

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656526

研究課題名(和文) ドップラーシフトの位相特性を利用した船舶レーダの海面ノイズ除去に関する研究

研究課題名(英文) Research on the sea clutter reduction of the marine radar using the phase characteristic of the Doppler shift

研究代表者

林 昌奎 (Rheem, Chang-Kyu)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：70272515

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：船舶用レーダは船舶の航行に欠かせない機器となっているが、荒天時に海面からの反射がノイズとなって探知が困難になるという問題があった。本研究では、数値シミュレーション及び現地観測によりレーダ信号の特性について検討を行い、海象条件によらず鮮明な探知が可能な新しいレーダ技術を開発した。今後は船舶の位置だけでなく速度もモニタリング可能なシステムを開発していく予定である。

研究成果の概要(英文)：Marine radars are indispensable equipment for the ship operation. The problem of the marine radar is a noise from the sea surface in the rough weather. In this study, the characteristics of the radar signal are investigated by the numerical simulation and the field measurement. And new radar technique is developed to detect a target in severe conditions. The system which can monitor not only the position of a ship but the speed will develop in future research.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学

キーワード：シークラッタ レーダ マイクロ波 後方散乱 ドップラーシフト

1. 研究開始当初の背景

レーダはもともと航空機の探知のために発展した機器であるが、現在では、気象・海象観測等さまざまな分野で活用されている。船舶の探知における恒常的な問題はシークラッタと呼ばれる海面からの反射であり、これが大きくなると海面上のターゲットがノイズに埋もれて探知できなくなる。船舶用レーダは船舶の航行に欠かせない機器となっているが、シークラッタの根本的な解決はなされておらず、STC(Sensitivity Time Control)やAGC(Automatic Gain Control)等のいわば対症療法が用いられている。シークラッタを除去するには、電磁波の海面からの反射とターゲットからの反射を分離する新しい手法が必要と考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、海面からのレーダ信号に含まれているシークラッタを分離・抽出可能なレーダ技術を開発することである。レーダからの基本的な出力は散乱強度とドップラーシフトであるが、既存のレーダは散乱強度の情報のみを用いてターゲットの位置を探知していた。そのため、海面の散乱強度がターゲットと同程度になると判別が困難になるという問題があった。本研究では、ドップラーシフトの情報を利用したアルゴリズムを開発し、海象条件によらず鮮明な探知が可能な船舶用レーダを実現することを目的とする。

3. 研究の方法

シークラッタを分離・抽出可能なレーダ技術を開発するため、本研究では、数値シミュレーション及び現地観測により検討を行った。数値シミュレーションでは、物理光学近似によりマイクロ波散乱を解析できるモデルを開発し、パルスドップラーレーダが受信する海面とターゲットからの信号を再現し、後方散乱強度やドップラースペクトルの特性を調べた。レーダ信号の解析については、実際の海域におけるデータを用いることが望ましいため、水槽実験ではなく現地観測を実施することにした。既存のデータは固定式アンテナによる観測結果だったため、新たに回転式アンテナのパルスドップラーレーダを平塚沖観測タワーに設置して観測を行った。船が存在する場合のレーダ信号を解析し、ドップラーシフトの情報を利用したノイズ除去法について検討を行った。

4. 研究成果

(1) 数値シミュレーション

① 計算手法

シミュレーションの概略図を図1に示す。マイクロ波は波長 0.03125m(X-band)として、レーダの高さは 10m とした。入射角は 80 度としたため、ターゲット形状は高入射角度において強い後方散乱を実現できるような板形

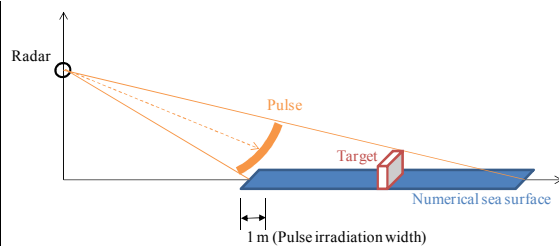


図1 数値シミュレーションの概略図

状としている。レーダに対する局所的な入射角を小さくすることで強い後方散乱としている。本シミュレーションにおいては、シークラッタとターゲット信号を識別するアルゴリズム提案が目的であるため、ターゲット形状は単純に強い後方散乱を表現するものとしている。また本シミュレーションにおいては海面とターゲットの両方を完全導体と仮定している。

