

[特別講演]浅いマルチパス環境対応水中 OFDM 通信システム開発

和田 知久¹⁾ 鈴木 大作²⁾ Tran Minh Hai³⁾ 松田安登³⁾

¹⁾ 琉球大学工学部情報工学科 〒903-0213 沖縄県西原町千原 1

²⁾ 沖縄工業高等専門学校メディア情報工学科 〒905-2192 沖縄県名護市字辺野古 905

³⁾ 琉球大学理工学研究科 〒903-0213 沖縄県西原町千原 1

E-mail: ¹⁾ wada@ie.u-ryukyu.ac.jp, ²⁾ suzuki.t@okinawa-ct.ac.jp, ³⁾ {matsu, haitran}@lsi.ie.u-ryukyu.ac.jp

あらまし OFDM 変調方式を用いた水中超音波通信システムを提案し、浅い海での海洋通信実験を実施したので、その概要を説明する。海洋では、生物が発生するインパルス的なノイズ（シュリンプノイズとも呼ばれる）が発生しており、このインパルスノイズをキャンセルするキャンセラー処理も合わせて導入した。また、送受信装置の移動に対応するため 2 次元 DFT を用いたチャンネル推定方式を採用した。沖縄北部漁港で海洋実験を実施し、ビットエラー率=1E-2 条件で、53m の QPSK 変調による通信ができることを確認した。また、0.3m/s および 0.6m/s で受信装置を移動させ、シュリンプノイズキャンセルの効果も実験により確認した。

キーワード 水中通信、超音波、OFDM、キャリア間干渉除去、インパルスノイズ、シュリンプノイズ

[Special Talk] An acoustic underwater OFDM communication system for shallow sea multipath environment

Tomohisa Wada¹⁾ Taisaku Suzuki²⁾ Tran Minh Hai³⁾ Yasuto Matsuda³⁾

¹⁾ Dept. of Information Engineering, University of the Ryukyus 1 Senbaru, Nishihara, Okinawa, 903-0213 Japan

²⁾ Dept. of Media Information Engineering, Okinawa National College of Technology
905 Aza-Henoko, Nago, Okinawa, 903-2192 Japan

³⁾ Graduate School of Engineering and Science, University of the Ryukyus
1 Senbaru, Nishihara, Okinawa, 903-0213 Japan

E-mail: ¹⁾ wada@ie.u-ryukyu.ac.jp, ²⁾ suzuki.t@okinawa-ct.ac.jp, ³⁾ {matsu, haitran}@lsi.ie.u-ryukyu.ac.jp

Abstract OFDM based acoustic communication system for underwater application is proposed. In order to mitigate a shrimp (impulsive) noise created by ocean living creature, time and frequency domain noise canceller is introduced. 2 dimensional DFT based channel estimation is also adopted to enhance the mobility of the communication system. Ocean measurement was performed in the experiment, and 53.0 m distance communication with Bit Error Rate below 1E-2 was successfully confirmed using QPSK modulation. BER reduction by the proposed time and frequency domain shrimp noise canceller is also realized with 0.3 to 0.6 m/s mobility.

Keyword underwater, acoustic, OFDM, ICI cancellation, impulsive noise, shrimp noise

1. はじめに

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）面積は、451 万 km² と陸部の 10 倍以上に広く、世界 6 位の海洋大国であり、近年海洋開発が果たず役割はますます大きくなってきている。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、様々な調査活用が必要であり、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され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、これらの計測機器の設置場所や、水中ロボットの場場合はその行動範囲、機器のメンテナンスにおける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求められている。特に、水中でのモニタリングでは画像データもしくは動画データを通信することが求められており、データ転送バンド幅の大きい水中での無線

通信の実現が必要である。

また、レジャーダイビング産業の分野においても、スキュ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となっている。この場合、音声伝送や画像伝送をリアルタイムで行う必要がある。

