小型 FRP 船レーダ映像の 2 次元分布の解析

水井 真治*・山田 多津人**・月坂 明広***・中川 義教****

Analysis of the Two Dimensionally Distributed Radar Echoes of the Small FRP Boat

Shinji MIZUI, Tatsuto YAMADA, Akihiro TSUKISAKA and Yoshinori NAKAGAWA

Abstract

The authors developed a system for sampling the radar echo signals in high frequencies by A/D conversion of the receiving signals. Using this system, we analyzed the two-dimensional distribution of radar echoes of a point target such as a small FRP boat and report the following results.

1. The size of the images by the radial-scanning (azimuth and distance) becomes larger than the theoretical value as the radar sensitivity goes up. The image size by sensitivity decreases characteristically to the change of distance.
2. In high sensitivity, the image by the radial-scanning is as twice large as the theoretical image determined so far, at a close distance around 1,000 meters.
3. The width to length ratio of the image size on the radar screen is almost identical to the value evaluated as the Echo point of the point target.

Keywords : Radar, Radar image, Radar image of the small boat, Radar resolution

キーワード: レーダ, レーダ映像, 小型船舶の映像, レーダ分解能

1. はじめに

AIS (クラス A) は、国際航海に従事する全ての旅客船と 300 総トン以上の旅客船以外の船舶、国際航海以外の 500 総トン以上の船舶への設置が義務付けられている。一方、簡易型 AIS (クラス B) が登場し、クラス A 対象船外の小型船舶に対しても AIS が搭載される環境が整いつつある。しかしながら、この簡易型 AIS がプレジャーボートや漁船等、5 トン未満の小型 FRP 船等にまで広く搭載される状況になるためには、解決すべき課題も多いことから、小型 FRP 船の動静把握には、目視以外では、レーダの役割はこれまで同様に非常に大きいものがあると考えられる。小型 FRP 船等の小物標の探知について、レーダ反射信号強度やレーダ反射断面積

(Radar Cross Section、以下、「RCS」という) に着目した探知特性については、著者らも含めて様々な研究者により検討されている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、こうした小型 FRP 船は、複数隻が近接して漂泊する場合や他の物標と映像が重なる場合があり、動静把握の前段階としての小物標の探知と言う観点からは、レーダ画面での映像の分離表示と認識も重要な事項である。一般的には自船レーダの距離分解能と方位分解能が分離表示の一つの目安となるものの、レーダ受信感度や距離との関係において、実際の小型 FRP 船のレーダ映像が PPI 面上にどの程度の範囲で分布するのかという定量的な情報は殆ど無い。船舶運航者がこの様なレーダ映像を正確に判読するためには、一定の実務経験を積むことによる技能の習

* 正会員 広島商船高等専門学校 (〒725-0231 豊田郡大崎上島町東野 4272-1) mizui@hiroshima-cmt.ac.jp

** 正会員 海上保安大学校 (〒737-8512 広島県呉市若葉町 5-1) yamada@jcg.ac.jp

*** 正会員 (株) 中電技術コンサルタント (〒734-8510 広島市南区出汐 2-3-30) tukisaka@cecnet.co.jp

**** 非会員 (株) シーメック (〒730-0004 広島市中区東白島町 20-1 古葉ビル 202) seamec@biglobe.ne.jp

得に依っていると考えられる。

著者らは、レーダ反射信号を高分解能（12 ビットのデジタル値、サンプリング周波数が 100MHz で A/D 変換する）で取得することが可能なレーダ画像収録システムの開発を行った。このシステムにより、実海域において小型 FRP 船のレーダ映像の取得実験を実施し、小型 FRP 船映像の 2 次元分布について定量的な解析を行った。この結果、これまで船舶運航者が実務経験を積むことで習得していたと考えられるレーダ感度や探知距離と小物標映像の判読に関連する小型船映像の分布について、新たな知見が得られたので報告を行う。

