

令和元年6月6日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06374

研究課題名(和文)ダブルセレクトティブ伝搬環境に適したMIMO水中音響通信に関する研究

研究課題名(英文)MIMO underwater acoustic communications for doubly-selective channel environments

研究代表者

久保 博嗣(Kubo, Hiroshi)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：40633243

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)：本研究では、伝搬路が高速に時間変動し、遅延広がりが大きいダブルセレクトティブ伝搬環境が問題となる水中音響通信に関して、通信の高信頼化・大容量化を図る研究を実施した。本研究では、(1)水中音響通信のダブルセレクトティブ伝搬路において性能評価を容易化できるシミュレータ、(2)厳しいダブルセレクトティブ環境に有効な高信頼伝送方式(8kbps)と大容量伝送方式(64kbps)を提案した。特に、ダブルセレクトティブ環境を模擬した実験水槽、海洋浅瀬環境での実環境試験により、提案したチャネルシミュレータにより水中音響通信環境を模擬できること、提案した無線伝送方式が良好な性能を有することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果にて、水中音響通信の実現性を実際の海洋浅瀬環境で実験実証した。具体的には、高信頼伝送方式について、従来の2倍を超える厳しさのダブルセレクトティブ水中音響通信伝搬路での8kbps伝送、大容量伝送方式について、従来は10kbps程度であった海洋浅瀬環境での64kbps伝送の実現性を実証した。

本技術の適用先は、海洋資源探掘などに活用されている自律型無人潜水機(AUV)の通信制御手段である。今回の研究により、8kbps高信頼伝送方式では移動環境・長距離環境での水中音響通信の信頼性向上、64kbps大容量伝送方式では画像信号も視野に入れた水中音響通信の容量拡大に寄与する成果を得た。

研究成果の概要(英文)：This research investigates on reliable and high-speed communications for doubly-selective channel environments inherent in underwater acoustic communications (UWACs), which suffer from fast time-varying and large delay-spread channel environments. This research has proposed the following two schemes: 1) simulation channel models (channel simulators) of doubly-selective UWAC channels for simple performance comparison of UWAC transmission technologies; 2) reliable transmission technologies (8kbps) and high-speed transmission technologies (64kbps) for doubly-selective UWAC environments. Especially, from experimental results in doubly-selective environments of an experimental acoustic pool and shallow underwater channels, it has been confirmed that the proposed channel simulator can model UWAC channels, and the proposed UWAC transmission technologies have excellent performance.

研究分野：無線通信

キーワード：通信方式 変復調 信号処理 符号化 MIMO伝送方式 水中音響通信 移動体通信 海洋探索

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

海洋資源採掘などに活用されている自律型無人潜水機 (AUV) の通信制御手段としては、音波を用いた水中音響通信が有効である。電波でなく音波を利用する理由は、海中では電波の減衰が大きく、減衰が相対的に小さい音響通信が有効であるためである。しかし、水中での音速は光速の 20 万分の 1 であるため、伝搬路が高速に時間変動し、遅延広がりが大きいダブルセレクトティブ伝搬環境が問題となる。他方、水中音響通信においても、通信の高信頼化・大容量化が重要な課題となっている。その理由は、AUV に用いる水中音響通信は、制御信号のみでなく、画像信号の送受信も期待されているためである。

2. 研究の目的

本研究では、伝搬路が高速に時間変動し、遅延広がりが大きいダブルセレクトティブ伝搬環境が問題となる水中音響通信に関して、通信の高信頼化・大容量化を図ることを目的としている。具体的な目標としては、水中音響通信のダブルセレクトティブ伝搬路において性能評価を容易化できるシミュレータの実現、厳しいダブルセレクトティブ環境に有効な高信頼伝送方式 (8kbps) と大容量伝送方式 (64kbps) の実現である。

上記目的を達成するために、研究において解決するための課題は、次の 3 点となる。

- ダブルセレクトティブ伝搬モデル作成
- 耐ダブルセレクトティブ通信方式確立
- 実環境通信性能評価

3. 研究の方法

まず、2. で述べた課題と研究課題の関係について論じる。課題(a)に対しては、伝搬路を計測するためのチャンネルサウンダ、計測した結果を反映した伝搬モデルを模擬できるチャンネルシミュレータの研究を実施する。課題(b)に対しては、厳しいダブルセレクトティブ環境に有効な音響通信に関する伝送方式の研究を実施する。課題(c)に対しては、水中音響通信のための伝送方式の性能の実験評価環境の研究を実施する。

