



Αθανάσιος Δερμάνης

Διαστημική
Γεωδαισία και
Γεωδυναμική

GPS

ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ



Αθανάσιος Δερμάνης

Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

ISBN 960-431-504-8

© Copyright 1999, Α. Δερμάνης
Space Geodesy and Geodynamics - GPS
A. Dermanis, 1999
The Aristotle University of Thessaloniki, Greece

Η κατά οποιονδήποτε τρόπο αναπαραγωγή, δημοσίευση ή χρησιμοποίηση όλου ή μερών του βιβλίου αυτού απαγορεύεται χωρίς την έγγραφη έγκριση του συγγραφέα, εξαιρουμένης της επιστημονικής αναφοράς.



**Φωτοστοιχειοθεσία
- Εκτύπωση**

Βιβλιοπωλείο

Π. ΖΗΤΗ & Σια ΟΕ

18° κλμ. Θεσ/νίκης-Περαίας (στροφή Τριλόφου) ● Τ.Θ. 170 57
Θεσσαλονίκη 542 10 ● ☎ & Fax (0392) 72 222 (3 γραμμές)

ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ

Αρμενοπούλου 27 ● ☎ (031) 203 720
Θεσσαλονίκη 546 35 ● Fax (031) 211 305

e-mail: ziti@hyper.gr

Πρόλογος

Αφορμή για τη συγγραφή του βιβλίου αυτού υπήρξε η κάλυψη των διδακτικών αναγκών του μαθήματος "Διαστημικές Μέθοδοι της Γεωδαισίας και της Γεωδυναμικής", που μπορούν να επιλέξουν οι φοιτητές του Τμήματος Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Α.Π.Θ. στο τελευταίο έτος των σπουδών τους. Ο ευρύτερος όμως στόχος είναι η παροχή ενός βασικού συγγράμματος αναφοράς, όχι μόνο για τους προπτυχιακούς και μεταπτυχιακούς φοιτητές, αλλά και για όσους συναδέλφους ασχολούνται ακαδημαϊκά ή επαγγελματικά με το αντικείμενο.

Η δημιουργία και η διάδοση του παγκοσμίου συστήματος προσδιορισμού θέσης, γνωστού ως GPS από τα αρχικά των λέξεων Global Positioning System, μετέτρεψε τη Διαστημική Γεωδαισία από ένα εξειδικευμένο αντικείμενο, που συγκέντρωνε το ενδιαφέρον πολύ λίγων ειδικών σε όλο τον κόσμο, σε κλάδο άμεσου ενδιαφέροντος. Η νέα τεχνολογία του GPS έρχεται να αντικαταστήσει τις κλασικές μεθόδους της Γεωδαισίας και της Τοπογραφίας, περιορίζοντας τις αποτυπώσεις με θεοδόλιχο και EDM στην Τεχνική Γεωδαισία (ειδικές εφαρμογές σε έργα και κατασκευές) και στις αποτυπώσεις αστικών περιοχών, όπου η ύπαρξη κτηρίων εμποδίζει την απρόσκοπτη παρατήρηση των δορυφόρων του συστήματος.

Έτσι το GPS, σε συνδυασμό με τη σύγχρονη Ψηφιακή Φωτογραμμετρία και Χαρτογραφία, έχει προκαλέσει μεγάλες αλλαγές στο επάγγελμα του Τοπογράφου Μηχανικού, οι οποίες έχουν αρχίσει να γίνονται αισθητές και στη χώρα μας.

Δύο σημαντικά προβλήματα έπρεπε να αντιμετωπιστούν κατά τη συγγραφή του βιβλίου, που είναι το πρώτο με αυτό το αντικείμενο στην ελληνική βιβλιογραφία και ένα από τα ελάχιστα στη διεθνή. Το πρώτο πρόβλημα ήταν η ανάγκη κάλυψης στοιχειωδών γνώσεων, που κανονικά θα έπρεπε να είχαν καλυφθεί από την ύλη μαθημάτων υποδομής, όπως και θέλω να ελπίζω ότι θα γίνει με τον μελλοντικό επανασχεδιασμό-εκσυγχρονισμό των προγραμμάτων σπουδών. Το δεύτερο πρόβλημα είναι ότι, εξαιτίας των ραγδαίων εξελίξεων στο αντικείμενο αυτό, ένα σύγγραμμα του τύπου αυτού κινδυνεύει να καταστεί απαρχαιωμένο μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα.

Για να ξεπεραστούν, όσο ήταν δυνατόν, τα παραπάνω προβλήματα, αποφασίστηκε να δοθεί μεγαλύτερη έμφαση στις βασικές έννοιες από ότι στις εφαρμογές, και να διαφοροποιηθεί σημαντικά η αρχική αναλογία του μαθήματος, όπου το GPS καλύπτει περισσότερο από το μισό των παραδόσεων. Για την επιλογή αυτή, σημαντικό ρόλο έπαιξε η ελπίδα ότι σύντομα θα εισαχθεί υποχρεωτικό μάθημα με αντικείμενο το GPS, και ότι ένα ξεχωριστό βιβλίο, αποκλειστικά για το GPS, θα γραφεί με τη συμβολή των νεοτέρων συναδέλφων του Τμήματος που ασχολούνται κατά τρόπο συστηματικό με τις σχετικές εφαρμογές.

