

B-5 マルチユーザ MIMO-OFDM 伝送におけるホタルアルゴリズムを用いた ビームフォーミングとチャネルのヌル空間を用いた適応 PAPR 抑圧法

Combination of Beamforming Using Firefly Algorithm and Adaptive PAPR Reduction Method Using Null Space in MIMO Channel for Multiuser MIMO-OFDM Transmission

鈴木 幹人
Mikihito Suzuki

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

ビームフォーミング(BF)を用いたマルチユーザ MIMO と OFDM 伝送の組み合わせは、高いチャネル容量を広いカバレレッジで実現できるものの、高いピーク電力対平均電力比(PAPR)の抑圧が課題となる。チャネル容量と PAPR の双方を改善するには、互いに関係する BF 制御と PAPR 抑圧の両方を考慮する必要がある。本稿では、ホタルアルゴリズム(FA) [1]を用いた BF 制御[2]と MIMO チャネルのヌル空間を活用した適応 PAPR 抑圧法[3]を組み合わせる方法を提案する。

2. アンテナ間電力配分を考慮した FA を用いた BF 制御

基地局の送信アンテナ数を N 、1 受信アンテナを有するユーザ数を K とし、 $N > K$ とする。FA を用いた BF 制御[2]では、 F 個のホタルを用意し、各ホタルの位置を BF 行列に見立て、チャネル容量を増大するように BF 行列を更新する。ホタル f の位置となる大きさが $N \times K$ の BF 行列を $\mathbf{B}_{f,\text{data}}$ とする。 $\mathbf{B}_{f,\text{data}} = [\mathbf{b}_{1,f} \dots \mathbf{b}_{K,f}]$ であり、長さ N のベクトル $\mathbf{b}_{k,f}$ はユーザ k 宛信号の BF ベクトルに相当する。 $\mathbf{B}_{f,\text{data}}$ を用いたときに得られるチャネル容量を $C(\mathbf{B}_{f,\text{data}})$ とする。FA に基づきホタル f の $\mathbf{B}_{f,\text{data}}$ は、 $C(\mathbf{B}_{g,\text{data}}) > C(\mathbf{B}_{f,\text{data}})$ となるホタル g に対して、次式に基づき更新する。

$$\mathbf{B}_{f,\text{data}}^{\text{new}} = \mathbf{B}_{f,\text{data}} + [e^{-\gamma r_{k,f,g}} (\mathbf{b}_{1,g} - \mathbf{b}_{1,f}) + \alpha \mathbf{w}_1 \dots e^{-\gamma r_{K,g}} (\mathbf{b}_{K,g} - \mathbf{b}_{K,f}) + \alpha \mathbf{w}_K] \quad (1)$$

ここで、 $r_{k,f,g}$ は $\mathbf{b}_{k,f}$ と $\mathbf{b}_{k,g}$ 間の距離 $\|\mathbf{b}_{k,g} - \mathbf{b}_{k,f}\|$ である。 γ ($\gamma > 0$) はホタル f が自身よりチャネル容量の大きいホタル g に引き寄せられて移動する強さを制御するパラメータであり、 γ を大きく設定するほどホタル g に引き寄せられて移動する強さは両者間の距離 $r_{k,f,g}$ が大きいときに抑圧される。 $\alpha \mathbf{w}_k$ はホタルのランダムな移動要素を与える項であり、本稿では \mathbf{w}_k の各要素は独立で平均が 0 で分散が 1 のガウス分布に従うものとした。

さらに、PAPR 抑圧の観点から送信アンテナ間の送信電力のばらつきを抑えるため、提案法では各 $\mathbf{B}_{f,\text{data}}$ に以下の拘束条件を設ける。

$$P_n(\mathbf{B}_{f,\text{data}}) \leq P_{\text{ant}} / N, n=1, \dots, N, \sum_{n=1}^N P_n(\mathbf{B}_{f,\text{data}}) \leq 1 \quad (2)$$

ここで、 $P_n(\mathbf{B}_{f,\text{data}})$ は $\mathbf{B}_{f,\text{data}}$ を用いたときの送信アンテナ n の送信電力である(総送信電力は最大 1)。 P_{ant} ($P_{\text{ant}} \geq 1$) は送信アンテナ間の送信電力のばらつきを制御するパラメータであり、 P_{ant} を 1 に近づけるほど、アンテナ間の送信電力のばらつきが小さくなるよう BF 行列の制御が拘束されるため、BF 単体でのチャネル容量は劣化するが、後続の PAPR 抑圧で生じる干渉電力を低減できるので、PAPR 抑圧後のチャネル容量を増大できると期待される。式(2)の拘束条件のもと式(1)に基づいて各ホタル f の $\mathbf{B}_{f,\text{data}}$ の更新を繰り返し、最終的に最もチャネル容量の大きな $\mathbf{B}_{f,\text{data}}$ が伝送に用いられる。実際の伝送に用いられる BF 行列を \mathbf{B}_{data} と表記する。

3. MIMO チャネルのヌル空間を用いた適応 PAPR 抑圧法

BF 後の各送信アンテナ端の送信信号に対して PAPR を抑圧するためにクリッピング・フィルタリング(CF)処理[4]を行うと、伝送帯域内に干渉が生じる。この干渉をなるべく K 個のデータストリームの伝送に影響を与えないようにするのが、MIMO チャネルのヌル空間を用いた適応 PAPR 抑圧法[3]である。

