

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04373

研究課題名（和文）光無線OFDM方式におけるプリコーディングを利用したコードシフトキーイング

研究課題名（英文）Code shift keying using precoding in optical wireless OFDM systems

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） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、直交周波数分割多重（OFDM）の信号上でコードシフトキーイング（CSK）による情報伝送を行う通信方式を研究し、光無線通信に応用することを研究した。OFDM信号上でCSKを実現するために、本研究ではZadoff-Chu系列から得られる行列を選択的に利用するプリコーディング技術を活用した（プリコーディング行列選択方式）。計算機シミュレーションによる解析の結果、プリコーディング行列選択方式は、光無線通信においても従来の光無線OFDM方式と同等のビット誤り率特性を達成しながら、情報伝送効率を向上できることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光無線OFDM方式は電波無線OFDM方式に比べて情報伝送効率が低い問題がある。本研究では、光無線OFDM方式の誤り率特性を従来の光無線OFDM方式と同程度に保持しながら、情報伝送効率を向上させる技術を考案した。これは、光無線OFDM方式の進展に寄与するものといえる。また、副次的な成果として、Zadoff-Chu（ZC）行列によるプリコーディングとOFDM送信機の逆フーリエ変換の処理が統合できることを示した。これにより、ZC行列によるプリコーディング処理でOFDM信号のピークが低減されるメカニズムを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated a communication method for transmitting information by code shift keying (CSK) over orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) signals and its application to optical wireless communications. To realize CSK over OFDM signals, we utilized a precoding technique that selectively utilizes matrices obtained from the Zadoff-Chu sequences (precoding matrix selection method). Computer simulation results show that the precoding matrix selection method can improve the data transmission rate in optical wireless communications while achieving the same bit error rate performance as the conventional optical wireless OFDM systems.

研究分野：通信方式

キーワード：光無線通信 直交周波数分割多重 強度変調 コードシフトキーイング プリコーディング

## 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かった。この解決策として DCO-OFDM 方式や ACO-OFDM 方式が考案された。しかしながら、いずれの方式も強度変調を利用する観点から、送信信号を実信号とする必要がある。この理由により、光無線 OFDM 方式の周波数利用効率は、電波無線通信における OFDM 方式の周波数利用効率の約半分以下になってしまう。光無線 OFDM 方式の周波数利用効率を向上させる手法としては、OFDM 信号を構成する各サブキャリアをより高い多値度の変調方式で変調することが一般的と言える。しかしながら、多値度を増加させると信号空間ダイアグラム上の信号点間距離が相対的に短くなるため、誤り率特性が劣化してしまう。つまり、信号の占有帯域幅を一定としたときに、「情報伝送量の増加」と「誤り率特性の改善」の間にトレードオフが存在する。したがって、誤り率特性を保持あるいは向上させつつ、情報伝送量を増加させる有効な手段の考案が、光無線 OFDM 方式における課題になっている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、IM/DD 方式を用いる光無線 OFDM 方式において、「情報伝送量の増加」と「誤り率特性の改善」を両立する新しい伝送方式を実現することである。本研究で考察する伝送方式では、光無線 OFDM 方式によって情報を伝送すると同時に、その OFDM 信号上でコードシフトキーイング (CSK) による情報伝送も行い、元々の光無線 OFDM 方式によって伝送される情報に加えて、CSK によっても情報が伝送できるため、伝送帯域幅を増やすことなく、情報伝送量の純増が見込める。また、1ビット当たりの送信エネルギーを固定した場合、情報伝送量の増加に伴って送信信号に掛けられるエネルギーが増加するため、信号空間ダイアグラム上の信号点間距離が広がる。これにより誤り率特性の改善も期待できる。

