

## 可伸缩多媒体传输错误保护算法综述

霍龙社<sup>1,2</sup> 高文<sup>1,2</sup> 黄庆明<sup>2</sup> 谢建国<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(中国科学院计算技术研究所 北京 100080)

<sup>2</sup>(中国科学院研究生院 北京 100049)

(lshuo@jdl.ac.cn)

### Error Protection Algorithms for Scalable Multimedia Transmission : A Survey

Huo Longshe<sup>1,2</sup>, Gao Wen<sup>1,2</sup>, Huang Qingming<sup>2</sup>, and Xie Jianguo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(*Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

<sup>2</sup>(*Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

**Abstract** Scalable multimedia bitstreams are very sensitive to packet losses and bit errors in transmission channels, and therefore robust error protection is needed. FEC-based error protection algorithms are discussed in this paper. The key objective of these algorithms is to reasonably allocate bits between source coding and channel coding so that the reconstruction signal quality seen at the decoder side can be optimized. According to error statistics, transmission channels are classified into two models: packet-loss channel and wireless bit-error channel. A uniform problem description is formulated for each model's error protection scheme and optimization objective. Major algorithms in the literature are surveyed and their performance and complexities are analyzed. Finally, future directions are discussed.

**Key words** scalable multimedia; transmission; error protection; rate-distortion optimization; joint source-channel coding

**摘要** 可伸缩多媒体对传输中的丢包和误码极为敏感,需要有效的错误保护。主要讨论基于前向纠错的错误保护算法,其核心是利用率失真优化和信源信道联合编码等技术在信源和信道之间合理分配码率,以使接收方重构信号质量最好。依据信道的错误统计特性,将传输信道分为丢包信道和无线误码信道两种,对每种信道模型的错误保护模式和优化目标都给出了统一的形式化问题描述,对主流算法的技术特点和性能指标等进行了分析和比较,最后讨论了下一步研究方向。

**关键词** 可伸缩多媒体;传输;错误保护;率失真优化;信源信道联合编码

中图法分类号 TP393;TP37

## 1 引言

为适应网络带宽波动以及各类用户和终端设备的不同解码能力和需求,除了高效的压缩性能外,可伸缩性也正成为多媒体编码所追求的重要特性之一。

在可伸缩的嵌入式码流中,信息比特按其重要性和依赖关系从前向排列。对于同一信源,其低码率码流是高码率码流的一个前缀,只需按某一高码率编码一次便可在任意低码率位置截断并独立解码。解码时所用码率越高,则重构信号质量越好。可伸缩性使得渐进传输和动态带宽适应成为可能。典型的可伸缩图

像编码算法有 EZW<sup>[1]</sup>, SPIHT<sup>[2]</sup>和 JPEG2000<sup>[3]</sup>等, 可伸缩视频编码算法有 3D SPIHT<sup>[4]</sup>和 MPEG4-FGS<sup>[5]</sup>等.

可伸缩码流的嵌入式特性使得它对于传输信道中的丢包和误码等现象极为敏感, 传输过程中的任一比特错误都可能导致位于其后的码流无法正确解码, 从而降低显示质量. 为此, 如何在不可靠的传输信道中可靠传输可伸缩码流, 成为了近年来多媒体传输领域研究的热点之一. 网络通信中的差错控制机制主要包括自动请求重传(ARQ)和前向纠错(FEC)两大类. 由于 ARQ 的使用会带来额外的时延, 而且不适合基于广播或多播的流媒体传输, 因此许多研究者将目光投向了 FEC. FEC 的基本思想是在信源编码之后再跟上信道编码, 即在待传输的压缩信源码流中加入一定数量的冗余信息, 以使接收方能够从出错的信道码流中恢复出正确的信源数据来.

虽然著名的 Shannon 分离原理<sup>[6]</sup>证明了信源和信道可以分开独自编码而不会损失性能, 但其苛刻的前提条件对于实时流媒体传输来说并不适用. 在实际的多媒体传输系统中往往需要采用信源信道联合编码(JSCC). 如图 1 所示, 可伸缩多媒体 JSCC 所要解决的主要问题就是在已知信源率失真模型、信道统计模型和传输码率约束等条件下, 如何选择适当的错误保护模式, 并在信源编码和信道编码之间合理分配码率, 以使接收方的重构信号质量期望值最大.

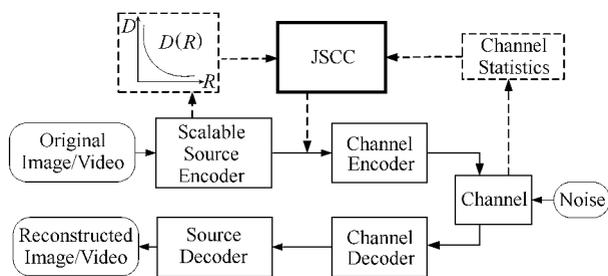


Fig. 1 Scalable multimedia joint source-channel coding transmission system.

图 1 可伸缩多媒体信源信道联合编码传输系统

信源率失真模型给出了给定信源码率所对应的重构信号质量. 本文使用码率-质量函数来表示, 记为  $Q(r)$ , 其中  $r$  表示解码时用到的信源码率. 对于嵌入式的可伸缩码流,  $Q(r)$  为单调非递减函数.

