

海洋レーダーのドップラースペクトルに及ぼす海象の影響

Influence of Currents and Waves on the Doppler Spectra of Ocean Radar

宮本豊尚¹・西田修三²

Toyohisa MIYAMOTO and Shuzo NISHIDA

The method of velocity measurement using an Ocean Radar has already come into practical use. However the measured velocity is sometimes not reliable because the first order Doppler spectra may have double peaks or flat peaks. To reveal the influential factor on the shape of the spectrum, effects of currents and waves are analyzed using observed data and model calculation results of Doppler spectra. Results show that current unsteadiness make the spectrum peaks flattened, and that horizontal shear and convergence of current cause double-peaked spectra. The second order Doppler spectra depend on the period and direction of the sea surface wave. We propose a simple equation estimating the significant waveheight from the measured Doppler spectrum.

1. はじめに

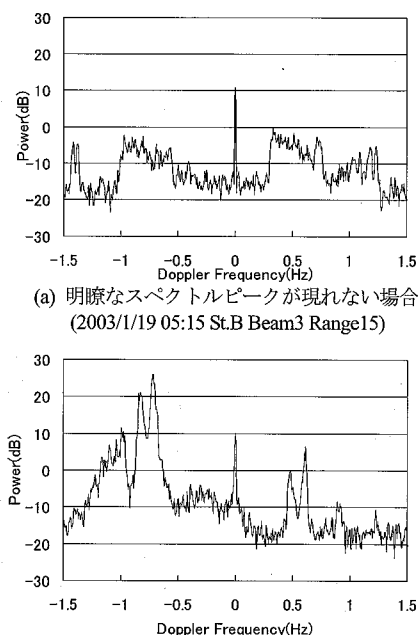
海洋レーダーは、短時間のうちに広域の表層流速を陸上から捉えることのできる観測機であり、すでに実用の域に達している(坂井ら, 2004). 国内でも沿岸域の流況モニタリングに向けた配備が進められている. しかし, 実測されるドップラースペクトルは図-1に示すように, 海象の影響を受けて流速算定に必要な1次散乱ピーク周波数の検出が困難な場合も多い(佐藤ら, 1999; 西田ら, 2005). そこで本研究では, 被測定域における流動の時空間変動が, スペクトルピークの双峰化やエネルギーレベルの低下などスペクトル形状に及ぼす影響について, 実測データの解析とモデル計算により明らかにする. また, 波浪情報の抽出が可能とされているスペクトルの2次散乱についても海象の影響解析を行い有義波高の推算式を提案する.

2. 現地観測

解析には, 大阪湾西部海域と大阪湾奥部で実施したDBF 海洋レーダー (41.9 MHz 帯, 電力中央研究所)の観測データを使用した.

大阪湾西部海域では2003年1月17日~2月20日に観測を実施した. レーダーサイトを明石海峡を挟んだ約8 km離れた2地点(淡路A局と垂水B局: 図-2(a))に設置し, 視線方向約25 km, 走査角約90°で計測を行った.

大阪湾奥部では2003年10月18日~12月17日および2004年10月8日~12月20日に実施した. レーダーサイトを大阪湾奥部の約7 km離れた2地点(夢洲A局と堺B局: 図-3(a))に設置し, 同じく視線方向約25 km, 走査角約90°で計測を行った. 2004年の観測ではA局に気象計を設置し, 10分間隔の風向風速と日射量



(a) 明瞭なスペクトルピークが現れない場合
(2003/1/19 05:15 St.B Beam3 Range15)

(b) 複数のスペクトルピークが現れる場合
(2004/10/20 0:00 St.A Beam5 Range12)

図-1 スペクトル観測例

のデータ収集も行った.

解析には, 各ビームの視線方向500 m 間隔に得られるスペクトルデータとともに, 15分間隔, 500 m メッシュに時空間補間された流速データも使用した.

