

PEM

第5回 光応用電磁界計測研究会

—航空管制・空港における光応用電磁界計測—

PEM2017-5~9

2017年 9月4日(月)

於： 東北大学 青葉記念会館

主 催： 電子情報通信学会
光応用電磁界計測特別研究専門委員会

協 賛： スタック電子株式会社

第5回 光応用電磁界計測研究会

プログラム

テーマ：「 航空管制・空港における光応用電磁界計測 」

2017年 9月 4日 (月) 13:00 ~ 16:35

13:00 - 13:50 PEM2017-5

〔招待講演〕 航空機監視システムと光ファイバ無線の応用

角張泰之, 古賀 禎 (電子航法研)

13:50 - 14:40 PEM2017-6

〔招待講演〕 光ファイバ無線を用いた受動型一次監視レーダの開発

大津山卓哉, 本田純一, 渡邊優人 (電子航法研)

—— 休憩 (15分) ——

14:55 - 15:45 PEM2017-7

〔招待講演〕 90GHz 帯リニアセルレーダーによる滑走路灯のレーダー反射断面積評価
～ RoF とミリ波を用いた新しい電波システム ～

柴垣信彦, 佐藤洋介, 加島謙一 (日立国際電気)

15:45 - 16:10 PEM2017-8

〔一般講演〕 空港における電波を利用した舗装体モニタリングについて

佐藤源之, 鄒 立龍, 菊田和孝 (東北大)

16:10 - 16:35 PEM2017-9

〔一般講演〕 低誘電率低損失フッ素系樹脂基板と薄板 LiNbO_3 結晶を用いた 80GHz 帯
アンテナ電極電気光学変調器

山崎 伸, 井上敏之, 塩見英久, 真田篤志 (阪大),

木谷聡志 (住電プリントサーキット), 中林 誠 (住電ファインポリマー),

村田和夫 (住電/住電プリントサーキット), 村田博司 (阪大)

場 所： 東北大学 青葉記念会館

主 催： 電子情報通信学会 光応用電磁界計測特別研究専門委員会

(<http://www.ieice.org/~pem/>)

協 賛： スタック電子株式会社

本予稿集に掲載された論文等の著作権は著者に帰属します。

発行年月日：2017年9月4日

発行所：(一社)電子情報通信学会

光応用電磁界計測(PEM)特別研究専門委員会

[招待講演] 航空機監視システムと光ファイバ無線の応用

角張 泰之[†] 古賀 禎[†]

[†] 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 電子航法研究所 監視通信領域
〒182-0012 東京都調布市深大寺東町 7-42-23

E-mail: [†] kakubari@mpat.go.jp

あらまし 航空管制のための航空機監視システムとしてはレーダ装置が主流であるが、データの更新頻度がアンテナの回転周期に依存するなど、近年の高密度運航には必ずしも性能要件を満たせない場合がある。双曲線測位原理を用いたマルチラテレーションはレーダ装置よりも高性能を謳う新しい監視システムであるが、システム構成の一部に光ファイバ無線(Radio over Fiber)を応用することで、更に高い性能を実現できる。本講演では、航空機監視システムの概要を交え、RoFを適用したマルチラテレーションの実際の開発・評価の状況を報告する。

キーワード 航空管制, 航空機監視, レーダ, マルチラテレーション, 光ファイバ無線

[Invited Talk] Application of Radio over Fiber for Aircraft Surveillance System

Yasuyuki KAKUBARI[†] and Tadashi KOGA[†]

[†] Surveillance and Communications Department, Electronic Navigation Research Institute,
National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology, National Research and Development Agency
7-42-23 Jindaijihigashi-machi, Chofu, Tokyo 182-0012 Japan

E-mail: [†] kakubari@mpat.go.jp

Abstract Although radar is one of main equipment as aircraft surveillance system for air traffic control, sometimes its performances such as data refresh rate depending on antenna rotation period or position estimate accuracy do not satisfy the requirements for high density operation in recent years. Multilateration utilizing hyperbolic positioning method is a newly proposed surveillance system and is said to have higher performances than conventional radar system. We applied Radio over Fiber to multilateration system for much higher performances and confirmed them in our evaluations in actual airport environment.

Keyword Air Traffic Control, Aircraft Surveillance, Radar, Multilateration, Radio over Fiber

1. はじめに

航空機を安全かつ円滑に導くための航空管制を行う上で、航空機の位置を正確に把握することが重要である。地上に配備された航空機監視システムは、正確な航空機の位置を航空管制官に提供することで、航空管制の下支えをしているシステムである。本稿では、航空機監視システムの概要を紹介するとともに、当研究所で開発した RoF を応用した新しい航空機監視システムであるマルチラテレーションに焦点を当て、その評価について紹介する。

2. 航空機監視システム

2.1. 航空管制と航空機監視

航空管制とは、航空機同士や障害物等との衝突の防止や航空交通の秩序ある流れの維持・促進を目的として、航空管制官(以下、管制官と称する)によって行われる、言わば空の交通整理である。空港を出発してから目的地に到着するまでの航空機が、他の航空機との安全間隔を常に保てるように、管制官が航空機の操縦士に適宜指示を出している。このような安全かつ円滑な航空交通の確保を実現するためには、管制官が航空機の位置を常に正確に把握した上で、適切な指示を出すことが非常に重要である。

空港の管制塔に居る管制官によって行われる「飛行場管制」においては、管制塔からの目視により航空機の位置把握を行うこともあるが、空港のレーダ室において行われる「ターミナル管制」や航空交通管制部において行われる「航空路管制」においては、管制官は飛行中の航空機を目視では確認できないため、主にモニタ画面上で航空機の位置把握を行う。この管制官が使用するモニタ画面に、正確な航空機の位置情報を提供するのが、「航空機監視システム」の役割である。

航空機監視システムは、主に地上に設置された設備によって実現され、対象とするエリアや求められる監視性能要件などに応じて、いくつかの監視センサを使い分けたり組み合わせたりしている。現在航空機監視システムとして使用されている監視センサの代表格は回転式のアンテナを持つレーダである。

2.2. 航空管制用 2 次監視レーダ(SSR)

飛行中の航空機を監視するための、最も一般的な監視センサはレーダである。航空管制用のレーダには、大きく分けて 2 種類の方式がある。1 次監視レーダ(PSR: Primary Surveillance

Radar)と 2 次監視レーダ(SSR: Secondary Surveillance Radar)である。いずれも、電波の往復時間から計算される航空機までの距離と、アンテナのメインビームの向いた角度(アジマス角)を用いて、航空機の位置を算出する。

PSR はパラボラアンテナからパルス状の強い照射波を送信し、対象物(航空機)からの反射波をレーダエコーとして受信することで航空機を検出する装置である。それに対して、SSR はオープンアレイアンテナから航空機に向けて「質問信号」を送信する。航空機に装備された応答装置である ATC(Air Traffic Control)トランスポンダ(以下、トランスポンダと称する)は、これを受けて「応答信号」を返す。SSR はこの電波の往復を基に航空機を検出する。即ち、SSR は機上の装置と一体になって実現されるシステムであり、この意味から純粋なレーダと言うよりは、通信システムのひとつであると捉えた方が理解がしやすい。

通信システムとしての SSR はその信号の中に情報を盛り込んでいる。トランスポンダからの応答信号は 12 ビットのパルス列を持ち、航空機の識別を可能とするビーコンコード(スコークともいう)や気圧高度情報を SSR 地上局に伝えることが出来る。これにより、PSR だけでは出来なかった、航空機の識別や正確な飛行高度の把握が出来るようになっている。

SSR には、電波環境の改善や扱う情報量の増大を目的として、SSR モード S という個々の航空機に対して選択的に質問信号を送信することが出来る上位のモードが存在する。SSR モード S の質問信号に対応して応答できるトランスポンダを特にモード S トランスポンダと言う。モード S トランスポンダは後方互換により、従来型 SSR の質問信号にも応答する。モード S トランスポンダからの応答信号には、56 ビットまたは 112 ビットの情報が含まれ、スコークの他、より分解能の高い気圧高度情報や、航空機のユニークアドレス等が伝送される。現在、ある一定以上の規模の航空機には航空機衝突防止装置の一要素として、モード S トランスポンダの搭載が義務付けられている。

2.3. マルチラテレーション

空港内で地上走行する航空機を、管制官の目視ではなく、画面表示にて確認するための監視センサとして、マルチラテレーションがある。モード S トランスポンダは、質問信号への応答以外に、モード S スキットという自発信号を周期的(1

秒に1回以上)に送信しており、マルチラテレーションは、この自発信号を受信して航空機位置を算出する受動型監視システムである。空港面に設置した複数の受信局でモードS スキッタを検出し、その受信時刻差(TDOA: Time Difference Of Arrival)から得られる各受信局と航空機との距離差を利用して双曲線測位原理により航空機位置を算出する。図1にその概略図を示す。2つの受信局からの距離差が一定という条件で線を描くと、双曲線が得られるが、このような双曲線を2本以上得たとき、その交点が航空機の位置として計算される。即ち、空港面上(2次元)の測位をする場合、少なくとも3局以上の受信局で受信時刻(TOA: Time Of Arrival)を検出する必要がある。

マルチラテレーションは、主として空港面の航空機を監視対象とするが、同様の測位原理を用いた広域マルチラテレーション(WAM: Wide Area Multilateration)は飛行中の航空機を監視対象とする。例えば、平行滑走路への同時離着陸等の高度な運航を、低視程時においても維持するためには、従来型レーダのデータ更新頻度(4秒に1回)や位置精度では不十分であるとされ、このような箇所にもWAMの導入が進められている。基本的に高さを含めた3次元測位をする必要があるため、WAMでは少なくとも4局以上の受信局でTOAを得る必要がある。

3. 光ファイバ無線を応用したマルチラテレーション

3.1. マルチラテレーションの位置精度

マルチラテレーションは、原理上、受信局の配置が適切であれば、一般的にSSRの位置精度に比べ良い性能が得られるとされる。SSRの場合、トランスポンダが質問信号を受信してから応答信号を送信するまでの規定遅延時間に誤差許容があり、この分が潜在的に取り除けない誤差となる。また、SSRはレーダから遠いターゲットについては、アンテナの指向性特性に起因して誤差が大きくなりやすい。一方、マルチラテレーションの位置精度は、TDOAの測定精度 Δt [sec]、光速 c [m/sec]、及び受信局の幾何学的配置から決まる精度劣化指数DOP(Dilution of Precision)で次のように表される。

$$\text{位置精度 [m]} = \Delta t \text{ [sec]} \times c \text{ [m/sec]} \times \text{DOP} \quad (1)$$

即ち、ターゲットまでの距離やトランスポンダの性能に左右されないことが分かる。

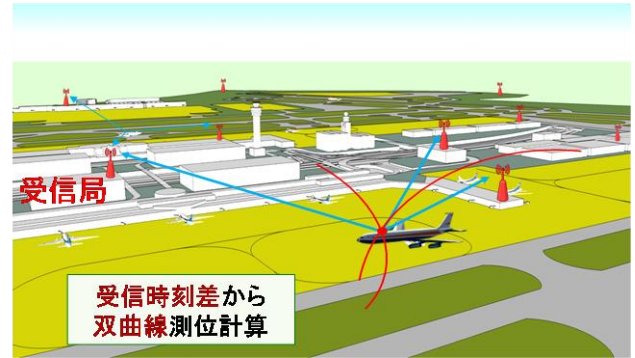


図1. マルチラテレーションの測位原理

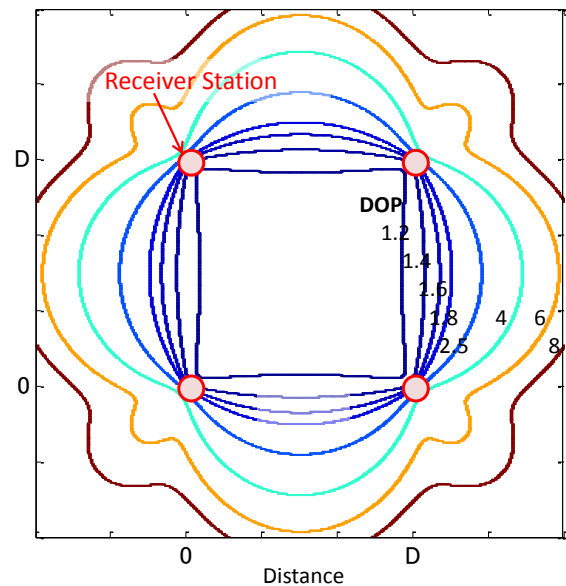


図2. 受信局の配置とDOP分布のイメージ

DOPは受信局の幾何学的配置によって決定される。受信局を距離 D で正方形に4局配置した場合のDOPの分布イメージを図2に示した。複数の受信局で囲まれた範囲でDOPは小さな良い値を示し、外側に向かうにつれて大きな悪い値になる。幾何学的には受信局配置の外側では双曲線の漸近線部分で交点を作る。このような箇所では、僅かなTDOAの計測誤差により交点の位置が大幅にずれる。これがDOPという値の示す定性的な意味である。

マルチラテレーションの性能向上には、時刻測定精度の向上と、適切な受信局配置によるDOPの設計が重要である。実際の空港では、建造物によるLOS(Line of Sight) / nLOS(Non-Line of Sight)を考慮したDOPの設計が必要となる。

3.2. マルチラテレーションの性能低下要因

日本の空港においても空港面監視のためマルチラテレーションの導入が行われているが、運用に先立つ評価において、

特にターミナルビル近傍の駐機場エリアや大きな格納庫が建ち並ぶ誘導路エリア等で、マルチパス信号干渉による性能低下の事象が指摘されている[1]。これは建造物等で多重反射した電波がマルチパス干渉することにより、スキッタ信号の波形が歪み、結果として時刻測定精度の低下や信号自体の検出率の低下を引き起こしているためと考えられる。

スキッタ信号は、モード S 応答信号の信号形式と同じ、1090MHz の搬送波をパルス変調した 64μs または 120 μs のシンプルな信号である(図 3)。プリアンプル部とデータブロック部(パルス位置変調)で構成され、マルチラテレーションでは、プリアンプル部の先頭パルスの立ち上がり部分で時刻検出を行う。

信号検出率の低下は、波形歪みによるデータブロック部のビット解読エラーが原因であるが、信号を検出出来なかった受信局は位置計算に寄与しないため、DOP の値が劣化することとなり、性能が低下する。

3.3. 光ファイバ無線の応用

マルチパスの発生と干渉は物理的に回避しにくい、これらが生じた場合にも、その影響を受けにくいシステム構成とすることで、高い性能を維持できるマルチラテレーションとなる。このような発想の下、当研究所では、空港内に点在する受信局部と中央処理部(信号処理・測位計算装置)とを光ファイバ無線技術(RoF)により接続する方式を採用したマルチラテレーション装置を開発し[2]、これを「光ファイバ接続型受動監視システム(OCTPASS: Optically Connected Passive Surveillance System)」と名付けた。OCTPASS と一般的な従来型マルチラテレーションの構成の比較を図 4 に示した。

RoF による伝送は、RF 信号を同軸ケーブルで伝送するのに比べ、遥かに減衰しにくく長距離伝送が可能であり、これにより、空港内に点在する各受信局で得た受信信号を、高い品質のまま、瞬時に 1 箇所(機器室)に集約することが出来る。

