

可視光カラーシフトキーイング方式のための デジタル制御型送信機に関する実験的研究

7313637 島本 弘樹

1 まえがき

近年、人間の目に見える光（可視光）を利用した無線通信として可視光通信（VLC: Visible Light Communication）が注目されている [1]。この VLC は、照明インフラを通信に活用できる、電波法による制限を受けない、他の機器や人体への影響が少ない、遮蔽によって容易にセキュリティを確保できる、といった利点があり、近年の LED 技術の発展と LED 照明器具の普及とともに注目されている。VLC の標準規格として IEEE 802.15.7 では照明機能（ちらつき軽減、調光制御）と通信機能を両立させる情報変復調法が検討されており [3]、これらの方式の一つとして 3 色の LED 光源を用いた色相偏移変調（CSK: Color Shift Keying）方式が提案されている。この CSK 方式では xy 色度図上に配置された信号点を選択することで送信情報を表現する。この xy 色度図は、光色が三原色の比率で表せることを利用して、横軸に赤色の割合、縦軸に緑色の割合をとることで全ての色を色座標上に表現できる [6]。CSK 方式では送信に用いるフルカラー LED の各 3 色の色座標が三角形の頂点となり、この三角形内部に M 個の信号点を配置することで $\log_2 M$ ビットの情報を表現する。最終的に、CSK 方式では xy 色度図上で選択された信号点に応じて、フルカラー LED の赤緑青 3 色の LED の駆動電流をそれぞれ可変させることで各色の発光強度比を変化し情報を送信する。例えば 4-CSK の場合、赤（赤色 LED のみ点灯）、緑（緑色 LED のみ点灯）、青（青色 LED のみ点灯）、白（3 色をそれぞれ最大発光強度の 3 分の 1 の強度で発光）、の 4 パターンの色を送信情報に応じて切り替えることで 2 ビットの情報を表現する。ここで、白色時に最大発光強度の 3 分の 1 となるのは、明るさの総量を揃えることでちらつきを抑えるためである。以上より、CSK 方式は単色のみを用いた情報変調法に比べて M を増大することで情報量（周波数利用効率）を増大することが可能である。しかし、多くの情報を表現するためにはさらに細かく電流を可変する必要がある。この電流可変のためには D/A コンバータ、電流制御回路 [2]、フィードバック回路が必要となり、システムは複雑で高コストとなる。また、LED には電流によって発光スペクトルが変化するカラーシフトと呼ばれる現象があり [7]、これも通信精度低下の原因となる。

本稿では、CSK 方式の通信精度の向上とシステムの簡易化を共に達成する方式として、複数のフルカラー LED を用いた CSK 方式を提案する。本方式では、複数のフルカラー LED を用いることで LED の駆動電流を可変制御せずに各

LED の点灯と消灯のみのデジタル制御で信号点に応じた各色の発光強度比を表現する。したがって、本方式は M の増大に伴い、より多くのフルカラー LED を必要とするが、LED の駆動電流に対する順方向電圧の非線形性、駆動電流に対する LED の発光効率の非線形性による従来の CSK 方式の性能劣化 [2] を改善することが可能である。しかしながら、従来の CSK 方式とは異なり本方式では複数のフルカラー LED を用いるため、各 LED の配置と PD の配置が CSK 方式の通信性能に影響を与えることが予想される。そこで本稿では、提案方式のプロトタイプを製作し、フルカラー LED の配置間隔、LED-PD 間の距離をそれぞれ変化した場合の影響について実験により明らかにする。とくに、最も誤り率性能の良い 4-CSK 方式に着目し、3 個のフルカラー LED を用いた提案方式のエラーベクトル振幅（EVM: Error Vector Magnitude）性能を実験により明らかにする。

2 システムモデル

2.1 従来法

IEEE 802.15.7 CSK のシステムモデルを図 1 に示す。

CSK 方式の信号点配置は xy 色度図上で定義されている。選択された信号はそれに応じた発光強度比の情報 (P_R, P_G, P_B) に変換され、その値は D/A コンバータおよび LED ドライバを通じて 3 色の LED の電流量としてそれぞれ与えられる。CSK 方式では情報を色で表現するため、発光素子にはフルカラー LED（3 色の LED 素子がひとつのパッケージになったもの）を用いる。例えば 4-CSK の場合、各色 LED を次の表 1 のように点灯させて 2 ビットの情報を表現する。

