

LED 照明を用いた光無線 LAN システムの開発

吉木 大司*・松本 佳昭*²・藤永 栄治*³

Development of Visible Light Communication by LED lighting fixtures Daiji Yoshiki, Yoshiaki Matsumoto and Eiji Fujinaga

タブレットなどの携帯情報端末の普及により、これら情報端末を活用した業務支援アプリケーションが注目されており、船舶分野においても、機関モニタリングや船員の安全確保など、船内作業における携帯情報端末の利用ニーズは高い。しかし、船舶内は鋼板で遮蔽された空間が多いことから、一般的に用いられる Wi-Fi（電波無線）によるネットワークアクセスは確立しにくい。そこで、本研究開発では、比較的安価なシングルチップ型白色 LED を発光素子とした場合の信号応答性を評価すると共に、同 LED を用いた可視光通信技術を開発し、照明光の届く範囲に入るだけで、複数台の情報端末が同時にネットワークアクセスできる光無線 LAN システムを開発した。また、実用化に向けて開発した光無線 LAN システムのネットワーク速度を評価し、複数台の情報端末が同時にネットワークアクセスできることを確認した。

1. 緒 言

近年、タブレットやスマートフォンの登場により、これら携帯情報端末を活用した業務支援アプリケーションが増えており、様々な業務で活用されている。特に、携帯性・機能性の高さから、現場作業時の活躍に対する期待が大きく、船舶分野においても、機関モニタリング、船内内線、船員の安全確保や最適配置の確認など、船内作業における携帯情報端末の利用ニーズは高い。しかし、これら業務支援アプリにおいては、ネットワークアクセスができる通信環境がほぼ必須となっており、船舶分野での利用を難しくしている。これは、船内は鋼板で遮断された空間が多く、Wi-Fi 環境を確立しにくい上に、世界各国を航行する商船においては、それぞれの国の電波法に対応した Wi-Fi 機器が必要となるためである。また、エンジンルームにおいても、電磁ノイズにより通信が不安定になる。このように、電波無線通信は、劣悪な電磁環境、水中など電波が通じない環境、電波を嫌う環境下では使用することができない。

そこで、本研究開発では、電波無線通信の代替として LED 照明を用いた可視光通信による光無線 LAN システムを開発する。具体的には、LED の高速点灯制御が可能な特性を活用することで、LED 照明器自体が光無線 LAN アクセスポイントとなり、Wi-Fi アクセスポイントと同じように、照明光の届く範囲に入るだけで複数の情報端末が同時にネットワークアクセスできる装置を開発する。これによって、これまで電波が使えなかった環境下においても当該照明器の光の届く範囲に在るだけで、ネットワークアクセスできるようになる。本報告では、光無線 LAN システムに用いるシングルチップ型白色 LED を発光素子とした場合の信号応答性の評価や光無線 LAN システムの機器開発、複数台通信時のネットワーク速度の評価結果について報告する。

2. 白色 LED を発光素子とした信号応答性の評価

2・1 シングルチップ型白色 LED

シングルチップ型白色 LED は、青色 LED チップと黄色蛍光体で構成されており、LED チップの青色発光と補色となる（蛍光体の）黄色発光を組み合わせることで、白色を得る。この白色 LED は、他の方式による白色 LED よりも安価に供給されており、現在、照明用 LED として多く利用されている。

本研究開発では、実用化を見据えて「光無線 LAN アクセスポイント機能 LED 照明器」として、既存船などに安価に導入できることも目標としており、シングルチップ型白色 LED を可視光通信の発光素子として用いる。しかし、通信を行うために、この白色 LED を高速点滅すると、含まれる蛍光体の蓄光・残光によって、受信信号に遅延が生じる。

そこで、シングルチップ型白色 LED に含まれる蛍光体の影響と受光素子である PD（フォトダイオード）の遮断周波数の影響を確認するため、受信信号の応答性を評価した。

