

論文

# マルチシート構成による ローカル5Gシステム向け 偏波共用広角反射メタサーフェス反射板の開発

Tanan Hongnara\*    白澤 嘉樹\*    佐々木隆吉\*  
佐々木克守\*    佐藤 啓介\*\*    大島 一郎\*\*  
道下 尚文\*\*\*    中林 寛暁\*\*\*\*    長 敬三\*\*\*\*

## Development of Dual-Polarized Broad-Beam Reflective Metasurface based on Multi-Sheet Configuration for Local 5G Systems

*Tanan Hongnara, Yoshiki Shirasawa, Takayoshi Sasaki,  
Katsumori Sasaki, Keisuke Sato, Ichiro Oshima,  
Naobumi Michishita, Hiroaki Nakabayashi and Keizo Cho*

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が、設置環境に合わせた設計が都度必要になる。そのため、当社では設計の簡易化を目的として、異なる反射角を持つ MTS 反射板を複数配列したマルチシート構成の MTS 反射板を提案している。

今回は水平面内 30° 方向からの入射波を、54° ~ 66° の角度へ反射するよう 4 枚の異なる反射角を持つ反射板を組み合わせる反射板を開発した。また、開発した反射板について、鹿沼工場内のローカル 5G 実験局にて測定を行い、実環境において広角な反射を実現できることを確認した。

本論文は、2021 年 4 月に開催された EuCAP (15th European Conference on Antennas and Propagation) にて報告した "Dual-Polarized Broad-Beam Reflective Metasurface based on Multi-Sheet Configuration for Local 5G Application at 28.25 GHz" を改編したものである。

Though reflective metasurface (MTS) can be designed freely in terms of the direction of reflected waves and beam width, they must be designed to meet the installation condition on a case-by-case basis. To simplify the design, we have proposed a multi-sheet reflective MTS that consists of several reflective MTS with different reflection angles.

This time, we have developed a reflector that combines four reflectors with different reflection angles to reflect an incident wave from the direction of 30° in the horizontal plane to the angle of 54° to 66°. The developed reflectors were measured at a local 5G experimental station in the Kanuma Plant, and it was confirmed that wide-angle reflection was realized in the real environment.

This paper is based on "Dual-Polarized Broad-Beam Reflective Metasurface based on Multi-Sheet Configuration for Local 5G Application at 28.25 GHz" (copyright©2021 EurAAP) presented at EuCAP (15th European Conference on Antennas and Propagation) in April 2021.

\* 移動通信技術開発部 移動通信開発課

\*\* R&D 統括センター ワイヤレス研究所

\*\*\* 防衛大学校

\*\*\*\* 千葉工業大学

## 1. はじめに

第5世代移動通信システム(5G)において、ミリ波(mmWave)帯域の使用は、高速大容量かつ低遅延通信など、通信品質を高度に向上させるために有用とされている。一方で、5Gのもう一つの重要な課題は、カバーエリアの広さであり、多くのスモールセルエリアを構築する必要がある。

日本国内では、スマートファクトリーなどのアプリケーションをサービス化することを目的に、総務省がプライベートネットワークをローカル5Gシステムとして利用する構想を発表し推進している。ローカル5Gに用いられる周波数帯には、無線通信で大容量かつ高速、低遅延通信を実現するために、28.2~29.1GHzの準ミリ波帯も含まれている<sup>(1)</sup>。

しかしながら、ミリ波は伝搬損失がSub-6帯などと比較して大きい為、長距離伝搬においてはアンテナ利得を高くすること、またその高利得な指向性を走査するビームフォーミングを用いるアンテナ等を用いる必要がある。このような場合、電磁(EM)波の伝搬においては非常に直進性が高く、指向性が鋭くなるという課題がある。そのため、6GHz以下の周波数帯と比較して、電磁波が障害物によって回折しにくいという欠点を持つ<sup>(2)</sup>。これは、カバレッジエリアが狭くなることや、多くの不感地帯の発生といったエリア設計上の課題を生じる。