2. 開発したシステムの概要

開発したシステムのブロック図を Fig.1 に示す。本システムは、船舶用のレーダ信号が信号変換器を通り、レーダ画像変換装置、そして表示用パソコンへと送られ処理される。

信号変換器には検波信号レベル変換器と掃引パルスレベル変換回路があり、検波信号レベル変換器からの出力はレーダ画像変換装置の高速 A/D 変換器、高速バッファメモリ、そして、高速 DIO (Data Input /Output) カードから表示用パソコンへと通される一連の流れを示す。

2.1 開発したハードウェアの特徴

今回開発したシステムとパソコン間のデータ転送には問題があった。レーダ画像変換装置はパソコンに対して 1 画像で最大 40Mbyte の大量のデータを転送する必要がある。可搬性を確保するためにノートパソコンを使用することを前提にしたことから、PCI 拡張基板を挿入することは不可能であった。

本システムの設計思想において、データの取得・保存を確実に実施するために、レーダ 1 送信パルス分のデータを高速メモリに蓄積し、次の送信パルスまでに蓄積データをパソコンに送信する方法を採用した。このためにはパソコンにリアルタイム性が要求されるが、一般的な LAN 接続（100Base）、USB 接続は 40Mbyte の転送に最短でも数秒から数十秒の転送時間が必要である。Windows OS システムに強く依存する LAN、USB データ転送はリアルタイム性に欠けデータの欠損が発生する可能性もあり、リアルタイム高速転送と制御には不向きである。

そこで、本システムでは PCMCIA カードスロットを使用することし DMA 高速転送 DIO カード（インタフェース社製）を採用し高速リアルタイム転送を実現した。すなわち、本システムは開発した画像

変換ボードとパソコンとのリアルタイム高速データ転送を画像変換 BOX 内のバッファメモリ、さらにバッファメモリを搭載した DMA 高速転送 DIO カードと専用の DLL (Dynamic Link Library) により高速データ転送動作を担保した。

従って、本システムの特徴はレーダ信号から分岐入力した受信信号を、12 ビットのデジタル値として A/D 変換し、1 画面のレーダ画像データとして DMA 高速転送 DIO カード経由でパソコンに伝送し、パソコンのハードディスク内に収録・再生できることである。

Fig.1 Block Layout of Developed System

Fig.2 Example of Converted B Scope Image

2.2 開発したソフトウェアの特徴

レーダー回転分のレーダ画像データは、パソコンのメモリに蓄積され、アプリケーションは蓄積したメモリの内容をファイルに保存し、A スコープ、B スコープ、PPI スコープ、グレイスケール、濃淡カラーの各画像を表示できるようにした。また、本機能の中には拡大表示機能を備えている。

B スコープ画面においては、任意の領域を切り出して Excel で処理可能な CSV 形式のデータフォーマットでファイル出力することができる。

Fig.3 Calibration data of radar receiving signal intensity

PPI スコープ画面にて解析したいレーダ画像の確認の後に、例えば Fig.2 に示す B スコープから切り出したいデータ範囲を指定し、その範囲内の 12 ビット A/D 変換デジタルデータを収録できる。

3. 実験概要

本実験に先立ち、レーダ映像の 2 次元分布の検討等に本システムを利用するために、ケーブルロス等を考慮した上で 5dB 刻みのマイクロ波標準信号発生器の出力をレーダ受信部に供給し、出力されるビデオ信号の A/D 変換値を記録することで校正を実施した。この結果、-10dBm～-90dBm の範囲でレーダビデオ信号の A/D 変換値出力には、ほぼ直線性があることを確認した。Fig.3 に当該結果を示す。同図中、縦軸がケーブルロス等を補正済みのマイクロ波標準信号発生器の出力 (dBm) であり、横軸がビデオ信号の 12 ビットの A/D 変換値の出力結果である。なお、本測定で用いたビデオ信号の出力は、GAIN や STC の調整による影響を受けない構成となっている。

