

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04937

研究課題名（和文）指向性制御機能を有する可視光レーザーアレイを用いた長距離水中光無線通信システム

研究課題名（英文）Long Distance Underwater Wireless Optical Communication System using Visible Light Laser Array with Directivity Control Function

研究代表者

中村 一彦（NAKAMURA, Kazuhiko）

山梨大学・大学院総合研究部・准教授

研究者番号：40402086

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、ギガビット級水中光無線通信の伝送距離延伸を目的とし、可視光レーザーアレイの指向性制御による送信機の実現を目指した。低出力ながら高速変調可能な複数レーザーダイオードをアレイ化し出射方向を受光面に集中させて送信光パワーを向上させる手法により、2つのレーザーダイオードで受信光パワーが2倍近く向上しビット誤り率特性が改善された。またLD・PDの狭いダイナミックレンジの有効活用のため、Tomlinson-Harashimaプリコーディング（THP）を送信側に適用する手法を検討した。THPを用いることで、従来のFIR型前置等化器に比べビット誤り率特性が改善し、所要受信光電力が約2dB低減された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題で検討している水中光無線通信システムは、既存の入手性の高い広帯域・低パワーLDを複数用いることで、可視光デバイスの性能に頼らずに伝送距離の延伸化を図るものである。将来提供されるであろう高速変調が可能なハイパワーLDや広帯域・高感度PDと置き換えることが容易であることから、キロメートルオーダーの伝送距離の実現も見えてくる。今後の高速光無線通信システムの発展に大きく寄与するものと考えている。本システムにより、広大な海洋の資源探査だけでなく、地震関連や港湾・橋脚等の水中構物の調査に大きく寄与する高精細動画の水中長距離無線伝送システムの実現が期待できる。

研究成果の概要（英文）：This research project aimed to extend the transmission distance of gigabit-class underwater wireless optical communications by realizing a transmitter employing directional control of a visible light laser array. The proposed technique involved arraying low-power laser diodes with high-speed modulation bandwidth and concentrating their emission directions onto the receiving surface to enhance the transmitted optical power. Experiments demonstrated that using two laser diodes nearly doubled the received optical power and improved the bit error rate performance. Furthermore, to effectively utilize the narrow dynamic range of laser diodes and photodiodes, we investigated applying Tomlinson-Harashima precoding (THP) at the transmitter side. Employing THP improved the bit error rate characteristics and reduced the required received optical power by approximately 2 dB compared to conventional FIR pre-equalization.

研究分野：水中光無線通信，通信方式，信号処理

キーワード：水中光無線 可視光レーザー レーザアレイ 水中通信 可視光LD

1. 研究開始当初の背景

近年、資源問題への関心が高まり海底に埋蔵された資源が大いに注目されており、地震や環境調査のため積極的に海中探査が行われている。海中探査には母船とケーブルで繋がっている有線の遠隔操作無人探査機(ROV)や予めプログラムされた航路や動作ルールに従い自立航行する自律型無人潜水機(AUV)など様々な無人探査機が用いられる。水中探査機の移動自由度の確保、ケーブル設置コスト削減、ケーブル切断による探査機の消失を防ぐためには、取得した動画像やセンシング情報などを無線で通信することが望まれる。しかし、現在主として水中無線通信に用いられている音響波は数百 kbit/s 程度の低速伝送であり、高精細動画像等の大量のデータをリアルタイムで無線伝送することは困難である。無線 LAN など地上で利用されている既存の無線通信システムの場合、水中では電磁波の減衰が非常に大きく(例えば、2.4GHz 帯だと 30cm で約 1/10)、事実上利用できない。そこで最近注目されているのは、水中において最も吸収減衰の小さい可視光を利用した水中光無線システムである。特に、可視光レーザダイオード(LD)による平行光のビームを用いて、送受信機を対向させ、1Gbit/s を超える伝送速度の高速な水中光無線通信システムがいくつか提案されている。

これまでの国内外の研究により、水中無線通信の伝送速度はフル HD、4K、8K 動画が十分に伝送可能な速度(例えば、フル HD では無圧縮で約 1.2Gbit/s)を達成しているといえる。しかしながら、伝送距離については光源と受光器を対向させた理想的な送受位置かつ清水中であっても現状では数十メートル程度と十分に長いとは言えない。主な原因は、伝搬光が海中での散乱により拡散してしまい受光パワーが減衰することで、十分な光が受信機に届かないことである。これにより、受信 SN 比が劣化してしまい伝送距離が短くなってしまっている。

