

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：15501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760301

研究課題名(和文) 移動時を考慮した高速・高信頼性の光無線通信方式の実現

研究課題名(英文) Implementation of High Speed and Reliability Optical Wireless Communication System Considering Movement

研究代表者

松元 隆博 (MATSUMOTO, TAKAHIRO)

山口大学・大学評価室・准教授

研究者番号：10304495

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、移動しているときでも、高速かつ、信頼性のある通信ができる光無線方式を提案した。この方式では複数の発光素子(LED)と受光素子(APD)を備え、受信した信号の合成と使用する擬似雑音系列の直交性によって、ビット誤り率を低く抑える。このシステムをLED素子とAPD素子、FPGA素子からなる送受信機による光空間伝送実験と計算機シミュレーションによって評価した。その結果、移動速度の向上に伴ってビット誤り率特性が劣化するが、発光素子(LED)と受光素子(APD)の増加によって移動によるビット誤り率特性の劣化を抑えられることと、それぞれの間隔には最適な距離が存在することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this research, I have proposed and manufactured the high speed and reliability optical wireless communication system considering receiver's movement which is constructed by many infrared light emitting diodes (LEDs), avalanche photo diodes (APDs) and a field programmable gate array (FPGA) board corresponding to 132,540 logic elements (LEs) by way of trial, and it is obtained by combining of received signal and orthogonality of pseudo noise sequence. The bit-error rate (BER) performance of the proposed system is evaluated by the indoor experiment and computer simulation. As a result, the system can reduce deterioration of BER performance even if the receiver moves, and the optimal distance between adjoined APD and APD exists.

研究分野：情報通信工学

キーワード：光無線通信 光軸ずれ スペクトル拡散 光ZCZ符号 ZCZ-CDMA方式 マッチドフィルタ FPGA LED

### 1. 研究開始当初の背景

近年、電波法の規制を受けず、電波に比べて広い帯域を利用できるため高速伝送が期待でき、また隣室へ光が通過しないため耐盗聴性に優れている光無線通信が注目を集めている。特に、次世代の照明用光源として期待されている白色 LED を照明として利用しつつ、同時に通信を行なう研究等、発光素子として LED を用いた光無線通信の研究が活発に行なわれている。LED はレーザダイオードに比べ、安価で長寿命である反面、応答速度が遅いため高速伝送が困難である。それを解決する手段として、LED を二次元的に並列に並べ、それぞれ別々のデータを送信することで高速伝送する方式が提案されている。この方式では、LED の指向性の問題で、希望する LED からの光以外に、近傍の LED からの光も受光素子に入力され、それが干渉となり通信速度の劣化に繋がる。この近傍からの干渉を抑圧する方法として、光符号分割多重方式が考えられる。この方式は、拡散符号によって各信号を識別する方式で、光波長分割多重方式に比べ、光の波長を変えずに実現できるため、システムを簡単かつ安価に実現できる。光符号分割多重方式では、各符号間の相互相関特性によって上記干渉（以後、符号間干渉）を受ける。これまで、光通信の符号として 1 と 0 の要素からなる光直交符号や拡張プライム符号等が提案されているが、系列要素の制限から相互相関関数を 0 にすることが出来ず、符号間干渉を無くすることが出来なかった。それに対して、我々は復調点の前後のある範囲で相互相関関数が完全に 0 となる光 ZCZ 符号を提案している。これは符号数が数学的上界を満たすため、並列数を増加でき、また光軸ずれがある場合でも近傍からの干渉を抑圧できることを実証している。また、この通信方式の実現を目指し、この符号に対するマッチドフィルタの小規模な構成法と符号発生器の小規模な構成法をそれぞれ提案し、FPGA を用いて実装することで、従来の構成法に比べて小規模の回路規模で実現出来ることを明らかにしている。したがって、送受信機の小型化も期待できる。また、これらの回路を実装した FPGA と LED、APD モジュールを用いた簡単な送受信機を試作し、実験的に LED 間の干渉を抑圧できることを伝送実験、及び計算機シミュレーションによって明らかにしている。しかし、実際の応用においては、車走行時に信号機や街灯などの LED から発せられる光から交通情報を受信したり、街中の電子掲示板からの光から広告情報を受信したりするなど、受信機が移動している際にデータを高速に、かつ瞬時に受け取る必要があるが、これまで移動局が停止時の光無線通信方式の性能評価はなされているが、移動時の性能評価はもちろんのこと、移動時を考慮した光無線通信方式は提案されていない。

