρησιμοποιούνται και για την αναγωγή των παρατηρήσεων στα ARP αλλά και για τη μεταφορά γεωμετρικών κέντρων στα σημεία εδάφους και αντιστρόφως.

Με παρόμοιο τρόπο που γίνεται η βαθμονόμηση της κεραίας του δέκτη,πραγματοποιείται και η βαθμονόμηση της κεραίας καθενός δορυφόρου πριν εκτοξευθεί έτσι ώστε να γίνει προσδιορισμός της διαφοράς ,στο τοπικό σύστημα του δορυφόρου, μεταξύ του κέντρου μάζας του δορυφόρου, σημείο στο οποίο αναφέρονται οι συντεταγμένες εφημερίδων ακριβείας και κέντρου φάσης κεραίας του (θεωρείται ίδιο για την L1 και την L2), όπου εκπέμπεται το δορυφορικό σήμα.Οι μεταβολές του κέντρου φάσης λόγω διαφορετικής

κατεύθυνσης θεωρούνται αμελητέες σε αντίθεση με την κεραία του δέκτη, εξ'αιτίας του κώνου εκπομπής του δορυφορικού σήματος ο οποίος έχει σχετικά μικρή γωνία. Κατά την διαδικασία επεξεργασίας των παρατηρήσεων GPS, λαμβάνεται υπόψη η μετατόπιση ή εκκεντρότητα του κέντρου της φάσης της κεραίας του δορυφόρου ως προς το κέντρο μάζας ούτως ώστε να γίνεται με κατάλληλο τρόπο η μεταφορά των συντεταγμένων του δορυφόρου (εφημερίδες ακρίβειας) στο κέντρο φάσης από το κέντρο μάζας .

3.2.5 ΤΟ ΤΥΧΑΙΟ ΣΦΑΛΜΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ.

Το τυχαίο σφάλμα ή διαφορετικά λευκός θόρυβος συμβαίνει αναπόφευκτα σε κάθε παρατήρηση GPS όπως άλλωστε συμβαίνει και σε κάθε παρατήρηση κλασικού τύπου, όπου γίνεται χρήση μετρητικών οργάνων. Ο όρος τυχαίο μπορεί να αντανακλάσει πολύ απλά το σφάλμα το οποίο τείνει κατά μέσο όρο στο μηδέν όσο αυξάνονται οι επαναλήψεις της μέτρησης, υπό τις ίδιες συνθήκες. Η ακρίβεια των πρωτογενών μετρήσεων, ενδεικτικά 0,1 % έως 1% του μήκους παλμού/κύματος, για μεν τον κώδικα C/A είναι της τάξης του 30 cm - 3cm για τον κώδικα P της τάξης των 3-30 cm και για τις φάσεις της τάξης του 1 mm. Αντιπροσωπευτικές τιμές τυπικής απόκλισης (rms) τυχαίου σφάλματος των μετρήσεων που χρησιμοποιούνται κυρίως είναι 0,5 - 1 m για τις ψευδοαποστάσεις και 1-2 mm για τις φάσεις. Μάλιστα, οι πρωτογενείς παρατηρήσεις θεωρούνται μαθηματικά ασυσχέτιστες και της όμοιας ακρίβειας ανά είδος ενώ υπάρχει φυσική συσχέτιση.

Δεν θα πρέπει να αγνοηθεί το γεγονός ότι στο σχετικό προσδιορισμό θέσης αντί να χρησιμοποιούνται οι πρωτογενείς παρατηρήσεις, χρησιμοποιούνται παράγωγες, συνθετικές παρατηρήσεις μέσω κάποιων συνδυασμών τους, επειδή έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα τα οποία προσφέρουν (απαλοιφή συστηματικών σφαλμάτων), αλλά και με κάποιο κόστος το οποίο είναι σχετικό με την αύξηση του θορύβου σε σχέση με τις πρωτογενείς παρατηρήσεις.

3.2.6 ΤΟ ΣΦΑΛΜΑ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΓΝΩΣΤΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ.

Οποιοδήποτε σφάλμα θέσης του σημείου το οποίο παραμένει σταθερό στην επίλυση μιας βάσης GPS (σχετικός προσδιορισμός) έχει τη δυνατότητα να επηρεάζει συστηματικά τις εκτιμήσεις των συνιστωσών ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$). Γενικά, η αβεβαιότητα όλων των προσεγγιστικών συντεταγμένων που αναφέρονται στο σημείο αναφοράς λαμβανομένου ως σταθερού, δεν επιτρέπεται να ξεπερνά τα 10m περίπου ως προς το WGS84 ή ένα ITRF για σύνηθες

γεωδαιτικές και τοπογραφικές εφαρμογές. Αυτή η ακρίβεια επιτυγχάνεται εύκολα (αρκετά καλύτερη) μέσω της λύσης πλοήγησης του δέκτη ή και μέσω της βοήθειας κάποιων μετασχηματιστικών παραμέτρων. Με υψηλής ακρίβειας απαιτήσεις επιδιώκεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια, κάτι το οποίο μπορεί και επιτυγχάνεται σχετικά εύκολα. Η επίδραση αυτού του σφάλματος στη σχετική θέση μοιάζει με την επίδραση που έχει το σφάλμα της τροχιάς.

3.2.7 ΤΟ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΣΦΑΛΜΑ.

Εκείνα τα τμήματα της ατμόσφαιρας που ουσιαστικά επηρεάζουν τη διαδρομή του δορυφορικού, ηλεκτρομαγνητικού σήματος και με διαφορετικό τρόπο με αποτέλεσμα να δημιουργούνται χρονικές καθυστερήσεις λόγω μείωσης της ταχύτητας διάδοσης και καμπυλότητας της τροχιάς από την αλλαγή της κατεύθυνσης σε σχέση με την ευθύγραμμη διαδρομή στο κενό με ταχύτητα ($c=299792458,0$ m/s), είναι η τροπόσφαιρα ($H<50$ km) και ιονόσφαιρα ($50<H<1000$ km). Η διαφορετική και ξεχωριστή σύσταση και επίδραση της τροπόσφαιρας και ιονόσφαιρας χαρακτηρίζονται με τους όρους τροποσφαιρικό και ιονοσφαιρικό σφάλμα ή διαφορετικά τροποσφαιρική και ιονοσφαιρική καθυστέρηση.

Για να μειωθούν τα σφάλματα της ατμόσφαιρας λαμβάνουμε ή χρησιμοποιούμε μετρήσεις προς δορυφόρους που έχουν γωνία ύψους πάνω από ένα όριο, συνήθως πάνω από 15 μοίρες κατά την διαδικασία της επεξεργασίας. Αυτή η γωνία, η οποία είναι γνωστή και ως γωνία αποκοπής (cut-off angle, elevation angle/mask) είναι συνήθως 10 ή 15 μοίρες.

Η τροπόσφαιρα είναι το πιο χαμηλό τμήμα της ατμόσφαιρας το οποίο είναι μεταβλητού πάχους και που εκτείνεται σε ύψος των 9 km στους πόλους και μέχρι 16 km στον Ισημερινό. Συνήθως περιλαμβάνεται σε αυτήν και ένα μέρος της στρατόσφαιρας το οποίο επιδρά κατά αρκετά λιγότερο και με αυτό τον τρόπο θεωρείται ότι εκτείνεται η τροπόσφαιρα μέχρι περίπου τα 50 km.

Η τροποσφαιρική διάθλαση στη μη ιονισμένη τροπόσφαιρα, δηλαδή στην ουδέτερη, δημιουργεί το τροποσφαιρικό σφάλμα αυτό επιφέρει το αποτέλεσμα να καθυστερεί το σήμα στη διαδρομή του. Η τροπόσφαιρα δεν αποτελεί μέσο διασποράς για τα ραδιοκύματα μέχρι και 15 GHz (1,5 GHz στο GPS), αυτό σημαίνει ότι η μεταβολή του δείκτη διάθλασης δεν είναι συνάρτηση της συχνότητας του σήματος, αντίθετα όμως με την ιονόσφαιρα. Η καθυστέρηση της ομάδας και της φάσης είναι ίδιες.

Η τροποσφαιρική καθυστέρηση είναι εξαρτημένη από την πίεση, την θερμοκρασία και την υγρασία ή όπως αλλιώς λέγεται από τον ξηρό παράγοντα (επίδραση της τάξης του 90% και εύκολα μοντελοποιήσιμο) και από τον υγρό παράγοντα (επίδραση της τάξης του 10% και δύσκολα μοντελοποιήσιμο). Επίσης είναι συνάρτηση της απόστασης της οποίας το σήμα διανύει μέσα στην τροπόσφαιρα, της ζενίθιας γωνίας του δορυφόρου (αυξάνει από το ζενίθ προς τον ορίζοντα ή όσο μεγαλώνει η ζενίθεια γωνία) και του υψομέτρου που έχει ο δέκτης (μειώνεται με την αύξηση του υψομέτρου του δέκτη). Χρησιμοποιώντας ατμοσφαιρικά μοντέλα π.χ. Saastamoinen, Hopfield, και λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους: θερμοκρασία, πίεση και υγρασία, μπορεί να υπολογιστεί περίπου 90% του τροποσφαιρικού σφάλματος. Το υπόλοιπο 10% οφείλεται κυρίως στον υγρό παράγοντα.

Το τροποσφαιρικό σφάλμα έχει την ίδια επίδραση στους κώδικες και στις φάσεις ανεξάρτητα από τη συχνότητα που έχουν οι φορείς L1, L2, L5. Δεν μπορεί να γίνει απαλοιφή του με δέκτες δύο συχνοτήτων όπως γίνεται με το ιονοσφαιρικό σφάλμα όμως μπορεί από γνωστά τυπικά μοντέλα να υπολογισθεί σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό για μικρές βάσεις (ακρίβεια μερικών εκατοστών) ή και να μοντελοποιηθεί το σφάλμα το οποίο απομένει σε κάθε σημείο για μεγαλύτερες βάσεις (tropospheric site parameters).

Το μέγεθος του τροποσφαιρικού σφάλματος κυμαίνεται από 2 έως 2,5 m για σημεία που είναι περίπου πάνω στη στάθμη της θάλασσας και για διεύθυνση προς το ζενίθ (μηδενική ζενίθεια γωνία ή γωνία ύψους 90 μοιρών), έως 5m για γωνία ύψους 30 μοιρών, έως 10 m για γωνία ύψους 15 μοιρών και μπορεί να φτάσει περίπου τα 25 m για γωνίες ύψους 5 μοιρών και περισσότερο γωνίες που είναι μικρότερες. Για δορυφόρους που βρίσκονται κοντινά με τον ορίζοντα δεν είναι συνήθως ικανοποιητική η μοντελοποίηση της τροπόσφαιρας και έτσι αποφεύγεται η όποια παρατήρηση αυτών των δορυφόρων.

Μπορεί να γίνει διακριτό το σχετικό τροποσφαιρικό σφάλμα λόγω διαφορετικών επιδράσεων της τροπόσφαιρας μεταξύ δύο σημείων αυτό συμβαίνει συνήθως για σημεία με σημαντική υψομετρική διαφορά, το οποίο σφάλμα έχει επίδραση μόνο στη σχετική υψομετρική διαφορά, και μπορούμε να διακρίνουμε και το απόλυτο τροποσφαιρικό σφάλμα λόγω της κοινής επίδρασης που έχει, στα δύο αυτά σημεία που επηρεάζει την κλίμακα της βάσης. Για εφαρμογές τοπικού χαρακτήρα, το πιο σημαντικό και δύσκολα μοντελοποιήσιμο είναι το σχετικό τροποσφαιρικό σφάλμα. Το απόλυτο τροποσφαιρικό σφάλμα έχει νόημα όταν υπολογίζεται χωριστά στα ακραία σημεία της βάσης, για μεγάλες βάσεις της τάξης των μερικών δεκάδων χιλιομέτρων. Ενδεικτικά αυτές που είναι πάνω από 15 km και για μεγάλες υψομετρικές διαφορές.

Ένα σχετικό τροποσφαιρικό σφάλμα ΔT δίνει ένα σφάλμα Δh , κάποιες φορές είναι μεγαλύτερο του ΔT (ενδεικτικά σφάλμα $\Delta T=1$ cm συνεπάγεται σφάλμα 3cm στην υψομετρική διαφορά Δh). Για δορυφόρους που βρίσκονται χαμηλά στον ορίζοντα το σφάλμα μπορεί να επηρεάσει σημαντικά και την υψομετρική διαφορά, αυτό έχει ως συνέπεια να επηρεαστεί και η βάση.

Είναι γνωστοί δύο μέθοδοι που περιγράφουν μαθηματικά το τροποσφαιρικό σφάλμα:

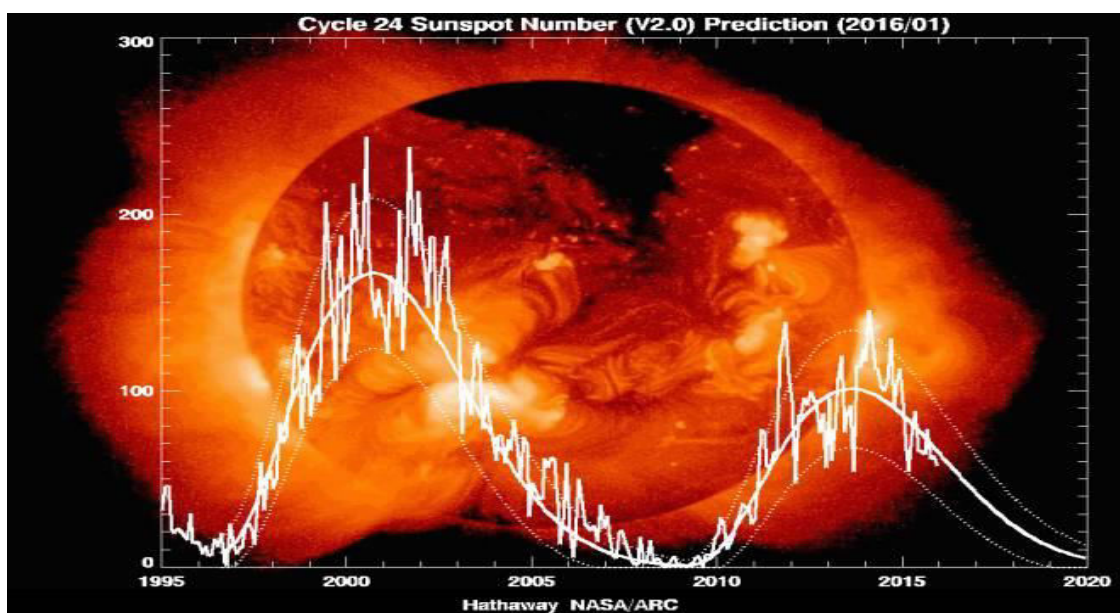
- Με τη χρήση μόνο μετεωρολογικών μετρήσεων του εδάφους όπως η πίεση, η θερμοκρασία και η υγρασία ή μετρώντας ραδιόμετρα για τη μέτρηση υγρασίας με πολύ υψηλή ακρίβεια. Στη δεύτερη περίπτωση τα αντίστοιχα όργανα WVR (Water Vapour Radiometers) έχουν πάρα πολύ μεγάλο κόστος. Από τα μετεωρολογικά δεδομένα είναι δυνατό να δημιουργηθούν τοπικά μοντέλα χωρίς καμία χρήση παρατηρήσεων GPS.
- Με τη χρήση μετρήσεων του GPS και προσδιορίζοντας τροποσφαιρικές παραμέτρους (μοντέλα τροπόσφαιρας) κατά τη συνόρθωση των παρατηρήσεων GPS.
- Μόνο η χρήση των μετεωρολογικών δεδομένων του εδάφους, δεν μπορεί να λύσει το πρόβλημα και να οδηγήσει σε υπολογισμό υψηλής ακρίβειας, αν και βελτιώνει την ακρίβεια μέχρι και λίγα εκατοστά, εκτός ίσως χρησιμοποιώντας μετρήσεις WVR που μπορούμε να φτάσουμε την ακρίβεια εκατοστών κατά τον υπολογισμό της τροποσφαιρικής επίδρασης. Τα μικρά σφάλματα στις μετεωρολογικές παραμέτρους κάνουν χειρότερα τα αποτελέσματα της επίλυσης μιας βάσης. Έτσι, αντί να χρησιμοποιούνται οι μετεωρολογικές μετρήσεις του εδάφους προτιμούνται τυπικές τιμές μετεωρολογικών παραμέτρων.

Ο προσδιορισμός τροποσφαιρικών παραμέτρων ενδείκνυται για μεγαλύτερες αποστάσεις από 15-20 km σε σύγκριση με κάποιο αρχικό μοντέλο αναφοράς. Σε εκτάσεις οι οποίες είναι περιορισμένες δηλαδή βάσεις μικρότερες των 10km και για διαφορές υψομέτρων μικρότερες από 100m περίπου δηλαδή ένα επίπεδο έδαφος συνιστάται να γίνεται χρήση μόνο των τυπικών μοντέλων ατμόσφαιρας, όπως είναι π.χ. τα μοντέλα Saastamoinen και Hopfield μαζί με όποιες συναρτήσεις απεικόνισης αναφέρονται στη συνέχεια. Σημειώνεται επίσης ότι με τις διπλές διαφορές των παρατηρήσεων GPS γίνεται απαλείφηση ενός μεγάλου μέρους του τροποσφαιρικού σφάλματος.

3.2.8 ΤΟ ΙΟΝΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΣΦΑΛΜΑ.

Η ιονόσφαιρα είναι εκείνο το τμήμα της ατμόσφαιρας το οποίο εκτείνεται από τα 50km περίπου έως 1000 km πάνω από την επιφάνεια της γης και χαρακτηρίζεται από ύπαρξη

ιονιζόντων αερίων όπως O_2 , H_2 , He , N_2 και κυρίως ελευθέρων ηλεκτρονίων και θετικών ιόντων. Η ιονόσφαιρα είναι ένα μέσο διασποράς για το σήμα του GPS, αυτό σημαίνει ότι ο δείκτης διάθλασης είναι εξαρτημένος από τη συχνότητα που έχει το σήμα και αυτό το γεγονός είναι πολύ «βολικό» για παρατηρήσεις GPS και στις δύο συχνότητες π.χ. L1 και L2 ή L1 και L5. Αυτός είναι άλλωστε και ο κύριος σκοπός δύο τουλάχιστον συχνοτήτων L στο σήμα του GPS. Με διπλής συχνότητας δέκτες, μπορεί γίνει απαλοιφή του ιονοσφαιρικού σφάλματος ουσιαστικά αν χρησιμοποιηθεί κατάλληλος γραμμικός συνδυασμός πρωτογενών παρατηρήσεων των δύο φορέων ή ψευδοαποστάσεων από κώδικες ή φάσεων.



Σχήμα 1: Η ηλιακή ακτινοβολία από το έτος 1995 έως το 2020.

Η εμφάνιση ελεύθερα φορτισμένων σωματιδίων, κυρίως ηλεκτρονίων που προέρχονται από άτομα οξυγόνου, προκαλείται λόγω της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία καθορίζει επίσης και το βαθμό ιονισμού δηλαδή την πυκνότητα της ιονόσφαιρας ανάλογα με τη δραστηριότητά της (11ετής ηλιακός κύκλος κηλίδων). Το 2001 παρουσιάστηκε μεγάλη έξαρση ηλιακής ακτινοβολίας με την αμέσως επόμενη έξαρση να εμφανίζεται από τον Μάιο προς το καλοκαίρι του 2013. Η ιονόσφαιρα είναι αποτελούμενη από επιμέρους στρώματα με ονομασίες D, E, F1, F2 τα οποία έχουν διαφορετικά υψόμετρα και διαφορετικό ιονισμό. Η μεγαλύτερη πυκνότητα ηλεκτρονίων παρατηρείται στο στρώμα F2 σε υψόμετρο 250-400 km. Τα ηλεκτρόνια εκείνα, τα οποία απελευθερώνονται από μόρια και άτομα αερίων που περιέχονται στην ιονόσφαιρα, έχουν επιρροή κατά τη διάδοση του σήματος, δηλαδή αλλάζουν το μέτρο της ταχύτητας, τη διεύθυνση και την πολικότητα με τη μεγαλύτερη

επίδραση να πραγματοποιείται στο μέτρο της ταχύτητας και άρα στην απόσταση μεταξύ του δέκτη και του δορυφόρου.

Η ταχύτητα της διάδοσης κωδικών (group velocity) καθυστερείται από την ιονοσφαιρική διάθλαση ούτως ώστε να είναι μεγαλύτερες οι ψευδοαποστάσεις σε σχέση με το κενό ενώ αυξάνει αντίθετα την ταχύτητα φάσης των καθαρών φορέων (phase velocity) έτσι ώστε να είναι μικρότερες οι αντίστοιχες αποστάσεις, συγκριτικά με τον κενό. Η διόρθωση των κωδικών είναι ίση και αντίθετη με τη διόρθωση στις φάσεις, όπως παρατηρεί κανείς και στα πρόσημα που έχουν οι όροι στις αντίστοιχες εξισώσεις των παρατηρήσεων.

Το μέγεθος του ιονοσφαιρικού σφάλματος μεταβάλλεται σε σημαντικό βαθμό και αρκετά γρήγορα μέσα στο 24ώρο. Αυτό σημαίνει ότι αυξάνεται σταδιακά όσο ανατέλει ο ήλιος, με τη μέγιστη τιμή να πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια των μεσημβρινών ωρών, και μειώνεται προς τη νύχτα όπου τότε σταματά και ο ιονισμός. Γενικά κυμαίνεται περίπου από 1 μέτρο μέχρι αρκετές δεκάδες μέτρα ενώ σε πολύ ακραίες περιπτώσεις σε απότομες μεταβολές και γεωμαγνητικές διαταραχές ξεπερνάει και τα 100m στον ορίζοντα. Το ιονοσφαιρικό σφάλμα στη διάρκεια της νύχτας ελαττώνεται σχεδόν 1-5 φορές σε σχέση με την ημέρα, λόγω του μικρότερου TEC.

Στα μεσαία πλάτη, υπάρχει η δυνατότητα να υπολογιστεί σχεδόν το 70% του συνολικού μεγέθους του ιονοσφαιρικού σφάλματος μέσω του μηνύματος των δεδομένων.

Η ιονοσφαιρική καθυστέρηση είναι ανάλογη με την πυκνότητα των ηλεκτρονίων – TEC (Total Electron Content : αριθμός ηλεκτρονίων ανά m^2 , δηλαδή ο αριθμός των ηλεκτρονίων που περιέχονται σε μία κυλινδρική στήλη διατομής $1 m^2$ γύρω από τη διαδρομή του σήματος) και αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της συχνότητας f του φορέα L1 και L2.

Η ιονοσφαιρική καθυστέρηση για παρατηρήσεις φάσης δίνεται σε μέτρα, με μία πολύ καλή προσέγγιση, της τάξης των μερικών εκατοστών από την εξής σχέση:

$$I_L = -\alpha \frac{TEC}{f^2} = -40,3 \frac{TEC}{f^2}, (\alpha = 40,3 \text{ ms}^{-2}) \text{ (σχέση 1)}$$

Όπου η f είναι η φέρουσα ικανότητα σε Hz, με το TEC να παίρνει τιμές μεταξύ 10^{16} και 10^{18} .

εφόσον το TEC εκφράζεται σε μονάδες TEC, σε $TECU^{-1}$ δηλαδή. Η παρουσία αρνητικού προσήμου σημαίνει ότι η απόσταση μεταξύ του δέκτη και του δορυφόρου γίνεται πιο μικρή λόγω της επίδρασης της ιονοσφαιρας στη φάση των φορέων. Αντίθετα, η απόσταση μεταξύ τους μεγαλώνει σε περίπτωση που αναφερόμαστε σε παρατηρήσεις κώδικα (C/A, P1, P2), αυτό σημαίνει ότι η προηγούμενη σχέση ισχύει αλλά με θετικό πρόσημο.

Η ποσότητα TEC και οι μεταβολές της μπορούν να προσδιοριστούν προκύπτοντας από μετρήσεις GPS δύο φορέων ή γνωστών σημείων δηλαδή μονίμων σταθμών και συμβάλουν έτσι για τη δημιουργία ημερησίων χαρτών μεταβολής TEC και γενικότερα για την μελέτη της ιονόσφαιρας. Παραδείγματος χάρη, η ημερήσια μεταβολή του TEC αντανακλά την αλλαγή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της γης η οποία έχει σχέση με την ηλιοφάνεια. Διάφορα κέντρα σε όλο τον κόσμο χρησιμοποιούν για τη μελέτη της ατμόσφαιρας, μετρήσεις των μόνιμων σταθμών GPS/GNSS. Συμπεραίνουμε ότι επιλέγοντας υψηλές συχνότητες μειώνεται το ιονοσφαιρικό σφάλμα. Προκύπτει μέσω της προηγούμενης σχέσης πως ο λόγος των ιονοσφαιρικών σφαλμάτων των παρατηρήσεων φάσης των δύο φορέων είναι ίσος με τον αντίστροφο του λόγου των τετραγώνων των συχνοτήτων τους, δηλαδή για τους φορείς L1, L2 θα είναι $\frac{I_1}{I_2} = \frac{f_2^2}{f_1^2}$, θέτοντας όπου $\gamma = \frac{f_1^2}{f_2^2} = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 = \left(\frac{1575.42}{1227.60}\right)^2 = \left(\frac{77}{60}\right)^2 = 1,647$ και έτσι γράφεται η σχέση,

$$I_2 = \gamma \cdot I_1 \approx 1,6471, \text{ όπου } I = I_1 \text{ (σχέση 2)}$$

από την οποία και φαίνεται πως η ιονοσφαιρική επίδραση είναι σχεδόν 1,647 φορές πιο μεγάλη στην L2 από ότι στην L1.

Προσέγγιση των μερικών εκατοστών, περίπου 5, βασιζόμενη στην προηγούμενη σχέση μειώνεται ακόμα πιο πολύ χρησιμοποιώντας διπλές διαφορές κατά τον σχετικό προσδιορισμό της θέσης και για σχετικά όχι μεγάλες αποστάσεις της τάξεως μερικών χιλιομέτρων ενδεικτικά είναι 10 έως 20 km, το ιονοσφαιρικό σφάλμα εξαλείφεται σχεδόν εξαιτίας της αυτοσυμπεριφοράς του ιονοσφαιρικού στρώματος σε άκρα μικρής βάσης (υψηλή συσχέτιση). Οι πολύ απότομες μεταβολές στον αριθμό των ηλεκτρονίων οι οποίες συμβαίνουν κατά το μήκος διαδρομής του σήματος προκαλούν προβλήματα στα κυκλώματα PLL και συνεπώς αρκετές και σημαντικές απώλειες στη λήψη του σήματος (loss of lock) ή προκαλούν την παρουσία ακέραιων κύκλων ολίσθησης (cycle slips), με αποτέλεσμα να δυσκολεύεται ο σωστός προσδιορισμός ακεραίων ασαφειών της φάσης κατά την διαδικασία συνόρθωσης παρατηρήσεων. Αυτό το φαινόμενο της ιονοσφαιρικής εξίσωσης (ionospheric scintillation) το οποίο κυρίως εμφανίζεται σε πολικές περιοχές και σε ένα εύρος ζώνης $\pm 30^\circ$ γύρω του γεωμαγνητικού ισημερινού, έχει διάρκεια μερικών λεπτών και έχει τη δυνατότητα να συνεχίζεται ανά χρονικά διαστήματα για αρκετές ώρες. Συνήθως προκαλείται από την έντονη ηλιακή δραστηριότητα η οποία με την σειρά της προκαλεί την ιονοσφαιρική και τη μαγνητική καταιγίδα μέσω των οποίων αυξάνεται κατά πολύ ο αριθμός των ηλεκτρονίων, συνήθως κατά τη χειμερινή περίοδο ενώ αντιθέτως μειώνεται το ETC κατά την καλοκαιρινή περίοδο. Κάποιες φορές είναι τόσο έντονη η μεταβολή με αποτέλεσμα το σήμα να αδυνατίζει αρκετά αφού

συμβένει μείωση πλάτους άρα θα συμβαίνει και μείωση ισχύος, και έτσι ο δέκτης δεν έχει τη δυνατότητα να το ανιχνεύσει διότι δεν βρίσκεται μέσα στα όρια μεταβολής για τα οποία έχει προγραμματιστεί να ψάχνει. Το φαινόμενο έξαρσης της ιονόσφαιρας αποτελεί κατά κάποιον τρόπο κάποιο είδος πολυανάκλασης του δορυφορικού σήματος.

Για όσους χρησιμοποιούν ψευδοαποστάσεις μίας συχνότητας, το ιονοσφαιρικό σφάλμα υπολογίζεται βάσει της χρήσης ενός τυπικού μοντέλου ιονόσφαιρας ,όπως του εκπεμπόμενου, ή ακόμα και βάσει άλλων μοντέλων τα οποία είναι διατεθειμένα από υπηρεσίες και έχουν προκύψει και στις δύο συχνότητες μέσω μετρήσεων GPS όχι μόνο ψευδοαποστάσεων αλλά ακόμα και φάσεων.

Για εκείνους τους οποίους χρησιμοποιούν ψευδοαποστάσεις P_{Lix}, P_{Liy} σε δύο συχνότητες π.χ. κώδικα P(Y) στην L1 και L2 ή κώδικα C/A στην L1 και κώδικα L2C στην L2, οι μετρήσεις έχουν την ικανότητα να διορθωθούν και να βελτιωθούν ή και να απαλλαγούν από την παρουσία της ιονοσφαιρικής επίδρασης (πρώτης τάξης) και έτσι να γίνει σημαντική βελτίωση του απόλυτου προσδιορισμού θέσης, κυρίως σε πραγματικό χρόνο.

Μπορούμε να ξαναγράψουμε την εξίσωση της παρατήρησης της πρωτογενούς ψευδοαπόστασης κώδικα για τα δύο σήματα L_{ix} και L_{iy} σε διαφορετικούς όμως φορείς L_i και L_j αντίστοιχα , π.χ. τα σήματα L_{IC/A} ή L_{IP(Y)} για τον φορέα L1 και τα σήματα L_{2C} ή L_{2P(Y)} για το φορέα L2 ή και το σήμα L₅₁₅ για τον φορέα L5. Για τον ίδιο δορυφόρο, και με την προϋπόθεση διαχωρισμού στην εξίσωση των σχετικών καθυστερήσεων, μεταξύ των σημάτων εντός του δορυφόρου και μέχρι την εκπομπή τους από την κεραία, θα έχουμε,

$$P_{Lix} = \rho + c(\delta_A - \delta^i) + c(T_{GD} - ISC_{Lix}) + I_{Pi} + T + e_{Pix} \text{ (σχέση 3)}$$

$$P_{Liy} = \rho + c(\delta_A - \delta^i) + c(T_{GD} - ISC_{Liy}) + I_{Pj} + T + e_{Piy} \text{ (σχέση 4)}$$

Όπου οι όροι e_{Lix} και e_{Liy} εκφράζουν το θόρυβο των μετρήσεων ή εφόσον υπάρχει εκφράζουν και το σφάλμα πολυανάκλασης, οι καθυστερήσεις D' του δορυφόρου έχουν ληφθεί υπόψη ως $D' = T_{GD} - ISC_L$.

