

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02148

研究課題名（和文）可視光高速水中無線光通信のための基盤技術の開発

研究課題名（英文）Development of fundamental technologies for high-speed underwater wireless optical communications

研究代表者

埴 雅典（Hanawa, Masanori）

山梨大学・大学院総合研究部・教授

研究者番号：90273036

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：PAM信号を元にしたPRSに対し、ビタビ復号を用いたPRML信号のAWGN環境下における誤り率特性を数値解析した。PRMLとPAM信号の理論BERを比較すると、PAM4-PRMLは2.5 dB大きな送信電力を必要とするが、帯域幅は半分であるため、シンボルレートを2倍にして伝送速度を2倍にできるため、高速化実現に有効であることを確認した。

青色LDを光源とするUWOC実験系で原理確認実験を行った。送信機に1Wの青色LDを用い、500MHzの帯域幅を実現。送信前非線形等化を導入し、1G bit/sのPAM4信号伝送を可能とし、受信電力が-15dBmから+2dBmでエラーフリーのBERを達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、「水中可視光無線通信の飛躍的長距離化をもたらす変調方式は何か？」を問として様々な検討を行った。長距離化には大出力送受信機が必要だが、OFDMは強い線形性を必要とするため全く適さない、と考えられる。一方、PAM4は適切な非線形等化を導入することで、高速大出力伝送に利用可能であることを実験的に示した。この発展形といえるPAM4-PRS/PRMLは帯域制限の厳しい可視光無線伝送系で有効と考えられるが、実験上では送信機で重畳する雑音レベルを低減する必要がある。これらは今後の水中光無線通信技術の発展の方向性を示す成果と考えている。

研究成果の概要（英文）：The error rate characteristics of PRML signals using Viterbi decoding in an AWGN environment were numerically analyzed for PRS based on PAM signals. When comparing the theoretical BER of PRML and PAM signals, it was confirmed that PAM4-PRML requires 2.5 dB more transmission power, but since the bandwidth is halved, the symbol rate can be doubled, making it effective for achieving higher speeds.

A proof-of-concept experiment was conducted using a UWOC experimental system with a blue LD as the light source. A 1W blue LD was used in the transmitter, achieving a bandwidth of 500MHz. Pre-transmission nonlinear equalization was introduced, enabling the transmission of 1G bit/s PAM4 signals, and achieving error-free BER with received power ranging from -15dBm to +2dBm.

研究分野：光通信、光信号処理、光センシング

キーワード：水中 光無線通信 PAM4 PRS PRML 非線形等化

1. 研究開始当初の背景

地球表面上の 70%以上が海に覆われており、陸上地下資源の枯渇が懸念される中、海中資源の開発は持続可能な社会体制作りのためにも、喫緊の課題となっている。海中資源探査を目的として、高精細映像のリアルタイム伝送が可能な遠隔操作型探査機(ROV)や無人自動探査機(UAV)の開発が進められているが、水による電磁波の大きな吸収減衰により、陸上で用いられている高速無線通信技術は海中では一切利用できず、現状では、海上にある探査母船などから光ファイバを曳航して通信を行っている。しかしながら、光ファイバの曳航は ROV や UAV の自由な移動を制約する上、時に海底岩礁などに引っ掛かり切断され、ROV や UAV を遺失する事故が発生していることから、図 1 のように ROV 等の自由な移動を可能にする水中高速可視光無線通信技術の確立が求められる。

綺麗に澄んだ海が青く見えることから明らかなように、波長 400nm 近傍の青色光は水中での吸収減衰が他の波長帯に比べて著しく小さく ($5.8 \times 10^{-3} \text{m}^{-1}$ @400nm)、青色～青緑色の可視光のみが、水中における通信資源として利用可能である。

申請者らは 2014 年の OptoElectronics & Communications Conference において、405nm の青色レーザー光を用いて約 1Gbit/s の水中光無線伝送が可能であることを世界で初めて報告し、翌 2015 年 1 月には 1.45Gbit/s、4.8m の実証実験結果を Optics Express 誌に発表した。これを受けて、この波長帯の光を用いた水中高速可視光無線伝送技術の開発が近年盛んに行われるようになってきている。例えば 2015 年 9 月には波長 450nm、伝送速度 4.8Gbit/s、伝送距離 5.4m の 16QAM-OFDM (強度変調) が報告され、2018 年には複数段の注入同期を用いた波長 680nm、伝送速度 25Gbit/s、伝送距離 5m の実証実験結果が報告されている。しかし、これらはいずれも **伝送距離が数メートル止まりの極短距離伝送の実証報告**であり、**実用化には程遠い**。これは、現存する多くの可視光帯レーザーダイオード(LD)や光検出器(PD)が高速通信を目的として開発されたものではないため、出力光強度、線形性、電氣的帯域幅、感度、線幅などが不足している上に、なにより水中可視光無線通信技術の研究自体が新しい分野であることが原因である。これらの状況を踏まえ本研究では、