一般的な従来型マルチラテレーション装置が、受信局部で検波・信号処理を行うのに対し、OCTPASS が RoF を利用して受信した RF 信号を中央処理部にて集約処理する方式を採用することで、次のような利点が得られた。

一つ目は、信号利用率(検出率)が向上した点である。通常、モード S スキッタに含まれる航空機識別情報を用いて送信源である航空機を特定し、各受信局で得た同一信号をグループ

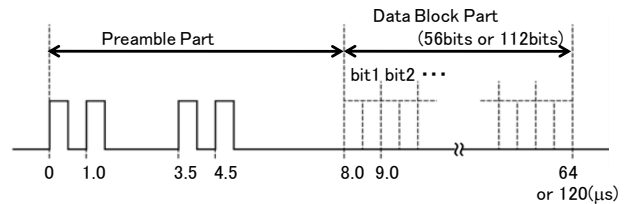


図 3. モード S 応答信号の信号形式

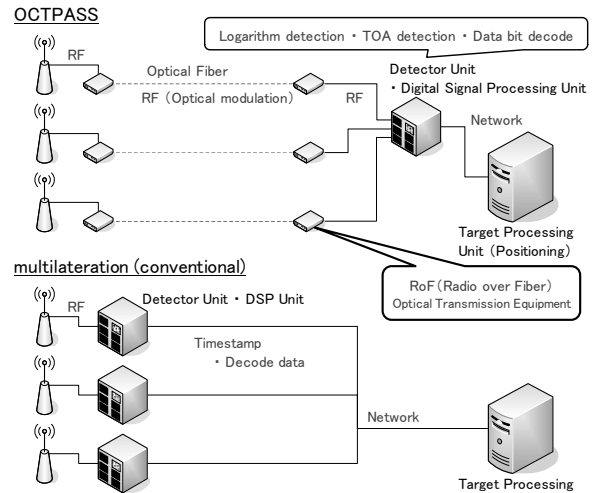


図 4. OCTPASS と従来型マルチラテレーションの構成比較

化して TDOA を求め、測位計算を行う。前述のとおり、受信状態によって信号歪み等が生じると、この識別情報がデコード出来ず、測位計算に利用できないことが多々ある。RoF を利用すると、複数箇所を受信した RF 信号が一括して処理装置に入力されるため、一部の受信局で信号歪みによりデコード出来ない状況が生じて、同時に入力された信号は同一送信元であると認識でき、TOA の検出さえ出来れば、測位計算に利用することが出来る。これにより、信号の利用率が向上し、より少ない受信局数で必要とされる性能を得る。マルチラテレーションでは、使用できる受信局が多いほど DOP の値が小さくなるが、信号の利用率が向上すると、式(1)における DOP の値が不用意に劣化することを防げるため、高い位置精度を維持しやすい。

二つ目は、受信局間の時刻同期が不要になった点である。従来型システムでは各受信局部にそれぞれクロックを置いているので、クロック間のずれによる TDOA の誤差が生じる。離れた箇所でのクロック同期のためには、基準信号同期や GPS コモンビュー同期などの手法が用いられるが、何れもそのために他の信号を受信しなくてはならず、その受信状態に同期精度が依存する。同期精度が良い時と悪い時の変動が生



図5. 仙台空港における OCTPASS マルチラレーションの受信局配置

じる原因にもなり、不安定である。RoF を用いて RF 信号を集約処理する場合は、入力する処理装置内で共通クロックを使用するため、原理的に複数の受信局間に時刻のずれが生じない。即ちこちらでも、式(1)における Δt が劣化しにくいため高い性能を維持しやすくなる。唯一、受信局間の時刻ずれの原因としては、光ファイバ内での伝送遅延が挙げられるが、事前に校正を行うことで、非常に安定的な運用が可能である。

4. 仙台空港における実用化評価

当所岩沼分室が隣接する仙台空港内に、開発した OCTPASS の受信局を設置し、実用化評価を実施している。図5にその配置を示す。空港全面が監視覆域となるよう、取り囲むように配置しており、良好な DOP 分布を実現している。RoF で接続された処理装置等は全て岩沼分室内に設置している。

図6に実際の航空機の地上走行航跡(120秒分)を示した。誘導路や駐機場のラインに沿って線が描写されていることが分かる。別途実施したモード S トランスポンダを搭載した実験用車両による地上走行実験では、空港全面において抜けなく車両位置の監視が出来ることを確認している。仙台空港程度の規模であると、従来型マルチラレーションでは、同等の性能を得るために 12 局程度の受信局を必要とするところ、RoF を適用したマルチラレーションでは、より少ない受信局でこれを実現している。

実用化評価では、その性能の他、整備や維持に係る観点もひとつの評価ポイントとなる。OCTPASS では RoF を利用したことにより、性能向上が図れたことに加え、受信局の大幅



図6. 地上走行する航空機の航跡例

な小型化が実現できた。これは受信局部が複雑な処理機能を廃し、単純な電気・光変換器のみで構成されていることに起因する。併せて RoF が超低消費電力であることに着目し、光ケーブルの予備ファイバ心線を利用した光給電機能を実装した。これは機器室の処理装置側から強いレーザー光を受信局に送ることで、受信局内で必要な電力を発電する機能である。これにより受信局の設置に係る電源工事が不要となった他、電源ケーブルからの誘導雷等の影響を受けないため、極めて故障のしにくい、メンテナンスフリーの装置となった。

装置を設置してからの約3年間において、建物の停電等の外的な要因以外では、装置の異常停止やアラート発生はない。また、光路長差に起因する伝送遅延の校正を最初に行って以来、再度の校正を行っていないが、TDOA の測定に誤差が生じる様子は確認できず、安定的な動作を継続している。

5. おわりに

航空機監視システムの概要について述べるとともに、RoFを応用した新しいマルチラレーションである OCTPASS について、その利点と仙台空港において実施している実用化評価について紹介した。特にシステムの構成の中で RoF を使用したことに起因する利点が数多く、この方式は他の通信システムなどでも応用出来るものと考えている。

文 献

- [1] 宮崎裕己, 古賀禎 他, “空港面マルチラレーションの導入評価結果,” 電子航法研究所報告, Vol.125, pp.1-20, 2010.
- [2] 角張泰之, 古賀禎 他, “空港面用航空機受動監視システムの高性能化,” 電気学会論文誌 C, Vol.132, No.7, pp.1088-1093, 2012.

[招待講演] 光ファイバ無線を用いた受動型一次監視レーダの開発

大津山卓哉[†] 本田 純一[†] 渡邊 優人[†]

[†] 国立研究開発法人 海上港湾航空技術研究所
電子航法研究所
東京都調布市深大寺東町 7-42-23
E-mail: †otsuyama@mpat.go.jp

あらまし 電子航法研究所では次世代の一次監視レーダとして期待されるマルチスタティックレーダの研究を行なっている。本研究では周波数資源の有効活用と現行 PSR の機能拡張の観点から、光ファイバ接続受動型一次監視レーダ (OFC-PPSR) の試作を行なった。本稿では OFC-PPSR の概要を述べるとともに、現在行なっている評価試験での初期評価結果について述べる。

キーワード マルチスタティックレーダ, 空港監視レーダ, 光ファイバ無線, レーダシステム

Development of Optical Fiber Connected Passive Primary Surveillance Radar

Takuya OTSUYAMA[†], Junichi HONDA[†], and Masato WATANABE[†]

[†] Electronic Navigation Research Institute
National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology
Jindaiji-Higashimachi 7-42-23, Chofu, Tokyo
E-mail: †otsuyama@mpat.go.jp

Abstract Electronic Navigation Research Institute (ENRI) investigates a multi-static primary surveillance radar (MSPSR) which is expected to be used as the next generation primary surveillance radar (PSR). ENRI developed an optical fiber connected passive primary surveillance radar (OFC-PPSR) for the effective use of frequency band and the radar system enhancement. In this paper, we present the introduction of OFC-PPSR and the preliminary results of the evaluation test.

Key words multi-static primary surveillance radar, airport surveillance radar, radio over fiber, radar system

1. はじめに

現在の航空管制では、レーダによる航空機監視によって航空機の安全間隔を維持している。航空管制では大きく分けて 1 次監視レーダ (PSR : Primary Surveillance Radar) と 2 次監視レーダ (SSR : Secondary Surveillance Radar) の 2 種類のレーダが使われている。PSR は、気象レーダなどのように、送信機から送信された探索信号が測定対象物から反射されて受信機で受信されるまでの時間によって距離を測定している。一方、SSR は、反射信号ではなく、送信機から送信された質問信号に対して測定対象 (航空機) に搭載されたトランスポンダが応答を返し、受信機で応答信号を受信するまでの時間によって距離を測定している。SSR では測定対象に搭載されたトランスポンダの送信信号を使用するため、同じ覆域を探索する場合に PSR に比べて小さい出力の送信機もしくは小さい利得のアンテナで実現可能となる。さらに、SSR は航空機の高度やコー

ルサインなどといった航空管制に必要な情報がトランスポンダを通じて送信機と情報交換されている。このような理由から、現在の航空管制において SSR は必要不可欠な監視システムとなっている。近年は SSR の応答信号を使ってより更新レートの高い、MLAT や WAM などといったシステムも導入されている [1]。SSR とその応用方式を使った監視手段は、様々な応用方式が考えられているが、その性能は航空機に搭載されたトランスポンダに依存している。したがってトランスポンダが故障した場合や、テロなど意図的にトランスポンダを停止した場合には、SSR による航空機監視は不可能となる。そのため、安全性確保の観点から PSR のような航空機の装備に依存しない監視システムが必要となってくる。しかしながら、既に述べたように PSR で SSR と同じ監視覆域を得るためには、大型のアンテナと大型の送信機が必要となり、システムの使用頻度に対して導入および運用のコストが非常に大きくなる。これらの問題に対応するため、既存の無線システムの電波を使用

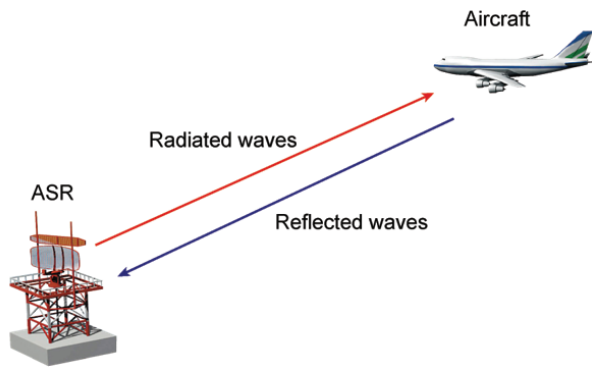


図1 一次監視レーダの原理

した MSPSR(Multi-Static Primary Surveillance Radar) が新しい一次監視レーダとして民間航空の分野で注目されている。MSPSR は複数の送信局および受信局によって構成される受動型レーダである、マルチスタティックレーダを航空機監視に応用するものであり、欧州を中心に実用化に向けたプロジェクトが行われている。

電子航法研究所ではマルチスタティックレーダ実用化に向けた研究プロジェクトとして、既存の PSR を使い、送信機の送信情報を光ファイバにて受信機に伝送するパッシブレーダシステムを開発した。本論文では光ファイバ接続型パッシブレーダ (OFC-PPSR:Optical Fiber Connected Passive Primary Surveillance Radar) の概要を述べるとともに、仙台空港内に設置した実験システムによる初期評価結果について述べる。

2. MSPSR

PSR は図1に示す ASR(Airport Surveillance Radar) のうち、2.7GHz から 2.9GHz のパルス信号を使ったレーダシステムであり、アンテナの方位角と反射波の往復時間から航空機の位置を検出する。一方、MSPSR は送信機と受信機が分離し、複数の送受信機によって構成される一次監視レーダシステムである。基本となるレーダは、1 対の送受信機が分離して構成される図2に示すようなバイスタティックレーダである。現在使われている多くのレーダシステムでは、送信用アンテナと受信用アンテナがサーキュレータを介して共有し、また目標探知のために使われる送信信号の信号源は同一の信号を送受信機で使用することにより、信号解析が有利になるよう設計されている。一方、バイスタティックレーダにおいてはこれらの送受信機を分離し、受信機において何らかの方法によって送信信号を推定することにより実現している。そのため、送信機を既存の放送局などの電波源を利用して実現することも可能である [2]~[4]。

2.1 基本原理

図2に示すように、バイスタティックレーダにおいても測距方法は基本的にモノスタティックレーダと同様であり、信号を送信した時刻と受信した時刻によって対象物までの距離を測る。ただし、モノスタティックレーダの場合は送受信時刻の差の半分が対象物までの距離であることに対して、バイスタティックレーダの場合は送信機からの直接波が届く時間と対象物からの

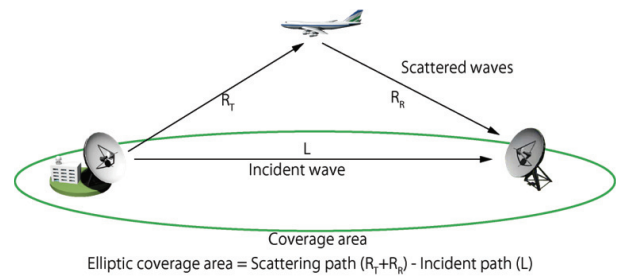


図2 バイスタティックレーダの原理

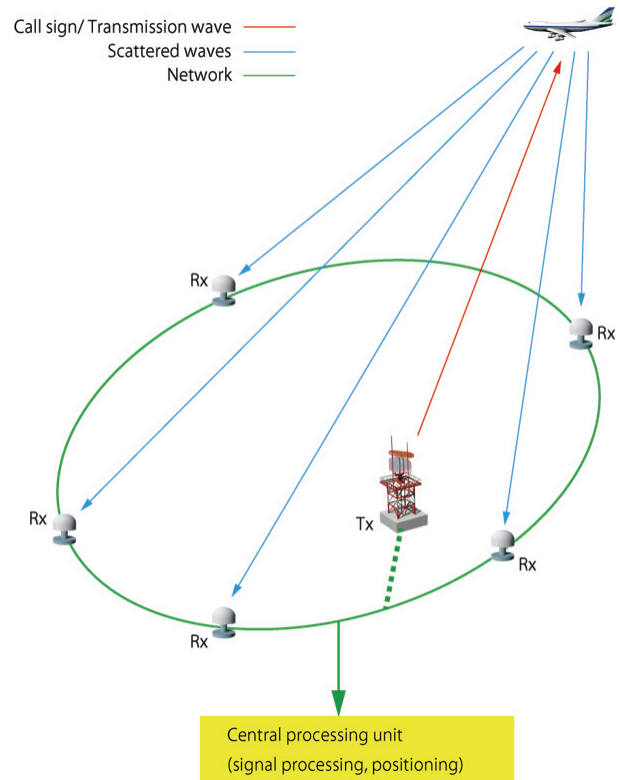


図3 マルチスタティックレーダのイメージ

反射波が届く時間との時間差によって距離が求まる。したがって、送受信とも無指向性アンテナの場合には、対象物の位置候補が楕円として推定される。また、送信もしくは受信に指向性アンテナを使うことによって、対象物の位置が特定可能となる。さらに送信もしくは受信機を増やすことによって、マルチスタティックレーダを構成すればそれぞれの受信機での受信時刻差から受信機間の到来時間差がわかり、複数の双曲線も描くことが可能となる。図3にマルチスタティックレーダのイメージ図を示す。この図のようにマルチスタティックレーダは、送信機から放射された電波が対象物で四方八方に散乱される信号を受信することによって実現するものである。したがってレーダの構成に重要となるのは航空機からの反射波を受信側が検波できるかどうかにある。航空機からの反射波は、航空機の高さ、形状、姿勢などによって大きく変化し、場合によっては反射波を得ることができない。そのため、レーダシステムとして使用するためには、受信処理などに多くの課題が残されている。

