

端末共同受信に基づく MIMO システムにおける 周波数領域繰り返し等化の伝送実験

永野 裕規[†] 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-h26j@hanase.kuee.kyoto-u.ac.jp

あらまし 移動する車内や公園などにおいて低コストで通信可能である近接する移動端末間で信号を共有することで等価的な受信アンテナ数を大きくし、MIMO 多重数を飛躍的に高める端末共同受信に基づくマルチユーザ MIMO システムが提案されている。プリコーディング技術では基地局側で処理を施すのに対し、移動端末側で従来のシングルユーザ MIMO のような等化処理を施すのがこのシステムの特徴である。本稿では、受信側で干渉抑圧処理を行うこのシステムの特徴を生かし、MIMO 伝送による同一チャネル干渉及び周波数選択性フェージングによるシンボル間干渉を LDPC 符号による誤り訂正と周波数領域の等化処理を繰り返すことにより抑圧する手法を検討している。端末共同受信に基づく MIMO システムの実際の利用シーンとして想定されている移動する車内での伝送実験を行い、実環境での伝送特性の向上効果を確認している。

キーワード マルチユーザ MIMO, 共同干渉キャンセル, LDPC 符号, 繰り返し等化, 屋外伝送実験

Experimental Performance Evaluation of Iterative Frequency-Domain Equalization on Collaborative MIMO Systems

Hiroki NAGANO[†] and Hidekazu MURATA[†]

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

E-mail: [†]contact-h26j@hanase.kuee.kyoto-u.ac.jp

Abstract Collaborative interference cancellation (CIC), which is one technique for the multi user MIMO systems, has been proposed. In this system, to increase spatial multiplexing order, mobile stations share their received signals with neighbors. For suppressing inter-stream interference, precoding techniques are used at BS side. On the other hand, CIC makes it possible to equalize inter-stream interference at MS side. In this paper, CIC employing LDPC code and frequency-domain iterative equalization is studied to improve the performance of MIMO transmission under the condition that co-channel interference caused by MIMO transmission and inter-symbol interference exist.

Key words Multi-user MIMO, Collaborative interference cancellation, Low density parity check (LDPC) code, Iterative equalization, Field experiment

1. はじめに

スマートフォンやタブレット端末など高機能な携帯端末の普及によりこれまでの携帯電話に比べ容量の大きな通信が増え、無線通信が伝送するデータ量は年々増加している。さらに、端末の高画質化、携帯端末向けの動画のストリーミング配信サービスの登場などにより、これからも無線通信の需要が高い状態が続くことが予想される。

このような需要に応えるためには周波数利用効率を高め、限られた周波数帯域でできるだけ多くのデータを伝送する必要がある。MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) システムでは

送信側、受信側の双方が複数のアンテナを備えることにより、同一時刻、同一周波数帯における多重伝送を可能にし、周波数利用効率を向上させている。さらに周波数利用効率を上げるには備えるアンテナ数を増加させればよいが、物理的制約から 1 台の移動端末に備えることのできるアンテナ数には上限があり、さらに近接する位置に存在するアンテナは伝搬路が似通ったものになり、多重数の向上に寄与しない恐れもある。

そこで基地局が複数の移動端末に向けて MIMO 伝送を行うマルチユーザ MIMO (MU-MIMO) システムの研究が盛んに行われている。MU-MIMO システムにおいて、移動端末での干渉抑圧負荷の低減を目的として、基地局からの送信信号にプリ

コーディングを施す手法が検討されている。この手法では送信時に用いる下り伝搬路情報を移動端末がフィードバックするため、端末が高速に移動している場合、フィードバックの間に伝搬路が変動してしまい干渉が十分に抑圧できない。