この問題を解決するために、無給電で動作する反射板を使用して、電磁波を不感地帯方向に反射させるコンセプトが提案され、実験されている<sup>(3)</sup>。さらに、より高度な方法として薄い構造のMTS反射板設計が報告され、鏡面反射角度以外のNLOS(見通し外)方向に電磁波を反射させるために使用されている<sup>(4)</sup>。設計において重要となる点として、単一方向への高効率な反射を達成するために、MTS反射板の表面インピーダンスと反射位相を1次回折周期で制御することである<sup>(5)</sup>。通常、金属製反射板と比較して、MTS反射板は入射角と反射角を変化させることができるため、より柔軟でコンパクトな反射板の設置を実現可能である。

さらに、より多くのユーザー端末にサービスを提供するためには、カバレッジエリアを広くすることが求められており、反射板は、広角の反射指向性が望ましい。従来、金属反射板の反射ビーム幅は、反射板の開口面積に依存する。反射板開口面積が大きくなるにつれ、反射波の利得は高くなり、ビーム幅

も狭くなる。また、従来設計していたMTS反射板においても同じであり、開口面積が大きくなることにより反射ビーム幅は狭くなる。このような設計では、不感地帯改善の効果は限定的であると考えられる。

そこで、設計のしやすさ、エリア設計の柔軟性を考慮して、複数のMTS反射板の反射指向性を合成して広角反射指向性を実現する、マルチシートMTS反射板構成を提案した。本提案構造では、すべてのMTS反射板の入射角は等しいが、反射角は反射波の半値角に合わせて適度に重なるように設計されている。本検討では、入射角( $\theta_i$ )が $30^\circ$ の垂直・水平偏波共用のメタサーフェス反射板を4枚設計し(以下サブMTS)、それらの反射角( $\theta_r$ )を $54^\circ$ 、 $58^\circ$ 、 $62^\circ$ 、 $66^\circ$ と設定した。単一のメタサーフェス反射板の反射指向性とマルチシート構成の反射指向性を電磁界シミュレーションおよび実測により検証した。設計周波数は28.25GHzとしている。

## 2. マルチシート MTS 反射板の構成

### 2.1 マルチシート MTS 反射板の概要

図1に、本実験で使用するマルチシートMTS反射板の全体構造を示す。マルチシートMTS反射板は4つのサブMTS(MTS-A, MTS-B, MTS-C, MTS-Dとする)を組み合わせて構成される。

すべてのサブMTSは、xz平面(アジマス平面)で入射波を反射するように設計される。これらのMTS反射板は、すべて等しい入射角 $\theta_i = 30^\circ$ となる。そして、MTS-A, MTS-B, MTS-C, MTS-Dでは、 $\theta_r$ をそれぞれ $54^\circ$ 、 $58^\circ$ 、 $62^\circ$ 、 $66^\circ$ に設定する。図1に見られるように、すべてのサブMTSは、反射指向

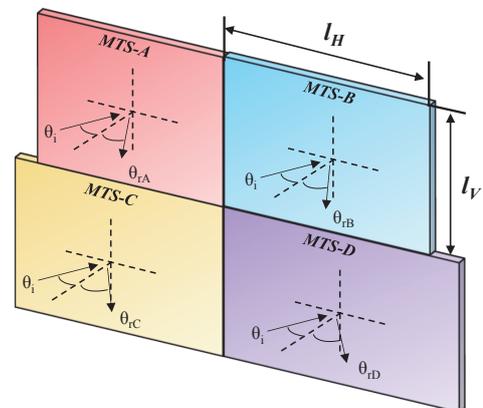


図1 広角反射MTS反射板におけるマルチシート構成のコンセプト

表1 サブMTS構成の設計諸元

Parameter	MTS-A	MTS-B	MTS-C	MTS-D
Incident Angle $\theta_i$	30°			
Reflection Angle $\theta_r$	54°	58°	62°	66°
Vertical Length $l_v$	180 mm			
Horizontal Length $l_H$	285 mm	300 mm	314 mm	335 mm

