

RTK GNSS-Messungen mit Einfrequenz-Empfängern

Werner STEMPFHUBER

Zusammenfassung

Die genaue Bestimmung von 2D- oder 3D-Trajektorien bewegter Objekte können mit Inertialmesssystemen, mit zielverfolgenden Tachymetern und mit satellitengestützten Systemen (Global Navigation Satellite System, GNSS) für verschiedene Navigationsaufgaben durchgeführt werden. Quasi-statische Messaufgaben, wie z. B. bei der Bauwerksüberwachung oder -schwingung müssen häufig auch mit kinematisch-tauglicher Messsensorik erfasst und in Echtzeit ausgewertet werden.

Differenzielle GNSS-Verfahren können Absolutgenauigkeiten unter einem Meter liefern, mit regionalen Ergänzungssystemen wie z. B. EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) oder WAAS (Wide Area Augmentation System) liegen sie häufig bei Genauigkeitsbereichen von wenigen Dezimetern. Ansätze von phasengeglätteten Codemessungen im statischen oder kinematischen Precise Point Positioning Verfahren (PPP) sind für zukünftige Anwendungen vielversprechend. Die Initialisierungszeit ist hierbei sehr zeitintensiv. Somit ist dieser Ansatz für viele Anwendungen nicht geeignet. Bei genauen RTKGNSS-Messungen im Zentimeterbereich werden meist Mehrfrequenz-Empfänger verwendet. Hierbei müssen Trägerphasen-Mehrdeutigkeiten berechnet und angewendet werden. Dies wird in den verschiedenen Bereichen der Geodäsie seit vielen Jahren angewendet.

Verschiedene Forschungsarbeiten mit Low-Cost-Empfängern (L1 GPS-Einfrequenz-Empfänger und auch L1 GLONASS-Empfänger) haben gezeigt, dass bei Satellitenbedingungen mit 5-6 Satelliten (wenig Abschattung und Minimierung der Störeinflüsse) zentimetergenaue 3D-Positionen mit statischen Positionsdaten (z. B. GLABSCH et al. 2009) aber auch mit kinematischen Positionsdaten (STEMPFHUBER 2011, 2012) erreicht werden können.

Diese Publikation stellt neben der Motivation zunächst das modulare Messverfahren des RTKGNSS-Low-Cost-Systems mit den detaillierten Beschreibungen der Subsysteme vor. Dabei werden Optimierungen der verschiedenen Einzelkomponenten ausführlich behandelt und diskutiert. Eine umfassende Dokumentation der Untersuchungen und Entwicklungen in den Bereichen klassischer Messaufgaben, geodätisches Monitoring und Ingenieurnavigation beschreiben das Leistungsvermögen des Low-Cost-RTKGNSS-Systems.

1 Motivation und Stand der Technik

Das globale Navigationssatellitensystem GNSS wird für viele Aufgaben der 3D-Positionsbestimmung und der Navigation verwendet. Im Vermessungswesen werden die globalen Satellitensysteme (GPS, GLONASS, Galileo und COMASS) mit oder ohne den satellitengestützten Ergänzungssysteme (EGONAS, WAAS, MSAS, GAGAN oder IRNSS) meist

für die Punktaufnahme und -absteckung, Netzmessungen, Überwachungsmessungen, und Navigationsaufgaben verwendet. Zahlreiche nationale und regionale Referenzdienste werden dabei eingesetzt. Dabei existiert meist die Auffassung, dass für Messungen mit sehr hohen Genauigkeitsanforderungen geodätische Mehrfrequenz-Empfänger und -Antennen einzusetzen sind. Mehrfrequenz-Empfänger können die Einflussgrößen zur statischen oder kinematischen 3D-Positionsbestimmung minimieren.

