

文章编号:1000-582X(2005)09-0074-05

# 多步迭代 MUD 技术在 TD-SCDMA 系统中的应用\*

杨丰瑞,于秀兰  
(重庆邮电学院,重庆 400065)

**摘要:**联合检测(JD)技术是 TD-SCDMA 系统中的关键技术,但是满码道工作时,信噪比恶化将导致系统性能降低.多步联合检测(MSJD)技术和迭代多用户检测(MUD)技术可以解决这个问题.采用迭代 MUD 技术时,经过 3 次迭代后,将接近单用户的性能,但运算量与码道数呈指数关系.采用 MSJD 时,当码道数较大时,运算量相对于迭代 MUD 少得多,但是  $K$  个码道的系统性能最好只能接近采用 JD 算法时  $K/2$  个码道的性能.同时考虑运算量和系统性能,将迭代 MUD 和 MSJD 技术结合起来,提出了多步迭代 MUD 技术.根据仿真得出:相对于单纯的迭代 MUD,运算量将大大减少;相对于单纯的 MSJD,系统性能将大大提高.

**关键词:**TD-SCDMA 系统;多用户检测;联合检测;迭代多用户检测;多步联合检测;多步迭代 MUD  
**中图分类号:**TN929.53 **文献标识码:**A

我国提交的 TD-SCDMA 标准提供了一整套空中接口用以支持 IMT-2000 所要求的话音以及低、高速数据通信业务.它是中国在百年通信史上第一次制定的国际标准.

TD-SCDMA 作为 CDMA TDD 技术的一种,具备 CDMA TDD 的所有特点,而且因为采用了 SCDMA、联合检测、智能天线、软件无线电和接力切换等关键技术,它具有独特的优点,所以已经得到广大运营商的认同,成为通信界研发的一个热点.

但是,CDMA 是干扰受限的系统,多址干扰是影响 CDMA 系统容量和性能提高的主要因素.采用多用户检测(MUD)技术和信道编码是提高 CDMA 系统性能的非常有效的方法.在接收端将 MUD 技术和译码算法结合在一起进行考虑,以便最大限度的提高系统性能,是现在第三代移动通信的一个研究热点.

## 1 TD-SCDMA 系统的传输模型

TD-SCDMA 的每个 TDD 帧由 7 个主时隙以及下行导引时隙、上行导引时隙和保护时隙 3 个特殊时隙构成.每个主时隙可以由 OVSF 码(扩频因子  $SF = 1, 2, 4, 8, 16$ )分为 1-16 个码道(Code Channel).主时隙中每个码道中由两个数据区、训练序列和保护间隔组

成,数据区中的数据比特先用 QPSK 调制为数据符号,然后再采用 OVSF 码对数据 Symbol 进行扩频.一个用户可以占据多个或一个码道.假定系统共有  $K$  个用户,其传输模型如图 1 所示.用户  $k$  首先对信息比特序列  $\{b^{(k)}\}$  进行 Turbo 编码,再经过  $\frac{\pi}{2}$  QPSK 调制得到数据符号序列  $\{d^{(k)}\}$ ,然后用扩频码  $c^{(k)}$  进行扩频调制后,得到用户  $k$  的发射数据  $\{e^{(k)}\}$ ,经过各自的信道到达接收机,由此得到总信号  $e$ .

$$e = \sum_{k=1}^K e^{(k)} + n = \sum_{k=1}^K A^{(k)} d^{(k)} + n = Ad + n, (1)$$

其中,  $n$  为信道中的加性高斯白噪声 AWGN,

$$e^{(k)} = (e_1^{(k)}, e_2^{(k)}, \dots, e_{N \cdot SF + W - 1}^{(k)})^T, k = 1 \dots K$$

$$d^{(k)} = (d_1^{(k)}, d_2^{(k)}, \dots, d_N^{(k)})^T, k = 1 \dots K$$

$$A_{(n-1) \cdot SF + n}^{(k)} = \begin{cases} B_i^{(k)} = c^{(k)} \otimes h^{(k)} & n = 1, 2, \dots, N; \\ & l = 1, 2, \dots, SF + W - 1; \\ & k = 1, 2, \dots, K \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

