

IMOに適合する船舶用Sバンド固体化レーダーの開発

Development of S-Band Shipborne Solid-State Radars Conformed with IMO Standard

須藤 正 則 菅 原 博 樹 沢 柳 雅 哉 時 枝 幸 伸
Masanori Sudoh Hiroki Sugawara Masaya Sawayanagi Yukinobu Tokieda

要 旨

近年、船舶の安全航行のためのレーダー稼働時間が急増し、寿命のあるマグネトロンに代わる固体素子を用いたレーダーへの期待が高まっている。それに呼応するかのようになり、2008年7月に新International Maritime Organization (IMO) 性能規準が施行され、従来のマグネトロンを用いたパルスレーダーに加え、Sバンドにおいては、電波形式の異なる新しい技術を活用したレーダーも使用できるようになる。このような背景のもとに、JRCが開発したSafety Of Life At Sea (SOLAS) 船向けのSバンドレーダーを紹介する。本レーダーでは、パルス圧縮方式を採用し、300Wの送信出力を備えた送受信部とパルス圧縮技術を盛り込んだ信号処理部を開発した。実際の船舶に搭載して、評価実験を行い、従来レーダーと遜色ない性能を確認した。

Abstract

Recently maintenance-free radars are strongly demanded by customers, because the use of radar has increased dramatically for ensuring safe navigation of vessels—consequently making the maintenance costs burden to replace their shorter-lived magnetrons. As if responding the customer demand, the International Maritime Organization (IMO) radar performance standard MSC 192(79) covering shipborne equipment shall come into force in July 2008; which will allow the new technology radar in the S-band frequency, in addition to the conventional pulse radars with a magnetron. In such circumstances, JRC has developed an S-band shipborne solid-state radar for the Safety Of Life At Sea (SOLAS) vessels. This radar has adopted the pulse compression method; for which we developed a several hundred-watt transmitter-receiver unit and the signal processing unit to realize the pulse compression technology. We have confirmed that our new radar achieves as sufficient performance as the conventional magnetron radars, through the field evaluation on a practical vessel.

1. まえがき

近年、船舶の安全航行のためのレーダー稼働時間が急増し、寿命のある高価なマグネトロンに代わる安価な固体素子を利用したレーダーへの要望が高くなってきている。また、通信のブロードバンド化に伴い、周波数有効利用の面からマイクロ波帯に広い帯域を占有しているレーダーに対する狭帯域化の要求が強まると共に、高出力の高周波デバイスが開発され、利用できるようになってきた。これに呼応するかのようになり、2008年7月に新しいIMO性能基準が施行され、Sバンドのレーダーについては、新しい技術の活用が可能になる。これを契機に、船舶用レーダー装置に関する技術的革新が急激に進むものと考えられる。

本稿では、このような背景のもとに、船舶に搭載される将来レーダーの1つとして開発したSOLAS船向けのSバンド固体化レーダーについて紹介する。

2. 何故固体化レーダー？

(1) レーダーへの顧客要望

船の安全航行のため、レーダーの使用頻度が高くなり、

寿命の有るマグネトロン交換による高い維持費が負担となっている。そのために、維持費のかからないレーダーへの要望が高まってきた。

(2) レーダーの狭帯域化要求

通信のブロードバンド化が急激に進み、マイクロ波帯やミリ波帯での通信需要が高まり、レーダーの広い割当周波数帯域の狭帯域化が求められている。その一環として隣接周波数帯域への影響を軽減させるため、ITU-R勧告SM.1541-ANNEX8でレーダースプリアス基準の設計目標が設定され、将来、更に厳しくなるスプリアス基準を満足させるには、高電圧をパルス変調しているマグネトロンの発振器では、実現が難しくなっている。

(3) IMO性能基準の見直し

船舶に搭載される機器を対象にした新IMO性能基準MSC 192(79)が、2008年7月に施行される。レーダー装置に関して、その基準の中で、Xバンドレーダーはビーコン局やSARTs (Search And Rescue radar Transponder) の信号を探知できることを要求している。Sバンドレーダーについては、何も言及されていない。換言すれば、Sバンドレーダーは、従来変調方式のレーダーでなくても良いことになる。

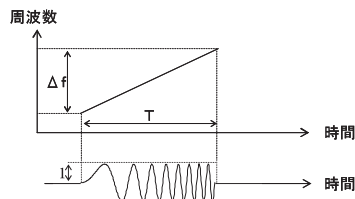
(4) 高出力高周波デバイスの活用

最近研究されている次世代ブロードバンド通信において、広範囲に高速で大容量の情報を通信できる高出力、高周波デバイスが必要不可欠である。その中でバンドギャップの大きいGaNデバイスが注目されており、Sバンド以上の高い周波数帯において高出力化が期待できる。最近このデバイスの開発が進み、1パッケージで数百Wの出力が可能となり、いろいろな分野での活用が容易になってきた。

