

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360166

研究課題名(和文) 電波伝搬測定に基づくMIMO通信容量の評価とその改善に関する研究

研究課題名(英文) Evaluation of MIMO Channel Capacity Based on Propagation Measurement and its Improvement

研究代表者

小川 恭孝 (OGAWA, YASUTAKA)

北海道大学・情報科学研究科・特任教授

研究者番号：70125293

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,400,000円、(間接経費) 4,620,000円

研究成果の概要(和文)：マルチユーザMIMOシステムの下り回線においては、送信側でチャネル情報を必要とする。時変動環境では、得られたチャネル情報と実際に信号を送送するときのチャネル特性が異なるため、干渉が発生し、通信容量が低下する。本研究では、送信時刻におけるチャネルを予測することによって特性を改善することを目的とした。チャネル予測法として、ARモデルに基づく線形予測法とラグランジュ外挿法を用いた。屋内における電波伝搬測定結果を用いてチャネル予測法の評価を行った結果、実現の容易なラグランジュ外挿法により、0.1波長以上先のチャネル予測を大きな特性劣化なしに実現できることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：A transmitter side needs channel state information in multi-user MIMO downlinks. In time-varying environments, channels at the actual downlink transmission time are different from estimated channels, which situation causes interference and performance degradation. The purpose of this study was to improve the multi-user MIMO system performance predicting channels at the transmission time. As for the channel prediction scheme, we examined autoregressive (AR)-model-based prediction and Lagrange extrapolation. We evaluated the MIMO transmission performance using channels obtained in a measurement campaign in indoor environments. It has been shown that the Lagrange extrapolation that is easy to implement can predict channels in the range over 0.1 wavelengths without significant performance degradation.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 通信・ネットワーク工学

キーワード：MIMOチャネル マルチユーザMIMOシステム 時変動チャネル 電波伝搬測定 チャネル予測 ARモデル
線形予測 ラグランジュ外挿

1. 研究開始当初の背景

プリコーディングを行う MIMO システムにおいては、送信側でチャンネル情報を必要とする。時変動環境では、得られたチャンネル情報と実際に信号を伝送するときのチャンネル特性は異なるため、干渉が発生し、通信容量が低下する。特にマルチユーザ MIMO システムの下り回線においては、ストリーム間干渉 (ISI) に加えてユーザ間干渉 (IUI) による特性劣化が深刻な問題となっていた。

2. 研究の目的

本研究では、過去のチャンネル情報を用いて、下り回線信号を送信する未来の時刻におけるチャンネルを予測し、それを基に基地局でのプリコーディングウエイトや各種のパラメータを決定することによって時変動マルチユーザ MIMO システムの特性を改善することを目的とした。

3. 研究の方法

チャンネル予測法として、AR モデルに基づく線形予測法と単純な外挿法 (ラグランジュ外挿法) を採用した。前者については、Jakes 環境を仮定し、最大ドップラー周波数を用いて予測係数を求める手法を定式化した。一方、ラグランジュ外挿法は過去のチャンネルの値を取る多項式を用いて予測を行う手法であり、簡易な予測法である。屋内での電波伝搬測定により得られたマルチユーザ MIMO チャンネルに上記 2 通りの予測法を適用し、パケット誤り率とスループットを求め、特性の評価を行った。

4. 研究成果

(1) チャンネル測定は北海道大学 大学院情報科学研究科棟 大会議室で行った。その平面図を図 1 に示した。TX は基地局 (下り回線の送信側), RX1 と RX2 は 2 つのユーザ端末 (下り回線の受信側) に対応している。図 2 に示した通り、基地局と各端末には、それぞれ、4 本と 2 本のアンテナが y 軸上に設置さ

れている。各アンテナ素子間隔は 3 cm (5GHz の半波長) である。全体で、16 個のチャンネルが存在することになるが、ネットワークアナライザを用いて、5.15GHz~5.40GHz の周波数帯域を 156.25kHz 間隔で測定した。

(2) 本研究では、図 3 に示したように上り回線と下り回線を時間により分割する TDD システムを想定した。そのフレーム長を T_f とし、端末から基地局に送られる ACK パケットの τ 秒後に下り回線のデータパケット (DL packet) がマルチユーザ MIMO 伝送される。基地局では、ACK パケットを用いてチャンネルの測定を行い、DL packet 送信のためのプリコーディング行列と送信パラメータを決定する。プリコーディング行列は、ユーザ間干渉を完全に除去するブロック対角化とストリーム間干渉を除く固有ビーム空間分割多重を実現するように決定している。各ユーザへのストリーム数、各ストリー

