

Berichte aus der Luft- und Raumfahrttechnik

Bernhard kleine Schlarmann

**Kleinsatelliten-Bahnbestimmung durch
Dopplerfrequenz-Messungen zur optimalen
Positionierung von mobilen Bodenstationen
beim Wiedereintritt**

Shaker Verlag
Aachen 1998

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	I
FORMELZEICHEN	IV
ABKÜRZUNGEN	VIII
1 EINLEITUNG	1
1.1 Kleinsatelliten und ihre Bedeutung	1
1.2 Zielsetzung dieser Arbeit	7
2 THEORIE UND GRUNDLAGEN	11
2.1 Bahnmechanik	11
2.1.1 Definition der Referenzsysteme	13
2.1.1.1 Das klassische Bahnsystem	13
2.1.1.2 Das geozentrische kartesische Äquatorsystem	14
2.1.1.3 Das topozentrische Äquatorsystem	15
2.1.1.4 Das topozentrische Horizontsystem	16
2.1.2 Die Bestimmung der Bodenstationskoordinaten	16
2.1.3 Die Bestimmung der Satellitenkoordinaten	18
2.1.4 Die Bestimmung von range und range-rate	20
2.1.5 Die Bestimmung der Subsatellitenbahn	21
2.1.6 Bahnstörungen auf erdnahen Satellitenbahnen	22
2.1.6.1 Störungen durch das Gravitationspotential der Erde	23
2.1.6.2 Aerodynamische Störungen	26
2.1.6.2.1 Dichte der Atmosphäre	28
2.1.6.2.2 Zeitliche Entwicklung von Sonnenaktivität und geomagnetische Aktivität	41
2.1.6.2.3 Definition des Ballistischen Koeffizienten	42
2.1.6.2.4 Aerodynamische Beiwerte	44
2.1.6.2.5 Iterative Bestimmung des Ballistischen Koeffizienten	49
2.1.6.3 Weitere Störungen	52
2.1.7 Bahnbeeinflussung durch Drallradabwurf und Schwenkmanöver	53
2.1.8 Numerische Integration der Bewegungsgleichung	57
2.2 Physik des Doppler-Effektes	59
2.2.1 Der elementare Doppler-Effekt	60
2.2.2 Bestimmung von Sendefrequenz und Kulminationszeit	65
2.2.2.1 Geradliniger Überflug mit konstanter Geschwindigkeit	66
2.2.2.2 Überflug bei kreisförmiger Satellitenbahn und stationärer Erde	71
2.2.3 Technik des Meßverfahrens	74
2.2.4 Meßfehler	76
2.2.4.1 Fehler des Meßgerätes	78
2.2.4.2 Fehler des Zeitsystems	78
2.2.4.3 Frequenzfehler	79
2.2.4.4 Fehler in den Positionen der Bodenstationen	80
2.2.4.5 Fehler in der Phasengeschwindigkeit - Atmosphärische Störungen	81
2.2.4.5.1 Aufbau der Atmosphäre	84
2.2.4.5.2 Troposphäre	85
2.2.4.5.3 Ionosphäre	88
2.2.4.5.4 Berechnung des „Atmosphärischen Dopplereffektes“	95
2.2.4.5.5 Technische Möglichkeiten zur Verringerung der Atmosphärenfehler	97
2.2.4.6 Fehler durch den linearen Ansatz in der Doppler-Gleichung	98

