

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

篠原 諒[†] 村田 英一[†]

[†] 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: [†]contact-h25j@hanase.kuee.kyoto-u.ac.jp

あらまし マルチユーザ MIMO 伝送は高い周波数利用効率を実現する技術として注目されている。基地局が複数の移動局を収容するため、プリコーディングによる信号分離が行われるが、伝搬路情報のフィードバックや基地局での演算の間の伝搬路変化によって、ユーザ間干渉が残留する。線形信号処理による十分なユーザ間干渉抑圧効果を得るためのアンテナ数を移動局に期待することは現実的ではない。そこで、近傍移動局間で受信信号を共有することで実質的なアンテナ数を増加させ、干渉抑圧効果を向上させる方法について検討を行っている。この方法では移動局アンテナが空間的に分散するため空間相関の低下が期待できる一方で、キャリア周波数、サンプルタイミング、熱雑音、位相雑音などの個体差の影響を受ける。このため、実験的に特性評価を行うことが求められる。本稿では移動局が無線 LAN を用いて受信信号を共有する試作システムを用いた屋内実験環境における伝送実験結果を報告している。

キーワード マルチユーザ MIMO, 共同干渉キャンセル, 伝送実験

Indoor Experimental Evaluation of Collaborative Interference Cancellation Technique in Multi-user MIMO Transmission

Ryo SHINOHARA[†] and Hidekazu MURATA[†]

[†] Graduate School of Informatics, Kyoto University Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501 Japan

E-mail: [†]contact-h25j@hanase.kuee.kyoto-u.ac.jp

Abstract Multi-user multiple-input multiple-output (MU-MIMO) transmission has been investigated to improve the spectrum efficiency in wireless communications. Outdated CSI causes residual inter-user interference on precoding for MU-MIMO. Sufficient interference rejection by linear signal processing requires more than the number of antennas which mobile stations can equip. In this paper, collaborative interference cancellation is proposed to cancel inter-user interference. In this scheme, to increase the number of receiver antennas, mobile stations share their received signals collaboratively by using short-range wireless interface. Experimental results show BER improvement by mobile stations' antennas at intervals of 1 meter.

Keyword Multi-user MIMO, Interference cancellation, Transmission experiment

1. はじめに

近年の無線機器の急速な発達および普及により利用可能な周波数帯域の枯渇が問題となっている。マルチユーザ MIMO 伝送は同一周波数、同一時間に複数信号を伝送するため、周波数利用効率の向上を実現する技術として注目されており、ハードウェアを用いた実験的研究も複数報告されている [1-4]。基地局が複数の移動局を収容するため、信号分離技術としてプリコーディングが用いられる。このとき伝搬路情報のフィードバックレイテンシや基地局におけるユーザ選択などの処理の間の伝搬路変化に起因するユーザ間干渉が問題となる。

移動局における従来の干渉抑圧手法として複数の受信アンテナを用いる干渉抑圧受信器 [5] などが挙げられる。十分な干渉抑圧効果を得るためには移動局において多数の受信アンテナを

移動局に期待することは、物理的な制約などから現実的には難しい。そこで、近傍の移動局間で受信信号を共有することで実質的な受信アンテナ数を増加させ、線形信号処理によってユーザ干渉を抑圧する移動局共同干渉キャンセルを考える。近年普及している無線端末には Bluetooth, Wi-Fi などの短距離通信の無線インターフェースを備えたものが数多く存在するため、それらを活用した受信信号の共有を行うことを想定している。

1 台の移動局が多数のアンテナを備える干渉キャンセラと比較して、提案手法では移動局とともにアンテナが空間的に分散するため空間相関の低下が利点として挙げられる。一方で、周波数オフセット、サンプルタイミング、熱雑音、位相雑音などの個体差が懸念される。これらの影響を加味した特性評価を行うために、ハードウェアを用いてシステムを試作した。

無線 LAN を用いて移動局が受信信号を共有するシステムの

屋内実環境伝送実験の結果を報告している。同時に行った実験結果 [6] より、移動局共同干渉キャンセルによる干渉キャンセル効果を確認しているが、本稿では、従来手法のようなアンテナ間距離が狭い干渉キャンセルとの比較のため、移動局アンテナ間隔を 1m 間隔で配置した場合と 6cm 間隔で配置した場合の特性比較を行った。