3. 1次散乱の解析

(1) 観測結果

海洋レーダーによる表層流速の推定には, 観測されたドップラースペクトルの1次散乱ピーク周波数が用いられる. Barrick(1972a)による理論解析では1次散乱は線スペクトルで示されるが, 観測結果はピーク周波数付近に拡がりをもった形状を示し, 時には複数のピークをもつ双峰型のスペクトルやピークが不明瞭なスペクトル形

1 正会員 工修 (独法)土木研究所 材料地盤研究グループ

2 正会員 工博 大阪大学大学院准教授 地球総合工学専攻

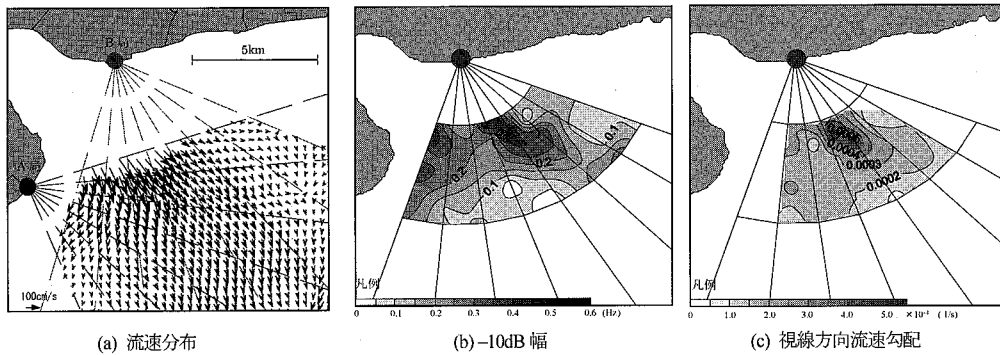


図-2 大阪湾西部海域における解析例 (2003/1/19 02:00)

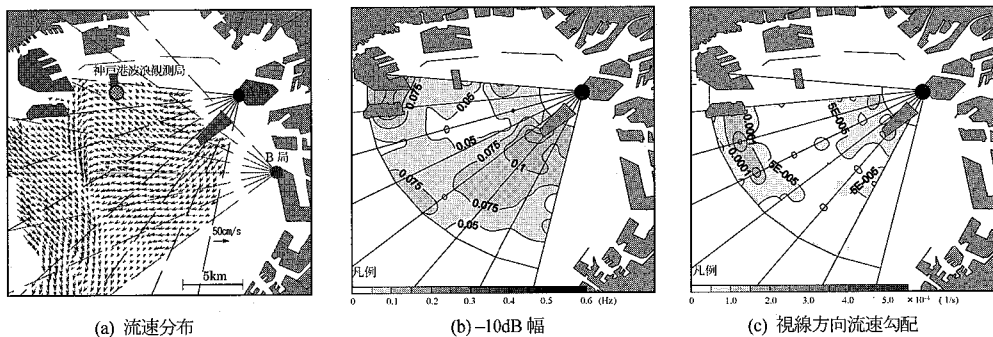


図-3 大阪湾奥部における解析例 (2003/12/10 02:00)

状を示す。そこでピーク周波数の検出精度の目安として -10 dB 幅 (1/10 値幅) を採用し、その空間分布と流動構造の関係について解析を行った。

大阪湾西部海域において、大潮期の明石海峡東流最強時である 2003 年 1 月 19 日 02:00 に観測された流況を図-2 に示す。明石海峡からジェットが大阪湾に侵入しているが、 -10 dB 幅が大きな値を示しているのはジェットの中心ではなく外縁の空間的に流況が大きく変化している領域であることがわかる。また、視線方向流速の勾配との関係を見ると、 -10 dB 幅が大きな領域と流速勾配が大きな領域は良く一致している。このことから、 -10 dB 幅は流速の検出精度の目安となるほか、流動場の非一様性の度合いを示す指標ともなっていることがわかる。

湾奥部において潮目が観測された 2003 年 12 月 10 日の結果を図-3 に示す。この日は大潮であり、一日を通して風が弱く、出水もほとんどなかった。この日の明石海峡東流時には神戸沖から南に延びる潮目の存在が認められる。この時、西に明石海峡からの強いジェット流の影響が、東には弱い河口流が現れていた。

視線方向流速の勾配は、潮目が見られる神戸沖において大きな値を示し、 -10 dB 幅もわずかながら同海域で大きくなっている。勾配が大きな領域はほぼレーダーサイトから 15 km、ちょうど -10 dB 幅が観測できる限界

