

5G evolution & 6Gに向けた 透明RIS技術の研究

6G-IOWN推進部

きたやま	だいすけ	はま	ゆうと
来山	大祐†1	濱	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

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る。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する。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、ドコモの取組み内容を述べる。

1. まえがき

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る [1]。このような状況の中、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上での課題も明らかになった。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）が小さい。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上での鍵といえる。

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

©2021 NTT DOCOMO, INC.

本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

本誌に掲載されている社名、製品およびソフトウェア、サービスなどの名称は、各社の商標または登録商標。

†1 現在、日本電信電話株式会社 NTT先端集積デバイス研究所

*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。

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、ドコモの取組み内容を通して解説する。

2. IREとRIS

2.1 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る [4]。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形「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る。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る。

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、制御可能な要素と見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目指す検討が精力的になされている。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: Smart Radio Environment)」と呼ばれている。IREの概念図を図1に示す。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認する。

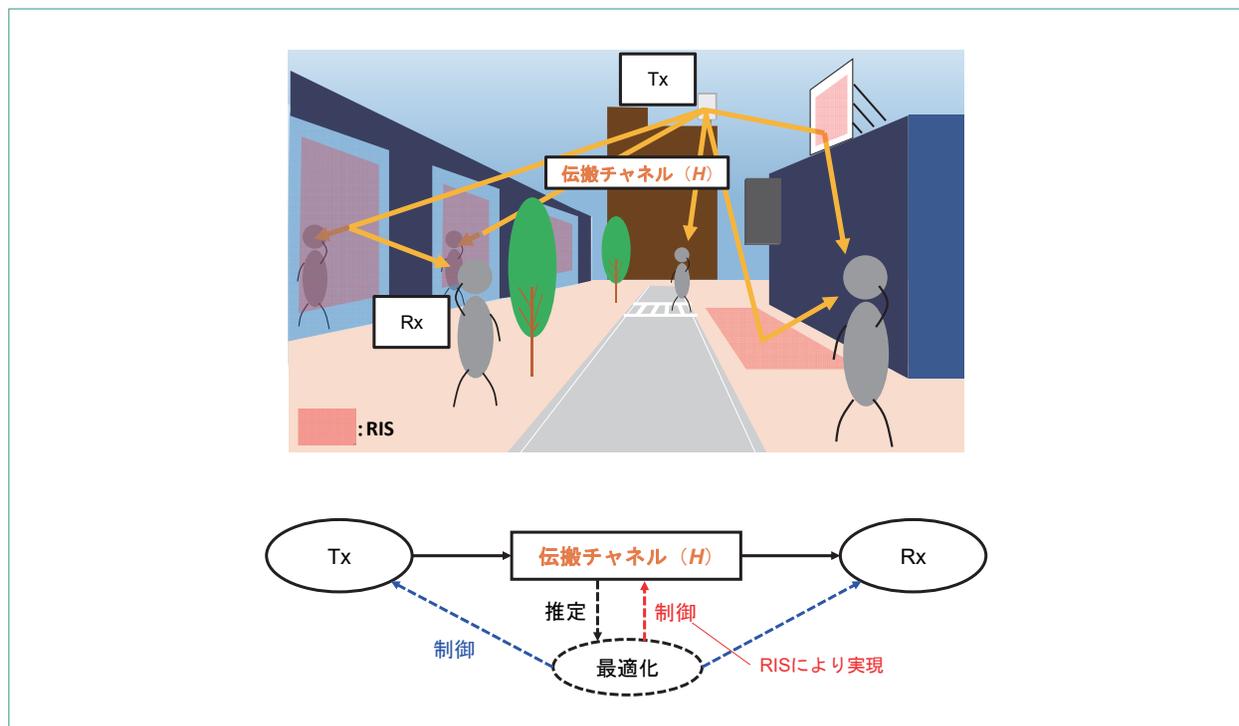


図1 IREの概念図

- *2 ミリ波：周波数帯域の区分の1つ。30GHzから300GHzの周波数であり、5Gで使用される28GHz帯を含めて慣習的にミリ波と呼ぶ。
- *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。

- *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 により表現される。

2.2 RIS

RISは、上記IREを実現するための重要技術である。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。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、構造物に沿った形での設置が可能である。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る。これはTx - 伝搬チャネル - Rxのうち、伝搬チャネルを制御していることを意味する。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る。

- ①RIS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
- ②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る。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) などがある。

(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回発生する。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い。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く。この傾向はRISに対しても

当てはまる。

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るが、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る。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 (以下、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する [5]。本解析では、以下について計算した。

