

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760672

研究課題名(和文) マルチパス測定型水中音響多重通信の実証実験とアレイ信号処理の適用

研究課題名(英文) Underwater Acoustic Communication using Multiplexing Technique for Multipath Measurement with Array Processing

研究代表者

海老原 格 (EBIHARA, TADASHI)

筑波大学・システム情報系・助教

研究者番号：80581602

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円、(間接経費) 1,080,000円

研究成果の概要(和文)：音波を用いてワイヤレスに情報を伝送する水中音響通信は水中ロボットの制御や海洋工事での映像伝送など多くの需要がある一方で、マルチパスやドップラー広がりの影響により安定した通信の実現が難しいことで知られている。そこで伝送速度と伝送品質の改善を目的に、マルチパスに頑健な通信方式(直交信号分割多重方式)とアレイ信号処理を組み合わせ、さらに、その効果を実証実験により確認した。水槽実験ならびに港湾における実験によって提案手法の性能を評価した結果、提案手法は従来用いられてきた通信方式と比較して、通信品質を大きく向上できることを明らかにした。今後はドップラー広がりへの対策が課題である。

研究成果の概要(英文)：Underwater acoustic (UWA) communication is widely used for underwater activities. To provide reliable communication in shallow water, communication scheme to cope with the effects of multipaths and Doppler spread is necessary. To conduct reliable communication in shallow water, performance of UWA communication using orthogonal signal division multiplexing (OSDM) with array processing was considered in both a test-tank and a harbor. It was found that the proposed scheme could achieve the best communication quality than existing schemes under heavy multipath environment. Addressing Doppler spread is an issue in the future.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：水中音響通信 マルチパス ドップラー アレイ信号処理

1. 研究開始当初の背景

音波を用いてワイヤレスに情報を伝送する水中音響通信は様々な分野で利用されている基幹技術である。特にマルチパスやドップラー効果の影響が顕著な浅海域での音響通信は水中ロボットの制御、海洋工事の際の映像伝送、海洋生物モニタリングなどへの需要がある一方で、安定した通信の実現が難しいことが知られている。浅海域では音波が海面や海底で反射を繰り返しながら伝搬するため、送受信機間には複数の伝搬経路(マルチパス)が存在する。そのため、受信機で受信される信号は時間遅れを伴う複数の信号の和となることから、シンボル間干渉が発生してしまう。また、海面の揺動や送受信機間の相対速度によって無視できないドップラーシフトが発生する。ドップラーシフトの大きさは経路毎に異なるため、受信機で観測される信号の周波数が広がる、ドップラー広がりへの対策も必要となる。

本研究ではマルチパスとドップラー広がりのうち、マルチパスに着目する。研究代表者はこれまで直交信号分割多重(OSDM)を浅海域における水中音響通信に適用することを提案してきた。そして、水槽実験などからOSDMはマルチパスに頑健であることを確認してきた。しかし、上記に挙げられるような需要に応えられるだけの伝送品質を達成するには未だ改善の余地があった。

2. 研究の目的

OSDMにアレイ信号処理を組み合わせることで、マルチパスの影響が顕著な浅海域における水中音響通信の伝送品質を向上させることを目的とする。提案方式の性能は実験水槽ならびに実浅海域において評価する。そして、従来のアレイ信号処理と等化器を組み合わせた通信方式と比較することで、提案方式が従来方式と比較して安定した通信を実現できることを確認する。将来的にOSDMによる水中音響通信を実用化し各種アプリケーションに応用していくためにも、受信機における計算コストなどについても検討する。

3. 研究の方法

- (1) OSDMにアレイ信号処理を組み合わせた通信方式であるマルチチャネルOSDMを設計する。そして、提案方式の性能をシミュレーションと水槽実験で評価する。この際、従来の通信方式の性能も併せて評価し、提案方式と比較することで提案方式の有効性を検証する。
- (2) (1)の結果を踏まえ、実浅海域(港湾)において提案方式の性能を評価する。実浅海域ではシミュレーションや水槽実験と異なり、環境雑音や波浪、潮位などの影響が通信系に加わる。実浅海域での実験をすることで、実用に即した環境下における提案方式の性能を評価する。

