

A Study on Improvement Technique of Transmission Performance in MIMO-MLD Multicast Communication Systems

Yuki AOYAMA*, Hisato IWAI* and Hideichi SASAOKA*

(Received March 21, 2013)

In MIMO (Multiple Input-Multiple Output)-MLD (Maximum Likelihood Detection) multicast communication systems, the communication quality at receivers varies depending on the channel status between the transmitter and the receiver. The subject of this paper is to present an improvement technique of the MIMO multicast transmission system. We propose a new method of increasing transmission performance to multiple receivers by adopting precoding at the transmitters in the MIMO-MLD transmission system. In this research we propose two schemes, precoding selection scheme and precoding switching scheme. In the selection scheme, precoding weights are chosen according to the channel status of the receiver at the worst transmission state among multiple receivers, and in the precoding switching scheme, precoding weights are switched in time. The switching scheme is combined with error correction and interleaving techniques to effectively decrease the bit errors. We present the configurations of the proposed schemes and evaluate the transmission performance via computer simulations of wireless communication channels.

Key words : MIMO, MLD, multicast communication, precoding, CSI

キーワード : MIMO, MLD, マルチキャスト通信, プリコーディング, 伝搬路情報

MIMO-MLD マルチキャスト通信における 伝送特性改善法の検討

青山 雄貴, 岩井 誠人, 笹岡 秀一

1. まえがき

移動通信における, 高速・大容量無線通信技術として, MIMO(Multiple Input-Multiple Output)システムが注目されている. このシステムは, 送信側と受信側の双方で複数アンテナを用いて, 各々のアンテナから異なる独立な信号を同一周波数で伝送する方式である¹⁻²⁾. しかし, 同一周波数で複数の信号を送信すると, 受信側では複数の信号が干渉しあうた

め, それぞれの信号を分離する必要がある. この分離処理には, 伝搬路情報(CSI: Channel State Information)が送受信両側で既知である場合と受信側のみで得られる場合の二つに分類される. 前者のうち代表的なものが, 固有モード伝送方式³⁾であり, 伝搬路の固有ベクトルを用いたマルチビーム形成により, それぞれの信号を直交化することが可能となり相互の干渉が発生しない. その結果, 並列伝送

* Department of Electronics, Doshisha University, Kyotanabe, Kyoto, 610-0321, Japan
Telephone: +81-774-65-6267, Fax: +81-774-65-6801, E-mail: iwai@mail.doshisha.ac.jp

により高い伝送効率を得ることができる。一方、後者では、CSIを受信側でのみ測定するため、伝搬路が変動する環境で用いるのに適している。この方式として、最尤推定(MLD: Maximum Likelihood Detection)をMIMOに適用したMIMO-MLDがある⁴⁾。

他方、最近、地上デジタル放送の普及に伴い、放送コンテンツをマルチキャスト通信するサービスが検討されている。放送コンテンツには、音声や映像発信のための大容量通信が必要で、例えば偏波MIMOを用いて伝送容量を増加させる提案が行われている⁵⁾。

このような放送分野におけるシステム構成に、MIMOシステムが用いられる検討はあまり行われていない。MIMOを前提としたシステムにおいて、SDM(Space Division Multiplexing)伝送およびMLDによる受信を行う伝送方式は、マルチキャスト通信の高速化には適していると考えられる。しかし、マルチキャスト伝送では、送信局とユーザ間の伝搬路状態によって受信品質が劣化するユーザが存在する。このため、複数ユーザの受信状態に応じて、ユーザの受信品質を改善する検討も行われている⁶⁾。

そこで本研究では、このようなマルチキャスト通信を行うMIMO-MLD伝送システムを対象として、CSIが送信側で既知の場合を想定し、プリコーディングにより複数ユーザへの伝送特性を向上させる方法を提案する。プリコーディングウェイトには、MLDの信号検出特性を改善する最小距離最大化プリコーディングを用いる⁷⁻⁸⁾。本研究では、プリコーディングウェイトを複数ユーザの伝送状態に応じて選択するプリコーディング選択方式と、各ユーザに対応するプリコーディングウェイトを順次切り替え、誤り訂正とインターリーブを組み合わせるプリコーディング切り替え方式を新たに提案する。

2. MIMO マルチキャスト通信における要素技術

2.1 MIMO システムにおけるMLD

MLDは取り得る全ての送信信号候補点に対し、CSIを用いて受信信号の候補点を算出し、複素平面上で実際の受信点と最も近い候補点を探す方法で

ある。これを式で表すと、

$$\hat{\mathbf{s}} = \arg \min_{\bar{\mathbf{s}} \in \mathbf{S}} \|\mathbf{y} - \mathbf{H}\bar{\mathbf{s}}\|^2 \quad (1)$$

