

時変動環境におけるマルチユーザ MIMO システム

A Multi-user MIMO System in Time-varying Environments

小川恭孝 西村寿彦 大鐘武雄

Abstract

マルチユーザ MIMO システムの下り回線においては、通常、ユーザ間の干渉、及び、同一ユーザの複数ストリーム間の干渉がなくなるように基地局は送信ウェイトを決定し、それを信号に乗算して伝送が行われる。一方、ユーザ端末や周囲の散乱体の移動により、一般に、チャンネルは時間変動する。このような環境では、送信ウェイトを決定したときのチャンネルと実際に送信を行うときのチャンネルに変動があるため干渉が発生し、特性が劣化する。この問題はチャンネルを予測することにより軽減が可能である。本稿では、時変動チャンネルがマルチユーザ MIMO システムに与える影響とチャンネル予測の効果を明らかにする。

キーワード：マルチユーザ MIMO システム、時変動チャンネル、ユーザ間干渉、チャンネル予測、AR 法

1. はじめに

マルチユーザ MIMO システムの下り回線（基地局から各ユーザ端末への伝送）⁽¹⁾では、通常、基地局はユーザ間干渉が発生しないように送信が行われる。これは、ユーザ端末のアンテナ数は基地局のそれに比べて少なく、端末での干渉除去が簡単ではないためである。このような送信のためには、基地局において全てのユーザ端末についての下り回線チャンネル^(明語)情報が必要となる。上り回線と下り回線の周波数が異なる FDD (Frequency Division Duplex) 系の場合には、基地局からパイロット信号を送信し、ユーザ端末の各アンテナまでのチャンネルを推定し、その情報をフィードバックすることにより、これが可能となる。本稿では、下り回線のチャンネル情報を用いてほかのユーザ端末に干渉を全く与えないウェイトを送信信号に乗算するブロック対角化法⁽²⁾が用いられると仮定する。一方、ユーザ端末や周囲の散乱体が移動するような環境では、チャンネルは時間変動をす

ることになる。通常、ユーザ端末からのフィードバックには遅延があるため、実際に下り回線での送信を行うときのチャンネルと送信ウェイトを決定する際に用いたチャンネルには違いが存在し、ユーザ間干渉が発生する。同一のユーザに複数のストリーム^(明語)を送信するときには、これらのストリーム間の干渉も生ずることになる。上り回線と下り回線を時間で分ける TDD (Time Division Duplex) 系では、上下回線で同一の周波数帯が用いられるため、上り回線信号から下り回線のチャンネルを推定することができる。この場合にも、上り回線信号の受信と下り回線信号の送信の間に時間差があると、FDD 系と同様にチャンネルの時変動による干渉の発生は免れない。

本稿では、マルチユーザ MIMO 通信における時変動チャンネルの影響とチャンネル予測による干渉軽減の効果を考察する。

2. ブロック対角化法を用いたマルチユーザ MIMO システム

図 1 に 2 ユーザ端末の場合のマルチユーザ MIMO システムのブロック図を示した。簡単化のため、基地局には 4 本のアンテナ、各ユーザ端末には 2 本のアンテナが設置されているとする。ユーザ端末 1 と 2 に送信される信号を、それぞれ、 $\mathbf{s}_1(t)$ と $\mathbf{s}_2(t)$ と表すことにする。一

小川恭孝 正員：フェロー 北海道大学大学院情報科学研究科メディアネットワーク専攻
E-mail ogawa@ist.hokudai.ac.jp
西村寿彦 大鐘武雄 正員 北海道大学大学院情報科学研究科メディアネットワーク専攻
Yasutaka OGAWA, Fellow, Toshihiko NISHIMURA, and Takeo OHGANE, Members (Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University, Sapporo-shi, 060-0814 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.97 No.4 pp.285-289 2014 年 4 月
©電子情報通信学会 2014

