

ファイバ無線とテラヘルツ伝送技術についての展望

Study on high precision beam control method for optical phased array

川西 哲也
Tetsuya Kawanishi

早稲田大学理工学術院
Faculty of Science and Engineering, Waseda University

1. はじめに

第 5 世代移動通信システム (5G) のサービスが端緒についたばかりであるが [1]、すでにその次の世代の移動通信システム (6G) を目指した議論が活発化してきている。5G における大きな技術的特徴の一つとして、大容量データ伝送のための準ミリ波帯 (26GHz/28GHz) の利用をあげることができる。6G ではさらに高い周波数帯であるテラヘルツの活用が議論の対象となっている [2-4]。テラヘルツ帯は大気減衰が大きいと、用途が限られていると考えられてきたが、将来の移動通信システムでは個々の基地局がカバーする範囲 (セル) のサイズはさらに小さくなるのが想定されており、莫大な数の基地局を接続するためのネットワークが必要となる [2]。

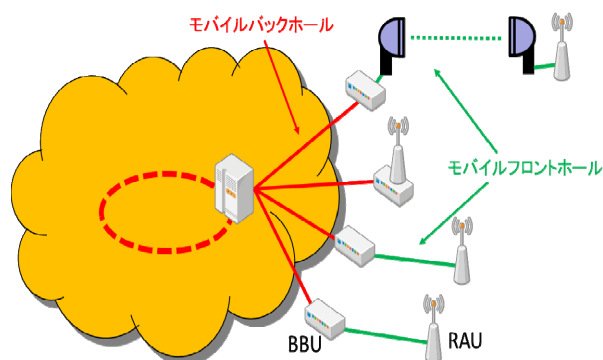


図 1 モバイルバックホールとモバイルフロントホール

図 1 に示すような、基地局 (信号処理を担う本体部分を BBU: Base Band Unit とよぶ) とコアネットワークをつなぐモバイルバックホール (MBH: Mobile backhaul) と基地局とリモートアンテナユニット (RAU: Remote Antenna Unit) を結ぶモバイルフロントホール (MFH: Mobile fronthaul) で、稠密なネットワークを構成する。6G ではアンテナ間、基地局間の距離が数 100 メートル以下となるため、テラヘルツ伝送技術でこれらをつなぐことが可能となり、MBH/MFH の一翼を担うことが期待される。一方で、テラヘルツ伝送と光ファイバ伝送をシームレスに融合することも重要であり、光ファイバ通信で無線波形を伝送するファイバ無線技術との組み合わせが期待される。

本稿では、テラヘルツ通信技術の研究動向とモバイル通信システムにおいて期待される役割、ファイバ無線によるフォトニックネットワークとの融合について考察したい。

2. 各種伝送媒体の組み合わせ

MBH/MFH においては、光ファイバ伝送、固定無線通信、衛星通信などの様々な伝送システムが適宜組み合わせられて利用されている。光ファイバ伝送は高速伝送に適しているのに対して、固定無線と衛星通信は、人口が希薄な地域にも容易に設置可能であるという特長がある [4, 5]。北東アジアや北米などの通信ネットワークの整備が進んでいる地域においては、光ファイバ伝送によるものが大半であるのに対して、サハラ以南のアフリカでは、光ファイバが占めるシェアは 10% 未満である。途上地域では、マイクロ波による固定無線のシェアが依然として大きい。このようなシステムの伝送容量は、利用可能な無線帯域幅の限界のために、光ファイバリンクよりもはるかに小さい。拡大し続けるモバイルデータ通信需要に対応するために、これらの固定無線による MBH/MFH リンクが引き続き光ファイバへと置き換えられていくことが予想されている。そのため、途上地域中心に MBH/MFH リンクに占める光ファイバ伝送の割合が急拡大する見込みである。

