## [共同研究成果]

# 複数領域時間領域差分法(MR-FDTD)法を用いた Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave(FMICW)レーダの 電磁界シミュレーション手法の開発

有馬 卓司, 宇野 亨 東京農工大学 大学院 先端電気電子部門

レーダとは電磁波を対象物に照射しその散乱波から情報を得るものであるが、様々な分野で活用されている。海流などを監視する海洋監視には、古くからレーダが用いられてきた。また現在は、一般的な乗用車にもレーダが装備されつつある。海洋監視レーダでは海洋上の海流の速度と方向だけでなく漂流物の位置を検出することもできる。また、乗用車に用いられているレーダでは、前車との間隔や速度差を検出できる。これらのレーダは FMICW (Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave) 方式が用いられている。今後 FMICW レーダの高性能化のために、電磁界シミュレーションを用いた解析が重要である。本報告では、FMICW レーダの電磁界シミュレーション手法について述べる。シミュレーションには、複数領域 FDTD (Multi-Region Finite Difference Time Domain) 法を用いた.

### 1. FMICW レーダ

本節では FMICW レーダについて簡単に述べる。図 1 に海上監視に用いられる FMICW レーダ [1] の配置図を示す。海上監視用 FMICW レーダにおいては,一般的に電波を送受信するアンテナは地上に設置され,アンテナから海面に向けて電波を放射する。電波は海面に当たりその一部は散乱し,地上に設置された受信アンテナによって受信される。もし,海流があると散乱波はドップラーシフトにより送信した周波数とは異なる周波数となる。ドップラーシフトによる周波数の変化 $\Delta f$ は送信周波数を f6 とすると

$$\Delta f = \frac{2V}{c_0} f_{\rm r} \tag{1}$$

と計算できる。ここで、V は海流の速度、 $C_0$  は電波の速度である。FMICW レーダにおいてはドップラーシフトしている海面からの散乱波と送信波をかけ合わせる。この掛け合わせた信号は異なる

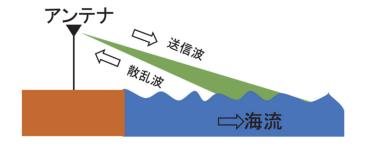


図 1 海上監視用 FMICW レーダの配置

周波数の信号をこの掛け合わせていることからビート信号と呼ばれる。そして、このビート信号にはドップラーシフトによる周波数シフト $\Delta f$ の成分が多く含まれるので、ビート信号をフーリエ変換することで $\Delta f$  を求めることが出来る。 $\Delta f$  が求まれば、(1) 式より海流の速度を求めることが出来る。さらに、FMICW レーダにおいては、送信しながら周波数を変えている。これは周波数掃引と呼ばれる。よって、受信する散乱波は時間によって周波数が異なる。送信時間が分かっていれば、散乱波の周波数より距離が分かるので、FMICW レーダでは広範囲の海上を高速に監視することが出来る。海上監視用の FMICW レーダではこのようにして、海流を検出している。

### 2. FMICW レーダの電磁界シミュレーション

本研究では、解析対象が複雑なモデルでも比較的容易に解析できる FDTD 法[2]を用いて FMICW レーダのシミュレーションを行う. この手法は、電磁界を支配するマクスウエルの方程式を直接 差分し、電界および磁界を求める手法である. 差分法は一般的に計算量が多くなることが知られており、FDTD 法も多くの計算機資源が必要となる. FDTD 法の計算量を削減する手法がいくつか提案されている. 計算削減手法の一つに複数領域 FDTD 法[3]が提案されている. この手法の概念を図 2 に示す.

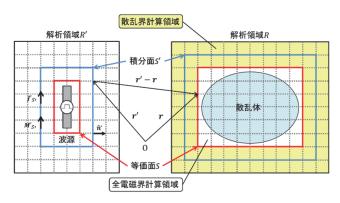


図2 複数領域 FDTD 法の概念

図 2 は、左側の領域に波源(アンテナ)があり、少し離れた領域に散乱体が存在する領域がある. この図に示すように、複数領域 FDTD 法においては、解析空間中で波源や散乱体のない自由空間(図 2 中では左右の領域の間の空間)の計算を FDTD 法では行わず、数学的にその結合を評価する手法である. この手法は、FDTD 法自体の計算領域を大幅に減らせる事から計算量の削減が期待できる. 一方、複数領域同士を結合するには複雑な積分計算が必要になる. 領域 2 における電磁界を、領域 1 の電磁界から数学的手法で求める方法を説明する. まず、図 2 の左の領域内に仮想的に設置された青枠で示される閉曲面上の電界および磁界より、等価電流 J および等価磁流 M を求める. そして求まった等価電磁流および自由空間のグリーン関数 G を用いて、右の領域における電界は(2)式のように求められる.

