

# 5G—光学部品は5Gネットワークに 欠かせない存在に

ジェフ・ヘクト

5Gに関する話題とえば、ワイヤレスと無線技術が中心だが、フォトニクスや光ファイバは、ユーザーにサービスを提供する新世代の基地局との間の信号伝送を支えるという、重要な役割を担う。

第5世代(5G)携帯端末として最初の製品が発表されたのは2019年だが、5G技術が完全に展開されるまでには多くの年月がかかる見込みである。現在の計画としては、モノのインターネット(Internet of Things: IoT)や自動運転車に代表される、まだ初期段階にある他の技術に対する接続の提供などがある。5Gは、標準規格として完全に定義されているわけではなく、進行中の取り組みという状態にある。ミリ秒の遅延や99.9999%の信頼性などが目標として掲げられているが、現時点では達成可能というよりは野心的な目標のように思われる。それでも5Gは、

通信の未来を具現化しつつある。

5Gの説明のほとんどが、ワイヤレスやモバイルという単語で占められている。しかし、光学部品はネットワークのデータ伝送バックボーンに残り、海底及び地上ケーブル、データセンター、ワイヤレストランスミッタから建物まで敷設された伝送線に組み込まれる。5Gによって、欧州や北米では光ファイバが家庭まで敷設されるようになるかもしれない。これらの地域では、光ファイバの利用率がわずか15%にとどまっており(ただし光ファイバが敷設されている家庭は約40%にのぼる)、韓国で80%、シンガポールで90%とい

う加入率と比べると、大きく引き離された状態にある。

## 5Gの目標

5Gの3大主要目標は、以下のとおりである。

モバイルブロードバンドの高度化(enhanced Mobile Broadband: eMBB): 10Gbps以上のピークデータレートの提供。これは、拡張現実(AR)や仮想現実(VR)や「超高密度」動画といった新興技術とともに言及されることが多いが、実際には、顧客が求めるすべての情報に対応する帯域幅を提供することを意味する。それには、昔ながらの音声通話やテキストメッセージから、テレワーク接続、ゲーム機、壁サイズでハイダイナミックレンジ(HDR)のビデオスクリーン、高精細で高性能なパーソナルビデオやオーディオに至るまでのすべてが含まれる。これは、強化されたインターネットと考えることができる。「モバイル」と名付けられるかもしれないが、実際には固定ブロードバンドも提供する。

高信頼・低遅延通信(Ultra-Reliable and Low Latency Communications: URLLC): 99.9999%の信頼性とミリ秒レベルの遅延を実現するサービス。どちらも、自動運転車とその周囲にあるものすべて(他の車両、自転車、歩行者、建設現場、木など)の追跡と制

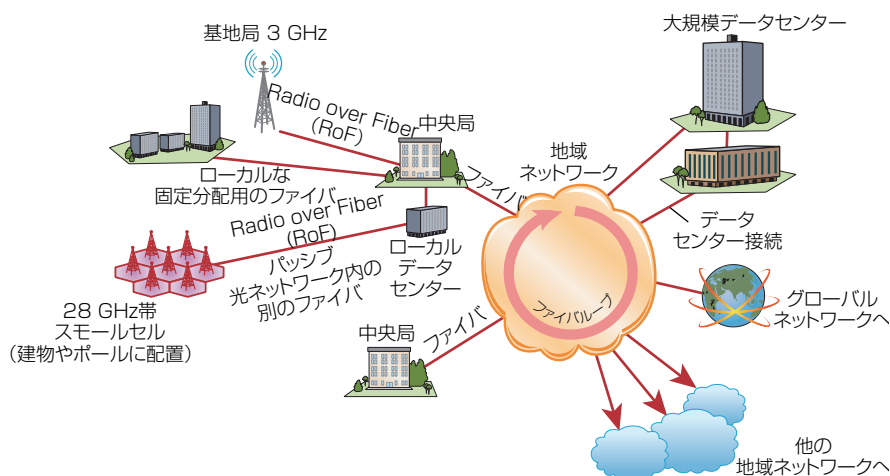


図1 5Gネットワークの簡素化された概念図。28GHz帯で動作するスモールセルは、ギガビットレートのブロードバンドサービスをローカルな目的まで伝送する。ラージセルは6GHz以下の周波数帯でより広いエリアをカバーする。アンテナはワイヤレス信号を受信し、ケーブルまたは固定ワイヤレスリンクを介して中央局に送信する。中央局では、さらなる処理と転送が行われる。低遅延が求められるサービスは、ローカルデータセンターに転送され、それ以外は、大規模なリモートデータセンターで処理される。