水中では電波の減衰率は大きいことは知られており、音波を用いた通信を行う必要がある。本論文では、水中で比較的データバンド幅の大きい通信を音波帯域で行うために、電波環境でよく用いられている OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) を適用した水中通信システム構築に関する検討結果を報告する [1-2]。図 1 は想定される水中無線通信の応用例である。海上もしくは海面付近から Unmanned Vehicle (UV) やセンサーロボットなどにより海洋探索を行っている。通信経路に障害物の可能性、そして海底・海面・物体等での多重反射 (Multipath) 環境が想定され、このようなマルチパス環境に強い通信システムが必要とされる。

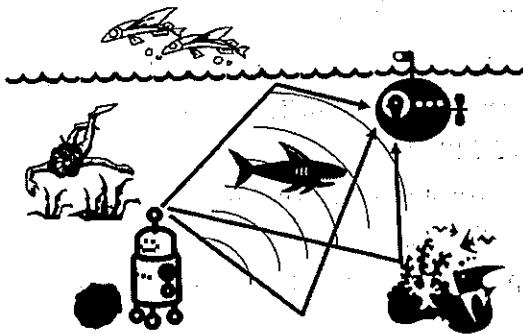


図 1. 水中無線通信の応用例

また、海洋音波通信では、インパルスなノイズがランダムに観測される。これは海洋生物より生成されることが確認されており、シュリンプノイズ [3] と呼ばれている。本論文では、上記のような海洋のマルチパス環境に対応できる OFDM 変調方式を用いた超音波通信システムを提案する [4]。合わせて、上記シュリンプノイズに対応するために、インパルスノイズキャンセラーを搭載した。以下セクション 2 で、今回提案するシステム構成の詳細を説明し、セクション 3 にて、海洋実験結果を開示する。そして結論をセクション 4 にまとめる。

2. 水中超音波通信システム概要

図 2 に本論文で提案する水中超音波通信システム

のブロック図を示す。さらに詳細なパラメータは表 1 に示す。提案システムは、20KHz から 28KHz の 8KHz 幅の超音波領域を用いた OFDM 通信システムで、サンプリング周波数は 96KHz である。2つの動作モード (MODE2 と MODE3) をサポートしており、MODE2 では OFDM 変調として 1KFFT に対応し、有効シンボル長は 10.667ms、MODE3 では 2KFFT に対応し、有効シンボル長は 21.333ms である。8KHz 帯域を用いるので、OFDM 変調のサブキャリア数はそれぞれ、81 (MODE2) および 161 (MODE3) となっている。動的なチャンネル推定を実施するために、サブキャリアの 25% は BPSK 変調されたパイロット信号であるスキューバードパイロットであり、周波数-時間表示で、斜め方向に繋がる形で配置されている (図 3)。したがって、残りの 75% のサブキャリアはデータ通信に利用される。

