

## MC-CDMA 系统采用解相关-并行干扰抵消检测器的性能分析<sup>1</sup>

栾英姿 李建东 杨家玮

(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室 信息科学研究所 西安 710071)

**摘要:** 该文分析了 MC-CDMA 系统采用解相关-并行干扰抵消 (DEC-PIC) 多用户检测器的性能, 把它与 Hara 提出的最小均方误差合并 (MMSEC) 单用户检测器在上行和下行信道加以比较, 仿真结果显示下行信道应用 MMSEC 单用户检测性能较好, 且能抵抗信道估计错误, 而上行信道多用户检测器的性能也较好, 但是多用户检测器会受较大的信道估计错误影响而性能降低。

**关键词:** MC-CDMA, 解相关-并行干扰抵消, 多用户检测, 最小均方误差合并, 单用户检测, 瑞利衰落信道

**中图分类号:** TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)04-0517-08

## The Performance Analysis of DEC-PIC Detector Exploited in MC-CDMA System

Luan Ying-zi Li Jian-dong Yang Jia-wei

(National Key Lab of ISN and Info. Sci. Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract** This paper analyzes the performance of DEC- Parallel Interference Canceling(DEC-PIC) multiuser detector exploited in MC-CDMA system. It is compared with Hara's Minimum Mean Square Error Combining(MMSEC) single-user detector in the uplink and downlink channels. The simulation results show that MMSEC single user detector is better in the downlink, and it can resist the channel estimation error. And in the uplink, the performance of the multiuser detector is better, but the large channel estimation error will bring performance degradation.

**Key words** MC-CDMA, DEC-PIC, Multiuser detection, MMSEC, Single-user detection, Rayleigh fading channel

### 1 引言

MC-CDMA(MultiCarrier Code Division Multiple Access) 是在 1993 年的国际会议上首次提出的。它结合了正交频分复用 (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM) 和 CDMA 技术。MC-CDMA 信号可以采用快速傅里叶变换 (FFT) 来方便地发送和接收, 且不提高发射机和接收机的复杂度, 由于子载波间的频谱重叠而获得了高效频谱利用率。它的编码、峰值、同步以及接收等问题得到了广泛的研究, 本文着重讨论它的接收问题。到目前为止, 关于 MC-CDMA 的接收大多数分析单用户检测的性能<sup>[1-5]</sup>, 在这里作者主要集中于对多用户检测器与单用户检测器 [5] 的性能进行比较。

多用户检测器中多个用户的码字和信道信息被联合用来更好地检测出单个用户。它最初的提出是用于 CDMA 系统。Verdu<sup>[6]</sup> 的开创性的工作分析了最优多用户检测器, 或称最大似然

<sup>1</sup> 2002-08-14 收到, 2003-04-23 改回

国家 863 计划 (2001AA123031)、高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划和国家自然科学基金 (60372048) 资助课题

序列检测器, 但是其算法复杂性随活动用户数指数增加。因此, 在过去十几年中, 大多数的研究集中于更易于实现的次优多用户检测方案上。总结起来共有 4 种方案<sup>[7]</sup>, 解相关 (DEC) 检测器, 最小均方误差 (MMSE) 检测器, 并行干扰抵消器 (PIC) 和串行干扰抵消器 (SIC)。线性解相关检测应用相关矩阵求逆来分离出所需数据, 它能够克服多址干扰。MMSE 检测器使得检测器的输出和发送码元间的均方误差最小, 这种检测器把背景噪声和多址干扰都考虑进去。对于实际情况, 干扰抵消体制 (IC) 得到了很多注意, 它需要初始判决矢量。PIC 体制的基本原理是估计所有用户的幅值并抽取所有的多址干扰, 再回馈到第一级检测器, 进行再度判决。PIC 体制要取得好的性能的前提是初始估计错误率较低。

