

多载波 CDMA 在 Rician 衰落信道的性能研究

王 灿* 李乐民

(电子科技大学抗干扰通信技术国防科技重点实验室 成都 610054)

【摘要】 在一种同步 OFDM-CDMA 的系统模型基础上,对频率非选择性 Rician 衰落信道的误码率性能进行了研究,分析和数值结果说明由于多径的存在系统误码率性能迅速下降,而且当直射成分很小时,信道为 Rayleigh 信道,系统性能变为最差。

关 键 词 码分多址; 正交频分多址; 正交频分复用-直接序列扩频-码分多址; Rician 衰落信道

中图分类号 TN919. 72

由于码分多址(CDMA)与其他多址技术相比具有容量高、可实现软切换、有效的利用了话音的沉默期等特点,而在移动通信中得到了广泛的应用,但 DS-CDMA 由于多址干扰和符号间干扰(ISI)难以实现高速数据传输。随着多媒体技术的快速发展,移动用户对业务种类的需求已从单纯的话音向活动图像、CD 质量的音频业务发展,这样传统的 DS-CDMA 就难以胜任了。正交频分多路(OFDM)^[1] 采用了并行传输技术,将快衰落造成的突发损伤有效地分散到多个符号(symbol)中,而不是将相邻的若干个符号完全毁坏;此外,OFDM 的并行处理技术将传输信号的符号周期延长了,降低了信号对信道多径扩散的敏感性,在经过了三十多年的发展以后,OFDM 目前已广泛应用于较高速率的无线通信中,例如:欧洲的数字音频广播(EP-DAB),数字 TV 广播,以及正在研究中的数字 HDTV 的传播^[2]。OFDM-CDMA 是近期提出的一种将 CDMA 和 OFDM 相结合的技术^[3],它结合了 OFDM 和 CDMA 的优点,对于高速数据的无线传输,其抗符号间干扰性能明显优于传统的单载波 CDMA。

本文在一种同步 OFDM-CDMA 的系统模型的基础上,对该模型的信号经非选择性 Rician 衰落信道后的接收比特差错概率性能进行了研究。

1 系统模型

OFDM-CDMA 的系统模型如图 1 所示。发信机中 $b_k(t)$ 为用户数据流,比特周期为 T_b , $b_{k,m}(t)$ 为 $b_k(t)$ 经串/并变换后的数据流,其符号周期为 MT_b ,文中令 $T=MT_b$ 。 $\alpha_k(t)$ 为第 k 个用户的地址码(又叫扩频码),每码周期为 T_c , $\alpha_k(t)=\alpha_{k+N}(t)$,且 $T_c=T/N$, N 为地址码长度,也叫扩频倍数。 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$ 为正交的多载波角频率,为了保证各子载波正交,要求满足^[1]

$$\omega_m = \omega_1 + (m - 1) \frac{2\pi}{T_c} \quad m = 1, 2, \dots, M \tag{1}$$

式中 ω_1 为频率最低的子载波角频率。发信机和收信机的正交多载波调制也可以用快速傅里叶变换(FFT)及反变换实现^[1]。为了分析方便,而又不失一般性,假设各用户、各子载波的发射功率

1997 年 8 月 25 日收稿
* 女 29 岁 在职博士生 讲师

相同为 P , 则第 k 个发信机的发射信号可表示为

$$s_k(t) = \sum_{m=1}^M \sqrt{2P} b_{k,m}(t) \alpha_k(t) \cos \omega_m t \tag{2}$$

$s_k(t)$ 经过 Rician 衰落信道, 当同步 CDMA 系统中正在工作的发射用户数为 K , 并且假设系统采用了理想的功率控制, 如图 1 所示到达接收机天线的信号为^[4]

$$r(t) = \sum_{k=1}^K s_k(t) + \sum_{k=1}^K f_k(t) + n(t) \tag{3}$$

式中 $s_k(t)$ 为第 k 个发射用户的直达分量; $n(t)$ 为零均值白高斯噪声, 其双边功率谱密度为 $N_0/2$; $f_k(t)$ 为 $s_k(t)$ 的多径衰落分量

$$f_k(t) = \sum_{m=1}^M \sqrt{2P} \lambda_{k,m} \beta_{k,m} b_{k,m}(t) \alpha_k(t) \cos(\omega_m t + \phi_{k,m}) \tag{4}$$