- (a)BS - MS間の距離が200mで直接波を受信する場合
- (b)BS - RIS間の距離が100m、RIS - MS間が100mで、RISを介したパス以外は存在しない場合 (合計の経路長200m)

計算機シミュレーションによって求めた、28GHz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する。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る。

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る。なお、後述するが、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となる。図に示すとおりRISを最適制御しない場合で

*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。

*8 フレネル半径：第1フレネルゾーン (*9参照) の半径。

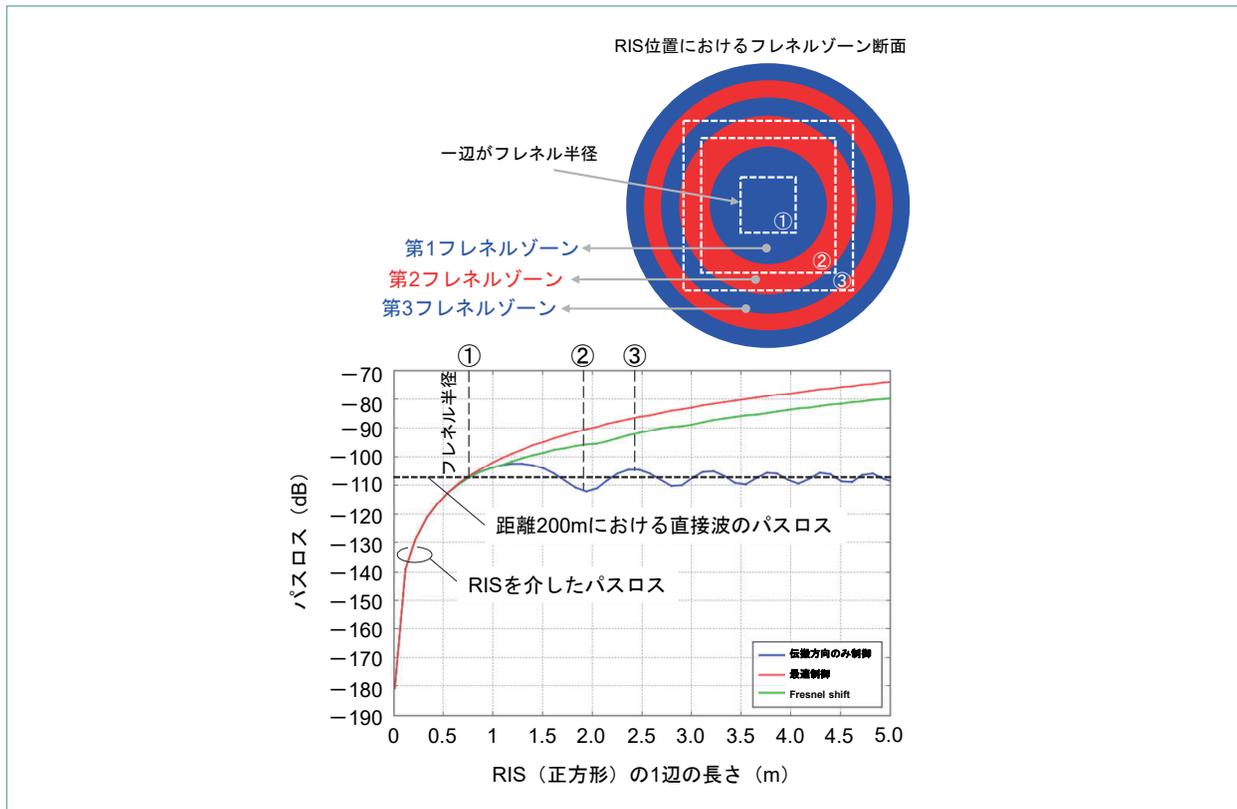


図2 RISサイズとパスロスの関係

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る（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する。

(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

できる（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もつようになる。なお、RISサイズが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見られないため、方向のみの制御で十分である。

RISを受信電力の観点で最適制御する場合は、上記のとおりRIS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る。制御が複雑となる可能性がある。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、 $0/\pi$ (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する。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

*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う。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る。

スロスは増減を繰り返す。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（以下、Fresnel shift）ことで受信電力が著しく改善する（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ーに対しても、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る。本手法の詳細は文献 [5] を参照されたい。

3. 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ある。

メタマテリアルは、電磁波に対して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を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る [6]。当初、メタマテリアル技術の実証はマイクロ波帯（5GHz）にて行われたが、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る [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～ μ m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る。

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。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る（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る。

