

GPS basierte Radio-Tomographie der Ionosphäre

Stefan Schlüter¹, Claudia Stolle², Christop Jacobi², Volker Wilken¹

¹Institut für Kommunikation u. Navigation, DLR

²Institut für Meteorologie, Universität Leipzig

Ergänzend zu den klassischen Messverfahren der Ionosphärenforschung (z. B. Ionosonden, Radar) hat die Nutzung von Satellitennavigationssystemen (NNSS, GPS) als Mittel zur Untersuchung des absoluten Elektronengehalts der Ionosphäre immer mehr an Bedeutung gewonnen. Einer der wesentlichen Vorteile, insbesondere des GPS, liegt in dem Vorhandensein globaler geodätischer Empfängernetzwerke sowie der zunehmenden Anzahl von Radio-Okkultationsatelliten (GPS-MET, Oersted CHAMP, SAC-C ...), deren Daten Untersuchungen im globalen Maßstab mit einer hohen Datendichte und einer hohen zeitlichen Auflösung ermöglichen.

Ein Verfahren der Datenaufbereitung von GPS-Messungen ist die Ionosphärentomographie, bei der aus den integralen Messungen der Elektronendichte entlang des Strahlenwegs räumliche Verteilungen dieser Größe abgeleitet werden. Langfristige Zielsetzung dieser Ionosphärentomographie ist insbesondere die Untersuchung von Wellenphänomenen, Plasma-Konvektion sowie Irregularitäten in der Elektronendichteverteilung, wie sie z.B. im Zusammenhang mit ionosphärischen Stürmen auftreten.

Schwerpunktt Themen der hier vorgestellten Übersicht über den gegenwärtigen Stand dieses Verfahrens und dessen Möglichkeiten sind: Grundlagen der Datengewinnung sowie mathematische Ansätze und Probleme der GPS basierten Ionosphärentomographie, die anhand von Daten- und Ergebnisbeispielen erläutert werden.

Einleitung

Die Positionsbestimmung mit Hilfe des Global Positioning System (GPS) beruht auf dem Prinzip die Entfernungen zwischen einem Empfänger und den Satelliten aufgrund von Laufzeitmessungen der von den Satelliten ausgesandten Radiowellen zu bestimmen. Die Qualität der Positionsbestimmung hängt somit sehr wesentlich davon ab, inwieweit atmosphärische Einflüsse auf die Signalausbreitung bestimmt und korrigiert werden können.

Aufgrund der in den letzten Jahrzehnten durchgeführten Entwicklung von Verfahren, sowohl troposphärische als auch ionosphärische Einflüsse aus den GPS-Messungen zu separieren, und dem Aufbau großer geodätischer Empfängernetzwerke, wurde nicht nur die Positionierungsgenauigkeit verbessert, sondern auch Meteorologen und Geophysikern die Möglichkeit eröffnet GPS als globales, kostengünstiges Messsystem atmosphärischer Parameter mit einer hohen zeitlichen Auflösung zu nutzen.

Der erste Schritt im Bereich der GPS basierten Ionosphärenforschung war es, die direkt aus den Signalen einzelner Empfänger ermittelten Werten des entlang des Signalweges integrierten Elektronengehalts der Ionosphäre (TEC) zu bestimmen, um zeitliche und räumliche Veränderungen der Ionosphäre zu untersuchen (z.B. *Jakowski et al.*, 1998, *Jakowski et al.*, 1999).

Eine Erweiterung dieser Technik stellt die GPS basierte Ionosphärentomographie dar. Bei diesen Verfahren wird versucht durch die Kombination vieler Messungen ein dreidimensionales Bild der Elektronendichteverteilung innerhalb der Ionosphäre zu rekonstruieren. Ziel dieser Anstrengungen ist es dabei vor allem einen besseren Einblick in irreguläre Strukturen der Ionosphäre zu bekommen, deren Auftreten von großer praktischer Bedeutung sowohl für die Geophysik als auch für verschiedenste Bereiche der Kommunikation und Satelliten-Navigation ist.

