

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04931

研究課題名（和文）次世代ヘリコプタ前方障害物探知センサに適用するミリ波MIMOレーダ要素技術の研究

研究課題名（英文）Research on millimeter-wave multiple-input and multiple-output radar technology for next-generation helicopter forward-looking obstacle detection sensors

研究代表者

二ッ森 俊一（Futatsumori, Shunichi）

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・上席研究員

研究者番号：20551211

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：代表的なヘリコプタ前方障害物である高圧送電線について、実測に基づく詳細なRCS特性評価を実施し、送電線探知に適した送受信偏波を明らかにした。また、ミリ波平面アンテナ素子の基本設計および試作評価を実施し、ミリ波平面アンテナ素子の実現可能性を明らかにした。さらに、高圧送電線探知に必要な所要特性分析を実施した上で、信号処理回路の構築を実施し、COTS製品を用いた76 GHz帯ミリ波MIMOレーダ実験系構築および試験評価を電波暗室内で実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、航空機前方障害物となる高圧送電線等の線状構造物の検出に適したアンテナ特性および小型平面アンテナ構造を理論解析と測定の両面で検討し、高速移動体の前方障害物探知に利用可能な技術の確立に資することができる。これらは、ミリ波帯において小送信電力レーダを用いた障害物の長距離・高頻度探知法確立のためのキー技術となり得ることから、航空分野のみならず、広範な応用分野において有効なレーダ技術となることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：As a typical obstacle in front of a helicopter, detailed radar cross section characteristics of high-voltage power lines are evaluated based on the measurements. The transmit and receive polarization which is suitable for high-voltage power line detection are clarified using the measurement results. In addition, the design and prototype evaluation of a millimeter-wave planar antenna are performed, and the feasibility of the millimeter-wave planar antenna is clarified. Furthermore, after performing an analysis of the characteristics required for high-voltage power line detection, a signal processing circuit is constructed. A 76 GHz band millimeter-wave multiple-input and multiple-output radar experimental system is constructed using COTS products and a test evaluation is performed in an anechoic chamber.

研究分野：ミリ波レーダ

キーワード：ミリ波レーダ 高圧送電線 線状障害物 平面アンテナ レーダ断面積 ブラッグ散乱 FDTD解析 76GHz

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

近年、自動車事故防止のための安全システムへの適用を中心に、ミリ波レーダ等を用いた運輸安全技術に関する議論や、関連する安全システムの研究開発が国内外で活発に行われている。自動車分野においては低コスト化に伴い、実用化が進み安全システムの装備率も年々増加している。一方、航空機の中でも比較的低高度を有視界飛行するヘリコプタの場合、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、事故等の危険な状況が発生する恐れがある。最近の機種別事故統計によれば、ヘリコプタは全体に占める事故割合が高く、それらの事故原因のうち、乗員の周囲の障害物に対する状況認識に起因すると考えられるケースが少なくない。これら障害物等の事前察知及び周囲監視のための操縦者支援システムとして、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。さらに、近年では、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。

こうした背景の中、研究担当者らのグループでは、これまで 76 GHz 帯ミリ波レーダを中心センサデバイスとして、ヘリコプタの前方 2 マイル程度に存在する送電線等の障害物を探知するための前方監視用ミリ波レーダを開発している。従来の前方監視用ミリ波レーダの最も大きな課題の一つとして、探知対象物の探知率向上の課題と小型化の要求がある。送電線等から反射波を取得するため、パラボラ反射板等の 3 次元構造を有するアンテナを機械走査することで、高利得のペンシルビームを得ていた。一方、パラボラアンテナは容積が大きくなると同時に、機械走査となるため、探知対象物へのビーム照射率およびデータ更新頻度に制限がある。これらから、送電線等の低 RCS (Radar Cross Section) の線状障害物を、1 マイル以上の遠距離で高頻度で探知するための新たなレーダ技術が必要であることが明らかとなった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、小型平面アンテナ構造かつ線状障害物を高頻度で検出可能な性能を有するミリ波レーダを、MIMO (Multiple-Input and Multiple-Output) レーダ技術に基づいて実現することである。具体的には、次の項目について、実験と数値解析の両面から研究を進める。まず、送電線等の線状障害物探知に適したミリ波平面アンテナ構築技術の検討を行う。ここでは、構造の異なる複数の送電線や鉄塔等の RCS 特性を測定評価し、アンテナに求められる偏波特性等を明らかにする。

