

# 照明可視光通信のための擬似雑音符号を用いた調光制御法に関する研究

7313618 尾崎 崇

## 1 はじめに

近年 LED は、長寿命や低消費電力、高速な応答特性といったその特性により、次世代の光源として急速に普及している。これに伴い LED の持つ高速な応答特性を活かした可視光通信に注目が集まっている [1][2]。可視光通信とは、人の目に見える波長域の光を用いて行われる通信方式であり、光の広帯域性により高速通信の実現が可能であることに加え、屋内の照明光源に対して適用することで、照明機能と通信機能を同時に達成することが可能である。この照明可視光通信では、照明としての側面からは調光（明るさ制御）機能が求められる。また、通信としての側面からは高速な情報伝送能力に加え、複数ユーザに対する同時情報伝送のための多重化技術が求められる。

照明可視光通信におけるちらつきの緩和と調光制御のために、デジタル調光制御が検討されている [3]。デジタル調光制御では一般的に Pulse Width Modulation (PWM) 方式によって光パルスのデューティ比（パルス幅）を制御することで調光制御が行われる。このデジタル調光制御を用いた情報変調方式として、IEEE802.15.7 では Variable Pulse Position Modulation (VPPM) 方式が提案されている [2]。VPPM 方式は 2 値の PPM 方式と PWM 方式を組み合わせた方式である。VPPM 方式では所望の明るさに応じてデューティ比（パルス幅）を制御することで調光制御を行う。また、閾値を必要とせず情報の復調を行うことが可能である。しかしながら、2 値の PPM 方式を基にしているため、情報伝送効率（ビット/フレーム）は調光制御にかかわらず常に 1 [bit/frame] となってしまうことに加え、多重化を行うことができない。この VPPM 方式の情報伝送効率を改善するために、Multi-pulse PPM (MPPM) 方式 [4][5] を拡張し調光制御を可能にした Variable-Rate MPPM (VR-MPPM) 方式が提案されている [6][7]。MPPM 方式では、1 フレーム当たり  $m$  個のスロットの中から  $k$  個のスロットを選択することで、 ${}_m C_k$  通りの符号の組み合わせにより情報を送信する。そのため MPPM 方式の情報効率は  $\lfloor \log_2 {}_m C_k \rfloor$  [bit/frame] となる。VR-MPPM 方式では、所望の調光度合いに応じて、 $k$  を変えることで調光制御を行う。したがって VR-MPPM 方式の平均情報効率は  $\frac{\sum_{k=1}^{m-1} \lfloor \log_2 {}_m C_k \rfloor}{m-1}$  となり、VPPM 方式の情報効率は改善することができる。しかし、MPPM 方式と同様に受信信号を復調するためには、受信機において調光度合い（選択されたスロットの数  $k$ ）を推定しなければならない。また、VR-MPPM 方式でも複数ユーザへの同時多重伝送は実現されていない。

そこで、本稿では従来方式の情報伝送効率改善及び多

重化の実現と、調光情報を必要としない復調を実現するため、擬似雑音 (PN) 符号として、変形擬直交 M 系列対 [8][9] を用いたデジタル調光制御を提案する。さらに、提案するデジタル調光制御法を MPPM 方式と組み合わせた Variable MPPM (VMPPM) 方式を提案する [10]。提案する VMPPM 方式では PN 符号の符号長を変化させることで、シングルユーザ環境とマルチユーザ環境のそれぞれに対応することが可能である。また、調光精度と通信路容量を向上するため、提案する VMPPM 方式と従来方式である VR-MPPM 方式を組み合わせた Hybrid Dimmable MPPM (HD-MPPM) 方式を提案する。

本研究では、まずシングルユーザを想定した理論解析及び周波数利用効率の評価を行う。さらに、提案する VMPPM 方式をマルチユーザ環境に拡張し、その誤り率性能と周波数利用効率の検討を行う。HD-MPPM 方式においては、その通信路容量の評価を行う。特に調光性能については人の目が感じる明るさを考慮して行う。

