

## 学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	小規模回路による準同期光 CDMA 方式の実現に関する研究
氏 名(Name)	大平 康旦

近年, LED を用いた照明器具や信号機などの様々な製品が実用化されており, それらの製品の光を用いてデータの伝送を行う光無線通信システムが注目されている. 光無線通信システムは電波法の規制を受けないため, 広い帯域を使用できるので高速な通信が期待できる. さらに, 壁やカーテンで光を遮ることで, 外部に情報を漏洩させることのない安全な通信を実現することができる. しかし, 光無線通信を実現する上での問題点として, 複数のユーザが同時に通信を行う際, 希望の光源に隣接する光源からの光が干渉してしまう他局間干渉が発生することが挙げられる. この問題を解決するための方式として, 符号の直交性を利用して多元接続を実現する光符号分割多元接続(CDMA; Code Division Multiple Access)方式が提案されている. この光 CDMA 方式で用いられる拡散符号として, 光直交符号がよく知られているが, その他, 拡張プライム符号や変形擬直交 M 系列対などそれぞれ特徴のある相関特性を有する拡散符号(系列セット)が提案され, また, それらの符号に合わせた通信方式が提案されている. その中でも, 相関特性が零相関区間(ZCZ; Zero-Correlation Zone)を有する光 ZCZ 系列セットは, 他局間干渉のない準同期の光 CDMA 方式を与えることができる. これは光 ZCZ-CDMA 方式と呼ばれ, ユーザ間の同期が不完全でも他局間干渉を抑圧できる. ユーザ間の同期ずれの許容範囲は ZCZ の長さによって決まる. これまでに ZCZ の長さが 1, または  $4z - 2$  ( $z$  は自然数)となる系列の生成法が提案されている. この方式の実用化を考えた場合, 信号機やスマートフォンといった LED が用いられている既存の製品に光 CDMA 方式による光無線通信の機能を実装することになる. このような製品は人間工学に配慮してその外観や機能が設計されており, それらを損なわないためにも, 送受信機はなるべく小規模に構成できることが求められる. 光 ZCZ-CDMA 方式ではこれまで, ZCZ が 1,  $4z - 2$  となる場合に符号発生器や, 送信されたデータを相関処理するために必要となるマッチドフィルタバンクを小規模に構成する手法が提案されている.

本研究では, より柔軟な同期ずれへの耐性をもつ光無線通信を実現するため, ZCZ が  $2z$  となる光 ZCZ 系列の構成法を与え, さらにこの系列を用いた光 ZCZ-CDMA 方式の送受信機を小規模に構成する手法を提案する. また, 提案手法にしたがって並列伝送実験装置を試作し, 実際に光 ZCZ-CDMA 方式による光無線通信を行ない, その性能を評価する.

第 1 章では, 研究の背景と目的, 研究の位置づけ, および本論文の構成について述べる.

第 2 章では, 光 ZCZ 系列セットの定義と本論文が取り扱う ZCZ が  $2z$  となる系列の構成法, そして光 ZCZ-CDMA 方式の原理について述べる. ZCZ が  $2z$  となる光 ZCZ 系列セットは, ZCZ が 1 となる光 ZCZ 系列セットをインターリーブすることで容易に構成でき, 様々な同期ずれの大きさに対応可能な系列セットが構成可能であることを明らかにする. また, 同期ずれが生じる通信環境下で, 光 ZCZ 系列セットを用いた準同期の光 CDMA 方式がどのように他局間干渉を除去するかについて述べる.

第 3 章では, 前述の課題を解決するための符号発生器の小規模な構成法について述べ, 符号発生器を

FPGA上に実装し、回路規模と最大動作周波数の評価を行なう。その結果、系列長が1024、ZCZが2となる場合で約11分の1まで回路規模を縮小できることが示す。また、最大動作周波数も系列長が1024、ZCZが4の場合で約7.2倍の高速化ができることが明らかになり、提案手法の有効性が示される。

第4章では、全系列の相関処理を行なうことのできるマッチドフィルタバンクの回路規模を小規模に抑える構成法について述べ、マッチドフィルタバンクをFPGA上に実装し、回路規模の評価を行なう。その結果、系列長が256、ZCZが2の場合で約15分の1まで回路規模を縮小できることが明らかになり、提案手法の有効性が示される。

第5章では、実際に上記の手法を用いてFPGA上に実装した符号発生器とマッチドフィルタバンクに、LEDやAPDを組み合わせて基本的な送受信機を試作し、ビット誤り率特性を評価する伝送実験の結果について述べる。伝送実験の結果、等利得合成を用いることで送受信機間の距離が約60cm、対受光電力でみた場合では約2dBm改善できることが明らかになり、受光素子数の増やし、等利得合成を行なうことでBER特性が改善できることを明らかにする。

第6章では、本研究のまとめと今後の展望について述べる。

(様式 9 号)

