

LED を受光素子として用いた双方向可視光通信に関する基礎的検討

非会員 鈴木 康祐* 非会員 旭 健作*^{a)} 非会員 渡邊 晃*

Basic Study on Receiving Light Signal by LED for Bidirectional Visible Light Communications

Kousuke Suzuki*, Non-member, Kensaku Asahi*^{a)}, Non-member, Akira Watanabe*, Non-member

(2012年3月28日受付, 2012年9月25日再受付)

Recently the light emitting diodes (LED) have been used for lighting and illumination because of their features such as low power consumption and long life. The lighting equipments have only LED. Therefore, it is necessary to install photo detector to enable bidirectional communication. In this paper, we propose a receiving light signal by LED for bidirectional visible light communications. We evaluate the characteristics of LED used as a photo detector for bidirectional visible light communications through experiment. And, we describe the developed experimental system that uses LED as a photo detector. We show that we can use LED as not only light source but also photo detector for bidirectional visible light communications through experiment.

キーワード: 可視光通信, 双方向通信, LED, 受光素子

Keywords: visible light communication, bidirectional communication, LED, photo detector

1. はじめに

発光ダイオード (Light Emitting Diode: LED) は, 小型, 長寿命, 低消費電力, 低発熱などの特長から様々な用途に用いられている。無線通信の分野では LED の高速な応答性を利用した光無線通信があり, これまでに赤外光を利用した無線システムの研究・開発がなされ実用化されてきた。赤外線光無線通信は, 受光部に可視光カット用のフィルタを用いることで高品質な信号伝送を行えることからよく用いられている⁽¹⁾。

最近では可視光 LED を利用した無線通信システムの研究が注目されている⁽²⁾。この一つとして照明光通信があり, これは, 可視光 LED を照明用としての役割を維持すると同時に情報をのせて光通信を行うものである。

LED 照明を利用した可視光通信は, 例えば美術館や博物館での利用が考えられる⁽³⁾。これは, 照明からの熱や紫外線から展示作品を保護するために LED 照明の利用が検討されており⁽⁴⁾, それに通信機能を加えることで, 作品の説明等を観覧者へインタラクティブに提供する事が可能となる。これらのシステムは主に, 照明から端末への通信を想定しているが, 例えばインターネットへの接続を行うには端末から照明への通信も必要となる。

通常の照明機器には受光素子が用意されていないため, 照明機器側で信号を受け取るためには受光素子を用意する必要がある。しかし, 通常の照明機器にはそのような素子は存在しない。そこで, 照明機器に最初から用意されている LED を受光素子として使用することができれば, 新たに受光素子を用意する必要がなくなると考えられる。

そこで, 本論文では, 発光素子である LED を受光素子として利用することを提案する。この提案について, LED を受光素子として用いる場合の特性を, 実験を通してその特性を明らかにする。さらに, 提案手法を実現する双方向可視光通信システムの検討ならびに試作を行い, LED を受光素子として用いた通信が可能であることを示す。

2. 双方向可視光通信システム

照明光通信とは, 家庭内やオフィスにおいて照明機器の可視光によりデータ通信を行うものである。その利用イメージを Fig.1 に示す。

照明光通信は, 一般的に以下の利点が挙げられる。

- 電波を使用しないため病院などでの利用が可能である。
- 電波式の無線通信などと違い帯域などの制限がない。
- 照明機器に通信機能を付加するだけでワイヤレス環境が構築できる。
- カーテンなどで光を遮光できるので漏洩に対するセキュリティ性が高い。
- 高い密度で配置しても遮光により容易に干渉を防ぐことが出来る。

a) Correspondence to: Kensaku Asahi. E-mail: asahi@meijo-u.ac.jp

* 名城大学 大学院理工学研究科 情報工学専攻
〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501
Graduate School of Science and Technology, Meijo University
1-501, Shiogamaguchi, Tempaku-ku, Nagoya 468-8502, Japan

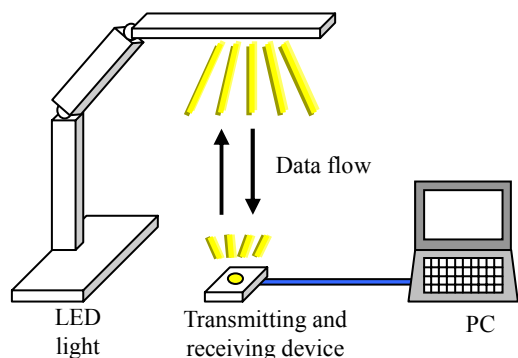


Fig. 1. An example of the visible light communication system.