Motiviert werden diese Anstrengungen nicht zuletzt durch die zunehmende Anzahl von Radio-Okkultationsatelliten (Satelliten mit Orbithöhen von etwa 400-800km, die mit GPS-Empfängern ausgerüstet sind; CHAMP, SAC-C, GRACE ...) und deren Daten aufgrund der Satelliten-Empfänger-Geometrie einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der rein bodengestützten Tomographie leisten können.

Bestimmung des ionosphärischen Elektronengehalts aus GPS Daten

Grundprinzip der Ionosphären-Tomographie ist die Rekonstruktion der Elektronendichteverteilung aus integralen Messungen, im vorliegenden Fall die GPS-Signallaufzeiten. GPS-Satelliten, die in etwa 20000 km Höhe die Erde umkreisen, senden Signale auf den auf den Frequenzen L1 (1.5 MHz) und L2 (1.2 MHz) aus. Auf den Trägersignalen sind Codes aufmodelliert, die eine Laufzeitmessung der Signale ermöglichen. Aus der Beschreibung des ionosphärischen Brechungsindex lässt sich in erster Näherung eine einfache Beziehung zwischen dem Integral über die Elektronendichte N_e entlang des Signalweges S und den Veränderungen der Gruppen- u. Phasenlaufzeit ableiten, die man in der Navigation üblicherweise als Wegverlängerung (Ranges) in Metern ausdrückt:

$$dion = \pm \frac{40,3}{f^2} \cdot \int_S N_e ds$$

Neben den ionosphärischen unterliegen die Signale weiteren Einflüssen, so dass sich die Beobachtungsgleichungen der gemessenen Pseudo-Entfernungen für Kode- und Trägerphasen auf dem jeweiligen Kanal folgendermaßen zusammensetzen:

$$\text{Kode [m]:} \quad C_{rec,k}^{sat} = R_{rec,k}^{sat} + c \cdot [dt_{rec,k} - dT_k^{sat}] + dtrop_{rec,k}^{sat} + dion_{rec,k}^{sat}(f) + E_{rec,k}^{sat}$$

$$\text{Phase [m]:} \quad P_{rec,k}^{sat} = R_{rec,k}^{sat} + c \cdot [dt_{rec,k} - dT_k^{sat}] + dtrop_{rec,k}^{sat} - dion_{rec,k}^{sat}(f) - \lambda \cdot N - E_{rec,k}^{sat}$$

In den Gleichungen ist:

- $R_{rec,k}^{sat}$ die wahre Entfernung zwischen Satellit und Empfänger,
- $dt_{rec,k}$ der Fehler der Empfängeruhr,
- dT_k^{sat} der Fehler der Satellitenuhr,
- $dtrop_{rec,k}^{sat}$ der troposphärische Einfluss auf die Signallaufzeit,
- $dion_{rec,k}^{sat}(f)$ der frequenzabhängige ionosphärische Einfluss auf die Signallaufzeit,
- N die unbekannte Anzahl ganzzahliger Phasen (Ambiguities),
- λ die Trägerwellenlänge,
- $E_{rec,k}^{sat}$ die Summe aus Rauschen, Mehrwegeausbreitung und instrumentellen Laufzeitfehlern

für jeden Messzeitpunkt k .

Um den Ionosphärenbeitrag aus den Beobachtungsgleichungen zu separieren, nutzt man die dispersive Eigenschaft der Ionosphäre. Durch Differenzenbildung der Phasen-Messungen und der Kode-Messungen auf den beiden Frequenzen erhält man Kode- u. einen Phasenterme, bei denen alle frequenzabhängigen Größen eliminiert sind.

Um die verbleibenden Störgrößen zu eliminieren, mittelt man die über Zeiträume von mehreren Stunden aufgezeichneten rauscharmen Trägerphasendifferenzen in die stärker verrauschten Kodephasendifferenzen und erhält damit einen Term der (vernachlässigt man die Mehrwegeausbreitung bei höheren Elevationswinkeln) sich aus dem ionosphärischen Anteil, sowie den instrumentellen Laufzeitfehlern der Satelliten und Empfänger zusammensetzt.

