

令和元年6月18日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06383

研究課題名(和文)地球周辺プラズマ監視のための1周波GPS受信機連携型観測装置の開発に関する研究

研究課題名(英文)Study on Ionospheric TEC Measurement by Single Frequency GPS Receivers

研究代表者

後藤 由貴 (Goto, Yoshitaka)

金沢大学・電子情報通信学系・准教授

研究者番号：30361976

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙の利活用の拡大に伴い、衛星を使ったサービス(通信、放送、測位、遠隔計測など)で利用される電波に対して大きな影響を及ぼす電離圏プラズマ(荷電粒子)の監視の重要性が高まっている。電離圏は、シンチレーションや遅延など電波伝搬に最も大きな影響を及ぼす領域であるが、その組成や密度分布は太陽活動や地磁気活動と深く関わっており複雑なパラメータ依存性をもっている。本研究では、従来の高価な2周波受信機ではなく、民生用の安価な1周波受信機を使って電離層のプラズマ密度を測定する方法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

GPS標準測位では通常、電離層遅延に対して関数モデルを用いた低減処理がなされているが、処理後でも、数メートル程度の標準偏差の誤差が残ることが知られている。一方、日本でサービスが開始された準天頂衛星システムでは、地上のGNSS信号の観測局網(電子基準点)で得られた複数周波の測距データを利用して日本上空の電離層TEC(鉛直方向のプラズマ密度の積分値)マップを作成し、その情報を補強信号として準リアルタイムに衛星から地上に向けて放送にすることにより、数センチメートル級の測位精度の実現が目指されている。本研究成果はこうした電離層TECの観測網を拡大することにつながると期待される。

研究成果の概要(英文)：Continuous monitoring of ionospheric total electron content (TEC) using networks of GNSS (global navigation satellite system) ground stations has been conducted in many countries since such networks make it possible to measure the TEC distributions in high spatial and temporal resolutions. Most of the GNSS networks are, however, built in mid latitude regions. In order to understand dynamics of ionospheric plasma at equatorial regions in more detail, it is effective to expand the observation network in low latitudes. The TEC observations are generally realized by measuring two frequency signals from GNSS satellites because only ionospheric delay depends on the frequency in ranging errors. However, multi-frequency receivers are not consumer products and their costs are much higher than those of single frequency receivers. In this study, ionospheric TEC observation method using a single frequency GPS receiver was developed.

研究分野：計測工学

キーワード：電離層プラズマ TEC計測 GPS観測網

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙利用の拡大に伴い、衛星を使ったサービス(通信、放送、測位、遠隔計測など)で利用される電波に対して大きな影響を及ぼす宇宙プラズマの監視の重要性が高まっている。特に、地球近傍のプラズマの供給源となっている電離圏は、シンチレーションや遅延など電波伝搬に最も大きな影響を及ぼす領域であるが、その組成や密度分布は太陽活動や地磁気活動と深く関わっており複雑なパラメータ依存性をもつ。このような宇宙環境の観測は、これまで主として大型予算を必要とする科学衛星、観測ロケット、地上レーダーなどに委ねられていたことから、観測期間、領域、時間継続性(頻度)について様々な制約があり、監視という観点において問題があった。

これに対して、近年、GPS に代表される衛星測位システム(GNSS)の信号の観測網を利用した TEC(電子密度の鉛直方向の積分値)の測定が国内外で積極的に進められている。日本国内では、国土地理院により電子基準点として 1,200 局以上の観測局(GEONET)が設置されており、米国、欧州、ニュージーランドなどにも同様の高密度な観測局網が存在する。このような GNSS 信号の高密度な連続観測網は、地球周辺のプラズマ密度の変動を高時間・高空間分解能で把握できる大変重要なツールになっており、各国で宇宙天気予報の情報源として活用されている。また、国際宇宙空間研究委員会(COSPAR)や国際電波科学連合(URSI)により推進されている国際電離圏標準のリアルタイムモデルの確立においても GNSS-TEC が重要な役割を果たしつつある。一方、こうした高密度の観測網は、中緯度地域に多い。プラズマ密度の変動が他の地域よりもはるかに大きい低緯度地域に、今後、如何に観測網を展開するかが、地球周辺プラズマの観測分野における重要な課題といえる。

現在、国内で運用されている GNSS の受信局網 GEONET は、本来、測定の基準点としての役割を担うものであり、発展途上国が多い低緯度地域において同種の観測網が構築されることは現状では期待できない。ここには初期投資の問題だけでなく、個々の観測局の維持、管理、更新など持続性に関する問題も潜在的に存在する。すなわち、低緯度地域の TEC 分布を観測するためには、こうした問題を解決する何らかの観測手法が必要となる。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、本研究では、通常の TEC 測定に利用される高価な 2 周波受信機ではなく、民生用の複数の 1 周波 GPS 受信機を連携させることによって、数 100 km の範囲における TEC 分布を測定する受信機連携型の観測装置の開発を目的とする。具体的な課題を以下に挙げる。

