

Αριστείδης Ι. Φωτίου • Χρήστος Κ. Πικριδάς

GPS

και ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ



Δεύτερη έκδοση

ΕΚΔΟΣΕΙΣ
ZHΤΗ

Αριστείδης Φωτίου

Καθηγητής Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης
Πολυτεχνική Σχολή – Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών
Τομέας Γεωδαισίας και Τοπογραφίας
Εργαστήριο Γεωδαιτικών Μεθόδων και Δορυφορικών Εφαρμογών

Χρήστος Πικριδάς

Αναπληρωτής Καθηγητής Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης
Πολυτεχνική Σχολή – Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών
Τομέας Γεωδαισίας και Τοπογραφίας
Εργαστήριο Γεωδαιτικών Μεθόδων και Δορυφορικών Εφαρμογών

© Copyright 2012: Α. Φωτίου – Χ. Πικριδάς,
GPS και Γεωδαιτικές Εφαρμογές, Δεύτερη Έκδοση

Φωτογραφία εξωφύλλου: *Περιοχή Πυθίου Ελασσόνας, Πηγή Α. Φωτίου*

© Copyright 2012: A. Fotiou and C. Pikridas
GPS and Geodetic Applications, Second Edition
The Aristotle University of Thessaloniki, Greece
Faculty of Engineering – Department of Geodesy and Surveying

ISBN: 978-960-456-346-3

Η κατά οποιοδήποτε 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 αποτελεί τη δεύτερη έκδοση του ομώνυμου βιβλίου του 2006. Στην ουσία πρόκειται για ένα νέο σύγγραμμα, σημαντικά αναβαθμισμένο και εμπλουτισμένο με σύγχρονο υλικό και νέες εφαρμογές. Επιδιώκει να καλύψει πρώτα από όλα τις διδακτικές ανάγκες των φοιτητών των Τμημάτων Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών των Πολυτεχνικών Σχολών της χώρας καθώς και άλλων Τμημάτων και Σχολών Μηχανικών, Θετικών Επιστημών, Γεωεπιστημών και Τεχνολογικών Ιδρυμάτων που ασχολούνται συστηματικά ή σε κάποιο βαθμό με τα θέματα των παγκόσμιων δορυφορικών συστημάτων προσδιορισμού θέσης. Ταυτόχρονα απευθύνεται στον αντίστοιχο επαγγελματία Μηχανικό και επιστήμονα που επιθυμεί να κατανοήσει καλύτερα ή και σε βάθος τόσο το θεωρητικό όσο και το πρακτικό μέρος των εφαρμογών, πέρα από την απλή εμπειρική προσέγγιση. Ακόμα, σε αρκετά θέματα, δίνεται το ερέθισμα για παραπέρα ερευνητική ενασχόληση και πιστεύουμε ότι ο νέος και ο ώριμος ερευνητής θα έχει έναν χρήσιμο σύμμαχο στις ερευνητικές του δραστηριότητες.

Η επί σειρά αρκετών ετών διδασκαλία υποχρεωτικών μαθημάτων και μαθημάτων επιλογής του προπτυχιακού και μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών του Τμήματος ATM της Πολυτεχνικής Σχολής του ΑΠΘ αλλά και η συστηματική ερευνητική τους δραστηριότητα, σε συνδυασμό με τις νέες τεχνολογικές εξελίξεις, ώθησαν τους συγγραφείς στην ολοκλήρωση του παρόντος. Θα αποτελούσε παράλειψη να μην αναφερθεί και η συμβολή της καθοριστικής αποκτηθείσας εμπειρίας μέσω της εκπόνησης ερευνητικών προγραμμάτων και της επίβλεψης διπλωματικών εργασιών, μεταπτυχιακών και διδακτορικών διατριβών σε θέματα GPS/GNSS, με έμφαση στους μετασχηματισμούς συντεταγμένων GNSS και στον προσδιορισμό ταχυτήτων μετακίνησης στον ελλαδικό χώρο.

Η παρούσα έκδοση εξακολουθεί να καλύπτει το κενό στην ελληνική βιβλιογραφία, σε θέματα που αφορούν στο παγκόσμιο σύστημα προσδιορισμού θέσης – GPS και γενικότερα GNSS. Παράλληλα φιλοδοξεί να αποτελέσει ένα εγχειρίδιο αναφοράς με πρακτικές οδηγίες και προδιαγραφές.

Η αξιοποίηση της σύγχρονης τεχνολογίας των παγκόσμιων δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης και προσδιορισμού θέσης GNSS αποτελεί πραγματική επανάσταση όχι μόνο για τις γεωδαιτικές και τοπογραφικές εφαρμογές με απαιτήσεις υψηλής ακρίβειας στον προσδιορισμό συντεταγμένων (ίδρυση γεωδαιτικών συστημάτων αναφοράς, δίκτυα και πυκνώσεις, τοπογραφικές και υδρογραφικές αποτυπώσεις, χαρτογραφήσεις και κτηματογραφήσεις, οριοθετήσεις και χαράξεις έργων, με-

λέτες ατμόσφαιρας, μελέτη μικρομετακινήσεων του γήινου φλοιού και κρίσιμων τεχνικών έργων, εφαρμογές GIS) αλλά και σε πλήθος άλλες εφαρμογές, όπως είναι η πλοήγηση, η διαχείριση στόλου οχημάτων, οι υπηρεσίες έρευνας-διάσωσης, οι δραστηριότητες αναψυχής, η ασφαλής μεταφορά δεδομένων, ο ακριβής υπολογισμός χρόνου και ταχύτητας σε παγκόσμιο επίπεδο, κ.ά.

Η ύλη αλλά και το επίπεδο δυσκολίας συσχετίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι χρήσιμα τόσο στον αναγνώστη που για πρώτη φορά έρχεται σε επαφή με τα αντίστοιχα αντικείμενα όσο και στον ώριμο επιστήμονα και μηχανικό που επιζητεί περισσότερες λεπτομέρειες ή και εμπάθунση. Είναι προφανές ότι δεν είναι δυνατόν να καλυφθούν σε πλήρη έκταση όλα τα θέματα που άπτονται και άλλων επιστημονικών περιοχών της Γεωδαισίας ή και να απαντηθούν όλα τα ερωτήματα μέσα από την ύλη ενός συγγράμματος.

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 των αποτελεσμάτων, με σκοπό τον προσδιορισμό συντεταγμένων με τα συστήματα GPS/GNSS. Έμφαση δίνεται στις γεωδαιτικές και τοπογραφικές εφαρμογές όπου η ακρίβεια που απαιτείται ξεπερνά την ακρίβεια της πλοήγησης του ενός ή μερικών μέτρων και φτάνει στην ακρίβεια των μερικών εκατοστών έως και μερικών χιλιοστών του μέτρου. Ο μαθηματικός συμβολισμός διατηρήθηκε σε απλή μορφή κατανοητός από τον 'μέσο' αναγνώστη. Τα σχήματα και οι εικόνες παρουσιάζονται με τέτοιο τρόπο που βοηθούν σημαντικά στην κατανόηση της ύλης και ταυτόχρονα καθιστούν ευχάριστη την ανάγνωση.

Το βιβλίο αποτελείται από έντεκα Κεφάλαια με το τελευταίο να απαρτίζεται από ένα σύνολο πέντε Παραρτημάτων.

Στο *Κεφάλαιο 1* δίνονται οι βασικές έννοιες και η γεωμετρική ερμηνεία για τον προσδιορισμό θέσης με τη χρήση του GPS και γενικότερα των συστημάτων GNSS, ενώ παρουσιάζονται αναλυτικά τα μέρη του συστήματος GPS.

Στο *Κεφάλαιο 2* περιγράφονται οι βασικές έννοιες από τη θεωρία των ταλαντώσεων και των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, αναλύεται η δομή και η διαμόρφωση του δορυφορικού σήματος GPS, οι κώδικες και το μήνυμα δεδομένων, με έμφαση τη μεταφορά του δορυφορικού χρόνου στον δέκτη. Επίσης παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των νέων πολιτικών δορυφορικών σημάτων προς την κατεύθυνση εκσυγχρονισμού του GPS. Τέλος αναφέρονται οι καταστάσεις της σκόπιμης μείωσης της ακρίβειας του GPS και δίνονται γενικές πληροφορίες για τα συστήματα GLONASS, GALILEO και COMPASS.

Το *Κεφάλαιο 3* αφιερώνεται στους δέκτες και τις κεραίες GPS, αναλύοντας τα

τεχνικά τους χαρακτηριστικά αλλά και τους συνδυασμούς για τη χρήση τους μαζί με τον παρελκόμενο εξοπλισμό, με τη βοήθεια αρκετών σχημάτων και εικόνων.

Στο *Κεφάλαιο 4* περιγράφεται η διαδικασία εκτέλεσης των μετρήσεων GPS από τον δέκτη, για την ψευδοαπόσταση από κώδικες και τη φάση στις φέρουσες συχνότητες, προσδιορίζονται οι σχετικιστικές επιδράσεις στο σήμα δίνοντας αριθμητικές τιμές και εξηγείται λεπτομερώς ο ρόλος του χρόνου και των σφαλμάτων των χρονομέτρων με έμφαση στη διόρθωση του δορυφορικού χρόνου, σύμφωνα με τις νεότερες οδηγίες των επισήμων εγχειριδίων του συστήματος.

Η δημιουργία των εξισώσεων παρατηρήσεων και η λεπτομερής ανάλυση – μοντελοποίηση των συστηματικών σφαλμάτων που επιδρούν στις μετρήσεις GPS εξετάζονται στο *Κεφάλαιο 5*. Έμφαση δίνεται στα τροποσφαιρικά και ιονοσφαιρικά μοντέλα και στο σφάλμα πολυανάκλασης.

Το *Κεφάλαιο 6* ασχολείται με τα μαθηματικά μοντέλα προσδιορισμού θέσης, για επεξεργασία εκ των υστέρων αλλά και σε πραγματικό χρόνο για όλα τα είδη των παρατηρήσεων. Εξάγονται οι εξισώσεις παρατηρήσεων των απλών, διπλών και τριπλών διαφορών φάσης και κώδικα για τον σχετικό προσδιορισμό θέσης, ερμηνεύοντας ταυτόχρονα τη χρησιμότητά τους. Ακολουθούν περιγραφές για τα πρωτόκολλα επικοινωνίας για εφαρμογές πραγματικού χρόνου (RTCM, NMEA, NTRIP) και δίνονται αναλυτικές οδηγίες με παραδείγματα για διάφορες κινηματικές εφαρμογές συμπεριλαμβανομένων και τη χρήση δικτύων μόνιμων σταθμών στην Ελλάδα. Στο τέλος γίνεται σύντομη περιγραφή για το σύστημα EGNOS και τις υπηρεσίες του.

Το *Κεφάλαιο 7* περιλαμβάνει αρχικά τη μεθοδολογία σχηματισμού γραμμικών συνδυασμών των πρωτογενών παρατηρήσεων GPS. Παρουσιάζονται χρήσιμοι συνδυασμοί και μεθοδολογίες για την επίλυση των ασαφειών φάσης και την επίλυση των βάσεων, δίνοντας και μια διαδικασία στρατηγικής. Στο τέλος παρουσιάζεται ένα παράδειγμα επίλυσης βάσης χρησιμοποιώντας ένα από τα γνωστά λογισμικά επεξεργασίας.

Στο *Κεφάλαιο 8* διατυπώνονται τα στοιχεία σχεδιασμού των μετρήσεων GPS (μέτρα DOP, στοιχεία κεραιών, συνθήκες πεδίου) και περιγράφονται αναλυτικά όλες οι δυνατές μέθοδοι μετρήσεων με τις αντίστοιχες ακρίβειες, δίνοντας και παράδειγμα μέτρησης ενός δικτύου. Επίσης δίνονται παραδείγματα απόλυτου και σχετικού προσδιορισμού θέσης για δύο βάσεις GPS διαφορετικού μήκους εξετάζοντας την επίδραση των παραμέτρων στα τελικά αποτελέσματα.

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 GNSS. Παρουσιάζονται τα δίκτυα μόνιμων σταθμών και τα προϊόντα που παράγονται από τα

διάφορα Διεθνή ερευνητικά κέντρα και υπηρεσίες όπως είναι η IGS, ενώ ταυτόχρονα γίνεται ειδική αναφορά στους μόνιμους σταθμούς AUT1, DUTH, LARM του Τομέα Γεωδαισίας και Τοπογραφίας του ΤΑΤΜ-ΑΠΘ που είναι ενταγμένοι στο Ευρωπαϊκό δίκτυο EPN. Επίσης, περιγράφονται αναλυτικά τα δίκτυα μόνιμων σταθμών που είναι εγκατεστημένα στην Ελλάδα, με έμφαση τα δίκτυα HERMES, HEPOS και METRICANET. Ακολουθεί παράδειγμα εφαρμογής πραγματικού χρόνου με τα παραπάνω δίκτυα. Στο τέλος παρουσιάζονται οι επικρατέστερες δικτυακές τεχνικές πραγματικού χρόνου (NRTK), η τεχνική VRS και η νεώτερη τεχνική MAC, δίνοντας και τις βασικές εξισώσεις υλοποίησης των συγκεκριμένων αλγορίθμων για μια σε βάθος κατανόηση των αντιστοιχών μεθοδολογιών.

Το *Κεφάλαιο 10* αφιερώνεται στα καθοριστικής πρακτικής σημασίας προβλήματα μετασχηματισμού συντεταγμένων GPS/GNSS σε διαφορετικά γεωδαιτικά συστήματα και ιδιαίτερα σε προβολικές συντεταγμένες και ορθομετρικά υψόμετρα τοπικών συστημάτων, όπως είναι η περίπτωση του HTRS07 και ΕΓΣΑ87 για την Ελλάδα. Μέσα από την παράθεση της μεθοδολογίας και των σχετικών αλγορίθμων, με τη βοήθεια πραγματικών παραδειγμάτων και εφαρμογών ο αναγνώστης μπορεί να κατανοήσει πλήρως το πώς επιλύονται τα προβλήματα του μετασχηματισμού και να ελέγξει με δικούς του αλγόριθμους την ακρίβεια των αποτελεσμάτων του.

Τέλος δίνονται τα *Παράρτηματα Α, Β, Γ, Δ, Ε*, με πολλές χρήσιμες πληροφορίες: Στο Παράρτημα Α δίνεται η δομή των αρχείων των παρατηρήσεων σε μορφή RINEX και των αποτελεσμάτων επίλυσης σε SINEX. Στο Παράρτημα Β περιγράφεται η δομή τόσο της εκπεμπόμενης εφημερίδας, με παράδειγμα υπολογισμού συντεταγμένων δορυφόρου, όσο και εφημερίδας ακριβείας σε SP3 format. Στο Παράρτημα Γ δίνεται αριθμητικό παράδειγμα απόλυτου προσδιορισμού θέσης με μετρήσεις κώδικα και με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Η επίδραση του σφάλματος κύκλων ολίσθησης στις μετρήσεις φάσης και στις διαφορές τους δίνεται στο Παράρτημα Δ μέσα από πίνακες και διαγράμματα. Τέλος στο Παράρτημα Ε παρατίθεται ένας πολύτιμος 'γεωδαιτικός οδηγός' σχετικά με τα συστήματα αναφοράς και χρόνου, τις βασικές έννοιες και τα γεωδαιτικά datum, τους μετασχηματισμούς συντεταγμένων στα ελληνικά συστήματα. Τέλος δίνονται χρήσιμες σχέσεις για τα μοντέλα του 2-Δ και 3-Δ μετασχηματισμού ομοιότητας.