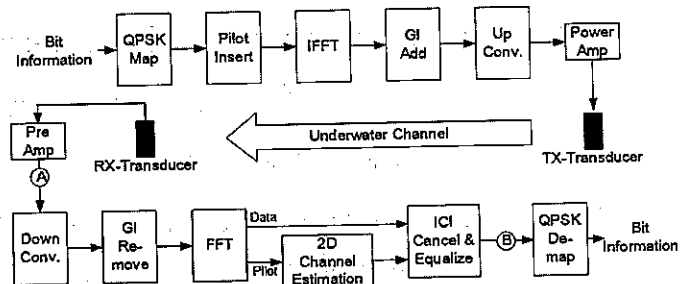


図 2. 提案水中超音波通信システムブロック図

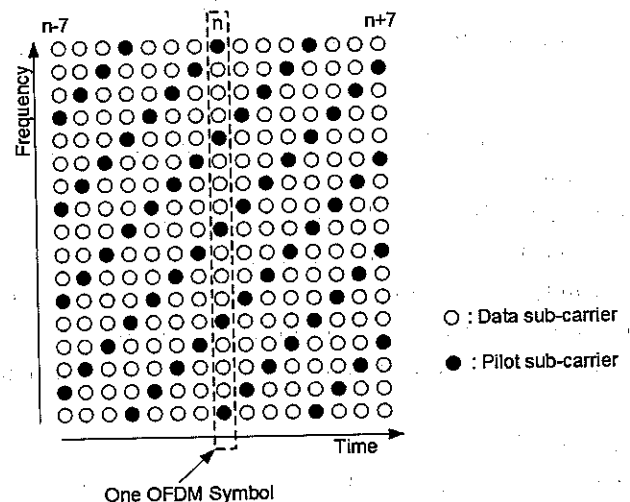


図 3. パイロット配置

データは QPSK 変調され、その後 BPSK 変調されたパイロットと合成され IFFT 処理により OFDM 変調が行われる。マルチパス時のシンボル間干渉を減らすために、ガードインターバル (GI) が挿入されている。ガードインターバル長は有効シンボル長の 50% である。

そして、生成されたベースバンド信号は 24KHz 中心のパスバンド信号に変換され、増幅後送信トランスデューサで、水中に送出される。

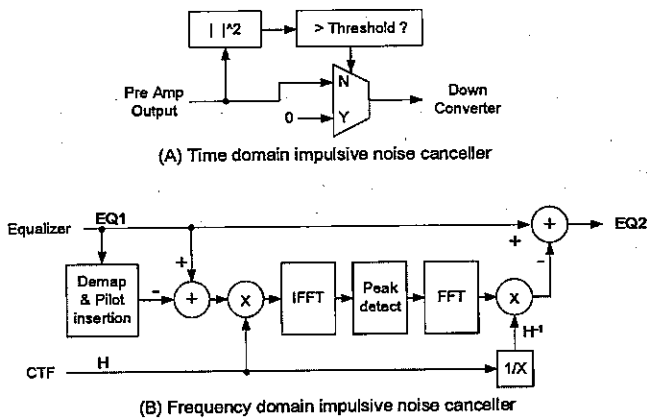


図 4. インパルスノイズキャンセラー

受信側では、受信トランスデューサで受信された信号はプリアンプにより増幅され、GI 除去後 FFT による復調処理が行われる。チャンネル伝達関数(Channel Transfer Function: CTF)を求めるために、スキャッタードパイロット部分の CTF 値は、2次元 DFT 補間によりドップラー・遅延 2次元プロファイルを介して補間処理される。また、インパルスノイズ対策として、図 4 に示す時間領域キャンセラー(A)および周波数領域キャンセラー(B)が図 2 の A 点および B 点に挿入されている。(A)の時間領域キャンセラーは閾値を超えた信号を単純に零と置き換える処理であり、プランキングとも呼ばれる。(B)の周波数領域キャンセラーは IFFT により加わったインパルスノイズを再現し、それを FFT 処理して、周波数領域で減じることによりインパルスノイズの除去を行う [5-7]。

表 1. システム緒言

Parameters	Mode	
	2	3
TX-RX Elements	1 TX and 1 RX Transducer	
Sampling Frequency	96000 Hz	
TX Center Frequency	24000 Hz	
Band Width	8000 Hz	
FFT Size	1024	2048
OFDM symbol length T	10.667 ms	21.333 ms
GI length	0.5T	0.5T
Sub Carrier Spacing	93.75 Hz	46.875 Hz
Number of Sub Carrier	81	161

3. 実験結果

A) 海洋実験パラメータ

海洋実験は沖縄県北部漁港にて実施した。実験パラメータを表 2 に示す。漁港の水深はおおよそ 3 から 5m で、送受信トランスデューサを海面から約 1m にセットしている。設置状況は図 5 に示すように岸壁より約 1.5m の位置に吊り下げの形で設置した。岸壁や船の停泊もあり厳しいマルチパス状況と思われる。

