

端末連携 MIMO 受信における適応端末選択手法と実受信信号による特性評価

荒井 将弘^{†a)} 村田 英一[†]

Study of Adaptive Terminal Selection Schemes for Terminal Collaborated MIMO Reception and Its Performance Evaluation with Actual Received Signals

Masahiro ARAI^{†a)} and Hidekazu MURATA[†]

あらまし 端末連携 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 受信は分散 MIMO 伝送の一形態であり、基地局は複数の信号ストリームを多数の受信アンテナをもつ仮想端末に送信する。この仮想端末は複数の携帯端末から構成されている。端末連携 MIMO 受信は受信端末数が増加すると伝送特性が改善されるが、端末間連携通信によるオーバーヘッドが増大してしまう。受信端末の中から少数の適切な受信端末を選択して復調に用いることで伝送特性を確保しつつオーバーヘッドを削減できると考えられる。本論文では端末の受信状況と端末間通信品質に基づく受信端末の選択手法を検討し、連携端末数削減による特性劣化を適応的端末選択によって改善できることを実受信信号を用いた伝送特性評価により明らかにした。

キーワード MIMO 伝送, 端末連携 MIMO 受信, 端末間通信, 端末選択, 屋外伝送実験

1. ま え が き

近年スマートフォン等の通信機器が普及したことにより、通信トラフィックが急増している。今後も通信トラフィックが増大し続けることが想定されるため、周波数利用効率の向上が望まれている。周波数利用効率の向上に向けて送受信ともに複数のアンテナを用いて同一周波数の異なる複数の信号を同時に伝送する MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 伝送が実用化されている。

MIMO 伝送は送信アンテナ数、受信アンテナ数のうち少ない方にほぼ比例してチャンネル容量が増大する。しかし MIMO 伝送はアンテナ間の距離を十分に離さないで受信信号同士が高い相関をもち特性が劣化する。このことから携帯端末のような小型端末では設置可能なアンテナ数が限られる。

この制約を解消するために複数の携帯端末を用いて

MIMO 伝送を行うマルチユーザ MIMO が研究されてきた。マルチユーザ MIMO では、ユーザ間干渉を抑圧するために基地局側で送信信号にプリコーディングを施す手法が用いられる。このプリコーディングには送受信間の CSI (Channel State Information) が必要であり、CSI 取得からプリコーディングを施す送信までの間に携帯端末が移動するとチャネル状態が変動し、送信に用いた CSI との誤差が生じてマルチユーザ MIMO の伝送特性を劣化させていた [1]。

このような問題に対して、近傍に存在する複数の携帯端末での受信信号を収集し等価的に受信アンテナ数を増大させて復調を行う端末連携 MIMO 受信が研究されている [2]~[5]。この手法は基地局でダウンリンクの CSI を把握する必要がないため移動環境における使用に有効である。端末連携 MIMO 受信が特に適する使用場面の一例として端末が多数存在し端末同士の相対位置がほぼ一定な移動環境である、電車やバスといった公共交通機関の中が考えられる。

今後高周波数帯を用いたスモールセルにおいて高速低遅延の無線通信が実用化されると見込まれるため、この通信機能と周波数帯域をスモールセル外において受信端末の連携に活用することが考えられる。これに

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

a) E-mail: murata@i.kyoto-u.ac.jp

DOI:10.14923/transcomj.2019GTP0014

より高速な端末間連携通信が可能となるが、受信端末数が多くなると連携通信のための電力消費と時間というオーバーヘッドが増大してしまう。

全受信端末の中から連携対象とする受信端末を適切に選択して復調に用いることで、オーバーヘッドの削減が実現できる。しかし復調に用いる信号数が減少するため伝送特性は劣化する。そこで、オーバーヘッドを削減しつつ、受信端末を適切に選択することで伝送特性の劣化を抑えることを考える。

これまでシングルユーザ MIMO における受信アンテナ選択 [6], [7] やマルチユーザ MIMO におけるユーザ選択の研究が行われてきた [8], [9]。しかし端末連携 MIMO 受信は基地局と受信端末の間の伝搬路だけでなく、端末間の伝搬路も考慮する必要がある。端末間の通信品質が劣化していると端末連携 MIMO 受信の伝送特性が劣化する。よって端末連携 MIMO 受信における連携端末は、基地局からの受信状況のみならず端末間の通信品質をも考慮して選択することが適切である。

このように連携端末の選択手法の検討は、基地局と連携端末群間並びに連携端末間の 2 種の伝搬路を扱う必要がある。このため、適切な伝搬路モデルを用いた検討だけでなく、実際の環境における特性評価が重要となる。そこで、受信端末を搭載した移動車両を用いて取得した基地局からの受信信号と車両内での端末連携通信品質を用いて連携端末の選択手法の検討を行う。

本論文では初めに基地局からの受信状況に基づいた連携端末の選択手法を検討し、続いて連携端末間の通信品質を考慮した選択手法による伝送特性の改善効果を示す。これには、屋外伝送実験により市街地を移動中に記録した基地局からの受信信号と、同時に記録された連携端末間通信の SNR (Signal to Noise power Ratio) を用いた。

