

船舶用X帯固体化レーダの開発

Development of X-band Solid State Radar for Ships

齋藤 壽寛 川口 優
Toshihiro Saito Masaru Kawaguchi

要 旨

船舶用X帯固体化レーダは、従来のマグネトロンレーダと比べて低廉な維持費および高い物標探知性能を特長とする。当社は既存製品として実績があるMFD¹を指示機とする2ユニット構成のX帯固体化レーダを開発した。本レーダは送信尖頭電力が600 WでIMO²性能基準に適合し、固体化レーダの特長を生かしてクラッタ（海面や雨雪における反射信号）に埋もれた物標の反射信号を高い確率で検出することが可能である。これにより、従来のマグネトロンレーダと比較して漁船や浮標などの小さな物標に対する優れた探知性能を実現した。社会的な要求が強まっている船舶の自律航行を実現するうえでも、キーセンサであるレーダの性能向上は不可欠であり、本開発の今後の社会貢献が大いに期待される。

Abstract

The X-band solid-state radar for ships features lower maintenance costs and high target detection performance compared with conventional magnetron radars. JRC has developed an X-band solid-state radar in a two-unit configuration that uses MFD¹ as a display unit, which has a proven track record as an existing product. This radar complies with the IMO² performance standard with a transmitting peak power of 600 W and can detect reflected signals from targets buried in clutter (reflected signals from sea surfaces, rain, and snow) with high probability by taking advantage of the features of solid-state radar. Based on these results, JRC has achieved superior detection performance for small targets such as fishing boats and buoys compared to conventional magnetron radars. The improvement of radar performance, which is a key sensor, is essential to realizing autonomous navigation of ships, which is increasingly required by society, and this development is expected to contribute greatly to society in the future.

1. まえがき

船舶レーダは、船舶の安全な航行を支える重要な役割を果たしている。それゆえ、国内外の法律においても船舶レーダは船種に応じて搭載が義務化されている。近年では、船舶の自律航行の実現を見据えた探知性能の向上を始めとする様々な技術開発が進められており、安全な航行の運用管理における幅広い貢献が期待されている。

従来からレーダに広く用いられてきたマグネトロン（マイクロ波を発振する電子管）は、電極をヒータにより加熱し、熱電子を放出させることで高周波信号（電波）を生成するという動作原理であるがゆえに劣化が早く、レーダの性能を維持するため、運用条件によって差異はあるが数千時間程度の使用を目安にマグネトロンの定期交換が必要である。この一方で、近年では半導体デバイスに係る技術的な進歩が目覚ましく、これはレーダに用いられるデバイスも例外ではない。特に、高周波帯向けの高出力トランジスタに代表される半導体電力増幅素子の普及は、固体化レーダの開発を加速させている。当社は既にS帯の固体化レーダを製品化しており、その優れた品質と低廉な維持費によって市場から好評を博し、近年の販売数はマグネトロンレー

ダを上回っている。以上のような固体化レーダへの要求の高まりに加え、昨今のX帯向けデバイスの低価格化、法規制の改正などを受け、過去に当社が開発した官公庁向けの気象観測用レーダや港湾監視用レーダを通じて培ったX帯固体化レーダ技術を生かし、民生向けの船舶用X帯固体化レーダを開発したので紹介する。

2. 固体化レーダ装置の概要

固体化レーダは、信頼性が高く長寿命の半導体電力増幅素子を用いるため、定期的な交換が不可欠なマグネトロンを用いるレーダと比べて維持費を低く抑えることができる。用いられる半導体電力増幅素子には複数の種類があるが、X帯においてはGaN³ HEMT⁴が主流である。

固体化レーダの送信尖頭電力は数百W程度のものが主流で、数十kWに及ぶマグネトロンレーダと比べ非常に小さいが、固体化レーダの特長である信号制御の簡便さを生かし、マグネトロンレーダに匹敵する受信感度と分解能を有する。これは、QON⁵型式の信号（周波数変調パルス信号）を送信し、受信信号にパルス圧縮処理を施すことによる効果である。送信信号はマグネトロンレーダと同様のPON⁶型式の信

