

## 水中音声帯域 OFDM 通信における最適パラメータの検討

中山 康弘<sup>†</sup> 鈴木 大作<sup>‡</sup> 和田 知久<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 琉球大学大学院理工学研究科 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原 1 番地

<sup>‡</sup> 沖縄工業高等専門学校 〒905-2192 沖縄県名護市辺野古 905

E-mail: <sup>†</sup> {k118589, wada}@ie.u-ryukyu.ac.jp, <sup>‡</sup> suzuki.t@okinawa-ct.ac.jp

あらまし OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 方式は周波数利用効率に優れ、大容量通信に欠くことのできない技術である。この技術を水中に適用し、搬送波を音声帯域に拡張した研究が進められている。本稿では水中環境における音声帯域 OFDM 通信実験結果について述べる。実験では縦 25 m、横 14 m のプールを使用し、通信パラメータは CP(Cyclic Prefix)サイズ、搬送波中心周波数、FFT(Fast Fourier Transform)ウィンドウサイズを変更して実験を行った。実験結果から FFT ウィンドウサイズの差異による BER(Bit Error Rate)の変化は見られず、また搬送波中心周波数は全ての FFT ウィンドウサイズにおいて 9-12 kHz で BER が悪化していることを確認した。

キーワード OFDM, 音声帯域, 無線通信, 水中環境

## Evaluation of Optimal Parameters for Underwater Voice-Band OFDM Communication

Yasuhiro NAKAYAMA<sup>†</sup> Taisaku SUZUKI<sup>‡</sup> and Tomohisa WADA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Faculty of Engineering, Graduate school of Engineering and Science University of the Ryukyus

1 Senbaru, Nishihara, Nakagami, Okinawa, 903-0213 Japan

<sup>‡</sup> Okinawa National College of Technology, 905 Henoko, Nago, 905-2192 Japan

E-mail: <sup>†</sup> {yasu@lsi, wada@}ie.u-ryukyu.ac.jp, <sup>‡</sup> suzuki.t@okinawa-ct.ac.jp

**Abstract** OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) is well-known for its spectral efficiency, and this scheme plays an essential role in large capacity communication. Recently work is proceeding with underwater communication using OFDM scheme. This paper shows experimental results of voice-band OFDM communication system of underwater environments, especially focusing on CP(Cyclic Prefix), center frequencies of carriers, FFT(Fast Fourier Transform) window size and the distance between Transmitter and Receiver. The Experimental Results shows that FFT window size has no relation with the experimental results and BER got worst from 9 to 12 kHz.

**Keyword** OFDM, voice-band, underwater communication, underwater, delay profile

### 1. はじめに

近年、高速な伝送を実現する変調方式として OFDM が注目されており、同技術を用いた多くのシステムの実用化及び開発が広く行われている。OFDM の大きな特徴として、周波数利用効率が非常に優れており、同技術を用いることにより、高速・広帯域の実現が可能になる点が挙げられる。この OFDM 方式を水中環境に適用した研究[3]が既に進められている。本稿では水中音声帯域 OFDM 通信の基礎実験を 25 m プールにて行い、OFDM の各種パラメータの検討を行った。

本稿では 2 章で CP 長設定のための遅延プロファイルについて紹介し、3 章で水中 OFDM 通信システムを、4 章で実験環境の説明及び実験評価を行う。最後に 6 章でまとめとして、水中 OFDM 通信の最適なパラメータについて述べる。

### 2. 遅延プロファイル

実験環境では直接波とは別に水面や壁面に反射して受信側に到来する反射波が存在する。この反射波は直接波に対して遅延しており、OFDM シンボルに影響を与える。しかし、CP と呼ばれる OFDM シンボルの後半部のコピーをシンボルの先頭に付与することで、遅延波の到来時間が CP の範囲内であれば反射波の影響を除去することが出来る。

OFDM シンボルの CP(Cyclic Prefix)サイズを設定するために、遅延プロファイルを用いた。遅延プロファイルとは遅延波の到来を測定したものであり、ガード区間である CP 長の設定に有用である。遅延プロファイルの算出は以下に示す式(1)を用いる。

$$\text{Delay Profile} = \text{IFFT} \left[ \frac{X(F_1)}{T(F_1)}, \frac{X(F_2)}{T(F_2)}, \dots, \frac{X(F_n)}{T(F_n)} \right] \quad (1)$$

式中の X 及び T はそれぞれ受信機で受信したパイロット信号の FFT(Fast Fourier Transfer)後の出力結果とパイロット信号である。ここで、パイロット信号とは送受信側で既知のデータから生成された OFDM シンボルである。また、 $F[1,2,\dots,n]$  はサブキャリア番号を示している。