2. 端末連携 MIMO 受信

2.1 システムモデル

システムモデルを図 1 に示す。送信アンテナ数を N_t 、受信端末数を N_r とする。基地局から N_t 個の送信信号 x_1, x_2, \dots, x_{N_t} を送信する。各受信端末はこれらの送信信号を、受信信号 y_1, y_2, \dots, y_{N_r} として受信する。 i 番目の送信アンテナから j 番目の受信端末までのチャネル係数を h_{ji} とすると、 $y_n = h_{n1}x_1 + h_{n2}x_2 + \dots + h_{nN_t}x_{N_t}$ ($n = 1, 2, \dots, N_r$) となる。端末 n は自身が受信した信号 y_n を他端末に近

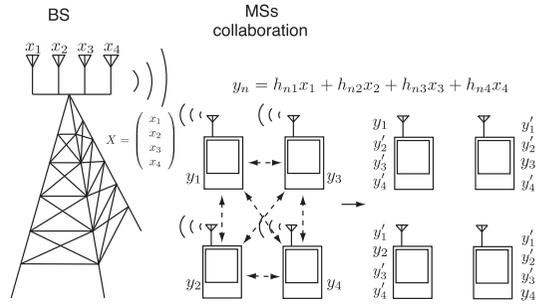


図 1 システムモデル ($N_t = N_r = 4$)
Fig. 1 System model ($N_t = N_r = 4$).

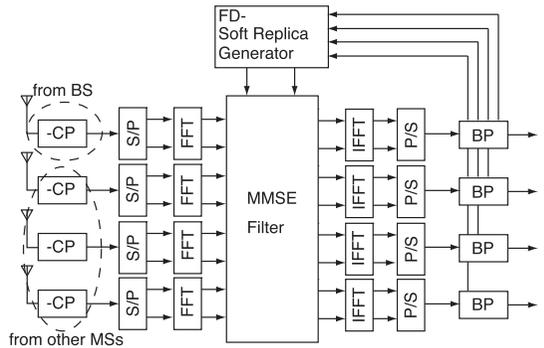


図 2 端末連携 MIMO 受信の復調処理
Fig. 2 Demodulation process for terminal collaborated MIMO reception.

距離無線通信で送信する。他端末はこれを y'_n として受信する。連携通信により取得した信号と自身での受信信号を用いて x_1, x_2, \dots, x_{N_t} を復調する。

2.2 受信信号処理

MIMO 空間多重信号の復調方式として周波数領域繰り返し等化を用いた [10]。基地局から受信した信号を復調するまでの処理を図 2 に示す。サイクリックプリフィックスを除去した後 FFT により周波数領域に変換し、自身が受信した信号波形及び他から共有された信号波形を全て用いて MMSE (Minimum Mean-Square Error) による信号分離と等化を行う。その後 IFFT によって時間領域に戻し LDPC (Low-Density Parity Check) 符号に対し BP (Belief Propagation) 復号を行う。

2.3 システム構成

屋外伝送実験で得た受信信号を用いて検討を行う。基地局から 4 本の送信アンテナを用いて、QPSK 変調したパケットを 50 ms ごとに 427.2 MHz で 4 ストリームを送信する。各送信アンテナから送信されるパケッ

15	35	15	4	192	8
SW	TS	CTRL	CP	Data	CRC

SW: Synchronization Word TS: Training Symbol CTRL: Control word
 CP: Cyclic Prefix CRC: Cyclic Redundancy Check

図3 基地局からの送信パケット
 Fig. 3 Transmit packet from BS.

トは図3に示すように同期系列(SW), 直交トレーニング系列(TS), 制御部系列(CTRL), サイクリックプリフィックス(CP), データ部(DATA), CRC(Cyclic Redundancy Check)によって構成されている. 同期系列は受信端末のタイミング同期, 直交トレーニング系列はチャネル推定, 制御部系列は基地局からの受信端末制御, CRCは誤り検出にそれぞれ使用される. このパケットを6台の端末で受信する. 受信端末には簡易なソフトウェア無線端末であるUSRP(Universal Software Radio Peripheral)を用いた.

今回, 基地局から受信した信号をそのまま他端末へ送信するAF(Amplify and Forward)を用いた. 具体的には, 基地局からの受信信号はパケット全体について複素ベースバンドのデジタル値がメモリに保存され, 所定の時刻に周波数変換器を通して他端末へ送信される. この信号送信(以後, 連携送信と呼ぶ)は端末番号順に3ms間隔で行う. 受信端末の周波数基準には共通のGPSDO(GPS Disciplined Oscillator)を用いた. サンプルタイミングの同期には基地局からのトレーニング信号を用いた.