### 2. 研究の目的

本研究では、受信機が静止しているときはもちろんのこと、移動しているときであっても、高速かつ、信頼性のある光無線通信方式の実現を目指す。具体的には、送信機には複数の発光素子 (LED) を、受信機にも複数の受光素子 (APD 素子) を使用し、受信した信号の合成によって、受信機の移動時に、ある一つの受光素子で信号が受信出来なかった場合でも周りの受光素子の信号を利用して、ビット誤り率を低く抑える光無線通信方式を実現する。その際、送受信間で光軸ずれの問題が起こるが、それに対しては隣り合う発光素子からの干渉を抑圧できる擬似雑音系列を適用することで解決する。

### 3. 研究の方法

平成 24 年度は、上記研究の準備として、まず従来の 1 次元の ZCZ 符号による光並列伝送方式の仕様の検討とその送受信機の試作を行った。具体的には ZCZ 符号をデジタル値で発生させる符号発生器とその符号によって拡散変調を行う変調処理部、その変調信号を光信号に変換させる LED、空間上に伝送された光信号を受信するための APD 素子、そのアナログ出力信号をデジタル値に変換する AD 変換器、そのデジタル値を復調するためのマッチドフィルタを用いた復調処理部などによる送受信機の構成について検討を行った。ここでは比較的部品を調達しやすい波長 850nm の近赤外線の光を用いた送受信機を設計することにし、変調処理部、復調処理部は FPGA を用いることにした。また、信号機を想定して、9 個の LED を 3×3 の格子状に配置した送信機と、9 個の APD 素子を同様に 3×3 の格子状に配置した受信機を設計することにした。つぎに、それらの機器を組み合わせて、実際に送受信機の設計とその試作を行った。また、動作試験により、SN 比が高い状況で送受信が正確に行えることを確認した。

平成 25 年度は、複数の受光素子 (APD) によって得られた受信信号を合成することによって、ビット誤り率を低く抑える光無線通信方式を提案した。またその有効性を確認するために、前年度試作した複数の発光素子 (LED)、受光素子 (APD) を備えた送受信機に、提案する光無線通信方式のベースバンド処理部を送受信機内の FPGA 上に構成し、静止時での光空間伝送実験を行った。それに加えて計算機シミュレーション及び、理論解析を行った。

平成 26 年度は、前年度までに試作した複数の発光素子 (LED)、受光素子 (APD) と提案する光無線通信方式のベースバンド処理部を実装した FPGA で構成した送受信機を用いて、移動時の光空間伝送実験を行った。移動時の実験では自動ステージをコントローラによって制御し、数種類の速度による実験を行った。これらには環境の制限があるため

に、更に計算機シミュレーションによって評価を行った。

#### 4. 研究成果

試作した複数の発光素子(LED)と受光素子(APD)を備えた送受信機を用いた光空間伝送実験では、静止時と移動時のビット誤り率特性を計測し、性能評価した。また、同様にシンチレーションと背景光、APD 雑音、熱雑音による干渉と多元接続による他信号による干渉を考慮した計算機シミュレーションによって性能評価した。

その結果、静止時では受光素子(APD)の増加によってビット誤り率特性を向上できることを明らかにした。また、複数の発光素子(LED)から別々の信号を送信した場合でもそれによる干渉を抑圧できることを明らかにした。また、移動時では、移動速度の向上に伴ってビット誤り率特性が劣化するが、発光素子(LED)と受光素子(APD)の増加によって移動によるビット誤り率特性の劣化を抑えられることと、それぞれの間隔には最適な距離が存在することを明らかにした。

以上の結果より、提案する光無線通信方式は移動速度の向上によるビット誤り率特性の劣化を抑えることができることと、受光素子(APD)の間隔を移動速度によって最適化すればその抑圧効果を大きくできることがわかった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 35 件)

T. Matsumoto, H. Torii, Y. Ida, S. Matsufuji, "A Compact Matched Filter Bank for a Mutually Orthogonal ZCZ Sequence Set Consisting of Ternary Sequence Pairs," IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E97-A, No.12, pp.2595-2600, Dec. 2014 (査読有) DOI : 10.1587/transfun.E95.A.2595.

