

令和元年6月12日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H05560

研究課題名(和文) 環境に応じて自律的にパラメータを調整する水中音響モデムによる小型移動体通信の実現

研究課題名(英文) Realization of Mobile Underwater Acoustic Communication Using Flexible Acoustic Modems

研究代表者

海老原 格 (Ebihara, Tadashi)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：80581602

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：水中の通信環境は陸上よりも遙かに過酷なため、特に小型移動体通信の実現は陸上無線技術ベースでは難しい。そこで、水中の環境に適した、新しい通信エンジンを構築し、実海域における実証実験を通じて、その性能を評価した。その結果、本研究で確立した通信エンジンは、小型移動体通信の実現に不可欠な四課題(マルチパス、ドップラー広がり、搭載空間、搭載電力)を同時に解決することができ、かつ、優れた通信品質を達成することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、遅延広がりやドップラー広がりの影響が顕著な水中における移動体通信環境を実験により明らかにするとともに、それを克服するために、データを時間・周波数方向に繰り返し送受信する新しい通信方式を確立したことにある。そして、水中において、安定したデータ伝送が実現できることを実証することで、海中IoT基盤(海洋環境や資源に関するビッグデータを収集する仕組み)の実現に不可欠な通信インフラに、新しい選択肢をもたらしたことは、大きな社会的意義を有していると考えている。

研究成果の概要(英文)：Mobile underwater acoustic communication is still challenging since we have to address several issues (delay spread, Doppler spread, limited space, and limited power), simultaneously. In this project, a new communication engine based on orthogonal signal division multiplexing technique is constructed and tested in actual sea trials. As a result, the constructed underwater acoustic modem can simultaneously address the issues and achieved excellent communication quality.

研究分野：情報通信工学

キーワード：水中音響通信 マルチパス ドップラー

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

水中音響通信は、水中ロボットの制御、映像伝送、海洋環境監視網の構築など、海洋の調査・観測を支える基幹技術である。特に小型移動体同士の水中音響通信は、既存の調査・観測活動の効率や利用範囲、機動性を大きく高めるだけでなく、海洋活動に新しい地平を切り拓く技術として着目されている。しかし、小型移動体同士の水中音響通信を実現するためには、通信路の遅延広がり、ドップラー広がり、搭載空間、搭載電力の制限など、多岐に亘る課題を同時に解決する必要がある。しかし、水中の通信環境は陸上よりも遙かに過酷なため、特に小型移動体通信の実現は陸上無線技術ベースでは容易ではない。

一方、研究代表者は、全く新しい無線技術である直交周波数分割多重（Orthogonal Signal Division Multiplexing, OSDM）を基盤とする通信エンジンを開発し、それを軸に困難とされてきた諸課題への対策を全て確立してきた。そして、それらを統合することで、小型移動体通信に適した新しい通信エンジンを確立できる確証を得た。

2. 研究の目的

これまで研究代表者が開発・発展させてきた技術を元に、小型移動体通信に適した新しい通信エンジンを確立し、実海域においてその性能を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

まず、新しい通信エンジンと、その運用に必要な機能を確立する。次に、それをモデムとして移動体に実装し、実証実験を段階的に繰り返すことで、完成度を高めていく。

(1) 水中移動体用通信エンジンの確立

研究代表者がこれまで確立した要素技術を統合し、複数の課題（通信路の遅延広がり、ドップラー広がり、搭載空間、搭載電力の制限）を同時に解決できる通信エンジンを確立する。通信シミュレーション、および、屋内水槽での実証実験によって、通信エンジン単独での性能評価を行う。そして、信号のパラメータが適切に設定されていれば、安定した小型移動体通信が実現できることを、まず実証する。

(2) 水中移動体通信における通信環境の測定とモデル化

小型移動体通信は、端末の移動に伴って通信路の環境が変化する。そのような環境で通信エンジンを運用するためには、水中移動体通信における通信環境は、（移動体の移動によって）どのように変化するのか、実験を通じて明らかにする必要がある。次に、その通信路を可能な範囲でモデル化し、水中通信路シミュレータを構築する。最後に、構築したシミュレータを用いて、(1)で確立した通信エンジンのチューニングを行うことで、(3)の実証実験に備える。

(3) 水中移動体通信モデムの実装と実証実験

(1)で確立し、(2)でチューニングを行った通信エンジンを、水中音響モデムとして実装する。次に、このモデムを移動体に搭載し、実海域（港内、および、港外）での実証実験を段階的に実施する。そして、ビット誤り率、および、パケット誤り率を測定することで、通信品質を評価する。

