

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：19760275

研究課題名（和文） 地球周辺電子密度の大規模データベースを利用した衛星測距誤差の補正に関する研究

研究課題名（英文） Error correction for ionospheric delay in satellite navigation systems using a data set of the global density profile

研究代表者

後藤 由貴 (GOTO YOSHITAKA)

金沢大学・電子情報学系・助教

研究者番号：30361976

研究成果の概要（和文）：衛星測距における測距精度向上を目指して、科学衛星の観測データを利用した地球周辺の3次元的な電子密度分布モデルの構築と同モデルを利用した測距信号の伝搬シミュレータの作成を行った。現在、衛星測位の標準となったGPS(Global positioning system)では、伝搬路上のプラズマ粒子による遅延の影響を、薄膜電離層を仮定することにより対処している。これに対し、電離圏を取り囲む広大な領域であるプラズマ圏の各種パラメータ依存性も考慮して遅延補正を行うことでより高精度な見積もりが可能となった。

研究成果の概要（英文）：We developed a new error correction model for satellite navigation systems such as the GPS. The model is based on observations of VLF waves from the Akebono satellite and the GPS data obtained at the IGS (International GNSS service) stations all over the world.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,700,000	0	1,700,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	480,000	3,780,000

研究分野：電波工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：衛星測位, 磁気圏・電離圏

1. 研究開始当初の背景

宇宙空間の応用は、人工衛星を利用した測位や環境モニタリング、計画中の宇宙太陽発電所など様々な目的のために拡大しており、その媒体である電磁波の伝搬特性の高精度な解析が求められている。このような衛星-地上間で送受信される電磁波に大きな影響を及ぼす電離圏については、従来から様々な方法で調査が進んでいるのに対し、電離圏の外側で地球を取り囲むプラズマ圏に関しては、伝搬媒質の分散特性が無視できないにもかかわらず、その原因となる電子密度の空間構造を十分に把握しきれていないのが現状である。これは、プラズマ圏が地上からの直接観測が難しく、主に一点観測の衛星による調査にゆだねられていることに起因している。このため衛星-地上間の通信、特に衛星測距において、電離層のみを考慮した遅延補正には本質的に限界があった。

こうした問題に対し、プラズマ圏の重要性が認識されるようになり、理論・観測の両面から電離層+プラズマ圏の電子密度分布モデルの構築が試みられつつある。過去の衛星観測に基づくものやプラズマ粒子の拡散理論に基づくものなど様々なモデルが提案されているが、プラズマ圏の形成における各種パラメータ依存の複雑さから、未だに標準化には至っていない。一方、当研究グループのこれまでの研究において、地球周辺の観測を長期間（1989年～）行ってきた科学衛星「あけぼの」の電磁波動データを利用して、地球周辺のグローバルな電子密度分布を推定する手法の開発を行ってきたが、これにより得られた分布は、衛星軌道や衛星運用上の制約のため時間的・空間的に不連続となり、単独ではモデルを構築できないという問題があった。こうした離散的な電子密度分布のデータセットを既存の電子密度分布モデルと統合することにより時間的・空間的に連続でかつ信頼度の高い分布モデルの形成が期待できる。これを太陽活動度や地球磁場に関するパラメータとともにデータベース化し、統計解析を行うことで、衛星測距において、より高精度な伝搬遅延の補正が実現できる。

2. 研究の目的

上記の研究背景をふまえ、本研究課題の目的を以下に挙げる。

(1) 地球周辺電子密度構造のデータベースの構築と統計解析

あけぼの衛星の自然波動の観測データから推定した電子密度分布のデータセットに対して、既存のモデルを適用することにより、時間的・空間的に連続な分布を再現する手法の開発を目指した。これにより地球周辺電子

密度分布のデータベースを構築し、統計的解析により太陽活動や地球磁場など各種パラメータに関する依存性を調査できるようになる。

(2) 測距信号の伝搬を再現するシミュレータの開発と測距誤差の補正

構築した電子密度分布のデータベースを利用して、地上から静止軌道高度までの実用域をカバーした電磁波動の伝搬シミュレータを作成し、より高精度な測距誤差の補正を目指す。グローバルナビゲーションの標準となったGPS(Global Positioning System)の電離層遅延補正モデルでは薄膜電離層を仮定しているが、プラズマ圏を含めた電子密度分布の3次元構造を考慮した伝搬シミュレータを用いることで、精度の向上が可能となる。

