

Abstract

The International Association of Geodesy (IAG) has recognized the need of global long-term Earth observations and consequently has inaugurated the Global Geodetic Observing System (GGOS) in July 2003. GGOS is dedicated to ensuring precise long-term monitoring of the geodetic observables, the dynamics of the atmosphere and ocean, the global hydrological cycle, as well as natural hazards and disasters, related to a global reference frame defined by integrating different geodetic techniques, models and approaches (www.ggos.org).

Within the framework of IAG's GGOS service, measurements using three different space geodetic positioning systems, i.e. Satellite Laser Ranging (SLR), Global Navigation Satellite Systems (GNSS), and Very Long Baseline Interferometry (VLBI), must be carried out at the millimeter level of accuracy. Furthermore, the measurement of the main geodetic observables using these techniques should be accomplished in a consistent manner to ensure a world-wide homogeneous and long-term interpretation of the measurement results. However, the demand to increase the accuracy of the measurements has revealed that their ultimate accuracy is limited by the hardware systems and atmospheric propagation effects. In addition, different atmospheric correction models applied for these space geodetic techniques might jeopardize the consistency of the atmospheric range corrections.

The research presented in this thesis mainly deals with the corrections for the atmospheric propagation effects of space geodetic techniques. In order to ensure the consistency of the atmospheric range corrections, a new concept of atmospheric correction modeling is proposed, with all developments of atmospheric corrections being based on this concept. The developments conducted in this research consist of three distinct sections: (1) atmospheric correction formula for two-frequency SLR measurements, (2) unified atmospheric corrections for space geodetic techniques, and (3) corrections of the atmospheric propagation effects using co-located observations of different space geodetic techniques.

In the first section, a new atmospheric correction formula for two-frequency SLR measurements was developed. This new formula properly eliminates the total atmospheric density effects and takes into account all of the remaining propagation effects, except for those caused by atmospheric turbulence. The water vapour distribution and curvature (*arc-to-chord*) effects are properly modeled in the new formula. Numerical simulations show that this new formula significantly reduces all propagation effects at any elevation angle to an accuracy better than 1 mm. It therefore has a much better performance than the existing formula. However, the required precision for the difference of the two-frequency SLR measurements, i.e. better than 8 μm , exceeds the capability of current state-of-the-art SLR systems. An averaging technique is thus proposed to improve the precision of the measurements.

The required information about the water vapor distribution along the propagation path can be inferred using GPS or Water Vapor Radiometer data. The accuracy demand on this data is moderate, thus the use of a co-located GPS receiver is proposed. Moreover, the *arc-to-chord* correction can be calculated by a moderately accurate model.

In the second section, a unified atmospheric correction formula was developed, which can be applied to correct for the propagation effects of the electrically neutral atmosphere and ionosphere on GNSS/VLBI measurements, as well as the effects of the electrically neutral atmosphere on SLR measurements. In the unified formula, all integrations are carried out along the known chord of the propagation path, gradients of the horizontal density are incorporated into the integrations, and the chord elevation angle is used instead of the unknown apparent elevation angle. The curvature effects through the electrically neutral atmosphere and the ionosphere are evaluated separately from the propagation delays. It has been shown that the unified formula can be used to develop a new model for the accurate calculation of the zenith propagation delays as well as a unified mapping function for all space geodetic techniques.

In the third section, which is based on the results of the previous developments, methods of utilizing co-located observations of SLR and GNSS techniques are proposed, which are useful to estimate the remaining water vapor effects of SLR measurements. There are two possible co-location scenarios: (i) co-located SLR and GNSS observations to a GNSS satellite equipped with a retroreflector, and (ii) co-located SLR and GNSS observations to different satellites. For the first scenario, the Slant Wet Delay (SWD) can be calculated from a single GNSS signal (e.g. GPS-36, GPS-35, GLONASS-95, GIOVE-A and GIOVE-B satellites). The propagation paths of the SLR and GNSS signals (optical and microwave paths) deviate only slightly and hence they are assumed to carry the same information about the water vapor distribution. For the second scenario, the SWD values along the propagation paths of the SLR signal can be calculated by interpolating the SWD values obtained from processing the GNSS data.

Zusammenfassung

Die Internationale Assoziation für Geodäsie (IAG) erkannte die Notwendigkeit von globalen Langzeit-Erdbeobachtungen und hat infolgedessen im Juli 2003 das Globale Geodätische Beobachtungs System (GGOS) ins Leben gerufen. GGOS soll präzise Langzeitbeobachtungen von geodätischen Beobachtungsgrößen, der Dynamik der Atmosphäre und Ozeane und dem globalen hydrologischen Zyklus garantieren, ebenso wie jene von Naturgewalten und -katastrophen, jeweils in Bezug auf das globale Referenzsystem, welches durch Einbindung verschiedener geodätischer Methoden, verschiedener Modelle und Ansätze definiert wird (www.ggos.org).

