

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 28 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2011～2014

課題番号：23360169

研究課題名(和文) マルチキャリア無線信号の光ファイバー括無ひずみ伝送の研究

研究課題名(英文) Linear Transmission of Multicarrier Radio Signal over the Optical Fiber

研究代表者

山尾 泰 (YAMAOKI, YASUSHI)

電気通信大学・AWCC・教授

研究者番号：10436735

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,200,000円

研究成果の概要(和文)：ブロードバンド移動通信システムを広く導入する上の問題の解決策として、伝送損失が小さい光ファイバー無線(ROF: Radio over Fiber)を用いた簡易な前進基地局の導入が期待されている。しかし光ファイバー前進基地局を新世代ブロードバンド移動通信システムで用いる場合、電気光変換器の非線形によってマルチキャリア無線信号が歪むという技術課題があった。また、前進基地局へ光ファイバーを介して電力を供給する可能性について検討する必要があった。本研究では包絡線パルス変調送信による光無線信号伝送方式と光ファイバー給電による電力供給前進基地局構成法を提案し、その性能を解析および実験で確認した。

研究成果の概要(英文)：Radio-over-Fiber(ROF) Transmission is a promising method for easier migration of broadband mobile communication systems. It employs very low-loss optical fibers that enable compact and simple front-end base stations. However, nonlinearity of Electro-Optical (E/O) conversion modulators distorts radio signals used in the new generation broadband wireless signals. Also, power distribution to the base stations is another issue to be solved. In this study, we proposed the front-end base station that employs Envelope Pulse Width Modulation (EPWM) transmitters and optical power feed. The performances of proposed technologies are validated by analysis and experiments.

研究分野：無線通信、無線回路

キーワード：OFDM ROF EPWM 非線形

1. 研究開始当初の背景

携帯電話システムは高速・大量のデータを送受信するためにブロードバンド化が進められている。例えば LTE (Long Term Evolution) では、信号伝送に多数のアンテナを用いる MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 送受信技術等の採用により、伝送速度は 100 Mbit/s 以上に達する。しかしながらブロードバンド化に伴って受信機での雑音帯域も広がるため、電波の到達距離が短くなり、従来の基地局からの電波だけでは十分な性能を得ることが困難である。このためビル陰や建物内など電波の弱いエリアがスポット的に多数発生する。

このようなブロードバンド移動通信システム導入上の大きな問題の解決策として、伝送損失が小さい光ファイバ無線(ROF: Radio over Fiber)を用いた簡易な前進基地局の導入が期待されていた。しかし光ファイバ前進基地局を新世代ブロードバンド移動通信システムで用いる場合、以下の課題がある。

(1) 電気信号 - 光信号変換 (E-O / O-E 変換) に用いる光変調器と光検波器の非線形性によって発生する相互変調ひずみの影響が無線信号のブロードバンド化、マルチバンド化に伴ってより一層シビアとなり、このひずみを低く抑えるための新たな光無線信号伝送技術が必要である。

(2) 光ファイバ前進基地局の設置場所には電源供給の不可能な場所が多く、前進基地局の設置箇所の増加に伴ってリモート給電の必要性が著しく増している。

本研究ではこれらの技術課題を解決するため、新たな光無線信号伝送方式とこれを用いた光ファイバ電力供給前進基地局構成法を提案する。

2. 研究の目的

新世代移動通信システムの展開に必須である光ファイバ無線前進基地局技術として、

(1) E-O/O-E 変換での非線形の影響を受けない包絡線パルス幅変調 (EPWM) 送信法に基づく光無線信号伝送方式の研究

(2) 1 本の光ファイバで電力と無線信号を同時に伝送できる前進基地局構成法の研究

を行う。EPWM 送信法は飽和高周波電力増幅器で非線形の影響を受けことなく高効率な送信が可能であるが、その適用範囲を光信号伝送の領域に拡張する学術的意義が大きい。光無線領域への EPWM 送信技術の適用は世界でも例がない独創性の高い技術であり、そのインパクトは大きく、前進基地局のコストダウンとリモート給電による設置の大幅な自由度を可能とする

3. 研究の方法

(1) E-O/O-E 変換での非線形の影響を受けない光無線信号伝送方式の研究

新世代無線システムで広く用いられる OFDM(Orthogonal Frequency Division

Multiplexing) 信号はマルチキャリア信号であるため大きな振幅変動を有し、ひずみの影響を強く受ける。そこで無線信号の振幅をパルス幅変調信号に変換することで振幅を 0 または一定値に変換して送信する包絡線パルス幅変調 (EPWM; Envelope Pulse Width Modulation) 送信機が提案者によって検討され、電力効率の高い非線形の飽和電力増幅器を用いてひずみの無い増幅が可能であることが解明されてきた。

