

M 系列 CDMA 方式における分枝限定アルゴリズムを用いたマルチユーザ検出の特性解析

松波信広[†] 五十嵐保隆[†] 福島誠治[†] 八野知博[†]

従来、多元接続通信方式の一種である CDMA において、分枝限定アルゴリズムを用いたマルチユーザ検出法の特性はランダム符号を用いて解析されていた。しかし現実世界ではランダム符号が用いられることは稀であり、M 系列などの実用的な符号が用いられることが多い。そこで本研究では M 系列符号を用いた場合におけるマルチユーザ検出法の特性を解析し、ランダム符号を用いた場合と比較することによりその特性の違いを明らかにする。計算機実験の結果として、SNR などのパラメータの値に関わらず GDE 率及び BER はランダム符号よりも M 系列を用いた方が改善することがわかった。

Performance Analysis of Multiuser Detection by Branch and Bound Method using User Grouping for M-sequence Coded CDMA Communication Systems

NOBUHIRO MATSUNAMI[†] YASUTAKA IGARASHI[†]
SEIJI FUKUSHIMA[†] TOMOHIRO HACHINO[†]

Conventionally, in a code-division multiple-access (CDMA) scheme which is one of multiple access communication systems, the performance of the multi-user detection method by a branch-and-bound algorithm using user grouping have been analyzed with random codes. However M-sequence codes are often applied for practical use instead of random codes. Therefore, in this article, we analyze the performance of the multi-user detection method by a branch-and-bound algorithm using user grouping with M-sequence codes, and compare the performance with one for random codes. As a result of computer simulations, we show that group-detection error (GDE) rate and bit-error rate (BER) are reduced by using M-sequence codes regardless of system parameters such as SNR.

1. はじめに

通信方式の一つである符号分割多元接続 (CDMA : Code Division Multiple Access) 方式は、複数のユーザが同一のチャネルを共有することが可能であり、周波数利用効率が高い通信システムである[1]。CDMA の中でも直接拡散符号分割多元接続 (DS/CDMA : Direct Sequence/CDMA) 方式の研究が盛んに行われているが、複数のユーザが同時に同一の周波数帯域を利用して通信を行うため、他のユーザの信号が干渉となり、システム容量を制限する要因となる。このような問題を多元接続干渉 (MAI : Multiple Access Interference) という[2]。MAI の大きさは各ユーザの信号電力と拡散符号間の相互相関値に影響される。

MAI の低減として、マルチユーザ検出 (MUD : Multiuser Detection) がある。ここで、MUD の性能を比較する指標の一つにグループ検出誤り率 (GDE : Group Detection Error) 率がある。MUD の中で最も小さい GDE 率をもつ最適 MUD として最尤検出器 (MLD : Maximum Likelihood Detector) がある[3]。しかし、ユーザ数が増えるごとに計算量が指数関数的に増えてしまうという問題がある。そこで、MLD より少ない計算量を持つ準最適 MUD の研究が行われている。

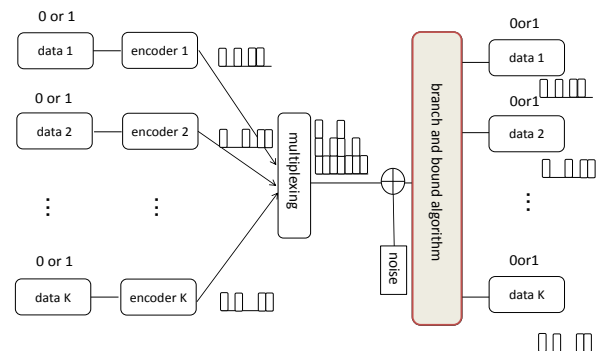


図 1 システムモデル

広く知られている準最適 MUD として最小平均 2 乗誤差 (MMSE : Minimum Mean-Square Error) に基づく検出器[4]、判定帰還型検出器 (DFE : Decision Feedback detector)[5]-[7] が挙げられる。MUD では、計算量と GDE 率の間にトレードオフの関係があり、文献[8]において、様々な MUD におけるこのトレードオフに関する比較が行われた。[8]では、分枝限定法に基づく検出器[9]を良いトレードオフを持つ準最適 MUD として注目されている。

