

令和 3 年 6 月 6 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01440

研究課題名（和文）多層基板を用いたロットマンレンズ広帯域2次元マルチビームアレーアンテナの開発

研究課題名（英文）Development of broadband two-dimensional Rotman-lens multi-beam array antenna using multi-layer substrate

研究代表者

榊原 久二男（Sakakibara, Kunio）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：50359759

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：基板厚1mmのふっ素樹脂基板を5枚積層し、各層ごとの電力分配のH面ロットマンレンズと層方向への電力分配のE面ロットマンレンズを従属接続した2次元ロットマンレンズと、多層基板の背面に接続した導波管から各層に給電する中空導波管・基板内導波管変換回路と、多層基板内導波管各層から放射するスロット素子を設計することで、2次元マルチビームロットマンレンズアレーアンテナを実現した。水平面に約25度ピッチ、垂直面に約12度ピッチのそれぞれ3ビームで合計9マルチビームができることを、電磁界シミュレーションと実験で確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今後、周波数の活用が期待されるミリ波帯において、波長が短いミリ波の特徴である小型のアンテナでも鋭い指向性ができる特性を活かし、高利得を広い範囲にカバーする指向性走査技術を開発した。多層基板技術を用いることにより、これまでに困難であった、低コストが期待できるプリント基板技術で2次元ビーム走査技術の開発である。指向性走査技術はミリ波帯において、ミリ波レーダや在宅医療などの電波センシングや、5Gなどの通信応用に期待される技術である。

研究成果の概要（英文）：A two-dimensional Rotman-lens multi-beam array-antenna was developed by using five-layer substrates of fluoro-carbon resin film with 1 mm thickness. Following three techniques are developed; (1) a two-dimensional Rotman-lens in which an H-plane Rotman-lens for power distribution for each layer and an E-plane Rotman-lens for power distribution in the layer direction, (2) a transmission-line transitions from a hollow waveguide on the back to a substrate integrated waveguide in each layer, (3) a radiating slot element that radiates from each layer of the multilayer substrate integrated waveguide. It was confirmed both by electromagnetic simulation and experiment that 9 multi-beams can be generated with 3 beams each with a pitch of about 25 degrees on the horizontal plane and a pitch of about 12 degrees on the vertical plane.

研究分野：ミリ波・テラヘルツ帯におけるアンテナおよび給電回路の研究

キーワード：アンテナ ミリ波 マルチビームアンテナ 指向性走査 給電回路 多層基板

### 1. 研究開始当初の背景

周波数資源開発を背景に、次世代大容量高速無線通信や電波センシングなど、ミリ波の電波を用いた無線応用が注目されている。無線通信応用では、WiGig や IEEE802.11ad による標準化が進められ、60GHz 帯において日米欧で 7~9GHz の広い周波数帯域幅が定められて、ミリ波 WiFi の実用化が始まった。この用途には、広い角度範囲から到来する信号を高感度で受信する要求のため、搭載性の高い小型・薄型・軽量な高利得指向性走査平面アンテナが求められている。指向性走査によって広範囲を高利得でカバーできるため極めて魅力的であるが、広帯域特性を有する指向性走査アンテナの実現は、技術的ハードルが高いため、その実現は困難であった。また、第 5 世代移動通信では、すでに WiFi など広く使われるようになってきた MIMO (Multiple Input Multiple Output) の技術を発展させた、非常に大きい素子数で構成される Massive MIMO というアンテナ技術が、28GHz 帯で基地局用途に用いられることが考えられている。しかし、MIMO のデジタル信号処理のために、すべての素子に受信機を搭載するのはコストの点で非現実的であるため、デジタル指向性形成と、マルチビーム方式などのアナログ指向性形成の組み合わせとすることが、現実的な 1 つの方式と考えられている。高速通信エリアを、街中の様々な箇所に、小セルでスポット的に形成するために、小型で低コストな 2 次元指向性形成システムが必要とされている。これら通信応用における基地局の用途や、より高機能が求められる自動運転用のミリ波レーダには、2 次元の指向性走査技術が必須となることが予想されるが、給電回路が複雑になり、これを実現するアンテナシステムの技術課題は、非常に難易度が高い。