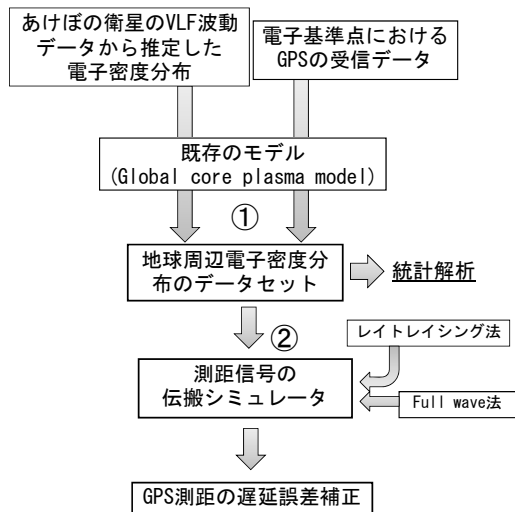
3. 研究の方法

(1) 地球周辺電子密度構造のデータベースの構築と統計解析

地球周辺の電子密度分布を反映するあけぼの衛星のVLF波動観測データを、近年開発が進められているグローバルな電子密度分布モデルGlobal core plasma model (GCPM)に反映させる手法を検討した。ここで、公開されている世界各地の電子基準点におけるGPSの受信データも合わせて利用することにした。GPSのデータからは、経路上の電子密度の積分値TEC(total electron content)の情報が得られる。GCPMの誤差モデル(補正モデル)としてSmoothness priorを仮定することにより、VLFの観測データおよびGPSの受信データに矛盾のない誤差分布を季節、ローカルタイム、高度に対し求解した(図1のフローチャート中の①)。最適パラメータの探索は、複数の計算機による並列計算により実現した。

(2) 測距信号の伝搬を再現するシミュレータの開発と測距誤差の補正

測距信号の伝搬を再現するシミュレータの開発において、プラズマ中の電磁波の分散関係を逐次的に解くレイトレイシング法と電磁界の数値的解析手法であるFull wave法を合わせて利用した。レイトレイシング法は伝搬モードの遷移を再現できないことや、波のモードエネルギーを表現するのが難しいなどの問題があり、これらに対し何らかの工夫により近似的に求解する必要がある。一方、多数の平面波の電磁界成分をすべて追跡するFull wave法は電磁波の挙動を精度良く再現できるという利点がある反面、媒質に水平層構造を仮定する必要があり、また膨大な計算量を要する。地上から静止衛星高度までの複数の異なる領域における伝搬特性、特に屈折効果を精度良く求めるために、各手法の計算量と精度を考慮してバランス良く用いるようにした



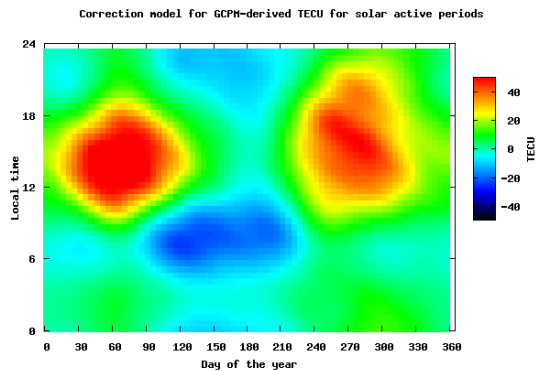
(図1のフローチャート中の②)。両手法とも非常に多数の平面波を追跡することにより波の広がりを変換するため、計算過程において並列処理を行った。実際、各手法を領域別に適用する場合、両手法間で伝搬特性に不連続が生じないように注意する必要がある。このシミュレータを用いて、GPS測距における遅延誤差補正を試みた。

図1. 開発のフローチャート

4. 研究成果

ベースモデルとして GCPM を利用することにより、時間的・空間的に連続な電子密度分布が得られるようになった。GCPM の精度が特に低かった低緯度において測距信号の遅延の見積もり精度の大幅な改善に成功した。例として太陽活動度が高い年における通年日とローカルタイムに対する補正モデルを図2に示す。両パラメータに対して特徴的な傾向を示しているのが分かる。また、高度方向に対しては、電離圏とプラズマ圏で逆のセンスの補正が必要であることが分かった。これらの補正モデルにより、長期間のあけぼのの観測値およびGPSの受信データを反映したグローバルな電子密度分布モデルの構築が可能となった。今後、同手法により、さらなるデータをフィードバックして行きたい。