Durch die Kombination vieler Messungen sowie einer einfachen Modellierung der Ionosphäre in der Umgebung der Empfänger lässt sich nun der ionosphärische Anteil in den Messungen von den instrumentellen Laufzeitfehlern in einem Kalman-Filter hinreichend genau separieren (*Sardon et al.*, 1994, *Kee et al.*, 1998).

Als Ergebnis dieser Prozeduren erhält man das Integral der Elektronendichte entlang des Signalweges, den so genannten TEC¹-Wert:

$$TEC = \int_S N_e ds \cdot$$

Die auf mehreren Empfängern gemessenen TEC-Werte bilden die Eingangsgröße für die eigentliche Tomographie.

¹ TEC: Total Electron Content

GPS Ionosphären-Tomographie ?

Ziel der Ionosphären-Radio-Tomographie ist es, aus den integralen TEC-Messungen vieler Empfänger eine Rekonstruktion der Elektronendichte N_e in Abhängigkeit von der geographischen Länge, Breite und Höhe zu erhalten. Die Anwendung dieser Technik im Bereich der Ionosphärenforschung wurde erstmals 1986 von *Austen et al.* vorgeschlagen und in den folgenden Jahren für 2D-Elektronendichte-Rekonstruktionen aus Daten des NNSS (Naval Navigation Satellite System) verwendet (z.B. *Pryse et al.*, 1995).

Aufgrund der kostengünstigen und globalen Verfügbarkeit von Daten aus GPS-Referenznetzwerken (z.B. IGS², EUREF³, MGN⁴, etc.), die eine hohe zeitliche Auflösung ermöglichen und den guten Erfahrungen die bereits mit dem GPS-Basierten TEC-Monitoring gemacht wurden, wurden ab dem Ende der 90ziger Jahre Versuche unternommen eine GPS-basierte 3D-Ionosphärentomographie durchzuführen. Die grundlegende Schwierigkeit der GPS-Ionosphärentomographie liegt dabei in der schlechten Datengeometrie (Beispiel s. Abb. 1.). Die ungleichmäßige Verteilung der GPS-Referenzempfänger sowie der eingeschränkte Winkelbereich aus dem die Signale empfangen werden führen zu mathematisch schlecht konditionierten Problemen, die sich nur durch die Nutzung von a priori Informationen (physikalische Randbedingungen, Informationen anderer Sensoren), einer hohen Approximation des Problems, bzw. der zu Hilfenahme von Modellen lösen lassen.

Entsprechend der Komplexität des Problems und der angestrebten Nutzung der Ergebnisse wurden unterschiedliche Verfahren entwickelt:

- Abel –Transformation für die globale Ionosphärentomographie, mit einer geringen, jedoch für Navigationsanwendungen ausreichenden, räumlichen Auflösung (*Ruffini et al.*, 2002).

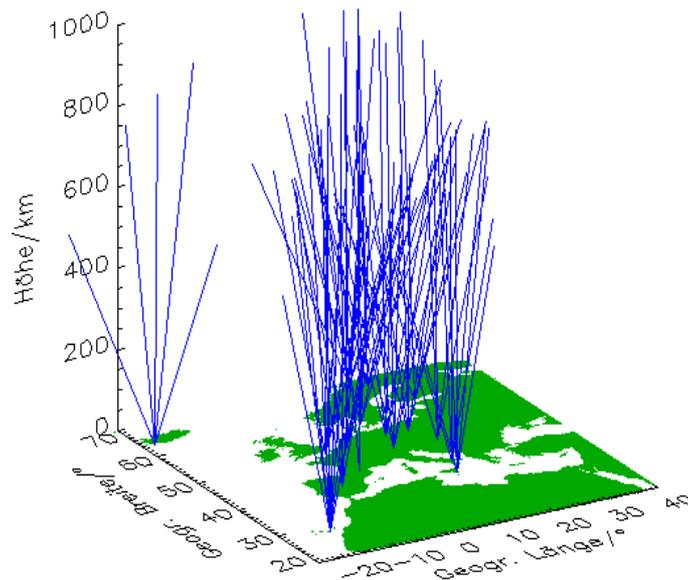


Abb. 1: Visualisierung von GPS-Empfängerstrahlenwegen für 11 IGS/GPS-Empfänger in Europa.

