

Xバンドレーダシステムと偽像

田中 聡^{*} 寺園 将文^{**} 吉田 育穂^{***}

System specification of the X-band sky observation radar system.

Satoshi TANAKA Masafumi Terazono Ikuho Yoshida

ABSTRACT

The X-band radar system installed in Fukuyama University are now under the operation for detecting the air planes which passes through the campus. It is employed for the support of the air observation experiment by the Lider system. This reports show the features of radar system, and the summerize of the investigation on the radar clutter. The anntenna sidelobe effect was at first suspiciously glanced as the cause of the majour clutter image. But it is cleared of suspicion instead of the 'multiple scatter echo'. Now we continue the expriments to confirm the reason of the radar clutter.

キーワード：Xバンドレーダ、マイクロ波、クラッタ、レーダ画像

Keywords: X-band, radar, microwave, radar clutter

1. まえがき

福山大学電子・電気工学科ではレーザ光を用いて大気中に浮遊している黄砂などの微粒子や風速の分布などを測定するシステムとして、レーザレーダ(ライダー)を1999年より運用している[1]。ライダーの発するレーザ光は532nmの緑色光であるが、強い照射を直接目に受けると障害を発生する可能性がある。本学は福山市と尾道市の境界近くの田園丘陵地に立地し、近辺を山陽自動車道が通過している。北側20kmにV29(西行き24000ft,東行き12000ft)、南側8kmにV28(5000ft)という、主要航空路がある。また、西側70kmには中国地方では最大級の規模を誇る広島空港があり、同空港の航空管制空域(CA)が近接しているという理由から、空路を離れて本学上空を通過して進入する航空機も多い。さらに、米軍岩国基地のものと思われる軍用機が高速で飛来する場合や、ヘリコプタの低空通過という場合もある。こうした航空機は航路、飛来時刻ともに予測不能であり、レーザレーダの運用中に低空を通過する場合には不慮の事態が予測される。

2001年3月に電子・電気工学科3号館に設置

したXバンドマイクロ波レーダシステムの導入目的の1つはこうした航空機の飛来を予測し、ライダーの運用を支援することにある。このような航空機の監視には本来は航空機用のレーダを導入する必要があるが、船舶用のレーダのアンテナ部の改造により航空機に対応できることが分かり、比較的low価格で実現することが可能になった。

レーダで利用される周波数は観測したいターゲットの特性によりほぼ決定される。Xバンド帯を用いるレーダは主に海上において船舶の航行支援や衝突監視に用いられているが、霧や薄い雲は透過し、船舶・航空機・建造物などの監視に向いている。その一方で、強度の降雨・降雪などには散乱を受けやすいので、一部の気象観測用としても用いることができる。そこで、本レーダシステムにより地域気象情報の収集が可能になり、ライダーの情報と組み合わせると有意義な運用できることが期待される。

レーダではいろいろな条件によって不要な反射波(クラッタ)のために偽像が発生する。陸上のレーダでは、

(1)地面からの反射(Ground Clutter)

- (2)他の無線設備との干渉 (Radio Interference)
- (3)多重反射による偽像 (Multiple Scatter Echo)
- (4)アンテナのサイドローブによる偽像 (Spurious Echo, Side-lobe Echo)
- (5)近くの構造物の陰影上に生じる間接像
- (6)スーパ・リフレクションあるいはダクト状態による第二次掃引偽像 (Second Trace echo)
- (7)大型構造物が中間反射面になる鏡偽像

が問題になる[2]。これらの影響はクラッタ（不要反射）の除去処理機能である STC や CFAR によっても軽減することは困難である。

約1年半にわたってマイクロ波レーダシステムを運用し、レーダ性能と動作について一連の測定を行った。本報告では、システムの概要と構成を説明し、レーダアンテナに関して行った実験結果を示し、中間的ではあるがその画像に現れる偽像の解析の結果をとりまとめて報告する。