Θεσσαλονίκη, Σεπτέμβριος 2012

Οι συγγραφείς
Αριστείδης Φωτίου – Χρήστος Πικριδάς

Περιεχόμενα

<i>Ακρονύμια</i>	15
<i>Συμβολισμοί</i>	18
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	19
1.1 Δορυφορικός προσδιορισμός θέσης και γεωμετρική ερμηνεία.....	28
1.2 Τα μέρη του συστήματος GPS.....	33
1.2.1 Το δορυφορικό τμήμα.....	36
1.2.2 Το τμήμα ελέγχου.....	41
2 ΤΟ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΣΗΜΑ	45
2.1 Βασικές έννοιες από τις ταλαντώσεις και τα κύματα.....	45
2.2 Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα	53
2.3 Το φαινόμενο Doppler	62
2.4 Δομή δορυφορικού σήματος GPS.....	65
2.4.1 Φέρουσες συχνότητες και κώδικες PRN	66
2.4.2 Το μήνυμα δεδομένων-μήνυμα πλοήγησης.....	72
2.4.2.1 Μεταφορά του δορυφορικού χρόνου στον δέκτη μέσω του Z-count.....	74
2.4.3 Η διαμόρφωση του δορυφορικού σήματος	77
2.4.4 Νέα σήματα και εκσυγχρονισμός του συστήματος GPS.....	82
2.4.4.1 Το δεύτερο νέο πολιτικό σήμα L2C.....	83
2.4.4.2 Το τρίτο νέο πολιτικό σήμα L5.....	85
2.4.4.3 Το τέταρτο νέο πολιτικό σήμα L1C.....	86
2.5 Σκόπιμη μείωση της ακρίβειας	88
2.5.1 Η κατάσταση AS - αντι-εξαπάτηση	88
2.5.2 Η κατάσταση SA - επιλεκτική διαθεσιμότητα	89
2.6 Σύντομη περιγραφή των συστημάτων GLONASS, GALILEO και COMPASS	91
2.6.1 Το σύστημα GLONASS.....	91
2.6.2 Το σύστημα GALILEO	93
2.6.3 Το σύστημα COMPASS/BEIDOU.....	95

3	ΔΕΚΤΕΣ GPS	97
3.1	Η κεραία του δέκτη.....	97
3.2	Ο κυρίως δέκτης.....	103
3.3	Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά δεκτών GNSS	113
4	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΧΡΟΝΟΣ GPS	117
4.1	Η παρατήρηση της ψευδοαπόστασης.....	120
4.2	Η παρατήρηση της φάσης.....	124
4.3	Σχετικιστικές επιδράσεις στο σήμα του GPS	127
4.4	Χρόνος GPS και σφάλματα ρολογιών	131
4.4.1	Η διόρθωση του δορυφορικού χρόνου	139
5	ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΦΑΛΜΑΤΑ	145
5.1	Εξίσωση παρατήρησης ψευδοαπόστασης.....	145
5.1.1	Γεωμετρική απόσταση και χρόνος ταξιδιού	149
5.2	Εξίσωση παρατήρησης φάσης	152
5.3	Σφάλματα και πηγές σφαλμάτων GPS	157
5.3.1	Το σφάλμα της τροχιάς των δορυφόρων	158
5.3.2	Το σφάλμα ρολογιού του δορυφόρου.....	161
5.3.3	Το σφάλμα ρολογιού του δέκτη.....	162
5.3.4	Οι μεταβολές των κέντρων φάσης της κεραίας.....	162
5.3.5	Το τυχαίο σφάλμα της παρατήρησης.....	165
5.3.6	Το σφάλμα της αβεβαιότητας του γνωστού σημείου	165
5.3.7	Το τροποσφαιρικό σφάλμα	166
5.3.7.1	Το μοντέλο Hopfield	168
5.3.7.2	Το μοντέλο Saastamoinen	170
5.3.7.3	Συναρτήσεις απεικόνισης για τον υπολογισμό της τροποσφαιρικής καθυστέρησης	171
5.3.7.4	Η συνάρτηση απεικόνισης VMF (Vienna Mapping Function)	174
5.3.8	Το ιονοσφαιρικό σφάλμα.....	176
5.3.8.1	Εκτίμηση ιονοσφαιρικού σφάλματος ή TEC	182
5.3.8.2	Εξομάλυνση της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης από κώδικα	184
5.3.8.3	Το εκπεμπόμενο μοντέλο υπολογισμού της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης.....	186
5.3.8.4	Το μονοστρωματικό ιονοσφαιρικό μοντέλο (Single Layer Model)	187

5.3.9 Το σφάλμα πολυανάκλασης.....	190
5.3.9.1 Αλγόριθμος υπολογισμού του σφάλματος της πολυανάκλασης.....	192
5.3.10 Το σφάλμα της ολίσθησης κύκλων	196
6 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΜΕ ΤΟ GPS	197
6.1 Απόλυτος προσδιορισμός θέσης.....	198
6.1.1 Απόλυτος προσδιορισμός θέσης σε πραγματικό χρόνο. Λύση πλοήγησης	200
6.1.2 Απόλυτος προσδιορισμός θέσης εκ των υστέρων	109
6.1.3 Απόλυτος προσδιορισμός θέσης με μετρήσεις κωδίκων και φάσεων	211
6.1.3.1 Εξομάλυνση ψευδοαποστάσεων κώδικα από μετρήσεις φάσης	212
6.1.4 Ακριβής απόλυτος προσδιορισμός θέσης (Precise Point Positioning)	213
6.2 Σχετικός προσδιορισμός θέσης.....	220
6.2.1 Απλές διαφορές (single differences).....	223
6.2.2 Διπλές διαφορές (double differences)	226
6.2.3 Τριπλές διαφορές (triple differences).....	230
6.3 Σχετικός στατικός προσδιορισμός θέσης	232
6.3.1 Μαθηματικό μοντέλο απλών διαφορών	233
6.3.2 Μαθηματικό μοντέλο διπλών διαφορών	234
6.3.3 Μαθηματικό μοντέλο τριπλών διαφορών.....	234
6.4 Σχετικός κινηματικός προσδιορισμός θέσης εκ των υστέρων	235
6.5 Σχετικός κινηματικός προσδιορισμός θέσης σε πραγματικό χρόνο	236
6.5.1 DGPS/DGNSS με ψευδοαποστάσεις από κώδικα PRN.....	239
6.5.2 RTK με ψευδοαποστάσεις από φάση	240
6.5.3 Μήνυμα RTCM	242
6.5.4 Το πρωτόκολλο NTRIP	250
6.5.5 Ο διακομιστής EPMHS (Hermes NtripCaster)	252
6.5.6 Οδηγίες προετοιμασίας δέκτη σε λειτουργία RTK–Rover.....	256
6.5.7 Βασικές οδηγίες και κανόνες για τους χρήστες RTK.....	261
6.5.8 Πρωτόκολλο επικοινωνίας NMEA.....	263
6.5.9 Το σύστημα EGNOS	266
6.5.9.1 Η Υπηρεσία EDAS	266
6.5.9.2 Η Υπηρεσία Assisted GPS	267

7	ΓΡΑΜΜΙΚΟΙ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ ΒΑΣΗΣ GPS	269
7.1	Γραμμικοί συνδυασμοί παρατηρήσεων διαφορετικών φορέων.....	269
7.2	Επίλυση ασαφειών φάσης και βάσης GPS.....	274
7.2.1	Επίλυση ασαφειών φάσης με μετρήσεις στη μία συχνότητα	275
7.2.2	Επίλυση ασαφειών φάσης με μετρήσεις στις δύο συχνότητες	276
7.2.2.1	Η μέθοδος FARA (Fast Ambiguity Resolution Approach)	278
7.2.2.2	Η μέθοδος Sigma (Sigma-dependent rounding)	279
7.2.2.3	Προσδιορισμός ασαφειών φάσης με τη βοήθεια τριπλών διαφορών	280
7.2.2.4	Η μέθοδος LAMBDA (Least squares AMBIGUITY Decorrelation Adjustment)	281
7.3	Στρατηγική επίλυση ασαφειών και επίλυσης βάσης	283
7.3.1	Παράδειγμα επίλυσης βάσης	287
8	ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ	291
8.1	Στοιχεία σχεδιασμού μετρήσεων	292
8.2	Στατικός προσδιορισμός θέσης.....	296
8.2.1	Γρήγορος στατικός προσδιορισμός (rapid static, fast static, quick static).....	299
8.2.2	Ψευδοκινηματικός προσδιορισμός (pseudo static, pseudo kinematic, reoccupation).....	299
8.3	Σχετικός κινηματικός προσδιορισμός	300
8.3.1	Ημικινηματική μέθοδος (stop-and-go kinematic, intermittent kinematic)	304
8.4	Παραδείγματα επίλυσης βάσεων με στατικό προσδιορισμό.....	305
9	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ GPS	315
9.1	Κριτήρια σχεδιασμού και επιλογής βάσεων GPS.....	318
9.2	Συνόρθωση δικτύων GPS/GNSS.....	323
9.3	Δίκτυα μόνιμων σταθμών GPS/GNSS.....	329
9.3.1	Ο μόνιμος σταθμός AUT1 και το δίκτυο ΕΡΜΗΣ	331
9.4	Δίκτυα μόνιμων σταθμών GNSS στην Ελλάδα	333
9.4.1	Το δίκτυο HEPOS.....	334
9.4.2	Το δίκτυο METRICANET.....	337
9.4.3	Εφαρμογή RTK με τα δίκτυα Hepos, Metrica και Hermes	341
9.4.4	Άλλα δίκτυα μόνιμων σταθμών στην Ελλάδα.....	342
9.4.5	Έλεγχος και διαχείριση δεδομένων δικτύων μόνιμων σταθμών GPS/GNSS.....	343

9.5 Δικτυακές τεχνικές σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου (Network RTK)	345
9.5.1 Η τεχνική VRS (Virtual Reference Station).....	348
9.5.1.2 Ο αλγόριθμος VRS.....	351
9.5.2 Η τεχνική MAC (Master-Auxiliary Concept)	354
9.5.2.1 Ο αλγόριθμος MAC	357
10 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ GPS/GNSS	361
10.1 Μετασχηματισμοί συντεταγμένων GPS/GNSS σε τοπικό σύστημα ..	361
10.2 Προσδιορισμός ορθομετρικών υψομέτρων με το GPS.....	363
10.3 Πρακτική εφαρμογή: μέτρηση, επίλυση και ένταξη δικτύου GPS/GNSS στο ΕΓΣΑ87	370
10.3.1 Μετασχηματισμός (X, Y, Z) / HTRS07 σε (E, N) / ΕΓΣΑ87	374
10.4 Πρακτική εφαρμογή: προσδιορισμός ορθομετρικών υψομέτρων από μετρήσεις GPS/GNSS	379
10.4.1 Παράδειγμα μετασχηματισμού συντεταγμένων νεοϊδρυθέντος σημείου	381
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	385
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Αρχεία Παρατηρήσεων σε RINEX και SINEX format	387
A1 RINEX format	387
A1.1 RINEX 2.0 – Παράδειγμα	389
A1.2 Η νέα έκδοση RINEX 3.01	391
A2 Αρχείο σε SINEX format – Παράδειγμα (Solution INdependent EXchange)	393
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Αρχεία δορυφορικών τροχιών (Broadcast Ephemeris, SP3) και υπολογισμός συντεταγμένων δορυφόρου	395
B1 Δομή της εκπεμπόμενης εφημερίδας GPS και υπολογισμός συντεταγμένων δορυφόρου	395
B1.1 Περιγραφή αρχείου RINEX εκπεμπόμενης εφημερίδας	397
B1.2 Υπολογισμός χρόνου εκπομπής του δορυφορικού σήματος και συντεταγμένων δορυφόρου	400
B2 Αρχείου εφημερίδας ακριβείας-SP3 format	403
B2.1 Περιγραφή αρχείου εφημερίδας ακριβείας – sp3	403
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Παράδειγμα προσδιορισμού απόλυτης θέσης με μετρήσεις ψευδοαποστάσεων	409

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Επίδραση της ολίσθησης κύκλων στις μετρήσεις φάσης και στις διαφορές τους.....	414
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε: Προσδιορισμός θέσης και συντεταγμένες	421
E1 Συστήματα και πλαίσια αναφοράς	421
E1.1 Βασικές έννοιες και ορισμοί.....	421
E1.2 Τα διεθνή συστήματα και πλαίσια αναφοράς.....	423
E1.3 Το σύστημα WGS84 του GPS.....	427
E1.4 Το Ευρωπαϊκό σύστημα ETRS89.....	429
E2 Συστήματα χρόνου.....	431
E2.1 Παγκόσμιος και αστρικός χρόνος.....	431
E2.2 Δυναμικός χρόνος.....	433
E2.3 Ατομικός χρόνος.....	434
E2.4 Παγκόσμιος συντονισμένος χρόνος.....	434
E2.5 Χρόνος GPS.....	435
E.3 Βασικές γεωδαιτικές έννοιες και μετασχηματισμοί συντεταγμένων ...	436
E3.1 Επιφάνειες αναφοράς.....	436
E3.2 Γεωδαιτικές συντεταγμένες	440
E3.3 Μετατροπή μεταξύ καρτεσιανών και ελλειψοειδών συντεταγμένων..	442
E3.4 Παράμετροι ελλειψοειδούς αναφοράς.....	443
E3.5 Τα γεωδαιτικά datum στην Ελλάδα.....	445
E3.5.1 Το παλιό Ελληνικό datum (Bessel).....	446
E3.5.2 Το ΕΓΣΑ87.....	446
E3.5.3 Τα προβολικά συστήματα στην Ελλάδα	447
E4 Ο μετασχηματισμός ομοιότητας.....	450
E.4.1 Το 2-Δ μοντέλο και οι τελικές αναλυτικές σχέσεις.....	450
E.4.2 Το 3-Δ μοντέλο.....	452
<i>Contents</i>	457
<i>Βιβλιογραφία</i>	463
<i>Ευρετήριο όρων</i>	473



Κεφάλαιο 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το **NAVSTAR GPS** (NAVigation Satellite Timing And Ranging, **Global Positioning System**) ή απλά **GPS**, είναι ένα **παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα προσδιορισμού θέσης (συντεταγμένες), χρόνου και ταχύτητας**, οπουδήποτε στην επιφάνεια της γης (ξηρά, θάλασσα, αέρα) και στο εγγύς διάστημα, σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή και ανεξάρτητα από καιρικές συνθήκες.

