

Turbo CDMA多用户检测的研究*

杨东林** 叶 梧

(华南理工大学电子与通信工程系 广州 510641)

【摘要】 简述了Turbo译码原理及逐符号最大后验算法，并将Turbo译码原理应用于CDMA系统的多用户检测；提出了基于Turbo译码原理的多用户检测接收机方案，通过计算机仿真验证了该方案的性能。结果表明，该方案经过4次迭代之后，其误码率接近单用户界，这种接收机可去除多址干扰(MAI)的影响。

关键词 Turbo 码； 码分多址； 多用户检测； 迭代译码； 软输入软输出

中图分类号 TN914.4； TN92

1993年，Berrou等人提出了一种接近香农理论极限性能的信道编码方案——Turbo码^[1]，成为近年来编码理论的重要突破。随着研究的深入，Turbo码的译码引入了迭代译码思想，进一步推广到更为广泛的检测和译码结构中，如串行级联码译码、均衡、编码调制、多用户检测、联合信源与信道译码等^[2-6]。本文介绍Turbo译码原理和逐比特最大后验算法，将Turbo译码原理应用于CDMA系统的多用户检测中。

1 Turbo译码原理

Turbo码的译码原理如图1所示^[1]，它是一类具有反馈结构的伪随机译码器。Turbo-code并不局限于并行级联码，还可是串行及分组码等多种形式。由于交织环节的存在必然引起时延，使译码器不可能有真正意义上的反馈，而是形成流水线式的迭代结构。由于这种流水线结构，使译码器可由若干完全相同的软输入软输出的基本单元构成，如图2所示。本文用似然比函数来描述Turbo译码原理。由图1可以看出，一个Turbo译码器的软输入软输出译码单元的输入分为反映信道特性的似然比和反映信息位的先验信息的似然比两部分，输出得到的信息位后验信息分为三部分，即

$$L(\hat{u}) = L_c y + L(u) + L_e(\hat{u})$$

式中 L_c 与信道的特性有关，对于时不变信道而言， L_c 是常数； y 表示接收序列， $L(u) = \ln\{p(u=+1)/[p(u=-1)]\}$ 反映了信息位的先验信息。 $L_c y + L(u)$ 输入译码器后，得到信息位的后验信息 $L(\hat{u})$ 比输入多了一个附加信息 $L_e(\hat{u})$ ，这是由于接收序列码元之间的相互制约引起的。译码器的任务是根据经过编码和信道得到的接收序列 y ，估计一个矢量 u 的每个码元 u_k 。可用逐位软判决最大后验译码算法计算似然比，即用迭代方法计算每位码元的最大后验概率(BCJR算法)；然

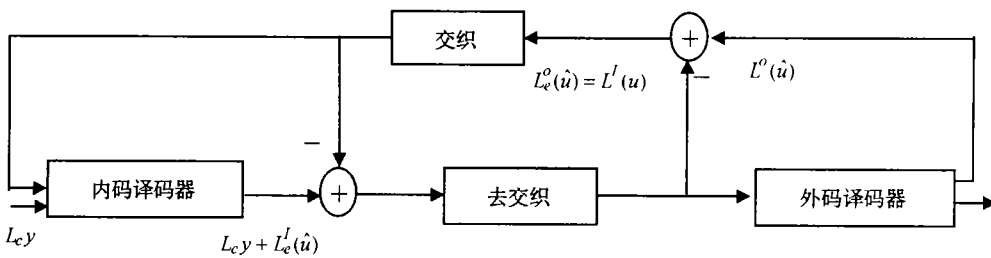


图1 Turbo迭代译码器

1999年11月9日收稿

* 广东省科委重大科研项目，编号：99J10168

** 男 30岁 博士

后根据条件概率分布 $p(y|u)$ 和先验概率 $p(u)$ 计算后验概率 $p(u_k|y)$, 待后续处理使用。因此, Turbo 译码原理为^[2]: 采用Turbo反馈结构的伪随机译码器, 内码外码可以交替互不影响地译码, 且可以通过关于系统码信息位的软判决输出相互传递信息, 进行递推式译码。对内码进行软输出译码而

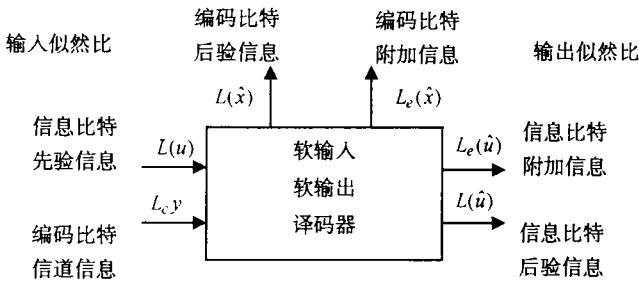


图2 软输入软输出译码器

每个码元都可以得到来自同一序列中其他所有码元的信息, 具体是通过迭代中反复交织反馈、去交织来实现的, 这实际上就实现了译码的伪随机化。外码和内码均用先验概率分布 $p_i(u)$ (i 表示迭代次数) 进行码元符号的迭代MAP估计; 充分利用在第 i 次迭代中统计独立的信息(充分统计量集合)计算 $p_i(u)$, 随着迭代次数的增加, 使先验概率分布 $p_i(u)$ 逐渐精确。