N 送信アンテナと K ユーザのチャネル行列を大きさが $K \times N$ の \mathbf{H} とする。 \mathbf{H} と直交する $N-K$ 本の長さ N のベクトルを $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_{N-K}$ とする ($\mathbf{H}\mathbf{v}_i = \mathbf{0}$) と、 $\mathbf{B}_{\text{null}} = [\mathbf{v}_1 \dots \mathbf{v}_{N-K}]$ は MIMO チャネル \mathbf{H} のヌル空間に相当する。 \mathbf{B}_{null} を含めた大きさが $N \times N$ の BF 行列を $\mathbf{B} = [\mathbf{B}_{\text{data}} \mathbf{B}_{\text{null}}]$ とし、長さ K の BF 前の送信信号ベクトルを \mathbf{x}_{data} とすると、BF 後に CF を適用した長さ N の送信信号ベクトルは $\mathbf{B}_{\text{data}}\mathbf{x}_{\text{data}} + \Delta$ と表せる。 Δ は CF 処理で加わった干渉成分である。これは、等価的に送信ストリームベクトル \mathbf{x}_{data} が

$$\mathbf{B}^{-1}(\mathbf{B}_{\text{data}}\mathbf{x}_{\text{data}} + \Delta) = \mathbf{B}^{-1} \left(\mathbf{B} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{\text{data}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \Delta \right) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{\text{data}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \mathbf{B}^{-1}\Delta = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{\text{data}} + \mathbf{e}_{\text{data}} \\ \mathbf{e}_{\text{null}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

に変化することを意味する。 \mathbf{e}_{data} は実効データストリーム \mathbf{x}_{data} に与える干渉であり、チャネル容量の劣化を引き起こす。チャネルのヌル空間を用いた適応 PAPR 抑圧法では、CF 処理と干渉制限処理を繰り返すことにより、 \mathbf{e}_{data} なるべく小さくなるようにすなわち、

$$\mathbf{B}^{-1}(\mathbf{B}_{\text{data}}\mathbf{x}_{\text{data}} + \Delta) \approx \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{\text{data}} \\ \mathbf{e}_{\text{null}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

となるように制御する。このとき、 \mathbf{e}_{null} は PAPR 抑圧の役目を果たした後、チャネルのヌル空間に放出されるので K ユーザ受信には現れないため、チャネル容量の劣化を抑えることができる。

4. シミュレーション評価

$N=8$ 、 $K=4$ とした。OFDM の総サブキャリア数は 512 とした。各サブキャリアの信号のコンスタレーションは独立な標準複素ガウス分布に従って定めた。レイリーフェージングを模擬し、送受信アンテナ間のフェージング相関は 0 とした。SNR は 10 dB で全ユーザ共通とした。PAPR 値は 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として定義した。比較のため、BF にゼロフォーミング(ZF)法を用いた場合も評価した。FA を用いる提案法では、 $F=100$ 、 $\gamma=1.738$ 、 $\alpha=4.3 \times 10^{-5}$ 、繰り返し数は 100 とした。 P_{ant} は 1.25 の場合と ∞ の場合を評価した。適応 PAPR 抑圧法の繰り返し数は 20 とした。

図 1 に平均 PAPR に対する平均チャネル容量を示す。CF 処理でのクリッピングしきい値を変化させることにより PAPR 値とチャネル容量の関係を変化させた。ZF を用いた場合に比較して FA に基づく BF 制御が同一の PAPR 値に対するチャネル容量を増大させていることがわかる。これは FA により K ユーザ間干渉の抑圧と電力利得の双方を総合的に考慮した BF 行列が生成できたためである。FA 法において、 P_{ant} を 1.25 に制限すると、 ∞ の場合に比較して所要 PAPR 値が大きい場合はチャネル容量が劣化するが、所要 PAPR 値が小さい場合はアンテナ間の送信電力のばらつきを抑えて PAPR 抑圧で生じる干渉量を低減できるためチャネル容量を増大できた。

5. まとめ

適応 PAPR 抑圧法に FA を用いた BF 制御を組み合わせることにより、マルチユーザ MIMO-OFDM 伝送における PAPR 対チャネル容量特性を改善できた。

参考文献

- [1] X-S. Yang, Fundamentals and Applications, Lecture Notes in Computer Sciences, vol. 5792, pp. 169-178, Springer, Berlin, 2009. [2] T. yamanaka, et al., in Proc. APCC2017, Perth, Australia, 11-13 Dec. 2017. [3] Y. Sato, et al., IEICE Trans. Commun., vol. E96-B, no. 9, pp. 2270-2280, Sept. 2013. [4] X. Li, et al., IEEE Commun. Lett., vol. 2, no. 5, pp. 131-133, May 1998.

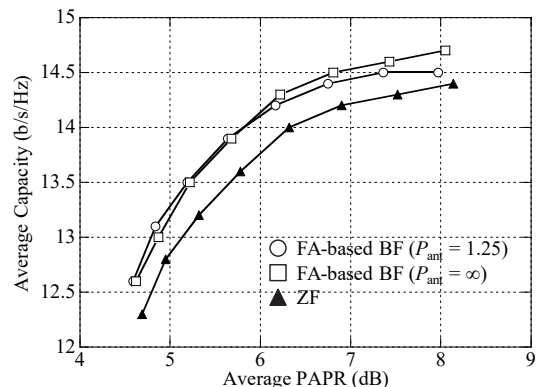


図 1. 平均 PAPR に対する平均チャネル容量