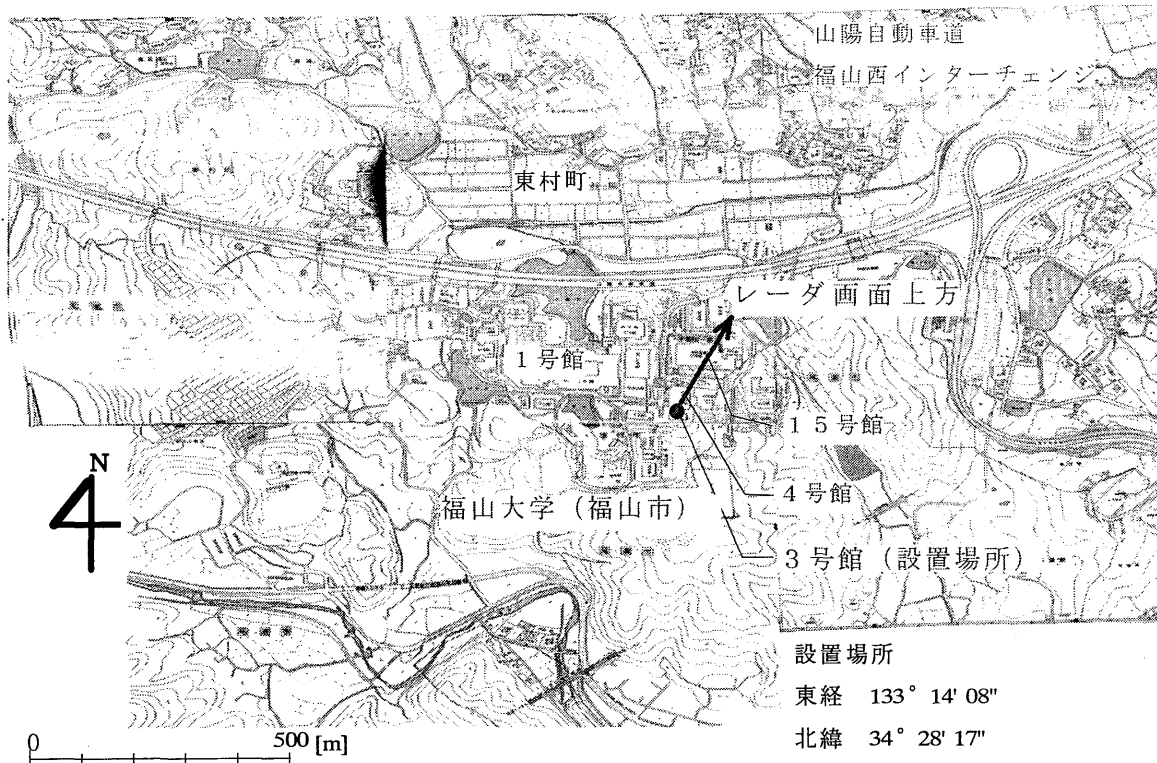
2. レーダサイトの構成

導入されたレーダはシステムは(株)トキメック社製のマリンレーダ BR-2220C-14 である。主な諸元を表1に示す。本レーダシステムは公称4ftのスロットラインアンテナと表示装置から構成されている。スロットラインアンテナは3号館（地上部の標高5.9m）の屋上に置かれた4.4mのやぐら台に

設置されている。アンテナまでの地上高は15.7mとなる。一方、表示装置はライダのそばに設置されておりオペレータが肉眼で航空機の監視を行っている。なお、2002年度よりリアルタイム画像をホームページで配信する機能を付加したため、学内外のコンピュータから遠隔で監視することも可能となった。

表1 レーダ諸元[3]

項目	仕様
電波形式	PON(パルス変調)
画面表示方式	PPIのみ
最小探知距離	2.8m
距離分解能	2.8m
最大探知距離	約1.5km(実測)
方位分解能	2.0°
アンテナ長	4ft級(実長1.4m)
レーダ周波数	9410±30MHz
送信出力	10kW
水平ビーム幅	1.8°
垂直ビーム幅	2.5°
チルト角	22.5°
アンテナ利得	26dB
回転速度	24rpm
パルス幅	0.06~1.2μsec



レーダの性能について数値上の評価を行う。距離方向の最小探知距離 R_{min} と最小分解能 ΔR の理論値はレーダパルス幅によって決定される。チャープ・ド・パルスなどの広帯域化の機能は搭載されていないため、

$$R_{min} = \Delta R = 3 \times 10^8 (\text{m}) / 2 \times 0.06 (\mu \text{ sec}) = 9 (\text{m}) \quad (1)$$

