

電波環境適応レーダーの研究開発

Research and Development of Knowledge-Based Interference Rejection Radars

時枝 幸伸 菅野 真行 富木 洋一 菅原 博樹
Yukinobu Tokieda Masayuki Sugano Yoichi Tomiki Hiroki Sugawara

要 旨

固体化レーダーが普及し、従来のマグネトロンレーダーから置き換わる過程で、船舶レーダーによるレーダー干渉が厳しさを増すことが懸念される。特に、過密海域では固体化レーダーの干渉が映像に重なり合い、従来の信号処理では干渉を除去できなくなる。その問題を解決するため、電子走査アンテナによる干渉抑圧と、レーダー自ら周囲の干渉状況（電波環境）に適応して自動的に信号処理を最適化する技術を開発した。信号処理の最適化は、多数のレーダー干渉事例のデータベースに基づき、多種の信号処理を組み合わせることで実現する。当社は、本研究開発で試作したレーダーにおいて、疑似データ評価とフィールド実験によって従来方式の7倍を超える干渉除去性能が達成できることを確認した。

Abstract

Radar interference will be a critical problem against marine radars in the future when solid-state radars have replaced conventional magnetron radars. Particularly, in an important marine trade route, interferences from hundreds of solid-state radars will overlap so heavily that the conventional interference rejection processing performs inadequately. For countermeasures against such tough interference circumstances, JRC has researched and developed a novel radar manipulating the interference rejection algorithm optimized for the circumstances, as well as suppressing interference with an electronic scanning antenna. The optimized algorithm is the combination of plural interference rejection functions selected in accordance with the database of variation of interference examples. With the novel techniques built in, JRC has developed a knowledge-based interference rejection radar; consequently, through pseudo-interference evaluations and field experiments, the radar shows the performance exceeding seven times the capability of conventional radars.

1. まえがき

船舶レーダーは、固体素子の安定した発振によって狭帯域化が可能⁽¹⁾なため、従来のマグネトロンレーダーから固体化レーダーへの移行が進みつつある。しかし、固体化レーダーは感度を確保するため、幅の長いパルスを送信するので他船のレーダーに干渉を与えやすい欠点があり、船舶レーダーが固体化レーダーに置き換わった将来、多数の船舶が航行する過密海域では他の船舶レーダーに起因する干渉の深刻化が懸念される。当社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、将来のレーダー干渉問題を解決する技術の研究開発に取り組んだ。将来の過密海域でのレーダー干渉を想定し、半径5海里以内に400台の干渉源が存在する状況で干渉除去できることを本研究開発の到達目標とした。なお、本研究では干渉量を数値表現するため、干渉占有率という値を定義した。干渉占有率は、全画面を占める干渉の面積比である。なお、到達目標とする状況での干渉占有率は22%である。この値は、既存の干渉除去処理で除去可能な干渉占有率の約7倍である。

本稿では、研究開発の成果として獲得した電波環境適応レーダーの技術と、計算機シミュレーションやフィールド実験によって検証できた効果を報告する。

2. 電波環境適応レーダー

電波環境適応レーダーは、周囲の電波環境に応じて信号処理を組み替えることによって、操作員が映像調整をしなくても最適なレーダー映像が生成できるレーダーである。本レーダーは、将来の過密海域で直面する厳しいレーダー干渉状況においてレーダー探知性能を損なうことなく、干渉を除去した鮮明なレーダー映像を出力できる。本節では、当社が試作した電波環境適応レーダーのシステムの概要と仕様を説明する。

2.1 システム概要

電波環境適応レーダーのシステムは、図1に示すように空中線装置と信号処理装置によって構成される。

空中線装置としては、Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) レーダー方式によるアンテナを採用した。MIMO レーダー方式のアンテナは、実在の素子数が少ないが、送信と受信のアンテナ素子の位置関係を利用して素子数が多い仮想アレイ⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾を形成することで細いビームを形成できる電子走査アンテナである。

信号処理装置は、レーダー送信制御と信号処理を実行する装置である。レーダーの送信制御は、電波環境適応処理によって決定され、送信周波数や送信タイミングが制御さ

れる。一方、信号処理装置にはレーダー映像を生成する通常の信号処理だけでなく、電波環境適応処理が実装されている。電波環境適応処理は、周囲の電波環境に基づき、干渉除去に最適な信号処理の構成、送信周波数、送信タイミングを決定する。

