

可視光通信向け海中映像伝送システムのFPGA実装

学生員 松田 祐希* 正員 宮城 桂^{*a)} 正員 山田 親稔*
非会員 谷藤 正一* 正員 市川 周一**

FPGA Implementation of Undersea Video Transmission System for Visible Light Communication

Yuki Matsuda*, Student Member, Kei Miyagi^{*a)}, Member, Chikatoshi Yamada*, Member,
Shoichi Tanifuji*, Non-member, Shuichi Ichikawa**, Member

(2018年5月9日受付, 2018年10月11日再受付)

The mainstream of conventional underwater radio communication technology is acoustic communication; however, there is a problem in that the communication speed is limited. On the other hand, optical wireless communication technology has been utilized, wherein in which large capacity data transmission becomes possible. In this paper, we show the configuration of the transmitter and receiver for FPGA mounted video and its evaluation results for video transmission by underwater visible light communication. As a result of the evaluation, it is shown that a transmission speed of 20 Mbps or more can be achieved, and the total power consumption of the visible light communication transceiver was at most 0.372 W.

キーワード: 海中データ通信, 海洋観測装置, 可視光通信, IoT, FPGA

Keywords: undersea data communication, ocean observation apparatus, visible light communication, IoT, FPGA

1. はじめに

現在, 沖縄近海には約 740 万トンとされる豊富な海底資源(熱水鉱床資源)が存在する事が分かっている⁽¹⁾。これら資源の有効活用が期待されているが, まだ開発段階であるため, 産業化の目途は立っていない。人が潜れない海底における資源開発では, 自律型無人水中ロボット AUV (Autonomous Underwater Vehicle) や遠隔操作型の無人潜水機 ROV (Remotely Operated Vehicle) が必要不可欠である。現在, 各種用途の AUV, ROV からの水中観測データの伝送及び制御信号の伝送は, 水中音響通信装置により双方向で行われている。しかしながら, 水中音響通信では, 観測のために AUV, ROV 自身から発生されるソナーや, 近傍船舶からのソナーなど雑音源も多く, それらの影響を受けや

すいため, 通信品質は低下する。特に音波データ無線通信方式における通信速度の限界は大きな課題である⁽²⁾。また, 電波による無線通信は陸上において長距離かつ高速な通信が実現されているが, 水中では減衰率がかなり大きく実用的ではない。Fig. 1 に海中における電磁波(電波・光波)の吸収減衰特性を示す。波長 380~780 nm の可視光は, 海中における減衰率が非常に小さいため, 数十 m~数百 m 程度の距離の伝送が可能となる⁽³⁾。

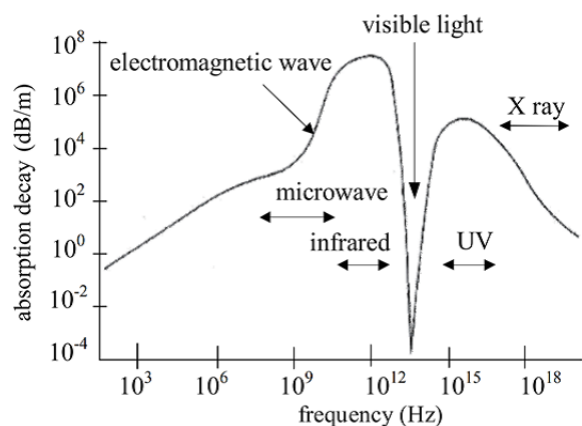


Fig. 1. The absorption decay of electromagnetic waves (radio and light waves) in the sea.

a) Correspondence to: Kei Miyagi. E-mail: k.miyagi@okinawa-ct.ac.jp

* 沖縄工業高等専門学校

〒905-2192 沖縄県名護市辺野古 905

National Institute of Technology, Okinawa College
905, Henoko, Nago, Okinawa 905-2192, Japan

** 豊橋技術科学大学

〒441-8508 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1

Toyohashi University of Technology

1-1, Hibiogaoka, Tempaku, Toyohashi, Aichi 441-8580, Japan

また、可視性により、伝搬方向や位置範囲の制御が容易であるため、光固有の高い指向性と集光性を生かす事により、大容量の高速無線通信が期待できる。近年では、半導体光源の高出力化により、LED やレーザーダイオードが高出力かつ低消費電力となったことから、ダイオード系の光源を用いた水中可視光通信技術の開発が進んでいる^{(2)(4)~(7)}。これらの技術革新により、海底ステーションからのデータ回収を目的として、80 m の距離で 10 Mbps を達成した報告⁽⁴⁾や、各種変調方式の評価⁽⁵⁾などがなされている。しかしながら、可視光通信技術を用いた海中 IoT 化の普及に向けた無線通信機器の実現法に関しては、ほとんど検討されていない。例えば、海洋研究開発機構と島津製作所が共同で開発した水中可視光通信システムは、LAN (Ethernet) 上で TCP/UDP を用いる汎用通信を実現しており、速度と信頼性は高いが、全体の総重量は 40 kg、総消費電力は最大 350 W (Out light power > 5 W) にのぼる⁽⁶⁾ため、コスト面に課題がある。IoT 化を実現する為には、機器の小型化や省電力化は避けられない。

