

編集チームリーダー 村上靖宜
Yasutaka Murakami

第6世代移動通信システム(6G)の 実現に向けての取組み

2020年に第5世代移動通信システムである5Gのサービスが開始され、2030年にサービス開始予定である6Gに関して重要となる未来の技術について、本小特集で取り上げています。ある調査では、全世界のデータ通信の需要は年平均22%超の成長率を見込んでおり、2030年の全世界のデータ通信量は1か月で約2,400～3,000 EByte（エクサ＝10の18乗）という聞いたことがない単位の数値に達すると予想され、発展はとどまることがないとも予想されています。編集作業が真ただ中であった2024年4月23日には、国際的な標準化団体3GPP（3rd Generation Partnership Project）から6Gの正式なロゴも発表され、着々と実用化に向けて進められている状況です。更に、身近では、高画質の動画像閲覧が当たり前になり、SNSの発展により誰もが情報発信者となり、公共手続きの電子申請や電子決裁を誰もが使用し、データ通信は生活の一部となっており、それを支える技術及び開発がより重要となってきました。

6Gにおいて、通信にテラヘルツ帯と呼ばれる光の周波数に近い新たな領域の周波数が使用され、本小特集ではそのテラヘルツ帯の電波について主に技術的な側面から解説した7件の記事を取り上げています。テラヘルツ帯の電波を利用した通信の最新動向からNRNT（New Radio Network Topology）、本小特集では無線通信技術・アンテナ開発や計測技術やメタサーフェス・RIS（Reconfigurable Intelligent Surface）などの多岐にわたる内容の記事を用意致しました。小特集記事では解説論文が多くあり、少し専門家向けの内容になっておりますが、2030年とまだ先のサービスに対して、着々と実現に向けて研究が行われていることを知って頂ければ幸いです。

最後に、小特集の発行に当たり、御執筆頂いた皆様、編集委員の皆様、査読・校閲で御協力頂いた皆様に心から感謝致します。

小特集編集チーム

村上靖宜、飯田裕之、木下雅之、中西孝行、中村光貴

6Gの実現に向けた テラヘルツ通信の最新動向

THz Radio Transmission for 6G Networks

川西哲也 Tetsuya Kawanishi†

Summary

第5世代移動通信システム(5G)の普及が進みつつあるが、既に次世代の第6世代移動通信システム(6G)に向けた研究が活発化しており、その中でテラヘルツ波を使った通信が注目されている。実用化には、増幅器やアンテナなどの送受信機を構成する要素技術のみならず、テラヘルツ波の伝搬・散乱に関する研究が重要である。テラヘルツ通信が実現する新しい機能や高い性能に対する期待は大きい。電波資源逼迫の緩和のため高い周波数帯への移行の必要性も忘れてはならない視点である。制度面での課題についても議論したい。

Key Words

テラヘルツ波, ミリ波, マイクロ波, 固定無線

1 はじめに

現在、第5世代移動通信システム(5G)に利用が広がりつつあるが、既にその次の世代の第6世代移動通信システム(6G)に向けた研究開発が活発化している。5Gでは周波数6 GHz以下のマイクロ波帯(Sub6)が主力の帯域として重要な役割を担っている。これに加えて、大容量伝送を実現するために新しい電波帯域としてミリ波帯(26 GHz/28 GHz)が割り当てられており、その利用の拡大が期待されている。図1にSub6とミリ波帯の周波数割当のイメージを示した^{(1), (2)}。ここではミリ波帯との帯域幅の比較をするためにSub6は3.6~4.6 GHzに注目した。広い範囲をカバーするためにSub6を使った基地局の展開が進んでいる。Sub6では100 MHzごとに割り当てられているのに対して、ミリ波では400 MHzごととなっている。ミリ波では一つの基地局でカバーできる範囲が限られているために、現時点では普及は限定的であるが、図1に示すように圧倒的に広い帯域幅を有している。後述するように伝搬可能距離がSub6と比較すると短いという課題があるが、限られた電波資源を有効に使うという観点では、ユーザの近くで局所的に電波を活用する技術は非常に重要であると考えている。

6Gではミリ波よりも更に周波数が高いテラヘルツ波を使った通信への期待が高まっている。テラヘ

ルツ波は、周波数が0.1 THzから10 THzの範囲にある電磁波を指し、波長は3 mm以下である。この中で比較的周波数が低い帯域では増幅器などの電子デバイスが開発されつつあり、高速無線伝送の報告が数多くなされている。主に、周波数が0.1 THzから0.3 THz程度の範囲内のテラヘルツ波が注目を集めている。この帯域はサブテラヘルツ帯と呼ばれることもある^{(1), (2)}。

2019年に開催された世界無線通信会議(WRC)で、サブテラヘルツ帯に相当する275 GHzから450 GHzにおいて、幾つかの帯域が通信用途として周波数特定がなされた⁽³⁾。これらの帯域を合わせると合計で137 GHzに達する。これは既存無線通信システムで用いられている帯域幅の総計をはるかに上回るもので、この広帯域性を生かした高速通信の実現への期待が高まっている。本稿では6Gでの利用が期待されるテラヘルツ通信の研究動向を紹介し、技術面、制度面での課題について議論したい。

2 電波技術の普及

テレビやラジオの放送が始まって以来、一般向けの電波技術の普及が進んできた歴史がある。放送では送信側と受信側で、無線設備の規模や情報発信の方向性の両面で大きな非対称性があった。しかし、今日では個々の人々が電波を介して情報を送受信することが日常となり、動画像共有プラットフォームなどにより、誰もが情報発信できるようになっている。

† 早稲田大学, 東京都
Waseda University, Tokyo, 169-8555 Japan

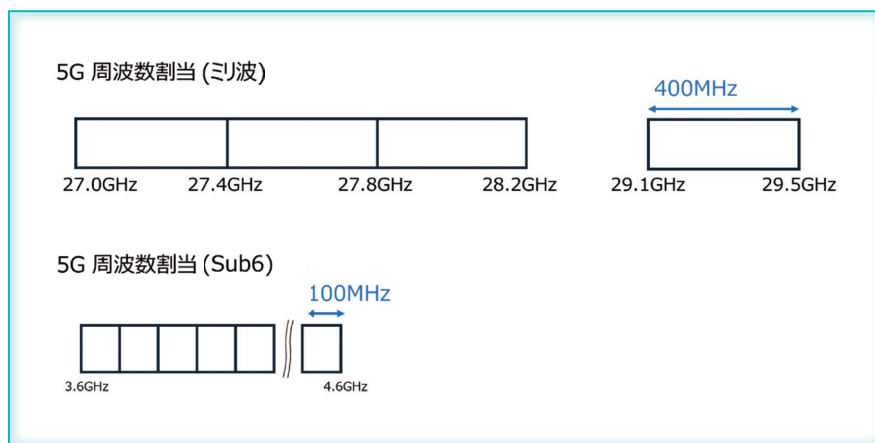


図 1 5G で使われている周波数帯域図

身の回りの電子機器で無線機能を持たないものが少なくなりつつある状況である（図2）。このように、エンドユーザが利用する無線送信機の数が増発的に増えている。特に 2.4 GHz 帯を使った機器は身の回りにあふれている。無線 LAN や Bluetooth などの通信機器のみならず、電子レンジなどの電波を応用した高周波利用設備での利用も許されている帯域である。個別に免許を受けることなく、気軽に使うことができる一方で干渉が問題となる。

このように、様々な無線機器が普及することで、限りある電波資源のひっ迫につながっている。日本国内における免許を必要とする無線局数は、情報通信白書によると 2 億 8,859 万局とされている⁽⁴⁾。他方、上述の 2.4 GHz 帯など、免許不要で利用が許されている無線機器も多数ある。これらの無線機器の数の把握は難しいが、その中で Wi-Fi 機器の稼働台数は全世界で 180 億台と推計されている⁽⁵⁾。日本での普及率が世界平均程度であると仮定すると、日本の人口と世界総人口の比から我が国における Wi-Fi 機器の稼働台数は 2 億 8,000 万台と推計できる。この推計数は、上記の免許を必要とする無線局数とほぼ一致する。日本国内の Wi-Fi 機器普

及率は全世界平均を上回っている可能性がある。また、この推計には Bluetooth などは含まれていないので、2.4 GHz 帯で稼動している無線機だけで、国内で稼動している無線機の半数近く、若しくはそれ以上を占めている可能性がある。これは身近な電子機器による電波利用が非常に活発で、電波資源のひっ迫が著しいということを示している。

2.4 GHz 帯における利用の集中は、電波利用のための手続きが簡単であるということが第 1 の理由であると言える。限られた電波資源を有効に使うためには、電波を利用するためのルール作りが極めて重要であることを示している。

3 周波数資源ひっ迫への対策

限られた公共財である電波資源のひっ迫を緩和するための対策として以下の三つを挙げる。

- ① 周波数利用効率の向上
- ② 無線伝送距離の縮小
- ③ 新しい周波数帯域の開拓

周波数利用効率の向上は、変調方式の改善やビーム方向の制御などによってなされる。前者は送信機で生成される信号波形に関するものであり、電磁波の時間軸方向での制御に相当する。他方、後者は空間軸方向の制御に相当すると言える。光速に比べて十分遅い速度で移動する受信機に対しては、空間的位置関係に係る制御は、変調信号の時間変動のスケールからは準静的に見ることができ、独立的に扱うことが可能である。時間と周波数の双対性から、時間軸での高精度制御が周波数軸での利用効率向上につながる。空間軸制御の高精度化は同一周波数帯の複数ユーザや複数チャネルでの共有を可能とし、こちらも周波数利用効率の向上につながる。周波数帯域の利用状況に応じて、異なる無線システム間で



図2 身の回りの無線機器

帯域を共有する技術も注目を集めている。

船舶・航空向けの通信や衛星通信などは本質的に無線通信が必要な分野であるが、図2に示したような身の回りの無線機器では、有線通信で置き換えることが可能となる場合が多い。利便性向上のための無線化が主目的である。その場合、無線で接続する部分の物理的距離を縮小し、有線通信と組み合わせ、無線区間で必要となる放射電力を低減するという方法を取ることができる。移動体通信においても、一つの基地局がカバーする範囲を小さくし、無線で情報を伝える区間をなるべく短縮するという手法が取られる。

もう一つの方向性は、新たな周波数帯域の開拓である。限られた周波数帯域を鉱物資源になぞらえて、電波資源若しくは周波数資源と呼ばれることがある。技術開発によりこれまで利用不可能であった周波数帯域を可能としていくことを、電波資源拡大、周波数資源開拓などと呼ぶ。新たな周波数帯が発見されるというわけではないが、利用可能な帯域が広がるという意味で開拓と呼ばれる。鉱物資源や化石燃料の可採埋蔵量が技術開発によって拡大することとアナロジーが成り立つ。

無線装置ではトランジスタに代表される電子デバイスで高周波信号の発生・増幅が実現されている。これらの電子デバイスの動作速度が、利用可能な周波数帯域の範囲を制限する最も大きな要因である。電波伝搬特性も通信容量を見積もる上では重要な要素であるが、単純化した議論では、トランジスタの動作可能最大周波数が、有効な電波資源の周波数上限に与えると言える。電波技術開発の歴史をたどると、送受信デバイスの高周波化への挑戦が常に主題であった。れい明期から現在に至るまで、電子デバイスの高速化とそれをういた新しい周波数帯域の開拓が繰り返されている。現時点での周波数資源開拓の最前線がテラヘルツ通信の研究開発である。

4 新しい周波数帯域の開拓

5G以前のシステムでは、周波数が数GHz程度のマイクロ波が無線通信を支えてきた。3.で述べたとおり、より広い周波数帯域を確保するために、より高い周波数帯の開拓を繰り返してきた。その一端を、電波帯域の名称にかい間見ることができる。

地上波アナログテレビ放送で主に用いられていた周波数帯域は超短波、英語ではVHF (Very High Frequency) と呼ばれている。地上波デジタルテレビ放送で用いられている帯域の名称は極超短

波、若しくはUHF (Ultra High Frequency) である。これらの帯域の波長は、現在の技術水準から見ると、特に短いわけではない。電子デバイスの動作可能周波数の観点において、問題なく発生・増幅が可能な帯域であり、周波数も高いとは言えない。

ミリ波の周波数は30 GHz以上、波長が1 cm以下であり、その呼称はmmオーダであることに由来している。これに従うと、マイクロ波の波長が μm オーダということになるが、実際にはマイクロ波の波長は1 cm以上で、ミリ波よりも波長が大きいということになる。マイクロ波は上述のUHF帯を含む周波数30 GHz以下の帯域を指す。これは、マイクロ波帯が新たな電波帯域として注目を集めた際に、非常に小さなサイズの電波ということを強調するために「マイクロ」という言葉が使われたために起きた命名規則の不統一と言える。

これらの経緯は、新しい電波帯域の呼称を新しい無線サービスを訴求するためのアイコンとして利用していたという側面を示している。例えば、5Gで使われているミリ波帯は周波数30 GHzを下回っており、本来はマイクロ波帯に属する。ミリ波帯と比べて僅かに周波数が下回る帯域を、以前は、準ミリ波帯、高マイクロ波帯と呼んでいたが、5Gのサービス開始以来、単にミリ波と呼ばれるようになった。これもユーザへの訴求が目的であるという側面が否定できないであろう。周波数帯域以外の技術的要素もユーザへの訴求に用いられている。例えば、ラジオでは変調方式による差別化が行われ、FMラジオ、AMラジオという呼び方が一般的である。これに対して、テレビ放送ではデジタル技術の利用を前面に押し出した訴求となっている。

テラヘルツ波は、周波数若しくは波長の視点で見ると、光と電波の境界に位置し、従来の帯域命名方法とは異なる独特な名称を持つ。通常、波の周波数や波長に基づいて名前が付けられるが、テラヘルツ波は「ヘルツ」(周波数の単位)と10の12乗を示す接頭辞「テラ」の組合せである。例えば、FMラジオ放送で使用される電波は数十MHzであるが、「メガヘルツ」という用語は用いられない。この名称の由来は、テラヘルツ波の持つこれまでにない特徴を反映していると考えられる。

テラヘルツ帯の開拓は、これまでの高周波帯の探求を継続する方向性の一環でありながら、効果的な利用にはテラヘルツ波の物理的特性を十分理解し、新たなネットワーク構築の概念に基づく必要がある。テラヘルツ波は広帯域であり、通信だけでなく、レーダなどのセンシングにも活用が期待される

が、伝搬距離が短いため、有線ネットワークとのシームレスな連携が不可欠である。

5 テラヘルツ波の特徴

テラヘルツ帯は図3に示すように周波数がおおむね0.1 THz から 10 THz の範囲を指す。3. で述べたとおり、利用可能周波数の上限は、電子デバイスの動作速度限界に支配されている。周波数が高くなるにつれ、電子デバイスの増幅効率の低下や導体損の増大により発生可能な電力が急激に減少する。その上限は1 THz 程度で、この周波数範囲の研究が活発化している。最近では、この周波数帯(0.1~1 THz) をサブテラヘルツ帯と呼ぶことがある。

テラヘルツ波は波動性、直進性や、フォトンエネルギーの観点から、光と電波の性質を併せ持っていると言える。周波数3 THz 以下の電磁波が電波である、と電波法においては定義されている。つまり、テラヘルツ帯(周波数0.1~10 THz) が物理的性質のみならず、法的にも電波と光の境界となっていることを意味している^{(6), (7)}。以下では、テラヘルツ波の特徴、技術課題、光ファイバ通信との融合の必要性を説明する。

テラヘルツ帯は従来の電波の分類によるミリ波帯とサブミリ波帯、光としては遠赤外線を含む。テラヘルツ波よりも周波数が低い範囲では、電波の発生に電子回路で構成された発振器が用いられる。これは、導体内に存在する自由電子の集団的な運動を

電波に変換するという原理に基づいている。他方、より高い周波数帯では、量子化された電子のエネルギー準位間の遷移による光子の発生が用いられている。発光ダイオードやレーザはこの原理により動作している。前者では電子回路の動作可能周波数に上限を与えている。後者では、一つ一つの電子の遷移が光子を発生させるが、準位間のエネルギー差が光子、つまり、電磁波の周波数に比例する。周波数が低くなると、光子当りのエネルギーが小さくなり、発生効率が大きく低下する。このことから、量子効果による光子発生ではその周波数に下限がある。図3に示すようにテラヘルツ帯では発振器の周波数上限と、光子発生周波数下限の間に位置しており、その発生が困難とされてきた。

電磁波は電界と磁界の波動、いわゆる光波としての性質と光子としての粒子性を併せ持つが、テラヘルツ波は波と量子の性質がきつ抗する領域にあるとも言える。テラヘルツ波を電気的な波動として発生させるためには、時間軸での高速性の追求が必要となる。例えば1 THz の信号を発生するには500 fs 以下の立上り、立下り時間を持つ電子デバイスが必要となる。1 THz のテラヘルツ波を光量子として見た場合、300 THz の可視光と比較すると、同じエネルギーを得るためには300 倍の個数の電子の遷移が必要となる。現時点ではテラヘルツ帯はどちらの技術を使っても発生効率が低いという課題があるが、デバイス開発によりこのギャップが狭まりつつある。将来的には光波と光子の両方の性質を利用できるようになる可能性もある。

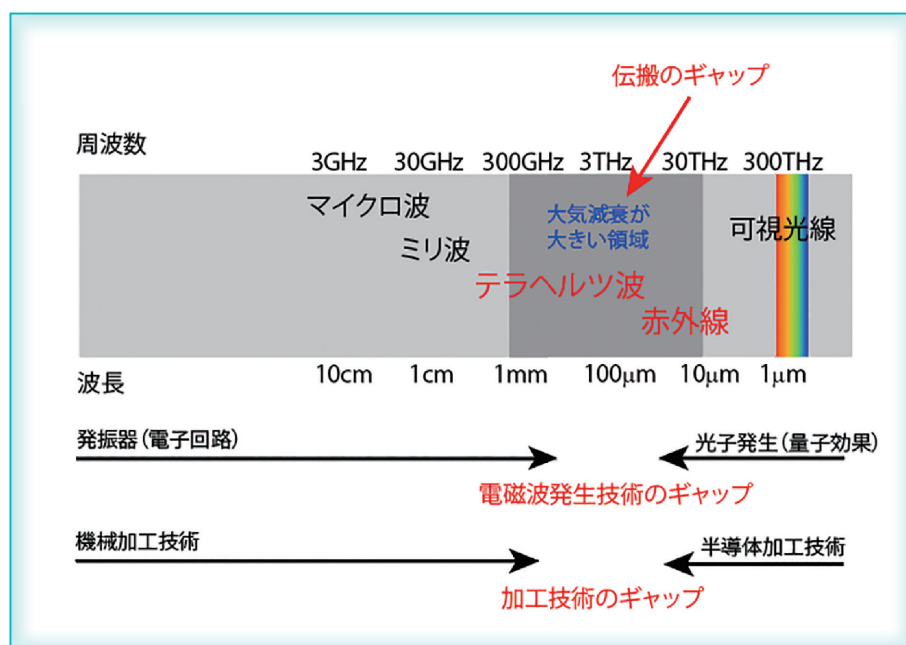


図3 テラヘルツ帯の周波数・波長範囲^{(6), (7)}

表1 テラヘルツ波の電波としての特徴⁽⁶⁾

特徴	×	○
大気減衰大きい	長距離伝送困難	近距離なら適用可能
波長が短い	障害物に弱い	細いビームでエネルギー集中できる
帯域幅広い		高速伝送・高精度センシング可能

表1にテラヘルツ波の電波としての特徴を列記した。大気中では減衰が大きい。特に水蒸気による吸収が顕著である。波長が短く直進性が高い。回折の影響が弱く、障害物があると、その影に当たる部分では信号を受けることが非常に難しい。光の直進性の高さを反映した性質であると言える。既存の周波数帯、例えばUHF帯では回折や透過により、見通し外通信が可能となっているが、ミリ波帯、テラヘルツ帯では見通し内通信が基本で、広い範囲をカバーするのが困難であるという課題を抱えている。他方、必要な範囲のみに放射を集中することが可能で、電波資源有効利用の観点ではメリットと考えることも可能である。

大気中の電波伝搬においては、大気による吸収に加えて、降水時の損失の増大を考慮に入れる必要がある。雨や雪による吸収、散乱の影響がある。降雨時の吸収と散乱の影響を合わせたものを降雨減衰と呼ぶ。雨滴による散乱は気象レーダに活用されている。マイクロ波帯などの従来から広く使われている帯域では、周波数が高いほど降雨減衰が大きいことが知られている⁽⁸⁾。例えば、12 GHzを使う衛星テレビ放送では降雨減衰が大きくなることが予測されるときに、変調方式を切り換えて、受信ができない状態を避ける降雨対応放送の機能を備えている。テラヘルツ帯においても降雨・降雪減衰の影響は大きい。周波数100 GHz以上のテラヘルツ帯においては周波数増加に応じて、降雨減衰が若干低下するという性質がある。そのため、テラヘルツ帯での降雨減衰は、マイクロ波帯、ミリ波帯との比較から類推されるほど大きなものではない。

悪天候時には強風を伴うこともある。ミリ波帯、テラヘルツ帯では指向性の高いアンテナを使うことが多い。強風時においても安定通信を確保するためには、風によりアンテナが振動する影響を考慮する必要がある⁽⁹⁾。短距離通信であれば、必要な可用性と伝送容量のバランスを取りつつ、風雨の影響を考慮に入れたシステム設計が可能である^{(10), (11)}。

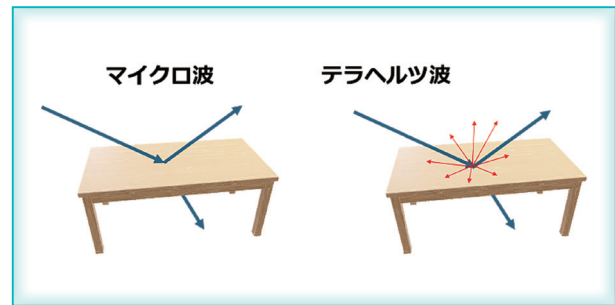


図4 滑らかな机の表面による電波散乱

上述のとおり、最も周波数の高い電波帯域であるテラヘルツ帯においては増幅素子がまだ開発途上であり、大出力信号発生は困難である。更に、テラヘルツ帯では電波が大気中を伝搬する際の減衰が大きいという課題がある。これらの二つの課題を図3に「電磁波発生技術のギャップ」、「伝搬のギャップ」と示した。これに加えて、‘もの’づくりの視点で加工技術のギャップがあると考えている。アンテナやフィルタなどの電子部品はその原理から対象となる電波の波長と同程度のスケールを持つ。

マイクロ波などの電波帯域では、通常の機械加工技術でそのスケールの構造を精度良く作製することが可能である。例えば3 GHzでは波長が10 cmであるので、機械加工公差1 mmで波長の百分の一以下の誤差に抑えることが可能となる。波長10 cmの長さ寸法に対してJIS規格粗級公差においても基準公差は0.8 mmであり、十分な精度である⁽¹²⁾。他方、光波は波長が1 μm程度であるので、半導体加工技術に適したスケールとなる。最新のプロセスルールは10 nm以下となっており、波長の百分の一程度が確保されている。しかしながらサイズの大きな構造を効率的に作製するには適していない。テラヘルツ帯ではその波長が1 mm～10 μm程度で、機械加工にとっては小さ過ぎ、半導体加工にとっては大き過ぎるため、量産化に向けた一つの課題となる可能性がある。

テラヘルツ帯では滑らかに見える表面においても散乱が発生する^{(13), (14)}。機械加工された木材の平滑面の表面粗さは80 μm程度である⁽¹⁵⁾。これはサブテラヘルツ帯では波長の十分の一程度に相当し、散乱の影響が目立ち始める条件が満たされている。波長が1 cm以上あると、我々の手で触った感覚で凹凸がない場合には、電波伝搬の視点においても平たん面であると考えられることができる。他方、光に対しては波長に比べて大きな表面粗さがある面として振る舞うために、磨き上げられた金属面以外では乱反射（散乱）が支配的となる。例えば四方を壁で囲まれた室内で、光波は散乱が支配的であるのに

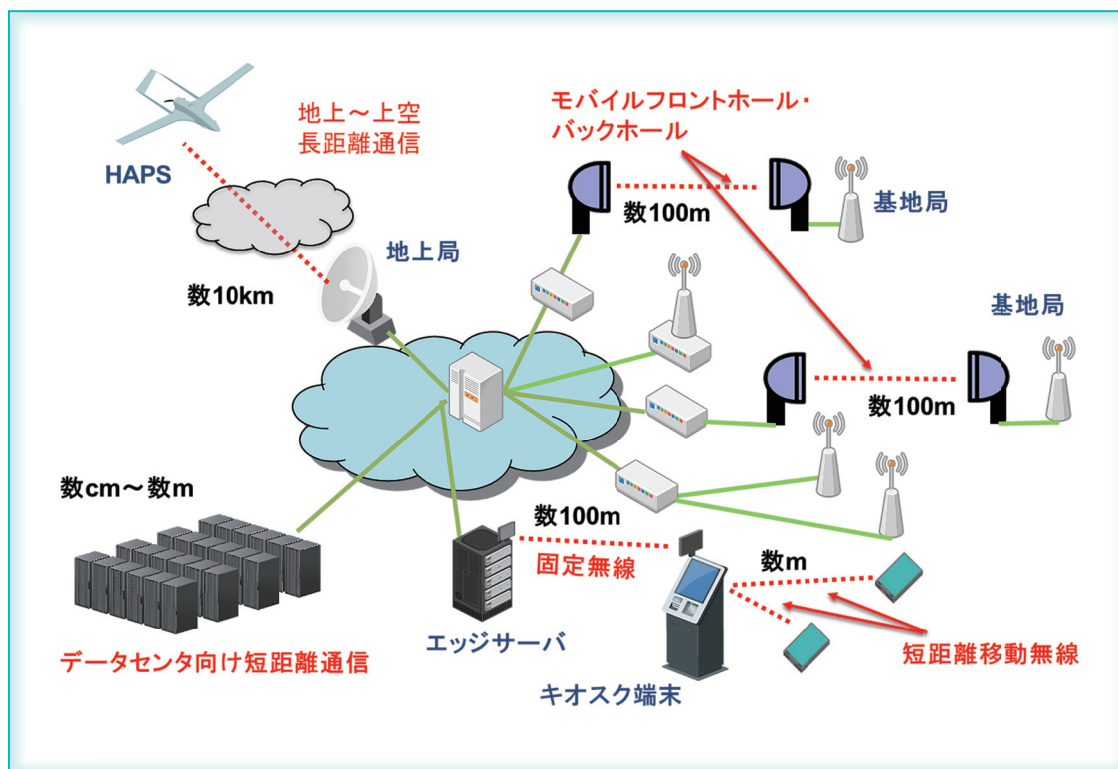


図5 様々な分野で利用が期待されるテラヘルツ通信

対して、電波に対しては反射が支配的で、その解析には反射波を追跡するレイトラシングが広く用いられている。コンピュータグラフィックスにおいて光線の追跡としてレイトラシングが用いられるが、散乱波の表現は難易度が高い。

身の回りのものの表面粗さを考えると、従来の電波帯では鏡に囲まれたような状態であったと言える。これに対して、光波帯では光源を直視することを避ければ、柔らかい間接照明光を得ることは難しい。散乱が大きくなると、それに応じて鏡面反射成分が小さくなる。木材表面や壁面を想定した粗面に対して、100 GHz 帯ではその影響が0.01 %程度であったのに対して、300 GHz 帯では8 %程度に急増するという解析の例がある⁽¹⁶⁾。身近なものの表面粗さと波長の関係性から、テラヘルツ波は伝搬、散乱の視点においても、光と電波の中間的な性質を持っていると言える。

6 テラヘルツ通信研究動向

テラヘルツ帯の持つ非常に広い帯域幅を活用した新しい無線通信技術に関する研究が国内外で活発化している^{(6), (7)}。5. で述べたとおり、大気減衰などの影響から、テラヘルツ通信のみでネットワーク全体を構成することは困難であるが、6G の目標である地球のどこでも安定した接続を提供するため

の重要な要素となることが期待される。図5に研究が進められているテラヘルツ通信システムの例（図中の破線）を示した。

デバイス性能限界に起因する送信電力の制限や大気減衰などによる受信電力の小ささから、通信距離が短い応用が多い。例えば、データを受け取るためのキオスク端末では、端末とユーザの距離は非常に短い。エッジサーバとキオスク端末間の通信も図中に例示しているが、この場合には固定した2点間の通信になる。前者では、ユーザが移動する可能性があり、その場合には、指向性の低いアンテナを使う、電波の放射方向を制御するなどの工夫が必要となる。後者は所定の位置の間をつなぐ固定無線であり、指向性の高いアンテナを用いて受信電力を大きくすることが可能である。

データセンター向け短距離通信についても研究が進められている。データセンター内ではラック間のデータ伝送などに光ファイバが広く用いられているが、バックアップ回線としてのテラヘルツ通信の有効性が検討されている⁽¹⁷⁾。光ファイバの方が伝送速度を高くすることは容易であるが、伝搬遅延に関しては、テラヘルツ通信の方が有利である。直線的に大気中を伝搬するテラヘルツに比べて、ファイバ材料の屈折率とファイバの敷設状況に依存し、光波伝搬に要する遅延が大きくなる。光ファイバ通信と無線通信における伝搬遅延の比較とシステムに与

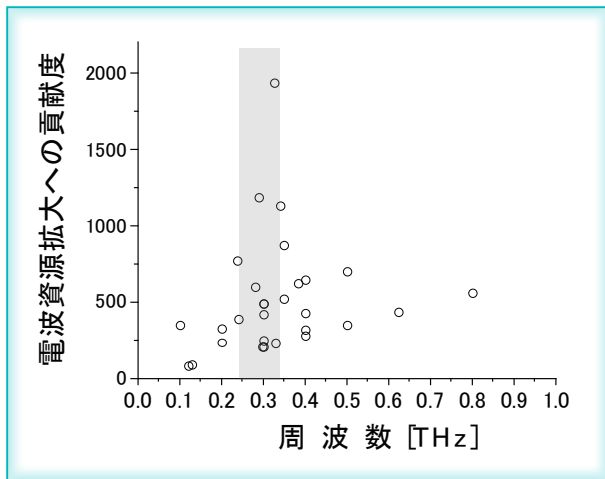


図6 テラヘルツ帯における無線伝送技術の搬送波周波数・周波数利用効率積（2018年時点）

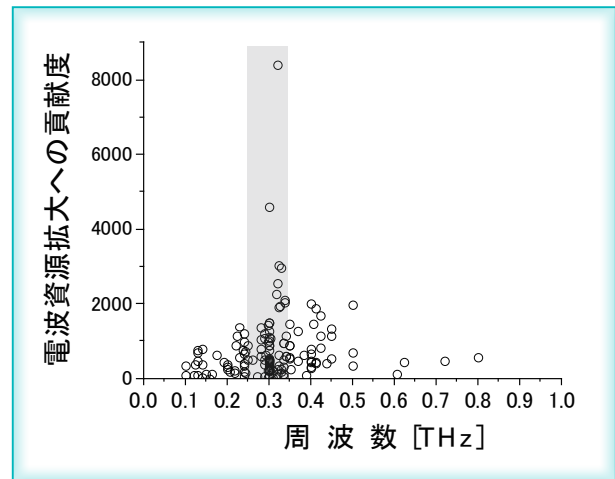


図7 テラヘルツ帯における無線伝送技術の搬送波周波数・周波数利用効率積（2023年時点）

える影響についての検討がなされている⁽⁷⁾。

6Gでは多数の基地局間を接続するネットワーク（モバイルフロントホール・バックホール）を効率的に構築するかが課題である。日本を含む東アジアでは光ファイバ通信がモバイルバックホール・フロントホールを構成する伝送媒体として大きな役割を担ってきた。次世代移動通信システムにおいてはその役割の一部を短距離固定無線通信が担うという予測がある^{(7), (18)}。6Gでは一つの基地局アンテナがカバーする範囲が数百m以下と小さいため、その間隔も同程度となることが想定される。モバイルバックホール・フロントホールは基地局アンテナが設置されている箇所間を接続するので、固定無線通信で必要となる伝送距離も数百m以下でよいということになる。図5に示すように光ファイバケーブル敷設が困難な部分に固定無線を用いて、効率的にネットワークを構成するという考え方である。

上述のとおり、様々なテラヘルツ通信システムに関する研究が進められている。その動向を把握するための一つの指標として、電波資源拡大への総合的な貢献度を搬送波周波数・周波数利用効率積（CFSE: Carrier frequency spectral efficiency product）として定義している例がある^{(6), (7)}。CFSEは論文などで発表された無線伝送システムの搬送波周波数と周波数利用効率を掛け合わせたものである。論文によっては周波数利用効率が開示されていないことがあるが、その場合には変調方式や信号スペクトルなどから推定している。搬送波周波数の高さは新しい周波数帯域の開拓への貢献の程度を表し、周波数と利用効率の積が新規電波資源の開拓と与えられた周波数資源の有効利用の両方への総合的な貢献度合いに相当するとの考えに基づいている。

図6と図7がそれぞれ2018年と2023年時点での調査結果である。調査対象はテラヘルツ帯（0.1 THz以上）における無線伝送技術（論文などでの発表）とした。図中の各点が研究成果を示している。2018年時点、2023年時点ともに300 GHz付近にピークが存在する。（250 GHzから350 GHzにかけてハッチを掛けている。）この貢献度は周波数利用効率が一定であるとする、搬送波周波数に比例する。2018年時点の結果では、300 GHz以下の範囲でその傾向が見られる。300 GHzを超えると貢献度が大幅に低下しており、搬送波周波数向上には周波数利用効率の大きな低下が伴うことを示している。このことから、300 GHz以上の帯域では更なるデバイス開発が必要で、伝送速度向上に向けた伝送システム研究の最前線は300 GHz付近であると言える。2023年時点の調査結果では、300 GHz付近の貢献度が際立って高くなっている。これは、多値度が非常に高い変調方式による伝送実験の報告がなされたためである⁽¹⁹⁾。300 GHz帯において電子デバイスや測定技術の開発が進み、研究が更に活発化したことを反映している。

7 テラヘルツ波の特徴を生かした固定無線

テラヘルツ波は移動通信への応用も期待されるが、更なる送信電力の向上やビームをスキャンするためのアレーアンテナが必要となる。それに対して、固定無線通信では高い利得のアンテナを使うことができるので、より実用に近い段階に位置していると言える。アンテナの大きさ（アンテナ実効面積）を一定とすると、アンテナ利得は周波数の二乗

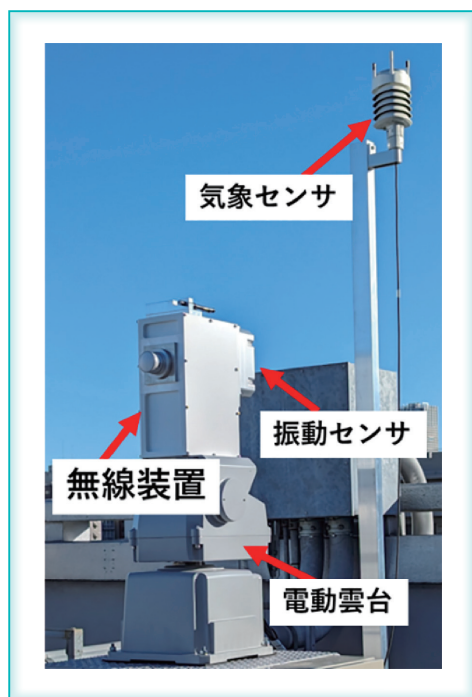


図8 屋外設置型 300 GHz 無線装置

に比例する。テラヘルツ帯では小形のアンテナにおいても波長に対しては十分な大きさを取ることが可能となり高利得化は容易である。直径 10 cm の円形開口アンテナを例として考えると、300 GHz ではその直径は波長の 100 倍程度となる。

日欧共同研究による事例を紹介する⁽²⁰⁾。テラヘルツ帯での伝送実験の大半は測定器による信号発生・分析によるものであった。この研究では、実際のネットワークに接続可能なテラヘルツ無線機の開発に成功している。アンテナ利得向上により、通信距離の拡大が可能であるが、風雨や降雪の影響を評価する必要がある。また、アンテナ方向の調整の困難さも課題である。我々の研究グループでは、屋外で連続運転可能な自動方向調整機能付きの 300 GHz 送受信機を開発し、気象条件と通信品質の相関に関するデータ取得などの連続試験を開始している（図 8）。信号形式はテラヘルツ帯で唯一の通信規格である IEEE802.15.3d に準拠している。アンテナ方向調整の自動化にも成功しており、設置コストの低減や動的な無線局配置への応用が期待される。

8 上空との通信への応用

テラヘルツ帯では大気減衰により通信の長距離化が困難であるが、上空では地上と比較するとその影響が小さい。テラヘルツ波としては最も周波数が低い帯域ではあるが、100 GHz 帯を利用した地上・

上空間の高速伝送技術の開発が進められている⁽²¹⁾。大形のアンテナを備える地上局と上空の無人プラットフォーム HAPS (High Altitude Platform Station) との間で高速無線伝送を実現することが目的である。窒化ガリウム (GaN) を用いた高出力増幅器実現の見通しがあり、追尾機能をもった高利得アンテナとの組合せで 10 km 以上の長距離通信が可能となる。

9 実用化に向けた課題

テラヘルツ通信の実用化のためには、増幅器、アンテナなどの要素技術の更なる開発が必要であることは言うまでもないが、電波利用のルール作りも重要である。テラヘルツ波が持つ従来の電波と大きく異なる性質を考慮に入れた議論も必要であろう⁽²²⁾。例えば、テラヘルツ帯での電波干渉は放射電力の小ささや伝搬減衰の大きさから、その観測自体が容易ではない。このような現状を踏まえて、海外では研究開発促進のために弾力的な運用を行っている例もある⁽²³⁾。テラヘルツ帯においては、研究を優先させる必要がある段階であり、状況に応じたルールを検討することは競争力確保の上で重要である。

テラヘルツ帯の持つばく大な帯域幅を活用した新しい無線システムへの期待が広がるが、新機能・性能拡大が必須ではない。高い周波数帯の開拓の最大の目的は電波資源ひっ迫の緩和である。

無線通信システムは送受信機製造のための資源や動作時の電力を必要とする。これに加えて、公共財である電波資源の割当が必要である。マイクロ波帯はその伝搬特性から、今後も重要性が低下することはない。6G において第 3 の周波数帯 (FR3) として周波数 24 GHz 以下の帯域が注目を集めている⁽²⁴⁾。このことはテラヘルツ帯の必要性を否定するものではない。マイクロ波帯が重要であるからこそ、マイクロ波帯における電波資源ひっ迫の緩和が重要である。テラヘルツ波で実現可能な無線サービスはテラヘルツ帯へと移行を進めるべきであることを示している。

様々な分野で限られた資源を有効利用し、持続発展可能な社会を構築するために、様々な施策が取られている。例えば、太陽光発電や電気自動車への補助金などである。テラヘルツ帯の利用促進のための積極的な施策が、マイクロ波帯活用のためにも重要である。必ずしも性能・機能に変化がなくとも、テラヘルツ帯への移行を促進するための技術開発が電波技術に関する持続可能な開発目標として位置付け

られるべきである。制度面においても、テラヘルツ帯における免許制度の大幅緩和や、電気自動車でなされているような大胆な促進策が重要な役割を果たす。規制の在り方が利用の状況に大きな影響を与えることは2.4 GHz帯の現状より明らかである。

謝辞 本稿の内容の一部は、情報通信研究機構委託研究(JPJ012368C00302, JPJ012368C00401, JPJ012368C0430, JPJ012368C04901, JPJ012368C06001), 科学技術振興機構ASPIRE(JPMJAP2324), 総務省電波資源拡大のための研究開発(JPJ000254)のうち「無線・光相互変換による超高周波数帯大容量通信技術に関する研究開発」によって実施した成果を含む。また、本稿で紹介した研究の一部は早稲田大学理工学術院総合研究所の支援を受けたものである。

文献

- (1) 川西哲也, “テラヘルツ通信の開発事例と課題,” 電波技術協会報FORN, no. 355, pp. 22-25, Nov. 2023.
- (2) 川西哲也, “テラヘルツ通信の最前線,” 電波技術協会報FORN, no. 349, pp. 12-15, Nov. 2022.
- (3) 小川博世, “Beyond 5G (6G) に向けて準備が進むテラヘルツ帯規則,” 電波技術協会報FORN, no. 337, pp. 6-9, Nov. 2020.
- (4) 総務省, 令和5年版 情報通信白書.
- (5) 総務省, 無線LAN等の欧米基準試験データの活用 の在り方に関する検討会, 資料6-2, 2022.
- (6) 総務省, デジタル変革時代の電波政策懇談会, 資料5-1-4, 2021.
- (7) T. Kawanishi, Wired and Wireless Seamless Access Systems for Public Infrastructure, Artech House, 2020.
- (8) APT Report on FWS link performance under severe weather conditions, APT/AWG/REP-81, April 2018.
- (9) APT Recommendation on Models for FWS Link Performance Degradation due to Wind, APT/AWG/REC-12, Dec. 2022.
- (10) Z. -K. Weng, A. Kanno, P. T. Dat, K. Inagaki, K. Tanabe, E. Sasaki, T. Kürner, B. K. Jung, and T. Kawanishi, “Millimeter-wave and terahertz fixed wireless link budget evaluation for extreme weather conditions,” IEEE Access, vol. 9, pp. 163476-163491, Dec. 2021.
- (11) U. Mankong, P. Chamsuk, S. Nakprasert, S. Potha, Z-K. Weng, P. T. Dat, A. Kanno, and T. Kawanishi, “Millimeter wave attenuation due to wind and heavy rain in a tropical region,” Sensors, vol. 23, no. 5, 2532, Feb. 2023.
- (12) JIS 規格 普通公差-第1部: 個々に公差の指示がない長さ寸法 及び角度寸法に対する公差, JIS B 0405-1991.
- (13) R. Yoshino, T. Kanaya, S. Takada, K. Jitsuno, K. Inagaki, and T. Kawanishi, “Modeling and evaluation of millimeter wave scattering from minimally rough surfaces on stones,” IEICE Electron. Express, vol. 19, no. 13, pp. 1-6, July 2022.
- (14) R. Yoshino, Y. Asakura, K. Inagaki, and T. Kawanishi, “300 GHz terahertz wave scattering experiment and simulation from slightly rough surfaces on dielectrics,” IEICE Commun. Express, vol. 13, no. 2, pp. 43-47, Feb. 2024.
- (15) E. Csanady, E. Magoss, and L. Tolvaj, “Surface Roughness of Wood,” In: Quality of Machined Wood Surface, Springer, 2015.
- (16) R. Yoshino, Y. Asakura, J. Chakarothai, K. Inagaki, and T. Kawanishi, “Measurement and Analysis of Scattering from Slightly Rough Surfaces on Dielectrics in 100 GHz and 300 GHz Bands,” (投稿準備中)
- (17) J. M. Eckhardt, T. Doeker, S. Rey, and T. Kürner, “Measurements in a real data centre at 300 GHz and recent results,” European Conf. Antennas Propag. March 2019.
- (18) Mobile backhaul options, Spectrum analysis and recommendations, GSMA, 2018.
- (19) J. Shi, J. Yu, J. Znang, M. Zhu, L. Zhang, K. Wang, W. Zhou, T. Xie, and J. Yu, “65,536-QAM OFDM signal transmission over a fiber-THz system at 320 GHz with delta-sigma modulation,” Opt. Lett., vol. 48, pp. 2098-2101, April 2023.
- (20) “世界初の双方向 300 GHz テラヘルツ伝送に成功,” 早稲田大学プレスリリース, 2022.6.29.
- (21) 川西哲也, 爲末和彦, 実野邦久, 佐藤拓朗, 西堀俊幸, 山中宏治, “THz 帯 NTN 通信システムの設計,” 2022 信学総大, C1-7-2, March 2022.
- (22) Unlocking the potential of Terahertz radio spectrum, Ofcom, 2021.12.2.
- (23) FCC takes steps to open spectrum horizons for new services and technologies, FCC News release, 2019.3.15.
- (24) 5G Evolution and 6G, NTT DOCOMO White Paper, Feb. 2021 (Version 3.0) .

