

低演算量ユーザ選択手法を用いたマルチユーザ MIMO システムの 屋内実伝搬環境における伝送実験

齊藤 俊^{†a)} 谷口 真人[†] 篠原 諒[†] 佐藤 弘基[†]
村田 英一[†] 吉田 進[†] 山本 高至[†] 梅原 大祐^{††}
田野 哲^{†††} 守倉 正博[†]

Experimental Performance Evaluation of Multi-User MIMO System with Low-Complexity User Selection Schemes in an Actual Indoor Environment

Suguru SAITO^{†a)}, Masato TANIGUCHI[†], Ryo SHINOHARA[†], Hiroki SATO[†],
Hidekazu MURATA[†], Susumu YOSHIDA[†], Koji YAMAMOTO[†], Daisuke UMEHARA^{††},
Satoshi DENNO^{†††}, and Masahiro MORIKURA[†]

あらまし プリコーディングを用いるマルチユーザ MIMO システムにおいて伝送特性を改善する技術としてユーザ選択手法が検討されている。各ユーザの伝搬路状況に応じてユーザ間の伝搬路の直交性が高い組み合わせをリアルタイムに選択して伝送することで伝送特性を改善する。ユーザ選択手法の特性は伝搬路の相関性に大きく影響されるため、実伝搬環境における特性評価が重要となる。これまでにユーザ選択手法に関する検討が多く行われているが、計算機シミュレーションや理論解析が主であり伝送実験による特性評価はほとんど行われていない。本論文は、同時に伝送を行うユーザ組を伝搬路間の直交度に基づいた低演算量のアルゴリズムにより動的に選択するマルチユーザ MIMO 実験システムの構成と屋内実伝搬環境における伝送実験結果について述べている。伝送実験の結果から、伝搬路状況に応じてユーザ選択を行うことで受信電力一定の条件下における送信電力特性及び BER 特性が大幅に改善されマルチユーザダイバーシチ効果が得られていることが確認されている。

キーワード マルチユーザ MIMO, ユーザ選択, 伝送実験

1. ま え が き

近年、スマートフォンに代表される無線通信機器の普及などにより無線通信のトラフィックが急増しており、無線通信に使用できる周波数リソースの枯渇が危惧されている。ユーザ数の増加に伴い無線通信システムの更なる高速化、大容量化の期待が高まっている。

無線通信において大容量の通信を実現する基盤技術として MIMO (Multiple Input Multiple Output) 技術が利用されている。MIMO システムは複数の送受信アンテナを用いることにより同一周波数、同一時間に複数の信号を多重伝送することで、多重数にはば比例して周波数利用効率を向上させることが可能である。

無線端末の物理的制約により一つの端末で多数のアンテナを備えることは難しいため、複数のユーザ端末と MIMO 伝送を行う MU-MIMO (Multi-User MIMO) システムが検討されている。MU-MIMO システムは周波数利用効率を大幅に改善する技術として盛んに研究が行われている [1]~[5]。

MU-MIMO システムにおいて多重数を増やすにあたり、ユーザ端末に基地局と同程度のアンテナ数を期待することは難しく信号処理能力も限られてしまう。そこで基地局においてあらかじめ受信点でのユーザ間

[†] 京都大学大学院情報学研究所, 京都市
Graduate School of Informatics, Kyoto University, Yoshida-hommachi, Sakyo-ku, Kyoto-shi, 606-8501 Japan

^{††} 京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科, 京都市
Graduate School of Science and Technology, Kyoto Institute of Technology, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto-shi, 606-8585 Japan

^{†††} 岡山大学大学院自然科学研究科, 岡山市
Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, 3-1-1 Tsushima-naka, Kita-ku, Okayama-shi, 700-8530 Japan

a) E-mail: contact-h25j@hanase.kuee.kyoto-u.ac.jp

干渉の抑圧を行うための信号処理を送信信号に施すことで、ユーザ端末のアンテナ数が少ない場合でもユーザ端末の信号処理負担を軽減しつつ MU-MIMO 伝送を実現するプリコーディング技術が検討されている。

線形プリコーディングを行う場合、同時に収容するユーザ数が送信アンテナ数により制限されてしまう。また同時に収容するユーザ間の伝搬路の相関性が高い場合、プリコーディングウェイト乗算後の送信電力が大幅に増大してしまう。この対策として非線形プリコーディングも検討されているが、複雑な非線形演算処理が必要とされる [2], [3]。本論文では線形プリコーディングに低演算量のユーザ選択手法を適用しこの劣化を改善する。

これまでにも、線形プリコーディングによる特性劣化を回避するためユーザ端末からのフィードバックにより把握した伝搬路情報に応じて同時に伝送するユーザ組を選択するユーザ選択手法が検討されてきた [6]～[10]。このユーザ選択手法は位相情報を含む高精度な伝搬路情報が必要であり、その特性は伝搬路の相関性に大きく影響される。

ユーザ選択手法の特性を評価するにあたり、個々の伝搬路状況の把握のみならず伝搬路間の空間相関性までも考慮する必要がある。つまり、特性評価には伝搬路の空間相関性を現実によくモデル化することが重要である。また、実際の装置では周波数同期精度や位相雑音などにより推定伝搬路情報の精度が影響を受ける。更に、そのフィードバックに要する遅延時間やタイミング同期誤差などが高精度な伝搬路情報を必要とするユーザ選択手法の特性に直接影響する。

マルチユーザ MIMO システムの伝送実験に関する報告 [1]～[5] は数多くされているものの、ユーザ選択手法を用いたマルチユーザ MIMO システムの伝送実験に関する報告 [10] はほとんどなく、特に実伝搬環境における伝送実験の報告は行われていない。

本論文では最大で 4 本のアンテナを備えた基地局装置と単一アンテナを備えたユーザ端末装置 6 台の 4×6 構成の実験システム [11]～[13] を用いてユーザ選択手法の伝送特性を屋内実伝搬環境において実験的に検討する。最初にこの実験システムにおけるユーザ選択手法の有効性を計算機シミュレーションにより確認する。実伝搬環境では動作検証が困難であるため、フェージングエミュレータを用いて伝送実験を行い実験装置の基礎特性を示した後、屋内実伝搬環境における伝送実験によりユーザ選択の効果を示す。

2. システムモデル

N_{BSA} 本のアンテナをもつ基地局 1 台と N_{MSA} 本のアンテナをもつユーザ端末 N_{MS} 台との MU-MIMO 伝送を考える。基地局から送信信号 $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{N_{\text{BSA}} \times 1}$ が送信されたとき、ユーザ n の受信信号 $\mathbf{y}_n \in \mathbb{C}^{N_{\text{MSA}} \times 1}$ は次式で表される。

$$\mathbf{y}_n = \mathbf{H}_n \mathbf{x} + \mathbf{z}_n \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{H}_n \in \mathbb{C}^{N_{\text{MSA}} \times N_{\text{BSA}}}$ は基地局からユーザ n への伝搬路係数行列、 $\mathbf{z}_n \in \mathbb{C}^{N_{\text{MSA}} \times 1}$ は i.i.d. 加法的白色ガウス雑音である。

