

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420364

研究課題名(和文)強度変調による光無線OFDM方式のための偏光を用いる省電力伝送法

研究課題名(英文)A power-efficient optical wireless OFDM system using circular polarization

研究代表者

大内 浩司 (Ohuchi, Kouji)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：50313937

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、強度変調・直接検波方式を用いる光無線通信において、直交周波数分割多重(OFDM)信号の省電力伝送を実現するために、円偏光を用いる光無線OFDM方式を提案した。提案方式では、OFDM信号を正極性と負極性の部分に分割し、これらを右回りと左回りの円偏光で伝送する。解析の結果、従来のDCO-OFDM方式と同等の情報伝送速度を維持しながら、その1/5の光電力でビット誤り率 $1.0 \times 10^{-5}$ を達成できることを示した。また、正極性と負極性の部分に分割することの影響を考慮して、ビット誤り率特性の理論解析も行った。理論解析の結果はシミュレーションの結果とほぼ一致し、理論解析が妥当であることを示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, an optical wireless orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) system that uses circular polarization was proposed in order to achieve a power-efficient optical wireless OFDM with intensity modulation/direct detection. The proposed system divides OFDM signals into positive and negative parts. Then, it converts these divided signals into left-handed and right-handed polarization, and transmits them. This study showed that the proposed system required 1/5 times as much as the optical power the conventional DCO-OFDM system required when achieving a bit error rate of  $1.0 \times 10^{-5}$  and the same data transmission rate. In addition, this study provided a theoretical analysis of the bit error rate performance of the proposed system. It fully considered the influence of the division of OFDM signals into positive and negative parts. The results of the theoretical analysis were generally coincident with those of the simulation results.

研究分野：情報通信工学

キーワード：光無線通信 OFDM 円偏光 省電力

### 1. 研究開始当初の背景

無線通信の需要の増加により、電波周波数資源が逼迫する状況にある。そのため、電波無線通信を補う一つの方法として光を媒体とする光無線通信が注目されている。特に直交周波数分割多重(OFDM)方式を光無線通信に応用する研究が進められている。光無線通信では、光の強度によって情報を送信し、これを受信側のフォトディテクタで直接検波する方式(強度変調・直接検波方式)が、システムの簡易化の点で重要となる。しかしながら光の強度は非負信号であるため、両極性信号である電波無線通信の OFDM 方式をそのまま強度変調・直接検波方式で実現することはできない。これを回避する従来方式として、主に、DCO-OFDM 方式がある。この方式は、OFDM 信号を非負化するために直流バイアスを付加するものである。しかしながら、直流バイアスの分の電力が余計に必要となり、電力効率が著しく低下する問題点を有している。つまり、強度変調・直接検波方式において高い情報伝送速度を維持しながら省電力性を達成する有効な光無線 OFDM 方式は実現されていない。

### 2. 研究の目的

本研究では、強度変調・直接検波方式を用いる光無線通信において、OFDM 信号の省電力伝送を実現することを目的とする。この実現のために、本研究では偏光を利用する。特に、OFDM 信号の正極性部分と負極性部分を分離し、これらを直交関係にある2つの偏光で伝送する方式を研究する。これにより、従来の DCO-OFDM 方式で必要であった直流バイアスの付加が不要となり、情報伝送速度を維持したまま、送信電力を従来の DCO-OFDM 方式の半分以下にする。

### 3. 研究の方法

(1) 平成25年度は、偏光を用いる光無線 OFDM 方式について、偏光が受ける伝送路の影響を理論的に解析した。また、送受信機間で回転が起こる場合、つまり、偏光軸が正対しない場合の回転角の影響を理論的に解析した。これらの解析を活用して、偏光度を考慮した誤り率特性について、計算機シミュレーションによる解析を行った。

