

# MIMO チャンネルのヌル空間を活用した適応 PAPR 抑圧法を適用した B-5 マルチユーザ MIMO-OFDM 伝送におけるユーザ群選択法の一検討

Investigation on User Group Selection Method in Multiuser MIMO-OFDM Transmission with Adaptive PAPR Reduction Method Using Null Space in MIMO Channel

岑 俊成  
Shyunsei Shin

樋口 健一  
Kenichi Higuchi

東京理科大学 理工学部 電気電子情報工学科  
Department of Electrical Engineering, Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science

## 1. まえがき

筆者らが先に報告したマルチユーザ MIMO-OFDM 伝送における MIMO チャンネルのヌル空間を活用したピーク対平均電力比(PAPR)抑圧法[1, 2]の特性は、用いられるビームフォーミング(BF)行列で決定される送信共分散行列に依存しうることが文献[3]で示されている。そこで、本適応 PAPR 抑圧法を用いたマルチユーザ MIMO-OFDM 伝送において、送信共分散行列の特性を考慮して PAPR 抑圧処理後のスループット対 PAPR 特性が良好な宛先ユーザ群を効率よく選択する方法を提案する。

## 2. MIMO チャンネルのヌル空間を活用した適応 PAPR 抑圧法

MIMO チャンネルのヌル空間を活用した適応 PAPR 抑圧法[1, 2]の原理を説明する。本稿では、簡単のためチャンネルの周波数選択性は考えない。基地局の送信アンテナ数を  $N$  とし、それぞれ 1 受信アンテナを有する  $K$  ユーザに空間多重伝送を行うマルチユーザ MIMO を想定する。ただし、 $N > K$  と仮定する。

BF 後の各送信アンテナ端の送信信号に対して PAPR 抑圧信号を直接加算することにより生じるデータストリーム内の干渉がスループットに影響を与えないようにするのが本適応 PAPR 抑圧法の特徴である。大きさが  $K \times N$  のチャンネル行列  $\mathbf{H}$  のヌル空間に相当する大きさが  $N \times (N-K)$  の行列を  $\mathbf{B}_{\text{null}}$  とする(つまり  $\mathbf{B}_{\text{null}}$  は  $\mathbf{H}\mathbf{B}_{\text{null}} = \mathbf{0}$  を満たす)。  $K$  個のデータストリームに対する BF ベクトルを並べた大きさが  $N \times K$  の BF 行列を  $\mathbf{B}_{\text{data}}$  とし、  $\mathbf{B} = [\mathbf{B}_{\text{data}} \ \mathbf{B}_{\text{null}}]$  と定義する。このとき、長さ  $K$  の BF 前の送信データ信号ベクトルを  $\mathbf{x}_{\text{data}}$  とすると、BF 後に PAPR 抑圧信号が加算された長さ  $N$  の送信信号ベクトルは  $\mathbf{B}_{\text{data}}\mathbf{x}_{\text{data}} + \Delta$  と表せる。  $\Delta$  は PAPR 抑圧信号ベクトルであり、データストリーム内の干渉を意味する。適応 PAPR 抑圧法では、等価的に BF 前の送信データ信号ベクトル  $\mathbf{x}_{\text{data}}$  に加わる干渉成分  $\mathbf{e}_{\text{data}}$  が次式のように極力小さくなるよう干渉制限制御する。

$$\mathbf{B}^{-1}(\mathbf{B}_{\text{data}}\mathbf{x}_{\text{data}} + \Delta) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{\text{data}} + (\mathbf{e}_{\text{data}} \approx \mathbf{0}) \\ \mathbf{e}_{\text{null}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$\mathbf{e}_{\text{null}}$  は PAPR 抑圧処理後、チャンネルのヌル空間に放出され  $K$  ユーザ受信には現れないため、スループットの劣化を抑えられる。

文献[3]では、 $\mathbf{B}_{\text{data}}$  で決まる送信共分散行列  $\Sigma_{\text{tx}} = \mathbf{B}_{\text{data}}\mathbf{B}_{\text{data}}^H$  がなるべく単位行列のスカラー倍に近いときに本適応 PAPR 抑圧法の特性が良好となりうることが示されている。

## 3. 提案するユーザ群選択法

2章で述べた適応 PAPR 抑圧法を用いたマルチユーザ MIMO-OFDM 伝送において、空間多重する  $K$  ユーザを候補となる  $L$  ユーザ( $L > K$ )の中から選択することを考える。候補となるユーザ群の総数は  $C(L, K) = L!/K!(L-K)!$  となる。全候補ユーザ群に対してそれぞれ適応 PAPR 抑圧法を適用した後のスループットと PAPR を測定し最良の結果を得るユーザ群を選ぶのが最適だが、 $C(L, K)$  が大きいとき必要な計算量が膨大となる。

そこで、文献[3]での考察に従って送信共分散行列  $\Sigma_{\text{tx}}$  の特徴量に基づいて候補となるユーザ群を予備選択するユーザ群選択法を提案する。提案法では  $\Sigma_{\text{tx}}$  の対角項に着目し、そのばらつき(分散)がなるべく小さいユーザ群を予備選択する。なぜなら、 $\Sigma_{\text{tx}}$  の対角項は各送信アンテナでの平均送信電力を表すため、このばらつきを抑えることにより OFDM シンボル毎のピーク信号電力と全送信アンテナの平均信号電力との比で定義される PAPR 値をあらかじめ小さな値に抑えられ、後続する適応 PAPR 抑圧法が有効に作用すると期待できるからである。

