

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 28 日現在

機関番号：82727

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420397

研究課題名(和文)MPS符号を用いた光CDMA方式の提案と照明光通信システムへの応用

研究課題名(英文)Study on visible light OCDMA schemes using MPS codes and its applications

研究代表者

松嶋 智子 (Matsushima, Tomoko)

独立行政法人高齢・障害・求職者雇用支援機構職業能力開発総合大学校(能力開発院、基・その他部局等・教授)

研究者番号：30648902

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：照明光通信はセキュアな屋内通信の手段として注目されている。本研究では、照明光通信のために、MPS符号の反転系列とMUIキャンセラを用いた新しい光CDMA方式を提案した。提案方式は、系列を反転しない従来方式と同様にMUIを完全に除去することができる。計算機シミュレーションの結果、提案方式の多重化信号は従来方式に比べて、平均強度が高く、ゆらぎが小さいことが示された。さらに、31.25 KHzのMIDI信号を符号長64のMPS符号で多重化し、5個のLED光源で伝送する照明光CDMAシステムの実験装置を作成した。実験により5チャンネルのMIDI信号はすべて誤りなく復号され、実用化の可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：Visible-light communication systems are suitable to realize secure indoor networks. In this study, optical CDMA schemes employing MUI cancellers with inverted sequences of MPS codes have been proposed for visible-light communication systems. The proposed schemes have the property of canceling MUI as well as the conventional schemes. Bit error rate, average light intensity and normalized intensity fluctuation of multiplexed optical signals were investigated by computer simulation. It has been shown that the proposed schemes are suitable for visible light communication, since it has lower intensity fluctuation and higher average light intensity than the conventional schemes. Then, a visible-light CDMA system with several LEDs has been implemented. It has five channels on each of which 31.25 KHz MIDI data, coded with a MPS code with a length of 64, is transmitted. It was confirmed that the system can correctly decode every MIDI data transmitted simultaneously.

研究分野：通信・ネットワーク工学

キーワード：照明光通信 光CDMA MUIキャンセラ MPS符号 反転系列

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 照明光通信と光 CDMA への期待

白色発光ダイオードを光源とする LED 照明の普及に伴い、LED 照明に通信機能を付加した照明光通信の実用化が注目されつつあった。照明光通信は、電磁波を発生しないため、医療機器などの電子機器に影響を与えない。また、光の届く範囲を限定させることが容易であるため、電波に比べて漏洩を防ぎやすくセキュアな通信が可能であるという特徴を持つ。

一方、光 CDMA (符号分割多元接続) 方式は、光信号の広い帯域を有効に利用することができ、比較的容易に既存の光源でシステムを実現できるため、光通信システムにおける多元接続方式として注目されていた。

### (2) 光 CDMA に関する研究動向

光 CDMA 方式に関する研究は、1986 年に発表された P.R.Prucnal らの研究 (J. Lightwave Tech., vol.LT-4, no.5, pp.547-554, May 1986) から本格的に行われるようになった。強度変調を行う光 CDMA システムの場合、拡散符号として単極性のシグネチャ符号を用いなければならぬため、多重ユーザ干渉(MUI)の除去が難しい。その結果、初期の光 CDMA システムでは一般に MUI に起因する復号誤り率が高いという問題があった。

その後、拡張プライム系列(MPS: Modified Prime Sequence)符号と適切な信号方式を組み合わせることにより、MUI を除去し干渉による復号誤りを完全になくす同期光 CDMA 方式が提案された。このような方式としては、職業能力開発総合大学の松嶋らが提案した EWO 方式 (電子情報通信学会論文誌(A), vol.J86-A, No.9, pp.957-968, Sept. 2003) の他に、エジプト Alexandria 大学 H.M.H. Shalaby らが提案した Shalaby 方式 (Second IEEE Symposium on Computers and Communications, pp.556-560, July 1997)、国立台湾大学 M.-Y. Liu らが提案した Liu 方式 (Microwave and optical technology letters, Vol.25, No.6, pp.390-392, June 2000) がある。さらに、2008 年に松嶋らが発表した MPS 符号の一般化 (電子情報通信学会論文誌(A), vol.J91-A, No.5, pp.559-573, May 2008) により、それまで素体上でしか構成できないと考えられていた MPS 符号が拡大体上でも構成できることが示され、パラメータ設定の制限が大幅に緩和された。