となる。ただしスクリーン上では輝点にある程度の大きさがあることや、電波ビームが広がるときに近距離では死角ができるため実際の値は表 1 の程度である。

最大探知距離はレーダ方程式

$$R_{max} = \left[\frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma_0}{(4\pi)^3 k T_0 B (NF) \left(\frac{S_0}{N_0} \right) \frac{1}{n} L_{system}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

から与えられる[3]。本システムにおけるそれぞれのパラメータは表 2 のようになる。

最小受信感度やシステムの総合損失は不明であるがあわせて 30 dB 程度に達すると推定される。なお、実際の運用ではパルス幅 1.2 $\mu \text{ sec}$ 1000 PRF で動作させる。

σ_0 はターゲットの有効散乱断面積、 n はレーダアンテナの一周でターゲットにあたるパルス数、すなわちパルスヒット数でありターゲットの大きさにより変化する。たとえば小型機で $\sigma_0 = 10 \text{ m}^2$ であり 10 m 程度の機体が 12 km の距離を通過するとすれば、 $n = 0.33$ となり、最大探知距離 R_{max} はほぼ 12km が得られる。

本レーダのレーダビームは、水平ではなく、斜め上空を監視するため、大型機でも運用上は約 15km ほどまりである。よって、北は新市、南は因島北部、

表 2 レーダ関連パラメータ

記号	パラメータ名	値
P _t	送信電力	10kW ± 50%
G _t	送受信アンテナ利得	30 dB
λ	波長	31.8 mm
B	帯域幅 (中間周波増幅器の帯域幅)	24MHz (0.06 μ sec) 10MHz (0.15, 0.3 μ sec) 5MHz (0.6, 1.2 μ sec)
NF	総合雑音指数	6.5dB 以下
S/N	最小受信感度	不明
L _{system}	総合システム損失	不明

西は三原市の中央部、東は芦田川近くまでをカバーすることができる。

レーダアンテナの設置された位置を図 1 の周辺地図と図 2 の建物配置の略図で示す。本学は丘陵地であり、山陽自動車道の高架よりも高い位置にある。近辺には数百メートル級の山があるが、レーダ位置から見ると数度の仰角に過ぎない。しかし、レーダの設置されている 3 号館の南側にはレーダの位置よりも高い丘陵が上りになって続いているため、この丘陵部からの不要反射が予想された。

3. 偽像とアンテナ放射特性

図 3 は表示装置に出力されるレーダ画面 (PPI スコープ) の例である。スクリーンは上方向がレーダを設置している 3 号館に隣接した 15 号館の時計台に向けて設定されている。時計台までの距離は 107 m で最小探知距離外にあり、また、周囲より突出した高さであるため識別が容易であったためである。レーダアンテナの位置から見ると時計台は方位角 (北を 0 度としたとき、上から見て時計回りに測定した角度、N の後ろに角度の数値をつけて表現する) が 31.5° であるが、レーダ画像上では -3° 程度のずれがあり、レーダの方位分解能が 2° であることを考えると、実際は 30 ± 2° とみられる。以下の議論では画像の方向をレーダ画面の方向を基準として示すことにする。

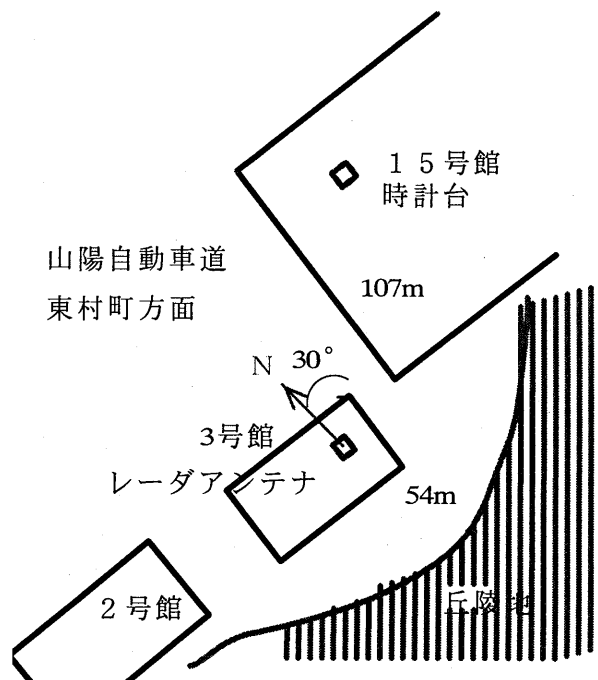


図 2 建物配置略図 (レーダ画像に方向が一致)

