論文

簡易な 1 次伝送路予測による判定帰還多重遅延検波と その音響通信への応用

宮崎 律子¹, 湯本 菜々瀬², 久保 博嗣³

^{1,2} 立命館大学大学院理工学研究科, 滋賀県草津市野路東 1-1-1

³ 立命館大学理工学部, 滋賀県草津市野路東 1-1-1

Decision-Feedback Multiple Differential Detection Employing Simple First-Order Channel Prediction and Its Application to Acoustic Communications

Ritsuko Miyazaki¹, Nanase Yumoto² and Hiroshi Kubo³

^{1,2} Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University
1-1-1 Noji-Higashi, Kusatsushi, Shiga 525-8577, Japan

³ Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University
1-1-1 Noji-Higashi, Kusatsushi, Shiga 525-8577, Japan

E-mail: {¹ri0014xr, ²ri0034ir}@ed.ritsumei.ac.jp, ³kubohiro@fc.ritsumei.ac.jp

Abstract This paper proposes decision-feedback multiple differential detection (DFMDD) employing simple first-order channel prediction for time and frequency selective channels, i.e., double selective channels. For the sake of decision-feedback and simple channel prediction, the computational complexity of the proposed DFMDD is independent of the number of differential detection (DD) operations. Computer simulation results confirm that the proposed DFMDD has excellent bit error rate (BER) performance compared with the conventional DD on double selective fading channels. In addition, the field evaluation results in actual shallow underwater acoustic communications (UWAC) and terrestrial acoustic communications confirm that the proposed DFMDD has better BER performance than the conventional DD on fast time-varying channels.

Keywords: decision-feedback, differential detection, channel prediction, fast time-varying fading, underwater acoustic communications, terrestrial acoustic communications

1. まえがき

無線伝送方式における主要な課題として, 次の
3 点が挙げられる。

(1) 周波数利用効率の改善

(2) 耐遅延波特性の改善

(3) 耐伝送路変動特性の改善

これらの課題において, 課題(1)と(2)に関する研究
と比較して, 課題(3)に関する研究は比較的少ない。
その理由は, 無線通信の研究の主流が, 広帯域

化・大容量化であり、multiple-input multiple-output (MIMO) や orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) が主に検討されているためである[1]。しかし、同報通信を前提とする無線通信や放送の分野では、課題(3)が重要な役割を演じることも多い[2], [3]。更に、近年の海洋資源開発への期待もあり、水中音響通信 (UWAC) をはじめとした音響通信が注目を浴びつつある[4]–[7]。このような、電波でなく音波による無線通信においては、時間選択性と周波数選択性が同時に生じるダブルセレクトィブが厳しい環境となり、課題(1)と(2)と同様に課題(3)の克服も重要となっている。

UWAC のダブルセレクトィブ環境の克服技術として、適応等化器を用いたシングルキャリア (SC) 伝送方式や OFDM などのマルチキャリア (MC) 伝送方式が検討されている。MC 伝送方式はシンボル長を長くして周波数選択性を緩和する手法であるが、これは結果的に時間選択性を増大させることに帰着する。即ち、厳しいダブルセレクトィブ環境に対応する受信方式として、高速時変伝送路に対応可能な無線伝送方式が必要となる。

高速に変動する伝送路に対しては、遅延検波 (DD) が有効である[8]。加えて、更なる高速な伝送路変動に対応するために、高次予測を適用した方式も含めて数多くの DD を拡張した方式が検討されている[8]–[16]。伝送路変動への追従性改善を目的としたパラメータ設定の観点からは、(a)フェージングや雑音の統計的性質を何らかの手法で推定してパラメータを設定するもの、(b)前もって決定したターゲット性能からパラメータを設定するものがある。他方、データ判定の観点からは、(c)ビタビアルゴリズムなどを活用して準最尤の判定を行うもの、(d)判定帰還のような簡単な形式で判定を行うものがある。ここで、性能面からは、上記(a)と上記(c)の組合せが有効であるが、上記(a)は統計的性質を何らかの手法で知る必要があること、上記(c)は復調処理の演算量が大きいという問題がある。それゆえ、本論文では、上記(b)と上記(d)を組合せた方式に焦点を当てて議論する。

