

令和元年6月18日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06346

研究課題名(和文)強度変調を用いる光無線OFDM方式における周波数利用効率改善

研究課題名(英文)Improvement of spectral efficiency in optical wireless OFDM system using intensity modulation

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、強度変調と直接検波方式を用いる光無線通信において、高い周波数利用効率と省電力伝送を両立するOFDM方式を実現することを研究の目的としている。従来技術であるACO-OFDM方式では、奇数番サブキャリアのみを用いて省電力伝送を実現しているが、偶数番サブキャリアを利用できない問題があった。本研究では、基本周波数の異なる複数のACO-OFDM信号を多重化することにより、偶数番サブキャリアも利用可能にし、伝送情報量の増加を図った。さらに、信号の多重化に起因する干渉信号をキャンセラで低減した。その結果、従来のACO-OFDM方式と比較して、周波数利用効率を最大で2倍にできることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電波無線通信でよく使われている無線通信技術の一つに直交周波数分割多重(OFDM)方式がある。このOFDM方式を光無線通信に応用する場合、従来技術では、周波数利用効率と省電力性を両立することは困難だった。それに対して、本研究では、新しい方法で信号を多重化し、伝送する方法を示しており、伝送情報量の増加を図っている。その結果、周波数利用効率と省電力性の点でバランスのとれた光無線OFDM方式を実現している。したがって、本研究の成果は、光無線通信におけるOFDM方式の活用を一層促進させることに寄与するものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study is to accomplish an OFDM system that achieves both high spectral efficiency and power saving transmission in optical wireless communication using intensity modulation and direct detection. In the conventional ACO-OFDM system, power saving transmission is achieved using only odd numbered subcarriers. However, there is a problem that even numbered subcarriers can not be used. In this study, even-numbered subcarriers are made available by multiplexing multiple ACO-OFDM signals with different fundamental frequencies, and the amount of transmission information is increased. Furthermore, the interference signal caused by signal multiplexing is reduced by a canceller. As a result, it is clarified that we can double the spectral efficiency compared to the conventional ACO-OFDM system.

研究分野：情報通信工学

キーワード：光無線通信 直交周波数分割多重 強度変調 周波数利用効率

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

無線通信の需要の増加により、電波の周波数資源が逼迫する状況にある。そのため、可視光線などを媒体とする光無線通信が注目されている。このような状況の中で、電波無線通信で用いられてきた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(IM/DD方式)が、システム簡易化の点で重要となる。しかしながら、光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IM/DD方式で実現することはできない。これの解決策として、DCO-OFDM方式やACO-OFDM方式が検討されている。前者は、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が、直流バイアスの電力が余計に必要となり、電力効率が著しく低下する。後者は、基本周波数の奇数倍の周波数のサブキャリア(以下、奇数番サブキャリアとする)のみを用いることによってOFDM信号の非負部分のみで情報伝送を可能にするものであり、省電力伝送を実現できる。しかしながら、基本周波数の偶数倍の周波数のサブキャリア(以下、偶数番サブキャリアとする)を利用できないため、周波数利用効率が前者の半分になる。つまり、省電力性を維持しながら、高い周波数利用効率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

本研究は、強度変調/直接検波方式を用いる光無線通信において、高い周波数利用効率と省電力伝送を両立するOFDM方式を実現することを目的とする。従来のACO-OFDM方式では、奇数番サブキャリアのみを用いて省電力伝送を実現しているが、偶数番サブキャリアを利用できない問題があった。本研究で考察するOFDM方式では、従来とは異なる発想の多重化手法を考案し、偶数番サブキャリアも同時伝送可能にする。これにより、従来のACO-OFDM方式と比較して、同程度の電力効率を維持しながら、周波数利用効率を最大で2倍程度にする。