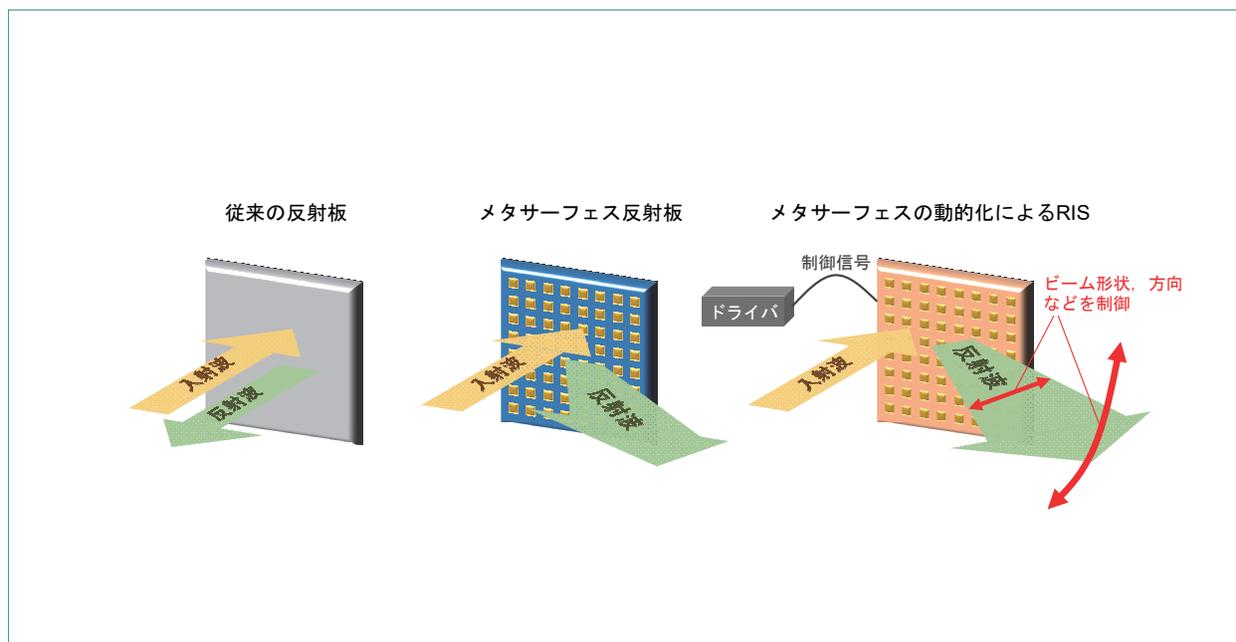


図3 メタサーフェス技術を用いたRISの概念図

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

そこで以下では、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組み内容について解説する。

3.1 透明動的メタサーフェス

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る [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・対策箇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った。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る。

そこで、我々は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／検討している (図4) [9]。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、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。

従来のメタマテリアル／メタサーフェ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あった。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」「基板の面積積化が容易」という優位性があり、設置の際に景観や