と一致している。大潮期でかつ河川流量が少なかったため、潮汐フロントが東に移動しレーダーの観測可能域内に入ったと考えられる。

局所的には河口流や地形の影響を受けて、観測精度が低下する海域もあるが、総じて湾奥部では西部海域と異なり急激な流動場の変動はあまり観測されず、 -10 dB 幅も小さいことから、観測データは西部海域よりも精度が高いものと推察される。

(2) モデル計算

スペクトルピークの双峰化や平坦化、さらにエネルギーレベルの低下など、特異なスペクトル形状の発現の原因を明らかにするために、流動と波浪が共存する場のモデル化を Nadai (2006) にない行った。Barrick 近似を用いたレーダー方程式の数値解析によって、モデル場のドップラースペクトルを求めた。波浪場は Bretschneider-光易型を、流動場については非定常場、収束場(潮目を想定)、シア場をそれぞれ与えて計算を行った。ここでは VHF 帯の海洋レーダーを想定し、大阪湾奥部の標準的な海象条件下におけるレーダーサイトから 10 range (=5 km) 付近についての計算結果を示す。

モデルの概念を図-4 に、計算条件を表-1 に示す。なお簡単のため計算領域をビーム感度分布の $\pm \sigma_x$, σ_y 内とした。

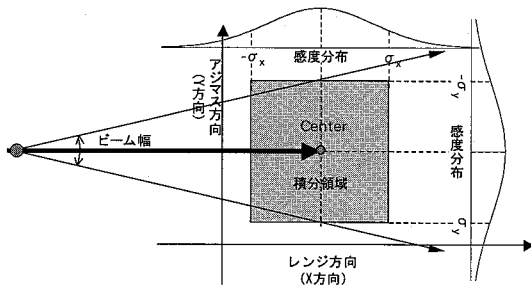


図-4 モデルの概念図

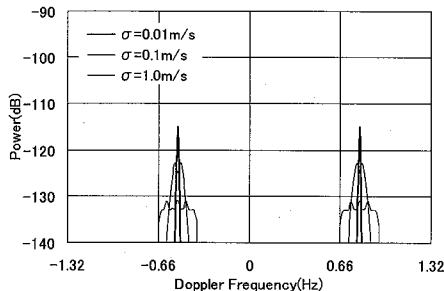


図-5 非定常性に対するスペクトル応答

a) 非定常場における1次散乱

実際の流速場は時々刻々変化している。時間の非定常性を考慮するために、時間平均流速 V_x 、標準偏差 σ の正規分布関数に従って変動させ、空間的には一様な流速場を考える。例として、平均視線方向流速 $V_x = 0.50$ m/s、標準偏差 σ が 1.0, 0.1, 0.01 m/s の3ケースについて計算を行った。その結果を図-5に示す。標準偏差 σ が大きくなるほど一次散乱のスペクトルピーク値が減少し、スペクトル幅が広がっていくことがわかる。そこで各一次散乱スペクトルの -10 dB 幅を求め、標準偏差 σ と比較したところ、図-6に示すような良好な線形関係が得られた。この結果を用いて大阪湾奥部において実測された -10 dB 値幅から、およその標準偏差 σ を算定したところ 5 cm/s 程度と求まった。

b) 収束場における1次散乱

観測領域内に潮目が存在する場合を想定し、収束場に対するモデル計算も行なった。まず、非定常性や Wave Current Interaction の効果を無視し、レンジ方向に視線方向流速の変化率 ($\alpha = \Delta U/a$) が一定の場合の計算結果を示す。図-7には流速場の概念を、図-8には $\alpha = 4.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ を一定として流速を変化させたときに得られたドップラースペクトルを示す。このときスペクトルは2つのピークをもち、それぞれ領域内の最大流速と最小流速に対応している。また、流速変化率が同じ場合、2つのピークの間に存在する谷の領域は一致している。ピーク-谷の中心部におけるエネルギー比 (谷の深さ) と流速変化率の関係を求めたところ、図-9に示す

表-1 パラメータ諸元

項目	設定値
X方向の刻み幅 dX	1.0 m
Y方向の刻み幅 dY	1.0 m
タイムステップ dt	5.0 s
周波数方向の刻み幅 $d\omega$	0.02 Hz
波数 kt	0.14 m^{-1}
最大感度 G_0	10.0
送信電力 P_t	100.0 W
レーダ局からターゲットの中心までの距離 r	10^5 m
波浪スペクトル $Se(-K_0)$	$1.13 \times 10^{-5} \text{ J/Hz}$
波浪スペクトル $Se(K_0)$	$1.13 \times 10^{-5} \text{ J/Hz}$
レンジ方向 感度分布 標準偏差 σ_x	250 m
アジマス方向 感度分布 標準偏差 σ_y	658.5 m

