

水中音声帯域 OFDM 通信における ダイバーシティ技術の導入に関する検討

鈴木 大作[†] 中山 康弘^{††} 和田 知久^{†††}

[†] 沖縄工業高等専門学校 〒905-2192 沖縄県名護市辺野古 905
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
^{††} 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
^{†††} 琉球大学 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原 1 番地
E-mail: [†] suzuki.t@okinawa-ct.ac.jp, ^{††}, ^{†††} {k118589, wada}@ie.u-ryukyu.ac.jp

あらまし 水中での無線による通信手段の一つとして、水中音響通信が挙げられる。水中音響通信は音波により通信を行うもので、古くより研究開発が盛んに行われてきた。本研究では、水中音響通信における OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 技術と空間ダイバーシティ技術の導入に関する検討を行う。OFDM は、地上波デジタル放送や IEEE 802.11a/g/n, WiMAX などの無線 LAN, 更には携帯電話の LTE や UMB などで採用され始めているデジタル変調方式であり、狭帯域干渉に強く、周波数利用効率が高いなどの利点がある。空間ダイバーシティ技術は、マルチパス干渉下における受信特性を向上する手段として、空間的に離れた複数の受信アンテナを使って、それらを選択ないしは合成することにより特性改善を図る方法である。両技術を水中音響通信に適用した実験をプールで行った結果、OFDM 変調技術を使用した水中音響通信の有効性を確認した。また、ダイバーシティ技術を適用した場合の受信品質特性の改善を確認した。

キーワード OFDM, 水中音響通信, ダイバーシティ

Performance evaluation of space diversity for Underwater Voice-band OFDM Communication

Taisaku SUZUKI[†] Yasuhiro NAKAYAMA^{††} and Tomohisa WADA^{†††}

[†] Okinawa National College of Technology, 905 Henoko, Nago, 905-2192 Japan
Faculty of Engineering, Graduate school of Engineering and Science University of the Ryukyus 1 Senbaru, Nishihara,
Nakagami, Okinawa, 903-0213 Japan
^{††} Faculty of Engineering, Graduate school of Engineering and Science University of the Ryukyus 1 Senbaru,
Nishihara, Nakagami, Okinawa, 903-0213 Japan
^{†††} University of the Ryukyus 1 Senbaru, Nishihara, Nakagami, Okinawa, 903-0213 Japan
E-mail: [†] suzuki.t@okinawa-ct.ac.jp, ^{††}, ^{†††} {k118589, wada}@ie.u-ryukyu.ac.jp

Abstract The underwater acoustic communication is performed by the sound waves. It is estimated that the communication is being inhibited by reflection and absorption of sound waves propagating in the water, and scattering, of biological activities and a variety terrain in the water for realize long-distance high-speed and large capacity communication.

In this study, we discuss the performance evaluation of OFDM and space diversity for underwater acoustic communication.

Keyword Underwater, Acoustic, Communication

1. はじめに

近年、周囲を海に囲まれた日本の発展にとって、海洋開発が果たす役割はますます大きくなってきていると言える。我が国の国土面積は約 38 万 km² と狭いが、200 海里排他的経済水域 (Exclusive Economic Zone, EEZ) の面積は、451 万 km² と陸部の 10 倍近くも広く、我が国

は世界 6 位の海洋大国であるとされる¹⁾。

海洋開発においては、海洋環境のモニタリング、海底資源調査、海洋生物の活動調査、海底地殻変動の調査等、様々な調査活動が必要であり、現在、船舶による観測のほか、潜水士が海に潜って行う調査活動や、