² International GPS Service for Geodynamics

³ European Reference Frame

- Modellierung des Problems mit Kugelflächenfunktionen (horizontal) u. EOF's⁵ (radial) (z.B. *Spencer et al.*, 2002, *Kee et al.*, 2003)
- Nutzung iterativer algebraischer Rekonstruktionsmethoden und dem IRI⁶-Model (*Schlüter et al.*, 2003) in Regionen, die eine hohe Dichte von GPS-Stationen aufweisen.

Ein Beispiel für das Ergebnis einer GPS-basierten 3D-Rekonstruktion einer gestörten Ionosphäre (Ionosphärensturm) ist in Abb. 2 dargestellt. Das Bild zeigt Schnitte durch die berechnete Elektronendichteverteilung am 6. April 2000, 23 Uhr UT, für einen Bereich von -20°- 40°O und 32,5°-70°N, 80-1000 km Höhe und einer Auflösung von 5° in der geogr. Länge, 2,5° in der geogr. Breite und 10km in der Höhe.

Die Rekonstruktion wurde mit dem bereits oben erwähnten Verfahren von Schlüter (*Schlüter et al.*, 2003) durchgeführt. Im Kern beruht die Methode auf dem MART⁷-Verfahren (*Censor et al.*, 1983, *Subbarao et al.*, 1997), wobei hier, die durch ein Hintergrundmodell (IRI95) vorausberechnete Elektronendichteverteilungen iterativ durch GPS-Daten an das aktuelle ionosphärische Szenario angepasst werden:

$$Ne_j^{k+1} = Ne_j^k \cdot \left[\frac{TEC_i}{\sum_j l_{ij} Ne_j^k} \right]^\mu,$$

dabei ist Ne_j die Elektronendichte im Voxel-Element j , l der in einem Voxel-Element zurückgelegte Signalweg, TEC der über den gesamten Signalweg integrierte Elektronengehalt, μ ein Gewichtungsfaktor und k der Iterationsschritt.

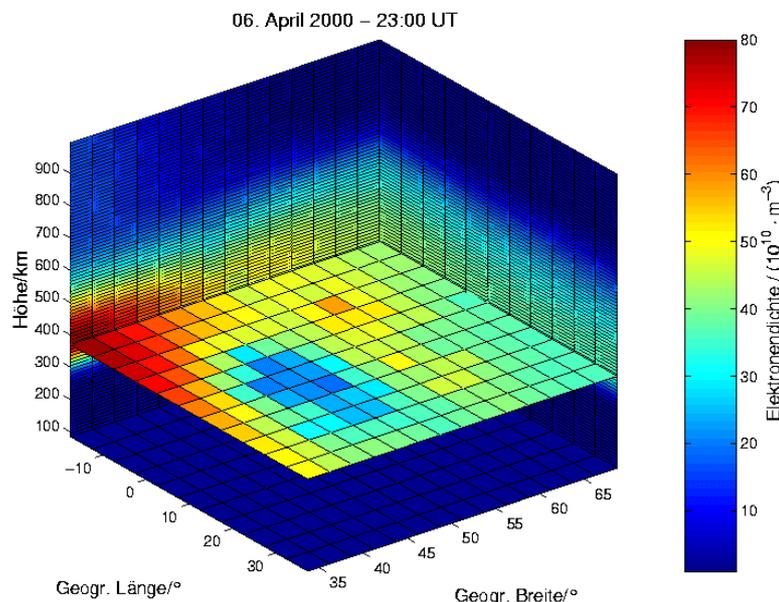


Abb. 2: Rekonstruktion der Ionosphäre über Europa für den 6. April 2000 2300UT.

