ウェーブレット変換によるレーダ受信信号の処理 — 海面反射の除去 —

村井 康二*・河口 信義**・三好 雄一**

Radar Signal Processing by Wavelet Transform — Suppression of Sea Clutter —

Kouji MURAI, Nobuyoshi KOUGUCHI and Yuichi MIYOSHI

Abstract

On a marine radar display, a small target is often lost in a sea and/or rain clutter, which often leads to a casualty. The sea surface has been a dominant reflector to a radar and so will always be in the future. So it is one of our urgent tasks to find the ways that makes the identification of the target buried in clutter possible, especially in a sea clutter. Familiar device to cope with this problem to date is STC, but STC has limited capability to do the job due to its inflexibility against non-stationary behavior of the signal echo pulses. The objective of this report is to propose a new method that would improve a clutter suppression process with radar echo signal. The method employs the Wavelet Transform which is applied to the radar echo data to produce their time-frequency representations, which gives rise to optimum cut-off frequency with time (distance). Wavelet coefficients for frequencies higher than cut-off frequency at a given time are combined back together to produce video signal which is to be fed into a display to give a supposedly clutter suppressed radar picture. In order to evaluate the effectiveness of the proposed process the authors defined the Signal to Clutter Ratio and applied it to the resulted video signal and noted that the method proposed effectively reduced the influence of the clutter.

Thus it is shown that the proposed clutter suppression method using Wavelet Transform was successfully performed.

1. はじめに

レーダを船舶航行に利用する場合、必要な目標による反射信号が海面による反射信号や雨雪などによる反射信号によりマスクされる時にレーダディスプレイ上で目標を識別できないことが起こる。また、ARPA では不要な目標からの反射信号が強い場合、追尾中の目標がこれに乗り移ることもある。これらは航行援助装置としてのレーダの性能にとって深刻な問題で、特に海面反射中の小目標を識別できることは、レーダによる避航のために不可欠の条件であると考えられる。

海面反射による目標のマスキングに対する対策として、現用の船用レーダでは、海面反射の反射強度が強い近距離では感度を下げ、距離が遠くなり海面反射が弱くなるに従って徐々に感度を元に戻すという機能を持つ STC (Sensitivity Time Control) 回路を組み込んでいる。一般にレーダ観測者は海面反射中の目標を識別するために STC と Gain の調整をする。ただ現用の STC では通常全ての方向に同一の信号処理がなされ、走査線毎に異なる STC 処理は可能でない。この問題に対し韭沢ら⁽¹⁾は、走査線毎に検出した

* 学生会員 神戸商船大学大学院商船学研究科 (〒658 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

** 正 会 員 神戸商船大学 (〒658 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

海面反射のレベルを利用し STC の自動的な走査線毎の処理法を提案した。しかしながら、この手法では感度を距離方向に対し指数関数的に変化させており、海面反射信号の距離特性が指数関数的でない場合には適切な処理ができていない。これは海面反射信号が距離に関して(空間的に)非定常であることに対する配慮が十分でないため、空間的に非定常な信号を扱うにはこの手法では不十分である。すなわち部分的な空間で非定常な振る舞いをする信号に対する処理方法が必要とされる。

近年非定常な信号に対する処理手法の一つとしてウェーブレット変換⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾が注目されている。ウェーブレット変換とは、時間的かつ周波数的に局在する関数(アナライジングウェーブレット)を用いて信号を時間一周波数平面上に展開する手法である。この変換によれば信号の任意の時刻(場所)における周波数に関する情報が与えられ、また逆変換(合成)により元の信号に対して、時間毎に、異なる処理が可能であることから、ウェーブレット変換はレーダの受信信号の空間的な非定常性の検証あるいはその処理に応用できる可能性があると考えられる。

本研究はウェーブレット変換をレーダ受信信号の処理に応用することを目的としたもので、実験で得たレーダ受信信号の処理にウェーブレット変換を適用した。まず変換により得られた海面反射の時間一周波数特性を示し、次にこの手法を用いた海面反射の除去方法を提案し、さらに本手法による海面反射除去の効果を検討した。その結果、目標からの反射信号を抑圧することなく目標の近傍の海面反射信号の除去が可能であることを述べる。

2. ウェーブレット変換

2.1 ウェーブレット変換⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾

ウェーブレット変換とは、時間的かつ周波数的に局在したアナライジングウェーブレットと呼ばれる自己相似系関数を用いて、信号を時間一周波数平面上に展開することを意味する。アナライジングウェーブレットはウェーブレットと呼ばれる基底関数によりスケールパラメータ(周波数の逆数に相当)および時間シフトパラメータの作用を受ける。ウェーブレット変換および逆変換の基本式を(1)、(2)式⁽⁴⁾にそれぞれ示す。

$$WT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{C_\phi}} \int_{-\infty}^{\infty} \phi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) x(t) dt \quad (1)$$

