

遠距離海洋レーダによる対馬暖流分岐流の観測

ーバイスタティック受信機の開発ー

○久島萌人^{A)}、民田晴也^{A)}、森本昭彦^{B)}、杉谷茂夫^{C)}

A) 教育・研究技術支援室 計測・制御技術系

B) 愛媛大学沿岸環境科学研究センター

C) NICT 沖縄電磁波技術センター

概要

遠距離海洋レーダ (LROR) で対馬海流の観測を行った。LROR は 9 [MHz] の FMCW ドップラーレーダであり、200 [km] 離れた対馬と相島の 2 局で観測、両局で受信したドップラー速度ベクトルを合成して対馬暖流の流速分布を観測する。諸事情により対馬局の送信機を停波しなければならず、対馬局を側方散乱波を受信するバイスタティック局として運用することで観測の継続が達成できた。本報告では対馬局のバイスタティック化について紹介する。

1 はじめに

対馬海峡西水道から日本海へと流入する対馬暖流は、陸棚斜面上を東へ流れる対馬暖流第二分枝と、朝鮮半島に沿って北上する東韓暖流に分かれ、第二分枝の存在は季節性があるとされているが結論は出ていない。そのため、対馬暖流の長期・連続的な観測を行い第二分枝の存在を明らかにするため、2013 年 4 月から 2017 年 3 月の間、長崎県対馬と山口県萩市沖の相島に遠距離海洋レーダ (LROR) を設置しデュアルドップラーレーダ観測を行った[1]。図 1 にレーダの設置位置及び観測範囲、図 2 に LROR アンテナの外観を示す。2014 年 12 月以降、対馬局の送信機を運用できなくなり、観測継続を実現するため、対馬局のバイスタティック受信局への改修を検討した。バイスタティック観測は、後方散乱波に比べ格段に弱い側方散乱波を利用したデュアルドップラーレーダ観測技術であり、側方散乱方向のドップラー速度ベクトルを得て流速の水平分布を観測する。バイスタティック観測の実現には、150[km] と遠く離れた第二分枝からの信号を検出するための感度向上技術、およびバイスタティック受信局で送信時刻の検出技術の開発が必要である。本報告では、送信時刻の同期技術について紹介する。

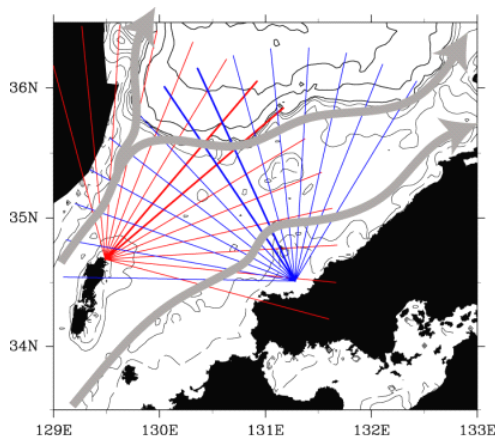


図 1. LROR 観測範囲と対馬暖流流路



図 2. LROR アンテナの外観

2 LROR 概要

遠距離海洋レーダ (LROR) は沿岸から遠く離れた黒潮を観測する目的で開発され、通常の海洋レーダより低い周波数帯を使用することにより、より遠くまで (200[km]程度) 観測することができるレーダである[5]。LROR は 30 分の観測周期で送信電力 1 [kW]、中心周波数 9.2 [MHz] のアップチャープ周波数変調波 (パルス幅 680.96 [ms]、占有帯域幅 22 [kHz]) を送信し、海面で生じるブラッグ散乱波の強度とドップラー速度を観測する。また、受信波と送信波との位相差 (ビート信号) を利用したパルス圧縮技術で観測対象までの距離を観測する[3]。ただし、パルス幅 680.96[ms] の信号処理は技術的に難しく、アップチャープ信号を 256 パルスに分割して送受信する FMICW 方式を採用している (図 3)。受信波はドップラー効果により送信周波数から f_D シフトし、そのシフト量から流速を求める (図 4)。パルス圧縮技術により観測距離分解能は 7[km] を実現、2048 回掃引し 2.5[cm/s] の流速分解能を実現している。

