

12. 障害物探知用FM-CW方式ミリ波レーダ

電子航法開発部

※山本 憲夫 山田 公男 米本 成人 安井 英己*

日比 祥博** 根日屋 英之*** Claire Migliaccio****

*(株)IHIエアロスペース **日立エンジニアリング(株) ***(株)アンプレット ****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、障害物を検知してパイロットに警報を与える障害物探知・衝突警報システムの開発が望まれている。

小型機の衝突を防ぐためこれまで多くの研究が行われている。たとえば、ミリ波レーダによる送電線のレーダ断面積が解析されている。障害物をGPSで得た自己の位置データと地図情報との照合から推定する方法⁽¹⁾、レーザー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センサとす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を主目的とするものが多く、提案されたシステムには精度や検知距離等において解決すべき課題が多いのが現状である。

電子航法研究所では民間ヘリコプタ用に小型、軽量かつ安価な障害物検知・衝突警報システムを開発するための研究を行っている。研究内容は、障害物探知用センサ、センサ情報からの障害物識別、障害物表示及び実験/評価用障害物探知・衝突警報システムの試作等からなる。これまでに、赤外線カメラからの画像を処理して障害物を識別する手順や障害物表示法等について研究してきた⁽²⁾。その結果、悪天候時への対応、衝突危険度の予測精度向上等のため、センサとしてレーダの追加が必要との結論に達した。そこで、自動車の衝突防止用に研究が進み、今後小型、軽量化及び価格低下の可能性が高いミリ波レーダの応用を考えることにした。

ミリ波は波長が短く装置の小型化が見込めること、周波数資源に余裕があることからレーダや超高速通信用として最近広く研究されている。しかし、本用途に適したレーダの構成、地物による不要反射等に関して未だ十分なデータ

がないため、パルス方式の実験用94GHzミリ波レーダを試作し、これらについて調査している⁽³⁾。さらに、探知距離拡大や速度情報の取得を容易にするためFM-CW方式ミリ波レーダを試作し、その有効性について検討を開始した。

本稿では、まず現在想定している障害物探知・衝突警報システムの要件について述べる。次いで、新たに試作したFM-CW方式ミリ波レーダの概要を紹介する。このレーダへの適用を目指して試作したビバルディアンテナの特徴と放射特性等について報告する。また、赤外線とカラー画像をもとに、これまでの検討で得られた障害物の表示法を示す。

2. 障害物探知・衝突警報システムの要件

図1は現在想定している障害物探知・衝突警報システムの構成である。航空事故報告書によると、我が国での小型機衝突事故の多くは送電線、索道等により引き起こされているため、本システムで探知すべき主要障害物は線状の物体とした。本システムの赤外線カメラは目標が細長いこととパソコンの処理能力とを考慮して、640×480画素程度の分解能を有することが必要である。パイロットの意見から、レーダでは送電線を800m程度先で検出できることを目標とする。なお、ミリ波は直進性が強いいため、電波と目標とのなす角を直角に近くしないと目標

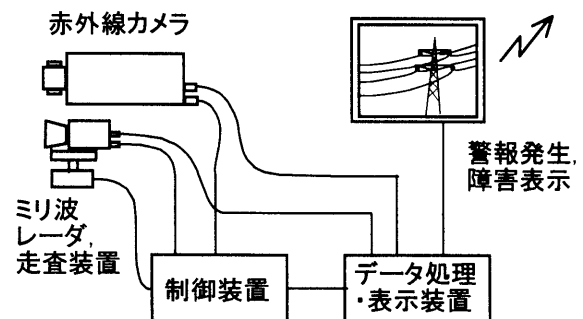


図1 障害物探知・衝突警報システムの構成

検出が困難になる。そこで、レーダビームの走査又は水平方向に広い放射特性をもつアンテナの開発が必要である。

現在用いている赤外線カメラ、ミリ波レーダ等は相当大きくかつ高価であるが、最近重量が約10分の1、価格が約8分の1の赤外線カメラが発売された。ミリ波レーダについては自動車用レーダの技術により今後大幅な小型、低価格化が期待できる。さらにデータ処理・表示装置としては小型パソコンの利用を前提としている。したがって、小型軽量かつ安価な障害物探知・衝突警報システムが近い将来実現する可能性は高いと考える。

3. FM-CW方式ミリ波レーダ

3.1 レーダの構成、原理

図2はFM-CWレーダの基本回路構成である。図3はこのレーダの信号波形で、レーダが目標に近づく場合を想定している。電圧制御発振器からの搬送波は、三角波発生器の出力電圧に比例するFM変調波として送信アンテナから放射される。反射物からの受信波と送信波の一部とはミキサで合成されビート信号が得られる。この信号には目標までの距離に比例する位相遅れ