課題(1) 複数受信機の連携による TEC 分布計測手法の開発

図 1 に示すように複数の既知の地点で得られた 1 周波 GPS 観測データから、数 100 km の範囲の TEC 分布を、できるだけ高い精度で推定する信号処理法を開発する。

課題(2) データ処理サーバーおよび受信モジュールへの信号処理法の実装

ネットワークを通して各受信機を制御するデータ処理サーバーと受信機それぞれに対して、課題(1)で開発した信号処理法を実装する。

課題(3) TEC 分布計測の実証実験

開発した観測装置を用いて国内で TEC 分布の測定を行い、GEONET から導出された分布との比較を通して、観測装置としての精度検証を行う。

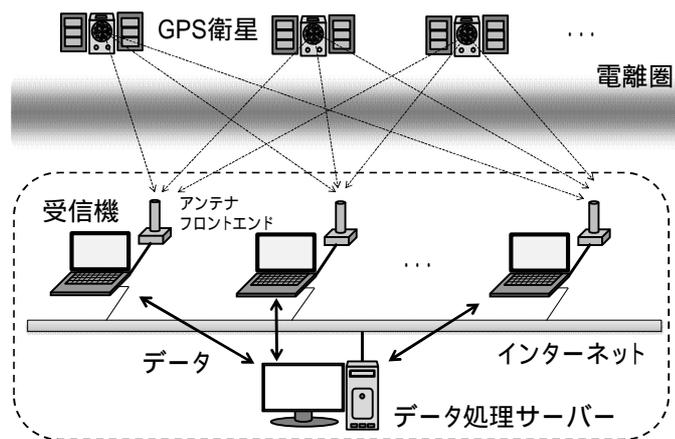


図1: 受信機連携型の観測装置の概念図

3. 研究の方法

課題(1) 複数受信機の連携による TEC 分布推定手法の開発

複数の 1 周波 GPS 受信機からの TEC 推定はいわゆる不適切逆問題であり、その求解には高度な信号処理技術が要求される。これに対して、関数モデルおよびより柔軟なセミパラメトリックなモデルを使った TEC 分布推定法を開発する。具体的には、複数地点からの TEC 測定の空間的な整合性と時間軸に対する連続性、またもう一つの未知数である受信機クロック誤差の時間連続性を保証した観測モデルを構築し、カルマンフィルタにより最適解を求解する。手法の開発に当たっては、GEONET で得られたデータのうち、1 周波で取得されたものだけを利用する。ここで、実観測でデータ処理サーバーとして利用する高速ワークステーションを購入する。

課題(2) 受信モジュールへの実装

課題(1)で開発した推定手法を、データ処理サーバーおよび受信モジュールとして実装する。

モジュール開発においては、GPS 信号の受信から TEC 分布の推定までの一連の処理を、サーバーと各受信モジュールへ割り振る方法について検討する。具体的には、[1]GPS 信号の捕捉・追尾（測距）、[2]測距誤差の算出、[3]電離圏遅延・受信機クロック誤差以外の誤差の削減、[4]信号の伝搬経路の算出、[5]TEC 分布の推定の各処理について、受信機のリアルタイム動作を保証できるという条件の元で、どの部分を受信機に担当させるかを定める。ここで、[1]の機能は、新規開発をせずに、モジュール内のチップに内蔵されたものを流用する。一方、全体を取りまとめる[5]はサーバー側に実装し、残る処理を、受信機 PC の処理能力およびサーバーと受信機の間回線容量・レスポンスを考慮して決定する。

課題(2)の遂行のために、GPS 信号を受信して PC に取り込むためのアンテナ、受信モジュール、シングルボードコンピュータなど一式を購入する。

課題(3) TEC 分布観測の実証実験

開発した信号処理法を用いて、TEC 分布計測の実証実験を行う。数 100 km 程度の範囲の TEC 分布が得られるよう各受信モジュールの配置を検討し、受信機連携型の観測機器として稼働させる。観測装置で計測された TEC 分布を、2 周波受信機の観測網である GEONET から導出された TEC 分布と比較し、精度について検証する。この際、数時間の連続観測において機器が正常に動作し続けるかの確認を行い、定常観測における問題点を洗い出す。また、受信機数を限定した長期間の定常観測を行い、季節変動や地磁気活動に対する変動が観測されることを確認する。

4. 研究成果

まず、複数受信機の連携による TEC 分布推定手法の開発に取り組んだ。複数の既知の地点で得られた 1 周波 GPS 観測データに対して、数 100km の範囲の TEC 分布を多項式の関数モデルを用いて表現し、そのモデルパラメータに時間的な連続性を仮定して求解する手法を確立した。手法開発には、国土地理院の電子基準点のデータのうち、1 周波で取得されたものを利用した。また、同手法において、受信機数に対する TEC の空間分布を表す多項式の次数の妥当性を検討した。同成果は、2016 年 URSI アジア・太平洋電波科学会議 (URSI AP-RASC2016)、地球電磁気・地球惑星圏学会 2016 年秋学会などで発表すると共に、学術誌にて公表した。

