

5. ヘリコプタ前方障害物監視用ミリ波レーダの研究開発

監視通信領域 ※ニッ森 俊一, 森岡 和行, 河村 暁子, 岡田 国雄, 米本 成人
国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 小林 啓二
北海道放送株式会社 桂 信生

1. はじめに

様々な航空機の中でもヘリコプタは、比較的離着陸場所等の条件に柔軟に対応可能であり、空中での静止ができることから、災害救助・救急医療などで活躍している。一方、ヘリコプタは航空機の中でも比較的low高度を有視界飛行するため、気象や周囲構造物の影響で障害物等の発見に支障が生じ、事故等のリスクが発生する恐れがある。

これらの障害物等を事前察知し、周囲を監視するために操縦者を支援するシステムとして、可視・赤外カメラやレーダ等の様々なセンサを組み合わせたシステム等の研究がこれまで行われている[1]。さらに、送電線鉄塔等の障害物データベースと自機位置のGPS情報に基づき接近警報を発生するシステムも検討されている[2]。著者らは、これまでミリ波レーダを中心とした様々なセンサからなる高度監視システムの研究を行い、実機試験等を実施している[3]。本稿では、これまでに検討を行っているヘリコプタ前方障害物監視用ミリ波レーダの開発状況を議論する。最初にレーダ構成および障害物探知性能向上のための検討を示した上で、地上において実施した送電線鉄塔および送電線測定試験の測定結果例を示し、議論を行う。

2. ヘリコプタ前方障害物監視用ミリ波レーダシステム

図1に、2012年に実施したヘリコプタ前方障害物監視用ミリ波レーダの搭載状況を示す。開発したレーダシステムは特定小電力ミリ波レーダ規格(表1)[4]に基づくものであり、電波法の免許が不要である利点がある。図2に今回新たに改良を加えたヘリコプタ前方障害物監視用ミリ波レーダシステムの概観を示す。特定小電力ミリ波レーダ規格の範囲内で、障害物探知性能を向上させるため、後述するミ



図1 回転翼航空機搭載状況
(宇宙航空研究開発機構
三菱式 MH2000A 型ヘリコプタ)

表1 特定小電力ミリ波レーダ規格(一部)

周波数帯	76.0 GHz - 77.0 GHz
帯域幅	1 GHz 以内
送信電力	10 dBm 以下
アンテナ利得	40 dBi 以下

リ波レーダ受信回路を新たに構築し、送受信偏波としてミリ波レーダによる送電線検出に適した円偏波を用いている。また、送受信アンテナは送受信が同一のモノスタティック方式を用いており、機械回転式の炭素繊維強化プラスチック製のパラボラ反射板アンテナを有している。アンテナ仰角はスタビライザ付きの自動制御を行い、水平維持および任意角度制御が可能である。送受信分離および円偏波化のための偏波器は、76.5 GHzにおいて、送受信アイソレーション 35 dB および軸比 1.1 dB である。また、アンテナ利得は円偏波利得 35.6 dBic である。レーダシステムは、アンテナ部、送受信回路および信号処理回路を同一筐体内に納め、イーサネット経由でリアルタイムに、PPI (Plan Position Indicator) スコープ等のレーダ探知結果を出力可能である。

