ARPAの性能を向上させるレーダ信号処理について

小塚 孝徳*・林 尚吾**
外岡 幸吉***・竹内 毅****

Radar Signal Processing Improving Performance of ARPA

Takanori KOZUKA, Shogo HAYASHI,
Koukichi SOTOOKA and Tsuyoshi TAKEUCHI

Abstract

With respect to shipboard radar signal processing, the method of reducing noise by LOG-CFAR circuit system up to now has had little effect on the scatter of larger amplitude values which signal sea clutter.

Taking the ship's tracking radar as the most important factor, the authors decided to calculate the threshold of the clutter value in order to enhance incoming data that might signal the presence of other ships.

Accordingly, two variables were identified, the value of the average amplitude N and the indicated scatter deflection variable D . By multiplying each variable (k with N and m with D respectively) and adding them together yields the threshold value Th .

$$Th = kN + mD.$$

Such calculations of Th were carried out in other procedures.

In order to ignore the land and sea clutter and to distinguish the presence of other ships, the authors analyzed by statistical methods both pulse and scan correlations.

As a result of the various experiments at sea and from land with these methods, the effect of sea clutter was reduced. The results show improvement in two respects: Although problems remain with ARPA (Automatic Radar Plotting Aids), the ability to distinguish the signals of other ships and the accuracy of tracking their progress by these improvements in signal processing is enhanced.

1. はじめに

現在使用されているARPAには下記に示す問題がある。

- (1) 波浪や海岸線を目標として誤探知したり、シークラッタ等により目標が探知できないことがある。
- (2) 追尾目標処理可能数を上回る船舶が存在する場合、追尾していない他船が自船周囲を航行しても認識できない。

これらの問題を改善するため他船検出方式や他船を検出すべき領域について検討し性能の向上を図った。

2. レーダ信号処理方式の検討

* 正会員 日本アビオニクス株式会社 (〒246 横浜市瀬谷区本郷2-28-2)

** 正会員 東京商船大学 (〒135 東京都江東区越中島2-1-6)

*** 正会員 住友重機械工業株式会社 (〒237 横須賀市夏島町19)

**** 非会員 日本アビオニクス株式会社 (〒246 横浜市瀬谷区本郷2-28-2)

2.1 しきい値算出方式の検討

2.1.1 従来のCFAR処理方式の問題点

目標を検出しようとする船舶レーダのビデオには海上の他船舶や浮遊物からの反射の他、海面や陸地からの反射、さらにレーダ受信機雑音が含まれる。したがって目標検出機能にはビデオ信号中のクラッタ等を抑圧してできるだけ海面や陸地からの反射やレーダ受信機雑音を目標として検出することなく、海上の他船舶や浮遊物のみを検出することが要求される。

レーダビデオから船舶目標を検出するためにはクラッタやレーダ受信機雑音の性質を統計的に把握する必要がある。クラッタやレーダ受信機雑音の除去の方式としてLOG/CFAR方式がよく知られている。この方式はレイリー分布の性質を利用し、平均値によってクラッタレベルを規格化し、クラッタの実効値を受信機雑音の実効値レベルまで抑圧しようとするものである。ところが、クラッタやレーダ受信機雑音の確率分布はレイリー分布の他、ワイブル分布、対数正規分布、 k -分布等多くの分布が知られており、これらの分布はLOG/CFAR方式では誤警報確率が一定に

ならない。図1にワイブル分布の入力ビデオをLOG/CFAR方式で処理したシミュレーションを示す。入力ビデオ(a)を対数増幅器により対数ビデオ(b)に変換し、この対数ビデオから平均(c)を算出し、対数ビデオ(b)からこの平均を減算し(d)、逆対数変換(e)を行う。次に目標検出のためしきい値を設定し、しきい値を越えるものをヒットとして検出する。この(e)のビデオはCFAR化されていないため、目標検出のためしきい値を設定するとその設定レベルによっては(f)に示すように偏在して多くの誤目標を生ずることとなる。このため、これらの分布に対応したCFAR方式が多く提案されている。特に、ランドクラッタ、シークラッタ、シーアイスクラッタ、ウェザークラッタがワイブル分布に従うことが報告され、これに対応したCFAR方式が多く紹介されている⁽¹⁾。これらは信号の平均値とともに分散を求め、この両者で信号を規格化しようとするものであるが、これらを構成しようとする回路構成が大規模で高速な動作を必要とする難点があった。