其中,  $A$  称为系统矩阵,  $B$  称为合并信道冲激响应,它考虑了信道特性和扩频码的影响.符号  $\otimes$  表示卷积,  $W$  为信道估计窗长,  $SF$  为扩频因子,  $N$  为一个数据

\* 收稿日期:2005-04-23

基金项目:国家高技术研究发展计划(2004AA123150)

作者简介:杨丰瑞(1963-),男,重庆合川人,重庆邮电学院副教授,主要从事通信网络新技术的应用研究.

区的数据 Symbol 长度,  $K$  为用户数。

在接收端,传统的检测技术是将 MUD 的软输出直接作为 Turbo 译码的软输入. 多用户检测技术可采用联合检测<sup>[1-2]</sup>,同时得到所有用户的数据符号. 但是随着用户数的增加,它将会引起信噪比恶化的增大;而且信道译码后的输出信息都不能得到充分利用. 从改善信噪比恶化和充分利用信道译码后的输出信息入手,提出了迭代多用户检测技术<sup>[3-4]</sup>和多步联合检测技术<sup>[5-6]</sup>.

## 2 联合检测(JD)技术

1992 年,德国 Kaiserslautern 大学的 A. Klein 等人将消除多址干扰 (MAI) 和符号间干扰 (ISI) 一并考虑,提出了联合检测技术<sup>[1-2]</sup>,联合检测算法主要是根据基于迫零 (简称 ZF) 和最小均方误差 (简称 MMSE) 这两个优化准则的均衡算法发展而来的。

ZF-BLE 算法对数据的连续值的无偏估计为

$$\hat{d}_{c,ZF-BLE} = (A^T R_n^{-1} A)^{-1} A^T R_n^{-1} e, \quad (2)$$

其中,矩阵  $R_n = E\{n \cdot n^T\}$  是加性噪声矢量  $n$  的协方差矩阵。

MMSE-BLE 算法对数据的连续值的估计为

$$\hat{d}_{c,MMSE-BLE} = (A^T R_n^{-1} A + R_d^{-1})^{-1} A^T R_n^{-1} e, \quad (3)$$

其中,  $R_d$  是数据符号矢量  $d$  的协方差矩阵。

当噪声  $n$  为 AWGN 时,ZF-BLE 算法所得的估计值为

$$\hat{d}_{c,ZF-BLE} = (A^T A)^{-1} A^T e = d + (A^T A)^{-1} A^T n, \quad (4)$$

当满足 ( $KN$  单位阵) 及 ( $N * SF + W - 1$  单位阵) 条件时,MMSE-BLE 算法所得估计值为

$$\hat{d}_{c,MMSE-BLE} = (A^T A + \sigma^2 I)^{-1} A^T e. \quad (5)$$

总的来讲,MMSE-BLE 算法比 ZF-BLE 算法的性能好:当噪声功率趋于零时,MMSE-BLE 等价于 ZF-BLE,对于抗 MAI 及 ISI 是最优的;当噪声功率远高于信号功率,即 MAI 和 ISI 占次要地位时,MMSE-BLE 相当于传统的匹配滤波检测器,对抗噪声是最优的。

但对于一个确定的信道模型,采用传统的联合检测,随着用户数的增加,信噪比恶化  $\delta$  会增大,传输质量将下降. Weckerle<sup>[6]</sup> 提出了一个经验公式来近似表示:

$$\delta \approx \frac{K_a * SF + 1}{K_a * SF - K + 1}, \quad (6)$$

其中,  $K_a$  表示接收端的天线数,这里假定天线的接收数据不相关。

## 3 迭代多用户检测技术

迭代多用户检测技术<sup>[3-4]</sup>结合了 Turbo 码的译码和多用户检测的研究,其迭代思想源于 Turbo 码的译码算法,它采用迭代反馈的方式把信道译码后的软输出信息  $P_r(d_j^{(k)}/R^{(k)})$  反馈给 MUD,如图 2 所示。