(2024年2月17日受付, 5月13日再受付)

川西哲也 (正員:フェロー)

平4京大・工・電子卒。平6同大学院工学研究科電子工学専攻修士課程了。松下電器産業株式会社生産技術研究所勤務を経て、平9京大大学院工学研究科電子通信工学専攻博士後期課程了。同年同大学ベンチャービジネスラボラトリー特別研究員。平10郵政省通信総合研究所(現情報通信研究機構)入所。平16カリフォルニア大サンディエゴ校客員研究員。平27から早大理工学術院基幹理工学部電子物理システム学科教授。光変調技術、マイクロ波フォトニクスなどの研究に従事。IEEEフェロー。



5Gの高度化と6Gに向けた New Radio Network Topologyの研究

Study on New Radio Network Topology for 5G Evolution and 6G

須山 聡 Satoshi Suyama[†] 岩渕匡史 Masashi Iwabuchi^{††} 後藤健太 Kenta Goto[†]
立石貴一 Kiichi Tateishi[†] 村上友規 Tomoki Murakami^{††}

Summary

重要な社会インフラの一つである移動通信システムでは、第5世代移動通信システム（5G）の商用サービスが2020年に開始された。今後のトラフィック増加と多種多様な新規サービス、更にはAIを活用したサイバーフィジカルシステムの高度化に対応するため、5Gの高度化（5G Evolution）と、2030年頃からのサービス開始を目指す次世代の移動通信システム6Gの研究開発が進められている。本稿では、5G Evolutionと6Gに向けて、NTTドコモとNTTで研究を行っている、空間領域で分散された新たな無線ネットワークポロジ（NRNT: New Radio Network Topology）の技術コンセプトについて述べる。また、NRNTの構成技術である反射板や分散MIMOを用いた実証実験やシミュレーションによる研究結果について紹介する。

Key Words

5G Evolution, 6G, 反射板, 分散MIMO, 実証実験, シミュレータ

1 はじめに

今日、我々の生活を見ると、無線通信はなくてはならないものとなっている。中でも、スマートフォンに代表される移動通信端末は爆発的に普及しており、2022年の総務省による調査では、スマートフォンの世帯保有率は90.1%となっている⁽¹⁾。スマートフォンは移動通信システムを利用してインターネットに接続しており、この移動通信システムは1979年に第1世代のシステムがスタートしてから、約10年ごとに新しい世代のシステムが登場しており、日本では2020年3月から第5世代移動通信システム（5G）の商用サービスが開始されている。更に、今後のデータトラフィックの増加と多種多様な新規サービスに対応するため、移動通信システムの国際標準化団体である3GPP（3rd Generation Partnership Project）では5Gの高度化（5G Evolution / 5G Advanced）の標準化が進められている。また、AI（Artificial Intelligence）を活用したサイバーフィジカルシステム（CPS: Cyber-Physical System）の高度化に貢献するため、2030年頃からの商用サービス開始を目指す第6世代移

動体通信システム（6G）の検討も進められており、その技術コンセプトやホワイトペーパーが公開されている^{(2)~(4)}。移動通信システムは、端末から基地局までの無線アクセス、基地局間の通信であるコアネットワークといった様々な要素技術で構成されており、その中で、無線アクセス方式や電波伝搬に関する要素技術は、基地局との高速・大容量通信を支える重要な技術となっている⁽⁵⁾。既に6Gに向けた同要素技術の実証実験が2022年から開始され、検討が進められている^{(6)~(8)}。

本稿では、NTTドコモとNTTが5G Evolutionと6Gに向けて検討している、空間領域で分散された新たな無線ネットワークポロジ（NRNT: New Radio Network Topology）に焦点を当てる^{(2), (6)~(12)}。NRNTは、基地局アンテナなどの送受信点（TRP: Transmission and Reception Point）と端末の間において、見通し環境を増やし、パス選択の余地を広げることで、無線通信性能の向上や低消費電力化を実現する技術コンセプトである。上述のとおり、6Gに向けては、様々な技術コンセプトや要素技術の検討が進められている。例えば、サブテラヘルツ帯などの高周波数帯を開拓するために必要となる電波伝搬特性の解明や、それを踏まえた無線アクセス技術、無線装置として実現するために必要となる高周波数帯デバイス技術、空・海・宇宙に通信エリアを拡張するカバレッジ拡張技術、移動通信ネットワークを活用して通信とセンシングを同時に行う無線センシング技術、加えて、こ

[†] (株)NTTドコモ、横須賀市
NTT DOCOMO, INC., Yokosuka-shi, 239-8536
Japan

^{††} 日本電信電話株式会社、横須賀市
Nippon Telegraph and Telephone Corporation,
Yokosuka-shi, 239-0847 Japan

これらの技術をネットワークとして実現するためのネットワークアーキテクチャ技術などがある^{(2)~(4)}。一方、NRNTは、6G時代においてAIを活用したCPSによるシステム制御・最適化により、従来システムでは実現できなかった通信性能の大幅な向上や、低消費電力化を低コストで実現できる高い潜在能力を持っており、最も重要でかつ新しい技術コンセプトである。

まず、本稿ではNRNTの概要と構成技術について説明する。加えて、NRNTの構成技術である反射板技術、無線中継技術、分散MIMO（Multiple Input Multiple Output）技術に関して、実証実験やシミュレーションによる研究結果について紹介する。

2 New Radio Network Topology (NRNT)

2.1 NRNTの概要

移動通信システムのNRNTへの進化のイメージを図1に示す⁽²⁾。従来のセルベースで設計された無線ネットワークトポロジー（以降、トポロジー）から、複数のTRPで形成される大小のセルが重畳されたトポロジーに進化する。更にそれを拡張し、複数のセルエリアを重畳させ、周囲の中継器を含めて端末間も連携させ、接続経路（パス）を増やすことで新たなトポロジーが構築される。すなわち、新たなトポロジーとは、通信端末に対して、空間的に周辺に分散配置されている複数のTRP、中継器、端末から、複数のパスが確立されたトポロジーのことである。NRNTにより複数のパスが確立されるという条件を満たして、従来のトポロジーよりパス数自体が増えることと、パス選択の組合せ数が増えることで、通信可能なエリア（カバレッジ）の拡大、見通しエリアの拡大、遮蔽に対する耐性の向

上、MIMO空間多重数の増加などの効果が期待できる。ただし、多数のTRPを設けることにより、干渉の増加が懸念される。NRNTではCPSを活用し干渉も適切に制御することで、システム性能の向上を図る。また、このような多経路化により、柔軟かつ細やかなサービスも提供できると考えられる。例えば、大容量通信が提供されるエリアや電力効率の高いエリア展開など、場所に応じて異なるサービス要求、あるいは、同時に複数のサービス要求に対応できる。

一方、NRNTでは、周辺環境、通信状況、サービス要求に応じてトポロジーが動的に変化するため、時間的な変動に追従した制御が求められる。また、NRNTの主な性能指標（KPI: Key Performance Indicator）は、スループット、システム容量、周波数利用効率、カバレッジ、信頼性、伝送遅延、エネルギー効率、コストなど多岐にわたり、これらのKPIに対するNRNTの最適化が必要である。

2.2 NRNTの構成技術

NRNTの構成技術とその要素を図2に示す。NRNTの構成技術は、無線アクセス技術とそれをインテリジェントに制御するシステム制御技術から成る。加えて、NRNTを実現するためにはシステム展開技術も必要になる。以降では、各構成技術について概説する^{(9)~(12)}。

2.2.1 無線アクセス技術

無線アクセス技術は、トポロジーを構成し、無線通信性能を向上・担保する上で最も重要な技術である。TRPを実質的に、あるいは仮想的に増やすため、無線アクセス技術の構成要素は、分散MIMO技術、無線中継技術、反射板技術などが主要なものとなる^{(9)~(29)}。各技術については後述する。

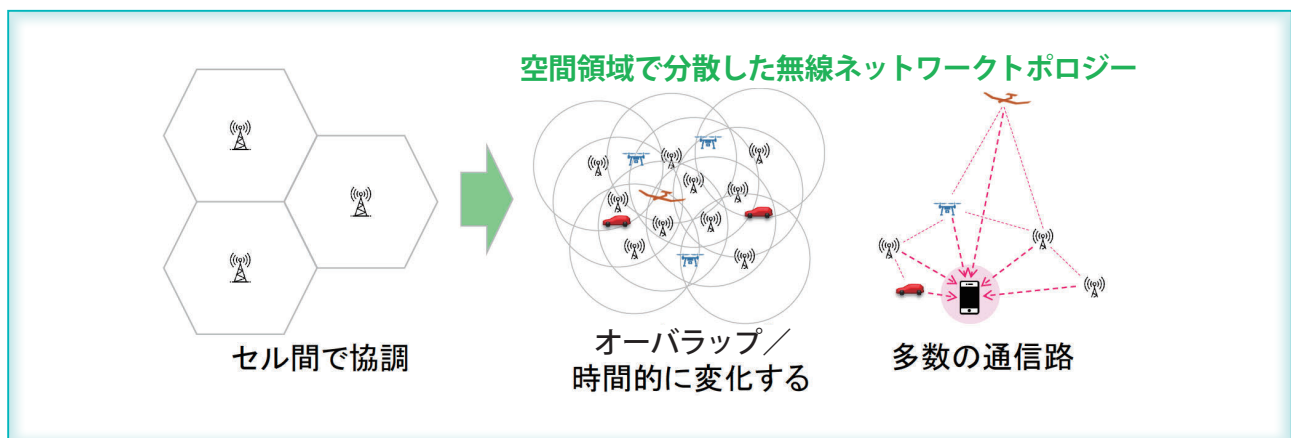


図1 NRNTへの進化イメージ

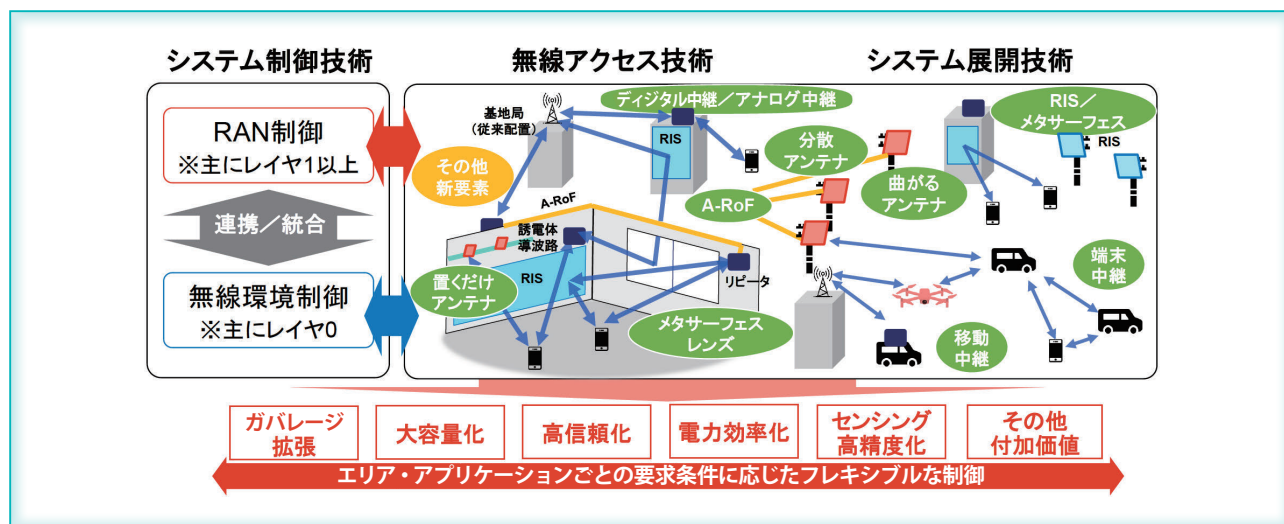


図2 NRNTの構成技術とその要素

無線アクセス技術では、各端末が所望するサービス要求を満たしつつ、与干渉や消費電力の低減などのシステムとしてのサービス要求を達成するため、複数の周波数帯を同時に活用することが想定される。6Gに向けては、既に4Gや5Gで使用している既存周波数帯に加えて、カバレッジを考慮した高速・大容量通信を提供する7~24 GHzのミッドバンドや、エリアを限定した超高速・大容量通信を提供する100~300 GHzのサブテラヘルツ帯が新たな周波数帯の候補として議論されている^{(2),(4)}。

なお、図1のようにNRNTのコンセプトとしては、成層圏を飛行する高高度プラットフォーム(HAPS: High-Altitude Platform Station)や衛星などの非陸上ネットワーク(NTN: Non-Terrestrial Network)の活用も含まれる⁽²⁾。ただし、NTNについては陸上ネットワークに対して大きな伝送遅延が発生するため、サービス要件が異なるとともに、HAPSや衛星からの陸上ネットワークへの影響については現在研究されている課題も多いため、本稿では議論を単純化するために陸上ネットワークのみに閉じて議論を行う。

(a) 分散MIMO技術

分散MIMO技術では、図3のように送受信機能を有する基地局アンテナであるTRPが面的に分散配置され、各TRPは集約局に接続される。更に、分散MIMOでは、あるTRPのカバレッジがほかのTRPのカバレッジと重なるように展開されるトポロジーを持っており、その重なり合う場所に存在する端末は、複数のTRPとの同時通信が可能であるため、集約局からTRPを連携させる送受信処理を行うことで、受信電力やダイバーシチ利得の向上、

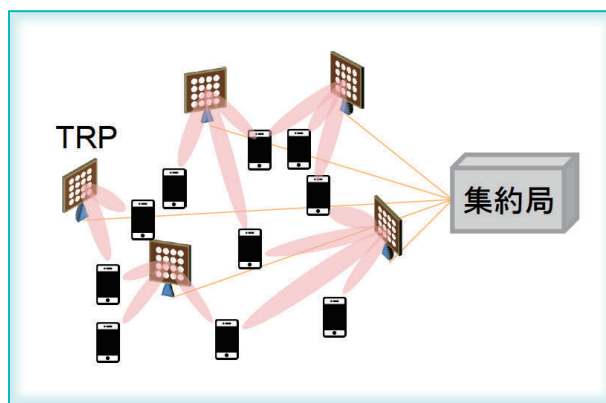


図3 分散MIMO技術

各TRPから異なるMIMOストリームを多重することによる大容量化、特に高周波数帯では見通し確率の増加などにより、通信性能の向上が期待できる。

分散MIMO技術の技術課題は、同一周波数帯のTRPのカバレッジが重なることで同一チャネル間干渉が発生することである。5GではTRPの送信電力を動的に協調制御する、あるいは、振幅だけでなく位相も制御するデジタルプリコーディングにより局所的に干渉を抑圧でき、その活用が期待されている。このように多数のTRPを活用することで論理的なセル境界をなくすることができるため、セルフリーMassive MIMOとも呼ばれている⁽¹³⁾。また、6Gでは、6Gの特長でもあるセンシング技術^{(2)~(4)}を活用することで、発生する干渉を場所ごとに測定し、加えて、時間的に変動する伝搬環境も把握・予測することで、CPSによる自動最適化制御により分散MIMOの性能を最大化できる可能性がある。更に、分散MIMOとFull Duplexとの組み合わせなどにより、低周波数帯での周波数利用効率の大幅な向上も期待される⁽²⁾。ドコモとNTTでは、

分散 MIMO の可能性を実験的に評価するため、ミリ波帯やサブテラヘルツ帯での実証実験を進めている^{(8), (14)~(17)}。

(b) 無線中継技術

無線中継技術は、デジタル信号処理機能を有するデジタル中継(再生中継)技術と、信号処理機能を有さず電力増幅のみを行うアナログ中継(非再生中継)技術に大別できる。あらゆる機器を用いて無線中継を実現することを考えると、端末による中継や端末間で協調して送受信する方式も活用できる。デジタル中継は、3GPP において 5G 向けに IAB (Integrated Access and Backhaul) として標準化が行われた。将来的にはデジタル中継ではアナログ及びデジタル信号処理機能を拡張することで、Full Duplex 中継を実現できる可能性がある。これにより、デジタル中継の課題である周波数利用効率の低下や遅延の増加を改善できるが、現状では実現する上での技術課題は多い。一方、アナログ中継は、設備規模やコストの観点から、電力増幅のみを行う、すなわち、信号処理を行わないため、遅延が生じにくいという利点がある。

最近では、高周波数帯のビームフォーミング (BF: Beamforming) にも対応するため、BF や通信認識機能を備えた高度な中継器 (スマートリピータ) が議論されている。無線中継技術の詳細や技術課題については文献 (10) を参照されたい。

(c) 反射板技術

反射板は古くから利用されている技術であるが、移動通信における高周波数帯の活用に向け、無線中継よりもコストを低減できる技術として反射板技術が再び注目されている。メタサーフェスとは、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二次元とした人工表面である。そのため、メタサーフェス反射板は、メタサーフェスにより任意の誘電率・透磁率を実現することで、任意の反射特性を持たせた反射板であり、入射波を全反射させる反射板とは全く異なった振舞いを行う⁽¹⁸⁾。透過型メタサーフェスは、メタサーフェス技術の進歩により電波の透過も可能にしたもので、反射板だけでは難しかった場所へのエリア拡大が可能であり、特に特定の場所に電波を集約する機能を持ったものをメタサーフェスレンズと呼んでいる⁽¹⁸⁾。これらは基本的には受動デバイスであるため、特性を適応的に制御することは難しい

が、低コストかつ設置するだけでエリアを拡大できることから、比較的早期な導入が期待されている。また、3.3で後述するように、メタサーフェスと BF を組み合わせることで、適応的な制御も可能となる。

反射特性や透過特性を動的に変化させることができる技術が Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) である。RIS は Intelligent Reflecting Surface (IRS) とも呼ばれ、近年、非常に多くの研究が報告されている^{(18)~(21)}。RIS で期待される機能は、メタサーフェス技術を発展させ、反射・透過特性を調整することにより、電波の振舞いを制御できる機能である。RIS は反射・透過特性を端末移動に追従させて制御し、受信電力を改善することや、RIS の反射波や透過波の活用により MIMO 空間多重度を向上することができる。比較的低コストかつ低消費電力で無線伝搬路を制御でき、NRNT において期待される技術の一つである。一方、反射板技術を移動通信システムで活用するためには解決しないといけない課題が多く存在する。例えば、システムにおける反射・透過方向の制御方法、移動通信事業者間での共用 (あるいは隣接チャネルへの影響の低減)、複数 TRP やマルチユーザへの対応、端末の高速移動への追従、デバイスのマルチバンド化・低消費電力化・大面積化、適用シナリオの明確化などである^{(10), (12)}。

2.2.2 システム制御技術

システム制御技術は、トポロジを認識する機能を有し、システムの効率的な制御や運用・管理を担う。NRNT は空間領域での分散ネットワークを構成し、サービス要件、通信状況、環境に応じた時空間軸での制御を行う。加えて、複数の周波数帯を取り扱うため、周波数軸での制御も必要である。更に、6G では Wi-Fi や WiGig などの異種の無線通信システムとの統合制御も視野に入れられており、複数の異種の無線通信システム間の連携・協調制御、すなわち、システム軸での制御も重要である⁽¹¹⁾。システム制御技術では、物理層であるレイヤ 1 より下に位置することからレイヤ 0 と呼ばれている無線電波伝搬環境を管理する制御から、無線アクセス技術における制御、更には、ユーザのアプリケーションやサービスの QoE (Quality of Experience) に至る上位レイヤまでを含めた制御を実現する必要がある。ユーザの QoE を重視したユーザセントリックな制御を実現できる一方、システムとして複数の KPI の効率的な達成方法も重要であり、両者に

関してバランスの取れた制御が必要である⁽¹⁰⁾。

2.2.3 システム展開技術

移動通信システムの更なる性能向上を目指す NRNT では、多数の無線装置の展開が避けられない。そのため、ネットワーク設備を構築するための費用 CAPEX (Capital Expenditure) や、同設備を保守・運用していくために発生する費用 OPEX (Operating Expense) の削減は NRNT を実現する上で重要な課題である。無線装置自体や設置に掛かるコストの削減が重要であり、例えば、TRP の代わりに無線中継技術や反射板技術を活用して機能が制限された無線装置を許容するシステムを構築できれば、その課題は解決しやすくなる。また、新たな無線装置の形態や装置設置のハードルを下げる工夫も必要である。例えば、街灯、照明、看板、自動販売機、窓ガラスなどの既存オブジェクトを活用した TRP や反射板の展開、A-RoF (Analogue Radio on Fiber) 技術の活用、NRNT を活用したセンシングや無線給電などの非通信技術との融合、誘電体導波路を活用した「置くだけアンテナ」⁽²²⁾ など、従来の移動通信では使われていない新たな技術の導入が考えられる⁽⁹⁾。

3 NRNT の実証実験

上述のとおり、ドコモと NTT では、NRNT の構成技術である分散 MIMO 技術について実証実験を進めているが、それ以外にも、反射板技術や無線中継技術に関する有効性を評価するため、ミリ波帯での実証実験を実施している^{(18), (23)~(29)}。5G Evolution と 6G に向けて、反射板技術や無線中継技術、それらの組合せについては、従来技術では達成できなかった高い性能を低コストで実現できる可能性があり、非常に注目されている研究分野であるため、本稿では、これらの実証実験の一部について簡単に紹介する。

3.1 メタサーフェスレンズと中継器を活用した実証実験

メタサーフェスレンズと中継器の組合せにより、カバレッジが拡大する効果を検証する実証実験が行われている^{(23), (24)}。図 4 に実験の構成を示す。28 GHz 帯 5G 基地局を用い、メタサーフェスレンズ付きのガラスを会議室の入り口に設置した。更に、基地局から電波を受信する中継器のドナーノードをレンズの焦点位置になるように設置し、ドナーノード

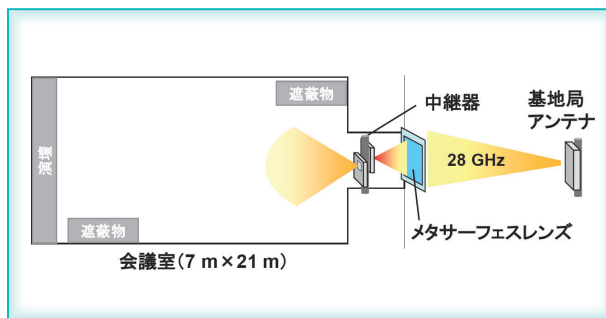


図4 メタサーフェスレンズと中継器を用いた実験

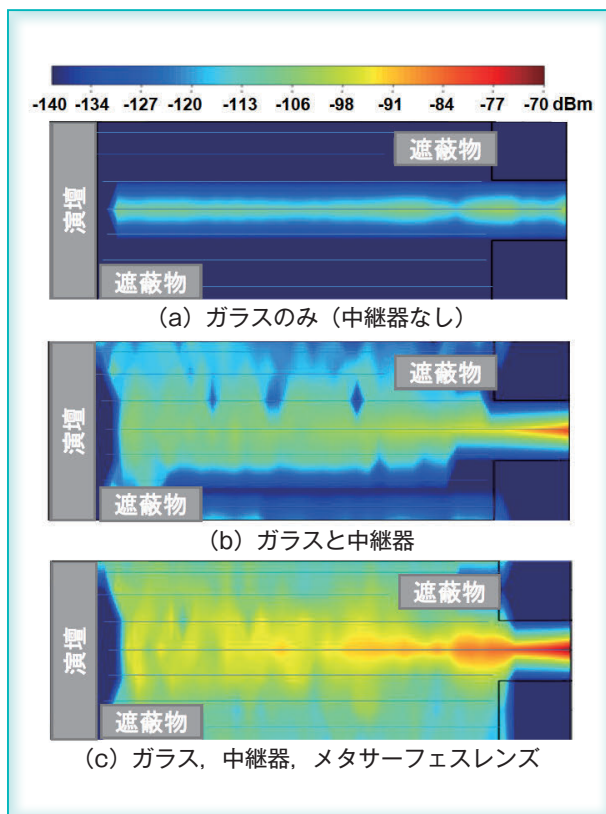


図5 測定された受信電力

ドで受信した電波を中継器のサービスノードにおいて増幅して会議室内に再放射する。

会議室内で測定された受信電力を図5に示す。図5(a)はガラスのみを使用したときの受信電力である。また、図5(b)はガラスと中継器を、図5(c)はガラス、中継器、メタサーフェスレンズを使用したときの結果である。図5(b)から中継器の効果により受信電力が増加しているが、会議室全体をエリア化できていない。一方、図5(c)から、中継器とメタサーフェスレンズを組み合わせることによって受信電力が大幅に向上し、会議室全体のエリア化ができていることが分かる。

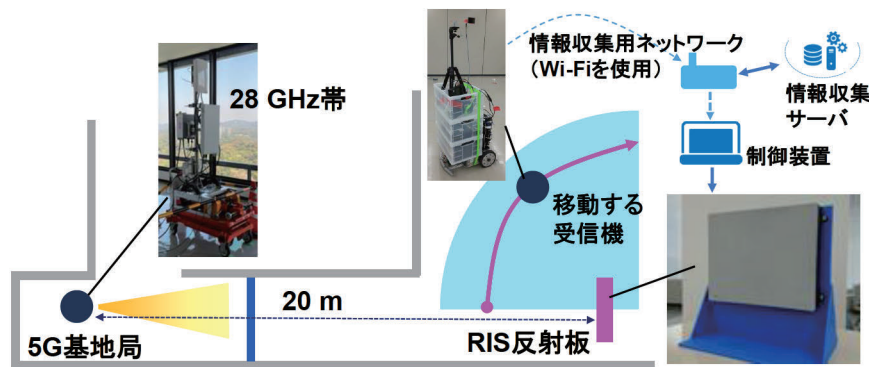


図6 RIS 反射板と端末の位置情報を用いた実験

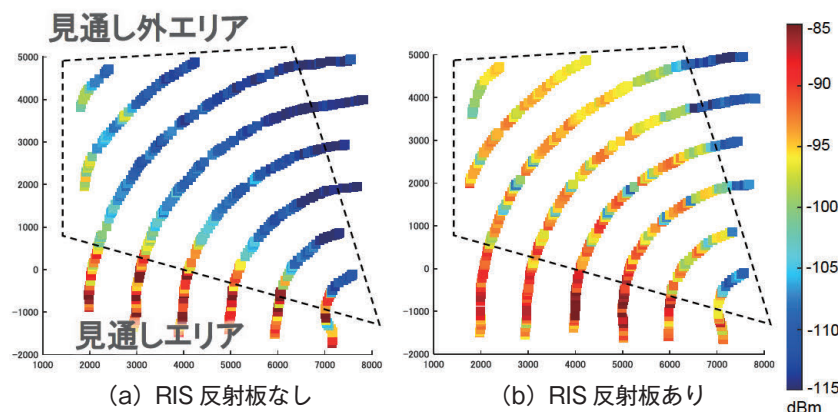


図7 移動する受信機で測定された受信電力

3.2 RIS 反射板と端末の位置情報を活用した実証実験

28 GHz 帯ユーザ追跡型メタサーフェス反射板 (RIS 反射板) の実証実験について紹介する^{(12), (25)}。図6に実験構成を示す。ここで、図中の灰色の線は壁である。28 GHz 帯5G基地局を用いてRIS反射板に電波を放射し、ロボットに搭載された移動する受信機（端末）の位置情報をWi-Fiによって収集し、受信機の位置に応じてRISの反射方向を電氣的に制御した。受信機は移動しながら、それぞれの位置で受信電力を測定した。図7に移動する受信機で測定された受信電力を示す。比較のため、図7(a)にRIS反射板を使用しないときの結果を示しており、見通し外エリアでは、反射波が測定されないため、受信電力が低いのにに対し、図7(b)ではRISのユーザ追従効果により、同エリアの受信電力が最大で20 dB改善できていることが分かる。なお、本実験では別システムにより取得した位置情報を用いてRISの反射方向を制御したが、実用化に向けては、6Gのセンシング技術による端末の位置情報

の取得、あるいは、反射方向を掃引して端末からのフィードバックにより反射方向を決定する方法などが必要である。

3.3 透過型メタサーフェスとBFを活用した実証実験

図8に示すように、窓ガラスに貼り付けたフィルム形状の透過型メタサーフェスを活用することにより、屋内に設置した28 GHz帯5G基地局からの電波を屋外の建物の足元に誘導する実証実験について紹介する^{(26)~(28)}。5枚の透過型メタサーフェスと基地局のBF機能を組み合わせることで、使用するメタサーフェスを高速に切り換え、加えて、メタサーフェスが貼っていない方向に電波を放射することで、メタサーフェスを使用しない制御も行える。本実験では、図8のように5枚の透過型メタサーフェスが横一列に並ぶように設置し、窓ガラスと基地局の距離は0.9 mとした。

図9に下りリンク（Downlink: DL）において端末で測定されたスループットを示す。基地局は建物

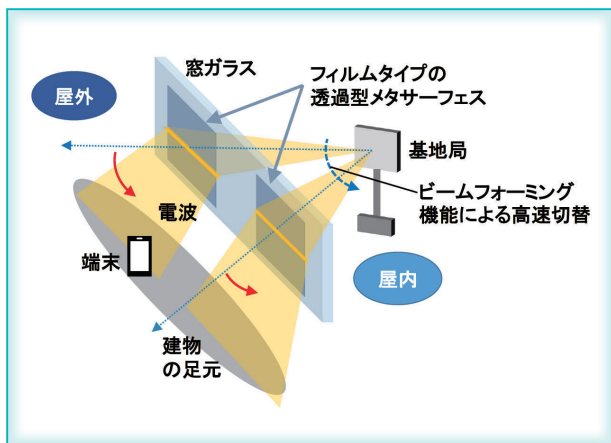


図8 透過型メタサーフェスとBFを用いた実験

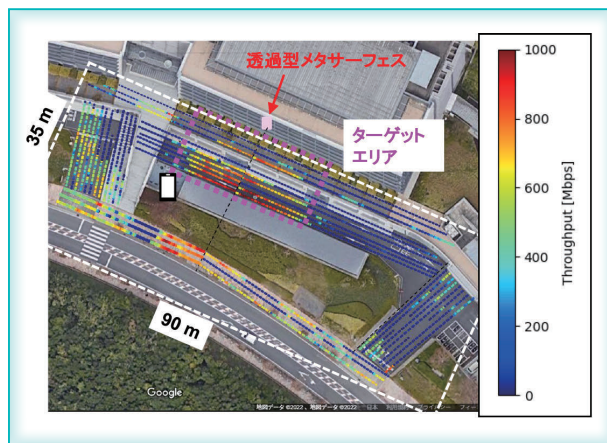


図9 測定されたDL スループット

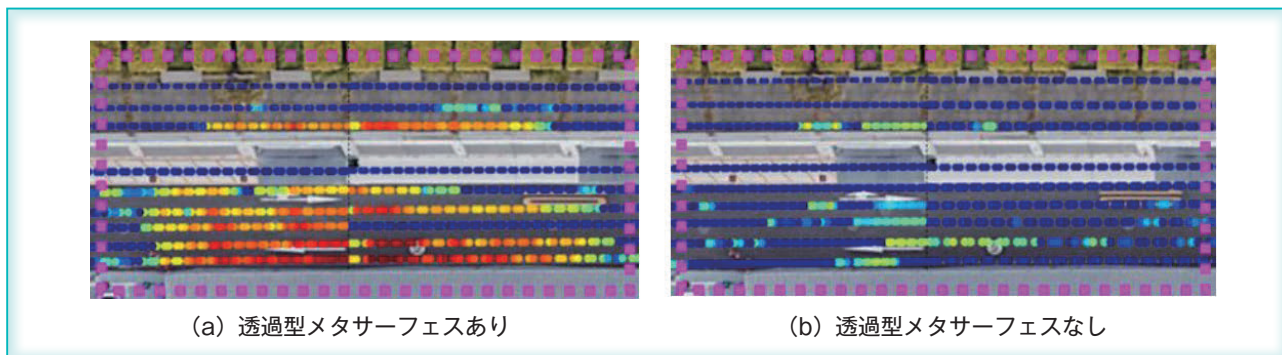


図10 ターゲットエリアで測定されたDL スループット

の5階、地上約20 mの屋内に設置されており、帯域幅は300 MHzである。図中のターゲットエリアがメタサーフェスによりエリア化を目指した場所である。同エリアにおいて測定されたDL スループットを図10に示す。比較のため、メタサーフェスを使用しなかったときの結果も示しており、同エリアでほぼ100 Mbit/s以下のDL スループットであるのに対し、メタサーフェスを使用することで600 Mbit/sを超える場所が大幅に増加していることが分かる。

4 6G シミュレータを用いたNRNTの評価

6Gでは5Gよりも高い通信速度を提供するため、100~300 GHzのサブテラヘルツ帯や7~24 GHzのミッドバンドの活用が検討されている。これらの周波数帯とNRNTの無線アクセス技術を組み合わせた6Gのシステム性能を評価するため、6Gシステムレベルシミュレータ(6Gシミュレータ)が開発されている^{(30),(31)}。本稿では、屋外の都市環境において同シミュレータを用いて実施された評価結果について紹介する。

屋外都市環境における6Gシミュレータの画面を図11に示す。3Dモデリングにより高層ビルに囲まれた開けた広場が表現されており、広場に反射物は存在しないが、樹木が立っている。TRPはビルの壁面あるいは街灯に設置され、ドローンTRPは道路脇の上空を定期的に往復する。RISも街灯などに設置されており、デジタルサイネージの表面にフィルム形状で設置されているRISも存在する。

シミュレーション諸元を表1に示す。Sub 6(6 GHzより少し低い周波数)、ミリ波、ミッドバンド(ミリ波とSub 6の中間の周波数)、サブテラヘルツ帯の四つの周波数帯を用いており、各周波数帯の帯域幅はそれぞれ表のとおりである。TRPには9サブアレー構成のMassive MIMOアンテナが用いられ、各サブアレーは表中の縦×横のアンテナ素子を持った一様平面アレーであり、位相を制御することでビームを形成し、9サブアレーを縦に3、横に3で配置することで9ビームを同時に放射できる。複信方式は時分割多重(TDD: Time Division Duplex)であり、DLと上りリンク(UL: Uplink)の時間比率は7:3とした。22台の端末(UE: User Equipment)がこの環境に配置されており、人が所持あるいはロボットや自動運転車に搭載され

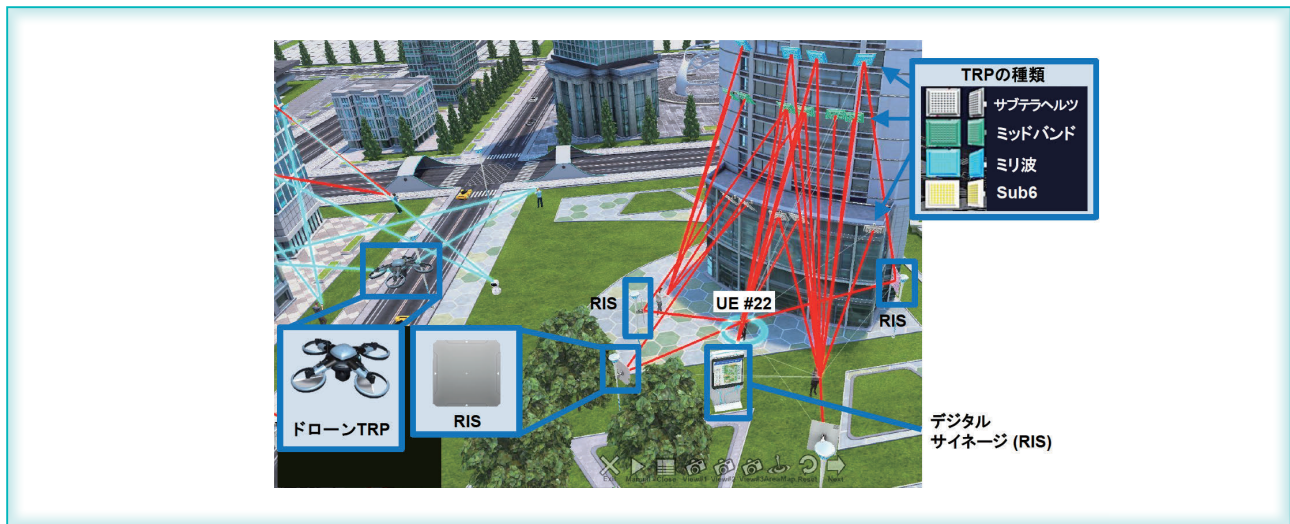


図 11 屋外都市環境における 6G シミュレータ

表 1 シミュレータの諸元

	Sub6	ミリ波帯	ミッドバンド	サブテラヘルツ帯
中心周波数	4.7 GHz	28 GHz	15 GHz	100 GHz
帯域幅	100 MHz	400 MHz	400 MHz	4 GHz
TRP アンテナ素子数 (縦×横×サブアレー)	144 (4×4×9)	2304 (16×16×9)	2304 (16×16×9)	9216 (32×32×9)
TRP 数	3	28	13	11
TRP 送信電力	30 dBm			
UE 送信電力	23 dBm			
MIMO 空間多重数	1, 2, 3, 4, 8, 16, 24			

ている。MIMO 空間多重数については、各 UE に対して 1, 2, 3, 4, 8, 16, 24 の候補から伝搬環境に応じて最大数が選択される。具体的には、各 UE に割り当てられたビームを活用して MIMO 空間多重が行われるため、各 UE に割り当てられたビーム数以下の候補に対するスループットを、伝搬環境に関する情報を利用して予想し、同時に多重される全 UE のスループットの総和が最大になるように空間多重数が決定される⁽³¹⁾。

まずは、ミリ波帯・ミッドバンドの導入時のスループット特性を図 12 に示す。図 12(a) は、図 11 の高層ビル前に位置する水色の輪で囲まれている UE #22 における DL と UL のスループットであり、横軸は時間 (スロット番号) を示している。DL スループットでは、分散 MIMO 技術を適用すること (図中の w/ D-MIMO が適用されたタイミング) で、18 Gbit/s から最大で 32 Gbit/s 程度までスループットが向上していることが分かる。また、図 12(b) では、分散 MIMO に加えて RIS を導入することで、

42 Gbit/s 程度まで DL スループットが向上している。これは NRNT として分散 MIMO と RIS を組み合わせることで、図 11 のように各 TRP 及び RIS からの異なる経路を活用して MIMO ストリームを更に空間多重し、それにより周波数利用効率を向上できたためである。

次に、ミリ波帯・ミッドバンドに加えて、サブテラヘルツ帯の TRP を追加で導入したときのスループット特性を図 13 に示す。図 13(a) では、UE #22 における DL と UL のスループットであり、サブテラヘルツ帯においても分散 MIMO と RIS を活用している。サブテラヘルツ帯の 4 GHz の広い帯域幅を用いることで、ミッドバンドと比較して非常に高いスループットになっており、最大で DL が 126 Gbit/s、UL が 35 Gbit/s のスループットを達成できている。また、図 13(b) はこの環境に配置された全 UE の DL と UL のスループット分布を示しており、0~1 Gbit/s から 100 Gbit/s 超までの 5 種類を色で表現している。横軸が時間、縦軸がスループット分布ごとのユーザの割合である。DL においては 1 Gbit/s 以上のスループットを 100 % の UE で、10 Gbit/s 超を 40 % 以上の UE で、100 Gbit/s 超を約 13 % の UE で達成できている。UL では 20 % 以上の UE において 10~50 Gbit/s のスループットを達成できていることが分かる。

6G シミュレータで用いた RIS は、理想的な動作を仮定していたため、今後は **3.2** や **3.3** で用いた実際の RIS やメタサーフェスなどの特性を取得し、その特性をシミュレータに反映していく予定である。また、今回は 3D モデリングされた屋外都市環境において評価を行ったが、実際に存在する特定の屋内外環境において NRNT の有効性の評価も必

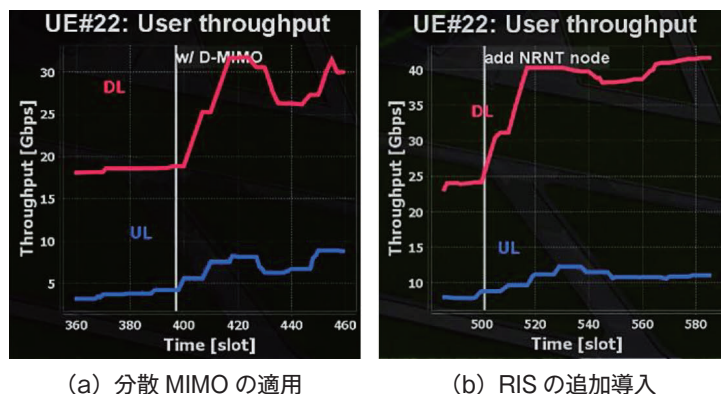


図 12 NRNT 適用時の UE #22 のスループット特性

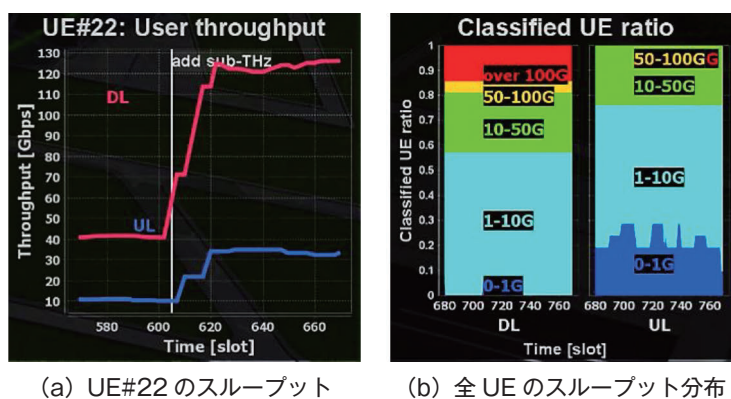


図 13 サブテラヘルツ帯導入時のスループット特性

要である。そのため、実空間で取得した点群データを用いて 3D モデルとして再現できる 6G シミュレータも開発しており^{(5), (32)}、実際の工場環境を取り込んで受信電界強度やスループットの評価を既に進めている⁽³³⁾。今後は、NRNT の実用化に向けて、複雑な条件での詳細なシステム評価を行っていく予定である。

5 まとめ

本稿では、5G Evolution と 6G に向けて検討されている、空間領域で分散された新たな無線ネットワークポロジである NRNT の技術コンセプトについて、その概要と構成技術について紹介した。更に、NRNT の構成技術である反射板技術（メタサーフェス、RIS）や分散 MIMO 技術に関して、最近の実証実験やシミュレーションによる評価結果について示し、その有効性を明らかにした。6G に向けては、引き続き世界各国で様々な技術の研究開発が進められると予想される。その中でも、NRNT

は、AI を活用した CPS によるシステム制御・最適化により、6G の通信性能を低コストで大幅に向上できる高い潜在能力を持っていると考えられ、ドコモと NTT は今後も同技術の実用化を目指して研究開発に取り組む予定である。また、同様に 6G に向けて検討が進められている NRNT 以外の技術については、本稿では紙面の都合で説明を割愛したが、ホワイトペーパーやその別冊などを参考にして頂きたい^{(2), (4), (34)}。

文献

- (1) 総務省，“通信利用動向調査・令和 4 年調査（令和 5 年 5 月 29 日公表）。” https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/statistics/data/230529_1.pdf
- (2) NTT ドコモ，“ホワイトペーパー：5G の高度化と 6G (5.0 版) (Nov. 2022)。” https://www.docomo.ne.jp/corporate/technology/whitepaper_6g/index.html
- (3) 岸山祥久，永田 聡，須山 聡，“5G Evolution & 6G で目指す世界，無線技術と標準化，” 信学誌，vol. 104, no. 10, pp. 1065-1068, Oct. 2021.
- (4) Beyond 5G 推進コンソーシアム白書分科会，“Beyond 5G ホワイトペーパー ～2030 年代へのメッセージ～ 3.0 版 (March 2024)。” <https://b5g.jp/w/>

- wp-content/uploads/2024/03/whitepaper_3-0.pdf
- (5) 中村光貴, 須山 聡, 北尾光司郎, 富永貴大, “新しい電波伝搬研究が支える第6世代移動通信システム,” 信学通誌, no. 66, pp. 111-118, Sept. 2023.
 - (6) NTTドコモ, “国内外の主要ベンダーと6Gの実証実験で協力 - 「5G Evolution & 6G powered by IOWN」の実用化に向けた研究開発において世界をけん引 - (June 2022).” https://www.docomo.ne.jp/info/news_release/2022/06/06_00.html
 - (7) NTTドコモ, “国内外の主要ベンダーと6Gの実証実験の協力体制を拡大 - 新たにEricsson, キーサイト・テクノロジーとの実験協力に合意 - (Feb. 2023).” https://www.docomo.ne.jp/info/news_release/2023/02/27_01.html
 - (8) NTTドコモ, “6G実現に向け新たにSKテレコム, ローデ&シュワルツと実証実験の協力に合意 - Nokia, 富士通, キーサイト・テクノロジーと取り組みを進める実証実験成果も確認 - (Feb. 2024).” https://www.docomo.ne.jp/info/news_release/2024/02/22_00.html
 - (9) 須山 聡, 岩渕匡史, 山田貴之, “5Gの高度化と6Gに向けたNew Radio Network Topology,” 信学誌, vol. 106, no. 9, pp. 808-815, Sept. 2023.
 - (10) 岩渕匡史, 須山 聡, 新井拓人, 中村光貴, 後藤健太, 大宮 陸, 内田大誠, 山田貴之, 小川智明, “5G Evolution & 6Gに向けたNew Radio Network Topologyとその課題,” 信学技報, RCS2022-148, Oct. 2022.
 - (11) 須山 聡, 岩渕匡史, 村山大輔, 山田貴之, 丸田 靖, 村岡一志, “6Gに向けたNew Radio Network Topologyと更なる高度化,” 2023信学ソ大, BS-3-1, Sept. 2023.
 - (12) 岩渕匡史, 米田拓海, 大宮 陸, 須山 聡, 後藤健太, 山田貴之, 小川智明, 鷹取泰司, “New Radio Network TopologyにおけるReconfigurable Intelligent Surfaceへの期待と課題,” 2023信学総大, BT-1-5, March 2023.
 - (13) 菅野一生, 村上隆秀, 新保宏之, 天野良晃, “セルフ展開技術の最新動向,” 信学誌, vol. 106, no. 9, pp. 790-795, Sept. 2023.
 - (14) NTTドコモ, “世界初, 28 GHz帯で遮蔽を気にせず繋がり続ける分散MIMOの実証実験に成功 - ショッピングモールや工場など厳しい遮蔽環境でも, 大容量通信が利用可能に - (Oct.2022).” https://www.docomo.ne.jp/info/news_release/2022/10/31_01.html
 - (15) NTTドコモ, “複数ユーザが移動することで干渉が発生しても, 無線伝送品質を維持できる40 GHz帯分散MIMO実証実験に成功 - 多数の無線端末が集まるイベント会場や工場での大容量通信実現に前進 - (Oct. 2023).” https://www.docomo.ne.jp/info/news_release/2023/10/31_01.html
 - (16) 新井拓人, 和井秀樹, 内田大誠, 須山 聡, 蔣 恵玲, 村岡一志, 竹内俊樹, 丸田 靖, “40 GHz帯分散MIMOシステムを用いた受信品質予測による空間リソース制御の実験評価,” 2024信学総大, B-5A-25, March 2024.
 - (17) 竹内俊樹, 村岡一志, 丸田 靖, 新井拓人, 内田大誠, 蔣 恵玲, 須山 聡, “40 GHz帯分散MIMO向け移動予測に基づくアンテナ・ビーム制御の実験評価,” 2024信学総大, B-5A-26, March 2024.
 - (18) 来山大祐, 濱 優人, 宮地健介, 岸山祥久, “5G Evolution & 6Gに向けた透明RIS技術の研究,” NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル, vol. 29, no. 2, pp. 15-23, July 2021. https://www.docomo.ne.jp/corporate/technology/rd/technical_journal/bn/vol29_2/004.html
 - (19) M. Di Renzo, A. Zappone, M. Debbah, M. -S. Alouini, C. Yuen, J. Rosny, and S. Tretyakov, “Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: how it works, state of research, and the road ahead,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 38, no. 11, pp. 2450-2525, Nov. 2020.
 - (20) Y. Ogawa, S. Tadokoro, S. Suyama, M. Iwabuchi, T. Nishimura, T. Sato, J. Hagiwara, and T. Ohgane, “Smart radio environments with intelligent reflecting surfaces for 6G sub-terahertz-band communications,” IEICE Trans. Commun., vol. E106-B, no. 9, pp. 735-747, Sept. 2023.
 - (21) 毛利 檀, 須山 聡, 蔣 恵玲, “RISを活用した大容量化のためのハイブリッドBFアルゴリズム,” 2024信学総大, B-5A-08, March 2024.
 - (22) NTTドコモ, “ケーブルに置くだけで通信エリアを構築できるアンテナを開発 - 高周波数帯のきめ細かな通信エリア構築を可能にするエリア化ツールの利用シーンを拡大 - (Jan. 2022).” https://www.docomo.ne.jp/info/news_release/2022/01/17_02.html
 - (23) NTTドコモ, “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).” https://www.docomo.ne.jp/info/news_release/2021/01/26_00.html
 - (24) 坪井 淳, 茂木 健, 加賀谷 修, 来山大祐, 宮地健介, 浅井孝浩, “高周波数帯の屋内エリア改善に向けたメタサーフェス, FSS, 中継局技術の有効性の評価,” 信学技報, RCS2021-187, pp. 63-68, Dec. 2021.
 - (25) NTTドコモ, “世界初, 6G時代の超カバレッジの実現に向けたユーザ追従型メタサーフェス制御の実証に成功 (Nov. 2021).” https://www.docomo.ne.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/topics/2021/topics_211112_00.pdf
 - (26) NTTドコモ, “世界初, 透過型メタサーフェスで屋内の電波を屋外の建物の足元に届ける実証に成功 - ビルの足元でもミリ波がつながりやすく - (Jan. 2023).” https://www.docomo.ne.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/topics/2022/topics_230130_04.pdf
 - (27) 後藤健太, 須山 聡, 山田貴之, 新井圭祐, 加賀谷 修, “複数の透過型メタサーフェスとビームフォーミングを用いた28 GHz帯伝送実験,” 信学技報, RCS2023-78, pp. 294-299, June 2023.
 - (28) 新井圭祐, 加賀谷 修, 後藤健太, 須山 聡, “複数の透過型メタサーフェスを用いた28 GHz帯カバレッジ改善,” 信学技報, AP2023-149, pp. 98-103, Nov. 2023.
 - (29) 村山大輔, 芝田卓也, 中平俊朗, 小川智昭, 後藤健太, 蔣 恵玲, 須山 聡, 丸田 靖, “複数の中継局を含む複雑ネットワークの高速な設計制御技術,” 2024信学総大, B-5A-11, March 2024.
 - (30) 立石貴一, 須山 聡, 蔣 恵玲, “第6世代移動通信システムに向けたリアルタイムシミュレータ,” 信学技報, RCS2023-143, pp. 74-78, Oct. 2023.
 - (31) 立石貴一, 須山 聡, 蔣 恵玲, “ミッドバンドを用いる6Gシミュレータの伝送特性評価,” 2024信学総大, B-5A-10, March 2024.
 - (32) 北尾光司郎, 須山 聡, 中村光貴, 富永貴大, 立石貴一, 山田貴之, “点群データに基づく実環境モデル

を用いた 6G シミュレータ,” 信学技報, AP2023-65, pp. 187-191, June 2023.

