

移動端末共同干渉キャンセルの伝送特性改善と屋外走行実験

田中 利樹[†] 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 基地局が複数の移動局を同時に収容するマルチユーザ MIMO システムにおいて、近傍の移動局同士が近距離通信により連携して受信信号を共有することで等価的に受信アンテナ数を増加させユーザ間干渉の抑圧を行う端末共同干渉キャンセルについて検討している。これによりプリコーディング技術と比べて伝搬路変動による特性劣化が抑えられるが、高速フェージング環境下ではパケット内における伝搬路変動の影響が無視できなくなる。そこでパケット内における伝搬路変動をトラッキングすることを検討する。本稿では、判定指向形チャネルトラッキングを用いる共同干渉キャンセルにより高速フェージング環境において伝送特性が改善されることを屋外伝送実験によって確認している。

キーワード マルチユーザ MIMO, 干渉キャンセル, 判定指向形, 伝送実験

Field Measurements and Performance Improvement of Collaborative Interference Cancellation

Tosiki TANAKA[†] 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 In this paper, collaborative interference cancellation (CIC), which is a form of multi-user MIMO systems, is studied. Mobile users share their received signals with neighboring users and generate weights for inter-user interference. In fast time-varying channels, there are channel fluctuation in each packet, so channel tracking for compensation is required. A decision-directed tracking loop scheme is employed and the performance improvement with this scheme is confirmed by field experiments.

Key words Multi-user MIMO, Interference cancellation, Decision-directed, Transmission experiments

1. はじめに

周波数利用効率の向上が期待できるシステムとしてマルチユーザ (MU) MIMO システムが研究されている [1-3]. MU-MIMO システムでは受信点において干渉抑圧が行われるように基地局側で伝搬路情報を基にしたプリコーディングが施される。しかしながら、伝搬路推定からプリコーディング送信を行うまでには主に伝搬路情報のフィードバックに起因する時間差が存在するため、時変動する伝搬路においてユーザ間干渉が発生することで伝送特性が劣化する。

そこで、基地局へフィードバックを行わず、近距離通信を用いて移動局間で連携して信号を共有することにより等価的なアンテナ数を増加させ、干渉抑圧を行う共同干渉キャンセルが研究されている [4-6]. この手法では、受信信号を共有することで移動局を多数のアンテナを備えた 1 端末と等価として扱うこと

ができる。また、フィードバックを行わないためプリコーディング処理を施す方式と比較して高速な移動に対応することが可能である。基地局移動局間の通信と移動局間の通信は別の周波数帯を用いることが想定されており、移動局間の通信はより高い周波数帯を用いる近距離通信により行われることが想定されている。

共同干渉キャンセルに適したシナリオとしてバス、電車内などの移動局の相対的な位置関係が大きく変化しない場所での利用が考えられる。一方、基地局移動局間の通信は高速フェージング環境であり、パケット内における伝搬路変動が無視できない。そこで、判定指向形チャネルトラッキングによってシンボル毎に更新されたウェイトを用いて干渉キャンセルを行うことで高速フェージング環境下での伝送特性を改善することを検討する。計算機シミュレーションにより判定指向形チャネルトラッキングを用いた共同干渉キャンセルの特性評価を行う。

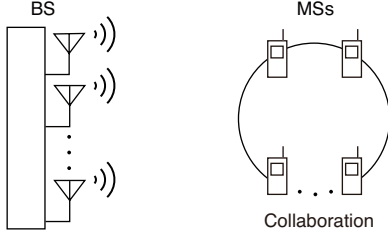


図1 共同干渉キャンセルのシステムモデル

共同干渉キャンセルでは信号共有の成否が伝送特性に影響する。伝送特性を評価するには、基地局移動局間および移動局間通信の2つの伝搬路モデルを必要とする。さらに、各移動局は独立に動作しているため、異なる位相雑音や雑音指数、周波数オフセットが移動局毎に存在する。

