



Lambert Wanninger, Dresden

Interpolation von GPS-Beobachtungen

Der für GPS-Positionierung notwendige Meßepochenabstand ergibt sich aus dem Bewegungsverhalten des Mobilempfängers. Bei langzeitigen statischen Messungen ist ein Abstand von 15 Sekunden oder sogar 60 Sekunden vollkommen ausreichend. Bei kinematischen Anwendungen wird dagegen mit Intervallen von einer Sekunde oder Bruchteilen einer Sekunde gearbeitet. Für präzise (cm-genaue) Anwendungen müssen auch die Beobachtungen der Referenzstation mit entsprechendem Epochenabstand vorliegen. Dabei ergeben sich sehr große Datenmengen (mindestens 10 MByte pro Tag für Sekundendaten) und somit Probleme bei Datenkommunikation und -archivierung.

Einleitung

Sowohl die 1990 erfolgte Einführung der künstlichen GPS-Signalverschlechterung durch Selective Availability (SA, GEORGIADOU und DOUCET 1990) als auch deren Abschaltung am 2. Mai 2000 hatten nur geringe Auswirkungen auf die relative GPS-Positionierung. Die SA-Satellitenuhrenfehler ließen sich durch Differenzbildung der simultanen Messungen auf zwei Stationen praktisch vollständig eliminieren. Die künstliche Verschlechterung der Satellitenbahnen wurde – mit Ausnahme weniger Testbetriebe – nicht eingesetzt.

Da aber die SA-Satellitenuhrenfehler die kurzperiodischste Fehlerquelle großer Amplitude darstellten, bestimmten sie in starkem Maße die von einer Referenzstation zu übertragende Datenmenge. Die Gültigkeit von Beobachtungskorrekturen war durch SA auf weniger als eine Sekunde bei cm-Genauigkeit und einige Sekunden bei m-Genauigkeit begrenzt. Nach Abschaltung von SA ist es nun möglich, Beobachtungskorrekturen länger zu verwenden, d. h. seltener zu übertragen, ohne Genauigkeitsverluste hinnehmen zu müssen. Für cm-genaue Post-Processing-Anwendungen lassen sich nun längere Datenlücken durch Interpolation ohne Genauigkeitsverluste überbrücken.

Der für GPS-Positionierung notwendige Meßepochenabstand ergibt sich aus dem Bewegungsverhalten des Mobilempfängers. Bei langzeiti-

gen statischen Messungen ist ein Abstand von 15 Sekunden oder sogar 60 Sekunden vollkommen ausreichend. Bei kinematischen Anwendungen wird dagegen mit Intervallen von einer Sekunde oder Bruchteilen einer Sekunde gearbeitet. Für präzise (cm-genaue) Anwendungen müssen auch die Beobachtungen der Referenzstation mit entsprechendem Epochenabstand vorliegen. Dabei ergeben sich sehr große Datenmengen (mindestens 10 MByte pro Tag für Sekundendaten) und somit Probleme bei Datenkommunikation und -archivierung.

Interpolationsalgorithmus und -ergebnisse

Betrachtet man die Pseudostreckenmessungen (Code und Phase) eines GPS-Empfängers, so ist die Entfernung zwischen Satellit und Empfangsantenne die sich am schnellsten verändernde Einflußgröße. Sie kann rechnerisch erfaßt und berücksichtigt werden, indem sie aus der (Näherungs-) Position der Empfangsantenne und den *broadcast*-Satellitenbahnen berechnet wird. Die um die geometrische Entfernung Satellit – Empfangsantenne reduzierten Beobachtungen werden (nach Anbringung der Korrekturen für Satellitenuhr und für relativistische Effekte) als Beobachtungskorrekturen bezeichnet (RTCM 1998) und sind die Ausgangsdaten für die Interpolation (Abb. 1). Fehler der Orbits und der Stationsposition in Zehnermeter-Größenordnung bewir-

