X帯船舶用固体化レーダーの開発 Development of X-Band Shipborne Solid-State Radars

須藤正則菅原博樹沢柳雅哉時枝幸伸Masanori SudohHiroki SugawaraMasaya Sawayanagi Yukinobu Tokieda

要 旨

近年,船舶の安全航行のためにレーダーの使用頻度が急激に高くなり,寿命のあるマグネトロンに代わる固体化レーダー の要望が強くなってきている。一方,無線周波数資源がひっ迫する現在,レーダー周波数の狭帯域化も要望されている。そ のような要望を背景に,JRCはX帯船舶用固体化レーダーを開発した。開発した固体化レーダーは,固体素子の安定した発振 と,送信波形の最適化技術によって,レーダーの許容帯域幅を現行の70%相当に狭帯域化することができた。さらに,固体 化レーダーに組み込まれたパルス圧縮処理とコヒーレント処理の効果として,300Wの送信出力でありながら探知性能が既 存のマグネトロンレーダーと同等以上であり,海面反射/雨雪反射による不要成分(クラッタ)の抑圧性能が既存レーダー より優れていることを船舶搭載の評価実験によって実証できた。

Abstract

Maintenance-free radars are strongly demanded by customers, because radars are more and more frequently relied upon for ensuring safe navigation of vessels—consequently making the maintenance costs burden to replace magnetrons with limited life. On the other hand, radar frequency band is demanded to be narrowed because of the present congestion of radio frequency resources. In response to those demands, JRC has developed X-band solid-state radars for Safety Of Life At Sea (SOLAS) vessels. Due to the stable oscillation by the solid-state device and the waveform optimization technique applied, the developed radar has successfully reduced the necessary bandwidth down to 70 %. Furthermore, we have confirmed through the field evaluations on a practical vessel that the developed solid-state radar achieves the matching sensitivity despite its 300 W of transmission, and the superior clutter suppression performance in comparison with the existing magnetron radars, as the benefit from the pulse compression and the coherent processing.

1. まえがき

近年,船舶の安全航行のためにレーダーの使用頻度が急激に高くなり,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,周波数有効活用の面から,マイクロ波帯の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くなっている。一方,通信のブロードバンド化に伴い,高出力の高周波デバイスが開発され活用できるようになってきた。そのような背景のもと,JRCは総務省の委託研究「電波資源拡大のための研究開発」の一環として,Safety Of Life At Sea (SOLAS)条約対象船向けのX帯固体化レーダーを開発し,実証実験によって,狭帯域化と船舶レーダーとしての性能を確認した。本稿では,実証実験で得られたデータを示し,開発したX帯船舶用固体化レーダーについて報告する。

2. レーダー固体化の要因

船舶レーダーを含むレーダー全般にわたり,現在使われ ているマグネトロンや進行波管などの電子管から固体素子 へ移行が進むと考えられる。そのような固体化への指向は 以下の要因によるものである。

(1) レーダーに対する顧客要望

船の安全航行のため、レーダーの使用頻度が高くなって いる。それに伴い、寿命のあるマグネトロンの交換による 高い維持費が負担となってきたため、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 ミリ波帯での通信が必要不可欠となっている。それに伴い, 広い周波数帯を占有しているレーダー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 Annex 8でスプリアス基準 の設計目標が設定されている。将来,さらにスプリアス基 準が厳しくなると,マグネトロンを用いたレーダーでは基 準の適合が困難になる。

(3) 高出力高周波デバイスの活用

次世代ブロードバンド通信のために開発された高出力高 周波デバイスの中でバンドギャップが大きいGaN-HEMTが 注目されている。GaN-HEMTはS帯以上の高い周波数帯にお いて高出力化が期待でき、最近、パッケージあたり数百ワ ットの出力が可能となったため、レーダーへの応用が可能 になってきた。

3. 装置の仕様と特性

JRCは、SOLAS条約対象船向けのレーダーとして、パルス 圧縮方式を利用したX帯固体化レーダーシステムを開発し た。パルス圧縮は、パルス幅が広い周波数変調パルス(FM パルス)を送信し、そのエネルギーを時間軸上の一点で積 み上げることによって探知性能を向上させる技術⁽¹⁾である。 固体化レーダーの送信電力が既存のマグネトロンレーダー の100分の1程度であるため、パルス圧縮は固体化レーダー が既存のマグネトロンレーダーと同等以上の感度を得るた めに必要な技術である。

本レーダーシステムは図1に示すように空中線と指示機で 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。各 ユニットの主な仕様は、表1のようになっている。本レーダ ーの空中線は、固体素子による高出力増幅回路や信号処理 回路を内蔵し、固体化特有の機能を空中線内部に集約し、 既存のパルスレーダーと互換性のあるレーダービデオを指 示機に出力する。そのため、既存のパルスレーダー用の指 示機でレーダー映像の表示が可能である。



図1 レーダーシステムの構成 Fig.1 Structure of the developed radar system.

