

频率选择性衰落信道中 MC-CDMA 信号检测技术

陈 霞, 谈振辉

(北方交通大学现代通信研究所, 北京 100044)

摘 要: 正交多载波码分多址(MC-CDMA)是近年无线宽带通信研究的热点. 本文介绍了 MC-CDMA 信号检测技术, 在分析频率选择性衰落信道中单小区 MC-CDMA 系统上/下行多址干扰(MAI)的基础上, 指出上行接收引入多用户检测技术(MuD)的必要性和可能性, 并通过与直接序列(DS)CDMA 的对照和对偶性分析, 讨论了 MC-CDMA MuD 的发展方向.

关键词: MC-CDMA; 多址干扰; 检测

中图分类号: TN929.533

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2003) 04-0627-04

MC-CDMA Detection Techniques in Frequency Selective Fading Channels

CHEN Xia, TAN Zhen-hui

(Modern Communication Institute, Northern Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Orthogonal Multi-carrier Code Division Multiple Access (MC-CDMA) has attracted much attention in recent years. In this paper, an overview of MC-CDMA detection techniques is presented, and we point out the necessity and possibility of introducing multi-user detection (MuD) techniques into MC-CDMA uplink reception, based on an analysis of the Multiple Access Interference (MAI) in both uplink and downlink. Moreover, by comparing Direct Sequence (DS) CDMA and MC-CDMA and analyzing the duality between them, we discuss the future development of MC-CDMA MuD.

Key words: MC-CDMA; multiple access interference; detection

1 引言

CDMA 已成为第三代移动通信的主流, 但 DS-SS 接收机处理速度随码片(chip)速率迅速增加, 给高速传输的实现带来很大困难. 正交频分复用(OFDM)多载波调制能有力地抗信道弥散和降低要求的码片速率, 因而它与 CDMA 的结合是近几年研究的热点之一, MC-CDMA 就是其中的一种重要形式^[1].

MC-CDMA 是作为适合室内环境高速传输的调制和多址技术提出的^[2,3]. 因为具有频谱效率高、抗 ISI 能力强等优点, 研究它在移动环境中的应用很有价值. 另外, 其调制/解调部分可采用离散傅立叶变换, 通过数字信号处理(DSP)技术实现, 符合向软件无线电发展的趋势. 但 MAI 仍是提高移动 MC-CDMA 系统容量和性能的主要障碍之一. 以消除 MAI 为目的的多用户检测(MuD)^[4]近年来得到了深入的研究, 实现 MC-CDMA MuD 的想法是自然的.

文章第2节阐述 MC-CDMA 传输模型和衰落信道模型. 第3节分析单小区系统上/下行链路 MAI 的多种原因. 第4节介绍 MC-CDMA 信号检测技术. 在第5节, 我们提出依照 DS-SS MuD(简称 DS-MuD)分类对 MC-CDMA MuD(简称 MC-MuD)分类, 并讨论 MC-MuD 发展方向和应注意的问题.

收稿日期: 2001-09-20; 修回日期: 2002-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(No. 90104016)

2 系统模型

2.1 MC-CDMA 传输

MC-CDMA 传输原理如图1. 其中 $b_{k,p}(n)$ 是第 k 个用户第 p 个支路的第 n 个数据符号, $a_{k,l}$ 是长度为 L 的第 k 个用户的扩频码第 l 个 chip, P 是串/并变换路数, i 是子载波角频率. 被同一数据符号调制的 L 个 chip 并行传输. 相邻载波间隔为 $1/T_s$. 为了增强抗 ISI 能力, 通常符号之前还要插入保护间隔. 为使子载波衰落为频率非选择性, 串/并变换使 T_s 增大. 在 chip 周期上, 相邻子信道频谱相互重叠, 载波频率为:

$$f_o = f_i + (i-1)/T_s \quad (f_i = i/2) \quad (1)$$

其中 $i = p + (l-1)P$; $p = 1, 2, \dots, P$; $l = 1, 2, \dots, L$. f_o 为给定的参考频率. 为提高频率分集数, (等间隔)交织使传输同一数据符号的各子载波间隔最大. 第 k 个用户发射信号可表示为:

$$S_k(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sqrt{2S_k} \sum_{p=1}^P \sum_{l=1}^L b_{k,p}(n) a_{k,l}(n) \mu_{T_s}(t - nT_s) \cos(\omega_i t + \phi_{k,i}) \quad (2)$$

其中 $\sqrt{2S_k}$ 是第 k 个用户一个载波的信号幅度(假设各载波等功率); $\mu_{T_s}(t)$ 是 $[0, T]$ 上的基带脉冲波形, 为分析简便一般假设为矩形波; $\phi_{k,i}$ 是第 k 个用户第 i 个载波的初始相位, 后面

都假设为 0.

