

マイクロ波・ミリ波フォトニクス技術の最新動向

Role of Microwave Photonics in Future Sensing and Mobile Services

川西哲也

Abstract

光技術により電波の発生・検波を行うマイクロ波・ミリ波フォトニクス技術は、通信の分野ではシステム構築の柔軟性や簡素化など、計測の分野では広帯域性や低じょう乱性などの利点があり、現在、国内外で活発に研究開発が進められている。次世代移動通信システムにおいて、ネットワーク接続された多数の基地局から成る構成が検討されており、光ファイバ通信と無線通信の更なる融合が期待されている。本稿ではこのような光と無線の融合領域の開発の方向性を議論し、マイクロ波・ミリ波フォトニクス技術の動向を紹介する。

キーワード：ファイバ無線，移動通信，5G，センシング

1. マイクロ波フォトニクス的な考え方

マイクロ波フォトニクス (MWP: Microwave Photonics) は光技術により高い周波数の信号波形の処理・伝送・発生・検出などを実現するための技術分野を指す。非常に狭義に解釈すると、マイクロ波 (3~30 GHz) の電波に相当するアナログ波形を光で取り扱うための技術ということになるが、マイクロ波が波長の短い波、送受信機デバイス内部でも波動性が顕著となる波長帯を意味するとすれば、ミリ波帯、テラヘルツ帯に至る高い周波数の無線波形のためのフォトニクス全般を含むものと言える。電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティにはこの分野をカバーする研究専門委員会があるが、新たな波長帯域への展開を明確にするためにその正式名称を「マイクロ波・ミリ波フォトニクス研究専門委員会」としている。

無線信号を発生、検出するために不可欠なデバイスはもちろん高速の電子デバイスである。マイクロ波・ミリ波帯、更にはテラヘルツ帯の信号に対応した発振器、検

波器、アンテナなどが最重要であることは言うまでもない。これに対して、不可欠な要素技術に見えないマイクロ波フォトニクスの役割は何であろうかという問いは何度となく繰り返されている。もちろん、学術分野の意義を問うことは議論を深める上で最も大切なプロセスの一つである。マイクロ波フォトニクス技術を使った方がよいのか、それとも、使わない方がよいのかという問いには定性的な答えを与えることはできない。マイクロ波フォトニクス技術の有用性は、システム構成、想定されるデバイスコストによって確定するものであり、定量的な議論が必須であるというのが特徴である。

マイクロ波フォトニクス的な考え方とは、光技術を是が非でも無線技術に導入しようとするものではなく、必要があれば光技術を使うこともいとわず、より広い視野で無線サービスのための高い周波数帯域の波形を操るための最適化を目指すというものである。詳細は後述するが、携帯電話サービスのための無線波形を光ファイバ通信で伝送するという技術が、幅広く用いられている。最新のシステムでは光ファイバ通信の高速性を生かし、波形をデジタル化して、伝送するという手法がとられている。しかし、デジタル伝送技術の高速化、低コスト化が進展する以前は、地下街などへの電波の再放射にはアナログ波形を光ファイバで伝送するという技術が用いられていた。より広帯域の波形の転送が必要となる第5

川西哲也 正員 早稲田大学基幹理工学部電子物理システム学科
E-mail kawanishi@waseda.jp
Tetsuya KAWANISHI, Member (Faculty of Science and Engineering, Waseda University, Tokyo, 169-8555 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.101 No.2 pp.131-137 2018年2月
©電子情報通信学会 2018

世代携帯電話システム、いわゆる 5G において、全て波形をデジタル化して、単純にデジタルで伝送するということが可能であろうか。これまでの方式をそのまま拡大すると、必要となる伝送速度がばく大となるため、今のところ、明確な答えは出ていないというのが実情であろう。波形そのものを伝送するのではなく、機能分界点を調整し、所要容量を抑えながら、システムの最適化を目指す取組みがなされているが、マイクロ波フォトニクス的な考え方も重要であろう。5G をはじめとする有線と無線の融合が必須のシステムが求められていることから、無線と光の境界領域をカバーするマイクロ波フォトニクス分野への注目は高まりつつある。