シミュレーションにおいてはレーダが得る空間的な分解能であるパルス照射領域を計算領域(1m 四方)とし、サンプリング間隔は海面上で 1m 間隔としている。また、計算領域を三角形の計算格子に分割し、それぞれの格子からのマイクロ波後方散乱を受信点において足し合わせることである時間におけるマイクロ波後方散乱を求めている。計算格子の大きさは送信マイクロ波の波長の 1/10 である 0.003125m とした。

レーダが受信する信号としては、パルスの移動に応じて計算領域を移動させ、空間的な受信信号を得ている。各計測点でのマイクロ波後方散乱を時系列で求め周波数解析をすることでドップラースペクトルを求める。ここでは各計測点でのサンプリングは 100Hz、1024 点としている。

不規則な数値海面は風波スペクトルの Mitsuyasu - Honda スペクトルと Pierson-Moscovitz スペクトルを用いている。海洋波の高周波数側では Mitsuyasu-Honda スペクトルを用いて Bragg 共鳴散乱波を考慮して 0.015-0.017m とし、この波長域の波浪スペクトルを 25 分割し、それぞれの波にランダムな位相を与えて重ね合わせる。波の進行方向はアンテナから遠ざかる方向とし、アンテナ視線方向を 0° とした場合に波向きは 0°、±10° の 3 方向の成分波としている。

マイクロ波後方散乱においては Bragg 共鳴散乱波により風速の増加に伴い後方散乱も強くなることが再現されるが、Bragg 共鳴波に近い波長のみで数値海面を生成すると、ドップラースペクトルを求めた際にスペクトルの広がり小さくなる。そこで実際の海面のように多くの成分波から成る数値海面とするために、低周波数の波浪成分として Pierson-Moscovitz スペクトルを用いて生成された波を足し合わせている。波長は 0.5-20m とし、波浪スペクトルを 25 分割して高周波数の波と同様に生成している。数値海面を生成する際に風速は 5、10、15m/s とし

ている。

また、ターゲットの進行方向はアンテナから遠ざかる方向とし、速度は 0.5m/s と設定している。ターゲットの大きさは高さ 1m、レーダからのマイクロ波照射方向には幅 0.1m としている。

②計算結果

まず後方散乱強度のシミュレーション結果について述べる。風速が 5、10、15m/s の結果をそれぞれ図 2 から図 4 に示す。表示されている値は 100Hz、1024 点の後方散乱強度の平均値である。

後方散乱強度はターゲットである平板からの受信信号と海面からの信号成分となっているが、風速が 5m/s の場合には海面からの信号成分は小さく、ターゲットからの信号が強いため、ターゲットの識別が容易にできる。ここでターゲットは動いているため、ターゲットからの信号は一点のみではない。一般に、レーダで海面を観測する場合、風速の増大に伴い海面からの後方散乱強度も増すという風速に依存したものとなる。図 4 の結果において、風速が 15m/s の場合には海面か

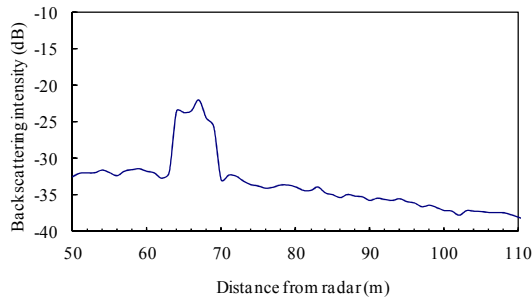


図 2 後方散乱強度の空間分布(風速 5m/s)

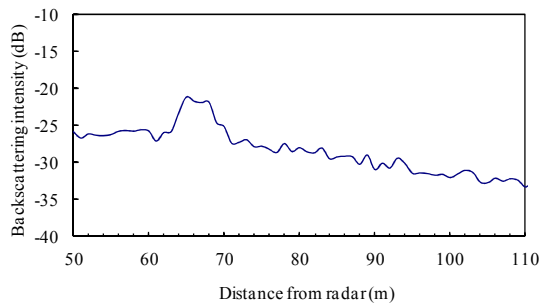


図 3 後方散乱強度の空間分布(風速 10m/s)