基地局においてユーザ n に対する送信信号 $\mathbf{x}_n \in \mathbb{C}^{N_{\text{MSA}} \times 1}$ にプリコーディング行列 $\mathbf{W}_n \in \mathbb{C}^{N_{\text{BSA}} \times N_{\text{MSA}}}$ を乗じる。基地局からプリコーディング後の送信信号 $\mathbf{x}' \in \mathbb{C}^{N_{\text{BSA}} \times 1}$ が送信されたとき、ユーザ n の受信信号 $\mathbf{y}_n$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_n &= \mathbf{H}_n \mathbf{x}' + \mathbf{z}_n \\ &= \mathbf{H}_n \mathbf{W}_n \mathbf{x}_n + \sum_{j=1, j \neq n}^{N_{\text{MS}}} \mathbf{H}_n \mathbf{W}_j \mathbf{x}_j + \mathbf{z}_n \end{aligned} \quad (2)$$

式 (2) 右辺の第 1 項目はユーザ n の所望信号であり、第 2 項目は干渉信号である。

プリコーディング行列 $\mathbf{W}$ は ZF (Zero-Forcing) 基準を用いるため、 N_{BSA} 本のアンテナをもつ基地局 1 台に対して、 N_{MSA} 本のアンテナをもつユーザ端末 N_{MS} 台が存在する場合、収容可能ユーザ数は $\lfloor N_{\text{BSA}}/N_{\text{MSA}} \rfloor$ 台以下に制限される。ここで、 $\lfloor \cdot \rfloor$ はガウス記号を表す。そこで全ユーザから $N_{\text{sel}} (\leq \lfloor N_{\text{BSA}}/N_{\text{MSA}} \rfloor)$ 台のユーザ端末を選択して MU-MIMO 伝送を行う。図 1 に基地局アンテナ数 $N_{\text{BSA}} = 4$ 、ユーザ数 $N_{\text{MS}} = 6$ 、ユーザ端末のアンテナ数 $N_{\text{MSA}} = 1$ 、選択ユーザ数 $N_{\text{sel}} = 4$ の場合のシステムモデルを示す。

以上の条件より、プリコーディング行列 $\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{N_{\text{BSA}} \times N_{\text{sel}} N_{\text{MSA}}}$ 、選択ユーザ n に対する受信信号 $\mathbf{y}_n$ は次式に置き換えられる。

$$\mathbf{W} = \mathbf{H}_{\text{sel}}^\dagger (\mathbf{H}_{\text{sel}}^H \mathbf{H}_{\text{sel}})^{-1} \mathbf{H}_{\text{sel}}^H \quad (3)$$

$$\mathbf{y}_n = \mathbf{H}_n \mathbf{W}_n \mathbf{x}_n + \mathbf{z}_n = \mathbf{x}_n + \mathbf{z}_n \quad (4)$$

ここで、 $[\cdot]^\dagger$ は疑似逆行列を表し、 $\mathbf{H}_{\text{sel}} \in \mathbb{C}^{N_{\text{sel}} N_{\text{MSA}} \times N_{\text{BSA}}}$ は選択されたユーザのみにより構成される下り伝搬路行列である。プリコーディング処理により選択ユーザ n は干渉信号が抑圧され所望信号

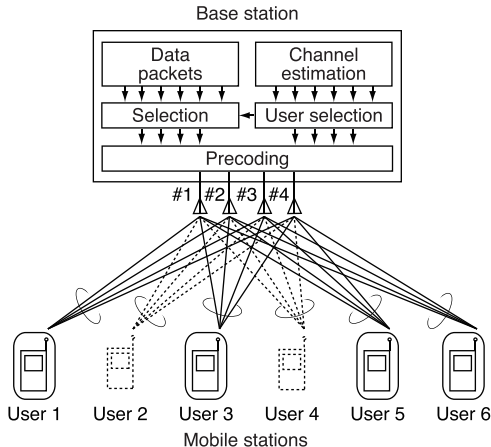


図 1 4×6 構成の MU-MIMO システムモデル
Fig. 1 System model for 4×6 MU-MIMO.

x_n を得ることができる。

この場合、基地局における送信電力制限が許す限り各ユーザ端末における受信電力は同一となっている。本論文では、伝送実験装置の簡単化のために変調方式を QPSK に固定して検討する。

3. ユーザ選択手法

線形プリコーディングを用いた MU-MIMO システムでは同時に収容するユーザの組み合わせにより伝送特性が大きく異なる。下り伝搬路情報を基に伝送特性が改善されるユーザ組を動的に選択することでマルチユーザダイバーシチ効果を得ることができる。

これまでに、選択されたユーザ組に対してシステム容量が最大となるユーザを順に選択する GUS (Greedy User Selection) 法 [6] が提案されている。この手法では各組み合わせに対してシステム容量を計算する必要があり演算量の増大が問題となる。

また、システム容量ではなく伝搬路間の直交度を基準としたユーザ選択手法 [7]~[10] が提案されている。伝搬路行列同士の演算により直交度を評価するため演算量の大幅な軽減が可能となる。SUS (Semiorthogonal User Selection) 法 [7] では既に選択されたユーザ組との伝搬路間の直交度をグラムシュミット直交化を用いて評価し直交性が高いユーザを順に選択する。CDUS (Chordal Distance-based User Selection) 法 [8]~[10] では chordal distance により伝搬路間の直交度を評価することで更なる特性改善が可能となる。

本論文では、基地局において推定した下り伝搬路情報を基に同時に伝送するユーザ組をリアルタイムに決

定する必要があるため、実装するにあたりユーザ選択手法の演算量が問題となる。そこで、今回は比較的少ない演算量で高い特性をもつ CDUS 法を採用する。CDUS 法による改善効果を検討するためユーザ間の選択確率に関する公平性を考慮せず伝送特性の改善が最も見込まれるユーザ組を常に選択する。また、比較対象として全ユーザの選択確率が等しくなるようにユーザの全組み合わせを順に選択する簡易なユーザ選択手法である RR (Round-Robin) 法を採用する。

3.1 CDUS 法

CDUS 法は既に選択されたユーザ組の下り伝搬路行列との chordal distance が最大となるユーザをステップごとに選択していく手法である。chordal distance は式 (5) により表される。

選択候補ユーザの下り伝搬路行列 $\mathbf{H}_{\text{cand}} \in \mathbb{C}^{N_{\text{MSA}} \times N_{\text{BSA}}}$ 、既に選択されたユーザ組の下り伝搬路行列 $\mathbf{H}_{\text{sel}} \in \mathbb{C}^{M_{\text{sel}} N_{\text{MSA}} \times N_{\text{BSA}}}$ とする。ここで、 M_{sel} は選択済みのユーザ数である。二つの行列間の chordal distance は次式のように求められる。

$$d_{\text{cd}}(\mathbf{H}_{\text{cand}}, \mathbf{H}_{\text{sel}}) = \sqrt{\sum_{m=1}^{N_{\text{MSA}}} \sin^2 \theta_m} = \sqrt{N_{\text{MSA}} - \text{tr}(\tilde{\mathbf{H}}_{\text{cand}} \tilde{\mathbf{H}}_{\text{sel}}^H \tilde{\mathbf{H}}_{\text{sel}} \tilde{\mathbf{H}}_{\text{cand}}^H)} \quad (5)$$

ここで、 θ_m は行列 $\mathbf{H}_{\text{cand}}$ の第 m 行と $\mathbf{H}_{\text{sel}}$ の正準角であり、 $[\cdot]$ は行列の各行をグラムシュミット直交化により正規直交化して得られる行列である。したがって d_{cd} は行列間の直交性が高いほど大きくなる。

3.1.1 CDUS 法アルゴリズム

1) 選択候補ユーザ集合 $\mathcal{U}_i$ 、選択ユーザ集合 $\mathcal{S}_i$ 、ステップ数 i に対し初期化を行う。

$$\mathcal{U}_0 = \{1, \dots, N_{\text{MS}}\}, \mathcal{S}_0 = \phi, i = 1$$

2) $i = 1$ のとき、選択候補ユーザ $n \in \mathcal{U}_0$ に対し、式 (6) より下り伝搬路行列のフロベニウスノルムが最大となるユーザを第 1 ユーザ s_1 として選択する。

$$s_1 = \arg \max_{n \in \mathcal{U}_0} \|\mathbf{H}_n\|_F \quad (6)$$

$$\tilde{\mathbf{S}}_1 = \tilde{\mathbf{H}}_{s_1}$$

$$\mathcal{U}_1 \leftarrow \mathcal{U}_0 - \{s_1\}, \mathcal{S}_1 \leftarrow \mathcal{S}_0 + \{s_1\}, i \leftarrow i + 1$$

ここで、 $\mathbf{H}_n$ は選択候補ユーザ n の下り伝搬路行列、 $\mathcal{S}_i$ はステップ数 i までに選択されたユーザの下り伝搬

路行列により構成される行列, $\|\cdot\|_F$ は行列のフロベニウスノルムを表す.

