

令和 4 年 5 月 10 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04396

研究課題名（和文）マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いた多信号復調方式の検討

研究課題名（英文）Multiuser Detection based on Markov chain Monte Carlo Methods

研究代表者

眞田 幸俊（Sanada, Yukitoshi）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・教授

研究者番号：90293042

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：第5世代移動通信システムでは多数のセンサデバイスからの情報を収容し、従来とは違ったアプリケーションのプラットフォームになることが期待されている。第5世代移動通信で実用化された超多素子アンテナ基地局を用いれば、同時に100以上の信号を受信し、復調することができる。しかし従来の復調方式では、復調のための計算量が膨大なものになる。そこで本研究ではマルコフ連鎖モンテカルロ法を用いて100を超える信号を同時に受信し復調するアルゴリズムを検討した。特に新しい選択確率分布曲線の提案を行い、復調特性を改善した。また強制的に送信信号ベクトルの要素を変更する方式を提案し、特性を改善した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これらの研究成果は従来とは違った多数接続アプリケーションのプラットフォームに適用することが期待できる。その例としては工場内の機器を無線でつなぎ、遠隔から工場を制御するスマート工場などが考えられる。このようなプラットフォームに第5世代移動通信で実用化された超多素子アンテナ基地局を用いれば、同時に100以上の信号を受信し、復調することができる。

研究成果の概要（英文）：Massive connection is one of the key features of a fifth generation (5G) mobile communication system. A base station with massive antenna elements has been implemented for 5G and it is possible to demodulate more than 100 signals at a time. However, conventional demodulation scheme demands huge computational complexity. Thus, in this research, the application of a Markov chain Monte Carlo method to multiple signal detection has been investigated. More specifically, a candidate symbol selection with a novel selection probability curve has been proposed. Furthermore, a forcible symbol change scheme has been proposed. These schemes improve the bit error rate performance especially under high signal-to-noise ratio conditions.

研究分野：無線通信

キーワード：5G マルコフ連鎖モンテカルロ法 多信号復調

1. 研究開始当初の背景

第5世代移動通信システムでは多数のセンサデバイスからの情報を收容し、従来とは違ったアプリケーションのプラットフォームになることが期待されている。その例としては工場内の機器を無線でつなぎ、遠隔から工場を制御するスマート工場などが考えられる。このようなプラットフォームに第5世代移動通信で実用化された超多素子アンテナ基地局を用いれば、図1のように多数のセンサからの信号を同時に受信、復調することができる。しかし従来の方式では、復調のための計算量が膨大なものになる。

