

準ミリ波/ミリ波帯の柔軟なエリア構築に 向けたメタサーフェス技術

株式会社NTTドコモ ネットワークイノベーション研究所 来し

きたやま だいすけ **来山 大祐**



1. はじめに

第5世代移動通信システム (5G) が商用サービス開始となり、スマートフォンによる大容量コンテンツの利用だけでなく、RealとVirtualとの融合を目指したVR/AR/MR/SR等のxR技術や大多数のIoT (Internet of things) デバイスによる産業/インフラの高度化、移動の安全/効率化を実現するセルラー V2X (Vehicle to everything) 等様々な分野への5G技術の適用について期待が高まっている[1,2]。これまで我々は5Gから利用される準ミリ波帯において、5Gにおけるキーテクノロジーである超多素子アンテナ (Massive MIMO) によるビームフォーミングを実装した5G伝送装置を用いて様々な実証実験を実施し[3,4]、高速大容量・超低遅延・高信頼といった5Gのポテンシャルを示してきた。

一方これら実験を通して、セルラー方式の無線通信で準 ミリ波帯をより有効に活用する上での課題も見えてきた。5G で利用される28GHz帯は第4世代移動通信システム(LTE) 等で利用されている電波より周波数帯が高いため、電波伝 搬の直進性が強く、そのふるまいが光に近くなってくる。こ れは電波が物の陰に回り込む(回折する)性質が弱いこと を意味しており、基地局アンテナから見通し外となる建物、 樹木等の遮蔽物の陰をどのようにエリア化するかが大きな 課題となる。

そこで筆者らは、見通し外環境のエリア化及び通信品質の改善に向けて、波長よりも小さい構造体を周期的に配置することにより構成されるメタマテリアル/メタサーフェス技術の利用を検討している「5-7」。メタマテリアル/メタサーフェス技術を適用した反射板は、反射板の設置方向/サイズによらず反射波の伝搬方向及びビーム幅を自由に設計可能となるため、ビル壁面などに設置し特定の方向に反射波を誘導できる。これにより反射板を街中に設置する施工上の制約が低くなり、準ミリ波/ミリ波帯の高速・大容量エリア拡大が可能になる。本稿では、本技術の実環境における有効性を検証した結果を示す。また、メタサーフェス反射板のさらなる高度化に向けて筆者らが開発をした透明動的メタサーフェスについても簡単に紹介する^[8]。

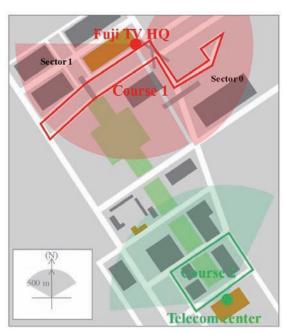
2. 5G testbed概要

本検証では参考文献 [4] で説明された基地局・移動局ビー ムフォーミングを実装した5G伝送実験装置を用いている。 本実験装置では28GHz帯において無線アクセス方式として OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) を上りリンク及び下りリンクで用いる。サブキャリア間隔は 75kHz、サブフレーム長は0.2msecとしている。Component Carrier (CC) 当たりの実効帯域幅は90MHz、サブキャリ ア数は1200であり、27.5GHzから27.9GHzにおいて4CCの キャリアアグリゲーション (CA) を行う。上りリンクと下り リンクのフレーム構成は対称であり、上下サブフレームの時 間比率は1:1とした。基地局(BS)と移動局(MS)はそ れぞれ垂直・水平の両偏波を受信可能なアンテナパネルを 搭載しており、最大のMIMOストリーム数は2となる。基地 局アンテナは64素子で構成され、48通りのアンテナビーム 候補を形成する。一方、移動局アンテナは16素子で構成され、 40通りのアンテナビーム候補を形成する。移動局はビーム選 択のために基地局から送信されるBRS (Beam Reference Signal) を用いてBRSRP (Beam Reference Signal Received Power) を算出し、上位のビームインデックスと対応する BRSRPをBSにフィードバックすることで最適なビームの組 合せが選択される。

