

# 反射角度を再構成可能な パッシブ型メタサーフェス

白澤 嘉樹\* 佐々木隆吉\* 佐々木克守\*  
佐藤 啓介\* 大島 一郎\*

## Passive Metasurface with Reconfigurable Reflection Angle

*Yoshiki Shirasawa, Takayoshi Sasaki, Katsumori Sasaki,  
Keisuke Sato and Ichiro Oshima*

メタサーフェス (MTS) 反射板は反射波の方向やビーム幅を自由に設計可能である。当社では MTS 反射板を用いたエリア改善の柔軟性向上と低コスト化を目的として、28GHz 帯向けに電源を必要としないパッシブ型 MTS 反射板を提案する。

本論文では、MT 反射板への入射角度を維持しながら、水平方向の反射角度を変化させる手法と電磁界解析の結果を紹介する。提案する MTS 反射板は、回折格子周期となるセル 1 周期あたり 6 つのユニットセルで構成され、垂直方向に配列されている。誘電体基板を用いた反射板であり、ユニットセル数は垂直方向と水平方向にそれぞれ 36 個配列されている。水平方向の反射角可変を実現する為に MTS 反射板を短冊状に分割し、各短冊状の MTS 反射板を垂直方向に固定量分だけスライドさせる。スライドさせることで各短冊状の MTS 反射板の隣接する素子の位置が機械的に変化し、水平方向に対して反射位相の変化を生み出している。電磁界解析による解析を行った結果、隣接する短冊状の MTS 反射板のスライド距離の差を最大 12mm とした場合に、 $\pm 11.2^\circ$  の反射角可変を実現できることを確認している。通常のパッシブ型の MTS 反射板では入射角度を維持する場合、反射角度は固定されるため、エリア改善の柔軟性向上と低コスト化が期待できる。

本論文は、2023 年 3 月に開催された電子情報通信学会総合大会にて報告した「反射角度を再構成可能なパッシブ型メタサーフェスに関する検討」を加筆・転載したものである (copyright©2023 by IEICE)。

Metasurface (MTS) reflector allows a free design of the direction and beam width of reflected waves. A passive MTS reflector that does not require a power source for the 28 GHz band is proposed for the purpose of improving flexibility and lowering costs for area improvement by using MTS reflectors.

This paper introduces a method to change the horizontal reflection angle while maintaining the incident angle to the MTS reflector, and results of electromagnetic field analysis. The proposed MTS reflector consists of six unitcells per cell period, which is the period of the diffraction grating, and is arranged in the vertical direction. This is a reflector using a dielectric substrate, and 36 unitcells are arranged vertically and horizontally. To change the reflection angle in the horizontal direction, the MTS reflector is divided into strips, and each strip of MTS reflector is slid vertically by a fixed amount. By sliding it, the positions of adjacent elements of each strip-shaped MTS reflector mechanically change and a change in the reflection phase in the horizontal direction is created. As a result of electromagnetic field analysis, we confirmed that it is possible to achieve a reflection angle variation of  $\pm 11.2$  degrees when the slide distance difference between adjacent strip-shaped MTS reflectors is set to 12 mm at most. With a normal passive MTS reflector, the reflection angle is fixed when

\* R&D 統括センター ワイヤレス研究所

maintaining the incident angle, so it can be expected to improve flexibility in area improvement and reduce costs.

This paper is a revised and reprinted version of the "Study on passive metasurface that can reconfigure the reflection angle" reported at the IEICE General Conference held in March 2023 (copyright © 2023 by IEICE).

## 1. はじめに

第6世代移動通信(6G)で電波の反射や透過を制御してエリア形成を可能とする RIS (Reconfigurable Intelligent Surface) が着目されている<sup>(1)</sup>。著者らは、エリア改善の柔軟性向上と低コスト化を目的として、ミリ波帯における反射角度を半導体等のアクティブ素子を用いずに可変するパッシブ型可変メタサーフェス(MTS)の開発に取り組んでいる<sup>(2)(3)</sup>。本稿では、MTSを短冊状に分割して、各短冊をスライドさせることで反射角度可変を実現する。

