5G evolution & 6G に向けた 透明 RIS 技術の研究

5Gの商用導入が世界的に開始され、現在は5Gのさらなる発展と しての5G evolutionと次世代移動通信システムである6Gに向けた研 究がさかんになってきています.本稿では、5G evolution & 6Gに 向けて議論されている「New Radio Network Topology」において重 要となるIREというコンセプトについて解説します.また、IREの 実現に向けて重要になるRISと、これを構成する要素技術であるメ タマテリアル/メタサーフェス技術に関して、NTTドコモの取り 組み内容を述べます.

ゆうと きたやま だいすけ はま 来山 大祐* 漝 優人 みやち けんすけ きしやま よしひさ 宮地 健介 岸山 祥久 NTT KJE

- リシ皮

 \times

XIAH-JIX

まえがき

NTTドコモは、2020年3月より第 5世代移動通信システム(5G)の商 用サービスを開始しました. これによ り VR (Virtual Reality)/AR (Augmented Reality)/MR (Mixed Reality)などのXR^{*1}の応用やIoT (Internet of Things)デバイスによ る産業/インフラの高度化など、さま ざまな分野への5G技術の適用に期待 が高まっています⁽¹⁾. このような状況 の中、NTTドコモは5Gで利用される ミリ波*²帯の電波を用いて、高速・ 大容量、低遅延、高信頼などの5Gの 可能性を実証してきました^{(2). (3)}.

一方,これらの検証を通して,セル ラ方式の無線通信でミリ波帯を有効活 用するうえでの課題も明らかになりま した.ミリ波帯は電波伝搬の直進性が 強く,その振舞いが光に近くなるため, 遮蔽物の陰への回り込み(回折)が小 さくなります.そのため基地局アンテ ナから見通し外となる場所をどのよう にエリア化するかが、ミリ波帯をセル ラ方式の無線通信で活用するうえでの 鍵となります.

5G evolution

\$ 66

本稿では5G evolution & 6G実現 に向けた重要課題の1つであるミリ波 帯のエリア形成について、有望なアプ ローチとして注目されているIRE (Intelligent Radio Environment) の概念を示し、IREの実現に必須とな る RIS (Reconfigurable Intelligent Surface) とその要素技術であるメタ マテリアル^{*3}・メタサーフェス^{*4}技 術について、NTTドコモの取り組み 内容を通して解説します.

IRE & RIS

IRE

近年、ミリ波帯における見通し外カ バレッジの課題に対して、電波環境を 適応的・動的に制御しようと試みる IREに向けた研究がさかんになってい ます⁽⁴⁾.NTTドコモが発表した第6 世代移動通信システム(6G)に向け たホワイトペーパー⁽¹⁾においても、ネッ トワークとの接続経路を増やすような 新しい無線ネットワークのかたち 「New Radio Network Topology」 が提言されており、その中で電波環境 の制御が議論されています. 遮蔽物に より電波が遮られてしまうという課題 は、送受信機技術の進化だけでは解決 が困難であり、新たな無線ネットワー ク体系を構築する必要があります.

そこで,従来考えられていた無線環 境は制御不可能であるという仮定から 脱却し,制御可能な要素とみなすこと で無線ネットワークの大幅なパフォー マンス向上をめざす検討が精力的に行 われています.このようなアプローチ は,これまでの無線ネットワーク体系 との概念的な違いを強調するために、 「インテリジェント無線環境(IRE)」 や「スマート無線環境(SRE:

- *1 XR: VR, AR, MRといった仮想空間と現 実空間との融合で新たな体験を提供する技 術の総称.
- *2 ミリ波:周波数帯域の区分の1つ.30 GHz から300 GHzの周波数であり、5Gで使用さ れる28 GHz帯を含めて慣習的にミリ波と呼 びます。
- *3 メタマテリアル:電磁波に対して自然界の 物質にはない振舞いをする人工物質のこと.
- *4 メタサーフェス:波長に対して小さい構造 体を周期配置して任意の誘電率・透磁率を 実現する人工媒質(メタマテリアル)の一 種で、構造体の周期配置を2次元とした人 工表面技術。