となる。ここで $\bar{\mathbf{s}}$ は、全アンテナから送信される送信信号候補点であり、変調多値数を I 、送信アンテナ本数を M とすると、 I^M 個の候補点が存在する。このようにMLD法は、送信信号候補の全ての組み合わせとチャネル行列 \mathbf{H} から、受信信号候補点を作成する。作成した候補点と実際の受信信号とのユークリッド距離に基づくメトリックを計算し、メトリックが最少となる送信信号 $\hat{\mathbf{s}}$ を受信信号候補点の中から選択することで、送信信号を検出する(送信信号の検出とは、信号の分離と等価である)。MLDは、空間フィルタリングのような他の分離処理を比較した場合、通信品質において最も優れているという利点がある。しかし、送受信アンテナ本数や変調多値数の増大に伴い、演算量が増加するという欠点がある。

2.2 最少距離最大化プリコーディング

最少距離最大化プリコーディングは、受信候補点間の最少ユークリッド距離を最大にする送信ウェイトを送信機側で信号に乗算することで、MLDの伝送特性を改善する手法である⁷⁻⁸⁾。Fig. 1に、最少距離最大化プリコーディングを用いたMIMOシステムの構成を示す。受信側はMLDにより信号を分離している。送信信号ベクトル $\mathbf{x}(\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_M]^T)$ は、 $\mathbf{x} = \mathbf{F}\mathbf{s} = \mathbf{V}\mathbf{F}_{\text{MOD}}\mathbf{s}$ となるよう送信ウェイトが乗算される。ここで、 $\mathbf{s}(\mathbf{s} = [\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_J]^T)$ は、 $J \times 1$ のデータシンボルベクトルで、 J はストリーム数を表している。また、 $\mathbf{F} = \mathbf{V}\mathbf{F}_{\text{MOD}}$ は $M \times J$ の送信ウェイト行列を表している。 \mathbf{V} はチャネル行列 \mathbf{H} の相関行列の固有値分解より得られる $M \times J$ のユニタリ行列で、各要素の値は \mathbf{H} に依存する。

$$\mathbf{H}^H \mathbf{H} = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^H \quad (2)$$

ただし、式中の $\mathbf{\Lambda}$ は、次式のように相関行列 $\mathbf{H}^H \mathbf{H}$ の固有値 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M$ ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_M$)を対角成分に持つ行列とする。

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & \lambda_M \end{bmatrix} \quad (3)$$

また, \mathbf{F}_{MOD} は受信予測点間の最小ユークリッド距離を最大にするように設計された $J \times J$ の行列で, 値が \mathbf{H} に依存せず固定値となる. 本研究で想定する $J=2$ の場合には, \mathbf{F}_{MOD} は次式で表される.

$$\mathbf{F}_{\text{MOD}} = \begin{bmatrix} \cos\psi & 0 \\ 0 & \sin\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\xi & \sin\xi \\ -\sin\xi & \cos\xi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i\varphi} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで, $0 \leq \psi \leq \pi/4$, $0 \leq \xi \leq \pi/4$, $0 \leq \varphi \leq \pi/2$ である. また, 文献 8) では, $\psi = 0^\circ$, $\xi = 27.37^\circ$, $\varphi = 15^\circ$ が最適値であると報告されている. \mathbf{U} は, 受信ウェイト行列で, 受信アンテナ本数を N とすると, $J \times N$ の最大比合成ウェイトとして, $\mathbf{U} = (\mathbf{H}\mathbf{V})^H$ で与えられる. これを用いた出力信号 \mathbf{r} は

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= \mathbf{U}\mathbf{y} = \mathbf{U}\mathbf{H}\mathbf{F}\mathbf{s} + \mathbf{U}\mathbf{z} \\ &= \Lambda\mathbf{F}_{\text{MOD}}\mathbf{s} + \mathbf{U}\mathbf{z} \end{aligned} \quad (5)$$

となる. その後, \mathbf{r} から MLD により信号を検出する. MLD は, 前節で述べたように, すべての受信候補点に対し受信信号との距離を計算し, その距離が最少となる信号点を送信信号と決定する. 最少距離最大化プリコーディングを用いる場合, (1)式は次式のように書き換えられる.

$$\hat{\mathbf{s}} = \arg \min_{\mathbf{s} \in \mathbf{S}} \|\mathbf{r} - \mathbf{W}\mathbf{H}\mathbf{F}\mathbf{s}\|^2 \quad (6)$$

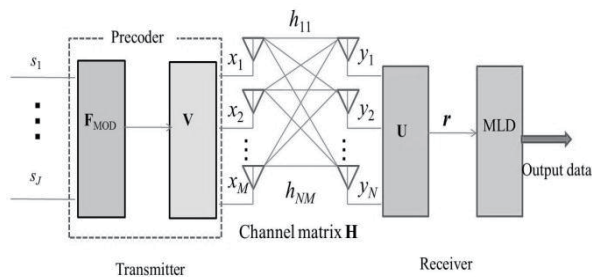


Fig. 1. MIMO system with precoding to maximize the minimum distance of MLD.

