

# 基于遗传算法的卷积码快速译码

陈军<sup>1</sup>, 孙韶辉<sup>2</sup>, 王新梅<sup>2</sup>, 曹志刚<sup>1</sup>

(1. 清华大学电子工程系, 北京 100084; 2. 西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 西安 710071)

**摘要:** 本文提出基于遗传算法(GA)的卷积码快速译码,进行格图上的单向(U-GA)和双向(B-GA)搜索译码.它利用遗传算法的群体多样性好、搜索空间宽广,具有全局优化能力,提高译码质量.通过模拟计算,分析了单向和双向的译码算法和群体规模  $M$  对误比特性能  $P_b$  的影响.模拟结果表明:在相同译码复杂度下、 $P_b = 10^{-6}$ 时,与MA算法(编码约束度  $K=19$ )相比,该译码算法约有0.5dB性能增益;与VA算法( $K=7$ )相比,B-GA大约有1dB增益.

**关键词:** 卷积码;译码算法;遗传算法;性能

**中图分类号:** TN911.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2000)09-0137-03

## Fast Decoding of Convolutional Codes Using Genetic Algorithm

CHEN Jun<sup>1</sup>, SUN Shao-hui<sup>2</sup>, WANG Xin-mei<sup>2</sup>, CAO Zhi-gang<sup>1</sup>

(1. Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084;

2. National Key Lab. of ISN, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** In this paper, fast decoding algorithms for convolutional codes, which are based on the genetic algorithm (GA), are presented. They search from one side or both sides of the trellis respectively to implement unidirectional decoding (U-GA) or bi-directional decoding (B-GA). With good diversity, wide search region and global optimal ability of GA, the decoding performance can be improved. The effects of U- and B-GA and population size  $M$  on  $P_b$  are analyzed. Simulation results show that, with the same decoding computation efforts and at  $P_b = 10^{-6}$ , B-GA achieves about 0.5 dB coding gains over MA algorithm (MA) for the coding constraint length  $K=19$  code, and 1dB gain over Viterbi algorithm (VA) with the  $K=7$  code.

**Key words:** convolutional code; decoding algorithm; genetic algorithm; performance

### 1 引言

在现代数字通信系统中,常使用差错控制技术来实现可靠通信.卷积码是一类误比特性能较好的常用码类,采用格图(或码树)上的Viterbi算法(VA)或Stack算法(SA)译码,可以获得最佳的、或者接近最佳的纠错性能.VA仅适用于编码约束度较小的码字.SA的计算量具有不确定性,会出现堆栈溢出和数据删除,从而导致性能损失.还有其它译码算法,如M算法(MA)<sup>[1,2]</sup>,实际上都是VA和SA的综合与推广.

目前,遗传算法(GA)是深受关注的优化算法<sup>[3]</sup>,文献[4~6]利用遗传算法研究了线性分组码及其译码算法,加快了译码速度.本文也结合遗传算法,提出新的卷积码译码算法,它适用于编码约束度  $K$  较大的卷积码,能够进一步改善MA的译码性能<sup>[1,2]</sup>.

### 2 单向译码算法

MA译码算法<sup>[1,2]</sup>是一种格图上宽度优先搜索的译码算法,在译二进制 $(2, 1, m)$ 卷积码时,每次前进搜索,它仅扩展  $M$  条最大似然路径,所以,它的译码计算量是一个固定值,且与  $M$  成正比.一般地,  $M$  远小于  $2^m$ ,因此,该算法更适于译存

储级数  $m$  较大(如  $m > 12$ )的卷积码.在噪声干扰较小的环境下,MA算法可以正确译码,而当信道噪声较大时,为确保正确路径仍然落在  $M$  条扩展路径中,就需要增大  $M$ .此时,若  $M$  很大(最大为  $2^m$ ),则该译码算法的计算复杂度太大,实际是不可实现的.但是若不改变  $M$ ,MA算法就容易丢失正确路径,译出错误码字.这是因为,MA算法沿着格图前进,在遇到严重的噪声干扰时,将偏离正确路径,对于  $m$  较大的、且具有对称的、双向最佳的距离谱(SBODP)的卷积码<sup>[7]</sup>,译码器将很难在较短的时间内重新回到正确路径上,导致后续译码输出有较多的错误比特.出现这种问题的主要原因是:MA算法仅扩展  $M$  条最大似然路径,使得被选中的路径不具备广泛的代表性.这样,译码器容易陷入次优的局部搜索区域,丢失存在正确路径的最优搜索区域,最终导致译码出错.我们对此进行了研究,认为:如果译码算法不仅保留若干最大似然路径,也扩展一些似然度较小的路径,即被选中的路径具备多样性,则译码器可以搜索比较宽的区域,并尽可能地跟踪到最佳路径,就能够克服上述缺点.本文的创新性主要体现在将GA的优点引入卷积码的快速译码中,较好地改善了译码性能.这一点从本文的仿真已得到验证.

