

機関番号：12612

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010年度

課題番号：21860035

研究課題名（和文）MIMO 通信路推定のための新しい符号化変調方式の構築

研究課題名（英文）Construction of Novel Coded Modulation Schemes for MIMO Channel Estimation

研究代表者

竹内 啓悟 (TAKEUCHI KEIGO)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号：30549697

研究成果の概要（和文）：移動体通信システムでは送受信者の移動により通信路の状態が時間的に変化する現象が生じるため、高精度な通信路推定が可能でかつ情報伝送速度の高い通信方式を構築することが求められる。本研究では、送受信者が複数のアンテナを利用する MIMO 方式に注目し、その通信路を推定するための訓練情報の新しい送信方式として、送信シンボルの発生頻度の偏り（バイアス）に基づく方式を提案した。さらに、その具体的な構成方法を二つ与え、数値シミュレーションによって既存手法の性能を改善できることを確かめた。

研究成果の概要（英文）：Mobility in mobile communication systems changes the state of wireless channels temporally. It is important to construct a communication system that can achieve accurate channel estimation and high-rate data transmission. As a novel scheme to send information for training, a communication scheme based on the bias of the occurrence probability of transmitted symbols has been proposed for multiple-input multiple-output (MIMO) channels, in which multiple transmit and receive antennas are used. Furthermore, two practical schemes have been constructed to realize the bias-based scheme. Numerical simulations show that the proposed schemes can outperform existing schemes.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,020,000	306,000	1,326,000
2010年度	980,000	294,000	1,274,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：情報通信工学

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：情報通信工学、通信路推定、符号化変調、MIMO、確率伝搬法

1. 研究開始当初の背景

MIMO 方式とは送受信者が複数のアンテナを利用して情報伝送を行う通信方式のことである。MIMO 移動体通信システムでは、送受信者の移動により通信路の状態が時間的に変化する、時間選択性フェーディングと呼ばれる現象が生じる。この環境下で高精度な通

信路推定が可能でかつ情報伝送速度の高い通信方式を構築することは重要な研究課題であった。

この課題を解決する有効な手法として、パイロット信号に基づく通信路と送信データとの同時推定法が提案されていた。パイロット信号の送信方法として、時分割多重パイロ

ット方式と重畳パイロット方式とがよく知られている。時分割多重パイロット方式とはデータシンボルと通信路推定のためのパイロットシンボルとを時間的に分割して送る方式である。一方、重畳パイロット方式とは変調のレベルでデータシンボルとパイロットシンボルを重ね合わせて送る方式である。しかしながら、これらの方式は、パイロット情報の送信方法としては必ずしも最良でなく、より効率の良いパイロット情報の送信方式を構築することで、システムの性能を改善できる可能性があった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、MIMO 通信路推定に適したパイロット情報の送信方式を提案し、その実用的な構成方法を与えることである。具体的な目標は次の三つである。

- (1)「最良なパイロット情報の送信方式は何か？」という問いに対する情報理論的な解答を与えること。
- (2)最良なパイロット情報の送り方を実現する実用的なシステムを構築すること。
- (3)最良なパイロット情報の送り方を実現する高性能でかつ実用的なシステムを構築すること。

3. 研究の方法

(1)情報理論解析

「どのようなパイロット情報の送り方をするのが最良か？」という問いに答えるために、情報理論に基づく解析を行う。情報理論とは最良な誤り訂正符号の使用を仮定した場合に達成可能な伝送速度を解析的に導出するための理論である。情報理論を利用する最大のメリットはパイロット情報の送信方式に具体的な構成方法を与えることなく、その性能を解析できる点にある。具体的には、パイロット情報の送信方式に関する情報はすべて送信シンボルの事前確率分布に集約される。したがって、情報理論的に達成可能な伝送速度を送信シンボルの事前確率分布に関して最大化することで最良なパイロット情報の送信方式を見つけることが可能となる。

