

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06962

研究課題名(和文)水中探査のための高速・長距離光無線通信システムの研究・開発

研究課題名(英文) Research & Development of High-Speed and Long-Range Optical Wireless Communication System for Underwater Exploration

研究代表者

中村 一彦 (NAKAMURA, Kazuhiko)

山梨大学・大学院総合研究部・助教

研究者番号：40402086

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、伝送速度のさらなる高速化と数十～数キロメートルでの長距離伝送が可能な水中光無線通信システムの構築を目指す。本研究では、(1)複数LD光源を有する水中光無線システム検証用通信システムとして、水中での減衰が比較的小さい青(405 nm)・緑色(532 nm)レーザーを用いたWDM伝送システム構築、(2)長距離伝送時における浮遊物質の影響、(3)距離延伸のための広帯域光電子増倍管(PMT)の適用効果、(4)複数LDを用いたOFDM/SBMA方式による大容量化について検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海中探査では水中探査機による調査が積極的に行われている。しかしながら、水中探査機の移動自由度を確保する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ているが、従来の音響波通信ではフルHDや4K等の高精細動画を送ることは困難である。可視光を利用した光無線通信システムであれば、今後の高速水中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、地震関連の調査に大きく寄与する高精細動画の水中伝送システムの実現が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this research project, novel underwater wireless optical communication (UWOC) systems that can achieve higher speed and extension distance have been considered. In this study, (1) an UWOC system with multiple LDs, Blue (405 nm) and green (532 nm) lasers for robust long distance transmission in underwater, (2) Effects of suspended solids on long-distance transmission, (3) Performance evaluation of the application of Wideband PMT for distance extension, (4) OFDM/SBMA method with multiple LDs for large capacity transmission were discussed.

研究分野：無線通信，光無線，信号処理

キーワード：水中光無線 可視光レーザー 多元接続 水中通信 可視光LD

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

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、また、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を確保する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。高速化については非常に多くの検討がなされているが、一方、通信距離の延伸化については現状あまり検討されていない。

2. 研究の目的

本研究課題では、伝送速度のさらなる高速化と数十～数キロメートルでの長距離伝送が可能な水中光無線通信システムの構築を目指す。伝送速度の高速化のために、複数の可視光レーザと複数の受信機を利用したマルチチャネル伝送を基に、水の吸収減衰・散乱係数の波長依存性を考慮した最適設計を行う。具体的には、散乱により受信光信号が時間方向および空間方向に広がり信号歪みが生じることが考えられるため、等化器、複数の受光デバイス配置間隔などの最適化が重要である。複数の送信信号が必要となるため、そのままでは水中探査機には複数あるいは口径の大きい耐水圧窓が必要となる。しかし水の吸収・散乱係数には波長依存性があるため波長ごとに水中伝搬特性が異なりチャネル分離が可能であることから、複数の波長の光信号を合波して1本のビームとして送信することが可能である。これにより窓数や口径の削減が可能となり水中探査機の省スペース化に寄与できる。

3. 研究の方法

本研究課題では、主に次の点について検証を行った。

(1) 複数 LD 光源を有する水中光無線システム

検証用通信システムとして、水中での減衰が比較的小さい青(405 nm)・緑色(532 nm)レーザを用いた WDM 伝送システム構築を主として検討した。

(2) 長距離伝送時の浮遊物質の影響

長距離伝送を実現するには実際の水中環境での伝送を考慮する必要があるため、プランクトンなどレーザビーム径とほぼ同スケールの浮遊物質がある状況についても検討した。

(3) 距離延伸のための広帯域光電子増倍管(PMT)の適用効果

高速水中光無線通信では従来アバランシェ PD が良く用いられているが、より高感度な光電子増倍管(PMT)により伝送距離の延伸が期待できる。また、さらなる延伸化のために、周波数利用効率は劣るが低い受信 SNR でも復調可能なオンオフキーイング(OOK)変調方式のギガビット伝送と伝送距離延伸について実験的に検討した。

(4) 複数 LD を用いた OFDM/SBMA 方式

送信側の端末数を増加させることで伝送チャネル容量を増やすことを目指した。各端末が非同期に通信できるように、本検討では直交周波数分割多重(OFDM)方式とサブバンド多元接続(SBMA)方式を組み合わせた新しい方式を提案し、その水中伝送実験により有効性を検証した。