 ^{*} 本特集は「NTT DOCOMOテクニカル・ジャー ナル」(Vol.29 No. 2, 2021年7月)に掲載され た内容を編集したものです.
 ※ 現、NTT先端集積デバイス研究所





Smart Radio Environment)」と呼 ばれています. IREの概念図を図1に 示します. IREにおいては,例えば遮 蔽物がある場合には,送信機(Tx: Transmitter),受信機(Rx: Receiver)だけでなく伝搬チャネル *⁵(H)も含めた最適制御をすることで, 遮蔽物の迂回が可能な伝搬ルートを確 保します.

RIS

RISは、前述した IREを実現する ための重要技術です.RISは電磁波を 散乱する多数の素子で構成され、面的 な散乱特性の分布を設計・制御可能な 「メタマテリアル・メタサーフェス技 術」が利用されることが多いです.ま たメタサーフェスは薄い板形状であり、 ベース材料の選択次第では柔軟性があ るシートの形状で作製することも可能 なため、構造物に沿ったかたちでの設 置が可能です.このため、既存の構造 物の形状を維持したまま電波の散乱特 性を制御できます.RISは一般的に、 以下の動作を定期的に繰り返すことに より無線環境を適応的に制御すること が想定されています.

RISの動作を決定するために必要な無線チャネルの特性を推定
 所望の伝搬チャネルが得られるように、推定された情報に基づいてRIS表面の散乱強度・位相分布を制御

本手順の具体的な実装についてはさ まざまなアプローチが研究されていま す. なお, RISと同様の技術を指す用 語としてLIS (Large Intelligent Surface) や,反射波の制御のみに着 目したIRS (Intelligent Reflecting Surface) などがあります.

(1) RISサイズの影響

基地局(BS:Base Station) - 移 動局(MS:Mobile Station)間が見 通しではなく、反射板やリピータ*⁶な どで電波を中継する場合(BS - 反射 板など - MS)、パスロス*⁷が「BS -反射板など」と「反射板など - MS」 の2回発生します、伝搬による電波の エネルギー密度の低下量は波源に近い ほど大きくなります、そのため、合計 の経路長が同一であったとしても、「BS - MS」のパスに比べて「BS - 反射板 など - MS」のパスのほうが、通常パ スロスが大きくなり受信電力の低下を 招きます. この傾向は RIS に対しても 当てはまります.

RISを介するパスロスは通常の金属 反射板と同様にそのサイズに影響され ますが、RISの場合はサイズだけでな く位相制御の方法によってもパスロス が異なります。そこでまずは、RISサ イズが受信電力へ与える影響につい て、RISを介することにより生じる2 回のパスロス(二重パスロス)と同一 経路長の直接波のパスロスとの関係を 解析した結果を基に紹介します⁽⁵⁾、本 解析では、以下について計算しました。

- BS MS間の距離が200 mで直
 接波を受信する場合
- ・BS RIS間の距離が100 m, RIS
- *5 伝搬チャネル:無線通信の個々の通信路. ここでは各送受信アンテナ間の通信路.通 信路の特性は伝達関数Hにより表現されます.
- *6 リピータ:基地局/移動局からの信号を電 力増幅して移動局/基地局への送信を行う 物理層の中継機器.
- *7 パスロス:送信電力と受信電力との差分から推定される伝搬経路損失.



図2 RISサイズとパスロスの関係

 MS間が100 mで、RISを介し たパス以外は存在しない場合(合 計の経路長200 m)

計算機シミュレーションによって求 めた、28 GHz帯におけるRISサイズ と各径路におけるパスロスの関係を図 2に示します.なお、本計算では、 RISの形状を正方形、反射率を100% とし、BS - RIS - MSは同一直線上 にあると仮定します.実際は同一直線 上にはならず、RISをBS/MSに対し て角度を付けて設置することが想定さ れ、その際は角度が付いた分、実効的 な面積が小さくなります.