これらの利点に加えて、本研究では、照明機器側に受信機能をつけることでデータの双方向可視光通信を行えるようにするために、照明機器の LED を受光素子として用いることを考える。

3. 受光時の起電力特性

LED は受光素子であるフォトダイオード (Photo diode : PD) と似た構造となっている為、受光により起電力が発生すると考えられる。まずは、LED に光が入射した場合の、光起電力発生の有無と発生量を実験によって確かめる。また、LED 自身の発光色によって特性が変化する可能性があるため、発光側、受光側の色の組み合わせも変更し、実験を行った。

〈3・1〉 実験方法 測定に使用した回路図を Fig.2 に示す。回路の動作として、発光側 LED (TX LED) で発生した光が空間を通り受光側 LED (RX LED) に入射する。このとき受光側 LED で起電力が発生した場合、その電流が抵抗 R_L に流れ電圧が発生する。この発生した電圧を R_L の両端に接続したデジタルマルチメータ (Digital multi meter : DMM) により測定する。ここで R_L は $10M\Omega$ 、 R_1 は $1k\Omega$ とした。

受光側の LED (以下、受光側 LED) は、白色照明を想定して、青色 LED+黄色蛍光体の疑似白色 LED (以下、白色 LED) と、赤色 LED、緑色 LED、青色 LED の計 4 種類で測定を行った。このとき発光側の LED (以下、発光側 LED) は、受光側で使用した LED と同じ型番のものを使用した。実験に使用した LED を Table 1 に示す。また、これらの LED に共通した仕様として、直径 5mm の砲弾型の LED で、指向性は光強度の半減角が 60 度のものである⁽⁵⁾。

〈3・2〉 実験条件 LED の配置は、発光側 LED と受光側 LED の光軸が一致するように配置する。発光側と受光側の LED 間の距離は、LED のレンズ天頂部を基準に 3cm とした。

発光側 LED の出力を光パワーメータで測定し、各色の LED で 2mW となるように駆動電源電圧 E_V を設定した。ただし、白色 LED については発光波長に特定のピークがないため、青色 LED の場合と同じ量の電流が白色 LED に流れるよう E_V を調整した。ここで、各色 LED での光パワーを一定

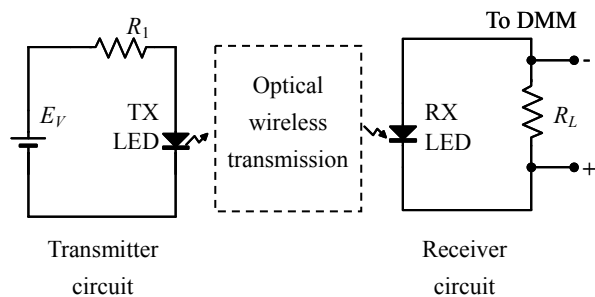


Fig. 2. Photovoltaic measurement circuit.

Table 1. LED list for experiment.

| Color | Model | Dominant wavelength [nm] | Luminous intensity [mcd] |
|-------|-----------|--------------------------|--------------------------|
| Red | OSHR5161P | 625 | 18000 |
| Green | OSPG5161P | 525 | 18000 |
| Blue | OSUB5161P | 470 | 8400 |
| White | OSPW5161P | - | 15000 |

にした理由は、一般的に LED の光出力は順方向電流に比例するが、その絶対値は発光色や周囲の温度等の条件、個体差により変化するためである。

〈3・3〉 測定結果 測定結果を Fig.3 に示す。ここで、横軸は受光側 LED の色を、縦軸は受光時に得られた電圧である。ここで、Fig.3(c), (d)において、グラフでは見づらいが、受光側が白の場合も 1.1mV 程度の受光電圧が発生している。

この結果から、受光側 LED の発光波長以下となる波長の光を発する LED を発光側を使用した場合に、受光電圧が発生することが確認できた。

また、発光、受光の両方に赤色 LED を使用した場合において、最も大きな受光電圧が得られた。

〈3・4〉 考察 Fig.3 から、受光側 LED の発光波長以下の光が入射した場合に起電力が発生していることがわかる。この理由として、まずは LED の発光エネルギーについて考える。ここで、LED の発光エネルギーは(1)式で与えられる。

$$E = h \frac{c}{\lambda} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 E はエネルギー、 h はプランク定数、 c は光速、 λ は波長である。

この式から λ が短いほど光エネルギーが大きくなることがわかる。LED で光起電力が発生するには、発光に必要なエネルギーを超える光エネルギーを照射する必要があると予想され、受光側 LED の発光波長以下の光を照射した場合に受光電圧が発生していると考えられる。

受光側に白色 LED を用いた時に光起電圧が非常に小さくなる理由は、半導体素子が青色 LED であることと白色 LED に塗布されている黄色蛍光体が入射した光を吸収または反射、拡散し、LED の半導体素子に届く光が減衰するためと考えられる。