4. 研究成果

(1) 複数 LD 光源を有する水中光無線システム

信号生成には小型化に寄与できる FPGA+高速 DAC、波長合分波にはダイクロイックミラーを利用して、青色光信号、緑色光信号をシングルビームでの WDM 伝送できる実験系を構築した。強度変調/直接検出方式による四位相偏移変調-直交周波数分割多重(QPSK-OFDM)伝送を行った結果、 10^{-3} 以下のビット誤り率(BER)で2チャネルの同時伝送が可能であることを確認した。

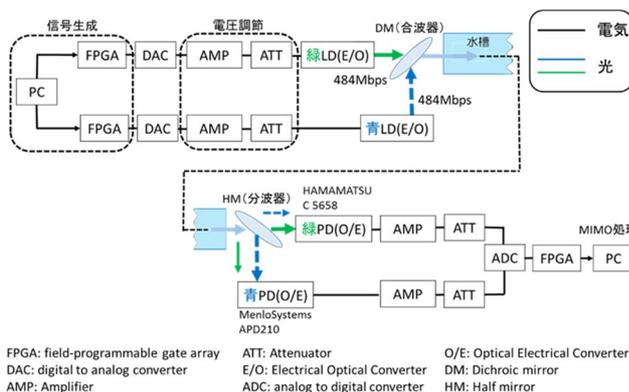


図1 複数 LD 光源を用いたマルチチャネル伝送実験系

(2) 長距離伝送時の浮遊物質の影響

プランクトンには、育成と体長の調整が容易なアルテミアを用いて伝送実験を行った結果、プランクトンの体長と同程度以上のビーム径であれば、瞬時的には誤差ベクトル振幅 (EVM), BER が劣化してしまいが、平均 EVM, BER は大きく劣化しないことが示された。

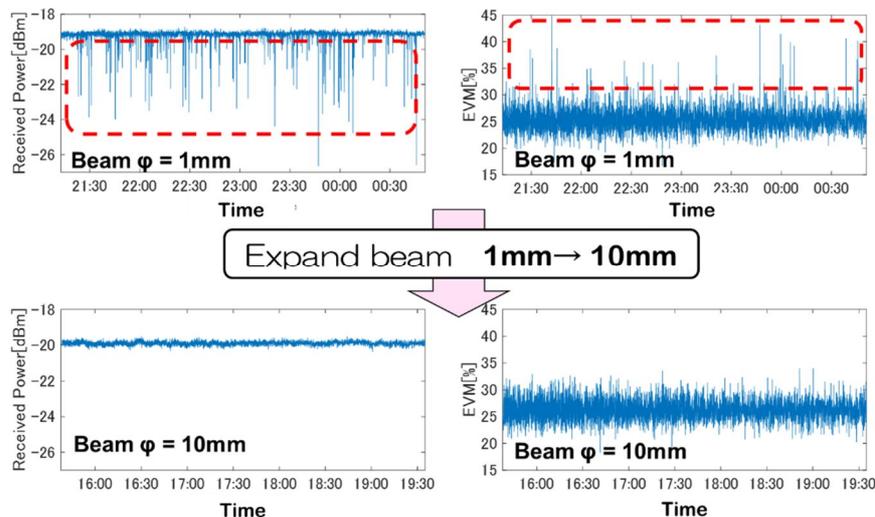


図2 浮遊物質の存在する水中通信路におけるビーム径拡大の効果

(3) 距離延伸のための広帯域光電子増倍管 (PMT) の適用効果

送信側では、パルスパターン発生器により生成した 500 M~2 Gbit/s のOOK 信号を波長 405 nm の青色 LD により電気・光変換を行い、直径 2 mm の平行光にして水中に射出した。射出光は水中通信路として設置した水道水で満たされたアクリルパイプ中を伝搬し受信側の光検知器にて受光される。今回の検討では、光検知器として、帯域 1GHz を有する広帯域 PMT を利用した。実験結果から、伝送速度 1.5 Gbit/s 以下であれば誤り訂正符号適用時エラーフリー伝送が可能となるしきい値ビット誤り率 10^{-3} 以下を満たす高速伝送が可能であることを確認した。1 Gbit/s 伝送時では、APD と比べて受信感度が約 17dB 改善した。伝送距離に換算すると約 3 倍の延伸化が可能となる。遠視距離としては、1Gbit/s 伝送時では、純水中では約 631 m, 飲料可能な自然水中では約 164 m もの長距離化が可能であることが明らかとなった。