一方、移動端末が受信信号を共有し、等価的に多数のアンテナを備えた1台の移動端末として干渉抑圧を行う端末共同受信に基づくMIMOシステムが研究されている[1], [2]。この端末共同受信に基づくMIMOシステムでは従来のシングルユーザMIMOシステムと同様に受信側で干渉抑圧処理を行うため、プリコーディング伝送に比べて伝搬路変動の影響を受けにくい。さらに、受信信号を共有するためのアンテナを除けば、1台の移動端末に備えるアンテナを増やすことなく干渉を抑圧するのに十分な信号数を得ることができる。干渉抑圧に有効な信号のみを共有することで信号を共有するコストを削減する研究も行われている[3]。

本稿では端末共同受信に基づくMIMOシステム上での広帯域伝送を行い、その影響により生じる周波数選択フェージング及びSNRの劣化の対策としてLDPC (Low Density Parity Check) 符号[4], [5]を用いた周波数領域における繰り返し等化[6]を導入する。実環境における伝送実験を行い、周波数領域繰り返し等化による誤り率特性の改善効果を確認する。

2. システムモデル

図1に本稿におけるシステムモデルを示す。\$L\$本の遅延波が到来する環境での基地局アンテナ数\$N\$本、単一アンテナを持つ移動端末数\$M\$台のMU-MIMO伝送において、移動端末で時刻\$k\$に受信される信号\$\mathbf{y}(k) \in \mathbb{C}^{M \times 1}\$は以下の式で表される。

$$\mathbf{y}(k) = \sum_{l=0}^L \mathbf{H}(l) \mathbf{x}(k-l) + \mathbf{n}(k) \quad (1)$$

ここで、\$\mathbf{H}(l) \in \mathbb{C}^{M \times N}\$は第\$l\$パスの伝搬路行列、\$\mathbf{x}(k) \in \mathbb{C}^{N \times 1}\$及び\$\mathbf{n}(k) \in \mathbb{C}^{M \times 1}\$はそれぞれ時刻\$k\$における送信信号、雑音信号を表す。MIMO伝送によるストリーム間干渉と、遅延波によるシンボル間干渉が同時に観測され、所望信号を取り出すために干渉を抑圧する技術が必要となる。

本稿では端末共同受信に基づくMIMOシステムにより移動端末側でのストリーム間干渉の抑圧能力を高め、周波数領域での等化処理を行うことでストリーム間干渉及びシンボル間干渉を抑える。さらに、送信系列にLDPC符号による符号化を施し、復号後の高信頼度のシンボルから生成される干渉信号のレプリカを受信信号から減算することにより干渉信号の抑圧を行う繰り返し等化を導入する。LDPCの復号法としては、繰り返し復号法であるBP (Belief Propagation) 復号を用いる。干渉信号が除去されればダイバーシチ利得の向上が期待できる。

3. 周波数領域繰り返し等化

図2に周波数領域繰り返し等化のブロックダイアグラムを示す。基地局からLDPC符号化された系列にCP (Cyclic Prefix) が付加された信号が送信される。受信信号はCPを除去された後FFTにより周波数領域の信号に変換されMMSE等化器に

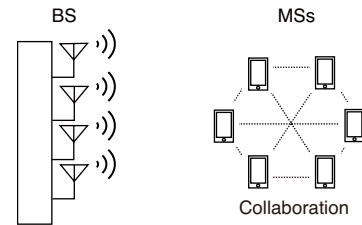


図1 システムモデル

入力される。MMSE等化器では以下の式のようにMMSEウェイト\$\mathbf{W}(f) \in \mathbb{C}^{M \times N}\$による初期等化を施すことにより第\$f\$周波成分の等化後の信号\$\tilde{\mathbf{X}}(f) \in \mathbb{C}^{N \times 1}\$を得る。

$$\tilde{\mathbf{X}}(f) = \mathbf{W}^H(f) \mathbf{Y}(f) \quad (2)$$

$$\mathbf{W}(f) = \left(\mathbf{G}(f) \mathbf{G}^H(f) + \frac{N}{P} \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{G}(f) \quad (3)$$

