

論文

28GHz 帯ローカル 5G 向け偏波共用
ホイヘンスメタサーフェス反射板の開発Tanan Hongnara*
佐々木克守**
道下 尚文****佐々木隆吉**
佐藤 啓介***
中林 寛暁*****白澤 嘉樹**
大島 一郎***
長 敬三*****Development of Dual-Polarized Huygens' Metasurface Reflector
for 28 GHz Band Local 5G*Tanan Hongnara, Takayoshi Sasaki, Yoshiki Shirasawa,
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。当社ではローカル 5G のエリア改善を目的として、回折格子周期を利用したホイヘンスメタサーフェス (HMTS) 反射板を開発した。

本論文では、28GHz 帯の偏波共用 HMTS の設計手法とローカル 5G における応用例を紹介する。開発した HMTS は、回折格子周期となるスーパーセル 1 周期あたり 2 つのユニットセルのみでシンプルに形成されている。誘電体基板を用いた反射板であり、垂直偏波と水平偏波の共用を実現するため、反射素子には十字型分割共振器を使用した。ユニットセルが 2 種類のみであり、配列時は左右対称構造となる事から、一つの反射板で 2 種類の入射角を実現している。入射角 $\theta_i = \mp 10^\circ$ から $\theta_m = \pm 70^\circ$ の 2 種類の入射特性を有しており、容易な設置とコストの削減も期待できる。本 HMTS を不感地帯の天井等に設置することでローカル 5G のカバレッジエリアを拡大することが期待できる。

本論文は、2022 年 8 月に開催されたアンテナ・伝播研究専門委員会にて報告した "Dual-Polarized Bipartite Huygens' Metasurface with Anomalous Wave Reflection for Local 5G Application at 28.25 GHz" を加筆・転載したものである (copyright© 2022 by IEICE)。

Metasurface (MTS) reflector can freely design the direction and beam width of the reflected wave. We have developed a Huygens' metasurface (HMTS) reflector using a diffraction grating period for a local 5G area improvement.

In this paper, we introduce the design method of dual-polarized HMTS in the 28 GHz band and its application in local 5G. The developed HMTS is simply formed with two unit cells per supercell period, which is the period of the diffraction grating. It is a reflector using a dielectric substrate, and a cross-shaped split resonator is used for the reflecting element to achieve common use of vertical polarization and horizontal polarization. There are only two types of unit cells which have a symmetrical structure when arranged. And two types of incident/reflection angles are realized with one reflector. Two types of incident/reflection characteristics from incident/reflection angle $\theta_i = \mp 10^\circ$ to $\theta_m = \pm 70^\circ$, are expected to facilitate installation and reduce costs. By installing this HMTS on the ceiling of the dead

* 元電気興業

** 機器統括部 移動通信技術開発部

*** 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

zone, it is expected to expand the local 5G coverage area.

This paper is a revised version of “Dual-Polarized Bipartite Huygens’ Metasurface with Anomalous Wave Reflection for Local 5G Application at 28.25 GHz” reported at the Antenna and Propagation Research Committee held in August 2022. Yes (copyright © 2022 by IEICE).

1. はじめに

第5世代移動通信システム(5G)では、無線システムのスループットを大幅に向上させるために、ミリ波帯が割り当てられ、使用されている。ミリ波帯では電波の直進性が高く、障害物を容易に通過しないことから、不感地帯が発生しやすいため携帯電話ネットワークにおけるカバレッジホールの発生などといった課題がある⁽¹⁾。そのため、金属製の機器やパーティションなどによる電磁波の遮断が発生し、狭いサービスエリアであっても不感知帯が存在している⁽²⁾。

このような問題を解決するために、入射角と反射角が異なる異常反射を実現するパッシブ型のHMTSを用いて、送信端末(Tx)と受信端末(Rx)間のVLOS(Visual Line of Sight)を実現した。本HMTSは、消費電力が無く、導入・運用コストに優れている。さらに、MTSは平面構造でありながら任意の入射角を実現できるため、壁への貼付けなどといった薄型での実装が可能となる。

最近では、MTSを実現する手法の一つとして、スーパーセル1周期あたりの2つのユニットセルを持つHMTSが提案されている⁽³⁾⁽⁴⁾。この設計手法は、スーパーセル1周期あたりのユニットセル数を少なくしつつ、異常反射を実現することができる。そのため、従来のMTSと比較して、MTSの設計や最適化プロセスの複雑さを軽減することができる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。さらに、MTSの設計角度と回折格子周期の長さの関係を適切に選択することで不要伝搬モードを制限し、所望方向への高い反射性能を簡単に実現することができる⁽³⁾。