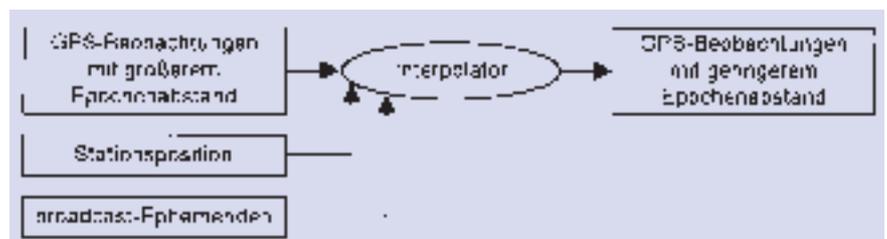


Abb. 1: Ein- und Ausgabedaten für die Interpolation von statischen GPS-Beobachtungen auf der Ebene von Beobachtungskorrekturen.

ken dabei keine Genauigkeitsverluste der interpolierten Daten. Durch Addition der Entfernung Satellit – Empfangsantenne zu den (interpolierten) Beobachtungskorrekturen können abschließend wieder vollständige Beobachtungen erzeugt werden.

Nach Abschaltung von SA gilt, daß die Fehlereinflüsse, die durch relative Positionierung verringert werden sollen (Orbitfehler, ionosphärische und troposphärische Laufzeitfehler), nur einen sehr geringen oder gar keinen Signalanteil mit Perioden von weniger als einer Minute haben. Am kurzperiodischsten sind die Einflüsse kleinräumiger ionosphärischer Störungen. Aufgrund der Kleinräumigkeit der Störungen werden diese Fehlereinflüsse durch relative Positionierung nur unvollständig erfaßt, so daß bei Beobachtungsinterpolation nur mit geringen zusätzlichen Problemen gerechnet werden muß. Weiterhin ist das Auftreten kleinräumiger ionosphärischer Störungen im wesentlichen auf Äquatorregion und Polarregionen beschränkt. In mittleren Breiten sind sie äußerst selten anzutreffen. Stationsabhängige Fehlereinflüsse aufgrund von Mehrwegesignalen und Signalbeugung können einen starken kurzperiodischen Signalanteil aufweisen. Da diese Fehlereinflüsse aber durch relative Positionierung ohnehin nicht verringert werden können, wirken sich die durch sie verursachten Interpolationsfehler auf die relative Positionierung nicht negativ aus.

Bei der Interpolation (und auch Extrapolation) von GPS-Beobachtungsgrößen muß darauf geachtet werden, daß alle Messungen einer Epoche durch denselben Empfängerfehler beeinflusst werden. Dies gelingt, wenn dieselbe Satellitenkonstellation in allen Ausgangsepochen vorliegt. Fehlen einzelne Messungen, so kann entweder der betroffene Satellit oder die betroffene Epoche nicht verwendet werden. Bei Verwendung von zwei Ausgangsepochen für eine lineare Interpolation ist die gestellte Bedingung immer erfüllt.