御に必要である。信頼性と迅速な応答は、家庭用医療機器などの他のデバイスに対しても不可欠な要素となる。

**大規模マシンタイプ通信 (massive Machine Type Communication : mMTC) :** 多種多様かつ大量のデバイスで構成されるIoT内のデータ伝送。1km<sup>2</sup>あたりのデバイス数は、数十万台にまで急増すると予想されている。多くの家庭で、サーモスタット、セキュリティカメラ、医療機器が既に接続されているが、より多くのデバイスが人間の介入なく絶えず互いに通信する状態を想定して、計画が進められている。

そのすべてが将来的に実現される。5G対応スマートフォンが2019年から販売開始されているが、帯域幅を飛躍的に拡大するだけのトランスミッターが実装されるまでには数年を要する。完全自動運転車やVRといった潜在的応用分野は、当初の計画よりも遅れた状態にある。しかし、これらの応用分野が結局軌道に乗らなかったとしても、動画配信の増加や画面解像度の向上といった既存のトレンドに対応するために、さらなる容量が必要になる見込みである。

## モバイルブロードバンドの周波数帯

5Gでは、新しい技術と、モバイル通信専用の無線周波数帯の拡大によって、帯域幅が拡大される予定である。周波数帯ごとに対象用途は異なる。以前はブロードバンドテレビや初期の携帯電話に占有されていた1GHz以下の周波数帯は、IoTからの低速データレート向けに、広域をカバーする代わりに限られた帯域幅を提供する。1～6GHzの周波数帯は、衛星リンク、携帯電話、WiFiなどの用途を対象に、より広い帯域幅を提供するが、周波数

が高いほど通信距離は短くなる。つまり、2.5GHzのWiFiのほうが5GHzのWiFiよりも通信距離は長い。帯域幅の増加に主につながるのは6GHz以上の新しい周波数帯で、米国では、27.5～28.35GHz、37～40GHz、64～71GHzが使用される。これらの高い周波数帯は、帯域幅は広いが通信距離がさらに限られるため、トランスミッターをユーザーの近くに配置する必要がある。ゲームや高解像度ビデオが、主な用途になると予想されている。

今日のセルラーネットワークでは、一般的に2～50kmの間隔でセルが配置される。地方に行くほどその間隔は広がる。都市部では高い人口密度に対応するために、0.4～4kmのエリアをカバーするマイクロセルが使用される。28GHz帯では伝送損失がはるかに高くなるため、5Gでは、マイクロセルに加えて、それよりも小さな数十mのエリアをカバーするピコセルと、カバーエリアはほぼ同じだがそれよりも消費電力が低いフェムトセルが使用される。これにより、多くのエリアで家庭から数軒の範囲内にアンテナが設置されることになる。

これらのセルのすべてに、一般的には多数の基地局からの信号を接続する中央局を介した、ネットワークへのバックホール接続が必要である。2015年の時点で、セルラーバックホールの約90%が銅ケーブル、6%が固定ワイヤレスマイクロ波、4%がファイバで接続されていた。さらなる帯域幅が求められる5Gに銅ケーブルは適さないため、その構成には変化が生じている。

図1は、新しいネットワークを簡素化して示したものである。28GHz帯の小セルは、ブロードバンド信号を短距離内で分配し、ラージセルは6GHz以下の周波数帯でより広いエリ

アをカバーする。アンテナまたは基地局に到達したワイヤレス信号は、ファイバなどのリンクを介して、無線またはデジタル形式で中央局まで伝送される。中央局の装置によって、無線信号のデコードやその他の処理が行われる。低遅延が求められる信号は、ローカルデータセンターに転送され、それ以外は、リモートデータセンターやネットワークコアにおける他の宛先に転送される。データのほとんどがファイバによって伝送されるが、固定ワイヤレスマイクロ波やフリースペースレーザーリンクが使われるケースもある。以下で説明するように、これらのシステムは現在開発段階にあり、何を選択するかは、コスト/性能面のメリットに依存する。

## ネットワークをアップグレードするための「プラグابل」モジュール

5Gハードウェアは、ネットワークコアに直接接続されるものではなく、伝送容量の大幅な増加を必要とする大量のデータトラフィックをもたらすものである。米シスコ社 (Cisco) の光学システム及び光学グループ担当上級副社長兼ゼネラルマネージャーを務めるビル・ガートナー氏 (Bill Gartner) によると、ファイバ伝送システムの拡張は、データセンター内と外部ファイバネットワークの2つに切り分けられるという。データセンター内のファイバは豊富で、伝送距離は短く10km以下で、それよりも短い場合も多い。「すべてのルーターまたはスイッチポートに専用のファイバが存在する。新しいスイッチまたはルーターを追加する場合は、新しいポートの終端として新たにファイバが追加される」とガートナー氏は述べた。従って、ポート密度の増加と、

