

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 26 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760329

研究課題名(和文) モバイルMIMOブロードキャスト方式に適した通信方式の構築と解析

研究課題名(英文) Construction and Analysis of Communication Schemes for Mobile MIMO Broadcast Systems

研究代表者

竹内 啓悟 (Takeuchi, Keigo)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・助教

研究者番号：30549697

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：持ち運び可能な無線端末が普及した現代、一つの基地局から複数のユーザに情報を効率的に伝送するモバイルブロードキャスト方式の重要度が増しつつある。複数のアンテナを利用して通信を行う多入力多出力(MIMO)方式は、主に単一のユーザの伝送効率を高めるための方式として実用化されてきたが、ブロードキャスト方式としても利用が可能である。

本研究では、MIMOを使ったモバイルブロードキャスト方式に適した通信方式としてデータ依存型ユーザ選択法を提案し、その性能解析を行った。さらに、同提案手法で使用される通信路状態に関する情報を推定するために、通信路とデータとの同時推定法の提案・解析も行った。

研究成果の概要(英文)：It is important to realize mobile broadcast systems that transmit efficiently data from one base station toward multiple mobile terminals, called users. Multiple-input multiple-output (MIMO) transmission has been used to improve spectral efficiency for single-user systems, and can be utilized for broadcasting.

In this research, we proposed and analyzed data-dependent user selection as a communication scheme suitable for mobile MIMO broadcasting. In order to estimate channel state information used in the proposed user selection, we also proposed and analyzed joint channel and data estimation.

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 移動体通信 MIMO ユーザ選択 レプリカ法

1. 研究開始当初の背景

持ち運び可能な無線端末が普及した現代、一つの基地局から多数の移動局(以後、ユーザと呼ぶ)に情報を効率的に伝送するモバイルブロードキャスト方式の重要性が増しつつあった。複数のアンテナを利用して通信を行う多入力多出力(MIMO)方式は、主に単一のユーザの伝送効率を高めるための方式として実用化されてきたが、ブロードキャスト方式としても利用が可能である。情報理論によりその効率が良いことは保証されているものの、特にモバイル環境では実用的な通信方式の構築には至っていない状況であった。そのため、MIMOを使ったモバイルブロードキャスト方式を構築することは、無線通信方式の物理層における重要な研究課題であった。

ブロードキャスト方式では公平性の確保が問題となる。それが難しい要因として、信号対雑音電力比(SNR)や伝送率の要求がユーザ毎に異なる点とユーザの(搬送波の波長程度の)移動によってフェーディングが生じる点とが挙げられる。前者は上位層で適切に議論されるものとしても、後者の問題は物理層で解決すべき問題点である。

固定局向けのMIMOを使ったブロードキャスト方式として、ユーザ選択法が提案されていた。ユーザ選択法は通信路の状態が良好なユーザを選択して優先的に情報を伝送することによって、単位ビット伝送するのに必要な電力を削減する。しかしながら、従来のユーザ選択法はモバイル環境での使用を想定していなかった。

2. 研究の目的

本研究では、ユーザ選択法をモバイル環境向けに改良することを目指した。モバイル環境では、通信路の状態が高速で変化するため時間ダイバーシティ効果が得られる。これにより、フェーディングに関する公平性の問題が解消されるという利点がある。具体的には以下の目標を達成することを目指した。

(1) 従来のユーザ選択法と同水準の計算コストを維持しつつ、従来法の電力効率を上回るような、MIMOを使ったモバイルブロードキャスト方式に適した新しいユーザ選択法を構築する。

(2) ユーザ数とアンテナ数は無限大であるが、両者の比は有限であるような極限(以後、大システム極限と呼ぶ)を仮定して、提案手法の性能解析を実施する。

(3) ユーザから基地局に向かって情報を伝送する上り回線での通信路推定の精度が、ユーザ選択法の性能に大きな影響を与えるため、上り回線での通信路推定法を構築し、その性能解析を行う。

3. 研究の方法

(1) データ依存型ユーザ選択法としては、ゼロフォーシングビームフォーミング(ZFBF)とユーザ選択とを組み合わせた方式を提案する。ブロードキャスト通信路では、あるユーザ宛に送られた信号が別のユーザにも届いてしまうという多元接続干渉が生じるが、ZFBFとはそのような干渉が生じないように事前に基地局で行う信号処理のことである。データ依存型ユーザ選択法では、選択されたユーザの集合が与えられると、それらのユーザに関する通信路状態とデータシンボルとから定まる瞬時送信電力を最適化の目的関数として使用する。

実行可能解の数は選択されるユーザ数に関して指数的に増大するため、最適解を見つけることは非常に困難である。本研究では代わりに、瞬時電力の増分が最も小さいユーザから順番に選んでいくという貪欲法に基づくデータ依存型ユーザ選択法を構築する。