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{C_\phi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} WT(a, b) \phi\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{1}{a^2} da db \quad (2)$$

(1)、(2)式において $WT(a, b)$ 、 $x(t)$ 、 a 、 b 、 $\phi_{a,b}$ 、 C_ϕ はそれぞれウェーブレット係数、信号列、スケールパラメータ、時間シフトパラメータ、基底関数、およびその基底関数によって決まる定数を示す。(2)式の逆変換を可能にする条件として、次式を満足する必要がある。

$$C_\phi = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{\hat{\phi}(\omega)}{\omega} \right|^2 d\omega < \infty \quad (3)$$

ただし、 $\hat{\phi}(\omega)$ は $\phi(t)$ のフーリエ変換である。さらに、(1)、(2)式の離散型を(4)、(5)式に示す。

$$WT(a, b) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{1}{\sqrt{a}} \phi^*\left(\frac{nT-b}{a}\right) x(nT) \right\} \quad (4)$$

$$x(nT) = \frac{1}{C_{\phi, n, m}} \sum \left\{ \frac{1}{\sqrt{a}} \phi\left(\frac{nT-b}{a}\right) WT(a, b) \right\} \quad (5)$$

上式のスケールパラメータおよび時間シフトパラメータは2のべき乗を用いて $a=2^n$ 、 $b=m2^n$ の関係を有する。

ウェーブレット変換によって得られる時間一周波数平面上のウェーブレット係数の配置を図1に示す。図中に黒丸でウェーブレット係数が与えられる場所を示す。

図1より、ウェーブレット変換は、低い周波数領域において高い周波数分解能と低い時間分解能を、また高い周波数領域において低い周波数分解能と高い時間分解能をもつという特徴を有していることがわかる。また、ウェーブレット係数(黒丸)を決める領域を表す各四角形の面積(時間×周波数)は一定であり、時間と周波数に関する不確定性原理は保持されている。

2.2 アナライジングウェーブレット⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾

アナライジングウェーブレットとしては、ウェーブレット逆変換によって元の信号の完全な復元を可能とする目的で、完全正規直交系であるハール関数を用いた。ハール関数を式(6)および図2に、またその周波数特性を図3に示す。

$$\phi(t) = \begin{cases} 1, & \text{for } 0 \leq x < 0.5 \\ -1, & \text{for } 0.5 \leq x < 1 \\ 0, & \text{for otherwise.} \end{cases} \quad (6)$$

アナライジングウェーブレットはウェーブレットを特徴づける重要な役割を持つ。ハール関数は図2、図3から明らかなように、時間的にはコンパクトな台を持つが周波数的にはコンパクトな台を持たない

図2 ハール関数

ため、時間一周波数平面上、時間分解能は良いが、周波数分解能は良くないという特徴をもつ。本研究ではレーダの受信信号中の反射パルス信号の時間位置情報を重視する観点からハール関数を選択することとした。

3. 実験概要

実験は、神戸商船大学淡路海洋実験実習場に設置された船用3cm波レーダを用い、データは、異なる2つの海面状態(Sea Smooth, Sea Mod.)で収集した。本実験で用いた試験用ブイの写真および実験場付近の概略図をそれぞれ図4、図5に示す。また、実験についての諸元を表1に示す。図5における+、△、○、□はそれぞれアンテナ、遊泳用ネットフロート、試験用ブイ、停泊船の位置を表す。

図1 時間一周波数平面上のウェーブレット係数の配置

図3 ハール関数の周波数特性

全長 1.53[m]
球の直径 60.0[cm]

図4 試験用ブイ

表1 実験に関する諸元

	海面状態	Smooth	Mod.
<レーダ装置>	使用レーダ	3cm波 (Xバンド) レーダ	3cm波 (Xバンド) レーダ
	送信出力	20[kW]	20[kW]
	パルス幅	0.08[μ sec]	0.08[μ sec]
	パルス繰り返し周波数	926[Hz]	870[Hz]
	水平ビーム幅	1.2[°]	1.2[°]
	アンプ	log	log
	アンテナ回転数	固定	24[r.p.m.]
	送信周波数	9410[MHz]	9410[MHz]
<収録装置>	サンプリング周波数	120[MHz]	120[MHz]
	収録サンプル数	2994	2208
	信号量子化レベル	8[bit]	8[bit]
	収録データ数	8[Mbyte]	8[Mbyte]
<その他>	日付	1993.7.30	1993.7.30
	時刻	16:22	08:57
	天候	bc	r
	物標	遊泳用ネットフロート (0.13[マイル]) 試験用ブイ (0.24[マイル]) 停泊船 (1.17[マイル])	遊泳用ネットフロート (0.13[マイル]) 試験用ブイ (0.24[マイル]) 停泊船 (1.17[マイル])