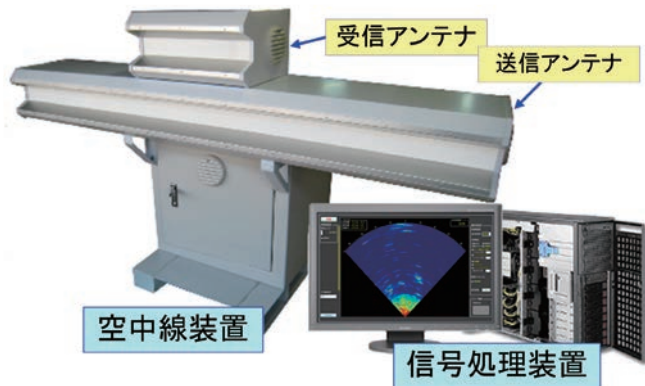


図1 電波環境適応レーダーの構成

Fig.1 Configuration of the Knowledge-Based Interference Rejection Radar

2.2 システム仕様

電波環境適応レーダーの仕様を表1に示す。本レーダーは9,320MHzから9,480MHzの周波数帯を8チャンネルに分割し、電波環境に応じて使用チャンネルを選択することによって干渉の受信を低減する。アンテナは送信と受信がそれぞれ16素子しかないが、MIMOレーダー技術によって113素子の仮想アレイを形成し、9GHz帯レーダーの6フィートアンテナと同等の角度分解能を得る。さらに、電子走査アンテナを採用しているため、アンテナは回転しないながらも、±45度の範囲でレーダー映像を生成できる。また、レーダー映像は現行の船舶レーダーの40%に相当する1.0秒という短い周期で更新される。

表1 電波環境適応レーダーの仕様

Table 1 Main Specification of the Knowledge-Based Interference Rejection Radar

項目	仕様
周波数	9,320 - 9,480 MHz (8チャンネル)
表示距離	0.125 - 24海里
アンテナ長	送信2,100 mm 受信500 mm
アンテナ素子数	送信16素子 受信16素子
走査範囲	±45度
スキャン時間	1.0秒
レーダー方式	MIMOレーダー (113素子 仮想アレイ)
干渉除去処理	データベースに基づく電波環境適応処理

3. 電波環境適応処理

電波環境適応処理は、電波環境を認識し、その結果に基づいて干渉除去を効果的に実行するためにレーダーを制御する一連の信号処理である。

電波環境適応レーダーは図2に示すように、レーダー探知期間と干渉監視期間の2種類の時間帯を設けて信号処理を実行している。レーダー探知期間とは、レーダー探知処理、すなわち、自身が送信したレーダー信号の反射波を信号処理する時間帯である。干渉監視期間は、レーダー信号を送信せず受信のみを実行し、レーダー干渉を監視する時間帯である。

干渉監視期間における受信信号は、電波環境適応制御のために使用される。電波環境適応制御は図2に示すように、特徴量抽出、信号処理モデル決定、環境適応制御で構成される。特徴量抽出は、干渉監視期間の受信信号からレーダー干渉の特徴を抽出する。レーダー干渉の特徴は、干渉量、干渉タイミング、干渉パルス幅といった3種類の数値(特徴量)として抽出される。干渉量は周囲の干渉の多さを表し、干渉タイミングは自身の送信タイミングとの同期性を表す。干渉パルス幅は干渉源となるレーダーのパルス幅に対応する特徴量である。

抽出された特徴量は信号処理モデル決定において、周囲環境に適した信号処理の組み合わせ(信号処理モデル)を決定するために使用される。信号処理モデルは、あらかじめ生成された決定規則を用いて決定される。その決定規則は、第3.2節で説明するように、多数のレーダー干渉の事例を蓄積した事例データベースから導き出される。