2. システムモデル

2.1 マルチユーザ MIMO

図 1 に本稿におけるシステムモデルを示す。基地局アンテナ数 N 、移動局アンテナ数 M のマルチユーザ MIMO 伝送において、移動局における受信信号 $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ は次式で表される。ここで、 $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ は下り伝搬路行列、 $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ は基地局送信信号、 $\mathbf{n} \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ は加法的白色ガウス雑音である。

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

本稿では式 (2) で表される ZF 規範のプリコーディングウェイト $\mathbf{W}_{Tx} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ を用いる。したがって、受信信号 \mathbf{y} は式 (3) となる。

$$\mathbf{W}_{Tx} = \mathbf{H}^H(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \mathbf{H}\mathbf{W}_{Tx}\mathbf{x} + \mathbf{n} \\ &= \mathbf{x} + \mathbf{n} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、伝搬路情報フィードバックレイテンシのために生じる伝搬路変化 $\Delta\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ により、受信信号 \mathbf{y} は次式となる。

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= (\mathbf{H} + \Delta\mathbf{H})\mathbf{W}_{Tx}\mathbf{x} + \mathbf{n} \\ &= (\mathbf{I} + \Delta\mathbf{H}\mathbf{W}_{Tx})\mathbf{x} + \mathbf{n} \end{aligned} \quad (4)$$

このとき、 $\Delta\mathbf{H}\mathbf{W}_{Tx}$ の非対角成分のため、ユーザ間干渉が残留する。

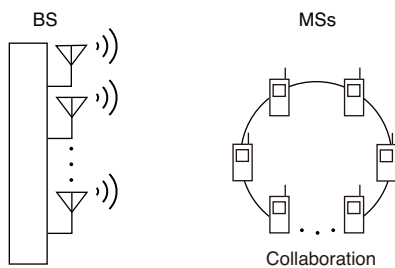


図 1 移動局共同干渉キャンセルを行うマルチユーザ MIMO 伝送のシステムモデル

2.2 移動局共同干渉キャンセル

移動局において以下の式で表される簡易な MMSE ウェイトを受信ウェイト $\mathbf{W}_{Rx} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ とした。

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{Rx} &= \mathbf{H}\mathbf{W}_{Tx}^H \mathbf{R}_{yy}^{-1} \\ &= \mathbf{H}\mathbf{W}_{Tx}^H (\mathbf{H}\mathbf{W}_{Tx} \mathbf{W}_{Tx}^H \mathbf{H}^H + \Sigma)^{-1} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{R}_{yy} \in \mathbb{C}^{M \times M}$ は受信信号の相関行列であり、 $\Sigma \in$

$\mathbb{C}^{M \times M}$ は雑音の相関行列である。

3. 伝送実験

図 2 に本実験システムのスロット構成を示す。伝送フレームは 3 パケットにより構成されており、移動局はスロット 1 で受信した往復伝搬路推定用トレーニング信号を 2ms 後のスロット 2 で上り伝搬路推定用トレーニング系列に付加し、非再生中継により送り返す。基地局はスロット 2 の上りリンクのトレーニング系列より下り伝搬路推定を行い、スロット 3 においてプリコーディングウェイトが乗算されたデータ信号を送信する。また、スロット 3 では移動局が無線 LAN を用いて受信信号の共有を行う。

