

水中光通信を「より深く」理解するために

ジョン・ムース

過酷な海洋環境にある作業車、ロボット、そして海底工場に向けて、水中光通信の可能性を理解するためには、伝送距離とデータレート間の明確なトレードオフを慎重に検討する必要がある。

水中環境は、あらゆる通信モードにおいて困難をとめない、伝送距離とデータレートの間に明確なトレードオフが存在する。無線電波は、導電率の高い海水によって指数的に減衰される。音響通信は、低いデータレート(キロビット/秒[Kbit/s])で長距離(km)に対応するが、一般的に浅水域では性能が低い。海中の雑音と、海面と海底からの複数の音響反射がその原因である。これによって、符号間干渉(ISI: Intersymbol interference、信号歪み)が生じる。

青色または青緑色レーザーと発光ダイオード(LED)を利用する水中自由空間光(FSO: Free Space Optical)通信は、限られた分野を対象とした短距離(150m未満)で高帯域幅(メガビット/秒[Mbit/s])のソリューションである。

伝送距離は、水質に大きく左右される。米ノースカロライナ州立大(North Carolina State University)では、水中の作業車やロボット、そして水中建設工事や海底工場用に光通信システムを構築および実装する際の実用的な検討事項に焦点を絞って取り組みを進めている。

データレートと伝送距離

水中通信の帯域幅要件は、制御信号用の約1kHzから、テレメトリ装置によるデータや画像の送信にはその10倍の帯域幅が必要となる場合がある。参考までに、電話品質の音声通信に必要な帯域幅は約3kHz、圧縮映像の高品質ストリーミングの場合は約500Kbit/sが必要である。

一般的に、最適化された無線周波数

(RF: Radio Frequency)通信システムは、利用可能帯域幅1Hzあたり約1ビットに近づきつつあり、高い搬送周波数が使われる。しかし、無線電波の水中伝搬は導電率と周波数に大きく依存し、海底との通信はこれまで、超長波(VLF: Very Low Frequency)で、100ビット/秒オーダーのデータレートに抑えられていた。最近では、数メートルという短い距離をキロビットレベルの速度で伝送可能なモデムもある。

水中作業車間の従来の通信モードは、音響通信である。水中での音の速度と減衰は周波数に依存し、周波数が高いほど減衰は大きく、ISIが生じるために、商用システムは500Kbit/s未満に抑えられている。

水中での映像伝送の重要性が高まっており、フレームレートを落として圧縮アルゴリズムを適用しても、音響通信では非常に厳しい状況になっている。一方、光無線通信は、LEDを使用する場合で1~5Mbit/s、半導体レーザーを使用する場合でギガビットレベルのデータレートで容易に伝送することができる(図1)。最近では、LEDの帯域幅を増加させる取り組みも進められており、それによって、LEDに基づくさらにデータレートの高い通信が実現される可能性がある。

光通信による性能の向上

海底に恒久的に配置される構造には、水中光通信ケーブルを敷設することができる。これにより、ギガビットレベルの速度で非常に高い帯域幅の通

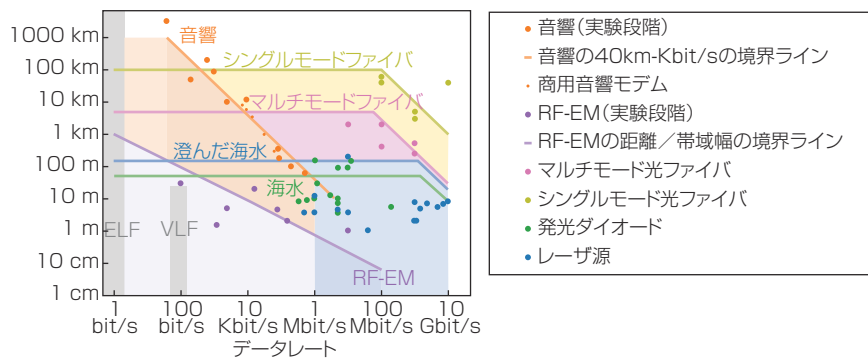


図1 伝送距離とデータレートに応じた、有効な水中通信手段。水色は、短距離光通信(150m未満)が主流となる領域を表し、データレートは1Mbit/sを優に上回る。橙色は、データレートの低い音響通信の領域を表し、通信システムの伝送距離は最大10kmにのぼる。軍用分野では今後も、データレートの低い音響通信とRF通信が利用される見込みである。