不同信道模型具有不同的错误统计特性, 相应的错误保护模式和码率分配算法也不尽相同. 在基于分组转发的有线网络如 Internet 中, 传输错误主要表现为分组丢失; 而无线网中的传输错误则主要

来源于信道噪声所导致的比特误码. 本文第 2 节介绍丢包信道中的错误保护; 第 3 节介绍无记忆误码信道中的错误保护; 第 4 节总结全文并讨论下一步研究方向.

## 2 丢包信道错误保护算法

在压缩的多媒体码流中, 不同位置的数据具有不同的重要性. 但在缺少服务质量保证的分组网中, 路由器无法区分流经它的各个分组的重要性, 而是随机选择分组进行丢弃. 一个有效的解决方法是采用非均匀错误保护(UEP), 为不同重要性的数据指派不同的保护强度, 从而提升重要性较高的数据正确传输的概率. 文献[7]提出一个优先级编码传输(PET)方法: 由用户将待传输数据分为不同的消息段, 并为其指派相应的优先级, 然后使用 Reed-Solomon(RS)码<sup>[8]</sup>为不同优先级的消息段施加不同强度的 FEC 冗余保护. 但 PET 本身并没有给出消息段划分及其优先级指派的原则和算法.

文献[9]将 PET 方法应用于可伸缩码流在丢包网中的传输, 并采用率失真优化技术<sup>[10]</sup>来对其进行细粒度的 UEP 保护. 这种保护又称为基于 FEC 的多描述编码(MDC)<sup>[11]</sup>, 因为经过信道编码之后的每一个分组均具有完全平等的重要性, 接收方任意收到一个或多个分组之后就可以独立解码, 且随着收到分组数的增加解码质量渐进改善; 解码质量的提高仅与所收到分组的个数有关, 而与收到的分组是哪一个是无关. 本文将该方法简称为 FEC-MDC, 它可以形式化为一个组合优化问题. 近年来, 研究者们相继提出若干算法<sup>[12~18]</sup>用于求解这个问题, 所采用技术主要包括动态规划、贪心迭代、拉格朗日乘子法和局部搜索等. 下面首先给出问题描述, 然后对其中有代表性的 4 个算法进行介绍和分析.

### 2.1 问题描述

考虑用  $N$  个长度固定为  $L$  个符号的分组来保护和传输可伸缩信源编码器的输出码流. 如图 2 所示, 该码流被划分为连续的  $L$  个信源段, 每段  $m_i$  个符号,  $1 \leq m_i \leq N$ ,  $1 \leq i \leq L$ . 采用系统 RS( $N, m_i$ ) 码为第  $i$  段附加  $f_i = N - m_i$  个冗余符号, 构成长度为  $N$  的信道编码段. 然后分别将各段中的第  $j$  个符号串接起来组成第  $j$  个分组,  $1 \leq j \leq N$ . 如果  $N$  个分组中的任意  $n$  个丢失, RS 码可保证所有最多包含  $N - n$  个信源符号的信源段能够被恢复. 在给定  $f_1 \geq \dots \geq f_L$  的约束条件下, 只要丢失的分组数不超过  $f_i$ ,

接收方就能够正确解码至少前  $i$  个信源段. 以下用向量  $F=(f_1, \dots, f_L)$  来表示一个 FEC-MDC 保护方案, 其中  $f_i \in \{0, 1, \dots, N-1\}, 1 \leq i \leq L$ .

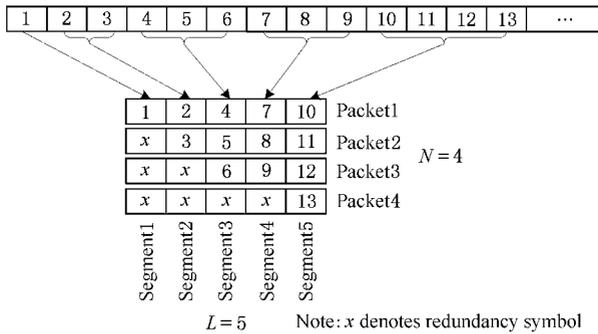


Fig. 2 Example of UEP for packet-loss channels.

图2 丢包信道中的UEP保护示意图

用  $p_N(n)$  来表示  $N$  个分组中刚好丢失  $n$  个的

概率, 并定义累积概率  $c_N(k) = \sum_{n=0}^k p_N(n), k=0, 1, \dots, N$ , 则  $c_N(f_i)$  就表示接收方可以正确解码第  $i$  个信源段的概率. 给定可伸缩信源的码率-质量函数  $Q(r)$ , 信道状态  $p_N(n)$  和传输码率约束  $R^* = NL$  则接收方的重构信号质量期望值可表示为 FEC-MDC 保护方案  $F=(f_1, \dots, f_L)$  的函数:

$$E_Q(F) = c_N(N)Q(0) + \sum_{i=1}^L c_N(f_i)(Q(r_i) - Q(r_{i-1})), \quad (1)$$

其中  $c_N(N) = 1, Q(0)$  为一常数,  $r_i = \sum_{k=1}^i m_k = iN - \sum_{k=1}^i f_k$ . 于是丢包信道中 JSCC 的优化目标就是在已知  $N, L, Q(r)$  和  $p_N(n)$  的情况下, 寻找合适的  $F$ , 使得式(1)中的  $E_Q(F)$  最大.