次に、ミリ波 MIMO アンテナアレイによるアンテナ開口面合成技術の検討を行う。ここでは、線状障害物の探知に適した MIMO 合成アンテナ特性を実現する。従来パラボラ反射板アンテナを用いて機械走査を行っていた方位角方向走査について、MIMO 開口面合成技術によるアンテナアレイを用い、高速指向性電子制御を実現するための要素技術を抽出する。

3. 研究の方法

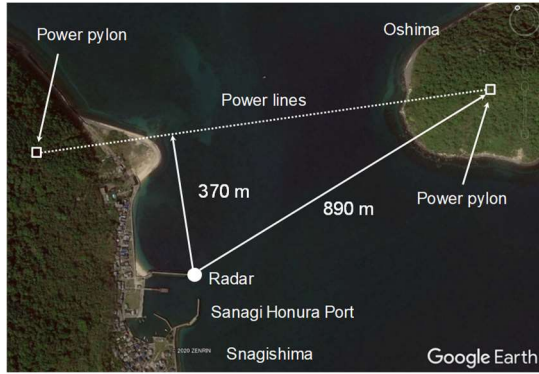
線状障害物を高頻度で検出可能な小電力ミリ波レーダを、MIMO レーダ技術に基づいて実現するため、探知対象物の RCS 特性評価および所要性能分析を行う。次に、アンテナ開口面合成法および信号処理法等の要素技術開発および評価を行うため、実験と数値解析の両面から検討を進める。初年度は、前方線状障害物のミリ波 RCS 特性評価、ミリ波平面アンテナ素子の基本設計および MIMO アンテナ合成技術および信号処理法の分析調査、を実施する。引き続き、線状障害物探知に適したミリ波平面アンテナ素子の設計および試作評価、信号処理回路の構築を行う。最後に、76 GHz 帯ミリ波 MIMO レーダ実験系構築および試験評価を電波暗室内における試験を実施する。

4. 研究成果

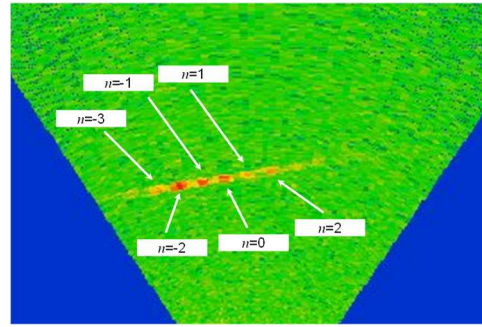
代表的なヘリコプタ前方障害物である高圧送電線について、実測に基づく詳細な RCS 特性評価を実施し、送電線探知に適した送受信偏波を明らかにした。また、ミリ波平面アンテナ素子の基本設計および試作評価を実施し、ミリ波平面アンテナ素子の実現可能性を明らかにした。さらに、高圧送電線探知に必要な所要特性分析を実施した上で、信号処理回路の構築を実施し、COTS 製品を用いた 76 GHz 帯ミリ波 MIMO レーダ実験系構築および試験評価を電波暗室内で実施した。

(1) 探知対象物の RCS 特性評価および所要性能分析

構築した実験系を用い、高圧送電線の RCS 特性を詳細に評価した結果を発表した。図 1 (a) に上送電線探知試験の測定場所の概要を示す。送電線 RCS 特性は、横に長い円筒状の形状によるスペキュラー反射とより線構造による Bragg 散乱から構成される。地上から実際の送電線の RCS 特性を取得し、Bragg 散乱を実測で明らかにした (図 1 (b))。なお、本内容は、International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2023)にて発表を行い、Track Best Paper Award (AP Related Topics)を受賞した。