(2) 円偏光を用いる光無線 OFDM(CPO-OFDM)方式について研究を進めた。この方式では、OFDM 信号を正極性部分と負極性部分に分割して伝送する。平成26年度は、この分割によって生じる影響を詳細に調査した。これに基づいて、CPO-OFDM 方式における雑音成分を理論的に解析した。さらに、CPO-OFDM 方式の誤り率特性の理論解析を行った。また、CPO-OFDM 方式の原理の応用として、マルチコード伝送方式を考察した。マルチコード伝送方式では、送信信号振幅に大きなピークが現れる問題があるため、この問題を解決する方

法について、検討を進めた。

(3) CPO-OFDM 方式は、偏光多重の一つの方法と言える。平成27年度は、さらなる伝送効率改善のために、偏光多重とは異なる観点の多重化技術の研究を進めた。また、一般に OFDM 方式の送信信号振幅には、高いピークが発生する問題がある。この問題を軽減するために、OFDM 信号のピーク低減方法についても検討を進めた。

### 4. 研究成果

(1) 従来の光無線 OFDM 方式の一つとして、フリップ OFDM 方式がある。これは OFDM 信号を正極性の部分と負極性の部分に分け、それぞれを別個に伝送する方式であり、電力効率に優れる方式である。しかしながら、正負それぞれの部分を時分割で伝送するため、従来の DCO-OFDM 方式に比べて情報伝送速度が半分になる問題がある。この点を克服する方式として、CPO-OFDM 方式を新たに提案した。この方式では、フリップ OFDM 方式と同様に、OFDM 信号を正極性の部分と負極性の部分に分ける。さらに、これらを直交する2つの円偏光によって表現し、それらを合成した信号を伝送する。偏光度を考慮した伝送路モデルを用いて CPO-OFDM 方式を評価した。その結果、右回りと左回りの円偏光を用いた場合、送受信機間に回転が生じて、問題なく送受信が行えることを理論的に明らかにした。また、従来の DCO-OFDM 方式と同等の情報伝送速度を維持しながら、DCO-OFDM 方式よりも7デシベル小さい光電力でビット誤り率  $10^{-5}$  を達成できることを示した(図1参照)。これは DCO-OFDM 方式の約5分の1の電力にあたる。当初の目標としては、DCO-OFDM 方式の半分以下の電力で同等の情報伝送速度を得ることとしていたため、目標を十分に達成することができたと言える。

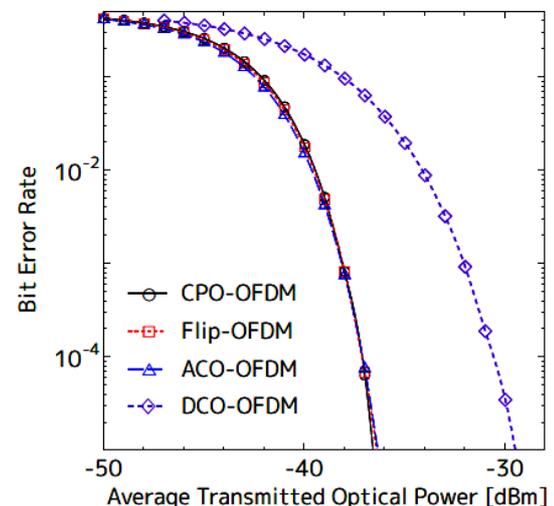


図1 CPO-OFDM 方式と従来方式のビット誤り率特性の比較(縦軸:ビット誤り率、横軸:平均送信光電力)

(2) CPO-OFDM 方式では、復調の際、右回りと左回りの円偏光成分の大きさを比較し、大きい方を受信信号として採用する方法（比較法）を用いる。この比較法を用いることで誤り率特性を改善できる。しかしながら、背景光が存在する環境下でこの比較法を用いると、受信信号に歪みが生じてしまい、誤り率特性が劣化する問題がある。この問題を解決するために、受信側で背景光の大きさを推定し、これを除去する簡易な方法を考案した。これにより、背景光が存在する環境下においても比較法を有効に機能させることができることを示した。また、CPO-OFDM 方式において比較法を用いたときの誤り率特性を理論的に解析した。特に、白色ガウス雑音下での誤り率特性を、近似式を使った閉形式で表した。これにより計算の簡易化に成功した。これをもとに、大気変動（シンチレーション）がある場合の誤り率特性も示すことができた。理論解析によって得られた誤り率特性はシミュレーションによって得られた値とほぼ一致し（図 2 参照）理論解析の妥当性を示すことができた。