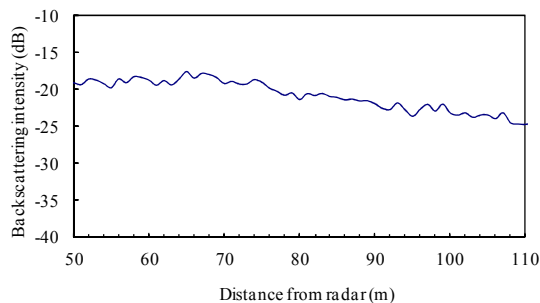


図 4 後方散乱強度の空間分布(風速 15m/s)

らの後方散乱強度も大きくなりターゲットからの信号識別ができない。これは後方散乱強度を表示するレーダを用いる場合、海面からのシークラッタが増大するとターゲットの識別が困難になることを示している。

次に、ドップラー信号を解析する場合について述べる。先程と同様のシミュレーション結果について周波数解析したドップラー成分を表示した場合のターゲット探知の有効性について検討を行う。レーダが計測する点において 100Hz、1024 点のシミュレーションしたマイクロ波後方散乱を周波数解析し、それぞれの計測点ごとにドップラースペクトルを求める。

ターゲットが存在する計測点におけるドップラースペクトルを図 5 から図 7 に示す。ここで、横軸に表示しているドップラー速度とは、ドップラーシフトによる周波数変調成分を速度に変換した値である。ドップラー速度はアンテナ方向の速度成分であり、アンテナに向かう方向を正、遠ざかる方向を負としている。

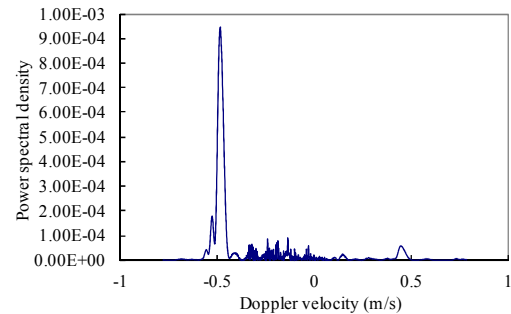


図 5 ドップラースペクトル(風速 5m/s)

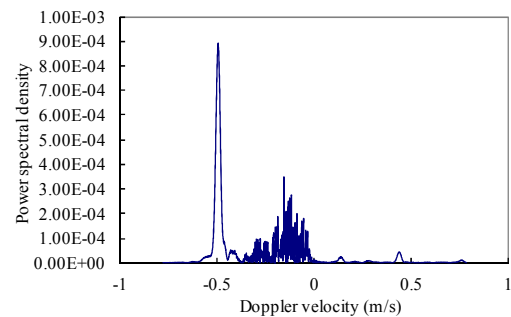


図 6 ドップラースペクトル(風速 10m/s)

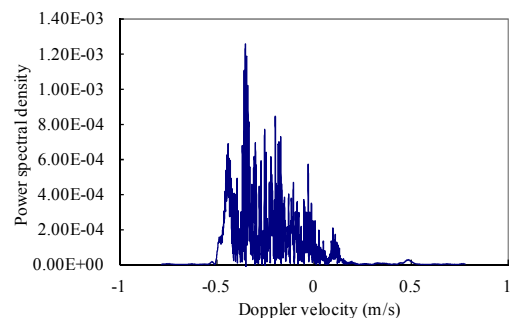


図 7 ドップラースペクトル(風速 15m/s)

各計測点でのドップラースペクトルが示すパワースペクトル密度のピーク値をプロットしたものを図 8 から図 10 に示す。シミュレーション結果からは、ドップラースペクトルのピーク値を表示した場合、風速 5、10m/s においては、ターゲットの存在する位置と海面からの信号では差が現れており、ターゲット識別が可能となる。風速 15m/s になると、ターゲットからの信号が海面からの信号に埋もれて識別が困難になる。本シミュレーションでは、ターゲットが小さく、かつ、ゆっくりと移動しているため、識別しにくい計算条件となっている。しかし、例えば船舶のようにターゲットの移動速度が海面よりも速い場合、ドップラースペクトルではターゲットの速度成分が明確になるため、ドップラースペクトルに含まれる波浪成分を取り除くことでターゲットを識別する精度の向上が期待される。

