

移動ターゲットに対応したスキャン間相関処理の開発 Development of Scan-to-Scan Integration-Correlation Processing Extended for Moving Targets

高山 卓也 時枝 幸伸 菅原 博樹
Takuya Takayama Yukinobu Tokieda Hiroki Sugawara

要 旨

船舶交通管理システムや船舶搭載の航法支援の用途で用いられているX帯（9GHz帯）レーダーは、高い分解能を得られる一方で海面からのシークラッタや雨雪からのウェザクラッタが大きくなり、船舶など海面上のターゲットの認識率を低下させる原因となる。スキャン間相関処理はこれらクラッタを抑圧する効果的な信号処理方法であるが、従来のスキャン間相関処理は移動ターゲット信号も抑圧してしまう欠点があった。そこで従来のスキャン間相関処理を拡張し、移動ターゲットでもその信号の抑圧が小さく、クラッタをより積極的に抑圧する移動ターゲット対応型のスキャン間相関処理を開発した。本手法を強いシークラッタ環境下の高速移動ターゲットに適用した結果、従来スキャン間相関処理と比べて8dBの信号対クラッタ比の改善を確認した。

Abstract

X-band radars are widely used for shipborne navigational aids and vessel traffic management systems. As for the radars operated on such high frequency, targets are likely to be obscured by the clutter signals scattered from sea surface, rain and snow. The scan-to-scan integration-correlation processing is one of the most effective techniques to enhance the target signals obscured by the clutter signals; however, the processing inevitably suppresses moving targets as well as the clutters. JRC has extended the conventional scan-to-scan integration-correlation processing to accommodate moving targets and also to achieve higher suppression against clutters. The new method evaluated on a real data has demonstrated the signal-to-noise ratio-improvement 8dB higher than the conventional method, for a fast-moving target under strong clutter environment.

1. まえがき

船舶交通管理システムや船舶搭載の航法支援の用途で、S帯（3GHz）やX帯（9GHz）のレーダーが広く用いられている。X帯のような高い周波数ではS帯に比べて高い分解能が得られる一方で、海面からのシークラッタや雨雪からのウェザクラッタが大きくなり、船舶など海面上のターゲットの認識率を低下させる原因となる。これらクラッタを抑圧する方法としてスキャン間相関処理[1]が知られているが、従来のスキャン間相関処理は移動ターゲット信号も抑圧してしまう欠点があった。本稿では移動ターゲットでもその信号の抑圧が小さく、クラッタに対する抑圧度を高めた、移動ターゲット対応型のスキャン間相関処理を提案し、実データを用いて従来法と比較することによりその効果を示す。

2. 従来のスキャン間相関処理

図1に示すように、従来のスキャン間相関処理は空中線装置から逐次送られてくる最新スキャン画像と、前回のスキャン間相関処理画像との間で重み加算することによってクラッタを抑圧する処理である。

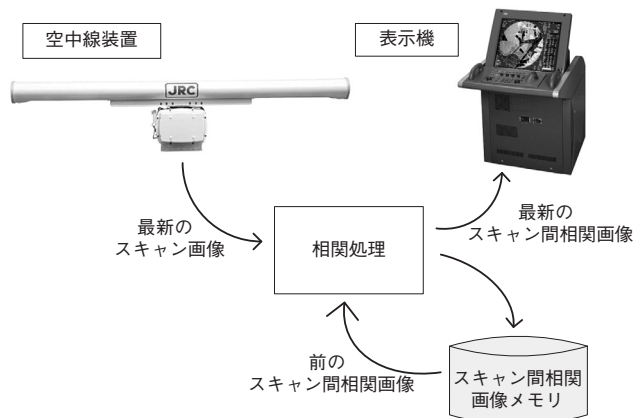


図1 従来スキャン間相関処理フロー

Fig.1 Processing flow of the conventional scan-to-scan integration-correlation

最新のスキャン画像信号を A_i 、1スキャン前のスキャン間相関画像信号を \bar{A}_{i-1} とすると、求めるべき最新のスキャン間相関画像信号 \bar{A}_i を図2のように求める。

