

既知系列を利用した QRM-MLBD を用いる SC-MIMO 多重 HARQ のスループット特性

Throughput Performance of SC-MIMO HARQ with Training-sequence Aided QRM-MLBD

山本 哲矢 武田 一樹 安達 文幸
Tetsuya YAMAMOTO Kazuki TAKEDA Fumiyuki ADACHI

東北大学大学院 工学研究科 電気・通信工学専攻

Department of Electrical and Communication Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University

1. まえがき

QR 分解と M アルゴリズムを利用した演算量削減型最尤ブロック信号検出(QRM-MLBD)は、最小平均二乗誤差規範に基づく信号検出(MMSED)に比べてシングルキャリア(SC)マルチ送受信アンテナ(MIMO)多重伝送のパケット誤り率(PER)特性を大幅に改善できる[1]が、演算量が依然として大きい。筆者らは最近、既知系列を利用した(TS-)QRM-MLBD を用いれば、M アルゴリズムの生き残りパス数を大幅に削減できることを示した[2]。本稿では、TS-QRM-MLBD を用いる SC-MIMO ハイブリッド自動再送要求(HARQ)のスループット特性を明らかにしている。

2. 信号伝送系

本稿では、HARQ type II S-P4 [3]を用いている。符号化率 1/3 で符号化された符号語を情報ビット系列と 4 つのパリティビット系列に分割する。まず、情報ビットのみを送信し、再送要求を受信する度に、パリティビット系列を順次送信する。 N_t 本の送信アンテナ、 N_r 本の受信アンテナを用い、各送信アンテナより N_c シンボルのデータブロックを送信する。第 n_t 送信アンテナ($n_t=0,1,\dots,N_t-1$)からの送信信号は行列表現を用いて $\mathbf{s}_{n_t} = [\mathbf{d}_{n_t}^T \mathbf{u}_{n_t}^T]^T$ のように表せる。ここで、 $\mathbf{d}_{n_t} = [d_{n_t}(0), \dots, d_{n_t}(N_c-1)]^T$ はデータシンボルブロックであり、 $\mathbf{u}_{n_t} = [u_{n_t}(0), \dots, u_{n_t}(N_g-1)]^T$ は N_g シンボルからなる全ブロック共通の既知系列である。

受信機では、受信アンテナ毎に N_c+N_g ポイント分散フーリエ変換(DFT)により、周波数領域受信信号を得る。各受信アンテナの受信信号を並べた $N_r(N_c+N_g) \times 1$ 拡張周波数領域受信信号ベクトル \mathbf{Y} は、次式のように表される[2]。

$$\mathbf{Y} = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{0,0} & \cdots & \mathbf{H}_{0,N_t-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{H}_{N_r-1,0} & \cdots & \mathbf{H}_{N_r-1,N_t-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{F} & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{F} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{s}_0 \\ \vdots \\ \mathbf{s}_{N_t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{N}_0 \\ \vdots \\ \mathbf{N}_{N_r-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$= \sqrt{2E_s/T_s} \mathbf{Hs} + \mathbf{N}$$

ここで、 E_s は受信シンボルエネルギー、 T_s はシンボル長である。 \mathbf{H}_{n_r, n_t} は、第 n_t 送信アンテナと第 n_r 受信アンテナ間の $(N_c+N_g) \times (N_c+N_g)$ 周波数領域チャネル行列、 \mathbf{F} は DFT 行列、 \mathbf{H} は $N_r(N_c+N_g) \times N_t(N_c+N_g)$ 等価チャネル行列、 \mathbf{s} は $N_t(N_c+N_g) \times 1$ 送信信号ベクトルである。