レーダ画像（図3）では航空機の航跡が点線で表示されるよう設定されている。この航空機は V28 を通過して広島空港の航空管制空域（CA）へ向けて旋回している。

5 km のレーダ環（点線表示）の内側で左側の N270 から N360° の範囲に約 2 km にわたって、おおぎ形の強いエコーが見られる。この方向は図1, 2の地図で示すように、障害物のない視界の開けた方向であるため偽像である可能性は高い。

一方、

- (1) N240° 10 ~ 15 km 複数のエコー
- (2) N270° 6km 明るい輝点
- (3) N60° 4 km
- (4) N90° 7 km

にある固定されたエコーは実際に存在するターゲットを表していると思われる。

まず、偽像と思われるエコーの原因を調べるための実験を進めた。屋上のレーダアンテナの直下で、屋上面から 1.2メートルの高さにトランシットを置き、周囲にある障害物の仰角を測定した。その結果を図4に示す。このデータには樹木の先端の高さを含むため、3号館の南側では仰角が 20° に達するところがある。しかし、北側は時計塔以外に仰角の高いものはなく高速道路の高架の向こうに数キロにわたって田畑が広がり山すそに達しているのみである。

設置されたレーダ装置は上空の観測を行うことを目的としているため、海上仕様のスロットラインアンテナを約 25.5° 上方にチルトすることにより、ファンビームの下限がこのような障害物を避けるように考慮されている。

図5はアンテナの前方5mの位置に利得0のループアンテナを置いて測定した放射電波強度分布である。仰角 12° の時の値を 0 dB として相対値で示している。横軸はアンテナから水平方向を 0° とした角度で表している。この測定ではメインビームの最大点まで値が測定できていないが、アンテナある 3 dB 低下点は $+10 \pm 2^\circ$ とみなすことができる。しかしながら、仰角の負の方向すなわち、地面方向への電波強度は -10° 方向でも -13 dB とかなり強い。

一方、サイドローブの大きさを測定するために、レーダアンテナの背面方向へ放射を測定したものが図6の結果である。この測定ではアンテナから 5m 離れた背面方向で、電波の受信強度が最大になる高さで受信電力を利得 19 dB のホーンアンテナで測定した。最大強度を求めたために測定した高さがそれぞれの点で異なるものの、おおむねその高さはア