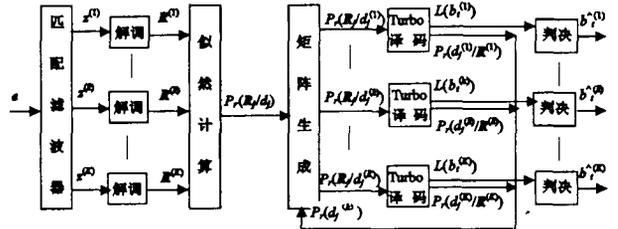


图 2 迭代多用户检测技术

接收机收到的总信号  $e$  经过匹配滤波器后输出  $z = A^T e = \text{diag}(A^T A d) + \text{diag}(A^T A d) + A^T n,$  (7)

其中,第 1 项表示有用信号,第 2 项代表 MAI,第 3 项是由 AWGN 产生的噪声.可以看出 MAI 没有被消除,被当作噪声处理。

由  $\frac{\pi}{2}$  QPSK 解调器得到“似然计算”的软输入序列

$\{R^{(k)}\}$ . 由于信道中噪声为高斯白噪声,  $P_r(R_j/d_j)$  服从多变量高斯分布,考虑到各个用户的  $d_j$  相互独立. 设  $H_i = A^T A$ ,“似然计算”的输出可以表示为

$$P_r(R_j/d_j) \propto \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2}(2R_j^T d_j - d_j^T H_j d_j)\right\}. \quad (8)$$

由于 Turbo 译码是对各个用户独立进行的,需要得到单个用户的条件概率  $P_r(R_j^{(k)}/d_j^{(k)})$ ,为了消除多址干扰,考虑到  $P_r(d_j^{(k)})$  依赖于所有用户的  $R_j^{(k)}$ ,需要用  $P_r(R_j/d_j^{(k)})$  替换  $P_r(R_j^{(k)}/d_j^{(k)})$  作为 Turbo 译码的输入。

$$P_r(R_j/d_j^{(k)} = d) = \frac{P_r(R_j, d_j^{(k)})}{P_r\{d_j^{(k)} = d\}} = \sum_{(d_j^{(k)} = d)} P_r(R_j | d_j) \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K P_r(d_j^{(i)}), \quad (9)$$

文中的单用户 Turbo 译码器不同于一般的 Turbo 译码器,它有 2 个输出,即信息比特  $b_i$  的对数似然比  $L(b_i)$  和对数似然比  $L(d_j)$ . 由  $L(d_j^{(k)})$  可以推导得到  $P_r(d_j^{(k)}/R^{(k)})$ ,作为“矩阵生成”的先验输入。

$$L(d_j) = \ln \frac{P_r(d_j = +1 | R_1^M)}{P_r(d_j = -1 | R_1^M)} = \ln \frac{\sum_{\substack{(s',s) \\ d_j = +1}} P_r(S_{i-1} = s', S_i = s, R_1^M)}{\sum_{\substack{(s',s) \\ d_j = -1}} P_r(S_{i-1} = s', S_i = s, R_1^M)}, \quad (10)$$

$$L(b_i) = \ln \frac{P_r(b_i = 1 | R_1^M)}{P_r(b_i = 0 | R_1^M)} = \ln \frac{\sum_{\substack{(s',s) \\ b_i=1}} P_r(S_{i-1} = s', S_i = s, R_1^M)}{\sum_{\substack{(s',s) \\ b_i=0}} P_r(S_{i-1} = s', S_i = s, R_1^M)} \quad (11)$$

根据对数似然比  $L(b_i)$  判决得到信息比特  $b_i$  的估计值:

若  $L(b_i) \geq 0$ , 则译码比特  $\hat{b}_i$  为 1; 若  $L(b_i) < 0$ , 则译码比特  $\hat{b}_i$  为 0.

