

海中ロボット協調に向けた海中電波通信の マルチホップ通信制御手法に関する研究

濱田 海晴^{1,a)} 野林 大起² 池永 全志² 塚本 和也³

概要: 海洋インフラの点検・保守には高コスト・高リスクが伴い、海中ロボットの協調作業が有力であるが、水中通信網の構築が課題である。本研究は、多端末・マルチホップ環境をパケットレベルで評価するシミュレーション基盤を構築し、海中電波通信技術である Nessum の PHY レート近似と海中電波減衰モデルの実装により距離依存の性能変化と限界付近のばらつきを再現した。さらにマルチホップ通信時に発生する恐れのある隠れ端末問題による通信性能の低下を示し、RTS/CTS の有効性と、Nessum のモード切り替えにより RTS/CTS のオーバーヘッドを抑制できることを明らかにした。

キーワード: 無線・モバイルネットワーク - すべて、トラフィック制御・解析、ネットワークシミュレーション

Research on Multi-Hop Communication Control Methods for Underwater Radio Communication Toward Underwater Robot Collaboration

KAISEI HAMADA^{1,a)} DAIKI NOBAYASHI² TAKESHI IKENAGA² KAZUYA TSUKAMOTO³

Abstract: Inspection and maintenance of marine infrastructure involve high costs and risks, making cooperative operations by underwater robots a promising approach. However, establishing an underwater communication network remains a challenge. This research developed a simulation platform to evaluate multi-terminal, multi-hop environments at the packet level. By implementing Nessum's PHY rate approximation and an underwater radio wave attenuation model, it reproduced distance-dependent performance variations and fluctuations near the communication limit. Furthermore, it demonstrates the potential degradation in communication performance due to the hidden terminal problem that may occur during multi-hop communication. It clarifies the effectiveness of RTS/CTS and shows that switching Nessum modes can suppress the overhead of RTS/CTS.

Keywords: Wireless/Mobile Networks - ALL, Traffic control/analysis, Network simulation

1. はじめに

日本は陸地面積が限られる一方で、領海および排他的経済水域を含む広大な海域を有し、海洋の利活用と保全是国の持続的発展に直結する重要課題である。特に、港湾・沿岸・河川といった人間活動に近い海域では、物流・産業基盤を支える施設が集中しており、構造物の点検・維持管理や環境モニタリングの需要が継続的に発生する [1]。しか

¹ 九州工業大学大学院情報工学府
Graduate School of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology

² 九州工業大学大学院工学研究院
Faculty of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology

³ 九州工業大学大学院情報工学研究院
Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology

^{a)} hamada.kaisei800@mail.kyutech.jp

し現場では、インフラ老朽化への対応、災害発生時の迅速な状況把握、海中設備の保守作業など、短時間で確実な意思決定を要するタスクが増えている一方、作業は潜水や船上作業に依存しやすく、安全面・コスト面の制約が大きい。これらの課題は作業員のリスクだけでなく、作業可能時間や天候・海象条件への依存を通じて、点検頻度や保守品質にも影響し得る。このような課題に対して、海中ロボットや海中ドローンを用いた無人化・遠隔化は有力な方向性である。しかし海中環境では通信インフラが脆弱であり、無人機の遠隔操縦、複数機の協調、センサ群からのデータ収集を支えるネットワーク構築が困難である点が導入の障壁となる。現状の海中無線通信は音響や光が中心であるが、音響は利用可能帯域が狭く実用データレートが 100 kb/s 未満になり得る一方、光は濁り等の影響を受けやすく適用範囲が限定されるなど、方式ごとに顕著な制約が存在する。以上を踏まえると、浅海・港湾・河川といった実利用ニーズの高い領域において、安定的に利用可能な海中無線通信を基盤として通信ネットワークを構築し、海中移動体の協調行動を実現することは、現場の省人化・安全性向上・保守効率化に資する重要な研究課題である。

本研究は、実機評価ではコストや安全性、実験規模の制約により検証が困難な条件についてシミュレーションにより再現・比較評価を行い、現時点の実機では未達の環境に対する設計上の示唆を与えることで、海中無線通信技術の更なる発展に寄与する。さらに、海中電波伝搬モデルを搭載したシミュレータを作成し、海中ロボットによる協調行動時の多端末・マルチホップ環境における性能劣化要因をパケットレベルで定量化し、通信領域拡張および運用設計を行うための評価基盤を構築し、マルチホップ環境における性能劣化に対する改善策の提案を目的とする。

2. 海中無線通信技術

海中での作業効率向上および安全性確保のためには、海中ロボットをリモート操縦し、観測・点検・作業を支援する技術開発が重要である。これを実現する上で、海中における無線通信は中核要素であり、音響通信、光通信、電波通信が代表的な手段として位置づけられる。音響通信および光通信については先行研究が多く、海中ロボット運用の基礎的検討が進められている一方、電波通信は海水中での伝搬損失が極めて大きく、広域かつ高速な海中電波通信は未開拓な領域として残されている。