4. 研究成果

(1) 水中移動体用通信エンジンの確立

直交周波数分割多重（Orthogonal Signal Division Multiplexing, OSDM）は、送信メッセージと、通信路の状態を測定する信号（パイロット信号）を多重送信し、遅延広がりの影響を受信機が精度良く測定することで、時間領域に広がったすべての信号エネルギーを通信に活用する技術である。このパイロット信号の配置を見直し、遅延広がりに加えて、ドップラー広がりの影響も受信機が精度良く測定できる通信方式（Doppler-resilient OSDM; D-OSDM）を確立した。そして、通信シミュレーション、および、屋内水槽（造波水槽）での実証実験を行い、D-OSDMの性能を評価した。その結果、D-OSDMは、遅延広がり、および、ドップラー広がりが存在する環境において、既存の通信方式の半分以下の電力で、所望の通信品質が達成できることを明らかにした（図1、雑誌論文①、学会発表①、③）。

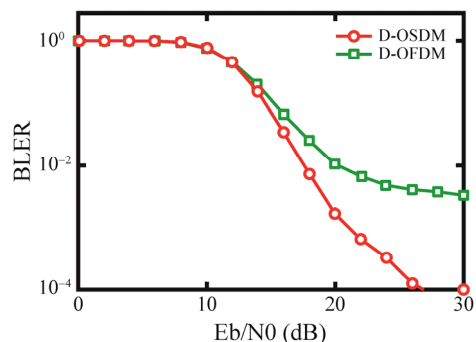


図1: 実験結果(雑誌論文①より転載)。横軸はビットあたりの信号対雑音電力比(グラフの左に行くほど、雑音の影響が顕著)、縦軸はブロック誤り率(グラフの下に行くほど、誤りが小さく、高品質)を表している。赤色の線はD-OSDMの性能、緑色の線は従来の通信方式の性能を表している。

さらに、D-OSDM に、時間ダイバーシティ技術を適用することで、受信機の小型化にも挑戦した。時間ダイバーシティ技術は、水中通信路の時変性を活用し、同じ信号を繰り返し送信することで、複数の受波器を用いた空間ダイバーシティと同様の効果を達成する。通信シミュレーション、および、港湾での実証実験を行った結果、D-OSDM に時間ダイバーシティを組み合わせることで、複数の課題（通信路の遅延拡がり、ドップラー拡がり、搭載空間、搭載電力の制限）が同時に解決できることを明らかにした（雑誌論文②、学会発表⑥）。

(2) 水中移動体通信における通信環境の測定とモデル化

水中移動体通信における通信環境が、移動体の移動によってどのように変化するかを明らかにするために、港湾において実験を行った。岸壁に送信機、小型のリモートコントロールボートに受信機を搭載して、移動環境における通信環境を測定した。その結果、水中における見通し通信路は二つのレイリーフェージングモデル（ドップラー拡がりがない直達波、および、ドップラー拡がりのある反射波が混合したもの）で表すことができることを明らかにした（図2、雑誌論文③、学会発表②、⑤）。

