

パターン認識を用いた海洋短波レーダーの流速推定法の提案

森 信人* ・坂井伸一** ・松山昌史***・坪野考樹****
西田修三*****・清水隆夫*****・中辻啓二*****

海洋短波レーダーによる表層流の推定精度と推定結果の安定性を向上させるため、Minimum-Perimeter Polygons 法を基にしたパターン認識にもとづくアルゴリズムを提案した。新しいアルゴリズムで推定された表層流速と船舶による観測結果との比較を行い、手法の妥当性について明らかにした。その結果、従来の手法より高い流速の推定精度と有効なデータレートとの向上を得ることができた。

1. はじめに

海洋レーダーは、短波帯 (HF 帯) や超短波帯 (VHF 帯) の電波のブラッグ散乱による反射波のドップラースペクトルから表層流速 (以下、単に流速) を観測することができるため、従来の船舶やブイ等による手法では困難かつ高コストとなる広域流動の長期連続観測が可能であり、80 年代後半より実用化に向けた様々な研究開発が行われてきた。我が国では、1988 年に通信総合研究所沖縄電波観測所が国内初の海洋レーダーとなる HF レーダーの開発に成功し、国内の様々な研究機関により、レーダーの流速測定精度や得られた流動パターンを用いた現象解明に関する研究が数多く実施されている (『海洋レーダ』シンポジウム, 1996; 2004)。

海洋レーダー (以下レーダー) による流速観測の最大の問題点としては、ドップラースペクトルのピーク周波数検出精度と誤差情報の検定処理が挙げられる。局所的な渦が存在する場合や 2 次散乱が強い場合および外来ノイズの影響が大きい場合には、ドップラースペクトルのピーク周波数が明瞭でない場合があり、時としてレーダーの視線 (レンジ) 方向に対する連続性を満たさないような現実的ではない推定値が得られることが多くある。これが流速の推定精度の低下や後処理の煩雑さを生み、レーダーによる流動観測の自動化を妨げており、これまで様々な改良が行われてきた。例えば、ある特定のレンジにおけるピーク周波数推定精度の向上には、MEM や AR を用いた方法 (児島ら, 2001) が提案されており、レンジ方向の連続性を満たすような改良としては、メディアンフィルターを用いた異常ベクトルの除去や正負の周波数のドップラースペクトルの重ね合わせによる

手法が用いられている (例えば、徳田ら, 1999)。しかしながら何れの手法も、スペクトルのピークが 2 つ以上存在する場合や、流速の符号が急速に変化する場合など普遍的に適用できないという課題を持っている。

本研究では、パターン認識に基づくアルゴリズムを用い、ドップラースペクトルのレンジ方向の変化を考慮することにより、ピーク周波数の推定精度と安定性の両者を満たす手法を提案する。ついで、新しいアルゴリズムで推定された流速値と観測結果との比較を行い、手法の妥当性について明らかにする。

2. パターン認識を用いたドップラースペクトルピーク周波数の推定

一般的に、海洋レーダーにより観測されたドップラースペクトルからピーク周波数を検出する場合、モーメント法もしくは半値幅法が広く用いられている (土木学会, 2001)。検出されたスペクトルのピークが 1 次散乱のものであるならば、表層流速を正しく推定することが可能となる。しかし、船舶等によるノイズ、短時間に大きな流速変動がある場合、高波浪による 2 次散乱の増加などの影響により正常にドップラースペクトルのピーク周波数を検出できない場合が数多く見られる。中でも、特に問題になるのが 2 次散乱の増加によるドップラースペクトルの平坦化やドップラースペクトルが 2 つ以上の明瞭なピークを持つ場合である。このため、モーメント法や半値幅により推定されたピーク周波数をレンジ方向に並べ、フィルター処理を行ったり、正負の周波数スペクトルを重ね合わせることでピーク周波数検出の安定性を増す方法が用いられている。しかしながら、現在用いられている手法では、ある特定のレンジにおけるドップラースペクトルからピーク周波数を検出し、その後レンジ方向の連続性について検定を行うため、レンジ方向に連続的に複数のピーク周波数が分布する場合には、ピーク周波数の検出結果が不安定であったり、検出そのものが不可能である場合が多々ある。