2. 研究の目的

水中光無線通信システムの伝送距離の延伸化を目的として、本研究課題では、A) 送信光電力の向上、B) 拡散光の送信側での制御による受信 SN 比改善を試みる。

青色・緑色レーザの場合、連続光や短パルス光であれば高強度の光源が入手可能である。しかしながら、通信利用のために駆動電流を変調させる場合(直接変調)、ワット級のハイパワー LD は変調帯域が狭いうえに大電流の信号を高速に変調させねばならず高速通信には向かない。光ファイバ通信のように光増幅器の利用も考えられるが、可視光帯のものはまだ研究段階であり現実的にはまだ利用できない状況である。そこで本研究課題では、入手性の高いミリワット級の低出力ではあるが高速変調が可能な LD を 1 次元または 2 次元配置したレーザアレイの利用を検討する(図 1 参照)。なお、可視光レーザアレイの市販品は主に工業用、加工用であり、高速変調には向いていないため、これまで高速水中光無線通信システムへの使用実績のある 405 ~ 532 nm の青または緑色 LD を用いアレイ化する。また、高速変調が可能な可視光 LD をアレイ化することで、送信光パワーの向上は見込めるが、一般的なレーザアレイのようにビーム出射角を平行にしてしまうと、水中散乱によるビーム拡散だけでなく、LD の配置間隔だけ集光位置がずれ、一部の LD に対しては低強度のビーム周辺部を受光することになり、それは受信 SN 比の劣化要因となってしまう。そこで本研究課題では、レーザアレイ内の各 LD の出射方向を制御することで、すべての LD が受光面に指向するよう焦点位置を制御することで、さらなる受信 SN 比の改善を試みる。さらに、一般的に LD,PD のダイナミックレンジは狭いので、せっかく送信

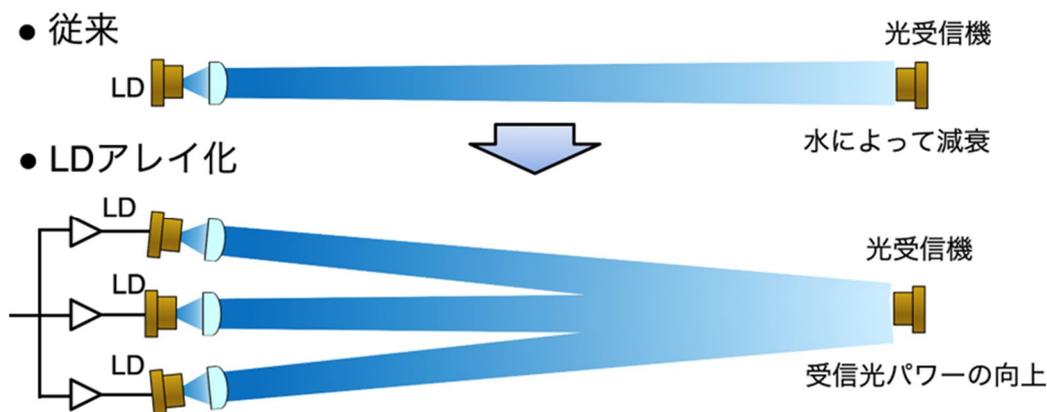


図 1 送信 LD のアレイ化のイメージ図

信号出力が大きくなってきたとしても、信号振幅がそのダイナミックレンジに収まるよう振幅調整が必要となってしまうが、その対策として、非線形関数を用いる Tomlinson-Harashima プリコーディング(THP)の適用効果についても検証する。

3. 研究の方法

本研究課題では、主に以下の点について検証を行った。

- (1) 複数 LD を用いた高速水中光無線通信の有効性の検証と原理確認実験
本研究課題を検証するために、まずは 2 光源の水中光無線通信システムを構築して、その有効性を数値計算および原理確認実験により検証した。
また、一つの受信機に別の角度から入射した光信号を利用した場合についてビット誤り率特性による評価を行った。
- (2) さらなる送信光出力向上のための前置等化器の有効性の実験的検証
複数 LD を用いた場合でも LD, PD の狭いダイナミックレンジを効率的に利用するために、THP 適用の効果について実験的に検証した。