実験に先立ち FFT ウィンドウサイズを 4096 に設定して遅延プロファイルを計測した。図 1 に示す遅延プロファイルによると、2000 サンプル時間までに 3 つの反射波が到来している。さらに、3700-4000 サンプル時間にも反射が存在しているが、本実験では CP 長を 2048 点に設定した。

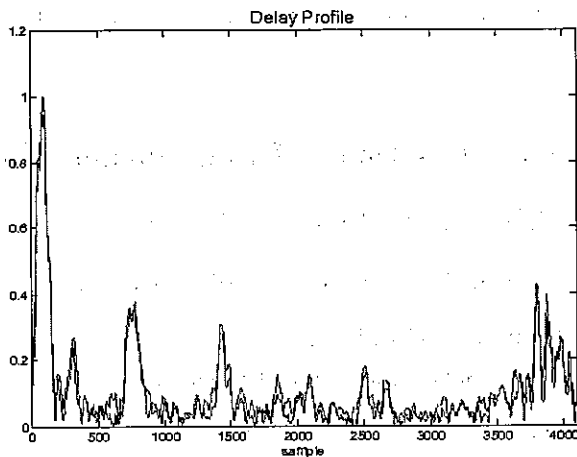


図 1: 遅延プロファイル

### 3. 水中音声帯域 OFDM 通信システム概要

実験に使用した水中音声帯域 OFDM 通信システムを図 1 に示す。送信側において、まずデータとパイロットの発生後、それぞれ QPSK、BPSK 変調を行う。次に直列・並列変換処理後に Inverse FFT(IFFT)が適用される。IFFT 後に並列・直列変換が施され、CP が付加される。CP 付加後には受信側における信号検出のためにプリアンブルが信号系列の先頭に付与される。最後に信号系列は任意の搬送波帯域に変換されて伝送路へと送信される。受信側では、送信時の逆の手順で FFT 部まで処理される。直列・並列変換処理後において得られたパイロット信号は元のパイロット信号と共にイコライザ部へと入力される。そして、このイコライザ部によりデータが修正され、復調処理後に送信側のデータが受信側で得られる。

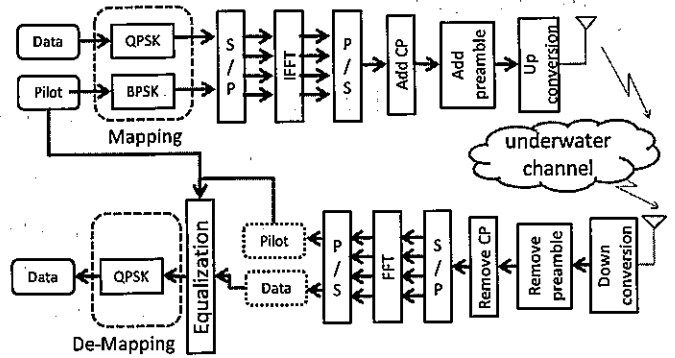


図 2: 水中音声帯域 OFDM 通信システム

## 4. 水中通信実験評価

### 4.1. 実験環境及びパラメータ

水中 OFDM 通信実験の環境を図 3 に示す。使用した環境は縦 14 m、横 25 m のプールである。マイク及びスピーカは同一の PC に接続されているが、スピーカは出力レベルが低い為、アンプを介して PC に接続されている。実験は FFT ウィンドウサイズ毎にマイクとスピーカの距離を 2 - 12 m の範囲で 2 m 刻みで行い、距離の変更毎に際して搬送波中心周波数を 2 - 12 kHz に設定して計測を行った。表 1 に実験で使用したハードウェア及びソフトウェアを示す。また、実験で設定したパラメータを表 1 に示す。

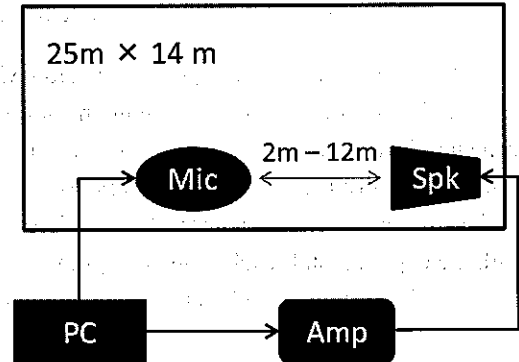


図 3: 実験環境

表 1 ハードウェア・ソフトウェア

PC	Lenovo ThinkPad R400
スピーカ	DARAVOCJ H001 Underwater Speaker
マイク	AQUARIAN H1A HYDROPHONE
アンプ	TE Engineering Boxer 15
ソフトウェア	Windows 7 Professional Windows Media Player, 帰ってきたサウンドレコーダー