⁴ Mediterranean GPS Network

⁵ Empirical Orthogonal Functions

⁶ International Reference Ionosphere

⁷ Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique

Die Rekonstruktion beruht auf Eingangsdaten von etwa 60 IGS/GPS-Empfängern und zeigt im nördlichen Bereich starke Abweichungen der Ionosphärenichteverteilung vom mittleren Verhalten im Bereich der F2-Schicht. Für eine ausführliche Diskussion dieser Rekonstruktionsmethode und deren physikalische Interpretation sei auf *Schlüter et al. (2003)* bzw. *Stolle et al. (2003)* verwiesen.

Tomographie mit Radio-Okkultationsdaten

Eine Möglichkeit die Datensituation für die GPS-Ionosphärentomographie wesentlich zu verbessern, insbesondere die Vertikalinformation, ist die Kombination von GPS-Boden- mit Radio-Okkultationsmessungen. Das Messprinzip ist schematisch in Abb. 3. dargestellt. Ein niedrig fliegender Satellit (hier CHAMP) mit einer Orbithöhen um die 400km-800km und Umlaufzeiten, die im Bereich einer Stunde liegen, empfängt die Signale von mehreren GPS Satelliten. Da die GPS Satelliten Umlaufzeiten von ca. 12 Stunden haben, stehen sie für den niedrig fliegenden Satelliten quasi still, so dass der in der Lage ist, die Atmosphäre nach dem Scanner-Prinzip abzutasten. Der Name dieses Messprinzips⁸ beruht auf der Tatsache, dass der Satellit, aufgrund der atmosphärischen Refraktion bereits Signale von GPS-Satelliten empfängt, obwohl er aus Sicht dieser Satelliten geometrisch noch verborgen ist.

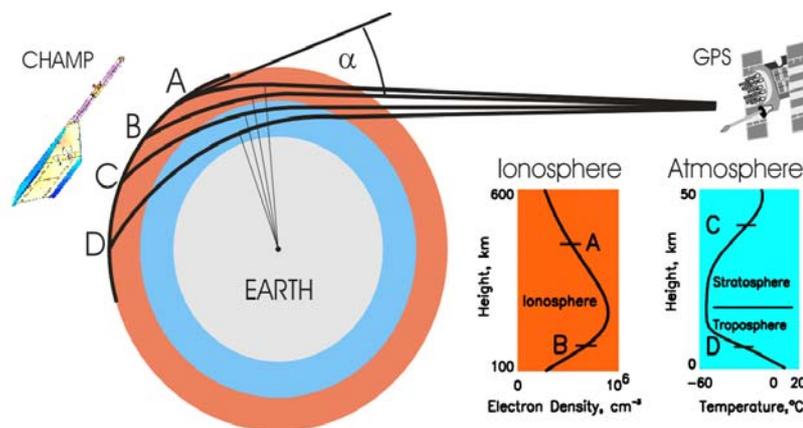


Abb. 3: Messprinzip der GPS-Radio-Okkultation.

Ein Beispiel der Ionosphärentomographie unter Einbeziehung von Radio-Okkultationsdaten ist Abb. 5. Dargestellt ist ein Vertikalschnitt einer 3D-Rekonstruktion der Elektronendichte über dem Nordpol entlang der Trajektorie des CHAMP-Satelliten für den 1. Nov. 2001. Die dazugehörigen Abb. 4 zeigt die Datenabdeckung von IGS/GPS-Bodenstationen und Daten von Radio-Okkultationsmessungen des Satelliten CHAMP (gestichelte Linie). als horizontale Projektion dargestellt.

Betrachtet man die Abbildung im Bereich von 65° - 90° N, so zeigen sich irreguläre Strukturen in der Elektronendichteverteilung, die durch eine, auf eine Störung des Erdmagnetfeldes zurückzuführende, Plasmakonvektion ausgelöst wurde. Betrachtet man die Form dieser Störung, speziell, die vertikale Verteilung, so erkennt man, dass die Rekonstruktion in diesem Bereich stark von den CHAMP-Daten, deren Strahlenwege in der Abbildung angedeutet sind, beeinflusst wird. Die Behebung solcher Artefakte, z.B. durch eine verbesserte Gewichtung der Daten, wird eine wesentliche Aufgabe der näheren Zukunft sein.

