

频率分集 MC-CDMA 在瑞利衰落信道下的性能分析*

廖明, 谭晓衡, 张志华

(重庆大学 通信工程学院, 重庆 400044)

摘要: 分析多载波码分多址系统的基带发射、接收信号模型以及多径 Rayleigh 衰落信道模型, 进而提出一种系统的通用矩阵分析模型。对多载波码分多址系统的单用户理论误码性能进行了深入探讨, 给出了一种新颖的单用户误码率分析方法。数值仿真结果表明: 多载波频率分集 CDMA 系统在无线宽带数据传输中性能大大优于 CDMA, 具有良好的应用前景。

关键词: 多载波码分多址; OFDM; Rayleigh 衰落信道; 误码率

中图分类号: TN929.533 文献标识码: A

0 引言

1993年, 几种将扩展频谱码分多址(CDMA)技术和具有很强抗多径干扰能力的高速并行传输技术正交频分复用(OFDM)^[1]相融合的多址接入系统被研究人员提出^[2]; N. Yee 和 A. Chouly 等提出多载波码分多址(MC-CDMA), V. Dasilva 和 E. S. Sousa 等提出了 MC-DS-CDMA, L. Vandendorpe 提出了 MT-CDMA。文献[2]按照扩频操作的差异将 OFDM-CDMA 混合技术分为频域扩频和时域扩频两类, 其中 MC-CDMA 属于频域扩频。MC-CDMA 在具有传统 CDMA 抗干扰能力强、容量大等优点的同时又继承了 OFDM 技术优秀的抗多径干扰能力, 非常适宜于无线高速数据传输。而和传统 OFDM 系统所不同的是在所有子载波上传送相同的信息符号, 因此还具有频率分集的效果。

文献[3]对比分析了 MC-CDMA 和传统 CDMA 系统的信号模型和误码性能, 理论上证明了 MC-CDMA 比 CDMA 在 Rayleigh 衰落信道中误码性能更佳。文献[4]也分析了 MC-CDMA 在 Rayleigh 衰落信道下的性能, 但是其误码分析过于复杂。文献[5]给出了一种 OFDM 系统的矩阵分析模型。

作者首先分析了 MC-CDMA 系统的基带发射、接收信号模型以及 Rayleigh 信道模型, 提出了一种 MC-CDMA 系统的通用矩阵分析模型, 并给出了系统的误码率分析, 数值分析验证了 MC-CDMA 系统

优异的性能。

1 MC-CDMA 系统通用矩阵模型

MC-CDMA 系统的基带发射、接收以及多径信道模型如图 1 所示。

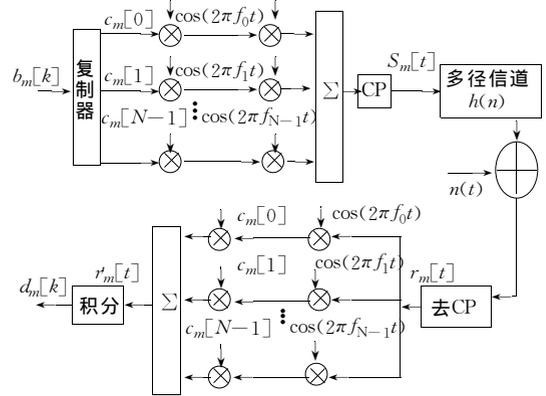


图1 MC-CDMA系统模型
Fig. 1 System model of MC-CDMA

1.1 发送系统模型

考虑一个用户数为 M 的 MC-CDMA 传输系统, 第 m 个用户传输的第 k 个比特为标量 $b_m[k]$, 扩频码用向量 $c_m = [c_m(0), \dots, c_m(i), \dots, c_m(N-1)]^T, i \in [0, N-1]$ 表示, 向量 $c_m b_m[k]$ 进行离散傅立叶逆变换 IFFT。定义 $(N \times N)$ 傅立叶变换矩阵和傅立叶逆变换矩阵分别为 F_N 和 F_N^H , H 表示共轭转置。 F_N 的矩阵元素为

$$F_N(t, i) = \frac{1}{\sqrt{N}} \cos(2\pi f_0 t + 2\pi i t / T_b) \xrightarrow{\text{离散化}}$$