しかし、GSMA の予測 [5] によれば、北東アジアにおいて、今後、光ファイバ伝送のシェアが低下し、固定無線のシェアが反転増加するとされている。これは、従来のマイクロ波帯固定無線によるものではなく、ミリ波などを用いた伝送容量の大きい固定無線システムによるものとされている。これは、将来の移動通信システムでは、莫大な数のアンテナが MBH/MFH を通じてコアネットワークに接続される必要であるが、光ファイバ伝送だけですべての基地局を接続することは困難であり、一部は短距離固定無線システムが担うという推測に基づく。従来のマイクロ波固定無線は数十 km の長距離伝送に対応しており、固定無線のみでネットワークを構成することが可能であったが、ミリ波やテラヘルツ波による大容量固定無線では伝送距離が数 km 以下に限定されるので、光ファイバ伝送と組み合わせる用いることが前提となる。ミリ波・テラヘルツ波による無線伝送と光ファイバ伝送を多数接続した構成が必要となると考えられる。異なる伝送媒体のインターフェースを簡単化するためには後述するファイバ無線が有力な手段の一つである。

3. ファイバ無線

モバイルフロントホールでは無線サービスに必要な波形を、ネットワークを介して伝送するという機能を実現する。これにより、信号処理を担う BBU を複数の RAU で共有し、仮想化により効率的なシステム構成が可能となる。

最新の移動通信システムでは、無線波形の帯域幅が広く、また、搬送波周波数が高く、同軸ケーブルで長距離伝送するのは困難である。この課題を解決するために広帯域かつ

低損失という特長をもつファイバ通信で無線波形を伝送するファイバ無線 (RoF: Radio-over-Fiber) が広く用いられている。

ファイバ無線では無線波形をデジタル信号に変換し、デジタル光ファイバ伝送で伝えるデジタルファイバ無線 (DRoF: Digital Radio-over-Fiber) と光を無線波形で直接に変調するアナログファイバ無線 (ARoF: Analog Radio-over-Fiber) に大別される。前者は、デジタル信号に変換する部分が必要となることと所要帯域が大きくなるという課題があるものの、一般的な汎用のデジタル伝送技術を適用することが可能であり、従来の第 4 世代移動通信システム (4G) では広く用いられてきた。帯域幅 20MHz の標準的な無線信号 (LTE のキャリアコンポーネント) を広く普及しているフォーマットである CPRI (Common Common Public Radio Interface) を用いて DRoF を構成する場合、所要伝送レートは 1.23 Gb/s となり、低コストの汎用光伝送装置で複数のキャリアコンポーネント (CC) をカバーできる [4, 6]。最新の 4G 規格 (3GPP Release 13) ではキャリアアグリゲーション (CA) が 32 の CC を束ねるものに拡張されており、所要伝送レートが 40Gb/s となる。5G では MIMO や CA を併用すると 1Tb/s を超える容量が必要となると見込まれている。これを解決する手段として、BBU の機能の一部を RAU に移して、所要帯域を削減するという手法が開発されている。しかしながら、RAU の機能が複雑化するので、6G で想定される莫大な数のアンテナ設置の際には大きな課題となる可能性がある。

一方、ARoF では所要帯域を大幅に削減 (理想的なシステムでは無線信号帯域と同程度) できるが、線形性の確保などのアナログ伝送の性能確保が必要となる。これまで、ARoF と DRoF は互いに比較対象で、無線波形伝送に必要な所要帯域、性能と、低コストで入手可能な光伝送装置の兼ね合いで、適宜選択されてきた歴史がある。しかしながら、これら 2 つの方式の区別は曖昧となりつつある。デジタル技術の進展に伴い、もはやアナログ技術のみで発生、検出される波形はほぼ存在せず、一方、デジタル伝送技術の多値化の進展に伴い、これらのシステム構成の差はなくなりつつあるといえる [7]。ミリ波・テラヘルツ波を用いたシステムではさらなる広帯域化が必須で、デジタル・アナログの両方式の詳細比較やそれぞれの特徴を生かしたシステムの開発が望まれる。また、ネットワーク経由での高い精度での同期も重要である。テラヘルツ搬送波の光による発生や伝送については、光時分割多重 (OTDM) 向けなどに開発された超高速光信号発生・処理デバイスが活用できる可能性がある [8, 9]。