本稿では、これらの影響を含めてシステムコンセプトの有効性を確認するために実際に車両内に複数の移動局を搭載して共同干渉キャンセルの走行実験を行う。特に、判定指向形チャネルトラッキングを用いる共同干渉キャンセルの誤り率評価を行い、判定指向形チャネルトラッキングによる特性改善効果を確認する。

2. システムモデル

N 本のアンテナを持つ基地局と M 台の単一アンテナを持つ移動局を考える。送信信号 $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 、伝搬路行列 $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 、加法的白色ガウス雑音 $\mathbf{n} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ を用いて、各移動局における受信信号から構成されるベクトル $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ は次式で表される。

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

移動局側では他ユーザへの信号も受信されるため、ユーザ間干渉が発生する。そのため、MU-MIMO伝送では干渉抑圧が必須となる。

移動局間で受信信号を共有することで干渉抑圧を行う共同干渉キャンセルのシステムモデルを図1に示す。移動局間で共有された信号は基地局移動局間の通信とは別の近距離通信により共有される。結果として、各移動局のアンテナ数が等価的に増大したことにより効果的な干渉抑圧が可能となる。また、MU-MIMOの特長の1つである受信アンテナ間の相関が低いことによる信号分離能力の向上も期待できる。

等価的にアンテナ数が増大しているため線形の干渉抑圧手法を適用することが可能となる。ウェイト乗算後の受信信号 $\hat{\mathbf{y}}$ は次式で表される。

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{W}(\mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}) \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{W}$ はウェイト行列である。

3. 干渉キャンセルに用いるMMSEウェイト

ここでは干渉抑圧に用いるためのMMSE規範の線形ウェイトについて述べる。

3.1 有限サンプルに基づくMMSEウェイト

MMSE規範を用いた場合の各移動局におけるウェイトベクトル $\mathbf{w} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ は次式で表される。

$$\mathbf{w} = \mathbf{R}_{yy}^{-1} \mathbf{r}_{yd} \quad (3)$$

$\mathbf{R}_{yy}^{-1} \in \mathbb{C}^{M \times M}$ は各アンテナから受信した信号に対する空間相関行列であり、 $\mathbf{r}_{yd} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ は各アンテナからの受信信号と所望値の相互相関ベクトルである。有限サンプルを用いて直接 $\mathbf{R}_{yy}^{-1}$ 、 $\mathbf{r}_{yd}$ を導出する手法はSMI (Sample Matrix Inversion) アルゴリズムと呼ばれている。トレーニング信号区間のサンプルを用いて $\mathbf{R}_{yy}^{-1}$ 、 $\mathbf{r}_{yd}$ を導出した後、求めた $\mathbf{w}$ を基にデータ信号区間における干渉抑圧を行う。

3.2 適応フィルタを用いるMMSEウェイト

MMSE規範に基づくウェイト $\mathbf{w}$ を適用フィルタを用いて逐次更新する。本稿では適用フィルタとしてRLS (Recursive Least Square) アルゴリズムを用いる。 $\mathbf{s}[n] \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ を時刻 n における各アンテナにおける受信信号、 $d[n]$ をウェイト合成後の所望値とした場合、時刻 n におけるタップウェイトベクトル $\mathbf{w}[n]$ は次式により導出される。ここで λ は忘却係数であり、 $\mathbf{P}[n]$ は時刻 n における $\mathbf{R}_{yy}^{-1}$ である。

$$\mathbf{k}[n] = \frac{\lambda^{-1} \mathbf{P}[n-1] \mathbf{s}[n]}{1 + \lambda^{-1} \mathbf{s}^H[n] \mathbf{P}[n-1] \mathbf{s}[n]} \quad (4)$$

$$\mathbf{P}[n] = \lambda^{-1} [\mathbf{P}[n-1] - \mathbf{k}[n] \mathbf{s}^H[n] \mathbf{P}[n-1]] \quad (5)$$

$$\mathbf{w}[n] = \mathbf{w}[n-1] - \mathbf{k}[n-1] \mathbf{s}^H[n] \mathbf{w}[n-1] + \mathbf{k}[n-1] d^*[n] \quad (6)$$

