

Günter Seeber

Satellitengeodäsie

Grundlagen, Methoden und Anwendungen



Walter de Gruyter · Berlin · New York 1989

Inhalt

1.	Einleitung	1
1.1	Gegenstand der Satellitengeodäsie.....	1
1.2	Allgemeine Einteilung und Grundkonzepte der Satellitengeodäsie	3
1.3	Historische Entwicklung.....	6
1.4	Anwendungen der Satellitengeodäsie	8
1.5	Einteilung und Zielsetzung des Buches	10
2.	Allgemeine Grundlagen	12
2.1	Bezugssysteme	12
2.1.1	Kartesische Koordinatensysteme und Koordinatentransformationen	12
2.1.2	Bezugssysteme der Satellitengeodäsie	15
2.1.3	Bezugssysteme im Erdschwerefeld	21
2.1.4	Ellipsoidische Bezugssysteme	22
2.1.5	Ellipsoid, Geoid und Geodätisches Datum	25
2.1.6	Dreidimensionale Zentrierung	29
2.2	Zeit	30
2.2.1	Allgemeines	30
2.2.2	Sternzeit und Weltzeit	32
2.2.3	Dynamische Zeit	34
2.2.4	Atomzeit	35
2.2.5	Uhren und Frequenznormale	36
2.3	Signalausbreitung	40
2.3.1	Einige elementare Grundlagen zur Wellenausbreitung	41
2.3.1.1	Grundbeziehungen und Definitionen	41
2.3.1.2	Dispersion, Phasen- und Gruppengeschwindigkeit	43
2.3.1.3	Frequenzbereiche.....	44
2.3.2	Aufbau und Struktur der Atmosphäre	45
2.3.3	Wellenausbreitung in der Ionosphäre und Troposphäre.....	48
2.3.3.1	Ionosphärische Refraktion	50
2.3.3.2	Troposphärische Refraktion	51

VIII	Inhalt
3.	Satellitenbewegung 56
3.1	Grundzüge der Himmelsmechanik, Zweikörperproblem 56
3.1.1	Keplerbewegung 58
3.1.2	Newtonsche Mechanik, Zweikörperproblem 61
3.1.2.1	Bewegungsgleichung 61
3.1.2.2	Elementare Integration 64
3.1.2.3	Vektorielle Darstellung 71
3.1.3	Bahngeometrie und Bahnbewegung 75
3.2	Gestörte Satellitenbewegung 82
3.2.1	Darstellung von gestörten Bewegungen 84
3.2.1.1	Oskulierende und mittlere Bahnelemente 84
3.2.1.2	Störungsgleichungen nach Lagrange 85
3.2.1.3	Gauß'sche Form der Störungsgleichungen 88
3.2.2	Gestörte Bewegungen aufgrund des anomalen Erdschwerefeldes 89
3.2.2.1	Störungsgleichungen und Geopotential 91
3.2.2.2	Störungen in den Elementen 95
3.2.2.3	Störbeschleunigungen aufgrund zonaler Koeffizienten J_n 98
3.2.3	Sonstige Störungen 100
3.2.3.1	Gravitationswirkung von Sonne und Mond 100
3.2.3.2	Gezeiten der festen Erde und der Meere 102
3.2.3.3	Strömungswiderstand der Atmosphäre 103
3.2.3.4	Direkter und indirekter Strahlungsdruck der Sonne 105
3.2.3.5	Weitere Störungen 107
3.2.3.6	Resonanzeffekte 108
3.2.4	Auswirkung von Störungen auf ausgewählte Satellitenbahnen 109
3.3	Bahnbestimmung 111
3.3.1	Integration der ungestörten Bahn 112
3.3.2	Integration der gestörten Bewegungsgleichung 115
3.3.2.1	Analytische Verfahren der Bahnintegration 116
3.3.2.2	Numerische Verfahren der Bahnintegration 118
3.3.3	Bahnrepräsentation 122
3.3.3.1	Ephemeridendarstellung bei Navigationssatelliten 122
3.3.3.2	Approximation durch Polynome 123
3.3.3.3	Vereinfachte Short-Arc Darstellung 126
3.4	Satellitenbahnen und Satellitenbahnmanöver 128
4.	Beobachtungskonzepte und geodätisch nutzbare Satelliten 135