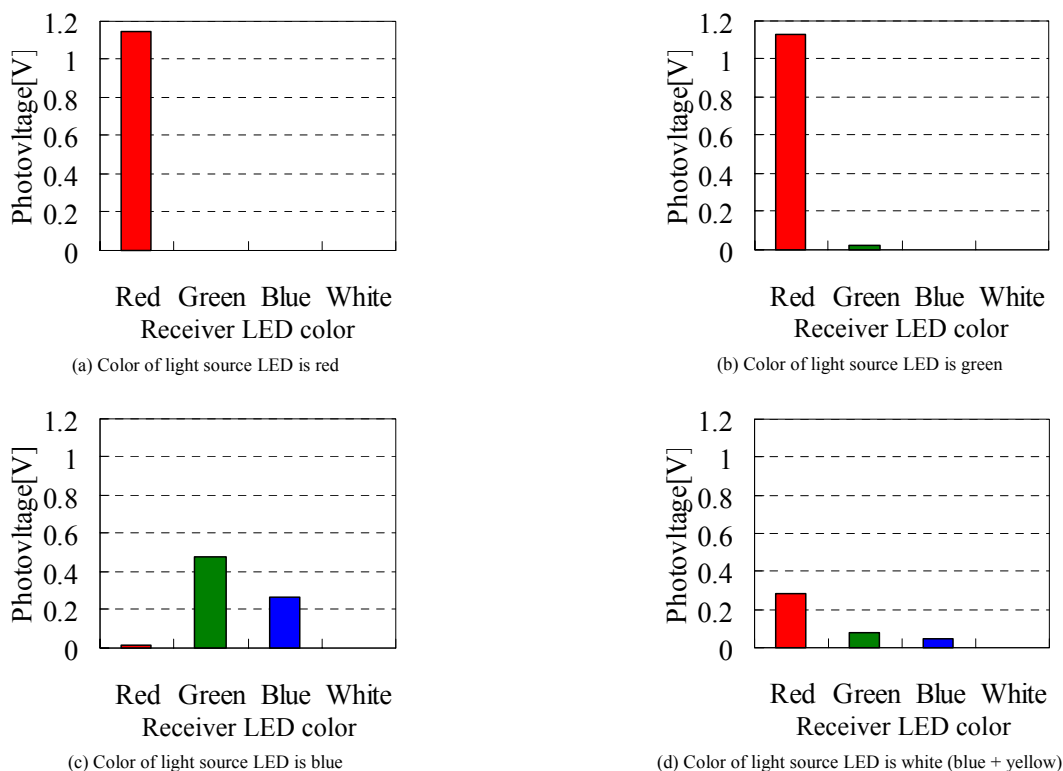


Fig. 3. Photovoltages in each color of receiver LED.

4. 逆バイアス印加時の応答速度特性

一般的に受光用素子として用いられているフォトダイオード (Photo diode : PD) では、応答速度の高速化のために逆バイアスを印加する。PD と同じダイオードである LED についても同様に逆バイアスを印加することで、応答速度が向上する可能性があり、これを実験により確認する。

発光側と受光側は同色の LED を使用し、最も受光電圧の発生した赤色と、疑似白色に使用される青色を選択した。疑似白色を使用しないのは、3章の実験において同一発光色で受光した場合に、最も受信電圧が大きい赤色 LED が約 1.1V に対して、白色 LED では 1/1000 以下の約 1mV と小さく、測定にあたって雑音の影響が大きくなり、逆バイアスの効果が測定困難なためである。

〈4・1〉 実験方法 本実験では発光側 LED に変調する必要があるため Fig.4 に示す LED 駆動回路を使用した。

この LED 駆動回路は、入力信号電圧に比例した電流により LED を駆動する回路であり、LED を定電流駆動したうえに変調信号を重畳する回路となっている。また、入力信号電圧の最大幅が LED の順方向の線形部分にかかるような回路構成となっている。

また、受光側 LED に逆バイアス電圧を印加するために Fig.5 に示す受光側回路を使用した。この回路では、LED に対して通常の発光時に印加するアノードからカソード方向への順バイアス電圧とは逆に、カソードからアノードへの逆バイアス電圧 V_R を印加できる回路となっている。

〈4・2〉 実験方法 発光側 LED と受光側 LED の光軸が

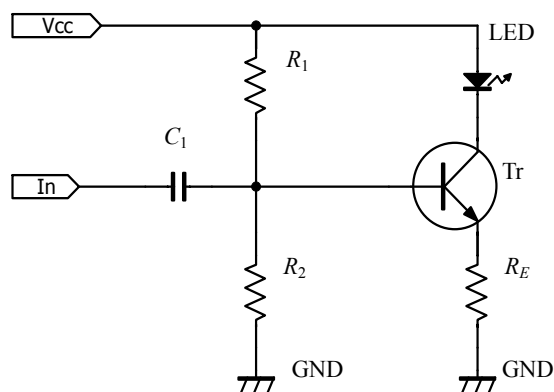


Fig. 4. Circuit diagram of LED driver.

