レーダの自動化STC

韭 沢 富 次* 岡 田 洋*

An Automated S. T. C. (Sensitivity-Time Control) System for Marine Radar
Tomiji NIRASAWA and Hiroshi OKADA

Abstract

An automated s. t. c. system for marine radar is presented. In this system, sea-clutter whose strength depends upon the wind-direction is effectively suppressed by using the feed-back loop. This system is a kind of c. f. a. r. (constant false alarm rate) receiver, and applicable to the radar set which has the conventional s. t. c. circuit.

1. ま え が き

マリン・レーダにあっては、その電波ビームが必然的に海面を照射するので、海上にある目標の他に、海面からの反射も受信されてしまい、それが目標探知の目的に対して妨害を与える。

従来、このような海面反射妨害を抑制するために STC (Sensitivity-Time Control=感度-時間制御) が用いられ、簡便のゆえに広く普及している。しかし、海面反射妨害の強度は風の向きによって異なり、つまりアンテナの方向によって、その程度が異なるにも拘らず、従来の STC バイアスは一定のものとして加えられていた。このため、筆者らは STC の簡便性を生かしつつ、この欠点を克服するねらいで、STC の自動化を試み、初期の成果をあげたので、ここにご報告する。

2. 動 作 原 理

2.1 海面反射の性質

海面反射は、マリン・レーダでは不可避のものであるので、マリン・レーダの出現とともに、その抑制が種々研究されてきた。海面反射妨害の抑制法として、すでに提案されたものには、感度(利得)を時間(距離)とともに制御する方法、海面反射と目標との統計的な性質の相異を利用するもの、周波数スペクトルによるもの、発射電波そのものを海面反射妨害が少なくなるように選ぶ方法などが挙げられよう。

このうち、感度-時間制御法は、比較的かんたんの割りに効果があることから、初期の頃からずっと用いられ今日に至っている。

さて、海面反射は、電波の反射であるという点において目標からの反射と同じであるけれども、いくつかの点で相異点をも有している。すなわち、電波の偏波状態^①、パルス幅^②などによって、海面反射の強度は相異しており、これらの点に着目した海面反射妨害抑制法はすでに提案されている。

また、レーダ電波を風上側ないし風下側から投射することによっても変化する。一般に、向かい風の状態で電波を送受した方が、追い風の場合より反射レベルは高い。図1にその一例^③を示す。向かい風と追い風で、ほぼ 10dB の差がある。レーダ画面上での、海面反射妨害の現われ方をモデル化してかくと図2の如くなる。

海面反射強度に、このような風向依存性があるときに、従来の STC の調整を、海面反射妨害の弱い

図1 風向による海面反射レベルの変化

* 正会員, (株)東京計器・総合研究所 (東京都大田区南蒲田2-16)

方向で合わせて行なつたとすれば、妨害の強い方向では極めて強い妨害が現われ、受信系や表示系の飽和をも惹起して、所要目標の探知が困難ないし不可能になる(海面反射妨害による誤警報)。また逆に、海面反射妨害の強い方向で、従来方式のSTCを調整して合わせたとすると、妨害の弱い方向ではSTCバイアス深すぎとなって、この方向の小目標を探知し得ないことになる(目標の損失)。

また、レーダにおける海面反射は一般に、その周波数成分は低い方に集中している。

本提案の自動化STCは、このような諸点を考慮して為された。すなわち、STCの簡便性を生かしつつ、海面反射妨害の風向依存性を巧みに利用して、その悪影響を抑圧したものといえる。

2.2 自動化STCの動作原理

図3に、この自動化STC方式の構成図を示す。従来方式の受信器およびSTC波形発生回路に対して、閉ループを構成すべくSTC自動制御回路が付加されている。

受信器およびSTC波形発生回路は、現に用いられているもので、特に目新しくはないので、説明を省略する。自動制御回路は、海面反射レベル検出器、記憶回路および制御回路から成っている。

図3 本方式の構成図

(1) 海面反射レベル検出器：ビデオ信号中の海面反射成分を抽出し、そのレベルを検出する。海面反射は一般にその周波数成分が低いので、低域濾波器を用いている。

(2) 記憶回路：海面反射レベル検出器によって検出された海面反射のレベルを、レーダの次の周期まで記憶する。コンデンサ・メモリなどで実現できる。

(3) 制御回路：記憶回路の出力を増幅して、この出力をSTC波形発生回路に加える。

かくて、制御回路の出力は、海面反射のレベルを代表するものとなり、この出力の大きさに応じてSTC波形の振幅は増減し、結局STCバイアスが増減して、受信器の感度(利得)を加減する。すなわち、系全体としては、海面反射レベルの変動によって、この変動を抑えるように動作する。