Αν αγνοηθεί ο θόρυβος και ληφθεί υπόψη μόνο ότι $I_{Pj} = \gamma_{ij} \cdot I_{Pi}$ (π.χ. για $i=1, j=2, \gamma_{ij} = \gamma_{12} = \gamma$), δημιουργείται η διαφορά των δύο ψευδοαποστάσεων:

$$\Delta P = P_{Lix} - P_{Liy} = (1 - \gamma_{ij}) \cdot I_{Pi} - c \cdot (ISC_{Lix} - ISC_{Liy}) \text{ (σχέση 5) από όπου :}$$

$$I_{Pi} = \frac{P_{Lix} - P_{Liy} + c(ISC_{Lix} - ISC_{Liy})}{1 - \gamma_{ij}} = \frac{\Delta P + c(ISC_{Lix} - ISC_{Liy})}{1 - \gamma_{ij}} = - \frac{\Delta P}{\gamma_{ij} - 1} - \frac{c(ISC_{Lix} - ISC_{Liy})}{\gamma_{ij} - 1} \text{ (σχέση 6)}$$

$$\text{και } I_{Pj} = \gamma_{ij} \cdot I_{P1}, \gamma_{ij} = \frac{f_i^2}{f_j^2} \text{ (σχέση 7)}$$

Στην περίπτωση των L1PY, L2PY σημάτων, η ιονοσφαιρική καθυστέρηση στην L1 και L2 συχνότητα, που υπολογίζονται από ψευδοαποστάσεις κώδικα, θα είναι

$$I_{P1} = \frac{P_{L1PY} - P_{L2PY} + c(\text{ISC}_{L1PY} - \text{ISC}_{L2PY})}{1 - \gamma_{12}} = \frac{\Delta P + c(0 - (1 - \gamma)T_{GD})}{1 - \gamma} = - \frac{\Delta P}{\gamma - 1} - c \cdot T_{GD} \text{ και } I_{P2} = \gamma \cdot I_{P1}$$

Βασιζόμενοι στα προηγούμενα έχουν τη δυνατότητα οι αντίστοιχες πρωτογενείς ψευδοαποστάσεις να διορθωθούν με κατάλληλο τρόπο ως προς τις ιονοσφαιρικές καθυστερήσεις ή τα ιονοσφαιρικά σφάλματα και να γίνει η χρήση τους στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης (ιδίως σε πραγματικό χρόνο, λύση πλοήγησης) με αποτέλεσμα αύξηση ακρίβειας. Αν γίνει διόρθωση των ψευδοαποστάσεων από την αρχή εξ' αιτίας των καθυστερήσεων T_{GD} , ISC ή διορθωθεί ισοδύναμα ο δορυφορικός χρόνος, οι όροι εκείνοι στους οποίους περιέχονται οι αντίστοιχες καθυστερήσεις προφανώς και δεν θα εμφανίζονται στις παραπάνω εξισώσεις. Διαφορετικά, όπως είναι σύνηθες, είναι εφικτό να γίνει χρήση ενός γραμμικού συνδυασμού των δύο πρωτογενών ψευδοαποστάσεων έτσι ώστε η αντίστοιχη παράγωγη ψευδοαπόσταση να είναι σχεδόν τελείως απαλλαγμένη του ιονοσφαιρικού σφάλματος. Αυτός ο συνδυασμός που είναι ελεύθερος ιονόσφαιρας (ionosphere-free pseudorange linear combination, iono-free, modernized iono-free pseudorange), έτσι όπως δίνεται από τα σύγχρονα εγχειρίδια (IS-GPS) είναι:

$$P_{IF} = P_{\text{iono-free}} = \frac{P_{Ljy} - \gamma_{ij} \cdot P_{Lix} + c(\text{ISC}_{Liy} - \gamma_{ij} \cdot \text{ISC}_{Lix})}{1 - \gamma_{ij}} - c \cdot T_{GD} =$$

$$= \frac{[P_{Ljy} - c(T_{GD} - \text{ISC}_{Ljy})] - \gamma_{ij}[P_{Lix} - c(T_{GD} - \text{ISC}_{Lix})]}{1 - \gamma_{ij}} \text{ (σχέση 8)}$$

Για τον συνδυασμό για τις ψευδοαποστάσεις L1 C/A και L2C, η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$P_{IF} = \frac{P_{L2C} - \gamma_{12} \cdot P_{L1C/A} + c(\text{ISC}_{L2C} - \gamma_{12} \cdot \text{ISC}_{L1C/A})}{1 - \gamma_{12}} - c \cdot T_{GD} \text{ (σχέση 9)}$$

Σε περίπτωση διόρθωσης των πρωτογενών ψευδοαποστάσεων για τους όρους των T_{GD} και ISC, η παραπάνω σχέση παίρνει τη μορφή:

$$P_{IF} = \frac{P_{Ljy} - \gamma_{ij} \cdot P_{Lix}}{1 - \gamma_{ij}} \quad (\text{σχέση 10})$$

Η εξίσωση της παρατήρησης ψευδοαπόστασης P_{IF} ελεύθερης ιονόσφαιρας αλλά επίσης και αυξημένου θόρυβου ο οποίος είναι τριπλάσιος για ψευδοαποστάσεις $P(Y)$ είναι:

$$P_{IF} = \rho + c\delta_R - C\delta^S + T + e_{P_{if}} \quad (\text{σχέση 11})$$

Η αντίστοιχη εξίσωση της πρωτογενούς ψευδοαπόστασης, μπορεί να γραφεί και στην ακόλουθη μορφή:

$$P = P_{IF} + I_P + e_P \quad (\text{σχέση 12})$$

Εάν επανέλθουμε στις παρακάτω εκτιμήσεις σχετικά με το ιονοσφαιρικό σφάλμα από ψευδοαποστάσεις, οφείλουμε να παρατηρήσουμε ότι παρουσιάζεται αβεβαιότητα περίπου δύο φορές μεγαλύτερη συγκριτικά με την αβεβαιότητα που παρουσιάζεται στην ψευδοαπόσταση, εφαρμογή νόμου μετάδοσης σφαλμάτων. Όμως τυπικά η εκτίμησή τους βελτιώνει σημαντικά τον προσδιορισμό της θέσης σε επίπεδο μερικών μέτρων μαζί με το θόρυβο και πιθανώς το σφάλμα πολυανάκλασης, τυπικά είναι 1m χωρίς πολυανάκλαση. Η τρίτη συχνότητα L5 στην οποία περιέχονται τα αντίστοιχα πολιτικά σήματα μπορεί να ενισχύσει ακόμα καλύτερα τον προσδιορισμό ιονοσφαιρικού σφάλματος και όλη την αλγοριθμική διαδικασία του προβλήματος του προσδιορισμού θέσης. Με παρόμοιο τρόπο με τους κώδικες, για να υπολογίσουμε την ιονοσφαιρική καθυστέρηση από τις ακριβείς μετρήσεις φάσης ή ψευδοαποστάσεις από φάσεις, από έναν δέκτη προς τον ίδιο δορυφόρο, θα έχουμε τις σχέσεις:

$$L_{Li} = \rho + c(\delta_A - \delta^i) - I_{Li} + T + \lambda_{Li} n_{Li} + \varepsilon_{Li} \quad (\text{σχέση 13})$$

$$L_{Lj} = \rho + c(\delta_A - \delta^j) - I_{Lj} + T + \lambda_{Lj} n_{Lj} + \varepsilon_{Lj} \quad (\text{σχέση 14})$$

Εάν πάρουμε ξανά τη διαφορά ΔL και αν αγνοήσουμε το θόρυβο, θα έχουμε:

$$\Delta L = - (I_{Li} - I_{Lj}) + (\lambda_i n_i - \lambda_j n_j) = - (1 - \gamma_{ij}) I_{Li} + (\lambda_i n_i - \lambda_j n_j) \quad (\text{σχέση 15}) \quad \eta$$

$$L_{Li} = \frac{I_{Li} - I_{Lj} - (\lambda_i n_i - \lambda_j n_j)}{\gamma_{ij} - 1} = \frac{\lambda_i (\varphi_{Li} - n_i) - \lambda_j (\varphi_{Lj} - n_j)}{\gamma_{ij} - 1} = \frac{I_{Li} - I_{Lj}}{\gamma_{ij} - 1} - \frac{\lambda_i n_i - \lambda_j n_j}{\gamma_{ij} - 1} = \frac{\lambda_i \varphi_{Li} - \lambda_j \varphi_{Lj}}{\gamma_{ij} - 1} - \frac{\lambda_i n_i - \lambda_j n_j}{\gamma_{ij} - 1}$$

(σχέση 16)

$$\text{όπου } \frac{1}{\gamma_{ij} - 1} = \frac{f_j^2}{f_i^2 - f_j^2}$$

Βλέπουμε ότι ενώ έχουμε στη διάθεσή μας τη διαφορά των φάσεων εκφραζόμενες σε μονάδες απόστασης υψηλής ακριβείας, δηλαδή με πολύ χαμηλότερο σφάλμα πολυανάκλασης και πολύ λιγότερο θόρυβο σε σχέση με τις παρατηρήσεις κώδικα (περίπου 100 φορές) υπάρχει όμως το πρόβλημα των αγνώστων ασαφειών n_i , n_j . Σε περίπτωση που δεν χαθεί το σήμα δηλαδή σε περίπτωση που δεν υπάρχουν κύκλοι ολίσθησης, παραμένουν σταθερές οι ασάφειες και η εκτίμηση της διαφοράς μεταξύ των διαδοχικών εποχών μέτρησης, μας δίνει το σχετικό ιονοσφαιρικό σφάλμα (differential delay). Αυτή η σχετική διαφορά μπορεί να υπολογιστεί με αβεβαιότητα της τάξης του 1cm και είναι ικανή για την σημαντική εξομάλυνση των παραπάνω απόλυτων ιονοσφαιρικών καθυστερήσεων από τους κώδικες (carrier smoothing of code measurements), κάτι το οποίο φαίνεται να είναι αρκετά χρήσιμο και για τη βελτίωση της ακρίβειας του απόλυτου προσδιορισμού της θέσης σε πραγματικό χρόνο.

Κατά το σχετικό προσδιορισμό θέσης με παρουσία δεκτών διπλής συχνότητας, τα ιονοσφαιρικά σφάλματα που έχουν απομείνει από τις διπλές διαφορές απαλείφονται χάρη στη δυνατότητα χρήσης κατάλληλων γραμμικών συνδυασμών των παρατηρήσεων ή και στην δυνατότητα χρήσης μοντέλων ιονόσφαιρας, ακόμα και αν οι αποστάσεις είναι μεγάλες.

3.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΙΟΝΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ Η TEC.

Εκτός από το ότι η χρήση μετρήσεων κώδικα ή και φάσης σε δύο φορείς μπορεί να προσφέρει σημαντική αύξηση της ακρίβειας, η ακριβής εκτίμηση του ιονοσφαιρικού σφάλματος μπορεί να προσφέρει ένα ισχυρό μέσο και για την εκτίμηση της ποσότητας TEC, που είναι αρκετά χρήσιμη για τη μελέτη της ιονόσφαιρας και από άλλους σχετικούς επιστημονικούς κλάδους. Η ακριβής εκτίμηση μπορεί να γίνει με τη βοήθεια μιας περιοδικά επαναλαμβανόμενης μεθόδου εξομάλυνσης των ψευδοαποστάσεων κώδικα από φάσεις – και κατά συνέπεια εκτίμησης της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης- ή ισοδύναμα σε απευθείας εξομάλυνση των ιονοσφαιρικών καθυστερήσεων κώδικα από τις αντίστοιχες καθυστερήσεις φάσης.

Σύμφωνα λοιπόν με τις παραπάνω εξισώσεις, ο υπολογισμός του ιονοσφαιρικού σφάλματος (ή του TEC, TECU) μπορεί να γίνει με βάση τις μετρήσεις ψευδοαποστάσεων προς τον ίδιο δορυφόρο σε δύο φορείς L_i και L_j , έστω L_1 και L_2 , δηλαδή,

$$I_P = I_{P1} - \frac{P_1 - P_2}{(\gamma - 1)} \quad (\text{σχέση 17})$$

όπου θεωρούμε ότι οι ψευδοαποστάσεις έχουν διορθωθεί για τις διάφορες καθυστερήσεις (ISC) και ότι το σφάλμα πολυανάκλασης δεν υπάρχει (ελέγχεται σε προηγούμενο βήμα). Όμως η αβεβαιότητα ή ο θόρυβος στον υπολογισμό του I_P είναι σχεδόν διπλάσιος από το θόρυβο της ψευδοαπόστασης και έτσι ο υπολογισμός του ιονοσφαιρικού σφάλματος δεν είναι ακριβής για εφαρμογές ανάλογης ακρίβειας. Αντίθετα, ο υπολογισμός του ιονοσφαιρικού σφάλματος με βάση τις ψευδοαποστάσεις (L_1, L_2) από φάση ή ισοδύναμα από τις φάσεις (φ_1, φ_2) σε κύκλους, είναι ακριβής, αρκεί να «απαλλαγούμε» από τον άγνωστο όρο των ασαφειών.

Ξαναγράφοντας τη σχετική εξίσωση,

$$I_L = I_{L1} = \frac{L_1 - L_2}{\gamma - 1} - \frac{\lambda_1 n_1 - \lambda_2 n_2}{\gamma - 1} = \frac{\lambda_1 \varphi_1 - \lambda_2 \varphi_2}{\gamma - 1} - \frac{\lambda_1 n_1 - \lambda_2 n_2}{\gamma - 1} \quad (\text{σχέση 18})$$

Και κατανοώντας ότι ο όρος των ασαφειών παραμένει σταθερός στο χρόνο, εφόσον δεν υπάρχει απώλεια σήματος, η ακριβής μεταβολή του ιονοσφαιρικού σφάλματος I_L (της τάξης του cm) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σημαντική βελτίωση του I_P , με τη βοήθεια τεχνικών εξομάλυνσης.

3.4 ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗ ΤΗΣ ΙΟΝΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΑΠΟ ΚΩΔΙΚΑ.

Με βάση τις ακριβέστερες εκτιμήσεις της σχετικής ιονοσφαιρικής καθυστέρησης από φάση μεταξύ διαδοχικών εποχών, οι χαμηλότερης ακρίβειας απόλυτες εκτιμήσεις από κώδικα σε δύο συχνότητες εξομαλύνονται – βελτιώνονται ως προς την ακρίβεια, σύμφωνα με το γνωστό, περιοδικά επαναλαμβανόμενο αλγόριθμο του Hatch (1982),

$$\bar{I}_P(t_K) = w_K I_P(t_K) + (1 - w_K) [\bar{I}_P(t_{K-1}) + (I_L(t_K) - I_L(t_{K-1}))] \quad (\text{σχέση 19})$$

όπου $w_K = \frac{1}{k}$, $k=1,2,\dots,N$, N ο αριθμός των εποχών μέτρησης και το σύμβολο (-) να δηλώνει τις εξομαλυμένες τιμές.

Για την πρώτη εποχή μέτρησης $k=1$ θέτουμε $w=1$, οπότε $(1-w)=0$ και άρα $\bar{I}_P(t_K) = I_P(t_K)$. Οι θετικές τιμές w και $(1-w)$ λειτουργούν ως βάρη. Όσο αυξάνουν οι εποχές, το βάρος των $I_L(t_K)$. Ο αλγόριθμος ενδείκνυται για εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο, όπου ένας λογικός αριθμός εποχών χωρίς απώλεια σήματος, της τάξης των 80 έως 100 εποχών ανά 1 sec, αρκεί για ικανοποιητική εκτίμηση, τυπικά της τάξης των μερικών cm εφόσον δεν υπάρχει σημαντικό σφάλμα πολυανάκλασης. Σε περίπτωση απώλειας κύκλων ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται για το επόμενο διάστημα από την αρχή. Έτσι κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου πρέπει να

γίνεται έλεγχος για πιθανά σφάλματα ολίσθησης. Μια μεγαλύτερη μεταβολή στις τιμές $I_L(t_k)$ από τη μεταβολή στις αντίστοιχες τιμές $I_P(t_k)$ ανιχνεύει κύκλους ολίσθησης. Θέτοντας ένα όριο π.χ. μερικούς κύκλους ή μερικές δεκάδες κύκλους, εάν ανιχνευθεί απώλεια σήματος, ο αλγόριθμος ξεκινά από την αρχή.

Ο παραπάνω αλγόριθμος βασίζεται στην ιδέα ότι η μεταβολή των ιονοσφαιρικών σφαλμάτων (ισοδύναμα των ψευδοαποστάσεων) από κώδικα και από φάση είναι θεωρητικά μεταξύ ίδια και ότι πρακτικά, λόγω του θορύβου, οι τιμές από κώδικα είναι σημαντικά χαμηλότερης ακρίβειας και άρα πρέπει να βελτιωθούν. Επειδή όμως η μικρή ιονοσφαιρική μεταβολή από κώδικα έχει διαφορετικό πρόσημο από την αντίστοιχη μεταβολή απόφαση, η συνολική περίοδος των παραπάνω εποχών δεν θα πρέπει να είναι μεγάλη διότι η απόκλιση μεταξύ των δύο μεταβολών αυξάνει. Έτσι ένα διάστημα των 100 περίπου εποχών είναι ένα λογικό διάστημα επιλογής. Στην πραγματικότητα οι εξομαλυμένες τιμές βασίζονται στη διόρθωση των τρεχουσών τιμών με βάση το μέσο όρο των προηγούμενων διαφορών μεταξύ κώδικα και φάσης.

Ένας παρόμοιος αλγόριθμος βασίζεται στις σχέσεις,

$$\Delta \bar{I}_P(t_k) = w_K [I_P(t_k) - (I_L(t_k))] + (1-w_K)\Delta \bar{I}_P(t_{k-1}) \quad (\text{σχέση 20})$$

$$\bar{I}_P(t_k) = I_L(t_k) + \Delta \bar{I}_P(t_k) \quad (\text{σχέση 21})$$

Μια τρίτη παρόμοια επιλογή αλγορίθμου, που δεν απαιτεί περιοδικές επαναλήψεις και είναι χρήσιμη για επεξεργασία εκ των υστέρων, με πολύωρη περίοδο μετρήσεων, βασίζεται στη σχέση,

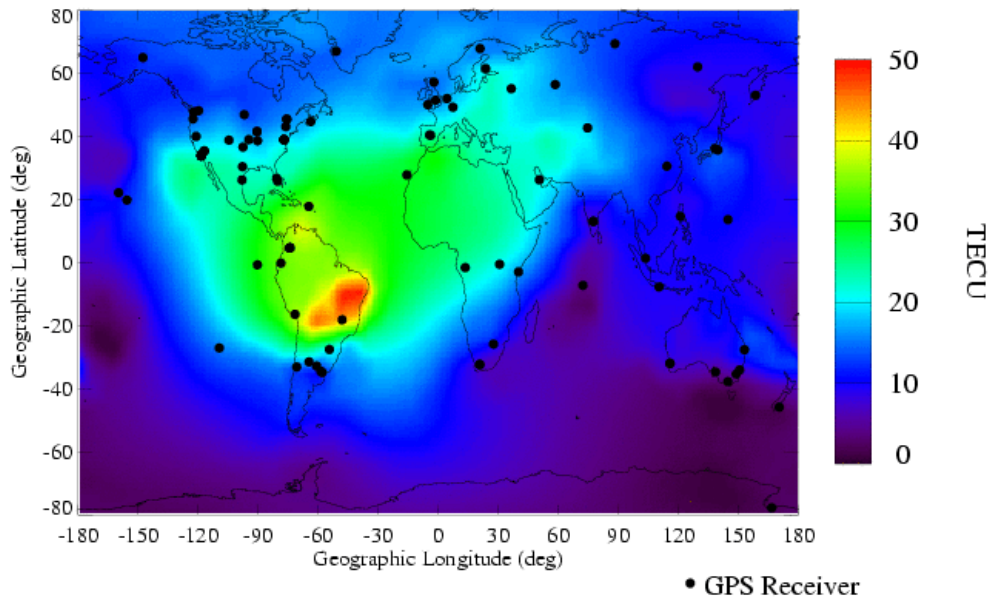
$$\bar{I}_P(t_k) = I_L(t_k) - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [I_P(t_k) - I_L(t_k)] \quad (\text{σχέση 22})$$

όπου το φίλτρο της εξομάλυνσης είναι ο μέσος όρος των διαφορών των αντιστοιχών ιονοσφαιρικών καθυστερήσεων.

Στα περιφερειακά και παγκόσμια δίκτυα η ιονόσφαιρα αποτελεί την κύρια πηγή σφαλμάτων και η σωστή μοντελοποίησή της αποτελεί κρίσιμο σημείο. Τα λογισμικά GPS χρησιμοποιούν διάφορα ιονοσφαιρικά μοντέλα, τοπικά ή περιφερειακά και παγκόσμια, ανάλογα με το μήκος των βάσεων GPS.

05/18/11
15:50 UT

Ionospheric TEC Map



Wed May 18 08:52:09 2011

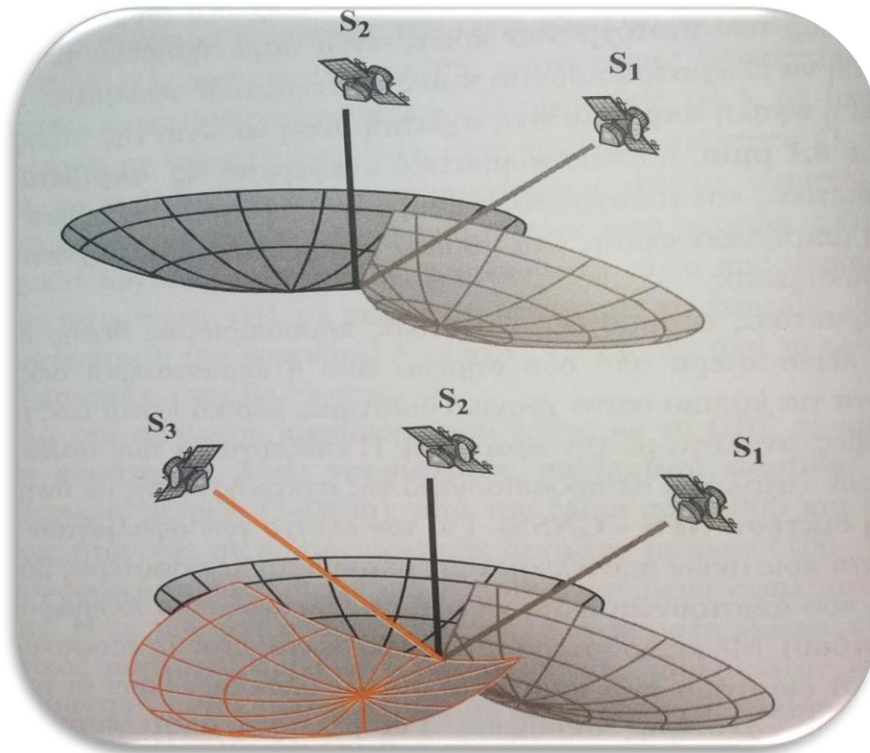
Σχήμα 2: ιονοσφαιρικός χάρτης για την Ευρώπη

Στο σχήμα 2 φαίνεται ενδεικτικά η ιονοσφαιρική κατάσταση για κάποια συγκεκριμένη ώρα και ημερομηνία στην Ευρώπη. Η χρήση χαρτών ιονόσφαιρας βοηθά τους χρήστες GPS να γνωρίζουν την τρέχουσα ιονοσφαιρική δραστηριότητα, ακόμα και για την πλοήγηση, όπου μετά την άρση της επιλεκτικής διαθεσιμότητας η ιονόσφαιρα αποτελεί τη σημαντικότερη πηγή σφαλμάτων στον προσδιορισμό θέσης. Εάν η ιονοσφαιρική καθυστέρηση δεν ληφθεί υπόψη οι βάσεις GPS κατά το σχετικό προσδιορισμό θέσης θα εμφανίζουν σφάλμα κλίμακας ανάλογα με το μέγεθος του σφάλματος.

3.5 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ

Ο απόλυτος προσδιορισμός θέσης μπορεί να συγκριθεί με μια πλευρική οπισθοτομία στο χώρο όπου τα γνωστά σημεία είναι οι δορυφόροι, ως τριγωνομετρικά σημεία σε τροχιά, τα άγνωστα σημεία οι δέκτες GPS και παρατηρήσεις οι αποστάσεις μεταξύ δεκτών και δορυφόρων. Ας υποθέσουμε προς στιγμή ότι τα ρολόγια των δεκτών και των δορυφόρων είναι τέλεια συγχρονισμένα ως προς την ενιαία κλίμακα χρόνου του GPS, άρα και μεταξύ τους. Τότε η θέση του δέκτη, σε κάθε χρονική στιγμή, ορίζεται γεωμετρικά από την τομή τριών

σφαιρών με κέντρα τους αντίστοιχους δορυφόρους και ακτίνες της μετρηθείσες αποστάσεις. Από την τομή δύο σφαιρών προκύπτει μια καμπύλη (κύκλος) ,ενώ από την τομή της καμπύλης με την τρίτη σφαίρα προκύπτουν γενικά δύο σημεία, ένα εκ των οποίων είναι το ζητούμενο, εκείνο που βρίσκεται κοντά στη γή και είναι εύκολα εντοπίσιμο (το άλλο απέχει πάρα πολύ).(Εικόνα 1)



Εικόνα 2. Γεωμετρική ερμηνεία απόλυτου προσδιορισμού θέσης.

Είναι προφανές ότι απαιτούνται τρεις ταυτόχρονες παρατηρήσεις αποστάσεων, όσες δηλαδή και οι άγνωστες συντεταγμένες (X,Y,Z) που εκφράζουν τη θέση στο χώρο. Στην πραγματικότητα τα ρολόγια των δορυφόρων και των δεκτών ποτέ δεν είναι τέλεια συγχρονισμένα και συνεπώς υπάρχουν πάντοτε συστηματικά σφάλματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Υπενθυμίζεται ότι ένα πολύ μικρό σφάλμα συγχρονισμού π.χ. της τάξης του ενός εκατομμυριοστού του δευτερολέπτου ($1 \mu s$) ισοδυναμεί με σφάλμα 300 m στη μέτρηση μιας απόστασης. Αν και το σημαντικό σφάλμα του ρολογιού του δορυφόρου υπολογίζεται από τον δέκτη με βάση την πληροφορία του μηνύματος πλοήγησης (μοντέλο πρόγνωσης) ή και εκ των υστέρων από ακριβέστερες παραμέτρους, το επίσης σημαντικό σφάλμα του ρολογιού του δέκτη παραμένει άγνωστο. Έτσι στο πρόβλημα του απόλυτου προσδιορισμού

θέσης υπεισέρχεται και μια επιπλέον άγνωστη παράμετρος, η διόρθωση του χρόνου του δέκτη ως προς την κλίμακα του GPS, με αποτέλεσμα να υπάρχουν συνολικά 4 άγνωστες παράμετροι. Απαιτούνται λοιπόν τουλάχιστον 4 ταυτόχρονες παρατηρήσεις αποστάσεων προς 4 δορυφόρους αντιστοίχως. Αυτή είναι και η βασική αρχή πάνω στην οποία στηρίχθηκε ο σχεδιασμός του συστήματος GPS, δηλαδή η συνεχής εξυπηρέτηση των αναγκών της πλοήγησης σε παγκόσμια κλίμακα, όπου ο προσδιορισμός θέσης απαιτείται σε πραγματικό χρόνο. Παρόμοια, ο σχετικός προσδιορισμός θέσης μπορεί να συγκριθεί με ένα τριπλευρικό δίκτυο στο χώρο, όπου πάλι τα γνωστά σημεία είναι οι δορυφόροι, τα άγνωστα σημεία οι δέκτες GPS και παρατηρήσεις οι αποστάσεις μεταξύ δεκτών και δορυφόρων. Οι καρτεσιανές συντεταγμένες (X,Y,Z) ή ισοδύναμα οι πιο κατανοητές γεωδαιτικές συντεταγμένες (φ,λ,h)- (γαιωδευτικό πλάτος, γαιωδευτικό μήκος, γαιωδευτικό υψόμετρο) προσδιορίζονται αρχικά ως προς το WGS 84 αφού σε αυτό το σύστημα υπολογίζονται οι συντεταγμένες των δορυφόρων. Στη συνέχεια μπορούν να μετασχηματίζονται σε άλλα γαιωδευτικά συστήματα και τελικά στην πράξη σε επίπεδες προβολικές ή χαρτογραφικές συντεταγμένες (X,Y) ή (E,N) και σε ορθομετρικά υψόμετρα (H) ως προς το γαιωειδές (μέση στάθμη θάλασσας-επιφάνεια αναφοράς των ορθομετρικών υψομέτρων). Ενώ οι προβολικές καρτεσιανές συντεταγμένες υπολογίζονται συναρτήσει των (φ,λ) από γνωστές και ακριβείς εξισώσεις απεικόνισης, διατηρώντας έτσι την υψηλή ακρίβεια του GPS, το ίδιο δεν ισχύει και για τα ορθομετρικά υψόμετρα. Το γεωμετρικό (ελλειψοειδές) υψόμετρο (h) που δίνει το GPS μπορεί να μετατρέπεται σε ορθομετρικό (H) από τη γνωστή σχέση $H=h-N$, αρκεί να είναι γνωστό το υψόμετρο του γαιωειδούς (N). Σε αντίθεση με το ορθομετρικό υψόμετρο, το υψόμετρο του γαιωειδούς δεν είναι κατά κανόνα γνωστό με ικανοποιητική ακρίβεια. Για παράδειγμα, από χάρτες ή από παγκόσμια μοντέλα γαιωειδούς, όπως είναι το EGM96 ή το EGM08, τα υψόμετρα του γαιωειδούς υπολογίζονται με μια ακρίβεια της τάξης του μισού μέτρου ή λίγο καλύτερη. Για μεγαλύτερη ακρίβεια έως και μερικά εκατοστά του μέτρου, απαιτούνται τοπικά μοντέλα γαιωειδούς τα οποία προσδιορίζονται από μετρήσεις GPS σε σημεία με γνωστό ορθομετρικό υψόμετρο ή και σε συνδυασμό με μετρήσεις βαρύτητας, δυνατότητα που συνήθως δεν έχει ο απλός χρήστης.

Παρόλο που τα γεωμετρικά υψόμετρα, άρα και οι υψομετρικές τους διαφορές, προσδιορίζονται με ακρίβεια παρόμοια με αυτή της οριζόντιας θέσης (ελαφρώς χαμηλότερη), η σχετική ακρίβεια των ορθομετρικών υψομέτρων από μετρήσεις GPS δύσκολα πλησιάζει την υψηλή σχετική ακρίβεια της κλασικής γεωμετρικής χωροστάθμησης. Για τρέχουσες όμως εφαρμογές και για σχετικά μικρής έκτασης περιοχές, που δεν ξεπερνούν σε έκταση τα μερικά

χιλιόμετρα, ενδεικτικά της τάξης των $5 \times 5 \text{ km}^2$, με μετρήσεις GPS σε ορισμένα σημεία με γνωστά ορθομετρικά υψόμετρα και με απλές μεθόδους βέλτιστης προσαρμογής, ευκολότερα καταλήγουμε στο προσδιορισμό ορθομετρικών υψομέτρων με ακρίβεια της τάξης του 1 έως 5 cm. Για μεγαλύτερες εκτάσεις χρησιμοποιούμε ως επιφάνειες προσαρμογής πολυώνυμα ή σε συνδυασμό με μετρήσεις βαρύτητας, κατάλληλες μεθόδους παρεμβολής, για να οδηγηθούμε σε ακρίβειες ορθομετρικών υψομέτρων της τάξης των μερικών εκατοστών, κατάλληλες για αρκετές πρακτικές εφαρμογές, όπως είναι οι τοπογραφικές αποτυπώσεις.

Ένα δίκτυο GPS-GNSS δημιουργείται στην ουσία από το σύνολο των βάσεων που έχουν μετρηθεί με δύο ή συνήθως περισσότερους δέκτες π.χ. με τρεις δέκτες GPS που μετρούν ταυτόχρονα σε τρία σημεία του δικτύου σε κάθε μετρητική μέθοδο. Μέχρι να ολοκληρωθεί η μέτρηση όλου του δικτύου, γίνονται εναλλαγές των δεκτών στα διάφορα σημεία, διατηρώντας έναν αριθμό κοινών σημείων (1 έως 4 αν είχαμε περισσότερους δέκτες) μεταξύ των διαδοχικών μετρητικών περιόδων. Η συνόρθωση του δικτύου γίνεται στις τρεις διαστάσεις, στο σύστημα WGS84, και καταλήγει στο υψηλής ακρίβειας σχετικό προσδιορισμό του δικτύου, δηλαδή της γεωμετρικής του μορφής. Η απόλυτη ακρίβεια των συντεταγμένων ως προς το σύστημα αναφοράς είναι παρόμοια με την ακρίβεια του γνωστού ή των γνωστών σημείων του δικτύου κατά την συνόρθωση, όπου το σύστημα αναφοράς ορίζεται από τις δεσμεύσεις των γνωστών σημείων (επιλογή συντεταγμένων ως απολύτως γνωστών).

