

シングルキャリア・ジョイント送信/受信 MMSE-FDE に及ぼすチャネル推定の影響

The effect of channel estimation on the performance of single-carrier transmission using joint transmit/receive MMSE-FDE

武田一樹 安達文幸
Kazuki Takeda Fumiyuki Adachi
東北大学 大学院工学研究科 電気・通信工学専攻

Dept. of Electrical and Communication Engineering, Graduate School of Engineering, Toyoku University

1. まえがき

本稿では、同一周波数を用いて交互に通信を行う時分割複信(TDD)を用いるシングルキャリア(SC)・ジョイント送信/受信周波数領域等化(FDE)[1]に及ぼす時間多重パイロットチャネル推定(PACE)の影響を検討する。チャネル推定誤差を考慮したときの最小平均二乗誤差(MMSE)規範に基づく送信・受信 FDE 重みを求め、ビット誤り率(BER)特性を評価している。

2. 時間多重パイロットチャネル推定

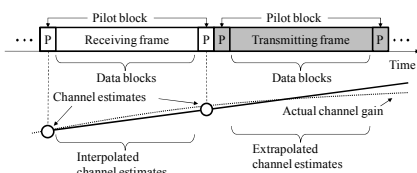


図1 送受信フレーム構成

送受信フレーム構成を図1に示す。ジョイント送信/受信 MMSE-FDE[1]では、送信信号には送信 FDE を、受信信号には受信 FDE を適用することで等化を行うため、

送受信フレームいずれにおいてもチャネル情報が必要となる。本稿では、送受信機双方で独立に PACE を行うものと仮定する。各フレームには FDE を適用するシンボルブロックが N_B 個含まれており、それぞれは $N_c + N_g$ シンボルにより構成されている。 N_c は高速フーリエ変換(FFT)/逆 FFT(IFFT)ポイント数、 N_g はガードインターバル(GI)長である。送信・受信フレームのうち先頭ブロック($b=0$)と最終ブロック($b=N_B-1$)はパイロットブロックであり、受信フレームの2つのパイロットブロックを用いて周波数領域 PACE[2]を行う。パイロット信号には Zadoff-Chu 系列[3]を用いる。パイロット信号の逆変調後に遅延時間領域窓関数(DTW)[2]を適用し、雑音電力を低減する。

1次線形関数補間を用い、受信フレーム内の各データブロックの中心時点におけるチャネル推定値を得る。送信フレームでは、受信フレームにおいて2つの受信パイロットブロックから計算した1次線形関数をそのまま延長し、チャネル推定値として用いる(1次線形予測)。なお、受信フレーム時点では相手側が送信フレーム時点に対応しており、相手側でも同様に周波数領域 PACE を行い、送信 FDE を適用する。

3. ジョイント送信/受信 MMSE-FDE

ジョイント送信/受信 MMSE-FDE では、データシンボルブロックと軟判定シンボルブロック間の平均自乗誤差が最小となるよう送受 FDE 重みのセットを与える。チャネル推定誤差が零平均の白色雑音に近似できると仮定すると、第 b ブロック時点での第 k 周波数における送信・受信 FDE 重み $\{W_{t,b}(k), W_{r,b}(k)\}$; $b=1 \sim N_B-2, k=0 \sim N_c-1$ は次式で与えられる(導出略)。

$$W_{t,b}(k) = \sqrt{\max\left\{\frac{1/\sqrt{\mu\gamma} |\hat{H}_{t,b}(k)| - 1/\gamma}{|\hat{H}_{t,b}(k)|^2 + 2\sigma_t^2}, 0\right\}}$$

$$W_{r,b}(k) = \frac{\{\hat{H}_{r,b}(k)\hat{W}_{t,b}(k)\}^*}{|\hat{H}_{r,b}(k)|^2 |\hat{W}_{t,b}(k)|^2 + 2\sigma_r^2 |\hat{W}_{t,b}(k)|^2 + 1/\gamma}$$

(1)

ここで $\{\hat{H}_{t,b}(k), \hat{H}_{r,b}(k)\}$; $k=0 \sim N_c-1$ および $2\sigma_t^2, 2\sigma_r^2$ はそれぞれ送信・受信側で得られる第 k 周波数のチャネル利得推定値およびチャネル推定誤差の分散を表しており、 $2\sigma_{t(or)r}^2 = E[|\hat{H}_{t(or)r,b}(k) - H_{t(or)r,b}(k)|^2]$ である。