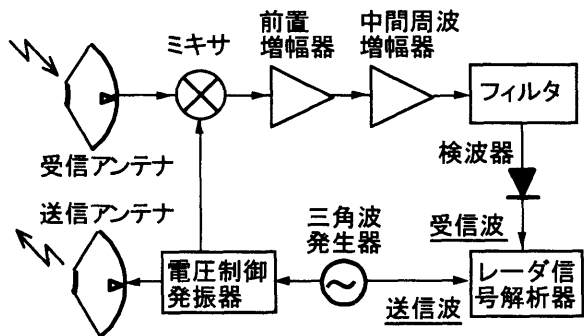


図2 FM-CWレーダの回路構成

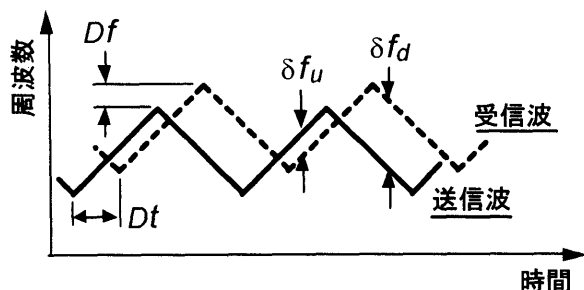


図3 FM-CWレーダの信号波形

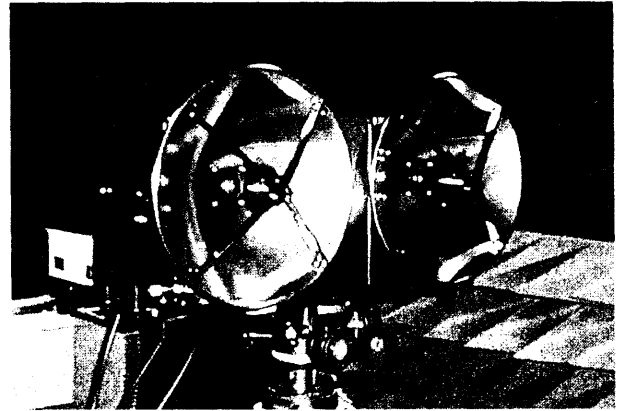


図4 94GHzFM-CW方式ミリ波レーダ

(図3の Dt) とレーダー目標間の相対速度により生じるドップラ周波数偏移 (図3の Df) が含まれている。 Dt 及び Df は変調周波数増加時及び減少時のビート信号の周波数差 (図3の δfu , δfd) から計算でき、これらをもとに目標までの距離と相対速度が求まる。

3.2 94GHzFM-CWレーダ

図4は試作したFM-CW方式ミリ波レーダのうち、レーダ信号解析器を除いた外観である。レーダの搬送波周波数 94GHz、信号電力約 +11dBm、変調周波数約 150MHz、三角波繰り返し周波数は約 10KHz である。アンテナは直径約 33cm、ゲイン 45dBi のカセグレンアンテナである。レーダの大きさは約 44×56×34cm、信号解析器部分を除く重量は約 7kg である。なお、送受信波の詳細な解析を行う必要から、信号解析器として現在は大型のベクトルシグナルアナライザ(アジレントテクノロジー 89610A) とパソコンを用いているが、信号復調法が確定すればこれらの小型化は容易である。

このレーダの基本特性について評価するため、送電線のレーダ断面積に相当する約 +28dBm² のコーナーリフレクタを用い、距離測定実験を行った。図5はレーダーリフレクタ間を 250m としたときの測定、表示結果である。同図(a)は受信ビート信号のスペクトル表示 (横軸: ビート周波数, 縦軸: 信号レベル), (b)は信号レベルを疑似カラー表示した例である。目標からの反射波に対応する周波数で信号レベルが高くなり、(b)では目標部分が最も白く表示された。なお、(b)の目標以外の薄い白線は後方の反射物の影響である。