3. 研究の方法

(1) 光無線OFDM方式の周波数利用効率の向上のために、ACO-OFDM方式を多重化する方式(以下、本方式とする)について解析した。特に、基本周波数の異なるACO-OFDM信号を個別に発生した後に、これらを足し合わせて送信信号を生成した。この際、複数のACO-OFDM方式の基本周波数を変化させて信号間の与干渉・被干渉の状況を計算機シミュレーションによって調査した。また、多重化の際に生じる干渉によってビット誤り率特性がどのように影響を受けるかについても調査した。さらに、干渉キャンセラの導入によって、誤り率特性の劣化を軽減する方式についても研究を進めた。

(2) 電波無線通信におけるOFDM方式と同様に、光無線通信におけるOFDM方式においても、ピーク電力の低減は検討課題の一つとなっている。そのため、本方式に応用することを念頭において、電波無線通信で活用されている既存のピーク電力低減手法の調査および改良を行った。本研究では特に、ピーク電力低減効果と計算量の点で優れる巡回シフト系列法に着目して研究を進めた。また、別のピーク電力低減手法である、Zadoff-Chu系列に基づく行列を用いるプリコーディング法にも着目し、この手法の改良にも取り組んだ。

(3) 本方式で得られるOFDM信号は本来一次元の信号であるが、これを二次元に拡張して二次元のOFDM信号とし、これを液晶ディスプレイ(LCD)カメラ間通信へ応用すること研究を進めた。特に、LCDを送信機として利用する場合に起こる送信信号の振幅制限と量子化処理に着目し、これらが通信性能に及ぼす影響などを調査した。

(4) さらなる周波数利用効率の改善を目的として、OFDM信号に施すプリコーディングによっても情報の伝送を行う方式を考案し、その基礎研究を進めた。この方式を用いた場合、送信信号の占有帯域幅は従来のOFDM方式よりも増加しない。その一方で、OFDM方式による情報伝送に加えて、プリコーディングによる情報伝送が加わることになる。そのため、従来方式に比べて、サブキャリアあたりの情報伝送量の増加が見込める。

4. 研究成果

(1) 本方式は、二つ以上のACO-OFDM方式を多重化する。基本周波数の異なるACO-OFDM信号を多重化した際に生じる与干渉・被干渉の状況を調査した結果、下記の2点を明らかにした。

- ・ i, j を正整数(ただし $i > j$) とするとき、基本周波数 $2^i f_0$ のACO-OFDM信号は基本周波数 $2^j f_0$ のACO-OFDM信号に干渉を及ぼさない。
- ・ 基本周波数 $2^i f_0$ のACO-OFDM信号は基本周波数 $2^j f_0$ のACO-OFDM信号に干渉を及ぼす。

上記の与干渉・被干渉の関係を考慮し、レプリカ減算型の干渉キャンセラを受信側に導入した。このとき、基本周波数の低いACO-OFDM信号から順に復調することにより、干渉信号のレプリカを上手く生成することができ、複数のACO-OFDM信号間で生じる干渉の影響を低減できることを

明らかにした。その結果、多重化によって、従来の ACO-OFDM 方式では使うことができなかった偶数番サブキャリアも、奇数番サブキャリアと同時に伝送ができるようになった。このときの誤り率特性の例を図 1 に示す。これにより DCO-OFDM 方式よりも優れた電力効率を維持しながら、周波数利用効率を最大で ACO-OFDM 方式の 2 倍にできることを明らかにした。この周波数利用効率は DCO-OFDM 方式と同程度である。したがって、所期の研究の目的を達成できた。

