

# 迭代MUD技术在SCDMA系统中的应用

于秀兰, 许萍, 郑建宏

(重庆邮电学院, 重庆 400065)

**摘要:**介绍了同步码分多址(SCDMA)系统中的迭代多用户检测(MUD)接收机,它是Turbo译码算法迭代思想的推广,迭代多用户检测技术,同Turbo码的译码和多用户检测的研究相结合,成为目前通信领域研究的热点。研究表明,多次迭代后,系统性能将得到很大提高,接近单用户的性能。

**关键词:**Turbo码;同步CDMA系统;多用户检测;迭代算法

**中图分类号:**TN929.533 **文献标识码:**A

## The Application of Iterative Multi-User Detection for Synchronous CDMA System with Turbo-Code Decoders

YU Xiu-lan, XU Ping, DENG Jian-hong

(Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, P. R. China)

**Abstract:** The paper introduces an iterative multi-user receiver for synchronous CDMA system, which derives from Turbo decode algorithm. The iterative multi-user detection decoding technology, combined with the research on Turbo decoding and multi-user detection, has become a hotspot in communication research field recently. The research shows that iterations of the system are used to attain large performance improvements that are close to single user performance.

**Key words:** Turbo code; synchronous CDMA system; multi-user detection; iterative algorithm

## 0 引言

第三代移动通信技术已成为人们关注的焦点。CDMA具有高容量、软切换等优点,成为第三代移动通信中的主要技术。但CDMA是干扰受限的系统,多址干扰(MAI)是影响CDMA系统容量和性能提高的主要因素。采用多用户检测和Turbo码是两种提高CDMA系统性能的非常有效的方法。CDMA系统多用户检测(MUD)技术的研究重点,前期大都放在未经信道编码的系统上,而实际应用中的CDMA系统都经过了信道编码,所以现在MUD技术的研究重点已放到了编码系统上。

Turbo码是近年来编码理论上的一个重大突

破,其性能与信道极限的差距可小于1dB,有着广阔的应用前景,其优异性能来源于独特的码结构和迭代译码算法,使其成为一种接近随机编码的可译码。Turbo码的编码思想对编码的研究产生了重要的影响;其译码算法中的迭代思想可以推广到多用户检测技术,即本文将重点介绍的迭代多用户检测技术。

迭代多用户检测技术结合了Turbo码的译码和多用户检测的研究,更是目前通信领域研究的热点之一。其思路是采用迭代反馈的方式把信道译码后的软输出信息反馈给MUD,而且Turbo译码也采用迭代算法。

本文中,矢量和矩阵为黑斜体字母, $(\cdot)^T$ 为转

· 收稿日期:2002-01-10

· 作者简介:于秀兰(1973-),女,四川广安人,讲师,硕士研究生,研究方向为移动通信技术;郑建宏,教授,硕士生导师。

置矩阵。非特殊指明,变量的上标 $k$ 一般为用户 $k$ ,变量的下标 $t$ 或 $j$ 为信息比特或编码比特的序号。

## 1 Turbo 码

由于具有出色的纠错性能,Turbo 码有望在各种通信系统中获得应用,如移动通信、个人通信、星际通信、卫星通信等。移动信道存在多径瑞利衰落、多普勒频移及多址接入干扰(MAI)等不利因素,而且带宽和功率均受限,信道环境十分恶劣,因此对信道编码有着严格的要求。第三代移动通信系统(3G)中,各无线传输技术方案的信道编码均选用了 Turbo 编码技术。下面对 3GPP 提出的 Turbo 编码方案做一介绍<sup>[1]</sup>。

### 1.1 Turbo 编码

Turbo 码是一种带有交织器的并行级联码(PCCC),由两个结构相同的 RSC 分量码编码器并行级联而成,它的组成方框图见图 1<sup>[2]</sup>。RSC I 编