## 3. 研究の方法

光無線の OFDM 信号上で CSK を行うために、本研究で考察する伝送方式の送信機ではプリコーディングの技術を利用する。このプリコーディングの処理は、プリコーディング行列を送信シンボルベクトルに乗算することで実現される。本研究では、プリコーディング行列として主に ZC 行列 (Zadoff-Chu 系列から得られる値を要素する行列) を用いて研究を進める。本研究で考察する伝送方式では、このプリコーディング行列の候補を  $M$  個用意し、それらを送信情報に基づいて選択的に用いる手法を取り入れる (以降、プリコーディング行列選択方式と呼ぶ)。これにより、どのプリコーディング行列を用いたかによって、 $\log_2 M$  ビットの情報を送ることができるようになる。つまり、プリコーディング行列を一種の符号 (コード) とみなした場合、OFDM 信号上で CSK を実現することになる。この点に本研究の独自性がある。受信側では、受信信号をフーリエ変換して得られる受信シンボルベクトルに対して、複数あるプリコーディング行列の各候補の逆行列を各々乗算する。乗算で得られる各サブキャリアのシンボル点が、信号空間ダイアグラム上の何れかの信号点に戻るかどうかを検証することで、送信側で用いたプリコーディング行列を特定できる。これにより、CSK で伝送された情報を復調できる。さらに、逆行列の乗算によって、本来の OFDM 信号が得られる。つまり、光無線 OFDM 信号の復調も従来通りに行うことができる。以上の通り、プリコーディング行列選択方式は、「情報伝送量の増加」と「誤り率特性の改善」の間に存在するトレードオフを緩和する新しい伝送方式となり得る。

プリコーディング行列選択方式では、使用するプリコーディング行列の候補数を多くすることによって、送れる情報伝送量を増加できるという利点が得られる。しかしながらその一方で、送信側が使用した行列を受信側で推定するのが困難になるため、誤り率特性が劣化するという欠点が生じる。またこの時、行列推定に要する計算量が増大するというデメリットも生じる。そのため本研究では、主に以下の3点についての研究を行った。

- (1) プリコーディング行列選択方式の情報伝送効率と誤り率特性の解析
- (2) プリコーディングに使用する行列についての研究
- (3) プリコーディングの計算量の解析とその低減についての研究

## 4. 研究成果

- (1) プリコーディング行列選択方式の情報伝送効率と誤り率特性の解析

前述の通りプリコーディング行列選択方式では、使用するプリコーディング行列の候補数が多い場合に、CSK によって送れる情報伝送量を増加できる。ただし、OFDM 信号も正しく復調するためには、送信機が選択したプリコーディング行列を受信側で正しく推定する必要がある。そのため、受信側で行う行列推定の推定精度が通信性能に大きく影響を及ぼすが、特にプリコーディング行列の候補数が多い場合

に推定精度の低下と計算量の増大が問題となる。そこで、これらの問題を緩和することを目的として、サブキャリアを幾つかのグループに分割し、それぞれのグループに対してプリコーディングを行う方式を考案した。この方式において、1回のプリコーディングで処理されるサブキャリア数とプリコーディング行列候補数に着目し、それらがプリコーディング行列選択方式に与える影響を調査した。まず、電波無線通信を想定して白色ガウス雑音の影響を考慮した計算機シミュレーションによる調査を行った。その結果、サブキャリア数と行列候補数を適切に調整することにより、従来の OFDM 方式と比べて、同等もしくは良いビット誤り率を達成しながら、従来の OFDM 方式よりも高い情報伝送効率を達成できることを明らかにした。この結果を受け、プリコーディング行列選択方式を光無線 OFDM 方式へ応用し、その性能を計算機シミュレーションによって解析した。光無線通信の伝送路モデルとしては、天井反射モデルを考慮した。解析の結果、プリコーディング行列選択方式は、光無線通信においても従来の光無線 OFDM 方式と同等の誤り率特性を達成しながら、情報伝送効率を向上できること明らかにした。例えば図 1 に示すように、変調方式に 16QAM (直交振幅変調) を用いた場合、プリコーディング行列選択方式では、従来の ACO-OFDM 方式と同等の誤り率特性を達成しながら、8 サブキャリアあたり 2~3 ビットを追加的に伝送できる。このとき、情報伝送率は、従来方式に比べて 6.25~9.375% 増加することになり、本研究の所期の研究目的を達成することができた。また、プリコーディング行列選択方式の有効性を明らかにするために、情報伝送効率の向上を目的とした既存方式の一つである DM-IM 方式との性能比較を行った。その結果、プリコーディング行列選択方式の情報伝送効率の改善度は DM-IM 方式の半分になってしまうが、DM-IM 方式よりも優れたビット誤り率を本方式が達成できることを明らかにした。

