

令和 4 年 6 月 25 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01444

研究課題名（和文）短波海洋レーダの多用途化技術に関する研究

研究課題名（英文）Research for versatile technology of HF oceanographic radar

研究代表者

藤井 智史（Fujii, Satoshi）

琉球大学・工学部・教授

研究者番号：30359004

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：短波帯電波を利用する海洋レーダは、海岸工学、環境保全、水産資源管理、沿岸海洋学に貢献してきている。これらの海洋現象観測にあたっては海面からの後方散乱波を受信しそのドップラースペクトルから情報を得ている。船舶や航空機の散乱特性をシミュレーションと実験から明らかにし、それに適応した信号処理技術を構築することで、海洋情報だけでなく、水平線以遠の船舶や飛行体を検知する新たな利用に向けた知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の海洋レーダでは用いられていない水平偏波も活用した、短波帯多偏波レーダとして再構築し、船舶・航空機からのエコーと海表面波浪の散乱信号を統合して扱うことを提唱し、その効果を明らかにした。特に、波浪の速度に比べ格段に高速移動する対象物のドップラー信号を抽出し、船舶や航空機の同定を可能にする信号処理法を開発しその性能を明らかにした。これにより、短波海洋レーダに関する課題の解決と新規応用分野の開拓という、二つの面から高度利用の実現（マルチユース化）を可能にした。

研究成果の概要（英文）：HF oceanographic radar has contributed to coastal engineering, environmental conservation, fisheries resource management, and coastal oceanography. In the observation of these oceanographic phenomena, backscattered signal from the ocean surface is received and various information on the ocean is obtained from their Doppler spectra. By clarifying the scattering characteristics of ships and aircrafts through simulations and experiments, and by developing signal processing techniques adapted to these characteristics, we have gained knowledge not only for oceanographic information, but also for new applications in detecting ships and flying objects beyond the horizon.

研究分野：レーダ信号処理

キーワード：海洋レーダ

1. 研究開始当初の背景

短波海洋レーダは、陸上から海洋情報を広域かつ連続的に得ることができるセンサーとして海岸工学、環境保全、水産資源管理、沿岸海洋学に貢献してきている。その測定原理は、海面重力波からのブラッグ共鳴散乱波をドップラー周波数解析することにより、表層流や波浪、海上風向などの空間分布を比較的高分解能かつ連続的に観測することができ、水平線以遠の観測が可能となっている。この特徴は、係留ブイや船舶による洋上現地観測の困難さを解消し、時空間分解能が不十分であったり沿岸域近傍では陸域の影響を受ける衛星リモートセンシングの欠点を補完するとして注目されている。

現用の沿岸海洋環境計測に利用されている海洋レーダは、1~2 時間間隔の観測が一般的である。これは、沿岸での海洋現象は潮汐が支配的であることから、1 日 2 回の干潮満潮に伴う変動を計測するには十分なサンプリング間隔である。また、短波帯では自然ノイズと人工ノイズがともに大きい上に、海面にはほぼ水平入射となることから大部分のエネルギーは前方に散乱すること、さらに地表面伝搬モードの伝搬損失の大きいことにより、後方散乱波は極めて微弱となる。そのため、受信信号の SN 比改善を図り流速読み取り精度を向上させるには積分時間を十分長くとる必要がある。

一方、海洋レーダの普及につれて、河川出水や高潮、津波といった沿岸域での 10 分以内の短時間現象も観測の対象とする期待も出てきた。特に、2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震津波が海洋レーダで初めてとらえられた以降、流動場の短時間変化を観測するために、2~4 分間程度の短い積分時間での流速読み取りが課題となっている。その中で、船舶や航空機のエコーの影響がクローズアップされてきた。これは、観測時間間隔が短くなり積分数減少による SN 比の悪化で顕在化し、特に信号が弱い遠距離では顕著であり、探知距離の減少や欠測の増加の原因となる。短時間で流速が大きく変化する現象(津波など)の場合、ドップラーピークが海面の変動によるものか船舶かを自動判断するのは難しく流速読み取り誤差を生じる原因となっている。さらに、波浪の位相速度(例えば最もよく使われている 24.5MHz レーダの対象波浪で約 3m/s)に比べ、移動速度が桁違いに大きい航空機のエコーはドップラー観測周波数範囲内一面に広がるスペクトルとなり、現状では観測不能状態になる。この問題の解決は、津波をはじめとした短時間現象観測に対する海洋レーダの活用に向けての喫緊の課題となっている。