- (33) 北尾光司郎, 須山 聡, 富永貴大, 久野伸晃, 中村敦也, 立石貴一, 小林真司, 山田弘章, “工場環境における点群データを用いた伝搬特性評価,” 2024 信学総大, B-1A-52, March 2024.
- (34) Beyond 5G 推進コンソーシアム白書分科会, “Beyond 5G white paper supplementary volume (白書別冊) 1.0 版 (March 2024).” <https://b5g.jp/output/>

(2024 年 4 月 19 日受付, 6 月 17 日再受付)

須山 聡 (正員: シニア会員)

平 13 東工大大学院修士課程了。同年同大学院・助手。以来, 移動通信における無線伝送技術の研究に従事。平 19 同大学院・助教。平 22 東工大・博士(工学)。平 25 (株)NTT ドコモ入社。現在, 5G の高度化と 6G に向けて無線アクセス方式・技術及び電波伝搬の研究・実証実験を推進中。同社 6G テック部担当部長。平 16 年度本会学術奨励賞, 平 23 年度本会論文賞, 令 3 年度本会通信ソサイエティ論文賞各受賞。



岩淵匡史 (正員)

平 22 東工大大学院修士課程了。同年日本電信電話株式会社入社。以来, 次世代無線 LAN 技術, 5G 無線アクセス技術の実証, 次世代無線通信システムにおける無線方式技術の研究開発に従事。令 5 東工大・大学院博士課程了, 博士(工学)。現在, NTT 知的財産センター担当課長。平 27 年度本会学術奨励賞受賞。



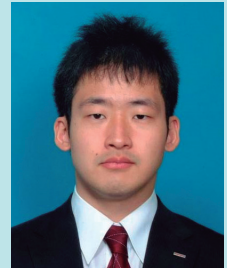
後藤健太

令 2 千葉大大学院修士課程了。同年(株)NTT ドコモ入社。入社以降, 6G に向けた無線アクセス技術の実証実験に従事。



立石貴一 (正員)

平 25 東京理科大学大学院修士課程了。同年(株)NTT ドコモ入社。入社以降, 5G 無線アクセス技術の実証実験に従事。平 30 から 4G/5G 基地局ソフトウェア開発に従事。令 4 から 6G 無線アクセス技術の実証実験に従事。平 28 年度本会学術奨励賞受賞。



村上友規 (正員)

平 20 早大大学院修士課程了。同年日本電信電話株式会社入社。以来, 無線空間信号処理技術の研究開発に従事。平 27 早大・博士(工学)。現在, NTT アクセスサービスシステム研究所特別研究員。平 22 本会学術奨励賞, AP 研若手奨励賞・最多発表賞。平 26 本会通信ソサイエティ論文賞, 平 27 本会喜安善市賞・論文賞各受賞。



テラヘルツ帯無線通信におけるアンテナ・伝搬技術

Antenna and Propagation Technology in Terahertz-band Wireless Communications

枚田明彦 Akihiko Hirata†

Summary

超高速無線通信を実現する手段として、0.1～10 THzの電磁波を利用したテラヘルツ無線の研究開発が進められている。テラヘルツ無線の研究開発の初期段階では、屋外固定無線の利用が主に検討されていたが、テラヘルツ帯デバイス技術の進展に伴い、移動体通信、無線LAN、近接無線など様々なユースケースでの利用の検討が進められるようになった。これらのユースケースを実用化するためには、ユースケースごとの電波伝搬特性を解明し、その伝搬特性に応じたアンテナ・システム開発を行う必要がある。本論文では、テラヘルツ帯を使用した「フロントホール／バックホール無線」、「移動体通信／無線LAN」、「近接無線」、の三つのユースケースにおける電波伝搬特性評価技術、及びアンテナ技術について解説する。

Key Words

テラヘルツ, 無線, アンテナ, 伝搬

1 はじめに

近年の爆発的なデータトラフィック量の増加に対応するために、無線通信システムの高速化に対する需要が高まっている。無線通信システムの高速化を実現する手法の一つが、周波数が0.1 THzから10 THzの電磁波であるテラヘルツ波の利用である⁽¹⁾。テラヘルツ波はその発生・検波が困難であったため、これまで産業的に未利用であった。このため、一つの無線システムが数十GHz以上というマイクロ波では実現し得ない広い帯域を使用することも可能である。

近年、半導体デバイス技術が進展し、100 GHzを超える周波数帯で動作するICの開発が可能になったことに伴い、テラヘルツ無線に関する研究開発が活性化している^{(2), (3)}。更に、この周波数帯の産業利用に向けて、周波数の国際割当を決める標準化会議、2019年世界無線通信会議(WRC-19)において、275～296 GHz, 306～313 GHz, 318～333 GHz, 356～450 GHzの四つの帯域が、移動・固定無線の利用周波数帯として特定された⁽⁴⁾。これらの技術や標準化の進展に伴い、これまでテラヘルツ信号の発生・検波用デバイス開発が主流であったテラヘルツ無線の研究開発に加えて、社会実装に向けたテラヘルツ無線システム開発が進められている⁽⁵⁾。

† 千葉工業大学, 習志野市
Chiba Institute of Technology, Narashino-shi,
275-0016 Japan

テラヘルツ無線システムの実用化に向けた重要な技術の一つがテラヘルツ帯におけるアンテナ・伝搬技術である。アンテナは無線システムの通信距離や移動範囲、移動速度、他システムとの干渉などを決める重要なデバイスである。また、伝搬損や伝搬遅延特性、マルチパスフェージングなどの基本伝搬特性の評価は、無線システム設計のパラメータを決める上で重要な要素である⁽⁶⁾。テラヘルツ波はその短波長性、高周波性から、既存の無線通信で主に使用されているマイクロ波と比較して伝搬特性が大きく異なっている。特に、直進性が高い、自由空間伝搬損や降雨減衰が大きい、という特性から、マイクロ波を使用する無線通信のように、「どこでもつながる」というシステムを構築するには、新たな技術開発が必要である。このため、テラヘルツ無線のユースケースごとにテラヘルツ帯の伝搬特性を把握し、その伝搬特性から必要となるアンテナの仕様を決めていく必要がある。図1にテラヘルツ無線システムの代表的なユースケースを示す。本論文では、これらの「フロントホール／バックホール無線」、「移動体通信／無線LAN」、「近接無線」におけるアンテナ技術、及び伝搬特性における課題について解説を行う。

2 フロントホール／バックホール無線

図2に5G/6G移動体通信におけるネットワーク構成を示す。通信事業者の建物に設置されている携帯電話ネットワークを制御するコアネットワーク



図1 テラヘルツ無線のユースケース

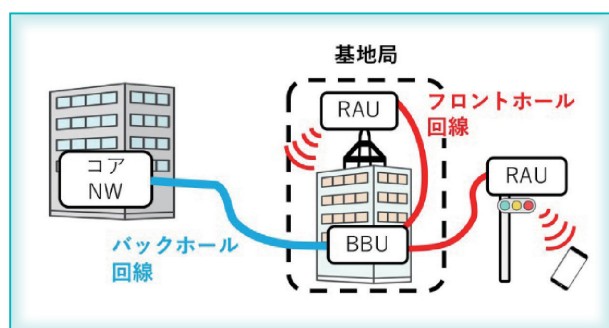


図2 5G/6G のネットワーク構成

(コア NW) と基地局を接続するのがバックホール回線である。また、基地局は、信号処理部分 (BBU: base band unit) と、電波を吹くだけの無線機 (RAU: remote antenna unit) の二つに分けて、BBU は建物内に、RAU を鉄塔上に設置することが多い。BBU と RAU を接続する回線がフロントホール回線である。6G では、5G の 10 倍以上の通信速度を実現するため、街灯や信号灯などに RAU を多数設置し、ユーザ端末との距離を短くすることが検討されている。しかし、多数の RAU を全て光ファイバで接続することは困難であるため、光ファイバと同等の通信速度を実現可能なテラヘルツ固定無線をバックホール／フロントホール回線に使用することが検討されている。

これらの回線の伝送距離は数百 m～数 km になるため、利得が 40 dBi を超える高指向性アンテナが使用される。しかし、300 GHz 帯の高利得アンテナでは、アンテナ径 (150 mm) と波長から算出される遠方界距離が 50 m を超えるが、そのような巨大な電波暗室内はほとんど存在しないため、遠方界特性の実測例はほとんど報告されていない。我々は 300 GHz 帯無線装置を試作し、実験試験局免許

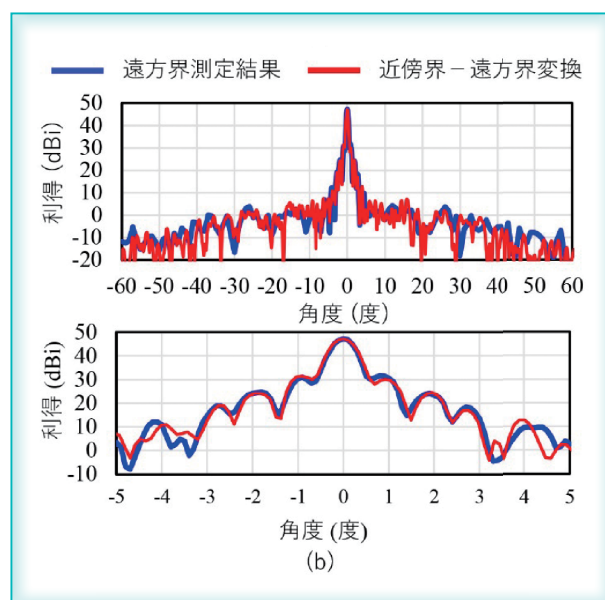


図3 遠方界放射パターン及び近傍界－遠方界変換結果⁽⁷⁾

を取得することにより、屋外での遠方界計測を可能にした。また、精度の高いベクトルネットワークアナライザ (VNA: vector network analyzer) を使用してアンテナの近傍界を測定し、近傍界－遠方界変換を行った結果を遠方界の実測値と比較した⁽⁷⁾。結果を図3に示す。両者はよく一致しており、300 GHz 帯においても近傍界測定－遠方界変換がアンテナ放射パターンの評価に有効な手段であることが明らかとなった。

6G では、超高速通信を実現するため、数十 m～100 m 間隔で RAU を設置する必要があるが、東京都心部のように高層ビルが乱立する都市部において、RAU 間で見通しが取れ、かつ、隣接する回線間で干渉が生じないように多数の RAU を配置することは困難である。我々は、RAU 間で見通しが取



図4 自動配置アルゴリズムにより配置した 300 GHz 帯フロントホール回線の模式図

れ、かつ、隣接する回線間で干渉が生じないように、多数の RAU を自動配置するアルゴリズムについて検討を行っている。東京駅周辺の 5 km 四方のエリアに、基地局自動配置アルゴリズム⁽⁸⁾により RAU と RAU 間を接続するフロントホール回線を設置した。本アルゴリズムでは、5 km 四方のエリアを 22×22 のセルに分割し、そのセル内のビル屋上に一つ以上の RAU をランダムに配置し、設定した通信距離 1 km 以下で見通しが取れる基地局間をフロントホール回線として接続した。配置したフロントホール回線の模式図を図 4 に示す。配置した RAU に図 3 で示すアンテナパターンを実装した電波伝搬シミュレーションを実施し、全ての回線において 100 Gbit/s 以上の伝送速度に必要な受信電力及び回線間干渉電力を考慮した信号対干渉雑音比が得られることを確認した⁽⁹⁾。次に配置したフロントホール回線がゲリラ豪雨時の降雨減衰により、回線断が生じる確率を評価した。設定した東京中心部のエリアにおける 250 m 角のメッシュごとの 1 分間降雨量データを DIAS のデータベースから取得し、2020 年通年のエリア内の回線稼働率を算出した。その結果、99.974 % の回線稼働率となることが明らかとなった⁽¹⁰⁾。

3 移動体通信、無線 LAN

テラヘルツ無線システムでは、送信機出力がデバイス性能限界により数 mW 程度しか得られないことや自由空間伝搬損が大きいことなどから、20 dBi 以上の高利得アンテナを使用する必要がある。

表 1 建材の複素誘電率

	実験結果 (@300GHz)	ITU-R 勧告 (@95.9GHz)
コンクリート	5.42 - j0.38	6.20 - j0.34
ガラス	6.67 - j0.01	6.76 - j0.19
御影石	5.69 - j0.02	

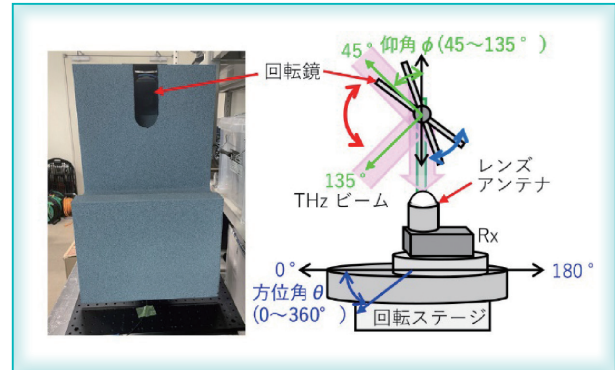


図5 テラヘルツ波半球スキャナの写真と模式図

しかし、移動体通信や無線 LAN の端末に高利得アンテナを使用した場合、アンテナから放射される電波は絞られて放射されるため、エリアをカバーするためには、ビーム走査アンテナの開発が必要である。近年の IC デバイス技術の進展により、300 GHz 帯においてもフェイズドアレーアンテナ用 IC の製造が可能になったため⁽¹¹⁾、300 GHz 帯の電波を使用した移動体通信や無線 LAN の研究開発が開始されている。これらの応用においては、ビルの外壁や部屋の壁などの反射が伝搬特性に大きな影響を与える。建材の反射特性は、建材の複素誘電率が定まれば算出することが可能であるが、100 GHz 以上の周波数における建材の複素誘電率のデータは存在しなかった。そこで、我々はテラヘルツ時間領域分光 (THz-TDS) 装置を利用したエリプソメトリ法により、各種建材の複素誘電率を測定した。計測した 300 GHz における建材の複素誘電率を表 1 に示す⁽¹²⁾。これらの複素誘電率の値を電波伝搬シミュレータに実装した。

次に我々は室内における電波伝搬の到来角度 (DOA: direction of arrival) 特性の測定を実施した。DOA 測定には、無線装置のアンテナを半球状に走査する必要があるが、既存の測定装置は無線機自体の仰角と方位角を走査するため、装置が大形化し、様々なユースケースでの測定が困難であった。我々は、高速計測が可能な 300 GHz 帯小形半球スキャナを開発し⁽¹³⁾、会議室での DOA 測定を実施した。図 5 に半球スキャナの模式図と写真を示す。スキャナは 300 GHz 受信機 (Rx)、回転鏡、回転ステージから構成されている。PC に接続した

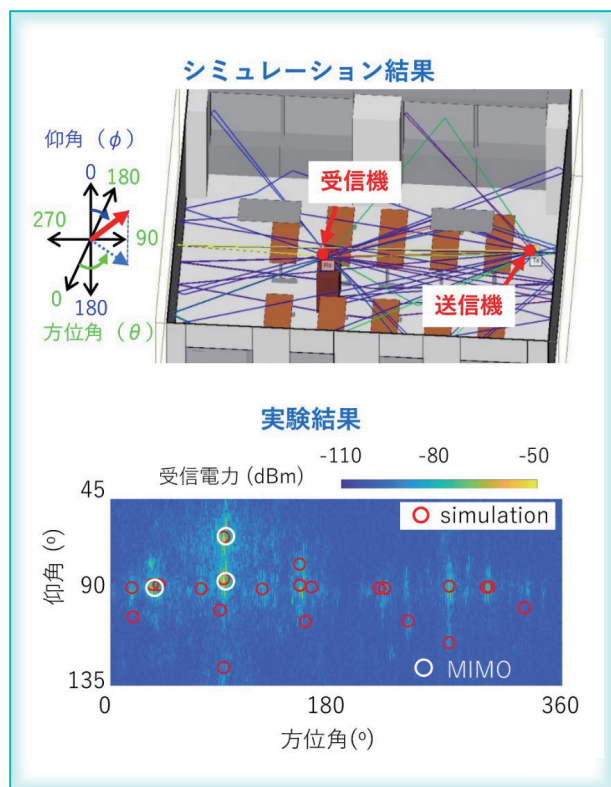


図6 会議室でのDOA測定及びシミュレーション結果

ステージドライバで回転鏡と回転ステージを制御し、テラヘルツビームの仰角と方位角方向を変化させ測定を行う。

会議室内において、受信機を部屋の中央に設置した場合のDOA測定結果、及び建材の誘電率の測定値を実装した電波伝搬シミュレーションの結果を図6に示す。両者はよく一致しており、半天球スキャナ、及び複素誘電率の測定値を実装した電波伝搬シミュレータの精度を確認することができた⁽¹³⁾。

次に、室内無線LANの通信容量拡大に向けて、300 GHz帯でMulti-Input Multi-Output (MIMO) 伝送システムの構築が可能か検討を実施した。MIMO伝送とは複数の送受信アンテナを用いて信号を空間多重伝送する技術である。MIMO伝送を可能にするためには、受信点において所要受信電力を超える伝搬路が複数存在する必要がある。そこで、図6に示す会議室での実験結果及びシミュレーションモデルを使用し、MIMOシステムを適用した場合に、各測定点で必要な受信電力を超える伝搬路が二つ以上存在するかを調べた。図6に白丸で示したDOAが50 Gbit/s以上の伝送速度を実現するための所要受信電力を超える伝搬路である。この結果が示すように、会議室の中央では所要受信電力を超える伝搬路が三つあることが分かる。実験では会議室内の9点でDOA測定を実施したが、全ての測定点において二つ以上の伝搬路が得られた。次に

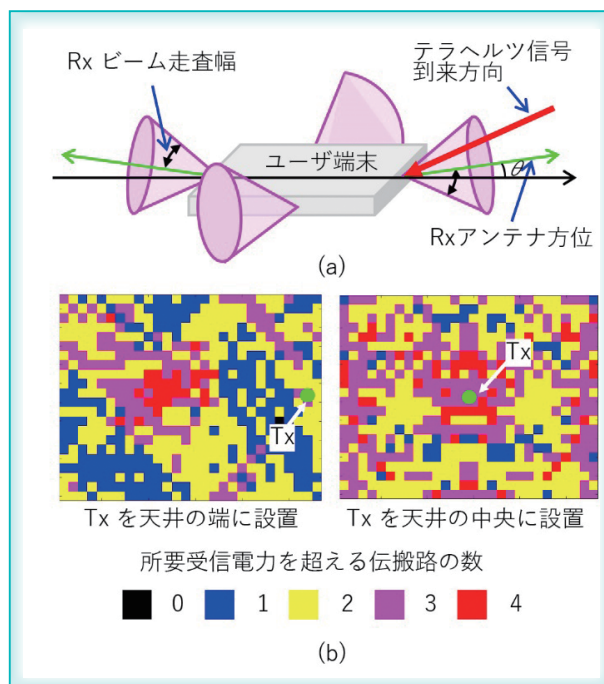


図7

- (a) MIMO 受信用ユーザ端末アンテナの模式図
(b) 会議室内で所要受信電力を超える伝搬路数のシミュレーション結果

伝搬シミュレーションを使用して、図7(a)に示す端末の四辺にビーム走査アンテナを配置した端末を受信機に用いた場合について、会議室内で所要受信電力を超える伝搬路数のシミュレーション結果を図7(b)に示す。MIMO伝送カバー率を、全測定点のうち所要受信電力を超える伝搬路が2以上あるRxの割合として定義した場合、送信機(Tx)を会議室の端に配置した場合、MIMO伝送カバー率は71%となった。一方、Txを会議室の中央に配置した場合、多くの地点で受信可能な伝搬路数が2以上となり、85%以上のMIMO伝送カバー率が得られた⁽¹⁴⁾。

テラヘルツ波は直進性が強いいため、移動体通信・無線LAN応用においては人体による遮断・散乱がこれらのユースケースでの電波伝搬特性に大きな影響を与える。しかし、テラヘルツ帯における人体近傍での電波伝搬特性についてはこれまで評価されていなかった。特にテラヘルツ帯の電波は波長が短いため、マイクロ波帯では考慮されていなかった腕と胴体の隙間や着衣がこれらの伝搬特性に影響を与えと考えられる。そこで、人体近傍でのテラヘルツ波のDOA特性を半天球スキャナを用いて評価した。ただし、人体近傍の電波伝搬モデルを構築するためには、生体の近傍に送信機・受信機を配置し、長時間を掛けた大量の伝搬データの測定が必要である。しかし、生体を用いて長期間の再現性のある実験を

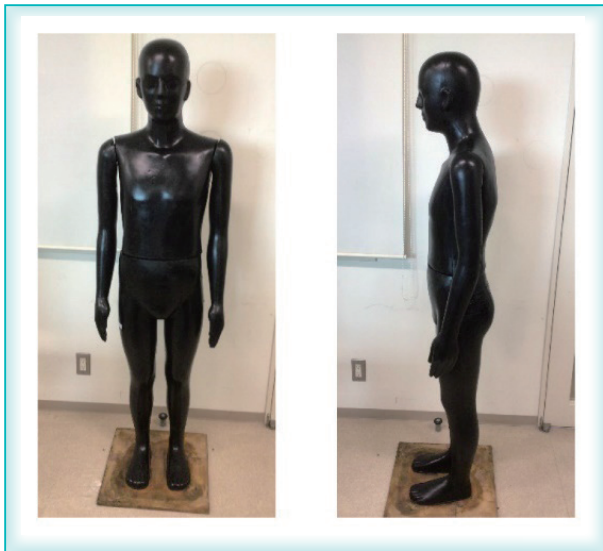


図8 300 GHz 帯人体ファントムの写真

行うことは困難であるため、人体と同じ誘電率を持つ人体ファントムを用いる必要がある。我々は、材料メーカーの協力を得て、様々なファントム材料を作製し、THz-TDS を用いてそれらの複素比誘電率を測定した。複数のファントム材料の中で、特殊なシリコーンゴム材料の複素比誘電率の測定値は、実部が4.6、虚部が1.2であった。このシリコーンゴム材料を用いて、図8に示す人体ファントムを試作した⁽¹³⁾。

この人体ファントムを使用し、人体での散乱・回折特性の評価を実施した。人体ファントムがテラヘルツ波の伝搬路を遮断している場合の DOA の測定結果を図9に示す。送信機-受信機の距離は1 m、送信機・受信機の高さは1.2 mであり、伝搬路の中央に人体ファントムの胴体の中心が来るように設置した。ダウンコートなしの場合、両腕の外側で回折する二つの伝搬経路が観測された。更に、胴体と腕の間を通る伝搬路が胴体の左右に観測された。腕の外側を通る伝搬路の DOA と比較し、胴体と腕の間を通る二つの伝搬路の DOA は仰角方向に広がっている。人体ファントムがダウンコートを着用している場合、ダウンコートを着用していない実験と比較して、これらの経路は DOA が仰角方向に広がりを持っている。これは、ダウンコート内での散乱によると考えられる。また、DOA が左右で非対称になっているが、これは人体ファントムにダウンコートを着せた際に、左右でコートの腕の部分のしわの寄り方が異なるためと考えられる。これらの結果から、胴体の中心がテラヘルツ電波の伝搬路を遮断した場合、胴体と腕の間の隙間や着衣が人体による回折特性に大きな影響を与えることが明らかとなった⁽¹³⁾。

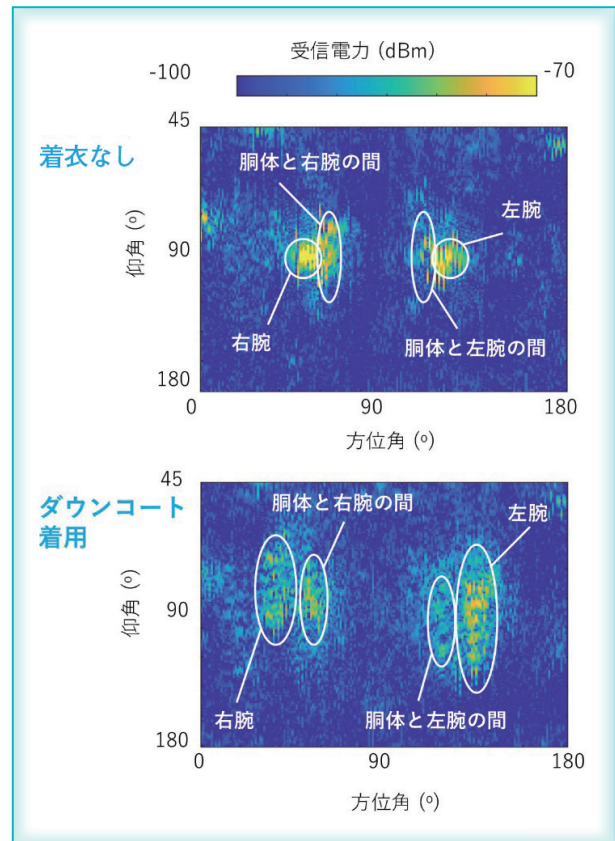


図9 伝搬路を人体が遮断時の DOA 測定結果

4 近接無線

現在の無線 LAN 技術では、一つのアクセスポイントに多数の端末からアクセスが集中した場合、通信のふくそうが生じ、通信速度が安定しない、電波の漏れにより情報漏えいが起こる危険性がある、などの欠点がある。無線 LAN の接続の簡便性を維持したまま、これらの問題点を解決する手段の一つがシート LAN 技術である。シート LAN 技術とは、無線通信の電波を誘電体シート内に閉じ込めて伝送し、受信機の底面に受信モジュールを実装することにより、誘電体シートに接触した端末のみがネットワークに接続できる、有線 LAN と無線 LAN の長所を併せ持つ LAN 技術である⁽¹⁵⁾。図10に無線 LAN とシート LAN の比較を示す。シート LAN は、誘電体シートに電波を閉じ込めて伝送するため、異なるアクセスポイント間での干渉が生じず、電波の漏れもほとんどなく、電波の傍受によるセキュリティリスクの低減も可能である。5 GHz 帯の電波を使用したシート LAN は既に商用化されているが、商用化されたシート LAN の通信速度は 54～300 Mbit/s 程度である。

我々は、既存の有線 LAN、無線 LAN と同等以上の通信速度を有するシート LAN を実現するため、120 GHz 帯シート LAN の研究を実施してい



図10 無線LANとシートLANの比較

る⁽¹⁶⁾。116-134 GHzは日本では移動業務に割当済みであり、この帯域を使用すれば大容量通信が可能となる。図11は本論文で提案するシートLANでの使用を検討しているテラヘルツ帯伝送路の模式図である。中空導波管の上面の一部を除去し、除去した面にSRR (split ring resonator) を集積したガラス基板を配置している。SRRはスプリット部のキャパシタンスと、リング部のインダクタンスで構成される、最小級サイズの共振器の一つである。図11 (a) のようにガラス基板に誘電体シートが接触していないときには、SRRは中空導波管内を伝搬する120 GHz帯信号を反射するため、ポート1からポート2への伝送損を減少させる。また、図11 (b) のようにガラス基板に誘電体シートが接触すると、SRRの持つ共振特性が失われ、中空導波管内を伝搬する120 GHz帯信号の一部がガラス基板を通過して誘電体シート側に誘導される。

図12 (a) は三次元電磁波シミュレーションモデルの模式図である。本シミュレーションモデルは中空導波管の上部の一部分を取り除き、取り除いた部分に厚さ200 μm のガラス基板を設置している。ガラス基板の表面には厚さ5 μm の金でSRRを形成した。これによって、誘電体シート非接触時には方形導波管内にテラヘルツ波を閉じ込めて伝送し、誘電体シート接触時には接触したエリアで誘電体シート側にテラヘルツ信号を導波することが可能になる。図12 (b) に試作した導波管モジュール及びSRR集積ガラス基板の写真を示す。導波管モジュール上部の穴にSRR集積ガラス基板を実装して使用する。モジュールの両端にVNAの周波数エクステンダを接続することにより、試作した導波管モジュールの通過損を評価することが可能である。

図12 (b) に示すSRR集積ガラス基板を搭載した導波管モジュールの通過損を図13に示す。125

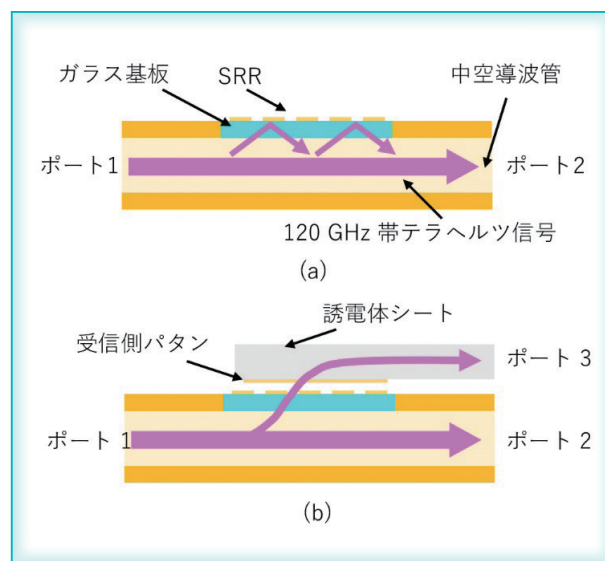


図11 本研究で提案する (a) 誘電体シート非接触時 (b) 誘電体シート接触時—のシートLANの模式図

GHzにおける通過損は、シミュレーション結果は2.31 dB、実験では2.57 dBとなり、両者の値はよく一致している。これらの結果はガラス基板上面に集積したSRRにより、120 GHz帯信号を中空導波管内に閉じ込めて伝送可能であることを示している。

次に、SRR集積ガラス基板の上面に誘電体シートを接触させることで、接触した誘電体シートに中空導波管内を導波するテラヘルツ信号の一部を導波させ、誘電体シートに接続した受信機により伝送した無線信号のデータ復調が可能であるか検討した。図14 (a) は図12 (b) の導波管モジュール上に実装したSRR集積ガラス基板に幅2 mmの誘電体シートを接触させた場合の実験系の写真である。ポート2は導波管終端器で終端されている。通過損の測定時には、誘電体シートの端部にはVNAを接続し、データ伝送実験の際は、受信機を接続する。ガラス基板に誘電体シートを接触させた場合の

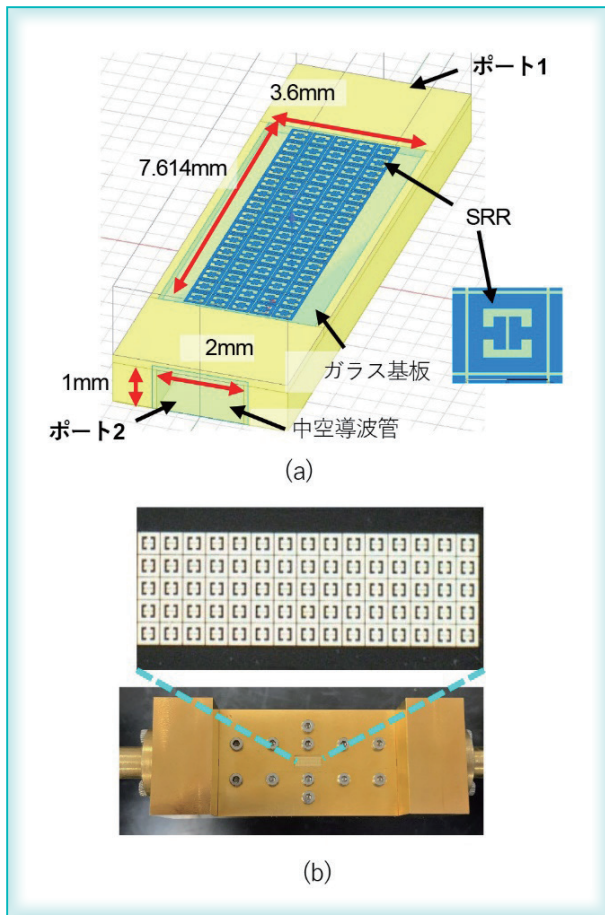


図 12

(a) テラヘルツ帯伝送路の電磁界シミュレーションモデル
(b) 導波管モジュール及び SRR 集積ガラス基板の写真

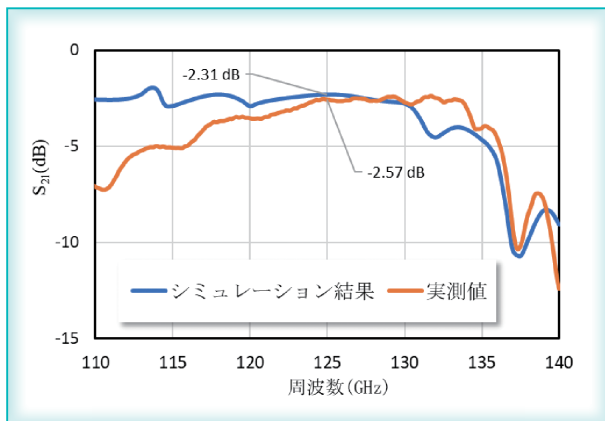
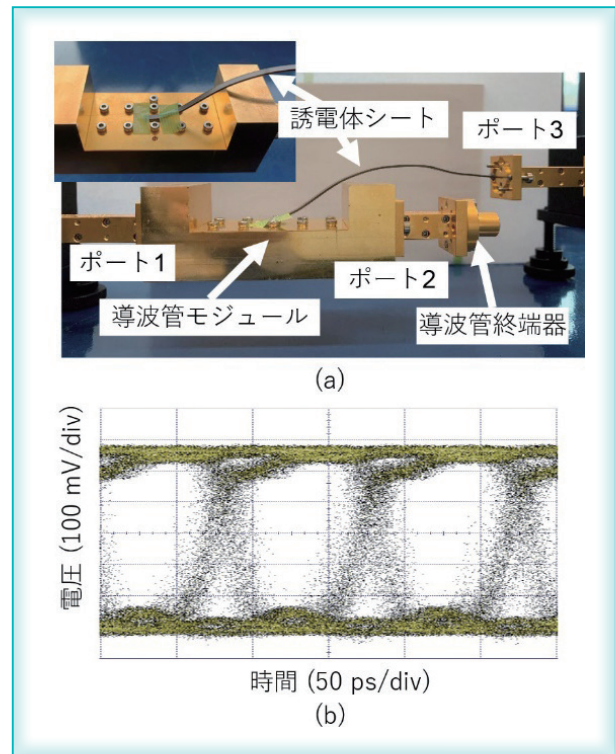


図 13 SRR 集積ガラス基板を実装した導波管モジュールの通過損のシミュレーション結果と実験結果⁽¹⁵⁾

125 GHz における伝送損は 19 dB であった。すなわち、中空導波管を伝搬する 125 GHz 無線信号の約 1.2 % が誘電体シートに導波されることが明らかとなった。図 14 (b) に送信電力 0 dBm で 10 Gbit/s ASK データ伝送時に包絡線検波で復調した信号のアイパターンを示す。送信電力 0 dBm で 10^{-10} 以下のビット誤り率が得られた。以上の結果より、120 GHz 帯シート LAN で 10 Gbit/s デー

図 14⁽¹⁶⁾

(a) 誘電体シート接触時の伝送特性評価系の写真
(b) 復調後の 10 Gbit/s データのアイパターン

タ通信が可能であることが明らかとなった。

5 まとめ

本論文では、テラヘルツ帯を利用したフロントホール／バックホール無線、移動体通信／無線 LAN、近接無線の三つのユースケースにおける電波伝搬特性評価技術、及びアンテナ技術について解説を行った。屋外固定無線であるフロントホール／バックホール無線では、豪雨時の回線断が課題であり、豪雨時における減衰特性を解明するとともに、通信断となる回線を事前に予測し、事前に切り換える技術の開発が必要である。移動体通信／無線 LAN については、建材の粗面での散乱特性、及び人体での散乱・回折特性のモデル構築などを早期に行う必要がある。近接無線では、近接したデバイス間のテラヘルツ帯における電磁結合メカニズムの解明が重要である。テラヘルツ無線の広帯域性は非常に魅力的であるため、テラヘルツ帯でのアンテナ・伝搬技術の開発を進めることにより、テラヘルツ無線の早期の社会実装を実現することが期待される。

謝辞 本研究の成果の一部は、国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) の委託研究 (No.00401, 04301), 及び総務省「電波資源拡大のための研究開発 (JPJ000254)」により得られたものである。

■文献

- (1) H. -J. Song and T. Nagatsuma, "Present and future of terahertz communications," IEEE Trans. THz Sci. and Technol., vol. 1, no. 1, pp. 256-263, Sept. 2011.
- (2) A. Hirata, R. Yamaguchi, T. Kosugi, H. Takahashi, K. Murata, T. Nagatsuma, N. Kukutsu, Y. Kado, N. Iai, S. Okabe, S. Kimura, H. Ikegawa, H. Nishikawa, T. Nakayama, and T. Inada, "10-Gbit/s wireless link using InP HEMT MMIC for generating 120-GHz-band millimeter-wave," IEEE Trans. Microw. Theory and Techn., vol. 57, no. 5, pp. 1102-1109, June 2009.
- (3) H. Hamada, T. Tsutsumi, H. Matsuzaki, T. Fujimura, I. Abdo, A. Shirane, K. Okabe, G. Itami, H.-J. Song, H. Sugiyama, and H. Nosaka, "300-GHz-band 120-Gb/s wireless front-end based on InP-HEMT PAs and mixers," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 55, no. 9, pp. 2316-2335, July 2020.
- (4) T. Kürner and A. Hirata, "On the impact of the results of WRC 2019 on THz communications," IWMTS 2020, pp. 1-3, July 2020.
- (5) 須山 聡, 奥山達樹, 野中信秀, 浅井孝浩, "6G におけるサブテラヘルツ波の活用に向けた NTT ドコモの取り組み," 2022 信学総大 CI-7-6, March 2022.
- (6) 猪又 稔, 山田 渉, 久野伸晃, 佐々木元晴, 北尾光司郎, 中村光貴, 石川博規, 小田恭弘, "第 6 世代移動通信システムにおけるテラヘルツ波帯利用に向けた電波伝搬特性," 信学技報, vol. 120, RCS-204, pp.36-41, Oct. 2020.
- (7) 枚田明彦, "300 GHz 帯無線におけるユースケースに即した電波伝搬特性の研究," 信学技報, vol. 122, SRW-83, pp. 20-24, June 2022.
- (8) 古川翔一郎, 奥村 凌, 枚田明彦, "300 GHz 帯フロントホール回線におけるゲリラ豪雨時の回線稼働率評価," 2022 信学ソ大, B-1-18, Sept. 2022.
- (9) R. Okumura and A. Hirata, "Automatic planning of 300-GHz-band wireless backhaul link deployment in metropolitan area," 2020 ISAP2020, 3G3-7, Jan. 2021.
- (10) 古川翔一郎, 白神澄弥, 奥村 凌, 枚田明彦, "自動配置アルゴリズムにより配置した Beyond 5G フロントホール無線回線の局所的豪雨時の回線接続率評価," 信学論 (B), vol. J106-B, no. 11, pp. 760-767, Nov. 2023.
- (11) I. Abdo, C. da Gomez, C. Wang, K. Hatano, R. Li, C. Liu, K. Yanagisawa, A. A. Fadila, T. Miura, K. K. Tokgoz, J. Pang, H. Hamada, H. Nosaka, A. Shirane, and K. Okada, "A bi-directional 300-GHz-band phased-array transceiver in 65-nm CMOS with outphasing transmitting mode and LO emission cancellation," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 57, no. 8, pp. 2292-2308, June 2022.
- (12) 浦橋正朗, 枚田明彦, 水津光司, "THz-TDS を用いた 200-500 GHz における建材の複素誘電率の特性評価," 2021 信学総大, C-14-1, March 2021.
- (13) A. Hirata, "Measurement of 300-GHz-band radio propagation characteristics in the vicinity of human body using terahertz hemispheric scanner," IEEE AP-S/USNC-URSI, pp. 1221-1222, July 2023.
- (14) A. Hirata, "Coverage analysis of indoor 300-GHz-band MIMO systems," URSI AT-RASC, F11-2, 2024.
- (15) <http://www.kyoei-ele.com/products/index.php/prod/info/205/file/2.pdf>
- (16) 熊木智大, 枚田明彦, 加賀谷 修, "誘電体基板を用いた 120 GHz 帯低損失高速接触通信の検討," 信学技報, vol. 123, MWPTHZ-118, pp. 147-150, July 2023.

