

デジタル制御型カラーシフトキーイング方式のための 信号点配置法に関する研究

7314679 村田 直也

1 はじめに

1.1 可視光通信

近年、発光ダイオード(LED: Light Emitting Diode)は省電力、長寿命、小型などの特徴から人工光源として急速に普及している。LEDの特徴の1つに高速応答性があり、光のオンとオフを高速で切り替えることが可能である。この特徴を活かし、LEDを送信デバイスインフラとして用いる可視光通信の研究が盛んに行われている[1]。この可視光通信は、広帯域な無線周波数を自由に利用することができ、周波数枯渇問題の解決法として期待されている。さらに、可視光は電磁干渉を起こさないため、発電所、変電所、病院、宇宙船内などのRF(Radio Frequency)帯の電波を用いた無線通信が使用できない場所に導入することができる。一方、照明光源を利用した可視光通信では、光が人に与える影響として、明るさの制御、ちらつきの低減、色温度、演色性(CRI: Color Rendering Index)、拡散性等を考慮した情報変調方式が必要となる。このうち、明るさ(調光)制御、ちらつき軽減を目的として標準化団体IEEE 802.15.7では、OOK(On-Off Keying)、VPPM(Variable Pulse Position Modulation)、CSK(Color Shift Keying)らの情報変調方式が提案されている[2]。特に、3色のLEDが1つのパッケージになっているマルチカラーLED(TLED: Trichromatic LED)を用いるCSKは高い周波数利用効率を達成ことができ、さらに照明機能として調光機能だけでなく、色を変化させる調色機能を実装することができる。

1.2 Color Shift Keying

3色のLEDを有するマルチカラーLEDを用いたCSKでは、CIE xy色度図[3]上の各LEDの色座標を頂点とする三角形内に配置された M 個の信号点を各LEDの発光強度の比を変化させることで表現し、情報伝送を行なう。信号点を表現する際、発光強度を常に一定とすることで、情報変調によるちらつきを低減している。さらに、所望の調光率に応じてアナログ調光制御であるPAM(Pulse Amplitude Modulation)型調光制御(発光強度の和を変化させること)で、調光機能を実現させることができる。また、CSKでは白色LEDを用いる他の変調方式と異なり、蛍光体によって低い周波数応答へと制限された白色LEDを用いないため、LED本来の数十MHzという高い応答性を利用することができ、高速な通信が可能となる[4]-[6]。さらに、三角形内に配置する信号点の分布を偏らせることで、人が知覚する色(ターゲットカラー)を変化させることができ、照明の調色

機能を実現させることが可能である[7]-[9]。

しかしながら、CSKでは信号点を表現する際、および調光を行う際に、Digital-Analog(D/A)変換器によりLEDに印加する電圧を制御することで、LEDの順方向電流を変化させ、LEDの発光強度を変化させるアナログ制御が必要があり、このアナログ制御によるLEDの非線形性の影響で通信性能の劣化が生じる[6][10]。

この問題は、(a)LEDの順方向電圧-順方向電流の関係、(b)順方向電流-発光強度の関係が非線形によって生じる[6]。さらに、(c)注入電流の大きさに応じて発光スペクトルが変化するカラーシフトの影響もある[10]。これらの(a)-(c)の影響により、CSKでは多値数の増大に伴い、変調精度が劣化することが予想される。

(a)および(b)の問題に対しては、Eric MonteiroらによってLEDの発光強度を線形にするプリディストーションを含む線形電流可変回路が提案されている[11]。この方式ではOPアンプを用いることで、入力電圧に対してLEDに流れる電流が線形に変化するようにし、(a)の問題を回避している。さらに順方向電流-発光強度特性を多項式近似でモデリングし、所望の発光強度に応じて入力信号を予め歪ませること(プリディストーション)で、所望の発光強度で発光させ、(b)の問題を回避する。しかしながら、この方法では(c)の問題による通信性能の劣化は避けることができないことに加え、LEDをアナログ駆動させるための回路により、送信機が複雑となってしまう。

1.3 Digital Color Shift Keying

そこで、これら(a)-(c)の問題をすべて回避する方法として、LEDアレイによる複数LEDのデジタル制御(オンオフ制御)に着目した、複数のマルチカラーLEDを用いたデジタル制御型カラーシフトキーイング(Digital CSK)が提案されている[12][13]。このDCSKでは各色の発光強度の変化を同色のLEDの発光強度の和で表現する。DCSKはCSKの送信機を簡略化し、さらにLEDの非線形性、カラーシフトの影響を受けないため、正確に信号点を表現することが可能であり、かつ文献[14]と同様に、4色のカラーLEDを有するQuad LED(QLLED)を用いることで通信性能を改善することも可能である。これまでの検討[13]では、3つのTLEDを用いた4-DCSKにおける複数送信機の位置関係に応じたEVM(Error Vector-Magnitude)を実験的に評価している。しかしながら、この研究では3つのTLEDを用いた4-DCSKしか評価されておらず、より多値数の多い変調やQLLEDを用いた場合の信号点の表現方法、LEDのアナロ