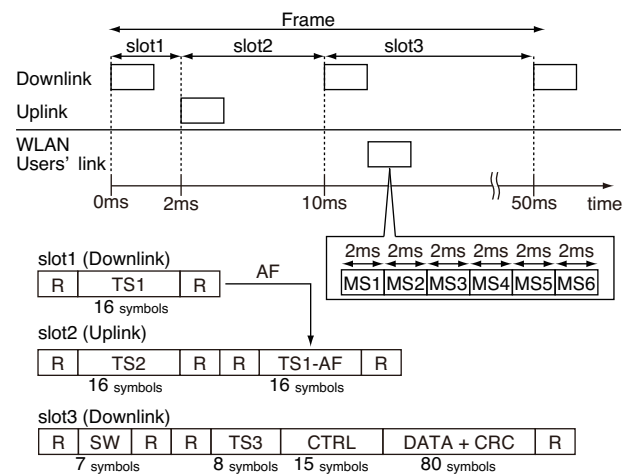


図 2 スロット構成

3.1 実験装置

基地局、移動局は共に特定実験試験局として中心周波数 5.11 GHz、最大 EIRP30 dBm が免許されている。

3.1.1 基地局装置

基地局装置は 4 台の RF ベクトル信号ジェネレータ (SG)、4 台の RF ベクトル信号アナライザ、FPGA ボード、制御 PC が組み込まれた測定シャーシおよび外付けの増幅器および RF スイッチからなる RF フロントエンド部により構成されており、4 信号の送受信が可能である。実験時には、10 MHz の RF 基準信号はルビジウム周波数標準から供給した。

3.1.2 移動局装置

移動局にはソフトウェア無線端末 USRP (Universal Software Radio Peripheral) N210 を用いた。ギガビットイーサネットを用いて接続した PC は汎用 OS が稼働しており、動作の制御、ベースバンド信号処理が行われる。基準発振器として 10 MHz 恒温槽付水晶発振器 OCXO を内蔵しており、タイミングクロックの生成および周波数リファレンスに共通して用いられる。

タイミング同期および周波数補償は基地局から送信された信号を参照して各移動局が独立して行う。スロット 3 の同期信号を用いて相関演算およびピーク検出によりタイミング同期を行い、タイミングドリフトを観測することによって周波数オフセット推定および補償を行う [7]。

3.1.3 無線 LAN を用いた受信信号共有の実現

移動局共同干渉キャンセルにあたり移動局間通信は移動局制御 PC の無線 LAN アドホックモードおよび UDP ブロードキャストを用いて実現した。移動局間で共有するのは、スロット 3 の 8 シンボルの受信トレーニング信号 (図 2 中 TS3) および 80 シンボルの受信データ信号のサンプル値であり、16 ビットのゲイン情報およびサンプル値毎の IQ 各 10 ビットを用いて表現した。

ブロードキャストは衝突回避のために事前に割り当てた移動局番号順に 2 ms 間隔で送信命令を実行する。ただし、全移動局からのブロードキャスト信号の受信が常に成功するとは限らず、その場合は再送などは行わない。15 ms のタイムアウトをもって受信を中断し、受信に成功した共有信号のみを用いて干渉キャンセルを行う。今回は、無線 LAN は 5 GHz 帯のチャンネル 48 を用いた。

3.2 実験環境および実験諸元

移動局共同干渉キャンセルを行うマルチユーザ MIMO 伝送実験を屋内実環境において行った。実験環境は京都大学総合研究 3 号館北館 4 階の展示スペースである。図 3 に示す配置図のように、25.8 m × 7.4 m のスペースの四隅に基地局アンテナを分散的に配置し、移動局アンテナを 1 m 間隔で配置した場合と図 3 の A 点に図 4 のように 6 cm 間隔で配置した場合で特性比較を行った。6 cm 間隔で配置したときの移動局アンテナの並ぶ順番と向きは 1 m 間隔のときと同様である。約 1 分間で 1200 フレームの伝送を行った。このとき全ての移動局は静止しており、周囲に伝搬路変動を起こすような人の動きなどは無かった。表 1 に実験諸元を示す。

