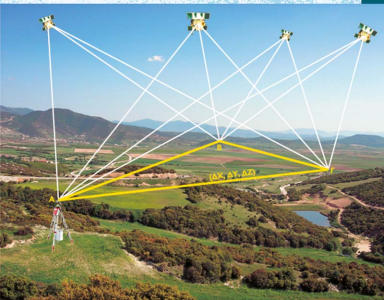


Α. Φωτίου - Χ. Πικριδάς

GPS ΚΑΙ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ



Φωτίου Αριστείδης

Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

Πικριδάς Χρήστος

Επίκουρος Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

Φωτογραφία εξωφύλλου:

Πηγή Α. Φωτίου, Περιοχή Πυθίου Ελασσόνας, Νομού Λαρίσης

© Copyright 2006, Α. Φωτίου – Χ. Πικριδάς

GPS and Geodetic Applications

Α. Fotiou – C. Pikridas

The Aristotle University of Thessaloniki, Greece

ISBN 960-456-004-2

Η κατά οποιονδήποτε τρόπο αναπαραγωγή, δημοσίευση ή χρησιμοποίηση όλου ή μερών του βιβλίου αυτού απαγορεύεται χωρίς την έγγραφη έγκριση των συγγραφέων (Ν.2121/1993 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει σήμερα), εξαιρουμένης της επιστημονικής αναφοράς



**Φωτοστοιχειοθεσία
Εκτύπωση**

Π. ΖΗΤΗ & ΣΙΑ ΟΕ

18ο χλμ Θεσ/νίκης-Περαίας

Τ.Θ. 4171 • Περαία Θεσσαλονίκης • Τ.Κ. 570 19

Τηλ.: 23920 72.222 (10 γραμ.) - Fax: 23920 72.229

e-mail: info@ziti.gr

Βιβλιοπωλείο**ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ**

Αρμενοπούλου 27 • 546 35 Θεσσαλονίκη

Τηλ. 2310 203.720, Fax 2310 211.305

e-mail: sales@ziti.gr

www.ziti.gr

Πρόλογος

Το παρόν βιβλίο γράφτηκε κυρίως για να καλύψει τις διδακτικές ανάγκες των φοιτητών του Τμήματος Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, στο πλαίσιο διδασκαλίας από τους συγγραφείς υποχρεωτικών μαθημάτων και μαθημάτων επιλογής του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών αλλά ταυτόχρονα και μαθημάτων του μεταπτυχιακού προγράμματος του Τμήματος εδώ και αρκετά χρόνια.

Το συγκεκριμένο σύγγραμμα έρχεται να καλύψει ένα κενό στην ελληνική βιβλιογραφία σε θέματα που αφορούν στο παγκόσμιο σύστημα προσδιορισμού θέσης - GPS και να αποτελέσει ένα εγχειρίδιο αναφοράς και μελέτης. Η αξιοποίηση της σύγχρονης τεχνολογίας των παγκόσμιων δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης και προσδιορισμού θέσης (GPS, GLONASS, GALILEO) αποτελεί πραγματική επανάσταση όχι μόνο για τις βασικές γεωδαιτικές και τοπογραφικές εφαρμογές (ίδρυση γεωδαιτικών datum, δίκτυα και πυκνώσεις, τοπογραφικές και υδρογραφικές αποτυπώσεις, χαράξεις έργων, παρακολούθηση μικρομετακινήσεων του γήινου φλοιού και κρίσιμων τεχνικών έργων, εφαρμογές GPS-GIS) αλλά και σε πλήθος άλλες μαζικές εφαρμογές όπως είναι η πλοήγηση, η διαχείριση στόλου οχημάτων, υπηρεσίες διάσωσης, δραστηριότητες αναψυχής, ασφαλής μεταφορά δεδομένων, κ.ά.

Η ύλη και το επίπεδο δυσκολίας διαρθρώνονται με τέτοιο τρόπο που την καθιστούν απαραίτητη για τον αναγνώστη που καθόλου ή λίγο έχει ασχοληθεί με το σχετικό αντικείμενο και χρήσιμη για τον ώριμο επιστήμονα και μηχανικό που επιζητεί περισσότερες λεπτομέρειες και εμβάθυνση. Είναι προφανές ότι δεν είναι δυνατόν να καλυφθούν σε πλήρη έκταση όλα τα θέματα που άπτονται και άλλων επιστημονικών περιοχών της Γεωδαισίας και να απαντηθούν όλα τα ερωτήματα μέσα από την ύλη ενός μόνο συγγράμματος.

Βασικός στόχος του συγγράμματος είναι η κατανόηση βασικών αρχών, εννοιών και μεθοδολογιών μετρήσεων και επεξεργασίας που εμπλέκονται στο πρόβλημα προσδιορισμού θέσης με το GPS, με έμφαση τις γεωδαιτικές και τοπογραφικές εφαρμογές όπου η ακρίβεια που απαιτείται ξεπερνά την ακρίβεια πλοήγησης των μερικών μέτρων και φτάνει στην ακρίβεια του εκατοστού του

μέτρου ή και καλύτερη. Ο μαθηματικός συμβολισμός και η παρουσίαση των μαθηματικών σχέσεων διατηρήθηκαν σε απλή μορφή ώστε να είναι προσιτά και ταυτόχρονα κατανοητά. Το πλήθος των σχημάτων και των εικόνων που παρουσιάζονται πιστεύουμε ότι βοηθούν σημαντικά στην κατανόηση της ύλης και ταυτόχρονα καθιστούν ευχάριστη την ανάγνωση.

Στο κεφάλαιο 1 δίνεται η γεωμετρική ερμηνεία του προσδιορισμού θέσης με τη χρήση του δορυφορικού συστήματος GPS παραθέτοντας επίσης τις βασικές έννοιες και τα μέρη του συστήματος.

Στο κεφάλαιο 2 περιγράφονται οι βασικές έννοιες από τη θεωρία των ταλαντώσεων και των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, αναλύεται η διαμόρφωση του δορυφορικού σήματος GPS, οι κώδικες και το μήνυμα δεδομένων. Στη συνέχεια, αναφέρονται οι καταστάσεις σκόπιμης μείωσης της ακρίβειας του συστήματος και δίνονται γενικές πληροφορίες για τα συστήματα GLONASS και GALILEO.

Το κεφάλαιο 3 αφιερώνεται στους δέκτες και τις κεραίες GPS, αναλύοντας τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά αλλά και τους συνδυασμούς χρήσης τους μαζί με τον παρελκόμενο εξοπλισμό, με τη βοήθεια αρκετών σχημάτων και εικόνων.

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται η διαδικασία εκτέλεσης των μετρήσεων GPS, της ψευδοαπόστασης και της φάσης, προσδιορίζονται οι σχετικιστικές επιδράσεις στο σήμα και εξηγείται λεπτομερώς ο ρόλος του χρόνου και των σφαλμάτων των χρονομέτρων του δορυφόρου και του δέκτη.

Η δημιουργία των εξισώσεων παρατηρήσεων και η ανάλυση – μοντελοποίηση των σφαλμάτων που επιδρούν στις μετρήσεις GPS εξετάζονται με λεπτομέρεια στο κεφάλαιο 5. Έμφαση δίνεται στα τροποσφαιρικά και ιονοσφαιρικά μοντέλα.

Το κεφάλαιο 6 ασχολείται με τα μαθηματικά μοντέλα προσδιορισμού θέσης, δίνονται οι ορισμοί του απόλυτου και σχετικού προσδιορισμού, του στατικού και κινηματικού και εξάγονται οι εξισώσεις παρατηρήσεων των απλών, διπλών και τριπλών διαφορών φάσης και κώδικα, ερμηνεύοντας ταυτόχρονα τη χρησιμότητά τους. Ακολουθούν περιγραφές για τα πρωτόκολλα επικοινωνίας RTCM και NMEA και για το βοηθητικό δορυφορικό σύστημα EGNOS.

Το κεφάλαιο 7 περιλαμβάνει αρχικά την ανάλυση και εφαρμογή των γραμμικών συνδυασμών των πρωτογενών παρατηρήσεων και των δύο φορέων και στη συνέχεια ασχολείται με τις στρατηγικές επίλυσης μιας βάσης GPS με έμφαση στις μεθόδους επίλυσης των ασαφειών φάσης.

Στο κεφάλαιο 8 διατυπώνονται τα στοιχεία σχεδιασμού των μετρήσεων GPS και περιγράφονται αναλυτικά οι μέθοδοι μετρήσεων με τις αντίστοιχες ακρίβειες. Δίνονται παραδείγματα απόλυτου και σχετικού προσδιορισμού θέσης για δύο

βάσεις GPS και εξετάζονται ταυτόχρονα οι παράμετροι που επιδρούν στην ακρίβεια προσδιορισμού της βάσης.

Το κεφάλαιο 9 αποτελεί μια εισαγωγή στα δίκτυα GPS όπου αναπτύσσονται τα κριτήρια σχεδιασμού και επιλογής βάσεων, περιγράφονται οι μέθοδοι συνόρθωσης και σχολιάζεται η μελέτη της ακρίβειας και αξιοπιστίας των δικτύων. Στη συνέχεια αναλύονται τα δίκτυα μόνιμων σταθμών παρακολούθησης και τα προϊόντα που παράγονται από τα διάφορα Διεθνή ερευνητικά κέντρα και υπηρεσίες όπως είναι η IGS, ενώ ταυτόχρονα γίνεται ειδική αναφορά στο μόνιμο σταθμό AUT1 του Τομέα Γεωδαισίας και Τοπογραφίας του ΤΑΤΜ-ΑΠΘ που είναι ενταγμένος στο Ευρωπαϊκό δίκτυο EPN. Στο τέλος παρουσιάζεται και η πρωτοποριακή τεχνική της χρήσης των εικονικών σταθμών αναφοράς (VRS).

Το κεφάλαιο 10 αφιερώνεται στον προσδιορισμό ορθομετρικών υψομέτρων με τη χρήση του συστήματος GPS. Στην αρχή περιγράφεται η διαδικασία μετασχηματισμού συντεταγμένων GPS σε ένα τοπικό γεωδαιτικό datum και ακολουθώς με αναφορά στο μετασχηματισμό υψομέτρων δίνονται τα μαθηματικά μοντέλα για συγκεκριμένες περιπτώσεις, ανάλογα με τη διαθέσιμη πληροφορία δεδομένων. Διατυπώνονται χρήσιμα σχόλια ενώ στο τέλος δίνεται και μία πραγματική εφαρμογή.