2.1.2 しきい値設定方法の改善

しきい値設定方法について回路構成が大規模になることなくクラッタやレーダ受信機雑音の確率分布がレイリー分布以外の場合でも対応可能となるよう検討した。

レーダビデオ信号のS/N比を向上させるためにDouble Loop Integratorにより方位積分を行い、次の方法によりしきい値を求めた。従来より提案されているワイブルCFAR方式で求めている分散の代わりに、標準偏差に相当する値として振幅値のばらつきを示す偏差を求めることとし、平均 N と偏差 D の値にそれぞれ乗数 $K1$ 、 $K2$ を乗じてしきい値 TH とすることとした。 $K1$ 、 $K2$ は誤警報確率を決定する乗数である。

$$TH = K1 \cdot N + K2 \cdot D \cdots \cdots (1)$$

図1 従来のLOG/CFAR回路動作(ワイブル分布)

このしきい値を積分ビデオと比較し積分ビデオがしきい値を越えるものを検出する。これはクラッタやレーダ受信機雑音を含んだ信号を平均のみならず偏差によっても規格化したことと同等の効果をねらったもので、クラッタの分布によらずCFAR化を達成した目標検出を行おうとするものである。上記(1)式を実現する回路構成を図2に示す。平均および偏差を求める方法はCell-Averaging LOG/CFAR回路を応用した。図2において、振幅値から平均を減算し、その差分を絶対値に変換しタップ付きの遅延回路に入力する。このタップ付きの遅延回路の中央の値を除いて各タップ出力の和をつくり、その値をタップ数で除算を行うことにより中央の値に対応する偏差 D を算出することができる。すなわち信号のばらつきの移動平均を偏差として求めたものである。タップの時間間隔はレーダの送信パルス幅より小さくならないよう設定し、タップ数は16とした。

2.1.3 シミュレーションによる動作検証

シミュレーションにより動作検証を行った。

(1) 波形シミュレーション

ワイブル分布の入力ビデオをこの方式で処理したシミュレーションを図3に示す。入力ビデオを対数変換し平均を求める処理までは図1の(a)から(c)に示した処理と同一であるので省略する。次に上で述べた方法で求めた偏差を(d)に示す。平均(c)及び偏差(d)からしきい値を求め対数ビデオと合わせて示したのが(e)である。対数ビデオにしきい値がうまく適合しヒットを良好に検出している(f)。

(2) ワイブル分布のパラメータと $K1$ 、 $K2$ の関係

ワイブル分布の確率密度関数を次に示す⁽¹⁾。

$$P_c(x) = \frac{c}{b} \left[\frac{x}{b} \right]^{c-1} e^{-\left(\frac{x}{b}\right)^c}$$

$$(x > 0, b > 0, c > 0)$$

ここで b は尺度パラメータであり、 c は形状パラメータである。 $c=1.0$ の場合は指数分布、 $c=2.0$ の場合はレイリー分布となる。シークラッタの観測データとして c の値は1.0から2.0の間の値が報告されている⁽¹⁾。

ワイブル分布の形状パラメータである c の値を変化させたときの一定誤警報確率が得られる $K1$ 、 $K2$ の値を算出し図4に示した。この図4によれば $K1=1.0$ であれば c の値が変化しても同じ $K2$ の値で同一の誤警報確率が得られることがわかる。 $K1 \neq 1.0$ の場合は c の値が変わると $K2$ の値をそれに対応させて変更しな

図2 しきい値算出／ヒット検出回路

図3 新方式動作(ワイブル分布)

いと一定誤警報確率を保つことができない。したがって、 $K1$ の値は1.0、 $K2$ の値は所望の誤警報確率が得られる値に設定する。

レイリー分布ノイズの場合($c=2$)の $K1$ 、 $K2$ の値と誤警報確率の関係を求め図5に示した。

(3) 実データによるシミュレーション

実際に収集したレーダビデオ信号を用いたシミュレーションを次に示す。1994年7月神奈川県横須賀市追浜で収集した東京湾のレーダ・ビデオ・データを図6に示す。そのヒット検出のシミュレーション結果を図7に示す。これら両図を並べると図6の①の目標が検出されていないことがわかる。これは当該目標の距離方向の前後に大きな目標が存在しているため、周辺のしきい値が上昇した結果である。

