

光給電で駆動する光ファイバ無線アンテナ基地局に関する研究

代表研究者 松浦基晴 電気通信大学 先端領域教育研究センター 特任准教授

1 研究の目的

スマートフォンや動画コンテンツの普及に伴い、より高速な無線通信の整備が必要不可欠になってきている。これに伴い、アンテナ無線基地局の小セル化も進み、将来的に人口密集地では膨大な数の基地局が必要になる。このため、基地局をいかに簡易化し、敷設・運用コストを抑えるかが重要な技術課題となってきている。光ファイバ無線伝送は、無線信号を光信号に変換し、光ファイバを用いることで無線信号を低損失かつ広帯域に遠方まで伝送する技術であり[1-3]、将来の無線通信の高周波数化や基地局の簡易化に役立つ技術として注目を集めている。一方、アンテナ基地局においては、無線信号を送受信するための電力を必要とするため、通常は電力供給に送電線やバッテリーなどの外部電源を利用しているが、基地局の数が膨大になってくると、これらの付加的な設備が敷設・運用コストを抑える上での大きな足枷となってくる。さらに、緊急災害時などで停電になった際には、基地局近隣からの送電線による電力供給は困難となるおそれがある。このため、緊急電源設備を配備している無線通信制御局からの基地局への送電を行うことが出来れば、光ファイバ無線が緊急災害時の災害情報の入手や家族との安否確認を行う際の重要な通信手段として活用することが期待出来る。また、光ファイバは無誘導な伝送媒体なので避雷対策としても有効である。

本研究では、一芯の光ファイバ伝送路で無線信号の上り・下り通信だけでなく、光エネルギーを基地局側まで伝送することで、送電線やバッテリーからの電力供給を用いることなく駆動可能な光ファイバ無線アンテナ基地局の開発を行った。光給電型光ファイバ無線伝送に関する研究は、これまでも、いくつか報告があり[4, 5]、我々の研究グループにおいても、2 kmの単一モード光ファイバを用いた実験報告を過去に行っている[6]。これらの大きな問題点としては、標準的な光ファイバではコア径が小さいため、光エネルギー伝送には向かず、2 W (ワット) 程度の給電光を信号光と同時伝送すると、大きなクロストークにより、光ファイバ無線伝送の伝送特性を劣化させてしまうという問題点があった。また、コア径が小さいことで、伝送路も含めた光ファイバ回路部品の光パワー耐性が低いことから、光ファイバヒューズや破断などが起きやすい欠点があった。これらの問題を解決すべく、本研究では、二重のクラッド構造により小径と大径のコア径を有するダブルクラッド光ファイバを用いた光給電型光ファイバ無線伝送を構成し、実際に光給電を行った状態での光ファイバ無線伝送の伝送特性評価を行い、その有効性を調査した[7]。

