

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22760645

研究課題名(和文) 外乱下での位相共役波による長距離音響通信の研究

研究課題名(英文) Compensation for time variance in long-range time-reversal communication

研究代表者

志村 拓也 (SHIMURA, Takuya)

独立行政法人海洋研究開発機構・海洋工学センター・サブリーダー

研究者番号：80359140

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：海中の音響通信においては、空中における電波の通信とは異なり、マルチパス波によるシンボル間干渉や送受波器の移動による影響(ドップラーシフトと送受波点の移動によるチャンネルレスポンスの変化)が非常に大きい。前者については、これまでの研究で、位相共役波(時間反転波)による通信が有効であることを示してきた。本研究では、位相共役波による通信において、チャンネルレスポンスの時変動に対応する手法を検討し、シミュレーション、実海域試験を行って、その有効性を検証した。

研究成果の概要(英文)：In underwater acoustic communication, differently from radio communication in air, inter symbol interferences (ISI) due to multipath rich environment and the movement of source or receiver, which results in Doppler shift and time-variant channel impulse response, are very dominant. For the former, time reversal (phase conjugate) communication has been proposed and verified to be very efficient in the previous study. In this research, the method to compensate the effect of time variance in time-reversal communication is discussed and demonstrated based on the normal mode simulations and at-sea experiments.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学 船舶海洋工学

キーワード：水中音響通信 デジタル通信 位相共役 (phase conjugate) 時間反転 (time reversal) ドップラー時間変動 シンボル間干渉 マルチパス波

1 . 研究開始当初の背景

位相共役波(phase conjugate wave),あるいは,時間反転波(time reversal wave)とは,その名の通り,時間反転した信号(位相を共役にした信号)のことで,海洋においては,音波を収束するために利用される.周知のように,海洋中の水平方向の伝搬では,導波路構造によって,反射と屈折の数多くのマルチパス波が伝搬する.よって,このマルチパス波をすべてアレイで受信し,時間反転波をアレイから送信すれば,それぞれのパスをさかのぼって音波が伝搬し,元の音源の位置に音波が時間・空間的に収束することになる.(このように実際に時間反転した音波を発信する操作を active な位相共役(active time reversal)と呼ぶ.)

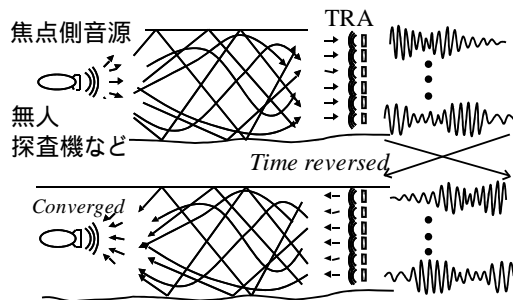


図 1 Active time reversal の概念図

位相共役波による通信は,この収束性を通信に利用しようとするものである.海洋中の音響通信では,前述のようにマルチパス波が多数受信されるため,シンボル間干渉(intersymbol interference : ISI)が発生して通信が困難になる.それに対し,時間反転波を適用すれば,マルチパス波が収束するために ISI が除去されて,通信が可能になる.いわば,通信を阻害するマルチパス波を逆に利用する方法であると言える.

研究代表者は,これまでに,この位相共役通信の適用について,シミュレーション,あるいは,仮想アレイ方式による実証実験によって,基礎的な検討を行ってきた.本研究では,こうした成果をさらに発展させ,後述するように,伝搬路の応答が時間変動する場合であっても適用ができる方法について研究を進めた.

なお,位相共役による通信は,多入力一出力の通信(multiple-output-single-output : MISO)と,一入力多出力の通信(single-input-multiple-output : SIMO)の双方に適用することができ,前者を active な位相共役通信(active time reversal communication),後者を passive な位相共役通信(passive time reversal communication)と呼ぶ.本研究では, SIMO 通信を目的とし, passive time reversal について,研究を行った.