特殊な位相制御を実施しない伝搬方 向のみの制御(図2の青線)に着目す ると、RISがあるサイズ(図中①)よ り小さい場合には同一経路長の直接波 のパスロスに対してRISを介した二重 パスロスが著しく大きいことが分かる 一方で、①よりRISサイズが大きくな ると、二重パスロスが同一経路長の直 接波のパスロスに漸近していく様子が 確認できます. なお、後述するMSの 受信電力が最大となるようにRISを最 適制御した場合の二重パスロスが図2 の赤線となり、この最適制御をした二 重パスロスと直接波のパスロスが同一 となる図中①のRISサイズを解析的に 求めると, RISの1辺の長さがフレネ ル半径*8となります、図に示すとお りRISを最適制御しない場合であって も、直接波のパスロスと同等のパスロ スとなるRISサイズはフレネル半径と ほぼ一致しており、RISが本サイズよ りも大きければ同一経路長の直接波と 同等の電力を受信できることになりま す (図2の青線).

なお、RISサイズが増加して二重パ スロスが直接波のパスロスに漸近して いく過程でパスロスが増減するのは、 奇数次と偶数次のフレネルゾーン*⁹ を介した信号が受信点において互いに 打ち消し合うことに起因します.

(2) RISによる位相制御の効果

BS - RIS - MSの伝搬パスを, RIS を構成する素子ごとに分解して考え, 受信点において各パスの波の位相が一 致するようにRISを位相制御すること により, BS - RIS - MS経路の受信 電力を最大化できます(図2の赤線). このように最適制御をすることにより, 受信電力が直接波パスの値に収束する ことなくRISサイズと正の相関を持つ ようになります. なお, RISサイズが

^{*8} フレネル半径:第1フレネルゾーン(*9参照) の半径.

^{*9} フレネルゾーン:送受信点間の最短距離(こ こではRISを介した最短距離)に対して経 路長差が半波長以下,つまり信号の位相差 がπ(rad)以下となる範囲を第1フレネルゾー ンと言います.経路長差が半波長のn-1倍 以上でn倍以下の範囲を第nフレネルゾー ンと言い,同一フレネルゾーンを介する信 号は互いに強め合って合成されます.



フレネル半径程度以下であれば、従来 の方向のみの制御(図2の青線)と最 適な位相制御による差はほとんどみら れないため、方向のみの制御で十分です.

RISを受信電力の観点で最適制御す る場合は、BISの各素子における位相 変化量を最適な値に設定する必要があ り、制御が複雑となる可能性がありま す. そこで、より簡易な制御の実現に 向けて、方向のみの制御に対して、 0/π (rad) の2 値の位相補正のみ を加えることで受信電力を大幅に改善 する手法についても紹介します. 図2 に示したように、方向のみ制御の場合、 RISサイズの増大に伴ってパスロスは 増減を繰り返します. そこで、この原 因となっている偶数次のフレネルゾー ンを介した波の位相をπ(rad)シフ トさせる (Fresnel shift) ことで受 信電力が著しく改善します(図2の緑 線). このFresnel shift法は、いず れの距離に位置するユーザに対して も、最適制御した場合と同様にRISサ イズに応じた受信電力の向上が可能で あることが分かります.