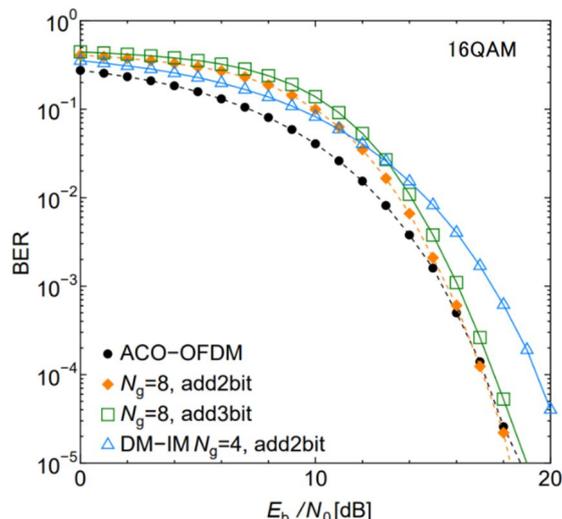


図 1: 光無線 OFDM 方式の誤り率特性比較 (本研究の方式 [黄線, 緑線] は、従来の ACO-OFDM 方式 [黒線] と同程度の誤り率を達成しながら、情報伝送速度を改善している)

### (2) プリコーディングに使用する行列についての研究

前述した通り、プリコーディング行列選択方式では、プリコーディング行列として主に ZC 行列を用いて研究を進めたが、ZC 行列とは異なる行列で送信シンボルベクトルを変換する場合についても調査を行った。その中でも特に、加重分数次フーリエ変換で用いられる変換行列に着目した。結果的には、この変換行列をプリコーディング行列選択方式に応用することにはならなかったが、この変換行列による変換には、興味深い性質 (実数値からなる送信シンボルベクトルを加重分数次フーリエ変換すると、それによって得られる信号は、時間領域と周波数領域の信号波形が対称となる性質) が有ることがわかった。この特性を情報通信に応用することを念頭に置いて、特に、受信信号におけるキャリア周波数オフセットとブロック時間オフセットをブラインド推定する研究を進めた。その結果、電波無線の OFDM 方式において、既存のブラインド推定方法よりも良い推定精度が得られる可能性があることを明らかにした。そこで、キャリア周波数オフセットのブラインド推定の研究に焦点を絞って研究を進めた。その結果、レイリーフェージング伝送路において、OFDM 方式における従来のブラインド推定法よりも優れた推定性能が得られることを明らかにした。この成果については、論文 (レター) として発表した (図 2 参照)。さらに、従来の推定法と加重分数次フーリエ変換行列を用いる推定方式を組み合わせる場合に、より広い範囲の周波数オフセットを推定できる可能性があることが分かった。

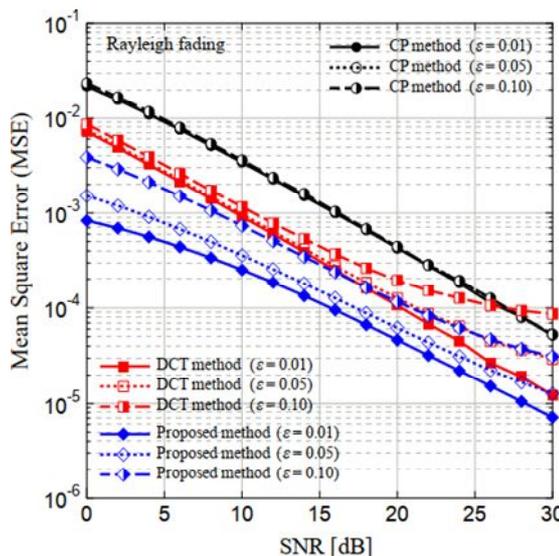


図 2: 周波数オフセットの推定性能比較 (本研究の方式 [青線] は、既存の方式 [黒線, 赤線] よりも小さい誤差で周波数オフセットを推定できる)