* 收稿日期: 2003-09-01

作者简介: 廖明(1973-), 男, 四川自贡人, 博士研究生, 研究方向为移动通信理论与技术。

$$F_N(n, i) = \frac{1}{\sqrt{N}} \cos(2\pi \frac{in}{N}) \quad i, n \in [0, N - 1] \quad (1)$$

其中,子载波 $f_i = f_0 + \frac{i}{T_b} = \frac{i}{NT_b}$, t 离散为 $t_n = nT_b$ 。

$S'_m = F_N^H c_m b_m[k]$, 用 CP^A 表示加入循环前缀变换, 得到发送信号向量 $S_m = CP^A F_N^H c_m b_m[k]$, 该向量为 $(N + N_L) \times 1$ 矩阵。

1.2 信道模型

信道为瑞利(Rayleigh)信道,在时域采用复低通等效冲激响应特性的线性滤波器模型来描述。

$$h(t) = \sum_{l=0}^{N_L-1} \alpha_l \delta(t - \tau_l) \quad (2)$$

式(2)中, N_L 为电波传播最大多径数; α_l, τ_l 分别为第 l 条路径的随机幅度、传播时延。其物理模型相当于由 N_L 个延时为 τ_l 的抽头而构成的信道模型。

在频域上,每个子载波所占带宽非常窄,通常远小于相干带宽,因此可以认为每个子载波上为平坦衰落,没有幅度和相位失真。每个子带上对应用户 m 的信道频率特性为

$$H_m(f_0 + \frac{i}{T_b}) = \rho_{m,i} e^{j\theta_{m,i}} \quad (3)$$

式(3)中, $\rho_{m,i}$ 为独立 Rayleigh 分布随机变量,表示信号幅度衰落系数; $\theta_{m,i}$ 为独立均匀分布随机变量,表示相位失真。

1.3 接收系统模型

发送向量通过式(2)、式(3)所描述的多径衰落信道和附加的 AWGN 噪声信道后,在接收端以切普(CHIP)速率进行采样。

$$r_m(t) = \sum_{l=0}^{N_L-1} h(l) s_m(t - l) + n(t) \quad (4)$$

假定 CP 长度大于信道冲击响应长度 N_L 并且认为信道冲击响应在一个 MC-CDMA 符号内是不变的,因此可以用向量 $h_l = [h_l(0), \dots, h_l(N_L - 1)]^T$ 来表示在第 k 个 MC-CDMA 码元内的整个信道的冲击响应序列。

同样,定义 $(N + N_L) \times 1$ 阶接收向量 R_m , 利用信道冲击响应为有限长度的特性,可以得到

$$R_m(i) = H_0 S_m(i) + H_1 S_m(i - 1) + n(i) \quad (5)$$

其中, H_0 和 H_1 为 $(N + N_L) \times (N + N_L)$ 的 Toeplitz 信道矩阵。

$$H_0 = \begin{bmatrix} h_l(0) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & h_l(0) & 0 & \dots & 0 \\ h_l(N_L - 1) & \dots & \ddots & \dots & \vdots \\ 0 & h_l(N_L - 1) & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & h_l(N_L - 1) & \dots & h_l(0) \end{bmatrix}$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} 0 & \dots & h_l(N_L - 1) & \dots & h_l(1) \\ \vdots & \ddots & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \ddots & \dots & h_l(N_L - 1) \\ 0 & \ddots & \dots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