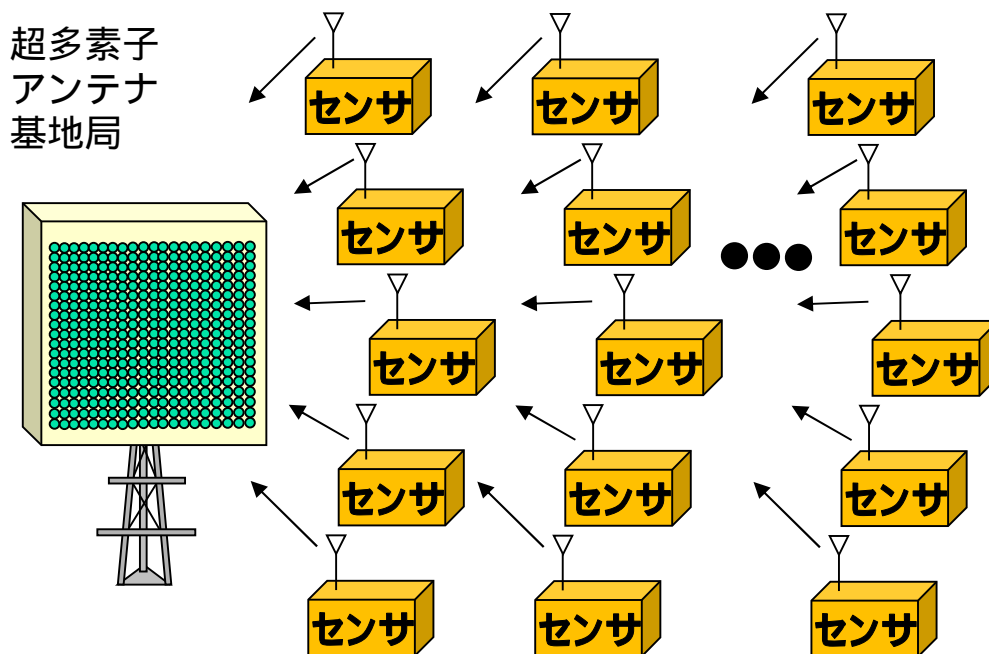


図1 多信号同時接続

2. 研究の目的

計算量の側面から考えると従来の復調アルゴリズムでは計算量的に同時受信することができる信号数が10程度に限られてしまう。そこで本研究ではマルコフ連鎖モンテカルロ法を用いて100を超える信号を同時に受信し復調するアルゴリズムを検討する。提案方式は確率分布の期待値を簡易的に求め、これを信号復調に適用する。そして(1)提案アルゴリズムによる計算量の削減、(2)想定するチャネルモデルによる復調特性の評価、(3)誤り訂正符号と組み合わせた提案アルゴリズムの特性評価を計算機シミュレーションにより評価する。

3. 研究の方法

本研究の目的はマルコフ連鎖モンテカルロ法を用いて100を超える信号を同時に復調する新し、かつ計算量の少ない方式を提案し検討しその特性を評価することである。マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いた多信号復調方式は[\*]に提案されていた。しかしこのアルゴリズムを用いた場合の復調特性はエラーフロアを引くことが示されている。そこで特に高次変調シンボルに対してエラーフロアを引かない復調方式を提案する。

提案するマルコフ連鎖モンテカルロ法による多信号復調方式では、通信路応答の状態に合わせて選択確率を選択し、エラーフロアを解消する。図2はその概念図である。選択確率は受信信号点を中心に分布する。ただしむやみに選択確率分布曲線を変更すると、受信信号点からの距離が候補点選択に与える効果が小さくなる。この場合、ランダムに候補点を選択することになるため、アルゴリズムの収束特性が劣化する。そこで適切な係数を用いて生起確率分布を拡張することを検討する。

[\*] B. Farhang-Boroujeny, H. Zhu, and Z. Shi, "Markov Chain Monte Carlo Algorithms for CDMA and MIMO Communication Systems," IEEE Trans. Signal Process., vol. 54, no. 5, pp. 1896-1909, May 2006.

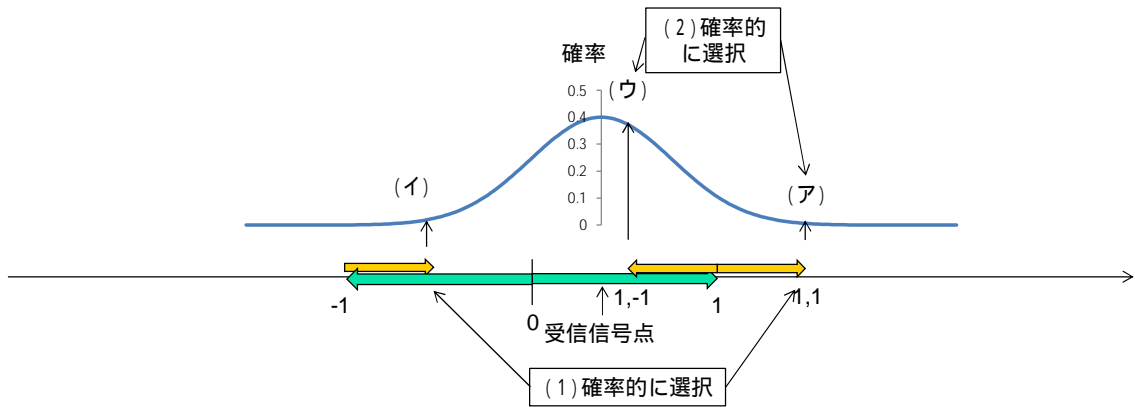


図2 マルコフ連鎖モンテカルロ法

#### 4. 研究成果

本研究の成果としては大きく2つある.