2 光給電型光ファイバ無線伝送

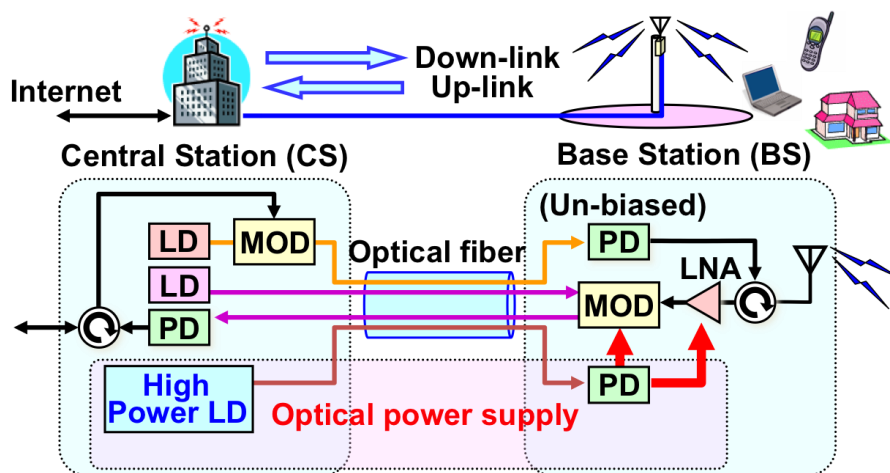


図 1 : 光給電型光ファイバ無線伝送の基本構成

図1に光給電型光ファイバ無線伝送の構成を示す。基本構成は制御局(CS: Central Station)と基地局(BS: Base Station)間を無線信号が光ファイバ伝送している。制御局では、無線信号をレーザ(LD: Laser-Diode)と光変調器(MOD: Modulator)で光アナログ信号に変換し、光ファイバ回線を利用して、基地局まで下り伝送(Down-link)している。受信信号はフォトダイオード(PD: Photo-Diode)で電気信号に変換され、サーキュレータを介し、アンテナから無線信号として出射される。上り伝送(Up-link)では、アンテナで受信した無線信号がMODを介して、光アナログ信号に変換する。この際、光源となるLDは基地局での消費電力を極力抑えるために、LDを制御局側に配備している。光ファイバ伝送後の信号は、下り伝送と同様に、PDを介し、電気信号に変換される。光給電については、制御局にハイパワーLD(High Power LD)を配備し、これを一芯の光ファイバに信号光と共に波長多重伝送し、基地局側では、受信した給電光をハイパワー用PDで電気エネルギーに変換し、このエネルギーを用いて、MODや電気低雑音増幅器(LNA: Low Noise Amplifier)を駆動するのに必要な電力を賄っている。これにより、基地局は光ファイバ給電以外の外部電源を用いることなく、駆動することが可能な光給電型光ファイバ無線伝送を実現することが可能となる。

3 ダブルクラッド光ファイバを用いた光給電型光ファイバ無線伝送

3-1 実験構成

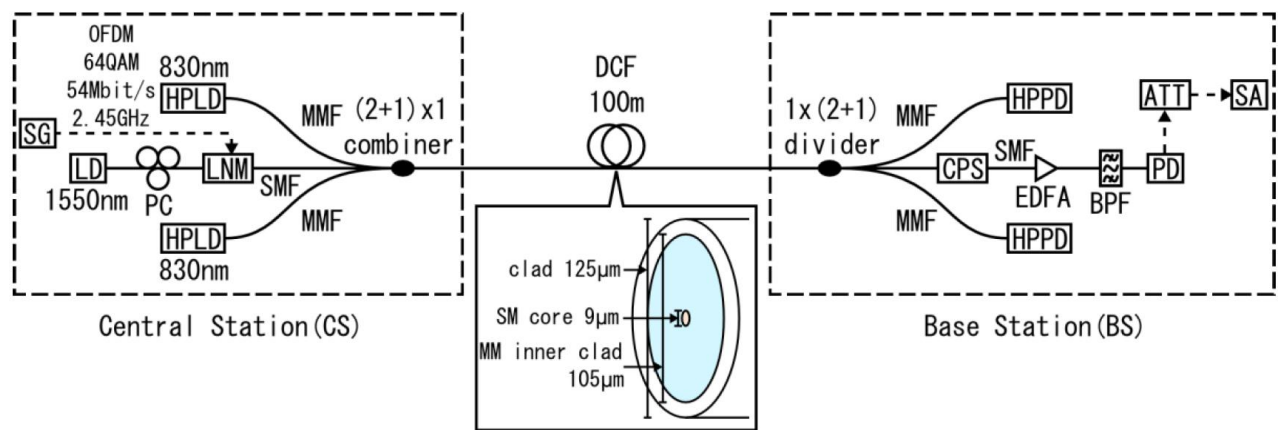


図2: ダブルクラッド光ファイバを用いた光給電型光ファイバ無線伝送（下り）の実験系

ダブルクラッド光ファイバ(以下、DCFとする)は、主にハイパワー光ファイバレーザや光ファイバ増幅器の利得媒質として利用されており、小径のコアには、信号光、もしくは、発振光を伝搬し、大径のコアには、増幅用の励起光を伝搬させるのが一般的である。本研究で使用したDCFの構成を図2の挿入図に示す。このDCFは、小径コア直径(単一モードコア)が9 μm で、大径コア直径(マルチモード)が105 μm となっている。大径コア部には、増幅のための希土類添加物はドーピングされておらず、光給電用の構成となっている。本実験に使用したDCFの長さは100mとした。制御局側に配備された送信器は、波長1550nmのレーザ(LD)出力光を偏波制御器(PC: Polarization Controller)を介して、光変調器(LNM: LiNbO₃ Modulator)で変調を行い、光アナログ信号を生成している。無線信号は信号発生器(SG: Signal Generator)で生成された搬送周波数2.45GHz、ビットレート54Mbit/s、64-QAM(Quadrature Amplitude Modulation)で変調されたOFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)信号を使用した。尚、入力する信号光の信号パワーはおおよそ8dBmであった。また、この信号は無線LAN規格に準拠した信号形式となっており、パケット単位で受信した信号の符号誤り率(BER: Bit Error Rate)とコンスタレーションにおけるEVM(Error Vector Magnitude)によって、伝送特性評価を行なっている。送信側では、信号光とは別に給電光として、波長830nmの2台のハイパワーレーザ(HPLD: High-Power Laser-Diode)を配備しており、これらの出力光は直径105 μm のマルチモード光ファイバに接続されており、出力パワーは最大で1台あたり2Wとなる。信号光の1出力ポートと給電光の2出力ポートは専用のコンバイナでカップリングされて、DCFに入力されている。この際、信号光はDCFの小径コアに入力され、給電光はDCFの大径コアに入力され、ファイバ中を伝送する。このコンバイナは通常のカプラとは構成が異なるため、2ポートから給電光を入力しても、出力ポートでパ