これまでに分枝限定アルゴリズムを用いたマルチユーザ

[†] 鹿児島大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University

検出法の特長解析においては、ユーザ(拡散)符号としてランダム符号を仮定していた。本論文ではユーザ符号として実用的な符号の一つである M 系列を用いて、分枝限定アルゴリズムを用いたマルチユーザ検出法の特長を解析する。さらにランダム符号を用いた場合との比較、考察を行う。

2. システムモデル

本論文におけるシステムモデルを図 1 に示す。送信側は左側の K 人、受信側は右側の 1 つの基地局で構成される。K 人それぞれは 0 もしくは 1 のデータを拡散符号器に入力し、それぞれのデータを拡散する。図 1 では符号長 7 を例にしている。この時、0 のデータを送っていたならば符号器は何も出力せず、1 のデータが送っていたならば、ユーザ固有の符号で拡散する。その後多重化を行い、通信路で雑音が付加され、受信側で MUD を行う。全ユーザが同期している場合には、受信パターンは 2^K 通り考えられる。このときマルチユーザ検出器が最尤検出器の場合、検出器で 2^K 通りのパターンを全て照合し、合致したパターンから送信データを復号するため、検出のための計算量がユーザ数 K に対して指数関数的に増加してしまうという問題が生じる。ここではその問題を回避するため、最尤検出器に代わり、分割分枝限定アルゴリズムを採用した検出器を用いることで計算量を大幅に削減する手法をとる[10]。

図 2 に分枝限定法と分割分枝限定法の概要を示す。一例としてユーザ数を 4 として考える。最尤検出器の場合においては、16 通りの分岐のパターン全てにおいて受信パターンと合致するか否かをチェックするので、計算量が 2^4 となる。分枝限定法の場合においては、数パターンについて、その重み(重みが小さいほど尤度が高いことを意味する)を検査し、その中で最小の重みを閾値とする。次にその閾値をもとに深さ優先探索をする。あるノードにおいて、その重みが閾値よりも大きくなった場合には、深さ方向の探索はそこで打ち切り、幅方向の探索に切り替える。一方、葉ノードに到達したときに、その時点での重みが閾値より小さい場合には、その重みの値で閾値を更新する。全ての探索が終了し、最終的に最小の重みを与えるパターンが真の受信パターンとなる。つまり分枝限定法は通信路で雑音が生じなければ真の解を与えるアルゴリズムであり、大幅な計算量の削減は困難となっている。その一方、分割分枝限定法を用いることにより計算量を大幅に削減できることが知られている[10]。図 2 にあるように例えば 4 人のユーザ 1, 2, 3, 4 をユーザ 1 と 2 のグループとユーザ 3 と 4 のグループの 2 つのグループに分割した場合を考える。この場合、それぞれのグループの中で最適解を探索することとなり、計算量は 2^2+2^2 となり大幅に削減できていることがわかる。また、分割するグループ数を増やせば計算量が更に削減されることが分かる。更にそれぞれのグループの中で分枝限定法を用いることで、更なる計算量の削減が期

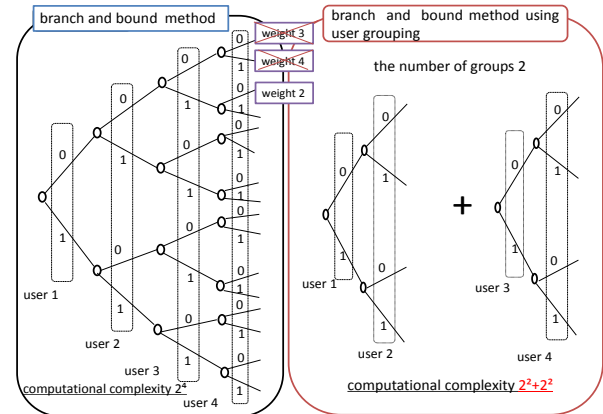


図 2 分枝限定法と分割分枝限定法の概要

待できる。分割分枝限定法は必ずしも最適解が得られるという訳ではない。これを補うために、それぞれのグループ内で複数の解候補を出すことにより、より最適解に近い解を得る工夫をしている。例えば図 2 におけるグループ数 2 の場合においては、左の枝群の暫定解が 2、右の枝群の暫定解が 1 であるとした場合、 $2 \times 1 = 2$ が全体の解候補数となり、この中から最終的な解を決定する。