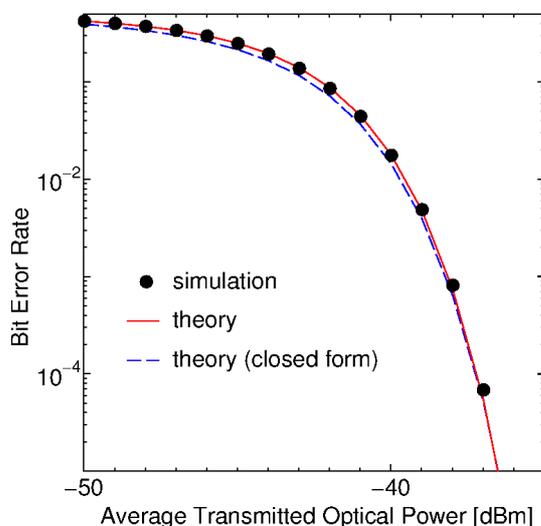


図 2 理論解析とシミュレーション解析によるビット誤り率特性の比較（縦軸：ビット誤り率、横軸：平均送信光電力）

(3) 光無線通信に応用する場合に限らず、一般に OFDM 方式の送信信号振幅には、高いピークが発生する。高いピークを有する信号を非線形増幅器で増幅すると、信号に歪みが生じる。これは受信誤りが生じる原因となるため、信号振幅のピークを低減するための方法の研究が従来から進められている。本研究においても、ピークを低減する方法の研究に取り組んだ。特に、巡回シフト系列という方法に着目した。この方法は、OFDM 信号を構成する副搬送波群をいくつかのグループに分け、信号振幅のピークが低くなるように、各グループの時間信号に異なる巡回シフトを与えて送信信号を構成するものである。受信者が

信号を復調する際には、各グループに与えた巡回シフトの量に関する情報を知っている必要がある。本研究では、一部の副搬送波をパイロット信号としてこの情報を推定する簡易な方法を提案した。今後この方法を発展させて、上記の情報をブラインド推定する方法の検討を進めたいと考えている。

(4) OFDM 信号を正極性の部分と負極性の部分に分け、それぞれを別個に伝送するという考え方は、CPO-OFDM 方式以外のブロック伝送方式へも応用することができる。そこで、強度変調/直接検波方式との親和性の良い符号分割多重（CDM、あるいはマルチコード）方式についても考察した。マルチコード方式では、OFDM 方式と同様に、信号振幅に高いピークが現れる。これを解決する方法として、信号の定振幅化（定電力化）の研究が従来から進められている。本研究では、定振幅化の方式の一つである PCMC-CA 方式を拡張する方法を新たに考案した。この拡張方法によって得られる 2 つの拡張方式を示し、誤り率特性と情報伝送速度を理論的に解析した。また、定振幅化を行う従来方式との性能比較を行った。その結果、拡張方式は、従来方式よりも高い情報伝送速度を達成できることを明らかにした（図 3 参照）。