根据文献[4] 我们可以设定在 $b_{k,m}(t)$ 的一个符号周期 T 内, Rician 衰落信道的衰减系数满足 $E[\beta_{k,m}^2] = 1$, 而不影响信道模型的普遍性, 同时 $\beta_{k,m}$ 服从 Rayleigh 分布; $\phi_{k,m}$ 为衰落信道引起的相移, 在 $(0, 2\pi]$ 内均匀分布, 对不同的 k 和 m 为 i.i.d 分布; $\lambda_{k,m}$ 为一非负常数, 当 $\lambda_{k,m} = 0$ 时, 信道为加性白高斯信道, 当 $\lambda_{k,m} \rightarrow \infty$ 时(无直达分量), 信道为频率非选择性 Rayleigh 衰落信道。

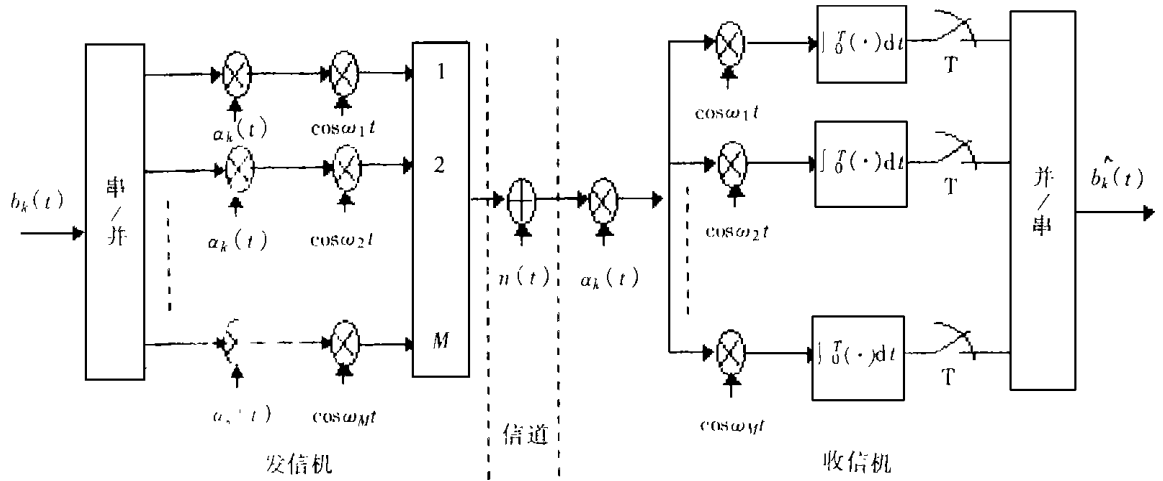


图 1 同频 OFDM-CDMA 系统模型

2 干扰分析

本文可以分析第 k 个接收用户第 1 个子载波的相关信号, 而不失一般性。当 $t = T$ 时, 式(3) 所示的接收信号经过图 1 所示接收机的相关器后的输出信号为

$$Z_{k,1} = \int_0^T r(t) \alpha_k(t) \cos \omega_1 t dt = D + I_f + \eta \tag{5}$$

式中 D 为需要的接收信号, 即式(3)中的第一项 $\sum_{k=1}^K s_k(t)$ 经接收机的输出, 因为系统同步且 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$ 正交

$$D = \int_0^T (\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^M \sqrt{2P} b_{i,j}(t) \alpha_i(t) \cos \omega_j(t) \alpha_k(t) \cos \omega_1 t dt =$$

$$\sqrt{2P} \int_0^T b_{k,1}(t) \alpha_k^2(t) \cos^2 \omega_1 t dt = \sqrt{P/2} b_{k,1} T \quad (6)$$

式(5)中 $\eta = \int_0^T n(t) \alpha_k(t) \cos \omega_1 t dt$ 为零均值高斯随机变量, 其方差为 $N_0 T/4$; I_f 为干扰信号, 由式(3)中的衰落分量 $\sum_{k=1}^K f_k(t)$ 产生, 且

$$I_f = \int_0^T \left[\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^M \sqrt{2P} \lambda_{i,j} \beta_{i,j} b_{i,j}(t) \alpha_i(t) \cos(\omega_j t + \phi_{i,j}) \right] \alpha_k(t) \cos \omega_1 t dt \quad (7)$$