Es wurden mehrere Interpolationsalgorithmen getestet. Bei aktivier-

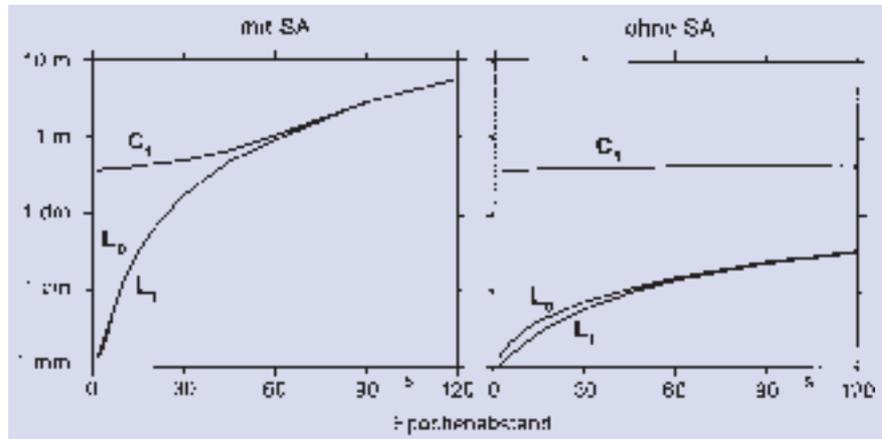


Abb. 2: Interpolationsfehler (Standardabweichung) in Abhängigkeit vom Abstand der Ausgangsepochen für Codebeobachtungen (C_1 – erste Frequenz) und Phasenbeobachtungen (L_1 – erste Frequenz, L_0 – ionosphären-freie Linearkombination) eines Trimble 4000 SSI.

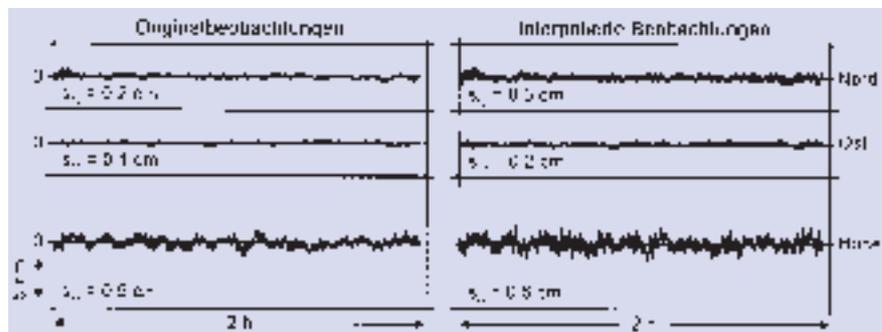


Abb. 3: Koordinatenfehler der epochenweisen L_1 -Koordinatenlösung einer kurzen Basislinie (3 m) mit Angabe der Standardabweichungen bei Verwendung der Originalbeobachtungen beider Stationen im Sekundentakt (links) und bei interpolierten Sekundendaten einer Station basierend auf einem Ausgangsintervall von 15 Sekunden (rechts).

tem SA wurden die besten Ergebnisse mit einem quadratischen Polynom basierend auf drei Meßepochen erzielt. Ohne SA ergaben sich die besten Ergebnisse mit einem linearen Interpolationsansatz auf der Basis von jeweils zwei Messungen. Hierbei werden die Ausgangsepochen unverändert übernommen und nur die Beobachtungen der Zwischenepochen berechnet.

Die Interpolationsfehler wurden aus der Differenz von Originalmessungen und interpolierten Beobachtungen abgeleitet. Hierbei ist epochenweise der Empfängerfehler zu berücksichtigen, der sich in Originaldaten und interpolierten Daten unterscheiden kann, ohne daß dies Auswirkungen auf die relative Positionierung hat. Zum Test der Algorithmen wurden Trimble-4000-SSI-Beobachtungen verwendet, die mit einem Intervall von einer Sekunde aufgezeichnet worden waren. Die

Originaldaten in RINEX-Format wurden durch Auswahl der gewünschten Epochen ausgedünnt und dann wieder durch Interpolation auf einen Epochenabstand von einer Sekunde aufgefüllt. Die Interpolationsfehler sind insbesondere eine Funktion des Abstands der Ausgangsepochen (Abb. 2). Unter SA lagen die Interpolationsfehler bis zu einem Ausgangsepochenabstand von etwa 3 Sekunden auf dem Niveau des Meßrauschens. Mit größer werdendem Intervall wuchsen sie schnell an. Ohne SA liegen dagegen die Interpolationsfehler bis etwa 10 Sekunden Epochenabstand auf Meßrauschniveau. Auch mit größer werdendem Abstand wuchsen sie nur langsam an.