そこで本研究では、海面流速に関連するドップラースペクトルのピーク周波数が、流体運動の連続性に基づきある程度の連なりを持つとの仮定の下で、パターン認識

* 正会員 博 (工) 大阪市立大学講師 大学院工学研究科

** 正会員 工 博 (財) 電力中央研究所 研究企画グループ 主任

*** 正会員 工 修 (財) 電力中央研究所 地球工学研究所 主任研究員

**** 正会員 工 修 (財) 電力中央研究所 環境科学研究所 主任研究員

***** 正会員 工 博 大阪大学助教授 大学院工学研究科

***** 正会員 工 修 (財) 電力中央研究所 環境科学研究所 上席研究員

***** 正会員 工 博 大阪大学教授 大学院工学研究科

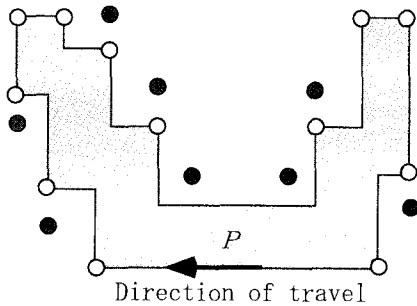


図-1 パターン認識対象領域と凹凸点の関係 (●:凹点, ○:凸点)

を用いてピーク周波数を推定するアルゴリズムの開発を行う。今回提案するパターン認識を用いた流速推定手法の概略は以下のようにまとめられる (以下 PM 法と略記)。

1. レンジ方向に並べたドップラースペクトルを各レンジにおけるピーク値で無次元化する (以下, 正規化スペクトル)。
2. 2 次元メディアンフィルターを用いて正規化スペクトルからスパイクノイズの除去を行う。
3. 閾値 $S[0-1]$ を基準にして, 正規化スペクトルを 2 値化処理する。
4. Minimum-Perimeter Polygons (MPP) 法を用いて 2 値化処理された正規化スペクトルよりパターン認識を行う。
5. 認識されたパターンより, 各レンジにおけるピーク周波数を推定し, 流速に換算する。

2 値化処理した後の正規化スペクトルからパターンを抽出する方法として, MPP 法 (Sklansky ら, 1972) を用いる。MPP 法では, 対象とするパターン周りの凹凸を計算し, 凸をつなぐように以下の手順で領域を定義する。

1. 対象とする領域周りの凹凸を計算する
2. 凸点だけ結んだ領域を定義する
3. 凸点だけ結んだ領域の外にある凹点を削除
4. 残った凹点を取り入れて領域を再定義
5. 再定義した領域で凹凸を再計算
6. 凸点から凹点に変わった点を削除
7. 5 と 6 を変化がなくなるまで繰り返す。

PM 法における全体のプロセスで任意に決定すべき変数および条件としては, 1) 正規化スペクトルを 2 値化する際の閾値 S , 2) 認識されたパターンからピーク周波数を推定するアルゴリズムの 2 点がある。閾値 S の影響については, 後で詳細な議論を行うこととし, 認識されたパターンからピーク周波数への換算は, レンジ毎のパターンのエッジを検出し, 半値幅法に準じて両端の間をピーク周波数として行った。

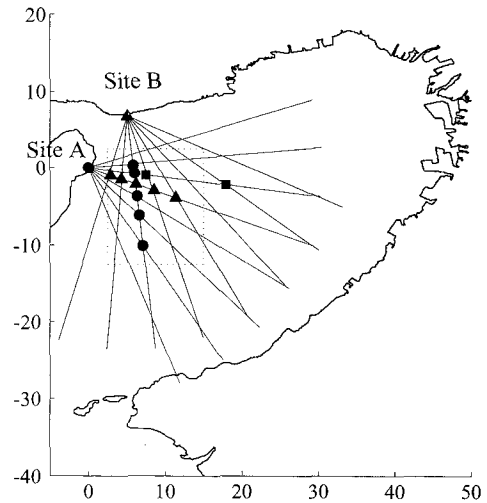


図-2 レーダー観測領域と船舶観測点 (●: Line A, ▲: Line B, ■: Line C)