T. Matsumoto, Y. Ohira, H. Torii, Y. Ida, S. Matsufuji, "Study on BER Performance of Atmospheric Optical ZCZ-CDMA System Using Equal Gain Combining," Proc. of the 2014 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'14), pp.521-524, March 2014 (査読有)。

T. Matsumoto, H. Torii, Y. Ida, S. Matsufuji, "BER Performance of ASK-SS and M-ary/ASK-SS Systems Using Compact Matched Filter Bank for an Optical ZCZ Code with Zero-Correlation Zone  $4n-2$ ," Journal of Signal Processing, Vol. 17, No. 6, pp.265-271, Nov. 2013 (査読有)。  
DOI : 10.2299/jsp.17.265

T. Matsumoto, Y. Ohira, S. Muranaga, H. Torii, Y. Ida, S. Matsufuji, "Trial of Free-Space Parallel Transmission System Based on Optical ZCZ-CDMA System," Proc. of the Sixth International Workshop on Signal Design and Its Applications in Communications (IWSDA'13), pp. 84-87, Oct. 2013 (査読有)。  
DOI : 10.1109/IWSDA.2013.6849068

T. Matsumoto, H. Torii, S. Matsufuji, "Theoretical Analysis of BER Performance of Optical ZCZ-CDMA System," International Journal of Computers and Communications, Vol. 7, Issue 1, pp.18-25, May 2013 (査読有)。

T. Matsumoto, T. Nishikawa, H. Torii, S. Matsufuji, "Matched Filter Bank Implementation on FPGA for a Mutually Orthogonal Set of ZCZ Codes Using Hadamard and ZCZ Codes," Proc. of the 15th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT2013), pp.764-767, Jan. 2013 (査読有)。

T. Matsumoto, H. Torii, S. Matsufuji, "Comparison of Optical ZCZ-CDMA System with Zero Correlation Zone  $4n-2$  by Electrical and Optical Processing," Proc. of the 3rd European Conference of Communications (ECCOM'12), pp. 268-273, Dec. 2012 (査読有)。

T. Matsumoto, H. Torii, S. Matsufuji, "Theoretical Analysis of BER Performance of Optical ZCZ-CDMA System With Smallest Zero Correlation Zone Using Optical Correlator," Proc. of the 2012 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS 2012), pp.549-552, Nov. 2012 (査読有)。  
DOI : 10.1109/ISPACS.2012.6473550

[学会発表](計 31 件)

蔵下征則, 松元隆博, 鳥井秀幸, 井田悠太, 松藤信哉, "拡散反射型の光 ZCZ-CDMA 方式における符号間干渉の影響," 電子情報通信学会技術研究報告, WBS2014-45, pp.37-41, Dec. 18-19, 2014 (熊本県熊本市, 熊本大学)。

蔵下征則, 松元隆博, 鳥井秀幸, 井田悠太, 松藤信哉, "拡散反射通信路における光 ZCZ-CDMA 方式の BER 特性の検討," 第 16 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム論文集, 301 通信工学, A-21, Nov. 15-16, 2014 (広島県広島市, 広島市立大学)。

松元隆博, 鳥井秀幸, 井田悠太, 松藤信哉, "CW 妨害を受けるハフマン系列を用いた SS 方式の AWGN 環境下での BER 特性の理論解析," 平 26 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会講演論文集, pp.386-387, Sept. 18-19, 2014 (鹿児島県鹿児島市, 鹿児島大学).

大平康旦, 村永聡, 松元隆博, 鳥井秀幸, 井田悠太, 松藤信哉, "等利得合成を用いた光 ZCZ-CDMA 方式の伝送実験," 平 25 電気・情報関連学会中国支部連合大会講演論文集, p.219, Oct. 19, 2013 (岡山県岡山市, 岡山大学).

西川隆洋, 松元隆博, 鳥井秀幸, 松藤信哉, "アダマール符号と ZCZ 符号から得られる直交符号に対するマッチドフィルタバンクの小規模化の検討," 第 14 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム予稿集, 通信工学, B-47, pp. 414-415, Nov. 17-18, 2012 (岡山県総社市, 岡山県立大学).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松元 隆博 (MATSUMOTO TAKAHIRO)

山口大学・大学評価室・准教授

研究者番号: 10304495