航空管制用二次監視レーダーの偽像の予測計算の検証

水城 南海男*・加来 信之*

An Evaluation of the Calculated Power of False Targets
in SSR by the Measured Data

Namio MIZUKI and Nobuyuki KAKU

Abstract

False targets have been caused by the reflecting objects such as buildings, hangars etc, in Secondary Surveillance Radar. In order to determine the amount of power reflected by the scattering objects, the Fresnel-Kirchhoff diffraction formula may be employed. And we get the radar equation for false targets caused by a simple flat plate.

For a concrete case, a numerical analysis is made and compared with the measured data obtained at Sendai Airport.

As the result, calculated Power of False Targets agrees approximately with received power.

1. はじめに

管制官は、航空路監視レーダーや空港監視レーダー等の一次レーダーで航空機の位置を監視し、それらに併設された二次監視レーダー (Secondary Surveillance Radar, SSR) の質問に対する航空機に搭載されたトランスポンダーの応答から位置、識別符号、高度等の情報を得ている。これらの SSR 情報は、ARTS (Automated Radar Terminal System), RDP (Radar Data Processing System) 又は TRN (Terminal Radar Numeric Display System) の導入による航空管制の自動化に伴い一層主要な役割を受けもつようになり、SSR 信号よりも高品質のものが要求されている。しかし、SSRでも、一次レーダーと同じようにビル、工場、格納庫等のその周辺の建造物壁面からの反射波によって偽像 (ゴースト) が発生する場合がある。とくに、近接した建造物が反射障害物の場合には、偽像の範囲も大きくなる。この偽像が、離着陸コースや航空路上に生じる場合には航空機の識別を誤る恐れがあり、適切な防止対策を施す必要がある。

ここでは、このような障害程度を定量的に予測し必要な対策をもとめるために、SSRの偽像レベルの予測計算法を提案し検討した結果⁽¹⁾及び仙台空港で行なった飛行実験のデータを用いて本予測計算法を検証した結果について報告する。

2. SSRの概要と偽像の発生機構について^{(2),(3)}

SSRは、図1示すように、地上局のインタロゲータと航空機に搭載されたトランスポンダとによって構成され、地対空回線1,030MHz、空対地回線1,090MHzの各局共通の周波数の電波を使用している。インタロゲータは各局共通の質問モード・パルス (モードA/C) を放射し、機上のトランスポンダはそれを受信し自機に割り当てられた航空機識別符号、現在の飛行高度等を応答する。インタロゲータは、それを受信し指示器上にそれらの管制上重要な情報を表示する。ここで、本計算及び実験に用いたレーダーの諸元を表1に示す。尚この中で、計算に必要なパラメータは、実際に測定したものである。

レーダーのメインビームが建物へ照射される場合、地対空及び空対地回線とも建物を經由する伝搬路が形成さ

* 正会員 電子航法研究所 (三鷹市新川6-38-1)

れると、指示器上に建物の方向に偽像として表示される。これが、最もよく起る偽像の発生機構である。ここでは、このような偽像を主に対象としている。この偽像の発生は、回線利得の大きさによって決ることがわかっている。通常の運用状態では、近距離ではインタローゲータのSTC効果即ち空対地回線によって、遠距離ではトランスポンダの最小デコード・レベル即ち地対空回線によって制限される。レーダー・サイトでは若干異なるが、その距離は30 N. Mile 程度である。なお、ARTS, TRN では偽像もタグ表示されるため、指示器上の表示が繁雑となり、またリポジション機能のないTRNでは正規のタグと重なり必要な情報が読みとれない等管制官に大きなワークロードを課すことになり問題が大きい。