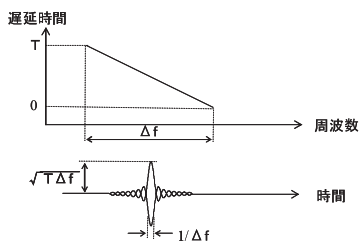
以上の要因から、船舶用レーダーはもとよりレーダー全般に亘り、現在使われているマグネトロンやTWTのような電子管から固体素子への移行がこれから進むものとする。

3. システム概要と仕様

JRCは、SOLAS船向けの船舶用レーダーとして、パルス圧縮方式を活用したSバンド固体化レーダーシステムを開発した。パルス圧縮の基本原理は、図1(a)に示すように時間に対して直線状に周波数変調をしたパルス幅の広い送信信号(チャープパルス)を送信する。目標からの反射波は図1(b)のように周波数に対して遅延時間が直線状に変化するよう処理を行なうことにより、パルス幅が狭くかつ大きな振幅のパルスに変換する。つまり低い送信電力でパルス幅の広いパルスを用い、大電力で狭い幅のパルスを送信した場合と同じ効果を得ることができる。



(a) 送信パルス (チャープパルス)



(b) パルス圧縮処理

図1 パルス圧縮処理の原理

Fig.1 Principle of Pulse Compression Processing

本レーダーシステムは図2に示すように送受信回路や信号処理回路を内蔵した空中線と指示機で構成される2ユニットタイプのレーダーシステムである。

新規空中線と従来のパルスレーダー用指示機をそのまま接続することによって、レーダー映像を表示できる。

それぞれのユニットの主な仕様は、表1のようにになっている。本システムにより、固体素子による高出力送信電力の実現、高安定・低位雑音局発振器による送信周波数の安定化、高パルス圧縮処理による物標識別の向上、コヒーレ

ント処理による目標探知性能の向上を達成した。

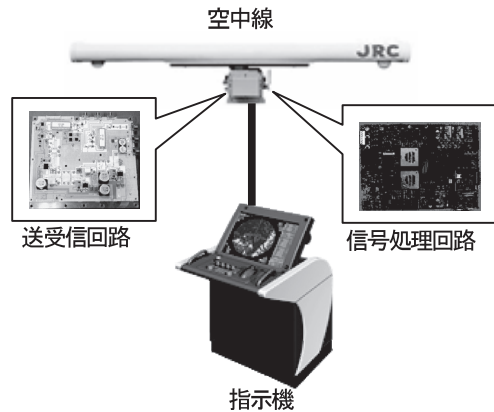


図2 レーダーシステムの構成

Fig.2 Configuration of Radar System

表1 レーダーシステムの仕様

Table 1 Radar System Specification

| 空中線 | |
|------------------------------------|---|
| アンテナ | |
| 周波数 -3dB ビーム幅 偏波面 アンテナ回転数 | Sバンド 水平：1.9度 垂直：25度 水平 24rpm |
| 送信系 | |
| 形式 送信電力 パルス幅 | 固体化送信 数百W (Peak) 数十 μs |
| 受信系 | |
| 形式 中間周波数/帯域 | リニアコヒーレント受信機 60MHz/30MHz |
| 信号処理回路 | |
| 信号処理 | パルス圧縮 コヒーレント処理 改良型CFAR |
| 指示機 | |
| 画面 | |
| 画面サイズ 分解能 画面表示 その他機能 | 23.1インチ SXGA(1280×1024ドット) ノースアップ、コースアップ、ヘッドアップ オフセンター表示、航跡表示、EBL/VRM 表示等 |

4. システム構成

本システムは、図3の機能ブロック図に示すように、空中線と指示機で構成され、それらを1本の複合ケーブルで接続している。空中線の主要構成は、輻射部とその駆動機構、送受信部と信号処理部からなり、すべての新型レーダーとしての機能が集約されている。そのため、指示機は、マグネトロンレーダーと同じ機器を使用することができる。