Nessum (旧称:HD-PLC) [2], [3] は、Nessum WIRE (専用線・電力線などの配線を用いる通信) と、Nessum AIR (空中・水中・海中の無線) を展開する通信技術である。PHY 層の通信方式として Wavelet OFDM (Wavelet Orthogonal Frequency Division Multiplexing) を採用している。OFDM において各サブキャリアの直交化に Wavelet 変換を適用し、冗長信号を付与することなくサブキャリア

のサイドロープレベルを低減することで、深いノッチ形成と高効率伝送を可能としている。さらに、この Wavelet OFDM は国際標準規格 IEEE 1901 にも採用されている技術として位置づけられている。

Nessum では、Master がビーコンフレームを周期的にブロードキャストし、QoS 等の制御管理を行う方式も示されており、アクセス制御として CSMA/CA を用いて、衝突のないアクセスを実現している。さらに、誤り訂正やサブキャリアごとの情報量最適化など、伝送路変動を前提とした機能も整理されている。

3. 先行研究

九州工業大学とパナソニックホールディングス株式会社が実施主体となり、Beyond 5G 時代に陸上 IoT を海中・水中へ拡張するための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、カメラ等からのデータ収集や遠隔操作を可能にすることで、運用コスト低減と安全性向上に寄与することを目的として研究が行われた [4]。成果として、実海域で通信距離 4m において 1Mb/s を達成したと報告された。

この先行研究では、実利用で想定する海中構造物メンテナンスや養殖業等の IoT 化の実現には、埋めるべきギャップがあると整理されている。特に重要な技術課題として、通信可能領域を「点」ではなく「面」で確保する技術の開発が挙げられている。さらに、固定アンテナ間通信から、海中移動体との高速電波無線通信、海中移動体間の高速通信による協調行動、海中ネットワークレイヤでの最適化研究へ拡張していく必要性が課題として示されている。

4. 海中電波通信シミュレーション

4.1 シミュレータ

本研究は、海中ロボットの協調行動を想定した多端末・マルチホップ環境において、通信モード切替え、伝搬損失(周波数依存減衰)、および隠れ端末・RTS/CTS 等の MAC 挙動が通信性能へ与える影響をパケットレベルで評価することを目的とする。そのため、シミュレータには (i) 無線プロトコルの実装粒度、(ii) 伝搬モデルの実装容易性、(iii) 大規模・多条件評価の運用性が求められる。

本研究では、(1) 海中環境の周波数依存減衰を伝搬モデルとして実装し、(2) 通信モード (PHY レート相当) を切り替えながら、(3) 隠れ端末や RTS/CTS 等の MAC 挙動を含めてパケットレベルで性能を評価する、という要件を同一基盤上で反復的に検証できることを重視した。

Scenargie は無線ネットワークシミュレータとしての枠組みが整理されており、さらに GIS データ管理および RF 伝搬解析をパケットレベルシミュレーションへ統合する設計が明示されているため、海中減衰モデルやシナリオ

条件（ノード配置・距離）を一体として扱いつながら評価を進めやすい。その結果、本研究の目的である、実機では検証が難しい多条件（距離・モード・干渉条件）を体系的に整理し、協働行動時の設計指針につながる性能評価を、実装・運用の両面で現実的な工数で実施可能であると判断し、Scenargie[5]を採用した。

本研究では、Scenargie シミュレータにて Nessum の電波通信時の海中減衰と電波通信速度を再現した。

4.2 海中電波減衰の再現

Scenargie には海中電波減衰モデルは存在しないため、新たに海中での電波伝搬モデルを実装した。

水は高い比誘電率と導電率を有するため、水中における電磁波の伝搬特性は空気中とは異なり、大きな減衰が生じる。海水と淡水では導電率のみが異なるが、本研究では海水中における電磁波の伝搬モデルを実装した。

海水中の電波伝搬損失算出式の導出において Seawater Short-Range Electromagnetic Wave Communication Method Based on OFDM Subcarrier Allocation[6] を参考にした。海水中における電磁波の伝搬定数 [7] は式 (1) で表される。

$$\gamma = \omega \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} = \alpha + j\beta \quad (1)$$

このとき、 $\omega = 2\pi f$ (f は電磁波の伝搬周波数)、 $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$ で誘電率、 $\mu = \mu_0\mu_r$ で透磁率、 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (H/m) で真空の透磁率、 σ は導電率である。

複素伝搬定数 γ は減衰定数 α と位相定数 β から構成され、その式は以下のように得られる。

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega^2\mu\varepsilon}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} - 1} \quad (2)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega^2\mu\varepsilon}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1} \quad (3)$$

周波数が $f \ll 887\text{MHz}$ を満たす場合、海水は良導体となり、減衰定数と位相定数はほぼ等しくなる。そのため式 (2) と式 (3) は以下のように簡略化できる。

$$\alpha = \beta \approx \sqrt{f\pi\mu\sigma} \quad (4)$$

式 (4) から、海水中の電磁波の減衰定数と位相定数はともに周波数に関係しており、周波数の増加とともに増加するため、より低周波数が好ましいことが分かる。また、本研究で用いる Nessum の周波数は $f \ll 887\text{MHz}$ を満たすことから、式 (4) の近似との整合もある。