3. 偽像レベルの予測計算法

3.1 偽像レベルの予測計算法

図2に示すように、建造物の反射面 S ($W \times H$) へ電界 E_o が入射するとき、観測点 Q での反射波 E_s は、波源 P の S に対するイメージ P' に波源があるとし開口面 S を透過した回折波に等価であるので、フレネルーキルヒホフの式を適用すると、

$$E_s = \frac{jE_o}{\lambda} \int_{-1/2W}^{1/2W} \int_{-1/2H}^{1/2H} (\cos\alpha + \cos\beta) \cdot \frac{\exp\{-j2\pi(r_1 + r_2)\}}{r_1 \times r_2} dz_0 dy_0 \quad \dots\dots(1)$$

但し、 α : 入射角, β : 反射角, r_1 : 送信アンテナ P から S までの距離, r_2 : S から Q までの距離と表わされる。

一方、SSRの自由空間でのレーダー方程式は、

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 L_f \cdot L_p \cdot L_a \cdot R^2} \quad \dots\dots(2)$$

図1 SSR偽像の発生機構の説明図

表1 SSRの諸元及び空対地回線のパラメータ

空対地回線(応答回線)パラメータ	測定結果又は定数
トランスポンダの送信電力	450W
インタローゲータのアンテナ利得	23.5dB
トランスポンダのアンテナ利得	0dB
波長(m)	0.275
フィーダ損失等の伝送系損失	
トランスポンダのフィーダ損失	2.6dB
インタローゲータのフィーダ損失	11.4dB
インタローゲータの最小受信電力	-85.0dBm

*STC特性及び $L_p \cdot L_a$ は別に示す。

SSRの諸元	規格値
インタローゲータの送信電力	1.5KW
インタローゲータ・アンテナのビーム幅	
水平	3.1度
垂直	55.0度
質問繰り返し周波数	200 ~ 450 PRF
走査時間	4 sec/scan
パルス幅	
質問信号	0.8 μ sec
応答信号	0.45 μ sec

図2 計算法の座標系

但し、 P_r : トランスポンダ又はインタロゲータの受信電力、 P_t : インタロゲータ又はトランスポンダの送信電力、 G_1 : インタロゲータのアンテナ利得、 G_2 : トランスポンダのアンテナ利得、 λ : 質問(地対空)又は応答(空対地)回線の波長、 L_a : アンテナ・ビーム損失、 L_f : フィーダ損失等の伝送系損失、 L_p : フェージング損失と表わされる。

ここで、建造物がない場合の P' 波源による Q への電界を E_d とすると、壁面 S による反射電力 P_s は、(1)及び(2)を用いると、

$$P_s = (E_s/E_d)^2 \times P \quad \dots\dots(3)$$

となる。これは、偽像のレーダー方程式とも言えるものである。

3.2 厳密解との比較⁽⁴⁾⁽⁵⁾

近接した建造物が反射障害物の場合には、偽像の発生範囲もひろがりその影響は大きい。しかし、近接した反射物の偽像レベルを正確に計算する方法はあまりない。従って、本計算では、フランクホッフ(遠方)領域からフレネル(近方)領域まで適用できるように、(1)式をフレネル近似して、厳密解の求まっている二次元の完全導体円筒の場合と比較

図3 厳密解との比較(座標系)

して検証した。即ち、図3に示すように、無限長完全導体円筒と完全導体平板を $X-Z$ 平面にとり、線波源が P' にあるときの観測点 Q の回折波 E_{dif} と E_{sdl} を計算した。ただし、 $E_{sdl} = E_d - E_s$ とし、二次元の無限長完全導体円筒の厳密解 E_{dif}/E_d は、次式を用いた。

$$E_{dif}/E_d = 1 - 2\sqrt{\frac{2(d_1+d_2)}{\pi k d_1 d_2}} \exp\left(-jk \frac{d_1 z^2}{2(d_1+d_2)d_2} + j\frac{\pi}{4}\right) \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n (-1)^n \frac{j_n(kH)}{H_n^{(2)}(kH)} \cos n\phi$$

