レーダ画像による船舶の監視 —東京湾を想定したレーダ配置の検討—

宮澤 暁*・藤坂 貴彦**・今津 隼馬**

A Study of the Radar Placement to Identify Vessels in Tokyo Bay Using ISAR Images

Akira MIYAZAWA, Takahiko FUJISAKA and Hayama IMAZU

Abstract

In this paper, the placement of radars is studied to identify vessels which cruise Tokyo Bay using ISAR (Inverse Synthetic Aperture Radar) images. First, the positions and motion data, for example, course, speed, rolling, pitching and yawing, of the training ship “SHIOJIMARU” were acquired. The observed ISAR images were generated in the computer simulation using the motion data of “SHIOJIMARU”, in the case of several different radar places in Tokyo Bay. As a result of inquiring the simulated ISAR images, when having placed the radar to two places, Tsurugi Saki and Kannon Saki, it was possible to identify vessels using ISAR images.

Keywords : radar, ISAR, Tokyo Bay

キーワード: レーダ, 逆合成開口レーダ, 東京湾

1. まえがき

AIS (Automatic Identification System) により、船舶の識別は容易に実現できるようになった。⁽¹⁾⁽²⁾しかし、搭載義務のない船舶や、送信を停止している船舶、間違った情報を送信している船舶も存在している。そのような船舶を識別するためには、AIS 以外の船舶識別も必要である。目視による船舶識別が有効であるが、目視では気象条件によりその成否が左右され、夜間の船舶識別は困難となる。そこで船舶の形状を画像化できる逆合成開口レーダ ISAR (Inverse Synthetic Aperture Radar) ⁽³⁾⁻⁽⁵⁾ を船舶の監視・識別に利用することが提案されている。

ISAR で取得できる画像のレンジ分解能は、送信信号帯域幅により決まり、クロスレンジ分解能は船舶の姿勢角変化により決まる。姿勢角の変化率が未知の場合、ドップラー周波数で表現されるクロスレンジ軸と実際の長さとは対応させられないため、レンジとクロスレンジの比率が実際と異なるとされている⁽⁶⁾。この問題を解決する方法として、クロスレン

ジ軸を実際の長さに対応させるクロスレンジスケールリングに関する研究がなされている⁽⁷⁾。

また、東京湾を出入りする船舶の監視に ISAR を適用した場合の分解能についての検討がなされているが、レーダの配置については検討されていない。⁽⁸⁾

本研究では、この点を考慮し東京湾を出入りする船舶を監視する場合、どこに ISAR を設置すればよいかを考察した。検討にあたっては、東京海洋大学練習船「汐路丸」が東京湾を出入りする際の航跡、運動データを使用した。ISAR による観測については ISAR シミュレーターを製作し、シミュレーションにより ISAR 画像を生成し、東京湾における ISAR の配置を検討した。

2. ISAR 画像と船舶運動

2.1 観測方向と ISAR 画像の関係

レーダと目標の位置関係とその時取得できる

* 学生会員 東京海洋大学大学院 (〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6) m065030@kaiyodai.ac.jp

** 正会員 東京海洋大学海洋工学部

ISAR 画像を Fig. 1 に示す。この図は、船舶が回転中心 0 を中心にピッチ運動をしているとき、船舶を正面から観測したとき取得できる ISAR 画像を示している。船舶がピッチ運動をしているときに得られる画像は、船舶を横から見た ISAR 画像となる。Fig. 1(b) において、縦軸はドップラー周波数(クロスレンジ)で横軸はレンジを表す。ISAR のレンジ分解能は、送信信号帯域幅により任意に設定できるが、クロスレンジ分解能は、観測対象の運動に依存する。それは、クロスレンジ方向の高分解能化に、ピッチ運動によるドップラー効果を利用するからである。Fig. 1(a) に示すように、ピッチ運動をしている船舶を正面から観測すると、同一レンジピン内の反射点であっても、高さ(回転中心からの距離)が異なっている点の反射波はドップラー周波数が異なる。このドップラー周波数差を利用することでクロスレンジ分解能を得て、2 次元のレーダ画像を生成する。