Στα παραρτήματα Α έως Ε δίνονται πολλές χρήσιμες πληροφορίες. Στο Παράρτημα Α περιγράφεται η δομή του αρχείου RINEX και στο Παράρτημα Β η δομή τόσο της εκπεμπόμενης εφημερίδας, με παράδειγμα υπολογισμού συντεταγμένων δορυφόρου, όσο και της εφημερίδας ακριβείας (SP3 format). Στο Παράρτημα Γ δίνεται παράδειγμα απόλυτου προσδιορισμού θέσης με μετρήσεις κώδικα και στο Παράρτημα Δ μέσα από πραγματικές μετρήσεις φάσης ερμηνεύεται το σφάλμα της ολίσθησης κύκλων παραθέτοντας κατάλληλα διαγράμματα. Τέλος στο Παράρτημα Ε δίνεται ένας ‘γεωδαιτικός οδηγός αναφοράς’ με πληροφορίες σχετικά με τα συστήματα και πλαίσια αναφοράς, τα συστήματα χρόνου, τις βασικές γεωδαιτικές έννοιες και τα γεωδαιτικά datum, τους μετασχηματισμούς συντεταγμένων στα ελληνικά γεωδαιτικά συστήματα και τέλος παρατίθεται τυπολόγιο για τα μοντέλα του μετασχηματισμού ομοιότητας.

Θεσσαλονίκη, Μάρτιος 2006

Α. Φωτίου
Καθηγητής ΑΠΘ

Χ. Πικριδάς
Επίκουρος Καθηγητής ΑΠΘ

Περιεχόμενα

Ακρωνύμια	15
1 Εισαγωγή	19
1.1 Δορυφορικός προσδιορισμός θέσης και γεωμετρική ερμηνεία	25
1.2 Τα μέρη του συστήματος GPS.....	30
1.2.1 Το δορυφορικό τμήμα.....	31
1.2.2 Το τμήμα ελέγχου	35
2 Το δορυφορικό σήμα.....	37
2.1 Βασικές έννοιες από τις ταλαντώσεις και τα κύματα	37
2.2 Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα	44
2.3 Το φαινόμενο Doppler	50
2.4 Διαμόρφωση δορυφορικού σήματος GPS	52
2.4.1 Οι κώδικες PRN.....	57
2.4.2 Το μήνυμα πλοήγησης.....	60
2.5 Σκόπιμη μείωση της ακρίβειας	63
2.5.1 Η κατάσταση της “αντι-εξαπάτησης” (AS:Anti-Spoofing)	63
2.5.2 Η κατάσταση της επιλεκτικής διαθεσιμότητας (SA:Selective Availability)	63
2.6 Συστήματα GLONASS και GALILEO	66
2.6.1 Το σύστημα GLONASS	66
2.6.2 Το σύστημα GALILEO	68
3 Δέκτες GPS	71
3.1 Η κεραία του δέκτη.....	71
3.2 Ο κυρίως δέκτης	77
4 Παρατηρήσεις και χρόνος GPS.....	87
4.1 Η παρατήρηση της ψευδοαπόστασης	89

4.2	Η παρατήρηση της φάσης.....	91
4.3	Σχετικιστικές επιδράσεις στο σήμα του GPS	93
4.4	Χρόνος GPS και σφάλματα ρολογιών	98
4.4.1	Η διόρθωση του δορυφορικού χρόνου	103
5	Εξισώσεις Παρατηρήσεων και Σφάλματα.....	105
5.1	Εξίσωση παρατήρησης ψευδοαπόστασης	105
5.1.1	Γεωμετρική απόσταση και χρόνος ταξιδιού	106
5.2	Εξίσωση παρατήρησης φάσης	109
5.3	Σφάλματα και πηγές σφαλμάτων GPS	113
5.3.1	Το σφάλμα της τροχιάς των δορυφόρων	113
5.3.2	Το σφάλμα ρολογιού του δορυφόρου.....	117
5.3.3	Το σφάλμα ρολογιού του δέκτη	117
5.3.4	Οι μεταβολές των κέντρων φάσης της κεραίας.....	117
5.3.5	Το τυχαίο σφάλμα της παρατήρησης	120
5.3.6	Το σφάλμα της αβεβαιότητας του γνωστού σημείου	120
5.3.7	Το τροποσφαιρικό σφάλμα.....	120
5.3.7.1	Το μοντέλο Hopfield.....	123
5.3.7.2	Το μοντέλο Saastamoinen	124
5.3.8	Το ιονοσφαιρικό σφάλμα	126
5.3.8.1	Το εκπεμπόμενο μοντέλο υπολογισμού της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης	130
5.3.8.2	Το μονοστρωματικό ιονοσφαιρικό μοντέλο (Single Layer Model)	131
5.3.9	Το σφάλμα της πολυανάκλασης.....	134
5.3.10	Το σφάλμα της ολίσθησης κύκλων	136
6	Μαθηματικά μοντέλα προσδιορισμού θέσης με το GPS	137
6.1.	Απόλυτος προσδιορισμός θέσης.....	137
6.1.1	Απόλυτος προσδιορισμός θέσης σε πραγματικό χρόνο. Λύση πλοήγησης	138
6.1.2	Απόλυτος προσδιορισμός θέσης εκ των υστέρων	140
6.2	Σχετικός προσδιορισμός θέσης.....	141
6.2.1	Απλές διαφορές (single differences).....	144
6.2.2	Διπλές διαφορές (double differences)	146
6.2.3	Τριπλές διαφορές (triple differences)	149
6.3	Σχετικός στατικός προσδιορισμός θέσης.....	151

6.3.1	Μαθηματικό μοντέλο απλών διαφορών	152
6.3.2	Μαθηματικό μοντέλο διπλών διαφορών	153
6.3.3	Μαθηματικό μοντέλο τριπλών διαφορών.....	153
6.4	Σχετικός κινηματικός προσδιορισμός θέσης εκ των υστέρων.....	154
6.5	Σχετικός κινηματικός προσδιορισμός θέσης σε πραγματικό χρόνο	155
6.5.1	Μήνυμα RTCM	158
6.5.2	Πρωτόκολλο επικοινωνίας NMEA.....	160
6.5.3	Το σύστημα EGNOS	163
7	Γραμμικοί συνδυασμοί και επίλυση βάσης GPS.....	165
7.1	Γραμμικοί συνδυασμοί παρατηρήσεων διαφορετικών φορέων	165
7.2	Επίλυση ασαφειών φάσης και βάσης GPS	168
7.2.1	Μέθοδοι επίλυσης των ασαφειών φάσης	168
7.2.1.1	Επίλυση ασαφειών φάσης με μετρήσεις και στις δύο συχνότητες.....	169
7.2.1.2	Η μέθοδος FARA	172
7.2.1.2	Η μέθοδος Sigma	173
7.2.1.4	Προσδιορισμός ασαφειών φάσης με τη βοήθεια τριπλών διαφορών	174
7.3	Επίλυση βάσης.....	175
7.3.1	Παράδειγμα επίλυσης βάσης.....	180
8	Μέθοδοι σχετικού προσδιορισμού θέσης.....	183
8.1	Στοιχεία σχεδιασμού μετρήσεων	184
8.2	Στατικός προσδιορισμός θέσης.....	187
8.2.1	Γρήγορος στατικός προσδιορισμός (rapid static, fast static, quick static).....	190
8.2.2	Ψευδοκινηματικός προσδιορισμός (pseudo static, pseudo kinematic, reoccupation).....	190
8.3	Σχετικός κινηματικός προσδιορισμός.....	191
8.3.1	Ημικινηματική μέθοδος (stop-and-go kinematic, intermittent kinematic)	194
8.4	Παραδείγματα επίλυσης βάσεων με στατικό προσδιορισμό	196
9	Εισαγωγή στα δίκτυα GPS.....	205
9.1	Κριτήρια σχεδιασμού και επιλογής βάσεων GPS	207

9.2	Συνόρθωση δικτύων GPS	212
9.3	Δίκτυα μονίμων σταθμών GPS.....	217
9.3.1	Ο μόνιμος σταθμός AUT1	219
9.4	Εικονικοί σταθμοί αναφοράς – VRS	221
10	Προσδιορισμός ορθομετρικών υψομέτρων με το GPS.....	225
10.1	Μετασχηματισμοί συντεταγμένων GPS	225
10.2	Προσδιορισμός υψομέτρων με το GPS	227
Παράρτημα Α: Αρχείο Παρατηρήσεων σε RINEX format.....		239
Παράρτημα Β: Αρχεία δορυφορικών τροχιών (Broadcast Ephemeris, SP3) και υπολογισμός συντεταγμένων δορυφόρου		244
B.1	Δομή της εκπεμπόμενης εφημερίδας GPS και υπολογισμός συντεταγμένων δορυφόρου	244
B.1.1	Υπολογισμός του χρόνου εκπομπής του δορυφορικού σήματος και των αντίστοιχων συντεταγμένων του δορυφόρου	249
B.2	Περιγραφή του αρχείου της εφημερίδας ακριβείας-SP3 format	252
Παράρτημα Γ: Παράδειγμα προσδιορισμού απόλυτης θέσης με μετρήσεις ψευδοαποστάσεων		258
Παράρτημα Δ: Επίδραση της ολίσθησης κύκλων στις μετρήσεις φάσης και στις διαφορές τους		263
Παράρτημα Ε: Προσδιορισμός θέσης και συντεταγμένες.....		270
E.1	Συστήματα και πλαίσια αναφοράς.....	270
E.1.1	Βασικές έννοιες και ορισμοί.....	270
E.1.2	Τα διεθνή συστήματα και πλαίσια αναφοράς.....	272
E.1.3	Το σύστημα του GPS – WGS84.....	276
E.1.4	Το Ευρωπαϊκό σύστημα ETRS89.....	278
E.2	Συστήματα χρόνου.....	279
E.2.1	Παγκόσμιος και αστρικός χρόνος.....	280
E.2.2	Δυναμικός χρόνος.....	281
E.2.3	Ατομικός χρόνος.....	282
E.2.4	Παγκόσμιος συντονισμένος χρόνος.....	283
E.2.5	Χρόνος GPS.....	284
E.3	Βασικές γεωδαιτικές έννοιες και μετασχηματισμοί συντεταγμένων αναφοράς	285