ここで\$\mathbf{G}(f) \in \mathbb{C}^{M \times N}\$, \$\mathbf{Y}(f) \in \mathbb{C}^{M \times 1}\$はそれぞれ第\$f\$周波成分における伝搬路応答、受信信号であり、\$N\$は雑音電力、\$P\$は送信電力である。等化されIFFTにより時間領域に変換された信号\$\hat{\mathbf{x}}(k) \in \mathbb{C}^{N \times 1}\$から尤度が計算されBP復号の入力値となる。繰り返し上限回数に達していない場合、BP復号後更新された尤度から軟判定シンボル\$\hat{\mathbf{x}}(k) \in \mathbb{C}^{N \times 1}\$が作られ、FD-Soft Replica Generatorに送られる。FD-Soft Replica GeneratorではこれをFFTにより周波数領域の信号\$\hat{\mathbf{X}}(f) \in \mathbb{C}^{N \times 1}\$に変換した後、伝搬路の第\$n\$送信アンテナに対する周波数応答ベクトル\$\mathbf{g}_n(f) \in \mathbb{C}^{M \times 1}\$を用いて干渉信号の軟判定レプリカ\$\hat{\mathbf{Y}}_n(f) \in \mathbb{C}^{M \times 1}\$を以下の式により生成する。

$$\hat{\mathbf{Y}}_n(f) = \mathbf{g}_n(f) \hat{\mathbf{X}}_n(f) \quad (4)$$

2回目以降の繰り返し等化時におけるMMSE等化器では、受信信号\$\mathbf{Y}(f)\$から所望信号以外のすべての干渉信号のレプリカを減算した後、ウェイトを掛け合わせることで等化処理を行う。所望信号が第\$n\$信号であるとき、等化後の出力\$\tilde{\mathbf{X}}_n(f)\$は

$$\tilde{\mathbf{X}}_n(f) = \mathbf{w}_n^H(f) \left\{ \mathbf{Y}(f) - \sum_{i \neq n} \hat{\mathbf{Y}}_i(f) \right\} \quad (5)$$

$$\mathbf{w}_n(f) = \left(\mathbf{g}_n(f) \mathbf{g}_n^H(f) + \sum_{i \neq n} \beta_i \mathbf{g}_i(f) \mathbf{g}_i^H(f) + \frac{N}{P} \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{g}_n(f) \quad (6)$$

となる。ここで\$\beta_i\$は\$0 \leq \beta_i \leq 1\$を満たす残留干渉係数である。この等化後の出力\$\tilde{\mathbf{X}}_n(f)\$をIFFTにより時間領域信号\$\tilde{\mathbf{x}}_n(k)\$に変換し、再度BP復号器に入力し尤度を更新する。