実験は平成 22 年 4 月 23 日 (日)、快晴、微風の気象条件で、海上保安大学の前面海域で実施した。Table 1 に船舶検査証書に記載の小型 FRP 船 (海上保安大学の小型艇) の主要目を、また、Table 2 に使用したレーダの主要目を示す。なお、Table 2 中のアンテナ利得 (G) のみ、水平ビーム幅 (θ_H) 及び垂直ビーム幅 (θ_V) から次の略算式³⁾で求めた数値であることから括弧書きで示している。

$$G = \frac{25,000}{\theta_H \times \theta_V} \quad (1)$$

Table 1 Major dimension of a small FRP boat

boat	Gross tonnage	Under 5 tons
	Length over all	5.56m
	Breadth	1.92m
	Depth	0.73m
	Name	M2

Table 2 Major specification of radar

Radar	Height of radar antenna	5m
	Transmission power	10kW
	Transmission frequency	9410MHz±30MHz
	Horizontal beam width	1.2°
	Vertical beam width	22°
	(Antenna gain)	(30dB)
	Pulse length	0.08 μs
	Pulse repetition frequency	2000Hz
	Revolution per minute of antenna	24rpm
	Sampling frequency	100MHz

Fig.4 Observed signal intensity from FRP boat and theoretical value

本システムは、100MHz のサンプリング周波数により、距離方向の分解能は 1.5m を実現し、12 ビットのデジタル値として反射信号強度を測定可能なことから、使用するパルス幅や実験船の大きさ等に対しても、十分な精度・分解能で観測可能である。実験は、海岸付近見晴らしのよい地点に設置したレーダにより、レーダから約 1 海里までの距離を、数ケーブル程度の間隔でアスペクト角が約 90°となるように小型 FRP 船を漂泊させ、全体で 19 個のデータを取得した。Fig.4 に小型 FRP 船からのレーダ反射信号強度の最大値と距離の関係を示す。なお、同図では、RCS を 3 m²、海面上のアンテナ高さを 5m、FRP 船の反射高さを 1m とした時の反射信号強度の

理論値を直線（海面反射の干渉なし）及び曲線（海面反射の干渉あり）で示している。この結果から小型 FRP 船からのレーダ反射信号強度は距離ごとに変動はあるものの一般的な傾向は理論値にほぼ適合している。なお、300m よりも近距離のデータでは約 -30dBm 以上の信号強度を示しているが、Fig.3 において、このレベル以上のデータは、近似直線から僅かではあるが上下の変動も見られることから、データの取扱には注意を要する。

4. 実験結果の検討及び考察

小型 FRP 船からレーダ反射信号の 2 次元分布の表示例を Fig.5 に示す。同図は、横軸に方位角度 (deg)、縦軸に距離 (m) を取り、10dB ごとに濃淡色で信号強度を示している。また、FRP 製小型船の概略の大きさを図中に示している。一般にレーダ映像の 2 次元分布は、レーダの感度を上げれば、弱い信号まで表示することからその分布範囲は大きくなり、逆にレーダの感度を下げれば小さくなる。すなわち、感度（閾値）の変化により映像の分布範囲が変化することは同図からも分かる。一方、映像の分離表示

の目安となる方位分解能や距離分解能は、一般的に、前者が水平ビーム幅による方位の拡大効果、後者がパルス幅による距離の拡大効果による影響で求めることができる。これらのレーダの性能は、近接する二つの物標間距離を対象とする事項であるが、本質的には一つの映像の方位方向及び距離方向への映像の拡大量として評価できる事項でもある。このことから、本研究では一つの小型 FRP 船のレーダ映像 2 次元分布に着目し、レーダの感度変化と距離変化の視点から、方位分解能及び距離分解能に関わる要素と比較検討を行った。また、レーダ感度については、3 の実験概要に示した方法で取得した各データについて、反射信号強度を -70dBm、-60dBm 及び -50dBm の 3 段階の閾値で処理・評価することとした。この理由は、著者らがこれまで実施してきた瀬戸内海の島々を繋ぐ架橋建設時のレーダ偽像調査⁽⁴⁾において、海域条件等によって若干の差異はあるものの操船実務者が使用するレーダ感度の平均値が -60dBm 程度であったことから、一般的なレーダ感度の調整範囲を -50dBm ~ -70dBm と想定したことによる。