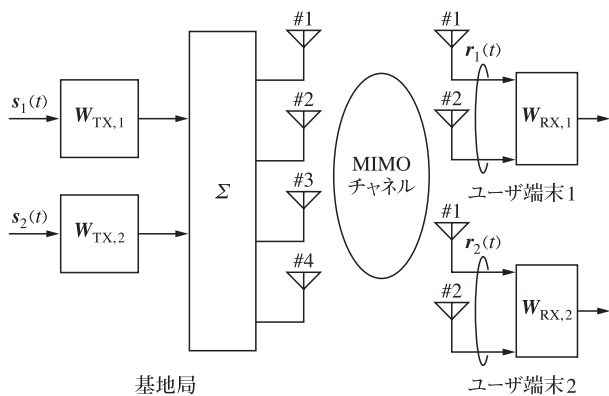


図1 マルチユーザ MIMO システム 基地局が2ユーザ端末を同時に収容するシステムを示した。 $s_1(t)$ と $s_2(t)$ は、それぞれ、ユーザ端末1と2に送られる信号を表している。それらに送信ウェイト $W_{TX,1}$ と $W_{TX,2}$ が乗算される。ユーザ端末では、受信信号ベクトル $r_1(t)$ と $r_2(t)$ に、それぞれ、受信ウェイト $W_{RX,1}$ と $W_{RX,2}$ が乗算される。

人のユーザに1ストリームを送信するときは、これらはスカラー量であり、2ストリーム伝送のときは二次元の列ベクトルである。それぞれの信号に送信ウェイト $W_{TX,1}$ と $W_{TX,2}$ が乗算される。送信ウェイトは、1ストリーム伝送時は四次元の列ベクトルとなり、2ストリーム伝送時には4行2列の行列となる。各送信アンテナから送られた信号は、多重波となってユーザ端末に届くことになる。ここで、ユーザ端末1と2の下り回線 MIMO チャンネルを、それぞれ、 H_1 と H_2 と表す。基地局アンテナ数が4、各ユーザ端末アンテナ数が2なので、 H_1 と H_2 は2行4列行列となる。

以上から、ユーザ端末1と2のアンテナ出力を表す二次元列ベクトル $r_1(t)$ と $r_2(t)$ は以下の式で与えられる。

$$r_1(t) = H_1 W_{TX,1} s_1(t) + H_1 W_{TX,2} s_2(t) + n_1(t) \quad (1)$$

$$r_2(t) = H_2 W_{TX,2} s_2(t) + H_2 W_{TX,1} s_1(t) + n_2(t) \quad (2)$$

用語解説

チャンネル 送信アンテナから受信アンテナまでの伝達特性を表す。伝搬に伴う減衰と位相回転のほか、各多重波による寄与の合成がチャンネルとなる。

ストリーム MIMO システムでは、同時に複数の信号系列を送送することができる。この信号系列をストリームという。

適応変調 チャンネルの特性に応じて変調方式を変えることにより、通信品質を保ちながら、最大限の情報を伝送する技術である。

MMSE Minimum Mean-Square Error の略で最小二乗平均誤差を意味する。ウェイトを最適化する場合、これが実現されるように決定されることが多い。

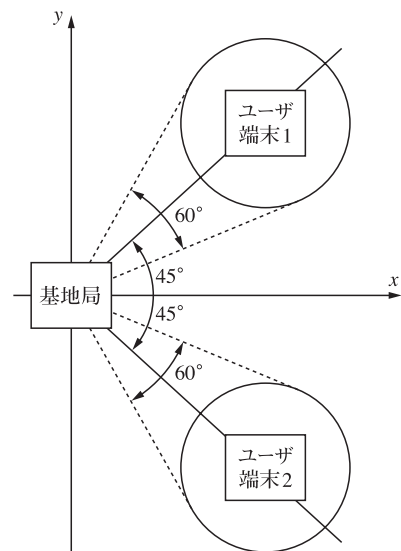


図2 Jakes 環境におけるマルチユーザ MIMO システム ユーザ端末を中心とした円周上に等間隔で散乱体が存在し、その中心を端末が移動している。端末には散乱体から等振幅の素波が到来するので時間変化するレイリーフェージングを受けることになる。

ただし、 $n_1(t)$ と $n_2(t)$ は、それぞれ、ユーザ端末1と2における熱雑音ベクトルを表している。式(1)、(2)の第1項は受信すべき希望波成分であり、第2項はほかのユーザの信号なので干渉となる。この干渉成分が0になる送信ウェイトを用いる手法がブロック対角化法である。また、各ユーザには固有ビーム空間分割多重、すなわち、E-SDM (Eigenbeam-Space Division Multiplexing) により、1ストリーム、若しくは、2ストリームの伝送が行われる。以上により、送信ウェイト $W_{TX,1}$ と $W_{TX,2}$ が求められる。これらの詳細は、文献(2)、(3)を参照されたい。