これらの符号や多重化方式によれば、多重ユーザ干渉や雑音に強い光 CDMA 方式を構築することが可能である。しかし、MPS 符号は疎な系列であるため、照明光通信に用いた場合、照明としての十分な明るさが得られず、また明るさのゆらぎが大きいという問題があった。そこで、多重ユーザ干渉を除去する能力を保持したまま、光信号の平均信号強度を高くし、強度の変動を小さく抑える多重化方式を検討する必要が生じた。

## 2. 研究の目的

本研究では、MUI を除去する性質はそのまま、光信号の平均強度を高め、強度の変動を小さくする光 CDMA 方式を開発することを第一の目的とする。また、本研究の第二の目的は、提案方式の誤り率特性等を詳細に評価し、実用的な照明光 CDMA システムへの応用を検討することである。

まず、光信号の平均強度を高くする具体的な方式として、MPS 符号の“1”(mark)と“0”(space)を反転させた系列をシグネチャ符号とし、EWO 方式などの MUI キャンセラを用いた多重化方式を提案する。通常の光 CDMA とは異なり、伝送しないユーザは常に“1”(mark)を送信し、復号時には通常の系列と同様に相関を計算する。相関復号の結果、MUI を除去し信号強度変動の小さい光 CDMA システムを実現することができる。本研究では、最適な復号器の構成についても合わせて検討することを目的とする。

さらに、提案方式の照明光通信への応用として、提案方式を用いた実験装置を開発して性能を確認する。送信側では各チャンネルに一つの LED 光源を接続して、空間光で多重化して伝送する。受信側では、受信信号を ADC で多値の電気信号に変換して、各チャンネルに割り当てられた符号語で復調を行うものである。このような実験装置を FPGA を用いて作成し、実際に伝送実験を行うことを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) シグネチャ符号等の調査と理論検討

目的とする光 CDMA 方式の提案に際して、まず、従来発表されているシグネチャ符号や MUI キャンセラの調査を行った。符号語の割り当て方や復号方式についても調査し、どのように干渉除去能力や雑音耐性に影響しているかを整理した。

### (2) 新しい光 CDMA 方式の提案

前述の調査をもとに、目的とする光 CDMA 方式、すなわち MUI を完全に除去しつつ、多重化された光信号の平均強度を高める光 CDMA 方式を提案した。また、多重化された受信信号に対する復号方式や定性的な特徴についても検討を行った。

### (3) シミュレーションによる詳細な評価

計算機シミュレーションにより、提案方式の誤り率特性を詳細に評価するとともに、平均光信号強度と信号強度の変動(標準偏差)を定量的に求めた。従来の代表的な光 CDMA 方式と比較することで、提案方式の有効性を確認した。

### (4) 光 CDMA 実験装置の開発

提案方式に基づく照明光 CDMA システムの実験装置の設計を行い、実際に数個の白色 LED 光源を用いて照明光 CDMA 通信システ

ムの実験装置を開発した．符号化や復号などのデジタル処理部は FPGA 等の回路を利用して実装した．

#### 4. 研究成果

本研究では，当初の目的通りに，照明光通信のために，MPS 符号の反転系列と MUI キャンセラを用いた新しい光 CDMA 方式を提案した．提案方式は，系列を反転しない従来方式と同様に MUI を完全に除去することができる．計算機シミュレーションの結果，提案方式の多重化信号は従来方式に比べて，平均強度が高く，ゆらぎが小さいことが示された．また，計算機シミュレーションにより，復号誤り率特性を詳細に評価した．さらに，31.25 KHz の MIDI 信号を符号長 64 の MPS 符号で多重化し，5 個の LED 光源で伝送する照明光 CDMA システムの実験装置を作成した．実験により 5 チャンネルの MIDI 信号はすべて誤りなく復号され，実用化の可能性が示された．