MIMO 方式によって情報理論的に達成可能な伝送速度を解析的に評価することは困難なので、大システム極限を検討する。大システム極限とは送受信アンテナ数が両者の比を一定に保ちながらともに無限大となる極限である。大システム解析は比較的小さいサイズのシステムに対するよい近似を与えることが経験的に知られており、MIMO 方式の理論解析を行うための常套手段の一つとなっている。本研究では大システム極限を仮定した場合に得られる達成可能な伝送速度を送

信シンボルの事前確率分布に関して最大化することで、パイロット情報の最良な送信方法を見つける。

(2)直列接続符号による構成

説明の都合上、上記の問いの答えを一言で先に述べると、送信シンボルの発生頻度に小さな偏り(バイアス)を与える方式が最良なパイロット情報の送信方式となる。そこで、送信シンボルの発生頻度にバイアスを課す具体的な方式として、強力な誤り訂正能力を持つ線形符号と送信シンボルにバイアスを課す非線形ブロック符号との直列接続符号による構成を与える。

直列接続符号による構成は、通信路と送信データとの同時推定問題に確率伝搬法を適用することで、高性能な同時推定アルゴリズムを構築することが可能となる。外部符号として多元線形符号を用いることや、あるいは送信信号の多値変調を行うことによって、情報伝送速度を高めることができる。しかしながら、簡単化のため、最も単純な構成として二元線形符号と四位相偏移変調(QPSK)のみを想定する。

非線形ブロック符号をどのように設計するかが高精度な通信路推定を実現するためのカギとなるが、本研究では、ブロック長の短い非線形ブロック符号を想定し、ビット誤り率(BER)特性に基づく比較的良い非線形ブロック符号のクラスを、コンピュータによる全探索によって特定する。そして、提案方式とパイロット信号に基づく通信路と送信データとの同時推定法との BER 特性の比較を数値シミュレーションによって行い、提案手法の有効性を示す。

(3)並列接続符号による構成

直列接続符号による構成は、通信路と送信データとの同時推定問題に確率伝搬法を適用することで高性能な同時推定アルゴリズムを構築することが可能である一方で、計算量の点で非線形ブロック符号のブロック長に強い制約を受ける。結果として、高信号対雑音電力比(SNR)の領域で、BERの減少がゆるやかになってしまうという欠点がある。そこで、非線形符号の符号長に関して線形な計算時間で符号化や復号を実行することができるバイアス畳み込み符号を提案する。さらに、バイアス畳み込み符号を要素符号として用いる並列接続符号を検討し、数値シミュレーションによって提案手法の有効性を示す。

4. 研究成果

(1)情報理論解析

統計力学で開発されたレプリカ法という手法を使って大システム極限において MIMO

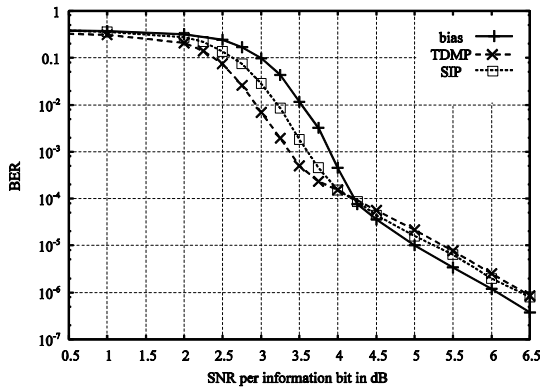


図 1：直列接続符号の BER 特性

方式で達成可能な伝送速度を解析的に評価し、送信シンボルの事前確率分布に関してその最大化を行った結果、QPSK の場合には送信シンボルの発生頻度を僅かにバイアスさせることが最良であるという結果を得た(学会発表(6)を参照)。重畳パイロット方式では変調のレベルでデータシンボルとパイロットシンボルを重ね合わせるが、バイアスに基づく提案方式では通信路推定のためのパイロット情報が符号化のレベルで送信シンボルの中にバイアスとして埋め込まれる。本成果は、バイアスに基づく方式は従来使用されてきた時分割多重パイロット方式や重畳パイロット方式よりも通信路推定に必要なパイロット情報を効率的に伝送できるという主張を情報理論的に裏付けている。なお、本成果は学術雑誌「IEEE Trans. Inf. Theory」に雑誌論文として投稿中である。