グ制御により生じる (a) から (c) の問題の回避の効果は検証されていない。

そこで、本稿では LED の非線形性、およびカラーシフトの通信性能への影響を回避することによる変調精度向上効果について、LED の順方向電圧-順方向電流、および順方向電流-発光強度の非線形性、カラーシフトによる影響を考慮した従来 CSK と比較する。一方で、DCSK では複数マルチカラー LED によるチャンネルゲインの差異の影響を考慮し、DCSK の有効性について評価を行う。また、本稿では DCSK の一般化を目的として、多値変調方式を考慮した DCSK、および QLED を用いた DCSK の検討を行う。とくに、DCSK のための信号点配置法として、 x - y 色度図上ではなく信号電力空間上における信号点配置法を提案する。提案する信号点配置法では、 x - y 色度図上では扱うことができない 4 色以上のマルチカラー LED を同時に点灯させる信号点を扱うことが可能となる。

さらに、DCSK における調光法について考える。DCSK におけるデジタル型調光法として、(1) パルス幅変調 (PWM : Pulse Width Modulation) により、光パルスのデューティ比を変化させることで調光を行なう方法 (PWM 型超高制御法)、(2) 複数のマルチカラー LED を協調させ、PAM 型制御により調光を行なう方法 (複数 LED 協調 PAM 型超高制御) が考えられる。しかしながら、(1) の方法では周波数利用効率の低下、(2) の方法では一般的な DCSK と比べ、LED あたりの情報量が低下してしまうという問題が生じる。

そこで、これらの問題を回避する調光方法として、調光可能な DCSK (DDCSK : Dimmable DCSK) を提案する。この DDCSK は N_{Tx} 個のマルチカラー LED それぞれにおいて、 N_{color} 個のカラー LED の中から i ($i = 1, 2, \dots, N_{color} - 1$) 個を点灯させることで調光機能を実現する。この DDCSK では一般的な DCSK と同じパルス幅および同じマルチカラー LED で調光機能を実現できる。また、 $N_{color} \geq 4$ のとき、 i を増加させることで、マルチカラー LED あたりの情報量を増加させることが可能である。本稿では、DCSK を用いたことによる LED の非線形の影響の回避を効果、および複数マルチカラー LED を用いた際の影響をシミュレーション解析により評価する。

2 システム構成

本節では DCSK の信号点配置、およびシステム構成について示す。図 1 に DCSK のシステム構成を示す。本稿ではマルチカラー LED の数を N_{Tx} 、カラーセンサーの数を N_{Rx} とする。また、マルチカラー LED は N_{color} 色の LED で構成されており、カラーセンサーは N_{color} 個のバンドパスフィルター (BPF : Band Pass Filter) 付きフォトダイオード (PD : Photo Diode) で構成されている。すなわち、LED の数と PD の数はそれぞれ $N_t = N_{color}N_{Tx}$ 、 $N_r = N_{color}N_{Rx}$ で表される。また、 k 番目 ($k = 1, \dots$) の LED の送信電力 1W あたりの発光スペクトルを $P_t^k(\lambda)$ とし、 k' 番目 ($k' = 1, \dots$) のバンドパスフィルター付き PD

の受光感度の波長特性を $\Gamma_r^{k'}(\lambda)$ とする。

2.1 信号電力空間を用いた信号点配置

IEEE802.15.7[2] で定められている信号点配置法は x - y 色度座標上の使用する LED の x - y 色度座標を頂点とする三角形の内部に、信号点を配置する。信号点は x - y 色度座標上で各信号点の最小の距離が最大となるように配置される。信号点の x - y 色度座標から各 LED の発光強度を求めるには以下の式を用いる。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_R x_R + P_G x_G + P_B x_B \\ P_R y_R + P_G y_G + P_B y_B \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$P_R + P_G + P_B = 1. \quad (2)$$

しかしながら、QLED を用いた CSK を行う場合には、式 (2) を用いて発光強度を求めると負の値をとる場合があるため、4 色の LED を同時に点灯させ、信号点を表現することはできない。そのため、R. Singh らは常に 3 色以下の LED を使い、 x - y 色度図上の信号点から式 (2) を用いて発光強度比を求める方法を提案している [14]。また、表現できる発光強度比がマルチカラー LED の数に依存する DCSK では、 x - y 色度図上の信号点から導出された発光強度を表現するためには、多くのマルチカラー LED が必要となる場合、または正確に表現することはできない場合がある。