Όπως είναι φυσικό, και όπως άλλωστε συμβαίνει και με άλλα μου συγγράμματα, συνειδητά δεν απέφυγα την προσέγγιση του αντικειμένου από τη σκοπιά του ειδικού στην ανάλυση των δεδομένων, παρόλο που το βιβλίο αυτό αποτελεί για μένα μια "επιστροφή στις ρίζες", αφού από το χώρο της Διαστημικής Γεωδαισίας ξεκίνησα ουσιαστικά την επιστημονική μου σταδιοδρομία, εργαζόμενος ως μεταπτυχιακός ερευνητής σε προγράμματα της NASA.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους του Τμήματος, που με τις παρατηρήσεις τους πάνω στις πανεπιστημιακές σημειώσεις, ή με τις σχετικές συζητήσεις μας, βοήθησαν στη βελτίωση του βιβλίου. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλονται στους υποψήφιους διδάκτορες του Τμήματός μας, Χρήστο Πικριδά (που συμμετέχει και στη διδασκαλία του μαθήματος) και Βασίλη Ανδριτσάνο, για την κάθε είδους βοήθειά τους, καθώς και στη Βάσω Δερμάνη που συνέβαλε στη διόρθωση και γλωσσική βελτίωση του κειμένου.

Ελπίζω πως οι παρατηρήσεις και η κριτική των συναδέλφων, ιδιαίτερα εκείνων της ελληνικής διασποράς που με τόση επιτυχία υπηρετούν το αντικείμενο αυτό, θα βοηθήσει στη βελτίωση του βιβλίου σε μια μελλοντική επανέκδοση.

Θεσσαλονίκη, Ιανουάριος 1999

A. Δερμάνης

Περιεχόμενα

Οδηγός συμβολισμού.....	ix
Συντμήσεις	xi
Εισαγωγή	1

1 Η γη

1.1. Γενικά χαρακτηριστικά και παράμετροι.....	5
1.2. Το εσωτερικό της γης.....	9
1.3. Μετάθεση των ηπείρων και τεκτονικές πλάκες	12
1.4. Το μαγνητικό πεδίο της γης	18
1.5. Η ατμόσφαιρα της γης	22
1.6. Οι παραμορφώσεις της γης - Οι παλίρροιες	24
Παράρτημα Α: Το δυναμικό έλξης της γης	30
Παράρτημα Β: Το παλιρροιακό δυναμικό	36
Παράρτημα Γ: Παραμόρφωση της ελαστικής γης και αριθμοί του Love	42

2 Συστήματα αναφοράς και χρόνου

2.1. Συστήματα αναφοράς και περιστροφή της γης	45
2.1.1. Αδρανειακό και επίγειο σύστημα αναφοράς	45
2.1.2. Το διάνυσμα της ταχύτητας περιστροφής.....	49
2.1.3. Δυναμική περιγραφή της περιστροφής της γης.....	55
2.1.4. Κλασική περιγραφή της περιστροφής της γης	57
2.1.5. Μετάπτωση και κλόνηση. Μέσο και αληθές ουράνιο σύστημα	58
2.1.6. Συμβατικό και αληθές επίγειο σύστημα αναφοράς	64
2.1.7. Σχέσεις μεταξύ σφαιρικών συντεταγμένων στα διάφορα συστήματα αναφοράς.....	66
2.1.8. Γεωδαιτικά συστήματα αναφοράς	67
2.2. Συστήματα χρόνου	69
2.2.1. Δυναμικός χρόνος	70
2.2.2. Αστρικός και παγκόσμιος χρόνος.....	71
2.2.3. Ατομικός χρόνος.....	76
2.2.4. Ιδανικά και πραγματικά χρονόμετρα	78
2.3. Υλοποίηση των συστημάτων αναφοράς - Η Διεθνής Υπηρεσία Περιστροφής της Γης (IERS).....	80
2.4. Ο ρόλος της θεωρίας της σχετικότητας.....	85

3 Οι τροχιές των δορυφόρων

3.1.	Εξισώσεις κίνησης και νόμοι του Kepler.....	91
3.2.	Εξήγηση των νόμων του Kepler με βάση τους νόμους του Νεύτωνα.....	94
3.2.1.	Η έλλειψη σε πολικές συντεταγμένες	94
3.2.2.	Η δευτεροβάθμια διαφορική εξίσωση της έλλειψης.....	95
3.2.3.	Η τροχιά σε ένα κεντρικό πεδίο δυνάμεων	96
3.2.4.	Η τροχιά σύμφωνα με το νόμο της παγκόσμιας έλξης του Νεύτωνα.....	98
3.2.5.	Μετατροπή της εξίσωσης της τροχιάς στη μορφή $r = r(\theta)$	99
3.2.6.	Το ολοκλήρωμα της ενέργειας	99
3.2.7.	Διανυσματική ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης	102
3.2.8.	Η έλλειψη του Kepler στο χώρο.....	104
3.2.9.	Η σχέση ανάμεσα στο διάνυσμα κατάστασης και τα στοιχεία του Kepler.....	110
3.3.	Οι τροχιές των δορυφόρων κάτω από την επίδραση της γήινης έλξης.....	111
3.3.1.	Οι εξισώσεις κίνησης εκφρασμένες με τα στοιχεία του Kepler	111
3.3.2.	Η συνάρτηση δυναμικού εκφρασμένη σε στοιχεία Kepler.....	116
3.3.3.	Η επίδραση του ισημερινού εξογκώματος στην τροχιά του δορυφόρου.....	121
3.4.	Σχεδιασμός των δορυφορικών τροχιών	124
3.5.	Άλλες επιδράσεις στις τροχιές των δορυφόρων.....	133
3.5.1.	Η έλξη της σελήνης και του ήλιου.....	134
3.5.2.	Η επίδραση των παλιροειών	136
3.5.3.	Η επίδραση της ατμοσφαιρικής τριβής.....	138
3.5.4.	Η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας	139
3.5.5.	Η επίδραση της θεωρίας της σχετικότητας	140

