

## 渐进图像传输中基于失真的码率分配

王红星 张勇\*

(北京航空航天大学 北京 100083)

\*(海军航空工程学院电子工程系 烟台 264001)

**摘要:** 该文根据信源编码压缩比、信道码率及信道特征对渐进图像传输失真的影响,提出一种基于最小图像失真的动态码率分配策略。在总的码率限制下采用遍历搜索信道码率的方法,得出可用码率在信源编码和信道编码之间的最优分配,使端对端的失真最小。

**关键词:** 渐进图像, 联合信源信道编码, 码率分配

中图分类号: TN919.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)12-1969-04

## Distortion-based Rate Allocation for Progressive Image Transmission

Wang Hong-xing Zhang Yong\*

(Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

\*(Department of Electronic Engineering, NAEI, Yantai 264001, China)

**Abstract** A dynamic rate allocation method is presented which is based on the compression rate of image source coder, channel rate, channel characters and their influence on the distortion of progressive image. The best channel rate is selected according to the optimal rate allocation criterion between the source coder and channel coder, which ensures to achieve the minimal end-to-end distortion.

**Key words** Progressive image, Joint source channel coding, Rate allocation

### 1 引言

图像的渐进特性是指经过编码的图像数据在接收端依次接收,在任意时刻,译码器可根据当前接收的编码数据以一定的质量恢复图像,此后接收的数据用于提高先前恢复图像的质量。因此,接收端可选择不同的分辨率显示图像,即传送的正确数据越多,接收端恢复的图像质量越好。当图像达到输出设备所用的分辨率时,译码器即可停止解压缩。这种特性在因特网浏览和新一代无线多媒体通信中有着广泛的应用前景。

嵌入式编码器是一类重要的渐进图像编码器,这类编码器特点是如果输出两个长度不等的比特流,短的比特流是长比特流的前缀。等级树中的集分割(SPIHT)编码器<sup>[1]</sup>和JPEG2000<sup>[2]</sup>是当前最为常用的嵌入式编码器。然而在噪声信道中,这类编码器的嵌入特性会给比特流的传输带来灾难性的后果,若接收端接收到一个错误比特,则其后传输的所有比特对图像恢复都是不可用的<sup>[3]</sup>。为避免这种错误出现在译码端,文献[3]将信道编码设计为检错码和纠错码两部分,如

果检错码检测出一个错误,译码器停止译码,根据已接收数据恢复图像,这种结构已成为当前渐进图像传输的主要编码结构。为了更有效将可传送的比特在信道编码和信道编码之间有效分配,文献[3,4]采用等误差保护(EEP)方案,即在给定的码率限制下,根据信道的不同在有限码率集中选择最优信道码率,这种分配方法没有考虑总的码率限制对最优信道码率选择的影响。不等误差保护(UEP)<sup>[5-7]</sup>方法对信源输出的分组码流选用码率不同的信道编码,从而使总的码率在信源编码和信道编码之间优化,这种方法系统资源利用率高,但实现复杂,尤其在压缩比高和分组长度短时,分配算法计算复杂。

本文提出一种基于最小图像失真的码率分配方法选择信源压缩比和信道码率,沿用信源编码、循环冗余校验(CRC)和信道编码串联的编码结构,将信源编码失真引入失真函数。对于SPIHT编码算法,给出端对端失真函数的封闭解析式。码率分配方法不仅根据信道参数选择码率,而且在相同的信道条件下根据总码率限制的不同动态分配码率。仿真结

果表明这种基于失真的码率分配算法采用简单的信道编码器即可取得较好的效果。

## 2 基于最小失真的码率分配模型

编码系统的失真通常由信源编码失真和信道编码失真组成,有损信源编码器的失真可用失真率函数  $D_S = D_1(R_S)$  表示,  $R_S$  为信源压缩比。信道编码器失真是由传输误码引起的,误码率由编码器的纠错能力、信源编码器输出数据的统计特性以及信道特征决定,因此可表示为  $D_C = D_2(r, \varepsilon, \beta)$ ,  $r$  为信道码的码率,  $\varepsilon$  表示信道的统计特性,  $\beta$  表示信源编码器输出的统计特性。

