

3 テラビットを越える無線伝送

世界初、サブテラヘルツ帯で 毎秒1.4テラビットの無線伝送に成功

IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想では大容量かつ高速なネットワーク (以下、NW) を支える技術として、光通信だけでなく無線通信も重要な役割を果たすことが想定されている。NTT 未来ねっと研究所 (以下、未来研) は IOWN や 6G の時代を見据えた無線通信技術の研究開発を進めており、世界で初めて毎秒1テラビットを越える無線伝送に成功している。

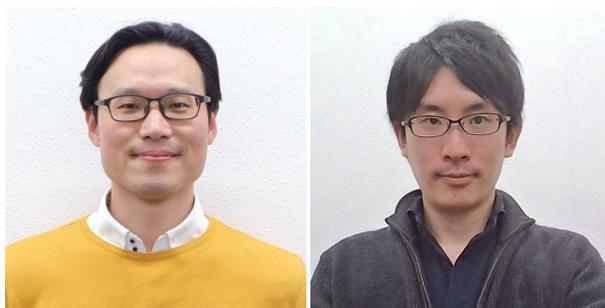
Beyond5G / 6G を見据えた 無線伝送技術の研究開発

5G の普及が進み高速・大容量な無線通信がより身近なものになりつつある。VR (仮想現実) や AR (拡張現実)、高精細映像伝送、コネクティッドカー、遠隔医療など、無線通信のユースケースも拡大すると考えられる。そして無線通信技術の進展に伴い、伝送容量は今後もますます増え続けることが予想されている (図1)。

Beyond 5G や 6G と呼ばれることが多い次世代の無線通信規格で

は、1 Tbps (毎秒1テラバイト) を越える転送速度が求められるようになると考えられており、多くの企業や研究機関がその想定に基いた研究開発に取り組んでいる。

未来研では OAM (Orbital Angular Momentum: 軌道角運動量) 多重伝送と MIMO (Multi Input Multi Output) を組み合わせた独自の方式による大容量無線伝送技術の研究開発に取り組んでいる。2023年3



NTT 未来ねっと研究所 波動伝搬研究部
(左) 席特別研究員 李斗煥氏
(右) 研究主任 菅木裕文氏

月にはその研究の過程で、OAM 多重伝送により世界で初めて 1.4 Tbps という高速大容量の無線伝送に成功したことを発表した。

以下、その研究成果に至る過程や技術の特徴などについて紹介していく。

テラビット級無線伝送の実現に向けた研究の方向性

無線伝送を高速化・大容量化するには、空間多重数の増加、伝送帯域幅の拡大、変調多値数の増加という3つの方向性が考えられる (図2)。未来研はこのうち変調多値数以外に注目し研究を進めている。

