

Rekonstruktion dreidimensionaler Elektronendichteverteilungen basierend auf CHAMP-GPS-Messungen

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades des
Doktors der Naturwissenschaften
vorgelegt von
Dipl. Met. Stefan Heise

Freie Universität Berlin
Institut für Meteorologie, Fachbereich Geowissenschaften
Berlin, im September 2002

Stefan Heise

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Institut für Kommunikation und Navigation, Außenstelle Neustrelitz
Kalkhorstweg 53, D-17235 Neustrelitz, Bundesrepublik Deutschland

Gutachter der Dissertation:

1. Prof. Dr. Horst Malberg
2. Prof. Dr. Justus Notholt

Datum der Disputation: 03.12. 2002

Zusammenfassung

Die Ionosphäre bezeichnet den Teil der oberen Atmosphäre, welcher aufgrund seiner Ionisation die Ausbreitung von Radiowellen signifikant beeinflusst. Diese Eigenschaft begründet auch das wissenschaftliche Interesse an der Ionosphäre. Zahlreiche technische Systeme nutzen zur Signalübertragung Radiowellen, deren Ausbreitung ionosphärischen Einflüssen unterliegt. Die Ionosphäre geht oberhalb von etwa 1000 km in die Plasmasphäre über. Zur Korrektur und Simulation ionosphärischer Einflüsse auf die Radiowellenausbreitung sind Modelle der Ionosphäre und Plasmasphäre unentbehrlich. Die Erhebung von Beobachtungsdaten ist eine Grundvoraussetzung zum Verständnis und zur Modellierung des Systems Ionosphäre/Plasmasphäre. Allerdings sind die obere Ionosphäre und insbesondere die Plasmasphäre aufgrund schwieriger Beobachtungsbedingungen bis heute ein wenig erforschtes Gebiet. Existierende Modelle basieren auf vergleichsweise geringen Datenmengen und weisen daher noch erhebliche Mängel auf. Vor diesem Hintergrund ist die Gewinnung neuer Beobachtungsdaten aus dem Bereich der oberen Ionosphäre und Plasmasphäre ein notwendiges und lohnendes Ziel.

Das globale Satellitennavigationssystem GPS sendet seine Signale auf zwei verschiedenen Trägerfrequenzen im L-Band. In diesem Frequenzbereich stellt die Ionosphäre ein dispersives Ausbreitungsmedium dar. Unter Annahme eines gemeinsamen Signalweges ermöglicht der simultane Empfang beider GPS-Signale daher prinzipiell die Fernerkundung der Ionosphäre. Bodengebundene GPS-Messungen werden bereits seit einigen Jahren erfolgreich zur operationellen Beobachtung der vertikalen Gesamtelektronenzahl verwendet. Der Einsatz von GPS-Empfängern an Bord niedrig fliegender erdumlaufender Satelliten wie CHAMP bietet neue Möglichkeiten zur Fernerkundung der Ionosphäre und Plasmasphäre. Der deutsche Kleinsatellit CHAMP führt über eine Zenitantenne permanent Zweifrequenz-GPS-Messungen von bis zu acht GPS-Satelliten mit einer Rate von 0,1 Hz durch. Diese der hochgenauen Orbitbestimmung dienenden Messungen bieten erstmals die Möglichkeit einer GPS-basierten Beobachtung der oberen Ionosphäre und Plasmasphäre im globalem Maßstab.

Diese Arbeit beschreibt die Rekonstruktion globaler dreidimensionaler Elektronendichteverteilungen im Bereich der oberen Ionosphäre und der Plasmasphäre, basierend auf CHAMP-GPS-Messungen, wobei die entwickelten Verfahren, Methoden und Algorithmen ausführlich dargelegt werden.

Nach geeigneter Vorprozessierung und Kalibrierung werden aus den CHAMP-GPS-Messungen die Gesamtelektronenzahlen (TEC) entlang der jeweiligen Strahlenwege bestimmt. Die Rekonstruktion der dreidimensionalen Elektronendichteverteilung erfolgt durch Assimilation der integralen TEC-Messungen jeweils eines vollständigen CHAMP-Umlaufs in das Ionosphären/Plasmasphärenmodell PIM, welches dazu auf einer globalen Voxel-Struktur diskretisiert wird. Das entwickelte Assimilationsverfahren basiert auf einem iterativen Algorithmus. Dabei wird die initiale Modellannahme multiplikativ so modifiziert, dass schließlich die zu assimilierenden TEC-Messungen repräsentiert werden.

