無線基地局のための光ファイバ給電技術

松浦 基晴

電気通信大学(〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1)

Power-over-Fiber Technologies for Radio-over-Fiber Networks

Motoharu MATSUURA

University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585

(Received May 22, 2018)

In future radio-over-fiber networks, a huge number of distributed remote antenna units are required to provide various kinds of communication services. Power-over-fiber, which delivers the power required for driving distributed remote antenna units into optical fibers, is an attractive technology to provide cost-effective installation, operation, and maintenance and achieve the power saving in the entire networks. This paper introduces our recent works on power-over-fiber technologies for remote antenna units in radio-over-fiber networks.

Key Words: Power-over-fiber, Radio-over-fiber (RoF), Photovoltaic power converters (PPCs), Double-clad fibers (DCF), Multimode fibers (MMFs)

1. はじめに

スマートフォンの急速な普及やIoT(Internet of Things)の発展に伴い、無線通信のトラヒックは年率50%にも及ぶ勢いで増加の一途を辿っている¹⁾。このような状況から、第5世代移動通信システム(5G)では、無線通信の高速化を目的とした無線信号の高周波数化が進められている²⁾。その一方、無線信号の周波数が高くなると大気中での伝搬損失も増大するため、1つのアンテナ無線基地局でカバー可能な通信エリア(セルサイズ)は必然的に小さくなっていく。このため、これまで以上に多くの無線基地局を構築する必要性から、敷設・管理が容易な無線基地局の導入が重要な課題となっていく。

無線通信の高速化においては、光ファイバ通信の導入も重要となる。光ファイバ無線(Radio-over-Fiber: RoF)は、電波(無線信号)を光信号に変換し、光ファイバで伝搬する技術である。RoFは無線信号を遠方の無線基地局まで広帯域かつ低損失に伝送することが可能なため、今後の無線通信においては主流となる伝送技術である。

このような無数に敷設される無線基地局で重要になるのが電源の問題である。通信サービスを稼働させるためには、無線基地局にも必ず電力が必要になる。現状は通信回線とその関連設備は通信会社が管理・運営し、電力に関しては近隣の送電線からの引込みによる商用電源を利用するのが一般的である。このため、どちらかに障害が生じると通信サービスは停止する。とりわけ、落雷、大地震、台風などの自然災害などによる停電はその大き

な要因となっている。実際、2011年の東日本大震災においては、無線通信サービスの遮断要因の85.3%が停電による無線基地局への電力供給停止との報告がある³⁾。このため、通信会社としては電源設備も含めた通信と送電の一括管理を行えるシステムの構築が望まれる。また、無線基地局あたりの通信トラヒックは、ユーザの移動や活動時間によって大きく変動するものの、実際のシステムでは通信トラヒックの変動を考慮せず、想定する最大トラヒック量に対応可能な電力を常に供給している。このため、効率の悪い電力供給を行っているのが現状である。これに対し、例えば、夜間にユーザがほとんど不在のオフィス街などでは、セルサイズの小さい無線基地局を全て停止し、セルサイズの大きい無線基地局で僅かな通信トラヒックを賄うことで最大60%の電力削減を出来るとの報告もあり⁴⁾、より効率の良い電力供給を行う手段が求められている。このような電源の問題を解決する一手段として、著者らは、RoFと電力供給システムを融合した、無線基地局のための光ファイバ給電技術の研究開発を進めている。

光ファイバ給電は、レーザーからの出力を給電光として光ファイバ伝送することで、末端の装置を給電光の光エネルギーで駆動する電力供給システムである。有線電力伝送という位置づけになるが、組成材料がガラスであることから、従来の電気ケーブルによる電力線と比較して、軽量で耐腐食性に優れるなどの特長がある。また、無誘導媒質のため、電気を通さない電力線になる。このため、無線基地局などの高所にアンテナを敷設する設備