##### (1) 新しい選択確率分布曲線の提案

従来のマルコフ連鎖モンテカルロ法を用いた多信号復調方式においては、送信シンボル候補の選択確率分布として正規分布を用いている. この場合確率を求める指数関数の計算量が大きい. そこで本研究では図3のように指数関数を Taylor 展開した曲線や分数を用いた低計算量の曲線を用いた Taylor 展開ではその次数により曲線が異なる. また提案曲線は  $f_\gamma(d) = 1/(d^\gamma + 1)$  で与えられ  $\gamma$  の値を制御することにより選択確率が変化する. なお  $d = \|\mathbf{r} - \mathbf{h}\hat{\mathbf{c}}^{n_t}\|^2 / \alpha^2 \sigma^2$  で与えられ、受信信号ベクトル  $\mathbf{r}$  と候補受信信号ベクトル (候補送信信号ベクトル  $\hat{\mathbf{c}}^{n_t}$  とチャネル応答行列  $\mathbf{h}$  を乗算したもの) の間の距離である.

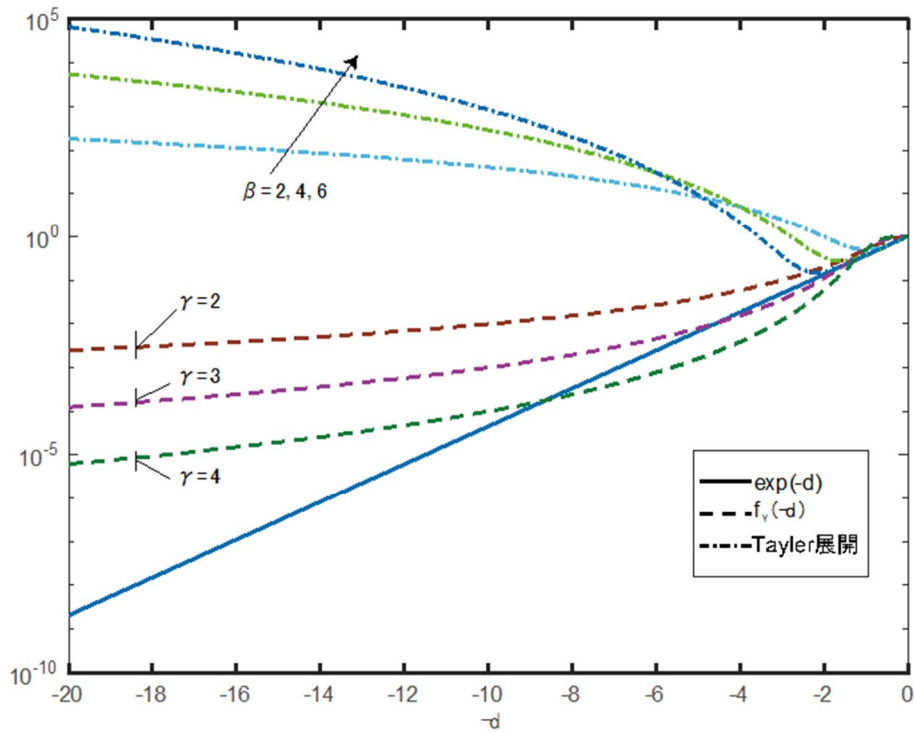


図3 選択確率分布曲線

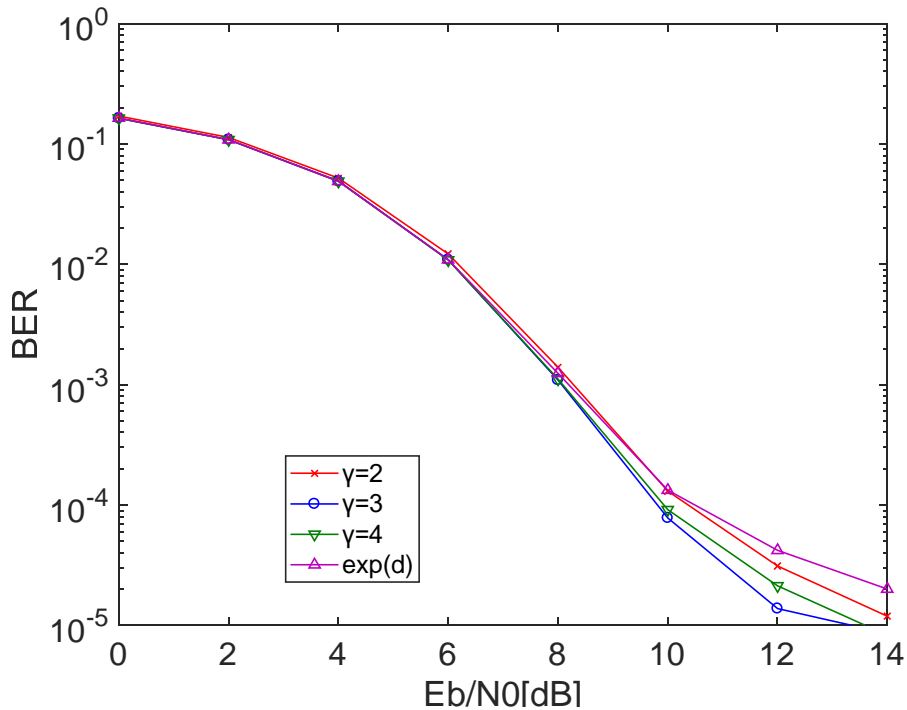


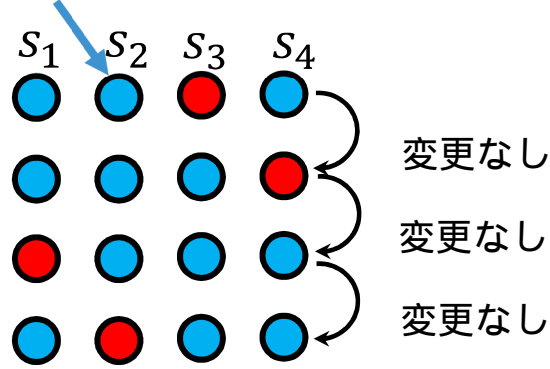
図4 ビット誤り率特性