式(5)中,第二项表示符号间干扰(ISI),第三项表示噪声向量。

用 $CP^H = [O_{N \times N_L}, I_N]$ 表示去掉循环前缀操作,然后再进行傅立叶变换和解扩。如果循环前缀长度大于信道多径长度就可以消除 ISI,即去掉式(5)中第二项。

$$R_m'(i) = c_m^T F_N CP^H H_0 CP^A F_N^H c_m b_m[k] + c_m F_N CP^H n(i) \quad (6)$$

令 $\hat{H}_0 = CP^H H_0 CP^A$, 为具有如下形式的 $N \times N$ 循环矩阵:

$$\hat{H}_0 = \begin{bmatrix} h_l(0) & 0 & \dots & 0 & h_l(N_L - 1) & \dots & h_l(1) \\ \vdots & h_l(0) & 0 & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \ddots & h_l(N_L - 1) \\ h_l(N_L - 1) & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & 0 \\ 0 & h_l(N_L - 1) & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & h_l(N_L - 1) & \dots & \dots & h_l(0) \end{bmatrix}$$

于是式(6)可改写为

$$R_m'(i) = c_m^T F_N \hat{H}_0 F_N^H c_m b_m[k] + c_m F_N \eta(i) \quad (7)$$

再令 $\tilde{H}_0 = F_N \hat{H}_0 F_N^H$, 由于 \hat{H}_0 为循环矩阵, F_N 的每一个行向量都是 \tilde{H}_0 的特征向量,因此 \tilde{H}_0 是一个简单的对角矩阵:

$$\tilde{H}_0 = \begin{bmatrix} \tilde{H}_{0,0} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \tilde{H}_{0,N-1} \end{bmatrix}$$

其中 $\tilde{H}_{0,i}$ 为多径信道在子载波频率 f_i 处的频率响应,即 $\tilde{H}_{0,i} = \rho_{m,i} e^{j\theta_{m,i}}$ 。令 $\eta(i) = c_m^T F_N CP^H n(i)$, 为噪声矩阵,式(7)能够简化为

$$R_m'(i) = c_m^T \tilde{H}_0 c_m b_m[k] + \eta(i) \quad (8)$$

因为 \tilde{H}_0 是 $N \times N$ 的对角阵,而 c_m, c_m^T 是 N 阶二进制向量,取值为 ± 1 ,如果系统可靠同步,则得到系统

判决前输出为标量信号:

$$R_m'(i) = b_m[k] \left(\sum_{i=0}^{N-1} \rho_{m,i} e^{j\theta_{m,i}} \right) + \eta(i) \quad (9)$$

从以上分析可见,多载波 CDMA 系统除了具有频率分集、抗干扰的优点以外,还充分利用了 OFDM 这种高效并行调制技术的优点,使信号和信道之间的卷积关系变成了线性加权,有效抑制了符号间干扰(ISI)和码间干扰(ICI)。^[6-8]

2 误码率分析

假设系统采用 BPSK 调制,即 $b_m[k]$ 取值为 ± 1 。并且接收端具有很好的同步性能,频率、相位能够完全同步。

$$d_m(k) = \frac{2}{T_b} \int_{kT_b}^{(k+1)T_b} \{b_m[k] \left(\sum_{i=0}^{N-1} \rho_{m,i} e^{j\theta_{m,i}} \right) + \eta(i)\} dt = b_m(k) \sum_{i=0}^{N-1} \rho_{m,i} e^{j\theta_{m,i}} + \frac{2}{T_b} \int_{kT_b}^{(k+1)T_b} [\mathbf{c}_m^T \mathbf{F}_N \mathbf{C} \mathbf{P}^H \mathbf{n}(i)] dt = d_m + I_n \quad (10)$$