さらに受信機から得られるコード擬似距離（拡散コードの伝搬時間から算出した距離）と搬送波位相距離（搬送波の位相から算出した距離）の差分から算出したオフセット slant TEC（信号の伝搬経路に沿ったプラズマ密度の積分値）を利用した新たな TEC 推定法を考案し、同手法において主な誤差要因となる送受信機のハードウェアバイアスの取り扱いについて検討した。同手法を低コストな民生用の 1 周波 GPS モジュールで取得した単独測距のデータに適用し、電離層観測の実現性を評価した。その結果、電子基準点の 1 周波データを利用した時と比べて TEC 推定値のランダム性の時間変動が大きくなったものの、時間連続性を考慮した自己回帰モデルを適用してカルマンフィルタによりフィルタリングを行うことにより変動成分を低減できることを確認した。

また、学内に常設した GPS アンテナを利用して、GPS 信号の連続観測を実施し、長期データに対して開発した電離層 TEC 推定法が適用できることを確認した。さらに東南アジア地域において GPS 信号観測モジュールを使ったデータ取得実験を行い、開発手法によって TEC 観測ができることを確認した。この成果は、米国ワシントン D.C. で開催された米国地球物理学会秋大会 (AGU 2018) および 2019 年 URSI アジア・太平洋電波科学会議 (URSI AP-RASC 2019) にて発表した。

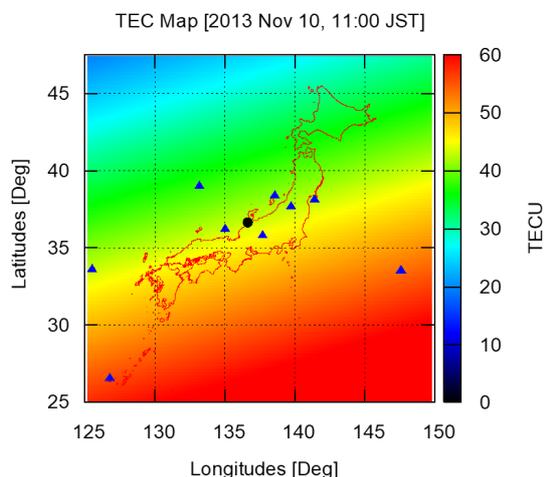


図2 GPS の 1 周波の観測データから得られた日本上空の TEC マップの例

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

Win Zaw Hein, Y. Goto, and Y. Kasahara, Estimation of Ionospheric TEC Distribution using Single Frequency Measurements of GPS signal, International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 7(12), 1-6, 2016, 査読有.

Y. Goto, K. Uda, Y. Kasahara, and K. Hashimoto, Calibration Method of Wave Polarization Data Obtained by KAGUYA/WFC, Radio Science, 51(9), 1579-1586, 2016, 査読有.

[学会発表](計7件)

Win Zaw Hein, Y. Goto, Su Su Yi Mon, and Khin Sandar Linn, Measurement of Ionospheric TEC Variation Over Low Latitude Region Using Single Frequency GNSS Receiver, 2019 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference, 2019.3.

Y. Goto, Win Zaw, Hein, K. Yokoyama, Y. Kasahara, Examination of Ionospheric TEC Observation at Low Latitude Region by Single Frequency GNSS Receiver, American Geophysical Union Fall Meeting 2018, 2018.12.

Y. Goto, Y. Tanaka, A. Suzuki, Y. Kasahara, and H. Nambo, Identification of plasma waves observed by scientific satellite with machine learning method, Japan Geoscience Union Meeting 2018, 2018.5.

Y. Goto, Win Zaw Hein, A. Matsui, and Y. Kasahara, Estimation Method of Ionospheric TEC Distribution from Single-Frequency GPS Measurements with Polynomial Models, URSI-GASS, 2017.8.

後藤由貴, Win Zaw Hein, 松井睦, 笠原禎也, 1周波 GPS 信号計測による電離層 TEC 観測の拡大, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 2017.5.

松井睦, Win Zaw Hein, 後藤由貴, 笠原禎也, 1周波 GPS 信号からの電離層 TEC 推定手法における TEC 観測モデルの検討, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2016 年秋学会, 九州大学伊都キャンパス, 2016.11.

Win Zaw Hein, Y. Kashiwa, Y. Goto, and Y. Kasahara, Estimation Method of Ionospheric TEC Distribution from Single Frequency GPS Measurements Using a Slant Effect Model, URSI AP-RASC 2016, Korea, Seoul, 2016.8.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

後藤 由貴 (YOSHITAKA, Goto)

金沢大学・理工研究域・電子情報通信学系・准教授

研究者番号：3 0 3 6 1 9 7 6

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。