4. レーダ受信信号の処理

現用船用レーダの一般的な受信信号の処理方法の一つはアンテナ指向方向に関わりのない、距離に対する一定なパターンの感度調整処理で、このパターンと異なる距離方向クラッターパターンに対しては有効性が低く、特に非定常な不要信号が存在するような場合、必要な反射信号を抑圧することなくクラッターを除去することはできないと考えられる。すなわち一般的にレーダでは、距離に対するクラッターパターン(非定常信号列)が方位により異なるため、このような条件下でのクラッター抑圧の処理方法の研究を行う必要がある。この問題を解決するための一方法として著者等が提案するウェーブレット変換を用いたアダプティブなレーダ受信信号の処理方法について以下に述べ、処理方法のブロック図を図6に示す。

図5 実験場付近の概略図

* 図中の斜めの矢印は、適正なフィルタリングの結果を用いて、アダプティブに合成数を調整することを意味する。

図6 処理方法のブロック図

4.1 受信信号の処理方法

- (1) データはレーダから得られる走査線 1 本分のビデオ出力信号で、これを 8 ビット、120 [MHz] で A/D 変換し、デジタル値で収録する。
- (2) 収録したデジタルデータをウェーブレット変換し、時間一周波数平面上の各点のウェーブレット係数を求める。
- (3) このウェーブレット係数を時間一周波数平面上で適正なフィルタリング処理をする。
- (4) フィルタリング処理されたウェーブレット係数を逆変換した後、ビデオ出力信号に合成する。
- (5) 合成された信号をレーダ映像表示装置に出力する。

4.2 海面反射信号除去手法

海面反射は一般的に距離方向に関して指数減衰関数で近似でき、目標からの反射信号が持つ高い周波数成分に比べてかなり低い周波数成分も持っており、この周波数特性を用いることにより海面反射信号の抑圧の可能性が考えられる。そこで、海面反射除去のための適正なフィルタリング処理に、海面反射に含まれる低い周波数成分 (ウェーブレット係数) をカットする手法を用いる。

4.3 処理の評価指標⁷⁾

受信信号に対する処理の有効性 (クラッターが物標の反射波に対してどの程度除去されたか) を評価するための指標として、次式で示す Signal to Clutter Ratio (S.C.R.) を定義する。

$$S.C.R. = 10 \log \left(\frac{S}{C} \right) \quad (7)$$

上式の S は目標からの反射パルス信号のピーク値の二乗値、 C は目標近傍のクラッターの二乗平均値を各々示し、S.C.R. はデシベル [dB] となる。

この S.C.R. の計算では、サンプル数を多くすれば二乗平均値の信頼性は向上するがクラッターが持つ距離方向の非定常性に対する処理効果の評価が困難となり、逆に少なくすれば二乗平均値の信頼性が低下するというトレードオフの関係が生じる。本研究では、この実験で用いたレーダのパルス幅が 0.08 [μsec] であることと信号のサンプリング間隔が 0.008 [μsec] であることから目標反射パルス近傍の前後 5 パルス幅分 (前後 50 サンプル) を採用することとした。また、海面反射除去法で述べた低周波ウェーブレット係数のカット後にウェーブレット逆変換を用い合成信号を得る過程で、ハール関数が持つステップ状の非線形特性の影響のために目標からの反射波近傍の合成信号値を著しく低下させ、場合によっては負の値が生じる。その結果、評価のために必要なクラッターの二乗平均値の変動が不安定となり、評価を困難にする。その対処法として、一連の評価対象となる処理後の信号が持つ最小値 (負) をゼロとするように対象信号をバイアスさせ、その値を用いて相対的な S.C.R. を求めた。

5. 処理結果と考察

5.1 受信信号の時間－周波数表現

今回使用した二つの海面状態に対するレーダビデオ出力信号を図7(a), (b)に示す。両図からは、海岸線、遊泳用ネットフロート、試験用ブイ、停泊船からの反射パルスが顕著に得られていることがわかる。また、これらの図においてアンテナ近傍の近距離の海面反射(指数減衰関数的特性)と考えられるエコーが、Sea Smooth(図7(a))に比較してSea Moderate(図7(b))の場合に、かなり遠距離まで存在している。