表 2 実験パラメータ

FFT ブロックサイズ	128, 256, 512, 1024
CP 長	46 ms (2048 points)
OFDM 信号長	2.9ms, 5.8ms, 11.6ms, 23.2ms
サンプリング周波数	44.1 kHz
基本周波数	344.5Hz, 172.3Hz, 86.1Hz, 43.1Hz
サブキャリア数	5, 11, 25, 51
シンボル数	300, 132, 60, 30
中心周波数	2 - 12 kHz
変調方式	QPSK (data), BPSK (pilot)

4.2. 通信実験結果

図4はFFTウィンドウサイズが128の実験結果である。結果より、送受信間の距離が2mではBERが3kHzと4kHzで落ち込んでいる。4mでは5kHzで、6mでは2kHzで、8mでは6kHzで、10mでは7kHzで、12mでは5kHzでそれぞれBERが落ち込んでいることが確認できる。また、全距離で共通して9kHz以降はBERが最悪となっていることが確認出来る。

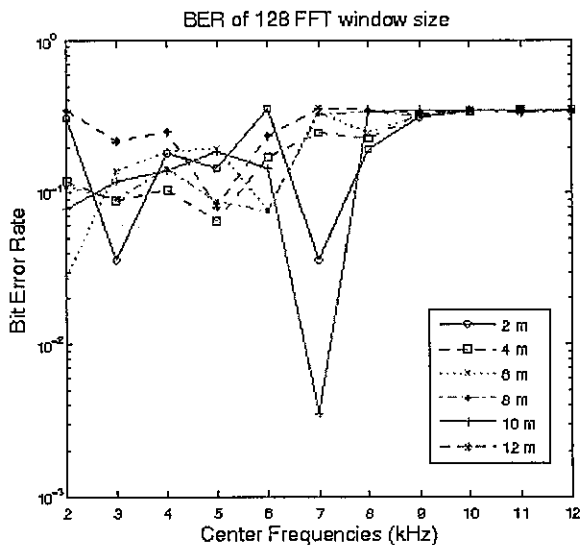


図 4 : FFT window size = 128

図5はFFTウィンドウサイズが256の実験結果である。結果より、送受信間の距離が2mではBERが2kHzで落ち込んでいる。4mでは7kHzで、6mでは2kHzと7kHzで、8mでは3kHzと7kHzで、10mでは7kHzで、12mでは4kHzと7kHzでそれぞれBERが落ち込んでいることが確認できる。また、全距離で共通して9kHz以降はBERが最悪となっていることが確認出来る。

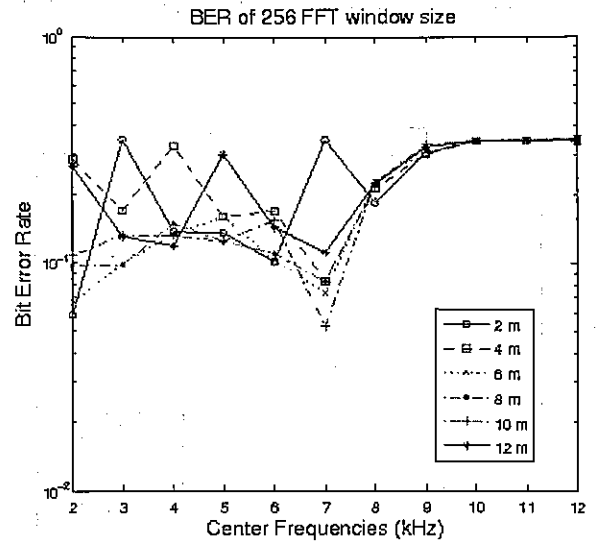


図 5 : FFT window size = 256

図6はFFTウィンドウサイズが512の実験結果である。結果より、送受信間の距離が2mではBERが2kHzと7kHzで落ち込んでいる。また、4mでは7kHzで、6mでは2kHzと6kHzで、8mでは3kHzで、10mでは7kHzで、12mでは4kHzと6kHzでそれぞれBERが落ち込んでいることが確認できる。また、全距離で共通して9kHz以降はBERが最悪となっている。