当前多用户检测用于 MC-CDMA 系统的研究主要有两个方面: 一是不与解码结合起来的独立多用户检测<sup>[8,9]</sup>, 二是与解码结合起来的迭代多用户检测<sup>[10,11]</sup>, 一般都是假设在已知信道信息的情况下。本文集中于与单用户检测器<sup>[5]</sup>的性能比较, 采用了与文献 [5] 同样的 MC-CDMA 发送信号, 将高速数据流经过串 / 并变换为低速数据流, 没有考虑信道编码部分。在文献 [8-11] 的发送框架中, 并没有将输入高速数据流经过串 / 并变换, 但都采用了信道编码, 与本文的具体实现存在差异, 因此在本文中并没有与它们加以比较。

本文选择采用的多用户检测器为解相关-并行干扰抵消 (DEC-PIC) 体制。Hara 提出的单用户检测<sup>[4,5]</sup>采用 MMSEC (Minimum Mean Square Error Combining, 最小均方误差合并), EGC (Equal Gain Combining, 等增益合并) 和 MRC (Maximum Ratio Combining, 最大比合并) 3 种方案。这些检测器都要已知多用户特征码和信道特性。目前关于多载波系统的信道估计已作了大量研究<sup>[12-14]</sup>。本文假设已经得到信道的估计, 主要通过仿真方法分析多用户情况时上、下行不同的信道情况对于各种检测器的影响。

文章安排如下: 第 2 节描述 MC-CDMA 系统, 包括发射信号、信道响应和接收信号的数学表达; 第 3 节介绍用于 MC-CDMA 系统的多用户和单用户检测方法, 第 4 节是仿真结果, 最后在第 5 节给出结论。

## 2 多用户 MC-CDMA 模型

### 2.1 发射器

我们首先考虑单小区上行信道情况, 系统包括  $W$  个用户终端准同步发送给基站的 MC-CDMA 码元,  $W$  是小区中总的用户数。图 1 示出了第  $w$  个用户发射给基站的上行 MC-CDMA 码元形成框图。

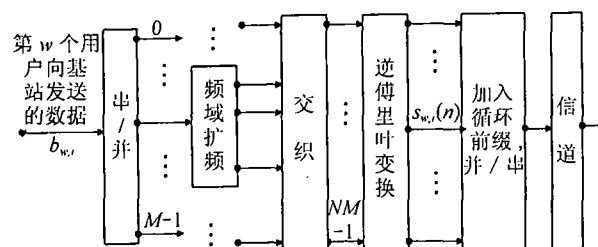


图 1 第  $w$  个用户的 MC-CDMA 码元形成框图

首先经过 BPSK 调制的数据流被串 / 并为  $M$  组; 再经过扩频增益为  $N$  的频域扩频; 经过长度为  $NM$  的 IFFT; 形成以下码元:

$$s_{w,i}(n) = A_w \sum_{k=0}^{NM-1} c_{w,k,i} e^{j2\pi nk/(NM)} \quad (1)$$

其中  $c_{w,k,i} = b_{w,k\%M,i} a_{w,[k/M]}$ ,  $i$  是 FFT 块下标,  $i = 0, \dots, \infty$ ,  $w$  是用户编号,  $n$  是时域离散抽样点,  $k$  是子载波下标,  $k = 0, \dots, NM - 1$ ,  $NM$  是 IFFT 长度,  $b_{w,k\%M,i}$  是在第  $i$  个 IFFT 块第  $w$  用户的发送数据比特,  $k\%M$  是  $k$  除以  $M$  的余数, 代表输入数据的分组数,  $a_{w,[k/M]}$  是第  $w$  用户在子载波  $k$  的频域扩频切普, 它是长度为  $N$  的 WH 码,  $[k/M]$  代表  $k/M$  下取整,  $A_w$  是  $w$  用户的发射幅度。

### 2.2 信道模型

在无线信道模型中, 从发射机到接收机可能不只有一条路径。不同路径的时延和衰减因子在移动环境下通常是时变的。如果我们假设信道由它的延迟功率谱 (或多径强度谱) 决定。在带限信号情况下, 时变散射多径信道可以由时变参数和固定抽头间隔的抽头延迟线来表达。时延扩展  $T_d$  小于或等于保护周期。