### 2. 研究の目的

指向性走査アンテナ用給電方式の 1 つとして、マルチビームアンテナがある。そのうちレンズアンテナは、広帯域特性を有するものの立体構造であるため、システムが大型になるという欠点がある。一方、バトラーマトリックスやプラス回路などの方向性結合器を組み合わせた方式は、平面回路であるため薄型なシステムが構成可能であるが、周波数帯域幅が狭いという欠点がある。そこで、レンズの原理をプリント基板に適用し、平面で広帯域なロットマンレンズ給電回路を適用することとした。

これらの平面型の指向性形成回路は、一般的に、単一面内に複数方向の指向性を形成する 1 次元指向性走査用の給電回路であり、これを 2 次元に適用し指向性形成するためには、回路が複雑となり容易ではない。そこで本研究では、図 1 に示すように、多層基板を用いることにより、基板面内に加えて積層方向にも 2 次元的に伝送線路を配列し、プリント基板と平行な面内でのマルチビーム形成に加え、プリント基板面と垂直な層方向の面にもロットマンレンズ指向性形成回路を構成することによって、2 次元の指向性形成回路を実現する。これによって、これまで複雑な形状を余儀なくされていた 2 次元の指向性形成回路が、近年、急速に発展してきた低コストな多層基板技術を用いることによって、2 次元の指向性形成回路が容易に実現でき、しかもロットマンレンズの原理を用いているため、広帯域な特性が期待できる。さらに、広帯域な伝送線路接続回路を組み合わせることにより、背面の導波管から容易に給電可能な、2 次元マルチビーム形成回路が実現可能となる。

### 3. 研究の方法

基板厚 1mm のふっ素樹脂基板を 5 層積層することで、2 次元マルチビームロットマンレンズアレーアンテナを実現する。この実現には、①各層ごとの電力分配の H 面ロットマンレンズと層方向への電力分配の E 面ロットマンレンズを従属接続した 2 次元ロットマンレンズと、②多層基板の背面に接続した導波管から各層に給電する中空導波管・基板内導波管変換回路と、③多層基板内導波管各層から放射するスロット素子を、基板加工上、製作可能な制約条件内で、設計する必要がある。

① 2 次元ロットマンレンズについては、水平面と垂直面で、レンズに最適な焦点距離が異なるため、2 次元一体レンズの構成は難易度が高い。そこで第 1 に、図 1 に示すように、水平面のロットマンレンズと垂直面のロットマンレンズを、同一基板ではあるが、別々に設計した水平面と垂直面のロットマンレンズを縦続接続する設計とする。水平面

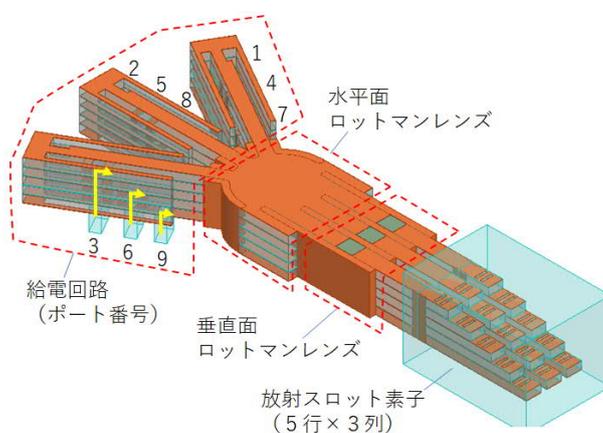


図 1. 2 次元ロットマンレンズマルチビームアンテナの構成

のポスト壁導波管  
ロットマンレンズ  
は、海外の大学など  
ではすでにミリ波  
帯で開発されている。  
しかし、層方向  
の垂直面ロットマ  
ンレンズは、新規な  
アイデアであり開  
発された例は無い。

これと並行して、  
②背面の導波管か  
らポスト壁導波管  
へ給電する給電回  
路を設計する。さら  
に、③ポスト壁導波  
管から放射するス  
ロットアンテナ素  
子を設計する。これ  
らの構成で、図1に  
示すような、3×3  
入力ポートで3×  
5素子アレーを給  
電し、2次元マルチ