Die Rekonstruktionsergebnisse werden anhand konkreter Beispiele präsentiert, wobei die Darstellung in Form meridionaler Schnitte entlang der jeweiligen Orbitebene erfolgt. Erste Validierungsergebnisse mit Elektronendichtemessungen der Langmuir-Sonde an Bord von CHAMP, von Incoherent-Scatter-Radars und Ionosonden sind vielversprechend und zeigen die prinzipielle Eignung des vorgestellten Assimilationsverfahrens zur Rekonstruktion lokaler Elektronendichten aus integralen TEC-Messungen. Die Assimilationsergebnisse könnten in der Zukunft eine umfangreiche Datenbasis zur Modellierung der oberen Ionosphäre und Plasmasphäre und zur Beobachtung ionosphärischer und plasmasphärischer Phänomene bieten. Dies gilt insbesondere mit Blick auf die GPS-Messungen zukünftiger Satellitenmissionen.

Abstract

The Ionosphere denotes that part of the upper atmosphere which affects significantly radio wave propagation due to its ionization. This property causes as well the scientific interest in the ionosphere. Radio waves used for signal transmission by numerous technical systems are affected by the ionosphere. Above altitudes of about 1000 km the ionosphere fades to the so called plasmasphere. For the correction and simulation of ionospheric/plasmaspheric impacts on radio wave propagation, models of the ionosphere and plasmasphere are needed. A basic requirement for the understanding and modeling of the ionosphere/plasmasphere system are observation data. Due to the difficult observation conditions, the exploration of the upper ionosphere and especially of the plasmasphere is indeed sparse up to now. Existing models are based on comparatively small data sets and are therefore still deficient in some cases. In front of this background, the collection of new ionospheric/plasmaspheric observation data is worthwhile and necessary.

The global navigation satellite system GPS uses two different L-band carrier frequencies for signal transmission. The ionosphere represents a dispersive propagation medium for this frequency range. Therefore, simultaneous reception of both GPS signals enables remote sensing of the ionosphere, assuming identical ray paths. Ground based GPS measurements are used successfully since several years to monitor the vertical Total Electron Content (TEC) in an operational manner. The installation of GPS receivers on board of LEO (Low Earth Orbiting) satellites such as CHAMP offers new opportunities of ionospheric/plasmaspheric remote sensing. For precise orbit determination the German small satellite CHAMP performs permanently dual frequency measurements of up to 8 GPS satellites with a sampling rate of 0.1 Hz, using a dedicated zenith looking antenna. These navigation measurements provide for the first time the opportunity of a GPS based monitoring of the upper ionosphere and plasmasphere on global scale.

This PhD thesis describes the reconstruction of global three dimensional electron density distributions of the upper ionosphere and plasmasphere based on GPS measurements from CHAMP. The methods and algorithms that have been developed in this frame are pointed out in detail.

After preprocessing and calibration, link related TEC measurements are derived from the GPS navigation observations on board CHAMP. The three dimensional electron density distribution is reconstructed by assimilating the integrated TEC measurements of a full CHAMP revolution into the ionospheric/plasmaspheric model PIM. For this purpose the discretization of PIM on a global voxel structure is necessary. The assimilation method which has been developed is based on an iterative algorithm. During this procedure the initial model assumption is modified in a multiplicative manner. Finally, the resulting electron density distribution represents the TEC measurements, which had been to assimilate. The reconstruction results are presented for selected assimilation examples by means of two dimensional slices along the respective CHAMP orbit plane. First validation results using electron density measurements from the Langmuir Probe on board CHAMP, from incoherent scatter radars and from ionosondes are promising and show the fundamental suitability of the presented technique for the reconstruction of adequate electron density information from integrated TEC measurements.

Considering especially the reconstruction opportunities using GPS measurements of planned LEO missions in the future, such assimilation results may provide a considerable data base for ionospheric/plasmaspheric modeling and research.