表 2. 海洋実験パラメータ

Item	Content
TX-RX Distance	0 to 53 m
Ocean Depth	3 to 5 m
Transducer Depth	1 m
Transducer Velocity	0 (stable), 0.3, 0.6 m/s
Weather	No wind

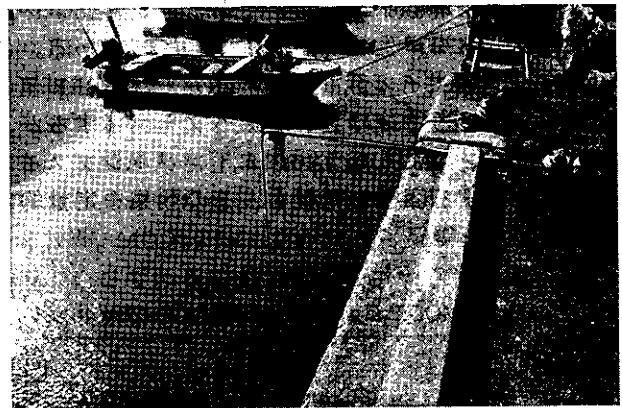


図 5. 漁港岸壁での受信トランスデューサの設置

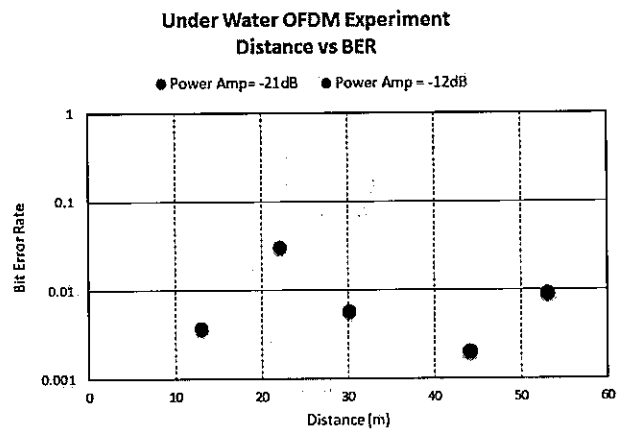


図 6. 伝送距離とビットエラー率

B) 伝送距離とビットエラー率 (BER) 依存性

図 6 に漁港実験で得られた MODE3 時の、ビットエラー率と送受信トランスデューサ間の距離の関係を示す。30m 以下では、岸壁に添った通信であり、途中で小型の停泊船もあり、約 22m の部分で BER 値が悪化しているが、おおむね $1E-2$ 以下の BER 値が得られた。この時の送信パワーアンプゲインとして -21dB 値を用

いている。それ以上の距離では、送信パワーを上げて-12dB値を用いた。

43m以上では、異なる岸壁間での通信を実施したので、マルチパス状況が短距離に比べて異なるが53mまでBER値は $1E-2$ 以下が得られた。この実験では、エラー訂正機構は用いていないので、実応用ではエラー訂正と組み合わせてエラーフリーを実現できる予定である。

C) インパルスノイズが観測された受信信号

ひとつの例として、送受信距離28mでのMODE3実験で得られた受信音波信号の信号波形を図7に示す。中央の振幅が大きい部分が実際に送信信号を送出している時間帯である。時間値 $1E-5$, $2.9E-5$ sampleあたりで大きな信号振幅の部分がある。これらは、測定ごとにランダムに表れるインパルスであり、シュリンプノイズと呼ばれる海洋生物が生成するノイズである。このインパルスノイズが重畳した部分では、BER値の悪化が予測される。後ほど実験データを開示するが、本論文では、このようなランダムインパルスノイズをキャンセルする機構を搭載し、その効果を定量的に測定した。

