

滑走路上障害物検知用光ファイバー接続ミリ波レーダー

河村 暁子 岡田 国雄 森岡 和行 ニッ森 俊一 米本 成人

独立行政法人電子航法研究所 〒182-0012 東京都調布市深大寺東町 7-42-23

E-mail: kohmura@enri.go.jp

あらまし 空港滑走路上に残された、航空機から落下した部品や破片などは大きな事故の原因となりうる。本報告では、空港滑走路上障害物検知のために、光ファイバーネットワークを利用したミリ波レーダーを用いることを提案する。この構成は、レーダーの送信信号（本稿では FM-CW 信号）とアンテナを含むレーダーモジュールとの間を光ファイバーで接続することで、減衰を抑えながら信号源とレーダーモジュールの距離を離すことができるのが利点である。この接続法を、RoF(Radio over Fiber, 光ファイバーを通して電波を送る、の意)とよぶ。RoF システムを含むミリ波レーダーの実現を最終目的として、はじめに光ファイバー接続構成の特長を有効に活用できる接続距離の条件を明らかにする。さらに、実際に RoF を含むミリ波レーダーを試作し、電波暗室における疑似ターゲットの測定を通して提案するシステムの効果を確認する。この実験により、滑走路上障害物検知のために RoF 接続ミリ波レーダーを用いることの効果と課題を明らかにすることができた。

キーワード 空港滑走路上障害物検知, ミリ波レーダー, RoF, FM-CW

Radio over Fiber Connected Millimeter-Wave Radar for FOD Detection on Airport Runway

Akiko KOHMURA Kunio OKADA Kazuyuki MORIOKA

Shunichi FUTATSUMORI and Naruto YONEMOTO

Electronic Navigation Research Institute 7-42-23, Jindaiji-higashi, Chofu, Tokyo, 182-0012 Japan

E-mail: kohmura@enri.go.jp

Abstract

Since the Concorde supersonic aircraft accident in 2000, the threat of Foreign Object Debris (FOD) on airport runways has been focused on. The FOD detection system is expected to prevent such the tragedy. In order to keep the airport runways clean and safe, authors are developing radar to detect small metallic objects on the airport runway surface. Millimeter-wave radar is the first candidate for this purpose because of its high detection resolution. However, the radar surveillance range is generally limited due to the high frequency attenuation and the low power devices.

This paper proposes a new concept of FOD detection millimeter-wave radar using a Radio over Fiber (RoF) system. The concept overcomes the attenuation problems by connecting a local signal generator and the millimeter-wave radar module with optical fibers. The optical fiber propagation loss is much less than the free space propagation loss of radio frequency (RF), thus the completely new FOD detection system can be composed by applying the RoF system. Measurements of a prototype system, 94 GHz millimeter-wave radar connected by optical fiber, show the possibilities for the new airport application especially in terms of detection sensitivity.

Keyword FOD detection; Millimeter-wave radar; RoF; FM-CW

1. はじめに

2000年にパリ・シャルルドゴール空港で起きたコンコルド機離陸中の炎上事故は、滑走路に残された他機の部品が原因であったと報告[1]されている。この事故では、離陸滑走中のコンコルド機によって障害物である部品が跳ね上がり、タイヤの破裂を経て燃料タンクに穴が開き、漏れた燃料がエンジンに引火して爆発を引き起こした。空港滑走路上の障害物はこのような大事故の原因となりうる。これまで、いくつかの滑走路障害物検知装置[2-4]が開発されているが、コストや設置面積、センサの天候依存、電波免許の取得等に問題があり、普及していない。よって、日本を含む世界のほとんどの空港では職員の目による1日2,3回のパトロールで障害物に対応しており、安全対策が十分でない状況にある。