令

$$I_1 = \sqrt{2P} \int_0^T \lambda_{k,1} \beta_{k,1} b_{k,1}(t) \alpha_k^2(t) \cos \phi_{k,1} dt = \sqrt{P/2} \lambda_{k,1} \beta_{k,1} b_{k,1} T \cos \phi_{k,1} \quad (8)$$

$$I_2 = \sqrt{2P} \sum_{j=2}^M \lambda_{k,j} \beta_{k,j} \int_0^T b_{k,j}(t) \alpha_k^2(t) \cos[(\omega_j - \omega_1)t + \phi_{k,j}] dt \quad (9)$$

显然, $I_f = I_1 + I_2$. 由式(8)可以看出 I_1 的均值为零, 其方差为

$$E[(I_1)^2] = \frac{PT^2}{8} \lambda_{k,1}^2 \quad (10)$$

下面分析 I_2 , 将式(1)代入式(9)积分后得

$$I_2 = \sqrt{2P} \sum_{j=2}^M \lambda_{k,j} \beta_{k,j} b_{k,j} \sin \left[\frac{2\pi(j-1)}{T_c} t + \phi_{k,j} \right] \Big|_0^T = 0 \quad (11)$$

3 误码率性能分析

假设第 k 个用户在 $(0, T]$ 时间内第一子载波上传“1”, 则相关器的输出 $Z_{k,1}$ 服从高斯分布, 由式(5)~(9)可得 $Z_{k,1}$ 的均值和方差为

$$m_z = E[Z_{k,1}] = \sqrt{PT^2/2} \quad (12)$$

$$\sigma_z^2 = \text{Var}[Z_{k,1}] = \frac{N_0 T}{4} + \frac{PT^2}{8} \lambda_{k,1}^2 \quad (13)$$

对于第 k 个接收机的第一子载波的比特差错概率为

$$P_{ek,1} = \text{Pr}\{Z_{k,1} < 0\} = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp[-(z - m_z)^2/2\sigma_z^2] dz \quad (14)$$

式(14)用误差补函数 $\text{erfc}(\cdot)$ 可表示为

$$P_{ek,1} = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{m_z}{\sqrt{2}\sigma_z}\right) \quad (15)$$

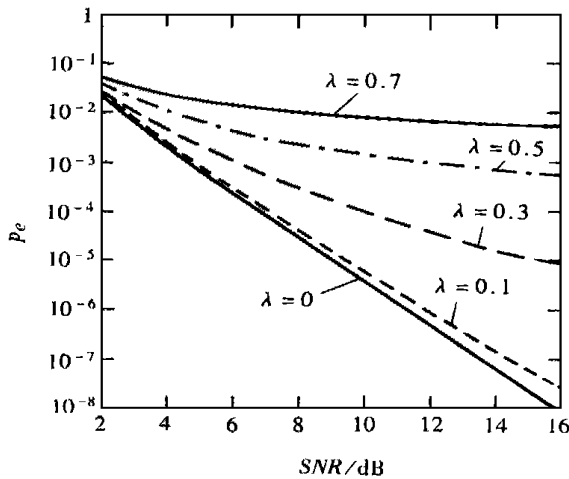


图2 频率非选择性 Rician 衰落信道的误码率

且 $\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp(-t^2) dt$.

对于第 k 个用户, M 条正交支路的总比特误码率为

$$P_e = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{m_z}{\sqrt{2}\sigma_z}\right) \quad (16)$$

显然, 式(16)也适合系统内其他用户。

4 数值结果及结论

在下面的数值分析中, CDMA 系统的地址 $N=31$, 根据式(10), (12)和式(16)得到如表 1 所示的数据。由表 1 得到图 2 的误码率与信噪比曲线。