## 2 変形擬直交 M 系列対を用いた調光制御法

提案するデジタル調光制御法では M 系列より生成される変形擬直交 M 系列対 [8][9] を用いる。この変形擬直交 M 系列対は、 $\{0, 1\}$  で構成される送信系列  $C$  と、 $\{1, -1\}$  で構成される受信機用の参照系列  $R$  により構成される。送信系列  $C$  では複数ユーザへの同時情報伝送を行うため、情報伝送用系列  $PN$  及び  $\overline{PN}$  を用いる。ここで  $\overline{PN}$  は  $PN$  の 0 及び 1 を反転させた系列である。符号長  $L$  が 4 の場合、 $PN$  及び  $\overline{PN}$  はそれぞれ次のようになる。

$$PN = \begin{bmatrix} PN_1 \\ PN_2 \\ PN_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\overline{PN} = \begin{bmatrix} \overline{PN}_1 \\ \overline{PN}_2 \\ \overline{PN}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

このとき情報伝送用系列では最大  $L-1 (= 3)$  ユーザまで同時情報伝送が可能である。さらに、 $PN$  及び  $\overline{PN}$  は受信機において参照系列

$$R = PN - \overline{PN}, \quad (3)$$

との相関をとることによって区別することが可能である。なぜなら  $PN$  及び  $\overline{PN}$  と参照系列  $R$  の間には次式に示すように擬直交関係が成り立っているからである。

$$PN \cdot R^T = \left(\frac{L}{2}\right) E, \quad (4)$$

$$\overline{PN} \cdot R^T = \left(-\frac{L}{2}\right) E. \quad (5)$$

ただし,  $x^T$  は  $x$  の転置行列,  $E$  は単位行列である. しかし, 情報伝送用の系列だけでは 50% の調光率しか表すことができない. そこで, 提案するデジタル調光制御法では調光制御用の系列  $Dim$  及び  $\overline{Dim}$  を用いる.  $Dim$  及び  $\overline{Dim}$  はそれぞれすべて 0 及び 1 の系列である. そのため, それぞれ 0% と 100% の調光率を表すことができる. また, これらの調光制御用系列は

$$Dim \cdot R^T = \overline{Dim} \cdot R^T = 0, \quad (6)$$

となる特徴を持っているため, 受信機において復調時に通信へ影響を与えることはない. 結果として, 提案するデジタル調光制御法では合計 4 種類の系列を用いて 3 段階 (0%, 50%, 100%) の調光率を表すことができる.

### 3 VMPPM 方式

本章では提案した PN 符号を用いる調光制御法を MPPM 方式に応用した, VMPPM 方式を提案する. MPPM 方式は 1 フレーム内の選択される複数のスロット位置により情報の伝送を行う方式である. そのため, 1 フレームあたりのスロット数を  $n$ , 選択されるスロット数を  $r$  ( $1 \leq r \leq n-1$ ) とすると, 情報伝送効率は  $[\log_2 n C_r]$  [bit/symbol] となる. ここで,  $[x]$  は  $x$  の床関数である. 受信機では, 各  $n$  個のスロットの積分値を大きい順に  $r$  個選択することで, 選択されたスロットの位置を推定し情報の復調を行う. VMPPM 方式では, 各スロット長を  $L$  個に分割したサブスロットを用いることで, 各スロットに対して PN 符号を適用する. したがって, スロット長と PN 符号の符号長は等しい. 選択された  $r$  個のスロットに対しては情報伝送用系列  $PN$  及び  $\overline{PN}$  が適用され,  $n-r$  個の非選択スロットに対しては調光情報に応じて調光制御用系列  $Dim$  及び  $\overline{Dim}$  が適用される. さらに, 情報伝送用系列が適用される  $r$  個のスロットでは, 各スロット毎に  $PN$  と  $\overline{PN}$  の選択を行うことで, 合計  $r$  [bit] の情報を表現することができる. そのため, VMPPM 方式では, MPPM 方式の  $[\log_2 n C_r]$  [bit] に加えて,  $r$  個の情報伝送用系列による  $r$  [bit] の情報を伝送することが可能であり, 情報伝送効率は 1 シンボルあたり  $[\log_2 n C_r] + r$  [bit] となる. また, 提案する VMPPM 方式では擬似雑音符号の符号長を変化させることで, シングルユーザ環境とマルチユーザ環境へ対応することが可能である.

#### 3.1 シングルユーザ ( $L = 2$ )

ここでは擬似雑音符号の符号長を  $L = 2$  とし, シングルユーザ環境を想定する.

