

障害物探知用赤外線及びミリ波センサの精度

電子航法開発部 山本 憲夫, 山田 公男*, 米本 成人, Shanker Man Shrestha¹, 安井 英己²
那須 清二³, 根日屋 英之⁴, Binh Duong Nguyen⁵, Claire Migliaccio⁵, Christian Pichot⁵

¹電気通信大学, ²(株) IHI エアスペース, ³日立エンジニアリング(株), ⁴(株)アンプレット, ⁵ニース大学

1. まえがき

ヘリコプタ等の小型機は、輸送、監視、農薬散布等で低空を有視界飛行することが多い。このとき、送電線や索道等目視では発見困難な障害物に衝突する事故がしばしば発生している。このため、前方をセンサで監視し、障害物を探知してパイロットに警報を与えると共にその情報を明瞭に表示できる障害物探知・衝突警報システムの開発が望まれている。

有視界飛行する小型機向け衝突防止技術の必要性は世界的に認識され、多くの研究が行われている。例えば、GPSデータと地図情報との照合から障害物を推定する方法、レーザレーダによる障害物検出/警報システム及びミリ波レーダを用いる衝突防止システム等が提案されている。しかし、これらは基礎研究段階のものや軍用が多く、精度や検知距離等においても解決すべき課題が多いのが現状である。

筆者らは、民間のヘリコプタ用障害物探知・衝突警報システム開発のための研究を共同で行っている。開発の主な目標は以下のとおりである。

- ・ 主な探知対象：送電線等線状の障害物
- ・ 最大探知距離：約 800m
- ・ 処理：リアルタイム（監視－障害物探知－警報発生－表示、の処理を約 1 秒以内）
- ・ 形状等：小型、軽量、安価

これまでに、センサとして赤外線カメラを用い、赤外線画像を処理して障害物を識別、表示する手順等について報告した⁽¹⁾。悪天候時の性能補強と障害物までの距離情報取得のため、センサとしてレーダを追加することとし、実験用ミリ波レーダの試作と性能測定を行った⁽²⁾。また、赤外線画像とカラー画像をもとに障害物を強調表示する方法について提案した⁽³⁾。これらをもとに、現在実験用障害物探知・衝突警報シ

ステムの試作を行っている。

本稿では、まずこの障害物探知・衝突警報システムの概要を述べる。次いで、探知距離拡大のため、赤外線望遠レンズを用いた実験結果について述べる。試作したミリ波レーダの短距離精度等について電子航法研究所の電波無響室で実測した結果を報告する。さらに、レーダ小型化のため開発したスロットアレイアンテナの放射特性等について述べる。

2. 障害物探知衝突警報システムの概要

図 1 は実験用障害物探知・衝突警報システムの構成で、参照用カラーカメラ、赤外線カメラ、ミリ波レーダ、レーダ走査装置、制御装置及びデータ処理・表示装置等からなる。

赤外線カメラは、波長 3~5 μm の赤外線を検知する 800 x 500 個の 2 次元素子を持つ分解能の高いカメラである。ミリ波レーダは、周波数 94GHz、アンテナ出力約 10dBm、変調は FMCW 方式である。アンテナとして現在はカセグレンアンテナを使用している。レーダ走査装置は機体動揺の影響を緩和するためスタビライザ付きであるが、その走査範囲等は今後決定する。制御装置は、レーダ及び走査装置の制御とレーダ信号をもとに障害物までの距離計算を行う。データ処理・表示装置としては PC を用い、赤外線画像、距離情報の取得、障害物探知処理・障害物強調表示等を行う。

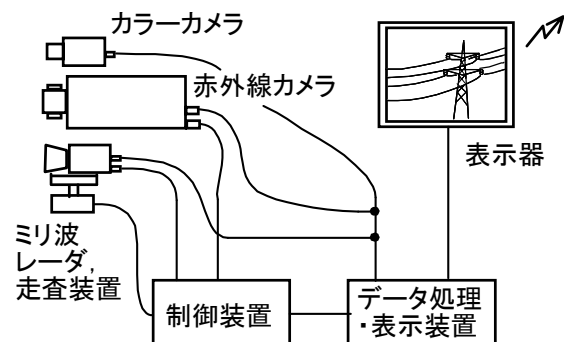


図 1 障害物探知・衝突警報システムの構成

* 元電子航法開発部



(a)カラー（望遠） (b)赤外線標準（50mm） (c)赤外線望遠（100mm）

図2 赤外線望遠レンズによる障害物の画像

表1 赤外線望遠レンズ，標準レンズの仕様

レンズ種類	焦点距離 (mm)	開口値 (F)	視野角 (度)
望遠	100	1.2	約 7 x 5.5
標準	50	1.2	約 14 x 11

3. 赤外線望遠レンズによる障害物の探知

3.1 赤外線望遠レンズの概要と実験内容

上記赤外線カメラによる線状障害物探知距離は天候，背景，気温等で変化するため一概には決められない。しかし，これまでのデータ分析から，開発目標として設定した探知距離800mは現在の標準レンズを用いたカメラでは満足できない場合が多いことが分かった。