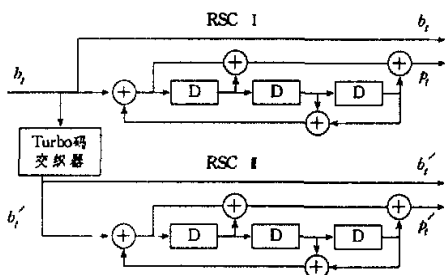


图1 Turbo码的编码电路

Fig. 1 The encoding structure of Turbo code

器的输入信息序列  $\{b_t\}$  由  $M$  个独立的 0 或 1 等概取值的比特  $b_t$  组成,生成校验序列为  $p_t$ 。 $b_t$  经交织后,输入到 RSC I,产生另一个校验序列  $p'_t$ 。Turbo 码的码率为  $1/3$ ,输出序列经复用后的编码输出顺序为: $b_1, p_1, p'_1; b_2, p_2, p'_2; \dots; b_M, p_M, p'_M$ 。RSC I 和 RSC II 的生成多项式可表示为  $G(D) = \left[ 1, \frac{g_1(D)}{g_0(D)} \right]$ ,其中逆向反馈多项式  $g_0(D) = 1 + D^2 + D^3$ ,前向反馈多项式  $g_1(D) = 1 + D + D^3$ 。

### 1.2 Turbo 译码

交织器的出现导致 Turbo 码的最优(最大似然)译码非常复杂,不可能实现。而一种次优的迭代译码算法在降低了复杂度的同时又具有较好性能,使得 Turbo 码的应用成为可能。迭代译码的基本思想是

分别对 2 个 RSC 码进行最优译码,以迭代的方式使两者分享共同的信息,并利用反馈环路来改善译码器的性能。Turbo 码译码器的结构见图 2。

它是两个软输入软输出(SISO)译码器 DEC I 和 DEC II 的串行级联,交织器与编码器中使用的交织器相同。迭代译码<sup>[3]</sup>的具体过程如下:Turbo 码经

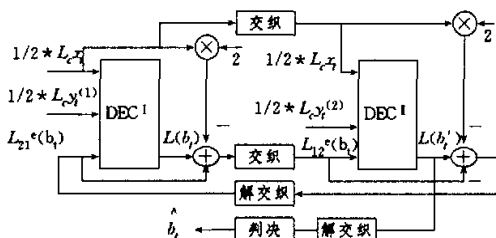


图2 Turbo码的译码电路

Fig. 2 The decoding structure of Turbo code

信道传输后得到的符号  $R_t = (x_t, y_t^{(1)}, y_t^{(2)})$ ,信息比特  $x_t$  及其校验比特  $y_t^{(1)}$  进入第一个译码器 DEC I,信息比特  $x_t$  经交织后及其校验比特  $y_t^{(2)}$  进入第二个译码器 DEC II。DEC I 对分量码 RSC I 进行最佳译码,产生信息比特的似然信息,并将其中的“外部信息”经过交织器后传给 DEC II;译码器 DEC II 将此信息作为先验信息,对分量码 RSC I 进行最佳译码,产生交织后的信息比特的似然信息,并将其中的“外部信息”经过解交织器后传给 DEC I,译码器 DEC I 将此信息作为先验信息,进行下一回合的译码。整个译码过程犹如两个译码器在打乒乓球,经过若干回合,DEC I 或 DEC II 的“外部信息”趋于稳定,似然比逐渐逼近于整个码的最大似然译码,然后对此似然比进行解交织,再进行硬判决,即可得到信息序列  $\{b_t\}$  的最佳估值序列  $\{\hat{b}_t\}$ 。

Turbo 译码中关于两个分量码译码器 DEC I 和 DEC II 的算法有多种,它们构成了 Turbo 码的不同译码算法。由于篇幅问题,只对 MAP 算法作简要介绍。MAP 译码器如图 3 所示。

针对  $1/2$  速率的 RSC 码,假设在时刻  $t$ ,RSC 编码器的输入比特为  $b_t$ ,输出信息比特为  $b_t$ ,校验比特为  $p_t$ ,变成双极性值为  $a_t, f_t$ ,经离散无记忆信道后,MAP 译码器的输入序列为  $R_t^M = (R_1, \dots, R_t, \dots, R_M)$ ,其中  $R_t$  表示时刻  $t$  接收到的符号,