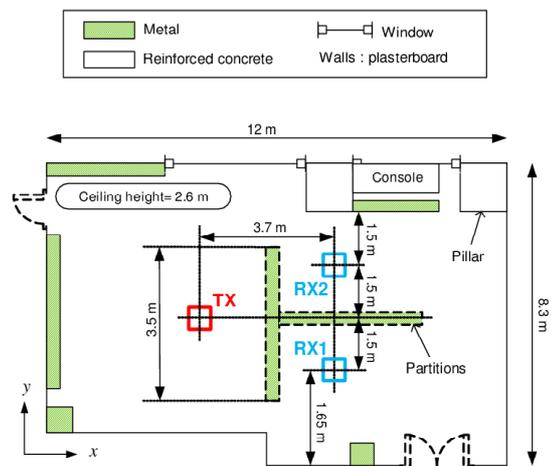


図 1. 測定環境の平面図

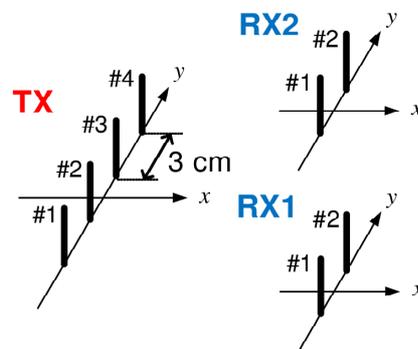


図 2. アレー構成

ムへの電力とビット配分（変調方式の決定）はビット誤り率の Chernoff 上界を最小にするように決定した。

(3) 先に述べた屋内伝搬環境での測定データを用いて、チャンネル予測効果をシミュレーションにより評価した。用いたパラメータは表1の通りである。図4に端末 RX1 の平均パケット誤り率特性と規格化した送信電力の関係を示した。パラメータ N_p はチャンネルを推定するときのパイロットシンボル数を表している。Non-Prediction と示した点線はチャンネル予測を行わず、直近の ACK パケットにより推定されたチャンネルを用いてプリコーディングを行ったときの特性である。Ideal case と示した実線は、上下回線におけるチャンネル推定と予測が完全であると仮定したときの結果である。マーカー付きの実線は AR モデルに基づく線形予測結果であり、()内の数字 (2, 3, 4) は AR 次数を表している。また、マーカー付きの点線はラグランジュ外挿法を用いてチャンネル予測を行ったときの特性である。Linear, Second, Third は外挿を行う多項式が、それぞれ、直線、2次関数、3次関数であることを示している。また、 τ は 5 ms としている。これらの図から分かるように、チャンネル予測を行わなかったときにはパケット誤り率は著しく劣化を生じ、高いフロアが現れる。一方、チャンネル予測の効果は高く、AR 予測では次数3次、ラグランジュ外挿法のときは2次関数のときに最適になることが分かった。

(4) 図5にスループット特性と正規化予測範囲の関係を示した。このシミュレーションでは符号化を行わずに伝送レート 4 bps/Hz で

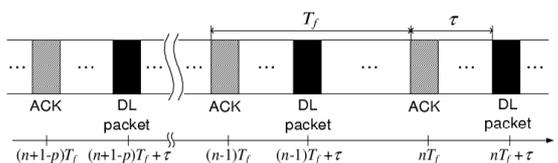
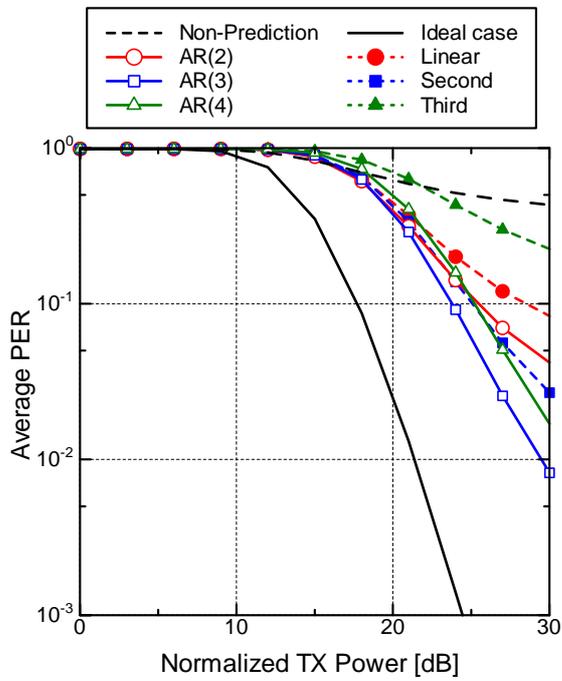