16 送信アンテナ，16 受信アンテナ，QPSK シンボル送信を想定した計算機シミュレーションの結果，図4に示したように提案方式は従来の指数関数曲線よりも高いビットエネルギー ( $E_b$ ) 対雑音スペクトル密度 ( $N_0$ ) の領域で特性を改善することを示した．また提案する曲線を元に各ビットの尤度を計算し，繰り返し型誤り訂正復号器に入力した場合の特性も評価した．この結果も提案曲線による特性の改善が確認できた．

## (2) シミュレーテッドアニーリングとの融合

従来のマルコフ連鎖モンテカルロ法では逐次的に候補送信信号ベクトルを更新する．解の探索がローカルミニマムに停留している場合，選択確率が極端に偏り新しい送信シンボルベクトル候補に遷移することができない．そこで本研究では1 繰り返し探索前の送信シンボルベクトル候補と比較して差分が見られない場合には強制的にその要素を変更する方式を検討した．図5はその概念図である． $s_1, s_2, s_3, s_4$  は送信シンボルの候補である．4つの送信シンボルを逐次的に変数とし，他のシンボルを定数として受信信号との差分を評価する．そして評価関数値の大きい，すなわち受信信号ベクトルとの差分の小さい送信信号ベクトルを保存する．すべてのシンボルを更新してもすべてのシンボルで変更が無い場合には複数のシンボルを強制的に変更する．これにより送信シンボルベクトル候補の探索範囲を拡大し，真の送信シンボルをより高い確率で発見する．

