

# 過負荷 MIMO 無線通信システムのための線形受信機の研究

田野 哲                      岡山大学 学術研究院 自然科学学域  
侯 亜飛                      岡山大学 学術研究院 自然科学学域

## 1 概要

無線通信の高速化への要求は止まることを知らない。実際、第六世代セルラー通信システムには第五世代の数倍以上の高速通信が期待されている。そこで、本研究では過負荷 MIMO (Multiple Input Multiple Output) による高速化を狙う。特に、地球規模で消費電力の低減が叫ばれる中、演算量の少ない線形受信機による過負荷 MIMO 通信の可能性を探る。そして、従来法に比較して 3～4 倍の高速通信の達成を目指す。

## 2 過負荷 MIMO のための線形受信機

第五世代セルラー通信システムや無線 LAN (Local Area Network) の IEEE 802.11ax 等では高速通信を行う場合に発生するマルチパスフェージング対策として OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) が適用され、高速通信のため MIMO 空間多重が適用されている[1-4]。所謂、MIMO-OFDM が適用されている[5-7]。本研究ではこれらのシステムの更なる高速化を目指して、MIMO-OFDM への過負荷 MIMO の適用を検討する。過負荷 MIMO システムでは線形受信機の適用が困難という理由で、非線形受信機が主に検討されてきた[8-13]。但し、一般に非線形受信機は線形受信機に比較して演算量が多く、特に変調多値数や MIMO 空間多重数の増大に伴い指数関数的に演算量が増大するという問題がある。

そこで、本研究では線形受信機による過負荷 MIMO の可能性を追求する。従来は QPSK 等の比較的多値数の小さな変調方式を前提として検討が行われてきたが、本研究では高速化のため多値 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) の適用を前提とする。

### 2-1 繰り返し線形受信機

従来より基底格子縮小を線形受信機に適用することで特性が改善することが知られていたため[14]、本研究は基底格子縮小の一実現法である LLL(Lenstra- Lenstra-Lovasz)アルゴリズムを適用する[15]。我々が従来見出していた、過負荷 MIMO システムのための線形繰返し受信機[16] に LLL アルゴリズムを適用した。64QAM[17]を適用した MIMO-OFDM システムにおいて、2 倍程度の過負荷率、即ち通常の 2 倍程度の高速通信を行なっても、信号対雑音電力比が十分であれば通信が可能になることを明らかにした。本研究では、さらに繰り返し復号を行うことで、6 dB 以上の通信品質の改善が可能になることも明らかにした。その構成を図 1 に示す。

原理的に、入力信号に含まれる雑音がランダムであれば誤り訂正は最大の特性を発揮する。繰返し受信では、誤り訂正の特性が改善すると、線形信号検出の特性も改善する。したがって、誤り訂正入力信号における誤り分布のランダム化は受信機の特性改善に有効である。そこで、ランダム化を達成するために下記の検討を行った。

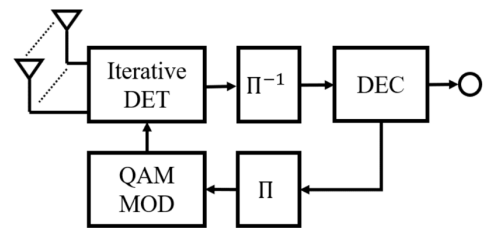


図 1 繰返し線形受信機の構成

### (1) デマッピング法

LLL アルゴリズムを適用した線形受信機では信号検出器出力信号に対して硬判定処理を行うが、多値変調を適用した場合、硬判定できない外れ値を信号検出器が出力することがある。外れ値は明らかに誤り信号である。従って、外れ値をどのように用いたとしても通信特性は劣化しない。そこで、この外れ値を利用して誤り分布のランダム化を狙う。実際、本研究では、下記の 4 つの方法を提案する。

- A) ハードデマッピング：最尤推定に基づき、外れ値の最近傍にある変調信号を硬判定
- B) 折返しデマッピング：最近傍の変調信号を中心に外れ値と対称な位置の変調信号を硬判定
- C) モジュロデマッピング：外れ値にモジュロ処理を行った後に硬判定

