

信号強度比を利用した単一受信機の波長多重可視光無線システム
Single receiver Wavelength-Division-Multiplexed visible light communication
using signal strength ratio

梅澤 直輝[†] 大柴 小枝子[†]
Naoki Umezawa Saeko Osiba

1. はじめに

近年、動画など大容量データのストリーミングサービスの普及から大容量通信や高速通信の需要が高まってきている。また、電波帯域の枯渇や通信トラフィックの混雑などが問題となってきた。その解決策として可視光無線通信が注目されている。[1]-[3]

可視光無線通信(visible light communication: VLC)は、電波とは異なる可視光領域(波長: 380 nm ~ 780 nm)の光を利用して通信を行う手法である。可視光の周波数領域は電波と比べて非常に広いため、大容量の通信が可能である。[4]-[6]

VLC における伝送容量の増加手法に波長多重(Wavelength-Division-Multiplexing: WDM)方式がある。WDM-VLC では送信機に LED(Light Emitting Diode)を利用する。発光波長の異なる複数の LED を利用することで同時に複数の信号送信が可能となる。一般的に、受信側にて光学フィルタを利用することで信号分離を行う。しかし、LED の発光スペクトルは広いため、中心波長間隔の狭い LED を多重した場合、隣接 LED のスペクトルが重なり信号分離が困難となる。そこで、受信機側でソフトウェアによる信号処理を併用することで多重信号分離を可能とする研究がある。近年、VLC への MIMO(Multi Input Multi Output)技術の適応の研究は数多く存在する[7]-[10]。しかし、先行研究においては、複数の PD(Photo Diode)もしくは光学フィルタが必要とされている。

一方、光学フィルタを利用せずに WDM を可能とする研究がいくつか提案されている[11][12]。しかし、[11]の論文では PD の受信感度を利用しているために、近い波長での

WDM における適用は困難であり、そのため多重数を増加させることが困難である。

本研究では、信号振幅比を利用することで光学フィルタなし単一受信機での近い波長の LED を利用した波長多重可視光無線通信が可能であることを実験的に示す。また、シミュレーションにより最適な信号振幅比を明らかにする。

2. システム構成

本研究で利用した WDM-VLC システムを図 1 に示す。2 つの LED と 1 つの APD(Avalanche Photo Diode)を用いた 2 × 1MIMO システムを構成している。

送信機には 2 つの LED を利用しており、PC 上で作成した信号 1 と信号 2 の二つの送信信号をそれぞれ LED1 と LED2 に印加する。ここで、LED1 及び LED2 より送信される光信号をそれぞれ S_1 と S_2 とする。 $|S_1|$ と $|S_2|$ はそれぞれ S_1 と S_2 の信号振幅(peak-to-peak)を表しているものとする。これら二つの信号振幅の比を調節することにより単一受信機での信号分離を可能とする。

送信信号はベースバンド OFDM (orthogonal frequency division multiplexing)信号であり、1 次変調に 16QAM (16-quadrature amplitude modulation)、2 次変調に OFDM を利用する。

OFDM 信号における 1 番目のサブキャリアは LED 発光への影響を除去するため Null(値なし)とする。DC バイアスを別途印加することで各 LED の発光強度(P_1, P_2)を制御する。各 LED の出力は、拡散板を通すことで混色させ、受信側 APD でそれぞれの送信信号を均一に受信できるものとする。