2・2 実験方法

受信信号の応答性を評価するため、カレントミラー回路で定電流駆動するシングルチップ型白色 LED に、ファンク

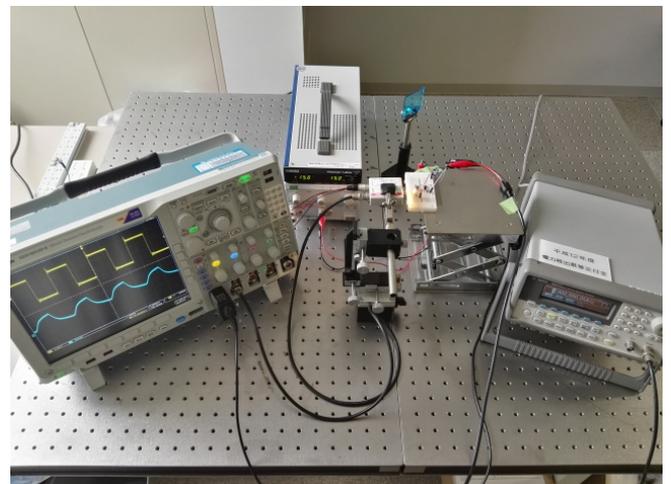


図 1 実験装置

* 企業支援部設計制御グループ

*2 企業支援部

*3 JRCS 株式会社

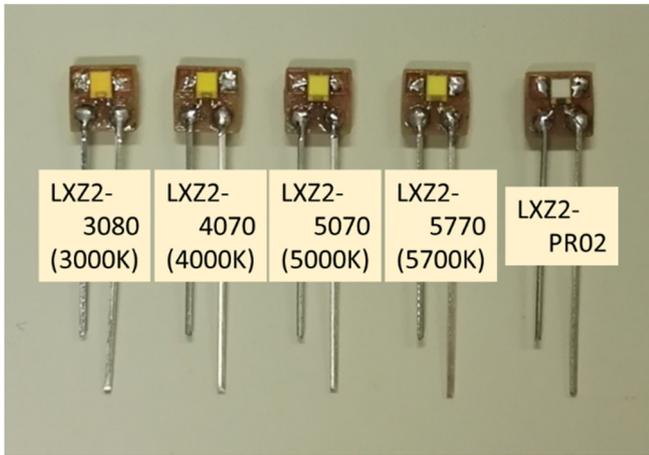


図2 シングルチップ型白色LED

シオンジェネレーター (Agilent 製 33250A) から発信される信号波形を入力して、疑似 4PPM で発光させた。受光素子である PD は、高速フォトセンサアンプ (浜松ホトニクス製 C8366) に接続し、デジタルオシロスコープ (テクトロニクス製 MD04054B) で受信信号を確認した。また、蛍光体の影響を除去するために、光学フィルター (シグマ光機製 BLF-50S-460B) を用いた実験も行った。

2・2 実験結果および考察

シングルチップ型白色LEDは、色温度ごとに含まれる蛍光体の量が異なるため、同じ青色LEDチップを使い、異なる色温度を用意している LXZ2 シリーズ (Lumileds) を用いた (図2)。また、受光素子である PD (フォトダイオード) は、表1に示す5種類を用いた。ただし、PDと組み合わせた高速フォトセンサアンプ C8366 の遮断周波数は 100MHz であるため、S3883 及び S5973-02 で受光した信号は、アンプの遮断周波数の影響を受ける。

表1 PD (フォトダイオード) の遮断周波数

| | PD (浜松ホトニクス社製) | 遮断周波数 |
|---|----------------------|--------|
| 1 | S5821-02 | 25MHz |
| 2 | S3071 | 40MHz |
| 3 | S3399 | 100MHz |
| 4 | S3883 | 300MHz |
| 5 | S5973-02 (※紫色レーザー向け) | 1GHz |

図3に示すように、PDの遮断周波数の違いによる受信信号の違いは見られないが、白色LEDに含まれる黄色蛍光体の量が増えると、発光信号 (1MHz, 75%デューティ) に対して、受信信号の立ち上がり、立ち下りに遅延が発生することが確認できる。この信号遅延により、変調方式として 4PPM 変調を用いている本光無線 LAN システムでは、通信速度を上げるために信号周波数を上げると、変調したデジタルデータの並びによっては、正しい "0", "1" の判断が行えないことを確認した (図4)。

また、蛍光体の影響を除去するために、光学フィルターを用いた場合の受信信号の違いも評価した (図5)。使用したフィルター BLF-50S-460B (シグマ光機) は、青色LEDのピーク波長である 460nm 付近の透過率が約 85%, 555~700nm の平均透過率が 14%以下と、青色LEDの発光を透過し、黄