この EPWM 送信法の原理を光ファイバ無線に適用すると図 1 の構成となり、光変調器の入力信号振幅は 0 または一定値となるので、光変調器 - 光ファイバ - 光検波器で構成される非線形光伝送系のひずみの影響を回避でき、光伝送系への要求条件を大幅に緩和できる。

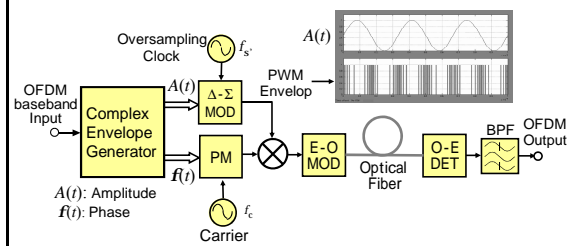


図 1 包絡線パルス幅変調光無線信号伝送

(2) 1 本の光ファイバで電力と無線信号を同時に伝送できる前進基地局構成法の研究

高出力レーザー光を光ファイバに注入し、遠端で検波して電力として利用する方式が ROF 前進基地局用として注目されている(図 2)。しかし電力伝送用光ファイバが別途必要であるため、1 本の光ファイバケーブルに収容できる前進基地局 / アンテナ数が減少するという課題があった。

一方、(1) の光無線信号伝送技術が実現できれば、無線信号が強い電力信号による非線形の影響を受けないので、1 本の光ファイバに無線信号と電力伝送用の高出力レーザー信号を重畳できる可能性が高い。これによって収容できる前進基地局 / アンテナ数が増加し、MIMO 送受信による送受信アンテナ設置数の増加をカバーしつつ、前進基地局によるエリアの拡大が可能となる。

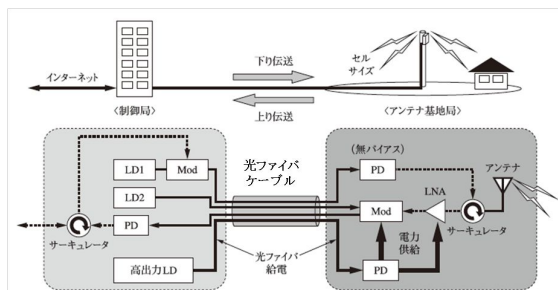


図 2 光ファイバ給電による ROF 伝送

4. 研究成果

(1) E-O/O-E 変換での非線形の影響を受けない光無線信号伝送方式の研究

図1に示した EPWM 送信による光無線信号伝送によって、E-O/O-E 変換の非線形性の影響を受けない OFDM 信号の伝送が可能であることを実証するため、E-O/O-E 変換器として、非線形特性の異なる (1) Mach-Zehnder (MZ) 変調器と、(2) Distributed Feedback Laser Diode (DFB LD) のバイアス制御による直接変調器の2種類を取り上げ、それぞれ非線形特性を数式モデル化して解析するとともに、実験によって伝送特性を確認した。

また EPWM 送信時に発生する量子化雑音の影響を軽減して高品質の信号伝送を可能とするため、図3に示す振幅雑音補償包絡線パルス幅変調 (ANC-EPWM; Amplitude Noise Compensated Envelope Pulse Width Modulation) 送信機について検討した。ANC-EPWM 送信機では、量子化雑音のうち、特に問題となる搬送波近傍の量子化雑音のみを選択してキャンセルする。

図4に、OFDM 信号直接送信、EPWM 送信および ANC-EPWM 送信による OFDM 信号の合計3種類の信号を ROF 伝送した出力スペクトルの解析結果を、(a)MZ 変調器および(b)DFB-LD 直接変調器を用いた場合に対して示す。DFB-LD 直接変調器と MZ 変調器を比べると、非線形特性は異なるが、いずれに対しても EPWM 送信および ANC-EPWM 送信は OFDM 信号直接送信に比べて、信号帯域外に現れる相互変調歪が大きく改善されるのがわかる。特に ANC-EPWM 送信では量子化雑音スペクトルが低く、良い特性を示していることがわかる。この時のベクトル変調信号誤差は、MZ 変調器で OFDM 信号直接送信時の 9.8% から、1.67%(EPWM)または 4.85% (ANC-EPWM)へと大きく改善されている。また DFB-LD 直接変調器においても、8.24% から 1.59%(EPWM)または 2.69%(ANC-EPWM)へと大きく改善されている。