表1 レーダーシ	/ステムの仕様
----------	---------

Table 1 Specification of the developed radar system.

空中線		
アンテナ		
周波数	X带	
-3dBビーム幅	水平:0.8度 垂直:20度	
アンテナ回転数	24rpm / 16rpm	
送信系		
形式	固体化送信	
送信電力	300W	
パルス幅 (PRF)	$0.08 \sim 20 \mu \mathrm{s} (640 \sim 4100 \mathrm{Hz})$	
受信系		
形式	リニアコヒーレント受信機	
中間周波数(帯域幅)	63MHz (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OS-CFAR, 干涉除去	
指示機		
画面		
画面サイズ	23.1インチ	
解像度	SXGA (1280×1024ドット)	
画面表示	ノースアップ, コースアップ, ヘッドアップ,	
その他機能	オフセンタ表示, 航跡表示, EBL/VRM表示等	

4. システム構成

本レーダーは空中線と指示機による2ユニットタイプのシ ステムである。空中線は図2の機能ブロック図に示すように, 輻射部とその駆動機構,送受信部と信号処理部によって構成 される。送受信部と信号処理部によってレーダーの反射信 号を受信・信号処理して得られたレーダー映像は,従来のパ ルスレーダーと互換性のあるレーダービデオとして指示機 に出力される。



図2 レーダーシステム機能ブロック図 Fig.2 Function block diagram of the developed radar system.

以下に固体化レーダーの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。

4.1 送受信部

送受信部は、レーダーの送受信を担うアナログ回路であり、図3に示すように高出力増幅回路と送受信回路によって 構成されている。

高出力増幅回路は、アンテナへ300W以上出力するために、 9GHz帯の送信信号を電力増幅する回路である。高出力増幅 回路はガリウムナイトライド(GaN)などのハイパワーFET で構成される。この回路はゲートスイッチング方式によっ て、電力効率を向上している。



図3 送受信部 ブロック図



送受信回路は、ダブルスーパヘテロダイン方式によるレ ーダー送受信のための回路であり、送信系と受信系に分か れる。送信系には、信号処理部から送信信号が入力され、 ダブルバランスドミキサ(DBM)により2回の周波数変換を 経て、9GHz帯に変換され、高出力増幅回路に伝送される。 受信系には、サーキュレータを通過した受信信号が入力さ 特

集

れる。受信系の入力端にはダイオードリミッタ回路が挿入 され、近傍外来波の過大入力から回路を保護している。入 力された受信信号はローノイズアンプ(LNA)により増幅 され、ノッチフィルタ(BRF)によるイメージ周波数除去の 後、中間周波数帯に変換され、信号処理部に伝送される。 また、高周波側の局部発振器(1st LO)には自社製のSAW VCOを使用したフェーズロックオシレータ(PLO)方式を 採用している。

4.2 信号処理部

信号処理部は、図4に示すように、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信号処 理回路によって構成される。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パルスを生成する。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、送受信部へ伝送さ れる。



図4 信号処理部の構成 Fig.4 Block diagram of the signal processor.

一方,送受信部から入力された受信信号は,A/D変換器に よってディジタル変換された後,信号処理回路に入力され る。入力された信号は,干渉除去,パルス圧縮,コヒーレ ント処理の順に信号処理され、レーダー映像に変換される。

干渉除去は,他レーダーからの干渉信号がパルス圧縮や コヒーレント処理に悪影響しないように,信号を補正する 処理である。

パルス圧縮は、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処理である。パ ルス圧縮は、パルス幅と周波数変調幅を適切に組み合わせ れば感度と距離分解能を両立できる利点をもつ。また、本 レーダーのパルス圧縮は、周波数領域におけるディジタル 処理⁽²⁾によって実現されている。