複数の目標が近接して存在する場合しきい値が急激に上昇し両者とも検出されにくくなることを防ぐため、次の処理を加えて再度シミュレーションを行った。しきい値算出に用いるビデオ振幅値の上限値を設定し次の変換を行う。入力されたビデオ振幅値を a_{in} 、しきい値算出に用いるビデオ振幅値を a とすると

$$a_{in} \leq (\text{リミット値}) \text{ の時 } a = a_{in}$$

$$a_{in} > (\text{リミット値}) \text{ の時 } a = (\text{リミット値})$$

ここで、振幅分布の状況を観測し、いくつかの値で(リミット値)を設定したときの効果を確認した。

図4 ワイブル分布のパラメータと $K1$ 、 $K2$ の関係

図5 しきい値乗数 $K1$ 、 $K2$ と誤警報確率(Pfa)の関係

図6 入力レーダビデオ図

図7 ヒット検出図

ビデオの振幅値全体は0～255までの256段階で表現しているが、(リミット値)を64に設定したシミュレーションの結果が図8であり、上記の目標①が検出されていることがわかる。ただしこのように一定のリミット値を設定するとクラッタに対するしきい値の追従性を鈍くするので、ビデオの状況に自動的に適応した最適なりミット値が設定できるようにすることが必要であり今後の課題である。

2.2 目標検出範囲の設定

従来のARPAの他船追尾処理可能数は20隻から40隻程度のものが多い。日本沿岸を航行する船舶の周囲12NM以内にはこの追尾処理可能数を超えた多数の船舶が存在することが少なくない。ある他船が自船と衝突の可能性がある場合でも追尾処理を行っていないれば危険性を発見することはできず、その他船の存在を自船の乗組員に知らせることができないので危険な事態を招くこととなる。このためできる限り他船監視上重要度の高い目標の捕捉追尾を行い、重要度が低くなれば追尾の解除を行う目標検出領域設定の機能を設けた。これは追尾可能隻数が限られているため自船に近い目標や自船進行方向にいる目標を重要な目標として必ず検出し重要度の低い目標の捕捉追尾は行わないことを領域設定することにより実現させるものである。

(1) 自船が停止している場合や周囲に目標が少ない場合

自船が停止している場合の目標検出領域は図9(A)に示すように自船を中心とした半径 r の円内とし、この範囲内の船舶を検出するものとする。自船の安全のためにレーダで監視する領域は前方に限らず全方位でなくてはならない。自船に近づく船舶が存在する可能性は360°いずれの方向にもあるからである。半径 r は他船を検出する範囲であり、通常レーダの諸元及び運用上必要十分な値に決めるものであるが、設定した半径 r 以内に追尾可能隻数を越える船舶が存在する場合、この半径 r の値を小さくすることにより目標検出範囲内にある船舶数を追尾処理可能数以下にすることができ、自船から距離 r 以内にいる船舶すべてを追尾監視することができる。この領域内の船舶が領域外に出た場合はその船舶の検出が行われず、その結果追尾が解除される。

この領域設定はまた自船が前進している場合であっても周囲に目標が少ない場合にも有効である。

(2) 自船が前進している場合

自船が前進している場合衝突予防として監視すべき他船を検出する領域は全方位均一でなく進行方向により大きな面積が必要である。設定する領域の形状は図9(B)に示すような楕円またはその他の形状とする。(1)の場合と同様、船舶数が追尾処理可能隻数を越える場合検出範囲を小さくすることによりこの範囲内の船舶すべてを追尾監視することが可能となる。この領域内の船舶が領域外に出た場合はその船舶の検出が行われず、その結果追尾が解除される。

2.3 電子海図によるランドクラッタの処理

図8 ヒット検出図

図9 目標検出範囲

レーダビデオ信号の中には船舶目標からの反射波以外に陸地、海面、雲などの不要なクラッタも含まれる。従来よりレーダ信号処理技術によりできるだけクラッタを目標として検出しないように処理を行い船舶目標だけを検出しようとしていた。ところが船舶目標からの反射波とクラッタとの区別は難しいことが多く、ランドクラッタも目標として検出することが多かった。ランドクラッタの処理にはこれまでもいくつかの方式が提案され実施されてはいるが、従来のレーダ信号処理技術だけでランドクラッタを目標として検出しないように処理を行うことには限界がある。今回、電子海図のデータを利用することによる新しいランドクラッタ処理機能を検討した。図10に示すように、レーダ目標検出部の他に、電子海図が格納されたCD-ROMドライブ、電子海図を読み出す演算処理回路および陸地ゲート発生部を設ける。陸地ゲート発生部はCD-ROMから読み出された電子海図データを基にしてレーダビデオ信号と同期させて陸地位置に陸地ゲート信号を発生し、レーダ目標検出部では陸地ゲート信号が発生している距離期間は目標の検出を禁止した。このことにより陸地領域からの反射波を目標として検出することをなくすることが可能となる。

図10 電子海図データ利用によるランドクラッタ処理

3. 実験結果とその考察

以下に2.章に示した機能の実験結果とその考察を示す。

3.1 しきい値算出方式について

(1) 目標検出状況

1995年12月1日に東京商船大学練習船汐路丸で東京湾浦賀水道北上中に収集したレーダビデオ波形を図11に示す。この図の中央付近に多くの船舶の波形が確認できる。右上部と中央下広く突き出ている領域が