本論文では、28.25GHzにおいて2種類の入射角を持つ偏波共用HMTSの設計手法を提案し、ローカル5G向けの応用例を紹介する。開発したHMTSは、異なる反射位相を持つ2つのユニットセルでスーパーセルが構成され、シンプルな設計および最適化プロセスを実現する。さらに、スーパーセルは対称構造であるため、2種類の入射特性を有し、MTSの設置や応用の柔軟性が期待される。

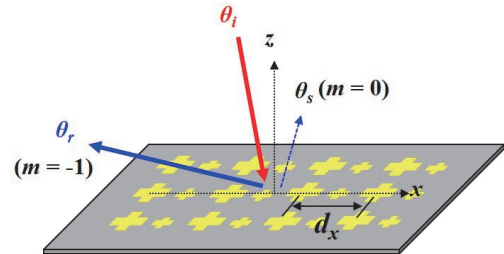


図1 HMTSの設計角度の考え方

2. MTSの設計と構成

図1は、xz面内で異常反射を実現するための設計角度の概念を示している。回折格子の周期(d_x)をx軸に並べて、入射角(θ_i)はMTS面の+z軸方向に近い角度とし、反射角(θ_r)は+z軸を対称に入射波と同じ面側に深い角度となるように設計する。このとき、適切なパラメータ選定により、ほとんどの反射電力が θ_r 方向に作用し、他の散乱モードが抑制される。

2.1 設計角度の決定

回折格子周期と散乱モード方向の関係から、開発したHMTSの入射角 θ_i とモード m の反射角 θ_{rm} は、 d_x を以下のように定義することで与えることができる。

$$d_x = \frac{m\lambda_0}{(\sin \theta_{rm} - \sin \theta_i)} \quad (1)$$

λ_0 は動作周波数における自由空間波長、 m は回折モード次数の整数値である⁽³⁾。今回のHMTSの設計では、入射角 θ_i を 10° 、反射角 θ_{rm} は -70° とし、 $m = -1$ で設計した。 θ_{rm} の負符号は、図1のように入射波と同じ面側(-xz面)に反射角が存在することを意味する。設計周波数は、日本のローカル5G周波数帯に割り当てられている28.25GHzとし、式(1)の計算から前述の入射角 θ_i と反射角 θ_{rm} から d_x は約9.54mmとなる。

2.2 セルの離散化と共振器設計

所望の反射角へ効率的に電力を伝達するためには、回折格子周期における MTS のユニットセルの反射位相と表面インピーダンスを適切に実装し、最適化する必要がある。従来は、表面特性の滑らかな変化を模倣するために、ユニットセルの反射位相を細かく離散化した設計が好まれていた。しかし、(7)で述べているように離散化 HMTS の設計は、スーパーセル 1 周期あたり少ないユニットセル数で高い電力効率を示している。この利点を活かして、スーパーセル 1 周期あたり 2 つのユニットセル (反射位相が 0° と 180° のように位相差が 180° となるユニットセルの組み合わせ) を十字型分割共振器で設計している。

文献(3)(4)で解析したように、スーパーセル 1 周期あたりの最小セル数 (N) は、HMTS の入射角 θ_i とモード m の反射角 θ_{rm} の関数であり、次式で与えられる。

$$N = 1 + \left\lfloor \frac{(1 - \sin \theta_i)}{|\sin \theta_{rm} - \sin \theta_i|} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{(1 + \sin \theta_i)}{|\sin \theta_{rm} - \sin \theta_i|} \right\rfloor \quad (2)$$

式(2)によって HMTS は、スーパーセル 1 周期あたり 2 つのユニットセルを使用するだけで実現することができる。図 2(a)は、開発した HMTS のユニットセル構造である。安価な FR-4 基板を用いており、誘電率は 4.3、誘電正接は 0.02 で、基板厚は 0.6mm である。そして、HMTS を通過する漏れ電力を避けるために、基板の裏面に銅製のグラウンド (GND) を取り付けている。