以下では、5G などの次世代移動通信システムで必要となる無線波形を転送するためのネットワーク技術、更には、環境から直接情報を集めてくるためのセンシング技術について、研究開発の例を挙げる。実用システムのために必要となるマイクロ波フォトニクスのためのデバイス開発についても動向について簡単に紹介したい。

2. ユーザの求めるオール無線

エンドユーザにとって端末とネットワークの接続は、有線と無線の選択肢があるとすると、コスト面の問題がなければ、無線接続の方が望まれるというのは議論を待たない。身の回りの接続を全て無線に、言い換えると、「オール無線」にしたいというのがユーザのニーズである。パソコンの普及段階では、据置型のパソコンが主力であったが、現在では、タブレット、スマートフォンなどの携帯端末がより身近な情報機器となり、有線接続のインターフェースは持たず、無線接続が前提となっていることも珍しくない。一方で、これらの無線サービスを提供するための多数の基地局を接続する光ネットワークの重要性は増すばかりである。

図 1 は筆者の作業中の机上を撮影したものであるが、各種の情報機器が短距離無線で接続されていることが分かる。有線 LAN インタフェースを持たないパソコンはスマートフォンによるテザリングにより、LTE でインターネットに接続されている。従来の無線システムはケーブルを引くことが困難であるところにおいても電気通信を実現するという目的を持っていた。短距離無線ではケーブルで接続することもできる。その手間を省くということが動機付けとなっているが、無線接続コストがケーブルを使う場合に比べて大幅にコスト高になれば、ユーザは有線接続を選択するであろう。無線接続に伴う消費電力の増大も大きなポイントである。常時電源接続が必要な場合、通信のみを無線化する意義が小さくなるためである。図 1 では、スマートフォンとパソコンが USB ケーブルで接続されているが、これは充電のためである。余りにも頻繁に充電が必要となれば、通信も



図 1 短距離無線を利用する身近な情報機器 パソコン、マウス、スマートフォンの全てが無線接続されている。

USB ケーブルで行えばよいということになる。

3. 有線・無線融合ネットワーク

光アクセスの置き換えのための無線通信に必要とされる要素はコストに加えて、伝送能力ということになる。高い伝送速度を実現するためには広い帯域が必要で、限られた電波資源の中でこれを実現するのは困難である。無線の利便性を損なうことなく、高速伝送を多数のユーザに提供する方法としては、なるべくユーザの近くにあるアンテナまで光ネットワークで情報を届けて、無線リンクを短くすることが有効であることは論を待たない^{(1), (2)}。

IoT を含む様々なアプリケーションをカバーする 5G においても、多数のセルをどのように効率的にネットワーク化するかというのが、無線伝送技術そのものに加えて大きな課題であると言える。基地局間をつなぐネットワークは、デジタル信号と無線信号を互いに変換するベースバンドユニット (BBU) とリモートアンテナユニット (RAU) をポイントツーポイントで結ぶモバイルフロントホール (MFH)、BBU 間のネットワークを構成するモバイルバックホール (MBH) に大別される (図 2)。

MBH ではベースバンドデジタル伝送、MFH ではデジタルまたはアナログによる無線波形の転送がなされる。いずれも、無線サービスのための光伝送システムであるが、MBH が無線で伝送したいコンテンツをデジタル伝送することが目的であるのに対して、MFH はコンテンツを無線伝送する際に必要となる無線波形そのものを伝送することが目的である点が大きく異なる。

無線波形の光ファイバによる転送技術がファイバ無線 (RoF: Radio-over-Fiber) である^{(2)~(5)}。MBH は一般的なデジタル信号伝送のためのネットワークと同等の機