2.2 OFC-PPSR 概要

一般的にレーダは、目標物体から反射された探査信号を処理

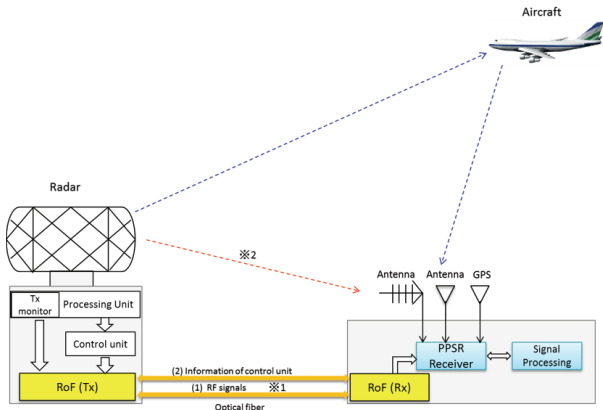


図 4 OFC-PPSR 概要

することによって実現している。このときに、送信時刻から受信時刻までの時間差や周波数変動を使って距離や速度を求めている。そのため、受信信号のみならず送信信号も重要な情報となっている。パッシブレーダシステムの構築において、送信信号をどのように扱うのかいくつかの手法が考えられる。もっとも多く行われている方法は、散乱波（反射波）と直接波の 2 種類のアンテナを使う方法である。この方法では直接波を送信波とみなして処理を行うため、直接波を受信できる場所で測定を行う場合には、簡単に実現できる。しかしながら、直接波の届かない場所や空港のレーダを送信局として使う場合のように送信機が回転して信号を送信している場合、直接波の情報が得られない場合がある。

これらの問題を解消する手法の一つとして、本論文では光ファイバ無線技術を使った光ファイバ接続型パッシブ一次監視レーダについて提案している。離れた送信機と受信機間で光ファイバ無線によって信号を共有することによって、通常を送受信機が一体となったレーダと同じ処理でレーダの実現が可能となる。図 4 に OFC-PPSR の概要を示す。この図では、受信側に送信情報を RoF によって送信しているが、受信情報を送信側に送った場合にも実現可能である。

2.3 OFC-PPSR 実験システム

OFC-PPSR の性能評価のために、実験システムを開発し、電子航法研の岩沼分室がある仙台空港に試験環境を整えた。送信信号源として航空保安大学校岩沼研修センターの研修用レーダを使用した。この実験システムでは設置場所の制約により、送信波形を RoF にて受信機側に送るようにしている。実験システムの構成は図 5 となっている。

送信信号はアンテナ直下にあるモニタ端子の出力を光信号に変換し、仙台空港内にあるシェルタまで光ファイバを通して送信する。シェルタでは光信号を再び電気信号に変換する。また、シェルタには散乱波の受信用にホーンアンテナが設置されていて、散乱波と RoF により送られてきた信号（送信波に相当）とを受信機で中間周波数に変換しそれを PC 上の A/D 変換ボードを通し記録するようになっている。A/D 変換された信号は RoF による時間遅れを補正し、信号処理を行うようになっている。通常のレーダと大きく異なる点は、送信信号が RoF を通

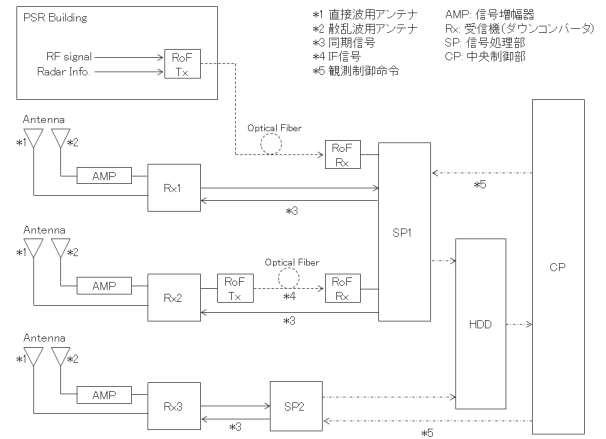


図 5 OFC-PPSR 全体構成図

しているため、時間補正が必要なおよび送受信時刻の差がレーダから目標までの距離ではなく、送信機-目標-受信機と伝搬した距離によって求まることが異なる点であり、信号処理等はモノスタティックレーダと異なる点はない。

2.3.1 受信局構成

開発した実験システムは 3 つの受信局で構成されている。受信局 1(Rx1) は OFC-PPSR の基本コンセプトとなる受信機であり、送信信号を RoF を通して受信側に送信し、その信号を基準としてレーダ信号処理を行なうものである。

受信局 2(Rx2) は、送信信号については Rx1 と同じであるが、受信機の設置場所を Rx1 とは離れた場所とし、そこで受信した信号を RoF によって信号処理装置のあるシェルタまで転送するものである。この構成の場合には受信信号の RF 信号をそのまま送る場合から IF 信号やベースバンド信号に変換してから送るなど、様々な方法が考えられ、RoF の特性と受信信号の特徴から最適なものを選択できるように試験を行なっている。

受信局 3(Rx3) は Rx1 および Rx2 とは異なり、RoF を用いることなくパッシブレーダを実現するための受信装置である。RoF による送信信号の参照ができないため、直接波を検出して、それをもとに送信信号を推定して信号処理を行なう。また、信号処理結果を無線や有線の LAN によって伝送することを想定している。

2.3.2 信号処理

各受信局で得られた信号は信号処理部で処理を行なう。評価用の実験システムであるため、リアルタイムでの処理は行なわない。そのため、信号処理部では受信機によって IF 信号に変換された信号を 25MS/s でサンプリングし、記録装置に伝送することのみをおこなっている。

2.3.3 中央制御部

中央制御部では信号処理部に対して A/D 変換の開始命令をだしている。また、記録装置に蓄えられた受信信号に対して最終的なレーダ信号処理をおこなう。現在、レーダ信号処理に関しては参照信号に対する散乱波の相対電力のみを表示するようになっており、現行の PSR で実装されている MTI 等の処理は中央制御部では実装していない。これらの処理は信号処理方法

の評価を行なうために、別途実装しているところである。

3. 評価試験結果

図 6 に開発した実験システムおよび仙台空港での実験環境を示す。送信源として使用した研修用レーダは空港南側に位置し、周囲は建物に囲まれている。そのため、駐機場や滑走路等の空港場内地面の大部分は見通し外となっている。RoF 送信機をレーダ局舎内に設置し、アンテナ直下のモニタ端子から取り出した送信信号を空港内に布設した光ファイバによって送信する。この信号は空港西側にあるシェルタまで送られる。また受信局 2 は空港中央付近にあるシェルタに設置した。ここから空港西側のシェルタまでも RoF によって信号を送信している。各受信局では標準ホーンアンテナを使い散乱波を受信している。またホーンアンテナは仙台空港において多くの航空機が着陸する方向である東側に向けている。

図 7 に測定結果の一例を示す。これは受信局 Rx1 での測定結果である。送信源の研修用レーダは 1 スキャン 4 秒となっていて、この図は 10 スキャン分のデータを重ね書きしたものである。全スキャンに対する平均値からの差分を取ることによって移動物体等変化の大きな点が強調されるようになっている。図のとおり、仙台空港の東側に 10 秒間にわたって強度の強い部分が見られる。1 スキャン毎のデータを並べて確認すると、移動していることからこれは航空機や船などの移動体からの反射であると考えられる。レーダから送信される電波は地上方向に放射していないため、船からの反射とは考えづらく、これらのピークは航空機からの反射であると思われる。なお、仙台空港近辺には複数の航空路が存在しているが、受信アンテナの向きが東向きであるため、それ以外のエリアからの反射はあまりみられない。また、実際の PSR で使われているオフセットカセグレンアンテナと実験で使用した標準ホーンアンテナではゲインが大きく異なるため、PSR で取得できるレーダ画像と同じものを得ることは難しい。しかしながら、受信機を分離して RoF を用いたレーダ装置構成によって、移動物体が検出可能であることは確認ができた。

同様に、受信信号を RoF で伝送する受信機 2(Rx2) でのデー

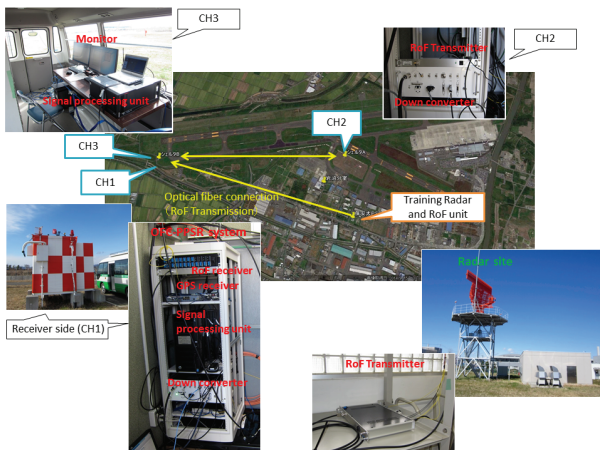


図 6 OFC-PPSR 評価試験実験環境

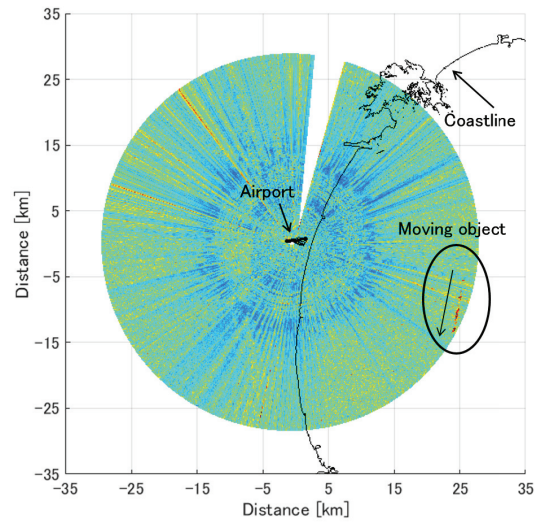


図 7 受信局 1(Rx1) での信号受信結果

タに関しても、Rx1 と同等の散乱波を受信することができており、これらの 2 点では距離に相当する送受信時刻が異なるだけでほぼ同じ結果が得られている。

4. まとめ

本稿では、電子航法研で研究開発を進めている OFC-PPSR の概要と実験結果を示した。本装置の特徴は、通常の PSR を同様のデータ処理を行なうために RoF を用いて受信信号もしくは送信信号を遠方の送信機もしくは受信機に伝送するものである。この技術によって、通常のレーダに於ける送受信アンテナとは異なる方向に放射された散乱波を受信し、レーダの検出率向上および覆域拡大が見込まれる。

本稿では実験システムの開発と展開した装置での初期実験結果を示した。アンテナゲインについて考慮する必要はあるものの、本提案システムは既存 PSR と同じ信号処理方法を用いることで、既存レーダと同等の性能かつ既存レーダの機能拡張ができると考えられる。本稿においては MTI 等のレーダ信号処理を行なった結果を示していないが、今後複数のレーダ信号処理を実装し、パッシブレーダにおける最適な信号処理手法についての検討をおこなう。また、他の航空機監視システムによって得られたデータと比較することによって、測位性能の評価を行なう予定である。

謝辞 実験にあたってご協力いただいた国土交通省東京航空局、仙台空港事務所及び航空保安大学校岩沼研修センターに謝意を表す。

文 献

- [1] ICAO “ICAO Doc 9924, Aeronautical Surveillance Manual,” 2012.
- [2] M. I. Skolnik, Introduction to RADAR system, Third ed., The McGraw Hill Co., 1962.
- [3] M. Cherniakov, ed., Bistatic Radar: Emerging Technology, WILEY, England, 2008.
- [4] D. Poullin, “Passive detection using digital broadcasters (DAB, DVB) with COFDM modulation,” IEE Proc. Radar Sonar Navig., vol. 152, no. 3, pp. 143–152, June 2005.

[招待講演] **90GHz 帯リニアセルレーダーによる
滑走路灯のレーダー反射断面積評価**
— **RoF とミリ波を用いた新しい電波システム** —

柴垣 信彦 佐藤 洋介 加島 謙一

日立国際電気ミリ波応用プロジェクト

〒187-8511 東京都小平市御幸町 32 番地

E-mail: {shibagaki.nobuhiko,sato.yousuke,kashima.kenichi }@h-kokusai.com

あらまし 自動車の衝突防止レーダーなどでミリ波帯のレーダーが実用化され、CMOS 化の動きも進展している。ミリ波帯の周波数資源は、これらの民生用の大量生産製品とは別に、インフラ用途を指向した応用にも有効活用が可能である。頻りに離着陸が行われる大規模空港では、先行の機体から落下した金属異物の影響で滑走路が一時的に閉鎖されることがある。このため小さな金属異物を検知できる滑走路監視システムは世界的に需要が高まっている。ミリ波帯レーダーを利用したシステムは開発事例があるがカバーエリアを拡げるには放射電力を大きくせざるを得ない。我々は吸収減衰特性の良好な 90GHz 帯のミリ波と RoF 技術の組み合わせにより、高い空間分解能で広いカバーエリアを実現できるシステムの検討を進めている。本報告ではシステム開発の背景、システムの構成、空港滑走路での検知評価試験の概要などを報告したのち、標準検知物体の電磁界解析による RCS (レーダー散乱断面積) の計算結果を紹介し、成田空港での実証実験で測定した実測結果との比較を行う。

キーワード RoF, Radar, RCS, FOD Detection System

Evaluation for Radar Cross Section of Runway Lights
Using 90GHz-band Linear Cell Radar System

— Advanced Wireless System with Radio over fiber and millimeter-wave Technology —

Nobuhiko Shibagaki Yosuke Sato Kenichi Kashima

Hitachi Kokusai Electric Inc., 32 Miyuki-cho, Kodaira-shi, Tokyo, 187-8511, Japan

E-mail: {shibagaki.nobuhiko,sato.yousuke,kashima.kenichi }@h-kokusai.com

Abstract Detection of small foreign object debris (FOD) on airport runways is important to prevent accidents and improve economical value of the airport. In this study, an FOD detection system that utilizes optically-connected 92-100 GHz millimeter-wave radar has been developed. This detection system uses Radio-over-Fiber signal transmission between a signal source and several radar antenna units. Field evaluations of the developed radar system are carried out at the Tokyo Narita International Airport. Radar Cross Section of reference objects are calculated using EM simulator (HFSS) at 100GHz. The RCS characteristics obtained by HFSS simulation have good insights for understanding the measurement results on the airport runway.

Keyword RoF, Radar, RCS, FOD Detection System

[招待講演]

90GHz帯リニアアセラーによる
滑走路灯のレーダー反射断面積評価
～ RoFとミリ波を用いた新しい電波システム～

平成29年9月4日

柴垣信彦 佐藤洋介 加島謙一

日立国際電気 ミリ波応用プロジェクト

Hitachi Kokusai Electric Inc. Proprietary & Confidential
Copyright © Hitachi Kokusai Electric Inc. 2017. All rights reserved.