ただし、初期値として、 $\mathbf{w}[0]$ は零ベクトル、 $\mathbf{P}[0]$ は単位行列に正の小さな値 δ の逆数を乗算したものとしている。ステップ n における予測誤差 $e[n]$ は

$$e[n] = d[n] - \hat{y}[n] = d[n] - \mathbf{w}^H[n-1] \mathbf{s}[n] \quad (7)$$

で与えられる。

4. 判定指向形チャネルトラッキング

高速フェージング伝搬路下においてはパケット内の伝搬路変動が無視できなくなる。そこで、トレーニング信号区間だけではなく、データ信号区間に対してもウェイト更新を行うチャネルトラッキングを行うことを考える。データ部においては所望値が既知でないため、ウェイト合成後の出力シンボルを硬判定した結果を所望値として利用する。判定指向形チャネルトラッキングを用いる干渉キャンセルのブロック図を図2に示す。まず、トレーニング部では所望信号が既知であることを利用し、干渉抑圧のためのウェイトの初期収束をトレーニング部で行う。生成したウェイトはトレーニング部の後続くデータ部の始めでは正しく干渉抑圧できていることが期待されるが、伝搬路変動とともに所望のウェイトも変化する。そのため所望信号を硬判定後のシンボルとしてシンボル毎にウェイトを更新することで、データ部での伝搬路変動の影響を軽減することができる。本稿ではシンボル毎にウェイトを計算するためにRLSアルゴリズムを用いる。

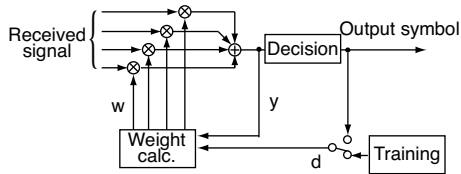


図 2 判定指向形を用いる干渉キャンセルのブロック図

表 1 主な計算機シミュレーション諸元

Parameters	Values
Number of BSAs	2
Number of MSs	4
Symbol rate	312.5 ksymbols/s
Modulation	QPSK
Filter	Root roll-off Nyquist ($\alpha = 0.4$)
Training symbols	32 symbols
Data symbols	72 symbols
Channel estimation	SMI, RLS
Channel model	i.i.d. Rayleigh
Angular distribution	Uniform

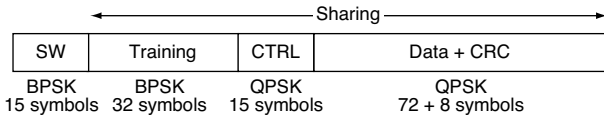


図 3 パケット構成

判定指向形チャネルトラッキングを用いる干渉キャンセルは伝搬路変動の影響を軽減できるが、一方で、硬判定後のシンボルが誤っていた場合にその誤りが次のシンボルへ引き継がれる誤り伝搬が発生する。そのためトレーニング信号区間から SMI を用いて推定した伝搬路からなるウェイトをデータ信号に適用する場合と比較すると、RLS を用いる判定指向形チャネルトラッキングは特に受信 SNR が小さい場合に特性が劣化する。

5. 計算機シミュレーション

判定指向形を用いる干渉キャンセルの特性を評価するため、計算機シミュレーションを行った。主なシミュレーション諸元を表 1 に示す。ここで、基地局アンテナ数 N が 2、移動局台数 M が 4、移動局は全て単一アンテナとしており、伝搬路は到来角分布が一様のレイリーフェージングである。パケット構成を図 3 に示す。制御信号とデータ部の前に付加するトレーニングは直交 M 系列により生成される 32 ビットが BPSK 変調されたものである。制御信号は QPSK 変調された 15 シンボルであり、主にフレーム番号を共有するために用いられる。データ部は QPSK 変調された 72 シンボルのデータ本体と 8 シンボルの CRC 部からなる。また、本節の計算機シミュレーションにおいては信号の共有は理想的に行われているものとする。