(a) 地上送電線探知試験の測定場所概要

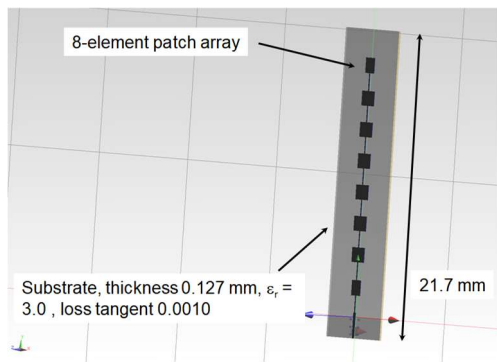


(b) スポット状に観測された Bragg 散乱による反射特性

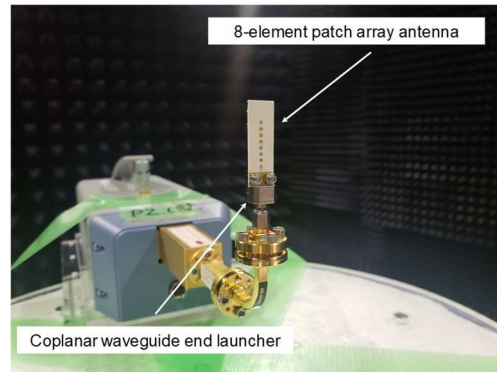
図 1. 地上送電線探知試験 : (a) 測定場所概要、(b) 取得した Bragg 散乱による反射特性

(2) ミリ波平面アンテナ素子の基本設計および試作評価

4 素子から 32 素子までの半波長平面パッチアンテナを放射素子とする、垂直偏波アレイアンテナを設計 (周波数: 76.5 GHz) および試作評価を実施した。8 素子平面アレイアンテナの解析モデルを示す (図 2 (a))。8 素子の平面アレイアンテナの概観と放射指向特性の測定状況を示す (図 2 (b))。アンテナ放射特性の測定値は、利得が約 2 dB 低下した点を除き、利得半値角およびサイドローブ形状を含めてよく解析値と一致することを確認した。これらにより、MIMO レーダに適用するミリ波平面アンテナ素子の実現可能性を明らかにした。



(a) 8 素子平面アレイアンテナの解析モデル

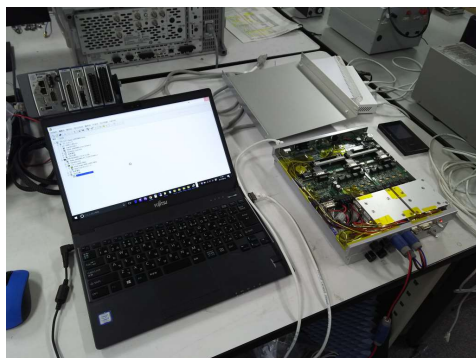


(b) 8 素子平面アレイアンテナの測定状況

図 2. アンテナ素子の基本設計および試作評価 : (a) 解析モデル、(b) 測定条件

(3) 信号処理回路の構築および COTS 製品を用いた 76 GHz 帯ミリ波 MIMO レーダ実験

信号処理回路とミリ波レーダ部を組み合わせ、接続動作が可能となるように実験系構築を実施した。これまで最大 4 MS/s であった受信信号の AD 変換器を最大 125 MS/s とし、さらに信号処理に用いる FPGA を更新し、信号処理能力向上が向上した。これにより、これまでよりも細かい距離分解能 (30 cm) で、遠距離 (4 km 以上) までを探知覆域とすることが可能となった。また、COTS 製品を用いた 76 GHz 帯ミリ波 MIMO レーダ実験系構築および試験評価を電波暗室内で実施した。