図-1 に示すのは, MPP 法によるパターン認識の模式図である。図-1 に示すような認識対象領域について, MPP 法では境界の凹凸 (図中の●○) を定義し, 境界線上を一定の方向に進みながら上記の手順によりパターンを抽出する。この一連の手順を領域の数だけ繰り返すと, 必要な数のパターンが得られる。このため本手法では, 従来の手法と大きく異なりレンジ方向の連続性を考慮しつつピーク周波数を検出でき, また同一レンジで 2 つピークが存在してもそれぞれを個別に抽出することが可能となる。

3. 観測の概要

(1) 海洋短波レーダー観測

アルゴリズムの検証に用いたレーダー観測データは, VHF 型を採用した Digital Beam-Forming (DBF) レーダー (坂井ら, 2002; 以下, レーダーと略記) を用いて取得し, 観測は大阪湾に面する神戸市垂水区と淡路島の津名郡東浦町の 2 箇所に基地局を設置して 2003 年 1 月 18 日～2 月 20 日にかけて実施した。図-2 に本研究のレーダー観測領域と船舶による測定点の位置を示す。図に示すように, 2 箇所の基地局のレーダーがそれぞれ 8 方向にビームを切り替え (図の実線方向), 各ビーム 5 分間の収録を行った。レーダー観測は, 送信周波数 41.9 MHz, 最大送信出力 100 W, 掃引幅 300 kHz, 測定時間 15 分で実施し, この場合のレンジ方向の距離分解能は 0.5 km, 速度分解能は 2.13 cm/s である。レーダーの波長は約 7.16 m であるので, それとブラッグ散乱を起こす海面波の波長は約 3.6 m となる。

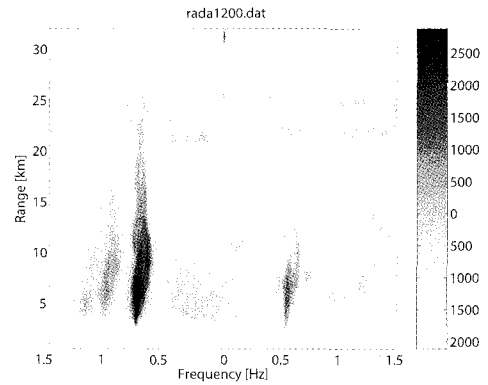
(2) 流速計等による同期観測

レーダーによる観測とは別に、レーダにより推定される流速の精度検証のため、2003年1月30日に ADCP を搭載した3隻の観測船により流速分布についての観測を行った。図-2に示した定点(●▲■)において、船上設置した ADCP を用いて表層から水底までの流速の鉛直分布を各測点3回ずつ計測した。2003年1月30日に船上で観測した風速は約2 m/s~9 m/sであった。Stewart・Joy(1974)の理論的研究によれば、VHF 帯レーダーにより検知される流速は、海面から共鳴する水面波の波長の $1/2\pi$ 倍の水深までの影響を受ける。それゆえ、流速の鉛直分布が線形であると仮定すれば、レーダーで推定される流速は、水深約0.3 mの平均流速とみなすことができる。そこで、ADCP で計測された流速の鉛直分布の中で、水深0.3 m~0.7 mにおける値の値を代表流速としてレーダーとの比較に用いた。

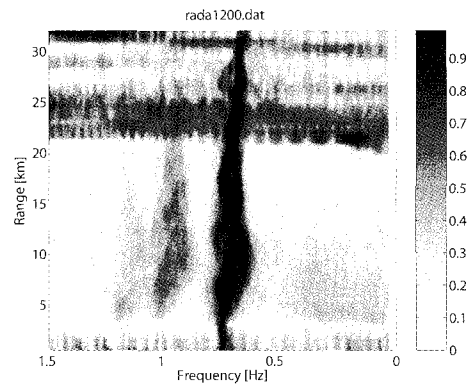
以下では、前節で提案したパターン認識を用いてレーダーにより計測されたドップラースペクトルから視線方法流速を推定する方法の妥当性について、ADCP による観測結果との比較結果より検証を行う。