一連の処理を繰り返し上限回数まで繰り返す。繰り返し上限回数に達すると、BP復号器の尤度出力に対して硬判定が行われ最終復号結果となる。

4. 伝送実験

4.1 装置構成

4.1.1 基地局

基地局装置の外観を図3に基地局アンテナの外観を図4に

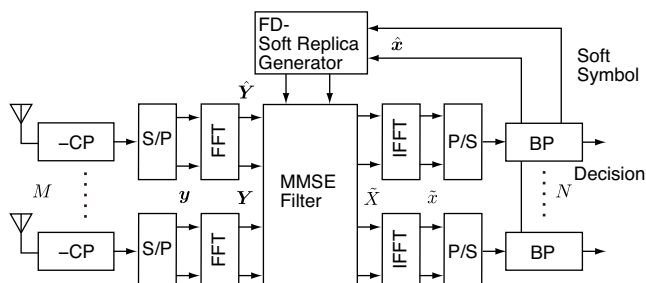


図 2 周波数領域繰返し等化のブロックダイアグラム

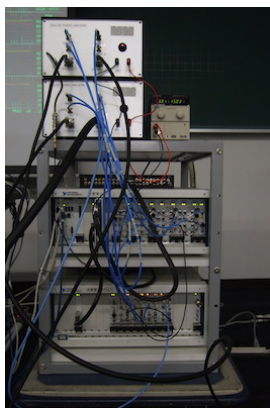


図 3 基地局装置



図 4 基地局アンテナ

示す。基地局装置は 4 台の RF ベクトルシグナルジェネレータ (SG), 4 台の RF ベクトルシグナルアナライザ (SA), FPGA ボード, 制御 PC が組み込まれた測定シャーシ及び増幅器からなる RF フロントエンド部などにより構成されており, 4 信号の同時送受信が可能である。ただし本稿では受信処理を行っていないため, SA は使用しない。基地局アンテナとして水平面内無指向性, 利得 5 dBi のアンテナを京都大学工学部 3 号館南棟の屋上に図 4 に示すように直交させた 2 本のブームの両端にそれぞれ 1 本ずつ合計 4 本設置した。ブームの両端のアンテナの間隔は 20 波長である。

4.1.2 移動端末

移動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。イーサネットケーブルによって接続された PC により動作制御, ベースバンド信号処理及び移動端末間の受信信号の共有を行う。図 5 に移動端末及び制御 PC を設置した車内の様子を示す。移動端末は座席の背もたれ裏テーブルの上に図 6 に示すように配置した。移動端末のアンテナとして水平面内無指向性, 利得 3 dBi のものを用いた。移動端末において, 基準信号として各 USRP に内蔵されている OCXO から生成される 10 MHz の基準信号を用いており, 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る。移動端末毎に異なる基準信号を用いているためタイミング同期及びオフセット補償が必要となる。本稿で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これらを各移動端末で独立に行う方法を用いる [7]。

4.2 移動端末間の信号共有

移動端末間の信号共有は, 図 6 中に AP で示した無線 LAN

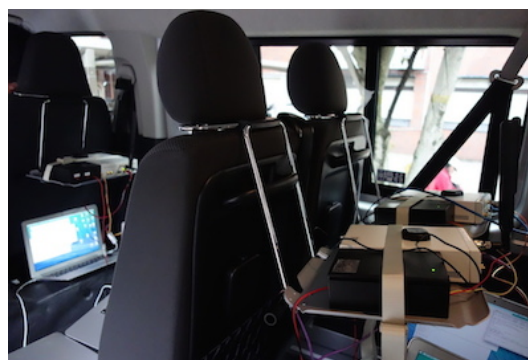


図 5 車内に設置した移動端末の様子

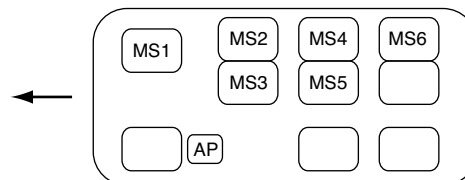


図 6 移動端末配置

表 1 実験諸元

Parameters	Values
Number of antennas of BS	4
Number of antennas of MS	1
Number of MSs	6
Carrier frequency	5.11 GHz
Symbol rate	1.25 M symbols/s
Modulation	QPSK
Transmit filter	Square Root Nyquist (roll-off factor = 0.4)
Channel estimation	Least-squares
LDPC coding rate	1/2
Code length	384 bit

アクセスポイントに各移動端末を制御する PC がそれぞれ接続し, あらかじめ割り振られた順番に波形情報を UDP ブロードキャスト送信することにより実現した。波形情報は最大値を表す 16 ビットのゲイン情報及びそのゲインで正規化した I 成分, Q 成分の各 8 ビットのサンプル値を用いて表現した。信号共有は UDP 通信で行い再送などの制御を行わないために, 信号が全端末で完全に共有されず干渉キャンセルに利用できる信号数が減少することがあるが, その場合は共有に成功した信号のみを用いて干渉キャンセルの処理を行う。

