

Turbo 码在 DS/CDMA 系统中的应用

沈丽华¹,王琳^{1,2},魏琴芳¹

(1. 重庆邮电大学 编码技术研究所,重庆 400065;2. 厦门大学 电子工程系,福建 361005)

摘要:基于多用户检测原理,针对传统的 Turbo 码通过信道信息来获得信息位的信息,修正了带校验位的并行级联 Turbo 码的 BCJR 算法,通过多用户提供的先验信息来获得信息位和校验位的信息,使其能和低复杂度的多用户检测器匹配,从而进行信息迭代,达到了消除多用户干扰的目的。

关键词:多用户检测;Turbo 码;直接序列码分多址

中图分类号:TN911 **文献标识码:**A

0 引言

在目前的 DS/CDMA 系统中,传统的单用户检测器由一组匹配滤波器器件构成,这种结构把由非正交扩频码引起的多址干扰作为噪声处理,是干扰受限的。对多个用户信号进行联合检测的多用户检测技术是未来移动通信中的关键技术之一。数据和多媒体业务的误比特性能要求比较高,一般采用 Turbo 编码技术。本文中我们提出了将 Turbo 码整合到低复杂度多用户检测器的算法和整个迭代接收的系统结构。

1 系统模型及低复杂度的多用户检测

1.1 系统模型

考虑一个有 K 个用户的 Turbo 编码同步 DS/CDMA 系统。图 1 为这种系统的发送端结构图。

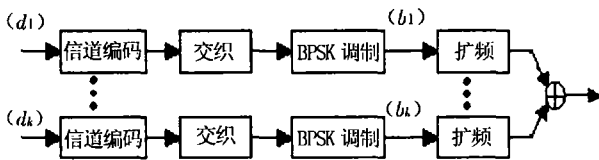


图 1 系统发送端结构图

如图 1 所示,各信道先进行独立的 turbo 码编码,然后通过交织器交织以减少各信道译码端突发错误的影响,交织后的码字分别进行 BPSK 符号调制,直接序列扩频调制(扩频波形归一化)。

1.2 迭代(Turbo)多用户接收结构

Turbo 多用户接收包括 SISO 多用户检测器和 K 个并行 SISO 译码器组成。两者以交织、解交织为纽带。图 2 为迭代多用户接收器模型图。如图 2 所示,SISO 多用户检测得到每个码元发送“+1”和“-1”的后验似然信息(LLR),即:

$$\Lambda_1[b_k(i)] \triangleq \log \frac{p[b_k(i) = +1 | r(t)]}{p[b_k(i) = -1 | r(t)]} = \underbrace{\log \frac{p[r(t) | b_k(i) = +1]}{p[r(t) | b_k(i) = -1]}}_{\lambda_1[b_k(i)]} + \underbrace{\log \frac{p[b_k(i) = +1]}{p[b_k(i) = -1]}}_{\lambda_2[b_k(i)]}$$
$$k = 1, \dots, K; i = 0, \dots, M-1 \quad (1)$$

(1)式中,第 2 项是上次迭代中第 k 个用户的信道译码交织反馈回来的关于 $b_k(i)$ 的先验 LLR;第 1 项代表 SISO 多用户检测器给出的基于接收信号 $r(t)$ 的外信息,它包含多用户和符号间的先验信息。外信息 $\lambda_1[b_k(i)]$ 是其它比特对该比特提供的信息,不包括其先验信息,因此可用来作为多用户检测器的先验信息,解交织反馈给多用户检测器,进行下一次迭代。

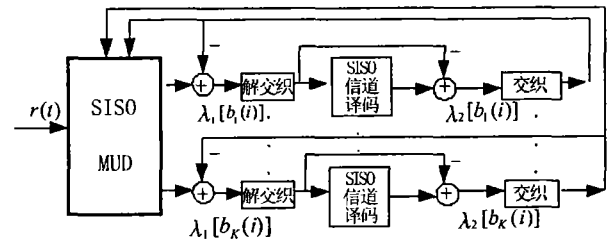


图 2 迭代多用户接收器模型

* 收稿日期:2006-03-15 修订日期:2006-04-12

基金项目:重庆邮电大学青年教师基金项目(A2005-29)