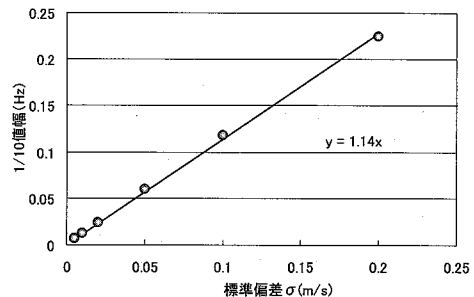


図-6 非定常性と -10dB 幅

ように流速変化率が大きくなるほど対数的に谷が深くなることがわかった。

以上は収束域の中心と計算領域の中心が一致している場合 ($d=0$) についての計算結果であるが、収束域の位置の偏りによるスペクトル形状の変化についても計算を行なった。 $d \neq 0$ における結果を図-10に示す。ただし、標準偏差 $\sigma = 5 \text{ cm/s}$ を有する定常成分と Wave Current Interaction の効果を考慮している。結果は収束域を変化させてもピーク値は数 dB の変化しか認められなかった。すなわち観測されたドップラースペクトルから収束域 (潮目) の位置を逆推定することは困難であることを意味している。

c) シアー場における1次散乱

シアー場がスペクトル形状に及ぼす影響を調べるため、図-11に示す流動場において収束場と同様に計算を行なったところ、収束場と同様に2つのピークをもつことがわかった。さらにシアー場の位置の偏りによるスペクトルの変化を見るために、 $d \neq 0$ についても計算を行なった。結果は図-12に示すとおり、ピークエネルギーは数 dB しか変化せず、シアー場の存在位置を特定することは収束場の場合と同様に困難であることがわかった。

4. 2次散乱の解析

(1) 海象がスペクトルに与える影響

1次散乱の解析と同様に、2次散乱に関する Barrick 近似 (Barrick, 1972b) を用いてレーダー方程式の数値解析によって、ドップラースペクトルを求めた。波浪スペク

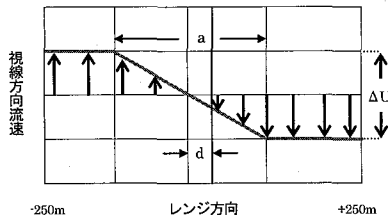


図-7 収束場モデルの流速分布

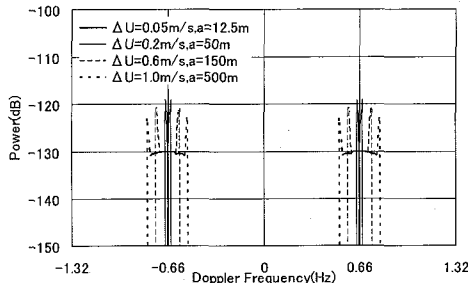


図-8 収束場のスペクトル応答 ($\alpha = 4.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$)

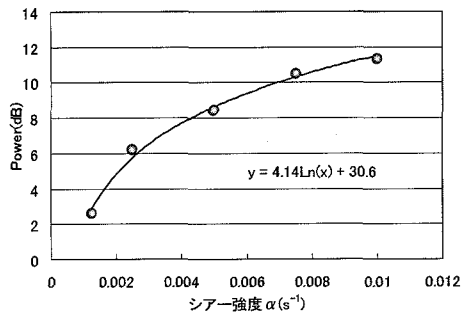


図-9 収束の大きさとスペクトルの谷の深さ

トルは Bretschneider- 光易型を与えて計算を行った。なお、Bragg 周波数で規格化した周波数 $\bar{\omega}$ が、 $|\bar{\omega}| < 0.6$ では有意な値は求められないため計算から除外した。

