

5G以降のワイヤレス光ネットワーク

ジェフ・フェクト

5Gワイヤレスネットワークが世界中に広がる中、標準規格策定者は、広い無線帯域幅による短距離伝送の手段として、光通信に目を向けている。

ワイヤレス通信は、休息することのない分野である。グローバルな5Gネットワークがまだ展開途上にある中、開発者らは既に、次世代の6Gネットワークでさらに広い帯域幅を提供して遅延を改善する方法を計画している。

計画者らによると、6Gは次なる目玉となるもので、さまざまな「モノ」へのデータリンクや、ホログラフィックの高解像度での拡張現実（AR）といった、新しいワイヤレスサービスを提供することになるという。

ワイヤレスネットワークの各世代

モバイル通信規格は、複数の世代を経ており、どの世代も技術における重要なステップだった。最初に広く使用

された携帯電話は、セルラーアナログシステムで、現在は1G(第1世代)と呼ばれるものである。1991年に登場した2Gのデジタルセルラーネットワークは、まずはテキスト機能を提供した後に、低解像度の画像やマルチメディアに対応した。1998年には3GPP(3rd Generation Partnership Project)が設立された。急速に成長していたインターネットを介してデータを伝送するように設計された、3Gセルラー携帯電話の規格を策定するためである。3Gはスマートフォンの扉を開き、最初に登場したのが、ビジネスユーザー向けに設計された「Blackberry」だった。業界ではその後、10年ごとに新しい世代が導入されている。4Gでは、スマートフ

ォンが万人に提供され、2020年頃に登場した5Gでは、帯域幅がさらに拡大され、6Gは、2030年の展開を目指して開発が進められている。

独ドレスデン工科大(Technical University of Dresden)でモバイル通信システムのVodafone顧問教授を務めるゲルハルト・フェットワイス氏(Gerhard Fettweis)によると、業界では現在、新技術を2つの世代によって導入しているという。1つめの世代でビジネスユーザーに提供した後、2つめの世代でその市場を消費者に拡大し、その後には再び、新世代の技術がビジネス向けに導入される。3Gは、スマートフォンとインターネットをモバイルビジネスユーザーにもたらし、4Gは、それをモバイル消費者へと拡大した。同氏によると、5Gネットワークは、農業から医療に至るまでのあらゆる分野の専門ユーザーを対象に、モノのインターネット(Internet of Things: IoT)における実際と仮想のオブジェクトに対する、ワイヤレスのリアルタイム制御を提供する、「タッチインターネット」(Tactile Internet)をもたらすという。

フェットワイス氏はさらに、「6Gでは、リモート制御のロボティックソリューションを万人に提供するためのインフラとなる、Personal Tactile Networkを整備しなければならない。2030年以降は6Gの提供開始とともに、ロボットヘルパーが私たちの生活を支援するという人類の昔ながらの夢が実