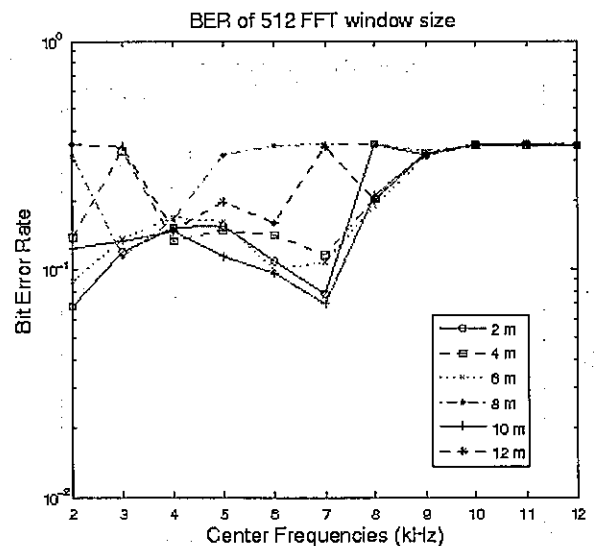


図 6 : FFT window size = 512

図7はFFTウィンドウサイズが256の実験結果である。結果より、送受信間の距離が2mではBERが2kHzと6kHzで落ち込んでいる。4mでは2kHzと7kHzで、6mでは2kHzと7kHzで、8mでは7kHzで、10mでは6kHzで、12mでは7kHzでそれぞれBERが落ち込んでいることが確認できる。また、全距離で共通

して 9 kHz 以降は BER が最悪となっていることが確認出来る。

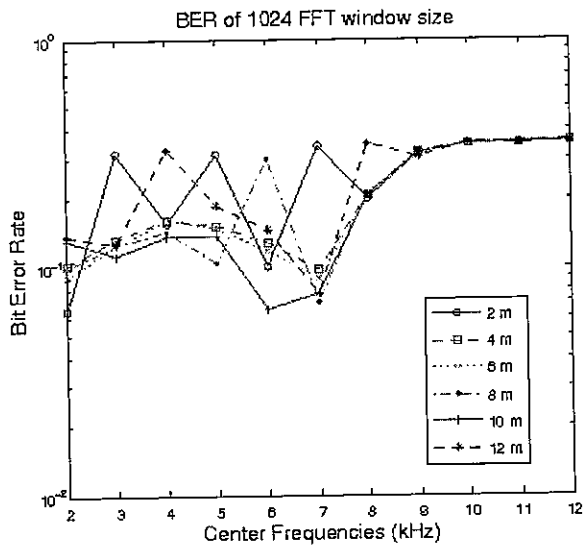


図 7: FFT window size = 1024

図 8 は図 4 - 図 7 の実験結果から得られた中心周波数毎の BER 平均である。結果より、FFT ウィンドウサイズがそれぞれ 128, 256, 512, 1024 において中心周波数がそれぞれ 3 kHz と 5 kHz, 6 kHz と 7 kHz, 4 kHz, 2 kHz と 7 kHz で BER が落ち込んでいることが確認できる。また、中心周波数が 9 kHz 以降は悪化している。

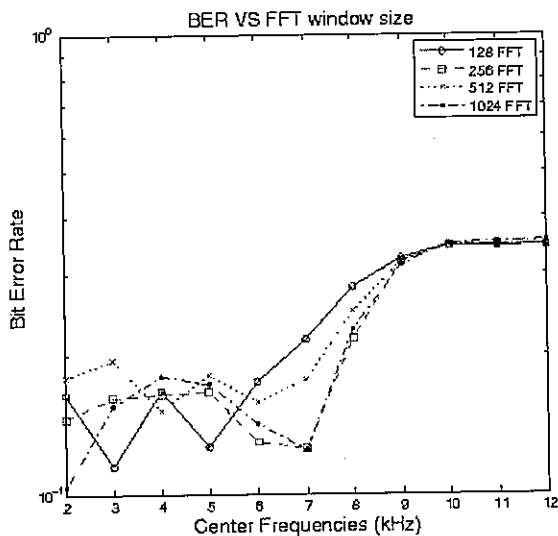


図 8: 中心周波数毎の BER 平均

## 5. まとめ

本稿では多重化方式に OFDM 方式を、搬送波に音声帯域信号を用いて水中通信実験を行った。実験結果において中心周波数が 9 kHz までは全ての FFT ウィンドウサイズにおいて BER の値が落ち込んでいる部分が

確認出来た。また、9 kHz 以降は BER が最悪であり通信の際の搬送波帯域に使用出来ないという結果が得られた。

今後の課題としては CP 延長、実験回数、送信信号出力レベルが挙げられる。実験結果では全体的に BER が悪く、CP 長が適切でなかったと想定されるからである。実験回数については、使用した環境の平均 BER に収束するようにすることが目的である。送信信号出力レベルは使用した環境でのマルチパスを抑える為に、たとえば本実験よりも低レベルで実験を行う等である。

## 文 献

- [1] FA-LONG LUO, Digital Front-End in Wireless Communications and Broadcasting, Tomohisa Wada, pp.561-562, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, Cambridge, 2011
- [2] 島村徹也, デジタル通信システムのための MATLAB プログラム事例解説, 株式会社トリケップス, 東京, 2000.
- [3] M.Stojanovic, OFDM for underwater acoustic communications: Adaptive synchronization and sparse channel estimation. Proc. International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP'08), April 2008