

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560471

研究課題名(和文)可視光通信方式におけるインタオペラビリティの研究

研究課題名(英文)Study on interoperability in visible light communication system

研究代表者

松本 充司(MATSUMOTO, MITSUJI)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：00287997

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円、(間接経費) 600,000円

研究成果の概要(和文)：スマートフォンやタブレット端末を利用した屋内の高速無線通信サービス環境を拡大する光無線LANアクセス方式の実現するため、アクセスプロトコル、周辺技術の研究を行った。屋内ではLEDの進展により、赤外線技術と可視光通信技術による実現方法が検討されているが、両者は使用する波長が異なり、各々のハードウェア構成技術は、利用環境が同一であっても独立の技術で構成されている。

本研究では、光無線LANのアクセスポイントのプロトコルの統合化の検討、および赤外線、可視光通信システムを実現するための環境条件、周辺技術についての検討を行った。

研究成果の概要(英文)：For the purpose of realization of optical wireless LAN access method to expand the high-speed wireless communication service environment of indoor using smartphones and tablet terminals, the study of design method have been made.

With the development of LED, implementation by visible light communication technology and infrared technology in indoor has been studied. However, since the wavelength used are different from each other, the use environment may be the same, the hardware configuration is constituted by independent techniques.

Therefore, the development of the protocol for the access system for optical wireless LAN and the related technologies, environmental conditions for infrared(IR), and visible light communication (VLC) system have been done.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：可視光通信 ちらつき 赤外線通信 インタオペラビリティ アクセスプロトコル 光無線LAN

1. 研究開始当初の背景

近年、インターネットや携帯電話の普及による情報量の増大により、いつでもどこでも瞬時に情報を取得できる超高速情報通信システムの開発が要望されている。特に、オフィス、病院などの公共の建物内や航空機内、電車内で、高速高品質の情報や多種多様な Web 情報を、近年急速な普及を見せているスマートフォンなどの個人の携帯情報端末で容易に取得できるシステムの提供が期待されている。この需要を満たすため、光ファイバを中心とする超高速ブロードバンドネットワークや高速無線 LAN の開発が行われ、オフィスのみならず家庭にまで導入が検討されている。

2. 研究の目的

屋外、屋内そして端末までの情報流通には、リンク間の接続やインタフェースに多くの課題が残されている。現在、LTE、Wi-Fi、WiMAX 等、電波による無線システムが主流であるが、帯域幅に制限があり、高速化に限界がある。この問題の解決手段の一つとして、高速広帯域の伝送に適した光無線技術による通信システムが注目されている。主にオフィス、病院、図書館など、多くの利用者が存在する公共の建物内における光無線 LAN 環境におけるアクセス方式の構築が要望されている。また、赤外線システムは 1970 年代に TV の遠隔制御用に登場している。1993 年には IrDA (Infrared Data Association) で PC 周辺における情報通信の担い手として発展している。赤外線システムは波長が 850nm 周辺の LED (Light Emitting Diode) で実現されている。最近では青色ダイオードの登場により白色 LED 照明が実現されると共に、白色 LED を用いた照明光通信にも応用されている。LED 照明に情報を付加した可視光通信が注目されている。このような光無線環境においては、瞬時に、かつ容易に情報が得られる屋内光無線 LAN システムの実現が急務の課題となっている。小型、安価、長寿命の白色 LED の登場に伴い、省エネルギー化の担い手として発展している。赤外線の狭帯域ビームの直進性と可視光のワイドビームとの組み合わせによるハイブリッド屋内光無線 LAN システムの構築が注目されている。

3. 研究の方法

本研究では、光無線 LAN のアクセスポイントのプロトコルの統合化の検討、および赤外線、可視光通信システムを実現するための環境条件、周辺技術についての検討を行った。

(1) 屋内における可視光通信と赤外線通信によるハイブリッド通信システム的设计、インタオペラビリティを満足するプロトコルの構成法

(2) 多くの利用者が密集する公共の施設内における有効な光無線アクセス方式の検討、

(3) 照明光と通信用光の共通信号に伴う照

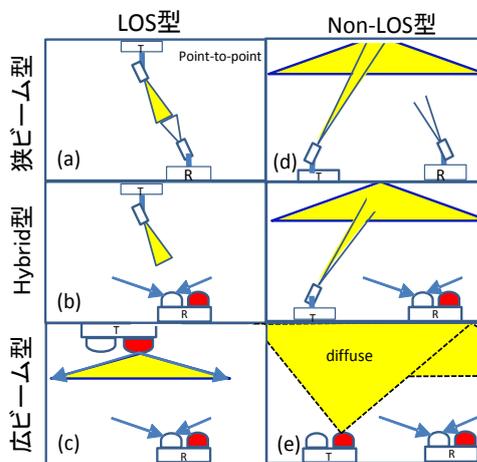
明光のちらつき問題等を取上げた。これらの課題をステップバイステップで検討した。

4. 研究成果

(1) 見通し内通信 (ハイブリッドシステム)