透明RISの実現に向けた メタサーフェス技術の検討

前述したとおりメタマテリアル・メ タサーフェス技術は、RISを実現する ためによく利用される技術です. メタマテリアルは、電磁波に対して 図3 メタサーフェス技術を用いたRISの概念図

その波長よりも十分に小さい構造を周 期的に配置することで、その人工周期 構造体が実効的に負の屈折率を有する 材料として振る舞うなど、通常の物質 では実現できない特性が得られること から、2000年ごろからその技術が精力 的に研究されています⁽⁶⁾. 当初, メタ マテリアル技術の実証はマイクロ波帯 (5 GHz) にて行われましたが、2010 年ごろからはミリ波・テラヘルツ波*10 帯での検討がさかんになってきていま す⁽⁷⁾. これは、ミリ波・テラヘルツ波 帯のメタマテリアルを構成する素子構 造が、mm~umオーダと既存の製造 プロセスで容易に作製可能なサイズで あること、従来の無線通信で利用され ている周波数帯と同様に、金属の電気 抵抗をほぼ無視できる周波数領域であ ることなどが要因と考えられます.

なお、メタマテリアルが3次元の人 工周期構造であるのに対して、2次元 の人工周期構造体はメタサーフェスと 呼ばれることが多いです、メタサー フェス上の反射位相分布を制御するこ とで、反射波の伝搬を制御することが できます(図3).

現在,メタマテリアル・メタサーフェ ス技術は,各種研究機関の6G向けホ ワイトペーパーにおいて重要な技術と して記載されています.

そこで以下では、NTTドコモにおけ るRISの実現に向けたメタサーフェス 技術の取り組み内容について解説します.

■透明動的メタサーフェス

NTTドコモでは、2018年から見通 し外におけるミリ波のエリア構築に向 けて、動的な制御を考えない静的なメ タサーフェス反射板について検討して います⁽⁸⁾.しかし、この際に検討した メタサーフェス反射板は、設置場所・ 基地局位置・対策個所から算出される 入射・反射角に応じて反射位相分布を 設計する必要があり、また反射板の裏 が新たな見通し外になるといった課題 がありました.加えて反射板は、街中 の景観に溶け込むような意匠であるこ とも求められます.

そこで、私たちはAGC株式会社の 協力の下、RISのプロトタイプとして、 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」を開発・検討してい ます⁽⁹⁾(**図4**).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、ガラス基板を微動させることで、 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の3パ ターンを動的に制御することを可能と しました.

従来のメタマテリアル・メタサーフェ

 ^{*10} テラヘルツ波:1 THz前後の電磁波の呼称.
 100 GHzから10 THzの周波数を指すことが 多い.



ス動的化手法としては、金属パターンの抵抗・電気容量成分を、半導体素子を用いて制御する方法が主流でした. 今回の透明動的メタサーフェスの動的化手法は、半導体素子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、設置の際に景観や既存のデザインへの影響を抑えることができます.

実証実験においては、透過モードの 際に透過率約-1.4 dB以上、反射モー ドの際に透過率-10 dB以下(これよ り計算される反射率:-1 dB以上) の性能を400 MHz以上の帯域で達成 できることを確認しています(図4).

今後は、透明RISの実現に向けて透 過・反射方向の制御機能の実装などさ らなる高機能化を検討していきます.

■透明メタサーフェスレンズに よる窓の電波レンズ化

ミリ波帯の電波は,現在LTEで使用されている周波数帯や,Sub6*¹¹帯の電波と比較し,直進性が高く,減衰

図4 透明動的メタサーフェスの取り組み

しやすいという特徴があります.その ため、屋外基地局アンテナから発信された電波は建物の窓ガラスに到達する までに減衰し、さらに減衰した微弱な 電波は広がることなく屋内に入り込む ため、屋外基地局アンテナによる屋内 のエリア化は困難となります.

そこで、屋内側から窓ガラスに貼付 け可能なフィルム形状で、窓ガラスを 通るミリ波を屋内の特定の場所(焦点) に集めることができる「透明メタサー フェスレンズ | をAGC株式会社と共 同で開発しました⁽¹⁰⁾.窓ガラス全面 を通る微弱な電波を焦点に集めること で電力を高めることができるため、焦 点位置にリピータやリフレクタ*12. RISなどのエリア改善ツールを置くこ とで, 屋外の基地局アンテナによる建 物内のエリア化が実現できると考えて います (図5). 本メタサーフェスレ ンズを用いた実証実験では、焦点にお ける受信電力が通常の透過ガラスを用 いた場合に対して24 dB以上向上する ことを確認しています.

