

[共同研究成果]

実際の海洋状況の数値モデル化と FMCW レーダによる漂流物の揺動特性 の抽出のシミュレーション

有馬 卓司

東京農工大学 工学部 知能情報システム工学科

筆者らのグループでは、電磁界現象について、実際の様々なモデルをコンピュータ上で再現し解析する研究に取り組んでいる。本報告では、実際に近い海洋の状態をコンピュータ上で再現し、FMCW (Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave) 海洋レーダを用いて、ランダム海面上における漂流物体の揺動特性を検出する手法について検討したので報告する。実際の海洋上の波は Pierson-Moskowitz (PM) スペクトルに基づくランダム海面などをモデル化している。電磁界解析手法は FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法を用いた。

1. はじめに

FMCW 海洋レーダ[1]は一般に海流や波浪の観測に用いられているが、漂流物体の検出および識別への応用も期待されている。しかし実際の海洋環境では、強い海面クラッタの影響により、これを実現することは極めて困難である。漂流物体が人である場合には、特有の周期的な揺動を示す。この特徴を捉えることができれば、人と他の漂流物とを識別できる可能性がある。本研究では、SISO 構成の FMCW レーダを用い、実際のランダム海面 (PM モデル) [2]と単純な正弦波モデルについて、海面クラッタの IQ プロットを比較する。さらに、これら二つの海面モデルが漂流物体の振動周波数推定に与える影響を評価する。

2. 海洋上の波のモデル化

海面の時間変動をモデル化するため、本研究では Pierson-Moskowitz (PM) スペクトル[1]から生成したランダム海面を用いる。PM スペクトルは、十分に発達した風成海面の角周波数 ω に関する特性を表すものであり、式(1)で表される。

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp \left[-\beta \left(\frac{g}{\omega U} \right)^4 \right] \quad (1)$$

ここで、 g は重力加速度、 U は海面上 19.5 m の高さにおける風速、 α および β は経験定数であり、本研究、一般的に用いられる値 α および β を採用した[2]。周波数スペクトルは、深海波の分散関係を用いて波数成分に変換した。各波数成分の振幅は PM スペクトルから決定し、各成分には一様分布のランダム位相を与えることで、実際の海洋を模擬したランダム海面変位を生成することができる。したがって、一次元的な空間 y と時刻 t に関する海面変位 η は、正弦波成分の重ね合わせとして式(2)で表される。

$$\eta(y, t) = \sum_{n=1}^N A_n \cos(k_n y - \omega_n t + \phi_n) \quad (2)$$

ここで、 A_n 、 k_n 、 ω_n 、 ϕ_n は、それぞれ周波数に対して第 n 成分の振幅、波数、角周波数、および初期位相を表す。時間変化する海面は、単純な規則的正弦波海面ではなく、複数の波長成分を含むランダム海面の線形重ね合わせとして FDTD 法[3]の解析領域に構成した。このモデルを