¹⁾ 「海洋と日本 -21 世紀における我が国の海洋政策に関する提言 (日本財団、2002)」

海底にセンサを設置する方法，水中ロボット，観測用ブイ等の各種観測手段により計測や調査が行われている。これらの水中で使用する計測機器等と海上との間は通信ケーブルを介して通信を行うことが多く，これら計測機器の設置場所や，水中ロボットの場合はその行動範囲，機器のメンテナンス等において制約が大きいという課題を有していた。そのため，通信ケーブルではなく，機動性に富んだ無線による通信手段が必要と推定される。また，レジャーダイビング産業の分野においても，スクーバダイビング時のダイバーの事故が増加傾向にあり，安全にレジャーを楽しむためのインストラクターとの円滑なコミュニケーションの実現や，安全管理を行うための新たなシステムの開発などが重要であると考えられる。特に，国内で最もレジャーダイビングが盛んな沖縄においては，スクーバダイビングを中心とするマリンスポーツ全般の普及のためには，安全にレジャーを楽しめる環境の実現が欠かせないと考えられる。

2. 水中音響通信特性

2.1. 水中での音の利用

光や電磁波は水中には透過しにくい物質的特性を持っているが，音波は非常に良好な透過性を持っている。特に海洋においては，そのほとんどの領域において光や電磁波は全く届かない世界であり，音響通信技術の利用が不可欠な世界であると言える。

下図は，電磁波と音波の海中における吸収減衰の大きさを，dB/kmの単位で，周波数に対して示しており，水中において音波は電磁波よりも桁違いに通りが良いことがわかる。

電磁波のうち水中で一番通りが良いのは可視光線の青色である。この青色でも，1 kmの吸収減衰は約 120 dB程にもなり，非常に激しい減衰のため海の中では昼間でも水深 100m ではもう暗くなる。一方，超音波でよく使われる 38kHz では 10 dB/km程度の減衰で，桁違いに減衰率が低い²。

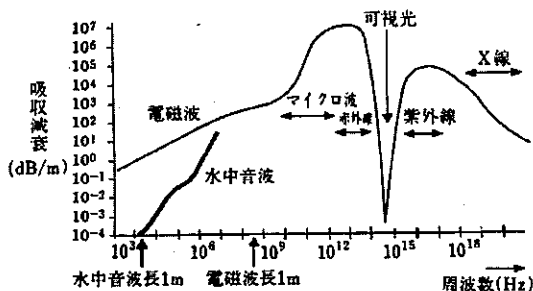


図 2.1: 電磁波と音波の海中での吸収減衰 (出所: 海洋音響の基礎と応用 (成山堂書店, 2004))

2.2. 音波の基本式

音波の伝搬は，音を発生する音源の圧力変化による振動の結果である，音波は音源から放射されたのちに次第に周囲に広がり，その形は球面波・円筒波・平面波などがあるとされる。いま，平面波を例に考えた場合，平面波音圧 p は次のように表すことができる。

$$p(t, x) = A \sin(\omega t - kx) \quad (2.1)$$

ここで， t は時間， x は位置， $\omega = 2\pi f$ は角周波数， $k = \omega/c$ は波数， A は音圧振幅である。 $c = f\lambda$ は音速で， f は周波数で λ は波長である。なお，音速 c は水温や海水の場合は塩分濃度，水深などによっても変化するが，標準大気圧下 20℃の蒸留水の場合，1481 m/sとされる。

2.3. 雑音

海洋においては，常に様々な音が発生している。雑音とはデータ通信に使用する音波以外の音を指し，背景雑音と呼ばれる。背景雑音は，大別して周囲雑音と自己雑音の二つがある。周囲雑音は，自然現象によるものや人為的なメカニズムによって発生する。自己雑音は，検知するための装置や，装置を搭載している船自身によるものが挙げられる。

周囲雑音は，数 100Hz から数 10kHz までは風浪による雑音が主であり，風速に関係する。また，降水による雑音は電気的なショットノイズに似ており，広帯域の雑音になるとされる。

3. OFDM 変調技術

OFDM は直行周波数分割多重方式 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing : OFDM)の意味で，周波数選択性フェージングを避けて高速通信を行うための技術である。周波数選択性フェージングでは，高速なデータ伝送で影響が大きく，低速なデータ伝送ではその影響は少ない。OFDM では，周波数選択性フェージングの影響を避けるために，複数の周波数で同時にデータ伝送を行い，それぞれの周波数での伝送では低速なデータ伝送を行うことにより，トータルとして高速なデータ伝送を実現する通信方式である。