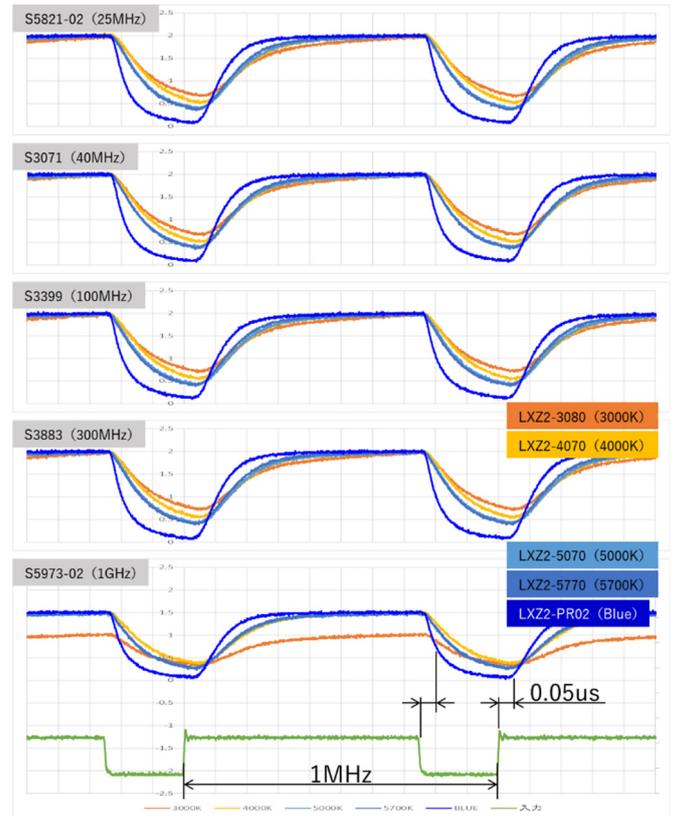


図3 白色LEDとPDの違いによる応答性

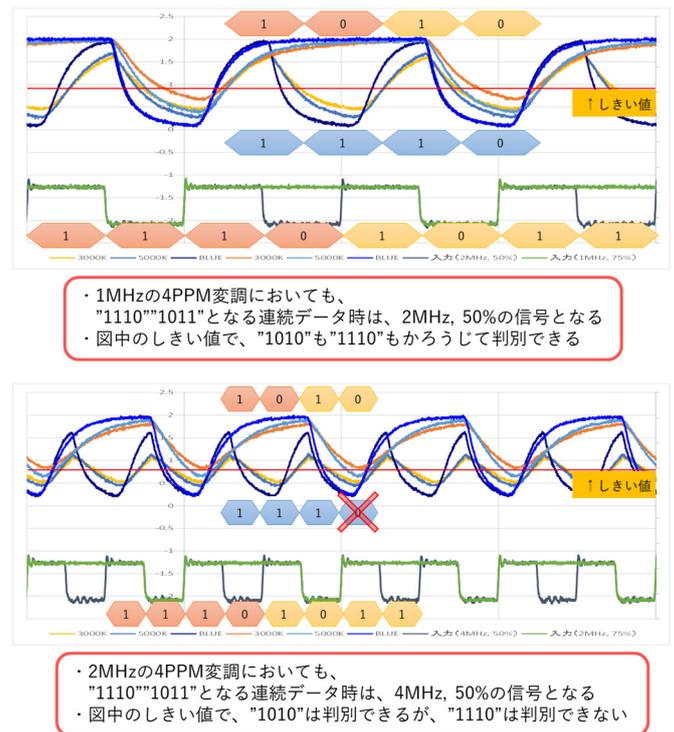


図4 信号周波数としきい値の関係

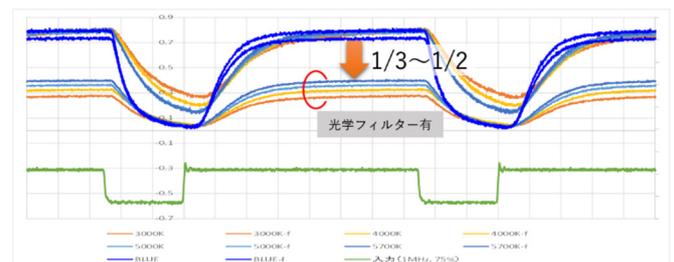


図5 光学フィルターの有無

色蛍光体の発光を遮断できる。これにより、受信信号から蛍光体の発光による影響は除去できたが、同時に受光信号レベルが $1/3 \sim 1/2$ に減衰した。この結果は、蛍光体による受信信号のなまりがなくなるため、2MHz の 4PPM 変調でも通信が可能となることを示しているが、その反面信号レベルの低下により、距離の逆 2 乗の法則から通信距離が 3~4 割程度減少することを示している。