そこで，探知距離を拡大するため赤外線望遠レンズを導入することとし，望遠レンズを用いた障害物の観測実験を行った。使用した望遠レンズ及び標準レンズの仕様を表1に示す。実験は，平成15年3月11日赤外線カメラ，カラービデオカメラ，ビデオレコーダ及びレーザ測距装置等を実験計測車に搭載し，神奈川県相模湖町から都留市に向かう山間の地方道沿いにおいて行った。

3.2 実験結果及び考察

図2は測定結果の一例で，神奈川県相模湖町三ツ木付近で建造物と山林を背景にした送電線を観測したものである。この図で建造物までの距離は約870m，建造物付近の送電線までの距離は約600mである。これらの距離は5万分の1地図及びレーザ測距装置で求めた。

図2(a)のカラー画像はズームレンズで約4倍に拡大したものである。しかし，この画像でも建造物，樹木を背景とした部分では電線の

識別が困難であった。一方，赤外線標準レンズ（50mm）を用いた画像(b)では背景に拘りなく上下に3条の送電線が検出できた。100mm望遠レンズを用いた画像(c)では，これら送電線の本数まで明瞭になると共に，標準レンズでは不明確な架空地線が識別でき，観測精度が向上した。

送電線の直径は送電電圧により異なり，一般に15～35mm程度であるが，架空地線はこれより細く10mm程度が多い。仮にこの送電線の直径が架空地線の1.5倍とすると，この図の観測距離は600mのため，送電線がこの架空地線と同じに直径に見える距離は， $600 \times 1.5 = 900(m)$ となる。即ち，この例では100mm望遠レンズを用いれば開発目標である800m先でも送電線が検出できると言える。

ただし，望遠レンズを用いると視野が狭くなり，ヘリコプタの運動特性を考慮すると監視範囲が不十分となる恐れがある。したがって，標準レンズ+電子ズームまたはカメラのスキャン等視野を維持しつつ探知距離を拡大する方法について今後検討する必要がある。

4. FMCW方式ミリ波レーダの距離精度

4.1 実験内容

FMCWレーダでは，レーダ・目標間の距離及び速度は送信波と目標からの反射波との混合で生じる中間周波信号(ビート信号)から求まる。そこで，このレーダを電波無響室内に設置し，レーダ断面積658m²のコーナーリフレクタをレーダ前方で5～26m移動させてビート信号の周波数及びレベルを観測した。また，ビート信号の安定性を調べるため，信号の周波数とレベルを連続的に収集してその変動を観測した。