本論文では、電源の確保が難しい海中において、動画像など大容量・高速データ伝送を低コストで実現する事を狙う。主として映像伝送に特化させる事で、より小型・低コスト・低消費電力の必要な産業応用を目指したシステムの実現法について述べる。低消費電力かつ低出力であっても、IoT ではアドホック通信など別の方法でシステム構築が可能である⁽⁸⁾。また、画像では多少のノイズや欠落は許容できるため、TCP のようなエラー処理や再転送は、画像应用到に限れば不要である。そこで、本システムでは、シリアル転送 (RS-232C) の採用により、可視光通信システムの低コスト化を目的としている。速度を下げて信頼性が必要な場合は、PPP (Point-to-Point Protocol) などを採用する事で対処できる⁽⁹⁾。以下、海中 IoT の実現に向けて、小型 FPGA を用いた海中映像伝送システムの実現法について述べるとともに、その評価結果を示す。

2. 可視光無線通信方式

可視光通信技術を用いた無線通信技術が陸・海・空へと広がりを見せている。可視光通信の基本的な原理を Fig. 2 に示す。送信側で送りたい情報に応じて電気信号を変調し、それを LED 等によって光に変換して送信する。受信機では、その光を受光素子 (PD: Photodiode) 等で受けて電気信号に変換し、復調する事によって、元の情報として認識する⁽¹⁰⁾。可視光は、従来の電波を用いた通信と比べて以下の利点がある。

- (1) 既存の LED 照明等を通信機器として利用できるため、低コストに通信環境を構築できる⁽⁷⁾。
- (2) 照明が当たっている場所に通信範囲を制限する事が出来るため、高いセキュリティを保持できる⁽¹⁰⁾。
- (3) 人体や電子機器に悪影響を及ぼさない⁽¹¹⁾。
- (4) 電波法による規制が無い場合、広帯域な無線周波数を自由に利用する事が出来る⁽¹¹⁾。

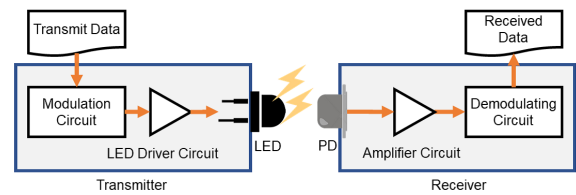


Fig. 2. Visible light communication (VLC) technology.

可視光通信では、主に光強度変調を用いており、通信方式としては、電波と同じく ASK (Amplitude Shift Keying), FSK (Frequency shift keying), PSK (Phase Shift Keying), PPM (Pulse Position Modulation) 等が用いられるが、FSK, PSK では、光の周波数帯域が電波の帯域よりも高いため、光の周波数や位相を信号に対して変調させる事が難しい⁽¹²⁾。屋内照明を利用した研究としては、FSK や PPM を用いたものが数多く提案されている^{(13)~(16)}。これは、照明として利用する際に、ちらつきを考慮する必要がある為である。例えば、単位時間あたりの点滅のデューティ比が変化すると明るさに変化が生じるため、人の目から見てちらつきを感じやすい⁽¹⁶⁾。一方、PPM 変調はパルスの位置の変化で情報を送るため、1 シンボルあたりの点灯と消灯時間は変化せず、人の目から見てちらつきを感じにくいという利点がある。

実装方法にもよるが、BER (Bit Error Rate) の観点からは、PPM よりも FSK, ASK が望ましいとの報告⁽¹⁷⁾もあり、性能の維持と回路の小型化を図るために、ASK 変調を利用した研究もある。しかしながら、通信データの内容によって明るさを変化させないための LED ドライブ回路が別途必要になる⁽¹⁷⁾。

一方、海中における可視光通信に関しては、照明としての機能は考慮する必要が無い場合、本研究では低コスト化・低消費電力化の観点から、変復調ハードウェア機構を簡略化できる ASK 変調方式を採用した。次章では、海中向け映像伝送システムのハードウェア構成法について述べる。

3. 海中可視光無線通信システム

海中の IoT 化を実現する上で、システムの小型化、低コスト化、省電力化は大きな課題である。また、自然水である海水 (半透明体) 中には水分子だけでなく、太陽光雑音やマリンスノーなどの海水を濁らせる様々な懸濁粒子が存在する⁽²⁾。そのため、太陽光の波長および海水の濁度といった海中特有の雑音源に対して、耐性のある通信システムを実現する必要がある。ここでは、送受信に関するハードウェア開発の観点から、システムの構成法について述べる。