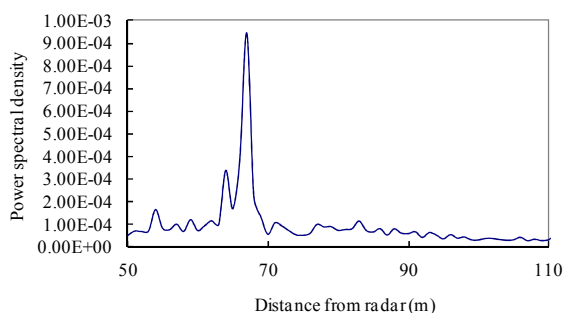


図 8 ピーク値の空間分布 (風速 5m/s)

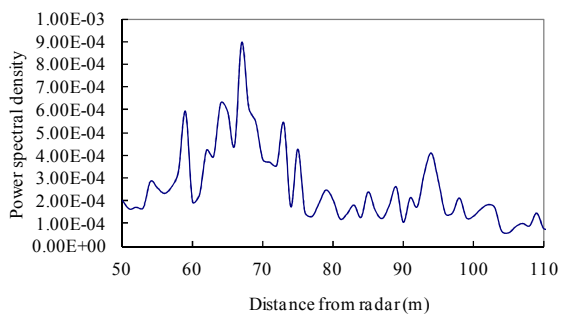


図 9 ピーク値の空間分布 (風速 10m/s)

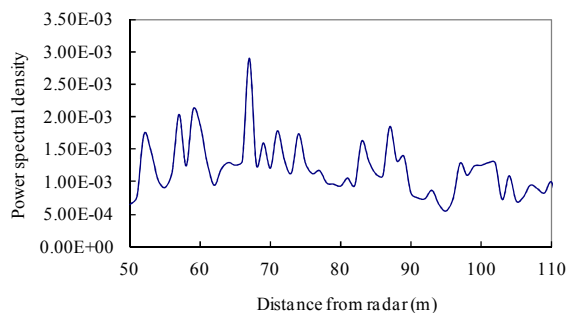


図 10 ピーク値の空間分布 (風速 15m/s)

(2) 現地観測

① 観測手法

現地観測は平塚沖観測タワーにおいて行った。観測期間は 2013 年 11 月 1 日から 11 月 26 日である。観測位置を図-11 に示す。平塚沖観測タワーは沖合約 1km、水深約 20m の地点に位置しており、超音波式波高計、風速計、流速計等により海象状況を常時観測している。

観測に使用したレーダは、回転式アンテナのパルスドップラーレーダであり、アンテナを連続的に 360° 回転させながら送受信を行うことができる。レーダの仕様と観測条件を表-1 に示す。レーダは図-12 に示すようにタワーの屋上に設置した。アンテナの設置高さは海面から約 22m である。

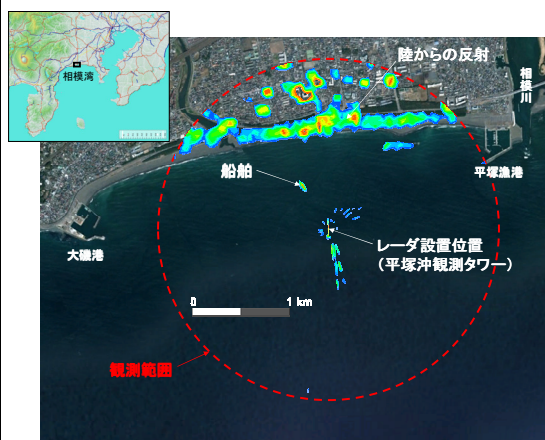


図 11 観測位置

表 1 レーダの仕様と観測条件

送信周波数	9410 MHz
送信ピーク電力	6.3 W
垂直ビーム幅	約 9.4°
水平ビーム幅	約 0.9°
パルス幅	600 nsec
パルス繰返し周波数	1000 Hz
アンテナ回転数	1/3 rpm