Fig.1 Geometry and ISAR image

2.2 船舶の運動と ISAR 画像の分解能

ISAR のクロスレンジ分解能と観測対象船舶の運動との関係について示す。ISAR のクロスレンジ分解能を Δz とし送信波長を λ 、観測中の姿勢角変化を $\Delta \theta$ とするとクロスレンジ分解能 Δz と姿勢角変化 $\Delta \theta$ との関係は次式であたえられる。⁽⁵⁾

$$\Delta z = \frac{\lambda}{2\Delta \theta} \quad (1)$$

式(1)から送信波長 $\lambda = 3\text{cm}$ の ISAR を用い観測中に姿勢角が 1 度変化すると ($\Delta \theta = 1^\circ$) クロスレンジ分解可能 Δz は約 1 m となる。Fig.2 にクロスレンジ分解

能と姿勢角変化の関係を示す。

Fig.2 Relation between rotational motion and cross range resolution

2.3 船舶運動と ISAR 画像の投影面の関係

船舶はピッチ、ヨー、ロールの回転運動を伴って移動する。ISAR では、観測対象船舶の回転運動を利用してクロスレンジの高分解能化を図り、レンジとクロスレンジ(ドップラー周波数)の 2 次元平面上に観測対象船舶の形状を投影した電波画像を得る。

Fig. 3 に示すように船舶を正面(ロール回転軸)から観測した際に取得できる ISAR 画像を Fig. 4 から Fig. 6 に示す。

Fig.3 Geometry of observation

Fig. 4 に示すとおり、船舶がピッチ運動のみをしていると仮定した場合、船舶を正面から観測すると、その船舶を横から見た画像が取得できる。図より明らかなように、船橋や甲板上の構造物を観測することができ、船舶識別に適した画像であるといえる。

船舶がヨー運動のみを行っているとは仮定した場合、Fig. 5 に示すように船舶を上から見た画像を取得することができる。輝度を見ると船橋や甲板上の構造物の位置が把握でき、その長さや幅が読み取れる。

船舶がロール運動のみを行っているとは仮定した場合、Fig. 6 のように線状の画像となる。画像の輝度の変化から船橋の位置などは分かるが、船舶を識別することは難しい。これは船舶を正面から観測する

とロール運動の場合、観測方向とロール回転軸が同一方向となってしまうドップラー周波数差が発生しないためである。

Fig.4 ISAR image of Pitching

Fig.5 ISAR image of Yawing

Fig.6 ISAR image of Rolling

次に、船舶を横から観測した場合の画像を Fig. 7 に示す。船舶がロール運動のみを行っているとした場合、図に示すように船舶を正面から見た画像を取得することができる。これは Fig. 8 に示す位置関係では、ロール運動により発生するドップラー周波数差を利用することでクロスレンジの高分解能化を図るからである。しかし、船舶を正面から見た画像では、船舶の特徴を捉えることが難しいため船舶識別には適していないといえる。

多くの場合、Fig. 9 に示すようにレーダで船舶を斜め方向から観測することになり、その際、船舶はピッチ、ヨー、ロールの複合運動を行っている。このような場合の ISAR 画像の投影面については、既に報告⁽⁹⁾ されているとおり Fig. 10 のような ISAR 画

像が取得できるとされている。このように斜めから見た船舶の形状からも識別は可能と考えられる。

Fig.7 ISAR image of Rolling

Fig.8 Geometry of observation

Fig.9 Geometry of observation

Fig.10 ISAR image of Pitching, Yawing and Rolling

3. ISAR 画像シミュレーション

3.1 シミュレーション方法

送信波長 3cm の ISAR を想定し、レーダが送受信する電波を模擬し、ISAR 画像を生成するシミュレーターを製作した。3 次元空間 (x, y, z) を 1m の格子に分解し、船型に一致するように格子に電波を反射

