

レベル分割多重と符号分割多重とを用いた簡易可視光通信システム

○松永 龍真（島根職業能力開発促進センター）

1. まえがき

発光ダイオード (Light-Emitting Diode: LED) は、照明や表示のための光源として広く用いられている。これらの LED を高速に点滅することで情報伝送を実現する可視光通信は、電波による無線通信を補う技術として注目されている^[1]。可視光通信は、無線通信でありながら、情報の伝送される様子を人間の目で直接確認でき、利用に際して免許を必要としないなどの特徴をもつ。

可視光通信における通信容量を増大するため、レベル分割多重 (Level-Division Multiplexing: LDM) と符号分割多重 (Code-Division Multiple Access: CDMA) とを組み合わせた方式が提案されている^[2]。この方式では、拡散符号として拡張プライム系列符号 (Modified Prime Sequence Code: MPSC) を用い、干渉除去方式として等重み直交 (Equal Weight Orthogonal: EWO) 方式を用いることで、多重ユーザ干渉と背景光の影響とを同時に除去している。

同様の拡散符号及び干渉除去方式を用いた実機実験として、符号分割多重 (Code-Division Multiplexing: CDM) を用いた可視光通信システムが開発されている^[3]。このシステムでは、送受信機間の同期をカンニング方式によって実現しているため、送受信機を完全に分離できない問題がある。また、LDM による多重化は実装されていない。

本研究では、LDM と CDM とを組み合わせた簡易可視光通信システムを開発し、実装を行った。開発したシステムでは、情報信号に先立ってプレアンブルを送信することで、送受信機間の同期及び受信機における強度推定を実現する。また、通信中にも同期ずれを随時補正することで、推定クロック周期に誤差がある場合にも対応できる。伝送実験では、低速かつ短距離の条件下において、送受信機を完全に分離した無線通信を実現した。

2. 通信方式

同期光 CDM の拡散符号として用いられる MPSC は、 q を素数とする有限体 $GF(q)$ 上になる符号である^[4]。それぞれの符号語は q 個の符号語をもつ q 個のグループに分けられ、各グループを単位とする相関特性をもつ。表 1 に $GF(2^2)$ 上になる MPSC を示す。 i 番目のグループに属する j 番目の符号語を $\mathbf{c}_{i,j}$ と表すとき、 \mathbf{c}_{i_1,j_1} と \mathbf{c}_{i_2,j_2} との内積は式 (1) で表される。ただし、 $\Gamma(\mathbf{c}_{i_1,j_1}, \mathbf{c}_{i_2,j_2})$ は \mathbf{c}_{i_1,j_1} と \mathbf{c}_{i_2,j_2} との相互相関関数の零シフトにおける値であり、こ

表 1: $GF(2^2)$ 上の MPSC

i	j	$\mathbf{c}_{i,j}$
0	0	1000 1000 1000 1000
	1	0100 0100 0100 0100
	2	0010 0010 0010 0010
	3	0001 0001 0001 0001
1	0	1000 0100 0010 0001
	1	0100 1000 0001 0010
	2	0010 0001 1000 0100
	3	0001 0010 0100 1000
2	0	1000 0010 0001 0100
	1	0100 0001 0010 1000
	2	0010 1000 0100 0001
	3	0001 0100 1000 0010
3	0	1000 0001 0100 0010
	1	0100 0010 1000 0001
	2	0010 0100 0001 1000
	3	0001 1000 0010 0100

こではこれを \mathbf{c}_{i_1,j_1} と \mathbf{c}_{i_2,j_2} との相関とよぶ。

$$\Gamma(\mathbf{c}_{i_1,j_1}, \mathbf{c}_{i_2,j_2}) = \begin{cases} q, & \text{if } i_1 = i_2 \text{ and } j_1 = j_2, \\ 0, & \text{if } i_1 = i_2 \text{ and } j_1 \neq j_2, \\ 1, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