¹ MFD (Multi-Function Display) : マルチファンクションディスプレイ

² IMO (International Maritime Organization) : 国際海事機関

³ GaN (Gallium Nitride) : 窒化ガリウム

⁴ HEMT (High Electron Mobility Transistor) : 高電子移動度トランジスタ

⁵ QON : 「パルス期間中に搬送波を角度変調」「変調信号なし」「無情報」に該当する電波型式

⁶ PON : 「パルス無変調」「変調信号なし」「無情報」に該当する電波型式

号(無変調パルス信号)と組み合わせており、これは、受信信号過大時の飽和現象により近距離映像の品質が低下する弊害(「タイムサイドロブ」と呼ぶ偽像の発生)がQ0N型式の信号において避けられず、この影響を軽減するためである。

さらに、固体化レーダの特長の一つである信号の高い安定性を生かし、信号の位相情報を積極的に利用して物標における反射信号(受信したい信号)とクラッタ(海面や雨雪における反射信号)の速度を検出し、両者の速度の違いを識別することにより、高い精度で物標を探知することができる。一般に、X帯においてはクラッタが強く観測されるため、荒天時における物標探知はS帯に比べて不利とされており、この点を改善できるX帯固体化レーダの早期製品化が望まれていた。

3. 開発における課題

3.1. 低コスト化

半導体デバイスに係る技術が進歩し、デバイスの低価格化が進んでいるとはいえ、固体化レーダに係るコストがマグネトロンレーダと比べると未だ高いことは否めない。なかでも半導体電力増幅素子はレーダの送信電力を決めるキーデバイスであり、レーダの探知性能を左右する要であるが、マグネトロンと比べ高価である。

本開発においては、デバイスの選定、電力増幅回路構成の適正化を始めとした低コスト化が課題とされた。

3.2. 放熱特性を考慮した構造設計

固体化構造において600 Wの送信尖頭電力を実現するうえで、電力増幅回路に用いられる半導体電力増幅素子の放熱の適正化が不可欠である。不十分な放熱は送信波形の歪の原因となり、受信信号のパルス圧縮処理(タイムサイドロブ)の特性劣化、および装置の寿命短縮を招く。

以上の観点により、きょう体内の放熱特性を十分に考慮した構造設計が課題とされた。

3.3. 探知性能と映像品質の確保

固体化レーダにおける本質的な課題として、タイムサイドロブ(距離方向に間延びした形状でレーダ画面上に表示される偽像)を防ぐ必要がある。偽像は受信信号が強いほど顕著で、物標の識別や測距を妨げるため、この対策が課題とされた。

4. 装置構成/仕様

新たに開発した船舶用X帯固体化レーダは、空中線と指示機(MFD: Multi-Function Display)の2ユニット構成である。空中線は6ftと9ftモデルの2種類、また指示機は26インチと19インチの2種類の画面サイズがあり、各々の組み合わせにより4種類の装置構成を可能とする。空中線の外観を図1に、空中線の仕様を表1に示す。

なお、送信尖頭電力を600 Wとした背景には、船舶用X帯レーダに義務付けられているSART⁷(捜索救命用レーダトランスポンダ)への対応要件がある。



(1) 6ft空中線 NKE-1696-6



(2) 9ft空中線 NKE-1696-9

図1 空中線の外観

Fig.1 Appearance of scanner unit

表1 X帯固体化レーダの空中線の仕様

Table 1 Scanner unit specification of X-band solid-state radar

項目	仕様
電波型式	P0N / Q0N
送信尖頭電力	600 W
周波数	P0N: 9410 MHz, Q0N: 9435/9440 MHz
パルス幅	P0N: 1.2 μ sec以下, Q0N: 9.2 μ sec以下
繰返し周波数	660~1700 Hz

表1に示すとおり、X帯固体化レーダが用いる信号(電波)の型式はP0NおよびQ0Nで、両者を交互に送受信することにより物標を探知する。近距離にある物標の探知にはP0N型式の信号を用い、中遠距離にある物標の探知にはQ0N型式の信号を用いて処理制御を行う。P0NおよびQ0Nの両型式の信号の送受信タイミングの例を図2に、またレーダ画面上の探知範囲イメージを図3に示す。