これらの問題を解決するため、本稿では DCSK のための新たな信号点配置法として N_{color} 次元信号電力空間を用いた信号点配置法を提案する。

提案する信号点配置法では送信機に用いるマルチカラー LED の色の数だけ次元を有する信号電力空間上に信号点を配置することで、4 色以上の LED を用いて表現する信号点を扱うことが可能となる。さらに、提案方式では N_{Tx} 個のマルチカラー LED で表現可能なすべての発光強度比を信号点として扱うことで、DCSK において M 個の信号点を表現するのに必要なマルチカラー LED の数を削減させることが可能である。

次にマルチカラー LED の数と表現可能な信号点の数について述べる。DCSK では各マルチカラー LED の中の 1 つの LED が常に点灯するため、重複組み合わせによって表現できる信号点の数を求めることができる。 N_{Tx} 個のマルチカラー LED があるとき、 N_{color} 次元信号電力空間を用いた信号点配置法で表現できる信号点の数、 N_s は

$$N_s = \binom{N_{Tx} + N_{color} - 1}{N_{Tx}}, \quad (3)$$

となる。ここで $\binom{S}{k}$ は k -元集合から S 個の相異なる元を選ぶ組合せの総数を与える。多値数 M の変調を行なう際には N_s が M を超えるようなマルチカラー LED の数を用意し、 N_s から M 個の発光強度比を選択し、信号点とする。この際、各色の出現確率に偏りが生じるように信号点を選択することで、ターゲットカラーを変えることが可能である。DCSK の信号点の例として、図 2 に 3 次元信号電力空間上での 2 つの TLED を用いた場合の表現可能な信号点を示す。図 2 に示すように、2 つの TLED を用いると 6 つの発光強度比を

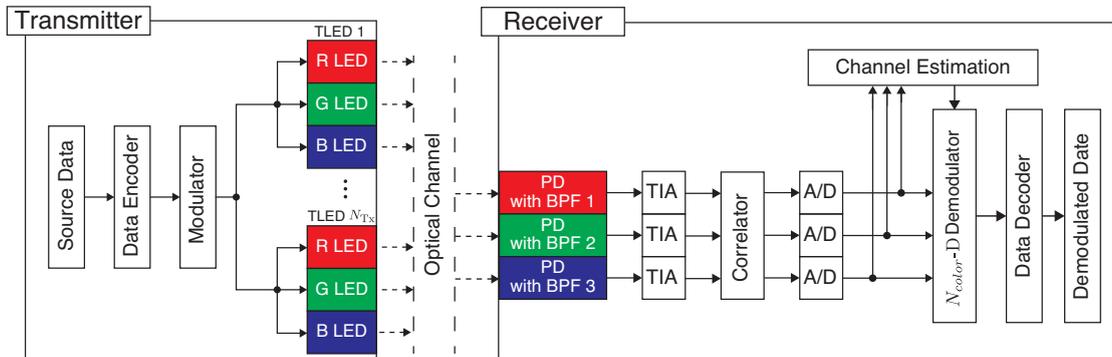


図1 N_{Tx} 個の TLED を用いた DCSK のシステム構成

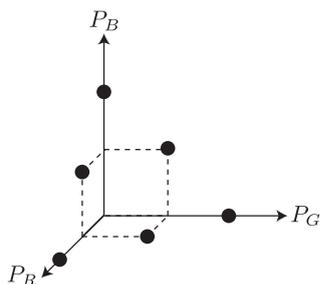


図2 2 個の TLED を用いた際の提案する N_{color} 次元信号電力空間上で表現可能な発光強度比

表現することができ、4-DCSK を行なう際にはこの中から 4 つの点を選択することで情報伝送を行う。また、これらの点は発光強度の和が一定であるため、同一平面上に存在しており、その平面は従来の x - y 色度座標と対応している。

2.2 DDCSK

本章では DCSK における調光法である調光可能な DCSK (DDCSK) について述べる。

2.2.1 調光

DDCSK では所望の調光レベルに応じて、各マルチカラー LED において点灯させるカラー LED の数, i , を変化させることで調光機能を実現する。ただし、情報伝送を行なうため、すべてのカラー LED を点灯、消灯させることができないため、 i は $1 \cdots N_{color} - 1$, 調光段階は $N_{color} - 1$ となる。調光率, Dim , は

$$Dim = \frac{i}{N_{color}} \times 100 [\%], \quad (4)$$

である。

2.2.2 信号点の表現方法

DDCSK では、ACSK と同様、発光強度の和, P_{total} , を一定にする条件下で発光強度比を変化させることで信号点を表現する ($P_{total} = P_{ave}$)。 N_{Tx} 個のマルチカラー LED を用いた DDCSK では各マルチカラー LED において i 個のカラー LED を点灯させるため、オンオフの入力信号の総数は $\binom{N_{color}}{i}^{N_{Tx}}$ である。ただし、発光強度比が同一となる入力信号は受信機で復調される際に区別できないため、情報伝送