信が海底ノード間に提供される。しかし、光ファイバの導波モードと比べると、水中FSO通信の課題はさらに複雑である。

地上FSOシステムは、ビーム拡散を抑えるためのバルク光学系、適切な指向および追尾システム、大気乱流を処理する複数波長の適応型光学系を備える。このようなシステムで現在、キロメートルレベルの距離でギガビットレベルの速度が達成可能である。こうした機能は、1.55 μm のアイセーフなレーザ、エルビウムファイバ増幅器、光ファイバ通信用に開発された検出器の活用によって、急速に進化している。

近赤外(NIR: Near IR)波長は水による吸収が大きく、輝度の高い青緑色レーザとLEDを見つけたことが、水中通信の課題となっている。幸い、GaN(窒化ガリウム)をベースとする高輝度LEDと半導体レーザが現在、小型水中プラットフォーム用の安価な光源として提供される一方で、周波数を二倍化したNIRレーザによって、より大きなパルス波システム用の高いピーク出力が提供されている。

2つめの課題は、浅瀬で昼間に作業する場合に、日光が非常に輝度の高い干渉光源となり、水中の検出器の性能が抑えられることから、良好な光学フィルタと広いダイナミックレンジを備える検出器が求められることである。

最後に、地上FSO通信と比べると、乱流は海底通信システムにおいてさほど深刻な問題ではない。それよりも、吸収と散乱が対処すべき重大な問題である。青く澄んだ海水の場合、最大伝送性能が得られるのは青色波長(405~440nm)で、吸収係数は約0.017 m^{-1} である。沿岸水域では、吸収係数は0.033 m^{-1} と約2倍になり、最大伝送性能が得られる波長は緑色(510~530nm)

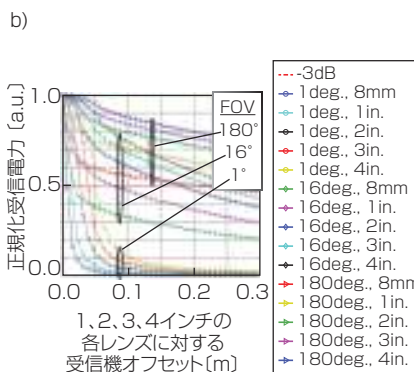
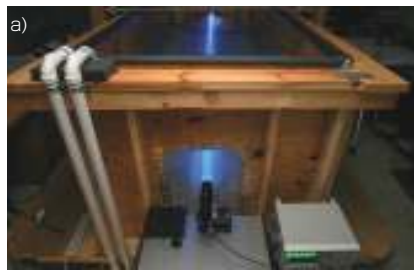


図2 水中光通信の特性評価に用いられる深さ3.66mのタンク(a)。微粒子と染料の注入によって水質が制御され、海水の吸収と散乱がシミュレーションされる。シミュレーションと実験の結果(b)には、港湾水域の水深15mの水質では、非散乱光だけを集光するのではなく、多重散乱光子も信号に寄与するように、受信機の視野を制御することが有効であることが示されている。

へとシフトする。黄色物質を多く含む非常に濁った沿岸水域では、吸収係数は約0.291 m^{-1} で、吸収は黄色の波長域で最小となる。

これらの値から、海中光無線通信で見込まれる伝送距離は、非常に澄んだ海水で150~200m、標準的な海水で50~75m、濁った港湾水域ではわずか数メートルということになる。音響通信とは異なり、散乱によるマルチパス分散は非常に小さく、1Gbit/sを超えるデータレートで動作しない限りはほぼ無視できる。