まず軌道角運動量を持つ電波を用い空間多重数を増加する。この発想

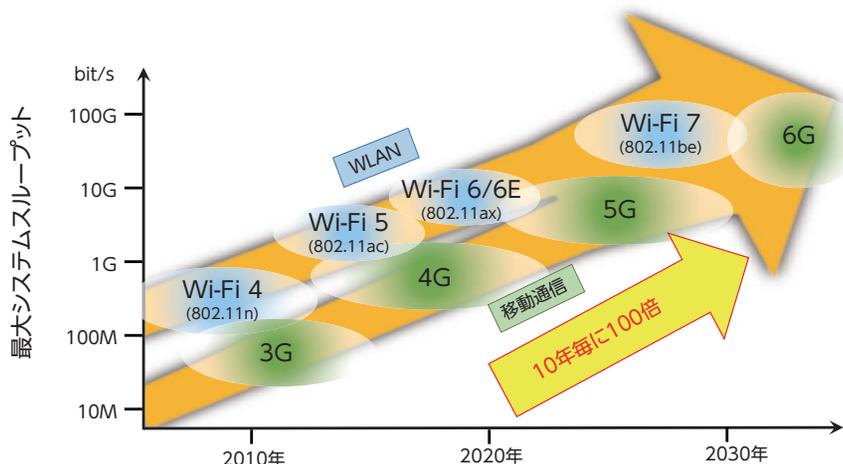


図1 無線通信技術の進展と伝送容量のトレンド

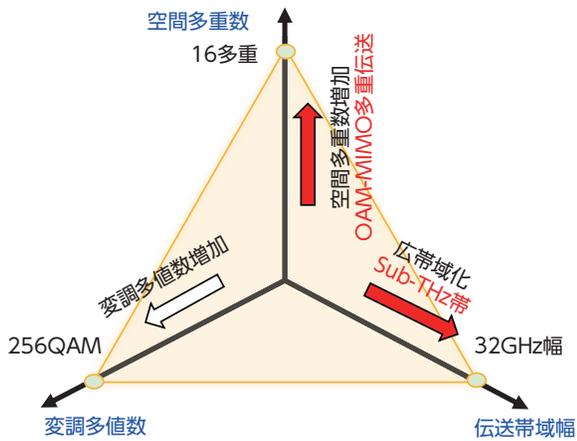


図2 高速大容量化に向けた研究の方向性

に基づく伝送技術が前述の OAM 多重伝送技術だ。

また現在はまだ比較的使われておらず混雑していないミリ波やサブテラヘルツ波を利用することにより、伝送帯域幅を拡大する。具体的には 100 GHz 以上の周波数帯を想定しており、無線 LAN や携帯電話などで用いられているマイクロ波と呼ばれている周波数帯と比較して 10 倍以上の帯域幅を利用できる余地がある。

OAM 多重伝送技術による空間多重数増加

OAM は電波の進行方向の垂直平面上で位相が回転するように表されるという、電波の性質の 1 つだ。

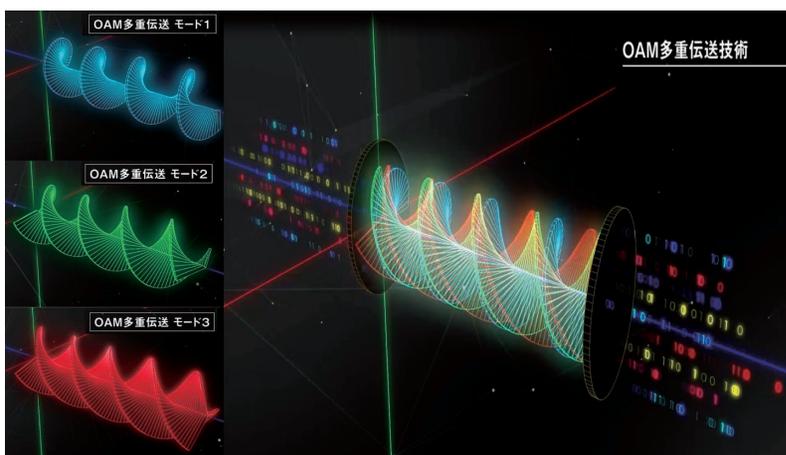


図3 OAM 多重伝送技術のイメージ

この位相の回転数を OAM モードと呼んでいる。同じ位相の電波の軌跡は進行方向に対して螺旋形状を示す (図 3)。送信された際と同じ OAM モードを持つ受信機でなければ受信できない。

このため複数の OAM モードが異なる電波を多重化して送信しても、それぞれの OAM モードに

合う受信機を用意することにより、干渉を受けることなくそれぞれの電波を分離して受信できる。溝の形状が合わなければはまらないボルトとナットの関係に似ている。

OAM 多重伝送技術はこの特徴を利用し、複数の異なるデータを同時に伝送する技術だ。

帯域幅拡大だけではないミリ波・サブテラヘルツ波のメリット

電波は空間を伝搬するのに伴い電磁波エネルギーが拡散するため、伝送距離が長いほど受信が難しくなる。またエネルギーの拡散は OAM 波の位相が回転する速度が速いほど、また周波数が低いほど大きいと

いう特性もある。そのような条件では OAM 波を受信するアンテナのサイズを大きくしなければならず、実用化の段階では問題となることが予想される。

「伝送帯域幅を拡大するためとはいえ、サブテラヘルツ波を利用するのはそれ自体がチャレンジなことです。ただし帯域幅を拡大する以外のメリットもあります。高周波数帯では電波の直進性が高まり、エネルギーの拡散が小さくなるのです。サブテラヘルツ帯のような高周波数帯であるほど、アンテナのサイズを抑えることが可能になります」(笹木氏)。

実用化を考慮したアンテナの実装

モードが異なる複数の OAM 波を送受信するため、かつてほとんどの研究機関や企業では物理形状の異なるアンテナを複数使用していた。この方式ではモードが増えるに従いアンテナの構成が複雑になることが、実用化の際に問題となることが予想された。そこで未来研ではアンテナ素子群を円形に配置する UCA (Uniform Circular Array) という方式を採用している。

また単一のアンテナ群で複数の



図4 多重UCA方式のアンテナ

OAM 波を送受信できるものの、そのままでは特定の OAM モードで S/N 比が低下し通信に影響するという問題があるため、異なるサイズの UCA を同心円状に配置する多重UCA という方式でアンテナを実装している (図 4)。