EWO 方式は MPSC の相関特性を利用した干渉除去方式であり、多重化による干渉及び背景光の影響を同時に除去できる。 $GF(q)$ 上の MPSC を用いる EWO 方式で多重化できる最大チャネル数 N は $q\lfloor q/2 \rfloor$ となる^[1]。EWO 方式に LDM 方式を組み合わせることで、伝送容量を信号強度の層数分だけ倍増できる。EWO 方式に全 L 層の LDM 方式を組み合わせる場合、第 k チャネル ($1 \leq k \leq N$ の整数) の第 ℓ 層 ($1 \leq \ell \leq L$ の整数) には直交する二つの符号語 $\mathbf{w}_{k,\ell,0}$ 及び $\mathbf{w}_{k,\ell,1}$ を割り当てる。送信機では情報信号 $I_{k,\ell} \in \{0, 1\}$ に応じて $\mathbf{w}_{k,\ell,I_{k,\ell}}$ を強度 $A_{k,\ell}^{(T)}$ の光信号に変換して送信する。各信号は空間で多重化される。

光信号は受信機の光検出器で検出され、全チャネルの全階層の信号を含む信号 $\mathbf{r}_1 = \sum_{k=1}^N \sum_{\ell=1}^L A_{k,\ell} \mathbf{w}_{k,\ell,I_{k,\ell}}$ となる。ただし、 $A_{k,\ell}$ は第 k チャネルの第 ℓ 層の受信強度である。所望する第 k_d チャネルの第 ℓ_d 層を復号するため、全チャネルの第 ℓ_d 層以降の全ての信号をもつ信号 \mathbf{r}_{ℓ_d} と $\mathbf{w}_{k_d,\ell_d,0}$ 及び $\mathbf{w}_{k_d,\ell_d,1}$ との相関の差 $y_{k_d,\ell_d} = \Gamma(\mathbf{r}_{\ell_d}, \mathbf{w}_{k_d,\ell_d,0}) - \Gamma(\mathbf{r}_{\ell_d}, \mathbf{w}_{k_d,\ell_d,1})$ を計算する。 y_{k_d,ℓ_d} から、式 (2) の通り情報信号 \hat{I}_{k_d,ℓ_d} を得、 $|y_{k_d,\ell_d}|$ の平均から推定強度 \hat{A}_{k_d,ℓ_d} を得る。

$$\hat{I}_{k_d,\ell_d} = \begin{cases} 0, & \text{if } y_{k_d,\ell_d} > 0, \\ 1, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

第 $\ell_d + 1$ 層の情報信号を復号するための信号 \mathbf{r}_{ℓ_d+1} は

¹ ただし、 $\lfloor \cdot \rfloor$ は床関数である。

表 2: 実験システムの符号語割当

i	j	$c_{i,j}$	$\ell = 1$	$\ell = 2$
2	0	1000 0010 0001 0100	$w_{1,1,0}$	$w_{1,2,1}$
	1	0100 0001 0010 1000	$w_{2,1,0}$	$w_{2,2,1}$
	2	0010 1000 0100 0001	$w_{1,1,1}$	$w_{1,2,0}$
	3	0001 0100 1000 0010	$w_{2,1,1}$	$w_{2,2,0}$

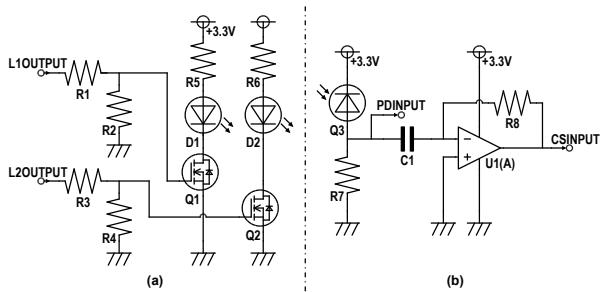


図 1: 送受信機の回路図

全チャネルの第 ℓ_d 層の情報信号 \hat{I}_{k,ℓ_d} 及び推定受信強度 \hat{A}_{k,ℓ_d} から $\mathbf{r}_{\ell_d+1} = \mathbf{r}_{\ell_d} - \sum_{k=1}^N \hat{A}_{k,\ell_d} \mathbf{w}_{k,\ell_d, \hat{I}_{k,\ell_d}}$ として得られる。

3. システム構成

拡散符号に GF(2²) 上の MPSC を用い、干渉除去方式に EWO 方式を用いる。表 2 に符号語割当を示す。開発したシステムでは、LDM で 2 多重、CDM で 2 多重の合計 4 多重を行うことにより、4 bit の情報信号を同時に送信する。