本稿では、空港滑走路障害物検知のために、光ファイバーネットワークを利用したミリ波レーダーを用いることを提案する。この構成では、レーダーの送信信号（本稿ではFM-CW信号）とアンテナを含むレーダーモジュールとの間を光ファイバーで接続することで、信号源とレーダーモジュールの距離を離すことができるのが利点である。この接続法を、RoF(Radio over Fiber, 光ファイバーを通して電波を送る、の意)とよぶ。

第2章でこのコンセプトについて詳しく述べ、さらに、第3章で光ファイバー接続構成の特長を有効に活用できる接続距離の条件について、同軸ケーブル接続の場合と比較検討する。最後に第4章にて、試作したRoFを含む94 GHz FM-CWレーダーの測定結果について報告し、まとめとする。

2. 障害物検知 RoF レーダーのコンセプト

滑走路上で検知の対象となる障害物は、潜在的に前章で示したような大事故の原因となりうる。FAA(米航空局)の基準[5]では、その障害物の形状を最小で高さ直径が1inch(25.4 mm)の円柱と想定している。本研究では、このような障害物の検出に、94 GHz帯 FM-CWレーダーを使用する。ミリ波を用いるのは、分解能を得るためである。また、レーダーは高感度カメラや赤外線カメラ等と比べて天候の変化に強くコストも適当である。

図1に本研究で提案する空港滑走路障害物検知装置のイメージを示す。このシステムは、滑走路付近に設けられる、アンテナを含む複数のレーダーモジュールとこのモジュールをまとめる中央装置に大別できる。滑走路付近の各モジュールは、それぞれ自身の半径約60 m(滑走路の幅に相

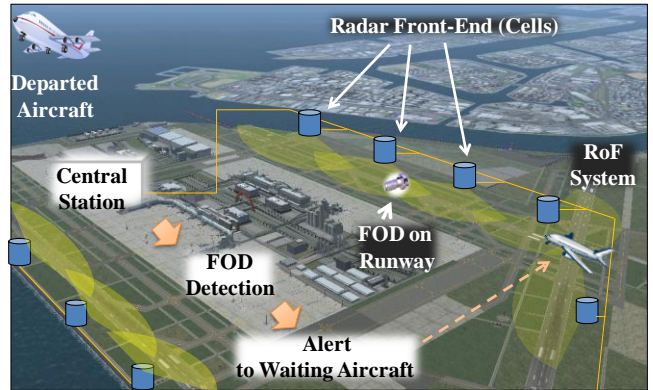


図1 滑走路障害物検知システムイメージ

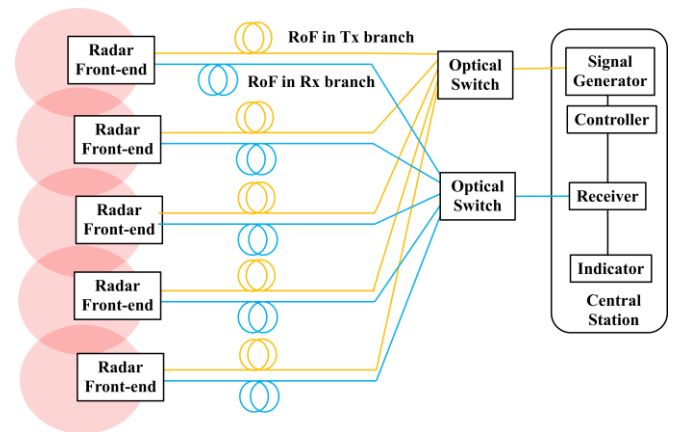


図2 光ファイバーを用いた接続網

当)の領域を監視する。これらモジュールは、滑走路全体を網羅する必要はなく、離着陸に多く使われる領域に配置する。一方、中央装置は、システム全体で1つあればよく、各レーダーモジュールへ供給するレーダーの送信信号の生成および検知結果の処理を担う。本システムが滑走路上で障害物を検知した場合は、この中央装置が管制官へその情報を知らせる。