收稿日期:1999-06-24;修回日期:1999-12-05

基金项目:国家自然科学基金(No. 69972035, 69772022)

已经知道<sup>[3]</sup>,遗传算法(GA)是一种基于群体进化的全局优化算法,它采用了多种对策,主要是三个遗传算子——选择、交叉和变异,使得GA在整个进化阶段维持群体的多样性,增强了全局搜索能力.因此,若在译码中结合遗传算法的这些特点,就可以改进单向MA译码算法(U-MA)<sup>[1,2]</sup>.基于GA的(2,1,m)卷积码单向译码算法(U-GA)步骤为:

(1)个体编码方式 若码长为 $L$ 段(即 $2L$ 比特),则个体的染色体 $X_j(1 \leq j \leq M)$ 由 $L+1$ 个基因片段排列组成,其中第 $i$ 个基因片段代表格图上第 $i$ 级的某一节点( $0 \leq i \leq L$ ),基因片段按 $m$ 比特编码.所有的遗传算法都以基因片段为最小基本单位进行操作.

(2)适度函数的选择 在二进制对称信道(BSC)下,采用无偏的Fano度量作为适度函数,即: $f(X_j) = \sum_{i=1}^L \log [p(y_i|x_i)/p(y_i)]$ ,其中, $y_i$ 为接收序列的第 $i$ 个比特, $x_i$ 为码字序列的第 $i$ 个比特, $l_j$ 为个体 $X_j$ 已经进化的次数(等于已扩展的路径长度).显然, $f(X_j)$ 越大,则个体越优秀.

(3)初始群体的设定 初始群体由 $M$ 个个体组成,即群体规模为 $M$ ,所有个体 $X_j$ 都初始化为全零比特,适度值设为 $f(X_j) = -$ .

(4)选择算子 在遗传算法的初期(即进化次数 $I_F \leq \log_2 M$ )时,所产生的新个体都被保留,作为新的后代;在后期(即 $I_F > \log_2 M$ ),所有的个体将按“自然选择,优胜劣汰”的繁殖规律,产生新的后代.

(5)交叉算子 由于卷积码的前后码组之间有关联,如果个体进行交叉操作,就会破坏这种固有的联系,因此,放弃使用交叉算子.

(6)变异算子 当进行第 $I_F(1 \leq I_F \leq L)$ 轮进化时,变异算子从集合 $\{0, \dots, 2^m\}$ 中选择两个数(用 $m$ 个比特来表示),置入个体的第 $I_F$ 个基因片段内,并要求第 $I_F - 1$ 个基因片段与第 $I_F$ 个基因片段满足卷积码编码器的状态转移关系,这样,相应地生成两个新个体.

(7)新后代的产生 所有个体每发生一次变异,就产生两部数目的新个体.它们经过生存竞争、自然选择后,只有其中的 $M$ 个个体能够生存下来,并作为新的后代,继续进行下一轮进化、繁殖.

(8)译码结束条件 当进化次数为 $L$ 次,即已到达格图的最末级节点时,译码停止.

### 3 双向译码算法

文[1]还提出双向MA译码算法(B-MA),它采用前向和后向两个译码器,从格图的两端交替搜索前进,包含正确路径的(可能性最大的)译码器将优先进行扩展.这样,两个译码器从两端逼近噪声区域,两个方向相反的路径在此汇合、实现对接,并译出相应的信息比特.与单向MA相比,双向MA译码性能有一定的改善,但是它同样也有缺陷——路径选择策略缺乏广泛的代表性.根据上述分析,我们也可利用遗传算法的独特优点:(1)群体进化,优胜劣汰;(2)物种多样性;(3)并行搜索,来改进双向MA译码算法<sup>[1]</sup>.

基于遗传算法的双向译码算法(B-GA)也使用前向和后

向两个译码器,它们的个体编码方式、适度函数的选择、初始群体的设定,以及遗传操作和新后代的产生,其基本思想与U-GA相同,其译码终止方式与B-MA基本相同.文中采用遗传算法来提高群体多样性,可提高B-MA跟踪正确路径的能力,从而改善其译码性能.图1和图2分别给出了单、双向译码示意图,下面的计算机模拟将验证这一点.