4.3 実験諸元

図 7 に実験環境の概略図を基地局アンテナの位置とともに示す。走行経路は図中 A 地点から出発し B 地点を右折した後 C 地点に至るまでは住宅地の道路, C 地点から D 地点を通過し E 地点に至るまでは片側 2 車線の幹線道路である。住宅地では時速 20 km 程度, 幹線道路では時速 40 km 程度で走行した。実験諸元を表 1 に示す。基地局のアンテナは地上から 25.5 m の位置に設置し, EIRP 1 W にて送信した。BP 復号の繰返し回数及び周波数領域の繰返し等化の回数はそれぞれ, 8 回, 3 回に設定した。

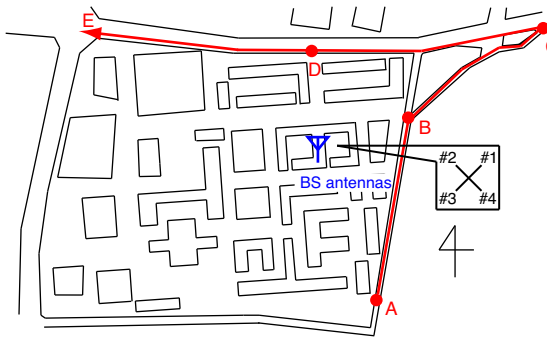


図 7 実験環境の概略図

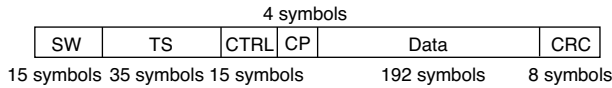


図 8 パケット構造

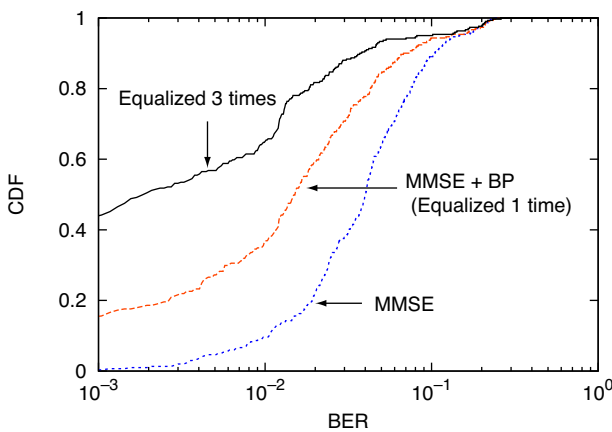


図 9 MMSE 等化, 1 回等化及び 3 回繰り返し等化の BER の CDF

伝送実験でのパケット構造を図 8 に示す。SW は移動端末のタイミング同期用の同期系列であり、全信号において同一の 15 シンボル長の M 系列を用いた。トレーニング系列として基地局の送信アンテナ毎に異なる 32 シンボルの直交系列の先頭に末尾から 3 シンボルを加えた 35 シンボルの系列を用いた。CTRL は基地局から移動端末を制御するための信号である。CP は 4 シンボルとした。データ信号は 192 シンボルの QPSK 変調信号である。CRC はパケット誤りを検出するために付加している。なお、受信信号共有に使用した無線 LAN のチャンネルは 116 チャンネルであった。

4.4 実験結果

図 9 に共有した受信信号に対して、MMSE 等化を行った場合、MMSE 等化及び BP 復号を行った場合（以降これを 1 回等化と呼ぶ）、さらに 3 回の繰り返し等化を行った場合の 10 パケット区間平均の BER の累積分布関数を示す。ただし、MMSE 等化の特性は LDPC 符号を組織符号となるように構成し、データシンボルの前半のみを判定することにより算出している。等化処理の段階が進むにつれて、良好な特性が得られている。

図 10 に全 MS の平均受信電力、MMSE 等化、1 回等化及び 3 回繰り返し等化の全ストリームの 10 パケット区間 BER の時間推移を示す。図 10 中の A から E は、図 7 中のそれぞれの位