水中システムの設計

通信システムを設計する際には、システムが対応可能な伝送距離に加えて、送信機と受信機間のリンクを確

立するために必要なレンズのサイズ、視野と指向性の精度を把握する必要がある。水中では、これらの関係が必ずしも直感的であるとは限らない。

非常に澄んだ水中で強く前方に散乱する光とは異なり、濁水中では、短い平均自由行程(mean free path)によってビームが大きく拡大され、広視野の光学系を装備するシステムによって、受信機に向かって拡散する光子を効率的に捉えることができる。この様子を、モンテカルロ・シミュレーションを用いてモデル化し、実験によって比較することができる(図2)。濁水では、システムの指向性要件を引き下げることが可能である。

同様に、マルチパス分散(粒子間の光子散乱にともなう経路長の増加で表される)も、さまざまな送信機/受信機構成に対して、水質の関数として計算し、比較することができる。その結果、水中光通信で想定される比較的短い距離での、メガビットレベルの速度の伝送において、マルチパス分散はほぼ無視できることが明らかになっている⁽¹⁾。

ノースカロライナ州立大では、光無線システムを非常に小型化できること、また、誤り訂正符号の付加と伝送距離に応じた伝送速度の変更によって、信号雑音比を6~8dB改善できることを確認している(図3)⁽²⁾。信号雑音比の改善は伝送距離の延長につながり、誤り訂正はリンクの堅牢性の向上につながる。

光ファイバ通信と同様に、異なる色のLEDを用いた波長分割多重方式(WDM: Wavelength Division Multiplexing)によって、波長数の増加と比例して帯域幅を拡大することができる。異なる方向に向けて異なる符号を送信するビームを照射する、スマートな送信機と受信機ならば、携帯電話通信と

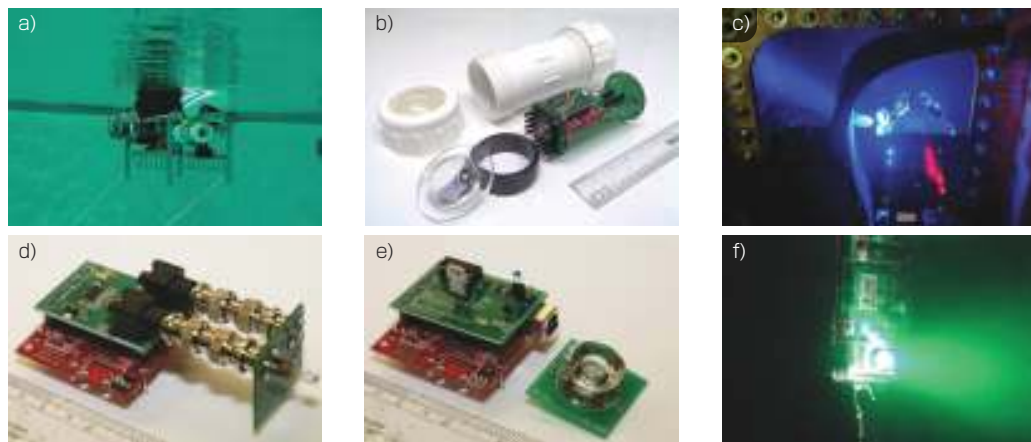


図3 海底光通信装置の例。(a)は、プール実験において1～5Mbit/sの小型光システムを搭載する自律型無人潜水機(AUV: Autonomous Underwater Vehicle)。(b)は、1～5Mbit/sの小型光送信機。(c)は、指向性ビームでCDMA符号化信号を送信するスマート送信機。(d)は、FPGAによる誤り訂正符号を付加する、1～5Mbit/sのLED光送信機。(e)は、FPGAを装備する光受信機。(f)は、濁水中の5Mbit/sの光学パイ。

