

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06295

研究課題名(和文) VLF/LF帯電磁波を用いた下部電離圏の広域かつ常時モニタリング法の開発

研究課題名(英文) Development of a global and real-time monitoring method for electron density profiles of the lower ionosphere by using the VLF/LF wave propagation

研究代表者

安藤 芳晃 (Ando, Yoshiaki)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：30323877

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：下部電離圏の電子密度分布をリアルタイムで観測する要素技術の研究として、VLF/LF帯電磁波による電子密度同定問題の数値的検証を行った。まず、高精度なVLF/LF帯大地-電離圏導波管伝搬シミュレーション法を開発し、次にそれを用いて遺伝的アルゴリズムによる下部電離圏の電子密度同定問題の数値的検証を行った。送信局から500kmの位置に電子密度擾乱があった場合の電子密度同定を行ったところ、伝搬路上1,000km、またそれと直角な方向100kmに観測点を置いた場合に十分な精度で電子密度の同定が行えることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽フレアやコロナガス噴射によって地球周囲の電磁環境が擾乱を受け、様々なシステムへ影響を及ぼす。例えば送配電システムの停電、人工衛星の運用停止、無線通信の遮断などが報告されている。この地球周囲の電磁環境観測としては、人工衛星による宇宙天気予報などがあるが、安価で安定的な常時運用システムとしてVLF/LF帯の電磁波伝搬を見ることが候補として存在する。本研究は、どのようなVLF/LF電磁波観測システムを構成すべきなのかということに知見を与えるものである。

研究成果の概要(英文)：A numerical consideration on a monitoring method of electron density profile in sub-ionospheric layer has been performed. A numerical method to model the VLF/LF earth-ionosphere waveguide propagation was developed. Then, an identification of electron density profile in the sub-ionosphere, which is based on the genetic algorithm, was developed. We verified a validity of our proposed method for the problem where an ionospheric perturbation exists 500km away from a transmitter and observation points are distributed over 1,000km X 100km, and confirmed that the method successfully works with sufficient precision.

研究分野：電磁界解析

キーワード：電磁界解析 VLF/LF帯大地電離圏導波管伝搬

1. 研究開始当初の背景

下部電離圏の電子密度分布をリアルタイム観測することは、地球電磁気学上の科学的意義だけでなく、宇宙天気に関わって電力システムや人工衛星の運用などの人間活動の社会的インフラにも影響する重要な研究テーマである。この下部電離圏のモニタリング法として Very Low Frequency (VLF)/Low Frequency (LF) 帯電磁波を受信して電子密度を同定する手法はこれまでも研究されてきたが、従来法の問題点として(1) 電子密度を推定するための数値シミュレーションがモード理論に基づくものであり、詳細な電離圏のモデリングができない、(2) 観測ベースの研究が主であり、測定器の設置位置・数などの制限から、特定のイベントのみでしか計算できない等があり、そもそもどの程度の電子密度擾乱まで同定が可能なのかといったことや、同定に必要な測定器の配置などの基本的特性が明らかでなかった。これらを解決するには現実的モデリングに即したシミュレーション法を開発し、それを用いて、VLF/LF 帯電磁波による電子密度同定問題を数値的にも明らかにする必要があると言える。

2. 研究の目的

本研究の目的は大きく二つからなり、一つは高精度な VLF/LF 帯大地-電離圏導波管伝搬シミュレーション法の開発であり、もう一つはそれを用いた下部電離圏の電子密度同定問題の数値的検証である。

VLF/LF 帯の電磁波は大地表面と電離圏の下部の間の約 80km 程度の高度の間を反射しながら伝搬し、これを VLF/LF 帯大地電離圏導波管と呼ぶ。高精度な VLF/LF 帯大地電離圏導波管シミュレーション法の開発のためには、自然の持つ複雑さを、要求される精度でモデリングし、それを組み込むことのできるシミュレーション法で実装する必要がある。電離圏中の電子密度などは連続的に分布が変化し、それも単純な関数で表せるものではなく、日変化・季節変化なども含む。また、長距離伝搬となるにつれ、地球の曲率が無視できなくなってくる。これらを考慮したシミュレーション法を確立するのが本研究の目的である。また、長距離伝搬となった際には、空間分割のセル数の増加によって多くのメモリを使用することから、分散型コンピューティングなどの手法を取り入れる必要がある。これらを実装することで、送信点と受信点の地理的位置および時刻を与えれば VLF/LF 帯大地電離圏導波管伝搬をモデリングできるようになることが目的の一つである。

もう一つの目的は、上記で確立したシミュレーション法を用いて、実際の下部電離圏の電子密度を同定したときに、可能な同定範囲、精度などを明らかにすることである。実際に観測点を設置する際の、同定に必要な間隔および観測点数が明確となっていない。また、同定された電子密度が、それら観測点の密度に応じてどの程度の精度で同定できるものなのか、同定の精度も明確になっていない。これらを数値的に検証することが本研究の目的となる。

3. 研究の方法

高精度な VLF/LF 帯大地-電離圏導波管シミュレーション法を確立するため、球座標系における 3次元有限差分時間領域(Finite Difference Time Domain; FDTD)法をベースにし、これまで本研究代表者が開発してきた球座標系における吸収境界条件と、下部電離圏を効率的にモデル化する等価導電率法を取り入れる。電子密度分布としては電離圏モデルである International Reference Ionosphere (IRI)-2016 とリンクすることで取得、また衝突周波数は同じく大気モデルである NRL-Mass Spectrometer Incoherent Scatterer (MSIS) E-00 から大気温度と密度を取得し、理論式に従って導出する。これらの経験的モデルは地理的位置と高度、日時からパラメータを導出できるため、日変化や季節変化をシミュレーションに取り込むことが可能となる。大地の導電率を考慮するため、表面インピーダンス法を取り入れた。また、地磁気については地表面における値を上空まで拡張して用いている。電離圏は磁化プラズマとしてモデル化できるが、球座標とデカルト座標の変換を行い、球座標系での磁化プラズマテンソルを導出する。