このように EPWM 送信および ANC-EPWM 送信は OFDM 信号直接送信に比べて、ROF における E-O/O-E 変換の非線形性の影響を受けにくいことが明らかになった。

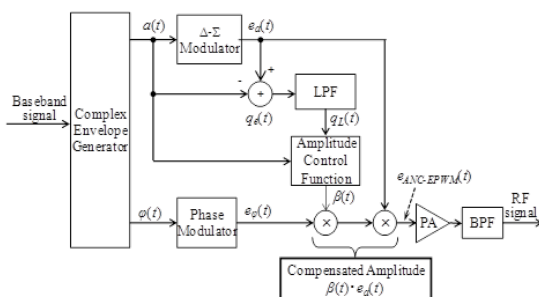
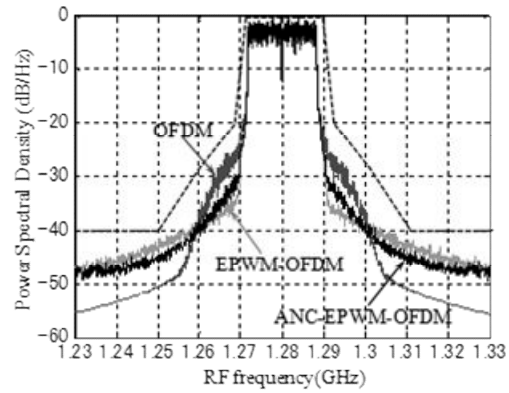
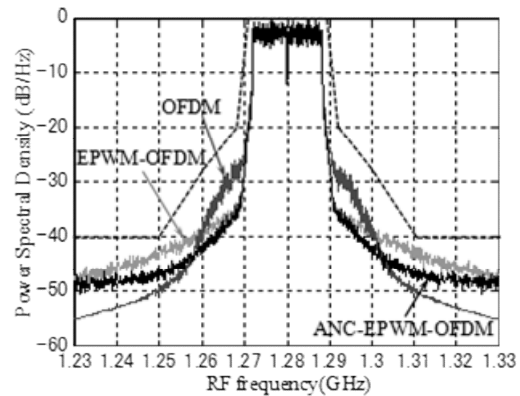


図3 振幅雑音補償包絡線パルス幅変調送信



(a) MZ 変調器による ROF 伝送の無線信号出力



(b) DFB-LD 直接変調器による ROF 伝送の無線信号出力

図4 3種類の OFDM 信号を ROF 伝送した出力スペクトルの解析結果

(2) 1本の光ファイバで電力と無線信号を同時に伝送できる前進基地局構成法の研究

広帯域な無線信号の伝送と高強度な光電力伝送を実現するために、二重のコア構造を有するダブルクラッド光ファイバ (DCF: Double Clad Fiber) を伝送路に使用した ROF 伝送システムを提案・構築し、その有効性を実験的に検証した。

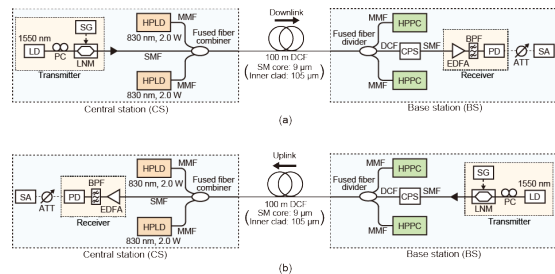


図5 DCF を用いた ROF 伝送

図5に DCF を用いた ROF 伝送の実験系を示す。給電光源には2台の高出力レーザ (HPLD) を用い、トータルで最大 4 W の出力パワーを有する波長 830 nm の給電光を伝送した。これと波長 1550 nm、周波数 2.54 GHz、ビットレート 54Mb/s の OFDM マル

チキャリア変調 64QAM 信号で変調された光信号を同時に 100 m の DCF で伝送した。受信側では、ファイバ型のディバイダで給電光と光信号を分波し、給電光は 2 台の光電変換素子 (HPPC) で電気エネルギーに変換している。光信号はそのまま電気信号に変換し、シグナルアナライザ (SA) でのエラーベクターマグニチュード (EVM) 評価によって、RoF 伝送の伝送特性を比較した。また、上り伝送・下り伝送での伝送特性の比較を行うために、図 3 の (a) と (b) に示すように、送信器 (Transmitter) と受信器 (Receiver) を入れ替えた構成において、EVM による伝送特性評価を実施した。