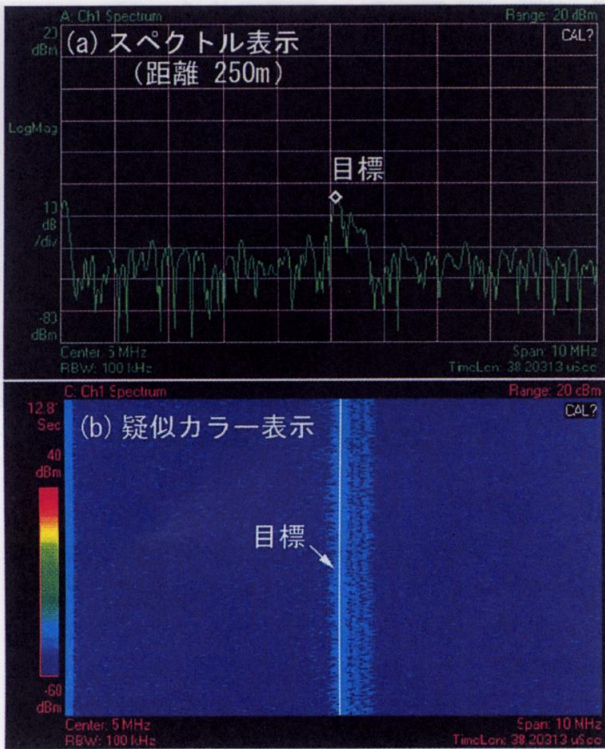


図5 測距データ表示例

この図で目標部分のビート周波数は5.075MHzであった。これは257mに相当し、測距誤差は約3%となった。リフレクタを200m先に設置し同様に測定した結果、測距誤差は約2%となった。これらは、このレーダの測距範囲及び精度が昨年度報告したパルス方式レーダ（測距範囲約120m、誤差約7%）より優れていることを示している⁽⁴⁾。ただし、測距精度はレーダの回路構成や不要反射波の影響を受けやすいため、今後さらに検討する必要がある。次に、反射物を移動しつつ測定した結果、その移動速度に関する情報が得られ、本レーダが適正な動作をしていることを確認した。

本レーダの最大探知距離、250mを超える遠方での測距精度及び速度情報の精度等については今後測定・評価を行う予定である。

3.3 ミリ波レーダ用ビバルディアンテナ

試作したFM-CW方式ミリ波レーダには現在直径約33cmのカセグレンアンテナが用いられている。しかし、レーダ小型化のためにはアンテナも小型化しなければならない。また、将来のレーダ集積回路化に対応するため印刷型アンテナを開発する必要がある。そこで、仏・ニース大学を主担当としてこのレーダ用ビバルディ

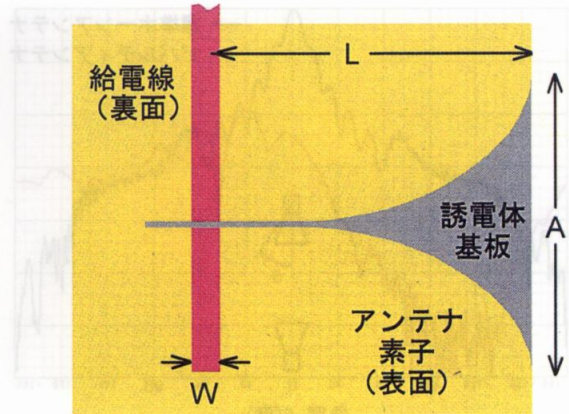


図6 ビバルディアンテナの模式図

アンテナの研究開発を行っている。図6はビバルディアンテナの模式図で、誘電体基板片面にアンテナ素子、反対面に給電線が印刷された構造となっている。このアンテナは、開口A、アンテナ長L及び給電線幅W等の変化で目的に応じたアンテナ設計が容易、周波数帯域特性が広い、形状が単純でモノパルスレーダ用アレイアンテナの構成が容易等の特徴がある⁽⁵⁾。

これまで、適当な誘電体基板がない等の理由でミリ波用ビバルディアンテナはなかったが、最近ニース大学において94GHz用ビバルディアンテナ及び同アンテナ-導波管接続素子の試作に成功した。そこで、その特性に関する基礎実験を当研究所の電波無響室で行った。図7は測定に用いたビバルディアンテナとアンテナ-導波管接続素子である。アンテナ素子は比誘電率9.2のアルミナ上に印刷され、大きさは約6.8×10.1×0.13mmである。アンテナ周辺の灰色及び青い物質は電波吸収材である。図8はこの