ユーザ群  $i$  ( $i = 1, \dots, C(L, K)$ ) に対して求まる BF 行列を  $\mathbf{B}_{\text{data}, i}$  とし、このときの送信共分散行列を  $\Sigma_{\text{tx}, i} = \mathbf{B}_{\text{data}, i}\mathbf{B}_{\text{data}, i}^H$  とする。提案法では、まず  $\Sigma_{\text{tx}, i}$  の対角項の分散  $V_i$  を次式で求める。

$$V_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left( \{\Sigma_{\text{tx}, i}\}_{nn} - \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \{\Sigma_{\text{tx}, i}\}_{mm} \right)^2 \quad (2)$$

ここで  $\{\Sigma_{\text{tx}, i}\}_{nn}$  は  $\Sigma_{\text{tx}, i}$  の第  $(n, n)$  要素、つまり第  $n$  対角項を示す。提案法では、 $C(L, K)$  種類の全候補ユーザ群  $i$  それぞれに対し

て  $V_i$  を求める。次に、求めた  $V_i$  が小さい順に  $Q$  個 ( $1 \leq Q \leq C(L, K)$ ) の候補ユーザ群を予備選択する。最後に、予備選択した  $Q$  個の候補ユーザ群それぞれの送信信号に対して、実際に適応 PAPR 抑圧法を適用し、PAPR 抑圧処理後のスループットと PAPR 値を求め、最良の結果を得るユーザ群を 1 つ最終選択し実際のデータ伝送を行う。ここで、基本的にトレードオフの関係にあるスループットと PAPR 値の最良を求める規範を求めるのは一般に難しい。本稿では、簡易的な判断法の一つとして PAPR 値は無視してスループット値が最大となるユーザ群を選ぶものとした。

提案法では、 $Q$  値を小さくするほど、後段の適応 PAPR 抑圧法による PAPR 抑圧処理の計算量を低減できるが、 $Q$  値を小さくしすぎると、送信共分散行列の対角成分のばらつきに基づく予備選択の誤差の影響が大きくなる。

## 4. シミュレーション評価

$N = 8, L = 8, K = 4$  とした ( $C(L, K) = 70$ )。OFDM サブキャリア数は 512 とした。各サブキャリアの信号点は独立な標準複素ガウス分布に従って定めた。アンテナ間相関が 0 のフラットレイリーフェージングを模擬した。SNR は 20 dB で全ユーザ共通とした。ゼロフォーミング規範の BF を用いた。適応 PAPR 抑圧法の繰り返し数は 20 とした。

図 1 に平均 PAPR に対する平均スループットを示す。適応 PAPR 抑圧法におけるピーク電力しきい値を変化させることにより PAPR 値とスループットの関係を変化させた。提案法は  $Q = 1, 10, 35, 70$  の場合を評価した(図 1 では  $Q = 35$  と 70 の結果はほぼ一致して重なって表示されている)。比較のための従来法として、PAPR 抑圧前のスループットの最大値を得るユーザ群を選択する場合も評価した。従来法のユーザ選択法と比較すると、提案法は PAPR 抑圧処理の影響をユーザ選択で考慮するか否かの影響が結果の特性に強く表れる低 PAPR 領域において同一の PAPR 値に対するスループットを増大している。

提案法における  $Q$  値の影響を見ると、 $Q = 1$  のときの特性は劣化が大きい。この場合、ユーザ群選択は完全に送信共分散行列の対角項の分散に基づくことになり、実際の PAPR 抑圧処理の特性を完全に予測しきれないためである。しかし、送信共分散行列の対角項の分散に基づく予備選択誤差の影響は  $Q$  を 10 程度に増大すれば顕著に改善し、 $Q = 35$  の場合はユーザ群選択を予備選択無しに完全に実際の PAPR 抑圧処理結果に基づいて行った場合に相当する  $Q = 70$  の結果とほぼ一致している。

## 5. まとめ

提案法により、得られるスループット対 PAPR 特性の劣化を抑えつつ計算量を削減したユーザ群選択を行うことができた。

## 参考文献

[1] Y. Sato, et al., IEICE Trans. Commun., vol. E96-B, no. 9, pp. 2270-2280, Sept. 2013. [2] R. Kimura, et al., in Proc. IEEE VTC2011-Spring, Budapest, Hungary, 15-18 May 2011. [3] 樋口, 信学技報 RCS2018-172, pp. 115-120, Oct. 2018.

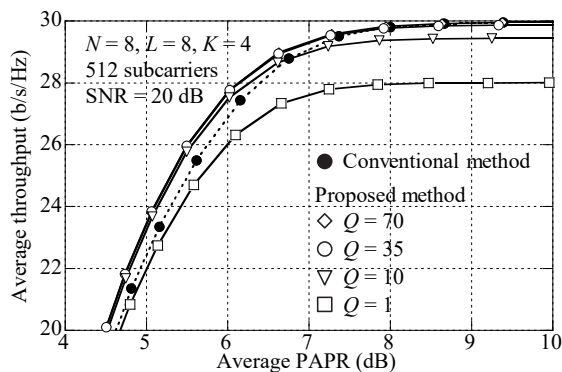


図 1. 平均 PAPR に対する平均スループット