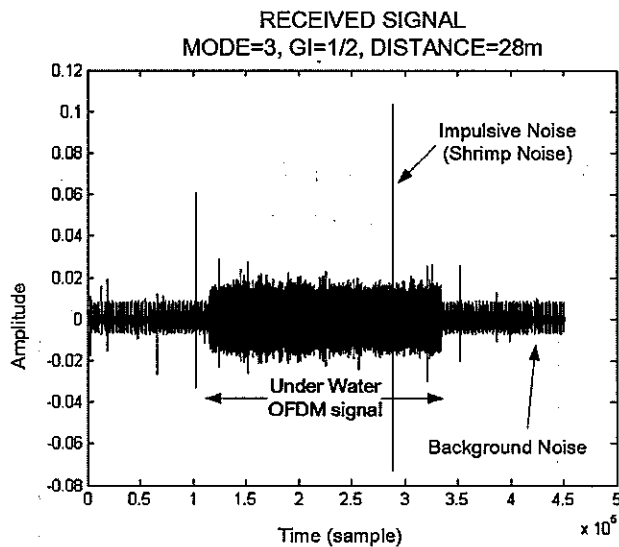


図7. 受信信号波形

D) 送信トランスデューサ移動実験

実応用での海中での Unmanned Vehicle (UV)やセンサーロボットなどの移動や、海上の船の揺れ等を想定し、今回送信トランスデューサを移動させての送受信実験も合わせて実施した。図8に実験風景を示すが、今回は簡易的に、時間を計りながら人間がトランスデューサを移動させて実験を実施した。移動速度は、 $\pm 0.3m/s$, $\pm 0.6m/s$ である。

移動受信時には特にチャンネル伝達関数(CTF)が時間

とともに変動するのでその推定は重要である。セクション2でも説明したように、スキッタードパイロットを2次元DFTにより補間することで、CTFの補間を実施した。図9に、MODE3送受信距離28mの受信信号に対して、その補間途中で得られたドップラー・遅延2次元プロファイルを示す。今回パイロットは全体のサブキャリアの25%であるので、2次元IDFTにより図9に示すような1個の実プロファイルと3個のエイリアスが得られる。図からわかるように、実プロファイルは左にずれており、約-4Hzのドップラーシフトが観測されている。

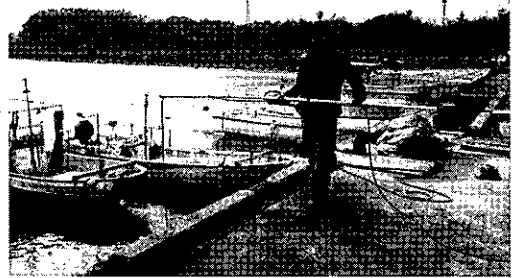


図8. 送信トランスデューサ移動実験風景

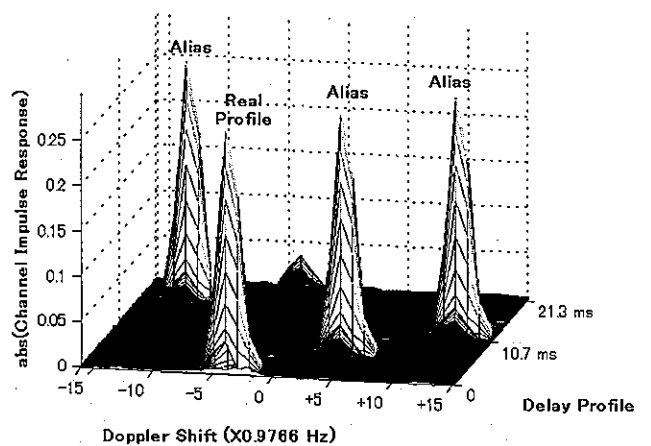


図9. ドップラー・遅延2次元プロファイル

図10は図9で示したエイリアス3個をマスク処理したのち、振幅を4倍に拡大したものであり、これが実際のドップラー・遅延2次元プロファイルに対応する。この実プロファイルを2次元DFTすることにより、時間・周波数領域でのチャンネル伝達関数を得ることができる。