Innerhalb des Netzwerkes von GGOS müssen die Messungen der verwendeten drei geodätischen Positionierungssysteme [Satellite Laser Ranging (SLR), Global Navigation Satellite System (GNSS), und Very Long Baseline Interferometry (VLBI)] mit einer Genauigkeit im Millimeterbereich ausgeführt werden. Des Weiteren sollen die Messungen der wichtigsten geodätischen Beobachtungsgrößen in einer konsistenten Art erfolgen, um eine weltweite homogene und langzeit Interpretation der Messergebnisse sicher zu stellen. Die Genauigkeitssteigerung der Messungen ist letztendlich durch die Hardware und die atmosphärischen Ausbreitungseffekte limitiert. Zusätzlich kann die Anwendung von verschiedenen Modellen zur atmosphärischen Korrektur für die verschiedenen Weltraumtechnologien die Konsistenz der Korrekturen der atmosphärischen Laufzeitverzögerungen gefährden.

Die in dieser Dissertation vorgestellte Forschungsarbeit beschäftigt sich hauptsächlich mit den Korrekturen der Effekte der atmosphärischen Laufzeitverzögerungen geodätischer Weltraumtechnologien. Um die Konsistenz der Laufzeitkorrekturen zu garantieren, wird ein neues Konzept zur Modellierung der atmosphärischen Korrekturen vorgestellt, entsprechend erweitert und weiter entwickelt. Diese Entwicklungen können in drei verschiedene Abschnitte aufgeteilt werden: (1) Formel für die atmosphärische Korrektur von Zweifrequenz SLR-Messungen, (2) Einheitliche atmosphärische Korrekturen für geodätische Weltraumtechnologien, (3) Korrektur der atmosphärischen Ausbreitungseffekte durch ortsgleiche Beobachtungen mittels verschiedener geodätischer Weltraumtechnologien.

Im ersten Abschnitt wird eine neue Formel für die atmosphärische Korrektur für Zweifrequenz SLR-Messungen abgeleitet. Diese neue Formel eliminiert den gesamten atmosphärischen Dichteeffekt und berücksichtigt alle verbleibenden Ausbreitungseffekte ausgenommen jene, die durch Turbulenzen in der Atmosphäre verursacht werden. Die Verteilung des Wasserdampfs und die Krümmungseffekte (Bogen zu Sehne) werden ausreichend genau modelliert. Numerische Simulationen zeigen, dass diese neue Formel alle Ausbreitungseffekte für jeden Elevationswinkel mit einer Genauigkeit besser als 1mm eliminiert. Sie ergibt genauere Ergebnisse als die existierende Methodik. Allerdings können die bestehenden SLR-Systeme die benötigte Messgenauigkeit von 8 μm nicht liefern. Für eine Verbesserung der Präzision der Messungen wird eine Mittelungsmethode vorgeschlagen.

Die benötigte Information über die Verteilung des Wasserdampfes entlang des Ausbreitungsweges kann durch GPS oder Wasserdampf-Radiometer Daten ermittelt werden. Die Genauigkeitsanforderungen an diese Daten ist moderat, weshalb die Verwendung eines

ortsgleichen GPS-Empfängers vorgeschlagen wird. Die Korrektur für die Reduktion des Bogens zur Sehne kann durch ein einfaches Modell berechnet werden.

Im zweiten Abschnitt wird eine einheitliche Formel für die atmosphärische Korrektur der Ausbreitungseffekte der elektrisch neutralen Atmosphäre und Ionosphäre bei GNSS/VLBI Messungen entwickelt. Auch die Effekte der elektrisch neutralen Atmosphäre bei SLR Messungen können damit reduziert werden. In dieser einheitlichen Formel für die atmosphärische Korrektur sind alle Integrationen entlang der bekannten Sehne des Ausbreitungsweges ausgeführt, die Gradienten der horizontalen Dichte werden in die Integration eingebunden und anstelle des nicht bekannten scheinbaren Elevationswinkels wird der bekannte Elevationswinkel der Sehne verwendet. Die Krümmungseffekte der elektrisch neutralen Atmosphäre und Ionosphäre werden getrennt ausgewertet. Es wird gezeigt, dass diese einheitliche Formel für die Entwicklung eines neuen Modells für die genaue Berechnung von Zenit-Laufzeitverzögerungen als auch für einheitliche *Mapping Functions* aller geodätischen Weltraumtechnologien verwendet werden kann.

Im dritten Abschnitt werden, aufbauend auf die vorhergegangenen Ergebnisse, ortsgleiche GPS- und SLR-Beobachtungstechniken vorgeschlagen, welche für die Schätzung des Einflusses des Wasserdampfes von Nutzen sind. Es existieren zwei mögliche Anordnungen: (i) ortsgleiche GPS- und SLR-Beobachtungen zu einem mit Reflektoren ausgestatteten GNSS-Satelliten und (ii) ortsgleiche GPS- und SLR-Beobachtungen zu verschiedenen Satelliten. Für die erste Anordnung kann der feuchte Anteil der Laufzeitverzögerung SWD (Slant Wet Delay) mittels eines GNSS-Signals berechnet werden (e.g. GPS-36, GPS-35, GLONASS-95, GIOVE-A and GIOVE-B). Der Ausbreitungsweg der SLR- und GNSS-Signale weicht nur leicht (optische und Mikrowellenausbreitung) voneinander ab, weshalb derselbe Informationsgehalt bezüglich der Wasserdampfverteilung angenommen werden kann. Für die zweite Anordnung können die SWD-Werte entlang des Ausbreitungsweges des SLR-Signals durch Interpolation der SWD-Werte entlang des GNSS-Signals berechnet werden.