さらに、 焦点を動的に制御する機能 についても検証しました。 従来 電波 の透過・反射波方向を制御する際は. 同一の素子を均一に配列することでメ タサーフェスを構成し、素子ごとに異 なる制御信号を与えることで実施しま した. 今回の動的メタサーフェスレン ズでは、4種類の構造の異なる素子を 適切に配置することで, 全素子に同一 の制御信号を与えたとしても、焦点位 置を切替えられること(今回は単焦点 ⇔2 焦点の切替え) を実証しました (図) **5**). 単焦点モードにおいては. 焦点 1の受信電力が焦点2の受信電力に対 して11 dB高い結果となっており、焦 点1のみが焦点として機能していま す.一方で、2 焦点モードにおいては、 焦点1と焦点2の両焦点にて、単焦点 モードの焦点2によりも受信電力が6

 ^{*11} Sub6:周波数帯域の区分の1つ. 3.6 GHz から6 GHzの周波数を持つ電波信号.

^{*12} リフレクタ:本稿では、従来の金属反射板 やメタサーフェス反射板を含めてリフレク タと呼称します.



図5 透明メタサーフェスレンズによる窓の電波レンズ化

dB高くなっており, 焦点が2つ形成 されていることが分かります. 制御が 簡単にできることで, 大きな面積のメ タサーフェスレンズでも焦点を動的制 御できる可能性があります.

あとがき

本稿では、5G evolution & 6G実 現に向けた課題の1つであるミリ波帯 における見通し外力バレッジについて, 有望なアプローチとして、無線環境の 適応的な制御を試みるIREの概念を示 し、IREの要素技術であるRISとその 基となるメタマテリアル・メタサーフェ ス技術について解説しました. ある有 限の面積を有したリフレクタやRISで 伝搬環境に影響を与える場合、その面 積が波長に対して大きいほど、つまり 周波数が高いほど制御性が増します. ここで解説した技術は5Gのみならず, 利用周波数がより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1つに なることが期待されます.

今後は、本稿で解説したRIS技術の

実環境における効果の実証に取り組む とともに、6Gに向けて、RISのさら なる高周波数化を検討していきます。

■参考文献

- https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/ technology/whitepaper_6g/index.html
- (2) 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, August 2019.
- (3) 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, August 2019.
- (4) M. D. Renzo, A. Zappone, M. Debbah, M. S. Alouini, C. Yuen, J. de Rosny, and S. Tretyakov : "Smart Radio Environments Empowered by Reconfigurable Intelligent Surfaces:How It Works, State of Research, and The Road Ahead," IEEE Journal on Selected Areas in Commun, Vol.38, No.11, pp.2450-2525, Nov. 2020.
- (6) D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz: "Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity," Phys. Rev. Lett., Vol.84, No.18, pp.4184-4187, May 2000.
- (7) D. Kitayama, M. Yaita, and H.-J. Song: "Laminated metamaterial flat lens at millimeter-wave frequencies," Opt. Express, Vol.23, pp.23348-23356, Sept. 2015.

- (8) 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 APMC, pp.435-437, 2019.
- (9) 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," Jan. 2020.
- (10) NTTドコモ報道発表資料: "メタサーフェス 技術により窓ガラスの電波レンズ化に世界 で初めて成功," Jan. 2021.



(左から) 来山 大祐/ 濱 優人/ 宮地 健介/ 岸山 祥久

今回紹介した技術はパートナーとの密 な連携により創出されました. これから もNTTドコモR&D, NTT R&D, そし てパートナーとの連携を推進し,本技術 により5G evolution & 6Gの発展に貢献 していきます.

◆問い合わせ先

NTTドコモ R&D戦略部 E-mail dtj@nttdocomo.com