Στην πράξη ενδιαφέρει η ένταξη του δικτύου GPS στο ισχύον γαιωδαιτικό datum που είναι συνήθως τοπικό, για την Ελλάδα ενδιαφέρει η ένταξη του δικτύου GPS στο ΕΓΣΑ84 (Ελληνικό Γαιωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς του 1987). Δηλαδή ενδιαφέρει ο μετασχηματισμός των συντεταγμένων GPS σε συντεταγμένες του τοπικού συστήματος. Η ένταξη αυτή επιτυγχάνεται μέσω ενός μετασχηματισμού, συνήθως ομοιότητας ή και αφινικού, με βάση τα κοινά σημεία που έχουν συμπεριληφθεί στη μέτρηση των στοιχείων GPS. Το γνωστό ή τα γνωστά σημεία που συμπεριλαμβάνονται στο δίκτυο GPS μπορεί να είναι σημεία του γαιωδαιτικού datum μίας χώρας ή ακόμα κι ενός διεθνούς συστήματος αναφοράς ανάλογα με το σκοπό της εργασίας. Το δίκτυο GPS επιλύεται αρχικά έτσι ώστε να γίνει ο έλεγχος της εσωτερικής ακρίβειας και αξιοπιστίας (συνόρθωση με ελάχιστες δεσμεύσεις ή ως ελεύθερο) και στη συνέχεια μετασχηματίζεται ή εντάσσεται στο τοπικό σύστημα που μας ενδιαφέρει. Στο πλαίσιο μιας συνολικής μελέτης, όπως είναι μια τοπογραφική αποτύπωση/χαρτογράφηση, τα σημεία που εξαρτώνται από το δίκτυο, για παράδειγμα τα σημεία λεπτομερειών της αποτύπωσης, ακολουθούν την ίδια πορεία του μετασχηματισμού στο ισχύον datum και

προβολικό σύστημα, όπως και τα νεοϊδρυόμενα σημεία του δικτύου. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται στην Ελλάδα το σύστημα HEPOS (Hellenic Positioning System) της Κτιματολόγιο Α.Ε. αλλά και συστήματα ιδιωτικών εταιριών που παρέχουν υπηρεσίες προσδιορισμού θέσης και σε πραγματικό χρόνο μέσω των μόνιμων σταθμών τους. Τα συστήματα αυτά υλοποιούν ένα γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς (HTRS07) μέσω του οποίου ο χρήστης, και με έναν μόνο δέκτη, μετασχηματίζει τις συντεταγμένες του HTRS07 σε προβολικές συντεταγμένες ως προς το ΕΓΣΑ87 με αβεβαιότητα μερικών εκατοστών για όλη την Ελλάδα. Για το προσδιορισμό ορθομετρικών υψομέτρων δεν έχει ακόμα προσδιοριστεί ένα μοντέλο μετασχηματισμού για όλη την Ελλάδα που να εγγυάται ακρίβεια της τάξης των μερικών εκατοστών. Έτσι εναπόκειται στο χρήστη να προσδιορίσει ή να χρησιμοποιήσει ένα ικανοποιητικό τοπικό μοντέλο γεωειδούς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 ΓΕΩΜΑΤΙΚΗ (GEOMATICS ENGINEERING)

Με τον όρο Γεωματική ή Γεωματική Μηχανική (Geomatics engineering), εκφράζεται η επιστήμη που έχει ως αντικείμενο την συλλογή, καταγραφή, ανάλυση, διαχείριση και παρουσίαση γεωχωρικών πληροφοριών. **Η γεωματική μηχανική είναι ουσιαστικά, ο σύγχρονος όρος της επιστήμης της τοπογραφίας.** Περιέχει τις παραδοσιακές τεχνικές και μεθόδους συλλογής γεωπληροφοριών, σε συνδυασμό, με αξιοποίηση σύγχρονων τεχνολογιών και νέων μεθόδων, που αποσκοπούν στον ακριβή προσδιορισμό και την παρουσίαση χαρακτηριστικών του φυσικού και τεχνικού περιβάλλοντος. Επίσης, εξετάζονται οι χωρικές σχέσεις με τις οποίες συνδέονται τα διάφορα αυτά χαρακτηριστικά ανάλογα κάθε φορά με το σκοπό της μελέτης, με στόχο την διεξαγωγή των επιθυμητών συμπερασμάτων. Η γεωματική, εφαρμόζεται από τους τοπογράφους μηχανικούς και συντίθεται από επιμέρους επιστημονικά πεδία όπως :

- Γεωδαισία (κλασσική, φυσική, δορυφορική, τοπογραφία)
- Χαρτογραφία
- Φωτογραμμετρία
- Τηλεπισκόπηση
- Υδρογραφία
- Γεωπληροφορική

- Συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών (G.I.S.)
- Κτηματολόγιο
- Διαχείριση Γης και ακινήτων
- Γεω-Χωρική ανάλυση

4.2.ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ G.P.S ΣΤΗΝ ΓΑΙΩΜΑΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ

Τα G.P.S παρέχουν ανώτερες GNSS (Global Navigation Satellite Systems) δυνατότητες για την κάλυψη πλήρους εύρους τοπογραφικών εργασιών όπως χάραξη και αποτύπωση σε πραγματικό χρόνο, stop&go αποτύπωση, τριγωνισμό, πολυγωνομετρία και μέτρηση φωτοσταθερών. Επιπλέον, υποστηρίζουν πλήρως GIS εφαρμογές.Πιο συγκεκριμένα:

- Τοπογραφικές αποτυπώσεις για παραγωγή διαγραμμάτων μεγάλης κλίμακας και υψηλής ακρίβειας.
- Μετρήσεις υψηλής ακριβείας για έλεγχο καθιζήσεων και μικρομετακινήσεων.
- Αποτυπώσεις ακριβείας σε δυσχερείς θέσεις με ειδική διαμόρφωση όπως ειδικές εκσκαφές, κατακόρυφα πρηνή, σπήλαια κλπ.
- Αποτυπώσεις σηράγγων και υπόγειων έργων.
- Εφαρμογές κάθε μορφής τεχνικών έργων.
- Αρχιτεκτονικές αποτυπώσεις και αποτυπώσεις αρχαιολογικών χώρων, συνόλων και μνημείων.
- Εγκατάσταση υψηλής ακριβείας δικτύων οριζοντιογραφικού ελέγχου (τριγωνομετρικά δίκτυα και δίκτυα ειδικών χρήσεων).
- Αποτυπώσεις με χρήση δορυφορικών δεκτών – Τεχνική Real Time Kinematic.
- Εφαρμογές σύνθετων έργων με χρήση τεχνολογίας G.P.S.
- Εντοπισμός θέσεων, υλοποίηση ειδικών χαράξεων και καθοδήγηση σκαφών σε ποντίσεις αγωγών και καλωδίων.
- Εφαρμογές της τεχνολογίας G.P.S σε αεροφωτογραφήσεις για τον προσδιορισμό συντεταγμένων των κέντρων λήψης αεροφωτογραφιών και σε λήψεις αεροφωτογραφιών από προκαθορισμένες θέσεις (Pin Point Photography).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΜΕ ΤΟ GPS

5.1. ΑΠΟΛΥΤΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ

Με τον όρο απόλυτο προσδιορισμό θέσης (absolute positioning ,point positioning, single point positioning) εννοούμε τον προσδιορισμό των συντεταγμένων (X,Y,Z) ενός δέκτη από τις δικές του παρατηρήσεις. Για το G.P.S οι συντεταγμένες υπολογίζονται αρχικά στο WGS84 (World Geodetic System 1984 ,Παγκόσμιο γαιωδαιτικό σύστημα αναφοράς) και μπορούν να αναφέρονται στη συνέχεια σε ένα άλλο γαιωδαιτικό ή και προβολικό σύστημα αναφοράς σε πραγματικό χρόνο μέσω παραμέτρων μετασχηματισμού που εισάγονται στο δέκτη με χρήση κατάλληλου λογισμικού.

Η λύση πλοήγησης (navigation solution ,kinematic real time point positioning) είναι μια ειδική περίπτωση απόλυτου προσδιορισμού θέσης που αναφέρεται σε πραγματικό χρόνο και συνεπώς η θέση δίνεται σε κάθε εποχή μετρήσεων. Αν ο δέκτης παραμένει ακίνητος κατά τη διάρκεια των μετρήσεων (static point positioning) μπορούμε εκ των υστέρων να αξιοποιήσουμε όλες τις εποχές των παρατηρήσεων και να καταλήξουμε σε αποτελέσματα σημαντικά μεγάλης ακρίβειας.

Για τον απόλυτο προσδιορισμό θέσης χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο παρατηρήσεις ψευδοαποστάσεων από κώδικες, κυρίως από κώδικα C/A και σύντομα και από τους κώδικες νέων συστημάτων .Με τα νέα σήματα οι επιλογές αυξάνονται κατά πολύ και μάλιστα η ακρίβεια θα αυξηθεί τόσο σημαντικά ώστε θα είναι δυνατή η σχεδόν απολοιφή του ινοσφαιρικού σφάλματος. Επιπρόσθετες παρατηρήσεις από άλλα συστήματα GNSS, όπως GLONASS, αυξάνουν την ακρίβεια του προσδιορισμού της θέσης και του χρόνου.

Οι παρατηρήσεις φάσης ή ψευδοαποστάσεων από φάσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης και να βελτιώσουν την ακρίβεια. Συνήθως χρησιμοποιούνται για την εξομάλυνση των παρατηρήσεων κώδικα ή χρησιμοποιούνται μαζί με τις παρατηρήσεις κώδικα για τον εκ των υστέρων ακριβή προσδιορισμό θέσης. Από μόνες τους δεν χρησιμοποιούνται, επειδή στις περιπτώσεις απωλειών σήματος παρουσιάζονται προβλήματα στην επίλυση των ασαφειών φάσης με αποτέλεσμα η παροχή λύσης να καθίσταται ασταθής και αναξιόπιστη έως και επικίνδυνη για κάποιες εφαρμογές πραγματικού

χρόνου όπως στην αεροπλοΐα. Εάν είναι απαραίτητο να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία σε πραγματικό χρόνο, τότε αξιοποιούνται τα συνεργαζόμενα συστήματα SBAS όπως το EGNOS ή άλλες ισοδύναμες υπηρεσίες σε συνδυασμό με τις νέες δυνατότητες των συστημάτων GNSS και τη συνεργασία μεταξύ τους.

Με τη χρήση μόνο των ψευδοαποστάσεων από τους κώδικες PRN, η μέγιστη ακρίβεια που μπορεί να υπάρξει είναι της τάξης του θορύβου των ψευδοαποστάσεων (τυπικά 0.5-1 m) και μάλιστα με παρατηρήσεις δύο συχνοτήτων και επιπλέον με την προϋπόθεση ότι τα συστηματικά σφάλματα θα αντιμετωπιστούν ικανοποιητικά.

Η εξίσωση της ψευδοαπόστασης μεταξύ δέκτη A και δορυφόρου i με παρατηρήσεις στους κώδικες ,π.χ C/A , P(Y), L2C, L515, και L5Q5, αν θεωρήσουμε ότι αγνοείται το σφάλμα πολυανάκλασης και οι καθυστερήσεις εσωτερικά στον δέκτη ,ενώ οι καθυστερήσεις εσωτερικά στο δορυφόρο μπορούν να ληφθούν υπόψη, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$p_A^i = \rho_A^i + c\delta_A - c\delta^i + I_A^i + T_A^i + e_A^i =$$

$$\sqrt{(X^i - X_A)^2 + (Y^i - Y_A)^2 + (Z^i - Z_A)^2} + c\delta_A - c\delta^i + I_A^i + T_A^i + e_A^i \quad (\text{σχέση 23})$$

όπου η ψευδοαπόσταση p_A^i αναφέρεται σε κάποιον φορέα και κώδικα PRN, π.χ στον φορέα L1 και στον κώδικα C/A , που είναι και η πιο συνηθισμένη περίπτωση μέχρι σήμερα. Η σχέση (5.1) αποτελεί το βασικό μαθηματικό μοντέλο για τον απόλυτο προσδιορισμό θέσης. Είναι προφανές πως μπορούν να υπάρχουν ψευδοαποστάσεις ταυτόχρονα μόνο σε έναν ή και σε περισσότερους κώδικες. Παρατηρήσεις κώδικα σε μία ή δύο συχνότητες παρέχουν τη δυνατότητα της σχεδόν απολοιφής του ινοσφαιρικού σφάλματος. Παρατηρήσεις κώδικα σε μία ή δύο συχνότητες σε συνδυασμό με παρατηρήσεις φάσης μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντική βελτίωση της ακρίβειας.

Επίσης , η αντίστοιχη εξίσωση ψευδοαπόστασης από φάση μεταξύ δέκτη A και δορυφόρου i , αν αγνοηθεί το σφάλμα πολυανάκλασης , οι καθυστερήσεις εσωτερικά στο δέκτη και οι αρχικές φάσεις στο δορυφόρο και στο δέκτη γράφεται στη μορφή:

$$L_A^i = \rho_A^i + c\delta_A - c\delta^i - I_A^i + T_A^i + \lambda v_A^i + \varepsilon_A^i \quad (\text{σχέση 24})$$

5.2 ΑΠΟΛΥΤΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ. ΛΥΣΗ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ.

Η απαίτηση στην περίπτωση αυτή είναι ο προσδιορισμός της θέσης του δέκτη σε κάθε χρονική στιγμή, δηλαδή σε πραγματικό χρόνο, από ταυτόχρονες παρατηρήσεις προς S δορυφόρους και με βάση την εκπεμπόμενη δορυφορική εφημερίδα.

Παρατηρούμε ότι η εξίσωση είναι μη γραμμική ως προς τις άγνωστες συντεταγμένες του δέκτη. Οι άγνωστες παράμετροι (m σε πλήθος) είναι οι τρεις συντεταγμένες του δέκτη (X, Y, Z), το σφάλμα του ρολογιού του δέκτη και το σφάλμα του ρολογιού του κάθε δορυφόρου. Δηλαδή, σε κάθε εποχή παρατήρησης έχουμε συνολικά, $m=(3+1+S)=4+S$ άγνωστες παραμέτρους.

Το ιονοσφαιρικό σφάλμα υπολογίζεται από ένα σύνθετο μοντέλο που περιέχεται στο μήνυμα ναυσιπλοΐας (οκτώ ιονοσφαιρικοί συντελεστές) σε ποσοστό συνήθως 50% έως 70% του συνολικού σφάλματος. Επίσης, το τροποσφαιρικό σφάλμα υπολογίζεται από τα συνήθη τυπικά μοντέλα τροπόσφαιρας με ικανοποιητική ακρίβεια. Ο αριθμός των παρατηρήσεων είναι $n = S < m$ και συνεπώς υπάρχουν πάντοτε περισσότερες άγνωστες παράμετροι από τις παρατηρήσεις (θεωρητικά έχουμε άπειρες λύσεις). Όμως το σφάλμα του ρολογιού του κάθε δορυφόρου μπορεί να υπολογιστεί με βάση τις εκπεμπόμενες χρονικές παραμέτρους (ό,τι απομένει θεωρείται αμελητέο για τη λύση πλοήγησης) και να θεωρηθεί έτσι γνωστό στην εξίσωση παρατήρησης (υπολογίζεται δηλαδή ο όρος cd'). Τελικά, οι άγνωστες παράμετροι είναι τέσσερις, $m=4$, και εφόσον ο δέκτης λαμβάνει ταυτόχρονα **τουλάχιστον 4 δορυφόρους**, δηλαδή $S \geq 4$, έχουμε λύση στο πρόβλημα και μάλιστα έχουμε πρόβλημα συνόρθωσης παρατηρήσεων όταν $S > 4$ (μέθοδος εξισώσεων παρατηρήσεων, βέλτιστη εκτίμηση παρατηρήσεων).

Παίρνοντας λοιπόν τέσσερις μη γραμμικές εξισώσεις ψευδοαποστάσεων θα μπορούσαμε να προσδιορίσουμε τις τέσσερις άγνωστες παραμέτρους (με κατάλληλες αλγεβρικές μεθόδους επίλυσης μη γραμμικών συστημάτων). Παλαιότερα οι δέκτες έκαναν μία καλή επιλογή τεσσάρων δορυφόρων όταν αυτοί ήταν περισσότεροι, σύμφωνα με κάποια κριτήρια π.χ. να μη βρίσκονται κοντά στον ορίζοντα, να μη βρίσκονται περίπου στο ίδιο επίπεδο, για να αποφευχθούν προβλήματα επικίνδυνης ή μη αξιόπιστης λύσης εξαιτίας κάποιας ιδιάζουσας γεωμετρίας. Με τη συνεχή αλλαγή της θέσης των δορυφόρων και κυρίως με την εύκολη πλέον λήψη περισσότερων των τεσσάρων δορυφόρων οι επικίνδυνες περιπτώσεις είναι σπάνιες.

Οι σύγχρονοι δέκτες χρησιμοποιούν τις ψευδοαποστάσεις από όλους τους δορυφόρους που λαμβάνουν και προσδιορίζουν τη βέλτιστη λύση (λύση με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια στο πλαίσιο των διαθέσιμων παρατηρήσεων) σύμφωνα με το κριτήριο ελαχίστων τετραγώνων και ειδικότερα εφαρμόζοντας τη συνόρθωση με τη μέθοδο των εξισώσεων παρατηρήσεων ή μέθοδο των παραμέτρων.

Ας θεωρήσουμε λοιπόν ότι έχουν υπολογιστεί τα παραπάνω σφάλματα, οπότε οι διορθωμένες ψευδοαποστάσεις θα είναι

$$P_A^i = \rho_A^i + c\delta_A + e_A^i = \sqrt{(X^i - X_A)^2 + (Y^i - Y_A)^2 + (Z^i - Z_A)^2} + c\delta_A + e_A^i \text{ (σχέση 25)}$$

Όπου έγινε η αντικατάσταση $P_A^i \rightarrow P_A^i - (-c\delta^i + I_A^i + T_A^i)$ και χρησιμοποιήθηκε το ίδιο σύμβολο e_A^i για τα εναπομείναντα σφάλματα και θόρυβο (μέγεθος μερικά μέτρα), που τα θεωρούμε ως τυχαία σφάλματα.

Σημειώνουμε ότι για τους χρήστες μιας συχνότητας, στον υπολογισμό του δορυφορικού σφάλματος δ^i έχουν ληφθεί υπόψη και οι καθυστερήσεις T_{GD} , ISC , σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν για την ψευδοαπόσταση Lix , η διόρθωση δ^i (πολυώνυμο και σχετικιστική διόρθωση) θα διορθωθεί επιπλέον σύμφωνα με την αντικατάσταση $\delta^i \rightarrow \delta^i - T_{GD} + ISC_{Lix}$.

Για τους χρήστες δύο συχνοτήτων π.χ. ψευδοαποστάσεις C/A στην $L1$ και $L2C$ στην $L2$ ή $P(Y)$ στην $L1$ και $P(Y)$ στην $L2$, θα μπορούσε η διόρθωση να γίνει μέσω του υπολογισμού του ιονοσφαιρικού σφάλματος και της αφαίρεσής του από τις αντίστοιχες παρατηρήσεις. Είναι όμως πιο απλό και αποτελεσματικό να χρησιμοποιείται ο γραμμικός συνδυασμός των ψευδοαποστάσεων που είναι απαλλαγμένος του ιονοσφαιρικού σφάλματος (iono-free pseudo range), δηλαδή,

$$P_{A,IF}^i = \frac{P_{Ljy} - \gamma_{ij}P_{Lix} + c(ISC_{Ljy} - \gamma_{ij}ISC_{Lix})}{1 - \gamma_{ij}} - cT_{GD} \text{ (σχέση 26)}$$

Οπότε η αντίστοιχη εξίσωση παρατήρησης θα είναι,

$$P_{A,IF}^i = \rho_A^i + c\delta_A + e_A^i = \sqrt{(X^i - X_A)^2 + (Y^i - Y_A)^2 + (Z^i - Z_A)^2} + c\delta_A + e_A^i \text{ (σχέση 27)}$$

Παρακάτω θα χρησιμοποιούμε τον ίδιο συμβολισμό για την ψευδοαπόσταση είτε αφορά το συνδυασμό ελεύθερο ιονόσφαιρας είτε τις πρωτογενείς παρατηρήσεις, διορθωμένες ή όχι για τα διάφορα συστηματικά σφάλματα.

Θέτοντας στην παρακάτω εξίσωση ως άγνωστη παράμετρο το γινόμενο $d = c\delta_A$ αντί του δ_A (για υπολογιστικούς λόγους, χωρίς να είναι απαραίτητο), τότε σύμφωνα με τη μέθοδο των εξισώσεων παρατηρήσεων το γραμμικό σύστημα $\mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{v}$, γράφεται αναλυτικά,

$$\begin{bmatrix} P_A^1 - (P_A^1)^0 \\ P_A^2 - (P_A^2)^0 \\ P_A^S - (P_A^S)^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X^1 - X_A^0}{(\rho_A^1)^0} & -\frac{Y^1 - Y_A^0}{(\rho_A^1)^0} & -\frac{Z^1 - Z_A^0}{(\rho_A^1)^0} & 1 \\ \frac{X^2 - X_A^0}{(\rho_A^2)^0} & -\frac{Y^2 - Y_A^0}{(\rho_A^2)^0} & -\frac{Z^2 - Z_A^0}{(\rho_A^2)^0} & 1 \\ \frac{X^S - X_A^0}{(\rho_A^S)^0} & -\frac{Y^S - Y_A^0}{(\rho_A^S)^0} & -\frac{Z^S - Z_A^0}{(\rho_A^S)^0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta X_A \\ \delta Y_A \\ \delta Z_A \\ \delta d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A^1 \\ e_A^2 \\ e_A^S \end{bmatrix}$$

Όπου \mathbf{A} ο πίνακας σχεδιασμού-πίνακας μερικών παραγώγων των παρατηρούμενων ψευδοαποστάσεων ως προς τις άγνωστες παραμέτρους \mathbf{x}, \mathbf{v} τα τυχαία σφάλματα \mathbf{b} οι ανηγμένες παρατηρήσεις.

$(X_A \ Y_A \ Z_A)$ οι συντεταγμένες του δέκτη A ,

$(X^i \ Y^i \ Z^i)$ οι συντεταγμένες του δορυφόρου i ,

$\mathbf{x}^0 = [X_A^0 \ Y_A^0 \ Z_A^0]^T$ οι προσεγγιστικές συντεταγμένες του δέκτη,

$\mathbf{X} = [\delta X_A \ \delta Y_A \ \delta Z_A]^T$ οι διορθώσεις των προσεγγιστικών τιμών,

$(\rho^i)^0 = \sqrt{(X^i - X_A)^2 + (Y^i - Y_A)^2 + (Z^i - Z_A)^2}$ η προσεγγιστική γεωμετρική απόσταση μεταξύ δέκτη και κάθε δορυφόρου,

$(P_A^i)^0 = (\rho^i)^0 + d^0$ η προσεγγιστική ψευδοαπόσταση μεταξύ δέκτη και κάθε δορυφόρου και

$d^0 = c\delta_A^0$ το προσεγγιστικό σφάλμα του ρολογιού του δέκτη σε μονάδες απόστασης.

Συνήθως οι παρατηρήσεις των ψευδοαποστάσεων θεωρούνται ασυσχέτιστες μεταξύ τους και της ίδιας ακρίβειας σ^2 , οπότε ο πίνακας συμμεταβλητοτήτων τους θα είναι $\mathbf{C} = \sigma^2 \mathbf{I}$ και μπορεί για τον υπολογισμό των εκτιμήσεων να χρησιμοποιηθεί ο πίνακας βάρους $\mathbf{P} = \mathbf{1}$. Η σ^2 ως μια a-priori μεταβλητότητα αναφοράς εκφράζει ένα μέτρο της ακρίβειας των σφαλμάτων του μοντέλου και ποικίλει ανάλογα με την μοντελοποίηση των συστηματικών σφαλμάτων και το θόρυβο των μετρήσεων (τυπικά $< 5\text{m}$). Η (σ) είναι γνωστή και ως **USERE** (User Equivalent Range Error).

Οι βέλτιστες εκτιμήσεις των διορθώσεων των προσεγγιστικών τιμών των αγνώστων θα δίνονται από τις σχέσεις (**συνόρθωση** με εφαρμογή του κριτηρίου ελαχίστων τετραγώνων),

$$\hat{x} = [\delta \hat{X}_A \ \delta \hat{Y}_A \ \delta \hat{Z}_A \ \delta \hat{d}]^T = (A^T P A)^{-1} A^T P b = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (\text{σχέση 28})$$

$$\hat{X}_A = X_A^0 + \delta \hat{X}_A, \hat{Y}_A = Y_A^0 + \delta \hat{Y}_A, \hat{Z}_A = Z_A^0 + \delta \hat{Z}_A, \hat{d} = d^0 + \delta \hat{d} \quad (\text{σχέση 29})$$

Ενώ η εκτίμηση του σφάλματος του ρολογιού του δέκτη σε sec, θα είναι,

$$\hat{\delta}_A = \hat{d}/c. \quad (\text{σχέση 30})$$

Ο αλγόριθμος απαιτεί μια **επαναληπτική διαδικασία**, με συνήθως 2 έως 4 επαναλήψεις. Ξεκινάμε με προσεγγιστικές τιμές των συντεταγμένων του δέκτη, π.χ. ίσες με το μηδέν (σαν να ταυτίζεται με το γεώκεντρο) και επίσης $d^0 = 0$ (δηλαδή $\delta_A = 0$). Από τις διορθωμένες ψευδοαποστάσεις λόγω των σφαλμάτων των ρολογιών των δορυφόρων και των ατμοσφαιρικών σφαλμάτων, υπολογίζονται για κάθε δορυφόρο αρχικές εκτιμήσεις για τους χρόνους ταξιδιού $\tau = P_A^i/c$ (θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε και μία τιμή της τάξης των 0,75 sec). Για τους αντίστοιχους χρόνους εκπομπής $t^i = t_A$ -τα υπολογίζονται οι συντεταγμένες των δορυφόρων οι οποίες μετασχηματίζονται στο επίγειο σύστημα της αποχής λήψης $t = t_A - \delta_A$. Η λύση που προκύπτει από την εφαρμογή του αλγορίθμου της συνόρθωσης αναθεωρείται πάλι (επανάληψη της συνόρθωσης) μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση, θέτοντας ένα λογικό όριο σύγκλισης. Για παράδειγμα στη δεύτερη λύση-επανάληψη ως προσεγγιστικές τιμές των αγνώστων παραμέτρων λαμβάνονται οι εκτιμήσεις της προηγούμενης (πρώτης) λύσης. Στη συνέχεια, για να προχωρήσουμε στην Τρίτη λύση-επανάληψη (αν δεν έχει επιτευχθεί σύγκλιση), διορθώνεται ο χρόνος λήψης του δέκτη t_A ($t = t_A - \delta_A$), οι χρόνοι ταξιδιού $\tau = \tau_0 = \rho_A^i(t, t - \tau_0)/c$, όπου στο εξής χρησιμοποιούμε τις γεωμετρικές αποστάσεις ρ_A^i με βάση τις διορθωμένες συντεταγμένες του δέκτη και τις συντεταγμένες του δορυφόρου που είχαμε ήδη, οι χρόνοι εκπομπής και οι συντεταγμένες των δορυφόρων (που μετασχηματίζονται πάντα στο χρόνο λήψης). Με αυτά τα δεδομένα εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο της συνόρθωσης και συνεχίζουμε παρόμοια μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση.

Προηγουμένως χρησιμοποιήθηκε ο συμβολισμός (τ_0) για να φανεί ότι ο χρόνος ταξιδιού (τ) προσεγγίζεται ικανοποιητικά από το χρόνο ταξιδιού (τ_0) στο κενό. Μάλιστα η αντίστοιχη σχέση θα μπορούσε να εφαρμοστεί επαναληπτικά από την αρχή με τη λογική που αναφέραμε παραπάνω, αν είχαμε κάποιες καλές αρχικές εκτιμήσεις για τις συντεταγμένες του δέκτη και το χρόνο λήψης.

Από τον αλγόριθμο της συνόρθωσης προκύπτει και ο πίνακας συμμεταβλητοτήτων των εκτιμήσεων των αγνώστων παραμέτρων, χρήσιμος για τον υπολογισμό μέτρων ακρίβειας,

$$C_{\hat{x}} = \begin{bmatrix} \sigma_{\hat{x}}^2 & \sigma_{\hat{x}\hat{y}} & \sigma_{\hat{x}\hat{z}} & \sigma_{\hat{x}\hat{d}} \\ & \sigma_{\hat{y}}^2 & \sigma_{\hat{y}\hat{z}} & \sigma_{\hat{y}\hat{d}} \\ & & \sigma_{\hat{z}}^2 & \sigma_{\hat{z}\hat{d}} \\ \text{συμ.} & & & \sigma_{\hat{d}}^2 \end{bmatrix} \quad (\text{σχέση 31})$$

$$C_{\hat{x}} = \sigma^2 (A^T A)^{-1} = \sigma^2 N^{-1} = \sigma^2 Q_{\hat{x}} = \sigma^2 \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ & & q_{33} & q_{34} \\ \text{συμ.} & & & q_{44} \end{bmatrix} \quad (\text{σχέση 32})$$

Οι μεταβλητότητες ή οι τυπικές αποκλίσεις (rms) του πίνακα $C_{\hat{x}}$ εκφράζουν την ακρίβεια των αντίστοιχων παραμέτρων. Η ακρίβεια αυτή εξαρτάται από τη σ^2 και από τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα παραγόντων συμμεταβλητοτήτων $Q_{\hat{x}}$ ο οποίος όπως φαίνεται εξαρτάται αποκλειστικά από τον πίνακα σχεδιασμού A , δηλαδή από τη γεωμετρία μεταξύ δέκτη και δορυφόρων. Ο πίνακας $Q_{\hat{x}}$ μπορεί να υπολογιστεί και πριν από την εκτέλεση των μετρήσεων GPS συναρτήσει του χρόνου αρκεί να διαθέτουμε μία προσεγγιστική θέση του δέκτη και μία πρόχειρη δορυφορική εφημερίδα (ένα πρόσφατο almanac).

Με βάση τον πίνακα $Q_{\hat{x}}$ μπορούμε να ορίσουμε τα εξής μέτρα εσωτερικής ακρίβειας ή μέτρα **DOP** (Dilution Of Precision):

- Το μέτρο **GDOP** (Geometric Dilution Of Precision) ως η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των διαγώνιων στοιχείων είναι της μορφής :

$$\text{GDOP} = \sqrt{q_{11} + q_{22} + q_{33} + q_{44}}$$
- Το μέτρο **PDOP** (Position Dilution Of Precision) ως η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των διαγώνιων στοιχείων που αντιστοιχούν στις τρεις συντεταγμένες:

$$\text{PDOP} = \sqrt{q_{11} + q_{22} + q_{33}}$$
- Το μέτρο **TDOP** (Time Dilution Of Precision) ως η τετραγωνική ρίζα του στοιχείου που αντιστοιχεί στο σφάλμα του ρολογιού του δέκτη: $\text{TDOP} = \sqrt{q_{44}}$

Αν τα μετρά DOP πολλαπλασιαστούν με μια εκτίμηση (UERE) προκύπτει η τυπική απόκλιση ή το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (rms) που εκφράζει την αντίστοιχη ακρίβεια ή σφάλμα, δηλαδή,

Ακρίβεια ή σφάλμα εκτίμησης 3-Δ θέσης και ρολογιού (rms)

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_d^2} = \sigma \cdot \text{GDOP} \text{ (σχέση 33)}$$

Ακρίβεια ή σφάλμα εκτίμησης 3-Δ θέσης (rms)

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} = \sigma \cdot \text{PDOP} \text{ (σχέση 34)}$$

Ακρίβεια ή σφάλμα εκτίμησης του σφάλματος του ρολογιού (rms)

$$\sqrt{\sigma_d^2} = \sigma \cdot \text{TDOP} \text{ (σχέση 35)}$$

Στην πράξη είναι πιο κατανοητό να υπολογίζουμε την ακρίβεια χωριστά στις δύο διαστάσεις (2-Δ) και στη μία διάσταση (1-Δ), οπότε αναφερόμαστε σε ακρίβεια οριζόντιας θέσης και στο αντίστοιχο **HDOP** (Horizontal DOP) καθώς και σε ακρίβεια κατακόρυφης θέσης και στο αντίστοιχο **VDOP** (Vertical DOP). Αρκεί να μετασχηματίσουμε τις καρτεσιανές (X, Y, Z) συντεταγμένες σε τοποκεντρικές γεωδαιτικές (x^g, y^g, z^g) κατά τις διευθύνσεις των γεωδαιτικών συντεταγμένων (λ, φ, h) που είναι γνωστές στη διεθνή βιβλιογραφία ως (e, n, u) από τα αρχικά των λέξεων (**e**ast, **n**orth, **u**p). Αρκετοί χρησιμοποιούν το σύστημα ως αριστερόστροφο, δηλαδή ως (n, e, u), οπότε ο παρακάτω πίνακας στροφής **R** τροποποιείται ανάλογα. Από τη Γεωδαισία γνωρίζουμε ότι $dx^g = de = R dX$, δηλαδή,

$$\begin{matrix} dx^g & de & & & & \\ dy^g & = & dn & = & [& \\ dz^g & = & du & & & \end{matrix} \begin{matrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\sin\gamma\cos\lambda & -\sin\phi\sin\lambda & \cos\phi \\ \cos\phi\cos\lambda & \cos\phi\sin\lambda & \sin\phi \end{matrix} \begin{matrix} dX \\ dY \\ dZ \end{matrix}$$

$$\text{ή } C_{\hat{x}} = R C_x R^T = \sigma^2 R Q_x R^T = \sigma^2 W$$

$$\text{όπου, } C_{\hat{x}} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{x\hat{y}} & \sigma_{x\hat{z}} \\ & \sigma_{\hat{y}}^2 & \sigma_{\hat{y}\hat{z}} \\ & & \text{συμ.} & \sigma_{\hat{z}}^2 \end{bmatrix}$$

Ο πίνακας **R**, ως πίνακας στροφής, αφήνει αμετάβλητο το ίχνος του πίνακα $Q_{\hat{x}}$ και έτσι το PDOP και η αντίστοιχη ακρίβεια θέσης παραμένουν ίδια, δηλαδή,

$$\sqrt{w_{11} + w_{22} + w_{33}} = \sqrt{q_{11} + q_{22} + q_{33}} = \text{PDOP} \text{ (σχέση 36)}$$

Ακρίβεια ή σφάλμα εκτίμησης 3-Δ θέσης (rms)

$$\sqrt{\sigma_{\hat{e}}^2 + \sigma_{\hat{n}}^2 + \sigma_{\hat{u}}^2} = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2} = \sigma \cdot \text{PDOP} \quad (\text{σχέση 37})$$

Ακόμα θα έχουμε,

$$\text{HDOP} = \sqrt{q_{11} + q_{22}}, \text{VDOP} = \sqrt{q_{33}} \quad (\text{σχέση 38})$$

Ακρίβεια ή σφάλμα εκτίμησης (2-Δ) οριζόντιας θέσης (rms)

$$\sqrt{\sigma_{\hat{e}}^2 + \sigma_{\hat{n}}^2} = \sigma \cdot \text{HDOP} \quad (\text{σχέση 39})$$

Ακρίβεια ή σφάλμα εκτίμησης (1-Δ) κατακόρυφης θέσης (rms)

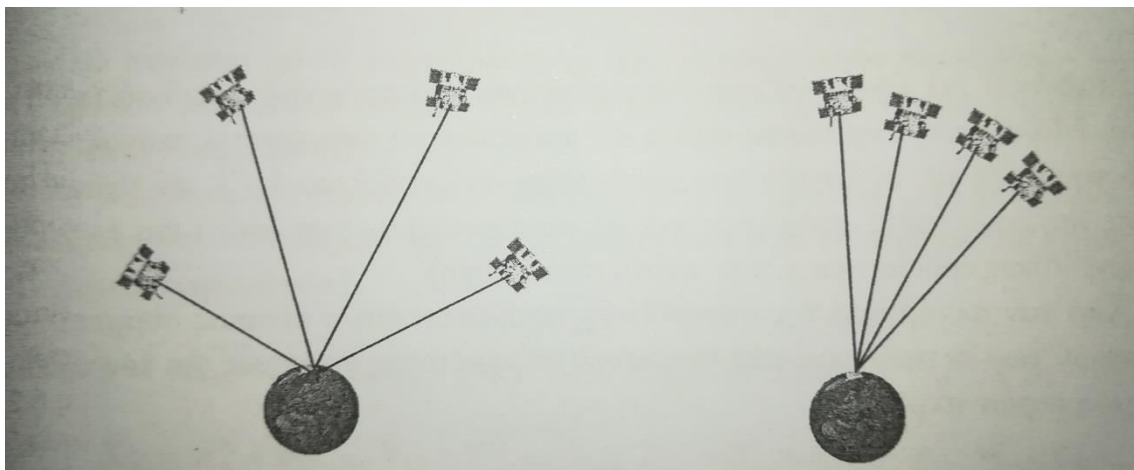
$$\sqrt{\sigma_{\hat{u}}^2} = \sigma \cdot \text{VDOP} \quad (\text{σχέση 40})$$

Κατά κανόνα όσο μικρότερη τιμή έχουν οι αριθμοί DOP και όσο μικρότερη η σ (UERE), τόσο καλύτερη η ακρίβεια. Όταν οι αριθμοί DOP ξεπερνούν κάποιες οριακές τιμές, η γεωμετρία δεν είναι καλή και πιθανόν να υπάρξουν προβλήματα αντιστροφής του πίνακα των κανονικών εξισώσεων στη συνόρθωση ή και γενικότερα μη αξιόπιστη λύση (Σχήμα 6.1). Μία ικανοποιητική εκτίμηση της UERE (τάξη μεγέθους 5 έως 10 m) δίνεται από την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των επιμέρους σφαλμάτων, κυρίως όσον αφορά το σφάλμα μέτρησης του κώδικα, τα ατμοσφαιρικά σφάλματα, το σφάλμα εφημερίδας/τροχιάς, το σφάλμα της διόρθωσης του δορυφορικού χρόνου, το σφάλμα πολυανάκλασης. Ειδικά σε ό,τι αφορά τον χρήστη C/A το σύστημα GPS παρέχει τιμές ακρίβειας (URE: User Range Equivalent) στην ψευδοαπόσταση με βάση τα σφάλματα που οφείλονται μόνο στο σήμα (SIS: Signal-In-Space) και όχι στο περιβάλλον του δέκτη (multipath) και στον ίδιο το δέκτη (hardware). Για παράδειγμα, δίνονται τιμές URE από 6 έως 13 m για πιθανότητα 95% με κανονικές συνθήκες λειτουργίας του συστήματος και για διάφορες επιλογές της ηλικίας των δεδομένων (AOD: Age Of Data) του μηνύματος πλοήγησης.