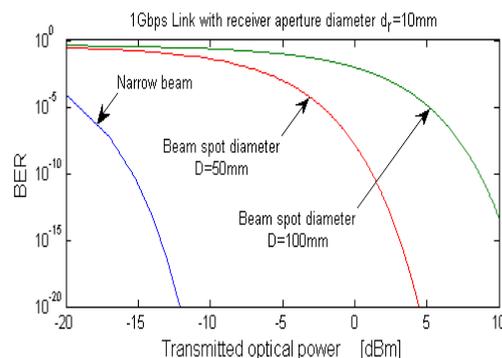
LOS (視界) の観点から、赤外線による異速度通信を許容するダウンリンク、アップリンクハイブリッド方式を提案し、そのシステムパフォーマンスについて有効性、実用性を検討し、システムパフォーマンス向上を示す解決策を提案した。

本研究では、主として天井に設置するアクセスポイントと、室内の受信端末間のハイブリッドシステムの実現を目指して、有効なシステムデザインの検討を行った。J. R. Barry “Wireless Infrared Communications” によればシステム構成は主に以下のように分類される。

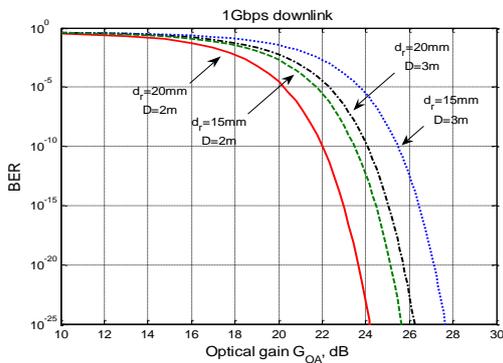


本研究では、複数のユーザを考慮してダウンリンクは可視光技術による広ビーム、アップリンクは、個々のユーザによる高速通信を可能とする赤外線技術による狭ビーム方式が望ましいとした。また、単一指向型とハイブリッド構成によるポイントポイント間通信に加えて、ポイント・マルチポイント通信についてもその有効性および実用性を示した。

また、下図に 1 Gbps リンクにおける受信開口径 $d_r = 10\text{mm}$ の場合のビームスポットをパラメータとした屋内レーザーリンクの送信光電力と BER の関係を示した。



ビームスポットが大きくなれば、同一 BER を得るために送信電力を大きくする必要があることを示す。また、以下に受信レンズの開口径をパラメータとした時の受信利得と BER の関係を示した。



さらに、将来の屋内の光無線通信方式で LED に加えて、LD (Laser Diode), EL (Electro Luminescence) などが混在することが想定されることについても検討を行い、将来における検討課題を示した。

(2) 赤外線通信システムの展開：

赤外線は、波長が赤色可視光線よりも長く、 $0.78\mu\text{m}$ から $100\mu\text{m}$ 程度の電磁波のことである。水分子に吸収されやすいが、窒素分子や酸素分子には吸収されないため空気中での透過性が高い。肉眼では知覚することができないため意識することは少ない。目に対する安全性が高く、各国の法規制が少ない、小型化・軽量化、省電力化が可能であるなどの特徴がある。初期の規格は 115.2kbps (SIR) で半二重シリアル通信であったため、実際の PC 間のファイル転送に数十秒要したが、速度の改良が行われ、現在では 1 Gbps の規格化が行われている。通信プロトコルも改良され、従来比の 20% まで通信時間の短縮化が実現されている。しかしながら、以下の課題は解決されていない。高速化・多機能化を進める展開において様々な課題に直面している。

- (a) 高速プロトコルの構築と相互接続性
- (b) 全二重通信と通信性能

(3) アクセスプロトコルの構築。

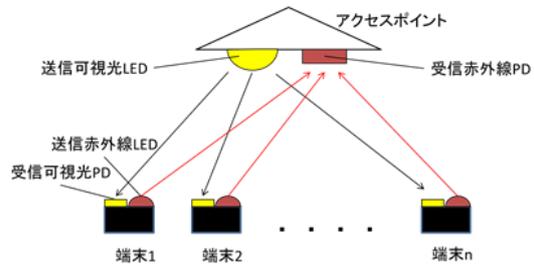
屋内や電車内の高密度で通信する場合、衝突防止アクセス方式を検討した。LED を利用する屋内や列車内で利用される高速可視光 LAN 通信の研究を進めた。特に、可視光通信では、信号はビームに近い形で伝搬するため、電波のように拡散しないことから、近傍の端末からの発信の状態が不明確である（隠れ端末問題が発生する）。このため、タイミングによっては同一アクセスポイントへ同時アクセスが発生するため、両者のアクセスは不可になることがある。これを防ぐ方法として、電波の場合では MAC 制御 (Media Access Control) 方式が開発されている。