性の垂直方向の半値幅が等しくなるように、垂直方向の長さ ( $l_v$ ) を 180mm とした。これは、長方形の開口面積からの放射指向性および利得の推定に基づいて設計している<sup>(6)</sup>。一方、反射角  $\theta_r$  が各サブ MTS によって異なることにより、反射開口面積も異なる。反射電力を等しくするために、サブ MTS 反射板の水平方向の長さ ( $l_H$ ) を適切に変更し、反射電力が一定となるよう補正をしている。したがって、この構成では、 $\theta_r$  が最も大きい MTS-D が最も長い  $l_H$  を持つことがわかる。各サブ MTS の詳細を表 1 に示す。

## 2.2 サブ MTS の角度設計

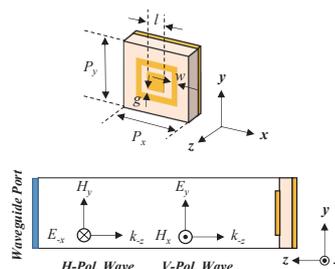
入射と反射の方向を自由に定義するために勾配位相 MTS 反射板の技術を用いている。この設計は一般化されたスネルの法則の方程式に基づいて行っており、次式のように表される。

$$\sin \theta_r - \sin \theta_i = \left( \frac{\lambda_0}{360^\circ \times n_i} \right) \cdot \left( \frac{d\phi}{dx} \right) \quad (1)$$

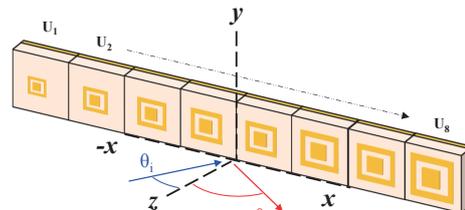
$\theta_i$ ,  $\theta_r$ ,  $\lambda_0$  はそれぞれ、入射角、反射角、MTS 反射板の動作周波数における波長である。

また、反射面の空気媒体の屈折率  $n_i$  は 1 とした。 $d_\phi/dx$  の項は、 $d_x$  の距離による反射位相の差である<sup>(7)</sup>。そのため、通常、 $d_x$  は MTS のユニットセルの反射位相が 360° 回転する周期として設定される。

鹿沼工場において取得した実験用免許の周波数に合わせ、動作周波数は 28.25GHz を中心として設計した。MTS 反射板を構成するセル間の位相差  $d_\phi$  は 45° に固定されている。したがって、各サブ MTS で異なる反射角  $\theta_r$  値を実現するために、単位セルの  $d_x$  またはスーパーセル周期を変化させる。図 2(a) に示すように、MTS 反射板のユニットセル素子として、正方形の金属パッチとリングを用いて設計している。ユニットセルの裏側には金属板を設定している。試作コストを削減するために、これらの素子は実験的に設計し、基板厚さ 0.8mm の安価な FR-4 基板 ( $\epsilon_r = 4.3$ , 誘電正接 = 0.018) を使用した。すべてのサブ MTS は、リング素子の Y 方向のセルの周期 ( $p_y$ ),



(a) ユニットセル



(b) スーパーセル

図2 MTSの構成図

表2 スーパーセル構成の設計諸元

Parameter	MTS-A	MTS-B	MTS-C	MTS-D
$p_x$ (mm)	4.12	3.74	3.45	3.23
$l$ of $U_1$ (mm)	0.53	0.52	0.53	0.53
$l$ of $U_2$ (mm)	0.67	0.66	0.65	0.65
$l$ of $U_3$ (mm)	0.75	0.74	0.73	0.73
$l$ of $U_4$ (mm)	0.81	0.80	0.80	0.80
$l$ of $U_5$ (mm)	0.89	0.88	0.90	0.90
$l$ of $U_6$ (mm)	1.00	1.05	1.05	1.11
$l$ of $U_7$ (mm)	1.38	1.48	1.54	1.57
$l$ of $U_8$ (mm)	1.73	1.74	1.75	1.76