基地局送信電力は以下の式のように、全アンテナからのプリコーディングウェイト乗算後の送信信号の packets 内のピーク電力の最大値 P_{\max} が常に $P_{\lim} = -40$ dBm の SG 出力に制限されるように制御した。また、基地局、移動局ともにスロット 1, 2 のトレーニング信号の送信電力は 7 dBm となるよう調節した。

$$P_{\max} = \max_{n \in N, t} |x_n(t)|^2 \quad (6)$$

$$x'_n(t) = \sqrt{\frac{P_{\lim}}{P_{\max}}} x_n(t) \quad (7)$$

3.3 実験結果

図 5 に 6 cm 間隔配置時のビットエラーレートの区間平均および受信信号のブロードキャスト受信に成功した共同移動局数の推移を移動局 1 を例にとって示す。ビットエラーレートは 9 パケットで平均化を行っている。このとき、平均データ受信電力は 4 台の移動局全て -94 dBm であった。BER の推移より、ほとんどの区間において BER が 10^{-3} 以上であることが分かる。また、共同移動局数について他の 3 台の移動局全てから受信信号を得られないパケットが数パケットあったが、ほぼすべてのパケットにおいて 3 台の移動局から受信信号を得られていることが分かる。全パケットに対して、3 台全ての共同移動局からのブロードキャスト受信に成功したパケットの割合は 96% で

| System Parameters | Values |
|-----------------------|---|
| Number of BS antennas | 4 |
| Number of MSs | 4 |
| Carrier frequency | 5.11 GHz |
| Symbol rate | 312.5 ksps |
| Modulation | QPSK |
| BS parameteres | Values |
| Transmit filter | Square Root Nyquist (roll-off factor = 0.4) |
| Channel estimation | Echo-MIMO |
| Precoding | Linear(ZF) |
| Antenna height | 2 m |
| Antenna gain | 5 dBi |
| MS parameteres | Values |
| ADC/DAC resolution | 14/16 bit |
| Model | Ettus USRP N210 |
| Daughterboard Model | XCVR2450 |
| Host PC | Core i5 1.8 GHz |
| Antenna height | 88 cm |
| Antenna gain | 3 dBi |

表 1 実験諸元

あった。

図 6 は 1 m 間隔配置時のビットエラーレートの区間平均および受信信号のブロードキャスト受信に成功した共同移動局数の推移であり、移動局 1 を例としている。ビットエラーレートは図 5 同様 9 パケットで平均化を行っている。このとき、平均データ受信電力は 4 台の移動局全て -91 dBm であった。1 m 間隔配置時はほとんどビットエラーが発生しておらず、6 cm 間隔配置時よりも良好な特性を示している。3 台全ての共同移動局からのブロードキャスト受信に成功したパケットの割合は 98% であった。

図 7 に 1 m 間隔配置時および 6 cm 間隔配置時の BER 特性を示す。ここでは、移動局 1, 2, 3, 4 の区間平均 BER の CDF 特性を示している。この結果からも 1 m 間隔配置時のほうが 6 cm 間隔配置時よりも良好な特性を示すことが分かる。6 cm 間隔配置時に特性が劣化した理由として、空間相関が高まったことや、基地局アンテナ位置が対称となる移動局の配置が干渉キャンセル効果を下げたことが考えられる。