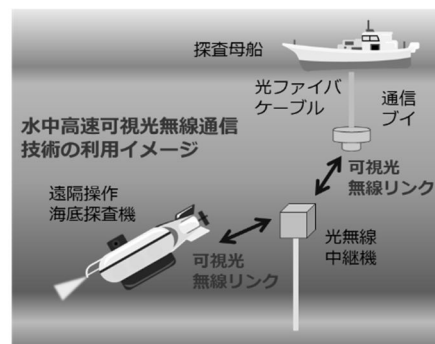


図 1 水中高速可視光無線通信技術

「水中可視光無線通信の飛躍的長距離化をもたらす変調方式は何か？」

という素朴な「問い」を核として、変復調技術を中心に、概要で述べた 3 点について水中光無線通信技術の研究を実施した。

2. 研究の目的

本課題は、以下の 3 つを目的としたが、本報告書では紙面の都合で と は割愛する。

- 可視光 LED-OFDM-UWOC 伝送装置へのビットローディングの導入と評価
- 可視光水中無線光通信向けの新しい狭帯域多値変復調方式の検討
- 海水中の可視光伝搬特性評価技術の検討

小課題「可視光水中無線光通信向けの新しい狭帯域多値変復調方式の検討」では、PAPRが（OFDMに比べて）低く、直線変調の直線性を必ずしも必要としない狭帯域変調方式(具体的にはDuo/Trio/Quad PAM-4/8/16変調方式)と、その雑音耐性を改善可能な新しい復調方式の検討を行う。連続する送信シンボル間に相関がある信号に対しては遷移を制約したトレリスが定義でき、そのトレリス上で最尤推定を行うことで受信系列の誤りを補償できることが知られている。このアイデアは、隣接シンボル間に相関がある（トレリス上の遷移に制約がある）場合には、アプリケーションによらず適用可能である。そこで本小課題では、 m 値パルス振幅変調（PAM- m ）信号に対してパーシャルレスポンスシグナリング（PRS）を導入することで隣接シンボル間に相関を持たせて狭帯域化するとともに、連続するシンボル系列を遷移が制約されたトレリス上にマッピングして最尤復号する方式の雑音耐性向上効果を検証する。

3. 研究の方法

雑音が重畳された受信シンボル系列に対して、上記状態遷移が制約されたトレリス上で最尤推定を行うことで、PRS導入（すなわち隣接シンボル間に相関を与えることによる狭帯域化）に起因する雑音耐性低下を補償する方式（図3参照）について、まずは詳細な数値シミュレーションを行ったうえで、既存の青色LDを光源とする UWOC実験系において原理確認実験を行った。

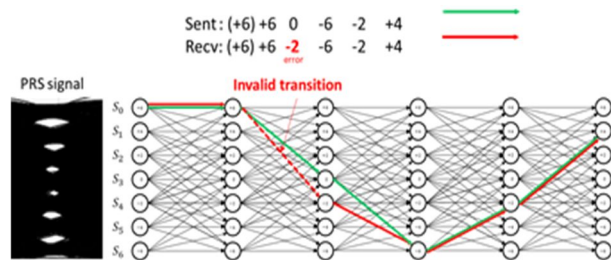


図 3 遷移が制約されたトレリスにおける最尤復号
（左はPAM4-PRS信号のアイダイアグラムの例）

4. 研究成果

PAM 信号を原信号とした 1 次遅れ PRS に対し、ビタビ復号を用いて最尤推定を行った PRML信号のAWGN環境下における誤り率特性を図6左に示す。終端までのデータ長 $L=10$ として、PAM 信号の信号レベル数 M を変化させたときの誤り率特性を比較した。PRSに対するPRMLの利得（BER=10⁻³で比較）は、2値（OOK）に対しては約3.0 dB、4値（PAM4）では約2.4 dB、8値（PAM8）では1.6 dBと、多値数が増えるに従って低下した。