図 1 に VMPPM 方式のシステム構成を示す. 送信機では, まずソースデータを  $[\log_2 n C_r]$  [bit] の情報と  $r$  [bit] の情報に変換する. 次に, 1 フレーム内  $n$  個のスロットの中から,  $[\log_2 n C_r]$  [bit] の情報に応じて  $r$  個のスロットが選択される. さらに,  $r$  [bit] の情報と調光情報に応じて, 各  $n$  個のスロットに対し PN 符号の適用を行う. 具体的には,  $r$

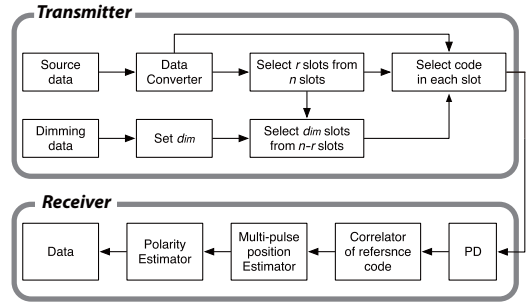


図 1 VMPPM 方式のシステム構成.

[bit] の情報に応じて, 選択された各  $r$  個のスロットごとに  $Dim$ , または  $\overline{Dim}$  が選択される. また,  $n-r$  個の未選択スロットに対しては調光制御用系列が適用され, 調光情報に応じて  $d_{im}$  個のスロットで  $\overline{Dim}$  が選択される. ただし,  $0 \leq d_{im} \leq n-r$  である. したがって, VMPPM 方式では  $\frac{r+2d_{im}}{2n} \times 100$  [%] の調光率を表現することができる.

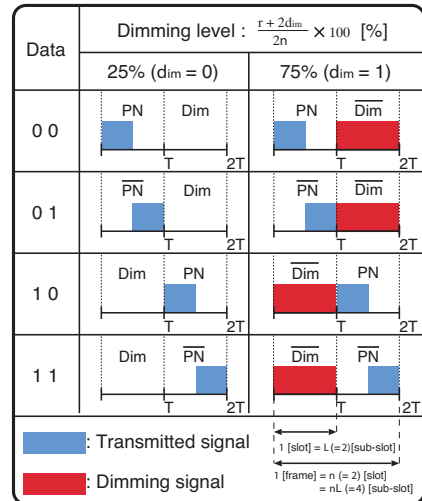


図 2 提案方式の送信信号とその調光例 ( $L = 2, n = 2, r = 1$ ).

図 2 に VMPPM 方式で  $L = 2, n = 2, r = 1$  としたときの送信信号とその調光例を示す. 図 2 において,  $T$  は MPPM スロットの間隔を示している. この場合, 25% ( $d_{im} = 0$ ) と 75% ( $d_{im} = 1$ ) の  $n-r+1 (=2)$  段階の調光制御を行うことができる. VMPPM 方式では  $n$  を増加させることによって調光可能な段階数を増加させることができる (表 1 参照).

表 1 調光率と情報伝送効率 ( $L = 2, n = 2, 4$ ).

n	r	Dimming level : $\frac{r+2d_{im}}{2n} \times 100$ [%]				Data transmission rate [bit/symbol]
		$d_{im} = 0$	$d_{im} = 1$	$d_{im} = 2$	$d_{im} = 3$	
2	1	25.0	75.0	-	-	2
	1	12.5	37.5	62.5	87.5	3
4	2	25.0	50.0	75.0	-	4
	3	37.5	62.5	-	-	5

受信機では, 受信した光信号を PD (Photo diode) により電気信号に変換する. そして, 各  $n$  個のスロットごとに適用された送信系列と参照系列との相関がとられ,  $n$  個の相関

値が生成される。VMPPM 方式では  $\lfloor \log_2 n C_r \rfloor$  [bit] の情報を、 $n$  個の相関値の中から絶対値の大きい順に  $r$  個を選択することにより推定する。このとき、調光制御用系列が適用されたスロットの相関値は、理想的には式 (3) より 0 となるため、調光率変化による通信品質への影響の軽減化が期待できる。さらに、推定された  $r$  個のスロットの相関値の極性を判定することで、推定された各  $r$  個のスロット毎に  $PN$  と  $\overline{PN}$  のどちらが適用されたかを決定し、計  $r$  [bit] の情報を復調する。VMPPM 方式において、各スロットの相関値とその絶対値は容易に計算することができるため、VMPPM 方式におけるシステムの複雑さは、従来の MPPM 方式とほぼ変わらない。

### 3.2 マルチユーザ ( $2 \leq L$ )

提案する VMPPM 方式は変形擬直交 M 系列対の符号長を  $2 \leq L$  とすることで、情報伝送用系列の符号数を増加させ、マルチユーザ環境に対応することが可能である。