海水中の電磁波の波長は、式 (5) で表される。

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = 2\sqrt{\frac{\pi}{f\mu\sigma}} \quad (5)$$

受信電力はフリスの伝達公式 [8] より、次式で表される。

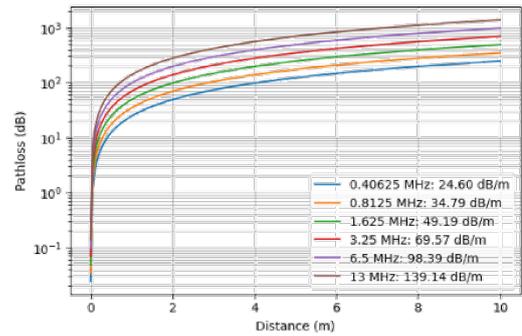


図 1 Nessum の各モードにおける中心周波数の伝搬損失

Fig. 1 Propagation Loss at the Center Frequency in Each Mode of Nessum

$$P_r = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 P_t G_T G_R |A|^2 \quad (6)$$

P_t は送信電力、 P_r は受信電力、 G_T は送信アンテナの利得、 G_R は受信アンテナの利得、 $A = \frac{|E|}{|E_0|}$ は減衰係数である。

電磁波が $+Z$ 方向へ伝搬する場合、 $E = E_0 e^{-\alpha z - j\beta z}$ であるので、

$$[A]_{dB} = 20 \log e^{-\alpha z} = -20\alpha z \log e \quad (7)$$

送信アンテナの入力電力と受信アンテナの出力電力の比は、水中伝送損失 L と定義され、dB で表される。アンテナ装置の影響を考慮しない場合、 $[G_T]_{dB} = [G_R]_{dB} = 0$ となる。これはチャネルの電力伝送、すなわち水中経路損失を反映する。

$$L_p = 10 \log \left\{ \left(\frac{4\pi d}{\lambda |A|}\right)^2 \frac{1}{G_T G_R} \right\} = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) - [A]_{dB} \quad (8)$$

式 (7) における $z = d$ は伝搬距離を示す。式 (5) と式 (7) を式 (8) に代入することで、経路損失の式が得られる。

$$L_p = 6.021 + 8.686\alpha d + 20 \log(\beta d) \quad (9)$$

本研究では、式 (9) を海中における電波の伝搬損失関数とし、Scenargie のカスタム伝搬モデルに実装した。

Nessum の海中減衰計算は式 (9) を用いて、Nessum の各モードごとに規定される代表周波数として、モードの中心周波数を用いて減衰量を算出した。具体的には、各モードに対応する中心周波数を伝搬損失式 (4) の f に代入し、得られた損失値を当該モードのリンク損失として適用した。これにより、モード（周波数設定）の違いが海中伝搬損失へ与える影響を、モデル上で一貫した手順により反映できる。図 1 は、各モードの中心周波数を代入したときの伝搬距離とその時の伝搬損失値の関係である。

4.3 電波通信速度の再現

本研究では、Nessum の MAC 層におけるアクセス制御方式が CSMA/CA である [2], [3] ことから、その挙動を

模擬するために無線 LAN 規格 IEEE 802.11ac を用いた。Nessum における電波通信 (標準周波数 2-28MHz) の PHY データレートは、無線 LAN 規格 IEEE 802.11ac (5GHz 帯) の MCS 設定により近似的に再現した [9]。Nessum のモード別 PHY レートは、1/1 モード 220Mb/s, 1/2 モード 110Mb/s, 1/4 モード 55Mb/s, 1/8 モード 27.5Mb/s, 1/16 モード 13.7Mb/s, 1/32 モード 6.8Mb/s である。これらに対し、本研究では 802.11ac の帯域幅 (20MHz または 40MHz) および変調方式・符号化率 (MCS) を調整し、対応する通信レートが近傍となるよう設定した。

具体的には、1/1 モード (220Mb/s) の再現として、20MHz チャンネルを 2 本用意しチャンネルボンディングにより 40MHz とした上で、256QAM (符号化率 0.83) を用い、伝送レート 200Mb/s を設定した。1/2 モード (110Mb/s) の再現では、同様に 40MHz とし、64QAM (符号化率 0.67) で 120Mb/s を設定した。1/4 モード (55Mb/s) の再現では 20MHz チャンネルを 1 本用意し、64QAM (符号化率 0.67) で 57.8Mb/s を設定した。さらに、1/8 モード (27.5Mb/s) の再現では 20MHz, 16QAM (符号化率 0.5) で 28.9Mb/s を設定した。1/16 モード (13.7Mb/s) の再現では 20MHz, QPSK (符号化率 0.5) で 14.4Mb/s を設定した。1/32 モード (6.8Mb/s) の再現では 20MHz, BPSK (符号化率 0.5) で 7.2Mb/s を設定した。