近年、逆に船舶エコーを積極的に活用し、船舶検知・追跡を行う試みがされている。海洋レーダはドップラーレーダであることから、船舶の位置のみならず船速も得ることができ、さらにマイクロ波レーダでは届かない水平線以遠の航路管理や船舶監視に有用として期待されている。ただ、これらの試みは、現状の海洋レーダに手を加えずに得られる信号から、海表面散乱ではないと経験的に判断したドップラーピークを抜き出して船舶と想定している手法であり、レーダ技術自体は船舶検知に適した設計により構築されているわけではない。一方、航空機に関しては、航空機エコーとして解析した例はまったくなく、単にやっかいなノイズとしてのみとらえられているにすぎない。

2. 研究の目的

本研究では、短波海洋レーダに関する課題の解決と新規応用分野の開拓という、二つの面から高度利用の実現(マルチユース化)を目指す。

具体的には次の 2 点を目標とする。

- (1) 津波観測等の短時間海洋現象把握のための不要散乱エコー除去法の確立
- (2) 船舶・航空機の検知・追跡に適したレーダ技術の開発

この目標に向けて、従来の海洋レーダでは用いられていない水平偏波も活用した多偏波レーダとして再構築し、船舶・航空機からのエコーと海表面波浪の散乱信号を統合して扱うことに加え、波浪位相速度に比べ格段に高速移動する対象物のドップラー信号を抽出し船舶・航空機同定を可能にする信号処理法を開発する。さらに、プロトタイプレーダを試作し、観測実験を通してその性能検証を行う。

3. 研究の方法

研究目的を達成するために、以下の項目について研究を進める。

- (1) 二偏波レーダ方式： 海洋レーダへの二偏波レーダ技術の導入
- (2) 散乱条件詳細検討： 船舶・航空機の短波帯電波での散乱断面積の詳細把握
- (3) プロトタイプ開発： レーダ方式、信号処理法の検討と試作レーダの開発
- (4) 観測実験： 航行船舶・航空機等をターゲットとした検証

4. 研究成果

水平と垂直の二偏波での送受信を可能にするプロトタイプレーダの開発を行った。

アンテナシステムとしては、送信は 3 エLEMENTのクロス八木アンテナを用い、水平垂直を個別に給電できるようにした。受信アンテナについては、およそ 0.5 波長間隔で 8 基の 2 エ

メントクロス八木を配置してアレイアンテナを構成した。8基の受信アンテナから水平垂直2系統の計16系統の受信信号を得る。このアレイアンテナは各素子アンテナにそれぞれ受信部を持ちAD変換後に数値計算によりビームを形成するDBF(Digital Beam Forming)方式とした。

レーダの送受信にあたって、変調方式をFMICW(Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave)として、送信信号生成と受信処理はFPGA(Field Programmable Gate Array)で構成した。

送信信号はDDS(Direct Digital Synthesizer)を使用して位相の連続した周波数掃引を実現した。DDSは高周波数で動作するシステムクロックから任意のアナログ波形をデジタルで生成する技術であり、正確な周波数で周期的な信号を生成する。DAコンバータを通したあとフィルタリング処理を行い高調波成分を除去することで希望の波形を得ることができる。

アナログ受信機の場合、短波帯の受信機ではスーパーヘテロダイン方式が一般的であるが、FPGAの高速処理を活かして、受信信号から一回の周波数変換で直接ベースバンド信号を得るダイレクトコンバージョン方式を採用した。ダイレクトコンバージョンではスーパーヘテロダイン方式のIF処理部を省略してIFフィルタやIFミキサーを減らし回路構成をシンプルにすることで、小型化、低消費電力化などの利点がある。アナログ回路でダイレクトコンバージョン方式を適用する場合、直接ベースバンド信号に変換するため、受信信号と非常に近い周波数の信号を内部のLOで作成し、ミキシングする必要がある。そのため信号の発振や、LO出力が他の回路にリークすることでミキサー出力に直流信号の重畳(DCオフセット)が起こる恐れがある。またイメージ混信の除去のために使用される二つのミキサーはまったく同じ特性を持ち、位相のみ90°異なったものでなければならないため、回路素子の劣化やばらつきなどによる特性の差異や変化が生ずることによって位相や振幅にずれが発生した場合、I/Q信号の成分が正確に分離できずS/N比が悪化するといった問題がある。これに対してデジタル処理では、LOリークや発振といった心配もなく、また理想的なミキサーによってI/Q信号を得ることができるので実用的な実装が可能となる。