若采用穷举法, 上述问题的搜索空间为  $N^L$ . 在加入  $f_1 \geq \dots \geq f_L$  的限制后其搜索空间降为  $\binom{N+L-1}{L}$ , 但仍是指数级的, 因此必须寻找能够快速降低其复杂度的快速求解算法.

### 2.2 基于动态规划的全局最优算法

文献 13 给出一个基于动态规划的全局最优算法(简称 DPA), 其基本思路如下:

定义前  $k$  个信源段 ( $1 \leq k \leq L$ ) 对重构信号质量的贡献为  $E_Q^k(f_1, \dots, f_k) = \sum_{i=1}^k c_N(f_i)(Q(r_i) - Q(r_{i-1}))$  则可将最大化公式(1)中的  $E_Q(F)$  等价于最大化  $E_Q^L(f_1, \dots, f_L)$ . 对于任意三元组  $(k, n,$

$t)$ , 其中  $1 \leq k \leq L, 0 \leq n \leq N-1, kn \leq t \leq k(N-1)$ , 定义  $A(k, n, t) = \max\{E_Q^k(f_1, \dots, f_k) | N-1 \geq f_1 \geq \dots \geq f_k \geq n, f_1 + \dots + f_k = t\}$ , 则最大化  $E_Q^L(f_1, \dots, f_L)$  又可表述为寻找合适的  $(f_1, \dots, f_L)$ , 使得  $E_Q^L(f_1, \dots, f_L) = \max_{0 \leq t \leq L(N-1)} A(L, 0, t)$ .

对任意  $1 \leq k \leq L, 0 \leq n \leq N-1$ , 文献 13 中给出了一个用于求解  $A(k, n, t)$  的递归公式. 在给定初值  $A(0, n, 0) = 0, 0 \leq n \leq N-1$  的情况下, 便可根据该公式利用动态规划法进行递归迭代, 最终解出所有  $A(L, 0, t), kn \leq t \leq k(N-1)$  的值, 以及相应的最优解  $(f_1, \dots, f_L)$  来.

该算法的迭代为 3 重循环, 最外层  $L$  次, 中间层  $N$  次, 最内层不超过  $NL$  次, 故总的时间复杂度为  $O(N^2 L^2)$ .

### 2.3 贪心迭代算法

文献 14 提出一个贪心迭代算法(简称 GRA), 其基本思想是假定  $Q(r)$  曲线中相邻两个凸壳节点之间的比特具有同等的重要性, 并为它们赋予相同的 RS 冗余保护. 在每次迭代中都选择能够使所取得报酬与所付出代价之比最大的那个冗余值来进行保护.

滤除  $Q(r)$  中所有非凸壳节点从而生成  $h$  个离散凸壳节点, 记为  $\{v_0, v_1, \dots, v_{h-1}\}$ . 引入变量  $R$  表示当前已经使用了的信道码率,  $U$  表示与  $R$  所对应的重构信号质量期望值. 假设接收方恰好正确接收  $k$  个分组时可解码的最高节点为  $v_i$ , 这时如果对  $v_i$  到  $v_{i+1}$  之间的信源比特采用  $RS(N, k)$  进行保护, 则可计算出  $R$  的增加值  $\Delta R_k$  和相应  $U$  的增加值  $\Delta U_k$  来. 于是 GRA 算法可描述如下:

1) 置初值  $R=0, U=0$ ;

2) 为每个  $1 \leq k \leq N$ , 搜索刚好接收  $k$  个分组时可解码的最高节点  $v_i$ , 并计算采用  $RS(N, k)$  保护  $v_i$  到  $v_{i+1}$  之间的信源比特后的  $\Delta R_k$  和  $\Delta U_k$ . 选择  $k' = \arg\max_k(\Delta U_k / \Delta R_k)$ ;

3) 如果  $R + \Delta R_{k'} < NL$ , 用  $RS(N, k')$  保护  $v_i$  到  $v_{i+1}$  之间的信源比特, 令  $R = R + \Delta R_{k'}$ . 转至步骤 2);

4) 否则, 按线性插值法取  $v_i$  到  $v_{i+1}$  之间的部分比特用  $RS(N, k')$  保护, 以使  $R = NL$ , 中止迭代.

如果  $v_i$  到  $v_{i+1}$  之间的信源比特数不能被  $k'$  整除, 则无法求得整数解, 在 RS 编码时需要通过适当调整来把分数解变为实际可编码的整数解. 每个凸壳节点最多可能有  $N$  种 RS 保护模式, 故算法最多迭代  $hN$  次. 采用合适的数据结构(如优先级队列)

可将每次迭代中选择  $k'$  的复杂度降为  $O(\log N)$ , 总的复杂度为  $O(hN \log N)$ .