以上により、Nessum で定義されるモード別 PHY レートを、802.11ac の MCS および帯域幅の組合せとして近似し、後述の性能評価を同一シミュレーション基盤上で比較可能とした。なお、本研究では MAC 競合挙動評価を主目的としており、海中通信に起因する物理層エラー特性の再現は今後の課題とする。

5. シミュレータの基礎評価

5.1 海中通信実験との性能比較

海中通信実験 [4] との性能比較において、まず開発したシミュレータが実験で観測された距離依存の通信性能を再現できているかを確認した。海中通信実験では、固定アンテナ間で、Nessum 各モードのフルレートが送信される時の通信性能を計測された。したがって本研究におけるシミュレータでは、フルレート条件として、Nessum の通信モード (1/1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32) それぞれの PHY レートに相当する CBR トラフィックを送信し、通信距離を 0.0 m から 5.0 m まで 0.1 m 刻みで変化させて評価した。各距離点において乱数シードをランダムに変更した 20 回の試行を行い、得られたスループットの平均値を実線として算出した。

図 2 および図 3 に、フルレート CBR 通信の距離別スループットを、実験結果とシミュレーション結果で比較して示す。図より、通信距離の増大に伴いスループットが低下する傾向が両者で一致しており、距離に対する性能劣化の度

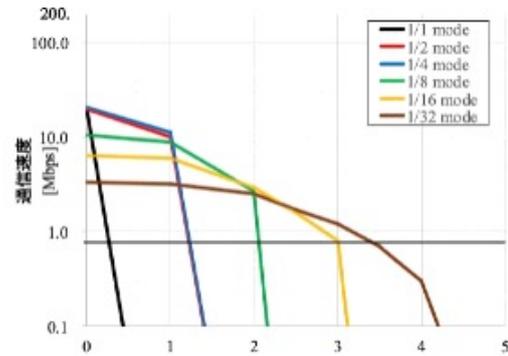


図 2 実験におけるスループット
Fig. 2 Experimental throughput

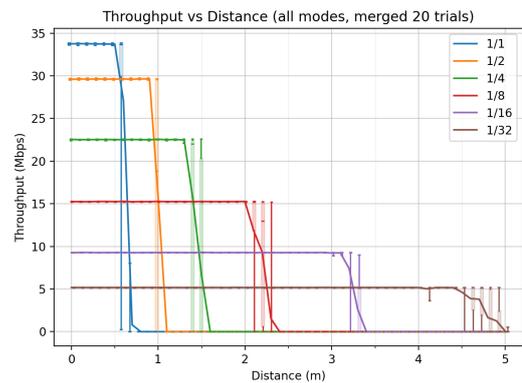


図 3 シミュレータで再現したスループット
Fig. 3 Throughput reproduced in the simulator

合いも概ね整合していることが確認できる。したがって、本シミュレータは、海中通信実験で得られた「通信距離—通信性能」関係を定量的に概ね再現できているといえる。

5.2 考察

図 2, 3 より、通信モードを 1/1 から 1/32 へと圧縮率が高くなるにつれて通信可能距離が延伸する傾向が確認できる。これは、周波数が低くなることで電波減衰が抑えられていることが要因であると考えられる。また、圧縮率が高いモードほど目標 PHY レートが低く設定され、所要 SNR が相対的に緩和されるため、同一距離条件でも受信成立しやすくなるのが要因であると考えられる。したがって、低レート (高圧縮率) モードは高速性を犠牲にする代わりに、到達性を優先する設計点として機能している。

一方で、各モードにおけるスループット値のばらつきは、距離が通信限界に近づくにつれて増大する傾向が見られた。これは、限界付近では受信電力・干渉・雑音のわずかな変動が復号の成否や再送回数に直結し、試行間で「成立する回」と「成立しない回」が混在しやすくなるためであると考えられる。結果として、平均値は滑らかに低下して見える一方で、個々の試行ではスループットが大きく上下し、ばらつきが増大したと考える。