2.4 受信信号の記録とオフライン処理

本論文では6台の受信端末から4台の連携端末を選択する. 今回の装置ではリアルタイムでの復調処理が可能であるが, 様々な連携端末パターンを同一条件で比較するために基地局からの受信信号を各受信端末が記録する機能を実装した. これにより各選択パターンにおける復調特性を同一条件で比較できる. 以下, 屋外伝送実験で記録した受信信号を用いて復調することをオフライン処理と呼ぶ. 図3のパケット構成において, 直交トレーニング系列, CP, データ部, CRCの全シンボルでサンプル値のI成分, Q成分をそれぞれ記録する.

3. 屋外伝送実験

屋外伝送実験の全体構成を図4に示す. 図5に示す京都大学構内の建物の屋上にある4本の基地局アンテナ(地上高25.5m, 配置は3.8m×2.5mの長方形)から信号を送信した. 基地局アンテナには水平面内無

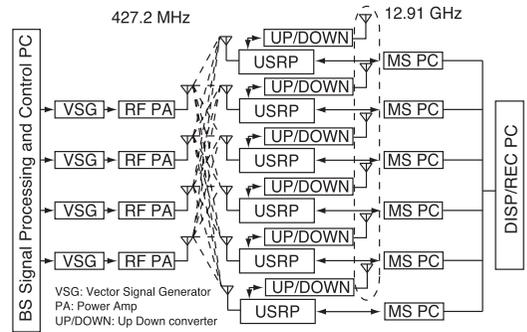


図4 実験構成
 Fig. 4 Experimental setup.

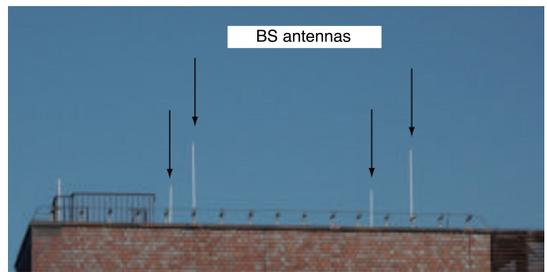


図5 基地局アンテナ
 Fig. 5 Base station antennas.

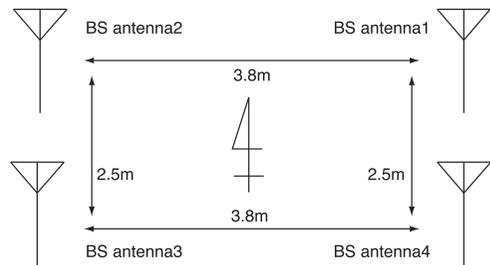


図6 基地局アンテナの配置
 Fig. 6 Arrangement of BS antennas.

指向性グラウンドプレーンアンテナ(ノンラジアル)を用いた. 基地局アンテナの配置を図6に示す. アンテナの番号は送信するストリームの番号に対応する.

公共交通機関などでのグループモビリティ環境を想定し端末間の通信は車両内で行うが, アンテナ配置を柔軟にするために基地局からの信号は車両のルーフ上に設置した受信アンテナで受信する. 受信アンテナの形式はλ/4モノポール(430MHz, 水平面内無指向性)である. 受信アンテナは図7のように配置した. 実環境におけるアンテナ間隔と伝送特性の関係について今後検討するために, 0.5波長から2波長までのアンテナ

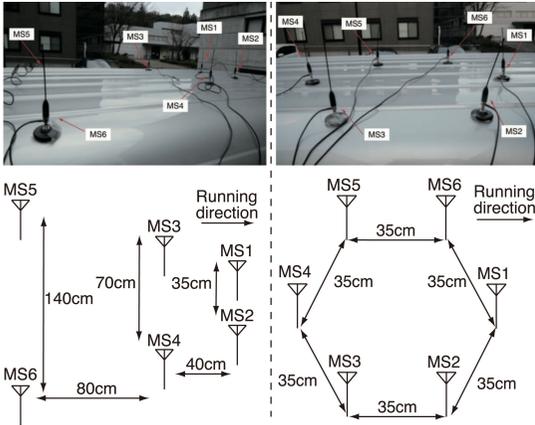


図 7 受信アンテナ (左: 台形配置, 右: 円形配置)
Fig. 7 Receive antenna (Left: trapezoid arrange, Right: Circular arrange).



Running direction

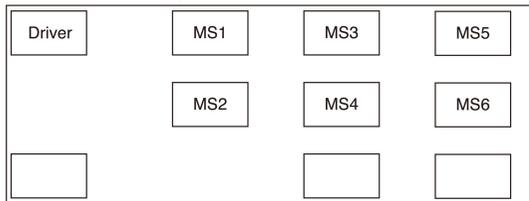


図 8 車両内の受信端末
Fig. 8 Mobile stations in measurement vehicle.