3. MIMO マルチキャスト通信における伝送特性改善法の検討

3.1 MIMO マルチキャスト通信における問題点

Fig. 2 に, 想定する MIMO マルチキャスト通信の

伝送構成を示す. ユーザ数は K , 送受信アンテナの本数は 2 本とする. この構成では, まず s'_1 , s'_2 の情報シンボルに対し畳み込み符号とインターリーブを行う. そして, 送信機から x'_1 , x'_2 の同一データを各ユーザに対して送信する. ユーザは MLD により受信を行い, ビタビ復号によりデータを復号する. 本研究では, 以後この伝送方式を MIMO マルチキャスト通信における基本伝送方式とする.

送信信号ベクトルを \mathbf{x}' , 送信局とユーザ間の伝搬チャネルを \mathbf{H}' , 雑音ベクトルを \mathbf{z}' とすると, 各ユーザの受信信号ベクトル \mathbf{y}' は, 式(7-8)のように表せる.

$$\mathbf{y}' = \mathbf{H}'\mathbf{x}' + \mathbf{z}' \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}'_1 \\ \mathbf{y}'_2 \\ \vdots \\ \mathbf{y}'_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}'_1 \\ \mathbf{H}'_2 \\ \vdots \\ \mathbf{H}'_K \end{bmatrix} \mathbf{x}' + \begin{bmatrix} \mathbf{z}'_1 \\ \mathbf{z}'_2 \\ \vdots \\ \mathbf{z}'_K \end{bmatrix} \quad (8)$$

$\mathbf{y}'_1 \sim \mathbf{y}'_K$, $\mathbf{H}'_1 \sim \mathbf{H}'_K$, $\mathbf{z}'_1 \sim \mathbf{z}'_K$ はそれぞれユーザ 1~ユーザ K に対する受信信号ベクトル, 伝搬チャネル, 雑音ベクトルを表している. 各ユーザが受信した信号は, MLD により分離検出を行なう.

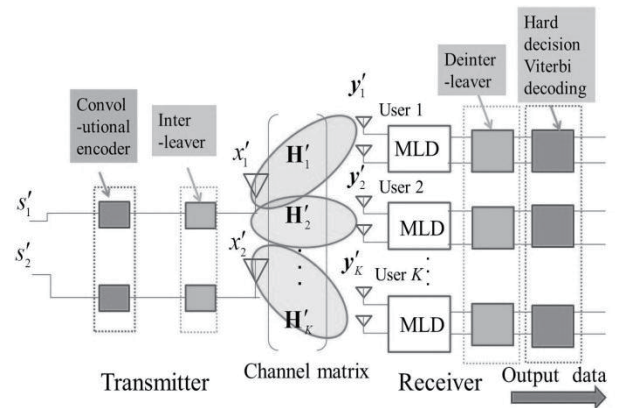


Fig. 2. Reference model of MIMO-MLD multicast communication

ここでは基本伝送方式におけるユーザごとの伝送特性の偏りをシミュレーションにより評価する. 具体的には, 全ユーザの中で最も伝送特性が良いユーザと最も伝送特性が劣化するユーザの伝送特性差を示す. シミュレーションパラメータは Table 1 に示すとおりであり, 以降のシミュレーションでは

全てこの表の値を用いる．ユーザ数の増加に伴う評価を行うため，ユーザ数 $K=10, 100$ とした．また，伝搬チャネルは，各伝送路が無相関である i.i.d. (Independent and Identically-Distributed) レイリーフェージング環境とする．誤り訂正符号には，符号化率 $R=1/2$ ，拘束長 $L=7$ の畳み込み符号と硬判定のビタビ復号により復号を行う．

Table 1. Simulation parameters of reference model.

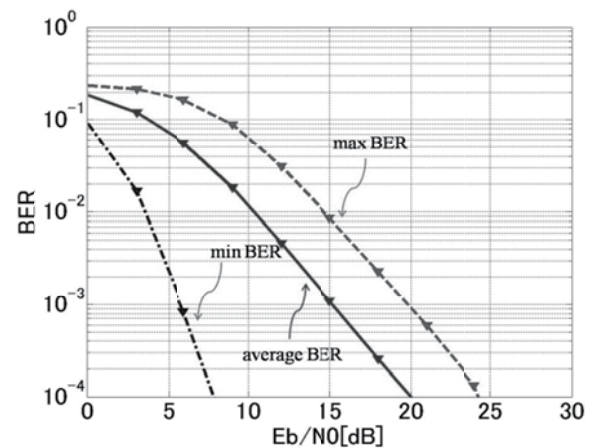
Parameters	Value
Number of transmitter and receiver antennas	2×2
Number of users	10, 100
Modulation	QPSK
Channel	i.i.d. Rayleigh fading
FEC	Convolutional encoding ($R=1/2, L=7$) + Viterbi decoding (Hard decision)
Interleave block size	200bit \times 10bit