図3 . TDD 回線のフレーム構成

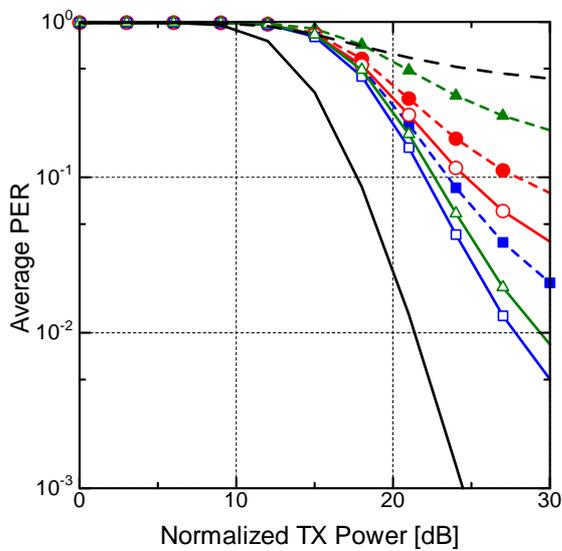
表1 . シミュレーションパラメータ

ユーザ数	2
TX×RX アンテナ本数	4×2
伝送レート	4 bits/symbol/user
変調方式	QPSK, 16QAM
リソース制御	Chernoff 上界を用いた誤り率最小基準
バースト長	128 シンボル
フレーム長 (T_f)	10 ms
中心周波数 (f_c)	5.275 GHz
最大ドップラー周波数 (f_D)	18.6Hz
熱雑音	白色ガウス雑音
受信端末での処理	MMSE ウェイトによる線形処理

送信を行っている。従って、スループットは $4 \times (1 - (\text{平均パケット誤り率}))$ で与えられる。横軸の正規化予測範囲は、時間 τ の間に端末が移動する距離を中心周波数 (5.275GHz) における波長で正規化した値であり、最大ドップラー周波数 (18.6Hz) と時間 τ の積に等しくなる。また、規格化送信電力は 20dB のときの結果である。上下回線におけるチャンネル推定と予測が完全な Ideal case のときは、正規化予測範囲によらずスループットは 4 bps/Hz の値を取っている。図中の 3.6bps/Hz は最大のスループットからの劣化が 10% のときの値である。パイロットシンボル数が 1 のときは、3 次の AR 予測を用いるとスループットの劣化が理想状態から 10% 以内の正規化予測範囲が 0.1 以上 (予測範囲は 0.1 波長以上) となることが分かる。パイロットシンボル数を 8 にすると、次数 3, 4 の AR 予測法に加えて、実現の容易なラグランジュ外挿法も 2 次関数を用いることによって正規化予測範囲が 0.1 以上となることが明らかになった。



