

# 携帯端末間で連携する受信方式の屋外伝送実験

林 勇治<sup>†</sup> 村田 英一<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 京都大学大学院 情報学研究科 〒606-8501 京都市左京区吉田本町

E-mail: <sup>†</sup>contact-h26j@hanase.kuee.kyoto-u.ac.jp

あらまし 増加し続けている通信量に対応するための技術の一つとして、MIMO 伝送が研究されている。MIMO 伝送ではアンテナ数を増加させるほど周波数利用効率を向上させることができるが、携帯端末においては多数のアンテナを備えることが困難である。そこで本稿では携帯端末間で受信信号を共有して行う、端末間連携によるマルチユーザ MIMO 伝送を考える。受信信号を共有することで多数のアンテナを備えた 1 端末として扱うことができる。しかし携帯端末は独立に動作しているため、信号共有の成否が特性に影響する。また端末ごとに異なる周波数オフセットや位相雑音が存在し、これらの影響を計算機シミュレーションで評価することは困難である。そこで本研究では、端末間連携による伝送特性改善効果を屋外伝送実験により検討する。干渉キャンセルアルゴリズムとして線形処理である MMSE 法及び非線形処理である MLD 法を実装し、屋外伝送実験における誤り率特性を基に端末間連携の効果を示す。キーワード マルチユーザ MIMO, 共同干渉キャンセル, MMSE, MLD, 屋外伝送実験

## Field Experiments of Signal Reception Schemes with Mobile Terminal Collaboration

Yuji HAYASHI<sup>†</sup> and Hidekazu MURATA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Informatics, Kyoto University Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501 Japan

E-mail: <sup>†</sup>contact-h26j@hanase.kuee.kyoto-u.ac.jp

**Abstract** Multiple-input multiple-output (MIMO) transmission has been proposed as an effective scheme to satisfy increasing traffic. In MIMO systems, the higher spectral efficiency is achieved by using more antennas. However, it is hard to equip mobile terminals with a lot of antennas. Therefore, multi-user MIMO (MU-MIMO) system using collaborative interference cancellation scheme is proposed. In this scheme, received signal sharing among collaborated mobile terminals is employed. These collaborated terminals are regarded as one terminal equipped with many antennas. In this paper, MU-MIMO system with collaborative interference cancellation is investigated by field experiments. The bit error performance is evaluated by comparison between the systems using minimum mean square error filter and using maximum likelihood detection.

**Keyword** Multi-user MIMO, Collaborative interference cancellation, Minimum mean square error, Maximum likelihood detection, Field experiment

### 1. はじめに

増加し続ける通信量に対応する方法の一つとして周波数利用効率の向上による通信容量の拡大があげられる。その技術の一つである MIMO 伝送ではアンテナ数に応じて周波数利用効率を向上させることができる。しかし携帯端末では多数のアンテナを備えることは困難である。そこで複数の携帯端末への MIMO 伝送を行うマルチユーザ MIMO (MU-MIMO) 伝送の研究が進められている。MU-MIMO 伝送では、同一周波数帯で複数ユーザ宛に信号を同時に送信するためユーザ間干渉の抑圧が重要である。干渉を抑圧する技術として、基地局において推定した伝搬路を基に、携帯端末における干渉信号を抑圧するためのプリコーディングを送信信号に施す方法がある [1, 2].

しかし伝搬路が大きく変動する環境では、推定した伝搬路と、伝送時の伝搬路で差が生じるため、干渉を十分に抑圧できなくなる。

そのため携帯端末側で干渉を抑圧する技術として、端末同士で連携して行う端末共同干渉キャンセルが研究されている [3-5]. 携帯端末側で干渉抑圧処理を行うため、伝搬路変動による特性劣化を軽減できる。共有した信号の処理方法には線形処理と非線形処理がある。非線形処理は線形処理と比べ、演算量が大きい。しかし誤り率特性は良好であることが知られている。

端末共同干渉キャンセルでは各端末が独立に動作しているため受信信号の共有の成否が特性に影響を与える。また端末ごとに異なる周波数オフセットや位相雑音が存在し、周波数オフセットは発振器の精度に応じて時間変化する。これらの影響を