Fig.5 Example of observed FRP small boat by B-scope image

4.1 映像の方位方向の分布

実務的な観点から、レーダの方位分解能は画面の輝点の大きさを考慮しなければ、半値幅である水平ビーム幅 (θ_H) で評価することが一般的である⁵⁾。また、一つの映像の方位方向への拡大量として評価する立場においては、実験時の小型 FRP 船をアスペクト角が約 90° となるように漂泊させたことから、船の全長 ($L = 5.56\text{m}$) も考慮する必要がある。すなわち、実務的な観点に限定した時、実測値の比較対象となる映像の方位方向の大きさの理論値 (α 、単位は deg) は、レーダと同船までの距離を D (m) とする時、次式によって表すことができる。

$$\alpha = \theta_H + \sin^{-1}\left(\frac{L}{D}\right) \quad (2)$$

Fig.6 に小型 FRP 船映像データの方位方向の大きさ及び(2)式の結果等を示す。図中、横軸は船までの距離 (m)、縦軸は映像の方位方向の大きさを角度 (deg) で示している。-70dBm の状況 (感度を上げた状態) では、約 1800m よりも近距離では理論値で示した値よりも、殆どの場合で大きな広がりを見せていることが、また、-50dBm の状況 (感度を下げた状態) では、1000m で理論値と同程度の大きさになることが分かる。また、3 段階で切り分けた映像の 2 次元分布の大きさと距離による減少傾向は Fig.6 中に破線で示した近似直線の傾きが約 -0.0017 を示し、決定係数も約 0.8 以上を示すことから、映像の方位方向の分布角度の距離に対する減少傾向に一定の関係が見出せる。

4.2 映像の距離方向の分布

実務的な観点から、レーダの距離分解能は画面の輝点の大きさを考慮しなければ、パルス幅 (τ 、単位は μsec) の半分で評価することが一般的である⁵⁾。また、4.1 と同様に一つの映像の距離方向への拡大量として評価する立場では、小型 FRP 船の実験時の船位状況から船幅 ($B = 1.92\text{m}$) を考慮し、実測値の比較対象となる映像の距離方向の大きさの理論値 (β 、単位は m) は、実務的な観点に限定した時、次式によって表すことができる。

$$\beta = 150 \times \tau + B \quad (3)$$

Fig.7 に小型 FRP 船映像データの距離方向の大きさ及び(3)式の結果を示す。図中、横軸は船までの距離 (m)、縦軸は映像の距離方向の大きさを長さ (m) で示している。4.1 の方位方向の分布と同様に、-70dBm の状況 (レーダ感度を上げた状態) の距離方向の大きさは、概ね 1800m 以内では、理論値よりも大きな値を示しており、-50dBm の状況 (レー

Fig.6 Measured angular size of echoes and bearing discrimination

Fig.7 Measured range size of echoes and range discrimination

ダ感度を下げた状態) では、1000m で理論値と同程度の大きさになることが分かる。また、4.1 と同様に、近似直線の傾きが約 -0.01 を示し、決定係数もほぼ 0.8 を示すことから、距離に対して表示される映像の距離方向の分布が小さくなる傾向に一定の関係を見いだせる。

4.3 映像の 2 次元分布

4.3.1 映像の大きさに関する考察

4.1 及び 4.2 から、レーダ感度を上げた状態 (-70dBm) での映像の方位方向及び距離方向の分布は共に約 1000m で、理論値よりも 2 倍程度の値を示しており、約 1800m で理論値と同程度の値となることが分かる。この様に、特に近距離では感度

が大きい程、理論的な映像の大きさよりも実際のレーダ映像は、方位方向及び距離方向に拡大された映像として表示される傾向が顕著であり、またある程度、感度を下げても（-50dBm）、自船レーダの性能（方位分解能及び距離分解能）を十分に発揮できないことが分かる。この理由としては次の事項が考えられる。