图3 MAP译码器  
Fig. 3 MAP decoder

$R_t = (x_t, y_t)$ ,  $x_t, y_t$  分别为译码器接收到的信息比特和校验比特。  $x_t = (2b_t - 1) + q_t = a_t + q_t$ ,  $y_t = (2p_t - 1) + u_t = f_t + u_t$ 。式中,  $q_t, u_t$  是均值为0, 方差为  $\sigma^2$  的独立正态变量。  $L'(b_t)$  是关于  $b_t$  的先验信息,  $L(b_t)$  是关于  $b_t$  的对数似然比。

MAP 算法以追求每个码元译码错误概率最小为目标。经过推导可以得到  $b_t$  的对数似然比  $L(b_t)$  的表达式如下:

$$L(b_t) = \ln \frac{P_r(b_t = 1 | R_t^M)}{P_r(b_t = 0 | R_t^M)} = \ln \frac{\sum_{s'_{t-1}} P_r(S_{t-1} = s', S_t = s, R_t^M)}{\sum_{s'_{t-1}} P_r(S_{t-1} = s', S_t = s, R_t^M)} = \ln \frac{\sum_{s'_{t-1}} \alpha_{t-1}(s') * \gamma_t(s', s) * \beta_t(s)}{\sum_{s'_{t-1}} \alpha_{t-1}(s') * \gamma_t(s', s) * \beta_t(s)} = L_c x_t + L'(b_t) + \ln \frac{\sum_{s'_{t-1}} \alpha_{t-1}(s') * \gamma_t(s', s) * \beta_t(s)}{\sum_{s'_{t-1}} \alpha_{t-1}(s') * \gamma_t(s', s) * \beta_t(s)} \quad (1)$$

其中:  $P_r(b_t | R_t^M)$  是数据比特  $b_t$  的后验概率;  $S_t$  为时刻  $t$  的编码器状态;  $\gamma_t(s', s) = \exp[\frac{1}{2} L_c y_t f_t]$ ; 其中  $L_c$  为信道可靠值,  $L_c = 4E_r/N_0 = 2/\sigma^2$ 。  $b_t$  的先验信息为

$$L'(b_t) = \ln \frac{P_r(b_t = 1)}{P_r(b_t = 0)} \quad (2)$$

前向递推

$$\alpha_t(s) = P_r(S_t = s, R_t^M) \quad (3)$$

后向递推

$$\beta_t(s) = P_r(R_{t+1}^M | S_t = s) \quad (4)$$

$s' \rightarrow s$  分支转移概率:

$$\gamma_t(s', s) = P_r(S_t = s, R_t | S_{t-1} = s') = P_r(S_t = s | S_{t-1} = s') P_r(R_t | S_t = s, S_{t-1} = s') = P_r(b_t) P_r(R_t | b_t) \quad (5)$$

式(1)中的对数似然比的第一项叫做信道值; 第二项代表的是前一个译码器为第二个译码器所提供的关于  $b_t$  的先验信息; 第三项代表的是可送给后续译码器的“外部信息”。

如果分量码译码器DEC I 和DEC II 均采用上述

的译码算法, 则它们在第  $i$  次迭代的软输出分别是

$$L_1^{(i)}(b_t) = L_c x_t + [L_{21}^{(i)}(b_t)]^{(i-1)} + [L_{12}^{(i)}(b_t)]^{(i)} \quad (6)$$

$$L_2^{(i)}(b_t) = L_c x_t + [L_{12}^{(i)}(b_t)]^{(i)} + [L_{21}^{(i)}(b_t)]^{(i)} \quad (7)$$