最後に変更されたシンボ



強制的に変更

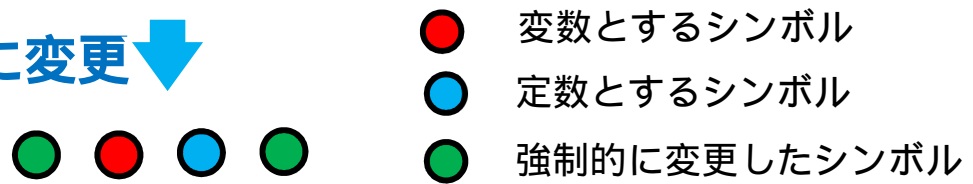


図5 強制的変更による候補送信信号ベクトル探索

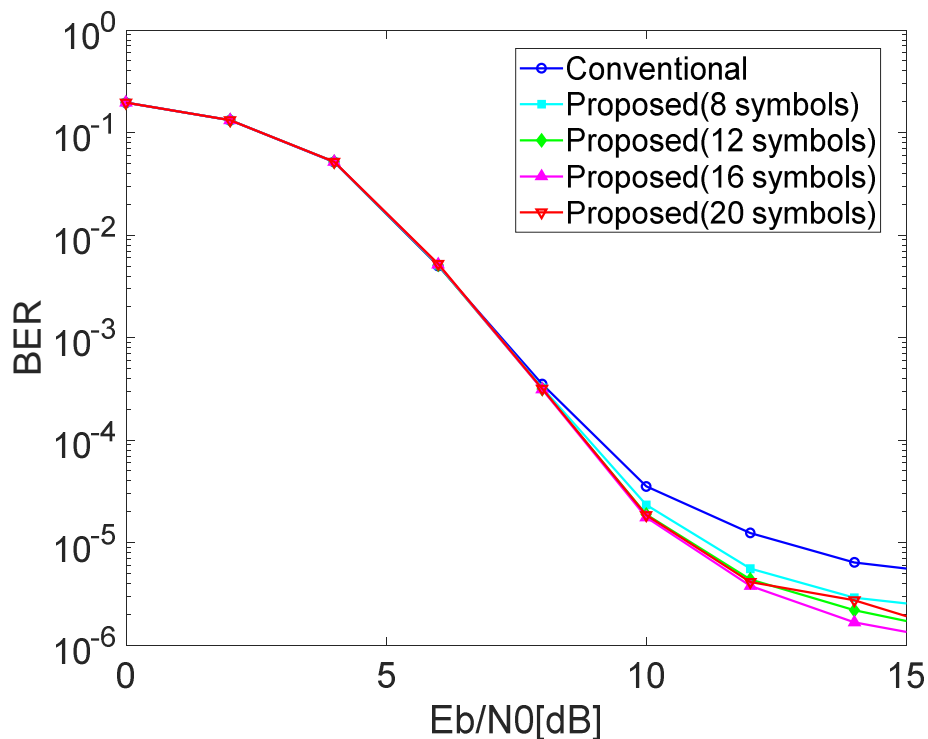


図6 ビット誤り率特性

128 送信アンテナ, 128 受信アンテナ, QPSK シンボル送信を想定した計算機シミュレーションの結果, 図6 に示したように提案方式は 16 シンボルを強制的に変更した探索を行った場合に高いビットエネルギー ( $E_b$ ) 対雑音スペクトル密度 ( $N_0$ ) の領域で特性を改善することを示した. 16 シンボル以下の変更では解の探索が不十分であり特性が劣化した. また 16 シンボル以上の探索では最適解より離れてしまう可能性があり, これも同様に特性が劣化した.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 YAMAZAKI Kenji, SANADA Yukitoshi	4. 巻 E104.B
2. 論文標題 Forcible Search Scheme for Mixed Gibbs Sampling Massive MIMO Detection	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 419 ~ 427
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transcom.2020EBP3030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 KOBAYASHI Yutaro, SANADA Yukitoshi	4. 巻 -
2. 論文標題 Likelihood-based Metric for Gibbs Sampling Turbo MIMO Detection	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transcom.2020FGT0001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 G. Otsuru and Y. Sanada	4. 巻 E103-B
2. 論文標題 Phase Selection in Round-Robin Scheduling Sequence for Distributed Antenna System	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Trans. on Communications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transcom.2019EBP3222	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yamazaki Kenji, Sanada Yukitoshi
2. 発表標題 Forcible Search with Mixed Gibbs Sampling Massive MIMO Detection
3. 学会等名 2020 IEEE Region 10 Conference（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Tomura, Y. Sanada, and K. Yutaro
2. 発表標題 MIMO Detection with Block Parallel Gibbs Sampling and Maximum Ratio Combining
3. 学会等名 2020 IEEE Region 10 Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中馬健士郎 眞田幸俊
2. 発表標題 Gibbs サンプリングを用いたMIMOチャネル推定における重み最適化
3. 学会等名 電子情報通信学会技術報告
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 G. Otsuru and Y. Sanada
2. 発表標題 User Allocation with Round-Robin Scheduling Sequence for Distributed Antenna System
3. 学会等名 IEEE Vehicular Technology Conference 2019 Fall (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林佑太郎, 眞田幸俊
2. 発表標題 GibbsサンプリングターボMIMO復調における尤度を用いたメトリックの適用
3. 学会等名 電子情報通信学会技術報告, RCS2019-388
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山崎健司, 眞田幸俊
2. 発表標題 Gibbs Samplingを用いた大規模 MIMO復調方式における強制的シンボル探索の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術報告
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 戸村宏輔, 眞田幸俊
2. 発表標題 最大比合成を用いた混合ブロック並列GibbsサンプリングによるMIMO復調の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術報告
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------