4 Η περιστροφή της γης

4.1.	Οι εξισώσεις της περιστροφικής κίνησης.....	141
4.2.	Οι εξισώσεις Liouville	143
4.3.	Διάφορες προσεγγίσεις στον προσδιορισμό της περιστροφής της γης	146
4.4.	Εναλλακτικές μέθοδοι επίλυσης των εξισώσεων περιστροφής	148
4.5.	Η περιστροφή της στερεάς γης.....	151
4.5.1.	Γραμμικοποίηση των εξισώσεων Euler	151
4.5.2.	Η ελεύθερη περιστροφή	154
4.5.3.	Γεωμετρική περιγραφή της ελεύθερης περιστροφής.....	157
4.5.4.	Η εξαναγκασμένη περιστροφή.....	161

4.5.5.	Γεωμετρική περιγραφή της εξαναγκασμένης περιστροφής.....	163
4.5.6.	Η θεωρία του Woolard.....	165
4.5.7.	Η θεωρία του Kinoshita.....	168
4.6.	Η περιστροφή της ελαστικής γης.....	172
4.6.1.	Η ελεύθερη περιστροφή της ελαστικής γης	175
4.6.2.	Η εξαναγκασμένη περιστροφή της ελαστικής γης.....	176
4.6.3.	Γεωμετρική περιγραφή της περιστροφής της ελαστικής γης	178
4.6.4.	Μεταβολές στην ταχύτητα περιστροφής της ελαστικής γης.....	184
4.7.	Περιστροφή της γης με ελαστικό μανδύα και ρευστό πυρήνα	186
4.7.1.	Η θεωρία των Sasao, Okubo, Saito	191
4.7.2.	Η θεωρία του Wahr.....	197

5 Μετάδοση και επεξεργασία σημάτων

5.1.	Στοιχειώδεις έννοιες της μετάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ...	199
5.2.	Σειρές Fourier και μετασχηματισμός Fourier	205
5.3.	Σήματα ενέργειας	213
5.4.	Σήματα ισχύος.....	215
5.5.	Γραμμικά συστήματα και φίλτρα.....	216
5.6.	Διαμόρφωση.....	222
5.7.	Μίξη σημάτων με τη μέθοδο της πολυπλεξίας.....	231
5.8.	Ετεροδύναση.....	234
5.9.	Μετάδοση ψηφιακών σημάτων	236
5.10.	Συσχέτιση ψηφιακών σημάτων.....	240
5.11.	Η επίδραση της ατμόσφαιρας στη μετάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων	247
5.11.1.	Η επίδραση της τροπόσφαιρας.....	248
5.11.2.	Η επίδραση της ιονόσφαιρας	253
5.12.	Η επίδραση της θεωρίας της σχετικότητας.....	254

6 Διαστημικά συστήματα και μέθοδοι παρατηρήσεων

6.1.	Η μέθοδος των διευθύνσεων.....	257
6.2.	Μετρήσεις αποστάσεων με ηλεκτρομαγνητικά σήματα.....	259
6.3.	Το φαινόμενο Doppler	262
6.4.	Μετρήσεις με βάση το φαινόμενο Doppler.....	264
6.5.	Το σύστημα DORIS	269
6.6.	Μετρήσεις αποστάσεων με Laser (SLR).....	271
6.7.	Μετρήσεις αποστάσεων γης-σελήνης με Laser (LLR).....	280
6.8.	Συμβολομετρία πολύ μεγάλης βάσης (VLBI).....	283

