

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：17401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14986

研究課題名（和文）縁端部を考慮したメタ表面反射板を用いたLOS-MIMOの小型構成に関する研究

研究課題名（英文）Study on compact configuration of LOS-MIMO with meta-surface reflector considering the edge diffraction

研究代表者

久世 竜司 (Kuse, Ryuji)

熊本大学・大学院先端科学研究部（工）・助教

研究者番号：40808929

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、主にLOS-MIMOの小型構成利用を想定した、反射板の利用方法および設計技術の確立を行った。反射板の中央部と縁端部で異なる反射特性を有する反射体をメタ表面に適用することで、通信容量の向上が見込まれることを確認した。また、縁端部の反射特性を補償することが可能な構造を提案し、その効果を示した。メタ表面の縁端部は、ユニットセル解析と同様の動作はしないこととスロットとノッチを設けることでユニットセル解析と同様の特性に保証できることを、実験を通して確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

MIMOにおいて通信容量を向上させる手段として、小型構成においては十分なアンテナ面積を確保できない可能性があることからメタ表面反射板を利用した改善方法を見出した。また反射板として利用する際、縁端部の動作が中央部と異なる特性を有することから、メタ表面反射板の実例は大口径な反射板が主であったが、本手法により、あらゆるサイズに対して位相補償が適用可能となり利用シーンを大きく拡大することができた。また、動作原理等も明らかにすることができ、有限小型サイズのメタ表面反射板に関する多くの知見を獲得できた。

研究成果の概要（英文）：In this study, we established a method and design technique for the use of meta-surface-reflectors, mainly for use in small LOS-MIMO configurations. The channel capacity can be improved by using a meta-surface-reflector that have different reflective characteristics at the center and the edge of the reflector. This study also proposed a meta-surface with a backing conductor having notches and slots to compensate for the reflection phase affected by the complex diffraction at the edge. The proposed and conventional MSs were fabricated to verify the deterioration and compensation effect.

研究分野：アンテナ工学，電磁波工学

キーワード：アンテナ メタ表面 反射板 LOS-MIMO

### 1. 研究開始当初の背景

大容量の移動通信を実現する伝送方法として送信・受信にそれぞれ複数のアンテナを用いた MIMO (Multiple Input Multiple Output)がある。MIMO は携帯電話のデータ通信規格である LTE や無線 LAN の規格に採用されるなど、データ通信の要の技術の一つであり、第五世代移動通信(5G)でも利用を前提としている。5G ではさらなる周波数利用効率向上を目指し、マイクロ波帯以上の周波数を用いたシステムの導入が進められている。5G では、移動通信のみでなくあらゆる端末とネットワークを構築する IoT(Internet of Thing)による、より充実した情報共有および活用の実現が期待されている。また、災害時の迅速な情報収集や多視点リアルタイム映像配信の実現に利用可能なドローン中継局を用いたネットワーク形成が提案されている。空飛ぶネットワークにおいても MIMO の利用を想定している。

また、端末同士が近接しており高周波を利用した端末協調をする場合や、ドローン中継局を用いたネットワーク形成において、ポイントとなることは、見通し環境(送受信アンテナ間に建物等の遮蔽物がない環境)が支配的になる点である。つまり、LOS(Line of Sight)MIMO 技術が重視されるといえる。LOS-MIMO では、送信側のアンテナ間距離と送受信間距離について最適な組み合わせがあることが明らかにされている。これは、MIMO の理想動作として送信側と受信側がそれぞれ完全に一対一で通信を行うことに対して、電波が広がりを持って伝搬するため、送信側の 1 つのアンテナから放射された電波が受信側の複数のアンテナに到達してしまうためである。この時の位相遅延が信号分離に有利な条件があり、それが最適な組み合わせとなる。ただし、特に近距離においては非常にスポット的なものとなり、送受信間距離が変動するような状況では高い伝送容量を維持することが困難であることから、鋭い指向性を持ったアンテナが適切であると考えられている。しかし、指向性の鋭さとアンテナのサイズはトレードオフの関係にあり、鋭い指向性を得るには大きなサイズのアンテナ構成が求められる。これは、特に機器同士の通信において、アンテナ設置スペースが求められるため小型な機器に搭載したい場合に課題となる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、特に LOS-MIMO に利用可能な小型なアンテナシステム的设计法やそれに係る要素技術を確立することである。具体的には、送信点・伝搬路・受信点を含んだ空間について反射器や導波器を加えるなど、ハードウェアの側面から無線通信システムの伝送容量を向上させることが可能な手法を明らかにする。