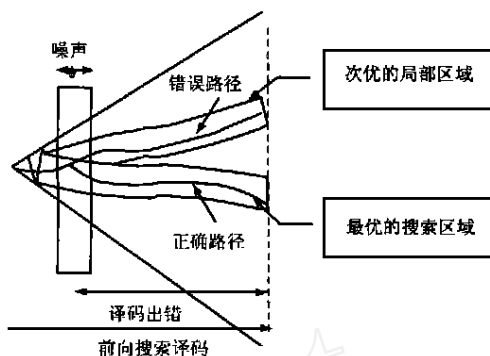


图1 单向译码示意图

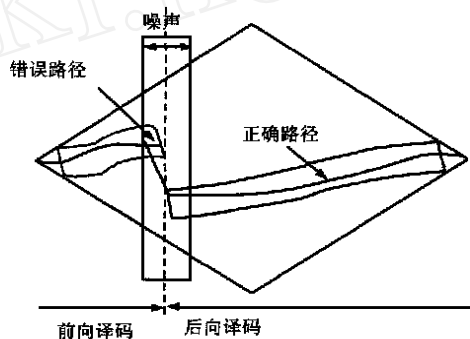


图2 双向译码示意图

### 4 译码算法的计算复杂度

对于二进制(2,1,m)卷积码的译码,Viterbi算法(VA)每一步译码,需要进行 $2^m$ 次“加比选”操作,每个“加比选”操作包括两次分支度量计算、一次度量比较和一次路径选择,并用 $2^m$ 个状态寄存器来存储 $2^m$ 条幸选路径和相应的路径度量值.因此,VA的复杂度随 $m$ 呈 $2^m$ 指数增加,对于 $m$ 较大的码,VA的复杂度非常大,根本不能实用.与之相比,我们的译码算法U-GA、B-GA以及MA译码算法<sup>[1]</sup>,每一步的译码复杂度仅为 $M$ 次“加比选”,不随 $m$ 变化,故本算法更适用于 $m$ 较大的卷积码译码.若给定 $M$ ,本文的译码算法复杂度与MA完全相同.此时,进一步研究在相同译码计算量下,U-GA和B-GA的纠错性能,以及相对U-MA和GMA译码性能改善情况.

### 5 译码算法的性能分析

本文对码率 $R=1/2$ 、SBODP卷积码<sup>[7]</sup>进行了计算机模拟.研究了在BSC信道下,译码性能 $P_b$ 随信噪比 $E_b/N_0$ 和搜索路径宽度 $M$ 变化的规律,并与Viterbi算法进行性能对比.分析本算法的特点.设定码长 $L=500$ 段,遗传算法的群体规模等于 $M$ ,选择算子的操作概率 $P_s$ 由赌轮法确定,交叉算子的操作由译码步骤5确定,变异算子的操作由步骤6确定.

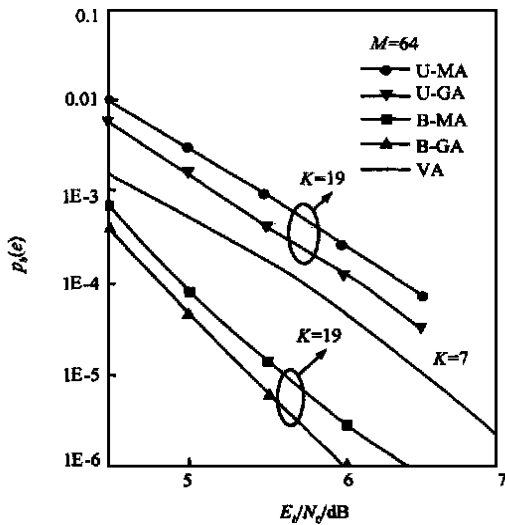


图 3 单向和双向译码性能

图 3 给出了当群体规模  $M=64$ 、编码约束度  $K=19$  时,单向的和双向的 MA、GA 译码性能随信噪比  $E_b/N_0$  变化的曲线以及 VA ( $K=7$ ) 的性能曲线。此时,单向的 U-MA、U-GA、双向的 B-MA、B-GA 和 VA 的译码复杂度相同,都是  $ML=2^{k-1}L_{K=7}=32000$  次“加比选”运算。由图 3 可以看到 U-MA 和 U-GA 的误比特率比 VA ( $K=7$ ) 大得多,这是由于单向译码算法很容易丢失正确路径,在译码时容易出现较长的误比特串,U-GA 和 U-MA 的纠错性能一般比 VA 差,但 U-GA 的性能比 U-MA 更好,大约有 0.4dB 的增益,其性能更接近 VA ( $K=7$ )。这表明 U-GA 对 U-MA 有较大的性能改善。与单向译码算法相比,双向译码算法 B-GA 有更大的性能增益。比如在  $P_b=10^{-4}$  时,B-GA 的译码性能比 U-GA 好近 1.2dB,比 U-MA 好约 1.5dB。此外,B-GA 的性能也比 B-MA 好,比 VA ( $K=7$ ) 要好得多。比如在  $P_b=10^{-6}$  时,它相对 B-MA 具有 0.5dB 增益,而相对 VA 有 1.3dB 的增益。