(2) 提案データ依存型ユーザ選択法の性能を評価するために、レプリカ法を使用して最適なデータ依存型ユーザ選択法の性能を大システム極限の下で解析的に評価する。

レプリカ法とは統計力学の分野でSherrington-Kirkpatrick(SK)モデルと呼ばれるスピングラスのモデルを解析するために開発された計算手法で、さまざまな無線通信システムの性能解析に近年応用されている。ある最適化問題の目的関数の最小値を評価する問題は、統計力学の言葉で言い換えると、与えられた物理系の基底状態エネルギーを評価する問題と等価である。基底状態そのものを見つけることは非常に難しい最適化問題であるが、大システム極限において基底状態エネルギーを評価することはレプリカ法を使うことで可能である。

(3) モバイル環境での通信路状態は時々刻々と変化するため、高頻度で通信路の推定値を更新しなければならない。そのような状況下では、通信路推定用のパイロット信号の送信頻度が増えるため、データの伝送速度が低下してしまうという問題点が生じる。この問題を解決するために、通信路とデータとの同時反復推定を行う方式を提案し、その性能解析を行う。

4. 研究成果

(1) データ依存型ユーザ選択法を提案し、その有効性を計算機シミュレーションによって確認した。従来のユーザ選択法では、通信路の状態が良好なユーザを選択して優先的に情報を伝送することによって送信電力効率を高めていた。一方、提案したデータ依存型ユーザ選択法では通信路の状態だけでなく、送信データシンボルも考慮して選択するユーザを決める。ユーザ選択を送信データに

も依存させることで、特にユーザ選択の更新頻度が高いモバイル環境では従来法に比べて送信電力効率を改善できることを示した。

データ依存型ユーザ選択法の利点を直感的に説明するために、例えとして、さまざまな形や大きさをしたタイルの集合から、決められた個数だけを選び出して、選んだタイルを平面上に重なることなくできる限り狭い領域に敷き詰めることを目標とする“タイル充填問題”を考える。一つの戦略は大きさの小さいタイルから順に選ぶことである。しかしながら、この戦略ではタイル同士の形が合わず敷き詰めた領域内に空白が生じてしまい、結果的に敷き詰めた領域の面積が広がってしまう可能性がある。より賢明な戦略はタイルの大きさを意識しつつ、タイル同士の形の相性が良いものを選ぶという戦略である。こうすることで、敷き詰めた領域内の空白を減らすことができ、結果的に領域の面積を小さくすることができる。この例えでタイルの大きさと形とに例えたのは、それぞれ通信路状態とデータシンボルとである。

(2) 既存の理論解析ではアンテナ数に比べてユーザ数が十分大きい極限を仮定して、極値統計理論を用いた性能解析が行われてきた。この極限下で得られる解析結果は、例えばアンテナ数が4本、ユーザ数が64人のシステムの性能に対する近似とみなすことができる。しかしながら、アンテナ数が8本、16本と増えていくにつれて従来法の近似の精度は悪化してしまう。このようなアンテナ数は現実的な本数となりつつあるため、例えば、アンテナ数が16本、ユーザ数が64人のシステムの性能をよく近似できるような理論を構築するために、大システム極限を仮定した。

レプリカ法で得られる結果として、レプリカ対称(RS)解とレプリカ対称性の破れた(RSB)解とが知られている。前者は準最適解の個数がたかだか数個である場合に有効な解で、後者は準最適解が非常に多数存在する場合に有効な解である。本研究ではRS解とRSB解の中で最も単純な解とを検討した。

大システム極限を仮定して最良なデータ依存型ユーザ選択法の理論解析を実施した結果、大システム極限では従来のデータ非依存型ユーザ選択法を使用するメリットはなくなることが判明した。それに対して、提案手法であるデータ依存型ユーザ選択法を使用することで、大システム極限下でも送信電力の削減が可能であることを示した。

(3) 通信路とデータとの同時反復推定を行う方法を提案し、大システム極限を仮定してその性能解析を行った。レプリカ法による解析から、パイロット信号の量がシステム極限において無視できる程度であっても、推定したデータをパイロット信号として利用することで、十分な精度で通信路推定できるこ

とが分かった。つまり、通信路とデータとの同時推定を行えば、モバイル環境であってもパイロット信号の送信によるデータの伝送速度の低下を回避できる。以上の結果から、モバイルブロードキャスト方式において通信路の状態を既知と仮定することは、非現実的な仮定ではないと言える。

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 10 件)

K. Takeuchi and S. Horio, “Iterative Multiuser Detection and Decoding with Spatially Coupled Interleaving,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 2, no. 6, pp.619-622, Dec. 2013.

DOI:10.1109/WCL.2013.082713.130465

(査読有)

K. Takeuchi, R. R. Müller, M. Vehkaperä, and T. Tanaka, “On an Achievable Rate of Large Rayleigh Block-Fading MIMO Channels with No CSI,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 59, no. 10, pp. 6517-6541, Oct. 2013.

DOI:10.1109/TIT.2013.2268848

(査読有)

K. Takeuchi, R. R. Müller, and M. Vehkaperä, “Iterative LMMSE Channel Estimation and Decoding Based on Probabilistic Bias,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 7, pp. 2853-2863, Jul. 2013.