分枝限定法の最大計算量(乗算と加算の和)は次式で与えられる[9]。

$$\begin{aligned} \text{乗算} &= \frac{K(K+3)}{2} + 3 \cdot 2^{K-1} - K - 2 \\ \text{加算} &= K(K+1) + 5 \cdot 2^K - \frac{(K+3)(K+4)}{2} \end{aligned} \quad (1)$$

(1)式より、ユーザ数 K の増加に伴い、指数関数的に計算量が増えることがわかる。これに対して、分割分枝限定法の最大計算量は次式で与えられる[10]。

$$\begin{aligned} \text{乗算} &= \frac{K(K+3)}{2} + K(K-1) + \sum_{m=1}^M (3 \cdot 2^{N_m-1} - N_m - 2) \\ &\quad + \sum_{m=1}^M N_m \cdot P^m \\ \text{加算} &= K(K+1) + K(K-1) + \sum_{m=1}^M \left(5 \cdot 2^{N_m} - \frac{(N_m+3)(N_m+4)}{2} \right) \\ &\quad + \sum_{m=1}^M N_m \cdot P^m \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、M はグループ数、 N_m は各グループのユーザ数、P は解候補数である。(2)式により、計算量が削減できることがわかる。例えば N_m が大きい場合には計算量は約 $M \cdot 2^{N_m}$ に比例する。

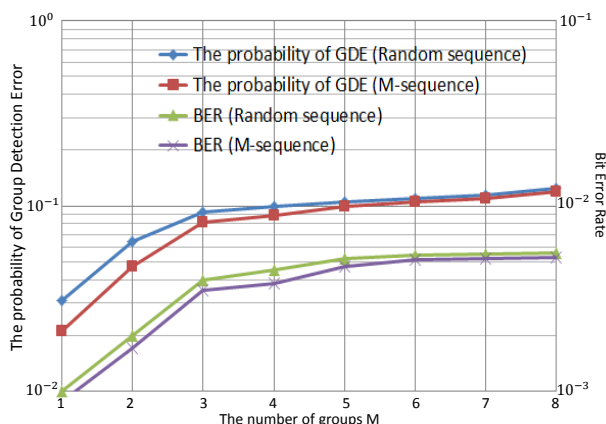


図 3 グループ数 M に対してランダム符号を用いた場合と M 系列符号を用いた場合の GDE 率及び BER の比較

3. シミュレーション

計算機シミュレーションにより、ユーザ符号としてランダム符号を用いた場合と M 系列を用いた場合の GDE 率またはビット誤り率(BER)を比較する。GDE 率は全ユーザの中で一人以上のユーザの受信データの判定を誤る確率である。シミュレーションで用いたパラメータは次の通りである。ユーザ数 15, 符号長 15, 試行回数 1000 回。送信データの 0, 1 はそれぞれ確率 1/2 でランダムに割り当て、各ユーザから信号の受信電力は全て等しいとする。

図 3 に SNR = 10 dB, 解候補数 $P = 1$ のときにグループ数 M に対してランダム符号を用いた場合と M 系列符号を用いた場合の GDE 率及び BER を示す。グループ数 M の増加に伴い、ランダム符号及び M 系列符号を用いた場合の GDE 率及び BER は増加していくことが分かり、ランダム符号よりも M 系列符号を用いた方が GDE 率及び BER が低減していることが分かる。 M の増加に伴い GDE 率及び BER が劣化する要因としては、 M の増加は多くのユーザの受信データの解の探索枝を細切れにすることを意味し、結果的に最適解に近い解を得る確率が低くなるためだと考えられる。ランダム符号よりも M 系列符号を用いた方が、特性が改善する理由は、ランダム符号よりも M 系列符号の方が符号間の相互相関値が低いためであると考えられる。

図 4 に SNR = 10 dB における解候補数 P に対してランダム符号を用いた場合と M 系列を用いた場合の GDE 率を示す。解候補数 P の増加に伴い、それぞれの GDE 率は低下してゆくことがわかる。解候補数 P の増加に伴い、それぞれの GDE 率が低減する理由は、 P が大きい場合、最適解により近い解が得られる確率が高くなるからであると考えられる。