前節で述べたように、6G 向け MBH/MFH ネットワーク実現には、多数の短距離テラヘルツ固定無線と光ファイバ伝送の融合が必要であるが、ファイバ無線は、光とテラヘルツ波のインターフェースの単純化、低遅延化、低消費電力化に大きな貢献を果たすことが期待される [4]。

4. テラヘルツ伝送システムの設計例

300GHz テラヘルツシステムの設計例について議論する [10]。アンテナ利得は 50 dBi、送信電力は 20 dBm と仮定した。ノイズフロアは熱雑音レベルに等しいとし、288.15 K における熱雑音電力は、100GHz 帯域幅 (BW) システムに対

して -64.00 dBm となる。帯域幅 2GHz の場合、雑音電力は -80.99 dBm である。

4 値位相変調 (QPSK) の場合、必要な SN 比は約 10dB である。参考文献 [11] に示されているように、雑音指数を 15dB と仮定すると、必要な SNR マージンはおおよそ 25dB となる。変調速度 (ボーレート) は、THz 波が理想的なフィルタ処理された QPSK 波形によって変調されたときの信号 BW に等しいと仮定することができる。したがって、100GHz の BW リンクの伝送容量は 200Gb/s になる。ここでは、弱雨 (5mm/h) と豪雨 (50mm/h) 条件下での 200Gb/s 伝送に対する伝送可能距離を考察した。図 2 に示すように、1km 以上の伝送は、軽い雨の条件下では 300GHz リンクによって達成できるが、予想されるリンク距離は、豪雨の条件下では 780m となる。

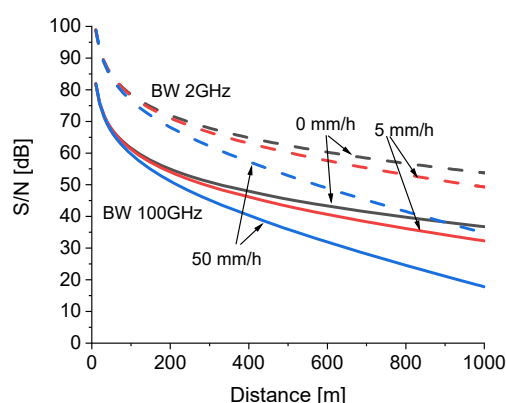


図 2 300GHz テラヘルツ伝送システムの SNR [12]

謝辞

本研究の一部は情報通信研究機構 高度通信・放送研究開発委託研究 (19601) の委託を受けて実施したものである。また、Thor (TeraHertz end-to-end wireless systems supporting ultra high data rate applications) project funded by Horizon 2020, the European Union's Framework Programme for Research and Innovation, under grant agreement No. 814523、科研費 (JP18H01454)、および早稲田大学理工学術院総合研究所の支援を受けて実施したものである。無線リンク性能の計算は、情報通信研究機構の稲垣恵三氏に協力いただいたものである。

参考文献

- [1] 5G PPP Architecture Working Group, View on 5G architecture.
- [2] T. Kawanishi, et al., IEEE Microwave Magazine, 19 (3), 102-111 (2018).
- [3] T. Kawanishi, IEEE/OSA J. Lightwave Technol. 37, 1671-1679 (2019)
- [4] T. Kawanishi, Wired and Wireless Seamless Access System for Public Infrastructure, Artech House, 2020.
- [5] Mobile backhaul options – Spectrum analysis and recommendations, GSMA Research Report (2018).
- [6] Common Public Radio Interface (CPRI) Specification V7.0 (2015).
- [7] X. Chen, et al., ECOC2019, PD 3.3.
- [8] A. I. Siahlo, et al., CLEO2005, CTuO1.
- [9] T. Kawanishi, et al., ECOC2006, We4.6.
- [10] 川西哲也, 信学会技報 SRW2020-24.
- [11] Report ITU-R SM.2450-0.
- [12] <https://doi.org/10.5281/zenodo.3933334>