写真1 プロトタイプレーダ



写真2 受信アンテナアレイ

受信部は、水平垂直それぞれ8チャンネル分の回路を1つのFPGAに実装し2FPGA間で同期させることで、同時16チャンネル受信を可能にした(写真1)。構成したレーダ送受信機ならびに送信アンテナと受信アンテナアレイを新潟大学工学部校舎屋上に設置(写真2)し、新潟市沖を実験観測することとした。

短波帯電波の海面波浪による電磁波散乱を厳密に数値計算する手法の開発を行った。海水の電気的性質はほぼ分かっているため、波浪のモデルが決まれば原理的には従来の電界シミュレーション法によって数値計算可能である。しかしながら、数km遠方の波浪による散乱の計算を全空間で実施しようとするると計算機メモリ容量の面から不可能である。そこで、解析計算にあたって、領域全体をアンテナの部分と海面波浪の部分の2つに分け、それぞれの領域表面上の等価電磁流をFDTD(Finite Difference Time Domain)法によって厳密に数値計算したのちに、時間ステップごとにそれぞれの領域を電磁界の等価定理によって結合させる複数領域FDTD法を開発した。図1に複数領域FDTD法を模式的に示す。さらに、波浪の速度が光速に比べて極めて遅いことから、時間ステップごとに計算するのではなく、送信パルスの継続時間内ごとに電磁界を接続することによって計算時間の短縮を図った。

本手法の妥当性を検証するために、24.5MHz帯海洋レーダのドップラースペクトルの計算および340MHz帯水槽実験の結果と比較した。24.5MHz帯海洋レーダのドップラースペクトルを計算した例を図2に示す。波浪の波長を6.21m、位相速度を3.07m/sとしたことから、ドップラースペクトルは±0.5Hzと計算される。FDTD法による計算結果はそれを忠実に再現できて

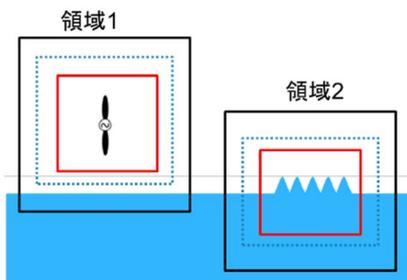


図1 複数領域FDTD法概念図

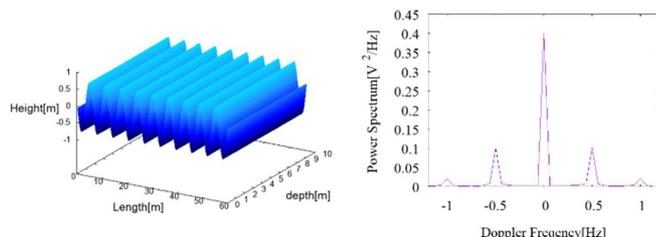


図2 波浪モデルと計算されたドップラースペクトル

いることがわかる。また、水槽実験を用いた 340MHz 帯海洋レーダのドップラースペクトルの実験結果と計算結果の比較を行い、それぞれ、ドップラースペクトルのピークが現れる周波数は実験結果とよく一致していることから、本計算手法の妥当性が確認された。

プロトタイプレーダを用いた観測実験としては、送信アンテナを垂直方向から 45 度傾け、受信はクロス八木アンテナの垂直エレメントと水平エレメントで同時受信し、直交 2 偏波観測を実現した。電波照射領域である新潟市沖の日本海の海洋に加え、付近を航行する船舶、航空機からの受信信号を解析した。

海表面の波浪からの信号について、垂直及び水平偏波における海面状態の違いについて検証した。比較的穏やかな海面状態の時と、それに比べてやや荒れた海面状態の場合のドップラースペクトルマップをそれぞれ図 3 および 4 に示す。縦軸は距離(0-50km)、横軸はドップラー周波数(-1~1Hz)であり、 $\pm 0.5\text{Hz}$ 付近の距離方向に分布したスペクトルピークが、海面表層の波浪による応答である。このドップラースペクトル強度分布から、波浪の解析が可能となる。水平偏波に対し垂直偏波の応答が強く、これが海洋レーダで海洋観測に垂直偏波が用いられる理由である。しかし海面が荒れるに従い、水平偏波における応答も強く観測されることが分かる。このことは 2 偏波観測により波浪に関する新たな情報が得られる可能性があることが示唆された。この点に関しては、今後、数値計算での検証を加える予定である。