Inhaltsverzeichnis

1	EINFÜHRUNG UND ZIELSTELLUNG.....	3
2	DIE IONOSPHERE UND PLASMASPHÄRE DER ERDE.....	6
2.1	EINORDNUNG INNERHALB DER ERDATMOSPHERE	6
2.2	DER AUFBAU DER IONOSPHERE.....	9
2.3	RÄUMLICHE UND ZEITLICHE VARIABILITÄT DER IONOSPHERE	11
2.3.1	<i>Reguläres Verhalten und geographische Regionen.....</i>	<i>11</i>
2.3.2	<i>Ionosphärische Irregularitäten</i>	<i>12</i>
2.4	ATMOSPHERISCHE BEEINFLUSSUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN	13
2.4.1	<i>Der atmosphärische Brechungsindex.....</i>	<i>13</i>
2.4.2	<i>Geometrische Optik und optische Weglänge.....</i>	<i>15</i>
2.5	BEDEUTUNG DER IONOSPHERE	17
2.6	DIE PLASMASPHÄRE	19
2.7	BEOBACHTUNG DER IONOSPHERE UND PLASMASPHÄRE.....	21
2.7.1	<i>In-situ-Messungen</i>	<i>21</i>
2.7.2	<i>Fernerkundung</i>	<i>22</i>
	Die Ionosonde.....	22
	Incoherent-Scatter-Radar.....	23
	Beobachtung transionosphärischer Signale.....	25
2.8	TOMOGRAPHIE DER IONOSPHERE	26
2.8.1	<i>Grundlagen der Tomographie.....</i>	<i>26</i>
2.8.2	<i>Datenquellen und Methoden der Ionosphärentomographie.....</i>	<i>28</i>
2.9	MODELLE DER IONOSPHERE	31
2.9.1	<i>Empirische Modelle.....</i>	<i>31</i>
2.9.2	<i>Physikalische Modelle.....</i>	<i>32</i>
2.9.3	<i>Analytische Modelle</i>	<i>33</i>
	Das Parameterized Ionospheric Model (PIM).....	33
3	DIE CHAMP-MISSION	35
3.1	WISSENSCHAFTLICHE ZIELE	35
3.2	SATELLIT UND WISSENSCHAFTLICHE INSTRUMENTE.....	35
3.2.1	<i>CHAMP-Satellit.....</i>	<i>36</i>
3.2.2	<i>Wissenschaftliche Instrumente</i>	<i>36</i>
	GPS-Empfänger.....	36
	Langmuir-Sonde	37
3.3	MISSION UND ORBIT	37
4	FERNERKUNDUNG DER IONOSPHERE MIT GPS.....	38
4.1	DAS GLOBAL POSITIONING SYSTEM	38
4.2	GPS-MESSGRÖßEN UND DIE BEOBACHTUNGSGLEICHUNG.....	43
4.3	BESTIMMUNG DES TEC AUS DEN GPS-BEOBACHTUNGEN	45
5	PROZESSIERUNG DER CHAMP-GPS-DATEN ZUR ABLEITUNG VON TEC-INFORMATIONEN	47
5.1	VERWENDETE DATEN.....	47
5.1.1	<i>CHAMP-GPS-Daten.....</i>	<i>47</i>
5.1.2	<i>Orbitdaten.....</i>	<i>48</i>
	CHAMP-Orbit	48

GPS-Orbits	49
5.1.3 <i>Differentielle Codebiases der GPS-Satelliten</i>	49
5.1.4 <i>Geophysikalische Modellparameter</i>	49
5.2 PROZESSIERUNGSÜBERSICHT UND AUTOMATISCHE PROZESSIERUNG	50
5.2.1 <i>Softwaremodule und Datenfluss</i>	50
5.2.2 <i>Automatisches Prozessierungssystem und operationelle Aspekte</i>	51
5.3 SICHERUNG DER GPS-DATENQUALITÄT	54
5.4 KALIBRIERUNG DER RELATIVEN TEC-MESSUNGEN	59
5.4.1 <i>Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten</i>	59
Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten mit dem Intervall-Verfahren	61
5.4.2 <i>Bestimmung der instrumentellen Biases</i>	63
6 ABLEITUNG LOKALER ELEKTRONENDICHTEN AUS DEN	
INTEGRALEN TEC-INFORMATIONEN	68
6.1 DIE VOXEL-STRUKTUR	68
6.1.1 <i>Allgemeine Beschreibung</i>	68
6.1.2 <i>Mathematische Formulierung und Handhabung</i>	71
6.2 ASSIMILATION DER TEC-DATEN	73
6.2.1 <i>Allgemeine Überlegungen</i>	73
6.2.2 <i>Grundprinzipien des verwendeten Assimilationsverfahrens</i>	76
Iterative Modifikation entlang der Strahlenwege	76
Einfluss modifizierter Voxel auf deren Umgebung	78
6.2.3 <i>Konkrete Umsetzung</i>	80
7 ERGEBNISSE UND DISKUSSION	85
7.1 ERGEBNISSE DER DATENASSIMILATION	85
7.2 VALIDIERUNG REKONSTRUIERTER ELEKTRONENDICHTEVERTEILUNGEN MIT	
UNABHÄNGIGEN IONOSPHERISCHEN DATEN	89
7.2.1 <i>Messungen der Langmuir-Sonde an Bord von CHAMP</i>	89
7.2.2 <i>Incoherent-Scatter-Radar-Messungen</i>	98
7.2.3 <i>Ionosondenmessungen</i>	99
8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	101
9 LITERATUR	104
AKRONYME	111
DANKSAGUNG	113