においては、雷害の際、光ファイバで接続された通信設備への逆電流の被害を阻止する役割を果たすことが可能である。また、光ファイバ給電は複数の無線基地局を管理する中央局から送電されるため、それぞれの無線基地局の通信トラフィックに応じた電力制御も容易に行うことが可能である。さらに、電源設備の一元化によって電力設備の管理が格段に容易になる特長がある。一方、標準的な光ファイバの外径は人間の髪の毛程度の太さ(125 μm)で、光の通り道であるコアはそのさらに1/10程度の太さであるため、高出力の給電光を送電することが困難である。例えば、遠隔のカメラを駆動する光給電カメラシステムでは、監視用カメラシステムとして、給電用および映像信号用の2本の光ファイバで伝送を行う構成で最大400 mWの出力光パワーを送電している⁵⁾。また、山間部などの電力を自由に確保出来ない場所において、受信点で受信した放送波を、光給電で駆動する光送信器を用いて送信所に伝送する無給電光伝送装置がある。これも給電用および信号用の光ファイバを別にして、最大300 mW程度の出力光パワーを送電している⁶⁾。いずれにおいても遠隔地に供給可能な電気電力は100 mW以下である。これに対し、著者らが提案している光ファイバ給電では無線基地局の駆動を目的としているため、最低でも数Wの電気電力を供給する必要がある。

本論文では、無線基地局の駆動を目的とした光ファイバ給電技術について、著者らの取り組んでいる研究成果を解説する。

2. 給電用光ファイバ

無線基地局向けの光ファイバ給電においては、既存の光アクセス系の光ファイバ敷設状況を考慮した導入が重要である。このため、以下2つの条件を満たすことを前提として、研究開発を進めている。第一に、1本で信号と電力の同時伝送が可能な光ファイバを使用する。光アクセス系の光ファイバ敷設においては、無線基地局も含めた終端装置の数が膨大で、将来的な増設の必要性からも余分な光ファイバを敷設する余裕はないため、給電用の光ファイバを別途敷設するのは現実的ではない。このため、1本の光ファイバで信号と電力の同時伝送を行える光ファイバが必要となる。第二に、使用する光ファイバのクラッド外径は現在敷設されている光ファイバと同じ125 μm とする。現在の光アクセス系では全て、クラッド外径125 μm で規格化された構成になっているため、新たに導入される給電用の光ファイバにおいても、これに準拠したものを使用することが望ましい。

Fig. 1 に上記の条件を満たす4つの光ファイバの断面図を示す。単一モード光ファイバ(Single-Mode Fiber: SMF)は光ファイバ通信で最も利用されている光ファイバであるが、先述の通り、コア直径が10 μm と小さいため、高パワーの伝送には不適で供給可能な電力

Fig. 1 Cross section of various optical fibers for power-over-fiber. (a) Single-Mode Fiber (SMF), (b) Multimode Fiber (MMF), (c) Multi-Core Fiber (MCF), and (d) Double-Clad Fiber (DCF).

は100 mW以下である^{1),2)}。RoF伝送用の光ファイバ給電への検討も行われていたが、小型の無線LANスポットなどの数十 mWの電力で駆動可能な基地局を目的としていた⁵⁾。多モードファイバ(Multimode Fiber: MMF)も汎用性の高い光ファイバだが、コア径が大きいため、光信号が伝搬する際に発生するモード分散によって伝送帯域が制限されるという問題がある^{6,7)}。また、SMFやMMFのような単一コアの光ファイバで信号と電力の同時伝送を行う際には、膨大なパワーを有する給電光の強度揺らぎや雑音等が信号光にクロストークを与える場合がある。マルチコア光ファイバ(Multi-Core Fiber: MCF)は、クラッド内に複数のコアを有する光ファイバである。製造工程は複雑であるが、1本の光ファイバでコア数分の伝送路を確保することが可能である。光ファイバ給電においては、信号光を1コア、給電光を他の複数コアを利用することが可能で、これまでにMCFを用いて電気増幅器を内蔵した光電変換モジュールを駆動する実証実験も報告されている⁷⁾。これらに対して、著者らは、ダブルクラッド光ファイバ(Double-Clad Fiber: DCF)を用いた光ファイバ給電を提案している。DCFはFig. 1 (d)に示すように、単一モード(Single-Mode: SM)コアの外側に内部クラッドを有する2重コア構造の光ファイバである。信号光をSMコア、給電光を内部クラッドで伝送することで、信号光はSMFと同様に広帯域伝送が可能とし、給電光については、大口径の内部クラッドを用いる。これにより、他の光ファイバと比べて、パワー伝送用のコア面積を格段に大きく確保することが可能である。本論文では、著者らが提案しているDCFを用いた光ファイバ給電技術と、MMFでのモード分散および給電光クロストークの抑制を可能とする光ファイバ給電技術を解説する。