(3-1) 送受信機の構成 異なる端末間で映像を正しく伝送するためには、送信機と受信機間で信号の同期を取る必要がある。同期が取れない場合、送受信機間でタイミングに齟齬が生じてしまい、映像を正しく再現出来ない。そこで、本研究では、可視光送受信機のインタフェース部として、RS-232C 通信方式により接続する構成とした。RS-232C を

利用することで、既存の観測機器やコンピュータとの接続を容易にするとともに、Ethernet を用いた場合よりも、低コストな可視光通信を実現できる。

先行研究として、RS-232C を利用する事で、低消費電力化、低コスト化を目指した研究⁹⁾がある。しかし、市販のロジック IC を含む電子部品によって変復調機能を構成しているため、低コスト化や小型化、低消費電力化には限界がある。例えば、RS-232C インタフェース IC (MAX3232ECAE) だけでも、その消費電力は、最大で 517 mW⁽¹⁸⁾となる他、基板上には、送受信制御用の 32 bit-CPU (V850E/JG2) も集積されているため、総消費電力はさらに増加する。加えて、変調方式や仕様の変更等の要求条件が生じた場合には、回路全体の再設計が必要となり、機能変更時の融通性が低いという問題もある。

本研究では、それら課題を解決するために変復調機能を FPGA に実装する。例えば、IoT デバイスの通信機能には、Ethernet, USB, RS-232C, Wi-fi, ZigBee, Bluetooth などの通信モジュールが利用されるが、FPGA であれば、回路の書き換えにより用途に応じて、適した通信機能を実現する事が出来る他、可視光通信に必要な通信機能を単一の FPGA により 1 チップ化する事で、小型化と低コスト化を実現できる可能性がある。しかし、FPGA を対象とした海中可視光通信向け映像伝送ハードウェアに関する研究は、筆者らの知る限りほとんど存在しない。そこで、FPGA 上に可視光通信専用ハードウェアを実装する事で、システムの効率化を試みる。

Fig. 3 に提案する海中映像伝送システムの送信機と受信機の構成を示す。送信機では、HDMI を介して FPGA ボードに入力された映像データを RGB 信号にデコードしてシリアル変換する事で単一の LED による伝送を可能にしている。映像処理部では、RGB の色深度を落とす事により、LED のスイッチング速度に応じてビットレートを制御できる構成とした。その後、RS-232C の規格に基づき、ビット列をシリアル変換して LED の明滅でデータを出力する。受信機では、可視光により伝送された信号を映像に復元する。まず、送信機より出力された可視光の明滅をフォトダイオード PD により検知し、O/E 変換により電気信号として FPGA に入力する。受信した映像データはシリアル信号として入力されるため、RS-232C レシーバにより、シリアル/パラレル変換する事で送信されたビット列 (RGB) を復元している。RGB データは、DAC (Digital to Analog Converter) を介して、VGA 端子に送られ、ディスプレイ上に画像として描画される。

RS-232C には、通信方式として「同期式通信」と「非同期 (調歩同期) 式通信」の規格が定められているが、本研究では、低コスト化の観点から、調歩同期式通信 (非同期通信) による同期化回路を実装した。「同期式通信」を行った場合、データとは別に同期信号を送る必要があるため、送信機には、2 つ以上の LED が必要になる為である。一方、調歩同期通信の場合、単一の LED でデータの伝送が可能と

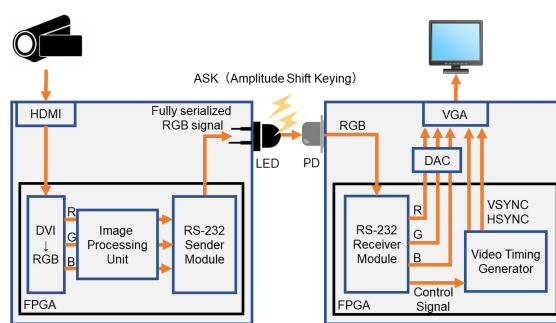
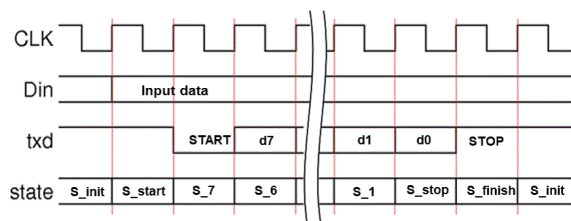
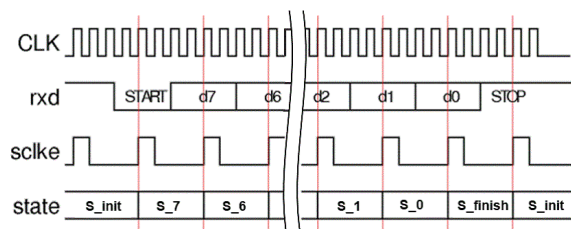


Fig. 3. Block diagram of the system structure.