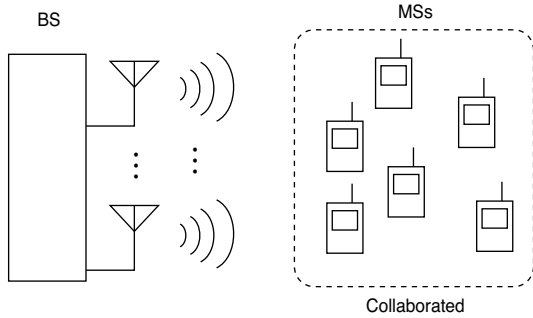


図1 端末間連携による MU-MIMO 伝送のシステムモデル

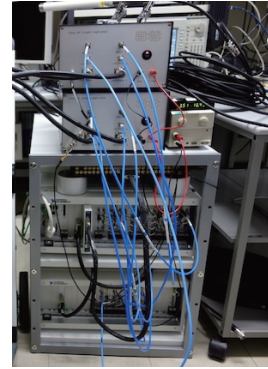


図2 基地局外観



図3 基地局アンテナ

含めて特性を評価するためには基地局と携帯端末間及び携帯端末同士の通信の2つのチャンネルモデルが必要である。特に携帯端末同士の通信として本稿で想定している車内での近距離通信のモデルはほとんど知られておらず、計算機シミュレーションでの評価は困難である。

そこで本稿では、端末共同干渉キャンセルを用いた MU-MIMO 伝送の屋外伝送実験によって特性を評価する。信号処理方法として線形処理である MMSE (Minimum Mean Square Error) 法と非線形処理である MLD (Maximum Likelihood Detection: 最尤判定) 法を用い、誤り率を測定し検討する。

## 2. システムモデル

### 2.1 MU-MIMO 伝送

本稿におけるシステムモデルを図1に示す。基地局アンテナ数  $N$ 、単一アンテナの携帯端末数  $M$  の MU-MIMO 伝送において、携帯端末における受信信号  $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  は次式のように表される。ただし、 $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{M \times N}$  は伝搬路行列、 $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$  は基地局の送信信号、 $\mathbf{n} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  は加法的白色ガウス雑音である。

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

携帯端末において所望信号以外の信号が干渉信号として受信されるため、所望信号を取り出す技術が必要となる。

### 2.2 端末共同干渉キャンセル

MU-MIMO 伝送を実現する方法として携帯端末間で受信信号を共有し、携帯端末側で干渉をキャンセルする端末共同干渉キャンセルの研究が行われている [3-5]。受信信号を共有することで多数アンテナを備えた1端末として扱うことができる。また携帯端末間の距離は離れていて、共有信号の伝搬路の相関は小さいことが期待でき、信号分離能力が高まると考えられる。

### 2.3 共有信号の信号処理

共有した信号に対して信号処理を行うことで所望信号を得る。以下で本稿で用いた信号処理方法である MMSE 法及び MLD 法について説明する。

#### 2.3.1 MMSE 法

携帯端末において以下の式で表される MMSE ウェイト  $\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{N \times M}$  を受信ウェイトとし、干渉キャンセルを行う [6]。

$$\begin{aligned} \mathbf{W} &= \mathbf{H}^H \mathbf{R}_{yy}^{-1} \\ &= \mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H + \mathbf{\Sigma})^{-1} \end{aligned} \quad (2)$$



図4 携帯端末設置例

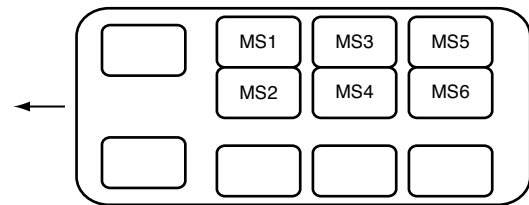


図5 車内の携帯端末位置

ここで、 $\mathbf{R}_{yy} \in \mathbb{C}^{M \times M}$  は受信信号の相関行列、 $\mathbf{\Sigma} \in \mathbb{C}^{M \times M}$  は雑音の相関行列である。MMSE 法は行列の線形演算で記述でき、計算量は小さい。

#### 2.3.2 MLD 法

$\mathbf{H}$  と送信信号パターン  $\mathbf{p} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$  を用いて、携帯端末における受信信号のレプリカを作成する。レプリカと受信信号間の二乗ノルムを基に判定結果  $\hat{\mathbf{x}} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$  を得る。