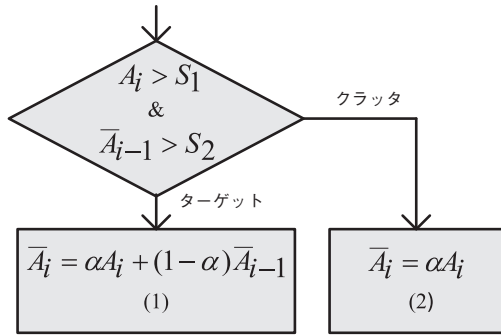


図2 従来のスキャン間相関の分岐処理

Fig.2 Branch Structure of the conventional scan-to-scan integration-correlation

ここで、 α は定数であり、 $0 < \alpha < 1$ である。 S_1 、および、 S_2 はしきい値であり、クラッタの信号レベルによって決定される。静止したターゲットの場合は、ターゲット位置の振幅は毎スキャン同じレベルであるので(1)の条件となり信号振幅は変化しない。一方、スキャン毎にランダムに変化するクラッタ信号の場合(2)の条件となることがある。その際、前回のスキャン間相関画像が足し合わされないために、スキャン間相関画像結果は最新スキャン画像信号の α 倍となり信号振幅が低下する。この効果によってクラッタに対してターゲット信号を強調させることができる。一方、移動ターゲットの場合、最新のスキャン画像内でのターゲットの位置と前回のスキャン間相関画像内での位置が異なるために(2)の条件となり、クラッタ同様振幅が α 倍に低下してしまう。

一般的に、 α を小さくすることによってより大きなクラッタ抑圧効果を得ることができるが、移動ターゲットも同様に抑圧されてしまう。そのため、従来スキャン間相関では α を小さくできない欠点があった。

3. 移動ターゲット対応型スキャン間相関処理

本稿で提案する移動ターゲット対応型スキャン間相関処理は、従来手法の欠点である移動ターゲットの抑圧を防ぐとともに、クラッタに対する抑圧度を高めることにより、従来法以上に信号対クラッタ比(S/C)を改善することが可能である。図3に本手法の処理フローを示す。

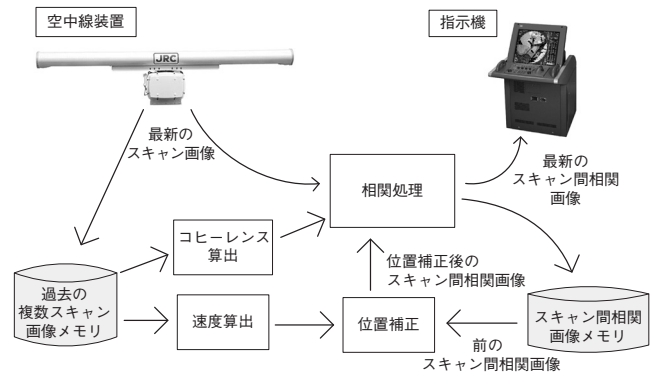


図3 移動ターゲット対応型スキャン間相関処理フロー

Fig.3 Processing flow of the scan-to-scan integration-correlation extended for moving targets

本手法では、過去の複数スキャン画像からターゲット速度、および、エリア内にターゲットが存在するかどうかの指標を示すコヒーレンスを算出する。ターゲット速度は、重み加算の際に画像の位置補正をすることにより移動ターゲット信号の抑圧を防ぐ。コヒーレンスはスキャン間相関処理の重み係数を決定するために使用され、クラッタと判断したエリアの振幅を集中的に抑圧する。以下に各処理の詳細を述べる。

3.1 速度、コヒーレンスの推定

スキャン時刻 t において取得したレーダー画像を $f(x, y, t)$ と表す。 x, y はそれぞれ x 座標、 y 座標である。エリア内にターゲットが存在する場合、等速直線運動を仮定すると $f(x, y, t)$ は次式で表される形式となる。

$$f(x, y, t) = g(x - ut, y - vt) \tag{3}$$

ここで、 u, v はそれぞれエリア内ターゲットの x 方向、 y 方向の速度であり、また、 $g(x, y)$ は最新スキャン画像における x, y 平面上のターゲットの波形を示す。ここで、求めたいのは速度成分 u, v であるが、そのために信号を周波数空間上へ変換する。

$$F(k_x, k_y, \omega) = FT_3[f(x, y, t)] = G(k_x, k_y) \delta(\omega + uk_x + vk_y) \tag{4}$$