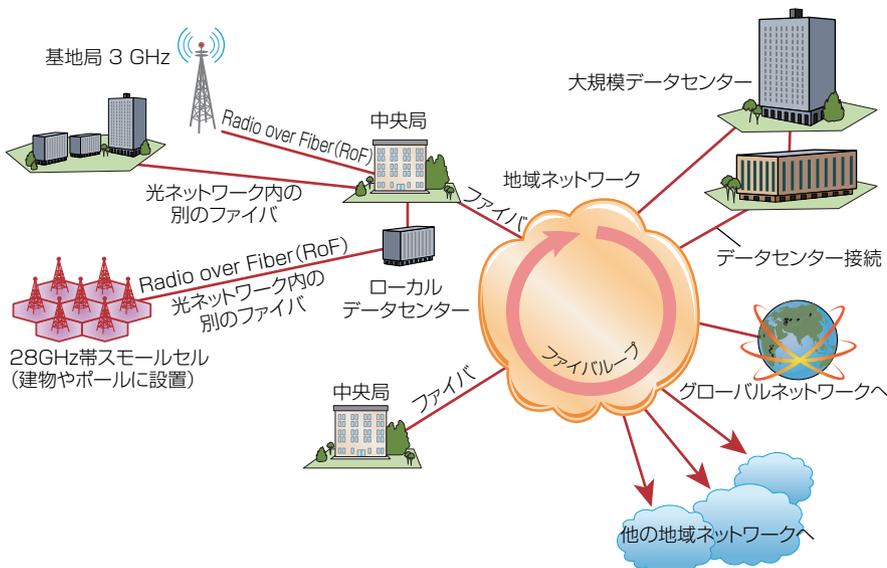


図1 5Gネットワークと、データセンターやグローバルネットワークへのその外部接続における、光ファイバ伝送の利用状態。ワイヤレスシステムの内部において、光ファイバは、中央局やローカルデータセンターを、基地局や、建物やボールに設置された28GHz帯スモールセルに接続している。

現することになる」とも述べている。それは、拡張現実とパーソナルロボットエージェントを含むコンセプトの実現を目指す、広大なビジョンである。その目標を達成するには、莫大な伝送容量と広大な相互接続性を提供して、ほぼゼロ遅延を達成することのできる、新しい技術が必要になる⁽¹⁾。

物理層の重要性

英クイーンズ大 (Queen's University) のミハイル・マタイオウ教授 (Michail Matthaiou) によると、5Gの成功は、マイクロ波帯における Massive MIMO (mMIMO: 大規模多入力多出力) 技術の利用に起因すると考えられるという。最大の懸念は、モバイルネットワークの物理層、すなわち、信号を送送するハードウェアである。その他の機能は、通信システムの他の層が行う。例えば、音声、映像、またはデータ入力をシステムに取り込み、入力信号を送送に適した形式に変換し、さまざまなソースからの信号を多重化して、物理層を介して伝送するための単一のデータストリームにする処理である。光学機器は、物理層の一部である。光送信器は、光ファイバ、または自由空間光通信で大気中を伝送する光信号を生成する。アンテナからの無線信号とマイクロ波信号は、大気中をワイヤレスに伝播する。電子送信器は、配線上を短距離だけ流れる電流を生成する。

光ファイバは、5Gモバイルネットワークの物理層において重要な役割を担う(図1)。まず、グローバルな通信システムとデータセンターの間の高容量のバックボーン伝送を提供する。また、地域の分配ノードと、無線周波数のワイヤレス信号を分配する基地局の間のバックホールも提供する。パッシブ光

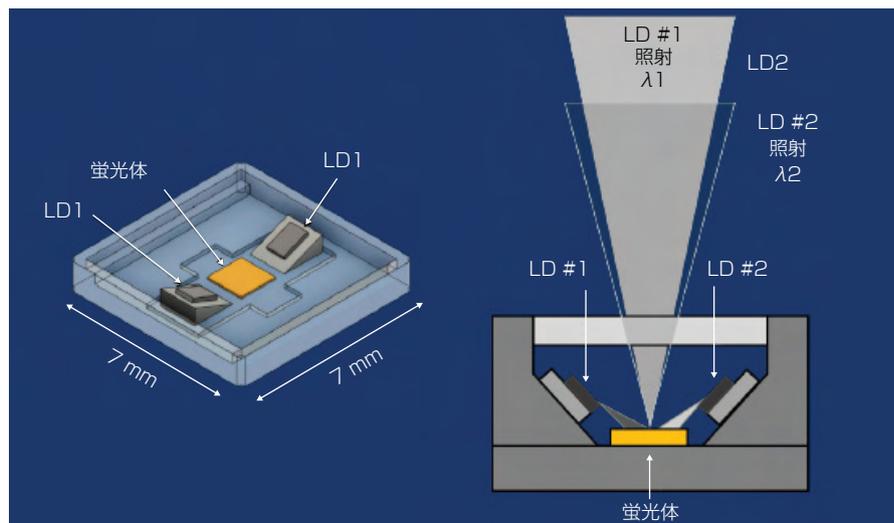


図2 京セラのLi-Fi技術「LaserLight」に使用されているモジュールの構造。CESでは、10個のモジュールで構成されたアレイに対する波長分割多重によって、100Gbit/sの通信速度が示された。(画像提供:京セラSLDレーザ社)