3) $i \geq 2$ のとき, 選択候補ユーザ $n \in \mathcal{U}_{i-1}$ に対し, 式 (7) より選択ユーザ組との chordal distance が最大となる第 i ユーザ s_i を選択する.

$$s_i = \arg \max_{n \in \mathcal{U}_{i-1}} d_{cd}^2(\mathbf{H}_n, \mathbf{S}_{i-1}) \quad (7)$$

$$\tilde{\mathbf{S}}_i = [\tilde{\mathbf{S}}_{i-1}^H \tilde{\mathbf{H}}_{s_i}^H]^H$$

$$\mathcal{U}_i \leftarrow \mathcal{U}_{i-1} - \{s_i\}, \mathbf{S}_i \leftarrow \mathbf{S}_{i-1} + \{s_i\}, i \leftarrow i + 1$$

3) を必要なユーザ数が選択されるまで繰り返す.

3.2 RR 法

RR 法は全ユーザの選択確率が等しくなるようにユーザの全組み合わせを順に選択する簡易なユーザ選択手法である. 選択されるユーザ組は伝搬路状況に関係なくあらかじめ決定されているされるため, 選択確率に関して公平性を保つことが可能である. 一方, 伝搬路状況に対して伝送特性が大きく劣化する組み合わせを選択することもあるためシステムの特性が劣化することがある.

4. 実験システム

4.1 装置構成

本論文では, これまでに試作した分散アンテナ構成のプリコーディングを用いた 2×2 MU-MIMO 実験システム [5] を最大で 4 本のアンテナを備えた基地局装置と単一アンテナを備えたユーザ端末装置 6 台の 4×6 構成 [11]~[13] まで拡張し, ユーザ選択手法を用いた MU-MIMO システムの伝送実験を行う.

基地局装置の外観を図 2 に, 構成を図 4 に示す. 基地局装置は測定器シャーシと, 増幅器及び RF スイッチから構成されるフロントエンド部からなる. 測定シャーシには 4 組の RF ベクトル信号発生器 (SG) と 4 組の RF ベクトル信号アナライザ (SA), FPGA ボード, PC が組み込まれている. 実伝搬環境における伝送実験時にはフロントエンド部を接続し信号の増幅及び送受の切り替えを行う. 送受共通の基地局アンテナは水平面内無指向性, 利得 5 dBi のコリニアアンテナである. 中心周波数 5.11 GHz, 最大 EIRP 1 W の特定実験試験局として免許されている.

ユーザ端末装置の外観を図 3 に, 構成を図 5 に示す. ユーザ端末装置としてソフトウェア無線端末 USRP (Universal Software Radio Peripheral) を用いる. USRP はソフトウェア無線端末の一種であり,



図 2 基地局装置の外観
Fig. 2 Base station (BS).

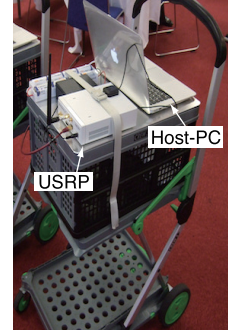


図 3 ユーザ端末装置の外観
Fig. 3 Mobile station (MS).

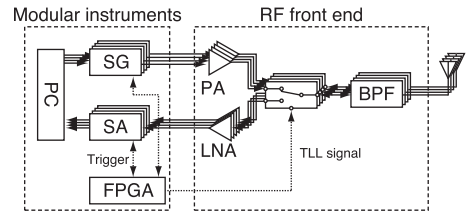


図 4 基地局装置の構成
Fig. 4 Block diagram of BS equipment.

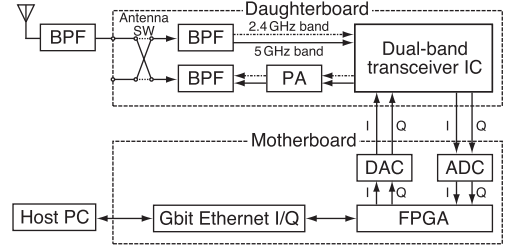


図 5 移動局端末の構成
Fig. 5 Block diagram of MS equipment.

ドータボードとマザーボードで構成される. ドータボードが RF 帯域とベースバンド帯域の間の周波数変換を, マザーボードがベースバンド信号の D/A, A/D 変換及び変調を行う. USRP はギガビットイーサネットにより PC と接続され, 動作の制御及び信号処理は PC 上で動作するソフトウェアにより行われる. 実伝搬環境における伝送実験時には, USRP に BPF と水平面内無指向性, 利得 3 dBi の送受共通アンテナを接続する. 各ユーザ端末装置についても, 基地局装置と同様に特定実験試験局として免許されている.

4.2 伝搬路推定法

ユーザ選択及びプリコーディングを行うためには, 基地局において下り伝搬路の情報が必要となる. 本論文では, ユーザ端末における信号処理の負担を軽減す

る簡単な手法として、各ユーザ端末が基地局から送信されたトレーニング信号を非再生中継により送り返す方法 [14], [15] を利用する。

基地局からユーザ端末へのトレーニング信号、ユーザ端末から基地局へのトレーニング信号、プリコーディングを施したデータパケットをスロットごとに順に送信し、3 スロット構成を 1 フレームとする。

フレーム内のスロット 1, 2 において上り伝搬路のみを通過した上り伝搬路推定用トレーニング信号と下り伝搬路と上り伝搬路を通過した往復伝搬路推定用トレーニング信号の受信信号に基づいて、上り伝搬路行列 $\hat{\mathbf{H}}_{\text{up}} \in \mathbb{C}^{N_{\text{BSA}} \times N_{\text{MS}}}$ と往復伝搬路行列 $\hat{\mathbf{H}}_{\text{round}} \in \mathbb{C}^{N_{\text{BSA}} \times N_{\text{BSA}}}$ を推定する。往復伝搬路行列 $\hat{\mathbf{H}}_{\text{round}}$ から上り伝搬路行列 $\hat{\mathbf{H}}_{\text{up}}$ の成分を取り除くことにより、下り伝搬路行列 $\hat{\mathbf{H}}_{\text{down}} \in \mathbb{C}^{N_{\text{MS}} \times N_{\text{BSA}}}$ を次式から求める。

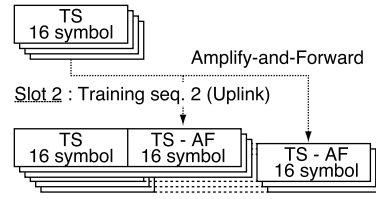
$$\hat{\mathbf{H}}_{\text{down}} = \hat{\mathbf{H}}_{\text{up}}^\dagger \hat{\mathbf{H}}_{\text{round}} \quad (8)$$