ここで、 FT_3 は三次元フーリエ変換操作、 δ はディラックのデルタ関数である。また、 k_x, k_y はそれぞれ x, y 座標に対応する空間角周波数、 ω はスキャン時間に対応する角周波数である。(4) からわかるように時間とともに直線移動する画像の時空間スペクトラム電力は、ベクトル $(k_x, k_y, \omega) = (u, v, 1)$ を法線方向とし、原点を通る平面上に集中する。一方クラッタのような時空間軸上でランダムな信号は周波数軸上でもランダムに分布する。よって、時空間スペクトラム電力分布がどの程度平面上に分布しているか、つまり

相関係数を知ることにより、エリア内にターゲットが存在するかを示す指標であるコヒーレンスを算出し、また平面の傾きを知ることにより、エリア内のターゲットの速度を算出する⁽²⁾。実際の処理は図4に示すように、過去の複数スキャン画像を小さな処理ブロックに分割し、それぞれのブロックにおいて実行される。

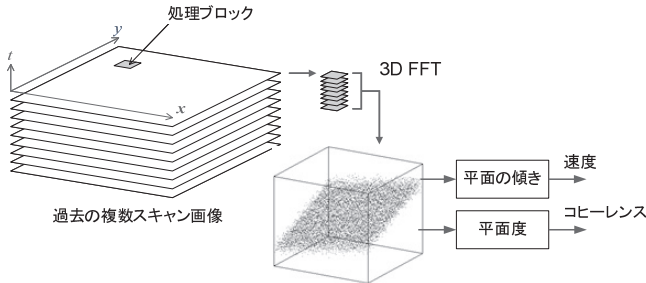


図4 速度、コヒーレンス推定処理フロー

Fig.4 Processing flow of the estimation of velocity and coherence

3.2 速度、コヒーレンスを考慮したスキャン間相関処理

本手法では速度、コヒーレンス、および、振幅情報を用いて、スキャン間相関における重み係数を以下のように決定する。

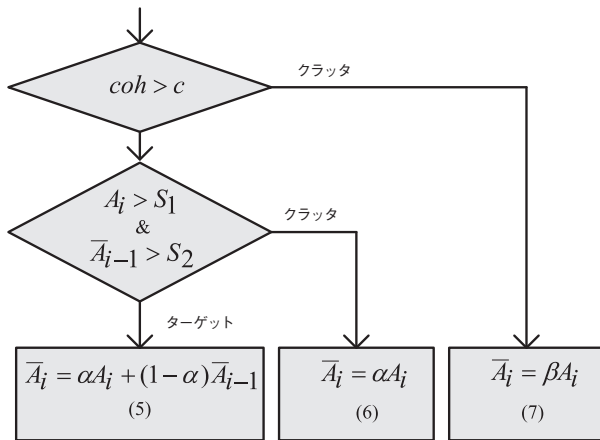


図5 移動ターゲット対応型スキャン間相関の分岐処理

Fig.5 Branch Structure of the conventional scan-to-scan integration-correlation extended for moving targets

ここで β は定数であり $0 \leq \beta \leq 1$ である。 c は定数であり、コヒーレンスのしきい値を示す。(7)においてコヒーレンスがしきい値より小さい場合についてはクラッタとみなし、1スキャン前のスキャン間相関画像を β 倍することによって、従来以上に積極的にクラッタを抑圧する。(5)においてはコヒーレンスがしきい値よりも大きく、信号振幅もあるしきい値よりも大きい場合においてはターゲットであると判断し、最新スキャン画像との重み加算をする。この際、1つ前のスキャン間相関画像に速度を考慮した位置補正を加えることにより、従来のスキャン間相関処理の欠点である、移動ターゲットの信号振幅が抑圧されるのを防ぐことが可

能である。

以上、速度、コヒーレンスの算出、および、それらを考慮した相関処理は従来の処理に比べ計算量は増加するが、高速フーリエ変換を利用することにより計算の高速化が可能であり、近年のDSPでリアルタイム性を損なうことなく表示することができる。