具体的には、本研究では、以下の(1)から(5)に記載する項目を研究することにより、2. で述べた目的を達成する。

- MIMO (multiple-input multiple-output) チャンネルサウンダ方式/装置
- 水中音響通信伝搬環境測定とチャンネルシミュレータ
- 高信頼水中音響通信方式 (8kbps)
- 大容量水中音響通信方式 (64kbps)
- 水中音響通信伝送方式の性能実験評価

4. 研究成果

- MIMO チャンネルサウンダ方式/装置

本項目における研究成果としては、(i)プリコーディングによる音響電子機器の周波数歪の補償、(ii)サイクリック相関による時変伝送路に対するチャンネルサウンド精度向上、(iii)変形 M 系列の導入による相関のサイドローブ除去、(iv)帯域制限の導入による所望周波数帯のみのチャンネルサウンド実現、(v)CDD (cyclic delay diversity) の原理を利用した MIMO チャンネルサウンド方式の提案、が挙げられる。

図 1 に、CDD を適用した MIMO チャンネルサウンドの原理を示す。CDD の遅延量として例えば変形 M 系列周期の 1/3 と設定することにより、送信アンテナ 1 (Tx#1) からの信号と送信アンテナ 2 (Tx#2) からの信号を受信側で分離でき、MIMO チャンネルサウンドが可能となる。図 2 に、海洋浅瀬環境の距離 370m におけるチャンネルサウンド結果を示す。海洋浅瀬環境伝搬路にて、スパースな 3msec 程度の遅延広がりが観測されることが示された。

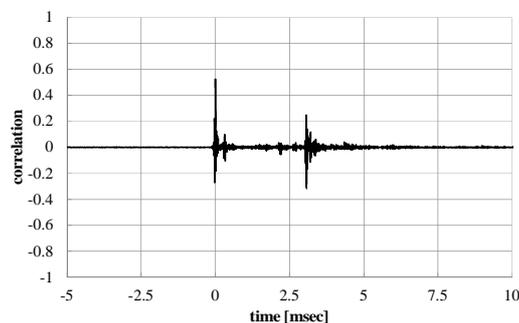
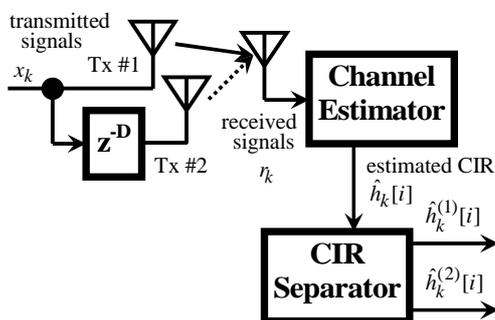


図 1 MIMO チャンネルサウンドの原理

図 2 海洋浅瀬環境でのチャンネルサウンド結果

- 水中音響通信伝搬環境測定とチャンネルシミュレータ

本項目における研究成果としては、(i)実験水槽でのチャンネル計測 (ロボット実験水槽、無響水槽)、(ii)実環境でのチャンネル計測 (琵琶湖浅瀬環境、海洋浅瀬環境)、(iii)模擬ダブルセレクト

タイプ環境におけるチャンネル計測 (iv) キャリア周波数帯サンプリングによるチャンネルシミュレータの提案, が挙げられる.

各種環境でのチャンネル計測の結果, 水中音響通信伝搬路はスパースな複数のパスが, それぞれドップラーシフトを有した伝搬路であることを確認した. このような環境に対応するチャンネルシミュレータとして, キャリア周波数帯サンプリングによるチャンネルシミュレータを提案した. 特に, 本チャンネルシミュレータは, キャリア周波数帯サンプリングにより, 水中音響通信特有の比帯域の大きな環境を模擬できるという利点がある. 図 3 に, 無響水槽での模擬移動環境実験と提案するチャンネルシミュレータによるシミュレーションに対して, 伝送路インパルス応答の時間変動 (3次元チャンネルサウンド結果) を示す. チャンネルシミュレータにより, 無響水槽での模擬移動環境実験に近い伝送路特性を実現できることが示される.