図 2(a)に見られるように、ユニットセルは垂直偏波と水平偏波の共用を実現するために十字型共振器を採用している。本設計では、スーパーセル 1 周期あたり 2 つのユニットセルのため、 d_x の半分の長さ

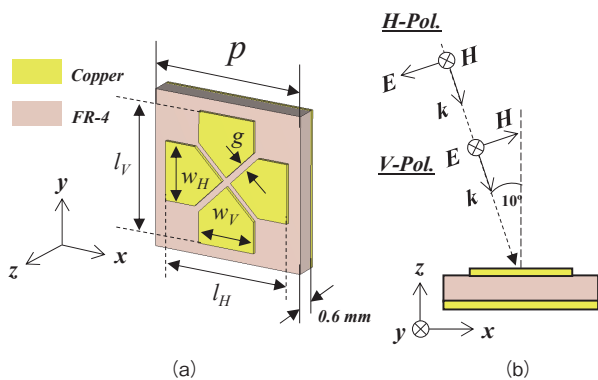


図 2 ユニットセルの構成と入射波励振の設定

とし、表面インピーダンスを制御するために垂直軸と水平軸のストリップの幅と長さを調整し、 l_v , w_v , l_h , w_h でパラメータ化した。

2.3 ユニットセル特性

シミュレーションの結果はすべて、CST studio suite シミュレータプログラム⁽⁸⁾を用いて行われたものである。ユニットセルの特性を解析するために、図 2(b)に示すように、垂直偏波および水平偏波の平面波がユニットセルの表面に対して 10° の角度で斜めに入射している。解析はユニットセル境界条件下の無限周期構造で行われる。図 3 は、設計したユニットセルの垂直偏波における反射振幅と反射位相を解析したものである。水平偏波については、ユニットセル構造の対称性からシミュレーション結果がほぼ同じになるため、示していない。28.25GHz において w_v , w_h , g をそれぞれ 1.8, 1.8, 0.2mm とし、 l_v と l_h を 2.1~4.6mm まで同時に変化させて解析した結果である。赤の一点鎖線で示すように、反射振幅は 0.8 より大きい。次に、青の点線で示した反射位相は 120° から -92° まで変化しており、 212° の位相変化が得られた。HMTS の設計では、2 つのユニットセル間で位相が 180° ずれた特性が要求される⁽⁴⁾。したがって、このユニットセルはすでに回折格子周期に十分な位相変化を満たしていることがわかる。

2.4 MTS の表面構造

図 4 は、バイスタティックなレーダー断面積 (RCS) 解析による散乱放射パターン (RCS パターン) を解析するためのスーパーセルの構成と表面構造を示している。図 4(b)に見られるように、MTS

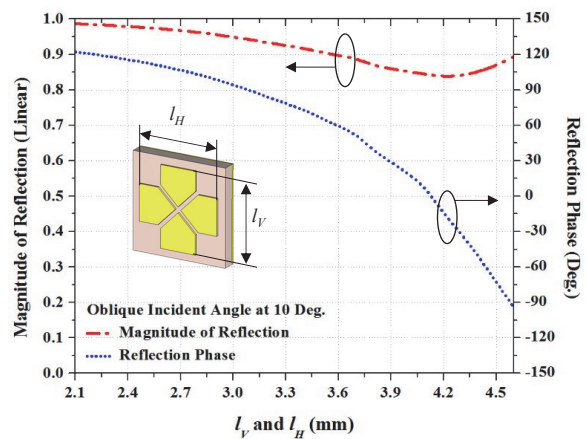


図 3 入射角度 10° の垂直偏波入射下でのユニットセル特性

は $209.88 \times 209.88 \text{mm}^2$ の正方形の面積で構成されている。図4に見られるように、MTSの表面はスーパーセルの配列から生成されており、2つの異なるサイズの共振器のユニットセル (U_1 , U_2) で構成されている。 U_1 と U_2 のサイズが異なることで、位相がずれた状態に対応する。

図4(b)に示すように、RCSパターンは入射角 θ_i の平面波を入射させて共振器を励振させて反射角 θ_m の反射波を生じさせることで得られる。偏波共用設計の検証のため、垂直偏波と水平偏波の両方のRCSパターンを解析する。