DOI:10.1109/TCOMM.2013.053013.120919

(査読有)

R. Ohashi, K. Kasai, and K. Takeuchi, “Multi-Dimensional Spatially-Coupled Codes,” in *Proc. 2013 IEEE Int. Symp. Inf. Theory*, Istanbul, Turkey, pp. 2448-2452, Jul. 2013.

DOI:10.1109/ISIT.2013.6620666

(査読有)

K. Takeuchi, “Accelerating Iterative Detection for Spatially Coupled Systems by Collaborative Training,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 17, no. 3, pp. 451-454, Mar. 2013.

DOI:10.1109/LCOMM.2013.012213.122769

(査読有)

K. Takeuchi, R. R. Müller, and T. Kawabata, “Large-System Analysis of Joint User Selection and Vector Precoding with Zero-Forcing Transmit Beamforming for MIMO Broadcast Channels,” in *Proc. 2012 Int. Symp. Inf. Theory and its Appl.*, Honolulu, Hawaii, USA, pp.245-249, Oct. 2012.

(査読有)

K. Takeuchi, T. Tanaka, and T. Kawabata, "A Phenomenological Study on Threshold Improvement via Spatial Coupling," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol. E95-A, no. 5, pp. 974-977, May 2012.

DOI: 10.1587/transfun.E95.A.974

(査読有)

K. Takeuchi, M. Vehkaperä, T. Tanaka, and R. R. Müller, "Large-System Analysis of Joint Channel and Data Estimation for MIMO DS-CDMA Systems," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 58, no. 3, pp. 1385-1412, Mar. 2012.

DOI: 10.1109/TIT.2011.2177757

(査読有)

K. Takeuchi, R. R. Müller, and M. Vehkaperä, "A Construction of Turbo-Like Codes for Iterative Channel Estimation Based on Probabilistic Bias," in *Proc. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2011)*, Houston, USA, Dec. 2011.

DOI: 10.1109/GLOCOM.2011.6133738

(査読有)

K. Takeuchi, T. Tanaka, and T. Kawabata, "Improvement of BP-Based CDMA Multiuser Detection by Spatial Coupling," in *Proc. 2011 IEEE Int. Symp. Inf. Theory, Saint Petersburg, Russia*, pp. 1489-1493, Aug. 2011.

DOI: 10.1109/ISIT.2011.6033789

(査読有)

[学会発表](計 13 件)

竹内啓悟, 「空間結合系における閾値飽和現象の本質」, 2014 年電子情報通信学会総合大会 チュートリアルセッション (AT-2-2), 新潟, 2014 年 3 月 18 日~21 日.

竹内啓悟, 「ブラインド圧縮センシングに基づくパイロット汚染除去」, 2014 年電子情報通信学会総合大会 シンポジウムセッション (ABS-1-2), 新潟, 2014 年 3 月 18 日~21 日.

竹内啓悟, 堀尾修平, 「空間結合に基づく反復マルチユーザ復号の性能改善」, 第 36 回情報理論とその応用シンポジウム, 静岡, 2013 年 11 月 26 日~29 日.

堀尾修平, 竹内啓悟, 川端勉, 「空間結合インターリーバを用いた反復通信路推定の性能改善」, 第 36 回情報理論とその応用シンポジウム, 静岡, 2013 年 11 月 26 日~29 日.

竹内啓悟, 「空間結合の最新動向~空間結合 LDPC 符号を中心に~」, 情報理論研究会 若手研究者のための講演会, 静岡, 2013 年 11 月 26 日.

R. Ohashi, K. Kasai, and K. Takeuchi,

"Multi-Dimensional

Spatially-Coupled Codes," 2013 IEEE Int. Symp. Inf. Theory, Istanbul, Turkey, 7--12 Jul. 2013.

竹内啓悟, 「バイアス畳み込み符号に基づく反復通信路推定」, 第 35 回情報理論とその応用シンポジウム, 大分, 2012 年 12 月 11 日~14 日.

K. Takeuchi, R. R. Müller, and T. Kawabata, "Large-System Analysis of Data-Dependent User Selection with General Modulation for MIMO Broadcast Channels," 35th Symp. Inf. Theory and its Appl. (SITA2012), Oita, Japan, 11--14 Dec. 2012.

K. Takeuchi, R. R. Müller, and T. Kawabata, "Large-System Analysis of Joint User Selection and Vector Precoding with Zero-Forcing Transmit Beamforming for MIMO Broadcast Channels," 2012 Int. Symp. Inf. Theory and its Appl., Honolulu, Hawaii, USA, 28--31 Oct. 2012.

K. Takeuchi, R. R. Müller, and M. Vehkaperä, "A Construction of Turbo-Like Codes for Iterative Channel Estimation Based on Probabilistic Bias," IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2011), Houston, USA, 7 Dec. 2011.

久富彰人, 竹内啓悟, 川端勉, 「自己相似な事前分布による無歪情報源符号の漸近的冗長性」, 第 34 回情報理論とその応用シンポジウム 岩手 2011 年 11 月 30 日.
竹内啓悟, 「空間結合によるマルチユーザ検出の性能改善」, LDPC 符号ワークショップ, 東京, 2011 年 9 月 29 日.

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, 3 Aug. 2011.

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