4. 研究成果

平成24年度はOSDMにアレイ信号処理を組み合わせたマルチチャネルOSDMを設計し、提案方式の性能をシミュレーションと水槽実験で評価した(研究の方法(1))。

OSDMでは、送信機は送信メッセージと通信路のインパルス応答測定のためのパイロット信号を多重化して送信する。浅海域で海面や海底で反射を繰り返しながら伝搬し受信された信号は、マルチパスの影響により大きく歪んでいる。しかし、信号設計の工夫により、パイロット信号とメッセージはマルチパスの影響を受けても互いに干渉せず、受信機で分離できる。受信機は通信路のインパルス応答を受信信号から測定し、連立方程式を解くことで歪みの影響を補償する。まず単一の受波器を用いるOSDMの場合、連立方程式が悪条件になる場合があること、それによって通信品質の向上が阻まれることを見いだした。そこで複数の受波器を用いるマルチチャネルOSDMを設計し(図1)、シミュレーション及び水槽実験によってマルチチャネルOSDMの性能評価を行った。得られた結果を図2に示す。図2の横軸は入力SNR、縦軸はビット誤り率となっている。提案方式は従来方式と比較してより小さな入力SNRで小さなビット誤り率を達成している。これは、提案方式が従来方式よりも小さな信号電力で、同等の通信品質を達成できることを意味している。また、マルチパスの影響を補償するために必要な計算コストについても検討を行った。その結果、OSDMはOFDM(直交周波数分割多重)よりは計算コストが大きくなるものの、RLS-DFE(RLS判定帰還等化器)を用いるシングルキャリア伝送よりは小さな計算コストで、選り優れた通信品質を達成することを明らかにした。

すなわち、マルチチャネルOSDMは実用的な計算コストながら前述の連立方程式の悪条件を回避できること、そして従来の通信方式と比較して同等の通信品質をより小さな信号電力で実現できることを明らかにした(図2、発表論文①)。

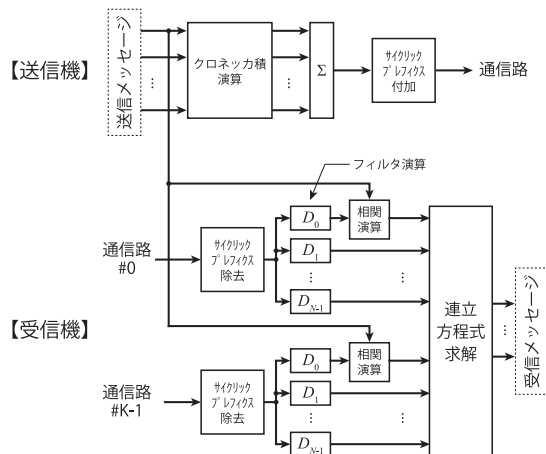


図1: マルチチャネル OSDM (発表論文①より)

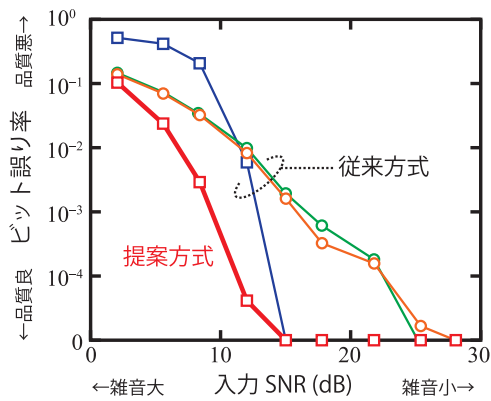


図 2：マルチチャネル OSDM の性能
(発表論文①より)

次に複数の送波器と複数の受波器を用いる多入力・多出力 (MIMO) に対応したマルチチャネル OSDM (MIMO-OSDM) を設計した。前述のマルチチャネル OSDM は単一の送波器から信号を送信し、複数の受波器で受信する。一方、MIMO-OSDM では複数の送波器から (独立した) 信号を送信し、複数の受波器で受信する。この方式は空間多重化によって送波器の数に比例して伝送速度を向上することが出来る他、各送波器における変調速度を小さくすることで単一の送波器を用いる場合と比較して同じ通信品質をより小さな信号電力で実現することが出来る。そこで、後者の特徴に着目し、より小電力な水中音響通信を提供する目的で MIMO-OSDM を設計した。MIMO では送波器と受波器の間に存在する複数の通信路のインパルス応答を独立に測定することが求められる。そのため、マルチチャネル OSDM をベースに、パイロット信号を工夫することで複数の通信路のインパルス応答を独立に測定することができるよう改良した。

新しく設計した MIMO-OSDM の性能評価を大型水槽で行った。先に提案したマルチチャネル OSDM では単一の送波器を用いるが、MIMO-OSDM では二つの送波器を用いる場合と比較して半減させた。そして、両者を同一の実効伝送速度、同一の送信電力で比較を行った。実験の結果を図 3 に示す。図 3 の横軸は入力 SNR、縦軸はビット誤り率となっている。MIMO に対応したマルチチャネル OSDM とマルチチャネル OSDM の実行伝送速度は同一となっている。両者を比較すると、MIMO に対応したマルチチャネル OSDM は、マルチチャネル OSDM より更に小さな入力 SNR で同等の通信品質を達成している。