Eine genauere Diskussion des hier aufgeführten Beispiels findet sich bei Stolle et al., 2003.

⁸ occultation: eng.: geheim, versteckt

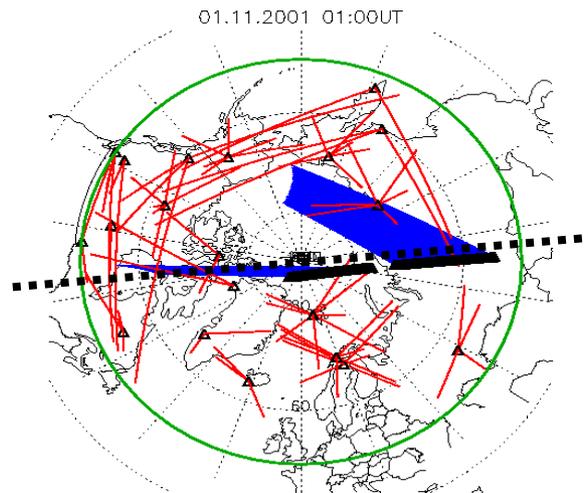


Abb. 4: Horizontal-Projektion der IGS/GPS- u. CHAMP Signalwege über dem Nordpol, 01.11.2001, 1 Uhr UT.

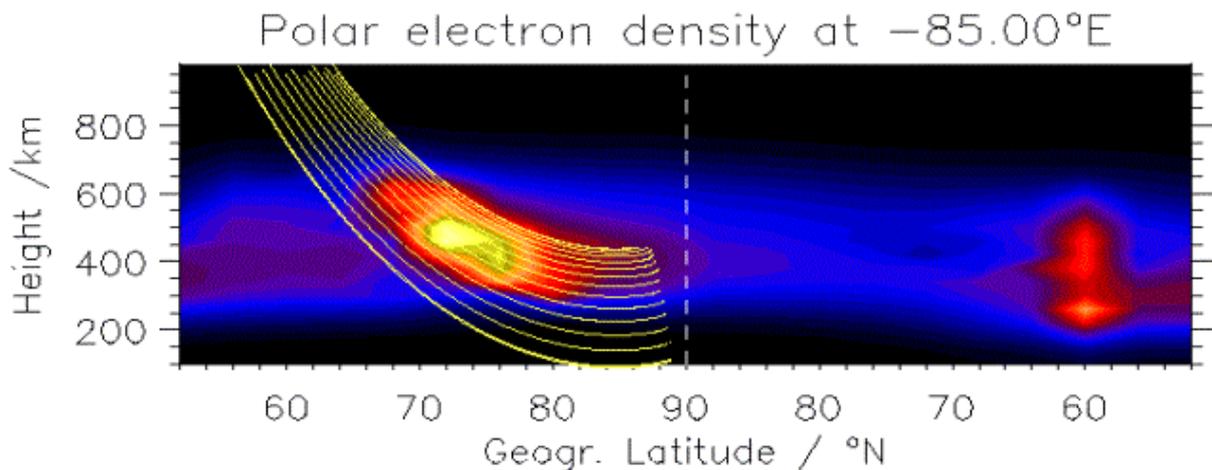


Abb. 5: 2D-Schnitt entlang der CHAMP-Trajektorie, durch eine 3D-Tomographie der polaren Ionosphäre, 01.11.2001, 1 Uhr UT.

Zusammenfassung/Ausblick

GPS Ionosphärentomographie ist auf dem Weg, ein neues Werkzeug zur Untersuchung ionosphärischer Prozesse zu werden. Wie an Beispielen gezeigt, lassen sich bereits heute großräumige Gebiete mit tomographischen Methoden untersuchen. Diese Technik profitiert dabei von der großen Anzahl bestehender Empfänger-Netzwerke, die globale Messungen mit einer hohen zeitlichen Auflösung zumeist kostenfrei zur Verfügung stellen. Für die Lösung bestehender Probleme der tomographischen Rekonstruktion, die im Wesentlichen auf die schwierige geometrische Situation zurückzuführen sind (und natürlich auch von der Größe des Gebietes und der angestrebten Auflösung abhängig sind), werden Radio-Okkultationsmessungen einen wesentlichen Beitrag leisten.