図4に示すごとく、海面反射の風向によるレベル変動(ΔC)が、この自動化STC系によって抑圧される程度($\Delta \epsilon$)は、自動制御理論によって、

$$\Delta \epsilon \propto \frac{1}{K} \Delta C \quad \dots\dots(1)$$

図2 海面反射妨害の現われ方

で示される。ここに、 K は系の定数である。すなわち、 K を大きくする程、変動幅を小さくすることができるが、系の安定性から制限を受けるので、適当な妥協を要する。

このようにして、アンテナの向きによってレベルが異なる海面反射妨害が抑圧される。

2.3 STCについて^{(4)・(7)}

ここで、STCについて若干触れておく。一般にレーダの受信電力 P_r は次式で示される。

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} 16 \sin^4 \left(\frac{2\pi h_1 h_2}{R\lambda} \right) \dots\dots (2)$$

ここに、 P_t ：送信電力、 G ：アンテナ利得、 λ ：レーダ波長、 σ ：目標の有効反射面積、 R ：目標の距離、 h_1 ：アンテナ高、 h_2 ：目標の有効高、である。
ところで、海面反射のレーダ有効反射面積 σ_c は、

$$\sigma_c = \frac{1}{2} c \tau R \theta \sigma_0 \dots\dots (3)$$

ここに、 c ：光速、 τ ：レーダの送信パルス幅、 θ ：アンテナの水平ビーム幅、 σ_0 ：海面の単位面積当たりの反射係数、である。式(3)を、式(2)に代入して、

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 c \tau \theta}{2(4\pi)^3 R^3} \sigma_0 16 \sin^4 \left(\frac{2\pi h_1 h_2}{R\lambda} \right) \dots\dots (4)$$

となり、ある距離（屈折距離）以内では、 P_r が R^{-3} に比例することがわかる。また、距離が屈折距離より大きくなると、 P_r は R^{-7} に比例する。しかし、マリン・レーダのようにアンテナ高があまり高くないばあいには、この R^{-7} 領域での海面反射はあまり問題にならないのがふつうである。これらのことと、レーダ受信器のバイアス-利得特性とから最適のSTCバイアスの波形が決められる。

この他に、STC波形を R^{-4} なる物標の減衰特性に適合するように決める考え方もある^{(6)・(7)}。この方法だと、 R^{-3} の海面反射妨害が消え残る反面、特定の範囲で物標の探知が向上する一面もある。

3. 実験結果

STC自動制御回路（図3）を試作し、船上のレーダに装着して、従来方式の手動STCに対する効果の程度を実験により確めた。レーダは、東京計器製MR-120C型である。

図5は、海面反射妨害の軽減の例で、海面反射妨害の弱い方のレベルが手動（同図(a)）と自動（同図(b)）の両方で同程度になるように、手動STCを調整したばあいのレーダ映像写真である。自動化による海面反射妨害（誤警報）の軽減がはっきり現われている（図4参照）。

図6は、物標の損失の軽減の例で、図5のばあいと逆に、海面反射妨害の強い方のレベルが手動（同図(a)）と自動（同図(b)）の両方で同程度になるように、手動STCを調整したものである。この写真では、自動でむしろ海面反射がふえているように見えるが、これは妨害の弱い方でSTCバイアスが緩和されている為であって、このため、従来方式で失なっていた小目標の探知が自動方式では可能となる。

また、図7は岸壁における映像写真であって、飽和の改善の例である。沖の物標（ブイ）が、手動（同図(a)）と自動（同図(b)）で同程度に表示されるように、手動STCを調整した。中心付近の陸上物標による飽和傾向が図7(b)の自動では、かなり改善されていることがわかる。

以上の実験結果から、つぎのことが言える。

(1) 従来方式の手動STCを、風向による海面反射妨害の弱い方向をみて調整していたばあいに生じていた強い方向での妨害が、本方式の自動化STCで大幅に軽減された（妨害による誤警報の軽減）。

(2) 同様に、手動STC調整を海面反射妨害の強い方向をみて行っていたばあいに生じていた、妨害の弱い方向における物標の損失が大幅に軽減された（物標の損失の軽減）。