##### (1) シグネチャ符号等の調査と理論検討

これまでに発表されているシグネチャ符号としては，OOC (光直交符号)，PSC (プライム系列符号)，MPS 符号が提案されている．特に，MPS 符号は，符号語が複数のグループに分割され，グループを単位とした特殊な相関特性を持つことが知られている．また，多重化を行う各ユーザにどのように符号語を割り当てるかは，情報変調方式により決定される．

これまでの研究で，MPS 符号を拡散に用いた場合のみ MUI を完全に除去できることが示されている．代表的な MUI キャンセラ方式として，EWO 方式，Shalaby 方式，Liu 方式が発表されているが，それらの特徴や誤り訂正能力の比較が，本研究において初めて示された (表 1)．

表 1 MUI キャンセラの比較

特性	EWO	Shalaby	Liu
拡散率	$q^2$	$q^2$	$q^2+q$
ユーザ数	$q \lfloor q/2 \rfloor$	$q^2-q$	$q^2$
判定距離	$2q$	$q$	$q$
復号閾値	0	$q/2$	$q/2$

##### (2) 新しい光 CDMA 方式の提案

光信号の平均強度を高めるため，MPS 符号の反転系列で拡散する光 CDMA 方式を提案した．MUI の影響を除去するため，多重化された受信信号の復号方式も合わせて検討し，復号器の構成を明らかにした．復号器は 2 つの相関器を持ち，一方の相関器の出力と他方の出力の差を比較することで復号を行う．図 1 に提案方式の拡散系列と多重化信号の例を示す．

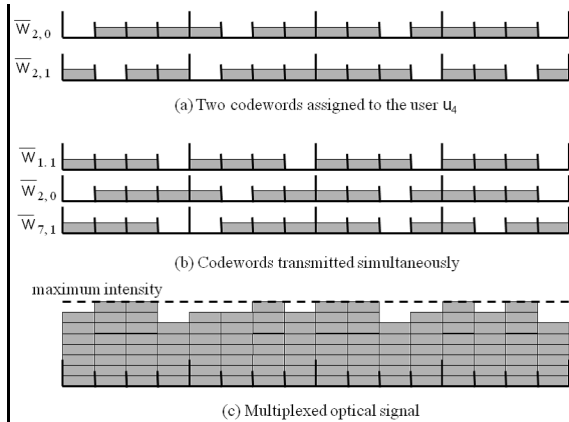


図 1 提案方式の拡散系列と多重化信号

##### (3) シミュレーションによる評価

計算機シミュレーションにより，提案方式の誤り率特性を詳細に評価するとともに，平均光信号強度と信号強度のゆらぎ (正規化された標準偏差) を求めた．系列を反転させない従来方式と比較して，提案方式の平均光強度は高く，信号強度のゆらぎも小さいことが示された．図 2 に提案方式の一つである反転 EWO-MPSC 方式とその他の方式の復号誤り率の比較を示す．

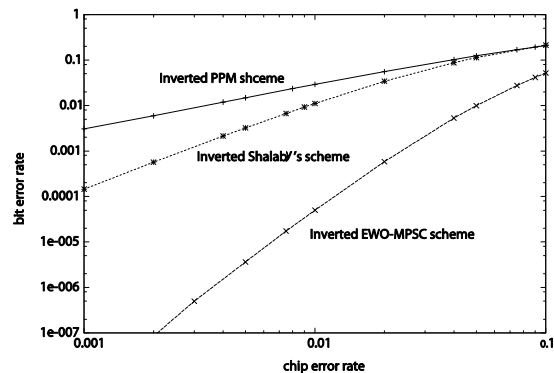


図 2 誤り率特性の比較

##### (4) 光 CDMA 実験装置の開発

複数の白色 LED 光源を用いて，提案方式に基づく照明光 CDMA システムの実験装置を開発した．符号化や復号などのデジタル処理部は FPGA で実装した．また，復号器においては，受光器の出力を ADC で多値デジタル信号に変換し，多値情報を CDMA の相関復号に利用できるようにした．MIDI データの伝送実験では，全チャンネルで誤りのない伝送ができ，照明光 CDMA システムの実用化の可能性を示した．