4. 研究成果

- (1) 複数 LD を用いた高速水中光無線通信の有効性の検証と原理確認実験

本研究課題で用いるアレイ化の手法は、省電力であるが高変調帯域を持つ LD を複数用いて受信機の PD の受信面における受信光パワーを向上させ、伝送距離延伸を目指す手法である。図 2 に実験系のブロック図を示す。実験系では、FPGA と DAC により構成された OFDM 送信機から信号を出力し、電気アンプで増幅される。その後 SP (Splitter) で分岐され、一方は OS (Oscilloscope) で波形を確認し、もう一方は LD 動作点制御のための Bias-T を介し緑色 LD を強度変調され LD に入力。レーザを出力する。出力されたレーザはレンズにより 2 mm の並行光に変換され、1.3 m の伝送路を伝搬し焦点距離約 10 cm のレンズにより集光された後 PD で光/電気変換され、PC 上でオフライン復調が行われる。ハーフミラー (BS: Beam Splitter) と光パワーメーター (OPM: Optical Power Meter)、水中での伝送距離による減衰を模擬するための光の減衰器として偏光板を設置し、得られた受信光電力に対する EVM をもとに BER を算出する。また同じ送信 LD を一つ追加しそれぞれ LD、LD とした。この二つの LD の距離は 5.5 cm である (図 3 参照)。なお使用した OFDM 信号は、強度変調/直接検出 (IM/DD) 方式で生成され、サブキャリア数 64 (有効サブキャリア数 31)、サブキャリア変調方式は 16QAM、サイクリックプレフィックスは 4 であり、伝送速度は約 1 Gbit/s である。本実験では LD もしくは LD のレーザ光を遮断しそれぞれの単一の LD のみの場合、および二つのレーザを用いた場合における受信光パワーに対する BER の特性を図 4 に示す。図を見ると、単一の LD では最大受信光パワーが 1.5 mW 程度であるが二つの LD を用いることで受信光パワーが 3.5 mW まで向上していることがわかる。またそれに伴って BER が 10^{-3} 以下となる通信可能範囲が広がっていることがわかる。BER も最高で 10^{-6} 近くまで改善していることもわかる。このことから送信 LD のアレイ化の有効性を確認できたといえる。

