

令和 5 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 02301

研究開発課題名 海中・水中 IoT における無線通信技術の研究開発

(1) 研究開発の目的

Beyond 5G 時代には陸上に整備される IoT 環境を海中・水中にも拡張するための革新的な電波通信技術を開発し、海中土木作業機械、AUV、海中ドローン、センサ群、カメラ等の IoT 機器からのデータ収集や遠隔操作を可能とし、運用コストの低減や作業の安全性に寄与することで、海中・水中での経済活動の拡大に貢献する。

(2) 研究開発期間

令和 3 年度から令和 6 年度 (4 年間)

(3) 受託者

国立大学法人九州工業大学<代表研究者>  
パナソニックホールディングス株式会社

(4) 研究開発予算 (契約額)

令和 3 年度から令和 5 年度までの総額 315 百万円 (令和 5 年度 126 百万円)  
※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

研究開発項目 1： 中距離電波伝搬の理論解析とアンテナの開発

- 研究開発項目 1-a) 海中・水中における電波伝搬の基礎評価 (九工大)
- 研究開発項目 1-b) 高効率なアンテナの開発と評価 (九工大・パナ)
- 研究開発項目 1-c) 海中・水中 MIMO 技術の開発と評価 (九工大・パナ)
- 研究開発項目 1-d) 大型水槽、海洋でのアンテナの評価 (九工大・パナ)

研究開発項目 2： 通信システム・装置の開発と評価

- 研究開発項目 2-a) 水中通信用通信装置の設計開発 (パナソニック)
- 研究開発項目 2-b) 近距離高速・長距離通信シームレス化 (パナソニック)
- 研究開発項目 2-c) 水中通信用通信装置の小型水槽評価 (九工大・パナ)
- 研究開発項目 2-d) 大型水槽におけるシステム評価 (九工大・パナ)
- 研究開発項目 2-e) 海洋・淡水湖での実証実験 (九工大・パナ)

(6) 特許出願、外部発表等

		累計 (件)	当該年度 (件)
特許出願	国内出願	7	1
	外国出願	5	5
外部発表等	研究論文	1	1
	その他研究発表	20	8
	標準化提案・採択	17	9
	プレスリリース・報道	5	3
	展示会	1	1
	受賞・表彰	1	0

## (7) 具体的な実施内容と成果

### 研究開発項目 1：中距離電波伝搬の理論解析とアンテナの開発

本開発項目は、中距離（4m 以内、1Mbps 以上）での海中通信技術の確立を行うものである。本年度は、海中における電波伝搬の特性評価、高効率アンテナの開発、海中・水中 MIMO 技術の基礎的開発を行った。以下に項目ごとの成果を記載する。

#### ■研究開発項目 1-a) 海中・水中における電波伝搬の基礎評価

- ① 海中アンテナから海上に漏洩する電磁界の簡易推定
  - ・海面に近い位置にあるハーフシースダイポールアンテナから海面、海上に発生する電磁界を簡易に推定する式を算出
  - ・海上への漏洩電磁界強度を考慮した送信機の出力電力調整に活用可能
- ② コンクリート壁面近傍でのラテラル波による伝搬に対する電磁界シミュレーション
  - ・大型水槽や岸壁近傍での通信を想定し、コンクリート壁面近傍にハーフシースダイポールアンテナを設置した場合の、コンクリートを介して伝搬する経路を電磁界シミュレータにより確認

#### ■研究開発項目 1-b) 高効率なアンテナの開発と評価

- ① アンテナの大型化により通信可能エリアを水槽全域に拡大
  - ・螺旋状アンテナ（海中ヘリカルアンテナ）、U 字アンテナの開発
  - ・大型海水水槽全域（縦横 5.4×深さ 4.8m）で通信可能となることを実証
- ② アンテナ間伝送特性改善のための効率改善回路の設計
  - ・使用帯域を限定することにより特定帯域の伝送特性を改善する回路の設計
  - ・アンテナ間距離が 4m 程度の場合は 2024 年度に実験を実施予定
- ③ 海中アンテナ間伝送特性を模擬したエミュレータの開発
  - ・ある距離に置かれた 2 つのループアンテナ間の伝送特性を模擬するエミュレータ回路を開発
  - ・通信機の通信モード設定確認や性能評価の簡易化を実現
- ④ アンテナ間伝送特性から Wavelet OFDM 通信速度の推定法の改良
  - ・昨年度開発した推定法に対し、外来ノイズや通信機内部ノイズを考慮した推定法に改良
  - ・上記、エミュレータと組み合わせた海中通信簡易評価系を構築