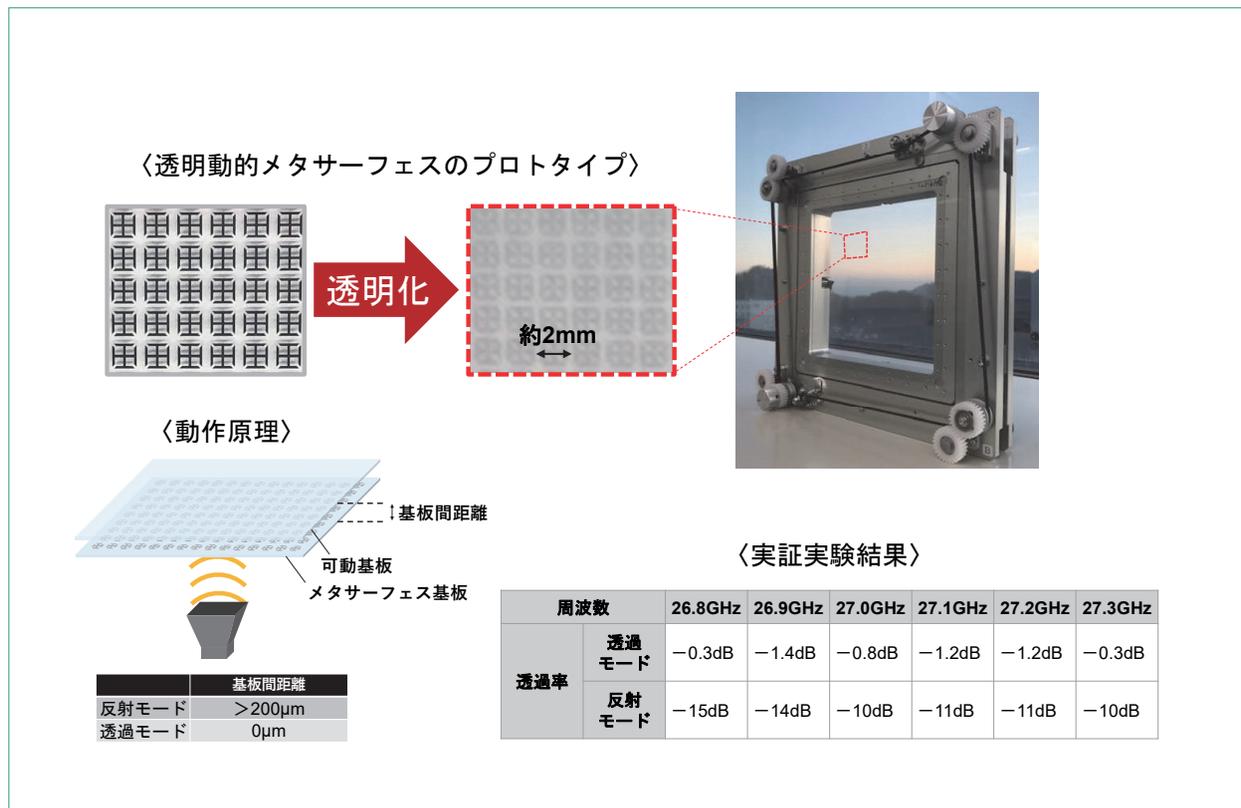


図4 透明動的メタサーフェスの取組み

既存のデザインへの影響を抑えることができる。

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

3.2 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、減衰しやすいという特徴がある。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る。

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（以下、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る（図5、6）。本メタサーフェスレンズを用いた実