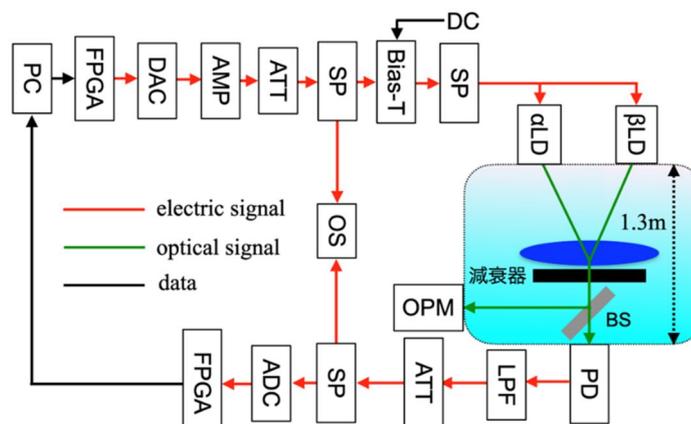


図 2 二個の送信 LD を用いた光無線通信実験の実験系

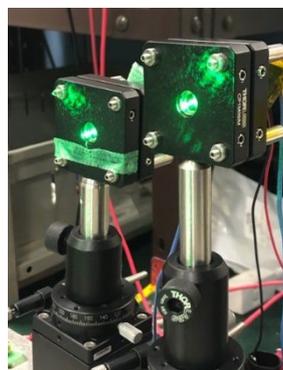


図 3 二個の送信 LD

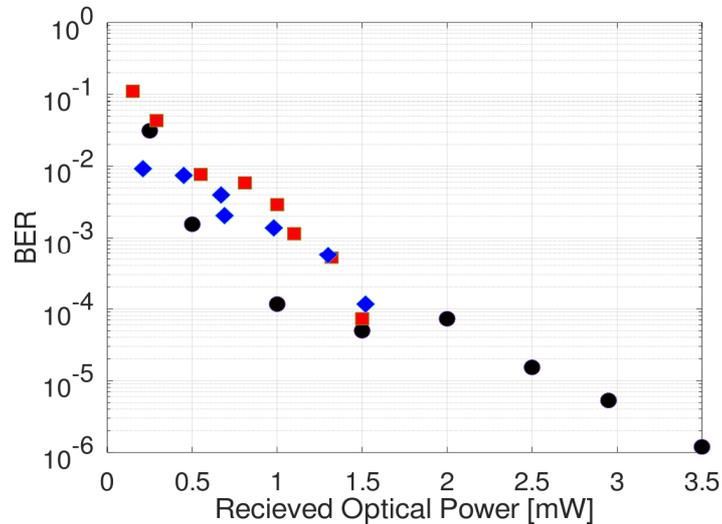


図4 複数の送信 LD を用いた場合の BER 特性

□ : LD のみ, ◇ : LD のみ, ● : 同時使用

(2) さらに送信光出力向上のための前置等化器の有効性の実験的検証

等化器は一般的に受信側に実装(後置等化)されることが多いが雑音強調により受信 SNR が劣化する場合がある。それに対し等化器を送信側に実装する前置等化が有効であるが本稿では送信信号のダイナミックレンジを小さくすることができる THP の適用を考える。図 5 に THP のブロック図を示す。本研究では、送信信号を生成する DAC の手前に THP を挿入した。図 6 に水中光無線伝送実験系を示す。本実験では光 PAM4 信号生成にシステム構成が簡易な LD 直接変調を用いる。PC 上で生成した PAM4 信号は、THP 処理がなされたのち送信側 FPGA ボードにアップロードされ、2.5GSa/s DA コンバータによりアナログ電気信号へと変換される。RF アンプとアッテネータによりレベル調整後、波長 520nm の LD を直接変調させることで光 PAM4 信号へと変換される。光 PAM4 信号は、コリメートレンズによりビーム整形し直径 5mm の平行光へと変換した後に、水中伝送路として用意した、水道水で満たされた長さ 1m のアクリルパイプ中に入射される。水中を伝搬した光は、偏光板によりビーム強度が調整される。受信機側レンズ系に入射された光は集光され、TIA が内蔵された APD(Avalanche PD) モジュールにより電気信号に変換される。電気アナログ PAM4 信号は AD コンバータにより 2.5 GSa/s でサンプリングされ、受信側 FPGA に保存される。取得した受信 PAM4 信号は、PC 上のオフライン処理により復調を行った。本システムでは、送信側において 4 倍のオーバーサンプリングで PAM4 信号を出力しているので、伝送速度は 1.25Gbit/s となる。なおシステム応答 $H(D)$ はタップ長を 256 とし、予備実験として白色信号伝送をおこない、その送受信信号を用いて最小二乗法に基づく Wiener 解により求めた。

図 7 に受信光電力を約 0.1 mW に調整した場合の水中光無線伝送実験での受信信号のアイパターンを示す。なお、今回は水中での大きな減衰を模擬するために水中伝送路の出口に可変光減衰器として角度調整が可能な偏光板を設置した。図を見ると THP 適用時のほうがアイ開口部が広がっている。これは、THP のほうが送信振幅を大きくできたことと、DC バランスの揺らぎを抑えられたことによると考えられる。

図 8 に PAM4 信号を水中伝送させたときの、受信光電力に対するビット誤り率特性を示す。受信光電力は、水中伝送路の出力端にある偏光板による可変光減衰器により調整した。図を見ると、FIR 型前置等化器に比べて THP 適用時のビット誤り率特性が改善していることがわかる。ビット誤り率 10^{-3} を達成するための所要受信光電力が約 2dB 改善しており、このことから、THP を適用することで、FIR 型前置等化器よりも雑音耐性を向上させることが期待できる。