3. 実環境における28GHz帯カバレッジ評価

はじめに、我々が東京都お台場地区にて実施した、28GHz 帯カバレッジ評価結果について紹介する(図1)。本評価では、フジテレビ本社社屋及びテレコムセンターに基地局アンテナを設置し、アンテナ高はそれぞれ114m、96mとした。1セクタ当たりのビームトラッキングの水平方向の範囲は±60°、垂直方向の範囲は±15°である。測定結果の内、見通しの有無の影響がよく確認できるコースの測定結果を図2に示す。Course1はフジテレビ本社社屋に設置した基地局から近く見通しの良いコースである。一方、Course2はテレコムセンターに設置した基地局から近いが、周辺の高い建築物等の影響で基地局正面方向以外がほぼ見通し外となるコースである。なお、移動局アンテナは測定車両の屋根に搭載しており、アンテナ高は約2mとなる。また、移動速度は約

特 集 アンテナ及び関連技術の最新動向



■図1. 実験サイトと測定コース(お台場)

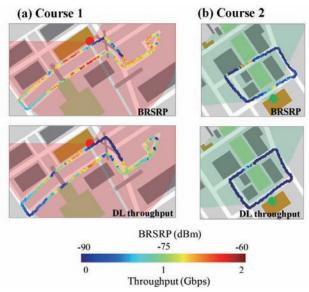
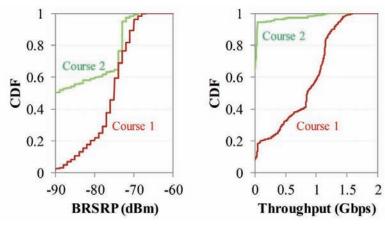


図2. 受信電力及びDLスループット分布の測定結果



■図3. 下りリンク伝送特性の累積分布図

20km/hとした。受信電力及び下りリンク (DL) スループット分布から、CourselではBS正面や各所にある歩道橋により遮蔽される見通し外環境及び垂直方向ビームトラッキングの範囲外となってしまう基地局足元を除き信号を受信できており、受信電力の変化に応じてスループットが変動することが確認できる。Couse2では周辺建物によって遮蔽されない正面方向を除き、ほとんどのエリアにて受信電力が低く、スループット特性も低い結果となった「個。図3にBRSRP及びDLスループットの累積分布図を示す。図示のとおり、CDF値60%においてCouselは約1Gbps、Course2はほぼ0Gbpsのスループットであり、見通し外が主なCourse2はCourse1

に対して5Gカバレッジが大幅に小さい結果となった。

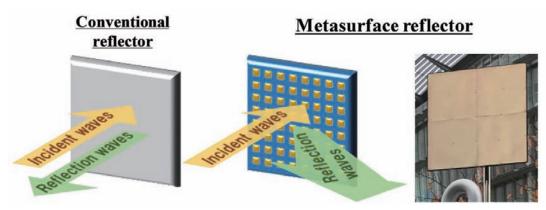
4. メタサーフェス技術を活用したエリア構築

4.1 メタサーフェス反射板

前セクションにて示したとおり、28GHz帯を含む準ミリ波/ミリ波帯をセルラー方式無線通信に適用する上で、遮蔽物による見通し外環境における5Gエリア構築が大きな課題となる。また今後、より高い周波数帯を利用すると予想される6G以降の世代においても本課題が生じることは容易に想像できる。

解決策の一つとして、反射波を積極的に活用して見通し





■図4. メタサーフェス反射板の概念図と本実験で用いたメタサーフェス反射板

外をエリア化することが考えられる。28GHz帯はLTE等で用いられてきた電波に比べて波長が約1cmと短いため、反射損失を抑制するために必要な、波長に対して十分大きいサイズの反射板を街中に設置することは現実的な手法といえる。しかし、通常の金属反射板を考えた場合、反射波を所望の方向に反射させるには電波の入射角を考慮して角度をつけて金属板を設置する必要があるため設置面積が大きくなる。さらに、十分なエネルギーを反射させるために反射板を波長に対して大きくすると反射波の半値角が非常に小さくなってしまう(40cm角の反射板で反射波半値角<5°:反射板-アンテナ間距離が反射板サイズに対して十分大きい、つまり反射板に対して平面波が入射する場合)。