### 3. 研究の方法

本研究では、背景で述べたようにハードウェアの側面から LOS-MIMO 通信に有利な導波器や反射器について検討する。特に小型化においては反射器の縁端部が特性に大きく寄与することから、縁端部に着目した構成方法を検討した。また、反射器を構成する上で所望の設計通りに実現できない課題があったことから、所望の反射特性を維持する構造を検討した。

#### 3.1 反射板中央部と縁端部とで異なる反射特性を有する反射板の効果

同一素子のメタ表面反射板を設計した場合でも、小型有限メタ表面反射板をその縁端部において設計通り反射特性とならないことを逆手に取り、予め中央部と縁端部とで異なる反射特性を有することを前提とした設計について検討した。図 1 に概要図を示す。メタ表面中央部の反射係数を  $R_1$ 、縁端部での反射特性を  $R_2$  とした反射板を適用することで、通信容量向上に有利な見通し伝搬環境を構築することが狙いである。

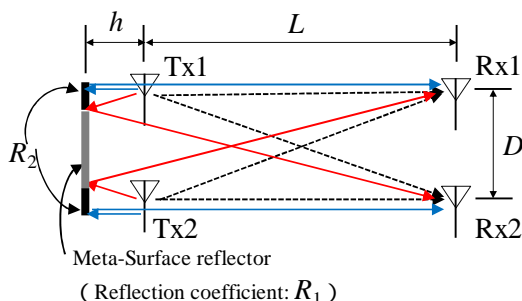
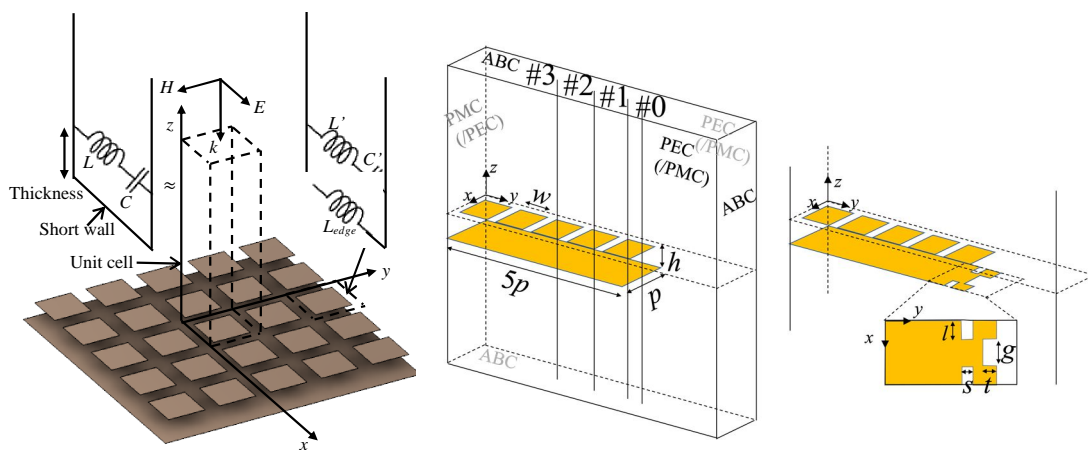


図 1 縁端部と中央部で反射特性の異なる反射板の利用

#### 3.2 反射板の設計自由度確立のための位相補償設計

メタ表面と縁端部での位相補償概念図を図 2(a)に示す。メタ表面は波長より十分に小さい金属素子を周期的に配置することで任意の反射位相特性を実現しており、一般的にその特性は、無限周期配列を前提としたユニットセル解析によって求められる。よって有限構造メタ表面においても、メタ表面中央部ではユニットセル解析とほぼ同様の結果が得られる。一方、メタ表面縁端部は素子が不連続となり、まず素子そのものが持つと仮定されているリアクタンスが中央部と異なるものとなる。また、金属背面板も不連続となることから電力が集中し、誘導性リアクタンスとみなされるような応答となる。このために、有限構造メタ表面反射板は同一の素子を用いている場合においても、中央部と縁端部とでことなる反射特性を有する。

この現象を確認するために、図 2(b)に示す解析モデルを用いた。メタ表面の一例のみを取り出し、 $x$  方向について境界を完全導体(PEC)とすることで、PEC に垂直な電界を入射させることで、等価的に無限構造とみなすことができる。一方、 $y$  方向については吸収境界とすることで有限構造となっている。縁端部と各素子の中央を貫くように観測線を設けることで反射位相を調べる。また、反射位相補償構造を図 2(c)に示す。通常メタ表面の金属背面板にノッチとスロットを設けることで、図 2(a)に示した  $L_{edge}$  を制御することを目的としており、それにより中央部の反射特性に近づけることが狙いである。