由于 MC-CDMA 把很宽的频段分为较小的子带, 因此可以把频率选择性衰落信道转换成每子载波的平坦衰落信道。因为信道的相干时间远远大于码元周期, 我们也假设信道是慢衰落的。每载波的路径增益和相移在一个 FFT 块周期  $[0, NT_s]$  ( $T_s$  是抽样周期) 内为常量 (这是本文分析的一个关键假设), 记为  $\alpha_{w,i}$  和  $\theta_{w,i}$ ,  $\alpha_{w,i}$  是服从瑞利分布的随机变量,  $\theta_{w,i}$  是均匀分布于  $[0, 2\pi]$  的随机变量, 它们在 IFFT 块之间的变化速度由最大多普勒频移决定。

设  $\tau_{l,w}$  是第  $w$  用户第  $l$  条多径的延迟时间,  $l = 0, \dots, L$ , 因此延迟路径总数是  $L + 1$ , 可以假设  $\tau_{l,w}$  是离散点抽样周期的整数倍,  $\tau_{l,w} = l'T_s$ ,  $l'$  是实际的延时与抽样周期的比值。信道脉冲响应 (CIR) 对应于  $\tau_{l,w}$  的系数为

$$h_{w,i}(\tau_{l,w}) = \alpha_{w,i} e^{j\theta_{w,i}} c e^{-r l/L} \tag{2}$$

其中  $c = 1 / \sum_{l=0}^L e^{-r l/L}$ ,  $r$  是指数衰减因子。在下行信道,  $\alpha_{w,i}$ ,  $\theta_{w,i}$ ,  $\tau_{l,w}$  与不同用户  $w$  无关。在上行信道,  $\alpha_{w,i}$ ,  $\theta_{w,i}$ ,  $\tau_{l,w}$  对于不同用户取值是不同的。

### 2.3 接收信号

MC-CDMA 接收框图见图 2。

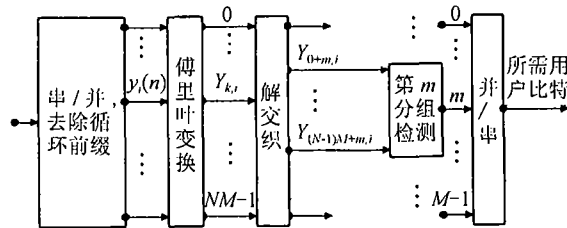


图 2 MC-CDMA 接收端框图

经过信道后, 经过串/并变换, 去除循环前缀, 接收信号为信道响应与发射信号的离散卷积, 表达为

$$y_i(n) = \sum_{w=0}^{W-1} \sum_{l'=0}^{NM-1} h_{w,i}(l') s_{w,i}(n-l') + z_i(n) \tag{3}$$

把式 (1) 代入式 (3) 得到

$$y_i(n) = \sum_{w=0}^{W-1} A_w \sum_{l'=0}^{NM-1} h_{w,i}(l') \sum_{k=0}^{NM-1} c_{w,k,i} \exp \left[ j 2\pi \frac{(n-l')k}{NM} \right] + z_i(n) \tag{4}$$

上式离散积分内参数交换次序得到

$$y_i(n) = \sum_{w=0}^{W-1} A_w \sum_{k=0}^{NM-1} c_{w,k,i} e^{j2\pi nk/(NM)} \sum_{l'=0}^{NM-1} h_{w,i}(l') e^{-j2\pi l'k/(NM)} + z_i(n) \quad (5)$$

$z_i(n)$  是均值为 0, 方差为  $\sigma_n^2/2$  的复高斯噪声. 定义  $H_{w,k,i} = \sum_{l'=0}^{NM-1} h_{w,i}(l') e^{-j2\pi l'k/(NM)}$ , 则上式可以写为

$$y_i(n) = \sum_{w=0}^{W-1} A_w \sum_{k=0}^{NM-1} c_{w,k,i} H_{w,k,i} e^{j2\pi nk/(NM)} + z_i(n) \quad (6)$$