図 3 でドップラー周波数 0.4Hz、距離 17km、図 4 ではドップラー周波数 0.9Hz、距離 21km 付近の強いエコーが認められる。これらの応答は、同時刻の船舶自動識別装置(AIS: Automatic Identification System) の情報から、船舶の応答であることが分かっている。なお、図 3 の船舶は旅客船で全長は 125m、図 4 は貨物船で全長 74m であった。これらの応答は、観測時間約 10 分の間に航行のため、スペクトルピークに広がりが見られる。図 5 は短時間フーリエ変換(STFT: Short Time Fourier Transform)を施したドップラースペクトルマップである。観測時間 10 分のうち、1.5~2.5 分、2~3 分、2.5~3.5 分、3~4 分のドップラースペクトルである。波浪からの応答に大きな変化は見られないが、ドップラー周波数方向に線状に伸びた応答は、各観測時間に応じた距離、ドップラー成分に分割された、高速移動物体であることと判断できる。そして、この応答は同時刻の ADS-B 信号のデータから、新潟県上空を通過している航空機の応答であると判明した。この飛行経路の航空機は、アジアから欧州を結ぶ比較的大型の旅客機で、全長は 60m 程度であったものと思われる。なお、ドップラースペクトルで、視線方向の速度がドップラー観測レンジを越えた場合は、エイリアシングが生じることも視認できる。

これらの散乱対象物の偏波特性を比較すると、船舶は向きにより水平方向にも広がる構造であるが、マストやポールなどの垂直構造物により比較的垂直偏波に強く応答が現れ、航空機に関しては水平方向の構造が支配的となることから、水平偏波の応答が強くなることが分かる。

以上の検討から、海洋レーダのマルチユース化として、水平垂直 2 偏波同時観測が可能な偏波海洋レーダを試作し、その偏波観測結果から、使用電波波長や観測時間に制約のある短波帯の海洋レーダで船舶や航空機などの人工物からの偏波散乱特性は、海象情報と異なる特徴を有することを明らかにした。さらに STFT 処理により、海流よりも大きな移動速度を有するターゲットを容易に識別できることを示した。今後、散乱体の偏波特性、時間変化情報に加え、統計的解析手法を用いてターゲットの検出・識別性能、及び海象情報の推定精度の改善とその定量的な評価を行う予定である。