に用いることができない。例えば、2 個の三色 LED (TLED : Trichromatic LED) を用い、各 TLED において 1 個のカラー LED を点灯させる場合、1 番目の TLED で赤色 LED, 2 番目の TLED で緑色 LED を点灯させる入力信号と 1 番目の TLED で緑色, 2 番目の TLED で赤色 LED を点灯させる入力信号の発光強度比は $P_R : P_G : P_B = 1 : 1 : 0$ となり、受信機で判別することができない。故に、情報伝送に用いることができる入力信号の数, N_s , の数はオンオフの入力信号の総数よりも小さくなる。図 3 に N_s と N_{Tx} の関係を示す。マルチカラー LED の種類は TLED, QLED, PLED (Pentad LED, $N_{color} = 5$) である。図 3 から DDCSK における N_s は一般的な DCSK ($= 1$) と同等以上になることがわかる。情報伝送を行なう際には、この N_s 個の中から M 個の入力信号を選択し、 M 値の情報変調を行なう。信号電力空間 [14] 上での信号点間距離が大きくなるように信号を選択することで、通信性能を改善することができる。また、 M 個の信号点で出現する色の割合を偏らせることで、調色機能を実現させることが可能である。本稿では基礎的な解析のため、BER 特性が最大となるように信号点を選択する。

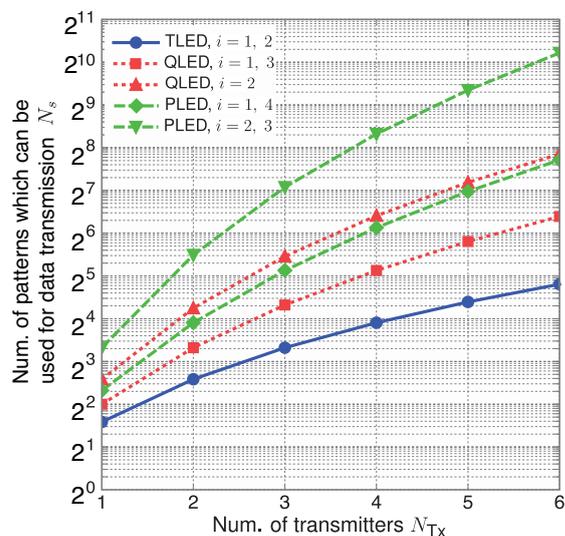


図3 N_s versus N_{Tx} for TLED, QLED, PLED ($N_{color} = 3, 4, 5$)

2.3 送受信信号及びチャンネルモデル

DCSK では、送信データに応じて、対応する信号点を表現するための送信信号が各 LED に入力される。DCSK では送信信号はオンオフのみで形成されているため、D/A コンバータを必要としない。信号点 j ($j = 1, \dots, M$) が選択された際の送信信号、 $s^j(t)$ は N_t 次元のベクトルで表現され、

$$\mathbf{x}^j(t) = \begin{bmatrix} x_1^j(t) & \cdots & x_k^j(t) & \cdots & x_{N_t}^j(t) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$x_k^j(t) = \begin{cases} 1 & \text{if 'ON'} \\ 0 & \text{if 'OFF'} \end{cases}, \quad (6)$$

となる。LED に入力された信号は光信号に変換される。本稿では、LED のインパルス応答、 $g_{t,k}(t)$ は指数的減衰とし、

$$g_{t,k}(t) = 2\pi f_k \exp(-2\pi f_k t), \quad (7)$$

とした。ただし、 f_k は k 番目の LED の -3dB 帯域である。

LED から出力される光信号、 $s(t)$ は

$$\mathbf{s}^j(t) = \begin{bmatrix} s_1^j(t) & \cdots & s_k^j(t) & \cdots & s_{N_t}^j(t) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$s_k^j(t) = P_{t,k} x_k^j(t) \otimes g_{t,k}(t), \quad (9)$$

となる。ただし、 $P_{t,k}$ は k 番目の LED の送信電力である。本稿ではすべての信号点の発光強度を一定にするため、各 LED の送信電力はすべて P_t とする。