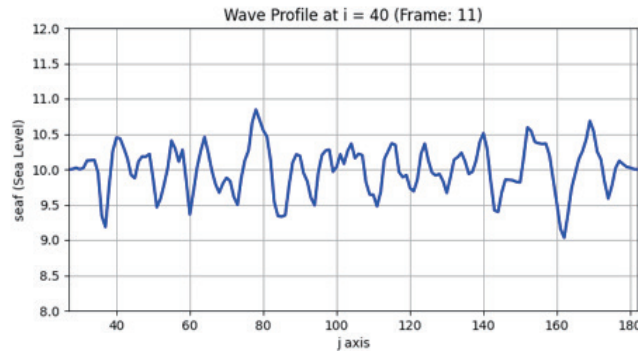


図 1 PM モデルによる生成した海洋上の波の波形

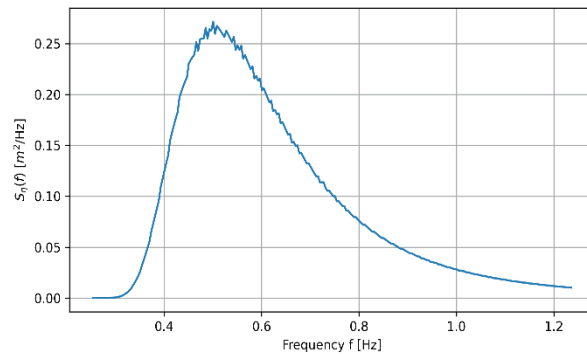


図 2 PM モデルによる生成した海洋上の波のスペクトル

用いて作成した波の波形を図 1 に示す。このように複雑な形状となる。この波形のスペクトルは図 2 に示す様である。

3. FDTD 法を用いた FMCW レーダのシミュレーション

FMCW 海洋レーダは一般に海流や波浪の観測に用いられているが、漂流物体の検出および識別への応用も期待されている。しかし実際の海洋環境では、強い海面クラッタの影響により、これを実現することは極めて困難である。漂流物体が人である場合には、特有の周期的な揺動を示す。この特徴を捉えることができれば、人和其他の漂流物とを識別できる可能性がある。本研究では、SISO 構成の FMICW レーダを用い、実際的なランダム海面（PM モデル）と単純な正弦波モデルについて、海面クラッタの IQ プロットを比較する。さらに、これら二つの海面モデルが漂流物体の振動周波数推定に与える影響を評価する。

FDTD 法を用いた海洋監視用の FMCW レーダのシミュレーション手法は過去に詳細を報告している[4]ので、ここでは概要のみを述べる。図 3 に示すよう、海面波およびターゲットの速度は、1 回の掃引における電磁波の往復伝搬時間に対して十分に小さいため、その間は静止しているものと仮定した。漂流物体は、海面上で正弦的に振動する物体としてモデル化した。各掃引において、送信信号と受信信号の積から得られるビート信号に FFT を適用し、最大振幅をもつ IQ 成分を抽出する。抽出された成分を用いて IQ プロットを構成し、海面クラッタおよび漂流物体の揺動特性を評価した。

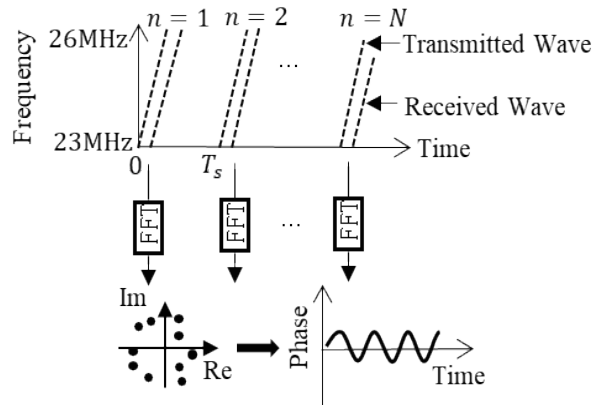


図3 FDTD法を用いたFMCWレーダの再現とIQ信号の抽出方法

4. FMCW レーダのシミュレーション結果

本研究では、中心周波数 24.5 MHz、帯域幅 3 MHz、掃引間隔 0.05 s で動作する SISO 構成の FMCW レーダを用いる。図 4 に本研究で用いた解析モデルを示す。漂流物体は一辺 6.0 m の PEC 立方体としてモデル化し、y 方向に振幅 2.2 m、周波数 2 Hz で振動させた。レーダから物体中心までの距離は 400 m とした。図 3 に、正弦波モデルおよび PM モデルにより生成した海面を示す。図に示すように、海面は x 方向に沿った通路状に配置した。正弦波モデルでは波の振幅を 1.2 m とした。PM モデルでは、式(1)の U を算出するため、海面上 10 m の高さにおける風速を 10 m/s とした。最後に、式(2)の N は 10,000 とした。