なお、本研究開発では、変調による照明光の揺らぎを抑え、照明として最適となるよう 4PPM 変調を採用した。

3. LED 照明を用いた光無線 LAN システム

3・1 光無線 LAN システムの概要

開発した光無線 LAN システムは、既存船など電波が使えない環境下で、既存の照明器を光無線 LAN 機能付き LED 照明器と交換し、複数の携帯情報端末に光無線 LAN アダプターを装着することで、Wi-Fi と同様のネットワーク環境を提供する。このとき、情報端末に対して下りのネットワーク経路に可視光を用い、上りに赤外光を用いている。また、上位のネットワークから LED 照明器までのネットワーク経路には電力線搬送通信 (PLC) を用いることで、新たな通信線の敷設を不要としている (図 6)。

3・2 機器の試作開発

図 7 に、LED 照明を用いた光無線 LAN (VLC) アクセスポイントの構成と外観を示す。VLC アクセスポイントは、照明器であり送信機でもあるシングルチップ型白色 LED の発光回路及び赤外線の受光回路であるアナログ系と可視光通信のプロトコル処理を行うデジタル系で構成される。

LED 照明は、高輝度白色 LED 素子が 4 直列接続された構造を内部に持つ LED チップを 12 灯直列接続したものであり、その電源は約 140V、1Amax となる。変調はこの高電圧を高速でスイッチングする必要があるため、相当のノイズの発生が予想される。一方、赤外線通信の受光回路では、PD (フォトダイオード) の数十 mV の微弱信号を高利得で増幅する必要があるため、回路内のノイズの存在は大きな問題となる。そこで、VLC アクセスポイントの設計製作に当たっては、ノイズの発生源となるであろう LED 照明の発光回路 (駆動・変調) と、ノイズに敏感な受光回路及びプロトコル処理 FPGA 回路の弱電系回路を、電気的に絶縁することとした。そのため、電源基板、LED 発光基板、PD 受光基板、FPGA 基板の 4 枚構成とした。

なお、上位のネットワークから LED 照明器までのネットワーク経路として用いる電力線搬送通信 (PLC) に関しては、現段階では電波法の規制により船舶での利用はできないため、PLC 部は必要に応じて取り外し可能な構成としている。ただし、船舶での PLC 利用に関しては、現在も船舶業界団体と共に、関連部署への働きかけを継続している。

図 8 に、携帯情報端末に取り付ける光無線 LAN (VLC) アダプターの構成と外観を示す。

VLC アダプターの回路構成は、アクセスポイントと基本的な構成は同じであるが、発光・受光回路のアナログ系とプロトコル処理 FPGA 回路のデジタル系を同一基板上に配