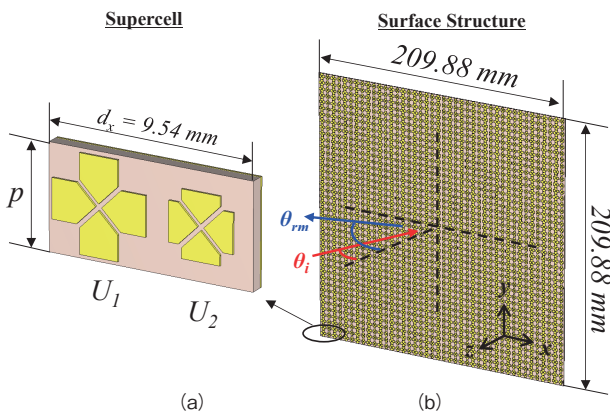


図4 スーパーセル構成とHMTSの表面構造

3. 結果及び考察

3.1 シミュレーション結果

表1は、スーパーセル構造のパラメータ概要である。まず、 U_1 と U_2 の初期設計パラメータ (Int. の列)

を選択した。この2列のパラメータは、垂直偏波と水平偏波の動作において互いに 180° の位相変化を与えることができ、各ユニットセルにおいて構造の対称性が保たれるように設計されている。図5は垂直偏波と水平偏波のシミュレーション結果であり、周波数 $28.20 \sim 28.30 \text{GHz}$ における初期設計パラメータの xz 平面内のRCSパターンを示している。このRCSパターンの軸設定は、図4(b)の表面構造で示されるように、角度(横軸)の負符号は $-x$ 軸から $+z$ 軸への角度掃引を意味する。逆に、 $+z$ 軸から $+x$ 軸への角度の変化は正符号で表される。

解析の結果、両偏波ともに2本の反射ビームが発生していることが確認された。RCSパターンから、 -10° の波が入射していることがわかる。左から1つ目のビームは、所望方向が -70° で入射波と同じ角度側(負符号の角度領域)にある。これは所望の回折モード次数 $m = -1$ の反射ビームである。一方、左から2つ目のビームは入射角による鏡面反射により生じたビームで、 $+10^\circ$ の角度で発生する。この鏡面反射モード ($m = 0$) は設計における不要反射であり、

表1 スーパーセル構造のパラメータ概要

Parameter	U_1 (mm)		U_2 (mm)	
	Int.	Opt.	Int.	Opt.
d_x	9.54			
p	4.77			
l_v	4.47	4.52	2.78	3.82
w_v	1.8	1.8	1.8	1.7
l_H	4.47	4.53	2.78	3.07
w_H	1.8	1.8	1.8	1.8