式(6)中,  $[L_{21}^{(i)}(b_t)]^{(i-1)}$  是前一次迭代中DEC II 给出的外信息经解交织后的信息, 在本次迭代中被DEC I 用作先验信息;  $[L_{12}^{(i)}(b_t)]^{(i)}$  是DEC I 新产生的外信息, 经交织后成为式(7)中  $[L_{12}^{(i)}(b_t)]^{(i)}$ , 被DEC II 用作先验信息。经过几次迭代后, 译码性能达到一定要求时, 就可根据对数似然比  $L(b_t)$  与0 门限的比较结果进行硬判决, 得到译码比特的估计值:

$$\hat{b}_t = \begin{cases} 1, & L(b_t) \geq 0 \\ 0, & L(b_t) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

## 2 同步CDMA

同步CDMA 是指CDMA 系统中的所有无线基站收、发同步。CDMA 移动通信系统中的下行链路总是同步的, 故同步CDMA 主要是指上行同步, 即要求来自不同位置、不同距离的不同用户终端的上行信号能够同步到达基站。由于各个用户终端的信号码片到达基站解调器的输入端时是同步的, 它充分应用了扩频码之间的正交性, 大大降低了同一射频频道中来自其它码道的多址干扰影响, 因而系统容量可以随之增加。

同步CDMA 系统离散时间传播模型<sup>[4]</sup>如图4 所示。系统共有  $K$  个用户, 用户  $k$  首先对  $M$  个二进制比特序列  $\{b_t^{(k)}\}$  进行编码, 再进行BPSK 调制得到  $N$  个数据符号序列  $\{d_t^{(k)}\}$ , 然后用扩频系数为  $Q$  的扩频码  $c^{(k)}$  对数据符号进行扩频调制得到用户  $k$  的发射数据, 经过各自的信道, 设信道冲激响应为  $h^{(k)}$ , 估计窗长为  $W$ , 到达接收端用户  $k$  的接收信号为  $e^{(k)}$ , 由此得到接收机收到的总信号  $e$ 。

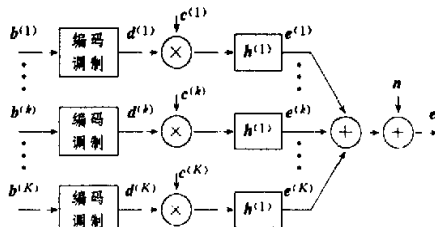


图4 同步CDMA系统的传播模型

Fig. 1 Transmission model of SCDMA

用户  $k$  的接收信号  $e^{(k)}$  可以表示为  $e^{(k)} = A^{(k)} d^{(k)}$ ,

其中矩阵  $A^{(k)}$  由合并信道冲激响应  $B^{(k)}$  构成,

$$A^{(k)} = \begin{cases} B_l^{(k)}, n = 1, 2, \dots, N; l = 1, 2, \dots, Q + W - 1; \\ k = 1, 2, \dots, K \\ 0 \quad \text{其它} \end{cases} \quad (9)$$

$B^{(k)}$  可表示为  $B^{(k)} = c^{(k)} * h^{(k)}$ ; 其中,

$$c^{(k)} = (c_1^{(k)}, c_2^{(k)}, \dots, c_Q^{(k)})^T, k = 1, \dots, K \quad (10)$$

$$h^{(k)} = (h_1^{(k)}, h_2^{(k)}, \dots, h_W^{(k)})^T, k = 1, \dots, K \quad (11)$$

接收机收到的总信号  $e$  可表示为式(12),其物理意义是用户的数据矢量  $d^{(k)}$  通过合并信道冲激响应为  $B^{(k)}$  的信道传播,到达接收机后与其他  $K-1$  个用户的信号叠加,然后加上均值为0,方差为  $\sigma^2$  的信道高斯噪声矢量  $n$ ,就组成了接收机收到的总信号矢量  $e$ .

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

其中,  $e = (e_1, e_2, \dots, e_{NQ+W-1})^T$ ,  $A = (A^{(1)}, A^{(2)}, \dots, A^{(K)})$ ,  $d = (d^{(1)T}, d^{(2)T}, \dots, d^{(K)T})^T$ ,  $n = (n_1, n_2, \dots, n_{NQ+W-1})^T$ .