由于信道频域响应  $H_{w,k,i}$  被假设为在一个傅氏变换周期内保持不变, 因此载波间干扰化为 0; 只存在多用户间干扰. 接收信号经过 FFT 后成为

$$Y_{ki} = \frac{1}{NM} \sum_{n=0}^{NM-1} y_i(n) e^{-j2\pi nk/(NM)} = \frac{1}{NM} \sum_{w=0}^{W-1} A_w c_{w,k,i} H_{w,k,i} + Z_{k,i} \quad (7)$$

$k$  是子载波下标,  $k = 0, \dots, NM-1$ ,  $i$  对应于时域第  $i$  个 FFT 块,  $Z_{k,i} = \frac{1}{NM} \sum_{n=0}^{NM-1} z_i(n) \times e^{-j2\pi nk/(NM)}$ .

把傅氏变换后的数据解交织, 并分为  $M$  组, 此时形成用于检测的第  $m$  分组向量:

$$\mathbf{Y}_{m,i} = [Y_{0+m,i} \ Y_{M+m,i} \ \dots \ Y_{(N-1)M+m,i}]^T, \quad \mathbf{b}_{m,i} = [b_{0,m,i} \ b_{1,m,i} \ \dots \ b_{W-1,m,i}]^T, \quad m = 0, \dots, M-1 \quad (8)$$

$$\mathbf{R}_{m,i} = \begin{bmatrix} a_{0,0} H_{0,0+m,i} & a_{1,0} H_{1,0+m,i} & \dots & a_{W-1,0} H_{W-1,0+m,i} \\ a_{0,1} H_{0,M+m,i} & a_{1,1} H_{1,M+m,i} & \dots & a_{W-1,1} H_{W-1,M+m,i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{0,N-1} H_{0,(N-1)M+m,i} & a_{1,N-1} H_{1,(N-1)M+m,i} & \dots & a_{W-1,N-1} H_{W-1,(N-1)M+m,i} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & A_{W-1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{Z}_{m,i} = [z_{0,m,i} \ z_{1,m,i} \ \dots \ z_{N-1,m,i}]^T \quad (11)$$

式 (7) 可以写为:

$$\mathbf{Y}_{m,i} = \mathbf{R}_{m,i} \mathbf{A} \mathbf{b}_{m,i} + \mathbf{Z}_{m,i}, \quad m = 0, \dots, M-1 \quad (12)$$

### 3 MC-CDMA 的多用户检测和单用户检测

#### 3.1 解相关-并行干扰抵消 (DEC-PIC) 多用户检测器

本节介绍采用解相关-并行干扰抵消的多用户检测器的具体实现. 第  $m$  分组检测如图 3 所示. 我们假设所需检测出的用户为第 0 用户.

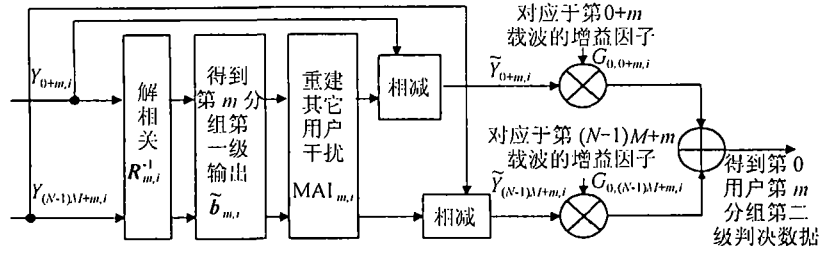


图 3 第  $m$  分组多用户解相关-并行干扰抵消检测器框图

第  $m$  分组第 1 级输出为

$$\tilde{b}_{m,i} = R_{m,i}^{-1} Y_{m,i} \tag{13}$$

我们知道  $R_{m,i}^{-1}$  是解相关多用户检测的变换矩阵 [7]。

根据第 1 级估计出的各用户比特, 重新合成接收信号, 得到除 0 用户外的多用户间干扰:

$$\Lambda_{m,i} = [\eta_{0+m,i} \quad \eta_{M+m,i} \quad \cdots \quad \eta_{(N-1)M+m,i}]^T = R_{m,i} Q \tilde{b}_{m,i} \tag{14}$$