(a) メタ表面概念図 (b) 解析モデル (c) 提案構造  
図 2 位相補償構造のためのメタ表面の概念と解析モデルおよび提案提案構造

## 4. 研究成果

### 4. 1 異なる反射特性を有する反射板を用いた効果

異なる反射位相特性を有する反射板を用いた LOS-MIMO の具体的な構成を図 3(a)に示す。縁端部で所望の反射位相特性を得ることが困難なことから縁端部を PEC として中央部の反射位相特性を制御することで、通信容量を向上させる特性および構造を求めた。結果を図 3(b)に示す。横軸は送受信アンテナ間距離で縦軸は通信容量である。点線、破線、直線はそれぞれ、通常の金属反射板 (PEC)、中央部のメタ表面の素子を一律に適用した反射板、提案した PEC とメタ表面を組み合わせた反射板を用いた場合の理論値を示す。結果より、通常の PEC と比較すると、空間相関が改善されることで電力 2 倍に相当する改善効果が期待できることがわかる。また、一律のメタ表面反射板と PEC と組み合わせたメタ表面反射板の結果を比較すると、縁端部を有効に活用できるようになり、さらなる改善効果がきたいできることがわかる。

マーカーはモーメント法による電磁界解析結果を示す。結果より、送受信間距離が  $4\lambda$  の範囲までは、理論値に近い特性を有していることがわかる。それ以降の距離においては、異なる反射特性を用いる効果は得られていないが、通常の金属反射板と比較すると十分な通信容量改善効果が認められる。

図 4 に送受信のアンテナの中心軸からの位置ずれの影響を示す。横軸は位置ずれの大きさを波長で規格化したものであり、縦軸は通信容量である。結果より、位置ずれが  $0.4\lambda$  の範囲内であれば、基準値と同程度の通信容量を維持できる見込みがあることがわかる。

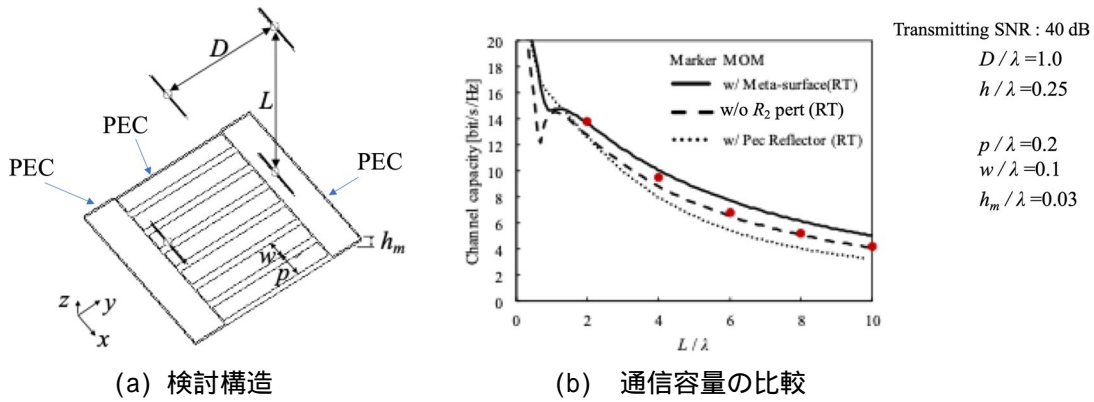


図3 異なる反射特性を有する反射板を用いた効果

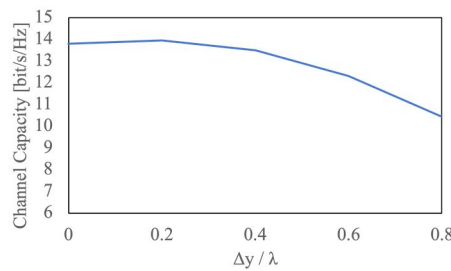


図4 位置ずれの影響

#### 4.2 反射板の設計自由度確立のための位相補償設計

図5に3.2節で説明した反射位相補償効果の解析結果を示す。どちらも8GHzにおいて反射位相が $0^\circ$ となるように設計されたものであるが、通常メタ表面では図5(a)に示すように特に縁端部において設計値と大きく異なる反射特性を有しており、結果として $15^\circ$ で収束することが確認できる。一方で、スロットとノッチを設けた場合は、どの地点でもほぼ同様の反射位相特性を有しており、約 $0^\circ$ の反射位相特性が維持されていることがわかる。