(a) 構築した信号処理回路概観



(b) ミリ波レーダ部との組み合わせ例

図 1. 実験系構築と要素技術評価 : (a) 信号処理回路、(b) 構築した回路との組み合わせ評価

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 Shunichi Futatsumori | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 Dielectric Material Constant Sensitivity Analysis of 3D-Printed W-Band Reflector Fresnel Lens Antenna Based on Acrylonitrile Butadiene Styrene | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of 2023 International Applied Computational Electromagnetics Society | 6. 最初と最後の頁 1-2 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 ニッ森 俊一, 宮崎 則彦 | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 ヘリコプタ前方障害物監視用76 GHz小電力ミリ波レーダにおけるレドーム影響評価 -レドームによる探知性能劣化影響評価のための地上試験- | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告 | 6. 最初と最後の頁 35-39 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 ニッ森 俊一 | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 ミリ波を用いたヘリコプタ障害物監視支援技術 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 電子航法研究所リーフレット | 6. 最初と最後の頁 1 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 ニッ森俊一, 宮崎則彦 | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 76 GHz帯ミリ波レーダ用多素子平面アレイアンテナの設計および試作評価 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 2022年電子情報通信学会総合大会通信講演論文集 | 6. 最初と最後の頁 227 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 ニッ森俊一, 宮崎則彦 | 4. 巻 120 |
| 2. 論文標題 ヘリコプタ前方障害物監視用76 GHz小電力ミリ波レーダを用いた小線径高压送電線からの反射電力測定-実環境におけるBragg散乱等の反射特性評価- | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告 | 6. 最初と最後の頁 19-24 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------|
| 1. 著者名 Shunichi Futatsumori, Norihiko Miyazaki | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 Bragg Scattering Characteristics Evaluations of Thin High-Voltage Power Lines Using Small Transmitting Power Helicopter Forward | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of 2023 Proceedings of International Symposium on Antennas and Propagation | 6. 最初と最後の頁 1-2 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Shunichi Futatsumori | 4. 巻 123 |
| 2. 論文標題 Research Progress of Helicopter Forward-Looking Obstacle Detection System Based on Low-Transmitting Power 76 GHz Millimeter-Wave Radar -Overview of the recent flight experiments and the ground detection test- | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of 2023 International Conference on Space, Aeronautical and Navigational Electronics | 6. 最初と最後の頁 122-124 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shunichi Futatsumori |
| 2. 発表標題 Dielectric Material Constant Sensitivity Analysis of 3D-Printed W-Band Reflector Fresnel Lens Antenna Based on Acrylonitrile Butadiene Styrene |
| 3. 学会等名 2023 International Applied Computational Electromagnetics Society (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 ニッ森俊一, 宮崎則彦 |
| 2. 発表標題 ヘリコプタ前方障害物監視用76 GHz小電力ミリ波レーダにおけるレドーム影響評価 -レドームによる探知性能劣化影響評価のための地上試験- |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会宇宙・航行エレクトロニクス研究会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 ニッ森俊一 |
| 2. 発表標題 ヘリコプタ周辺障害物探知支援のためのミリ波レーダの活用 |
| 3. 学会等名 日本航空技術協会 航空安全シンポジウム(招待講演) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 ニッ森俊一, 宮崎則彦 |
| 2. 発表標題 76 GHz帯ミリ波レーダ用多素子平面アレイアンテナの設計および試作評価 |
| 3. 学会等名 2022年電子情報通信学会総合大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 ニッ森俊一, 宮崎則彦 |
| 2. 発表標題 ヘリコプタ前方障害物監視用76 GHz小電力ミリ波レーダを用いた小線径高压送電線からの反射電力測定-実環境におけるBragg散乱等の反射特性評価- |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会宇宙・航行エレクトロニクス研究会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shunichi Futatsumori, Norihiko Miyazaki |
| 2. 発表標題 Bragg Scattering Characteristics Evaluations of Thin High-Voltage Power Lines Using Small Transmitting Power Helicopter Forward |
| 3. 学会等名 2023 International Symposium on Antennas and Propagation (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shunichi Futatsumori |
| 2. 発表標題 Research Progress of Helicopter Forward-Looking Obstacle Detection System Based on Low-Transmitting Power 76 GHz Millimeter-Wave Radar -Overview of the recent flight experiments and the ground detection test- |
| 3. 学会等名 2023 International Conference on Space, Aeronautical and Navigational Electronics (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
| | | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
| | |