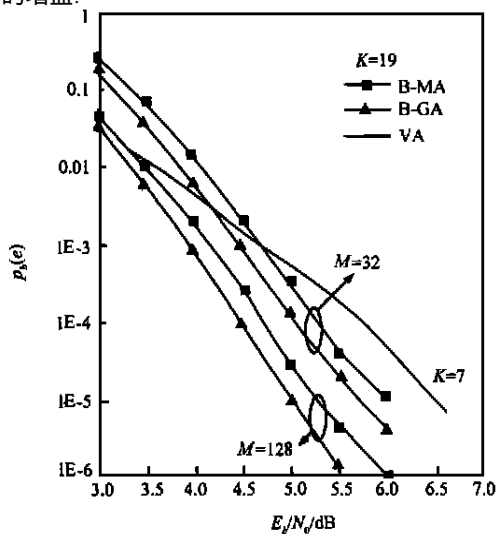
图 4 双向译码性能与  $M$  的关系图

图 4 给出了  $M=32、128、K=19$  时,双向的 MA、GA 译码性能随  $E_b/N_0$  变化的曲线。正如所预期的那样,随着  $M$  的增加,双向译码算法 B-MA 和 B-GA 的误比特率都逐渐减小。当  $M(=32)$  比较小时,B-MA 和 B-GA 的译码复杂度很小,都是  $ML=16000$  次“加比选”运算,但是误比特率性能很差。当  $M=128$  较大时,B-MA 和 B-GA 的译码计算量仍相同,都是  $ML=64000$  次“加比选”运算,比  $M=32$  大了 3 倍,但是误比特率大大下降了。这是因为译码算法扩大了搜索路径的数目  $M$ ,降低了丢失最佳路径的概率,即使受较强的信道噪声的干扰时,仍可以寻找到最佳、或者次佳的路径,基本上能够实现正确译码,所以译码性能明显地改善。相比之下,由于 B-GA 提高了搜索路径的多样性,增强了算法跟踪最佳路径的能力,因此它的误比特率比 B-MA 更低,进一步改善了译码性能。比如  $P_b=10^{-6}$ ,B-GA 比 B-MA 有 0.5dB 左右的性能增益,而译码复杂度与 B-MA 完全相同。

综上所述:采用遗传算法(GA)进行译码,可以有效地利用所给定的路径搜索宽度,提高算法跟踪正确路径的能力,进一步改善 MA 算法和 VA 算法的译码性能,但不增加其它大的计算开销,译码复杂度与之完全相同。它的复杂度仅与  $M$  成正比,不随  $m$  指数增加。这些特点使得在  $K$  较大的卷积码译码中,本算法比 VA 和 MA 有更大的实用价值。

应当指出,虽然上述结果是在 AWGN 信道模型下获得的,但是本算法还可以推广到其它信道中,比如多径衰落、阴影衰落信道中。其推广的条件是:需要采用好的(理想)交织器、要能获取衰落信道的状态信息,并根据不同的实际信道特征,采用相应的度量函数<sup>[8]</sup>,这样算法就能够正确地译码。值得关注的是,对遗传算法的理论研究和工程应用已经在国内外广泛开展<sup>[3,9,10]</sup>。我们深信,这方面的研究成果一定能促进信道编码理论,尤其是译码理论的深入研究。

#### 作者简介:



陈 军 1971 年出生,现为清华大学电子工程系博士后,研究兴趣为数字通信系统、编码与调制等。

孙韶辉 1972 年出生,分别于 1994 年和 1999 年获西安电子科技大学学士学位和硕士学位。现为该校通信与电子系统博士研究生。目前的研究兴趣包括信息论、编码/调制理论和通信网络与交换。

#### 参考文献:

- [1] J. Belzile, D. haccoun. IEEE Trans. Feb. 1993, IT-41 (2) :370 - 380.
- [2] J. B. Anderson, C. F. Lin. In Conf. Proc., 20th Annu. Conf. Inform. Sci. Syst., Princeton, Mar., 1986.