### 2.4 拉格朗日乘法

文献 [15] 采用拉格朗日乘法(简称 LMA)来求解 FEC-MDC 保护中的码率分配问题.

考虑选择  $N + 1$  个分隔点  $\mathbf{R} = (R_0, R_1, \dots, R_N)$  将一个可伸缩码流划分为  $N$  层, 再将其中第  $n$  层 ( $1 \leq n \leq N$ ) 平均分为  $n$  段, 每段用  $R_S(N, n)$  来进行保护. 这样编码后总的信道码率可表示为

$$R_T(\mathbf{R}) = \sum_{n=1}^N ((R_n - R_{n-1})/n)N = \sum_{n=1}^N \alpha_n R_n, \text{ 其中 } \alpha_n = N/n(n+1), n=1, \dots, N; \alpha_N = 1. \text{ 如果接收方刚好接收到 } n \text{ 个分组, 则可以正确解码前 } n \text{ 层, 即 } R_n \text{ 之前的所有信源数据. 用 } q_N(n) \text{ 表示 } N \text{ 个分组中刚好接收到 } n \text{ 个的概率, 即 } q_N(n) = p_N(N-n), \text{ 则接收方重构信号质量的期望值又可表示为}$$

$$E_Q(\mathbf{R}) = \sum_{n=0}^N q_N(n)Q(R_n). \quad (2)$$

此时问题的优化目标就变为寻找合适的  $\mathbf{R}$ , 使得公式(2)中的  $E_Q(\mathbf{R})$  最大, 且满足下列约束条件:

$$\sum_{n=1}^N \alpha_n R_n \leq NL, \quad (3)$$

$$0 = R_0 \leq R_1 \leq \dots \leq R_N, \quad (4)$$

$$R_n - R_{n-1} = nk_n, k_n \text{ 为整数, } k_n \geq 0, \quad (5)$$

如果忽略约束条件(4)和(5), 该问题可规约为标准的比特资源分配问题<sup>[19]</sup>, 并用拉格朗日乘法进行求解. 通过引入拉格朗日系数  $\lambda$ , 问题的求解目标可转化为最小化:

$$L(\mathbf{R}, \lambda) = - \sum_{n=0}^N q_N(n)Q(R_n) + \lambda \left( \sum_{n=1}^N \alpha_n R_n - NL \right). \quad (6)$$

其最优解可通过为每个  $n, 1 \leq n \leq N$ , 在  $Q(r)$  曲线上寻找斜率等于  $\lambda(\alpha_n/q_N(n))$  的节点来求得. 文献 [15] 证明了当  $Q(r)$  为严格下凸函数时, 在最优解的情况下约束条件(4)自动满足.

该算法松弛了约束条件(5), 所求得的也是分数解. 根据  $Q(r)$  的单调非递减特性, 在其曲线上寻找  $N$  个斜率系数最多需要遍历前面的  $NL$  个节点, 故每次迭代的时间复杂度为  $O(NL)$ . 通过选择合适的方法可将迭代次数近似为一个常数.

### 2.5 基于码率最优解的局部搜索算法

如果将使得式(1)中  $E_Q(\mathbf{F})$  最大化的解  $\mathbf{F}^* =$

$(f_1^*, \dots, f_L^*)$  称为质量最优解, 并将使得接收方可正确解码的信源码率期望值

$$E_R(\mathbf{F}) = \sum_{i=1}^L m_i c_N(f_i) = \sum_{i=1}^L m_i \sum_{j=0}^{f_i} p_N(j) \quad (7)$$

最大化的解  $\mathbf{F}' = (f'_1, \dots, f'_L)$  称为码率最优解, 文献 [16] 推测在  $Q(r)$  为严格下凸函数的情况下, 质量最优解的保护强度大于或等于码率最优解的保护强度, 即  $\sum_{i=1}^L f_i^* \geq \sum_{i=1}^L f'_i$ , 并据此给出了一个基于码率最优解的局部搜索算法(简称 LSA).

由于  $E_R(\mathbf{F})$  与信源的率失真特性无关, 故码率最优解的计算要比质量最优解容易得多. 它实际上是一个计算复杂度为常数的均匀错误保护解. LSA 首先将该码率最优解作为当前可行解, 然后开始进行迭代搜索. 每次迭代从当前解的邻域中选择一个最好的解, 并与当前解进行比较: 如果好于当前解, 则置为当前解并继续迭代; 否则结束搜索. 其中邻域的定义限制在能够提供比当前解更强保护的可行解范围内. 该算法最多迭代  $N - 1$  次, 每次迭代最多进行  $L$  次邻域比较, 故时间复杂度为  $O(NL)$ .

### 2.6 小结

DPA 算法可以找到最优解, 但时间和空间复杂度都过高, 无法用于实时计算. GRA 和 LMA 都对  $Q(r)$  曲线的凸函数性质做了假设并松弛了离散约束条件, 只能得到分数近似解. LSA 通过缩小搜索空间来加快求解速度, 但易于陷入局部极值. 实验表明在多数情况下它们的性能都非常接近最优解, 其中 GRA 的平均性能最好, 但运行速度不如 LMA; LMA 的运行速度最快, 但在码率较高的情况下性能稍差; LSA 的平均性能介于二者之间.