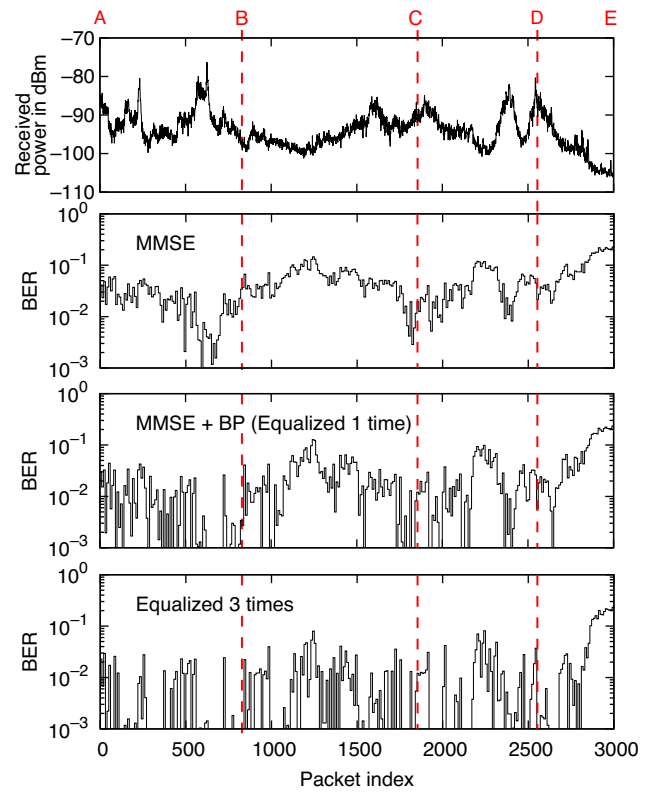


図 10 全 MS の平均受信電力、MMSE 等化、1 回等化及び 3 回繰り返し等化の全ストリームの区間 BER の時間推移

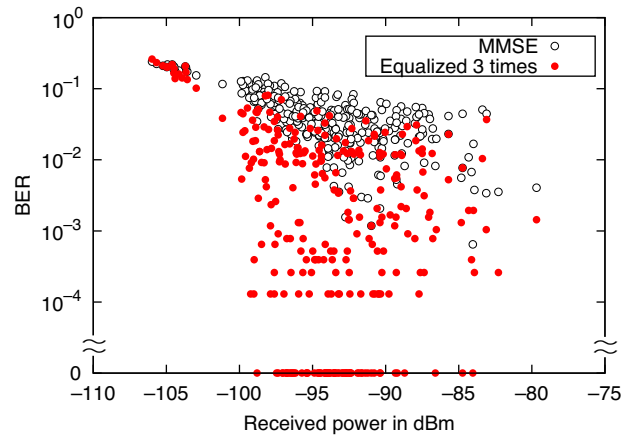


図 11 MMSE 等化及び 3 回繰り返し等化の受信電力対 BER 特性

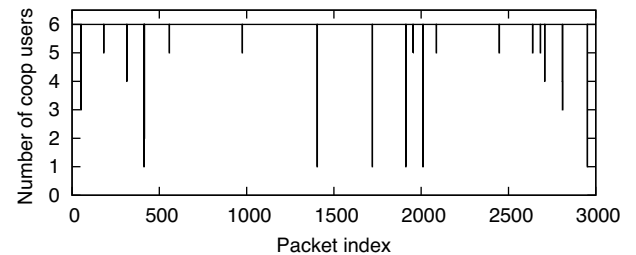


図 12 移動端末 1 における共有信号数の推移

置を通過したときのパケットインデックスである。区間 BER の推移を見ると、図 9 と同様に等化を繰り返すことにより特性の改善効果が得られており、パケットインデックス 300 付近で