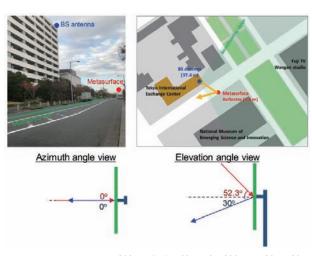
そこで我々は、波長に対して非常に小さな構造体をアレー状に配置し、配置場所によって構造体を異なる形状とすることで所望の散乱位相分布を設計し、設置角度やサイズによらずに任意の反射方向やビーム形状を実現することが可能なメタマテリアル/メタサーフェス技術の反射板への適用を検討しており、メタサーフェス反射板(図4)を検証した結果を紹介する^[5-7]。

4.2 メタサーフェス反射板の実証実験結果

実験は東京都お台場地区の東京国際交流館屋上(37m)に基地局アンテナを設置して行った。本建物正面の道路は設置建物自身が遮蔽となって通信品質が劣化してしまうため、BSから見通しとなる位置にメタサーフェス反射板を設置し、メタサーフェス反射板からの反射波により建物正面道路に5Gエリアを構築することを検討した。なお、本メタサーフェス反射板の製造はMetawave Corporationに協力いただいた。

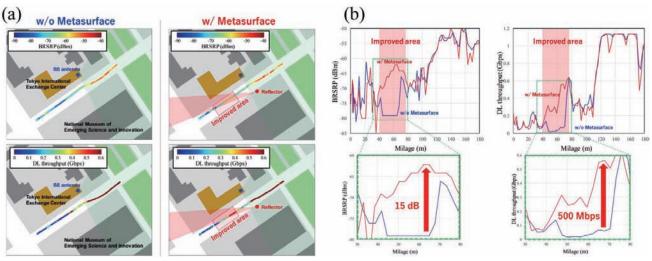
図4の右に本実験で用いたメタサーフェス反射板を示す。

本メタサーフェスの単位セル構造は基板表面にパッチタイ プの金属パターンが形成されており、裏面はベタの金属で 覆われている。裏面メタルを含む金属パッチの構造により 固有振動数が決定され、この固有振動数の周辺では散乱 位相が大きく変化する。そのため、エリア構築をしたい周 波数に対応した固有振動数を有する金属パッチパターンを 中心に、基板内でパッチサイズを分布させることにより任 意の反射波面を設計できる。本検証で用いたメタサーフェ ス反射板は垂直方向の入射角/反射角が約50°/30°となる ように設計されており、メタマテリアル反射板の設置高は 3.4mとした。また、十分な電力の反射波を形成するため、 反射板のサイズは80cm×80cmとしているが、入射波を平 面波と仮定した場合、本開口面積では非常に狭いビーム(半 値角:約2~3°) が形成され構築エリアが細くなってしまう ため、反射角だけでなく、反射波の半値幅も18°となるよ うに波面を設計している(図5)。

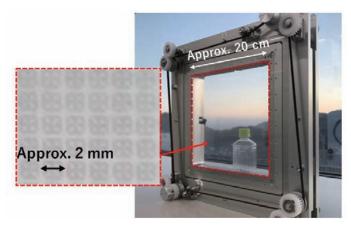


■図5. メタサーフェス反射板の実験環境及び反射板の入射/反射設 計角度

特集アンテナ及び関連技術の最新動向



■図6. 受信電力及びDLスループットの(a)分布(b)走行距離特性の測定結果



■図7. 透明動的メタサーフェスのプロトタイプ

図6 (a) に、移動局車両を国際交流館前にて走行させて 測定したBRSRPの分布を示す。メタサーフェス反射板を設 置しない場合、建物正面におけるBRSRPは-70dBm以下の レベルで推移しており、見通しエリア(>-50dBm)に比べ て受信電力が大きく劣化している。一方、メタサーフェス 反射板を設置した場合、建物正面におけるBRSRPが改善 し、またこれに伴ってスループット特性も向上していること が確認できる。図6 (b) に移動局車両の走行距離に対する BRSRP及びDLスループットの測定結果を示す。メタサー フェス反射板の設置により走行距離40~75mの35mの範囲 でBRSRPが向上しており、最大で約15dBの改善を確認し た。また、スループットについても、同様の範囲で改善が 見られ、最大で約500Mbpsの向上(反射板無:60Mbps⇒ 反射板有:560Mbps)を実現した。