## 3 无记忆误码信道错误保护算法

大多无线噪声信道可模型化为无记忆的二元对称信道(BSC), 其传输错误表现为随机分布于码流中的比特误码. 通过比特交织技术可将具有突发误码特性的衰落信道模拟为近乎无记忆的 BSC 信道, 因此本节主要讨论 BSC 信道中的错误保护. 虽然可通过在接收方丢弃含有误码的分组来将其模拟为丢包信道, 但这种方式仅适合于误码率极低的情况. 在误码率较高的无线信道中, 更为有效的方法是采用卷积码<sup>[20]</sup>等纠错码来对传输过程中所引入的随机误码进行纠正.

针对可伸缩码流在 BSC 信道中的传输, 文献

[21]率先采用了基于码率兼容的删截卷积码(RCPC)<sup>[22]</sup>和循环冗余校验码(CRC)的级联码技术来进行检错和纠错.但其中采用的是均匀错误保护(UEP).由于可伸缩码流中不同位置比特具有不同的重要性,因此另一种更为有效的方法是采用非均匀错误保护(UEP).BSC信道中的UEP保护又分为定长信源分组和定长信道分组两种模式.所有模式下的码率分配都可以形式化为一个组合优化问题.下面首先给出一个通用的问题描述,然后针对不同模式下的优化算法分别进行讨论.

### 3.1 问题描述

考虑用一个有限RCPC编码码率集合  $R_c = \{r_1, \dots, r_M | r_1 \leq \dots \leq r_M\}$  来编码和保护一个可伸缩信源码流.如图3所示,首先将该码流划分为  $N$  个连续的信源段,其中第  $i$  个信源段的长度为  $l_s(i)$  比特,  $1 \leq i \leq N$ .然后为每个信源段计算并附加  $c$  个CRC检错码比特和  $m$  个零比特,其中  $m$  为RCPC编码器的记忆长度.最后将这个长度为  $l_s(i) + c + m$  的比特串输入到编码码率为  $r_\pi^i \in R_c$  的RCPC编码器,得到长度为  $l_c(i) = (l_s(i) + c + m) / r_\pi^i$  个比特的信道分组.以下用矢量  $\pi = (r_\pi^1, \dots, r_\pi^N)$  来表示这种保护模式下的一个RCPC码率分配方案.

接收方采用List Viterbi算法<sup>[23]</sup>解码.它搜索具有最短累积错误量度且同时满足CRC校验码的最短路径作为最佳路径.假定CRC能够检出所有误码,并把解码器无法纠正CRC检出误码的情况称之为解码失败.如果某一个分组解码失败,则不再解码所有后续分组,而仅使用在其之前已正确解码的比特流来重构信源.

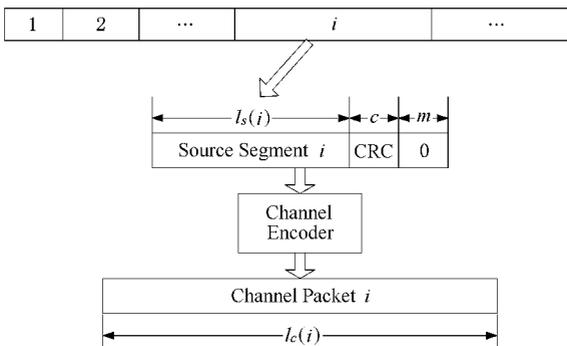


Fig. 3 Example of UEP for memoryless bit-error channels.

图3 无记忆误码信道中的错误保护示意图

设BSC信道的平均比特误码率为  $\epsilon$ , 编码码率为  $r_i$  的信道分组在该信道状态下的解码失败概率为  $p_\epsilon(r_i)$ , 并定义解码器在码率分配方案  $\pi = (r_\pi^1, \dots, r_\pi^N)$  下可正确解码第1至  $i$  个分组而第  $i+1$  个分组解码失败的

...  $r_\pi^N$ ) 下可正确解码第1至  $i$  个分组而第  $i+1$  个分组解码失败的

$$P_\pi(i) = p_\epsilon(r_\pi^{i+1}) \prod_{j=1}^i (1 - p_\epsilon(r_\pi^j)), \quad i = 1, \dots, N-1; P_\pi(0) = p_\epsilon(r_\pi^1); P_\pi(N) = \prod_{j=1}^N (1 - p_\epsilon(r_\pi^j)).$$

给定信源码率-质量函数  $Q(r)$ , 则接收方的重构信号质量期望值可表示为RCPC码率分配方案  $\pi$  的函数:

于是BSC信道中JSCC的优化目标就是在已知  $Q(r) \in R_c$  和传输码率  $R^*$  的情况下,寻找合适的RCPC码率分配方案  $\pi = (r_\pi^1, \dots, r_\pi^N)$ , 使得

$$\max_{\pi} E_Q(\pi), \quad \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^N l_c(i) \leq R^*. \quad (9)$$

把满足公式(9)的解称之为质量最优解.该解由于涉及信源的率失真特性因而不易求解.从  $Q(r)$  的单调性可知接收方可正确解码的信源比特数越多,则重构信号质量越好,因此可将公式(9)中的优化目标近似为求解下面的码率最优解,即最大化接收方可正确解码的信源比特数期望值:

$$\max_{\pi} E_R(\pi), \quad \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^N l_c(i) \leq R^*, \quad (10)$$

其中:

$$E_R(\pi) = \sum_{i=1}^N P_\pi(i) \sum_{j=1}^i l_s(j). \quad (11)$$

公式(9)与(10)并不等价,但实验表明它们的最优解的性能较为接近.