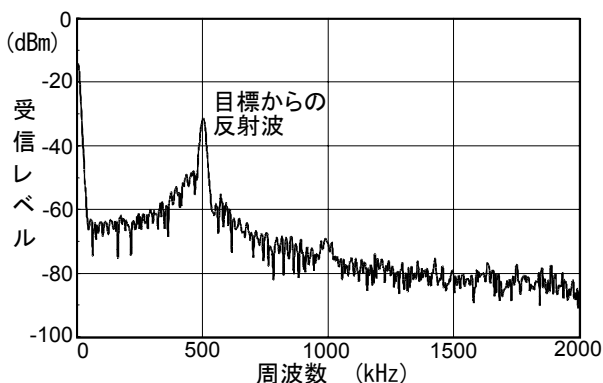


図3 FMCWビート信号スペクトル

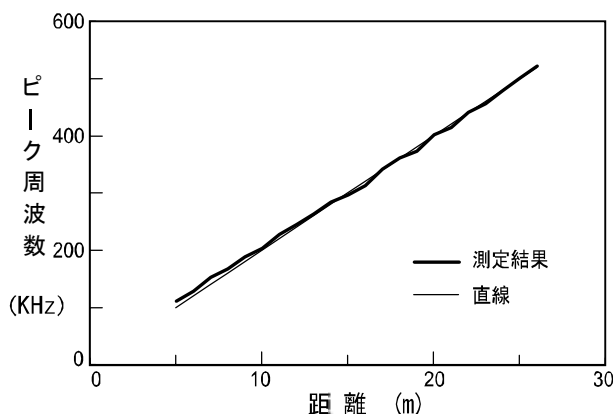


図5 ピーク周波数の直線性

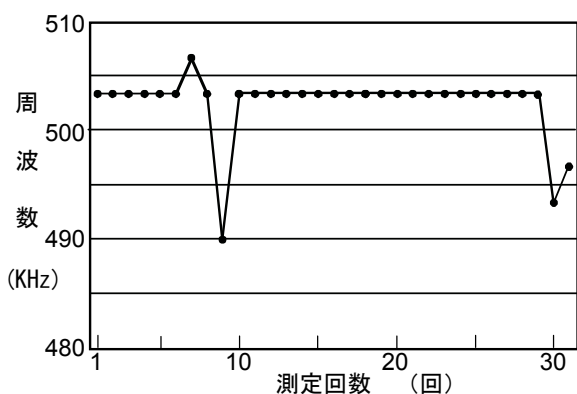


図4 ピーク周波数の変化

4. 2 実験結果及び考察

図3は、レーダ・目標間の距離を25mとしたときのビート信号スペクトルである。測定は電波無響室内で行ったためマルチパスが少なく、目標からの反射波に対応する500kHz付近と、送・受信回路の結合が原因の0kHz付近を除き高いピークは観測されなかった。

目標に対応するピーク信号の安定性を調べるため、ピーク周波数とそのレベルを約6秒間連続収集し、それぞれ31のデータを得た。図4はピーク周波数の変化で、31回のうち2回周波数が2%程度変化した。この原因は不明で今後調査が必要であるが、平均すると周波数は502.5kHz、標準偏差は3.2kHzとなり信号は安定していた。ピークレベルについて同様に観測した結果、レベル平均は-30.6dBm、標準偏差は0.78dBとなり、レベル変動も小さいことが確認できた。

レーダ・目標間の距離は図3のピーク周波数に比例するため、距離に対するピーク周波数の直線性を調べた。図5は測定結果で、距離10m程度以遠では直線からの偏位は±1.5%以下と

なった。したがって、このレーダの距離精度は本用途に対しては十分高く、かつ前述のようにピーク周波数やレベルの変動も小さいことから、データレートの低下に結びつくデータ平均化等の処理も簡潔にできる。なお、図5において10m程度以内で直線性が悪化するのには反射波のレベルが高く、受信回路での信号飽和が起こったためと考えられる。ただし、このレーダは本来そのような近距離での使用は想定していないため支障はない。

今回の測定では短距離でのレーダ精度と信号の安定度を明らかにしたが、遠距離かつ地上や背景からの不要反射がある実用に近い環境下でのレーダの精度について、今後実験・評価を行う予定である。

5. ミリ波レーダ用スロットアレイアンテナ

5. 1 アンテナの構成と実験内容

現在使用しているカセグレンアンテナは、直径33cmとミリ波レーダ本体に比べ大型である。レーダをヘリコプタに搭載するには必要なゲインを維持しつつ小型化でき、かつ振動・衝撃等に強いアンテナの開発が必要である。そこで、スロットアレイアンテナを一次放射器とし、これに反射板を付加したりフレクタアンテナ開発を進めている。図6はこのアンテナの全体構成とスロットアレイ部分の外観で、導波管開口に6個の長方形開口を持つ誘電体基板を貼りつけたスロットアレイと、円形の反射板からなる。ここで、誘電体基板の広さは4.9×2.3mm、個々の長方形開口は0.7×0.3mmと極めて小さい。アンテナ特性はこの開口の位置、大きさを調整することにより最適化できる。