## 2. メタサーフェスの反射角可変

図1に想定するユースケースを示す。ミリ波帯の無線通信は、高速で大容量な通信ができる反面、直進性が高く伝搬損失が大きいいため、基地局から(Non-Line of Sight) NLOSとなる場所は不感地帯となる。パッシブ型の MTS による異常反射を利用した方法<sup>(2)-(4)</sup>が多く提案されている。しかし、MTS の設計入射角・反射角以外における動作は回折格子周期の理論<sup>(2)-(4)</sup>に基づき変動し、不感地帯の全てをカバーすることは困難である。不感地帯をカバーする場合、反射角が異なる MTS の設計が必要となり、コストの増大につながる。

本稿では、パッシブ型 MTS の入射角を維持して、

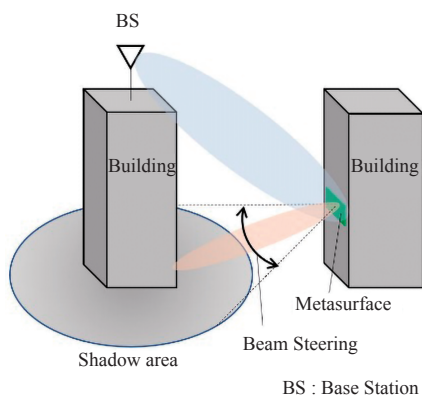


図1 MTSによる不感地帯の改善

水平方向の反射角を変化させる手法を提案する。解析は CST STUDIO SUITE<sup>(5)</sup>を用いる。図2に設計した MTS の基本構造と短冊状にスライドした場合の構造を示す。設計周波数は 28GHz で、FR-4 誘電体積層基板を使用し、大きさは 187.56×187.56mm<sup>2</sup>とした。

MTS の基本設計として、回折格子周期を生成するために1周期当たりのセル数とセルの大きさを決定する方法が紹介されている<sup>(6)(7)</sup>。回折格子周期あたりの最小セル数  $N$  及び回折格子周期  $D$  はそれぞれ式(1)、(2)で計算できる。

$$N = 1 + \left\lfloor \frac{(1 - \sin \theta_i)}{|\sin \theta_r - \sin \theta_i|} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{(1 + \sin \theta_i)}{|\sin \theta_r - \sin \theta_i|} \right\rfloor \quad (1)$$

$$D = \frac{m\lambda_0}{(\sin \theta_{rm} - \sin \theta_i)} \quad (2)$$

$\theta_i$ ,  $\theta_r$  はそれぞれ MTS の入射角と反射角を表し、 $\lambda_0$  は自由空間内の設計周波数の波長、 $m$  は回折モード次数を表す。図3に MTS の垂直方向のスライドについて示す。 $\theta_{i,EL}$ ,  $\theta_{i,AZ}$  はそれぞれ MTS の垂直方向と水平方向の入射角、 $\theta_{r,EL}$ ,  $\theta_{r,AZ}$  はそれぞれ MTS の垂直方向と水平方向の反射角を表す。入射角と反射角はそれぞれ  $\theta_{i,EL} = 20^\circ$ ,  $\theta_{i,AZ} = 0^\circ$ ,  $\theta_{r,EL} = \theta_{r,AZ} = 0^\circ$  とした。

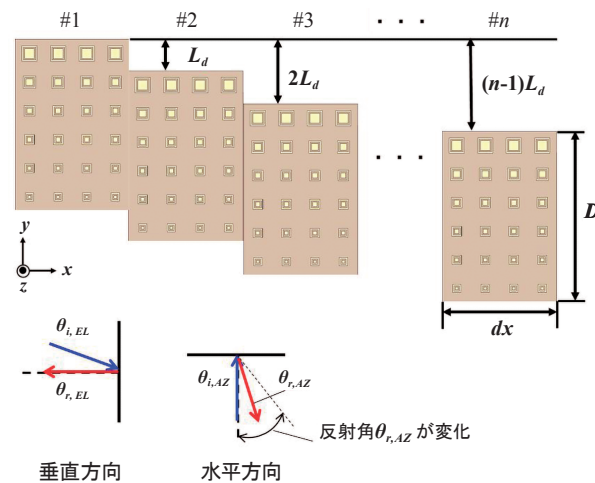


図2 設計した MTS と短冊状 MTS のスライド時の外観

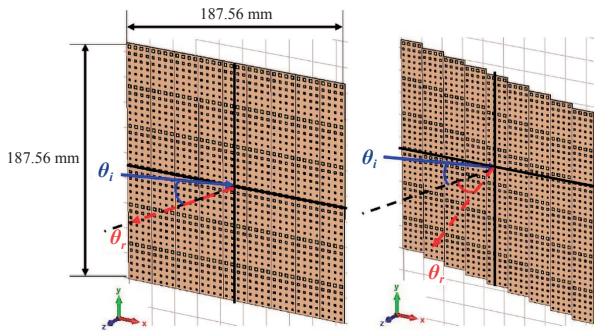


図3 短冊状 MTS の垂直方向スライド量(-y 方向)