ワーが半分になることはなく、効率の良いパワーカップリングが出来るようになっている。DCF 伝送後は、 $1 \times (2+1)$ ポートのディバイダで信号光と給電光に分波される。給電光は再度、コア径 $105 \mu\text{m}$ のマルチモードファイバに分波され、その出力光は 2 ポートそれぞれのハイパワー用フォトダイオード (HPPD: High-Power Photo-Diode) に入力される。信号光はもう 1 つの出力ポートに分波され、ファイバ内に残留しているマルチモード内の光成分を除去するため、クラッドパワーストリッパ (CPS: Clad Power Stripper) に入力し、シングルモード内の信号光成分のみを取り出している。その後、信号光はエルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier) で増幅し、増幅器で発生する雑音成分を光バンドパスフィルタ (BPF: Bandpass Filter) で除去し、後段のフォトダイオード (PD) で電気信号に変換し、電気可変減衰器 (ATT: Attenuator) で信号レベルを調整し、シグナル・アナライザ (SG: Signal Analyzer) で受信信号の BER と EVM の評価を行った。

3-2 光給電素子の基本特性

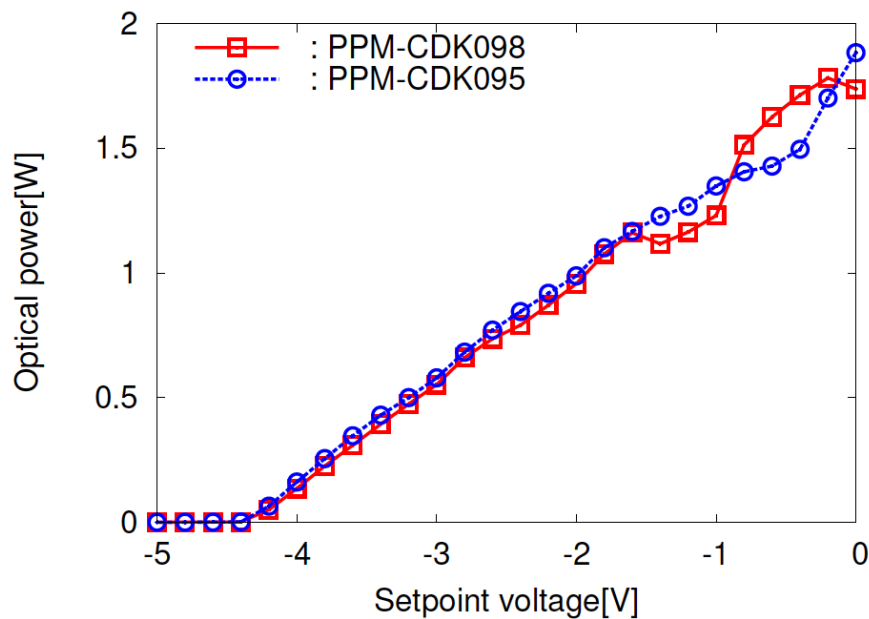


図 3 : HPLD の出力特性.