本実験系では最大 4×6 構成のマルチユーザ MIMO 伝送を行うため、基地局アンテナ数 N_{BSA} よりユーザ端末数 N_{MS} が多い場合の下り伝搬路行列を推定する必要がある。しかしこの場合、上り伝搬路行列 $\hat{\mathbf{H}}_{\text{up}}$ の行数が列数より大きくなり $\hat{\mathbf{H}}_{\text{up}}^\dagger \hat{\mathbf{H}}_{\text{up}} = \mathbf{I}$ を満たす疑似逆行列 $\hat{\mathbf{H}}_{\text{up}}^\dagger$ が存在しないため、往復伝搬路から上り伝搬路行列の成分を取り除く事ができない。そこで、同時に送信するユーザ端末数が基地局アンテナ数以下になるようにグループを分け、グループごとに時分割で非再生中継を行うことで全ユーザ端末への下り伝搬路行列を推定する。

ユーザ端末を、第 k グループのアンテナ数 M_k が N_{BSA} 以下となるように K 個のグループに分ける。ユーザ端末群は、グループごとに時分割で往復伝搬路推定用トレーニング信号の非再生中継を行う。このとき、各グループのユーザ端末数 M_k は基地局アンテナ数 N_{BSA} 以下であるため、第 k グループの往復及び上り伝搬路行列 $\hat{\mathbf{H}}_{\text{round},k}$ 及び $\hat{\mathbf{H}}_{\text{up},k}$ について式 (8) の計算により下り伝搬路行列 $\hat{\mathbf{H}}_{\text{down},k}$ が推定される。よってシステム全体の下り伝搬路行列 $\hat{\mathbf{H}}_{\text{down}}$ は次式のように推定される。

$$\hat{\mathbf{H}}_{\text{down}} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{H}}_{\text{down},1} \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{H}}_{\text{down},K} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{H}}_{\text{up},1}^\dagger \hat{\mathbf{H}}_{\text{round},1} \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{H}}_{\text{up},K}^\dagger \hat{\mathbf{H}}_{\text{round},K} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Slot 1 : Trainig seq. 1 (Downlink)



Slot 3 : Data packet (Downlink)



図 6 送受パケット構成

Fig. 6 Packet structure. Two training packets are used for channel estimation.

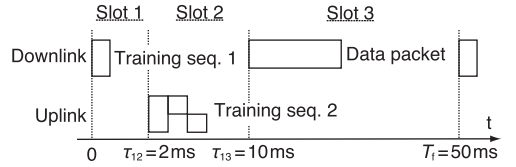


図 7 送受パケットタイミング

Fig. 7 Timing of packet transmissions.

4.3 パケット構成と送受タイミング

伝送実験時のパケット構成を図 6 に、パケットの送受タイミングを図 7 に示す。スロット 1 において、基地局は往復伝搬路推定用トレーニング信号をユーザ端末に向けて送信する。

スロット 2 において、ユーザ端末は受信した往復伝搬路推定用トレーニング信号を上り伝搬路推定用トレーニング信号の後に付加し、他のユーザ端末と同時に基地局へ送信する。本実験系の場合、基地局アンテナ数以下になるようにユーザ端末を 2 グループに分け、グループごとに時分割で非再生中継を行う。基地局において受信信号から上り伝搬路行列及び往復伝搬路行列を推定し、それらを用いて下り伝搬路行列を推定する。推定された下り伝搬路行列に基づいてユーザ選択により動的に同時に収容するユーザ組を決定しデータパケットにプリコーディング処理を施す。

スロット 3 において、プリコーディング処理を施したデータパケットを送信する。データパケットはユーザ端末におけるタイミング及び周波数同期用の 15 シンボルの同期トレーニング系列、復調時の基準位相及び振幅推定用の 8 シンボルのトレーニング系列、主に測定結果の集計に用いる 15 シンボルの制御信号、PN 系列より生成したデータ部、16 ビットの CRC チェッ

クサムからなる．データと CRC チェックサムは合わせて 80 シンボルとしている．

本論文では特に断りのない限りスロット 1 開始からスロット 2 開始までの時間差 τ_{12} を 2 ms, スロット 1 開始からスロット 3 開始までの時間差 τ_{13} を 10 ms, フレーム間隔 T_f を 50 ms とする．

4.4 周波数及びタイミング同期

周波数同期はユーザ端末ごとに独立な GPS レシーバを用いて 10 MHz 基準信号を供給することにより行い、タイミング同期はスロット 3 におけるデータパケット内の同期トレーニング系列との相関ピーク検出により行う [12]．

タイミング同期において、全ての受信信号との相関計算からスロット 3 の同期トレーニング系列との相関ピーク検出をする場合、スロット 2 でのユーザ端末からの送信信号電力が大きい場合は所望の同期系列で相関ピーク検出ができない可能性がある．そのため 2 段階の行程でタイミング同期を行う．まず、スロットごとのパケット長の違いからスロット 3 の時刻を検出する．ユーザ端末は 1 フレーム間に受信した全ての信号電力を計算し受信信号の累積確率分布を計算する．無信号区間と信号区間の比は一定であることから無信号と信号区間を決定し、スロット 3 のパケット長を基に同期用系列を含むスロット 3 の時刻を検出する．その後、検出したスロット 3 の時刻を基に相関ピーク検出を行い正確なタイミング位置を決定する．

5. 計算機シミュレーションによるユーザ選択手法の特性評価

5.1 計算機シミュレーション諸元

実験システムにおけるユーザ選択手法の有効性を計算機シミュレーションを用いて確認する．図 1 に示すような 4×6 構成の MU-MIMO システムに対して、ZF 基準のプリコーディングを施した分散アンテナ構成の MU-MIMO ダウンリンク伝送を行う．全ての送受信機のアンテナは同一平面内に存在し、 x - y 座標系の配置を考える． $(x, y) = (0, 0)$ を中心として基地局アンテナ及びユーザ端末はそれぞれ中心から距離 $\sqrt{2}L/2, L$ の同心円上に等間隔で配置する．

フレームごとに独立に伝搬路推定及びユーザ選択を行い、データパケットにプリコーディングを施して伝送を行う．伝搬路推定に関しては、実験と同じ手法により下り伝搬路を推定した場合とスロット 1 における送信時の下り伝搬路が基地局において既知で理想 CSI

表 1 計算機シミュレーション諸元
Table 1 Simulation parameters.

