

令和 6 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 6 年度までの総額 420 百万円 (令和 6 年度 106 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	9	2
	外国出願	13	8
外部発表等	研究論文	3	2
	その他研究発表	26	6
	標準化提案・採択	19	1
	プレスリリース・報道	7	1
	展示会	2	1
	受賞・表彰	2	1

(7) 具体的な実施内容と成果と最終成果

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

本研究開発項目では、中距離電波伝搬の理論解析とアンテナの開発の研究開発を行った。以下に示す研究を実施し、本項目の最終目標である、通信距離 4m で 1Mbps の通信を実海域で達成した。

■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

下記の項目について、理論的考察、解析、実験を行い海中電波通信メカニズムの知見を得た。

- ① 海中・水中での電波伝搬メカニズムの基礎検討
- ② 海中磁界強度の解析
- ③ 海面・水面近傍のラテラル波の解析と評価
- ⑤ 海上に漏洩する磁界の評価
- ⑥ 海中・水中での電波伝搬の実験システムの設計・製作

■研究開発項目 1-b) 高効率なアンテナの開発と評価

海中通信の特性改善のため、ループアンテナの大型化、ヘリカルアンテナ、U 字型ハーフシースダイポールアンテナ、ワイヤーアンテナ（海中漏洩同軸アンテナ）を開発し、それぞれ伝送特性の向上や通信エリア拡大の可能性を示した。

■研究開発項目 1-c) 海中・水中 MIMO 技術の開発と評価

ループアンテナ 2 個を用いた 2×2MIMO の評価・検討を行い、MIMO 通信により独立な伝送路を構築することで、近傍のアンテナからの干渉波による影響を軽減し、海中電波通信でも通信容量を増加することが可能であることを示した。

■研究開発項目 1-d) 大型水槽、海洋でのアンテナの評価

日本サルヴェージ（株）大型水槽、岡山県笠岡市の白石新港、沖縄県久米島町近海において実験を実施した。水中通信でよく用いられるループアンテナ、ハーフシースダイポールアンテナに加えて、生け簀、洋上風力発電などでの利用を想定したヘリカルアンテナ、深さ方向の通信エリア拡大を想定した U 字型ハーフシースダイポールアンテナおよび平面方向の通信エリア拡大を想定したワイヤーアンテナ（海中漏洩同軸アンテナ）を考案し通信可能範囲の拡大を実現した。

研究開発項目 2 通信装置・システムの開発と評価

研究開発項目 2 では、WaveletOFDM 技術を用いた広帯域通信装置の研究開発を行った。以下に示す研究を実施し、本項目の最終目標である、マルチホップ 10 段以上で通信距離 10m 以上の通信を実海域で達成した。

■研究開発項目 2-a) 水中通信用通信装置の設計開発

海中通信に適した広帯域通信を実現するため、①周波数の低周波化にシフトする帯域圧縮モードの開発、②マルチホップ通信による海中での長距離通信、③アンプ改造など通信速度向上および通信安定化のしくみの導入を行った。

また、これらの通信技術の特許化すると共に、世界初の海中電波通信規格「IEEE 1901.c」の規格化を達成した。

■研究開発項目 2-b) 通信モード切替えのシームレス化

海中移動体通信の実用性を高める標記システムの開発を行い特許出願を完了。

■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-b)で開発した、3 種類の海中アンテナを用いて $\phi 1.6 \times$ 深さ 1.6m の塩水小型水槽で通信速度性能を確認した。通信速度は 2 組の直径 1m ループアンテナを用いて 1/16 帯域圧縮モードの UDP で 1Mbps / 4.7m を達成した。

■研究開発項目 2-d) 大型水槽におけるシステム評価

大型海水水槽および大型淡水水槽におけるシステム評価を行い、研究開発項目 2-e に示す最終実験の基礎評価をおこなった。

■研究開発項目 2-e) 海洋・淡水湖での実証実験

実海洋（岡山県白石島および沖縄県久米島）での実験を行い、最終的に下記の海中電波通信性能の達成を証明した。

- 直径 2m と 1m のループアンテナを用いた実験で 1 Mbps/4.2m を達成
- 直径 1m のループアンテナ 11 個を用いてマルチホップ 10 段で 10m の通信に成功
- 長さ 30m 程度のワイヤーアンテナを海中に配置して、ワイヤーアンテナ近くにループアンテナを距離 1m に配置すれば 1 Mbps 以上で通信できることを確認した。

(8) 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

■計画

本研究課題にあげた技術目標は達成し、標準化については当初予定を大幅に前倒して達成することができた。しかし、アウトカムに挙げた水中構造物のメンテナンスや養殖業等の IoT 化の実現には、まだ研究開発で埋めるべきギャップが存在する。その中で最も重要な技術課題が通信可能領域を面で確保する技術の開発であると分析した。

本研究課題においては、海中での固定アンテナ間の通信を取り扱ったが、通信領域を点から面に拡張し海中移動体との高速電波無線通信を実現することで、アウトカムに挙げたアプリの実現に大きく前進することとなる。そのため、九州工業大学およびパナソニックホールディングス株式会社に加えて連携部門を増やして、海中移動体の協調行動を実現する海中無線通信技術の研究に取り組む。ここでは、上記した面の海中通信領域すなわち海中ホットスポットの構築と海中移動体間的高速通信による協調行動を実現する。また空気中とは異なる海中電波無線通信の可能性を広げるために海中ネットワークレイヤーでの最適化研究も行う。

このような研究開発を通して、洋上風力発電など海中構造物のメンテナンスなどを実現していく。本研究の社会実装における製品化としては海中電波無線通信機があるが、真の狙いは海中構造物のメンテナンスの IoT 化などサービス事業と考えている。そのため、本研究課題の成果も含めて上記したユースケースの可能性を、積極的に对外発表を行っていく予定であり、その第一弾として 2025 年 4 月から開催される大阪万博における「Beyond 5G ready showcase」において本研究成果の展示を行う。

■展望

海中電波無線通信技術の実用化に向けた構想は上記した通りであるが、海中無線通信の世界には、音響通信および光通信がある。本研究開発のベンチマークをする中で、電波を含めた 3 方式は優劣を競うものではなく、互いに補完し合う技術であることが明確になってきた。3 つの方式の学術的研究は、それぞれのソサエティで推進されているが、3 方式の学術的な横のつながりはほとんど行われていない。本研究課題を進める中で 8 回の講演会を行い、それぞれの方式の最新技術トピックなどを共有・議論してきた。今後は、このような横連携の場を学会の研究会に移して実施していきたいと考えている。

標準化については、今回、世界で初めての海中通信の国際標準規格化を日本発で達成することができたが、この幹を太くしていく方針で本技術の国際競争力を高めていく。具体的に戦略を記すことはできないが、上述したように、音響通信、光通信とのハイブリッド化や周波数帯域の可変性などが重要になってくる。

九州工業大学およびパナソニックホールディングス株式会社は、アウトカムに記したように民生利用を目的とした研究開発を進めているが、海中電波通信技術への期待はこの範囲にとどまらない。日本は排他的経済水域と領海の面積が世界第 6 位の海洋大国であるが、同時に全ての国境を海に持つ国家であるため、海中無線通信技術は安全保障や経済安全保障の面でも国家および国民生活を支える技術であると言える。その意味においても、本研究開発の成果を今後も様々な場でアピールしていく。