Fig. 3(a)は10 ユーザの場合，(b)は100 ユーザの場合における E_b/N_0 に対する平均ビット誤り率(BER: Bit Error Rate)特性を評価した．ここで E_b/N_0 は，信号1ビットあたりの受信信号電力対雑音密度比を表しており，全ユーザが同じ E_b/N_0 であると仮定している．また，フェージング環境下における平均BER特性は，フェージング変動に対する平均的なBER特性を表している．図中の average BER は全ユーザの平均BER特性，max(min) BER は全ユーザの中で最も伝送特性が悪い(良い)ユーザの平均BER特性をそれぞれ表している．

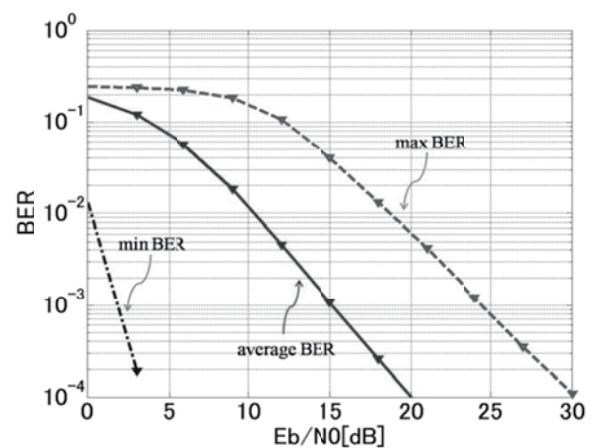
同図(a)において，max BER と min BER を比較すると，BER が 10^{-3} の時，約 14dB もの特性差が生じる．同様に同図(b)において，約 22dB もの特性差が生じることがわかる．このような伝送特性差が生じる要因は，フェージングにより受信信号強度がユーザごとに変化することに加え，送信局とユーザ間の伝搬チャネルの相関が高い場合には，各ユーザが行う

MLD 受信の受信信号の分離検出精度が劣化してしまうことが理由として挙げられる．つまり，送信局とユーザ間の伝搬路状態によって，ユーザの伝送特性にばらつきが生じてしまうことがわかる．また，同図(a)と(b)を比較すると，(b)の方が伝送特性に差が生じていることがわかる．これは，ユーザ数の増加に伴い，最も伝送特性の悪いユーザの最悪値が劣化したためである．

マルチキャスト通信では，最も伝送特性が悪いユーザに合わせてシステムが構成される．そのため，max BER を改善することはシステム構成の改善につながる．そこで本研究では，送信局とユーザ間のCSIが送信局側で既知である場合を想定し，プリコーディングを用いることで，特に伝送特性の悪いユーザの伝送特性を改善し，その結果として複数ユーザの平均伝送特性を向上させる方法を検討する．



(a) 10user.



(b) 100user.

Fig. 3. Difference of transmission performance for multiple users.

3.2 プリコーディングを用いたマルチキャスト通信

プリコーディングにより伝送特性の悪いユーザ及び複数ユーザの伝送特性を向上させる方法として、2.2 節で述べた、MLD の伝送特性を改善する最小距離最大化プリコーディングを用いる。 K ユーザマルチキャスト通信システムにおいてプリコーディングを用いた伝送方式の構成を Fig. 4 に示す。同図の構成において、ユーザ数が 10 の場合にプリコーディング対象ユーザ(このユーザ番号を k とする)とそれ以外のユーザの瞬時 BER 特性を比較した結果を Fig. 5(a)に示す。ここで、瞬時 BER 特性は、ある瞬間のフェージング状態での BER 特性を表すものである。同図より、プリコーディングの対象となるユーザ k の特性は、プリコーディングの効果により特性が改善される。また、それ以外のユーザ(図中 other users)の特性は、Fig. 3 と同様に特性の良し悪しに差が生じ、プリコーディングにより特性が向上する場合も劣化する場合もあると考えられる。これに対して、平均 BER 特性を比較したものを Fig. 5(b)に示す。この場合、ユーザ k の特性は改善されているが、その他のユーザの特性は、Fig. 3 の average BER と変わらない特性となる。つまり、MIMO マルチキャスト通信にプリコーディングを適用した場合、あるユーザに対して有利となるプリコーディングウェイトは、瞬間的には、他のユーザの特性を変化させるが、平均的な BER 特性を変化させるものではないことがわかる。