図 4 に $f_D T_s = 6.4 \times 10^{-4}$, 3.2×10^{-7} のときにトレーニング信号区間の SMI から MMSE ウェイトを生成した場合 (図中 w/o Tracking) と忘却係数 $\lambda = 0.92$ の RLS を用いる判定指向形チャネルトラッキングを行い MMSE ウェイトを逐次更新し

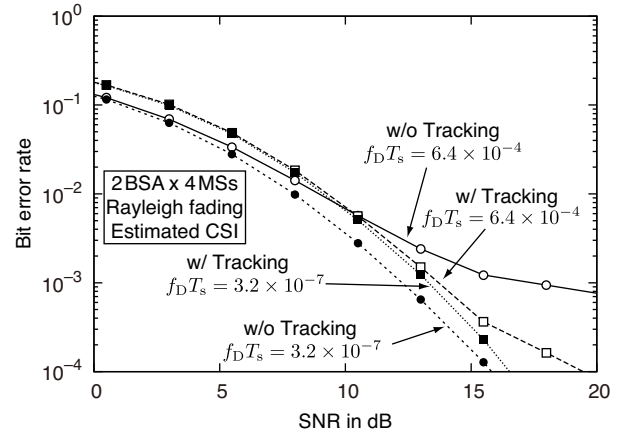


図 4 判定指向形チャネルトラッキングを用いる共同干渉キャンセルの特性

た場合 (図中 w/ Tracking) の特性をそれぞれ示す。 λ は 0.8 から 1 まで 0.01 ステップで変更した結果最適であったものとして選択している。図より、 $f_D T_s = 6.4 \times 10^{-4}$ の場合に SNR が約 11 dB 以上でトレーニング信号区間を用いる SMI と比較して RLS を用いる判定指向形チャネルトラッキングにより平均 BER 特性が改善される結果となった。

$f_D T_s = 3.2 \times 10^{-7}$ の場合はパケット内変動が微小であるため、パケット内シンボルの誤り伝搬の影響が相対的に大きくなる。そのため、トレーニング信号区間の SMI からウェイトを生成する手法が、RLS を用いる判定指向形チャネルトラッキングにより逐次ウェイトを更新する手法と比較して良好な BER 特性を示す。

6. 伝送実験

基地局アンテナ数 $N = 2$ と移動局台数 $M = 4$ の MU-MIMO システムを構築し、京都大学本部キャンパス外周道路において判定指向形チャネルトラッキングを用いる共同干渉キャンセルの屋外伝送実験を行った。電車・バス内の移動局群が想定されており、伝搬路推定誤差、共有信号の量子化による波形の劣化、共有の失敗に起因する移動局の干渉キャンセル能力の低下を取り入れた特性が評価されている。

6.1 実験装置

基地局装置及び車内に設置した移動局装置の外観を図 5, 6, 7 に示す。基地局はモジュール型測定器を中心に構成された装置を、移動局として単一アンテナを持つソフトウェア無線機 USRP (Universal Software Radio Peripheral) およびギガビットイーサネットにより接続した制御用の PC を用いている。

基地局アンテナとして、水平面内無指向性、利得 5 dBi のものを用いる。そのアンテナを対角のアンテナ間隔を 20 波長に設定して京都大学 3 号館南棟屋上に正方に配置した。ルビジウム周波数標準より 10 MHz の基準信号が基地局に供給されている。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。