若信源编码器和信道编码器产生的失真不相关<sup>[8]</sup>,总的失真可表示为

$$D_T = D_S + D_C = D_1(R_S) + D_2(r, \varepsilon, \beta) \quad (1)$$

若信道编码器的数据错误会导致信源译码的失真,则总的失真是二者的函数:  $D_T = f(D_S, D_C)$ 。函数关系  $f(\cdot)$  由信源编码失真和信道编码失真之间的相关性决定。

一般而言,对于给定的信源编码器,压缩比越大,即表示每个信源符号所用的比特数越多,信源编码引起的失真越小;对于给定的码率兼容的信道编码器,信道码率越小,即用来纠错或检错的校验位越多,信道和信道编码引起的失真越小。受系统带宽的限制,总的码率总是要小于特定的值。基于失真的码率分配方法就是在总的码率  $R_T$  限制下,选择最优的信道码率  $\hat{r}$ ,合理分配信源比特和信道比特,使系统总的失真最小。因此如果将信道码率作为因变量,基于失真的码率分配问题可表示为:

$$\hat{r} = \arg_{r_c} \min D_T = \arg_{r_c} \min (f(D_1(R_S), D_2(r_c, \varepsilon, \beta))) \quad (2)$$

其中  $R_S = R_T r_c$ ,  $r_c$  为系统可选择的信道码率。

## 3 渐进图像传输的码率分配

本文选用 SPIHT 编码器作为信源编码器,其它渐进编码器也可采用类似的分析方法。SPIHT 算法是为最佳渐进传输和压缩设计的,它的一个重要特点是在图像解码的任意时刻,所显示的图像质量都是当时解码器输入位数所能获得的最佳者。编码系统采用 SPIHT 编码器、循环冗余校验(CRC)和码率兼容删除卷积(RCPC)码编码器串联的编码结构,将 SPIHT 码流分为  $n$  组,每组长度为  $j$  比特,每组数据后附加  $c$  个循环冗余校验(CRC)比特,  $f$  个零比特使维特比译码网路终止于全零状态。

渐进图像传输中,峰值信噪比(PSNR)、图像失真,以及最大可用比特数均可作为度量传输质量的标准,文献[9]证明了这3种标准在一定程度上的等价性。为简化分析,本文采用均方误差(MSE)度量图像失真,信道为二进制对称信道(BSC),交叉概率为  $p_0$ 。对于压缩比为  $R_S$  的 SPIHT 编码器,信源编码的失真可表示为<sup>[10]</sup>:  $D_S = D_1(R_S) = e^{aR_S + d}$ , 其中参数  $a$ ,  $d$  由特定的图像决定。SPIHT 码流传输时的单比特错误,极有可能导致其后的所有接收比特在译码时不可用,用第一个错误产生的位置表示失真,第  $k$  比特错误引起的失真为<sup>[10]</sup>:  $D_2(k) = \sum_{i=1}^4 c_i e^{-l_i k}$ ,  $c_i$  和  $l_i$  是由特定类型的图像决定的参数。

对误码率为  $p_0$  二进制对称信道(BSC),信道编码码率为  $r_c$ ,则每比特发生错误的概率可表示为:  $p = g(p_0, r_c)$ 。码率兼容删除卷积(RCPC)码由一个卷积码编码器选择不同的删除矩阵生成码率集为  $\{r_1, r_2, \dots, r_{c_n}\}$  删除卷积码<sup>[11]</sup>。数据经 RCPC 码编码后在二进制对称信道(BSC)上传输的比特错误概率可表示为<sup>[8, 11]</sup>

$$\left. \begin{aligned} p(r_{c_i}, p_0) &\leq \frac{1}{T} \sum_{d=d_{\text{free}}}^{\infty} c_d P_d(p_0) \\ P_d(p_0) &= \sum_{k=(d+1)/2}^d \binom{d}{k} p_0^k (1-p_0)^{d-k}, p \text{ 为奇数} \\ P_d(p_0) &= \sum_{k=d/2+1}^d \binom{d}{k} p_0^k (1-p_0)^{d-k} + \frac{1}{2} \binom{d}{d/2} p_0^{d/2} \\ &\quad \cdot (1-p_0)^{d/2}, p \text{ 为偶数} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中  $T$  为删除周期;  $c_d$  为 RCPC 码的码错误权重(error weight),对于固定的 RCPC 码编码器,  $c_d$  是固定的;  $P_d$  为选择距离为  $d$  的错误路径概率。对于给定的信道码率  $r_c$  和信道参数即二进制信道的交叉概率  $p_0$ ,  $p$  为常数。信道误码引起失真的期望值为