図11 入力レーダビデオ波形図

図12 プロット出力分布図

陸地からの反射によるものである。図12はこのレーダビデオ信号から目標検出した結果をプロットしたものである。これら両図を並べてみると、陸地からの反射信号を目標として検出することがなく、また、中央付近の船舶からの反射信号とプロットの位置は正確に一致していることがわかる。図11のAは目標であるが、目標の振幅が受信機雑音と同レベルまで低く図12では目標として検出されていない。

(2) 設定パラメータについて

しきい値算出に用いられるパラメータ $K1$ 、 $K2$ は次の値を使用した。

$$K1=1.0 \quad K2=11.5$$

2.1節で述べたように $K1$ の値は1.0とし、 $K2$ の値は1 スキャンあたりに生じる誤目標数が平均して50以下になるよう $K2=11.5$ とした。この誤目標数は誤警報確率が約 5.0×10^{-4} に相当し、シミュレーションで求めた図5によると、 $K2=11.5$ の場合の誤警報確率は 1.0×10^{-6} 以下であり、大きく異なってしまった。これはレーダビデオに含まれる受信機雑音がベースライン下に沈み込んでいる領域があり、そこでは平均 N や偏差 D が小さくなりその結果しきい値が小さくなって多くの誤目標が検出されやすくなったため $K2$ の値を大きくする必要があったこと等によるものである。実際のレーダビデオ振幅の密度や振幅はいろいろなレーダごとに状況が異なると考えられるので、それらのレーダと接続された時点で $K2$ の値を設定する必要がある。

(3) 検出結果について

目標検出率や検出データの精度を評価するため振幅の小さな目標として図11の中の目標Aについて分析した。同日9時23分から31分までに検出された目標をプロットしたものを図13に示す。この目標Aについて検出距離と検出方位の時間経過に伴う変化をプロットし、それぞれ最小二乗曲線を求め図14および図15に示した。その曲線が真の距離、方位を示すものと仮定し、この曲線の対応する値と各距離値、方位値との差を誤差とし最大誤差と標準偏差を算出した。

距離については最大誤差は0.05 NM、標準偏差は0.01NMであった。

図13 プロット出力分布図

図14 目標Aの距離の変化

図15 目標Aの方位の変化

標準偏差値が0.01NMと小さく、これは目標検出機能部における距離の最小基本単位($1/64\text{NM}=0.015625\text{NM}$) とほぼ等しい。距離の誤差は非常に小さく良好といえる。

方位については最大誤差 1.16° 、標準偏差は 0.41° であった。この方位データには検出された目標のレーダ方位角に自船の向いている方位を示すジャイロコンパスからの方位角も加算されているためその誤差も含まれている。方位の標準偏差は約 0.41° であるがこの値はアンテナの指向性ビーム幅の 1° の半分以下であり、目標検出結果の値としては妥当であると考えられる。

(4) 目標検出率について

目標検出率は時々刻々変化する周囲の環境により変化するため算定することは難しい。図13の目標Aの検出状況を調査した結果、32スキャン中28回検出と全体的にほぼ安定して検出されている。この検出率は目標追尾処理を行うのに十分な値である。

3.2 目標検出範囲指定について

目標検出範囲は次の6種類とし、手動設定により切り替え可能にして実験を行った。

①円 $r=6\text{NM}$ ②円 $r=12\text{NM}$ ③円 $r=24\text{NM}$ ④楕円 $a=6\text{NM}$ $b=2\text{NM}$ ⑤楕円 $a=12\text{NM}$ $b=4\text{NM}$ ⑥楕円 $a=24\text{NM}$ $b=8\text{NM}$ (a は前方距離、 b は後方距離)

目標数が多くなれば目標検出範囲を楕円にしたり、範囲を小さくしたりすることにより、自船前方の監視領域を広くとりながら不必要な遠距離の船舶目標の処理を行わないように設定して船上試験を行い、本機能が非常に有効であることが確認された。ただし、最小の領域である上記の④を設定してもその領域内に存在する船舶数が追尾処理可能数40より多いことがあった。船舶数が追尾可能隻数をこえる場合は追尾監視をしていない目標が目標検出範囲内に存在する。衝突予防の観点からは目標検出範囲内の船舶数が追尾可能隻数をこえる事態にさせないことが重要であり、その対策として追尾処理可能数の増加および実験で示した目標検出範囲をさらに小さく設定可能とするなどの領域の形状や大きさの検討が必要である。