### 3 迭代多用户检测

迭代多用户检测技术<sup>[5]</sup>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,而且Turbo译码也采用迭代算法。它由一组匹配滤波器、似然计算、矩阵生成、译码器和判决器构成,如图5所示。

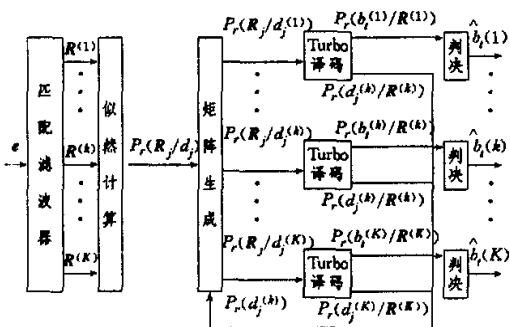


图5 迭代多用户检测电路图

Fig.5 Iterative MUD structure

接收机收到的总信号  $e$  经过匹配滤波器后输出

$$R = A \cdot^T e = A \cdot^T \left[ \sum_{k=1}^K e^{(k)} + n \right] = A \cdot^T Ad + A \cdot^T n \quad (13)$$

设  $H_i = A \cdot^T A$ , 由于信道中噪声为高斯白噪声,所以

“似然计算”的输出

$$P_r(R_i/d_j) \propto \exp\left\{ \frac{1}{2\sigma^2} (2R_i^T d_j - d_j^T H_i d_j) \right\} \quad (14)$$

因此,“矩阵生成”输出的条件概率

$$P_r(R_i/d_j^{(k)} = d) = \frac{P_r(R_i, d_j^{(k)})}{P_r(d_j^{(k)} = d)} = \sum_{d_j^{(k)} = d} P_r(R_i/d_j) \prod_{i=1}^K P_r(d_j^{(i)}) \quad (15)$$

单用户Turbo译码器有两个输出,即  $L(b_i)$  和  $L(d_j)$ ,  $L(b_i)$  可以参见公式(1)。编码比特  $d_j$  的对数似然比  $L(d_j)$  为

$$L(d_j) = \ln \frac{P_r(d_j = +1 | R_i^M)}{P_r(d_j = -1 | R_i^M)} = \frac{\sum_{S_{i-1}} P_r(S_{i-1} = s', S_i = s, R_i^M)}{\sum_{S_{i-1}} P_r(S_{i-1} = s', S_i = s, R_i^M)} = \frac{\sum_{S_{i-1}} \alpha_{i-1}(s') * \gamma_i(s', s) * \beta_i(s)}{\sum_{S_{i-1}} \alpha_{i-1}(s') * \gamma_i(s', s) * \beta_i(s)} \quad (16)$$

其中,  $P_r(d_j | R_i^M)$  是编码比特  $d_j$  的后验概率。  $\alpha_i(s)$ ,  $\beta_i(s)$  可以参见式(3)和式(4)。

考虑到多址干扰(MAI)的影响,用户  $k$  的MAP译码的输入不再是单用户的条件概率  $P_r(R_i^{(k)} | d_j^{(k)})$ , 而是“矩阵生成”的输出  $P_r(R_i | d_j^{(k)})$ , 则公式(5)变为

$$\gamma_i(s', s) = P_r(S_i = s | S_{i-1} = s') \prod_{d_j^{(k)}} P_r(R_i | d_j^{(k)}) \quad (17)$$

应注意以下几点。

① 由用户  $k$  译码器的输出  $L(d_j)$  可以得出  $P_r(d_j | R_i^M)$ , 它的第  $i$  次迭代输出为“矩阵生成”第  $i+1$  次的先验输入,即

$$P_r(d_j^{(k)}) = P_r(d_j^{(k)} | R_i^{(k)}) \quad (18)$$

在第1次迭代中,设定  $P_r(d_j^{(k)}) = 1/2$ ;  $d_j^{(k)}$  为  $\pm 1$ 。

② 求  $L(b_i)$  时的分支转移概率  $\gamma_i(s', s)$  是在未编码比特为1或0的情况下求得;而求  $L(d_j)$  时的分支转移概率  $\gamma_i(s', s)$  是在编码比特为  $\pm 1$  的情况下求得,信息比特的  $P_r(d_j | R_i^M)$  从Turbo译码器的MAP2得出,而校验比特分别从MAP1和MAP2得出。