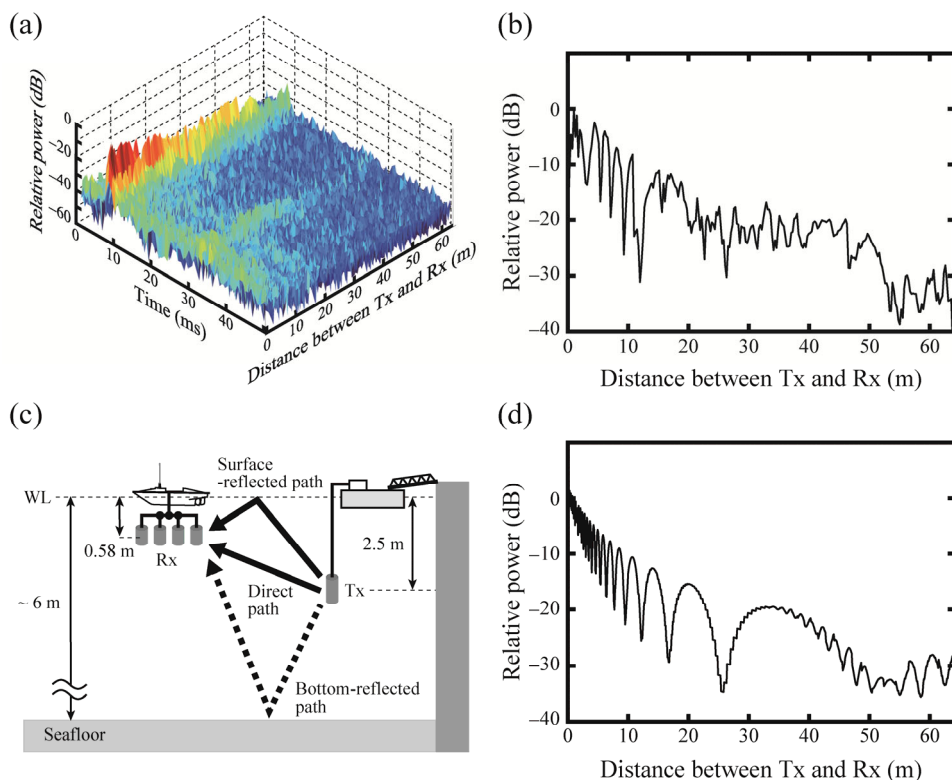


図2：測定された移動環境、および、構築した通信環境モデルの例（雑誌論文③より転載）。図2(a)、2(b)は実験結果であり、それぞれ、岸壁 (Rx) からリモートコントロールボート (Tx) を発進させ、両者の距離を増加させながら測定した遅延拡がり、および、受信信号強度を表している。図2(c)、2(d)はモデル化の一例であり、それぞれ、直達波と反射波が存在する水中通信路のモデル、および、モデルから計算された受信信号強度を表している。

(3) 水中移動体通信モデムの実装と実証実験

(1)で確立し、(2)でチューニングを行った通信エンジンを、水中音響モデムとして実装した。次に、このモデムを移動体に搭載し、実海域（港内、および、港外）での実証実験を段階的に実施した。

まず、リモートコントロールボートを用いた実験を港内で実施した。港内では、通信路の遅延拡がりは約 50 ms、ドップラー拡がりは最大 4.5 Hz であった。これらの遅延拡がり、および、ドップラー拡がりに対応可能な信号を設計し、岸壁に送信機、小型のリモートコントロールボートに受信機を搭載して、移動環境における通信品質を測定した。その結果、D-OSDM は、遅延拡がり、および、ドップラー拡がりが存在する環境において、既存の通信方式よりも、優れた通信品質が達成できることを確認した（雑誌論文③、学会発表④、⑦）。

最後に、実海域（駿河湾・内浦）における実験を実施した（図3）。実海域では、通信路の遅延拡がりは約 5-25 ms、ドップラー拡がりは最大 8 Hz であった。これらの遅延拡がり、および、ドップラー拡がりに対応可能な信号を設計し、計測船に送信機、大型バ

ージに受信機を搭載して、移動環境における通信品質を測定した。その結果、D-OSDMのパケットエラー率は3.2%と、優れた通信品質が達成できることを確認した(図4、雑誌論文④、学会発表⑧)。

本研究は、複数の課題(通信路の遅延拡がり、ドップラー拡がり、搭載空間、搭載電力の制限)を同時に解決できる通信エンジンの確立に成功した。さらに、移動体環境において優れた通信品質が達成できることを実証実験により明らかにし、研究を完遂した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計4件)

- ① T. Ebihara, H. Ogasawara, K. Mizutani, and N. Wakatsuki: Field Experiment of Underwater Acoustic Communication Using Doppler-resilient Orthogonal Signal Division Multiplexing in Coastal Area of Suruga Bay, Jpn. J. Appl. Phys. 58 (2019) 印刷中, 査読有.
- ② T. Ebihara, G. Leus and H. Ogasawara: Underwater Acoustic Communication Using Doppler-resilient Orthogonal Signal Division Multiplexing in a Harbor Environment, Phys. Commun 27 (2018) 24-35, 査読有.
DOI: 10.1016/j.phycom.2018.01.001
- ③ T. Ebihara, H. Ogasawara, and K. Mizutani: Underwater Acoustic Communication Using Orthogonal Signal Division Multiplexing Scheme with Time Diversity, Japanese Journal of Applied Physics 55 (2016) 037301_1-037301_13, 査読有.
DOI: 10.7567/JJAP.55.037301
- ④ T. Ebihara and G. Leus: Doppler-Resilient Orthogonal Signal Division Multiplexing for Underwater Acoustic Communication, IEEE J. Ocean. Eng. 41 (2016) 408-427, 査読有.
DOI: 10.1109/JOE.2015.2454411

[学会発表] (計8件)