E.3.1 Επιφάνειες αναφοράς.....	285
E.3.2 Γεωδαιτικές συντεταγμένες.....	289
E.3.3 Μετατροπή μεταξύ καρτεσιανών και ελλειψοειδών συντεταγμένων ..	291
E.3.4 Παράμετροι ελλειψοειδούς αναφοράς.....	292
E.3.5 Τα γεωδαιτικά datum στην Ελλάδα.....	294
E.3.5.1 Το παλιό Ελληνικό datum (Bessel).....	294
E.3.5.2 Το ΕΓΣΑ87	295
E.3.5.3 Τα προβολικά συστήματα στην Ελλάδα	295
E.4 Ο μετασχηματισμός ομοιότητας.....	298
E.4.1 Το 2-Δ μοντέλο και οι τελικές αναλυτικές σχέσεις.....	298
E.4.2 Το 3-Δ μοντέλο.....	300
Βιβλιογραφία.....	311
Ευρετήριο	317

Ακρωνύμια

AS	Anti-Spoofing
BIH	Bureau International de l'Heure
BIMP	Bureau International des Poids et Mesures
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CODE	Center for Orbit Determination in Europe
CORS	Continuously Operating Reference Station
DGPS	Differential GPS
DLL	Delay Lock Loop
DMA	Defense Mapping Agency
DoD	Department of Defense
DOP	Dilution of Precision
ECEF	Earth Center Earth Fixed
EGM96	Earth Gravity Model 1996
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
ΕΓΣΑ87	Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987
ERP	Earth Rotation Parameters
EUREF	European Reference Frame
EPN	Euref Permanent Network
ESA	European Space Agency
ETRS	European Terrestrial Reference System
FARA	Fast Ambiguity Resolution Approach
ftp	File Transfer Protocol
GDOP	Geometric Dilution of Precision
GFZ	GeoForschungsZentrum
GIS	Geographic Information System
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPM98	GeoPotencial Model 1998
GPS	Global Positioning System

HDOP	Horizontal Dilution of Precision
HOW	Hand over World
IAG	International Association of Geodesy
ICRF	International Celestial Reference Frame
ICRS	International Celestial Reference System
IERS	International Earth Rotation Service
IF	Intermediate Frequency
IGS	International GNSS Service
IPMS	International Polar Motion Service
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
ITRS	International Terrestrial Reference System
JPL	Jet Propulsion Laboratory
NAVSTAR	Navigation Satellite Timing and Ranging
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency
NGS	National Geodetic Survey
NMEA	National Maritime Electronics Association
MCS	Master Control Station
MJD	Modified Julian Date
OTF	On-the-Fly
PDOP	Position Dilution of Precision
PLL	Phase Lock Loop
ppm	Parts Per million
PRN	Pseudo-random Noise
RIMS	Ranging and Integrity Monitoring Station
RINEX	Receiver Independent Exchange (format)
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	Real Time Kinematic
SA	Selective Availability
SINEX	Software Independent Exchange (format)
SIO	Scripts Institution of Oceanography
SNR	Signal to Noise Ratio
SVN	Space Vehicle Number
TAI	Temps Atomique International
TCB	Barycentric Coordinate Time
TCG	Geocentric Coordinate Time

TEC	Total Electron Content
TLM	Telemetry word
TOW	Time Of Week
TVEC	Total Vertical Electron Content
UTC	Universal Time Coordinated
USNO	United States Naval Observatory
VDOP	Vertical Dilution of Precision
VRS	Virtual Reference Station
WGS84	World Geodetic System 1984
WVR	Water Vapor Radiometer



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το **NAVSTAR GPS** (NAVigation Satellite Timing And Ranging, **Global Positioning System**) ή απλά το **GPS**, είναι ένα **παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα προσδιορισμού θέσης (συντεταγμένες), χρόνου και ταχύτητας**, οπουδήποτε στην επιφάνεια της γης ή και πάνω από αυτήν, σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή και ανεξάρτητα από καιρικές συνθήκες. Το σύστημα σχεδιάστηκε στη δεκαετία του 1970, αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1980 και βρίσκεται συνεχώς υπό τον έλεγχο του Υπουργείου Άμυνας των ΗΠΑ. Πρόκειται για ένα στρατιωτικό και πολιτικό σύστημα με πρωταρχικό σκοπό την κάλυψη των στρατιωτικών και στη συνέχεια και των πολιτικών αναγκών πλοήγησης. Η πολιτική χρήση του GPS, όπως είναι οι τοπογραφικές και γεωδαιτικές εφαρμογές υψηλής ακρίβειας ή οι χαμηλότερης ακρίβειας εφαρμογές GIS, οι εφαρμογές πλοήγησης και διαχείρισης στόλου οχημάτων, έγινε δυνατή ύστερα από έγκαιρη απόφαση των ΗΠΑ (1983, με αφορμή κάποιο αεροπορικό δυστύχημα), σχεδόν από τα πρώτα βήματα, με πρόβλεψη για περαιτέρω βελτίωση.

Το GPS ανήκει στην κατηγορία των συστημάτων **GNSS** (Global Navigation Satellite Systems), δηλαδή των παγκόσμιων δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης, όπως είναι το παρόμοιο Ρωσικό σύστημα **GLONASS** (GLObal NAVigation Satellite System) και το πολλά υποσχόμενο καθαρά πολιτικό Ευρωπαϊκό σύστημα **GALILEO**. Το GLONASS δεν έγινε μέχρι σήμερα πλήρως επιχειρησιακό, αναμένεται να γίνει έως το 2008, και συνεπώς δεν έτυχε της ευρείας αποδοχής και χρήσης όπως το GPS. Τα τελευταία χρόνια έχουν κατασκευαστεί δέκτες GPS που λαμβάνουν σήματα δορυφόρων GPS και GLONASS, βελτιώνοντας περισσότερο την ακρίβεια και τη λειτουργικότητα των συστημάτων.

Σήμερα η Ευρωπαϊκή Ένωση προχωρεί στην ανάπτυξη του πρώτου πολιτικού συστήματος προσδιορισμού θέσης και πλοήγησης, του GALILEO, που αναμένεται περί το 2010, όταν ολοκληρωθεί, να αλλάξει σημαντικά την υπάρχουσα κατάσταση και να άρει τις όποιες 'στρατιωτικές δεσμεύσεις' των άλλων

συστημάτων. Το GALILEO είναι τεχνολογικά περισσότερο προηγμένο, καλύτερων επιδόσεων, ασφαλέστερο και με μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών σε συνδυασμό με την κινητή τηλεφωνία και το διαδίκτυο. Πάντως υπάρχουν αρκετές ομοιότητες στη λειτουργία και εφαρμογή μεθοδολογιών και τεχνικών μεταξύ των τριών συστημάτων GNSS.

Η εποχή της δορυφορικής και διαστημικής γεωδαισίας αρχίζει ουσιαστικά στη δεκαετία του 1960. Τα τελευταία 15 περίπου χρόνια, το GPS φαίνεται να έχει επικρατήσει στο μεγαλύτερο μέρος των γεωδαιτικών και τοπογραφικών εφαρμογών και όχι μόνο. Οι τοπογραφικές και υδρογραφικές αποτυπώσεις, οι απλοί τριγωνισμοί και τα δίκτυα πυκνώσης, τα εθνικά, ηπειρωτικά και παγκόσμια γεωδαιτικά δίκτυα, οι συνδέσεις διαφορετικών συστημάτων αναφοράς και γεωδαιτικών datum, οι φωτογραμμετρικές και κτηματογραφικές αποτυπώσεις, οι χαράξεις στην οδοποιία και τα τεχνικά έργα, η μελέτη μικρομετακινήσεων κρίσιμων τεχνικών έργων καθώς επίσης και οι γεωδυναμικές εφαρμογές, όπως είναι παρακολούθηση μικρομετακινήσεων του φλοιού της γης, αποτελούν μερικές χαρακτηριστικές εφαρμογές του GPS στα αντικείμενα κυρίως των επιστημών του Τοπογράφου Μηχανικού αλλά και άλλων Μηχανικών, επιστημόνων και τεχνικών που σχετίζονται με αυτά ή και παρόμοια αντικείμενα.

Εκτός από τις παραπάνω εφαρμογές υψηλής ακρίβειας, όπου η απαίτηση σε ακρίβεια κυμαίνεται από μερικά χιλιοστά του μέτρου έως μερικά εκατοστά, αρκετές ακόμα εφαρμογές με απαιτήσεις χαμηλότερης ακρίβειας, από μερικές δεκάδες εκατοστά έως και μερικά μέτρα, καλύπτονται από τις δυνατότητες του GPS, π.χ., η ενημέρωση χαρτών, οι εφαρμογές GIS, η πλοήγηση, η διαχείριση στόλου οχημάτων, ο εντοπισμός προεπιλεγμένων θέσεων. Η τοπογραφική – γεωδαιτική ακρίβεια της τάξης του cm ή και μερικών cm απαιτεί διαφορετικό εξοπλισμό και διαφορετική μεθοδολογία μετρήσεων και επεξεργασίας των παρατηρήσεων, με σημαντικά αυξημένο οικονομικό κόστος σε σχέση με τον χαμηλής ακρίβειας προσδιορισμό θέσης της τάξης των μερικών μέτρων.

Τα κλασικά παγκόσμια συστήματα αναφοράς έχουν πλέον αναθεωρηθεί και αντικατασταθεί από τα υψηλής ακρίβειας διεθνή συστήματα αναφοράς τα οποία συνδέονται εύκολα με τα εθνικά/τοπικά γεωδαιτικά συστήματα και datum. Ταυτόχρονα τα σύγχρονα παγκόσμια συστήματα προσφέρουν τη δυνατότητα για εύκολη αναθεώρηση των υπαρχόντων ή και ίδρυση νέων συστημάτων. Τα παγκόσμια, ηπειρωτικά ή και εθνικά δίκτυα μπορούν εύκολα να πυκνώνονται και να ιδρύονται έτσι σύγχρονα γεωδαιτικά datum με ακρίβεια καλύτερη του 1 ppm, έως και 0.1 ppm. Διεθνείς υπηρεσίες, εργαστήρια και υπολογιστικά κέντρα προσφέρουν ελεύθερα και σε καθημερινή σχεδόν βάση μέσω του διαδικτύου προϊό-

ντα υψηλής ακρίβειας, όπως δορυφορικές εφημερίδες, συντεταγμένες μόνιμων σταθμών και παραμέτρους περιστροφής της γης, στοιχεία χρήσιμα και απαραίτητα για τον προσδιορισμό θέσης υψηλής ακρίβειας με το GPS.

