

## 高速水中音響通信装置の研究開発 ～しんかい 6500 搭載画像伝送装置の開発～

○志村拓也・樹田行弘・出口充康（海洋研究開発機構）

よく知られているように、海中では、電波は吸収されてしまうため、通信や測位には音波が用いられる。しかし、水中の音響通信では、「マルチパス波干渉が非常に強い（周波数選択性が非常に厳しい）」「時間変動の影響が大きい（時間選択性が非常に厳しい）」「周波数帯域が非常に狭い」といった特有の問題があり、空中の電波通信とは異なる課題がある[1]。マルチパス波については、特に水平方向の伝搬路において、多数の反射や屈折のために数百シンボル相当の長い時間にわたって受信されることがあり、その影響は電波通信に比べてけた違いに大きい。また、移動や時間変動によるドップラーシフトの影響も、伝搬速度が非常に遅いため（空中の電波の伝搬速度は $3 \times 10^8$  m/s、海中の音波の伝搬速度は1,500 m/s）、電波通信と比較すると桁以上大きいことになる。周波数帯域幅については、数 km の距離ではせいぜい十数 kHz の帯域幅が利用できる程度で、MHz オーダの帯域が利用できる空中の電波通信と比べて非常に狭い。また、伝搬速度が遅いため、ARQ（自動再送要求）のような方法を採用することも難しい。

こうした問題に対して、著者らは、Time Reversal と Decision Feedback Equalizer (DFE) を組み合わせた手法（Time-Reversal DFE）を考案し、水平方向のマルチパス環境において有効であることを示してきた[2-6]。現在では、この Time Reversal による通信を Multiple-Input/ Multiple-Output (MIMO) に適用し、高速な音響通信を実現するための基礎研究を進めている。一方、こうした基礎研究のスピノフとして、深海の無人探査機や潜水調査船との通信装置の開発にも取り組んでいる。こうした通信は、母船との間のほぼ垂直方向の通信となるため、マルチパス波はほとんど影響しない。よって、マルチパス対策の手法は必要とならないため、DFE を採用した装置の開発を進めている。本稿では、しんかい 6500 に搭載するために、著者らが in-house で開発した音響通信装置の性能確認試験結果について報告する。

性能確認試験は、試験・訓練潜航航海において、開発した通信装置をしんかい 6500 に装備して行われた[7]。この試験では、DFE による通信試験と、比較のために電波通信で広く用いられている Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) による通信試験を行った。使用周波数帯域は15~25kHz で、シンボルレート10kS/s として、BPSK、QPSK、16QAM、32QAM、64QAM、128QAM の各方式で変調した試験信号を送信した。潜航深度3,600m で行った DFE と OFDM の試験結果を図1と2に示す。図1に示されているように、本装置で採用している DFE では、ほぼすべてのパケットでエラーフリーの復調が達成されている。また、output SNR は、input SNR にほぼ近づいており、ドップラーシフトによる影響を見ても、復調成績はほとんど影響を受けておらず、時間変動に対してロバストな復調が達成されている。一方、OFDM による試験結果では、ドップラーシフトの影響を大きく受けており、Bit Error Rate を見ると、エラーゼロのパケットは、わずかに2パケットのみである。Output SNR は、ドップラーシフトがゼロに近いパケットを除いて、ほとんどが10dB 以下となっており、リサンプリングによる時間変動の補正をしても1~2dB 程度しか改善できていない。以上の結果から、OFDM は時間変動に弱く、海中音響通信において、高速通信を達成することは難しいと考えられる。

図3に、開発した音響通信装置と既存の市販通信装置との性能を比較したグラフを示す[7, 8]。水中

の音波は、高周波数帯域では吸収されてしまうため、長距離では低周波域を使わざるを得なくなる。低い周波数帯では、トランスデューサの使用帯域が狭くなるため、達成可能な通信速度も下がることになる。その結果、通信の距離と速度は大よそ反比例の関係となり、距離×速度 (km・kbps) が水中音響通信の性能を比較する重要な指標となる。図3を見ると、既存の通信装置の性能はおおよそ 40kbps・km のラインの近辺にある。それに対し、今回、開発した通信装置は、距離 6,500 m で実効通信速度 79.1 kbps (周波数利用効率 7.91 bps/Hz)、距離×速度の指標では 514km・kbps を達成しており、他の通信装置の性能を大きく上回っている。

本装置は、しんかい 6500 に搭載され、潜水船のカメラの画像を伝送するための装置(画素数 320×240 の静止画を約 2.5 秒に 1 枚のレートで伝送) として、2018 年度から実運用が開始されている。