ビームアンテナを設計する。その特性を、電磁界シミュレーションと実験で評価することにより、提案構造の実現可能性を確認する。

#### 4. 研究成果

①2次元ロットマンレンズ、②中空導波管・基板内導波管変換回路、③放射スロット素子を電磁界シミュレーションで最適化設計し、図1に示すマルチビームアンテナを構成し、3×3入力ポートから給電した指向性を電磁界シミュレーションで評価した。その特性を図2に示す。図1に示すポート番号と、指向性の番号が対応している。図2より、3×3入力ポートから給電した信号が、3×3マルチビームを形成していることが分かる。1, 2, 3ポートでは低仰角で、4, 5, 6ポートでは中仰角で、7, 8, 9ポートでは高仰角で水平面にビーム走査している。

この特性を測定によって確認するために、アンテナを試作した。試作したアンテナの写真を図3に示す。銅張りふっ素樹脂積層プリント基板を5枚貼り合わせることで、2次元ロットマンレンズマルチビームアンテナを構成した。

図4に示す近傍界測定装置を用い、ベクトルネットワークアナライザで信号を送受信し、近傍界データを制御用コンピュータに記録し、フーリエ変換することにより遠方界指向性を求めた。その測定結果を図5に示す。図5から、図2のシミュレーション結果と同様に、1, 2, 3ポートでは低仰角で、4, 5, 6ポートでは中仰角で、7, 8, 9ポートでは、高仰角でビーム走査していることが分かる。シミュレーション結果と角度を比較すると、水平面走査特性では、シミュレーションは-25,0,+25度であったのに対し、測定結果では-21, +7, +31度と、角度の間隔は28, 24度とシミュレーションに近い特性が得られているものの、全体に正の方向に偏った方向に傾いていることが分かる。これは測定時に、ア