4. ピーク周波数の推定結果と観測結果との比較

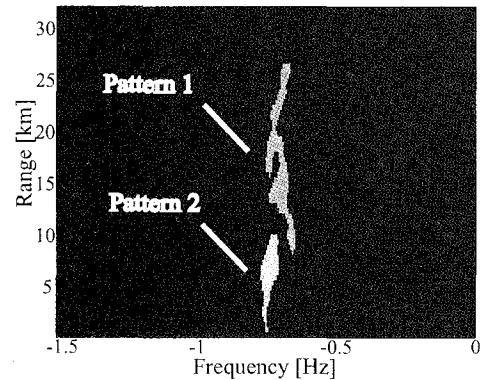
図-3に示すのは、正規化したドップラースペクトルより PM 法を用いてパターン認識を行った結果である。図-3(a)に示すのは、2003年1月30日午後12時に A 局で観測したドップラースペクトルであり、(b)が正規化スペクトル(周波数の負側のみ表示)、(c)が PM 法により得られたパターンである。図-3(b)からわかるように、このサンプルの場合にはレンジ8 km・周波数0.7 Hz前後で2つの重複したピークが見られ、(c)に示すように、PM 法では両者をそれぞれの別のグループとして検出することに成功している。続いて図-4に示すのは、認識されたピーク周波数周りのパターン(図-3(c))からレンジ毎のピーク周波数を検出し、視線方向流速に換算した結果である。認識されたパターンからピーク周波数への換算は、レンジ毎のパターンのエッジを検出し、半値幅法に準じて両端の間をピーク周波数として行った。比較のために、モーメント法と半値幅法を用いて推定した結果も合わせて示す。いずれの手法による結果も異常値についての検定処理を行わず、ピーク周波数検出結果をそのままプロットしてある。全体的には3種類の手法に大きな違いはないが、8 km 前後に見られる2つのピークが存在する領域に注目すると、モーメント法による検出結果は2つのピークの一方からもう一方へ不連続に変化しており、半値幅法では2つのピークの中間を通る検出結果になっている。これに対し、PM 法の結果は



(a) オリジナルのドップラースペクトル



(b) 正規化したドップラースペクトル (負側の周波数のみ)



(c) パターン認識により得られた結果 (負側の周波数のみ)

図-3 パターン認識によるピーク周波数の検出手順

モーメント法や半値幅法に比べて目視で認識されるピーク周波数の変化をそのまま捉えており、同じレンジで重複する2パターンのピーク周波数の変化にそれぞれに追従し、PM 法を用いたピーク周波数検出の利点を見ることができる。

次に、PM 法によるドップラースペクトルのピーク周

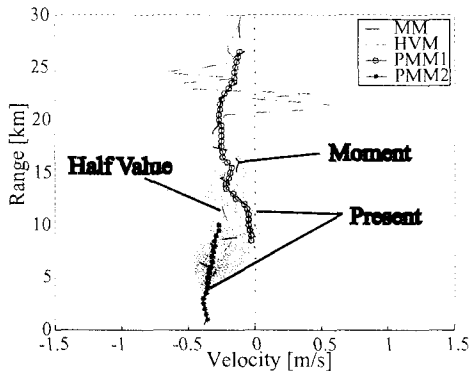
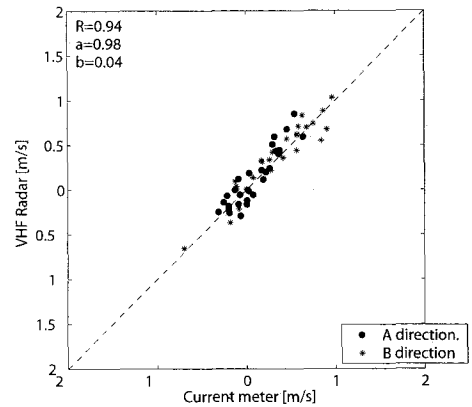


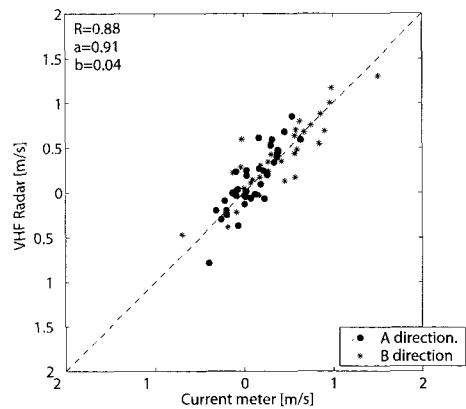
図-4 各手法により推定された視線方向流速の比較(記号: PM 法, 破線: モーメント法, 一点鎖線: 半値幅法)