(a) Timing chart of transmission data



(b) Timing chart of received data

Fig. 4. RS-232C communication waveform.

なるため、コストを抑える事が出来る。次節では、シリアル伝送において、伝送後の映像データを再現するために必要となる同期化の実現法について述べる。

〈3・2〉 調歩同期 (非同期) 式通信 調歩同期式通信は、送信する情報 (ワード) の前に START ビット 0 を、後に STOP ビット 1 を付加することにより受信側で同期を取る事を可能とした通信方式である。調歩同期式通信を用いた場合の送受信機のタイミングチャートを Fig. 4 に示す。

〈3・3〉 送信機の動作原理 Fig. 4(a) は送信機のタイミングチャートである。データ 8 ビットを送信する場合は、データの到着を示す START ビット (1 bit)、データ部の 8 ビット、データの終了を示す STOP ビット (1 bit) の合計 10 ビットに符号化してデータを送信する。なお、Din は入力データ、txd は出力データである。送信機は S_init, S_start, S_7 から S_0, S_stop および S_finish の計 12 個のステートから成り、ステートマシンはクロックの立ち上がりで、次の状態へと遷移する。以下に送信機の動作を示す。

- (1) 初期状態 S_init では、入力データを読み取りレジスタへ格納する。
- (2) S_start では START ビット 0 を出力し、S_7 から S_0 ではレジスタに保持されているデータの最上位ビットから 1 ビットずつ出力する。
- (3) S_stop では、STOP ビット 1 を出力して S_finish

へと遷移し、動作の終了を検出する。

(4) 初期状態 S_{init} へ遷移する。

〈3・4〉 受信機の動作原理 ASK 変調方式は、回路構成が単純になる反面、実際の通信では受信レベルの変動や、ノイズに弱いこと誤り率が悪い、という難点がある。そこで、受信データをサンプリングするタイミングに工夫を施した。Fig. 4(b) は、受信機のタイミングチャートである。受信機は、シリアル伝送されたデータ部の $START$ ビット、すなわち、0 が伝送されるタイミングを常に監視しており、0 を検出した後、3 サイクル経過したところで、再度、0 になっている事を確認する。この動作により、 $START$ ビットを検出するとともに、3 サイクル分の遅延時間を設ける事で過渡状態、すなわち、受信側の信号の電位が変化しだした直後の信号のサンプリングを避け、信号の鈍りやスイッチングノイズ等による誤動作を抑制することが出来る。次に、 $START$ ビットを検出したタイミングから 4 サイクル経過した箇所がデータビットの 1 ビット目としてサンプルされる。以下、同様の手順を繰り返す事により、8 ビット目までのデータをサンプリングする。その後、 $STOP$ ビット 1 を検出する事で、データ転送の終了を検知する。仮にサンプルした $STOP$ ビットの値が 0 だった場合は、本来、 $STOP$ ビットであるべき箇所が正常ではなかった事を示すフレーミングエラーが出力される。

これらの機能を実現するために、受信機のクロック周波数は、送信機の 4 倍の周波数としている。rxd は受信データを示しており、受信機は S_{init} , $S_{chkstart}$, S_7 から S_0 , S_{finish} の計 11 個の状態で動作する。以下に動作手順を示す。

- (1) 初期状態 S_{init} の際に $START$ ビット 0 を検出すると $S_{chkstart}$ に遷移する。
- (2) $S_{chkstart}$ では $START$ ビットが入力されていることを再確認する。
- (3) S_7 から S_0 では入力された信号をレジスタに最上位ビットから格納していく。なお、受信モジュールはボーレートの 4 倍のクロック周波数で動作しており、ビット列の中央付近の値を読み取るために 4 クロックおきにレジスタへ格納を行っている。
- (4) 最後に S_{finish} から S_{init} に遷移して動作を終了する。

4. FPGA 実装

シリアル通信の実現のために、可視光通信向け送受信回路を設計した。開発環境と設計仕様を Table 1 に示す。今回は、実証実験に用いる LED のスイッチング速度に対応させるために、伝送レート 10 Mbps を設計目標値とした。

〈4・1〉 送信機の回路構成 Fig. 5(a) に送信機のブロック図を示す。HDMI から入力された画像データは、Xilinx の IP コア dvi2vga により、VGA に変換され RGB を出力する。RGB データは、Image Processing Unit において、LED のスイッチング速度に応じて RGB の色深度を落とす処理

Table 1. Development environment and design specifications.