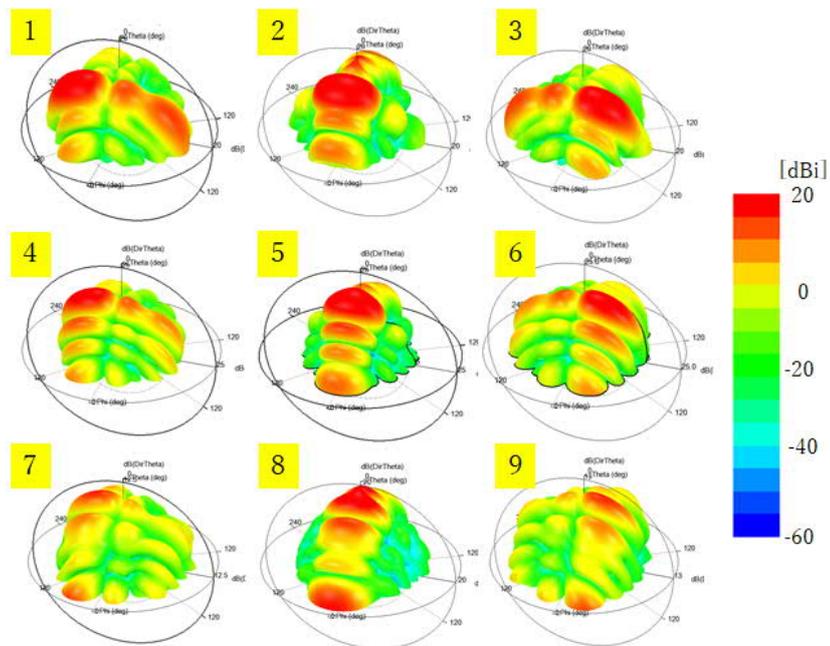


図2. 3×3ポート入力マルチビーム指向性のシミュレーション結果

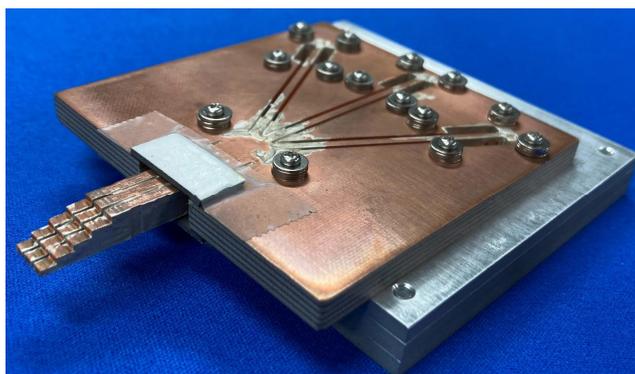


図3. 試作した2次元ロットマンレンズマルチビームアンテナ

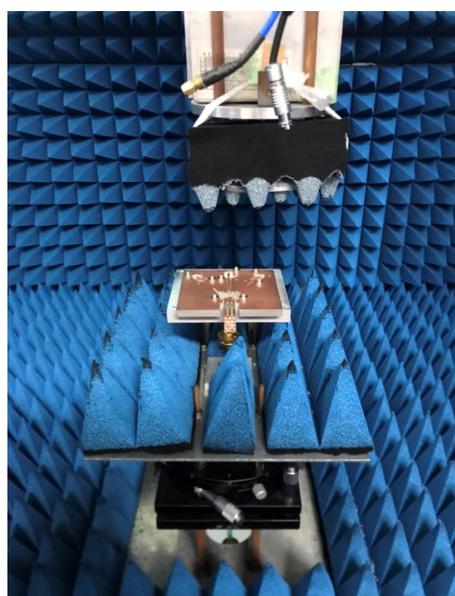


図4. 近傍界測定の様子

アンテナの設置が水平から傾いたことが原因と考えられる。垂直面走査特性では、シミュレーションは-28,-16,-4 度であったのに対して、測定結果では-26,-16,-3 度と、シミュレーション結果に近い特性が得られた。利得に関しては、ポート 6 のレベルが、他のポートと比較して約 8dB 低い。放射系に問題があれば他のポートでも同様の影響が及ぶはずであるので、これは 6 番の入力ポート付近に、製作上の問題が生じたものと考えられる。多層基板において、基板内導波管の狭壁を構成するときに、ルータカットによる切削加工する必要があるが、切削加工時に高い加工精度が要求されることが分かった。

以上より、製作誤差による特性劣化が発生したものの、提案のアンテナにより 2次元マルチビーム特性が得られることが電磁界シミュレーションと測定の両方によって確認できた。