3.1. OFDM 送信機

図 3.1 に送信機の構成を示す。OFDM 送信機では，入力されたシンボルを S/P 変換器で分割し，各々を別々の周波数で送信を行う。S/P 変換器では，入力された直列のシンボルを複数の並列のシンボルに分割する。PSK 変調器では，入力データに対し QPSK 変調を行う。

S/P 変換では，PSK 変調器で QPSK 変調された直列

² 海洋音響の基礎と応用 (成山堂書店, 2004)

のシンボルを複数の並列のシンボルに分割する。その後チャンネル推定用系列を付加した後に高速逆フーリエ変換(Inverse Fast Fourier Transform : IFFT)を行い、ガードインターバルを付加して P/S 変換を行い送信する。

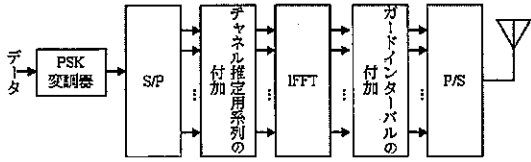


図 3.1: 送信機の構成

3.2. OFDM 受信機

OFDM 受信機では、アンテナで受信した OFDM 信号を分岐し、各信号にサブキャリアの複素共役を乗算する。そのあと、低域通過フィルタ(LPF)を通すことにより、並列のシンボル S_0, S_1, S_2, S_3 が得られる。これらの並列のシンボル S_0, S_1, S_2, S_3 は、送信機の S/P 変換の逆を行う P/S 変換を行うことにより、直列のシンボル $\dots S_4 S_3 S_2 S_1 S_0$ が得られる。最後に、これらの直列のシンボルを復調器に入力することにより、データを取り出すことができる。

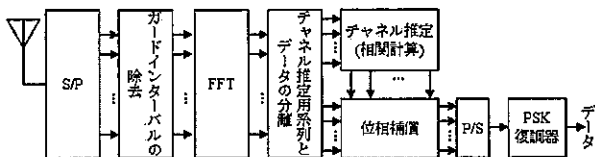


図 3.2: 受信機の構成

4. ダイバーシティ技術

本提案では、水中音響通信における OFDM 変調において、空間ダイバーシティ技術を導入する。

空間ダイバーシティとは、マルチパス干渉下における受信特性を向上する手段として、空間的に離れた複数の受信アンテナを使って、それらを選択ないしは合成をすることにより特性改善を図る方法である。受信側で行う空間ダイバーシティの方法として、大きく分けると以下の三つの方法がある。

- 選択ダイバーシティ
- 等利得合成
- 最大比合成

選択ダイバーシティは複数のアンテナからの受信信号のうち、最も電力が大きいものを選び、受信信号とする方法である。一般的に高い性能は望めないが実装が容易であるという特徴を持つ。

等利得合成は、複数のアンテナから受信される信号の位相が同位相となるよう調整を行い合成する方法である。最大比合成は、位相調整するだけでなく、振幅も調整するようにしたものである。

本研究では、SNR を最大にするために最適な方法である最大比合成を使用することとする。

5. 検証

5.1. 検証方法

本提案の内容を検証するに当たり、以下の手順により検証を行った。

1. MATLAB を使用した送信機及び受信機の作成
2. 送信機による送信データの生成
3. 生成した送信データを用いた受信データ測定実験
4. 測定した受信データをもとに受信機での受信処理
5. 性能評価

5.2. 検証パラメータ

ダイバーシティ効果の検証を行うために、以下のパラメータを設定し実験を行った。

表 5.1: 実験パラメータ

番号	項目	可変/固定	内容
1	マイク間距離	可変	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 1.0, 1.5, 2.0 [m]
2	マイク・スピーカ間距離	可変	2, 4, 6, 8, 10 [m]
3	マイクの水深	固定	0.5 [m]
4	スピーカの水深	固定	0.5 [m]
5	送信データ中心周波数	可変	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 [kHz]

