

マルチユーザ Massive MIMO-OFDM 伝送における B-5 チャネルのヌル空間を用いた適応 PAPR 抑圧に適した ZF 型ビームフォーミング法の一検討

Investigation on ZF-based Beamforming Method Appropriate for Combinational Use with Adaptive PAPR Reduction Method Using Null Space in MIMO Channel for Multiuser Massive MIMO-OFDM Transmission

鈴木 拓
Taku 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

マルチユーザ Massive MIMO-OFDM 伝送において、用いるビームフォーミング(BF)とピーク電力対平均電力比(PAPR)との間には相関がある。本稿では、筆者らが先に報告した MIMO チャネルのヌル空間を用いた適応 PAPR 抑圧法[1]に適した BF 法として、伝送レートの制御等が簡易になる空間ストリーム間の干渉を 0 とするゼロフォーミング(ZF)規範を満たしつつ送信アンテナ間の送信電力差を抑圧した BF 法を提案し、平均 PAPR 対スループット特性を明らかにする。

2. 送信アンテナ間電力配分を考慮した ZF 型 BF 制御

基地局の送信アンテナ数を N 、1 アンテナを有する受信ユーザ数を K とし、 $N > K$ とする。また、大きさが $K \times N$ のチャネル行列を $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1 \dots \mathbf{h}_K]^H$ 、 $N \times K$ の BF 行列を $\mathbf{B}_{\text{data}} = [\mathbf{b}_1 \dots \mathbf{b}_K]$ とする。 \mathbf{b}_i ($i = 1, \dots, K$) はユーザ i 宛信号の BF ベクトルである。BF ベクトルは送信電力の要素も含むものとする。このとき、 \mathbf{h}_i を除く $K-1$ 本の長さ N のチャネルベクトル $\mathbf{h}_{k \neq i}$ 全てと直交し互いに直交するノルムが 1 の $N-K+1$ 本のベクトル $\mathbf{v}_{i,1}, \dots, \mathbf{v}_{i,N-K+1}$ が必ず存在し、ZF 規範を満たす \mathbf{b}_i は一般に任意の複素重み係数 $\{\alpha_{i,m} = a_{i,m} e^{j\theta_{i,m}}\}$ を用いて次式のように表される。

$$\mathbf{b}_i = \sum_{m=1}^{N-K+1} \alpha_{i,m} \mathbf{v}_{i,m} = \sum_{m=1}^{N-K+1} a_{i,m} e^{j\theta_{i,m}} \mathbf{v}_{i,m} \quad (1)$$

式(1)の \mathbf{b}_i を用いたとき、ユーザ i の BF を含む実効チャネル $\tilde{\mathbf{h}}_i$ は、 $\tilde{\mathbf{h}}_i^H \mathbf{v}_{i,m} = r_{i,m} e^{j\theta_{i,m}}$ として次式のように表せる。

$$\tilde{\mathbf{h}}_i = \mathbf{h}_i^H \mathbf{b}_i = \sum_{m=1}^{N-K+1} \alpha_{i,m} \mathbf{h}_i^H \mathbf{v}_{i,m} = \sum_{m=1}^{N-K+1} a_{i,m} r_{i,m} e^{j(\theta_{i,m} + \varphi_{i,m})} \quad (2)$$

通常の ZF では、 $N-K+1$ 個の要素信号が最大比合成されるように $\theta_{i,m} = -\varphi_{i,m}$ としたうえで $a_{i,m} = \gamma r_{i,m}$ と定める (γ は送信電力依存の定数)。このときの \mathbf{B}_{data} は \mathbf{H} のムーアペンローズ一般逆行列として得られる。

このような通常の ZF では送信アンテナ間の送信電力差が大きくなり送信アンテナ全体を見た PAPR が増大しうる。そこで、提案法では、従来通り $\theta_{i,m} = -\varphi_{i,m}$ としたうえで $\{a_{i,m}\}$ については送信アンテナ間電力配分を考慮して最適化する。 $\{a_{i,m}\}$ の選択はスループットにも影響を与えるため、最適化の規範は送信アンテナ間の送信電力ばらつきを所定の値に抑えたとす K ユーザ合計のスループットを最大化することとする。ユーザ i のスループット C_i は $\{a_{i,m}\}$ の関数として次式のように表される。

$$C_i(\{a_{i,m}\}) = \log_2 \left(1 + \frac{|\tilde{\mathbf{h}}_i|^2}{N_0} \right) = \log_2 \left(1 + \frac{1}{N_0} \left(\sum_{m=1}^{N-K+1} a_{i,m} r_{i,m} \right)^2 \right) \quad (3)$$