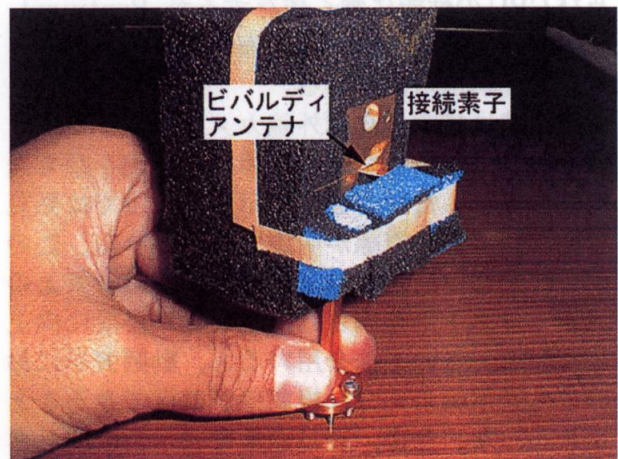


図7 94GHz ビバルディアンテナと接続素子

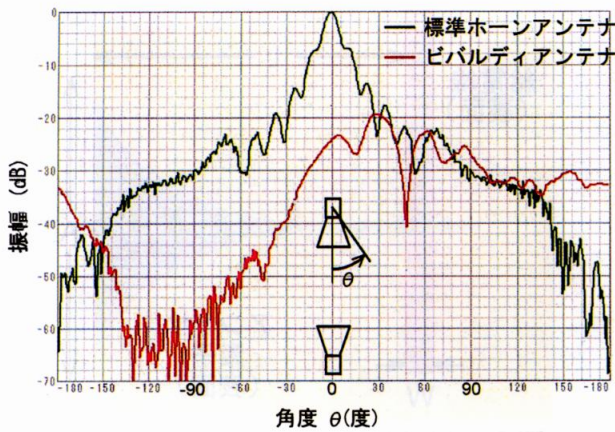


図8 アンテナE面放射特性 (94GHz)

アンテナと標準ホーンアンテナのE面放射特性である。試作したビバルディアアンテナではほぼ設計通りのゲインが得られた。ただし、このアンテナの放射特性は、本来ホーンアンテナと同様ゼロ度方向を中心に左右対称となるが、ここではアンテナ導波管接続素子の影響で左右が非対称となった。今後アンテナ本体への影響が少なくなかつ変換損失が少ない接続素子の開発を行うと共に、ミリ波レーダに適したアレイ構成を検討していく。

4. 障害物を含む画像表示

センサで検出した障害物をパイロットが見やすい形式で迅速に表示するため、現在検討中の障害物表示法の概要を紹介する。

障害物表示は、赤外線画像から輝度の高い部分の抽出、カラー画像との半透明合成、合成結果のリアルタイム表示の順で行う。描画速度は画像合成処理の他、撮像内容、通信バスの速度及びCPUの性能に強く依存するが、Pentium4, 1.5GHzのPCで720×480画素の画像を毎秒4枚以上更新が可能である。

航空機に搭載した赤外線カメラ、カラーカメラで観測、記録した映像を用い、上記手順で送電線を表示した例を図9に示す。目視では発見できなかった送電線が明瞭に表示された。この例では適切な配色により電線と周囲の背景とのコントラストが強調され、視認性が格段に向上している。この方法を用いると、動画表示においても送電線の十分な視認性が確保できることがわかった。今後、表示速度や表示色に関しさらに検討すると共に、将来的にはレーダ情報の適切な融合法について研究する予定である。

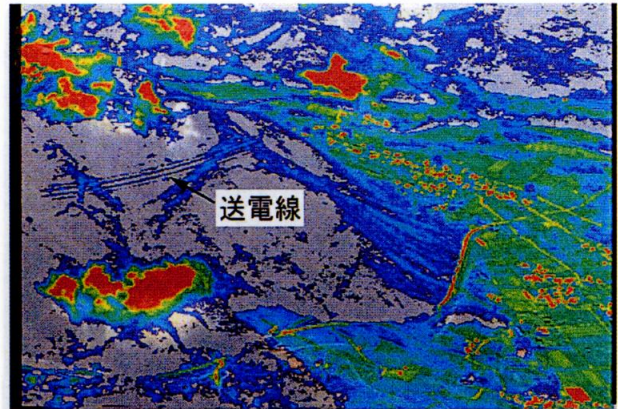


図9 送電線を含む画像表示例

5. むすび

ヘリコプタの障害物探知・衝突警報システム用にFM-CW方式ミリ波レーダを試作した。測定の結果、このレーダはパルスレーダより探知距離や精度が優れていることがわかった。ミリ波レーダ用ビバルディアアンテナを試作した。無響室での実験の結果、このアンテナのゲインは設計通りであったが、放射特性は導波管アンテナ接続素子の影響を受け、理論通りとはならなかった。また、赤外線画像をもとに障害物を表示する方法について述べ、提案した表示法で障害物を毎秒4枚以上明瞭に表示できることを示した。

今後、障害物探知用ミリ波レーダ及び赤外線、レーダデータ処理法について研究を進めたい。

文献

- (1) 倉谷直彦, “対地衝突回避機能付き航空用GPS/MAP装置の概要”, 第14回誘導制御シンポジウム, pp.57-62, Nov.1997.
- (2) 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.
- (3) K. Yamamoto, K. Yamada, “Obstacle Detection for Helicopter Flights by Infrared Images,” Proceedings of SPIE, Vol. 4363, pp.76-85, 2001.
- (4) 山田公男, 山本憲夫, “飛行障害物検出の処理とミリ波レーダ”, 第1回電子航法研究所発表会講演概要 pp. 47-50, June 2001.
- (5) L.Linardou, C.Migliaccio, J.M.Laheurte, “Twin Vivaldi Antenna for Transponding Applications”, International Symposium on Antennas (JINA), pp. 718-721, Nov. 1998.