図11は上記処理によって、等価処理されたコンスタレーションである。左図はI-Q複素平面で示されたコンスタレーションであり、45/135/225/315 degreeの

部分は送信データに対応する QPSK のコンスタレーションであり、0/180 degree の部分は BPSK 変調されたパイロットに対応するコンスタレーションである。右図は、この左のコンスタレーションの I 軸(In-Phase 軸)を縦軸とし、OFDM のサブキャリア番号を横軸としてプロットしたものである。右図よりわかるように、サブキャリア番号の小さい部分でコンスタレーションの乱れ大きいがおおむね美しいコンスタレーションが得られている。

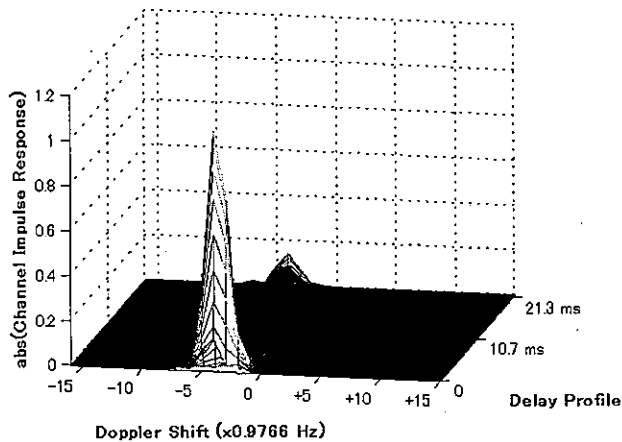


図 10. エイリアス除去後 2 次元プロファイル

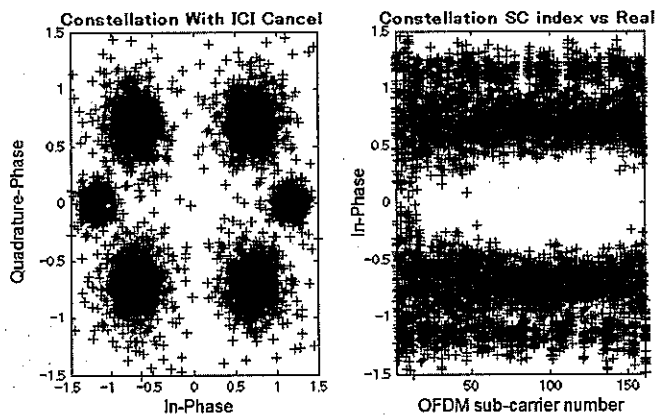


図 11. 受信コンスタレーション

移動通信では、2次元 DFT 補完で述べたように、エイリアス除去が一つの重要なポイントとなっている。すなわち、ドップラー・遅延 2次元プロファイルでの実プロファイルのピークを見つけ、そのエイリアスを除去することが必要である。図 12 は移動通信時に、エイリアス除去マスクが実ピークに適応してずらされた場合(図中点線表示)と、ずらさなかった場合(図中実線表示)の比較図である。MODE3 と MODE2 の両方の場合の結果を示している。