伝搬シミュレータの開発では、従来、ホイストラモードなどの低周波の波動の伝搬経路を求めるために利用されてきたレイトレイシング法を拡張し、マイクロ波帯の伝搬モードでも数値演算の桁落ちが生じないようにすることで、測距信号の伝搬を幾何光学近似に基づき理論的に再現できるようになった。媒質の変化が激しい領域においては Full wave 法により信号波動の挙動を再現することで波動の角度の広がりの変化を取り扱う



ことができるようになり、伝搬特性をより厳密に取り扱うことが可能となった。開発した伝搬シミュレータは、地球周辺だけでなく、月面近傍での HF 帯の伝搬解析にも応用することができた。伝搬シミュレータの核となるレイトレイシングのプログラムコードを、インターネットを通して公開することで、世界中の研究者が利用できるようにした。

図2. GCPM から求めた TEC に対する補正モデルの例

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

1. 井出 貴将, 後藤 由貴, 笠原 禎也, グローバルな電子密度モデルを用いた衛星測距誤差補正に関する研究, 信学技法, 108(267), SANE 2008-59, 35-39, 2008. 査読無
2. 後藤 由貴, 笠原 禎也, 橋本 弘藏, かぐや衛星搭載波形捕捉器における高効率波形データ取得法, 電子情報通信学会論文誌, J91-B(5), 617-625, 2008. 査読有
3. Y. Kasahara, Y. Goto, K. Hashimoto, T. Imachi, A. Kumamoto, T. Ono, and H. Matsumoto, Plasma Wave Observation Using Waveform Capture in the Lunar Radar Sounder on board the SELENE Spacecraft, Earth, Planets and Space, 60(4), 341-351, 2008. 査読有

[学会発表] (計12件)

1. Y. Goto, T. Fujimoto, Y. Kasahara, A. Kumamoto, T. Ono, Feasibility of Lunar Ionosphere Exploration Using Low Frequency Wave Reflection, 6th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society, PS17-A024, Suntec Singapore International Convention & Exhibition Centre (Singapore), 2009. 8. 14.
2. 後藤由貴, 井出貴将, 笠原禎也, GPS ト

- モグラフィによる低緯度における Global Core Plasma Model の統計的評価と改良, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, E116-P025, 幕張メッセ国際会議場 (千葉県), 2009 年 5 月 18 日.
3. 藤本貴政, 後藤由貴, 笠原禎也, 低周波波動を利用した月電離層探査に関する理論的検討, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, P144-P027, 幕張メッセ国際会議場 (千葉県), 2009 年 5 月 16 日.
 4. Y. Goto, S. F. Fung, Y. Kasahara, Intensity and Wave-normal Maps of Plasmaspheric Hiss Using Long-Term Observation data from the Akebono, Proc. of 29th Int. Union of Radio Science (URSI), HP-HG1.6, Hyatt Regency Chicago Hotel in downtown Chicago (USA), 2008.8.12.
 5. 江口恭平, 後藤由貴, 笠原禎也, あけぼの衛星で観測されたホイスラ波動データを用いたプラズマ圏の電子密度分布の変化, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, J161-P005, 幕張メッセ国際会議場 (千葉県), 2008 年 5 月 26 日.
 6. Y. Goto, S. F. Fung, and Y. Kasahara, Long-term Average Spectral and Spatial Distributions of Plasmaspheric Hiss Observed by the Akebono and IMAGE Satellites, American Geophys. Union Fall Meeting, SM14B-04, Moscone Convention Center (USA), 2007.12.10.
 7. 江口恭平, 後藤由貴, 笠原禎也, 科学衛星で観測されるプラズマ波動のオンボード自動データ縮小法に関する研究, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, J250-P009, 幕張メッセ国際会議場 (千葉県), 2007 年 5 月 23 日.

[その他]

ホームページ等

<http://waves.is.t.kanazawa-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

後藤 由貴 (GOTO YOSHITAKA)

金沢大学・電子情報学系・助教

研究者番号 : 30361976