する点を約 1500 点配置した。この反射点はどこでも同じ強度で反射するようにしてある。レーダから送信された電波はこれらの点で散乱され、その一部がレーダ方向への反射波となる。この反射波を受信し増幅、検波した受信信号の位相は、レーダと反射点との距離で決まる。今回のシミュレーションでは、ドップラシフトの観測時間を 1 秒、アンテナビーム幅を 1 度とした。このとき 10 km 先でのアンテナビームの広がり は 174m となり、船体全体に電波が照射される。幾何光学的には、影になる部分があるが、実際の観測では影になる部分からも電波の反射が得られている⁽¹⁰⁾ので、各散乱点に電波が当たるものとしてシミュレーションを行った。

Fig.11 Shape of simulation model ship

ISAR シミュレーションでは、東京海洋大学練習船「汐路丸」が東京湾を実際に航行した際に取得した運動データ(航跡、ピッチ、ヨー、ロールの姿勢角)を利用し、汐路丸の船型として Fig. 11 で示すような長さ 50m、幅 10m、高さ 11m のデータを使用した。

シミュレーションに用いた航跡及び姿勢角を Fig. 12 と Fig. 13 に示す。以後、Fig. 12 の航跡を航跡 1 と呼ぶ。図中の矢印に示すように、汐路丸は、始め南下しその後北上する。丸印は 0 秒から 600 秒ごと 5400 秒までの航跡である。また、浦賀水道航路、船長協会自主設定航路を記入している。

Fig. 11 に示す姿勢角の時間変化から、船舶は南下しているときはピッチ角が最大 3 度と大きく変動し、北上を始めたときからその変動が少なくなっていることがわかる。一方、ロール角は南下しているとき変動が小さいが、北上を始めると最大 5 度程度変動する。Fig. 14, 15 に航跡 1 で取得した風速、風向の変化を示した。図より風速は、4m/s から 6m/s である。また、異なる時期に取得した南行の航跡 2 と北行の航跡 3 を Fig. 16 に示す。航跡 2 と航跡 3 での姿勢角の時間変化を Fig. 17, 18 に示し、風速、風向を Fig. 19 から Fig. 22 示す。図より、航跡 2 ではロール角が最大 2 度変動し、ピッチ角は最大 1 度変動している。航跡 3 ではロール角は最大 1 度、ピッチ角は最大 1 度変動している。航跡 2 のとき、風速は 6m/s であり、航跡 3 のとき、風速は 2m/s から 4m/s であつ

た。これら 3 つの気象状態より、今回シミュレーションに用いた、航跡、動揺データは一般的な気象状態の下で観測されるものと判断した。

Fig.12 Trail of simulation (Trail1)

Fig.13 Rotational motion data at Trail 1

Fig.14 Wind speed at Trail 1

Fig.15 Wind direction at Trail 1

Fig.16 Trail2 and Trail3

Fig.17 Rotational motion data at Trail2

Fig.18 Rotational motion data at Trail 3

Fig.19 Wind speed at Trail 2

Fig.20 Wind direction at Trail 2

Fig.21 Wind speed at Trail 3

Fig.22 Wind direction at Trail 3

3.2 シミュレーション結果

Fig. 23 及び Fig. 24 に示すように汐路丸の位置が異なる 3 ヶ所を選定し、表 1 に示すような条件の下でシミュレーションを実施した。表中、条件 1-1 と条件 1-2 は汐路丸の位置が同じで姿勢角変化が異なる。