流速ベクトルはレーダビーム視線方向成分しか得られないため、対象エリアを 2 方向から観測し、2 つの流速ベクトルを合成して海流の水平分布を得る (デュアルドップラーレーダ観測)。LROR は、指向性の広い 3 素子の八木アンテナから送信し、2 素子の八木アンテナ 14 本 (対馬は 15 本) で受信する、デジタルビームフォーミング技術 (DBF)[2] を用いたフェーズドアレイ方式のレーダであり、14 (15) 本のアンテナ合成で 14 方位の同時観測が可能である。

観測例として、図 5 に 2014 年 6 月 11 日~9 月 8 日の平均海面流速ベクトルを示す。

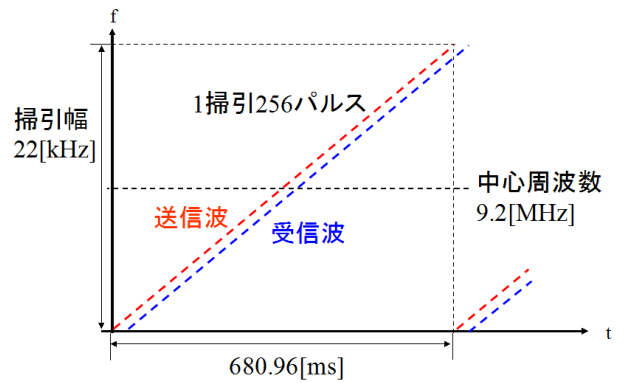


図 3. FMICW 方式の送信波形

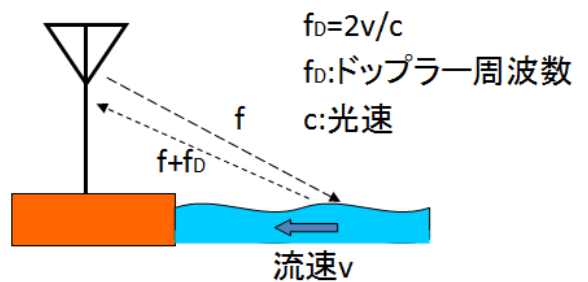


図 4. 海洋レーダ観測原理

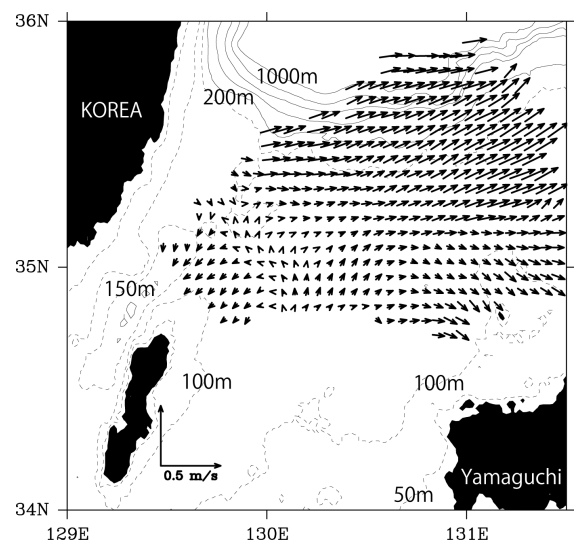


図 5. 2014 年 6 月~9 月の平均海面流速ベクトル

3 バイスタティック受信機の開発

バイスタティック観測の実現には、受信感度の大幅な向上と送信局とバイスタティック局での送信時刻同期技術が必要となるが、LROR は時刻同期が難しい設計となっている。LROR は GPS 時刻同期で 30 分毎に観測トリガをかける設計であるが、トリガ発生後に送信波生成と送信校正プロセスを踏むため、送信までに数秒間の遅れが生じる。また、680.96[ms]の送信パルス間隔が同期を困難にする。幸い先頭送信パルスは GPS の 1 秒周期信号に同期するため、秒単位でのズレ検出で同期が可能となる。

