

Atmospheric Tomography Using Satellite Radio Signals

Doctoral Thesis

by

Alejandro Flores Jiménez

Advisor: Dr. Antonio Rius (CSIC)

Tutor: Dr. Angel Cardama (UPC)

Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicacions de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya
Institut d'Estudis Espacials de Catalunya, IEEC-CSIC

Barcelona, October 1999

To Ana

Resumen

Los sistemas de posicionamiento global GNSS (GPS y GLONASS) se han convertido en una herramienta básica para obtener medidas geodésicas de la Tierra y en una fuente de datos para el estudio atmosférico. Proporcionan cobertura global y permanente y por la precisión, exactitud y densidad de datos, las señales radio transmitidas pueden ser usadas para la representación espacio-temporal de la atmosfera.

La tecnología de los receptores GPS ha evolucionado con una sorprendente rapidez, resultando en instrumentos con suficiente calidad de medida para ser utilizados en estudios geodésicos, comparables a los resultados de técnicas como la interferometría de muy larga base (VLBI), y estudios atmosféricos cuyos resultados pueden ser usados en meteorología.

En la tesis *Tomografía Atmosférica utilizando señales radio de satélites* nos hemos centrado en el uso del sistema GPS por disponer mayor cantidad y calidad de referencias y herramientas para el procesado de los datos. No obstante, se ha demostrado la posibilidad de extender el concepto a cualquier sistema de transmisión radio desde satélite como sondeador atmosférico. La estructura de la tesis se ha dividido en dos áreas: el procesado de datos GPS para extraer información referente a los parámetros atmosféricos de interés, y la aplicación de técnicas tomográficas para la resolución de problemas inversos. En particular, la tomografía se ha aplicado a la ionosfera y la atmósfera neutra. Ambos problemas tienen aplicación de impacto socio-económico: a) la monitorización del estado ionosférico es fundamental por las perturbaciones que la ionosfera provoca en las transmisiones radio que la atraviesan, y b) la estimación del contenido de vapor de agua de la troposfera es de utilidad en la predicción meteorológica y climática.

La tomografía ionosférica se empezó a desarrollar usando únicamente datos de la red global IGS. A continuación se mejoró la resolución vertical mediante la utilización de datos de ocultaciones del experimento GPS/MET. La mejora de la resolución se ve limitada a la región en la que estos datos existen. Finalmente, se utilizaron datos de altimetría del satélite TOPEX/POSEIDON para mejorar los mapas y para demostrar la posibilidad de calibración instrumental de los altímetros radar.

La aplicación a la troposfera se obtuvo tras la mejora y refinamiento tanto del procesado de datos GPS como del proceso de inversión tomográfica. Los primeros resultados se obtuvieron mediante los datos experimentales de la red permanente en Kilauea, Hawaii, por la configuración particular de los receptores. Estos resultados demostraban la capacidad de obtener representaciones espacio-temporales de la troposfera con datos GPS. El análisis de los datos de la campaña REGINA, realizada en el Onsala Space Observatory, nos permitió la descripción de un fenómeno meteorológico complejo mediante la tomografía troposférica usando datos GPS y su verificación por comparación directa con medidas realizadas por radiosondeo.

En conclusión, se ha demostrado la posibilidad de aplicar tomografía a la atmósfera utilizando señales radio de satélites y, en particular, la constelación GPS.

Acknowledgements

This thesis is the final outcome of many years of perseverance and long working hours in different related topics. It comes a time when it is needed to put an end to a path opened long ago and call it a PhD dissertation. Atmospheric tomography using satellite radio signals was the topic to which I devoted most of the time and it is time now to acknowledge everyone who contributed to this creature.

First and foremost, I am indebted with Antonio Rius, who has guided the group since its creation, back in the depths of time. Along these years, I must say, I have learnt a lot on dealing with projects, research, people and meeting-hopping. Without him, this thesis would have never happened.

My advisor at the University, Angel Cardama, has eased my way through what could have become my own private karkian castle.

The Earth Science Department in the Institut d'Estudis Espacials de Catalunya needs also to bear some of the responsibility of this thesis: Giulio, with whom I started learning about tomography, Lidia, Pedro, Estel, Pepa, Jordi, who taught me meteorology and how to write a chapter in an express course, Josep Maria, Herr Dirk, my dearest Ana and, of course, our always helpful system manager Josep.

I must also thank people from other institutions who have hosted me in different visits or provided insight to the work. Chris Rocken and the group at UCAR, hosted us in November 1997, made available large sets of GPS/MET data, and kept a constructive critic view on the work done; Pierluigi Silvestrin hosted a one-week visit at ESTEC/ESA and with him we had many useful conversations at different meetings; Lubo Gradinarsky and Gunnar Elgered and the Onsala community for fruitful discussions during a peaceful rainy month. Beatriz Navascués (INM) provided the ECMWF data for the Hawaii experiment. Mike Bevis (SOEST) and Mike Lisowsky (HVO-USGS) made the GPS data available. Bruce Haines (JPL) kindly provided the T/P GPS data and Nicolas Picot (CNES) the altimetry data. Ken Hurst (JPL) supported the use of GIPSY-OASIS II for a variety of purposes. Manfred Sust (Austrian Aerospace) and Jacob Christensen (Saab-Ericsson Space) for their help in occultation related problems and active discussion on GPS capabilities. Data used for the analysis was gathered from publicly available servers, maintained by organizations like IGS, CODE, JPL, NOAA, ECMWF and USGS. Many colorful pictures in this thesis were done using GMT and Vis5d. The research work was supported by the EU-funded projects WAVEFRONT and CLIMAP, and the Comissionat per a Universitats i Recerca de la Generalitat de Catalunya.