光給電を行ったとき、実際に必要となるエネルギーは電気エネルギーとなるので、HPLD の出力特性と基地局で光エネルギーを電気エネルギーに変換する HPPD の特性も光給電システムの重要な性能指標となってくる。図 3 に実験に使用した 2 台の HPLD の出力特性を示す。出力パワーは LD に内蔵されている出力パワー調整用のバイアス電圧の電圧値を変化させることで調整することが可能である。図より、無バイアスの状態で最大でおよそ 1.8~1.9 W の出力光パワーが得られることがわかる。この 2 台の HPLD を図 2 のような実験構成で並列使用することで最大で 4 W 弱の給電光を伝送することが可能である。

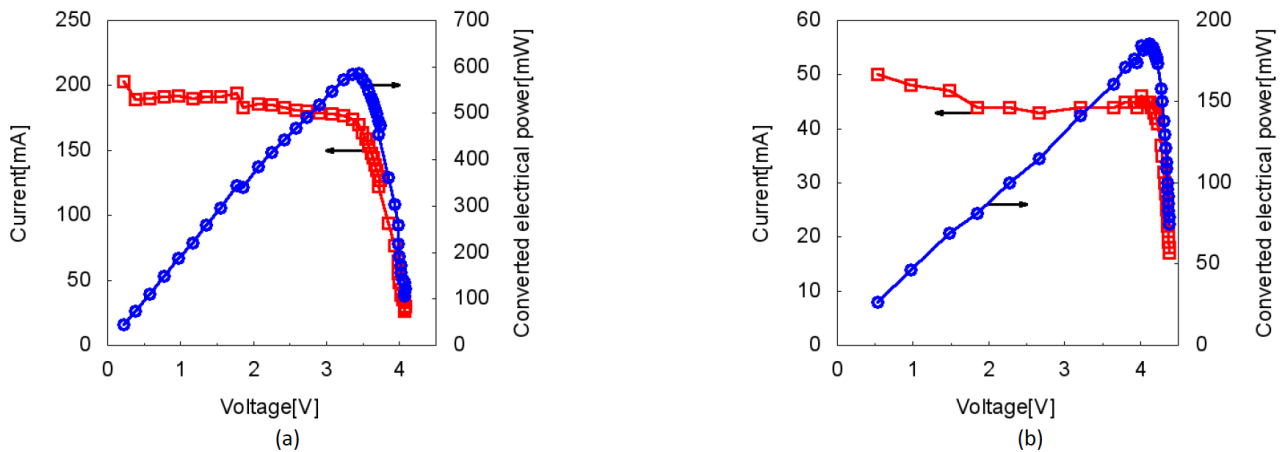


図 4 : HPPD の I-V 特性. (a) 2 W の HPLD 出力光を入射したとき, (b) DCF 伝送後.

図 4 (a) に HPPD に 2 W の給電光を直接入射した際の I-V 特性を示す. 可変負荷抵抗については, 市販の電子負荷装置を利用した. これにより, 電圧がおおよそ 3.4 V 付近で変換された電気パワーが最大で, その値はおおよそ 600 mW となり, 変換効率は約 30 % となった. 同様に, 図 4 (b) は DCF 伝送後の一方の HPPD での I-V 特性を示す. このとき, 電気パワーはおおよそ 200 mW 弱となるので, 図 1 の実験系では, 光給電用の LD, PD がペアで配備されているので, 3.8 W の光給電によって, 基地局側で得られる電気パワーは合計でおおよそ 400 mW となることがわかった. すなわち, 大口径の DCF を利用することによって, より高いパワーの給電光を入力すれば, 基地局側でもより高い電気パワーを取り出すことが可能であることを示した.

3-3 光ファイバ無線伝送の伝送特性

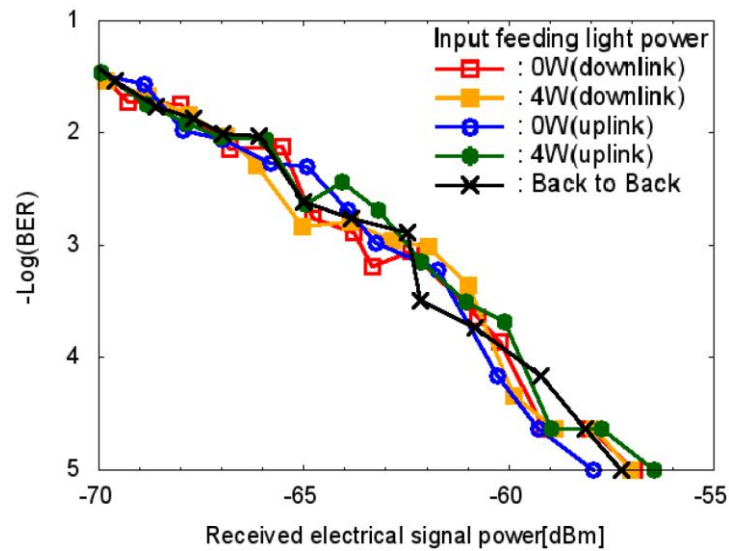


図 4 : 光給電下での光ファイバ無線伝送特性 (上り・下り).