有線 LAN の場合キャリア検出が可能であり CSMA / CD (Carrier Sense Multiple Access

/Collision Detection) が利用される。

無線 LAN の場合は CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance) 方式が利用されている。光無線通信の場合は、電波の拡散とは異なることから、新たな MAC 制御 を検討する必要があった。

このため平成 24 年度までは天井の LED 照明を AP (アクセスポイント) とし、下りは天井から LED 照明光で拡散し、ユーザ端末に可視光用 PD (Photo Diode) AP へ、上りは指向性のある赤外線 LED を利用して、天井に赤外線用 PD (Photo Diode) で受信するモデルでアクセス方式を検討した。可視光無線 LAN システムに CSMA/CD 方式の適用では電圧変異による衝突検出が不可のため折り返し送信を利用した。以下に可視光 LAN のモデルを示した。

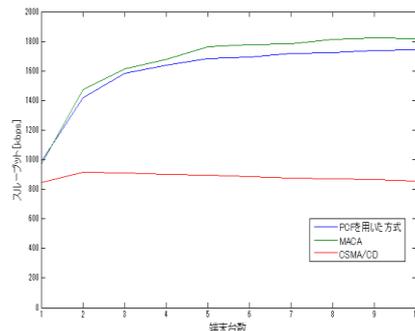


(i) CSMA/CD 方式では送信データと折り返しによる受信データが一致すれば非衝突、一致しなければ衝突と判定できるが折り返し送信のため、上り下りで異なる波長であるが、半二重通信になってしまうという欠点がある。

(ii) Collision Avoidance (MACA) 方式では、キャリア検出をしない点以外は電波無線 LAN の CSMA/CA with RTS/CTS と等しいが、端末がアクセスポイントにデータを送信中の時、下りのデータを送ることができるため、アクセスポイントが CTS/ACK 確認信号の送信中を除き、全二重通信が可能である。

(iii) PCF (Point Coordination Function) 方式ではビーコンによる送信許可を得るため予め端末に番号を割振っておく必要がある。AP がビーコンとポール・ACK の送信区間を除くと全二重通信が可能である。

各プロトコルの、端末台数を変化させたときのスループットシミュレーションの結果を以下に示した。



情報発生頻度が高い場合、PCFによる全2重方式がよい結果を示した。同一条件ではCSMA/CD方式では端末が5台のスループットは約900kbpsに対して、PCF方式では約1600kb/sの有用性を確認できた。

CSMA/CD方式を用いると半二重通信になるため、1000kbpsのチャンネルがある。

アクセス方式では、下りは天井からLED照明光で伝搬し、上りはユーザ端末から可視光用PD(Photo Diode)に指向性の強い赤外線LEDを利用するモデルでアクセス方法を検討した。MAC制御にはCSMA/CD, CSMA/CA with RTS/CTS および、ビーコンとポール・ACKによる組み合わせたPCF方式を選択して比較検討した結果、同一条件ではスループットは約1600kbpsでCSMA/CDの約900kbpsに比べ有用性を確認した。

受信端末の整合性、インタオペラビリティに関しては、原則天井のアクセスポイント(AP)とスマートフォン等の受信端末間の標準化が必要で、これについては基本的な通信方式を決めることが先決である。可視光通信の標準化にはIEEE802.15.7でCSK(Color Shift Keying)が決められているが、Colorフィルタの規格、実現性が困難で実用的ではない。さらに、システム設計の観点から、全体のアーキテクチャ並びに複数の端末が同時にアクセスした場合のマルチアクセス方式の規格も従であることから、平成25年では、アーキテクチャの設計およびアクセス方式の明確化を行い、成果を国内外の学会に提案した。この結果は今後屋内や電車などの高密度の端末が存在する場合の開発が注目され、今後の展望が期待される。

(4) チラツキの検討

赤外線や可視光線では他の照明光や太陽光源からの外乱光によって影響を受ける。特に、LED光源の普及に伴い、照明と通信を兼備し、照明として利用中に情報信号を同一照明光源から提供するニーズが高まっている。特に低速信号の通信では電源のオンオフによるチラツキが問題となる。本件に関しては平成24年度までの研究で、低速度のLED通信時に発生するチラツキに関して、1kbps以内であってもPPM(Pulse Position Modulation)を用いることおよび高速キャリアと帯域フィルタを組み合わせることで解決した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① Dimitar Kolev, K.Wakamori, M.Matsumoto: "Transmission Analysis of OFDM-Based Services Over Line-of-Sight Indoor Infrared Laser Wireless Links," *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 30, no.23, pp.3727,3735, Dec.1, 2012.
- ② Dimitar Kolev, K.Wakamori, M.Matsumoto: "A Gigabit Single- Wavelength Optical -Transparent FSO Link with FEC Using

Bit-Interleaving and Delay Lines for Enhanced Digital TV Transmission" *Journal of IIEEJ*, Vol.41, No. 5, pp. 546-553, Sept. 2012.