Thanks so much to my family for encouraging me and specially to Ana who bore my obsessive revision of the manuscript with a smile.

Contents

Acknowledgements	i
1 Introduction	5
2 GPS Signal Structure	9
2.1 Signal Modulation and Access Technique	9
2.2 GPS Observables	12
2.2.1 Primary Observables: Phase and Pseudorange	12
2.2.2 Modeling the Primary Observables	14
2.2.3 Secondary Observables	16
2.2.3.1 Carrier-Phase Smoothed Pseudorange	16
2.2.3.2 Cycle Slip Detection: Wide-laning and Narrow-laning	17
2.2.4 Clock errors: Selective Availability	18
2.2.5 Atmospheric effects	18
2.2.5.1 Ionosphere	19
2.2.5.2 Neutral Atmosphere	19
2.3 GPS data processing	20
2.3.1 Differential GPS vs. Precise Point Positioning	21
2.3.1.1 Differential GPS Processing	21
2.3.1.2 Precise Point Positioning	22
2.3.1.3 Characterization of the variables in Precise Point Positioning	23
2.3.2 Atmospheric modeling in the GPS data processing	23
2.3.2.1 Ionospheric Data	24
2.3.2.2 Tropospheric Data	24
3 The Inverse Theory and Tomography	27
3.1 The inverse problem	27
3.1.1 Formulation	27
3.1.1.1 Set of basis functions	29
3.1.1.2 Construction of the linear system	30
3.1.1.3 Coping with the indetermination of the system: constraints .	31
3.1.2 Solving process	31
3.1.2.1 The least squares approximation	31
3.1.2.2 The Constraints in the Spectral Domain: Minimizing a Func-	
tional	32
3.1.2.3 Singular Value Decomposition	33
3.2 Kalman filter	35
3.2.1 Forward filter	35

3.2.2	Smoothing process	36
3.3	A probabilistic view of the inverse problem	36
3.3.1	Particularization to Tomography	39
3.4	The GIST/LOTTOS Software package	41
4	Ionospheric Tomography	43
4.1	Ionospheric tomography equations	43
4.1.1	Differencing vs. direct approach in tomography	44
4.2	Two-layers global solution	45
4.3	Tomography with Occultation data	48
4.3.1	The GPS/MET mission	48
4.3.2	Localization of the occultations: the ring solution	49
4.4	Impact of the protonosphere: simulations using PIM	55
4.5	Ionospheric Calibration of Radar Altimeters	56
5	Tropospheric Tomography	61
5.1	Tropospheric tomography equations	61
5.1.1	The observations equations: the slant wet delays	62
5.1.1.1	Analysis of errors in the SWD calculation	63
5.1.2	The equations of constraints	64
5.2	Results with simulated data	65
5.2.1	Characterization of the system: Resolution and Noise	65
5.2.2	Simulations using the Hawaii network	67
5.2.2.1	Discretization error and spike analysis	68
5.2.2.2	3D refractivity field reconstruction	71
5.2.3	Tomography using a flat network	72
5.2.3.1	Gradient Impact	75
5.2.3.2	3D refractivity field reconstruction	75
5.2.3.3	Network geometry considerations: a link with antenna theory	77
5.3	Results with experimental data	81
5.3.1	Results from the Hawaii network on Feb. 1, 1997	81
5.3.1.1	The Network and the Tomographic Processing	81
5.3.1.2	Interpreting the tomographic solution	83
5.3.1.3	Verification of the results: comparison with ECMWF analysis	86
5.3.1.4	Conclusions from the Hawaii 1997 data	86
5.3.2	Results from the REGINA Campaign at the OSO	86
5.3.2.1	The Network and the Tomographic Processing	86
5.3.2.2	Interpreting the tomographic solution	89
5.3.2.3	Verification of the results: Discussion of the meteorological situation over Onsala on the 24th August 1998	91
5.3.2.4	Verification of the results: A direct comparison of GPS tomography with radiosonde data	101
5.3.2.5	Verification of the results: Comparison for August 29, 1998 data	103
5.3.2.6	Conclusions on the REGINA experiment	105
6	Conclusions	107

A Gradients in tropospheric delay modeling	111
A.1 Slant delay gradients	111
A.2 Zenith delay gradients	112
B Basics of Atmospheric Physics	113
B.1 Hydrostatic equation	113
B.2 Temperature lapse rate	113
B.3 Potential Temperature	114
B.4 Water vapor in the atmosphere	115
B.5 Skew-T plots	116
B.6 Atmospheric Radiation	116