以下に主要回路である送受信部と信号処理部について説明する。

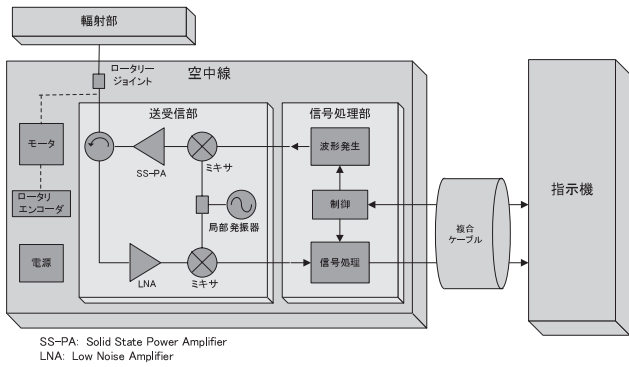


図3 レーダーシステム機能ブロック図
Fig.3 Block Diagram of Radar System

4.1 送受信部

送受信部は図4に示すように、ダブルスーパーヘテロダイン方式を採用している。信号処理部より入力される送信信号はDBM（ダブルバランスドミキサ）により、周波数変換を経て、3GHz帯に変換される。この3GHz帯の送信信号は、パワーアンプ回路により出力数百Wに増幅され、サーキュレータより出力される。このパワーアンプ回路の最終段はGaNなどのハイパワーFETで構成される。また、このパワーアンプ回路をパルススイッチング駆動させることにより送信休止期間中の消費電力をカットし、電力効率を向上させることを可能としている。

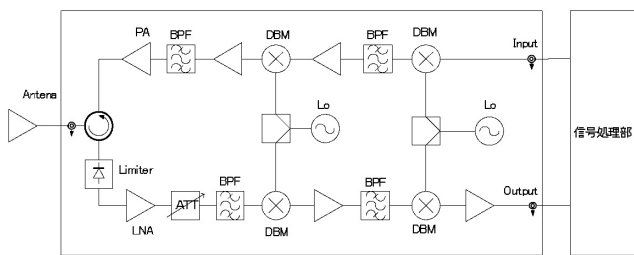


図4 送受信部 ブロック図
Fig.4 Block Diagram of Transmitter-Receiver Unit

レーダーエコーとして反射された受信信号はサーキュレータを通り受信部へ入力される。受信部入力端には送信電力リークと近傍外来波の過大入力保護としてダイオードリミッタ回路が挿入されている。入力された受信信号はLNA（ローノイズアンプ）により増幅され、その後周波数変換によりIF帯に変換され信号処理部に出力される。

また、送受信部にはパフォーマンスモニタ機能が内蔵されており、レーダーを運用しながら、輻射部を含めたオーバーオールのパフォーマンスチェックを実施することが可能である。更に本送受信部はPCB一枚に実装することにより小型化、低価格化が可能となり船舶用レーダーへの搭載を可能としている。

4.2 信号処理部

信号処理部は、図5に示すように、送信信号発生回路と、受信したレーダー信号をレーダー映像に変換するための干渉除去回路、パルス圧縮回路、コヒーレント処理回路によ

って構成される。送信信号発生回路は、パルス圧縮やコヒーレント処理などの信号処理に適した、位相制御されたFMパルスを生産する。FMパルスとは、パルスの内部で周波数変調されたパルスのことをいう。この送信信号発生回路は、レーダーの表示距離設定などに応じて、生成するFMパルスの周波数偏移幅や、パルス幅を切り替える機能を有する。また、他レーダーへの干渉を低減するため、送信タイミングをランダムに変化させることも可能である。生成されたFMパルスはD/A変換器によってアナログ信号に変換され、送受信部へ伝達される。

一方、受信信号は送受信機から入力され、A/D変換器によってデジタル変換された後、干渉除去回路、パルス圧縮回路、コヒーレント処理回路の順に信号処理され、レーダー映像に変換される。レーダー映像は、D/A変換器でアナログ信号に変換されて、レーダー指示機へ伝送される。

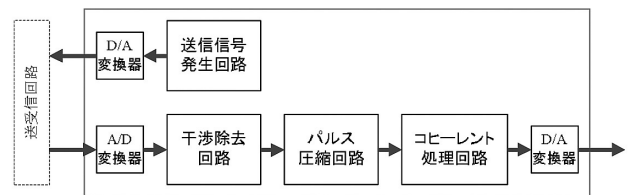


図5 信号処理部の構成
Fig.5 Block Diagram of the Signal Processor.