本コンセプトの重要な点は、前述の複数のレーダーモジュールと中央装置が、図2に示すように光ファイバーで接続されることである。この接続によって、レーダーの高価な部分である信号生成部(中央装置側)と、比較的成本の低いモジュール部を離して設置することが可能となる。その距離は、空港面積から考えて1~3 km程度と想定される。一般的な同軸RFケーブルによる接続では、特に高周波(今回の実験では約15 GHzの中間周波数を通す予定)の伝搬損失が大きく、両者を数km離すことは不可能である。この効果につ

いては、第3章にて詳しく検討する。さらに、光ファイバーは空港灯火等の管理のためすでに空港地中に敷設されていることが多く、少なくとも管路は存在する。よって、既存の設備の応用によって設置コストを抑えられる可能性がある。参考までに、1000本の被覆されていない光ファイバーケーブルを束ねた太さは、直径3cm程度である。

3. RoF が効果的な条件

前章で述べた通り、本研究で提案する滑走路障害物検知システムは、レーダー信号生成部を含む中央装置と滑走路付近で障害物を監視するレーダーモジュールの間を、光ファイバーで接続する。この接続距離は、最大で数kmを想定している。このとき、光ファイバー接続の、一般的なRF同軸線路接続と比較した効果について議論する。

光ファイバーでRF機器同士を接続する場合、図3に示すように、E（電気）/O（光）変換器とO/E変換器を介す必要がある。E/O変換器は、変調器とも呼ばれ、レーザ信号を送信するRF周波数に従って振幅変調し、光ファイバーへ送り出す。一方、O/E変換器は、この光信号をLiNb3フォトダイオードを用いて直接検波方式でRF信号へと復調する。

本報告では、この両変換器と光ファイバーを合わせてRoFシステムとよぶ。光ファイバー接続と従来の同軸ケーブル接続を比べる場合、光ファイバー側は、2つの変換器の損失を含めたRoFシステム全体の損失として扱う必要がある。

図4はベクトルネットワークアナライザで測定した、RoFシステムと同軸ケーブル(1m)の透過係数である。一般的に、光ケーブルの単位長あたりの損失は、同軸ケーブルに比べてはるかに小さいと考えられる。しかし、変換器を含めたRoFシステム全体で比べると、低い周波数でも27dB程度の変換損失が存在することがわかる。

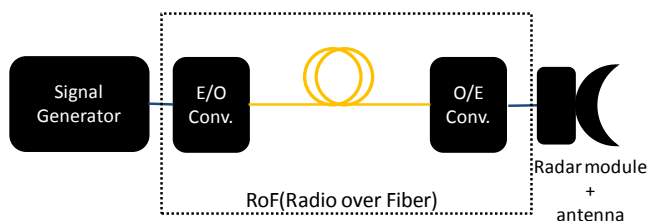


図3 RoFの定義

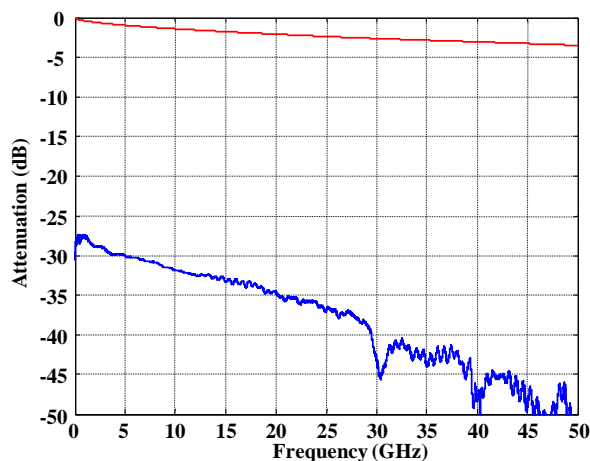


図4 同軸線路(赤), RoF(青)の伝搬損失

ここで、接続の長さの関数としてその損失を比較してみたい。なお、光ケーブルまたは同軸線路の長さのみを考慮し、変換器の物理的サイズは長さには含めない(実際、変換器は非常に小型である)。RoFシステムの総損失は、今回の測定値(図4の青線)に光ファイバーのRF電力損失0.4dB/km[6]を足したものとなる。一方、同軸ケーブルの単位長さあたりの損失 L_c は、もっとも低損失といわれるテストケーブルの場合で、

$$L_c = a \cdot \sqrt{f} + b \cdot f \quad (1)$$

(ただし $a = 0.4255$, $b = 0.0100$)となる[7]。両者を比較すると、通す信号周波数と接続距離の関係は図5の境界で表される。図中の線より上の領域