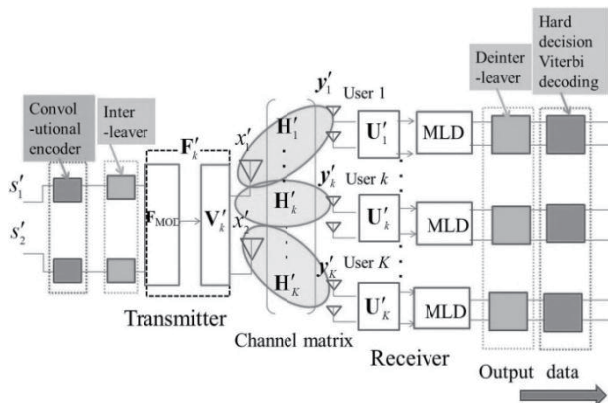
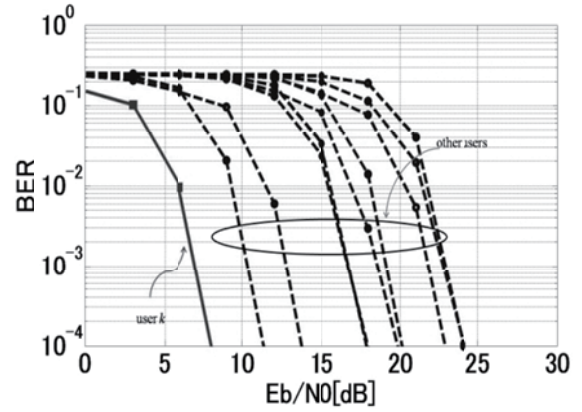
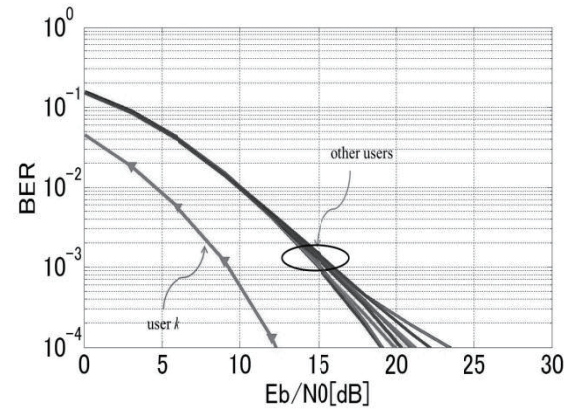


Fig. 4. Reference model with precoding for k -th user.

そこで、本研究では、プリコーディングウェイトの適用方法を工夫することにより、複数ユーザに対する伝送特性を改善する方法を検討する。



(a) Instant BER



(b) Average BER

Fig. 5. BER characteristics comparison between user k and other users.

3.2.1 プリコーディング選択方式を用いたマルチキャスト通信(提案方式 A)

プリコーディングを用いた、複数ユーザに対する伝送特性改善方法の一つとして、Fig. 6 に示すような、プリコーディング選択方式を用いたマルチキャスト MIMO 伝送方式を提案する。以後、この方式を提案方式 A とする。提案方式 A は、全ユーザの中で伝送特性が最も悪いユーザを最悪ユーザとし、その最悪ユーザの伝搬路に対する最小距離最大化プリコーディングウェイトを選択する方式である。これにより、最悪ユーザの伝送特性及び全ユーザの平均的な伝送特性を改善することを目的とする。なお、本提案方式 A は、後に述べるプリコーディング切り替え方式(提案方式 B)と比較するとより簡易

な構成の方式である．プリコーディングウェイトの選択方法は、まず、送信側において各ユーザのチャネル行列 $\mathbf{H}_k (k=1, \dots, K)$ を固有値分解することにより、各ユーザに対応する固有ベクトル \mathbf{V}_k' を得る．

$$\mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k = \mathbf{V}_k' \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}_k'^H \quad (9)$$

この操作が実現可能ということは、前述のように、送信側で全てのユーザとの間の CSI が既知であることを必要とする．

次に、プリコーディングを用いずデータを送信した場合に、伝送特性が最も悪いユーザを検索し、そのユーザに対応するプリコーディングウェイト \mathbf{F}_k' を、このユーザのチャネル行列 \mathbf{H}_k' から生成し、それをプリコーディングウェイトとして用いる．

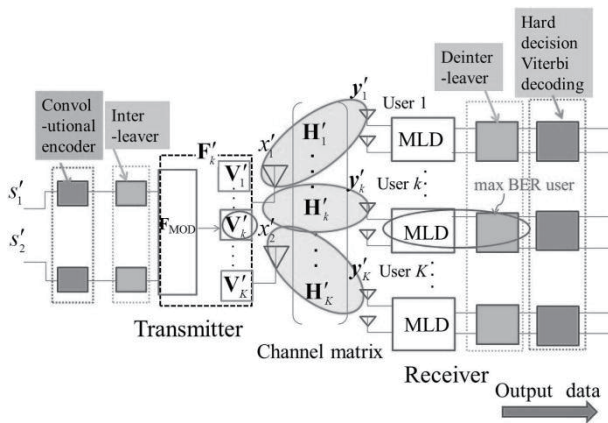


Fig. 6. Configuration of Proposed system A.