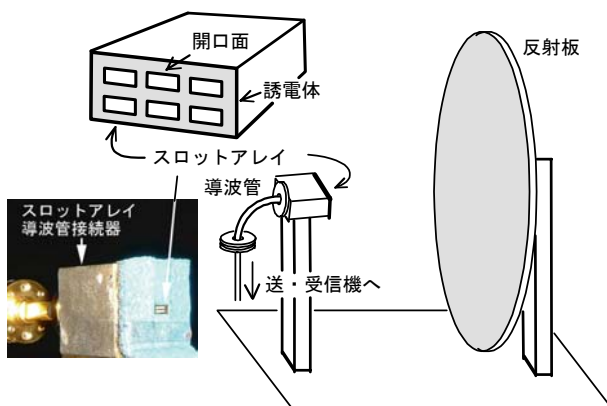


図6 反射板付スロットアレイアンテナ

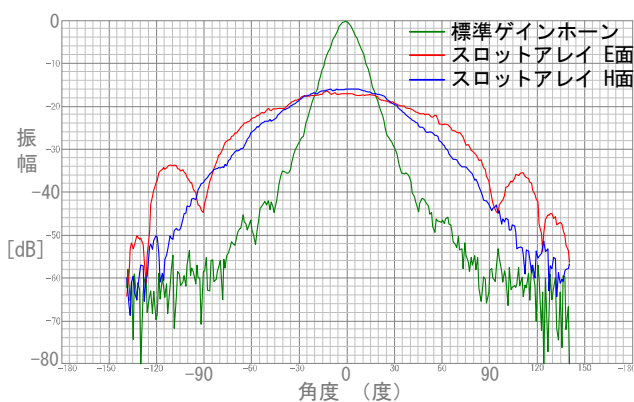


図7 スロットアレイの放射特性

今回はこのアンテナのスロットアレイ部分の放射特性，リターンロス (= S_{11} : アンテナ，給電線不整合による電力損) 特性を電波無響室で測定した。また，参照データとして標準ゲインホーンアンテナの特性測定を行った。

5. 2 実験結果及び考察

図7は上記スロットアレイの放射特性で，標準ゲインホーンアンテナのレベルで正規化している。スロットアレイの放射特性は，E面，H面共ゼロ度方向に対しほぼ左右対称となり，標準ゲインホーンとの比較から，そのゲインは約9dBiであった。図8はこのスロットアレイのリターンロス特性で，約93.3GHz ~ 96.6GHzの間で-20dB以下と給電線との整合はよくとれていた。これらの結果は予測計算結果とよく一致し，本スロットアレイは本リフレクタアンテナの一次放射器として満足できる性能を有していることが明らかとなった。

このスロットアレイに反射板を付加した総合的な特性については現在分析中であり，次の

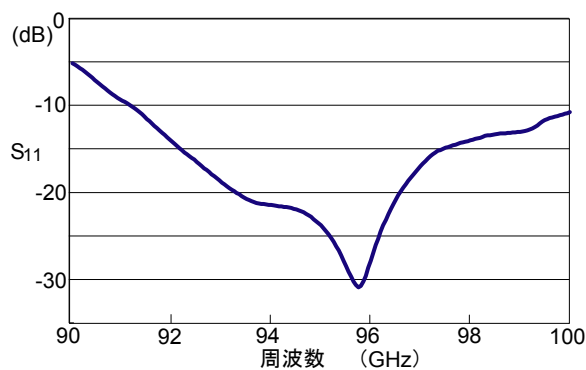


図8 スロットアレイのリターンロス特性

機会に報告したい。なお，現在の構成ではスロットアレイ・導波管接続器が大きく(図6参照)，リフレクタアンテナとしては効率が低下する恐れがある。したがって，この接続回路の小型化が今後の課題である。

6. むすび

ヘリコプタの障害物探知・衝突警報システム用の赤外線カメラに100mm望遠レンズを設置し，障害物観測実験を行った。その結果この望遠レンズにより800m先の障害物の探知が容易になることを示した。FMCW方式ミリ波レーダの距離精度を電波無響室で評価した。その結果このレーダの短距離での誤差は±1.5%以下と小さく，かつ変動も小さかった。このレーダ用にスロットアレイを一次放射器とするリフレクタアンテナを試作した。実験の結果，このスロットアレイの放射特性，ゲイン及びリターンロス特性は設計とよく一致した。

今後，実験用障害物探知・衝突警報システムを製作し，飛行実験の準備を進める予定である。

本研究は，一部運輸施設整備事業団基礎研究制度の支援を受け実施しています。

文献

- (1) 山本憲夫，山田公男，“小型機用衝突警報のための障害物検出・識別法”，日本航空宇宙学会 第36回飛行機シンポジウム，pp.157-160，Oct.1998.
- (2) K. Yamamoto et al.：“Millimeter Wave Radar for the Obstacle Detection and Warning System for Helicopters”，IEE Radar, 490, pp.94-9, Oct. 2002.
- (3) N. Yonemoto et al.：“Obstacle Detection and Warning for Helicopter Flight using Infrared and Millimeter Wave”，SPIE AeroSense2003 Symposium, April 2003.