(下转第 110 页)

### 3 仿真实验

为了验证算法的效果,本文用  $256 \times 256$  的 256 灰度标准 Lena 图像作为训练图像来产生码书,码字个数为 256,矢量维数为 16. 为了比较,本文对 LBG 算法和 SA 算法也作了相应测试. 所有测试都在 Pentium 计算机上进行,测试结果如表 1 所示. 表 1 对比了各算法的均方误差和计算时间. 图 1(a) 为原始的 Lena 图像,图 1(b), 1(c), 1(d), 1(e) 分别是用 LBG、SA、PB-TS 和 CB-TS 算法产生的码书对标准 Lena 图像进行编码的恢复图像,其峰值信噪比 (PSNR) 分别为 28.91dB, 30.02dB, 30.24dB, 30.35dB.

### 4 结论

本文提出了两种基于改进禁止搜索算法的矢量量化码书设计方法. 为了提高算法的收敛性能,文中在算法中融入了模拟退火机制. 为了提高码书性能,文中还将 LBG 算法融入禁止搜索算法中. 结果表明,基于禁止搜索的两种码书设计方案所生成的码书质量都比 LBG 算法有明显提高.

表 1 各算法计算时间及均方误差比较

算法	时间(秒)	MSE
LBG	70	1337.673
SA	1630	993.45
PB-TS	16335	982.91
CB-TS	23785	965.16

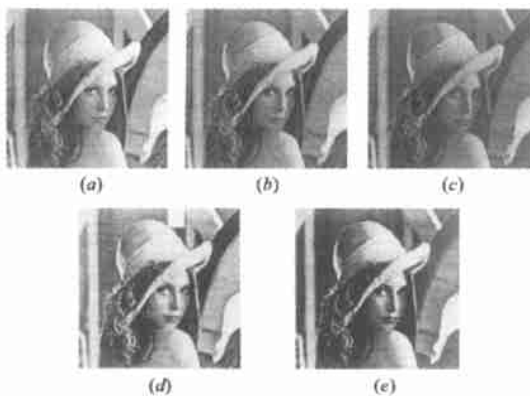


图 1 (a) 原始 Lena 图; (b) LBG 算法恢复的图像; (c) SA 算法恢复的图像; (d) PB-TS 算法恢复的图像; (e) CB-TS 算法恢复的图像

### 参考文献:

- [1] A. Gersho, R. M. Gray. Vector Quantization and Signal Compression [M]. Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [2] Y. Linde, A. Buzo, R. M. Gray. An algorithm for vector quantizer design [J]. IEEE Transactions on Communications, 1980, 28(1): 84 - 95.
- [3] L. M. Po. Novel subspace distortion measurement for efficient implementation of image vector quantizer [J]. Electronics Letters, 1990, 26(29): 480 - 482.
- [4] W. H. Equitz. A new vector quantization clustering algorithm [J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech Signal Processing, 1989, 37: 1568 - 1575.
- [5] J. Vaisey, A. Gersho. Simulated annealing and codebook design [A]. Proceedings ICASSP 88, 1988: 1176 - 1179.
- [6] F. Glover. Tabu search (Part I) [J]. ORSA Journal on Computing, 1989, 1(3): 190 - 206.
- [7] F. Glover, M. Laguna. Tabu Search [M]. Kluwer Academic Publishers, 1997.

### 作者简介:



陆哲明 1974 年出生, 1995 年和 1997 年获哈尔滨工业大学学士学位和硕士学位, 现为哈尔滨工业大学自动化测试与控制系博士研究生. 目前主要致力于图像处理研究.



潘正祥 1996 年获英国爱丁堡大学博士学位. 现任台湾高雄科学技术学院电子工程系副教授, 并被哈尔滨工业大学自动化测试与控制系聘为兼职副导师. 发表论文 30 多篇, 大多数被 SCI, EI 检索. 目前主要致力于信号处理和微处理机应用研究.

孙圣和 (见本期第 12 页)

(上接第 139 页)

- [3] Holland J. Adaption in Natural and Artificial System [M]. Univ Michigan Press, 1975.
- [4] Y. H. Tseng, J. L. Wu. IEEE International Symposium on Information Theory, June 1994, 343.
- [5] H. Maini, K. Mehrotra. IEEE International Symposium on Information Theory, June 1994, 397.
- [6] L. E. Aguado-Bayon, P. G. Farrell. IEEE International Symposium on Information Theory, 1995, 347.
- [7] S. Kallel, K. Li. Bi-directional sequential decoding [J]. IEEE Trans., July 1997, IT-43(4): 1319 - 1326.
- [8] J. K. Cavers, P. Ho. IEEE Trans. Jan. 1992, Com-40(1): 74 - 83.
- [9] D. E. Goldberg. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.
- [10] Z. Michalewicz. Genetic Algorithms + Data Structure = Evolution Programs [C]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1994.