決定された信号処理モデルは環境適応制御において、信号処理や空中線装置に対する制御内容に変換され、その制御内容にしたがい、送信制御を含むレーダー制御が実行される。

この一連の処理によって、レーダーが自ら電波環境に適応し、従来の干渉除去で実現できない優れた干渉除去性能が実現できる。

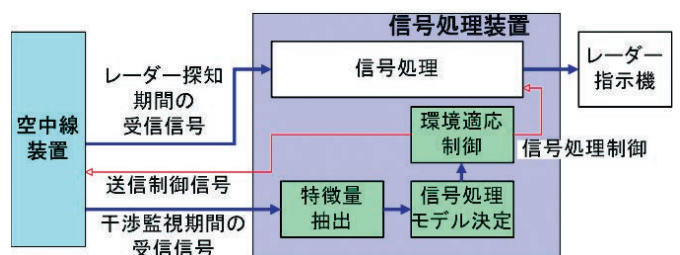


図2 電波環境適応処理のデータフロー

Fig.2 Data flow diagram of Knowledge-Based Interference Rejection

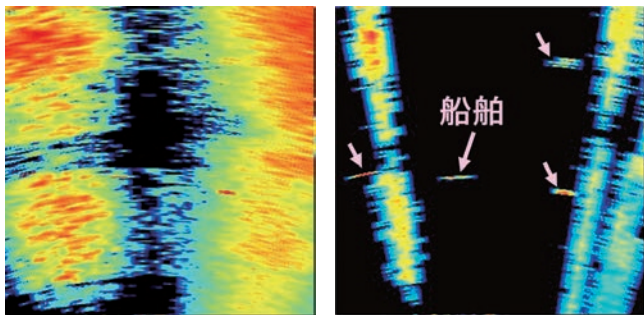
3.1 干渉除去処理

本レーダーは優れた干渉除去性能を実現するため、多数の干渉除去処理を組み合わせ、最適な信号処理を構成する。組み合わせる干渉除去処理は、空間情報、時間情報、周波数情報を用いた干渉除去の三つに分類される。干渉除去の

各分類について説明する。

3.1.1 空間情報を用いた干渉除去

空間情報を用いた干渉除去として、ヌルステアリングを用いて、干渉の到来方向の利得をゼロにする。その手法として、方向拘束付き電力最小化法 (DCMP) を用いた。DCMPは、レーダー観測方位以外から受信波が到来するとき、その方位の利得をゼロにすることで干渉を抑圧する。図3に示すように、フィールド実験で、航行する船舶によるレーダー干渉 (図3 (a)) がヌルステアリングによって除去され、干渉に埋もれていた船舶が見えるようになっている (図3 (b))。



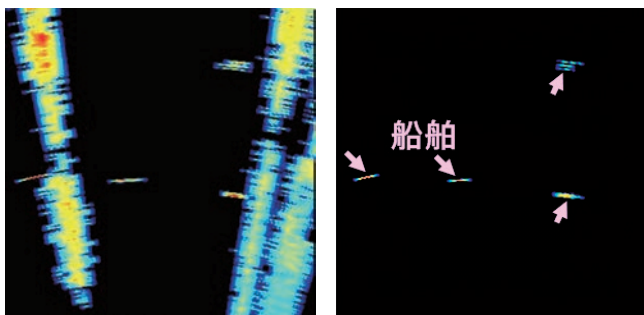
(a) 処理前 (b) 処理後

図3 ヌルステアリングの処理効果

Fig.3 Interference Rejection by NULL-Steering

3.1.2 時間情報を用いた干渉除去

時間情報を用いた干渉除去としてランクフィルタが代表的である。ランクフィルタは、干渉の時間相関性が小さいことを利用した信号処理であり、現行レーダーでも使用されている。電子走査アンテナを用いたシステムでは回転式アンテナのシステムよりもランクフィルタの性能が高くなる。その理由は、アンテナが回転しないため同一物標に長時間にわたり信号照射できるため、時間相関性の判定性能が向上するからである。フィールド実験において、ヌルステアリングで除去できなかった信号 (図4 (a)) を除去することが確認できている (図4 (b))。