ナ間隔を混在させた配置が左の台形配置である。右側は一般的な円形配置である。

受信端末は 10 人乗り車両内の座席に図 8 のように配置した。連携端末間通信用のアンテナ ($\lambda/4$ スリープアンテナ, 水平面内無指向性) は座席の背もたれに固定した。

各受信端末には制御用 PC (図中 MS PC) が接続されており, 他端末への信号送信や受信信号の復調は制御用 PC によって制御される。制御用 PC は有線 LAN で表示・記録用 PC に接続されており, 各端末の各パ

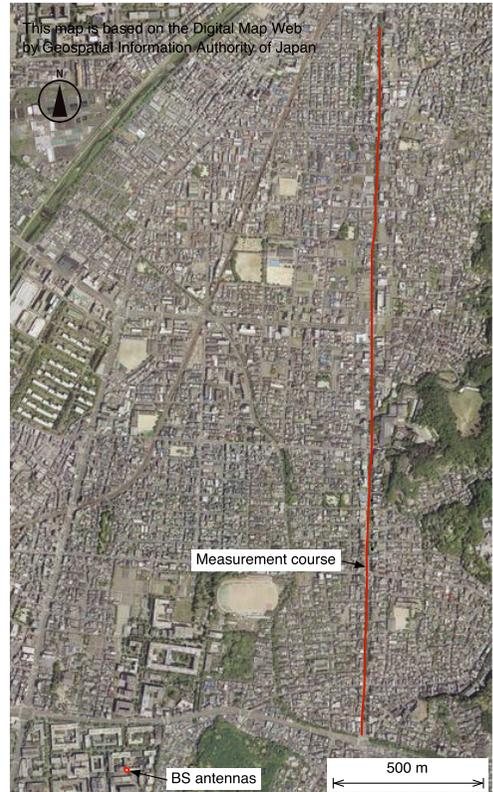


図 9 走行コース
Fig. 9 Measurement course.

表 1 屋外伝送実験の実験諸元

Table 1 Parameters for outdoor transmission experiments.

Parameters	Values
Number of BS antennas	4
Transmit power of BS	1 W
Antenna gain of BS	5.8 dBi
Cable loss	1.4 dB
BS antenna height	25.5 m
Carrier frequency	427.2 MHz
Symbol rate	312.5 k symbols/s
Transmit filter	Square root raised cosine
	Roll-off factor 0.4
Frame interval	50 ms
Number of MS	6
Number of MS antennas	1
MS antenna height (427.2 MHz)	2.1 m
Frequency of inter-MS communications	12.91 GHz
Symbol rate of MS	312.5 k symbols/s
Transmit and receive filter	Fourth root raised cosine
	Roll-off factor 0.4
Transmit power of MS	10 mW

ケットにおける受信電力や誤り数などの数値は制御用 PC が算出して表示・記録用 PC (図中 DISP/REC PC) に送信して保存する。

車両は京都市左京区の白川通りを北上した。走行コースの地図を図 9 に示す。走行は受信アンテナ台形配置, 円形配置それぞれにおいて 3 回ずつ行った。各走行において, 信号で停止する時間やタイミングが異なるため, 記録した信号波形の中から車両が停止している区間を除外した。基地局からの受信電力は -100 dBm ~ -55 dBm の範囲で変化した。実験諸元を表 1 に示す。

4. 端末の受信状況に基づく連携端末の選択

MIMO 受信におけるアンテナ選択手法としてはチャネル容量の最大化が考えられる。しかし本研究では基地局がダウンリンクの CSI を取得しない状況を想定しているため伝搬路に基づく送信電力制御や適応変調が行えず, チャネル容量は達成できない。このため, 復調特性を BER (Bit Error Rate) で評価する。今回用いているシングルキャリア周波数領域等化の BER 特性の改善にはチャネル容量の最大化ではなく復調特性そのものを基準にするべきであるが [11], 本論文ではチャネル行列のみから算出できる特異値に基づいた選択に着目する。

4.1 連携端末の選択手法

本研究では 6 台の受信端末から 4 台選択する場合を考える。今回の構成では 3 シンボル遅延波までに対応しているため, 先行波を含めた 4 タップのチャネルレスポンスを DFT (Discrete Fourier Transform) して得られる四つの周波数成分についてチャネル行列を生成し, この特異値に基づいて選択を行う。

各チャネル行列において特異値は 4 個算出されるため, 各選択パターンにおいて 16 個の特異値がある。そこで本章は, 連携端末を選択する手法を複数検討し, その中から端末連携 MIMO 受信の特性を最も改善するものを明らかにする。本章で検討する手法は以下の 3 種類である。

- (1) 最小特異値最大化: $a^* = \arg \max_{a \in \mathcal{A}} (\min_i \lambda_i^{(a)})$
- (2) 最大特異値最大化: $a^* = \arg \max_{a \in \mathcal{A}} (\max_i \lambda_i^{(a)})$
- (3) 特異値積最大化: $a^* = \arg \max_{a \in \mathcal{A}} (\prod_{i=1}^{16} \lambda_i^{(a)})$

\mathcal{A} は選択パターンの集合, a^* は選択されるパターン, $\lambda_i^{(a)}$ はパターン a におけるチャネル行列の第 i 特異値である。

表 2 平均 BER の比較 (台形配置)

Table 2 Comparisons of average BER (trapezoid arrangement).

