

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：82626
研究種目：若手研究
研究期間：2020～2021
課題番号：20K14798
研究課題名（和文）フレキシブルな非周期メタ表面を利用したポスト5G携帯基地局用アレイアンテナの開発
研究課題名（英文）Development of an array antenna system for beyond-5G mobile base stations using flexible aperiodic metasurfaces
研究代表者
加藤 悠人（Kato, Yuto）
国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員
研究者番号：70635820
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）：第5世代無線通信（5G）では、ミリ波帯の電波を利用したビームフォーミング技術が使用される。従来のビームフォーミングの実現技術は、複雑なアンテナの構造設計が必要であったり、アンプ等の放熱を伴うアクティブ素子が使用されていたりと、機能・性能や効率の面で限界がある。本研究では新技術として極薄の非周期メタ表面とアレイアンテナを組み合わせた構成を提案し、5Gやポスト5Gなどで必要とされるビームフォーミングの実現を目指した。具体的には、基地局用アンテナの誘電体カバ（レドーム）の湾曲面にメタ表面を取り付けた構成を想定し、フレキシブル基板を用いた曲がったメタ表面でのビームフォーミングの検証を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義
メタ表面によるアレイアンテナのビームフォーミングとして、メタ表面によるアレイアンテナの開口面効率の増大を実証した。具体的には、Xバンドレーダー用のアレイアンテナの開口面に開口面の位相分布を均一にする大面積メタ表面を取り付けた構成により、アレイアンテナの透過利得が3 dB増大することを実験的に確認した。本成果はメタ表面とアレイアンテナの組み合わせという提案構成の実現可能性を確認したもので、5Gやポスト5G無線通信の基地局システムにおける活用が期待される。

研究成果の概要（英文）：The 5th generation wireless communication (5G) uses beamforming technology using millimeter waves. The conventional beamforming technology requires a complicated structural design of antennas and uses active elements such as amplifiers that accompanies heat dissipation, which results in a limitation in terms of function, performance, and efficiency. In this research, I proposed a novel configuration that combines an ultra-thin aperiodic metasurface and an array antenna, aiming to realize the beamforming technology required for 5G and beyond-5G communications. Specifically, I envisioned a configuration in which a curved metasurface using a flexible substrate was attached to the curved surface of the dielectric radome of a base station antenna.

研究分野：電磁波計測

キーワード：メタ表面 ポスト5G ビームフォーミング アレイアンテナ メタマテリアル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

第5世代無線通信(5G)では、ミリ波帯の電波を利用したビームフォーミング技術が利用される。従来のビームフォーミングの実現技術は、複雑なアンテナの構造設計が必要であったり、アンテナ等の放熱を伴うアクティブ素子が使用されていたりと、機能・性能や効率の面で限界がある。そのため、5G やポスト5G での利用に資する新たなビームフォーミングの実現技術が求められている。

2. 研究の目的

本研究の目的は極薄の非周期メタ表面とアレイアンテナを組み合わせた構成を提案し、5G やポスト5G などで必要とされるビームフォーミングを実現することである。将来的な実用化としては、基地局用アンテナの誘電体カバー(レドーム)の湾曲面にフレキシブル基板を用いた曲がったメタ表面を取り付けた構成を想定する。

3. 研究の方法

本科研費事業においては、非周期メタ表面とアレイアンテナの組み合わせによるビームフォーミングを実現するために、(1) 透過波の局所位相を制御する非周期メタ表面の設計を確立したうえで、(2) アレイアンテナの開口面を覆う大面積メタ表面による開口面効率の増大を実験的に実証した。

4. 研究成果

(1) 非周期メタ表面の設計

電波望遠鏡や気象、船舶用の高精度レーダーなど、様々な用途で利用される高利得の大開口アンテナの設計において、開口面効率の向上につながる位相補償技術が、メインローブ利得の増大やサイドローブの抑制のために求められる。たとえば、スロットアレイアンテナでは、正面方向のビームを放射するためにスロット間隔が管内波長に設計されており、開口面効率を向上しサイドローブを抑制するための、位相補償技術が必要である。しかしながら、大開口アンテナの開口面全体にわたる位相補償は技術的に困難で、薄型軽量かつ無反射な構造による位相補償技術、特に位相を補償する領域の大面積化が容易な技術はこれまでのところ未確立であり、位相の不均一性による開口面効率の低下やサイドローブ生成などのアンテナ性能劣化が課題となっていた。