MATLAB を使用し作成した送信機を用い、実験で使用する送信データを生成する。生成する送信データのフォーマットは WAV とし、ファイルとして保存する。

以下に WAV フォーマットのデータ形式を示す。なお、受信データの保存データ形式も同様とする。

表 5.2: 送信データの保存形式

符号長	サンプリング周波数	チャンネル数
16 [bit]	44.1 [kHz]	2(ステレオ)

送信機により生成した送信データを用いて、実環境における水中通信による実験を通した受信データの測定を行う。測定においては、マイク・スピーカ間距離、マイク間距離を変化させて測定を行う。

図 5.4 にスピーカとマイクの位置関係を示す。使用する 2 本のマイクの距離はマイク間距離と定義し、マ

イクとスピーカとの距離はマイク・スピーカ間距離として定義する。いま、マイク間距離を I 、マイク・スピーカ間距離を D とした場合、マイクとスピーカの実距離 I_R は以下の式で与えられる。

$$I_R = \sqrt{\left(\frac{I}{2}\right)^2 + D^2} \quad (5.1)$$

本論文では、特に断りのない限り、マイク・スピーカ間距離は D の値を指すものとする。

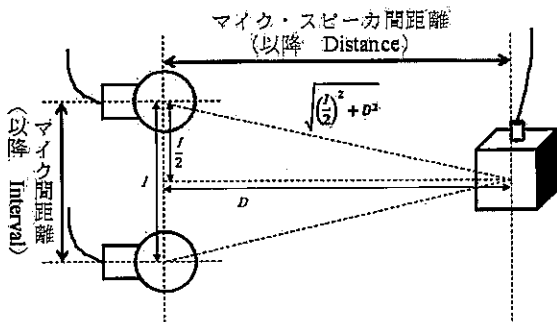


図 5.1: マイクとスピーカの位置関係

MATLAB を使用し作成した受信機を用い、実環境で実験を通して測定した受信データの受信処理を行う。受信データとして保存した WAV 形式のファイルを、MATLAB で作成した受信機の入力とし、受信処理を行う。受信データはステレオで 2 チャンネルのデータを有し、各チャンネルデータをそれぞれ個別のアンテナで受信したデータと見立て空間ダイバーシティの処理を行う。

5.3. 環境

本研究では、大きく二つの環境を使用する。

- 開発及び性能評価環境
- 実験環境

開発及び性能評価環境は、MATLAB を使用した送信機・受信の開発や、実験で使用する送信データの生成、実験で測定した受信データの受信処理や性能評価などを行うための環境である。

実験環境は、開発及び性能評価環境で生成した送信データを用い、実際に水中でのデータ通信を行うための実験環境である。

以下に、環境で使用するソフトウェア、ハードウェアの一覧を示す。

表 5.2: ソフトウェア一覧

番号	名称	内容
1	Microsoft Windows 7 Enterprise SP1	MATLAB を使用した送信機・受信機の作成、測定データの分析・性能評価環境として使用
2	Recky Version 1.6	水中スピーカからの送信データを水中マイクで受信し、受信データとして録音するためのソフトウェアとして使用
3	Windows Media Player	水中スピーカから送信データを再生するためのソフトウェアとして使用
4	MATLAB R2012a	送信機・受信機の作成、送信データ生成、受信データ処理と分析を行う

表 5.3: ハードウェア一覧

番号	名称	内容
1	Aquarian Audio Products H2a-15	水中でスピーカからの送信データを受信するためのマイクとして使用
2	DARAVOC Underwater Speaker Model: JH001(Blue)	水中で送信データを再生するためのスピーカとして使用
3	TOPPING TP32	Windows Media Player を使用し送信データを水中スピーカから再生する際に使用するデジタルアンプ
4	EPSON Endeavor Pro 7000	MATLAB を使用する環境 (Windows 7 Enterprise SP1 搭載マシン)
5	AP-212A	オーディオ変換アダプタ (3.5Φ モノラルミニジャック×2 ←→ 3.5Φ ステレオミニプラグ)
6	AP-2633	オーディオ変換アダプタ (3.5Φ ステレオミニジャック ←→ 3.5Φ モノラルミニプラグ)
7	HP Compaq 8000 Elite CMT Business PC	水中実験で使用する環境 (Windows 7 Enterprise SP1 搭載マシン)