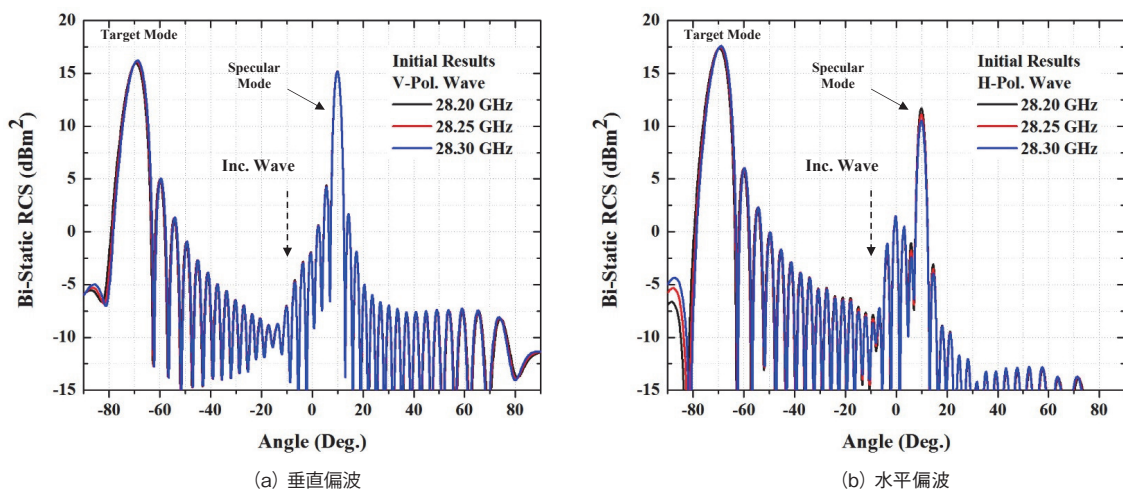


図5 HMTSの初期設計パラメータ(Int.)のRCSパターンのシミュレーション結果

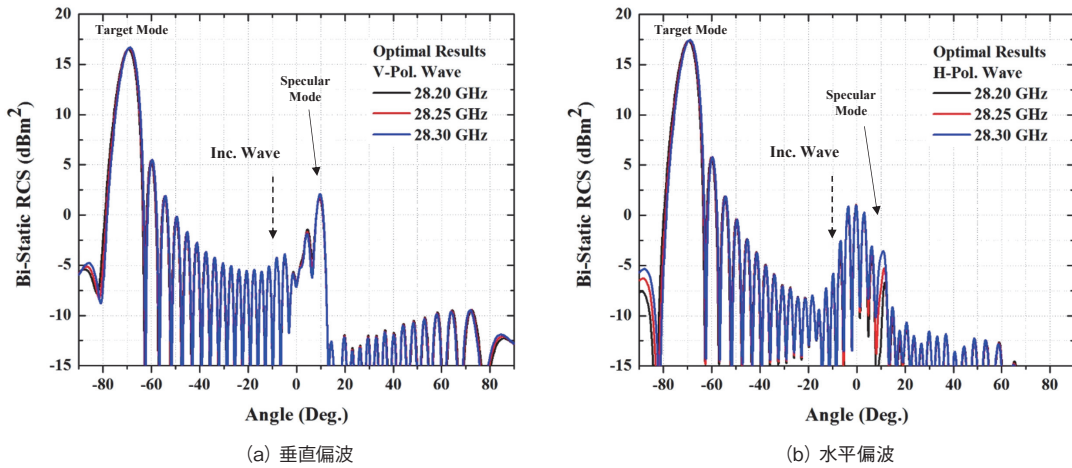


図6 HMTSの初期設計パラメータ(Opt.)のRCSパターンのシミュレーション結果

反射性能を低下させるサイドローブと考えることができる。

この不要反射を抑制するために、スーパーセル構造における U_1 および U_2 の構造パラメータを最適化する。このプロセスは、隣接するユニットセル間の結合によりずれた反射位相を所望の反射位相に修正するために行う。通常、サイズや形状の異なる複数の共振器を組み合わせて位相勾配型 MTS を実現する場合に必要となる⁽³⁾⁻⁽⁸⁾。その理由は、最初のユニットセル解析による反射位相解析では、基本的に周期的な構造配列によって解析されるからである。したがって、異なるサイズの共振器間の結合効果は考慮されない。

図6は、表1の最適パラメータ(Opt.の列)を用いたMTSのRCSパターンを解析したものである。両偏波ともに鏡面反射モード($m = 0$)の反射強度が大きく減少していることが確認できる。垂直偏波では、所望モード($m = -1$)の反射強度が0.7dB増加する一方で、鏡面反射モード($m = 0$)の反射強度は12.5dB減少している。一方、水平偏波では、鏡面反射モード($m = 0$)の反射強度が15dBと大きく減少しており、所望モード($m = -1$)の反射強度の減少は小さい。

また、HMTSのコンセプトにより2つの共振器間の基準位相は 0° と 180° の2つの反射位相を持つ相対的なものとなっている。これは所望モードの反射がない角度領域(図5の負符号の角度領域に所望波が反射する場合に正符号の角度領域を表す)でも同様の反射位相プロファイルを示すことを意味する。この特性を調べるために、入射波を $+10^\circ$ で入射させて解析した。図7に、28.25GHzにおける2つの入

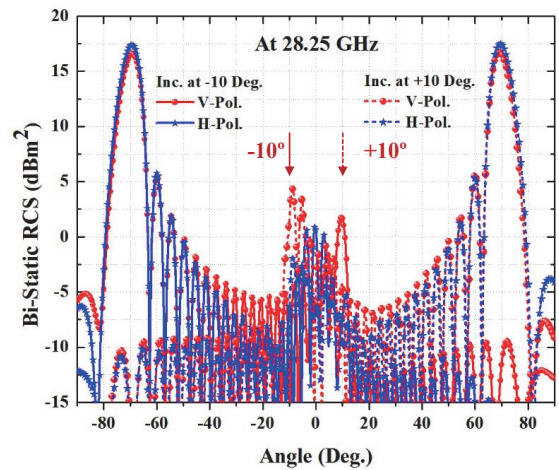


図7 HMTSの2つ入射波($\pm 10^\circ$)におけるRCSパターンのシミュレーション結果

射波($\pm 10^\circ$)における比較結果を示す。図からわかるように、2つの入射波のRCSパターンは正面方向(0°)を対称に同様の反射挙動が得られている。また、 -70° と 70° の所望モード($m = -1$)に対する反射強度は、両偏波で等しくなっている。鏡面反射モード($m = 0$)では異なる特性が見られたが、所望モード($m = -1$)と比較して反射強度が小さいため、この影響は軽微である。