2 . 研究の目的

Time reversal による通信では,伝搬路のチャ

ネルレスポンスが時不変であること,すなわち,送波点・受波点が移動しないこと,あるいは,音速分布が時間変動しないことが適用する前提条件となる.これが崩れると, time reversal による収束が崩れ,復調結果が悪化する.

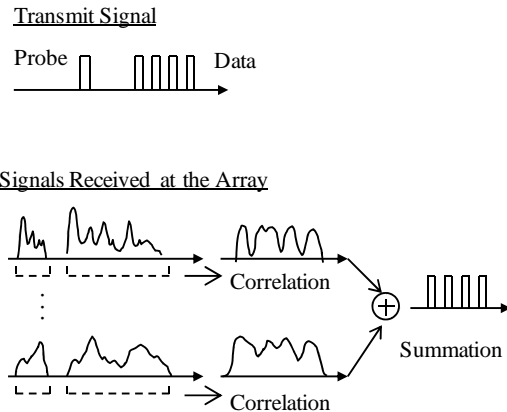


図 2 Time reversal による通信

これまでの研究で,このような時間変動に対応するために, time reversal による収束の後に,適応等化器(adaptive equalizer)による処理を組み合わせる手法を提案してきた.適応等化とは,デジタル通信の分野で広く用いられている,リアルタイムのデジタル処理によって逆フィルターを形成し通信を行おうとする方法である.この time reversal の収束と適応等化を組み合わせた方法によれば,ある程度の移動速度までは,その影響を補償できることがこれまでに示されている.ただし,移動速度が速くなれば,ドップラーによる影響だけではなく,位置のずれによる影響(time reversal における mismatch の問題)が大きくなり,復調が困難になってくる.

そこで本研究では,より大きな時変動やドップラーに対応する方法を検討し,シミュレーションや実データによって,その効果を検証する.

3 . 研究の方法

本研究では,シミュレーションと実海域試験によって,提案手法の有効性を検証する.海洋音響における音波伝搬の解析手法としては, ray theory(音線理論), normal mode 法, PE 法(放物型方程式近似法)などがよく用いられる.音線理論による方法は,よく知られている高周波近似による方法であり, normal mode 法, PE 法は,波動理論に基づくものである.いずれの方法も,送波点,受波点は,固定であるとして扱うため,移動体との音波伝搬シミュレーションを行うには,そのままでは適用することはできない.音線理論に基づいて,移動体のシミュレーションを行っている研究例なども見られるが,これらの例では,各パスにドップラーによる周波数シフトを加えただけであり,移動することによって,

応答関数が変化する効果は考慮されていない。

それに対して、送波点・受波点が水平方向に一定速度で移動する場合の影響を normal mode 法に正確に組み入れた方法が、Schmidt, Kuperman らによって、考案されている。本研究では、この手法を用いて、移動体との伝搬のシミュレーションを行い、復調方法の検討を行った。

さらに、送信制御回路、受信制御回路を製作し、既存の送波器、受波器アレイと合わせて使用して、実海域において深海域での計測実験を行った。

4. 研究成果

(1) CIR updating

先に述べたように、time reversal による通信では、伝搬路の reciprocity が保たれていることがその前提条件であり、送波側あるいは、受波側の移動速度が速くなれば、ドップラーによる影響だけではなく、位置のずれによる影響（time reversal における mismatch の問題）が大きくなり、復調が困難になってくる。

この問題を解消するために、CIR updating という方法が Song らによって考案された。通常の passive time reversal では、上述したように、データ信号とは別途プローブ信号を発信し、それらの受信信号の相関をとる。それに対し、CIR updating では、データ信号をブロック化して処理し、各ブロックを復調して得られた信号列から CIR (channel impulse response: 伝搬路のインパルス応答) を推定して、次のブロックに対する passive time reversal のプローブ信号として処理に用いるという処理を行う。このことによって、上記の mismatch 問題や移動速度の変動（一定速度ではない場合）などに対応し、復調が可能になる。