(2024 年 1 月 30 日受付, 4 月 15 日再受付)

枚田明彦 (正員・シニア会員)

1992 東大・理卒. 1994 同大学院修士課程了. 同年日本電信電話株式会社入社. 2016 千葉工大・工・情報通信システム工学・教授. 博士 (工学). 2007 年度本会業績賞, 2011 年度文部科学大臣賞各受賞. 現在, センサネットワーク, ミリ波・テラヘルツ波無線の研究に従事.



共進化するテラヘルツ無線技術と人間拡張工学

Co-evolution of Terahertz Wireless Technology and Human Augmentation Technology

門内靖明 Yasuaki Monnai[†] 村本剛毅 Goki Muramoto[†] 矢崎武瑠 Takeru Yazaki[†] 内藤竜治 Ryuji Naitou[†]
齊藤寛人 Hiroto Saito[†] 前川和純 Azumi Maekawa[†] 稲見昌彦 Masahiko Inami[†]

Summary

身体内外の体験を高精細に記録する計測（例えば 360°カメラ、ライトフィールドカメラ、ハイスピードカメラ、モーションキャプチャ、超音波エコー、多点生体電位計測、BMI 等）は空間的にも時間的にも大容量のデータを生成する。筆者らは、このようなデータに基づいて構築される人間拡張工学と、そのデータを高速・大容量に無線伝送するテラヘルツ無線技術とが共進化すると考え、テラヘルツ波の変調や伝送に関する技術基盤から人間の認識行動を拡張する応用技術まで通貫した研究開発に取り組んでいる。本稿ではその取組みの現状と展望を解説する。

Key Words

身体情報学, 人間拡張工学, テラヘルツ波, Beyond 5G/6G

1 はじめに

「ラスト・ワンマイル」と称される通信インフラのボトルネックを解消することは、5G までの無線通信の発展の指導原理であり、これによって高品質な映像を高速ストリーミング可能な通信環境が整備されてきた。肉眼では見えない時空間を越えた世界や仮想世界を可視化する映像メディアは人間の視覚を拡張する役割を果たし、視力限界である約 120 ppd (pixel/degree) をベンチマークとして 8K まで高解像度化・大容量化されてきた。このような映像メディアによる視覚の拡張と無線通信の高速化・大容量化の間には相互に促進し合う共進化関係を見いだすことができる。

しかし、映像メディアが人間の視力限界に迫る今後、この共進化は停滞を迎えることになるのだろうか？ 現在よりも更に高速大容量・低遅延・多数接続可能な無線通信は我々に何をもたらすのだろうか？ 筆者らは、ここで鍵になるのが人間拡張工学であると考え、人間拡張工学では、センサやディスプレイ、アクチュエータなどのデバイスを身体上あるいは身体周辺に配置し、神経系のように機能するネットワークを構築することで、拡張的な感覚器・運動器として機能させる試みがなされている⁽¹⁾。これは映像メディアによって、言わば潜在的に行われていた感覚の拡張を、随意で能動的な身体として

の拡張に引き上げる試みと捉えることができる。そして、その技術基盤となる無線通信には、現実と等価な知覚情報を得るための高品質性に加えて、自己と他者及び環境の間にインタラクションを確保するための双方向性と低遅延性が求められる。身体周囲の 1 m 程度の領域は自己近傍空間（ペリパーソナルスペース）と呼ばれ、身体と周囲の物体や環境、及びそれらに対する行為を結び付ける知覚にとって特に重要である⁽²⁾。各人の身体を起点とするこの「ファースト・ワンメータ」（最初の 1 m）を高速大容量・低遅延な無線通信でカバーできれば、環境や他者から感覚情報を受信だけでなく、環境や他者に生体情報や運動情報を送信できるようになり、自己近傍空間も物理的な制約を超えて拡張されることが考えられる。

知覚の総体としての体験に伴う情報は大容量データとなる。そのため、ファースト・ワンメータにはそれを伝送可能な無線通信が必要となる。ここで、身体的な体験をデータ量の観点から捉える手掛かりとして「百聞は一見にしかず」という言葉を考えてみる。視覚は左右 2 個の眼の中にメガピクセルのセンサがあるが、聴覚は左右 2 個しかない。一方で、聴覚は 20 kHz 程度の周波数まで検出できるが、視覚は通常 10 Hz 程度である。つまり、空間的な分解能は視覚の方が 6 桁高く、時間的な分解能は聴覚の方が 3 桁多い。時間分解能と空間分解能の積を考えると「千聞でようやく一見」と釣り合いそうであり、同じ時間幅の動画ファイルと音声ファイルのサイズが 3 桁ほど異なることは日常的な経験とも符合する。

[†] 東京大学先端科学技術研究センター，東京都
Research Center for Advanced Science and
Technology, The University of Tokyo, 153-8904
Japan

更に、「百聞百見は一験にしかず」という言葉もある⁽³⁾。これは体験によって得られるデータ量は「見聞きする」だけよりも大きいと換言できる。身体的な体験を他者に伝達する試みとして、技能動作をHDカメラや筋電センサによって記録し、HMD (Head Mounted Display) や振動モータを通じて他者に提示する方法の有効性が示されている⁽⁴⁾。今後、体験をより高精細に共有することで、より精密なスキル伝達や共感的理解などを促せる可能性がある。

体験は、視聴覚に加えて触覚、嗅覚、味覚などの情報も伴い、身体の運動に合わせて刻々と変化する。そして、それらは他者が存在する社会的な文脈の中で行われ、最終的に脳に伝えられて約100億個と言われるニューロンが形成する複雑なネットワークに作用する。このような脳活動を直接取り扱うBMI (Brain Machine Interface) においては、今後センサ自体に加えて取得データの伝送方法に関する研究開発も一層重要になると考えられる。一例として、侵襲型電極アレーでは3,072 Chの電極により得られる信号が最大18.6 kHzのサンプルレートで10 bitでA-D変換されており⁽⁵⁾、そのデータレートは無圧縮で0.6 Gbit/sになり得る。また、超音波を用いて非侵襲的に脳活動を読み取る例では、128 Chのトランスデューサで15.6 MHzの超音波を14 bitでA-D変換しており⁽⁶⁾、無圧縮で28 Gbit/sになり得る。これは無圧縮8K映像のデータレート⁽⁷⁾に迫りつつあり、今後その送信や受信にはTbit級の伝送速度が必要になる可能性が考えられる。

また、感覚器による知覚は脳の情報処理とも密接に関連しており、例えば視覚が失われた場合に脳の視覚野が聴覚情報処理を拡張して、エコーロケーションの能力を発達させられる場合があることが知られている⁽⁸⁾。今後脳機能の解明が進み、更に感覚情報を統合することで、新たな認知能力が生まれる可能性もある⁽⁹⁾。大容量データとなる感覚情報や脳活動情報を伝送する技術は、そのための基盤としても今後重要性を増すと考えられる。

このように人間拡張工学の基盤となる無線通信では、Tbit級のデータ伝送を低遅延で双方向的に行うことが重要となる。映像メディアと無線通信の共進化は、人間拡張工学と無線通信の共進化に継承され、とりわけ各人の身体を起点としたファースト・ワンメータへの要求が今後一層高まると考えられる。

2 テラヘルツ無線技術への取組み

身体内外の情報を、例えば360°カメラ、ライトフィールドカメラ、ハイスピードカメラ、モーションキャプチャ、超音波エコー、多点生体電位計測、BMIなどにより高精細に取得して伝送するには、Tbit級の高速大容量化・低遅延化が重要になると考えられる。テラヘルツ帯 (本稿ではおおむね300 GHz前後とする。) をキャリアとする無線通信では、その広帯域性によってTbit級を見込む高速なデータ伝送が可能になると考えられており、発振器や検波器、増幅器などの研究開発が進められている⁽¹⁰⁾。また、テラヘルツ帯では短波長化に伴ってアンテナが小形化されるため、身体の一部のような装置によって人間を計測したり、人間に情報を提示したりすることができ、物理世界と情報世界とを融合させる技術基盤となり得る。

しかし、キャリアの波長が短くなると回折減衰を補償するために指向性ビームの形成が不可欠となる。その結果、送受信機間のアラインメントずれに対するぜい弱性や、見通し経路上に遮蔽物が存在する場合の伝送損が増大するほか、波動干渉に起因するフェージングも波長1 mm程度の空間周期性を伴って頻繁に現れることになる。今後、これらの原理的な課題が解決されない限り、発振器・検波器・増幅器の性能が向上しても、テラヘルツ波を無線通信に用いることには困難が伴うと考えられる⁽¹¹⁾。

そこで、筆者らはテラヘルツ波を安定的に無線伝送する方法、並びにその変復調の方法について低レイヤからの研究開発に取り組んでいる。

2.1 FPGAに基づくテラヘルツ変調システム

無線通信の変復調の特性評価には、一般に任意波形発生装置や高速オシロスコープなどが用いられることが多いが、実応用においては据置型の装置ではなく、組込み機器のような形で自在な変復調を行うことが不可欠である。テラヘルツ波を無線通信に応用する試みにおいても、近年では要素技術の研究開発に加えて、よりシステム化を指向した取組みが増えてきており、300 GHz帯で160 mの距離でTCP/IP双方向通信を行った事例⁽¹²⁾や、AMD社のFPGAであるRFSocと外部ミキサを用いてI/Q変調した波形を周波数多重化した事例⁽¹³⁾などが報告されている。筆者らも、FPGAを用いてテラヘルツ波の変復調を自在に実装する技術基盤の整備が重要と考え、その実装に取り組んでいる (図1)。特に、数m以下の屋内規模を対象として、イーサ

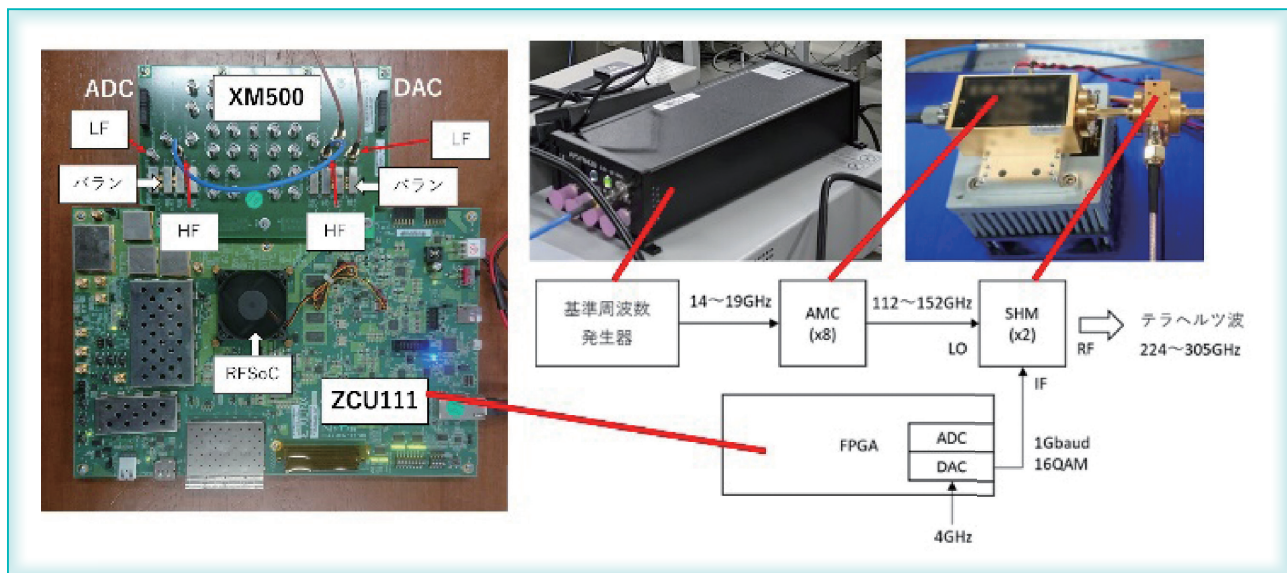


図 1 FPGA に基づく変調テラヘルツ波の生成方法

ネットや PCI Express に代表される高速・双方向の有線インタフェースの大容量データを無線伝送できるようになると、現在は有線でなければ接続困難な計測装置を無線化でき、広範な波及効果が生じると考えられる。それに向けて現在、FPGA を高速変復調に用いる上での技術課題の洗い出しと、FPGA に適した変調回路の構成方法について検討を進めている⁽¹⁴⁾。

筆者らが構築しているシステムでは、テラヘルツ波の送受信及び変復調に FS (Frequency Synthesizer), AMC (Amplifier Multiplier Chain), SHM (Sub-Harmonic Mixer) を用いる。FS で発生させた 14~19 GHz の信号を AMC で 8 通倍して 112~152 GHz とし、それを SHM で 2 通倍して 224~304 GHz にすると同時に変調を行う。SHM はダイオードの非線形性により、LO (Local Oscillator) ポートの入力信号周波数を 2 通倍の後、IF (Intermediate Frequency) ポートの入力信号と乗算して RF (Radio Frequency) ポートから出力する。逆に、RF ポートに入力信号が供給されれば IF ポートから復調信号を出力する。このシステムにより、220~290 GHz で -10~-13 dBm の信号を生成できる。

そして、変調ベースバンド信号の生成には、高速 ADC/DAC (Analog-to-Digital Converter/Digital-to-Analog Converter) を内蔵する FPGA ボードである RFSoc ZCU111 を用いる。RFSoc は高速 ADC と DAC を内蔵した FPGA であり⁽¹⁵⁾、ZCU111 には AMD 社 (XILINX) の ZU28DRF-FFVG1517 というデバイスが搭載されている⁽¹⁶⁾。最大サンプリング周波数は DAC が 6.5 GHz で

ADC が 4 GHz であるため、低い方に合わせて 4 GSa/s で 1 Gbaud の 16 QAM 変調ベースバンド信号を生成した場合、4 Gbit/s の通信が可能となる見込みである。実際に DAC の出力をオシロスコープ (Tektronix DPO72304DX) で観測したところ、スペクトラムは $1\text{ GHz} \pm 500\text{ MHz}$ の帯域を占有した (図 2 (a))。また、2 GHz ごとに折り返してエイリアシングが発生したほか、周波数特性がフラットではなく高周波ほど減衰した。一方、比較参照用に任意波形発生装置 (AWG Keysight M8195A) を用いて擬似乱数を直交変調したベースバンド信号を発生させたところ、エイリアシングがなく $1\text{ GHz} \pm 500\text{ MHz}$ の帯域全体でフラットな周波数特性であった (図 2 (b))。この原因としては、RFSoc を 4 GSa/s で駆動しているため 2 GHz ごとに折り返しひずみが発生してしまうこと、DAC の直線性が低いこと、及び基板上の各部で高周波成分が減衰することなどが考えられる。

この DAC を用いて擬似乱数を生成し、シンボル間干渉を回避するためのナイキストフィルタ (ロールオフフィルタ) を適用した上で SHM の IF ポートに入力することで、16 QAM でテラヘルツ波を変調した。変調波形について観測された 1 Gbaud コンステレーションの EVM (Error Vector Magnitude) は 6.9 % であった (図 2 (c))。また、EVM はキャリア周波数によって大きく変動した。その原因としては、変復調に用いた SHM の周波数特性がフラットでないことや、導波管接続部での反射や定在波の発生などが考えられる。なお、DAC の前にはナイキストフィルタを入れる必要があるものの、本実験のサンプリングレートである 4 GHz

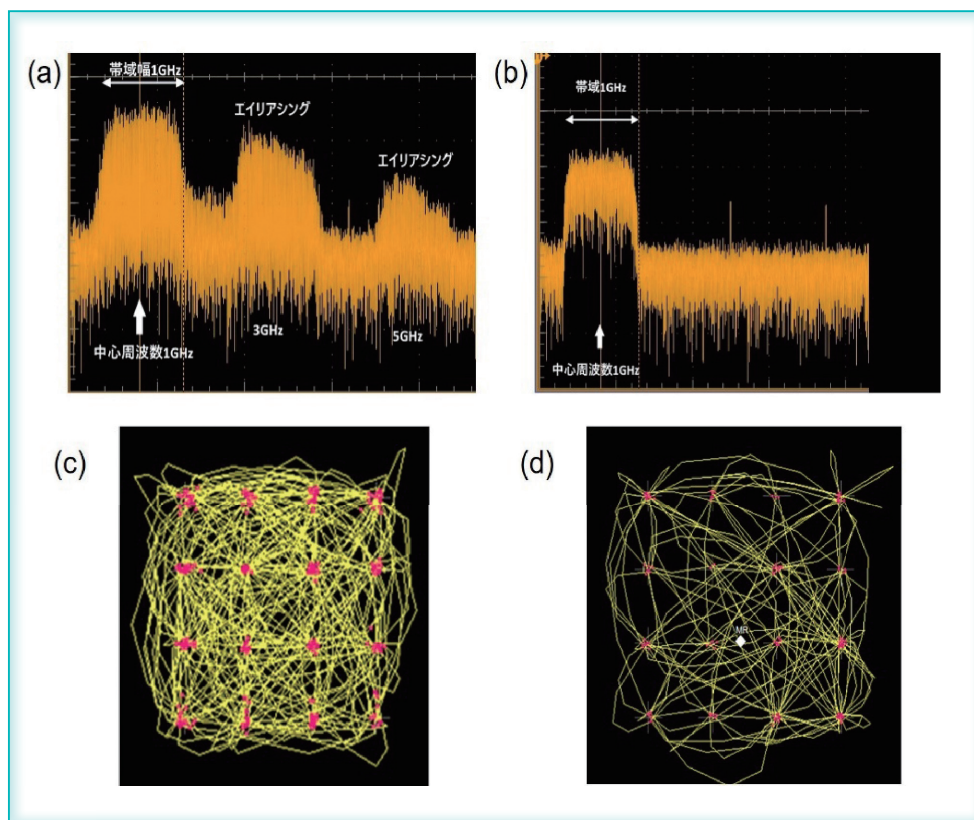


図2 (a)FPGA で生成したベースバンド信号のスペクトル
(b) 任意波形発生装置で生成したベースバンド信号のスペクトル
(c)FPGA で生成した波形 EVM6.9 % (d) 任意波形発生装置で生成した波形 EVM3.3 %

は FPGA で FIR (Finite Impulse Response) フィルタの計算をリアルタイム処理するには高速過ぎる。そのため、上記の実験では事前に計算された波形を FPGA 内の Block RAM に保存して出力していた。現在、これをリアルタイム動作可能とするために、250 MHz で動作する FIR フィルタを 16 個並列化してフィルタを実装する方法を提案している。ナイキストフィルタは本来低域フィルタであるが、FIR フィルタの係数を変えれば高域特性を持たせて、FPGA 内の DAC と伝送線路の周波数特性を合わせて補償できると考えられる。これによって今後、任意波形発生装置 (図 2 (d)) に比肩し得る高品質なコンステレーションを FPGA により生成できるようにしていく。また、以上の実験では送信機と受信機が個別に各 1 台ずつの AMC と SHM を用いて構成されていたが、今後は 1 台の SHM を送受信双方向で共用することが望ましい。そこで、SHM の IF ポートに方向性結合器を接続して送受信信号を分離する構成を提案している。

また、直交変復調におけるサンプリングタイミングについても改善が必要なことが明らかとなっている。ADC のサンプリングクロックとシンボルのタイミングは、僅かでもずれると復調が困難になる。

特に、移動しながら行われる無線通信ではこのタイミングは受信機の位置に依存して数十 cm の空間周期 (ベースバンド信号の波長に相当) で変動する。その影響を抑制すべく、より高精度かつ低ジッタの位相調整を現在実装している。また、移動通信では距離やアンテナの指向性により受信電力が大きく変動するが、現在のテラヘルツ検波器 (SHM やショットキーバリアダイオードなど) は概して受信耐性が低いため、受信電力が上振れすると容易に破壊されてしまう。そのため、システム構成としては送信電力を小さくして、受信感度を高くする必要がある。SHM で生成可能なテラヘルツ波電力は高々数百 μ W 程度であるが、数 m の距離で屋内利用に限れば、受信側で IF 後に低ノイズアンプ (LNA) を挿入することで、送信側にパワーアンプを用いずとも十分な SN 比を達成できる可能性がある。

また先述のように、DAC から得られるベースバンド信号は $1 \text{ GHz} \pm 500 \text{ MHz}$ の帯域幅を占有するが、一般に中心周波数の 50 % もの帯域を通す広帯域の方向性結合器や帯域フィルタを作製することは難しい。そこで、1 Gbaud のベースバンド信号を、例えば一旦 5 GHz 程度の副搬送波により $5 \text{ GHz} \pm 500 \text{ MHz}$ にアップコンバートするように、複数の

アップコンバート先周波数を用意することで、複数チャネルのベースバンド信号を周波数分割で多重化できると考えられる。これらの要素技術を総合することで、FPGAを用いるテラヘルツ波の自在な変復調を目指している。

2.2 テラヘルツビームステアリングによる

追従型無線伝送

一般に、送受信アンテナの利得を一定に保った場合、送受信機間を無線伝送可能な信号パワーはフリスの公式に従って周波数の二乗に反比例する⁽¹⁷⁾。そのため、マイクロ波帯よりも2桁ほど高周波のテラヘルツ帯では、高指向性ビームにより回折減衰を補償することが不可欠となり、自由に動く人間や物体に追従して信号を送送するビームステアリングを実現する必要がある⁽¹¹⁾。

ビームステアリングにおいては、多数のアンテナをアレー化して位相を個別制御するフェイズドアレーを実装することが基本的なアプローチである。テラヘルツ帯でも近年精力的な研究開発が行われており、CMOS^{(18), (19)}やBiCMOS^{(20), (21)}による実装が報告されている。また、光ファイバを介して複数の光電変換素子を位相差駆動するフォトリクスベースのアプローチも研究されている⁽²²⁾。しかし、アンテナ利得は開口面積と波長の二乗との比で与えられることから、波長1 mm (300 GHz)のテラヘルツ波を1 mの距離にわたって回折減衰なく伝送するには、3 cm角大の開口面積が必要となる。加えて、グレーティングロブを抑制するには、隣接する放射素子間の間隔を波長よりも短くせねばならない。更に、ビームを大きく傾けると基板上で表面波が励振されて効果的な放射が困難になるため、それを抑制することも重要となる。能動素子をアレー化して電力合成やビームステアリングを行うフェイズドアレーの重要性は明白であるものの、テラヘルツ帯でこれらを満たすアレーを実装することは依然として挑戦的な技術課題である。

一方、回折素子を介して単一の能動素子の出力を指向性ビームに変換する受動型のアプローチも検討されており、大面積化に加えて増幅器との結合可能性や送受信動作の可逆性の点で能動型と相補的なメリットを持つ。可変な回折を実現する上で、低損失で広帯域の移相器の実現もまた課題として残されているものの、例えば静電駆動型の可変回折格子⁽²³⁾や、CMOSベースの再構成可能なメタサーフェスによるビームステアリングが可能である⁽²⁴⁾。しかし、回折素子への入出力に空間光学系を用いると系全体

の大形化を免れない。平面集積化のためには開口を導波構造と一体化することが有効と考えられる。例えば、誘電体導波構造と一体化されたルーネブルグレンズを用いて、給電ポートの選択により構造端部からのビーム出射方向を離散的に切り換える手法が提案されている⁽²⁵⁾。端部におけるインピーダンス整合を実装しつつ給電点を連続的に変化させれば、水平方向のビームステアリングが可能になる一方、垂直方向まで含めた2軸ビームステアリングには対応していない。

筆者らは最近、2軸ビームステアリング可能なテラヘルツ平面アンテナの実装法として、二次元漏れ波構造中の実効屈折率分布を変調する方法を提案している(図3(a))⁽²⁶⁾。例えば、対向する導体平板間を伝搬するモードの実効屈折率は平板間の距離に依存するため、それらの距離及び傾斜を微小変化させると内部を伝搬するテラヘルツ波の波数及び軌跡を制御でき、端部あるいは表面から出射するビームをステアリングできる。首振り式のアンテナとは異なり、微小な機械変位に対してこれを利かせるようにして、大きなビーム偏向角を得られるようにする点が小形化・高速化に向けて重要である。その実装には、例えばピエゾアクチュエータやボイスコイルモータ、あるいはMEMSなどを用いることができ、カメラの手振れ補正やズームなどで用いられている信頼性の高い技術を援用できると考えられる。入出力ポートから放射開口までを導波構造上で平面集積化することで大開口化が容易になる上、天井や壁など環境側への組込みも可能になる。将来的に、可視光帯における液晶のようにテラヘルツ帯で低損失な可変屈折率媒質が実現された場合には、同じ考え方を適用して微小機械駆動を置換することができる。これまでに、260 GHzにおいて水平方向に50°幅、垂直方向に20°幅、最大アンテナ利得28 dBiで3 dB帯域幅が20 GHz程度の2軸ビームステアリングを行えることを原理実証している(図3(b))。現在、導波構造の作製方法を改善することで、アンテナ利得の変動抑制やステアリングの範囲拡大並びに高速化に取り組んでいる。

ユーザの身体動作に追従しながらテラヘルツ波を送送するためには、体動を上回る速さのビームステアリングが必要となる。高速な身体動作の例として野球の投球を考えると、肘の角速度は2,400deg/sに達し⁽²⁷⁾、前腕の長さを0.7 mとすると先端速度はおおむね30 m/sとなる。このことを踏まえると、一人のユーザが身に着けた端末の追従に必要なビームの最大先端速度 v を $v=30$ m/sとすることは合

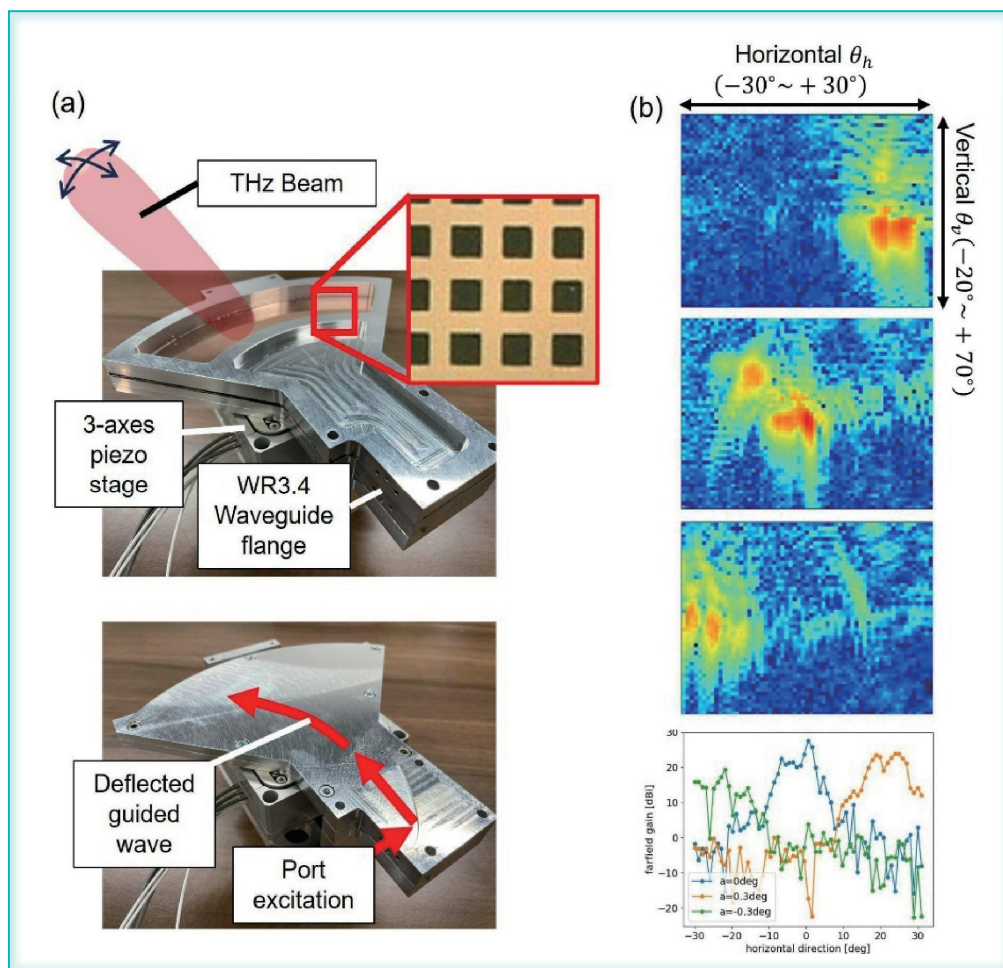


図3 2軸ビームステアリング可能な漏れ波アンテナの作製と 260 GHz における実験結果の例

理性がある。今、テラヘルツ波の波長を 1 mm (300 GHz), アンテナ利得を 20 dB (リニア値 g を考えると $g = 100$) とするとき, ビーム幅 θ_w はおおむね $\theta_w = \sqrt{4\pi/g}$ から 0.35 rad (20°) 程度となる。このとき, 身体側の移動端末と環境側の固定端末との距離 R を仮に $R = 2$ m とすると, 2 m 先でのビーム径 $w = R\theta_w$ は $w = 70$ cm となる。速度 v の移動体が幅 w の領域を横切るのに要する時間 $\tau = w/v = R\sqrt{4\pi/g}/v$ は 24 ms となるため, ビームステアリングのフィードバック周期 (現在の観測値に基づいてビーム方向を次の値に更新するまでの時間) は τ よりも短くする必要がある。このときビーム方向の切換に要求される角速度 $\omega = v/R$ は 15 rad/s (860 deg/s) よりも速い必要があるが, この値自体は一般的なアクチュエータの回転・傾斜速度に鑑みると厳しくない要求と言える。また, 例えばビーム角変位に約 60 倍のてこが利くようなシステム⁽²⁸⁾であれば要求される角速度は 1/60 に緩和される。ただし, 逆に角度の決定精度は向上させる必要がある。

なお, 上記はあくまで位置が既知のシングルユー

ザへの追従を考慮して見積もられた値であり, ユーザ位置が未知でその探索を行う場合や, 複数のユーザに対して時分割伝送を行う場合には, これよりも 1 桁以上高速なステアリングが要求されると考えるべきである。また, 信号強度を最大化する方向の探索アルゴリズムの高速化も必要となる。その際, 指向性ビームの方向だけでなく幅や形状を可変にすることで, 探索当初は指向性を低下させて広範に探索し, リンクが確立されたら指向性を高めるといった制御を行うことも重要になる。筆者らは現在, 開発されたビームステアリング手法に基づく身体追従型無線伝送の実装に取り組んでおり, 今後システムレベルでの最適化に注力していく。

3 大容量感覚情報の伝送に基づく認識行動の拡張

前章までに述べられたテラヘルツ無線技術により高速大容量・低遅延に感覚情報を送受信する基盤を構築できれば, 人間の認識行動を拡張する新たな可能性が開かれる。本章では, その実現に向けて筆

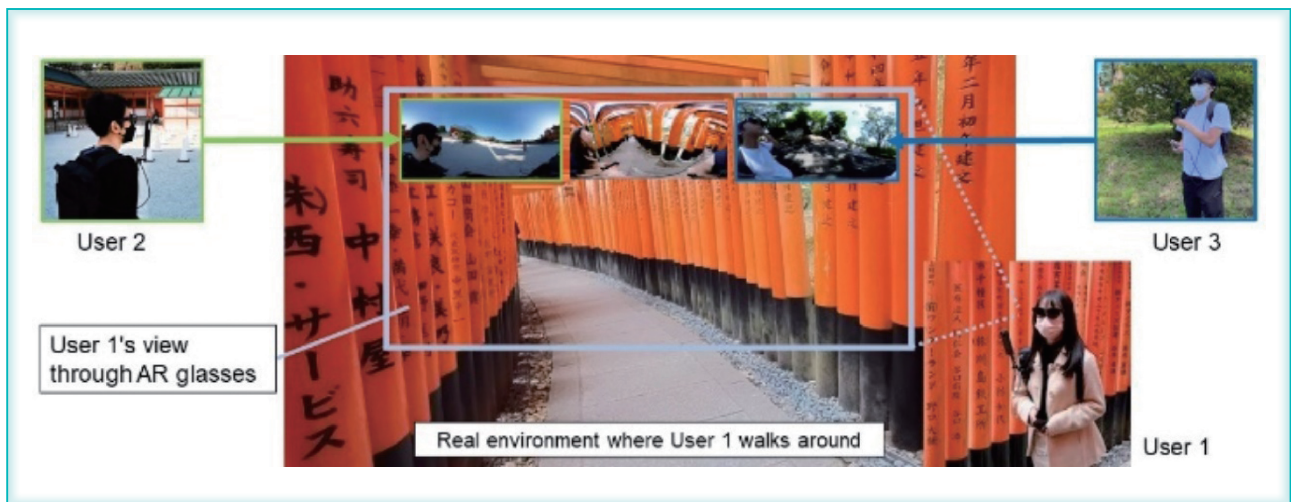


図4 複数のユーザが相互の視界を通して環境と体験を共有する対称形ウェアラブル・テレプレゼンスシステム

者らが、現時点では有線あるいは低速な無線を用いて取り組んでいる具体的な研究プロジェクトを、「空間知覚」と「運動学習」という二つの側面から紹介する。ここで筆者らが特に対象とするのは、人間の知覚限界を超えた感覚情報の送受信である。例えば、視覚の時間分解能を超えたフレームレートのデータや複数人分の視界データなどを伝送しつつ、その情報をウェアラブルシステムにおける処理を通して感覚に還元するアプローチを検討している。また、力触覚を介した運動感覚支援により、特定の技能・拡張体験の実現やモチベーション支援を行う技術の概念実証を行っている。これらのアプローチを通して、今後テラヘルツ無線技術によって高速大容量・低遅延なデータ伝送が可能になった場合に、ユーザが獲得する情報の量的変化が認識や行動にもたらす変化を考察していく。

3.1 空間知覚の拡張

人間は自身の視界に基づいて空間を認識し行動するのが通常であるのに対して、工学的な手法を用いると他者の視界に没入することができるようになる。例えば、ある地点（現地とする）のユーザに装着されたカメラの映像を、異なる地点（遠隔地とする）のユーザがHMDやAR（Augmented Reality）グラスなどを装着して視聴するテレプレゼンスシステムを用いると、遠隔地側のユーザが現地側のユーザに憑依しているかのような体験を作り出し、遠隔地側からの作業支援を促進できることが示されている^{(29)～(33)}。筆者らも、複数のユーザが各自の周囲を360°カメラで撮影して遠隔地側のユーザに伝送するテレプレゼンスシステムを開発しており、遠隔地側のユーザ（例えば遠出しにくい高

齢者）が現地側のユーザと一緒に歩いているかのような体験を実現してきた^{(34), (35)}。

これらのシステムにおいては、ユーザ間の関係性は非対称になっており、カメラを装着して映像・音声を送受信する現地側のユーザと、端末を利用してそれを視聴し、その環境に没入する遠隔地側のユーザという役割に分かれている。そのため、一方通行の没入体験や指示、作業支援などは可能だが、本来の人間同士のコミュニケーションが持つ双方向性は実現しにくい。双方向性を実現するには、遠隔地側ユーザからも現地側ユーザに向けて映像を送信することが考えられるが、両ユーザの関係性が対称的なものとなる場合、自身の環境と他者の映像という二つの視界に同時に没入することは難しい。

筆者らは、これまでに得られた映像共有に伴う空間知覚の知見を土台に、複数ユーザの視覚情報を統合することで空間知覚を拡張することを目指している。その実現のためには、「ユーザが何をどう見ているか」だけでなく、「他者と見る・他者を見る」というユーザ間の相互作用に注目する必要がある。そのための具体的な取組みとして、複数のユーザが異なる空間にいる場合と同じ空間にいる場合のそれぞれについて、感覚情報を共有する自由視点遠隔随行システムと動的知覚共有システムの二つの事例を紹介する。

3.1.1 自由視点遠隔随行システム

遠隔地にいる複数のユーザが、それぞれの環境と体験を相互共有可能な対称形ウェアラブル・テレプレゼンスシステムを開発している（図4）⁽³⁶⁾。このシステムでは、各ユーザが360°カメラとARグラスを装着して映像の送信と受信を同時に行い、自



図5 Lived Montage の実演の様子
(文化庁メディア芸術祭 25 周年企画展)

身の視界に他者の視界を重畳表示する。これにより、自身及び他者が存在している複数の空間を同時に知覚できるようになる。ユーザ間の映像切替方法を制御することで遠隔ユーザ同士の協調作業への効果を検証することができる。例えば、一方のユーザの存在をもう一方のユーザに提示する方法を変更することで、協働的な空間知覚や相互連携を向上させることや、両者の歩行速度差などの行動の近さに応じて視界を交換することで体験の同時交換を実装できると考えられる。

また、システム内にロボットやドローンを介在させることで、ユーザの体験を人間同士では実現できないものへと拡張することもできる。例えば、ユーザ動作と連動するロボットやドローンの外観を視界上で実効的に消失させたり、複数台の連動動作を一つのアバタやオブジェクトとして統合提示したりするシステムの開発を行っている。このような「現実感編集技術」によって、ユーザの集中力や学習効率を向上させたり、ユーザ間のコミュニケーションを支援したりすることを目指している。

3.1.2 動的知覚共有システム

同じ空間にいる複数のユーザ間で視覚を交換することで、他者の視界を自身の視界に映画的に導入することを試みている。通常、映画の撮影現場では一つの空間を複数台のカメラが取り囲み、鑑賞者はそれらにより撮影・編集された多角的な映像体験を事後的に受容する。一方、我々の日常生活でも、長時間にわたり同じ空間を複数人で経験しており、そこには複数のカメラ、すなわち「意思を持った眼」が存在する。しかるに我々は、自身の眼だけを使って空間を経験するが、もし他者の視界も同時に知覚されるならば、我々の空間認識はどのように変化するだろうか、という問いを立て、その検証を行う実

験系を設計した。具体的には、周囲撮像用のカメラを組み付けた HMD を用いて、複数の HMD 間でリアルタイムかつ双方向のデータ伝送を可能にすることで、任意のユーザ間で視界を交換できるようにする。その交換の制御則を変化させることで、自身の視覚に他者の視覚を映画的に導入することができる。他者の視界が混み込まれたマルチ・パースペクティブな視覚体験を通して、自身が属する空間を認識し行動することができる。筆者らは、このようなシステムをパブリックイベントなどで実演し^{(37), (38)}、視界共有下の認識行動を探索的に調査している(図5)。この研究の長期的な目標は、人間が他者の感覚器官も自然に使いながら生活するような状況を実現する設計論の確立であり、無線通信により知覚情報が瞬時に宙を飛び交う未来における新たな知覚の遠近法を協創することである。

3.2 運動学習の拡張

ユーザに対する身体的な情報の提示方法を編集することで、運動学習を拡張する試みが多くなされてきている。例えば、三人称視点から見た自身の運動中の映像を提示することで、ユーザ自身に自覚的な運動修正を促す手法^{(39), (40)}や、運動に応じて補助的に触覚提示を行う手法^{(41), (42)}が提案されており、一定の成果を挙げている。また、単一の感覚だけでなく複数のモダリティを複合的に組み合わせることで、特定の身体技能の習得時間を短縮した事例が報告されている⁽⁴⁾。しかし、失敗を繰り返すことによる自己効力感低下の阻止や、新しい技能の習得に向かうためのモチベーションの支援は依然課題として残されている。近年では、例えばけん玉を題材として、VR (Virtual Reality) 空間内で時間伸縮を調整して初学者が成功体験を積み重ねることで、無理なく運動技能を習得可能なシステムが提案されており⁽⁴³⁾、その適用可能範囲について検討が行われている。

筆者らは、力触覚を介した運動支援によりユーザが特定の運動技能の成功体験を実空間で積むことを支援しつつ、その支援量を適切に制御することでモチベーションの維持・支援と運動学習を両立する技術の概念実証を行っている。また、視覚の時間分解能を超えた高フレームレートの撮像・視聴を通して、リアルタイムなスローモーションを体感することで認識行動を拡張する時間変調システムの研究を行っている。ここでは、これらの二つの事例を紹介する。

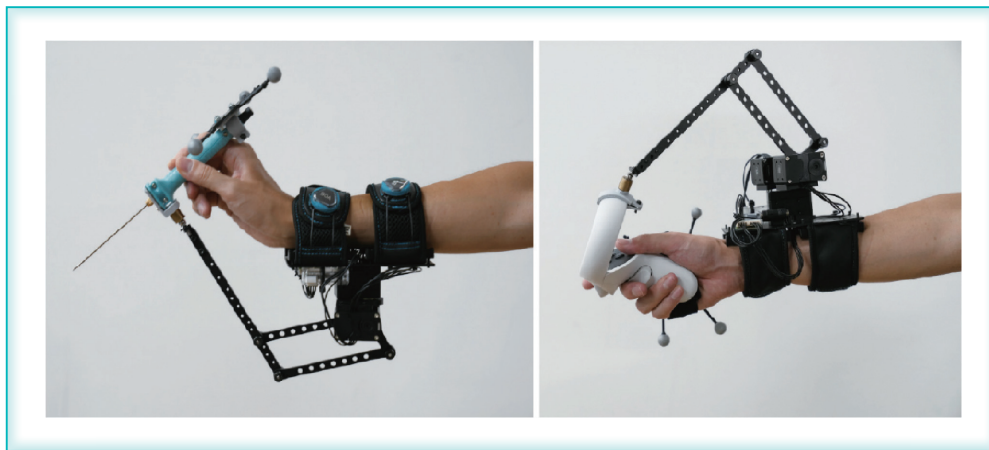


図6 道具に対して力触覚を提示する装着型装置

3.2.1 把持型道具使用支援システム

これまで筆者らは、運動能力の拡張⁽⁴⁴⁾や時空間を超えた運動の拡張⁽⁴⁵⁾に関する研究に取り組んできた。腕力や技量に差があるユーザ同士が身体的な競技を行う際に、例えば綱引きやエアホッケーを題材として、ユーザの動作をセンシングしながらシステムが介入して、ゲームバランスを動的調整するプラットフォームを構築してきた。筆者らはそれらの研究を通して、システムがユーザの動作に介入する際にユーザの行為主体感を損なわないようにすることの重要性を明らかにしてきている。行為主体感とは、例えばスポーツトレーニングやリハビリテーションにおいて、体のケアだけでなく、モチベーションや自己効力感を高める心のケアの面から重要であるこ

とが知られている⁽⁴⁶⁾。無線通信の援用により身体への負荷や拘束を最小限に抑えつつセンシングやアクチュエーションを行い、行為主体感を損なうことなく成功体験を提供して、体と同時に心の支援を実現することを目指している。

現在、このようなケーススタディの更なる拡充に向けて、把持型の道具を介して技能動作を支援するシステムの構築を行っている。具体的には、図6に示す装着型装置を開発している⁽⁴⁷⁾。

この装置はユーザの前腕に装着され、ユーザが把持する道具に対してリンク機構を介したアクチュエーションを行うことで、運動への介入や支援、あるいは触力覚の提示を行う。装置及び道具の位置・姿勢はモーションキャプチャシステムによって約