提案法が解くべき最適化問題は次式のように表される。

$$\{a_{i,m}\}^* = \arg \max_{\{a_{i,m}\}} \sum_{i=1}^K C_i(\{a_{i,m}\})$$

$$\text{s.t.} \quad a_{i,m} \geq 0, \quad i=1, \dots, K, m=1, \dots, N-K+1$$

$$\sum_{i=1}^K \sum_{m=1}^{N-K+1} a_{i,m}^2 \leq P_{\max} \quad (P1)$$

$$P_n = \sum_{i=1}^K \left| \sum_{m=1}^{N-K+1} a_{i,m} e^{-j\varphi_{i,m}} \mathbf{v}_{i,m,n} \right|^2 \leq \frac{(1+\beta)P_{\max}}{N}, \quad n=1, \dots, N$$

ここで $\mathbf{v}_{i,m,n}$ は $\mathbf{v}_{i,m}$ の第 n 要素である。2 つ目の拘束条件は送信アンテナ合計の送信電力が P_{\max} 以下とする条件である。3 つ目の拘束条件は、送信アンテナ n の送信電力 P_n の最大値に対する制限であり、 β ($\beta \geq 0$) が制限の厳しさを制御するパラメータとなる。 $\beta = 0$ のときが最も厳しい制限であり全送信アンテナの送信電力が等化される。 β を大きくするとスループットは増大しやすくなるが、アンテナ間送信電力のばらつきが増大する。

最適化問題(P1)は凸最適化問題となっている。本稿では、内点法[2]を用いて最適な $\{a_{i,m}\}$ を求めた。

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クリッピン

グ・フィルタリング(CF)処理[3]を行う際に生じる伝送帯域内の干渉がデータスループット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[1]である。 \mathbf{H} のヌル空間に相当する長さ N のベクトルを \mathbf{B}_{null} とする。 $N \times N$ の BF 行列 $\mathbf{B} = [\mathbf{B}_{\text{data}} \mathbf{B}_{\text{null}}]$ 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。適応 PAPR 抑圧法では、等価的に送信ストリームベクトル \mathbf{x}_{data} に加わる干渉成分 \mathbf{e}_{data} が次式のように小さくなるよう干渉制限の制御を行う。

$$\mathbf{B}^{-1}(\mathbf{B}_{\text{data}} \mathbf{x}_{\text{data}} + \Delta) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{\text{data}} + (\mathbf{e}_{\text{data}} \approx \mathbf{0}) \\ \mathbf{e}_{\text{null}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

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

4. シミュレーション評価

$N = 8, 64$, $K = 4$ の場合を評価した。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。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定義した。提案法の β は 0.1 とした。比較のため従来の ZF 法の特長も評価した。適応 PAPR 抑圧法の繰り返し数は 20 とした。

図 1 に平均 PAPR に対する平均スループットを示す。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 値とスループットの関係を変化させた。従来の ZF と比較して提案法は PAPR の小さい範囲で同一の PAPR に対するスループットを増大できた。これは BF 制御においてあらかじめ送信アンテナ間の PAPR を低減で来ているため、後続する適応 PAPR 抑圧処理で生じるデータストリームに与える干渉電力を低減できたためである。 N が大きいときの方が提案法の効果が増大している。これは、 N が大きいほど BF による電力利得の効果でチャネルが干渉制限となるため、提案法の干渉低減効果がより顕著に現れるためである。

5. まとめ

提案法はマルチユーザ Massive MIMO-OFDM 伝送における PAPR 対スループット特性を改善できた。

参考文献

[1] Y. Sato, et al., IEICE Trans. Commun., vol. E96-B, no. 9, pp. 2270-2280, Sept. 2013. [2] D. P. Bertsekas, *Nonlinear Programming*, Athena Scientific, Belmont, U.S.A., 1999. [3] X. Li, et al., IEEE Commun. Lett., vol. 2, no. 5, pp. 131-133, May 1998.

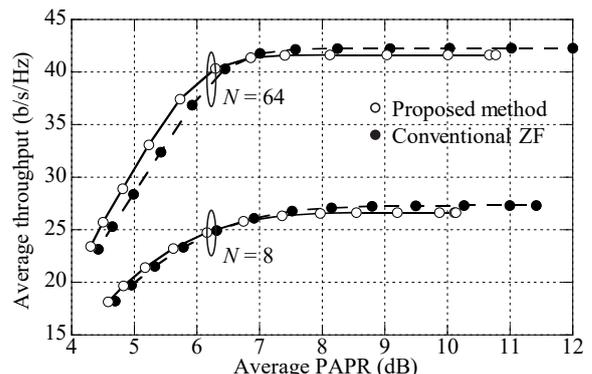


図 1. 平均 PAPR に対する平均スループット