

周波数領域繰り返し PIC を用いる多値変調 SC-MIMO 多重の伝送特性

Performance of SC-MIMO Multiplexing with Frequency-Domain Iterative PIC using Multi-level Modulation

中島 昭範, ガーグ ディープシカ, 安達 文幸
Akinori Nakajima Deepshikha Garg Fumiyouki Adachi

東北大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Tohoku University

1. はじめに

帯域拡大せずに、より高速のデータ伝送を可能とする MIMO 多重が最近注目を集めている[1]。しかし、周波数選択性フェージングチャネルでは、シングルキャリア(SC)伝送を用いると厳しい符号間干渉により伝送特性が大幅に劣化してしまう。これまで筆者らは、狭帯域 SC-MIMO 多重における繰り返し PIC を提案し[2]、次いで広帯域 SC-MIMO 多重を対象として周波数領域繰り返し PIC を提案した[3]。本稿では、多値変調を用いる広帯域 SC-MIMO 多重に周波数領域繰り返し PIC を適用したときのビット誤り率(BER)特性を計算機シミュレーションにより明らかにしている。

2. 周波数領域繰り返し PIC

送信アンテナ数を N_t 、受信アンテナ数を N_r とする SC- (N_t, N_r) MIMO 多重の受信系の構成を図 1 に示す。 2^M 値 QAM データ変調を用いる。送信機では、 N_t アンテナを用いて N_t 個のデータフレームを同時送信する。なお、1 フレームは N_c 個のシンボルで構成されている。受信機では、まず N_c ポイント FFT を用いて受信信号を N_c 個の周波数成分に分解する。次に、多重された信号を分離するために最小平均 2 乗誤差(MMSE)規範に基づく 2 次元周波数領域等化(2D-FDE)を行う(繰り返し回数 $i=0$)。これによって得られた N_t 行 1 列の第 k 周波数成分ベクトル $\tilde{\mathbf{R}}^{(0)}(k)$ は次式で表される。

$$\tilde{\mathbf{R}}^{(0)} = \mathbf{W}^{(0)}(k)\mathbf{R}(k) \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{R}(k)$ は N_r 行 1 列の周波数領域受信信号ベクトルである。 $\mathbf{W}^{(0)}(k)$ は、 N_t 行 N_r 列の MMSE 等化重み行列であり、次式で与えられる[4]。

$$\mathbf{W}^{(0)}(k) = \mathbf{H}^H(k)[\mathbf{H}(k)\mathbf{H}^H(k) + (\sigma^2/S)\mathbf{I}]^{-1} \quad (2)$$

ここで、 S は平均受信電力、 $(\cdot)^H$ はエルミート転置、 \mathbf{I} は N_r 行 N_r 列の単位行列、 $\mathbf{H}(k)$ は N_r 行 N_t 列の複素チャネル利得行列である。しかし、2D-MMSE-FDE だけでは残留干渉が大きく、受信信号の分離精度が悪いため、周波数領域レプリカ信号が必要となる。そのため、FDE 後、IFFT を適用して時間領域受信信号系列を得て、各送信シンボル系列の各シンボル中の各ビットに対する対数尤度比(LLR)を求め、繰り返し $i+1$ 回目における第 n_t フレーム中の第 t 番目のデータシンボル $d_{n_t}(t)$ に対する軟判定シンボルレプリカ $\tilde{d}_{n_t}^{(i+1)}(t)$ を、次式のように生成する。

$$\tilde{d}_{n_t}^{(i+1)}(t) = A \left\{ \sum_{b=1}^{M/2} B_b \tanh\left(\beta \frac{LLR_{n_t, b}^{(i)}(t)}{\sqrt{2S}}\right) + C_c \right\} + j \left\{ \sum_{b=M/2+1}^M B_b \tanh\left(\beta \frac{LLR_{n_t, b}^{(i)}(t)}{\sqrt{2S}}\right) + C_s \right\} \quad (3)$$

ここで、 $LLR_{n_t, b}^{(i)}(t)$ は繰り返し i 回目、第 n_t 送信フレームのデータシンボル $d_{n_t}(t)$ における第 b ビットの LLR であり、 β は LLR を軟判定シンボルに反映させるパラメータである。また、 A, B_b, C_c, C_s は多値変調シンボル軟判定係数である。軟判定によって N_t 個の軟判定値系列ベクトルを得た後、これらに FFT を適用して、 N_t 行 1 列の周波数領域信号ベクトル $\hat{\mathbf{D}}^{(i+1)}(k) = [\hat{D}_0^{(i+1)}(k), \dots, \hat{D}_{N_t-1}^{(i+1)}(k)]^T$ に変換する。その後、周波数領域レプリカを生成し、他アンテナの送信信号からの干渉をキャンセルし、 $N_t N_r$ 行 1 列の受信信号ベクトル $\hat{\mathbf{R}}^{(i+1)}(k) = [\hat{\mathbf{R}}_0^{(i+1)}(k), \dots, \hat{\mathbf{R}}_{N_t-1}^{(i+1)}(k)]^T$ を得る。繰り返し $i+1$ 回目の等化に必要な第 n_t アンテナから送信されたシンボル系列の N_r 行 1 列の受信信号ベクトル $\hat{\mathbf{R}}_{n_t}^{(i+1)}(k) = [\hat{R}_{0, n_t}^{(i+1)}(k), \dots, \hat{R}_{N_r-1, n_t}^{(i+1)}(k)]$ を抽出するために用いられる PIC 操作は次式で表される。