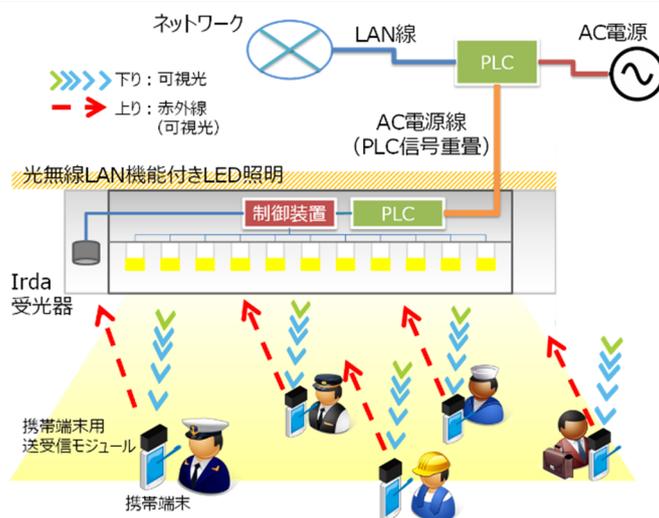


図 6 光無線 LAN システムの概要

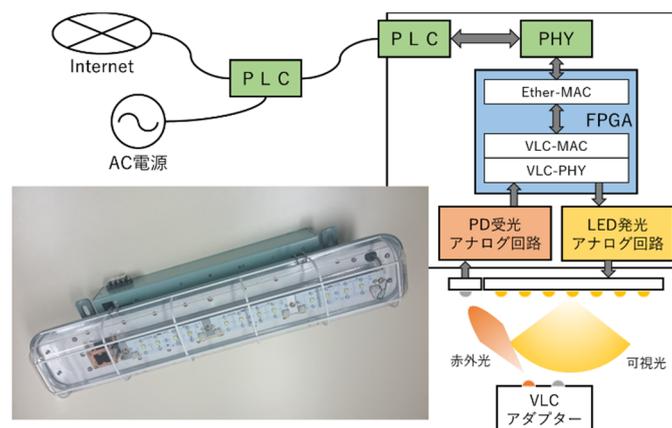


図 7 光無線 LAN アクセスポイント

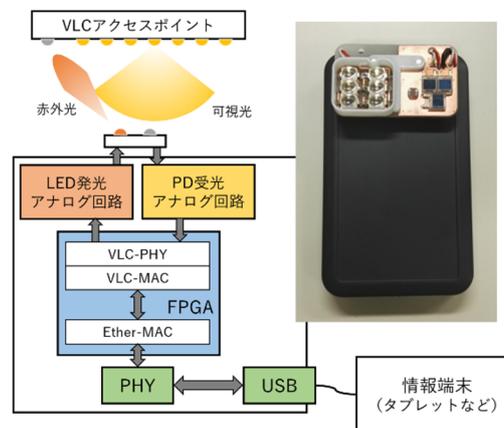


図 8 光無線 LAN アダプター

置している。これは、赤外 LED の駆動電圧が低く、基板上で十分なノイズ対策ができることに加え、情報端末に取り付ける VLC アダプターは小型化する必要があるためである。なお、試作当初は専用バッテリーを内蔵しており、弁当箱サイズであったが、製品化試作の段階において、標準的なスマートフォンと同等サイズ (69×118×27mm) にまで小型化し、情報端末からの給電で動作する機器とした。

しかし、目標である通信距離 3m を実現するため、赤外 LED の発光強度向上及び可視光 PD の受光感度向上が必要となり、それぞれ複数のチップを並列化して配置しており、機器の小型化が制約された面もある。

3・3 光無線 LAN システムの評価

開発した光無線 LAN アクセスポイントの評価は、主に複数台通信時のネットワーク速度に関して行った。ネットワーク速度の評価には、ネットワーク帯域測定ソフトウェアである”Iperf”を用いた。”Iperf”は、ネットワーク速度の評価に一般的に用いられており、測定対象となるネットワークの最大帯域パフォーマンスを測定することができる。

ネットワーク速度測定の様子を図9に示す。測定環境は、一般的なオフィスの天井にアクセスポイントを設置し、外光をブラインドで遮断した。また、天井に取り付けられたアクセスポイント以外の照明は消灯した状態で測定を行った。光無線 LAN アダプターは、アクセスポイントの直下2mの地点とアクセスポイントから4方向に距離2m、角度40°の4地点に配置した。

図10に測定結果の一例を示す。1対1通信時の下り（可視光）と上り（赤外光）の最大ネットワーク速度は、それぞれ1.86Mbpsと1.12Mbpsであるが、1対N通信になるとコリジョン処理の関係で、若干全体のネットワーク速度が低下する。しかし、下り（可視光）においても複数台通信時のネットワーク速度は1.55Mbpsと、約8割のネットワーク速度を維持しており、通信プロトコルの設計時に行ったシミュレーション結果と比較しても差はなく、概ね良好な結果と言える。ただし、複数台通信時に送受信モジュール間で通信帯域を等分できていない点は問題である。これに関して、特定の送受信モジュールが通信帯域を占有している訳ではないので、コリジョン処理のアルゴリズムと待ち時間に関するパラメーターを調整する必要があると考えている。