選択手法	1 回目	2 回目	3 回目
連携端末パターン固定	0.068	0.054	<u>0.064</u>
連携端末番号	2,3,4,5	1,4,5,6	1,3,4,5
最小特異値最大化	0.061	0.048	0.071
最大特異値最大化	0.077	0.062	0.087
特異値積最大化	<u>0.058</u>	<u>0.044</u>	0.068

表 3 平均 BER の比較 (円形配置)

Table 3 Comparisons of average BER (circular arrangement).

選択手法	1 回目	2 回目	3 回目
連携端末パターン固定	0.062	0.056	0.067
連携端末番号	1,3,4,5	1,3,4,5	2,3,4,5
最小特異値最大化	0.056	0.048	0.061
最大特異値最大化	0.069	0.062	0.076
特異値積最大化	<u>0.052</u>	<u>0.045</u>	<u>0.057</u>

最小特異値最大化はシングルユーザ MIMO-OFDM におけるアンテナ選択手法として検討例 [7] がある。最大特異値最大化は BER 改善には適さないと考えられるが比較対象として取り上げる。特異値積最大化はマルチユーザ MIMO におけるユーザ選択で検討例 [12] がある。

各選択手法による端末連携 MIMO 受信の伝送特性の改善効果を検討する指標には, 受信信号をオフライン処理で復調したときの BER を用いる。この BER は 50 ms のフレーム内で基地局から同時送信される 4 パケットのデータ部を復調したときの BER である。なお, 実システムにおいては適切に選ばれた端末が他端末からチャネル推定結果または受信したトレーニング信号部分を取集してチャネル行列を把握し, 端末選択の結果を他端末に周知することになる [13]。

4.2 検討結果

台形配置, 円形配置それぞれについてコース全体の平均 BER を表 2, 表 3 に示す。連携端末パターン固定は, 平均 BER が最も低かった選択パターンにおける結果のみを示している。台形配置での 1 回目と 2 回目, 円形配置での 1~3 回目の走行における結果では, 最小特異値最大化が連携端末パターン固定よりも平均 BER が改善されている。一方, 最大特異値最大化は連携端末パターン固定よりも BER が劣化している。特異値積最大化は最小特異値最大化よりも平均 BER が改善されている。

台形配置での 3 回目の走行における結果のみ, 連携端末パターン固定の BER が最も低くなっている。

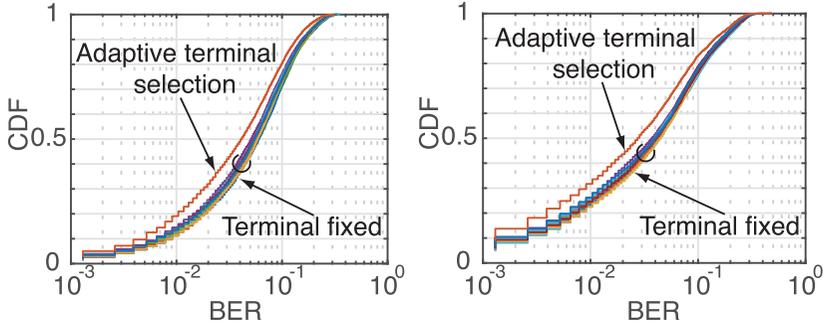


図 10 フレームごとの BER の CDF (左：台形配置，右：円形配置)
 Fig. 10 CDF of frame by frame BER (Left: trapezoid arrange, Right: Circular arrange).

データを分析したところ，MS6 が選択されたときに BER が劣化する現象が発生していた．この走行においてのみ MS6 のサンプルタイミングのロック位置が適切ではなく，走行に伴いチャンネルインパルスレスポンスが等化可能範囲を超えたためと思われる．

連携端末パターン固定と特異値積最大化について，フレーム毎 BER の CDF (Cumulative Distribution Function) を図 10 に示す．特異値積最大化（図中 Adaptive terminal selection）は連携端末パターン固定（図中 Terminal fixed, 全 15 パターン）よりも BER が改善されていることがわかる．

5. 端末の受信状況と端末間通信品質に基づく連携端末の選択

前章のオフライン処理で用いた受信信号は各端末が基地局から受信した信号を記録したものであり，端末間通信による品質劣化を受けていない．そこで，受信信号とともに記録した各種電力値を元に連携端末間通信における雑音を推定して受信信号に付加する機能を実装した．本章ではこの機能を用いて端末の受信状況と端末間通信品質の両方に基づいた適応端末選択について検討する．

5.1 端末間通信における雑音の推定

各端末において，基地局から受信した信号の受信電力と他端末から受信した連携信号の SNR がフレームごとに記録されている．この SNR は信号が基地局から端末に送信され，その端末から自身に受信されるまでの総合 SNR である．基地局からの信号を受信した時点での SNR を γ_1 ，端末間通信単体の SNR を γ_2 とすると，非再生中継であるため簡単な計算により総合 SNR は $\gamma_1\gamma_2/(\gamma_1 + \gamma_2 + 1)$ となる．今回の屋外伝送

実験では，総合 SNR は最大で約 45 dB であった．これらの値からガウス雑音を生成して受信信号に付加した．平均電力を推定するにあたって，400 MHz 帯受信における端末の雑音指数をカタログスペックから 3 dB とした．