- 滑走路用FODレーダーの概要
 - 開発の背景
 - 経済効果
- 成田空港に設置した実証システム
 - 設置概要・システム構成
 - これまでの性能評価結果
- 接地帯灯のRCS評価
 - 基準としての金属円柱の電磁界解析
 - 接地帯灯の電磁界解析
- まとめと今後の課題

Hitachi Kokusai Electric

Hitachi Kokusai Electric Inc. Proprietary & Confidential
Copyright © Hitachi Kokusai Electric Inc. 2017. All rights reserved.

Tragedy by FOD on the runway in France

HITACHI
Inspire the Next



- Air France Flight 459- Le Monde, France



Air France Flight 459, 2000
Five minutes before the Concorde departed, an aircraft dropped a titanium ally strip.

The Concorde ran over debris during takeoff, blowing a tire and puncturing a fuel tank, leading to fire and engine failure.

The titanium ally trip
width 2.5 cm
length 42 cm

Hitachi Kokusai Electric

Hitachi Kokusai Electric Inc. Proprietary & Confidential
Copyright © Hitachi Kokusai Electric Inc. 2017. All rights reserved.

FOD Items of Varying Hazard Levels

HITACHI
Inspire the Next

Table 1. Foreign Object Debris Items of Varying Hazard Levels

FOD Item	Expected Hazard	Frequency of Occurrence
1. Small piece of concrete	High	Frequent
2. Standard lug nut from service vehicle	High	Frequent
3. Roller bearing	High	Frequent
4. Chunk of rubber	Low	Frequent
5. Mechanic's wrench	High	Frequent
6. Fuel cap	High	Frequent
7. Cotter key	Moderate	Frequent
8. Plastic bottle/bottle cap	Low	Frequent
9. Strapping material	Moderate	Frequent
10. Expansion joint material	Low	Frequent
11. Construction material (galvanized nails or sheetrock screws)	Moderate	Based on construction activity
12. Runway infrastructure part (piece of runway light or signage)	High	Infrequent
13. Small fasteners	Moderate	Frequent
14. Metal strip	High	Infrequent
15. Fiberglass door	Moderate	Frequent

FAA report (2015)

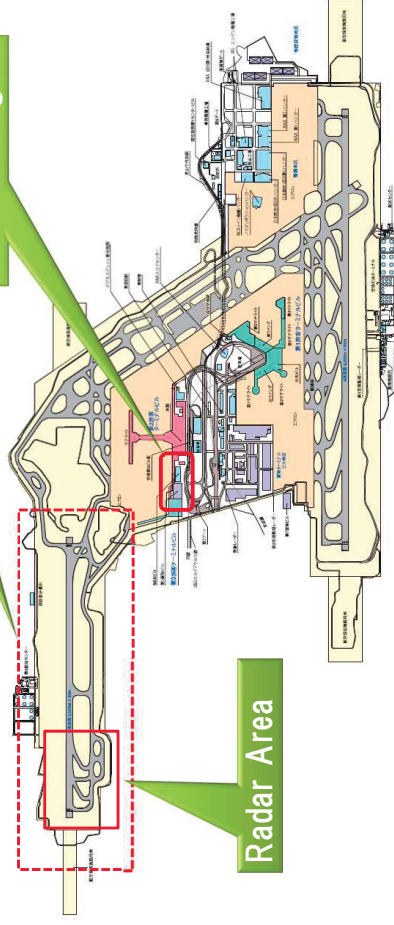
Hitachi Kokusai Electric Inc. Proprietary & Confidential
Copyright © Hitachi Kokusai Electric Inc. 2017. All rights reserved.

Hitachi Kokusai Electric

- 滑走路用FODレーダーの概要
 - 開発の背景
 - 経済効果
- 成田空港に設置した実証システム
 - 設置概要・システム構成
 - これまでの性能評価結果
- 接地帯灯のRCS評価
 - 基準としての金属円柱の電磁界解析
 - 接地帯灯の電磁界解析
- まとめと今後の課題

#B Runway

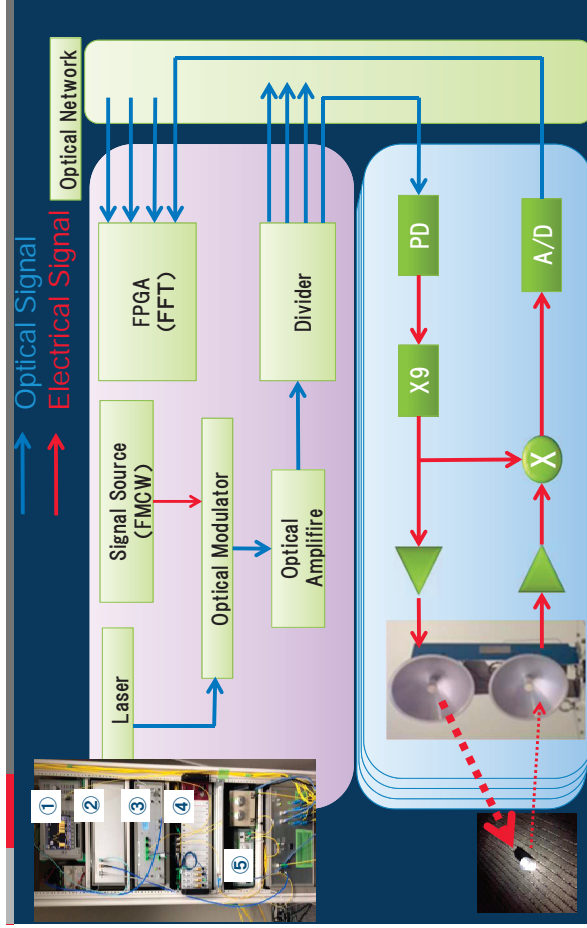
NAA Building



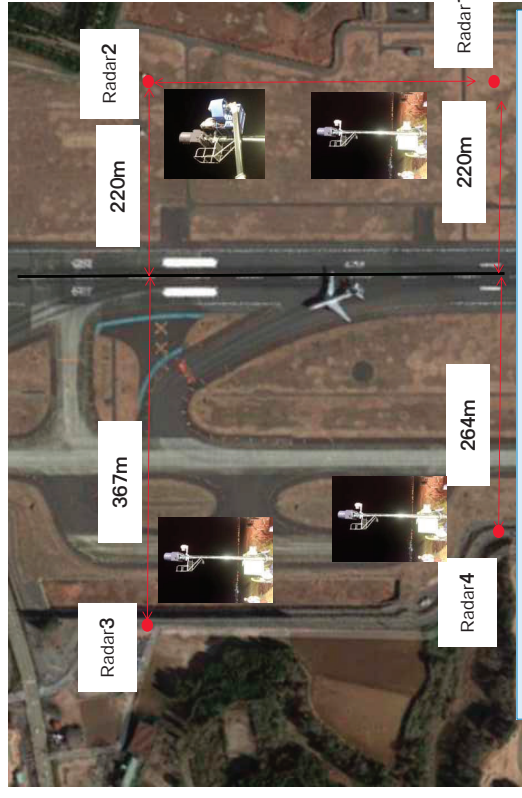
<https://www.naa.jp/ip/airport/pdf/layout/01.pdf>

- 滑走路用FODレーダーの概要
 - 開発の背景
 - 経済効果
- 成田空港に設置した実証システム
 - 設置概要・システム構成
 - これまでの性能評価結果
- 接地帯灯のRCS評価
 - 基準としての金属円柱の電磁界解析
 - 接地帯灯の電磁界解析
- まとめと今後の課題

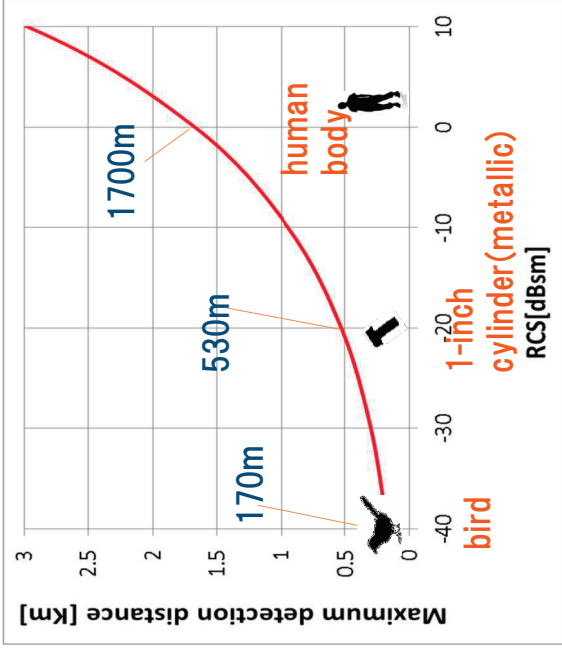
System Block Diagram of Demonstration Radar



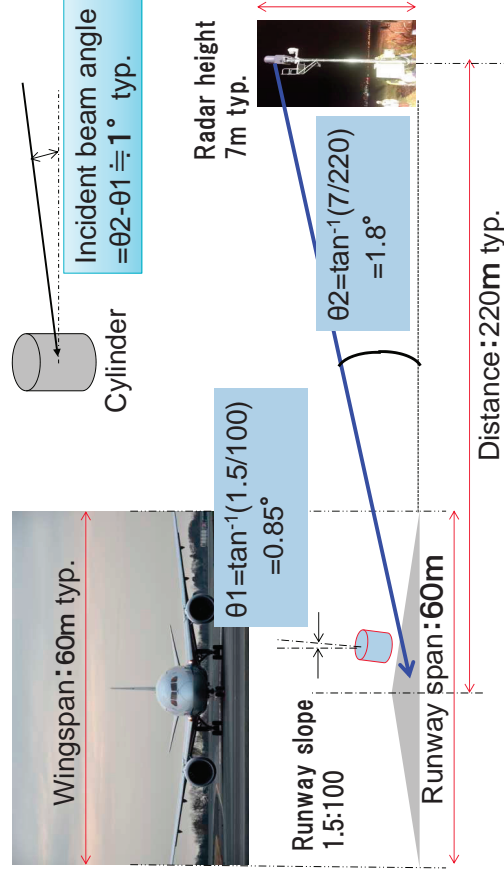
Allocation Map of Demonstration System



4 radar RF units cover one third of 3km length runway

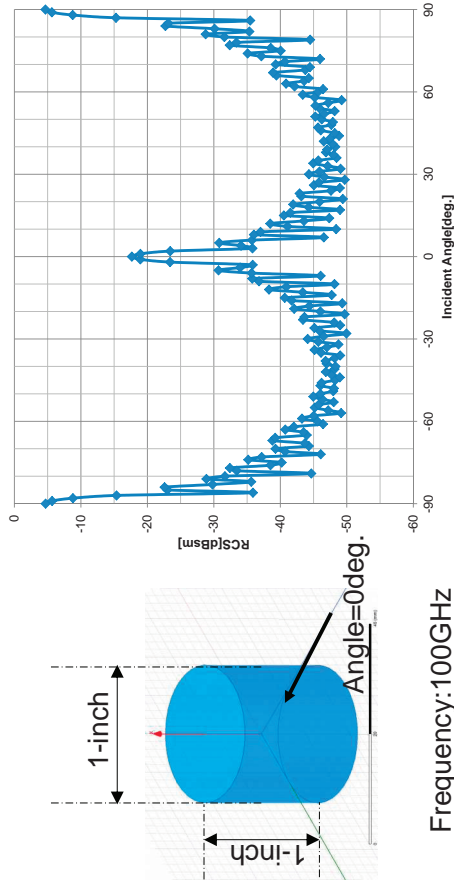


- 滑走路用FODレーダーの概要
 - 開発の背景
 - 経済効果
- 成田空港に設置した実証システム
 - 設置概要・システム構成
 - これまでの性能評価結果
- 接地帯灯のRCS評価
 - 基準としての金属円柱の電磁界解析
 - 接地帯灯の電磁界解析
- まとめと今後の課題



RCS simulation for 1-inch Metallic Cylinder

HITACHI
Inspire the Next



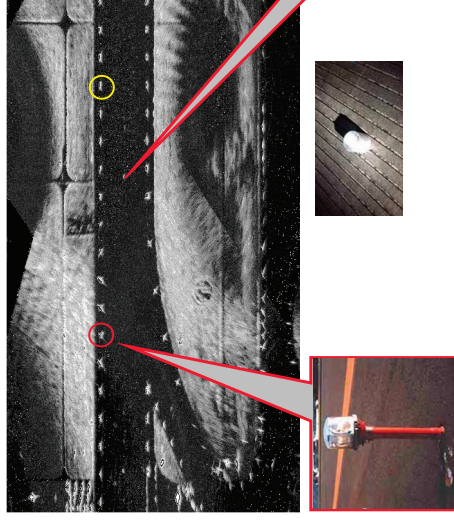
Frequency: 100GHz
Material: PEC
Polarization: Horizontal

Hitachi Kokusai Electric

Hitachi Kokusai Electric Inc. Proprietary & Confidential
Copyright © Hitachi Kokusai Electric Inc. 2017. All rights reserved. 12

High Resolution PPI Image

HITACHI
Inspire the Next



✓ High resolution image



Overlapped zone



Runway Edge Light
RCS > -20dBsm

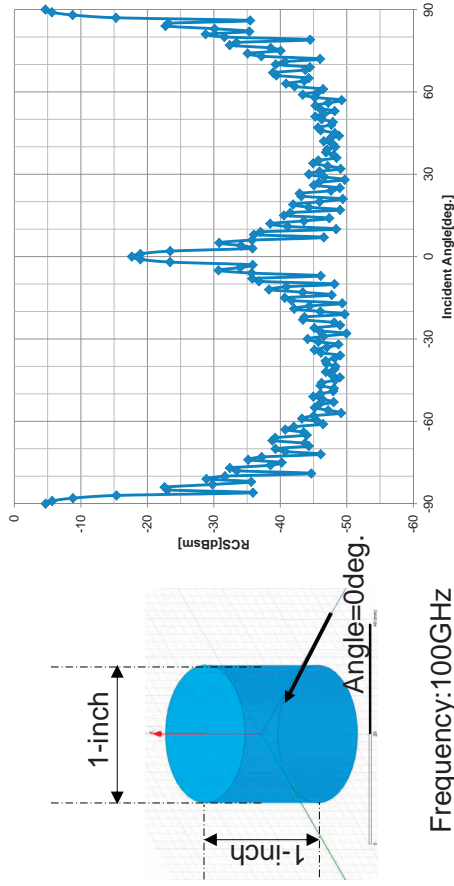
Touch Down Light
Runway Center Light
RCS < -20dBsm

Hitachi Kokusai Electric

Hitachi Kokusai Electric Inc. Proprietary & Confidential
Copyright © Hitachi Kokusai Electric Inc. 2017. All rights reserved. 13