さらに、圧縮率が高いモードほど、通信限界付近でのば

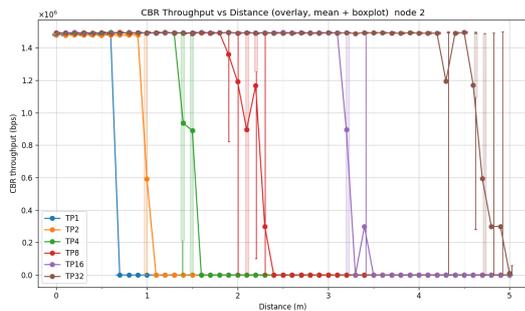


図 4 UDP のスループット
Fig. 4 UDP throughput

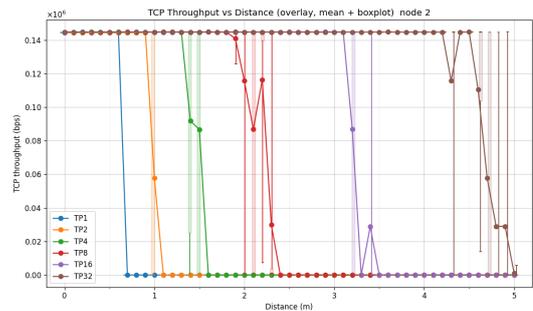


図 5 TCP のスループット
Fig. 5 TCP throughput

らつきが大きくなる傾向が確認できた。これは、高圧縮率モードでは到達距離が長くなる分、評価対象となる「限界付近の距離領域」が相対的に広がり、伝搬損失の増加や環境変動の影響を受けやすい距離条件での試行が増えるためであると考えられる。また、低レート通信では再送や誤り訂正の影響が実効スループットに与える割合が相対的に大きくなりやすく、成功・失敗の境界領域に入るとスループット変動が顕著に現れるためであると考えられる。

以上より、低レートモードは平均的な到達性を改善する一方で、通信限界近傍では性能の確率的変動が増大することが示唆され、運用設計においては「平均スループット」だけでなく「ばらつき」を含めたマージン設計が重要であることが分かる。

5.3 実機の海中ロボットトラフィック

本節では、実機の海中ロボットが生成するトラフィックを模擬し、通信距離に対する性能変化を評価するために、実際の海中ロボットがどのような通信トラフィックを生成するかパケットキャプチャ実験を行った。実機では主に (1) 状態情報 (TCP: 約 100 kb/s) および (2) ビデオ画像 (UDP: 約 1.5 Mb/s) が送信されていたため、シミュレータ上でも同等のトラフィックを生成した。各通信モード (1/1~1/32) について、送受信距離を変化させた際のスループットを測定し、図 4、図 5 に示す。

図 4、5 より、距離の増加に伴い TCP・UDP ともにスループットが低下することが確認できる。また、本評価条件では、TCP と UDP の低下傾向は概ね類似しており、UDP が急峻に低下し TCP が緩やかに低下するという直感的な差は顕著には現れなかった。一方で、TCP は UDP と比較して、スループット低下がわずかに緩やかである傾向が見られた。

5.4 考察

本結果で TCP と UDP の距離依存低下が類似した要因として、無線区間の品質劣化や MAC 層の再送が支配的となり、トランスポート層の違いが相対的に現れにくかった可能性が考えられる。特に通信限界距離付近では、誤りや

再送の増加により、送達できるデータ量がリンク成立性によって規定されやすく、TCP の送信レート制御の影響が見かけ上小さくなる。一方で TCP がわずかに緩やかに低下した点は、損失や RTT 変動に応じた送信抑制が過度な競合や再送の増大を抑え、結果として実効スループットの落ち込みを部分的に緩和した可能性があると考えられる。

なお、本節で用いた評価指標はスループットであり、MAC 層の再送制御や競合の影響を含んだ「実効的に受信できた量」を反映している。したがって、トランスポート層 (TCP/UDP) の挙動差を純粋に切り分けるには、アプリケーションが有効に受信したデータ量 (グッドブット) や、再送回数・再送率、遅延、ジッタ等の指標を併せて評価する必要があると考えられる。

6. 基礎通信特性評価

6.1 複数ロボット協調時の課題

複数無索無人機 (UUV: Unmanned Untethered Vehicle) が協調行動を行う状況では、各 UUV が協調のための情報 (前節で判明した実トラフィック) を送信する一方、探索等の目的で UUV 間距離が時間的に変動・拡大する。海中における電波通信は減衰が大きく、長距離通信が困難であるため、送信が集中するタイミングでは互いの送信を物理的に検知できず、隠れ端末問題が発生しやすい。

さらに Nessum では、ノード間の情報共有がマスター (基地局) 経由に限定されるという制約がある (図 6) ため、通信要求が中継点に集約されやすく、結果として同一チャネル上での競合・衝突確率が増大する。

6.2 評価シナリオ

本章では、隠れ端末の有無によって通信品質がどの程度変化するかを明確化するため、隠れ端末なし環境と隠れ端末あり環境の 2 種類のトポロジを用意し、パケット損失率を指標として評価する。隠れ端末なし環境では、全ノードが相互にキャリアセンス可能となる間隔の配置を与える。隠れ端末あり環境では、ノード間距離を 2.5m とし、アンテナ (基地局) と UUV2 が相互にキャリアセンスできない条件を構成することで、隠れ端末問題が発生しやすい状況を