Fig. 25, 26 に航跡 1 から航跡 3 の航行中のピッチ及びロールの 1 分ごとの最大の姿勢角変化率 $[\circ/s]$ と出現頻度を示した。姿勢変化率 5 度以上は 5 度の点に示している。これは毎分 1 枚の ISAR 画像を得ることを想定している。これからピッチの最大の角度変化率が $0.5[\circ/s]$ 以上となるのは 88%、同様に $1[\circ/s]$ 以上となるのは 59%であった。またロールの場合は最大の姿勢角変化率が $0.5[\circ/s]$ 以上になるのは 93%、 $1[\circ/s]$ になるのは 77%であった。クロスレンジ分解能は 0.5 度で約 2m、1 度で約 1m となる。これらのデータをシミュレーションでは含むように条件を設定した。

ISAR では、船舶を前後方向から観測すると船舶を横から見た形状が取得でき船舶識別に適した ISAR 画像を得られ、東京湾に出入りする船舶は、南北方向に航行することが多いことを考慮して ISAR 設置場所を選定することにした。さらに灯台などの海上保安庁の既存施設の設置場所も考慮して、観音崎、釧崎を選定した。それぞれの条件での観測時間は 1 秒間とした。得られた ISAR 画像は、姿勢角変化率に

よりクロスレンジの幅が変化してしまうため、ISAR 画像取得後に、観測者がクロスレンジの倍率を変化させ、識別しやすいように調整した。

Fig.23 Geometry in Case1-1, Case1-2 and Case2

Fig.24 Geometry in Case3

Table.1 Conditions of simulation

	Case1-1	Case1-2	Case2	Case3
Course (degree)	177.3	179.0	310.5	70.2
Speed (knot)	11.4	11.6	11.9	12.1
Pitch (degree)	2.0	0.75	0.20	0.71
Yaw (degree)	0	0.19	0.093	0
Roll (degree)	0.46	1.0	1.1	1.6

Fig.25 Histogram of pitch rate

Fig.26 Histogram of roll rate

条件 1-1 はピッチ角の変化が大きく、条件 1-2 はロール角の変化が大きい。

条件 1-1 の下で観音崎、剣埼に ISAR を設置したときに取得できる画像を Fig. 27, 28 に示す。図中の縦軸はドップラー周波数、横軸はレンジビン番号で 1 レンジは 1m となっている。これらの図より、ともに船橋やファンネルなどを把握することができ、船舶識別に適した画像であると考えられる。

条件 1-2 の下で観音崎、剣埼に ISAR を設置した場合に取得できる画像を Fig. 29, 30 に示す。双方ともに分解能は低下したが、船橋やファンネルを把握することができ船舶の識別は可能であると考えられる。

同様に、条件2で取得できる ISAR 画像を Fig. 31, 32 に示す。この場合、ともに船舶を斜めから見たような ISAR 画像を取得することができた。船橋やファンネルの位置なども分かるため船舶識別に適した画像であると考えられる。

同様に、条件3で取得できる ISAR 画像を Fig. 33, 34 に示す。観音埼からの観測では、船橋やファンネルの位置が分かり、船舶を識別可能な画像を取得できた。しかし、劔埼からの観測では船舶を正面方向から見た画像となり、どのような船舶であるか識別するのは難しい。

今回のシミュレーションにより、条件1-1、条件2では観音埼、劔埼双方とも船舶識別に適した画像を取得することができた。条件1-2では、ピッチ変化量が減り、分解能が低下したが船舶の識別は可能であった。条件3では、観測位置と姿勢角変化により劔埼からの観測で船舶識別に適さない ISAR 画像となった。

Fig.27 Observation from Kannon Saki with case1-1

Fig.28 Observation from Tsurugi Saki case1-1

Fig.29 Observation from Kannon Saki case1-2

Fig.30 Observation from Tsurugi Saki case1-2

Fig.31 Observation from Kannon Saki case2

Fig.32 Observation from Tsurugi Saki case2

Fig.33 Observation from Kannon Saki case3

Fig.34 Observation from Tsurugi Saki case3

4. むすび

東京湾を出入りする船舶の航跡、運動データを取得し、姿勢角変化率を分析し、船舶識別に有効と考えられる分解能 1m および 2m の ISAR 画像が取得でき

る割合を明らかにした。そして、海上保安庁の既存施設の中から、レーダ設置場所を選定し、シミュレーションを行い船舶の監視、識別に有効な船舶を横から見た ISAR 画像が取得できるか否か調査した。