4. 評価

X帯レーダーで取得したレーダー画像を用いて、従来スキャン間相関処理と今回提案した移動ターゲット対応型スキャン間相関処理について、画像比較、および、強いシークラッタ環境内を航行する小型船のS/C比較評価を実施した。解析に用いたレーダー画像(3NM×3NM)を図6に示す。これはスキャン間相関処理前の画像であり、シークラッタが非常に強いレーダー画像である。なお、探知した船舶の航跡履歴をターゲット信号に重ねて表示している。今回の解析において、図中に示した3つのターゲットに着目した。

1. 静止ターゲット
2. S/Cが高い移動ターゲット(速度15ノット程度)
3. S/Cが低い移動ターゲット(速度15ノット程度)

ターゲット2、および、3はS/Cが低いためのクラッタとの判別が困難であり、航跡をかすかに確認できる程度である。

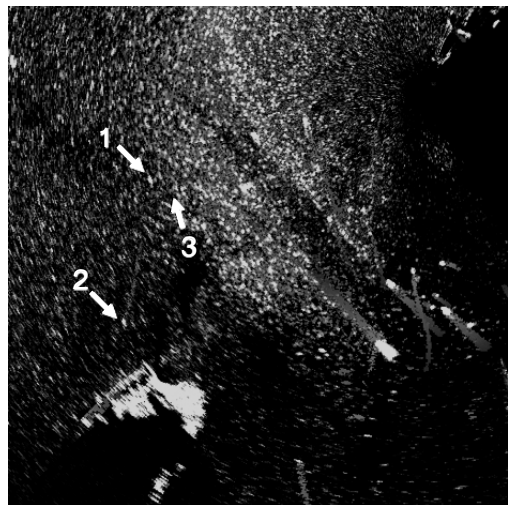


図6 スキャン間相関処理前のレーダー画像

Fig.6 Raw radar image

4.1 画像比較

提案する方式の効果を示すため、移動ターゲット対応型スキャン間相関処理と従来スキャン間相関処理の結果とを比較した。従来スキャン間相関では図7に示す結果が得られた。スキャン間相関における重み係数 α は0.2とした。表示のダイナミックレンジは図6と同様である。図6と比べると、スキャン間相関処理によってシークラッタ信号が抑圧されているのがわかる。ターゲット1は静止ターゲットであるのでスキャン間相関処理後も振幅は変化しておらず、クラッタが低下した分だけ強調されている。移動ターゲット2は高

速移動しているためスキャン間相関処理によって信号が抑圧されているものの、クラッタとの振幅差が大きいために、強調されて見える。一方、移動ターゲット3はS/Cが低いためにクラッタとともに抑圧され、見えなくなっている。

表1 移動ターゲット対応型
スキャン間相関処理パラメータ

Table 1 Parameters for the processing of the proposed scan-to-scan integration-correlation

重み係数 α	0.2
重み係数 β	0.8
コヒーレンスしきい値	0.5
エリアサイズ	16×16 [pixel] (170m×170m)
速度推定スキャン数	8

移動ターゲット対応型スキャン間相関処理では図8に示す結果が得られた。この処理では表1に示すパラメータを用いた。従来スキャン間相関との違いを見ると、ターゲット2については従来処理では航跡が途切れ途切れであったのが、図8では連続して航跡が引かれている。また、S/Cが低いターゲット3は、従来処理では完全に見失っていたが、図8では明確に航跡が引かれており、ターゲットとして認識されていることがわかる。

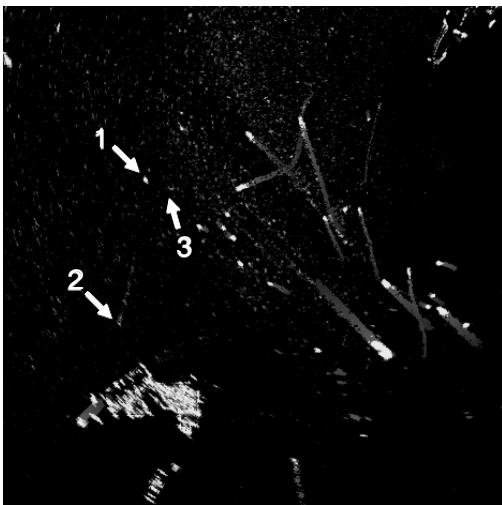


図7 従来スキャン間相関処理後のレーダー画像

Fig.7 Radar image after the conventional scan-to-scan integration-correlation processing