表 1 4-CSK における LED の信号パターン

情報	P_R	P_G	P_B
11 (赤)	1	0	0
00 (緑)	0	1	0
10 (青)	0	0	1
01 (白)	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$

ここで、情報“01”送信時にすべての色の強度を $1/3$ にしているのは、照明としての観点から、明るさ（光度）の総量を統一することで強度変化によるちらつきを抑えるためである。したがって、発光強度をそれぞれ P_R, P_G, P_B とすると、

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

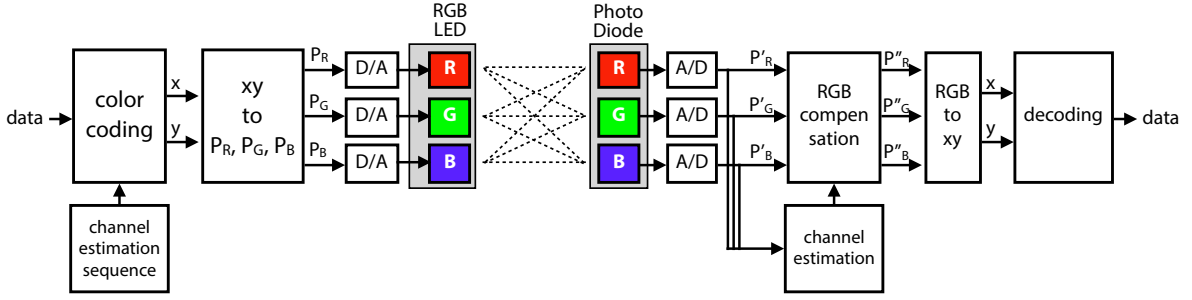


図1 CSK のシステムモデル

と表すことができる。

受信機では、受光素子として各3色に対応した3つのフォトダイオード (PD) が使われる。受信される信号は、光検出器の特性の不均衡、環境光の付加、PDの色間干渉などの経路の特性の影響により送信した信号とは異なる値となる。この経路の特性を行列 H (チャンネル行列) で表すと、送信信号 P_R, P_G, P_B と受信信号 P'_R, P'_G, P'_B の関係は次のようになる。

$$\begin{pmatrix} P'_R \\ P'_G \\ P'_B \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} P_R \\ P_G \\ P_B \end{pmatrix}. \quad (2)$$

行列 H は、各色 LED を単色発光させたときの各色 PD の出力値を用いて次のように表せる。

$$H = \begin{pmatrix} h_{RR} & h_{GR} & h_{BR} \\ h_{RG} & h_{GG} & h_{BG} \\ h_{RB} & h_{GB} & h_{BB} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

ここで、例えば h_{RG} は赤色 LED のみ点灯させたときの緑色 PD の出力値を表す。CSK 方式では、プリアンプル信号により算出されたチャンネル行列 H の逆行列を受信信号に乗算することで、経路特性による影響を取り除き、元の送信信号を復号する。

$$\begin{pmatrix} P''_R \\ P''_G \\ P''_B \end{pmatrix} = H^{-1} \begin{pmatrix} P'_R \\ P'_G \\ P'_B \end{pmatrix}. \quad (4)$$

このとき、 $P''_R + P''_G + P''_B = 1$ となり、 xy 色度図への変換行列 H_{xy} を用いて次のように線形変換することで xy 色度図上での信号座標点が導出される。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = H_{xy} \begin{pmatrix} P''_R \\ P''_G \\ P''_B \end{pmatrix}. \quad (5)$$

ここで、変換行列 H_{xy} は、光検出器の各色の感度ピーク波長の xy 色座標値を用いて次のようになる。

$$H_{xy} = \begin{pmatrix} x_R & x_G & x_B \\ y_R & y_G & y_B \end{pmatrix}. \quad (6)$$

2.2 提案法

本稿では、CSK 方式のうち 4-CSK に注目し、従来は一つのフルカラー LED の各素子の電流を制御して発光強度パターンを表現しているところを、3つのフルカラー LED を

用いてそれぞれの点灯消灯のみを制御することで 4-CSK の発光強度パターンを表現できるようにした。これにより、電流可変のための D/A コンバータや電流可変回路が不要となり、システムは大幅に簡略化できた。提案方式のシステムモデルを図 2 に示す。