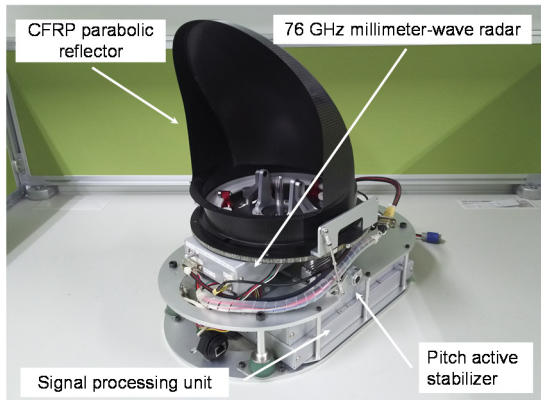


図 2 ヘリコプタ前方障害物監視用ミリ波レーダの概観

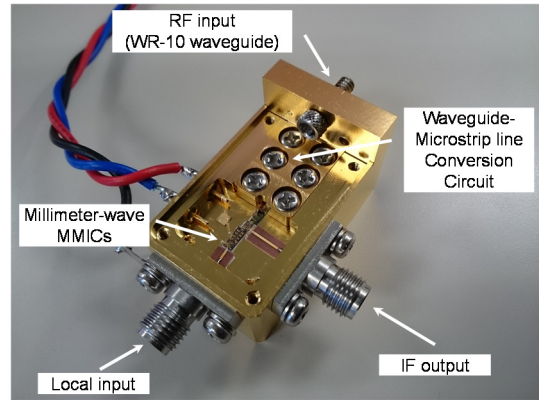


図 4 76 GHz 帯ミリ波レーダ受信回路フロントエンド部の概観

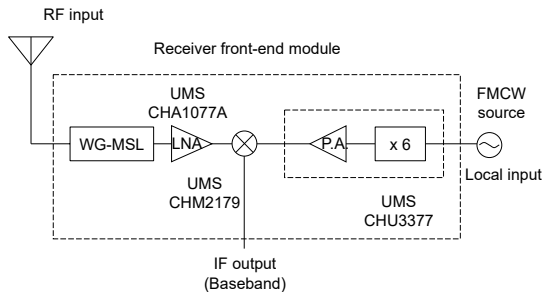


図 3 76 GHz 帯ミリ波レーダ受信回路フロントエンド部のブロック図

3. ミリ波レーダ受信回路構成

開発したレーダシステムでは、障害物探知感度向上を目的にレーダ受信回路フロントエンド部の検討を行った。従来のミリ波レーダ受信回路部では、主として回路の簡単化および小型化を目的にダイレクトコンバージョン方式を用いていた。ダイレクトコンバージョン方式では、回路の簡単化が達成できる一方、回路内で送受信信号の分離度を確保するのが困難であるため、受信フロントエンド内に低雑音増幅器 (Low noise amplifier, LNA) を設置することが困難である。受信フロントエンド内のミキサもしくは検波器の前段に LNA を設置することで、受信回路の雑音指数 (Noise figure, NF) を低下させることが可能であり、探知性能を改善することができる。そこで、新たに受信用ミキサの前段に LNA を設置した受信回路フロントエンド部の試作検討を行う。図 3 および図 4 に、それぞれ試作した 76 GHz 帯ミリ波レーダの受信回路フロント

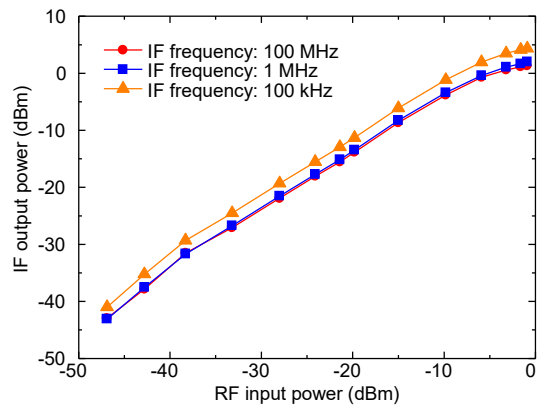


図 5 ミリ波レーダ受信回路フロントエンド部の 76.5 GHz における RF 信号-IF 信号電力特性

エンド部のブロック図および概観を示す。

受信フロントエンドは、ブロック図に示すように 3 つのミリ波モノリシックマイクロ波集積回路 (Monolithic microwave integrated circuits, MMIC) および導波管-マイクロストリップ線路 (WG-MSL) 変換器から構成されている。探知対象物で反射されたミリ波帯の受信信号は、導波管 WR-10 入力端子に加わり、WG-MSL 変換器に入力される。WG-MSL 変換器についても、ミリ波帯受信信号の減衰の原因となり、探知感度低下につながるため、可能な限り低損失な設計が必要である。ここでは、変換損失は 1.2 dB であり、従来のフロントエンド内部の WG-MSL 変換回路よりも損失を低減することができている。また、3 つの MMIC はそれぞれ、United Monolithic Semi-