$$\mathbf{E}_{2}(\mathbf{r}_{2},\omega) = \int_{S_{1}} \left[ -j\omega\mu \mathbf{J}_{1}(\mathbf{r}_{1},\omega)G(\mathbf{R}) - \mathbf{M}_{1}(\mathbf{r}_{1},\omega) \times \nabla_{1}G(\mathbf{R}) + \left\{ \hat{\mathbf{n}}_{1} \cdot \mathbf{E}_{1}(\mathbf{r}_{1},\omega) \right\} \nabla_{1}G(\mathbf{R}) \right] dS_{1}$$
(2)

(2)式中で、 $\mathbf{R}$  は左の領域から右の領域に向かうベクトルである。また、 $\hat{\mathbf{n}}_1$  は左の領域に設定した仮想閉曲面の法線ベクトルである。この面積分を行えば、左の領域で生じた電磁界を基に右の領域において正しい電界を再構成できることを示している。この面積分によって電界を再構成する原理は等価定理と呼ばれている。磁界についても同様に再構成できる。一方、(2)式の計算は、右の領域の点の電界を求めるために、左の領域に設置した仮想閉曲面全体にわたり積分を実施する必要がある。すなわち、図 2 の右の領域に示す赤枠の仮想的な閉曲面上のすべての電磁界を再構成するには膨大な計算量となることが分かる。また、この手法を高速度化する方法も提案されている[4][5]。この手法は、四分木モデル[6][7]を用いている。

次に、FDTD 法においてた FMICW レーダの解析手法を説明する. FDTD 法は時間領域の解析手法であり、FDTD 法内での解析時間は、数 n (ナノ:  $10^{-9}$ ) 秒程度と大変短い時間である. 海流による海面の移動速度は数十 km/h 程度であり、数 n 秒の間にはほぼ移動しないので通常の FDTD 法を用いてこの FMICW レーダの解析を行うのは難しい. 理論的に FDTD 法における計算時間を数十秒程度まで延ばせば海面の移動によりドップラーシフトが観測できるかもしれないが、これは数 n 秒の解析に数分以上の解析時間が必要な現状から考えると、現在の計算機の性能では非常に難しいといえる. そこで、本研究では次の方法を用いて解析を行う. 解析の概念を図 3 に示す. まず、海面の波を再現し、海流を止めた状態で FMICW の送信波を送信し、散乱波を観測する. FMICW の送信波図 3 の上段に示されているように、時間とともに周波数を変化させている. このことを周波数掃引という. そして観測した散乱波の FFT (高速フーリエ変換)を行う. この結果

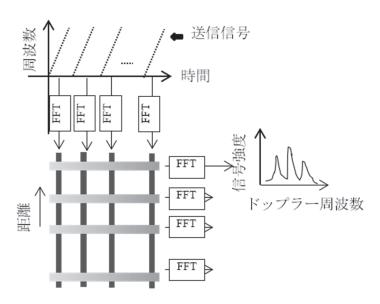


図3 FDTD 法における FMICW レーダの解析

は上述したように、海面を静止した状態でのアンテナからの距離に相当する。そして、ある時間が経過したとして、海面を経過時間に相当する距離分だけ移動させる。例えば、解析ごとの経過時間を 1 秒とすると、海流の速度が時速 30km/h では、経過時間ごとに 8.33m 移動するので、海面をこの距離だけ移動させ再度 FDTD 法を用いて散乱波をシミュレーションする。このように経過時間ごとに海面を移動させて FFT を行う。この FFT を 1 回目の FFT と呼ぶ。そして、1 回目の FFT 波形のスペクトルは距離に対応しているので、ある距離のデータをならべて再度 FFT を行うと、海面の移動によるドップラースペクトルが観測できる。このようにシミュレーションを行うと距離ごとの海流の速度を解析できる。

### 3. FMICW レーダの電磁界シミュレーション結果

実際に複数領域 FDTD (MR-FDTD) 法を用いて、海上監視を目的とした FMICW レーダの解析を行った.解析モデルを図 4 に示す.解析モデルでは、アンテナを含む領域を Region 1 とし、1 km 離れた幅 248m の海面および散乱体を含む領域を Region 2 として、MR-FDTD 法で解析している.Region 1 には送信アンテナとして垂直偏波のダイポールアンテナを設置した.Region 2 には海面上に波を設定している.なお海水は金属としてモデル化した.FMICW レーダの中心周波数は 24.5 MHz,掃引周波数は 3MHz とした.FDTD 法のセルサイズは 40cm としている.

まず基礎検討として、散乱体の無い海面のみのモデルを用いてシミュレーションを行った.解析においては、海面を止めた状態で解析し、解析間隔を 0.5 秒とし、次の解析においては、0.5 秒で海面が移動したとして、導体の海面の位置をずらして解析する.この解析を 256 回行った.解析結果を図 5 に示す.このように、想定通りの-0.5Hz に強いスペクトルが観測されている.

