

CÁLCULO DEL CONTENIDO TOTAL DE ELECTRONES
(TEC) EN LA IONOSFERA COLOMBIANA MEDIANTE
LA UTILIZACIÓN DE UNA RED DE ESTACIONES DE
RASTREO SATELITAL (REICO)

Juan Carlos Palacios Caicedo

CÁLCULO DEL CONTENIDO TOTAL DE ELECTRONES
(TEC) EN LA IONOSFERA COLOMBIANA MEDIANTE
LA UTILIZACIÓN DE UNA RED DE ESTACIONES DE
RASTREO SATELITAL (REICO)

Trabajo de tesis para optar por el título de
Master en Ciencias - Física

Juan Carlos Palacios Caicedo

Director: Jaime Villalobos Velasco Ph.D.

Grupo de Investigación Argos - Física Geoespacial
Departamento de Física y Química
Universidad Nacional De Colombia
Manizales

Agosto de 2010

Ph. D. Jaime Villalobos Velasco
Director

Juan Carlos Palacios Caicedo
Autor

Cálculo del Contenido Total de Electrones (TEC) en la Ionosfera Colombiana mediante la utilización de una Red de Estaciones de Rastreo Satelital (REICO)

Ing. Juan Carlos Palacios Caicedo

Trabajo de tesis para optar por el título de
Master en Ciencias-Física

Resumen

La ionosfera es una región de la alta atmósfera, originada por la interacción de ésta con la radiación proveniente, principalmente, del Sol. Se ve afectada por la latitud, longitud y altitud terrestre, el tiempo, el ciclo solar, las estaciones, entre otros. La ionosfera constituye un medio de propagación de señales electromagnéticas a las cuales distorsiona, debido a su naturaleza conductora y características altamente cambiantes.

En este trabajo se desarrolla un modelo que permite obtener el contenido total de electrones (TEC) de la ionosfera, a partir de datos adquiridos con la red REICO (Red de Estaciones Ionosféricas Colombiana) basada en receptores GPS de doble frecuencia. El modelo se realiza analizando las variaciones que sufren las señales electromagnéticas satelitales al transitar por la ionosfera. Tomando los observables de pseudorange y fase de arrastre, provenientes de los archivos de observación, se calcula el Slant TEC. Posteriormente, usando los archivos de navegación, se obtiene las órbitas de los satélites GPS. Asumiendo la ionosfera como una capa delgada, el vector de onda, de la señal producida por el satélite, cruza la ionosfera en un punto de corte, calculado a partir de la posición del receptor y del satélite para un tiempo determinado. Con referencia a este punto se calcula el Vertical TEC. Finalmente se hace una confrontación del modelo diseñado con otros existentes.

Cálculo del Contenido Total de Electrones (TEC) en la Ionosfera Colombiana mediante la utilización de una Red de Estaciones de Rastreo Satelital (REICO)

Ing. Juan Carlos Palacios Caicedo

Trabajo de tesis para optar por el título de
Master en Ciencias-Física

Abstract

Geospace physics has increasingly growth in importance in the last years. The development of new space technologies must take into account the interaction between space weather and terrestrial atmosphere. Consequently, the ionosphere is a very important zone because of its characteristics, properties and the influence in electromagnetic waves.

In this thesis a model aimed to provide information related with total electron content (TEC) in ionosphere is presented. Studied data was collected from a station located at Bogotá, (Colombia) belonging to (REICO) (Red de Estaciones Ionosféricas de Colombia) based on two frequency GPS receivers. The presented model is based on analysis of the variation in the satellital electromagnetic waves that pass through the ionosphere. By taking the Observation files to obtain pseudorange and carrier phase observables slant TEC is calculated. Next, using Navigation files, GPS orbits are estimated. By assuming ionosphere as a single layer, the wave vector crosses such a layer through a piercing point. Vertical projection of TEC is obtained for that point. Finally, the designed model is compared with other existing.

Agradecimientos

El primer agradecimiento lo debo hacer a mi familia ya que sin ellos no hubiera podido hacer todo lo que he hecho hasta este momento.

Mi agradecimiento principal es para mi director de tesis, el profesor Jaime Villalobos Velasco bajo cuya supervisión elegí y desarrollé el tema tratado en este trabajo. También debo agradecer al Dr. Cesar Valladares de Boston College quien ha sido una guía y un apoyo para el desarrollo de esta investigación. Agradezco también a los miembros del grupo LISN, a los docentes de la Universidad Nacional, a mis amigos y compañeros que me colaboraron mucho.

Un agradecimiento muy especial a Paola Narváez.