同様の符号分割多元接続(CDMA: Code Division Multiple Access)方式が採用できる⁽³⁾。同大は、映像伝送に十分な帯域幅と、直角位相振幅変調(QAM: Quadrature Amplitude Modulation)を用いたソフトウェア無線を備える、MEMS(Micro Electro Mechanical System)に基づく再帰反射型変調器も実装した^{(4)、(5)}。

ほとんどの光無線リンクは実験段階にあり、貯水タンクやプールに実装されている。商用化されているものとしては、伝送距離40m、伝送速度10Mbit/sのシステムが米アムバルクス社(Ambalux)によって実装されており、100Mbit/sと1Gbit/sの伝送速度を達成する同社の光トランシーバがオプションとして提供されている。米ウッズホール海洋研究所(Woods Hole Oceanographic Institute)が開発した技術は、英ソナーダイナ社(Sonardyne)に移管され、同社は現在、2種類のBlueComm(商標登録済み)システムを提供している。LEDを採用するシステムは、10mで1～5Mbit/sと150mで1～12.5Mbit/s、レーザを採用するシステムは、7mで500Mbit/sに対応する。

この1年間で、複数の研究者によってタンク実験が行われ、実験施設における光無線通信の限界が押し上げられ

つつある。16QAMの直交周波数分割多重方式(OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing)によって、海中で4～8mの伝送距離で7Gbit/sを超えるデータレートが達成されている^{(6)、(7)}。このことから、光無線通信技術が急速に成熟しつつあること、また、実験施設のタンク内から海中へと実験の場を移す時期が来ていることがうかがえる。

一般的に、人間がさらに効率的に海底資源を探査し始めるにつれて、海底パイプライン、作業車、ダイバー、ロボットで構成されるますます大規模なネットワークが、水中装置を検査、修理、保守するために連携して動作する

ことが求められるようになる。複数の通信モードが必要となり、音響、光ファイバ、RF、水中FSOの各通信を相互にシームレスに変換するハイブリッドシステムの重要性がさらに高まる。

この新たな海底環境では、有線通信と電力ケーブルによって水中の固定インフラと繫留作業車が接続され、音波とRFによって海底プラットフォームと沿岸の間の通信が行われる。水中FSO構造は、遠隔操作無人探査機(ROV: Remotely Operated Vehicle)やダイバーといった可動資産と、固定資産の間の高帯域幅で短距離の通信を提供するという、対象は限られるが重要な通信手段となる。

参考文献

- (1) B. Cochenour and L. Mullen, "Channel response measurements for diffuse non-line-of-sight (NLOS) optical communication links underwater," Proc. IEEE/MTS OCEANS, Waikoloa, HI (Sep. 2011).
- (2) J. A. Simpson et al., "5 Mbps optical wireless communication with error correction coding for underwater sensor nodes," Proc. IEEE/MTS OCEANS, Seattle, WA (Sep. 2010).
- (3) J. A. Simpson et al., IEEE J. Sel. Area. Comm., 30, 5, 964-974 (Jun. 2012).
- (4) W. C. Cox et al., "A MEMS blue/green retroreflecting modulator for underwater optical communications," Proc. IEEE/MTS OCEANS, Seattle, WA (Sep. 2010).
- (5) W. C. Cox et al., "Underwater optical communication using software defined radio over LED and laser based links," Proc. IEEE Military Communications Conference (MILCOM), Baltimore, MD, 2057-2062 (Nov. 2011).
- (6) H. H. Lu et al., IEEE Photon., 8, 5, 7906107 (Oct. 2016).
- (7) T. C. Wu et al., Sci. Rep., 7, 40480 (Jan. 2017).

著者紹介

ジョン・ムース(John Muth)は、電気およびコンピュータ工学を専門とする米ノースカロライナ州立大(NCSU: North Carolina State University)の教授。
e-mail: muth@ncsu.edu URL: www.ece.ncsu.edu