Σε περιπτώσεις μικρού αριθμού λαμβανομένων δορυφόρων, παίζει σημαντικό ρόλο η γεωμετρία. Χρειάζεται ομοιόμορφη κατά το δυνατόν κατανομή τόσο ως προς το αζιμούθιο όσο και ως προς τη γωνία ύψους. Εδώ και μερικά χρόνια οι δορυφόροι GPS που λαμβάνονται (με ικανοποιητικό ορίζοντα) είναι τουλάχιστον στον οκτώ, εξασφαλίζεται καλή γεωμετρία και μικροί αριθμοί DOP, π.χ. PDOP \leq 3, HDOP \leq 2 και VDOP \leq 2. Γενικά ισχύει VDOP \geq HDOP, δηλαδή το υψόμετρο υπολογίζεται κατά κανόνα με χαμηλότερη ακρίβεια από ότι η οριζόντια

θέση και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι λαμβανόμενοι δορυφόροι βρίσκονται όλοι πάντοτε πάνω από τον ορίζοντα του δέκτη. Αν υπήρχε τρόπος ώστε το σφάλμα του ρολογιού του δέκτη να ήταν εκ των προτέρων γνωστό και με μεγάλη ακρίβεια, στην ουσία θα αντιμετωπιζόνταν όπως το δορυφορικό σφάλμα και δεν θα μας απασχολούσε, τότε θα ίσχυε $VDOP < HDOP$ (P.Misra and P.Engel, 2006).

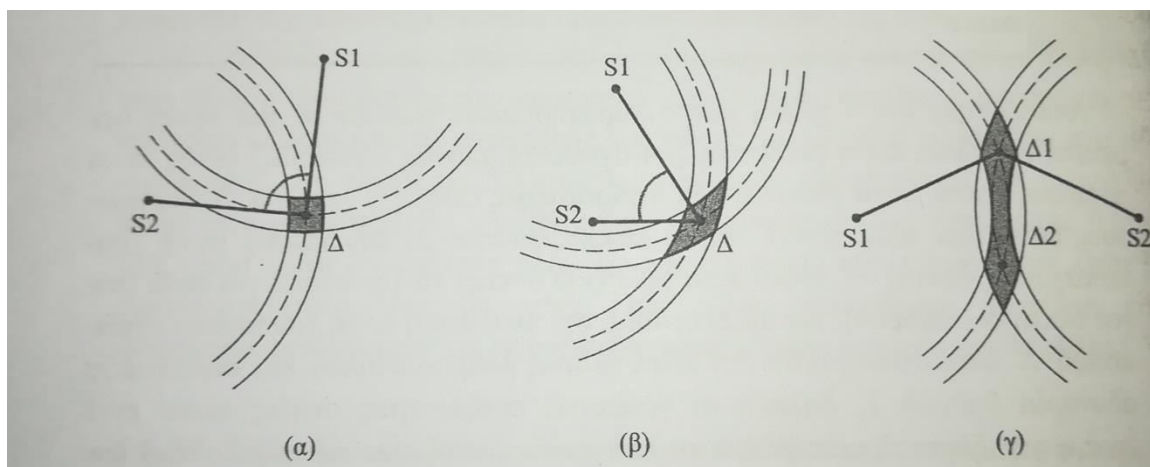
Ακόμα και στο σχετικό προσδιορισμό θέσης, π.χ. στην επίλυση μιας βάσης, τα μέτρα DOP ως σχετικά μέτρα DOP (υπολογίζονται από τον πίνακα παραγόντων συμμεταβλητοτήτων) έχουν κάποια αξία. Γενικότερα, τα μέτρα DOP βοηθούν στο σχεδιασμό των μετρήσεων (εκτίμηση εκ των προτέρων), διευκολύνουν σε μια πιθανή απόρριψη κάποιων διαστημάτων μέτρησης με πολύ μεγάλες τιμές και συμβάλουν μαζί με άλλους ποιοτικούς δείκτες στην αποδοχή μιας εκτίμησης θέσης ως αξιόπιστης, ιδιαίτερα κατά την κινηματική μέθοδο σε πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 2: Γεωμετρία δορυφορικού σχήματος και δέκτης GDOP.

Για να γίνει περισσότερο κατανοητό το πώς επηρεάζει η γεωμετρία 'δέκτη-δορυφόρων' την ακρίβεια προσδιορισμού θέσης θα θεωρήσουμε το παράδειγμα της πλευρικής εμπροσθοτομίας στις δυο διαστάσεις, όπου σύμφωνα και με το σχήμα 6.2 (σελ 208), η 2-Δ θέση ορίζεται από την τομή των κύκλων με κέντρα τους δορυφόρους. Παρατηρούμε ότι οι ακτίνες των κύκλων που αντιπροσωπεύουν τις ψευδοαποστάσεις, έστω με το ίδιο σφάλμα, ανάλογα με τη γεωμετρία τέμνονται και ορίζουν την 2-Δ θέση με μικρότερη ή μεγαλύτερη αβεβαιότητα που εκφράζει το εμβαδόν της σκιασμένης περιοχής. Στην (γ) περίπτωση του Σχήματος 6.2 η γεωμετρία είναι η χειρότερη και κατά συνέπεια το ίδιο ισχύει και για την ακρίβεια θέσης, δηλαδή η θέση Δ1 δεν μπορεί εύκολα να διαχωριστεί από την θέση Δ2 όσο οι

δύο θέσεις πλησιάζουν μεταξύ τους (οι κύκλοι τείνουν να εφάπτονται και αυξάνει η απροσδιοριστία).



Σχήμα 3 : Επίδραση της γεωμετρίας του δορυφορικού σχηματισμού στην ακρίβεια θέσης (σχηματική παράσταση για τις 2- Δ).

Το τμήμα ελέγχου μέσω των δημοσιευμένων επίσημων εγχειριδίων παρέχει και περιγράφει διάφορες συνθήκες, προδιαγραφές και μεγέθη σφαλμάτων (π.χ. URE) ώστε να εξασφαλίζονται κάποια μέτρα ακρίβειας με μετρήσεις ψευδοαποστάσεων στο σήμα (L1 C/A). Με τα μέχρι σήμερα δεδομένα το **σύστημα εγγυάται** (υπό προϋποθέσεις) μία **μέση ακρίβεια** στην οριζόντια θέση ≤ 9 m (95%) και ≤ 15 m (95%) στην κατακόρυφη θέση ενώ στο χρόνο εγγυάται ακρίβεια ≤ 40 ns (GPS SPS Performance Standard, 4th edition, 2008).

Ο δέκτης υπολογίζει τη θέση του (X, Y, Z) ή (ϕ , λ , h) στο WGS84 ή και σε οποιοδήποτε **γεωδαιτικό datum** και **προβολικό σύστημα** αν διαθέτει στη μνήμη του την αντίστοιχη πληροφορία μετασχηματισμού από το WGS84 στο τοπικό datum ή και στο προβολικό σύστημα με βάση τις αντίστοιχες εξισώσεις απεικόνισης. Αν επίσης διαθέτει και ένα **μοντέλο γεωειδούς**, μπορεί να υπολογίζει το υψόμετρο του γεωειδούς N και άρα και το ορθομετρικό υψόμετρο H ($H=h-N$). Σε περίπτωση που ο δέκτης βρίσκεται σε γνωστό ή σε περίπου γνωστό υψόμετρο (π.χ. περίπτωση πλοίου) αρκούν τρεις δορυφόροι για τον υπολογισμό της θέσης του.

Η χρήση μόνον παρατηρήσεων φάσης μιας εποχής, όπως είναι η λύση πλοήγησης, δεν είναι δυνατή επειδή για κάθε δορυφόρο εισάγεται επιπλέον και μία άγνωστη παράμετρος - ασάφεια φάσης - και συνεπώς θα ισχύει πάντα $n < m$, δηλαδή ο αριθμός των εξισώσεων παρατηρήσεων θα είναι μικρότερος από τον αριθμό των αγνώστων παραμέτρων.

5.3 ΑΠΟΛΥΤΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ ΕΚ ΤΩΝ ΥΣΤΕΡΩΝ

Η απαίτηση για ταυτόχρονη λήψη τεσσάρων τουλάχιστον δορυφόρων στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης εκ των υστέρων (static point positioning) δεν είναι αναγκαία, αφού μπορούν να χρησιμοποιηθούν παρατηρήσεις πολλών εποχών από διαφορετικούς δορυφόρους, λιγότερους από 4 σε κάθε εποχή (π.χ. περίπτωση αστικών περιοχών, στενών κοιλάδων). Όμως, λύσεις σε $S < 4$ πρέπει να χρησιμοποιούνται με κάποια προσοχή γιατί υπάρχει μεγάλος κίνδυνος κακής γεωμετρίας και τελικά «ασταθούς» λύσης (ill-conditioned problem).

Το χαρακτηριστικό στοιχείο στην περίπτωση αυτή είναι ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ταυτόχρονα τις παρατηρήσεις όλων των εποχών, αντί λύση ανά από εποχή, και μάλιστα σε μια εκ των υστέρων επεξεργασία (post processing), ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια θέσης και χρόνου σε σχέση με τη λύση πλοήγησης.

Η μεγαλύτερη ακρίβεια χρειάζεται για παράδειγμα και στο σχετικό προσδιορισμό θέσης, όπου προηγουμένως προσδιορίζονται καλές προσεγγιστικές συντεταγμένες για κάθε δέκτη (σημείο) και ικανοποιητικές εκτιμήσεις για τα σφάλματα των ρολογιών των δεκτών, ώστε να αποφεύγονται σφάλματα γραμμικοποίησης και να ελέγχονται ταυτόχρονα και διάφορα συστηματικά σφάλματα στο στάδιο της προεπεξεργασίας. Τα σφάλματα των ρολογιών των δεκτών, άρα και ο χρόνος λήψης στην κλίμακα GPS, εάν υπολογιστούν με ακρίβεια καλύτερη του 1 μ s (που επιτυγχάνεται εύκολα με τον απόλυτο προσδιορισμό ακόμα και με χρήση C/A) μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως κριτήριο ελέγχου του «ταυτόχρονου» των παρατηρήσεων φάσης και κυρίως για τον ακριβή υπολογισμό των γεωμετρικών αποστάσεων στο σχηματισμό των διπλών διαφορών. Αν διατίθενται ψευδοαποστάσεις δύο συχνοτήτων χρησιμοποιείται ο συνδυασμός «ελεύθερος ιονόσφαιρας», ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και μετρήσεις φάσεων, π.χ. για την εξομάλυνση των ψευδοαποστάσεων ή και σε μια ενιαία συνόρθωση μαζί με τις ψευδοαποστάσεις από κώδικα.

Στην εκ των υστέρων επεξεργασία, υπάρχει και η δυνατότητα διόρθωσης του δορυφορικού χρόνου με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια ($< 0,1$ ns ή < 5 nsσε πραγματικό χρόνο) μέσω π.χ. χρονικών παραμέτρων της IGS με παράλληλη χρήση εφημερίδας ακρίβειας (ακρίβεια < 3 cm ή < 5 cm σε πραγματικό χρόνο). Στην περίπτωση αυτή αναφερόμαστε στον λεγόμενο ακριβή απόλυτο προσδιορισμό θέσης ή **PPP (Precise Point Positioning)** και η ακρίβεια μπορεί να φτάσει τα μερικά cm. Ακόμα η ακρίβεια μπορεί να φτάσει και το 1 cm για μερικές ώρες

δεδομένα, με παρατηρήσεις ψευδοαποστάσεων και φάσεων σε δύο συχνότητες, ειδικά μοντέλα τροπόσφαιρας και μοντέλα άλλων μικρών διορθώσεων όπως οι παλίρροιες του στερεού φλοιού της γης. Λογισμικά με τέτοιες δυνατότητες αυστηρής επεξεργασίας είναι π.χ. το BERNES και το GIPSY. Μάλιστα η δυνατότητα προσδιορισμού θέσης στο επίπεδο του εκατοστού, με έναν μόνο δέκτη, συναγωνίζεται το σχετικό προσδιορισμό με πολλούς δέκτες που μετρούν ταυτόχρονα σε ένα σύνολο σημείων (μέτρηση δικτύου GNSS).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση προσδιορισμού θέσης σε (σχεδόν) πραγματικό χρόνο (kinematic point positioning) όπου με τη βοήθεια μετάδοσης διορθώσεων στις παρατηρήσεις ψευδοαποστάσεων (DGPS), με τη βοήθεια άλλων πηγών (επίγειοι σταθμοί, δορυφόροι, διαδίκτυο) οδηγούμαστε σε ακρίβειες στη θέση της τάξης των 10 έως 20 cm ή στο επίπεδο των μερικών ή και του 1 cm εάν χρησιμοποιηθούν παρατηρήσεις φάσης (RTK). Οι τελευταίες περιπτώσεις όπου μεταδίδονται διορθώσεις ανήκουν κανονικά στις μεθόδους του σχετικού προσδιορισμού θέσης σε σχεδόν πραγματικό χρόνο.

Για Τα εποχές και S δορυφόρους που παρατηρούνται συνεχώς από έναν ακίνητο δέκτη, έχουμε αριθμό παρατηρήσεων $n = ST$ και αριθμό αγνώστων παραμέτρων $m = 3 + T$, όπου T ο αριθμός των σφαλμάτων του ρολογιού του δέκτη τα οποία είναι διαφορετικά από εποχή σε εποχή. Για να έχουμε λύση στο πρόβλημα θα πρέπει $n \geq m$.

Αλγοριθμικά, το σύστημα των εξισώσεων παρατηρήσεων μπορεί να διαχωριστεί στο μέρος που αφορά τις συντεταγμένες του δέκτη και στο τέλος που αφορά στα σφάλματα των ρολογιών του της κάθε εποχής. Το σύστημα των κανονικών εξισώσεων επιλύεται με τη γνωστή τεχνική του διαχωρισμού, όπου σε πρώτο βήμα απαλείφεται το μέρος των σφαλμάτων του ρολογιού και υπολογίζονται οι εκτιμήσεις των συντεταγμένων. Η διαδικασία της συνόρθωσης απαιτεί μερικές επαναλήψεις ανάλογα με την ακρίβεια των προσεγγιστικών τιμών.

Ένα ακόμα σημαντικό σχόλιο αφορά στη συμπεριφορά του ρολογιού του δέκτη. Το σφάλμα αυτό αναμένεται να έχει μία ομαλή μεταβολή συναρτήσει του χρόνου λόγω της ολίσθησης του ρολογιού (clock drift). Η συμπεριφορά του ρολογιού μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά από μία ομαλή συνάρτηση π.χ. από ένα πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού, ως προς το χρόνο του οποίου οι συντελεστές προσδιορίζονται από τη συνόρθωση. Στην περίπτωση αυτή το μαθηματικό μοντέλο της συνόρθωσης απλοποιείται, αφού ο αριθμός των αγνώστων παραμέτρων μειώνεται σημαντικά.

5.4 ΑΠΟΛΥΤΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ ΜΕ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΩΔΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΑΣΕΩΝ.

Η χρήση μόνο παρατηρήσεων φάσεων σε μια εποχή δεν μπορεί να δώσει λύση (περισσότεροι άγνωστοι από τις εξισώσεις) εκτός αν οι ασάφειες φάσης είναι γνωστές. Για περισσότερες εποχές T και για S δορυφόρους θα έχουμε πάλι $n=ST$ παρατηρήσεις φάσεων με αγνώστους $m=3$ (συντεταγμένες δέκτη) $+T$ (σφάλματα ρολογιού δέκτη) $+S$ (ασάφειες για κάθε ζεύγος δέκτη-δορυφόρου). Αν μελετήσουμε την αναλυτική δομή του πίνακα σχεδιασμού **A** διαπιστώνεται ότι δεν είναι πλήρης βαθμού στηλών και παρουσιάζει αδυναμία βαθμού 1, δηλαδή οι γραμμικά ανεξάρτητες στήλες είναι $m-1$ (γραμμική εξάρτηση μεταξύ των στηλών των ασαφειών και των σφαλμάτων των δεκτών). Κατά συνέπεια δεν θα αντιστρέφεται ο πίνακας των κανονικών εξισώσεων (ορίζουσα μηδέν) και για να υπάρξει λύση πρέπει μία άγνωστη παράμετρος να θεωρηθεί γνωστή π.χ. το σφάλμα του ρολογιού του δέκτη σε μια εποχή (Hoffman-Wellenhof et al., 2008). Τελικά θα είναι, $m=3+(T-1)+S$ και θα πρέπει να ισχύει, $ST \geq 3+S+T-1$ ή $T \geq (S+2)/(S-1)$, δηλαδή για $S=2$ θα είναι $T \geq 4$, για $S=4$ θα είναι $T \geq 2$ και παρόμοια.

Ένα άλλο πρόβλημα κατά την αποκλειστική χρήση των μετρήσεων φάσεων θα υπάρχει στις περιπτώσεις απωλειών σήματος οπότε δημιουργούνται προβλήματα στην επίλυση των ασαφειών φάσης με αποτέλεσμα η λύση να καθίσταται δύσκολη ή λανθασμένη και αναξιόπιστη. Για τους λόγους αυτούς αποφεύγεται η αποκλειστική χρήση παρατηρήσεων φάσης κατά τον απόλυτο προσδιορισμό θέσης. Αντίθετα, εφόσον διατίθενται παρατηρήσεις φάσης και απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια χρησιμοποιούνται μαζί με τις παρατηρήσεις κωδίκων.

Όμοιο πρόβλημα αδυναμίας βαθμού ($=1$) υπάρχει και στον κινηματικό προσδιορισμό, όπου $n=ST$, $m=3T+(T-1)+S$ και θα πρέπει να ισχύει, $ST \geq 4T+S-1$ ή $T \geq (S-1)/(S-4)$, δηλαδή απαιτούνται τουλάχιστον $S=5$ δορυφόροι με $T \geq 4$, για να υπάρξει λύση και παρόμοια για άλλα ακέραια ζεύγη (S,T) .

Ο απόλυτος προσδιορισμός θέσης με ακίνητο δέκτη και με παρατηρήσεις φάσης από πολλές εποχές, μπορεί να γίνει παρόμοια σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω. Στην περίπτωση και των φάσεων θα υπάρχουν επιπλέον και οι άγνωστες παράμετροι των ασαφειών φάσης, τόσες όσοι και οι δορυφόροι, εφόσον δεν έχει υπάρξει απώλεια λήψης του σήματος.

Με δέκτη μιας συχνότητας δεν μπορούμε να απαλείψουμε το ιονοσφαιρικό σφάλμα, απλά χρησιμοποιούμε το εκπεμπόμενο μοντέλο και το μειώνουμε περίπου στο μισό ή και παραπάνω ή ακόμα και κάποιο καλύτερο μοντέλο από άλλη υπηρεσία π.χ. παγκόσμιο ιονοσφαιρικό μοντέλο (GIM) της IGS.

Μία δυνατότητα εκμετάλλευσης των παρατηρήσεων φάσης στη μία συχνότητα είναι η εξομάλυνση των σημαντικά χαμηλότερης ακρίβειας ψευδοαποστάσεων του κώδικα από τις αντίστοιχες της φάσης, με τον ίδιο αλγόριθμο που περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο (smoothing of code pseudoranges by means of phase measurements) για την εκτίμηση του ιονοσφαιρικού σφάλματος ή του TEC. Μια άλλη δυνατότητα αλλά με παρατηρήσεις δύο συχνοτήτων είναι η ταυτόχρονη συνόρθωση για τα οποία θα αναφερθούμε στη συνέχεια.

5.5 ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗ ΨΕΥΔΟΑΠΟΣΤΑΣΕΩΝ ΚΩΔΙΚΑ ΑΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΦΑΣΗΣ

Με βάση λοιπόν τις σημαντικά ακριβέστερες εκτιμήσεις της σχετικής διαφοράς των ψευδοαποστάσεων από φάση, μεταξύ διαδοχικών εποχών, οι χαμηλότερης ακρίβειας ψευδοαποστάσεις P από κώδικα στη συχνότητα L εξομαλύνονται – βελτιώνονται ως προς την ακρίβεια, σύμφωνα με τον περιοδικά επαναλαμβανόμενο αλγόριθμο του Hatch (1982),

$$\tilde{P}(t_k) = w_k P(t_k) + (1 - w_k) [\tilde{P}(t_k) + (L(t_k) - L(t_{k-1}))] \quad (\text{σχέση 41})$$

Όπου, $w_k = \frac{1}{k}$, $k=1,2,\dots, N$, N ο αριθμός των εποχών μέτρησης και το σύμβολο (\sim) να δηλώνει τις εξομαλυμένες τιμές. Για την πρώτη εποχή $k=1$, θέτουμε $w=1$, οπότε $(1-w)=0$ και συνεπώς $\tilde{P}(t_k) = P(t_k)$. Οι θετικές τιμές w και $(1-w)$ λειτουργούν ως βάρη. Όσο αυξάνουν οι εποχές, το βάρος των $P(t_k)$ μειώνεται ενώ αντίθετα αυξάνει το βάρος των $L(t_k)$. Ο αλγόριθμος ενδείκνυται και για τις εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο, και αποδείχθηκε πειραματικά ότι ένας λογικός αριθμός εποχών, χωρίς απώλεια σήματος, περίπου 100 εποχές ανά 1 sec (1Hz), αρκεί για να σταθεροποιηθεί η εξομαλυμένη ψευδοαπόσταση. Το σύνολο των εξομαλυμένων ψευδοαποστάσεων, μία για κάθε δορυφόρο, χρησιμοποιούνται στη συνέχεια ως καλύτερες εκτιμήσεις για τον προσδιορισμό θέσης, ο οποίος και βελτιώνεται αισθητά. Η λήψη αρκετών δορυφόρων δίνει τη δυνατότητα εξαίρεσης κάποιων ψευδοαποστάσεων επειδή παρουσιάστηκε απώλεια λήψης σήματος. Διαφορετικά θα χρησιμοποιηθούν οι αντίστοιχες μη εξομαλυμένες ψευδοαποστάσεις με πιθανή μείωση της ακρίβειας εάν αυτές είναι αρκετές.

Σημειώνεται ακόμα ότι με την εξομάλυνση των ψευδοαποστάσεων μειώνεται και το σφάλμα πολυανάκλασης εκτός από τη σημαντική μείωση του θορύβου.

Σε περίπτωση απώλειας κύκλων, κάτι συνηθισμένο στις κινηματικές εφαρμογές, ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται για το επόμενο διάστημα από την αρχή. Έτσι κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου πρέπει να γίνεται και έλεγχος για πιθανά σφάλματα ολίσθησης κύκλων. Μία μεγαλύτερη μεταβολή των L από τη μεταβολή των P ανιχνεύει κύκλους ολίσθησης. Θέτοντας ένα όριο π.χ. μερικούς κύκλους ή μερικές δεκάδες κύκλους, εάν ανιχνευτεί απώλεια σήματος, π αλγόριθμος ξεκινά από την αρχή. Διάφορες παραλλαγές του βασικού αλγορίθμου προσπαθούν να περιορίζουν το πρόβλημα της ολίσθησης κύκλων, για παράδειγμα, να γίνεται η εξομάλυνση στη θέση (συντεταγμένες) και όχι στις ψευδοαποστάσεις.

Ο αλγόριθμος βασίζεται στην ιδέα ότι η μεταβολή των ψευδοαποστάσεων από κώδικα και από φάση είναι θεωρητικά ίδια και ότι πρακτικά, λόγω του θορύβου, οι τιμές από κώδικα είναι σημαντικά χαμηλότερης ακρίβειας και άρα πρέπει να βελτιωθούν-εξομαλυνθούν. Στην πραγματικότητα οι εξομαλυνμένες τιμές βασίζονται στη διόρθωση των τρεχουσών τιμών με βάση το μέσο όρο των προηγούμενων διαφορών μεταξύ κώδικα και φάσης.

Η ακρίβεια θέσης βελτιώνεται ακόμα περισσότερο και μπορεί να φτάσει το 0,5 έως 1 m αν διαθέτουμε δέκτη διπλής συχνότητας ώστε αφού εξομαλύνουμε τις ψευδοαποστάσεις P_{Li} και P_{Lj} σύμφωνα με τον παραπάνω αλγόριθμο, να χρησιμοποιήσουμε στη συνέχεια τον συνδυασμό «ελεύθερης ιονόσφαιρας» P_{IF} για τον προσδιορισμό θέσης.

5.6 ΑΚΡΙΒΗΣ ΑΠΟΛΥΤΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ (PRECISE POINT POSITIONING).

Η συνεχής αύξηση των δικτύων μόνιμων σταθμών GNSS σε όλο τον κόσμο αλλά και η αξιοποίηση του διαδικτύου ως προς τη χρήση, διαχείριση και επεξεργασία δεδομένων GNSS οδήγησαν τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη διαδικτυακών εφαρμογών ακριβούς προσδιορισμού θέσης όχι μόνο σε εκ των υστέρων επεξεργασία αλλά και σε (σχεδόν) πραγματικό χρόνο. Η εφαρμογή που καλείται χάριν συντομίας με τα αρχικά PPP (Precise Point Positioning) χαρακτηρίζεται από μεγάλη έως υψηλή ακρίβεια, συνεχή κάλυψη και γρήγορη διαθεσιμότητα. Ο χρήστης υποβάλλει τα δεδομένα στην αντίστοιχη Υπηρεσία που έχει δυνατότητα PPP και περιλαμβάνει τη λύση, μέσω του διαδικτύου.

Η συγκεκριμένη διαδικτυακή εφαρμογή μπορεί να υπολογίζει τη θέση ενός δέκτη (χρήστη) σε οποιοδήποτε σημείο της γήινης επιφάνειας χρησιμοποιώντας μόνο τις παρατηρήσεις του δέκτη. Μέχρι σήμερα, τα προς επεξεργασία δεδομένα μπορούν να προέρχονται από τα συστήματα GPS και GLONASS. Ο δέκτης μπορεί να βρίσκεται σε διαδικασία μέτρησης στατικού ή και κινηματικού προσδιορισμού, δηλαδή να παραμένει ακίνητος ή να κινείται. Για κάθε μία εποχή καταγραφής δεδομένων παρέχεται ξεχωριστή λύση εκτός από τη συνολική λύση που δίνεται για την περίπτωση του στατικού προσδιορισμού.

Η εφαρμογή PPP παρέχεται από λίγες Υπηρεσίες όπως από την Υπηρεσία **APPS** (Automatic Precise Positioning Service) του JPL (Jet Propulsion Laboratory, NASA, CALTEC, Καλιφόρνια, <http://apps.gdgps.net/>) και από την **CSRS-PPP** (Canadian Spatial Reference System) της NRC (Natural Resources Canada, http://www.geod.nrcan.gc.ca/index_e.php). Κάθε χρήστης μπορεί μέσω μίας απλής διαδικασίας, κατά περίπτωση εγγραφής, να στείλει το αρχείο δεδομένων του δέκτη σε μορφή RINEX και να λάβει αμέσως ή ύστερα από μερικά λεπτά μέσω ηλεκτρονικού ταχυδρομείου το αρχείο με τα σχετικά αναλυτικά αποτελέσματα καθώς και χρήσιμα γραφήματα που εξάγονται κατά το στάδιο της επεξεργασίας.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι ψευδοαποστάσεις κώδικα και φάσης στις δύο συχνότητες. Ο προσδιορισμός θέσης μπορεί να επιτευχθεί και με παρατηρήσεις στη συχνότητα L_1 αλλά μόνο ψευδοαποστάσεων κώδικα (όχι φάσεων). Για τους χρήστες μιας συχνότητας χρησιμοποιούνται παγκόσμια ακριβή μοντέλα ιονόσφαιρας π.χ. GIM/IGS. Για την τροπόσφαιρα επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν εμπειρικά μοντέλα ή για μεγαλύτερη ακρίβεια να γίνει ο προσδιορισμός τροποσφαιρικών παραμέτρων ταυτόχρονα με τη θέση.

Για την επίτευξη της λύσης απαιτείται τόσο η χρήση εφημερίδων ακριβείας και διορθώσεων των δορυφορικών χρονομέτρων, όπως εξάγονται από την IGS και χρησιμοποιούνται από τις εν λόγω υπηρεσίες. Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφερθεί ότι η ποιότητα των συγκεκριμένων προϊόντων (τροχιές και ρολόγια), έχει αυξηθεί από τα 10 cm και τα μερικά ns το 1994 σε περίπου 2 cm και 0,1 ns από το 2003 και έπειτα.

Για τα δεδομένα κώδικα και φάσης από δέκτη δύο συχνοτήτων εφαρμόζονται οι γραμμικοί συνδυασμοί «ελεύθεροι ιονόσφαιρας» (P_3 , L_3) για την απαλοιφή του ιονοσφαιρικού σφάλματος,

$$P_3 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_1 - \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_2 \quad (\text{σχέση 42}) \quad L_3 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_1 - \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_2 \quad (\text{σχέση 43})$$

όπου P_1 και P_2 οι ψευδοαποστάσεις κώδικα σε δύο φορείς 1 και 2 π.χ. κώδικα C/A στην L_1 και κώδικα L_{515} στην L_5 , οι οποίες έχουν διορθωθεί προηγουμένως για τις καθυστερήσεις (T_{GD} , ISC). Γενικότερα ,

$$P_{3,IF} = \frac{P_{Ljy} - \gamma_{ij} P_{Lix}}{1 - \gamma_{ij}} = \frac{P_2 - \gamma_{12} P_1}{1 - \gamma_{12}} = \frac{\gamma_{12}}{\gamma_{12} - 1} P_1 - \frac{1}{\gamma_{12} - 1} P_2 \text{ (σχέση 44)}$$

Έτσι προσδιορίζονται εκτός από τη θέση, οι ασάφειες φάσης καθώς και τα σφάλματα του ρολογιού του δέκτη. Ταυτόχρονα υπολογίζεται και το τροποσφαιρικό σφάλμα ανά εποχή παρατήρησης. Για επεξεργασία εκ των υστέρων διάφοροι γραμμικοί συνδυασμοί, όπως η απλή διαφορά μεταξύ δέκτη και ζεύγους δορυφόρων, απαλείφει σφάλματα που σχετίζονται με το δέκτη, όπως το σφάλμα του ρολογιού του, η αρχική ασάφεια φάσης και οι εσωτερικές καθυστερήσεις των σημάτων με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ακρίβεια.

Για τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια, γίνονται και άλλες διορθώσεις από γνωστά μοντέλα, οι οποίες είναι σημαντικές σε σχέση με την ακρίβεια των παρατηρήσεων φάσης και μπορούν να επιλεγούν σε εξειδικευμένα λογισμικά όπως είναι το BERNESE και το GIPSY (που άλλωστε είναι αυτά που κυρίως εφαρμόζουν PPP). Οι διορθώσεις αυτές (που πολλές από αυτές δεν επηρεάζουν το σχετικό προσδιορισμό θέσης) προκύπτουν από επιδράσεις όπως είναι :

- Οι εκκεντρότητες του κέντρου φάσης της κεραίας του δορυφόρου ως προς το κέντρο μάζας του (satellite antenna offsets)
- Η κατά περίπτωση (γρήγορη) περιστροφή της κεραίας του δορυφόρου για να διατηρηθεί ο προσανατολισμός των ηλιακών πλαισίων προς τον ήλιο (phase wind-up correction), η οποία προκαλεί απότομη αλλαγή του προσανατολισμού των κεραίων δέκτη-δορυφόρου και σφάλμα στη φάση του φορέα.
- Οι παλίρροιες του στερεού φλοιού της γης (solid earth tides), επιφέρουν περιοδικές μεταβολές στη θέση (ελαστικότητα φλοιού) και οι οποίες οφείλονται στις ίδιες βαρυτικές ελκτικές δυνάμεις που προκαλούν και τις θαλάσσιες παλίρροιες.
- Περιοδική αύξηση της μάζας των Ωκεανών (Ocean loading) παρόμοια με τις παλίρροιες του στερεού φλοιού. Σε αρκετές περιπτώσεις μπορούν να αγνοούνται.
- Η κίνηση του πόλου – παράμετροι προσανατολισμού γης (EOP: Earth Orientation Parameters, συντεταγμένες πόλου x_p , y_p και διαφορά UTI-UTC) που απαιτούνται για τον ακριβή μετασχηματισμό μεταξύ γήινου και αδρανειακού συστήματος αναφοράς των εφημερίδων.