Ein nicht unwesentlicher Aspekt für die Zukunft dieser Technik ist der bestehende hohe Automatisierungsgrad bei der Erfassung und Verarbeitung von GPS-Daten, der eine operationelle Anwendung dieser Technik bereits heute ermöglicht.

Referenzen

- Austen, J. R., Franke, S.J., Liu, C.H. and Yeh, K.C., *Application of computerized tomography techniques to ionospheric research*, In: Proceedings of the URSI and COSPAR International Beacon Satellite Symposium on Radio Beacon Contribution to the Study of Ionization and Dynamics of the Ionosphere and to Corrections to Geodesy and Technical Workshop, Part 1, University of Oulu, Finland, pp. 23-35, 1986
- Censor, Y., Eggermont, P.P.B. and Gordon, D., *Strong Underrelaxation in Kaczmarz's Method for Inconsistent Systems*, Numer. Math. Pp. 83-92, 1983.
- Jakowski, N., Sardon, E., Schlüter, S., *GPS-Based TEC Observations in Comparison With IRI95 and the European TEC Model NTCM2*, Adv. in Space Res., 22, 803-806, 1998.
- Jakowski, N., Schlüter, S., and Sardon, E., *Total Electron Content of the Ionosphere During the Geomagnetic Storm on January 10*, 1997, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 61, 299-307, 1999
- Kee, C., and Yun, D., *Development of Real-time SNUDGPS via Ionospheric and Tropospheric Corrections*, Proc. of the ION GPS, pp 1411-1419, Nashville, Tennessee, Sep. 1998
- Kee, C., Sohn, Y., Park, J., *Modified Tomographic Estimation of the Ionosphere Using Fewer Coefficients*, Proc. of the ION GPS, pp 1704-1708, Portland, Oregon, Sep. 2003
- Kunitsyn, V. E. and Tereshchenko, E.D., *Ionospheric Tomography*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2003
- Materassi, M., Mitchell, C.N. and Spencer, P.S.J., *Ionospheric imaging of the northern crest of the equatorial Anomaly*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 65, pp. 1393-1400, 2003
- Pryse, S.E. and Kersley, L.A., *A preliminary test of ionospheric tomography*, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 30, 7/8, 89-103, 1995
- Ruffini, G., Flores, A., Rius, A., *GPS tomography of the Ionospheric Electron Content with a correlation functional*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol 36, No. 1, 2002
- Sardon, E., Rius, A. and Zarraoa, N., *Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from Global Positioning System observations*, Radio Science, Vol. 29, Nr. 3, pp 577-586, May-June 1994
- Schlüter, S., Stolle, C., Jakowski, N. and Jacobi, C., *Monitoring of 3 Dimensional Ionospheric Electron Distribution based on GPS measurements*, In: First CHAMP Mission Results for Gravity, Magnetic and Atmospheric Studies (Ed.: Reigber, Lühr, Schwintzer), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003
- Spencer, P.S.J. and Mitchell, C.N., *Multi-Instrument Inversion Technique for Ionospheric Imaging*, Proc. of International Beacon Satellite Meeting, Boston, 2001
- Stolle, C., Schlüter, S., Jacobi, C., Jakowski, N., Raabe, A., *Monitoring of a polar plasma convection event with GPS*, Rep. Inst. Meteorol. Univ. Leipzig 30, 112-120, 2003
- Stolle, C., S. Schlüter, Ch. Jacobi, N. Jakowski, S. Heise, A. Raabe, *Three-dimensional monitoring of the polar ionosphere with ground- and space-based GPS*; Proceedings to the Second CHAMP Science Meeting, Springer Series, 2004, in print.
- Subbarao, P.M.V., Munshi, P., Muralidhar, K., *Performance of iterative tomographic algorithms applied to non-destructive evaluation with limited data*, NDT&E International, Vol 30, No. 6, pp. 359-370, 1997