波数推定アルゴリズムの妥当性を定量的に評価するため, レーダーで観測した流速と船舶に搭載した ADCP により計測した流速との比較を行う。図-5 に示すのは, 図-2 に示した観測点における ADCP による計測値と PM 法, モーメント法および半値幅法により推定された流速の比較である。図中の 2 種類の記号はそれぞれ 2 つの基地局についての視線方向流速を示し (スペクトル正規化のための 2 値化の閾値 $S=0.85$), R は相関係数, a および b は線形回帰の傾きと切片の値である。PM 法で推定された流速と観測値の相関係数は 0.94, 傾き 0.98, バイアス 4 cm/s であり, 両者の一致度は良好といえる。一方, PM 法と比較して, モーメント法および半値幅法により推定された流速と観測値は, 相関係数が 0.06 低く, 傾きも 0.90 前後まで下がり, 推定精度がやや悪くなっていることがわかる。これらの結果より, PM 法により推定された流速は, モーメント法および半値幅法と同程度もしくはそれ以上の精度を持つことがわかる。

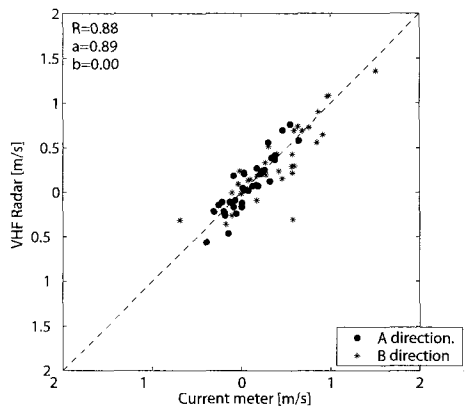
PM 法により推定された流速の推定結果は, 正規化スペクトルを 2 値化する際の閾値 S の値により影響を受けることが予想されるため, 閾値 S と推定精度および有効データ取得率の関係について検討を行った。図-6 に示すのは, PM 法, モーメント法および半値幅法を用いて推定した流速と観測結果の S と相関係数, rms 誤差および有効データレートの関係である。有効データレートは, ピーク周波数を求めることができたデータの点数を全データ点数で割った値として定義する。図-6(a) に示す観測値との相関係数について見ると, モーメント法および半値幅法の相関係数が共に 0.88 であるのに対し, PM 法の相関係数は閾値 S の値に対して単調増加であり, S が 0.7 より大きくなるとモーメント法および半値幅法より強い相関を示す。これに連動して, 図-6(b) に示す推定値の rms 誤差も S の値が大きくなるとともに小さくなり, 今回使用したデータでは $S=0.9$ で rms 誤



(a) PM 法



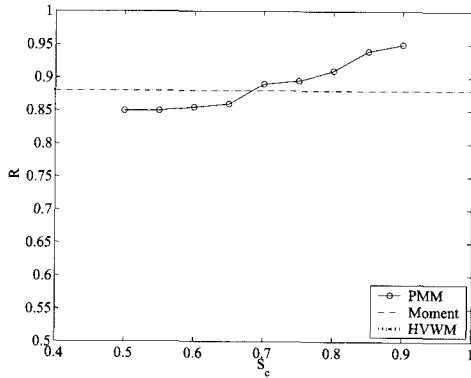
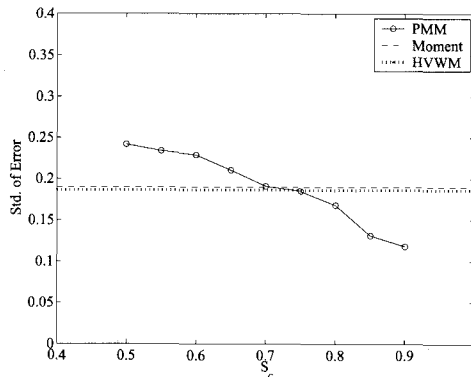
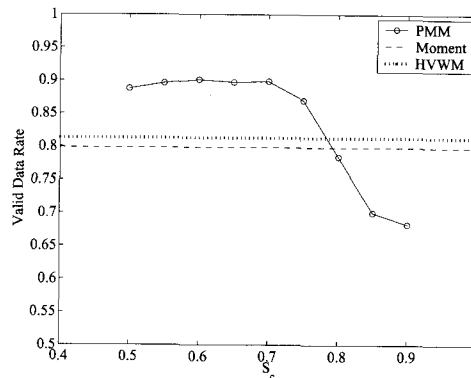
(b) モーメント法