移動局は図 7 のように 10 人乗り車両内の座席背もたれ裏に設置したテーブル上に 1 台ずつ配置した。移動局間の信号共有

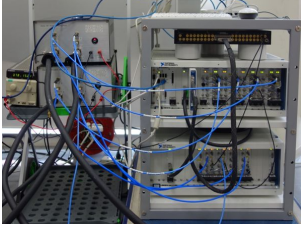


図 5 基地局装置



図 6 基地局アンテナ



図 7 車内に設置した移動局装置及び車内配置図

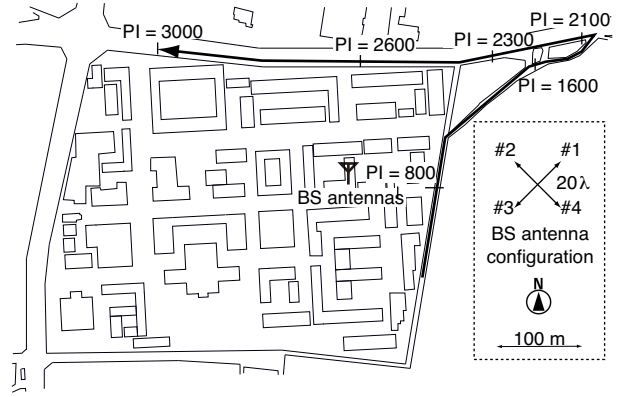
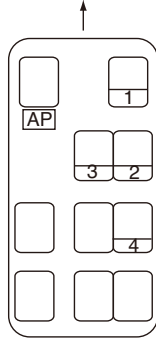


図 8 実験環境

表 2 基地局移動局間通信の諸元

System Parameters	Values
Number of BSAs	2
Number of MSs	4
Frame length	50 ms
Carrier frequency	5.11 GHz
Symbol rate	312.5 k symbols/s
Modulation	QPSK
Filter	Root roll-off Nyquist ($\alpha = 0.4$)
Training symbols	32 symbols
Data symbols	72 symbols
Channel estimation	SMI, RLS
BS Parameters	Values
Antenna height	25.5 m
Antenna gain	5 dBi
Peak EIRP	1 W
MS Parameters	Values
Antenna gain	3 dBi

のための Wi-Fi ネットワークへの接続は移動局制御用 PC の無線 LAN モジュールを用いて行っている。Wi-Fi ネットワークのアクセスポイントは図 7 のように助手席の座席裏に配置した。移動局に備え付けられているアンテナとして水平面内無指向性、利得 3 dBi のものを用いている。10 MHz の基準信号は各 USRP 内蔵の OCXO から供給されている。基地局移動局間タイミング同期及び周波数オフセット補償は文献 [6] で検討されている手法を用いている。

6.2 実験環境

実験環境を図 8 に示す。パケットインデックス (図中 PI) 約 2100 までの前半は住宅地の道路 (中央線なし), 後半は東西の幹線道路 (片側 2 車線, 今出川通) であり, 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。幹線道路区間において, PI 約 2300 から 3000 までの区間は常に時速 40 km 以上であった。約 3000 フレーム (約 150 秒間) の測定をトレーニング信号区間の SMI からウェイトを生成してデータ信号に適用する手法及び RLS を用いる判定指向形チャネルトラッキングを行う手法に基づく場合について行った。基地局アンテナとして北側に設置されている 1, 2 番を使用した。基地局移動局間の通信における諸元を表 2 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, ピーク EIRP 1 W で送信した。なお, シミュレーションにおける最大ドップラー周波数とシンボル時間の積 $f_D T_s = 6.4 \times 10^{-4}$ は本稿の実験諸元ではおよそ時速 42 km に相当している。

6.3 パケット構成

伝送実験のパケット構成は図 3 に示した計算機シミュレーションにおけるパケット構成と同一である。計算機シミュレーションと同様に, トレーニング部は BPSK 変調された M 系列により生成される 32 シンボル, 制御信号は QPSK 変調された 15 シンボル, データ部は QPSK 変調された 72 シンボルのデー