本提案の検証を行うための実験環境を以下に示す。

図 5.5 に示す通り、本実験で使用した環境は、縦 14m、横 25m の屋外プールを使用した。

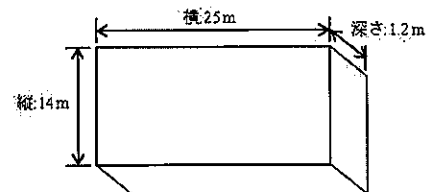


図 5.2: 実験環境

表 5.4: 実験時の気象条件等

条件	状態
場所	沖縄工業高等専門学校 体育館屋上プール
天候	曇り
気温	20℃
水温	15℃

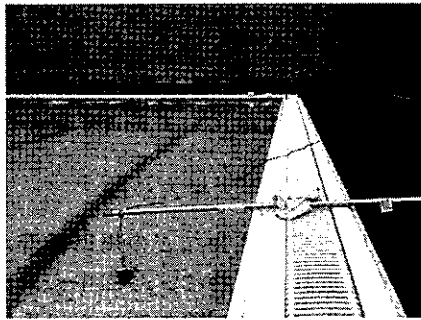


図 5.3: 実験風景

図 5.4 に本実験におけるシステム構成図を示す。

使用する PC はデスクトップ型 PC である。一般的に、ノート型 PC では、マイク入力ジャックの仕様がモノラルであり、本研究で空間ダイバーシティの実験を行うためにはステレオジャックである必要があるため、デスクトップ型 PC を使用する。

実験で使用するマイクおよびスピーカは水中で使用可能な防水型である。スピーカの周波数レスポンスは 100Hz - 10,000 Hz のため、実験ではこの範囲内のパラメータを使用する。スピーカは、デジタルアンプを介し PC と接続する。マイクは、空間ダイバーシティの実験を行うため 2 個使用する。それぞれのマイクはステレオプラグであり、ステレオ ↔ モノラル変換アダプタで一旦モノラルに変換後、モノラル × 2 ↔ ステレオ変換アダプタで L/R のチャンネルをもつステレオ音声に変換して PC に入力する。

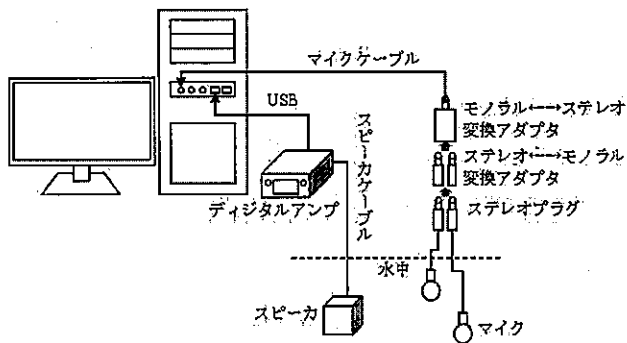


図 5.4: 実験システム構成図

表 5.5: スピーカ仕様

仕様	内容
Max. Input Power	40 Watts
Net Weight	1.15 kg (2.53 lb)
Size	103x91x85 mm (4.1x3.6x3.4")
Frequency Response	100 - 10,000 Hz
Impedance	4 Ω/8 Ω
Temperature Resistant	up to 176°F (80°C)

表 5.6: マイク仕様

仕様	内容
Sensitivity	-180dB re: 1V/μPa
Useful range	<10 Hz to >100KHz
Operating depth	<80 meters
Output impedance	2 KΩ
Power	0.3 mA
Dimensions	25mm x 46mm
Mass	105 grams
Specific Gravity	5.3

5.4. 実験結果

水中音響通信における OFDM 変調技術と空間ダイバーシティ技術の適用結果について述べる。

実験結果のうち、Interval を 0.5 [m]、Distance を 2 [m] とし中心周波数を 2~9 [kHz] に変化させた場合、中心周波数 7~9 [kHz] において空間ダイバーシティ技術を適用した場合の BER の改善効果が最も高いという結果が得られた。ただし、BER の値 0.000001 は、計測値 0 を対数軸にプロットするために近似しており、以降についても同様とする。