Το σύστημα σχεδιάστηκε στη δεκαετία του 1970, αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1980, έγινε επιχειρησιακό από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 και πλήρως επιχειρησιακό από τα μέσα περίπου της δεκαετίας του 1990 ενώ βρίσκεται συνεχώς υπό τον έλεγχο του Υπουργείου Άμυνας των ΗΠΑ. Εδώ και μερικά χρόνια η Αμερικανική Αεροπορία (USAF) έχει αναλάβει την ευθύνη για την πλήρη λειτουργία και υποστήριξη του συστήματος. Στα τέλη της δεκαετίας του 1990 ανακοινώθηκε η ουσιαστική βελτίωση και εκσυγχρονισμός του συστήματος. Πρόκειται για ένα στρατιωτικό και ταυτόχρονα πολιτικό σύστημα με πρωταρχικό σκοπό την κάλυψη των στρατιωτικών και των πολιτικών αναγκών της πλοήγησης. Η πολιτική χρήση του GPS, όπως είναι οι τοπογραφικές και γεωδαιτικές εφαρμογές υψηλής ακρίβειας, οι χαμηλότερης ακρίβειας εφαρμογές GIS, οι μαζικές 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 για αρκετά χρόνια δεν ήταν σε πλήρη ανάπτυξη και λειτουργία αλλά τα τελευταία χρόνια έχει σχεδόν ολοκληρωθεί και

τυγχάνει ευρείας αποδοχής και χρήσης όπως και το GPS. Οι σύγχρονοι (γεωδαιτικοί) δέκτες GPS, αποκαλούμενοι και δέκτες GNSS, κατασκευάζονται με τη δυνατότητα να λαμβάνουν δορυφορικά σήματα GPS και GLONASS, και σταδιακά GALILEO, βελτιώνοντας περισσότερο την ακρίβεια και τη λειτουργικότητα των συστημάτων.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση, αν και έχει καθυστερήσει αρκετά σύμφωνα με τον αρχικό σχεδιασμό, προχωρεί στην ανάπτυξη και ολοκλήρωση στα επόμενα χρόνια του πρώτου πολιτικού συστήματος προσδιορισμού θέσης και πλοήγησης, του συστήματος GALILEO. Έτσι αναμένεται να αλλάξει σημαντικά η υπάρχουσα κατάσταση με πλήθος πολιτικών εφαρμογών χωρίς 'στρατιωτικές δεσμεύσεις', αν και στο πλαίσιο του εκσυγχρονισμού του GPS (**GPS modernization, GPS III**) με την προσθήκη νέων πολιτικών σημάτων η διαφορά στην ακρίβεια μεταξύ στρατιωτικής και πολιτικής χρήσης σχεδόν μηδενίζεται. Η ακρίβεια αυτή αφορά κυρίως τις εφαρμογές πραγματικού χρόνου και όχι τις υψηλής ακρίβειας γεωδαιτικές ή άλλες εφαρμογές που δεν επηρεάζονται, εδώ και αρκετά χρόνια, από τις στρατιωτικές κρυπτογραφήσεις κάποιων μετρητικών σημάτων.

Το σύστημα GALILEO έχει σχεδιαστεί για να είναι τεχνολογικά περισσότερο προηγμένο, καλύτερων επιδόσεων, ασφαλέστερο και με μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών σε συνδυασμό και με την κινητή τηλεφωνία και το διαδίκτυο. Παράλληλα ο πλήρης εκσυγχρονισμός του GPS θα προσφέρει παρόμοιες δυνατότητες. Υπάρχουν αρκετές ομοιότητες στη λειτουργία και εφαρμογή μεθοδολογιών και τεχνικών μεταξύ και των τριών συστημάτων GNSS που αναφέρθηκαν.

Επιπλέον προβλέπεται και υλοποιείται τελευταία η συνεργασία μεταξύ των συστημάτων GNSS, όχι μόνο μεταξύ των τριών αναφερθέντων αλλά και άλλων όπως είναι το Κινεζικό **COMPASS** και τα 'τοπικά' συστήματα της Ιαπωνίας (QZSS: Quasi-Zenith Satellite System) και της Ινδίας (IRNSS: Indian Regional Navigation Satellite System). Για παράδειγμα, η συνεργασία, ιδιαιτέρως μεταξύ GPS και GALILEO, προβλέπει την εκπομπή μιας κοινής συχνότητας για πολιτική χρήση. Επίσης η συνεργασία αφορά και με τα 'συμπληρωματικά' συστήματα των GNSS, τα λεγόμενα **SBAS** (Satellite Based Augmentation Systems), όπως είναι το Ευρωπαϊκό **EGNOS** (European Geostationary Navigation Overlay Service) και το Αμερικανικό **WAAS** (Wide Area Augmentation Systems) καθώς και συνεργασία με Διεθνείς Οργανισμούς και Υπηρεσίες Τηλεπικοινωνιών, Αεροπλοΐας, Ναυτιλίας, κ.α.

Υπάρχουν δέκτες που είναι ταυτόχρονα δέκτες GPS και INS (Inertial Navigation System, επίγειο αδρανειακό σύστημα πλοήγησης). Ένας δέκτης INS φέρει γυροσκόπια και επιταχυνσιόμετρα ώστε 'αξιοποιώντας' τους νόμους της κί-

νησης να προσδιορίζει τη θέση του αν είναι γνωστή μία αρχική θέση, που παρέχεται από το GPS. Όπου το GPS χάνει το σήμα, λόγω π.χ. εμποδίων, η θέση παρέχεται από το σύστημα INS.

Οι παρατηρήσεις των συστημάτων GNSS συνδυάζονται με παρατηρήσεις και μη δορυφορικών συστημάτων, όπως SLR, VLBI, μεγαλύτερης ακόμα ακρίβειας, για την υλοποίηση των υψηλής ακρίβειας παγκόσμιων αδρανειακών και επίγειων συστημάτων αναφοράς που αποτελούν τις τελευταίες δεκαετίες το θεμέλιο για τον προσδιορισμό θέσης και άλλες επιστημονικές και ερευνητικές δραστηριότητες.

Η εποχή της δορυφορικής και διαστημικής γεωδαισίας αρχίζει ουσιαστικά στη δεκαετία του 1960 με την πρώτη εκτόξευση τεχνητού δορυφόρου Sputnik από τη Σοβιετική Ένωση – Ρωσία στις 4-10-1957. Από τότε μέχρι σήμερα έγιναν επιστημονικά άλματα και στο θέμα του προσδιορισμού θέσης.

Το σύστημα GPS έχει επικρατήσει περισσότερο έως τώρα στο μεγαλύτερο μέρος των γεωδαιτικών και τοπογραφικών εφαρμογών και όχι μόνο. Εδώ και μερικά χρόνια αξιοποιείται παράλληλα και το GLONASS με παρόμοιες δυνατότητας. Οι τοπογραφικές και υδρογραφικές αποτυπώσεις, οι απλοί τριγωνισμοί και τα δίκτυα πύκνωσης, 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 των συστημάτων GPS/GNSS στα αντικείμενα κυρίως των επιστημών του Τοπογράφου Μηχανικού αλλά και άλλων κλάδων Μηχανικών ή επιστημόνων και τεχνικών που σχετίζονται με αυτά ή και με παρόμοια αντικείμενα.

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

προσδιορισμό θέσης της τάξης των μερικών δεκάδων εκατοστών ή και 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 ή και να ιδρύονται εξ αρχής 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 προϊόντα υψηλής ακρίβειας, όπως δορυφορικές εφημερίδες, συντεταγμένες και παρατηρήσεις μόνιμων σταθμών αναφοράς και παραμέτρους περιστροφής της γης, στοιχεία χρήσιμα και απαραίτητα για τον προσδιορισμό θέσης υψηλής ακρίβειας με το GPS και γενικότερα με τα συστήματα GNSS.

Η κλασική γεωδαιτική και τοπογραφική μεθοδολογία έχει αλλάξει ριζικά από τα τέλη του 20^{ου} αιώνα. Η χρήση του GPS ή άλλου παρόμοιου συστήματος για τον προσδιορισμό θέσης δεν απαιτεί πλέον ορατότητες μεταξύ των σημείων και κατάλληλες καιρικές συνθήκες για την εκτέλεση των μετρήσεων. Οι παρατηρήσεις μπορούν να γίνονται μέρα και νύκτα, σε σημεία ή μεταξύ σημείων που απέχουν έως και αρκετές εκατοντάδες χιλιόμετρα. Η μόνη συνθήκη που πρέπει να ικανοποιείται είναι η ύπαρξη ανοικτού ορίζοντα ώστε να λαμβάνονται σήματα από ικανό αριθμό δορυφόρων, δηλαδή να υπάρχει ορατότητα μεταξύ δέκτη GPS/GNSS και λαμβανομένων δορυφόρων. Σε περιπτώσεις παρεμβολής εμποδίων, όπως είναι τα υψηλά κτίρια σε πυκνοδομημένες εκτάσεις με στενούς δρόμους, τα βουνά πλησίον του δέκτη και τα πυκνά φυλλώματα των δέντρων, 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, τα EDM, τα 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 (στις 'δυσκολότερες') αντικαθιστά πλήρως τα κλασικά όργανα. Για παράδειγμα, η μέτρηση γεωδαιτικού ή και τοπογραφικού δικτύου και γενικότερα ο προσδιορισμός συντεταγμένων βασικών σημείων αναφοράς γίνεται σχεδόν αποκλειστικά σήμερα με το GPS ή τα συστήματα GNSS.

Το σύστημα GPS/GNSS αποτελείται ουσιαστικά από 'πομπούς σε τροχιά' που είναι οι δορυφόροι του συστήματος και από δέκτες GPS στη γήινη επιφά-

νεια. Ο δέκτης μπορεί να αναπτύσσεται όπως ένα κλασικό τοπογραφικό-γεωδαιτικό όργανο σε τρίποδα, βάθρο, στυλεό, να τοποθετείται σε κινούμενο όχημα (πλοίο, αεροπλάνο, ελικόπτερο, τρένο, αυτοκίνητο, κ.λπ.) ή ακόμα να κρατιέται στην παλάμη του χεριού και να λαμβάνει ηλεκτρομαγνητικά σήματα που εκπέμπονται από τους ορατούς ως προς τον δέκτη δορυφόρους.

Τα δορυφορικά σήματα λαμβάνονται από τον δέκτη και χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση των μετρήσεων. Οι μετρήσεις ισοδυναμούν άμεσα ή έμμεσα με αποστάσεις μεταξύ δέκτη και δορυφόρων σε κάθε χρονική στιγμή, ακρίβειας ανάλογης του μετρητικού σήματος που παρατηρείται, από περίπου 1 m έως και 1 mm!. Οι παρατηρήσεις καθώς και άλλες πληροφορίες/δεδομένα 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, ιδίως σε πραγματικό χώρο, όπως είναι τα στοιχεία τροχιάς των δορυφόρων από τα οποία υπολογίζονται οι συντεταγμένες τους, οι παράμετροι διόρθωσης χρόνου και άλλα συστηματικά σφάλματα ώστε τελικά να υπολογιστεί η θέση ή το λεγόμενο στίγμα (συντεταγμένες).

Οι μετρήσεις GPS γίνονται πάνω σε μετρητικούς κώδικες και σε ημιτονοειδή κύματα - φορείς των κωδίκων και του μηνύματος πλοήγησης. Είναι πάντοτε επηρεασμένες από συστηματικά σφάλματα που οφείλονται κυρίως στο μη συγχρονισμό των ταλαντωτών/χρονομέτρων (ρολογιών) των δορυφόρων και των δεκτών καθώς και στην επίδραση της ατμόσφαιρας στο δορυφορικό σήμα (διάθλαση) κατά τη διαδρομή του. Τα σφάλματα αυτά προσδιορίζονται σε ικανοποιητικό βαθμό με τη βοήθεια κατάλληλων μοντέλων ή και απαλείφονται με ειδικές 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/ακρίβεια 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 ακριβής μέτρηση των αποστάσεων δέκτη-δορυφόρων απαιτεί πολύ μεγάλη ακρίβεια στη μέτρηση του χρόνου ταξιδιού των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων από τους δορυφόρους έως τους δέκτες (απόσταση = ταχύτητα φωτός × χρόνος ταξιδιού). Αν λάβουμε υπόψη ότι το δορυφορικό σήμα ταξιδεύει με την ταχύτη-

τα 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 δέκτη-δορυφόρου, ένα σφάλμα του ενός microsecond ($1 \mu\text{s} = 10^{-6} \text{ sec}$) 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, π.χ. της τάξης του cm, είναι προφανές το πόσο σημαντική είναι η σωστή διαχείριση και ο ακριβής προσδιορισμός του χρόνου και των σφαλμάτων του καθώς και η ακριβής διατήρηση μιας ενιαίας κλίμακας (ατομικού) χρόνου από το σύστημα.

Ο προσδιορισμός θέσης με το GPS ή με ένα σύστημα GNSS διακρίνεται γενικά σε δύο κατηγορίες: Στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης και στο σχετικό προσδιορισμό θέσης. Μπορεί δε να γίνεται είτε **εκ των υστέρων** - μετά το πέρας των μετρήσεων (post processing) ή **σε πραγματικό χρόνο** (real time), ανάλογα με τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

- Στον **απόλυτο προσδιορισμό θέσης** (absolute positioning, absolute point positioning, point positioning, single point positioning) προσδιορίζονται οι συντεταγμένες ενός σημείου από παρατηρήσεις μόνον του αντίστοιχου δέκτη. Οι συντεταγμένες του σημείου αναφέρονται ως προς ένα γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς, π.χ. ως προς το WGS84 ή ένα σύστημα που διαφέρει λίγο από το WGS84 (έως μερικά μέτρα). Ο προσδιορισμός γίνεται από το λογισμικό του δέκτη σε πραγματικό χρόνο (π.χ. ανάγκες πλοήγησης ή χάραξης) ή εκ των υστέρων, συνήθως από το λογισμικό της κατασκευάστριας εταιρείας. Με έναν κατάλληλο μετασχηματισμό οι συντεταγμένες μπορούν να αναφέρονται σε ένα διαφορετικό σύστημα, γεωκεντρικό ή όχι, ή και σε ένα προβολικό σύστημα συντεταγμένων.
- Στον **σχετικό προσδιορισμό θέσης** (relative positioning, differential positioning), προσδιορίζονται οι συντεταγμένες ενός σημείου ως προς ένα άλλο σημείο του οποίου οι συντεταγμένες θεωρούνται γνωστές ως προς το WGS84 ή ένα σύστημα που διαφέρει λίγο από το WGS84 (μερικά μέτρα). Προϋπόθεση η εκτέλεση ταυτόχρονων παρατηρήσεων από τους δύο δέκτες στα αντίστοιχα σημεία προς τους ίδιους δορυφόρους. Αυτό που προσδιορίζεται με υψηλή ακρίβεια είναι η σχετική θέση, δηλαδή οι διαφορές των συντεταγμένων μεταξύ των δύο σημείων (διάνυσμα βάσης) και όχι οι απόλυτες τιμές του άγνωστου σημείου η ακρίβεια των οποίων εξαρτάται από την ακρίβεια των συντεταγμένων του γνωστού σημείου. Με την ίδια λογική, ο σχετικός προσδιορισμός μπορεί να αφορά την ταυτόχρονη μέτρηση σε περισσότερα από δύο σημεία από αντίστοιχο αριθμό δεκτών και κατά συνέπεια τον

προσδιορισμό της σχετικής θέσης μεταξύ όλων των σημείων. Πάντα κάποιο σημείο, τουλάχιστον ένα, θεωρείται με γνωστές συντεταγμένες.