本論文では、ダブルセレクトィブ環境に有効な、伝送路予測を適用した判定帰還多重遅延検波 (DFMDD) に関して検討する。なお、検討する高

次予測 DFMDD に対して、予測次数を1次に限定することで、演算量を大幅に低減する手法[17]の適用を提案する (本論文の一部は文献[18], [19]で既に提案している)。本論文では、検討を容易にするために狭帯域 SC 伝送方式に焦点を当てて議論する。次に、計算機シミュレーションにより、ダブルセレクトィブ環境において、従来の DD と提案する1次伝送路予測 DFMDD との特性比較を行い、提案する DFMDD の有効性を明らかにする。最後に、UWAC 環境とスピーカとマイクを利用した陸上音響通信環境で、DD と提案する DFMDD の性能を比較して、DFMDD の有効性を明らかにする。

本論文は、次のように構成されている。2.では、想定する通信システムについて述べる。3.では、簡易な1次伝送路予測によるDFMDDを提案する。4.及び5.では、シミュレーションと実験結果から、提案するDFMDDの有効性を明らかにする。

2. 想定する通信システム

2.1 通信システムのモデル

図1 通信システムのモデル
Fig.1 Communication system model

図1に、2本の受信アンテナを有するSIMO (single-input multiple-output) 伝送系による通信システムのモデルを示す。ここで、シンボル周期は T 、2本の受信アンテナは q ($q = 1, 2$) なるサフィックスを用いて表記する。加えて、SIMO 伝送路は、伝送路インパルス応答 (CIR) が $h_k[q]$ で、伝送路に符号間干渉 (ISI : intersymbol interference) が存在しないものとする。ここで、 a_k は時刻 k における

信号 a を示す。

差動符号化変調器は m ビットの送信情報 b_k を入力し、次の変調情報信号 u_k を作成する。

$$u_k \in \left\{ \exp\left(\frac{2\pi}{M}i\right); i=0,1,\dots,2^m-1 \right\} \quad (1)$$

ここで、 M は 2^m なる変調多値数である。差動符号化変調信号 x_k は、変調情報信号 u_k を用いて、次のように算出される。

$$x_k = u_k x_{k-1} \quad (2)$$

ここで、 $x_0 = 1$ とする。差動符号化変調信号 x_k は、SIMO 伝送路を介して加法性白色ガウス雑音(AWGN) $w_k[q]$ を受けて、次のような2系統の受信信号 $r_k[q]$ となる。

$$r_k[q] = h_k[q]x_k + w_k[q] \quad (3)$$

復調器は、この受信信号 $r_k[q]$ を入力し、送信情報の推定値である判定値 $\hat{b}_k$ を出力する。

2.2 ダブルセレクトティブ伝搬路

無線伝搬環境を規定するパラメータとして、シンボル周期正規化最大遅延時間差 τ_D/T 、及び、シンボルレート正規化最大ドップラー周波数 $f_D T$ が重要である。ここで、 τ_D/T は周波数選択性と関係し、 $f_D T$ は時間選択性と関係する。本論文で論じるダブルセレクトティブ伝搬路とは、周波数選択性と時間選択性が同時に発生する伝搬環境である。