### 3.2 EEP保护

文献[21]最先采用CRC和RCPC的级联码来保护可伸缩码流在BSC信道中的传输.它首先将原始压缩码流划分为长度相等的信源段,然后采用Monte-Carlo法为所有信源段选择相同的RCPC编码码率进行信道编码.文献[24]以式(9)为优化目标,给出一个简化的  $E_R(\pi)$  表达式.算法采用全局搜索,实验表明其所求得的解与用Monte-Carlo法求得的解基本一致.

### 3.3 定长信源分组UEP保护

EEP模式可能导致对可伸缩码流中位置靠后重要性较低比特串的过保护,从而浪费信道带宽.如果适当降低对这些比特的保护强度,则可以腾出一定的带宽来传输更多的信源比特,进而提高接收方的重构信号质量.这正是UEP所追求的目标.

在定长信源分组 UEP 模式中,所有信源段的长度相等,即  $l_s(1) = \dots = l_s(N) = L_s$ . 而不同信源段采用的 RCPC 编码码率则可以不同,因此编码后的信道分组长度也不一致. 在一定的传输码率约束下,分组数  $N$  的取值事先无法确定.

文献[25]给出一个定长信源分组 UEP 模式下块误码率与编码后信道分组长度之间关系的参数模型,利用该模型把求解码率分配问题转化为了求解块误码率分配问题,并采用拉格朗日乘法推导出一个计算块误码率的递归公式. 但该公式没有给出递归的结束条件,需要通过选择不同的  $N$  值来反复猜测和迭代,计算复杂度难以确定.

文献[26]提出一个 2-rate 动态 UEP 模式,思路为在信源码流中寻找一个分隔点将其分为前后两部分,然后选择两种不同的编码码率分别对这两部分进行信道编码. 其优化目标为寻找码率最优解,算法采用全局搜索,计算复杂度为  $O(R^* M^2)$ . 随后文献[27]中又提出一个 3-rate 动态 UEP 模式,思路与 2-rate 模式相似,只是稍微细化了码率分配的粒度,时间复杂度变为了  $O(R^{*2} M^3)$ . 这两种模式简单易行,对于低误码率和低传输码率信道状况较为有效,但当这些条件改变时则显得不够精细.

文献[28]采用动态规划法来同时求解公式(9)和(10)中问题的最优解,其基本思路为引入一个增量报酬的概念将公式(8)和(11)中的目标函数表达式进行统一. 用  $\delta_i$  来表示接收方可正确解码第  $i$  个分组时的增量报酬,则对于求解公式(9),  $\delta_i = Q(iL_s) - Q((i-1)L_s)$ ,  $i = 1, 2, \dots$ ; 对于求解公式(10),  $\delta_i = L_s$ ,  $i = 1, 2, \dots$ . 对于任意  $\pi = (r_\pi^1, r_\pi^2, \dots, r_\pi^N)$  和整数  $k$ ,  $1 \leq k \leq N$ , 定义

$$E_\delta^k(\pi) = \sum_{i=k}^N P_\pi(i) \sum_{j=k}^i \delta_j, \quad (12)$$

则可将公式(9)和(10)中的优化目标统一为

$$\max_{\pi} E_\delta^k(\pi), \quad \text{s.t.} \quad \sum_{i=k}^N \frac{L_s + c + m}{r_\pi^i} \leq R^* \quad (13)$$

当  $k=1$  时的特例. 用  $\Delta^*(k, R^*)$  来表示公式(13)中目标函数的最优值,并令  $L_{\min} = \min_{r \in R_c} (L_s + c + m)/r$ , 文献[28]证明了如下递归等式成立:

$$\Delta^*(k, R^*) = \begin{cases} 0, & \text{if } R^* < L_{\min}, \\ \max_{r \in R_c} (1 - p_\epsilon(r)) \delta_k + \Delta^*(k+1, R^* - (L_s + c + m)/r), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (14)$$

根据式(14)并用动态规划法进行迭代,即可求得最优解时的和码率分配方案  $\pi$ .

上述算法用于求解质量最优解时,  $\delta_i$  随着  $i$  的改变而变化,计算复杂度为  $O(R^{*2})$ ; 用于求解码率最优解时,  $\delta_i$  恒等于  $L_s$ , 计算复杂度为  $O(R^*)$ .

### 3.4 定长信道分组 UEP 保护

许多传输协议要求编码后的信道分组为定长结构. 在定长信道分组 UEP 模式中,每个编码后的信道分组具有相同的比特数,即  $l_c(1) = \dots = l_c(N) = L$ , 且对于给定的传输码率约束  $R^*$ , 编码后的分组个数也是预先确定的:  $N = R^*/L$ .