### 4 多步联合检测技术(MSJD)

多步联合检测技术<sup>[5-6]</sup>中,接收信号包含的码道被分为 2 组,各自进行联合检测,由多个周期来完成,如图 3 所示. 设第 1 组包含码道 1 ~ 码道  $K_g$  ( $K_g < K$ ), 第 2 组包含码道  $K_g + 1$  ~ 码道  $K$ , 一般情况下,取  $K_g \approx K/2$ . 接收信号  $e$  表示为:

$$e = \sum_{k=1}^K e^{(k)} + n = \sum_{k=1}^{K_g} e^{(k)} + \sum_{k=K_g+1}^K e^{(k)} + n = \sum_{k=1}^{K_g} A^{(k)} d^{(k)} + \sum_{k=K_g+1}^K A^{(k)} d^{(k)} + n \quad (12)$$

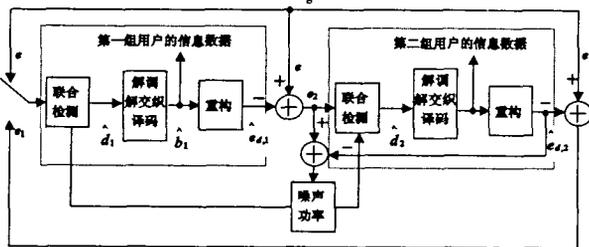


图 3 多步联合检测技术

首先,接收端采用总的接收信号  $e$  作为迫零算法(ZF)部分联合检测的输入信号,对码道 1 ~  $K_g$  进行联合检测,估计出第一组码道的数据符号:

$$\hat{d}_{c1,ZF-BLE} = (A_1^T A_1)^{-1} A_1^T e, \quad (13)$$

其中,  $A_1$  为第一组码道的系统矩阵,  $A_1 = (A^{(1)}, A^{(2)}, \dots, A^{(K_g)})$ .

再对第 1 组数据符号进行解调、解交织、译码得到译码比特  $\hat{b}_i$ , 然后在译码比特的基础上进行信号的重构,即进行与发送端相同的编码、调制、扩频以及信道的模拟.

$$\hat{e}_{d,1} = \sum_{k=1}^{K_g} A^{(k)} \hat{d}^{(k)}, \quad (14)$$

从总用户信号中减去  $\hat{e}_{d,1}$ , 得到第 2 组码道的输入信号

$$e_2 = e - \hat{e}_{d,1}, \quad (15)$$

然后,采用 ZF-BLE 联合检测算法得到第 2 组码道的数据符号  $\hat{d}^{(k)}$ ,  $k = K_g + 1 \dots K$ , 再经过与第 1 步类似的处理,估计出第 2 组码道的信息比特,并通过下式得到

第 1 组码道的输入信号:

$$e_1 = e - \hat{e}_{d,2} = e - \sum_{k=K_g+1}^K A^{(k)} \hat{d}^{(k)} \quad (16)$$

这样就检测了所有码道的信息比特,它是 MSJD 的第 1 个周期. 在下面进行的第 2 个周期,由于 MMSE 联合检测算法一般优于 ZF 联合检测算法,将采用 MMSE-BLE 代替 ZF-BLE,这就需要知道噪声功率  $\sigma^2$ , 噪声  $\hat{n}$  可由  $\hat{n} = e_2 - \hat{e}_{d,2}$  估计得出,容易得到

$$\sigma^2 = E\{|\hat{n}_i|^2\}, i = 1, 2, \dots, N * SF + W + 1. \quad (17)$$

以后周期的处理过程与第 1 周期相似. 在最后的 一个周期输出所有码道的译码比特,即估计出的信息比特.