は MMSE 等化の区間 BER が 10^{-2} 以上でも 3 回繰り返し等化の区間 BER が 10^{-3} を下回っている区間も存在する。MMSE 等化の区間 BER と受信電力の推移を見比べると、受信電力の低い場所と区間 BER が劣化している場所が概ね一致していることが確認できる。特に経路最終地点の E 地点付近では、南側にある建物によるシャドウイングの影響により受信電力が著しく低下しており、MMSE 等化だけでなく 1 回等化、3 回繰り返し等化の BER が全て 0.1 を上回っている。また、1 回等化と 3 回繰り返し等化の区間 BER を比較すると、パケットインデックスが 1300 付近や D 地点の 2500 付近では 1 回等化の特性が劣化しているのに対し、3 回繰り返し等化では区間 BER を低く抑えることができています。

図 11 に MMSE 等化及び 3 回繰り返し等化の 10 パケット区間平均の受信電力対 BER 特性を示す。なお、MMSE 等化では 10 パケット区間平均 BER が 0 になる区間は存在しなかったが、3 回繰り返し等化では全 300 区間中 70 区間で 10 パケット区間平均 BER が 0 となった。MMSE 等化よりも 3 回繰り返し等化を行うときの方が優れた特性を示すことが確認できる。3 回繰り返し等化のグラフにおいて受信電力が -100 dBm を上回る辺りから急激に BER が改善しており、誤り訂正及び干渉信号の除去によるダイバーシチ利得が得られていることがわかる。なお、3 回繰り返し等化について受信電力が十分大きいときにも BER が劣化している点が存在する。この原因については端末間の信号共有の失敗により干渉抑圧能力が不足する場合や、伝搬路行列のランク落ちにより信号分離が困難になっている場合などが考えられるが、今後の検討課題とする。

図 12 に信号共有の結果干渉抑圧に使えた信号数を移動端末 1 を例にとって示す。ただし、自身の信号は共有する必要がないため利用可能信号数の最小値は 1 である。頻度が高いわけではないが信号の共有に失敗する状況が見られた。また稀に自身の信号以外の信号を全く得られていない場合もあることがわかる。1 つでも信号共有に失敗したのは 3000 パケットのうち 21 パケットであり全体の 0.7% であった。

5. む す び

端末共同受信に基づく MIMO システム上で動作する LDPC 符号を用いた周波数領域繰り返し等化を実装した。屋外伝送実験を行い繰り返し等化の各段階での誤り率特性を評価した。実験結果より、等化処理を繰り返し、干渉信号のレプリカ信号を受信信号より減算することにより干渉信号を抑圧することで特性が改善することを確認した。

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。また、実験を行うにあたって協力していただいた学生の皆様に感謝します。

文 献

- [1] 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.
- [2] H. Kwon and J.M. Cioffi, “Multi-user MISO broadcast channel with user-cooperating decoder,” IEEE Vehicular Technology Conference, 2008, pp.1–5, Sept. 2008.
- [3] 篠原諒, 村田英一, “共同干渉キャンセルにおける推定 SINR に基づく受信信号選択,” 信学技報, RCS2014-15, pp.79–84, April 2014.
- [4] R.G. Gallager, “Low-density parity-check codes,” IRE Trans. Inf. Theory, vol.8, no.1, pp.21–28, Jan. 1962.
- [5] D.J.C. MacKay, “Good error-correcting codes based on very sparse matrices,” IEEE Trans. Inf. Theory, vol.45, no.2, pp.399–431, Mar. 1999.
- [6] T. Koike, H. Murata, and S. Yoshida, “Frequency-domain SC/MMSE iterative equalizer with MF approximation in LDPC-coded MIMO transmissions,” IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, vol.2, pp.1414–1418, Sept. 2004.
- [7] 佐藤弘基, 村田英一, “マルチユーザ MIMO におけるタイミング同期及び推定タイミングに基づく周波数オフセット補償法,” 信学論 (B), vol.J98-B, no.2, pp.188–196, Feb. 2015.