

時間領域 Full wave 解析を用いた 電離圏電子密度推定手法に関する研究

0955015 二谷 崇大

1. 目的

MF レーダを用いることで、電離圏下部の連続観測が可能となるが、電波による電子密度計測技術は1970年代以降大きな進展ないため、電子密度分布の導出過程や処理アルゴリズムなどの再検討により電子密度計測技術の向上・検証が国際的に期待されている。現在MFレーダを用いた電離圏下部電子密度推定に用いられているアルゴリズムとしてDAE法がある。DAE法とは電離圏D、E領域で分反射される左旋性偏波と右旋性偏波の反射量の違い（観測された受信電波比）から電子密度を推定する手法である。しかし、DAE法にはいくつかの問題点がある。そこで、時間領域 Full wave 法を用いてMFレーダの観測手法を再現し、DAE法の問題点・改良点の検討を行った。

2. 検証方法

電離圏中の電波伝搬特性は、Full wave 解析により求めることができる。これまででは、単一の周波数に対する各薄層中の解析解を求め、その境界に境界条件を適用することで電離圏全体の解析解を求めていた。しかし、MFレーダ送信パルス（パースト波）は広い周波数スペクトルを持つため、単一周波数ではなく広い周波数帯域を取り扱う必要がある。パルス波の伝搬特性を解析するため、パルス波をフーリエ変換して、各周波数毎に Full wave 計算を行い、逆フーリエ変換して伝搬後の波形を再現する。こうすることで時間領域における任意の波形の伝搬解析を行うことができ、Full wave 解析によってパルス波を再現できるようになった。本研究では、この手法を時間領域 Full wave 法と呼ぶ。時間領域 Full wave 法で再現した電離圏反射波 (A_X/A_O)、予め仮定した反射係数 (R)、吸収係数 (k) が DAE 法のパラメータとなり、電子密度推定を行う。そして時間領域 Full wave 法でパラメータとして用いた電子密度高度分布と DAE 法を適用させて得られた電子密度高度分布を比較することにより、DAE 法で使用するパラメータの妥当性を検証した。図1に検証方法のブロックダイアグラムを示す。

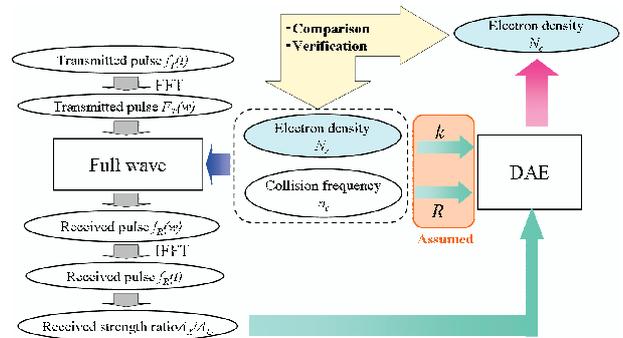


図 1: 検証方法のブロックダイアグラム

3. R_X/R_O 及び、 $(k_X - k_O)/N$ の修正値

MF レーダシミュレーションの結果をもとに、 R_X/R_O 及び、 $(k_X - k_O)/N$ に修正を加えた。図2に反射係数比 R_X/R_O 、図3に吸収係数 $(k_X - k_O)/N$ を示す。それぞれ縦軸に高度、図2の横軸に反射係数比、図3の横軸に吸収係数を示す。これまでのMFレーダシミュレーションの結果から、 R_X/R_O の高度約80km以下の値において電子密度高度分布が正確に推定できない原因があると分かった。そこで、高度約80km以下

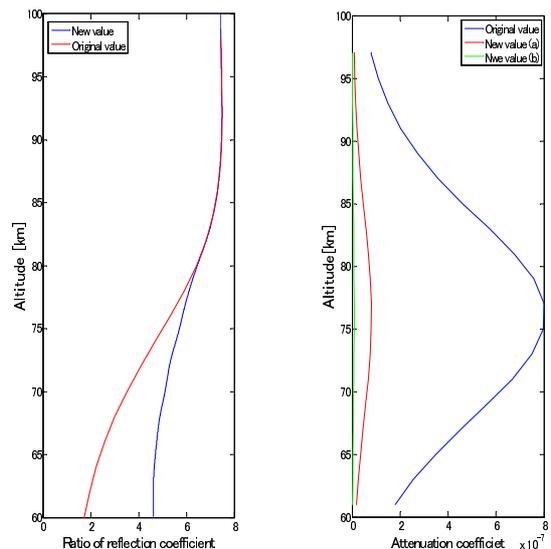


図 2: 修正前と修正後の反 図 3: 修正前と修正後の吸
射係数比 R_X/R_O 収係数 $(k_X - k_O)/N$

で R_X/R_O の比を大きくした．この図の赤線は修正前の R_X/R_O ，青線は修正後の R_X/R_O である． R_X/R_O を修正しただけでは正確な電子密度高度分布推定ができない場合があったため，DAE 法のパラメータとして用いる $(k_X - k_O)/N$ に含まれる N を変更することで，より正確な電子密度高度分布が推定できると考え，本研究では修正を加えた $(k_X - k_O)/N$ を 2 パターン作成しシミュレーションを行った．この図の青線は修正前の $(k_X - k_O)/N$ ($N = 10^2 \text{cm}^{-3}$)，赤線は 10^{-1} 倍 ($N = 10^3 \text{cm}^{-3}$)，緑線は 10^{-2} 倍 ($N = 10^4 \text{cm}^{-3}$) した値である．