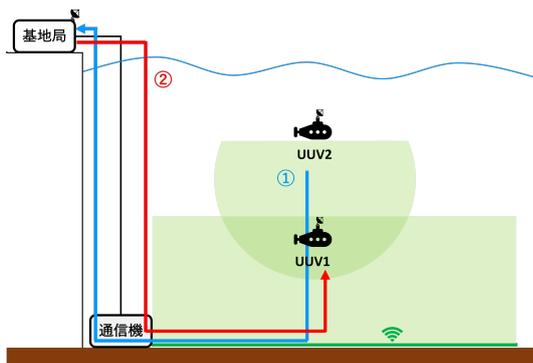


図 6 Nessum の制約
Fig. 6 Nessum Constraint

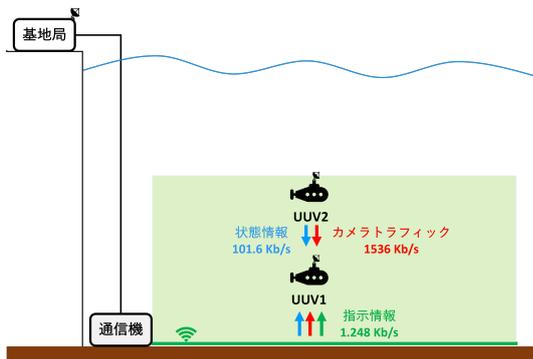


図 7 隠れ端末なし環境
Fig. 7 No hidden terminals environment

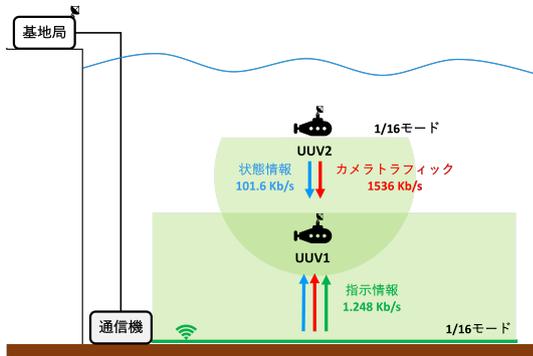


図 8 隠れ端末あり環境
Fig. 8 Environment with hidden terminals

再現する。また、通信に使用する Nessum のモードは 1/16 とする。1/16 モードにおける帯域は図 3 より約 9 Mb/s であるため、UUV が送信するレートはカバーできる。以降の評価では、隠れ端末の有無以外の条件は同一とした。

6.3 隠れ端末なし環境

本節では、Nessum において子機同士の通信が親機 (Master) を介して行われる運用を想定し、「UUV2 が生成したトラフィックが基地局 (アンテナ) へ到達し、基地局から UUV1 へ転送される」という流れを模擬したシナリオを評価する。すなわち、UUV2 のカメラ + 状態情報は一旦基地局へ集約され、その後基地局から UUV1 へ送信される構成

とし、協調行動時に想定される集約と中継が隠れ端末環境でどの程度影響を受けるかを確認する。

トラフィック条件は、実機運用を模擬して次の通り設定した。基地局から UUV1 に対しては、UUV1 および UUV2 への指示情報として 1.248 kb/s, UUV2 から基地局を介して UUV1 に送られる状態情報 101.6 kb/s とカメラトラフィック 1536 kb/s のトラフィックを送信した。また UUV2 から UUV1 に対しては、カメラトラフィック 1536 kb/s と状態情報 101.6 kb/s を送信した。以上の条件で通信を行い、各フローの packets 損失率を算出した。

測定の結果、基地局 → UUV1 の packets 損失率は 1.1% であった。また、UUV2 → UUV1 の packets 損失率は 0.8% であった。

6.4 隠れ端末あり環境

評価環境は、ノード間距離を 2.5m とし、端末間でキャリアセンスが成立しないトポロジを構成した。トラフィック条件は、基地局 → UUV1 に対して指示情報 1.248 kb/s, カメラトラフィック 1536 kb/s および状態情報 101.6 kb/s を送信し、あわせて UUV2 → UUV1 の通信も存在する条件で packets 損失率を測定した。

測定の結果、基地局 → UUV1 の packets 損失率は 10.3% であった。また、UUV2 → UUV1 の packets 損失率は 7.5% であった。したがって、隠れ端末環境では packets 損失が増大し得ることが確認された。

6.5 考察

まず、隠れ端末なし環境 (全ノードが相互にキャリアセンス可能) では、アンテナ → UUV1 の指示情報フローと、UUV2 → UUV1 のカメラ + 状態情報フローのいずれも低い損失率に留まった。これは、送信機会が競合しても端末が互いの送信を検知できるため、キャリアセンスにより同時送信が回避され、衝突が抑制されるためである。

次に、基地局経由通信を想定したシナリオでは、UUV2 で生成されたカメラ + 状態情報が基地局へ集約され、基地局から UUV1 へ転送される運用を模擬した。この条件では、隠れ端末あり環境において UUV2 → UUV1 の損失率が 7.5%, 基地局 → UUV1 の損失率が 10.3% と、いずれも顕著に増大した。これは、(i) UUV2 → 基地局の上りと基地局 → UUV1 の下りが同一チャネル資源を時間分割して消費すること、(ii) 隠れ端末により同時送信が発生すると基地局周辺あるいは UUV1 受信点で衝突が生じ、中継に必要な 2 ホップ分の送達確率が連鎖的に低下すること、の両面が重なったためと解釈できる。すなわち、親機経由の運用では中継区間がボトルネックになりやすく、隠れ端末に起因する衝突が発生すると、転送経路全体として損失が増幅され得ることが示唆される。