Parameters	Values
Number of BS antennas	$N_{BSA} = 4$
Number of MS	$N_{MS} = 6$
Number of MS antennas	$N_{MSA} = 1$
Modulation	QPSK
Channel model	Rayleigh fading
Normalized Doppler freq.	$f_D T_s = 1.0 \times 10^{-6}$
Data packet length	98 symbol
Path loss exponent	2
Channel estimation	Echo-MIMO
Precoding weight	Zero-Forcing
User selection scheme	CDUS, SUS, RR

が得られる場合の 2 通りを比較する．

同時に収容するユーザの組み合わせによりプリコーディングウェイト乗算後の送信電力が大幅に異なるものとなる．そこで、プリコーディングウェイト乗算後の送信電力が最小となるユーザ組を選択する理想的なユーザ選択手法 (OPT) と CDUS 法, SUS 法, RR 法の 4 通りの特性を比較する．

各ユーザ端末におけるデータパケットの受信電力が一定の条件下で BER 特性と送信電力特性を評価する．実際の実験装置には電波免許、回路などの制約からピーク電力制限値が存在するため電力制御を行う必要があるが、送信電力特性を評価するため計算機シミュレーション上では送信電力のピーク電力制限を行わないものとする．また、本研究では伝搬路推定誤差の影響を極力抑えるため伝搬路推定時の SNR は高く設定する．計算機シミュレーションではスロット 1 及び 2 における伝搬路推定時の SNR を 40 dB として行う．

その他の計算機シミュレーション諸元を表 1 に示す．ここで、 f_D は最大ドップラ周波数、 $1/T_s$ はシンボレートである．

5.2 4×6 構成の MU-MIMO 伝送におけるユーザ選択手法の伝送特性

選択されたユーザ端末における BER 特性を図 8 に示す．理想 CSI が得られる場合、ユーザ間干渉をほぼ完全に抑圧できるためユーザ選択手法による BER 特性の差は見られない．一方、実験と同じ手法により伝搬路推定を行った場合、CDUS 法及び SUS 法を用いることで BER 特性が改善される．特に、CDUS 法を用いることで高い受信 SNR において RR 法に比べて 1 桁以上改善されることが確認される．

また、伝搬路推定を行った場合の高い SNR においてフロア誤りが生じている．フィードバック遅延を考

慮した理想 CSI の場合には生じていないことから、伝搬路推定ではユーザ端末からのフィードバックを用いて上り伝搬路及び往復伝搬路の 2 回の推定結果から下り伝搬路を推定しているため、理想 CSI の場合に比べて伝搬路推定誤差によるユーザ間干渉の影響が大きくなったからであると考えられる。このとき、CDUS 法を用いることでユーザ間の伝搬路の相関性の低いユーザ組を選択しているため、他のユーザ選択手法に比べてユーザ間干渉の影響を改善できていることがわかる。

基地局における送信電力特性を図 9 に示す。縦軸は最小平均送信電力を基準とした平均送信電力の相対値である。図 9 より RR 法に比べ SUS 法では約 6 dB、CDUS 法では約 11 dB 平均送信電力を低減することができる。伝搬路状況に応じて伝搬路の相関性が低いユーザ組を動的に選択しているため、各ユーザ端末の受信電力一定の条件下で平均送信電力が低減され

たと考えられる。CDUS 法は OPT に比べ約 1 dB 劣化しているものの、他のユーザ選択手法と比べ大幅な改善効果が得られていることが確認される。

6. フェージングエミュレータを用いた伝送実験

6.1 実験諸元

実伝搬環境における伝送実験の準備として実験システムの基礎特性を示す [5]。実伝搬環境では動作検証が困難であるため、8 チャンネルを備えるフェージングエミュレータを用いて伝搬路を模擬して MU-MIMO 伝送実験を行う。本実験系では最大 4×6 構成の MU-MIMO 伝送を行うが、フェージングエミュレータのチャンネル数に制限があるため、基地局アンテナ 2 本とユーザ端末 2 台の 2×2 MU-MIMO 伝送により動作検証を行った。

図 10 に装置の接続を示す。SG 及び SA 各 2 組とユーザ端末 2 台間の、2×2 下り伝搬路及び 2×2 上り伝搬路の合わせて 8 本の伝搬路をフェージングエミュレータにより模擬した。

周波数及びタイミング同期には 10 MHz 基準信号及び 1 PPS 信号を使用する。屋外実験ではこれらの信号をユーザ端末ごとに独立な GPS レシーバから供給する。屋内実験ではこれらの信号をルビジウム発振器及びファンクションジェネレータ (FG) を用いて生成することもでき、結線により全ての装置に共通信号を供給することが可能である。本節ではルビジウム発振器と FG を用いて結線同期をした場合のシステムの基礎特性の確認を行うとともに、ユーザ端末ごとに独立な GPS レシーバを用いた場合の影響を評価する。

パケットの送受タイミングは本節におけるフェージングエミュレータを用いる伝送実験においてのみ $\tau_{12} = 2 \text{ ms}$, $\tau_{13} = 8 \text{ ms}$, $T_f = 100 \text{ ms}$ とする。これ

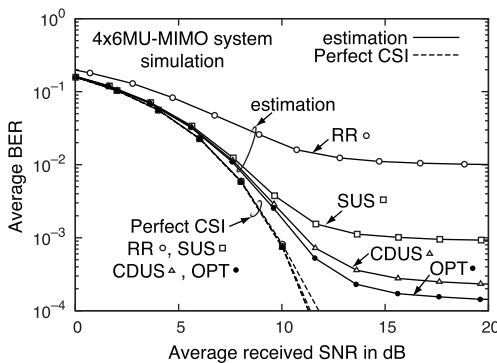


図 8 平均 BER 特性

Fig. 8 BER versus SNR performance for 4×6 MU-MIMO with user selection in computer simulation.

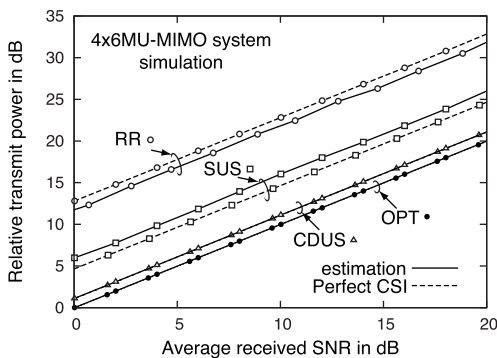


図 9 送信電力特性

Fig. 9 Relative transmit power versus SNR performance for 4×6 MU-MIMO with user selection in computer simulation.

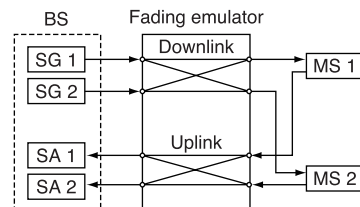


図 10 フェージングエミュレータを用いた伝送実験における装置の接続

Fig. 10 Experimental setup for in-lab experiments. SGs and SAs of the BS equipment are directly connected with the fading emulator.

表 2 伝送実験諸元
Table 2 Experimental parameters.

Parameters	Values
Number of BS antennas	$N_{BSA} = 2$
Number of MS	$N_{MS} = 2$
Number of MS antennas	$N_{MSA} = 1$
Carrier frequency	5.11 GHz
Symbol rate	97.7 kbaud
Modulation	QPSK
Filter	Root roll-off Nyquist (roll-off factor = 0.4)
Oversampling (BS)	16 samples/symbol
Oversampling (MS)	8 samples/symbol
Channel estimation	Echo-MIMO
Duration of timeslot 1	$\tau_{12} = 2$ ms
Duration of timeslot 2	$\tau_{13} - \tau_{12} = 6$ ms
Duration of timeslot 3	$T_f - \tau_{13} = 92$ ms
Precoding weight	Zero-Forcing

は、 2×2 MU-MIMO 実験システムにおいて τ_{12} は最短で 2 ms, $\tau_{13} - \tau_{12}$ は最短で 6 ms の場合に安定した動作が確認されており、フレーム間隔 T_f はユーザ端末において実験データの統計処理及び画面への表示を行う十分な時間を確保するためである。

スロット 1 におけるトレーニング信号は -15.0 dBm で常に一定で送信しユーザ端末における SNR は 33 dB 程度である。スロット 2 におけるトレーニング信号は -25.2 dBm で常に一定としスロット 1 と同設定の伝搬路を通過する。スロット 3 におけるプリコーディングを施したデータパケットは各アンテナのパケット内ピーク電力のうち最大値が一定となるように全送信信号を一樣に制御する。その他の実験諸元を表 2 に示す。