図2や図3に示すように、MTSの回折格子周期は垂直方向に並んでいるため、式(1)及び(2)は垂直方向のパラメータに沿って計算され、 $D \approx 31.26\text{mm}$ 、 $N = 6$ となる。MTSの素子4列を1ユニットとして短冊状に分割し、 $n$ 番目の短冊状MTSの垂直方向( $\pm y$ 方向)のスライド距離が $(n-1)L_d$ になるようにスライドさせる。 $L_d$ は隣接する各MTSのスライド量(固定値)の差分を表す。MTSの分割数は $n = 9$ とした。スライドさせることにより、水平方向に対して反射位相の変化が生み出され、反射角 $\theta_{r,AZ}$ を変化させることが可能となる。スライドさせる量については、MTSの開口面形状による反射パターンへの影響を最小限にするために、 $n$ 番目の短冊について $(n-1)L_d \leq D$ とした。MTSのスーパーセルは回折格子周期 $D$ ごとに位相周期 $2\pi$ の繰り返しになり、あるスライド距離 $d$ の位相 $p_d$ において、 $p_d = p_{d+D}$ となるためである。

文献(8)では、反射角と入射角の関係が位相の勾配で表され、水平方向について以下の式(3)で計算できる。

$$k(\sin \theta_{i,AZ} - \sin \theta_{r,AZ}) = \frac{d\Phi}{dx} \quad (3)$$

$k$ は位相定数、 $d\Phi$ はユニット間の位相変化量、 $dx$ は1ユニットの $x$ 方向の長さを表し、 $dx = 20.84\text{mm}$ である。スライド量に対するユニット間の位相変化量 $d\Phi$ は、 $d\Phi$ (deg.) =  $360 \times (L_d/D)$ で計算でき、式(3)を $\theta_{r,AZ}$ について解くことで反射角度を求めることができる。

### 3. 電磁界解析結果

表1に $L_d = 4\text{mm}$ 、 $8\text{mm}$ 、 $12\text{mm}$ の場合のスライ

表1 反射角度の計算値と解析値の比較

スライド方向	反射角度 $\theta_{r,AZ}$ [deg.]			
	$L_{d,+y}$		$L_{d,-y}$	
スライド量の差分 $L_d$	計算値	解析値	計算値	解析値
4 mm	3.7	3.7	-3.7	-3.7
8 mm	7.5	7.4	-7.5	-7.3
12 mm	11.3	11.2	-11.3	-11.2

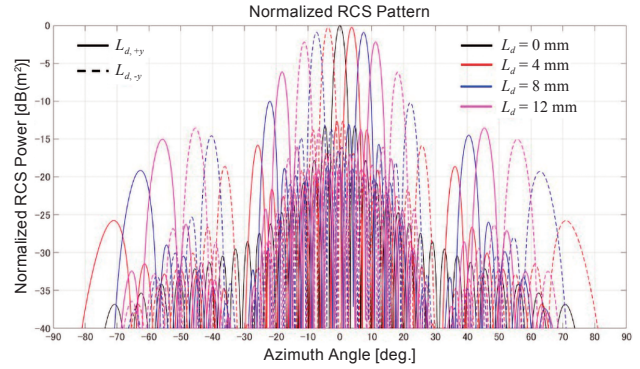


図4 電磁界解析による反射特性

ド量に対する反射角度方向を示す。計算値は式(3)より求めた。計算値と解析値を比較すると反射角度がほぼ一致していることが分かる。スライド量を増やすほど主ビーム反射方向がAzimuth = 0°方向から変化して角度が深くなっていることが分かる。 $y$ 方向の向きに関わらず、短冊間における位相変化量は同じになるためAzimuth = 0°方向を対称に反射角度が同じ量だけ変化している。

