

周波数領域拡散を行う遅延時間/符号分割マルチアクセスの BER 特性 BER Performance of Delay-time/Code Division Multi-Access Using Frequency-domain Spreading

武田一樹 山本哲矢 安達文幸
Kazuki TAKEDA Tetsuya YAMAMOTO 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

筆者らは最近、上りリンク伝送を対象とし、遅延時間領域で各ユーザの遅延プロファイルが重ならないように直交化してマルチアクセスする遅延時間/符号分割マルチアクセス(DT/CDMA)を提案した[1]。本論文では、周波数領域拡散を用いる DT/CDMA のビット誤り率(BER)特性を明らかにするとともに、文献[1]で提案した時間領域拡散符号を用いる DT/CDMA、直接拡散(DS-)CDMA[2]、およびマルチキャリア(MC-)CDMA[3]との比較を行っている。

2. DT/CDMA

周波数領域拡散符号 $\{c(k)=\pm 1; k=0\sim SF-1\}$ を用いる DT/CDMA では、まず、各ユーザの送信データシンボルを拡散率 SF の同一拡散符号を用いて周波数領域拡散する。そして、各ユーザの周波数領域信号に SF ポイント逆高速フーリエ変換(IFFT)を適用して時間領域信号系列に変換し、ユーザ固有の循環遅延を与えた後にガードインターバル(GI)を挿入して送信する。第 u ユーザ($u=0\sim U-1$)の送信信号 $\{s_u(t); t=0\sim SF-1\}$ は次式で表せる。

$$s_u(t) = d_u \frac{1}{\sqrt{SF}} \sum_{k=0}^{SF-1} c(k) \exp\left(j2\pi k \frac{t-u\Delta}{SF}\right) \quad (1)$$

ただし d_u はデータシンボルを、 $u\Delta$ は第 u ユーザの循環遅延を表す。

基地局では、受信信号から GI を除去した後に SF ポイント FFT を適用し、周波数領域受信信号 $\{R(k); k=0\sim SF-1\}$ へと変換する。 $R(k)$ は次式で表せる。

$$R(k) = \sum_{u=0}^{U-1} \sqrt{2P_u} H_u(k) c(k) \exp\left(-j2\pi k \frac{u\Delta}{SF}\right) + \Pi(k) \quad (2)$$

ここで P_u および $H_u(k)$ は、それぞれ第 u ユーザの受信電力および第 k 周波数におけるチャネル利得を表す。 $\Pi(k)$ は平均 0 で分散は $2N_0/T_c$ の雑音成分であり、 N_0 は加法的白色ガウス雑音(AWGN)の片側電力スペクトル密度、 T_c は FFT のサンプリング周期である。

周波数領域等化と逆拡散を同時に行う重み $w_u(k)$ を $R(k)$ に乗算した後に SF ポイント IFFT により遅延時間領域信号 $\{y_u(\tau); \tau=0\sim SF-1\}$ を得る。時間領域拡散符号を用いる場合には拡散符号の周波数スペクトルは一定値とはならないため、最小平均二乗誤差(MMSE)規範に基づく等化重みを用いる必要がある[1]。一方、周波数領域拡散符号は周波数領域で一定値であるため、次式のような重みを用いることができる。

$$w_u(k) = \frac{1}{c(k)} \exp\left(j2\pi k \frac{u\Delta}{SF}\right) = c^*(k) \exp\left(j2\pi k \frac{u\Delta}{SF}\right) \quad (3)$$

$y_u(\tau)$ は次式のようになる。

$$y_u(\tau) = \sum_{u'=0}^{U-1} \sqrt{2SF P_{u'}} d_{u'} \sum_{l=0}^{L-1} h_{u',l} \delta(\tau - \tau_{u',l} - (u' - u)\Delta) + \frac{1}{\sqrt{SF}} \sum_{k=0}^{SF-1} c^*(k) \Pi(k) \exp\left(j2\pi k \frac{\tau + u\Delta}{SF}\right) \quad (4)$$

ただし、 $h_{u,l}$ および $\tau_{u,l}(l=0\sim L-1)$ はそれぞれ第 u ユーザと基地局間の第 l パスの複素パス利得および遅延時間である。

遅延時間領域信号 $\{y_u(\tau); \tau=0\sim SF-1\}$ の $[0, \Delta-1]$ 区間を取り出し、なおかつ遅延時間領域整合フィルタを用いて $[0, \Delta-1]$ 区間に広がる信号成分を最大比合成することで、マルチアクセス干渉(MAI)を完全抑圧しつつパスダイバーシチを得ることができる。複素パス利得 $\{h_{u,l}; l=0\sim L-1\}$ が与えられたときの第 u ユーザの瞬時信号対雑音電力比(SNR)は次式のように計算できる。

$$\gamma_u = (2SFP_u T_c / N_0) \sum_{l=0}^{L-1} |h_{u,l}|^2 \quad (5)$$

式(5)は、周波数領域で拡散符号を用いる DT/CDMA が BER 特性の理論的下界[4]を達成できることを表している。

3. 計算機シミュレーション

長周期 PN 系列を拡散符号に用い、 $SF=256$ とした場合の BER 特性を図 1 に示す。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周波数選択性チャネルである。また、全てのユーザの平均受信電力は等しいものとする。 $U=16$ の場合、DT/CDMA では全てのユーザが遅延時間領域で直交化されてマルチアクセスできる。周波数領域拡散を用いた場合には、拡散符号が周波数領域で一定値であるため、第 2 章で示したように理論的下界を達成できる。 $U=32$ の場合には、 (SF/Δ) を超えるユーザグループに異なる拡散符号を割り当てるから MAI は発生するものの、従来の DS および MC-CDMA より大幅に優れた BER 特性を実現できることがわかる。

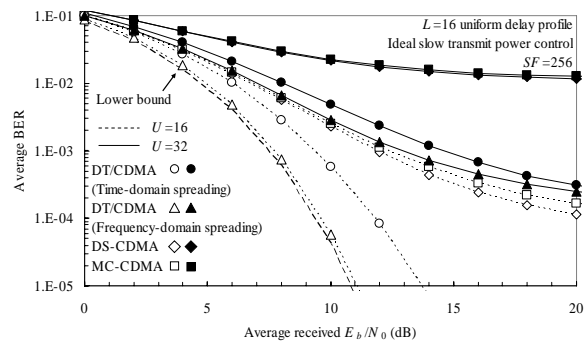


図 1 BER 特性

4. むすび

本論文では、周波数領域拡散を用いる DT/CDMA の BER 特性を計算機シミュレーションにより明らかにした。DT/CDMA では、拡散符号が周波数領域で一定ならば BER 特性の理論的下界を達成できることを示すと同時に、従来の DS および MC-CDMA よりも優れた BER 特性が得られることを示した。

[1]F. Adachi and Kazuki Takeda, IEE Electronics Letters, Vol. 43, No. 18, pp. 985-986, 2007. [2]Kazuki Takeda and F. Adachi, Proc. 59th IEEE Veh. Tech. Conf. (VTC), Italia, May, 2004. [3]S. Hara and R. Prasad, IEEE Commun. Mag., Vol. 35, No. 12, pp. 126-144, Dec. 1997. [4]J. G. Proakis, Digital communications, 3rd ed., McGraw-Hill, 1995.