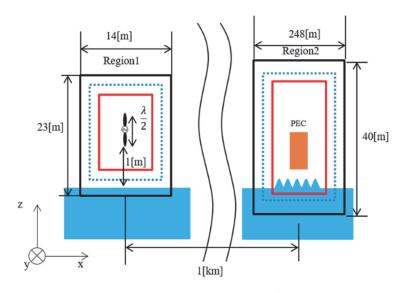


図4 シミュレーションモデル

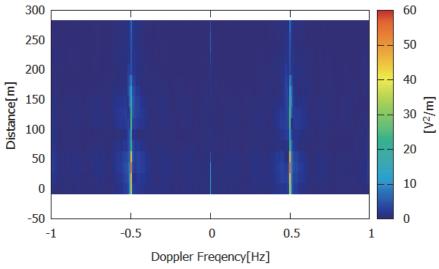


図5 ドップラースペクトルの分布(海面のみ)

次に、海上の漂流物の FMICW レーダによる検出をシミュレーションした。まずは海面を考えず、漂流物のみの解析を行った。漂流物が+x方向に  $1.5\,\mathrm{m/s}$  で移動するモデルをシミュレーションした。配置した漂流物は、大きさが  $5\mathrm{m}\times5\mathrm{m}\times4\mathrm{m}$  の完全導体とした。解析においては、海面の移動速度のシミュレーションと同じく導体を止めた状態で解析し、解析間隔を  $0.5\,\mathrm{t}$  砂とし、次の解析においては、 $0.5\,\mathrm{t}$  砂で導体が移動したとして、導体の位置をずらして解析する。この解析を  $256\,\mathrm{t}$  回行ったので、導体は解析の間に  $191.25\mathrm{m}$  ほど移動している。解析結果を図  $6\,\mathrm{t}$  に示す。スペクトルより散乱体が移動していることが確認できた。観測されている位置は帯を引いているがこれは散乱体がある程度の体積を持っているため、多重反射が起きていると考えられる。

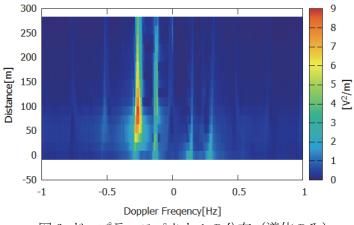
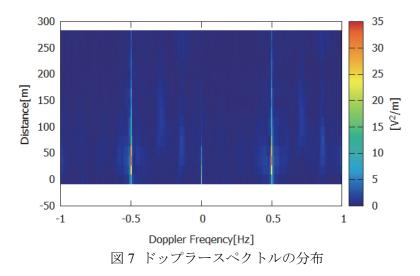


図6 ドップラースペクトルの分布(導体のみ)

また、散乱体が比較的小さかったためスペクトルが小さく比較的スペクトルの範囲が広がった可能がある。次に実際に、海面上に漂流物がある際のシミュレーションを行った。海面上の波はサイン波でモデル化している。導体は先ほどと同じく、アンテナから遠ざかる方向に 1.5 m/s で移動するよう設定した。解析結果を図7に示す。 図7においては、±0.5 Hz に海面の波の位相速度による強いドップラースペクトルが現れていることが確認できる。また、図6のときと同じく、-0.25の部分に弱いが、スペクトルが現れていることが確認できた。このスペクトルは漂流物を配置することによって現れたスペクトルである。この結果より、海面上の移動する漂流物のスペクトルを解析できた。



4. まとめ

本研究では、海上監視用 FMICW レーダの解析を目的に、FDTD 法で解析を行った.解析には遠方の解析になるために、MR-FDTD 法を用いた.海面および散乱体は FDTD 法の解析中は動かないものとし、ある時間間隔で動いたとし、位置をずらして解析を行った.解析結果より、適当な位置にスペクトルが現れており妥当な解析が行えていることが分かった.

# 謝辞

本研究は、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用することで実現することができた。また、研究にあたっては同センター関係各位に有益なご指導とご協力をいただいた。ここに謝意を示す。

# 参考文献

- [1] 土木学会,海岸工学委員会 "陸上設置型レーダによる沿岸海洋観測"(土木学会,2001)
- [2] 宇野亨, 何一偉, 有馬卓司, 数値電磁界解析のための FDTD 法, コロナ社, 2016
- [3] J. M. Johnson, Y. Rahmat-Samii, MR/FDTD: A Multiple-Region Finite-Difference Time-Domain Method, Microwave and Optical Technology Letters, vol. 14, no.2, pp.101-105, February 1997
- [4] 有馬 卓司, 宇野 亨, "複数領域 FDTD (時間領域差分) 法の高速化", SENAC Vol.53, No.4, 2020. 10
- [5] K. Asahi, T. Arima, A. Uematsu, T. Nishibori and T. Uno, "Space-Time Adaptive Processing Concept for Calculation Speed Improvement in Multi-Region/FDTD Method," in IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques, vol. 6, pp. 92-99, 2021, doi: 10.1109/JMMCT.2021.3101493.
- [6] R. A. Finkel and J. L. Bentley, Quad trees a data structure for retrieval on composite keys," Acta Informatica, vol. 4, pp. 1-9, 1974/03/01 1974
- [7] G. J. Sullivan and R. L. Baker, Efficient quadtree coding of images and video, IEEE Transactions on Image Processing, vol. 3, no. 3, pp. 327-331, May 1994