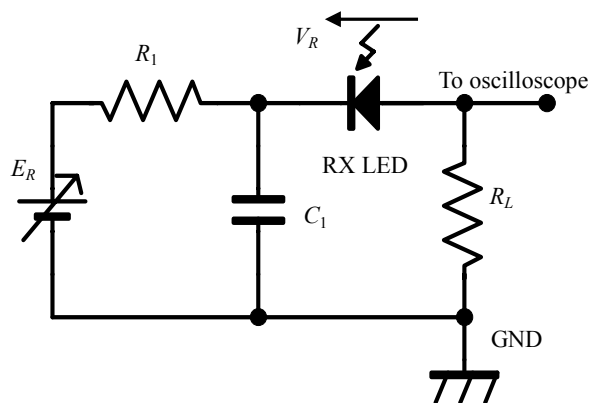


Fig. 5. Circuit diagram for measuring response speed with reverse bias.

一致するように配置し、LED 間の距離はレンズの天頂部を基準に 3 cm とした。発光側は Fig.4 に示す LED 駆動回路を使用し、矩形波で変調を行った。使用した LED は赤色と青色の 2 種類で、発光側と受光側は同色の LED とした。

逆バイアス電圧 V_R を 0V から増加し、オシロスコープにより受信信号の電圧波形を観測し、波形の立ち上がり時間と立ち下がり時間を測定した。実験に使用した LED の逆電圧の最大定格はデータシートより 5V であるが、応答速度が変化する場合 V_R が 5V を超えて測定を行った。

ここで、保護用抵抗 R_1 や負荷抵抗 R_L の影響により、逆バイアス印加用の電源電圧 E_R と V_R は同値ではないため、 V_R の測定時には、LED の両端に DMM を接続して逆バイアス電圧 V_R を測定した。ただし、応答速度の測定時には、DMM は接続しない状態とした。

〈4・3〉 測定結果 立ち上がり時間と立ち下がり時間の測定結果を、赤色 LED については Fig.6 に、青色 LED については Fig.7 にそれぞれ示す。

Fig.6 より、赤色 LED では V_R が 5V 付近の時に最も応答速度が速くなった。また、Fig.7 より、青色 LED の場合は V_R が 6V 付近で最も応答速度が速くなった。

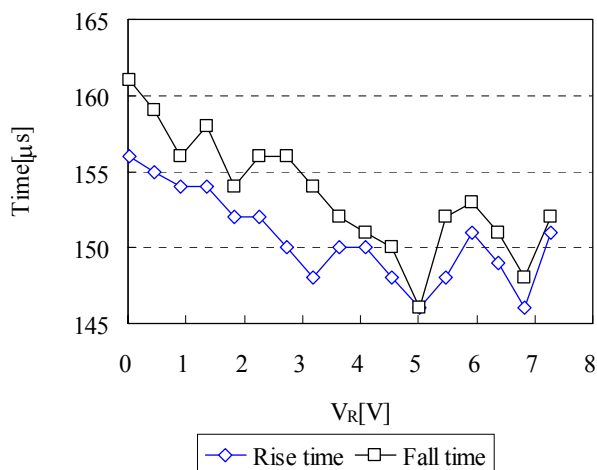


Fig. 6. Response speed of red LED.

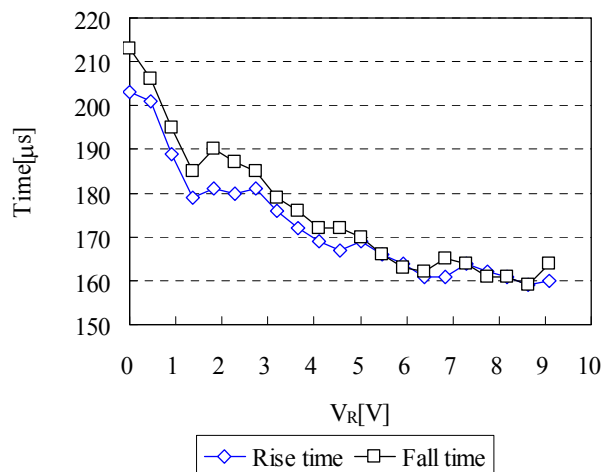


Fig. 7. Response speed of blue LED.