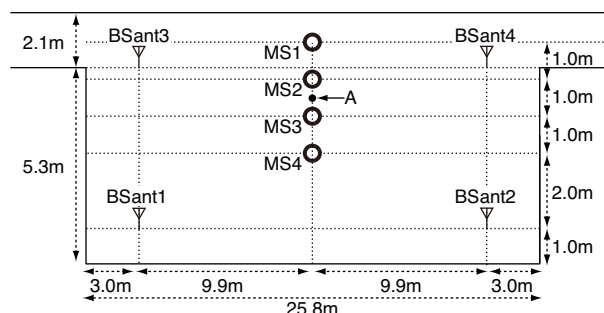


図 3 実験環境の見取り図



図 4 6 cm 間隔で配置した移動局アンテナ

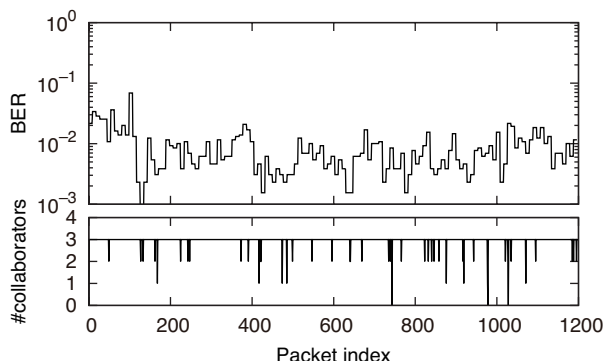


図 5 6 cm 間隔配置時の移動局 1 の BER 区間平均および共同ユーザ数推移

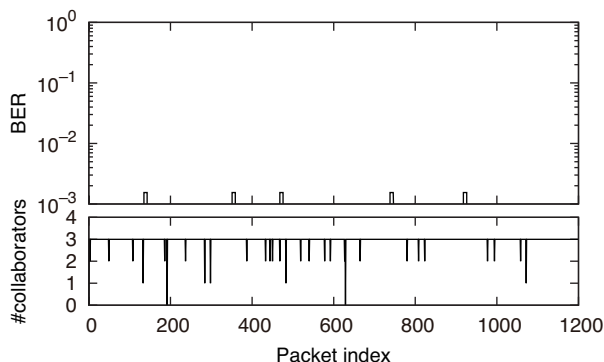


図 6 1 m 間隔配置時の移動局 1 の BER 区間平均および共同ユーザ数推移

4. む す び

移動局が無線 LAN を用いて受信信号を共有する移動局共同干渉キャンセルを行うマルチユーザ MIMO システムを試作し、屋内実環境伝送実験において特性評価を行った。移動局アンテナを 1 m 間隔で配置したときのほうが 6 cm 間隔で配置したときと比較して良好な特性が得られた。

文 献

- [1] 石原浩一, 浅井裕介, 工藤理一, 市川武男, 溝口匡人, “次世代無線 LAN システムにおける DCT による CSI フィードバック法を用いたリアルタイムマルチユーザ MIMO 伝送の屋内実験結果,” 信学技報, RCS2011-277, pp.61–66, Jan. 2012.
- [2] 菌部聡司, 塚本悟司, 北沢祥一, 前田隆宏, 阿野進, 伴弘司, 宇野雅博, 小林聖, “ブロック対角化 vector perturbation を用いた非線形マルチユーザ MIMO の屋内伝送実験,” 信学技報, RCS2012-18, pp.103–108, April 2012.
- [3] 須山聡, 福田裕之, 鈴木博, 府川和彦, “超高速ビットレート移動通信用 10 Gbps 8x8 MIMO-OFDM RF/BB 伝送実験系,” 信学技報, RCS2011-215, pp.155–160, Nov. 2011.

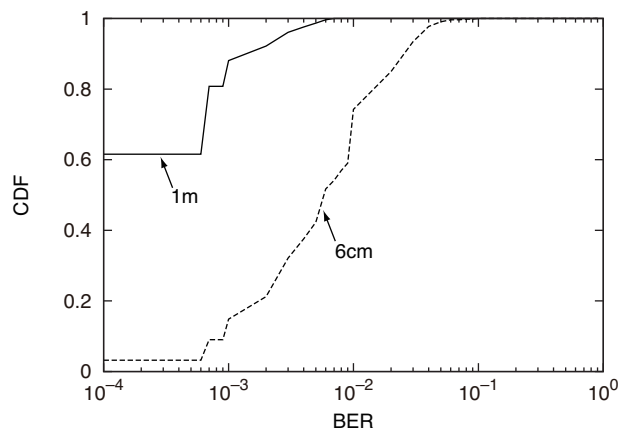


図 7 6 cm 間隔と 1 m 間隔で移動局アンテナを配置したときの BER の CDF

- [4] P. Luethi, T. Koch, P. Maechler, N. Felber, W. Fichtner, and M. Lerjen, “Hardware platform and implementation of a real-time multi-user MIMO-OFDM testbed,” Proc. IEEE ISCAS 2009, pp.789–792, May 2009.
- [5] 大渡裕介, 三木信彦, 浅井孝浩, 阿部哲士, 田岡秀和, “LTE-Advanced 下りリンクにおけるセル間干渉を抑制する受信器に関する検討,” 信学技報 RCS2011-80, pp.31–36, July 2011.
- [6] 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 RCS 発表予定, Nov. 2013.
- [7] 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 RCS 発表予定, Nov. 2013.