2 W 出力の HPLD と HPPD をペアで配備することで, 基地局側で最大 400 mW の電気パワーを確保することが明らかになったが, これらの給電光が信号光に与える影響を調査するため, 総電力 3.8 W の光給電下での光ファイバ無線伝送の BER 測定を行い, その比較を行った. 図 4 のその BER 特性を示す. Back-to-back は DCF 伝送路を介さず, 送信器を直接, 受信器に接続し, 伝送特性を測定したものである. また, 上り伝送については, 図 2 の実験系において, 送信器と受信器の位置を入れ替えて, 信号光と給電光が互いに逆方向に伝搬する構成で伝送特性を測定したものである. 図からわかるように, シングルパケットで伝送したもののから,

BER を換算しているのので、ある程度のばらつきが見られるものの、給電光の有無や伝送方向によらず、ほぼ同等の BER 特性が観測された。これは、3.8 W の給電光と信号光を同時伝送しても、DCF を用いた光ファイバ無線伝送では、伝送品質の劣化はほとんど見られないことを意味している。その要因として、小径コアと大径コアのコア径差が大きく、ほとんど信号光給電光間のクロストークを発生させなかったためと考えられる。

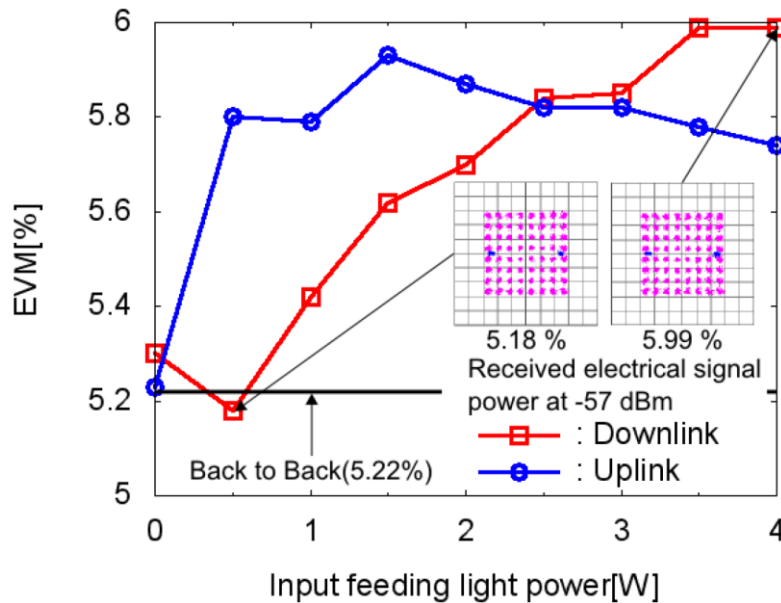


図 5 : 上り・下り伝送での EVM 比較. 挿入図はそれらのコンスタレーション.

上り・下り伝送では、信号光と給電光の伝搬方向が異なるので、これらの与える影響をより詳しく調査するため、伝送信号のコンスタレーションから換算される EVM を用いて、特性比較を行った。その比較結果を図 5 に示す。図 4 の BER 比較ではわかりにくかったが、給電光パワーが増大するにつれて、EVM がわずかではあるが増大していくのがわかる。また、上り伝送と下り伝送では、その特性が異なっている。上り方向では、僅かな給電パワーにおいても EVM の値は急激に上昇し、それ以降はほぼ一定値を保っている。一方、下り伝送では、0.5 W で一度減少するものの、それ以降は緩やかに EVM が増大していく傾向が見られた。これらの要因としては、信号光と給電光の伝送方法が互いに逆のときには、給電光が微弱なときでも伝送特性に影響を与えやすく、伝送方向が互いに同じであるときには、給電光のパワーに対応して、その影響も大きくなるのがわかった。伝送系に挿入された素子のパワー依存性などにも起因することも考えられるので、今後もより詳細な比較調査が必要であると考えられる。