ネットワークは、5Gネットワークにおいて使用される28GHz帯の無線信号を、小さな「ピコセル」を対象に高周波数信号を分配するローカルアンテナから伝送することができる。

6Gに向けて 規模を拡大する上での課題

光学機器は、6Gネットワークの目標を達成するためにモバイルネットワークの物理層の規模を拡大するうえで、重要な役割を担う。マタイオウ氏によると、これには3つの主要な技術的進歩が必要だという。すなわち、5Gで使用される28GHz帯から光帯域までの周波数の信号を伝送すること、アンテナシステム用にインテリジェントで再構成可能なサーフェスを開発すること、そして、従来の固定セルラーネットワークをmMIMOに基づくセルフフリーのネットワークに置き換えることである。

6G向けに検討されている3つの主な周波数帯は、30~300GHzのミリ波帯、300GHz~3THzのテラヘルツ帯、そして、光帯域である。光帯域には、赤外域 (IR) の大部分、可視域の全範囲、

紫外域の長波長側が含まれる。大気吸収は、ミリ波帯のほとんどの領域における問題としてよく知られており、ほとんどの大気減衰が、300GHz~10THzにおいて2~1万dB/kmである⁽²⁾。少なくとも短期的には、この高い減衰によって、ミリ波帯とテラヘルツ帯のほとんどの領域における伝送は、短距離に制限される。枝葉や壁などの障害物によっても、伝送は遮断される可能性がある。

インテリジェントで再構成可能なサーフェスを開発するということは、ワイヤレス信号を送受信するアンテナの構造を抜本的に変更するということである。ミラーの形状が集光に影響を与えるように、アンテナの形状によって、無線波がどのように放射または収集されるかが決まる。シンプルなアンテナで構成されるフェーズドアレイは、入射または出射する光を集約することができる。フェーズドアレイを一步進めたのが、サブ波長要素で構成されたメタ材料またはメタサーフェスである。サブ波長要素を組み合わせることにより、より複雑な形で放射をシェー

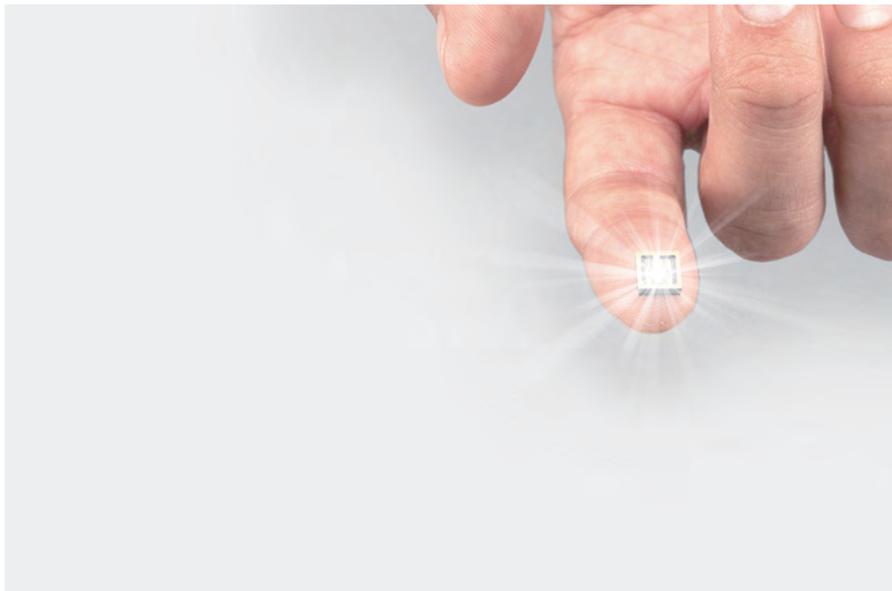


図3 単一のレーザー駆動のLi-Fiモジュール。光の拡散によって信号を室内に分散する。(画像提供:京セラSLDレーザー社)

ピングすることができる。インテリジェントで再構成可能なサーフェスは、サーフェスの形状を動的に制御して光または放射の指向方法を変更する機能を追加することにより、複雑な可動アンテナによって、所望の放射パターン及び信号を合成することを可能にする。