Τονίζεται επίσης η χρήση προϊόντων και μοντέλων συμβατών μεταξύ τους π.χ. χρήση προϊόντων της IGS.

Οι εκτιμήσεις των συντεταγμένων είναι προφανές ότι θα αναφέρονται στη τρέχουσα εποχή της εφημερίδας ακριβείας που χρησιμοποιείται, που σήμερα είναι το σύστημα IGS08 και μπορεί να μετασχηματίζονται και σε άλλο σύστημα π.χ. ITRFyy. Από την υπηρεσία PPP δεν απαιτείται κάποια ελάχιστη χρονική διάρκεια δεδομένων. Παρόλα αυτά είναι φανερό ότι η ποιότητα της λύσης εξαρτάται από τη διάρκεια και ποιότητα των δεδομένων, τον αριθμό και τη γεωμετρία των παρατηρούμενων δορυφόρων καθώς και το ρυθμό καταγραφής των παρατηρήσεων. Μεγάλης διάρκειας δεδομένα βοηθούν σημαντικά στην επίλυση των ασαφειών φάσης. Η επίλυση γενικά των ασαφειών απαιτεί δεδομένα τουλάχιστον 30 λεπτών της ώρας και με διάφορα μοντέλα γίνεται προσπάθεια να μειωθεί σημαντικά ο χρόνος σύγκλισης.

Γενικά η ακρίβεια επεξεργασίας εκ των υστέρων, για δεδομένα δύο συχνοτήτων μιας ή δυο ωρών είναι της τάξης των μερικών cm ενώ για δεδομένα μερικών ωρών φτάνει το 1 cm. Για δεδομένα μιας συχνότητας η ακρίβεια είναι της τάξης των 20 cm χωρίς να βελτιώνεται για περισσότερες ώρες. Η υπηρεσία PPP δεν αφορά δέκτες απλούς για τους οποίους η ακρίβεια το πολύ να φτάσει το 1 m.

Για εφαρμογές κινηματικού προσδιορισμού σε πραγματικό χρόνο οι προσπάθειες βρίσκονται σε εξέλιξη. Απαιτείται η σχεδόν σε πραγματικό χρόνο επίλυση των ασαφειών, και αυτό μπορεί να γίνει με τη βοήθεια τοπικών δικτύων μόνιμων σταθμών, παρόμοια με τις τεχνικές NRTK (Network RTK). Η ακρίβεια μπορεί να φτάσει τα μερικά cm.

Μέχρι σήμερα δεν έχει ακόμα «κυριαρχήσει» η μέθοδος PPP, με χρήση του ενός δέκτη, ανεξάρτητο από δίκτυα μόνιμων σταθμών, στις γεωδαιτικές εφαρμογές. Η «εξάρτηση» από λίγες υπηρεσίες, περιορίζει την επιλογή του χρήστη και το «οπλοστάσιο» που διαθέτει με τη μεθοδολογία του σχετικού προσδιορισμού. Η μέθοδος PPP δεν μπορεί ακόμα να δώσει μεγαλύτερη ακρίβεια από τη μέθοδο του σχετικού (στατικού) προσδιορισμού θέσης αλλά φιλοδοξεί να καταστεί ισοδύναμη. Έχει πάντως ενδιαφέρον να παρακολουθήσουμε στο μέλλον την εξέλιξη.

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν, πραγματοποιήθηκε η χρήση της συγκεκριμένης εφαρμογής PPP σε δεδομένα δύο συχνοτήτων που προήλθαν από το μόνιμο σταθμό ΑΥΤΙ του ΤΑΤΜ/ΑΠΘ για την 146^η ημέρα του έτους 2012 (25 Μαΐου 2012). Οι μετρήσεις αναφέρονται σε χρονικά

διαστήματα μίας ημέρας (24 ώρες), τεσσάρων ωρών και μίας ώρας. Ο ρυθμός καταγραφής των δεδομένων είναι 30 sec και η γωνία αποκοπής των δορυφορικών σημάτων ίση με 10°.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι βασικές επιλογές των παραμέτρων επεξεργασίας. Επίσης δίνονται πληροφορίες σχετικά με την ολίσθηση κύκλων, τις μεταθέσεις των δορυφορικών κεραιών και της κεραίας του δέκτη, τη χρήση των ωκεάνιων μοντέλων παλίρροιας, τα μετεωρολογικά δεδομένα και τη συνάρτηση απεικόνισης που χρησιμοποιούνται για την αρχική-προσεγγιστική εκτίμηση της τροποσφαιρικής επίδρασης.

SECTION 3. Session Processing Summary

3.1 Processing Options

User dynamics	:	STATIC
Observation processed	:	CODE&PHASE
Frequency observed	:	L3
Satellite orbits	:	PRECISE
Satellite product input	:	30-SECOND
Ionospheric model	:	L1&L2
Marker coordinates	:	ESTIMATED
Troposphere zenith delay (TZD)	:	ESTIMATED
Clock interpolation	:	YES
Parameter smoothing	:	NO
Reference frame	:	ITRF
Ellipsoid for lat, long, h	:	WGS84
Coordinate system	:	ELLIPSOIDAL
Pseudorange sigma (m)	:	2.000
Carrier phase sigma (m)	:	0.015

TZD random walk	(mm/hr ^{1/2})	:	5.000
Marker->ARP distance	(m)	:	0.182
Cutoff elevation	(deg)	:	10.000

5.7 ΣΧΕΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ.

Με τον όρο σχετικό προσδιορισμό θέσης, όπως ήδη αναφέρθηκε, εννοούμε τον προσδιορισμό των συντεταγμένων ενός σημείου ως προς ένα άλλο σημείο το οποίο θεωρείται γνωστό. Με άλλα λόγια, προσδιορίζεται το διάνυσμα μεταξύ των δύο σημείων που ονομάζεται διάνυσμα βάσης ή απλά **βάση (baseline)**. Οι συντεταγμένες του γνωστού σημείου μπορεί να δίνονται ή να προσδιορίζονται με κάποια μέθοδο π.χ. με τη μέθοδο του απόλυτου προσδιορισμού (ακρίβεια μερικών μέτρων για τις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές). Ο δέκτης καταγράφει στα αρχεία των παρατηρήσεων τις συντεταγμένες της λύσης πλοήγησης για όλα τα σημεία που μετρά και έτσι οποιοδήποτε σημείο μπορεί να θεωρηθεί ως γνωστό προκειμένου να επιλυθεί ή να επιλυθούν οι βάσεις ως προς αυτό το σημείο.

Αν (X_A, Y_A, Z_A) είναι οι συντεταγμένες του γνωστού σημείου A, προσδιορίζονται οι συντεταγμένες (X_B, Y_B, Z_B) του αγνώστου σημείου B οπότε προκύπτουν και οι συνιστώσες $(\Delta X_{AB}, \Delta Y_{AB}, \Delta Z_{AB})$ του διανύσματος βάσης, δηλαδή,

$$\begin{bmatrix} \Delta X_{AB} \\ \Delta Y_{AB} \\ \Delta Z_{AB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{bmatrix} \quad (\text{σχέση 45})$$

Ο σχετικός προσδιορισμός προϋποθέτει ταυτόχρονες μετρήσεις προς S δορυφόρους από δύο τουλάχιστον δέκτες ($R \geq 2$). Στη συνέχεια θα εννοείται ότι ο σχετικός προσδιορισμός αφορά σε προσδιορισμό εκ των υστέρων και όχι σε πραγματικό, διαφορετικά θα γίνεται ειδική αναφορά.

Αντί των πρωτογενών παρατηρήσεων GPS χρησιμοποιούνται συνήθως **γραμμικοί συνδυασμοί** με σημαντικά πλεονεκτήματα αλλά και κάποια μειονεκτήματα. Ο κυριότερος λόγος χρήσης τους είναι ότι με αυτόν τον τρόπο, απαλείφονται ή ελαχιστοποιούνται τα περισσότερα από τα συστηματικά σφάλματα, μερικά από τα οποία είναι δύσκολο να περιγραφούν μαθηματικά πλήρως. Το ίδιο ισχύει και για τα σφάλματα της επιλεκτικής

διαθεσιμότητας όταν η κατάσταση ενεργοποιείται (από τον Μάιο του 2000 παραμένει ανενεργή). Παράλληλα, με τη χρήση των γραμμικών συνδυασμών επιτυγχάνεται και σημαντική αλγοριθμική ευκολία για την δημιουργία λογισμικών επεξεργασίας.

Ως μειονεκτήματα των γραμμικών συνδυασμών θα μπορούσαμε να αναφέρουμε τη **μαθηματική συσχέτιση** των συνθετικών παρατηρήσεων, η οποία συνεπάγεται και δυσκολία προσδιορισμού του στοχαστικού μοντέλου, την αύξηση του θορύβου/αβεβαιότητας (μεγαλύτερες τυπικές αποκλίσεις) ή ισοδύναμα τη μείωση της «εσωτερικής ακρίβειας» και επίσης τη μείωση της πλεονάζουσας πληροφορίας σε σχέση με την αρχική των πρωτογενών παρατηρήσεων. Η μείωση αυτή δυσκολεύει πολλές φορές την ταυτόχρονη εκτίμηση όλων των αγνώστων παραμέτρων π.χ. συντεταγμένες και ασάφειες φάσης. Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα αυτό, αν και θεωρητικά όχι σωστό, συστήνονται ειδικές στρατηγικές επίλυσης με διαχωρισμό της ενιαίας λύσης σε περισσότερες επιμέρους διαδοχικές επιλύσεις.

Κάποιοι γραμμικοί συνδυασμοί συνδυάζονται μεταξύ τους για την επίλυση του σοβαρού προβλήματος της σωστής εκτίμησης των ακέραιων ασαφειών φάσης. Αν και θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν μόνο οι πρωτογενείς παρατηρήσεις, όπου τα διάφορα συστηματικά σφάλματα περιγράφονται μαθηματικά ή προσδιορίζονται από κατάλληλα μοντέλα και οι επιπλέον άγνωστες παράμετροι παίζουν το ρόλο των αδιάφορων παραμέτρων (nuisance parameters) στη συνόρθωση, τελικά φαίνεται να έχει επικρατήσει η χρήση γραμμικών συνδυασμών, όπως για παράδειγμα οι λεγόμενες διπλές διαφορές και ο συνδυασμός ελεύθερης ιονόσφαιρας. Οι γραμμικοί συνδυασμοί αποδίδουν τα μέγιστα με παρατηρήσεις και στους δύο φορείς (δέκτες διπλής συχνότητας). Εκτός από λίγες εξαιρέσεις, οι συνδυασμοί αναφέρονται σε παρατηρήσεις του ίδιου τύπου και του ίδιου ή διαφορετικού φορέα.

Στο στάδιο της προεπεξεργασίας των παρατηρήσεων ελέγχεται η ποιότητα των παρατηρήσεων, όπου κάποιες παρατηρήσεις μπορεί να εξαιρεθούν (π.χ. έλεγχος σφάλματος πολυανάκλασης), και επίσης η ανίχνευση για τον εντοπισμό πιθανών απωλειών κύκλων ολίσθησης (για τις φάσεις). Το επόμενο στάδιο, αφορά την επίλυση/συνόρθωση των επιλεγμένων βάσεων μαζί με τον σωστό προσδιορισμό των ακέραιων ασαφειών ανά βάση που συνήθως προηγείται, και στη συνέχεια την τελική συνόρθωση του δικτύου. Επισημαίνεται ότι τα ειδικά επιστημονικά λογισμικά (π.χ. το λογισμικό Bernese) ακολουθούν πιο αυστηρές μαθηματικές διαδικασίες από τα συνήθη λογισμικά επεξεργασίας που προορίζονται περισσότερο για τις τρέχουσες επαγγελματικές εφαρμογές.

Αγνοώντας από τις αντίστοιχες πλήρεις αναπτύξεις των εξισώσεων παρατηρήσεων το σφάλμα της πολυανάκλασης καθώς και κάποια ακόμα σφάλματα τα οποία τελικά απαλείφονται με τη βοήθεια γραμμικών συνδυασμών, οι εξισώσεις παρατηρήσεων για τους κώδικες PRN και τις φάσεις σε δύο συχνότητες, γράφονται,

$$P_{1A}^i = \rho_A^i + c\delta_A - c\delta^i + I_{1A}^i + T_A^i + e_{1A}^i \text{ (σχέση 46)}$$

$$P_{2A}^i = \rho_A^i + c\delta_A - c\delta^i + I_{2A}^i + T_A^i + e_{2A}^i \text{ (σχέση 47)}$$

$$L_{1A}^i = \rho_A^i + c\delta_A - c\delta^i + I_{1A}^i + T_A^i + \lambda_1 n_{1A}^i e_{1A}^i \text{ (σχέση 48)}$$

$$L_{2A}^i = \rho_A^i + c\delta_A - c\delta^i + I_{2A}^i + T_A^i + \lambda_2 n_{2A}^i e_{2A}^i \text{ (σχέση 49)}$$

Οι παραπάνω εξισώσεις αφορούν ταυτόχρονες παρατηρήσεις για κάθε εποχή λήψης στην κλίμακα του GPS, με τις δύο πρώτες να αναφέρονται στις ψευδοαποστάσεις σε κάθε φορέα και τις δύο επόμενες στις αντίστοιχες φάσεις των φορέων εκφρασμένες σε μονάδες απόστασης. Ο φορέας (1) θα μπορούσε να είναι η συχνότητα L1 με ψευδοαπόσταση του κώδικα C/A ή P(Y) και ο φορέας (2) η συχνότητα L2 με ψευδοαπόσταση του κώδικα P(Y) ή L2C. Με τα νέα πολιτικά σήματα GPS αυξάνονται σιγά-σιγά οι επιλογές φορέων και κωδίκων. Παρόμοιες εξισώσεις μπορούν να γραφούν για άλλα συστήματα GNSS, όπως για το GLONASS.

Οι παρατηρήσεις φάσης είναι αυτές που χρησιμοποιούνται απαραίτητως στο σχετικό προσδιορισμό θέσης για τις γεωδαιτικές και τοπογραφικές εφαρμογές ενώ οι παρατηρήσεις ψευδοαποστάσεων χρησιμοποιούνται ως βοηθητικές είτε για τον προσδιορισμό καλύτερων προσεγγιστικών συντεταγμένων και το συγχρονισμό των ρολογιών (απόλυτος προσδιορισμός θέσης) ή μερικές φορές και για την επίλυση των ασαφειών μαζί με τις παρατηρήσεις φάσης. Οι ψευδοαποστάσεις από κώδικες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές σχετικού προσδιορισμού χωρίς αυξημένες απαιτήσεις ακρίβειας, της τάξης του 0,5 έως 1 m, για παράδειγμα σε πολλές εφαρμογές GIS.

Παίρνοντας υπόψη τη σχέση των ιονοσφαιρικών σφαλμάτων των δύο φορέων (με ακρίβεια πρώτης τάξης περίπου 5 cm), οι παραπάνω εξισώσεις γράφονται,

$$P_{1A}^i = \rho_A^i + c\delta_A - c\delta^i + I_{1A}^i + T_A^i + e_{1A}^i \text{ (σχέση 50)}$$

$$P_{2A}^i = \rho_A^i + c\delta_A - c\delta^i + \gamma_{12} I_{2A}^i + T_A^i + e_{2A}^i \text{ (σχέση 51)}$$

$$L_{1A}^i = \rho_A^i + c\delta_A - c\delta^i + I_{1A}^i + T_A^i + \lambda_1 n_{1A}^i e_{1A}^i \text{ (σχέση 52)}$$

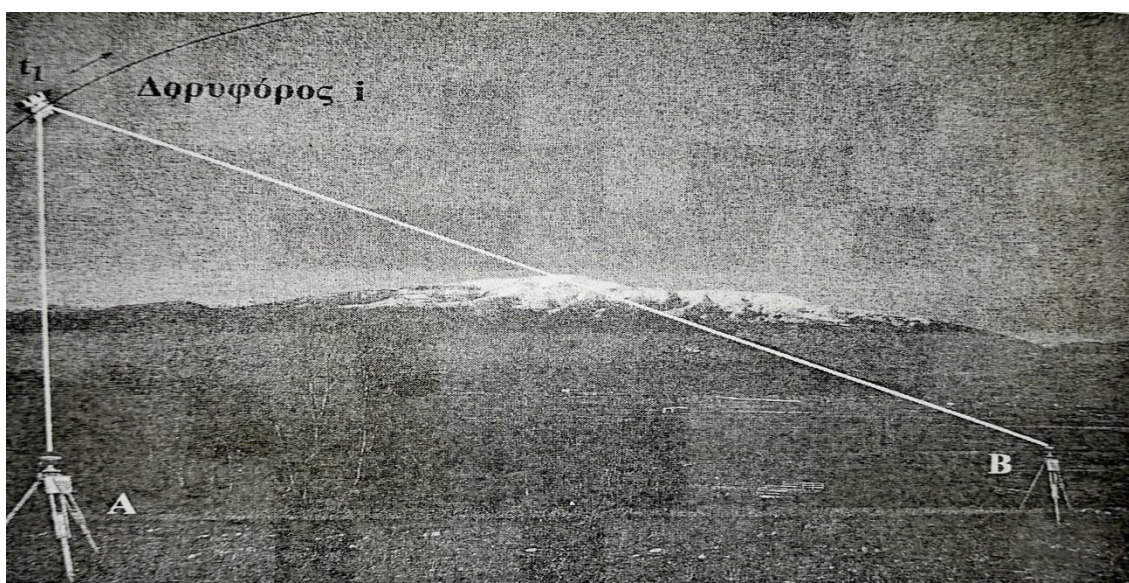
$$L_{2A}^i = \rho_A^i + c\delta_A - c\delta^i + \gamma_{12}I_{2A}^i + T_A^i + \lambda_2 n_{2A}^i e_{2A}^i \text{ (σχέση 53)}$$

όπου, $\gamma_{12} = \frac{f_1^2}{f_2^2}$, ο γνωστός λόγος των τετραγώνων των συχνοτήτων των φορέων 1 και 2.

Μία κατηγορία γραμμικών συνδυασμών, αναφέρεται συνήθως ως διαφορές παρατηρήσεων (differences) μεταξύ δεκτών ή και μεταξύ δορυφόρων ή και μεταξύ διαφορετικών εποχών. Οι πρωτογενείς παρατηρήσεις ψευδοαποστάσεων και φάσεων συνηθίζεται να ονομάζονται «μηδενικές διαφορές» (zero differences, undifferenced observations, raw observations). Οι «διαφορές» αναφέρονται σε μετρήσεις του ίδιου τύπου και φορέα αλλά μεταξύ διαφορετικών δεκτών. Ο βασικός λόγος που χρησιμοποιούμε τις διαφορές είναι η απαλλαγή ή σχεδόν απαλοιφή κοινών συστηματικών σφαλμάτων. Παράλληλα, άλλα σφάλματα, όπως τα ατμοσφαιρικά, ανάγονται σε πολύ μικρότερο μέγεθος ή και απαλείφονται για βάσεις μικρού μήκους (μερικά km, ενδεικτικά μέχρι 10 km). Οι εν λόγω διαφορές ονομάζονται απλές, διπλές και τριπλές διαφορές.

5.7.1 ΑΠΛΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ (SINGLE DIFFERENCES)

Η απλή διαφορά ορίζεται ως η διαφορά ταυτόχρονων παρατηρήσεων μεταξύ δύο δεκτών ως προς τον ίδιο δορυφόρο (between receiver difference). Για παράδειγμα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.7, αν δύο δέκτες A και B παρατηρούν ταυτόχρονα τον ίδιο δορυφόρο, π.χ. τον δορυφόρο i, την εποχή (t_i),



Σχήμα 4 : Απλή διαφορά παρατηρήσεων GPS.

τότε για τις ψευδοαποστάσεις και για τις φάσεις των φορέων, η απλή διαφορά θα εκφράζεται από τις σχέσεις,

$$P_{AB}^i = P_A^i - P_B^i \text{ (σχέση 54)}$$

$$L_{AB}^i = L_A^i - L_B^i \text{ (σχέση 55)}$$

ή αναλυτικά για τους δύο φορείς L1 και L2,

$$\begin{aligned} P_{1AB}^i &= P_{1A}^i - P_{1B}^i = (\rho_A^i - \rho_B^i) + c(\delta_A - \delta_B) + (I_{1A}^i - I_{1B}^i) + (T_A^i - T_B^i) + (e_{1A}^i - e_{1B}^i) \\ &= \rho_{AB}^i + c\delta_{AB} + I_{1AB}^i + T_{AB}^i + e_{1AB}^i \text{ (σχέση 56)} \end{aligned}$$

$$P_{2AB}^i = P_{2A}^i - P_{2B}^i = \rho_{AB}^i + c\delta_{AB} + \gamma_{12} I_{1AB}^i + T_{AB}^i + e_{2AB}^i \text{ (σχέση 57)}$$

$$L_{1AB}^i = L_{1A}^i - L_{1B}^i = \rho_{AB}^i + c\delta_{AB} + I_{1AB}^i + T_{AB}^i + \lambda_1 n_{1AB}^i + e_{1AB}^i \text{ (σχέση 58)}$$

$$L_{2AB}^i = L_{2A}^i - L_{2B}^i = \rho_{AB}^i + c\delta_{AB} + \gamma_{12} I_{1AB}^i + T_{AB}^i + \lambda_2 n_{2AB}^i + e_{2AB}^i \text{ (σχέση 59)}$$

Παρατηρούμε ότι με τις απλές διαφορές απαλείφονται τα κοινά σφάλματα που οφείλονται στον δορυφόρο, κυρίως το σφάλμα του ρολογιού του δορυφόρου και άλλα πιθανά σφάλματα που δεν συμπεριελήφθησαν παραπάνω όπως είναι η αρχική φάση φ_o^i για τις παρατηρήσεις φάσης, οι σχετικές καθυστερήσεις του σήματος εσωτερικά στον δορυφόρο (γνωστές με τους όρους DCB ή IFC ή ISC ή T_{GD}) ενώ κάποια άλλα εμφανίζονται ως διαφορές με σημαντική μείωση της τιμής τους κατά περίπτωση. Για παράδειγμα, οι όροι των ατμοσφαιρικών επιφράσεων έχουν μειωθεί δραστικά και σχεδόν μηδενίζονται για αποστάσεις λίγων χιλιομέτρων. Εάν για κάποιο λόγο έχουν γίνει οι διορθώσεις του σφάλματος του ρολογιού του δορυφόρου και οι διορθώσεις λόγω των καθυστερήσεων DCB, με την απλή διαφορά θα απαλειφούν και τα πιθανώς ασήμαντα εναπομείναντα σφάλματα των διορθώσεων αυτών.

Δορυφορικό σήμα που εκπέμπεται την ίδια χρονική στιγμή από δύο δορυφόρους, λαμβάνεται από τους δέκτες σε διαφορετική χρονική στιγμή λόγω της διαφοράς των αποστάσεων από το δορυφόρο προς τους δέκτες. Παρόμοια, σήμα που λαμβάνεται την ίδια εποχή από τους δέκτες (ταυτόχρονες παρατηρήσεις) αντιστοιχεί σε διαφορετικό χρόνο εκπομπής από το δορυφόρο. Στην πραγματικότητα το σφάλμα του ρολογιού του δορυφόρου δεν απαλείφεται πλήρως με την απλή διαφορά επειδή οι αντίστοιχοι χρόνοι ταξιδιού (άρα και οι χρόνοι εκπομπής) δεν είναι ακριβώς ίδιοι (σε μεγάλες βάσεις η διαφορά αυξάνει) και το σφάλμα του δορυφόρου ως συνάρτηση διαφορετικών εποχών εκπομπής θα διαφέρει. Η μέγιστη διαφορά

στο χρόνο λήψης στα άκρα μιας απόστασης της τάξης των 300 km είναι περίπου 1 ms. Για τα συνήθη λοιπόν μήκη η διαφορά είναι αμελητέα και το σφάλμα αυτό θεωρείται ίδιο και πρακτικά απαλείφεται. Πάντως κατά τον υπολογισμό των γεωμετρικών αποστάσεων από κάθε δέκτη προς τον ίδιο δορυφόρο, υπολογίζεται διαφορετικός χρόνος εκπομπής με βάση τον οποίο θα γίνει η παρεμβολή για τον υπολογισμό των δορυφορικών εφημερίδων (συντεταγμένων δορυφόρων).

Στις παραπάνω εξισώσεις της απλής διαφοράς, η διαφορά των ρολογιών των δεκτών εκφράσθηκε από έναν όρο (μία άγνωστη παράμετρο) όπως και η διαφορά των ακεραίων ασαφειών π.χ. $\eta_{1AB}^i = (\eta_{1A}^i - \eta_{1B}^i)$. Αυτό είναι αναγκαίο διότι διαφορετικά, αν δηλαδή χρησιμοποιήσουμε ξεχωριστούς όρους-άγνωστες παράμετροι, όπως εύκολα φαίνεται, θα υπάρχουν ανάλογες- γραμμικά εξαρτημένες στήλες στον πίνακα σχεδιασμού σε μία συνόρθωση με χρήση απλών διαφορών. Συνεπώς θα υπάρξει πρόβλημα αδυναμίας βαθμού και τελικά μη αντιστροφή του πίνακα των κανονικών εξισώσεων (αδυναμία λύσης).

Η διαφορά μεταξύ των εξισώσεων των απλών διαφορών φάσης και ψευδοαποστάσεων οφείλεται κυρίως στον όρο των ασαφειών που περιλαμβάνουν οι εξισώσεις φάσης. Το μειονέκτημα των απλών διαφορών είναι ότι παραμένουν τα σφάλματα των ρολογιών των δεκτών τα οποία είναι σημαντικά μεγαλύτερου μεγέθους σε σχέση με άλλα. Οι απλές διαφορές χρησιμοποιούνται σε μερικές τεχνικές επίλυσης των ασαφειών αλλά κυρίως ως ενδιάμεσες ποσότητες για το σχηματισμό των διπλών διαφορών.

Ένας δέκτης GPS εκτελεί ταυτόχρονες μετρήσεις από σήμα κάθε δορυφόρου. Οι πρωτογενείς μετρήσεις είναι φυσικά συσχετισμένες επειδή εξάγονται χρησιμοποιώντας π.χ. δορυφορικά σήματα από τον ίδιο δορυφόρο ή και από διαφορετικούς δορυφόρους που διέρχονται και επηρεάζονται όμοια από ίδια περίπου τμήματα της ατμόσφαιρας όπως είναι η τροπόσφαιρα. Η φυσική συσχέτιση αγνοείται συνήθως από τα διάφορα λογισμικά επειδή είναι δύσκολο να ληφθεί υπόψη και το γεγονός αυτό οδηγεί σε μη ρεαλιστικό στοχαστικό μοντέλο (εκτίμηση μεταβλητότητας αναφοράς, πίνακας συμμεταβλητοτήτων) των εκτιμήσεων, δηλαδή σε πολύ αισιόδοξες εκτιμήσεις. Έτσι οι πρωτογενείς παρατηρήσεις θεωρούνται **μαθηματικά ασυσχέτιστες** με πίνακα συμμεταβλητοτήτων της μορφής ($\sigma^2 I$), όπου η a-priori εκτίμηση σ^2 για την άγνωστη μεταβλητότητα αναφοράς ή η τυπική απόκλιση σ λαμβάνεται συνήθως ίση με την ακρίβεια της μέτρησης π.χ. 2 mm για τις φάσεις ή ίση με μία τιμή (URE) που συνυπολογίζει και τις αβεβαιότητες άλλων σφαλμάτων (τροχιές, ρολόγια, ατμόσφαιρα,

εσωτερικές καθυστερήσεις, πολυανάκλαση). Οι απλές διαφορές μεταξύ δύο δεκτών A και B (βάση A-B) και ενός δορυφόρου είναι και αυτές ασυσχέτιστες όπως εύκολα αποδεικνύεται.

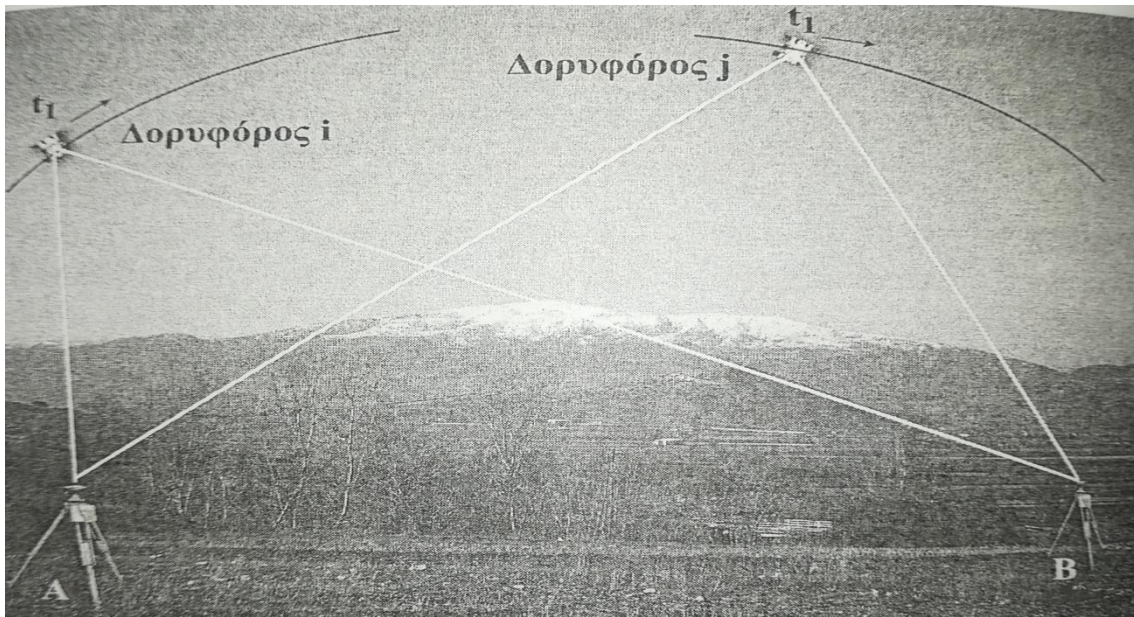
Εάν έχουμε R δέκτες που εκτελούν ταυτόχρονες μετρήσεις προς S δορυφόρους σε T εποχές (sessions), τότε οι συνολικές πρωτογενείς παρατηρήσεις θα είναι RST. Για κάθε περίοδο μέτρησης (session), οι ανεξάρτητες βάσεις θα είναι (R-1) και συνεπώς οι ανεξάρτητες απλές διαφορές για το σύνολο των ανεξαρτήτων βάσεων θα είναι (R-1)ST. Από το σύνολο αυτό ένα μέρος είναι ασυσχέτιστες, όσες για κάθε εποχή αντιστοιχούν σε βάσεις που δεν έχουν κοινό σημείο. Ανάλογα με την επιλογή των βάσεων μορφώνεται και ο πίνακας συμμεταβλητοτήτων των απλών διαφορών. Στην απλή περίπτωση της μιας βάσης, ο πίνακας συμμεταβλητοτήτων των απλών διαφορών θα είναι της μορφής ($2\sigma^2 I$), όπως εύκολα μπορεί να δειχθεί.

5.7.2 ΔΙΠΛΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ (DOUBLE DIFFERENCES)

Η διπλή διαφορά ορίζεται ως η διαφορά δύο ταυτόχρονων απλών διαφορών μεταξύ δύο δεκτών ως προς δύο δορυφόρους (between receiver-satellite difference). Σύμφωνα και με το σχήμα 6.8, μεταξύ των δεκτών A και B που παρατηρούν ταυτόχρονα δύο δορυφόρους i και j, π.χ. την εποχή (t_i), η διπλή διαφορά, για τις ψευδοαποστάσεις και για τις φάσεις με τα ίδια σχόλια που έγιναν παραπάνω για τις απλές διαφορές, εκφράζεται από τις σχέσεις,

$$P_{AB}^{ij} = P_{AB}^i - P_{AB}^j \text{ (σχέση 60)}$$

$$L_{AB}^{ij} = L_{AB}^i - L_{AB}^j \text{ (σχέση 61)}$$



Σχήμα 5 : Διπλή διαφορά παρατηρήσεων GPS.

την διπλή διαφορά π.χ. την L_{AB}^{ij} μπορούμε να την εκφράσουμε και από τη σχέση

$$L_{AB}^{ij} = L_{AB}^i - L_{AB}^j = (L_A^i - L_B^i) - (L_A^j - L_B^j) = (L_A^i - L_A^j) - (L_B^i - L_B^j) \text{ (σχέση 62)}$$

δηλαδή, ως η διαφορά δύο ταυτόχρονων διαφορών που η κάθε μία ορίζεται μεταξύ ενός δέκτη και ζεύγους δορυφόρων.

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις και για τους φορείς L1 και L2, θα έχουμε τις αναλυτικότερες σχέσεις,

$$\begin{aligned} P_{1AB}^{ij} &= P_{1AB}^i - P_{1AB}^j = \rho_{AB}^i - \rho_{AB}^j + I_{1AB}^i - I_{1AB}^j + T_{AB}^i - T_{AB}^j + e_{1AB}^i - e_{1AB}^j = \\ &= \rho_{AB}^{ij} + I_{1AB}^{ij} + T_{AB}^{ij} + e_{1AB}^{ij} \text{ (σχέση 63)} \end{aligned}$$

$$P_{2AB}^{ij} = \rho_{AB}^{ij} + \gamma_{12} I_{2AB}^{ij} + T_{AB}^{ij} + e_{2AB}^{ij} \text{ (σχέση 64)}$$

$$L_{1AB}^{ij} = \rho_{AB}^{ij} - I_{1AB}^{ij} + T_{AB}^{ij} + \lambda_1 n_{1AB}^{ij} + e_{1AB}^{ij} \text{ (σχέση 65)}$$

$$L_{2AB}^{ij} = \rho_{AB}^{ij} - \gamma_{12} I_{1AB}^{ij} + T_{AB}^{ij} + \lambda_2 n_{2AB}^{ij} + e_{2AB}^{ij} \text{ (σχέση 66)}$$

Παρατηρούμε ότι με τις διπλές διαφορές απαλείφονται (επιπλέον των απλών διαφορών) τα κοινά σφάλματα των δεκτών, κυρίως τα μεγάλοι μεγέθους σφάλματα των ρολογιών τους. Επίσης απαλείφονται οι αρχικές φάσεις φ_0 των δεκτών και οι εσωτερικές καθυστερήσεις (DCB) των σημάτων στους δέκτες με την προϋπόθεση ότι παραμένουν σταθερές για κάθε δορυφόρο κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, υπόθεση ρεαλιστική.