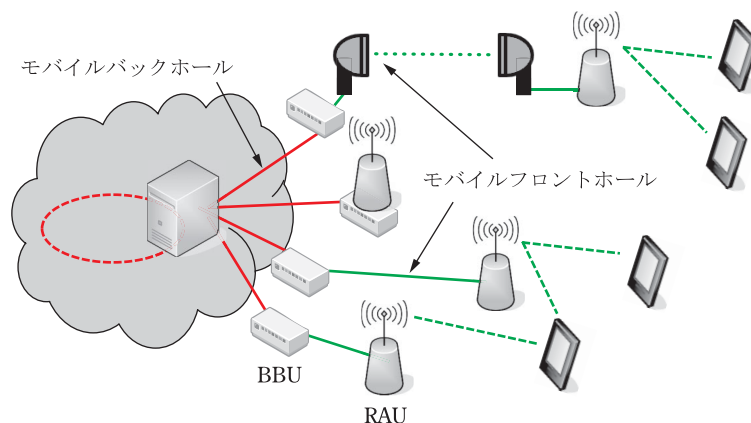


図2 モバイルバックホール (MBH) とモバイルフロントホール (MFH)
 MBHは無線装置本体に相当するBBU間を結ぶ。MFHはBBUとリモートアンテナユニット (RAU) をつなぐ。MBH/MFHの一部には固定無線が用いられることもある。

能を持つが、MFH無線信号波形を光で伝送するという点が特徴的であり、光と無線を結ぶ最前線を担っている部分であると言える。現在、LTEなどの既存のサービス向けのMFHでは波形をデジタル化して伝送する方式 (D-RoF: Digitized Radio-over-Fiber) が用いられている。これは、必要とされる無線波形の帯域幅が、低コストで高速伝送が可能な光ファイバ通信で十分カバーできる範囲に収まっているからである。

1. で述べたように、地下街への電波の再放射にアナログ波形 (A-RoF: Analog Radio-over-Fiber) が用いられていた。ケーブルテレビにおいてもA-RoFは大きな役割を果たしてきた。A-RoF, D-RoFの選択は、光ファイバ通信によるデジタル伝送、A-D変換、D-A変換に掛かるコストと帯域、アナログ波形伝送の性能などの要素により判断すべきで、簡単に二者択一できるものではない。

5Gではより広帯域無線信号の転送が必要で、現在広く使われているD-RoFをそのまま適用すると、Tbit/s級の伝送が必要と見込まれている。MFHはRAUでの信号処理を極限まで抑えて、BBUに必要なリソースを仮想化し、効率化を図ることを目的としているが、D-RoFによるMFHを用いることは所要伝送帯域の大きさで困難が伴うことが想定されている。そのため、BBUの機能の一部をRAUに持たせることで、BBUとRAU間の所要伝送帯域を削減するという考え方が検討されている。しかし、これは、RAUをシンプルにして、大量に配置するという考えと矛盾するもので、MFHで必要となる帯域とRAUの複雑さにトレードオフの関係があり、更なる検討が必要であろう。

一方、A-RoFはアナログリンクの性能の向上という課題があるが、RAUの構成をシンプルにすることができる。5Gで利用が検討されているミリ波を含む高い周

波数帯においては、光変調器、光検出器などの光・電気変換デバイスのコストや、ファイバ伝送中の分散の影響が問題となり得る。これに対して、無線で使う波形をそのものではなく中間周波数帯信号として送る方式 (IFoF: IF-over-fiber) が、性能と複雑さのバランスが取れた構成として研究開発が進められている^{(5)~(8)}。詳細については、本小特集の鈴木氏の記事を参照されたい。

我が国ではMBH/MFHには光ファイバ通信が用いられることが一般的であるが、世界的に見るとマイクロ波による固定無線なども依然として広く用いられている⁽⁹⁾。光ファイバに比べて伝送容量が小さく、4G, 5Gなどの高速モバイルサービスへの適用が難しいという課題があるが、ルーラルエリアなどへの展開が容易であるというメリットを生かすため、ミリ波帯の積極活用など固定無線の高度化について様々な検討がなされている⁽¹⁰⁾。我が国においても国土に対する面積比で見ると携帯電話サービスのサービスエリアは70%程度であることを指摘しておきたい⁽¹¹⁾。農林業向けのIoTや、更なる高速伝送を無線で実現するためには、ばく大な数の基地局を配置する必要がある。ネットワークへのアクセスが照明や冷暖房などと並ぶ基本的なインフラであるとすると、小さなセルの基地局の数は手元を照らすランプの数と同等、つまり、人口を超えるという状況を想像するのは難くない。光ファイバの設置が進み、その利用が容易とされる我が国においても、ばく大な数の基地局の全てを直接光ファイバ接続が可能であるかどうかは、議論の余地がある。5Gの普及が面的に広がり、本格化する際には、テラヘルツ波やミリ波による短距離高速無線リンクや、空間光通信システムの併用も検討する必要がある。