⁷ SART (Search And Rescue Transponder): 捜索救助用レーダトランスポンダ

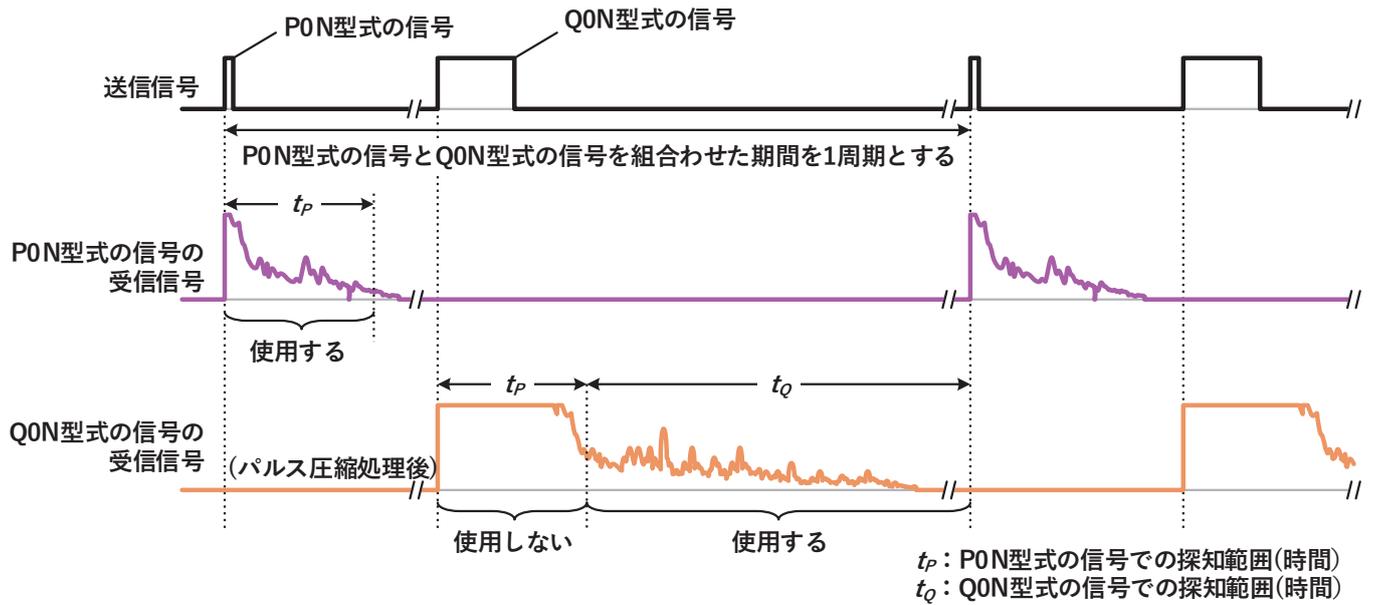


図2 パルス信号 (PON型式およびQON型式の信号) の送受信タイミング

Fig.2 Transmit and receive timing of pulse signals (type of emission: PON and QON)

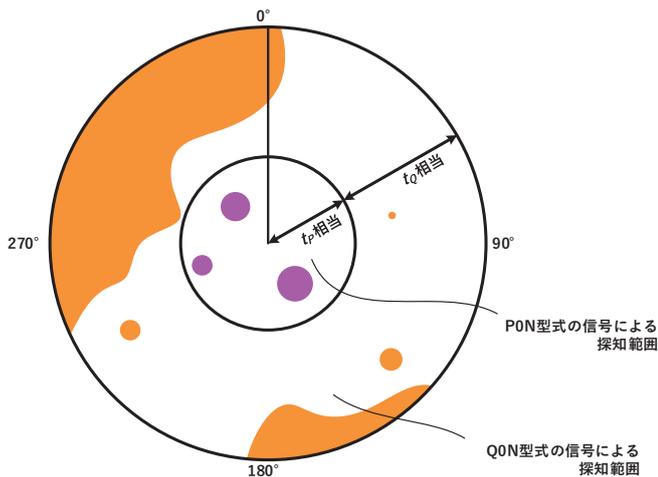


図3 レーダ画面に表示される探知範囲イメージ

Fig.3 Image of detection range displayed on radar screen

5. 製品化設計

船舶用X帯固体化レーダの空中線内部構成を図4に示す。空中線はアンテナときょう体で構成され、きょう体内には電力増幅回路、送受信回路、信号処理回路、電源インタフェース回路、アンテナ回転駆動部（モータ、モータドライバ）などが実装される。