各 LED は情報に応じて表 2 のように点灯させることで全体として 4-CSK の信号パターンを表現できる。

このとき、いずれの信号においても発光強度の和は 3 となっており、ちらつきを抑えることができている。したがって、 P は次の式 (7) を満たす。

$$\sum_{i=1}^3 (P_{Ri} + P_{Gi} + P_{Bi}) = 3. \quad (7)$$

また、各フルカラー LED においても常に 1 つの色のみが点灯しているため、それぞれのフルカラー LED でもちらつきを抑えられる。

$$P_{Ri} + P_{Gi} + P_{Bi} = 1 \quad (i = 1, 2, 3). \quad (8)$$

提案方式におけるチャンネル行列 H は次の式 (9) のようになる。

$$H_{xy} = \begin{pmatrix} h_{R1R} & h_{G2R} & \cdots & h_{G3R} & h_{B3R} \\ h_{R1G} & h_{G2G} & \cdots & h_{G3G} & h_{B3G} \\ h_{R1B} & h_{G2B} & \cdots & h_{G3B} & h_{B3B} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

しかし、ここでは復号処理を簡単にするため、次の式 (10) によって 3 つずつある各色 LED を色ごとにひとつの LED とみなす。

$$\begin{aligned} h_{RR} &= h_{R1R} + h_{R2R} + h_{R3R} \\ h_{RG} &= h_{R1G} + h_{R2G} + h_{R3G} \\ &\vdots \\ h_{GB} &= h_{G1B} + h_{G2B} + h_{G3B} \\ h_{BB} &= h_{B1B} + h_{B2B} + h_{B3B} \end{aligned} \quad (10)$$

これにより、従来と同様のプロセスで復号可能となる。

3 実験による評価

提案するシステムでの 4-CSK は、従来とは違い、複数の LED 光源を用いるため受光側から見た光源は 1 点として見なせなくなる。したがって、LED の配置が通信精度に

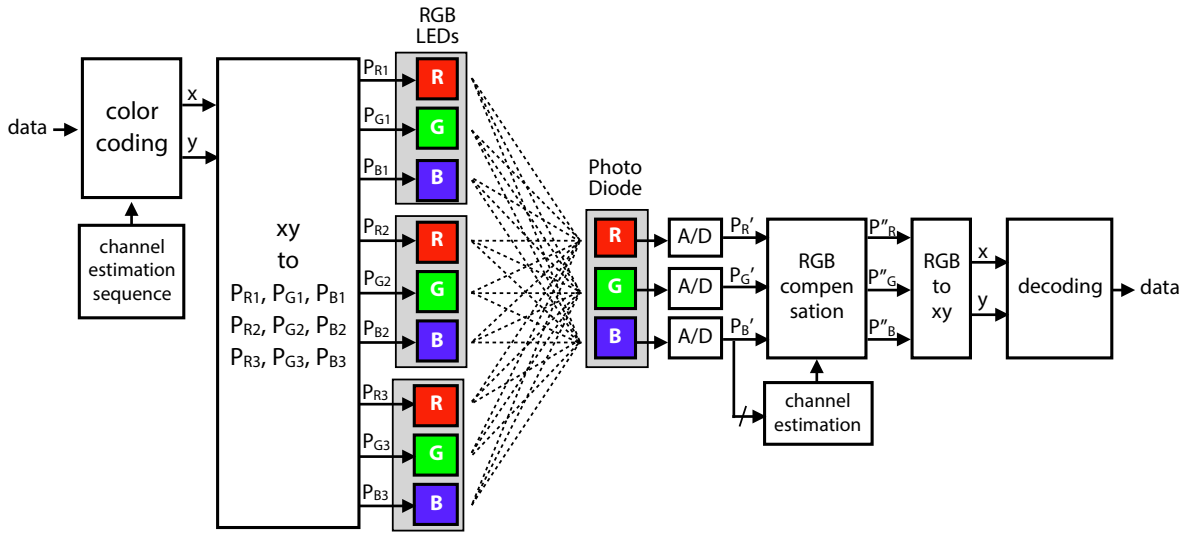


図2 3個のフルカラーLEDを用いた4-CSK方式(提案方式)