ドップラースペクトルの2次散乱における特異点は1次散乱の近傍のほか $\bar{\omega} = \pm\sqrt{2}$ 、 $\pm\sqrt{2^3}$ にも存在する。与える波浪場の波高を変化させた場合、図-13に示すように得られる二次散乱のスペクトルは相似形を示し、その比は波高比の4乗、つまりエネルギー比の2乗の値を示していた。一方、与える有義波の周期を変化させた場合には、図-14に示すようにスペクトル形状は大きく変化する。周期が短くなるほど1次散乱近傍の特異点の値が相対的に小さくなる。特に周期が5秒以下になると大きく変化する。このような周期は大阪湾等の内湾ではよく観測されるが、外洋では支配的ではない。Lipa-Barrick (1986) が波浪解析のために提案した式は主に1次散乱の近傍における特異点を利用しているが、これは波浪の周期が長い外洋では利用できるものの内湾における波高算定には利用できないことを示唆している。

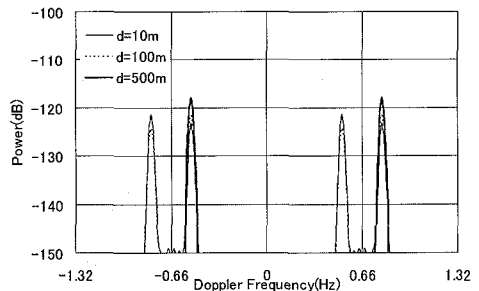


図-10 収束場のスペクトル応答

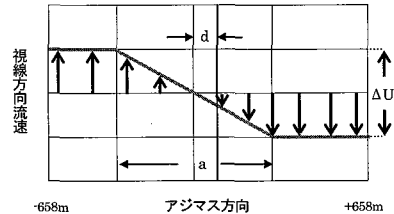


図-11 シアー場モデルの流速分布

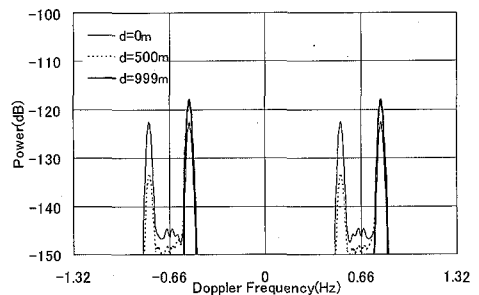


図-12 シアー場のスペクトル応答

(2) 波浪解析への応用

西田ら (2005) は、2次散乱エネルギーを1次散乱エネルギーで規格化しその1/2乗を相対波高と定義し、これが実測波高とよく似た変動を示すことを報告している。しかし限られた波向・周期条件下での解析であったため、普遍性については十分検討されていない。そこで本モデルを用いてドップラースペクトルを計算し、相対波高の周期・波向依存性を調べてみた。図-15に示す結果が得られ、相対波高・有義波高・有義波周期・波向は式(1)の関係で表された。

$$H_R = \left\{ \left(\frac{C_1}{T_s} + C_2 \right) \cdot \cos(2\phi) + C_3 \cdot T_s + C_4 \right\} \cdot H_s + C_5 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに H_R : 相対波高, H_s : 有義波高, T_s : 有義波周期, ϕ : Beamと波向の交角, $C_1 \sim C_5$: 定数

この関係式を用いて、レーダーのスペクトルデータより算定した有義波高と神戸港沖において実測された有義波高を比較したものが図-16である。ノイズレベルが高

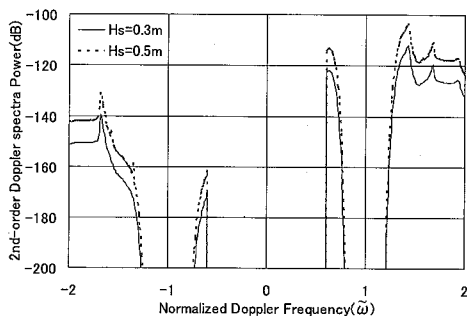


図-13 ドップラースペクトルの波高応答

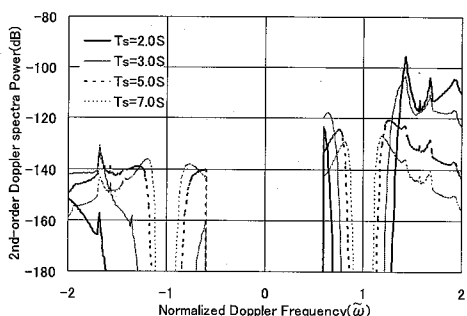


図-14 ドップラースペクトルの周期応答

い時や双峰型のスペクトルの場合を除き、精度良く波高が推算されていることがわかる。

5. ま と め

DBF 海洋レーダーの実測データとモデル計算により、ドップラースペクトルに及ぼす海象の影響について解析を行った。本研究によって得られた主要な結果は以下のとおりである。