Ο προσδιορισμός θέσης μπορεί ακόμα να διακριθεί σε σχέση με την κίνηση των δεκτών κατά τη διάρκεια των δορυφορικών παρατηρήσεων. Διακρίνουμε τον **στατικό** (static) και τον **κινηματικό** (kinematic) προσδιορισμό 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 προσδιορισμού αφορά περισσότερο τις τοπογραφικές και γεωδαιτικές εφαρμογές υψηλής ακριβείας (π.χ. ίδρυση δικτύων, μελέτη παραμορφώσεων, γεωδυναμικές εφαρμογές). Η μέθοδος του σχετικού κινηματικού προσδιορισμού σε πραγματικό χρόνο, όπου ένας κινούμενος δέκτης λαμβάνει διορθώσεις των σφαλμάτων, από μοντέλα πρόγνωσης από έναν ακίνητο μόνιμο σταθμό - δέκτη (μέσω π.χ. του διαδικτύου ή radio modem), χρησιμοποιείται και στις τοπογραφικές ή άλλες παρόμοιες εφαρμογές με απαιτήσεις ακρίβειας, όταν από τους δύο δέκτες εκτελούνται παρατηρήσεις φάσης (**RTK: Real Time Kinematic**). Εάν εκτελούνται ή χρησιμοποιούνται μόνον οι χαμηλότερης ακρίβειας παρατηρήσεις ψευδοαποστάσεων των μετρητικών κωδίκων αναφερόμαστε στην κατηγορία που είναι γνωστή ως διαφορικός προσδιορισμός θέσης, γνωστός και ως **DGPS** (Differential GPS) ή γενικότερα ως **DGNSS**. Η μέθοδος του σχετικού κινηματικού προσδιορισμού σε πραγματικό χρόνο με παρατηρήσεις κωδίκων και λήψη αντιστοιχών διορθώσεων, από μόνιμους σταθμούς ή από συστήματα SBAS, δίνει ακρίβεια της τάξης του 0.5 έως 3 m. Τέλος, ο κινηματικός προσδιορισμός σε πραγματικό χρόνο με χρήση παρατηρήσεων κωδίκων αφορά κυρίως την πλοήγηση και γενικότερα εφαρμογές της τάξης των μερικών μέτρων. Αν οι μετρήσεις κατά τον κινηματικό προσδιορισμό καταγράφονται από τον δέκτη μπορεί να γίνει και εκ των υστέρων επεξεργασία με αποτελέσματα καλύτερης ακρίβειας. Σημειώνεται ότι η λήψη διορθώσεων σε (σχεδόν) πραγματικό χρόνο εμπεριέχει κάποια σφάλματα του μοντέλου πρόγνωσης που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό τους.

Στον σχετικό προσδιορισμό, όπως αναφέρθηκε, απαιτούνται τουλάχιστον δύο δέκτες που μετρούν ταυτόχρονα στα αντίστοιχα σημεία, ώστε χρησιμοποιώντας κατάλληλα τις ταυτόχρονες παρατηρήσεις να προσδιορίζεται η σχετική θέση μεταξύ των σημείων. Για κάθε ζεύγος δεκτών, π.χ., για δύο δέκτες που ορίζουν μία **βάση GPS**, προσδιορίζεται η σχετική θέση, δηλαδή 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 οι δια-

φορές (ΔX , ΔY , ΔZ), που έχουν υπολογισθεί με μεγάλη ακρίβεια, προστεθούν στις συντεταγμένες του γνωστού σημείου θα προκύψουν οι συντεταγμένες του αγνώστου σημείου στο σύστημα αναφοράς του γνωστού σημείου. Βέβαια η απόλυτη ακρίβεια των συντεταγμένων (X , Y , Z) του νέου/αγνώστου σημείου θα είναι (σχεδόν) ίδια με την απόλυτη ακρίβεια του γνωστού σημείου. Όμως η σχετική ακρίβεια μεταξύ των σημείων παραμένει υψηλή. Ένας χρήστης με έναν μόνο δέκτη μπορεί να εφαρμόσει τη μέθοδο του σχετικού προσδιορισμού εφόσον το ρόλου του δεύτερου δέκτη αναλαμβάνει ένας ή περισσότεροι μόνιμοι σταθμοί GPS/GNSS, που ανήκουν σε παγκόσμια, ηπειρωτικά, εθνικά ή ιδιωτικά δίκτυα και διαθέτουν ελεύθερα ή με κάποια σχετικά οικονομική συνδρομή τα δεδομένα τους. Τέτοια δίκτυα μόνιμων σταθμών είναι π.χ. το παγκόσμιο δίκτυο της IGS, το δίκτυο EPN για την Ευρώπη, τα δίκτυα HEPOS, HERMES καθώς και άλλα δίκτυα ιδιωτικών εταιρειών για την Ελλάδα.

Στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης, χρησιμοποιούμε τις παρατηρήσεις των μεμονωμένων σημείων και καταλήγουμε σε προσδιορισμό γεωκεντρικών συντεταγμένων με σημαντικά χαμηλότερη ακρίβεια, σε σχέση με το σχετικό προσδιορισμό, επειδή δεν μπορούν να αντιμετωπισθούν ικανοποιητικά τα διάφορα συστηματικά σφάλματα, αντίθετα από ότι συμβαίνει στον σχετικό προσδιορισμό.

Το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς του GPS είναι το **WGS84** (World Geodetic System 1984). Οι συντεταγμένες GPS, καρτεσιανές γεωκεντρικές (X , Y , Z) ή ισοδύναμα γεωδαιτικές/γεωγραφικές/ελλειψοειδείς (φ , λ , h) μπορούν να μετασχηματίζονται σε οποιοδήποτε άλλο σύστημα, τρισδιάστατο (3- Δ) ή προβολικό (2- Δ), μέσω κατάλληλων μετασχηματισμών είτε με γνωστές παραμέτρους μετασχηματισμού είτε με προσδιορισμό τους από μετρήσεις GPS/GNSS σε κοινά σημεία των δύο συστημάτων. Σημειώνεται ότι ο προσδιορισμός των ορθομετρικών υψομέτρων (H), με επιφάνεια αναφοράς το γεωειδές, απαιτεί τη γνώση των υψομέτρων του γεωειδούς N (αποχές γεωειδούς από το ελλειψοειδές αναφοράς) ή και γνώση της βαρύτητας.

Η ακρίβεια του απόλυτου προσδιορισμού θέσης με το GPS σε πραγματικό χρόνο (**λύση πλοήγησης**, **λύση ναυσιπλοΐας**, **navigation solution**) είναι της τάξης των μερικών μέτρων (**3-10 m**), από τον Μάιο του 2000 και μετά, ενώ προηγουμένως ήταν της τάξης των αρκετών δεκάδων μέτρων (100–150 m) επειδή το δορυφορικό σήμα περιείχε και κάποια εσκεμμένα σφάλματα μείωσης της ακρίβειας. Η εκ των υστέρων επεξεργασία των παρατηρήσεων ενός μόνον δέκτη (στατικός απόλυτος προσδιορισμός διάρκειας τουλάχιστον μιας ώρας) οδηγεί σε σημαντικά μεγαλύτερης ακρίβειας αποτελέσματα επειδή εξομαλύνονται τα διάφορα σφάλματα. Μάλιστα η ακρίβεια μπορεί να φτάσει τα μερικά εκατοστά εφόσον χρησιμοποιηθούν πιο ακριβείς παράμετροι, από άλλες πηγές-

υπηρεσίες, για τον ακριβή υπολογισμό των συστηματικών σφαλμάτων των παρατηρήσεων.

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 μια ακρίβεια των συντεταγμένων του θεωρούμενου γνωστού σημείου ως προς το WGS84, της τάξης των μερικών μέτρων (ενδεικτικά 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 WGS84.

Η απαίτηση για δύο τουλάχιστον δέκτες στον σχετικό προσδιορισμό θέσης, που μετρούν ταυτόχρονα τους ίδιους δορυφόρους, προκύπτει από το γεγονός ότι μέσω καταλλήλων γραμμικών συνδυασμών (τεχνική διαφορών – συνθετικές παρατηρήσεις) των ταυτόχρονων πρωτογενών παρατηρήσεων μπορούν να απαλείφονται ή να ελαχιστοποιούνται κοινά συστηματικά σφάλματα. Ως εκ τούτου προκύπτει η υψηλή **ακρίβεια στη σχετική θέση** να είναι της τάξης του **1 έως 2 ppm** ή και **0.1 ppm**, η οποία συμβατικά αναφέρεται ως ‘**ακρίβεια εκατοστού**’ στις γεωδαιτικές και τοπογραφικές εφαρμογές. Η υψηλή ακρίβεια προϋποθέτει τη χρήση μετρήσεων φάσης στα κύματα - φορείς υψηλών συχνοτήτων του δορυφορικού σήματος.

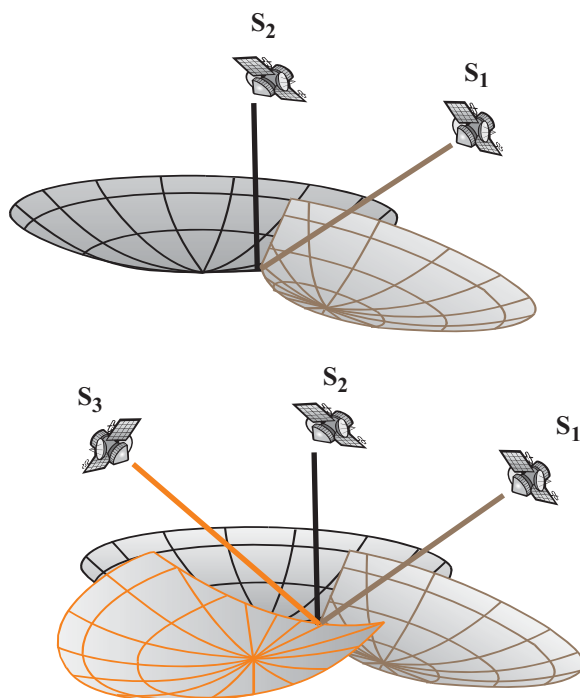
Στις πρακτικές εφαρμογές, ο σχετικός προσδιορισμός θέσης περιλαμβάνει συνήθως περισσότερα από δύο σημεία. Δύο ή περισσότεροι δέκτες μετρούν ταυτόχρονα για κάποιο ικανό χρονικό διάστημα, μερικά λεπτά έως μερικές ώρες ή και ημέρες, ανάλογα με την εφαρμογή. Η επεξεργασία των ταυτόχρονων παρατηρήσεων καταλήγει σε προσδιορισμό της σχετικής θέσης με υψηλή ακρίβεια (**μέτρηση δικτύου GPS - GNSS**). Για τον έλεγχο των σφαλμάτων και γενικώς για εξαγωγή ποιοτικών αποτελεσμάτων μετρούνται περισσότερες βάσεις από τις ελάχιστες που απαιτούνται ώστε να υπάρχει πλεονάζουσα πληροφορία (**συνόρθωση δικτύου**). Με περισσότερους από δύο δέκτες έχουμε προφανώς οικονομία στο χρονικό διάστημα που απαιτείται για να ολοκληρωθούν οι μετρήσεις και αποτελέσματα καλύτερης ακρίβειας. Για βέλτιστα αποτελέσματα απαιτείται πρωτίστως καλός σχεδιασμός των εργασιών πεδίου, σωστή επιλογή των μετρη-

τικών οργάνων (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, ως τριγωνομετρικά σημεία σε τροχιά, τα άγνωστα σημεία οι δέκτες GPS και παρατηρήσεις οι αποστάσεις μεταξύ δεκτών και δορυφόρων.

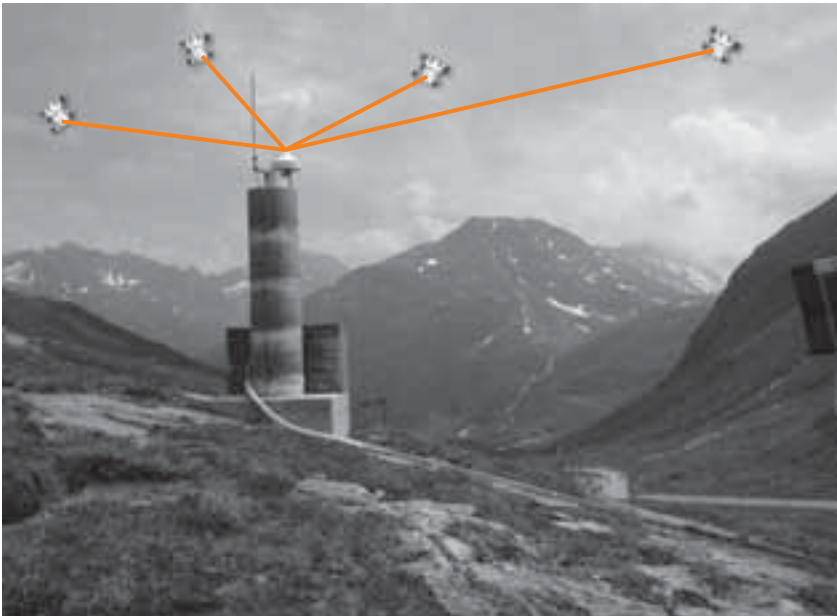
Ας υποθέσουμε προς στιγμήν ότι τα ρολόγια των δεκτών και των δορυφόρων είναι τέλεια συγχρονισμένα ως προς την ενιαία κλίμακα χρόνου του GPS, άρα και μεταξύ τους. Τότε η θέση του δέκτη, σε κάθε χρονική στιγμή, ορίζεται γεωμετρικά από την τομή τριών σφαιρών με κέντρα τους αντίστοιχους δορυφόρους



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

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 είναι το ζητούμενο, εκείνο που βρίσκεται κοντά στη γη (το άλλο απέχει πάρα πολύ) και είναι εύκολα εντοπίσιμο (Σχήμα 1.1).

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 ($1 \mu\text{s} = 10^{-6} \text{s}$) 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 μία επι-



Σχήμα 1.2: Βασική αρχή GPS στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης: Ταυτόχρονη λήψη σήματος από τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους (Ελβετικές Άλπεις, πηγή Α. Φωτίου).

πλέον άγνωστη παράμετρος, η διόρθωση του χρόνου του δέκτη ως προς την κλίμακα του GPS, με αποτέλεσμα να υπάρχουν συνολικά **τέσσερις άγνωστες παράμετροι** ($4 = 3 + 1$).

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).

Οι καρτεσιανές συντεταγμένες (X, Y, Z) ή ισοδύναμα οι πιο κατανοητές γεωδαιτικές συντεταγμένες (φ, λ, h) – (γεωδαιτικό πλάτος, γεωδαιτικό μήκος, γεωμετρικό υψόμετρο) – προσδιορίζονται αρχικά ως προς το WGS84 αφού σε αυτό το σύστημα υπολογίζονται οι συντεταγμένες των δορυφόρων. Στη συνέχεια μπορούν να μετασχηματίζονται σε άλλα γεωδαιτικά συστήματα και τελικά στην πράξη σε επίπεδες προβολικές ή χαρτογραφικές συντεταγμένες (x, y) ή



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

(E,N) και σε ορθομετρικά υψόμετρα (H) ως προς το γεωειδές (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 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 ή το EGM08, τα υψόμετρα του γεωειδούς υπολογίζονται με μια ακρίβεια της τάξης του μισού μέτρου ή λίγο καλύτερη. Για μεγαλύτερη ακρίβεια, έως και μερικά εκατοστά του μέτρου, απαιτούνται τοπικά μοντέλα γεωειδούς 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 αυτήν 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 (βέλτιστη προσαρμογή επιπέδου), εύκολα καταλήγουμε στον προσδιορισμό ορθομετρικών υψομέτρων με ακρίβεια, της τάξης του 1 έως 5 cm. Για μεγαλύτερες εκτάσεις χρησιμοποιούμε ως επιφάνειες προσαρμογής πολυώνυμα, π.χ. 2^{ου} βαθμού 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 περίοδο (Σχήμα 1.4). 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



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

διαδοχικών μετρητικών περιόδων. 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 (σχήμα+ μέγεθος). 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, 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 γεωδαιτικό datum που είναι συνήθως τοπικό, π.χ. για την Ελλάδα ενδιαφέρει 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 συστήματος/πλαίσιου αναφοράς (π.χ. **ITRF2005**: International Terrestrial Reference

Frame του 2005) 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 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.

Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται στη Ελλάδα το σύστημα HEPOS (Hellenic Positioning System) της Κτηματολόγιο ΑΕ 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 τον 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 στον χρήστη να προσδιορίσει ή να χρησιμοποιήσει ένα ικανοποιητικό τοπικό μοντέλο γεωειδούς.

1.2 Τα μέρη του συστήματος GPS

Ο πρόγονος του GPS είναι το δορυφορικό σύστημα U.S. Navy Navigation Satellite System, γνωστό περισσότερο ως **TRANSIT**, το οποίο αναπτύχθηκε με τη συνεργασία του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Φυσικής του Πανεπιστημίου Johns Hopkins (όπου επινοήθηκε η ιδέα) και του Αμερικανικού Ναυτικού (επείγουσα ανάγκη για πλοήγηση – ενημέρωση θέσης και παροχή αρχικών συνθηκών στο αδρανειακό σύστημα κυρίως των υποβρυχίων Polaris) στη δεκαετία του 1960. Η λειτουργία του συστήματος που είναι παρόμοια με αυτή του GPS βασίστηκε στο φαινόμενο Doppler για το οποίο θα αναφερθούμε σε επόμενα κεφάλαια.

Το σύστημα Transit τέθηκε σε λειτουργία το 1964 ενώ από το 1967 αφέθηκε σε εμπορική χρήση με την κατασκευή δεκτών και μετρήσεις της λεγόμενης μετατόπισης ή απαρίθμησης Doppler μαζί με το μήνυμα πλοήγησης (μέτρηση στην

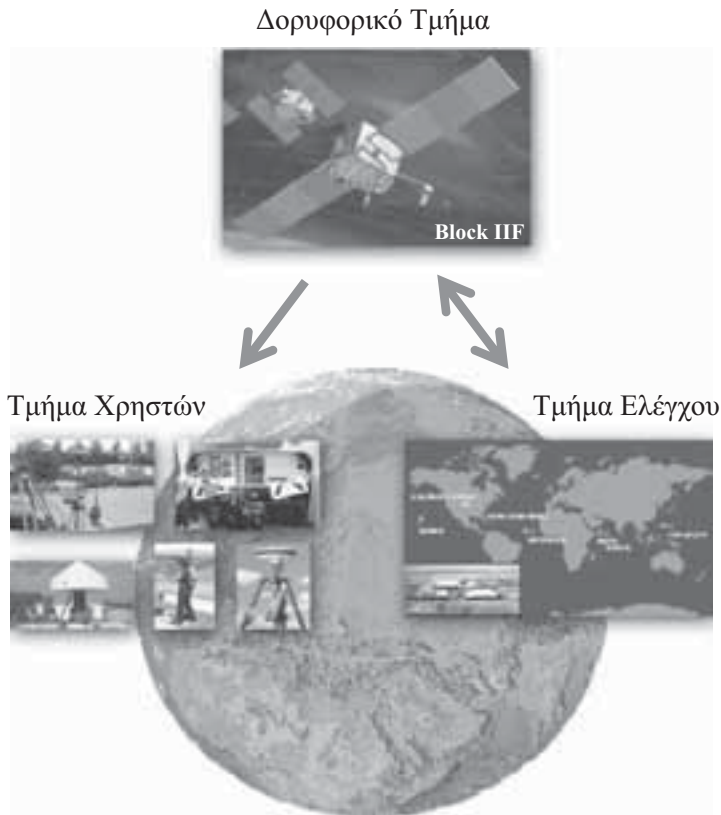
ουσία της μεταβολής της απόστασης μεταξύ δέκτη-δορυφόρου για μία συγκεκριμένη περίοδο). Ένας δορυφόρος κάθε φορά ήταν ορατός και μόνο για 10 έως 20 λεπτά. Στο διάστημα αυτό έπρεπε να παρατηρηθεί ο δορυφόρος μέχρι το επόμενο διάστημα που απείχε περίπου 100 λεπτά από το προηγούμενο. Για στατικές μετρήσεις και εκ των υστέρων επεξεργασία για ακίνητο δέκτη ή για αργά κινούμενο όχημα η ακρίβεια του απόλυτου προσδιορισμού θέσης στις δύο διαστάσεις ήταν της τάξης των μερικών δεκάδων μέτρων. Με παρατηρήσεις δορυφόρου σε αρκετές διαβάσεις του και σε αρκετές μέρες η 3-Δ ακρίβεια για ακίνητο δέκτη έφτανε τα μερικά μέτρα. Η ακρίβεια του σχετικού προσδιορισμού (διάνυσμα βάσης) από ταυτόχρονες παρατηρήσεις για πολλές διαβάσεις μπορούσε να φτάσει και το ένα μέτρο για αποστάσεις εκατοντάδων χιλιομέτρων.

Ο μικρός όμως αριθμός δορυφόρων (4 έως 7), που εξέπεμπαν σε δύο κύριες συχνότητες (150 MHz, 400 MHz) σε ύψος περίπου 1075 km και σε σχεδόν κυκλικές-πολικές τροχιές, υπήρξε ο κύριος λόγος που επέβαλε αρκετούς περιορισμούς στη χρήση και απόδοση του συστήματος. Η περιορισμένη διάρκεια (10 – 20 min) μιας διάβασης δορυφόρου Transit δεν επέτρεπε συνεχή προσδιορισμό θέσης και έτσι ενώ το σύστημα ήταν ικανοποιητικό για τη ναυσιπλοΐα δεν ικανοποιούσε τις απαιτήσεις της αεροπλοΐας και γενικότερα των κινούμενων οχημάτων που απαιτούν γνώση της θέσης σε κάθε χρονική στιγμή (σε πραγματικό χρόνο). Το Transit ‘αποσύρθηκε’ το 1966. Έτσι γρήγορα προωθήθηκε η ιδέα για το σχεδιασμό του συστήματος GPS.

Παρόλα αυτά, με το σύστημα Transit, **για πρώτη φορά** δόθηκε ουσιαστικά η δυνατότητα στη διεθνή γεωδαιτική κοινότητα για εκτέλεση ή βελτίωση σημαντικών γεωδαιτικών εργασιών, όπως είναι η ίδρυση – μέτρηση νέων ή και βελτίωση υπαρχόντων γεωδαιτικών δικτύων με δορυφορικές μεθόδους, στις δεκαετίες του 1970 και του 1980.

Το αντίστοιχο Σοβιετικό σύστημα ήταν το Parus για το Ναυτικό και το Tsiskada για την εμπορική ναυτιλία. Το στίγμα στις δύο διαστάσεις (συντεταγμένες – θέση) παρέχουν, ακόμα και σήμερα, μερικά μη δορυφορικά συστήματα διαφόρων χωρών, τα λεγόμενα συστήματα ραδιοπλοήγησης, π.χ. το LORAN-C, και το OMEGA, τα οποία όμως δίνουν ακρίβειες της τάξης των μερικών εκατοντάδων μέτρων έως και μερικών χιλιομέτρων, και κατά συνέπεια λειτουργούν (όσα βρίσκονται ακόμα σε λειτουργία) κυρίως ως εναλλακτικά συστήματα σε περίπτωση που για κάποια αιτία ένα σύστημα GNSS ‘αδυνατεί’ να καλύψει τις ανάγκες πλοήγησης.

Προέκυψε λοιπόν η ανάγκη για το σχεδιασμό ενός νέου συστήματος πλοήγησης με συνεχή και αξιόπιστη παροχή στίγματος και μάλιστα καλύτερης ακρίβειας για παγκόσμια χρήση. Έτσι **το σύστημα GPS άρχισε να σχεδιάζεται και**



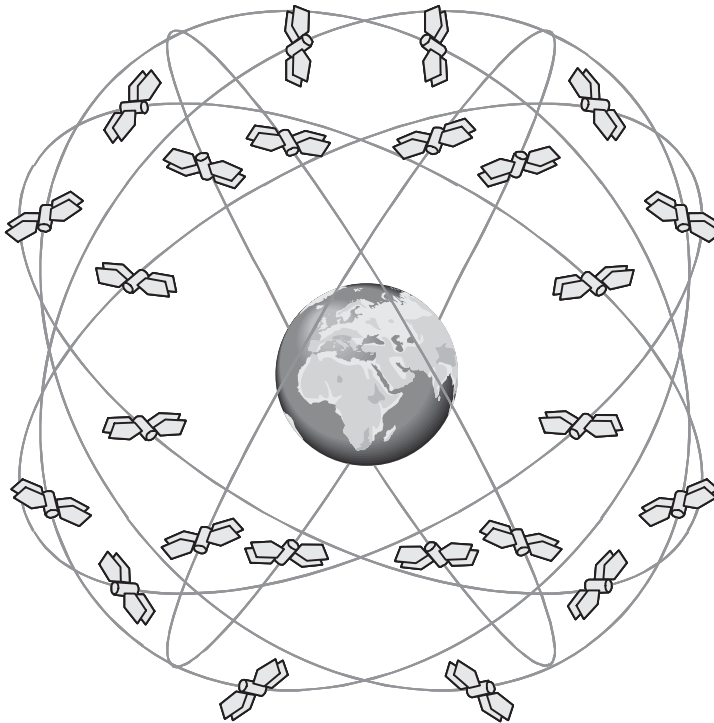
Σχήμα 1.5: Τα μέρη του συστήματος GPS.

να υλοποιείται σταδιακά στη δεκαετία του 1970, στην ουσία από το 1973 και μετά, με ευθύνη του Υπουργείου Άμυνας των ΗΠΑ (DoD: Department of Defense) και σε συνεργασία του Αμερικανικού Ναυτικού και της Αεροπορίας (the GPS Joint Program Office). Τα τελευταία χρόνια η διεύθυνση του συστήματος πέρασε στην USAF. Το GPS είναι το πρώτο από τα σύγχρονα συστήματα GNSS που έγινε λειτουργικό και επιχειρησιακό. Το 1978 αρχίζει η εκτόξευση των δορυφόρων GPS και ταυτόχρονα σχεδόν η κατασκευή των πρώτων δεκτών GPS, οι οποίοι έκτοτε βελτιώνονται συνεχώς.

Το σύστημα GPS αποτελείται από τρία βασικά τμήματα: το δορυφορικό τμήμα, ο 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.

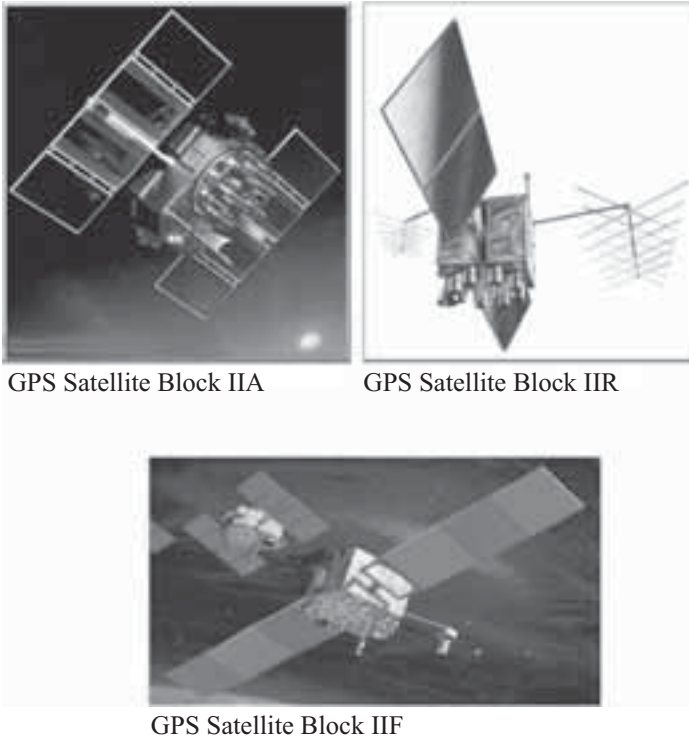
1.2.1 Το δορυφορικό τμήμα

Το δορυφορικό τμήμα (Σχήμα 1.6) αποτελείται σήμερα από 32 δορυφόρους των σειρών BLOCK II/IIA/IIR/IIR-M/IIF (Σχήμα 1.7). Η κατηγορία BLOCK I έχει αποσυρθεί ενώ στα επόμενα χρόνια αναμένεται η κατηγορία BLOCK III. Κάθε σειρά συμπληρώνει ή και αντικαθιστά σταδιακά τις προηγούμενες επειδή οι δορυφόροι έχουν ορισμένη διάρκεια ζωής, περίπου 10 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 σειράς II τέθηκαν σε τροχιά από το 1989 (η σειρά IIA από τον Νοέμβριο 1990 και η σειρά IIR από τον Ιανουάριο 1997) ενώ το Σεπτέμβριο του 2005 εκτοξεύτηκε ο πρώτος δορυφόρος της σειράς IIR-M με πρόσθετο πολιτικό κα στρατιωτικό σήμα. Τον Μάιο του 2010 έγινε η πρώτη εκτόξευση δορυφόρου της σειράς BLOCK IIF με πρόσθετη φέρουσα συχνότητα για πολιτική χρήση ενώ σχεδιάζεται και η σειρά BLOCK III.



Σχήμα 1.7: Δορυφόροι GPS.

Κάθε δορυφόρος GPS εκπέμπει ένα εξαιρετικά πολύπλοκο δορυφορικό σήμα, δύο υψηλές συχνότητες της τάξης του 1.5 GHz, και από το 2010 τρεις συχνότητες, διαμορφωμένες από κώδικες ψευδοτυχαίου θορύβου και από μηνύματα δεδομένων. Λεπτομέρειες δίνονται σε επόμενο κεφάλαιο.