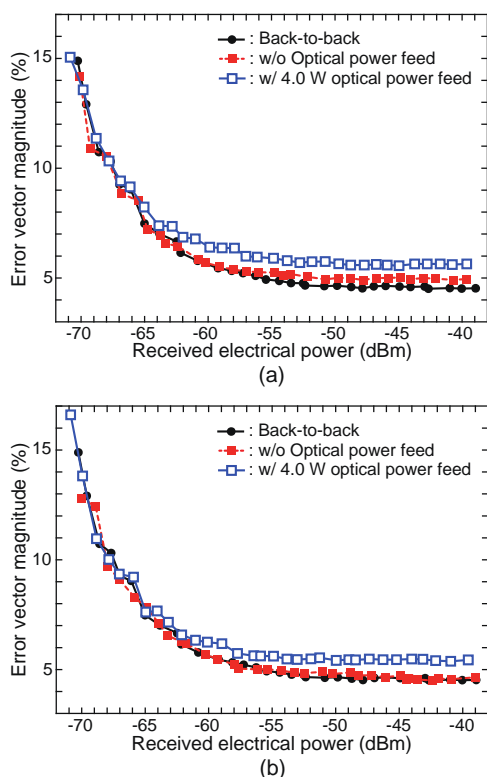


図 6 受信電信信号パワーを変化させた際の EVM 特性 (a) 下り伝送と (b) 上り伝送

図 6 に受信電信信号パワーを変化させた際の EVM 特性を示す。全体として、受信信号パワーが増加するにつれて EVM の値は小さくなり、伝送性能が向上し、 -50 dBm 以上では EVM 値はほとんど一定となった。また、Back-to-back 信号と給電なしでの伝送信号では EVM 特性にほとんど変化が見られなかったものの、 4.0 W の給電電力を入射した場合は、EVM 値の上昇が確認された。しかし、その上昇値は給電光の有無で比較しても EVM 値の最大で 0.8% 以下となっており、申請者らが研究開発を行っている光給電型 ROF 伝送系が高電力の光給電下でも極めて高い伝送特性を実現可能であることを明らかにした。その主要因としては、直径 $9\ \mu\text{m}$ のコア内を伝送する光信号に対し、給電光は直径 $105\ \mu\text{m}$ のインナークラッドを伝送す

ることで、双方の光で発生するクロストークが大きく軽減されているためだと考えられる。実際に、インナークラッドの実効コア断面積はシングルモードコアの 100 倍以上であるため、 $1/100$ の実効コア断面積内で伝搬している光信号の伝送品質に給電光が大きな影響を与えることはなかったと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 18 件)

- 1) M. Matsuura and N. Oka, "Performance of all-optical format conversion using a self-generating optical clock," IEEE Photonics Technology Letters(査読有り), vol. 26, no. 22, pp. 2217-2230, Nov. 2014.
- 2) Q. N. The, M. Matsuura, and N. Kishi, "WDM-to-OTDM conversion using super-continuum generation in a highly nonlinear fiber," IEEE Photonics Technology Letters(査読有り), vol. 26, no. 18, pp. 1882-1885, Aug. 2014.
- 3) G. M. Sharif, Q. N. The, M. Matsuura, and N. Kishi, "All-optical wavelength-shift-free NRZ-DPSK to RZ-DPSK format conversion with pulsedwidth tunability by an SOA-based switch," IEICE Transaction on Electronics(査読有り), vol. E97-C, no. 7, pp. 755-761, July 2014.
- 4) A. Inoue, R. Furukawa, M. Matsuura, and Y. Koike, "Reflection noise reduction effect of graded-index plastic optical fiber in multimode fiber link," OSA Optics Letters(査読有り), vol. 30, no. 12, pp. 3662-3665, June 2014.
- 5) M. Matsuura, R. Furukawa, Y. Matsumoto, A. Inoue, Y. Koike, "Evaluation of modal noise in graded-index silica and plastic optical fiber links for radio over multimode fiber systems," OSA Optical Express(査読有り), Vol. 22, no. 6, pp. 6562-6568, March 2014.
- 6) X. Yu, Y. Yamao, and M. Matsuura, "EPWM-OFDM signal transmission against nonlinearities of E/O converters in radio-over fiber channel," IEICE Transaction on Communications(査読有り), Vol. E97-B, no. 2, pp. 484-494, Feb. 2014.
- 7) M. N. Bhuiyan, M. Matsuura, H. N. Tan, N. Kishi, "Use of state of polarization transparent scheme for polarization shift keying signal as optical phase conjugator to improve the transmission performance," OSJ Optical Review(査読有り), Vol. 21, no. 1, pp. 48-53, Jan. 2014.
- 8) G. M. Sharif, Q. N. The, M. Matsuura, N. Kishi, "All-optical polarization-insensitive non-return-to-zero-to-pulse width tunable return-to-zero conversion," OSJ Optical Review(査読有り), Vol. 20, no.