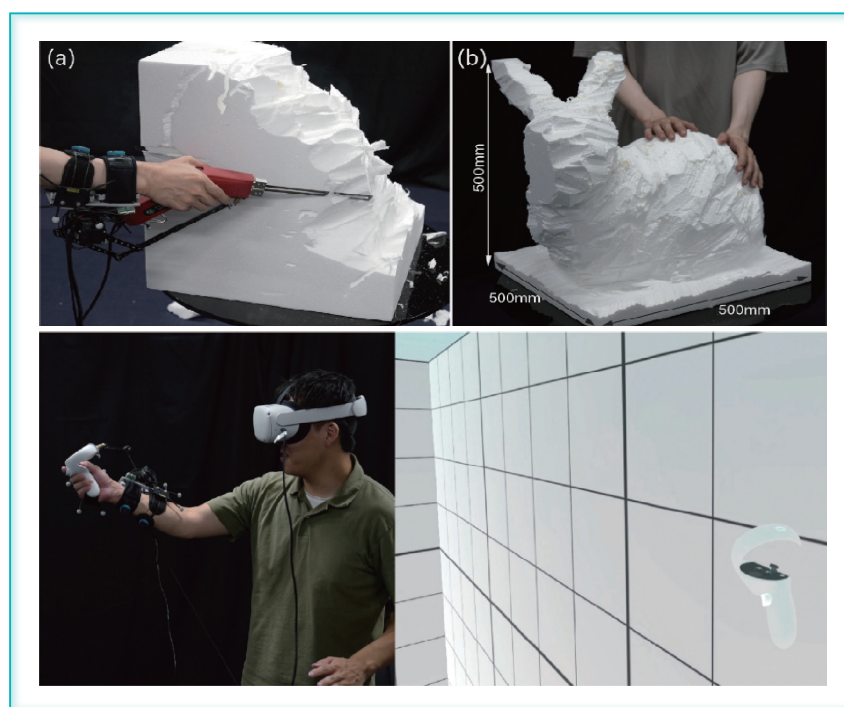


図7 彫刻作業支援システム（上左）及びそれを用いた彫刻作品（上右）
VR空間における力触覚提示（下）

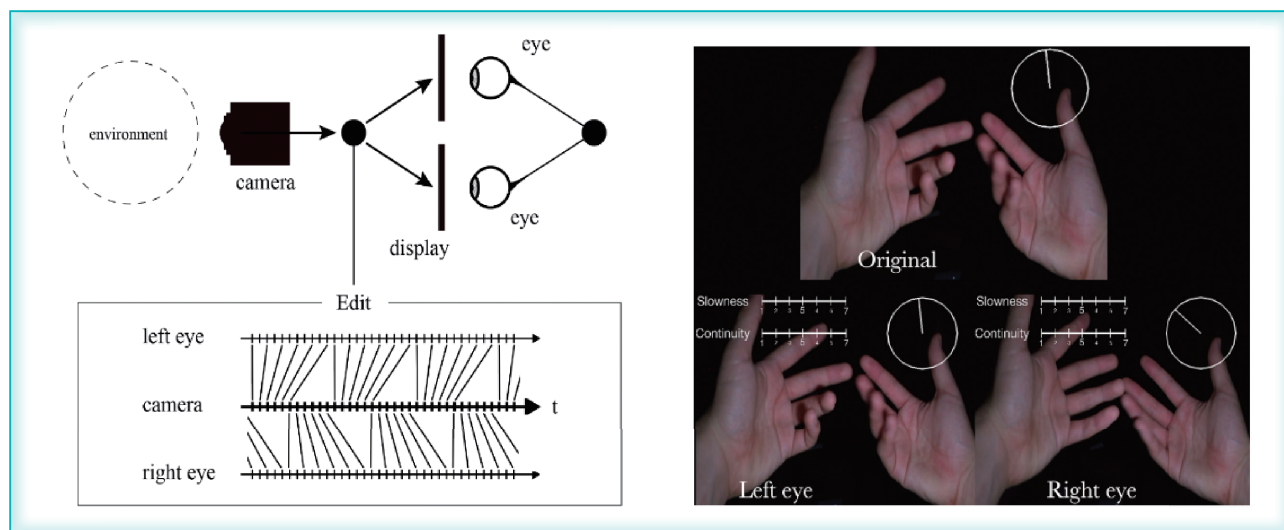


図8 両眼統合を用いた時間変調システム

300 fps のフレームレートで計測され、それを基に提示されるフィードバック力が計算される。被験者実験の結果、非接地型の装着装置でありながらユーザに対して外力を知覚させられることが分かった。また、これを用いてユーザの手の運動を三次元的に誘導可能であることが分かった。

開発した装置がどのような状況で有効か、またどのような運動支援や介入が可能になるかについて、複数のユースケース状況を想定しつつ検討を進めている。一例として、図7（上左）に示されるようにホットナイフを用いた彫刻作業の支援を検証し、特別な技能を持たない初心者であっても力覚を提示して運動をガイドすることで、目的とする三次元形状を削り出すことを支援できることが示された（図7（上右））。また、図7（下）で示すようなVR空間での作業や活動に対しても、提案装置によって力触覚を付与することで臨場感を高められることが示された。

ユーザ動作のセンシングは現在モーションキャプチャに基づいており、そのトラッキング精度はカメラの画素数や感度、フレームレート性能とともに向上する。一方、今後はユーザ動作のセンシングのみならず、ユーザの行為の結果に対するセンシングも重要になる。そのためには、例えば高精細な立体情報を取得可能なセンサ等を装置に組み合わせていくことが考えられる。これらの大容量データを高速・低遅延に無線伝送できるようにすることで、人間と機械の認識行動を協調させることを目指している。また、今後、このようなケーススタディを更に拡充させていくことで、行為主体感を損なうことがないユーザ支援の一般的な方法論を構築し、多様な運動学習の拡張の実現を目指していく。

3.2.2 時間感覚変調システム

人間の視覚の時間分解能は通常高々 30 Hz 以下であることが知られており、実際多くの映像コンテンツも 60 fps までのフレームレートで作成されている。それでは、人間の視覚拡張において映像がこれ以上のフレームレートを持つ意義はないのだろうか。この問いに対して筆者らは、リアルタイムにスローモーションを知覚するという時間的編集の実装において、通常の知覚限界を超えた高フレームレートの映像が必要になると考えている。これまで筆者らは、本来共存しないリアルタイムとスローモーションを共存させるフレームワークを提案してきた。両者の原理的な共存不可能性は、二つのリアルタイムストリーミング映像を並べ、片方だけをスローモーションに切り換えると両者のかい離がどんどん広がっていくことを考えれば理解できる。それに対して提案するフレームワークでは、主観的現在（今）の短い幅の中に小さなスローモーションを畳み込むことで、リアルタイムからかい離せずに追従し続けるスローモーション体験を実現する。左右の網膜像の統合を用いた実装（図8）では、ユーザがリアルタイムからかい離しないスローモーション体験を獲得したことが心理実験により示唆されている⁽⁴⁸⁾。これは、本来空間的な情報の増強に使われる二つのレイヤ（この実装では両眼の網膜像）を、時間方向の情報のキャパシティに割り当てるという発想であるとも言える。

このシステムにより、日常的には知覚し得ない時間スケールの運動を認識することができるようになると考えられる。しかし、例えば 0.1 倍速のスローモーションを、最終的にフレームレート 30 Hz で出力するには、元々 $30 \times 10 = 300$ Hz のフレーム

レートを送受信映像が持っている必要がある。空間中をアクティブに動き回るユーザが常に目の前の現象のスローモーションを体験するという状態を成立させるには、このように大容量の高フレームレート映像を無線伝送可能な技術基盤が不可欠である。今後、これまで有線あるいは低速な無線により部分的に実装してきたデータ伝送部分を、テラヘルツ無線技術で実装することで、このようなスローモーション体験がユーザの運動学習に与える影響を調査していく。

4

おわりに

人間の認識行動を拡張するには、高精細な感覚情報を低遅延で双方向伝送できる無線通信が不可欠であり、広大な帯域幅を有するテラヘルツ無線技術はそれを可能にする重要な基盤となる。人間の視力限界に迫りつつある映像メディアと無線通信の共進化は、人間拡張工学と無線通信の共進化に継承され、そこでは各人の身体を起点とするファースト・ワンメータの広帯域化が重要になると考えられる。本稿では、このような問題意識の下でテラヘルツ無線技術と人間拡張工学を通貫して研究開発する筆者らの取組みについて概説した。

特に大容量の感覚情報の伝送が重要となる事例として、複数人の視界を統合して空間知覚を拡張する自由視点遠隔随行システムや動的知覚共有システム、並びに身体への情報提示方法を編集して運動学習を拡張する把持型道具使用支援システムや時間感覚変調システムを紹介した。現時点ではまだ低速な無線伝送を用いて実装されたこれらのプロトタイプは、人間拡張に向けたシステム設計論を明らかにしつつあるとともに、今後の高速大容量化・低遅延化への要求仕様を明確化しつつある。特に今後、身体内外の情報を例えば360°カメラ、ライトフィールドカメラ、ハイスピードカメラ、モーションキャプチャ、超音波エコー、多点生体電位計測、BMIなどにより高精細に取得して伝送するには、Tbit級を見込む高速大容量化・低遅延化が重要になると考えられる。現在、その実装に必要なFPGAベースのテラヘルツ変復調や身体追従型のテラヘルツビームステアリングの技術を併せて研究開発している。これらの取組みを通してファースト・ワンメータを広帯域化し、人間の認識行動を拡張することを目指していく。

謝辞 本研究はNICT Beyond 5G 研究開発促進事業(#06101)の委託を受けて行われた。

■文献

- (1) F. F. Mueller, P. Lopes, P. R. Strohmeier, W. Ju, C. Seim, M. Weigel, S. Nanayakkara, M. Obrist, Z. Li, J. L. Delfa, J. Nishida, E. Gerber, D. Svanæs, J. Grudin, S. Greuter, K. Kunze, T. Erickson, S. Greenspan, M. Inami, J. Marshall, H. Reiterer, K. Wolf, J. Meyer, T. Schiphorst, D. Wang, and P. Maes, "Next steps for human-computer integration," Proc. 2020 CHI Conf. Human Factors in Computing Syst., ACM, pp. 1-15, April 2020.
- (2) N. P. Holmes and C. Spence, "The body schema and multisensory representation (s) of peripersonal space," Cogn. Process., vol. 5, no. 2, pp. 94-105, June 2004.
- (3) 松下幸之助, 人生談義, PHP 研究所, 1998.
- (4) A. Hiyama, Y. Doyama, M. Miyashita, E. Ebuchi, M. Seki, and M. Hirose, "Wearable display system for handing down intangible cultural heritage," Proc. 2011 international conf. Virtual and mixed reality: syst. and appl. Vol. Part II, pp. 158-166, June 2011.
- (5) E. Musk, "An integrated brain-machine interface platform with thousands of channels," J. Med. Internet Res., vol. 21, no. 10, pp. 1-14, Oct. 2019.
- (6) S. L. Norman, D. Maresca, V. N. Christopoulos, W. S. Griggs, C. Demene, M. Tanter, M. G. Shapiro, and R. A. Andersen, "Single-trial decoding of movement intentions using functional ultrasound neuroimaging," Neuron, vol. 109, no. 9, pp. 1554-1566, May 2021.
- (7) J. Webber, A. Oshiro, S. Iwamatsu, Y. Nishida, M. Fujita, and T. Nagatsuma, "48-Gbit/s 8K video-transmission using resonant tunnelling diodes in 300-GHz band," Electron. Lett., vol. 57, no. 17, pp. 668-669, May 2021.
- (8) 三浦貴大, "視覚障害者が音で見る世界," 音響誌, vol. 77, no. 3, pp. 199-207, March 2021.
- (9) 角谷美和, 蘆原 郁, 飛龍志津子, "生物に学ぶヒューマンエコーロケーションの世界," 音響誌, vol. 77, no. 3, pp. 192-198, March 2021.
- (10) T. Kürner, D. M. Mittleman, and T. Nagatsuma, Eds., THz Communications, vol. 234. in Springer Series in Optical Sciences, vol. 234. Cham: Springer International Publishing, 2022.
- (11) Y. Monnai, X. Lu, and K. Sengupta, "Terahertz beam steering: from fundamentals to applications," J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves, Vol. 44, pp. 169-211, Feb. 2023.
- (12) T. Kurner and T. Kawanishi, "Demonstrating 300 GHz wireless backhaul links - The Thor approach," 2022 47th International Conf. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), IEEE, pp. 1-1, Aug. 2022.
- (13) P. Sen, V. Ariyaratna, A. Madanayake, and J. M. Jornet, "A versatile experimental testbed for ultrabroadband communication networks above 100 GHz," Comput. Netw. vol. 193, no.9, p. 108092, April 2021.
- (14) 内藤竜治, 門内靖明, "RFSocを用いた300GHz帯送信機のためのデジタルフィルタの構成についての一検討," 信学技報, vol. 123, no. 71,

- RECONF2023-10, pp. 52–57, June 2023.
- (15) XILINKS, “UltraScale+ RFSoc データシート, DS889 (v1.13).” 2022.
 - (16) XILINKS, “ZCU111 Evaluation Board User Guide, UG1271 (v1.2).” 2018.
 - (17) C. A. Balanis, *Modern antenna handbook*, Wiley, 2007.
 - (18) H. Saeidi, S. Venkatesh, C. R. Chappidi, T. Sharma, C. Zhu, and K. Sengupta, “A4 × 4 steerable 14-dBm EIRP array on CMOS at 0.41 THz with a 2-D distributed oscillator network,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 57, no. 10, pp. 3125–3138, July 2022.
 - (19) I. Abdo, C. da Gomez, C. Wang, K. Hatano, Q. Li, C. Liu, K. Yanagisawa, A. A. Fadila, J. Pang, H. Hamada, H. Nosaka, A. Shirane, and K. Okada, “A 300 GHz-band phased-array transceiver using bi-directional outphasing and hartley architecture in 65 nm CMOS,” *2021 IEEE International Solid-State Circuits Conf. (ISSCC)*, IEEE, pp. 316–318, Feb. 2021.
 - (20) H. Jalili and O. Momeni, “A 318-to-370 GHz standing-wave 2D phased array in 0.13 μm BiCMOS,” *Dig. Tech. Pap. IEEE Int. Solid-State Circuits Conf.*, vol. 60, pp. 310–311, Feb. 2017.
 - (21) M. Elkhoully, J. Ha, M. J. Hdyoak, M. Saygner, R. Enright, I. Kimionis, Y. Baeyens, and S. Shahramian, “Fully integrated 2D scalable TX/RX chipset for D-band phased-array-on-glass modules,” *2022 IEEE International Solid-State Circuits Conf. (ISSCC)*, IEEE, pp. 76–78, Feb. 2022.
 - (22) M. Che, K. Kondo, H. Kanaya, and K. Kato, “Arrayed photomixers for THz beam-combining and beam-steering,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 40, no. 20, pp. 6657–6665, 2022.
 - (23) Y. Monnai, K. Altmann, C. Jansen, H. Hillmer, M. Koch, and H. Shinoda, “Terahertz beam steering and variable focusing using programmable diffraction gratings,” *Opt. Express*, vol. 21, no. 2, pp. 2347–2354, 2013.
 - (24) S. Venkatesh, X. Lu, H. Saeidi, and K. Sengupta, “A high-speed programmable and scalable terahertz holographic metasurface based on tiled CMOS chips,” *Nat. Electron.*, vol. 3, no. 12, pp. 785–793, 2020.
 - (25) D. Headland, W. Withayachumnankul, R. Yamada, M. Fujita, and T. Nagatsuma, “Terahertz multi-beam antenna using photonic crystal waveguide and Luneburg lens,” *APL Photonics*, vol. 3, no. 12, 2018.
 - (26) N. Tanaka and Y. Monnai, “Two-dimensional fixed-frequency terahertz beam steering based on displacement controlled leaky-waveguides,” *2023 48th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, pp. 1–2, IEEE, Sept. 2023.
 - (27) J. Loftice, G. S. Fleisig, N. Zheng, and J. R. Andrews, “Biomechanics of the elbow in sports,” *Clin. Sports Med.*, vol. 23, no. 4, pp. 519–530, 2004.
 - (28) K. Sato and Y. Monnai, “Terahertz beam steering based on trajectory deflection in dielectric-free luneburg lens,” *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, vol. 10, no. 3, pp. 229–236, 2020.
 - (29) S. Kasahara, S. Nagai, and J. Rekimoto, “First person omnidirectional video,” *Proc. ACM International Conf. on Interactive Experiences for TV Conf. Online Video*, pp. 33–42, New York, NY, USA: ACM, June. 2015.
 - (30) S. Kasahara and J. Rekimoto, “JackIn: integrating first-person view with out-of-body vision generation for human-human augmentation,” *Proc. 5th Augmented Human International Conf.*, pp. 1–8, ACM, March 2014.
 - (31) S. Kasahara and J. Rekimoto, “JackIn head: immersive visual telepresence system with omnidirectional wearable camera for remote collaboration,” *Proc. 21st ACM Symposium Virtual Reality Softw. and Technol.*, pp. 217–225, Nov. 2015.
 - (32) T. Kashiwabara, H. Osawa, K. Shinozawa, and M. Imai, “TEROOS: a wearable avatar to enhance joint activities,” *Proc. SIGCHI Conf. Human Factors in Computing Syst.*, pp. 2001–2004, ACM, May 2012.
 - (33) S. Kratz, D. Kimber, W. Su, G. Gordon, and D. Severns, “Polly: ‘being there’ through the parrot and a guide,” *Proc. 16th international conf. Human-comput. interaction with mobile devices & services*, pp. 625–630, ACM, Sept. 2014.
 - (34) M. Manabe, D. Uriu, T. Funatsu, A. Izumihara, T. Yazaki, I-H. Chen, Y-Y. Liao, K-Y. Liu, J. -C. Ko, Z. Kashino, A. Hiyama, and M. Inami, “Exploring in the city with your personal guide: design and user study of T-leap, a telepresence system,” *19th International Conf. Mobile and Ubiquitous Multimedia*, ACM, pp. 96–106, Nov. 2020.
 - (35) T. Yazaki, D. Uriu, Y. Watanabe, R. Takagi, Z. Kashino, and M. Inami, “‘Oh, could you also grab that?’: A case study on enabling elderly person to remotely explore a supermarket using a wearable telepresence system,” *Proc. 22nd International Conf. Mobile and Ubiquitous Multimedia*, pp. 340–352, ACM, Dec. 2023.
 - (36) T. Yazaki, Y. Watanabe, L. Kong, and M. Inami, “Design and field study of Syn-Leap: A symmetric telepresence system for immersion switching and walking across multiple locations,” *ACM Int. Conf. Proc. Ser.*, pp. 347–359, 2023.
 - (37) 村本剛毅, “Lived Montage, 文化庁メディア芸術祭 25周年企画展,” 2023.
 - (38) 村本剛毅, “‘Nice to meet me!’, NTT Inter Communication Center (ICC),” 2023.
 - (39) K. Higuchi and J. Rekimoto, “Flying head: a head motion synchronization mechanism for unmanned aerial vehicle control,” *CHI’13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Syst.*, pp. 2029–2038, ACM, April 2013.
 - (40) S. Yan, G. Ding, Z. Guan, N. Sun, H. Li, and L. Zhang, “OutsideMe: Augmenting dancer’s external self-image by using a mixed reality system,” *Proc. 33rd Annual ACM Conf. Extended Abstracts on Human Factors in Computing Syst.*, pp. 965–970, ACM, April 2015.
 - (41) J. Lieberman and C. Breazeal, “TIKL: development of a wearable vibrotactile feedback

- suit for improved human motor learning,” IEEE Trans. Robot., vol. 23, no. 5, pp. 919–926, Oct. 2007.
- (42) K. Fujii, S. S. Russo, P. Maes, and J. Rekimoto, “MoveMe: 3D haptic support for a musical instrument,” Proc. 12th International Conf. Advances in Comput. Entertainment Technol., pp. 1–8, ACM, Nov. 2015.
- (43) H. Kawasaki, S. Wakisaka, H. Saito, A. Hiyama, and M. Inami, “A system for augmenting humans’ ability to learn Kendama tricks through virtual reality training,” Augmented Humans 2022, pp. 152–161, ACM, March 2022.
- (44) A. Maekawa, S. Kasahara, H. Saito, D. Uriu, G. Ganesh, and M. Inami, “The tight game: implicit force intervention in inter-personal physical interactions on playing tug of war,” ACM SIGGRAPH 2020 Emerging Technol., pp. 1–2, ACM, Aug. 2020.
- (45) A. Maekawa, H. Saito, N. Okazaki, S. Kasahara, and M. Inami, “Behind the game: implicit spatio-

temporal intervention in inter-personal remote physical interactions on playing air hockey,” Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques Conf. Emerging Technol. pp. 1–4, ACM, Aug. 2021.

- (46) J. W. Moore, “What is the sense of agency and why does it matter?,” Front. Psychol., vol. 7, Aug. 2016.
- (47) 信川凜佳, 前川和純, 門内靖明, 稲見昌彦, “装着型力覚提示デバイスを用いた反力表現とその知覚特性評価,” 第28回バーチャルリアリティ学会大会, pp. 2A1-06, Sept. 2023. <https://conference.vrsj.org/ac2023/program/doc/2A1-06.pdf>
- (48) 村本剛毅, 齊藤寛人, 脇坂崇平, 笠原俊一, 稲見昌彦, “リアルタイムとスローモーションを共存させるインタフェース,” 第25回日本バーチャルリアリティ学会大会, pp. 3B2-7, Sept. 2020.

(2024年2月14日受付, 4月22日再提出)

門内靖明 (正員)

2013 東大大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻博士課程了。博士(情報理工学)。同年同大学特任助教。2015～2021 慶大大学院基礎理工学専攻物理情報工学専修助教, 専任講師, 准教授。2018～2021 JST さきがけ研究員。2021 東大先端科学技術研究センター准教授, 同大学卓越研究員, 現在に至る。テラヘルツ波の応用システムに関する研究に従事。



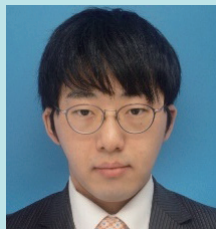
村本剛毅

2023 東大・工・電子情報工卒。同年同大学院学際情報学府修士課程入学。独自のメディアを発明・彫刻するプロセスを通じてイメージの一義性／多義性を研究。



矢崎武瑠

2023 東大大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程了。修士(情報理工学)。2023 同工学系研究科先端学際工学専攻博士課程入学。テレプレゼンスシステムや遠隔コミュニケーションシステムに関する研究に従事。



内藤竜治 (正員)

東京大学先端科学技術研究センター学術専門職員, 2001 同大学院工学系研究科システム量子工学専攻修士課程了。企業勤務を経て, 2004 特殊電子回路株式会社を設立, 現在に至る。FPGA と高速 ADC を活用したデータ計測収集装置の開発を行う。技術士(電気電子)。



齊藤寛人

2019 明大大学院先端数理科学研究科博士後期課程了。博士(理学)。2019～2022 東大先端科学技術研究センター特任研究員。2022～2023 同大学特任助教, 2023 同助教。運動学習・運動知覚及びそれらの特性を利用したヒューマンコンピュータインタラクションの設計に関する研究に従事。ACM, 情報処理学会, VR学会, 認知科学会, モーターコントロール研究会各会員。



前川和純

2021 東大大学院工学系研究科博士課程了。博士(工学)。同年から同大学先端科学技術研究センター特任助教, 同大学助教を経て, 2023-11 から同大学特任講師。生物と人工物の境界に焦点を当てた作品制作や研究活動に従事。



稲見昌彦

1999 東大大学院工学系研究科博士課程了。博士(工学)。東大助手, JST さきがけ研究員, 電通大講師, 助教授, 教授, 慶大大学院教授, 東大大学院情報理工学系研究科教授等を経て, 東大先端科学技術研究センター教授。



Beyond 5G/6Gに向けた多層型NTNのアーキテクチャと経路制御技術

Multilayer NTN Architecture and Routing Method for Beyond 5G/6G

加納寿美 Hisayoshi Kano[†] 松井宗大 Munehiro Matsui[†]

阿部順一 Jun-ichi Abe[†] 山下史洋 Fumihiro Yamashita[†]

Summary

NTT では IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想の柱の一つとして宇宙通信の拡張を位置付けており、現在、関係機関と連携しながら、宇宙統合コンピューティング・ネットワークの構想を掲げ、上空 20 km の成層圏に無人飛行体を停留させる高高度プラットフォーム (HAPS)、宇宙空間の低軌道と静止軌道まで視野に入れた垂直方向の宇宙通信・コンピューティングインフラの構築を目指している。本稿では、Beyond 5G (第 5 世代移動通信システム) / 6G (第 6 世代移動通信システム) 時代の超カバレッジモバイルサービスを実現するため、HAPS と低軌道と静止軌道まで視野に入れた垂直方向の多層型 NTN (Non Terrestrial Network) に関する研究開発を紹介する。

Key Words

非地上系ネットワーク, 衛星, HAPS, 降雨減衰, トラヒック経路制御

1 はじめに

NTT が将来的なコミュニケーション基盤として提案する IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想では、宇宙通信の拡張を柱の一つに位置付けている⁽¹⁾。図 1 は、IOWN 宇宙統合コンピューティング・ネットワークの構想を示す。本構想では、統合インフラは RF (Radio Frequency) 無線や光無線で接続され、究極的には複数の衛星や高高度プラットフォーム (HAPS: High Altitude Platform Station) で処理を分担する分散コンピューティングにより、宇宙で発生するデータを宇宙で処理・分析を完結させることで、地上の災害などの影響を受けず、宇宙で自立して接続可能なインフラを目指している。

宇宙統合コンピューティング・ネットワークは三つの機能に対応している。一番目は宇宙センシングで、地上ネットワークが届かないエリアでの IoT (Internet of Things) 通信と衛星からの観測による、地球規模の包括的なセンシングの実現を目指している。二番目は宇宙データセンターで、光電融合による衛星搭載機器の低消費電力化を実現することで、大容量の光無線通信とコンピューティング処理を備えたインフラを整備し、より即応性のある様々なアプリケーションを開発可能にすることを目指す

ている。三番目は宇宙 RAN (Radio Access Network) で、Beyond 5G (第 5 世代移動通信システム) / 6G (第 6 世代移動通信システム) 時代に向け、地上と静止軌道 (GEO: Geostationary Earth Orbit) 衛星、低軌道 (LEO: Low Earth Orbit) 衛星、無人の飛行機や飛行船などをプラットフォームとして通信する HAPS などの通信インフラを統合し、超カバレッジ・超耐災害性などを目指している。NTT では宇宙統合コンピューティング・ネットワークの実用化に向けて各機能の研究開発を推進している⁽²⁾。本稿では宇宙 RAN の中で、我々の研究開発グループが注力して取り組んでいる「多層型 NTN (Non Terrestrial Network)」に関する研究開発を紹介する。

2 多層型 NTN による Beyond 5G/6G 通信サービス

2.1 コンセプト

図 2 に多層型 NTN による Beyond 5G/6G 通信サービスのイメージを示す。Beyond 5G/6G 時代に向けた研究や検討が各国で開始されており、これまで地上モバイルのサービスエリアとすることが困難であったエリアにおけるサービス提供 (地上モバイルサービスの超カバレッジ化) もその研究の柱の一つと位置付けられ、衛星通信や HAPS 通信の活用が検討されている⁽³⁾。超カバレッジの概念には離島や山間といった地上のルールエリアだけでなく、上空・海・宇宙も含まれ、一般に「NTN」と

[†] NTT, 横須賀市
NOPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE
CORPORATION, Yokosuka-shi, 239-0487 Japan

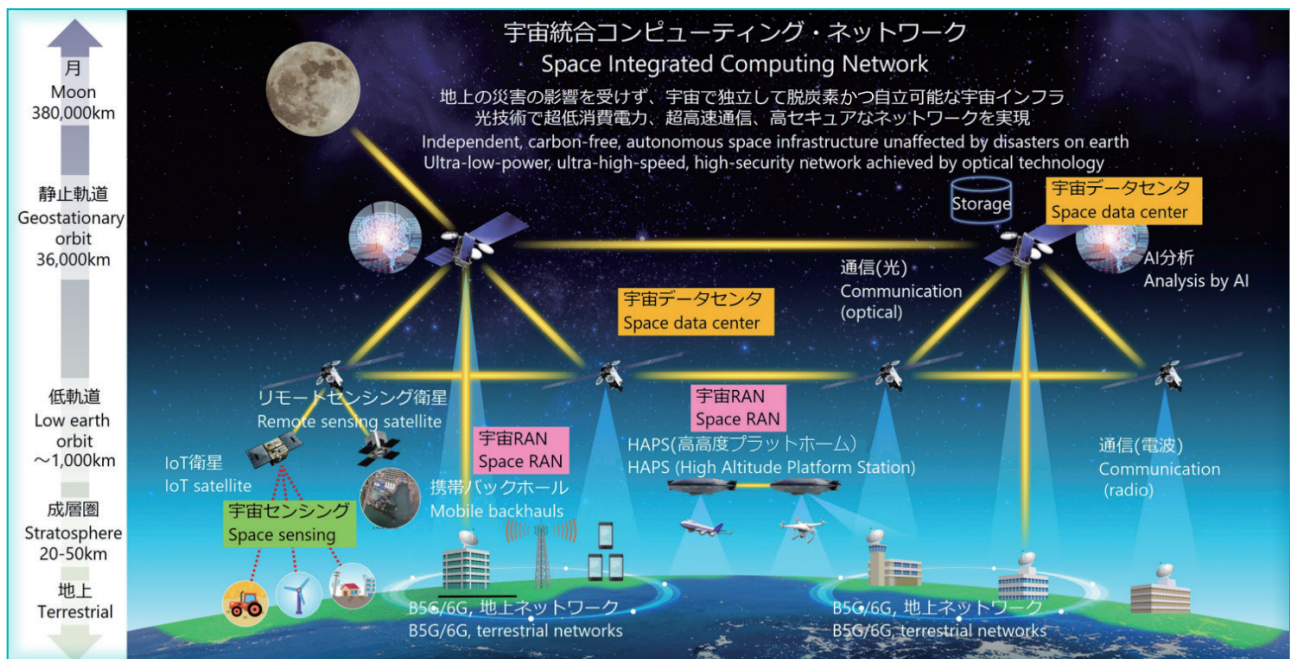


図 1 IOWN 宇宙統合コンピューティング・ネットワーク

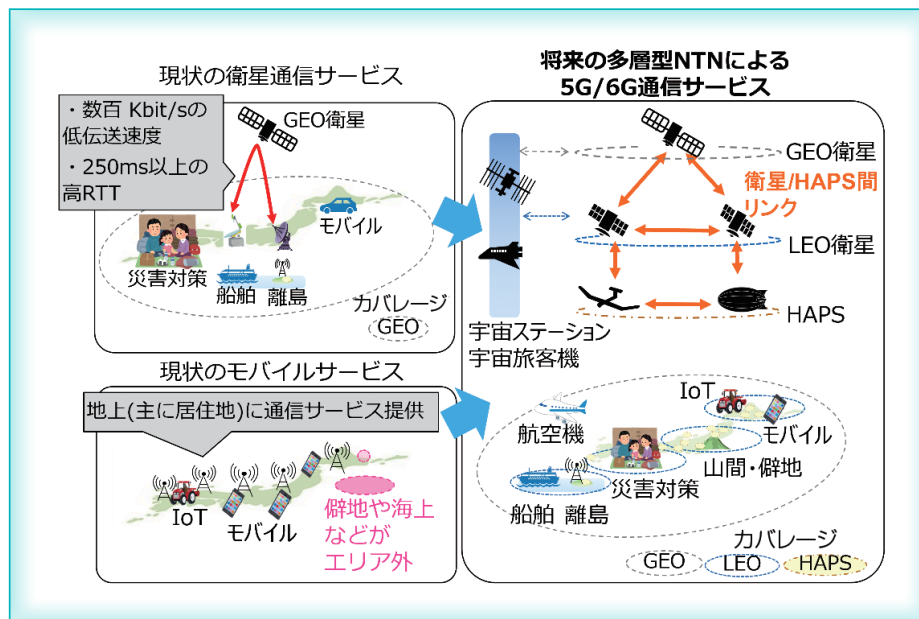


図2 多層型 NTN による Beyond 5G/6G 通信サービス

呼称される。NTN では、汎用のスマートフォンを用いた携帯電話サービスに加え、船舶・自動車・監視制御などの自動化・無人化で衛星通信や HAPS 通信が利用されることが予想されている。このとき、地上ネットワークを利用可能なエリアについては地上ネットワークを利用し、地上ネットワークの通信エリア外では衛星通信や HAPS 通信を利用するなど、地上と上空のハイブリッドなネットワーク構成となる。これまでは衛星通信とモバイル通信は通信プロトコルが互いに独立し、インタフェース仕様も分かれていた。これに対し、今後は Beyond 5G/6G 時代の超カバレッジサービスを見据えて、

5G 通信の仕様の一部を衛星通信用にカスタマイズした汎用チップを端末や基地局に実装することにより、衛星と地上のシームレスな通信接続が期待される。衛星通信と HAPS 通信に対するアクセスサービスを統合した宇宙 RAN により超カバレッジサービスを実現することで、災害対策だけではなく、離島やへき地の通信エリア化、飛行機や船舶などの通信環境の飛躍的な改善など、利便性の向上や新たな付加価値が提供可能となる。

図 3 に、宇宙 RAN における多層型 NTN のイメージを示す。上空方向のネットワークとして最大 3 種類 (GEO 衛星, LEO 衛星, HAPS) のプラッ

トホームの利用を想定している。これらは、カバレッジ・コスト・伝搬遅延・技術成熟度の観点でそれぞれ一長一短がある。例えば、地上から高度 36,000 km 程度に位置する GEO 衛星は 1 機当りのカバレッジが最大であるが、衛星と地上間の伝搬遅延が 250 ms とトレードオフがある。一方で、地上から高度 1,000 km 程度に位置する LEO 衛星は、衛星と地上間の伝搬遅延が数 ms 程度と GEO 衛星と比較して 100 分の 1 程度と短い。しかし、GEO 衛星が地上の 1 点からほぼ静止しているように見えるのに対して、LEO 衛星は上空を時々刻々と移動するため、常時接続性を維持するには多数の LEO 衛星を打ち上げる必要がある。地上から高度 20 km 程度に位置する HAPS は地上との伝搬距離が短く、汎用スマートフォンからのダイレクトアクセスやスポットエリアでのブロードバンドサービスを提供できる可能性が高いが、日本上空で安定した飛行や通信技術を確認し、低価格な通信機器が普及するまでには時間を要する。以上のことから、Beyond 5G/6G 時代では各国の地域特性や通信事情も勘案し、地上と GEO 衛星／LEO 衛星／HAPS をベストミックスさせて柔軟に接続する世界となることが想定される。

地上基地局の設置が不可能な海上などのサービスでは、GEO 衛星／LEO 衛星／HAPS と地上基地局との通信回線であるフィードリンクを、陸地に設置された地上基地局と接続する必要がある。しかし、高度が低くて 1 機当りのカバレッジが狭い HAPS は、地上基地局が通信エリア外に存在しフィードリンクを接続できない環境で運用するケースも想定される。HAPS と地上基地局を接続するため、隣接する HAPS 間や、HAPS と衛星を ISL (Inter Satellite/HAPS Link) で相互接続するマルチホップ接続が必要となる。ISL は、通信リンク

の大容量化や、ほかの無線システム間との煩雑な周波数調整が不要なことから、自由空間光通信 (FSO: Free-space optical communication) の利用が検討されている^{(4), (5)}。NTN 内におけるトラヒックの通信経路は、地上に配置したネットワークコントローラが一元的に決定することを検討している。ネットワークコントローラは、通信経路の導出に必要な各種情報を集約し、導出した通信経路の情報を衛星／HAPS に通知する。

このようなシステムにおいて、例えばアップリンク通信の場合、スマートフォンなどのユーザ端末 (UE: User Equipment) から送信されたトラヒックを NTN 経由で地上基地局に転送し、モバイル通信のネットワークに収容する。

2.2 実現までのマイルストーン

図 4 に、我々の研究開発グループが考えている、多層型 NTN 実現までのマイルストーンを示す。スマートフォンのサービスカバレッジ拡大を中心に考えると、まずは低高度で汎用スマートフォンからのダイレクトアクセスが可能な HAPS を利用したサービスを STEP1 として目指している。一方で、1 機当りのカバレッジが狭い HAPS のみで日本全土や排他的経済水域 (EEZ) を通信エリア化することは、設備投資や導入スケジュールの観点から現実的ではなく、早期展開を見据えて HAPS と GEO 衛星の連携を STEP2 として目指している。最後に STEP3 として、近年注目を集めているブロードバンド LEO 衛星との連携を組み込むことで、多層型 NTN を完成させることを目指している。

3 多層型 NTN の実現に向けた主要技術

本章では、地上セルラ網と GEO 衛星／LEO 衛

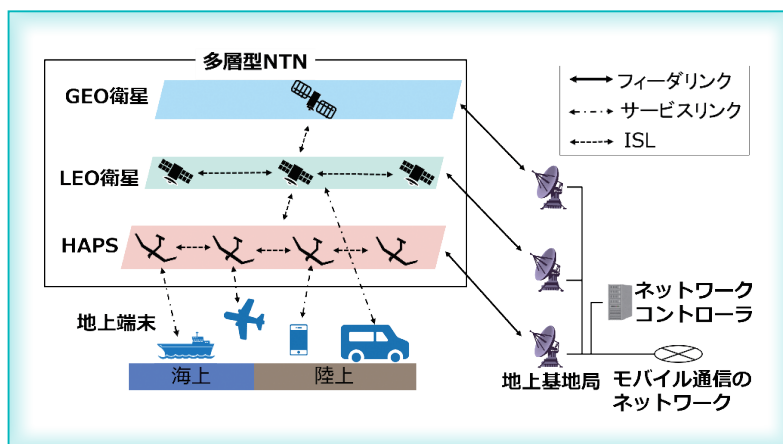


図3 宇宙 RAN における多層型 NTN のイメージ

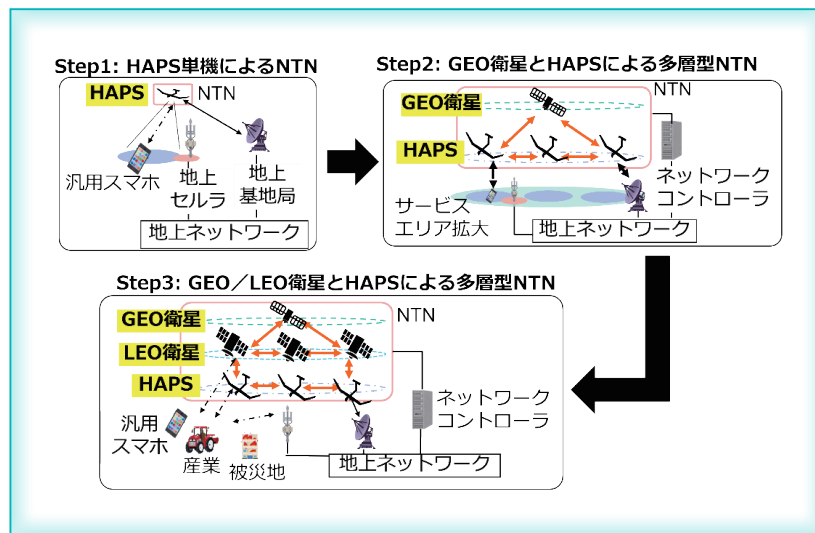


図4 多層型 NTN 実現に向けたマイルストーン

星／HAPSを柔軟に接続する多層型NTNの実現に向けて、我々のグループが研究開発を進めている技術について紹介する。

3.1 ネットワークアーキテクチャ

GEO衛星／LEO衛星／HAPS及び地上セルラ網を組み合わせるトラヒックを収容する場合、ネットワークのアーキテクチャ設計が重要となる。例えば、GEO衛星／LEO衛星／HAPSに対し、5Gの基地局であるgNB(gNodeB)を搭載するか、しないかにより、ネットワークアーキテクチャやトラヒックのルーティング方法が異なる。我々の研究開発グループでは、ネットワークアーキテクチャ及び無線伝送技術について、スマートフォンなどのUE接続構成やgNBの配置パターンから分類して検討を行っている。

UE接続構成は、UEの接続形態や衛星／HAPSにおける信号中継形態などに応じて、様々な構成が考えられる。衛星／HAPSにおける無線信号の中継形態として、受信した無線信号を変復調せずに信号電力増幅や周波数変換のみを行い、フィーダリンク接続された地上基地局やISL接続された衛星／HAPSに転送する非再生中継型と、衛星／HAPSにおいて受信信号を復調し再変調して転送する再生中継型が考えられる。再生中継型は非再生中継型と比較して衛星／HAPSにおける付加雑音軽減によるリンクバジェット(通信経路上の利得と損失の合計)の改善などの利点がある一方、変復調装置を衛星／HAPSに搭載する必要があるため、衛星／HAPSに求められる重量や電力供給の要求が高くなる欠点があり、衛星／HAPSの性能なども考慮して構成を選択する必要がある。

gNBの配置パターンは、3パターン(UE側に配置、衛星／HAPS上に配置、地上基地局側に配置)が考えられる。図5は、gNBをUE側に配置する場合の構成を示す。UEは、統制局からの制御を受けて運用される小形地球局であるVSAT(Very Small Aperture Terminal)局にgNBを搭載したものなどを經由して、衛星／HAPSに接続するインダイレクトアクセス型のセルラバックホール接続となる。セルラバックホール接続では、NTN区間のバックホール回線にVSAT回線の使用が考えられる。衛星／HAPSにおける信号中継形態としては、再生中継型(①-1)と非再生中継型(①-2)の両方が考えられる。

図6は、gNBを衛星／HAPS上に配置する場合の構成を示す。UEは衛星やHAPSと直接通信を行うダイレクトアクセス型の接続(②)と、IAB(Integrated Access and Backhaul)ノードを介して衛星やHAPSに接続するインダイレクト型のIABリレー接続(③)が考えられる。

図7は、gNBを地上基地局側に配置する場合の構成を示す。UEは衛星／HAPSと直接通信を行うダイレクトアクセス型の接続と、リレーノードを介して衛星／HAPSに接続するインダイレクトアクセス型のIABリレー接続がある。ダイレクトアクセス型の接続においては、衛星／HAPSが非再生中継型である構成(④)と、衛星／HAPSが再生中継型でIABノードを搭載した衛星／HAPSに接続する構成(⑤)が考えられる。インダイレクトアクセス型の接続においては、IABノードを介して衛星やHAPSに接続するIABリレー接続が考えられるが、衛星／HAPSにIABノードを搭載し中継を行う構成(⑥)、衛星／HAPSにIABノードを搭載

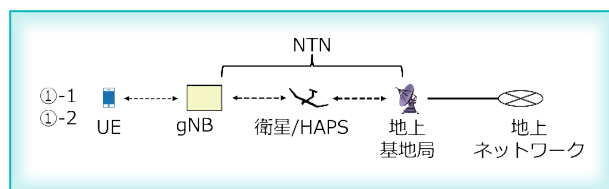


図5 gNBをUE側に配置した構成

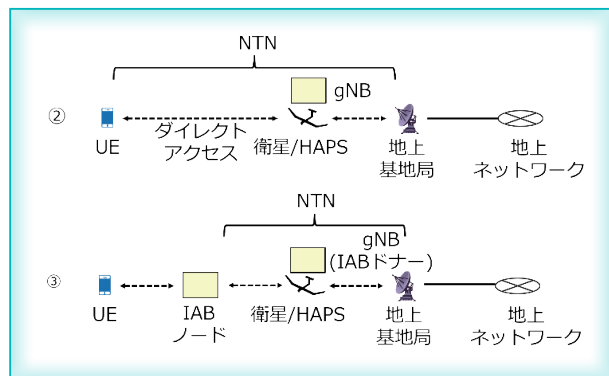


図6 gNBを衛星/HAPS上に配置した構成

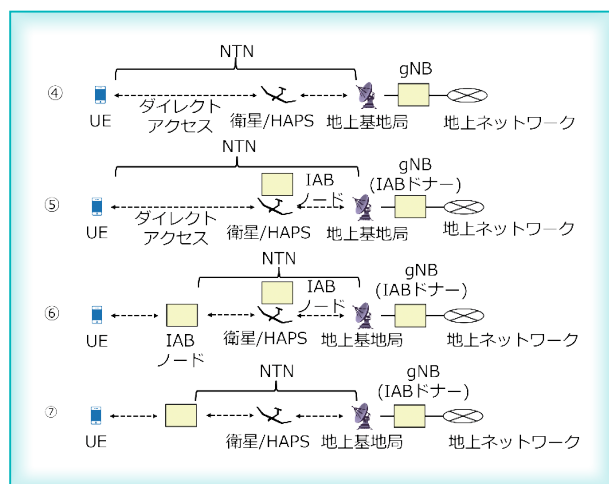


図7 gNBを地上基地局側に配置した構成

せずに非再生で中継を行う構成（⑦）が考えられる。

上記構成を一覧化したものを表1に示す。ユースケースごとに要求されるQoSや収容キャパシティなどによって、最適な構成が変わると考えられる。また、衛星/HAPSの性能などによる非再生中継型/再生中継型の適用可否のほか、UEの性能などの制約条件も存在するため、ユースケースごとの最適構成の検討や多層型NTNの段階的な構築の検討などを基に、取捨選択や段階的な構築の検討を行う必要があると考えられる。

3.2 降雨減衰補償技術

NTNサービスにおいて、モバイルユーザを想定したサービスリンクの高速化に伴い、それを束ねる衛星/HAPSと地上基地局間のフィードリンクには、より大容量の伝送容量が求められる。このため、フィードリンクの周波数としてWRC (World Radiocommunication Conference) -19で新たに割当された38.0~39.5 GHz帯を中心とした36.0~42.5 GHzのQバンドを活用することが検討されている^{(6), (7)}。しかし、当該帯域はこれまでの衛星通信で広く利用されてきたKuバンド(10.6~15.7 GHz)やKaバンド(17.3~31.0 GHz)などと比較して高い周波数帯であるため、降雨による減衰量が大きい^{(8), (9)}。そのため、日本のような多雨地域では可用性を向上するための降雨減衰補償技術が必要となる。降雨減衰補償技術として、複数設置した地上基地局から通信環境の良い方を選択してフィードリンクを接続する、従来からのサイトダイバーシチ技術に加え、フィードリンクを接続する地

