

1. 評価対象研究課題

- (1) 研究課題名：Time Reversal による長距離 MIMO 音響通信の研究
- (2) 研究代表者：海洋研究開発機構 志村 拓也
- (3) 研究期間：平成30年度～令和4年度

2. 終了評価の実施概要

日時：令和5年10月20日

場所：TKP 新橋カンファレンスセンター

評価委員：未来工学研究所 理事長、上席研究員／東京大学 名誉教授

平澤 洽 (委員長)

神奈川大学 名誉教授

遠藤 信行

情報通信研究機構 主席研究員

門脇 直人

東京理科大学 工学部 電気工学科 嘱託教授、東京理科大学

名誉教授

村口 正弘

元東海大学 教授

森本 雅之

(委員長以外は五十音順・敬称略)

3. 研究と成果の概要

研究の概要

海中の音響通信は、距離に対して通信速度がおおよそ反比例する関係にあり、水平方向のマルチパス環境においても、先行研究などの事例では、その性能は $40\text{kbps}\cdot\text{km}$ 程度に留まっている。これに対して、本研究では、 2kHz 帯、 4kHz 帯、 6kHz 帯、 10kHz 帯の送波アレイを用いた水中音響 MIMO 通信の実証試験を5種類の海域で行い、いずれかの海域及び帯域において、 $400\text{kbps}\cdot\text{km}$ 以上の通信を達成することを最終目標とする。

成果の概要

異なる5か所の海域において、計7回の実海域における実証試験を行い、福島沖、高知沖の試験において $400\text{kbps}\cdot\text{km}$ を上回る指標を達成した。また、目標値に及ばなかった試験においても従来の研究例と比較して、長距離かつ高速な通信を実証することができた。水中音響 MIMO 通信技術の成立要件である受波アレイによる空

間多重処理として Adaptive Passive Time Reversal (APTR) アレイ信号処理と適応等化器 (Decision Feedback Equalizer, DFE) を組み合わせた受信信号処理法を提案し、同条件で収録したデータを用いた比較において、従来技術に対して飛躍的な性能向上が果たされることを確認した。

4. 終了評価の評点

A 十分な研究成果をあげた。

5. 総合コメント

海中での高伝送速度通信の実現を目指し、新たに着想された MIMO 方式を用いて、限られた条件で従来の実績を大幅に上回る目標値を達成した。また、海中での音響通信は複雑な対象であることから、目標通りの成果が得られなかった海洋実験も見られたが、それでも従来法に比べればよい結果が得られていて、第一段階としては妥当であった。

得られた海洋実験のデータには意味があり、結果の今後の解析により、よりよい通信方式の確立が期待できる。適応対象範囲を広げる場合に必要な検討課題を明らかにするなど、今後の成果発信の仕方を検討されることを期待する。

6. 評価の観点ごとの評価結果と個々の委員によるコメント

6-1. 研究開始時に設定した研究目標の達成度 (主題的成果)

計画当初、「400 kbps×km の通信速度×距離指標をいずれかの海域・周波数帯で突破すること」を目標として研究を開始した。本研究の要素技術課題として①チャンネル間干渉・シンボル間干渉の抑制、②時変動性への対応、③プローブ信号の改善、を挙げて、それぞれ、①APTR による干渉抑制、②リサンプリング処理と DFE による時変動チャンネル等化、③新たに考案した伝搬応答計測方法 (特許取得) により、問題解決に取り組んだ。結果として、複数の海域条件で研究目標値を達成することができた。また、高知沖浅海域試験においては、90%以上のデータにおいて 600 kbps×km の指標を達成する結果が得られるなど、当初の目標値を大きく超えた結果を得た。

【個々の委員によるコメント】 (主題的成果)

- ・ 目標の 400 kbps×km、誤り率 0.001 以下は、半数の測定海域でほぼ達成した。
- ・ 実験結果の通信速度は世界的に注目を浴びた。
- ・ 将来の海洋内遠距離通信技術の基礎知識を得た。
- ・ 海中高速通信における阻害要因を明確化した。
- ・ 通信方式の評価としては、実験結果を用いて、通信環境に対する設計手法を

明確化する必要があるのではないか。

- ・従来にない高速通信が達成できたが、その達成できる条件が明確になっていない。

6-2. 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）

前述の通り、本研究の提案手法によって要素技術課題を克服して目標とする通信性能指標を達成したが、さらなる性能向上に向け、6-1.で示した①②③各々に対して以下の取り組みを行った。

- ①部分アレイ処理を用いた干渉抑制手法。
- ②スパース正則化やカルマンフィルタアルゴリズムの改良によるチャネル等化性能の向上。
- ③干渉抑制処理を逐次的に行うための信号設計。加えて、チャネル等化後の処理結果に対して、誤り訂正符号の検討。さらに、誤り訂正符号の一種である **Low Density Parity Check** と **DFE** を接続した等化手法の考案。