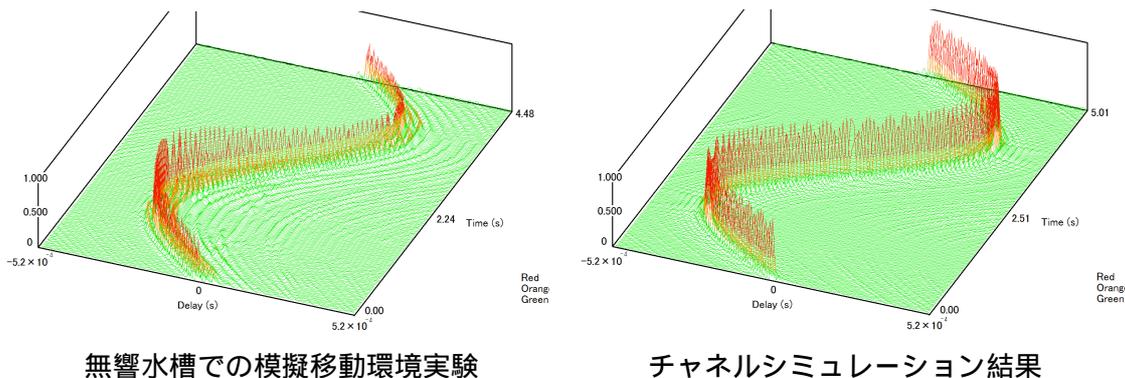
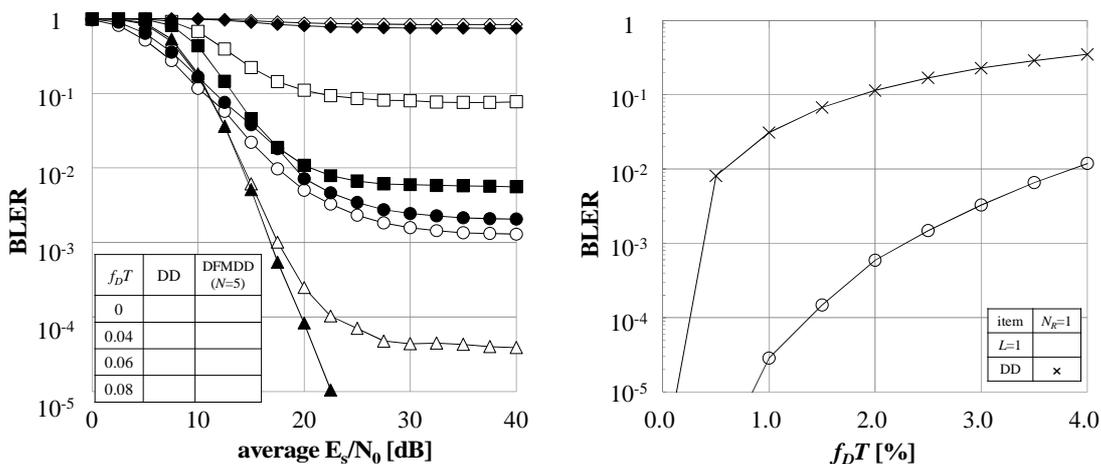


図 3 3次元チャンネルサウンド結果

(3) 高信頼水中音響通信方式 (8kbps)

高信頼水中音響通信方式としては, 送信側に差動のシングルキャリア伝送方式を並列伝送する多重シングルキャリア (MSC) 伝送方式, 受信側に伝送路予測を適用した多重遅延検波を採用して, 8kbps 伝送を実現した. その理由は, MSC 伝送方式は, ドップラーシフトが大きい場合のキャリア間干渉 (ICI) への耐性が高いためである. 具体的なパラメータとしては, サブキャリア数は 64, サブキャリア当たりのシンボルレートは 93.75sps, ロールオフ率が 0.2 の QPSK に対して, RS(240,160,8) の Reed-Solomon 符号を適用した.

図 4 の左図に, 高信頼水中音響通信方式に対して, 平均 E_s/N_0 をパラメータとした BLER (block error rate) 特性のシミュレーション結果を示す. 多重遅延検波としては 1 次伝送路予測の判定帰還多重遅延検波 (DFMDD) を採用し, 遅延検波 (DD) に対する有効性を確認した. ここで, N は伝送路予測における観測シンボル数である. なお, 伝送路は 2 パスレイリーフェージングとし, 2 パス間の時間差を 1/8 シンボル, DU 比を 6dB とした.