表2 情報とLEDの発光強度

情報	LED1			LED2			LED3		
	P_{R1}	P_{G1}	P_{B1}	P_{R2}	P_{G2}	P_{B2}	P_{R3}	P_{G3}	P_{B3}
11 (赤)	1	0	0	1	0	0	1	0	0
00 (緑)	0	1	0	0	1	0	0	1	0
10 (青)	0	0	1	0	0	1	0	0	1
01 (白)	1	0	0	0	1	0	0	0	1

う影響するかを調べる必要がある。そこで、送信光源と受信素子の位置関係を変えたときの通信精度の変化を実験によって確かめた。通信精度はエラーベクトル振幅 (EVM: Error Vector Magnitude) によって評価した。EVM は次の式 (11) によって表せる [8]。EVM 算出には xy 色度図上の信号点を用いる。

$$EVM = \left[\frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |S_{ideal,n} - S_{meas,n}|^2}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |S_{ideal,n}|^2} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (11)$$

ここで、 S_{ideal} は送信した信号の xy 色度図上の理想点、 S_{meas} は受信後にデコードした信号点で、すべての信号での理想点からのずれの小ささを通性精度の高さとして評価に用いる指標である。

3.1 送信機

発光素子としてフルカラーLED [9] を3つ用いてRGBそれぞれ3つずつ計9個のLED素子をトランジスタによってスイッチングする。信号の生成及びLEDの制御にはマイクロコントローラを用いた。チャンネル行列 H を算出するためのプリアンブルデータとランダムデータ 5,000 点を 10kHz で送信した。3つのフルカラーLEDは図3のように正三角形(中心からの角度が 60° ずつ)になるように配置した。

3.2 受信機

受光素子としてはカラーセンサ(カラーフィルタ付きフォトダイオード) [10] を用い、図4のように3つのLEDがな

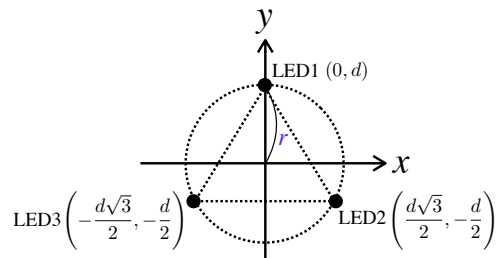


図3 LEDの配置

す正三角形の重心を軸としてLED面から距離 D の位置に配置する。カラーセンサの電流をトランスインピーダンス (TIA) 回路とOPアンプによる反転増幅回路でIV変換する。出力電圧はオシロスコープによって記録する。

また、カラーセンサの各色の感度ピーク波長の xy 色度座標を次の表3に示す。

3.3 復号

オシロスコープで記録した受信機出力電圧は、MATLABを用いて復号処理をする。チャンネル行列 H はプリアンブルデータ送信時の値から算出する。RGBの比率値から xy 色度図へ変換する行列 H_{xy} は表3の値を用いて次の式

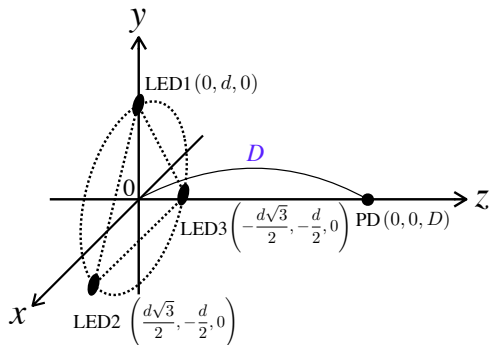


図4 LEDおよびPDの配置

表3 カラーセンサの各色感度ピークのxy色度座標

色	(x, y)
R	(0.690, 0.305)
G	(0.230, 0.755)
B	(0.140, 0.030)

(12) のようになる.

$$H_{xy} = \begin{pmatrix} 0.69 & 0.23 & 0.14 \\ 0.305 & 0.755 & 0.03 \end{pmatrix} \quad (12)$$

実験で用いた素子は以下の表4のようになっている.

表4 実験に用いた素子

素子	型番
LED	ROHM SMLV56RGB1W1 [9]
カラーセンサ	浜松ホトニクス S9702 [10]

また実験諸元は表5である. 実験装置の写真を図5および図7に示す.