3.2.2 プリコーディング切り替え方式を用いたマルチキャスト通信 (提案方式 B)

MIMO マルチキャスト通信の各ユーザに伝送特性差が生じる問題に対して、最悪ユーザの伝送特性を改善するための簡易な方法として、提案方式 A を提案した．しかし、提案方式 A では、全ユーザのうち 1 ユーザにしか最小距離最大化プリコーディングウェイトを適用できないため、例えば、伝搬路状態の悪いユーザが複数存在した場合には伝送特性の改善ができない．更に、全ユーザに対する BER 特性の改善効果は必ずしも大きくない．

そこで、次に、全ユーザに対する伝送特性改善方法として、Fig. 7 に示すような、プリコーディング切り替え方式を用いた MIMO マルチキャスト伝送方式を提案する．以後、この方式を提案方式 B とす

る．提案方式 B は、各ユーザに対して最少距離最大化プリコーディングウェイトを、送信シンボルの α シンボルごとに切り替える方式である．

プリコーディングウェイトの切り替え方法は、まず、前節の(9)式と同じ手順で、各ユーザに対応する最小距離最大化プリコーディングウェイト $\mathbf{F}_k' (\mathbf{F}_k' = \mathbf{F}_1', \dots, \mathbf{F}_K')$ を作成する．そして、作成した \mathbf{F}_k' を、送信シンボルの α シンボルごとに、 $\mathbf{F}_1' \sim \mathbf{F}_K'$ へと順番に切り替える．プリコーディングウェイトの切り替えは、受信側でも既知であるとする．

プリコーディングウェイトの切り替えを行うことで、例えば、伝搬路状態が悪いユーザにおいても伝送特性の良い状態と悪い状態を時間的に変化させることができる．このような伝送路では、畳み符号化とインターリーブを組み合わせることにより、畳み込み符号の誤り率改善効果を利用し、伝送特性を向上させることができる．具体的には、送信シンボルにインターリーブを行った状態でプリコーディングウェイトの切り替えを行なう事により、伝搬路状態が悪いユーザに集中するデータの誤りを、一様に分布させることができる．一様に分布させたデータ誤りは、畳み込み符号とビタビ復号を行ない訂正することで、複数ユーザの特性改善を行う．

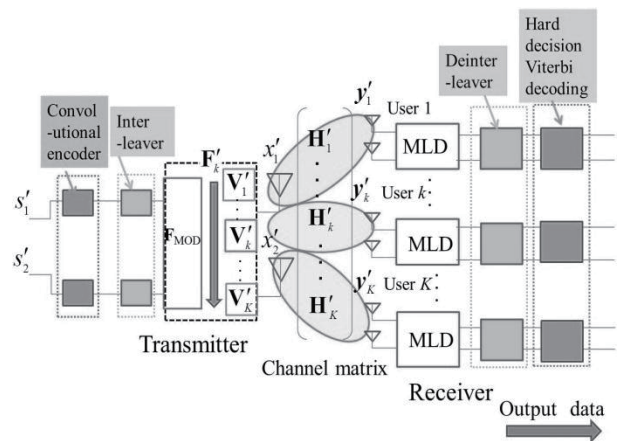


Fig. 7. Configuration of Proposed system B.

4. 計算機シミュレーションによる提案方式の伝送特性評価

4.1 シミュレーションシステム

前章で提案した MIMO マルチキャスト通信にお

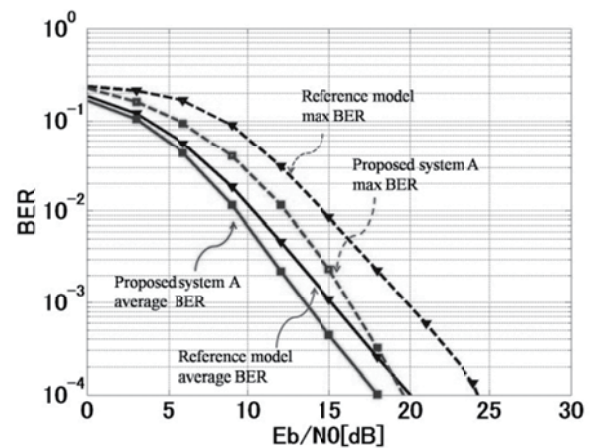
けるプリコーディングを用いた提案方式の効果を確認することを目的として、計算機シミュレーションにより伝送特性の評価を行った。シミュレーションパラメータは、Table 1 と同じ値を用いる。なお、送信局とユーザ間の CSI は、送信局側で完全に既知であるとしている。また、提案方式 B では、一つのフェージング筐体における送信シンボル数を 1000 シンボルとし、(送信シンボル/ユーザ数)シンボルごとにプリコーディングウェイトの切り替えを行なう。本シミュレーションは、 E_b/N_0 に対する平均 BER 特性で評価している。