光信号は BPF を通過し、PD で電流に変換されたのち、TIA(Transimpedance Amplifier) で電圧に変換される。本稿では、TIA のトランスインピーダンスを $1[\]$ とした。電圧信号は相関器に入力された後、A/D コンバータでデジタル信号に変換され、復調される。相関器から出力された電圧信号は

$$\mathbf{r}^j(t) = \mathbf{s}^{j'}(t) + \mathbf{n}(t), \quad (10)$$

$$= \begin{bmatrix} r_1(t) & \cdots & r_{k'}(t) & \cdots & r_{N_t}(t) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$= \begin{bmatrix} s_1^{j'}(t) + n_1(t) & \cdots & s_{N_r}^{j'}(t) + n_{N_r}(t) \end{bmatrix} \quad (12)$$

で表される。 $n_{k'}(t)$ はホワイトガウスノイズでモデリングされた雑音であり、それぞれの雑音電力は $N_0/2 = \sigma^2$ である。各相関器の出力電圧信号は

$$r_{k'}(t) = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \sum_{k=1}^{N_t} \{G_{kk'} s_k^j(t) \otimes h_{kk'}(t) \otimes g_{r,k'}(t) + n_{k'}(t)\} dt, \quad (13)$$

$$G_{kk'} = \int_0^\infty P_t^k(\lambda) \Gamma_r^{k'}(\lambda) d\lambda, \quad (14)$$

で表される。 T_s はシンボル幅、 $G_{kk'}$ は k 番目の LED から k' 番目の PD へ送信されたときの受光感度、 $h_{kk'}(t)$ は空間のチャンネル応答、 $g_{r,k'}(t)$ は受信機のインパルス応答である。本稿では空間のチャンネル応答は LOS(Line Of Sight) のみを考え、

$$h_{kk'}(t) = \frac{(m+1)A}{2\pi d_{kk'}^2} \cos^m(\phi_{kk'}) g(\psi_c), \quad (15)$$

$$\times \cos(\psi_{kk'}) \text{rect}\left(\frac{\psi}{\psi_c}\right) \delta\left(t - \frac{d_{kk'}}{c}\right)$$

$$g(\psi_c) = \frac{1}{\sin^2(\psi_c)}, \quad (16)$$

で与えられる。ただし、 m はランベルト係数、 $d_{kk'}$ は LED 間距離、 $\psi_{kk'}$ は入射角、 $\phi_{kk'}$ は放射角、 $g(\psi)$ はレンズの利得、 ψ_c は視野角、 c は光速である [15]。ランベルト係数は LED の半値角、 $\theta_{\frac{1}{2}}$ を用いて、 $m = \ln 2 / \ln(\cos \theta_{\frac{1}{2}})$ で与えられる。また 矩形関数は

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1 & \text{for } |x| \leq 1 \\ 0 & \text{for } |x| > 1 \end{cases}, \quad (17)$$

である。相関器の N_r 次元のベクトルの出力電圧は復調器に入力され、最尤判定法により N_{color} 次元信号空間で最もユークリッド距離が近い信号点を選択され、復調される。

復調機では、最尤判定法 (MLE : Maximum Likelihood Estimation) により、 N_{color} 次元の信号電力空間上で最もユークリッド距離が小さい信号点を選ばれ、復調される [16]。 j 番目の信号点が発送されたとき、 $\mathbf{r}^j(t)$ と j' 番目の信号点の N_{color} 次元の信号電力空間上でのユークリッド距離は、

$$D(\mathbf{r}^j, \mathbf{s}^{j'}) = \begin{cases} |\mathbf{n}(t)|^2 & j = j' \\ |\mathbf{s}^j(t) - \mathbf{s}^{j'}(t) + \mathbf{n}(t)|^2 & j \neq j' \end{cases} \quad (18)$$

$$= \begin{cases} |\mathbf{n}(t)|^2 & j = j' \\ P_t^2 |(\mathbf{h}^j - \mathbf{h}^{j'}) + \mathbf{n}|^2 & j \neq j' \end{cases}, \quad (19)$$

で表される。ただし、 \mathbf{h}^j は j 番目の信号点を単位電力で送信したときの受信信号である。 j 番目の信号点が発送されたとき、 j' 番目の信号点と誤って判定される確率、 $PEP_{j \rightarrow j'}$ は

$$PEP_{j \rightarrow j'} = p\left(D(\mathbf{r}^j, \mathbf{s}^{j'}) > D(\mathbf{r}^j, \mathbf{s}^j)\right) \quad (20)$$

となる。送信された信号点が正しく選ばれない確率 (SER : Symbol Error Rate) はユニオンバウンドを考慮し、

$$SER \leq \frac{2}{M} \sum_{j=1}^{M-1} \sum_{j'=j+1}^M Q\left(\sqrt{\frac{(P_t)^2}{4N_0} \|\mathbf{h}^j - \mathbf{h}^{j'}\|_F^2}\right) \quad (21)$$