Επισημαίνεται ότι αν και το σφάλμα των ρολογιών των δεκτών απαλείφεται, θα πρέπει να είναι γνωστό με ακρίβεια καλύτερη από 1 μ s επειδή πρέπει να υπολογισθούν οι θέσεις των δορυφόρων στη σωστή εποχή εκπομπής του δορυφορικού σήματος. Όπως και στις απλές διαφορές, για τους ίδιους λόγους, χρησιμοποιούμε και εδώ έναν όρο για να περιγράψουμε την ασάφεια φάσης των διπλών διαφορών, αλλιώς έχουμε αδυναμία βαθμού. Η ασάφεια των διπλών διαφορών είναι πλέον ακέραιος αριθμός μετά την απαλοιφή των σχετικών σφαλμάτων τα οποία αν υπήρχαν θα απορροφούνταν από τον όρο της ασάφειας και τότε αυτός θα ήταν πραγματικός αριθμός. Τονίζεται ακόμα ότι εφόσον υπάρχει δεν απαλείφεται το σφάλμα της πολυανάκλασης.

Οι διπλές διαφορές φάσης είναι αυτές που κατά κανόνα χρησιμοποιούνται στην τελική συνόρθωση μιας βάσης ή γενικότερα ενός δικτύου GPS/GNSS. Κατά τη συνόρθωση του δικτύου οι ασάφειες φάσης των διπλών διαφορών θεωρούνται γνωστές έτσι όπως προσδιορίστηκαν από την επίλυση της κάθε βάσης, υποτίθεται στο σωστό ακέραιο.

Η εκτίμηση της παραμέτρου της ασάφειας των διπλών διαφορών στο σωστό ακέραιο αποτελεί ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα. Μόνον εφόσον έχουν επιλυθεί σωστά οι ασάφειες (fixed solution) η ακρίβεια του σχετικού προσδιορισμού είναι της τάξης του εκατοστού και καλύτερη. Εάν πριν από την τελική συνόρθωση έχουν εκτιμηθεί σωστά οι ακέραιοι των ασαφειών, η επίλυση της βάσης αφενός μεν απλοποιείται αλγοριθμικά επειδή ένα σχετικό μεγάλο μέρος αγνώστων παραμέτρων είναι στη συνέχεια γνωστές και αφετέρου «ενισχύεται» η λύση μιας και διαθέτουμε περισσότερη πλεονάζουσα πληροφορία. Για μικρές σχετικά βάσεις, μέχρι λίγες δεκάδες km, που αφορούν στις συνήθειες γεωδαιτικές εργασίες, δεν έχουμε ιδιαίτερο πρόβλημα. Για μεγαλύτερες όμως βάσεις και για μεγάλη διάρκεια παρατηρήσεων, αυξάνουν οι μη κοινοί δορυφόροι που παρατηρούνται από τα διάφορα σημεία και τότε μπορεί να έχουμε επιλύσει σωστά ένα μόνο ποσοστό των ασαφειών π.χ. πάνω από 60%, με τις υπόλοιπες ασάφειες να προσδιορίζονται ως πραγματικοί αριθμοί (float

solution). Επίσης μπορεί να μην έχουμε καθόλου επίλυση των ασαφειών σε περίπτωση πολλών απωλειών λήψης του σήματος και τότε θα πρέπει να απορρίψουμε κάποια διαστήματα παρατηρήσεων. Η τυπική απόκλιση των εκτιμήσεων των ασαφειών είναι μικρότερη από 1 κύκλο για ικανοποιητική διάρκεια χρόνου παρατηρήσεων.

Οι διπλές διαφορές είναι συσχετισμένες μεταξύ τους, ακόμα και για μία βάση. Ο πίνακας συμμεταβλητότητας προκύπτει από την εφαρμογή του νόμου μετάδοσης των συμμεταβλητοτήτων στις απλές διαφορές. Για μία βάση ο πίνακας θα είναι διαγώνιος κατά τμήματα, όπου κάθε τμήμα αντιστοιχεί σε διαφορετική εποχή. Για R δέκτες που λαμβάνουν ταυτόχρονα S δορυφόρους, σε κάθε χρονική εποχή παρατήρησης θα έχουμε (R-1)(S-1) ανεξάρτητες διπλές διαφορές.

Ο σχηματισμός των απλών και στη συνέχεια των διπλών διαφορών γίνεται με βάση την επιλογή των ανεξαρτήτων βάσεων σύμφωνα με κάποια κριτήρια, π.χ. με το κριτήριο του μικρότερου μήκους ή και του μέγιστου χρόνου παρατήρησης. Το σύνολο των διπλών διαφορών για μία εποχή είναι $\frac{R(R-1)}{2} * \frac{S(S-1)}{2}$ = σύνολο ζευγών δεκτών ή σύνολο βάσεων * σύνολο ζευγών δορυφόρων}. Για κάθε ανεξάρτητη βάση δημιουργούνται το πολύ ST ανεξάρτητες απλές διαφορές, και το πολύ (S-1)T ανεξάρτητες διπλές διαφορές που αναφέρονται σε διαφορετικές εποχές. Για (R-1) ανεξάρτητες βάσεις το σύνολο των ανεξάρτητων διπλών διαφορών θα είναι το πολύ (R-1)(S-1)T. Η επίλυση των ασαφειών γίνεται με βάση τις διπλές διαφορές, ξεκινώντας συνήθως από μία βάση αναφοράς και έναν δορυφόρο αναφοράς. Αν π.χ. η βάση αναφοράς, που επιδιώκεται να έχει μικρό μήκος, επιλυθεί σωστά τότε η επίλυση αυτή εισχύει την επίλυση της επόμενης βάσης με μεγαλύτερο μήκος μέχρι την επίλυση όλων των βάσεων με την ίδια λογική (τεχνική boot-strapping).

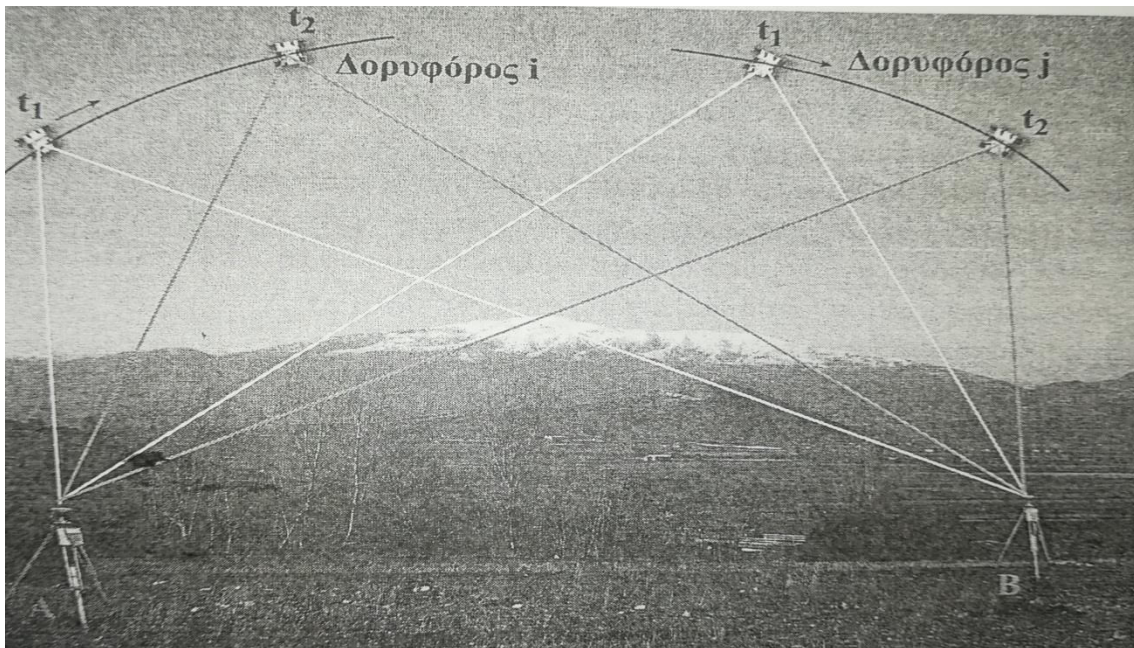
Γενικότερα, χρειάζεται μια στρατηγική για τη δημιουργία των διπλών διαφορών και συνεπώς και των πινάκων συμμεταβλητοτήτων τους. Το πρόβλημα περιπλέκεται όταν, όπως συνήθως συμβαίνει σε πολύωρες περιόδους μετρήσεων, κάποιοι δέκτες δεν παρατηρούν καθόλη τη διάρκεια ή υπάρχουν απώλειες κύκλων κατά περίπτωση ή υπάρχουν και κάποιοι διαφορετικοί δορυφόροι ανά εποχή.

Η δημιουργία των διπλών διαφορών βασίζεται συνήθως σε έναν δορυφόρο αναφοράς, σε συνδυασμό με ένα σημείο αναφοράς, ως προς τον οποίο δημιουργούνται τα ζεύγη των δορυφόρων ή σε ένα σχήμα όπου τα ζεύγη σχηματίζονται από διαδοχικούς δορυφόρους, π.χ. PRN 11- PRN3-PRN6, PRN6- PRN9 κ.λ.π. Ανάλογα με το σχήμα που θα ακολουθηθεί

προκύπτουν και διαφορετικοί πίνακες συμμεταβλητοτήτων, τα αποτελέσματα όμως θα είναι θεωρητικά ισοδύναμα. Στην πραγματικότητα θα υπάρχουν διαφορές και στα αποτελέσματα επειδή τα σφάλματα ή οι τεχνικές επίλυσης δεν παρουσιάζουν τα ίδια χαρακτηριστικά, π.χ. οι παρατηρήσεις του δορυφόρου αναφοράς να μην είναι ποιοτικά καλές.

5.7.3 ΤΡΙΠΛΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ (TRIPLE DIFFERENCES)

Η τριπλή διαφορά αφορά στις παρατηρήσεις φάσης και ορίζεται από τη διαφορά δύο διπλών διαφορών ως προς δύο διαφορετικές εποχές. Για τις παρατηρήσεις φάσεις η ασάφεια φάσης παραμένει σταθερή ως προς το χρόνο με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει απώλεια λήψης σήματος, οπότε σύμφωνα και με το Σχήμα 6.9 και για δύο εποχές (t_1) και (t_2) η τριπλή διαφορά γράφεται για τους δύο φορείς αντιστοίχως,



Σχήμα 6 : Τριπλή διαφορά παρατηρήσεων GPS.

$$L_{1AB}^{ij}(t_2, t_1) = L_{AB}^{ij}(t_2) - L_{AB}^{ij}(t_1) = \rho_{AB}^{ij}(t_2) - \rho_{AB}^{ij}(t_1) - [I_{1AB}^{ij}(t_2) - I_{1AB}^{ij}(t_1)] + e_{1AB}^{ij}(t_2, t_1) \text{ (σχέση 67)}$$

$$L_{2AB}^{ij}(t_2, t_1) = \rho_{AB}^{ij}(t_2) - \rho_{AB}^{ij}(t_1) - \gamma_{12} [I_{2AB}^{ij}(t_2) - I_{2AB}^{ij}(t_1)] + e_{2AB}^{ij}(t_2, t_1) \text{ (σχέση 68)}$$

Παρατηρούμε ότι με τις τριπλές διαφορές απαλείφονται οι ακέραιες ασάφειες φάσης (αυτή είναι και η βασική ιδέα σχηματισμού τους), σημαντική ιδιότητα που επιτρέπει μία a-priori συνόρθωση με ικανοποιητική εκτίμηση των συντεταγμένων, που βοηθούν ως τέτοιες στην επίλυση των ασαφιών φάσης των διπλών διαφορών. Παράλληλα, αν θεωρήσουμε ότι ο σχηματισμός των τριπλών διαφορών γίνεται μεταξύ εποχών που δεν απέχουν μεγάλο χρονικό διάστημα, π.χ. μεταξύ διαδοχικών εποχών, ο τροποσφαιρικός όρος μειώνεται σημαντικά και γι αυτό δεν συμπεριελήφθηκε στις παραπάνω εξισώσεις, αντίθετα με τους ιονοσφαιρικούς όρους που μπορεί και σε μικρό ιδιάστημα να υποστούν μεγάλες μεταβολές και να είναι σημαντικοί.

Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα των τριπλών διαφορών είναι ότι σε περίπτωση απώλειας σήματος, οι επόμενες συστηματικά επηρεασμένες μετρήσεις συνεπάγονται μόνον μία επηρεασμένη τριπλή διαφορά (πριν και μετά) από τον αντίστοιχο ακέραιο ολίσθησης, σε αντίθεση με τις διπλές διαφορές που θα είναι όλες επηρεασμένες. Έτσι, οι τριπλές διαφορές χρησιμοποιούνται και στο στάδιο της προεπεξεργασίας για την ανίχνευση και τον πιθανό εντοπισμό της ολίσθησης των κύκλων (fixing cycle slips), πριν από την επίλυση των βάσεων. Από μία συνόρθωση τριπλών διαφορών, εντοπίζονται πιθανά προβλήματα ολίσθησης με βάση το μέγεθος των εκτιμήσεων των σφαλμάτων (οι ολισθήσεις εμφανίζονται ως χονδροειδή σφάλματα στη συνόρθωση), οπότε αν διορθωθούν ή εξαιρεθούν οι αντίστοιχες παρατηρήσεις προκύπτουν στη συνέχεια οι «καθαρές» διπλές διαφορές. Συνήθως όμως συνδυάζονται και άλλες αλγοριθμικές τεχνικές.

Οι τριπλές διαφορές παρουσιάζουν το μειονέκτημα της μειωμένης πληροφορίας, δηλαδή μικρότερο αριθμό παρατηρήσεων σε σχέση με τις διπλές διαφορές και συνεπώς οδηγούν σε «μειωμένης ισχύος» λύση, ιδιαίτερα αν μας ενδιαφέρει υψηλή ακρίβεια.

Ο αριθμός των ανεξάρτητων τριπλών διαφορών είναι το πολύ $(R-1)(S-1)(T-1)$ από τις οποίες συσχετισμένες ανά βάση όσες αναφέρονται σε διαδοχικές χρονικές εποχές, π.χ. μεταξύ (t_2, t_1) και (t_2, t_3) . Ο πίνακας συμμεταβλητοτήτων προκύπτει από την εφαρμογή του νόμου μετάδοσης των συμμεταβλητοτήτων στις διπλές διαφορές.

5.8 ΣΧΕΤΙΚΟΣ ΣΤΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ.

Με τον όρο στατικό προσδιορισμό θέσης εννοούμε τον προσδιορισμό όπου οι δέκτες παραμένουν ακίνητοι στα σημεία καθόλη τη διάρκεια των μετρήσεων.

Για να προσδιοριστούν σωστά οι συνιστώσες μιας βάσης, αρκεί οι συντεταγμένες του σημείου που θεωρείται «γνωστό» να είναι γνωστές με ακρίβεια μερικών μέτρων, ενδεικτικά της τάξης των 10 m ως προς το WGS84. Στην ουσία, δηλαδή, η επίλυση μιας βάσης αναφέρεται σε ένα «ψευδο-WGS84» σύστημα αναφοράς. Με ανενεργή την κατάσταση SA, η ακρίβεια αυτή παρέχεται εύκολα από την τυπική λύση πλοήγησης ή για μεγαλύτερη ακρίβεια από τον απόλυτο προσδιορισμό θέσης εκ των υστέρων ή και από ένα τουλάχιστον σημείο που είναι π.χ. μόνιμος σταθμός GNSS και συνεπώς είναι γνωστών συντεταγμένων. Με ενεργή την κατάσταση SA (πριν από το Μάιο του 2000), η δυνατότητα αυτή υπήρχε είτε μέσω του εκ των υστέρων απόλυτου προσδιορισμού θέσης ή μέσω του μετασχηματισμού στο WGS84, με γνωστές παραμέτρους, ενός γνωστού σημείου – μόνιμου σταθμού.

Οι συντεταγμένες που υπολογίζονται στο σχετικό προσδιορισμό αναφέρονται στο σύστημα WGS84 (σύστημα εκπεμπόμενης τροχιάς) ή σε κάποιο από τα ITRF (όταν γίνεται χρήση τροχιών ακριβείας) με υψηλή σχετική ακρίβεια και απόλυτη ακρίβεια ανάλογη αυτής του γνωστού ή των γνωστών σημείων.

Γνωρίζοντας τη σχέση που συνδέει το WGS84 ή το ITRF με κάποιο άλλο σύστημα αναφοράς ή βρίσκοντας τις παραμέτρους μετασχηματισμού με βάση κοινά σημεία, είναι δυνατός ο μετασχηματισμός των συντεταγμένων GPS/GNSS σε ένα διαφορετικό σύστημα, π.χ. για την Ελλάδα, στο ΕΓΣΑ87.

Όταν έχουμε να επιλύσουμε πολλές βάσεις, που αποτελούν ένα δίκτυο GPS, αρκεί να είναι γνωστό ένα μόνο σημείο (ελάχιστες δεσμεύσεις για ένα 3-Δ δίκτυο). Τα λογισμικά έχουν τη δυνατότητα να επιλύουν τις βάσεις αυτόματα ή δίνουν και τη δυνατότητα να επιλέγει ο χρήστης ποιες βάσεις θα επιλύσει από το σύνολο των βάσεων (π.χ. μόνον τις ανεξάρτητες) σύμφωνα με κάποια κριτήρια (αυρή είναι η σωστότερη επιλογή). Στις συνήθεις γεωδαιτικές και τοπογραφικές εργασίες σχεδόν πάντα μας ενδιαφέρει η ένταξη του δικτύου GPS στο τοπικό σύστημα αναφοράς (π.χ. στο ισχύον κρατικό, για την Ελλάδα TM87/ΕΓΣΑ87 ή και στο σύστημα HRTS07 του Herpos). Έτσι, για να ελεγχθεί η ένταξη, κάποια από τα σημεία του δικτύου (τουλάχιστον 3) πρέπει να είναι κοινά ώστε να χρησιμοποιηθούν για το μετασχηματισμό του δικτύου GPS στο τοπικό γεωδαιτικό datum.

Για να αξιοποιήσουμε τα σημαντικά πελονεκτήματα που προσφέρει η τεχνική των διαφορών (απλές, διπλές, τριπλές) οι παρατηρήσεις πρέπει να είναι ταυτόχρονες με ικανοποιητική ακρίβεια στα σημεία κάθε βάσης που επιλύεται.

Αγνοώντας τα σφάλματα της ιονόσφαιρας και της τροπόσφαιρας, τα οποία αντιμετωπίζονται με βάση τους γραμμικούς συνδυασμούς ή και τη μαθηματική περιγραφή τους (μοντελοποίηση), διατυπώνονται στη συνέχεια μερικά σχόλια που αφορούν στο μαθηματικό μοντέλο των εξισώσεων παρατηρήσεων για τις φάσεις ως προς τις απλές, διπλές και τριπλές διαφορές, δεδομένου ότι οι διπλές διαφορές και «βοηθητικά» οι τριπλές είναι αυτές που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές ακρίβειας. Επίσης θα αγνοηθούν τα σφάλματα πολυανάκλασης και ο θόρυβος – τυχαίο σφάλμα ώστε για λόγους απλότητας να έχουμε τις παρατηρούμενες παραμέτρους ως συνάρτηση των αγνώστων παραμέτρων.

Τα αντίστοιχα μοντέλα για τους κώδικες PRN προκύπτουν ως ειδικές περιπτώσεις. Στις παρακάτω εξισώσεις θα χρησιμοποιηθεί ο συμβολισμός ως προς τον φορέα L1 (παρόμοια ισχύουν για τον L2 ή L5), θεωρώντας μία μόνο βάση (δέκτες A και B), και την υπόθεση ότι δεν έχουμε απώλεια του σήματος στη διάρκεια των παρατηρήσεων.

5.8.1 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΠΛΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ

$$L_{1AB}^i = \rho_{AB}^i + ct_{AB} + \lambda_1 n_{1AB}^i \quad (\text{σχέση 69})$$

Για S δορυφόρους και T εποχές θα έχουμε $n = ST$ ανεξάρτητες και ασυσχέτιστες απλές διαφορές με $m = (3+S+T)$ άγνωστες παραμέτρους : 3 παραμέτρους για τον όρο ρ_{AB}^i (οι τρεις συντεταγμένες του αγνώστου σημείου ή ισοδύναμα οι τρεις συνιστώσες του διανύσματος της βάσης), T παραμέτρους για τους όρους t_{AB} (μία για κάθε εποχή) και S παραμέτρους για τις ακέραιες ασάφειες (μία για κάθε δορυφόρο). Αν μελετήσουμε τον πίνακα σχεδιασμού θα διαπιστώσουμε ότι υπάρχει αδυναμία ναθμού 1 (παρόμοια με όσα αναφέρθηκαν στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης με παρατηρήσεις φάσης) και αυτό σημαίνει ότι μία άγνωστη παράμετρος πρέπει να ληφθεί ως απολύτως γνωστή, π.χ. να προσδιοριστεί με απόλυτο προσδιορισμό το σφάλμα του ρολογιού της διπλής διαφοράς για μία εποχή. Κατά συνέπεια οι άγνωστες παράμετροι θα είναι $m = (3+S+(T-1))$. Για να υπάρχει λοιπόν λύση, θα πρέπει προφανώς να ισχύει,

$$ST \geq 3+S+T-1 \text{ ή } T \geq \frac{S+2}{s-1}$$

Για $S=1$ δεν υπάρχει λύση ($n < m$), για $S = 2$ απαιτούνται τουλάχιστον 4 εποχές και για $S = 4$ (που πάντα σχεδόν ικανοποιείται) απαιτούνται τουλάχιστον 2 εποχές.

5.8.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΠΛΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ

$$L_{1AB}^{ij} = \rho_{AB}^{ij} + \lambda_1 n_{1AB}^{ij} \text{ (σχέση 70)}$$

Στην περίπτωση των διπλών διαφορών (εδώ δεν υπάρχει αδυναμία βαθμού), θα έχουμε $n = (S-1)T$ ανεξάρτητες αλλά συσχετισμένες ανά εποχή διπλές διαφορές με $m = 3+(S-1)$ άγνωστες παραμέτρους. Πρέπει να ισχύει,

$$(S-1)T \geq 3+(S-1) \text{ ή } T \geq \frac{S+2}{s-1}$$

Για $S=2$ δορυφόρους (το ελάχιστο που απαιτείται στις διπλές διαφορές) απαιτούνται τουλάχιστον 4 εποχές και για $S=4$ (που πάντα σχεδόν ικανοποιείται) απαιτούνται τουλάχιστον 2 εποχές. Για να αποφύγουμε γραμμικά εξαρτημένες για κάθε εποχή δημιουργούνται ως προς αυτόν.

5.8.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΡΙΠΛΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ

$$L_{AB}(t_2, t_1) = \rho_{AB}^{ij}(t_2) - \rho_{AB}^{ij}(t_1) \text{ (σχέση 71)}$$

Εδώ έχουμε μόνο $m=3$ άγνωστες παραμέτρους (συντεταγμένες δέκτη) και $n = (S-1)(T-1)$ ανεξάρτητες αλλά συσχετισμένες τριπλές διαφορές. Θα πρέπει να ισχύει,

$$(S-1)(T-1) \geq 3 \text{ ή } T \geq \frac{S+2}{s-1}$$

όπως και στις διπλές διαφορές. Για $S=2$ δορυφόρους απαιτούνται τουλάχιστον 4 εποχές ενώ για $S=4$, που πάντα σχεδόν ικανοποιείται, απαιτούνται τουλάχιστον 2 εποχές.

5.9 ΣΧΕΤΙΚΟΣ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ ΕΚ ΤΩΝ ΥΣΤΕΡΩΝ

Στο σχετικό κινηματικό προσδιορισμό εκ των υστέρων και με παρατηρήσεις φάσης, έχουμε έναν ακίνητο δέκτη A σε γνωστό σημείο (base station, reference receiver) και έναν κινητό δέκτη B (moving receiver, rover) του οποίου οι συντεταγμένες πρέπει να προσδιοριστούν σε επιλεγμένες εποχές, π.χ. ανά 1 sec. Για τον κινούμενο λοιπόν δέκτη οι άγνωστες συντεταγμένες θα είναι 3 για κάθε εποχή και συνολικά 3T για τις T εποχές. Ο κινητός δέκτης για λίγες εποχές, σε συγκεκριμένα σημεία.

Σε κάθε περίπτωση γραμμικού συνδυασμού-διαφορών, αν n ο αριθμός των παρατηρήσεων και m ο αριθμός των αγνώστων παραμέτρων, θα έχουμε :

- απλές διαφορές : $n = ST$ $m = 3T + S + T$ (αδυναμία βαθμού = 1)
- διπλές διαφορές: $n = (S-1)T$ $m = 3T + (S-1)$
- τριπλές διαφορές: $n = (S-1)(T-1)$ $m = 3T$

Στην περίπτωση των απλών διαφορών υπάρχει αδυναμία βαθμού (=1), όπως και στο σχετικό στατικό προσδιορισμό, ενώ στις διπλές διαφορές δεν αντιμετωπίζεται τέτοιο πρόβλημα. Τόσο στις απλές όσο και στις διπλές υπάρχουν οι άγνωστες ασάφειες φάσης που θα πρέπει να επιλυθούν προκειμένου να έχουμε λύση σε κάθε εποχή (οπότε δεν υπάρχει αδυναμία βαθμού για τις απλές διαφορές). Στις τριπλές διαφορές όπου δεν υπάρχουν ασάφειες φάσης, για να υπάρχει λύση για τον κινούμενο δέκτη σε κάθε εποχή, θα πρέπει σε μία εποχή, κατά προτίμηση στην πρώτη, να είναι γνωστές οι συντεταγμένες του κινούμενου δέκτη. Έτσι για τις τριπλές διαφορές θα ισχύει $m = 3(T-1)$. Μετά από όσα αναφέρθηκαν, και με γνωστές τις ασάφειες φάσης, για κάθε εποχή (T=1) θα έχουμε,

- απλές διαφορές

$$L_{1AB}^i - \lambda_1 n_{1AB}^i = \rho_{AB}^i + ct_{AB} \quad S \geq 4 \text{ (σχέση 72)}$$

- διπλές διαφορές

$$L_{1AB}^{ij} - \lambda_1 n_{1AB}^{ij} = \rho_{AB}^{ij} \text{ (σχέση 73)}$$

- τριπλές διαφορές

$$L_{AB}^{ij}(t_{k+1}, t_1) + \rho_{AB}^{ij}(t_1) = \rho_{AB}^{ij}(t_{k+1}) \text{ (σχέση 74)}$$

με την προϋπόθεση της μη απώλειας του σήματος.

Η γνώση των ασαφειών επιτυγχάνεται συνήθως με τη γνωστή τεχνική του σχετικού στατικού προσδιορισμού, όπου για ένα αρχικό σημείο (static initialization), ο κινούμενος δέκτης παραμένει ακίνητος σε γνωστό σημείο για λίγες εποχές. Τότε οι ασαφείς υπολογίζονται με τη χρήση των διπλών διαφορών ως πραγματικοί αριθμοί που στρογγυλεύονται στους πλησιέστερους ακεραίους. Εναλλακτικά ο δέκτης παραμένει ακίνητος σε ένα άγνωστο σημείο και εφαρμόζεται ο γρήγορος στατικός προσδιορισμός με παραμονή μερικά λεπτά αν το σημείο βρίσκεται κοντά στο γνωστό σημείο αναφοράς. Στην περίπτωση αυτή επιλύεται η αντίστοιχη βάση και προσδιορίζονται οι συντεταγμένες του αγνώστου σημείου μαζί με τις ασαφείς.

Αν κατά τη διάρκεια κίνησης του δέκτη Β υπάρξει απώλεια σήματος, επαναλαμβάνεται από την αρχή η όλη διαδικασία (new initialization). Η προηγούμενη διαδικασία επίλυσης των ασαφειών μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση που ο κινούμενος δέκτης βρίσκεται από την αρχή σε κίνηση (kinematic initialization), περίπτωση ιδιαίτερα χρήσιμη όταν δεν είναι δυνατόν ο κινούμενος δέκτης να παραμείνει ακίνητος, π.χ. περίπτωση πλοίου, αυτοκινήτου ή αεροπλάνου. Η τελευταία τεχνική είναι γνωστή ως τεχνική **OTF (On-The-Fly ambiguity resolution)**. Η χρήση δικτύων μόνιμων σταθμών μπορεί επίσης να διευκολύνει σημαντικά όχι μόνο την επίλυση των ασαφειών αλλά και τον προσδιορισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο.

Στον κινηματικό προσδιορισμό, όσον αφορά την επίλυση των ασαφειών εντάσσεται και η ημικινηματική μέθοδος «stop and go». Οι υπόλοιπες μέθοδοι μετρήσεων, όπως είναι η γρήγορη στατική (rapid/fast static) και η ψευδοκινηματική (reoccupation) είναι στην ουσία στατικές μέθοδοι.

5.10 ΣΧΕΤΙΚΟΣ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ

Στην περίπτωση του σχετικού κινηματικού προσδιορισμού θέσης σε πραγματικό χρόνο απαιτείται η εκπομπή δεδομένων *διορθώσεων ή παρατηρήσεων) από έναν σταθερό/ακίνητο δέκτη γνωστών συντεταγμένων (reference receiver), σε έναν ή περισσότερους δέκτες (rover) που μπορεί να παραμένει ακίνητος για μία τουλάχιστον εποχή (συνήθως μερικές εποχές, μερικά sec) σε συγκεκριμένα σημεία ή να βρίσκεται συνεχώς σε κίνηση ακολουθώντας μία διαδρομή. Ο κινούμενος δέκτης επεξεργάζεται τις δικές του μετρήσεις μαζί με τα δεδομένα που λαμβάνει σε σχεδόν πραγματικό χρόνο (μεσολαβεί κάποια μικρή χρονική καθυστέρηση) και προσδιορίζει τη θέση του.

Η επικοινωνία μεταξύ των δεκτών απαιτεί ειδικό λογισμικό που εγκαθίσταται και στους δέκτες καθώς και ένα σύστημα ασύρματης επικοινωνίας, π.χ. “radio modem”, κινητής τηλεφωνίας, διαδίκτυο, επίγειων κεραιών ή και μέσω δορυφόρων. Τα δεδομένα που εκπέμπονται σχετίζονται με τις ψευδοαποστάσεις ή και τις φάσεις, συνήθως με ένα μοντέλο διορθώσεων που πρέπει να εφαρμόσει ο κινούμενος δέκτης στις δικές του παρατηρήσεις ώστε να προσδιορίσει τη θέση του. Ο δέκτης αναφοράς παίζει το ρόλο ενός ψευδοδορυφόρου που εκπέμπει δεδομένα στον κινούμενο δέκτη. Το format εκπομπής των δεδομένων είναι συνήθως το γνωστό RTCM ή και διαφορετικό ως προς την εκπομπή των φάσεων ανάλογα με την κατασκευάστρια εταιρεία.

Η χρήση ψευδοαποστάσεων από κώδικες PRN για τον προσδιορισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο είναι περισσότερο γνωστή με τον όρο **DGPS (Differential GPS)** ή γενικότερα ως **DGNSS (Differential GNSS)**. Επίσης η χρήση φάσεων είναι γνωστή με τον όρο **RTK (Real Time Kinematic)**. Σε κάθε περίπτωση ο προσδιορισμός των συντεταγμένων του κινούμενου δέκτη ανάγεται σε κάθε εποχή ενώ για περισσότερες εποχές στο ίδιο σημείο υπολογίζεται μία καλύτερη λύση, παρατηρώντας ταυτόχρονα και ποιοτικούς δείκτες όπως το δείκτη DOP, την επιτυχή επίλυση των ασαφειών και το rms της εκτίμησης. Είναι δυνατόν οι μετρήσεις ανά εποχή να καταγράφονται στον δέκτη έτσι ώστε ο χρήστης, αν επιθυμεί π.χ. για λόγους ελέγχου, να επαναπροσδιορίζει όλα ή κάποια από τα σημεία σε μία εκ των υστέρων επεξεργασία με βάση ταυτόχρονες και όχι σχεδόν ταυτόχρονες παρατηρήσεις (μεταξύ σταθερού και κινητού δέκτη) με καλύτερη ακρίβεια.

Στην περίπτωση του DGPS ο σταθερός δέκτης με βάση τις γνωστές του συντεταγμένες υπολογίζει τις διορθώσεις των ψευδοαποστάσεων. Στην ουσία αφαιρεί τη γνωστή γεωμετρική απόσταση από την αντίστοιχη ψευδοαπόσταση. Επειδή ο υπολογισμός και η μετάδοση των διορθώσεων στον κινούμενο δέκτη απαιτεί κάποιο χρονικό διάστημα, ο κινούμενος δέκτης θα λαμβάνει τις διορθώσεις αυτές σε λίγο διαφορετική εποχή από αυτή στην οποία αναφέρονται οι δικές του μετρήσεις. Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα αυτό, ο σταθερός δέκτης μετρά σε μερικές εποχές έναν ικανό αριθμό ψευδοαποστάσεων και υπολογίζει ένα μοντέλο πρόγνωσης για το ρυθμό μεταβολής των διορθώσεων των ψευδοαποστάσεων, που ισχύει για ένα μικρό χρονικό διάστημα, και το οποίο μοντέλο πρόγνωσης ενημερώνεται τακτικά. Έτσι ο κινούμενος δέκτης, θεωρώντας ίδιες τις διορθώσεις (στα όρια των αποστάσεων που ισχύει, π.χ. η ατμόσφαιρα να θεωρηθεί ότι επηρεάζει με τον ίδιο τρόπο τις δύο θέσεις) μπορεί να

υπολογίσει τις διορθωμένες δικές του ψευδοαποστάσεις για την τρέχουσα εποχή και άρα τη θέση του με ένα μοντέλο απόλυτου προσδιορισμού θέσης.