Η κλασική γεωδαιτική και τοπογραφική μεθοδολογία άλλαξε ριζικά από τα τέλη του 20^{ου} αιώνα. Η χρήση του GPS για τον προσδιορισμό θέσης δεν απαιτεί ορατότητες μεταξύ των σημείων και κατάλληλες καιρικές συνθήκες για την εκτέλεση των μετρήσεων. Οι παρατηρήσεις μπορούν να γίνονται μέρα και νύκτα, μεταξύ σημείων που απέχουν έως και αρκετές εκατοντάδες χιλιόμετρα. Η μόνη συνθήκη που πρέπει να ικανοποιείται είναι η ύπαρξη ικανοποιητικού ορίζοντα ώστε να λαμβάνεται σήμα από ικανό αριθμό δορυφόρων (τουλάχιστον από τέσσερεις), δηλαδή να υπάρχει ορατότητα μεταξύ δέκτη GPS και λαμβανομένων δορυφόρων. Σε περιπτώσεις παρεμβολής εμποδίων, όπως είναι τα υψηλά κτίρια σε πυκνοδομημένες εκτάσεις με στενούς δρόμους και τα βουνά πλησίον του δέκτη, υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί στη χρήση του συστήματος. Θα πρέπει πάντως να σημειωθεί ότι το GPS δεν είναι ο αντικαταστάτης των κλασικών οργάνων όπως είναι τα θεοδόλιχα, EDM, total stations και οι χωροβάτες, άλλωστε δεν σχεδιάστηκε γι' αυτό το σκοπό, αλλά είναι ένα νέο συμπληρωματικό και ισχυρότατο μέσο της σύγχρονης τεχνολογίας που σε αρκετές περιπτώσεις αντικαθιστά πλήρως τα κλασικά όργανα. Για παράδειγμα, η μέτρηση γεωδαιτικού ή και τοπογραφικού δικτύου και γενικότερα ο προσδιορισμός συντεταγμένων για βασικά σημεία αναφοράς γίνεται σχεδόν αποκλειστικά με το GPS.

Το σύστημα GPS αποτελείται ουσιαστικά από “πομπούς σε τροχιά” που είναι οι δορυφόροι GPS και από δέκτες GPS στη γήινη επιφάνεια. Ο δέκτης μπορεί να αναπτύσσεται όπως ένα κλασικό τοπογραφικό όργανο σε τρίποδα, βάθρο, στυλεό, να τοποθετείται σε κινούμενο όχημα (πλοίο, αεροπλάνο, ελικόπτερο, τρένο, αυτοκίνητο, κλπ.) ή ακόμα να κρατιέται στην παλάμη του χεριού, και να λαμβάνει ηλεκτρομαγνητικά σήματα που εκπέμπονται και λαμβάνονται από τους ορατούς ως προς τον δέκτη δορυφόρους.

Τα δορυφορικά σήματα χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση μετρήσεων από το δέκτη, που ισοδυναμούν σε αποστάσεις μεταξύ δέκτη και δορυφόρων σε κάθε χρονική στιγμή. Οι παρατηρήσεις και άλλες πληροφορίες καταγράφονται στη μνήμη του δέκτη και επεξεργάζονται είτε εσωτερικά από το λογισμικό του δέκτη σε πραγματικό χρόνο είτε εκ των υστέρων ‘στο γραφείο’, παρέχοντας τη θέση (συντεταγμένες), ή και την ταχύτητα και τον χρόνο. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ο δέκτης ‘διαβάζει’ και ένα μήνυμα δεδομένων-πλοήγησης που περιλαμβάνει απαραίτητες πληροφορίες για τον υπολογισμό της θέσης σε πραγματικό χώρο, όπως είναι τα στοιχεία τροχιάς των δορυφόρων, από τα οποία υπολο-

γίζονται οι συντεταγμένες των δορυφόρων, οι παράμετροι διόρθωσης χρόνου και άλλα συστηματικά σφάλματα.

Οι μετρήσεις GPS γίνονται πάνω σε ‘μετρητικούς’ κώδικες ή σε ημιτονοειδή κύματα (φορείς των κωδίκων και του μηνύματος πλοήγησης) και είναι πάντοτε επηρεασμένες από συστηματικά σφάλματα που οφείλονται κυρίως στην επίδραση της ατμόσφαιρας στο δορυφορικό σήμα και στο μη συγχρονισμό των ταλαντωτών/χρονομέτρων (ρολογιών) των δορυφόρων και των δεκτών. Τα σφάλματα αυτά προσδιορίζονται σε ικανοποιητικό βαθμό με τη βοήθεια κατάλληλων μοντέλων ή και απαλείφονται με κατάλληλες τεχνικές επεξεργασίας των μετρήσεων. Σε αντίθεση με τις κλασικές παρατηρήσεις γωνιών και αποστάσεων, το πρόβλημα των συστηματικών σφαλμάτων είναι κυρίαρχο στις μετρήσεις GPS και η επιτυχής αντιμετώπισή του είναι καθοριστική για την ποιότητα των αποτελεσμάτων.

Η ακριβής γνώση του χρόνου που αντιστοιχεί σε κάθε παρατήρηση και ο συγχρονισμός των ρολογιών των δεκτών και των δορυφόρων αποτελούν κρίσιμους παράγοντες στην επίτευξη της αναμενόμενης ακρίβειας με το GPS, αφού η με μεγάλη ακρίβεια μέτρηση των αποστάσεων δέκτη-δορυφόρων απαιτεί πολύ μεγάλη ακρίβεια και στη μέτρηση των χρόνων ταξιδιού των δορυφορικών σημάτων από τους δορυφόρους στους δέκτες (απόσταση = ταχύτητα x χρόνος ταξιδιού). Αν λάβουμε υπόψη ότι το δορυφορικό σήμα ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός (περίπου 300000 km/sec), ένα σφάλμα του ενός millisecond ($1\text{ms} = 10^{-3}\text{ sec}$) στη μέτρηση του χρόνου αντιστοιχεί σε σφάλμα 300 km στην απόσταση δορυφόρου-δέκτη, ένα σφάλμα του ενός microsecond ($1\text{ }\mu\text{s} = 10^{-6}\text{ sec}$) αντιστοιχεί σε σφάλμα 300 m και ένα σφάλμα της τάξης του ενός nanosecond ($1\text{ ns} = 10^{-9}\text{ sec}$) αντιστοιχεί σε σφάλμα 30 cm. Όταν λοιπόν απαιτούνται ακρίβειες της τάξης του εκατοστού είναι προφανές πόσο σημαντικός είναι ο ακριβής προσδιορισμός χρόνου και των σφαλμάτων του χρόνου καθώς και η ακριβής διατήρηση μιας κλίμακας χρόνου από το σύστημα.

Ο προσδιορισμός θέσης με το GPS διακρίνεται γενικά σε δύο κατηγορίες: στον **απόλυτο προσδιορισμό θέσης** (absolute positioning, point positioning, single point positioning) και στο **σχετικό προσδιορισμό θέσης** (relative positioning, differential positioning), μπορεί δε να γίνεται είτε μετά το πέρας των μετρήσεων (post processing) ή σε πραγματικό χρόνο (real time positioning), ανάλογα με τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Στον απόλυτο προσδιορισμό, προσδιορίζονται οι συντεταγμένες σημείου ως προς ένα ορισμένο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς, π.χ. ως προς το WGS84, από παρατηρήσεις μόνο του αντίστοιχου δέκτη.

Στο **σχετικό προσδιορισμό θέσης**, προσδιορίζονται οι συντεταγμένες ση-

μείου ως προς ένα άλλο σημείο του οποίου οι συντεταγμένες θεωρούνται γνωστές ως προς ένα σύστημα αναφοράς τοπικό ή γεωκεντρικό ή αλλιώς προσδιορίζεται η σχετική θέση (διαφορές συντεταγμένων) μεταξύ των δύο σημείων. Το σημείο που θεωρείται γνωστό μπορεί να θεωρηθεί ως η αρχή ενός αυθαίρετου 3-Δ συστήματος αναφοράς ή να έχει γνωστές συντεταγμένες ως προς ένα τοπικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς, π.χ. ως προς το ΕΓΣΑ87, ή ως προς ένα γεωκεντρικό, π.χ. ως προς το WGS84. Στο σχετικό προσδιορισμό χρειάζονται τουλάχιστον δύο δέκτες που μετρούν ταυτόχρονα σε αντίστοιχα σημεία ώστε χρησιμοποιώντας κατάλληλα τις ταυτόχρονες παρατηρήσεις προσδιορίζεται η σχετική θέση μεταξύ των σημείων. Για κάθε ζεύγος δεκτών, π.χ., για δύο δέκτες που ορίζουν μία βάση, προσδιορίζεται η σχετική θέση ή οι **συνιστώσες του διανύσματος βάσης** ($\Delta X_{12} = X_2 - X_1$, $\Delta Y_{12} = Y_2 - Y_1$, $\Delta Z_{12} = Z_2 - Z_1$), τεχνική κατάλληλη για τις τοπογραφικές και γεωδαιτικές εφαρμογές. Αν προσθέσουμε τις διαφορές (ΔX , ΔY , ΔZ) που έχουν υπολογισθεί με μεγάλη ακρίβεια στις συντεταγμένες του γνωστού σημείου θα υπολογίσουμε τις συντεταγμένες του αγνώστου σημείου στο σύστημα αναφοράς του γνωστού σημείου.

Στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης με το GPS, χρησιμοποιούμε τις παρατηρήσεις των μεμονωμένων σημείων και καταλήγουμε σε προσδιορισμό γεωκεντρικών συντεταγμένων σημαντικά χαμηλότερης ακρίβειας επειδή δεν μπορούν να αντιμετωπισθούν ικανοποιητικά τα διάφορα συστηματικά σφάλματα όπως στον σχετικό προσδιορισμό.