で与えられる [16]。ただし、 $\|\cdot\|_F$ はフロベニウス距離である。

3 性能評価

本節ではシミュレーション解析により、DCSK、及び CSK の性能評価を行う。今回のシミュレーションでは同期は完全にとれているものとする。DCSK における送信機の数 は信号電力空間を用いた信号点配置法で M 個の信号点を表現するのに必要最小限の数とし、 $M = 4$ のとき、 $N_{Tx} = 2$ 、 $M = 8$ のとき、 $N_{Tx} = 3$ 、 $M = 16$ のとき、 $N_{Tx} = 5$ となる。LED のアナログ制御の影響には Optosupply Electronics Limited の OS5RKA5111P, OSG58A5111A, OSB56A5111A の非線形性、カラーシフトの特性を用いるものとする [18][19][20]。LED の非線形性は定められている発光強度比を LED に印加する電圧の比とし、導出した V- Φ 特性を用い、歪ませることで考慮する。非線形性の近似には多項式近似を用い、MATLAB の polyfit 関数を用いて、V-I 特性、カラーシフトの特性では 6 次、I- Φ 特性では 3 次で近

似式を得る。それぞれの多項式近似は

$$\begin{aligned} I_f &= \sum_n^6 a_n V_f^n \\ \Phi_f &= \sum_n^3 b_n I_f^n \\ G_{kk'} &= \sum_n^6 c_n I_f^n, \end{aligned} \quad (22)$$

である。ここで、 a_i, b_i, c_n は n 番目の多項式の係数である。ただし、順方向電圧の範囲は照度計で測定可能な電圧から緑色の LED の定格電圧時の発光強度となる電圧とした。また、信号電力対雑音電力比 γ_{ave} を

$$\gamma_{ave} = \frac{P_{ave-ideal}}{N_0}, \quad (23)$$

とした。ただし、 $P_{ave-ideal}$ は LED が線形発光すると仮定した時の平均送信電力である。

DCSK では複数のマルチカラー LED の配置により、各 LED のチャンネルゲインが異なり、通信性能の劣化が生じることが予想される。そこで本稿ではマルチカラー LED を四角い渦巻き上に配置する方法 (図 4) で解析を行う。ただし、すべての LED の重心が $(0,0,D)$ となるように配置する。

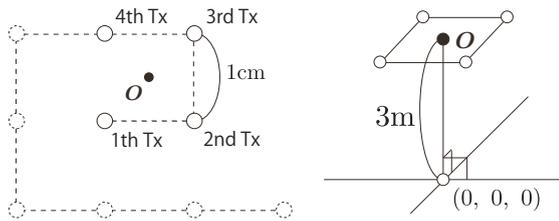


図 4 マルチカラー LED の配置

バンドパスフィルタには、Midwest Optical Systems, Inc. の BP635, BP525, BP470 を用い、PD には浜松ホトニクス社の S6775 を用いた [21]-[24]。OSG56A5111A の定格電流時の電力に統一した際の受光感度は

$$G = \begin{pmatrix} 0.381 & 0.002 & 0.000 \\ 0.000 & 0.276 & 0.024 \\ 0.000 & 0.034 & 0.194 \end{pmatrix} \quad (24)$$

である。

表 1 にシミュレーションに用いる諸元を示す。

表 1 シミュレーション諸元

| property | symbol | value |
|--------------------------------------|----------------------|----------------------|
| Num. of PDs | N_r | 3 |
| Band width of LED | f_{-3dB} | 20 [MHz] |
| Semi-angle at half illuminace of LED | $\phi_{\frac{1}{2}}$ | 60 [°] |
| Num. of color | N_{color} | 3 |
| Receiving area | A | 1 [cm ²] |
| FOV at PD | ψ_c | 60 [°] |
| Receiver response | $g_r(t)$ | $\delta(t)$ [17] |

図 5 に TLED を用いた場合のビットレートに対する $BER = 10^{-3}$ を達成するのに必要な γ_{ave} を示す。ビットレートが 10Mbps 以下に着目する、多値数に関わらず、DCSK はアナログ制御型の CSK に比べ、BER 特性が改善していることがわかる。これにより、アナログ制御の影響を回避する効果はマルチカラー LED の配置による影響、提案した信号点配置法による影響よりも大きく、DCSK が有効であることがわかる。理想的な CSK と比較すると、ほぼ同等の BER 特性であることがわかる。これは受光感度、ビットマッピングにより変化するがほぼ同等の特性になると予想される。次に達成可能な最大ビットレートに着目すると、8, 16 値の場合、DCSK はアナログ制御型の CSK に比べ、最大のビットレートを改善している。しかしながら、4 値変調の際には最大のビットレートが低下している。これはアナログ制御型の CSK は非線形性の影響により、発光強度が一定となっていないため、信号電力空間を用いた復調ではビットレートの増加に伴う符号間干渉に強くなったためだと考えられる。理想的な CSK と比較すると、ほぼ同等のビットレートを達成することがわかる。