無線通信システムにおいて、MIMOでは、複数のエミッタからなる1つのアレイから、複数のコレクタからなる2つめのアレイへと、信号が送信される。広帯域光ファイバ通信では、MIMO符号化を使用して、高次モードで信号が送信されるが、実装可能な構成の規模は小さい。mMIMOは、多数の入力とアクセスポイントで構成される。アクセスポイントはアンテナとして機能する。

既存のセルラー通信ネットワークには、基地局の間の境界付近に望ましくない影響が生じるという問題がある。最もよく知られている問題は、境界における信号が弱く、基地局間の転送で信号が失われることである。mMIMOは、多数のアクセスポイントを広いエ

リアにわたって分散して配置することができるため、信号は複数の異なる経路を伝播することができ、微弱信号を加算して強度の高い結合信号を生成することができる。ネットワークの構成要素が多いほど、信号を広いエリアに均等に分配することができる。現行のセルラーネットワークにおける、数本の大きな送信アンテナに代わって、セルフリーのmMIMOでは、各アクセスポイントに、複数の小さな低消費電力のアンテナが配備される。

光ワイヤレス通信

光ファイバケーブルは長い間、ワイヤレスネットワークのバックボーン伝送とバックホールを提供してきたが、ワイヤレス光学機器が使われるようになったのは、4Gシステムが実装されるようになってからである。しかし、光波の高い周波数は、大量の帯域幅を必要とする6Gワイヤレスアプリケーションに対して、光伝送の魅力を一層高めている。

マイクロ波周波数では、ワイヤレス

ネットワークの達成可能な帯域幅は制限される。新しいワイヤレス標準規格であるWiFi6では、1~7.125GHzのマイクロ波帯の領域を利用して、9.6Gbpsのデータ速度が何とか達成されている。数百テラヘルツの周波数に相当する光波長では、それよりもはるかに高いデータ速度がワイヤレスアプリケーションに対して提供される見込みである。

最も成熟した技術は、英ストラスクライド大 (University of Strathclyde) のハラルド・ハース氏 (Harald Haas) によって提案されたLi-Fi (light fidelity) である。これは、可視域と赤外線域の光を使用して双方向のマルチユーザー通信を提供する、ワイヤレス光システムを実現するものである⁽³⁾。ワイヤレス光通信は一般的に、送信器と受信器の間に見通し線が得られる場合に最もうまく機能するが、光が拡散的に分散および反射されれば、機能することができる。見通し線が得られない場合でも動作は可能だが、特殊な技術と信号処理が必要になる可能性がある。壁、扉、枝葉、霧、降雨などの障害物によって、光が遮断されたり、大きく減衰されたりする可能性があるため、実際には、ほとんどのワイヤレス光リンクが、短~中距離にしか対応しない⁽⁴⁾。その制約をバグとみなすか、それとも機能とみなすかは、アプリケーションによって異なる。室内または建物内に信号を制限することは、多くの状況においてセキュリティを提供することにつながるが、複数の居室または構造を網羅するネットワークや、建物の外にいるユーザーを範囲に含めるネットワークにおいては、問題となる可能性がある。

LEDは、短中距離のワイヤレス通信に魅力的な光源である。広い角度にわ

たって光を拡散して、望ましい多様なマルチパスを短距離リンクに提供することができ、出力が低いために目に損傷を与えるリスクを回避できるためである。Li-Fiシステムの初期のアピールポイントの1つは、頭上のLED電球の光を、無線波のような室内に拡散される信号で変調するという概念だった。光照射によって、サーバーからユーザーへのダウンリンクを提供することが可能で、個々のユーザーデバイスには無線アップリンクを装備する、というものである。

米京セラSLDレーザ社(Kyocera SLD Laser)は、新しい種類のレーザベースの表面実装デバイス(SMD)のLi-Fi光源を実証している。2個のGaN(窒化ガリウム)半導体レーザによって蛍光体を照射して白色光を生成するものである(図2)。「青または紫のレーザ光源で蛍光体を照射し、それによって一部のエネルギーを黄色に変換することで白色光を生成する。レーザ光はランバート反射を示し、(LaserLight Li-Fiの出力において)約20%の青色と80%の黄色を混合した光を生成する」と、同社のポール・ルディ氏(Paul Rudy)は述べている。