選択パターンが同一であっても総合 SNR は端末ごとに異なるものとなる．簡単のため MS1 における復調特性に限って検討する．そのため選択する連携端末には必ず MS1 を含め，復調処理には MS1 が基地局及び連携端末から受信した信号を用いることにする．また，復調処理 (MMSE 及びびゆう度計算) に用いる雑音電力は MS1 における雑音電力値を用いている．

5.2 連携端末の選択手法

本章における連携端末の選択は MS1 を含む 4 台の連携端末パターン全 10 通りからの選択である．検討する選択手法は，以下の 3 種類とする．

- (1) 特異値積最大化: $a^* = \arg \max_{a \in \mathcal{A}} (\prod_{i=1}^{16} \lambda_i^{(a)})$
- (2) SNR 和最大化: $a^* = \arg \max_{a \in \mathcal{A}} (\sum_{i=1}^3 SNR_i^{(a)})$
- (3) 特異値積最大化+SNR しきい値:

$$\mathcal{A}' := \{a \in \mathcal{A}, SNR_i^{(a)} > Th, i = 1, 2, 3\}$$

$$a^* = \arg \max_{a \in \mathcal{A}'} (\prod_{i=1}^{16} \lambda_i^{(a)})$$

\mathcal{A} は MS1 を含む 4 台の連携端末を選択するパターンの集合， $SNR_i^{(a)}$ は連携端末パターン a における MS1 が i 番目（選択された 3 台に新たに振った番号）の他端末から受信した信号の総合 SNR， Th は $SNR_i^{(a)}$ のしきい値である．

SNR 和最大化において最大になる連携端末パターンが複数存在した場合は MS の番号が小さい端末を優先的に選択することにした．特異値積最大化+SNR し

表 4 平均 BER の比較 (台形配置)

Table 4 Comparisons of average BER (trapezoid arrange).

選択手法	1 回目	2 回目	3 回目
連携端末パターン固定	0.076	0.063	<u>0.073</u>
連携端末番号	1,3,4,5	1,2,4,5	1,3,4,5
特異値積最大化	0.067	0.056	0.078
SNR 和最大化	0.077	0.063	0.078
特異値積最大化+SNR しきい値	<u>0.066</u>	<u>0.054</u>	0.076

表 5 平均 BER の比較 (円形配置)

Table 5 Comparisons of average BER (circular arrange).

選択手法	1 回目	2 回目	3 回目
連携端末パターン固定	0.071	0.066	0.075
連携端末番号	1,3,4,5	1,3,4,5	1,3,4,5
特異値積最大化	0.063	0.058	0.067
SNR 和最大化	0.070	0.063	0.075
特異値積最大化+SNR しきい値	<u>0.060</u>	<u>0.054</u>	<u>0.066</u>

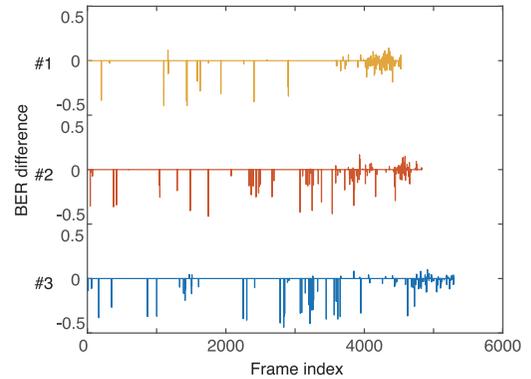
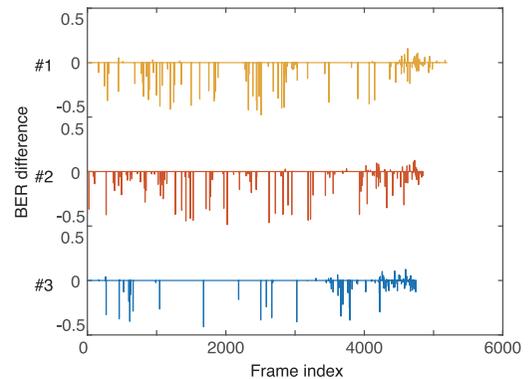
きい値において MS1 における総合 SNR がしきい値を満たす端末が 3 台以下の場合、しきい値を満たす端末を全て含む全連携端末パターンについて特異値積最大化を行うこととした。

5.3 検討結果

端末間通信における雑音を付加した信号を用いて、4. と同様の検討を行う。平均 BER を算出した結果を表 4, 表 5 に示す。連携端末パターン固定は、平均 BER が最も低かった連携端末パターンにおける結果を示している。表 4, 表 5 とともに表 2, 表 3 に比べて全体的に平均 BER が劣化しており、連携通信における雑音を付加した影響が現れている。

台形配置での 1 回目と 2 回目、円形配置での 1~3 回目の走行における結果では、特異値積最大化は端末間連携通信における雑音が付加されていても、連携端末パターン固定に比べて平均 BER が改善されている。また SNR 和最大化よりも特異値積最大化の方が平均 BER が改善されている。SNR 和最大化は BER 改善効果が得られるが特異値積最大化には劣る。