図 1 に送受信機の回路図を、表 3 に部品表を示す。図 1 (a) が送信機である。割り当てられる各符号語同士は直交であるため、各層に設定された輝度で点灯する LED をオンオフ制御して信号を送出できる。図 1 (b) が受信機である。受光器の出力信号を PDINPUT とし、その反転微分信号を CSINPUT としてコントローラに入力する。各信号はコントローラのプログラムによって処理される。

3.1. 送受信機間の同期及び信号強度の推定

送受信機間で同期を取り、信号強度の推定を行うため、送信機はデータに先立ってプレアンプルを送信する。送信機がクロックと同周期の矩形波を送信すると、受信機では CSINPUT にパルス信号が発生する。このパルス周期及び時刻を計測し、送受信機間の同期を実現する。

統いて、強度推定のための疑似信号として、送信機は 64 bit のパターン信号を送信する。受信機はこれを受信して復号し、信号強度を推定する。パターン信号の受信を終えると、本来のデータを受信する状態に移行する。受信機はデータの受信中にも推定信号強度を更新し続ける。

3.2. データ受信中の同期補正

プレアンプルを計測して得られる推定クロック周期には誤差が含まれる。この誤差は時間の経過によって蓄積するため、パケットの後半に位置するデータでは同期ずれの影響を受ける。これを解決するため、受信機はデータ受信中に同期ずれを自動補正する。受光器の出力信号

表 3: 部品表

記号・番号	使用部品
コントローラ	Seeeduino XIAO (SAM D21)
C1	積層セラミックコンデンサ (0.01 μ F)
D1, D2	赤色 LED (OSR7CA5111A; 660 nm)
Q1, Q2	N チャネル MOS-FET (2N7000)
Q3	フォト IC ダイオード (S7183; 650 nm)
R1, R3	炭素皮膜抵抗 (10 k Ω)
R2, R4, R8	炭素皮膜抵抗 (100 k Ω)
R5	炭素皮膜抵抗 (100 Ω)
R6	炭素皮膜抵抗 (200 Ω)
R7	炭素皮膜抵抗 (1.0 k Ω)
U1	フルスイングオペアンプ (NJM2732D)

が変化すると、CSINPUT にパルスが発生する。このパルスの発生時刻と受信機の内部クロックとを随時比較することで同期ずれを検出し、必要に応じて補正を行う。

4. 伝送実験

開発したシステムを用いて、簡易的な伝送実験を行った。通常の室内において、送信機の LED から受信機の受光器までの距離を約 36 cm、データ長を 8192 bit に設定し、クロック周波数を 1 Hz から 4800 Hz まで（ビットレート換算で 0.25 bps から 1200 bps まで）変化させた。伝送速度が低速である場合、復号誤りのない安定した通信を実現した。一方、クロック速度が約 1900 Hz を上回ると通信は不安定になり、復号誤りが発生した。これは、推定クロック周期の誤差が大きく、送受信機間の同期ずれを補正しきれないことに起因すると考えられる。

5. あとがき

LDM と CDM とを組み合わせた簡易可視光通信システムの開発を行った。プレアンプルを用いた送受信機間の同期や強度推定、通信中の同期ずれ補正を実装し、送受信機を完全に分離した無線通信を実現した。今後、多重化数をより増加させ、伝送速度を向上させるほか、双方向通信を用いた自動再送制御等を実装する予定である。

参考文献

- [1] 中川正雄:「可視光通信とは」, 電子情報通信学会誌, Vol.101, No.1, pp.32–37 (2018).
- [2] 上方文理, 小野恭平, 宮崎真一郎, 山崎彰一郎, 松嶋智子, 大村光徳:「レベル分割多重を用いた光符号分割多元接続方式」, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J104-A, No.8, pp.178–190 (2021).
- [3] 河本椋, 中村信也, 松嶋智子, 宮崎真一郎, 大村光徳, 山崎彰一郎:「拡張プライム系列符号と EWO 干渉除去方式を用いた可視光 CDM 伝送実験システム」, 技能科学研究, Vol.34, No.1, pp.94–103 (2018).
- [4] 松嶋智子, 長尾剛, 落合昇, 寺町康昌:「拡張プライム系列符号の一般化とその特性について」, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J91-A, No.5, pp.559–573 (2008).