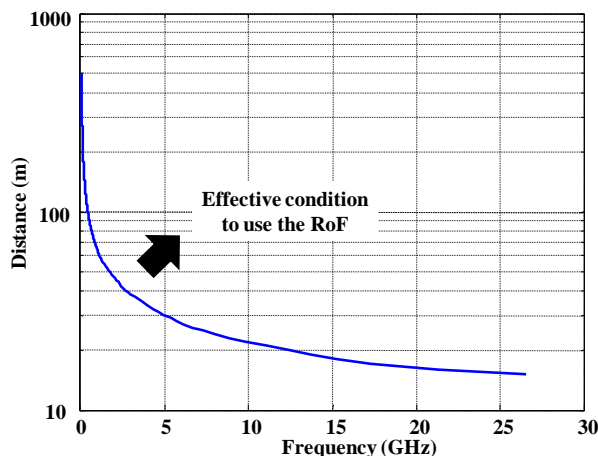


図5 RoF利用が効果的な条件

では、変換器特性を含む RoF システム全体の伝送損失が、同軸ケーブル接続よりも小さくなる。すでに述べた通り、本研究で想定する伝搬距離は数 km であり、図 5 より相当低い周波数であっても、1 km 離れた場合は RoF 接続を採用する方が損失が小さく効果的であるといえる。

4. ミリ波 RoF レーダー

本章では、滑走路障害物検知システムに、RoF を導入することについて検討する。前章図 5 にて同軸線路よりも RoF システムで接続する方が伝搬損失が少ない条件を明らかにした。しかしながら、一定の距離を離せばいずれの線路でも伝搬損失は必ず生じる。よって、滑走路脇のレーダーモジュールへ信号を入力する際はモジュール内の通倍器等に対し適切な電力となるよう、アンプを用いて信号を増幅しなければならない。前章の試算はこのアンプが理想的な特性を持っていることを前提としており、実際のレーダー構成全体を見た場合は、このような細部のノイズ源が与える影響も考慮する必要が生じる。

図 6 に、基本的なモノスタティック 94 GHz FM-CW レーダーの構成を示す。任意波形発生器で生成した 4 GHz 帯 FM-CW 信号を通倍し RoF へ入力する。図 6 中 RoF の右側が滑走路脇に置くレーダーモジュールに相当し、アンテナの手前に通倍器、検波器を含む。本レーダーは、ダイオード検波によるダイレクトコンバージョン方式である。レーダーターゲットの受信結果は、オシロスコープにて AD 変換し、ビート信号周波数からターゲット距離が読み取れる。

図 6 で示す通り、送信側の 2 つの通倍器の間に RoF の挿入を検討する。理想的には、レーダーモジュール (Radar Front-End) の直前に RoF を用いると滑走路脇の装置をより少ないパーツ数で構成できる。しかし、前章図 4 にて、今回使用する RoF が安定した特性で変換できる周波数はおよそ 25 GHz 以下であることが明らかとなったため、約 15 GHz の信号を通す部分に RoF を適用する。図 4 の結果によれば、RoF システムの伝搬損失は、15 GHz において 34 dB である。

まずはじめに、レーダーのアンテナ直前の送信信号を観察する。図 7 は、レーダーのアンテナ直前における 94GHz 無変調送信信号の位相ノイズをスペクトラムアナライザにて測定した結果を、同軸ケーブル接続、RoF 接続で比較している。全体的に、接続方法による大きな違いはみられず、傾向は一致している。1 kHz オフセットでの位相