(2) OFDM 信号のピーク電力の低減手法として、巡回シフト系列法を検討した。巡回シフト系列法では、復調の際に巡回シフト量に関する情報が必要となる。これを受信側でブラインド推定する場合、サブキャリア数に依存して計算量が増加する問題がある。そこで、計算量の削減に取り組んだ。その結果、誤り率特性が若干劣化するものの、従来法の半分のサブキャリア数でもブラインド推定ができることを明らかにした(図 2 参照)。また別のピーク低減手法として、Zadoff-Chu 系列に基づく行列を利用したプリコーディング法にも着目した。本研究では、このプリコーディング法と部分伝送系列法とを組み合わせ、新たなピーク電力低減法を考案した。この方法の基礎的な性能を明らかにするために、電波無線通信における OFDM 方式を想定して性能解析を行った。その結果、用意する候補信号数を同じとした場合に、提案法は従来法よりもピーク電力低減効果に優れることが確認できた(図 3 参照)。

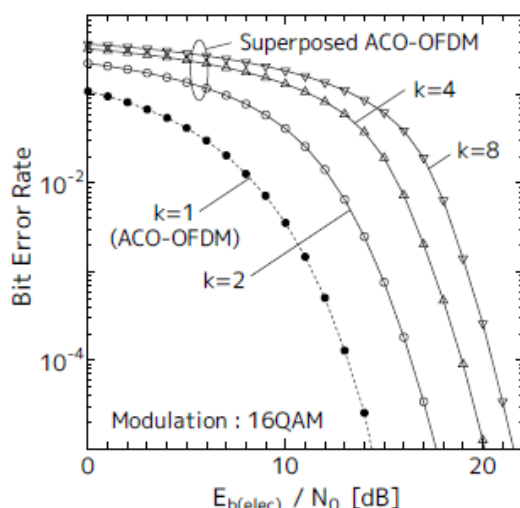


図 1 本方式の誤り率特性
総サブキャリア数は 512, k は多重化する ACO-OFDM 方式の数を表す。偶数番サブキャリアも利用可能となる。 $k=8$ のとき、実質的なサブキャリア数は 255 となり、周波数利用効率が従来の ACO-OFDM 方式の 2 倍となる。(学会発表原稿(15)より引用)

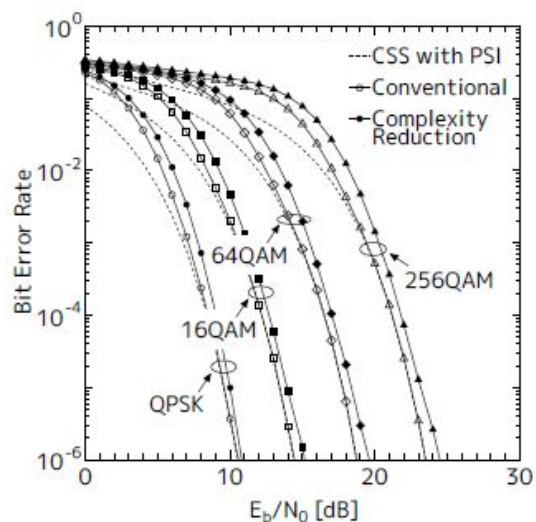


図 2 巡回シフト系列法(CSS)の巡回シフト量を受信側でブラインド推定したときの OFDM 方式の誤り率特性
誤り率特性は従来方式よりも約 1dB 劣化するが、ブラインド推定に用いるサブキャリア数を半減させて計算量の削減に成功した(学会発表原稿(13)より引用)

(3) 本方式を拡張して二次元の空間 OFDM 信号を生成し、これを LCD カメラ間通信へ応用することを検討した。一般に、LCD カメラ間通信では、送信機の出力に振幅制限がある。これを考慮し、最適な振幅制限レベルについて調査した。その結果、振幅制限レベルを 15dB としたときに、多重化した空間 ACO-OFDM 方式は、従来の空間 ACO-OFDM 方式よりもビット誤り率が優れることを明らかにした。これにより LCD カメラ間通信においても本方式の有効性が確認できた。この検討に付随して、LCD カメラ間通信における空間 OFDM 信号についても、プリコーディングによるピーク電力低減手法の効果も調査した。その結果、空間 OFDM 信号においてもピーク電力低減効果が確認でき、これに伴って、ビット誤り率特性が改善することも確認できた。