但し、 $H_n^{(2)}(X)$: ハンケル関数、 $j_n(X)$: ベッセル関数、 ϵ_n : ノイマン数 $\epsilon_n = 1/2$, $n=0$,

$$\epsilon_n = 1, n \neq 0, k: 2\pi/\lambda$$

その結果を図4に示す。この場合、観測点 Q は、開口面 S との距離が一万波長程度に近づくと円筒と平板による差が現われるので、約40万波長離れた距離とした。このように、厳密解と近似解は、ほぼ完全に一致している

ことがわかる。ここでは、この近似解を用いて計算を行なった。

4. 偽像レベルの実測と計算結果の比較

仙台空港では、管制塔の上部壁面（正六角形のうちの一面）からの反射波によるものと考えられる偽像が発生し、その対策が急がれている。その前段階として、この事例を対象として飛行実験によって偽像レベルの実測データを収集し、計算結果と比較を行ない本計算法を検証した。

SSRでは地対空回線と空対地回線のシステム・パラメータが異なるが、この測定では地対空回線に比べ測定方法及び実験方法が容易な空対地回線について行なった。これは、近距離ではSSR地上局にはSTC効果があり回線利得が比較的小さいので、偽像が発生するかどうかは空対地回線で決るためでもある。

4.1 実験の概要

飛行実験は、昭和57年11月下旬～12月上旬に仙台空港で実施した。

SSR地上局のアンテナ及び管制塔の上部壁面の配置図を図5に示す。この図の中では、方位は真方位で示しているが、磁方位とのずれは約7度である。この管制塔の壁面の表面は、アルミ製の平板である。図5より、SSR地上局のアンテナ高は20.6m、幅6.6×高さ4.5mの建物の壁面Sの中心が地上高27.5mにあり、アンテナと管制塔との距離は270m、アンテナからこの壁面の中心をみる角度（空対地回線では反射角）は $\alpha_1=18.5^\circ$ 、 $\alpha_2=1.5^\circ$ である。

実験機の飛行方法は、図5の配置図から磁方位92度付近の航空機に対して偽像が発生するものと推定されるため、ILSコース付近の89～95度（磁方位）方向から壁面にむかう降下角1.5及び3度の進入飛行、高度を一定とする放射状飛行、壁面を中心とする周回飛行とした。ここで、周回飛行は水平面内の障害範囲を確認するためである。また、放射状飛行は、主に(2)式の $L_p \cdot L_a$ を推定するためである。

つぎに、データの収集方法を図6に示す。航跡及び偽像の記録では、レーダ指示器上の1フライトの実験機の航跡とその偽像を多重露出撮影によって1枚の写真に記録した。その一例を写真1に示す。但し、レーダーの指示器は、30マイル・レンジである。このデータから実験機及び偽像の方位を読み取った。この写真から、92度方向の実験機に対して偽像が308°方向に発生していることがわかる。一方、偽像レベルの測定では、SSRが

図4 近似解の検証

図5 アンテナと建物の配置図

地対空回線 1,030MHz, 空対地回線 1,090MHz の各局共通の周波数の電波を使用し、パルスコードを信号として用いているため、他の航空機及びその偽像と識別する必要がある。したがって偽像レベルの測定方法として、測定方法及び実験方法が容易な地対空回線とし、図6の測定系のブロック線図を参照すると(1)

同期信号としてSSRのシステム・トリガーを用い(2)希望のエリアのみターゲットを抽出するためにエリア・ゲート発生器で制御し(3)SSRコードはそのまま(実験機に割り当てられたコード)の形でそのレベルをSSRの距離情報と共にデジタル化して磁気テープに記録した。なお、受信機の増幅器は、直線性の高い対数増幅器である。

4.2 実測結果と計算結果

偽像レベルの測定データは、1信号(1ヒットに相当)あたり数パルスあり且つ1スキャン当り十数ヒット分あるため、パルス列及び十数ヒットの中で最も大きいものを用いて計算機処理した。また、図6の本測定系を挿入する前(図6の中のM点)のレ