干渉除去回路は、受信信号が他レーダーから受けた干渉波を含む場合に信号を補正する回路である。固体化レーダーはコヒーレントレーダーであるので、受信信号の位相を無視した振幅補正による従来の干渉除去ではその後の処理に悪影響を及ぼす。そのため、固体化レーダーにはコヒーレントレーダーでも使用できるように改善した干渉除去回路を実装している。

パルス圧縮回路は、長さ10マイクロ秒程度のFMパルスを0.1マイクロ秒のオーダまでパルス幅を圧縮する回路である。圧縮率は送信パルス幅 T と圧縮後のパルス幅 τ との比で求められる。但し、 τ は周波数偏移幅 Δf の逆数であるので、圧縮率は図1で示すように $T * \Delta f$ で表わすことができる。例えば、送信パルス幅10マイクロ秒で偏移幅3.5MHzのFMパルスは、約0.3マイクロ秒に圧縮され、尖頭電力は約35倍になる。言い換えれば、送信電力は数百Wでありながら、約10kW出力のマグネトロンレーダーに相当する探知性能を得ることができる。

レーダーにおけるコヒーレント積分は、レーダー受信信号の位相情報を使用したスイープ積分で、短時間では同位相とみなせる物標に対して信号対雑音比の改善効果が得られる。本システムのコヒーレント処理回路は、図6 (a)に示すように受信信号を送信パルスに同期したレンジピンでサンプルし、相対速度に対応する各フィルタに入力することによって、所望の物標を抽出する。抽出された信号は、D/A回路でアナログのレーダービデオ信号に変換される。

以上で説明した信号処理による利点として、クラッタ（海面反射波、雨雪反射波）抑圧性能が従来のパルスレーダーと比較して改善すると期待できる。レーダーにおいて、クラッタ内の物標識別は永遠の課題であるが、本レーダーは、(1)

パルス圧縮, および, (2) コヒーレント処理によってクラッタ抑圧効果がある。

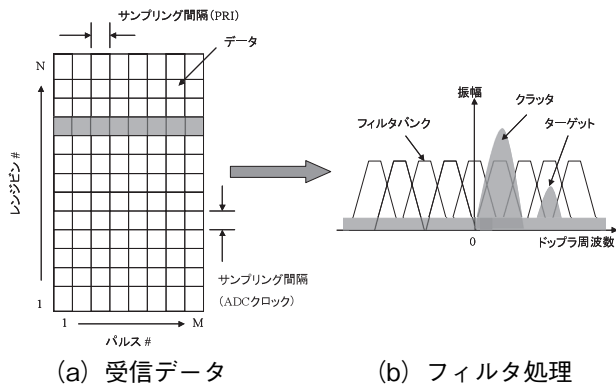


図6 コヒーレント処理
Fig.6 Coherent Processing

(1) パルス圧縮による改善

信号電力対クラッタ電力 (S/C) 比はパルス幅 τ に反比例することが知られている。パルス圧縮レーダーにおいて, この τ は圧縮後のパルス幅, すなわち, Δf の逆数であるので, Δf を広く取れば, 物標探知性能を維持したまま, クラッタレベルを下げる事が出来るので, S/C比の改善が期待できる。

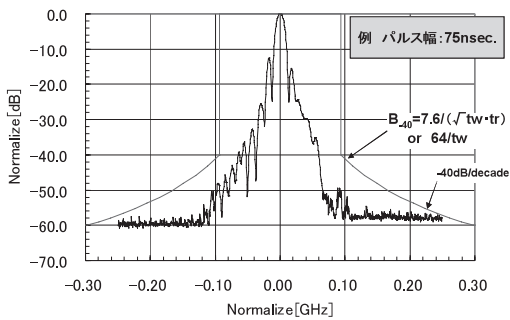
(2) コヒーレント処理による改善

コヒーレント処理によって, 物標の相対速度に応じてレーダー信号が分離されるため, 船舶のような物標とクラッタが異なる速度であれば, それらは分離される。そのため, クラッタを除去する処理をしても, 分離された小物標は除去されずに出力される。

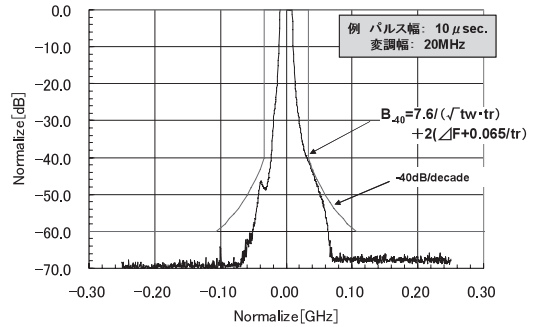
5. 実験評価

(1) スプリアス

狭いパルスと広いパルスを送信した場合の周波数スペクトルの測定結果をそれぞれ図7 (a) と (b) に示す。同図にITU-R勧告SM.1541-ANNEX8のスプリアス基準から求めたスプリアスマスクを重ねて示す。スプリアスマスクのOut of Band (OoB) 領域は, -40dB/decade のスロープで規定している。狭いパルス幅および広いパルス幅の送信パルスの周波数スペクトルは, 共にスプリアスマスクのレベル以下にあり, スプリアス基準を満足している。