図 12 観測状況

②観測結果

2013年11月12日に観測されたレーダ画像を図-13に示す。図-13は従来手法と同様に後方散乱強度の空間分布をプロットしたものであり、船舶位置における値を基準にdBに変換している。したがって、船舶位置で0dBとなっている。このときは図-14に示すように静穏時(風速5.3m/s、有義波高0.5m、有義波周期7.8s)であったため、従来手法と同様に後方散乱強度のデータからでも船舶位置を識別することができた。荒天時の例として、2013年11月10日に観測されたレーダ画像を図-15に示す(スケールは図-13と同じとしている)。このときは低気圧の接近により図-16のように白波が立っている状況であった(風速20.8m/s、有義波高2.0m、有義波周期5.8s)。そのため、シークラッタが大きくなり、相対的に船舶と海面の後方散乱強度の差が小さくなる傾向となった。実際には、このとき海域に船舶は存在していなかったが、このような場合には船舶の識別が困難になる。

静穏時(2013年11月12日)の船舶位置におけるドップラースペクトルを図17に示す。比較のため、荒天時(2013年11月10日)の同じ位置におけるドップラースペクトルを赤線で示している。なお、それぞれのドップラースペクトルは積分値が1になるように無次元化して表示している。両者を比較すると、船舶位置におけるドップラースペクトルには明瞭なピークが存在するのに対して、荒天時の海面におけるドップラースペクトルはなだらかな分布になっていることがわかる。海面にはさまざまな速度成分が存在するため、ドップラースペクトルのバンド幅が広がる。対して、船舶が存在する位置では、ドップラースhiftは船速に対応して一定となるため、対応するドップラー周波数に鋭いピークが生じる。

船舶が存在する位置と存在しない位置とでドップラースペクトルに明瞭な違いがあることから、これを船舶探知に応用する手法を考案した。図18、図19はそれぞれ静穏時(2013年11月12日)、荒天時(2013年11月10日)について、ドップラースペクトルのピーク値の空間分布をプロットしたものである(スケールは同じとしている)。ただし、周波数2Hz以下の低周波数成分は除去している。図18は図13と同様であるのに対して、図19は図15に比べてシークラッタが大きく低減されていることがわかる。これは従来手法に比べて、荒天時でも鮮明に船舶を探知できることを意味している。

ドップラースペクトルの特性を利用した本手法は、比較的簡単なアルゴリズムで鮮明なレーダ探知を可能にする新しい技術である。また、ドップラースhiftは散乱強度に比べて環境影響を受けにくいいため、従来手法より安定した探知が可能になると考えられる。

2013/11/12 06:30

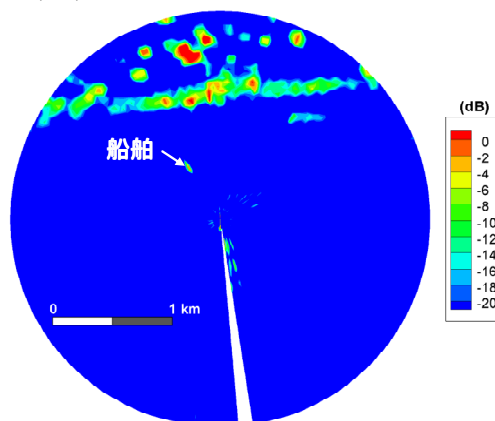


図13 従来手法のレーダ画像(船舶存在時)

2013/11/12 06:35



図14 船舶存在時のカメラ画像

2013/11/10 13:00

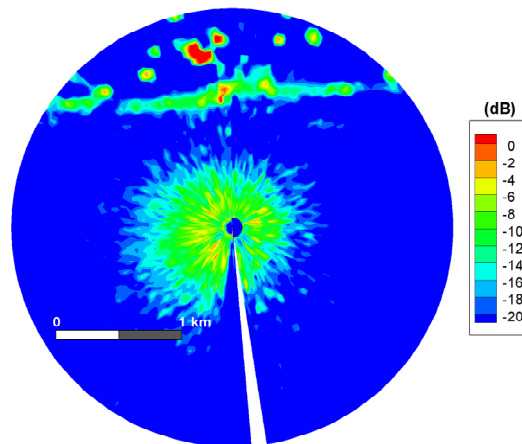


図15 従来手法のレーダ画像(荒天時)