(4) 多重化とは異なる手法で ACO-OFDM 方式の周波数利用効率をさらに高めるために、2つの方式を適用することを検討した。一つは、デュアルモード変調の適用であり、もう一つは、コードシフトキーイングの適用である。デュアルモード変調では、各サブキャリアの変調の際、2種類の変調方式を選択的に用いる。これにより伝送できる情報量を増やせる場合がある。解析の結果、ACO-OFDM 方式においてもデュアルモード変調を適用することができ、周波数利用効率を改善できることを明らかにした。コードシフトキーイングを適用する方式は、OFDM 信号上でコードシフトキーイングによる情報伝送も行うものである。このとき、信号の占める帯域幅は増加しない。基本的な性能解析として、電波無線通信における OFDM 方式を想定して解析を進めた。その結果、1 サブキャリアあたりの伝送情報量を増やせると同時に、誤り率特性の改善が図れることが確認できた(図 4 参照)。この技術は光無線 OFDM 方式にも適用可能であるばかりでなく、本方式とも組み合わせることが可能であると予想される。そのため、この技術と本方式

を組み合わせることにより、一層の周波数利用効率の改善が期待できる。

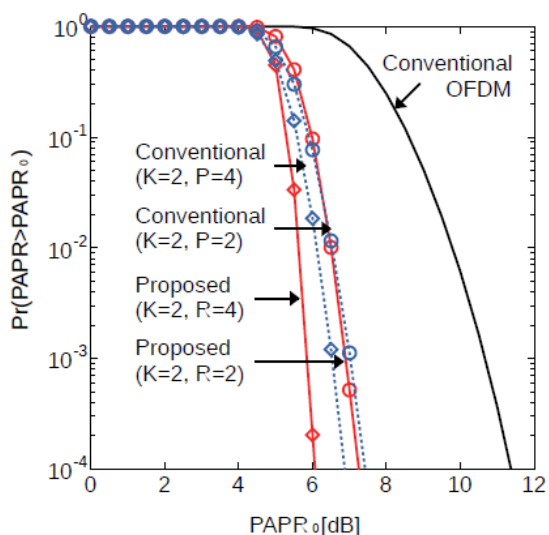


図 3 プリコーディング法と部分伝送系列法を組み合わせた新しいピーク電力低減手法の性能
 K はサブキャリアのグループ数を、 P と R は用意する候補信号数を表す。考案したピーク電力低減手法では、候補信号数を増やすことで、従来法よりも効果的にピーク低減が図れる。(学会発表原稿(4)より引用)

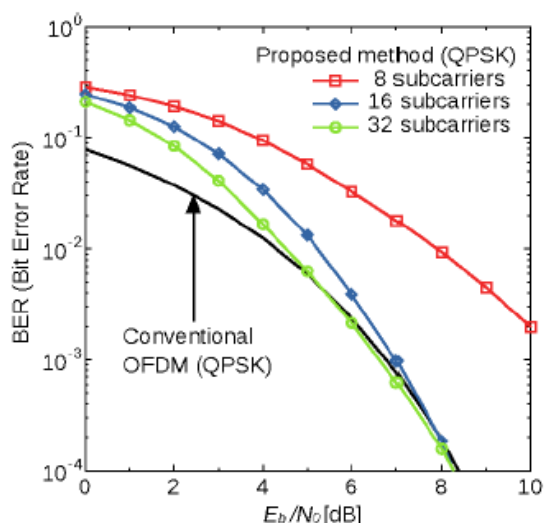


図 4 プリコーディング法を利用した情報伝送量増加方式の誤り率特性
 プリコーディングによっても情報を送るため、情報伝送速度が向上する。サブキャリア数 16 または 32 を単位としてプリコーディングする場合、従来の OFDM 方式と同等か優れた誤り率特性となる。(学会発表原稿(5)より引用)

5. 主な発表論文等

[学会発表](計 17 件)

