

氏名	HUSSAM ALRAIE (シリア)		
学位の種類	博士 (工学)		
学位記番号	生工博甲第485号		
学位授与の日付	令和6年3月25日		
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当		
学位論文題目	2-D OFDM System using Subcarrier Power Modulation to Double the Data Rate in Underwater Acoustic Communication (水中音響通信におけるパワー変調により通信量を2倍にする二次元OFDMシステム)		
論文審査委員会	委員長	教授	我妻 広明
		准教授	西田 祐也
		准教授	安川 真輔
		教授	渡邊 啓介
		教授	石井 和男

## 学位論文内容の要旨

水中通信は、信号の高い減衰や様々な環境雑音によってデータ通信密度が低下するため、海洋分野における最も重要かつ困難な課題の一つである。水中音響通信は陸上無線通信と比較し、通信密度が低い、帯域幅範囲が狭い、遅延が大きい、等の多くの課題があるが、水中環境では電波や光通信よりも伝送距離が長いという利点があるため、水中通信では一般に音響通信が用いられる。陸上無線通信において、複数のキャリアを使用してデータを送信する OFDM 通信が注目されているが、水中環境における OFDM 通信が研究されている。本論文ではデータ通信密度を向上させるために、直交周波数分割多重 (OFDM) 方式にサブキャリア電力変調を加えた OFDM-SPM を提案している。High 信号と Low 信号のサブキャリア電力変調 (OFDM-SPM) システムを併用することにより、OFDM のデータ通信量を2倍にすることが可能となり、帯域幅を半分節約できる。第1章では、研究背景と関連研究、第2章では海洋環境のモデルを用いた通信シミュレーションにおいて、提案システムを実装した数値実験、第3章ではその評価、及び、水槽実験の結果を述べている。それらをまとめ第4章において結論としてまとめている。

第1章では研究背景について述べている。水中における電波通信、光通信、音響通信に関して、最新の研究成果をまとめ、それらの研究動向と課題をまとめている。次に OFDM 通信の原理について述べている。

第2章では、水中音響通信の数値シミュレーションのための海洋音響チャンネルについて述べている。海洋音響通信における物理パラメータとして、減衰率や塩分濃度、温度、通信周波数を変化させ、外乱を加えた場合の OFDM 通信の通信誤差 (Bit Error Rate)、及び、提案するサブキャ

リア電力変調を加えた OFDM-SPM 通信の通信誤差に関する数値シミュレーションを行い、提案手法により理論上性能が向上することを確認している。提案システムは、振幅制御が可能な差動位相偏移変調 (DPSK) とサイクリックプレフィックス (CP) を備えたており、水中環境のモデルとして距離と周波数の関数としての拡散損失、Rician fading マルチパスを考慮したモデルを用いている。入力信号をサブキャリアに分割し、0 か 1 で位相変調を行い、並行して振幅変調を組み合わせて通信量を 2 倍にする。受波信号を高速フーリエ変換し、位相変調を判定してビットデータに判定し、さらに振幅信号を閾値処理により High か Low に判別しデータを復元する手法を提案している。

第 3 章では、数値シミュレーションの結果について分析している。通信周波数を 200kHz, 300kHz, 400kHz とし、バンド幅を 32kHz, 64kHz, 128kHz、サブキャリアを 16, 32, 64 とし、通信距離を変化させながら数値シミュレーションを行っている。Pilot 信号を用いて距離に応じた増幅率を加えて信号を平均化することにより、通信誤差率を下げることを示している。また、提案手法を用いることにより、外乱が小さい場合は理論値である通信量が約 2 倍となることを示している。

次に、水槽実験の結果について評価している。通信距離を 1m~4m まで変化させて通信実験を行っている。OFDM-SPM 通信により変調された送信信号と受波器の信号を比較し、同様な信号が得られていることを確認している。最初に、振幅変調を評価するため、High レベルの信号と Low レベルの信号の波形を比較し、その倍率について議論している。受波信号をフーリエ変換し、サブキャリア信号の各周波数においてピーク値が得られていること、High レベルと Low レベルの信号が判別できる閾値を設定できることを確認しており、水中における OFDM-SPM 通信が可能であることを示している。

第 4 章では、結論として提案手法の可能性、通信距離に応じた送信電力について議論し、提案手法の有効性をまとめている。

## 学位論文審査の結果の要旨

本論文は、データ通信密度を向上させるため、直交周波数分割多重 (OFDM) 方式にサブキャリア電力変調を加えた OFDM-SPM を提案し、数値シミュレーション及び水槽実験において提案手法の有効性を確認したものである。様々な通信環境によるシミュレーションを行い、その可能性を確認し、実際に水槽実験を行って有効性を確認しており、その新規性が認められる。

公聴会には多くの参加者があり、学外からも多くの出席者があった。参加者からは、AUV への搭載や、通信距離の変化への対応、海洋の潮流の影響、AI の導入、海洋における通信のための課題等の幅広い質問がなされたが、いずれも著者の説明によって質問者の十分な理解が得られた。以上により、論文審査及び最終試験の結果に基づき、審査委員会において慎重に審査した結果、本論文が博士 (工学) の学位に十分値するものであると判断した。