- (1) 観測データの解析を基に、流速シアの大きい海域では、スペクトルピークの -10 dB 幅が大きく現れ、 -10 dB 幅は流速の算定精度の目安となるほか、流動場の非一様性の度合いを示す指標ともなっていることがわかった。
- (2) 非定常流動場のモデル計算より、非定常性はスペクトルピークの低下と平坦化を招き、スペクトルピークの -10 dB 幅と流速変動の標準偏差 σ には、明瞭な比例関係が認められた。
- (3) 収束場とシア場のモデル計算により、いずれの場合もスペクトルピークは双峰化し、流速勾配とピーク間の谷の深さに一定の関係があることが見いだされた。しかし、シアの存在位置やその向きは、スペクトル形状にほとんど影響を及ぼさない。
- (4) 2次散乱エネルギーの積分値を1次散乱ピーク値で規格化して得られる相対波高は、風向(主波向)と波周期に依存することがモデル計算によって明らかとなり、簡便な有義波高の推算式を提案した。

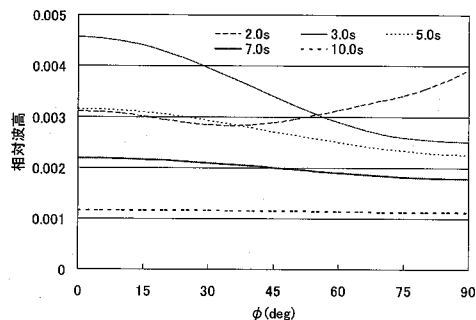


図-15 相対波高の周期・風向応答

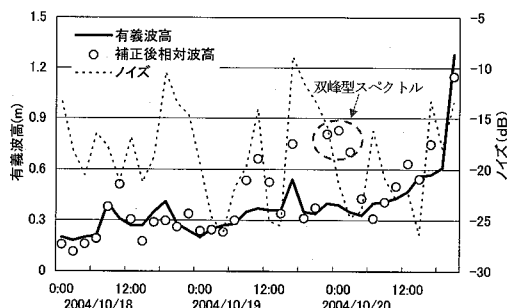


図-16 実測波高と計算波高の比較

謝辞：本研究は、(財)電力中央研究所と共同で実施したものであり、現地観測においては大阪市港湾局ならびに大阪府環境農林水産部にご高配頂いた。また、国土交通省神戸技術調査事務所には波浪データのご提供を頂いた。記して感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 坂井伸一・松山昌史・坪野孝樹・森 信人・中辻啓二・西田修三・中池悦郎・谷川陽祐(2004):DBF レーダによる沖ノ瀬環流域の広域流動観測, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 1416-1420.
- 佐藤建治・藤井智史・小西伸英・二瓶泰雄・灘岡和夫(1999):鹿島灘において短波海洋レーダーで測定されたドップラースペクトルについての考察, 1999年度日本海洋学会秋季大会予稿集, p. 165.
- 西田修三・中辻啓二・宮本豊尚・清水隆夫・坂井伸一・松山昌史・坪野孝樹(2005):DBF 海洋レーダーによる大阪湾奥部の流況観測と波浪観測への応用, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 1441-1445.
- Barrick,D.E. (1972a):First-order theory and analysis of MF/HF/VHF Scatter from the sea, IEEE Trans. Antennas Propag., vol.AP-20, pp. 2-10.
- Barrick,D.E. (1972b):Remote sensing of sea state by radar, Remote sensing of the Troposphere, V.E.Deer, Ed., ch. 12 pp. 12.1-12.46.
- Lipa,B. and D.E.Barrick, (1986):Analysis methods for narrow-beam High-Frequency radar sea echo, NOAA Technical Report ERL 420-WPL 56, pp. 1-55.
- Nadai,A. (2006):Model analysis of influence of wave-current interaction on current measurement of HF ocean surface radar for isolated eddy and upwelling, Journal of Geophysical Research, vol. 111, C10012.