4.2 プリコーディングを用いた MIMO マルチキャスト通信の伝送特性評価

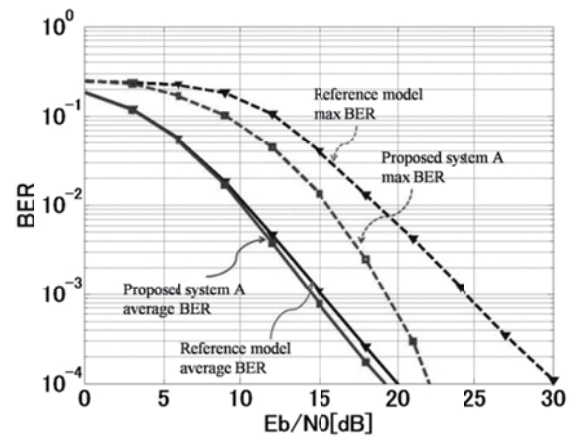
4.2.1 提案方式 A における伝送特性評価

Fig. 8(a), (b)は、提案方式 A を用いた場合の全ユーザの平均 BER 特性(図中 Proposed system A average BER)と、最悪ユーザの平均 BER 特性(図中 Proposed system A max BER)を示している。比較対象として、基本伝送方式における全ユーザの平均 BER 特性(図中 Reference model average BER)と最悪ユーザの平均 BER 特性(図中 Reference model max BER)を併せて示している。また、Fig. 8(a)は、ユーザ数が 10 の場合、(b)は、ユーザ数が 100 の場合である。

提案方式 A を用いた場合、Fig. 8(a)では、例えば $BER=10^{-3}$ において、max BER に約 5dB 程度の特性改善が見られた。しかし、average BER に効果は見られなかった。これは、プリコーディング選択方式が、1 ユーザの特性しか改善できないため、ユーザが多い場合には、ユーザ全体の平均的な特性は変化しないことが理由である。また、Fig. 8(a)の max BER と Fig. 8(b)の max BER を比較すると、後者の方が劣化していることがわかる。これはユーザ数の増加に伴い、伝搬路状態の悪いユーザが増加したためである。



(a) 10user.



(b) 100user.

Fig. 8. BER characteristics of proposed system A.

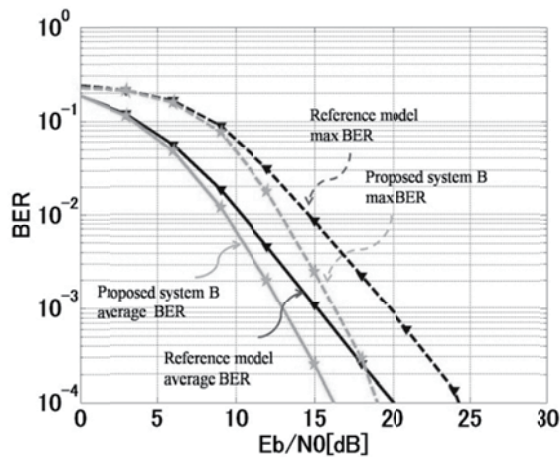
4.2.2 提案方式 B における伝送特性評価

Fig. 9(a), (b)は、それぞれ E_b/N_0 に対する全ユーザの平均 BER 特性(図中 Proposed system B average BER)と、最悪ユーザの平均 BER 特性(図中 Proposed system B max BER)を示している。Fig. 8 同様に、ユーザ数 10 と 100 の場合を表す。

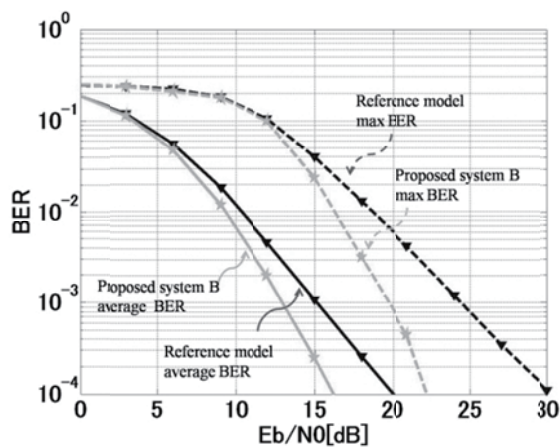
提案方式 B を用いた場合、Fig. 9(a)では、例えば、 $BER=10^{-3}$ において、max BER に約 3dB、average BER に約 2dB の特性改善が見られた。また、Fig. 9(b)では、 $BER=10^{-3}$ において max BER に約 4dB、average BER に約 2dB の特性改善が見られた。これらの結果から提案方式 B を用いた場合には、ユーザ数の増加に関係なく、全ユーザ及び最悪ユーザの伝送特性に一定の特性改善効果が得られることがわかる。

次に、提案方式 A と提案方式 B の優劣を評価するため、Fig. 10(a), (b)にそれぞれの方式の average

BER と max BER を示した。同図より、max BER においては提案方式 A の方が特性が改善されていることがわかる。これは、提案方式 A のプリコーディングウェイトに、最悪ユーザに対して最小距離最大化プリコーディングウェイトを適用しているためである。これに対して average BER においては提案方式 B の方が特性が改善されていることがわかる。提案方式 A では、最悪ユーザのみの特性改善しか行えていないのに対し、提案方式 B では、プリコーディングウェイトの切り替えの効果によって誤り訂正の効果が向上し、全ユーザの伝送特性改善が行えている。



(a) 10user.