次に、PRML と原信号である PAM 信号の理論BER曲線と比較した結果を図6右に示す。い

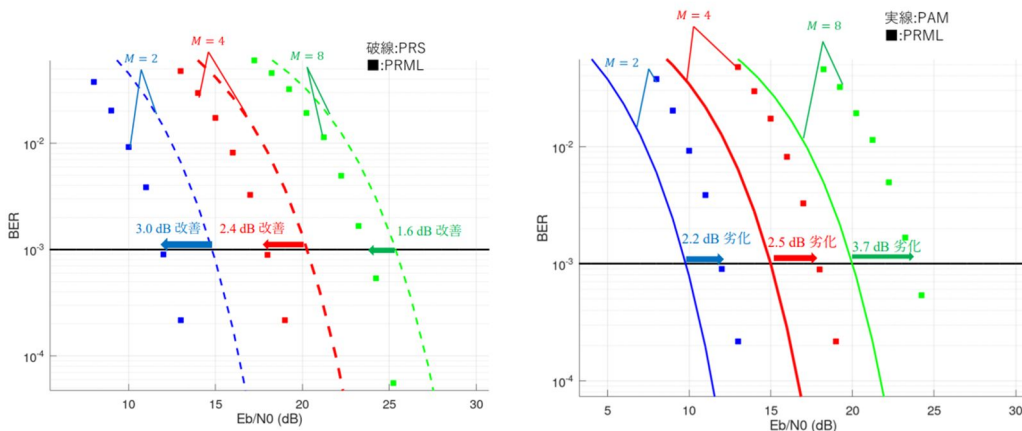


図 6 : PRS 及び最尤推定を導入した PRML の BER 特性

ずれの多値数においても現信号のPAM信号に比べるとPRMLであっても特性劣化があるようにも見えるが、実際にはPAM信号に比べてPRML信号の伝送帯域幅は半分であること、帯域に厳しい制限のある可視光デバイスを使った高速通信の可能性を探ることが本研究の目的であることから、単純な比較はできない。すなわち、例えばPAM4-PRMLの場合にはPAM4に比して2.5 dB大きな送信電力を供給する必要があるが、帯域幅は半分であることから、シンボルレートを2倍して伝送速度を2倍にできる、ことを意味しており、現状の水中可視光通信においては、PRMLの活用は高速化実現に向けた有効な手段であることが確認できた。これ以外にも様々な条件(例えば1次遅れだけでなく2次遅れの導入や終端長の変更など)でシミュレーションを行った。2次遅れPAM-4 PRMLでは同じ2次遅れPAM4-PRSに対して2.8dB Eb/N0が改善、通常のPAM4に対しては6dB弱の劣化であった。2次遅れPAM-4 PRS/PRMLはPAM4に対して1/3の帯域幅となるため、6 dB程度の送信電力増大によって伝送速度を3倍に向上できることがわかった。