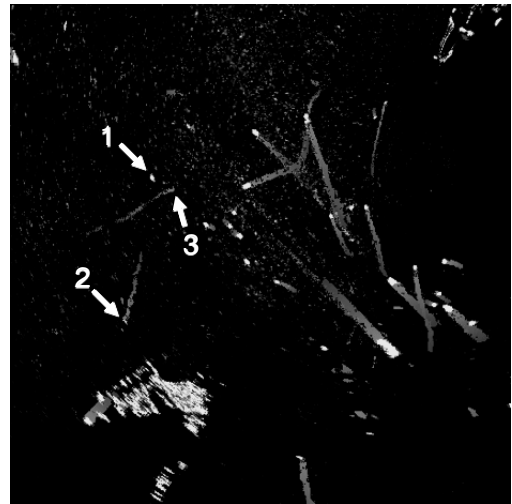


図8 移動目標対応型スキャン間相関処理後のレーダー画像

Fig.8 Radar image after the proposed scan-to-scan integration-correlation processing

4.2 S/C比較

S/Cが低いターゲット3において、従来スキャン間相関と移動目標対応型スキャン間相関を比較してS/Cの改善レベルを評価した。図9は横軸に最初の画像から数えたスキャン数、縦軸にターゲット3の信号電力（実線）、および、周辺シークラッタ信号のピーク電力（十字線）を示している。従来スキャン間相関の結果が細線、移動目標対応型スキャン間相関処理の結果が太線である。

ターゲット信号は移動目標対応型スキャン間の方が従来スキャン間相関より5dBほど高く、クラッタの信号は3dBほど低い。すなわちS/Cとしては8dBの改善効果である。これは移動目標対応型スキャン間相関処理の位置補正により移動目標の信号の抑圧が抑えられることと、コヒーレンスの判定により従来以上にクラッタ振幅を抑圧したためである。

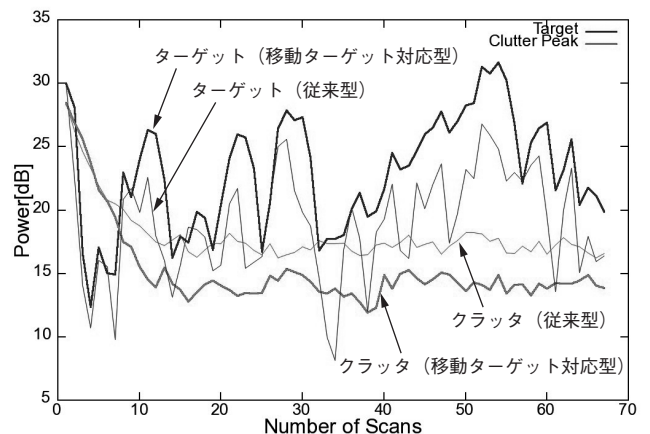


図9 スキャン間相関処理による移動ターゲット信号レベルの推移

Fig.9 Temporal change of the signal level of a moving target as the result of the processing of the scan-to-scan integration-correlation

5. あとがき

移動ターゲットに関する従来のスキャン間相関の問題を解決するための手法として、移動ターゲット対応型スキャン間相関を提案した。本手法をX帯レーダー画像に適用し、従来法に比べて移動ターゲットをより安定して認識できることを示した。また、定量的S/C評価では、強いシークラッタ環境下の高速移動ターゲットに関して、従来スキャン間相関処理に比べて8dBのS/C改善効果を確認した。本技術を適用することによって、荒天時における船舶レーダーの探知性能が向上すると期待できる

参考文献

- (1) Hofele, F. X, "Scan-to-Scan Integration-Correlation for the Detection of Small Fast Targets," Radar, 2001 CIE International Conference on, Proceedings, pp. 380-384, 2001
- (2) 高山卓也, 時枝幸伸, 菅原博樹, "移動目標対応型スキャン間相関処理", 信学技報, vol. 110, no. 348, SANE2010-127, pp. 1-6, 2010年12月

用語一覧

NM : Nautical Mile (海里, 1852m)

S/C: Signal to Clutter Ratio (信号対クラッタ比)