Ο προσδιορισμός θέσης μπορεί να διακριθεί ακόμα σε **στατικό** (static) και **κινηματικό** (kinematic) ανάλογα με το αν το ‘αντικείμενο’ που υπόκειται σε προσδιορισμό θέσης είναι ακίνητο ή κινείται. Η μέθοδος του στατικού προσδιορισμού και μάλιστα του σχετικού στατικού αφορά περισσότερο στις τοπογραφικές και γεωδαιτικές εφαρμογές υψηλής ακριβείας ενώ η μέθοδος του κινηματικού και μάλιστα σε πραγματικό χρόνο αφορά περισσότερο την πλοήγηση.

Το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς του GPS είναι το **WGS84** (World Geodetic System 1984). Οι συντεταγμένες GPS, καρτεσιανές γεωκεντρικές (X, Y, Z) ή ισοδύναμα γεωδαιτικές/ελλειψοειδείς (φ, λ, h) μπορούν να μετασχηματίζονται σε οποιοδήποτε άλλο σύστημα μέσω καταλλήλων μετασχηματισμών είτε με γνωστές παραμέτρους μετασχηματισμού είτε με προσδιορισμό τους από μετρήσεις GPS σε κοινά σημεία.

Η ακρίβεια του απόλυτου προσδιορισμού θέσης με το GPS σε πραγματικό χρόνο (**λύση πλοήγησης**, **λύση ναυσιπλοΐας**, **navigation solution**) είναι της τάξης των μερικών μέτρων (**5-15 m**) από τον Μάιο του 2000, ενώ προηγουμένως ήταν της τάξης των αρκετών δεκάδων μέτρων (100–150 m) επειδή το δορυφορικό σήμα περιείχε και κάποια εσκεμμένα σφάλματα μείωσης της ακρίβει-

ας. Η εκ των υστέρων επεξεργασία των παρατηρήσεων ενός δέκτη (στατικός απόλυτος προσδιορισμός διάρκειας περίπου μιας ώρας) οδηγεί σε σημαντικά καλύτερης ακρίβειας αποτελέσματα επειδή εξομαλύνονται κάποια σφάλματα και χρησιμοποιούνται δεδομένα από άλλες πηγές, πέρα από αυτές που περιέχει το μήνυμα πλοήγησης του δορυφορικού σήματος.

Σε κάθε περίπτωση, η ακρίβεια του απόλυτου προσδιορισμού θέσης δεν είναι κατάλληλη για τη συντριπτική πλειοψηφία των γεωδαιτικών και τοπογραφικών εφαρμογών και συνεπώς απαιτείται η μέθοδος του σχετικού προσδιορισμού (στατικού ή κινηματικού), όπου για κάθε ζεύγος δεκτών προσδιορίζεται με υψηλή ακρίβεια το αντίστοιχο διάνυσμα της σχετικής θέσης ή όπως συνήθως λέγεται η **βάση GPS (GPS baseline)**.

Η επίλυση μιας βάσης με υψηλή ακρίβεια προϋποθέτει ακρίβεια συντεταγμένων του γνωστού σημείου ως προς το WGS84 της τάξης των μερικών μέτρων (ενδεικτικά της τάξης των 10 m) γεγονός που εύκολα επιτυγχάνεται, είτε από τη λύση πλοήγησης του δέκτη ή από την επίλυση μιας βάσης της οποίας το ένα σημείο έχει γνωστές συντεταγμένες ως προς ένα, έστω τοπικό, σύστημα αναφοράς και είναι επίσης γνωστές (με ακρίβεια της τάξης των 10 m) οι παράμετροι μετασχηματισμού από το τοπικό σύστημα στο σύστημα WGS84.

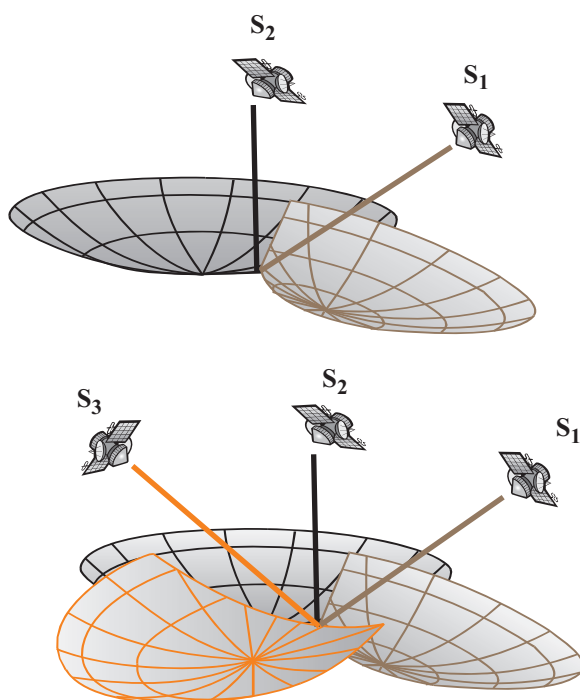
Η απαίτηση για δύο δέκτες στο σχετικό προσδιορισμό προκύπτει από το γεγονός ότι μέσω καταλλήλων γραμμικών συνδυασμών (τεχνική διαφορών) των ταυτόχρονων πρωτογενών παρατηρήσεων των δύο δεκτών προς τους ίδιους δορυφόρους μπορούν να απαλείφονται ή να ελαχιστοποιούνται κοινά συστηματικά σφάλματα, με αποτέλεσμα η υψηλή ακρίβεια στη σχετική θέση να είναι της τάξης του **1 έως 2 ppm** ή και καλύτερη, που συμβατικά αναφέρεται ως **‘ακρίβεια εκατοστού’** στις τρέχουσες γεωδαιτικές και τοπογραφικές εφαρμογές. Η υψηλή ακρίβεια προϋποθέτει τη χρήση των μετρήσεων φάσεων στα κύματα - φορείς του δορυφορικού σήματος.

Στις πρακτικές εφαρμογές, ο σχετικός προσδιορισμός θέσης περιλαμβάνει συνήθως περισσότερα από δύο σημεία. Με δύο λοιπόν δέκτες που τοποθετούνται στα άκρα των διαφόρων βάσεων ανάμεσα στα σημεία και μετρούν ταυτόχρονα για κάποιο ικανό χρονικό διάστημα, μερικά λεπτά έως μερικές ώρες ανάλογα με την εφαρμογή, εφαρμόζουμε το σχετικό προσδιορισμό για το σύνολο των σημείων και καταλήγουμε σε προσδιορισμό της σχετικής θέσης με υψηλή ακρίβεια (**μέτρηση δικτύου GPS**). Για τον έλεγχο των σφαλμάτων και γενικώς για ποιοτικά αποτελέσματα μετρούνται συνήθως περισσότερες βάσεις από τις ελάχιστες που απαιτούνται (πλεονάζουσα πληροφορία, ίδρυση και συνόρθωση δικτύου).

Με περισσότερους από δύο δέκτες που μετρούν ταυτόχρονα σε περισσότερα από δύο σημεία, έχουμε προφανώς οικονομία στο χρονικό διάστημα που απαιτείται για να ολοκληρωθούν οι μετρήσεις και αποτελέσματα καλύτερης ακρίβειας. Για βέλτιστα αποτελέσματα απαιτείται πρωτίστως ένας καλός σχεδιασμός των εργασιών πεδίου, σωστή επιλογή των μετρητικών οργάνων (κυρίως δέκτες), αξιόπιστα λογισμικά επεξεργασίας, εμπειρία και καλή θεωρητική γνώση.

1.1 Δορυφορικός προσδιορισμός θέσης και γεωμετρική ερμηνεία

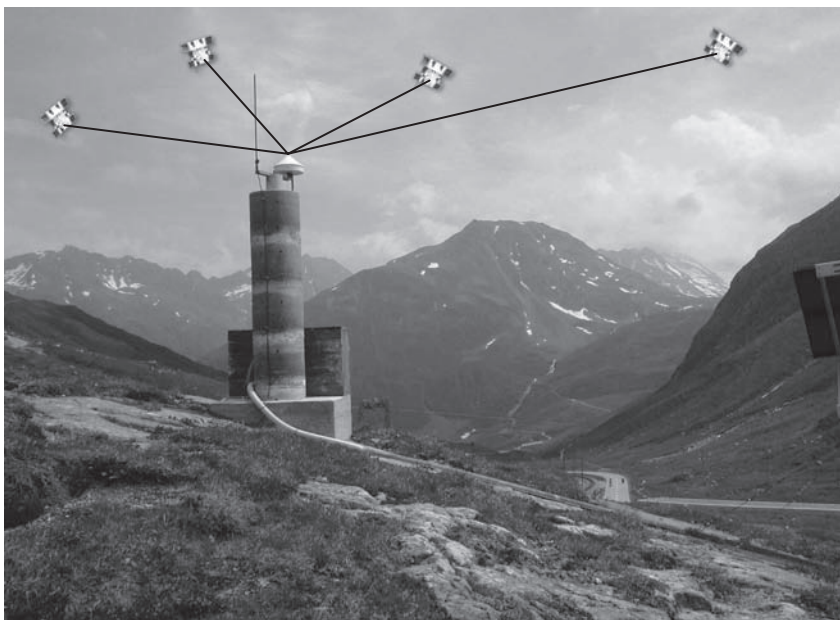
Ο απόλυτος προσδιορισμός θέσης μπορεί να συγκριθεί με μία πλευρική οπισθοτομία στο χώρο όπου τα γνωστά σημεία είναι οι δορυφόροι, σαν τριγωνομετρικά σημεία σε τροχιά, τα άγνωστα σημεία οι δέκτες GPS και παρατηρήσεις οι αποστάσεις μεταξύ δεκτών και δορυφόρων.



Σχήμα 1.1: Γεωμετρική ερμηνεία απόλυτου προσδιορισμού θέσης (αρχική πηγή: Leica)

Ας υποθέσουμε προς στιγμή ότι τα ρολόγια των δεκτών και των δορυφόρων είναι τέλεια συγχρονισμένα ως προς την ενιαία κλίμακα του χρόνου GPS. Τότε, η θέση του δέκτη, σε κάθε χρονική στιγμή, ορίζεται γεωμετρικά από την τομή τριών σφαιρών με κέντρα τους αντίστοιχους δορυφόρους και ακτίνες τις μετρηθείσες αποστάσεις. Από την τομή δύο σφαιρών προκύπτει μία καμπύλη (κύκλος) ενώ από την τομή της καμπύλης με την τρίτη σφαίρα προκύπτουν γενικά δύο σημεία, ένα εκ των οποίων, εκείνο που βρίσκεται κοντά στη γη και άρα εύκολα εντοπίσιμο, είναι το ζητούμενο (Σχήμα 1.1).