〈4・4〉 考察 測定結果から LED も PD 同様に逆バイアスにより応答速度が向上することがわかった。応答速度は、赤色 LED の場合は V_R が約 5V で、青色 LED は約 6V で最高となった。ここで、逆バイアス電圧 V_R を大きくするほど応答速度の点では有利はあるが、一方で LED に印加できる逆電圧は最大定格により制限されるためこの範囲内で設定する必要がある。

5. 双方向通信システムの提案と試作

3章と4章において、LED の受光特性の計測を行った。この結果を踏まえ、実際に双方向通信が可能なシステムを提案する。そして、提案システムについて試作、検討を行う。

〈5・1〉 双方向通信システムの提案 同一の LED で送受信を行うため、時分割多重で通信を行うシステムとする。また、時分割多重では受信中は LED が消灯してしまうので、照明のチラつきを感じない周期で送受信を切り替える必要がある。

〈5・2〉 実験システムの概要 提案システムを実現する方式として Fig.8 に示すシステムを検討する。図の上半分が照明側のデバイス、下半分がユーザ側のデバイスとなる。図では照明側からユーザへ通信する場合の概要を示している。本システムは、送信回路と受信回路の接続を切り替える回路（以下、切り替え回路）と、送信回路、受信回路、回路制御用マイコン、情報源のコンピュータ PC1 および情報を受取るコンピュータ PC2 から構成されている。

通信の流れとしては、送信側である照明の切り替え回路が、マイコンからの制御信号により送信回路と接続された状態（以下、送信モード）となる。そして、マイコンで生成された送信データ信号により LED は光強度変調される。次に受信側である端末側では、切り替え回路は照明側とは逆に受信回路と接続された状態（以下、受信モード）となる。受信回路では、信号の増幅および ASK の復調を行う。そして、その受信信号をマイコンで AD (Analog to digital) 変換し、サンプリングしたデータを PC2 へと送り、データの復号を行う。端末側から照明への通信を行う場合は、照明と端末の動作が逆となる。

送信側と受信側での送信モードと受信モード切り替えの同期について、本来であれば、照明側の切り替えタイミングに合わせてユーザ端末側では受光信号により同期を確立する必要があるが、今回の実験システムでは、性能測定の簡単化のために照明側から端末側へ別途、同期タイミングのみを指示することにより切り替えを行った。

〈5・3〉 システムのパラメータ Table 2 に今回のシステムで設定したパラメータを示す。変調方式については、光無線通信では一般的に PPM や PWM が用いられるが、いずれも、基本的に副搬送で変調された光を断続する方式であることから、本システムでは構成が最も簡単となる ASK を採用した。

搬送波周波数は、LED の発光時の周波数応答特性が 1MHz 程度⁽⁶⁾であることと、受信回路において信号の抽出に用いる

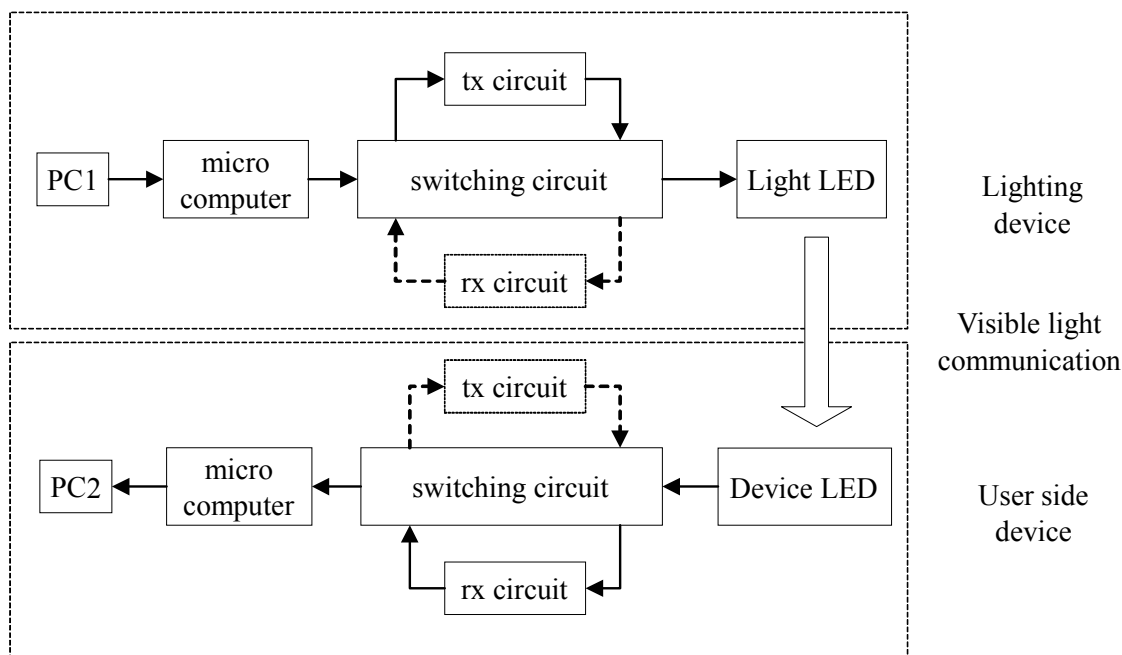


Fig. 8. Block diagram of experimental system.