アナログデジタルハイブリッド構造で多重処理の負荷を削減

従来は、OAM モードの位相回転を与える処理をデジタル信号処理によって実現し、複数の OAM モードの多重伝送を行っていた。しかしながら、複数の OAM 波を送信する際、および受信して分離する際に同じ信号処理が必要であり、しかも多重数が増大するほど、また広い帯域幅を利用するほど、デジタル信号処理の負荷が大きくなる。

実用化に向けこの処理負荷が問題になると考えた未来研は、Butler Matrix 回路と呼ばれるアナログ回路 (以下、Butler 回路) を用いて OAM 波の生成・分離を行うことに

した。

2021 年までに 28 GHz 帯や 40 GHz 帯を用いた OAM 多重伝送が可能な Butler 回路を実装し、100Gbps を越える速度の伝送実験に成功している。これによりデジタル信号処理量を大幅に削減できるようになった。この時点で帯域幅は 2 GHz を達成している。

サブテラヘルツ帯で動作するアンテナ一体型の Butler 回路

複数の OAM 波を同時に伝送するためには各 OAM 波の位相を高い精度で制御する必要がある。高周波数帯において Butler 回路で広帯域にわたり位相を均一に制御する難易度は非常に高い。既存の設計による Butler 回路ではこれ以上の高周波数帯に対応することが難しくなっていたため、未来研は Butler 回路の設計そのものを見直した。

具体的には、導波路内の電波伝搬を解析し位相の進み方を均一に揃えることが可能な位相回路を考案した。そしてその位相回路を含めアンテナまでを接続するすべての経路が電氣的に等しい長さになるよう、アンテナ一体型の立体経路を持つ Butler 回路を設計した。

「さまざまなパーツを接続して回路を構成するため、従来の平面的な回路では非常に多くの箇所経路が交差します。交差箇所電磁波が干渉しないように専用の回路を実装す

るなど対策を行ったとしても損失が生じますし、我々がめざすような広帯域に対応する特性を実現することは困難です。そこでそもそも交差が不要な形状の回路を設計すべきと考えました。そうして考案したのがさまざまなパーツを立体経路で接続した多層構造の Butler 回路 (図 5) です」(笹木氏)。

帯域幅 35GHz で 8 個の OAM 波を同時に生成・分離可能に

立体経路設計による Butler 回路の試作も完了している (図 6 左)。この Butler 回路は 135 GHz から 170 GHz にわたる 35 GHz という広い帯域において、8 個の OAM 波を同時に生成・分離できる。異なる 2 つの偏波でそれぞれ OAM 多重通信を行うことにより、16 個のデータ信号を同時に伝送可能だ。

「35 GHz もの帯域幅で低損失かつ高い精度で動作する回路を実現することは難しいため、測定した帯域特性を見せると驚かれることがあるほどです。性能が良いだけでなく、従来デジタル信号処理を行うために必要であったデジタル信号処理回路と比較して導入コストも大幅に低く抑えることができる見込みです。動作に電力を必要としないため電力消費量の軽減効果も大きく、運用面でもメリットが大きいと考えています」(笹木氏)。