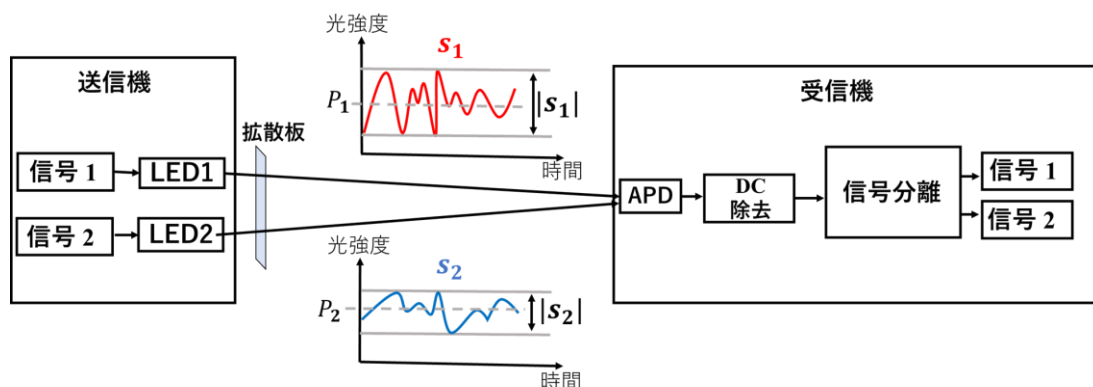


図 1 WDM-VLC システム

[†] 京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科
Graduate School of Science and Technology, Kyoto Institute of
Technology

受信機では、光学フィルタは用いずに単一の APD のみを利用する。APD で受信した信号は、信号分離を行う前に DC 成分を除去する。MIMO の処理技術の一つである SIC(successive interference canceller)信号分離法を用いて信号分離を行う。信号分離の詳しい手法に関しては 3 節にて述べる。最後に分離した信号を復調し、ビット列を得る。

3. 信号分離手法

本研究では、SIC をもとにして逐次的に信号分離を行う。信号分離における処理フローを図 2 に示す。

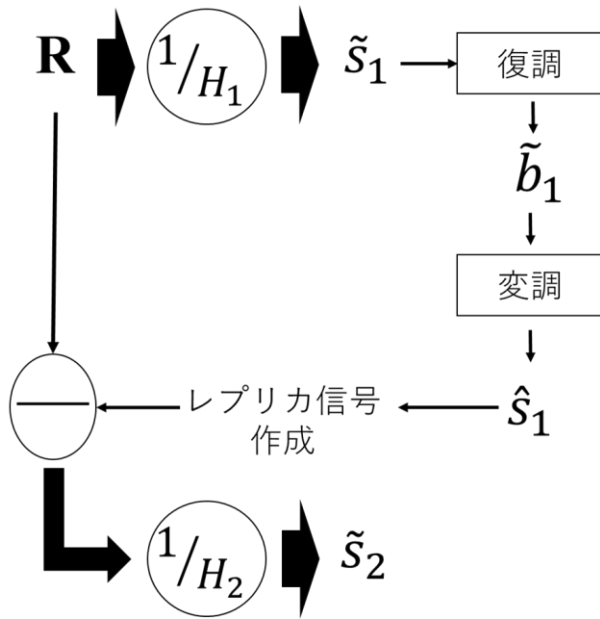


図 2 信号分離における処理フロー

LED1 及び LED2 より送信される光信号をそれぞれ S_1 と S_2 とし、受信信号を R とする。

まず初めに受信側にて既知としている pilot 信号を利用して各信号に対するチャンネル係数を求める。

$$H_1 = \frac{\sum_{i=0}^N (R_{p1,i} / p_{l1,i})}{N} \quad (1)$$

$$H_2 = \frac{\sum_{i=0}^N (R_{p2,i} / p_{l2,i})}{N} \quad (2)$$

ここで、 H_1 と H_2 は S_1 と S_2 におけるチャンネル係数である。また、 $p_{l1,i}$ と $p_{l2,i}$ はそれぞれ信号 1 と信号 2 における i 番目の送信側での pilot シンボルを表すものとする。さらに、 $R_{p1,i}$ と $R_{p2,i}$ は受信側における i 番目の pilot シンボルを示している。 N は各信号における pilot シンボルの総数を示している。これら 2 つのチャンネル係数を利用して信号分離を行う。