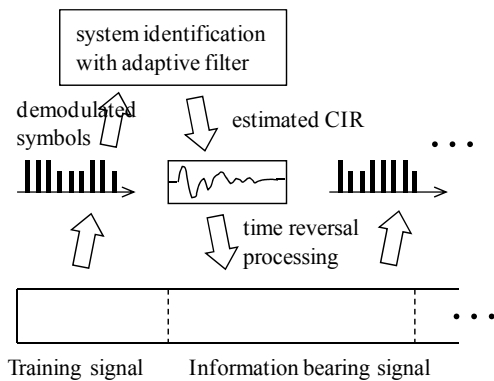


図 3 CIR updating 法 の 概 念 図

(2) シミュレーションによる検証

前述したように、送波点・受波点が水平方向に一定速度で移動する場合の影響を normal mode 法に組み入れた方法が、Schmidt, Kuperman らによって、考案されている。本研究では、この方法を用いて、移動体との伝

搬のシミュレーションを行い、復調方法の検討を行う。Schmidt らの手法の概要は以下のようになる。

円筒座標系 $\mathbf{r}=(r, z)$ における送波点、受波点の位置をそれぞれ、 $\mathbf{r}_s=(r_s, z_s)$, $\mathbf{r}_r=(r_r, z_r)$ とし、また、これらが一定速度で水平方向に移動しているとして、それぞれの速度を v_s, v_r とする。角周波数を ω とし、送信信号のスペクトルを $S(\omega)$ とすると、normal mode 法による応答関数は、

$$G(\omega; \mathbf{r}, \mathbf{r}_s) = \frac{i \exp(-i\pi/4)}{\sqrt{8\pi} \rho(z_s)} \times \sum_{m=1}^M S(\Omega_m) \Psi_m(z_r) \Psi_m(z_s) \times \frac{\exp(ik_m(\omega + k_m(\omega)v_r)|r_r - r_s|)}{\sqrt{k_m(\omega + k_m(\omega)v_r)|r_r - r_s|}}$$

と表される。ここで、

$$\Omega_m = \omega - k_m(\omega)(v_s - v_r)$$

であり、 k_m は、水平方向の波数、 $\Psi_m(z_r)$ は、 m 番目のモード関数である。式をみると、送信信号のスペクトルは、各モードでのシフトした周波数を介して、複数の周波数において寄与することが分かる。移動の影響によってシフトした周波数 Ω_m は、以下のように書き直される。

$$\Omega_m = \omega - k_m(\omega)(v_s - v_r) = \omega(v_m - (v_s - v_r)) / v_m$$

ここで、 v_m は、水平方向の各モードでの位相速度である。Normal mode 理論では、水平からの仰角 $\phi_m = \cos^{-1}(k_m c / \omega)$ の方向に伝搬する平面波が各モードに対応し、これらの重ね合わせで、音場が表現されることになる。よって、式は、それぞれの伝搬方向に応じたドップラーシフトがそれぞれのモードに加わることを示している。

このシミュレーション手法によって、CIR updating の有効性を検証した結果を以下に示す。シミュレーションは、標準的な成層媒質 (range-independent layer) モデル (Pekeris モデル) において、送波器が一定速度で移動するものとして行った。周波数帯域は後述する現在の送波器に合わせて、 $500 \pm 50\text{Hz}$ とし、シンボルレート 0.01sec の BPSK 信号を送信するものとする。まずは、理想的な条件として、受波アレイの素子間隔を十分密に、半波長 (1.5m) とし、送波器の移動速度を 1.5m/s としたときの結果が図 4 である。図は、上から、復調したシンボルの constellation map, mean square error (MSE), 同相成分のシンボル, digital phase lock loop による位相追尾の結果を示している。この結果から、移動の影響を補償し、シンボルエラーゼロの良好な復調が達成されていることが分かる。