光ファイバ通信の性能はこれまでに飛躍的に向上して

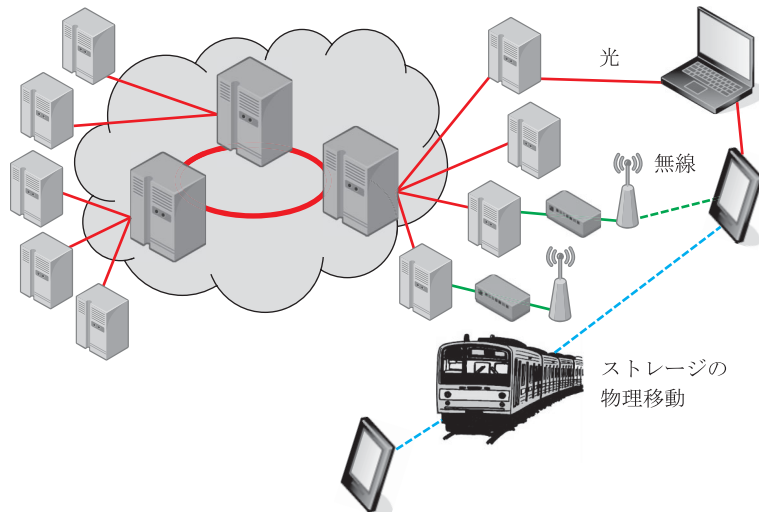
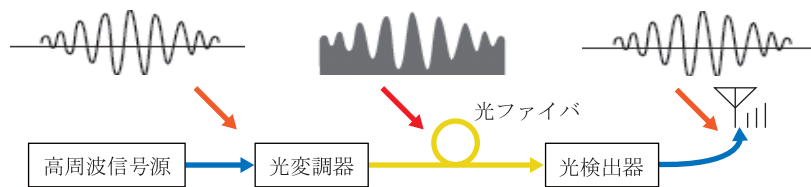


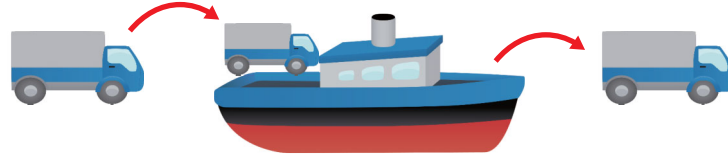
図3 様々な媒体によるデータ伝送 光ファイバ、無線伝送に加えて、ストレージの物理的移動も大量のデータを転送する能力を持つ。

情報を運ぶための電波波形ごと光で運ぶ
 → 光=電波の変換部が簡単に



(a) ファイバ無線の基本構成

荷物をトラックごとフェリーに乗せて運ぶ
 → 港での作業(荷役)が簡単に



(b) フェリー輸送でのアナロジー

図4 ファイバ無線の基本構成とフェリー輸送でのアナロジー 光ファイバで広帯域の伝送が必要となるが、異なる媒質をまたぐインターフェースの構成が簡単化できる。

きているが、記録メディアを物理的に輸送する方法に比べて伝送速度だけを見るとまだ圧倒的に優位とは言えない⁽¹²⁾。現在、図3に示すように、数十GByteのストレージを持ち歩くことが日常となっており、ストレージの物理的移動の効果も考慮すべきであろう。駅の改札に置かれた、テラヘルツ波を使ったキオスク端末で、大量のデータを瞬時にスマートフォンにコピーし、後でデータを使うといったシナリオがあり得る。移動中にモバイルネットワークで継続的にデータを転送する方式に比べて、電波資源の有効活用という視点と、消費電力の面でメリットがあり得る⁽⁴⁾。テラヘルツ波通信に関しては、

本小特集の永妻氏の記事を参照されたい。

4. 様々な伝送媒体をつなぐファイバ無線

2. で議論したとおり、より大量のデータをどこにいてもやり取りできるようにするためには、様々な周波数の電波、光ファイバ、空間光、更には、ストレージの物理的移動をも含む多種多様な伝送媒体を組み合わせる必要がある。また、端末の数、基地局の数も激増することが想定される。つまり、異なる伝送媒体のインターフェースが無数に存在するようなネットワークが出現す