図 5 に SNR に対してランダム符号を用いた場合と M 系列符号を用いた場合の GDE 率を示す。分割分枝限定法の

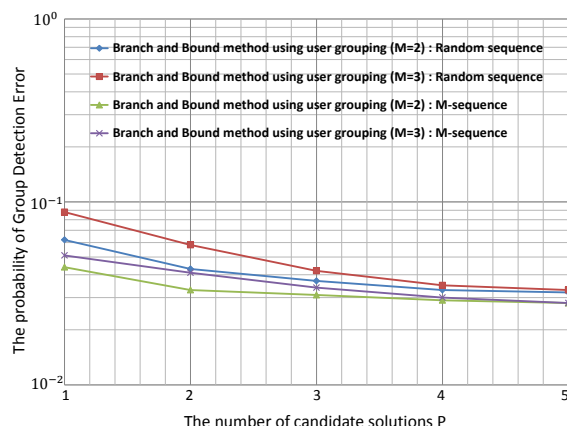


図 4 解候補数 P に対してランダム符号を用いた場合と M 系列符号を用いた場合の GDE 率の比較

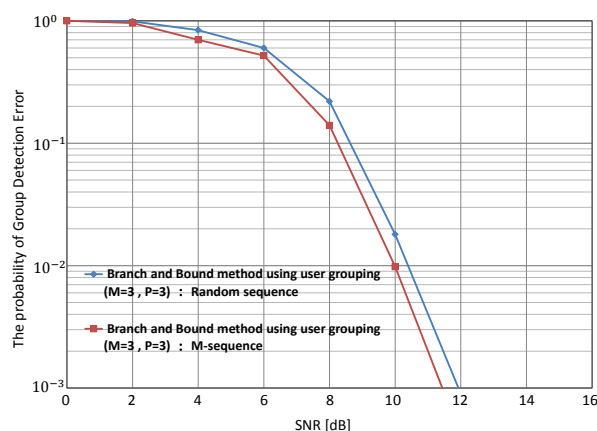


図 5 SNR に対してランダム符号を用いた場合と M 系列符号を用いた場合の GDE 率の比較

もとではランダム符号より M 系列を用いた方が雑音に対してロバストであることがわかる。

4. むすび

本論文では MUD として分割分枝限定法を用いた CDMA システムにおいて、ユーザ符号としてランダム符号を用いた場合と M 系列符号を用いた場合の GDE 率または BER を比較し、考察した。計算機実験の結果から GDE 率及び BER はランダム符号よりも M 系列を用いた方が改善することを示した。また GDE 率の低減のためには SNR の値に関わらず、ランダム符号よりも M 系列符号が有効であることを明らかにした。

参考文献

- [1] 丸林元, 中川正雄, 河野隆二: スペクトル拡散通信とその応用, 電子情報通信学会, pp.1-17 (1998).
- [2] S. Moshavi, : Multi-user detection for DS-CDMA communications, IEE Commun. Mag., vol.34, no.10,

pp.124-136 (1996).

[3] R. Lupas and S. Verdu, : Linear multiuser detectors for synchronous code-division multiple-access channels, IEEE Trans. Inform. Theory, vol.35, no.1, pp.123-136 (1991).

[4] Z. Xie, R. Short, and C. Rushforth, : A family of suboptimum detectors for coherent multiuser communications, IEEE Trans. Commun., vol.8, pp.89-91 (1990).

[5] A. Duel-Hallen, : Decorrelatin decision-feedback multiuser detector for synchronous code-division multiple-access channel, IEEE Trans. Commun., vol.41, pp.285-290 (1993).

[6] A. Duel-Hallen, : A family of multiuser decision-feedback detectors for asynchronous code-division multiple-access channels, EE Trans. Commun., vol.43, pp.421-432 (1995).

[7] M. K. Varanasi, : Decision feedback multiuser detection: a systematic approach, IEEE Trans. Inform. Theory, vol.45, p.219-240 (2004).

[8] F. Hasegawa, J. Luo, K. Pattipati, P. Willett, and D. Pham, : Speed and accuracy comparison of techniques for multiuser detection in synchronous CDMA, IEEE Trans. Commun., vol.52, no.4, pp.540-545 (2004).

[9] J. Luo, K. Pattipati, P. Willett, and G. M. Levchuk, : Fast Optimal and suboptimal any-time algorithms for CDMA multiuser detection based on branch and bound, IEEE Trans. Commun., vol.52, no.4, pp.632-642 (2004).

[10] 高野友佑, 関屋大雄, 呂建明, 谷萩隆嗣, : 同期 CDMA マルチユーザ受信方式における分割 BBD 法, 電子情報通信学会論文誌, vol.J90-A, no.4, pp.305-314 (2007).