タ本体と 8 シンボルの CRC 部により構成されている。移動端末間でトレーニング信号部, 制御信号部及びデータ信号部の波形データを共有しており, 波形データを基にデータ信号部に対する干渉キャンセルを行う。フレーム長 T_{frame} は移動局における信号処理や移動局間の信号共有や測定データの保存を行うために十分長い 50 ms としている。

6.4 受信信号の共有

移動端末間の通信は移動局制御用 PC と車内に設置したアクセスポイント間の W56 帯 108, 112 ch の無線 LAN を用いた UDP (User Datagram Protocol) ブロードキャストによって行った。衝突回避のためブロードキャスト送信は 2 ms のスロットを設け, 移動局番号順に送信を行う。共有する情報として, ゲイン情報及びゲインで正規化した受信ベースバンド信号の IQ のサンプル値を他の移動局に対して送信する。ここでゲイン情報とは波形の I 成分の最大値と Q 成分の最大値のうち大きい方であり, IQ のサンプル値は符号ビットと線形量子化の出力情報によりそれぞれ 8 ビットで表現した値である。移動局の ADC は 14 ビットであるがバイト境界のため, ゲイン情報は簡単に 16 ビットで表現した [5]。

信号共有に UDP ブロードキャストを用いるため、パケットロス時に再送を行わない。そのため受信失敗時に信号を共有できない場合がある。この場合は 15 ms のタイムアウトをもって受信を中断し、受け取ることができた信号と自身の受信信号のみを用いて干渉キャンセルを行う。

6.5 干渉キャンセル手法

波形データを基に伝搬路を推定し、データ信号部に対する干渉キャンセルを行う。このとき共有信号の受信に成功した自身を除く信号数と自身の信号数 1 の和を共有した信号数として扱う。トレーニング信号区間の SMI からウェイトを生成する手法および RLS を用いる判定指向形チャネルトラッキングによりウェイト更新を行う手法を基に共同干渉キャンセルを行った。

6.6 実験結果

図 9 に無線 LAN を用いた移動局間の信号共有における受信成功数、受信電力の時間推移及び平均 BER 特性の時間推移を示す。今回は移動局を 4 台用いているため、最大で 4、最小で自身の信号のみの 1 となっている。図から走行した車内において、頻度は少ないものの信号共有に失敗する現象が見られた。パケットインデックス 800 付近において、全ての MS において他信号の共有に失敗した現象が見られた。アクセスポイントの不具合などが考えられ、今後分析を行う。

図中の受信電力の時間推移に着目する。MS1, 2, 3, 4 の受信電力が示されている。走行経路はほぼ全域にわたって基地局アンテナと車両間に建物が存在する NLOS 環境である。図から、パケットインデックス 800 付近は車両と基地局アンテナが最も接近した場所にほぼ対応しており、受信電力の上昇が確認できる。パケットインデックスがおよそ 1600 から 2100 の間は緩やかな登りであり、基地局と一部 LOS に近くなることによる受信電力の上昇が確認できる。同様にパケットインデックス 2600 付近は北側の建物による反射波が期待でき、さらに幹線道路と基地局アンテナが最も接近した場所にほぼ対応しているため、受信電力の上昇が確認できる。パケットインデックス 2600 以降は道路北側に高い建物がなく、距離の増加とシャドウイングによると思われる受信電力の低下が観察できる。

図中の 10 パケット区間平均 BER 特性の時間推移に着目する。トレーニング区間の SMI からウェイトを生成する手法(図中 w/o Tracking)と RLS を用いてウェイトを逐次更新する手法(図中 w/ Tracking)を比較すると、多くの領域で判定指向形チャネルトラッキングを行うことで大幅に良好な特性を示すことがわかる。特に、前で述べた電力が高い区間において判定指向形チャネルトラッキングを用いた場合に誤り率が大きく低減される関係が確認できる。移動により発生するフロア誤りが低減したことによる改善効果であると考えられる。