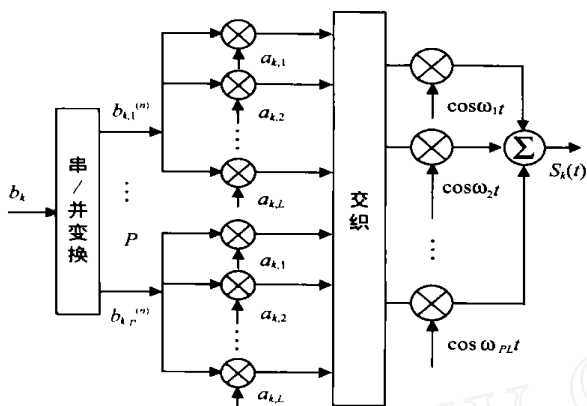


图 1 MC-CDMA 发射机结构

2.2 衰落信道模型

为使子载波衰落为频率非选择性必须满足:

$$1/T_s \ll (\Delta f)_c \quad (3)$$

其中 \$(\Delta f)_c = 1/T_m\$, 是信道相干带宽, \$T_m\$ 是信道最大延迟扩展^[5]. 如果要求同一数据比特的各子载波衰落独立, 应满足:

$$(\Delta f)_c \ll P/T_s \quad (4)$$

要保证信道特性在一个符号周期内基本不变, 还应有:

$$T_s \ll (\Delta t)_c \quad (5)$$

其中 \$(\Delta t)_c\$ 是信道相干时间. 容易选择 \$P\$ 满足式 (3) 和 (5), 因为 \$(\Delta t)_c\$ 一般比 \$T_m\$ 大得多. 但式 (4) 通常难以满足, 相邻码片所在子载波衰落相关^[6]. 为了简化分析, 假设各子载波衰落特性相同. 设用户 \$k\$ 的第 \$i\$ 个载波的基带信道脉冲响应为:

$$g_{k,i}(t) = h_{k,i}(t) e^{j\phi_{k,i}(t)} \quad (6)$$

当传播的路径较多时, 根据中心极限定理, \$g_{k,i}(t)\$ 可近似为复高斯随机变量. 移动通信中上行是多址信道, 下行是复用信道, 所以下行同步而上行非同步的模型更接近实际情况. 设单小区系统有 \$K\$ 个活跃用户, 则上行接收信号 \$r_u(t)\$ 和下行第 \$k\$ 个用户接收信号 \$r_{d,k}(t)\$ 分别为 (略去式中其它因子下标 \$u\$ 和 \$d\$):

$$r_u(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left((t) + \sqrt{2S} \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{l=1}^L h_{k,i}(t) b_{k,p}(n) \cdot a_{k,l}(n) \cdot \mu_{T_s}(t - nT_s - \tau_k) \cos(\omega_c t + \phi_{k,i}(t)) \right) \quad (7)$$

$$r_{d,k}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left((t) + \sqrt{2S} \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{l=1}^L h_{k,i}(t) b_{k,p}(n) \cdot a_{k,l}(n) \cdot \mu_{T_s}(t - nT_s) \cos(\omega_c t + \phi_{k,i}(t)) \right) \quad (8)$$

其中: \$\phi_{k,i}(t) = \phi_{k,i}(t) - \omega_c \tau_k\$; \$\tau_k\$ 是信号经多径传播的相位变化, \$\tau_k\$ 是第 \$k\$ 个用户相对于参考用户的时间错位; \$\omega_c\$ 是时间错位引起的相位变化; \$r_{d,k}(t)\$ 中 \$\phi_{k,i}(t) = \phi_{k,i}(t)\$, 没有时间错位引起的相位变化; \$(t)\$ 是零均值、功率谱密度为 \$N_0/2\$ 的双边白噪声.

3 MAI 分析

造成移动 MC-CDMA 系统 MAI 的因素很多, 但尚未有文献对此做过分析, 人们倾向于仅考虑自己关心的某种环境中

的 MAI. 在大多数情况下, 为了简化问题这样做是必须的. 但较全面的认识 MAI 机制对讨论 MC-MuD 很重要, 对 MC-CDMA 研究的其它方面也有帮助.