[学会発表] (計17件)

- ① 松本充司, 林新; "(招待講演)光無線通信の展開", 131回微小光学研究会, 早大, 2014.3
- ② 今村侑輔・松本充司・林新; "可視光無線LANにおける隠れ端末問題解決の一検討", 電子情報通信学会総合大会2013, A-5-15, 新潟, 2014.3
- ③ 安田直矢・松本充司; "偏光フィルタを用いた外乱光除去による可視光通信品質向上の一検討", 電子情報通信学会総合大会2013, B-12-1 新潟2014, 3
- ④ Dayong Kou, Fan Bai, Yuwei Su, Mitsuji Matsumoto; "Performance Analysis of DC-biased Optical OFDM for Indoor Visible Light Wireless Communication System Based on White LEDs", 2014信学会総合大会予稿, BS-1-20, 新潟大, 2014.3
- ⑤ 謝拓・ハオボヤン・蘇昱璋・白帆・松本充司; "高周波数駆動の有機ELを使った可視光通信の検討", 電子情報通信学会総合大会2013, B-5-120, 新潟, 2013.3
- ⑥ Mitsuji Matsumoto; "(Invited speech) The challenge of VLC in Japan", 2nd International Workshop on OWC- IWOW2013, Newcastle, 22 October 2013
- ⑦ D. Kolev, K. Wakamori, M. Matsumoto, T. Kubo, T. Yamada, N. Yoshimoto, "Hybrid Line-of-Sight Indoor Infrared Laser Wireless Link with 10Gbps Downlink and 1Gbps Uplink" International Workshop on Optical Wireless Communications 2013, Newcastle, UK, 21-23 Oct. 2013.
- ⑧ Mitsuji Matsumoto; "(Invited) Research and Development of Next-generation Optical Wireless System - Experimental Study towards the Seamless Connection of a Fiber Network", International Symposium on Optical Wireless Communications, Beijing China, June 2013
- ⑨ 今村侑輔・松本充司; "可視光通信を用いた双方向通信モデルシミュレーションの基礎検討", 2013年度画像電子学会第41回年次大会, S3-2, 青森, 2013, 6.22
- ⑩ ハオボヤン・松本充司; "可視光通信における輝度制御方法に関する研究", 2013年度画像電子学会第41回年次大会, p-9, 青森, 2013, 6.22
- ⑪ Dimitar Kolev, T. Kubo, T. Yamada, N. Yoshimoto, K. Wakamori; "Non - Directed Indoor Optical Wireless Network with a Grid of Direct Fiber Coupled Ceiling Transceivers for Wireless EPON Connectivity," *ITU Kaleidoscope(K-2013)*, no.5 pp.1,8, 22-24 April 2013.

- ⑫ Dimitar Kolev, K. Wakamori, M. Matsumoto, T. Kubo, T. Yamada, N. Yoshimoto, “Gigabit Indoor Laser Communication System for a Mobile User with MEMS Mirrors and Image Sensors,” International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW), 2012, pp.1,3, 22-22 Oct. 2012.
- ⑬ Dimitar Kolev, Mitsuji Matsumoto, “A Study of a Low Speed Uplink, Based on Diverged LaserBeam and Multiple Ceiling Transceivers for Indoor Optical Wireless System,” IIEEJ-IEVC2012, Malaysia, 21-24 Nov.2012
- ⑭ 北角権太郎, 松本充司; 標準化に向けた可視光通信における光学空間的評価法の考察 LED 照明による可視光通信の評価, IIEEJ 40th Conference R5-2, 23 June 2012
- ⑮ 戸塚, 佐藤, 高野, 大木, 松本; “白色 LED を用いた光空間伝送によるキノフォーム動画像再生の検討”, IIEEJ 40th Conference P-3, 23 June 2012
- ⑯ Dimitar Kolev, Mitsuji Matsumoto: “Indoor HDTV Broadcasting through Line-of-Sight Optical Wireless Link with Direct Fiber Coupling Transmitter,” IIEEJ 40th Annual Conference, Tokyo, 23-24 June 2012.
- ⑰ Tam Hoang Thi, Mitsuji Matsumoto; “A Study on Handover algorism for Visible Light Communications Systems”, IIEEJ 40th Annual Conference, Tokyo, 23-24 June 2012.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本充司 (MATSUMOTO, Mitsuji)

早稲田大学理工学術院・教授

研究者番号 : 00287997