由于分组数和可用编码码率集合都事先确定,故可采用穷举法,但其搜索空间为  $M^N$ , 仅适合于分组数很小的情况. 文献[29]采用 Viterbi 算法来求解质量最优解,可把搜索空间降为  $O(N^2)$ . 但它仅适用于某些特定的信道编码码率集合. 对于任意信道编码器来说,其最坏计算复杂度仍是指数级的.

文献[30]中给出一个用于求解该模式下码率最优解问题的最优算法. 其求解过程基于式(14)中的动态规划等式,并根据定长信道分组的特性对算法做了改进,时间复杂度略有下降.

式(14)中动态规划等式的成立要求增量报酬  $\delta_i$  与第  $i$  个分组之前的其他分组无关. 对于求解定长信道分组 UEP 模式下的质量最优解来说,这个条件不再满足,故不能再套用类似的动态规划算法来进行求解. 文献[31]推测在  $Q(r)$  为严格下凸函数的情况下质量最优解的保护强度大于或等于码率最优解的保护强度,并在此基础上提出一个用于求解质量最优解问题的局部搜索算法. 该算法的时间复杂度为  $O(NM)$ , 求解速度好于文献[29]中的 Viterbi 算法. 但由于搜索过程中每次比较都需要计算式(8)中的目标函数值,而其中的  $P_\pi(i)$  服从几何分布,需要累积的乘积运算,因此该复杂度公式中的常数项不可忽视.

### 3.5 小结

EEP 模式简单易用,在传输码率较低和信道误码率较小的情况下能够取得很好的性能. 当传输码率提高或信道误码率增大时,采用 UEP 可以进一步改善性能,但算法复杂度也相应提高. 定长信源分组 UEP 实现起来较为容易,且采用合适的算法可以取得渐进传输效果. 但其编码后的信道分组长度变化不一,在实际应用中容易受到传输协议和物理链路等的限制,因此在许多场合需要用到定长信道分组 UEP. 这两种 UEP 模式目前都有求解码率最优

解的线性时间最优算法. 定长信源分组 UEP 目前虽有求解质量最优解的多项式时间最优算法,但其复杂度仍然过高,无法用于实时计算. 定长信道分组 UEP 目前还没有求解质量最优解的多项式时间最优算法.

#### 4 结束语

本文针对基于 FEC 的错误保护算法进行讨论,其核心是如何利用率失真优化和信源信道联合编码等技术在信源编码和信道编码之间合理分配码率,以使接收方解码后的重构信号质量最好. 根据信道的错误统计模型将传输信道分为丢包信道和无线误码信道,并分别对当前文献中适合于这两种信道模型的 FEC 错误保护模式和算法进行了综述. 对于每种信道模型都给出了一个统一的形式化的问题描述,并对各主流优化算法所采用的关键技术及其性能和复杂度等进行了分析和比较.

当传输网络是由多种形式的传输信道所组成的混合网络时,需要将多种错误保护模式结合起来使用,或者在不同的错误保护模式之间相互进行转换. 其算法的设计和优化会变得更加复杂,仍有待进一步深入研究.