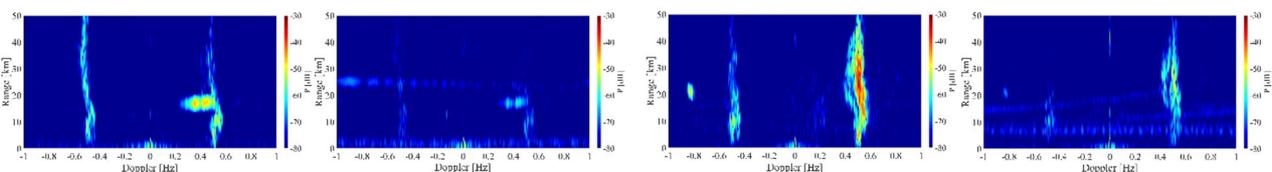


図 3 穏やかな海況のドップラースペクトル

図 4 やや荒れた海況のドップラースペクトル

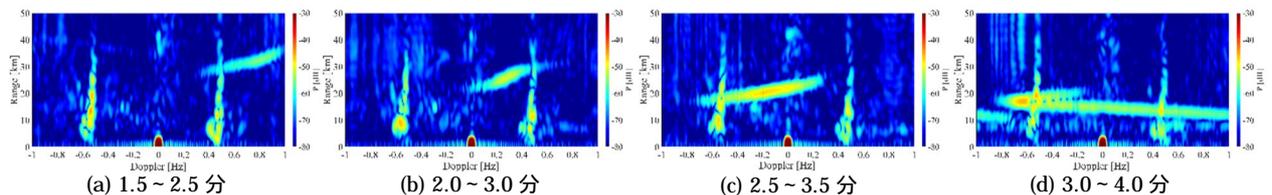


図 5 STFT によるドップラースペクトル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5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 玉城大地, 長名保範, 藤井智史	4. 巻 RECONF2019-36
2. 論文標題 FPGAによる短波海洋レーダの実現へむけた検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術報告	6. 最初と最後の頁 3-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 小林寛希, 宇野亨, 藤井智史, 有馬卓司	4. 巻 AP2019-147
2. 論文標題 MR-FDTDを用いた海面ドップラースペクトルの解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術報告	6. 最初と最後の頁 31-35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 小泉達寛, 山田寛喜, 藤井智史, 長名保範, 宇野亨	4. 巻 SANE2021-16
2. 論文標題 偏波海洋レーダを用いた移動ターゲット検出に関する検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術報告	6. 最初と最後の頁 7-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 小泉達寛, 山田寛喜, 藤井智史, 長名保範, 宇野亨	4. 巻 Vol. J105-B
2. 論文標題 偏波海洋レーダによる海洋および船舶・航空機観測に関する実験的検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会和文論文誌B	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 長名保範, 玉城大地, 藤井智史	4. 巻 RECONF2022-17
2. 論文標題 複数FPGAボードによる多チャネル短波海洋レーダーの試作	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術報告	6. 最初と最後の頁 74-79
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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14件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Hiroki Kobayashi, Toru Uno, Satoshi Fujii, Takuji Arima
2. 発表標題 Doppler Spectrum Analyzing of Sea Surface Using MR-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 小林寛希, 宇野亨, 藤井智史, 有馬卓司
2. 発表標題 MR-FDTD法を用いた海面ドップラースペクトルの解析
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林寛希, 宇野亨, 藤井智史, 有馬卓司
2. 発表標題 海面ブラッグ反射のフルウェーブ電磁界シミュレーション
3. 学会等名 2019年度 海洋レーダを用いた海況監視システムの開発と応用に関する研究集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小泉達寛, 山田寛喜, 藤井智史, 長名保範
2. 発表標題 海洋レーダの高機能化に関する基礎検討
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小泉達寛, 山田寛喜, 藤井智史, 長名保範
2. 発表標題 海洋レーダの多偏波観測に関する基礎検討
3. 学会等名 2020年度電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 玉城大地, 長名保範, 藤井智史
2. 発表標題 FPGAによる短波海洋レーダ実現へ向けた検討
3. 学会等名 2020年度 海洋レーダを用いた海況監視システムの開発と応用に関する研究集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小泉達寛, 山田寛喜, 藤井智史, 長名保範, 宇野亨
2. 発表標題 垂直・水平偏波を用いた偏波海洋レーダによる実験結果報告
3. 学会等名 2020年度 海洋レーダを用いた海況監視システムの開発と応用に関する研究集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tatsuhiko Koizumi, Hiroyoshi Yamada, Satoshi Fujii, Yasunori Osana
2. 発表標題 Basic Study on Polarimetric Observation of Ocean Radar
3. 学会等名 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2020) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村昇平, 宇野亨, 有馬卓司, 藤井智史
2. 発表標題 散乱体のある環境における海洋レーダのFDTD解析
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小泉達寛, 山田寛喜, 藤井智史, 長名保範, 宇野亨
2. 発表標題 偏波海洋レーダを用いた航空機検出に関する検討
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村昇平, 宇野亨, 有馬卓司, 藤井智史
2. 発表標題 海上監視用FMICWレーダのFDTD解析
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小泉達寛, 山田寛喜, 藤井智史, 長名保範, 宇野亨
2. 発表標題 偏波海洋レーダを用いた航空機の世界速度推定に関する検討
3. 学会等名 2021年度電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 玉城大地, 長名保範, 藤井智史
2. 発表標題 FPGAによる短波海洋向けターゲットシミュレータ
3. 学会等名 2021年度 海洋レーダを用いた海況監視システムの開発と応用に関する研究集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤井智史
2. 発表標題 短波海洋レーダにおけるSDR技術
3. 学会等名 第28回SDR & 信号処理研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022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
研究 分担者	山田 寛喜 (Yamada Hiroyoshi) (20251788)	新潟大学・自然科学系・教授 (13101)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	宇野 亨 (Uno Toru) (80176718)	東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (12605)	

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