ダブルセレクトティブ環境では、 τ_D/T と $f_D T$ は T をパラメータとして、トレードオフを有する。著者らは、このトレードオフを規定するパラメータとして、次の $f_D \tau_D$ を提案し、幾つかの例に関して検討を実施している[20]。

$$f_D \tau_D = (f_D T) \times (\tau_D / T) \quad (4)$$

$$f_D T = \frac{v f_c}{c} T \quad (5)$$

$$\tau_D / T = \frac{d}{cT} \quad (6)$$

ここで、 v は移動速度、 d は最大伝搬距離差、 f_c は搬送波周波数、 c は光速である。なお、音波伝搬に関しては、式(5)及び式(6)における c を音速とすれば良い。その結果、 $f_D \tau_D$ は、電波伝搬環境下では、次のように算出できる。

$$f_D \tau_D = \frac{v d f_c}{c^2} \quad (7)$$

具体的な移動環境における数値を検討してみよう。SC 伝送方式にて厳しいダブルセレクトティブ環境といわれる狭帯域 SCPC (single channel per carrier) システム[2]を想定したとしても、 $f_D \tau_D$ は 1.9×10^{-3} 程度に留まる[20]。他方、UWAC 環境の一例として、移動速度 v を3kt 即ち1.5m/sec、最大伝搬距離差 d を1.5m、搬送波周波数 f_c を30kHzとすると、 $f_D \tau_D$ は 3.0×10^{-2} 程度となる。換言すると、UWAC 環境は電波環境の一例の10倍以上厳しいダブルセレクトティブ環境ということになる。例えば、 τ_D/T が1/8 まで SC 伝送方式が対応できると仮定すると、対応すべき $f_D T$ は、

$$f_D T \geq 8 f_D \tau_D \quad (8)$$

の関係を満足する必要がある。すなわち、UWAC では約20%程度の $f_D T$ への対応が必要となる。以上より、UWAC 環境では、大きな $f_D T$ に対応可能な復調方式の実現が重要となる。

3. 簡易な1次伝送路予測 DFMD の提案

3.1 DFMD のアルゴリズム

従来から、移動体通信の復調技術としては、DD が多く用いられている。しかし、2.2 で記載した、UWAC を想定した高速フェージング環境では、DD の性能は大きく劣化する。そこで、本論文では、DD を発展させた DFMD[11]に対して、伝送路予測を適用した復調方式を検討する。

図2にDFMDのブロック図を示す。DDは、1シンボル間の位相差を情報として扱うのに対し、

DFMDD は判定値を利用することで、受信信号 r_k と n 個 ($n = 1, 2, \dots, N$) 過去の受信信号 r_{k-n} との DD 結果を情報とし、その情報にタップ係数 v_n を乗算し、軟判定値 $\bar{u}_k$ を作成する。

$$\bar{u}_k = \sum_{n=1}^N v_n \hat{g}_k^{(n)*} r_k r_{k-n}^* \quad (9)$$

ここで、 a^* は a の複素共役、 N は DD の最大観測シンボル数で、 $\hat{g}_k^{(n)}$ は次のように与えられる。

$$\hat{g}_k^{(n)} = \hat{u}_{k-1} \hat{u}_{k-2} \cdots \hat{u}_{k-n+1} \quad (10)$$

この軟判定値 $\bar{u}_k$ を硬判定して判定値 $\hat{u}_k$ を得る。上記より明らかなように、DFMDD は従来の DD と比較して、演算量は約 N 倍となる。

DFMDD では、タップ係数 v_n をどのように設計するかにより性能が変化する。本論文では、演算量が少なく、かつ、高速フェージングへの高い追随性を有するタップ係数の設計に関して検討する。

図2 DFMDD のブロック図
Fig. 2 Block diagram of DFMDD

3.2 提案する1次伝送路予測法

文献[11]の DFMDD では、受信感度を改善するために、遅延検波結果を平均化する手法が提案されている。他方、伝送路変動に対する追随特性を高めるためには、伝送路予測を検討する必要がある。

ここで、高速フェージングに対する予測手法としては、AR モデルに基づく線形予測手法が有効である[21]。しかし、この手法は、事前に最大ドップラー周波数や受信 SNR を知る必要があるために、現実的とはいえない[21]。そこで、本論文では、AR モデルに基づく線形予測手法は検討せず、現実的な手法にて伝送路予測を行う手法を検討する。