ギャップ ( $g$ ), 幅 ( $w$ ) をそれぞれ 3.23, 0.2, 0.25mm に固定している。一方、パッチ長 ( $l$ ) と x 方向の周期 ( $p_x$ ) は、式 (1) に従って、各サブ MTS の所望の  $\theta_r$  に対してセル間で適切な位相差が得られるように調整する。また、シンプルな設計で反射角調整を実現すべく、図 2(b) に示すように、1 サイクルの位相変動のための単位セル (スーパーセル) の数を 8 セル ( $U_1 \sim U_8$ ) とした。これにより、素子の大きさを変えることで、容易に 360° の反射位相変化を発生させることができる。各サブ MTS におけるスーパーセルの構成の詳細を表 2 に示す。

ユニットセル構造とサブ MTS 構造の反射特性は、電磁界解析ソフトウェア「CST Microwave Studio<sup>(8)</sup>」を用いて解析を行った。

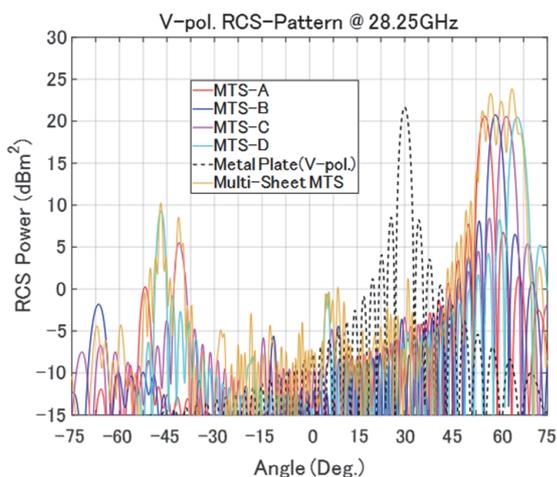
図 2(a) のユニットセル構造は、xy 平面上の周期構造として設定されている。垂直偏波の平面波と水

平偏波の平面波の両方を用いて、yz平面に対して30°の入射角で反射素子へ入射する。その後、適切な大きさの1パラメータ(表2に示す)を選択し、位相勾配を生成することによってサブMTS構成を構成する。

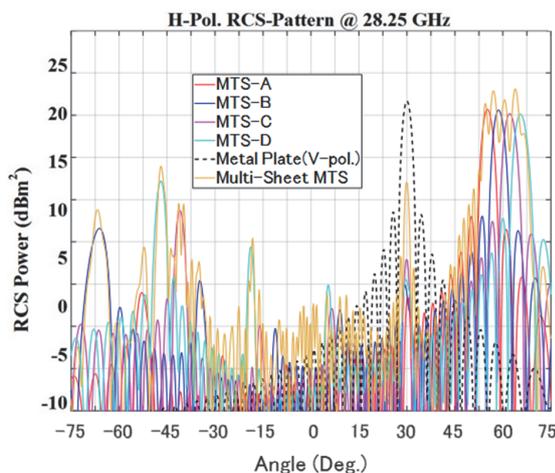
反射特性を明らかにするため、MTS-A, MTS-B, MTS-C, MTS-D, マルチシート構成の試験では、バイスタティックレーダー断面積(RCS)を設定した。同様に、MTS反射板の構造体には、入射角30°の垂直偏波および水平偏波の平面波が照射される。

図3は、28.25GHzにおける垂直偏波および水平偏波を用いたすべてのMTS反射板構成のRCSパターンの電磁界解析結果を示す。次に、金属板(230mm×180mm)の垂直偏波RCSパターンも電磁界解析を行い、開口面積からの利得算出の基準とする。

図3(a)と(b)の結果から、垂直偏波と水平偏波の



(a) 垂直偏波入射時



(b) 水平偏波入射時

図3 RCSパターン(電磁界解析値)

反射特性は、すべてのケースのMTS反射板構成でほぼ同じであることが確認できる。しかし、MTS-B, MTS-C, MTS-Dの水平偏波におけるRCSパワーは、垂直偏波の場合よりも約1dB低い。各サブMTSの反射角は、MTS-A, MTS-B, MTS-C, MTS-Dでそれぞれ54.5°, 58.6°, 62°, 65.4°と異なる反射角を示した。マルチシートMTS反射板の場合、垂直偏波と水平偏波の両方のケースで広いビームの反射指向性が得られていることが確認できる。この広いビームは、すべてのサブMTSの単一ビームを合成した結果から生成される。