Design Tools	Vivado Webpack 2016.4
FPGA Board	Zybo Zynq-7000 ARM/FPGA SoC
Language	VHDL
Communication Method	RS-232C (Serial)
Synchronization Scheme	Asynchronous Communication
Modulation Method	ASK (Amplitude Shift Keying)
Graphic Mode	VGA (640×480 pixels)
Frame Rate	60 fps
Weight	0.12 kg (Excluding LED and PD)

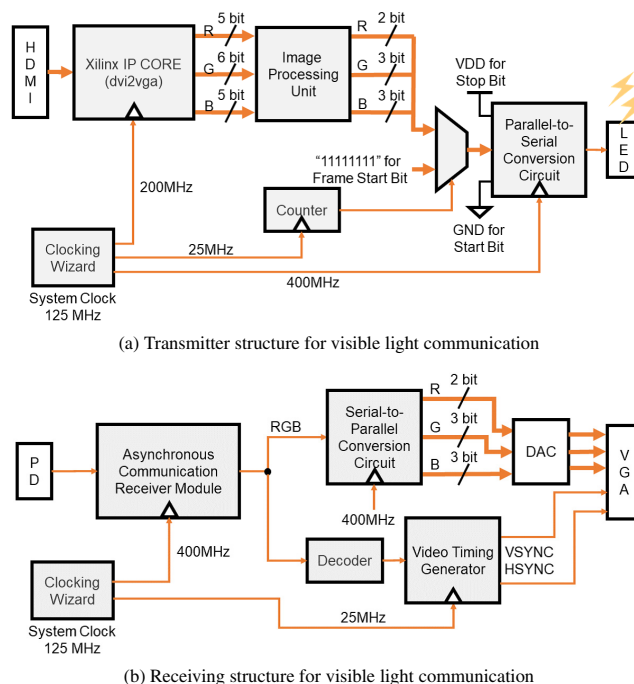


Fig. 5. Block diagram of the proposed system architecture in FPGA.

が行われる。その後、RGB データに対して $START$ ビットと $STOP$ ビットが付加され、シリアル変換されたデータは、LED を介して伝送される。ここで、受信側で画像フレームの最初のピクセル (開始位置) を検出できるように、Frame Start Bit を付加する構成とした。海中における通信では、マリンスノーなどの海水を濁らせる様々な懸濁粒子により、通信が一時的に遮断される場合が想定される。その場合でも、通信再開時に画像フレームの開始位置を再検出する事により、映像信号における各フレームの走査開始の基準となる開始位置を水平・垂直同期信号と再同期させる事ができるようになる。

〈4・2〉 受信機の回路構成 Fig. 5(b) に受信機のブロック図を示す。フォトダイオード PD から入力されたシリアルデータは、Asynchronous Communication Receiver Module にて RGB に変換された後、シリアル/パラレル変換され、デジタル-アナログ変換回路 DAC を介して VGA に送られる。Decoder は、Frame Start Bit の到着を検出し、その結果を受けて Video Timing Generator で画像の描画に必要な垂直同期 (VSYNC) 信号と水平同期 (HSYNC) 信号

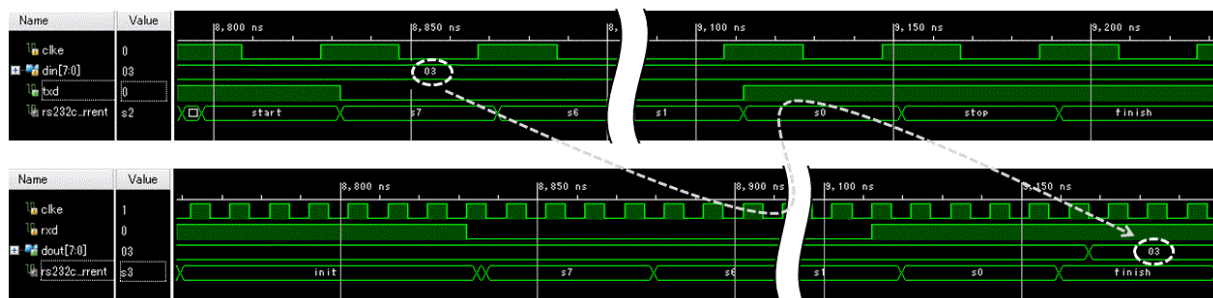


Fig. 6. Simulation waveform of implemented transceiver.