シミュレーションの結果、レーダを観音崎と鋸崎の双方に配置すれば少なくとも一方のレーダで船舶の識別に有効な船舶を横から見た ISAR 画像が取得でき、ピッチ運動が支配的な場合に分解能が約 1m 以上となる確率は 59%であり、分解能が約 2m 以上となる確率は 88%となることが分かった。また、ロール運動が支配的な場合には、分解能が約 1m 以上となる確率は 77%であり、分解能が約 2m 以上となる確率は 93%となることが分かった。

参考文献

- (1) AIS の現状と展望, AIS 研究会 (東京海洋大学海洋工学部内), 2004. 1
- (2) 田中隆博・長澤明・山田多津人・山本淳 : AIS による海上交通評価に関する研究－I－来島海峡周辺における搭載船の実態とデータの分析－, 日本航海学会論文集第 111 号, pp219-pp224, 2004. 9
- (3) Prickett M.J. and Chen C.C. : Principles of inverse synthetic aperture radar(ISAR) imaging, IEEE, 1980 EASCON Record, pp.304-344, 1980.
- (4) Chen C.C. : Target-motion-induced radar imaging, IEEE Trans. Aerosp & Electron. Syst Vol. AES-16, no.1, pp.2-14, 1980.1
- (5) 藤坂貴彦・岩本雅史・原芳久・江馬浩一 : 画像レーダ, 非破壊検査代 47 号 12 号, pp872-877, 1998.12
- (6) 吉田孝監修 : 改訂レーダ技術, 社団法人電子情報通信学会, pp283-pp285, 1999.5
- (7) Masaharu AKEI, Masato NIWA, Mituyoshi SHINONAGA, Hiroshi HIYAUCHI, Masanori MATUMURU : Radar Image Cross-Range Scaling Method—By Analysis of Picture Segments—, IEICE TRANSACTION on Communications Vol.E76-B No.10 pp.1258-1262
- (8) 藤坂貴彦・今津隼馬 : 船舶監視における ISAR 画像の分解能, 日本航海学会論文集第 113 号, pp127-pp133, 2005. 9
- (9) Kazuhiko YAMAMOTO, Masafumi IWAMOTO and Tetsuo KIRIMOTO : A New Algorithm to Generate the Reference Images of Ship Targets for ATR Using ISAR, IEICE

TRANSACTION on Communications Vol.E88-B No.2 pp.737-744, 2005.5

- (10) Toshiharu ITOH, Hachiro SUEDA and Ysuo WATANABE : Motion compensation for ISAR via centroid tracking, IEEE Trans. AES Vol.32, No.3, pp1191-pp1197, 1996.7

質疑応答

三好晋太郎 (三井造船昭島研究所) :

船体上の構造物の影になる部分は、電波の反射が得られないから、実際には画像が得られないのではないのでしょうか？

藤坂貴彦 :

電波が回折するため、受信信号電力は低下しますが画像は取得できます

三好晋太郎 (三井造船昭島研究所) :

レーダの設置位置は、もっと離れた位置を提案すべきではないでしょうか。

藤坂貴彦 :

東京湾を航行する船舶の場合、北行、南行する船舶が多くそれらの船を正面から観測するため、本研究のような配置となりました。

長澤明 (海上保安大学校) :

平穏な湾内で、大型船舶が対象となる場合、姿勢角変化 (Roll, Pitch, Yaw) が小さくなり十分なドブッラシフトが得られないと思われますが、対応や、検証についてどのように考えておられますか。

宮澤暁 :

船舶の大きさでなく姿勢角の変化でクロスレンジ分解能は決まるため、姿勢角の変化が小さければ、船舶は観測できないと考えています。