

既知系列を利用したシングルキャリア QRM-MLBD におけるチャンネル推定の影響

The effect of channel estimation on the performance of single-carrier transmission using QRM-MLBD

山本 哲矢

Tetsuya YAMAMOTO

東北大学大学院 工学研究科 電気・通信工学専攻

安達 文幸

Fumiyuki ADACHI

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

1. まえがき

既知系列(TS)と QR 分解と M アルゴリズムによる演算量削減型最尤検出(QRM-MLBD)を用いるシングルキャリア(SC)ブロック伝送[1]では、従来のサイクリックプリフィックス(CP)の代わりに既知系列を用いることで、演算量を大幅に削減しつつ、伝送特性を大幅に改善できる。本稿では、既知系列を利用したチャンネル推定を適用した時の QRM-MLBD を用いる SC 伝送の平均ビット誤り率(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. QRM-MLBD を用いる TS-SC 伝送系

図 1 に送信ブロック構成を示す。1 ブロック当たり N_c 個のシンボルを送信する。

送信ブロックは $\mathbf{s}=[\mathbf{d}^T \mathbf{u}^T]^T$ で表せる。 $\mathbf{d}=[d(0), \dots, d(N_c-1)]^T$ はデータシンボルブロック、 $\mathbf{u}=[u(0), \dots, u(N_g-1)]^T$ 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。既知系列には Chu 系列[2]を用いる。

送信信号は L 個の離散パスから構成される周波数選択性チャンネルを伝搬して受信されるものとする。受信信号ベクトル $\mathbf{y}=[y(0), \dots, y(N_c+N_g-1)]^T$ は、 $\mathbf{y}=\sqrt{2E_s}/T_s \mathbf{H}\mathbf{s}+\mathbf{n}$ で表せる。 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} は、 $(N_c+N_g) \times (N_c+N_g)$ インパルス応答行列、 \mathbf{n} は雑音ベクトルである。受信機では、 N_c+N_g ポイント離散フーリエ変換(DFT)により、周波数領域受信信号 $\mathbf{Y}=[Y(0), \dots, Y(N_c+N_g-1)]^T = \sqrt{2E_s}/T_s \mathbf{H}\mathbf{F}\mathbf{s}+\mathbf{F}\mathbf{n}$ を得る。 \mathbf{H} は、 $(N_c+N_g) \times (N_c+N_g)$ チャンネル利得行列、 \mathbf{F} は DFT 行列である。

QRM-MLBD ではまず、等価チャンネル行列 $\mathbf{G}=\mathbf{H}\mathbf{F}$ を $\mathbf{G}=\mathbf{Q}\mathbf{R}$ のように QR 分解する。 \mathbf{Q} はユニタリ行列、 \mathbf{R} は上三角行列である。次に、 \mathbf{Q}^H を \mathbf{Y} に乗算し、 $\tilde{\mathbf{Y}}=\mathbf{Q}^H\mathbf{Y}=\sqrt{2E_s}/T_s \mathbf{R}\mathbf{d}^T + \mathbf{Q}^H\mathbf{F}\mathbf{n}$ を得た後、M アルゴリズムを用いる MLD[1]を適用する。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、既知系列を利用した QRM-MLBD では初期ステージに対応するシンボルが既知であるから、 M を小さくでき演算量を大幅に削減できる[3]。

3. TS-SC 伝送におけるチャンネル推定

既知系列を利用したチャンネル推定[3]を用いる。 N_B 個の送信ブロックを並べたものを 1 フレームとし、1 フレーム分のブロックを受信した後、繰り返しチャンネル推定を以下のように行う(第 n ブロックを上付き文字(n)で表す)。

まず初回のチャンネル推定($i=0$)では、次式のように受信ブロックの後尾 N_g シンボルと先頭 $L-1$ シンボルを用いることで既知系列の巡回性を保証する。ただし、ブロック先頭 $L-1$ シンボルのデータからの干渉が増加する。

$$\tilde{y}^{(n)}(t) = \begin{cases} y^{(n)}(t) + y^{(n)}(t+N_c) & t=0-L-2 \\ y^{(n)}(t+N_c) & t=L-1-N_g-1 \end{cases} \quad (1)$$