3. 既知系列を利用した QRM-MLBD

QRM-MLBD ではまず、等価チャネル行列を $\mathbf{H}=\mathbf{QR}$ のように QR 分解する。 \mathbf{Q} は $N_r(N_c+N_g) \times N_r(N_c+N_g)$ ユニタリ行列、 \mathbf{R} は $N_r(N_c+N_g) \times N_t(N_c+N_g)$ 上三角行列である。次に、 \mathbf{Q}^H を \mathbf{Y} に乗算し、次式を得た後、M アルゴリズムを用いる MLD[1, 2]を適用する。

$$\hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{Q}^H \mathbf{Y} = \sqrt{2E_s/T_s} \mathbf{R}\mathbf{s} + \mathbf{Q}^H \mathbf{N} \quad (2)$$

QRM-MLBD では、等価チャネル行列の列成分および送信信号ベクトルの要素を任意の順序に変更するオーダリングが行える。TS-QRM-MLBD では、 $\bar{\mathbf{s}} = [\mathbf{d}^T(0), \dots, \mathbf{d}^T(N_c-1), \mathbf{u}^T(0), \dots, \mathbf{u}^T(N_g-1)]^T$ のように全て

の既知系列が送信信号ベクトルの下部に集まるようにオーダリングを行う。ここで、 $\mathbf{d}^T(t)$ および $\mathbf{u}^T(t)$ は、それぞれ送信ブロック内の第 t 番目の $N_c \times 1$ データシンボルベクトルおよび $N_g \times 1$ 既知系列ベクトルである。M アルゴリズムの初期ステージでは信号電力が十分に得られないから、生き残りパス数 M を小さくすると正しいパスを削除してしまう確率が高くなる。しかし、TS-QRM-MLBD では初期ステージに対応するシンボルが既知系列であるから、 M を小さくでき演算量を大幅に削減できる。

4. 計算機シミュレーション

ターボ符号化を用い、復号の繰り返し回数は 6 回とした。QRM-MLBD における生き残りパスが存在しないビットに対する対数尤度比(LLR)推定法としては、文献[4]の手法を用いた。パケット長は 3072 ビットである。データ変調方式としては 16QAM と 64QAM を用い、各平均受信 E_s/N_0 においてスループットを最大にする変調方式を選択している。伝搬路は、等電力遅延プロファイルを有する 16 パスの周波数選択性ブロックレイリーフェージングを仮定した。チャネル推定は理想としている。TS-QRM-MLBD を用いる 4×4 SC-MIMO 多重 HARQ のスループット特性を 1 受信アンテナあたりの平均受信 E_s/N_0 の関数として図 1 にプロットした。また、比較のため MMSED を用いる場合も示す。TS-QRM-MLBD では、 $M=16$ 程度で十分に優れたスループット特性が得られる。 $M=16$ の TS-QRM-MLBD は、MMSED よりも最大で 50% のスループット向上が得られる ($E_s/N_0=22$ dB および 64QAM の場合)。

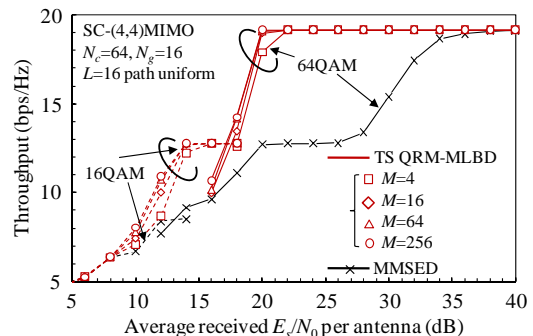


図1 スループット特性

5. まとめ

本稿では、TS-QRM-MLBD を用いる SC-MIMO 多重 HARQ のスループット特性を明らかにした。 4×4 SC-MIMO 多重の場合、 $M=16$ 程度で優れたスループット特性が得られることを示した。また、MMSE 周波数領域空間フィルタリングより優れたスループット特性を達成できることを示した。

[1] K. Nagatomi, et. al., in Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Apr. 2009. [2] 山本ら, 信学技報, RCS2010-137, 2010年10月. [3] D. Garget. al., IEICE Trans. Commun., Vol. E88-B, No. 2, Feb. 2005. [4] W. Shin, et. al., in Proc. IEEE 66th Vehicular Technology Conference, Oct. 2007.