RCS simulation for 1-inch Metallic Cylinder

HITACHI
Inspire the Next



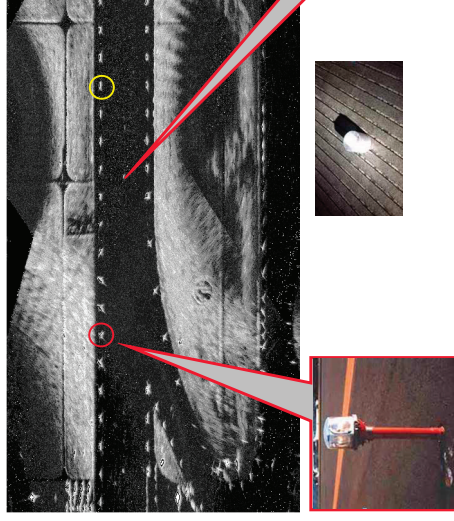
Frequency: 100GHz
Material: PEC
Polarization: Horizontal

Hitachi Kokusai Electric

Hitachi Kokusai Electric Inc. Proprietary & Confidential
Copyright © Hitachi Kokusai Electric Inc. 2017. All rights reserved. 12

High Resolution PPI Image

HITACHI
Inspire the Next



✓ High resolution image



Overlapped zone



Runway Edge Light
RCS > -20dBsm

Touch Down Light
Runway Center Light
RCS < -20dBsm

Hitachi Kokusai Electric

Hitachi Kokusai Electric Inc. Proprietary & Confidential
Copyright © Hitachi Kokusai Electric Inc. 2017. All rights reserved. 13

Runway Touchdown Zone Light

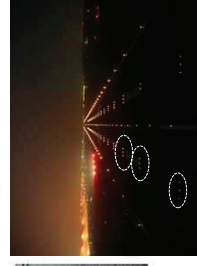
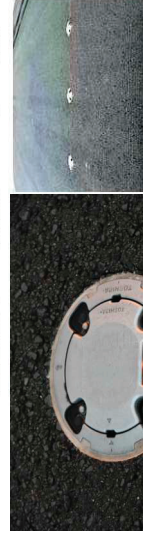
HITACHI
Inspire the Next

接地帯灯

接地帯灯 (Runway Touchdown Zone Light)



飛行機が着地する範囲を示します。
通常、60m間隔で15列(1列6灯)設置され、基本は白の光です。
埋込型灯具で、これは、航空機の間でも嫌わぬ強度をもっています。



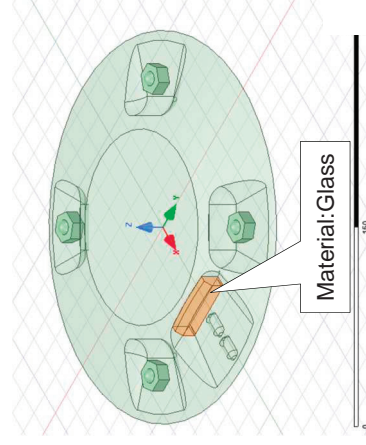
<http://www.pref.hokkaido.lg.jp/ss/kkk/kei/mamechishiki/youka/tzj.htm>

Hitachi Kokusai Electric

Hitachi Kokusai Electric Inc. Proprietary & Confidential
Copyright © Hitachi Kokusai Electric Inc. 2017. All rights reserved. 14

RCS simulation for "Touchdown zone light"

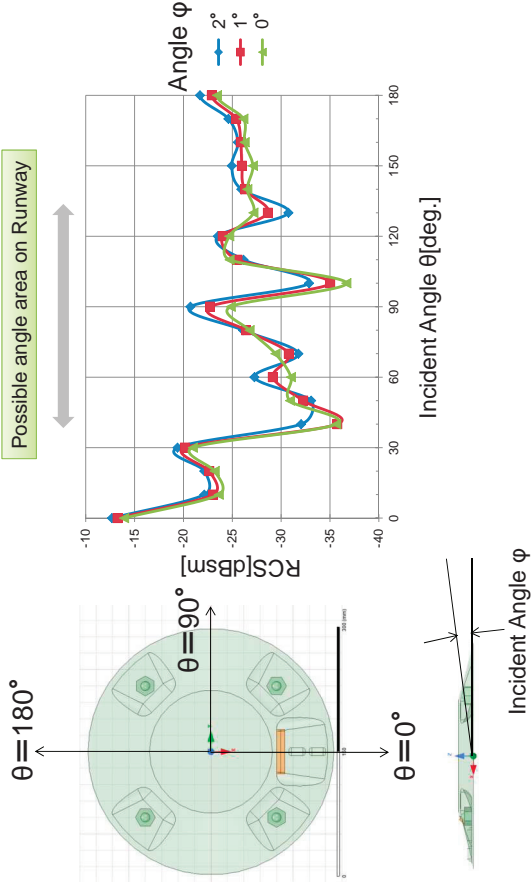
HITACHI
Inspire the Next



Frequency: 100GHz
Material: PEC
Polarization: Horizontal

Hitachi Kokusai Electric

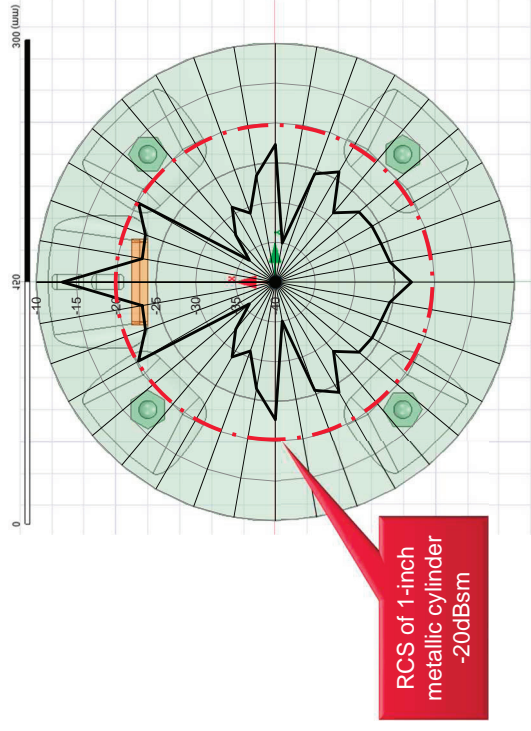
Hitachi Kokusai Electric Inc. Proprietary & Confidential
Copyright © Hitachi Kokusai Electric Inc. 2017. All rights reserved. 15



Hitachi Kokusai Electric

Hitachi Kokusai Electric Inc. Proprietary & Confidential
Copyright © Hitachi Kokusai Electric Inc. 2017. All rights reserved.

16

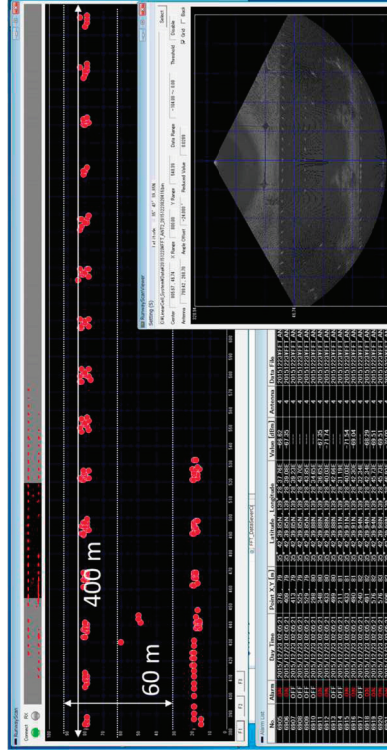


Hitachi Kokusai Electric

Hitachi Kokusai Electric Inc. Proprietary & Confidential
Copyright © Hitachi Kokusai Electric Inc. 2017. All rights reserved.

17

Example Radar Images for Airport Operator



FOD alert include

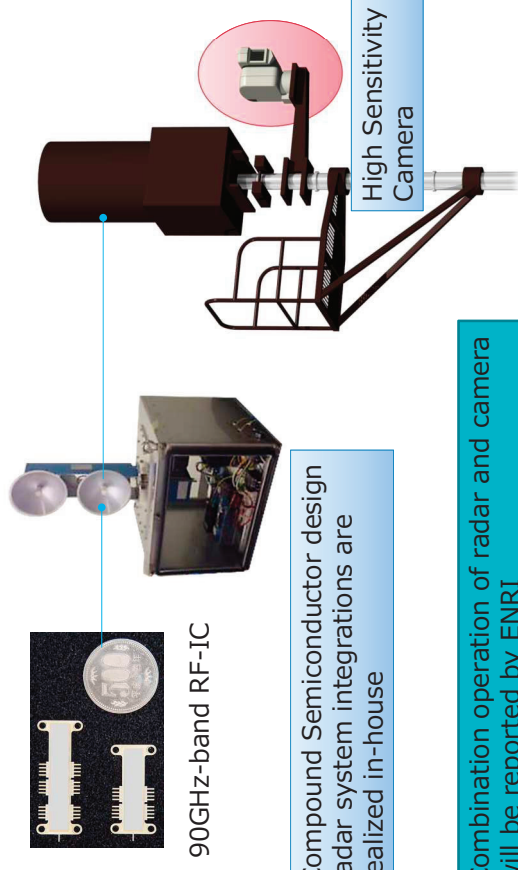
- position (latitude and longitude)
- reflection power level (dBm)
- estimated Radar Cross Section of the FOD
- time and date of occurrence

Hitachi Kokusai Electric

Hitachi Kokusai Electric Inc. Proprietary & Confidential
Copyright © Hitachi Kokusai Electric Inc. 2017. All rights reserved.

18

Structure of Hybrid Sensor



Combination operation of radar and camera will be reported by ENRI

Hitachi Kokusai Electric

Hitachi Kokusai Electric Inc. Proprietary & Confidential
Copyright © Hitachi Kokusai Electric Inc. 2017. All rights reserved.

19

Summary

- 成田空港に設置した実証システムでFODレーダーとしての基本性能を確認
- 滑走路上の既存構造物のRCS評価のためにRCS(レーダー散乱面積)の電磁界解析を実施
 - 滑走路勾配と送信アンテナの配置関係から評価物体は垂直に対して約1°傾いている。
 - 1インチ金属円柱のRCSは100GHzで約-20dBsm
 - 滑走路上の既存構造物では最もRCSが小さな接地帯灯はRCSに構造起因の角度依存性があり、設置条件から定まる角度範囲では1インチ金属円柱よりRCSが小さい

Hitachi Kokusai Electric Inc. Proprietary & Confidential
Copyright © Hitachi Kokusai Electric Inc. 2017. All rights reserved.

Future Work

- 実用化に向けた基本性能の向上
- 他のシステムとの共用検討及び国際標準化活動
- 国内技術基準の策定
- 既存構造物のRCS評価の詳細化と検知システムの高度化
- FOD検知の自動化による検知性能の向上
- 海外展開に向けた国際的な協力関係の構築

Hitachi Kokusai Electric Inc. Proprietary & Confidential
Copyright © Hitachi Kokusai Electric Inc. 2017. All rights reserved.

Thank you for your attention

Hitachi Kokusai Electric Inc. Proprietary & Confidential
Copyright © Hitachi Kokusai Electric Inc. 2017. All rights reserved.

Acknowledgement

This study was conducted as a part of a research project entitled “R&D of coordinated linear cell radar system in 90GHz-band”, supported by a Japanese Government funding, “R&D to Expand Radio Frequency resources” of Ministry of Internal Affairs and Communications

Hitachi Kokusai Electric Inc. Proprietary & Confidential
Copyright © Hitachi Kokusai Electric Inc. 2017. All rights reserved.

空港における電波を利用した舗装体モニタリングについて

佐藤 源之 鄒 立龍 菊田和孝

東北大学 東北アジア研究センター 〒980-8576 仙台市青葉区川内 41

E-mail: motoyuki.sato.b3@tohoku.ac.jp

あらまし 本報告ではレーダを利用した空港における誘導路など舗装体の健全性評価手法を提案する。まず実開口レーダ(RAR)に干渉処理を施し一般道路の表面の微少な振動を計測できることを示す。レーダは通行する車両と舗装体の表面を同時に計測するが、ラドン変換を利用した信号処理により車両からの反射波を除去し舗装体表面の振動を計測できることがわかった。これらについてレーザ・ドップラ計を用いて検証実験を行った。次に地表設置型合成開口レーダ(GB-SAR)利用した干渉処理の例を示す。羽田空港において行った計測において、ターミナルビルの表面の振動を 0.18mm の精度で計測できることを示した。この手法を舗装体表面計測に利用し、損傷箇所の検知ができる可能性を示した。

キーワード SIP, GPR, GB-SAR, 空港舗装体

Monitoring of Pavement at Airports by Means of Electromagnetic Wave

Motoyuki SATO Lilong ZOU and Kazutaka KIKUTA

† Center for Northeast Asian Studies, Tohoku University 41 Kawauchi, Aoba-ku, Sendai 980-8576 Japan

E-mail: † motoyuki.sato.b3@tohoku.ac.jp

Abstract In this report, we propose a novel methodology to evaluate the quality of pavement such as taxiway at airports by using radar technologies. At first, we demonstrate that Real Aperture Radar (RAR) can measure small displacement of the pavement surface by Interferometric processing. Radar measures both the moving vehicle and displacement of the pavement, but applying Radon transform and remove the radar signal from vehicle, we could observe the pavement displacement. We validated the result by a laser Doppler measurement. Then we show some results of the use of Ground Based Synthetic Aperture Radar (GB-SAR) Interferometry. We could demonstrate that 0.18mm displacement of a wall of a building at Haneda airport. Now we are applying this method for the surface measurement of pavement

Keyword SIP, GPR, GB-SAR, Airport pavement

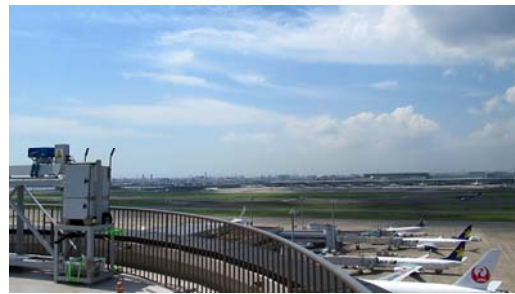
あらまし

- 研究背景
- 実開口レーダによる道路面計測
- 空港誘導路のGB-SAR (地表設置型合成開口レーダ) 計測
- まとめ

1



GB-SARから望む羽田空港A滑走路



2



研究背景

© 2003 Steve Muench

Flexible Pavement load distribution

Rigid Pavement load distribution

3



提案する手法の概要

- 内閣府戦略推進プログラム (SIP)
 空港の舗装体内変状把握用モニタリングシステムの構築と現場実証 (計測・分析)
- GB-SARによる広域・高速異状箇所検知
 - 数分間隔での計測
 - 数百m程度の範囲を一度に計測
 - 舗装表面の状態把握
 - アレイ型GPRによる精査
 - 深度1mまで舗装体内計測
 - 分解能: 2cm
 - 2cm以下の層内状態把握



4



干渉SAR

First acquisition: T_1

Phase 1: ϕ_1

Second acquisition: T_2

The interferometric phase $\Delta\phi_{21}$ is given by:

$$\Delta\phi_{21} = \phi_2 - \phi_1 = \frac{4\pi \cdot (R_2 - R_1)}{\lambda}$$

Then the displacement d of this point target can be obtained by:

$$d = R_2 - R_1 = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\phi_{21}$$