送信側において各信号の振幅を $|S_1| \gg |S_2|$ となるように調整し、LED から送信する。これにより受信信号では S_1 が大部分を占めるようになる。そのため以下の式にて S_1 の推定信号 \tilde{S}_1 を得ることが可能である。

$$\tilde{S}_1 = R / H_1 \quad (3)$$

さらに、 \tilde{S}_1 を復調することでビット列 \tilde{b}_1 を得ることができる。この \tilde{b}_1 が信号分離後の S_1 の復調信号に相当するものとなる。また、 \tilde{b}_1 に変調処理を行うことで硬判定信号 \hat{S}_1 を得ることができる。この硬判定信号 \hat{S}_1 をもとにチャンネル係数 H_1 を用いてレプリカ信号を作成する。受信信号からレプリカ信号を減算することで疑似受信信号 R^{2nd} を作成する。

$$R^{2nd} = R - \hat{S}_1 H_1 \quad (4)$$

R^{2nd} は受信信号から信号 1 の信号成分を除去したものとなる。つまり R^{2nd} は S_2 が支配的な受信信号となる。この R^{2nd} を利用して S_2 の推定信号 \tilde{S}_2 を得る。

$$\tilde{S}_2 = R^{2nd} / H_2 \quad (5)$$

\tilde{S}_2 を復調することでビット列 \tilde{b}_2 を得る。この \tilde{b}_2 が信号分離後の S_2 の復調信号に相当するものとなる。

このように逐次的に信号成分を除去していく手法が SIC である[13]。

本研究では各信号の振幅を $|S_1| \gg |S_2|$ となるように設定し送信することで単一受信機での SIC による信号分離を可能とする。

4. シミュレーション解析

信号分離を行うために最適な信号振幅比を決定するためにシミュレーション解析を用いて検証を行う。2 節に示した WDM-VLC システムにおいてシミュレーション解析を行う。送信信号はサブキャリア数 32 のベースバンド OFDM 信号とした。また、シミュレーション解析においては比較のため、一次変調に 16QAM と QPSK (quadrature phase-shift keying) を用いた場合の 2 パターンにて検証を行う。

信号振幅比 α を以下のように定義する。

$$\alpha = |S_2| / |S_1| \quad (6)$$

α を 0 から 1 まで変化させてシミュレーションを行い、その際のビット誤り率(BER)を算出した。この時 BER が一番低くなる時の α の値を最適信号振幅比とする。BER は信号分離後の信号 1 と信号 2 すべてに対して算出した。最適信号振幅比を求めるために各変調方式に合わせて特定の搬送波信号電力(CNR)の雑音を付与している。CNR は信号 1 と信号 2 が合成された受信信号に対しての値としている。シミュレーション結果を図 3 に示す。

図 3 より 16QAM においては $\alpha = 0.25$ の時に BER が最低になると考えられる。また、QPSK においては $\alpha = 0.5$ の時に BER が最低となる。

α の値が小さい場合、信号 2 が雑音に埋もれてしまい復調が不可能になってしまうため BER の値が悪くなると考えられる。

また、 α の値が大きい場合においては、 $|S_1| \gg |S_2|$ が成り立たなくなってしまうため信号分離が不可能となり、BER の値が悪くなったと考えられる。