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{p}} (\|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{p}\|^2) \quad (3)$$

MLD 法は全送信信号パターンについて計算するため、計算量は大きい。誤り率特性は良好である。

## 3. 伝送実験

### 3.1 実験構成

実験に用いた基地局及び基地局アンテナの外観を図2及び図3に示す。基地局は4台の RF ベクトルシグナルアナライザと RF ベクトルシグナルジェネレータ、FPGA ボード及び制御 PC が組み込まれている測定シャーシ、外付けの増幅器からなる RF フロントエンド部等により構成されている。基地局アン

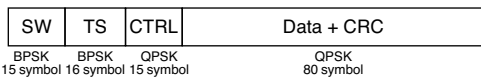


図 6 パケット構成

表 1 基地局, 携帯端末間通信の諸元

System Parameters	Values
Number of antennas of BS	4
Number of MSs	4, 6
Frame length	50 ms
Carrier frequency	5.11 GHz
Symbol rate	312.5k symbol/s
Modulation	QPSK
BS Parameters	Values
Transmit filter	Square Root Nyquist (roll-off factor = 0.4)
Antenna height	25.5 m
Antenna gain	5 dBi
MS Parameters	Values
Velocity of MSs	about 20 km/h
ADC resolution	14 bit
Antenna gain	3 dBi

テナとして, 水平面内無指向性, 利得 5 dBi のものを用い, 京都大学総合研究 3 号館屋上に設置した. アンテナ間隔は, 対角方向に約 1.2m (約 20 波長) として正方に配置した. 実験時にはルビジウム周波数標準より 10 MHz の基準信号を基地局に供給した. 基地局は中心周波数 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 [7].

実験の際に自動車に搭載した携帯端末の設置例を図 4 に, 車内の携帯端末の配置を図 5 に示す. 携帯端末として USRP (Universal Software Radio Peripheral) 及びこれと接続した PC を用いた. PC によって動作制御, ベースバンド信号処理及び携帯端末間のアドホックネットワークの構築を行う. またアンテナとして, 水平面内無指向性, 利得 3 dBi のものを用いる. 基準信号として各 USRP に内蔵されている 10 MHz OCOXO を用いており, タイミングクロックの生成及び周波数リファレンスに用いている.

基準信号が端末ごとに異なるためタイミング同期及び周波数オフセット補償を行う. これらは基地局から送信される信号に含まれる同期信号を用いて各端末で独立に行う. 相関演算及びピークの検出によってタイミング同期を行い, 同期タイミングの推移を観測することで周波数オフセット補償を行う [8].

### 3.2 パケット構成

今回の実験で用いたパケットの構成を図 6 に示す. SW は基地局との同期用系列であり, TS は直交系列を用いたトレーニング信号である. 携帯端末間で受信信号のトレーニング信号部及びデータ信号を共有し, これを用いて伝搬路行列を計算し, 干渉キャンセルを行う.