ユーザ端末では、受信信号ベクトル $r_1(t)$ と $r_2(t)$ に、それぞれ、受信ウェイト $W_{RX,1}$ と $W_{RX,2}$ が乗算される。

3. 時変動環境での特性

下り回線のチャンネル情報を基に前章で述べた送信ウェイトを用いると、ユーザ間干渉も同一ユーザについてのストリーム間干渉も存在しない最適な伝送が実現される。しかし、先に述べたように、時変動環境では、実際の送信を行う時刻でのチャンネルは送信ウェイトを決定したときに用いたチャンネルから変化している。その結果、ユーザ間干渉が発生する。また、一人のユーザに2ストリーム伝送をするときには、ストリーム間干渉が生じる。当然、これらの干渉によって特性が劣化する。本章では、その影響について考察する。

本稿では、図2に示した環境での評価を行う。これは Jakes モデルというチャンネルモデルであり、ユーザ端末

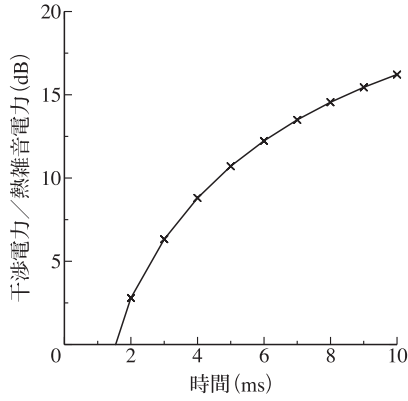


図3 時変動環境における干渉電力の挙動 Jakes 環境において送信ウェイトを固定したときのユーザ間干渉電力が時間とともに大きな値となることが分かる。最大ドップラー周波数は 18.6 Hz であり、端末が 0.2 波長足らず移動した場合でも干渉電力が上昇することが分かる。

の周囲の円周上に等間隔に散乱体が存在し（本稿では、13 個の散乱体を想定）、各散乱体から等振幅で位相がランダムな素波が端末に到来するものである。この円の中心を端末が一定速度で移動していると仮定する。これにより、端末は時間変化するレイリーフェージングを受けることになる。両ユーザ端末は、基地局から等距離に存在し、それらの速度は同一とする。

前章で述べたようにマルチユーザ MIMO システムでは、端末に干渉が現れないような送信ウェイトが用いられる。チャンネルに時間変動があったときには、送信ウェイトは最適値ではなくなるため、干渉成分が受信されてしまうことになる。図3は Jakes 環境で端末が移動したときの、時刻 0~10 ms 間の干渉電力の時間変動を示している。これは時刻 0 における下り回線チャンネルを用いてブロック対角化と E-SDM により、送信ウェイトを決定し、その値を固定し続けたときの 1 番目のユーザの 1 番目のアンテナに現れる干渉の平均電力対熱雑音電力の比を表している。ここで、最大ドップラー周波数は 18.6 Hz としている。キャリア周波数が 5.58 GHz で、端末の移動速度が 1 m/s の歩行速度のとき、最大ドップラー周波数は上記の値となる。経過した時間と最大ドップラー周波数の積は、波長で規格化した距離となるので、横軸の最大値が 10 ms であることから図3は端末が 0.186 波長（10 mm）まで移動するときの干渉電力の上昇を表していることになる。各ユーザに 1 ストリーム伝送を行っているときの特性なので、発生する干渉はユーザ間干渉である。時刻 0 のときは、干渉は全く存在しないが、時間が経過し、チャンネルが変動するにつれて干渉が大きな値となることが分かる。0.2 波長足らずの端末の移動でも干渉電力が大きく上昇している。干渉によるビット誤り率の劣化は次章で考察することにする。

4. チャンネル予測による特性改善

前章で述べたように、推定された下り回線チャンネルを用いて送信ウェイトを決定すると、実際の送信時の下り回線チャンネルは時間変化をしているため、干渉が生ずることになる。この問題を軽減するため、推定された下り回線チャンネルを用いて、実際に送信を行う時刻のチャンネルを予測し、それを用いてブロック対角化と E-SDM を適用することが考えられる。本章では、チャンネル予測による、時変動環境での特性を改善することについて述べる。