4. MF レーダシミュレーション

前節に示した修正値を DAE 法に用いることで，これらのパラメータの妥当性を検証する．表 1 に MF レーダシミュレーションのパラメータを示す．MF レーダシミュレーションを行うに当たり，テストモデル，S-310-38 号モデル等の電子密度高度分布を用いた．テストモデルとは，高度 70km まで 10cm^{-3} で，そこから指数関数的になだらかに電子密度が増加する簡単なモデルである．S-310-38 号モデルとは，本研究室が S-310-38 号を用いて観測した電波強度から推定した電子密度高度分布を推定したモデルである．このモデルは電子密度変化が大きく，最も現実的なモデルである．

図 4 と図 5 に得られた電子密度高度分布を示す．それぞれ，縦軸に高度，横軸に電子密度を示した．青線は修正前の $(k_X - k_O)/N$ ($N = 10^2 \text{cm}^{-3}$)，赤線は 10^{-1} 倍 ($N = 10^3 \text{cm}^{-3}$)，緑線は 10^{-2} 倍 ($N = 10^4 \text{cm}^{-3}$) した値と，修正した R_X/R_O を用いた DAE 法を適用させて得られた電子密度高度分布である．図 4 の茶線はテストモデル，図 5 の S-310-38 号モデルの場合を示す．これらの図から，修正した R_X/R_O と，これまで使用されていた $(k_X - k_O)/N$ の値 ($N = 10^2 \text{cm}^{-3}$) を用いた DAE 法で得られた電子密度は $10^1 \sim 10^2 \text{cm}^{-3}$

表 1: シミュレーションパラメータ

| | |
|--------------------|--------------|
| 電波の進行方向 | 鉛直上向き |
| 磁場ベクトルと電波の進行方向のなす角 | 0 ° |
| 偏波 | O モード, X モード |
| 計算領域 (高度) | 110km |
| 衝突回数 | 0 |
| 周波数 | 1.955MHz |
| パルス幅 | 10ms |

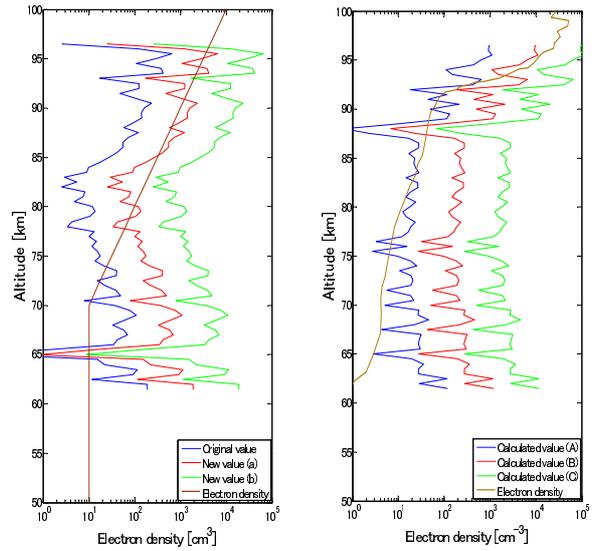


図 4: テストモデルを用いて得られた電子密度高度分布
図 5: S-310-38 号モデルを用いて得られた電子密度高度分布

の範囲， 10^{-1} 倍した値 ($N = 10^3 \text{cm}^{-3}$) では $10^2 \sim 10^3 \text{cm}^{-3}$ の範囲， 10^{-2} 倍した値 ($N = 10^4 \text{cm}^{-3}$) では $10^3 \sim 10^4 \text{cm}^{-3}$ の範囲において正確な電子密度高度分布を推定できた．

5. まとめと今後の課題

MF レーダシミュレーションを行うに当たり，新たに時間領域 Full wave 解析法を開発した．また，DAE 法に使用されている反射係数比 R_X/R_O ，吸収係数 $(k_X - k_O)/N$ の修正を行った．その結果，これまでより精度の良い電子密度高度分布推定ができるようになった．

測定する電子密度に応じて吸収係数 $(k_X - k_O)/N$ を変更することで電子密度推定精度が向上するが，電子密度の大まかな値が分からないと吸収係数 $(k_X - k_O)/N$ を選択する事ができないため，測定条件によって適切な吸収係数 $(k_X - k_O)/N$ を選択する手法の開発が必要である．また，本研究で求めた反射係数比 R_X/R_O 及び吸収係数 $(k_X - k_O)/N$ を更に微調整する事により，より正確な電子密度高度分布が得られると考えられる．