図 10 にトレーニング区間の SMI からウェイトを生成する手法(図中 w/o Tracking)もしくは RLS を用いてウェイトを逐次更新する手法(図中 w/ Tracking)それぞれの受信電力対 10 パケット区間平均 BER 特性を示す。判定指向形チャネルトラッキングを用いることで受信電力が高い場合に特性が大幅に改善されることがわかる。受信電力が -105 dBm 未満の場合において RLS を用いた判定指向形チャネルトラッキングの特性が

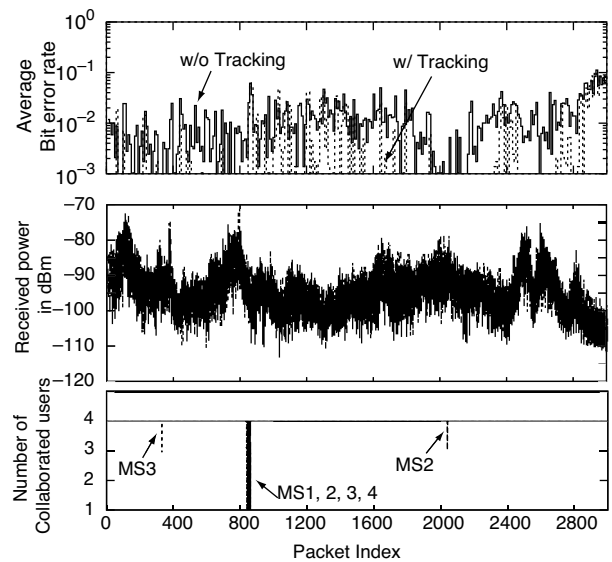


図 9 全移動局で平均した 10 パケット毎の BER 特性、各移動局の受信電力、各移動局で取得した受信信号数の時間推移

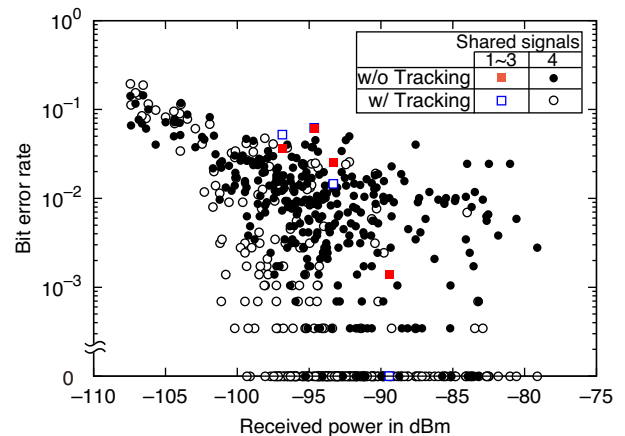


図 10 判定指向形チャネルトラッキングを用いる共同干渉キャンセルの受信電力対 10 パケット平均 BER 特性

トレーニング信号区間の SMI に基づく手法より劣化する傾向が確認できる。特性劣化の要因として誤り伝搬が考えられる。受信電力が高い場合においても判定指向形チャネルトラッキングを用いた場合の BER 特性が劣化することがある。原因の 1 つとして共有の失敗が考えられ、実際に共有が失敗した場合に BER が劣化する現象が確認できる。一方で共有が成功した場合でも BER が劣化していることがある。他の移動局における受信 SNR の低下などが考えられ、今後分析を行う。

図 11 に判定指向形チャネルトラッキングを用いる共同干渉キャンセルの BER の全区間における CDF を示す。図からトレーニング区間の SMI を用いるチャネルトラッキングを行わない場合と比較して RLS を用いる判定指向形チャネルトラッキングを用いることで特性が大幅に改善されることを再確認できる。パケットインデックス約 2300 から 3000 までの走行速度が時速 40 km 以上であった高速移動区間の BER の CDF を図 12 に示す。BER が 1×10^{-3} 以下となる確率が高速移動区間ではトレーニング区間の SMI からウェイトを生成する手法では