コヒーレント処理は、レーダー受信信号を対応する反射 体の相対速度に応じて異なるフィルタバンクに分離する信 号処理である。本レーダーにおけるコヒーレント処理は、 クラッタ内の探知性能を改善するための手段である。クラ ッタ内を移動する小型船が存在する場合、クラッタと小型 船からの受信信号は異なるフィルタバンクに分離される⁽³⁾ ため、従来レーダーではクラッタに埋もれて見えなかった 小型船を本レーダーでは探知できるようになる。

5. 実証実験

本レーダーの性能を実証するため,狭帯域化,レンジ性能, レーダー性能を実証実験によって評価した。実証実験では, 本レーダーが良好な性能をもつことが確認された。本節で は、これらの実証実験における結果を報告する。

5.1 狭帯域化の評価

固体化レーダーは固体素子の安定した発振,および,ディジタル生成された送信の種信号により,狭帯域化が可能である。本レーダーの狭帯域化は,現行のITU-R規定より厳しいスプリアスマスクを目標とした。目標のスプリアスマスクは,40dB帯域幅が現行の70%に相当する140MHzに制限され,帯域外領域のスロープが-40dB/decadeのように設定された厳しいマスクである。

目標のスプリアスマスクに対応するため,送信系,特に, 高出力増幅回路における送信波の歪みをモデル化すること によって,狭帯域化を実現した。具体的には,図5に示すよ うに,送受信部の振幅対振幅(AM-AM)特性と振幅対位相 (AM-PM)特性を測定し,送信系での歪みモデルを構築する。 構築されたモデルを用いて,空間放射される送信波をシミ ュレーションすることによって,所望の送信スペクトルが 得られるようにフィードバックしながら送信波形を最適化 する。最適化された信号を本レーダーの空中線に内蔵され る信号発生回路に設定すると,所望の送信スペクトルを示 す狭帯域化された信号が送信できる。



図5 送信信号の最適化 Fig.5 Illustration of the waveform optimization.

上記の手順によって送信信号を最適化した後, ITU-Rの直 接法⁽⁴⁾によって送信波のスペクトルを測定し,不要波の分 布を調べた。図6には不要波分布が最も厳しい短パルス(パ ルス幅0.08µs)の測定結果を示す。図には,現行のITU-Rで 規定されるスプリアスマスクと,目標スプリアスマスクを 重畳表示している。本レーダーの送信スペクトルを見ると, 不要波レベルが目標のスプリアスマスクより十分に低くな っていることが確認できる。仮に,将来的にスプリアス規 制が厳しくなり,40dB帯域幅が140MHzで,帯域外領域のス ロープが -40dB/decadeのように規定されても,本レーダー はその厳しい規定に十分に対応可能である。



図6 直接法による送信スペクトル測定結果 Fig.6 Transmitted spectrum measured by the direct method in compliance with ITU-R.

5.2 レンジ性能の評価

本レーダーの基本的な性能を評価するため,距離分解能, 角度分解能,最大探知距離を評価し,国際海事機関(IMO) のレーダー性能基準⁽⁵⁾と比較した。比較の結果,固体化レ ーダーは十分な性能が達成されていることが確認できた。

(1) 距離分解能·角度分解能

IMOのレーダー性能基準では,距離方向に40m離れた二つの目標と,方位角2.5度だけ離れた二つの目標を分解しなければならないと規定されている。

実証実験による結果を図7に示す。これらの映像は、それ ぞれ、二つの目標を距離方向に40m、角度方向に2.5度離し た状態でのデータであるが、十分に目標が分離できている ことが確認できる。これらのデータに対して詳細な解析を した結果、距離方向の分解能が21m、角度方向の分解能が 2.0度という限界値が算出された。ともにIMOの性能基準を 十分に満足する性能である。





(a) 距離分解能 図7 分解能試験の結果 Fig.7 Resolution test of the solid-state radar.

(2) 最大探知距離

IMOのレーダー性能基準では、レーダー断面積(RCS)が 10m²である目標が4.9海里の距離で探知できなければならな いと規定されている。その規格に対する実証結果を図8に示 す。この映像は10m²のRCSの反射器を積んだボートを4.9海 里の距離に配置した映像である。この映像に示すように、距 離4.9海里の目標が探知されていることが確認できる。この データに対して詳細な解析をした結果, RCS 10m²の最大探 知距離は11.4海里と算出され, IMOのレーダー性能基準を十 分に満足する性能であった。



特

図8 最大探知距離試験の結果 Fig.8 Maximum detection range test of the solid-state radar.