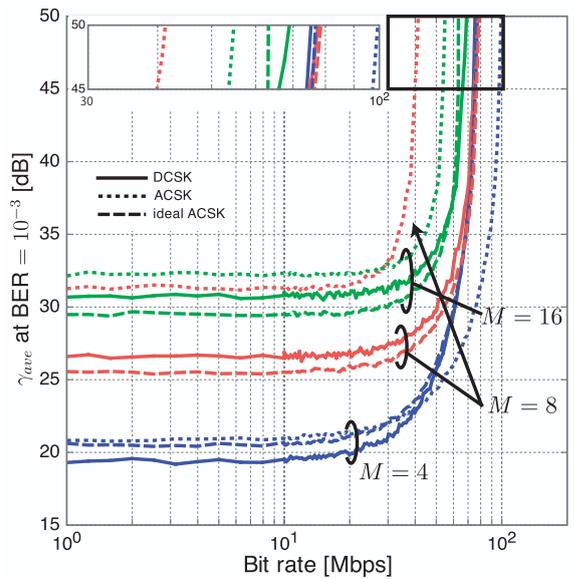


図 5 TLED を用いた DCSK, 及び CSK のビットレートに対する $BER = 10^{-3}$ を達成するのに必要な γ_{ave}

4 むすび

本稿では LED のアナログ制御の影響を回避することができる DCSK に着目し、多値 DCSK のための信号電力空間を用いた信号点配置法を提案した。さらに、調光可能な DCSK (DDCSK) を提案した。性能評価では LED のアナログ制御の影響を考慮した CSK と複数マルチカラー LED によるチャンネルゲインの差異の影響を考慮した DCSK を比較し、DCSK の有効性を検証した。その結果、 $M = 8$ のときに BER 特性を最大で 3.6dB、達成可能な最大ビットレートを 34.97Mbps 改善した。

参考文献

- [1] D. O'Brien, L. Zeng, H. Le-Minh, G. Faulkner, J. Walewski, and S. Randel, "Visible Light Communications: challenges and possibilities," IEEE 19th International Symposium, Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. (PIMRC 2008.), pp. 1-5, Sept. 15-18, 2008.
- [2] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light, IEEE Standard 802.15.7-2011, pp. 1-309, Jun. 2011.
- [3] CIE, "Commission Internationale de l'Éclairage Proc." 1931.
- [4] D. C. O'Brien, G. Faulkner, H. L. Minh, O. Bouchet, M. El Tabach, M. Wolf, J. W. Walewski, S. Randel, S. Nerretter, M. Franke, K.-D. Langer, J. Grubor, and T. Kamalakis, "Home access networks using optical wireless transmission," IEEE 19th International Symposium, Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008 (PIMRC 2008.), pp. 1-5, Sep. 15-18, 2008.
- [5] J. Grubor, O. C. Gaete Jamett, J. W. Walewski, and K.-D. Langer, "High-Speed Wireless Indoor Communication via Visible Light," JTG Fachbericht, Vol. 198, pp. 203-208, 2007.
- [6] Hiroo Yonezu, "Hikari Tusin Soshi Kougaku (Optical Communication Element Engineering)," Tokyo, Kougaku Tosyo, 1984 (in Japanese).
- [7] S. Pergoloni, M. Biagi, S. Rinauro, S. Colonnese, R. Cusani, and G. Scarano, "Merging Color Shift Keying and complementary Pulse Position Modulation for visible light illumination and communication," Euro Med Telco Conference (EMTC), pp. 1-6, Nov. 2014.
- [8] R. J. Drost and B. M. Sadler, "Constellation design for color-shift keying using billiards algorithms," IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), 2010, pp. 980-984, Dec. 2010.
- [9] E. Monteiro and S. Hranilovic, "Constellation design for color-shift keying using interior point methods," in Proc. Wireless Opt. Commun. Workshop, 2012, pp. 1224-1228, 2012.
- [10] S. Beczkowski and S. Munk-Nielsen, "LED Spectral and Power Characteristics under Hybrid PWM/AM Dimming Strategy," in Proc. IEEE Energy Convers. Conger. Expo., pp. 731-735, 2010.
- [11] E. Monteiro and S. Hranilovic, "Design and Implementation of Color-Shift Keying for Visible Light Communications," Journal of Lightwave Technology, Vol. 32, Issue 10, pp. 2053-2060, Mach 28, 2014.
- [12] H. Qian, S. Zhao, S. Z. Cai, and T. Zhou, "Digitally Controlled Micro-LED Array for Linear Visible Light Communication Systems," IEEE Photonics journal, Vol. 7, Num. 3, Jun. 2015.
- [13] H. Shimamoto, Y. Kozawa, and Y. Umeda, "An Experimental Evaluation on EVM Performance for 4-CSK (Color Shift Keying) using visible light with multiple multi-color LEDs," IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), 2015, pp. 206-208, Jan. 25-28, 2015.
- [14] R. Singh, T. O'Farrell, and J. P. R. David, "An Enhanced Color Shift Keying Modulation Scheme for High-Speed Wireless Visible Light Communications," Journal of Lightwave Technology, Volume:32, pp. 2852-2859, July 15, 2014.
- [15] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights," IEEE Transactions Consumer Electronics, Vol:50, Issue:1, pp. 100-107, Feb. 2004.
- [16] W. O. Popoola, E. Poves, and H. Haas, "Error Performance of Generalised Space Shift Keying for Indoor Visible Light Communications," IEEE Transactions Communications, Vol:61, Issue:5, pp. 1968-1976, May 2013.
- [17] M. Biagi, T. Borogovac, and T. D. C. Little, "Adaptive Receiver for Indoor Visible Light Communications," journal of Lightw. Technol., Vol. 31, No. 23, Dec. 2013.
- [18] Optosupply Electronics Limited "OS5RKA5111P," Available at : <http://www.optosupply.com/UploadFile/PDF/os5rka5111p.pdf> (Accessed : Jun. 19)
- [19] Optosupply Electronics Limited "OSG58A5111A," Available at : <http://www.peace-corp.co.jp/data/opto/OSG58A5111A-HPM.pdf> (Accessed : Jun. 19)
- [20] Optosupply Electronics Limited "OSB56A5111A," Available at : <http://www.peace-corp.co.jp/data/opto/OSB56A5111A-HPM.pdf> (Accessed : Jun. 19)
- [21] Midwest Optical Systems, Inc. "BP635," Available at : http://midopt.com/wp-content/uploads/specs/filters/BP635_Transmission_MidOpt.pdf (Accessed : Jun. 19)
- [22] Midwest Optical Systems, Inc. "BP525," Available at : http://midopt.com/wp-content/uploads/specs/filters/BP525_Transmission_MidOpt.pdf (Accessed : Jun. 19)
- [23] Midwest Optical Systems, Inc. "BP470," Available at : http://midopt.com/wp-content/uploads/specs/filters/BP470_Transmission_MidOpt.pdf (Accessed : Jun. 19)
- [24] Hamamatsu Photonics K.K. "S6775," Available at : http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s2506-02_etc_kpin1048j.pdf (Accessed : Jun. 19)