图 2 为 MC-CDMA 接收机原理框图. 接收端对接收信号进行 OFDM 解调、解交织和并/串变换之后对信号进行检测. MC-CDMA MAI 产生的原因主要有: 1) 非正交扩频码; 2) 功率控制不完善; 3) 频率选择性衰落; 4) 非同步传输; 5) 非理想 OFDM 解调.

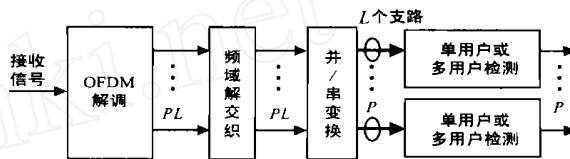


图 2 MC-CDMA 接收机原理

如果使用非正交扩频码, 因为扩频码互相关不为零, 即使没有其它因素影响, 也存在 MAI. 功率控制不完善会带来远近效应, 造成处于小区边界或其它不利传播条件下的用户通信中断或无法接入. 从式 (7) 和 (8) 可以看出, 通过频率选择性衰落信道后, 各个子载波会有不同幅度和相移. 即使同步传输、无交织, 对应于同一数据比特的 \$L\$ 个子载波高度相关时, 用户间正交性也会失真, 产生 MAI.

从式 (7) 中看到, 非同步传输的影响主要有两方面, 期望用户相对于参考用户的时间错位及相应的相位变化. 当时间错位大于保护间隔时, 会在 OFDM 解调后产生载波间干扰 (ICI)^[7]. 即使使用正交码, 用户间正交性也会失真. 文 [6] 的仿真表明: 小信噪比 (SNR) 时, 白噪声和信道衰落效应支配着 MAI, 系统性能主要依赖于能达到的分集数; 而大 SNR 情况下, MAI 主要由不同步 OFDM 解调的 ICI 导致, 并且这时 MAI 是影响系统性能的主要因素. 另外, 使 OFDM 解调性能不理想的还包括频率偏移、相位噪声等时变因素^[7], 这些因素都会直接或间接地引起 ICI, 进而导致 MAI.

由以上分析可知, 如果信道相干带宽较大, 可采用正交扩频码来减小原因 1 造成的下行链路 MAI; 否则, 原因 1 会给出、下行链路造成基本相当的 MAI. 原因 3 和 5 上、下行链路信号都有. 原因 2 和 4 只在上行多址信道中存在. 因此上行链路会受到比下行链路更严重的 MAI.

4 单用户检测技术

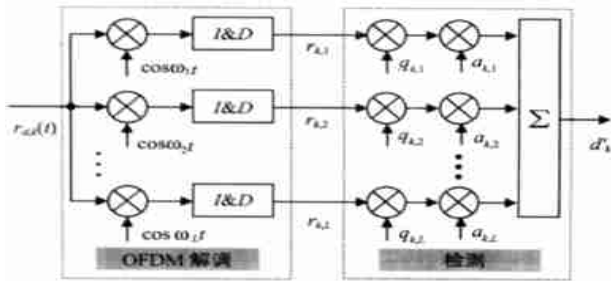
图 3 为传统的单用户接收机结构, 完成子载波信号相关接收解交织和一个数据符号的检测 (\$p=1\$). 判决变量可表示为:

$$d_k = \sum_{l=1}^L r_{k,l} \cdot q_{k,l} \cdot a_{k,l} \quad (9)$$

$$r_{k,l} = \sum_{k=1}^K h_{k,l} \cdot b_k \cdot a_{k,l} + n_l \quad (10)$$

其中 \$r_{k,l}\$、\$h_{k,l}\$ 和 \$n_l\$ 分别是第 \$k\$ 个用户第 \$l\$ 个子载波信号的复基带成分、信道复包络和复白高斯噪声. \$\{q_{k,1} \sim q_{k,L}\}\$ 是加权系数, 由具体检测技术利用信道状态信息 (CSI) 得到.