(a) 狭いパルス幅

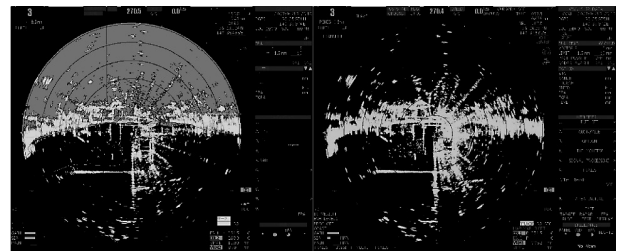


(b) 広いパルス幅

図7 送信スペクトルとスプリアスマスク
Fig.7 Transmitting Spectrum & Spurious Mask

(2) 近距離映像

図8 (a) に従来の30kWマグネトロンレーダーの場合, (b) に固体化レーダーの場合の近距離レンジにおける表示例を示す。ここでは3n.m.レンジにおけるレーダー映像を示しており, 従来レーダーと比較してもほとんど変わらない近距離におけるレーダー性能を示している。

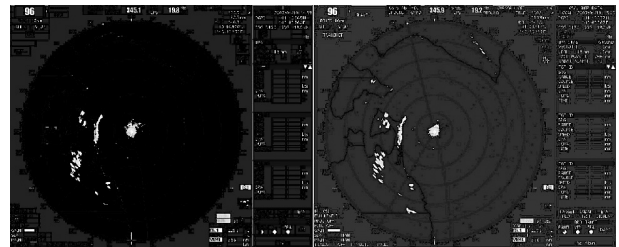


(a) マグネトロンレーダー (b) 固体化レーダー

図8 近距離のレーダー映像
Fig.8 Radar Images in Near-Range

(3) 遠距離映像

図9 (a) に従来レーダーの場合, (b) に固体化レーダーの場合の遠距離レンジの表示例を示す。ここでは96n.m.レンジにおけるレーダー映像を示しており, 従来レーダーと比較しても遜色のない十分な探知性能を有していることが確認できる。



(a) マグネトロンレーダー (b) 固体化レーダー

図9 遠距離レーダー映像
Fig.9 Radar Images in Long-Range

(4) クラッタ性能向上

図10にFMパルスの周波数偏移幅を変化させた場合のレーダー映像を示す。4.2の (1) のパルス圧縮による改善で述べていることの実船評価として, 同図からシークラッタ, ウェザークラッタの抑圧性能の向上が見られ, 新型レーダー

のクラッタ環境における有効性が確認できた。

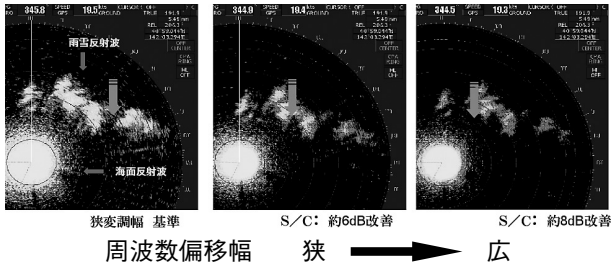


図10 クラッタのレーダー表示例
Fig.10 Radar images of Clutter

6. あとがき

上記に示したように、パルス圧縮レーダーに代表される将来レーダーは、数々の利点を有するが、その反面、特有の課題もある。特に各種レーダーとの干渉を抑圧する技術的課題は重要である。今後はこれらの課題が克服され、更に、新しい技術を活用したビーコンやSARTsが市場導入されると、Sバンド船舶用レーダーだけでなく、Xバンドの船舶用レーダーについても固体化レーダーが促進されると思われる。近い将来、気象レーダー、港湾監視レーダー等のあらゆる用途のレーダーについても、固体化の方向に進むことは明らかであろう。

参考文献

1. M.I.Skolnik: "Introduction to Radar Systems", Third Edition, McGraw-Hill
2. M.I.Skolnik: "Radar Handbook", 2nd Edition, McGraw-Hill
3. D.K.Barton: "Modern Radar System Analysis", Artech House
4. 吉田孝監修: "改訂 レーダ技術", 電子情報通信学会

用語一覧

CFAR: Constant False Alarm Rate
 DBM: Double Balanced Mixer
 EBL: Electronic Bearing Line
 IMO: International Maritime Organization
 LNA: Low Noise Amplifier
 MSC: Maritime Safety Committee
 n.m.: nautical mile
 SAW: Surface Acoustic Wave
 SOLAS: Safety Of Life At Sea
 SXGA: Super eXtended Graphics Array
 VRM: Variable Range Marker