チャンネル予測はこれまで主に、時変動環境での適応変調^(用語)を対象に多くの研究がなされてきた。文献(4)、及びそこで引用されている文献に詳細な検討が述べられている。代表的な手法は、自己回帰モデル (Autoregressive model) に基づく手法（以下、AR 法と呼ぶ）であり、線形予測法とも呼ばれている。 T_f 間隔の p 個の時刻 $nT_f, (n-1)T_f, \dots, (n+1-p)T_f$ におけるチャンネル値 $h(nT_f), h((n-1)T_f), \dots, h((n+1-p)T_f)$ が得られたとき、AR 法では、次の時刻 $(n+1)T_f$ のチャンネルを次のような線形演算により予測する。

$$\hat{h}((n+1)T_f) = \sum_{m=1}^p a_m h((n+1-m)T_f) \quad (3)$$

上式で a_m は AR 係数、 p は AR モデルの次数と呼ばれている。

本章では、TDD 系についてチャンネル予測の効果を考察する。仮定するフレーム構成を図4に示す。フレーム間隔 T_f でユーザ端末から送信される ACK (Acknowledgement) 信号（上り回線）を用いて、ACK の到着時刻より τ だけ遅れた時刻に下り回線のマルチユーザ MIMO 伝送を行うものとする。下り回線の信号は図4に DL パケットと記載されている。時刻 $nT_f + \tau$ のチャンネルを、 T_f 間隔の p 個の時刻 $nT_f, (n-1)T_f, \dots, (n+1-p)T_f$ における ACK 信号のチャンネルを用いて、式(3)を少し変形した次式により推定を行う。

$$\hat{h}(nT_f + \tau) = \sum_{m=1}^p a'_m h((n+1-m)T_f) \quad (4)$$

ここで、チャンネル予測に必要な AR 係数 a'_m を要素とする p 次元列ベクトル \mathbf{a}' を以下のように定義する。

$$\mathbf{a}' = [a'_1 \ a'_2 \ \dots \ a'_p]^T \quad (5)$$

ここで、 T は転置を表している。

式(4)の予測を最適に実現する a'_m から成るベクトル \mathbf{a}' は次式の Yule-Walker 方程式を解くことにより与えられる。

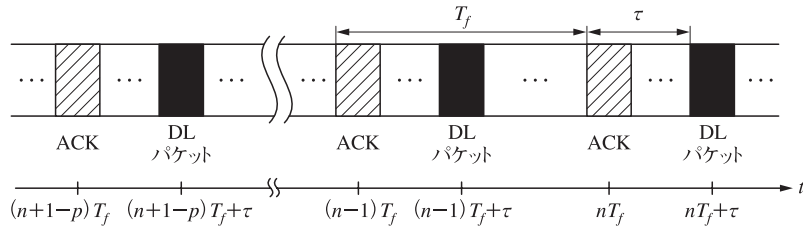


図4 TDD系のフレーム構成 ユーザ端末から時間間隔 T_f で ACK 信号が送られてくる。ACK 信号の τ だけ後に基地局はマルチユーザ MIMO 伝送を行い、DL パケットを送信する。

$$R\mathbf{a}' = \mathbf{r}' \quad (6)$$

\mathbf{R} は p 行 p 列の相関行列であり、その l_1 行 l_2 列要素はチャンネル $h((n+1-l_1)T_f)$ と $h((n+1-l_2)T_f)$ の相関 $E\{h^*((n+1-l_1)T_f)h((n+1-l_2)T_f)\}$ である。ここで、 $E\{\cdot\}$ は平均、 $*$ は複素共役を表している。図2に示した Jakes 環境ではこの値は、 f_D を最大ドップラー周波数とするとき、0 次の第1種ベッセル関数を用いて $J_0(2\pi f_D(l_1-l_2)T_f)$ で与えられる⁽⁵⁾。

また、 \mathbf{r}' は p 次元列ベクトルで、その l 番目の要素はチャンネル $h((n+1-l)T_f)$ と $h(nT_f+\tau)$ の相関 $E\{h^*((n+1-l)T_f)h(nT_f+\tau)\}$ である。行列 \mathbf{R} と同様に Jakes 環境では、この値は $J_0(2\pi f_D(\tau+(l-1)T_f))$ となる。