4.3 透明動的メタサーフェス

上記のとおり、メタサーフェス反射板は見通し外における準ミリ波/ミリ波のエリア構築に対して有効であるが、このままでは設置場所・基地局位置・対策箇所から算出される入射/反射角に応じて設計する必要があり、反射板の裏が新たな見通し外となるといった課題もある。加えて、比較的大きな構造体であるため、街中の景観に溶け込むような意匠であることが求められる。そこで我々は、AGC株式会社の協力の下、高い透明性を維持しながら電波の反射・透過を動的制御可能な「透明動的メタサーフェス」も開発している(図7)。メタサーフェス基板を透明化したものに透明なガラス基板を重ね、重ねたガラス基板を微小に可動させることで、入射電波を透過するモード、電波の一部を透過し一部を反射するモード、すべての電波を反射するモードの3パターンを動的に制御することを可能とした。本メタ



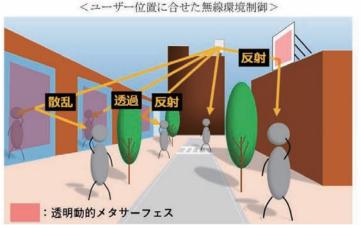
サーフェス動的化手法は、半導体を用いたこれまでの手法に対して、"透明性を維持したまま動的制御が可能"、"基板の大面積化が容易"という優位性があり、景観や既存のデザインを損なうことがないため、建築物や看板、広告、車両などへの設置の可能性が広がり、端末位置や伝搬環境の変化に応じて電波伝搬を制御することで適応的なエリア構築が期待できる(図8)。引き続き、透過/反射の割合だけでなく透過/反射方向の制御機能実装等、高機能化に取り組む予定である。

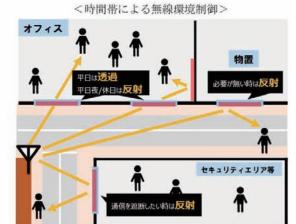
本稿では、準ミリ波/ミリ波帯で課題となる見通し外のエリア構築に向けた、メタサーフェス技術を適用した反射板の有効性を示した。さらに、メタサーフェスの特性を動的制御する取組みについても紹介した。本技術は5Gのみならず、利用周波数が高くなると予想される6G以降の無線システムにおいても、エリア構築における基盤技術の一つになると考えられる。

参考文献

- [1] NTT DOCOMO, INC. "DOCOMO 5G white paper, 5G radio access: Requirements, concept and technologies," Jul. 2014.
- [2] NTT DOCOMO, INC. "White Paper, 5G Evolution and 6G," Jan. 2020.
- [3] D. Kitayama, K. Tateishi, D. Kurita, A. Harada, M.

- Inomata, T. Imai, Y. Kishiyama, H. Murai, S. Itoh, A. Simonsson, and P. Okvist, "High Speed Mobility Experiments on Distributed MIMO Beamforming for 5G Radio Access in 28-GHz Band," IEICE Trans. Commun., vol. E102-B, No. 8, Aug. 2019.
- [4] D. Kurita, K. Tateishi, D. Kitayama, A. Harada, Y. Kishiyama, H. Murai, S. Itoh, A. Simonsson, and P. Okvist, "Indoor and Field Experiments on 5G Radio Access for 28-GHz Band Using Distributed MIMO and Beamforming," IEICE Trans. Commun., vol. E102-B, No. 8, Aug. 2019.
- [5] D. Kitayama, M. Yaita, and H. J. Song, "Laminated metamaterial flat lens at millimeter-wave frequencies," Optics Express, vol. 23, 18, pp. 23348-23356, 2015.
- [6] T. Maruyama, T. Furuno, Y. Oda, J. Shen, and T. Ohya, "Capacitance Value Control for Metamaterial Reflectarray Using Multi-layer Mushroom Structure with Parasitic Patches," ACES Journal, vol. 27, no.1, pp. 28-41, Jan. 2012.
- [7] D. Kitayama, D. Kurita, K. Miyachi, Y. Kishiyama, S. Itoh, and T. Tachizawa, "5G Radio Access Experiments on Coverage Expansion Using Metasurface Reflector at 28 GHz," 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), pp. 435-437, 2019.
- [8] 株式会社NTTドコモ,報道発表資料,"世界初、28GHz 帯5G電波の透過・反射を動的制御する透明メタサーフェス技術の実証実験に成功一高い透明性で景観を損ねずに柔軟な5Gエリアの拡大を実現一,"





■図8. 将来ユースケースのイメージ