3.2 測定結果と考察

図8は、試作したHMTSのバイスタティックRCSパターン測定の様子である。受信ホーンアンテナはHMTSの周りを円形に回転し、その反射波を受信する。HMTSの実用性を検証するために、反射板への入射角度が $\pm 10^\circ$ の2つで検証した。受信ホーンアンテナは -90° から $+90^\circ$ までの角度範囲で走査した。

図 9 と図 10 は、それぞれ -10° と $+10^\circ$ で入射した場合に測定した HMTS の RCS パターンである。測定結果から、開発した HMTS は、両偏波の -10° 入射(実線)および $+10^\circ$ 入射(破線)の両方で良好に動作することを確認した。さらに、2つの入射波($\pm 10^\circ$)で同様の反射挙動を示している。これらの測定結果は、図 7 のシミュレーション結果とよく一致している。

最後に、図 11 に示すように開発した HMTS をローカル 5G のユースケースに暫定的に適用することを検討した。この HMTS は部屋の天井に設置さ

れ、部屋の壁に設置された送信 (Tx.) 端末からの電波を変則的に不感地帯に反射させる。さらに、入射面の違いによる反射の特徴を利用し、左側送信端末 (Tx_{Left}) と右側送信端末 (Tx_{right}) の両方から反射させることができるため、反射板設置の自由度が高くなる。