以下に、本研究で提案する、大口径スロットアレイアンテナの開口面位相補償のための大面積メタ表面の設計手法を説明する。具体的には、無反射メタ表面による透過波位相制御を利用して、大開口アンテナの開口面効率の向上を図る。ここで、伝搬波の局所位相を無反射で制御するために、位置に依存したインピーダンス行列を導入する非周期の3層構造の無反射メタ表面を導入する。本科研費事業では、X帯レーダー用大開口アレイアンテナを取り上げ、本制御技術の有効性を数値的に検証した。

図1に本研究で検討したアレイアンテナシステムを示す。船舶レーダー等で利用されるXバンド動作のスロットリニアアレイアンテナと、開口部を覆うメタサーフェスで構成される。スロットアレイアンテナは、部分的に誘電体で満たされたWR-90長方形導波路からなる準TEMモード導波路を使用し、低交差分極でy方向に直線偏光ビームを放射する。アンテナ利得を上げるために、ホーン形状の2枚の金属板からなるバッフル板が導入されている。開口部の寸法は600mm×102mmである。メタ表面はアンテナ開口を覆うように導入し、開口面の位相変動を補償する。

開口面の位相補償のために、開口面全体を覆う無反射メタ表面を設計する。まず、開口部を3mm×3mmの単位格子に分割する(200個×34個)。非周期構造のメタ表面の各単位格子が入射波に位置に依存した移相量 θ を無反射で導入することを考える。このとき、単位格子の局所的な