$$\hat{\mathbf{R}}_{n_t}^{(i+1)}(k) = \mathbf{R}(k) - \sqrt{2S}[\mathbf{H}(k)\hat{\mathbf{D}}^{(i+1)}(k) - \mathbf{H}_{n_t}(k)\hat{D}_{n_t}^{(i+1)}(k)] \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{H}_{n_t}(k)$ は $\mathbf{H}(k)$ の第 n_t 列の N_r 行 1 列ベクトルである。PIC 後は送信シンボル系列毎にシングルアンテナ送信時と同様の 1D-FDE を適用する。次式のように FDE と受信アンテナダイバーシチ合成を同時に行って、受信信号ベクトル $\tilde{\mathbf{R}}^{(i+1)}(k)$ を得る。

$$\tilde{\mathbf{R}}^{(i+1)} = \mathbf{W}^{(i+1)}(k)\hat{\mathbf{R}}^{(i+1)}(k) \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{W}^{(i+1)}(k)$ は、次式で表される繰り返し $i+1$ 回目における N_t 行 $N_r N_t$ 列の MMSE 等化重み行列である。

$$\begin{cases} \mathbf{W}^{(i+1)}(k) = \text{diag}[\mathbf{W}_0^{(i+1)}(k), \dots, \mathbf{W}_{N_t-1}^{(i+1)}(k)] \\ \mathbf{W}_{n_t}^{(i+1)}(k) = \mathbf{H}_{n_t}^H(k)[\mathbf{H}_{n_t}^H(k)\mathbf{H}_{n_t}(k) + (\sigma^2/S)\mathbf{I}]^{-1} \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{W}_{n_t}^{(i+1)}(k)$ は第 n_t 番目の送信アンテナに対する 1 行 N_r 列の MMSE 等化重みベクトルである。以上のように、軟判定、PIC 及び 1D-FDE 操作を繰り返して行うのが周波数領域繰り返し PIC である。

3. 計算機シミュレーション

多値変調を用いる広帯域 SC-MIMO 多重の平均 BER 特性を計算機シミュレーションで求めた。 $N_t \times N_r$ 個のフェージングチャネルは互いに独立で、一様電力遅延プロファイルを有する $L=16$ 個の独立なパスから構成される周波数選択性のブロックフェージングチャネルを仮定している。また、 $N_c=256$ であり、チャネル推定は理想的である。繰り返し回数は十分な改善効果が得られる 4 回に設定している。図 2 は $N_t=N_r=2$ の場合の平均 BER 特性である。Perfect PIC は干渉キャンセルが理想であるときの BER 特性である。図 2 から分かるように、平均 BER= 10^{-4} を得るための所要 E_b/N_0 の理想特性からの劣化は、QPSK, 16QAM, 64QAM の場合、繰り返し 4 回でそれぞれ約 0.4, 3.2, 6.2 dB まで小さくなること分かる。多値数が大きくなるにつれて理想特性からの劣化が大きくなるのは、より雑音や干渉の影響を大きく受けるために、レプリカ生成の精度が悪くなるからである。

4. むすび

周波数選択性が強い環境下における、周波数領域繰り返し PIC を用いる多値変調 SC-MIMO 多重の BER 特性を計算機シミュレーションによって明らかにした。

参考文献:[1] G. J. Foschini, et al., Wireless Personal Commun., vol.6, No. 3, 1998. [2] A. Nakajima, et al., IEICE Trans. Commun., vol E87-B, No.12, 2004. [3] 中島ら, 信学技報 2004-107, 2004 年 7 月. [4] John G. Proakis, Digital Communications, 4th edition, McGraw-Hill, 2001

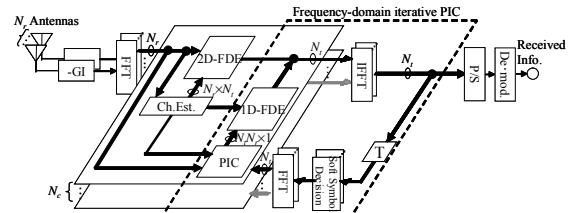


図 1 周波数領域繰り返し PIC を用いる SC- (N_t, N_r) MIMO 多重受信機

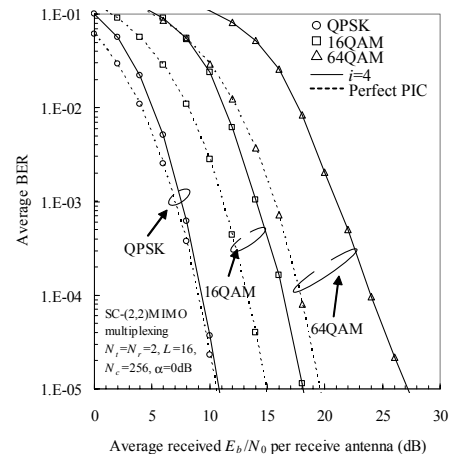


図 2 BER 特性