Table 2. Parameters of experimental system.

| | |
|------------------------|-----------------------|
| Modulation | ASK (100% Modulation) |
| Subcarrier freq. [kHz] | 455 |
| Encoding | NRZ |
| Symbol rate [kbps] | 10 |
| Max. throughput [kbps] | 6.4 |
| Duplex | Time Division Duplex |
| Time slot length [ms] | 5 |

バンドパスフィルタとして安価で性能が優れている中波 AM ラジオ向けのセラミックフィルタを用いることができるため 455 kHz とした。送出ビットレートは、先のフィルタの通過帯域幅が 10 kHz であることと、試作した回路の特性において安定してシンボルが判定できる速度から決定した。送受信の切り替え間隔は、照明にチラつきがない時間とした。符号化方式はシステムの実装を容易にするために、NRZ 符号を採用した。

〈5・4〉 送受信の切り替え時間 送受信の切り替え時間の詳細を Fig.9 に示す。送受信は、Table 2 で示したとおり 5 ms 間隔で切り替える。しかし、切り替え回路の性能上、モードを切り替えた時に 0.5 ms ほどの切り替え時間が発生してしまうため、通信を行うことができない。実際に信号を送信できる区間（以下、送信区間）と受信できる区間（以下、受信区間）は 4.5 ms となる。

〈5・5〉 物理層のフレームフォーマット 物理層のフレームフォーマットを Fig.10 に示す。本システムにおいて 1 フレームとは、受信・送信区間それぞれで送信する 42 bit を指す。1 つのフレームはプリアンブル 10 bit とペイロード 32 bit から構成される。

プリアンブルは、以下の構成である。まずプリアンブル

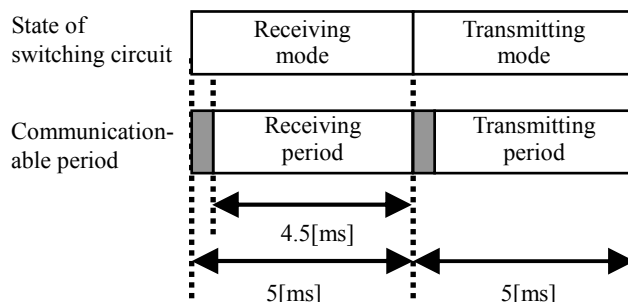


Fig. 9. Timing chart of communication period.

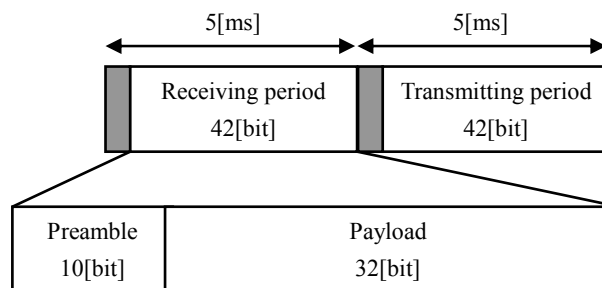


Fig. 10. Frame format.

の先頭 1~6 ビット目は、受信波形の 2 値化を行うためのしきい値の決定および、ビット位置を検出するために用いる。つづく 7~10 ビット目は、ペイロードの開始を示すためのユニークワードとなっている。

6. 試作システムの評価実験

〈6・1〉 実験方法 4 章において提案・試作したシステムについて距離に対する BER 特性の評価実験を行い、実際に双方向通信が可能であることを示す。

PC1 (照明側) から PC2 (ユーザの端末) 側へデータを送信し、受信したデータのビット誤り率 (Bit error rate: BER) とフレーム誤り率 (Frame error rate: FER) を測定する。BER は送信した全ビット数のうち誤ったビット数の割合であり、FER は送信した全フレーム数のうち誤りが発生したフレーム数の割合である。送信するデータ量は BER 及び、FER の有効数字 2 桁を確保できる量を送信する。

照明には、美術館での応用なども考慮し、高演色性の観点から 3 原色の LED を用いた白色照明を想定する。また、通信には 3 原色中の赤色 LED を使用すると想定する。これは、3 章で示したとおり赤色 LED の光起電力が最も高いのである。実験に使用した LED は Table 1 の赤色 LED で、個数は、送信受信ともに 1 個である。送信、受信 LED を一直線上に配置し、レンズの天頂部を基準に、15~25 cm まで距離を変えて BER および FER 測定する。また、測定中は LED が動かないように固定する。