6.2 レイリーフェージングチャネルにおける伝送特性

結線同期を行った場合の十分に遅いレイリーフェージングチャネルにおける BER 特性を確認する。搬送波周波数 5.11 GHz におけるユーザ端末の移動速度 $v_{MS} = 0.27$ cm/s とし、これは最大ドップラ周波数 $f_D = 0.046$ Hz に相当する。実験結果を実計算機シミュレーション結果とともに図 11 に示す。実験結果は計算機シミュレーションと比べ受信 SNR が 20 dB 以上において劣化していることがわかる。これはサンプルタイミングのずれによるシンボル間干渉や USRP の局部発振器の位相雑音の影響であると考えられる。実験結果に多少の劣化は見られるものの比較的安定して動作していることが確認される。

次に、ユーザ端末ごとに独立な GPS レシーバを用いて同期を行った場合の影響について確認する。ユー

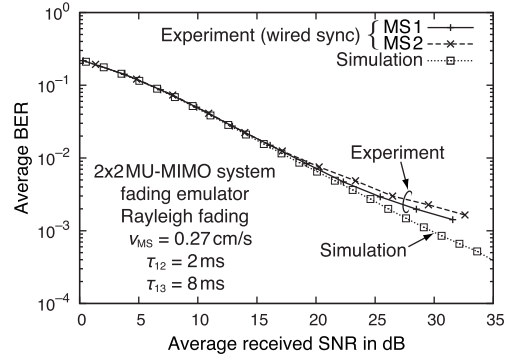


図 11 レイリーフェージングチャネルにおける BER 特性 ($v_{MS} = 0.27$ cm/s) [5]

Fig. 11 BER versus SNR performance for 2×2 MU-MIMO over the slow Rayleigh fading channel ($v_{MS} = 0.27$ cm/s) [5].

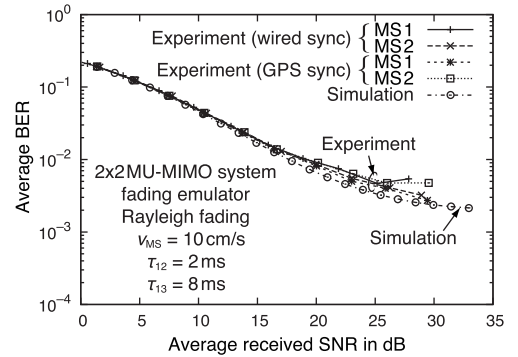


図 12 レイリーフェージングチャネルにおける BER 特性 ($v_{MS} = 10$ cm/s) [5]

Fig. 12 BER versus SNR performance for 2×2 MU-MIMO over the slow Rayleigh fading channel ($v_{MS} = 0.27$ cm/s) [5].

ザ端末の移動速度 $v_{MS} = 10$ cm/s とし、これは最大ドップラ周波数 $f_D = 1.7$ Hz に相当する。結線同期を行った場合と独立な GPS レシーバを用いた場合の実験結果を計算機シミュレーション結果とともに図 12 に示す。同期方法の違いによる特性差はほとんど見られず、GPS レシーバが安定している状態においては結線同期と同等の特性が得られる。

7. 屋内実伝搬環境における伝送実験

7.1 実験環境及び実験諸元

京都大学百周年時計台記念館 2F 国際交流ホールにおいて伝送実験を行った。実験を行った場所の写真を図 13 に、国際交流ホールの概略図を基地局アンテナ及びユーザ端末の配置とともに図 14 に示す。伝送実

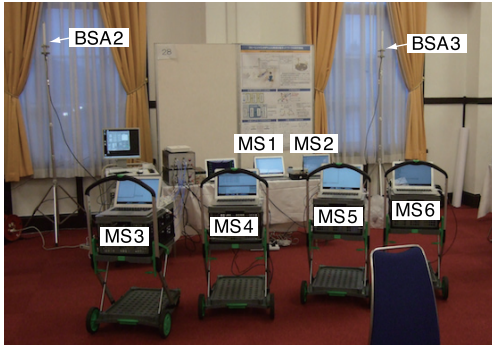


図 13 実験を行った場所 (京都大学百周年時計台記念館 2F 国際交流ホール)

Fig. 13 Environment for the experiments.

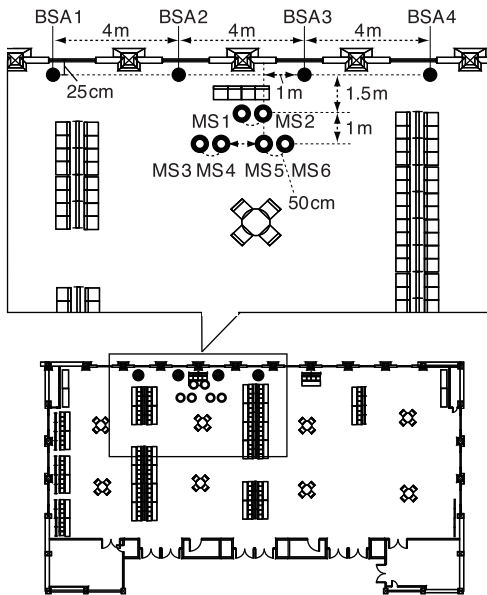


図 14 実験を行った場所の概略図

Fig. 14 Layout of the experimental location.

実験時は国際交流ホールにおいて展示会が開催されており人が自由に動き回る環境であった。各展示ブースは高さ 2m の敷居で仕切られていた。分散アンテナ構成の MU-MIMO 実験システムを考え、基地局アンテナ 4 本は壁から 25 cm の距離に 4m 間隔で直線上に配置する。ユーザ端末について、MS1 及び MS2 は壁から 1.75 m の距離に 50 cm 間隔で配置する。MS3 から MS6 は壁から 2.75 m の距離に MS3, 4 間, MS4, 5 間, MS5, 6 間をそれぞれ 50 cm, 1 m, 50 cm 間隔で直線上に配置する。アンテナ高は、基地局アンテナが 2 m, MS1 及び MS2 が 83 cm, MS3 から MS6 が

88 cm に設定する。基地局アンテナとユーザ端末のアンテナの間は基本的に見通し環境であったが、人体などにより見通しが遮られる場合もあった。

フレームごとに推定された下り伝搬路行列よりユーザ選択を行い基地局アンテナ数のユーザを選択し、ZF 基準のプリコーディングを施して伝送を行う。全体で 240 秒間 (4800 フレーム) の測定を行い、フレーム番号の偶数番号で CDUS 法、奇数番号で RR 法を使用する。二つの手法をフレームごとに切り替えることで伝搬路変動の影響を抑えてほぼ同一な条件下での伝送特性の比較を行う。

周波数同期はユーザ端末ごとに独立な GPS レシーバを用いて 10 MHz 基準信号を供給することにより行う。タイミング同期はスロット 3 におけるデータパケット内の同期トレーニング系列との相関ピーク検出により行う。

パケットの送受タイミングは、ユーザ数の増加及びユーザ選択の処理量の増大により $\tau_{13} = 10 \text{ ms}$ としている。一方、ユーザ端末における実験データの統計処理の改善によりシステムのスループット向上が可能となり $T_f = 50 \text{ ms}$ としている。なお、実験装置による CDUS 法の平均演算時間は約 $94 \mu\text{s}$ であり演算遅延による特性劣化がないことを確認している。

スロット 1 におけるトレーニング信号は 2.9 dBm で常に一定で送信し、各ユーザ端末における SNR は各端末の個体差及び設置位置、伝搬路変動により異なり 34~46 dB 程度であった。スロット 2 におけるトレーニング信号は -6.3 dBm で常に一定で送信する。スロット 3 におけるプリコーディングを施したデータパケットの送信信号は選択されたユーザ端末における受信電力が -91.8 dBm となるように制御する。その他の諸元を表 3 に示す。

7.2 屋内実伝搬環境における 4×6 構成実験システムの伝送特性

選択されたユーザ端末におけるデータパケットの受信電力の CDF を図 15 に示す。受信電力が -91 dBm 付近に多く分布しており正しく送信電力制御が行われていることがわかる。また、測定中に基地局においてピーク電力制限値に達したパケットが存在しなかったことを確認している。

選択されたユーザ 4 台の平均 BER を図 16 に示す。15 パケットの区間平均をプロットしている。これは RR 法により全ユーザ組 ($6C_4 = 15$ 通り) が一通り選択されるパケット数に相当する。ほぼ同じ伝搬路状況

表 3 実験諸元
Table 3 Experimental parameters.