(a) 処理前 (b) 処理後

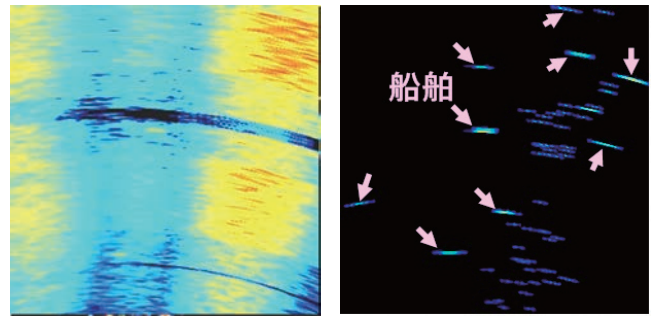
図4 ランクフィルタの処理効果

Fig.4 Interference Rejection by the Rank Filter

3.1.3 周波数情報を用いた干渉除去

干渉が存在する周波数がわかっているならば、その周波数か

ら回避するのが干渉回避の効果的な手段である。本レーダーでは9GHz帯に割り当てられた船舶レーダー用の帯域を、一例として、20MHz幅の8チャンネルに分割した。電波環境適応レーダーはすべての周波数チャンネルを監視し、レーダーの使用チャンネルを干渉が少ない周波数チャンネルに切り替えることによって干渉を回避する。切り替えた先の周波数チャンネルを使用するレーダーが十分に少なければ、図5に示すようにレーダー干渉が良好に回避できる。



(a) 周波数選択なし (b) 周波数選択あり

図5 周波数チャンネル選択の効果

Fig.5 Interference Rejection by the Frequency Selection

3.2 電波環境適応処理

電波環境適応処理は、前節で説明した処理を含む多数の干渉除去処理を、電波環境に対して最適に組み合わせ、レーダーを制御する一連の処理である。

干渉除去処理の最適な組み合わせを決定するには、決定木と呼ばれる二分木構造の判定規則を用いている。決定木には、レーダーの運用中に干渉監視によって得られた干渉量、干渉タイミング、干渉パルス幅といった特徴量が入力され、図6に示すように決定木にしたがって判定が進み、モデルAからモデルJの中から最適な信号処理モデルが決定される。信号処理モデルとは、空間、時間、周波数の情報を用いた複数の干渉除去処理の組み合わせで定義された信号処理構造である。なお、本レーダーでは干渉除去処理8種類を用意し、それらを組み合わせた信号処理モデル10種類を定義した。

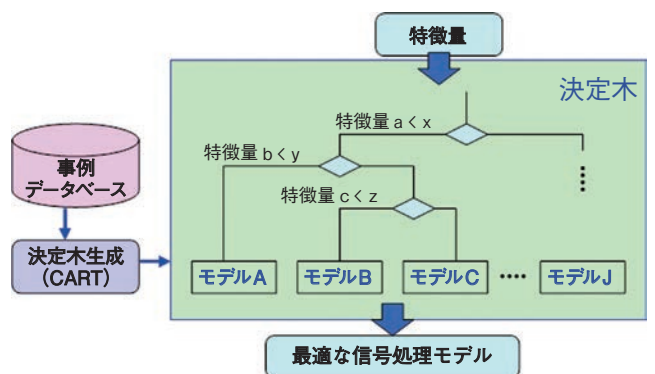


図6 決定木による信号処理モデルの決定

Fig.6 Selection of Signal Processing Model through the Decision Tree

決定木は、特徴量と信号処理モデルを数多く蓄積した事

例データベースに基づいて生成される。事例データベースは、電波環境の特徴と、その電波環境に対応する最適な信号処理を集めたデータベースと考えればよい。事例データベースの情報は、Classification And Regression Tree (CART) 法⁵⁾ と呼ばれるアルゴリズムによって評価され、その評価結果から決定木が生成される。CART法は、情報エントロピーが最小になるように判定基準となる特徴量と判定しきい値を決定する手法である。その操作を再帰的に繰り返すことによって、データ分類に利用可能な、階層が深い二分木を生成できる。情報エントロピーが最小化されているため、生成した二分木を用いてデータを適切に分類できる電波環境適応レーダーは、決定木にしたがって電波環境を分類し、その分類に一意的に対応したレーダー制御を実行すると言ってもよい。

4. 検証実験

検証実験として、東京湾を臨む環境でのフィールド評価と、疑似信号を用いた評価を実施した。フィールド評価では船舶が多く航行して変動する環境で、環境適応制御の追従性を評価した。疑似信号による評価では、厳しい干渉条件を与え、電波環境適応レーダーの性能限界を評価するために実施した。

4.1 フィールド評価

フィールド評価では千葉県南房総市の施設にて東京湾を航行する船舶を観測した(図7)。この評価実験では、空中線装置としてMIMOレーダー方式だけでなく、回転式アンテナを用いたシステムも対象とした。以降、前者をMIMO方式システム、後者を回転式システムと呼ぶ。なお、回転式システムには、現行の船舶用レーダーに簡易的な空間処理であるサイドローブキャンセラ処理と、周波数選択機能を含む電波環境適応処理ができる改造を施した。