Akronyme

AFRL	Air Force Research Laboratory
ART	Algebraic Reconstruction Technique
AS	Anti-Spoofing
BBC	British Broadcasting Corporation
C/A-Code	Clear/Acquisition-Code
CHAMP	CHALLENGING Minisatellite Payload
CHORB	CHAMP ORBit
CME	Coronal Mass Ejection
CODE	Center for Orbit Determination in Europe
COSMIC	Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate
DE-1	Dynamics Explorer-1
DFD	Deutsches FernerkundungsDatenzentrum
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
FTP	File Transfer Protocol
GFZ	GeoForschungsZentrum Potsdam
GLONASS	GLObal'naya Navigacionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GPS/MET	GPS Meteorology
GRACE	GRAvity recovery and Climate Experiment
GSOC	German Space Operation and Control Centre
IGS	International GPS Service for Geodynamics
IKN	Institut für Kommunikation und Navigation
IMAGE	Imager for Magnetopause-to-Aurora Global Exploration
IONEX	IONosphere map EXchange
IRI	International Reference Ionosphere
ISDC	Information System and Data Center
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LEO	Low Earth Orbiter
MART	Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique
MSIS	Mass-Spectrometer-Incoherent-Scatter
NASA	National AeroSpace Agency
NAVSTAR	NAVigation Satellite Timing And Ranging
NGDC	National Geophysical Data Center
NNSS	Navy Navigational Satellite System
NTCM	Neustrelitzer TEC-Modell
P-Code	Precise-Code
PIM	Parameterized Ionospheric Model
PLP	Planar Langmuir Probe
PPS	Precise Positioning Service
PRN	Pseudo Random Noise
RINEX	Receiver INdependent EXchange
RMSE	Root Mean Square Error
SA	Selected Availability
SIRT	Simultaneous Iterative Reconstruction Technique
SP3	Standard Product # 3
SPS	Standard Positioning Service
STAR	Space Triaxial Accelerometer for Research applications

SVD	Singular Value Decomposition
TEC	Total Electron Content
TECU	Total Electron Content Unit (1 TECU= 10^{16} m ⁻²)
TID	Traveling Ionospheric Disturbance
TRSR-2	Turbo Rogue Space Receiver-2
UTC	Universal Time Coordinated
vTEC	vertical Total Electron Content

Danksagung

Am Ende dieser Arbeit, die im Rahmen meiner Tätigkeit am DLR IKN Neustrelitz entstand, bleibt der Dank an alle, die mich während der vergangenen Jahre begleitet und direkt oder indirekt zu einem guten Gelingen beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr. Horst Malberg danke ich herzlich für seine Bereitschaft, als Erstgutachter und Doktorvater meiner Promotion aufzutreten. Ein herzlicher Dank auch an Herrn Prof. Dr. Justus Notholt für die Übernahme des Koreferates.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Norbert Jakowski für die großartige wissenschaftliche Betreuung, das kritische Lesen des Manuskripts und ein stets offenes Ohr bei allen Fragen und Problemen. Seine Anregungen und Ideen sowie sein persönlicher Einsatz an verschiedenen Stellen haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ich danke dem UNIX-Zauberer Dr. Andreas Wehrenpfennig für die Beantwortung zahlloser Fragen in Sachen Programmierung und Rechentechnik, für etliche Shell-Scripte, anregende Diskussionen, ein sehr angenehmes Büroklima und das kritische Lesen des Manuskripts. Meinen Kollegen Dr. Jens Wickert und Stefan Schlüter danke ich für wertvolle Hilfen, Diskussionen und Hinweise. Der gesamten Arbeitsgruppe sei für das gute Arbeitsklima und die generelle Hilfsbereitschaft gedankt.

Ich danke allen Kollegen des CHAMP-Teams, der CHAMP-Projektleitung und der Orbitgruppe des GFZ Potsdam, ohne deren Arbeit die hervorragende Datenbasis, welche den Grundstock meiner Promotion bildet, nicht existieren würde. Herrn Prof. Dr. Hermann Lühr und Herrn Wolfgang Mai danke ich herzlich für die Bereitstellung der Langmuirsondendaten. Weiterhin danke ich Frau Dr. Anna Belehaki und Herrn Jens Mielich sowie den Kollegen vom Millstone Hill Observatorium und dem Svalbard Radar für die Bereitstellung von Digisonden- und Incoherent-Scatter-Radar-Daten.

Meinen Eltern danke ich für Ihre Liebe, das Verständnis und die Zerstreung durch körperliche Arbeit an zahlreichen Wochenenden.

Zu guter Letzt ein großes Dankeschön an meine Sylvia, deren Liebe mich durch diese nicht immer einfache Zeit getragen hat und die sich nicht scheute, einem Doktoranden das Ja-Wort zu geben.