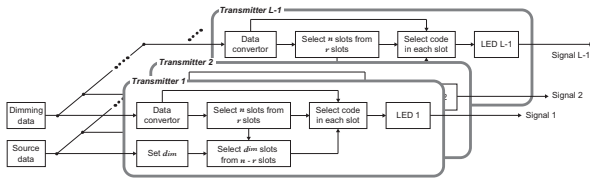


図3 マルチユーザを想定した VMPPM 方式の送信機のシステム構成。

図3に VMPPM 方式の送信機のシステム構成を示す。送信機は  $L - 1$  個の LED アレイによって構成され、 $i$  番目 ( $i = 1, 2, \dots, L - 1$ ) の LED 送信機に対して  $PN_i$  及び  $\overline{PN}_i$  割り当てられる。各 LED 送信機では、割り当てられた情報伝送用系列を用いて VMPPM 方式による情報の変調が行われる。この結果、LED 送信機 1 つあたりで  $\lfloor \log_2 n C_r \rfloor + r$  [bit/frame]、LED アレイ送信機では最大  $(L - 1) \times (\lfloor \log_2 n C_r \rfloor + r)$  [bit/frame] を達成することができる。また、各 LED 送信機において  $n - r$  個の未選択スロットに対しては調光制御用系列が適用され、調光情報に応じて  $d_{im}$  個のスロットで  $\overline{Dim}$  が選択される。したがって、各 LED 送信機では  $\frac{rL/2 + Ld_{im}}{nL} \times 100$  [%] の調光率を表現することができる。また、LED アレイの調光率は LED アレイの平均電力対ピーク電力比で定義され、次のように表すことができる。

$$\text{LED アレイの調光率} = \frac{1}{nLT_p(L-1)A} \int_0^{nLT_p} X(t)dt. \quad (7)$$

式 (7) において  $A$  は LED1 つあたりの光信号の振幅、 $T_p$  はサブスロットの間隔、 $X(t)$  は LED アレイの送信信号を示している。

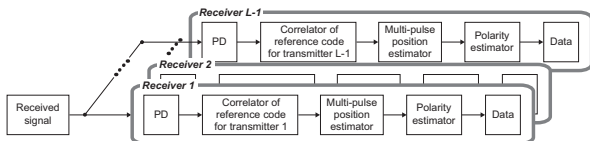


図4 マルチユーザを想定した VMPPM 方式の受信機のシステム構成。

図4にマルチユーザを想定した VMPPM 方式の受信機のシステム構成を示す。受信機では、各ユーザに割り当てられた参照系列を用いて、各ユーザごとに VMPPM 方式による情報の復調が行われる。

## 4 HD-MPPM

本章では提案方式の通信路容量を向上するため、提案方式と VR-MPPM 方式を組み合わせた HD-MPPM 方式を提案する。

### 4.1 送信機

図5に示すように、HD-MPPM の送信機は変調方式の選択と各変調方式による情報変調及び調光制御の2つのパートによって構成される。

#### 4.1.1 変調方式の選択

変調方式の選択パートでは、所望の明るさに応じた変調方式が選択される。具体的には、所望の明るさに応じて決定される変数  $k$  が定数  $r + D_{im}$  よりも小さい (調光率が低い) 場合、VR - MPPM 方式が選択される。一方、変数  $k$  が定数  $r + D_{im}$  よりも大きい (調光率が高い) 場合、VMPPM 方式が選択される。これは、調光率が高い ( $k \leq m/2$ ) 場合、VR - MPPM 方式の通信路容量が減少してしまうからである。

#### 4.1.2 情報変調及び調光制御

VR-MPPM 方式では、ソースデータに応じて  $m$  個のスロットから  $k$  個のスロットが選択される。そのため、情報効率は  $\lfloor \log_2 m C_k \rfloor$  [bit/frame] を達成することができる。また、このとき VR-MPPM 方式が表すことのできる調光率は  $\frac{k}{m} \times 100$  [%] となる。例えば、 $k = 1, r = 2, m (= 2n) = 8, D_{im} = 0$  の場合、変調方式には VR-MPPM 方式が選択され、HD-MPPM 方式は 12.5% の明るさを表現することができる (表6参照)。

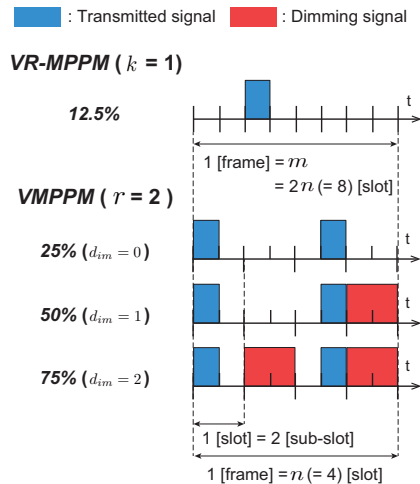


図6 HD-MPPM 方式の送信信号の一例 ( $m = 2n = 8, r = 2, D_{im} = 0$  and  $d_{im} = 0, 1, 2$ ).