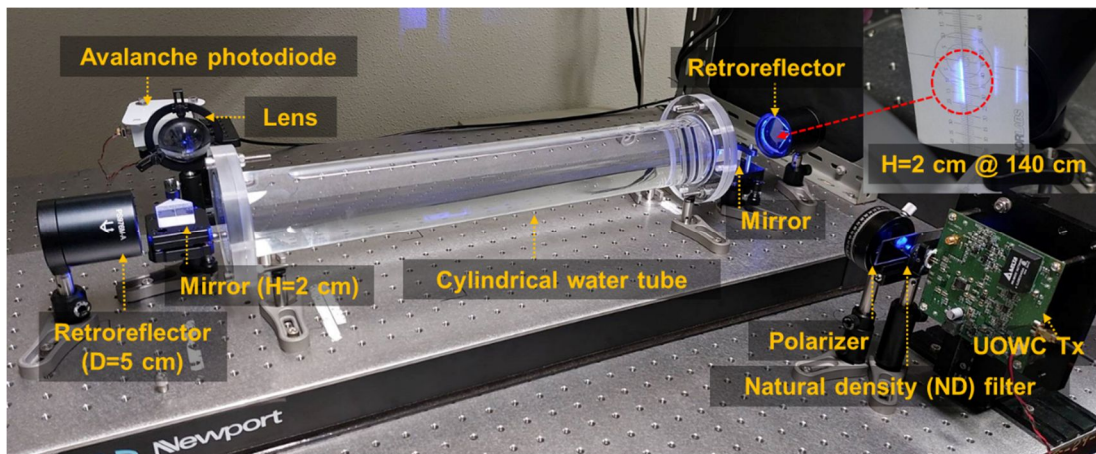


図7 光無線水中通信原理確認実験系の外観

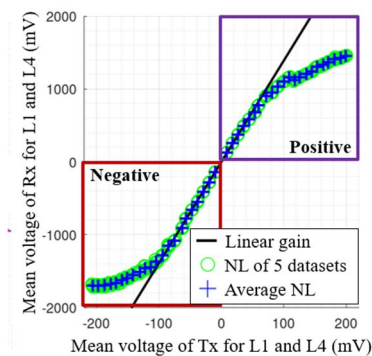


図8 大出力伝送系の非線形性

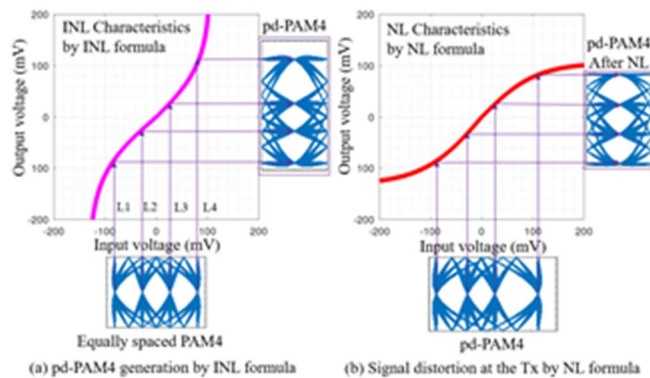


図9 非線形性の回避策

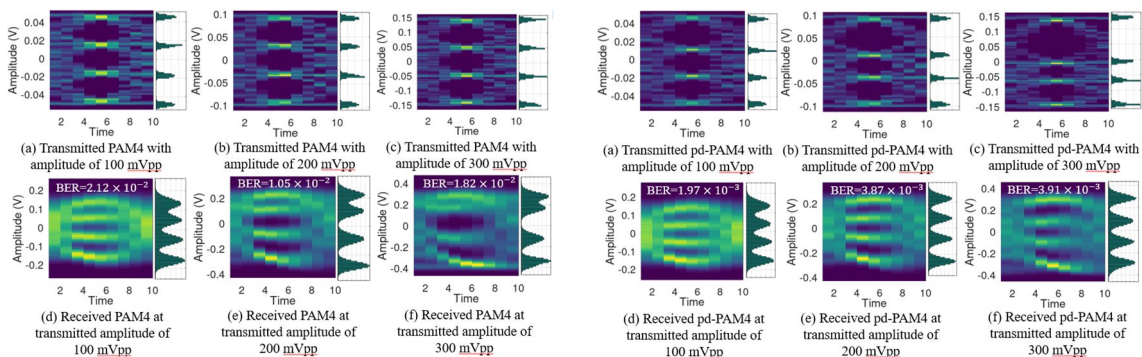


図10 1Gbit/s PAM4 信号の送受信アイパターン

上段：送信前。下段：受信後。左：非線形予等化なし。右：非線形予等化あり

シミュレーションによってPAM_x-PRMLによる可視光無線通信の速度向上の可能性が示されたことから、青色LDを光源とするUWOC実験系において原理確認実験を行った。図7にその実験系の外観を示す。本研究の最終的な目的が長距離光無線水中通信であることから、送信機には出力1Wの大出力青色LDを用いた。変調方式の原理確認を主目的とすることと、水質の変更を容易にするために水中チャンネルとしてアクリルパイプを用い、両端にレトロリフレクタを配置して折り返し伝送させることで伝送距離を延伸できる構成とした。写真中のUWOC Txが1W LDを搭載した送信機である。帯域幅が1GHz程度を想定していたが、実際には約500MHzと半分の帯域しか実現できていない。受信は帯域幅1GHzの市販アバランシェフォトダイオードを用いた。この送受信系が図8に示す強い非線形特性を有したことから、送信信号を線形性範囲内に制限したが、回路で重畳する熱雑音等と相まってPAM4信号の伝送すらできない状況であることが判明した。そこで、図9に示す非線形性回避策として送信前非線形等化を導入し、受信時のアイ開口が均等なレベル差を持つようにPAM4信号を設計した。図10にこの送受信アイパターンを示す。これにより、500MHzの帯域幅の送受信回路の非線形範囲をフルに利用した1G bit/sのPAM4信号伝送が可能となった。BER特性を評価したところ、受信電力が-15dBmから+2dBmの範囲で誤り訂正符号によるエラーフリー限界を下回るBERを得られた。このBER特性を図11に示す。通常のパAM4信号では非線形性によってアイ開口が完全に閉じ、FECリミットを下回るBERが全く得られないのに対して、提案方式によるPre-distorted PAM4信号では17.2dBもの広い受信電力余裕が見られる。この17dBの電力余裕は図7の実験系で約86mの伝送を可能とする。