高信頼水中音響通信方式 (8kbps)

大容量水中音響通信方式 (64kbps)

図 4 フェージング環境下でのシミュレーション結果

(4) 大容量水中音響通信方式 (64kbps)

大容量水中音響通信方式としては, 送信側に差動の MSC 伝送方式, 受信側に伝送路予測を適用した多重遅延検波を採用して, 64kbps 伝送を実現した. その理由は, UWAC では, 伝搬路の各パスの振幅が変動しない LOS (line-of-sight) 的な環境, かつ, 伝送路変動が高速なため, MIMO 伝送を用いるより, SIMO (single-input multiple-output) 伝送の方が有利である可能性が高

いためである．具体的なパラメータとしては，サブキャリア数は 256，サブキャリア当たりのシンボルレートは 93.75sps，ロールオフ率が 0.2 の 16PSK に対して，RS(255,177,8) の Reed-Solomon 符号を適用した．

図 4 の右図に，大容量水中音響通信方式に対して，シンボルレート正規化最大ドップラー周波数 $f_D T$ をパラメータとした BLER 特性のシミュレーション結果を示す．多重遅延検波としては 1 次予測の PSP (per-survivor processing) を採用し，DD に対する有効性を確認した．なお，伝送路は，雑音がない 1 パスレイリーフェージングとした．

(5) 水中音響通信用伝送方式の性能実験評価

本項目における研究成果としては，(i)模擬ダブルセレクトティブ環境での性能評価，(ii)海洋浅瀬環境での性能評価，が挙げられる．

図 5 に，模擬ダブルセレクトティブ環境下での実験結果を示す．ここで，模擬ダブルセレクトティブ環境においては，図 6 に示すように，無響水槽に反射板を挿入して，送信トランスデューサを装置にて上下移動させたもので，平均移動速度 v を変化させて性能評価を実施した．高信頼水中音響通信方式は $v=0.6\text{m/sec}$ まで，大容量水中音響通信方式は $v=0.1\text{m/sec}$ まで良好な性能を実現できることを確認した．

加えて，図 7 に示す海洋浅瀬環境にて準静止試験を実施し，高信頼水中音響通信方式 (8kbps) では距離 370m 時にエラーフリー，大容量水中音響通信方式 (64kbps) では距離 10m 程度までは通信性能が良好なことを確認した．

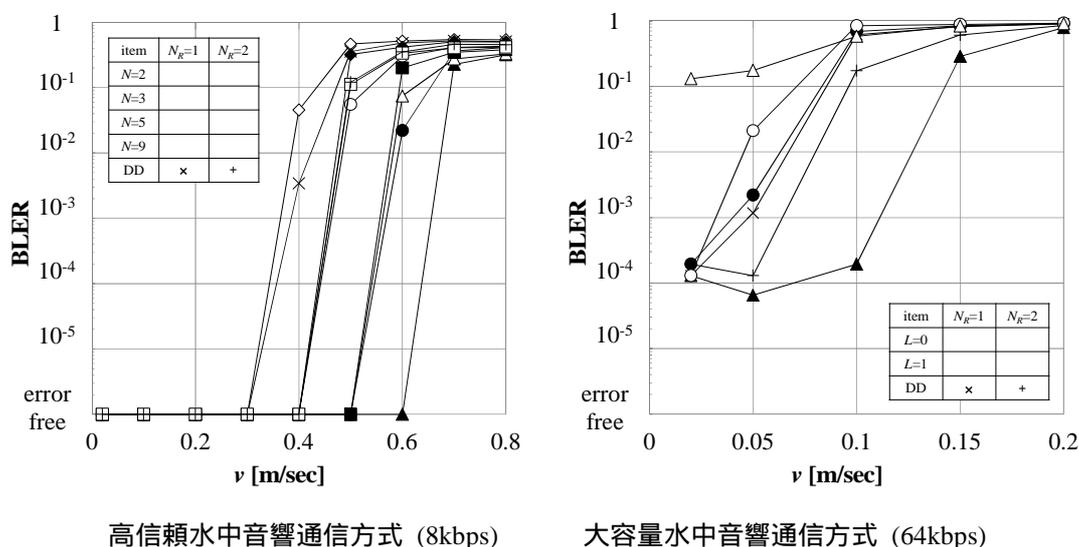


図 5 模擬ダブルセレクトティブ環境下での実験結果

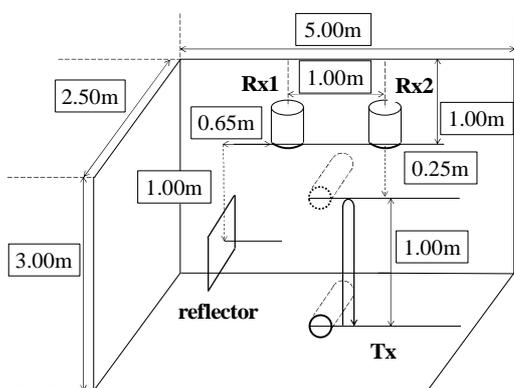


図 6 模擬ダブルセレクトティブ環境



図 7 長距離試験環境

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 9 件)

下村和輝, 久保博嗣, “軟判定出力 Per-Survivor Processing による予測形 MLSE の評価,” Journal of Signal Processing, vol. 23, no. 3, pp. 105-114 (2019), 査読有,

DOI: <https://doi.org/10.2299/jsp.23.105>.