表1 建材の複素誘電率

	gNBの配置	衛星/HAPSの信号中継	UEの接続構成	NTN区間の回線
①-1	UE側	非再生中継型	インダイレクトアクセス	VSAT回線 (gNB-地上基地局)
①-2	UE側	再生中継型	インダイレクトアクセス	VSAT回線 (gNB-地上基地局)
②	衛星/HAPS搭載	再生中継型	ダイレクトアクセス	5G回線 (UE-衛星/HAPS) VSAT回線 (衛星/HAPS-地上基地局)
③	衛星/HAPS搭載	再生中継型	インダイレクトアクセス	VSAT回線 (IABノード-地上基地局)
④	地上基地局側	非再生中継型	ダイレクトアクセス	5G回線 (UE-地上基地局)
⑤	地上基地局側	再生中継型	ダイレクトアクセス	5G回線 (UE-衛星/HAPS) VSAT回線 (衛星/HAPS-地上基地局)
⑥	地上基地局側	再生中継型	インダイレクトアクセス	VSAT回線 (IABノード-地上基地局)
⑦	地上基地局側	非再生中継型	インダイレクトアクセス	VSAT回線 (IABノード-地上基地局)

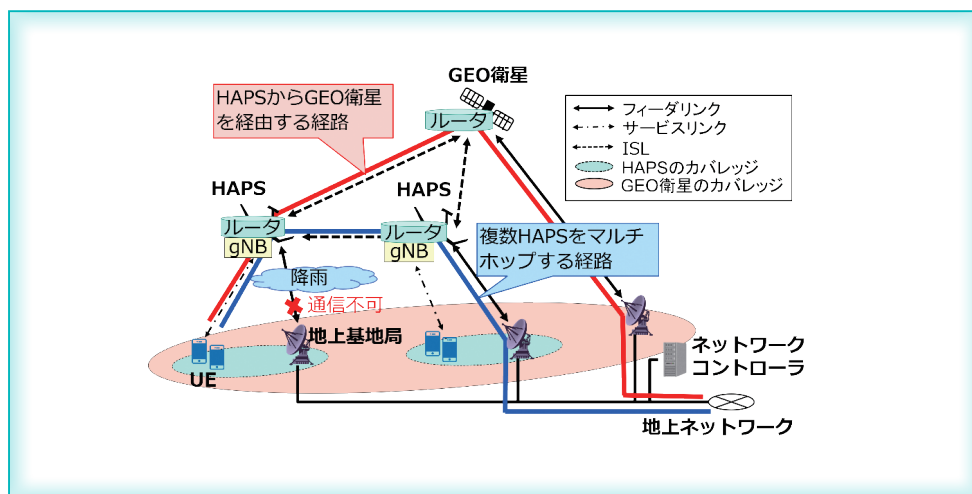


図8 検討対象の多層型 NTN 構成

上基地局を降雨予測に基づいてプロアクティブに切り換える技術⁽¹⁰⁾や、衛星／HAPSがカバレッジ内に複数設置された地上基地局のいずれとも通信不可な場合に、衛星／HAPS間のISLを介して通信可能な地上基地局を有する衛星／HAPSまで、NTN内でトラヒックを転送する降雨う回避制御技術について研究開発が進められている。特にHAPSは、衛星と比較して低高度なため1機当りのカバレッジが狭く、線状降水帯のように降雨領域が広い場合は、降雨減衰の影響で通信可能な地上基地局が存在しないことが想定される。そのため、我々の研究開発グループでは降雨う回避制御に着目し、NTN内における適切なトラヒックの転送経路を導出するNTN経路制御技術を検討している。

3.2.1 検討対象の多層型 NTN 構成

図8は、我々がNTN経路制御技術の検討を進める上で、検討対象としている多層型NTNの構成を示す。NTNは1機のGEO衛星と複数機のHAPSから構成（図4のStep2に該当）し、gNBはHAPSに搭載して地上のUEと直接通信する（図7及び表1の②に該当）。サービスリンクは、UEとして汎用スマートフォンの利用を想定し、地上のモバイルネットワークと同様に5G新無線周波数帯のn1（2GHz帯）を用いる。2GHz帯は降雨による減衰量が非常に小さいため、本検討ではサービスリンクは降雨減衰の影響を受けないものとした。衛星／HAPSの信号中継形態は、各伝送路で生じる通信品質劣化の低減や、地上のネットワークで広く用いられているレイヤ3（ネットワーク層）での通信経路制御が可能なことから再生中継型とし、衛星／HAPSにレイヤ3のルータ機能を搭載する。ISLは常時通信可能なものとし、フィーダリンクは降雨

減衰の影響でのみ通信不可になるものとした。このようなネットワークにおいて、例えばUEが送信したトラヒックを地上ネットワークに転送する経路として、複数のHAPSをマルチホップする経路のほかに、HAPSからGEO衛星を経由する経路も考えられる。複数の経路候補から適切なものを選択するNTN経路制御技術を検討している。

3.2.2 提案している NTN 経路制御技術

多層型NTNは、衛星／HAPSの搭載重量制限や使用可能な電力制限のため、地上5Gや光ファイバ網と比較して通信リンクの伝送容量に限られる。そのため、降雨減衰による伝送容量減少やリンク切断、災害時のトラヒック流量増加など周辺環境の変化に柔軟に対応する必要がある。2.1で述べたとおり、衛星／HAPSはプラットフォームごとに異なる特徴を有しており、これらを加味しながら柔軟にトラヒックを収容するNTN経路制御技術が必要となる。

NTN経路制御技術として、伝送容量や中継するノード数（ホップ数）などから算出したコスト値が最小のものを通信経路として選択する方法が広く検討されている^{(11)～(16)}。この中で、我々は式(1)を用いてコスト値を算出する方法を提案している。

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \quad C_i = \frac{B_r}{R_i \cdot (1 - \delta_i)} + \frac{d_i}{B_d} \quad \delta_i = \frac{r_i}{R_i} \quad (1)$$

式(1)において、 C_i は通信リンク*i*のコスト値、 n は通信経路に含まれる通信リンクの総数、 δ_i は通信リンク*i*の混雑度、 R_i は通信リンク*i*の伝送容量、 r_i は通信リンク*i*のトラヒック流量、 d_i は通信リンク*i*の遅延時間を示す。 B_r と B_d は全通信リンクで共通の基準値（値は任意）であり、システム

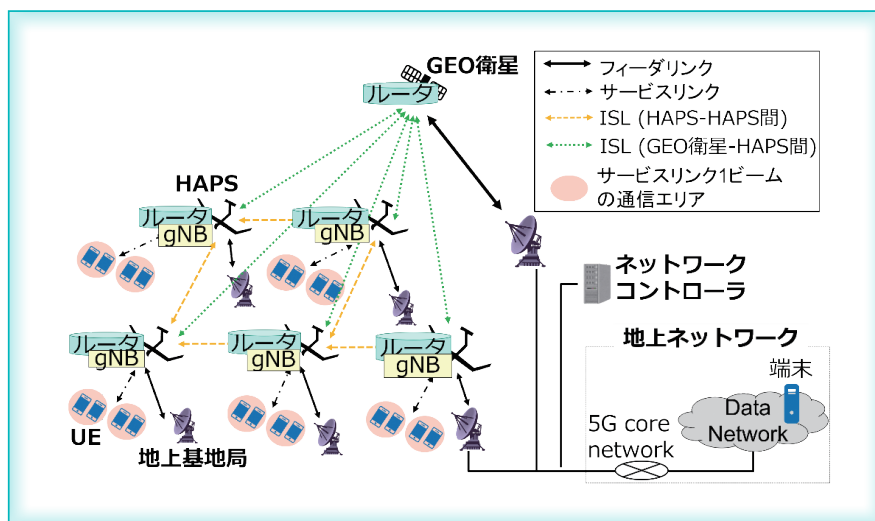


図9 シミュレーション評価系

表2 評価諸元

HAPS の機数	5 機	フィーダリンク伝送容量	500 Mbit/s
HAPS の航行高度	20 km	ISL の伝送容量	500 Mbit/s
HAPS 間の距離	100 km	サービスリンク周波数 / ビーム	2GHz
GEO 衛星の機数	5 機	サービスリンク1 帯域幅 / ビーム	20MHz
GEO 衛星の航行高度	36,000 km	フィーダリンク周波数	38 GHz
サービスリンクビーム数 / HAPS	20 本	ISL 周波数	193 THz
UE 数 / サービスリンクビーム	5 台	リンク容量の基準値 B_r	500 Mbit/s
トラフィック / UE	5 Mbit/s	遅延時間の基準値 B_d	10 ms

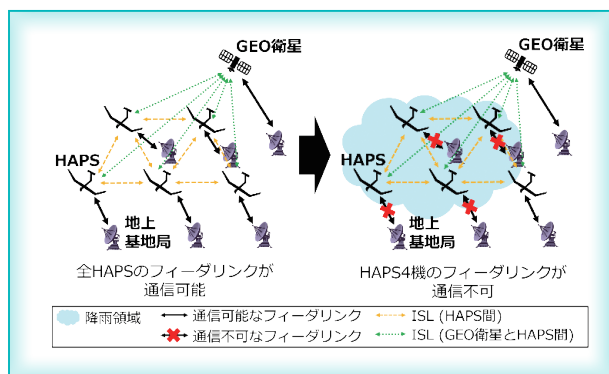


図10 評価で用いた降雨領域のイメージ

の運用方針に応じて設定する。 B_r は通信リンク容量の基準値を示し、リンク容量の上限値などを設定する。 B_d は遅延時間の基準値を示し、伝搬遅延などを設定する。提案技術は、降雨減衰によるフィーダリンクの伝送容量 R_i の減少、降雨時のトラフィック転送や災害時のトラフィック流量増加に伴う各通信リンクの混雑度 δ_i に応じてコスト値 C_i が変わる。伝送容量 R_i が小さい通信リンクや、トラフィックの混雑度 δ_i が大きい通信リンクはコスト値 C_i が高くなり、通信経路として選択される可能性が低くなる。これにより、通信リンクに伝送容量を超過したトラフィックが

流入することを回避できる。また、多層型 NTN では衛星－HAPS 間の ISL と HAPS－HAPS 間の ISL で伝搬遅延が大きく異なるため、提案技術では遅延時間も考慮して通信経路を選択する。

4 NTN シミュレータによる性能評価

NTN 経路制御技術の評価するため、各 UE のスループット及びエンドツーエンド遅延を定量的に評価可能な NTN シミュレータを市販のネットワークシミュレーションソフト EXata8.0.5.0⁽¹⁷⁾ をベースに開発している。本章では、NTN シミュレータを用いて提案している NTN 経路制御技術の評価した結果を紹介する。

4.1 評価条件

図9は、シミュレーション評価系、表2は評価諸元を示す。多層型 NTN は、5 機の HAPS 及び 1 機の GEO 衛星で構築した。隣接する GEO 衛星と HAPS 間は、自由空間光通信で接続する。各 HAPS はサービスリンクを 4 ビーム照射し、1 ビームにつき 5G の通信エリアを 1 セル形成する。フィーダリ

リンクは、GEO 衛星及び各 HAPS が 1 ビームずつ照射する。図 10 は、評価で用いた降雨領域のイメージを示す。降雨領域の変動は、地域や季節依存性が強く、年ごとの違いも大きく様々なパターンが考えられる⁽¹⁸⁾。本評価では、一例として全 HAPS の通信エリアが降雨領域に含まれない状態から、最大で HAPS4 機の通信エリアが降雨領域に含まれるものとして降雨領域を変動させた。また、通信エリアが降雨領域に含まれる HAPS のフィーダリンクは、必ず地上基地局と通信不可になるものとした。なお、GEO 衛星は 1 機で日本全域を通信エリア化できるほどカバレッジが広大であり、複数設置した地上基地局から通信環境の良い方を選択してフィーダリンクを接続するサイトダイバーシチ技術を用いることで、フィーダリンクはいずれかの地上基地局と必ず通信可能であることが想定される。本評価では、GEO 衛星のフィーダリンクは地上基地局と必ず通信可能なものとした。本構成において、インターネットなどの DN (Data Network) 内の端末から各 UE に対してダウンリンク通信を実施した際の、各 UE のスループット及びエンドツーエンド遅延をシミュレーション評価した。

4.2 評価結果

地上ネットワークにおける代表的なレイヤ 3 のルーティングプロトコルである OSPF (Open Shortest Path First) を従来手法とし、これと提案している NTN 経路制御技術の性能を比較する。

図 11 は、スループットを累積確率分布 (CDF) で評価した結果を示す。スループットは、アプリケーション層で 1 秒間に受信されたトラヒック量を UE 単位で計算した。最大値はいずれも同程度であった。これは、UE が接続した HAPS が降雨領域外に存在してフィーダリンクが通信可能な場合や、降雨領域が狭くて通信不可なフィーダリンク数が少ない場合など、転送されるトラヒック量が少ない場合の測定値である。いずれの手法を用いても、通信リンクに伝送容量を超過したトラヒックは流入しない。本評価では、低スループットの UE に着目する。CDF=10 % では、1.3 倍程度のスループット向上効果が得られた。これは、降雨領域が広域で通信不可なフィーダリンク数が多く、多くのトラヒックが ISL 経由で転送される場合に、提案技術では通信リンクに容量を超過したトラヒックが流入することなく通信できたためである。

図 12 は、各 UE のエンドツーエンド遅延の 1 秒間隔の平均値を CDF で評価した結果を示す。エン

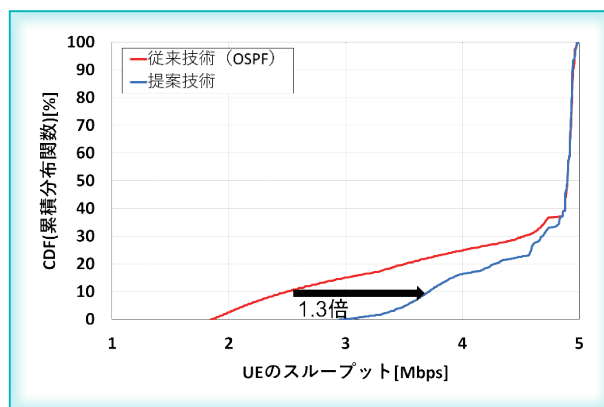


図 11 シミュレーション結果 (スループット)

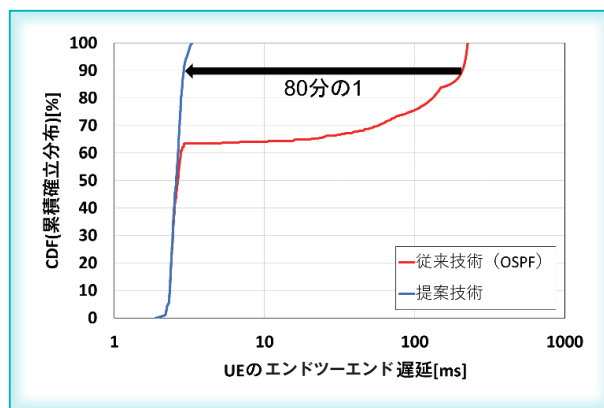


図 12 シミュレーション結果 (エンドツーエンド遅延)

ドツーエンド遅延は、DN 内の端末のアプリケーション層でトラヒックが発生してから、UE のアプリケーション層でトラヒックを受信するまでの時間と定義する。最小値はいずれも同程度であった。これは、UE が接続した HAPS が降雨領域外に存在してフィーダリンクが通信可能な場合の測定値であり、手法によらず GEO 衛星を経由せずに通信する。本評価では、遅延時間が長い UE に着目する。CDF=90 % では、遅延時間が 80 分の 1 程度に抑制された。これは、UE が接続した HAPS が降雨領域に含まれフィーダリンクが通信不可な場合に、遅延時間を考慮する提案手法では、トラヒックの転送経路として GEO 衛星-HAPS 間リンクよりも低遅延な HAPS 間リンクを優先選択するためである。

5 まとめ

本稿では IOWN 宇宙統合コンピューティング・ネットワーク構想を支える多層型 NTN と、それを実現するための主要技術について紹介した。衛星や HAPS を活用した NTN は大規模な研究開発となるため、NTT のみでけん引することは困難である。そのため、関係機関と連携しながら、実用化に向け

た基盤技術の研究開発に取り組んでいく。

謝辞 本研究は、国立研究開発法人情報通信研究機構の委託研究（採択番号 01501）によるものである。本研究の研究分担者であるスカパー JSAT 株式会社及び（株）NTT ドコモに謝意を表する。

文献

- (1) IOWN 構想, <http://www.rd.ntt/iown/>
- (2) 山下史洋, “IOWN 宇宙センシング/宇宙 RAN の研究開発,” 信学技報, SAT2021-29, pp. 8-13, Aug. 2021.
- (3) ドコモ 6G ホワイトペーパー 5.0 版, https://www.docomo.ne.jp/corporate/technology/whitepaper_6g/
- (4) 外園悠貴, 岸山祥久, 浅井孝浩, “宇宙 RAN における HAPS 実用化に向けた取り組み,” NTT 技術ジャーナル, vol. 34, no. 10, pp. 17-22, Oct. 2022.
- (5) 岸山祥久, 浅井孝浩, 阿部順一, 山下史洋, 箕輪祐馬, 鈴木 淳, 北之園 展, 大内幹博, 外山隆行, “非地上ネットワークによるカバレッジ拡張通信システムの開発—Beyond 5G に向けた NTN ノードのネットワーク化技術とカバレッジ拡張,” 2022 信学総大, BI-3-7, March 2022.
- (6) 北之園 展, 鈴木 淳, 岸山祥久, 外園悠貴, 外山隆行, 大内幹博, 三浦 龍, 辻 宏行, “HAPS を用いたミリ波帯バックホールシステムの開発状況—Beyond 5G/6G 時代の HAPS 搭載 NTN システムの開発と実証—,” 信学技報, SAT2021-30, pp. 14-19, Aug. 2021.
- (7) World Radiocommunication Conference 2019 (WRC-19) Final Acts, ITU Publications, pp. 41-43, 2020.
- (8) 森田, 樋口, “ミリメートル波帯降雨減衰の推定,” 研実報, vol. 24, no. 9, pp. 2061-2071, 1975.
- (9) ITU-R Recommendation P.838-3 Specific attenuation model for rain for use in prediction methods, Radio communication Sector of International Telecommunication Union, March 2005.
- (10) 北之園 展, 鈴木 淳, 外園悠貴, 岸山祥久, 浅井隆浩, “高高度プラットフォーム (HAPS) による 5G 網と連携した 38 GHz 帯の無線通信システム開発—フィードバックにおけるサイトダイバーシティの検討—,” 2022 信学ソ大, B-3-15, Aug. 2022.
- (11) 多田祐太, 西山大樹, 吉村直子, 加藤 寧, “階層型衛星ネットワークにおける効率的な経路制御に関する一検討,” 信学技報, SAT2010-9, pp. 45-50, June 2010.
- (12) C. Chen and E. Ekici, “A routing protocol for hierarchical LEO/MEO satellite IP networks,” Wirel. Netw., vol. 11, no. 4, pp. 507-521, July 2005.
- (13) J. W. Lee, “Satellite over satellite (SoS) network: A novel architecture for satellite network,” Proc. IEEE INFOCOM, pp. 392-399, Nov. 2000.
- (14) S. Bayha, “Performance of delay-sensitive traffic in multi-layered satellite IP networks with on-board processing capability,” International J. Satellite Commun. Netw., vol. 25, no. 6, pp.

603-617, Sept. 2007.

- (15) M. Werner, “A dynamic routing concept for ATM-based satellite personal communication networks,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 15, no. 8, pp. 1636-1648, Oct. 1997.
- (16) M. Mohorcic, “Performance evaluation of adaptive routing algorithms in packet-switched intersatellite link networks,” The International J. Satellite Commun., vol. 20, no. 2, pp. 97-120, Feb. 2002.
- (17) “EXata Network Simulator.” <https://www.keysight.com>
- (18) 唐沢好男, “地上無線回線の降雨減衰推定法—我が国における推定法高精度化への歩みと現行推定法の詳細—,” Technical Report YK-022, March 2019.

(2024 年 1 月 31 日受付, 5 月 14 日再受付)

加納寿美 (正員)

平 21 北大・工・情報エレクトロニクス卒。平 23 同大学院情報科学研究科博士前期課程了。同年日本電信電話株式会社入社。以来、無線通信に関する研究開発に従事。現在、同社アクセスサービスシステム研究所主任研究員。令 3 本会衛星通信研究会衛星通信研究賞受賞。



松井宗大 (正員)

平 10 名大・工卒。平 12 同大学院工学研究科了。同年日本電信電話株式会社入社。以来、無線通信に関する研究開発に従事。平 18 年度本会学術奨励賞受賞。



阿部順一 (正員)

平 16 東工大・情報工学卒。平 18 同大学院理工学研究科博士前期課程了。同年日本電信電話株式会社入社。以来、衛星通信における変復調技術、災害対策用衛星通信システム、非地上ネットワーク制御技術の研究開発に従事。平 25 本会学術奨励賞、平 25、平 27 本会衛星通信研究会衛星通信研究賞各受賞。



山下史洋 (正員：シニア会員)

平 8 京大・工・電子通信卒。平 10 同大学院修士課程了。同年日本電信電話株式会社入社。以来、衛星通信用変復調技術、衛星 MIMO/IoT 技術、B5G/NTN 技術、6G 無線技術の研究、離島・災対・船舶衛星通信インフラシステムの実用化開発に従事。現在、同社アクセスサービスシステム研究所無線エントランスプロジェクトプロジェクトマネージャー。主席研究員。工博。平 15 年度 IEEE PIMRC 論文賞、平 16 年度本会学術奨励賞、平 26 年度、令元年度本会通信ソサイエティ活動功労賞。令元年度電波功績賞電波産業協会会長表彰各受賞。令元年度本会衛星通信研究専門委員会委員長、現在、同委員会顧問。



高速無線通信の拡大をけん引するサブテラヘルツ帯材料計測技術

加藤悠人 Yuto Kato 産業技術総合研究所

1 はじめに

近年、高速大容量の無線通信を可能にするミリ波・サブテラヘルツ波帯電磁波の利用が急速に拡大している。次世代通信の6Gでは5G以上の高速大容量通信を実現するために100 GHz超の周波数帯の利用が見込まれる。一般に回路の伝送損は周波数が上がるほど増大する一方で、6Gでは5Gの1/100の超低消費電力性能が目指されているため⁽¹⁾、低損失化に向けた先端材料開発が6G実現の鍵となっている。

一般に高周波回路では、誘電体基板の複素誘電率で決まる誘電損と、金属線路の導電率で決まる導体損、回路構造などで決まる放射損の合計で回路全体の伝送損が決まる。そのため、低損失な誘電体基板と金属線路の使用により、誘電損と導体損の両者を低減することが高周波回路の低損失化には不可欠である(図1)。特に5Gや6Gで使用されるミリ波帯では、金属線路と誘電体基板の接着性を保持するための誘電体表面の粗化による実効的な導電率の低下が問題となっている^{(2), (3)}。そのため、回路基板材料の開発を行うに当たっては、材料の低誘電率・低誘電正接化と同時に、表面に高導電率の金属層を形成する実装プロセス技術の確立が一般に必要になり、ミリ波帯を含む広帯域での高精度な複素誘電率・導電率計測技術が強く求められている。

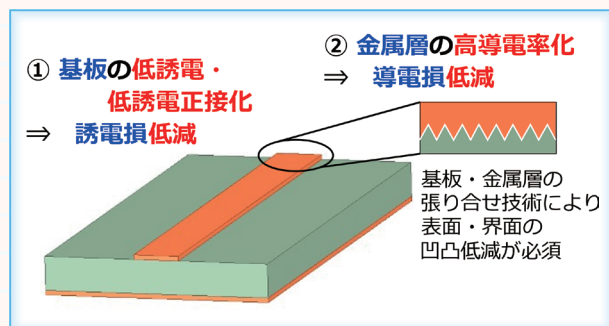


図1 高周波回路の主な損失要因

また、アンテナ、メタサーフェスや回路などの高周波デバイスの設計においても高精度な材料評価技術が求められる。基板材料の誘電率などの材料物性値は、設計やシミュレーションに必須のパラメータであるが、一般に周波数依存性を持つため、デバイスの動作周波数での値を把握し、その値に基づく設計が求められる。

本稿では、100 GHz超の周波数帯まで適用可能なサブテラヘルツ帯材料計測技術について述べる。一般に、高周波帯の材料計測技術としては反射伝送法と共振器法があるが、低損失の基板材料には共振器法が用いられる。共振器法の概論を述べた後に、ミリ波帯を含む超広帯域での複素誘電率計測が可能な平衡円板共振器法について説明し、最後に同方法の導電率計測への展開について述べる。

2 共振器法の概要と高周波化の課題

高周波の材料評価技術には様々な方法が提案されており、各方法は周波数帯や測定する材料の特性に応じて使い分けられる(図2)⁽⁴⁾。このうち、高損失材料の複素誘電率評価には反射伝送法が利用されるのに対し、低損失材料の複素誘電率を高感度・高精度に計測する方法としては共振器法が利用される。共振器法では、材料が封入された共振器に特定の電磁界モードを励振させ、その共振周波数と無負荷Q値を評価することで材料の複素誘電率を測定する。

多くの共振器法では基本モードを利用した測定に制限されており、基本的には一つの共振器で単一周波数の測定しか行えない。このような方法では、測定周波数を高周波化するには周波数と反比例した共振器の小形化が必要となり、共振器や誘電体材料の加工精度の問題からおよそ80 GHz超での適用は困難である。共振器の高次モードを利用して複数周波数で測定するためには、

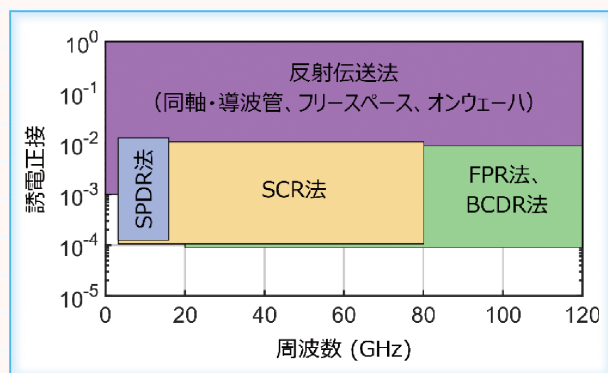


図2 代表的な複素誘電率の測定方法とその適用範囲。文献(4)を元に作成。

SPDR: split post dielectric resonator

SCR: split cylinder resonator

FPR: Fabry-Perot resonator

BCDR: balanced-type circular disk resonator

モードの同定やモード間の干渉による波形ひずみの問題を回避するために、材料評価に利用しない不要モードの抑制が必須となる。

特定の共振モードを選択的に励振させることで、複数周波数かつ広帯域での材料評価を実現し、サブテラヘルツ波帯での適用も可能な方法として、平衡円板共振器法(balanced-type circular disk resonator (BCDR)法)^{(5)~(9)}やファブリペロー共振器法(Fabry-Perot resonator (FPR)法)^{(10), (11)}がある。このうち、筆者らは平衡円板共振器法に基づく誘電率・導電率計測技術の研究開発を進めており、次章以降ではその取組みを紹介する。

3 平衡円板共振器法による複素誘電率計測技術

平衡円板共振器の写真と模式図を図3に示す。この方法では、誘電体サンプルとして、同一の厚さ t と比誘電率 ϵ_r 、誘電正接 $\tan\delta$ を持つ誘電体シートを2枚用意する。2枚のシートサンプルの間に厚さ $t_c=0.06$ mm、直径 D の銅はく円板を挟み、これらを合わせて2枚の銅板で挟む。シートサンプルで構成された誘電体共振器に対し、銅板の中央に位置する上下の励振孔から同軸線路で励振し、透過を検出する。シートサンプル間に挟まれた銅はく円板の中心と励振孔の中心のアラインメントが確保されたとすると、構造の対称性から、特定の TM_{0m0} モードのみが選択的に励振され、ほかの不要モードは十分に抑制される。したがって、不要モードの影響を受けることなく、高次モードを含めて TM_{0m0} モードの励振を複素誘電率計測に利用でき、各共振周波数と無負荷 Q 値の測定値から、その周波数における材料の複素誘電率を決定できる。複素誘電率の計算において

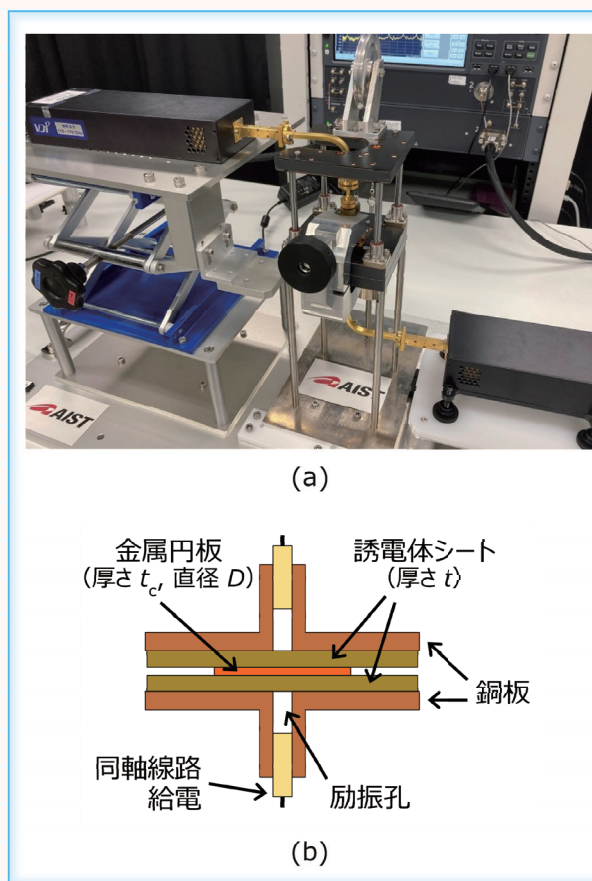


図3 平衡型円板共振器 (a) 写真 (b) 模式図

は、励振孔まで厳密に考慮されたMode-matching法による電磁界解析が利用される^{(6), (7), (9)}。なお、この方法では TM モードを利用するため、電界の向きはシート材料に垂直であり、面直方向の複素誘電率が測定される。

平衡円板共振器の特徴は2点ある。一つは、 TM_{0m0} モードの選択的励振と励振孔まで考慮した厳密な電磁界解析の確立により、単一の共振器で10 GHz程度から100 GHz超にわたる超広帯域での複素誘電率計測が可能な点である。もう一つは、測定周波数の可変性である。使用する銅はく円板の直径を変えることで、同一の誘電体サンプルに対して異なる周波数における測定が可能であり、円板径の調整により特定の周波数に合わせた測定を実現できる。これらのことから、単一の平衡円板共振器と径を変えた複数の銅はく円板を組み合わせれば、低損失の誘電体シートに対するほぼ任意の周波数での超広帯域な複素誘電率計測を実施できると言える。

測定周波数の可変性を示す一例として、 $D=9, 12, 15, 18, 21$ mmの銅はく円板から成る平衡円板共振器を用いて、 $t=0.254$ mmのシクロオレフィンポリマー(cyclic olefin polymer (COP))を評価した結果を図4に示す⁽¹²⁾。図4(a)の共振波形が示すとおり、共振周波数の位置は円板径に応じてシフトしており、円板径を変えると異なる周波数での材料評価が実現される。

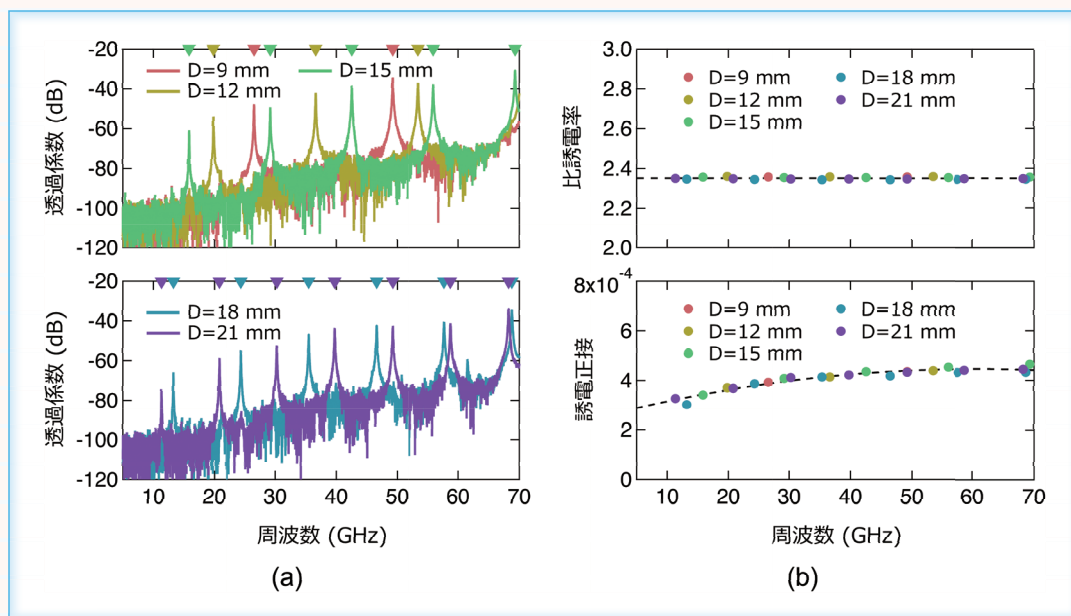


図4 径の異なる銅はく円板を用いた平衡円板共振器でシクロオレフィンポリマー (COP) を評価した結果。
(a) 共振波形. (b) 比誘電率と誘電正接. 点線は二次のフィッティング曲線を表す.

また, 図4 (b) のとおり, 異なる円板径に対応する比誘電率と誘電正接の測定結果は互いに整合していることが確認できる.

平衡円板共振器法の測定可能な上限周波数は, ①同軸励振線のカットオフ周波数, ②誘電体シートからの電磁波放射のカットオフ周波数の二つの要因で決まる. ①について, 従来型の平衡円板共振器に用いられる 1 mm 同軸励振線では, 同軸エアライン線路のカットオフ周波数は約 130 GHz となる. そのため, 1 mm 同軸励振の平衡円板共振器ではこれより高い周波数での材料評価を行えない. 一方で②については, カットオフ周波数は次式で与えられる⁽⁷⁾.

$$f_c^{\text{rad}} = \frac{c}{4(t + t_c/2)\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

ここで, c は光速である. 誘電体シートの厚さが薄いほど, また比誘電率が低いほど, 放射のカットオフ周波数は高周波化し, 例えば, $t=0.2$ mm, $\epsilon_r=2$ ではカットオフ周波数は 230 GHz に達する. したがって, 低誘電率の薄膜シートサンプルに対しては, ①が平衡円板共振器法の上限周波数を決定する.

同軸励振線のカットオフ周波数は同軸線路を細くすれば高周波化できることから, 筆者らは 0.6 mm 同軸線路を給電部に用いた平衡円板共振器を開発し (図3 (a)), 最大 170 GHz までの材料評価を実証した⁽⁹⁾. 開発した共振器では, 同軸-導波管変換を励振構造内部に実装することで, 極細の 0.6 mm 同軸を接続のインタフェースとせずに, D バンド導波管 (WR-6.5) をインタフェースに使用している. 測定周波数は導波管バンドの 110 GHz から 170 GHz に制限されるものの, 共振

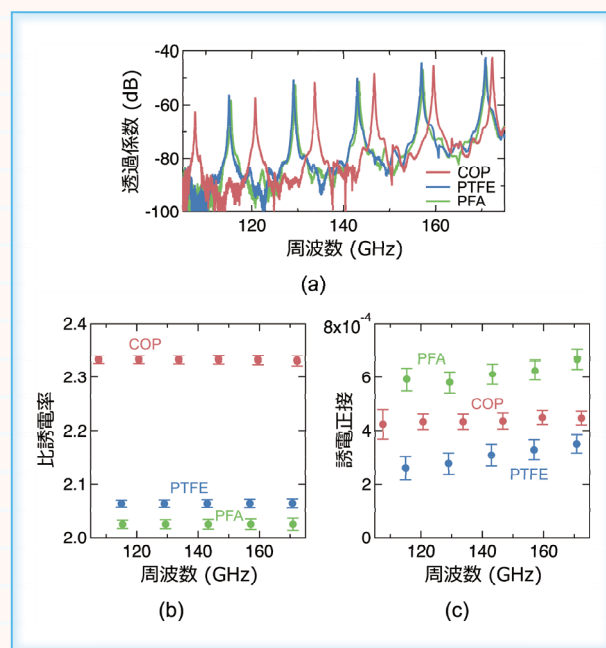


図5 WR-6.5 導波管インタフェース平衡円板共振器による COP, PTFE, PFA の D バンド複素誘電率計測結果.

(a) 共振波形. (b) 比誘電率. (c) 誘電正接.

器の堅ろう性の確保を優先した提案である. 同様のアプローチで, 最大 330 GHz までの材料評価が可能な平衡円板共振器の研究開発を現在進めている.

開発した WR-6.5 導波管インタフェースの平衡円板共振器を用いて, COP, polytetrafluoroethylene (PTFE), perfluoroalkoxy alkanes (PFA) の複素誘電率を測定した結果を図5に示す.

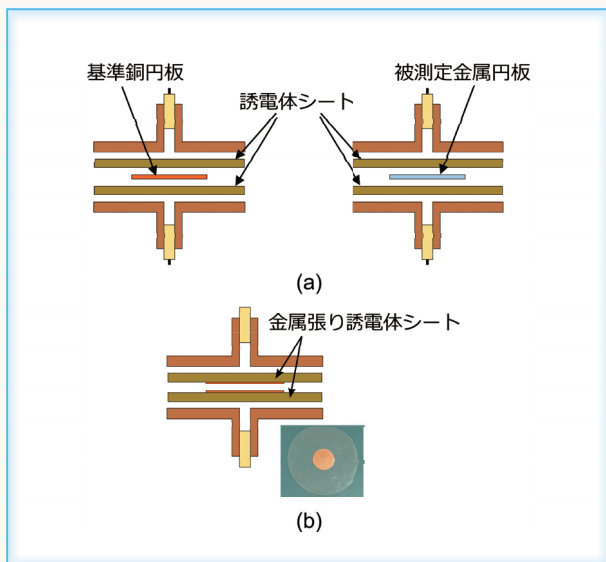


図6 平衡円板共振器法による導電率計測
(a) 金属はくの導電率計測の構成
(b) 金属張基板の界面導電率計測の構成

4 平衡円板共振器法による導電率計測技術

金属導電率計測には低損失誘電体の誘電率計測と同じく共振器法が利用されるが、誘電率計測と同様の理由により、ミリ波・サブテラヘルツ波帯への高周波化に課題があった。従来の導電率計測では極小の誘電体柱からなる共振器が必要であり、誘電体柱のサイズで決まる単一周波数のみでの測定しかできないことから、誘電体柱や励振機構の加工精度などの制限により、6Gで利用される100 GHz超のミリ波帯で金属導電率を簡便かつ高精度に計測する技術は確立されていなかった。

筆者らは平衡円板共振器法の導電率計測への展開を進めてきた。これにより、誘電体の精密な機械加工を必要としない簡便な測定系により、10 GHz程度から100 GHz超にわたる超広帯域での金属導電率計測を実現した⁽⁸⁾。導電率計測では、図6(a)に示すように同一の低損失誘電体シートと異種の金属円板を組み合わせた2構成の平衡円板共振器を用いる。導電率が既知の基準銅円板から成る共振器と、測定対象の金属円板から成る共振器について無負荷Q値を測定することで、被測定金属円板の導電率を決定できる。また、誘電体シートに円形金属パターンを形成することで、誘電体と金属層の間の界面導電率を評価することも可能である(図6(b))。

円板金属はくの導電率計測の一例として、高周波回路材料として使用される銅はくの導電率を測定した結果を紹介する⁽⁹⁾。一般に、回路基板に使用される銅はくは、アンカ効果によって誘電体基板との接着性を強化するために、片面が粗化されている。粗化処理は、銅原はくの上に金属粒子をメッキすることで行われる。ただし、

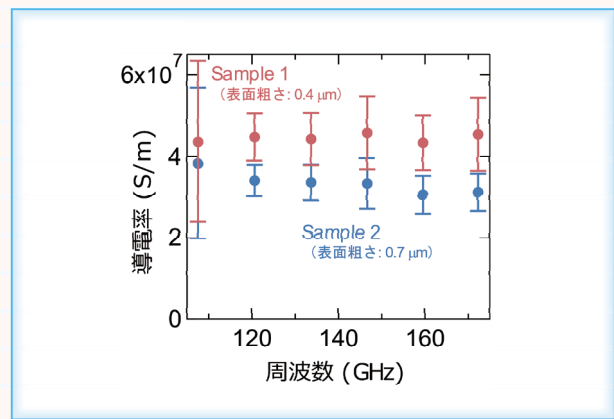


図7 表面粗さの異なる2種類の銅はくのDバンド導電率計測結果

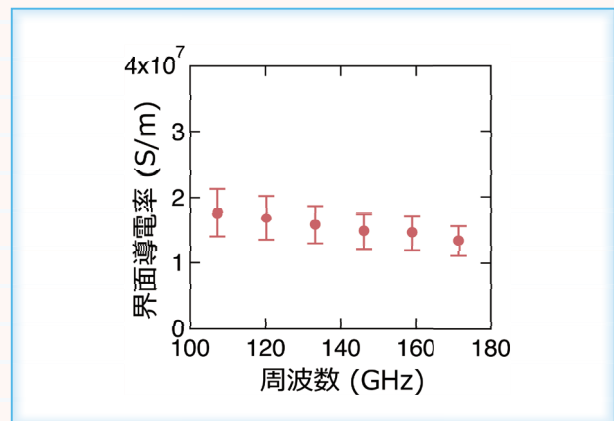


図8 銅張COP基板のDバンド界面導電率計測結果

1. で述べたとおり、特に表皮厚さがサブミクロンオーダーの6G周波数帯域では、表面粗さによって導電率が低減してしまう。この問題を回避するために、粗化粒子の組成、大きさ、形状を最適化して、高い導電率と誘電体基板への強固な接着性を両立する銅はくの開発が求められている。

粗化面の表面粗さが異なる2種類の銅はく(サンプル1,2)を用意し、粗化面の導電率を測定した。測定は図3(a)のWR-6.5導波管インタフェースの平衡円板共振器で行った。銅はくサンプル1と2の表面粗さ(10点平均粗さ)はそれぞれ0.4 μmと0.7 μmである。誘電体シートにはCOPを用いた。導電率の測定結果を図7に示す。2サンプルの表面粗さの違いを反映して、サンプル1の方が、周波数が増加しても高い導電率が維持されている。

界面導電率計測の一例として、COP基板の界面導電率計測結果を紹介する⁽¹³⁾。COP基板の片面に円形の銅張金属パターンが形成された評価サンプルを2枚用意し、円形パターンが互いに接触するように重ねて平衡円板共振器を構成する(図6(b))。この構成と、両面が無地のCOP基板と基準銅円板で構成された平衡円板共振器の無負荷Q値を測定・解析することで、COP基板

の金属パターンの界面導電率が測定される。WR-6.5 導波管インタフェースの平衡円板共振器を用いて行った測定の結果を図8に示す。一般に、界面導電率は周波数が増えるほど低下するが、低下の度合いは平滑性などの界面状態に依存することから、ミリ波・サブテラヘルツ波帯でも高導電率が維持される銅はく及びその実装プロセス技術が求められている。この技術開発を支える計測技術として、平衡円板共振器法による導電率計測技術の貢献が期待される。

5 まとめ

本稿では、ポスト5Gや6G向けの材料開発やデバイス開発を支えるミリ波・サブテラヘルツ波帯材料評価技術として、平衡円板共振器を用いた複素誘電率・導電率計測技術を紹介した。平衡円板共振器の超広帯域にわたるモード選択性を利用することで、10 GHz程度から100 GHz超にわたる超広帯域での材料評価が単一の共振器で実現される。紹介した計測技術は日本提案で国際標準化が進められており、平衡円板共振器による複素誘電率計測技術は既に2020年にIECでの国際標準化が行われた(IEC63185:2020)。また、導電率計測技術についても、IECでの標準化審議を現在進めており、更なる技術普及が期待される。

本研究の一部は、NEDO ポスト5G 情報通信システム基盤強化研究開発事業/先導研究(委託)「6Gに向けたミリ波・テラヘルツ帯基地局の高度化のためのアンテナ技術の研究開発」により進められた。

文献

- (1) 総務省, “Beyond 5G に向けた情報通信技術戦略在り方—強靱で活力のある2030年代の社会を目指して—,” 情報通信審議会中間答申(2022年6月)。
- (2) G. Gold and K. Helmreich, “A physical surface roughness model and its applications,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 65, no. 10, pp. 3720–3732, Oct. 2017.
- (3) K. Lomakin, G. Gold, and K. Helmreich, “Analytical waveguide model precisely predicting loss and delay including surface roughness,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 66, no. 6, pp. 2649–2662, June 2018.
- (4) iNEMI 5G/mmWave Materials Assessment and Characterization Project, “Report 1: benchmark current industry best practices for low loss measurements,” Nov. 2020.
- (5) H. Kawabata and Y. Kobayashi, “The analysis of a balanced-type circular disk resonator excited

by coaxial cable lines to measure the complex permittivity,” *Proc. Asia-Pacific Microw. Conf. (APMC)*, pp. 1322–1325, 2001.