新しい高速光学部品の大規模実装が必要になる。

シリコン集積回路の進歩に伴い、電子部品のビットあたりコストは着実に低下しているが、光学部品のビットあたりコストは、それと同等のペースでは低下していないと、ガートナー氏は述べた。従って、ビットレートの増加に伴って、ハードウェアコストに占める光学部品コストの割合は大きくなっていく。10Gbpsのデータセンターネットワークにおいて、光学部品がハードウェアコストに占める割合は10%だが、現在のペースでいくと、データレートが400Gbpsに達する頃には、ハードウェアコストの半分以上を光学部品が占めるようになると同氏は述べた。

光学部品のコストを制御するためのアプローチとして、シスコ社は、「プラグブル」な光学部品(オプティクス)の開発を推進している。プラグブルモジュールとは、光学部品や電子部品をパッケージ化した、信号を光形式から電子形式に変換するための標準化モジュールである(図2)。このモジュールの一端は、ルーター上の電気インタフェースに接続される電子モジュールで、もう一端は、出力ファイバに接続される光コネクタとなっている。このモジュールは、500mや2kmといった特定距離の性能を最適化する形式の光信号を生成する。データセンターの伝送は10km程度までに限られるため、プラグブルモジュールでは、コヒーレント伝送ではなく、1と0の直接検出を用いることによって、コストを抑える。

データセンターの外側の長距離伝送ネットワークでは、ファイバが不足しており、データレートは非常に高く、リピーターの間隔は80km以上である。これらのシステムでは、敷設済みのケーブルの容量を増加させるために、高

密度波長多重(Dense Wavelength Division Multiplexing: DWDM)とコヒーレント伝送を組み合わせた信号形式が望ましい。ガートナー氏によると、プラグブルでコヒーレントな光学部品は、ルーターやスイッチにおける接続を占有することがなく、通信事業者はネットワーク動作を自動化することができるという。

## RoF

ネットワークコアからアンテナまでのいずれかの地点で、デジタルデータをワイヤレス伝送用の無線信号に変換する必要がある。無線生成装置を基地局に実装することにより、これを行うことができる。それによって、出力信号をデータから無線に変換し、アンテナから受信したアナログ信号を無線か

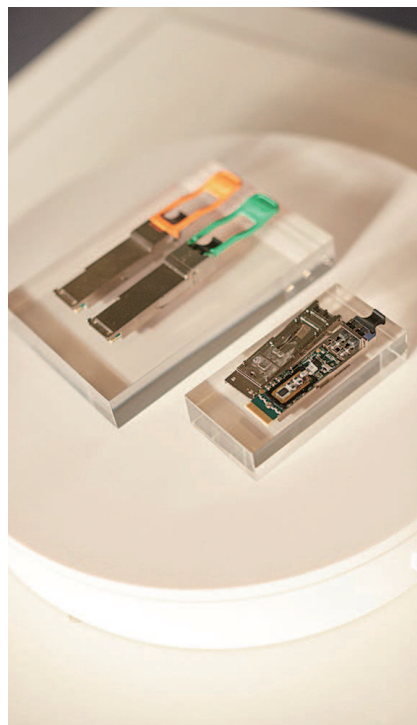


図2 シスコ社のプラグブルモジュールは、一端で電気入力を受信し、もう一端で光出力を送信することにより、信号を電子形式から光形式に変換する。写真は、カバーを付けた状態と外した状態のモジュールを示している。(写真提供:シスコ社)

らデータに変換することが可能になる。しかし、そのためにはこの装置を無線トランスミッタに実装する必要があり、実装コストは高額で、保守コストも余分に必要になる可能性がある。

その代替策となるRoF(Radio over Fiber)は、中央局またはその他の地域施設でデータを無線信号に変換し、その無線信号を、ファイバを介して基地局に光学的に送信できる形式に変換する。集中管理型のSDN(Software Defined Network)によって、中央局と送信局の間で信号を伝送するクラウド無線アクセスネットワーク(Cloud Radio Access Network: C-RAN)を構成することができる。実際には、RoFが最大のメリットを発揮するのは、機密機器による処理を必要とする複数の無線信号をアンテナが受信する場合である。無線信号は受信周波数で送信するか、送信しやすいそれよりも低い中間周波数に変換することが可能で、中央局でさらなる処理を行うことができるようになる。

## ファイバを どこまで敷設すべきか

最も近いワイヤレスブロードバンドトランスミッタまで、どのようにして信号を伝送するのが最良であるかは、まだ答えが見つかっていない大きな問題の1つである。28GHz帯で確実に信号を伝送するには、アンテナをおそらく100m以内に配置する必要がある。また、コンクリートやレンガの壁はそのような高周波数を遮断する可能性がある。

FTTH(Fiber To The Home)形式で、信号を家庭内(あるいは集合住宅の場合は敷地内)まで引き込んだほうが良いのだろうか。ベルギーのコンサルティング会社であるコムソフ社