2013/11/10 13:00



図16 荒天時のカメラ画像

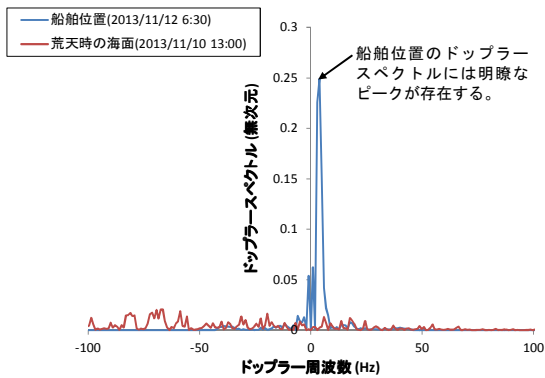


図 17 ドップラーспекトルの比較

2013/11/12 6:00

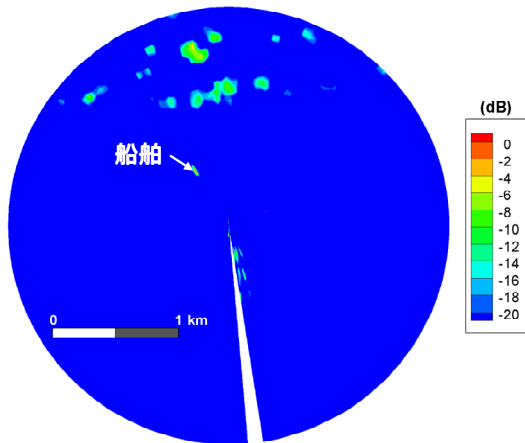


図 18 本手法のレーダ画像(船舶存在時)

2013/11/10 13:00

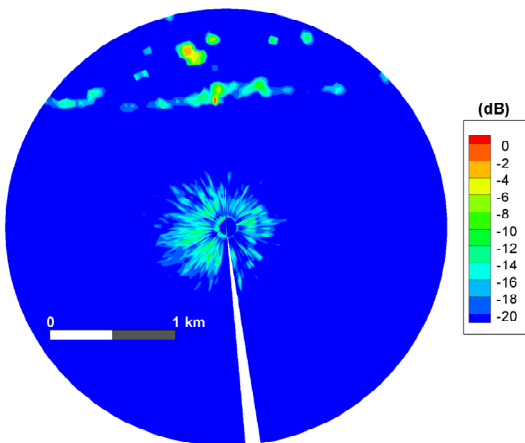


図 19 本手法のレーダ画像(荒天時)

(3) 今後の展望

本研究では、ドップラーспекトルの特性を利用した新しいレーダ探知アルゴリズムを開発した。ドップラーシフトからターゲットの速度を計測できるため、今後は船舶の位置だけでなく速度も同時にモニタリングできるシステムを開発していく予定である。また、本手法を普及させていくためには、パルスドップラーレーダのコストダウンも重要な課題である。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 2 件)

- ①吉田毅郎、ドップラーシフトを利用したレーダの海面ノイズ除去に関する研究、第 24 回海洋工学シンポジウム、2014 年 3 月 14 日、東京都千代田区
- ②吉田毅郎、海面漂流物を考慮したパルスドップラーレーダ信号のシミュレーション、第 55 回日本リモートセンシング学会学術講演会、2013 年 11 月 22 日、福島県郡山市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 昌奎 (RHEEM, Chang-Kyu)
 東京大学・生産技術研究所・教授
 研究者番号：70272515

(2) 連携研究者

小林 豪毅 (KOBAYASHI, Hidetaka)
 東京大学・生産技術研究所・特任研究員
 研究者番号：50621695

(3) 研究協力者

吉田毅郎 (YOSHIDA, Takero)
 東京大学・新領域創成科学研究科・特任研究員