#### ■研究開発項目 1-c) 海中・水中 MIMO 技術の開発と評価：

- ① 海水水槽による 2x2 海中 MIMO 通信の基礎特性評価
  - ・送受信アンテナの位置ズレ、送信アンテナ間間隔を変化させた場合の MIMO 通信の評価を電磁界シミュレーションにより実施
  - ・MIMO 効果が大きなアンテナ配置を検討

#### ■研究開発項目 1-d) 大型水槽、海洋でのアンテナの評価：

- ① 大型海水水槽（縦横 5×深さ 4.8m）を用いた研究開発項目 1-b) 記載の大型アンテナの評価実施
- ② 30m, 100m の線状アンテナによる通信エリア拡大を実海域にて実証

## 研究開発項目 2 通信装置・システムの開発と評価

本開発項目は、Wavelet OFDM での高帯域通信やマルチホップ技術を活用した水中での長距離通信システムを構築することであり、本年度はその基本的な開発を行った。

### ■研究開発項目 2-a) 水中通信用通信装置の設計開発：

- ① 長距離モード（特に 1/64 モード）の機能実装および性能向上を達成
  - Wavelet OFDM の通信パラメータを 1/64 モードに合わせて調整し、ファームウェアの設定に追加。1/64 モード送信フィルタ、受信フィルタを 1/64 モードの通信帯域 32~500kHz に最適化。
  - 実際の海中通信で使用する通信端末とアンテナを用いて、陸上でのマルチホップ 10 ホップ通信を事前に確認。
  - 通信装置とアンブの結合による動作検証を実施
- ② 通信速度向上および通信安定化に関する以下の仕様完成と機能実装を達成
  - 時間スケジューリング、同期/非同期ブロードキャスト通信機能の通信装置への実装を実施  
時刻同期方式として採用した IEEE 1588-2019 処理を Wavelet 通信装置ファームウェアの基本機能としてライブラリ化。多台数マルチホップ時の同期安定化手段を検討し、IEEE 1588-2019 の通信モードとしてバウンダリークロックモードを導入。非同期ブロードキャストについても必要都度実装。
  - IEEE 802.1X のサーバー認証を組み合わせた Wavelet OFDM 通信ネットワークの認証方式の認証完了時間短縮に向けたシーケンス見直し及びチューニングを実施。
  - 遠隔監視システム（通信装置の保守、ネットワーク管理等を遠隔から行うためのシステム）を目的とし、機器側に IP スタックの搭載、ならびに WEB UI 機能を実装
  - AUV と接続するために、今年度はシリアル通信（SPI）インターフェースを実装し 1 対 1 での通信を実現
  - ハードが異なる場合の互換性、性能に関する最適パラメータの探索 として、DOF 通信時のシンボルビット、 $x-16$  以降のモードにおける位相ベクトル、各モードでの送信パワー最大値に関してチューニングを行った。
  - 通信速度向上および安定化を実現するその他の新規機能探索  
高域の減衰が大きい伝送路で通信速度を測定する際のサブキャリア毎の送信パワー割当てを検討し、物理速度計算のシミュレーションを実施。
- ③ IEEE 国際標準化で、IEEE SASB (Standards Board) により本技術が IEEE 1901c 承認
  - 本研究開発課題で開発している技術内容について順次提案書を作成し、WG において議論を実施（~2023 年 8 月）
  - 2023 年 8 月に IEEE P1901c の作業部会において、技術ドラフト(v1.0)が承認
  - 2023 年 12 月にスポンサー投票において、技術ドラフト(v1.2)が承認
  - 2024 年 2 月に IEEE SASB (Standards Board) において、本技術が IEEE 1901c として承認