るということになる。媒体 A と B の境界を考えた場合、既存技術で最も確実性が高い方法は、媒体 A の受信機で復調し、ベースバンド信号に変換し、それを媒体 B の送信機に入力するという構成であるが、変換装置が複雑となりデバイスコスト、信号処理遅延が課題となり得る。

図 4(a) にファイバ無線 (A-RoF) の基本構成を示した。上述の説明の、媒体 A を光ファイバ、B を電波としたときに相当する。ファイバ無線技術は光ファイバの低損失性と広帯域性を生かして無線通信のための波形を光信号として伝送し、信号をベースバンドに一旦変換することなく媒体の境界を越えることを可能とする。ほかにもミリ波でマイクロ波帯の信号を送る、更にはその信号を光に乗せるといった構成も考えることができる^{(5),(8)}。ファイバ無線の意義を説明するためのフェリー輸送によるアナロジーを図 4(b) に示した。広い伝送帯域を持つ光ファイバを通して光強度変化として無線波形を送る過程は、港での作業を省くために荷物を載せたトラックをそのままフェリーで運ぶということに相当する。伝送媒体が切り換わる場所が必ずしも処理の拠点若しくはノードとなる必要がないということを示す例である。船の運搬能力を最大限生かすことが必要であった時代には車ごと運んでしまうというのは非常識に思われていたかもしれない。現在では、荷役作業の効率化が重要視され、同様のコンセプトのコンテナが広く普及していることは周知のとおりである。

このような技術の開発が進むことで、信号波形を様々な伝送媒体をまたいで伝送させ、最も効率的な場所で信号処理を行うことができる柔軟性が高いシステムの実現が期待される⁽¹³⁾。一旦デジタル信号に戻す再生中継と比較して、信号品質の劣化が問題となるが、現在広く使われている光増幅器も同様の技術であると考えられる。光信号を直接的に増幅するとももちろん SN 比が低下するが、適切にシステム設計することで長距離信号伝送が可能となる。

5. 交通インフラ向けシステムへの応用

低コスト要求が高いアクセスネットワーク向けのアプリケーションに先行して、鉄道施設や空港などの重要インフラ向けのマイクロ波フォトニクス技術の開発が現在進められている。

図 5 に高速鉄道向けの光ファイバとミリ波を用いた高速通信システムの構成例を示す⁽¹⁴⁾。高速移動する車両と線路脇に設置された RAU の間で高速データ伝送を実現するためには、ミリ波などの高い周波数の利用が有効であるが、伝搬損が大きく、多数の基地局の設置が必要となる。この場合、問題となるのは基地局のコストと、基地局間のハンドオーバーによるスループットの低下である。開発中のこのシステムではファイバ無線によりこれらの課題を解決することを狙いとしている。ファイバ無線により、RAU の構成が簡単になるために、多数の基地局設置が容易になることと、光ネットワークを動的に制御し、列車の移動に合わせて RAU を切り換えることで、ハンドオーバーの発生を抑えることができる。一般的な移動通信システムでは、移動端末がどこにいるかを見つけることが重要な機能であり、そのためにかなりのリソースが割かれている。高速鉄道の場合、列車の位置情報を利用することが可能である。5G においてはミリ波を用いたスモールセルと従来の帯域によるマクロセルで高速伝送と制御の役割を分担することも考えられているが、上記のシステムは既に、ネットワークの制御と高速伝送のための媒体が異なるものを適材適所で組み合わせている例となっていると言える。

これまでの MBH は BBU と RAU を一対一で結ぶものであったが、図 5 に示した例のように、MBH にもネットワーク的な機能が導入されていくことは十分考えられる。また、MBH と MFH の概念も多種多様な伝送メディアが組み合わせられていくと、その区別、定義が単純ではなくなると考えている。図 5 の例では、エンドユーザ向けのアクセスポイントは列車内にある。これらを結ぶネットワークはいわゆる基地局間をつなぎ合わせ