$$E(D_C) = \sum_{k=1}^{nj} D_2(k) p (1-p)^{k-1} \quad (4)$$

$nj$  是信源编码输出的比特数。编码系统端对端的失真为

$$E(D_T) = \sum_{k=1}^{nj} D_2(k) p (1-p)^{k-1} + D_1(R_S) (1-p)^{nj} \quad (5)$$

信道编码前将信源输出码流分为  $n$  组,若输入图像和每组数据长度固定,数据组数  $n$  随信源码率  $R_S$  线性变化。如果循环冗余校验检测出某一组数据出错,则丢弃出错组以及其后的所有数据。因此  $E(D_T)$  可表示为

$$E(D_T) = \sum_{i=1}^n D_B(i) P_B (1-P_B)^{i-1} + D_1(R_S) (1-P_B)^n \quad (6)$$

$D_B(i)$  为丢弃第  $i$  组及以后数据引起的失真,  $P_B$  为每组数据有误差的概率, 显然有:  $P_B = 1 - (1 - p)^j$ 。码率限制为  $R_T$  时, 若选定信道码率为  $r_{c_i}$ , 则信源编码码率为  $R_S = \gamma R_T r_{c_i}$ , 其中  $\gamma = j / (j + c + f)$ 。由上述条件, 式(2)可写为

$$\hat{r} = \arg_{r_{c_i}} \min E(D_T)$$

$$= \arg_{r_{c_i}} \min \left( \sum_{i=1}^n D_B(i) P_B (1 - P_B)^{i-1} + D_1(\gamma R_T r_{c_i}) (1 - P_B)^n \right) \quad (7)$$

其中  $r_{c_i} \in \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ , 每组出错概率  $P_B$  为  $r_{c_i}$  和交叉概率  $p_0$  的函数。  $D_B(i)$  由特定图像类型和信源压缩比决定。因此, 对于给定的码率限制和信道, 总可以选择出系统的最佳信道码率  $\hat{r}$ 。

### 4 仿真结果

我们采用  $512 \times 512$  Lena 图像, 选取 3 种二进制对称信道 (BSC), 交叉概率分别为  $p_0 = 10^{-1}$ ,  $p_0 = 10^{-2}$ ,  $p_0 = 10^{-3}$ 。RCPC 码选自文献[11]中列出的记忆长度为 4, 删除周期为 8 的删除卷积码, 码率集为  $r_c = \{8/32, 8/31, \dots, 8/9\}$ , 数据比特长度  $j$ , 循环冗余校验(CRC)比特数  $c$ , 零比特数  $f$  分别为 202, 16 和 4。图 1 给出了 3 种信道条件下选择不同码率时, 由 3000 次蒙特卡洛仿真得出的单组数据发生错误的概率  $P_B$ , 图 2 给出了 3 种信道条件下, 码率限制为 0.1bpp 到 1bpp 的最优信道码率, 步进长度为 0.05bpp。Lena 图像的失真模型为<sup>[9]</sup>  $D_1(R_S) = 45.51e^{-2.98R_S} + 2.87$ 。为便于和同类论文的比较, 仿真结果给出接收端恢复图像的峰值信噪比, 对于八位的灰度图像, 峰值信噪比(PSNR)可由均方误差(MSE)计算:  $PSNR = 10 \lg [255^2 / (MSE)]$ 。图 3 给出了 3 种信道条件下的选择最优信道码率得出的图像峰值信噪比(该图绘出了一次实验的仿真结果)。

为突出码率分配的合理性, 仿真选用了结构简单、记忆长度短的卷积编码器, 由图 1 可见, 信道码的误比特率较高, 纠错能力不强, 在信道恶劣时尤为明显。图 2 中信道码在