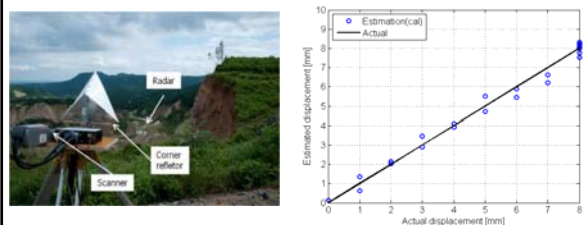
The total displacement of whole monitoring period can be obtained by:

$$Displacement_{total} = \sum_{i=1}^{N-1} d_i$$

5



干渉SARの精度検証



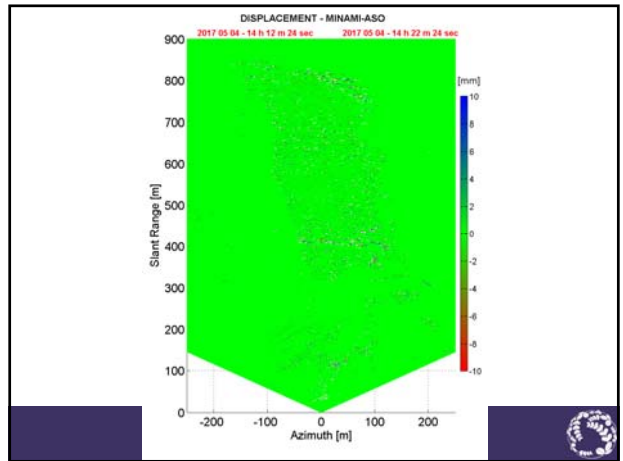
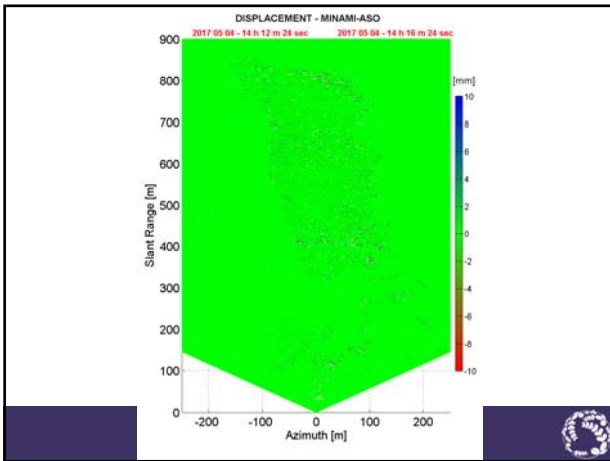
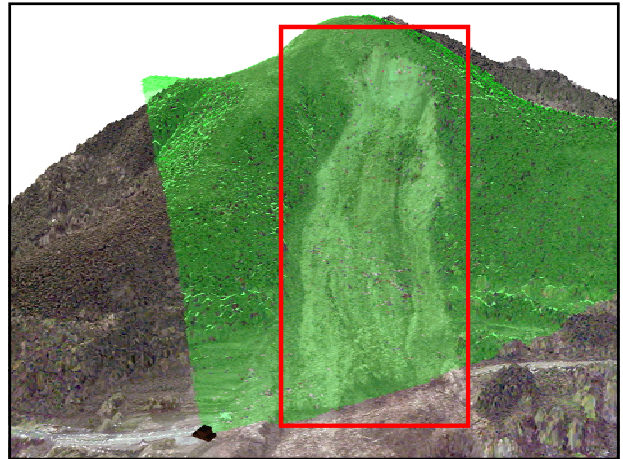
The distance to the radar was about 460m. Estimated displacement of the trihedral reflector. Mean errors was estimated at 0.18mm.

6

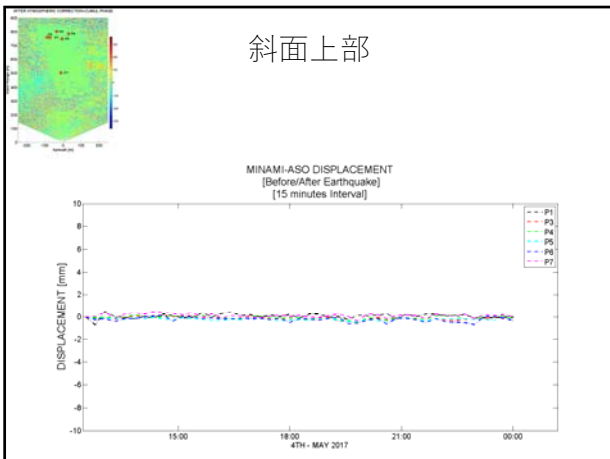


南阿蘇村立野地区

阿蘇大橋崩落の原因となった大規模土砂災害地域のモニタリング



斜面上部



実開口レーダによる道路計測

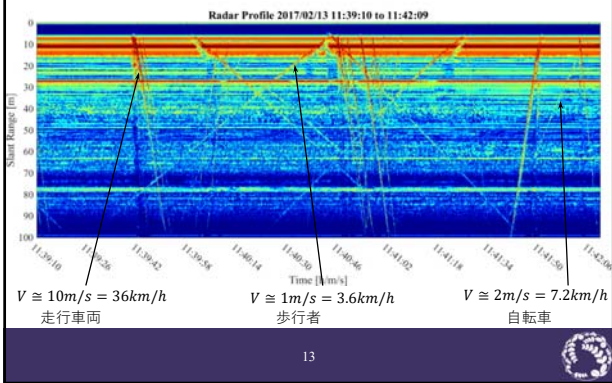


System parameters:

- Pulse Repetition Frequency(prf): 1250
- Acquisition interval: 5 minutes
- Maximum range: 200 m
- Range resolution: 0.5 m
- Frequency: 17 GHz - 17.3 GHz



レーダ計測データ



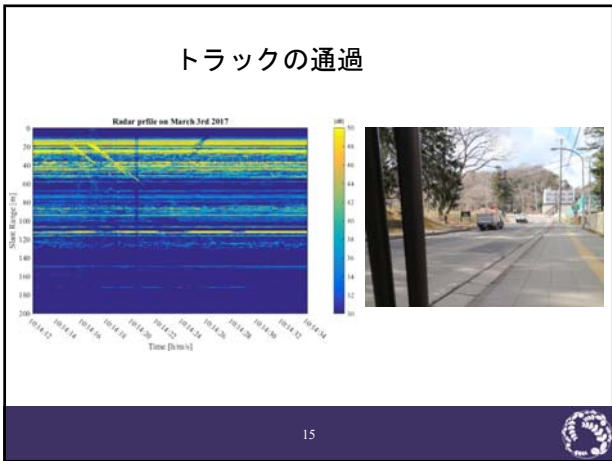
13

トータルステーションによる距離計測



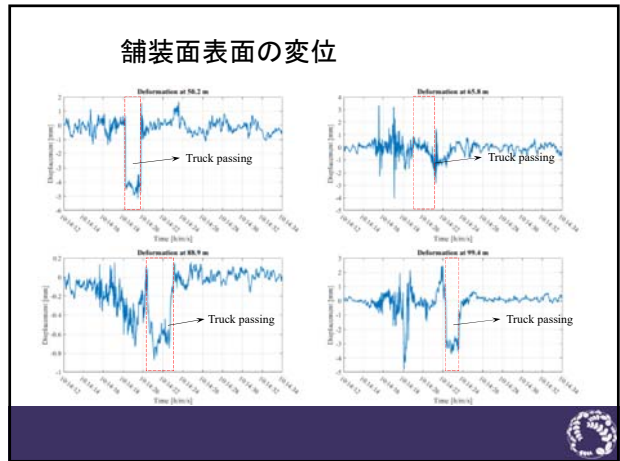
14

トラックの通過

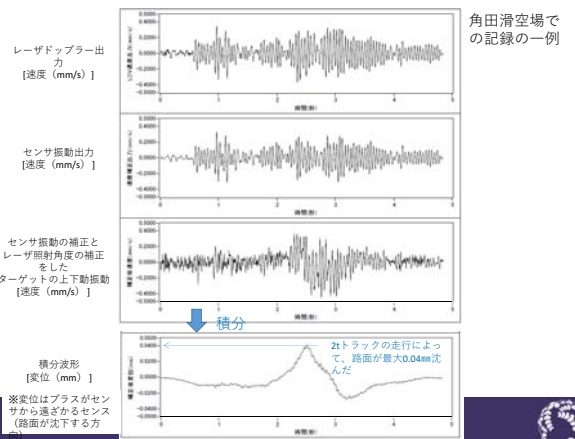


15

舗装面表面の変位



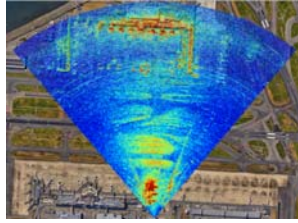
レーザドップラ計を利用した滑空場での舗装道路路面振動計測



羽田空港におけるGB-SAR計測



GB-SAR system



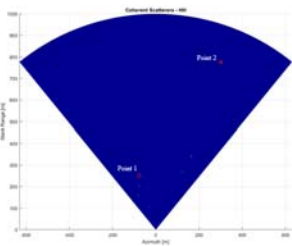
Entire GB-SAR Image (HH)

19

GB-SAR 計測履歴

Measurement Date	Weather	Data Quality	Measurement Date	Weather	Data Quality
5 th August	Fine	✓	19 th September	Heavy rain	NA
23 rd August	Fine	✓	21 st September	Heavy rain	NA
24 th August	Fine	✓	23 rd September	Heavy rain	NA
25 th August	Fine	✓	26 th September	Fine	✓
26 th August	Fine	✓	27 th September	Fine	✓
29 th August	Light rain	NA	28 th September	Fine	✓
30 th August	Light rain	NA	29 th September	Fine	✓
31 st August	Fine	✓	30 th September	Light rain	NA
01 st September	Fine	✓	4 th October	Fine	✓
02 nd September	Fine	✓	5 th October	Light rain	NA
05 th September	Fine	✓	7 th October	Fine	✓
06 th September	Light rain	NA	11 th October	Fine	✓
07 th September	Light rain	NA	12 th October	Fine	✓
09 th September	Fine	✓	13 th October	Fine	✓
10 th September	Light rain	NA	14 th October	Fine	✓
11 th September	Light rain	NA	18 th October	Fine	✓
14 th September	Light rain	NA	19 th October	Fine	✓
15 th September	Fine	✓	20 th October	Fine	✓
16 th September	Fine	✓			

安定した反射体



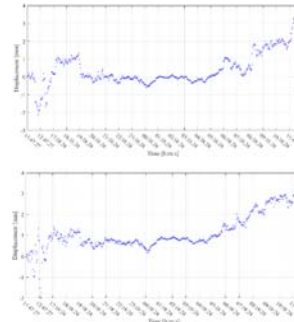
Coherent scatterers



Projection of selection coherent scatterers on map

21

空港建物壁面の24時間における変位

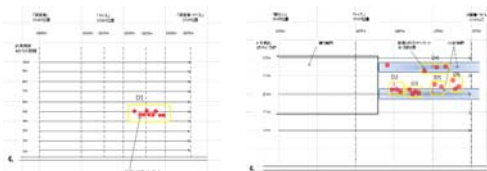


Displacement of Point 1

Displacement of Point 2

22

舗装体の損傷箇所



17

Selected points in damaged area



Selected points in un-damaged area



航空機通過時の舗装体表面変位



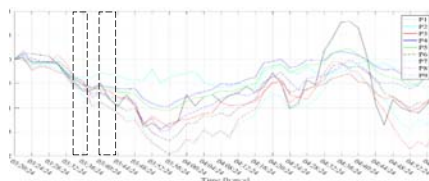
19

The time series of selected damaged points



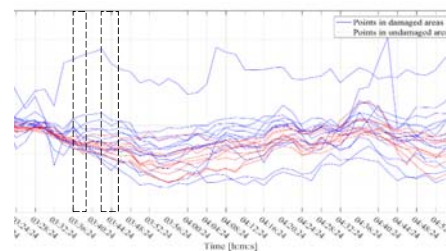
20

The time series of selected undamaged points



21

Comparison of the deformation in damaged and undamaged areas

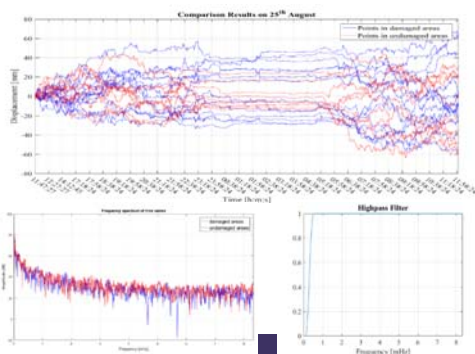


Standard Deviation

Damaged area	0.87
Undamaged area	0.50

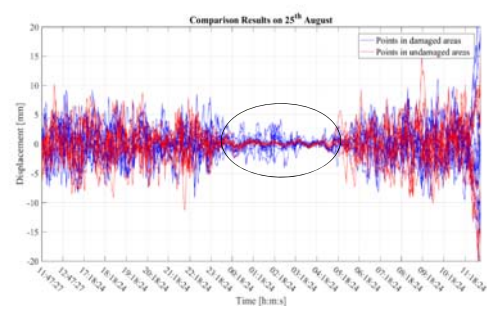
22

24 hours time series of selected damaged and undamaged points



23

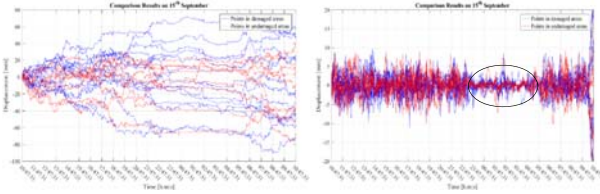
24 時間の変位



The time series of displacement that filter out long time vibration.

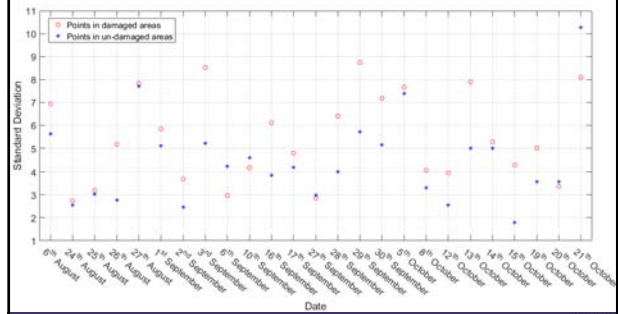
30

24 hours time series of selected damaged and undamaged points (15th September)



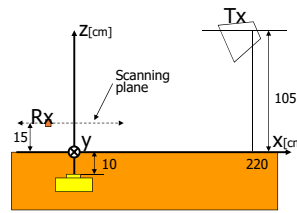
25

変位の標準偏差 (0 a.m.—6 a.m.)