Με διορθωμένες λοιπόν τις ψευδοαποστάσεις του κινούμενου δέκτη (pseudorange corrections), η εξίσωση παρατήρησης εκφράζει τη σχέση μεταξύ της διορθωμένης ψευδοαπόστασης (ως παρατηρούμενο μέγεθος) και της αντίστοιχης γεωμετρικής απόστασης (όπου περιέχονται οι συντεταγμένες του κινούμενου δέκτη) καθώς και ενός αγνώστου όρου που περιγράφει το σχετικό σφάλμα των ρολογιών και των δύο δεκτών

$[c(\delta_A - \delta_B)]$. Σε κάθε εποχή και με λήψη τουλάχιστον τεσσάρων κοινών δορυφόρων υπολογίζονται οι άγνωστες συντεταγμένες του δέκτη και το σχετικό σφάλμα των ρολογιών. Το μαθηματικό μοντέλο είναι παρόμοιο με το αντίστοιχο του απόλυτου προσδιορισμού αλλά με μεγαλύτερης ακρίβειας ψευδοαποστάσεις.

Η εφαρμογή σε πραγματικό χρόνο αποδίδει ικανοποιητικά για βάσεις που δεν ξεπερνούν τις μερικές δεκάδες χιλιόμετρα. Όσο αυξάνεται το μήκος της βάσης από τον σταθερό δέκτη αλλάζουν εν γένει οι ατμοσφαιρικές συνθήκες και η επίδραση δεν είναι όμοια, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ακρίβεια θέσης. Ο χρόνος που μεσολαβεί από τον υπολογισμό του μοντέλου πρόγνωσης μέχρι τη λήψη των εκπεμπόμενων δεδομένων από τον κινούμενο δέκτη είναι γνωστός με τον όρο **latency** (καθυστέρηση). Ο **ρυθμός ενημέρωσης** του δέκτη (**update rate**), δηλαδή κάθε πόσο μπορεί ένας δέκτης να εκτελεί παρατηρήσεις, παίζει σημαντικό ρόλο στις εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο αφού προσδιορίζει ανάλογα και το ρυθμό προσδιορισμού της θέσης.

Στην περίπτωση του DGPS με παρατηρήσεις φάσης ή όπως συνήθως λέγεται μέθοδος RTK, η διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως είναι παρόμοια με τη διαφορά ότι θα πρέπει να επιλυθούν οι ασάφειες φάσης τόσο για τον σταθερό δέκτη (εύκολο με βάση τις γνωστές του συντεταγμένες) όσο και για τον κινούμενο με βάση την τεχνική επίλυσης σε ένα αρχικό σημείο (γνωστό ή άγνωστο, static initialization) ή συνήθως με την τεχνική OTF.

5.10.1 DGPS/DGNSS ΜΕ ΨΕΥΔΟΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΑΠΟ ΚΩΔΙΚΑ PRN

Περιγράφοντας πιο αναλυτικά το σχετικό προσδιορισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο με χρήση ψευδοαποστάσεων κώδικα, σε μια εποχή λήψης (t_0) η εξίσωση της ψευδοαπόστασης μεταξύ δέκτη αναφοράς A με γνωστές συντεταγμένες και δορυφόρου I γράφεται,

$$P_A^i(t_0) = \rho_A^i(t_0) + c\delta_A(t_0) + \Delta\rho_A^i(t_0) \quad (\text{σχέση 75})$$

όπου ο όρος $\Delta\rho_A^i(t_0)$ αντιπροσωπεύει τα σφάλματα κατά μήκος της απόστασης δορυφόρου δέκτη, π.χ. τροχιακά και ατμοσφαιρικά. Στην προηγούμενη σχέση αγνοούμε το σφάλμα πολυανάκλασης και το θόρυβο. Το σφάλμα της χρονικής καθυστέρησης των σημάτων εσωτερικά στο δέκτη θεωρούμε ότι απορροφάται ικανοποιητικά από το σφάλμα του ρολογιού του. Η αντίστοιχη καθυστέρηση στο δορυφόρο θεωρούμε ότι έχει γίνει με βάση τις παραμέτρους (T_{GD} , ISC) του μηνύματος πλοήγησης εφόσον εκτέμνονται.

Η διόρθωση PC (Pseudorange Correction) στην μετρούμενη ψευδοαπόσταση για το δορυφόρο I, υπολογίζεται από τη διαφορά μεταξύ γεωμετρικής απόστασης και ψευδοαπόστασης, σύμφωνα με τη σχέση,

$$PC_A^i(t_0) = \rho_A^i(t_0) - P_A^i(t_0) = -c\delta_A(t_0) + c\delta(t_0)' - \Delta\rho_A^i(t_0) \quad (\text{σχέση 76})$$

Συλλέγοντας ένανικανό αριθμό ψευδοαποστάσεων, ο δέκτης αναφοράς A υπολογίζει το ρυθμό μεταβολής της διόρθωσης RPC (Rate of Pseudorange Correction). Επομένως η προβλεπόμενη διορθωμένη ψευδοαπόσταση σε μία επόμενη χρονική στιγμή t υπολογίζεται από τη σχέση,

$$CP_A^i(t) = CP_A^i(t_0) + RPC(t_0)(t - t_0) \quad (\text{σχέση 77})$$

Η ψευδοαπόσταση που παρατηρείται από έναν κινούμενο δέκτη B προς τον ίδιο δορυφόρο i, την (σχεδόν) ίδια χρονική στιγμή (t) δίνεται από τη σχέση,

$$P_B^i(t) = \rho_B^i(t) + c\delta_B(t) - c\delta^i(t) + \Delta\rho_B^i(t) \quad (\text{σχέση 78})$$

Ο κινούμενος δέκτης B βρίσκεται σχετικά κοντά στον σταθερό δέκτη και συνεπώς τα σφάλματα που περιγράφει ο όρος $\Delta\rho$ μπορεί να θεωρηθούν ίδια με ικανοποιητική ακρίβεια, λόγω υψηλής συσχέτισης. Η διορθωμένη ψευδοαπόσταση CP_B^i (Corrected Pseudorange) για τον κινούμενο δέκτη B την εποχή i μπορεί να προκύψει με βάση τη διόρθωση που υπολογίζεται από το σταθερό δέκτη A, δηλαδή,

$$\begin{aligned} CP_B^i(t) &= P_B^i(t) + PC_A^i(t) = P_B^i(t) + \{-c\delta_A(t) + c\delta^i(t) - \Delta\rho_A^i(t)\} = \\ &= \{\rho_B^i(t) + c\delta_B(t) - c\delta^i(t) + \Delta\rho_B^i(t)\} + \{-c\delta_A(t) + c\delta^i(t) - \Delta\rho_A^i(t)\} = \\ &= \rho_B^i(t) + c\delta_B(t) - c\delta_A(t) \quad (\text{σχέση 79}) \end{aligned}$$

όπου είναι φανερή η απαλοιφή του σφάλματος του δορυφορικού ρολογιού και του όρου $(\Delta\rho_B^i(t) - \Delta\rho_A^i(t))$ που επίσης (σχεδόν) μηδενίζεται.

Έτσι, καταλήγουμε στην εξίσωση ψευδοαπόστασης για τη μέθοδο DGPS/DGNSS,

$$PC_B^i(t) = \rho_B^i(t) + c \Delta\delta_{AB}(t) \quad (\text{σχέση 80})$$

η οποία αποτελεί την εξίσωση παρατήρησης, για κάθε εποχή του κινούμενου δέκτη, με 4 αγνώστους παραμέτρους $(X_B, Y_B, Z_B, \Delta\delta_{AB})$, οπότε για $S \geq 4$ λαμβανομένους δορυφόρους προσδιορίζεται από τον κινούμενο δέκτη η θέση του σε πραγματικό χρόνο. Στην ουδία πρόκειται για μία λύση πλοήγησης με σχετικά μεγάλη ακρίβεια, της τάξης του 1 m ή και 0.5 m ανάλογα με την απόσταση μεταξύ σταθερού και κινούμενου δέκτη.

5.10.2 RTK ΜΕ ΨΕΥΔΟΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΑΠΟ ΦΑΣΗ

Για μια εποχή λήψης (t_0) η εξίσωση της ψευδοαπόστασης από φάση για κάθε φορέα L , μεταξύ δέκτη αναφοράς A με γνωστές συντεταγμένες και δορυφόρου i γράφεται,

$$L_A^i(t_0) = \rho_A^i(t_0) + c \delta_A(t_0) - c\delta^i(t_0) + \Delta\rho_A^i(t_0) + \lambda n_A^i \quad (\text{σχέση 81})$$

όπου πάλι ο όρος $\Delta\rho_A^i(t_0)$ αντιπροσωπεύει τα σφάλματα κατά μήκος της απόστασης δορυφόρου δέκτη, π.χ. τροχιακά και ατμοσφαιρικά. Το σφάλμα πολυανάκλασης και ο θόρυβος έχουν αγνοηθεί ενώ υπάρχει ο άγνωστος όρος της ασάφειας για κάθε ζεύγος δέκτη A και λαμβανόμενου δορυφόρου i που παραμένει σταθερός εφόσον δεν υπάρξει απώλεια σήματος. Το σφάλμα της χρονικής καθυστέρησης των σημάτων εσωτερικά στο δέκτη θεωρούμε ότι απορροφάται ικανοποιητικά από το σφάλμα του ρολογιού του όπως και η αρχική ασάφεια φάσης στο δέκτη για την οποία θεωρούμε ότι απορροφάται από τον όρο της ασάφειας. Η αρχική ασάφεια φάσης στο δορυφόρο i θεωρήσουμε καταρχάς ότι παραμένει.

Η διόρθωση LC (L Correction) στην μετρούμενη ψευδοαπόσταση από φάση για το δορυφόρο i , υπολογίζεται από τη διαφορά μεταξύ γεωμετρικής απόστασης και ψευδοαπόστασης, σύμφωνα με τη σχέση,

$$LC_A^i(t) = \rho_A^i(t_0) - L_A^i(t_0) = -c\delta_A(t_0) + c\delta(t_0)^i - \Delta\rho_A^i(t_0) - \lambda n_A^i$$

Συλλέγοντας έναν ικανό αριθμό ψευδοαποστάσεων από φάσεις, ο δέκτης αναφοράς A υπολογίζει το ρυθμό μεταβολής της διόρθωσης RLC (Rate of L Correction). Επομένως η πρόβλεψη για τη διορθωμένη ψευδοαπόσταση L σε μία επόμενη χρονική στιγμή t υπολογίζεται από τη σχέση,

$$CL_A^i(t) = LC_A^i(t_0) + RLC(t_0)(t-t_0) \text{ (σχέση 82)}$$

Η ψευδοαπόσταση που παρατηρείται από έναν κινούμενο δέκτη B, προς τον ίδιο δορυφόρο I, την (σχεδόν) ίδια χρονική στιγμή (t) δίνεται από τη σχέση,

$$L_B^i(t) = \rho_B^i(t) + c\delta_B(t) - c\delta^i(t) + \Delta\rho_B^i(t) + \lambda n_B^i \text{ (σχέση 83)}$$

Ο κινούμενος δέκτης B βρίσκεται σχετικά κοντά στον σταθερό δέκτη και συνεπώς τα σφάλματα που περιγράφει ο όρος $\Delta\rho$ μπορεί να θεωρηθούν ίδια με ικανοποιητική ακρίβεια, λόγω υψηλής συσχέτισης. Η διορθωμένη ψευδοαπόσταση από φάση CL_B^i (Corrected L) για τον κινούμενο δέκτη B την εποχή t μπορεί να προκύψει με βάση τη διόρθωση που υπολογίζεται από το σταθερό δέκτη A, δηλαδή,

$$\begin{aligned} CL_B^i(t) &= L_B^i(t) + LC_A^i(t) = L_B^i(t_0) + \{-c\delta_A(t) + c\delta(t_0)\}^i - \Delta\rho_A^i(t_0) - \lambda n_A^i = \\ &= \{\rho_B^i(t) + c\delta_B(t) - c\delta(t)\}^i + \Delta\rho_B^i(t) + \lambda n_B^i + \{-c\delta_A(t) + c\delta(t_0) - \Delta\rho_A^i(t_0) - \lambda n_A^i\} = \\ &= \rho_B^i(t) + c\delta_B(t) - c\delta_A(t) + \lambda n_B^i - \lambda n_A^i \text{ (σχέση 84)} \end{aligned}$$

όπου είναι φανερό η απαλοιφή του σφάλματος του δορυφορικού ρολογιού και του όρου $(\Delta\rho_B^i - \Delta\rho_A^i)$ που επίσης (σχεδόν) μηδενίζεται.

Έτσι, καταλήγουμε στην εξίσωση ψευδοαπόστασης για τη μέθοδο RTK,

$$CL_B^i(t) = \rho_B^i + c\Delta\delta_{AB} + \lambda(n_B^i - n_A^i) = \rho_B^i + c\Delta\delta_{AB} + \lambda n_{AB}^i \text{ (σχέση 85)}$$

η οποία αποτελεί την εξίσωση παρατήρησης για κάθε εποχή του κινούμενου δέκτη, με άγνωστες παραμέτρους $(X_B, Y_B, Z_B, \Delta\delta_{AB})$ και τις ασάφειες φάσης λn_{AB}^i . Αν επιλυθούν οι ασάφειες, τότε οι προς προσδιορισμό άγνωστες παράμετροι θα είναι 4 ($S \geq 4$) και το πρόβλημα μετατρέπεται σε έναν ακριβή απόλυτο προσδιορισμό θέσης με ακρίβεια της τάξης των μερικών cm (γενικά < 5 cm για αποστάσεις που δεν υπερβαίνουν τα περίπου 20 με 30 km).

5.10.3 ΜΗΝΥΜΑ RTCM

Η μετάδοση των δεδομένων στις εφαρμογές πραγματικού χρόνου μεταξύ σταθερού και κινητού δέκτη γίνεται με τη χρήση διαφόρων τύπων του μηνύματος RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services). Υπάρχουν 64 τύποι μηνυμάτων αλλά μέχρι σήμερα δεν είναι όλοι σε χρήση. Αντίστοιχα υπάρχουν και χρησιμοποιούνται έως σήμερα, από τα λογισμικά επεξεργασίας, διάφορες εκδόσεις RTCM οι οποίες ανάλογα με το είδος της εφαρμογής μεταφέρουν και τις αντίστοιχες πληροφορίες. Πιο αναλυτικά, οι μέχρι σήμερα εκδόσεις (versions) του μηνύματος RTCM μπορούν να περιγραφούν ως εξής :

RTCM (έκδοση 2)

Τύπος μηνύματος	Περιεχόμενο
1	Σχετικές διορθώσεις για παρατηρήσεις κώδικα.
2	Διορθώσεις τύπου δέλτα. Περιγράφονται οι διαφορές στα διορθωμένα δεδομένα μεταξύ των στοιχείων των εφημερίδων, διότι μερικές φορές μπορεί να υπάρχει μεγάλο χρονικό κενό στη μετάδοση των δεδομένων από το σταθερό στον κινητό δέκτη.
3	Συντεταγμένες του σταθερού δέκτη.
16	Οποιοδήποτε αλφαριθμητικό κείμενο πληροφοριών π.χ. όνομα, τηλέφωνο κλπ. του σταθερού δέκτη.
59	Μήνυμα με πληροφορίες που εισάγονται από το χρήστη.

Η συγκεκριμένη έκδοση περιλαμβάνει και άλλους τύπους μηνυμάτων οι οποίοι είναι χρήσιμοι για εφαρμογές πλοήγησης και σχετικού εντοπισμού με χρήση δεδομένων κώδικα (DGPS). Η ακρίβεια προσδιορισμού που επιτυγχάνεται με τους συγκεκριμένους τύπους μηνυμάτων είναι της τάξης του ενός μέτρου ή και καλύτερη. Αξίζει να αναφερθεί ότι διορθώσεις για μετρήσεις φάσεων δεν περιέχονται στη συγκεκριμένη έκδοση και για αυτό το λόγο το 1993 αναπτύχθηκε η έκδοση 2.1 η οποία και περιγράφεται στη συνέχεια,

RTCM (έκδοση 2.1)

Τύπος μηνύματος	Περιεχόμενο
1	Όπως και στην έκδοση 2.
2	Όπως και στην έκδοση 2.
3 (ή 22)	Όπως και στην έκδοση 2 (στο μήνυμα 22 περιλαμβάνεται και το ύψος κεραίας του σταθερού δέκτη).
16	Όπως και στην έκδοση 2.
18	Μετρήσεις φάσης (μη διορθωμένες).
19	Μετρήσεις κώδικα (μη διορθωμένες).
20	Διορθώσεις για τις μετρήσεις των φάσεων.
21	Διορθώσεις για τις μετρήσεις κώδικα.
59	Όπως και στην έκδοση 2.

Για εφαρμογές που απαιτείται η χρήση δεδομένων φάσεων είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται ο τύπος 20 αντί του 18 λόγω του ότι η εκπομπή διορθώσεων συνήθως απαιτεί λογότερο χρόνο και οι αλγόριθμοι επεξεργασίας (στο κινητό δέκτη) χρησιμοποιούν λιγότερη μνήμη και λιγότερο υπολογιστικό χρόνο. Η ακρίβεια προσδιορισμού που μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση του μηνύματος RTCM v2.1 είναι της τάξης των μερικών εκατοστών η οποία συνδέεται άμεσα με την απόσταση (μειώνεται όσο αυξάνει) που έχει ο κινητός από το σταθερό δέκτη. Επίσης όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν και μετρήσεις κωδίκων προτιμότερο είναι να γίνει η χρήση (εκτός του μηνύματος 1) και των μηνυμάτων 19 και 21 όπου βοηθούν στη βελτίωση της ακρίβειας ειδικά όταν πρόκειται για γρήγορες λύσεις (rapid DGPS solutions).

RTCM (έκδοση 2.2)

Η έκδοση αυτή που ανακοινώθηκε τον Ιανουάριο του 1998 είναι όμοια με την προηγούμενη έχοντας επιπλέον πληροφορίες για τους δορυφόρους του συστήματος GLONASS. Διαφορικές διορθώσεις περιέχονται στον τύπο μηνύματος 31 οι οποίες μοιάζουν με τις αντίστοιχες για το GPS του τύπου 1. Ακριβέστερες πληροφορίες περιλαμβάνονται στους τύπους 18/19 και 20/21 όπου ξεχωρίζονται με ένα ειδικό σύμβολο. Στους τύπους μηνυμάτων 32 και 36

περιλαμβάνονται ειδικές πληροφορίες για το σύστημα GLONASS αλλά χωρίς ιδιαίτερη σημασία για τις γεωδαιτικές εφαρμογές. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι τύποι μηνυμάτων 18 και 21 μεταξύ των εκδόσεων 2.1 και 2.2 δεν είναι πλήρως συμβατοί και για αυτό μπορεί να δημιουργούνται προβλήματα, κατά τον συνδυασμό τους, μεταξύ του σταθερού και του κινητού δέκτη.

RTCM (έκδοση 2.3)

Την άνοιξη του 2001 ανακοινώνεται η τελική έκδοση 2.3 η οποία σε ότι αφορά τις γεωδαιτικές εφαρμογές περιλαμβάνει τον τύπο της κεραίας που χρησιμοποιείται (τύπος μηνύματος 23) καθώς και το σημείο αναφοράς της κεραίας (τύπος μηνύματος 24) στοιχεία που συμβάλλουν σημαντικά στον προσδιορισμό των υψομέτρων.

Για παράδειγμα αρκετοί από τους μόνιμους σταθμούς GPS του δικτύου EUREF που εκπέμπουν δεδομένα RTCM για εφαρμογές DGPS και RTK χρησιμοποιούν τους τύπους μηνυμάτων 1, 3, 16, 18, 19, 22, 23 24 και 31.

RTCM (έκδοση 3.0)

Η έκδοση αυτή που ανακοινώθηκε πριν από λίγα χρόνια αποτελεί μία εντελώς νέα δομή και περιέχει νέους τύπους μηνυμάτων με αποτέλεσμα να πλεονεκτεί σε σχέση με την έκδοση 2. Η αρχική της έκδοση αποτελείται κυρίως από τύπους μηνυμάτων που σχεδιάστηκαν για να υποστηρίζουν εφαρμογές RTK αφενός μεν, τόσο με το σύστημα GPS όσο και με το σύστημα GLONASS και αφετέρου δε, την εκπομπή διορθώσεων από πολλούς μόνιμους σταθμούς (Network-RTK). Τα μηνύματα χωρίζονται σε διάφορες ομάδες (groups) και με επιπλέον το πλεονέκτημα ότι διαφορετικά μηνύματα σε κάθε ομάδα περιέχουν παρόμοια πληροφορία. Ως αποτέλεσμα είναι ότι μπορούν να συνδυαστούν και έτσι να εξοικονομούν «φόρτο» εκπομπής κατά τη χρήση τους. Εξηγώντας με τεχνικούς όρους, η έκδοση 3.0 απαιτεί μικρότερο εύρος ζώνης (bandwidth) και παρουσιάζει περισσότερα πλεονεκτήματα σε σχέση με την προηγούμενη έκδοση 2 και τις αντίστοιχες βελτιώσεις της.

RTCM (έκδοση 3.1) και βελτιώσεις.

Η χρήση της τεχνικής δικτυακού RTK (Network-RTK) σε σχέση με τη χρήση της μεμονωμένης βάσης (single base concept) αυξάνει όχι μόνο την εφαρμογή της μεθόδου RTK σε μεγαλύτερες αποστάσεις αλλά και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Η μοντελοποίηση των συστηματικών σφαλμάτων ενός δικτύου μόνιμων σταθμών αποτελεί το «κλειδί» για την

επίτευξη ποιοτικών αποτελεσμάτων. Μέχρι σήμερα υπάρχουν τρεις εμπορικά διαθέσιμες τεχνικές δικτυακού RTK : η τεχνική του εικονικού σταθμού αναφοράς ή VRS (Virtual Reference Station), η τεχνική της μετάδοσης παραμέτρων επιφανειακών διορθώσεων ή FKP (Flachen Korrektur Parameter) και η τεχνική κύριας υποβοήθησης ή MAC (Master Auxiliary Concept). Ως αποτέλεσμα του δικτυακού RTK, ανακοινώθηκε η έκδοση 3.1 το έτος 2006 με νέους τύπους μηνυμάτων (1014 ως 1019).

Η πρώτη προσθήκη στην έκδοση 3.1 ακολούθησε το 2007 όπου επιπλέον νέοι τύποι μηνυμάτων (1021 ως 1028) προστέθηκαν με κοπό την εκπομπή παραμέτρων μετασχηματισμού Datum και προβολικών συστημάτων.

RTCM 3.1

Τύπος μηνύματος	Περιεχόμενο
1021	Παράμετροι μετασχηματισμού Helmert.
1022	Παράμετροι μετασχηματισμού Molodenski-Badekas).
1023	Σφάλματα μετασχηματισμού, σε μορφή ελλειψοειδούς κανάβου.
1024	Σφάλματα μετασχηματισμού, σε μορφή επίπεδου κανάβου.
1025	Παράμετροι προβολής διαφορετικής από τα μηνύματα 1026 και 1027.
1026	Παράμετροι προβολής τύπου Lambert – σύμμορφης κωνικής.
1027	Παράμετροι προβολής τύπου πλάγιας Μερκατορικής.
1028	Εφεδρικό μήνυμα.
1030	Σφάλματα δικτυακού RTK για το σύστημα GPS

Μία επιπλέον προσθήκη στη συγκεκριμένη έκδοση 3.1 ακολούθησε μέσα στο ίδιο έτος με την προθήκη τεσσάρων νέων τύπων μηνυμάτων (1030 ως 1033) σχετικών με τις τεχνικές του δικτυακού RTK τόσο για το σύστημα GPS όσο και για το σύστημα GLONASS.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΓΡΑΜΜΙΚΟΙ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ ΒΑΣΗΣ GPS

6.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ

Η μέθοδος μέτρησης και προσδιορισμού θέσης σε μία συγκεκριμένη εφαρμογή εξαρτάται πάρα πολύ από την απαιτούμενη ακρίβεια, γεγονός που οδηγεί και στην κατάλληλη επιλογή των δεκτών GPS. Γενικά ο προσδιορισμός θέσης μπορεί να διακριθεί σε στατικό και κινηματικό προσδιορισμό, σε προσδιορισμό εκ των υστέρων και σε προσδιορισμό σε πραγματικό χρόνο και τέλος σε απόλυτο και σε σχετικό προσδιορισμό θέσης. Οι κατηγορίες αυτές μπορούν να χαρακτηρισθούν ως μέθοδοι, τεχνικές ή και διαδικασίες και συνδυάζονται μεταξύ τους σε μια εφαρμογή, π.χ. σε μία μελέτη για την εκπόνηση ενός σχεδίου πόλης, σε μία κτηματολογική μελέτη, σε μία τοπογραφική αποτύπωση, σε μία περιβαλλοντική μελέτη, σε μία χάραξη ενός έργου κοινής ωφέλειας, σε μία χαρτογράφηση.

Ο όρος **στατικός προσδιορισμός θέσης (static positioning)** αναφέρεται στις περιπτώσεις εκείνες όπου ο δέκτης ή οι δέκτες GPS παραμένουν ακίνητοι καθόλη τη διάρκεια των μετρήσεων στα διάφορα σημεία που αναπτύσσονται σε κάθε μετρητική μέθοδο.

Ο όρος **κινηματικός προσδιορισμός (kinematic positioning)** αφορά στον προσδιορισμό των συντεταγμένων που ορίζουν τη διαδρομή (trajectory) ενός κινητού μέσου (οχήματος) πάνω στο οποίο βρίσκεται ο δέκτης, χωρίς να ενδιαφερόμαστε για την αιτία που προκαλεί την κίνηση. Επομένως, ο δέκτης βρίσκεται σε συνεχή κίνηση και καταγράφει παρατηρήσεις είτε σε τυχαία σημεία μιας διαδρομής είτε και σε συγκεκριμένα σημεία που επιλέγει ο χρήστης.

Μια άλλη γενική διάκριση για τον προσδιορισμό θέσης έχει σχέση με το πότε υπολογίζονται οι συντεταγμένες των σημείων σε σχέση με το χρόνο εκτέλεσης των μετρήσεων. Έτσι διακρίνουμε τον **προσδιορισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο (real time positioning)** την ίδια ή σχεδόν την ίδια χρονική στιγμή εκτέλεσης των μετρήσεων και τον **εκ των υστέρων προσδιορισμό θέσης (post processing positioning)** μετά το πέρας των μετρήσεων.

Τέλος, μία τρίτη κατηγορία μεθόδων προσδιορισμού θέσης έχει σχέση με την ακρίβεια (υψηλή ή χαμηλή) και αφορά στον **απόλυτο προσδιορισμό θέσης (absolute/point positioning)** και στο **σχετικό προσδιορισμό θέσης (relative positioning, differential positioning)**.

Οι παραπάνω μέθοδοι συνδυάζονται μεταξύ τους και καθορίζουν πλήρως μία συγκεκριμένη μέθοδο που θα εφαρμοσθεί στην πράξη π.χ. μέθοδος σχετικού στατικού προσδιορισμού, μέθοδος σχετικού κινηματικού προσδιορισμού, μέθοδος σχετικού προσδιορισμού σε πραγματικό χρόνο, μέθοδος απόλυτου προσδιορισμού κ.λ.π.. Για την ολοκλήρωση μιας μελέτης στην πράξη μπορεί να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι και τεχνικές μετρήσεων. Για παράδειγμα, για το δίκτυο GPS θα χρησιμοποιηθεί η στατική μέθοδος και για την αποτύπωση σημείων λεπτομερειών η κινηματική μέθοδος.

Στις τοπογραφικές και γεωδαιτικές εφαρμογές χρησιμοποιείται κυρίως η μέθοδος του σχετικού στατικού προσδιορισμού με επεξεργασία εκ των υστέρων (δίκτυα, πυκνώσεις δικτύων, πολυγωνομετρία και γενικά προσδιορισμοί σημείων αναφοράς με αυξημένες απαιτήσεις ακρίβειας), ακολουθεί η μέθοδος του σχετικού κινηματικού προσδιορισμού με προσδιορισμό εκ των υστέρων (περίπτωση αποτυπώσεων σημείων λεπτομερειών) και τέλος ο (σχετικός) κινηματικός προσδιορισμός σε πραγματικό χρόνο (περίπτωση χαράξεων). Υπενθυμίζεται ότι χρησιμοποιούνται απαραίτητως οι παρατηρήσεις φάσης για τις εφαρμογές υψηλής ακρίβειας όπως είναι οι γεωδαιτικές και τοπογραφικές εφαρμογές.

Πριν από την εκτέλεση των παρατηρήσεων GPS για οποιαδήποτε εφαρμογή, ιδίως για τον στατικό σχετικό προσδιορισμό, απαιτείται μία κατάλληλα προετοιμασία και ένας καλός **σχεδιασμός (planning a GPS survey)**.

6.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

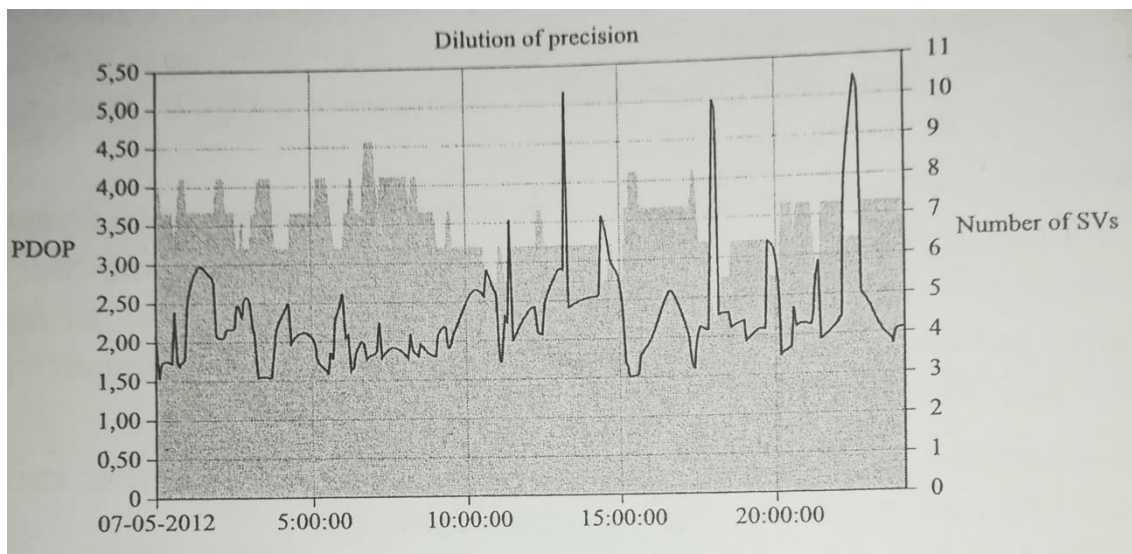
Ενδεικτικά, αναφέρονται παρακάτω μερικοί γενικοί κανόνες και οδηγίες για την προετοιμασία και την εκτέλεση των μετρήσεων GPS.

- Αναγνώριση της περιοχής των εργασιών για την επιλογή της κατάλληλης θέσης των σημείων (καλός ορίζοντας, όχι κοντά σε σοβαρά εμπόδια και πηγές παρεμβολών, εύκολη προσβασιμότητα).
- Επιλογή των μεθόδων και των παραμέτρων των μετρήσεων (mission planning).
- Επιλογή των δεκτών (τύπος και αριθμός) ανάλογα με την ακρίβεια και την ταχύτητα εκτέλεσης της εργασίας.
- Επιλογή του κατάλληλου προσωπικού τόσο για την εκτέλεση των μετρήσεων όσο και για την επεξεργασία.
- Δημιουργία κατάλληλων εντύπων στα οποία ο χρήστης θα καταγράφει κατά τη διάρκεια των μετρήσεων σημαντικές πληροφορίες π.χ. εξασφάλιση σημείου, όνομα

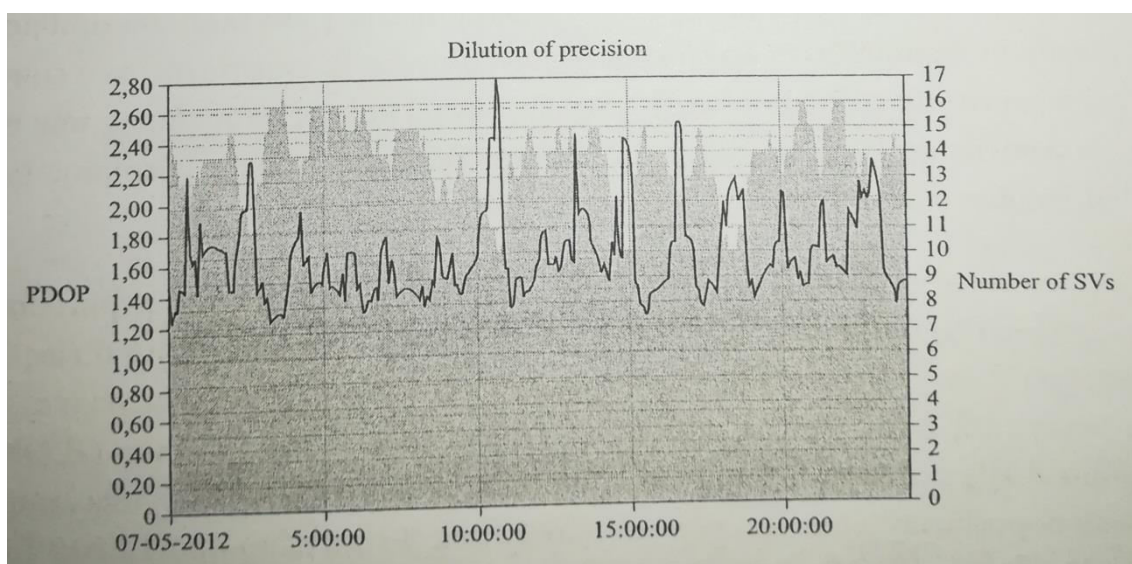
- σημείου, έναρξη και πέρασ των μετρήσεων, ύψος κεραίας, προσεγγιστική θέση, σύστημα αναφοράς, οδοιπορικό, στοιχεία εξοπλισμού και τυχόν προβλήματα.
- Προγραμματισμός των μετρητικών περιόδων, δηλαδή καθορισμός του αριθμού των περιόδων, του χρόνου των μετρήσεων, επιλογή των σημείων μέτρησης σε κάθε περίοδο και των διαδρομών μεταξύ των περιόδων για την εναλλαγή των δεκτών στα διάφορα σημεία σύμφωνα με τον προγραμματισμό.
 - Εξασφάλιση της επικοινωνίας μεταξύ των συνεργείων μέτρησης και της ασφάλειας του προσωπικού και του εξοπλισμού.
 - Μελέτη του δορυφορικού σχηματισμού, με τη δημιουργία διαγράμματος ορατότητας με μέτρα DOP και με βάση ένα πρόσφατο almanac (Σχήμα 8.1α, Σχήμα 8.1β) σε οριακές περιπτώσεις όπου η λήψη κατάλληλου αριθμού δορυφόρων περιορίζεται λόγω εμποδίων. Τα στοιχεία εισαγωγής των εμποδίων εισάγονται με τα αζιμούθια, τις γωνίες ύψους και τις αποστάσεις των σημείων που τα ορίζουν σε σχέση με το συγκεκριμένο σημείο μέτρησης (χρήση χάρτη, θεοδόλιχου, πυξίδας, κ.λπ.).