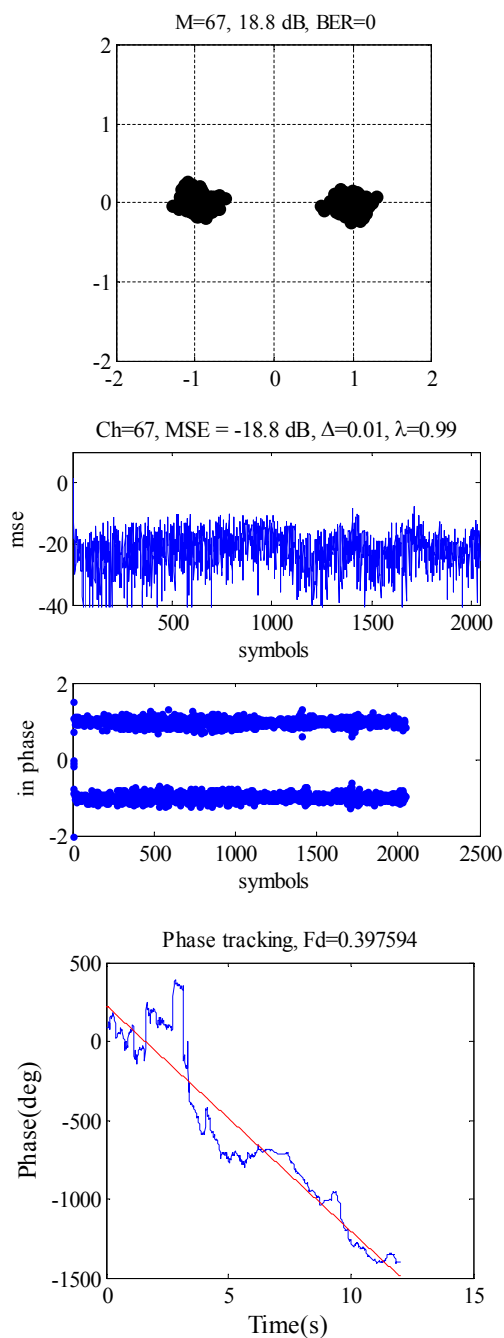


図4 移動速度 1.5m/s ,チャンネル数 67 でのシミュレーション結果

次に、より現実的な条件として、アレイの素子間隔を 15m、素子数を 7ch とした場合の結果が図 5 である。これらの結果から、半波長の 10 倍の間隔の受波アレイでも、1.0m/s までの速度に対応して復調が可能であることが示された。

(3) 実海域試験

実海域試験は、駿河湾奥の水深約 1,000m の海域において行った。前述したように、深海用の低周波送波器（中心周波数 500Hz、帯域 100Hz、送波レベル約 190dB）を調査船「かいはう」から吊下して、シンボルレート

0.01sec の BPSK 信号を発信した。送波点から距離約 10km の地点に、6m 間隔 20ch の受波アレイを係留し、信号を受信・計測した。図 6 に海域の海底地形図等を示す。