一方、上り（赤外光）においては1対1通信時と複数台通信時でネットワーク速度の低下が見られない。通信制御プロトコルは、下り（可視光）と同様のアルゴリズム（動作）であるため、変調方式が下りのI-4PPM変調に対して上りは4PPM変調にしていることが原因ではないかと推測される。この点に関しては、上り（赤外光）の目標通信速度1Mbpsを達成しているが、更なる高速化に向けて、今後も検証が必要である。

4. 結 論

4・1 光学特性からみた白色LEDの応答性評価

シングルチップ型白色LEDの応答性を評価し、白色LEDを用いた高速可視光通信技術に関する指針を示した。

- (1) 色温度の高い白色LEDを用いる。色温度5000K以上が望ましい。
- (2) 光学フィルターを用いると、安定性は向上する。ただし、通信可能距離は減少する。

4・2 LED照明を用いた光無線LANシステム

県内企業、大学と可視光通信技術の研究開発を行い、製品化試作を行った。

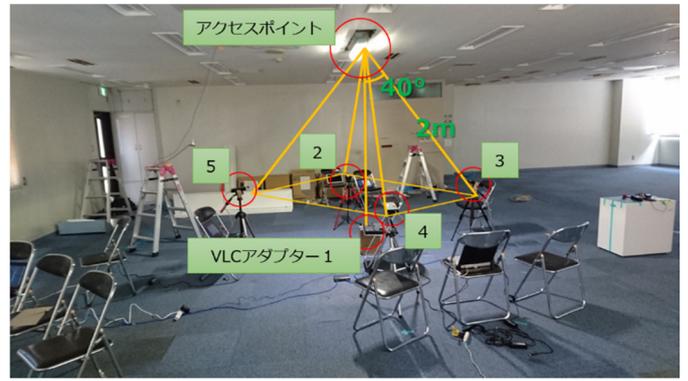
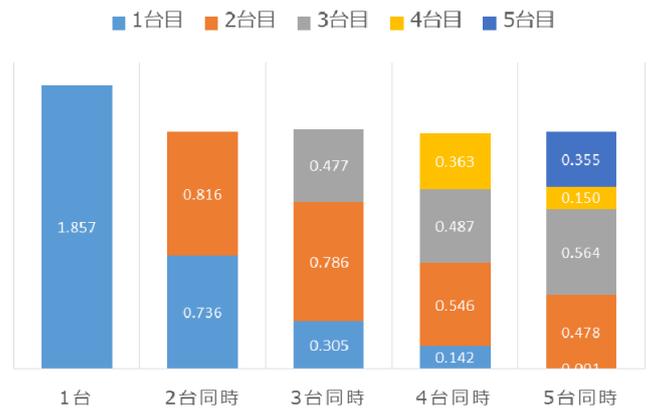
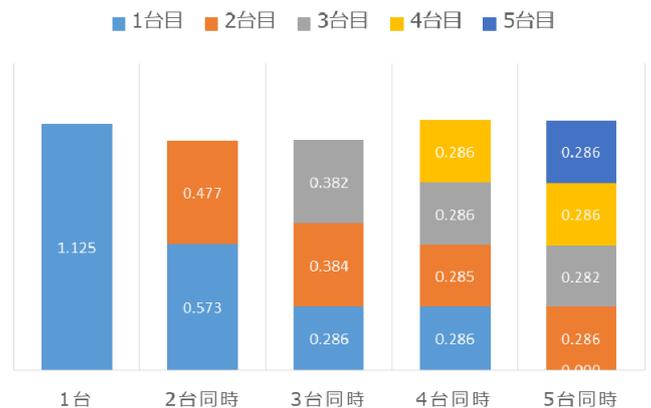


図9 ネットワーク速度の測定



(a) 下り（可視光）



(b) 上り（赤外光）

図10 ネットワーク速度の測定結果

- (1) 船舶用LED照明器向けに、光無線LANアクセスポイント機能付き照明器を開発した。
- (2) USB接続可能な光無線LANアダプターを開発した。
- (3) 開発した光無線LANシステムで複数台同時通信ができることを確認した。ベストエフォートは、1.86Mbpsである。

本研究開発の一部は、経済産業省の平成25年度～27年度 戦略的基盤技術高度化支援事業（サポイン事業）の委託を受けて実施しました。関係者の皆様に感謝いたします。