在两层码的译码器之间仅仅相互传递每次迭代得到的附加信息, 这种附加信息反映了接收序列码元之间的制约关系。先验概率 $p_i(u)$ 可以通过以下方法获得: 信源比特统计特性的先验信息或后验信息; 由并行传输(如分集、并行级联、相关的多用户信道等)得到后验概率; 由外码第 $(i-1)$ 次译码得出后验概率(串行级联); 将前次译码产生的串行级联和并行级联后验概率结合起来。另外, 可以将用卷积码作为信道编码的通信系统看成一个广义的Turbo码。以卷积码作为外码, 将多径信道、CDMA信道、 M -元调制等看作广义的内码。把整个系统看成广义的Turbo码, 这样可以构造出类似Turbo译码器的一些迭代的检测器和接收机。

2 CDMA多用户信道模型

如图3所示, 将一个具有卷积编码的CDMA系统当作一个广义Turbo码系统。内码为直接序列扩频, 外码为卷积编码, 两者通过交织器相联。整个系统发端看成外码与内码的串行级联。考虑 K 个异步CDMA用户的系统, 每个用户采用码率为 $1/n$ 的卷积码, 均发射 L 个编码符号, 相应共有 KL/n 个信息比特。每个用户独立地采用交织器进行编码符号交织, 设用户 $k(k=1,2,\dots,K)$ 的交织器输出序列 x 的第 i 个比特为 $x_k[i]$, 其中 $i=1,2,\dots,L$ 表示符号标号, 在每个时刻 i , $x_k[i]$ 与 N 个码片的扩频序列 $s_k[i] \in \{-1,+1\}^N$ 的乘积为 $s_k[i]x_k[i]$ 。设多径传输的最大时延为 MT_c , 其中 M 为一个整数, T_c 为码片周期, 变频后在接收机的接收信号可表示为 $r = Ad + n$, $r \in C^{(L+1)N+M}$ 、 $C^{(L+1)N+M}$, 表示 $((L+1)N+M)$ 维矢量空间。

设矩阵 $A \in C^{(L+1)N+M, LK}$, 即 $(L+1)N+M$ 行, LK 列矩阵, 每个列向量为 $a_j, j=1,2,\dots,LK$ 组成, 其定义如下

$$a_j = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{N(i-1)} \\ h_k[i] * s_k[i] \\ \mathbf{0}_{N(L-i)} \end{pmatrix} \in C^{(L+1)N+M}$$

式中 $h_k[i] * s_k[i]$ 表示用户 k 在符号 i 时的复数信道脉冲响应码片率抽样值 $h_k[i] \in C^{N+M}$ 与相应的扩频序列的卷积值, $\mathbf{0}_m$ 表示 m 维列矢量矩阵。 A 描述了CDMA系统中各个用户信道情况, 包括每个用户的扩频码, 到达接收机的相对时延, 接收到的信号幅度等信息。考虑异步情况, 对应的时延 $\tau_k T_c$ 在信道矢量 $h_k[i]$ 开始时放置 $\tau_k < N$ 个零元素。符号 j 的接收功率为: $w_j = a_j^* a_j, d_j = x_k[i]$ 为

矢量 d 的元素。 i, j, k 之间的约束关系为 $j=(i-1)K+k$ 。 矢量 $n \in C^{(L+1)N+M}$ 为具有独立同分布复高斯噪声矢量, 均值为 $E\{nn^*\} = \sigma_n^2 I_{(L+1)N+M}$ 。 因此在RAKE接收机前端的输出值为

$$y = \hat{A}^* e = \hat{A}^* A d + v \tag{1}$$

式中 \hat{A}^* 为接收机对 A 的估计值, 假设有理想的信道估计, 这样有 $R = A^* A$, 代入式(1)可得

$$y = R d + v \tag{2}$$

式中 v 表示接收机的噪声。

如果将噪声白化技术应用到 r , 得到的CDMA接收信道可看作是时变卷积编码。编码器不象传统卷积码那样采用模二加, 但同样具有距离谱和生成多项式^[7]。由于矩阵 R 的对角对称特性, 可以作为卷积码的生成矩阵, 可将 y 看成序列 d 在期望值 $E\{vv^*\} = R\sigma_n^2$ 的有色高斯噪声中的一个卷积编码过程。 R 为 $2(K+M)-1$ 阶矩阵, 给定了 y 和 R 就可以考虑采用卷积码的译码技术, 如维特比算法或最大后验算法来求解 d , R 定义为复数域中的一个时变卷积码, y 可改写为 d 的微扰形式