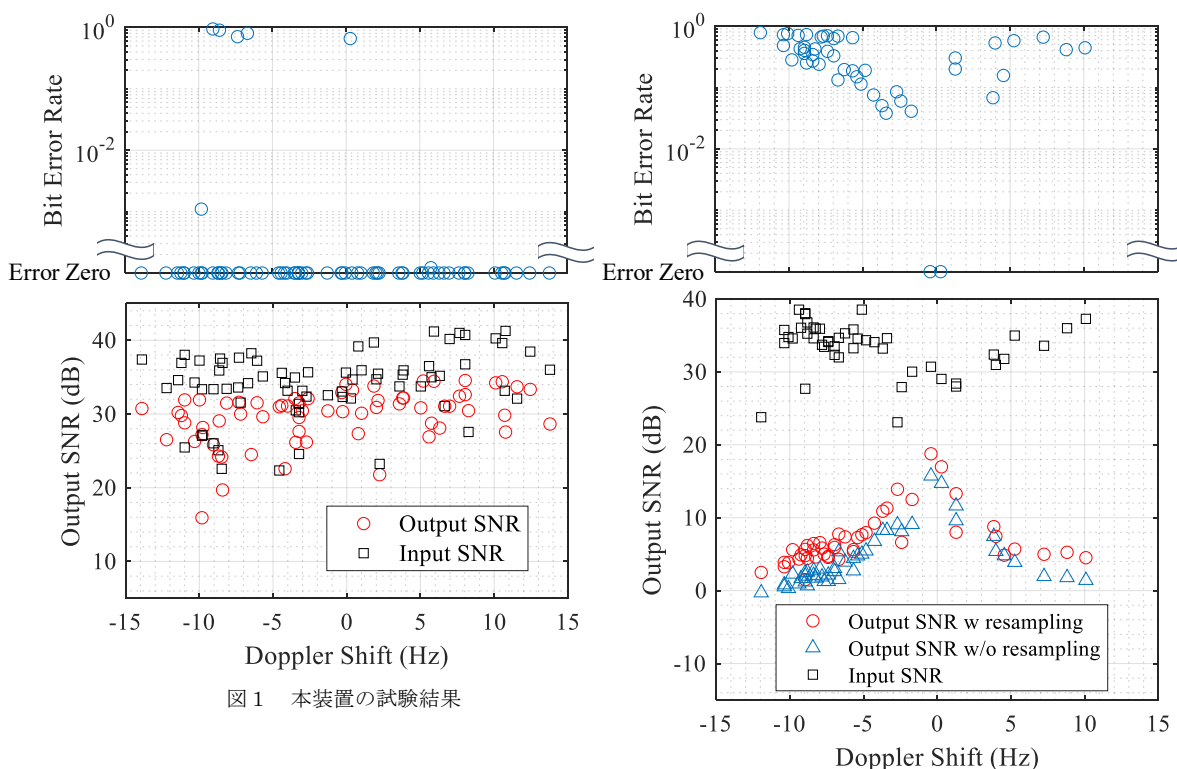


図1 本装置の試験結果

図2 OFDM による試験結果

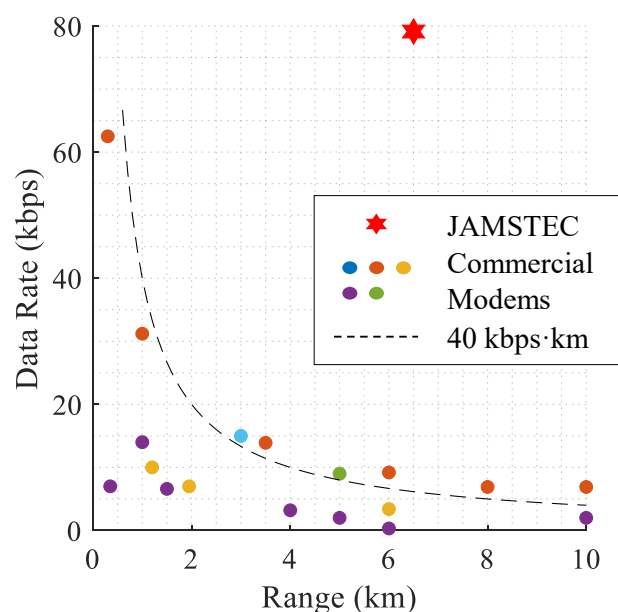


図3 他の通信装置との性能比較

参考文献

- [1] M. Stojanovic, et al., IEEE Comm. Mag. Vol. 47, pp.84-89 (2009).
- [2] Y. Kida, et al., Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 69 (SK), SKKF01 (2020).
- [3] M. Deguchi, et al., Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 69 (SK), SKKF02 (2020).
- [4] T. Shimura, et al., Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 58 (SG), SGGF06 (2019).
- [5] Y. Kida, et al., Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 58 (SG), SGGF03 (2019).
- [6] T. Shimura, et al., Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 57 (7S1), 07LC07 (2018).
- [7] T. Shimura, et al., Proc. IEEE/MTS Oceans'19 Marseille.
- [8] D. B. Kilfoyle, et al., IEEE J. Ocean. Eng., Vol. 25, pp. 4-27 (2000)