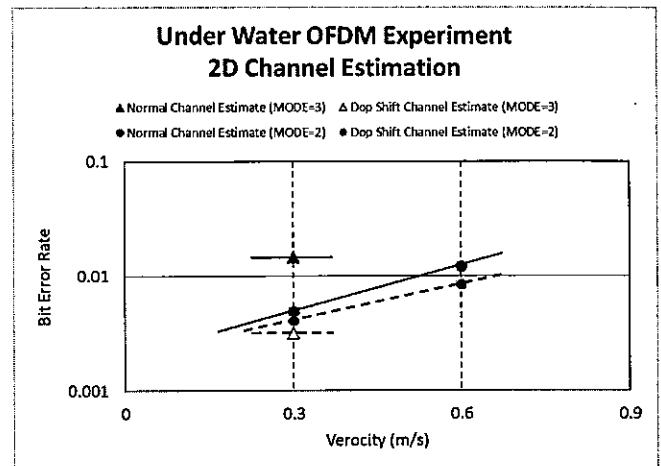


図 12. トランスデューサ移動時のビットエラー率

MODE3 は△マークで示されており、実線から点線への BER 値の改善が確認できた。MODE3 はサブキャリア間隔が 46.875Hz (表 1 参照) と狭いので、ドップラーシフトの影響を受けやすく、適応的なエイリアス除去の効果が大きい。MODE2 は○印で示されており、実線から点線への改善は小さいが BER 値の低減が確認された。MODE2 はサブキャリア間隔が 93.75Hz と 2 倍の大きさであるので、ドップラーシフトに対して比較的マージンが大きいと思われる。

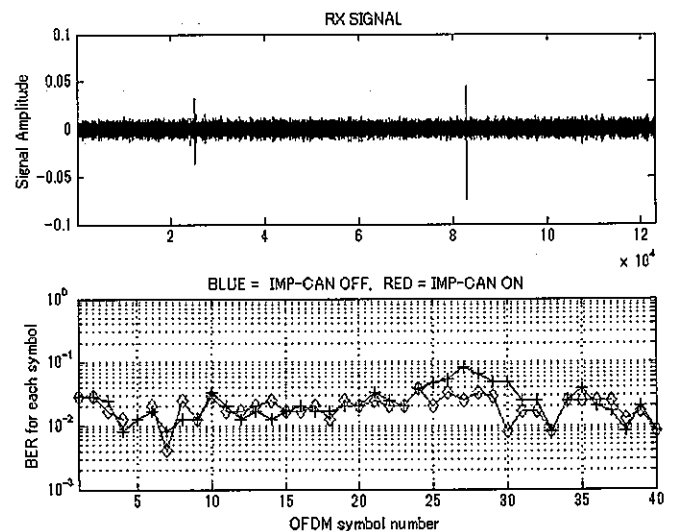


図 13. 受信信号振幅(上段)とシンボルごとの BER 値(下段) (+:インパルスノイズキャンセル OFF、◇:インパルスノイズキャンセル ON)

E) インパルスノイズキャンセル

図 13 は MODE3、移動速度 0.3m/s、送受信距離 28m での受信信号振幅(上段)と OFDM シンボルごとに計測した BER 値(下段、+:インパルスノイズキャン

セル OFF、◇:インパルスノイズキャンセル ON)を示した図である。上段の横軸 8.3E4 sample あたりに大きなインパルスノイズが計測されている。これに対応するシンボルごとの BER 値は下段のシンボル番号 27 前後で観測されている。すなわち、下段のインパルスノイズキャンセルが OFF の場合、そのシンボル前後で、BER 値の上昇が認められ、エラー訂正機構を搭載しても、塊のバーストエラーであり、エラー訂正に困難な状況が想定されるが、インパルスノイズキャンセルが ON の場合、その BER 値の上昇がかなり抑えられている。

図 1 4 はいくつかの送受信実験のケースで、インパルスノイズキャンセルの効果を調査した結果である。図中縦軸は、通信パケット全体の BER 値であるので、前述の図 1 3 のようなシンボルごとの計測ではなく、図 1 4 の下段の 2 本の線の平均値の比較に対応する。○印はインパルスノイズキャンセル OFF に対応し、△印はインパルスノイズキャンセル ON に対応している。シュリンプノイズ (インパルスノイズ) の発生は、海中の生物が生成する現象であり、ランダム現象であるので、効果がある場合とない場合が観測されるが、図よりわかるように多数のケースで、BER 値の減少が確認された。