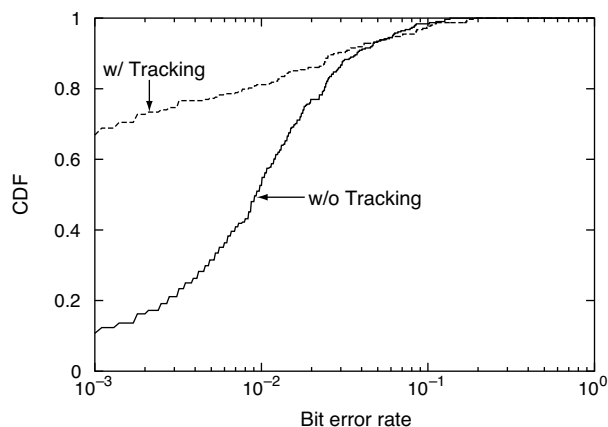


図 11 判定指向形チャネルトラッキングを用いる共同干渉キャンセルの BER の CDF

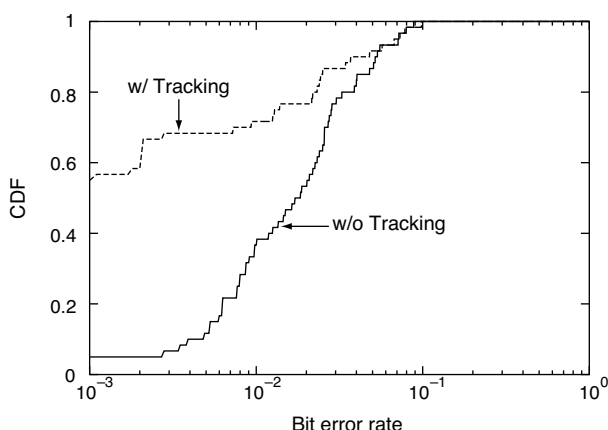


図 12 高速移動区間における判定指向形チャネルトラッキングを用いる共同干渉キャンセルの BER の CDF

1 割未満であるのに対し、RLS を用いた判定指向形チャネルトラッキングでは約 5.5 割となっており、全区間の場合と同様に判定指向形チャネルトラッキングを用いることにより特性が改善されていることがわかる。

7. む す び

移動局間で信号共有を行う共同干渉キャンセルについて高速フェージング環境下での特性評価を行った。判定指向形チャネルトラッキングを用いる干渉キャンセルにより高速フェージング環境下での特性改善が可能であることを示した。さらに、実際に走行する車両を用いて屋外伝送実験を行い、共同干渉キャンセルの伝送特性が判定指向形チャネルトラッキングにより改善されることを確認した。

謝辞 本研究の実験装置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] C. Zhong, M. Matthaiou, A. Huang, and Z. Zhang, "On the sum rate of MIMO nakagami-m fading channels with linear receiver," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol.11, no.10, pp.3651–3659, Oct. 2012.
- [2] F. Kaltenberger, D. Gesbert, R. Knopp, and M. Kountouris, "Correlation and capacity of measured multi-user MIMO

channels," In *Proc. IEEE PIMRC 2008*, Sept. 2008.

- [3] M. Taniguchi, H. Murata, S. Yoshida, K. Yamamoto, D. Umehara, S. Denno, and M. Morikura, "Field experiments of linearly precoded multi-user MIMO system at 5GHz band," In *Proc. IEEE VTC 2012-Fall*, Sept. 2012.
- [4] H. Kwon and J. Cioffi, "Multi-user MISO broadcast channel with user-cooperating decoder," In *Proc. IEEE VTC 2008-Fall*, Sept. 2008.
- [5] 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, vol.113, no.301, pp.159–164, Nov. 2013.
- [6] 林勇治, 村田英一, "端末共同干渉キャンセルにおける線形及び非線形信号処理の屋外伝送実験による検討," *信学技報*, RCS2014-261, vol.261, pp.243–248, Dec. 2014.