Índice general

Resumen	IV
Abstract	v
Agradecimientos	VI
1. Introducción	1
1.1. Objetivos de la Tesis	2
1.2. Estructura de la Tesis	3
2. La Ionosfera	4
2.1. La Atmósfera terrestre	4
2.2. Reseña Histórica	6
2.3. Fuentes de Ionización	7
2.4. Capas de la Ionosfera	8
2.4.1. Capa D	8
2.4.2. Capa E	9
2.4.3. Capa F	9
2.5. Anomalías Ionosféricas	9
2.6. Propagación de señales electromagnéticas por la Ionosfera	11
3. Sistema de Posicionamiento Global (GPS)	15
3.1. Descripción del Sistema	16
3.2. Ubicación por GPS	17
3.3. Observables básicos	18
3.4. El Tiempo	20
3.5. Archivos Rinex	21
3.6. Representación Orbital	25

4. Modelo de TEC Ionosférico Colombiano	30
4.1. Contenido Total de Electrones Oblicuo sTEC	32
4.2. Errores por Satélite y Receptor	34
4.2.1. Bias de Satélites	34
4.2.2. Bias de Receptor	36
4.3. Contenido Total de Electrones Vertical vTEC	37
4.4. Diagrama de Bloques	40
5. Comparación de Modelos	42
5.1. Modelos Ionosféricos	42
5.2. Comparación con IRI y TECALCRNX	44
6. Conclusiones y Perspectivas	49
6.1. Conclusiones	49
6.2. Perspectivas	51
Bibliografía	52
Apéndice	56
A. Gráficos de Contenido Total de Electrones	56
B. Glosario	66

Índice de figuras

2.1. perfil atmosférico de temperatura [18].	5
2.2. perfil ionosférico de densidad electrónica [18].	8
2.3. Modelo Ionosférico Global calculado con IRI para el día 3 de septiem- bre de 2007 a las 19:00 UT y una altitud de 10000 km	10
2.4. vector receptor satélite	11
3.1. Configuración orbital para satélites GPS	16
3.2. Intersección de tres esferas	17
3.3. Estructura de una señal GPS	19
3.4. Ejemplo de un archivo RINEX de Observación	22
3.5. Ejemplo de un archivo RINEX de Navegación	23
3.6. Parámetros Keplerianos y de perturbación para una órbita GPS [33].	26
3.7. Relación entre la anomalía verdadera y la anomalía excéntrica [22]. .	27
3.8. representación orbital para el satélite GPS PRN 3 usando archivos de Navegación. fecha: 15 de marzo de 2007	29
3.9. representación orbital para satélites GPS usando archivos de Nave- gación. fecha: 15 de marzo de 2007	29
4.1. Colombia	31
4.2. $sTEC$ de pseudorange(a) y $sTEC$ de fase(b), para el satélite 11 el 15 de marzo de 2007	33
4.3. $sTEC$ de pseudorange(azul) y $sTEC$ de fase(rojo) nivelados, para el satélite 11 el 15 de marzo de 2007	34
4.4. Curvas de $sTEC_L$ para todos los satélites el 15 de marzo de 2007 . .	35
4.5. bias satélites para señales P1 y P2	35
4.6. bias satélites para señales P1 y C1	36
4.7. Curvas de $sTEC_L$ incluyendo b_s para todos los satélites el 15 de marzo de 2007	36

4.8. Curvas de $sTEC_L$ incluyendo b_s y b_r para todos los satélites el 15 de marzo de 2007	37
4.9. Curva de $sTEC$ medio para el 15 de marzo de 2007	38
4.10. Esquema de la proyección de TEC vertical	38
4.11. Curvas de $vTEC$ incluyendo b_s y b_r para todos los satélites el 15 de marzo de 2007	39
4.12. Curva de valores medios de $vTEC$ incluyendo b_s y b_r para el 15 de marzo de 2007	40
4.13. diagrama de bloques	41
5.1. Contenido Total de Electrones calculado con IRI para el 15 de marzo de 2007 para una latitud de $4,64^\circ$, una longitud de $285,92^\circ$ y altura de 2000 km	43
5.2. Contenido Total de Electrones calculado con TECALCRNX para el 15 de marzo de 2007 para una estación ubicada en Bogotá	44
5.3. Comparación gráfica entre el modelo realizado (negro) y los modelos a) TECALCRNX (rojo) y b) IRI (azul) para el 15 de marzo de 2007 .	45
5.4. Comparación gráfica entre los valores medios del modelo realizado (negro) y los modelos TECALCRNX (rojo) e IRI (azul) para el 15 de marzo de 2007	46
5.5. Evolución temporal de las diferencias medias y los errores cuadráticos medios para 16 días comenzando el 15 de marzo de 2007 hasta el 30 de marzo de 2007.	48
A.1. gráficas de Contenido Total de Electrones para un período de 16 días comenzando el 15 de marzo de 2007 (a) hasta el 30 de marzo de 2007 (p) calculadas con el modelo desarrollado en este trabajo	59
A.2. gráficas de Contenido Total de Electrones para un período de 16 días comenzando el 15 de marzo de 2007 (a) hasta el 30 de marzo de 2007 (p) calculadas con TECALCRNX	62
A.3. gráficas de Contenido Total de Electrones para un período de 16 días comenzando el 15 de marzo de 2007 (a) hasta el 30 de marzo de 2007 (p) calculadas con IRI	65