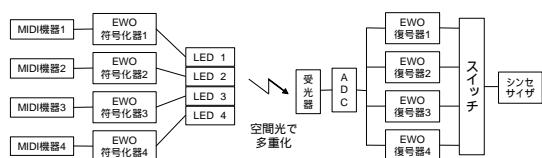


図 3 実験装置のブロック図

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計1件)

Shoichiro Yamasaki, Tomoko K. Matsushima, A security enhancement technique for wireless communications using secret sharing and physical layer secrecy transmission, IEICE Transactions on Information and Systems, 査読有, Vol.E99-D, No.4, 2016, pp.830-838.  
DOI: 10.1587/transinf.2015ICP0010

### 〔学会発表〕(計25件)

松嶋智子, 宮崎真一郎, 大村光徳, 山寄彰一郎, 光拡散符号を用いた可視光 CDMA 通信について(招待講演), 2016年電子情報通信学会総合大会, SA-3-3, 基礎・境界講演論文集, pp.S-39-S-40, 2016年3月15日~18日, 九州大学(福岡県・福岡市).

佐藤紘樹, 宮崎真一郎, 松嶋智子, 大村光徳, 山寄彰一郎, 拡張プライム系列符号を用いた MUI キャンセラの CDMA 無線通信への応用, 電子情報通信学会情報理論研究会, IT2015-107, pp.37-42, 2016年3月10日~11日, 電気通信大学(東京都・調布市).

松嶋智子, 宮崎真一郎, 山寄彰一郎, CDMA 無線通信のための拡張プライム系列符号を用いた多重ユーザ干渉除去方式の検討, 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会, WBS2015-27, 2015年10月9日, 早稲田大学(東京都・新宿区).

Shinichiro Miyazaki, Tomoko K. Matsushima, Shoichiro Yamasaki, Kotoku Omura, A visible-light communication system using optical CDMA with RGB multi-chip LEDs, 15th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), 査読有, 2015年10月7日~9日, 奈良春日野国際フォーラム(奈良県・奈良市).

宮崎真一郎, 松嶋智子, 山寄彰一郎, 拡張プライム系列を用いた CDMA 無線通信のための多重ユーザ干渉除去方式, 電子情報通信学会情報理論研究会, IT2015-19, pp.13-16, 2015年7月13日~14日, 東京工業大学(東京都・目黒区).

宮崎真一郎, 松嶋智子, 山寄彰一郎, マルチチップ LED を用いた可視光 CDMA システムの研究, 2015年電子情報通信学会総合大会, A-5-3, 2015年3月10日

~13日, 立命館大学(滋賀県・草津市).

Shoichiro Yamasaki, Tomoko K. Matsushima, Shinichiro Miyazaki, Secure wireless communications using secret sharing and vector coding, 2014 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS), C2L-A-05, 査読有, 2014年11月17日~20日, ANA インターコンチネンタル石垣リゾート(沖縄県・石垣市).

Kotoku Omura, Shoichiro Yamasaki, Tomoko K. Matsushima, Hirokazu Tanaka, Miki Haseyama, Performance of error resilient method using invertible codes for 3D DWT video transmission, 29th International Technical Conference on Circuit/Systems Computers and Communications (ITC-CSCC), PID 1122, 査読有, 2014年7月1日~4日, Phuket (Thailand).

Hirokazu Tanaka, Shoichiro Yamasaki, Tomoko K. Matsushima, Miki Haseyama, A study on simplified structure for multi-carrier DS-SS-CDMA with bi-orthogonal keying, 29th International Technical Conference on Circuit/Systems Computers and Communications (ITC-CSCC), PID 1063, 査読有, 2014年7月1日~4日, Phuket (Thailand).