### 5 几种多用户检测算法的运算复杂度

联合检测算法所需要的运算量<sup>[1]</sup>可以归纳如表 1 所示. 系统矩阵  $A$  为  $(N * SF + W - 1) \times NK$  维,  $R_n$  是  $(N * SF + W - 1) \times (N * SF + W - 1)$  维噪声协方差矩阵,  $R_d$  是  $NK \times NK$  维数据协方差矩阵. 矩阵  $A^* T R_n^{-1} A$  和  $A^* T R_n^{-1} A + R_d^{-1}$  都是  $NK \times NK$  阶方阵,而且是一个 Hermitian 矩阵. 为了简化表达,令  $T = (N * SF + W - 1)$ ,  $U = NK$ . 其中符号  $N, K, SF, W$  的含义与式(1)相同.

表 1 检测出一个数据符号的运算量归纳

运算	运算量
$A^* T R_n^{-1} e$ (白化匹配滤波器)	$T + T^2/U$
$(A^* T R_n^{-1} A)^{-1} A^* T R_n^{-1} e$ (ZF-BLE 联合检测)	$U^2/6 + T^2 + UT + U + T^2/U = T$
$(A^* T R_n^{-1} A + R_d^{-1})^{-1} A^* T R_n^{-1} e$ (MMSE-BLE 联合检测)	$U^2/6 + T^2 + UT + U + T^2/U = T$

迭代多用户检测算法中的各部分需要的运算量<sup>[4]</sup>可以归纳如表 2 所示. 其中  $K$  为码道数,  $M_s$  为译码器的状态数,  $P_s$  为从某一状态出去的路径数,  $R$  为码率. 单用户的匹配滤波的运算量可参考表 1.

表 2 检测出每个编码比特的运算量归纳

运算	运算量
似然计算	$2^K(7K^2/6 + 4K^2 + 6K + 4)/(RK)$
矩阵生成(1 次迭代)	$2^K(K-1)/(RK)$
MAP 译码(1 次迭代)	$2P_s M_s (R^{-1}/2 + 10) - 2M_s + 16$

多步联合检测算法的每个周期包含了联合检测、Turbo 译码和重构,其主要运算量参考表 1 和表 2 就可以得出.

### 6 多步迭代 MUD

假设信道模型为加性高斯白噪声,接收端天线数  $K_a = 1$ , Turbo 编码采用 3GPP 推荐的编码方案, Turbo 译码和迭代多用户检测都采用 MAX-LOG-MAP 算

法, Turbo 码译码迭代次数固定为 6 次. 一个用户占用多个码道时都独占一个估计窗, 窗长  $W=16$ .

图 4 给出了同一个时隙的  $K$  个码道数分配给同一用户, 进行 1~3 次迭代 MUD 的性能曲线. 固定每比特信噪比  $\frac{E_b}{N_0} = 3$  dB, 可见随着迭代次数的增加, 迭代 MUD 技术将大大提高系统的性能. 3 次迭代后, 无论码道数的多少, 都接近单用户的性能曲线. 但是由于迭代多用户检测算法中的似然计算和矩阵生成的运算量皆与码道数呈指数关系, 当码道数  $K > 8$  时运算量将变得很大, 几乎不可能实时实现, 因此它只适用于码道数较少的情况.