1.4Tbps の無線伝送に世界で初めて成功

この OAM 波の生成・分離を行う Butler 回路を用い、サブテラヘルツ帯でアナログ処理による OAM 多重伝送に世界で初めて成功した。室

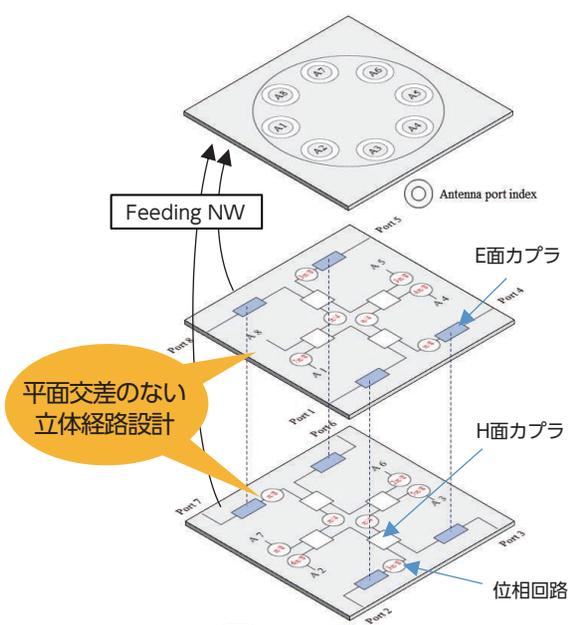


図 5 OAM 波を生成する Butler 回路の多層立体経路概略図

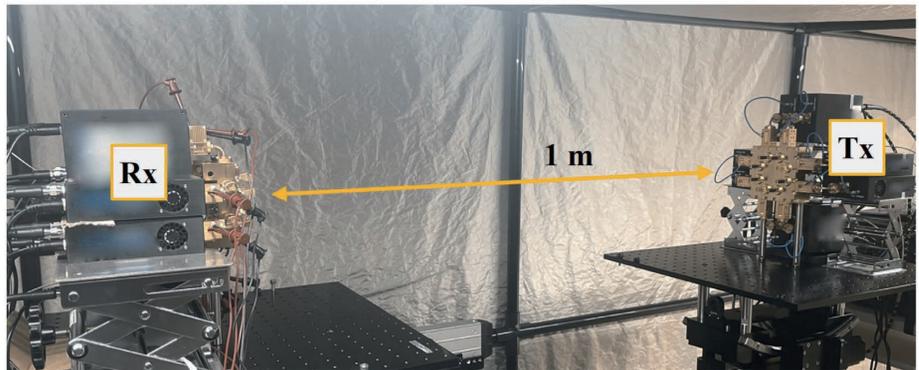


図6 アンテナ一体型 Butler 回路と伝送実験の様子

内で行った伝送実験において 1.4Tbps という世界最高速の無線伝送を達成したことを、2023年3月に発表している。図7に示すように、通信速度については他の研究機関の1歩先を行くこととなった。

動画サイトなどで4K動画を視聴する際に必要な伝送速度が40Mbps程度であるため、約35,000本分の4K動画を同時に伝送できる計算だ。およそ10Gbpsの伝送速度を必要とする非圧縮4K動画であっても、140本以上を同時に伝送できる。

伝送距離を100m～1km未満まで伸張することをめざす

1.4 Tbps を達成した無線伝送の

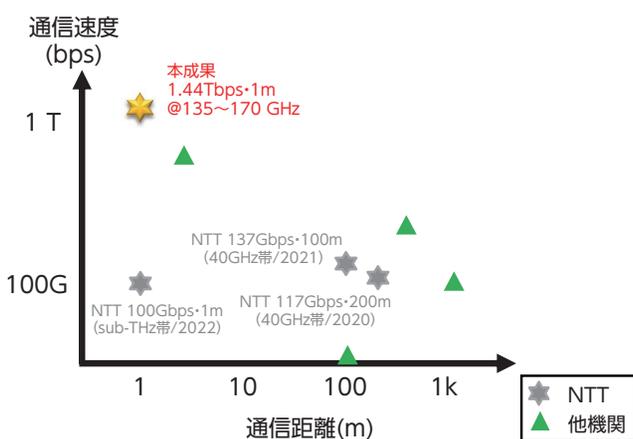


図7 大容量無線伝送の動向

室内実験は、伝送距離が1mと短かった。今後は伝送距離を伸ばすことに取り組むとして、笹木氏は次のように述べている。

「テラビット級の無線通信は、直近では一般的な個人ユーザー向けというよりも、コアNWと基地局の間などを無線で柔軟につなげるようなユースケースで重要な役割を果たすと考えています。今後はこのようなユースケースに備えるため、屋外100m以上の伝送距離の実現をめざしてさらなる研究開発を推進しています。」

NTT が世界で初めて提案した OAM-MIMO 多重伝送技術

未来研は空間多重数を増加させるもう1つの手法として、複数の送受信アンテナを使用し複数のデータを伝送するMIMOに注目している。伝送量の増加を目的にWi-Fiなどで活用されている技術だ。このMIMOとOAMを組み合わせた

OAM-MIMO 多重伝送技術を世界で初めて提案している。

世界初の1.4 Tbpsという無線伝送速度はOAM多重伝送単体で達成したものであり、今後はこの技術をOAM-MIMO多重伝送技術に活かし、さらなる高速大容量伝送をめざすことになる。

世界初をめざしつつ 実用化も見据えた研究を継続

32 GHz幅で1.4 Tbpsという光伝送に匹敵するような広帯域と高速な通信速度を達成したこと、またOAM-MIMO多重伝送技術に関する今後の研究活動に向けた思いを、李氏は次のように述べている。

「多くの研究機関や企業がターゲットとしてきた1 Tbpsを未来研がどこよりも早く達成したことには非常に大きな意味があったと思います。とはいえNTT研究所はあくまでも企業の研究所ですので、学術的な成果だけを追求するのではなく実用化を視野に入れていることも重要です。今後も世界一の研究成果を創出すると同時に実用化を見据えながら、OAM-MIMO多重伝送技術の研究開発を続ける考えです。」