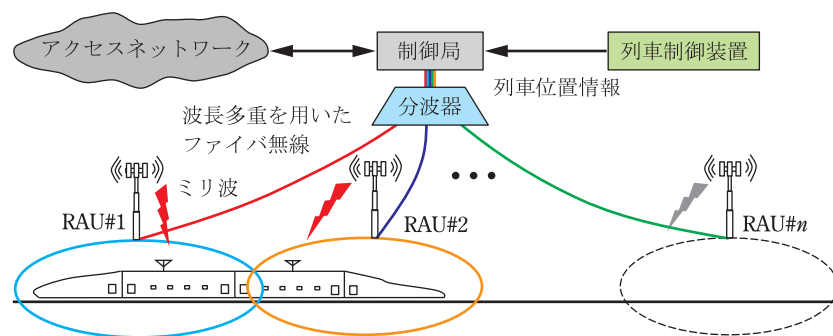


図 5 ファイバ無線による高速鉄道向け通信システムの例⁽¹⁴⁾ 波長多重による光ネットワークを制御し、列車の位置に相当するアンテナ (RAU) を動作させる。

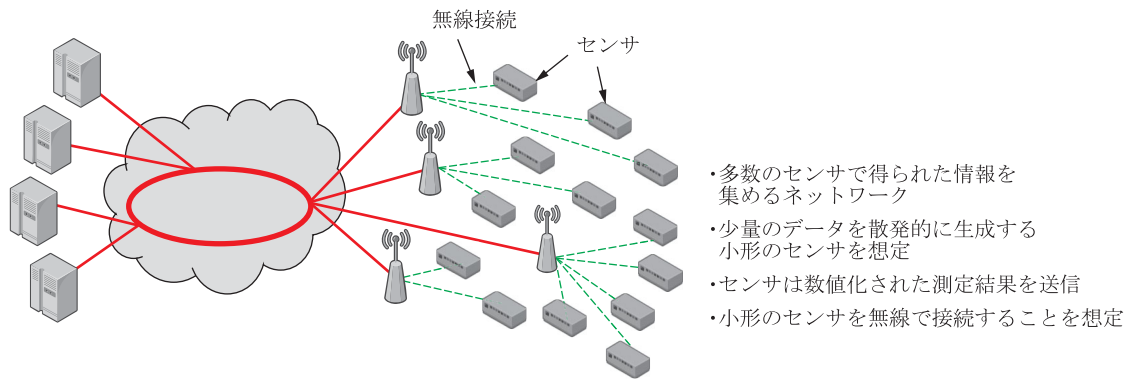


図6 センサネットワーク 多数のセンサからのデジタル情報を集める。

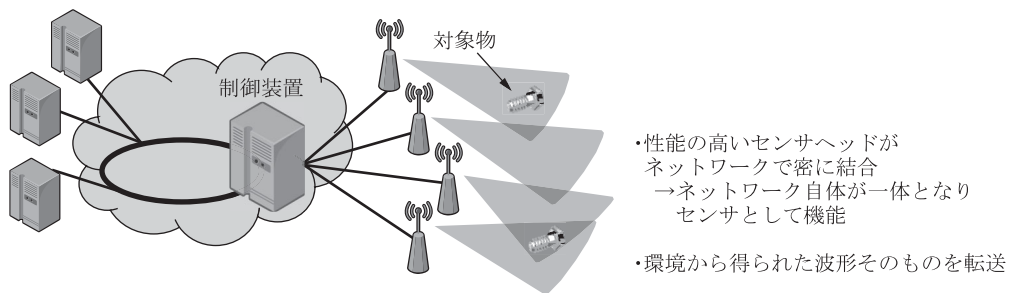


図7 ネットワーク全体がセンサとして機能する構成 光ネットワークによるセンサ環境から得られた波形そのものをネットワークで収集し、全体として高機能なセンシングを実現。



図8 成田空港にて実証実験中の滑走路監視レーダ

るものである。MBHと呼ぶべきものである。しかし、列車は高速移動するので、基地局自体が移動しており、移動している物体に対する通信という意味では移動体通信ということになる。移動体通信サービスのエンドユーザから見るとネットワーク構成上はバックホールである、一部が無線伝送となっている。光ファイバ部分は線路＝列車間の無線区間のための電波波形を伝送する役割を担っているという点では、列車自体をターミナルとみなした場合のMFHとして機能していると考えること