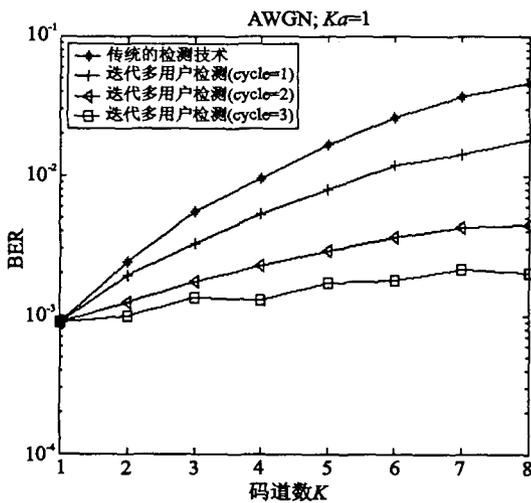


图 4 迭代 MUD 技术的性能曲线

图 5 给出了采用 MSJD 技术的性能曲线. 当一个时隙占用  $K$  个码道时, 采用 MSJD 的系统性能最好只能接近采用传统检测技术时  $K/2$  个码道的性能. 但是当码道数较大时, 它的运算量相对于迭代 MUD 则少得多.

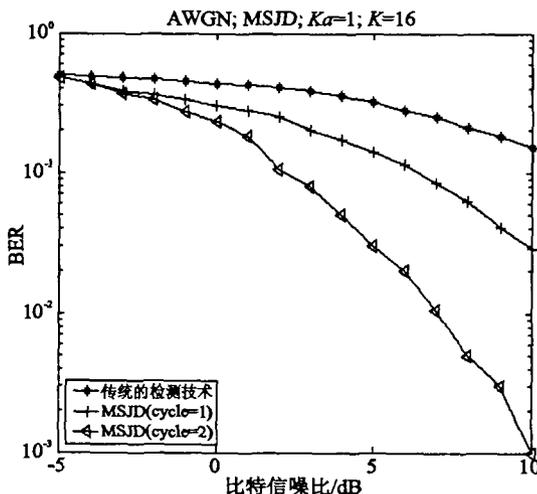


图 5 MSJD 技术的性能曲线

容易想到, 如果把迭代 MUD 技术和 MSJD 技术相

结合, 可以利用两种多用户检测技术的优点来提高系统性能. 这种技术称为“多步迭代 MUD 技术”. 它的处理方法如下: 把所有的码道分为两组, 每组码道分别进行“迭代多用户检测”, 然后对两组用户的接收数据进行重构, 得到 MSJD 下一周期的输入信号, 在下一周期又分别进行“迭代 MUD”. 多步迭代 MUD 技术的实现方案如图 7 所示.