Parameters	Values
Number of base station ant.	$N_{BSA} = 4$
Number of users	$N_{MS} = 6$
Number of user's ant.	$N_{MSA} = 1$
Carrier frequency	5.11 GHz
Symbol rate	312.5 kbaud
Modulation	QPSK
Filter	Root roll-off Nyquist (roll-off factor = 0.4)
Channel estimation	Echo-MIMO
Precoding weight	Zero-Forcing
User selection scheme	CDUS, RR
BS antenna	Omni-directional, 5 dBi
BS antenna height	2.0 m
MS antenna	Omni-directional, 3 dBi
MS antenna height	MS1~2 : 0.83 m MS3~6 : 0.88 m

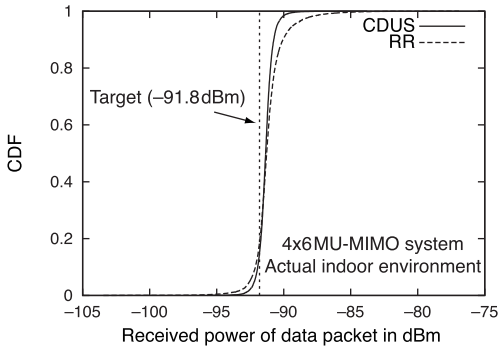


図 15 選択されたユーザ端末におけるデータパケット受信電力の CDF

Fig. 15 Cumulative distribution function of received power of data packets at selected MSs for 4x6 MU-MIMO.

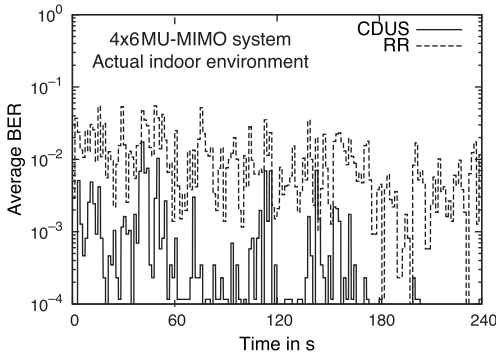


図 16 選択されたユーザ端末における平均 BER

Fig. 16 BER performance at selected MSs for 4x6 MU-MIMO. BER is calculated every 15 data packets.

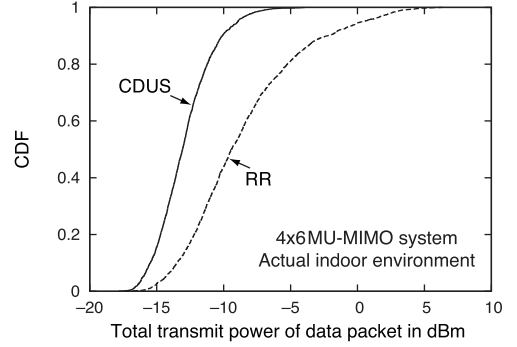


図 17 基地局におけるデータパケット送信電力の CDF
Fig. 17 Cumulative distribution function of transmit power of data packets at the BS for 4x6 MU-MIMO.

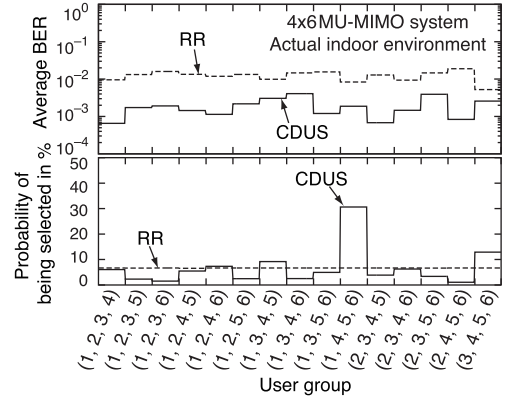


図 18 ユーザ組に対する平均 BER と選択確率

Fig. 18 Average BER and probability of being selected for user groups.

における RR 法との比較から、CDUS 法による BER 特性の改善が確認できる。

基地局におけるデータパケットの送信電力の CDF を図 17 に示す。これより RR 法に比べ CDUS 法を用いることで送信電力が大幅に低減されていることが確認できる。実伝搬環境においても伝搬路状況に応じて伝搬路の相関の低いユーザ組を動的に選択できているため、各ユーザ端末の受信電力一定の条件下で送信電力が低減されたと考えられる。

ユーザ組に対する平均 BER と選択確率を図 18 に示す。ユーザの組み合わせにより BER が大きく異なり、全てのユーザ組において RR 法より CDUS 法の BER 特性が改善されていることから伝搬路の状況に応じてユーザ組を選択していることがわかる。RR 法における最小 BER がユーザ組 (3, 4, 5, 6) の 5.3×10^{-3}

に対し CDUS 法における最大 BER がユーザ組 (1, 3, 4, 6) の 4.1×10^{-3} であり, RR 法における最小 BER より CDUS 法における最大 BER が下回っている。

ユーザ選択による公平性を確保する場合, 例えば一定期間 CDUS 法によってユーザ選択を行い, CDUS 法によって選ばれたユーザ組を除いて RR 法によるユーザ選択を残りの期間において行えば公平性は容易に実現できる。これは, QPSK に固定した伝送であるためである。なお, 公平性を考慮したことにより伝送特性と送信電力特性は劣化すると考えられる。

8. む す び

MU-MIMO 伝送における低演算量のユーザ選択手法について検討を行った。計算機シミュレーションにより 4×6 構成の MU-MIMO システムにおけるユーザ選択手法の有効性を示し, 屋内実伝搬環境において伝送実験を行った。実験結果よりユーザごとに異なるパスロス及び空間相関性をもつ実伝搬環境において, 伝搬路状況に応じて CDUS 法により動的に同時に伝送するユーザ組を選択することで, ほぼ同じ伝搬環境における RR 法と比べて受信電力一定の条件下において基地局における送信電力が低減され, かつユーザ端末における BER が大幅に改善された。