### 3.3 受信信号の処理

今回の実験において, 携帯端末間の通信は端末制御用の PC の無線 LAN を用いたアドホックネットワーク上での UDP プ

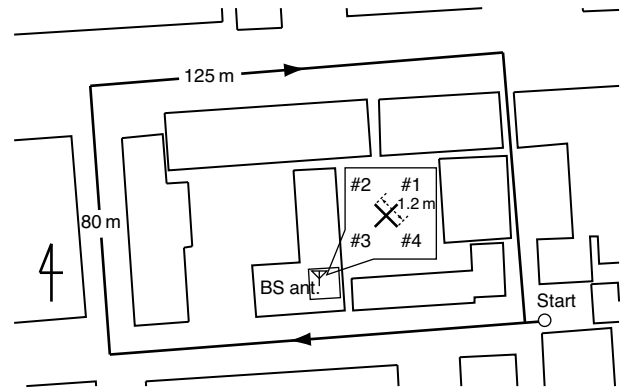


図 7 実験環境見取り図

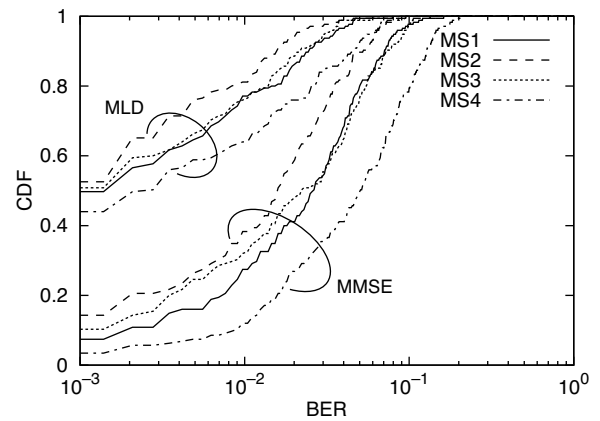


図 8 4x4 伝送における区間平均 BER の累積分布関数

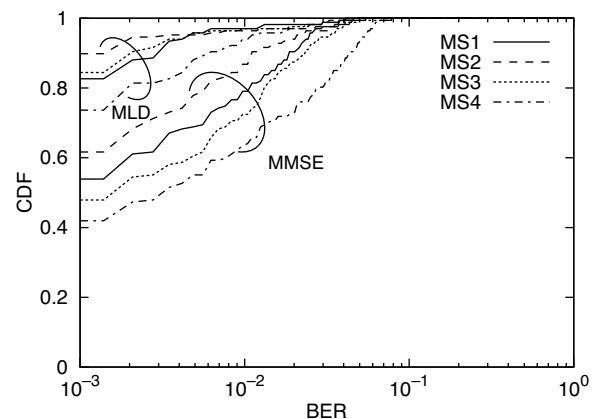


図 9 4x6 伝送における区間平均 BER の累積分布関数

ロードキャストによって行う. ゲイン情報及び受信ベースバンド信号の IQ 各 10 ビットのサンプル値を共有する情報として他端末に対して送信する. ゲイン情報は今回簡単のために 16 ビットとした.

ブロードキャストによって信号の共有を行うため, 各端末の状態や受信環境などによって信号共有に失敗することがある. このときは受け取ることができた信号と自身の受信信号のみに対して MMSE 法及び MLD 法によって信号処理を行う. 受信環境や信号共有の成否による影響でなく信号処理方法の違いのみによる差を見るためにそれぞれの信号処理を, 共有した同一の信号に対して行う.

### 3.4 実験諸元

京都大学総合研究3号館周囲において端末共同干渉キャンセルを用いる MU-MIMO 伝送実験を行った。実験諸元を表1に、実験環境を基地局アンテナ位置及び実験コースとともに図7に示す。送信電力はアンテナ端で21 dBmとなるように設定した。携帯端末を1台の自動車に搭載し、動作している携帯端末台数が4台及び6台の場合について、実験コースを自動車で1周し約1600フレーム(約80s)の伝送を行い誤り率を測定した。

### 3.5 実験結果

共同台数が4台及び6台のときの10フレームの平均BERの累積分布関数を図8及び図9に示す。個体差や配置の差による違いはあるもののいずれの携帯端末も同様のBER特性が得られていることがわかる。いずれの場合においてもMLDの方がMMSEよりもBER特性が優れているという結果が得られた。また図8のMLDと図9のMMSEを比較すると、本実験においては共同台数が4台のときのMLDと6台のときのMMSEは同等のBER特性であったことがわかる。

図10及び図11に共同台数4台及び6台のときの携帯端末の受信電力、信号処理に利用できた信号数及び10フレームの平均BERの推移をMS1を例にとって示す。受信電力の推移からいずれの場合もパスロスやシャドウイングの影響は同等であったといえる。

受信電力が小さいとき、共同台数が多いときのMLDではBER特性が良好であるが、共同台数が少ないときやMMSE法で信号処理を行った場合はBER特性が劣化した。これは共同台数が少ないときやMMSE法を用いたときには干渉抑圧能力が小さく、受信環境が良好でなければ十分に干渉を抑圧できないためと考えられる。

受信電力が大きいときは、MLD法で信号処理を行った場合や共同台数が多いときはBER特性が良好であることがわかる。これは受信環境が良好な場合、MLDや共同台数の多いときのMMSEでの干渉抑圧能力が十分であるためと考えられる。

受信電力が大きいときでも、図10の10秒付近や図11の20秒付近などの利用可能な信号数が少ないときには、実質的な共同台数が少なくなるためBER特性が劣化している。ただ、図10及び図11の利用可能な信号数の推移を見ると、今回の場合には6台で共同したときの方が、信号数が1つや2つになる回数が少ないように見える。これは共同台数が多いために利用可能な信号数の期待値が大きくなるためと考えられる。