個々の光源は、7mm²の表面実装デバイスである(図3)。その出力が信号で変調され、室内での使用を対象に、LED電球のような、室内に光を拡散する天井照明器具の中に取り付けられる。京セラはCESにおいて、異なる波長を生成する、10個の独立した光源からなるアレイを構成した。青色と紫色のGaNレーザと蛍光体を使用して可視光を生成し、ヒ化ガリウム半導体レーザによって赤外光を生成した。赤外光も拡散によって分散される。各光源を10Gbit/sで変調し、波長分割多重(Wavelength Division Multiplexing :

WDM)によって10個の光源を結合することにより、100Gbit/sの信号を提供した。

「非常に重要なのは、データ速度である。これは、太陽光の下で使用可能で、赤外光と可視光に対応する。さまざまなシナリオに対応し、センシングを組み合わせることが可能である」と、京セラと共同でこのデモを構築したハース氏は述べた。6Gでは、センシング、通信、コンピューティングが組み合わせられることになるため、これは重要なことだと、同氏は付け加えた。「おそらく今から20年後には、ワイヤレス通信は、無線ではなく光通信になる」(ハース氏)。

現時点ではLi-Fiは、敏感な医療機器などに対する干渉や、機密情報を扱う施設からの情報漏洩といった、無線ワイヤレス信号の問題を懸念するユーザーの関心を集めていると、ルディ氏は述べた。航空業界も、米連邦通信委員会(FCC)が最近、ワイヤレス通信に開放した無線周波数帯からのノイズが、敏感な航空機器に干渉する恐れを懸念しているため、これに関心を示している。

遅延と トランスポートネットワーク

ネットワークの遅延をミリ秒未満のレベルに抑えることは、6Gの要件リストの中でも優先度の高い項目である。人間が知覚できないほどの短い遅延が、拡張現実やロボットによる遠隔手術などの用途においては、不可欠だからで

ある。4Gネットワークの遅延は30~70msで、理論上の下限値は10msである。初期の5Gネットワークの遅延は5msにまで抑えられており、将来的には1msに達すると期待する声もある⁽⁵⁾。

スウェーデンのルンド大(Lund University)のハーシュ・タタリア氏(Harsh Tataria)は、IEEEのプロシードィングで発表した研究結果の中で、ミリ秒未満の遅延を達成するには、「ネットワーク設計を根本から見直す必要がある。それによって、現在のトランスポートネットワークは姿を消し始め、既存の光ファイバ上で仮想化され、最新のソフトウェア定義のネットワークを利用して隔離されるようになる」としている。遅延を低減するための近道は、「トランスポートネットワークのファイバインフラを削減または除去すること」だという。それでも、完全なワイヤレスリンクであっても、ミリ秒未満の遅延を達成するには、ネットワークの範囲を100km程度に制限する必要があるとしている。

今後の展望

6G規格において、さらなる帯域幅以外に何が規定されるかは、現時点では不明である。6Gで、ホログラフィック品質の拡張現実が、次なる目玉として実現されるという確証もない。

6Gで、高解像度の仮想現実(VR)などのアプリケーションが将来的に実現されるには、ワイヤレスデータ速度の大幅な向上が必要である。

参考文献

- (1) G. P. Fettweis and H. Boche, IEEE Bits: The Information Theory Magazine (Oct. 12, 2021); doi:10.1109/mbits.2021.3118662.
- (2) See <https://bit.ly/3KbPDnU> and A. Rogalski and F. Sizov, Opto-electron. Rev., 19, 3, 346-404 (Sep. 2011).
- (3) H. Haas, L. Yin, Y. Wang, and C. Chen, J. Light. Technol., 34, 6, 1533-1544 (2016).
- (4) H. Tataria et al, Proc. IEEE, 109, 7, 1166 (Jul. 2021).
- (5) See <https://cnet.co/3FoWqr2>.