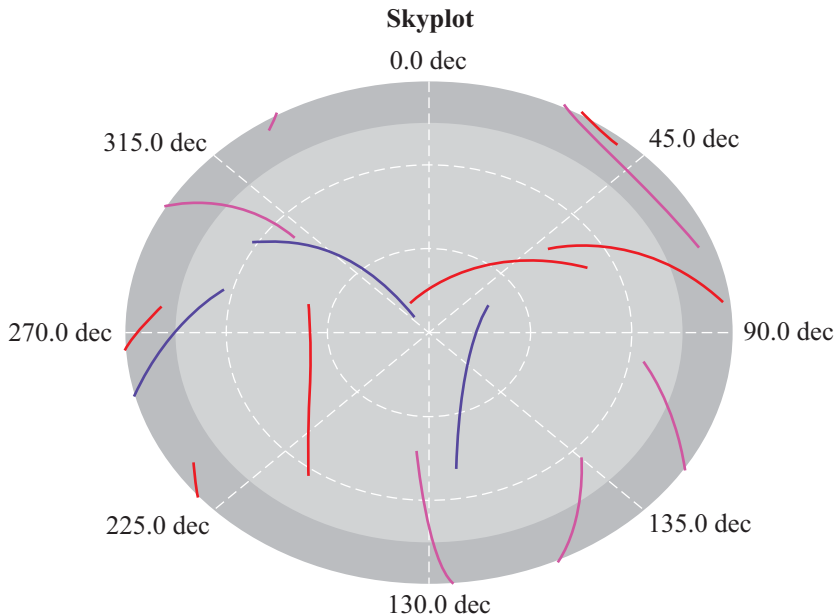
Ο αρχικός σχεδιασμός του συστήματος προέβλεπε 21 δορυφόρους ενώ από τα τέλη του 1993 ο αριθμός τους είναι σταθερά πάνω από 24. Ο αριθμός των 24 δορυφόρων αποτελεί τον απαραίτητο αριθμό για την πλήρη λειτουργία του συστήματος, έτσι όπως σχεδιάστηκε. Με την πλήρη ανάπτυξη μπορούν να παρατηρούνται ταυτόχρονα έξι έως οκτώ δορυφόροι από οποιοδήποτε σημείο της γήινης επιφάνειας με καλό ορίζοντα (ορατότητα δεκτών προς 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 σε 6 τροχιακά επίπεδα (Α έως F), τα οποία σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία 60° στο ισημερινό επίπεδο και έχουν γω-

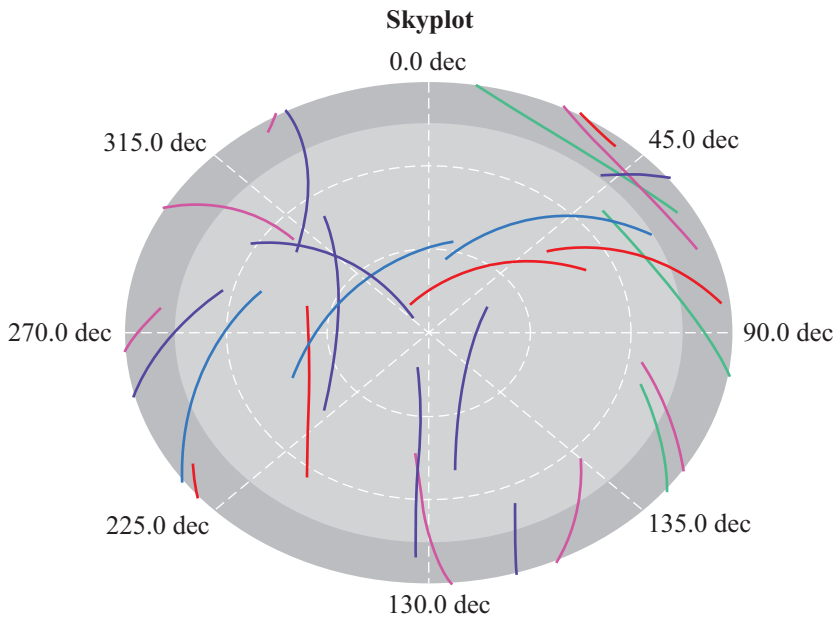
νία κλίση περίπου 55° ως προς το ισημερινό επίπεδο. Ο δορυφορικός σχηματισμός έχει ανομοιόμορφη διάταξη ανά τροχιακό επίπεδο ώστε από κάθε σημείο της γήινης επιφάνειας να λαμβάνεται δορυφορικό σήμα από τουλάχιστον 4 δορυφόρους, θεωρώντας ότι δεν παρεμβάλλονται εμπόδια μεταξύ δέκτη και δορυφόρων, και ταυτόχρονα να υπάρχει βέλτιστη γεωμετρική μορφή για τον προσδιορισμό θέσης. Ο μέγιστος αριθμός δορυφόρων που μπορεί να λαμβάνει ένας δέκτης ξεπερνά τους 10 με πολύ καλό ορίζοντα (≤ 12). Σήμερα είναι σχετικά εύκολο να λαμβάνονται τουλάχιστον 7 έως 8 δορυφόροι GPS με ικανοποιητικό ορίζοντα αφού οι δορυφόροι είναι 30 έως και 32.

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.

Στα σχήματα 1.8 και 1.9 φαίνονται οι τροχιές των δορυφόρων GPS και GPS



Σχήμα 1.8: Τροχιές δορυφόρων GPS σε σχέση με το αζιμούθιο και τη γωνία ύψους $\geq 15^\circ$ για διάστημα δύο ωρών ($0^h.00 - 2^h.00$, 05/07/2012) σε σημείο του κτιρίου ATM του ΑΠΘ.



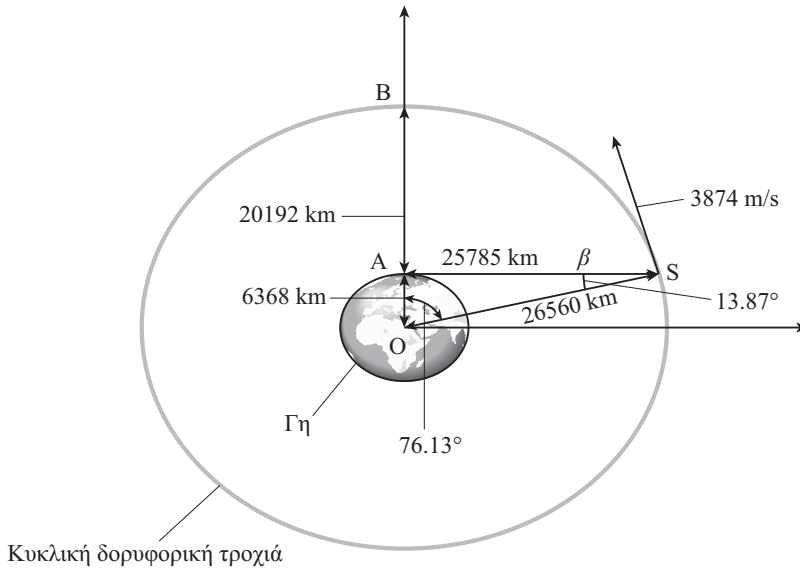
Σχήμα 1.9: Τροχιές δορυφόρων GPS και GLONASS σε σχέση με το αζιμουθίο και τη γωνία ύψους $\geq 15^\circ$ για διάστημα δύο ωρών ($0^h.00 - 2^h.00$, 05/07/2012) σε σημείο του κτιρίου ATM του ΑΠΘ.

+ GLONASS αντιστοίχως συναρτήσει του αζιμουθίου και της γωνίας ύψους, όπου φαίνεται η σαφώς μεγαλύτερη δορυφορική διαθεσιμότητα στην περίπτωση χρήσης και των δύο συστημάτων.

Η διάρκεια ζωής των δορυφόρων είναι περίπου 10 έτη, το βάρος τους είναι της τάξης του ενός 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 (< 0.02) και είναι σχεδόν κυκλική με ακτίνα $r \cong 26560$ 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 1.10 εύκολα υπολογίζονται η απόσταση ενός δορυφόρου που βρίσκεται στον ορίζοντα, $SA = \sqrt{r^2 - R^2} = 25785$ km καθώς και οι γωνίες $\beta = 13^\circ.87$ ή η συμπληρωματική της $(90^\circ - \beta) = 76^\circ.13$. Έτσι το δορυφορικό σήμα που ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός χρειάζεται από περίπου



Σχήμα 1.10: Η σχεδόν κυκλική τροχιά δορυφόρου GPS.

$\frac{20189}{300000} = 0.067$, $s = 67 \text{ ms}$ έως $\frac{25785}{300000} = 86 \text{ ms}$ για να φθάσει στη γήινη επιφάνεια. Σημειώνεται ότι η μέγιστη διαφορά λήψης του σήματος σε έναν δέκτη από δύο δορυφόρους θα είναι περίπου $(86-67) = 19 \text{ ms}$. Η γωνιακή ταχύτητα του δορυφόρου είναι περίπου διπλάσια από τη γωνιακή ταχύτητα της γης και συγκεκριμένα $\omega = \frac{2\pi}{T} \cong 1.458 \times 10^{-4} \text{ rad/s}$. Συνεπώς η **ταχύτητα του δορυφόρου κατά μήκος της τροχιάς** του θα είναι $v = \omega r = 3874 \text{ m/s}$ ($13946.4 \text{ km/h} \cong 14000 \text{ km/h}$). Σε $3 \text{ min } 55.91 \text{ sec}$ 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 $\frac{914}{25785} \times \frac{180}{\pi} \cong 2 \text{ μοίρες}$ ενώ για δορυφόρο κοντά στο ζενίθ η γωνία είναι $\frac{914}{20189} \times \frac{180}{\pi} \cong 2.6 \text{ μοίρες}$. Ως εκ τούτου, στον ίδιο χρόνο, από μέρα σε μέρα ο δορυφόρος θα αλλάζει θέση κατά 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 χρησιμοποιούνται ως εφεδρικά. Οι δορυφόροι τείνουν να αποκλίνουν από τις σχεδιασμένες τροχιές τους και υπόκεινται κατά διαστήματα σε διορθώσεις από το σύστημα ελέγχου (repositioning, maneuver) χρησιμοποιώντας κάποιες ποσότητες ‘καυσίμων’ που φέρουν.

Οι δορυφόροι ταξινομούνται και αριθμούνται κατά διάφορους τρόπους. Για παράδειγμα, ο δορυφόρος με ημερομηνία εκτόξευσης 17 Αυγούστου 2009 έχει τον κωδικό IIR-21M ως προς τη σειρά εκτόξευσης (Launch Order), είναι της σειράς BLOCK IIR-M, φέρει τον κωδικό SVN 50 (Space Vehicle Number 50) ως προς το διαστημικό όχημα και ως προς το μοναδικό εβδομαδιαίο τμήμα του κώδικα P που εκπέμπει φέρει τον κωδικό PRN 05 (Pseudo Random Noise 05). Οι ονομασίες με βάση τον κωδικό **SVN** ή **PRN** είναι αυτές που συνήθως χρησιμοποιούνται. Η σειρά II έχει αριθμούς SVN μεταξύ 13–21, η IIA μεταξύ 22–40, η IIR και IIR-M μεταξύ 41–61 και η σειρά IIF πάνω 62.

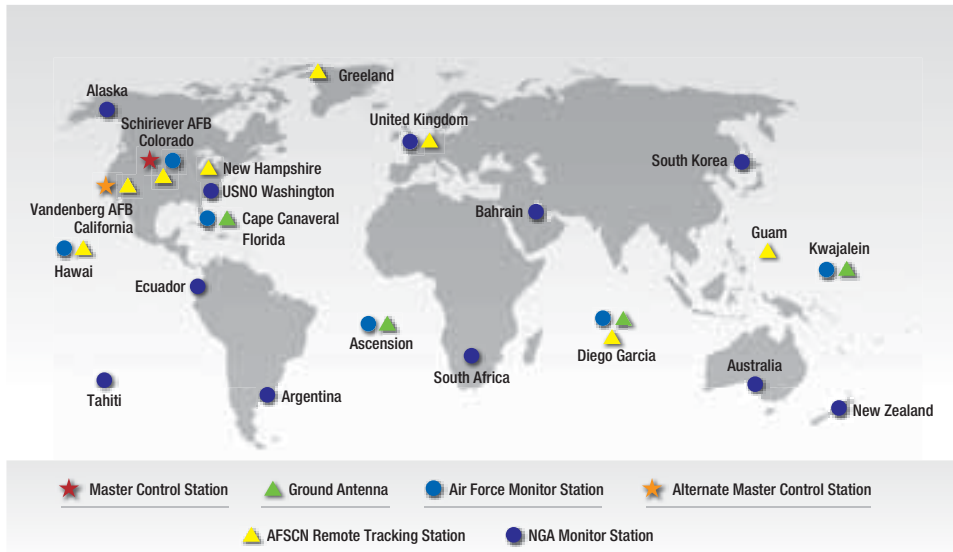
1.2.2 Το τμήμα ελέγχου

Το τμήμα ελέγχου (Control Segment) αποτελείται από ένα παγκόσμιο επίγειο δίκτυο σταθμών που συνεχώς παρατηρούν του δορυφόρους, επεξεργάζονται τα δεδομένα, υπολογίζουν και ελέγχουν τις δορυφορικές τροχιές και άλλες παραμέτρους, προετοιμάζουν τα μηνύματα πλοήγησης, μεταφέρουν τα προϊόντα επεξεργασίας στους δορυφόρους και ελέγχουν τον δορυφορικό σχηματισμό μέσω αποστολής συγκεκριμένων εντολών.

Επίσης το τμήμα ελέγχου, παρακολουθεί και προσπαθεί να διατηρήσει την καλή λειτουργία - υγεία των δορυφόρων, έχει την ευθύνη διατήρησης της κλίμακας χρόνου GPS (GPS time), κάνει πρόγνωση των δορυφορικών εφημερίδων και των παραμέτρων διόρθωσης χρόνου και επιβάλει μικρούς ελιγμούς στους δορυφόρους για να διατηρήσουν την προγραμματισμένη τους τροχιά επειδή τείνουν να αποκλίνουν λόγω της έλξης του γήινου πεδίου βαρύτητας. Την ευθύνη διαχείρισης και ελέγχου του δορυφορικού σχηματισμού έχει η αεροπορική μονάδα 2SOPS (2nd Space Operations Squadron).

Ειδικότερα το τμήμα ελέγχου αποτελείται από (Σχήμα 1.11):

1. **Δεκαέξι μόνιμους σταθμούς παρακολούθησης** (monitor stations) με γνωστές συντεταγμένες ως προς το WGS84, κατανεμημένους σε όλη τη γη και συγκεκριμένα: έξι σταθμούς της USAF με τις ονομασίες Hawaii, Cape Canaveral, Ascension Is., Diego Garcia, Kwajalein, και από το 2005 και μετά (σταδιακά) άλλους 10 σταθμούς της NGA (National Geospatial-Intelligence



Σχήμα 1.11: Το τμήμα ελέγχου του GPS (πηγή: www.gps.gov, 2012).

Agency, πρώην NIMA και παλαιότερα DMA) με τις ονομασίες Alaska, USNO Washington D.C, United Kindom, Argentina, Ecuador, South Africa, South Korea, Bahrain, Australia, New Zealand. Οι συντεταγμένες των σταθμών έχουν προσδιορισθεί με υψηλή ακρίβεια χρησιμοποιώντας και μετρήσεις VLBI. Κάθε δορυφόρος παρακολουθείται συνεχώς από τρεις μόνιμους σταθμούς. Οι σταθμοί παρακολούθησης είναι **δέκτες GPS που φέρουν ατομικά χρονόμετρα** και εκτελούν συνεχώς μετρήσεις, μεγαλύτερης ακριβείας από έναν κοινό δέκτη. Τα δεδομένα μεταβιβάζονται στον κεντρικό σταθμό ελέγχου για περαιτέρω επεξεργασία.

2. **Τέσσερις σταθμούς τηλεπικοινωνιών** (upload stations, Ground Antennas), οι οποίοι βρίσκονται στις θέσεις των μόνιμων σταθμών Cape Canaveral, Ascension Is., Diego Garcia και Kwajalein και ασχολούνται αποκλειστικά με το σύστημα GPS. Οι σταθμοί αυτοί αποστέλλουν τα δεδομένα του μηνύματος πλοήγησης καθώς και προγράμματα υπολογιστή και εντολές στους δορυφόρους. Ακόμα λαμβάνουν μηνύματα – απαντήσεις από τους δορυφόρους (telemetry) σχετικά με την καλή λειτουργία τους. 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. Επιπλέον χρησιμοποιούνται άλλοι **οκτώ συνεργαζόμενοι**

σταθμοί του δικτύου AFSCN (Air Force Satellite Control Network) της Αεροπορίας, προσδίδοντας περισσότερη ευελιξία και αποτελεσματικότητα στο σύστημα ελέγχου.