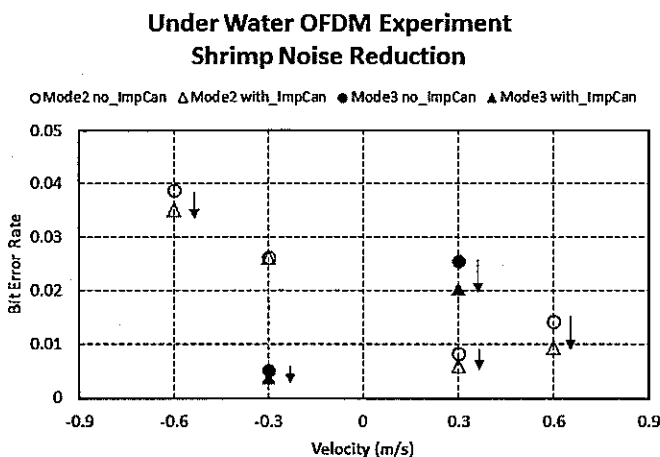


図 1 4 . インパルスノイズキャンセルの効果

4. まとめ

本論文では、20-28KHz 帯を用いた水中超音波 OFDM 通信システムを提案した。現実的な問題 1) 浅い海でのマルチパス環境、2)送受信移動でのドップラーシフト、3)海洋生物が生成するシュリンプ (インパルスノイズ) に対応するために、OFDM 方式にスキャッターパイロットを用いた 2次元 DFT 補間によるチャネル推定および、時間および周波数領域でのインパルスノイズキャンセラーを搭載した。

沖縄県北部漁港にての海洋実験を行い、以下の結論を得た。

- 1) QPSK 変調にて、少なくともお 53m 以上の通信を確認した。
- 2) 2次元 DFT 補間と適応型のエイリアス除去法を用いて、送信トランスデューサの移動に対して BER 特性の向上を確認した。
- 3) シュリンプ (インパルスノイズ) キャンセラーにより、ランダムに重畳される生物ノイズの影響を低減できることがわかった。

今後、受信トランスデューサを複数にするダイバーシティ伝送実験を実施し、さらなる高性能化 (16QAM 等の高次の変調によるデータ転送速度向上、送受信距離の延長、移動速度耐性の向上) を行う予定である。

5. 謝辞

本研究開発は、H25-26 年度総務省戦略的情報通信研究開発推進事業 SCOPE (Strategic Information and Communications R&D Promotion Program)として実施しています。総務省および琉球大学、沖縄高等専門学校の関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Baosheng Li, Shengli Zhou, Milica Stojanovic, Lee Freitag, Jie Huang, Peter Willett "MIMO-OFDM Over An Underwater Acoustic Channel", OCEANS 2007, 2007.
- [2] Ha Duyen Trung, Nguyen Van Duc, "An Analysis of MIMO-OFDM for Underwater Communications", Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2011 3rd International Congress on, 2011.
- [3] Legg, M.W., Zaknich, A., Duncan, A.J., Greening, M.V., "Analysis of impulsive biological noise due to snapping shrimp as a point process in time", OCEANS 2007, 2007.
- [4] Tomohisa Wada, "Digital Front-End in Wireless Communication and Broadcasting", Cambridge University Press, Chapter 18. Diversity and error compensation in OFDM transceivers: principles and implementation, 2011.
- [5] Khalifa Al-Mawali, Amin Z. Sadik, and Zahir M. Hussain, "Joint Time-domain/Frequency-domain Impulsive Noise Reduction in OFDM-based Power Line Communications", Telecommunication Networks and Applications Conference, 2008. ATNAC 2008. Australasian, pp.138-142, 2008.
- [6] Sergey V. Zhidkov, "Impulsive noise suppression in OFDM-based communication systems", IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 49, No. 4, 2003.
- [7] Al Mawali, K, Sadik, A, Hussain, Z, "Time-Domain Techniques for Impulsive Noise Reduction in OFDM-Based Power Line Communications: A Comparative Study", International Conference on Communication, Computer and Power, pp.368-372, 2009.