- (1) 平原 瑛一, 大内 浩司, ACO-OFDM におけるデュアルモードインデックス変調を用いた誤り率特性, 電子情報通信学会総合大会 ISS 特別企画学生ポスターセッション ISS-SP-005, 2019 年.
- (2) Ryohei Iwasaki, Kouji OHUCHI, PAPR Reduction in OFDM Signal by Combining Partial Transmit Sequences with Precoding Matrix, 12th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS), DOI: 10.1109/ICSPCS.2018.8631723, 2018 年.
- (3) 岩崎 良平, 大内 浩司, 伝送情報量を増加させた OFDM における非線形増幅器の影響, 電子情報通信学会技術研究報告 WBS2018-73, 2018 年.
- (4) 岩崎 良平, 大内 浩司, OFDM におけるプリコーディング行列を用いた効果的な PAPR 低減手法, 電子情報通信学会技術研究報告 WBS2018-18, 2018 年.
- (5) 岩崎 良平, 大内 浩司, サブキャリアをグループ化した OFDM におけるプリコーディングによる情報伝送, 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 A-9-2, 2018 年.
- (6) 岩崎 良平, 大内 浩司, プリコーディング行列選択による OFDM の伝送情報量増加法, 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会 C2-5, 2018 年.
- (7) 岩崎 良平, 大内 浩司, サブキャリアの極性反転を用いた並列組み合わせ OFDM の検討, 電子情報通信学会総合大会 ISS 特別企画学生ポスターセッション ISS-SP-008, 2018 年.
- (8) Joji Takatsuka, Kouji Ohuchi, Performance Improvement of Spatial OFDM by Using Parallel Combinatory Signaling in LCD-Camera Communication System, The 2018 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP), 2018 年.
- (9) 高塚常司, 大内 浩司, LCD-カメラ間通信における Spatial OFDM への並列組合せ伝送の適用, 電子情報通信学会技術研究報告 WBS2017-66, 2017 年.
- (10) 高塚常司, 大内 浩司, 多重化した空間 ACO-OFDM における振幅制限と量子化の影響, 電子情報通信学会技術研究報告 WBS2017-11, 2017 年.
- (11) 高塚 常司, 大内 浩司, Spatial ACO-OFDM の多重化と誤り率特性の基礎検討, 電子情報通信学会総合大会 ISS 特別企画学生ポスターセッション ISS-SP-150, 2017 年.
- (12) Tomoyuki Kozu, Kouji Ohuchi, BER performance of Superposed ACO-OFDM in multi-path fading channel, IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT), DOI:10.1109/ISSPIT.2016.7886019, 2016 年.
- (13) Takahiro Kitazawa, Kouji Ohuchi, On blind estimation with reduced complexity in

CSS-OFDM systems, IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT), DOI: 10.1109/ISSPIT.2016.7886020, 2016 年.

- (14) 神津 知之, 大内 浩司, 多重化 ACO-OFDM におけるサブキャリア間干渉を補償した送信器の提案, 電子情報通信学会技術研究報告 WBS2016-35, 2016 年.
- (15) 神津 知之, 大内 浩司, SACO-OFDM の多重化限界に関する検討, 電子情報通信学会ソサイエティ大会 A-9-5, 2016 年.
- (16) 北澤 隆浩, 大内 浩司, CSS-OFDM における計算量削減時の副情報ブラインド推定法の特性評価, 電子情報通信学会ソサイエティ大会 A-9-6, 2016 年.
- (17) 北澤 隆浩, 大内 浩司, CSS-OFDM 方式におけるブラインド推定可能な巡回シフト量の検討, 電子情報通信学会技術研究報告 WBS2016-16, 2016 年.

〔その他〕

ホームページ等

<https://tdb.shizuoka.ac.jp/RDB/public/Default2.aspx?id=10330&l=0&a=1>

6 . 研究組織

- (1)研究分担者 なし
- (2)研究協力者 なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。