Inhalt		IX
4.1	Satellitengeodäsie als Parameterbestimmungsproblem	135
4.2	Messungsgrößen und Meßverfahren	139
4.2.1	Richtungsmessungen	141
4.2.2	Entfernungsmessungen	142
4.2.3	Entfernungsdifferenzmessungen (Doppler)	145
4.2.4	Flughöhenmessungen (Altimetrie)	146
4.2.5	Entfernungs- und Entfernungsänderungsmessungen	147
4.2.6	Interferometrische Messungen	148
4.2.7	Sonstige Meßverfahren	150
4.3	Geodätisch nutzbare Satelliten	150
4.3.1	Allgemeine Anforderungen	150
4.3.2	Ausgewählte Satelliten und Teilsysteme	151
4.3.3	Geplante Satelliten und Systeme	155
5.	Klassische Beobachtungsverfahren	157
5.1	Photographische Richtungsbestimmung	158
5.1.1	Satelliten zur photographischen Richtungsbestimmung	158
5.1.2	Satellitenkameras	159
5.1.3	Beobachtungs- und Auswerttablauf	163
5.1.3.1	Satellitenaufnahme	163
5.1.3.2	Plattenmessung und Korrekturen	164
5.1.3.3	Plattenreduktion	167
5.1.4	Weiterverwendung der Richtungen	170
5.1.5	Ergebnisse	172
5.1.6	Heutige Bedeutung der Richtungsmessung	174
5.2	Elektronische Entfernungsmessung (SECOR)	175
5.3	Sonstige frühe Meßverfahren	176
6.	Dopplermessungen (TRANSIT)	178
6.1	Dopplereffekt und Prinzip der Positionsbestimmung	180
6.2	Entwicklung und Status des Navy Navigation Satellite Systems (TRANSIT)	184
6.3	Bahnbestimmung und Bahnrepräsentation	188
6.3.1	Broadcast Ephemeriden	188
6.3.2	Präzise Ephemeriden	193
6.3.3	Beziehungen zwischen Dopplerbezugssystemen	194

X	Inhalt
6.4	Satellitenempfangsanlagen 195
6.4.1	Grundsätzlicher Aufbau eines Dopplerempfängers 195
6.4.2	Zeitmessung und Dopplerzählung 197
6.4.3	Dopplerempfänger 200
6.5	Fehlereinflüsse und Korrekturen 202
6.5.1	Bahnephemeriden 202
6.5.2	Ionosphärische und troposphärische Refraktion 204
6.5.3	Empfangssystem 207
6.5.4	Erdrotation und relativistische Einflüsse 209
6.5.5	Bewegung der Empfangsantenne 210
6.5.6	Fehlerbudget für den Einzeldurchgang 211
6.6	Beobachtungsstrategien und Auswertemodelle 213
6.6.1	Erweiterte Beobachtungsgleichung 213
6.6.2	Einzelpunktbestimmung 218
6.6.3	Mehrstationsverfahren 221
6.6.4	Auswerteprogramme 225
6.7	Durchführung von Feldbeobachtungen 227
6.8	Anwendungen von Dopplerbeobachtungen 229
6.8.1	Anwendungen in der Grundlagenvermessung 229
6.8.2	Bestimmung von Paß- und Kontrollpunkten 237
6.8.3	Anwendungen in der Meeres- und Glazialgeodäsie 239
6.8.4	Bestimmung von Polbewegungsparametern 239
6.8.5	Die zukünftige Rölle von Satelliten- Dopplerbeobachtungen 240
7.	Das Global Positioning System GPS 242
7.1	Grundprinzip 242
7.1.1	Allgemeines 242
7.1.2	Raumsegment 245
7.1.3	Kontrollsegment 246
7.1.4	Beobachtungsprinzip und Signalstruktur 247
7.1.5	Bahnbestimmung und Bahnrepräsentation 252
7.1.5.1	Bestimmung der Broadcast-Ephemeriden 252
7.1.5.2	Bahnrepräsentation 253
7.1.5.3	Berechnung der Satellitenzeit und der Satellitenkoordinaten 256
7.1.5.4	Struktur der GPS Navigationsdaten 258
7.1.6	Systementwicklung 259
7.2	GPS Empfänger (Nutzersegment) 261