表5 実験諸元

パラメータ	値
各LEDの発光強度	各 102 [mcd]
シンボルレート	10 [ksymbol/Hz]
送信信号数 N	5,000 [点]
オシロスコープでのサンプリング周波数	5 [MHz]

4 結果

4.1 コンスタレーション

コンスタレーション結果を表6および表7に示す. これはすべての結果のうち D が 4cm, 12cm, 18cm の結果につ

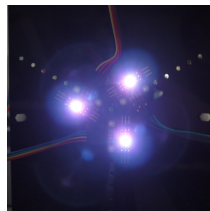


図5 実験装置(送信機)



図6 実験装置(受信機)

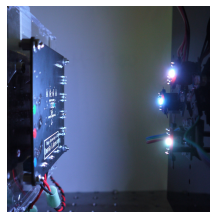


図7 実験装置

いて抜き出したものである. 表6は受信機をRX1に固定した時の $r=2\text{cm}$ と $r=5\text{cm}$ の比較である. 表7は $r=2\text{cm}$ に固定した時の受信機位置RX1とRX2の比較である.

4.2 EVM

LED1の中心からの距離 d およびLED面からカラーセンサまでの距離 D を変化させたときのEVMの変化を図8に示す. EVMの値は小さいほど通信精度が高いことを示し

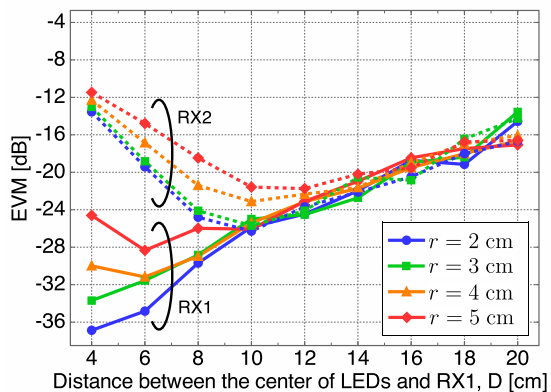


図8 LED面-PD間距離とEVMの関係

ている. LED間距離最も小さい $d=1\text{[cm]}$ が従来のCSK方式の値に最も近い状態であると考えられる. 距離 d を大きくするほどEVMは劣化することが分かるが, これ

表6 コンスタレーション (RX1)

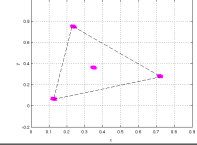
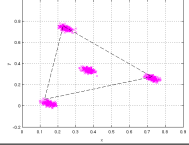
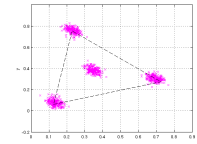
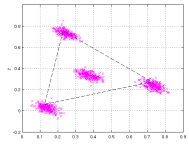
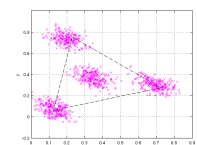
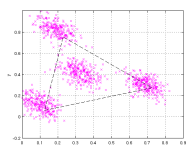
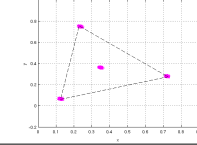
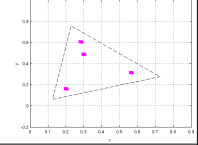
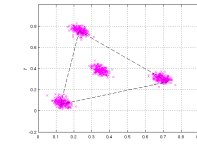
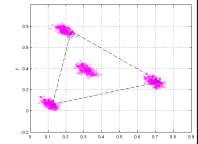
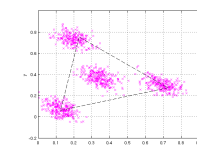
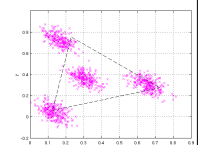
距離 D	$r = 2[cm]$	$r = 5[cm]$
4		
	-36.9 [dB]	-24.6 [dB]
12		
	-24.5 [dB]	-23.1 [dB]
18		
	-19.2 [dB]	-17.5 [dB]

表7 コンスタレーション (r=2)

距離 D	RX1	RX2
4		
	-36.9 [dB]	-13.6 [dB]
12		
	-24.5 [dB]	-23.7 [dB]
18		
	-19.2 [dB]	-18.0 [dB]