7. 提案手法

7.1 提案手法の概要

前章で示したように、隠れ端末環境では協調行動に必要なフローの損失率が增大し、通信性能が大きく劣化する。そこで本研究では、隠れ端末問題の解決策として、(1) RTS/CTS フレームの導入、(2) 複数 Nessum インターフェースを活用した通信制御、の二つの手法を検討し、それぞれの有効性を示す。

7.2 RTS/CTS 導入

隠れ端末問題に対する代表的な解決策として、RTS/CTS (Request to Send / Clear to Send) 機構がある。RTS/CTS は、データフレーム送信の前に送信側が RTS を送出し、受信側が CTS で応答することで、周辺端末に対して一定時間の送信抑止 (予約) を通知し、衝突を抑制する方式である。これにより、互いにキャリアセンスできない端末同士であっても、同一受信点での同時送信による衝突確率を低減でき、結果としてパケット損失の抑制や遅延・再送の削減が期待できる。

7.3 隠れ端末環境における有効性

隠れ端末あり環境において RTS/CTS を適用し、RTS/CTS を用いるパケットサイズの閾値を 70 B に設定した。本シナリオでは、隠れ端末問題が極めて厳しい環境にあるため、UUV が送信する全パケットの衝突回避のために低い値に設定した。6.3 節と同一のトラフィック条件でパケット損失率を測定した結果、基地局→UUV1 のパケット損失率は約 1.1% であった。また、UUV2→UUV1 のパケット損失率は約 0.8% であった。したがって、RTS/CTS を有効化することで、隠れ端末あり条件で増大していたパケット損失が、隠れ端末なし条件と同程度まで抑制されることが確認された。

一方で RTS/CTS は送信ごとに制御フレーム交換が追加されるため、オーバーヘッドが増大する。今回のトポロジでは RTS/CTS フレームがそれぞれ 24,208 ずつ発生した。RTS フレームは 20 Byte, CTS フレームは 14 Byte であることから、RTS フレームだけで約 64 Kb/s, CTS フレームだけで約 45 Kb/s の帯域を圧迫した。帯域制約の大きい海中電波通信では、特に競合端末数が増加した場合に制御オーバーヘッドが支配的となり、実効スループット低下や遅延増大を招く可能性がある。

7.4 考察

RTS/CTS を有効化し、閾値を 70 B として全トラフィックを対象にした場合、隠れ端末あり環境でも損失率が大幅に低減した。RTS/CTS は、データ送信前に RTS/CTS 交

換を行うことで周辺端末に送信抑止を促し、隠れ端末に起因する衝突確率を下げる機構であるため、損失率の改善に直接寄与したと考えられる。実際に、親機経由通信シナリオでは UUV2→UUV1 が 0.8%, 基地局→UUV1 が 1.1% まで改善し、隠れ端末の影響を受けにくい水準まで低減できた。一方で RTS/CTS は、データ送信ごとに制御フレーム交換が追加されるため、オーバーヘッドが増大し、実効スループット低下や遅延増大を招く可能性がある。特に本設定のように閾値を小さくして全パケットに適用すると、制御フレーム比率が高くなり、トラフィック量が増えた場合や多端末化した場合に効率面の不利が顕在化することが想定される。

7.5 複数 Nessum インターフェースを活用した通信制御

本研究が参加しているプロジェクト [4] では、複数の Nessum インターフェースを用いた Dual Nessum の開発が予定されている。本研究ではこの構成を前提に、複数インターフェースを用いてリンクごとに異なるモード (チャンネル) を割り当て、同一チャンネル上の競合を回避するマルチホップ通信制御を提案する。これにより、Nessum におけるモードの違いとして中心周波数が異なるため、干渉が発生しない。

7.5.1 隠れ端末環境における有効性

隠れ端末あり環境において RTS/CTS は用いず、UUV2 の使用モードを 1/32 に設定して評価を行った。ここでは、モード切替えにより UUV2 が他ノードと同一チャンネルを使用しない条件を与えることで、端末間のパケット衝突が発生しないシナリオを構成した。

測定の結果、UUV2→UUV1 のパケット損失率は約 0.8%, 基地局→UUV1 のパケット損失率は 1.1% であった。したがって、RTS/CTS を用いない場合でも、UUV2 のモードを切り替えてチャンネル競合を回避することにより、RTS/CTS によるオーバーヘッドを増やすことなく、隠れ端末に起因する衝突の影響を抑制でき、損失率が隠れ端末なし条件と同程度まで低減することが確認された。

7.5.2 考察

RTS/CTS を用いずに UUV2 のモードを 1/32 へ切り替え、同一チャンネルを用いないようにした場合では、隠れ端末あり環境で損失率が低減し、RTS/CTS 適用時と同程度の改善が得られたことから、チャンネル競合を回避できれば隠れ端末に起因する衝突を抑制可能であることが確認された。これは、衝突要因そのもの (同一チャンネル上の同時送信) を回避する設計であるため、RTS/CTS のような制御フレームの追加を伴わずに隠れ端末の影響を抑制できる点が利点である。すなわち、RTS/CTS は「同一チャンネルを共有する」ことを前提に制御フレームで衝突を低減する手段であり、モード切替は、チャンネルを共有しないことで衝突を原理的に避ける手段と整理できる。一方で、モード切