もできる。

以下では、ファイバ無線のセンシング技術への応用について紹介したい。図6に示すような、センサネットワーク (WSN: Wireless Sensor Network) がこれからのIoT時代を支えるコア技術として注目されている。多数のセンサで得られた情報を集めることが目的であり、基本的にデジタルデータを扱う。これに対して、最近、図7に示すような、ネットワーク全体がセンサとして機能する構成の検討がなされている。環境からの情報を波形として集めて、全体として高性能のセンシングを実現するというもので、ネットワーク上に高性能なセンサが実現していることになるので、ネットワークによるセンシング (SoF: Sensor over Fiber) と呼んでいる^{(15), (16)}。WSNがデジタルデータを集めるネットワークということでMBHに相当する機能を持つものに対して、SoFは波形そのものと伝送することを目的としているのでMFHに相当すると考えることもできる。

SoFの具体例としては、空港滑走路や鉄道設備内の異物を検出するためのレーダの開発が挙げられる⁽¹⁶⁾。対象物からの応答波形を光ファイバで伝送するというシステムである。複数のミリ波レーダヘッドが光ファイバで接続されており、数cmサイズの金属異物を数秒で検知する能力を持つ。詳細の説明は、本小特集の米本氏らの記事に譲るが、現在、成田国際空港にて実証実験が実施されている (図8)。

6. 今後の展開と集積デバイス技術への期待

最後にマイクロ波フォトニクス技術の課題と今後の方向性について述べたい。マイクロ波フォトニクスは電波と光という異なる媒体を自由に行き来することを可能とする技術であるが、性能とコストの要求にどのように応えていくかというのが大きな課題である。光ファイバに閉じた世界を行き交う信号ではなく、空中を飛び交う電波の質に直結する技術であるので、光デバイスに要求される制御精度が高いというのが一つの特徴である。例えば、従来の光のオンオフだけを用いていたファイバ通信で求められる光のオンオフ消光比は高々 20 dB 程度であったが、無線での不要ふく射抑圧はこれをはるかに上回るものが必要とされることが多い。

光ファイバ通信においても容量拡大のために様々な変調方式が開発され、無線で用いられるものとの差がなくなりつつある^{(17), (18)}。このような高精度光波制御技術を活用することで、光と電波を区別することなく扱うことが可能となりつつある。しかし、アクセスネットワークのような身近なところで幅広く利用していくためには、更なる低コスト化が要求される。また、IoT 時代に対応するためには国土の全てをカバーするような面的な展開が必要となる。

現状では、光デバイスのコスト面での課題は解決しているとは言えない。一方で、交通インフラなど、重要な拠点を集中的にカバーするためのシステムに対しては既に性能やコスト面で優位性を持つマイクロ波フォトニクスデバイスが生まれつつある。このような、重要インフラ向けハイエンドアプリケーションを先導開発し、デバイスコスト低減につなげ、アクセスネットワークでの面的な展開を狙うという戦略が有効ではないかと考える。

低コスト化に加えて、より高い周波数帯への対応も課題である。デバイスの集積化は、コストの低減のみならず、高い周波数の信号に対する安定性の向上に大きく寄与する。電子デバイスと光デバイスの集積についてはコンピュータ内の信号伝送を目的として、シリコンフォトニクスをはじめとするプラットフォームを用いて精力的に研究開発が進められている。詳細は本小特集の上條氏の記事に譲るがこれらの成果はマイクロ波フォトニクスにも適用し得るものであり、海外では集積マイクロ波フォトニクス技術に関するプロジェクトが盛んになっている⁽¹⁹⁾。今後国内外において、この分野が重要となっていくことは間違いないであろう。

謝辞 本稿準備するにあたり、日立国際電気加島謙一氏、柴垣信彦氏、電子航法研究所米本成人氏、鉄道技術総合研究所川崎邦弘氏、中村一城氏、情報通信研究機構山本直克氏、菅野敦史氏をはじめとする関係各位に、御議論の機会並びに資料の提供を頂いた。ここに謝意を表する。