Die Auswirkung der Interpolationsfehler auf die Koordinatenlösungen wurde an statisch beobachteten Basisliniendaten getestet. Die Ergebnisse zweier Basislinien, die nach

dem 2. Mai 2000 – also nach Abschaltung von SA – gemessen wurden, werden hier vorgestellt. Es kamen Trimble-4000-SSI-Empfänger zum Einsatz. Die Meßdaten wurden mit einem Epochenabstand von einer Sekunde aufgezeichnet. Auf einer Station, der „Referenzstation“, wurden die RINEX-Daten durch Beobachtungsselektion auf einen größeren Epochenabstand ausgedünnt und dann durch Interpolation wieder auf Sekundendaten aufgefüllt. Zur Ausdünnung wurde ein Epochenabstand von 15 Sekunden gewählt, da dieser häufig zur Datenarchivierung verwendet wird.

Für die kurze Basislinie (3 m) und einer epochenweisen Koordinatenlösung basierend auf L_1 -Beobachtungen ergeben sich geringfügig stärker verrauschte Koordinaten nach Ausdünnung und Interpolation (Abb. 3). Diese zusätzlichen kurzperiodischen Fehler der Meßwerte auf Millimeterniveau beeinflussen Mehrdeutigkeits- und Koordinatenlösung aber weit weniger als die immer vorhandenen längerperiodischen Mehrwegeinflüsse.

Für die längere Basislinie (6 km) sind die Koordinatenlösungen basierend auf der ionosphärenfreien Linearkombination der Phasendaten dargestellt (Abb. 4). Aufgrund des starken Einflusses der Mehrwegeeffekte auf diese Linearkombination sind hier keine Unterschiede zwischen Originalbeobachtungen und interpolierten Referenzbeobachtungen zu erkennen.

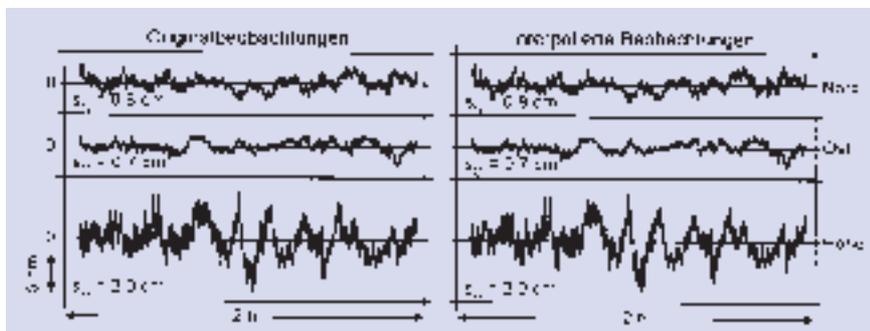


Abb. 4: Koordinatenfehler der epochenweisen ionosphärenfreien (L_0) Koordinatenlösung einer 6 km langen Basislinie mit Angabe der Standardabweichungen bei Verwendung der Originalbeobachtungen beider Stationen im Sekundentakt (links) und bei interpolierten Sekundendaten einer Station basierend auf einem Ausgangsintervall von 15 Sekunden (rechts).

Praktische Bedeutung der Interpolation von GPS-Beobachtungen

Da die nachträgliche Interpolation von Beobachtungsdaten einer Referenzstation auf das für präzise relative kinematische Vermessung notwendige Intervall von einer Sekunde oder Bruchteilen einer Sekunde ohne bedeutende Genauigkeitsverluste möglich ist, kann das Datenvolumen von Referenzstationsdaten drastisch verringert werden. Das Datenvolumen beträgt bei 15 Sekunden Epochenabstand nur ein Fünftel des Datenvolumens bei Sekundenintervall: z. B. 0,7 MByte pro Tag gegenüber 10 MByte pro Tag. Datenübertragung und -archivierung können so wesentlich effektiver durchgeführt werden.