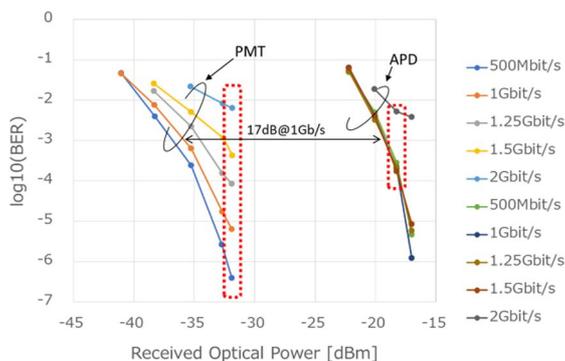


図3 ビット誤り率特性

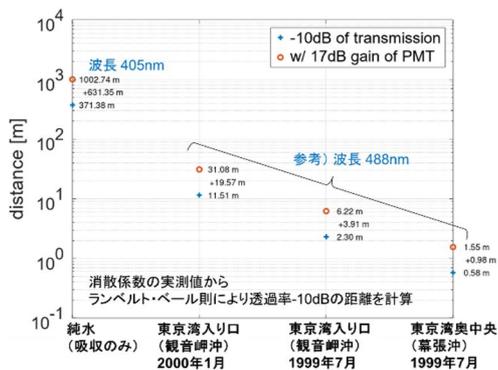


図4 水中伝送距離

(4) 複数 LD を用いた OFDM/SBMA 方式

水中通信路として長さ 1m, 内径 3cm の透明なアクリルパイプ内に満たした水道水中のその両端に送受信機を設置して伝送実験を行った。複数の送信端末からのレーザー光は、水中通信路に入射する前に結合した。2 送信端末での水中伝送実験結果から、エラーフリーを達成するための誤り訂正符号適用条件 (QPSK-OFDM 信号で EVM 約 32% 以下) を満たす OFDM/SBMA 方式による水中光無線伝送が可能であることを明らかにした。

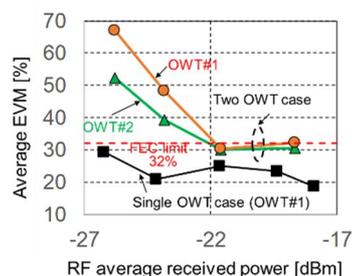


図5 伝送後の EVM

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 0件）

1. 著者名 Kazuhiko Nakamura, Kenichi Nagaoka, Daisuke Matsuo, Takahiro Kodama, and Masanori Hanawa	4. 巻 1
2. 論文標題 Over 1 Gbit/s NRZ-OOK Underwater Wireless Optical Transmission Experiment Using Wideband PMT	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Technical digest of OECC/PSC2019	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/PS.2019.8817830	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 Takahiro Kodama, Koki Arai, Kota Nagata, Kazuhiko Nakamura, and Masanori Hanawa	4. 巻 1
2. 論文標題 Underwater Wireless Optical Access Network with OFDM/SBMA System: Concept and Demonstration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Technical digest of OECC/PSC2019	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/PS.2019.8817754	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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 埴雅典, 中村一彦, 小玉崇宏
2. 発表標題 微小生物が浮遊する水中伝送路における高速光無線通信の実験的検討
3. 学会等名 OPIE ' 18 (OPTICS & PHOTONICS International Exhibition) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村一彦, 小玉崇宏, 埴雅典
2. 発表標題 微小生物が浮遊する水中通信路における光無線伝送でのビーム径拡大の効果
3. 学会等名 2018年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村一彦
2. 発表標題 高精細リアルタイム動画転送に向けた高速水中光無線通信
3. 学会等名 CEATEC JAPAN 2018 特別シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村一彦（山梨大）・長岡賢一・松尾大輔（浜松ホトニクス）・小玉崇宏・埴 雅典（山梨大）
2. 発表標題 広帯域PMTを用いた1Gbit/s超NRZ-OOK水中光無線伝送実験
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会総合大会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村 一彦
2. 発表標題 高精細リアルタイム動画転送に向けたギガビット級水中光無線通信
3. 学会等名 アックアフォーラム～次世代水中ネットワーク～（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中村一彦，埴 雅典
2. 発表標題 デジタルマッチトフィルタを適用したIM/DD-OFDM水中光無線伝送実験
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究者総覧(山梨大学 大学院総合研究部 工学域 電気電子情報工学系(電気電子工学)中村 一彦)
<http://nerdb-re.yamanashi.ac.jp/Profiles/337/0033631/profile.html>

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
--	---------------------------	-----------------------	----