Με ανοικτό ορίζοντα, παρατηρώντας το Σχήμα 8.1α για την περίπτωση δορυφόρων GPS, ο αριθμός των ορατών δορυφόρων κυμαίνεται από 6 έως 10 με μέσο όρο 7 έως 8 (γωνία ύψους $>15^\circ$) και ο δείκτης PDOP είναι γενικά <4 με μια μέση τιμή 2 έως 2,5. Σε περίπτωση λήψης δορυφόρων GPS και GLONASS (σχήμα 8.1β) φαίνεται η σημαντική βελτίωση τόσο στον αριθμό των λαμβανόμενων δορυφόρων, που κυμαίνεται από 10 έως 17 με μέσο όρο 12 έως 13 όσο και στον δείκτη PDOP που είναι γενικά <2 με μια μέση τιμή 1,5. Σε περιπτώσεις ύπαρξης εμποδίων οι παραπάνω τιμές μεταβάλλονται προς το χειρότερο π.χ. αύξηση του δείκτη PDOP.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ο χρήστης πρέπει να μεριμνά για τη συμπλήρωση των εντύπων, ιδιαίτερα να εισάγει στο δέκτη και να καταγράφει σε έντυπο το ύψος της κεραίας (Σχήμα 8,2) και το όνομα του σημείου, την ασφάλεια του εξοπλισμού, την επάρκεια των μπαταριών και της μνήμης και τα τυχόν διαγνωστικά μηνύματα και προβλήματα του δέκτη. Το ύψος της κεραίας πρέπει να μετριέται και να καταγράφεται σύμφωνα με το εγχειρίδιο του κατασκευαστή, στην αρχή, στο μέσον και στο τέλος της μετρητικής περιόδου.



Σχήμα 7 α : Διάγραμμα ορατότητας δορυφόρων GPS και δείκτης PDOP



Σχήμα 7 β : Διάγραμμα ορατότητας δορυφόρων GPS και GLONASS και δείκτης PDOP

Στατικός προσδιορισμός θέσης.

Η **σχετική ακρίβεια** του στατικού προσδιορισμού σε σχέση με το μήκος της βάσης είναι της τάξης των (3-5) mm + (0,5 έως 1) ppm με δέκτες δύο συχνοτήτων και (5-10) mm + (1 έως 2) ppm με δέκτες μίας συχνότητας, όπου η διάρκεια μέτρησης είναι περίπου διπλάσια για τις συνήθεις βάσεις των μερικών χιλιομέτρων. Σε μεγάλες βάσεις, της τάξης των δεκάδων km, η διάρκεια των μετρήσεων είναι τουλάχιστον μερικές ώρες και θα πρέπει να χρησιμοποιούνται δέκτες διπλής συχνότητας, κυρίως για την αντιμετώπιση του

ιονοσφαιρικού σφάλματος. Στον σχετικό κινηματικό προσδιορισμό οι ακρίβειες είναι λίγο χειρότερες. Σε αντίθεση με τις κινηματικές εφαρμογές, η επίδραση του σφάλματος πολυανάκλασης στις στατικές εφαρμογές (καλύτερη ακρίβεια) είναι αρκετά μικρότερη στη διάρκεια των μετρήσεων (αρκετά λεπτά μέχρι και ώρες) η μεταβολή της γεωμετρίας του δορυφορικού σχηματισμού ως προς το δέκτη προκαλεί και μεταβολή στα σφάλματα της πολυανάκλασης τα οποία τείνουν κατά μέσο όρο να ελαχιστοποιηθούν.

Η σχετική ακρίβεια για την κατακόρυφη θέση (υψομετρική ακρίβεια) είναι γενικά λίγο χειρότερη, μία έως δύο φορές, σε σχέση με τη σχετική ακρίβεια στην οριζόντια θέση (οριζοντιογραφική ακρίβεια). Η διαφορά αυτή οφείλεται στη γεωμετρία του δορυφορικού σχηματισμού ο οποίος δεν είναι βέλτιστος για την κατακόρυφη συνιστώσα (θα έπρεπε να λαμβάνονται και δορυφόροι στον ορίζοντα ή και χαμηλότερα που είναι αδύνατον).

Η τάξη μεγέθους των παραπάνω ακριβειών προϋποθέτει καλή γεωμετρία του δορυφορικού σχηματισμού και είναι συνάρτηση κυρίως του μήκους των βάσεων (συσχέτιση ατμοσφαιρικών συνθηκών) καθώς και της δυνατότητας του δέκτη να εκτελεί μετρήσεις διατηρώντας σε υψηλές τιμές το λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) που σημαίνει σήμα υψηλής ποιότητας. Οι βάσεις μπορούν να είναι και της τάξης των μερικών εκατοντάδων χιλιομέτρων αρκεί να υπάρχουν ταυτόχρονα κοινοί παρατηρούμενοι δορυφόροι. Όσο μεγαλύτερη είναι η βάση τόσο περισσότερος χρόνος μετρήσεων απαιτείται επειδή το πρόβλημα της επίλυσης των ασαφειών φάσης γίνεται δυσκολότερο, κυρίως λόγω των ατμοσφαιρικών συνθηκών.

Στο σχετικό στατικό προσδιορισμό ο **χρόνος συλλογής των δεδομένων** διαρκεί συνήθως 10 λεπτά έως μερικές ώρες ή και μερικές ημέρες. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι :

- ✓ Για βάσεις μέχρι 5 km η διάρκεια των μετρήσεων είναι περίπου 15 πρώτα λεπτά
- ✓ Για βάσεις από 5 km έως 15 km η διάρκεια των μετρήσεων αυξάνει σε περίπου μία ώρα
- ✓ Για μεγαλύτερες βάσεις (περίπτωση όχι συνήθης στις τρέχουσες εφαρμογές) απαιτούνται μερικές ώρες
- ✓ Ο ρυθμός καταγραφής των παρατηρήσεων επιλέγεται συνήθως στα 10 sec ή στα 15 sec για τις τρέχουσες εφαρμογές και στα 30 sec για πολύωρες περιόδους μετρήσεων
- ✓ Η γωνία αποκοπής (cut-off angle, elevation angle/mask) ορίζεται κατά κανόνα στις 15°, που σημαίνει ότι κάτω από αυτή την τιμή δεν παρακολουθούνται δορυφόροι και συνεπώς δεν καταγράφονται μετρήσεις.

Δύο ή περισσότεροι δέκτες που μετρούν ταυτόχρονα εναλλάσσονται σε διάφορα σημεία μέχρι να ολοκληρωθεί η μέτρηση των βάσεων που απαιτούνται για να έχουμε προσδιορισμό

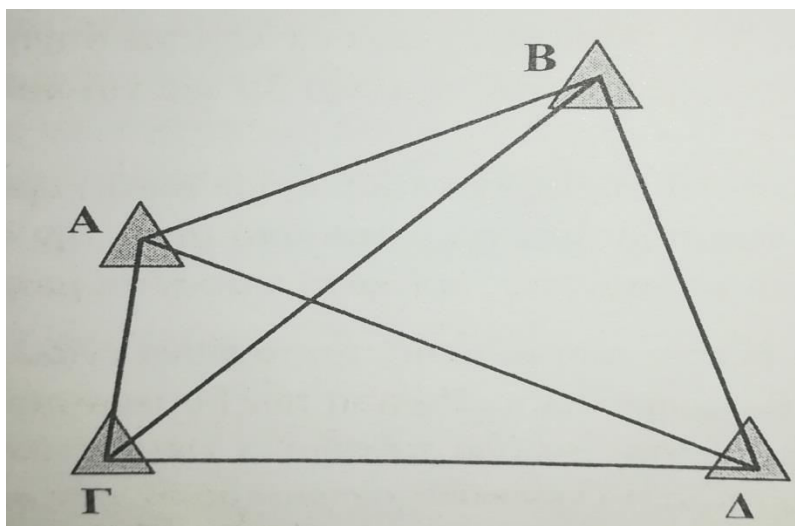
θέσης για όλα τα σημεία του δικτύου. Η μετακίνηση των δεκτών στα σημεία απαιτεί έναν καλό σχεδιασμό εκ των προτέρων, ιδιαίτερα όταν διατίθενται πάνω από δύο δέκτες, ώστε να ελαχιστοποιείται ο χρόνος μεταξύ των εναλλαγών και παράλληλα να υλοποιείται μία καλή γεωμετρική μορφή του δικτύου με ικανή πλεονάζουσα πληροφορία.

Απαιτείται προσοχή στις περιπτώσεις όπου ένα σημείο προσδιορίζεται μόνο από μία βάση και μετριέται μόνο μία φορά. Τότε δεν υπάρχει πλεονάζουσα πληροφορία για το συγκεκριμένο σημείο και αν υπάρξει κάποιο λάθος π.χ. σφάλμα κέντρωσης ή σφάλμα στο ύψος της κεραίας, δεν μπορεί να ελεγχθεί. Οι περιπτώσεις αυτές πρέπει να αποφεύγονται, ιδιαίτερα για βασικά σημεία ελέγχου στα οποία θα στηριχθεί στη συνέχεια μία ολοκληρωμένη εφαρμογή π.χ. μία τοπογραφική μελέτη αποτύπωσης.

Η μέτρηση ενός δικτύου ολοκληρώνεται συνήθως σε έναν αριθμό μετρητικών περιόδων. Με δύο μόνο δέκτες κάθε μέτρηση βάσης αποτελεί και μία περίοδο μέτρησης. Με περισσότερους δέκτες, από περίοδο σε περίοδο, προφανώς ένας αριθμός σημείων πρέπει να είναι κοινός : τουλάχιστον ένα και κατά προτίμηση δύο έως και τέσσερα σημεία για αύξηση και έλεγχο της ακρίβειας και της αξιοπιστίας.

Ένας ή περισσότεροι δέκτες μπορεί για κάποια διαστήματα να παραμένουν στα ίδια σημεία και οι υπόλοιποι δέκτες να μετακινούνται ανάλογα με το σχεδιασμό μέτρησης των βάσεων. Όσοι δέκτες μετακινούνται παραμένουν κλειστοί κατά τη διάρκεια των μετακινήσεων. Οι υπόλοιποι μπορούν στο ίδιο διάστημα να κλείσουν και να τεθούν πάλι σε λειτουργία ή να μετρούν συνεχώς (εξαρτάται και από τη οικονομία στη μπαταρία και τη διαθέσιμη μνήμη).

Η βασική ιδέα μέτρησης ενός δικτύου με δύο δέκτες μπορεί να δοθεί με το εξής απλό παράδειγμα. Σύμφωνα με το Σχήμα 8.3, έστω ότι θέλουμε να προσδιορίσουμε τα σημεία Α, Β, Γ και Δ διαθέτοντας δύο δέκτες και επιλέγοντας τη μέτρηση όλων των δυνατών βάσεων μεταξύ των σημείων, οι οποίες θα είναι και ανεξάρτητες μεταξύ τους.



Σχήμα 8: Μέθοδος στατικού προσδιορισμού

Ο σχεδιασμός των μετρήσεων μπορεί να είναι ως εξής : Ο ένας δέκτης παραμένει στο σημείο A (reference) και ο άλλος (rover) μετακινείται διαδοχικά στα σημεία Γ,Δ και Β παραμένοντας στο κάθε σημείο μια κατάλληλη χρονική διάρκεια για την καταγραφή των μετρήσεων. Κατά τις μετακινήσεις μεταξύ των σημείων ο δέκτης κλείνει (power off) ενώ ο σταθερός δέκτης μπορεί να μετρά συνεχώς ή και να κλείνει για οικονομία μνήμης και μπαταρίας. Απαιτείται συντονισμός και τήρηση του προγραμματισμού, με επικοινωνία των χρηστών, για τη σωστή εφαρμογή του σχεδιασμού των μετρήσεων. Έτσι, θα έχουν μετρηθεί διαδοχικά οι βάσεις (A-Γ),(A-Δ) και (A-B). Στη συνέχεια, ο δέκτης που ήταν στο σημείο A μετακινείται στο σημείο Γ ενώ ο άλλος δέκτης παραμένει στο B. Με σταθερό τώρα το δέκτη στο B (reference) ο άλλος δέκτης μετακινείται από τη νέα θέση B στο σημείο Δ και συνεπώς μετρούνται οι βάσεις (B-Γ) και(B-Δ). Τέλος, για τη μέτρηση της βάσης (Γ-Δ) ο ένας δέκτης παραμένει στο Δ και ο άλλος από το B επισκέπτεται το Γ ή εναλλακτικά ο δέκτης από το Δ επισκέπτεται το Δ και ο δέκτης που ήταν στο Δ μετακινείται στο Γ. Από την επίλυση των βάσεων και τη συνόρθωση του δικτύου προκύπτουν οι συντεταγμένες των σημείων στο σύστημα WGS84.

Στην πράξη ενδιαφέρει συνήθως η ένταξη του δικτύου GPS/GNSS σε ένα τοπικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς. Η διαδικασία αυτή ισοδυναμεί με ένα μετασχηματισμό των συντεταγμένων GPS/GNSS που αναφέρονται στο WGS84 ή σε ένα ITRF στο τοπικό σύστημα και απαιτεί έναν ικανό αριθμό κοινών σημείων. Έτσι σε κάθε καμπάνια μετρήσεων θα πρέπει να συμπεριληφθούν και ορισμένα σημεία με γνωστές συντεταγμένες ως προς το τοπικό σύστημα αναφοράς π.χ. ως προς το ΕΓΣΑ87, τουλάχιστον 2 και κατά προτίμηση, για έλεγχο, τουλάχιστον 3. Πολλές φορές, ιδιαίτερα όταν ο χρήστης χρησιμοποιεί δίκτυα μόνιμων

σταθμών, είναι διαθέσιμοι με κάποια μορφή (συντελεστές, τιμές κανάβου) παράμετροι μετασχηματισμοί των συντεταγμένων GPS/GNSS από το σύστημα του δικτύου των μόνιμων σταθμών στο τοπικό σύστημα ή γεωδαιτικό datum.

Δύο παραλλαγές της στατικής μεθόδου, είναι γνωστές με τις ονομασίες **γρήγορος στατικός προσδιορισμός** και **ψευδοκινηματικός στατικός προσδιορισμός** ή στατικός προσδιορισμός με επαναμέτρηση.

6.2.1 ΓΡΗΓΟΡΟΣ ΣΤΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ

Στην ουσία δεν υπάρχει κάποια ουσιαστική διαφορά στη μεθοδολογία μέτρησης με τη μέθοδο του στατικού προσδιορισμού. Απλά ο γρήγορος στατικός προσδιορισμός χρησιμοποιείται για μικρές βάσεις, της τάξης των μερικών χιλιομέτρων, και με ρυθμό καταγραφής συνήθως τα 10 sec. Έτσι ο χρόνος παραμονής των δεκτών στα σημεία είναι γενικά μικρότερος, της τάξης των 10 έως 15 λεπτών. Ο μικρότερος χρόνος για την εκτέλεση των μετρήσεων δικαιολογείται από τη χρήση πιο απλών και γρήγορων τεχνικών επίλυσης των ασαφειών φάσης.

Μερικοί δέκτες προειδοποιούν τον χρήστη ότι συμπληρώθηκε ο κατάλληλος χρόνος παραμονής, δηλαδή έχει συλλεχθεί ικανοποιητικός αριθμός παρατηρήσεων για την επίλυση της εκάστοτε μετρούμενης βάσης, σύμφωνα με τον αριθμό των λαμβανόμενων δορυφόρων και του μέτρου GDOP ή DOP.

6.2.2 ΨΕΥΔΟΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ

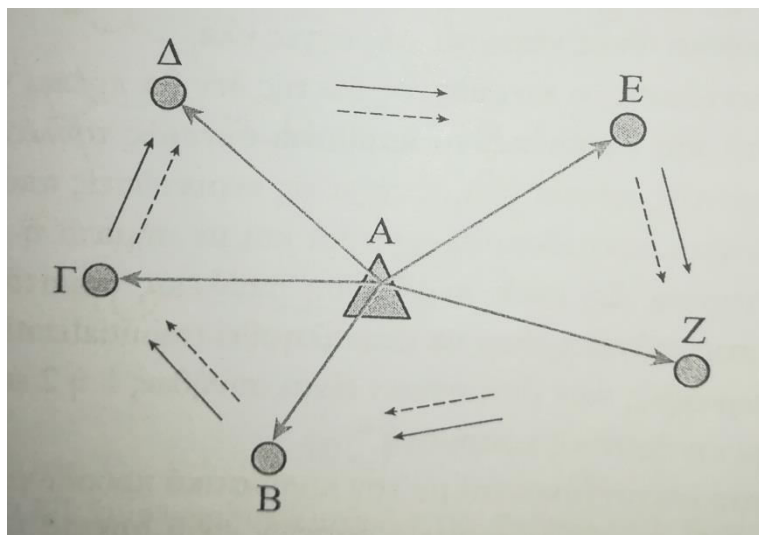
Και αυτή η μέθοδος είναι καθαρά μία στατική μέθοδος προσδιορισμού θέσης. Η μετρητική διαδικασία διαφοροποιείται από την προηγούμενη στο ότι ο κινητός δέκτης επισκέπτεται τα άγνωστα σημεία δύο τουλάχιστον φορές, μετά από την ολοκλήρωση κάθε μέτρησης όλων των σημείων (Σχήμα 8,4). Έτσι κάθε φορά που επισκέπτεται ένα σημείο παραμένει λίγα λεπτά, λιγότερο και από τη γρήγορη στατική μέθοδο.

Για παράδειγμα, μεταξύ της πρώτης και δεύτερης επίσκεψης έχει μεσολαβήσει ικανό χρονικό διάστημα π.χ. μία έως δύο ώρες, ώστε η γεωμετρία των δορυφόρων να έχει αλλάξει σημαντικά και έτσι να είναι δυνατή η επίλυση των ασαφειών φάσης.

Κάθε σημείο προσδιορίζεται από το σύνολο των μετρήσεων των δύο επισκέψεων ως εάν είχε γίνει μόνο μία επίσκεψη και με το σύνολο των δορυφόρων από τις δύο επισκέψεις που πιθανόν να είναι τελείως διαφορετικοί τη δεύτερη φορά.

Η μέθοδος αυτή προσφέρεται στις περιπτώσεις που θα χρειαστεί να μετρήσουμε π.χ. την άλλη μέρα, ορισμένα σημεία, για τα οποία δεν επιτύχαμε ικανοποιητική ακρίβεια ή όταν η πρώτη σειρά μετρήσεων πραγματοποιήθηκε με αδύνατη γεωμετρία οπότε οι νέες μετρήσεις θα αθροιστούν με τις παλιές για να δώσουν λύση στο πρόβλημα.

Η μέθοδος είναι ισοδύναμη με τη γρήγορη στατική και αφορά σχεδόν τις ίδιες εφαρμογές (μικρές βάσεις, μικρής έκτασης περιοχή)



Σχήμα 9: Ψευδοκινηματική μέθοδος.

6.2.3 ΣΧΕΤΙΚΟΣ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ

Ο **σχετικός κινηματικός προσδιορισμός** αφορά συνήθως εφαρμογές για τον προσδιορισμό της τροχιάς οχημάτων, διαδρομών π.χ. οδικό δίκτυο, και σημείων λεπτομερειών στις τοπογραφικές και χαρτογραφικές αποτυπώσεις.

Στη διαδικασία αυτή απαιτείται αρχικά να λυθεί το πρόβλημα της ασάφειας φάσης για όλους τους δορυφόρους. Ο ακίνητος δέκτης (reference receiver) μένει συνεχώς στο γνωστό σημείο με καλό ορίζοντα και μακριά από εστίες παρεμβολών και ανάκλασης (διερχόμενα οχήματα, κεραίες ραδιοφώνου/τηλεόρασης/κινητής τηλεφωνίας, υψηλή τάση).

Ο όρος «γνωστό σημείο» δεν σημαίνει υποχρεωτικά ότι το σημείο αυτό είναι ένα γνωστό τριγωνομετρικό σημείο αλλά επιλέγεται με βάση τα κριτήρια που αναφέρθηκαν. Οι ακριβείς του συντεταγμένες, αν χρειασθεί, θα προκύψουν από μια διαδικασία στατικού προσδιορισμού από άλλα γνωστά τριγωνομετρικά σημεία, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί εκ των υστέρων. Η μόνη περίπτωση που απαιτούνται οι ακριβείς συντεταγμένες είναι προσδιορισμός θέσης σε πραγματικό χρόνο οπότε η διαδικασία του στατικού προσδιορισμού πρέπει να προηγηθεί.

Ο κινητός δέκτης (rover, moving receiver) στην αρχή παραμένει ακίνητος σε ένα σημείο μέχρι να συλλέξει ικανό αριθμό μετρήσεων για την επίλυση των ασαφειών φάσης (static initialization) η οποία γίνεται εκ των υστέρων ή και σε πραγματικό χρόνο. Το σημείο αυτό μπορεί να είναι ένα σημείο με γνωστές ακριβείς συντεταγμένες, οπότε ο δέκτης παραμένει ακίνητος μόνο για λίγες εποχές, που απαιτούνται για να επιλυθούν οι ασάφειες με βάση τα δύο γνωστά σημεία. Επίσης, για την επίλυση των ασαφειών φάσης, το σημείο μπορεί να είναι ένα άγνωστο σημείο, όχι πολύ μακριά από τον δέκτη αναφοράς, οπότε ο δέκτης θα παραμείνει ακίνητος περισσότερο χρόνο π.χ. μερικά λεπτά (rapid static) ώστε να συλλεχθεί ικανός αριθμός παρατηρήσεων. Μερικές φορές, ιδίως για δέκτες μίας συχνότητας, χρησιμοποιούνται και άλλες τεχνικές όπως η τεχνική της εναλλαγής των κεραιών (antenna swarming) μεταξύ των δεκτών και η τεχνική της χρήσης βάσης γνωστού μήκους (initialization bar) χωρίς να απαιτείται γνωστό σημείο.

Μετά από το αρχικό στάδιο του οποίου σκοπός είναι η επίλυση των ασαφειών, ο κινούμενος δέκτης είναι έτοιμος να αρχίσει την κινηματική διαδικασία, τοποθετημένος συνήθως πάνω σε ένα όχημα (π.χ. σε σχάρα οροφής οχήματος). Εάν ενδιαφέρει ο προσδιορισμός σε πραγματικό χρόνο, τότε ο κινούμενος δέκτης λαμβάνει δεδομένα, κατά κανόνα διορθώσεις παρατηρήσεων, από τον σταθερό δέκτη.

Μια εναλλακτική τεχνική για την αρχική επίλυση των ασαφειών σε σχέση με τις προηγούμενες είναι γνωστή με τον όρο OTF (on the fly ambiguity resolution) όπου ο κινούμενος δέκτης τίθεται σε κινηματική διαδικασία από την αρχή χωρίς να παραμείνει ακίνητος για την επίλυση των ασαφειών. Η επίλυση των ασαφειών γίνεται με βάση τις παρατηρήσεις που θα συλλέξει τα πρώτα λίγα λεπτά π.χ. 3 έως 5 ή και λιγότερο αν παρατηρούνται περισσότεροι δορυφόροι, με την προϋπόθεση ότι δεν έχει υπάρξει απώλεια σήματος. Η μέθοδος είναι αποτελεσματική εάν χρησιμοποιούνται δέκτες δύο συχνοτήτων και λαμβάνονται τουλάχιστον 5 δορυφόροι με καλή γεωμετρία. Η τεχνική αυτή εξυπηρετεί

κυρίως τις περιπτώσεις που ο δέκτης βρίσκεται μέσα σε όχημα και δεν μπορεί να παραμείνει ακίνητος π.χ. σε περίπτωση αεροπλάνου ή πλοίου ή και όταν διέρχεται κάτω από εμπόδια όπως γέφυρες, σήραγγες κ.λπ..

Σε όλες τις περιπτώσεις ο κινούμενος δέκτης δεν θα πρέπει να χάσει το δορυφορικό σήμα, δηλαδή θα πρέπει να λαμβάνει συνεχώς τουλάχιστον 4 δορυφόρους. Ο χρήστης πρέπει να προσέχει τις περιπτώσεις απώλειας σήματος για τις οποίες ο δέκτης προειδοποιεί ηχητικά και με σήματα ή μηνύματα στην οθόνη του χειριστηρίου. Σε κάθε περίπτωση απώλειας σήματος η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω πρέπει να επαναληφθεί (reinitialization).

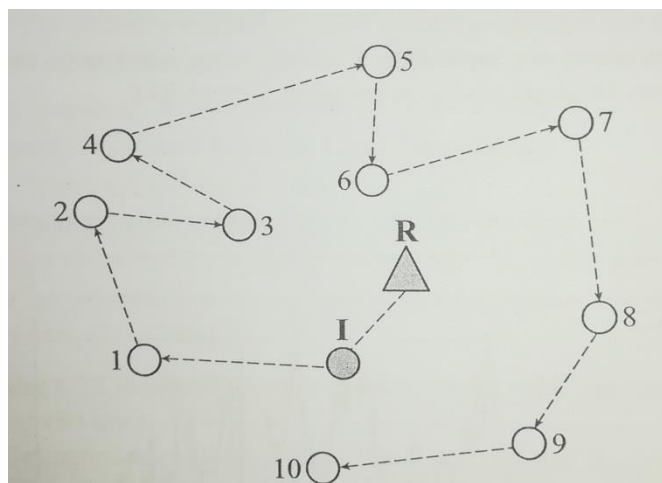
Ο ρυθμός καταγραφής των μετρήσεων είναι συνήθως 1 ή 2sec ή και λιγότερο ανάλογα με την κινηματική εφαρμογή.

Οι ακρίβειες που επιτυγχάνονται με τον κινηματικό προσδιορισμό, σε εκ των υστέρων επεξεργασία και με μετρήσεις φάσεων είναι αρκετά υψηλές, λίγο μικρότερες από αυτές του στατικού προσδιορισμού, δηλαδή της τάξης του (1-2) cm + (2-3) ppm ανάλογα με τις δυνατότητες του δέκτη.

Υπενθυμίζεται ότι με παρατηρήσεις ψευδοαποστάσεων (από κώδικες) δεν υφίσταται πρόβλημα ασαφειών αλλά οι ακρίβειες που επιτυγχάνονται είναι της τάξης του 0,5 m. Γενικά, σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου (Σχήμα 8.8), όπου απαιτείται και η επικοινωνία μεταξύ κινούμενου και σταθερού δέκτη (π.χ. radio modems, mobile phones), οι ακρίβειες είναι λίγο χειρότερες σε σχέση με την επεξεργασία εκ των υστέρων.

6.2.4 ΗΜΙΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ (STOP-AND-GO KINEMATIC, INTERMITTED KINEMATIC)

Μία παραλλαγή της καθαρά κινηματικής μεθόδου είναι η γνωστή με το όρο **“Stop-and-Go”**. Χρησιμοποιείται περισσότερο για αποτυπώσεις σημείων λεπτομερειών και γενικά για προσδιορισμούς χωρίς αυξημένες απαιτήσεις ακρίβειας. Πρόκειται για μία ημικινηματική διαδικασία όπου ο δέκτης κινείται από σημείο σε σημείο (go part) λαμβάνοντας συνεχώς σήμα και παραμένοντας στα συγκεκριμένα σημεία προσδιορισμού ακίνητος (stop part) για μερικά δευτερόλεπτα ώστε να καταγράψει μετρήσεις λίγων εποχών π.χ. 2 έως 4, με ρυθμό καταγραφής της τάξης των 5 sec ή και λιγότερο. Όταν λαμβάνονται παρατηρήσεις από λίγους δορυφόρους π.χ. 4, είναι προτιμότερο να καταγράφονται περισσότερες εποχές.



Σχήμα 10: Ημικινηματική μέθοδος (R: Reference, I: Initialization)

Η ημικινηματική διαδικασία είναι πολύ γρήγορη και οικονομική. Το μειονέκτημά της είναι ότι απαιτεί συνεχή λήψη του σήματος όπως και η καθαρά κινηματική μέθοδος. Η τεχνική αυτή είναι πολύ αποδοτική σε ανοιχτές περιοχές με λίγα εμπόδια λήψης σήματος.

Κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων ο χρήστης μεταφέρει στυλεό στον οποίο προσαρμόζεται η κεραία ή και ο δέκτης GPS (εναλλακτικά ο δέκτης τοποθετείται σε ειδικό σακίδιο πλάτης). Οι ακρίβειες που μπορούν να επιτευχθούν είναι παρόμοιες με εκείνες του κινηματικού προσδιορισμού.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CE%BF%CF%80%CE%BF%CE%B3%CF%81%CE%B1%CF%86%CE%AF%CE%B1> (15/10/17 16:26)
- https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CE%BF%CF%80%CE%BF%CE%B3%CF%81%CE%B1%CF%86%CE%AF%CE%B1#.CE.A3.CF.84.CF.8C.CF.87.CE.BF.CE.B9_.CE.BA.CE.B1.CE.B9_.CF.87.CF.81.CE.B7.CF.83.CE.B9.CE.BC.CF.8C.CF.84.CE.B7.CF.84.CE.B1 (16/10/17 18:37)
- <http://40thscouts.com/wp-content/uploads/Topografia.pdf> (16/10/17 20:12)
- https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/61/Galileo_sat_constallation.gif (20/10/17 19:25)
- http://www.esa.int/var/esa/storage/images/esa_multimedia/images/2006/02/galileo_constellation/10136150-2-eng-GB/Galileo_constellation_large.jpg (20/10/17 20:11)
- <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%93%CE%B5%CF%89%CE%B4%CE%B1%CE%B9%CF%83%CE%AF%CE%B1> (22/11/17 17:41)
- http://www.pspa.eu/images/files/project2013-14/2013-14_GPSparousiasi1.pdf (9/01/18 17:39)
- http://oceanis.lib.puas.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/222/pol_00593.pdf?sequence=1 (07/03/18 17:46)
- <https://eclass.teiath.gr/modules/document/file.php/TOP103/%CE%A0%CE%91%CE%9B%CE%91%CE%99%CE%95%CE%A3%20%CE%A0%CE%91%CE%A1%CE%9F%CE%A5%CE%A3%CE%99%CE%91%CE%A3%CE%95%CE%99%CE%A3/geodesy6.pdf>: (11/03/18 12:56)
- https://www.google.gr/search?biw=1366&bih=662&tbm=isch&sa=1&ei=WyyIWrv9LYTp6ATcobnYDw&q=solar+activity+per+year+nasa&oq=solar+activity+per+year+nasa&gs_l=psy-ab.3...27849.44487.0.44870.58.35.1.0.0.0.333.3007.0j14j2j1.17.0....0...1c.1.64.psy-ab..43.7.1217...0j0i7i30k1j0i7i10i30k1.0.c1jHsGKa0d4#imgdii=a0T25Rib4CtkEM:&imgrc=sIIXePGFICU3UM: (11/03/18 15:19)
- https://www.google.gr/search?tbm=isch&q=ionospheric+latitude+longitude+europe&spell=1&sa=X&ved=0ahUKEwiJws_N86zYAhXFZVAKHdxLAuUQvwUllYgA&biw=786&bih=467&dpr=1#imgdii=VercBJaYxQXbcM:&imgrc=EBzg1Voj1jp90M: (24/05/18 16:16)
- https://www.google.gr/search?tbm=isch&q=ionospheric+latitude+longitude+europe&spell=1&sa=X&ved=0ahUKEwiJws_N86zYAhXFZVAKHdxLAuUQvwUllYgA&biw=786&bih=467&dpr=1#imgdii=VercBJaYxQXbcM:&imgrc=EBzg1Voj1jp90M: (24/05/18 16:48)
- GPS ΚΑΙ ΓΑΙΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ Αριστέιδης Φωτίου –Χρήστος Πικριδάς Εκδόσεις ΖΗΤΗ 2^η Έκδοση.