高速フェージングが生じる伝送路では、伝送路特性の変化を、複雑な曲線のモデルで表すことができる。しかし、伝送路モデルを単なる1次モデルと近似しても、伝送路変動に対する予測性能を向上させることが可能である。図3に、CIR h_k の時間変動が、1次モデルである場合の例を示す。

図3 伝送路変動のモデル
Fig. 3 Channel model with first-order channel prediction

図3のモデルで、時刻 $(k-1)$ から $(k-N)$ の雑音による揺らぎを受けた観測 CIR、即ち、 h'_{k-1} から h'_{k-N} を用いて、時刻 k の CIR h_k を推定してみよう。ここで、 N は過去の受信信号の観測シンボル数である。観測される CIR は雑音の影響を受けているため、時刻 $(k-1)$ から $(k-N)$ の変動量の推定値 $\Delta \hat{h}_k$ は、次のように h'_{k-1} から h'_{k-N} の変化分から算出できる。

$$\Delta \hat{h}_k = h'_{k-1} - h'_{k-N} \quad (11)$$

この $\Delta \hat{h}_k$ における1シンボルに相当する変動分を h'_{k-1} に加算することで、時刻 k の CIR の推定値を得ることができる。

$$\hat{h}_k = h'_{k-1} + \frac{\Delta \hat{h}_k}{N-1} \quad (12)$$

$$= \frac{N}{N-1} h'_{k-1} - \frac{1}{N-1} h'_{k-N}$$

式(12)の関係式が, DFMDD における DD の重み付けに適用できると近似すると, DFMDD のタップ係数 v_n は次のようになる。

$$v_n = \begin{cases} \frac{N}{N-1} & (n=1) \\ -\frac{1}{N-1} & (n=N) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (13)$$

図4 提案する1次伝送路予測DFMDDのブロック図
Fig. 4 Block diagram of the proposed DFMDD

式(13)の v_n を用いることで, 1 タップ目と N タップ目以外の v_n は全て0となり, DFMDD のブロック図を, 図2から図4のように変更できる。これにより, 従来は N 個必要であったDD処理を, N とは関係なく, 2個とでき, 演算量を大きく削減できる。

4. シミュレーション結果

本章では, 計算機シミュレーションにより, 従来のDDと提案する1次伝送路予測DFMDDの性能を比較する。ここで, DFMDD のタップ係数 v_n は式(13)に従うものとする。シミュレーション条件は, 変調信号はQPSK, 送信シンボル数は224シンボル, 標本化タイミングはナイキスト点, 変調信号スペクト

ルは送受均等分割の20%ロールオフ特性とし, フェーディングは2パス独立レイリーフェーディング(パス間のシンボル周期正規化最大遅延時間差は τ_D/T), 受信アンテナ数が2とする。ここで, DFMDD に関しては, $N = 2, 5, 9$ の3通りを評価する。

図5では, フラットフェーディング下でのBER特性を比較する。ここで, 正規化最大ドップラー周波数 $f_D T$ は0, 0.04の2通りを評価する。

図5 フラットフェーディング下でのBER特性
($\tau_D/T = 0$)

Fig. 5 BER performance on flat Rayleigh fading channels ($\tau_D/T = 0$)

図6では, $f_D T$ が0.04という高速フェーディング下でのBER特性を比較する。ここで, 遅延時間差 τ_D/T は0, 1/8の2通りを評価する。なお, τ_D/T が1/8の場合がダブルセレクトィブ環境に相当する。

以上より, 次の性質が明らかとなる。

- ・図5の $f_D T = 0$ の準静特性から, $N = 5, 9$ のDFMDDがDDと同程度の受信感度特性を有することが示される。
- ・図6のダブルセレクトィブ環境における特性から, $N = 5$ のDFMDDは, 比較的低いSNRにてDDと同程度の受信感度を維持しつつ, 良好なBERフロア特性を実現できることが示される。