この二つの受信信号をウェーブレット変換し、時間－周波数平面に展開した結果を図8(a), (b)に示す。ここで同図の縦軸は時間－周波数平面という概念から高い周波数が上になるよう、最大のスケールパラメータ値($a_{max}=13$)からスケールパラメータ値を引いた($a_{max}-a$)を、また横軸は時間(サンプル数, 距離)を示している。また、図中の白黒色の濃淡はウェーブレット係数値の大小に対応しており、黒色で示される領域は小さなウェーブレット係数値を、逆に白い領域は大きなウェーブレット係数値を示す。両図とも3物標(遊泳用ネットフロート、試験用ブイ、停泊船)が存在する場所(それぞれ、サンプル数が180, 350, 1750の付近)において、高い周波数領域に白い部分が見られ、各目標の反射信号が比較的高い周波数成分を多く持っていることがわかる。また、比較的低い周波数で横軸方向に細長く分布している白い領域が見られる。この低い周波数領域にある大きなウェーブレット係数を持つ領域は、図8の色の濃度からは判別しがたいが、計算結果では近距離がより強く、アンテナ位置から遠ざかるにつれ弱くなる。この白い部分の領域を海面反射(指数減衰関数的特性)によるものであると考えれば、時間(距離)毎に低い周波数成分の一部分の除去により、ある程度の海面反射を抑圧することができると考えられる。

図7(a) Sea Smooth のビデオ出力信号

図7(b) Sea Mod. のビデオ出力信号

図8(a) Sea Smooth の時間－周波数表現

図8(b) Sea Mod. の時間－周波数表現

5.2 海面反射除去のためのカットオフ周波数の決定

そこで海面反射を除去するため距離別にカットすべきウェーブレット係数(最大周波数)の決め方について述べる。まず目標に対するウェーブレット係数を高い周波数成分のウェーブレット係数から順次加えていって、そのときの S.C.R. 値を比較する。図 9 に二つの海面状態に対する、加え合わせたウェーブレット係数の合成数と S.C.R. の関係を示す。ただし、ウェーブレット合成数 12 は受信信号自体である。

これらの図から、海面状態にかかわらず近距離 2 目標の近傍では 8 から 9 の合成数において S.C.R. の最大値を示している。また、距離的に遠くなるにしたがって多くの合成数(より低い周波数まで含む。)で S.C.R. の最大値を示しており、海面反射の影響が少ないと考えられる比較的遠距離にある停泊船付近では合成数 11 で最大の S.C.R. を示し、海面反射の影響が少なくなっている。そこで、3 目標の S.C.R. が最大値をとる合成数を目標近傍のクラッターを除去できる最適合成数であると考ええる。これを図 8 の時間-周波数表現に対応させることを考える。処理のためには不要なウェーブレット係数は最適合成数を用いて 13 (a_{max}) から最適合成数を引くことによって不要なウェーブレット係数の位置が求まる。これはカットオフ周波数に対応するウェーブレット係数であり、これをカットオフ係数と呼ぶ。次にカットオフ係数の距離に対する近似曲線を求めると、図 10 のようになり、二つの海面状態における距離と最適なカットオフ係数の関係を示している。この図からその距離におけるカットオフ係数を求めることができる。また、参考のために図 8 (a), (b) に図 10 の曲線も示しておく。図 10 では Sea

Smooth と Sea Mod. の海面反射に著しい違いは認められなかったが、これらの 2 条件の各海面反射が持つ指数関数的な減衰特性を比較することにより海面反射の影響が小さくなる (Sea Smooth) にしたがってより高い周波数成分まで取り除く必要があることが考えられる。

5.3 処理結果

前節で得られたカットオフ係数でウェーブレット係数をカットし、これをウェーブレット逆変換により合成した信号を図 11(a), (b) の下段に、また比較するために両図の上段に処理前の信号を示す。これらの結果より、レーダ受信信号をウェーブレット変換を用いた処理を行うことでかなりの海面反射の影響が除去できていることがわかる。また、本手法による受信信号の処理を行うことで評価指標である S.C.R. が 2-3 [dB] 向上しており、目標からの有用な信号を抑圧することなく海面反射の除去を行えていることがわかる。さらに、図 12(a), (b) に Sea Moderate 時に収録した約 15 度の受信信号データに本処理法を適用した結果を A スコープおよび PPI で示す。これらの結果から、本処理により処理前の映像に比べて、試験用ブイの識別が容易に可能となった。