6.9.	Παρατηρήσεις από δορυφόρο σε δορυφόρο (SST).....	291
6.10.	Δορυφορική βαθμιδομετρία.....	293
6.11.	Δορυφορική αλτιμετρία.....	298
6.12.	Προσορισμός του πεδίου βαρύτητας.....	303
7 Το παγκόσμιο σύστημα προσδιορισμού θέσης (GPS)		
7.1.	Γενική περιγραφή.....	313
7.2.	Το τμήμα ελέγχου.....	317
7.3.	Το δορυφορικό τμήμα.....	319
7.4.	Δομή των δορυφορικών σημάτων.....	323
7.5.	Δημιουργία των κωδικών PRN.....	330
7.6.	Δομή του μηνύματος των δεδομένων.....	333
7.7.	Δομή της "μεταδιδόμενης εφημερίδας" του GPS.....	335
7.8.	Υπολογισμός του χρόνου και της τροχιάς.....	336
7.9.	Μέθοδοι σκόπιμης μείωσης της ακρίβειας του συστήματος.....	340
7.10.	Δέκτες GPS.....	341
7.11.	Τύποι δεκτών.....	342
7.12.	Η επεξεργασία των σημάτων στο δέκτη.....	343
7.13.	Τεχνικές χωρίς γνώση του κώδικα.....	348
7.14.	Παρατηρήσεις του συστήματος GPS.....	353
7.14.1.	Παρατηρήσεις ψευδοαποστάσεων από κώδικες.....	353
7.14.2.	Παρατηρήσεις ψευδοαποστάσεων για γεωδαιτικούς σκοπούς.....	356
7.14.3.	Παρατηρήσεις φάσεων της φέρουσας συχνότητας.....	358
8 Η ανάλυση των παρατηρήσεων GPS		
8.1.	Μαθηματικά μοντέλα.....	363
8.2.	Συνόρθωση με αδιάφορες παραμέτρους.....	372
8.3.	Απαλοιφή αδιάφορων παραμέτρων με διαφορές παρατηρήσεων.....	375
8.4.	Η ευαισθησία των παρατηρήσεων ως προς τις άγνωστες παραμέτρους.....	380
8.5.	Η συσχέτιση των διαφορών.....	383
8.6.	Γραμμικοί συνδυασμοί παρατηρήσεων.....	387
8.7.	Συνόρθωση με αέριες παραμέτρους.....	402
8.8.	Προσδιορισμός των απωλειών κύκλων.....	410
8.9.	Προσδιορισμός των ακεραίων απροσδιοριστιών.....	417
8.10.	Τοπογραφικές εφαρμογές του GPS.....	426
8.11.	Αντί επιλόγου.....	436
Βιβλιογραφία - Πηγές στο διαδίκτυο.....		439

Ευρετήριο.....	445
----------------	-----

Οδηγός συμβολισμού

Ο συμβολισμός που χρησιμοποιούμε στο βιβλίο αυτό είναι ο συνήθης συμβολισμός πινάκων, όπως, π.χ., περιγράφεται στο βιβλίο:

A. Δεσμάνης (1985): *Γραμμική Άλγεβρα και Θεωρία Πινάκων*.
Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Οι πίνακες συμβολίζονται με έντονους χαρακτήρες (π.χ. **A**, **B**, **M**, **u**, **v**, **z**), ώστε να διακρίνονται από τα βαθμωτά μεγέθη (π.χ. *A*, *B*, *M*, *u*, *v*, *z*). Κατά κανόνα, πίνακες με μία μόνο στήλη, που αντιστοιχούν σε διανύσματα, συμβολίζονται με έντονα πεζά γράμματα (**u**, **v**, **z**) και πίνακες με περισσότερες στήλες με έντονα κεφαλαία (**A**, **B**, **M**).

Τα διανύσματα συμβολίζονται, όπως συνήθως, με ένα βέλος από πάνω (*a*, *v*, *x*). Έντονοι χαρακτήρες με ένα βέλος από πάνω (π.χ. **e**), συμβολίζουν 1-3 πίνακες οι οποίοι περιέχουν τα 3 διανύσματα βάσης ενός συστήματος αναφοράς (π.χ. **e**₁, **e**₂, **e**₃). Οι πίνακες αυτοί ακολουθούν τους ίδιους κανόνες πολλαπλασιασμού, όπως και οι συνήθεις πίνακες με στοιχεία πραγματικούς αριθμούς. Η ιδιότητα του πολλαπλασιασμού επεκτείνεται, στην περίπτωση αυτή, και στο εσωτερικό γινόμενο (π.χ. **e** Σ **e**^T).

Για τις ανάγκες συμβολισμού του εξωτερικού γινομένου, εισάγεται ο συμβολισμός [**a**], για τον 3 × 3 αντισυμμετρικό πίνακα που αντιστοιχεί στο "διάνυσμα" (3 × 1 πίνακα) **a**, σύμφωνα με τον ορισμό

$$\mathbf{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \quad [\mathbf{a}] = \begin{pmatrix} 0 & a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & a_1 \\ a_2 & a_1 & 0 \end{pmatrix} .$$

Με τον συμβολισμό αυτό, αν $\mathbf{v} = \mathbf{u} \times \mathbf{w}$, με $\mathbf{v} = \mathbf{e} \cdot \mathbf{v}$, $\mathbf{u} = \mathbf{e} \cdot \mathbf{u}$, $\mathbf{w} = \mathbf{e} \cdot \mathbf{w}$, τότε ισχύει, για τους πίνακες των συνιστωσών, η σχέση $\mathbf{v} = [\mathbf{u}] \mathbf{w}$.

Με $\mathbf{R}_k(\theta)$, $k = 1, 2, 3$, συμβολίζονται οι τρεις πίνακες στροφής, γύρω από έναν από τους άξονες του συστήματος αναφοράς, κατά μία γωνία θ , θετική για φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού. Ο μοναδιαίος πίνακας συμβολίζεται με **I**, ενώ τα **i**₁, **i**₂, **i**₃, συμβολίζουν τις 3 στήλες του 3 × 3 μοναδιαίου πίνακα $\mathbf{I} = [\mathbf{i}_1 \mathbf{i}_2 \mathbf{i}_3]$.