これは、提案方式が従来方式よりも小さな信号電力で、同等の通信品質を達成できることを意味している。

すなわち、MIMO に対応したマルチチャネル OSDM はマルチパスの影響下においても一定の品質をより小さな送信電力で実現できることを確認した (発表論文②)。

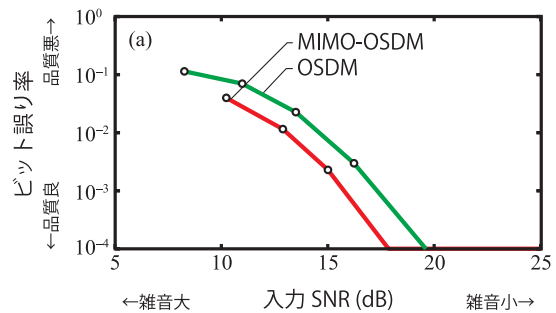


図 3：マルチチャネル OSDM と MIMO に対応したマルチチャネル OSDM の性能
(発表論文②より)

平成 25 年度は前年度の結果を踏まえ、実浅海域 (港湾) においてマルチチャネル OSDM の性能を評価した (研究の方法(2))。

港湾での実験はランダムに変化する海面、信号を散乱させる気泡などの存在、非定常な生物雑音、海面レベル、海水温、塩分濃度の時間変化、などの影響が通信系に加わる。これらの影響はシミュレーションや水槽実験では考慮されないため、実海域における通信実験は実用的な知見を与える上で必要不可欠である。

まずマルチチャネル OSDM によって通信を行う送受信機を構築した (図 4)。そして、それを港湾に設置して五日間に亘り通信実験を実施した。実験中、潮汐の影響などによって受信信号レベルは大きく変化した他、生物由来と推定されるパルス状の雑音を多く観測された。そのような環境で実施した実験の結果を解析したところ、シミュレーションや実験水槽とほぼ同様の結果が得られた。そして、マルチチャネル OSDM は実浅海域においても従来方式と比較して通信品質を大きく向上できるという傾向は実海域においても同様であることを明らかにした。この実海域における実験結果については現在投稿・審査中である。



図 4：実海域試験の様子
(左：送信機の一部 右：受波アレイ)

結果として、マルチチャネル OSDM は従来方式と比較してマルチパスに頑健であり、同じ条件下で通信品質を大きく向上できることが、水槽実験、実海域実験により明らかになった。これは従来の通信方式と比較してより小さな信号電力ながら同等の通信品質を達成できることを意味しており、蓄電池によって駆動されることが多い水中音響通信を用いるデバイスの稼働時間を飛躍的に延ばすことに繋がる成果であると言える。

本研究の成果は、主にマルチパスに着目していることから、海底に設置されたセンサ同士の水中音響通信などにそのまま適用可能である。一方、移動体同士の通信などではドップラー広がりへの対策を別途解決する必要があるため、今後の課題であるといえる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① T. Ebihara and K. Mizutani: Underwater Acoustic Communication with an Orthogonal Signal Division Multiplexing Scheme in Doubly Spread Channels, IEEE J. Ocean. Eng. **39** (2014) 47-58, 査読有.
DOI: 10.1109/JOE.2013.2245273
- ② T. Ebihara: Improvement of Power Efficiency for Underwater Acoustic Communication Using Orthogonal Signal Division Multiplexing, Jpn. J. Appl. Phys. **52** (2013) 07HG04_01-08, 査読有.
DOI: 10.7567/JJAP.52.07HG04

[学会発表] (計 4 件)

- ① T. Ebihara: Toward a More Stable and Reliable Underwater Acoustic Communication, Seminar of the Netherlands Organization for Applied Scientific Research (2013), 招待講演, 2013 年 9 月 23 日, Den Haag, オランダ.
- ② T. Ebihara: Underwater Acoustic Communication with an Orthogonal Signal Division Multiplexing Scheme, Signal Processing Seminars in Delft University of Technology (2013), 招待講演, 2013 年 6 月 7 日, Delft, オランダ.
- ③ T. Ebihara: Single-stream Communication Using Orthogonal Signal Division Multiplexing with Multiple Antennas, Proc. Progress in Electromagnetics Research Symposium 2013 in Taipei (2013) 113-116, 2013 年 3 月 25 日, 台北, 台湾.
- ④ T. Ebihara: Multichannel Underwater Acoustic Communication with Orthogonal Signal Division Multiplexing on Moving Platform, Proc. International Congress on Sound & Vibration (2012) CD-ROM, 2012 年 7 月 9 日, Vilnius, リトアニア.

6. 研究組織

(1)研究代表者

海老原 格 (EBIHARA TADASHI)
筑波大学・システム情報系・助教
研究者番号：80581602

(3)研究協力者

小笠原 英子 (OGASAWARA HANAKO)
防衛大学校・応用科学群・講師
研究者番号：00531782