図 9 S.C.R. とウェーブレット合成数

図 10 距離とカットオフ係数

図 11(a) Sea Smooth のビデオ出力信号と合成信号

図 11(b) Sea Mod. のビデオ出力信号と合成信号

図 12(a) 処理前の A スコープと PPI

図 12(b) 処理後の A スコープと PPI

6. まとめ

レーダを用いて海面や雨雪からの反射など、不要クラッターから小物標の分離、識別することは非常に難しく、現用の船用レーダの利用者は自分の知識や経験をもとに S.T.C., F.T.C., Gain の調整を行うことで対処しているのが現状で、レーダ映像から得られる情報の質は未だ十分ではないと考えられる。このような状況を踏まえる時、利用者の判断に資するためレーダ映像情報の質の向上に努力することが重要である。本論文は、レーダの受信信号にディジタル的な信号処理を施すことによりレーダから得られる情報の質的向上を目指すものであり、要約すると以下のとおりである。

- (1) 方位、距離に対して非定常なレーダ信号に関して、アダプティブに対応する処理方法を提案した。
 - (2) レーダの受信信号をウェーブレット変換を用いて時間一周波数平面上に展開し、目標および海面からの反射波の特徴を示した。
 - (3) ウェーブレット変換を用いた海面反射の除去手法を示した。
 - (4) 本手法を実験で得たレーダ受信信号の処理に応用し、目標からの反射信号の強度を抑圧することなく海面反射を除去する結果を得た。具体的には、目標からの反射信号の S.C.R. が 2-3 [dB] 向上した。
- 今後の検討課題として、本手法、適切なアナライジングウェーブレットの選択、距離毎のカットオフ係数の決定法の検討や海面反射以外のレーダ受信信号の処理法を検証すること等が考えられる。

最後に、本研究に際し貴重なご意見また文献を頂いた大阪大学工学部通信工学科の森永研究室の原晋介助手と横川和征氏に深く感謝致します。

尚、データの収集、記録および解析処理には平成 3 年度に配賦を受けた文部省特別設備費により本学に設置されたレーダ信号解析装置を用いた。

参 考 文 献

- (1) 韭沢富次, 岡田 洋: レーダの自動化 STC, 日本航海学会論文集, 52 号, pp.101-108, 1974
- (2) 山田道夫: ウェーブレット解析とその応用, 電子情報通信学会誌, Vol.76, No.5, pp.518-528, 1993
- (3) 山口昌哉, 守本 晃: ウェーブレットとその応用 [1], 計測と制御, Vol.31, No.8, pp.879-886, 1992
- (4) 山口昌哉, 山田道夫: ウェーブレット解析, 科学, Vol.60, No.6, pp.398-405, 1990
- (5) O.Rioul and M.Vetterli: Wavelet and Signal Processing, IEEE SP Magazine, Vol.8, No.4, pp.14-38, 1991
- (6) チャールズ K. チュウイ: ウェーブレット入門, 東京電気大学出版局, 1993
- (7) William S.Burdic: Radar Signal Analysis, Prentice-Hall Inc., pp.315-323, 1968
- (8) Martin Vetterli and Cormac Herley: Wavelets and Filter Banks: Theory and Design, IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, Vol.40, No.9, pp.2207-2232, 1992

質 疑 応 答

石田廣史(神戸商船大学): ウェーブレット変換の関数として、今回のレーダ受信信号の解析に種々の変換関数の内、ハール関数を用いられた理由についてお教え下さい。

村井康二: 最適なアナライジングウェーブレットの選択に関しましては、今後の課題としている一つの問題ですが、今回はレーダの距離精度を考え、時間的に精度を悪くしないことからハール関数を選択しました。

水城南海男(電子航法研究所): ウェーブレット変換とその後の処理に要する時間及びリアルタイム処理への応用の可能性について教えていただきたい。

村井康二:

1. ウェーブレット変換とその後の処理に要する時間は横河ヒューレットパッカートの HP730 の計算機を用いて約 3 分程度の時間を要します。ただし、本計算のプログラムは C 言語により記述し、データのサンプル数 4096 個での数字です。

2. リアルタイム処理への可能性に関しましては、Filter Bank 方式(文献(8)参照)などハードウェアの提案があり、現在も研究段階にあります。今後方位方向に対する信号の特性の検討を行う必要があり、現段階でははっきりした数字はお答えできませんが、走査線全てにおいては不可能としても何本か毎で時間をかせぐことも可能であると考えています。