$$y = W d + v + F d \tag{3}$$

式中 $W = \text{diag}(R)$, $F = R - W$ 。其中 diag 表示由对角元素构成的矩阵, 矩阵 W 表示各符号的功率, 而矩阵 F 表示系统中的多用户干扰。对于 y 的某一元素, 相应的RAKE接收机输出值为

$$y_j = w_j d_j + v_j + f_j d \tag{4}$$

式中 f_j 为 F 的第 j 行; 将CDMA信道看成卷积编码, y_j 是编码器输出的第 j 个码字。由于 R 的对角性, f_j 象一个滑窗选择 d 的子序列进行编码, 使得 f_j 类似卷积编码中的移位寄存器。

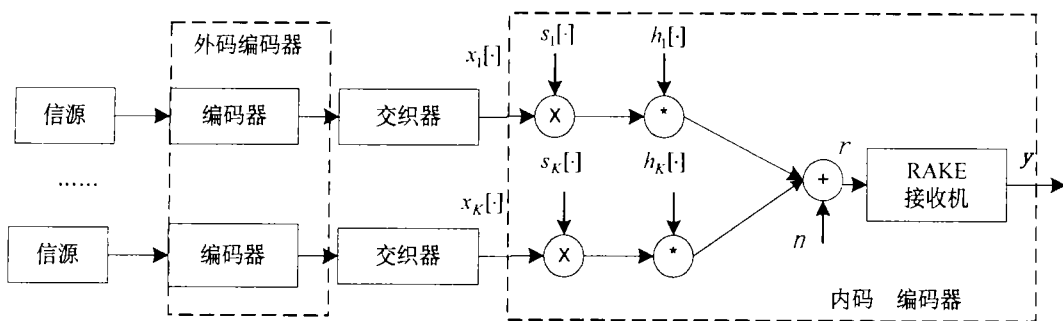


图3 异步CDMA发射机

3 迭代的CDMA多用户检测接收机

将Turbo译码原理应用于上述CDMA系统, 提出一个迭代多用户检测方案, 如图4所示。接收机包括干扰消除器和单用户译码器两个部分。干扰消除器用来降低多址干扰(MAI) F , 为单用户译码器产生一个信道条件概率 $p(x|d)$ 。单用户译码器产生信息比特条件概率 $p(b'|x')$ 和信道符号概率 $p(d'|x')$ 。信道符号 d 的软估计送给干扰消除器, 在下次迭代中可用来消除MAI。当接收机完成给定的迭代次数之后, 再进行硬判决估计信息比特。

干扰消除器输出为

$$x' = y - F \hat{d}' \tag{5}$$

$$F(d - \hat{d}') + W d + v \tag{6}$$

式中 x' 表示经过 i 次迭代的输出。由式(5)可知, 要用干扰消除器估计信道符号 \hat{d}' 。假定信道 R 是已知的, 即知道 F 。如果 $\hat{d}' = d$, 意味着MAI被全部去除。这里用迭代估计方法来提高 \hat{d}' 的估计性能。干扰消除器同时产生一个条件概率 $p(x|d)$ 反馈给单用户译码器。对足够大的 M 来说, 由式(4)的 $f_j d$ 项为高斯分布, 因此信道条件概率是高斯分布的, 用下式来计算条件概率

$$p\{x'_i | (d'_i = \pm 1)\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi \sigma_i^2}} \exp\left\{-\frac{(x'_i \mp 1)^2}{2\sigma_i^2}\right\} \tag{7}$$

其中 M 个单用户MAP译码器产生后验的信道符号概率 $p(d'_i = \pm 1 | \mathbf{x}')$ 和相应的信息比特概率 $p(b'_i = \pm 1 | \mathbf{x}')$ 。在干扰消除器中第 i 次估计的信道符号值 \hat{d}'_i 由 $\hat{d}'_i = E\{d'_i | \mathbf{x}'\}$ 计算。条件期望值可用单用户MAP译码器的输出的信道符号概率值 $p(d'_i = \pm 1 | \mathbf{x}')$ 来估计, 即

$$E\{d'_i | \mathbf{x}'\} = (-1)p(d'_i = -1 | \mathbf{x}') + (+1)p(d'_i = +1 | \mathbf{x}') \tag{8}$$

式(8)定义了一个“软估计值”, 可以用来消除MAI。同时, 单用户MAP译码器产生信息比特概率, 经过预定的迭代次数之后, 可以利用这些值进行硬判决。交织器的作用是使多址干扰消除器与译码器相互独立, 并减少单用户译码器模块的突发错误。

