

DISS. ETH NO. 23796

# Co-location of Geodetic Observation Techniques in Space

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

BENJAMIN MÄNNEL

Dipl. Ing.

born on 11.09.1987

citizen of Germany

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. M. Rothacher, examiner  
Prof. Dr. U. Hugentobler, co-examiner  
Prof. Dr. R. Haas, co-examiner

2016

## Abstract

This thesis describes the combination of geodetic observation techniques on-board satellites. This so-called co-location in space provides a considerable potential regarding the improvements needed to realize a long-term accurate and stable terrestrial reference frame. The space ties (i.e., the offset vectors between the on-board sensors) introduces new geometrical connections between sensors of different space geodetic techniques. This space ties can be provided easily to each fundamental site via space geodetic observations. Consequently, co-location in space allows to assess technique-specific error sources as systematic effects can be addressed either to a certain station or to a certain technique. Moreover, the additional introduced orbit dynamics improve the estimation of several geodetic parameters. Within this thesis the following core topics concerning co-location in space are discussed: orbit determination, the combination of ground and space GNSS observations, and VLBI Earth-orbiting satellite tracking.

Highly accurate orbit determination is the prerequisite for a suitable co-location in space. Based on the Earth observation satellite missions GRACE, GOCE, and OSTM/Jason-2 orbit determination and the impact of modeling non-gravitational perturbations is studied. The overall reached orbit accuracies are at the level of a few centimeters. The combination of ground and space-geodetic GNSS observations is studied based on the GPS observations derived by 53 ground stations and the four LEOs (low Earth orbiter). Adding one LEO to the ground-only processing decreases the formal errors of weekly geocenter estimates by around 20% which is eight times more than expected due to the increased number of observations. This shows the considerable potential of the combination of ground and LEO data. Comparing the derived geocenter time series against results from satellite laser ranging (SLR) shows a good agreement for annual amplitudes, whereas the annual phases shows considerable discrepancies in the x- and the z-component. Geocenter coordinates derived from surface load density coefficients estimated in a long-term solution show a better agreement to SLR solutions but without a significant impact of additional LEOs. Using the gravitational constraint GPS satellite antenna phase center offsets were estimated based on ground and LEO observations. The results show a significant benefit for the horizontal offsets as the introduced LEOs help to dissolve limiting correlations. Concerning single-frequency VLBI satellite tracking the L4R method is introduced to derive ionosphere delay corrections based on co-located GNSS observations. A 1 cm daily station coordinate repeatability is achieved in a single-frequency GNSS processing while introducing the L4R corrections. Differences to ionospheric delays derived from VLBI observations show also a good agreement. As VLBI satellite tracking is currently in an experimental stage Monte-Carlo simulations were performed for eight different satellite orbit types. For a GNSS constellation tracking, station coordinate repeatabilities are at the level of 0.7 and 1.2 cm for a regional and a global network, respectively. Station coordinate repeatabilities of around 1 cm were derived for simulated VLBI observation to a fictitious LEO with an altitude of 2000 km. The station coordinates estimated from simulated observations to E-GRIP and E-GRASP/Eratosthenes show larger uncertainties.

Based on the results suggestions for future action items regarding co-location in space were formulated. The most important recommendations are, that the combination of ground- and space GNSS observations provides a considerable benefit for the determination of several parameters and that ionosphere delay corrections should be derived from co-located GNSS observations.