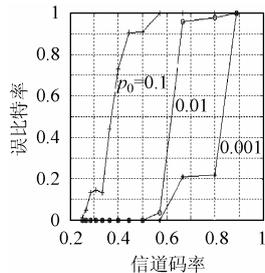


图 1 RCPC 码的误码率

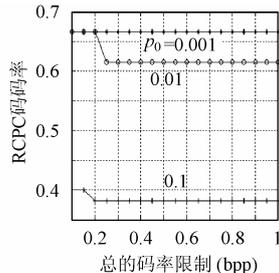


图 2 总码率限制下的最优信道码率

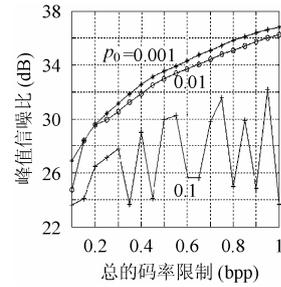


图 3 各种码率限制下的 PSNR

$p_0 = 10^{-1}$  条件下选择了码率最小即纠错能力最强的信道码, 而图 3 的相应曲线波动说明对  $p_0 = 10^{-1}$  的二进制对称信道, 受仿真选择的卷积码自由距离的限制, 即使 RCPC 码的删除器不加删除, 即选择码率为 1/4 的信道码, 译码器也不能完全纠正所有错误, 丢弃的数据表现出随机性, 因此需采用纠错能力更好的卷积编码器。在低误码率条件下, 这种基于最小失真码率分配, 充分利用了可用的码率资源, 选择最优码率信道码, 因此得到较高的图像质量。

### 5 结束语

本文采用基于失真的码率分配方法, 建立了相关的码率分配模型。为渐进图像在噪声信道上的传输提供了一种信源信道联合编码的解决方案。根据码率限制和信道特征选择不同的信道码率, 信源编码和信道编码之间合理分配系统资源。这种码率分配的方法计算简单, 仿真结果表明低误码率条件下, 采用简单的编码器即可取得较高的峰值信噪比。

### 参考文献

- [1] Said A, Pearlman W A. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees. *IEEE Trans. on Circuits Syst. Video Technol.*, 1996, 6(6): 243 – 250.
- [2] Banister A, Belzer B, Fischer R. Robust image transmission using JPEG2000 and Turbo-codes. *IEEE Signal Processing Letters*, 2002, SP-9(4): 117 – 119.
- [3] Sherwood P G, Zeger K. Progressive image coding on noisy channels. *IEEE Signal Processing Letters*, 1997, SP-4(7): 189 – 191.
- [4] Zhao M, Alatan A, Alansu N. A new method for optimal rate allocation for progressive image transmission over noisy channel. *Proc. IEEE DCC-2000, Snowbird, UT*, 2000: 213 – 222.
- [5] Stanković V, Charfi Y, Hamzaoui R. Real-time unequal error

- protection for distortion-optimal progressive image transmission. *IEEE on J. SAC.*, 2003, 21(10): 1526 – 1535.
- [6] Hammzaoui R, Stanković V, Xiong Z. Rate-based versus distortion-based optimal joint source-channel coding. Proc. IEEE DCC-2002, Snowbird, UT, 2002: 63 – 72.
- [7] Chande V, Farvardin N. Progressive Transmission over memoryless noisy channels. *IEEE on J. SAC.*, 2000, 18(6): 850 – 860.
- [8] 顾伟, 胡波, 凌燮亭. 一种抗误码能力强的无线信道图像传输方案. *通信学报*, 2002, 23(6): 97 – 104.
- [9] Hedayat A, Nosratinia A. Rate allocation criteria in source-channel coding of images. Proc. IEEE, ICIP-2001, Thessaloniki, 2001, vol. 1: 189 – 192.
- [10] Appadwedula A, Jones D L, Ramchandran K. Joint source channel matching for a wireless communication link. Proc. IEEE ICC'98, Atlanta, Georgia, 1998: 482 – 486.
- [11] Hagenauer J. Rate-compatible punctured convolutional codes (RCPC codes) and their applications. *IEEE Trans. on Communication*, 1988, COM-36(4): 389 – 400.
- 王红星: 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 长期从事图像处理、数字通信的教学与研究.
- 张 勇: 男, 1980 年生, 硕士生, 研究兴趣为图像传输和信道编码.