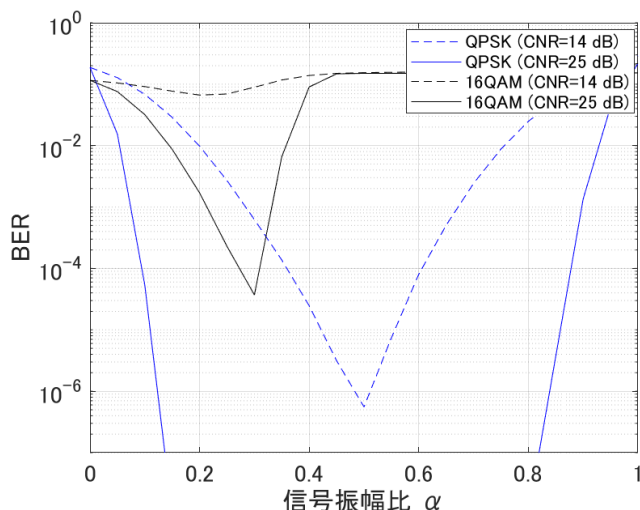


図3 シミュレーション結果

QPSK のほうが 16QAM に比べて信号点間距離が大きい
ため最適信号振幅比の値が大きくなると考えられる。また、
QPSK は 4QAM と等価な変調方式であることから変調次数
が M の QAM において最適信号振幅比 $\alpha_{M\text{QAM}}$ は以下のよう
な関係が成り立つと考えられる。

$$\alpha_{M\text{QAM}} = 1/(\log_2 M) \quad (6)$$

5. 実験検証

5.1 実験条件

2 節で示した WDM-VLC システムの実験系を構築し、信
号分離特性の評価を行った。実験にて送信機として用いた
LED の特性を図 4 に示す。

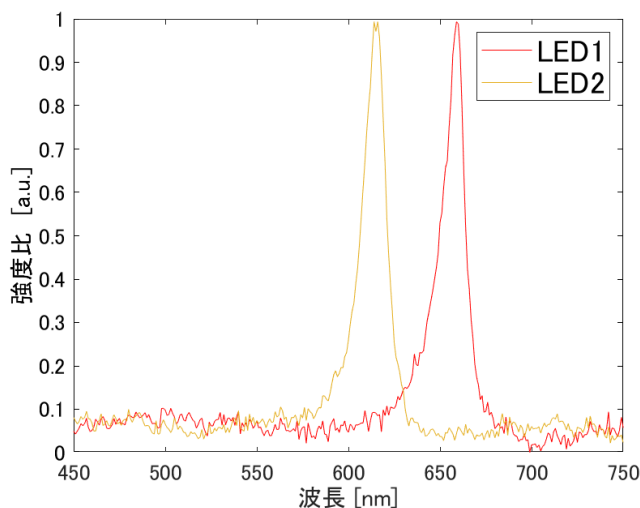


図 4 送信機として用いた LED の特性

発光波長が 660 nm のものを LED1、605 nm のものを
LED2 として利用した。これらの LED の特性はミニ分光器
(浜松フォトニクス社製)を用いて測定したものである。

送信信号はシグナルジェネレータ (AFG31022, Tektronix)
を用いて LED に印加する。シグナルジェネレータの出力
電圧は LED1 が 0.85 V ~ 1.37 V、LED2 が 1.2875 V ~ 1.4575
V とした。

受信側では、APD を用いて光信号を電気信号へと変換す
る。その後、電気信号をオシロスコープ (DLM2022,
Yokogawa) にて A/D 変換を行いデジタル信号として PC 上
で処理を行う。信号の変復調及び分離処理は
MTLAB(R2021b)を用いて行う。

復調信号全体に対して BER を算出し、その値によって
特性解析を行う。

実験で利用した送信信号のパラメータを表 1 に示す。

表 1 送信信号のパラメータ

変調方式	16QAM, OFDM
サブキャリア数	32
OFDM シンボル数	100
ガードインターバル	1/4 OFDM シンボル
ビットレート	128 kbit/s

信号 1 では、3 番目と 32 番目のサブキャリアを pilot 信
号とし、1 番目と 2 番目と 31 番目のサブキャリアを Null
としている。信号 2 では、2 番目と 31 番目のサブキャリア
を pilot 信号とし、1 番目と 3 番目と 32 番目のサブキャリ
アを Null としている。このように pilot シンボルを設定す
ることで、正確に pilot シンボルの取り出しが可能となる。
これにより、チャンネル係数が算出可能なる。