図4に電磁界解析による正規化したRCS(Radar Cross Section)パターンを示す。波源は平面波とし、 $L_{d,+y}$ 、 $L_{d,-y}$ はそれぞれ図3における $+y$ 方向と $-y$ 方向へのスライド量を表す。反射角度が深くなるほど所望方向以外の反射強度が高くなっている。これは、回折格子周期による所望以外の回折モードが現れているためである。反射特性の結果から垂直方向のスライド量に応じて反射角度の変化量を制御できることが確認できる。

### 4. む す び

パッシブ型MTSにおいて入射角を維持しつつ水平方向の反射角度を可変させる方法、ならびに反射特性について述べた。MTSを短冊状に分割し、各MTSを垂直方向にスライドさせて水平方向に対して反射位相の変化を生み出した。その結果、MTSの主ビームの水平方向の反射角度を変化させることを

確認した。電磁界解析した反射特性では、垂直方向のスライド量に応じて水平方向の反射角度の変化量を制御できることを示した。

## 文 献

- (1) NTT ドコモ, “ホワイトペーパー 5G の高度化と 6G, ”5.0 版, Nov. 2022.
- (2) T. Sasaki, Y. Shirasawa, T. Hongnara, K. Sasaki, K. Sato, I. Oshima, N. Michishita, H. Nakabayashi and K. Cho, “Incident Angle Reconfigurable Metasurface by Mechanically Extending Diffraction Grating Period,” 2020 Int. Symp. Antennas Propag. (ISAP), Osaka, Japan, 2020.
- (3) T. Hongnara, T. Sasaki, K. Sasaki, K. Sato, I. Oshima, N. Michishita, H. Nakabayashi, and K. Cho., "Dual-Polarized Reflective Metasurface Based on Cross-Shaped Resonator for 5G Wireless Communication Systems at 28 GHz," 2019 Int. Symp. Antennas Propag. (ISAP), Xi'an, China, 2019.
- (4) A. D.-Rubio, V. S. Asadchy, A. Elsakka, and S. A. Tretyakov, “From the generalized reflection law to the realization of perfect anomalous reflectors,” Sci. Advances, Vol. 3, No. 8, Aug. 2017.
- (5) <https://www.aetjapan.com/cst/>
- (6) A. M. H. Wong and G. V. Eleftheriades, “Perfect anomalous reflection with a bipartite Huygens’ metasurface,” PHYSICAL REVIEW X, Vol. 8 Iss. 1, Feb. 2018.
- (7) A. M. H. Wong, P. Christian, and G. V. Eleftheriades, “Binary Huygens’ metasurfaces: experimental demonstration of simple and efficient near-grazing retroreflectors for TE and TM polarizations,” IEEE Trans. Ant. Propag., Vol. 66, Iss. 6, Jun. 2018, pp. 2892-2903.
- (8) V. S. Asadchy, M. Albooyeh, S. N. Tsvetkova, A. Díaz-Rubio, Y. Ra’di, S. A. Tretyakov, “Perfect control of reflection and refraction using spatially dispersive metasurfaces,” Phys. Rev. B 94, 075142 (2016).

☆☆



**白澤 嘉樹**  
平成 31 年入社  
R&D 統括センター ワイヤレス研究所  
移動通信用アンテナ及び電波伝搬の研究・開発に従事  
電子情報通信学会会員



**佐々木隆吉**  
平成 28 年入社  
R&D 統括センター ワイヤレス研究所  
移動通信用アンテナ及び電波伝搬の研究・開発に従事  
電子情報通信学会・IEEE 会員



**佐々木克守**  
平成 10 年入社  
R&D 統括センター ワイヤレス研究所  
移動通信用アンテナ及び電波伝搬の研究・開発に従事  
電子情報通信学会会員



**佐藤 啓介**  
平成 18 年入社  
R&D 統括センター ワイヤレス研究所  
移動通信用アンテナ及び電波伝搬の研究・開発に従事  
電子情報通信学会・IEEE 会員



**大島 一郎**  
平成 7 年入社  
R&D 統括センター ワイヤレス研究所  
移動通信用アンテナ及び電波伝搬の研究・開発に従事  
電子情報通信学会・IEEE 会員  
博士(工学)