Με $\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{x}}$ συμβολίζεται ο πίνακας που έχει στην *i* σειρά και *k* στήλη την μερική

παράγωγο $\frac{\partial v_i}{\partial x_k}$. Σε εναρμόνιση με τον κανόνα αυτόν (και σε αντίθεση με τον συμβολισμό που ακολουθείται στη βιβλιογραφία), ο πίνακας $\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}}$ είναι ένας πίνακας-σειρά. Με $\text{grad} \mathbf{f}$ συμβολίζεται το διάνυσμα κλίσης της συνάρτησης $f(\mathbf{x})$, αλλά ταυτόχρονα και ο πίνακας-στήλη των συνιστωσών του, ως προς ένα συγκεκριμένο σύστημα αναφοράς, οπότε $\text{grad} \mathbf{f} = \left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right)^T$.

Με δ_{ik} συμβολίζεται το δέλτα του Kronecker, που έχει τιμές

$$\delta_{ik} = \begin{matrix} 1 & i = k \\ 0 & i \neq k \end{matrix} .$$

Την παράγωγο, ως προς το χρόνο μίας βαθμωτής ή διανυσματικής συνάρτησης, την συμβολίζουμε, συνήθως, με ένα τόνο, π.χ.

$$\dot{\mathbf{f}} = \frac{d\mathbf{f}}{dt}, \quad \dot{\mathbf{v}} = \frac{d\mathbf{v}}{dt}.$$

Για τις τυχαίες μεταβλητές χρησιμοποιούμε το συμβολισμό $\mathbf{x}(\mathbf{m}, \sigma^2)$, για να δηλώσουμε ότι η τυχαία μεταβλητή x έχει προσδοκία (μέση τιμή) $E\{x\} = \mathbf{m}$ και μεταβλητότητα $E\{(x - \mathbf{m})^2\} = \sigma^2$. Ο συμβολισμός αυτός επεκτείνεται και σε διανύσματα τυχαίων μεταβλητών, $\mathbf{x} \sim (\mathbf{m}, \mathbf{C})$, όπου $E\{\mathbf{x}\} = \mathbf{m}$ είναι το διάνυσμα προσδοκίας και $E\{(\mathbf{x} - \mathbf{m})(\mathbf{x} - \mathbf{m})^T\} = \mathbf{C}$ ο πίνακας συμμεταβλητότητας.

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ

AM	Amplitude Modulation
AMI	Alternate Mark Inversion
AS	Anti-Spoofing
ASK	Amplitude Shift Keying
ASM	Axial Spin Mode
BIH	Bureau International de l' Heure
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
BPF	Band Pass Filter
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BSF	Band Stop Filter
CDDIS	Crustal Dynamics Data Information System
CEP	Celestial Ephemeris Pole
CIGNET	Cooperative International GPS Network
CIS	Conventional Inertial System
CNES	Centre National d' Etudes Spatiales
CODE	Center for Orbit Determination in Europe
CORE/IVN	Continuous Observation of the Rotation of the Earth using the International VLBI Network
COSPAR	Cooperation for Space Research
CSR	Center for Space Research, University of Texas
CSTG	Commission on International Coordination of Space Techniques for Geodesy and Geodynamics
CTS	Conventional Terrestrial System
CW	Chandler Wobble
DGF	Deutsches Godätisches Forschungsinstitut
DLL	Delay Lock Loop
DoD	Department of Derence
DOP	Dilution of Precision
DORIS	Doppler Orbitography by Radiopositioning Integrated on Satellite
DOSE	Dynamics of the Solid Earth
DSB	Double-Sideband
EGM	Earth Gravity Model
EOP	Earth Rotation Parameters
ESA	European Space Agency
ET	Ephemeris Time

EUROLAS	European Laser
FLINN	Fiducial Laboratories for an International Natural Science Network
FM	Frequency Modulation
FSK	Frequency Shift Keying
ftp	file transfer protocol
GAST	Greenwich Apparent Sidereal Time
GDOP	Geometric Dilution of Precision
GEM	Goddard Earth Models
GFZ	GeoForschungsZentrum, Potsdam
GIUB	Geodetic Institute of the University of Bonn
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GMST	Greenwich Mean Sidereal Time
GPM	GeoPotential Models
GPS	Global Positioning System
GRGS	Group de Recherches de Géodésie Spatial
GSFC	Goddard Space Flight Center
GST	Greenwich True Sidereal Time
GTT	Greenwich True Time
HDOP	Horizontal Dilution of Precision
HOW	Hand Over Word
HPF	High Pass Filter
IAG	International Association of Geodesy
IAU	International Astronomical Union
ICRF	International Celestial Reference Frame
ICRS	International Celestial Reference System
IERS	International Earth Rotation Service
IGN	Institut Géographique National
IGS	International GPS Service
ILRS	International Laser Ranging Service
ILS	International Latitude Service
IPMS	International Polar Motion Service
IRM	International Reference Meridian
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
ITRS	International Terrestrial Reference System
IUGG	International Union of Geodesy and Geophysics
IVS	International VLBI Service for Geodesy and Astrometry
JD	Julian Date
JGM	Joint Gravity Models
JPL	Jet Propulsion Laboratory