作者简介:沈丽华(1982-),女,江苏人,硕士研究生,研究方向为 CDMA 多用户检测和信道编码技术,E-mail:shenlihua136@hotmail.com;王琳,男,教授。

基于先验信息 $\lambda^f[b_k(n)]$ 和网格图,第 k 个用户的 SISO 信道译码得到的每个码元的后验 LLR 为:

$$\Delta_2[b_k(n)] \triangleq \log \frac{p[[b_k(n) = +1] | \{\lambda^f[b_k(n)]\}_{n=0}^{M-1}; decoding]}{p[[b_k(n) = -1] | \{\lambda^f[b_k(n)]\}_{n=0}^{M-1}; decoding]} \quad k = 1, 2, \dots, K; i = 0, 1, \dots, M-1 \quad (2)$$

(2)式中可得信道译码的软输出由多用户检测器提供的先验信息与译码的外信息 $\lambda_2[b_k(n)]$ 两部分组成,并且外信息是从所有码元的先验信息 $\lambda^f[b_k(n)]|_{n=0}^M$ 提取出的关于 $b_k(n)$ 的信息。与发送端相对应,外信息需要交织后反馈给多用户检测器。

1.3 低复杂度 SISO 多用户检测

根据上一次迭代 SISO 信道译码提供的先验信息,估算码元的平均信息:

$$\bar{b}_j(i) \triangleq \sum_{b_j \in \{+1, -1\}} b_j p[b_j] = \tanh\left(\frac{1}{2}\lambda[b_j(i)]\right), \quad j = 1, \dots, K \quad (3)$$

设:

$$\bar{\mathbf{b}}_k(i) \triangleq [\bar{b}_1(i), \dots, \bar{b}_{k-1}(i), 0, \bar{b}_{k+1}(i), \dots, \bar{b}_K(i)]^T \quad (4)$$

匹配滤波器软干扰消除后,得到

$$\underline{y}_k(i) \triangleq \underline{y}(i) - \underline{RA}\bar{\mathbf{b}}_k(i) = \frac{\underline{RA}[\underline{b}(i) - \bar{\mathbf{b}}_k(i)] + \underline{\sigma}_n(i)}{k = 1, \dots, K} \quad (5)$$

为进一步抑制 $\underline{y}_k(i)$ 中的残余干扰,对其再进行线性 MMSE 滤波。寻求 $\underline{w}_k(i) \in \mathcal{R}^K$,使得码元 $b_k(i)$ 与滤波器输出 $z_k(i)$ 之间的均方误差最小,从而 MMSE 的输出为:

$$z_k(i) = A_k \mathbf{e}_k^T [\underline{V}_k(i) + \sigma^2 \underline{R}^{-1}]^{-1} \cdot [\underline{R}^{-1} \underline{y}(i) - \underline{A}\bar{\mathbf{b}}_k(i)] \quad (6)$$

1.4 软 MMSE 滤波输出的高斯近似

由于线性 MMSE 多用户检测输入端的残余干扰与噪声的分布十分类似于高斯分布^[4],故可利用 $b_k(i)$ 通过一加法性高斯白噪声信息等效输出 $z_k(i)$:

$$z_k(i) = \mu_k(i)b_k(i) + \eta_k(i) \quad (7)$$

(7)式中, $\mu_k(i) = E\{z_k(i)b_k(i)\}$, $\eta_k(i) \sim N(0, v_k^2(i))$ 为高斯噪声抽样,而 $v_k^2 = \text{var}\{z_k(i)\}$ 。根据(7)式,最后可求得软 MMSE 多用户检测的外信息:

$$\lambda_1[b_k(i)] \triangleq \log \frac{p[z_k(i) | b_k(i) = +1]}{p[z_k(i) | b_k(i) = -1]} = -\frac{[z_k(i) - \mu_k(i)]^2}{2v_k^2(i)} + \frac{[z_k(i) + \mu_k(i)]^2}{2v_k^2(i)}$$

$$\frac{2z_k(i)}{1 - \mu_k(i)} \quad (8)$$

2 改进后的 Turbo 码译码

改进后的 Turbo 译码器结构如图 3 所示。

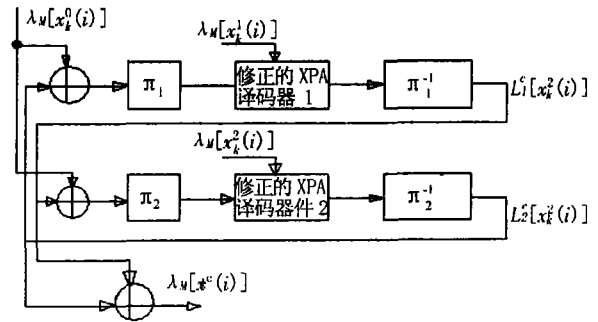


图 3 软 Turbo 译码器

由 SISO 多用户检测器传送的第 k 个用户比特的解交织 LLR $\{\lambda_1(b_k[i])\}$ 分配给两个 MAP 译码器。系统比特 $\{\lambda_1(x_k^0[i])\}$ 在通过比特交织后送给所有的 MAP 译码器。第 j 个奇偶校验比特 $\{\lambda_1(x_k^j[i])\}$ 送给第 j 个 MAP 译码器。

软 Turbo 译码本身是一个迭代算法。Turbo 译码中的第 j 个 MAP 译码器根据码约束,由 SISO 多用户检测器给出的输入码元的 LLR 及其修正的 MAP 译码器给出的外信息,计算系统比特的部分内信息 $\lambda_2^j(x_k^j[i])$ 和第 j 个校验比特的内信息 $\lambda_2^j(x_k^j[i])$ 。这部分外信息则被送给其他修正的 MAP 译码器,以供软 turbo 译码阶段的下一次迭代使用。经过几次迭代之后,合并的外信息送给 SISO 多用户检测器,作为 Turbo 多用户检测下一次迭代的后验 LLR。具体描述如下。

记第 j 个 MAP 译码器比特的 LLR 为(9)式

$$\Delta_2^j(x_k^j[i]) \triangleq \log \frac{p(x_k^j[i] = +1 | \{\lambda_1 x_k^0[i]\})_i}{p(x_k^j[i] = -1 | \{\lambda_1 x_k^0[i]\})_i} \rightarrow \frac{\langle \lambda_1(x_k^j[i]) \rangle, \{\lambda_2^j(x_k^0[i])\}_{i,l \neq j}}{\langle \lambda_1(x_k^j[i]) \rangle, \{\lambda_2^j(x_k^0[i])\}_{i,l \neq j}} = \log \frac{\sum_{(s',s) \in S_{i,c}^+} \alpha_{i-1}(s') \gamma_i(s',s) \beta_i(s)}{\sum_{(s',s) \in S_{i,c}^-} \alpha_{i-1}(s') \gamma_i(s',s) \beta_i(s)} \quad (9)$$

这里 $S_{i,c}^+$ 和 $S_{i,c}^-$ 分别表示状态转移对 (s',s) 的集合,且使得码比特 $x_k^j[i]$ 是 +1 或 -1。定义为第 j 个 MAP 译码器传送的码比特 $x_k^j[i]$ 为 +1 或 -1。定义 $\lambda_2^j(x_k^c[i]) \triangleq \Delta_2^j(x_k^c[i]) - \lambda_1(x_k^c[i]) (c = 0 \text{ 或 } j)$ 为第 j 个 MAP 译码器传送的码比特 $x_k^c[i]$ 的部分外信息。(9)式中的各参数的递推为:

$$\alpha_i(s) = \sum_{s' \in s} \alpha_{i-1}(s') \gamma_i(s', s) \quad (10)$$

$$\beta_{i-1}(s) = \sum_{s' \in s} \beta_i(s') \lambda_i(s, s') \quad (11)$$

$$\gamma_i(s', s) = p[x_k^0[i] = d(s', s) | \lambda_1(x_k^0[i]) + \sum_{i \neq j} \lambda_2^j(x_k^0[i])] p[x_k^1[i] = x_k^1(s', s) | \lambda_1(x_k^1[i])] \quad (12)$$

在 Turbo 多用户接收机的迭代运算后, 根据(13)式:

$$\hat{d}_k[i] = \text{sign}[\Lambda_2(x_k^0[i])] \quad (13)$$

对每个信息比特做硬判决。

3 仿真结果说明

本文中我们的仿真环境是 4 个用户的、turbo 编码的同步 DS/CDMA 系统, 各个用户采用不同的随机交织器, 每帧的信息比特数都为 128 bit。扩频序列的扩频因子为 13, 相关系数 $\rho=0.67$ 。Turbo 编码器的码率为 1/3, 生成矩阵为 $G=(1, 5_8/7_8)$ (下角“8”表示八进制)。图 4 为仿真结果曲线, 由图 4 的仿真结果可知, 在大信噪比下多用户的性能收敛于单用户的性能。

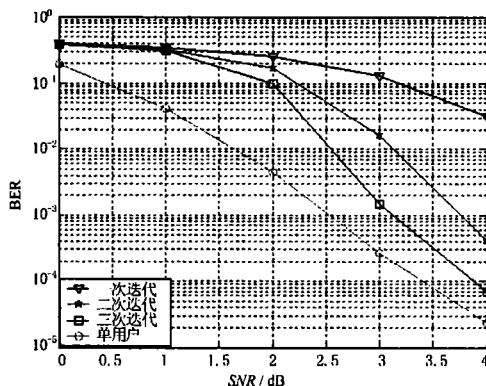


图 4 turbo 编码的多用户检测比特误码性能

4 结束语

多用户检测和信道译码是未来移动通信系统中接收端的两个主要模块。对于 Turbo 码来讲, 可以灵活改变帧率, 能实现短帧和长帧的任意转换。通过打孔技术可以产生任意码率的编译码系统。因此基于它的灵活性和优异的性能可以很好的满足高速数据和多媒体业务。

参考文献:

- [1] WANG X, POOR H V. Iterative (Turbo) soft interference cancellation and decoding for codes CDMA[J]. IEEE Trans on Communications, 1999, 47(7): 1046-1061.
- [2] MOHER M. An iterative multiuser decoder for near-capacity communications [J]. IEEE Trans on Communications, 1998, 46(7): 870-880.
- [3] KOBAYASHI M, BOUTROUS J, CAJRE G. Successive interference cancellation with SISO decoding and EM channel estimation [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2001, 19(8): 1450-1460.
- [4] POOR H V, VERDU S. Probability of Error in MMSE Multiuser Detection [J]. IEEE Trans on Inform Theory, 1997, 43: 858-871.

(责任编辑:魏琴芳)

Application of Turbo coding in system of DS/CDMA

SHEN Li-hua¹, WANG Lin^{1,2}, WEI Qin-fang¹

(1. Institute of Coding Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 40065 P. R. China;

2. Department of Electronic Engineering, Xiamen University, Fujian 361005, P. R. China)

Abstract: In traditional turbo decoding algorithm, it get information from the channel message without parity bits information. In this paper, we propose a modifying BCJR algorithm based on the turbo iterative multiuser detector principle witch includes system bits information and parity bits information from the multiuser detection to match the low-complexity SISO multiuser detector. The simulation results show its great performance.

Key words: multiuser detection; Turbo codes; DS/CDMA