#### 参 考 文 献

- J. M. Shapiro. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1993, 41(12): 3445~3462
- A. Said, W. A. Pearlman. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, 1996, 6(3): 243~250
- A. Skodras, C. Christopoulos, T. Ebrahimi. The JPEG 2000 still image compression standard. *IEEE Signal Processing Mag.*, 2001, 18(5): 36~58
- B. J. Kim, Z. Xiong, W. A. Pearlman. Low bit-rate scalable video coding with 3-D set partitioning in hierarchical trees (3-D SPIHT). *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, 2000, 10(8): 1374~1387
- W. Li. Overview of fine granularity scalability in MPEG-4 video standard. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, 2001, 11(3): 301~317
- C. E. A. Shannon. Mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 1948, 27: 379~423, 623~656
- A. Albanese, J. Blomer, J. Edmonds, *et al.* Priority encoding transmission. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 1996, 42(6): 1737~1744
- L. Rizzo. Effective erasure codes for reliable computer communication protocols. *ACM Computer Communication Review*, 1997, 27(2): 24~36
- A. E. Mohr, E. A. Riskin, R. E. Ladner. Unequal loss protection: Graceful degradation of image quality over packet erasure channels through forward error correction. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 2000, 18(7): 819~828
- A. Ortego, K. Ramchandran. Rate-distortion methods for image and video compression. *IEEE Signal Processing Mag.*, 1998, 15(6): 23~50
- V. K. Goyal. Multiple description coding: Compression meets the network. *IEEE Signal Processing Mag.*, 2001, 18(5): 74~93
- T. Stockhammer, C. Buchner. Progressive texture video streaming for lossy packet networks. *Packet Video Workshop*, Kyongju, Korea, 2001
- S. Dumitrescu, X. Wu, Z. Wang. Globally optimal uneven error-protected packetization of scalable code streams. *IEEE Trans. Multimedia*, 2004, 6(2): 230~239
- A. E. Mohr, R. E. Ladner, E. A. Riskin. Approximately optimal assignment for unequal loss protection. *IEEE Int'l Conf. Image Processing*, Vancouver, Canada, 2000
- R. Puri, K. Lee, K. Ramchandran, *et al.* An integrated source transcoding and congestion control paradigm for video streaming in the Internet. *IEEE Trans. Multimedia*, 2001, 3(1): 18~32
- V. Stankovic, R. Hamzaoui, Z. Xiong. Real-time error protection of embedded codes for packet erasure and fading channels. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, 2004, 14(8): 1064~1072
- J. Kim, R. M. Mersereau, Y. Altunbasak. Error-resilient image and video transmission over the Internet using unequal error protection. *IEEE Trans. Image Processing*, 2003, 12(2): 121~131
- J. Cai, X. Li, C. W. Chen. Layered unequal loss protection for progressive image transmission over packet loss channels. *SPIE Visual Communication and Image Processing*, San Jose, CA, 2004
- Y. Shoham, A. Gersho. Efficient bit allocation for an arbitrary set of quantizers. *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, 1988, 36(9): 1445~1453
- A. Viterbi. Convolutional codes and their performance in communications system. *IEEE Trans. Commun. Technol.*, 1971, 19(5): 751~772
- P. G. Sherwood, K. Zeger. Progressive image coding for noisy channels. *IEEE Signal Processing Lett.*, 1997, 4(7): 198~191
- J. Hagenauer. Rate-compatible punctured convolutional codes (RCPC codes) and their applications. *IEEE Trans. Commun.*, 1988, 36(4): 389~400
- N. Seshadri, C. E. W. Sundberg. List Viterbi decoding algorithms with applications. *IEEE Trans. Commun.*, 1994, 42(2/3/4): 313~323
- M. Zhao, A. A. Alatan, A. N. Akansu. A new method for optimal rate allocation for progressive image transmissions over noisy channels. *Data Compression Conf.* 2000, Snowbird, UT,

USA, 2000

- 25 A. Nosratinia, J. Lu, B. Aazhang. Source-channel rate allocation for progressive transmission of images. *IEEE Trans. Commun.*, 2003, 51(2): 186~196
- 26 M. Zhao, A. A. Alatan, A. N. Akansu. Dynamic UEP of progressive image bit streams over noisy channels. *IEEE Int'l Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Istanbul, Turkey, 2000
- 27 M. Zhao, A. A. Alatan, A. N. Akansu. Optimization of dynamic UEP schemes for embedded image sources in noisy channels. *IEEE Int'l Conf. Image Processing*, Vancouver, Canada, 2000
- 28 V. Chande, N. Farvardin. Progressive transmission of images over memoryless channels. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 2000, 18(6): 850~860
- 29 B. A. Banister, B. Belzer, T. R. Fischer. Robust image transmission using JPEG2000 and Turbo-codes. *IEEE Signal Processing Lett.*, 2002, 9(4): 117~119
- 30 V. Stankovic, R. Hamzaoui, D. Saupe. Fast algorithm for rate-based optimal error protection of embedded coders. *IEEE Trans. Commun.*, 2003, 51(11): 1788~1795
- 31 R. Hamzaoui, V. Stankovic, Z. Xiong. Fast algorithm for distortion-based error protection of embedded image codes. *IEEE Trans. Image Processing*, 2005, 14(10): 1417~1421



**Huo Longshe**, born in 1968. Ph. D. candidate and senior engineer. His research interests are in the areas of computer networks and multimedia communications.

霍龙社, 1968年生, 博士研究生, 高级工程师,

主要研究方向为计算机网络和多媒体通信。



**Gao Wen**, born in 1956. Ph. D., professor and Ph. D. supervisor. His main research interests are in the areas of multimedia data compression, image processing, computer vision, multimodal interface, and artificial intelligence.

高文, 1956年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为多媒体数据压缩、图像处理、计算机视觉、多模式接口和人工智能等。



**Huang Qingming**, born in 1965. Ph. D., professor, and Ph. D supervisor. His research interests are in the areas of video coding and compression, multimedia technology, image processing, and computer vision.

黄庆明, 1965年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为视频编码和压缩、多媒体技术、图像处理和计算机视觉等。



**Xie Jianguo**, born in 1964. Post Ph. D and professor. His research interests are in the areas of computer networks and streaming media transmission.

谢建国, 1964年生, 博士后, 教授, 主要研究方向为计算机网络和流媒体。

## Research Background

The design of robust systems for the transmission of multimedia over unreliable communication channels has become a major research topic over the past years. Since error control techniques based on automatic repeat request (ARQ) introduce delays that may be unacceptable in real-time applications, many researchers proposed systems based on forward error correction (FEC). This paper reviews the major algorithms used in these systems. The work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China under the grant No. 60333020, the Natural Science Foundation of Beijing under the grant No. 4041003, the National High Technology Development 863 Program of China under the grant No. 2004AA119010, and the Scientific Equipment Development and Reform Project of the Chinese Academy of Sciences under the grant No. Y2003008.