本研究に関する学会発表等

(A) 査読付き論文 [0 件]

なし

(B) 査読付き小論文 [2 件]

- Naoya Murata, Hiroki Shimamoto, Yusuke Kozawa, Yohtaro Umeda, "Performance Evaluation of Digital Colour Shift Keying for Visible Light Communications," IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW), 2015, pp. 1374-1379, June 8-12, 2015.
- Naoya Murata, Yusuke Kozawa, Yohtaro Umeda, "A Study of Dimming scheme for Digital Color Shift Keying," RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'16), Mar. 2016.

(C) 査読なし論文 [5 件]

- 村田直也, 小澤佑介, 榎田洋太郎, "一般化拡張ブライム符号系列を用いた双方向可視光通信 LED-to-LED 方式に関する一検討," 信学技報, Vol. 114, No. 158, pp. 67-72, Jul. 2014.
- 奥村淳平, 村田直也, 小澤佑介, 榎田洋太郎, "4色LEDを用いた一般化空間変調方式のいち検討," 信学技報, Vol. 115, No. 247, WBS2015-30, pp. 19-24, Oct. 2015.
- 村田直也, 小澤佑介, 榎田洋太郎, "デジタル制御型カラーシフトキーイング方式のための信号点配置法の検討," 信学技報, Vol. 115, No. 247, WBS2015-33, pp. 37-42, Oct. 2015.
- 伊形俊介, 村田直也, 小澤佑介, 榎田洋太郎, 羽瀨裕真, "デジタル制御型カラーシフトキーイング方式におけるターゲットカラー制御法の一検討," 信学技報, Vol. 115, No. 247, WBS2015-29, pp. 13-18, Oct. 2015.
- 村田直也, 小澤佑介, 榎田洋太郎, "デジタル制御型 CSK 方式の LED 線形発光による変調精度向上効果," 信学技報, Vol. 115, No. 364, WBS2015-68, pp. 163-168, Dec. 2015.

(D) 学会大会等の口頭発表・ポスター発表 [1 件]

- 村田直也, 小澤佑介, 榎田洋太郎, "デジタル制御型 CSK のための調光法の一検討," 電子情報通信学会, Mar. 2016.

(E) 特許

なし