DFMDDは, DDの最大シンボル数 N に関して, 受信感度特性と追従特性がトレードオフを有する。即ち, N を大きく設定すると受信感度が改善し, N を

小さく設定すると追従特性が改善する。他方、伝送路に遅延時間差が存在する条件では、ISI 成分が一種の雑音成分として作用する。その結果、平均 E_b/N_0 が良好な状況でも、実質的な SNR は低い値となる。それ故、ダブルセレクトィブ伝送路では、受信感度と追従特性のトレードオフにより最適な N が決定される。その結果、今回検討した条件では、提案する 1 次伝送路予測 DFMD ($N = 5$) が、最もダブルセレクトィブフェージングに有効であることが明らかとなる。

図 6 高速フェージング下での BER 特性
($f_D T = 0.04$)

Fig. 6 BER performance on fast time-varying fading channels ($f_D T = 0.04$)

5. 実験結果

本章では、琵琶湖浅瀬環境の UWAC と、移動を伴う陸上音響通信に対する実験結果を示し、従来の DD と提案する 1 次伝送路予測 DFMD ($N = 2, 5, 9$) の性能差を確認する。ここで、DFMD のタップ係数 v_n は式(13)に従うものとする。実験条件は、変調信号は QPSK, 1 フレームは 1024 シンボル、標準化タイミングは BTR (bit timing recovery) にて再生し、変調信号スペクトルは送受均等分割の 20% ロールオフ特性、受信アンテナは

2 本とする。実験における音響電子機器としては LS-100 (OLYMPUS) を用いる (実験系の詳細は、文献[22]–[24]参照)。

5.1 琵琶湖浅瀬環境での UWAC 試験結果

本実験は、琵琶湖博物館駐車場横の水深約 3m の浅瀬にて実施したものである。ここで、搬送波周波数は 30kHz, 伝送速度は 187.5sps とする。トランスデューサは水深 1m まで沈め、送信トランスデューサと 2 本の受信トランスデューサの中間点の距離は 1m, 2 本の受信トランスデューサは距離は 1m として、送信トランスデューサから一直線で並ぶ形としている。

図 7 に、上記 UWAC 環境にて取得した受信信号に対して、強制的にシンボルレート正規化周波数オフセット $\Delta f T$ を印加した場合の BER 特性を示す。図より、 $\Delta f T$ が 3% を超えると、提案する 1 次伝送路予測 DFMD ($N = 5$) が DD より良好な性能を有することが示される。

図 7 UWAC 環境で周波数オフセット $\Delta f T$ が BER 特性に与える影響

Fig. 7 BER performance as a function of frequency offset $\Delta f T$ in UWAC environment

5.2 陸上移動体音響通信環境での特性

図 8 に示すように、室内にてスピーカとマイクの距離を 0m から 1m の範囲でスピーカを時間的に双方向に移動させ、その移動速度が BER 特性に与

える影響を調査する。ここで、搬送波周波数は 16kHz, 伝送速度は 187.5sps とする。また、今回は室内にて、スピーカ NX-50 (YAMAHA) を用いて実施する。

図 8 陸上音響通信の実験系の構成

Fig. 8 Configuration of experimental model in terrestrial acoustic communications

図 9 陸上音響通信環境での平均移動速度 v が BER 特性に与える影響

Fig. 9 BER performance as a function of average velocity v in terrestrial acoustic communications environment

図 9 に、上記陸上音響通信環境にて、平均移動速度 v m/sec が BER 特性に与える影響を示す。図より、平均移動速度 v が 0.25m/sec を超えると、提案する 1 次伝送路予測 DFMD ($N = 5$) が DD

より良好な性能を有することが示される。

6. むすび

本論文では、高速フェージングに対して高い追従性を有する、伝送路予測を適用した DFMD について検討し、演算量の少ない 1 次予測係数を提案した。次に、提案する 1 次予測 DFMD の性能を、各種ダブルセレクトティブ環境にて評価した。具体的には、Jakes モデルによるダブルセレクトティブフェージング下でのシミュレーション、琵琶湖博物館横浅瀬の UWAC 環境の実験、移動環境を想定した室内音響通信の実験により評価した。これらシミュレーション結果と実験結果から、提案する 1 次予測 DFMD (観測シンボル数 N は 5) が従来の DD より良好な BER 特性を有することを明らかにした。