## 4. むすび

各端末が独立に動作し、携帯端末間で受信信号を共有する端末間連携によるMU-MIMO伝送について、干渉抑圧の信号処理方法としてMMSE法及びMLD法を用い、屋外伝送実験において信号共有の成否を含めて誤り率を測定し比較、検討を行った。実験結果より信号共有に成功した実質的な共有台数に応じて誤り率特性が改善されることを示した。

### 文献

[1] 呉潤錫, 阪口啓, 荒木純道, “MU-MIMOのためのチャンネル情報のハイブリッドフィードバックとプリコーディング手法,” 信学

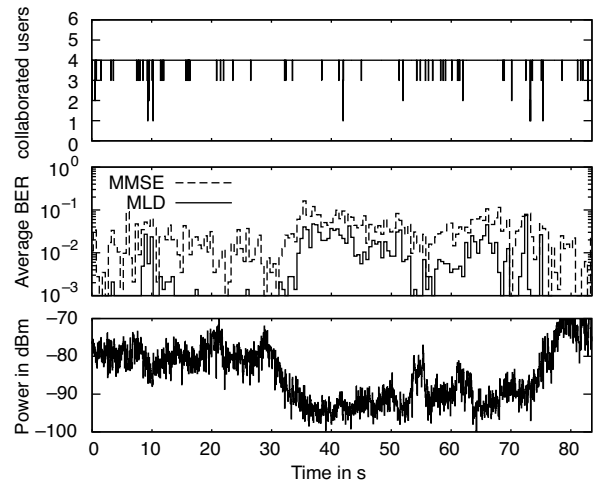


図10 4×4伝送でのMS1における受信電力、利用できた信号数及び区間平均BERの推移

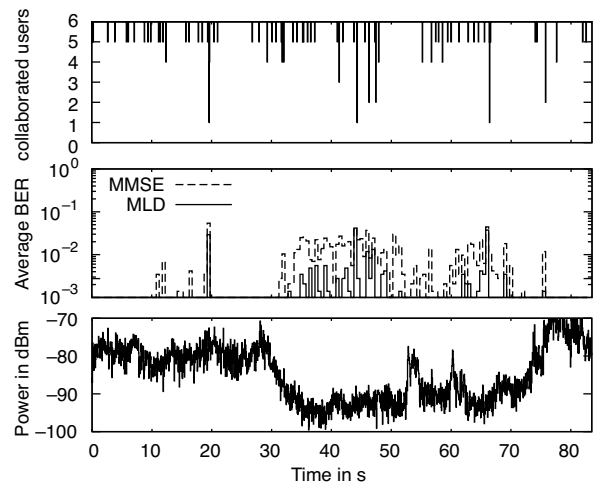


図11 4×6伝送でのMS1における受信電力、利用できた信号数及び区間平均BERの推移

技報, RCS2010-151, pp.57-61, Nov. 2010.

[2] 原田将如, 府川和彦, 鈴木博, 須山聡, “マルチユーザ MIMO 通信におけるチャンネルの2次統計量を用いた MMSE プリコーディング,” 信学技報, RCS2012-38, pp.97-102, May 2012.  
 [3] 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, RCS2013-201, pp.159-164, Nov. 2013.  
 [4] H. Kwon and J.M. Cioffi, “Multi-user MISO broadcast channel with user-cooperating decoder,” IEEE Vehicular Technology Conference, Sep. 2008.  
 [5] J. Lee, S. Kim, H. Suman, T. kwon, Y. Choi, J. Shin, and A. Park, “Downlink node cooperation with node selection diversity,” IEEE Vehicular Technology Conference, pp.1494-1498, May 2005.  
 [6] 篠原諒, 村田英一, “移動局共同干渉キャンセルを行う MU-MIMO システムの屋内伝送実験,” 信学技報, BCT2013-112, pp.157-160, Dec. 2013.  
 [7] 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, pp.55-60, Feb. 2013.  
 [8] 佐藤弘基, 村田英一, “マルチユーザ MIMO 実験システムにおけるタイミング同期及び周波数オフセット補償に関する一検討,” 信学技報, RCS2013-182, pp.49-54, Nov. 2013.