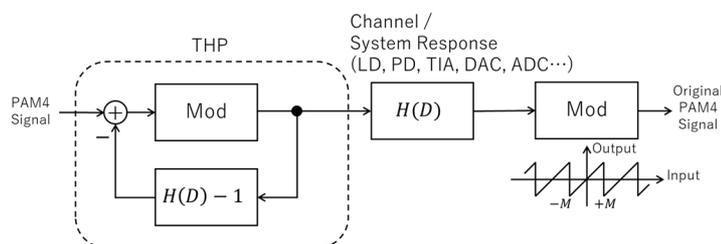


図5 THP のブロック図

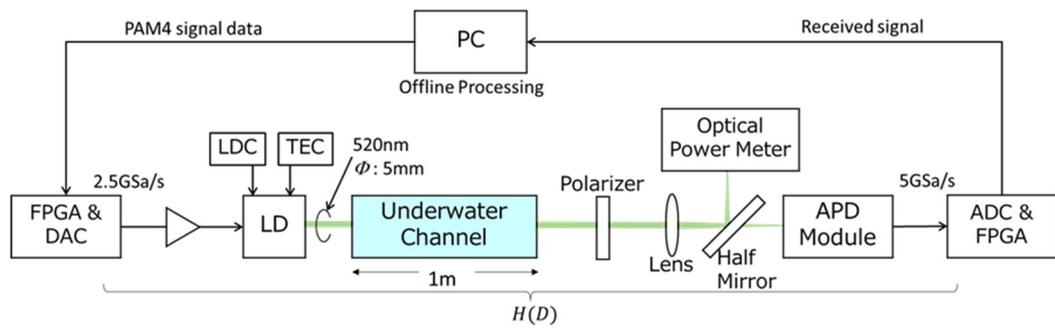


図 6 THP 有効性確認のための水中光無線伝送実験系

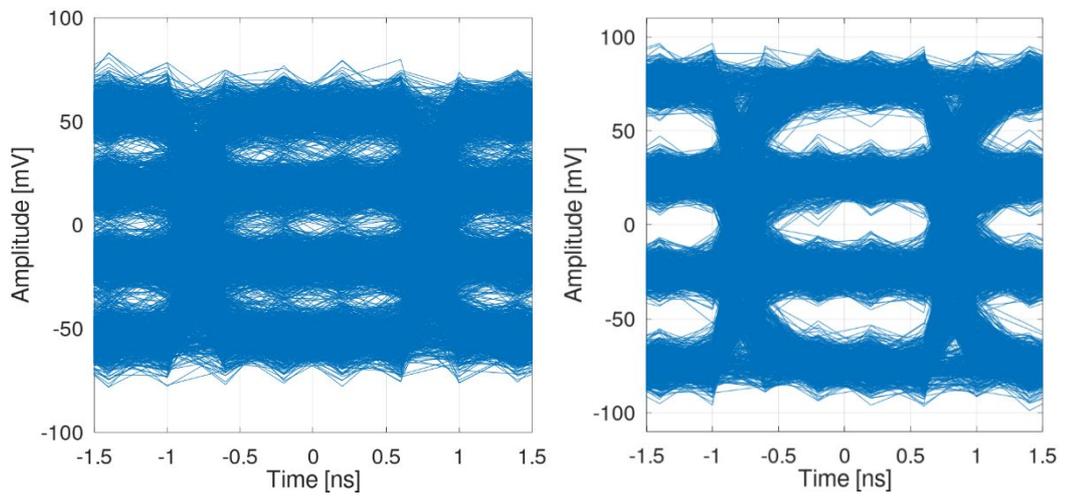


図 7 受信アイダイヤグラム
左 : FIR , 右 : THP

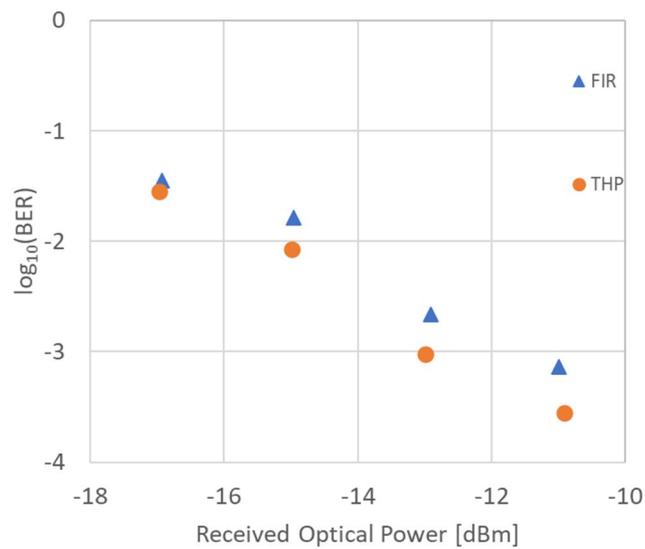


図 8 PAM4 信号の水中伝送時のビット誤り率特性
: FIR 型前置等化器 , : THP

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nakamura Kazuhiko, Hanawa Masanori	4. 巻 -
2. 論文標題 Research and Development Trends of Underwater Optical Wireless Communication Technologies	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 URSI GASS 2023	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.23919/URSI GASS57860.2023.10265465	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hanawa Masanori, Nakamura Kazuhiko	4. 巻 15
2. 論文標題 Research and Development Trends of Underwater Optical Wireless Communication Technologies	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Communications Society Magazine	6. 最初と最後の頁 298 ~ 306
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/bplus.15.298	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中村一彦
2. 発表標題 ギガビット級 水中光無線通信
3. 学会等名 CEATEC JAPAN 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村一彦, 埜 雅典
2. 発表標題 THPを適用した水中光無線通信の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 水中無線技術研究会
4. 発表年 2021年 ~ 2022年

1. 発表者名 中村 一彦, 埴 雅典
2. 発表標題 THPを適用したPAM4信号の水中光無線伝送
3. 学会等名 2021年 電子情報通信学会 ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 中村 一彦, 埴 雅典
2. 発表標題 可視光を用いたギガビット級高速水中光無線通信
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第41回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2020年～2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究者総覧 https://eradb-ref.yamanashi.ac.jp/html/100007750_ja.html</p>

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------