特異値積最大化+SNR しきい値について、しきい値を 10 dB から 20 dB まで 2 dB ステップで変化させて平均 BER を算出した。しきい値 12 dB 時に平均 BER 改善が最大となったため、表 4, 表 5 にはしきい値を 12 dB に設定したときの平均 BER を示している。特異値積最大化+SNR しきい値は特異値積最大化よりも平均 BER が改善されていた。端末連携 MIMO 受信の適応端末選択において、受信端末の受信状況と端末間通信の品質の両方を考慮することの有効性が示さ

図 11 特異値積最大化による BER と特異値積最大化+SNR しきい値による BER の差 $p_{\text{SNR},k} - p_k$ (台形配置)Fig. 11 BER difference between product of singular values maximization and product of singular values maximization with SNR threshold $p_{\text{SNR},k} - p_k$ (trapezoid arrange).図 12 特異値積最大化による BER と特異値積最大化+SNR しきい値による BER の差 $p_{\text{SNR},k} - p_k$ (円形配置)Fig. 12 BER difference between product of singular values maximization and product of singular values maximization with SNR threshold $p_{\text{SNR},k} - p_k$ (circular arrange).

れた。台形配置での 3 回目の走行のみ結果が異なるのは 4. と同様の理由と考えられる。

MS1 における総合 SNR にしきい値を設定したことによる特異値積最大化の改善効果を検討する。白川通りを走行したときの第 k フレームにおける特異値積最大化+SNR しきい値による BER を $p_{\text{SNR},k}$ とし、特異値積最大化による BER を p_k とする。横軸を k として $p_{\text{SNR},k} - p_k$ を図 11, 図 12 に示す。図中 # i は i 回目の走行を表す。このとき総合 SNR のしきい値は 12 dB に設定した。MS1 における総合 SNR のしきい

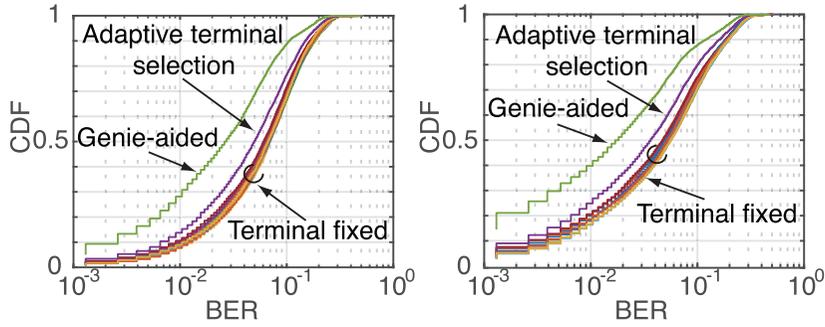


図 13 フレームごとの BER の CDF (左：台形配置, 右：円形配置)
 Fig. 13 CDF of frame by frame BER (Left: trapezoid arrange, Right: Circular arrange).

値を設定したことによって BER が減少したフレームは下に、増加したフレームは上にそれぞれグラフが伸びている。図 11, 図 12 とともに、BER が大幅に改善されているフレームが多数存在している。特異値積最大化で選択された端末が MS1 との通信品質が低いために BER が劣化するという現象が、MS1 における総合 SNR にしきい値を設定したことにより改善されていることがわかる。

各走行において BER が減少及び増加したフレーム数、減少及び増加したエラービット数、BER が変化したフレームにおける BER 減少値の平均を表 6, 表 7 に示す。減少及び増加したエラービット数は図 11, 図 12 の各グラフにおける正の値、負の値それぞれの総和に、1 フレームあたりに復調するビット数を乗算したものである。BER 減少値の平均に着目すると、MS1 における総合 SNR のしきい値を設定したことで、特異値積最大化では MS1 との通信品質が低い端末が選択されて BER が劣化するフレームに対して、BER を平均で 0.03 ~ 0.11 減少させることがわかる。表 4, 表 5 のように全フレームの平均 BER で比較したときにはほとんど見られなかった MS1 における総合 SNR にしきい値を設定したことによる特異値積最大化の改善効果が、BER が変化したフレームに着目することで顕著に見られた。

4. と同様に連携端末パターン固定の BER の CDF (図中 Terminal fixed, 10 本) と、特異値積最大化 + SNR しきい値の BER の CDF (図中 Adaptive terminal selection) を図 13 に示す。BER が 10^{-2} 以下になるフレームの割合に着目すると、受信アンテナ台形配置のときは 8~11%程度から 14%程度に増加している。受信アンテナ円形配置のときは、16~20%程度

表 6 BER が変化したフレーム数, エラービットの増減, BER の減少値の平均 (台形配置)

Table 6 Number of frames with BER change, increase or decrease of error bits and average BER decrease (trapezoid arrange).