Είναι προφανές ότι απαιτούνται τρεις ταυτόχρονες παρατηρήσεις αποστάσεων, όσες δηλαδή και οι άγνωστες συντεταγμένες (X, Y, Z) που εκφράζουν τη θέση. 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. Το μεν σφάλμα του ρολογιού του δορυφόρου υπολογίζεται από τον δέκτη με βάση την πληροφορία του μηνύματος πλοήγησης ενώ το σφάλμα του ρολογιού του δέκτη παραμένει άγνωστο. Έτσι στο πρόβλημα προσδιορισμού θέσης υπεισέρχεται και μία επιπλέον άγνωστη παράμετρος, η διόρθωση του χρόνου του δέκτη ως προς την κλίμακα του GPS, συνολικά, δηλαδή, υπάρχουν **τέσσερις άγνωστες παράμετροι** ($4 = 3 + 1$).



Σχήμα 1.2: Βασική αρχή GPS για τον απόλυτο προσδιορισμό θέσης: Ταυτόχρονη λήψη σήματος από τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους.

Απαιτούνται, λοιπόν, τουλάχιστον τέσσερις ταυτόχρονες παρατηρήσεις αποστάσεων προς τέσσερις δορυφόρους αντιστοίχως (Σχήμα 1.2). 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 (Σχήμα 1.3).



Σχήμα 1.3: Βασική αρχή GPS για το σχετικό προσδιορισμό θέσης: Δύο δέκτες που μετρούν ταυτόχρονα στα άκρα μιας βάσης.

Οι καρτεσιανές συντεταγμένες (X, Y, Z) ή ισοδύναμα οι πιο κατανοητές, γεωδαιτικές συντεταγμένες (φ, λ, h) , προσδιορίζονται αρχικά ως προς το WGS84 αφού σε αυτό το σύστημα υπολογίζονται οι συντεταγμένες των δορυφόρων, αλλά μπορούν στη συνέχεια να μετασχηματίζονται σε άλλα γεωδαιτικά συστήματα και τελικά στην πράξη σε επίπεδες προβολικές ή χαρτογραφικές συντεταγμένες και σε (ορθομετρικά) υψόμετρα ως προς τη μέση στάθμη της θάλασσας (το γεωειδές είναι η επιφάνεια αναφοράς των ορθομετρικών υψομέ-

τρων). 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 γεωειδούς (N). Σε αντίθεση με το ορθομετρικό υψόμετρο, το υψόμετρο του γεωειδούς δεν είναι κατά κανόνα γνωστό με ικανοποιητική ακρίβεια. Για παράδειγμα, από χάρτες ή από παγκόσμια μοντέλα γεωειδούς, όπως είναι το EGM96, τα υψόμετρα του γεωειδούς υπολογίζονται με μια ακρίβεια της τάξης του μέτρου. Για μεγαλύτερη ακρίβεια απαιτούνται τοπικά μοντέλα γεωειδούς που προσδιορίζονται και από μετρήσεις βαρύτητας, δυνατότητα που δεν υπάρχει συνήθως στον απλό χρήστη.

Παρόλο που τα γεωμετρικά υψόμετρα, άρα και οι υψομετρικές τους διαφορές, προσδιορίζονται με ακρίβεια παρόμοια με αυτήν της οριζόντιας θέσης, η ακρίβεια των ορθομετρικών υψομέτρων δύσκολα πλησιάζει την υψηλή ακρίβεια της κλασικής γεωμετρικής χωροστάθμησης. Για τρέχουσες εφαρμογές και για μικρής έκτασης περιοχές, οι γεωμετρικές υψομετρικές διαφορές μπορούν να λαμβάνονται ίσες με τις ορθομετρικές με ικανοποιητική ακρίβεια. Ακόμα καλλίτερα, για 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, εύκολα καταλήγουμε στον προσδιορισμό ορθομετρικών υψομέτρων με ικανοποιητική ακρίβεια, της τάξης του 1 έως 5 cm. Για μεγαλύτερες εκτάσεις ο συνδυασμός μετρήσεων GPS με μοντέλα γεωειδούς οδηγεί, μέσω καταλλήλων μεθόδων παρεμβολής, σε προσδιορισμό ορθομετρικών υψομέτρων με ακρίβεια που μπορεί να φτάσει τα μερικά cm, όπως προηγουμένως, και να καλύψει αρκετές από τις τρέχουσες εργασίες αποτυπώσεων. Ένα δίκτυο GPS δημιουργείται στην ουσία από το σύνολο των βάσεων που έχουν μετρηθεί με δύο ή περισσότερους δέκτες, π.χ. με τρεις δέκτες GPS που μετρούν ταυτόχρονα σε τρία σημεία του δικτύου σε κάθε μετρητική περίοδο (Σχήμα 1.4), μέχρι να ολοκληρωθεί η μέτρηση όλου του δικτύου. Η συνόρθωση του δικτύου γίνεται στις τρεις διαστάσεις, στο σύστημα WGS84, και καταλήγει στον 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 τη συνόρθωση (δεσμεύσεις).

Στην πράξη ενδιαφέρει η ένταξη του δικτύου GPS στο ισχύον γεωδαιτικό



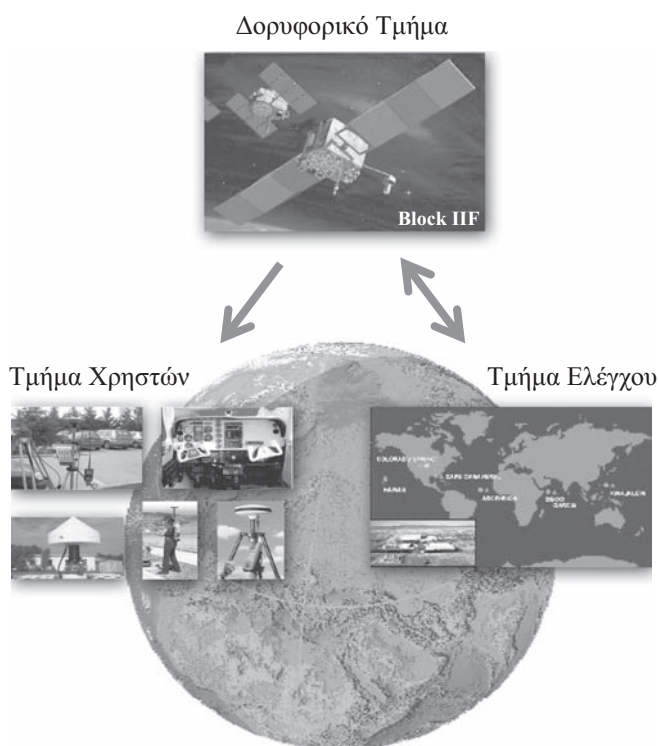
Σχήμα 1.4: Σχετικός προσδιορισμός θέσης με χρήση τριών δεκτών GPS που μετρούν ταυτόχρονα

datum που είναι συνήθως τοπικό, π.χ. για την Ελλάδα η ένταξη του δικτύου GPS στο **ΕΓΣΑ87** (Ελληνικό Γεωδαιτικό 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 κοινά σημεία που έχουν συμπεριληφθεί στη μέτρηση του δικτύου GPS. Το γνωστό ή τα γνωστά σημεία που συμπεριλαμβάνονται στο δίκτυο GPS μπορεί να είναι σημεία του γεωδαιτικού datum μιας χώρας ή ακόμα και ενός διεθνούς πλαισίου αναφοράς (π.χ. **ITRF2000**: International Terrestrial Reference Frame του 2000) ανάλογα με το σκοπό της εργασίας. Το δίκτυο GPS επιλύεται αρχικά έτσι ώστε να γίνει ο έλεγχος της εσωτερικής του ακρίβειας και αξιοπιστίας (συνόρθωση με ελάχιστες δεσμεύσεις ή ως ελεύθερο) και στη συνέχεια μετασχηματίζεται ή εντάσσεται στο σύστημα που ενδιαφέρει. Στο πλαίσιο μιας συνολικής μελέτης, όπως είναι μία 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 GPS.

1.2 Τα μέρη του συστήματος GPS

Το σύστημα GPS άρχισε να σχεδιάζεται και να υλοποιείται σταδιακά στη δεκαετία του 1970, με ευθύνη του Υπουργείου Άμυνας των ΗΠΑ (DoD: Department of Defense). Ο πρόγονος του GPS ήταν το δορυφορικό σύστημα **TRANSIT** το οποίο αναπτύχθηκε από το Αμερικανικό Ναυτικό στη δεκαετία του 1960. Ο μικρός όμως αριθμός δορυφόρων υπήρξε ο κύριος λόγος που επέβαλε αρκετούς περιορισμούς στη χρήση και απόδοση του συστήματος και έτσι γρήγορα προωθήθηκε η ιδέα για το σχεδιασμό του GPS. Παρόλα αυτά, με το σύστημα TRANSIT, για πρώτη φορά δόθηκε ουσιαστικά η δυνατότητα εκτέλεσης σημαντικών γεωδαιτικών εργασιών, όπως είναι η ίδρυση δικτύων, με δορυφορικές μεθόδους στις δεκαετίες του '70 και του '80.