(a) $N_p = 1$



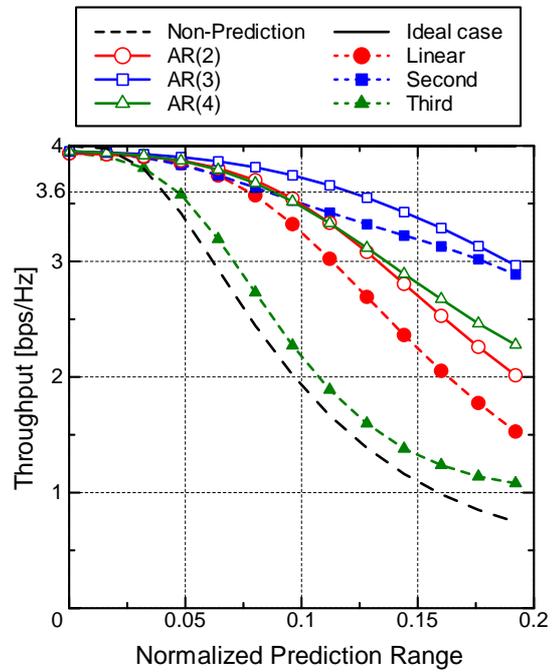
(b) $N_p = 8$

図4 . 平均パケット誤り率特性

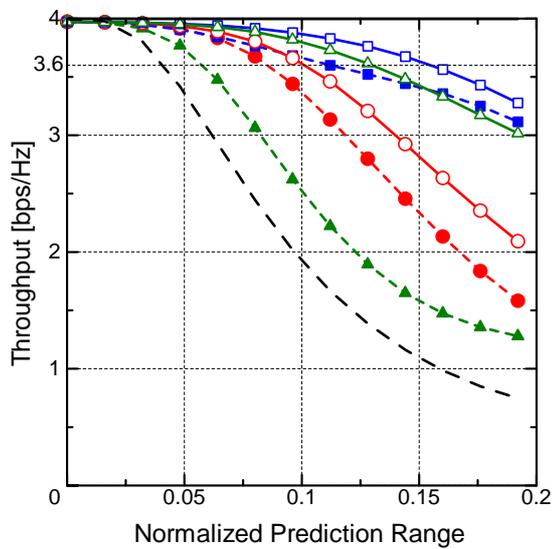
5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

Y. Ogawa, K. Yamaguchi, H. P. Bui, T. Nishimura, T. Ohgane, Behavior of a Multi-User MIMO System in Time-Varying Environments, IEICE Transactions on Communications, vol. E96-B, no. 10, pp. 2364-2371, 2013. 査読有
DOI: 10.1587/transcom.E96.B.2364



(a) $N_p = 1$



(b) $N_p = 8$

図5 . スループット特性

H. P. Bui, Y. Ogawa, T. Nishimura, T. Ohgane, Performance Evaluation of a Multi-User MIMO System with Prediction of Time-Varying Indoor Channels, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 61, no. 1, pp. 371-379, 2013. 査読有

DOI: 10.1109/TAP.2012.2214995

〔学会発表〕(計6件)

山口歌奈子, 小川恭孝, 西村寿彦, 大鐘武

雄, チャネル推定誤差環境下におけるチャネル予測を用いたマルチユーザ MIMO システムに関する考察, 2014 年電子情報通信学会総合大会, 2014 年 3 月 18 日, 新潟大学(新潟県新潟市)

山口歌奈子, 小川恭孝, 西村寿彦, 大鐘武雄, 時変動マルチユーザ MIMO システムにおけるチャネル予測手法の効果に関する考察, 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会, 2013 年 11 月 21 日, 松江テルサ(島根県松江市)

K. Yamaguchi, H. P. Bui, Y. Ogawa, T. Nishimura, T. Ohgane, Considerations on a Multi-User MIMO System Using Channel Prediction Based on an AR Model, 2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2013 年 7 月 9 日, Hilton Orland Lake Buena Vista (USA)

山口歌奈子, ブイ・フー・フー, 小川恭孝, 西村寿彦, 大鐘武雄, AR モデルに基づくチャネル予測を用いた時変動マルチユーザ MIMO システムの考察, 2013 年電子情報通信学会総合大会, 2013 年 3 月 20 日, 岐阜大学(岐阜県岐阜市)

Y. Ogawa, H. P. Bui, T. Nishimura, T. Ohgane, An Overview of Actual SU- and MU-MIMO Performances in a Measured Indoor Channel, 2011 International Symposium on Antennas and Propagation, 2011 年 10 月 28 日, Lotte Hotel Jeju (Korea)

H. P. Bui, Y. Ogawa, T. Nishimura, T. Ohgane, Multi-User MIMO System with Channel Prediction for Time-Varying Environments, 2011 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2011 年 7 月 4 日, Spokane Convention Center (USA)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小川 恭孝 (OGAWA, Yasutaka)
北海道大学・情報科学研究科・特任教授
研究者番号: 7 0 1 2 5 2 9 3

(2) 研究分担者

大鐘 武雄 (OHGANE, Takeo)
北海道大学・情報科学研究科・准教授
研究者番号: 1 0 2 7 1 6 3 6

西村 寿彦 (NISHIMURA, Toshihiko)
北海道大学・情報科学研究科・助教
研究者番号: 7 0 3 0 1 9 3 4