其中  $Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & A_{W-1} \end{bmatrix}$ ,  $R_{m,i}$  见 (9) 式。

从接收信号中减去多用户干扰, 再进行第 2 次检测判决, 这就是并行干扰抵消检测。在第 2 次检测判决时, 我们采用的是最小均方误差合并准则。

第 2 级输出为

$$\hat{b}_{w,i}^m = \sum_{p=0}^{N-1} G_{w,pM+m,i} \tilde{Y}_{pM+m,i} \tag{15}$$

其中  $\tilde{Y}_{pM+m,i} = Y_{pM+m,i} - MAI_{pM+m,i}$ ,  $G_{w,k,i} = a_{w,k} H_{w,k,i}^* / \left( \sum_{w=1}^{W-1} |H_{w,k,i}|^2 + \sigma_n^2 \right)$ , \* 代表复数的共轭,  $a_{w,k}$  是第  $w$  用户在子载波  $k$  的扩频切普,  $H_{w,k,i}$  为  $w$  用户的信道频域响应,  $\sigma_n^2/2$  为复高斯噪声方差。

本文中, 在上行信道采用的检测方案是解相关-并行干扰抵消。而下行信道用于与单用户检测器比较的多用户检测为单级解相关。

### 3.2 最小均方误差合并 (MMSEC) 单用户检测

这一节简单介绍 Hara 提出的 MMSEC 单用户检测 [5], 第 1 级判决数据如下式表达:

$$\tilde{b}_{w,i}^m = \sum_{p=0}^{N-1} G_{w,pM+m,i} Y_{pM+m,i} \tag{16}$$

其中

$$G_{w,k,i} = a_{w,k} H_{w,k,i}^* / \left( \sum_{w=1}^{W-1} |H_{w,k,i}|^2 + \sigma_n^2 \right) \tag{17}$$

\* 代表复数的共轭,  $a_{w,k}$  是  $w$  用户在子载波  $k$  的扩频切普,  $H_{w,k,i}$  为  $w$  用户的信道频域响应。

在本文中，下行信道用于比较的单用户检测为 MMSEC，而我们在上行信道考虑的单用户检测方案是 MMSEC-MMSEC，目的是为了提提高检测性能，在第 1 级单用户检测判决后，产生多用户干扰，从接收信号中减去此值，再进行第 2 次 MMSEC 检测。

### 4 仿真结果

下面我们给出不同检测方案的比较结果。

为了便于与文献 [5] 的结果进行比较，采用的参数与文献 [5] 中基本相同，数据比特流速率是 3Mb/s；考虑了数据流串 / 并为 8 组，扩频增益为 32 的情况，即  $M = 8, N = 32$ ，此时最多用户数是 32。我们仿真的即是最多用户数的情况。FFT 块速率是  $(3/8)M$  块 /s；取最大多普勒频移  $f_d = 10\text{Hz}$ (对应于固定无线信道)，则  $f_d T \approx 0.000027$ ， $T$  是 FFT 块周期。对于不同的用户以不同的 WH 码区分。多径模型为 2 径均匀分布，平均时延扩展为 20ns，即对应式 (2) 中  $\tau = 0, L = 1$ 。

#### 4.1 下行信道仿真结果

对于下行信道移动台需要检测出基站发送过来的多用户信息中属于自己的部分，此时多用户信息经过了相同的信道到达某一移动台。多用户检测方案是解相关，单用户检测方案为 MMSEC。

图 4(a) 是不同检测器的性能比较，可以看出在下行信道中，MMSEC 单用户检测器的性能较好。图 4(b) 是 MMSEC 单用户检测器在信道估计错误由小变大时的性能比较，图中几条曲线几乎重合，因此可以说 MMSEC 单用户检测抵抗信道估计错误的性能很好。