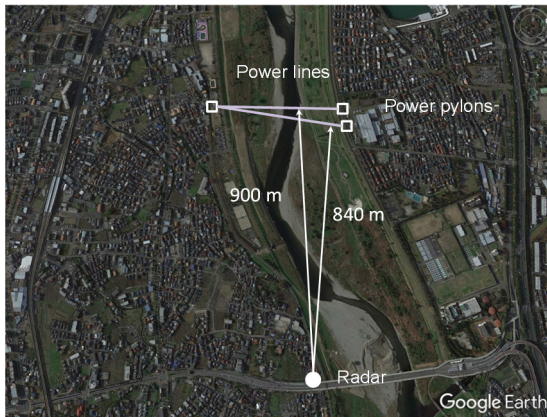


図6 ミリ波レーダ設置箇所および高圧送電線鉄塔・送電線位置

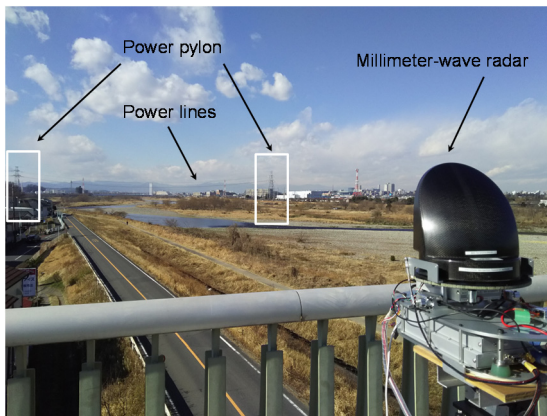


図7 ミリ波レーダ設置箇所から観測した高圧送電線鉄塔・送電線概観

conductors 社製であり、LNA、ミキサ、および局部発振信号生成の機能がある。LNAは周波数帯域が、76 GHz から 77 GHz であり、NF が 4.5 dB、利得 15 dB である。また、ミキサは同一周波数帯で変換損失は 7.5 dB である。さらに、局部発振信号生成用の MMIC は、6 通倍器および増幅器を内蔵し、12 GHz 帯の信号をミリ波帯の信号に変換後、ミキサに必要な電力レベルまで増幅する。試作した受信回路フロントエンド部の測定評価結果について議論する。図5に、ミリ波帯入力信号周波数を 76.5 GHz とした場合の RF 信号-IF 信号の電力特性を示す。局部信号周波数を変化させることで IF 信号の周波数を 100 kHz, 1 MHz, および 100 MHz とした。入力電力値を変化させた場合、0 dBm 程度で圧縮が観測されるが、

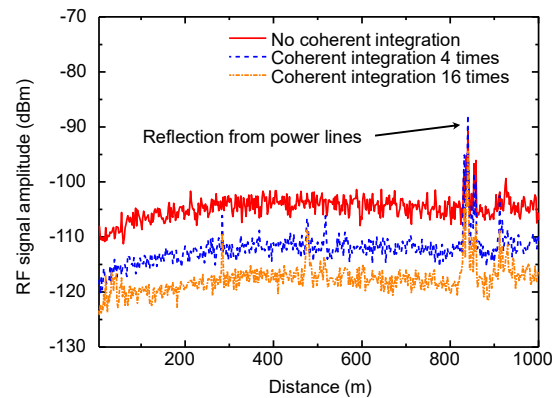


図8 高圧送電線測定時に得られたビート信号スペクトラム (インコヒーレント積分 10 回)

それまではいずれの IF 信号周波数でもほぼ線形特性が確認できる。これらの結果から、試作した受信回路フロントエンド部を、ミリ波レーダに適用することで、ミリ波受信信号を効率よく低ひずみで IF 信号に変換可能であることを確認した。

4. 送電線鉄塔および送電線測定試験

構築した 76 GHz ミリ波レーダを用いて、送電線鉄塔および送電線測定試験を実施する。受信フロントエンド部を含めたミリ波レーダシステムは特定小電力ミリ波レーダとして技術適合証明を取得している。ここでは、レーダ設置位置として、図6に示す東京都稲城市付近の歩道上から遠方の東京電力北多摩変電所に接続される送電線鉄塔および送電線からの反射波を取得する。高圧送電線は、275 KV の超高圧送電線であり、ACSR410 mm² の 4 導体構造である。送電線の探知距離はそれぞれ 840 m および 900 m である。ミリ波レーダ設置位置においては、図7に示す通り、測定対象物が見通せる位置にあり、パラボラ反射板アンテナの方位角および仰角を手動で調整することで対象物からの反射波を取得し、一次元のビート信号スペクトラムを取得する。信号処理において、信号対雑音比 (SN 比) 改善のための FFT 前のコヒーレント積分およびノイズフロアのゆらぎ低減のための FFT 後のインコヒーレント積分を行い、適宜パラメータを調整可能としている。図8に送電線測定時に