今回は、基礎検討として SC 伝送方式にて性能評価を実施した。しかし、ダブルセレクトティブ環境にては、MC 伝送方式が有効と想定され、各種 MC 伝送方式の性能評価を実施予定である。更に、誤り訂正方式の検討も実施予定である。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 25420393 の助成を受けたものである。本研究実施に関してご協力頂いた独立行政法人水資源機構琵琶湖開発総合管理所 湖南管理所 廣瀬正一所長並びに関係各位、東日本旅客鉄道株式会社 鉄道事業本部 電気ネットワーク部 安部哲也課長、三浦和人主員、吉田成利氏並びに関係各位、三菱電機株式会社情報技術総合研究所無線通信技術部岡崎彰浩グループマネージャに深く感謝する。

参考文献

- [1] H. Sampath, S. Talwar, J. Tellado, V. Erceg and A. Paulraj : A fourth generation MIMO-OFDM broadband wireless system : Design, performance, and field trial results, IEEE Commun. Mag., Vol. 40, pp. 143-149, Sep. 2002.
- [2] 吉田勝弘, 西村佳久, 安部哲也, 大島良夫, 久保博嗣, 浦口 剛, 棚田一夫, 岡崎彰浩, 山崎 茂, 田子憲三, 谷口 順 : 鉄道環境

- におけるデジタル列車無線の試験評価(2) —送信時間ダイバーシチによるビート干渉抑圧効果—, 信学技報, Vol. RCS2001-63, pp. 7-12, 2001-07.
- [3] S. Sheng : Mobile television receivers : A free-to-air overview, IEEE Commun. Mag., Vol. 47, pp. 142-149, Sep. 2009.
- [4] 金起煥, 合志和洋, 田所嘉昭 : 超音波を利用したデータ伝送に関する検討, 信学技報, Vol. US98-18, pp. 17-24, 1998-06.
- [5] 松岡保静, 中島悠輔, 吉村健 : 可聴帯域における音波情報伝送技術 -音響 OFDM-, 信学技報, Vol. EA2006-24, pp. 25-29, 2006-06.
- [6] A.C. Singer, J.K. Nelson and S.S. Kozat : Signal processing for underwater acoustic communications, IEEE Commun. Mag., Vol. 47, pp. 90-96, Jan. 2009.
- [7] S. Al-Dharrab, M. Uysal and T.M. Duman : Cooperative underwater acoustic communications, IEEE Commun. Mag., Vol. 51, pp. 146-153, July 2013.
- [8] J. G. Proakis and M. Salehi : Digital Communications, Fifth Edition, New York : McGraw-Hill, 2008.
- [9] D. Divsalar and M.K. Simon : Multiple-symbol differential detection of MPSK, IEEE Trans. Commun., Vol. COM-38, No. 3, pp. 300-308, March 1990.
- [10] H.J. Lodge and M.L. Moher : Maximum-likelihood sequence estimation of CPM signals transmitted over Rayleigh flat-fading channels, IEEE Trans. Commun., Vol. COM-38, No. 6, pp. 787-794, June 1990.
- [11] F. Adachi and M. Sawahashi : Decision feedback multiple-symbol differential detection for M-ary DPSK, IEEE Electron. Lett., Vol. 29, No. 15, pp. 1385-1387, July 1993.
- [12] D. Makrakis : Trellis coded modulations with improved non-coherent detection for personal and mobile satellite communications, Proc. International Journal of Satellite Communications, Vol. 11, pp. 253-269, Nov., 1993.
- [13] T. Kojima, F. Ishizu, M. Miyake, K. Murakami and T. Fujino : Design of anti-Rician-fading modem for mobile satellite communication systems, Proc. International Mobile Satellite Conference 1995, pp. 13-18, 1995.
- [14] R. Schober, W.H. Gerstacker and J.B. Huber : Decision-feedback differential detection of MDPSK for flat Rayleigh fading channels, IEEE Trans. Commun., Vol. COM-47, No. 7, pp. 1025-1035, July 1999.
- [15] 久保博嗣, 小島年春, 谷口 順 : 適応形最ゆう系列推定と多重遅延検波の関係とその無線通信への応用, 信学論(B), Vol. J84-B, No. 11, pp. 1909-1917, 2001-11.
- [16] H. Kubo, A. Okazaki, K. Tanada, B. Penther and K. Murakami : A multiple-symbol differential detection based on channel prediction for fast time-varying fading, IEICE Trans. Commun., Vol. E88-B, No. 8, pp. 3393-3400, Aug. 2005.
- [17] H. Kubo : A simple decision-feedback block differential detection scheme for DSTBC, Proc. IEEE VTC2014-Spring, May 2014.
- [18] 宮崎律子, 久保博嗣 : 高速フェージングのためのマルチキャリア高次予測判定帰還遅延検波, 信学技報, Vol. RCS2014-35, pp. 19-24, 2014-06.
- [19] R. Miyazaki, N. Yumoto and H. Kubo : Simple decision-feedback multiple differential detection employing first-order channel prediction and its applications to underwater acoustic communications, Proc. RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing 2016 (NCSP'16), pp. 439-442, March 2016.
- [20] 久保博嗣 : 高速時変伝送路に適した差動時空符号化とその無線通信システムへの応用, 信学技報, Vol. RCS2013-193, pp. 87-92, 2013-11.
- [21] 山口歌奈子, 小川恭孝, 西村寿彦, 大鐘武雄 : 時変動マルチユーザ MIMO システムにおけるチャネル予測手法の効果に関する考察, 信学技報, Vol. AP2013-107, pp. 43-48, 2013-11.
- [22] 森田宗一郎, 村山陽寛, 湯本菜々瀬, 久保