3. DCFを用いた光ファイバ給電技術

DCFはこれまで主に光ファイバ増幅器や光ファイバレーザーの利得媒質として利用されてきた。SMコアに希土類元素を添加し、高パワーの励起光を内部クラッドに入射することで高利得が得られる構成となっている。一方、光ファイバ給電用のDCFでは、伝送媒質として利用するために、SMコアに希土類元素を添加しないDCF

¹⁾ 古河電工：光給電カメラ <https://www.furukawa.co.jp/fitel/system/products/unit.htm>

²⁾ NHKアイテック：無給電光伝送装置 <http://nhkitec.com/images/catalog/001.pdf>

を用いる。これまでに著者らが報告してきたいくつかの成果があるが⁸⁻¹³⁾、本論文では最近報告したマルチチャネル伝送の実証実験¹³⁾について以下に解説する。

Fig. 2 に実験構成を示す。基本構成は中央局(Central Office: CO)と無線基地局(Remote Antenna Unit: RAU)間を想定したRoFの下り伝送になっている。信号光には単一チャネルの光アナログ信号(Ch. 3)と4チャネルの光デジタル信号(Ch. 1, 2, 4, 5)を用いており、それぞれのチャネル間隔は一般的な波長多重伝送を想定した100 GHzで配置されている。光アナログ信号は、半導体レーザー(Laser-Diode: LD)からの出力をLiNbO₃変調器(LiNbO₃ Modulator: LNM)によるアナログ変調で生成している。データ信号には無線LAN規格に準拠したキャリア周波数5.2 GHzの信号を使用している。光デジタル信号は波長の異なる4台のLD出力を1台のLNMを用いて、4チャネルの伝送速度10 Gbit/sのNRZ-OOK (Nonreturn-to-zero, On-off keying)信号を生成している。これらの信号は増幅後、光カプラ(Optical Coupler: OC)を用いて合波され、クラッドモードストリッパ(Cladding Mode Stripper: CMS)に入力される。このCMSは給電光の反射成分がDCF入力側のSMFに出射させないために用いている。給電光には、波長808 nmの2台の高出力レーザー(High-Power Laser-Diode: HPLD)を用いて、合計60 Wの光パワーをDCFに入力している。信号光と給電光はテーパファイババンドル型の合波器(Tapered Fiber Bundle Combiner: TFBC)で合波される。この際、信号光はそのままSMコアを伝搬し、給電光はテーパファイバによって、DCFの内部クラッドに入射される構成となっている。実験に使用したDCFは伝送路長300 mで、SMコア直径が9 μm 、内部クラッド直径が105 μm のものをを使用した。伝送後、信号光と給電光はテーパファイババンドル型の分波器(Tapered Fiber Bundle Divider: TFB)で分波される。合波器同様、信号光はそのままSMコアを伝搬するが、給電光は6本のテーパファイバによって、内部クラッドから給電光成分を取り出している。この構成でおよそ70%の給電光を6本のMMFで抽出している。残りの30%はTFBDを透過し、後段のCMSで吸収されている。それぞれのMMFは6台の光電変換素子(Photovoltaic Power Converter: PPC)に接続され、電気電力に変換している。CMSを通過した信号光は、それぞれの受信器に

分波され、フォトダイオード(Photo-Diode: PD)で電気信号に変換された後、アナログ信号はシグナルアナライザ(Signal Analyzer: SA)を用いたエラーベクトル振幅(Error Vector Magnitude: EVM)の評価、デジタル信号は符号誤り率検出器(Bit Error Rate Tester: BERT)を用いた符号誤り率(Bit Error Rate: BER)の評価によって、給電光パワーに対する伝送品質の測定を行っている。

Fig. 3 に給電光のパワー伝送特性を示す。(a)はHPLDの出力光からPPC前段までの光パワー伝送効率、すなわち、伝送系全体の損失を示す。(b)はHPLDの出力光からPPCで変換された電気電力までの伝送効率を示す。図より、伝送系においては、平均でおよそ48.5%のパワー

Fig. 3 (a) Power transmission efficiency and (b) Power delivery efficiency as a function of total optical feed power.

Fig. 2 Experimental setup for multichannel data transmission with 60-W power-over-fiber feed using a DCF.