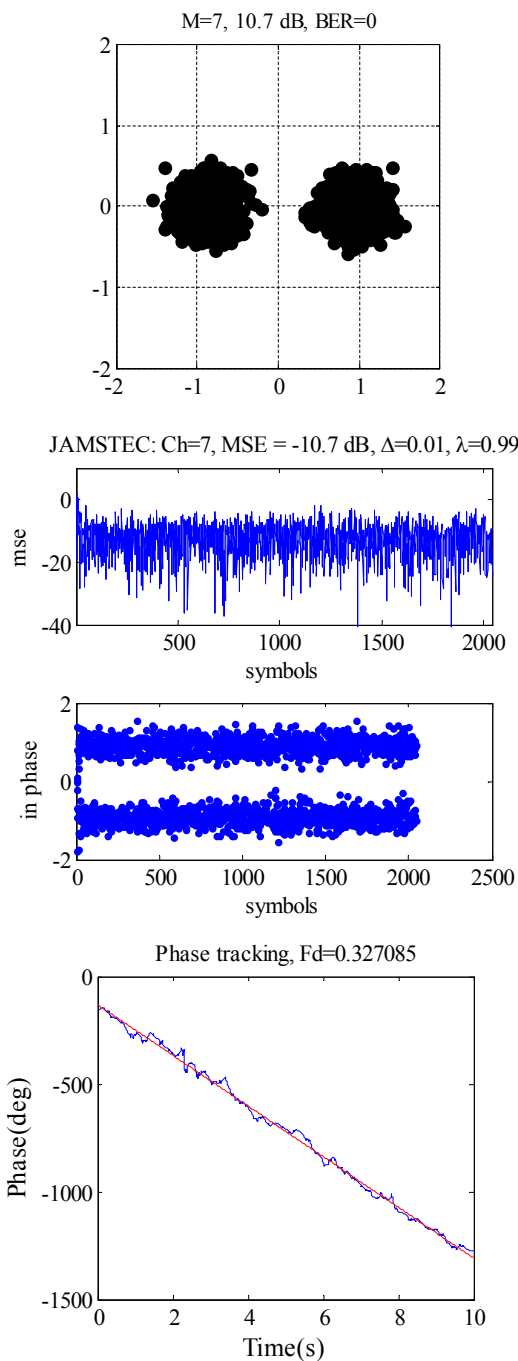


図5 移動速度 1.5m/s ,チャンネル数 7 でのシミュレーション結果

図 7, 8 は、動速度が約 0.5kt (約 0.25m/s) のときの、従来方法である passive time reversal と single-channel DFE を組み合わせた方法による復調結果と、CIR updating による復調結果である。これらを比較すると、従来手法では、パケットの後半で MSE が増大し、エラーが増加しているのに対し、CIR updating による結果では、安定してエラーフリーの復調

が実現されている．phase tracking の値を見ると, $f_d = -0.089$ となっており, 0.25m/s の移動速度がほぼ推定され, 的確に補正されていることが分かる．また, 図 9 は, 従来手法の passive time reversal の処理後の信号である．元の受信信号のレベルは変化していないにもかかわらず, この信号では, パケットの後半でレベルが減少している．これは, passive time reversal の処理において, 位置のずれによる mismatch の影響で, その収束効果が落ちていくことを表している．