を生成する。映像の出力は、VGA (640×480 pixel) に準拠させるために、25 MHz を基準にして設計している。

〈4・3〉 送受信機のシミュレーション 送受信モジュールを設計し、配置・配線後にシミュレーションを行った結果を Fig. 6 に示す。din が送信機へ入力された 8 ビットのデータ信号であり、dout は、受信機の出力結果である。入力値として “0x03” を送信した時、受信機で正しい値が出力される事を確認した。

5. 可視光通信システムの評価

Vivado 2016.4 を用いて、Zybo Zynq-7000 を対象に論理合成、配置配線を行い、ハードウェア使用量と消費電力を評価した。さらに、実機上で可視光通信におけるシリアル送受信回路の動作確認と FPGA ボード上で映像の伝送実験を行った。

〈5・1〉 伝送レートと回路規模の評価 伝送データは、8 ビット毎に START・STOP ビットを付加しているため、約 20% の伝送オーバーヘッドが生じる。そのため、実装した送受信機の実際のデータ伝送レート R_b は、動作周波数 f_{clk} との関係から、以下の式で導出される。

$$R_b [\text{bps}] = f_{clk} [\text{Hz}] \times 0.8 \dots \dots \dots (1)$$

評価の結果、実際のデータ伝送レートは 20 Mbps であり、設計目標値を達成できる事を確認した。また、YouTube の HD 画質は、720p (1280×720)、30 fps で最高 2 Mbps となっているため、映像を伝送するために十分な性能を備える事が出来たと考えている。本システムは、TDD (Time Division Duplex) による双方向通信を前提としているため、1 つの FPGA 上に送受信機と受信機を実装した。実装した送受信機のハードウェア使用量を Table 2 に示す。ハードウェア構成を映像伝送に特化させる事により、少ない素子数で回路を構成する事が出来ている。Fig. 7 に送受信機を実装した FPGA のフロアプランを示す。ハードウェア使用量を抑えたため、小型 FPGA でも余裕を持って実装する事が可能であった。空き領域には、海中の雑音耐性に優れている符号化方式や省電力機能を実装する事で、さらなる高性能化を図る事も十分可能である。

〈5・2〉 消費電力の評価 vivado2016.4 を用いて、実装した送受信機の総消費電力を評価した結果、最大 372 mW であった。FPGA に 1 チップ化する事で、周辺部品の削減

Table 2. Hardware utilization of visible light communication transceiver module.

	LUT	LUTRAM	FF	BRAM
Using	1272	24	1974	2
Utilization [%]	7.23	0.40	5.61	3.33

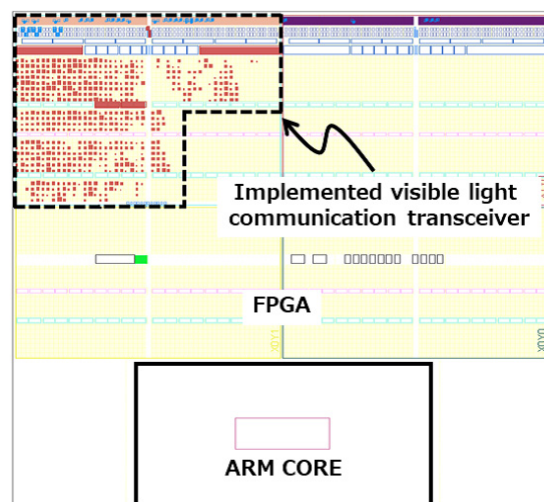


Fig. 7. Floorplan of FPGA chip.

や小型化だけでなく、省電力化も達成する事が出来たと考えている。また、回路の消費電力は、スイッチング電力とリーク電力に大別できるが、その内訳は、スイッチング電力が 72%、リーク電力が 28% であった。総消費電力の大半を占めるスイッチング電力の内、47% が PLL (Phase Locked Loop) によるものであった。例えば、映像の伝送を行わないアイドル時などは、PLL の動作を停止させる事で、さらなる低消費電力化が期待できる。

〈5・3〉 シリアル伝送実験 実験環境と実機上における動作検証の結果を Fig. 8 に示す。実験では、黒、赤、黄、緑で構成される画像データを伝送してディスプレイに出力させた。結果、シリアル通信により、画像が伝送出来ている事を確認した。しかし、細かく見ると色の境界部が櫛状に表示されている。これは、送信側の伝送レートと受信側で映像を描画するピクセルクロックの齟齬によるものであると考えられる。受信機では、ピクセルクロック 25 MHz に対して、RGB8 bit を VGA に出力しているため、シリアル伝送で必要になるビットレートは 200 Mbps (25 MHz×8 bit)

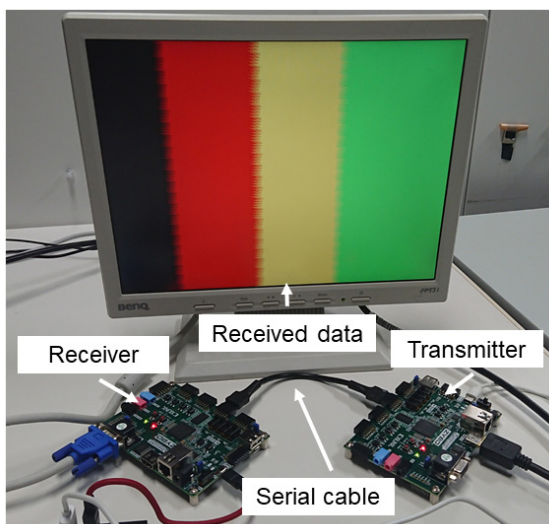


Fig. 8. Serial transmission experiment of video data.