5, pp. 266-270, May 2013.

9) M. Matsuura, N. Kishi, "Multichannel transmission of intensity- and phase-modulated signals by optical phase conjugation using a quantum-dot semiconductor optical amplifier," OSA Optics Letters(査読有り), Vol.38, no. 10, pp. 1700-1702, May 2013.

10) Y. Ma, Y. Yamao and Y. Akaiwa, "An algorithm for obtaining the inverse of a given polynomial in baseband," IEICE Transaction on Fundamentals (査読有り), Vol. E96-A, no.3, pp. 675-683, March 2013.

他 8 件 (全て査読有り)

[学会発表](計 46 件)

1) Y. Ma and Y. Yamao, "Power Amplifier Linearization Using Digital Predistortion technology: Practical Development and implementation Issues," IEICE Workshop on Microwaves, MW2014-213, Fukui Japan, March 5 2015.

2) 船橋鴻志, 馬岳林, 山尾泰, "振幅雑音補償包絡線パルス幅変調回路の FPGA 設計," 電子情報通信学会無線通信システム研究会予稿集, RCS2014-275, 岡山市, 2015 年 1 月 22 日 .

3) M. Matsuura, R. Furukawa, Y. Koike, "Modal noise impact in plastic optical fiber for radio over fiber systems," Proc. ECOC 2013, London, UK, Sept. 22-26 2013.

4) A. Inoue, R. Furukawa, M. Matsuura and Y. Koike, "Significant noise reduction for radio over fiber using microscopically heterogeneous plastic optical fiber," Proc. POF 2013, Rio de Janeiro, Brazil, Sept. 11-13 2013.

5) X. Yu, Y. Yamao and M. Matsuura, "EPWM-OFDM Transmission against Nonlinearity and Echo in radio over Fiver Channel," IEICE Society Convention, Fukuoka, Japan, Sept. 17-20 2013.

6) X. Yu, M. Matsuura and Y. Yamao, "Analysis of RoF-Echo Effect on OFDM Signal Transmission with EPWM Format," Proc. WPMC2013, Atlantic City, USA, June 9-13 2013. (WPMC 2013 Student Best Paper Award 受賞)

7) J. Sato and M. Matsuura, "Radio-over-fiber transmission with optical power supply using a double-clad fiber," Proc. CLEO-PR & OECC/PS 2013, Kyoto japan, June 30-July 4 2013.

8) X. Yu, M. Matsuura, S. Yokozawa, Y. Yamao, "OFDM Signal Transmission by EPWM Transmitter in Nonlinear RoF Channel," Proc. IEEE VTC2012-Spring, Yokohama, Japan, May 6-9 2012.

9) Y. Ma, Y. Akaiwa and Y. Yamao, "Fast

Baseband Polynomial Inverse Algorithm for Nonlinear System Compensation," Proc. IEEE VTC2012-Spring, Yokohama, Japan, May 6-9 2012. (IEEE VTS Japan Student Paper Award 受賞)

10) X. Yu, M. Matsuura and Y. Yamao, "Nonlinearity Effect of DFB Laser Diode RoF Channel on EPWM-OFDM Signal Transmission," Proc. TriSAI 2012, Tokyo, Japan, Sept. 18-20 2012.

11) S. Yokozawa and Y. Yamao, "Suppression of Quantization Noise for EPWM Transmitter with 2nd-order delta-Sigma Modulator," Proc. IEEE VTC 2011-Spring, Budapest, Hungary, May 17 2011. (IEEE VTS Japan Student Paper Award 受賞)

他 35 件

[図書](計 0 件)

[産業財産権]
出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.awcc.uec.ac.jp/yamaolab/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

山尾 泰 (Yasushi YAMA0)

電気通信大学・先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター・教授

研究者番号 : 10436735

(2)研究分担者

松浦 基晴 (Motoharu MATSUURA)

電気通信大学・大学院・情報理工学研究科・准教授

研究者番号 : 40456281