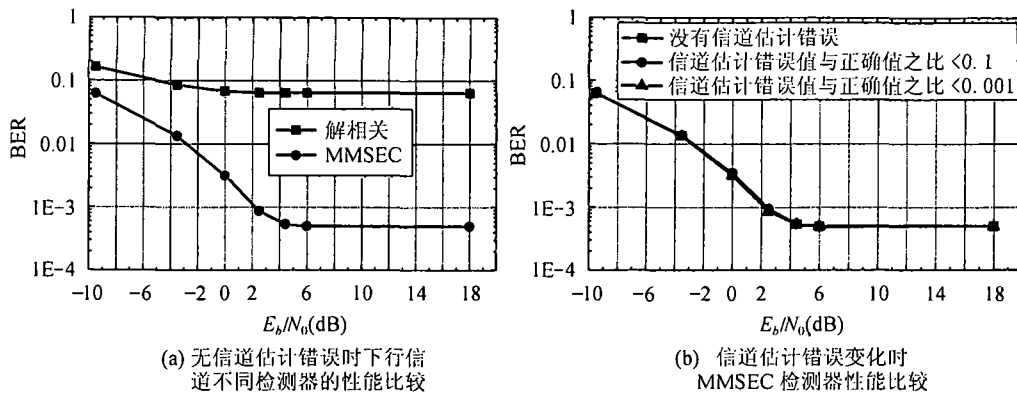


图 4 下行信道误码率与信噪比的关系

#### 4.2 上行信道仿真结果

上行信道不同用户的信道特性不一致，这表现在第 1 延迟多径的延时均匀分布于 [20, 60]ns，且不同用户的衰落幅度也不一样。对于基站来说，需要从接收的数据中检测出所需用户的部分。用于比较的多用户二级检测方案是：解相关-并行干扰抵消，单用户二级检测方案是：MMSEC-MMSEC。

图 5 给出用户数为 32 时不同检测方法在不同信噪比  $E_b/N_0$  情况下的误码率。图 5(a) 是无信道估计错误时不同检测器的性能比较，图 5(b) 是解相关-并行干扰抵消多用户检测器在信道估计错误由小变大时的性能比较。

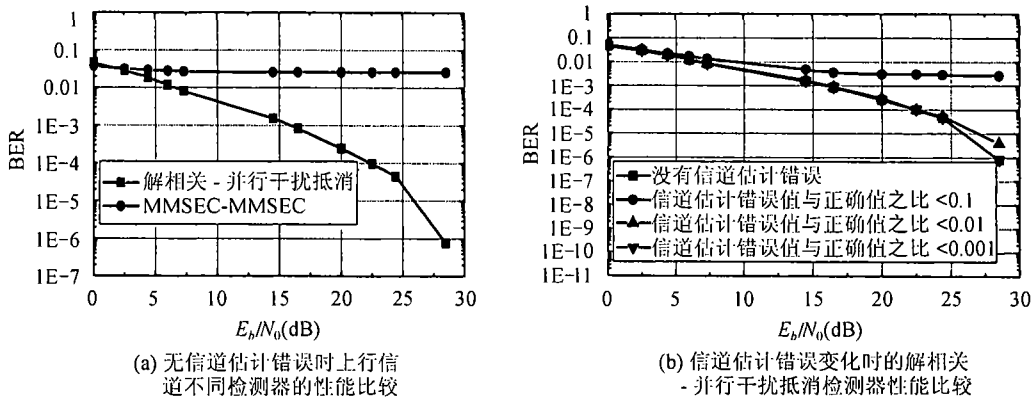


图5 上行信道误码率与信噪比的关系

可以看出在上行信道中只要信道估计错误值较小,解相关-并行干扰抵消多用户检测器的性能是最好的。但是它比下行信道的 MMSEC 单用户检测器对信道估计错误更敏感。

分析产生上述仿真结果的原因在于:在上行信道中,由于式(9)中对应于不同用户的信道频率响应不一样,多用户检测相当于利用了信道的频率分集,因此多用户检测的性能好于单用户检测,但是当信道估计存在错误时,这种分集作用消失了;而在下行信道,由于每个用户的信道频率响应是一样的,下行信道多用户干扰化为0,此时解相关检测器的性能不能充分体现,反而是单用户 MMSEC 检测器性能最好。