となる。設計した送信機のデータ伝送速度は(1)式より、最大でも 20 Mbps であるため、伝送レートとディスプレイのリフレッシュレートの違いにより、正しく描画できていない。正しく描画するためには、バッファリングやフレームレートの調整、もしくは、1 フレームのピクセル数を 10 分の 1 以下に抑える事で対応できる。高解像度の映像伝送が求められる場合に関しては、提案する回路の送信部を並列化するなどして対応したいと考えている。

6. おわりに

本研究では、可視光を用いた映像伝送システムの小型化、低コスト化、省電力化を目的として、海中映像送受信専用ハードウェアの設計と FPGA 実装を行った。可視光通信に必要な機能を実装した FPGA に 1 チップ化する事で、ボード面積の削減、部品点数の削減、そして製造コストの削減が可能となる。また、海中の IoT 化を目的として、Ethernet より低コスト化を実現できる RS-232C を採用して、映像信号をシリアル伝送する送受信機の設計を行った。信頼性が必要な場合は、PPP (Point-to-Point Protocol) などを採用する事で対処する事も出来る。

評価の結果、目標値とした 10 Mbps 程度の伝送速度を達成出来る事を確認した。また、双方向通信を実現するために送受信機を実装した場合の総消費電力は 0.372 W であり、従来の可視光通信システムと比較して、より低消費電力化が達成できるという結果を得られた。ハードウェア使用量で言えば、小型の FPGA (Zybo Zynq-7000) でも、可視光通信における双方向通信を実現するための機能を実装する事が十分可能であった。

今後は、海中における可視光の伝播特性の評価や誤り検出方式を含む適切な通信路符号化方式の検討、BER の評価などを通して、海中 IoT 化の実現に向けた研究開発を継続していく。

謝 辞

本研究は、豊橋技術科学大学・高専連携教育プロジェクトおよび沖縄科学技術振興センターの平成 29 年度「沖縄科学技術イノベーションシステム構築事業 (委託共同研究)」の助成を受けて実施した。

文 献

- (1) JAMSTEC ニュースリリース:「久米島沖および沖永良部島沖に新たな海底熱水鉱床の存在を確認」, http://www.japanmetaldaily.com/metal/2016/notsteel_news_20160527_2.html (2017)
- (2) L. Xin and T. Sawa: "Wavelength-adaptation technique for LED-based underwater data communications using visible light", JAMSTEC Report of Research and Development, Vol.19, pp.11-18 (2014) (in Japanese)
林 新・澤 隆雄:「波長適応技術を用いた海中 LED 無線データ通信」, JAMSTEC Report of Research and Development, Vol.19, pp.11-18 (2014)
- (3) 海洋音響学会:「海洋音響の基礎と応用」, 成山堂書店 (2014)
- (4) N. Farr, J. Ware, C. Pontbriand, T. Hammar, and M. Tivey: "Optical communication system expands CORK seafloor observatory's bandwidth", OCEANS 2010, MTS/IEEE SEATTLE, pp.1-6 (2010)
- (5) M. Saotome, Y. Kowaza, and Y. Umeda: "Bit Error Performance of Pulse Position Modulation Using Wavelength Estimation for Underwater Optical Communications", IEICE Student Activity Committee, Tokyo Section, No.5, p.5 (2013) (in Japanese)
早乙女充・小澤佑介・榎田洋太郎:「水中可視光通信における波長推定法を用いたパルス位置変調方式のビット誤り率性能」, 信学会東京支部学生会研究発表会, 講演番号.5, p.5 (2013)
- (6) 澤 隆雄・西村直喜・東條公資・伊藤 伸:「水槽および海域における水中光無線通信試験」, 信学会総合大会基礎・境界/NOLTA 講演論文集, 講演番号.AS-1-6 (2018)
- (7) H. Watanabe, T. Nishii, and S. Oshiba: "Expansion of Transmission Distance on Communication System between the Traffic Lights Using Visible Light Communication", IEICE Transaction, Vol.J98-B, No.2, pp.180-187 (2015) (in Japanese)
渡邊弘貴・西井達也・大柴小枝子:「可視光通信を用いた信号機間通信システムの雑音耐性向上による通信距離拡大に関する研究」, 信学誌, Vol.J98-B, No.2, pp.180-187 (2015)
- (8) S. Matsui: "Technology Trends and Applications of IoT System", IEICE Transaction, Vol.J100-C, No.4, pp.151-158 (2017) (in Japanese)
松井 進:「IoT システムの技術動向と実用化に向けた取り組み」, 信学論, Vol.J100-C, No.4, pp.151-158 (2017)
- (9) F. Dady: "Networking and Internetworking with Microcontrollers", Newnes (2004)
- (10) 山南圭吾・江川香奈・宮保憲治:「可視光照明を活用した音声通信システムの検討」, 情報処理学会第 76 回全国大会, 講演番号.2E-4, pp.73-74 (2014)
- (11) 可視光通信コンソーシアム:「可視光通信の紹介」, <http://www.vlcc.net>
- (12) H. Tanaka, M. Bandai, and T. Watanabe: "Fundamental Discussion and Experiments of Visible Light Communications using Two Dimensional code", WiNF2010, pp.165-170 (2010) (in Japanese)
田中 仁・萬代雅希・渡辺 尚:「二次元コードを用いた可視光通信の基礎考察と実験について」, WiNF2010, 第 8 回情報学ワークショップ, pp.165-170 (2010)
- (13) N. Sinzawa, M. Komozaki, and N. Miyaho: "Study on visible light communications by making use of FPGA", IEICE Student Activity Committee, Tokyo Section, No.20, p.20 (2009) (in Japanese)
新澤誠久・駒崎雅則・宮保憲治:「FPGA を用いた可視光通信に関する一検討」, 信学会東京支部学生会研究発表会, 講演番号.20, p.20 (2009)
- (14) 清水和徳・松原裕之・鶴岡 久:「可視光通信のソフトモデムの試作」, 電気関係学会九州支部連合大会, 講演番号.03-1A-02, p.30 (2010)
- (15) H. Ueno, Y. Sato, and A. Kataoka: "Visible Light System", TOSHIBA Review, Vol.62, No.5, pp.44-47 (2007)
上野秀樹・佐藤義之・片岡 淳:「可視光 ID システム」, 東芝レビュー, Vol.62, No.5, pp.44-47 (2007)
- (16) T. Hayama and W. Uemura: "About gain controll in in Visible Light Communication", JSAI Technical Report, pp.14-17 (2017) (in Japanese)
端山稜人・植村 渉:「可視光通信の利得制御方法に関する一考察」, 人工知能学会, JSAI Technical Report, pp.14-17 (2017)
- (17) M. Nakagawa, S. Haruyama, T. Arita, S. Matsuda, and A. Nanahara: "A Study on Ubiquitous Visible Light Communication Network", SCOPE (2006) (in Japanese)