図5に基地局の1番目のアンテナからユーザ端末1の1番目のアンテナまでのチャンネルの時間変動と、次数が2, 3, 4のときのAR法による予測結果(AR(2), AR(3), AR(4))を示した。ここで、フレーム間隔 T_f は10 ms、最大ドップラー周波数は図3と同じく、18.6 Hz としている。チャンネル予測を行わない場合には、時刻0のチャンネル値を使い続けることになり、その変動の影響を大きく受け、干渉電力の上昇を招くことになる。一方、チャンネル予測を行うことにより、その変動に追従していることから、以下に示すように特性の劣化を軽減可能である。

次に、シミュレーションによりチャンネル予測の効果を評価する。本章では、最大ドップラー周波数 f_D が既知と仮定する。式(6)で与えられる Yule-Walker 方程式を解くことによって AR 係数 a_m を求め、それを用いて式(4)を計算し、基地局からの下り送信時刻のチャンネルを予測する。ここでは、予測に必要なチャンネル値 $h(nT_f), h((n-1)T_f), \dots, h((n+1-p)T_f)$ は誤差なく推定されていると仮定する。

シミュレーション環境は図1, 2に示したとおりである。基地局のアンテナ4本は図2の y 軸上に半波長間隔で設置されている。ユーザ端末の移動方向とアンテナの向きは、多くの散乱体が円周上に等間隔で存在することから特性に影響しない。ユーザ端末のアンテナ間隔も半波長とする。本稿で扱っているマルチユーザ MIMO システムでは、図1から分かるように、全体で16個の

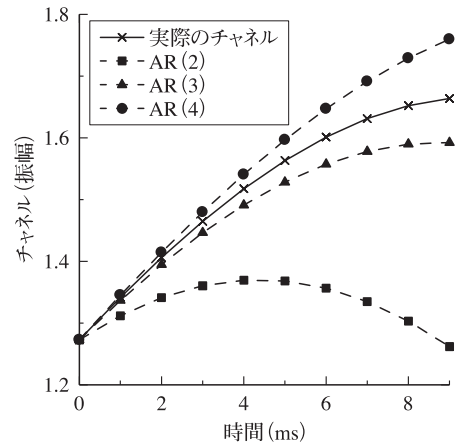


図5 チャンネル変動とチャンネル予測の比較 最大ドップラー周波数18.6 Hzのときのチャンネル変動と、次数が2, 3, 4のときのAR法によるチャンネル予測結果。チャンネル予測を行うことにより、チャンネル変動に追従していることが分かる。

表1 シミュレーション条件

各ユーザ端末への伝送レート	4 bits/symbol
変調方式	QPSK (2ストリーム伝送時) 16QAM (1ストリーム伝送時)
各ストリームへの電力とビットの配分	チャノフ上界を用いた誤り率最小基準 ⁽³⁾
バースト長	128 シンボル
フレーム長 (T_f)	10 ms
遅延時間 (τ)	5 ms
最大ドップラー周波数 (f_D)	18.6 Hz
熱雑音	白色ガウス雑音
受信端末での処理	MMSE ウェイトによる線形処理
試行回数	100,000

チャンネルが存在する。それぞれにつき、上述の予測を行うことになる。上記以外のシミュレーション条件は表1に記載したとおりである。フレーム間隔10 msでユーザ端末から送信されるACK信号を用いて、それより $\tau=5$ ms後に下り回線の送信を行うTDD系を仮定している。最大ドップラー周波数は先に述べたのと同様に18.6 Hz (キャリア周波数5.58 GHz, 端末の移動速度

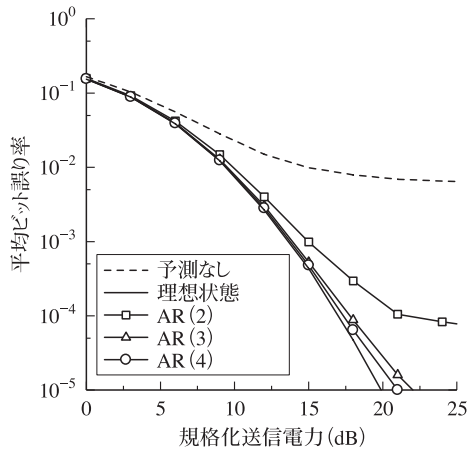


図6 平均ビット誤り率特性 チャンネル予測を行わないときには高い誤り率のフロアが発生するが、次数3あるいは4のAR法を用いて予測を行うことにより、理想状態に近い誤り率特性が実現される。