3. Έναν **κεντρικό σταθμό ελέγχου (MCS: Master Control Station)**, την καρδιά του τμήματος ελέγχου, που βρίσκεται στην αεροπορική βάση Schriever (πρώην Falcon) στο Colorado Springs. Ο κεντρικός σταθμός είναι υπεύθυνος για τη συνολική κατάσταση και λειτουργία του δορυφορικού σχηματισμού (διαχείριση από τη μονάδα 2SOPS). Ένας ακόμα εφεδρικός σταθμός ελέγχου (BackUp/Alternate MCS) βρίσκεται στη βάση Vanderberg στην Καλιφόρνια.

Στον κεντρικό σταθμό ελέγχου υπολογίζονται τα στοιχεία των δορυφορικών τροχιών και άλλες χρήσιμες ποσότητες, όπως οι παράμετροι διόρθωσης του δορυφορικού χρόνου για τον συγχρονισμό όλων των δορυφορικών ρολογιών ως προς τον χρόνο GPS. Τα στοιχεία αυτά μεταβιβάζονται στους δορυφόρους (ενημέρωση μηνύματος πλοήγησης/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 BlockIIIR έχουν δυνατότητα αυτονομίας 180 ημερών στο μήνυμα ναυσιπλοΐας και φέρουν δέκτες GPS που εκτελούν μετρήσεις μεταξύ τους ώστε η εξάρτηση από το σύστημα ελέγχου να περιορίζεται στο ελάχιστο.

Η εκπεμπόμενη (Κεπλέρεια) 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 έξι 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 αποκτά πρόσβαση στο WGS84 μέσω των δορυφορικών εφημερίδων του μηνύματος πλοήγησης.

Σύμφωνα με το πρόγραμμα εκσυγχρονισμού του συστήματος GPS, το τμήμα ελέγχου αναβαθμίζεται συνεχώς προετοιμάζοντας το επόμενο πλήρως εκσυγχρονισμένο σύστημα διαχείρισης-ελέγχου (OCX: Operational Control System).



Κεφάλαιο 3

ΔΕΚΤΕΣ GPS

Ο δέκτης GPS είναι μία συσκευή – όργανο πολύ υψηλής τεχνολογίας που κατά κάποιον τρόπο μοιάζει με ένα δέκτη ραδιοφώνου και μπορεί να ‘συντονίζεται’ πάνω σε δύο βασικές συχνότητες. Ένας δέκτης χωρίζεται καταρχήν σε δύο βασικά μέρη: την **κεραία** και τον κυρίως **δέκτη** (Σχήμα 3.1, Σχήμα 3.2). Η κεραία μπορεί να περιλαμβάνει έναν προενισχυτή χαμηλού θορύβου του σήματος και μπορεί να είναι είτε εξωτερική (ανεξάρτητη μονάδα συνδεδεμένη με τον κυρίως δέκτη μέσω καλωδίου) είτε εσωτερική ώστε το όλο σύστημα δέκτης-κεραία να είναι μία συμπαγής συσκευή. Ο κυρίως δέκτης αποτελείται από διάφορα επιμέρους τμήματα: το τμήμα των ραδιοσυχνοτήτων, τους διαύλους (κανάλια) παρακολούθησης του δορυφορικού σήματος με τους βρόγχους παρακολούθησης, τον μικροεπεξεργαστή, την τροφοδοσία – παροχή ισχύος, την μονάδα αποθήκευσης δεδομένων και τη μονάδα επικοινωνίας με τον χρήστη.

3.1 Η κεραία του δέκτη

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

Bluetooth). Το μήκος ενός τυπικού καλωδίου μπορεί να είναι της τάξης των 2 ή 10 ή 30 μέτρων και σε περιπτώσεις μόνιμων σταθμών GPS μπορεί να φτάσει τις μερικές δεκάδες μέτρων με πιθανή την επιπλέον προενίσχυση του σήματος.

Οι κεραίες είναι μικρών διαστάσεων, μικρού βάρους και συνήθως πολυκατευθυντήριες για λήψη σημάτων από όλες τις διευθύνσεις. Διακρίνονται σε διάφορους τύπους με πιο διαδεδομένο για τις γεωδαιτικές και τοπογραφικές εφαρμογές τον τύπο των ‘μικρολωρίδων’ (microstrip), που έχουν και το πλεονέκτημα καλής λήψης σημάτων από δορυφόρους χαμηλά στον ορίζοντα. Σχεδιάζονται έτσι ώστε να μπορούν να λαμβάνουν είτε το σήμα στην L1 (**δέκτες μίας συχνότητας**) είτε στην L1 και στην L2 (**δέκτες δύο συχνοτήτων**). Οι γεωδαιτικοί δέκτες έχουν τη δυνατότητα λήψης και στις δύο συχνότητες.

Για τη σωστή λήψη των σημάτων οι κεραίες δεν πρέπει να επισκιάζονται από γειτονικά αντικείμενα, όπως μεγάλα κτίρια, δέντρα κλπ.. Στις περιπτώσεις αυτές δημιουργούνται πολλαπλές διαδρομές του σήματος εξαιτίας της ανάκλασής του στις γειτονικές επιφάνειες με αποτέλεσμα τη δημιουργία σημαντικών σφαλμάτων στις παρατηρήσεις (**σφάλμα πολυανάκλασης, multipath error**). Παρόμοια επίδραση δημιουργεί και η επιφάνεια του εδάφους κάτω από την κεραία. Το σφάλμα αυτό δύσκολα μπορεί να απαλειφεί. Η ανάκλαση του δεξιόστροφα κυκλικά πολωμένου δορυφορικού σήματος δημιουργεί σήμα που είναι αριστερόστροφα κυκλικά πολωμένο. Αν ήταν γνωστή η διεύθυνση του ανακλώμενου σήματος θα μπορούσε η κεραία να σχεδιασθεί έτσι ώστε να εμποδίζεται η λήψη του. Για την περίπτωση των ανακλάσεων του σήματος κάτω από το έδαφος οι κεραίες μπορούν να ανθίστανται ικανοποιητικά.

Ιδιαίτερα ανθεκτικές στις πολυανακλάσεις είναι οι κεραίες που συνδυάζονται με μια διάταξη βάσης ‘σπειροειδών δακτυλίων’ (**choke ring**), διαθέτουν προστατευτικό θόλο (dome, **radome**), στοιχίζουν πολλαπλάσια από μία κοινή κεραία και χρησιμοποιούνται κυρίως στους μόνιμους σταθμούς (Σχήμα 3.1). Οι κεραίες τύπου ‘choke ring’ για τους μόνιμους σταθμούς πρέπει να διαθέτουν το διεθνώς αναγνωρισμένο στοιχείο Dorne & Margolin και μοντέλο βαθμονόμησης από κατάλληλους διεθνείς οργανισμούς ή εργαστήρια. Επίσης, πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για την αντικεραυνική προστασία.

Άλλα βασικά χαρακτηριστικά μιας κεραίας είναι η ευαισθησία στη λήψη σημάτων διαφορετικής διεύθυνσης (**gain pattern**) και διαφορετικής γωνίας ύψους, καθώς και η **σταθερότητα του κέντρου φάσης**, δηλαδή του ηλεκτρικού κέντρου αναφοράς των μετρήσεων, τόσο για την L1 όσο και για την L2 συχνότητα. Το ηλεκτρικό με το μηχανικό κέντρο μιας κεραίας δεν ταυτίζονται. Οι πι-



Σχήμα 3.1: Κεραίες δεκτών GPS {(α), (ε) και (δ) κεραίες choke ring με και χωρίς κάλυμμα, (β) εξωτερική κεραία, (γ) κεραία και δέκτης μαζί, (στ) εξωτερική κεραία και δέκτης/χειριστήριο}, (ε) choke ring με κάλυμμα}.



Σχήμα 3.4: Ανάπτυξη κεραιών GPS (με χειριστήρια-καταγραφικά και συσκευή ραδιο-επικοινωνίας) σε στυλέο και κεραιάς-δέκτη σε διάταξη σακιδίου πλάτης.

θανές συστηματικές αποκλίσεις του κέντρου φάσης από το γεωμετρικό ή μηχανικό κέντρο της κεραίας πρέπει να είναι γνωστές στις γεωδαιτικές εφαρμογές υψηλής ακρίβειας. Στην πράξη έχουν παρατηρηθεί αποκλίσεις μέχρι και ένα εκατοστό.

Κεραίες του ίδιου κατασκευαστή έχουν την ίδια συμπεριφορά στη μεταβολή του κέντρου φάσης και έτσι οι επιδράσεις ελαχιστοποιούνται εάν οι κεραίες προσανατολίζονται στην ίδια περίπου κατεύθυνση, π.χ. πάντα προς το βορρά, με τη βοήθεια μιας πυξίδας ή και εμπειρικά σε περιπτώσεις συνήθων εργασιών. Απαιτείται, λοιπόν, προσοχή όταν σε μία εργασία υψηλής ακρίβειας χρησιμοποιούνται δέκτες διαφορετικών εταιρειών.

Στο Σχήμα 3.2 φαίνονται διαφόρων τύπων εξωτερικές κεραίες τοποθετημένες σε βάθρα ενώ στο Σχήμα 3.3 οι κεραίες είναι τοποθετημένες σε ειδικές και κυρίως μόνιμες εγκαταστάσεις – διατάξεις για χρήση μόνιμων σταθμών GPS. Ακόμα, στα Σχήματα 3.4 και 3.5 παρατηρούμε κεραίες ή κεραίες και δέκτες να αναπτύσσονται σε στυλεό καθώς και σε τρίποδα όπως ένα θεοδόλιχο.

3.2 Ο κυρίως δέκτης

Το πρώτο τμήμα του δέκτη που αναλαμβάνει την επεξεργασία του εισερχομένου δορυφορικού σήματος, μετά την προενίσχυση, είναι το **τμήμα των ραδιοσυχνοτήτων (RF section)**, το οποίο περιλαμβάνει διάφορες διατάξεις όπως είναι οι **ταλαντωτές ή ρολόγια χαλαζιακού τύπου** για την παραγωγή των ημιτονοειδών σημάτων αναφοράς, οι πολλαπλασιαστές για τη δημιουργία μεγαλύτερων συχνοτήτων, τα φίλτρα για την απομάκρυνση ανεπιθύμητων συχνοτήτων και οι μείκτες για τον πολλαπλασιασμό/μείξη δύο διαφορετικών σημάτων και οι βρόγχοι παρακολούθησης και εξαγωγής μετρήσεων.

Η βασική παρέμβαση του τμήματος των ραδιοσυχνοτήτων είναι η μετατροπή της συχνότητας του εισερχομένου σήματος σε μικρότερη συχνότητα ώστε να είναι εύκολα διαχειρίσιμο από τον δέκτη. Η διαδικασία αυτή, που ολοκληρώνεται σε βήματα, γίνεται μέσω της συμβολής (πολλαπλασιασμός, *mixing*) του εισερχόμενου σήματος με ένα ημιτονοειδές σήμα αναφοράς που παράγεται από τον ταλαντωτή του δέκτη (τύπου κρυστάλλου χαλαζία). Από τη συμβολή αυτή προκύπτει ένα σήμα για κάθε δορυφόρο με δύο συνιστώσες που έχουν συχνότητα το άθροισμα και τη διαφορά των συμβαλλομένων συχνοτήτων αντιστοίχως. Με κατάλληλα ηλεκτρονικά φίλτρα διατηρείται μόνον η συνιστώσα της διαφο-

ράς των συχνοτήτων ή ισοδύναμα της διαφοράς των φάσεων, η οποία ονομάζεται **συχνότητα κτύπων (beat frequency)** ή **ενδιάμεση συχνότητα (IF: Intermediate Frequency)**. Το **IF σήμα**, που έχει συχνότητα τη διαφορά των συχνοτήτων μεταξύ του μεταβλητής συχνότητας λόγω φαινομένου Doppler εισερχομένου και του αντίγραφου, διατηρεί την αρχική διαμόρφωση του δορυφορικού σήματος. Το σήμα IF είναι το παρατηρούμενο σήμα στο δέκτη.

Στη συνέχεια το IF σήμα μεταβιβάζεται σε όλους τους διαύλους. Οι γεωδαιτικοί δέκτες διαθέτουν αρκετούς διαύλους, έναν αποκλειστικά για κάθε δορυφόρο, οι οποίοι λειτουργούν ταυτόχρονα (παράλληλοι δίαυλοι, parallel tracking architecture). Ο αριθμός των καναλιών σχετίζεται άμεσα με τον αριθμό των δορυφόρων που μπορεί ο δέκτης να παρακολουθεί ταυτόχρονα. Παλαιότεροι δέκτες χρησιμοποιούσαν ένα ή δύο κανάλια τα οποία εναλλάσσονταν, αργά ή γρήγορα, από δορυφόρο σε δορυφόρο (ακολουθιακοί δέκτες, πολυπλέκτες). Οι σύγχρονοι δέκτες λαμβάνουν θεωρητικά όλους σχεδόν τους δορυφόρους πάνω από τον ορίζοντα (**all in view**), π.χ., (12 L1, C/A, P), (12 L2, P). Σε κάθε δίαυλο, με τη βοήθεια των βρόγχων παρακολούθησης, γίνεται η ανάκτηση των συνιστωσών του σήματος του κάθε δορυφόρου (αποδιαμόρφωση) και εξάγονται οι μετρήσεις μέσω τεχνικών συσχέτισης του εισερχομένου σήματος με ένα σήμα αντίγραφο που παράγει ο δέκτης.

Οι **βρόγχοι παρακολούθησης** αναλαμβάνουν τη διεξαγωγή των μετρήσεων των κωδικών και των φάσεων. Διακρίνουμε τους βρόγχους προσδιορισμού καθυστέρησης (**DLL: Delay Lock Loop**) όπου γίνονται οι συσχετίσεις με τους κώδικες και συνεπώς εξάγονται οι μετρήσεις ψευδοαποστάσεων και τους βρόγχους προσδιορισμού φάσης (**PLL: Phase Lock Loop**) όπου γίνονται οι μετρήσεις φάσεων. Οι βρόγχοι DLL και PLL συνεργάζονται στενά μεταξύ τους σε μία αμφίδρομη επικοινωνία. Αρκετοί δέκτες διαθέτουν και βρόγχους μέτρησης της συχνότητας των φορέων (**FLL: Frequency Lock Loop**) είτε ως βοηθητικούς είτε αντί των βρόγχων PLL, οπότε μετρούν το ρυθμό μεταβολής της απόστασης δορυφόρου δέκτη με σκοπό τον υπολογισμό ταχυτήτων σε οχήματα που υπόκεινται σε έντονες επιταχύνσεις όπως τα αεροπλάνα.

Σε γενικές γραμμές η σειρά των συσχετίσεων αρχίζει συνήθως με τον κώδικα C/A για τη συνιστώσα (L1, C/A, P) στους βρόγχους DLL (code correlation). Μόλις επιτευχθεί η συσχέτιση για τον κώδικα το σήμα εγκλωβίζεται και εξάγεται η μέτρηση ψευδοαπόστασης. Στη συνέχεια, απομακρύνεται ο κώδικας (πολλαπλασιασμός με το αντίγραφο του) και το απομένον σήμα οδηγείται στους βρόγχους PLL. Εκεί ένα τοπικό αντίγραφο συσχετίζεται με το εισερχόμενο σήμα, διαβάζεται το μήνυμα πλοήγησης το οποίο αμέσως μετά απομακρύνεται και ο εναπομένον καθαρός (ημιτονοειδής) φορέας IF (κλειδωμένος) χρησιμοποιεί-

ται για τη μέτρηση της διαφοράς φάσης μεταξύ αυτού και του αντίστοιχου τοπικού αντιγράφου.