## 5 结论

本文提出了解相关-并行干扰抵消多用户检测器用于 MC-CDMA 系统的上行链路。仿真结果表明,在下行信道,MMSEC 单用户检测器的性能最好,而在上行信道无信道估计错误或错误很小时,解相关-并行干扰抵消多用户检测器的性能最好。预计随着数字信号处理芯片技术不断提高,多用户检测器的优秀性能使得它必将成功应用于 MC-CDMA 系统。

## 参 考 文 献

- [1] Jean-Paul M. Linnartz G. Performance analysis of synchronous MC-CDMA in mobile Rayleigh channel with both delay and Doppler spreads. *IEEE Trans. on Veh. Tech.*, 2001, 50(6): 1375-1387.
- [2] 蒋昆, 陈中文, 张力军. MC-CDMA 信道均衡技术性能分析. 南京邮电学院学报(自然科学版), 2001, 21(1): 1-9.
- [3] Shi Qinghua, Latva-aho Matti. An exact error floor for downlink MC-CDMA in correlated Rayleigh fading channels. *IEEE Comm. Letters*, 2002, 6(5): 196-198.
- [4] Hara S, Prasad R. Overview of multicarrier CDMA. *IEEE Comm. Mag.*, 1997(12): 126-133.
- [5] Hara S, Prasad R. Design and performance of multicarrier CDMA system in frequency-selective Rayleigh fading channels. *IEEE Trans. on Veh. Tech.*, 1999, 48(5): 1584-1595.
- [6] Verdu S. Minimum probability of error for asynchronous Gaussian multiple-access channels. *IEEE Trans. on Info. Theory*, 1986, IT-32(1): 85-96.
- [7] Moshavi S. Multi-user detection for DS-SS communications. *IEEE Comm. Mag.*, 1996(10): 124-136.
- [8] Bader F, Zazo S, Raos I. Improvement on the multi-user detection decorrelator of a MC-CDMA used in the reverse link. The 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications, Lisbon, Portugal(PIMRC2002), 15-18<sup>th</sup> Sep., 2002, vol.1: 409-413.

- [9] Mashury S, Zoubir A, Zoubir A M. Adaptive implementations of two blind channel estimation algorithms on mc-cdma. The 8th International Conference on Communication Systems(ICC2002), Singapore, 25-28th Nov., 2002, vol.1: 289-293.
- [10] Li Junqiang, Letaief K B, Cao Zhigang. A group oriented soft iterative multiuser detection for coded multi-carrier CDMA systems. ICC2002, New York city, April 28-May 2, 2002, vol.1: 293-297.
- [11] Kaffe P L, Sesay A B. Iterative semi-blind multiuser detection for turbo-coded MC-CDMA system with space-time transmit diversity. MILCOM 2002, Oct.7-10, 2002, California, vol.2: 1039-1043.
- [12] Y-S Choi, Voltz P J, Cassara F A. On channel estimation and detection for multicarrier signals in fast and selective Rayleigh fading channels. *IEEE Trans. on Comm.*, 2001, COM-49(8): 1375-1387.
- [13] Y(G) Li, Cimini L J, Sollenberger N R. Robust channel estimation for OFDM systems with rapid dispersive fading channels. *IEEE Trans. on Comm.*, 1998, COM-46(7): 902-915.
- [14] O Edfors, M Sandell, Jan-Jaap van de Beek, *et al.*. OFDM channel estimation by singular value decomposition. *IEEE Trans. on Comm.*, 1998, COM-46(7): 931-939.

栾英姿: 女, 1970年生, 博士生, 主要的研究领域包括无线个人通信、码分多址技术和多载波调制.

李建东: 男, 1962年生, 教授, 博士生导师, 通信工程学院院长, 中国通信学会会士, 中国电子学会高级会员, IEEE 高级会员, 第一届和第四届 863 个人通信技术专业专家组成员.

杨家玮: 男, 1946年生, 教授, 主要研究方向为移动通信中的空时编码.