假设第 m 个用户在 $[kT_b, (k+1)T_b]$ 时间内传送的数据为“1”,且令 $\rho_m = \sum_{i=0}^{N-1} \rho_{m,i} e^{j\theta_{m,i}}$,因为 $\rho_{m,i}$ 为独立同分布变量,由中心极限定理可知 ρ_m 服从高斯分布。 d_m 也服从高斯分布。

$$E(d_m) = E(\rho_m) = NE(\rho_{m,i} e^{j\theta_{m,i}}) = \sqrt{\frac{\pi}{2} N^2 \frac{1}{2} E(\rho_{m,i}^2)} = \sqrt{\frac{\pi}{2} N \bar{\rho}_m}$$

$$\text{令 } \bar{\rho}_m = N \frac{1}{2} E(\rho_{m,i}^2)$$

$$\sigma_{d_m}^2 = \sigma_{\rho_m}^2 = N \{E(\rho_{m,i}^2) - [E(\rho_{m,i})]^2\} = (2 - \frac{\pi}{2}) \bar{\rho}_m \quad (11)$$

I_n 的均值为 0,方差为: $\sigma_{I_n}^2 = \frac{N}{T_b} N_0$ 。

因此,由以上分析可知 $d_m(k)$ 同样服从高斯分布。其均值和方差为

$$\begin{cases} \mu = E[d_m(k)] = \sqrt{\frac{\pi}{2} N \bar{\rho}_m} \\ \sigma^2 = (2 - \frac{\pi}{2}) \bar{\rho}_m + \frac{N}{T_b} N_0 \end{cases} \quad (12)$$

由于第 m 个用户在 $[kT_b, (k+1)T_b]$ 时间内传送的数据为“1”,那么对于在接收端译码输出的比特差错概率为

$$p_e(m) = p_e[d_m(k) < 0] = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{[d_m(k) - \mu]^2}{2\sigma^2}} dz = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\mu}{\sqrt{2}\sigma}\right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left[\frac{\sqrt{\frac{\pi}{2} N \bar{\rho}_m}}{\sqrt{(4 - \pi)\bar{\rho}_m + 2\frac{N}{T_b} N_0}}\right] \quad (13)$$

式(13)中, $\operatorname{erfc}()$ 为余误差函数。

第 m 个用户在 $[kT_b, (k+1)T_b]$ 时间内传送的数据为“-1”,有同样的误码率结果。

3 数值分析

一般来说,式(13)给出的 MC-CDMA 系统的理论误码性能估计往往比较乐观。实际中,常用 Monte-Carlo 方法来对系统的误码性能进行数值分析。

仿真基于数值分析软件 Matlab6.5,作者利用 Simulink 构造了可视化分析平台进行 MC-CDMA 和 CDMA 无编码系统的基带仿真对比。系统映射采用 BPSK,扩频码采用 Walsh 码,地址长度为 64,进行 64 点 IFFT,CP 长度为 8,即保护间隔长度为符号长度的 1/8。多径信道的幅度、时延和相位可调,加入高斯白噪声。接收端采用 Viterbi 译码。

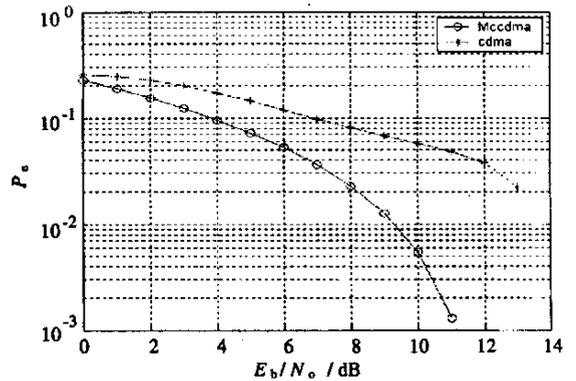


图2 多径数为 12 时 MC-CDMA 和 CDMA 的误码性能对比
Fig.2 BER comparison of MC-CDMA and CDMA with 12 multi-paths