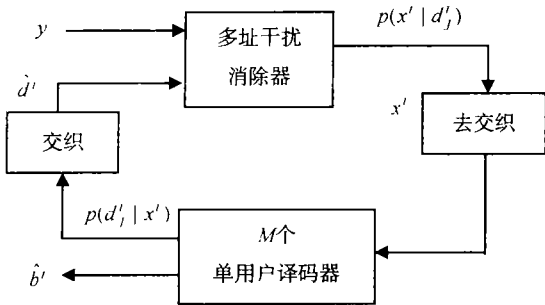


图4 CDMA迭代接收机结构

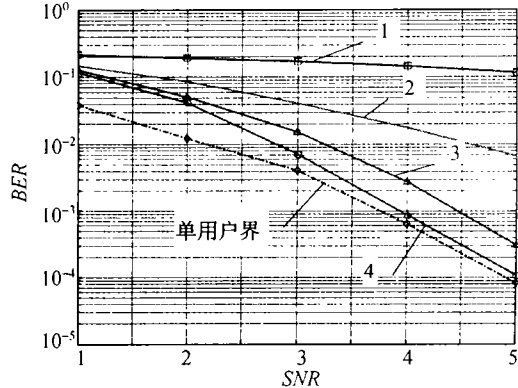


图5 系统仿真性能

4 计算机仿真结果

我们采用计算机仿真来验证本文提出的迭代多用户检测器的性能。设用户数 K 与扩频增益 N 保持比较高的数值, 纠错编码采用码率为 $1/2$ 约束长度为 4 的卷积码, 其生成多项式为 $G=(5,7)_8$ 。仿真中, 取 $K=27, N=31$ 。经过 4 次迭代之后, 用户的平均误码率性能如图 5 所示。我们同时仿真了仅有一个用户时的性能。从图 5 可以看出, 经 4 次迭代之后, 采用文中所给出方案的接收机所有 27 个用户可达到接近单用户界的性能。

5 结束语

本文阐述了Turbo译码原理和逐符号最大后验算法, 将Turbo 原理应用于CDMA系统的多用户检测, 提出了基于Turbo 译码原理的多用户检测接收机方案, 并通过计算机仿真验证了该方案的性能。仿真结果表明该方案能提供较好的误码率性能, 接收机只需进行 4 次迭代, 系统性能就接近单用户界, 即多址干扰几乎被完全消除。

参 考 文 献

- 1 Berrou C, Glavieux A, Thitimajshima P. Near Shannon limit error-correcting and decoding: Turbo-codes. IEEE ICC. 1993: 1 064~1 070
- 2 Douillard C, Jezequel C, Berrou C, et al. Iterative correction of intersymbol interference: Turbo-equalization. European Transaction on Telecommunications. 1995, 6: 507~511
- 3 Hagenauer J. Forward error correcting for CDMA systems. IEEE ISSSTA. 1996: 566~569

- 4 Giallorenzi T R , Wilson S G. Multiuser ML sequence estimator for convolutionally coded asynchronous DS-CDMA systems. IEEE Trans Commun, 1996, 44(8): 997~1 008
- 5 Giallorenzi T R , Wilson S G. Suboptimum multiuser receivers for convolutionally coded asynchronous DS-CDMA systems. IEEE Trans Commun, 1996, 44(8): 1 183~1 196
- 6 Alexander P D, Rasmussen L K, Schegel C B. A linear receiver for coded multiuser CDMA. IEEE Trans Commun, 1997, 45(5): 665~610
- 7 Lin S, Daniel J , Costello. Error control coding: fundamentals and applications. New Jersey: Prentice-Hall,1983

Turbo CDMA Multi-user Detection

Yang Donglin Ye Wu

(Dept. of Electronic and Communication Eng., South China University of Technology Guangzhou 510641)

Abstract In this paper, the basic Turbo decoder principle and symbol-by-symbol MAP algorithm are introduced, which are applied to multi-user detection in the coded asynchronous multi-path CDMA system. A multi-user detection scheme based on Turbo decoder principle is proposed and its performance is simulated by computer. Simulation results show that the performance of proposed multi-user receiver approaches the single user bound.

Key words Turbo code; CDMA; multi-user detection; iterative decoder; soft-in soft-out

· 科研成果介绍 ·

COAS开放式系统软件平台

主研人员: 王志刚 孟庆余 黄万镒 唐世渭等

COAS开放式系统软件平台取得的成果为:

- 1) 研制出系统软件平台COSAV1.1和COSAV2.0;
- 2) 研制出一批软件工具;
- 3) 制订了国家标准和国家军用标准《POSIX依从性测试方法》、《军用数据库管理系统功能规格说明指南》;
- 4) 研究出具有系统软件知识产权的研究成果。

· 科 卞 ·