Vorteile ergeben sich auch daraus, daß nun Referenzbeobachtungen mit geringerem Epochenabstand erzeugt werden können, als ursprünglich zur Datenaufzeichnung am Empfänger eingestellt war. So ist es nun auch möglich, Beobachtungsdaten mit einem Intervall von Bruchteilen einer Sekunde zu erzeugen, auch wenn der Referenzstationsempfänger dafür nicht ausgestattet ist.

Ausblick: Extrapolation für Echtzeitanwendungen

Das Abschalten von SA hat nicht nur Auswirkungen auf die Interpolation von GPS-Beobachtungsdaten, sondern auch auf die Extrapolation, wie sie bei präzisen Echtzeitanwendungen (RTK – Real Time Kinematic) von Bedeutung ist.

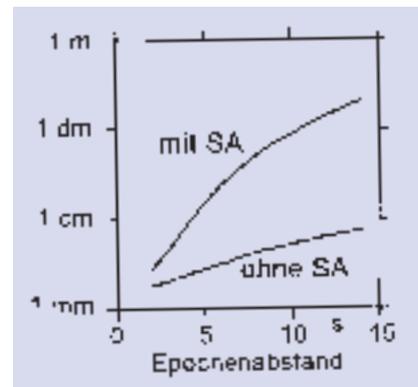


Abb. 5: Extrapolationsfehler (Standardabweichung) für Phasenbeobachtungen in Abhängigkeit vom Abstand der Ausgangsepochen für die Beobachtungsdaten aus Abb. 2.

tion, wie sie bei präzisen Echtzeitanwendungen (RTK – Real Time Kinematic) von Bedeutung ist. Auch die Extrapolation sollte zweckmäßigerweise auf Ebene von Beobachtungskorrekturen erfolgen.

Basierend auf den schon oben verwendeten Meßdaten wurde der Extrapolationsfehler aus der Differenz zwischen extrapolierten und tatsächlich gemessenen Beobachtungen als Funktion des Ausgangsepochenabstands bestimmt. Für SA-Daten wurden die besten Ergebnisse mit einem Prädiktionsmodell zweiter Ordnung erzielt. Bei den nicht durch SA verschlechterten Daten erzeugt ein Modellansatz erster Ordnung die besten Ergebnisse. Ohne SA behalten die Beobachtungskorrekturen sehr viel länger ihre Gültigkeit (Abb. 5). Das zu übertragende Datenvolumen kann ohne bedeutende Genauigkeitsverluste um einen Faktor von 2 bis 3 verringert werden. Verzögerungen durch die Datenübertragung wirken sich nun viel schwächer auf die Positionierung aus.

Dank

Das Landesvermessungsamt Sachsen stellte Testdatensätze zur Verfügung. Weitere Messungen wurden von Herrn Torsten Hentschel durchgeführt.

Literatur

GEORGIADOU, Y., DOUCET, K. (1990): The Issue of Selective Availability. GPS World, Sep./Okt. 1990, 53–56.

RTCM (1998): RTCM Recommended Standards for Differential GNSS Service, Version 2.2, Radio Technical Commission for Maritime Services Paper 11-98/SC104-STD, Alexandria Va., USA, Januar 1998.

Anschrift des Verfassers:
Dr.-Ing. LAMBERT WANNINGER,
Geodätisches Institut, TU Dresden,
01062 Dresden

Zusammenfassung

Bei kinematischer GPS-Vermessung wird mit Meßepochenabständen von einer Sekunde oder Bruchteilen einer Sekunde gearbeitet. Für präzise Post-Processing-Anwendungen müssen auch die Beobachtungen der Referenzstation mit entsprechendem Intervall vorliegen. Es wurde ein Interpolationsalgorithmus entwickelt, mit dem die Beobachtungsdichte der Referenzstationsdaten ohne bedeutende Genauigkeitsverluste auf den gewünschten Epochenabstand erhöht werden kann. Das zu übertragende und abzuspeichernde Volumen der Referenzstationsdaten kann damit um mehr als eine Größenordnung verringert werden.