上式に N_g ポイント DFT を適用し、周波数領域信号 $\tilde{Y}^{(n)}(q) = H(q(N_c+N_g)/N_g)U(q) + I^{(n)}(q) + \tilde{N}^{(n)}(q)$, $q=0-N_g-1$, に変換する。ここで、 $H(q(N_c+N_g)/N_g)$ は周波数 $k=q(N_c+N_g)/N_g$ におけるチャンネル利得であり、 N_B ブロックにわたり一定であるものとする。 $U(q)$ は既知系列の周波数

成分である。第 2 項、第 3 項はデータからの干渉成分および雑音成分である。次式のように周波数 $k=q(N_c+N_g)/N_g$ におけるチャンネル推定値 $\tilde{H}^{(0)}(q(N_c+N_g)/N_g)$ を得る。

$$\tilde{H}^{(0)}(q(N_c+N_g)/N_g) = (1/N_B) \sum_{n=0}^{N_B-1} \tilde{Y}^{(n)}(q)/U(q) \quad (2)$$

この時推定されるチャンネル利得は周波数 $k=q(N_c+N_g)/N_g$, $q=0-N_g-1$, の N_g 個の成分のみであるため、遅延時間領域窓関数法[4]により周波数領域補間を行い、チャンネル推定値 $\{\tilde{H}^{(0)}(k); k=0-N_g-1\}$ を得る。その後、QRM-MLBD を行って、仮データシンボル系列を得る。第 i 回目のチャンネル推定では、これと既知系列から成る送信レプリカブロックに N_c+N_g ポイント DFT を適用して、周波数領域送信レプリカブロック $\{\tilde{S}^{(i)}(k); k=0-N_c+N_g-1\}$ を求め、最尤推定理論[5]に基づき、 N_B 個の送信ブロックを受信したとき、チャンネル推定値を次式のように得る。

$$\tilde{H}^{(i)}(k) = (\sum_{n=0}^{N_B-1} Y^{(n)}(k) \{\tilde{S}^{(i)}(k)\}^*) / (\sum_{n=0}^{N_B-1} |\tilde{S}^{(i)}(k)|^2) \quad (3)$$

4. 計算機シミュレーション

データ変調は QPSK, $N_c=64$, $N_g=16$ とした。生き残りパス数 $M=16$ の QRM-MLBD を用いる。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、最大ドップラー周波数 $f_D \rightarrow 0$ とした。図 2 および 3 に平均 BER 特性を示す。横軸は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 である。図より、フレーム長(観測区間) N_B を大きくすることで、チャンネル推定精度が向上していることが分かる。これは平均化に用いるブロックが多くなることでチャンネル推定精度が向上するためである。 $I=1$ の場合、 $N_B=32$ で十分優れた特性が得られる。一方、繰り返し数を増やすことでチャンネル推定精度が向上し、観測区間を短くしても十分優れた特性が得られる。

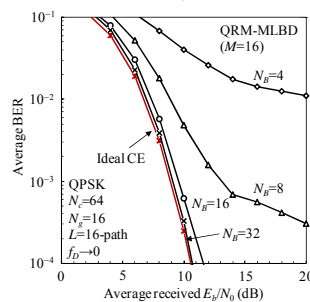


図 2 平均 BER 特性 ($I=1$)

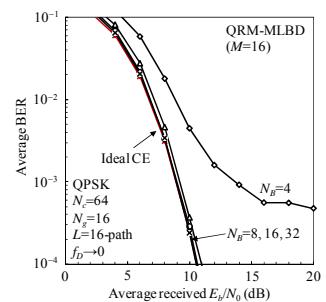


図 3 平均 BER 特性 ($I=3$)

5. まとめ

本稿では、QRM-MLBD を用いる TS-SC 伝送に既知系列を利用したチャンネル推定を適用した時の BER 特性を明らかにした。繰り返し数が少ない場合は観測区間を大きくすることで、また観測区間が小さい場合は繰り返し数を多くすることでチャンネル推定精度を向上でき、優れた特性を実現できることを示した。

[1] T. Yamamoto, et. al., EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, Vol. 2011. [2] D. C. Chu, IEEE Trans. on Inf. Theory, July 1972. [3] 山本ら, 信学技報, 2011 年 3 月. [4] J. J. de Beek, et. al., in Proc. IEEE VTC, July 1995. [5] Y. Kojima, et. al., IEICE Trans. Commun., June 2009.