- ① 方位方向の大きさは、水平ビーム幅と船の長さを基準に比較・評価した。しかしながら、実際のレーダ映像は、アンテナビームパターンに依存した方位方向への映像の拡大効果として現れることから、受信信号強度との関係もあり、感度を上げる程、その影響が顕著に現れる。
- ② 距離方向の大きさは、パルス幅と船の幅を基準として比較・評価した。しかしながら、実際の送信パルスの形状は方形波ではなく、パルスの立ち上がり部及び立下り部まで考慮すれば、受信信号強度と感度の関係から相当な広がり幅を持つこと、また、単純な船体構造の小型 FRP 船であっても、実際には操船者や船上構造物による多重反射の影響等も加わることが推察されることから、距離方向に伸びた映像になると考えられる。

4.3.2 映像の形状に関する解析と考察

今回の小型 FRP 船のような小物標では、実際のレーダ PPI 画面上における映像の形状は、レーダの方位分解能と距離分解能を合わせた形式である「Echo paint」（または、面積分解能）として評価することが一部の文献では紹介されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。文献⁽⁶⁾では、Echo paint を、「Echo paint' is a term used to describe the size and shape of an echo as it appears on the screen.」と説明しており、一般的に小物標は、近距離ほど距離方向に伸びた映像となり、遠距離になるに従って方位方向に延びる映像となってレーダ画面上に表示されることが示されている。小物標の Echo paint については、このような定性的な特徴が知られているだけであり、定量的な解析結果は殆ど明かになっていないため、ここでは、各データについて、方位方向の映像の大きさを角度から長さに変換し、距離方向の大きさとの比率を求め、定量的な Echo paint の評価から、映像の形状に関する検討を実施した。当該結果を Fig.8 に示す。なお、同図中の実線は、(2)式において、方位方向の大きさ（deg）を長さ（m）に変換し(3)式との比を取ったものであり、理論的な Echo paint を評価する値とした。同図中の横軸に距離（m）を取り、縦軸に映像

Fig.8 Observed aspect ratio of radar echoes and theoretical value

の縦横の比を取っていることから、1 よりも小さな値を示す場合が距離方向に伸びた映像であり、1 よりも大きな値を示す場合が方位方向に伸びた映像となる。同図から、アスペクト角が 90°で漂泊した条件であったが、500m 付近では縦横の長さが同程度となり、500m よりも近距離になる程、（距離方向の伸びた）縦長な映像として表示されている。また、500 m 以上になる程、（方位方向に伸びた）横長な映像として表示されることが分かる。加えて、理論値として示した実線と比較すると多少のばらつきはあり、500m 未満の近距離では理論値よりも小さな値を示す傾向があり、STC の残留効果の有無等について、より詳細な検討も必要である（この点は今後の検討課題としたい）が、感度による差異は明確ではなく、全体としての傾向は理論値とほぼ対応していると考えられる。

5. まとめ

得られた知見を以下の通りまとめることができる。

- ① 方位方向及び距離方向の映像の大きさは、感度を上げる程、理論値よりも大きな値を示し、また、感度別に見た距離変化に対する映像の大きさの減少傾向には共通した特性がある。
- ② 特に、感度を上げた状態（-70dBm）では、1000 m 程度での近距離では、方位分解能や距離分解能というレーダ性能との対比において、当該数値より 2 倍程度に大きな映像となる。
- ③ 映像の形状（縦横の比率）は、近距離での STC の残留効果の有無等についての詳細な検討はできていないものの、Echo paint として評価し

た値にほぼ等しく、感度の違いによる差異は明確には見られない。

- ④ 以上から、実務的な観点での小型船のレーダ映像の 2 次元分布の特徴として、映像の大きさは、感度変化や距離変化に対応した変動を示す（方位・距離分解能で示される数値とは、必ずしも一致しない）が、映像の形状は、感度変化には関わらず、距離変化のみに対応した変動を示す傾向が強い。