4 まとめ

アンテナ基地局を外部電源無しで駆動させることを目的として、ダブルクラッド光ファイバを用いた光給電型光ファイバ無線伝送に関する研究を行った。新しい研究課題として、本研究に取り組み、使用するダブルクラッド光ファイバに関する検討から、光ファイバ無線伝送系の構築、伝送特性評価に至るまでを実施した。これまでの単一モード光ファイバを用いた光給電では、信号光とのクロストークや光ファイバヒューズや破断が問題となっていたが、信号光と給電光をコア径の異なる光ファイバで伝送可能なダブルクラッド光ファイバを使用することによって、これらの問題を回避した。実際の伝送系においても、無線 LAN 規格に準拠した無線信号を利用した詳細な伝送特性の評価を行い、高いパワーでの光給電下で、上り・下り伝送の両方で高い伝送特性が得られることを明らかにした。一方、既存のダブルクラッド光ファイバでは、大口径コア部の損失によって、給電光の伝送損失が大きくなることや、ダブルクラッド光ファイバの融着接続が難しいなどの技術課題も示された。しかし、給電光のハイパワー化という点では優位性の高い光給電技術であると考えているので、今後は、ダブルクラッド光ファイバの高性能化と給電光のハイパワー化を軸に性能向上を目指した研究開発を進めていきたいと考えている。

【参考文献】

- [1] D. Wake, M. Webster, G. Wimpenny, K. Beacham, and L. Crawford, "Radio-over-fiber for mobile communication," in Proc. Microwave Photonics (MWP'04), pp. 157-160, Oct., 2004.
- [2] K. Sato, M. Fujise, S. Shimizu, and S. Nishi, "Millimeter-wave high-speed spot communication system using radio-over-fiber technology," IEICE Trans. Electron., vol. E88-C, no. 10, pp. 1932-1938, Oct., 2005.
- [3] Y. Doi, T. Kagawa, T. Ohno, T. Yoshimatsu, K. Tsuzuki, S. Mitachi, and S. Fukushima, "Full-duplex microwave transmission in a radio-over-fiber system using a bias-free base station," IEICE Trans. Electron., vol. E85-C, no. 3, pp. 856-858, March, 2002.
- [4] D. Wake, A. Nkansah, N. J. Gomes, C. Lethien, C. Sion, and J.-P. Vilcot, "Optically powered remote units for radio-over-fiber systems," J. Lightw. Technol., vol. 26, no. 15, pp. 2484-2491, Aug. 2008.
- [5] 中嶋信生, 三井崇, 長田滋, 森本健一, 川野晴子, 中山健, 三木哲也, 河野勝泰, 來住直人, "電源を不要とするROF型無線エントランス方式の検討," 信学技報, RCS2004-411, 2005.
- [6] 平尾元紀, 松浦基晴, 來住直人, "ヘテロダイン方式を用いた無電源光ファイバ無線通信システム," 信学技報, OFT2009-69, 2010.
- [7] J. Sato and M. Matsuura, "Radio-over-fiber transmission with optical power supply using a double-clad fiber," in Proc. CLEO-PR & OECC/PS 2013, TuPO-8, July, 2013.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
ANC-EPWM transmission of OFDM signal in RoF channel	電子情報通信学会 無線通信システム研究会	2012年4月
OFDM signal transmission by EPWM transmitter in nonlinear RoF channel	IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2012-Spring)	2012年5月
Nonlinearity effect of DFB laser diode RoF channel on EPWM-OFDM signal transmission	TriSAI 2012	2012年5月
半導体光増幅器による多チャンネル光波長変換を用いた光制御フェーズドアレイアンテナの制御法	電子情報通信学会 光ファイバ応用技術研究会	2013年3月
Analysis of RoF-echo effect on OFDM signal transmission with EPWM format	IEEE International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 2013)	2013年6月
Radio-over-fiber transmission with optical power supply using a double-clad fiber	The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, and The 18th OptoElectronics and Communications Conference/Photonics in Switching 2013 (CLEO-PR & OECC/PS 2013)	2013年7月
EPWM-OFDM transmission against nonlinearity and echo in radio-over-fiber channel	電子情報通信学会 光ファイバ応用技術研究会	2013年9月 (発表予定)
ダブルクラッド光ファイバを用いた光給電型光ファイバ無線伝送 (仮題)	電子情報通信学会 光ファイバ応用技術研究会	2013年10月 (発表予定)