(2) 直列接続符号による構成

バイアスに基づく方式の具体的構成として、畳み込み符号と送信シンボルにバイアスを課す非線形ブロック符号との直列接続符号による構成を与えた。さらに、通信路と送信データとの同時推定に確率伝搬法を適用することで、高性能な同時推定アルゴリズムを構築した。ただし、計算量を削減するために通信路推定器を線形最小二乗誤差推定器に置き換えるという近似を行った。直列接続符号による構成は外部符号として畳み込み符号の代わりにより強力なターボ符号や低密度パリティ検査(LDPC)符号等の誤り訂正符号を使用できるというメリットを持つ。

図 1 はバイアス(bias)に基づく方式の BER 特性を示したものである。比較のために時分割多重パイロット(TDMP)方式と重畳パイロット(SIP)方式の BER 特性も示されている。高 SNR の領域で提案手法によって 0.3 デシベル程度の性能改善が得られることを確認できる(雑誌論文(1)を参照)。

本成果は、実用的なシステムの構成においてもバイアスに基づく方式は従来使用されてきた時分割多重パイロット方式や重畳パイ

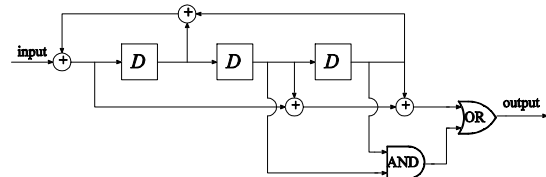


図 2：バイアス畳み込み符号

ロット方式よりも通信路推定に必要なパイロット情報を効率的に伝送できるという主張を裏付けている。

(3) 並列接続符号による構成

直列接続符号による構成は復号における計算量の問題で非線形ブロック符号のブロック長が小さなものに限られるという欠点を持つ。結果として高 SNR の領域における誤り率の減少度合いがゆるやかになってしまうという欠点がある。この欠点を解消するために、バイアス畳み込み符号を提案した。図 2 は(遅延素子の)状態数が 3 の場合のバイアス畳み込み符号の例を示している。全部で 8 通りの取りうる状態の中で AND 素子への入力とともに 1 となるような 2 状態を取る場合のみ、入力ビットに関係なく出力ビットを 1 に固定している。入力ビット系列が一樣ランダムな場合にはすべての状態は等確率で出現するため、出力ビットの発生確率に偏りを持たせることができる。この例では、1 が出る確率が 1/2 から 5/8 に偏っている。

バイアス畳み込み符号は二つのメリットを持つ。一つ目のメリットとして、単純な論理素子を使うことによって実装可能であるという点がある。もう一つのメリットは、バイアス畳み込み符号の復号には通常畳み込み符号と同じ復号法を使用できるため、直列接続符号あるいはターボ符号のような並列接続符号の要素符号として容易に組み込むことができるという点である。後者のメリットは最初に述べた非線形ブロック符号を直列接続符号の内部符号として使用した場合のデメリットを解消するものである。

図 3 はバイアス畳み込み符号をターボ符号の要素符号として用いた提案方式の BER 特性を示したものである。比較として、同じ畳み込み符号でバイアスを課す部分を削除した符号をターボ符号の要素符号とした場合の時分割多重パイロット(TDMP)方式及び重畳パイロット(SIP)方式の BER 特性も示されている。提案方式により従来法に比べて 0.3 デシベル程度の性能改善が得られることがわかった。

本成果は情報理論的な性能限界に近い領域で動く実用的なシステムの構成においても、バイアスに基づく方式は従来使用されてきた時分割多重パイロット方式や重畳パイロット方式よりも通信路推定に必要なパイロット情報を効率的に伝送できるという主