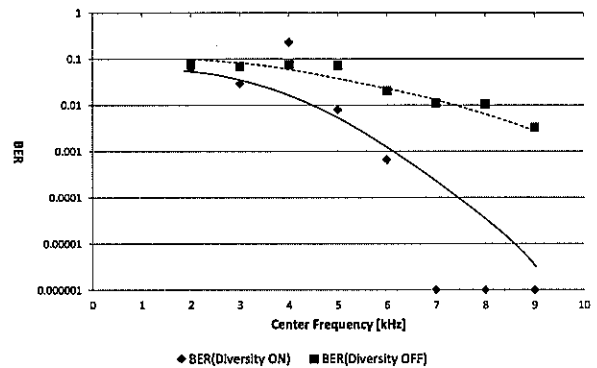


図 5.5: Interval: 0.5 [m]、Distance: 2 [m] 時の中心周波数ごとの BER 特性

また、Interval を 0.5 [m]、中心周波数を 7 [kHz] とし Distance を 2~10 [m] に変化させた場合、Distance が短くなるにつれ BER の値が小さくなり、2 [m] 時に最小になるという結果が得られた。

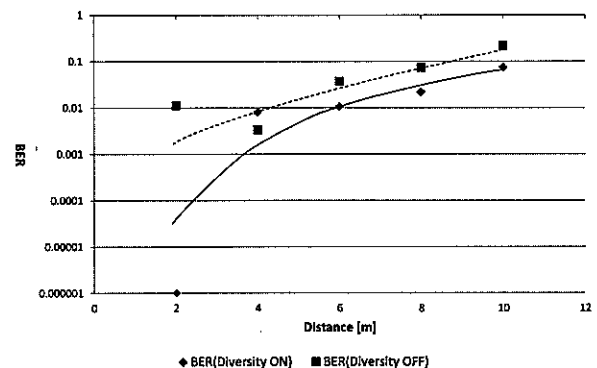


図 5.6: Interval: 0.5 [m]、中心周波数: 7 [kHz] 時の Distance ごとの BER 特性

同条件下における、ダイバーシティ ON 時と OFF 時の受信データのコンスタレーション図を下図のそれぞれ(a), (b)に示す。

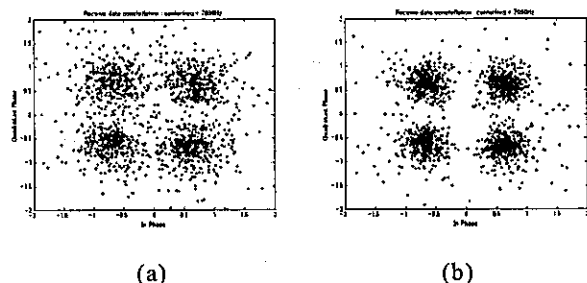


図 5.7: Interval:0.5 [m], Distance:2 [m], 中心周波数 7 [kHz]時のコンスタレーション

Distance を 2 [m], 中心周波数を 7 [kHz]とし Interval を 0.1~2 [m]に変化させた場合, Interval が 0.3~0.6 [m]においてはダイバーシティ ON 時の BER の値が低く, 大きな受信品質特性の改善が見られると共に, Interval が 0.1~0.2 [m], 1.0~2.0 [m]においては, 受信品質特性の改善効果が低いという結果が得られた。