松嶋智子, 佐々木詩歩, 角山正樹, 山寄彰一郎, 村田悠也, 寺町康昌, 反転 MPSC による MUI キャンセラの可視光 CDMA システムへの応用, 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会, WBS2013-59, pp.101-106, 2014年3月10日~11日, 名古屋大学(愛知県・名古屋市).

Tomoko K. Matsushima, Masaki Kakuyama, Shoichiro Yamasaki and Yasuaki Teramachi, A Study on multi-user interference cancellers for synchronous optical CDMA systems, 第36回情報理論とその応用シンポジウム(SITA2013), 4.3.4, pp.294-299, 2013年11月26日~29日, 伊東ホテル聚楽(静岡県・伊東市).

Shoichiro Yamasaki, Tomoko K. Matsushima, A compression scheme of secret sharing, 2013 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), 査読有, WA2-D-3,

2013年11月12日～15日, 沖縄県市町村自治会館(沖縄県・那覇市).

Kotoku Omura, Shoichiro Yamasaki, Tomoko K. Matsushima, Hirokazu Tanaka, Miki Haseyama, Error resilient 3D DWT video transmission using invertible codes, 2013 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), 査読有, WA1-B-5, 2013年11月12日～15日, 沖縄県市町村自治会館(沖縄県・那覇市).

Tomoko K. Matsushima, Shiho Sasaki, Masaki Kakuyama, Shoichiro Yamasaki, Yuya Murata, Yasuaki Teramachi, A visible-light communication system using optical CDMA with inverted MPSC, Sixth International Workshop on Signal Design and Its Applications in Communications (IWSDA), 4-4, 査読有, 2013年10月27日～11月1日, 機械振興会館(東京都・港区).

Shoichiro Yamasaki, Tomoko K. Matsushima, Hirokazu Tanaka, A state transition control method of space-time trellis coded transmission, 2013 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA), RS1-5, 査読有, 2013年9月30日～10月2日, 産業労働センターウインクあいち(愛知県・名古屋市).

Masaki Kakuyama, Shiho Sasaki, Tomoko K. Matsushima, Shoichiro Yamasaki and Yasuaki Teramachi, Performance Comparisons of Interference Cancellers for Synchronous Optical CDMA Systems, 2013 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA2013), RS1-8, 査読有, 2013年9月30日～10月2日, 産業労働センターウインクあいち(愛知県・名古屋市).

Shiho Sasaki, Masaki Kakuyama, Tomoko K. Matsushima, Shoichiro Yamasaki, Yuya Murata and Yasuaki Teramachi, An Optical CDMA Scheme Using Inverted MPSC for Visible-Light Communication, 2013 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA2013), RS1-7, 査読有, 2013年9月30日～10月2日, 産業労働センターウインクあいち(愛知県・名古屋市).

松嶋智子, 角山正樹, 大村光徳, 山崎彰一郎, 村田悠也, 寺町康昌, 反転 MPSC 系列を用いた照明光 CDMA 通信システムの評価, 電子情報通信学会スマートインフォメディアシステム研究会, SIS2013-3, pp.11-16, 2013年6月13日～14日, 鹿児島県文化センター宝山ホール(鹿児島県・鹿児島市).

[その他]

ホームページ等

[http://www.ieice.org/ess/wbs/2016IEICE\\_taikai.html](http://www.ieice.org/ess/wbs/2016IEICE_taikai.html) 2016年電子情報通信学会総合大会 公募シンポジウム 招待講演資料

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松嶋 智子 (MATSUSHIMA, Tomoko)  
独立行政法人高齢・障害・求職者雇用支援  
機構職業能力開発総合大学校・能力開発  
院・教授  
研究者番号: 30648902

### (2) 研究分担者

山崎 彰一郎 (YAMASAKI, Shoichiro)  
独立行政法人高齢・障害・求職者雇用支援  
機構職業能力開発総合大学校・能力開発  
院・教授  
研究者番号: 60648963

### (3) 研究協力者

寺町 康昌 (TERAMACHI, Yasuaki)  
田中 宏和 (TANAKA, Hirokazu)