## 学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	大平 康旦
審査委員	主 査：松元 隆博
	副 査：多田村 克己
	副 査：浜本 義彦
	副 査：松藤 信哉
	副 査：井田 悠太
論文題目	小規模回路による準同期光 CDMA 方式の実現に関する研究 (Study on Realization of Quasi-Synchronous Optical CDMA System with Small-Scale Circuit)
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>近年、LED を用いた照明器具や信号機などの様々な製品が実用化されており、それらの製品の光を用いてデータの伝送を行う光無線通信システムが注目されている。このシステムは電波法の規制を受けないため、広い帯域を使用できるので高速な通信が期待できる。さらに、壁やカーテンで光を遮ることで、外部に情報を漏洩させることのない安全な通信を実現することができる。しかし、応答速度が低速な LED を光無線通信に用いた場合、伝送速度が上げられない問題がある。それらを解決する方法として、零相関区間(ZCZ; Zero-correlation zone)を有する光 ZCZ 系列を用いた光符号分割多元接続 (CDMA) 方式を適用した複数の発光素子(LED)と複数の受光素子を用いた並列伝送が考えられる。さらにこの方式に等利得合成技術を適用することで、光量がレーザーダイオードに比べ弱いために、伝送距離を延すことができない問題も解決可能である。しかし、この方法を用いれば、並列伝送時に問題となる隣り合う LED 間の光の干渉を抑圧することができるが、複数の送受信機が必要となるため回路規模が問題となる。</p> <p>本論文では、送受信機の小規模化を実現すべく、送信機で用いる符号発生器と受信機で用いるマッチドフィルタバンクをそれぞれ小規模に構成する方法を提案し、FPGA 上に試作することでその有効性を明らかにしている。さらに、それらを含めた光 CDMA 送受信機を試作し、並列伝送実験によって、LED 間の光の干渉を抑圧できること、ビット誤り率特性を向上できること、伝送距離を延ばせることを明らかにしている。本論文の構成と内容は以下の通りである。</p> <p>第 1 章では、研究の背景と目的、研究の位置づけ、および本論文の構成について述べている。</p> <p>第 2 章では、光 ZCZ 系列の定義と本論文が取り扱う ZCZ が <math>2^2</math> となる系列の構成法、これを用いた光 CDMA 方式とこの方式の他局間干渉を抑圧できる原理について述べている。</p> <p>第 3 章では、光 ZCZ 系列に対する符号発生器の小規模構成法について述べ、この符号発生器を FPGA 上に実装し、系列長と回路規模及び最大動作周波数を評価し、提案する構成法の有効</p>	

性を明らかにしている。

第 4 章では、光 ZCZ 系列に対するマッチドフィルタバンクの小規模構成法について述べ、このマッチドフィルタバンクを FPGA 上に実装し、系列長と回路規模を評価し、提案する構成法の有効性を明らかにしている。

第 5 章では、光無線通信の発光素子に LED を用いた場合に伝送距離が延ばせない問題を解決するために、等利得合成を適用した光無線通信機を試作し、伝送実験によって伝送距離を延ばせることを明らかにしている。この等利得合成を適用した場合に問題となる回路規模が大きくなる問題は第 3 章と第 4 章の構成法を適用することで解決している。

第 6 章では、本論文のまとめと今後の課題となっている。

公聴会では、26 名の参加者があり、活発な質疑応答がなされた。その主な内容として、

- (1) 指向性とダイバーシティ効果の関係について
- (2) 光無線通信で目指す伝送速度について
- (3) 海中でのダイバー間通信へ応用する場合の目指す伝送距離について
- (4) 提案手法で用いる受光素子の制限について
- (5) 伝送実験で用いた LED の波長や光量などの仕様について

等の質問があり、申請者よりいずれに対しても適切に回答がなされた。

以上より、本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質疑に関する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文（査読付）の発表状況は、下記の通りである。

【関連論文】

1. Yasuaki Ohira, Takahiro Matsumoto, Hideyuki Torii, Yuta Ida, Shinya Matsufuji, " Code Generator for an Optical ZCZ Sequence with Zero-Correlation Zone  $2^2$ , " Journal of Signal Processing, Vol.21, No.6, pp.265-272, 2017.11.
2. Yasuaki Ohira, Takahiro Matsumoto, Hideyuki Torii, Yuta Ida, Shinya Matsufuji, " A Compact Matched Filter Bank for an Optical ZCZ Sequence Set with Zero-Correlation Zone  $2^2$ , " IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E101-A, No. 1, pp. 195-198, 2018.1.
3. Takahiro Matsumoto, Yasuaki Ohira, Satoshi Muranaga, Hideyuki Torii, Yuta Ida, Shinya Matsufuji, " Trial of Free-Space Parallel Transmission System Based on Optical ZCZ-CDMA System, " Proc. of IWSDA'13, pp. 84-87, 2013.10.
4. Yasuaki Ohira, Takahiro Matsumoto, Hideyuki Torii, Yuta Ida, Shinya Matsufuji, " Study on Construction of a Matched Filter Bank for an Optical ZCZ Sequence Set with Zero-Correlation Zone  $2^2$ , " Proc. of NCSP'16, pp.363-366, 2016.3.
5. Yasuaki Ohira, Takahiro Matsumoto, Hideyuki Torii, Yuta Ida, Shinya Matsufuji, " Construction of a Code Generator for an Optical ZCZ Sequence with Zero-Correlation Zone  $2^2$ , " Proc. of NCSP'17, pp.361-364, 2017.3.