## Zusammenfassung

Diese Arbeit beschreibt die Kombination geodätischer Weltraumverfahren auf Satellitenebene (*co-location in space*). Dieses Verfahren bietet entscheidende Möglichkeiten für die Realisierung eines langzeitstabilen terrestrischen Referenzrahmens. Die *space ties* (d.h. die Verknüpfungsvektoren der Sensoren an Bord des Satelliten) stellen neue geometrischen Verbindungen zwischen den verschiedenen Weltraumverfahren dar und stehen über die geodätischen Beobachtungen jeder Fundamentalstation zur Verfügung. *Co-location in space* erlaubt die Analyse verfahrensspezifischer Fehlereinflüsse da systematische Effekt einzelnen Statio-

nen oder Verfahren zugeordnet werden können. Darüber hinaus wirkt sich die zusätzliche Bahndynamik positiv auf die Schätzung geodätischer Parameter aus. In dieser Arbeit werden die drei Hauptthemen der Kombination auf Satellitenebene behandelt: Satellitenbahnbestimmung, Kombination von boden- und satellitenbasierten GNSS-Beobachtungen und VLBI Beobachtungen zu erdnahen Satelliten.

Hochgenaue Satellitenbahnen sind die Vorbedingung einer Kombination auf Satellitenebene. Die Bahnbestimmung und der Einfluss nicht-gravitativer Bahnstörungen wird für die niedrigfliegenden Satelliten (LEO, *low Earth orbiter*) GRACE, GOCE und OSTM/Jason-2 betrachtet. Insgesamt wurden Bahngenauigkeiten im Bereich weniger Zentimeter erreicht. GPS-Beobachtungen von 53 Bodenstationen und den vier erwähnten Satelliten wurden gemeinsam ausgewertet um die Kombination von boden- und satellitenbasierten GPS-Beobachtungen zu studieren. Dabei zeigte sich, dass eine Reduktion des formalen Fehlers der wöchentlichen Geozentrumsbestimmung um 20% durch die Hinzunahme eines einzelnen LEOs erreicht werden kann. Das Verbesserungspotential dieser Satelliten zeigt sich auch darin, dass die Reduktion etwa achtmal größer ist als durch die höhere Beobachtungszahl erwartet. Im Vergleich zu SLR zeigen die Geozentrumszeitreihen für die jährlichen Signale ähnliche Amplituden aber eine deutliche Phasenverschiebung. Wird das Geozentrum über Oberflächenauflastkoeffizienten bestimmt zeigt sich eine bessere Übereinstimmung mit SLR aber ein geringerer Einfluss der LEO GPS-Daten. GPS-Satellitenantennenphasenzentren, die in einer kombinierten Lösung unter Ausnutzung des Gravitationszhangs bestimmt werden, zeigen deutlich stabilere horizontale Offsets da die LEOs zur Auflösung limitierender Korrelationen beitragen. Zur Korrektur der ionosphärischen Laufzeitverzögerung bei VLBI-Beobachtungen erdnaher Satelliten auf einer Frequenz wurde die L4R Methode eingeführt, die die Bestimmung entsprechender Korrekturen durch benachbarte GNSS-Beobachtungen erlaubt. Unter Berücksichtigung dieser konnten Stationskoordinaten in einer GNSS-Einzelfrequenzlösung auf 1 cm bestimmt werden. Der Vergleich zu VLBI-basierten Verzögerungen zeigte nur geringe Unterschiede. Da sich VLBI-Beobachtung erdnaher Satelliten noch in einer Experimentierphase befindet wurden entsprechende Simulationsstudien zu acht verschiedenen Satellitenbahnen und -typen durchgeführt. Für die Beobachtung einer GPS-Konstellation konnten Stationskoordinaten mit einer Genauigkeit von 0,7-1,2 cm bestimmt werden. Für Beobachtungen zu einem fiktiven LEO konnten das 1 cm Genauigkeitslevel ebenfalls erreicht werden. Simulation für E-GRIP und E-GRASP/Eratosthenes zeigten größer Unsicherheiten in den Stationskoordinaten.

Empfehlungen für zukünftige Arbeiten wurden ausgehend von den Ergebnissen formuliert. Die wichtigsten Ergebnisse sind dabei die deutlichen Verbesserungen der verschiedenen Parameter durch die Kombination von Boden und LEO GPS-Beobachtungen sowie die Möglichkeit ionosphärische Laufzeitverzögerungskorrekturen von benachbarten GNSS Beobachtungen abzuleiten.