〈6・2〉 測定結果および考察 Fig.11 に試作したシステムで測定した BER と FER の結果を示す。BER は伝送距離が 25 cm のときに約 1.3×10^{-4} 、伝送距離が 30 cm のときに約 2.5×10^{-2} となった。また、FER と BER を比較すると、2 つのエラーレートは同様の傾向となった。ここで、加法性白色ガウス雑音 (AWGN) 環境下における BER 特性の理論値から、本実験結果について考察する。まず、BPSK での BER の理論値は、(2)式により表される⁽⁷⁾。

$$P_{e(BPSK)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\infty}^0 \exp\left[-\frac{(x-A)^2}{2\sigma^2}\right] dx \dots\dots\dots (2)$$

$$= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\gamma}{2}}\right)$$

ここで σ^2 は雑音の分散を、A は受信シンボル電圧を、 γ は $\gamma = A^2/\sigma^2$ であり SNR を、 $\operatorname{erfc}()$ は補誤差関数を示している。BPSK では情報ビットをシンボル $-A, +A$ に割り当てている。一方、本実験の ASK 変調では、シンボルは $0, +A$ となるため、BPSK の BER 特性について受信信号電圧を 1/2 とすると ASK の BER 特性となる。従って、ASK での BER の理論値は、(3)式で表される。

$$P_{e(ASK)} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\gamma/2}{2}}\right) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、BER が約 1.3×10^{-4} および約 2.5×10^{-2} となる所要 SNR を(3)式から求めると、それぞれ、約 17.4 dB および約 11.9 dB となり、その差は約 5.5 dB である。また、Fig.12 に LED からの距離に対する光の強度について、距離が 10 cm の時の光の強度を 0 dB とした正規化 (0 cm では測定値が飽和するため) した測定結果を示す。これは LED が 1 個の場合について正面方向に放射される光の強度を光レベルメータで測定した結果である。Fig.12 から伝送距離が 25 cm および 30 cm での受光強度は約 -12 dB および約 -15 dB であり、その差は約 3 dB である。受光強度の変化に対して理論所要 SNR の差の方が大きくなっており、試作システムの特性が

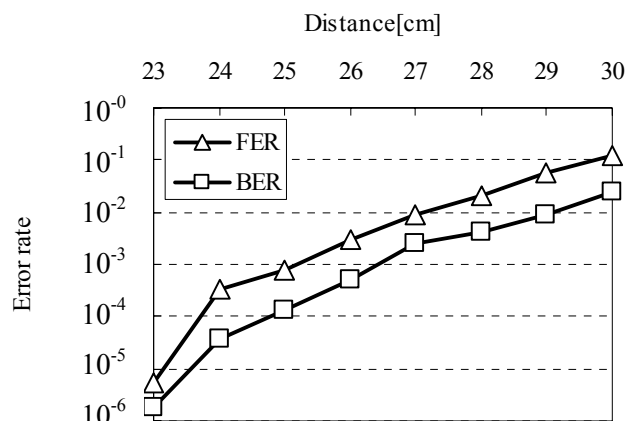


Fig. 11. Results of bit error rate and frame error rate.

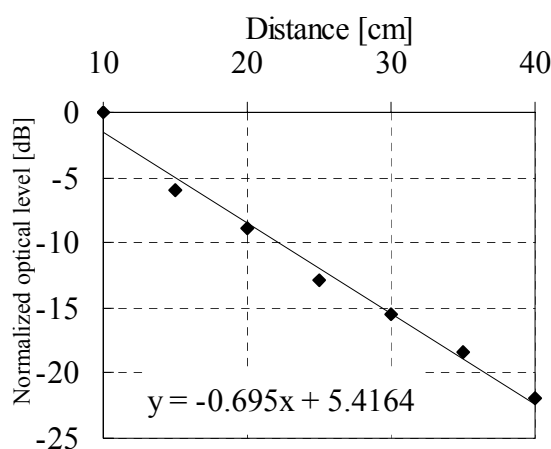


Fig. 12. Optical level in dB versus distance.