Abstract

Kinematic GPS positioning is performed with data sampling rates of one second or fractions of a second. Precise applications require reference observations with the same observation interval. An interpolation algorithm has been developed which increases the data rate without a significant loss of accuracy. The amount of reference station data can thus be reduced by more than one order of magnitude which facilitates data communication and archiving.

Studium der Geoinformatik in Moskau

Die Moskauer Staatliche Universität für Geodäsie und Kartographie, als Landmesserschule 1779 gegründet, 1835 in Konstantinowener Landmesserinstitut umgebildet, 1930 in Moskauer Geodätisches Institut und 1936 in Moskauer Institut für Ingenieure der Geodäsie, Aerophotogrammetrie und Kartographie (MIIGAiK) umbenannt, seit 1993 mit der jetzigen Bezeichnung, brachte seit 1917 1600 Ingenieure, mehr als 600 Kandidaten (Dr.-Ing.) und 100 Doktoren der Wissenschaften hervor. In den letzten Jahren entstanden die Fakultäten Angewandte Kosmonautik sowie Leitung des Territoriums und auf dem Gebiet von Bodenrecht und Architektur die Humanitäre Fakultät, in Verbindung damit die Lehrstühle für Kataster und Grundlagen der Bodennutzung sowie Ökonomik der städtischen Landnutzung. Traditionelle Fachgebiete wurden mit neuem Inhalt versehen, neue – wie Geoinformatik – kamen hinzu.

Die moderne Geoinformatik befasst sich mit der Untersuchung der Räume und zeitlichen Prozesse, der Erscheinungen und Systeme in Maßstäben im Vergleich mit Objekten auf der Erdoberfläche. Sie kann als Verallgemeinerung einer Reihe von Geowissenschaften betrachtet werden und hat vieles mit der Informatik gemeinsam. Unterteilt werden kann sie in Allgemeine, Spezielle und Angewandte Geoinformatik.

Die Allgemeine Geoinformatik befasst sich mit der Untersuchung und Entwicklung der wissenschaftlichen Grundlagen, mit Konzeptionen und verallgemeinernden Analysen der Geoinformatik. Sie kann als fundamentaler Teil angesehen werden.

Die Spezielle Geoinformatik, mit der Bearbeitung und Qualität von Geoinformationstechnologien verbunden, dient als Grundlage für die Analyse der angewandten Systeme, von Bearbeitungsmethoden und der Qualitätsbewertung.

Die Angewandte Geoinformatik stellt die Integration der Methoden und Technologien anderer Wissenschaften in Geoinformationssysteme und -technologien dar.

Der verallgemeinernde Begriff für ein Informationssystem in der Geoinformatik ist das Geoinformationssystem (GIS). Ein GIS ist ein für die Bearbeitung von räumlichen und zeitlichen Daten bestimmtes automatisiertes integriertes Informationssystem. Seine Besonderheiten sind

- die Integration von geographischen Informationen in das GIS – obwohl die Mehrzahl der mit dem GIS zu lösenden Aufgaben weit von der Geographie entfernt ist,
- die Integration der Technologie automatisierter Projektierungssysteme – obwohl die zu lösenden Aufgaben nicht zur Projektierung zählen,
- die Zugehörigkeit – der Definition nach – zu den Informationssystemen – obwohl es der funktionalen Bedeutung nach zur Klasse der Datenverarbeitungs- und -erkennungssysteme gehört,
- die Einordnung sowohl in die Expertensysteme als auch in die Expertentechnologien.

Diese Fakten werden bei der Ausbildung an der Moskauer Staatlichen Universität für Geodäsie und Kartographie berücksichtigt.

Aus: Obučenie v oblasti geoinformatiki v Moskovskom gosudarstvennom universitete geodezii i kartografii. Von Maksudova, L.G., und Cvetkov, V. Ja. – Geodez. i Kartogr., Moskva (2000) 2, S. 51 – 53

DEUMLICH