対馬局のバイスタティック化当初は、全ての受信アンテナで GPS 同期して 30 分毎の全パルスを A/D サンプリング (9.2[MHz]の受信信号を 2.2[MHz]でアンダーサンプリング[4]) し大量のデータを保存、観測サイトからデータを持ち帰りコンピュータで演算 (直達波検出、送信時刻同期、DBF 演算) する手法で対応した。アンダーサンプリングを採用した理由は、10[MHz]以上の A/D ボードは高価であり、今回は掃引幅 22[kHz]の信号からビート信号が取得できればよいので、2.2[MHz]の A/D カードを使い廉価に PC ベースでシステムを構築したからである。しかし、受信システムの感度不足で観測距離が第二分枝まで届かず、ハードウェアによるビートダウンと帯域制限による感度改善を検討した。そのためには、直達波をリアルタイム検出して、ビートダウン信号発生タイミングを制御する必要があった。

3.1 直達波検出

直達波検出手法として、送信波との相関を取る手法を用いた。対馬海域には、同一周波数帯の海洋レーダが数多く運用され、単純な信号強度判定では誤検出となるため、LROR のチャープ信号と同じ信号を検出する必要がある。相関を得るためパルス圧縮技術と同じ手法を用いている (図 6)。受信信号と送信信号レプリカ (時間反転) を畳み込み演算すると、相関がある場合にインパルス信号が生成される。畳み込み演算は時間軸での積分フィル

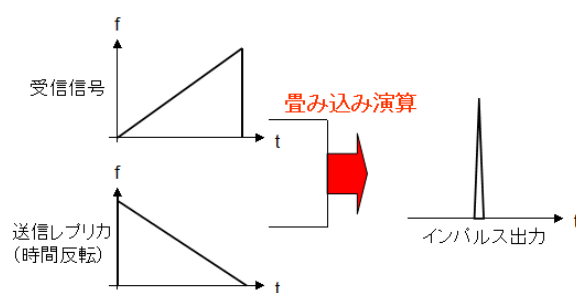


図 6. 畳み込みによる相関計算

タ方式と周波数軸での FFT 方式があり、本システム開発では FFT 方式を採用した。LROR の先頭送信パルスは GPS 1PPS に同期しているため、受信局でも GPS 1PPS に同期して、先頭パルスから約 300[ms]分を A/D で取得、FFT 方式で演算を行い 1 秒未満で余裕を持った相関判定を実現することで、先頭パルスのリアルタイム検出を実現、ビートダウンのハードウェア化を実現した [2]。

3.2 直達波検出からビートダウンまでの流れ

送信時刻同期システムのブロックダイアグラムを図 7 に、信号処理フローチャートを図 8 に示す。各アンテナの受信波はバンドパスフィルタで帯域制限後、RF 帯 9.2[MHz]から IF 帯 455[kHz]にダウンコンバート、I/Q 検波する。この受信 I/Q 検波信号の先頭部分を 12bit, 1.5[MHz]で A/D サンプリング (524288 サンプル ; 300[ms]相当)、保存してある送信 I/Q レプリカ信号との相関検出を行う。直達波を検出した場合、送信波信号レプリカ発生装置にトリガ信号を与え、送信局との時刻同期およびハードウェアによるビートダウンを実現することができ、バイスタティック局の受信感度 (S/N) 改善が達成できた。