从图 2 可以看出,未编码 MC-CDMA 在多径数为 12 大于保护间隔时,其误码性能大大优于 CDMA,表现了多载波 CDMA 优异的抗多径干扰和抗码间干扰的能力。这种性能对于无线宽带数据传输来说非常重要。图 3 是未编码 MC-CDMA 系统在信道具有不同多径数(3、5、7、9)时的误码性能,如果多径增加,系统误码率增加,9 条多径比 3 条多径的系统性能恶化 1 dB。由于时延越长的路径其传播的距离也越长,信号的衰落也越大,因此实际系统中路

径数大于12的多径是可以忽略的。

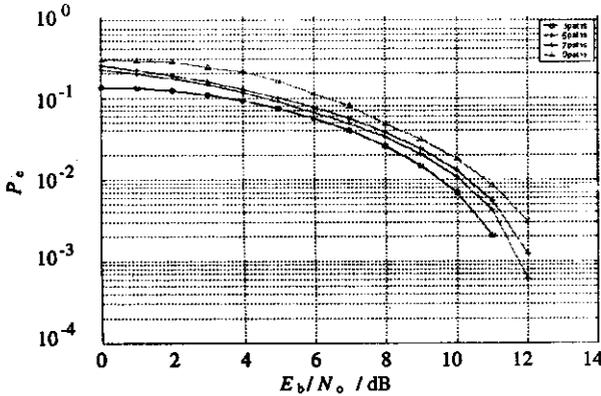


图3 不同多径数时MC-CDMA的误码性能对比
Fig. 3 BER comparison of MC-CDMA with various multi-paths

4 结论

MC-CDMA 技术是并行传输的OFDM 技术和 CDMA 技术的有效融合,克服了CDMA 系统面对无线宽带数据传输时由于扩展频谱而引起的码元周期缩短导致码间干扰严重的问题。作者分析了MC-CDMA 系统的模型,提出了一种通用的系统矩阵分析模型并给出了误码率分析。数值分析验证了MC-CDMA 系统的良好性能。

参考文献:

[1] BINGHAM J A C. Multicarrier modulation for data transmission; An idea whose time has come [J]. IEEE Communications

Magazine, 1990, 28(5): 5-14.

[2] PRASSAD R, HARA S. Overview of multi-carrier CDMA [J]. IEEE Commun. Magazine, 1997, 35(12): 126-133.

[3] ZHOU Shengli, GIANNAKIS Georgios B. Comparison of digital multi-carrier with direct sequence spread spectrum in the presence of multipath [C]. Proc. ICASSP2001, 2225-2228.

[4] 吴俊, 吴伟陵. 编码多载波CDMA 在瑞利衰落信道下的性能分析[J]. 北京邮电大学学报, 1998. 21(5): 23-29.

[5] 宫剑, 贾怀义. OFDM 技术及其仿真性能分析[J]. 铁道学报, 2002, (6): 45-48.

[6] 李向宁, 谈振辉. OFDM 基本原理及其在移动通信中的应用[J]. 重庆邮电学院学报(自然科学版), 2003, 15(2): 25-30.

[7] DERSH U, RUEGG R J. Simulation of time and frequency selective outdoor mobile radio channel[J], IEEE Trans, on veh. technol., 1993, 42(3): 338-344.

[8] 廖明, 杨士中, 吴玉成, 等. 基于OFDM 的宽带蜂窝移动通信系统[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2003, 26(6): 10-14.

(编辑:何先刚)

Performance of multi-carrier frequency diversity CDMA in Rayleigh fading channel

LIAO Ming, TAN Xiao-heng, ZHANG Zhi-hua,

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: On the basis of signal analyzing, MC-CDMA system is modeled, and then a universal matrix-analyzing model is advanced. The performance of bit error for single user MC-CDMA in Rayleigh fading channel is discussed, and a novel analyzing method for bit error ratio is proposed. The numerical results of simulation show that the ability of MC-CDMA for wireless broadband data transmission is much better than CDMA, therefore it has a better perspective for business application.

Key words: multi-carrier CDMA; OFDM; Rayleigh fading channel; BER