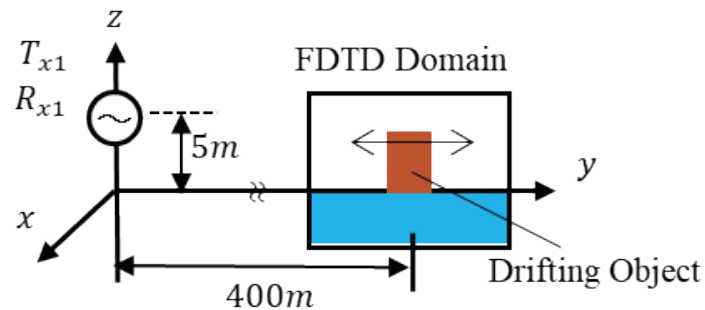
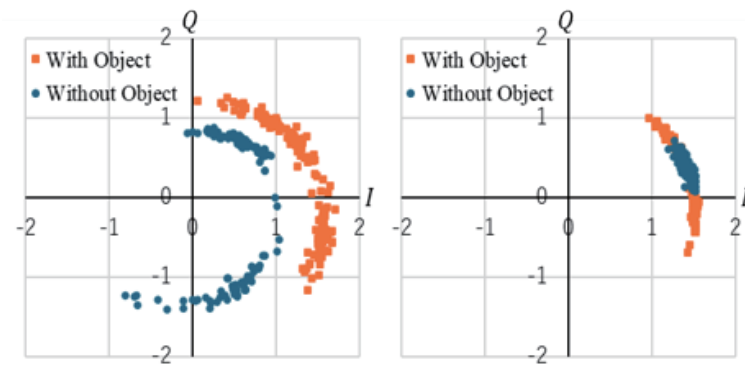


図4 FMCWレーダのシミュレーションモデル



(a) 正弦波モデル

(b) PM モデル

図5 異なる海面モデルにおけるIQプロット

図 5(a) (b) に漂流物体の有無を比較しながら、異なる海面モデルにおける IQ プロットをシミュレーションにより計算した結果を示す。正弦波モデルでは、物体の有無にかかわらず大きな円弧状の変動が現れている。これは、漂流物体が y 方向に振幅 2.2 m、周波数 2 Hz で振動正弦的に周期運動しているが、その位相情報を正しくシミュレーションできていることが分かる。一方、PM モデルでは物体が存在しない場合の IQ プロットの変動は著しく小さい。これは、PM モデルがランダム位相をもつ複数の波長成分を統合しており、単一の周期成分が支配的にならないためである。しかし、漂流物体を組み込んだシミュレーション結果では、IQ プロットの変動は大幅に拡大している。この結果は、実際の海面モデルである PM モデルにおいては物体の運動が IQ プロットの変動を支配的に表すことが分かった。これらの結果より、PM モデルではランダムな海面変動の影響が小さいため、漂流物体の運動が IQ プロットに顕著に反映され、物体検出に適した海面モデルであることが示された。

5. まとめ

本研究では、FDTD に基づく FMICW 海洋レーダシミュレーションにより、海面上の漂流物体の揺動特性を解析し、PM 海面モデルと従来の正弦波モデルについて IQ プロットおよび位相変動を比較した。その結果、正弦波海面では海面運動に支配された大きな変動が生じる一方、PM モデルでは漂流物体の 2 Hz 振動を位相変動内で分離できることを示した。これらの知見から、PM 海面モデルは正弦波モデルと比較して、波浪に起因する周期成分の影響を低減できることが分かる。したがって、位相変動解析により漂流物体の振動周波数を明確に同定できる。今後は、提案手法の有効性を確かめるために、実験用の大型水槽を用いて実験を行う予定である。

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。また、本研究は JSPS 科研費 26K00942 の助成を受けたものである。

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] W. J. Pierson, Jr. and L. Moskowitz, “A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii,” J. Geophys. Res., vol. 69, no. 24, pp. 5181–5190, Dec. 1964, doi: 10.1029/JZ069i024p05181.
- [3] 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
- [4] 有馬 卓司 “複数領域時間領域差分法(MR-FDT)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”, SENAC Vol.54, No.4, 2021. 10