信号処理回路により生成された中間周波数（IF⁸）の送信信号は、送受信回路においてX帯の周波数（RF⁹）に変換された後、電力増幅回路で尖頭電力600 Wに増幅され、送受切替器（サーキュレータ）、ロータリージョイントを経由して、アンテナから放射される。

物標で反射し、アンテナに到達した受信信号は送受信回路で中間周波数に変換され、信号処理回路でパルス圧縮を始めとする信号処理が施された後、映像信号として指示機へ出力される。

アンテナは漁船および内航船・ワークボート向けのレーダ装置（JMR-5400シリーズ）と同じ薄型タイプを採用し、回転負荷を軽減させることにより100ノット（=51.5 m/s）の強風下においても安定した動作を保証するとともに、回転に必要な電力（最大瞬時値）を従来の70%以下に低減させている。

⁸ IF (Intermediate Frequency) : 中間周波数

⁹ RF (Radio Frequency) : 無線周波数

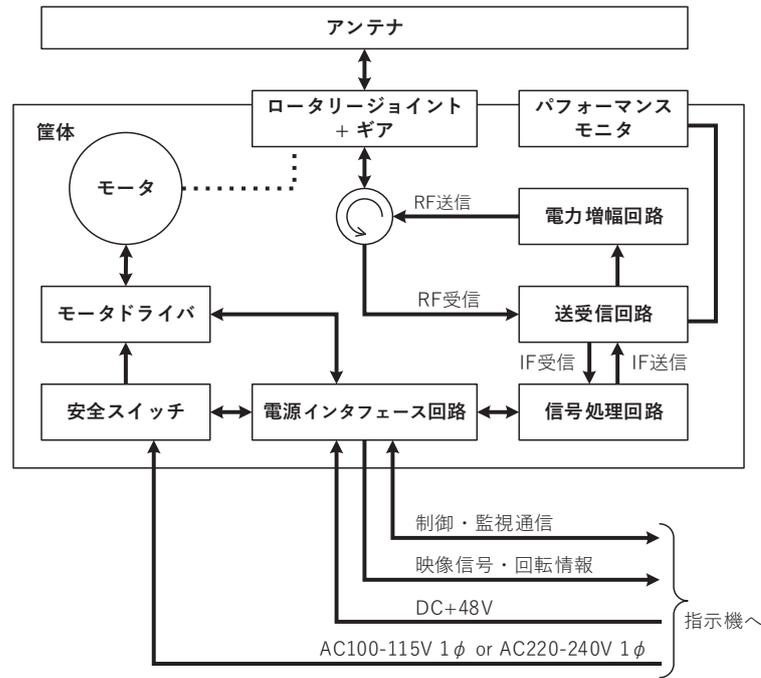


図4 空中線の内部構成
Fig.4 Internal configuration of scanner unit

6. 信号処理回路

信号処理回路は、指示機との通信、送信信号の生成、受信処理、および空中線内部の制御と監視を行う。

Q0N型式の信号に対する受信処理の一部として実行されるパルス圧縮処理は、本回路に記憶させた「送信信号ごとの受信処理データ」と受信信号との相関処理を行うもので、固体化レーダシステムの要であるが、処理後に生じるタイムサイドローブを抑圧することが探知性能と映像品質を実現するうえで不可欠である。タイムサイドローブを抑圧するためには、P0N型式の信号による探知範囲を広げてQ0N型式の信号による探知開始点までの距離を延ばし、物標にお

ける反射信号レベルを下げる必要がある。ここで、反射信号レベルが小さい物標が探知不能となる事象を回避するため、Q0N型式の信号による探知開始点までの距離の適正化が必要となる。

本回路では、窓関数を用いた信号処理によりタイムサイドローブの抑圧レベルを高めた。タイムサイドローブ抑圧処理適用有無の各々の状態におけるパルス圧縮処理後の信号の様子を図5に、レーダ画面上に表示される偽像の様子を図6に示す。なお、信号に歪が生じると、パルス圧縮における相関処理の結果、タイムサイドローブが増加するため、回路設計において信号の歪を小さくする必要がある。