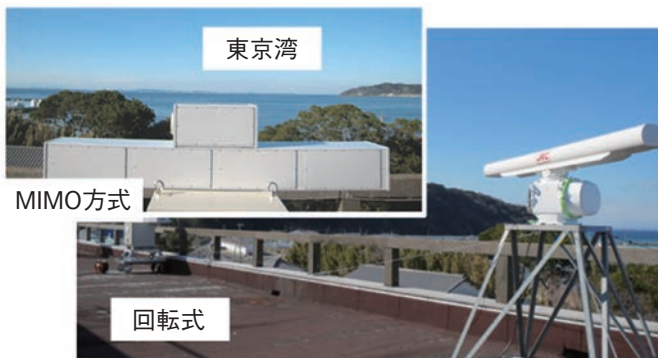


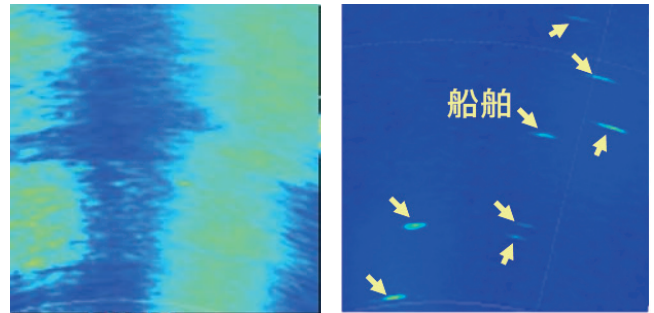
図7 レーダーアンテナ設置状況

Fig.7 Installed Radar Antennas at the Experimental Site

4.1.1 MIMO方式システム

MIMO方式システムの環境適応結果の例を図8に示す。図8 (a) は環境適応前の映像であり、東京湾を航行する多数の船舶からのレーダー干渉で埋め尽くされ、航行する船舶が見えない。電波環境適応処理を動作させると、図8 (b)

のように、使用周波数が干渉の少ないチャンネルに切り替わり、適切な信号処理モデルが決定され、その結果、干渉が消え、干渉に埋もれていた船舶が見えるようになった。



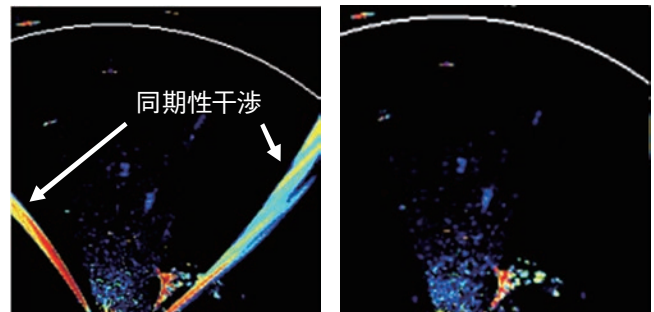
(a) 電波環境適応前 (b) 電波環境適応後

図8 MIMO方式システムの環境適応結果

Fig.8 Optimized Interference Rejection on the MIMO Radar System

4.1.2 回転式システム

回転式システムについても、MIMO方式システムと同様に電波環境適応の効果を検証できた。図9 (a) に映る強烈なV字型のエコーは自身のレーダーと同期した干渉(同期性干渉)である。電波環境適応を動作させると、レーダーは同期性干渉の存在を見破り、自動的に送信タイミングを変化させる。送信タイミングの変化によって、干渉の同期性がなくなり、図9 (b) に示すように干渉を除去できる。



(a) 電波環境適応前 (b) 電波環境適応後

図9 回転式システムの環境適応結果

Fig.9 Optimized Interference Rejection on the Rotating Antenna System

4.2 疑似信号による評価

本研究開発の到達目標である干渉除去性能の達成度を評価するため、周波数偏移幅16MHz、パルス幅10マイクロ秒の疑似信号をレーダシミュレータで生成し、レーダー干渉としてレーダーに入力した。

性能評価として、本研究開発の到達目標となる条件(半径5海里以内に400台以上の干渉源が存在する)で、電波環境適応によって干渉除去処理が成功することを確認した。なお、干渉除去の成功は、干渉除去処理後の干渉占有率が0.04%未満になることで判定した。このような評価を、MIMO方式と回転式のシステムの双方について実施した(図10)。さらに、電波環境適応処理を実行するにあたり、レー