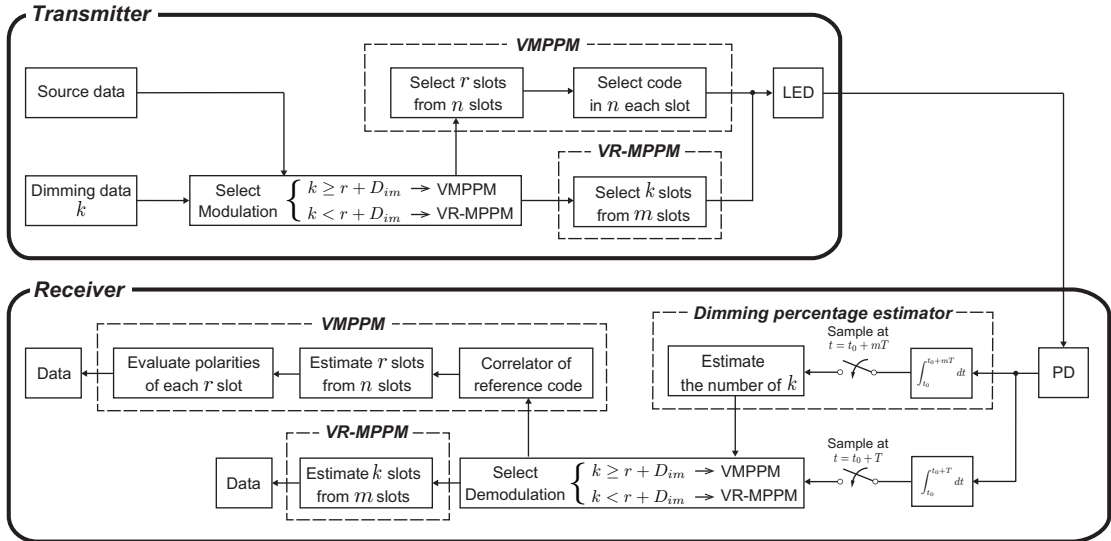


図5 HD-MPPM方式のシステムモデル.

## 4.2 受信機

受信機ではPDを用いて、受信した光信号を電気信号に変換する．受信機は図5に示すように、調光率の推定、サブスロットごとの相関値生成、復調方式の選択、各変調方式による情報の復調の4つのパートから構成される．

### 4.2.1 調光率の推定

このパートでは、電気信号に変換された受信信号からフレーム長  $mT_p$  ごとに相関値を出力する．さらに、その出力値を用いて表された調光率 ( $k$  の値) の推定を行う．ここで推定された調光率は、復調方式の選択を行う際に用いられる．

### 4.2.2 サブスロットごとの相関値生成

ここでは1フレームあたり各  $m (= 2n)$  個のサブスロットから相関値を生成する．この相関値は、各変調方式による情報の復調パートにおいて復調のために用いられる．

### 4.2.3 復調方式の選択

復調方式は推定された調光率 ( $k$  の値) に応じて選択される．具体的には、 $k$  が  $r + D_{im}$  より小さい場合にVR-MPPM方式が選択される．一方、 $k$  が  $r + D_{im}$  より大きい場合にはVMPPM方式が選択される．

### 4.2.4 各変調方式による情報の復調

ここでは、相関値の生成パートで得られた各  $m (= 2n)$  個のサブスロットの相関値を用いて情報の復調が行われる．選択された復調方式がVMPPM方式の場合、 $m (= 2n)$  個のサブスロットの相関値に対して参照系列の乗算が行われる．