中川正雄・春山真一郎・有田武美・松田真二・七原淳郎:「ユビキタス可視光ネットワークに関する研究」, 戦略的情報通信研究開発推進事業 (SCOPE) 研究成果報告書, 研究課題番号:954972 (2006)

- (18) Texas Instruments: “MAX3222E, 32E, 37E, 41E, 46E Datasheet”, <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX3222E-MAX3246E.pdf>

松田 祐希 (学生員) 2017年沖縄工業高等専門学校情報通信システム工学科卒業。現在, 同専攻科創造工学システム専攻電子通信システム工学コース在学中。



宮城 桂 (正員) 2008年高知工科大学情報システム工学科卒業。2010年同大学大学院修士課程修了。2014年同大学大学院博士課程修了。同年沖縄工業高等専門学校情報通信システム工学科助教。現在に至る。博士 (工学)。自己同期型回路を用いた超低消費電力 VLSI の研究に従事。電子情報通信学会会員。



山田 親稔 (正員) 2000年琉球大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。2004年同大学大学院博士後期課程単位取得満期修了。同年拓殖大学北海道短期大学専任講師。2007年沖縄工業高等専門学校情報通信システム工学科助教。2009年同高等専門学校情報通信システム工学科准教授。2014年ビクトリア大学 (カナダ) 客員研究員。2015年より, 沖縄工業高等専門学校情報通信システム工学科准教授。現在に至る。博士 (工学)。形式的設計検証, リコンフィギュラブルシステムの研究・教育に従事。IEEE, 電子情報通信学会, 各会員。



谷藤 正一 (非会員) 2010年3月東北大学大学院工学研究科博士後期課程 (電気・通信工学専攻) 修了。無線通信端末用の Si-CMOS を用いたミリ波帯 RF-IC および水中可視光通信装置の研究, 開発に従事。現在, 沖縄工業高等専門学校教授。IEEE, 電子情報通信学会, エレクトロニクス実装学会各会員。博士 (工学)。



市川 周一 (正員) 1985年東京大学理学部卒業。1987年同大学大学院理学系研究科修士課程修了。1987年新技術事業団 創造科学推進事業 (ERATO) 研究員。1991年三菱電機 (株) LSI 研究所, システム LSI 開発研究所勤務。1994年名古屋大学工学部助手。1997年豊橋技術科学大学工学部講師。同助教授, 准教授を経て, 2011年沼津工業高等専門学校制御情報工学科教授。2012年より, 豊橋技術科学大学大学院工学系研究科教授。現在に至る。理学博士。IEEE (senior member), 電子情報通信学会 (シニア会員), ACM, 情報処理学会, 各会員。