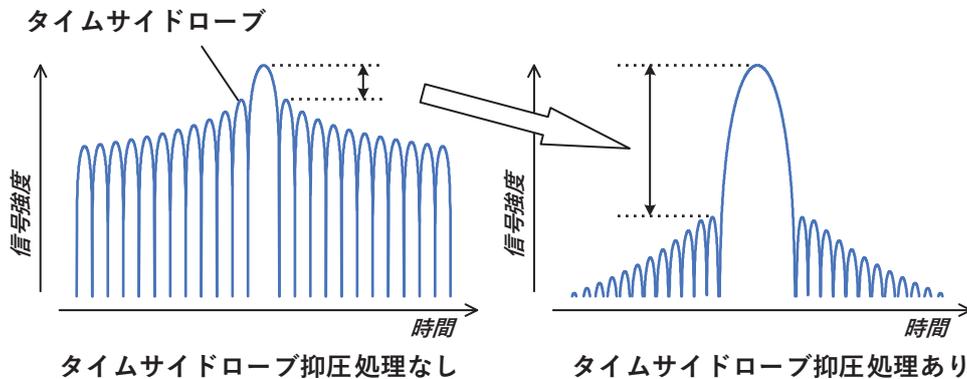
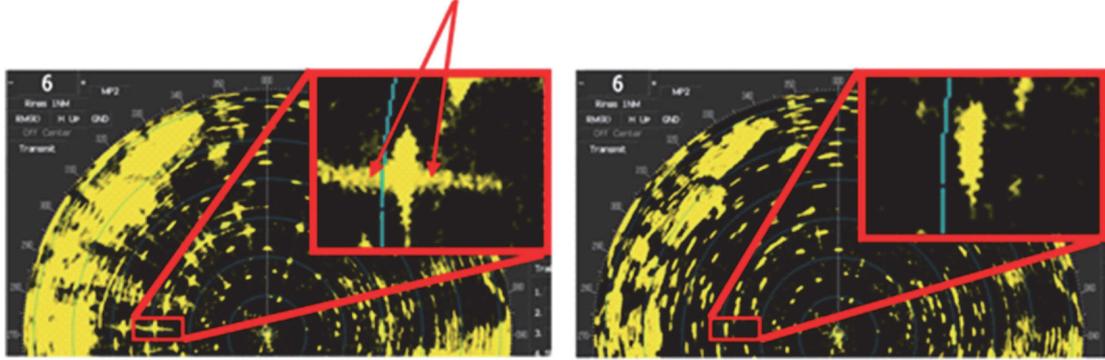


図5 タイムサイドローブ抑圧処理適用有無の各々の状態におけるパルス圧縮処理後の信号
Fig.5 Signal after pulse compression processing in each state with and without time sidelobe suppression processing applied

タイムサイドローブ (偽像)



タイムサイドローブ抑圧処理なし

タイムサイドローブ抑圧処理あり

図6 タイムサイドローブ抑圧処理適用有無の各々の状態においてレーダ画面上に表示される偽像の表示例

Fig.6 Display example of false echoes displayed on the radar screen in each state with and without time sidelobe suppression processing applied

さらに、本回路では、位相情報を用いた相関処理、レーダ干渉除去処理などを実行する。

本回路に採用するハードウェアは、既存のS帯固体化レーダに採用するものと共通化しているが、ソフトウェアやメモリに記憶するデータはX帯にあわせ調整している。信号処理回路の外観を図7に示す。本回路の基板の寸法はA5用紙大で、小型部品の採用と部品配置の工夫により小型化を図っている。

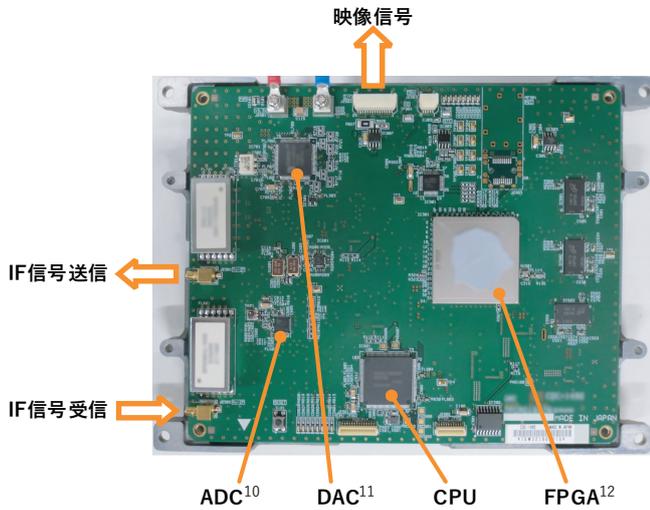


図7 信号処理回路の外観

Fig.7 Appearance of signal processor circuit

7. 送受信回路

送受信回路はダブルスーパーヘテロダイン方式を採用する。本回路において、送信信号は中間周波数からX帯の周波数へ、また受信信号はX帯の周波数から中間周波数へそれぞれ変換する。