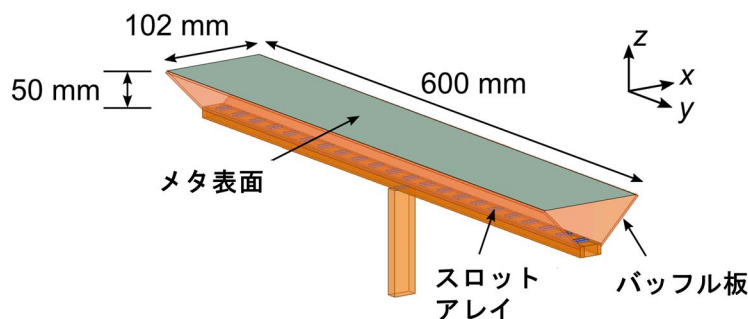


図1. 本研究で検討したアレイアンテナシステム

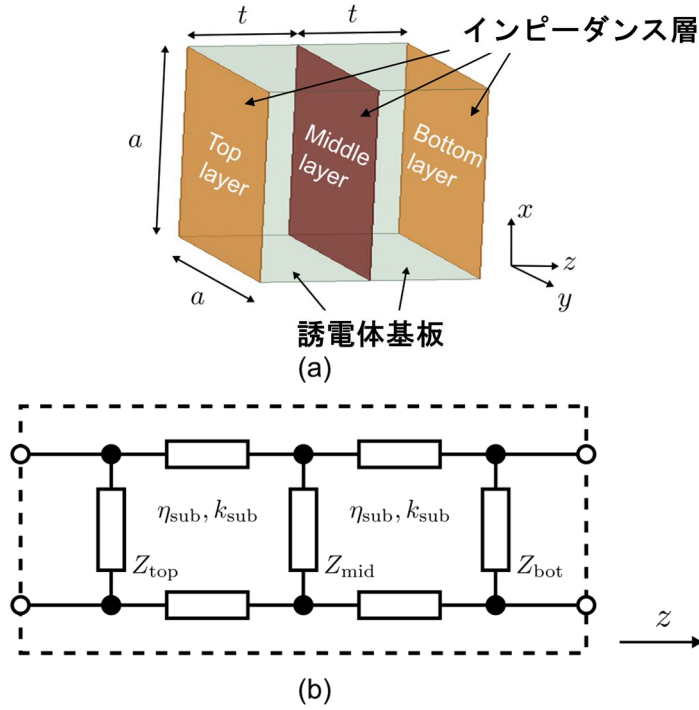


図2. 提案する無反射メタ表面の単位格子の(a)模式図と(b)等価回路

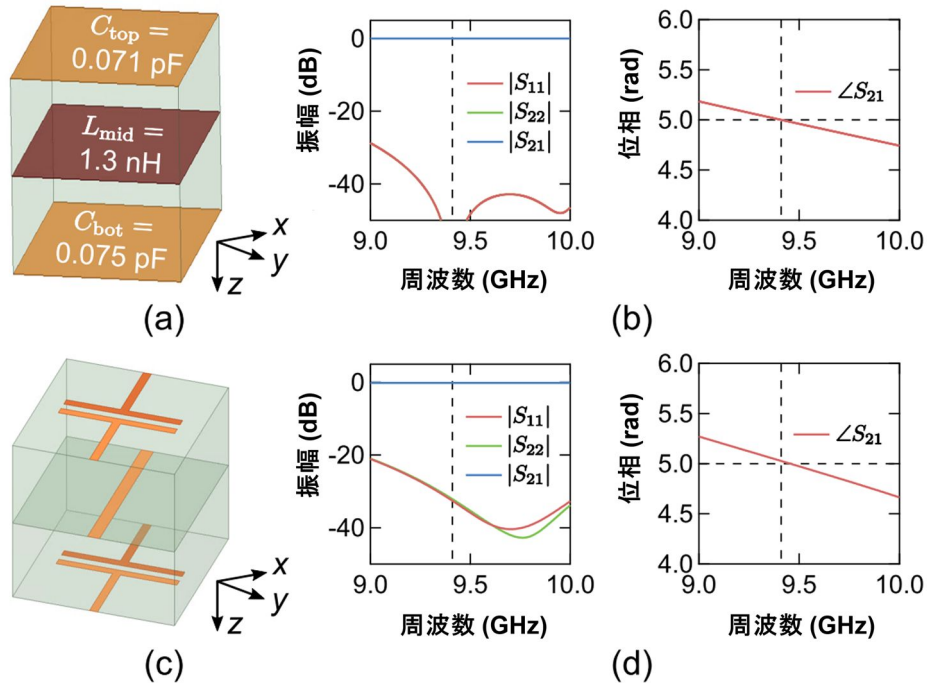


図3. $\theta = 5$ rad に対する単位格子の(a)等価回路設計および(b)等価回路解析で計算されたSパラメータ。 $\theta = 5$ rad に対する単位格子の(c)物理的構造の設計および(d)電磁界シミュレーションで計算されたSパラメータ。

Sパラメータ行列[S]は次式で表される。

$$[S] = \begin{pmatrix} 0 & \exp(j\theta) \\ \exp(j\theta) & 0 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Sパラメータ行列を実装するために、図2の単位格子を持つ3層構造の非周期メタ表面を導入する。2層の誘電体と3層のインピーダンス層からなる構造である。各インピーダンス層は位置に依存した局所シャントインピーダンスを有し、その値は式(1)から等価回路理論により決定できる。

ここで、以下の2段階の手順により大面積の非周期的メタ表面の物理的構造が設計される。まず、単位格子の伝播特性とその物理的構造を関連付けるデータベースを構築する。具体的には、

さまざまな位相シフト値に対応した単位格子の物理的構造を 3 層の構成にて設計する。設計周波数を 9.41 GHz に設定し、比誘電率 2.56、誘電正接 0.0015、厚さ 1.53mm の基板を想定する。例として、図 3 (a) は $\theta = 5$ rad の位相シフトの単位格子構造の設計を示し、図 3 (b) は等価回路解析によって計算された S パラメータを示す。図から、3 つの層に適切なインピーダンス値を実装することにより、設計周波数で目的の S パラメータ ($S_{21} = \exp(5j)$ および $S_{11} = S_{22} = 0$) が正確に実装されていることがわかる。なお、2 枚の誘電体基板を接着する接着剤層を考慮して設計している。 $\theta = 5$ rad の場合、図 3 (c) に示すように、最上層と最下層のキャパシタンスと中間層のインダクタンスは、それぞれ T 字型のコンデンサと直線線路によって物理的に実装される。図 3 (d) は、電磁界シミュレーションによって計算された図 3 (c) の構造の S パラメータを示す。反射は -30 dB 未満であり、透過位相は設計値とよく一致している (設計周波数での差が 0.03 rad 未満)。

次に、構築した単位格子のデータベースをもとに、目的の位相補償のために大面積メタ表面を設計する。位相補償のために各単位格子に実装される位相シフト θ は、開口面にメタ表面がないスロットアレイアンテナに対してシミュレーションで計算された開口面位相分布に基づいて決定される。各単位格子の物理的構造はデータベースに保存されている構造設計から決定される。データベースが準備されると、組み合わせるアレイアンテナが変わっても、必要な位相操作のための大面積メタ表面は自動的に設計できるため、汎用性の高い設計手順である。