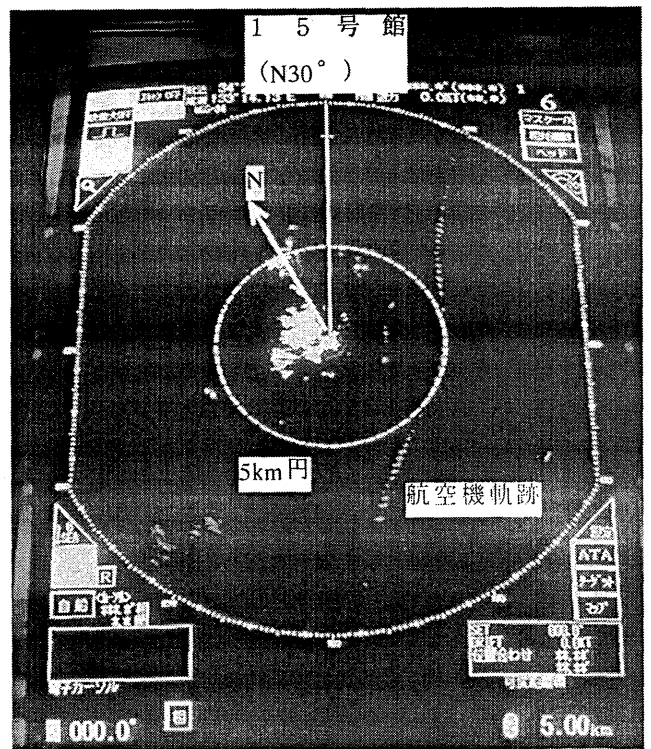


図3. レーダ画面（例）

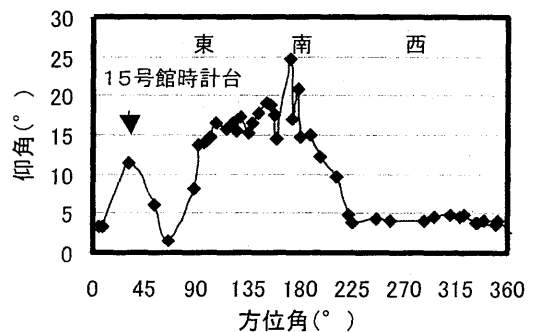


図4 3号館屋上（レーダアンテナ位置）からの視界

ンテナからみて俯角 40° 以上であった。この測定は図5の測定の場合とは受信アンテナが異なるため、完全には比較することができないが、おおむね図5の結果と整合している。このことから、このスロットラインアンテナのサイドローブは -20 dB とカタログ値 (-30 dB) よりも 10 dB 程度大きくなっていることが分かる。これはアンテナの一部から電磁波のリークではないかと疑われた。

そこでスロットラインアンテナの表面で放射電界強度を測定する実験を行った。その結果を図7に示す。スロットラインアンテナの表面に先のループアンテナを近づけてその受信電力を測定した。スロットラインアンテナは正面、背面、上、下面の4面を持つため、各面の中央部近くを長手方向に等間隔で測定する。その結果、下面の軸付近からの放射が他

に比べてやや大きいこと、また、上面の一部に放射のピークがあることが分かった。下面についてはスロットラインアンテナの仰角のチルトの設計において何か問題もしくは調整不良があると考えられた。

以上の結果を踏まえて、スロットラインアンテナ下面の軸付近にアルミテープをはり、アンテナ正面以外に電波吸収体を貼り付けた。しかし、このような作業を行ってもレーダ画像には何の変化も見られなかった。このような一連の実験結果から考えて、問題としている偽像は、1. に述べた(4)のサイドローブの効果はであるとはすでに否定された。

(1)の大地(すなわち屋上面)からの反射の可能性は屋上面でアルミ板を置いたり立てたりすることによってもレーダ画像に変化がなかったことから否定できる。他の無線設備による(2)のケースでは細長い線が伸びる画面となることが多く、特徴が異なる。さらに、大きな構造物が見当たらないことから(5)ではないと考えられる。

4. クラッタの解析

表示装置の側で受信感度を低下させ、さらに、観測する距離を最小とした場合のレーダ画面を図8に示す。2つの距離環は73mと55mである。図5とは違って変わり、北西側の偽像が表示されず、南側から西側にかけて集中したエコーが見られる。この方向は図4に示す丘陵地に当たる。このレーダ画像では15号館の時計塔もはっきり確認することができる。図9は図5のレーダイメージの偽像と思われる部分の拡大図である。細いイメージが層状に積み重ねられているように見える。

IからIVでひかれた線上でその層状の間隔を測定するとおよそ300mから400mの間隔となる。このことから少なくともレーダからこの距離にある何らかの反射体との間の多重反射ではないかと推定できる。そのようなものを図1の地図で見ると、山陽自動車道の高架がほぼそのような位置にあることがわかる。

試しに、30cm×70cmのアルミ板を10mの距離でレーダアンテナの高さより1mほど上方に置いた場合のエコーを図10に示す。10mしか離れていないにもかかわらず、2kmほど遠方まで層状のエコーとして表示されることが分かる。問題の偽像はこの結果によく似ており、同じように多重反射を繰り返した結果と見られる。しかしながら、高速道路がそのような作用を及ぼしているという実験的証拠を得るには至らなかった。