受信系には、受信信号レベルが過大となった時の飽和によるタイムサイドローブの劣化を回避するSTC¹³ (感度時間調整) 機能を実装し、ダイナミックレンジを高めた。送受信回路の外観を図8に示す。

本送受信回路は電力増幅回路と一体化させ、両回路を一枚の基板で構成することも可能だが、新たに開発したX帯固体化レーダにおいては、電力増幅回路の放熱特性およびメンテナンス性を向上させるため、送受信回路と電力増幅回路を分離させた。

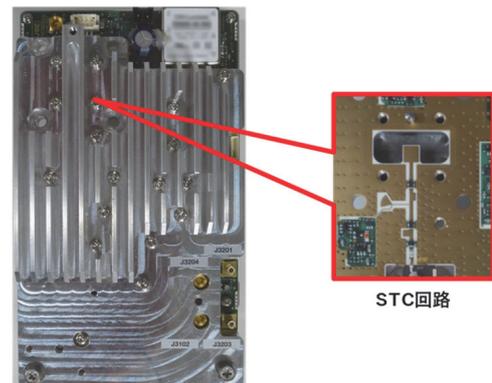


図8 送受信回路の外観

Fig.8 Appearance of TRX circuit

¹⁰ ADC (Analog to Digital Converter) : A/D変換器

¹¹ DAC (Digital to Analog Converter) : D/A変換器

¹² FPGA (Field Programmable Gate Array) : 設計者が構成を設定できる集積回路

¹³ STC (Sensitivity Time Control) : 感度時間調整

8. 電力増幅回路

船舶用X帯レーダの機能要件として義務化されているSART対応を実現するため、GaN HEMT半導体電力増幅素子を多段かつ並列で使用することにより600 Wの送信尖頭電力を実現した。

本回路に採用したGaN HEMT半導体電力増幅素子が高価であることにより、設計におけるコスト低減が課題とされたが、素子の使用数を最適化し、周辺回路の見直しを図ることにより本課題を克服している。電力増幅回路の外観を図9に示す。

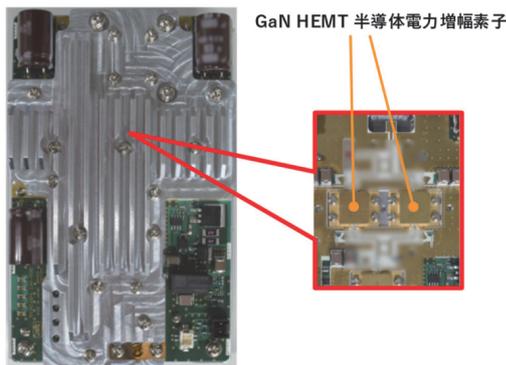
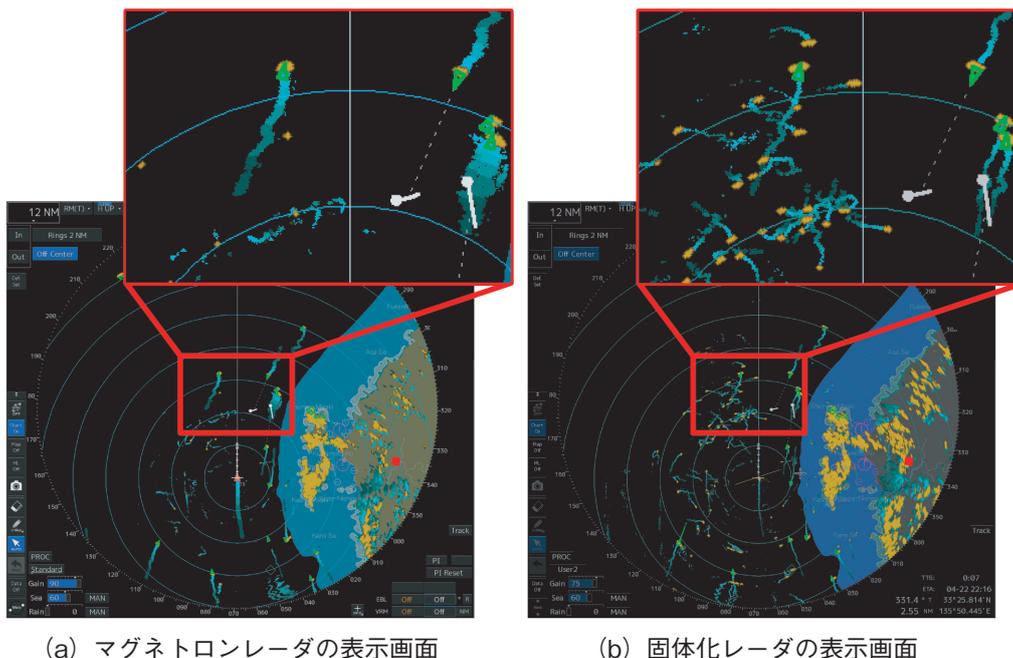