竹村真志, 塚本圭哉, 吉井綸太郎, 高橋拓也, 久保博嗣, “マルチキャリア伝送路予測

Per-Survivor Processing 多重遅延検波のためのオフライン水中音響ソフトウェアモデム,”
Journal of Signal Processing, vol. 23, no. 3, pp. 115-126 (2019), 査読有,

DOI: <https://doi.org/10.2299/jsp.23.115>.

T. Mori and H. Kubo, “Double decision-feedback multiple differential detection for double differential encoding,” IEICE Communications Express, vol. 8, no. 5, pp. 147-152 (2019), 査読有,

DOI: <https://doi.org/10.1587/comex.2019XBL0019>.

K. Shimomura, S. Nagano and H. Kubo, “A list Viterbi equalizer with simple liner channel interpolation for acoustic communications,” IEICE Communications Express, vol. 8, no. 4, pp. 110-115 (2019), 査読有,

DOI: <https://doi.org/10.1587/comex.2019XBL0011>.

森田宗一郎, 村山陽寛, 湯本菜々瀬, 中務光基, 竹村真志, 久保博嗣, “変形 M 系列による 2 重選択性音響伝送路用チャネルサウンダ,” Journal of Signal Processing, vol. 23, no. 1, pp. 23-34 (2019), 査読有,

DOI: <https://doi.org/10.2299/jsp.23.23>.

N. Yumoto, T. Mori, T. Yamagishi, K. Shimomura and H. Kubo, “Generalization of channel estimation weights for multiple differential detection based on per-survivor processing,” IEICE Communications Express, vol. 7, no. 12, pp. 432-437 (2018), 査読有,

DOI: <https://doi.org/10.1587/comex.2018XBL0112>.

村山陽寛, 森田宗一郎, 相澤大, 上田俊一, 市川貴英, 久保博嗣, “市販の音響電子機器を用いた水中音響通信用チャネルサウンダとそのフィールド評価結果,” Journal of Signal Processing, vol. 21, no. 3, pp. 97-107 (2017), 査読有,

DOI: <https://doi.org/10.2299/jsp.21.97>.

H. Kubo, T. Yamagishi and T. Mori, “Non-coherent MIMO of per transmit antenna differential mapping (PADM) employing asymmetric space-time mapping and channel prediction,” IEICE Transactions on Communications, vol. E100-B, no. 5, pp. 808-817 (2017), 査読有,

DOI: <https://doi.org/10.1587/transcom.2016EBP3162>.

T. Mori, T. Yamagishi, A. Murayama and H. Kubo, “Differential MIMO spatial multiplexing employing PADM based on channel prediction for fast time-varying channels,” Journal of Signal Processing, vol. 21, no. 2, pp. 53-62 (2017), 査読有,

DOI: <https://doi.org/10.2299/jsp.21.53>.

[学会発表] (計 30 件, 内招待講演 2 件, 国際会議 1 件)

久保博嗣, 竹村真志, 塚本圭哉, 吉井綸太郎, 高橋拓也, 佐野隆貴, “水中音響通信モデムの実験性能評価結果～音響実験水槽と海洋浅瀬音響環境における性能比較～,” 2018 年電子情報通信学会技術研究報告 (無線通信システム), (2019).

久保博嗣, 竹村真志, 塚本圭哉, “水中音響通信のための 2 重選択性チャネルシミュレータ～キャリア周波数帯サンプリング性能ベンチマークチャネルモデル～,” 2018 年電子情報通信学会技術研究報告 (無線通信システム), (2019).

久保博嗣, “[招待講演] 移動体音響通信に適した無線伝送方式,” 平成 30 年電気関連学会関西連合大会, (2018).

K. Shimomura and H. Kubo, “Multiple differential detection with channel prediction employing softoutput per-survivor processing,” Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference 2018 (APSIPA2018), (2018).

久保博嗣, “[招待講演] 厳しい 2 重選択性伝搬路に適した無線伝送方式～高速移動体通信と移動体音響通信の高信頼化に向けて～,” 2018 年電子情報通信学会技術研究報告 (コミュニケーションクオリティ), (2018).

他

[その他]

ホームページ等

水中音響通信に関する研究 (研究成果)

<http://www.ritsumei.ac.jp/~kubohiro/wspl-uwac.pdf>