5.3 レーダー性能の評価

開発した固体化レーダーの実環境での性能を評価するため,海上において実証実験を実施した。実証実験では,近距離映像,遠距離映像,クラッタ抑圧性能を,既存の25kWマグネトロンレーダーと比較した。

(1) 近距離映像

図9に固体化レーダーと、マグネトロンレーダーによる近 距離レンジの映像例を比較する。この図は仙台塩釜港付近 の1.5海里レンジにおけるレーダーエコーを示している。 こ れらの映像を比較すると、固体化レーダーの映像が、既存の マグネトロンレーダーと同様であることがわかる。



(a) 固体化レーダー
(b) マグネトロンレーダ・
図9 近距離のレーダー映像
Fig.9 Radar images in short range.

(2) 遠距離映像

図10に固体化レーダーと、マグネトロンレーダーによる遠距離レンジの映像を比較する。この図は48海里レンジにおけるレーダーエコーを示しており、伊勢湾周辺と、遠方に岐阜県奥美濃の山地が映っている。これらの映像から、300W出力の固体化レーダーが、25kW出力のマグネトロンレーダーと同等の探知性能を有していることが確認できる。



a) 固体化レーダー (b) マグネトロンレー: 図10 遠距離レーダー映像 Fig.10 Radar images in long range.

(3) クラッタ抑圧性能

図11に固体化レーダーとマグネトロンレーダーのクラッ タ抑圧性能を比較する。図に示す映像は、2010年1月22日の 強風時に伊勢湾で収録したデータである。これらの映像は、 指示機の航跡表示機能を使用し、探知された船の存在をわ かりやすく表示している。







クラッタ抑圧前には、双方のレーダー映像に無数のクラ ッタが映っている。クラッタを抑圧すると、固体化レーダ ーでは、丸で囲んだ位置に航跡を引く小船の存在が認めら れる。一方、マグネトロンレーダーでは、同じ位置に航跡 を引く小船の存在が見出せない。これは、マグネトロンレ ーダーは、クラッタを抑圧したことによって小船も一緒に 消えたことを意味している。それに対し、固体化レーダー では、クラッタと小船の信号を分離することによってクラ ッタのみを選択的に抑圧できるため、マグネトロンレーダ ーより優れたクラッタ抑圧性能が実現できている。

6. あとがき

本稿で説明したように,固体化レーダーは固体素子の安 定した発振と送信波形の最適化技術によって,より厳しい スプリアス基準への対応が可能である。さらに,コヒーレ ント処理によって既存レーダーより優れたクラッタ抑圧が 可能であることも確認できた。本レーダーにおける技術は, 船舶用レーダーだけでなく,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の固体化への動きに大い に貢献するものと期待できる。

関連特許出願 5件出願済み

参考文献

- 吉田孝監修: "改訂 レーダ技術," 電子情報通信学会,第4 版,2003, pp.275–278.
- 2. M.I.Skolnik: "Introduction to Radar Systems," Third Edition, McGraw-Hill, 2001, pp.131–136.
- 3. M.I.Skolnik: "Radar Handbook," 2nd Edition, McGraw-Hill, 2008, pp.8.28-8.35.
- Recommendation ITU-R M.1177-3: "Techniques for measurement of unwanted emissions of radar systems," 2003, pp.8–21.
- 5. IEC 62388: "Maritime Navigation and Radio-Communication Equipment and Systems - Radar Shipborne Radar - Performance requirements - Methods of testing and required test results," 2006, pp.275–278.

用語一覧
BPF: Band-Pass Filter
BRF: Band-Rejection Filter
CFAR: Constant False Alarm Rate
DBM: Double Balanced Mixer
EBL: Electronic Bearing Line
GaN: Gallium Nitride
HEMT: High Electron Mobility Transistor
IMO: International Maritime Organization
ITU-R: International Telecommunication Union - Radiocommunications
sector
LNA: Low Noise Amplifier
OS-CFAR: Order Statistic - Constant False Alarm Rate
PRF: Pulse Repetition Frequency
RCS: Radar Cross Section
SAW: Surface Acoustic Wave
SOLAS条約: international convention for the Safety Of Life At Sea
SXGA: Super eXtended Graphics Array
VCO: Voltage Controlled Oscillator
VRM: Variable Range Marker