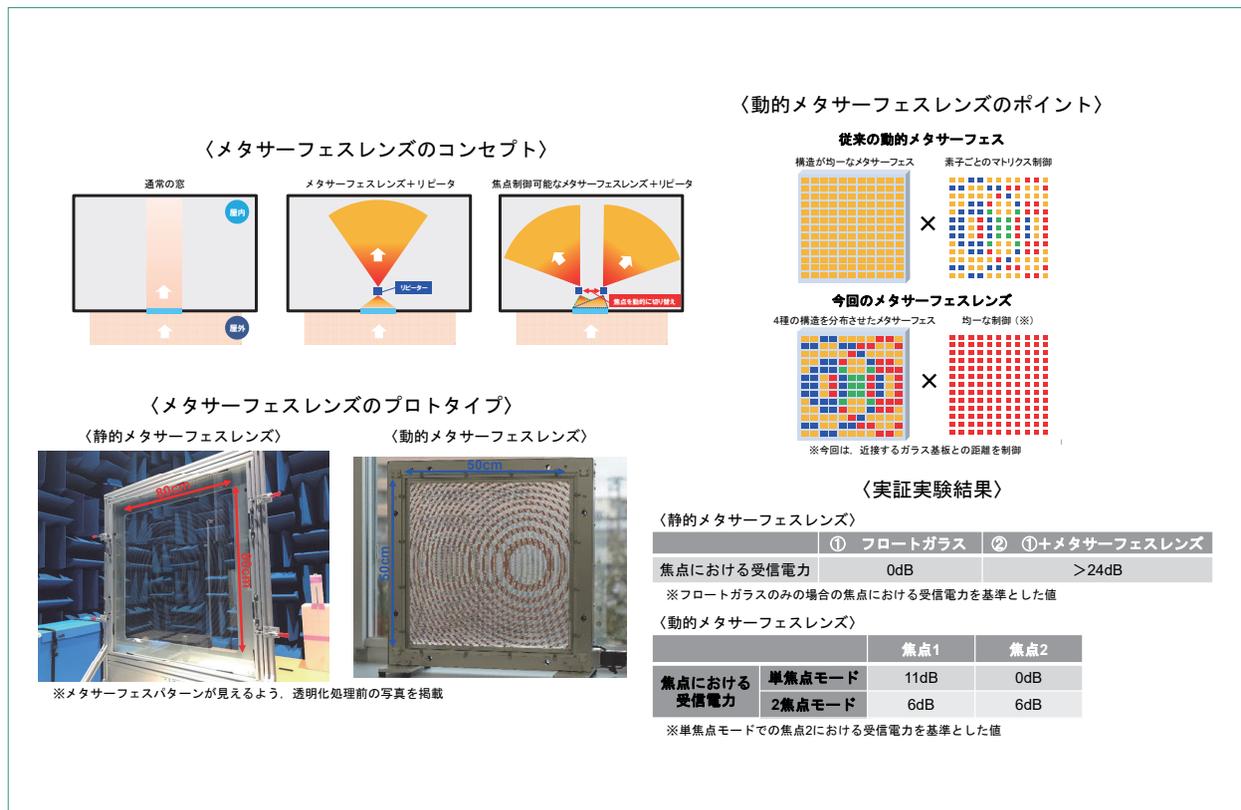


図5 透明メタサーフェスレンズによる窓の電波レンズ化

*11 Sub6：周波数帯域の区分の1つ。3.6GHzから6GHzの周波数をもつ電波信号。

*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する。

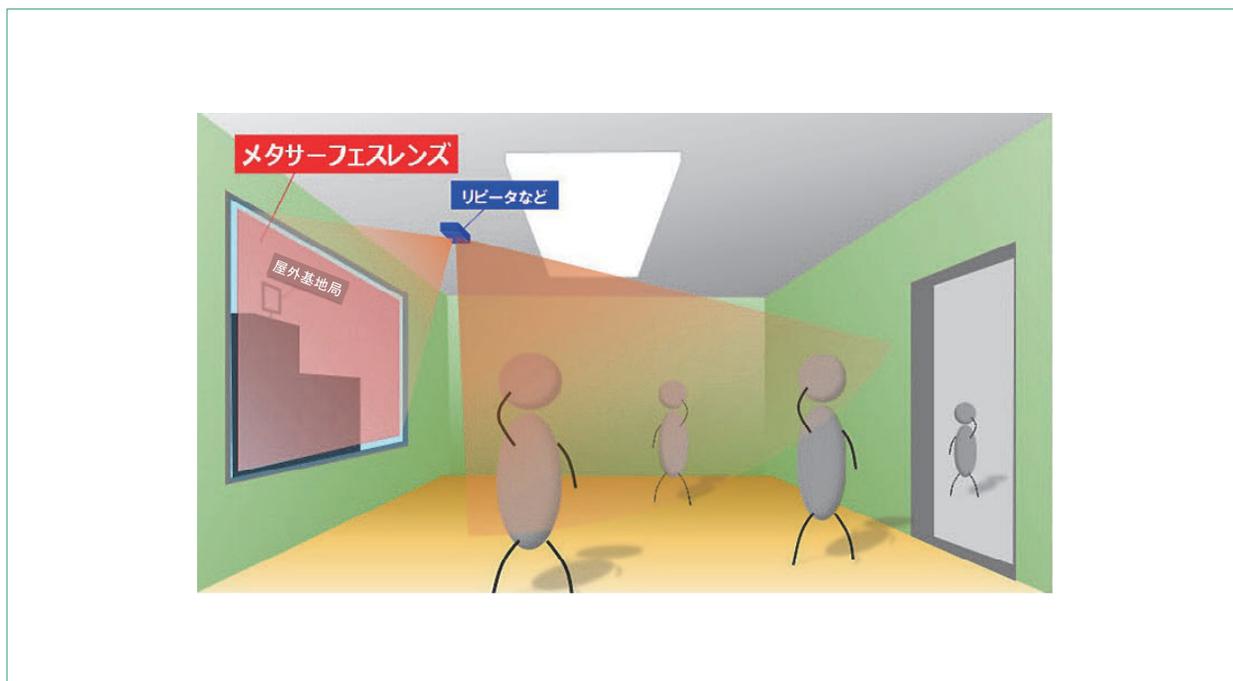


図6 透明メタサーフェスレンズの利用イメージ

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24dB以上向上することを確認している。

さらに、焦点を動的に制御する機能についても検証した。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11dB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る。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6dB高くなっており、焦点が2つ形成されていることが分かる。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る。

4. 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カバレッジについて、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た。ある有限の面積を有したりフレクタや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る。

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く。

文 献

- [1] NTTドコモ：“ホワイトペーパー：5Gの高度化と6G,” Feb. 2021.
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, Aug. 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, Aug. 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.
- [5] 濱 優人, 来山 大祐：“5G Evolution and 6Gに向けた Reconfigurable Intelligent Surfaceを用いたカバレッジ 拡張に関する取り組み,” *信学技報*, Vol.120, No.406, SRW2020-81, pp.98-103, Mar. 2021.
- [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, Sep. 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.