図9 電力増幅回路の外観

Fig.9 Appearance of power amplifier circuit

9. きょう体

きょう体は既存のX帯マグネトロンレーダの空中線に採用しているものと共通化して信頼性を継承するとともに、既存機種との装備互換性を考慮している。



(a) マグネトロンレーダの表示画面

(b) 固体化レーダの表示画面

図10 探知能力評価実験の結果 (マグネトロンレーダとの比較)

Fig.10 Results of detection capability evaluation experiment (comparison with magnetron radar)

きょう体の構造設計においては、船用機器に求められる耐振性能のみならず放熱特性についても十分に考慮している。放熱フィンを一体化した新開発のシャシを採用し、回路の動作による発熱をきょう体へ円滑に伝導させる構造とすることで放熱効率を高め、きょう体内の温度上昇を抑えている。

10. レーダ性能評価実験

新たに開発したX帯固体化レーダを、比較対象とするX帯マグネトロンレーダ (送信尖頭電力25 kW) と共に大型貨物船 (全長約180 m) に設置し、日本近海の航路において探知能力の評価実験を行った。

評価実験結果を示す両レーダの画面を図10に示す。画面には、AIS¹⁴シンボル、物標航跡、および海岸線の地形が重畳表示されている。

図において赤色の破線で囲んだ海岸線の地形は、いずれのレーダにおいても明瞭に表示されている。また、AISシンボル (緑色の△マーク) で示されるAIS搭載船 (大型船舶) の表示の明瞭度についても、両レーダ間で優劣は認められない。

注目すべきは、AISシンボルが重畳表示されていないAIS非搭載の小型船の探知能力において、固体化レーダがマグネトロンレーダよりも優れていた点である。本評価実験では、小さな物標に対しては、マグネトロンレーダより固体化レーダの方が数多く探知され、また航跡表示も明瞭であることを確認した。固体化レーダはマグネトロンレーダと比べ送信尖頭電力は小さいが、小さな物標に対する優れた探知性能を発揮することが評価実験において示された。

¹⁴ AIS (Automatic Identification System) : 船舶自動識別装置

11. あとがき

当社が培ってきたX帯固体化レーダ技術を生かし、また近年の半導体デバイスに係る技術的な進歩も踏まえて、新たに民生向けの船舶用X帯固体化レーダを開発した。本開発により、当社は既存のマグネトロンレーダに加え固体化レーダの製品群を拡充し、船用レーダに対する市場からの幅広い要求に柔軟に応える体制を築いた。固体化レーダがマグネトロンレーダと比べ維持費を低く抑えることができる点は既知であるが、本開発において実施した評価実験により、固体化レーダがマグネトロンレーダと比べ小さな物標（漁船や浮標など）の探知性能が優れていることが新たに確認され、この長所が船舶の安全航行支援に貢献することは論をまたない。

また、本レーダは、現在研究が進められている船舶の自律航行の実現に向けたキーセンサとしても重要な役割を担うことが大いに期待される。