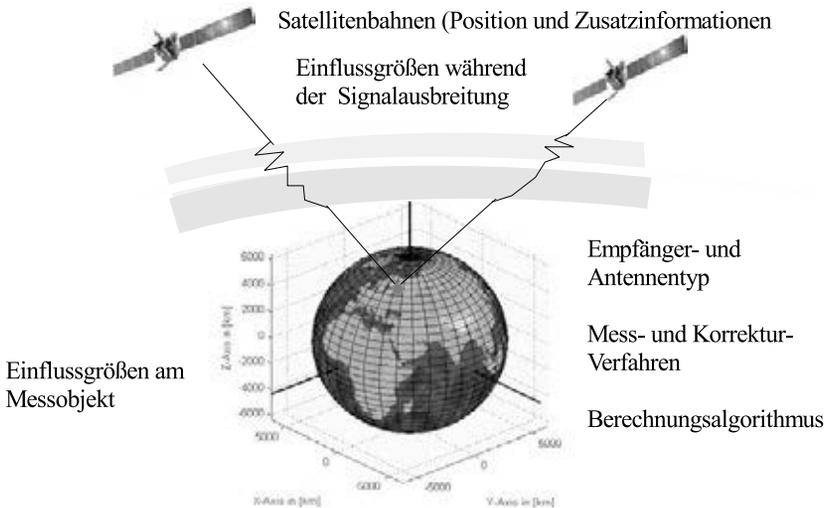


Abb. 1: Überblick der GNSS-Einflussgrößen

Verschiedenste Forschungsarbeiten belegen seit einigen Jahren das enorme Potenzial von Einfrequenz-Empfängern (z. B. SCHWIEGER 2005). Dabei werden in der Regel die Messdaten der L1-Frequenzen von GPS-Empfängern aufgezeichnet und im Post-Processing-Verfahren ausgewertet. Der Einsatz von Einfrequenz-Empfänger für die Punktaufnahme und -absteckung, Überwachungsmessungen, sowie Navigationsaufgaben erfordert ein RTKGNSS Verfahren (Real Time Kinematic). Dieser Themenbereich mit lokalen Referenzstationen oder NTRIP-Korrekturdaten aus einem Referenznetz wird in diesem Beitrag umfassend diskutiert. Dabei werden die verschiedenen PPP-Ansätze (Precise Point Positioning) und SBAS-Ansätze (Satellite Based Augmentation Systems) nicht behandelt.

1.1 Anforderungen für Vermessungs- und Navigationsaufgaben

Durch die Kombination von GPS und GLONASS-Signalen bei echtzeitfähigen Mehrfrequenz-GNSS-Empfängern (in Zukunft noch weitere Verfahren) wird in der Regel eine stabile 3D-Position in Abhängigkeit der Umgebungseinflüsse erreicht. RTKGNSS-Systeme mit Korrekturdaten von einer lokalen Basisstation oder Referenzdiensten erreichen zentimetergenaue Koordinaten. Stabile Algorithmen zur Ambiguitätenlösung sind für den Einsatz zwingend erforderlich. Die Initialisierungszeit zur Lösung der Trägerphasen-Mehrdeutigkeiten (Time to first fix TTFF) beträgt bei geodätischen Empfängern oftmals weniger als eine Minute nach einem Systemkaltstart. Selbstverständlich muss die Berechnung des

Integerwerts bei der Trägerphasen-Mehrdeutigkeitslösung während der Bewegung möglich sein. GNSS-basierte Monitoringsysteme können ebenfalls Bewegungen in diesem Genauigkeitsbereich detektieren. Außerdem sind Mehrfrequenz-GNSS-Systeme ideal geeignet um Schwingungsmessungen in Echtzeit durchzuführen (STEMPFHUBER 2012). Zusätzlich ist die Ausgabe von hochgenauen Zeitimpulsen zur Synchronisation mit weiteren Messdaten wichtig. Die Ausgabe der Echtzeitdaten sollte in dem standardisierten NMEA-Format erfolgen. Somit ist die Integration in bestehende Softwareschnittstellen gegeben.

Die wesentlichen Anforderungen eines RTKGNSS-Systems werden in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 1: Anforderungen an ein RTKGNSS-System (Mehrfrequenz-Empfänger)

Empfänger und Antenne	Initialisierungszeit	Messgenauigkeit	Messfrequenz	Stabilität der Trägerphasenlösung	Zeitausgabe	Basislinienlänge
Mehrfrequenz-Empfänger und -antennen	< 60 Sek.	2cm Lage (1σ) 3cm Höhe (1σ)	Bis zu 10-100 Hz (nicht interpoliert)	100% bei normalen Umgebungsbedingungen	> 10 μ s	~30 km

Um ein RTKGNSS-Low-Cost-System in der Praxis für die Einzelpunkterfassung, Absteckungsaufgaben oder Monitoringaufgaben einzusetzen, müssen ähnliche Eigenschaften erreicht werden (vgl. Tab. 3). Wesentliche Vorteile von Low-Cost-Systemen sind neben den geringen Anschaffungskosten das minimale Gesamtgewicht unter 1 kg und der geringe Stromverbrauch. Dadurch entsteht eine erhebliche Flexibilität. Der Einsatz eines Low-Cost-RTKGNSS-Rovers erfordert eine leichte und benutzerangepasste Lotstab-Lösung.