が伝送されていることになる。そのうち、およそ半分が300 m DCFでの伝送損失で、残りの半分がTFBDでの分岐損失になる。電気電力の伝送効率については、実験に使用したPPCの光電変換効率がおよそ25%だったため、平均でおよそ11.7%となった。これにより、60 Wの給電光入力下で、7 Wを超える電気電力を光ファイバ給電で送電することが可能であることがわかった。この値は従来技術の100倍に匹敵する給電能力を有しており、小型の無線基地局であれば、単独駆動も可能な電気電力を供給可能であることを示している。

併せて、給電下における信号光の伝送品質の評価も行った。光アナログ信号においては、元信号(Back-to-back)に対するEVMペナルティ評価で、給電光パワーによらず、ペナルティが0.04%以下となった。光デジタル信号においては、元信号に対するパワーペナルティ評価で、全ての伝送信号でペナルティが0.17 dB以下を達成した。これらのペナルティの値は誤差レベルに相当するほどに小さいものであることから、全てのチャンネルにおいて、給電光の有無に影響されない高い伝送品質を得られることを示しており、DCFによる光ファイバ給電技術の有効性を明らかにしていると言える。

4. MMFを用いた光ファイバ給電技術

DCFを用いることで、従来技術と比較して、高パワーな電力伝送を実現したものの、汎用性の高い光ファイバによる給電技術の検討も重要である。そこで、著者らは、MMFを用いた光ファイバ給電技術の研究開発も行っている。先述したように、MMFで問題となるのが、信号光の帯域制限の要因となるモード分散と、同コア内を伝搬する給電光の強度揺らぎや雑音等によって発生する信号光へのクロストークの影響である。実際に先述のMMFを用いた光ファイバ給電技術では、信号光と給電光を異なる光ファイバを用いて伝送している^{6,7)}。この問題を同時に克服するため、著者らは、MMFへの光ビーム入射法を利用した抑制法^{14,15)}に着目をした。信号光や給電光がSMFで生成・伝搬された際、伝送路になるMMFに信号光が入射されることになるが、ここで信号光のビーム入射位置を調整することで伝送する伝搬モードの大まかな制御を行うことが可能である。1つがMMFのコア中心軸からおよそ10 μm ほど離れた位置でSMFからの光ビーム入射を行うことで、信号光を高次モードで

伝搬可能なオフセットラウンチ(Offset Launching: OL)である¹⁴⁾。また、ビーム入射位置を中心軸に合わせ、SMFとMMFの間に中間コア径のファイバを挿入するか、融着接続の際の融着条件を調整することで、SMFとMMF間のコア径差に段階を付けてビーム入射し、低次モードでの伝搬を可能にするセンターラウンチ(Center Launching: CL)がある¹⁵⁾。いずれの場合も伝搬モードに制約を与えることになるため、モード分散の抑制が可能である。そこで、著者らは、信号光に対してOLによる高次モード伝搬、給電光に対してCLによる低次モード伝搬を行うことで、MMF内で発生する信号光のモード分散を抑制しつつ、両者の伝搬モードの違いを活用した融合技術によって、給電光によるクロストークも抑制するという手法を新たに提案した¹⁶⁾。

Fig. 4に実験構成を示す。信号光には、波長1310 nmのLD出力をLNMで変調することで生成した光アナログ信号を利用した。信号光は半導体光増幅器(Semiconductor Optical Amplifier: SOA)で増幅後、モードコンディショニングパッドコード(Mode Conditioning Patch-code: MCP)に入射した。MCPは挿入図にあるように、SMFとMMF間をおよそ10 μm の軸ズレで接続された受動素子で、市販品の光ファイバコードとして容易に入手可能なものである。これにより、信号光をOLの状態状態でMMF内に入射させている。一方、給電光には波長1550 nm、最大出力10 Wの高出力光ファイバレーザ(High-Power Fiber Laser: HPFL)を使用した。本研究では長距離伝送の際にも給電光の高いパワー伝送効率を得るため、最も伝送損失の低い1550 nm帯の光源を使用した。CLについては、HPFLのSMF出力とMMF伝送路間の融着接続の際に、融着回数を調整し、CLの条件に合うように設定した。マルチモード波長多重コプラ(Wavelength Division Multiplexing Coupler: WDMC)で信号光と給電光を合波後、コア直径62.5 μm のMMFを2 kmもしくは4 km伝送し、再度WDMCで分波を行った。給電光は光パワーメータ(Optical Power Meter: OPM)に入射され、伝送された給電光パワーを測定し、パワー伝送効率を評価した。信号光はPDで電気信号に変換された後、SAでEVMによる信号品質評価を行った。

給電光のパワー伝送効率の評価においては、2 km伝送では73%、4 km伝送では60%となり、DCFと比較して高い伝送効率を得た。その要因としては、給電光波長が1550 nmで、WDMCの挿入損失がTFBDよりも小さい

Fig. 4 Experimental setup for RoF transmission with 10-W power-over-fiber feed using an MMF.