③ 假设Turbo码的两个RSC编码器始于零状

态,且采用了收尾方式强迫RSC编码器最终归于零状态。则MAP译码中的边界条件为

$$\alpha(j,0) = \begin{cases} 1, & j = 0 \\ 0, & j \neq 0 \end{cases} \quad (19)$$

$$\beta(j,L) = \begin{cases} 1, & j = 0 \\ 0, & j \neq 0 \end{cases} \quad (20)$$

### 4 迭代多用户检测的性能分析

同步CDMA系统的传播模型见图4,调制方式采用BPSK,Turbo码采用3GPP提出的编码方案。 $N=44, Q=16, K=6$ ,假设一个用户占两个码道,共

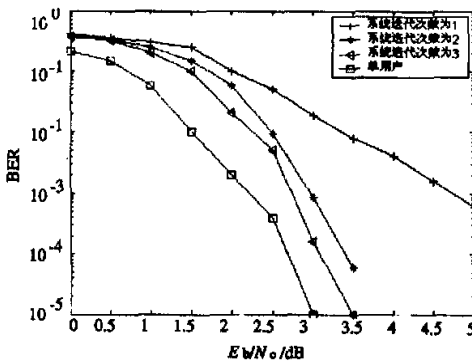
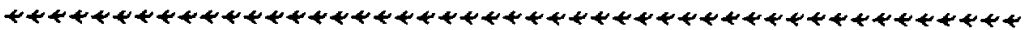


图6 迭代多用户检测的性能曲线  
Fig. 6 Iterative MUD performance curve

享一个估计窗, $W=16$ ,4帧数据Turbo码进行内部



(上接27页)

### 5 结论

移动通信中的安全技术得到了很大的发展,第三代移动通信的安全以第二代中的安全为基础,保留了在二代中被证明是必要和强大的安全功能,并且考虑了能与二代兼容。在3G中克服了2G中的一些安全问题,并且对2G中的弱点做了很大的改进,同时也考虑了安全的扩展性。

#### 参考文献

[1] 张平,王卫东. 第三代蜂窝移动通信系统—WCDMA [M]. 北京:北京邮电大学出版社,

交织, $M=234$ 。Turbo译码的迭代次数固定为6,当同步CDMA系统的迭代次数为1,2,3的性能曲线如图6所示。通过与单用户的性能比较,可以看出:3次迭代后,系统性能将得到很大提高,与单用户的性能相比小于1 dB。

#### 参考文献

[1] REED M C, SCHLEGEL C B, ALEXANDER P D, et al. Iterative multi-user detection for CDMA with FEC[C]. in The International Symposium on Turbo Codes & Related Topics, Brest, France, 1997.

[2] 刘树军. Turbo码在3G中的应用与DSP实现[J]. 重庆邮电学院学报(自然科学版), 2002, 14(1):43-45.

[3] 王新梅,肖国镇. 纠错码——原理与方法[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2001.

[4] WEBER Tobias, JOSTER Jochen, WECKERLE Martin, et al. Turbo multiuser detection for TD-CDMA[J], AEU Int. J. Electron. Commun, 1997, 51(1):1-2.

[5] REED M C, SCHLEGEL C B. Iterative multi-user detection for CDMA with FEC; near-single-user performance [J]. IEEE Transaction on Communication, 1998, 46(12):1693-1699. (编辑:郭继笃)

2000.

[2] 杨义先. 网络信息安全与保密[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 1999.

[3] 祁玉生,邵世祥. 现代移动通信系统[M]. 北京:人民邮电出版社, 1999.

[4] 3GPP Technical Specification 33. 102, 2000. 3G security architecture[S].

[5] 3GPP Technical Specification 33. 103, 2000. 3G security; Integration Guidelines[S].

[6] 3GPP Technical Specification 33. 900, 2000. 3G security; A guide to 3rd Generation Security[S]. (编辑:郭继笃)