RTKGNSS-Systeme verwenden lokale oder netzbasierte Korrekturinformationen. Diese Informationen für die Lösung der Trägerphasen-Mehrdeutigkeit werden standardisiert im RTCM-Format übertragen. In der Praxis werden hierzu Übertragungsmedien wie Funk, Bluetooth, oder Ad-hoc-WLAN-Netze verwendet.

2 Aufbau des RTKGNSS-Low-Cost-Systems

2.1 Allgemeine Komponenten

Mehrfrequenz-Empfänger bestehen heute für klassische Vermessungsaufgaben meist nur noch aus einer Antenne, einem integrierten Empfänger und einer Bedieneinheit mit integrierter Batterie und Datenspeicherung. Für Navigationsaufgaben reicht die kombinierte Antennen- und Empfängerlösung aus. Die NMEA-Echtzeitpositionen können via Bluetooth, Funk oder Kabel an die Anwendungen übergeben werden. Bei Baumaschinenanwendungen werden häufig robuste Empfänger mit IP Schutzklassen integriert. Die Kommunikation erfolgt meist über ein CAN-BUS-System. Bei landwirtschaftlichen Anwendungen existieren häufig in die Fahrerkabine verbaute GNSS-Systeme. Diese Systeme müssen ebenfalls dem IP-Standard entsprechen.

Für die Verwendung von Low-Cost-RTKGNSS-Systemen sind folgende Komponenten zwingend erforderlich:

- **Rovereinheit:**
Empfänger und Antenne mit Stromversorgung, Bedieneinheit mit zur Konfiguration, Anwendungssoftware, Rohdatenspeicherung und NMEA-Positionsausgabe;
- **Referenzeinheit:**
entweder via lokalem Empfänger und Antenne mit Stromversorgung, Bedieneinheit zur Konfiguration,
oder via NTRIP-Verfahren mit RTCM-Daten aus einem Referenznetz;
- Software zur Basislinienauswertung und 3D-Positionsberechnung;
- Kommunikation via Kabel, Funk, W-LAN, GSM oder Bluetooth aller Subsysteme untereinander.

Um ein solches Hard- und Softwaresystem zu realisieren, existieren zahlreiche Einzelmodule. Solche Systeme können für individuelle Messaufgaben zusammengesetzt und konfiguriert werden. Das folgende Gesamtsystem wurde in verschiedenen Forschungsarbeiten an der Beuth Hochschule für Technik Berlin entwickelt und eingesetzt.