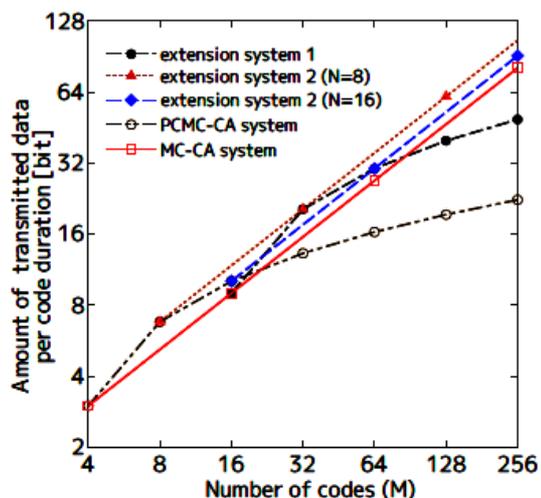


図 3 マルチコード伝送における拡張方式と従来方式の情報伝送速度の比較（縦軸：符号時間あたりの情報量、横軸：使用する符号数、発表論文 より引用）

(5) 従来の光無線 OFDM 方式の一つである ACO-OFDM 方式は、奇数番目の副搬送波を多重化して、その信号の正極性の部分を伝送する方式である。この方式は電力効率に優れた方式である。しかしながら、偶数番目の副搬送波を利用できないため、情報伝送速度が従来の DCO-OFDM 方式の半分になる問題点がある。CPO-OFDM 方式は、偏光多重によって ACO-OFDM 方式の問題点を克服する方式とも言える。そこで、偏光多重とは異なる観点から、情報伝送速度を向上させる研究にも取り組んだ。

調査の結果、ACO-OFDM方式で用いられていなかった偶数番目の副搬送波のうちの一部が、奇数番目の副搬送波に干渉を及ぼさないことを発見した。これに基づいて、新しいタイプの多重化方式を提案した。この多重化により、従来のACO-OFDM方式1.5倍の情報伝送速度を達成できることを明らかにした。また、室内無線通信を想定し、室内反射が起こる伝送路における通信性能を解析した。その結果、遅延が生じる伝送路においても、新しいタイプの多重化方式が利用できることを明らかにした。この新しい多重化方式を用いることによって、今後さらに多重度を高められると考えている。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3件)

K.Hagihara, K.Ohuchi, Theoretical Bit Error Rate in a Circular Polarized Optical OFDM System, IEICE TRANSACTIONS on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, Vol.E99-A, No.1, pp.177-184, 2016.  
DOI: 10.1587/transfun.E99.A.177

K.Hagihara, K.Ohuchi, Circular Polarized Optical OFDM for Optical Wireless Communication, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, Vol.E98-A, No.2, pp. 520-527, 2015.  
DOI: 10.1587/transfun.E98.A.520

T.Ohta, K.Ohuchi, Extension of Parallel Combinatory Multicode Transmission with Constant-Amplitude Signaling and Its Theoretical Analysis, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, Vol.E98-A, No.2, pp. 528-536, 2015.  
DOI: 10.1587/transfun.E98.A.528

〔学会発表〕(計 13件)

神津 知之, 大内 浩司, 二重化ACO-OFDMを用いた室内光無線通信の一検討, 電子情報通信学会総合大会講演論文集AS-3-7, 2016年3月17日  
九州大学(福岡市)。

T.Kozu, K.Ohuchi, Proposal for superposed ACO-OFDM using several even subcarriers, 9th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS2015), 2015年12月15日, Cairns (Australia)。

北澤 隆浩, 大内 浩司, 一部のサブキャリアを巡回遅延させたOFDM信号のPAPR特性, 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集A-5-5, 2015年9月10日, 東北大学(仙台市)。

萩原 和男, 大内 浩司, シンチレーション環境下での円偏光光無線OFDM方式の理論ビット誤り率, 電気関係学会東海支部連合大会J3-1, 2014年9月9日, 中京大学(名古屋市)。

萩原 和男, 大内 浩司, 円偏光光無線OFDM方式におけるビット誤り率の理論解析, 電子情報通信学会信学技報WBS2014-19, 2014年7月29日, 大阪市立大学(大阪市)。

〔その他〕

ホームページ

<https://tdb.shizuoka.ac.jp/RDB/public/default2.aspx?id=10330&l=0&a=1>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

大内 浩司(OHUCHI, Kouji)  
静岡大学・工学部・准教授  
研究者番号: 50313937