図4 自動STCによる抑圧の効果

(a) 手 動 S T C

(b) 自 動 化 S T C

図5 自動化STCの効果(1)——海面反射妨害の軽減

風向：西，風速：3m/s，レーダ・レンジ：3 浬，マーカ間隔：0.5 浬

(a) 手 動 S T C

(b) 自 動 化 S T C

図 6 自動化STCの効果(2)——物標の損失の軽減

風向：南東，風速：4 m/s，レーダ・レンジ：6 浬，マーカ間隔：1 浬

(a) 手 動 S T C

(b) 自 動 化 S T C

図7 自動化STCの効果(3)——岸壁における飽和の改善

風向：西，風速：3m/s，レーダ・レンジ：3浬，マーカ間隔：0.5浬

(3) 反射強度の強い陸上物標が、反射強度の弱い海面上物標と共に、同一映像面上に表示されるようなばあいでも、本方式の自動化動作の効果が発揮され、陸上物標による飽和傾向が改善される。

4. 特 徴

本方式の特徴について述べてみよう。

(1) 従来方式の、手動のSTCは、その構成・取扱いが比較的かんたんなので、広く用いられてきたが、海面反射妨害の風向依存性に追従することができなかった。しかし、本方式の、自動化STCは、この欠点を克服し、妨害の風向による変動を大幅に抑圧し、よって海面反射妨害を抑圧する。

(2) 本方式の自動化は、既存の手動STCの機器に対しても、かんたんな改造を加えるだけで、適用可能であるので、いわゆる両立性があるといえる。この点は、実用上の見地から有意義なことと考えられる。

(3) 本方式は、海面反射妨害の程度によって、STCバイアスを自動的に制御し、妨害による誤警報が大なるばあいに、これを小ならしめるものであるから、簡便ながら一種のCFAR(Constant False Alarm Rate=定誤警報率)受信系を形成するものといえることができる。

5. む す び

レーダにおけるSTCの自動化について述べた。今後、運用面からの検討も加え、必要な改善を行なって、普及を図り、安全な航海にいささかなりとも役立つものにしてゆきたい。関係各位のご叱正とご鞭撻をお願いしたい。

謝 辞

本方式の海上実験に多大のご援助を賜りました日本国有鉄道・青函船舶鉄道管理局殿および渡島丸乗組の方々に厚くお礼申し上げます。

また、日頃ご指導、ご協力いただいている関係各位、特に当社・船用事業部の新井技術部長、河重課長、総合研究所・エレクトロニクス研究部の佐藤前部長、力石部長、太田次長に感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 太田、韭沢 “レーダにおける海面反射妨害抑制方式の一試案”，昭48信学全大，1984。
- (2) 韭沢 “長・短パルスを用いる海面反射妨害抑制方式の提案”，信学会論文誌B，昭49—4，p. 262～263。
- (3) J. C. Daley, J. T. Ransone, Jr., and J. A. Burkett “Radar Sea Return—JOSS I”，p.11, Naval Research Laboratory (1971—5)。
- (4) 落合、茂在 “レーダの理論と実際”，海文堂（昭45）。
- (5) 高杉、山口、小林、佐伯、宮下、島村 “海面反射の実態調査に関する報告”（社内報告）（昭40—12）。
- (6) 山口 “海面反射除去に関するSTCについて”（社内報告）（昭41—9）。
- (7) M. I. Skolnik “A Review of Radar Sea Echo”，Naval Research Laboratory (1969—7)。

質 疑 応 答

大脇利清 1) 具体的に何 dB の改善か， 2) アダプティブ・タイムの内訳， 3) 運用面からの検討にはどんな項目がありますか。

岡田 洋 1) 海面反射のレベル差が50dB程度までの追従は可能ですが，改善の数量的表現法については検討中であります。

2) 海面反射レベル検出器および系の安定の為に要しています。

3) たとえば、従来からのSTCつまみをなくせるかという検討項目（これはオペレータの個人差を考慮する必要があるでしょうから）などがあると考えられます。

清水紀雄 1) 現方式のばあい，動作可能なパルス幅はどの位までですか。2) このような方法では見かけ上，海面反射は少なくなるが，本質的にS/N改善ではないと思います。その点はどのようにお考えですか。3) ご説明によると，距離方向で海面反射のレベルを一点でサンプリングして，他の距離では補間をしていますの

で、特異な分布をする海面反射雑音に対しては、適応性が少ないと思いますが。

岡田 洋 1) $0.05\mu\text{s}$ 程度まで可能です。(ただし、パルス幅については電波法に関して、また海面反射がパルス幅に依存していることに関して、別途に配慮しなければなりません……。)

2) 講演でも申し上げましたように、本方式は簡便を目標にしておりますので、必ずしも本質的な方法とは言えないかも知れません。ほぼ同方向における信号／クラッタ比を改善するには、他の方法、たとえばログ・アンプを用いた受信方式などを使用することが挙げられます。

3) 従来のSTCバイアスのカーブでカバーしてきた、一般的な海面反射のパターンを対象にしていますから、これから外れた特異なパターンについては、そういうことになります。