## 5 理論解析

この章では、シングルユーザ ( $L = 2$ ) を想定した場合のVMPPM方式のシンボル誤り率 (SER) 性能の理論解析を行う．光無線通信路のモデルは

$$Y(t) = RX(t) \otimes h(t) + N(t), \quad (8)$$

と表すことができる [1]．ここで、 $Y(t)$  は受信信号、 $R$  は受信機の感度、 $X(t)$  は送信信号、 $h(t)$  はインパルス応答、 $N(t)$  は加法的白色ガウス雑音 (Additive White Gaussian Noise: AWGN)、 $\otimes$  は畳み込みである．ここで、 $N(t)$  は平均0、分散  $\sigma^2$  の信号依存性の雑音である．1ビットあたりの受信信号電力対雑音電力比  $\gamma_{bit}$  は次式で定義される．

$$\gamma_{bit} = \frac{S_{bit}}{\sigma^2}. \quad (9)$$

式(9)において、 $S_{bit}$  は1フレームあたりでの1ビットあたりの受信信号電力である．VMPPMにおいて  $S_{bit}$  は

$$S_{bit} = \frac{(RP_{signal})^2}{M}, \quad (10)$$

と表すことができる．ここで  $R [A/W]$  は受信機の感度、 $P_{signal}$  は1フレームあたりの送信信号光電力の総和であり、 $M$  は1フレームあたりの送信ビット数である． $P_{signal}$  と  $M$  はそれぞれ次のように定義される．

$$P_{signal} = \lim_{T_p \rightarrow \infty} \frac{1}{2nT_p} \int_0^{2nT_p} X(t) dt, \quad (11)$$

$$M = \lfloor \log_2 {}_n C_r \rfloor + r. \quad (12)$$

## 5.1 シンボル誤り率

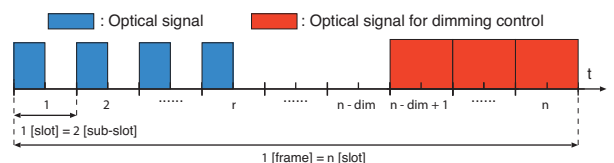


図7 VMPPM方式 ( $L = 2$ ) におけるLEDの送信信号の一例.

$n$  は1フレーム当たりのスロット数、 $r$  はソースデータに応じて選択されたサブスロット数、 $q_s$  及び  $q_{ns}$  は選択ス

ロットと非選択ロットの相関値出力,  $|x|$  は  $x$  の絶対値とする. VMPPM 方式において, 選択されたロットの位置や生成された符号によって一般性は失われないので, 図 7 を例に SER の解析を行う. 図 7 において, その SER はユニオンバンドを用いて式 (13) で表すことができる [11][12].

$$SER \leq \left\{ P_{e1} + (1 - P_{e1}) \sum_{k=0}^{r-1} \left( P_{e2}^{r-k} (1 - P_{e2})^k \right) \right\}. \quad (13)$$

式 (13) において,  $P_{e1}$  はある非選択ロットの相関値の絶対値が選択ロットのものよりも大きくなる確率である.  $P_{e1}$  は次のように表すことができる.

$$P_{e1} = \frac{2^{M-r} - 1}{\binom{n}{r}} \sum_{i=1}^r \sum_{\substack{j=r+1 \\ j \neq i}}^n P_{rob}(|q_{ns}| > |q_s|), \quad (14)$$

$$P_{rob}(|q_{ns}| > |q_s|) = \left\{ \int_{-\infty}^{-\frac{n}{(r+2d_{im})} \sqrt{M\gamma_{bit}}} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-x^2) \times \operatorname{erfc}\left(-x - \frac{n}{(r+2d_{im})} \sqrt{M\gamma_{bit}}\right) dx \right\} + \left\{ \int_{-\frac{n}{(r+2d_{im})} \sqrt{M\gamma_{bit}}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-x^2) \times \operatorname{erfc}\left(x + \frac{n}{(r+2d_{im})} \sqrt{M\gamma_{bit}}\right) dx \right\}. \quad (15)$$

また,  $P_{e2}$  は推定されたロットの相関値の極性を負と判定する確率であり, 次式で表すことができる.

$$P_{e2} = P_{rob}(q_{ns} < 0) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{n}{(r+2d_{im})} \sqrt{M\gamma_{bit}}\right). \quad (16)$$

## 6 性能評価

ページ数の都合上, 本稿ではシングルユーザ ( $L = 2$ ) を想定した VMPPM 方式の SER 性能の評価のみを行う (VMPPM 方式をマルチユーザ環境へ拡張した場合の評価と HD-MPPM の評価は本論参照).