また、自船速度を変えて設定する例として速度が0の場合と速度を持って前進している場合の2例を示したが、速度の高低による最適な領域の形状や大きさの検討も今後の課題である。

領域の拡大・縮小、形状の変更については、自船速度や他船目標数に応じて自動的に行うのが有効である。

3.3 電子海図によるランドクラッタの処理について

図11、図12を並べてみると陸地からの反射信号を目標船舶として検出することがなく、電子海図によるランドクラッタ領域の目標検出禁止機能が有効であることがわかる。ただし陸地位置データの更新が6分間隔であったため自船移動中は検出禁止領域とレーダビデオのランドクラッタの位置とが徐々にずれる場合があった。陸地位置データの更新時間はさらに短くする必要がある。

4. まとめ

ARPA機能を向上させる方策として、3つの方法を提案した。

- (1) しきい値算出方式は従来型LOG/CFAR方式を発展させたもので、レーダ受信ビデオの分布の種類によらず、誤警報確率を一定にすることを目標としたターゲット検出方式の効果が検証された。まだ検討や改良すべき事項があるが、実船試験において良好な結果を示した。
- (2) ARPA機能はレーダ目標を検出追尾し他船との衝突の危険性を事前に検出する機能であり、衝突予防の観点から重要な目標は必ず追尾処理することが必要である。ところが追尾処理可能数は限られているため従来のARPAは衝突予防の観点からの重要な目標の追尾処理が行えないことがあった。本方式は目標検出領域を設定することにより近距離の目標や自船進行方向にいる重要な目標は必ず追尾処理することを実現させたものであり実際の試験においても有効性が実証された。今後のARPA機能において非常に有効な機能と考えられる。ただし目標検出領域の設定方式、形状や大きさの最適化や自動化についてはさらに検討を行う。
- (3) 電子海図と連動させて陸地領域からの目標検出を禁止する機能は、陸地からの反射を船舶と認識して陸地領域内に船舶目標シンボルを表示してしまうことや、陸地からの反射による目標が多数追尾処理されていると追尾処理可能数が限られているため実際の船舶の追尾処理ができず目標シンボルの表示も衝

突の危険性の検出もできないことを防止するものであり、実際の試験においても有効性が実証された。ECDISとARPAが組み合わせられて使用される場合きわめて有効な機能である。

謝 辞

本研究開発はモーターボート競争公益資金により日本財団の援助を受けて（財）シップ・アンド・オーシャン財団（会長 今関憲作）が行う技術開発基金による補助金を受けて平成5年度から平成7年度の3年間にわたり実施したものである。ここに深く感謝申し上げます。また、レーダ信号処理方式についてご助言をいただきました東京工業大学関根松夫助教授に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 関根松夫：レーダ信号処理技術，pp.108－pp.130，電子情報通信学会，平成3年9月20日

質 疑 応 答

佐藤尚登（海技大学校）：ロウ・ビデオを対数変換した後の信号処理について、しきい値をエコーレベルの関数によって求めたということですが、対数変換した後のエコーでは飽和に近い信号と非常に弱い信号での偏差では大きな差異があると思います。そこで、次の点について教えてください。(1)飽和に近いエコーすなわち非常に強い受信信号での $K1$ 、 $K2$ の値と非常に弱い信号での $K1$ 、 $K2$ の値に違いはありませんでしょうか。(2) $K1$ 、 $K2$ の値を手動入力したとのことですが、受信信号レベルの違い等で $K1$ 、 $K2$ の入力値に何か特性があれば教えてください。

小塚孝徳：一般にレーダ・ロウ・ビデオは信号レベルが高い領域では分散も大きいため対数変換した後、信号レベルの高い領域の偏差と低い領域の偏差とに大きな差異が生ずるとはいえず、逆に差異を小さくさせるものです。レイリー分布の場合は対数変換をすると信号レベルの高い領域も低い領域も偏差が同じになります。本論文では、ワイブル分布のように対数変換をしても偏差が一定にならない場合でも対応可能としたもので、しきい値を平均と偏差の関数にしたことにより、 $K1$ 、 $K2$ は信号レベルの高い領域でも低い領域でも同じ値を適用することが可能となります。

水城南海男（電子航法研究所）：(1)レーダのGAIN、STC、FTC等の状態をどのように仮定したロウ・ビデオですか。(2)測定したロウ・ビデオは、どのような条件（レーダの運用状態）でしたか。

小塚孝徳：(1)航海士が通常行うレーダの運用設定の範囲内で使用される事を想定しています。(2)測定時はPPI表示が見やすいようGAINを調整し、STCを設定しておりました。