本稿では、時変動が小さくパイロット時点とデータ時点でチャネル推定誤差の平均および分散が同じであると仮定し、 $2\sigma_{t(or)r}^2$ はパイロットブロックから近似的に求めている。まず受信パイロットに逆変調と IFFT を行い、遅延時間領域信号に変換する。このときチャネルのインパルス応答成分は GI 区間内のみに広がり、チャネル推定誤差を与える雑音成分は遅延時間領域全体に広がる。そこで GI 区間外の遅延時間領域

信号から雑音の分散を求める。チャネル推定誤差はパイロット逆変調後の雑音成分に DTW を乗算したものであるから、求めた雑音の分散に DTW のサイズ N_g/N_c を乗算する。

なお、受信側ではチャネル推定値を元に送信 FDE 重みを計算し、受信 FDE 重みを求めなければならない。式(1)における $\hat{W}_{t,b}(k)$ は受信側で計算される送信 FDE 重みを表している。 γ は信号対雑音電力比(SNR)であり、 μ は送信 FDE 後の信号電力不変とするための定数である。 γ は理想推定を仮定している。

4. 計算機シミュレーション

図2に16QAMでの平均BER特性を示す。横軸は送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 である。ブロック長 $N_B=12$, $N_c=256$, GI長 $N_g=32$ とし、 $L=16$ パスの周波数選択性ブロックフェージングを用いた場合の平均 BER 特性を比較のため、受信 MMSE-FDE を用いた場合の平均 BER 特性を従来法として併せて示す。正規化最大ドップラー周波数 $f_D T = f_D(N_c + N_g)T_s = 0.001$ および 0.01 としている(T_s はシンボル長)。チャネルの変動が比較的緩慢な $f_D T = 0.001$ の場合はジョイント送信/受信 MMSE-FDE の方が優れた BER 特性を示すが、 $f_D T = 0.01$ の場合は受信 MMSE-FDE のみの方が優れた BER 特性が得られている。チャネルの変動が緩やかであれば、チャネル推定誤差が存在してもジョイント送信/受信 MMSE-FDE の方が優れた BER 特性を与える。一方、送信側で線形予測チャネル推定を行うジョイント送信/受信 MMSE-FDE では $f_D T = 0.01$ より速いチャネル変動に追従できなくなるために BER の劣化が生じる。 $E_b/N_0 = 22$ dB のときの平均 BER 対 $f_D T$ を図3にプロットした。 $f_D T > 0.005$ ではジョイント送信/受信 MMSE-FDE の BER 特性が大幅に劣化している。しかし例えば搬送波周波数が 5GHz、帯域幅が 100MHz の場合 $f_D T = 0.005$ は 375km/h の高速移動に相当し、実際の移動通信環境は $f_D T < 0.005$ となる場合がほとんどであると考えられる。したがって、提案法はチャネル推定誤差が存在しても従来法と比較して優れた伝送特性を実現できるといえる。

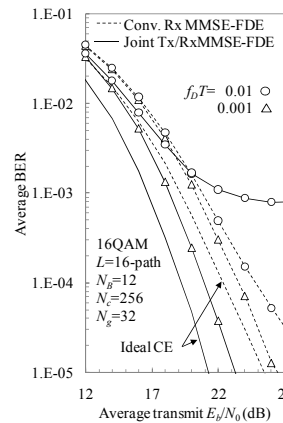


図2 平均 BER 特性

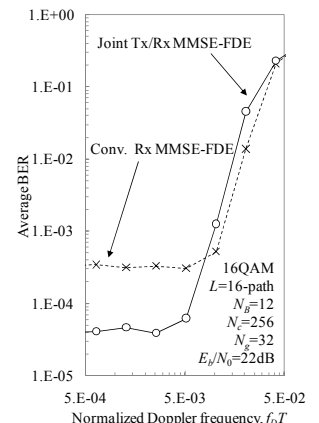


図3 平均 BER 対 $f_D T$

5. まとめ

本稿では TDD を用いる SC・ジョイント送信/受信 MMSE-FDE の BER 特性に及ぼすチャネル推定の影響を明らかにした。送信側でもチャネル推定が必要となることから従来の受信 MMSE-FDE より時間追従能力は劣るものの、実際の移動通信環境下で優れた伝送特性を実現できることを示した。

[1] K. Takeda, et. al., Proc. 20th IEEE PIMRC, Tokyo, Japan, Sept. 2009.
[2] J. J. de Beek, et. al., Proc. IEEE VTC, Vol. 2, pp. 815-819, July 1995.
[3] D. Chu, IEEE Trans. on Info. Theory, Vol.18, No.4, pp.531-532, Jul. 1972.