レーダー探知重視と干渉除去重視の制約条件を与えた。レーダー探知重視は、レーダーの探知性能を損なわないように電波環境適応する動作条件であり、干渉除去重視は、干渉を消すためにレーダー感度劣化を6dBまで許容して電波環境適応する動作条件である。

MIMO方式システムの場合、干渉源の数を500台以内で増加させても干渉占有率の増加がほとんど認められなかった。干渉源400台の状況で、レーダー探知重視と干渉除去重視の双方で干渉占有率がほぼゼロであり、目標を十分に達成している。レーダー探知重視の場合、干渉源が500台程度になっても、干渉占有率は0.01%程度にとどまっている。当社のシミュレーションによると、従来の干渉除去では55台程度が除去できる限界だったので、この評価結果は従来処理の7倍を超える性能である。

回転式システムでは、MIMO方式に比べ、干渉除去能力が劣る。レーダー探知重視の電波環境適応では目標値の60%にあたる干渉源250台を超えると干渉除去が失敗している。これに対し、干渉除去重視で電波環境適応すれば、干渉源400台の状況で干渉占有率が0.01%程度となり、目標を達成できた。

特許出願: 13件

参考文献

- (1) 須藤正則, 菅原博樹, 沢柳雅哉, 時枝幸伸, “X帯船舶用固体化レーダーの開発,” 日本無線技報, No.59, pp.42-46, 2010.
- (2) 菅野真行, 高山卓也, 時枝幸伸, 菅原博樹, “仮想アレイアンテナを用いたレーダーの研究開発,” 日本無線技報, No.64, pp.27-31, 2013.
- (3) T. Takayama, Y. Tokieda, H. Sugawara, “MIMO Imaging Radar with Enhanced Range-Azimuth Sidelobe Suppression,” Proc. IET Int. Radar Conf., 2012.
- (4) Jian Li, Petre Stoica, “MIMO Radar Signal Processing,” John Wiley & Sons Inc., ISBN 978-0-470-17898-0, pp.73-76, 2009.
- (5) Stéphane Tufféy, “Data Mining and Statistic for Decision Making,” John Wiley & Sons Ltd., ISBN 978-0-470-68829-8, pp.321-323, 2011.

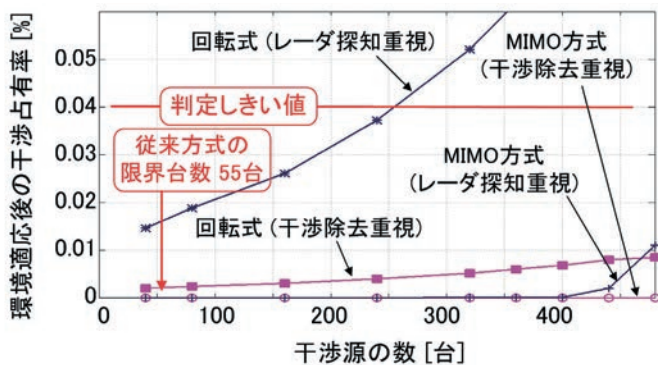


図10 環境適応による干渉占有率

Fig.10 Interference Abundance Resulted from Interference Rejection

用語一覧

CART: Classification And Regression Tree
(再帰的に分類木を生成するアルゴリズム)

DCMP: Directional Constrained Minimum Power
(方向拘束付き最小電力化法)

MIMO: Multiple-Input Multiple-Output
(仮想アレイを利用した電子走査アンテナをもつレーダー)

5. あとがき

干渉事例を蓄積したデータベースに基づき、周囲の電波環境に適応することによって、従来の干渉除去処理の対応限界である干渉占有率の約7倍の干渉を除去することに成功した。電波環境適応処理は、データベースによる最適化制御のみならず回転式アンテナを用いる従来の船舶用レーダーにも適用することが可能であるが、MIMOレーダーのような電子走査アンテナを用いることでさらに優れた干渉除去が得られることが実験によって実証できた。本研究開発によって獲得した電波環境適応の技術を実用化することによって、船舶レーダーの固体化への移行がさらに加速することが期待できる。

電波環境適応レーダーの発展形として、干渉対策だけでなく、海面反射の抑圧など探知性能の向上にも環境適応の技術を利用することによって「コグニティブレーダー」と呼ばれる新たなレーダーの実現も期待できる。