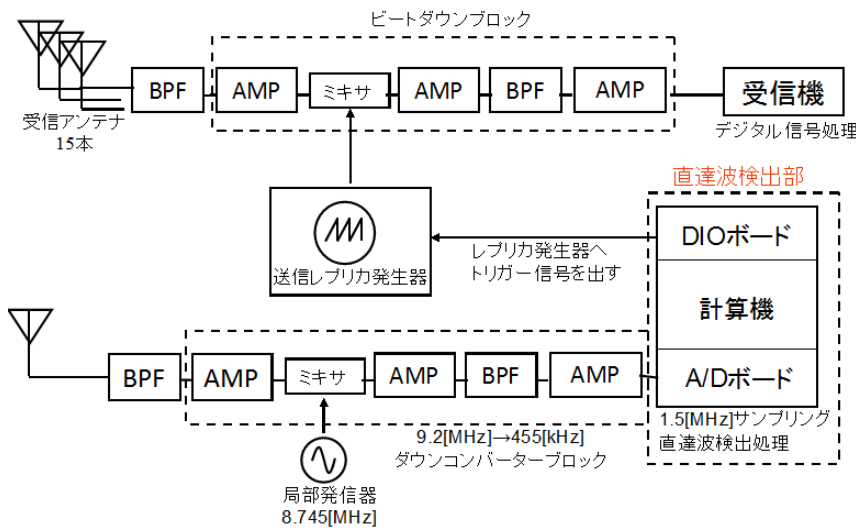


図 7. 送信時刻同期システム構成

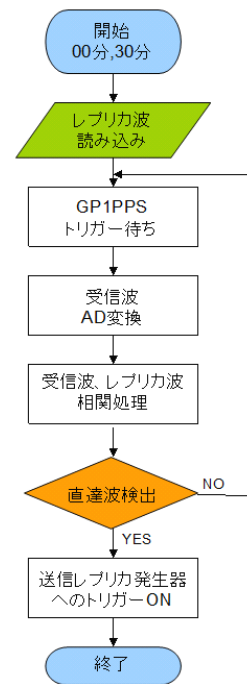


図 8. 直達波検出フローチャート

4 まとめ

対馬暖流分岐流の観測のため、長崎県対馬と山口県相島に LROR を設置した。LROR はモノスタティックレーダであるが、対馬の送信機が運用できなくなり、海流分布観測継続のため、対馬局のバイスタティック化が必要となった。送信時刻情報を持たないバイスタティック受信局でレーダ信号処理を行うためには送信時刻同期が必要であり、今回は送信局からの直達波を検出して時刻同期を行うリアルタイム直達波検出システムを開発し、対馬局のバイスタティック化が実現できた。直達波のリアルタイム検出により、バイスタティック局でのハードウェアビートダウンが実現でき、感度向上につながり、対馬局から 150 km 離れた対馬海流の第二分枝を長期観測できる可能性が見えてきた。今回開発したバイスタティック局では、30 分毎のパルスを連結、60 分毎の 4096 掃引として扱うことで S/N 向上を図ることも考えている。感度改善効果は現在調査中であり、ノイズから有意な信号抽出技術の開発により、より安定した第二分枝の解析手法開発は今後の課題である。

参考文献

- [1] Morimoto, A., Kyushima, M., et al, "Observation of the Tsushima Warm Current paths using Long Range Ocean Radar", The 18th Pacific-Asian Marginal Seas Meeting, 2015-04-21 - 2015-04-23
- [2] 杉谷 茂夫, 久島 萌人, et al, "同期掃引によるバイスタティックレーダ受信方式", 電気学会全国大会, 2017-03-15 - 2017-03-17
- [3] 深尾 昌一郎, 浜津 享助, "気象と大気のリモートセンシング", 京都大学学術出版会, 2005, P96 - P99
- [4] 金谷 秀紀, "デジタル信号処理 アンダーサンプリングによる周波数移動と標準化周波数の低減", ヒデ・ラヂオシャック, (<http://www.hide-radio.com/undersampling.html>), 参照 2018-2-16
- [5] Ichikawa, K., Kyushima, M., et al, "Preliminary results of the Japan-Taiwan joint survey on combining ocean radar data in the Kuroshio upstream region", Ocean Science Journal 48, 2013, P141-P148