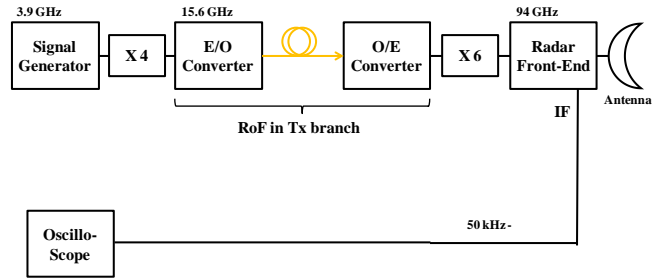


図 6 RoF を導入するミリ波レーダー構成

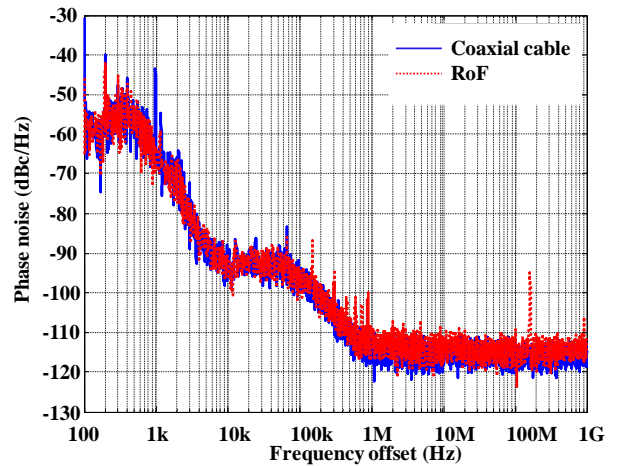


図 7 94GHz レーダーの位相ノイズ

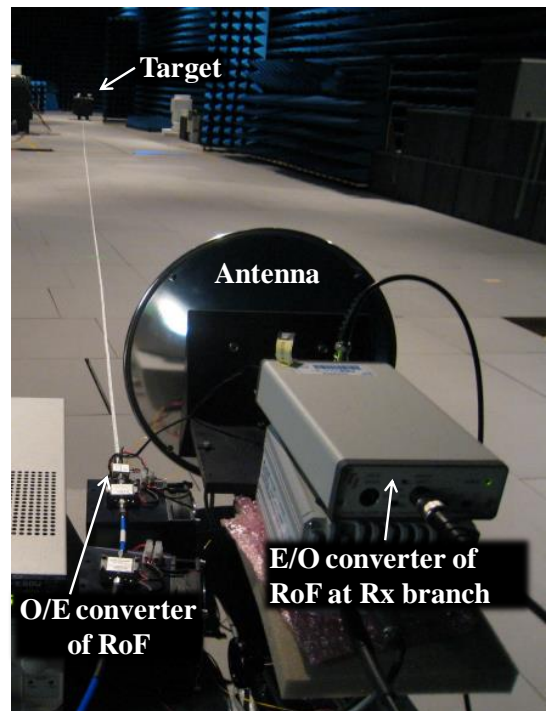


図 8 電波暗室内における測定

表 1 レーダー信号の諸元

周波数	92.04 - 94.04 GHz
帯域	2 GHz
チャープ形状	三角波（登りのみ使用）
繰り返し周波数	1 kHz

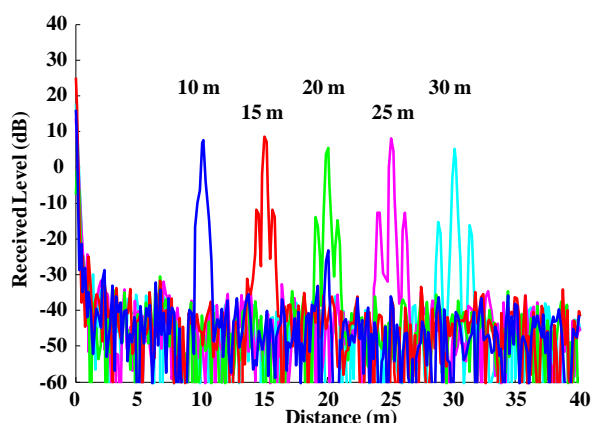


図 9 94GHz レーダーの測定結果

ノイズは約-65dBc/Hz, 10 kHzでは -95 dBc/Hz であった。ただし、同軸ケーブル接続による構成はより主信号に近い周波数にスプリアス信号が出やすく、反対に RoF 接続では離れた周波数に出やすいといえる。このようなスプリアス雑音は、レーダーのターゲット検知時の誤検知の原因になりうるため、できるだけ抑えることが望ましい。図 8 に、電波暗室内における測定の様子を示す。アンテナには、利得 43 dBi のカセグレンアンテナを用い、ターゲットとしてレーダー反射断面積 30 dBsm の三角コーナーリフレクタを用いた。表 1 に、FM-CW チャープ信号の概要を示す。なお、レーダー測定においては、図 6 中 RoF の位置に RoF を接続した場合と同軸ケーブルを測定した場合でレーダーの測定結果に変化が現れるか、確認を行う。このとき、図 6 中 6 通倍器へ入力する電力が、いずれの接続についても同じとなるよう、可変アッテネータを使って調節している。

最後に、図 9 に電波暗室内でターゲットとしてコーナーリフレクタを置きレーダー測定した場合の結果を示す。電波暗室の広さでは距離 30 m までしか測定できなかったが、この S/N 比から、当初の目標である距離 60 m でもターゲットを検知可能であることが推測できる。

5. おわりに

本報告では、空港滑走路障害物検出用レーダーの、信号源 - レーダーモジュール間接続を光ファイバーによる RoF システムに置き換えることを目的とし、各種検討を行った。具体的には、RoF を用いる効果的な接続距離についての考察および、ミリ波レーダーに組み込んでの実験を行った。この結果、RoF システムを滑走路障害物検知に利用できることがわかった。