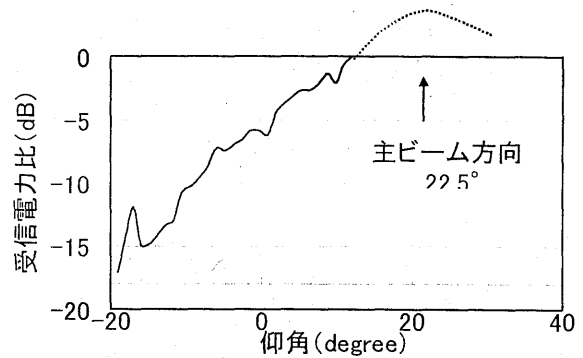


図5 アンテナ正面における鉛直方向の放射電力

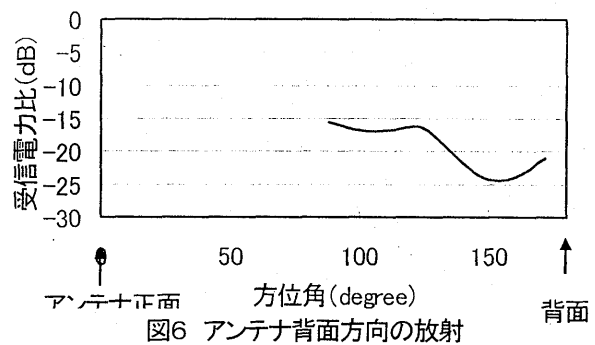


図6 アンテナ背面方向の放射

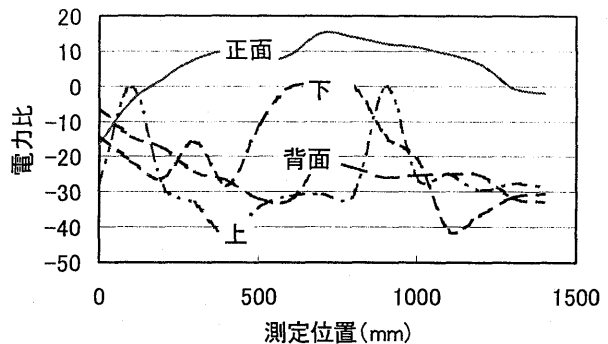
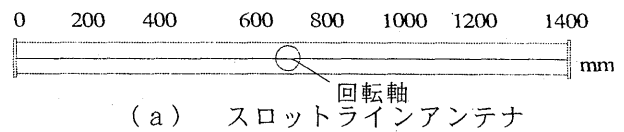


図7 スロットラインアンテナ表面の放射

偽像以外に実際のターゲットからの反射と見られるエコーは、数百m～400m級の比較的背の低い山であると推定している。レーダ波が上空にのみ放射されるのであればそれらの山の上をビームが飛び越えてるが、地表波として伝播する成分があるた