2.3 Kalman-Filter-Technik	99
2.3.1 Das konventionelle Kalman-Filter	101
2.3.1.1 Vorhersage (Extrapolation, prediction)	101
2.3.1.2 Korrektur des Schätzwertes unter Verwendung einer Messung (update)	106
2.3.2 Das Erweiterte Kalman-Filter	109
2.3.2.1 Vorhersage (Extrapolation, prediction)	109
2.3.2.2 Korrektur des Schätzwertes unter Verwendung einer Messung (update)	110
2.3.3 Bahnbestimmung mit dem EKF bei der BREM-SAT Mission	112
2.3.3.1 Das Systemmodell (die Transitionsmatrix)	113
2.3.3.1.1 Störbeschleunigungen des Erdgravitationsfeldes	114
2.3.3.1.2 Störbeschleunigungen des Harris-Priester-Atmosphärenmodelles	115
2.3.3.1.3 Die Systemmatrix	121
2.3.3.2 Das Beobachtungsmodell (die Meßmatrix)	123
3 BESCHREIBUNG DES PROGRAMMPAKETES OPUS	125
3.1 Struktureller Aufbau des Programmes	125
3.1.1 Bahnrechnungsmodul ZUNIEM	126
3.1.2 Bahnbestimmungsmodul DOMO	128
3.1.3 Datenempfang der Bahnmeßdaten von NASA	130
3.1.3.1 TLE-Datenbank des IRR	131
3.1.3.2 Transformation der TLE in kartesische Koordinaten	133
3.1.4 Empfang von Sonnenaktivitäts- und geomagnetischen Aktivitätsdaten	134
3.1.4.1 NASA/MSFC-Daten	135
3.1.4.2 NOAA/SESC-Daten	136
3.1.5 Datenverwaltung und -speicherung	139
3.1.6 Bulletin-Erstellung	140
3.1.6.1 Dateikonvertierungsmodul ZUDAKO	140
3.1.6.2 Graphikmodul zur Ausgabe von Überflugeometrien	142
3.1.6.3 Graphikmodul zur Ausgabe von Subspuren	142
3.2 Filter-Initialisierung (Filter-tuning)	143
3.2.1 Variation der Elemente in der Eingangsfehler-Kovarianzmatrix	146
3.2.2 Variation der Elemente in der Systemrauschen-Matrix	147
3.2.3 Variation der Elemente in der Meßrauschen-Matrix	149
3.3 Simulationsrechnung	151
4 POSITIONIERUNG MOBILER BODENSTATIONEN ZUR ERHÖHUNG DER KONTAKTWAHRSCHEINLICHKEIT WÄHREND DER WIEDEREINTRITTS-PHASE	155
4.1 Vorhersage von Zeitpunkt und Gebiet des Wiedereintritts	155
4.1.1 Statistische Betrachtungsweise	156
4.1.2 Deterministische Betrachtungsweise	165
4.1.2.1 Kurzfristige Prognosen für Sonnenaktivität und geomagnetische Aktivität	165
4.1.2.2 Plötzliche Solar Flares und Erdmagnetfeldfluktuationen	166
4.1.2.3 Unsicherheiten im Ballistischen Koeffizienten	167
4.1.2.4 Genauigkeit und Verfügbarkeit der Bahnmeßdaten	168
4.1.2.5 Beurteilung der Unsicherheiten	169
4.2 Auswahl geeigneter Gebiete für die Positionierung mobiler Bodenstationen	173
4.2.1 Allgemeine Aspekte	173
4.2.2 Mögliche Einsatzgebiete der BREM-SAT Mission	180
4.2.2.1 Positionierungsstrategie	188
4.2.2.2 Bodenstationskonstellation für Experiment 4	190

4.3 Kontaktwahrscheinlichkeiten	192
4.3.1 Kontaktwahrscheinlichkeit für Experiment 4	192
4.3.2 Kontaktwahrscheinlichkeit für Experiment 5	199
4.3.2.1 Methode zur Ermittlung der Erfolgswahrscheinlichkeit	202
4.3.2.1.1 Maximale Erfolgswahrscheinlichkeit	204
4.3.2.1.2 Reale Erfolgswahrscheinlichkeit	205
4.3.2.2 Methode zur Ermittlung der Kontaktwahrscheinlichkeit	208
4.3.3 Wahl des Einschaltzeitpunktes für Experiment 5	210
5 ABLAUF UND ERGEBNISSE DER BREM-SAT MISSION	213
5.1 Die BREM-SAT Mission	213
5.1.1 Technische Daten und Aufgaben des Satelliten	214
5.1.2 Ablauf der Mission	217
5.2 Die Braunschweiger Bodenstation am IfRR	221
5.2.1 Rechnerausstattung der Bodenstation	223
5.2.2 Satellitenempfangsanlage	223
5.3 Bodenstationskontakte und Überflugsequenzen	227
5.3.1 Kontaktzeiten und Überfluggeometrien	227
5.3.1 Verteilung der Überflüge	235
5.4 Dopplermessdaten	237
5.5 Verarbeitung der Dopplermessdaten	243
5.5.1 Kulminationszeitpunkte	246
5.5.2 Sendefrequenzen	247
5.5.3 Genauigkeit der Bahnbestimmung	249
5.5.3.1 Vergleich der Kulminationspunkte	249
5.5.3.2 Zustandsvektoren für die letzten zwei Missionswochen	251
5.6 Analyse der Bahndaten	256
5.6.1 Große Halbachse	256
5.6.2 Rektaszension des aufsteigenden Knotens	258
5.6.2.1 Kontaktzeiten der Bodenstationen Bremen und Braunschweig	259
5.6.3 Argument des Perigäums	263
5.6.4 Exzentrizität	265
5.6.5 Inklination	266
5.7 Analyse des Ballistischen Koeffizienten	267
5.8 Lebensdauerberechnungen	274
5.9 Vorhersage des Wiedereintritts und Positionierung der mobilen Bodenstationen	281
6 ZUSAMMENFASSUNG	297
ANHANG A LITERATUR	303
ANHANG B TABELLEN	323
ANHANG C BULLETIN BEISPIELE	337
ANHANG D KONTAKTWAHRSCHEINLICHKEITEN	345