	1 回目	2 回目	3 回目
BER 減少フレーム数	101	94	109
BER 増加フレーム数	66	57	35
減少エラービット	5606	8407	9954
増加エラービット	1614	1497	740
BER の減少値の平均	0.031	0.059	0.083

表 7 BER が変化したフレーム数, エラービットの増減, BER の減少値の平均 (円形配置)

Table 7 Number of frames with BER change, increase or decrease of error bits and average BER decrease (circular arrange).

	1 回目	2 回目	3 回目
BER 減少フレーム数	103	135	101
BER 増加フレーム数	31	25	33
減少エラービット	12397	13508	6913
増加エラービット	1614	1497	740
BER の減少値の平均	0.111	0.104	0.060

から 25%程度に増加している。特異値積最大化 + SNR しきい値は、受信信号が端末間通信で劣化している状況でも BER が 10^{-2} 以下になるフレームを約 5%増加させることが可能であると言える。

また図 13 では、各フレームにおいて BER が最小になる連携端末パターンを選択した理想選択の CDF (図中 Genie-aided) も示している。理想選択の CDF と特異値積最大化 + SNR しきい値の CDF を比較すると連携端末の選択手法に改善の余地があることがわかる。

6. むすび

端末連携 MIMO 受信において連携端末を適応的に

選択することによる BER の改善効果を示した。端末の受信状況に基づいた連携端末の選択手法としてチャネル行列の特異値に基づく選択を検討した。検討した手法中ではチャネル行列の特異値の積を最大化する手法が最も BER の改善効果があることを示した。復調を行う端末における他端末から受信した信号の総合 SNR にしきい値を設定し、しきい値を下回る端末を連携端末の候補から除外することで更なる BER の改善効果があることを示した。

今回は端末間連携通信による特性劣化を雑音の付加として加味したが、非線形ひずみなど他の要因も考えられる。今後、記録装置を改善し連携通信後の信号を記録することにより、より現実的な検討を行う。また、今回は連携端末数削減による BER 特性劣化を適応的端末選択によって改善できることを示したが、オーバーヘッド削減効果の定量的評価は今後の課題である。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 JP15H04007 の助成を受けたものである。本研究の装置の一部は総務省 SCOPE による。

文 献

- [1] H.P. Bui, Y. Ogawa, T. Nishimura, and T. Ohgane, "Performance evaluation of a multi-user MIMO system with prediction of time-varying indoor channels," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.61, no.1, pp.371–379, Jan. 2013.
- [2] 村田英一, "マルチユーザ MIMO システムにおけるユーザ端末共同干渉キャンセル," *信学技報*, RCS2013-20, Nov. 2013.
- [3] A. Maaref, J. Ma, M. Salem, H. Baligh, and K. Zarifi, "Device-centric radio access virtualization for 5G networks," *GLOBECOM 2014 Workshop*, pp.887–893, Austin, Texas, Dec. 2014.
- [4] R. Dabora and S.D. Serviette, "Broadcast channels with cooperating decoders," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol.52, no.12, pp.5438–5454, Dec. 2006.
- [5] T. Okubo and M. Itamami, "A study on cooperative reception of one segment ISDB-T," *2008 International Symposium on Information Theory and its Applications*, ISITA2008, Dec. 2008.
- [6] A.F. Molisch and M.Z. Win, "MIMO systems with antenna selection," *IEEE Microw. Mag.*, vol.5, no.1, pp.46–56, March 2004.
- [7] Z. Tang, H. Suzuki, and I.B. Collings, "Performance of antenna selection for MIMO-OFDM systems based on measured indoor correlated frequency selective channels," *Proc. ATNAC*, pp.435–439, Dec. 2006.
- [8] 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.
- [9] T. Yoo and A. Goldsmith, "On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol.24, no.3, pp.528–541, March 2006.
- [10] T. Koike, H. Murata, and S. Yoshida, "Frequency-domain SC/MMSE iterative equalizer with MF approximation in LDPC-coded MIMO transmissions," *IEEE 15th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol.24, pp.1414–1428, Sept. 2004.
- [11] A. Wilzeck, P. Pan, and T. Kaiser, "Transmit and receive antenna subset selection for MIMO SC-FDE in frequency selective channels," *14th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2006)*, Florence, Italy, Sept. 2006.
- [12] S. Nam, J. Kim, and Y. Han, "A user selection algorithm using angle between subspaces for downlink MU-MIMO systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol.62, no.2, pp.616–624, Feb. 2014.
- [13] 藤本裕真, 篠原 諒, 村田英一, "適応受信信号選択により端末間連携コストを削減する共同干渉キャンセルの走行実験," *信学技報*, RCS2014-262, Dec. 2014.
(2019年4月22日受付, 8月25日再受付,
9月27日早期公開)



荒井 将弘 (学生会員)

平 29 京大・工・電気電子卒。平 31 同大学大学院情報学研究所修士課程了。同年 NTT 西日本に入社。端末連携 MIMO 受信の研究に従事。



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 16 本会功労感謝状, 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 20・22・28 本会通ソ活動功労賞, 平 23・25 本会論文賞, 平 26 近畿情報通信協議会会長表彰, *IEEE ICC 2014 Best Paper Award* 各受賞。