### ■研究開発項目 2-b) 通信モード切替えのシームレス化：本内容の特許出願完了

- ① 近距離高速通信モードから長距離モードへの自動切替えについての機能を開発中
  - 任意の通信 CH で動き出した機器同士が、フレームをやりとりする仕組み
  - 通信 CH を評価し、結果を共有する仕組み
  - 評価結果をもとに、通信 CH を決定する仕組み
  - 決定した通信 CH を機器間で共有し、通信 CH を切替える仕組み

② 上記主たる機能のうち、4をIEEE1901c規格案として選定し、機能仕様書を作成。認証状態に遷移できるか否かを評価指標とするプロトタイプソフトを作成（上記1～4を実装）。実験室環境において、適切な通信CHを選択できることを確認した。また、通信信号の受信感度（RSSI）情報を評価指標の候補として選定し、実験室環境において、受信感度のATT減衰特性を通信CHごとに測定した。

#### ■研究開発項目 2-c) 水中通信用通信装置の小型水槽評価

研究開発項目 1 にて開発したアンテナ、および研究開発項目 2 にて開発した通信装置を結合し、直径 1.6m・深さ 1.6m の小型塩水水槽において、特性改善や通信装置の前段に広帯域低プリアンプを付加することで利得向上を検討。この実験ではプリアンプは適切に動作しているが、スイッチの 1MHz 以下の低い周波数で入力信号レベルが大きくなるとスイッチが歪むことがわかった。そのため歪の少ないスイッチを選択してシステムを設計・評価結果する予定である。

#### ■研究開発項目 2-d) 大型水槽におけるシステム評価

- ① 日本サルヴェージの 5m×5m×深さ 4.8m の大型塩水水槽内にて、研究開発項目 1 および 2 にて開発したアンテナおよび通信装置を、実際の AUV に搭載し、通信実験を実施。ループアンテナと通信装置 1/32 モードの組合せで、3.2m で 1Mbps を達成した。更に、マルチホップにより 3 ホップ、3.6m の通信も実現できた。
- ② AUV に通信装置およびアンテナを搭載し、AUV の LED の地上からの制御や、AUV 搭載カメラ映像の地上での視聴を実現した。また、水中においてダイバーにスマートフォンを所持して頂き、地上から海中のアンテナ経由のストリーミング動画視聴も実現した。

#### ■研究開発項目 2-e) 海洋・淡水湖での実証実験

沖縄県久米島において、実海域での AUV 運用を想定したデモンストレーション実験を実施した。AUV にアンテナ、通信装置および海中カメラを搭載し、海中に設置した線状アンテナとの間で、海中電波通信を行い、海中からの動画映像の取得を実施した。さらに海上の船上基地局および遠隔地（福岡県北九州市九州工業大学）から、海中電波通信による AUV の遠隔リモート操作にも実施した。実験により、AUV から発生するノイズが課題であることが分かった。

### (8) 今後の研究開発計画

#### ■研究開発項目 1：中距離電波伝搬の理論解析とアンテナの開発

本開発項目は中距離（4m 以内、1Mbps 以上）での海中通信技術の確立を行うものである。2024 年度は本年度開発した効率改善回路やインピーダンス変換回路により、4m で 1Mbps 以上の通信が可能であることを実験により示す。また、海面上を伝搬するラテラル波について、実海域において実験し伝送特性の変化を電磁界シミュレーションとともに検討する。

#### ■研究開発項目 2 通信装置・システムの開発と評価

Wavelet OFDM 技術の高帯域通信特性やマルチホップ技術を活用した水中での長距離通信システムの構築することを目標とする。最終年度は本機能の性能改善を行い、目標である 4m1Mbps 通信、およびマルチホップ 10 ホップ 10m 通信を実現させる。

来年度も引き続き、実海洋において、AUV の実動作を想定した、水中電波通信経由での海中カメラの映像を船上で視聴すること、および、船上および遠隔地から、海中電波通信経由で AUV 制御実験を行う実験を継続する。また、AUV のノイズ対策も実施し、通信性能向上を図る。