D)ランダムデマッピング：外れ値がでれば、ランダムに変調信号を選び硬判定□□□□□□□□

上記のデマッピング法による伝送特性への影響を図2に示す。同図ではLLLアルゴリズムを適用した過負荷MIMOのための逐次干渉除去を用いた信号検出器、符号化率1/2、拘束長3の畳み込み符号を用いている。同図に示すように、過負荷率は300%である。縦軸は平均ビット誤り率、横軸は $E_b/N_0$ を表している。ランダムデマッピングとモジュロデマッピングが折り返しやハードデマッピングよりも優れた伝送特性を達成していることがわかる。特に、ランダムデマッピングはハードデマッピングと比較して $PER=10^{-2}$ 点において、折り返しやピンギングより約1dB優れた特性を達成している。上記4つのデマッピング法は受信機の演算量を殆ど増大させないため、優れた特性改善方式であると言える。中でも、モジュロデマッピングはランダムデマッピングよりも僅かに低演算量で実装できるため、モジュロデマッピングが最も優れたランダム化の方法であることが明らかとなった。

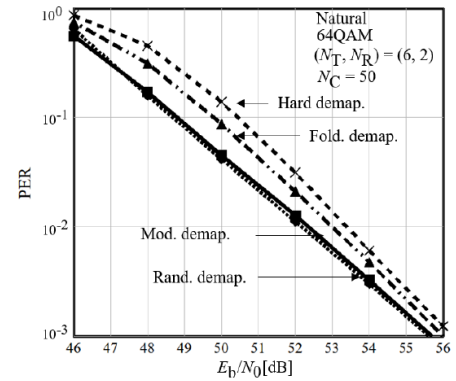


図2 デマッピング法の特性

### (2) 周期的パス切替法

LLLアルゴリズムはヒューリスティックな方法で且つ、基底格子縮小の完成度を制御するパラメータがある。パラメータを変更すれば、誤りビットの分布も変化する。そこで、本研究課題では複数の信号処理パスを用意し、それ毎に異なったパラメータセットを設定し、このパスを周期的に切り替える周期的パス切替法を提案した。この提案法により、周期的パス切替によっても誤りビット相関を低減でき、伝送特性の改善が可能になることを見出した。図3に周期的パス切替法による伝送特性改善効果を示す。同図における受信機、変調方式、符号化率、過負荷率も図2と同じである。同図からわかるように周期的パス切替により $PER=10^{-2}$ 点において1dB弱の特性改善が達成された。

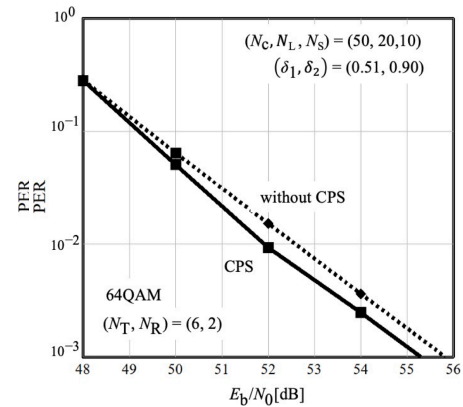


図3 周期的パス切替法

### 2-2 過負荷非線形プリコーディング

非線形過負荷受信機は変調方式が多値化されたり、空間多重数の増加と共に演算量が指数関数的に増大する。これに対して非線形プリコーディングは、若干の非線形処理を伴うもののほぼ線形プリコーディングと同様の演算量で実現できる。実際、空間多重数の増加や変調方式の多値化に伴う演算量増大は、線形受信機と非線形受信機で大差ない。一方、非線形プリコーディングは線形プリコーディングより優れた特性を発揮する。そこで、非線形プリコーディングを適用することで、線形受信機の更なる演算量低減を図った。図4に提案法の特性を示す。同図では受信機のアンテナ数の3倍の信号が受信される過負荷受信をした場合の特性である。一方、受信機は単なるユニタリー変換フィルタにより構成されているが、図に示す高い伝送特性を達成している。

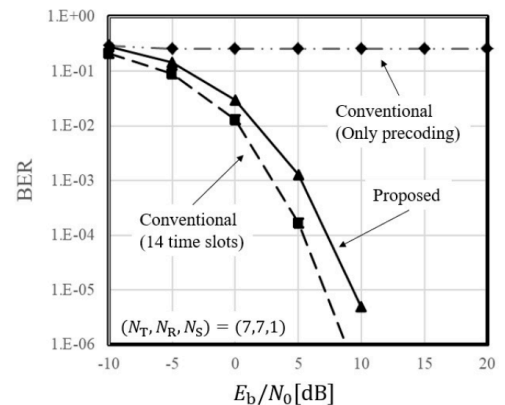


図4 提案過負荷プリコーディング

## 3 まとめ

本報告では空間多重数の増大を可能とする過負荷MIMOシステムのための線形受信機の構成法を提案した。提案法は低演算量ながら、通信速度を従来の3倍にまで高速にしても高い伝送特性を達成できることを示した。