5.2 実験結果

設定した実験条件をもとに実験を行った。受信側での各
信号のコンスタレーションを図 5 に示す。

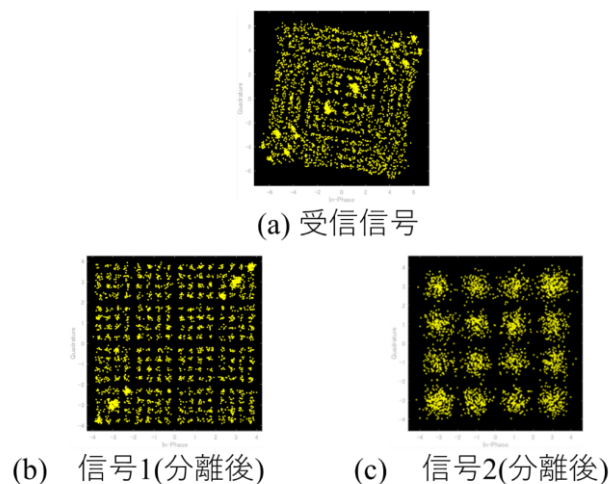


図 5 受信側での(a)受信信号と(b)信号 1(分離後)と
(c)信号 2(分離後)のコンスタレーション

図 5 より提案手法を用いることでコンスタレーション図
にて信号点の判別が可能になることがわかる。また、信号
1 のコンスタレーション図には多数の信号点か観測されて

いるように見えるが、これは信号 2 の影響によるものである。送信側にて信号振幅の最適化を行っているため 16 個の大きなくくりが見えることがわかる。これが信号 1 の成分であり、硬判定を行うことで信号 1 の成分を取り出すことが可能である。信号 2 のコンスタレーション図に信号 1 の成分がみられないのは SIC によって信号 1 の成分が除去されているためである。

各信号及びシステム全体に対して算出した BER を表 2 に示す。

表 2 各信号及びシステム全体に対して算出した BER

	信号 1	信号 2	システム全体 (信号 1+信号 2)
BER	3.7×10^{-4} 以下	2.7×10^{-3}	1.3×10^{-3}

表 2 よりすべての場合において BER の値が誤り前方訂正(FEC)の限界値である 3.8×10^{-3} 以下であることがわかる。これより、提案手法を用いることで単一受信機での信号分離が可能である。

最後にシミュレーションにより最適信号振幅比における CNR を変化させた場合の BER の特性を求め、実験結果との比較を行った。実験とシミュレーションの比較を図 6 に示す。

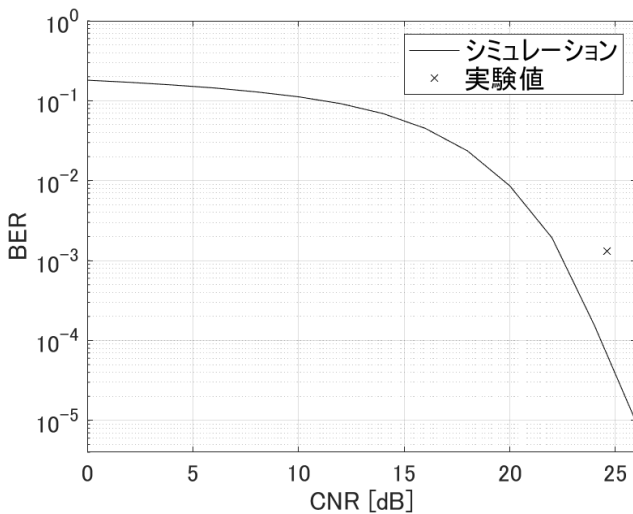


図 6 実験とシミュレーションの比較

図 6 より実験値はシミュレーションと比べて BER が劣化している。これは信号振幅比が最適値よりずれてしまったためと考えられる。図 3 からわかるように最適値からずれてしまうと BER が劣化してしまう。実験では APD の受光感度の影響でずれが生じたと考えられる。