4種類のサブMTSを製作し実測を行った。図4に、電波暗室内におけるRCSパターン測定の様子を示す。2つのKa-bandホーンアンテナを使用し、一つはMTS反射板へ入射する平面波を発生させる。もう一方は、MTS反射板からの反射電力を受信するために反射板を中心として2mの一定距離にて180°回転する。図5は、MTS反射板および金属板のRCSパターンの測定結果である。これらの結果は、金属板の測定のピーク値で正規化を行っている。この結果から、すべてのサブMTSの反射ビームの方向が電磁界解析の結果と同じ傾向にあることが確認できる。垂直・水平両偏波の反射角のピークは、MTS-A, MTS-B, MTS-C, MTS-Dでそれぞれ55.4°, 58.2°, 62.2°, 66.0°であった。金属板とMTSの受信電力について、各サブMTSの受信電力は金属板比-0.5~-1.8dBと変化している。しかし、水平面30°方向におけるMTSの鏡面反射について、シミュレーションと比較して大きくなっていることを確認した。これらの差異は、電磁界解析においてFR4基板の高周波数での特性設定が実用的でないためである。

次に、マルチシートMTSの広帯域動作を実用的に検証するため、図6(a)に示すように、鹿沼工場内

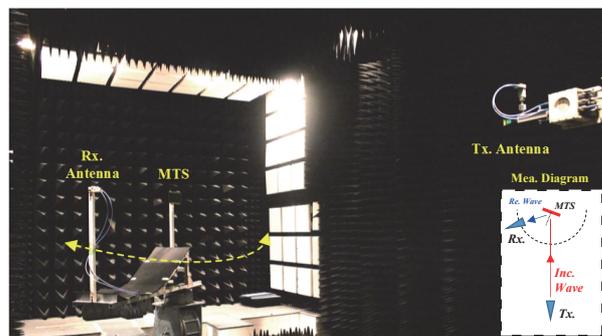


図4 RCSパターンの測定系

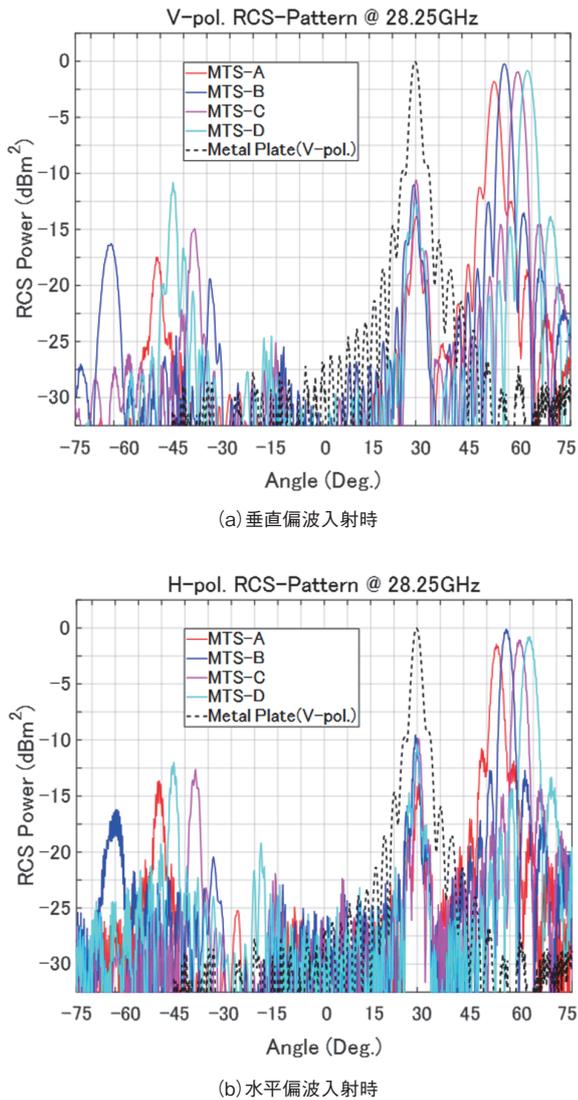


図5 RCSパターン(実測値)