は、各 LED の光軸から見たセンサの角度が大きくなるほど、その角度方向への LED の光度が小さくなるため、センサへの照度が下がり、ノイズが占める割合が増えて誤りやすくなるためである。しかし、距離 D を大きくしていくにつれ、センサの LED の光軸からの角度は限りなく小さくなるため、LED 間距離 d の違いによる差は小さくなり、 $D=20cm$ では 1[dB] 以下になることが分かる。したがって、複数の LED を用いることによる性能劣化は送信機-受信機間を十分に離すことで無視できるほどに問題にならなくなることが分かる。

5 むすび

本稿では、従来の CSK 方式のシステムを簡単にする方法として複数のフルカラー LED を用いたシステムを提案し、LED およびフォトダイオードの配置が通信精度にどう影響するかを実験によって確かめた。実験では、LED 間距離と LED 面-センサ間距離 $D[cm]$ を変化させ EVM による評価を行った。その結果、距離 D が小さいときは LED 間距離が大きくなるほどエラーベクトル振幅 (EVM: Error Vector Magnitude) が劣化することが分かった。一方、 D が大きくなると LED 間距離による通信精度への影響は小さくなり、 D を十分に大きくすることでその影響は無視できるほどに小さくなることが分かった。今後は、提案方式に空間多重方式を適用し情報伝送効率の向上を図る。

参考文献

[1] Haruyama, S., "Visible light communication using sustainable LED lights", ITU Kaleidoscope: Build-

ing Sustainable Communities (K-2013), 2013 Proceedings of, pp.1-6, 22-24 April 2013.

- [2] Monteiro, E., "Design and Implementation of Color-Shift Keying for Visible Light Communications", *Lightwave Technology, Journal of* (Volume:32, Issue: 10), pp.2053-2060, May15, 2014.
- [3] *802.15.7-2011 - IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light.*
- [4] H. Elgala, R. Mesleh, and H. Haas, "Impact of LED nonlinearities on optical wireless OFDM systems" in 2010 IEEE 21st International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), sept 2010, pp. 634-638.
- [5] H. Elgala, R. Mesleh, and H. Haas, "Non-linearity Effects and Predistortion in Optical OFDM Wireless Transmission Using LEDs," *International Journal of Ultra Wideband Communications and Systems (IJUWBCS)*, vol. 1, no. 2, pp. 143150, 2009.
- [6] CIE, "Commission Internationale de l'Éclairage Proc." 1931.
- [7] Marc Dyble, Nadarajah Narendran, Andrew Bierman, Terence Klein "Impact of dimming white LEDs: chromaticity shifts due to different dimming methods", Fifth International Conference on Solid State Lighting, Proceedings of SPIE, pp.291-299,

September 14, 2005.

- [8] Micheal D. McKinley, Kate A. Remley, Maciej Myslinski, J. Stevenson Kenney, Dominique Schreurs, Bart Nauweleers, “ EVM Calculation for Broadband Modulated Signal ” , 64th ARFTG Conf. Dig., Orlando, FL, pp. 45-52, Dec. 2004.
- [9] ROHM “ SMLV56RGB1W “ , Available at: <http://www.rohm.co.jp/web/japan/products/-/product/SMLV56RGB1W> (Accessed: July 2014).
- [10] HAMAMATSU Photonics “ S9702 “ , Available at: <http://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/category/3100/4009/4153/S9702/> (Accessed: July 2014).

本研究に対する学会発表など

(A) 査読付き論文

なし

(B) 査読付き小論文

Hiroki Shimamoto, Yusuke Kozawa , Yohtaro Umeda
“ An Experimental Evaluation on EVM Performance for 4-CSK(Color Shift Keying) using visible light with multiple Full-color LEDs ” Radio and Wireless Symposium (RWS) 2015 IEEE, 2015-01-25

(C) 査読なし論文

島本弘樹 ,小澤佑介 ,榎田洋太郎 : 「複数フルカラー LED を用いた可視光 4-CSK 方式における EVM 性能の実験的評価」電子情報通信学会技術研究報告 = IEICE technical report : 信学技報 114(158), 17-21, 2014-07-29

(D) 学会大会等の口頭発表・ポスター発表

なし

(E) 特許

なし