### 6.1 SER 性能

図 8 に VMPPM 方式, VPPM 方式, VR-MPPM 方式の各方式における, 光知覚率の変化に対する SER が  $10^{-7}$  を達成するときの  $\gamma_{bit}$  の変化を示す. ここで, 光知覚率と調光率の関係は次式で表すことができる [2].

$$\text{光知覚率} = 100 \times \sqrt{\frac{\text{調光率} [\%]}{100}}. \quad (17)$$

またこの比較では, 光知覚率が 10% ~ 100% の間での調光制御を可能にするため, 1 フレームあたりの総分割数を 64[sub-slot] とした. 各変調方式における 1 フレームあたりの総分割数はそれぞれ次のように表すことができる.

$$1 \text{ フレームあたりの総分割数} = \begin{cases} 2n & \text{for VMPPM} \\ n & \text{for VR-MPPM} \\ 2\ell_{vppm} & \text{for VPPM} \end{cases} \quad (18)$$

ここで,  $\ell_{vppm}$  は VPPM 方式における 1 スロットあたりの分割数である.

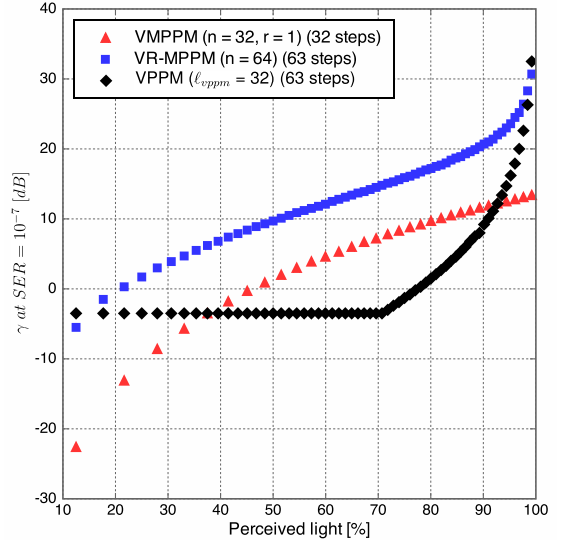


図 8 VMPPM 方式, VPPM 方式, VR-MPPM 方式の各方式における, 光知覚率の変化に対する SER が  $10^{-7}$  を達成するときの  $\gamma_{bit}$  の変化.

図 8 において, まず提案する VMPPM 方式を VR-MPPM 方式と比較すると, すべての光知覚率で VMPPM 方式の SER 性能が優れていることが分かる. 特に光知覚率が高い部分と低い部分では VR - MPPM 方式の SER 性能を大きく改善している. 次に, 提案する VMPPM 方式を VR-MPPM 方式と比較すると, 光知覚率が 40% ~ 90% の間では VPPM 方式の SER 性能が優れていることが分かる. これは, VPPM 方式が 2-PPM 方式を基にした変調方式であるため, パルス幅の変化が少ない光知覚率が 40% ~ 90% (調光率が 50% 近傍) の場合に, 最も良い性能を発揮するからである. しかしながら, 光知覚率が特に高い部分と低い部分では VR - MPPM 方式の SER 性能を大きく改善している. またこのとき, 提案方式の情報伝送効率も VPPM 方式の 6 倍を達成している. 図 8 において, VPPM 方式の SER 性能が光知覚率が 70% 以下のときに一定なのは, 所望のロットが持つビットあたりの総信号電力が光知覚率によらず一定になるからである.

## 7 まとめ

本稿では複数ユーザへの同時情報伝送と調光制御機能を同時に達成することの出来る変形擬直交 M 系列対を用いた新しいデジタル調光制御法を提案した. さらに, 高い情報伝送効率を実現するため提案するデジタル調光制御法を MPPM 方式と組み合わせた VMPPM 方式を提案した.



VMPPM 方式では変形擬直交 M 系列対の符号長を変化させることで、シングルユーザ環境とマルチユーザ環境のそれぞれに対応することが可能である。また、通信路容量を向上させるため従来方式と提案方式を組み合わせた HD-MPPM 方式を提案した。シングルユーザ環境を想定した VMPPM 方式は従来方式のシンボル誤り率性能を改善することが可能である。特に光知覚率が低い場合と高い場合では誤り率性能を約 20dB 改善した。