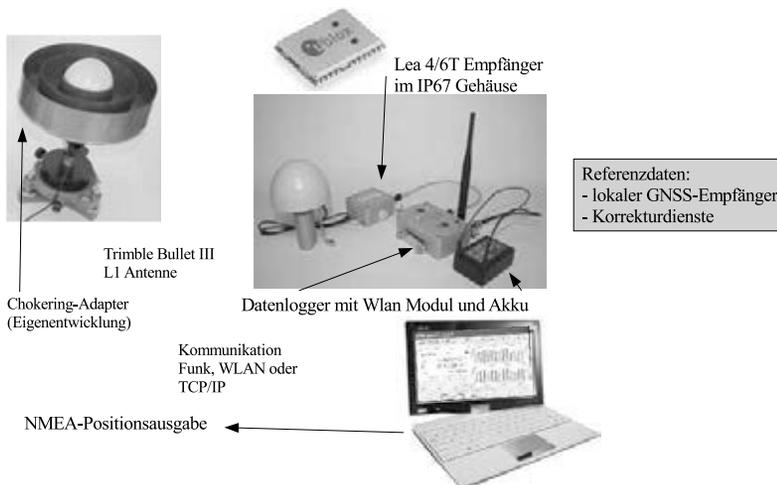


Abb. 2: Modulare Systemkomponenten

Das modulare Gesamtsystem an der Beuth Hochschule für Technik Berlin basiert vorrangig auf den kostengünstigen uBlox-Empfänger (<http://www.u-blox.com/>). Die uBlox L1-Empfänger Lea4/6T können GPS-Daten im veröffentlichten Rohdatenformat ubx binär ausgeben. Das neue Positionsmodul Lea7T kann GPS, GLONASS, Galileo, QZSS und SBAS-Signale verarbeiten. Untersuchungen wurden bisher mit diesem Modul noch nicht durchgeführt. Das u-Center ermöglicht die Empfängerkonfiguration der notwendigen Rohdaten für die Echtzeitauswertung. Die Integration des Moduls in ein IP67-Gehäuse ist ideal für den Feldeinsatz (vgl. Abb. 2). Untersuchungen mit der Low-Cost-Antenne Trimble Bullet III ergaben gute Gesamtergebnisse. Zur Verringerung von Multipath wurden verschiedene Chokering-Adapter im Rahmen der Forschungsassistenz V und VI zusammen mit der Firma Ing. J. H. Gerstenberg (JHG) gebaut.

Antennenkalibrierungen an den beiden Einrichtungen der Senatsverwaltung Berlin und der TU Dresden zeigten die signifikante Verbesserung mit einem solchen Zusatz (CARIUS 2011).

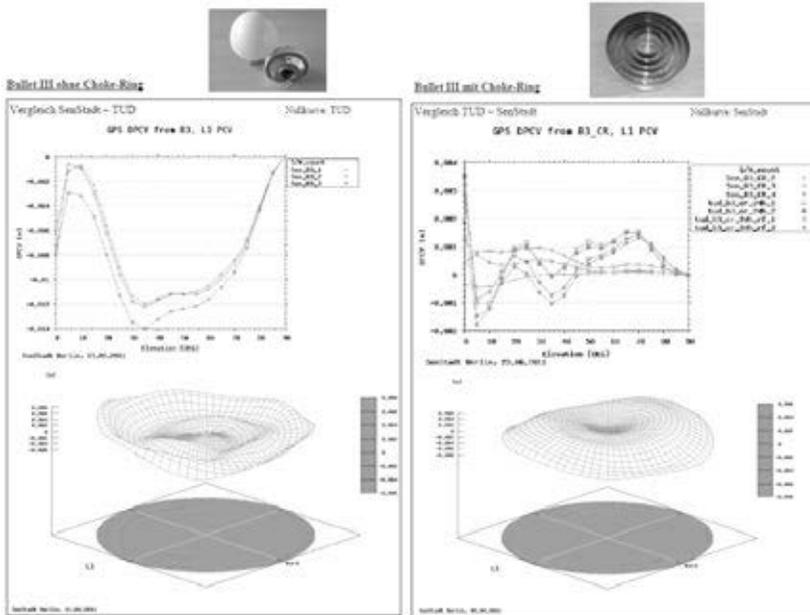


Abb. 3: Ergebnisse der Antennenkalibrierung ohne und mit dem Choking-Adapter

Der Einsatz des Datenloggers ermöglicht die kabellose Datenübertragung an einen Rechner via einem Ad-hoc-W-LAN-Modul. Zusätzlich können dabei die ubx-Rohdaten auf einer internen SD-Karte gespeichert werden. Der externe Akku versorgt das Gesamtsystem mit Strom. Dieser Aufbau kann daher auch als autonome Rovereinheit zur Datenregistrierung verwendet werden. Das Gesamtgewicht beträgt je nach Konfiguration einige Hundert Gramm. Die lokale Referenzstation kann mit einem identischen Systemaufbau betrieben werden. Selbstverständlich kann die Zusammensetzung der einzelnen Komponenten unterschiedlich aussehen. So wurden z. B. geodätische Antennen (u. a. die Trimble Zephyr-Antenne) zum Vergleichen mit L1-Low-Cost-Antennen untersucht (HAUSCHILD 2012).