6. おわりに

高い分解能でレーダ反射信号を取得することが可能なレーダ画像収録システムの開発を行い、このシステムにより、実海域において小型 FRP 船のレーダ映像の取得実験を実施し、小型船映像の 2 次元分布について定量的な解析を行った。Fig.6 及び 7 では 3 段階での閾値による結果を、直線近似により特性の把握を行ったが、映像の拡大傾向の詳細な検討は、データ数が限られていたこと等の理由から実施できていない。また、今回使用した小型船はレーダに対してアスペクト角を 90° とする船位条件で、パルス幅の設定を 80nsec のみで観測実験を行ったことから、アスペクト角やパルス幅を変えた状態の検討やより遠距離でのデータ取得を図ることも含めて、更なる詳細な検討については今後の課題としたい。

加えて、本研究で得られた知見を基礎として、レーダによる小物標映像の探知という実務的な側面への活用についても、検討を実施したいと考えている。

謝辞

本研究の実施に当たり、多くの貴重なご助言を頂いた故佐藤尚登先生（元海技教育機構理事）に深く感謝致します。同様に深い助言いただいた竹中康雄先生（海上保安大学校名誉教授）に対して感謝致します。

さらに、数回の実験に積極的にご協力頂いた海洋総合技研（株）の瀬戸氏、寺前君及び小田君（当時、広島商船高等専門学校・商船学科学生）に感謝致します。

参考文献

- (1) 井手麻奈美・林尚吾：FRP 製小型漁船のレーダ断面積について, NAVIGATION, 第 171 号, pp.54～59, 2009.9
- (2) 山田多津人・林尚吾・竹中康雄：FRP 製小型船

船のレーダ反射特性, NAVIGATION, 第 155 号, pp.67～70, 2003.3

- (3) 吉田孝監修：改訂レーダ技術, コロナ社, 平成 8 年 10 月
- (4) 例えば, 広島県道路公社, 瀬戸内海海上安全協会：豊島大橋架設に伴う航行安全対策調査研究報告書【5】, 平成 21 年 1 月
- (5) 飯島幸人・今津隼馬共著：電波航法, 成山堂書店, 平成 10 年 12 月
- (6) Alan Bole・Bill Dinely・Alan Wall：Radar and ARPA Manual Second Edition, Butterworth Heinemann, 2005.7
- (7) 西谷芳男著：電波計器（五訂増補版）, 成山堂書店, 平成 14 年 3 月

質疑応答

藤坂貴彦（東京海洋大学）：

距離に応じて物標である小型 FRP 船のレーダ映像の距離方向及び方位方向のピクセル数が変化するとの内容と理解しました。近距離では受信電力が大きいため広いピクセル範囲となり、遠距離ではそのピクセル範囲が狭くなるといった映像分布を検証されたということでしょうか？

水井真治（広島商船高等専門学校）：

ご指摘に近い内容です。ただし、今回はこの評価を出力である A/D 変換データの最大値を基にレーダ映像の 2 次元分布としてまとめました。

林尚吾（東京海洋大学）：

一つの質問と二つのコメントをさせていただく。

質問事項：A/D 分解能を 8 ビットから 12 ビットに改善された映像上の利点・変化について教えてください。

コメント：①アスペクト角を変えた時の拡大した映像検討は興味深いものです。是非、アスペクト角を 90° だけでなく斜め方向、正面、背後についての検討を期待します。②小型 FRP 船の 2 次元分布の拡大図をもっと見せていただきたかった。

水井真治（広島商船高等専門学校）：

12 ビットレベルの A/D 変換値から小型 FRP 船の距離変化に関する信号強度について知見をまとめています。細かく数値検討が可能となりました。例えば、これまで困難であった橋梁の反射体周辺の正しい映像と偽像の詳細な判定及び小型船映像と雑音の判定の可能性があるかと期待しています。現在、こうした偽像データなどを説明できるだけのデータ蓄積がありません。今後、ご指摘を参考にさせていただき研究を深化させたいと考えています。