### (3) プリコーディングの計算量の解析とその低減についての研究

プリコーディング行列選択方式では、複数あるプリコーディング行列の各候補の逆行列を受信側で各々乗算する処理 (デプリコーディング) が必要となる。プリコーディングの対象となる送信シンボルベクトルの要素数を  $N$  とするとき、プリコーディング行列の要素数は  $N^2$  となるため、素朴な計算方法では  $N^2$  回の複素乗算が必要となる。これは、 $N$  が大きくなった場合に非常に計算負荷が大きくなることを意味して

いる。そこで、プリコーディングおよびデプリコーディングの計算負荷の軽減を目的として ZC 行列の構成を数学的に解析した。その結果、プリコーディング処理に高速フーリエ変換のアルゴリズムが応用できることを明らかにした。高速フーリエ変換のアルゴリズムを応用することによって、 $N^2$ 回の複素乗算回数が  $(2N + (N/2)\log_2 N)$  回に削減できることを明らかにした。プリコーディングにかかる計算量の削減は本研究において解決すべき重要な課題であるが、これが解決できたことになる。さらに、副次的な研究として、OFDM 方式の送信機で行う逆フーリエ変換処理と ZC 行列によるプリコーディング処理の統合を理論的に解析した。その結果、サブキャリア数を  $N$  としたとき、これらの統合処理と等価な処理は、わずか  $N$  回の複素乗算で実現できることを示した。また、統合処理における ZC 行列の生成パラメータの影響も数学的に明らかにした。この解析により、プリコーディング処理を施した OFDM 信号はシングルキャリア信号と同等になることが示され、ZC 行列によるプリコーディング処理によって OFDM 信号のピークが低減されるメカニズムを明らかにできた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 KOJIMA Toshifumi、OHUCHI Kouji	4. 巻 E106.A
2. 論文標題 Blind Carrier Frequency Offset Estimation in Weighted Fractional Fourier Transform Communication Systems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 807 ~ 811
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.2022WBL0002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 大内 浩司
2. 発表標題 OFDM信号のピークを低減するためのZadoff-Chu行列を用いるプリコーディング処理の解析
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会講演論文集, A-9-13
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原田大樹, 大内浩司
2. 発表標題 PAPR 低減を目的としたディザ信号を付加した ACO-OFDM 方式の特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 120, no. 412, WBS2020-45, pp. 92-97, 2021年3月.
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小島利文, 大内浩司
2. 発表標題 WFrFTを利用したキャリア周波数オフセットとシンボル時間オフセットのブラインド推定
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 120, no. 412, WBS2020-57, pp. 160-165, 2021年3月.
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平原瑛一, 大内 浩司
2. 発表標題 プリコーディング行列選択によるOFDMの情報伝送効率の調査
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 119, no. 268, WBS2019-38, pp. 77-80, 2019年11月.
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Eiichi Hirahara, Kouji OHUCHI
2. 発表標題 Comparison of Dual-Mode index modulation and precoding matrix selection in OFDM system
3. 学会等名 The first International workshop on Control, Communication, and Multimedia 2019 (IWCCM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宗形優, 大内浩司
2. 発表標題 情報伝送量を増加させた光無線OFDMのマルチパスチャネル環境下における性能評価
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, vol.123, no.425, WBS2023-113, pp.312-316, 2024年3月
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 大内浩司
2. 発表標題 OFDM方式における逆離散フーリエ変換処理とZadoff-Chu行列によるプリコーディング処理の統合
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会講演論文集, A-9-21
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 宗形優, 大内浩司
2. 発表標題 プリコーディング行列選択による光無線OFDMの情報伝送量増加法
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, vol.123, no.314, WBS2023-45, pp.87-91, 2023年12月
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

静岡大学教員データベース <a href="https://tdb.shizuoka.ac.jp/rdb/public/Default2.aspx?id=10330&amp;l=0">https://tdb.shizuoka.ac.jp/rdb/public/Default2.aspx?id=10330&amp;l=0</a>
---

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------