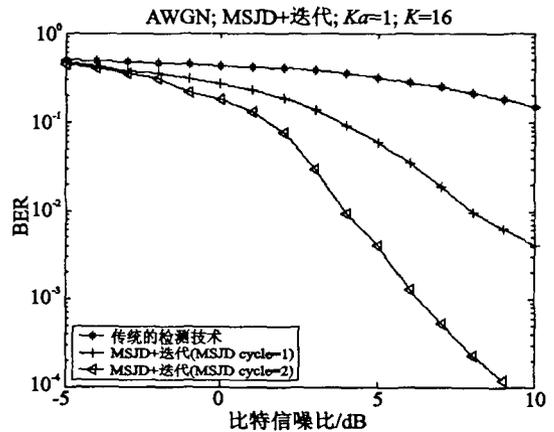


图 6 多步迭代 MUD 技术的性能曲线

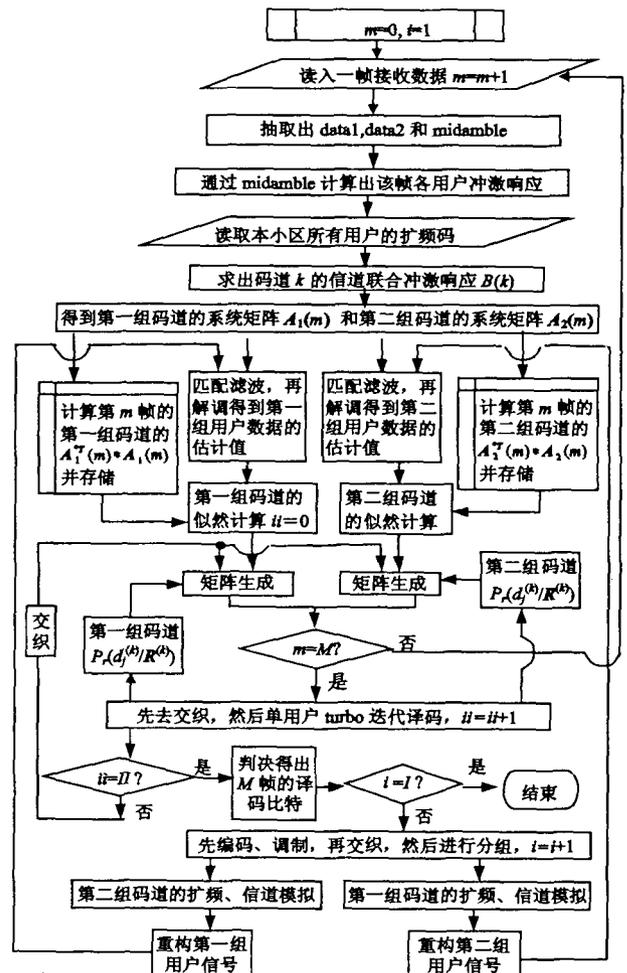


图 7 多步迭代多用户检测技术的实现方案

当信道模型为加性高斯白噪声,系统满码道( $K = 16$ )工作时,图 6 给出了采用多步迭代多用户检测技术的性能曲线.与图 5 对照,可以看出,将迭代多用户检测技术和 MSJD 技术结合起来,相对于单纯的 MSJD,系统性能将大大提高.

#### 参考文献:

- [1] KLEIN A, KALEH G K, BAIER P W. Zero Forcing and Minimum Mean Square Error Equalization for Multiuser Detection in Code Division Multiple Access Channels [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1996, 45: 276 - 287.
- [2] KLEIN A, BAIER P W. Linear Unbiased Data Estimation in Mobile Radio Systems applying CDMA [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1993, 11(7): 1 058 - 1 066.
- [3] 于秀兰,许萍,郑建宏.迭代 MUD 技术在 SCDMA 系统中的应用[J].重庆邮电学院学报,2002,14(4):28-32.
- [4] MARK C REED, CHRISTIAN B SCHLEGEL, PAUL D ALEXANDER, et al. Asenstorferk, Iterative Multiuser Detection for CDMA with FEC; Near-Single-User Performance [J]. IEEE Transactions, on Communications, 1998, 46(12):1 693 - 1 699.
- [5] 杨丰瑞. SCDMA 系统中 MSJD 技术的实现方案[J].电子科技大学学报,2005,34(1):65-68.
- [6] 于秀兰,杨丰瑞.多步联合检测技术在 SCDMA 系统中的应用[J].信息技术,2005,(3):6-10.

## Multi-Step Iterative MUD Technology for TD-SCDMA System

YANG Feng-rui, YU Xiu-lan

(Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** Joint Detection technology is a hot point in the research of TD-SCDMA system. Because of a SNR degradation, JD can not reach the need of system performance when system loads is close to the spread factor. MSJD and iterative multi-user detection are put forth to overcome the problem. When iterative MUD is adopted, the research shows that system performance is close to single user performance after 3 iterations, but its computational complexity grows exponentially with the number of code channel. When MSJD is adopted, complexity is reduced compared with iterative MUD, but system performance of code channels numbered  $K$  is only close to system performance of code channels numbered  $K/2$  as JD is used. Considering computational complexity and system performance, multi-step iterative multi-user detection technology is brought forth based on iterative MUD and MSJD. According to simulation, the result can be concluded that complexity is reduced compared with single iterative MUD and system performance is improved compared with single MSJD.

**Key words:** TD-SCDMA system; multi-user detection (MUD); joint detection (JD); iterative multi-user detection; multi-step joint detection (MSJD); multi-step iterative multi-user detection

(编辑 陈移峰)