一方、受信電力を増大してもアイ開口脇に示されている振幅分布が改善せずBERが低下しなかったことから、送信機において大きな雑音が混入していることが判明した。現状の雑音電力ではPAM4-PRS伝送信号を送信した場合に完全にアイ開口が閉じてしまうため、送信機の再設計が必要なことが判明した。PRM_x-PRSの原理確認実験用送信機の再設計が今後の課題である。

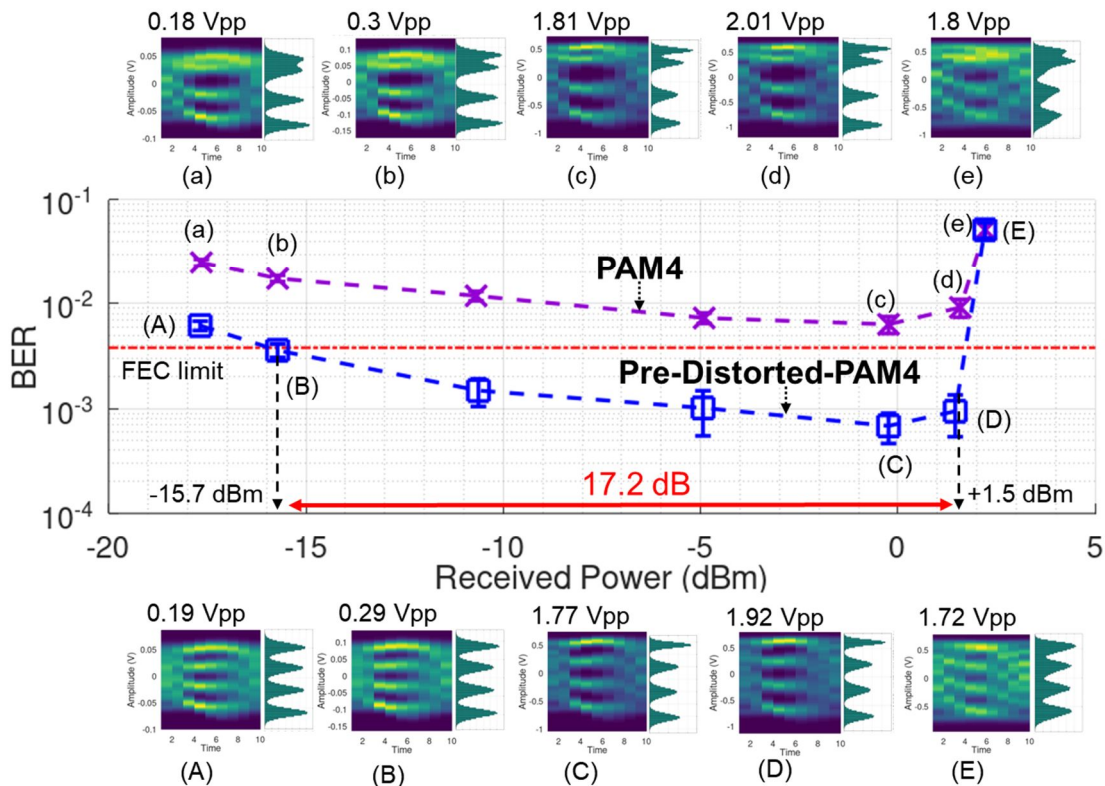


図11 LD駆動電圧を300mVppとしたときのBER特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 埴 雅典、中村 一彦	4. 巻 60
2. 論文標題 水中光無線通信技術の研究開発動向	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジンB-plus	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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 稲葉 凌一、埴 雅典
2. 発表標題 水中光無線通信向けパースナルレスポンス信号のビタビ復号
3. 学会等名 電子情報通信学会光通信システムシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 埴 雅典、中村 一彦
2. 発表標題 水中光無線通信における信号処理の可能性
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第42回年次大会・ALANコンソーシアムジョイントシンポジウム
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	中村 一彦 (Nakamura Kazuhiko) (40402086)	山梨大学・大学院総合研究部・助教 (13501)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究 分 担 者	鈴木 一克 (Kazuyoshi Suzuki) (60436714)	山梨大学・大学院総合研究部・特任准教授 (13501)	

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