LAREG	Laboratoire de Recherche en Géodésie, IGN
LAST	Local Apparent Sidereal Time
LLR	Lunar Laser Ranging
LMST	Local Mean Sidereal Time
LOD	Length of the Day
LORAN	Long Range Navigation
LPF	Low Pass Filter
MGGF	Monitoring of Global Geophysical Fluids
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MJD	Modified Julian Date
MT	Mean Solar Time
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NASDA	National Space Development Agency (of Japan)
NAVSTAR	Navigation System with Time and Ranging
NB	Narrow Band
NDFW	Nearly Diurnal Free Wobble
NGS	National Geodetic Survey
NIMA	National Imagery and Mapping Agency
NOAA	National Oceanographic and Atmospheric Administration
NRZ	Non Return-to-Zero
OSU	Ohio State University
PCM	Pulse Code Modulation
PLL	Phase Lock Loop
PM	Phase Modulation
PRN	Pseudo-random Noise
PSK	Phase Shift Keying
RINEX	Receiver Independent Exchange (format)
RZ	Return-to-Zero
SA	Selective Availability
SECOR	Sequential Collation of Ranges
SI	International System of Units
SINEX	Software Independent Exchange (format)
SLR	Satellite Laser Ranging
SOS	Sasao Okubo Saito
SPG	Space Geodesy Program
SSB	Single-Sideband
SST	Satellite-to-Satellite Tracking
TAI	Temps Atomique International
TCB	Barycentric Coordinate Time
TCG	Geocentric Coordinate Time

TDB	Temps Dynamique Barycentrique
TDOP	Time Dilution of Precision
TDT	Temps Dynamique Terrestre
TEC	Total Electron Content
TEG	Texas Earth Gravity (model)
TLM	Telemetry (word)
TOM	Tilt-over Mode
TOW	Time of Week
TT	Apparent or True Solar Time
TT	Terrestrial Time (= TDT)
UoH	University of Hannover
UoT	University of Texas
USNO	United States Naval Observatory
UT	Universal Time
UTC	Coordinated Universal Time
VDOP	Vertical Dilution of Precision
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
WB	Wide Band
WGS 84	World Geodetic System 1984
WPLTN	Western Pacific Laser Tracking Network

Εισαγωγή

Στις 4 Οκτωβρίου του 1957 η ανθρωπότητα περνά το κατώφλι της διαστημικής εποχής. Η εκτόξευση στο διάστημα, από την τότε Σοβιετική Ένωση, του πρώτου τεχνητού δορυφόρου "Σπούτνικ Ι", τον οποίο ακολούθησε, τον επόμενο μήνα, ο "Σπούτνικ ΙΙ" με επιβάτη τη σκυλίτσα Λάικα, εξάπτει τη φαντασία του απλού ανθρώπου, αλλά η επιστημονική κοινότητα βλέπει να ανοίγονται μπροστά της νέα πεδία έρευνας και εφαρμογών. Ανάμεσά τους οι γεωδαίτες, είναι ίσως οι περισσότεροι προετοιμασμένοι, καθώς έχουν ήδη προσπαθήσει να αξιοποιήσουν παρατηρήσεις του φυσικού δορυφόρου της γης, της Σελήνης.

Η μικρή, ιστορικά, χρονική απόσταση δεν επιτρέπει να αποτιμηθεί σωστά η σημασία αυτού του εγχειρήματος. Καθώς βρισκόμαστε στα χρόνια του ψυχρού πολέμου, ο πολιτικός αντίκτυπος στις Η.Π.Α. είναι τεράστιος. Η Αμερικανική Κυβέρνηση αναγκάζεται να μπει σε μια ξέφρενη κούρσα για την κατάκτηση του διαστήματος, που ευτυχώς δεν θα τερατισθεί με την ανάκτηση του προβαδίσματος, όταν το 1969 ο πρώτος άνθρωπος πατά το πόδι του στη Σελήνη. Τεράστια χρηματικά ποσά επενδύονται στην έρευνα, σε όλο το φάσμα των "θετικών" επιστημών. Από τη διαστημική έρευνα θα πηγάζει ουσιαστικά, (ή έστω θα γίνει δυνατή χάρη σ' αυτήν), η "τεχνολογική επανάσταση" και το πέρασμα στη σύγχρονη "κοινωνία της πληροφορικής".

Είναι αξιοσημείωτο ότι και στις νέες εφαρμογές που προκύπτουν από τη χρήση των δορυφόρων στη γεωδαισία, διατηρείται ο κλασικός δυϊσμός γεωμετρία-πεδίο βαρύτητας, ο οποίος στην "επίγεια γεωδαισία" σχετίζεται με τη χρήση της τοπικής κατακορύφου (οριζοντίωση θεοδολίχου) και την ταύτιση της έννοιας του ύψους με το δυναμικό του πεδίου βαρύτητας. Στη "δορυφορική γεωδαισία" τα νέα

"τριγωνομετρικά σημεία", που είναι οι θέσεις ενός τεχνητού δορυφόρου σε διάφορες χρονικές στιγμές, είναι σημεία μιας δορυφορικής τροχιάς, της οποίας η μορφή εξαρτάται άμεσα από το πεδίο βαρύτητας της γης.