- (6) H. Kawabata, K.-I. Hasuike, Y. Kobayashi, and Z. Ma, “Multi-frequency measurements of complex permittivity of dielectric plates using higher-order modes of a balanced-type circular disk resonator,” *Proc. Eur. Microw. Conf. (EuMC)*, Manchester, U.K., pp. 388–391, Sept. 2006.
- (7) Y. Kato and M. Horibe, “Broadband permittivity measurements up to 170-GHz using balanced-type circular-disk resonator excited by 0.8-mm coaxial line,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 68, no. 6, pp. 1796–1805, June 2019.
- (8) Y. Kato and M. Horibe, “Broadband conductivity measurement technique at millimeter-wave bands using a balanced-type circular disk resonator,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 69, no. 1, pp. 861–873, Jan. 2021.
- (9) Y. Kato, “D-band material characterization using a balanced-type circular disk resonator with waveguide interfaces and a modified full-wave modal analysis,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 72, pp. 1–10, Art. no. 6009210, 2023.
- (10) H. Chen, H. Chen, W. Che, S. Zheng, X. Xiu, and Q. Xue, “Review and modification of permittivity measurement on open resonator for transparent material measurements at terahertz,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 69, no. 11, pp. 9144–9156, Nov. 2020.
- (11) B. Salski, J. Cuper, T. Karpisz, P. Kopyt, and J. Krupka, “Complex permittivity of common dielectrics in 20–110 GHz frequency range measured with a Fabry–Perot open resonator,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 119, no. 5, Art. no. 052902, Aug. 2021.
- (12) Y. Kato and M. Horibe, “Broadband Permittivity Measurements Using a Frequency-Variable Balanced-Type Circular-Disk Resonator,” *Proc. Conf. Precis. Electromagn. Meas. (CPEM)*, Paris, France, pp. 1–2, July 2018.
- (13) Y. Kato, “Material characterizations in the D-band using a balanced-type circular disk resonator with waveguide interfaces,” *Proc. Conf. Precis. Electromagn. Meas. (CPEM)*, Wellington, New Zealand, pp. 1–2, Dec. 2022.

加藤悠人

国立研究開発法人産業技術総合研究所。2012 東大大学院修士課程了。同年国立研究開発法人産業技術総合研究所入所。2020 阪大大学院博士課程了。ミリ波・サブテラヘルツ波帯の材料評価技術とメタサーフェス・メタマテリアルの設計・評価技術の研究開発に従事。



アンテナ・伝搬研究者の角度から見る メタサーフェスとその向かう先

Metasurface from the Angle of View of Antenna and Propagation Researchers and Its Angle of Departure

村田健太郎 Kentaro Murata[†] 村上靖宜 Yasutaka Murakami^{††} 久世竜司 Ryuji Kuse^{†††}

Summary

近年、電波伝搬特性を自在に制御可能とする技術としてメタサーフェスが注目を集めている。特に本稿では、メタサーフェスを広義的に「平面状に構成された媒質であって、入射した電波の伝搬特性に受動的に作用可能なものの総称」と定義し取り扱う。メタサーフェスの機能は、入射した電波の再放射と解釈することができる。そのため、開口の大きなメタサーフェスにより、伝搬過程で空間に拡散される電波を効率良く回収でき、これをある点に収束させることで電波強度を向上できる。また、独立に制御可能な素子を多数用いたメタサーフェスにより、より自由度の高い電波伝搬制御が可能となる。一方、受動構成であるがゆえに電波の送受信ができず、原理的にそれ自体ではチャネル推定が不可能であり、上記の効果を最大限に引き出すことができない。更に、既存のリレー技術や分散アンテナ配置技術と比較し、その費用対効果が明らかとされておらず、有力なアプリケーションが欠如していることが問題提起されている。そこで本稿では、メタサーフェス実用化における上記二つの障壁に対し、アンテナ・伝搬研究者の視点から現実的な解の提案を試みる。

Key Words

メタサーフェス, reconfigurable intelligent surface, アンテナ・伝搬, over-the-air (OTA) 試験, 6G

1 序論

我が国では、2020年に第5世代移動通信方式(5G)のサービスが開始となり、40年前の音声伝送のみの1Gと比較すると、最大通信速度は約100万倍に劇的な進化を遂げ、今日では4K/8Kストリーミング、仮想現実・拡張現実といった大容量アプリケーションを超低遅延で利用できるようになった⁽¹⁾(図1)。この無線通信速度の指数関数的な進歩は止まることはなく、次世代移動通信規格Beyond 5G(6G)においては、100 Gbit/sを超える超高速無線通信の実現に向け研究開発が進められている。

このような無線通信高速化の背景には、「広帯域化」・「空間多重化」・「多値化」の三つの技術の存在がある。これらはしばしば、キャリヤを車両とみなした荷物(データ)の輸送に例えられる(図2)。まず、「道路の拡幅」は「広帯域化」に相当し、シャノン・ハートレーの定理が示すように、帯域が広いほど通信路容量は増加する。また「複車線化」

は「空間多重化」に対応し、MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)技術により、複数のデータを同時並列伝送することが可能となる。そして、1車両当りの荷物の「積載数の増量」は「多値化」に相当し、多値変調技術により1シンボル当たり数ビットのデータを伝送することが可能となる。つまり、従来の無線通信では、車両の発車前、すなわち電波が発射される前に適切な前準備(信号処理)をしておくことで、効率的なデータ伝送を可能としてきたのである。

ところが近年、ミリ波・テラヘルツ波といった極めて周波数の高い=直進性の高い電波の活用が検討され始め、図2(a)に示すように送受信アンテナが見通し外に存在する場合、道路(通信路)が遮断されてしまう可能性がある。このような状況下で

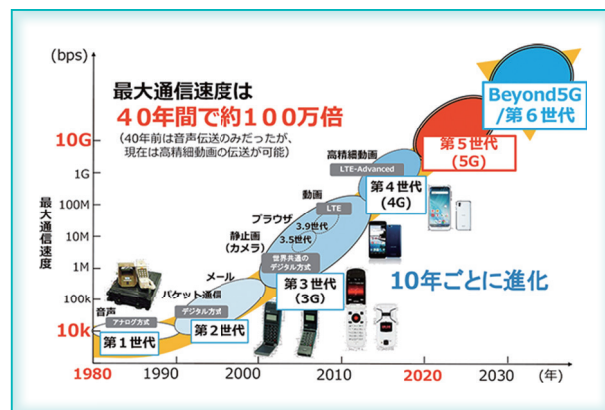


図1 無線通信速度の進化の歴史⁽¹⁾

[†] 岩手大学, 盛岡市
Iwate University, Morioka-shi, 020-8551 Japan

^{††} 電気通信大学, 調布市
The University of Electro-Communications,
Chofu-shi, 182-8585 Japan

^{†††} 熊本大学, 熊本市
Kumamoto University, Kumamoto-shi, 860-8555
Japan

は、“発射前”の電波を幾らコントロールしようとも、受信側にデータを伝送することはできない。

そこで近年、電波伝搬特性自体を制御可能とする技術としてメタサーフェスが注目を集めている。本稿ではメタサーフェスを広義的に「平面状に構成された媒質であって、入射した電波の伝搬特性に受動的に作用可能なものの総称」と定義する。言わばメタサーフェスは、“発射後”の電波の伝搬特性を適切に制御することで、図2(b)に示すように見通し外の通信路をバイパスする新たな通信路を形成可能とするものである。

メタサーフェスの機能性は大きく以下の2点に集約される。第1に、電波強度向上性である。基本的に、送信アンテナから発せられた電波は空間中で放射状に拡散してしまう。これに対しメタサーフェスは、その大きな開口で拡散する電波を一旦回収し、それをまとめて再放射することで、特定の点における電波強度を向上できる。第2の機能性は、多くの空間的自由度を用いることによる電波伝搬制御性である。これはメタサーフェスの単位セルの反射係数(特に位相)を電氣的または機械的に制御することで、平面全体で任意の位相勾配を実現し、入射した電波の反射・透過特性を自在に制御可能とするものである。そして何より、メタサーフェス最大の特徴は、上記二つの機能性を、簡素なハードウェアにより受動的に実現可能としていること、すなわち能動的な電波の発信を不要としていることである。

ところが、文献(2)において、メタサーフェス実運用上の二つの問題が指摘されている。第1に「チャネル推定の困難性」である。メタサーフェスはその受動構成ゆえに、電波の送受信機能を持たないため、信号の送り主と信号の送り先、そしてそこまでの経路(いわゆるチャネル)を知るすべがない。発射後の電波は、カーナビゲーションの付いていない車両のようなもので、目的地への経路も知らずに最初に決めた方向にひたすら道なりに進もうとするだけである。つまりメタサーフェスからすれば、経路・交通情報(いわゆるチャネル情報)が分からない状態では、どこからやってきて・どこに行きたいかも分からない電波を“どのように制御すればよいか”ということまでは分からないのである。このようにチャネル情報が分からない状態では、前述のメタサーフェスの機能を効果的に活用することはできない。

もう一つの問題は「有力なアプリケーションの欠如」である。これは、既存のリレー技術、分散アン

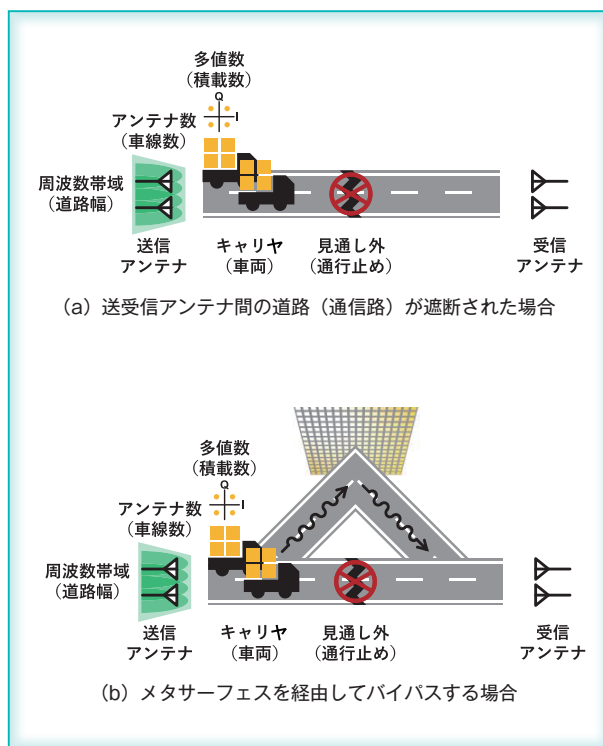


図2 無線通信を車両による荷物の輸送に例えた場合。

「広帯域化」は「道路の拡幅」,「空間多重化」は「複車線化」,「多値化」は「積載数の増量」に相当する。メタサーフェスは、送受信アンテナ間の経路が寸断された際に、バイパスとして機能する。

テナ配置技術と比較し、移動体通信におけるメタサーフェスの費用対効果が実証されておらず、ほかにメタサーフェスが絶対的に必要とされるアプリケーションがいまだ確立されていないことが問題提起されている。

そこで本論文では、メタサーフェス実用化における上記の二つの障壁に対し、アンテナ・伝搬研究者の視点から、現実的な解を提案する。

2 メタサーフェスの原理と実際

本章では、以降でのメタサーフェス関連技術の紹介に先立ち、電波伝搬特性を可変的に制御可能なメタサーフェスとして代表的な reconfigurable intelligent surface (RIS)^{(3), (4)} によるビームフォーミングの基本動作原理とその実際について説明する。

図3は、RISを含む無線ネットワークの概念図とRISによるビームフォーミングの基本動作原理を示している。RISを構成するアレーアンテナの各素子には、可変負荷が接続されている。今回は可変移相器から成る可変負荷を想定し、各素子に入射し、反射(再放射)される電波の位相(つまり「進み」と「遅れ」)を制御可能とする。

まず、ある方向から電波が到来したとき、RIS各

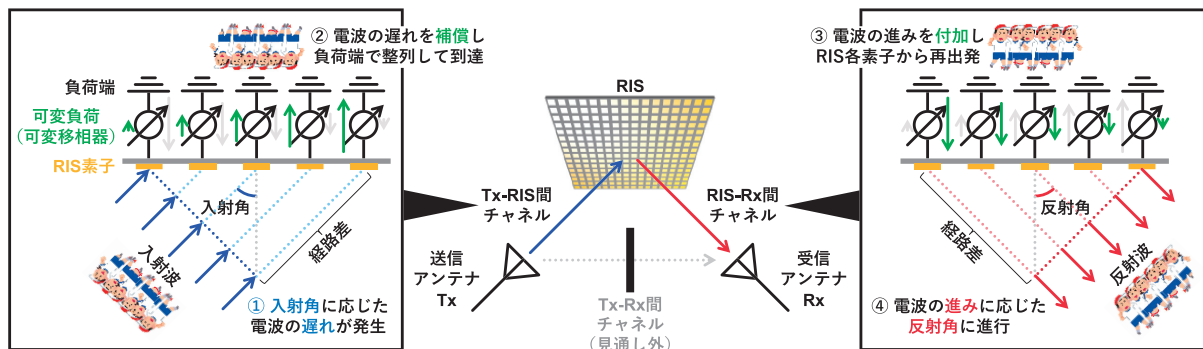


図3 RISを含む無線ネットワークの概念図とRISによるビームフォーミングの基本動作原理

素子に入射する電波には、電波の最前線（つまりは波面）を基準とし、入射角に応じた電波の遅れが発生する。そこで、各素子に入射した電波が負荷端に到達するときのタイミングがそろおうよう、可変移相器を制御することで電波の遅れを補償する。そして、負荷端で同時に反射した電波は再度RIS各素子から再放射される。このとき、再放射される電波に所定の位相勾配を形成するよう、可変移相器を制御し電波の進みを付加しておく。これにより、所定の反射角方向に波面がそろって電波が進行するようになる。なお、可変移相器には、入射時の電波の遅れの補償と反射時の電波の進みの付加を考慮した位相量が同時に設定されることになる。以上がRISによるビームフォーミングの仕組みである。

このようにシステムティックに考えれば、RISの制御はそれほど難しくなさそうに見える。しかし、アンテナ・伝搬研究者には、RISは図4のように見えている。

第1に着目するのが、可変負荷ハードウェアのト

レードオフである。例えば、多くのRISにおいて、開放・短絡をスイッチまたはpinダイオードで切り換える、いわゆる1bitアレーが採用されている。これは最も簡素な負荷構成である反面、移相分解能が 0° と 180° の1bitしかないため、電波伝搬制御性が大きく損なわれる。ほかにも文献(4)、(5)では、様々な可変負荷ハードウェアが報告されているが、互いに何かしらの特性においてトレードオフの関係にあり、要求仕様を部分的にしか満足できない妥協案を選択せざるを得ない可能性がある。

次に着目するのは、電波伝搬制御における二つの誤差要因である。一つは、RISを構成するアレーアンテナ素子の不整合及び相互結合である⁽⁶⁾。これにより、入射した電波の一部は可変負荷まで到達せず、位相制御されないまま反射されたり、ある素子から再放射された電波が隣接する素子で再回収され、再々放射されることとなる。もう一つは、RISの地板・支持部・回路部等で生じる散乱である。これは、RIS素子そのものからの散乱とは異なり、可変負荷

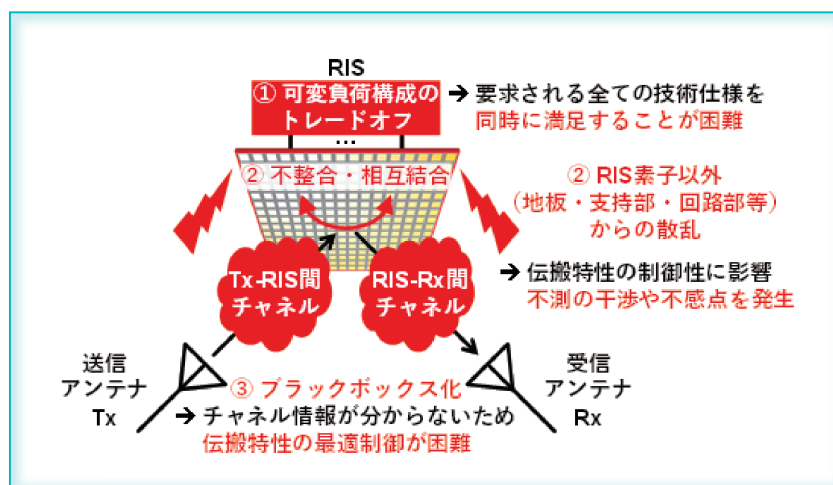


図4 アンテナ・伝搬研究者から見たRISの実際

制御により変化せず、それぞれの散乱の位相関係によつては、不測の干渉や不感点を生じる可能性がある⁽⁶⁾。ただし、いずれの誤差要因も RIS が形成するメインビームに与える影響は軽微であり、無視して考えることが多い。

そして1. で問題提起されたとおり、RIS における最大の問題は、能動的な電波の送受信機能を有しない受動構成の RIS ではチャンネル推定が困難なため、RIS と送受信アンテナ間のチャンネルがブラックボックス化してしまい、RIS の最適制御が困難な点にある。

そこで3. では、メタサーフェスの簡素性は維持しつつ、メタサーフェスを用い所望の受信点における電波強度を向上する手法について紹介する。

3

問題「チャンネル推定の困難性」に対する解

本章では、上記問題に対する解として、新たに三つのアプローチを提案する。図5の技術マップに、従来の固定式と可変式(機械式と電子式)のメタサーフェスそれぞれに対する提案手法(図5中赤字)の位置付けを示す。第1に提案するのは、

そもそものチャンネル推定を不要とする技術である。具体的には、メタサーフェスに入射した電波を擬似等方的に散乱させることで、特定の点に電波を集中するのではなく、電波を全く受信できない不感点を排し、どこでも一定強度以上の電波を受信可能とするものである。第2の提案は、従来の複雑な機構を有する機械式メタサーフェスと比較し、メタサーフェスの構造を簡素なメカニズムで変化させながら、到来方向の推定と反射方向の最適化を行う技術である。そして最後の技術は、電子式の RIS にたった一つ電力センサを外付けするだけで、マルチパスの影響を含む厳密なチャンネル情報を推定可能とする技術である。以下、各々の技術を紹介する。

3.1 チャンネル推定を必要としない電波を拡散するメタサーフェス

メタサーフェスは、電波の入射する方向及び所望の反射させる方向、及び設置環境に合わせてチャンネル推定を行い、制御の必要があるため、設計が複雑で再構成が必要である。メタサーフェスの反射方向は、設置環境ごとに再構成を行わない限り基本的に特定の一方方向である。特定の一方方向の場合、通信を

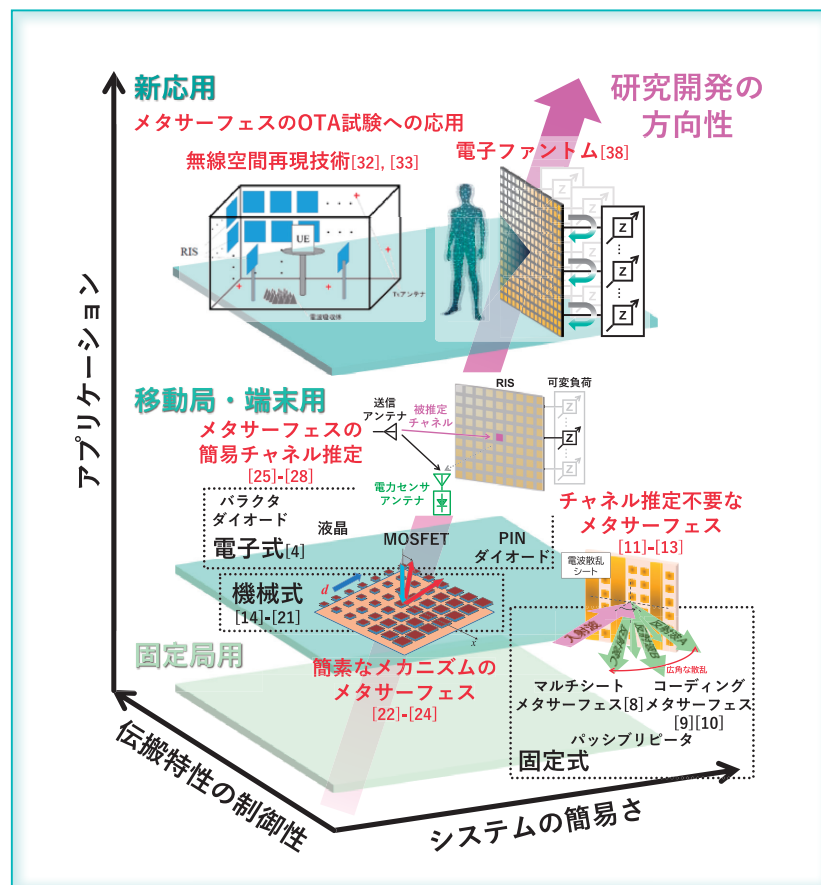


図5 システムの簡易さ・伝搬特性の制御性・アプリケーションの軸で見るメタサーフェスの技術マップ。

図中、赤字で示すものが、本稿で紹介する「メタサーフェス実用化における障壁」を解決する新技術

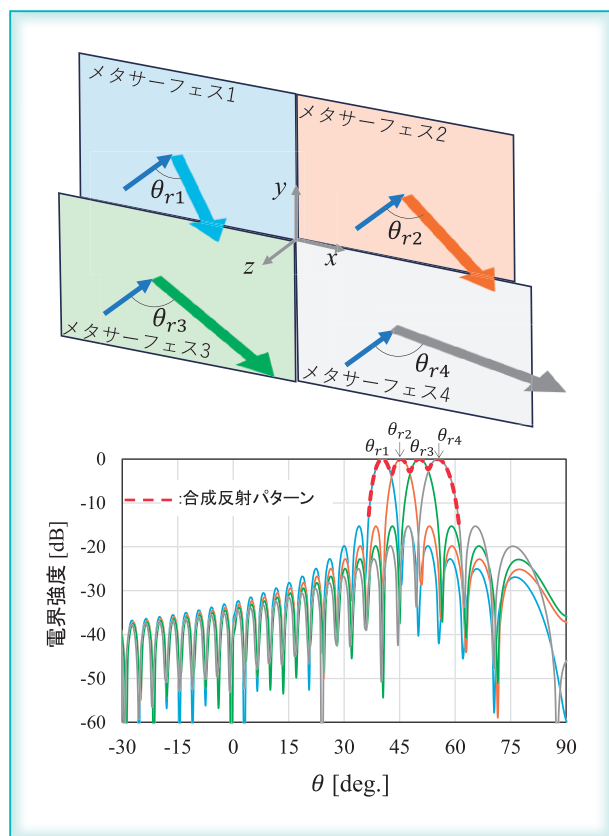


図6 マルチシートメタサーフェスと合成パターン

カバーできるエリアが限られるため、より多くのエリアをカバーするためには、広角な反射指向性であることが望ましい。本節では、電源が不要であり、負荷制御及び機械制御を必要とせず、メタサーフェスの設計の簡易化や複数の設置環境に対応したチャネル推定を必要としないメタサーフェスについて紹介する。

3.1.1 マルチシートメタサーフェス⁽⁸⁾

マルチシートメタサーフェスとは、異なる反射方向で設計されたメタサーフェスを複数枚組み合わせ、合成することで広角な反射指向性を実現している。図6にマルチシートメタサーフェスについて示す。4種類のサブメタサーフェスを用いて、それぞれの異なる反射方向のパターンを合成することで、広角な反射パターンを実現している。そのため、実現した反射角のカバーできるエリアでは、チャネル推定を必要としないメタサーフェスとして使用することができる。一方で、実現したカバーエリアから大きく外れた場合、再構成が必要となる。

3.1.2 コーディングメタサーフェス^{(9), (10)}

コーディングメタマテリアルと呼ばれる異なる反射位相を持つ2種類または4種類のメタサーフェ

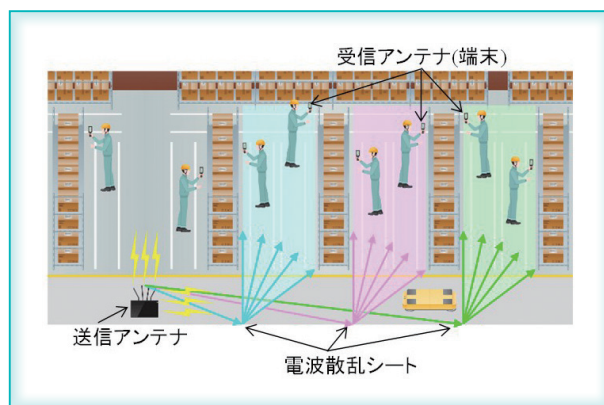


図7 メタマテリアル電波散乱シートの使用例

スをコードと置き換え、そのコードの組合せを最適化してメタサーフェスを構成する。最適化の目標値により、複数のマルチビームを形成するメタサーフェスや広角な反射パターンが実現できるメタサーフェスを設計できることが示されている。また、文献(10)では、メタサーフェスを8種類用いて、テラヘルツ波の広帯域かつ広角な拡散パターンが実現できることが実験で明らかにされている。これらのメタサーフェスもチャネル推定を必要としないが、使用するメタマテリアルの種類が多いほど、組合せ数が増大し、最適化までのプロセスが複雑になる。

3.1.3 メタマテリアル電波散乱シート⁽¹¹⁾

メタマテリアル電波散乱シートは、電波の到来方向やチャネル推定を一切行わずに、入射する電波を特定の一方方向に対してではなく、複数の広角な方向に散乱させることできる。文献(8)と比べて、カバーできるエリアが広く、1種類のメタマテリアルと金属平板で構成されるため、文献(9)、(10)と比べて最適化も高速に実現できる。図7にメタマテリアル電波散乱シートの使用イメージを示す⁽¹²⁾。図7に示すように、電波の伝搬環境が異なり、通常のメタサーフェス及びRISでは、各地点で到来方向推定を行い反射波の方向を調節する必要があるが、メタマテリアル電波散乱シートは異なる伝搬環境に表面構造の再構築をすることなく、広い領域をカバーすることができる。また、メタマテリアル電波散乱シートは到来方向やチャネル推定を行わないため、完全に電源を必要としない。そのため、外部電源を敷設することが困難な場所やメタサーフェス自体及びシステムコストが低いというメリットがあり、配置位置に関しても、送信アンテナと受信端末がある領域の両方から見通しであればよいため、電波伝搬に関する専門的な知識がなくても使用が可能であると考えている。

一方で、特定の一方方向に電波を集中させないため、各反射方向当りの受信電波強度が低下する。各受信電波強度が低下するため、特定の一方方向に電波を集中させた場合に比べて、電波の到達距離が短いというデメリットがある。そのため、6Gで生じる電波の不感エリアに関する問題は、チャネル推定を必要としていないメタマテリアル電波散乱シートは、そのみでは解決方法の一つであり、複数の伝搬制御方法を組み合わせることで実現できると考える。

図8に示すように、メタマテリアル電波散乱シートは表面の反射位相が 180° の金属平面と 0° のパッチ型メタマテリアル平面の領域を組み合わせることで構成される。二つの領域を組み合わせることにより、メタマテリアル電波散乱シートの表面での電流分布を不均一にすることができ、広角な散乱パターンが実

現される⁽¹³⁾。

二つの領域の組合せの順序により、散乱パターンは決定されるが、文献(11)、(12)では遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて、高速に最適化を行っている。図9及び図10に試作したメタマテリアル電波散乱シートと試作メタマテリアル電波散乱シートの散乱パターンを示す。図10(a)、(b)及び(c)はそれぞれ、入射角度が 0° 、 20° 及び 40° の場合の28 GHzの解析結果と実験結果であり、図10(d)は、同じサイズ(180 mm×180 mm)の金属平板の結果である。

図10の結果から、電波散乱シートは金属平板に比べて広い範囲に電波を散乱できることが分かる。また、入射角度が変化した場合でも同様の傾向が得られていることが分かる。

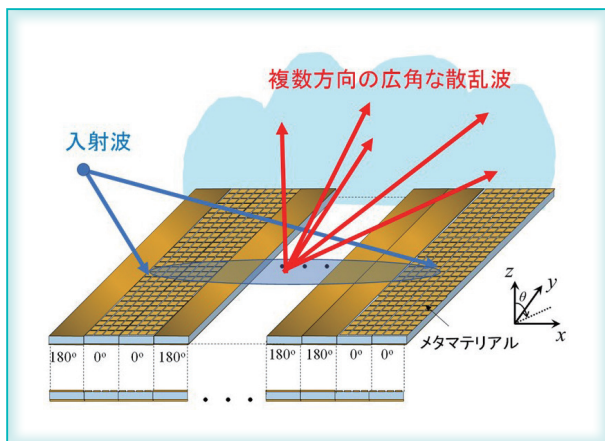


図8 メタマテリアル電波散乱シートの構成

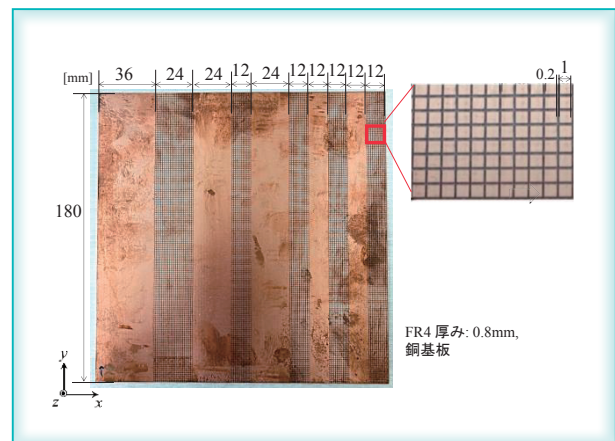


図9 試作したメタマテリアル電波散乱シート

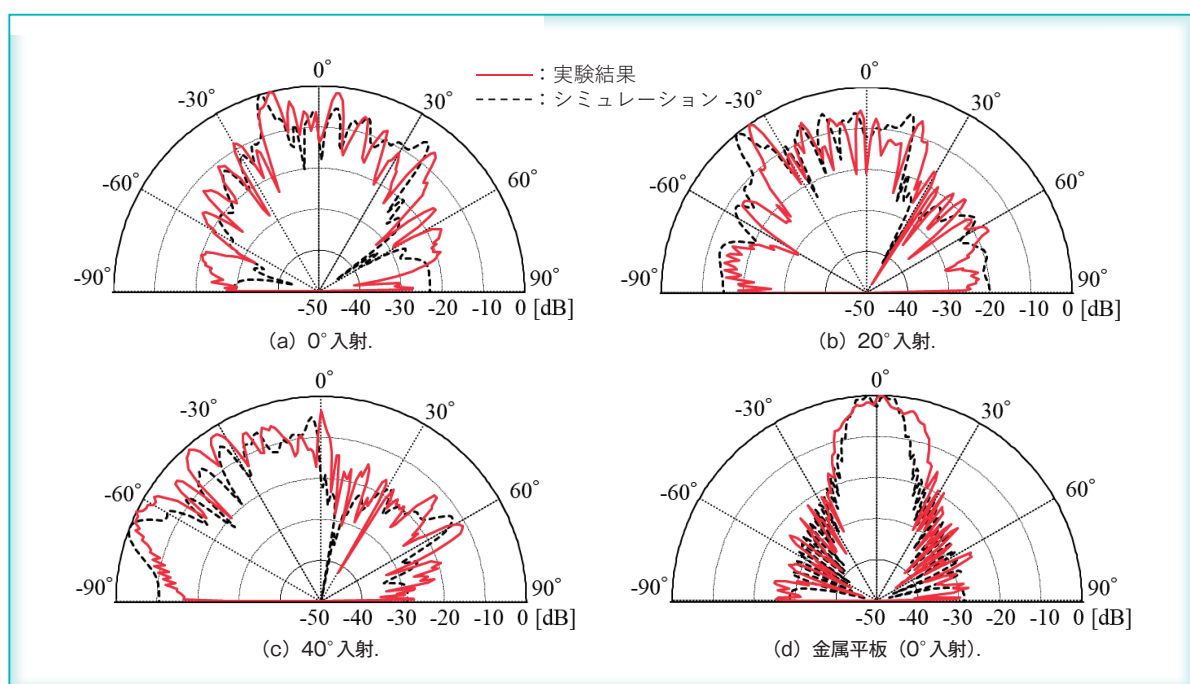


図10 メタマテリアル電波散乱シートの散乱特性

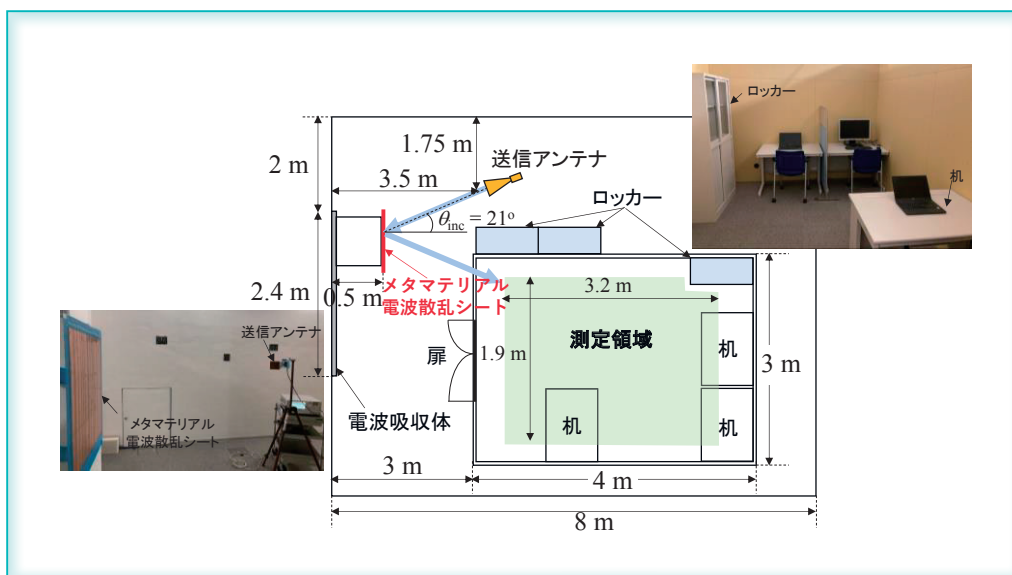


図 11 受信強度分布測定実験構成

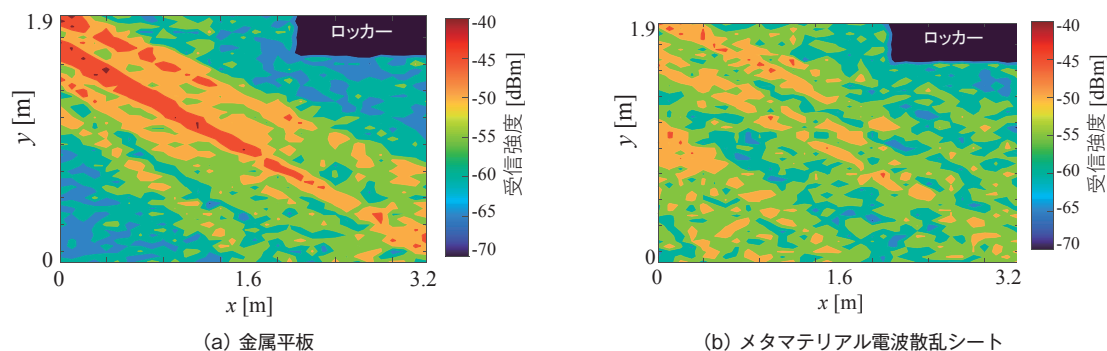


図 12 図 11 の測定領域の受信強度分布の実験結果

設計したメタマテリアル電波散乱シートの不感エリアの電波強度改善効果を確認するため、図 11 に示す模擬居室をシールドルーム内に施工し、受信強度分布の測定を行った。図 11 の実験構成では、送信アンテナからの直接波は測定領域にはロッカーで遮られ到達しないため、メタマテリアル電波散乱シートに反射波のみが到達する。また、反射板がない場合は、電波吸収体により測定領域内に電波は到達しない。測定実験ではメタマテリアル電波散乱シートの有効性を示すために、比較として同じ大きさの金属平板を用いて測定を行った。また、メタマテリアル電波散乱シート（図 9）を 3×3 枚並べた。

図 12 に測定した受信強度分布を示す。図 12 (a) と (b) はそれぞれ、金属平板とメタマテリアル電波散乱シートの実験結果である。金属平板では図中の一部の領域のみ受信強度が強く、それ以外の領域では急激に受信強度が低下することが分かる。一方で、電波散乱シートの場合は、測定領域内全体

で均一な受信強度を実現できており、電波の不感エリアの強度改善が実現できていることが分かる。

3.2 機械式制御によるリフレクトアレーの反射波方向操作

3.2.1 機械式制手法の分類

反射波の方向は、図 13 に示すようにリフレクトアレーの素子の配置周期 p 、隣り合う素子の位相差 $\Delta\phi$ とすると反射角 θ は次式となる。

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2\pi} \frac{\Delta\phi}{p}\right)$$

よって、何らかの手法で位相差 $\Delta\phi$ を制御できれば反射角を自由に操作できる。DC 配線の除去や運用時の消費電力抑制を目的として、極力仕組みを簡素化している。表 1 に主な制御手法の分類を示す。文献 (14)～(16) では、図 14 に示すようにグラウンドや素子の基準面に対する高さを、アクチュエータやカムによって操作することで位相差の制御を実

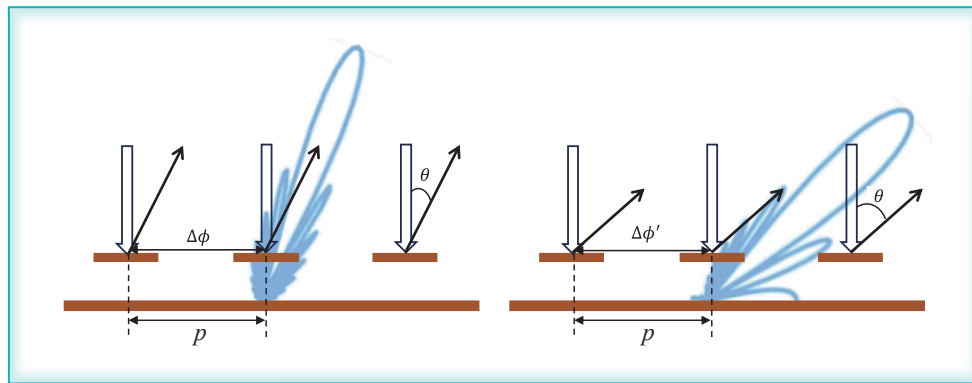
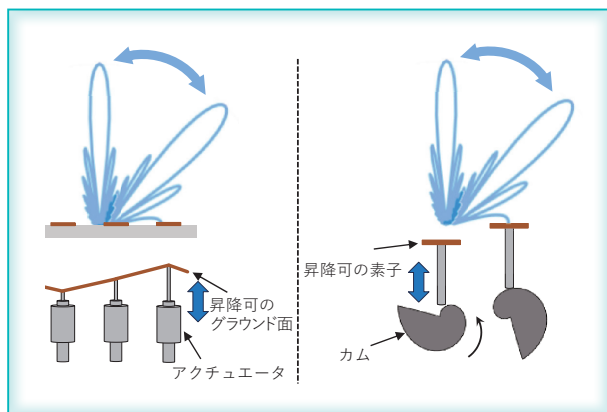
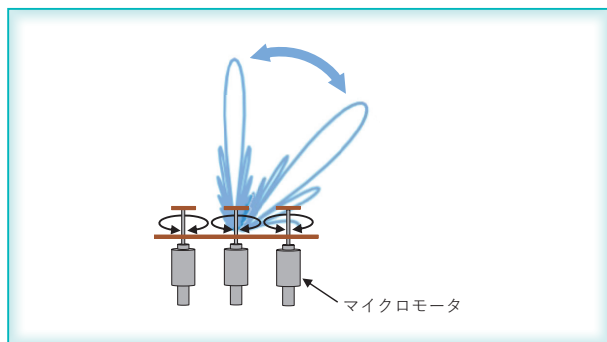


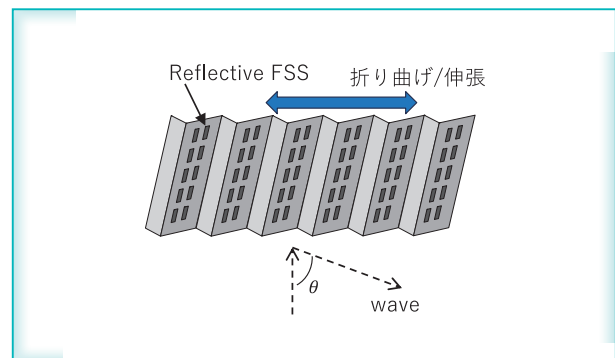
図 13 メタサーフェスの隣り合う素子の位相差と反射方向

表 1 位相操作実現のための機械式制御手法

文献	手法	モータ数
(14), (15), (16)	素子／グラウンド面の高さ	多～中
(17), (18), (19)	素子／面の回転	多～小
(20)	折り紙構造	小
(21)	柔軟性素材	小
(22), (23)	スライド	小

図 14 アクチュエータやカムを利用した素子やグラウンド面の高さ制御による反射角操作^{(14), (16)}図 15 マイクロモータを利用した素子／面の回転制御による反射角操作⁽¹⁷⁾

現している。また、文献(17)では図 15 のように個々の素子やメタサーフェス全面を回転させることで^{(18), (19)}、素子の偏波に対する反射応答を操作し位相差制御を実現している。更に、文献(20)や

図 16 折り紙構造を用いた反射角操作⁽²¹⁾

(21) のように、折り紙から着想した構造(図 16)や収縮可能な素材を用いることで、素子間の間隔や周期を操作し位相差制御を達成する手法も提案されている。反射角の設計自由度を確保する目的では、個々に回転可能な素子や高さの操作が可能な手法が有利であるが、一方でマイクロモータ数が多くなり、結果として pin ダイオード等を用いる場合と同等程度の制御回路が必要となることが懸念される。利用するマイクロモータ数を考慮すると、メタサーフェス全面を回転・伸縮・スライド^{(22), (23)}させる機構の方が優位である。

更に反射波方向制御の応用として、機械式制御でビームを走査し受信アンテナ一つで受信電力の傾向を得ることで、到来方向推定を可能とする技術の検討も進められている⁽²⁴⁾。

3.2.2 スライド操作を利用した一例

ここでは機械式制御の具体例として、層のスライド操作による反射角操作について記載する^{(22), (23)}。図 17 に示すように、メタサーフェスの素子を 2 層化し、片側を y 軸方向にスライド可能なものとする。このとき、素子の周期 $p = 0.13 \lambda_0$ 、下側の層とグラウンド間の厚さ $h = 0.03 \lambda_0$ 、素子の層間 $t = 0.006 \lambda_0$ とすると、素子長と反射位相は図の関係を持つ。ここで λ_0 は動作周波数の波長である。パッ

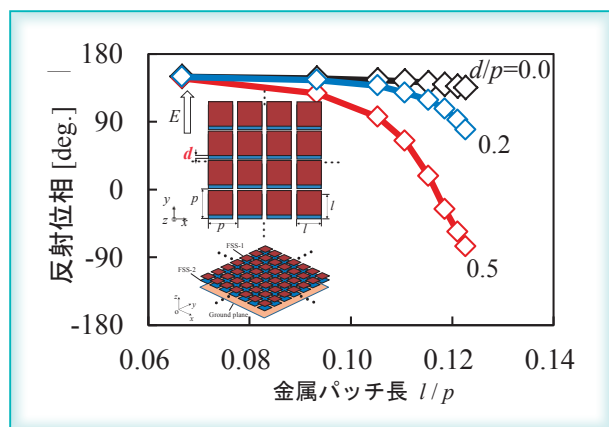


図 17 スライド式の基本構造及び素子長と反射位相の関係⁽²²⁾

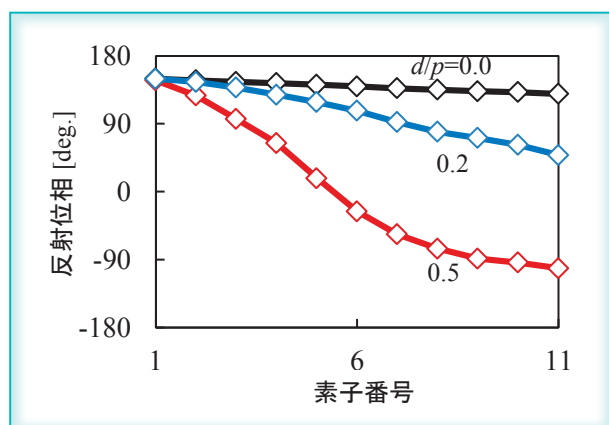


図 18 素子番号と反射位相の関係⁽²²⁾

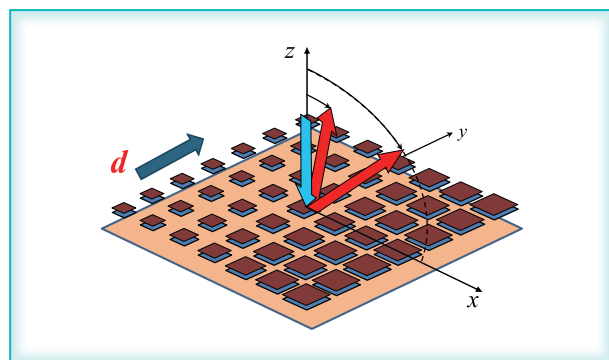


図 19 スライド制御による反射角方向操作

チの素子長が同じであってもスライド量 d によって反射位相が異なることが分かる。よって、図 18 に示すように、素子サイズを適切に選ぶことでスライド量によって素子間の位相勾配を制御できる。以上から、図 19 に示すようにスライド量に応じて反射位相の傾きを変更可能な構造となり、 y 方向に偏波された直線偏波が入射するとき、 y 方向へのスライド操作によって、 zx 面内において反射角の制御が可能となる。