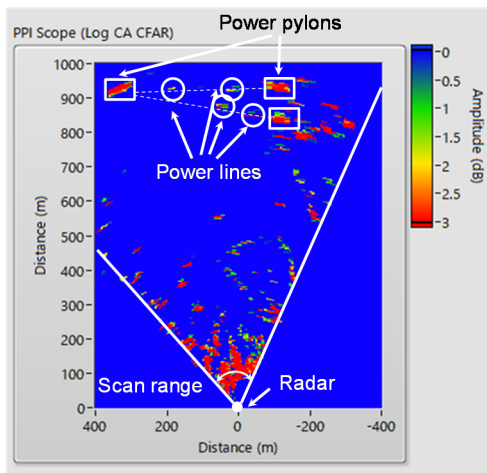


図9 送電線鉄塔および送電線測定時のレーダスコープ表示例

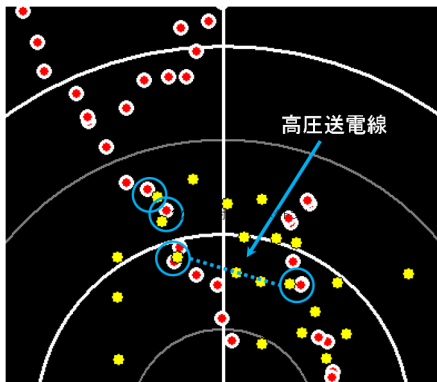


図10 送電線鉄塔データベースとレーダ検出データの重ね合わせ表示例

に得られたビート信号スペクトラムを示す。ここでは、インコヒーレント積分を10回に固定し、コヒーレント積分の回数を0回、4回および16回とした結果を示す。図から、840 mの送電線鉄塔において、反射波のピーク電力は約-90 dBmであることが確認できる。ここで、受信信号 SN 比はコヒーレント積分4回において、約28 dBである。ここで得られた受信信号電力値とノイズフロアを比較し、送電線の最大探知距離を推定すると、コヒーレント積分4回およびコヒーレント積分16回では、受信信号 SN 比10 dB時に、それぞれ約2,400 mおよび約3,700 mである。

また、図9に送電線鉄塔および送電線測定時のレーダスコープ表示例を示す。コヒーレント積分およびインコヒーレント積分に加え、

定誤警報確率処理 (Constant False Alarm Rate, CFAR) を行っている。図6と図9を比較すると、840 mおよび900 m先の送電線および両端の送電線鉄塔が観測されている。ここでレーダを地上に設置しているため、地上地物からの反射も確認できる。

構築したレーダシステムは毎秒1回以上のスコープ描画が可能である。図10に航空局提供の送電線鉄塔データベースとレーダ検出データの重ね合わせ表示例を示す。リアルタイムで送電線鉄塔データベースと重ね合わせて表示を行うことで、航空機上における障害物情報の充実を図ることができる。

5. まとめ

ヘリコプタ前方障害物監視用ミリ波レーダについて研究状況を述べた。レーダ構成および障害物探知性能向上のための検討を議論した上で、地上において実施した送電線鉄塔および送電線測定試験の測定結果例を示し、議論を行った。現在、構築したミリ波レーダを実機ヘリコプタに搭載し、障害物探知試験を予定しており、飛行時の送電線鉄塔および送電線鉄塔の探知性能を評価する予定である。また、送電線鉄塔データベースとの合成表示法についても今後検討を行う。

参考文献

- [1] L. S. Sadovonik, et al., "Helicopter obstacle detection radar system", Proc. SPIE, vol. 4023, pp.2-12, 2000.
- [2] パイロット用送電線鉄塔警告システム取扱説明書, 株式会社三新, Feb. 2012.
- [3] S. Futatsumori, et al., "Compact and high-performance 76 GHz millimeter-wave radar front-end module for autonomous unmanned helicopters", Proceedings of the 41th European Microwave Conference 2011 (EuMC2011), pp. 21-24, Oct. 2011.
- [4] ARIB STD-T48 2.2 版, 特定小電力無線局ミリ波レーダ用無線設備標準規格, 社団法人電波産業会, 2015.