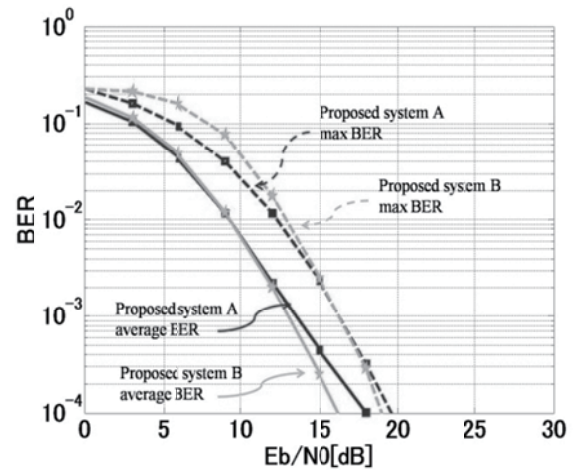


(b) 100user.

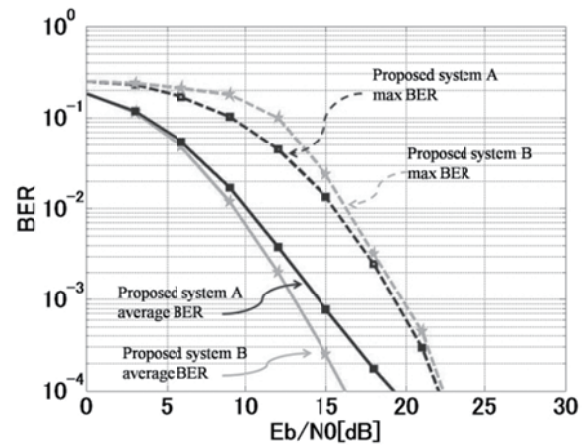
Fig. 9. BER characteristics of proposed system B.

以上の結果から、提案方式 A は、ユーザ数の少ない小規模な環境において簡易方式として用いることが有効であり、提案方式 B は、ユーザ数に関係

なく大規模な環境においても、複数ユーザの伝送特性を改善する方式として用いることが有効であることがわかった。



(a) 10user.



(b) 100user.

Fig. 10. Comparison of BER characteristics between proposed systems A and B.

5. まとめ

本研究ではMIMO-MLD マルチキャスト通信において、送信局とユーザ間の CSI が送信局側で既知である場合を想定し、プリコーディングにより伝送特性を改善する方法(提案方式 A, 提案方式 B)を検討・提案した。プリコーディングには、MLD の伝送性能を改善する最少距離最大化プリコーディングを用いた。

提案方式 A は、ユーザ数が少ない状況では、伝搬路状態が最も悪いユーザの伝送特性を大幅に改善でき、これに伴い平均的な伝送特性も改善された。

しかしこの方式では、伝搬路状態の悪いユーザが複数存在する場合には、平均特性としての改善は得られなかった。提案方式 B は、全ユーザの平均 BER 特性及び最悪ユーザの平均 BER 特性を大きく改善できた。これは、インターリーブとプリコーディングウェイトの切り替えを行うことで、伝搬路状態の悪いユーザの誤りを効果的に分散させることができ、その結果として、誤り訂正が有効に機能し、伝送特性が改善されたためである。

以上の評価の結果より、提案した両方式は、例えば、ユーザ数が少なく簡易な伝送方式を求めるなら提案方式 A が有効であり、ユーザ数に関係なく大規模な環境で複数ユーザの伝送特性改善効果を求めるなら提案方式 B が有効であることが確認できた。

参考文献

- 1) G. J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas," Bell Laboratories Technical Journal, **1**, (2), 41-59 (1996).
- 2) J. Andersen, "Array gain and capacity for known random channels with multiple element arrays at both ends," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, **18**, (11), 2171-2178, (2000).
- 3) 宮下和巳, 西村寿彦, 大鐘武雄, 小川恭考, 鷹取泰司, 長敬三, "MIMO チャネルにおける固有空間分割多重(E-SDM)方式," 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2002-53, 13-18, (2002).
- 4) Z. Xu, and R. D. Murch, "Performance analysis of maximum likelihood detection in a MIMO antenna system," IEEE Transactions on Communications, **50**, (2), 187-191, (2002).
- 5) 薮拓也, 村山研一, 田口誠, 朝倉慎悟, 渋谷一彦, "次世代地上放送に向けた伝送技術:円偏斜め偏波を用いた偏波 MIMO 伝送実験," 映像情報メディア学会技術報告, **35**, (13), 1-4, (2011).
- 6) 岩崎全男, 樋口健一, "マルチキャスト伝送における複数アンテナを用いたレート一定型 ARQ の検討," 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2009-39, 67-70, (2009).
- 7) 小林健一, 大槻知明, "LOS 環境における MIMO システムに適したプリコーディング法," 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2007-216, 181-186 (2008).
- 8) L. Collin, O. Berder, P. Rostaing, and G. Burel, "Optimal minimum distance-based precoder for MIMO spatial multiplexing systems," IEEE Transactions on Signal Processing, **52**, (3), 617-627, (2004).