2.2 Algorithmus zur Basislinienberechnung in Echtzeit

Eine weitere zentrale Komponente bei diesem Ansatz ist die Software zur Basislinienberechnung in Echtzeit. Hierbei müssen vor allem die Rohmessdaten vom Empfänger und der Referenzinformation in Echtzeit vorliegen und ausgewertet werden. Nach der Initialisierung und der Trägerphasenlösung muss für RTK-Anwendungen die 3D-Positionsinformation an einer Schnittstelle zur Verfügung stehen. Durch das Open-Source-Projekt RTKLib (www.rtklib.com) stehen solche Algorithmen frei zur Verfügung. Es ermöglicht GNSS-Basislinienrechnungen aus RINEX-Daten mit dem Unterprogramm RTKPost und stellt somit eine kostenlose Berechnungsalternative zu den bekannten GNSS-Auswertepro-

grammen der Hersteller oder der Berner GNSS-Auswertesoftware dar. Die Funktionsweise der Trägerphasen-Mehrdeutigkeitslösung ist in TAKASU (2008) und TAKASU (2009) sowie in den Tutorials auf der Webseite erläutert. Diese basierend auf der Methode der Least Square Estimation (beschrieben in TEUNISSEN (1995) und CHANG (2005)). Statische und kinematische PPP-Auswertungen sind ebenfalls möglich und wurden bereits in Forschungsarbeiten angewendet und untersucht. Berechnungen zur Bestimmung von Absolutorientierungen sind in RTKLib mit dem Berechnungsverfahren Moving-Base realisierbar. Folgende Module sind gegenwärtig verfügbar:

Tabelle 2: Funktionen im Open Source Projekt RTKLib

Programmname	Funktion	Bemerkung
RTKPost	GNSS-Basislinienberechnung,	Datenimport Rinex
RTKNavi	RTK-Echtzeitberechnung	Implementierung vieler Rohdatenformate
RTKPlot	Grafische Positionsausgabe	Viele Auswahlmöglichkeiten
RTKConv	Konvertierung der implementierten Rohdatenformate in Rinex	
STRSVR	Übertragung der Rohdaten via Internet	Serial, TCP Client/Server, NTRIP, NTRIP, File und HTTP
RTKGet	Download GNSS Daten	
SRCTBLBROWS	NTRIP Browser	Kontrolle des NTRIP-Datenstroms
pos2kml	GoogleEarth-Darstellungen	Visualisierung von Navigationsaufgaben (vgl. Abb. 7)
GPSTool	Matlabfunktion für Antennenkalibrierung	Untersuchung des Antennenphasenzentrums

Das RTKLib Unterprogramm RTKNavi ist das zentrale Auswerteprogramm im RTK-GNSS-Low-Cost-Gesamtsystem. Die Berechnungsoptionen und -parameter sind mit dem Unterprogramm RTKPost identisch. In der aktuellen Version 2.4.2 vom 29.4.2013 können Einfrequenz- und Mehrfrequenz-Empfänger der Firmen Novatel, uBlox, Superstar, Sky-Trac, Hemisphere in Echtzeit verwendet werden. Zusätzlich können RTCM2/3- und RINEX- Datensätze verarbeitet werden. Verschiedene Positionsmodi sind verfügbar (vgl. Systembeschreibung im Manual). Für Überwachungs- und Navigationsaufgaben wurde ausschließlich das Auswerteverfahren „kinematisch“ verwendet. Zur Integerer Ambiguity Resolution existieren ebenfalls unterschiedliche Lösungstypen. Eine weitere wesentliche Funktion ist die Ausgabe der Echtzeitpositionen in NMEA-Format. Diese werden standardmäßig in GGA, GSA, GSV und RMC ausgegeben. Die aktuelle Version ist als „Binary AP Package for Windows (x86 CPU)“ und als „Full Package with Source Programs“ verfügbar. Mit dem Quellcode und den Zusatzfunktionen kann die Software auch für Linux oder Tablet-Anwendungen kompiliert werden. Die Lizenzierung der RTKLib-Plattform ist auf das GNU General Public License Version 3 (GPLv3) Format ausgerichtet. Mit der neuen RTKLib Version wurde die Lizenzierung auf die Form BSD 2-cause geändert. Somit kann der Algorithmus bei kommerziellen Produkten komplett eingebunden werden, d. h. die Verwendung des C++ Codes in bestehende Entwicklungen ist möglich (STEMPFHUBER 2013).