今後、図 6 に示すレーダー構成の中で RoF を挿入する位置をさらに高周波側に移すことや、RoF の中で光信号において RF 周波数を通倍することなどが可能となれば、モジュールのさらなる小型化が望める。

謝辞

本研究の一部は、総務省の電波資源拡大のための研究開発「90GHz 帯リニアセルによる高精度イメージング技術の研究開発」の一環として実施された。

文 献

- [1] “Accident on 25 July 2000 at La Patte d’Oie in Gonesse (95) to the Concorde registered F-BTSC, operated by Air France,” BEA Report translation, f-sc000725a, January 2002.
- [2] P. D. L. Beasley, G. Binns, R. D. Hodges, and R. J. Badley, “Tarsier, a Millimeter Wave Radar for Airport Runway Debris Detection,” Proceedings of EuRAD 2004, pp. 261-264, Amsterdam, 2004.
- [3] P. Feil, W. Menzel, T. P. Nguyen, Ch. Pichot, C. Migliacchio, “Foreign Object Debris Detection (FOD) on Airport Runways Using a Broadband 78GHz Sensor,” Proceedings of EuRAD, Amsterdam, October 2008.
- [4] <http://www.xsightsys.com/>
- [5] FAA, “Airport Foreign Object Debris (FOD) Detection System”, Advisory Circular AC150/5220-24, September 30, 2009.
- [6] T. Miya, Y. Terunuma, T. Hosaka, T. Miyashita, “Ultimate Low-Loss Single-Mode Fiber at 1.55 μm ,” ELECTRONICS LETTERS, vol. 15, No. 4, pp. 106-108, February 1979.
- [7] HUBER+SUHNER, “Microwave cables and assemblies,” pp. 94-95, Edition 2008/2009.