最終的にこのシミュレータを電子密度同定に利用するには、多数シミュレーションを行う必要があることから高速化を行う。General Purpose Graphical Processing Unit (GPGPU)を用いた並列計算および、Message Passing Interface (MPI)を用いたネットワークを介しての並列計算環境で動作できるように実装する。

上記で構成したシミュレータを用いて、未知の下部電離圏電子密度を同定することがもう一つの目的となる。ここでは「どの程度の電子密度擾乱であれば同定できるのか」「同定できる電子密度擾乱パラメータは何か」といった同定の普遍性や精度について検証する。同定するには、解として設定した電子密度擾乱が存在したときの VLF/LF 帯伝搬時の地表面電界強度を作成し、その電界強度情報のみに基づいて電子密度の位置、密度、広がりを推定する。推定法としては、生物の淘汰、選択、交叉、突然変異を模した最適化法である遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm; GA)を用いて、探索中の電子密度擾乱による地表面電界強度と、解として設定したものと誤差を最小化するように GA で探索する。

4．研究成果

球座標系 3 次元 FDTD 法による VLF/LF 帯大地電離圏導波管伝搬の電磁界シミュレーションを実装した。IRI-2016 および NRL-MSISE00 から電子密度、大気数密度、温度を取得することで任意の位置、日時におけるシミュレーションを可能とした。大地導電率については表面インピーダンスで実装した。現在のところ地形情報は伝搬路を変えた際には設定し直す必要がある。また、座標変換を取り入れることで、地磁気の方法も任意にシミュレーションに組み込むことに成功した。

計算時間削減のため PC クラスタによる複数ノード MPI、GPGPU による高速 FDTD シミュレータをそれぞれ開発し、実行時間の高速化を試みた。複数ノード MPI による計算では、GA における個体数を分散できるため、効率的な分散コンピューティングが可能となる。例えば、個体数 24 に対して、単一ノードでは 12040.2 秒であったのに対して、複数ノード MPI では 6700.5 秒となり、約 1.7 倍速く計算を実行できることが確認された。また、GPGPU を用いた場合は 218 秒となり、これであれば、ほぼリアルタイムに電子密度の同定が可能といえる。

開発した GA による電子密度推定手法の有効性を確認するため、数値的検討を行った。設定した問題として、送信局と電子密度擾乱の水平距離を 500km とすると、その線上 1,000km、またそれと直角な方向 100km に密に観測点を置いた場合、擾乱の電子密度、高度方向および水平方向の広がり、線上およびそれと直角な方向の位置推定について、解として設定したパラメタを推定することができた。およそ 40km 四方に一点の観測点があれば同定が可能であると言える。同定の精度としては、高度方向は 1km 程度、水平方向は約 10km 程度、水平方向の広がりの標準偏差として約 10km 程度以内で同定が可能という結果が得られた。

観測点を大幅に減じて、送信局と電子密度擾乱を結ぶ線上と、それと平行に ± 50 km 離れた線上にのみに観測点を置いたところ、電子密度擾乱の同定には至らなかった。地表面の 2 次元平面全体にわたって均等な観測点配置が、電子密度擾乱の同定には重要であることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yoshiaki Ando	4. 巻 28
2. 論文標題 An Approximate PML Applied to Cylindrical and Spherical Coordinate Sectors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.	6. 最初と最後の頁 741-743
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LMWC.2018.2853565	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Yoshiaki Ando
2. 発表標題 Numerical simulation of ULF/SLF/ELF electromagnetic waves propagating in the lithosphere by using WLP-FDTD method
3. 学会等名 2019 URSI-Japan Radio Science Meeting（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Kawaura, T. T. Tsuda, Y. Hozumi, Y. Ando, K. Hosokawa, H. Suzuki, T. Nakamura, and K. T. Murata
2. 発表標題 PMC detection in Himawari-8 full disk image
3. 学会等名 ISAR-6（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Hozumi, T. T. Tsuda, K. Kawaura, Y. Ando, K. Hosokawa, H. Suzuki, T. Nakamura, and K. T. Murata
2. 発表標題 Polar mesospheric clouds observation from the Himawari geostationary meteorological satellite
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Kawaaura, T. T. Tsuda, Y. Hozumi, Y. Ando, K. Hosokawa, H. Suzuki, T. Nakamura, and K. T. Murata
2. 発表標題 PMC detection method applying to Himawari-8 data
3. 学会等名 The Tenth Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 寺山 透星, 安藤 芳晃
2. 発表標題 3次元球座標系FDTD法を用いたVLF/LF帯大地-電離圏導波管伝搬の数値解析
3. 学会等名 jpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村 亮太, 安藤 芳晃, 服部 克巳
2. 発表標題 WLP-FDTD法を用いた地震に伴うULF帯地殻内電磁波伝搬シミュレーション
3. 学会等名 jpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 関根健太, 安藤芳晃
2. 発表標題 3次元球座標系FDTD法によるVLF/LF帯大地-電離圏導波管伝搬シミュレーション法の開発
3. 学会等名 日本大気電気学会第97回研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------