Το 1978 αρχίζει η εκτόξευση των δορυφόρων GPS και ταυτόχρονα σχεδόν η κατασκευή των πρώτων δεκτών GPS, οι οποίοι έκτοτε βελτιώνονται συνεχώς. Το όλο σύστημα αποτελείται από τρία βασικά τμήματα: το δορυφορικό τμήμα,

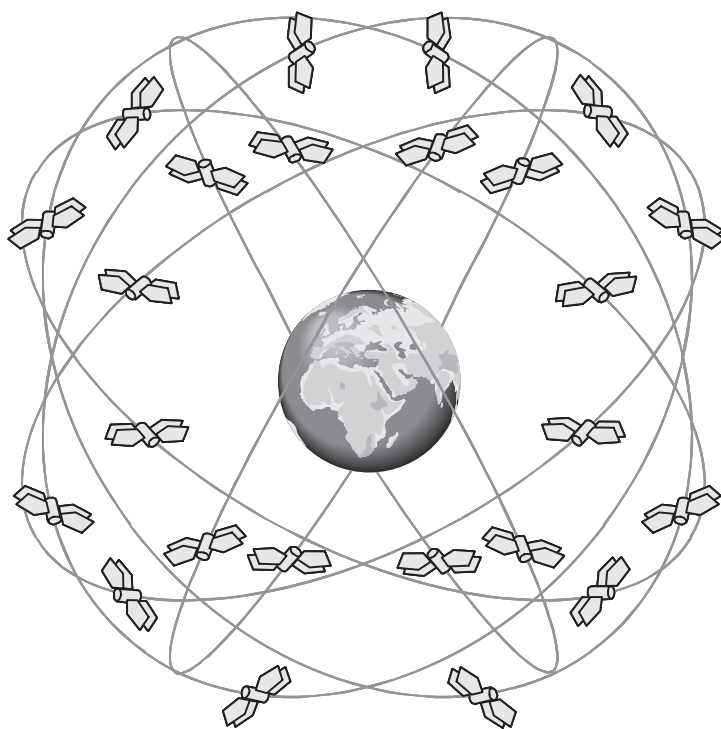


Σχήμα 1.5: Τα μέρη του συστήματος GPS.

το τμήμα ελέγχου και το τμήμα των χρηστών (Σχήμα 1.5). Για το τμήμα χρηστών, που αφορά ουσιαστικά τους δέκτες GPS, θα αναφερθούμε στο κεφάλαιο 3.

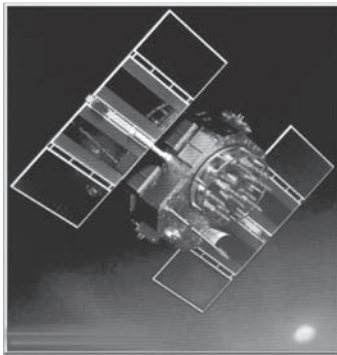
1.2.1 Το δορυφορικό τμήμα

Το δορυφορικό τμήμα (Σχήμα 1.6) αποτελείται σήμερα από 29 δορυφόρους των σειρών BLOCK II, IIA IIR, IIR-M (Σχήμα 1.7). Κάθε σειρά συμπληρώνει ή και αντικαθιστά σταδιακά τις προηγούμενες επειδή οι δορυφόροι έχουν ορισμένη διάρκεια ζωής (μερικά χρόνια).

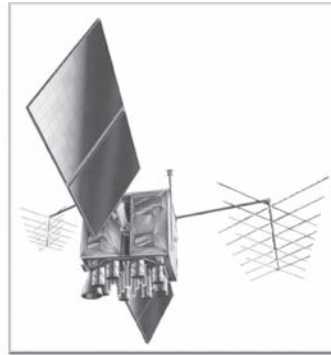


Σχήμα 1.6: Δορυφορικός σχηματισμός GPS (πηγή: Leica)

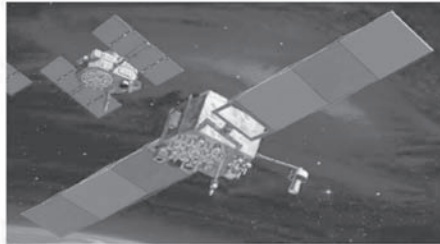
Ο πρώτος δορυφόρος GPS ήταν της σειράς BLOCK I (1^η εκτόξευση το 1978). Οι δορυφόροι της σειρά II τέθηκαν σε τροχιά από το 1989 ενώ το Σεπτέμβριο του 2005 εκτοξεύτηκε ο πρώτος δορυφόρος της σειράς IIR-M και το 2006 αναμένεται η πρώτη εκτόξευση δορυφόρου της σειράς BLOCK IIF (με επιπρόσθετα εκπεμπόμενα σήματα). Κάθε δορυφόρος εκπέμπει ένα εξαιρετικά πολύπλοκο δορυφορικό σήμα (δύο υψηλές συχνότητες της τάξης του 1.5 GHz,



GPS Satellite Block IIA



GPS Satellite Block IIR



GPS Satellite Block IIF

Σχήμα 1.7: Δορυφόροι GPS.

διαμορφωμένες από κώδικες ψευδοτυχαίου θορύβου και ένα μήνυμα δεδομένων) για το οποίο θα αναφερθούμε αναλυτικότερα σε επόμενο κεφάλαιο.

Ο αρχικός σχεδιασμός προέβλεπε 21 δορυφόρους ενώ από τα τέλη του 1993 ο αριθμός τους είναι σταθερά πάνω από 24. Ο αριθμός των 24 δορυφόρων αποτελεί τον απαραίτητο αριθμό για την πλήρη λειτουργία του συστήματος, όπως σχεδιάστηκε. Έτσι, μπορούν να παρατηρούνται ταυτόχρονα έξι έως οκτώ δορυφόροι από οποιοδήποτε σημείο της γήινης επιφάνειας με καλό ορίζοντα (ορατότητα δεκτών προς τους δορυφόρους). Οι νεότεροι δορυφόροι παρουσιάζουν ολοένα και μεγαλύτερη αυτονομία από το τμήμα ελέγχου αφού μπορούν, με παρατηρήσεις μεταξύ τους, να προσδιορίζουν μόνοι τους τα στοιχεία τροχιάς και άλλες παραμέτρους που απαιτούνται.

Οι δορυφόροι είναι τοποθετημένοι ομοιόμορφα σε 6 τροχιακά επίπεδα, ανά 60° στο ισημερινό επίπεδο και γωνία κλίσης 55° ως προς το ισημερινό επίπεδο. Ο δορυφορικός σχηματισμός έχει τέτοια διάταξη ώστε από κάθε σημείο της γήινης επιφάνειας να λαμβάνεται δορυφορικό σήμα από τουλάχιστον 4 δορυφόρους θεωρώντας ότι δεν παρεμβάλλονται εμπόδια μεταξύ δέκτη και δορυφόρων.

Ο μέγιστος αριθμός δορυφόρων που μπορεί να λαμβάνει ένας δέκτης ξεπερνά και τους 10 με πολύ καλό ορίζοντα (≤ 12). Στο πλάτος των 35° και για μικρά χρονικά διαστήματα η δορυφορική κάλυψη μειονεκτεί σε σχέση με την υπόλοιπη γη.

Η **περίοδος κάθε δορυφόρου** είναι μισή αστρική ημέρα (μέση αστρική ημέρα = $23^h 56^m 4.09^s$ σε ηλιακό χρόνο), δηλαδή 12 ώρες σε αστρικό χρόνο ή $T = 11^h 58^m 2.05^s$. Συνεπώς η θέση κάθε δορυφόρου ή δορυφορικού σχηματισμού θα είναι η ίδια στον ίδιο αστρικό χρόνο (μία φορά την ημέρα) και οι δορυφόροι θα εμφανίζονται στον ορίζοντα ενός τόπου 3 min, 55.91s ενωρίτερα κάθε ημέρα ή περίπου 4 min, όσο είναι μικρότερη η αστρική από τη μέση ηλιακή ημέρα.

Η διάρκεια ζωής των δορυφόρων είναι περίπου 10 έτη, το βάρος τους είναι της τάξης του 1 τόνου ενώ το μέγεθος του βασικού κορμού είναι όσο ένα πολύ μικρό δωμάτιο με τα πλαίσια των συσσωρευτών ηλιακής ενέργειας να εκτείνονται στα μερικά μέτρα.

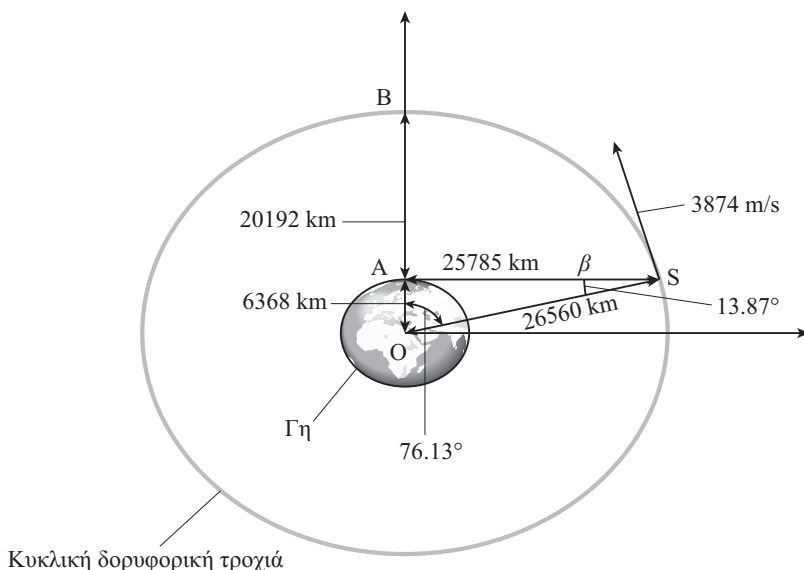
Η ελλειπτική τροχιά τους παρουσιάζει πολύ μικρή εκκεντρότητα και είναι σχεδόν κυκλική ακτίνας $r \cong 26560$ km. Αν λάβουμε υπόψη μία αντιπροσωπευτική τιμή της γήινης σφαίρας, $R = 6371$ km, τότε το μέσο ύψος ενός δορυφόρου GPS είναι $(r - R) = 20189$ km, τιμή που αντιστοιχεί στην πλησιέστερη απόσταση δορυφόρου και χρήστη GPS που βρίσκεται στην επιφάνεια της γης.