6. おわりに

本研究では単一の受信機による WDM 信号の分離の検討を行った。信号振幅比を最適化し、受信側にて SIC の処理を行うことによって中心波長が近接する LED を多重した場合においても光学フィルタなしで信号分離が可能である

ことを示した。シミュレーション解析により変調次数によって最適信号振幅が異なることを明らかとした。また、2-WDM-VLC での実験により提案手法を利用することによって受信信号の BER を FEC の限界値以下に抑えることが可能であることを示した。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP 23K03853 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] M. Z. Chowdhury, T. Hossain (MD.), A. Islam, and V. M. Jang, "A Comparative Survey of Optical Wireless Technologies: Architectures and Applications," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 9819–9840, 2018.
- [2] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu, and P. Mohapatra, "Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 17, no. 4, pp. 2047–2077, 4th Quart., 2015.
- [3] M. Uysal and H. Nouri, "Optical wireless communications—An emerging technology," in *Proc. Int. Conf. Transp. Opt. Netw.*, Jul. 2014, pp. 1–7.
- [4] H. L. Minh et al., "High-speed visible light communications using multiple-resonant equalization," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 20, no. 14, pp. 1243–1245, Jul. 2008.
- [5] D. Tsonev, H. Chun, S. Rajbhandari, J. J. D. McKendry, S. Videv, E. Gu, M. Haji, S. Watson, A.E. Kelly, G. Faulkner, M. D. Dawson, H. Haas, and D. O'Brien, "A 3-Gb/s single-LED OFDM-based wireless VLC link using a Gallium Nitride μ LED," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 26, pp. 637–640 (2014).
- [6] C. W. Hsu, C. W. Chow, I. C. Lu, Y. L. Liu, C. H. Yeh, and Y. Liu, "High Speed Imaging 3×3 MIMO Phosphor White-Light LED Based Visible Light Communication System," *IEEE Photon. J.*, vol. 8, no. 6, Dec. 2016.
- [7] M. J. Zakavi, S. A. Nezamalhosseini, and L. R. Chen, "Multiuser Massive MIMO-OFDM for Visible Light Communication Systems," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 2259–2273, 2023.
- [8] Y. Wang, Y. Zhou, T. Gui, K. Zhong, X. Zhou, L. Zhong, A. P. T. Lau, C. Lu, N. Chi, "Efficient MMSE-SQRD-Based MIMO Decoder for SEFDM-Based 2.4-Gb/s-Spectrum-Compressed WDM VLC System," *IEEE Photonics Journal*, vol. 8, no. 4, (2016).
- [9] M. Hosney, H. A. I. Selmy, A. Srivastava, and K. M. F. Elsayed, "Interference Mitigation Using Angular Diversity Receiver with Efficient Channel Estimation in MIMO VLC," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 54060–54073, 2020.
- [10] N. Umezawa, S. Oshiba, "SIC-MIMO systems with Neural Networks in OFDM-based WDM VLCs", 2022 Asia-Pac. Microw. Conf. (APMC 2022), (2022).
- [11] P. A. Haigh, A. Burton, P. Chvojka, S. Zvanovec, Z. Ghassemlooy, and I. Darwazeh, "Visible Light Communications: Filter-less Wavelength Division Multiplexing," in 2020 IEEE Wirel. Commun. Netw. Conf. (WCNC), (2020).
- [12] A. Burton, P. Chvojka, P. A. Haigh, Z. Ghassemlooy, and S. Zvanovec, "Optical Filter-Less WDM for Visible Light Communications Using Defocused MIMO," *Electronics*, vol. 10, no. 9 (2021).
- [13] N. Omura, A. Higashi, J. Yabuuchi, T. Iwamatsu, and S. Oshiba, "Experimental Demonstration of OFDM Based WDM-MIMO Visible Light Communication System," 2018 Asia-Pac. Microw. Conf. (APMC), (2018).