(c) 半値幅法

図-5 各手法により推定された流速と観測結果との比較

差 0.12 m/s となっている。一方, 図-6(c) に示すように, 実用上重要となる有効データレートは, 相関と異なり閾値 $S=0.7$ 以上で単調減少することがわかる。モーメント法や半値幅法と同程度の精度を持つ $S=0.7$

(a) S と相関係数の関係(b) S と誤差の関係(c) S と有効データレートの関係図-6 PM法における閾値 S の影響(実線: PM法, 破線: モーメント法, 点線: 半値幅法)

における有効データレートは約90%であり, これはモーメント法や半値幅法の結果を大きく上回るものである。一方, 精度が高くなる $S > 0.8$ の領域では有効データレートは大きく低下し, その値は70%を切るように

なることがわかる。

以上の結果より, PM法では2値化の閾値 S にピーク周波数検出結果が大きく依存し, S の値を大きく取ると推定精度が向上し, 観測値との誤差も減少するが, 有効データレートは減少するため, 適切な閾値を使用する必要がある, $S = 0.70 \sim 0.75$ を用いると推定精度と有効データレートの両方を満足することがわかった。

5. 結 語

本研究では, パターン認識に基づくアルゴリズムを用いて, ドップラースペクトルのレンジ方向の変化を考慮することにより, ピーク周波数の推定精度と安定性の両者を満たす手法を提案した。観測結果との比較を行い, 手法の妥当性と推定に必要なパラメータの鋭感性について検討を行った。その結果, PM法では2つのピークを持つようなドップラースペクトルを区別して検出することができることを示した。さらに, 正規化スペクトルを2値化する閾値 S を適切に取ることにより, 従来の手法より推定精度の良い流速と有効なデータレートの向上を得ることができることを明らかにした。

今後の課題としては, 認識したパターンからより適切にピーク周波数を検出する方法の検討, 効率的な異常ベクトルの除去と欠測データ補間方法を組み合わせた総合的なパッケージの開発があげられる。

謝辞: 最後に, 観測にあたり御協力を頂いた(財)電力中央研究所水鳥雅文氏を始めとする関係者の方々に重ねて感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 児島正一郎・橋本典明・吉松みゆき (2001): 海洋短波レーダーによる海表面流計測のための新しいドップラースペクトルの算定法, 海岸工学論文集, 第48(2)巻, pp. 1421-1425.
- 坂井伸一・平口博丸・松山昌史・坪野考樹・森 信人・杉山陽一・藤井智史・佐藤健治・松岡建志 (2002): 短時間観測が可能なデジタルビームフォーミング方式による沿岸海洋レーダーの開発, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1511-1515.
- 土木学会海岸工学委員会現況レビュー小委員会(Ed.) (2001): 陸上設置型レーダーによる沿岸海洋観測, 土木学会。
- 徳田正幸・村上和男・渥美泰彦・永松 宏 (1999): 海洋短波レーダーの表層流の自動抽出方法の開発, 海洋調査報告11, pp. 1-19.
- 海洋レーダシンポジウム (1996): 海洋レーダシンポジウム, 日本海洋学会春期大会講演要旨集, pp. 536-557.
- 海洋レーダシンポジウム (2004): 沿岸海域における海洋レーダー観測, 沿岸海洋研究41(2), pp. 71-136.
- Sklansky, J., R. Chazin, and B. Hansen (1972): Minimum-perimeter polygons of digital silhouettes, IEEE Trans. Computers C 21(3), pp. 260-268.
- Stewart, R. H. and J. W. Joy (1974): Hf radio measurements of surface currents, Deep-Sea Research (21), pp. 1039-1049.