Η πρώτη εφαρμογή της δορυφορικής γεωδαισίας είναι ο προσδιορισμός της δυναμικής πλάτυνσης της γης (συντελεστής C_{20} στο ανάπτυγμα του δυναμικού σε σειρά σφαιρικών αρμονικών) που είναι αποτέλεσμα της έλξης του ισημερινού εξογκώματος της γης. Η δυναμική πλάτυνση συνδέεται (εξίσωση Clairaut) με τη γεωμετρική πλάτυνση, και έτσι έχουμε έμμεσα και ένα νέο (δυναμικό αυτή τη φορά) προσδιορισμό του ελλειψοειδούς σχήματος της γης, ενώ ο αντίστοιχος γεωμετρικός προσδιορισμός έχει ήδη ξεκινήσει από τα τέλη του 17ου αιώνα με τις μετρήσεις τόξων στη Λαπωνία από τον Maupertuis, και στο Περού από τον La Condamine.

Ακολουθεί στη συνέχεια και προσδιορισμός περισσότερων λεπτομερειών του πεδίου βαρύτητας της γης, που εκφράζονται από τις τιμές των συντελεστών C_{nm} , S_{nm} του ανάπτυγματος της συνάρτησης δυναμικού σε σειρά σφαιρικών αρμονικών, πέρα από τον κυρίαρχο όρο C_{20} , που εκφράζει την έλξη του ισημερινού εξογκώματος. Η προσπάθεια αυτή συνεχίζεται ακόμη με τον προσδιορισμό συνεχώς βελτιούμενων τιμών των παραπάνω συντελεστών, που αποτελούν τα λεγόμενα "μοντέλα γης" (earth models).

Στις γεωμετρικές εφαρμογές, όπου υπάρχει ήδη σχετική εμπειρία από τη χρήση αεροστάτων, χρησιμοποιούνται οι δορυφόροι ως ταυτόχρονα παρατηρούμενα απρόσιτα τριγωνομετρικά σημεία και δεν είναι έτσι απαραίτητη η γνώση της τροχιάς. Με τον τρόπο αυτό, γίνεται δυνατή στην αρχή η σύνδεση των επιμέρους ηπειρωτικών δικτύων και στη συνέχεια η εγκαθίδρυση παγκοσμίων δικτύων ελέγχου.

Οι πρώτες εφαρμογές βασίζονται σε οπτικές μεθόδους με τη χρήση φωτογραφικών μηχανών, που ξεπερνιέται γρήγορα από τη δυνατότητα μέτρησης αποστάσεων με παρατηρήσεις της διαφοράς φάσεως ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ή του χρόνου μετάδοσης ακτίνων laser, καθώς και της μέτρησης του ρυθμού μεταβολής της απόστασης, από την αλλοίωση της εκπεμπόμενης από το δορυφόρο συχνότητας, λόγω του φαινομένου Doppler.

Ο αρχικός διαχωρισμός σε δυναμικές και γεωμετρικές μεθόδους εγκαταλείπεται γρήγορα, καταρχήν με μεθόδους "μικρών τόξων" της τροχιάς, όπου η επίδραση του πεδίου βαρύτητας είναι περιορισμένη, και στη συνέχεια με μικτές μεθόδους προσδιορισμού και του πεδίου βαρύτητας και των συντεταγμένων των επίγειων σημείων. Υπάρχει το πρόβλημα της ανάγκης να είναι γνωστή η θέση επίγειων σημείων για τον προσδιορισμό των τροχιών και αντίστροφα να είναι γνωστές οι τροχιές για τον προσδιορισμό των θέσεων των επίγειων σημείων. Το πρόβλημα αυτό θα ξεπεραστεί χάρη στο φαινόμενο της εξομάλυνσης των λεπτομερειών του πεδίου βαρύτητας με την απόσταση r από το κέντρο της γης, που εκφράζεται μαθηματικά

με τον πολλαπλασιασμό των συντελεστών των σφαιρικών αρμονικών C_{nm} , S_{nm} με τον συντελεστή $(r/R)^{n+1}$, όπου R η ακτίνα της γης. Έτσι ο προσδιορισμός συντεταγμένων γίνεται από δορυφόρους μεγάλου ύψους για τους οποίους είναι εύκολος ο ακριβής προσδιορισμός των τροχιών, ενώ το πεδίο βαρύτητας προσδιορίζεται από τη μορφή των τροχιών δορυφόρων χαμηλού ύψους. Αποκορύφωμα της προσέγγισης αυτής αποτελεί το Παγκόσμιο Σύστημα Προσδιορισμού Θέσης (GPS), όπου οι δορυφόροι μεταδίδουν σε επίγειους σταθμούς, μαζί με σήματα που χρησιμοποιούνται για μετρήσεις (ψευδο)αποστάσεων ή διαφορών φάσεων, και πληροφορίες σχετικά με τη θέση τους κατά τη στιγμή αναχώρησης του σήματος.