謝辞 本研究は総務省戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE) によるものである。

文 献

- [1] K. Ishihara, Y. Asai, R. Kudo, T. Ichikawa, and M. Mizoguchi, "Indoor experiments of real-time MU-MIMO with CSI feedback scheme for wireless LAN systems," *Proc. IEEE VTC 2012-Spring*, pp.1-5, May 2012.
- [2] Y. Hatakawa, T. Matsumoto, and S. Konishi, "Development and experiment of linear and non-linear precoding on a real-time multiuser-MIMO testbed with limited CSI feedback," *Proc. IEEE PIMRC 2012*, pp.1606-1611, Sept. 2012.
- [3] 矢野一人, 蘭部聡司, 俣 亜飛, 塚本悟司, 伴 弘司, 宇野雅博, 小林 聖, "小セル環境への適用に向けた非線形マルチユーザ MIMO システムの研究開発: 効果と実用化に向けた課題," *信学技報*, RCS2012-168, Nov. 2012.
- [4] 川村輝雄, 井上祐樹, 齊藤敬佑, 安川真平, 安藤英浩, "LTE-Advanced 下りリンクにおける固有値分解に基づく CSI フィードバックを用いるマルチユーザ MIMO 伝送実験," *信学技報*, RCS2012-170, Nov. 2012.
- [5] H. Murata, S. Yoshida, K. Yamamoto, D. Umehara, S. Denno, and M. Morikura, "Software radio-based distributed multi-user MIMO testbed: Towards green wireless communications," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E96-A, no.1, pp.247-254, Jan. 2013.
- [6] S. Ozyurt and M. Torlak, "Performance analysis of optimum zero-forcing beamforming with greedy user selection," *IEEE Commun. Lett.*, vol.16, no.4, pp.446-449, April 2012.
- [7] T. Yoo and A. Goldsmith, "On the optimality of multi-antenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol.24, no.3, pp.528-541, March 2006.
- [8] B. Zhou, B. Bai, Y. Li, D. Gu, and Y. Luo, "Chordal distance-based user selection algorithm for the multiuser MIMO downlink with perfect or partial CSIT," *Proc. IEEE AINA 2011*, pp.77-82, March 2011.
- [9] 齊藤 俊, 村田英一, 吉田 進, 山本高至, 梅原大祐, 田野哲, 守倉正博, "マルチユーザ MIMO 伝送におけるユーザ選択手法に関する一検討," *信学技報*, WBS2012-33, Oct. 2012.
- [10] 齊藤 俊, 谷口真人, 村田英一, 吉田 進, 山本高至, 梅原大祐, 田野 哲, 守倉正博, "マルチユーザ MIMO 実験システムにおけるユーザ選択手法に関する一検討," *信学技報*, RCS2012-295, Feb. 2013.
- [11] 谷口真人, 齊藤俊, 村田英一, 吉田 進, 山本高至, 梅原大祐, 田野 哲, 守倉正博, "ソフトウェア無線機により試作したマルチユーザ MIMO 実験システムの構成," *信学技報*, RCS2012-293, Feb. 2013.
- [12] 佐藤弘基, 村田英一, 吉田 進, 山本高至, 梅原大祐, 田野哲, 守倉正博, "マルチユーザ MIMO 実験システムにおけるタイミングおよび周波数同期に関する一検討," *映情学技報*, BCT2013-43, pp.21-24, Feb. 2013.
- [13] 篠原 諒, 村田英一, 吉田 進, 山本高至, 梅原大祐, 田野哲, 守倉正博, "USRP によるマルチユーザ MIMO 伝送実験用移動端末の試作," *映情学技報*, BCT2013-44, pp.25-28, Feb. 2013.
- [14] L. Withers, R. Taylor, and D. Warne, "Echo-MIMO: A two-way channel training method for matched cooperative beamforming," *IEEE Trans. Signal. Process.*, vol.56, no.9, pp.4419-4432, Sept. 2008.
- [15] R. Osawa, H. Murata, K. Yamamoto, and S. Yoshida, "Performance of two-way channel estimation technique for multi-user distributed antenna systems with spatial precoding," *Proc. IEEE VTC 2009-Fall*, pp.1-5, Sept. 2009.

(平成 25 年 5 月 23 日受付, 10 月 2 日再受付)



齊藤 俊 (学生会員)

平 24 阪府大・工・電気情報システム卒。現在, 京都大学大学院情報科学研究科修士課程在学中。マルチユーザ MIMO の研究に従事。



谷口 真人 (学生員)

平 24 京大・工・電気電子卒。現在、同大学大学院情報学研究科修士課程在学中。マルチユーザ MIMO の研究に従事。



篠原 諒 (学生員)

平 24 京大・工・電気電子卒。現在、同大学大学院情報学研究科修士課程在学中。マルチユーザ MIMO の研究に従事。



佐藤 弘基 (学生員)

平 24 阪府大・工・電気情報システム卒。現在、京都大学大学院情報学研究科修士課程在学中。マルチユーザ MIMO の研究に従事。



村田 英一 (正員：シニア会員)

平 3 京大・工・電子卒。平 5 同大学院修士課程了。平 5～14 同大助手。平 14 より東工大助教授、平 18 京大大学院情報学・助教授。平 19 同准教授、現在に至る。工博。ワイヤレスネットワーク、無線伝送方式の研究に従事。平 9 本会学術奨励賞、平 12 エリクソンヤングサイエンティストアワード、平 18 電気通信普及財団テレコムシステム技術賞、平 24 同奨励賞、平 18 科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞、平 23・25 本会論文賞受賞。



吉田 進 (正員：フェロー)

昭 46 京大・工・電子卒。昭 48 京大・院・修士修了。同年京大・工・助手。昭 53 京大工博。同助教授を経て平 4 京大・工・教授。平 25 京大定年退職。現在は京大特任教授・名誉教授。この間主として移動通信技術の研究に従事。平 24 本会会長。日本学術会議会員、総務省情報通信審議会委員など務める。本会業績賞、論文賞、エリクソン・テレコミュニケーション・アワード、電波の日・総務大臣表彰など受賞。



山本 高至 (正員：シニア会員)

平 14 京大・工・電気電子卒。平 16 同大学院情報学研究科修士課程了。同年日本学術振興会特別研究員。平 17 同大学院博士課程了。同年同大学院情報学・助手。平 19 同助教。平 23 同准教授、現在に至る。平 20～21 スウェーデン王立工科大学客員研究員。京都大学博士(情報学)。M2M 無線ネットワーク、ゲーム理論の応用に関する研究に従事。平 18 エリクソンヤングサイエンティストアワード、平 20 年度学術奨励賞、平 23 年度論文賞受賞。



梅原 大祐 (正員：シニア会員)

平 11 東工大・理工学研究科博士課程了。同年京大大学院情報学研究科助手。平 23 京都工繊大学院工学科学研究科准教授。通信路モデル化、変調方式、誤り訂正方式、メディアアクセス制御方式に関する研究に従事。工博。IEEE 会員。



田野 哲 (正員：シニア会員)

昭 63 京大大学院修士課程了。同年日本電信電話(株)入社。平 9 国際電気通信基礎技術研究所(ATR)出向。平 12 (株)NTTドコモ入社。平 14 (株)NTTドコモ欧州研究所出向。平 16 京大大学院情報学研究科助教授。平 23 岡大大学院自然科学研究科教授。平 7 本会論文賞受賞。デジタル変復調技術、時空間信号処理、ソフトウェア無線、センサネットワークに関する研究に従事。工博。IEEE 会員。



守倉 正博 (正員：フェロー)

昭 54 京大・工・電気第二卒。昭 56 同大学院修士課程了。同年日本電信電話公社横須賀電気通信研究所入所。以来、衛星通信用 TDMA 装置、高速無線 LAN 装置の研究開発、M2M システムの研究に従事。昭 63～平元カナダ政府通信研究所客員研究員。現在、京都大学大学院情報学研究科教授。工博。平 12 本会論文賞、平 12IEEE802.11 WG 功労者表彰、平 14 電波功績賞、平 18 本会業績賞、平 19 文部科学大臣表彰、平 20 前島賞受賞。