Με βάση και το Σχήμα 1.8 εύκολα υπολογίζονται η απόσταση ενός δορυφόρου που βρίσκεται στον ορίζοντα, $SA = \sqrt{r^2 - R^2} = 25785$ km και οι γωνίες $\beta = 13.87^\circ$ και η συμπληρωματική της 76.13° . Έτσι το δορυφορικό σήμα που ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός χρειάζεται περίπου $\frac{20189}{300000} = 0.067$ s =

67 ms έως $\frac{25785}{300000} = 86$ ms για να φθάσει στη γήινη επιφάνεια. Η γωνιακή ταχύτητα του δορυφόρου είναι περίπου διπλάσια από τη γωνιακή ταχύτητα της γης και πιο συγκεκριμένα $\omega = \frac{2\pi}{T} \cong 1.458 \times 10^{-4}$ rad/s, οπότε η **ταχύτητα του**

δορυφόρου κατά μήκος της τροχιάς του είναι $v_s = \omega r = 3874$ m/s (13946.4 km/h). Σε 3 min, 55.91 sec ο δορυφόρος διανύει περίπου 914 km, οπότε για ένα σταθερό σημείο στη γήινη επιφάνεια και για δορυφόρο κοντά στον ορίζοντα

η γωνία που αντιστοιχεί είναι $\frac{914}{25785} \times \frac{180}{\pi} \cong 2$ μοίρες ενώ για δορυφόρο κοντά στο ζενίθ η γωνία είναι $\frac{914}{20189} \times \frac{180}{\pi} \cong 2.6$ μοίρες. Κατά συνέπεια, στον



Σχήμα 1.8: Η σχεδόν κυκλική τροχιά δορυφόρου GPS.

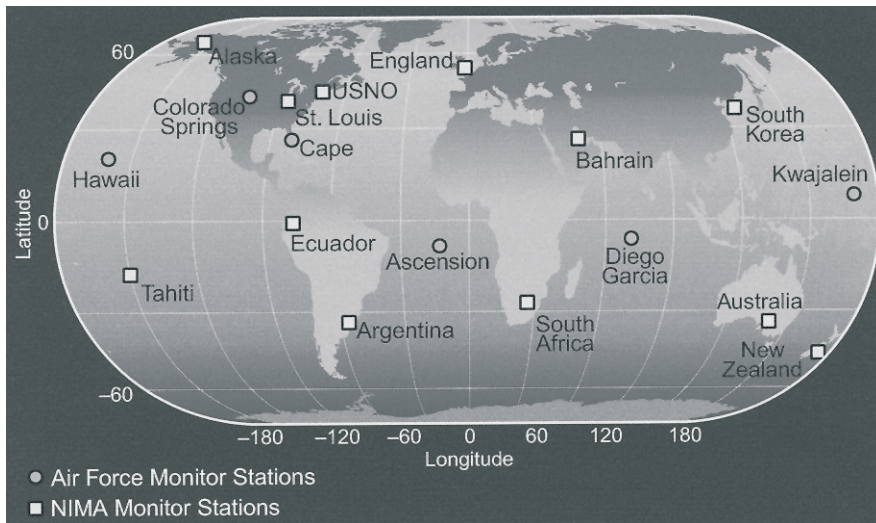
ίδιο χρόνο από μέρα σε μέρα ο δορυφόρος θα διαγράφει γωνία 2 έως 2.6 μοιρών σε σχέση με ένα σταθερό σημείο στη γη.

Κάθε δορυφόρος φέρει ως βασικό εξοπλισμό ταλαντωτές ή **ατομικά χρονόμετρα/ρολόγια**, υπολογιστές και κεραίες τηλεπικοινωνίας. Μεταφέρει συνήθως τρία ή τέσσερα ατομικά ρολόγια καισίου ή και ρουβιδίου εκ των οποίων ένα χρησιμοποιείται ως βασικό για την παραγωγή μιας θεμελιώδους συχνότητας για το δορυφορικό σήμα και τη διατήρηση της κλίμακας του χρόνου ενώ τα υπόλοιπα ως εφεδρικά. Οι δορυφόροι τείνουν να αποκλίνουν από τις σχεδιασμένες τροχιές τους και υπόκεινται κατά διαστήματα σε διορθώσεις από το σύστημα ελέγχου (repositioning, maneuver).

Οι δορυφόροι ταξινομούνται και αριθμούνται κατά διάφορους τρόπους. Για παράδειγμα, ο δορυφόρος με ημερομηνία εκτόξευσης 23-7-1997 έχει τον κωδικό IIR-2, ως προς τη σειρά εκτόξευσης (Launch Order) φέρει την ονομασία BLOCK IIR, ως προς το διαστημικό όχημα φέρει τον κωδικό SVN 43 (Space Vehicle Number 43) και ως προς το μοναδικό εβδομαδιαίο τμήμα του κώδικα P που εκπέμπει φέρει τον κωδικό PRN 13 (Pseudo Random Noise 13). Οι ονομασίες με βάση τον κωδικό **SVN** ή **PRN** είναι αυτές που συνήθως χρησιμοποιούνται. Η σειρά Ι έχει αριθμούς SVN από 13–21, η ΙΙΑ από 22–40 και η ΙΙΙ από 41 και πάνω.

1.2.2 Το τμήμα ελέγχου

Το τμήμα ελέγχου (Σχήμα 1.9) αποτελείται:



Σχήμα 1.9: Το τμήμα ελέγχου του GPS (πηγή: Crosslink, 2002).

1. Από πέντε επίγειους **μόνιμους σταθμούς παρακολούθησης** (monitor stations), συμπεριλαμβανομένου και του κεντρικού σταθμού, με γνωστές συντεταγμένες ως προς το WGS84, κατανεμημένοι σε όλη τη γη και συγκεκριμένα στις θέσεις Hawaii, Colorado Springs (MCS), Ascension Is., Diego Garcia, Kwajalein. Οι συντεταγμένες των σταθμών έχουν προσδιορισθεί με υψηλή ακρίβεια χρησιμοποιώντας μετρήσεις VLBI.
2. Τρεις **σταθμούς τηλεπικοινωνιών** (upload stations, Ground Antennas). Οι σταθμοί αυτοί βρίσκονται στις θέσεις των μόνιμων σταθμών εκτός από τους σταθμούς MCS και Hawaii. Μία ακόμα κεραία, που λειτουργεί για τον έλεγχο των δορυφόρων πριν την εκτόξευσή τους αλλά και ως εφεδρική, βρίσκεται στο Cape Canaveral, Florida. Κάθε σταθμός βλέπει όλους τους δορυφόρους στη διάρκεια μιας ημέρας, οπότε ο κάθε δορυφόρος είναι σε επικοινωνία τρεις φορές την ημέρα για να λάβει τα δεδομένα του μηνύματος πλοήγησης.
3. Έναν **κεντρικό σταθμό ελέγχου** (MCS: Master Control Station) που βρίσκεται στην αεροπορική βάση Falcon στο Colorado Springs, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη συνολική κατάσταση και λειτουργία του δορυφορικού σχη-

ματισμού. Ένας ακόμα εφεδρικός σταθμός ελέγχου (BUMCS: BackUp MCS) βρίσκεται στο Gaithersburg, Maryland.

Το Σεπτέμβριο του 2005 προστέθηκαν έξι μόνιμοι σταθμοί παρακολούθησης (Washington, D.C, England, Argentina, Ecuador, Bahrain, Australia) από την NGA (National Geospatial-Intelligence Agency, πρώην NIMA, και παλαιότερα DMA) στο υπάρχον δίκτυο της Αμερικανικής πολεμικής αεροπορίας (US Air Force), οπότε υπολογίζονται πιο ακριβή στοιχεία για το μήνυμα δεδομένων (εφημερίδες, διορθώσεις χρόνου) και άρα πιο ακριβής προσδιορισμός θέσης. Προβλέπεται η προσθήκη άλλων πέντε μόνιμων σταθμών ώστε κάθε δορυφόρος να παρακολουθείται συνεχώς από τρεις μόνιμους σταθμούς.

Οι σταθμοί παρακολούθησης είναι δέκτες GPS που φέρουν ατομικά χρονόμετρα και εκτελούν συνεχώς μετρήσεις ψευδοαποστάσεων, μεγαλύτερης ακρίβειας από έναν κοινό δέκτη. Τα δεδομένα αυτά μεταβιβάζονται στον κεντρικό σταθμό ελέγχου όπου υπολογίζονται τα στοιχεία των δορυφορικών τροχιών και άλλες χρήσιμες ποσότητες, όπως οι παράμετροι διόρθωσης του δορυφορικού χρόνου. Τα στοιχεία αυτά μεταβιβάζονται στους δορυφόρους (ενημέρωση μηνύματος ναυσιπλοΐας κάθε μερικές ώρες) μέσω των κεραιών τηλεπικοινωνίας και αναμεταδίδονται στη συνέχεια από τους δορυφόρους στο τμήμα των χρηστών, δηλαδή στους δέκτες GPS.

Σε περίπτωση βλάβης των σταθμών ελέγχου, οι δορυφόροι μπορούν από μόνοι τους να προβλέπουν την τροχιά τους με πιθανή όμως μείωση της ακρίβειας. Οι δορυφόροι της σειράς IIR έχουν αυτονομία 180 ημερών στο μήνυμα ναυσιπλοΐας και φέρουν δέκτες GPS που εκτελούν μετρήσεις μεταξύ τους ώστε η εξάρτηση από το σύστημα ελέγχου να περιορισθεί στο ελάχιστο.

Η εκπεμπόμενη δορυφορική εφημερίδα βασίζεται σε πρόγνωση της τροχιάς και δεν είναι κατάλληλη για υψηλής ακρίβειας γεωδαιτικές και γεωδυναμικές εφαρμογές. Έχει όμως το πλεονέκτημα να είναι διαθέσιμη σε πραγματικό χρόνο και καλύπτει όχι μόνο τις ανάγκες της ναυσιπλοΐας αλλά και τις συνήθεις γεωδαιτικές και τοπογραφικές εφαρμογές. Η Αμερικανική υπηρεσία NGA υπολογίζει ακριβείς δορυφορικές εφημερίδες εκ των υστέρων, από τα δεδομένα των πέντε μόνιμων σταθμών παρακολούθησης, επτά επιπλέον σταθμών υπό την ευθύνη της και ένα σύνολο σταθμών της **IGS** (International GNSS Service). Η ακρίβεια των τροχιών είναι συγκρίσιμη με εκείνη της IGS, όμως η IGS τις διαθέτει ενωρίτερα (μέσω του διαδικτύου).

Το τμήμα ελέγχου συντηρεί επίσης και το σύστημα WGS84. Ο χρήστης GPS έχει πρόσβαση στο WGS84 μέσω των δορυφορικών εφημερίδων του μηνύματος πλοήγησης.