(2) 大面積メタ表面によるアンテナ開口面効率増大の実験的実証

提案構成を実験的に実証するために、設計したメタ表面を試作し、図 4 (a) に示す測定システムを使用して、正面方向のアンテナ利得を測定した。実験において、メタ表面が開口部に固定されたスロットアレイアンテナは線形自動ステージに配置され、X バンド標準ホーンアンテナによって正面から照射される。アンテナ間の距離 L は 680 mm から 2880 mm の範囲で走査され、2.5 mm ごとに 2 つのアンテナ間の反射・透過特性が測定される。比較のために、メタ表面のないスロットアレイアンテナに対しても追加の実験を実行した。

図 4 (b) に周波数 9.41 GHz での透過の測定結果を示す。この図より、メタ表面による約 3 dB の利得増大が確認される。この結果は、メタ表面の位相補償による開口面効率の向上によるものと考えられる。図 4 (c) は、ホーンアンテナ側から観測された反射の測定結果を示す。アンテナ間の多重反射によるリップルがメタ表面によって大幅に抑制されており、メタ表面の無反射特性を示す結果が得られた。

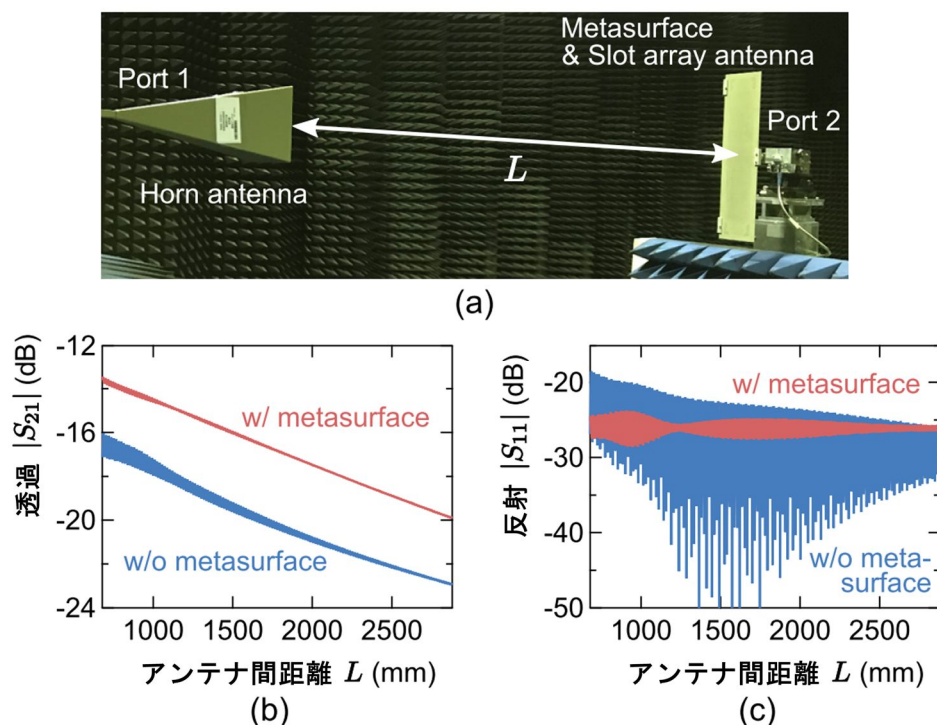


図 4. (a) 実験システムの写真。(b) 9.41 GHz での透過の測定結果。(c) 9.41 GHz での反射の測定結果。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yuto Kato, Yuanfeng She, Michitaka Ameya, Satoru Kurokawa, and Sanada Atsushi |
| 2. 発表標題 Aperture Efficiency Improvement by Reflectionless Metasurfaces for Large-Aperture Antennas |
| 3. 学会等名 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 加藤悠人、She Yuanfeng、飴谷充隆、黒川 悟、真田篤志 |
| 2. 発表標題 メタマテリアルによるアンテナ開口面効率の向上 |
| 3. 学会等名 アンテナ・伝播研究会（招待講演） |
| 4. 発表年 2020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 |
|---------|---------|
|---------|---------|