32

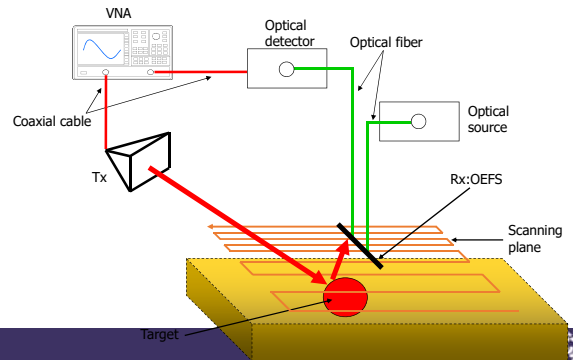
埋設物検知実験



比誘電率4.0(TDRで測定) → - TM波を使用
- 入射角を約60度に設定

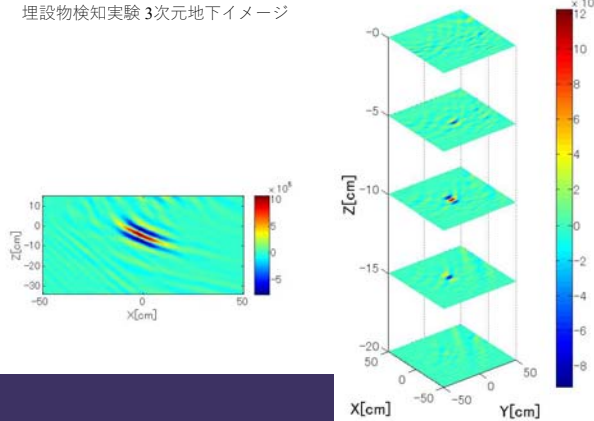
33

バイスタティック地中レーダシステム



34

埋設物検知実験 3次元地下イメージ



まとめ

- 大型車両通過後の路面変位が観測できた
- 空港誘導路の航空機通過による表面変位を計測できた。異状体の変位を捉えられた。
- GB-SAR 干渉計測による舗装面モニタリングは有効な遠隔計測手法である。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金(A) 26249058ならびに内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム (S I P) 「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人: N E D O) によって実施されました。

36

低誘電率低損失フッ素系樹脂基板と薄板 LiNbO₃ 結晶を用いた 80GHz 帯アンテナ電極電気光学変調器

山崎 伸¹ 井上 敏之¹ 塩見 英久¹ 真田 篤志¹ 木谷 聡志² 中林 誠³
村田 和夫^{4,2} 村田 博司¹

¹大阪大学 大学院基礎工学研究科 〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

²住友電工プリントサーキット 〒562-0068 滋賀県甲賀市水口町ひのきが丘 30

³住友電工ファインポリマー 〒590-0458 大阪府泉南郡熊取町朝代西 1-950

⁴住友電工 〒541-0041 大阪市中央区北浜 4-5-33

E-mail: murata@ee.es.osaka-u.ac.jp

あらまし 我々の研究グループは、平面アンテナと電気光学変調器を融合させたアンテナ電極光変調器の研究を進めている。平面アンテナと共振型変調電極を結合させたアンテナ電極を用いて電気光学変調器を構成すると、外部電源を用いることなく、アンテナで受信した信号をそのまま光信号に変換することが可能である。また、アンテナを光導波路に沿ってアレイ状に配置すれば、光波走行時間による位相差と自発分極反転による EO 極性制御技術を用いて、アレイアンテナとしての指向性を自在に設定することもできる。これまでに 10~60 GHz 帯で動作するアンテナ電極光変調器の試作・実証実験に成功している。今回、ミリ波帯で低誘電率かつ低損失なフッ素系樹脂系基板をベース基板として、その上部に厚さ 50 μ m の LiNbO₃ 結晶薄板を装荷した構造を用いて、80GHz 帯で動作するデバイスの設計・試作を行い、その基本動作実証実験に成功したので報告する。

キーワード アレイアンテナ, ミリ波, 光変調器, フッ素系樹脂, 光ファイバ無線, 5G

Antenna-Coupled-Electro Electro-Optic Modulators Operating in 80 GHz Band Using Low-Dielectric-Constant and Low-Loss Fluorine-Based-Resin Substrate and LiNbO₃ Thin Film

Shin YAMASAKI¹ Toshiyuki INOUE¹ Hidehisa SHIOMI¹ Atsushi SANADA¹ Satoshi KIYA²
Makoto NAKABAYASHI³ Kazuo MURATA^{4,2} and Hiroshi MURATA¹

¹Graduate School of Engineering Science, Osaka University 1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-8531 Japan

²Sumitomo Electric Printed Circuits 30 Hinokiga-oka, Minakuchi-cho, Koga, Shiga 528-0068 Japan

³Sumitomo Electric Fine Polymer 1-950 Asashironishi, Kumaori-cho, Sennan, Osaka 590-0458 Japan

⁴Sumitomo Electric Industries 4-5-33 Kitahama, Chuo-ku, Osaka 541-0041 Japan

E-mail: murata@ee.es.osaka-u.ac.jp

Abstract We have proposed and developed new antenna-coupled-electrode (ACE) electro-optic modulators (EOM), which enable us to convert microwave/millimeter-wave (MMW) wireless signals to optical signals directly without external power supply. The basic operations of the proto-type ACE EO modulators have been demonstrated successfully in the frequency range of 10-60 GHz. Their applications to future 5G wireless communication systems and millimeter-wave radar systems are now underway. In this report, a newly-designed ACE EOM operating in the 80 GHz band is reported. By use of the fluorine-based resin with low dielectric constant and low loss in MMW bands from Sumitomo Electric Industries, 80 GHz wireless signals of ~10 mW were directly converted to optical signals successfully. The conversion of 80 GHz band signals to IF (~1 GHz) band signals by use of photonic techniques is also presented.

Keyword Array Antenna, Millimeter-Wave, Optical Modulator, Fluorine-Based Resin, Radio-over-Fiber, 5G

1. はじめに

ミリ波は、次世代・次々世代（5G/6G）移動体通信や高分解能レーダーシステムの本命と期待されている[1]。特に、80 GHz帯は自動車衝突安全用レーダーとしての利用が進んでいるが、大容量無線データ通信への応用も検討されている。

一方、ミリ波は、自由空間伝搬・ケーブル伝搬の何れにおいても、マイクロ波帯に比べて伝搬損失が大きいという問題点がある。伝搬損失が大きいことは、セルラー無線通信において、他の基地局の影響を受けにくいという長所となるが、信号伝送・処理の観点からは、かなりの制約となってしまう。そこで、ミリ波を光信号に変換して低損失な石英光ファイバを用いて伝送するRadio over Fiber (RoF) 技術、および光領域においてミリ波信号を処理する技術が有用と考えられる[2], [3]。今後、ミリ波を用いたさまざまなデバイス・システム・アプリケーションが創出されると考えられるため、ミリ波無線信号を光信号に変換するデバイスがより重要になると考えられる。また、光応用電磁界計測技術の観点からも、ミリ波を光信号に変換・評価する技術は重要である。

我々は、平面アンテナと電気光学変調器を融合させたアンテナ電極光変調器の研究を進めている[4]-[8]。電気光学結晶基板に平面アンテナと共振型変調電極を結合させたアンテナ電極を作製すれば、外部電源を用いることなく、アンテナで受信した無線信号をそのまま光信号に変換することができる。また、アンテナを光導波路に沿ってアレイ状に配置する構成を用いると、光波走行時間による位相差と自発分極反転による光変調極性制御技術を用いて、無線-光信号変換の指向性を自在に設定することもできる。これまでに10~60 GHz帯で動作するアンテナ電極光変調器の試作・実証実験に成功している。特に、60GHz帯ではGb/s超データ受信・復調にも成功している。今回、ミリ波帯において低誘電率かつ低損失なフッ素系樹脂系基板[9]を用いて、80GHz帯で動作するデバイスの設計・試作を行い、その基本動作実験に成功したので報告する。

2. アンテナ電極変調器の構造

アンテナ電極光変調器の基本構造をFig. 1に示す。アンテナ電極を、単一モード光導波路に沿ってアレイ状に並べた構成を用いている。アンテナ電極は1組のマイクロストリップパッチアンテナを定在波共振型電極に結合させた構成である[4]-[6], [8]。

基板には低誘電率低損失フッ素系樹脂を用いて、その上にz-cut LiNbO₃結晶（厚さ~50μm）を装荷している。光導波路およびアンテナ電極は、LiNbO₃の裏面に作製する。LiNbO₃結晶の誘電率はかなり大きい（ $\epsilon_r=(43,43,28)$ ）ので、誘電率が低く損失が非常に小さい住友電工製フッ素系樹脂基板（ $\epsilon_r=2.28$, $\tan\delta=0.0008$ (@10 GHz))[8], [9]を用いることにより、複合基板としての実効誘電率をかなり小さくすることができる。そのため、アンテナの開口面積を大きくとっての受信電力を増加させるとともに基板における不要共振を抑制することができる。

アンテナ電極を光導波路に沿ってアレイ状に配置することにより、各アレイアンテナで受信された信号を光変調作用により合成して、一種のアレイアンテナとしての動作させることができる[4]-[8]。また、LiNbO₃は強誘電性光学結晶であり、結晶各部の自発分極の方向を、あらかじめ任意に反転させることができる[4]-[6]。これにより、光変調の極性を任意に反転させることができるので、無線信号-光信号変換における指向性を自在に設定することもできる。

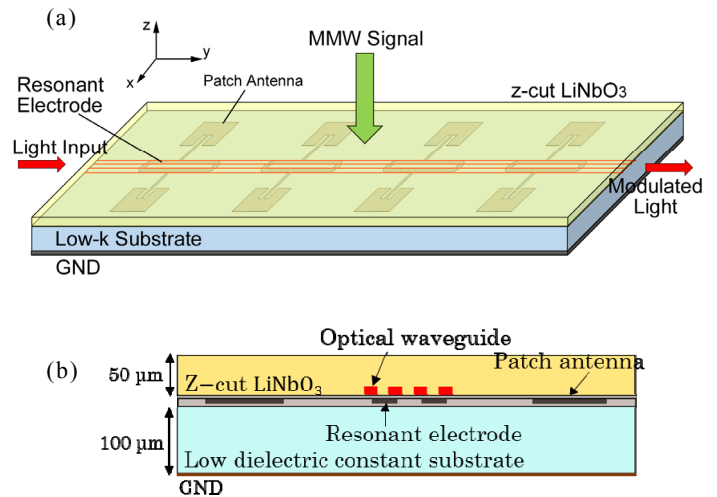


Fig.1. Basic structure of the antenna-coupled- electrode (ACE) EO modulator.

(a) Whole view. (b) Cross sectional view.

Table 1. Dielectric characteristics of the fluorine-based resin and fused silica glass

	ϵ_r	$\tan\delta$
Florine-based resin	2.28	0.0008
Fused silica glass	4.0	0.0007

(@10GHz)

3. 解析・設計

3次元電磁界シミュレーターを用いてアンテナ電極の詳細な解析を行ない、変調器を設計した。動作周波数は79 GHz、アンテナ電極素子数は8素子とした。動作光波長は1.55 μm帯である。アンテナ電極は、複数の共振器（2つのパッチアンテナと定在波共振線路電極）を結合させた構成である。このため、それぞれの共振周波数を合わせるとともに、インピーダンス整合を取ることがポイントである。それゆえ、まず、パッチアンテナと定在波共振線路を分けて解析・設計を行った後、これらを結合させて整合条件を調整して良好な光変調特性が得られる条件を求めた[4], [5]。

Fig. 2は、設計したアンテナ電極の上部から80GHz帯の平面波を照射したときの電界分布の計算結果の例

である。定在波共振線路電極上に強い定在波電界が誘起されていることがわかる。この状態において、光導波路を作製する LiNbO₃ 結晶部分における電界強度分布をプロットしたものを Fig. 3 に示す。照射したミリ波電界の振幅の 150 倍以上の電界が誘起されていることがわかる。この解析結果より、たかだか 10mW 程度のミリ波の照射で、明瞭な光変調サイドバンドが生成される（光位相変調指数~10 mrad）と見積もられる。

詳細な解析を繰り返してアンテナ電極変調器の諸元を定めた。この結果を Table 2 に示す。

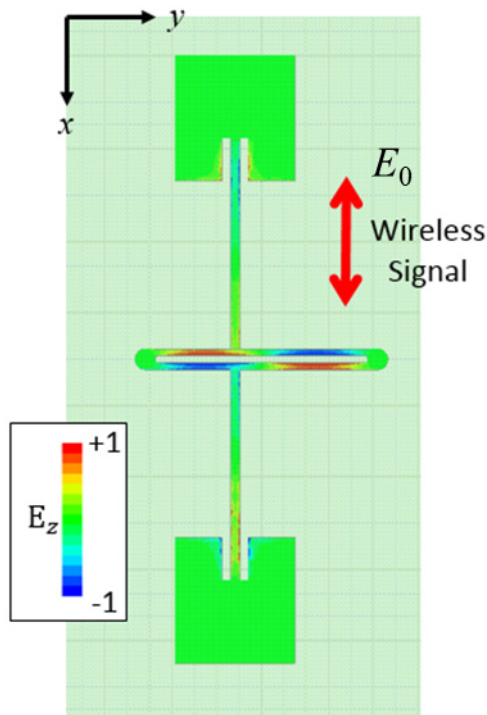


Fig. 2. Pattern of the ACE and calculated surface electric field distribution when a 79 GHz plane-wave MMW signal is irradiated from above by use of HFSS ver. 16.

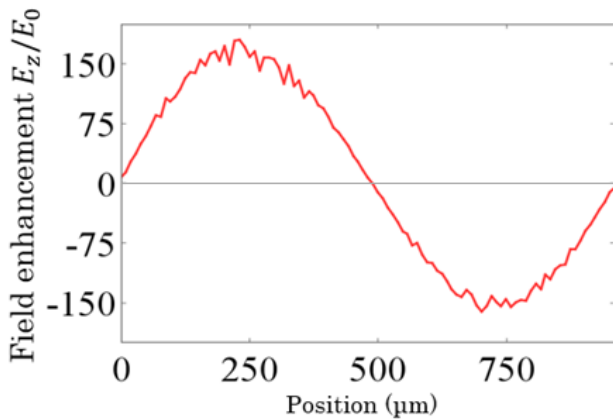


Fig. 3. Electric field distribution along the optical waveguide (modulation electric field).

Table 2. The parameters of the designed ACE EOM.

Antenna-coupled electrode (ACE)	
Operational frequency f_m	79 GHz
Electrode material and thickness t_e	Al, 1 μm
Square patch antenna length L_1	536 μm
Width of connection MSL W_1	40 μm
Groove length for antenna coupling ΔG_x	182 μm
Groove width for antenna coupling ΔG_y	40 μm
MSL length along y -direction y_1	900 μm
MSL connection point to the electrode from the center Δx	182 μm
Resonant electrode length L_2	921 μm
Resonant electrode width W_2	30 μm
Resonant electrode separation S	30 μm
Stacked substrate and optical waveguide	
Operational light wavelength λ	$\sim 1.55 \mu\text{m}$
Base substrate material and thickness t_b	Fluorine-based resin 100 μm
EO crystal material and thickness t_c	z-cut LiNbO ₃ 50 μm
Optical waveguide fabrication method	Annealed proton-exchange
Optical waveguide core size $w \times d$	3 $\mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$

4. 試作・動作実験

デバイスにおける光導波路、アンテナ電極等の作製基本プロセスは、従来のデバイス[6]-[8]と同様である。Congruent z-cut LiNbO₃ 結晶と低誘電率低損失フッ素系樹脂基板（250 μm 厚）とは UV 硬化光学接着剤を用いて貼り合せた。貼り合せ後に LiNbO₃ 結晶を光学研磨して 50 μm の厚さとした。作製した 80 GHz 帯アンテナ電極変調器の写真を Fig. 4 に示す。

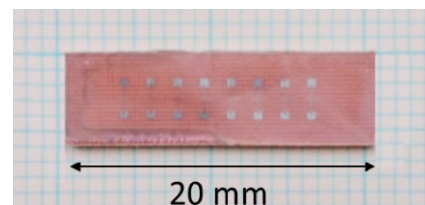


Fig. 4. Photograph of the fabricated ACE EOM.