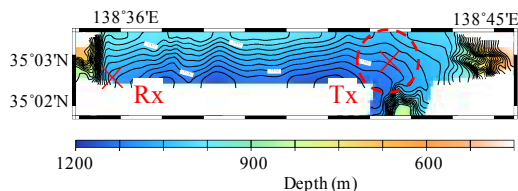


図 6 実験海域地形図

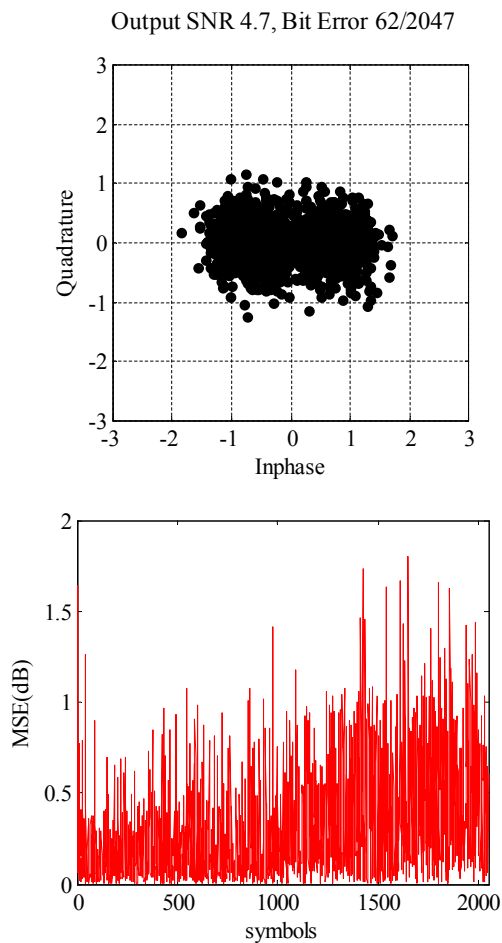


図 7 実験結果 速度 0.5kt
従来手法での復調結果

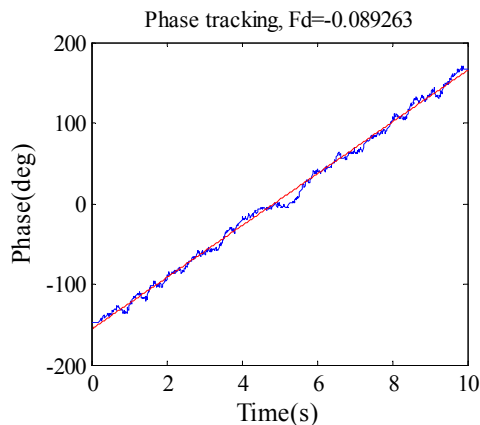
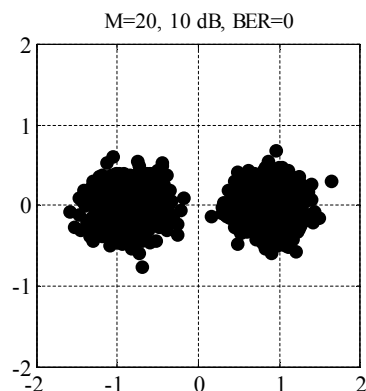


図 8 実験結果 速度 0.5kt
CIR updating による復調結果

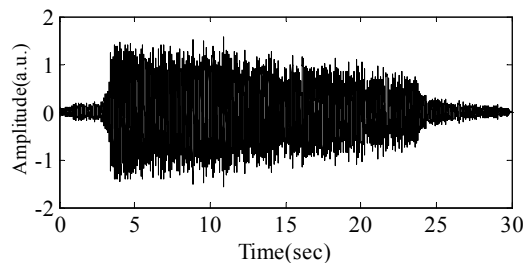


図 9 Passive time reversal による収束

続けて, 移動速度を 1.0kt , 1.5kt と変化させて実験を行った．図 10 は, 移動速度が約 1.5kt のときの CIR updating による復調結果である．これらの実験結果では, 移動速度に対応したドップラー推定がなされており, エラーフリーの復調が達成されている．

以上のように, CIR updating 法によって, 従来手法よりも早い移動速度に対応し, 通信を可能にできることを実証することができた．この後も更なる復調成績向上の検討を引き続き行う予定である．

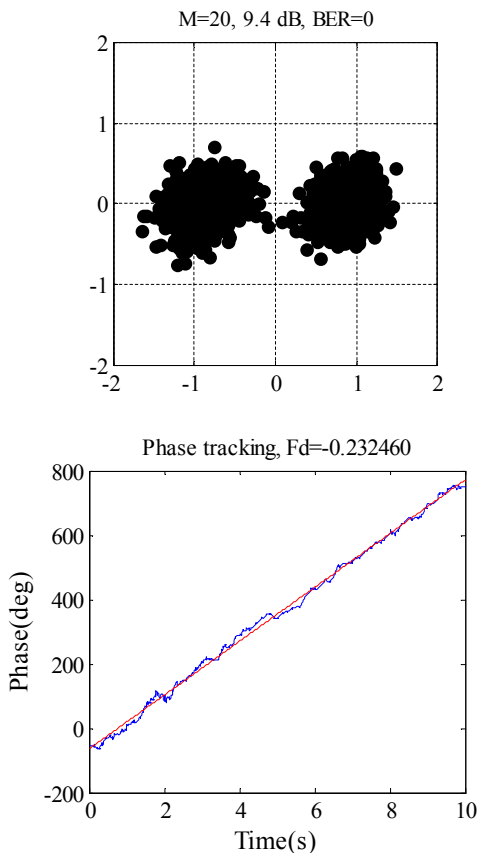


図 11 実験結果 速度 1.5kt
CIR updating による復調結果

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

Experimental demonstration of multiuser communication in deep water using time reversal, T. Shimura, H. Ochi, and H.C. Song, J. Acoust. Soc. Am. 134 (4), pp. 3223-3229 (2013). [査読あり]