表 1 パケットロス率と RTS/CTS オーバヘッド数
(基地局→UUV1)

Table 1 Packet loss rate
and RTS/CTS overhead count(Master → UUV1)

基地局→UUV1	パケットロス率 (%)	オーバヘッド数
隠れ端末なし	約 1.1%	0
隠れ端末あり	約 10.3%	0
RTS/CTS 手法	約 1.1%	24208
Dual Nessum 手法	約 1.1%	0

表 2 パケットロス率と RTS/CTS オーバヘッド数
(UUV2→UUV1)

Table 2 Packet loss rate
and RTS/CTS overhead count(UUV2 → UUV1)

UUV2→UUV1	パケットロス率 (%)	オーバヘッド数
隠れ端末なし	約 0.8%	0
隠れ端末あり	約 7.5%	0
RTS/CTS 手法	約 0.8%	24208
Dual Nessum 手法	約 0.8%	0

替はチャンネル分離により損失率を抑えられる反面、モードに応じた PHY レート低下や通信資源の分割を伴うため、ネットワーク全体の実効スループットや動画品質の観点では別のトレードオフが生じ得る。

以上より、本評価範囲では、隠れ端末による損失増大は RTS/CTS により抑制可能であるが、制御オーバヘッド増大の代償を伴うことが示された。一方で、モード切替によりチャンネル競合を回避できる場合には、RTS/CTS のオーバヘッドを発生させずに同等の損失抑制効果が得られることが確認された。したがって、隠れ端末対策の選択においては、損失率の改善量だけでなく、RTS/CTS によるオーバヘッドが実効スループット・遅延へ与える影響と、モード切替によるレート低下・資源分割の影響を同一指標で比較し、運用条件に応じた設計指針として整理することが重要であり、複数インターフェースを活用したモード分割は、オーバヘッドの追加を伴わずに競合を回避でき、帯域制約の厳しい海中電波通信において有効な選択肢となることが示唆される。

8. まとめ

本研究では、海中ロボットの協調行動を想定した多端末・マルチホップ環境において、通信性能が距離・通信モード・トラフィック特性・干渉条件により大きく変動する点に着目し、性能劣化要因をパケットレベルで定量評価できるシミュレーション基盤を構築した。

海中電波通信は伝搬損失が大きく、実機実験のみで多数条件を網羅的に検証することは、コスト、安全性、再現性の観点から困難である。そこで本研究は、(i) 実験で観測される距離依存の性能劣化を再現可能なモデル化と、(ii)

協調行動時に顕在化し得る干渉・隠れ端末といったネットワーク的課題の評価を、同一枠組みで両立させることを目的とした。

本研究は、

- 海中減衰モデルと通信モードを整合させたリンク表現、
- 距離依存性能と限界付近のばらつき再現、
- 実機トラフィックを模擬した距離別性能評価、
- 隠れ端末問題とその対策 (RTS/CTS, モード切替による競合回避) の定量比較、

を通じて、協調行動時の海中無線通信設計に資する評価基盤と基礎知見を提示した。

9. 今後の課題

本研究では、隠れ端末環境においてパケット損失率が顕著に増大し得ること、また RTS/CTS およびモード切替 (チャンネル分離) が損失率低減に有効であることを示した。一方で、帯域制約の厳しい海中電波通信において実運用へ適用するには、適応的なモード割当て、および実ロボット環境での検証が必要である。

謝辞 防衛装備庁が実施する安全保障技術研究推進制度 JPJ004596 の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] 国土交通省. 国土交通白書. 2024.
- [2] IEEE .IEEE 1901c-2024. 2024.
- [3] Nessum アライアンス. Nessum (オンライン). 入手先 (<https://jp.nessum.org>) (参照 2026-02-13).
- [4] NICT. 革新的情報通信技術研究開発委託研究. 採択番号 02301. 2024
- [5] Space-Time Engineering. Scenargie. 2007.
- [6] Jun Wang, Shilian Wang. Seawater Short-Range Electromagnetic Wave Communication Method Based on OFDM Subcarrier Allocation. Scientific Research Publishing. 2019.
- [7] Hunt, K.P., Niemeier, J.J. and Kruger, A. RF Communications in Underwater Wireless Sensor Networks. IEEE International Conference on Electro/ Information Technology. 2010.
- [8] Guru, B.S., Hiziroglu and Hüseyin, R. Electromagnetic Field Theory Fundamentals: Electromagnetic Field Theory. China Machine Press. 2005.
- [9] 古濱 佑樹, 野林 大起, 塚本 和也, 池永 全志. マルチホップ HD-PLC おけるブロードキャスト通信性能改善のための再送制御方式の検討. 電子情報通信学会 NS 研究会. 2023.