## 【参考文献】

- [1] I.E. Telatar, “Capacity of multi-antenna Gaussian channels,” *Eur. Trans. Telecommun.*, vol.10, no.6, pp.585–595, 1999.
- [2] E.G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T.L. Marzetta, “Massive MIMO for next generation wireless systems,” *IEEE Commun. Mag.*, vol.52, no.2, pp.186–195, Feb. 2014.
- [3] S. Yang and L. Hanzo, “Fifty years of MIMO detection: The road to large-scale MIMOs,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol.17, no.4, pp.1941–1988, Fourthquarter 2015.
- [4] M. Sakai, K. Kamohara, H. Iura, H. Nishimoto, K. Ishioka, Y. Murata, M. Yamamoto, A. Okazaki, N. Nonaka, S. Suyama, J. Mashino, A. Okamura, and Y. Okumura, “Experimental field trials on MU-MIMO transmissions for high SHF wide-band massive MIMO in 5G,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.19, no.4, pp.2196–2207, April 2020.
- [5] W. Fukuda, T. Abiko, T. Nishimura, T. Ohgane, Y. Ogawa, Y. Ohwatari, and Y. Kishiyama, “Low-complexity detection based on belief propagation in a massive MIMO system,” *IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2013.
- [6] T. Takahashi, S. Ibi, and S. Sampei, “On normalization of matched filter belief in GaBP for large MIMO detection,” *IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, 2016.
- [7] I. Shubhi and Y. Sanada, “Joint turbo decoding for overloaded MIMO-OFDM systems,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.66, no.1, pp.433–442, Jan. 2017.
- [8] Y. Sanada, “Performance of joint maximum-likelihood decoding for block coded signal streams in overloaded MIMO-OFDM system,” *International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, Nov. 2013,
- [9] S. Yoshikawa, S. Denno, and M. Morikura, “Complexity reduced lattice-reduction-aided MIMO receiver with virtual channel detection,” *IEICE Trans. Commun.*, vol.E96-B, no.1, pp.263–270, Jan. 2013.
- [10] R. Hayakawa, K. Hayashi, and M. Kaneko, “Lattice reduction-aided detection for overloaded MIMO using slab decoding,” *IEICE Trans. Commun.*, vol.E99-B, no.8, pp.1697–1705, Jan. 2016.
- [11] R. Hayakawa and K. Hayashi, “Convex optimization-based signal detection for massive overloaded MIMO systems,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 11, pp. 7080–7091, 2017.
- [12] R. Hayakawa and K. Hayashi, “Convex optimization-based signal detection for massive overloaded MIMO systems,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.16, no.11, pp.7080–7091, Nov. 2017.
- [13] T. Imamura and Y. Sanada, “Low complexity overloaded MIMO detection based on belief propagation with MMSE pre-cancellation,” *IEICE Trans. Commun.*, vol. E104-B, no. 3, pp. 312–319, March 2021.
- [14] X. Ma and W. Zhang, “Performance analysis for MIMO systems with lattice-reduction aided linear equalization,” *IEEE Trans. Commun.*, vol.56, no.2, pp.309–318, Feb. 2008.
- [15] A. K. Lenstra, H.W. Lenstra, Jr., and L. Lovas, “Factoring polynomials with rational coefficients,” *Math. Ann.*, vol.261, no.4, pp.515–534, 1982.
- [16] S. Denno, Y. Kawaguchi, T. Inoue, and Y. Hou, “A novel low complexity lattice reduction-aided iterative receiver for overloaded MIMO,” *IEICE Trans. Commun.*, vol. E102-B, no. 5, pp. 1045–1054, May 2019.
- [17] J.G. Proakis and M. Salehi, *Digital Communications*, 5th ed., McGraw-Hill, 2008.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Cyclic Path Switching for Lattice Reduction-aided Iterative Linear Receivers in Overloaded MIMO Systems	IEICE Communication Express	2021年10月1日
Out-of-Bound Signal Demapping for Lattice Reduction-aided Iterative Linear Receivers in Overloaded MIMO Systems	IEICE Transaction Communications.	2021年8月1日
Multi-Input Physical Layer Network Coding In Wireless Two-Way Relay Networks	Proceedings of the IEEE VTS APWCS 2021	2021年8月