悪いことを示している。この原因として、理論値では雑音として AWGN のみを考慮しているが、増幅回路や検波回路での非線形歪みや外部雑音による外乱、さらには、情報ビットを復調するための硬判定する際の閾値を受信信号から決定しているため、必ずしも最適な値となっていないことなどが考えられる。

伝送距離については、25 cm 程度であり、天井に設置された照明器具との通信に対して用いるのには短いと考えられる。しかし、デスク照明スタンドとの通信や LED を表示素子として利用する機器間での通信であれば適用可能であると考えられる。また今後、受光回路の改良や複数個の LED を利用することで、伝送距離の長距離化が可能であると考えられるが、この点については今後の課題である。

7. おわりに

照明を用いた可視光通信について、双方向通信を行うためには、受光素子が必要となっていた。本論文では、照明用 LED を受光素子として利用することを提案し、LED の受光素子として用いた場合の発生起電力や逆バイアス印加時の応答速度などの特性を示した。

また、得られた特性を基に、LED の受光素子とした双方向可視光通信が可能なシステムの試作を行い、LED を受光

素子とした可視光通信が実現できることを示した。これにより、例えば LED をインジケータとして用いる機器間での通信などが可能になると考えられる。

文 献

- (1) Z. Tani : "Application knowhow of optical device", CQ Publishing, Tokyo (2000) (in Japanese)
谷 善平 : 「新版 オプト・デバイス応用ノウハウ」, CQ 出版, 東京 (2000)
- (2) S. Haruyama : "Visible Light Communication", IEICE Transactions A, Vol.86-A, No.12, pp.1294-1291 (2003) (in Japanese)
春山真一郎 : 「可視光通信」, 信学論 A, Vol.J86-A, No.12, pp.1284-1291 (2003)
- (3) K. Toishi, Y. Yamamoto, and Y. Igarashi : "Communicating Lighting System – Study on Utilities and System Prototype for Exhibition Spaces", Architectural Institute of Japan, Vol.D-1, pp.395-396 (2005) (in Japanese)
登石久美子・山本裕治・五十嵐雄哉 : 「通信照明システムに関する研究 : 展示空間における利用メリットの考察およびシステムの試作」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol.D-1, pp.395-396 (2005)
- (4) M. Ishii, T. Moriyama, M. Toda, K. Kohmoto, and M. Saito : "Color Degradation of Textiles with Natural Dyes and Blue Scale Standard Exposed to White LED Lamps : Evaluation for Effectiveness as Museum Lighting", Journal of the Illuminating Engineering Institute of Japan, Vol.91, No.2, pp.78-86 (2007) (in Japanese)
石井美恵・森山巖興・戸田雅宏・河本康太郎・齊藤昌子 : 「白色 LED ランプに対する天然染料染色布とブルースケールの変退色挙動 : 美術・博物館用照明としての適正検証」, 照明学会誌, Vol.91, No.2, pp.78-86 (2007)
- (5) OptoSupply : "5 mm Deluxe Red LED OSHR5161P datasheet" (2005)
- (6) K. Suzuki, K. Asahi, A. Watanabe, and A. Ogawa : "A Basic Study on LED Used as a Receiver for Visible Light Communications", IEICE Technical Report, Vol.110, No.50, USN2010-2, pp.5-10 (2010) (in Japanese)
鈴木康祐・旭 健作・渡邊 晃・小川 明 : 「LED を受光素子とする双方向可視光通信に関する基礎的検討」, 電子情報通信学会技術報告, Vol.110, No.50, USN2010-2, pp.5-10 (2010)

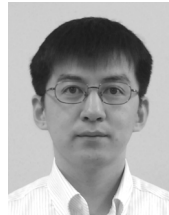
- (7) Y. Kamiya : "Digital Wireless Communication Technologies with MATLAB", Corona publishing, Tokyo (2008) (in Japanese)
神谷幸宏 : 「MATLAB によるデジタル無線通信技術」, コロナ社, 東京 (2010)

鈴木 康 祐



(非会員) 2010 年名城大学理工学部情報工学科卒業。2012 年同大学理工研究科情報工学専攻修士課程修了。在学中は、LED を受光素子として用いる双方向可視光通信の研究に従事。

旭 健 作



(非会員) 2001 年名城大学理工学部電気電子工学科卒業。2003 年同大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程修了。2003 年同大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻博士課程修了。同年、名城大学理工学部助教、現在に至る。博士 (工学)。無線通信や音響に関する信号処理の研究に従事。平成 14 年度情報処理学会東海支部学生論文奨励賞授賞, 平成 16 年度電気関係学会東海支部連合大会奨励賞。

渡 邊 晃



(非会員) 1974 年慶應義塾大学工学部電気工学科卒業。1976 年同大学大学院工学研究科修士課程修了。同年三菱電機 (株) 入社後、LAN システムの開発・設計に従事。1991 年同社情報技術総合研究所に移籍し、ルータ、ネットワークセキュリティ等の研究に従事。2002 年名城大学理工学部教授、現在に至る。博士 (工学)。電子情報通信学会, 情報処理学会, IEEE 各会員。