Long-range time reversal communication in deep water: Experimental results, T. Shimura, Y. Watanabe, H. Ochi, and H. C. Song, Journal of Acoustical Society of America, Vol. 132(1), pp. EL49-EL53 (2012). [査読あり]

Demonstration of time-reversal communication combined with spread spectrum at the range of 900 km in deep ocean, T. Shimura, Y. Watanabe, H. Ochi, and T. Hattori Acoustical Science and Technology, Vol. 33, No. 2, pp. 113-116 (2012). [査読あり]

Experiment Results of Time-Reversal Communication at the Range of 300km, T. Shimura, Y. Watanabe, H. Ochi, and T. Hattori, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 49 (7), 07GH11-1-7, (2010). [査読あり]

〔学会発表〕(計 7 件)

Experiments of long-range time-reversal communication in the deep ocean, Takuya SHIMURA, Hiroshi OCHI, and Yoshitaka WATANABE, The 11th European Conference

on Underwater Acoustics (ECUA2012), Edinburgh Conference Centre, pp.726-730, Heriot-Watt University. Edinburgh, UK (2012/07/02).

Recent experiment results of long-range time-reversal communication in deep ocean, Takuya SHIMURA, Hiroshi OCHI, and Yoshitaka WATANABE, The spring meeting of the Acoustical Society of America, JASA Vol. 131 (4), pp.3277, Hong Kong Convention and Exhibition Centre (HKCEC), Hong Kong, (2012/05/14).

Results of basic experiments for long-range communication in the deep ocean, Takuya SHIMURA, Hiroshi OCHI, Yoshitaka WATANABE, Takehito HATTORI, The Proc. of UAM2011 (4th International Conference and Exhibition on Underwater Acoustic Measurements : Technologies and Results), pp. 1417-1422, Kipriotis Panorama Hotel, Greece (2011/06/20).

Time-reversal communication in deep ocean - results of recent experiments -, Takuya Shimura, Yoshitaka Watanabe, Hiroshi Ochi, and Takehito Hattori, International Symposium on Underwater Technology 2011, University of Tokyo, Tokyo (2011/04/11).

Feasibility study on long horizontal time-reversal communication with AUV in the deep ocean, Takuya Shimura, Yoshitaka Watanabe, Hiroshi Ochi, and Takehito Hattori, The 10th European Conference on Underwater Acoustics (ECUA2010), Vol. 2, pp. 643-648, Renaissance Polat Istanbul Hotel, Istanbul (2010/07/05).

Feasibility study on time-reversal communication in the deep ocean with a long cruising AUV, Takuya Shimura, Yoshitaka Watanabe, Hiroshi Ochi, and Takehito Hattori, 日本船舶海洋工学会 春季講演会, 東京都・タワーホール船堀 (2010/06/07).

Experiment Results of Time-Reversal Communication in the Outer Ocean, Takuya Shimura, Yoshitaka Watanabe, Hiroshi Ochi, and Takehito Hattori, Proceedings of Meeting of the Marine Acoustics Society of Japan, pp. 39-40, 東京都・東京工業大学大岡山キャンパス (2010/05/27).

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.jamstec.go.jp/maritec/j/development/auv/uacs/list.html#3>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

志村 拓也 (SHIMURA, Takuya)

独立行政法人海洋研究開発機構・海洋工学センター・サブリーダー

研究者番号：80359140