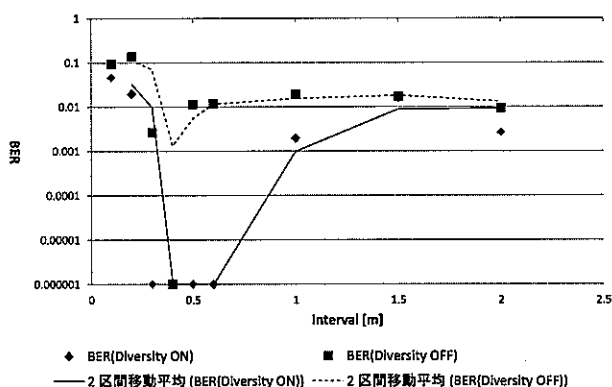


図 5.8: Interval:0.5 [m], 中心周波数:7 [kHz]時の Distance ごとの BER 特性

6. まとめ

本研究では, 水中音響通信における OFDM 変調技術とダイバーシティ技術の導入に関する検討を行い, 実際にプールを使用した実環境での実験を通し検証を行った。

検証の結果, OFDM 変調技術を使用した水中音響通信の有効性を確認した。また, ダイバーシティ技術を適用した場合の受信品質特性の改善を確認できた。

実験環境下では, 中心周波数を高くするほど BER の値が低くなり, 特に 7~9 [kHz]において最もダイバーシティ技術を適用した場合の受信品質特性の改善効果が高いという結果が得られた。また, Interval を 0.1~2 [m]に変化させた場合, Interval が 0.3~0.6 [m]において大きな受信品質特性の改善が見られると共に, Interval

が 0.1~0.2 [m], 1.0~2.0 [m]においては, 同効果が低いという結果が得られた。図 5.6 に示すように, ダイバーシティ導入前後では, 同一 BER を実現しようとした場合の Distance は距離にして約 1.5 倍となった。

7. 今後の課題

実験環境では, 波浪雑音などの周囲雑音が発生していることが考えられる。特に, 今回中心周波数として使用した 2 [kHz]~9 [kHz]の帯域においては, 波浪雑音による影響を受けやすい帯域であると考えられるため, 実験環境における雑音の計測と分析が必要である。また, より高い周波数帯域を使用した伝送を行うためには, 使用するスピーカやマイクの周波数特性を改善する必要がある, より性能の高いデバイスを使用する必要がある。

今後は, 実験を重ねてサンプル数を増やし, 更なる検証を行う予定である。

文 献

- [1] Tomohisa Wada, "Digital Front-End in Wireless Communications and Broadcasting: Circuits and Signal Processing"
- [2] 神谷 幸宏, "MATLAB によるデジタル無線通信技術", コロナ社, 東京, 2008
- [3] 海洋音響学会, "海洋音響の基礎と応用 海洋音響学会編", 成山堂書店, 東京, 2004
- [4] 古澤昌彦, "音で海を見る", 成山堂書店, 東京, 2001
- [5] 飯田 浩二・古澤 昌彦・稲田 博史, "音響資源調査の新技术 計量ソナー研究の現状と展望", 恒星社厚生閣, 東京, 2007
- [6] 上坂 吉則, "MATLAB プログラミング入門", 牧野書店, 東京, 2000
- [7] 石井 聡, "無線通信とデジタル変復調技術", CQ 出版社, 東京, 2005
- [8] 生岩 量久・安 昌俊, "OFDM 技術とその適用", コロナ社, 東京, 2010
- [9] 田中 博・風間 宏志, "よくわかるワイヤレス通信", 東京電機大学出版局, 東京, 2009
- [10] 後藤 尚久, "わかりやすい電波と情報伝送", オーム社, 東京, 2009
- [11] 関 清三, "わかりやすいデジタル変復調の基礎", オーム社, 東京, 2001
- [12] 大下 眞二郎・半田 志郎・デービッド アサノ, "デジタル通信", 共立出版, 東京, 2005
- [13] 伊丹 誠, "OFDM の基礎と応用技術", Fundamentals Review Vol.1 No.2
- [14] 社団法人 日本機械工業連合会・社団法人 海洋産業研究会, "平成 16 年度水中音響通信の高度化による海洋産業の発展と新事業創出等効果に関する調査研究報告書", 社団法人 日本機械工業連合会・社団法人 海洋産業研究会, 2005
- [15] 伊丹 誠, "〜デジタル放送/移動通信のための〜 OFDM 変調技術", トリケップス, 2000
- [16] 根日屋 英之・小川 真紀, "ワイヤレスブロードバンド技術", 東京電機大学出版局, 2006