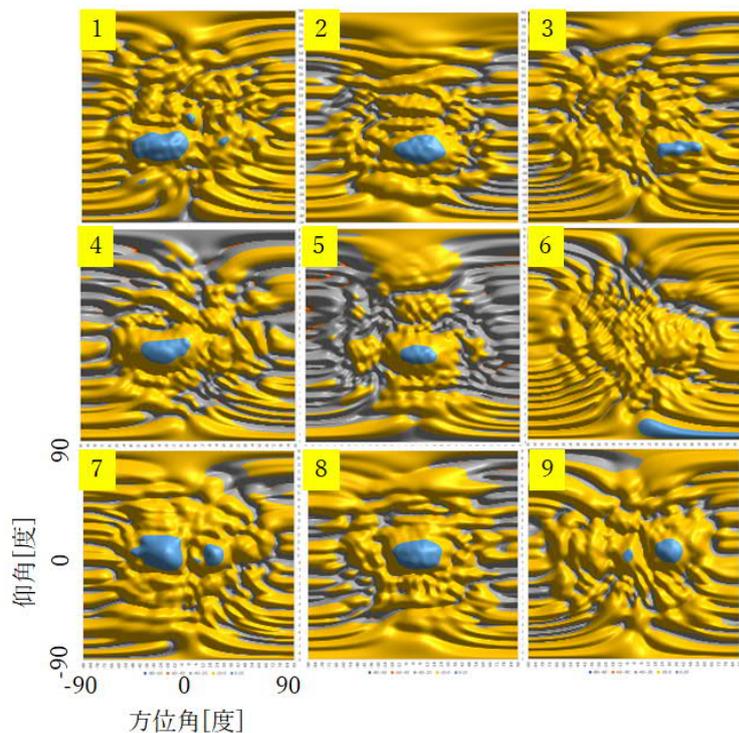


図 5. 3×3 ポート入力マルチビーム指向性の測定結果

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件）

1 . 発表者名 Kunio Sakakibara, Nguyen Tuan, Shugo Yamauchi, Kento Yamauchi, Shota Mariyama, Nobuyoshi Kikuma
2 . 発表標題 Multibeam Antennas using Multi-layer Substrate in Millimeter wave Band
3 . 学会等名 2019 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Shugo Yamauchi, Kento Yamada, Kunio Sakakibara and Nobuyoshi Kikuma
2 . 発表標題 Broadside Beam-forming Performance of Two-dimensional Rotman-lens Multi-beam Antenna using Step Radiating Elements on Multi-layer Substrate Integrated Waveguide
3 . 学会等名 The Philippines-Japan Workshop on Wireless, Radio and Antenna Technologies (PJWWRAT) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Shota MARIYAMA, Kunio SAKAKIBARA, Nobuyoshi KIKUMA
2 . 発表標題 Design of Hollow Waveguide to Substrate Integrated Waveguide Transition in Multi-layer Substrate
3 . 学会等名 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition 2019 (iWEM 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Shugo Yamauchi, Kento Yamada, Kunio Sakakibara, Nobuyoshi Kikuma, Kojiro Iwasa, Takeshi Okunaga, Akira Nakatsu
2 . 発表標題 Broadside Beam-forming Performance of Two-dimensional RotmanLens Multi-beam Antenna using Step Radiating Elements on Multi-layer Substrate Integrated Waveguide
3 . 学会等名 The 2019 Malaysia-Japan Workshop on Radio Technology (MJWRT2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Shugo YAMAUCHI, Kunio SAKAKIBARA, and Nobuyoshi KIKUMA
2. 発表標題 Broadside Beam-forming Performance of Two-dimensional Rotman-lens Multi-beam Antenna using Step Radiating Elements on Multi-layer Substrate Integrated Waveguide
3. 学会等名 The 2nd Indonesia-Japan Workshop on Antennas and Wireless Technology 2019 (IJAWT2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kunio SAKAKIBARA and Nobuyoshi KIKUMA
2. 発表標題 Multi-beam Antennas using Multi-layer Substrate in Millimeter-wave Band
3. 学会等名 The 2nd Indonesia-Japan Workshop on Antennas and Wireless Technology 2019 (IJAWT2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鞠山匠汰、榊原久二男、菊間信良
2. 発表標題 多層基板内の複数層に構成された金属導波管基板内導波路変換器の設計
3. 学会等名 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鞠山匠汰、榊原久二男、菊間信良、小山達也、奥長 剛、岩佐光次郎
2. 発表標題 多層基板内の複数層に構成された金属導波管基板内導波路変換器の設計
3. 学会等名 革新的無線通信技術に関する横断型研究会 (MIKA)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田健人、山内秀悟、榊原久二男、菊間信良
2. 発表標題 多層基板各層に構成された基板内導波路放射用スロットペアとアレー放射特性
3. 学会等名 革新的無線通信技術に関する横断型研究会 (MIKA)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鞠山匠汰、榊原久二男、菊間信良
2. 発表標題 多層基板内の複数層に構成された基板内導波路金属導波管変換器の設計
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山内秀悟、榊原久二男、山田健人、菊間信良、岩佐光次郎、奥長 剛、中津 彰
2. 発表標題 多層基板内導波路における階段状放射素子を用いた二次元マルチビームロットマンレンズのブロードサイドビーム形成特性
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yosuke Otsuka, Shugo Yamauchi, Kunio Sakakibara, Nobuyoshi Kikuma, and Kojiro Iwasa
2. 発表標題 E-Plane Beam-Forming Performance of Rotman-Lens in Multi-Layer Substrate
3. 学会等名 2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yamauchi Shugo, Yosuke Otsuka, Kunio Sakakibara, Nobuyoshi Kikuma, Kojiro Iwasa
2. 発表標題 E-plane Beam-forming Performance of Rotman-lens in Multi-layer Substrate
3. 学会等名 2018 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 榑原久二男、山田健人、鞠山匠汰、グェンタントゥアン、杉本義喜、菊間信良
2. 発表標題 ふっ素樹脂多層基板を活用したミリ波アンテナビームフォーミング技術
3. 学会等名 Microwave Workshop (招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

超高周波（ミリ波）アレーアンテナ <a href="http://aplab.web.nitech.ac.jp/pdf/mm_wg_slot60ghz.pdf">http://aplab.web.nitech.ac.jp/pdf/mm_wg_slot60ghz.pdf</a> ミリ波技術に関する主な発表論文 <a href="http://aplab.web.nitech.ac.jp/pdf/paper_millimeterwave_tech.pdf">http://aplab.web.nitech.ac.jp/pdf/paper_millimeterwave_tech.pdf</a>
---

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
---------	---------