4. む す び

本論文では、ミリ波帯で異常反射させる偏波共用の HMTS の設計手法を提案した。設計角度と回折格子の周期を適切に選択することで、不要伝搬モード

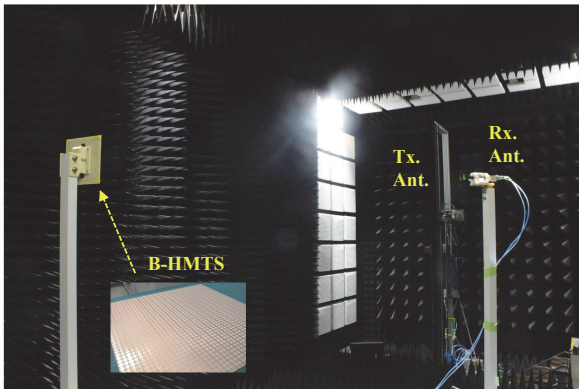


図 8 HMTS とバイスタティック散乱反射パターン測定の様子

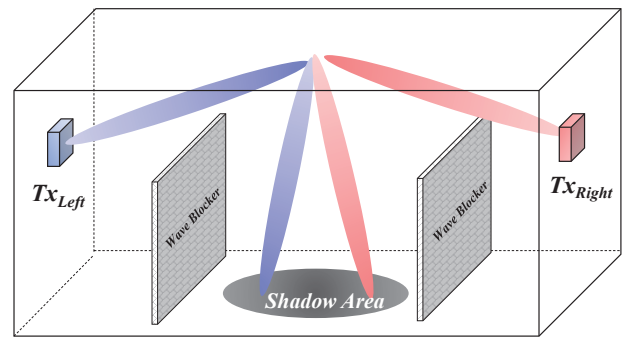


図 11 ローカル 5G のユースケースに向けた HMTS の適用例

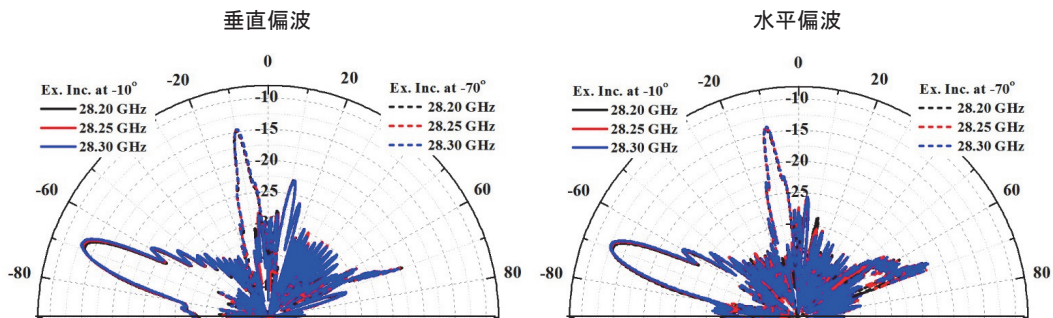


図 9 HMTS の -10° 入射における RCS パターン測定結果

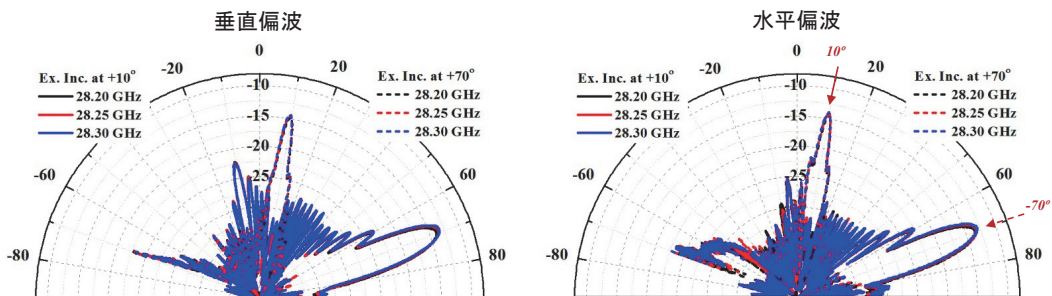


図 10 HMTS の $+10^\circ$ 入射における RCS パターン測定結果

を制限し、所望方向への高い反射性能を簡単に実現することができた。開発した HMTS は、シミュレーション結果と測定結果がよく一致していることから、設計手法の妥当性を示すと同時に、ローカル 5G アプリケーションの不感地帯を解決するための適用例を示すことで、有用性も示した。また、 $\theta_i = \mp 10^\circ$ から $\theta_m = \pm 70^\circ$ の対称な入反射特性を持ち、設置の複雑さを軽減してより良いコスト効率を実現可能としている。

文 献

- (1) S. Suyama, T. Okuyama, Y. Inoue, and Y., Kishiyama, "5G multiantenna technology," *NTT DOCOMO Technical Journal*, vol. 17, no. 4, pp. 29-39, 2016.
- (2) T. Hongnara, Y. Shirasawa, T. Sasaki, K. Sasaki, K. Sato, I. Oshima, N. Michishita, H. Nakabayashi and K. Cho, "Dual-polarized broad-beam reflective metasurface based on multi-sheet configuration for local 5G application at 28.25 GHz," in *Proc. the 15th European Conf. Ant. and Propag. (EuCAP 2021)*, Dusseldorf, Germany, 2021.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) A. D.-Rubio, V. S. Asadchy, A. Elsakka, and S. A. Tret'yakov, "From the generalized reflection law to the realization of perfect anomalous reflectors," *Science Advances*, Vol. 3, No. 8, Aug. 2017.
- (6) Y. Kato, K. Omori, and A. Sanada, "D-Band Perfect Anomalous Reflectors for 6G Applications," *IEEE Access*, Vol. 9, Nov. 2021, pp. 157512-157521.
- (7) C. Qi, A. and M. H. Wong, "Discrete Huygens' metasurface: realizing anomalous refraction and diffraction mode circulation with a robust, broadband and simple design," *IEEE Trans. Ant. Propag. (Early publish)*, Apr. 2022.
- (8) CST Microwave Studio 2022, France, www.3ds.com.

☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆

Tanan Hongnara
元電気興業



佐々木隆吉
平成 28 年入社
機器統括部 移動通信技術開発部
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



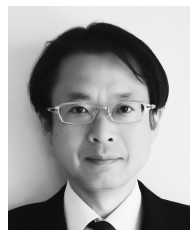
白澤 嘉樹
平成 31 年入社
機器統括部 移動通信技術開発部
移動通信用アンテナ及び電波伝搬の研究・開発に従事
電子情報通信学会会員



佐々木克守
平成 10 年入社
機器統括部 移動通信技術開発部
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)



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



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



長 敬三
千葉工業大学教授
電子情報通信学会・IEEE 会員
博士(工学)