また、素子間に間隙を持つパッチ型に分類される素子であれば同様の操作が可能で、図 20 に示す素子を利用することで、位相の傾きを整えることが可能である⁽²³⁾。図 21 は反射角切換として最適化した場合の位相特性と、その際のメタサーフェス 1 サイクルの設計例を示しており、スライド操作による

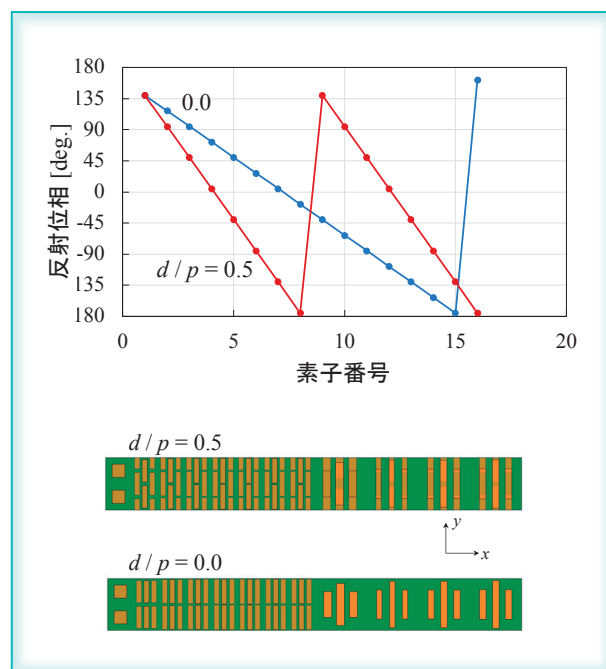


図 21 線形性を改善した素子番号と反射位相の関係とメタサーフェスの構造⁽²³⁾

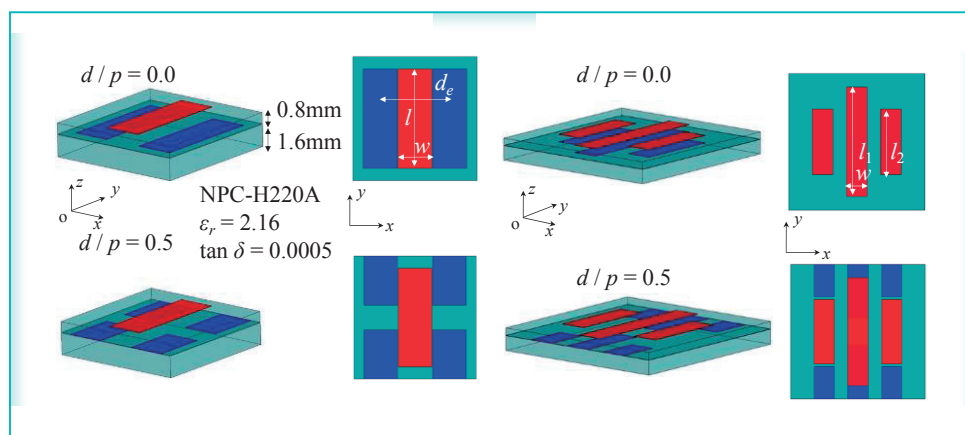


図 20 位相設計自由度向上を目的としたユニットセル構造⁽²²⁾

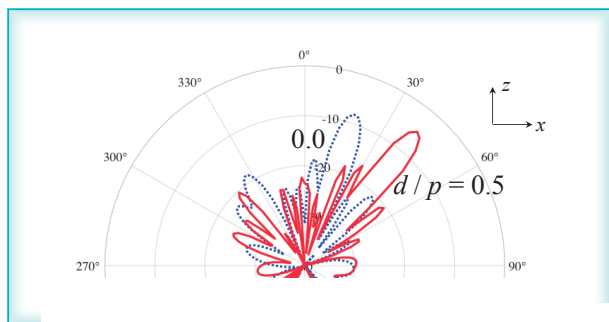


図 22 スライドした位置による散乱パターンの違い⁽²³⁾

位相変化が一定となっていることが分かる。また散乱パターンの解析結果を図 22 に示している。いずれも所望の方向に向くことが分かる。

3.3 単一の電力センサのみを用いたチャネル推定法

文献 (2) でも指摘されるように、電波の送受信機能を持たない基本構成のメタサーフェスでは、それ自体でチャネル推定を行うことが原理的に不可能である。そこで、文献 (2) では、メタサーフェス用の二つのチャネル推定法が紹介されている (図 23)。

一つ目の手法は、無線端末側からパイロット信号を送信し、RIS 各素子の可変負荷を制御したときに無線基地局で観測される信号の変化に基づきチャネル推定を行い、RIS へチャネル情報をフィードバックする方法である。しかし、この方法では RIS 各素子のチャネルを一つずつ順次推定していく必要があるため大幅なオーバーヘッドを生じる。更に、この手法で最も問題となるのが、RIS を介したパイロット信号の距離減衰である。RIS 各素子を介したチャネルは、無線端末 - RIS 各素子間と RIS 各素子 - 無線基地局間の距離減衰が乗ぜられた形で与えられるため、カバレッジの拡大に対しパイロット信号のレベルが急激に低下し、チャネル推定困難な状況に陥る。

二つ目の手法は、RIS 各素子にチャネル推定のための受信機能を設け、チャネル推定時とビームフォーミング時とで、可変負荷と切り換えて使用する方法である⁽³⁾。しかし、複素チャネル情報を推定するために IQ 復調器や局部発振器 (LO: Local Oscillator) を必要とし、RIS の最大の利点であるハードウェアの簡素性が大きく損なわれてしまうことが問題となる。

これに対し筆者は、受信信号強度 (RSS: Received Signal Strength) を観測可能な電力センサを一つだけ用いたチャネル推定法を提案している⁽²⁵⁾ (図 24)。提案法では、RIS 近傍に電力センサを外付けすることで、各無線基地局・端末から送信され RIS

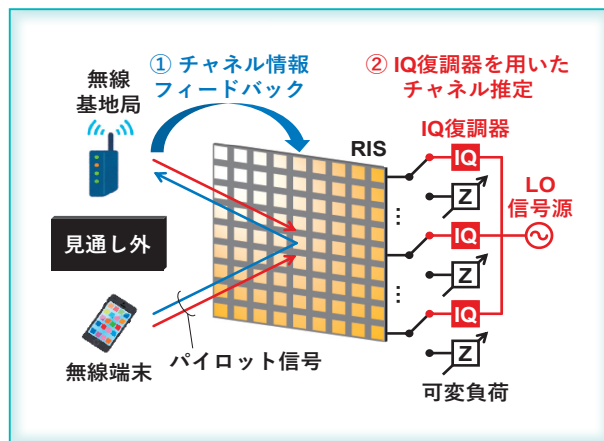


図 23 メタサーフェス用のチャネル推定法の例

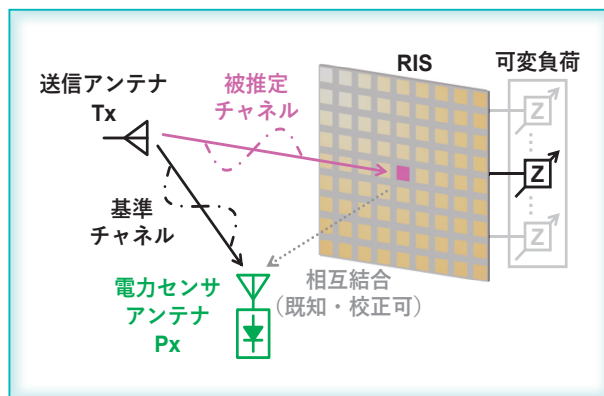


図 24 単一の電力センサのみを用いたチャネル推定法の概念図

Tx が送信したパイロット信号が、RIS で散乱したときの RSS を RIS 近傍の電力センサで観測し、これに基づき Tx-RIS 間のチャネルを間接的に推定する。これと同様に、Rx がパイロット信号を送信することで RIS-Rx 間のチャネルを別途推定し、これらに基づき RIS を介する Tx-Rx 間の等価的なチャネルが間接的に推定できる。

で散乱したパイロット信号を十分な強度で観測可能となり、高精度なチャネル推定が期待できる。

更に、前述の IQ 復調器を用いた構成と比較すれば、RIS へのハードウェアの追加実装は最小限にとどめられ、従来の問題点を克服できる。以下では、提案チャネル推定法の仕組みについて概説する。

まず、チャネル推定対象のアンテナからパイロット信号を送信したとき、電力センサでは送信アンテナからの直接波と、チャネル推定対象の RIS 素子からの散乱波が合成して受信される。なお、推定対象以外の RIS 素子の影響を排除するため、これらは系の基準インピーダンスで終端されるものとする。したがって、推定対象の RIS 素子に接続される負荷の反射係数の位相成分 (負荷位相) だけを線形に変化させると、電力センサでは信号の加算的または減算的合成により、RSS は図 25 のような正弦波形状 (灰点線) を示す。つまり、この RSS の正弦

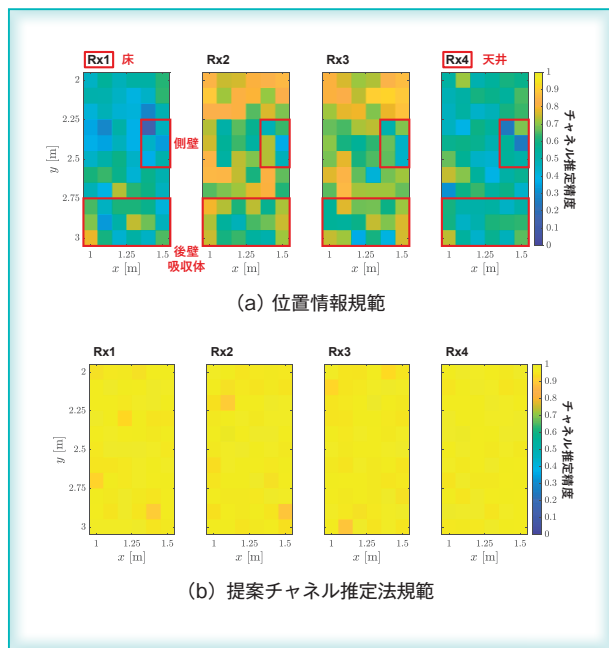


図 27 各受信アンテナ-RIS 間のチャネル推定精度の位置特性

(a) に示す濃赤色で強調されたテキストは、推定精度の劣化箇所の主要因を示している。

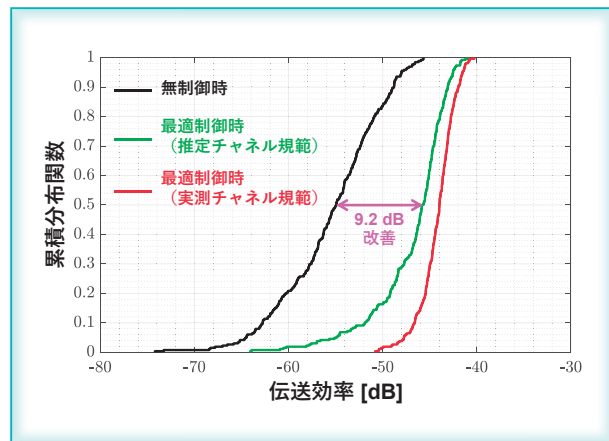


図 28 RIS を用いた伝送効率特性の CDF

荷制御した場合（赤線）の特性と比較しても、その差は僅か約 1.8 dB（中央値比）と、理想値に匹敵する伝送効率を達成可能であることが実証された。

4

問題「有力なアプリケーションの欠如」に対する解

3. では、メタサーフェスの最大の特徴である簡素なハードウェア構成を維持しつつ、所望点での電磁界強度を改善可能とする手法について紹介した。また前述のラボテストでも実証されたように、数 m オーダの範囲においてはメタサーフェスによる電波強度向上効果を享受できると言え、屋内無線通信への応用が期待できる。

図 5 のメタサーフェス技術マップが示すように、現状のメタサーフェスの研究開発は移動体通信への応用を想定したものが大部分を占める。しかし、受信端末の位置情報なしに、基地局・端末間のチャネル（または方向）をオンラインで推定しながら、モバイル通信距離に相当する数百 m の範囲を、メタサーフェスを用いて可変的にカバーする、といった実証実験は、筆者らの調査の範囲ではまだ報告されていない。

これには大きく二つの理由がある。第 1 に、長距離・広範囲にわたって高いチャネル利得を実現するに当たり、十分に大きなメタサーフェスの開口を確保することが困難なためである。そして第 2 に、メタサーフェスを介する二重の伝搬路損が乗ぜられた基地局・端末間のチャネルを高精度に推定するに当たり、十分に大きな SN 比を確保することが困難なためである。換言すれば、現実的にメタサーフェスで確保できるカバレッジは、上記二つの物理的限界により制限されてしまっているのである。事実、本稿冒頭で紹介した文献 (2) の指摘のとおり、メタサーフェスの費用対効果について言及した研究開発報告もまだなく、モバイル通信におけるメタサーフェスの実運用可能性については依然オープンな問題のままである。

その一方で、メタサーフェスのもう一つの特徴である電波伝搬制御性を活用したアプリケーションとして、OTA (Over The Air) 試験への応用が注目されている。OTA 試験とは、名前のとおり、空間中に電波を送信し、空間中の電波を受信することで、所定の電波伝搬環境下における試験対象の無線機 (DUT: Device Under the Test) の性能を実測・評価するものである。特に OTA 試験は、パッケージ化され有線接続試験が困難な無線機や、テスト用のアダプタ・ケーブル自体が測定自体に大きく影響するようなミリ波・テラヘルツ波帯の無線機に対し、それらの無線性能を実運用条件に近い形で包括的に評価する上で有効である。

それではこの OTA 試験において、メタサーフェスがどのように応用されるのだろうか？ 以下では、メタサーフェスを OTA 試験に応用した二つの事例 (図 5) を紹介し、その応用可能性について議論する。

4.1 RIS を用いた無線空間再現技術

一つ目の事例は、OTA 試験において任意の伝搬環境を再現するためのチャネルエミュレータとして RIS を活用したものである。

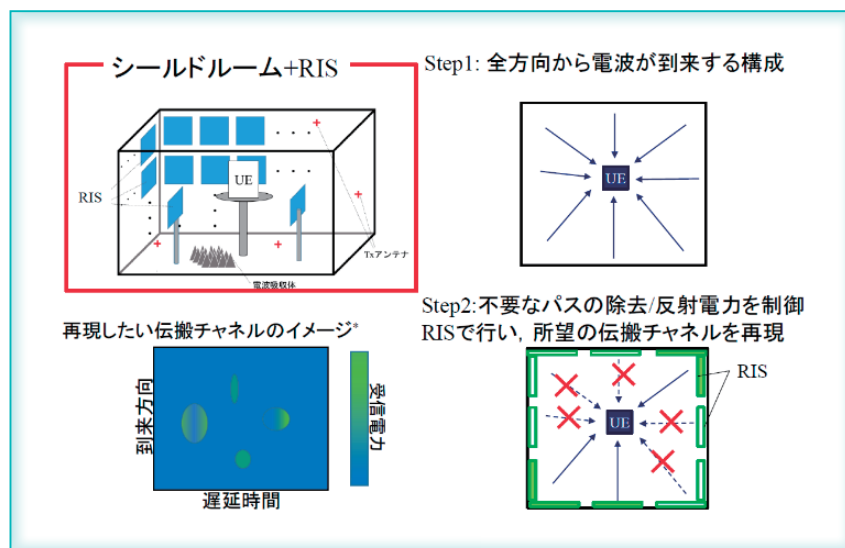


図 29 RIS を用いた無線空間再現技術の概要⁽³¹⁾ © NTT

従来の OTA 試験では、チャンネルエミュレータとして、以下に示す三つのアプローチが広く用いられてきた。第 1 に、電波暗室内に DUT を包囲するようにプローブのアンテナを配置し、任意の方向から到来する電波を再現するものである⁽²⁹⁾。第 2 に、電波暗室内で DUT の三次元指向性を事前に測定し、これを既存のチャンネルモデルにロードし、ポスト処理により任意の伝搬環境を模擬するものである⁽³⁰⁾。しかし、前者ではプローブ系統ごとに RF フロントエンド及び RF ケーブルを必要とし、後者ではプローブを三次元的に走査するアーク型のポジショナ（または DUT を回転するロテータ）等を必要とし、OTA 試験系が複雑化するという課題がある。第 3 に、シールドルーム内に電波を機械的に攪拌させるスターラを設置した、いわゆるリバブレーションチャンバを用いるものである⁽³¹⁾。これにより、所定の統計的分布を有するマルチパス環境を再現できるものの、ある任意の伝搬路特性と同一の特性を厳密に再現することは難しい。

そこで OTA 試験における上記の問題を解決する手法として、RIS を用いた無線空間再現技術⁽³²⁾が提案されている（図 29）。本技術では、UE（User Equipment）を包囲するように複数の RIS を設置し、これにより送信アンテナから発せられた電波の反射特性を変化させる。このようにして、受信アンテナに入射する電波の到来方向と強度を制御することで、受信アンテナから見て、任意の電波伝搬環境が再現されるのである。また従来のチャンネルエミュレータと比較し、RIS 自体に RF 測定機器を接続する必要がなく、RIS や DUT の位置を機械的に走査する必要もないため、OTA 試験系を容易に構成す

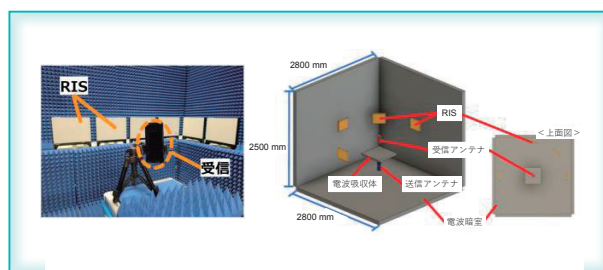


図 30 実験イメージ（左）と実験系構成（右）⁽³²⁾

© NTT

ることが可能となる。

更に OTA 試験の性質上、RIS・プローブ・DUT の固定的な位置関係から、その間のチャンネルを決定論的に見積もることができる。また RIS にテストポートを設け、一時的に測定器を接続し、事前にチャンネルを測定することも許容できる。したがって、RIS 運用上の最大の障壁であったチャンネル推定が、OTA 試験では問題とならず、RIS の電波伝搬制御性を最大限に活用できるようになる。

文献 (33) では、電波暗室内に設置された複数個の RIS を用い、27 GHz 帯の 5G 準拠信号の電波伝搬特性を再現した実験結果が報告されている（図 30）。実験では、図 31（左）に示される再現対象環境内の六つの位置における電波伝搬特性が再現されており、図 31（右）に各位置における受信電力特性が示されている。図から、レイトラッキングシミュレーションにより推定された受信電力（青○）と、提案法により再現された実測の受信電力（赤×）が誤差 2 dB 以下の精度で一致していることが確認でき、提案法により任意の受信電力特性を再現可能であることが実証されている。

一方で、信号の増幅ができない受動構成の RIS

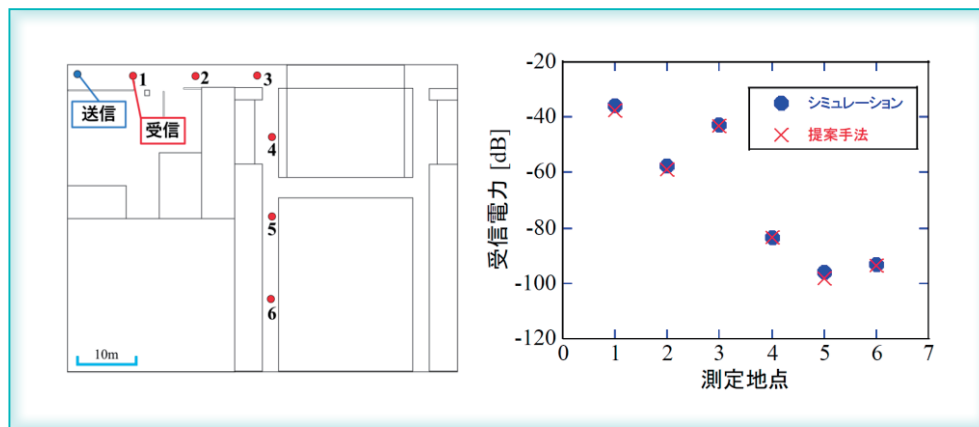


図 31 再現対象環境 (左) と無線空間再現技術により再現された位置ごとの受信電力特性 (右)⁽³²⁾ © NTT

だけでは、制御可能な受信電力のダイナミックレンジが限定されてしまうことが指摘されている⁽³²⁾。また文献 (33) では、電力情報の再現性のみ言及されており、広帯域で動作するマルチアンテナシステムの OTA 試験に対し提案技術を応用するに当たっては、周波数ごとの複素信号の再現性を検証することが求められる。

4.2 RIS を用いた電子ファントム

二つ目の事例は、レーダ OTA 試験への応用である。近年、レーダを用いたヒトセンシング技術の研究開発が推進されている⁽³⁴⁾。一方で、ヒトセンシング用のレーダ性能を評価するには被験者を対象とした臨床試験が必要となるが、ヒトの生体活動の非再現性のため、レーダシステムを公平にベンチマークテストすることが本質的に困難である。

一般に生体電磁環境研究では、被験者の代わりにヒトの幾何的特徴や電気的特性を模擬した人体ファントムが用いられるが⁽³⁵⁾、ヒトの動的な特徴まで模擬できるものは数少ない。例えば、胴体の周期運動を機械的に模擬するファントムが報告されているが⁽³⁶⁾、ヒトのあらゆる運動を忠実に再現することは困難である。これに対し、ターゲットで反射したレーダ信号に発現するドップラー偏移を電子的に再現可能なエミュレータが提案されている⁽³⁷⁾。このエミュレータは、レーダが発した信号を受信・復調し、ターゲットのドップラー偏移を再現した変調信号を再送信するというものである。しかし、エミュレータに信号の送受信・変復調のための RF フロントエンドが必要となり、システムが高コスト・高消費電力化し、導入・運用のハードルが高い。

そこで筆者は、RIS を用いた電子ファントム (RePH: RIS-based Electronic PHantom) のコンセプトを提案している⁽³⁸⁾ (図 32)。RePH ではまず

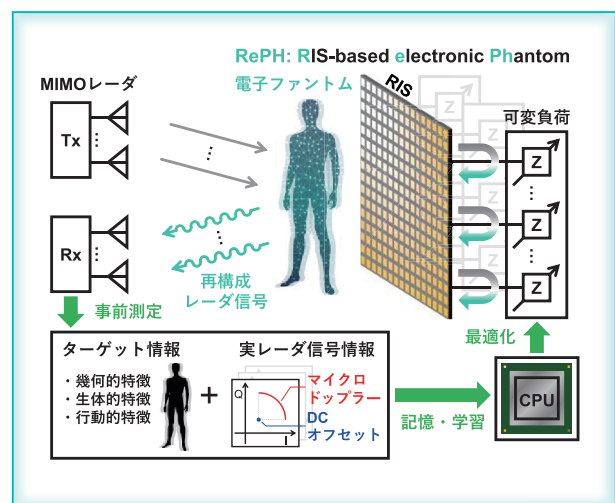


図 32 RIS を用いた電子ファントム (RePH) のコンセプト

事前に、ターゲット存在時に観測した実レーダ信号とターゲット情報とのデータセットを記憶する。そして、RIS と MIMO レーダ間のチャネル情報に基づき、前述のターゲット存在時の実レーダ信号と RIS により再構成されるレーダ信号が一致するように、RIS の可変負荷を最適化する。そして上記制御の結果、RIS により再構成された信号をレーダで観測すると、レーダは現実空間にターゲットが実在するかのように認識し、RIS が仮想的なファントムとして機能するのである。前述の電子エミュレータとの決定的な違いは、RePH では信号の能動的な送受信をすることなく、受動構成の RIS だけを用いた簡素なハードウェアで任意のレーダ信号を再構成可能という点にある。特に RePH の開口面積及び素子間隔 (つまり開口効率) は、ターゲットのレーダ断面積に関係し、これらのパラメータにより再構成可能なレーダ信号強度の上限が決定づけられる。更に、RePH では多数の空間的自由度 (つまりアレー素子) を用いることで、複雑な形状のターゲットに対応するレーダ信号、また MIMO レーダで送受信

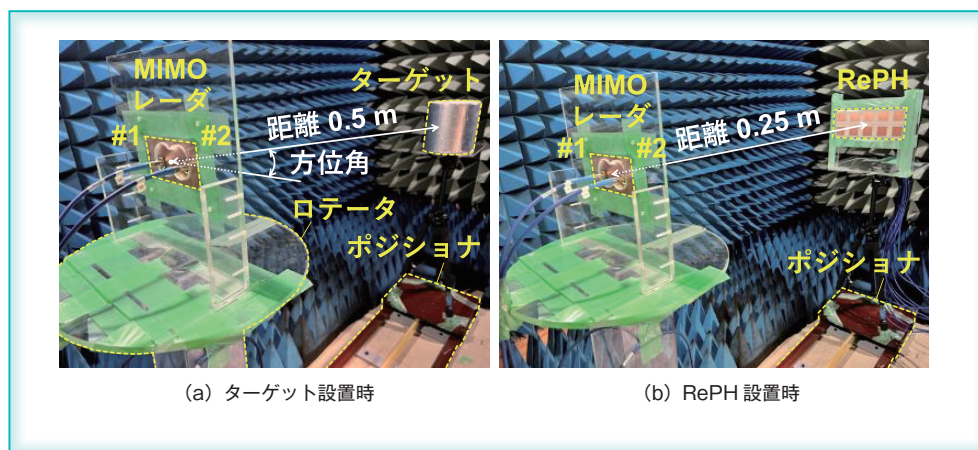


図 33 RePH を用いた MIMO レーダ信号の再現実験

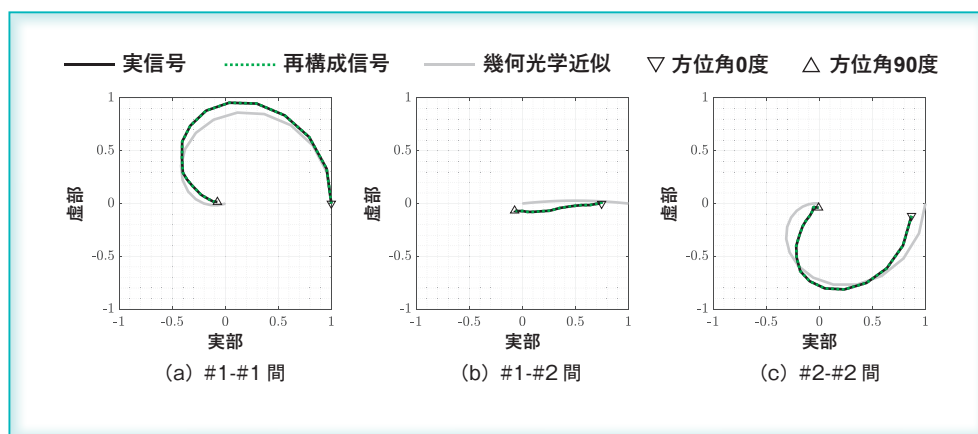


図 34 ターゲット方位角を変化させたときの MIMO レーダ実信号（黒実線）と再構成信号（緑点線）の軌跡

される多数のレーダ信号を再構成することを可能としている。

このように RePH を用いることで、一度記憶したターゲットのレーダ信号を、何度でも忠実かつ正確に再現でき、レーダ信号に含まれる百人百様のヒトの特徴を一つの RePH だけで再現できるため、ヒトセンシング用のレーダ OTA 試験系を超低コストに構築可能となる。

図 33 に、RePH を用いたモノスタティック MIMO レーダ信号の再構成実証実験の様子を示す。実験周波数は、2.4 GHz 帯 (CW) とし、MIMO レーダには 2 素子パッチアレーアンテナ、RePH には 2×5 方形パッチアレーアンテナを用いた。実験ではまず、図 33 (a) のとおり、レーダ前方距離 0.5 m に直径・高さ共に 20 cm 金属円筒のターゲットを設置し、ターゲットの方位角を 0°～90° の範囲で変化させたときのレーダ信号を測定し記憶する。そして、図 33 (b) のとおり、レーダ前方距離 0.25 m に設置した RePH の最適負荷制御により、前述のターゲット存在時の実レーダ信号を再構成した。

図 34 は、ターゲット方位角を変化させたときに、MIMO レーダで観測される信号の軌跡を複素座標平面に示したものである。まず実レーダ信号の軌跡（黒実線）が、幾何光学近似により解析的に求められた信号の軌跡（灰実線）とおおむね一致し、測定結果の妥当性が確認できる。そして、RePH による再構成信号の軌跡（緑点線）に着目すると、実信号とほぼ一致しており、MIMO レーダ信号を高精度に再構成できていることが分かる。

更に、MIMO レーダ信号に基づくターゲットの方向推定結果を図 35 に示す。ターゲット（白丸）の中心位置は、距離 0.5 m、方位角 30° とし、実信号及び再構成信号それぞれに基づきターゲット方向を推定した。なお、方向推定には MUSIC 法を用いた⁽³⁹⁾。図中、実信号規範の推定方向を桃実線で示しており、レーダから見たターゲットの中心方向を正確に推定できている。そして再構成信号規範の推定方向を緑点線で示しており、前述の実信号規範の推定結果と同じくターゲット方向を指していることが分かる。結果として、RePH はレーダ前方に位置しながらも、ターゲットが実在していた位置に仮

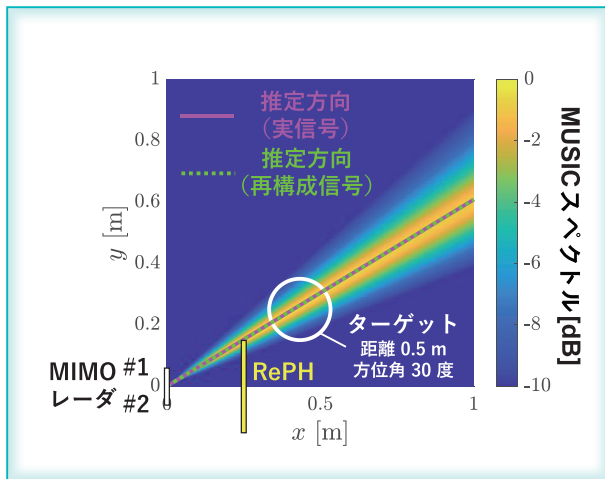


図 35 MIMO レーダ実信号（桃実線）と再構成信号（緑点線）に基づくターゲットの方向推定結果

想的なファントムを忠実に再現することに成功し、RePH のコンセプトを実証することができた。

今後、RePH の実用化に向け、運動するターゲットの時変動レーダ信号の再構成可能性、ミリ波帯・広帯域レーダへの拡張可能性について検証が求められる。

5 結論と展望

本論文では、メタサーフェスの実運用化に立ち着ける「チャンネル推定の困難性」及び「有力なアプリケーションの欠如」の二つの課題それぞれに関し、アンテナ・伝搬研究者の視点から現実的な解を提案した。

前者については、メタサーフェスの最大の利点であるハードウェアの簡素性を最低限維持しつつ、所望点での電磁界強度を改善可能な手法について、異なる三つのアプローチを提案し、それらの有効性を示した。後者については、メタサーフェスの電波伝搬制御性に着目し、RIS を用いた無線空間再現技術及び RIS を用いた電子ファントム RePH の二つの技術を紹介し、OTA 試験の簡易化を目的とした用途への応用可能性について議論した。

一方で、近年、複雑な伝搬環境下の電波の振舞いを AI や機械学習を活用し予測するといった研究開発が盛んに行われている。仮に、オンサイトでの電波の観測が不要となるような、従来の電波伝搬の常識を覆すチャンネル推定技術が確立されれば、メタサーフェス実用化のブレークスルーとなることは間違いない。

また、SWIPT (simultaneous wireless information and power transfer) や ISAC (integrated

sensing and communication) のように、無線通信信号を用い、同時に電力伝送やセンシングを行うといった多機能的な電波の使い方が求められるアプリケーションが台頭し、より高度な電波伝搬制御が要求されるようになると思予想する。この点において、空間中に放射された後の電波の伝搬特性を自在に制御可能なメタサーフェスの機能は魅力的であり、今後もメタサーフェスを必要とする新たな無線アプリケーションが創出されていくものと考ええる。

メタサーフェスの実運用については、既存の無線技術と比較し、費用対効果を明らかにすることが重要であり、ほかの無線技術との共用可能性を含め、産学官が連携して検討していく必要がある。またメタサーフェスの実装（特にミリ波帯）の観点では、既存の RF 電子部品だけでなく、コスト・機能性を両立する新たなデバイス開発（液晶や MEMS、更には NEMS）が必要不可欠である。

先人の言葉を借りれば、メタサーフェスはまさしく「アンテナ」・「伝搬」・「システム」が三位一体となった無線技術であり、本稿ではそのメタサーフェス技術の基礎から最新研究までをアンテナ・伝搬研究者のうがった見方で総括した。筆者らとしては、本稿が当該分野の初学者にとっては包括的な知識の取得、そして専門家にとっては発展的な研究開発へひらめきの一助になれば幸いである。将来的な展望として、メタサーフェス技術がアンテナ・伝搬分野の領域を超え、異分野技術と融合した学際的研究開発へとつながり、その実用・応用可能性が追求されていくことを期待する。

謝辞 本稿執筆に当たり、アンテナ・伝搬・システムの観点から有益な助言を頂いた岩手大の本間尚樹教授、Lund University の Buon Kiong Lau 教授、熊本大の福迫武教授に深く感謝する。また、メタサーフェスを用いた無線空間再現技術について有益な情報・図表等を提供頂いた NTT アクセスサービスシステム研究所の村上友規特別研究員に感謝する。

なお本研究の一部は、総務省 SCOPE (受付番号 JP235002001) の委託、JSPS 科研費 JP21H01318, JP23K13328 の助成及び文部科学省世界で活躍できる研究者戦略育成事業「学際融合グローバル研究者育成東北イニシアティブ (TI-FRIS)」の支援を受けたものである。

■ 文献

- (1) 総務省情報通信白書令和5年版. <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r05/pdf/index.html>
- (2) E. Björnson, Ö. Özdogan, and E. G. Larsson, "Reconfigurable intelligent surfaces: Three myths and two critical questions," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 12, pp. 90-96, Dec. 2020.
- (3) Q. Wu and R. Zhang, "Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 18, no. 11, pp. 5394-5409, Nov. 2019.
- (4) R. Liu, J. Dou, P. Li, J. Wu, and Y. Cui, "Simulation and field trial results of reconfigurable intelligent surfaces in 5G networks," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 122786-122795, Nov. 2022.
- (5) S. V. Hum and J. Perruisseau-Carrier, "Reconfigurable reflectarrays and array lenses for dynamic antenna beam control: A review," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 1, pp. 183-198, Jan. 2014.
- (6) M. Di Renzo, F. H. Danufane, and S. Tretyakov, "Communication models for reconfigurable intelligent surfaces: From surface electromagnetics to wireless networks optimization," *Proc. IEEE*, vol. 110, no. 9, pp. 1164-1209, Sept. 2022.
- (7) K. Murata, B. K. Lau and N. Honma, "Impact of ground plane scattering on performance of reconfigurable intelligent surfaces," *Proc. 2023 IEEE AP-S/URSI*, July 2023.
- (8) T. Hongnara, Y. Shirasawa, T. Sasaki, K. Sasaki, K. Sato, I. Oshima, N. Michishita, H. Nakabayashi and K. Chi, "Dual-polarized broad-beam reflective metasurface based on multi-sheet configuration for local 5G application at 28.25 GHz," *Proc. 2021 EuCAP*, March 2021.
- (9) T. J. Cui, M. Q. Qi, X. Wan, J. Zhao, and Q. Cheng, "Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials," *Light-Sci. Appl.*, vol. 3, Art. no. e218, July 2014.
- (10) L. Gao, Q. Cheng, J. Yang, and S. Ma, "Broadband diffusion of terahertz waves by multi-bit coding metasurfaces," *Light-Sci. Appl.*, vol. 4, Art. no. e324, Sept. 2015.
- (11) 情報通信研究機構, "NICT 発技術で現場の課題を解決 メタマテリアル電波散乱シート". https://www.nict.go.jp/riac/usecase_Scattering_ver1.html
- (12) Y. Murakami, J. Chakarothai, and K. Fujii, "Design of electromagnetic scattering wall using genetic algorithm," *IEICE Commun. Exp.*, vol. 9, no. 7, pp. 282-287, July 2020.
- (13) Y. Murakami, J. Chakarothai, L. Hamada, and K. Fujii, "Optimization and performance of metamaterial based electromagnetic scattering sheet for coverage improvement in 28 GHz band," *IEEE Access*, Vol. 12, pp. 17090-17101, Feb. 2024.
- (14) Z. Cao, Y. Li, Z. Zhang, and M. F. Iskander, "Single motor-controlled mechanically reconfigurable reflectarray," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 71, no. 1, pp. 190-199, Jan. 2023.
- (15) X. Yang, S. Xu, F. Yang, M. Li, H. Fang, Y. Hou, S. Jiang and L. Liu, "A mechanically reconfigurable reflectarray with slotted patches of tunable height," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 17, no. 4, pp. 555-558, April 2018.
- (16) C. Benteyn, R. Gillard, E. Fourn, G. Goussetis, H. Legay, and L. Datashvili, "A design methodology for reconfigurable reflectarrays with a deformable ground," *Proc. 2020 EuCAP*, March 2020.
- (17) X. Yang, S. Xu, F. Yang, M. Li, Y. Hou, S. Jiang, and L. Liu, "A broadband high-efficiency reconfigurable reflectarray antenna using mechanically rotational elements," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 8, pp. 3959-3966, Aug. 2017.
- (18) M. I. Abbasi, M. H. Dahri, M. H. Jamaluddin, N. Seman, M. R. Kamarudin, and N. H. Sulaiman, "Millimeter wave beam steering reflectarray antenna based on mechanical rotation of array," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 145685-145691, Oct. 2019.
- (19) G.-B. Wu, S.-W. Qu, S. Yang, and C. H. Chan, "Low-cost 1-D beam-steering reflectarray with $\pm 70^\circ$ scan coverage," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 6, pp. 5009-5014, June 2020.
- (20) P. Callaghan, P. Giannakou, S. G. King, M. Shkunov, and P. R. Young, "Linearly polarized reconfigurable reflectarray surface," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 69, no. 10, pp. 6480-6488, Oct. 2021.
- (21) 関 健斗, 米村一真, 中田陽介, 加藤悠人, 真田篤史, "伸縮性基板を用いたサブテラヘルツ波帯分離フィギャラブル完全異常反射メタサーフェス," 2023 信学ソ大, B-1-47, Sept. 2023.
- (22) R. Kuse, T. Hori, and M. Fujimoto, "Variable-reflection-angle meta-surface using double-layered patch-type FSS," *IEICE Commun. Exp.*, vol. 5, no. 8, pp. 290-296, June 2016.
- (23) 久世竜司, 福迫 武, 林 合祐, 佐藤彰弘, 木村翔, 田中翔馬, 表 英毅, "反射方向切替可能なメタ表面反射板," 2023 信学総大, BS-1-6, March 2023.
- (24) H. Shiiba, R. Kuse, and T. Fukusako, "A single receiver direction of arrival estimation using optimized meta-surface reflector," *Proc. 2023 USNC-URSI*, 2023.
- (25) K. Murata and N. Honma, "Concept of reconfigurable intelligent surface for WPT: Calibration, estimation and synthesization," *Proc. 2022 IEEE iWEM*, Aug. 2022.
- (26) 加藤 匠, 佐々木 駿, 村田健太郎, 本間尚樹, "Reconfigurable intelligent surface における単一観測素子を用いたチャネル推定法," 2022 信学ソ大, B-1-107, Sept. 2022.
- (27) 佐々木 駿, 加藤 匠, 村田健太郎, 本間尚樹, "Reconfigurable intelligent surface における圧縮センシングを用いた負荷変調チャネル推定法の高速・高精度化に関する研究," 2022 信学ソ大, B-1-108, Sept. 2022.

- (28) 村田健太郎, 加藤 匠, 佐々木 駿, 本間尚樹, “Reconfigurable intelligent surface におけるチャネル推定・最適負荷制御法の実験的評価,” 2023 信学総大, BS-1-8, March 2023.
- (29) W. Fan, X. C. B. Carreño Bautista de Lisbona, F. Sun, J. Ø. Nielsen, M. B. Knudsen, and G. F. Pedersen, “Emulating spatial characteristics of MIMO channels for OTA testing,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 61, no. 8, pp. 4306-4314, Aug. 2013.
- (30) Y. Jing, H. Kong, and M. Rumney, “MIMO OTA test for a mobile station performance evaluation,” IEEE Instrum. Meas. Mag., vol. 19, no. 3, pp. 43-50, June 2016.
- (31) P. -S. Kildal, X. Chen, C. Orlenius, M. Franzen, and C. S. L. Patane, “Characterization of reverberation chambers for OTA measurements of wireless devices: Physical formulations of channel matrix and new uncertainty formula,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 60, no. 8, pp. 3875-3891, Aug. 2012.
- (32) 谷口諒太郎, 村上友規, 小川智明, 浅井裕介, 鷹取泰司, “RIS を用いた無線空間再現技術の屋内環境における評価,” 信学技報 CQ2023-23, Aug. 2023.
- (33) 谷口諒太郎, 村上友規, 小川智明, 鷹取泰司, “屋内環境における無線空間再現技術の評価,” 信学ソ大, B-1-104, Sept 2023.
- (34) C. Li, V. M. Lubecke, O. Boric-Lubecke, and J. Lin, “Sensing of life activities at the human-microwave frontier,” IEEE J. Microwaves, vol. 1, no. 1, pp. 66-78, Jan. 2021.
- (35) A. T. Mobashsher and A. M. Abbosh, “Artificial human phantoms: Human proxy in testing microwave apparatuses that have electromagnetic interaction with the human body,” IEEE Microw. Mag., vol. 16, no. 6, pp. 42-62, July 2015.
- (36) M.-J. López, C. Palacios Arias, J. Romeu, and L. Jofre-Roca, “In-cabin MIMO radar system for human dysfunctional breathing detection,” IEEE Sens. J., vol. 22, no. 24, pp. 23906-23914, Dec. 2022.
- (37) P. Nallabolu, D. Rodriguez, and C. Li, “Emulation and malicious attacks to Doppler and FMCW radars for human sensing applications,” IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 71, no. 2, pp. 805-817, Feb. 2023.

- (38) 村田健太郎, 瀬川智尋, 新井, 小澤, 佐藤, 本間尚樹, 宮島, “Reconfigurable intelligent surface を用いた電子ファントム,” 信学総大, BS-1-02, March 2024.
- (39) N. Shiraki, N. Honma, K. Murata, T. Nakayama, and S. Iizuka, “Experimental evaluation of multi-target localization accuracy using multistatic MIMO radar,” IEEE Sens. J., vol. 23, no. 23, pp. 28863-28871, Dec. 2023.

(2024年2月15日受付, 5月1日再受付)

村田健太郎 (正員)

平 23 岩手大・工卒。平 26 同大学院修士課程了。平 28 防衛大理工学研究科博士課程了。同年(株)東芝入社。現在岩手大理工学部助教。マルチアンテナのシステム・信号処理・アプリケーションの研究に従事。平 27 ISAP Best Student Paper Award, 平 28 本会学術奨励賞, 平 29 IEEE AP-S Japan Young Engineer Award, 平 30 EuMC Microwave Prize, 令 4 URSI AT-RASC Young Scientist Award, 平 30 ~ 令 5 IEEE AP-S TAP Top Reviewers Award 各受賞。工博。IEEE 会員。



村上靖宜 (正員)

平 22 福井大・工卒。平 24 同大学院修士課程了。平 27 同大学院博士課程了。現在電通大工学部助教。メタマテリアル、電波伝搬測定の研究に従事。工博。IEEE 会員。



久世竜司 (正員)

平 23 福井大・工卒。平 25 同大学院修士課程了。平 28 同大学院博士課程了。平 29 熊本大大学院先端科学研究部助教。現在同大学院先端科学研究部准教授。メタサーフェス、円偏波アンテナ、アプリケーションに関する研究に従事。工博。IEEE 会員。