また、本研究で収録したデータから様々な帯域・海域における伝搬応答データを蓄積できたことは非常に大きな成果の一つであり、その一端として伝搬環境の統計的情報と通信信号処理性能の関連性を提示し、伝搬応答解析による通信性能予測の可能性を示した。

また、他の研究資金によって、相対速度 10 ノットを超える洋上-海中自動航走体間の高速度移動体通信の実証、有人潜水艇-洋上船舶間の高速度通信装置開発、洋上-複数海中自動航走体間通信装置開発などの成果を得ているが、これらの研究開発成果には、前述の伝搬応答データの蓄積も含め、本研究において得られた知見が少なからず応用された。

6-3. 他の者により派生した成果（間接的成果）

デジタル水中音響通信研究の世界的権威である米国 North Eastern 大学の Stojanovic 教授らと研究交流を行い、OFDM 方式を用いた MIMO 通信信号処理手法の検討を行って海域試験データを評価し、2 編の国際学会発表を行うことができた。従来技術である OFDM 方式を用いた MIMO 通信手法の適用性を示すことができたとともに、同一条件で取得したデータ処理結果の比較より本研究の提案手法がより優れた通信性能を示すことを明らかにした。

6-4. 成果全体として特筆すべき内容

2022 年に実施した高知沖浅海域試験において、600 km×kbps、BER < 0.001 の指標を全受信データのうち 93%以上の割合で達成することができた。また、一部のデータにおいては、900 kbps×km の指標を達成するものも確認できた。

要素技術課題の解決のため、プローブ信号の新規考案やチャネル等化技術の改良

に取り組み、通信性能向上へ寄与することが確認された。

学会発表等を通じて研究コミュニティからの反響も多く受けており、期間中に実施した North Eastern 大学との共同研究に加えて、本研究で取得した実験データをもとにいくつかの国際的な共同研究を今後予定している。

6-5. 論文（投稿中のものも含む）、学会発表等

雑誌論文 2 件

査読・審査付学術会議論文 6 件

査読・審査なし学術会議論文 5 件

解説記事 1 件

招待講演 3 件

6-6. 特許（出願中のものも含む）

出願中： 国内 1 件

【個々の委員によるコメント】（論文（投稿中のものも含む）、特許、学会発表等）

- ・相応な成果は認められる。
- ・実験結果のより深い検討解析結果を公表（学会発表等）することを望む。

6-7. 発展性と波及効果

水中音響通信従来技術における通信性能限界を 10 倍以上上回る通信手法を実海域環境において実証したことは、海中無線通信ネットワーク技術の性能向上に直接的に寄与するといえる。本研究の副次的成果として挙げた自動航走体間の通信技術と組み合わせることで、海洋無線通信ネットワークを構築することができ、我が国の広域な海洋環境調査・監視システム構築へ貢献すると期待される。

また、本研究では実海洋環境の 10~25 km の水平距離において、5 m 程度の分解能で音源分離することに成功しており、このような長距離・高分解能の空間多重信号処理手法を音響測位・イメージング技術へと応用できる可能性がある。

【個々の委員によるコメント】科学技術への波及効果

- ・複数の海域における通信環境のデータが豊富に取れたことは、多様な研究の基礎データとして有益である。

6-8. 効率的な研究実施体制とマネジメント

防衛装備庁ならびに関連業務委託会社との調整窓口、プロジェクトの経費執行管理者等に担当者を専任で配属し、事務管理業務の効率化を図った。また、実験に際しては海域調整担当部署協力のもと、COVID-19 の蔓延に伴う研究航海の日程アレン

ジに伴う海域の調整や、各試験の実施候補海域における漁業調整などを、研究計画全体を通して実施した。

研究遂行のための人的充足のため、新規公募により技術者 1 名研究補助員 1 名をプロジェクトにおいて雇用した。加えて、実験作業等において一時的に人的リソースが必要となった際には、企業への依頼によって作業人員を確保した。また、国内外の有識者と交流し、特に、水中音響通信研究の第一人者である Milica Stojanovic 氏との共同研究により、従来手法による MIMO 通信の実験評価を行った。

6-9. 研究推進時に生じた問題への対応

海域調整に不調が生じた際には代替試験海域の選定・調整等に尽力した。具体的には、COVID-19 蔓延に伴う海域の再選定や、漁業組合が提示する試験実施条件を満たすために試験系の改良を行うなどした。また、油価変動によって試験費用が圧迫された際には、航海スケジュールや使用船舶の再アレンジを行うなどの調整を行った。

6-10. 経費の効率的な執行

本委託研究においては、大規模な実験装置の製作と、これを用いた複数の海域試験を実施した。実験装置の製作においては、開発環境整備・人的リソースなどの費用削減のため、適宜外注によって対応した。また、海域試験においては海洋研究開発機構が所有する船舶を利用することで、民間の船舶運航会社への外注と比べて経費を圧縮することができた。また、担当事務局による発注プロセス管理により、適切な予算執行を推進できたと考える。