Inhalt	XI	
7.2.1	Empfängerkonzepte und Komponenten	261
7.2.2	Codeabhängige Empfänger	263
7.2.2.1	Grundsätzlicher Aufbau	263
7.2.2.2	Beispiele für codeabhängige Empfänger	266
7.2.3	Codefreie Empfänger	269
7.2.3.1	Grundsätzlicher Aufbau	269
7.2.3.2	Beispiele für codefreie Empfänger	270
7.2.4	Empfängerübersicht	272
7.3	Datenbehandlung und Auswertung	273
7.3.1	Beobachtungsgrößen	273
7.3.2	Code- und Trägerphasen	277
7.3.3	Auswertekonzepte	280
7.3.4	Lösung von Mehrdeutigkeiten	284
7.3.5	Auswertestrategien und Konzepte von Rechnerprogrammen	287
7.4	Genauigkeitsbeeinflussende Effekte	290
7.4.1	Allgemeines und Übersicht	290
7.4.2	Satellitengeometrie	293
7.4.3	Bahnen und Uhren	295
7.4.4	Ausbreitungseffekte	299
7.4.5	Empfangssystem	302
7.5	Durchführung von Feldbeobachtungen	303
7.5.1	Aufstellung eines Beobachtungsplanes	303
7.5.2	Praktische Gesichtspunkte bei Feldbeobachtungen	307
7.5.3	Beobachtungsstrategien und Netzentwurf	308
7.6	Anwendungsmöglichkeiten und Anwendungsbeispiele von GPS Beobachtungen	312
7.6.1	Grundlagenvermessung	313
7.6.2	Geodynamik	316
7.6.3	Überwachungs- und Ingenieuraufgaben	317
7.6.4	Präzisionsnavigation, Meeres- und Glazialgeodäsie	318
8.	Laserdistanzmessung	320
8.1	Grundprinzip und Allgemeines	320
8.2	Satelliten mit Laserreflektoren	322
8.3	Lasermeßsysteme und Komponenten	326
8.3.1	Laseroszillatoren	326
8.3.2	Sonstige Systemkomponenten	328
8.3.3	Verfügbare Systeme, Transportable Laser	330

XII	Inhalt
8.4	Korrekturen, Datenbehandlung und Genauigkeit 332
8.4.1	Erweiterte Distanzgleichung 332
8.4.2	Datenprüfung und Datenverdichtung, Normalpunkte 334
8.4.3	Genauigkeitsentwicklung bei Laserdistanzmeßsystemen 338
8.5	Durchführung und Nutzung von Laserdistanzmessungen zu Satelliten 339
8.5.1	Operationelle Durchführung von Beobachtungsprogrammen 339
8.5.2	Parameterschätzung 341
8.5.3	Positionen und Positionsänderungen 344
8.5.4	Bezugssystem, Erdrotation, Polbewegung 345
8.5.5	Schwerefeld 349
8.5.6	Gezeiten der festen Erde und der Meere 350
8.5.7	Sonstige Anwendungen 351
8.6	Lasermessungen zum Mond 352
8.7	Satellitengetragene Lasersysteme 356
9.	Satellitenaltimetrie (Flughöhenmessung) 357
9.1	Grundprinzip 357
9.2	Satelliten und Missionen 359
9.3	Meßwerte, Korrekturen und Genauigkeit 363
9.3.1	Geometrie der Altimetermessung 363
9.3.2	Datengewinnung 364
9.3.3	Korrekturen und Fehlereinflüsse 367
9.4	Bestimmung der mittleren Meeresoberfläche 371
9.5	Anwendungen von Altimetermessungen in Geodäsie, Geophysik und Ozeanographie 374
9.5.1	Schwerefeld- und Geoidbestimmung 374
9.5.2	Geophysikalische Interpretation 377
9.5.3	Ozeanographie 377
10.	Geplante Missionen und Sonderverfahren 382
10.1	Geplante Missionen zur hochauflösenden Schwerefeldbestimmung 382
10.1.1	Grundsätzliches 382
10.1.2	Satellite-to-Satellite Tracking 385
10.1.3	Satellitengradiometrie 391

Inhalt		XIII
10.2	Radiointerferometrie auf langen Basen	394
10.2.1	Grundprinzip und Beobachtungsgleichungen	395
10.2.2	Nutzung von VLBI in Geodäsie und Geodynamik	399
10.2.3	VLBI mit Satelliten	403
11.	Anwendungen von geodätischen Satellitenmethoden (Zusammenschau)	405
11.1	Positionsbestimmung	405
11.1.1	Konzepte, absolute und relative Positionsbestimmung	405
11.1.2	Globale und regionale Koordinatenlösungen	410
11.1.3	Operationelle Positionsbestimmung	412
11.2	Schwerefeldbestimmung und Erdmodelle	415
11.2.1	Grundsätzliches	415
11.2.2	Erdmodelle	421
11.3	Navigation und Meeresgeodäsie, kinematische Positionsbestimmung	427
11.3.1	Einsatzmöglichkeiten und Genauigkeitsanforderungen bei der Positionsbestimmung auf See	427
11.3.2	Besondere Gesichtspunkte bei der Anwendung des TRANSIT Systems	431
11.3.3	Besondere Gesichtspunkte bei der Anwendung des GPS Systems	434
11.3.4	Bestimmung von Eisbewegungen	437
11.4	Geodynamik	439
11.4.1	Rezente Krustenbewegungen	439
11.4.2	Referenzsystem, Erdrotationsparameter	441
12.	Literaturverzeichnis	445
13.	Sachverzeichnis	473