図6 SSR応答信号レベルの測定系統図

写真1 偽像発生状況

図7 測定した結果と計算値

ベルを求めた。その結果の1例を図7の中に示す。但し、92度（磁方位）方向から降下角1.5度で進入した場合である。図7では、アンテナと航空機が同じ位置関係にある場合の直接波のレベルも示したが、直接波と偽像のレベル差は約10dBとなっている。なお、この実験例は、写真1に相当するものである。

つぎに、この実験例に対応した計算値を求める。 $\alpha_1 = \beta_1 = 18.5^\circ$ 、7マイル地点での壁面 S による散乱パターン（ハイトパターン）を(1)式を用いて計算したものが図8である。但し、 S は完全導体とした。また、地対空回線では仰角であるが、空対地回線では俯角となる。図8から $\beta_2 = 1.5^\circ$ にピークがあることがわかる。この結果は、図5の配置から幾何光学的に求めた鏡面反射方向と一致していることがわかる。表1のデータを用いて、直接波及び S を経由する反射波をそれぞれ(1)及び(2)式から計算した結果を図7の中に示す。ここで、(2)式の大地反射波によるフェージングの影響 L_p とアンテナビーム損失 L_a は、図9に示す高度を一定とする放射状飛行による測定結果から $L_p \cdot L_a = 8.7\text{dB}$ とした。

なお、本実験に用いたSSR地上局の実測したSTC特性から最小デコードレベルを求めたものを図7に斜線の部分に示す。ここで測定された直接波及び反射波のレベルは、最小デコードレベルより大きく、指示器上に正規の映像及び偽像として表示される。このことは、写真1にも示されている。

5. 考 察

図7より実測結果と計算結果とを比較すると、かなりよい精度で偽像レベルを予測できることがわかった。ここでは、 $L_p \cdot L_a$ のデータは実測したものをを用いたが、 L_p については(3)式を計算する場合に大地反射波も考慮することによって解決されるものである。また、 L_a については、インタロゲータ及びトランスポンダの放射パターンのデータを与えることによって求めることができる。

今回行なった検証のための実験では、フランホーファ領域における例であるが、バイスタティックなレーダー・クロス・セクションによる計算値とも一致する。

図8では鏡面反射のある場合であるが、

図8 反射障害物の散乱パターン

図9 放射状飛行の実測データ

レーダーのアンテナ高が建物より高いときには鏡面反射は負の方向即ち大地方向となり、直接航空機の方角へ反射されない。

ここで計算及び実験した壁面は比較的単純な平面であるが、複雑な形状の反射体の場合にはいくつかの平面に近似してその各々をベクトル合成することによって計算することが必要である。

6. お わ り に

比較的近接した壁面からの反射による偽像を対象に計算結果を実測データによって検証した結果、かなりよい精度で一致することがわかった。本計算法をもとに製作したシミュレーション・プログラム（最大100個までの障害物を計算する）を更に検討して、レーダーの設置位置の選定、反射障害物の同定、周辺の建物の新設時の障害予測、偽像の防止対策等に生かしていきたい。

最後に本実験に御協力頂いた東京航空局、仙台空港事務所の関係各位に謝意を表したい。

参 考 文 献

- (1) 水城：「航空管制用二次監視レーダーの偽像発生予測について」第67回日本航海学会講演会概要（昭和57年10月）
- (2) 水城：「SSR偽似目標の発生機構の解析とその対策」第10回電子航研発表会講演概要，pp 25—26（昭和53年6月）
- (3) 水城 他3名：改良型サイドローブ抑圧方式に関する試験，昭和50年受託6号試験成績書，（昭和50年）
- (4) 関口 利男：「電磁波」pp 153—159，朝倉書店（昭和51年）
- (5) 中村 他4名：「地上障害物によるILS電波障害の解析と模型実験」電子航研研究報告，No. 31，（1981年3月）