5. まとめ

航空機の監視を行うためのXバンドレーダの設置め反射波が得られる。

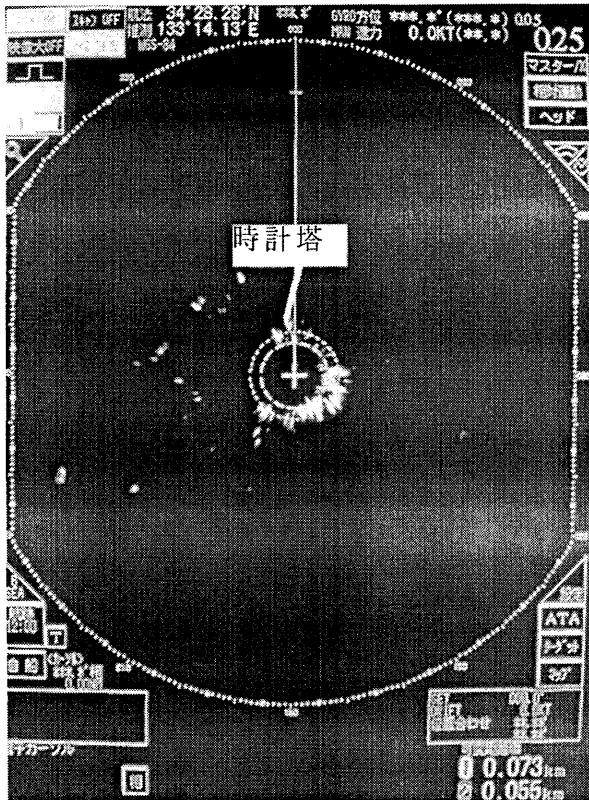


図8 受信感度を下げたレーダ画像

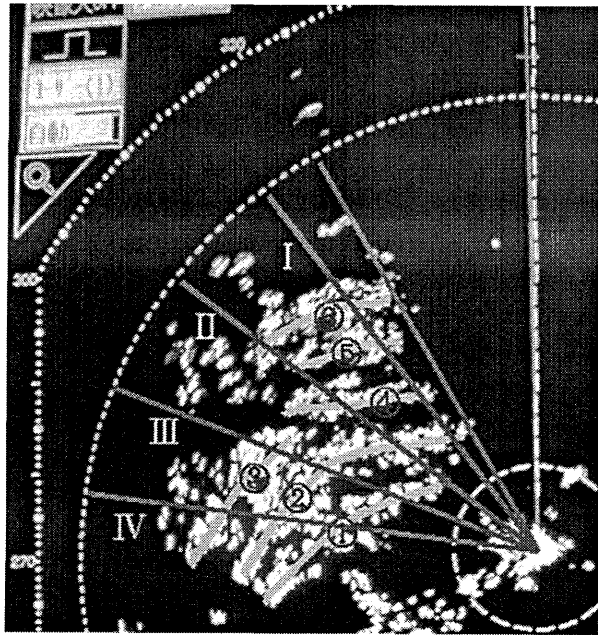


図9 偽像の拡大図

状態と諸性能について述べ、レーダ画像上に発生する偽像の原因について考察し、多重反射が発生していることを示した。しかし多重反射を起こすターゲットは特定できていないためさらに研究が必要である。

航空機を観測するためには遠方で補足し進路を予測する必要があるため、受信感度を高めにとる必要

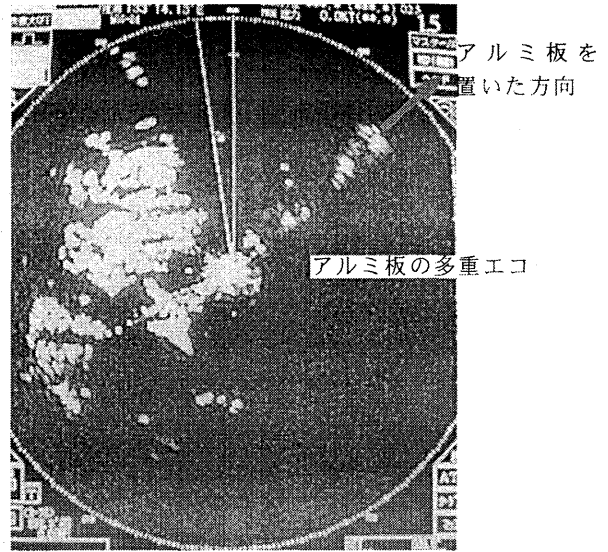


図10 アルミ板による多重エコー

があり、そのために偽像が現れ、2 km以内でのターゲットの捕捉を困難にする。しかしながら、このレーダでは鉛直線から 55° 以内には電波ビームが届きにくく、5000ftの高度の航空機の場合には2 km以内に進入すると見失ってしまうことになる。そういった意味ではこの偽像は運用上の障害となるほどではない。また、近くにあるターゲットを観測する場合には受信感度を下げてSTCを働かせることにより問題となっている偽像を抑制することは可能である。

今回は述べてはいないが、本レーダのもうひとつの利用目的としての降雨・降雪の観測とライダーとの連携がある。現在、降雨域の分布をリアルタイムで捕らえるなど、興味深いデータが得られつつある。今後、レーダ運用の自動化を進めていく中で、画像処理技術などを用いて、偽像と降雨を識別するなどの課題に取り組んでいく予定である。

謝辞

本稿の執筆にあたり多大なご協力頂いた電子・電気工学科 香川直己助教授に感謝する。

参考文献

- [1] 香川直己, 辻原佳奈, 三島匡記: 「対流圏大気観測のためのレーザ・レーダシステムの開発」, 福山大学工学部紀要, 第24巻, pp.23-29, 2002年10月.
- [2] 西谷芳雄: 「電波計器」, 成山堂書店(1998).
- [3] 株式会社トキメック: 「マリンレーダ BR-2220C シリーズ取り扱い説明書」(1998).
- [4] 関根松夫: 「レーダ信号処理技術」, 電子情報通信学会(1991).