に設置されたローカル5G実験局において、屋外の反射波測定を行った。基地局からの電波を直交する方向に反射させるために、金属板およびマルチシートMTS反射板を、送信アンテナと受信エリア中心のラインが直交する位置に配置する。ホーンアンテナを使って基地局から帯域100MHzの変調信号を放射する。その後、無指向性アンテナと5Gスペクトラムアナライザを用いてRSRP(Reference Signal Received Power:基準信号受信電力)値の測定を、垂直偏波の伝搬を用いて実施した。マルチシートMTS反射板による効果を確認するために、図6(b-d)に反射板を設置しない状態、金属反射板およびマルチシートMTS反射板を設置した際の3通りの測定結果を示す。反射板を設置しない場合、測定されたRSRPは図6(b)の右から左に向かって徐々に減衰している。これは、基地局と受信アンテナがNLOS(見通し外)環境となる場合のRSRPである。一方、金属反射板( $\theta_i = 45^\circ$ )を適用した場合には、RSRPの値が大きくなっていることが確認できる。そして、最も強いRSRPとなる位置は、反射板の位置と同じラインである中央の走査ラインにある。本稿で提案するマルチシートMTS( $\theta_i = 30^\circ$ )では、金属反射板と比較して広範囲でRSRPが向上していることがわかる。また、反射板を設置しない場合と比較して、マルチシートMTS反射板は、走査した面積( $6 \times 35\text{m}^2$ )の半分以上の面積のRSRPを向上できていることを確認した。

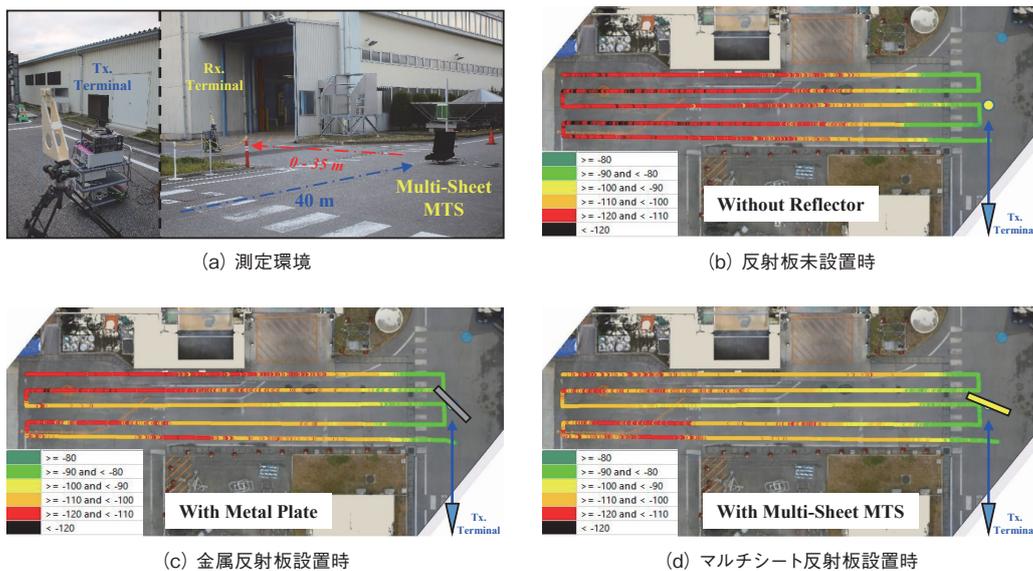


図6 反射板屋外実験の測定結果





**道下 尚文**  
防衛大学校  
電子情報通信学会・IEEE・日本シミュレーション学会会員  
教授・博士(工学)



**中林 寛暁**  
千葉工業大学  
電子情報通信学会・IEEE 会員  
准教授・博士(工学)



**長 敬三**  
千葉工業大学  
電子情報通信学会・IEEE 会員  
教授・博士(工学)