試作したアンテナ電極変調器の特性を、Fig. 5 に示す実験系を用いて評価した。光源には、市販の DFB レーザーを用いて、75-85GHz のミリ波信号（ x 偏波、 $\sim +10\text{dBm}$ ）を、ホーンアンテナを用いてアンテナ電極

変調に照射した．このときの出力光スペクトルの測定例を Fig. 6 に示す．明瞭な光変調サイドバンドを確認した．偏波応答は設計通り (x 偏波に対してのみ動作) であり，アンテナ電極が所期の動作をしていることを確認した．Fig. 7 には測定した周波数特性を示す．3dB 帯域幅は約 5GHz であり．例えば，無線通信に応用した場合には，10 Gb/s 級信号の大容量データ受信が期待できる．無線-光信号変換の指向性の測定結果を Fig.8 に示す．ほぼ設計通りの特性を得た．

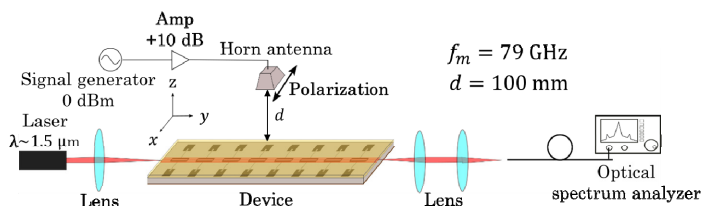


Fig. 5. Experimental set-up.

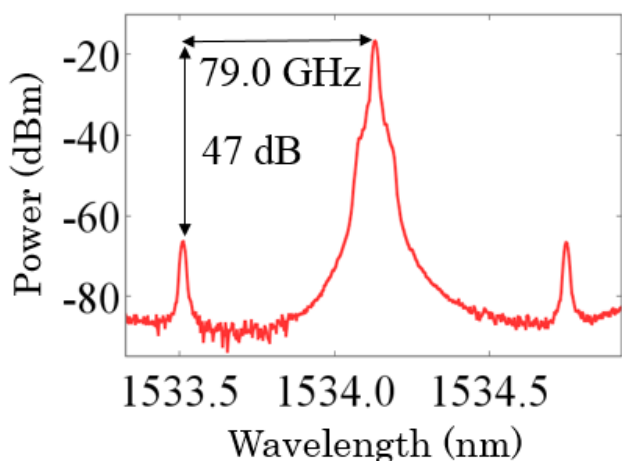


Fig. 6. Example of measured optical spectrum.

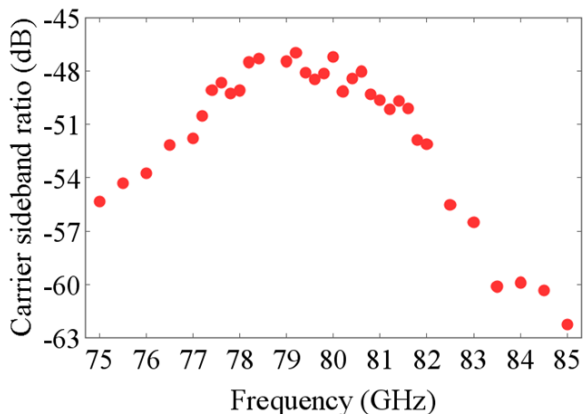


Fig. 7. Frequency dependence of signal conversion.

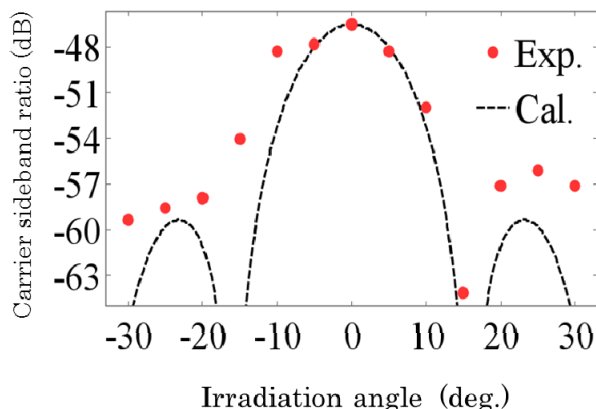


Fig. 8. Measured directivity.

5. IF 信号変換実験

UTC-PD のような超高速フォトダイオードを用いれば，80GHz 帯信号で変調された光信号を直接検波・復調することができる．しかし，80GHz 帯フォトダイオードは，あまり一般的ではなく，復調された信号の評価も容易ではない．そこで，光技術を用いて 80GHz 帯信号を IF 信号に変換して検出することを試みた．

実験系を Fig. 9 に示す．市販の高速光位相変調器を用いて，レーザー光を周波数 26 GHz の正弦波信号で適度な位相変調を掛けた．この光波を作製したアンテナ電極変調器に入射した．さらに，アンテナ電極変調器の上部から，79GHz のミリ波信号を照射してミリ波-光変換を行った．アンテナ電極変調器に入力された光波のうちで主となる光スペクトル成分は中央の搬送波光成分である．この搬送波光がミリ波 79GHz 無線信号で変調されたサイドバンド成分と，光位相変調器で生成された 3 次の変調サイドバンド成分のみを光バンドパスフィルターで取り出してフォトダイオード（周波数帯域～数 GHz）で検波することで，IF 信号に変換することができる．測定においては，エルビウムドープ光ファイバ増幅器も適宜併用した．

アンテナ電極変調器からの出力光スペクトルと生成 IF 信号スペクトル (IF 周波数 1 GHz) の例を Fig. 10 に示す．明瞭な IF 信号を生成することに成功した．C/N 比は 50 dB 程度が得られ，Gb/s 程度のデータ伝送や S/N の良いミリ波計測が期待できる．現在，データ伝送へ向けた準備を進めている．

6. むすび

低誘電率かつ低損失なフッ素系樹脂基板を用いた 80GHz 帯アンテナ電極光変調器について述べた．フッ素系樹脂基板は 80GHz 帯においても有効であることを実証した．電磁界解析結果より，フッ素系樹脂基板をさらに薄く (< 100 μm) すれば，アンテナの開口面

積がより大きくなり、光信号への変換効率がさらに向上すると見積られる。また、100GHz を超える周波数においても、このアンテナ電極変調器は有効と考えられる。今後は、データ伝送やレーダーへの応用を進めたいと考えている。

謝 辞

ミリ波帯無線と RoF 応用についてご助言を頂いた、電子航法研究所・米本成人博士、角張泰之博士、電力中央研究所・池田研介博士、日立製作所・柴垣信彦博士、同志社大学・戸田裕之教授、およびコーデンテクノインフォ・眞野浩博士に深く感謝します。

本研究の一部は、NICT 委託研究「新世代ネットワーク実現に向けた欧州との連携による共同研究開発および実証」の補助を受けた。

文 献

[1] 総務省, 「ITU 2015 年世界無線通信会議(WRC-15) 結果概要」, http://www.soumu.go.jp/main_content/000389780.pdf
 [2] J. Capmany and D. Novak, "Microwave photonics combines two worlds," *Nature photonics*, vol.1, pp.319-330, 2007.

[3] A. J. Seeds and K. J. Williams, "Microwave Photonics," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, vol.24, pp.4628-4641, 2006.
 [4] H. Murata, R. Miyanaka, and Y. Okamura, "Wireless Space-Division-Multiplexed Signal Discrimination device Using Electro-Optic Modulator with Antenna-Coupled Electrodes and Polarization-Reversed Structures," *Int. J. Microwave & Wireless Technol.*, vol.4, pp.399-405, 2012.
 [5] 高武直弘, 村田博司, 岡村康行, "ミリ波帯電磁界測定のためのアンテナ電極電気光学変調器", 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J97-B, no.3, pp.270-278, 2014.
 [6] H. Murata, and Y. Okamura, "High-Speed Signal Processing Utilizing Polarization-Reversed Electro-Optic Devices," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, vol.32, no.20, pp.3403-3410, 2014.
 [7] Y. N. Wijayanto, H. Murata and Y. Okamura, "Wireless microwave-optical signal conversion in quasi-phase-matching electro-optic modulators using gap-embedded patch-antennas," *IEICE Trans. Electron.*, vol.E96-C, no.2, pp. 212-219, 2013.
 [8] 井上敏之, 池田隆志, 村田博司, 塩見英久, 岡村康行, 木谷聡志, 中林誠, 村田和夫, "低誘電率フッ素系樹脂基板を用いた高性能ミリ波帯アンテナ電極光変調器", PEM 研究会, vol.5, no.2, PEM2016-10, pp.20-26, 2016.
 [9] <http://www.sei.co.jp/company/sei-world/2016/pdf/1610.pdf>

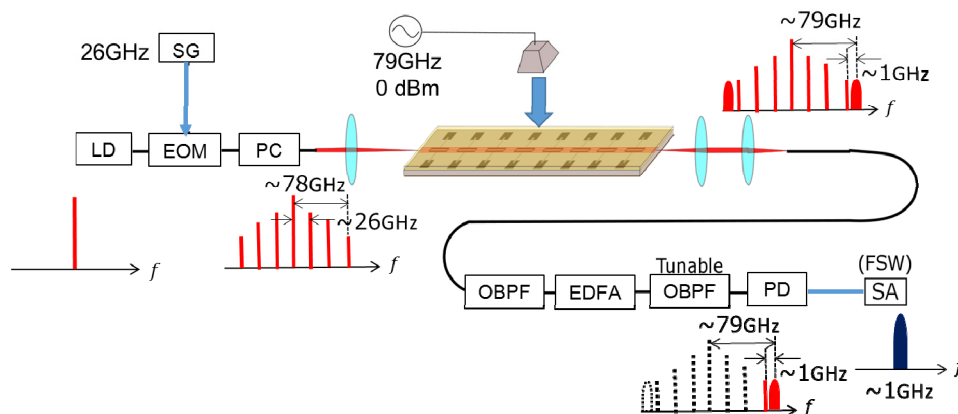


Fig. 9. Experimental set-up for IF conversion.

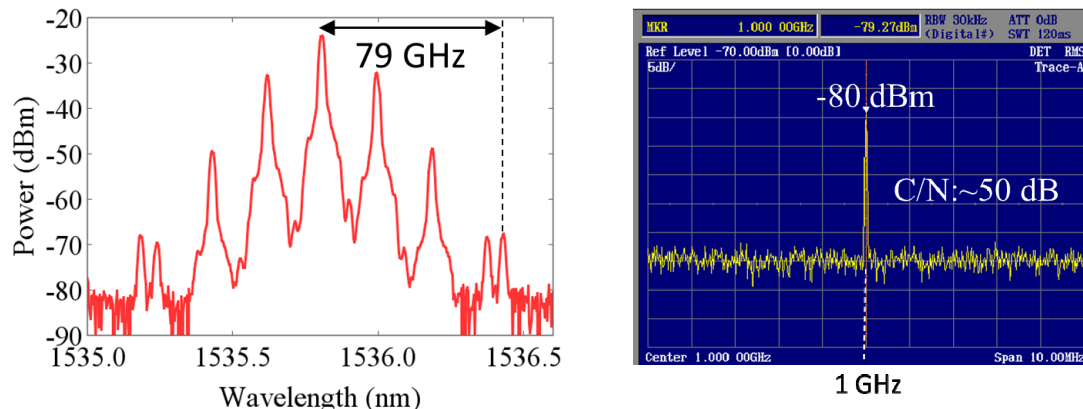


Fig. 10. Examples of the generated optical spectrum and measured IF spectrum (1 GHz).

光応用電磁界計測（PEM）時限研究専門委員会について

電子情報通信学会 光応用電磁界計測（PEM）時限研究専門委員会は、平成 24 年 4 月に発足した新しい研究専門委員会です。

PEM 研は、急速に進化・変貌を遂げつつある電磁界環境を正確に評価・計測するために、電磁界と光・物質との多彩な応答を利用した、新しい電磁界計測技術を追究することを目標としています。アンテナや電磁両立性等の電磁界計測分野と光センサ・光デバイス等の応用光学分野の専門家がコアメンバーです。対象とする電磁界は、アンテナや高周波回路だけでなく、プラズマ電磁界、宇宙到来電磁波など、人工および自然発生電磁界全般を含みます。また、それらと関連性の深い各種の現象についても議論したいと考えています。光・電磁界・マイクロ波・アンテナ等の様々な最先端研究分野を有機的かつ横断的に結びつけた新しい研究領域を開拓して、その成果を社会へ還元することを目指しています。

<委員名簿>

委員長	村田 博司	大阪大学
副委員長	鈴木 敬久	首都大学東京
	水野 麻弥	情報通信研究機構
幹事（研究会運営）	笹川 清隆	奈良先端科学技術大学院大学
幹事（財務）	羽賀 望	群馬大学
幹事補佐	佐々木 愛一郎	日本電信電話株式会社
専門委員	石井 望	新潟大学
	石山 和志	東北大学
	今莊 義弘	スタック電子株式会社
	菅野 敦史	情報通信研究機構
	近藤 順悟	日本ガイシ株式会社
	齊藤 一幸	千葉大学
	佐藤 圭	株式会社 NTT ドコモ
	佐藤 源之	東北大学
	余 元峰	産業技術総合研究所
	セツト ジイヨン	東京大学
	染野 薫	バイテックグローバルエレクトロニクス株式会社
	田島 公博	NTT アドバンステクノロジー株式会社
	土屋 明久	神奈川県産業技術センター
	鳥羽 良和	株式会社精工技研
	日景 隆	北海道大学
	日隈 薫	住友大阪セメント株式会社
	久武 信太郎	大阪大学
	平田 晃正	名古屋工業大学
	深沢 徹	三菱電機株式会社
	柳澤 幸樹	株式会社多摩川電子
顧問	大西 輝夫	株式会社 NTT ドコモ
	黒川 悟	産業技術総合研究所
	陳 強	東北大学

☆ 今後の PEM 研究会と関連行事のご案内

2017年 10月 5～6日 第2回 PEM 国際ワークショップ PEM 2017 (Zurich, Switzerland)

(2nd International Workshop on Photonics Applied to Electromagnetic Measurements)

<https://www.itis.ethz.ch/pem2017/>



2017年 12月 4～6日 国際会議 2017 IEEE CAMA (PEM Special Session) つくば市

<http://www.2017ieecama.org/>

2018年 1月 25～26日 第6回 PEM 研究会 姫路市 (発表申込締切 11月 13日 (月) (予定))

(電子情報通信学会 7 研専共催・電気学会連催研究会 EMT/EST/LQE/MWP/OPE/PEM/PN/IEEJ-EMT)

2018年 3月 20～23日 電子情報通信学会総合大会 シンポジウム企画 (共催)

「 テラヘルツ技術とそのシステム応用に関する動向と進展 」

(詳細は、PEM 研究会のホームページに随時掲載します)

☆ Facebook “Pem 研究会（光で電波を測る）”

Facebook に PEM 研究会のページを作りました。PEM 研究会の活動紹介や光応用電磁界計測の情報発信を進める予定です。フォロー、「いいね！」をよろしくお願いします。



☆ PEM 研究会コミュニティサイト “PEM-com”

PEM 研究会のコミュニティサイト「PEM-com」を開設しました。

このサイトは、PEM 分野の技術交流活性化のための様々な情報発信に活用する予定です。現在、チュートリアル記事等を公開しています。

URL : <http://pem.main.jp/>