博嗣：水中音響通信のための音響電子機器を用いたオフラインフィールド評価装置に関する検討，信学技報，Vol. RCS2015-227，pp. 221-226，2015-11.

[23] 村山陽寛，森田宗一郎，湯本菜々瀬，久保博嗣：ダブルセレクトティブ伝搬環境に適した水中音響通信用チャネルサウンダに関する検討，信学技報，Vol. RCS2015-231，pp. 245-250，2015-11.

[24] 湯本菜々瀬，森田宗一郎，村山陽寛，久保博嗣：シングルキャリア差動符号化 QPSK/遅延検波による実環境水中音響通信でのビット誤り率評価結果，信学技報，Vol. RCS2015-232，pp. 251-256，2015-11.

宮崎 律子 2014 年立命館大学工学部電子情報工学科卒業。2016 年立命館大学大学院理工研究科電子システム専攻修了。同年三菱電機㈱入社。現在，同社コミュニケーションネットワーク製作所勤務。在学中は，ディジタル無線通信方式の研究に従事。

湯本 菜々瀬 2016 年立命館大学工学部電子情報工学科卒業。現在，立命館大学大学院理工研究科電子システム専攻在学中。ディジタル無線通信方式の研究に従事。

久保 博嗣 1984 年大阪大学工学部通信工学科卒業。1986 年大阪大学大学院工学研究科修士課程修了。同年三菱電機(株)入社。同社情報技術総合研究所無線通信技術部長を経て，2012 年から立命館大学工学部電子情報工学科教授。ディジタル無線通信方式の研究開発に従事。平成 6 年度電子情報通信学会学術奨励賞，平成 21 年度第 20

回電波功績賞電波産業会長賞，平成 22 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞受賞。工博。電子情報通信学会シニア会員，IEEE 会員。

(2016 年 2 月 3 日受付；2016 年 4 月 20 日再受付)