

QRM-MLD を用いる広帯域シングルキャリア・マルチユーザ MIMO の上りリンク容量

Uplink capacity of single-carrier multi-user MIMO using QRM-MLD in a frequency-selective channel

板垣 将志 武田 一樹 安達 文幸
 Masashi Itagaki Kazuki Takeda Fumiyuki Adachi
 東北大学大学院工学研究科 電気・通信工学専攻

1. まえがき

限られた周波数帯域幅でユーザ多重を実現する手段として、マルチユーザ MIMO が注目されている[1]。本論文では、最尤検出(Maximum Likelihood Detection, MLD)の演算量を削減した QRM-MLD を信号検出法に用いるときのセルラシステムにおけるシングルキャリア・マルチユーザ MIMO の上りリンク容量について検討している。

2. QRM-MLD を用いるマルチユーザ MIMO

6 角形セル配置のシステムを考える。全てのセルを埋め尽くすために必要な異なる搬送波周波数群の数 N (クラスターサイズ) は 1, 3, 4, 7 のように離散値になり、このとき同一周波数を用いるセルは規則的に配置される。本論文では周辺 6 セルからの同一チャネル干渉(Co-Channel Interference, CCI)のみを考慮し、これをガウス近似する。各セルには単一の送信アンテナを有する U 人のユーザが存在するとし、基地局は N_r 本の受信アンテナを有するものとする。また、第 0 セルの U ユーザの送信タイミングずれと伝搬時間差の和はブロック伝送のガードインターバル(GI)以内に収まっているものとする。

各ユーザは N_c 個のデータシンボルからなるブロックの系列を構成する。その後、ブロックの末尾 N_g シンボルをコピーし、サイクリック・プレフィックスとしてブロック先頭の GI に挿入して送信する。

基地局では、 N_r 本の受信アンテナを用いて信号を受信する。各アンテナの受信信号ブロックから GI を取り除いた後に、 N_c ポイントの高速フーリエ変換(FFT)により周波数領域信号に変換する。 N_c シンボルから成るシングルキャリア伝送の周波数領域受信信号は、 $N_c \times N_c$ MIMO 多重の受信信号表現と同様に表せる[2]。この表現法を用い、 N_r 本の受信アンテナの周波数領域受信信号を $N_r N_c \times 1$ 列ベクトル \mathbf{Y} で表わすと次式のようになる。

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_0(0) & Y_0(1) & \dots & Y_{N_r-1}(N_c-1) \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

$$= \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \bar{\mathbf{H}}^{(0)} \mathbf{s}^{(0)} + \mathbf{Z} + \mathbf{N}$$

ここで、 E_s はシンボルエネルギー、 T_s はシンボル長、 \mathbf{Z} は周波数領域 CCI ベクトル、 \mathbf{N} は雑音ベクトルである。また、 $\mathbf{s}^{(0)} = [s_0(0) \dots s_{U-1}(N_c-1)]^T$ は希望ユーザ (第 0 セルのユーザ) の $UN_c \times 1$ 列ベクトル、 $\bar{\mathbf{H}}^{(0)}$ は希望ユーザと基地局間の $N_r N_c \times UN_c$ 等価チャネル行列である。

QRM-MLD では、まず $\bar{\mathbf{H}}^{(0)}$ を $N_r N_c \times UN_c$ 行列 \mathbf{Q} と $UN_c \times UN_c$ 上三角行列 \mathbf{R} との積に QR 分解する。 \mathbf{Q}^H を \mathbf{Y} に乗じた周波数領域受信信号 $\hat{\mathbf{Y}}$ は次式のように表される。

$$\hat{\mathbf{Y}} = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \begin{bmatrix} R_{0,0} & \dots & R_{0,UN_c-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & & R_{UN_c-1,UN_c-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0(0) \\ \vdots \\ s_{U-1}(N_c-1) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$+ \mathbf{Q}^H \mathbf{Z} + \mathbf{Q}^H \mathbf{N}$$

$\hat{\mathbf{Y}}$ に M アルゴリズムを適用する。M アルゴリズムは UN_c ステージから成り、各ステージで $\hat{\mathbf{Y}}$ と送信シンボル候補との 2 乗ユークリッド距離に基づくブランチメトリックを計

算し、累積ブランチメトリックの小さい M 個のシンボル候補を残していく。全ステージが終了したときに最も累積ブランチメトリックの小さいシンボル候補系列を出力する。

3. 計算機シミュレーション

QPSK 変調、 $N_c=64$, $N_g=16$ とする。チャネルは $L=16$ パスの一様電力遅延プロファイルを有するブロックレイリーフェージングとし、伝搬損失指数を $\alpha=3.5$ 、シャドウイング損失の標準偏差を $\sigma=7.0\text{dB}$ とする。各ユーザの送信電力は、セル端から送信したときの基地局における平均受信ビットエネルギー対雑音電力スペクトル密度比(E_b/N_0)が 10dB となるように定める。受信アンテナ本数 N_r は 4 本、チャネル推定は理想的であるものとする。

シミュレーションでは、各セル内のランダム位置に U ユーザを発生させて短区間平均ビット誤り率(BER)を求め、これを十分な回数繰り返し、BER が所要値 10^{-3} を上回る確率(アウテージ確率)を求める。このアウテージ確率が許容値 0.1 を下回る最大のユーザ数 U_{\max} を求め、クラスターサイズ N で正規化した値をリンク容量とする。

図 1 に、マルチユーザ MIMO の上りリンク容量を示す。QRM-MLD の M を 1, 4, 16 としている。比較対象として、最小平均二乗誤差規範に基づく周波数領域空間フィルタリング検出(MMSE)を適用した場合の特性も示している。図より、QRM-MLD は常に MMSE と同じかそれより高いリンク容量を与えることが分かる。最大リンク容量は MMSE では 0.14 であるが、QRM-MLD では 0.19 となり、約 1.3 倍高い。また、最大リンク容量のときの U_{\max} は、MMSE では 1 であるが、QRM-MLD で 3 である。

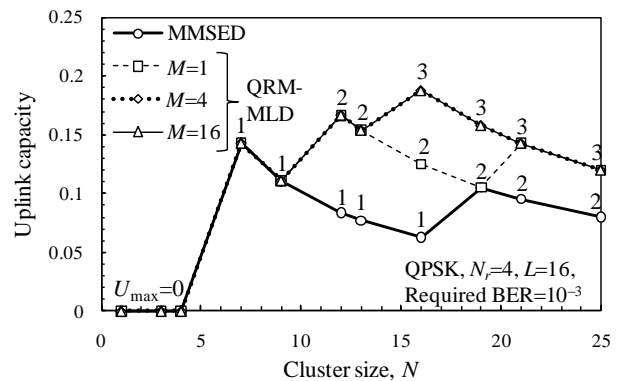


図 1 マルチユーザ MIMO の上りリンク容量

4. むすび

周波数選択性チャネルにおける、QRM-MLD を用いるシングルキャリア・マルチユーザ MIMO の上りリンク容量を明らかにした。QRM-MLD は MMSE より約 1.3 倍高いリンク容量が得られることを示した。

参考文献

- [1] Q.H.Spencer, C.B.Peel, A.L.Swindlehurst, M.Haardt, "An introduction to the multi-user MIMO downlink," IEEE Commun. Mag., Vol.42, No.10, pp.60-67, Oct. 2004.
- [2] T.Yamamoto, K.Takeda, F.Adachi, "A study of frequency-domain signal detection for single-carrier transmission," 2009 IEEE 70th VTC-Fall, 20-23 Sep. 2009.