Επειδή ο γνωστός κώδικας C/A δεν μεταδίδεται με τη συχνότητα L2 παρά μόνο ο κώδικας P ως κρυπτογραφημένος κώδικας P(Y), για την ανάκτηση της συνιστώσας L2 χρησιμοποιούνται διαφορετικές τεχνικές από την τεχνική για την ανάκτηση της L1, βέβαια, με κάποια μείωση της ποιότητας, π.χ. τεχνικές τετραγωνισμού.

Ο μικροεπεξεργαστής του δέκτη ελέγχει όλες τις λειτουργίες του, από τον εγκλωβισμό των δορυφόρων και την επεξεργασία του σήματος μέχρι τον υπολογισμό της θέσης σε πραγματικό χρόνο και την επικοινωνία με το χρήστη. Εκτελείται κάθε φορά που ο δέκτης τίθεται σε λειτουργία ένα πρόγραμμα (firmware) που είναι μόνιμα αποθηκευμένο στη μνήμη (memory chip) και μπορεί να αναθεωρείται για νέες εκδόσεις. Ένας σαφές ότι ένας καλός και ταχύς μικροεπεξεργαστής εγγυάται την καλή λειτουργία του δέκτη και προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα.

Στα Σχήματα 3.5, 3.6 και 3.7 φαίνονται γεωδαιτικοί και τοπογραφικοί δέκτες GPS διαφόρων κατασκευαστριών εταιρειών και στο Σχήμα 3.8 ο παρελκόμενος εξοπλισμός που συνοδεύει κατά περίπτωση ένα δέκτη GPS.

Η πηγή τροφοδοσίας-ενέργειας του δέκτη είναι πάντοτε κάποιου τύπου μπαταρίες (συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα, DC) και κατά περίπτωση και μετασχηματιστής για τροφοδοσία από μία πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Οι μπαταρίες μπορεί να είναι οι πιο απλές του εμπορίου (σαν αυτές των κοινών φακών), μικρού μεγέθους και ελαφριές ή τύπου αυτοκινήτου για μεγαλύτερη διάρκεια παρατηρήσεων. Πολλές εταιρείες δεκτών προσφέρουν δικές τους μπαταρίες και ειδικά καλώδια συνδέσεων. Η διάρκεια των παρατηρήσεων με μπαταρίες είναι της τάξης των μερικών έως και αρκετών ωρών. Κατά τη διάρκεια των παρατηρήσεων είναι δυνατή η αλλαγή ή προσθήκη επιπλέον μπαταριών χωρίς να διακόπτονται οι παρατηρήσεις (ο χρήστης προειδοποιείται από τον δέκτη με αντίστοιχα μηνύματα). Αν ο δέκτης βρίσκεται σε συνεχή λειτουργία, περίπτωση μόνιμων σταθμών, είναι λογικό ότι η τροφοδοσία γίνεται από πηγή AC και εφεδρικά από μπαταρία ή σε μερικές περιπτώσεις από διάταξη συσσωρευτών ηλιακής ενέργειας όταν δεν προσφέρεται εύκολα η πηγή AC.

Η μονάδα αποθήκευσης δεδομένων (παρατηρήσεις και άλλα δεδομένα ή πληροφορίες που εισάγονται από το χρήστη όπως ύψος κεραίας, κωδικός σημείου, κλπ..) είναι στην ουσία μνήμη κάποιου τύπου, π.χ. συμβατή **PCMCIA**, εσωτερική μνήμη τυχαίας προσπέλασης (**internal memory**), εξωτερική μνήμη (data collectors, controllers) και ο σκληρός δίσκος ενός PC όταν υπάρχει σύνδεση. Η χωρητικότητα της μνήμης αρκεί για πολλές ώρες παρατηρήσεων έως και μερι-



Σχήμα 3.5: Ανάπτυξη γεωδαιτικών-τοπογραφικών δεκτών GPS σε τρίποδα.



Σχήμα 3.6: Γεωδαιτικοί δέκτες GPS.



Σχήμα 3.8: Παρελκόμενος εξοπλισμός GPS: Θήκες μεταφοράς, κάρτα μνήμης, μπαταρίες, τρικόχλια, προσαρμοστής κεραίας, βάση κέντρωσης.

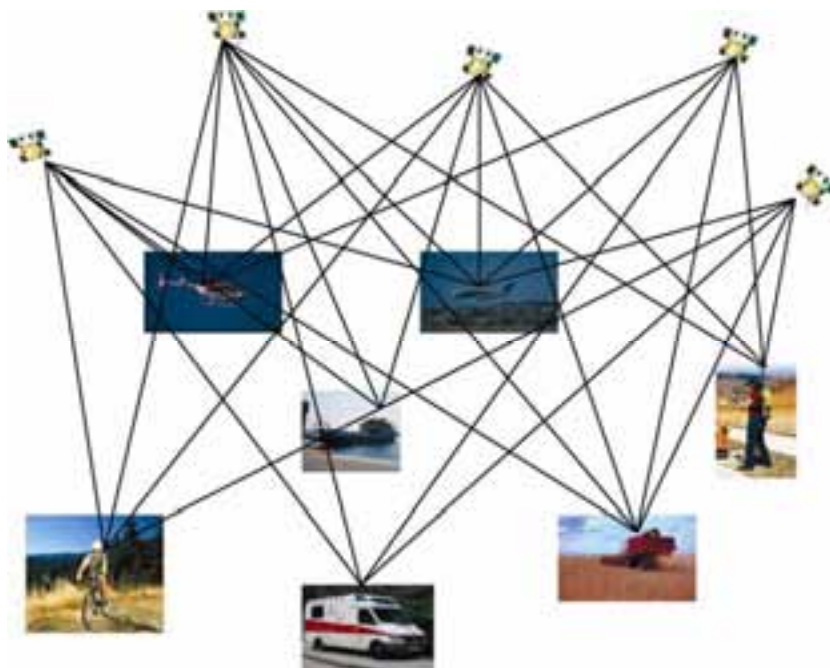
κούς μήνες ανάλογα με τον τύπο μνήμης και την εφαρμογή GPS. Αρκετοί τύποι μνημών είναι συμβατοί και με άλλα κλασικά γεωδαιτικά και τοπογραφικά όργανα. Το κατέβασμα των δεδομένων σε ένα PC είναι μια εύκολη διαδικασία (μέσω ειδικού ή κοινού προγράμματος και σύνδεση με θύρες επικοινωνίας τύπου COM, USB).

Η μονάδα επικοινωνίας με τον χρήστη, που είναι συνήθως ένα **χειριστήριο** ή και καταγραφικό (user interface, keyboard and display unit, controller), είναι ένας μηχανισμός μέσω του οποίου ο δέκτης GPS επικοινωνεί και συνεργάζεται με τον χρήστη. Σχεδόν όλοι οι δέκτες διαθέτουν ενσωματωμένα πλήκτρα και φωτοδιόδους (led) για τις βασικές λειτουργίες του δέκτη και την πληροφόρηση του χρήστη για το τι συμβαίνει στη διάρκεια των μετρήσεων, π.χ. πόσοι δορυφόροι λαμβάνονται. Άλλοι δέκτες, συνεργάζονται με εξωτερική μονάδα, συνδεδεμένη με καλώδιο ή και ασύρματα, η οποία είναι στην ουσία ένας υπολογιστής χειρός που φέρει οθόνη LCD και αλφαριθμητικό πληκτρολόγιο (**controller**). Στην περίπτωση αυτή η επικοινωνία με τον δέκτη διευκολύνεται σημαντικά (user-friendly), ιδιαίτερα ο έλεγχος και η προετοιμασία του δέκτη για τη διεξαγωγή των μετρήσεων με την εισαγωγή καταλλήλων παραμέτρων για τη διεξαγωγή των μετρήσεων (**mission planning**), π.χ. εισαγωγή γωνίας αποκοπής, ρυθμός καταγραφής των μετρήσεων, είδος προσδιορισμού κλπ.. Ταυτόχρονα η εμφάνιση μηνυμάτων, γραπτών και ηχητικών στην οθόνη, όπως η κατάσταση της μπαταρίας ή η απώλεια λήψης σήματος, καθιστούν πιο ασφαλή την εκτέλεση των μετρήσεων. Σύγχρονα καταγραφικά έχουν τη δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας μέσω π.χ. της τεχνολογίας Bluetooth.

Εκτός από τους γεωδαιτικούς – τοπογραφικούς δέκτες, υπάρχουν και οι λεγόμενοι δέκτες χειρός (Σχήμα 3.9) ή καλλίτερα δέκτες κώδικα (C/A). Σε αντίθεση με τους γεωδαιτικούς δέκτες, οι οποίοι μετρούν και καταγράφουν οπωσδήποτε παρατηρήσεις φάσης (L1/L2) και οι οποίοι χρησιμοποιούνται για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας, π.χ. ίδρυση δικτύων (Σχήμα 3.10) ή και μελέτες τοπογραφικών αποτυπώσεων και χαρτογραφήσεων, οι δέκτες κώδικα χρησιμοποιούνται κυρίως για εφαρμογές πλοήγησης και γενικότερα για εφαρμογές χαμηλής ακρίβειας, της τάξης του μέτρου ή και μερικών μέτρων ανάλογα με τις δυνατότητες του δέκτη. Οι εφαρμογές χαμηλής ακρίβειας αποτελούν τη συντριπτική πλειοψηφία χρήσης του συστήματος GPS σε παγκόσμια κλίμακα με συνεχή αυξητική τάση (Σχήμα 3.11).



Σχήμα 3.10: Ίδρυση δικτύου GPS – εφαρμογές υψηλής ακρίβειας με χρήση γεωδαιτικών δεκτών (L1/L2).



Σχήμα 3.11: Εφαρμογές πλοήγησης με το GPS – εφαρμογές χαμηλής ακρίβειας με δέκτες κώδικα.

3.3 Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά δεκτών GNSS

Η εισαγωγή των νέων δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης καθώς και η εξέλιξη της τεχνολογίας στους αντίστοιχους τομείς, ώθησαν τους κατασκευαστές δεκτών GNSS να αλλάξουν προς όφελος των χρηστών, τα βασικά χαρακτηριστικά των προσφερόμενων δεκτών της αγοράς. Μάλιστα, συχνά παρατηρείται τα ολοένα και νεότερα μοντέλα να διαθέτουν χαρακτηριστικά των οποίων η προσφορά δεν είναι ακόμη σε λειτουργία ή βρίσκεται σε δοκιμαστικό στάδιο (πχ. λήψη σημάτων Compass, Galileo). Στόχος όλων των νέων τύπου δεκτών είναι η όσο το δυνατό απλότητα στο χειρισμό και η επίτευξη της μέγιστα δυνατής ακρίβειας με λειτουργία ακόμη και κάτω από δύσκολες συνθήκες εγκλωβισμού των δορυφορικών σημάτων.

Αναφέροντας τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά που περιλαμβάνονται σε ένα σύγχρονο δέκτη GNSS, θα μπορούσαν (σήμερα) να συνοψιστούν ως εξής (Πίνακας 3.1):

Πίνακας 3.1: Βασικά χαρακτηριστικά σύγχρονων γεωδαιτικών δεκτών GNSS

Αριθμός καναλιών για τον εγκλωβισμό των δορυφορικών σημάτων	Ξεκινούν από 72 και φτάνουν μέχρι και τα 216.
Δυνατότητα λήψης σημάτων GNSS	GPS L1/L2 δυνατότητα για L2/C και L5, Glonass L1/L2, δυνατότητα για Galileo (E1, E5a, E5b, Alt-BOC), Compass, SBAS, WAAS, GAGAN
Τεχνικές φιλτραρίσματος και απόρριψης σημάτων παρεμβολής	Όπως πχ. SmartTrack, /In-Band interference, Blade, Advance Fence Antenna κ.α.
Δυνατότητες τροφοδοσίας ρεύματος	Αναφέρεται ο αριθμός και η ισχύς των μπαταριών πχ. 2 μπαταρίες 7.4 volt έως και 4.4Ah η κάθε μία. Η συνεχής λειτουργία μπορεί να φτάσει και τις 15 ώρες. Υπάρχουν μοντέλα όπου ο φορτιστής είναι ενσωματωμένος (built in) με το δέκτη. Δυνατότητα σύνδεσης εξωτερικής πηγής ενέργειας.

Συνθήκες λειτουργίας	Αδιάβροχοι σύμφωνα με προδιαγραφές IP67, θερμοκρασίες λειτουργίας από -40 έως και +65°C. Θερμοκρασίες αποθήκευσης ελαφρώς ανθεκτικότερες.
Βάρος/διαστάσεις	Εξαρτάται από το μοντέλο αλλά συνήθως το βάρος δεν ξεπερνά τα μερικά κιλά (1.2 έως 3 kg) και οι αντίστοιχες διαστάσεις από 150×150×90 mm ως μέση τιμή.
Μνήμη αποθήκευσης και ρυθμός καταγραφής παρατηρήσεων	Οι περισσότεροι δέκτες διαθέτουν εκτός από την εσωτερική μνήμη και δυνατότητες επέκτασης με χρήση συσκευών USB, SD κ.α. που μπορεί να φτάσει και τα μερικά GigaByte. Ο ρυθμός καταγραφής κυμαίνεται (όχι για όλα τα μοντέλα) από 100 Hz/0.01 sec και μπορεί να φτάσει και τα 999 sec.
Δυνατότητα επικοινωνίας	Ύπαρξη ενσωματωμένων κινητών τηλεφώνων με λειτουργία GSM/GPRS/EDGE Quad-band ή και tri-band. Σε διάφορα μοντέλα υπάρχει επιπλέον και ενσωματωμένη κεραία UHF για λειτουργία Base-Rover.
Τρόποι επικοινωνίας με άλλες συσκευές	Ύπαρξη θυρών τύπου RS232, Ethernet, USB. Δυνατότητα επικοινωνίας μέσω Bluetooth, δικτύου Wi Fi.
Εξαγωγή δεδομένων	Δυνατότητα εξαγωγής δεδομένων σε διάφορα format όπως πχ. Rinex (on board) CMR, CMR+, RTCM SC104 v2.1, 2,3, 3.0, 3.1. NMEA 0183 v2.x και 3.x.

Στα Σχήμα 3.12 φαίνονται γεωδαιτικοί δέκτες GNSS διαφόρων κατασκευαστριών εταιρειών καθώς και παρελκόμενος εξοπλισμός που συνοδεύει κατά περίπτωση ένα σύστημα. Επίσης στο Σχήμα 3.13 φαίνονται δέκτες GPS/GNSS κεντρωμένοι σε βάθρα ή τρίποδα κατά τη διάρκεια πραγματικών μετρήσεων δικτύου στην περιοχή Κοζάνης - Πτολεμαΐδας - Αμυνταίου - Μελίτης Φλώρινας στα Λιγνιτωρυχεία της ΔΕΗ Δυτικής Μακεδονίας στο πλαίσιο ερευνητικού προγράμματος.



Σχήμα 3.13: Δέκτες και κεραίες GPS/GNSS σε βάθρα και τρίποδα από πραγματικές μετρήσεις δικτύων (περιοχή Λιγνιτικού Κέντρου Δυτικής Μακεδονίας)