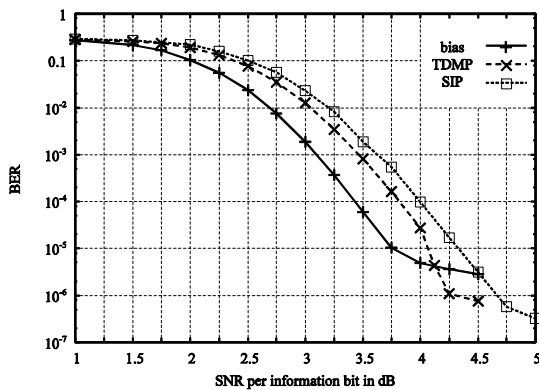


図 3 : 並列接続符号の BER 特性

張を裏付けている。本成果を研究期間内に雑誌論文として発表することはできなかったが、現在 GLOBECOM2011 に国際会議論文としてこれらの成果を投稿中である。できる限り早い段階でバイアス畳み込み符号に関する成果をまとめて学術雑誌「IEEE Trans. Commun.」に雑誌論文として投稿する予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- (1) K. Takeuchi, M. Vehkaperä, and R. R. Müller, "Bias-based training for iterative channel estimation and data decoding in fast fading channels," accepted for publication on IEICE Trans. Commun., vol E94-B, no. 7, Jul. 2011. (査読あり)
- (2) K. Takeuchi, M. Vehkaperä, T. Tanaka, and R. R. Müller, "Performance analysis of optimal channel estimation and multiuser detection in a randomly-spread CDMA channel," J. Syst. Sci. & Complexity, vol. 23, no. 1, pp.22-34, Feb. 2010. (査読あり)

[学会発表] (計 15 件)

- (1) K. Takeuchi, T. Tanaka, and T. Kawabata, "Improvement of BP-based CDMA multiuser detection by spatial coupling," 2011 IEEE Int. Symp. Inf. Theory, Saint Petersburg, Russia, Aug. 3, 2011.
- (2) K. Takeuchi, R. R. Müller, M. Vehkaperä, and T. Tanaka, "An achievable rate of large block-fading MIMO systems with no CSI via

successive decoding," 2010 Int. Symp. Inf. Theory and its Appl. & 2010 Int. Symp. Spread Spectrum Tech. and Appl., Taichung, Taiwan, Oct. 19, 2010.

- (3) M. Vehkaperä, K. Takeuchi, R. R. Müller, and T. Tanaka, "Iterative channel estimation, detection, and decoding in large CDMA systems," 6th Int. Symp. Turbo Codes & Iterative Inf. Processing, Brest, France, Sep. 9, 2010.
- (4) M. Vehkaperä, K. Takeuchi, R. R. Müller, and T. Tanaka, "Analysis of large MIMO DS-CDMA systems with imperfect CSI and spatial correlation," 2010 IEEE Int. Symp. Inf. Theory, Austin, USA, Jun. 14, 2010.
- (5) M. Vehkaperä, K. Takeuchi, R. R. Müller, and T. Tanaka, "How much training is needed for iterative multiuser detection and decoding?" 2009 IEEE Global Commun. Conference, Honolulu, USA, Dec. 1, 2009.
- (6) K. Takeuchi, R. R. Müller, M. Vehkaperä, and T. Tanaka, "Practical signaling with vanishing pilot-energy for large noncoherent block-fading MIMO channels," 2009 IEEE Int. Symp. Inf. Theory, Seoul, Korea, Jun. 30, 2009.
- (7) M. Vehkaperä, K. Takeuchi, R. R. Müller, and T. Tanaka, "Iterative channel and data estimation: Framework and analysis via replica method," 2009 IEEE Int. Symp. Inf. Theory, Seoul, Korea, Jul. 3, 2009.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹内 啓悟 (TAKEUCHI KEIGO)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号 : 30549697