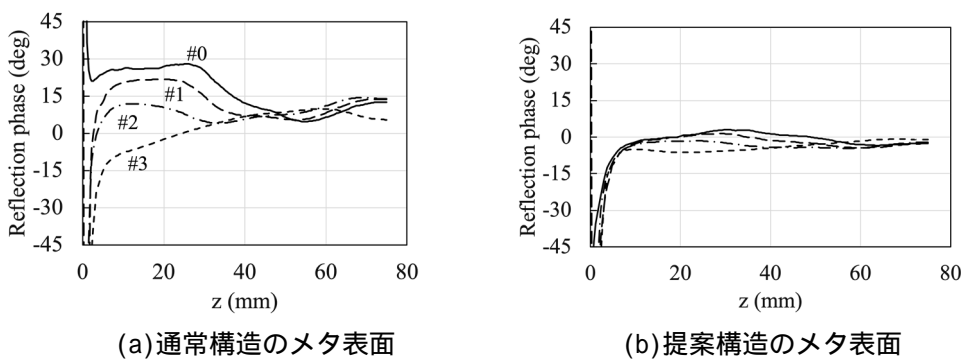
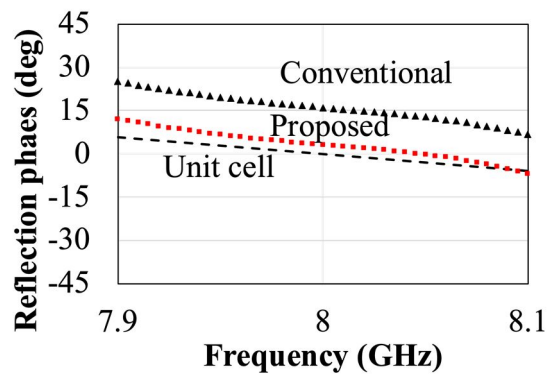
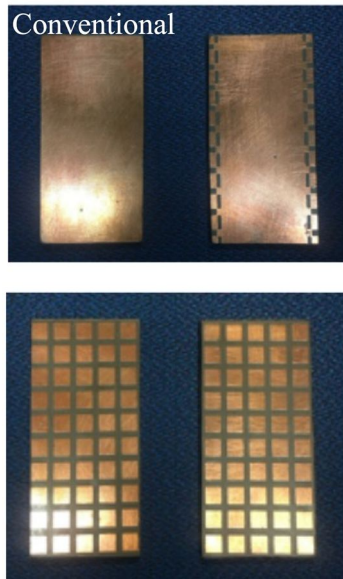


図5 提案構造の効果

また結果の妥当性を確認するため、実験で評価を行った。図6(a)に試作したメタ表面の写真を示す。通常メタ表面(Conventional)との違いは背面のスロットとノッチのみである。図6(b)に反射位相の測定結果を示す。結果より、提案構造(Proposed)はUnit cellとほぼ同様の結果を示すのに対して、従来(Conventional)は異なる値となっていることがわかる。以上から提案構造の有効性が確認できる。



(a) 試作したメタ表面の写真

(b) 実験での測定結果.

図 6 実験による検証結果

本研究では, LOS-MIMO に利用可能な小型なアンテナシステム的设计法やそれに係る要素技術の確立を目指し, 体的には, 送信点・伝搬路・受信点を含んだ空間について反射器や導波器を加えるなど, ハードウェアの側面から無線通信システムの伝送容量を向上させることが可能な手法について検討した.

反射板の利用においては, 特に小型構成においては反射板の縁端部が特性に大きく影響を及ぼすことを確認し, 縁端部と中央部で異なる特性を有する場合の効果を明らかにした. さらにメタ表面の縁端部の設計自由度を高める手法として, 金属背面板へのスロットとノッチの適用とその効果を示した. 自由度の高い補償手法は初の提案であり, 自由度と精度を高めることを可能とした. 本研究の成果をさらに発展させ, ハードウェアの観点から通信・伝搬応用に貢献したい.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Kuse Ryuji, Fukusako Takeshi, Matsushima Akira	4. 巻 early access
2. 論文標題 Reflection Phase Compensation for Finite Meta-surface using Notches and Slots on the Backing Conductor	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Antennas and Propagation	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TAP.2023.3269155	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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 久世竜司、福迫武、松島章
2. 発表標題 メタ表面背面板による反射位相特性改善の実験評価
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 Ryuji Kuse, Takeshi Fukusako, Akira Matsushima
2. 発表標題 Reflection Phase Compensation in Meta-surface with U-shaped Notches on the Backing Conductor
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Antennas & Propagation 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久世竜司、福迫武、松島章
2. 発表標題 メタ表面背面板による反射位相特性の改善
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久世竜司、福迫 武、松島 章
2. 発表標題 電磁勾配表面反射板を用いた2×2 LOS-MIMOのチャネル容量改善
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 2020年

1. 発表者名 久世竜司、福迫 武、松島 章
2. 発表標題 位相勾配を有するメタ表面を用いた2×2 LOS-MIMOのチャネル容量改善
3. 学会等名 2020年 電子情報通信学会 総合大会
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