(Comsof)の最高経営責任者(CEO)を務めるラフ・メールスマン氏(Raf Meersman)は、5Gファイババックホールの構築とFTTHの敷設を組み合わせるのが最良の方法だと考えている。同氏はFTTH Conference(オランダのアムステルダムにて2019年3月12～14日開催)において、高密度の高周波アンテナが必要になるため、5GとFTTHの間には相乗的な関係があると述べた。「最適化された将来対応のコンバージドファイバネットワークを展開することにより、5G(バックホール)のファイバコストの65～96%を削減することができる」と同氏は指摘した。

メールスマン氏の主張は、さまざまな密度レベルのワイヤレスセルを含む都市部、郊外、地方のモデルに基づいている。FTTHと5Gの28GHz帯のブロードバンドワイヤレスサービスの両方を提供する単一のネットワークを構築すれば、総コストを大幅に削減することに同氏は気づいた。「FTTHネットワークを直ちに5G対応にするために必要な追加投資は、(セルが高密度である場合でも)わずか1～7%である」と同氏は主張した。

それは興味深い意見である。ファイバブロードバンドに加入しているのは米国世帯の約15%にしかすぎないが、約40%の家庭にファイバが敷設されている。ファイバドロップケーブルを追加して5Gアンテナから既存のFTTHネットワークまでを接続できれば、通信事業者は敷設コストをかなり節約することができる。逆に、5Gアンテナを設置するために、とにかく家庭の近くまでファイバを敷設しなければならないという場合は、FTTH接続を追加することでそのコストの一部を回収することができる。

しかし、固定ワイヤレスリンクとフ

リースペースオプティクスは、少なくとも一部の地域において、敷設コストを大幅に削減することのできる代替策である。固定ワイヤレスは、これまでの世代のワイヤレス基地局で使われており、リースペースオプティクスはいくつかの用途で既に使われている。しかしどちらも、見通し線が確保されている必要があり、悪天候によって信号が減衰する可能性がある。

無線及び光周波数帯における固定ワイヤレス伝送は古くから利用されており、伝送のための高い建設コストを回避する手段となるが、性能が低く、ライセンスが必要で、コストが高いという、深刻な制約がある5Gによって、より集束されたビームを提供するMIMO(Multiple-Input, Multiple-Output)伝送や、高周波伝送など、無線周波数帯における新たな可能性が開拓されている(ただし、高周波伝送は距離に制約がある)。インド工科大(Indian Institute of Technology)のスマン・マリク氏(Suman Malik)とプラサント・クマール・サフ氏(Prasant Kumar Sahu)による最近の解析では、リースペースオプティクス伝送が、長距離における群速度分散とチャープに脆弱であることも明らかになった。両氏は、無線とリースペース光リンクを組み合わせれば、信頼性は高まる可能性があるが、コストが増加している。ワイヤレスリンクは、コストの削減につながる可能性があるが、深刻な性能の課題も抱えている。

リースペースレーザ通信を利用する新しい代替技術として、小型衛星のコンステレーションを低地球軌道に打ち上げるというものがある(米スペースX社[SpaceX]の「Starlink」など)。この構想では、地上局から衛星に送信された信号が、地上の目的地に送信でき

る地点まで、衛星間レーザーリンクを使用して世界中で中継される。その目標は、地上や海底のファイバケーブルでは十分なサービスが提供されていない地域に、ブロードバンドインターネットを提供することにある。

## 低遅延とその他の課題

ミリ秒遅延の追求も、大きな課題である。それは、自動運転車から家庭用医療監視システムに至るまでの用途における重大な目標だからである。ガラスの中の光速は約20万km/sで、それがクラウドコンピューティングセンターの必要最小遅延となる。1000km離れたデータセンターまでの往復だけで5ミリ秒が必要で、そこにはいずれかの端での処理時間は含まれていない。高速道路の速度で走行する自動車を操縦する場合や、医学的現象に反応する場合は、その時間が重要になる。

この遅延を低減するには、国全体を網羅するデータセンターのメッシュを構築する必要がある。データセンターは大規模でなくてもよいが高速でなければならない。研究者らはその速度を高める手段を模索している。そうした実験の1つとして、韓国電子通信研究院(Electronics and Telecommunications Research Institute)のファン・ソク・チャン氏(Hwan Seok Chung)とその同僚は、異なる波長のWDMチャネルのペアを結合して、25Gbpsのパケットを20kmの距離で400 $\mu$ s未満の遅延で並列に送信することにより、50Gbpsでのデータ伝送を行った。

5Gの成熟に伴って、さらなる課題が出現することが予想される。技術そのものにも確かに課題があるが、それよりも大きな課題は、回収に何年もかかる投資の資金を見つけ出すことかもしれない。