文 献

- (1) 関 宏之, 箕輪守彦, “モバイルアクセスシステムの技術動向,” FUJITSU, vol. 63, no. 6, pp. 681-688, 2012.
- (2) 川西哲也, “5G ネットワークを支える光ファイバ無線技術,” ITU ジャーナル, vol. 45, no. 11, pp. 36-39, 2015.
- (3) 久利敏明, “ITU における光ファイバ無線の標準化動向,” ITU ジャーナル, vol. 45, no. 12, pp. 23-26, 2015.
- (4) T. Kawanishi, A. Kanno, T. Kuri, and N. Yamamoto, “Transparent waveform transfer for resilient and low-latency links,” IEEE Photonics Society Newsletter, vol. 28, no. 4, pp. 4-8, Aug. 2014.
- (5) P.T. Dat, A. Kanno, N. Yamamoto, and T. Kawanishi, “5G transport networks: the need for new technologies and standards,” IEEE Commun. Mag., vol. 54, no. 9, pp. 18-26, 2016.
- (6) M. Sung, S.-H. Cho, K.-S. Kim, H.-K. Kwon, B.-S. Kang, D.-S. Oh, D.-S. Lyu, H. Lee, S.-M. Kim, J.-H. Lee, and H.-S. Chung, “Demonstration of IFoF based 5G mobile fronthaul in 28 GHz millimeter wave testbed supporting giga-bit mobile services,” OFC 2017, no. W1C. 5, 2017.
- (7) B.-G. Kim, K. Tanaka, T. Kobayashi, A. Bekkali, K. Nishimura, H. Kim, M. Suzuki, and Y.C. Chung, “Transmission experiment of LTE signals by IF-over-fiber using commercial base station and deployed optical fibers,” ECOC 2016, no. W.4.P1.SC7.75, 2016.
- (8) P.T. Dat, A. Kanno, N. Yamamoto, and T. Kawanishi, “Full-duplex transmission of LTE-A carrier aggregation signal over a bidirectional seamless fiber-millimeter-wave system,” J. Lightwave Technol., vol. 34, no. 2, pp. 691-700, 2016.
- (9) “Mobile backhaul: Fiber vs microwave, ceragon networks,” Ceragon社 White paper, Oct. 2009.
- (10) “APT survey report on fixed wireless systems,” APT/AWG/REP-54, 2014.
- (11) A. Kanno, N. Yamamoto, and T. Kawanishi, “Radio over fiber-based radio relay link technology for in-door and in-car applications towards 5G/IoT era,” ACP 2017, 2017.
- (12) T. Kawanishi, A. Kanno, Y. Yoshida, and K. Kitayama, “Impact of wave propagation delay on latency in optical communication systems,” Proc. SPIE, vol. 8646, no. 86460C, 2012.
- (13) A. Kanno, P.T. Dat, N. Sekine, I. Hosako, N. Yamamoto, Y. Yoshida, K.-I. Kitayama, and T. Kawanishi, “Seamless fiber-wireless bridge in the millimeter-and terahertz-wave bands,” J. Lightwave Technol., vol. 34, no. 20, pp. 4794-4801, 2016.
- (14) P.T. Dat, A. Kanno, and T. Kawanishi, “Radio-on-radio-over-fiber efficient fronthauling for small cells and moving cells,” IEEE Wirel. Commun., vol. 22, no. 5, pp. 67-75, 2015.
- (15) T. Kawanishi, A. Kanno, and N. Yamamoto, “Concept of sensor over fibres and its application to high resolution millimetre-wave radar,” ICTON 2017, no. We.B6.3, 2017.
- (16) 総務省, 電波政策 2020 懇談会 報告書, 2016.
- (17) T. Kawanishi, S. Sakamoto, and M. Izutsu, “High-speed control of lightwave amplitude, phase, and frequency by use of electrooptic effect,” IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 13, no. 1, pp. 79-91, 2007.
- (18) 川西哲也, 高速高精度光変調の理論と実際, 培風館, 2016.
- (19) J.E. Bowers, T. Komljenovic, J. Hulme, M. Davenport, and C. Zhang, “Integrated photonics for MWP,” IPC 2016, no. MA1.1, 2016.

(平成 29 年 9 月 7 日受付)



かわにし てつや
川西 哲也 (正員)

平 4 京大・工・電子卒, 平 6 京大大学院工学研究科電子工学専攻修士課程了。松下電器勤務を経て, 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。同年京大 VBL 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 UCSD 客員研究員。平 27 早大・理工・教授。IEEE フェロー。