1 m/s) としているので、基地局がACK信号を受信し、下り回線信号を送信するまでにユーザ端末は5 mm (0.093 波長) 移動していることになる。また、基地局は両ユーザ端末に等電力の送信を行っていると仮定する。

各ユーザ端末では、自分宛てに送信された信号をMMSE^(用語)基準で最適に受信するウェイトを用いているので、自分宛てに複数のストリームが送信されたときのストリーム間干渉を抑圧することは可能であるが、ユーザ間干渉を軽減することはできない。

図6にユーザ端末1における平均ビット誤り率と規格化された送信電力の関係を示した。同図には予測を行わなかったときの特性、次数2, 3, 4のときのAR法によるチャンネル予測を用いたときの特性 (AR(2), AR(3), AR(4)), 更には、理想的状態の特性を示した。ここで理想状態とは、正確な予測が行われたと仮定したときの特性である。この結果から、チャンネル予測を行わないときには高い誤り率のフロアが発生するが、次数を3あるいは4としたAR法を用いて予測を行うことにより、理想状態に近い誤り率特性が実現されることが分かる。

5. おわりに

本稿では、時変動環境でのマルチユーザMIMOシステムの特性を考察した。チャンネルの時間変動による特性の劣化は、チャンネル予測を用いることによって、軽減す

ることが可能である。本稿ではAR法によるチャンネル予測法を述べたが、それ以外にも、下り回線チャンネルを構成する各素波のドップラー周波数と複素振幅を推定し、予測を行うSOS (Sum-Of-Sinusoids) モデルによる予測法⁽⁴⁾、また、過去のチャンネルの単純な外挿による予測法⁽⁶⁾などがあり、研究が続けられている。

文献

- (1) Q.H. Spencer, C.B. Peel, A.L. Swindlehurst, and M. Haardt, "An introduction to the multi-user MIMO downlink," IEEE Commun. Mag., vol. 42, no. 10, pp. 60-67, Oct. 2004.
- (2) Q.H. Spencer, A.L. Swindlehurst, and M. Haardt, "Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels," IEEE Trans. Signal Process., vol. 52, no. 2, pp. 461-471, Feb. 2004.
- (3) 大鐘武雄, 小川恭孝, わかりやすいMIMOシステム技術, オーム社, 東京, 2009.
- (4) A. D.-Hallen, "Fading channel prediction for mobile radio adaptive transmission systems," Proc. IEEE, vol. 95, no. 12, pp. 2299-2313, Dec. 2007.
- (5) Y. Ogawa, K. Yamaguchi, H.P. Bui, T. Nishimura, and T. Ohgane, "Behavior of a multi-user MIMO system in time-varying environments," IEICE Trans. Commun., vol. E96-B, no. 10, pp. 2364-2371, Oct. 2013.
- (6) H.P. Bui, H. Nishimoto, T. Nishimura, T. Ohgane, and Y. Ogawa, "Performance of MIMO E-SDM systems using channel prediction in actual time-varying indoor fading environments," IEICE Trans. Commun., vol. E91-B, no. 6, pp. 1713-1723, June 2008.

(平成 25 年 10 月 28 日受付 平成 25 年 11 月 18 日最終受付)



小川 恭孝 (正員:フェロー)

昭48北大・工・電子卒。昭53同大学院博士課程了。昭54同大学・工・電子講師を経て現在、同大学院情報科学研究科メディアネットワーク・特任教授。この間、主に空間領域信号処理による移动通信システムの高度化に関する研究に従事。工博。昭56年度本会学術奨励賞、平18年度本会論文賞各受賞。



西村 寿彦 (正員)

平4北大・理・物理卒。平9同大学院工学研究科博士課程了。平10同大学院工学研究科・助手。現在、同大学院情報科学研究科メディアネットワーク・助教。この間、主に信号処理アンテナレーに関する研究に従事。博士(工学)。平11年度本会学術奨励賞、平18年度本会論文賞各受賞。



大鐘 武雄 (正員)

昭59北大・工・電子卒。昭61同大学院修士課程了。同年郵政省電波研入所。現在、北大大大学院情報科学研究科メディアネットワーク・准教授。この間、主に空間信号処理を用いた移动通信システムに関する研究に従事。博士(工学)。平元年度本会篠原記念学術奨励賞、平18年度本会論文賞各受賞。