Fig. 5 EVM value as a function of feed light power in 4 km downlink transmission.

ためである。このため、給電光の波長も含め、kmオーダーのパワー伝送においては、MMFによる光ファイバ給電の方が有利と言える。

Fig. 5 に4 km下り伝送でのEVM特性を示す。図中の点線は光ファイバを伝送する前の元信号(Back-to-back)の信号品質であるEVMを示しており、伝送後の信号はこれを基準にどのくらい信号品質が変化しているかを評価している。給電光パワーが小さいときにはほとんど差異はないが、給電光のパワーが増大するとOLのない(代わりにCLを用いた)信号光の場合は、EVMの値が急激に劣化し、給電光パワー6 W以上ではEVMの測定も不可能となった。これに対し、給電光パワーの影響があるものの、OLを用いた場合は、10 W給電下で4 km伝送することが達成された。これにより、OLを用いることで給電光によるクロストークが抑制されているのが確認された。尚、上り伝送については、給電光と信号光が逆方向に伝送するため、給電光の強度ゆらぎや雑音の影響は対向して伝送するうちに平均化され信号品質にほとんど影響を与えない。このため、OLの有無によらず、クロストークは確認されなかった。

5. まとめ

無線基地局の駆動を目的とした光ファイバ給電技術について、著者らの研究成果を中心に解説した。光ファイバの特徴を活かした伝送技術を活用することで、従来技術を大きく凌駕する給電能力が得られることを示した。ここ最近、高出力レーザーや光電変換素子の高性能化が急速に進んでいる状況になってきている。これらの進歩も後押しとなり、光エネルギーを用いた給電技術全般が大きく発展していくことを期待したい。

参考文献

- 1) Cisco System Inc.: Cisco Visual Networking Index, White Paper (2017).
- 2) NTTドコモ：ドコモ5Gホワイトペーパー(2014).
- 3) 陰井 敬義：東海防災情報セミナー資料(2015).
- 4) K. Sone, I. Lim, X. Wang, Y. Aoki, H. Seki, and J. C. Rasmussen: *Proc. 21st Opto-Electronics Commun. Conf., 2016* (IEICE, Niigata, 2016) TuA4-2.
- 5) T. Miki, K. Kawano, N. Nakajima, N. Kishi, M. Miyamoto, and T. Aoki: *Proc. 8th Opto-Electronics Commun. Conf., 2016* (Shanghai, China, 2003) 16D3-4.
- 6) D. Wake, A. Nkansah, N. J. Gomes, C. Lethien, C. Sion, and J.-P. Vilcot: *J. Lightwave Technol.* **26** (2008) 2484.
- 7) C. Lethien, D. Wake, B. Verbeke, J.-P. Vilcot, C. Loyez, M. Zegaoui, N. Gomes, N. Rolland, and P.-A. Rolland: *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** (2012) 649.
- 8) T. Umezawa, K. Kashima, A. Kanno, A. Matsumoto, K. Akahane, N. Yamamoto, and T. Kawanishi: *J. Quantum Electron.* **23** (2017) 3800508.
- 9) J. Sato and M. Matsuura: *Proc. 18th Opto-Electronics Commun. Conf., 2013* (IEICE, Kyoto, 2013) TuPO-8.
- 10) M. Matsuura and J. Sato: *IEEE Photon. J.* **7** (2015) 7900609.
- 11) M. Matsuura, H. Furugori, and J. Sato: *Opt. Lett.* **40** (2015) 5598.
- 12) M. Matsuura and Y. Minamoto: *J. Lightwave Technol.* **35** (2017) 979.
- 13) D. Kamiyama, A. Yoneyama, and M. Matsuura: *IEEE Photon. Technol. Lett.* **30** (2018) 646.
- 14) L. Raddatz, I. H. White, D. G. Cunningham, and M. C. Nowell: *J. Lightwave Technol.* **16** (1998) 324.
- 15) D. Sim, Y. Takushima, and Y. C. Chung: *J. Lightwave Technol.* **27** (2009) 1018.
- 16) H. Kuboki and M. Matsuura: *Opt. Lett.* **43** (2018) 1057.