表 1 OFDM-CDMA 系统在频率非选择性 Rician 衰落信道的误码率

SNR/dB	$Pe(\lambda=0.1)$	$Pe(\lambda=0.3)$	$Pe(\lambda=0.5)$	$Pe(\lambda=0.7)$
2	2.3×10^{-2}	2.8×10^{-2}	3.7×10^{-2}	5.1×10^{-2}
4	3.0×10^{-3}	5.0×10^{-3}	1.0×10^{-2}	2.2×10^{-2}
6	3.2×10^{-4}	1.0×10^{-3}	4.0×10^{-3}	1.4×10^{-2}
8	4.4×10^{-5}	3.0×10^{-4}	2.0×10^{-3}	1.0×10^{-2}
10	6.4×10^{-6}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-3}	8.0×10^{-3}
12	9.8×10^{-7}	3.9×10^{-5}	9.7×10^{-4}	7.0×10^{-3}
14	1.6×10^{-7}	1.7×10^{-5}	7.1×10^{-5}	9.0×10^{-3}
16	2.6×10^{-8}	8.0×10^{-6}	5.5×10^{-4}	5.0×10^{-3}

从图 2 可以看出, 参数 λ 对系统误码率的影响很大, 在信噪比相同时, λ 越大系统误码率也越大; 当 $\lambda=0$ 时, 系统性能最好, 此时信道为加性白噪声信道, 不存在多径分量; 当 $\lambda\rightarrow\infty$ 时(图 2 中未作出), 信道为 Rayleigh 信道, 系统误码率性能很差。

根据本文的分析和数值计算, 在 Rician 信道中, 如果多径成分的信道衰减系数越大, 系统的误码率越小; 当几乎没有直射波时(Rayleigh 信道), 系统误码率很大, 如果不采取抗衰落技术, 将无法进行正常的通信。由于本文采用的系统为同步 CDMA, 多址干扰对系统性能的影响很小; 但对于异步 CDMA 或准同步 CDMA 系统, 多址干扰将会使性能进一步的下降, 这还有待于进一步的研究。

参 考 文 献

1 Weinstein S B. Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete fourier transform, IEEE Trans Commun Tech, 1971, 19(5) :628~ 634

2 Ramchandran K. Multiresolution broadcast for digital HDTV using joint source/ channel coding. IEEE J. S. A. C., 1993, 11(1) :6~ 23

3 Fazel K. Performance of CDMA/OFDM for mobile communication system. IEEE ICUPC Proc., Ottawa : 1993

4 Varanasi M K, Aazhang B. Optimally near-far resistant multiuser detection in differentially coherent synchronous channels. IEEE Trans Inform Theory, 1991, 37(70) :1 006~ 1 018

5 Pursley M B. Performance evaluation for phase-coded spread-spectrum multiple-acces communication-Part I :system analysis. IEEE Trans Commun, 1977, 25(8) :795~ 799

6 Sourour E A. Performance of orthogonal multicarrier CDMA in a multipath fading channel. IEEE Trans Commun, 1996, 44(3) :356~ 367

7 Proakis J G. Digital communications. New York :McGraw-Hill, 1983

Performance Analysis of Multi-carrier CDMA in a
Non-Selective Rician Fading Channel

Wang Can Li Lemin

(National Communication Lab., UEST of China Chengdu 610054)

Abstract Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) is a general technique for data parallel transmission on multiple carriers. One principal advantage of OFDM is its utility for transmission at nearly optimum performance in unequalized channels and in multipath channels. OFDM-CDMA is a new concept that applies the orthogonal multicarrier technique to direct sequence CDMA systems. A synchronous OFDM-CDMA model is presented in this paper, and the performance of this system in a non-selective Rician fading channel is also evaluated. The numerical results show the system bit error probability degrades rapidly due to multipath component.

Key words code division multiple access; orthogonal frequency division multiplexing; OFDM-CDMA; non-selective Rician fading channel

编辑 徐培红

.....

“科研成果介绍”

X 波段雷达频率合成器

主研人员: 张玉兴 张开智 陆祖森 蒙以然 敬守钊 阳 光等

完成实用化 X 波段雷达频率综合器样机, 样机已通过环境试验要求。达到指标如下:

工作频率范围: 8.6 GHz ~ 9.5 GHz, 本振输出功率≥17.5 dBm;

本振输出相噪: $\mathcal{A}$ 1kHz ≤ -90 dBc/Hz;

本振输出谐波: < -50 dBc; 本振输出杂散 < 60 dBc;

激励输出功率: ≥ 500 mW; 跳频时间: ≤ 100 ms;

环境温度范围: $-40^{\circ}\text{C} \sim +60^{\circ}\text{C}$ 。

该样机指标已达国外同类产品(瑞典生产的“空中卫士”)的水平, 属国内领先水平。

“科 卞”