## 参考文献

- [1] T.Komine, M.Nakagawa, "Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System using LED lights", IEEE Trans on Consumer Electronics, Vol.50, No.1, pp.100-107, February 2004.
- [2] S.Rajagopal,S.-K. Lim, et. al, "IEEE 802.15.7 Visible Light Communication: Modulation Schemes and Dimming Support", IEEE Comm. Magazine, Vol.50, Issue.3, pp.72-82, March 2012.
- [3] J.Gancarz, H.Elgala, and T.D.C.Little, "Impact of Lightning Requirements on VLC System", IEEE Comm. Magazine, Vol.51, Issue.12, pp.34-41, December 2013.
- [4] H.Sugiyama and K.Nosu, "MPPM:A Method for Improving the Band-Utilization Efficiency in Optical PPM", IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol.7, Issue.3, pp.465-472, March 1989.
- [5] H.Habuchi and M.Masubuchi, "Performance Evaluation of Spread-Spectrum Multipulse PPM Systems",ISPACS 1998 pp.407-411, Nov 1998.
- [6] M.Tahir, Abu Bakar Siddique, "Optimal Brightness-Rate Control using VR-MPPM and its Spectral Analysis for VLC System", IEEE Comm. Letters, Vol.16, No.7, pp.1125-1128, July 2012.
- [7] Kwonhyung Lee, Hyuncheol Park, "Modulation for Visible Light Communication With Dimming Control", IEEE Photonics Technology Letters, Vol.23, No.16, pp.1136-1138, August 15, 2011.
- [8] Y.Kozawa and H.Habuchi, "Theoretical Analysis of Optical Wireless CDMA with Modified Pseudo Orthogonal M-sequence Sets", IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM 2009), pp.1-6 (Dec. 2009)
- [9] 小沢佑介, 羽瀨裕真, "変形擬直交 M 系列対を用いる光無線 DS/SS の検討", 電子情報通信学会技術研究報告, WBS 2 0 0 7-7 , pp.7-12 , June 2007 .
- [10] 尾崎崇, 小沢佑介, 榎田洋太郎, "照明可視光通信のための擬直交符号を用いた調光制御法", 映像情報メディア学会誌, Vol.68 (2014) No.5 , p.J217-J220 .
- [11] J.G.Proakis, "Digital Communications", Fourth ed. McGraw-Hill, 2000.

- [12] W.O.Popoola, E.Poves, H.Haas, "Error Performance of Generalised Space Shift Keying for Indoor Visible Light Communication", IEEE Trans. Comm, VOL61, No5, pp.1968-1975, May 2013.

## 本研究に関する学会発表等

### (A) 査読付き論文

なし

### (B) 査読付き小論文

尾崎崇, 小澤佑介, 榎田洋太郎, "照明可視光通信のための擬直交符号を用いた調光制御法", 映像情報メディア学会誌, Vol.68 (2014) No.5 , p.J217-J220, (計 4 項), 2014 年.

Takashi Ozaki, Yusuke Kozawa and Yohtaro Umeda : 「Improved error performance of variable PPM for visible light communication」, The 17th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC'2014), (計 6 項), 2014 年 9 月 8 日.

Takashi Ozaki, Yusuke Kozawa and Yohtaro Umeda : 「Variable multi-pulse PPM using new dimming control method for visible light communications」, International Symposium on Information Theory and Its Applications (ISITA), (計 5 項), 2014 年 10 月 27 日.

Takashi Ozaki, Yusuke Kozawa and Yohtaro Umeda : 「Channel capacity of hybrid dimmable MPPM for visible light communications」, 10th International ITG Conference on Systems, Communications and Coding (SCC), (計 6 項), 2015 年 2 月 3 日.

### (C) 査読なし論文

尾崎崇・小澤佑介・榎田洋太郎, "屋内可視光通信における調光制御可能な PPM 方式の情報伝送効率改善法", 信学技報, vol.113, no.275, WBS2013-22, pp.7-12, 2013 年 10 月.

尾崎崇・小澤佑介・榎田洋太郎, "変形擬直交 M 系列対を用いた調光制御可能な光符号分割多重下方の検討", 信学技報, vol.114, no.368, WBS2014-42, pp.19-24, 2014 年 12 月.

### (D) 学会大会等の口頭発表・ポスター発表

尾崎崇・小澤佑介・榎田洋太郎, "可視光通信のための調光制御可能な MPPM 方式のシンボル誤り率改善", 電子情報通信学会総合大会講演論文集, p.106, 2013 年 3 月 5 日.

四元志実・尾崎崇・小澤佑介・榎田洋太郎, "FPGA を用いた調光制御可能な MPPM 方式の実験的検討", 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, 2015 年 2 月 28 日.

### (E) 特許

なし