- ① 海老原格, 小笠原英子, 水谷孝一, 若槻尚斗: 直交信号分割多重を用いる水中音響通信の駿河湾における性能評価, 第39回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム講演論文集, Vol.39, 3J2-2, (2 pages), 京都, 2018.
- ② T. Ebihara, G. Leus, and H. Ogasawara: Underwater Acoustic Communication Using Multiple-input Multiple-output Doppler-resilient Orthogonal Signal Division Multiplexing, Proceedings of the 2018 MTS/IEEE OCEANS, Kobe, Japan, CD-ROM, 161130-133, 4 pages, 2018.
- ③ T. Ebihara and H. Ogasawara: Underwater Acoustic Communication Using Doppler-Resilient Orthogonal Signal Division Multiplexing with Time Diversity, Proceedings of the 2017 MTS/IEEE OCEANS, Aberdeen, United Kingdom, CD-ROM, 161130-133, 9 pages, 2017.
- ④ 海老原格, ハートルース, 小笠原英子: リモコンボートを用いたモバイル水中音響通信実験, 第26回海洋工学シンポジウム, 日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会, OES25-066, CD-ROM (4 pages), 東京, 2017.
- ⑤ 海老原格, ハートルース, 小笠原英子: ドップラー拡がりに頑健な直交信号分割多重を用いる水中音響通信の港湾実験, 第37回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム講演論文集, Vol.37, 1P6-9, (2 pages), 釜山, 2016.

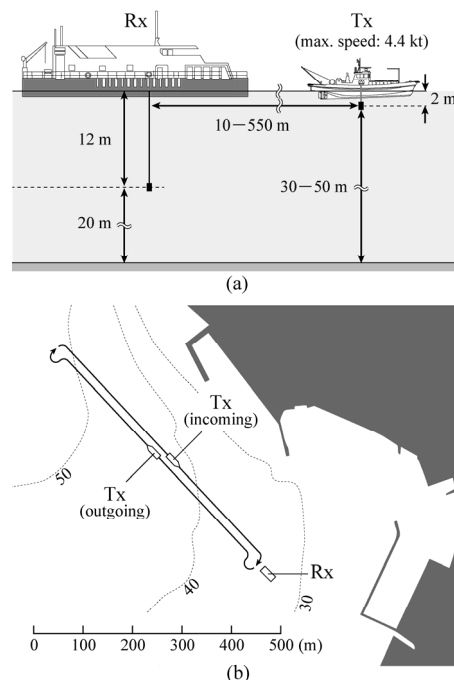


図3: 実験環境 (学会発表⑧より転載)
図3(a)は計測船(Tx), および, 大型バージ(Rx)の位置関係, および, 水中音響送受波器の配置を表している.
図3(b)は, 現場の水深, および, 計測船の航路を示している.

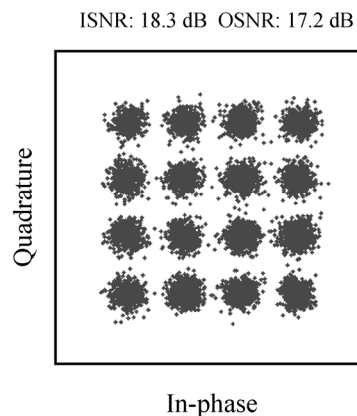


図4: 実験結果 (学会発表⑧より転載)
受信されたデータ信号を複素平面上に表している. サンプルのばらつきが小さいので, 誤りが発生しにくい(通信品質が良い)状況であるといえる.

- ⑥ 海老原格: Underwater Acoustic Communication With an Orthogonal Signal Division Multiplexing Scheme in Doubly Spread Channels, 海洋音響学会 2016 年度第 1 回談話会および第 1 回シンポジウム, 2016 (招待講演) .
- ⑦ T. Ebihara, G. Leus, and H. Ogasawara: Harbor trial of underwater acoustic communication using Doppler-resilient orthogonal signal division multiplexing, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol.140, No.4 (Program book the 5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan), pp.3229-3230, 2016 (招待講演) .
- ⑧ 海老原格, G. Leus, 小笠原英子: 直交周波数分割多重を用いる小型かつ省電力な水中音響通信実現のための基礎的検討, 第 25 回海洋工学シンポジウム, 日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会, OES25-121, pp.561-564, 東京, 2015.

6. 研究組織

(2)研究協力者

小笠原 英子 (OGASAWARA HANAKO)

防衛大学校・応用科学群・准教授

研究者番号 : 00531782

GEERT LEUS

デルフト工科大学・電子数理情報工学部・教授

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。