因为等增益合并 (EGC) 和最大比合并 (MRC) 检测的分析



虽然文献[3,8]并未用多用户信号检测的理论加以阐述,但已经具备了 PIC MuD 的特征. 这种方法先对所有用户信号进行一次单用户检测,然后对每个用户计算其它用户的 MAI,并从接收信号中减去 MAI,然后再进行一次单用户检测,因此是一级 PIC. ID 的两次单用户检测方案可根据需要选择. EGC-EGC MuD、ORC-MRC MuD、CE-ML MuD 是其中几种形式^[1].

MMSEIC^[1]基于 MMSE 准则估计和抵消多址干扰,试图使均方误差最小. 而 DIC^[1]是基于解相关原理估计和抵消多址干扰.

5.3 MC-MuD 的分类

按照文[4]中 DS-MuD 分类方法和 5.2 节的介绍,我们将 MC-MuD 技术分成 JD 及 IC 两大类. 虽然 MC-MuD 较 DS-MuD 少(应是研究深度和广度不足的缘故),但它们之间的确存在相当程度的对应,这种对应的根源是 MC-CDMA 和 DS-CDMA 之间的对偶关系. 如果将 DS-CDMA 扩频序列经傅立叶变换,用 DS-CDMA 发射机就可以发送 MC-CDMA 信号. 利用这一对偶关系,MC-CDMA 系统可以在许多方面向更成熟的 DS-CDMA 借鉴. 比如 MuD 技术,就是一种 DS-MuD 方案“应该”有一种对偶 MC-MuD 方案.

应当注意,时域处理和频域处理技术水平及相应的接收机实现复杂度是有差异的. 一种 MuD 方案在 MC-CDMA 系统和 DS-CDMA 系统,具体通信环境下的性能也不同.

6 结束语

本文在分析衰落信道 MC-CDMA 系统上/下行链路 MAI 机制的基础上,指出上行 MuD 的必要性和可能性,并根据 MC-CDMA 和 DS-CDMA 的对偶性和 MC-MuD 和 DS-MuD 方案的对比,提出依照 DS-MuD 分类方法对 MC-MuD 分类,使 CDMA MuD 的概念更加完善,并进一步将已有 DS-MuD 方案移植到 MC-CDMA 系统的发展方向.

参考文献:

- [1] R Prasad, et al. An overview of multi-carrier CDMA [C]. Proc. of 1996 ISSSTA:107 - 114.
- [2] N Yee, et al. Multi-carrier-CDMA in indoor wireless networks [C]. Proc of 1993 PIMRC:109 - 113.
- [3] K Fazel. Performance of CDMA/ OFDM for Mobile Communication System [C]. Proc of 1993 ICUPC:975 - 979.
- [4] D Koulakiotis, et al. Data detection techniques for DS/ CDMA mobile systems: A review [J]. IEEE Per Comm. June 2000:24 - 34.
- [5] J Proakis. Digital Communications [M]. 3rd edition, McGraw-Hill, 1995.
- [6] X Gui, et al. Performance of Asynchronous Orthogonal Multicarrier CDMA System in Frequency Selective Fading Channel [J]. IEEE Trans Comm, 1999, 47(7):1084 - 1091.
- [7] M Speth, et al. Optimum receiver design for wireless broadband systems using OFDM - part I [J]. IEEE Trans Comm. 1999, 47(11):1668 - 1677.
- [8] S Kaiser. On the performance of different detection techniques for OFDM/ CDMA in fading channels [C]. Proc of 1995 GLOBECOM: 2059 - 2063.
- [9] S Hara, et al. Design and performance of multicarrier CDMA system in frequency-selective rayleigh fading channels [J]. IEEE Trans Vehi. Tech, 1999, 48(5):1584 - 1595.
- [10] N Yee, et al. Wiener filtering of multi-carrier CDMA in a rayleigh fading channel [C]. Proc of 1994 PIMRC, Vol. 4:1344 - 1347.
- [11] P Jung, et al. Joint detection for multicarrier CDMA mobile radio systems- Part II: detection techniques [C]. Proc. of 1996 ISSSTA:996 - 1000.
- [12] B Steiner. Uplink performance of a multicarrier-CDMA mobile radio system concept [C]. Proc of 1997 VTC:1902 - 1906.

作者简介:



陈霞 女, 1975 年 5 月生于上海松江, 1997 年毕业于北方交通大学通信与控制工程系, 现于该校现代通信研究所攻读博士学位, 研究方向为移动通信.



谈振辉 男, 1944 年 2 月生于上海市, 北方交通大学通信系教授、工学博士、博士生导师、中国通信学会会员.