Εκτός από το πεδίο βαρύτητας και το γεωμετρικό σχήμα παγκόσμιων δικτύων ελέγχου, ένα ακόμα φυσικό φαινόμενο, αυτό της περιστροφής της γης, προσδιορίζεται με μεγάλη ακρίβεια. Αυτό γίνεται δυνατό επειδή τα επίγεια δίκτυα αναφέρονται σε ένα επίγειο σύστημα αναφοράς, ενώ οι νόμοι της μηχανικής, που καθορίζουν τις τροχιές των δορυφόρων, αναφέρονται σε ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Η μεταβολή, με το χρόνο, της θέσης (προσανατολισμού) του επίγειου συστήματος ως προς το αδρανειακό, αποτελεί ακριβώς το φαινόμενο της γήινης περιστροφής.

Ο προσδιορισμός της περιστροφής της γης θα περάσει σε νέες διαστημικές μεθόδους που δεν κάνουν χρήση τεχνητών δορυφόρων: Η Συμβολομετρία Πολύ Μεγάλης Βάσης (VLBI, Very Long Base Interferometry) αξιοποιεί παρατηρήσεις ακτινοβολίας που προέρχεται από εξωγαλαξιακές πηγές, είναι ανεξάρτητη του πεδίου βαρύτητας και επιτρέπει τον προσδιορισμό τόσο των συντεταγμένων, όσο και της γήινης περιστροφής, με εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια. Δευτερεύοντα ρόλο παίζουν οι μετρήσεις αποστάσεων γης-σελήνης με ακτίνες laser (lunar laser tracking), που γίνονται δυνατές χάρη στην τοποθέτηση ανακλαστήρων στη σελήνη κατά τις σχετικές επανδρωμένες πτήσεις. Οι παρατηρήσεις αυτές, εκτός από την περιστροφή της γης, εξαρτώνται από την τροχιά και τις "λικνίσεις" της σελήνης, δηλαδή τις μικρές αποκλίσεις από μία ομοιόμορφη περιστροφή, όπου η ίδια πάντα πλευρά είναι στραμμένη προς τη γη.

Η αυξανόμενη ακρίβεια του προσδιορισμού των επίγειων συντεταγμένων και η συγκέντρωση παρατηρήσεων για συνεχώς μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, επιτρέπει τον προσδιορισμό της μικρού μεγέθους χρονικής μεταβολής των συντεταγμένων, δηλαδή τη μελέτη της παραμόρφωσης του γήινου φλοιού, είτε σε μικρότερες περιοχές με τεκτονικό ενδιαφέρον (σεισμοί), είτε σε παγκόσμια κλίμακα με τον προσδιορισμό της σχετικής μετακίνησης των τεκτονικών πλακών.

Η ανάλυση δορυφορικών τροχιών δεν δίνει τις λεπτομέρειες εκείνες του πεδίου βαρύτητας που μπορούν να προκύψουν από πυκνές επίγειες βαρυτημετρικές μεθόδους, η εκτέλεση των οποίων όμως στη θάλασσα είναι δύσκολη και προβληματική. Την αδυναμία αυτή καλύπτει η ανάπτυξη της δορυφορικής αλτιμετρίας, όπου παρατηρείται το ύψος του δορυφόρου πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας (γυωει-

δές).

Τέλος πρέπει να αναφερθούν μέθοδοι που δεν έχουν μπει ακόμη στη φάση της ευρείας εφαρμογής (ίσως εξαιτίας του περιορισμού πλέον των σχετικών χρηματοδοτήσεων), όπως η βαρυτημετρία (satellite gravimetry) και η βαθμιδομετρία (satellite gradiometry) (μέτρηση της μεταβολής στο χώρο της βαρύτητας) από δορυφόρους, καθώς και η μέτρηση αποστάσεων από δορυφόρο σε δορυφόρο (satellite-to-satellite tracking). Ας σημειωθεί ότι ο εξοπλισμός των νέων δορυφόρων με γεωδαιτικού ενδιαφέροντος όργανα δεν είναι εύκολος, λόγω του σχετικού ανταγωνισμού ανάμεσα σε διαφορετικές επιστημονικές κοινότητες και των προτεραιοτήτων στα κέντρα των σχετικών αποφάσεων.

Αν χωρίσουμε τα 40 πρώτα χρόνια της "διαστημικής" γεωδαισίας σε δεκαετίες, μπορούμε να πούμε ότι η πρώτη δεκαετία είναι η εποχή της ανάπτυξης των σχετικών επιστημονικών μεθόδων παρατηρήσεων και ανάλυσης των δορυφορικών τροχιών. Η δεύτερη δεκαετία είναι η εποχή των μεγάλων ερευνητικών προγραμμάτων, με τα οποία αναπτύσσονται και βελτιώνονται νέες τεχνικές παρατηρήσεων, καθώς και του προσδιορισμού, με μεγαλύτερη ακρίβεια, συντεταγμένων και μοντέλων γης. Η τρίτη δεκαετία είναι η εποχή της ευρείας εφαρμογής των δορυφορικών μεθόδων στη γεωδαισία, τη γεωδυναμική και την τοπογραφία. Η τέταρτη δεκαετία χαρακτηρίζεται από την κυριαρχία του συστήματος GPS και τη χρήση του σε κοινές επαγγελματικές τοπογραφικές εφαρμογές, όπου και αντικαθιστά, με αυξανόμενο ρυθμό, το μεγαλύτερο τμήμα των εφαρμογών με κλασσικές επίγειες μεθόδους.