

# 基于信源符号重排的抗丢包图像不等保护方法<sup>\*</sup>)

杨亚东<sup>1</sup> 吴成柯<sup>2</sup> 肖 嵩<sup>2</sup> 杜建超<sup>2</sup>

(空军工程大学电讯工程学院 西安 710077)<sup>1</sup> (西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室 西安 710071)<sup>2</sup>

**摘要** 对内嵌图像数据采用交织器结构的不等保护,以抗击包丢失现象,是广泛采用的有效方案。本文提出在同一信道码率游程内,把信源符号的排列方式从原方案的逐行排列改成逐列排列能够增加接收端用于解码的信源符号数目,改善重建图像的质量。基于以上改进,导出了相应的期望 PSNR 计算式。在考虑重排效果和解码图像最小质量要求的前提下,提出了一种基于局部搜索的信源/信道码率分配新算法。采用双状态马尔可夫网络模型,通过对 SPIHT 和 JPEG2000 编码器产生的码流数据进行仿真实验。结果表明,在同样的传输失败概率下,新算法的期望 PSNR 值显著优于同类算法,特别在包数较少而包长度较大的情况下,期望 PSNR 性能的改善幅度更大。

**关键词** 联合信源/信道编码,不等保护,QoS,图像通信,图像编码

## Unequal Loss Protection of Image Based on Rearranging the Source Symbols

YANG Ya-Dong<sup>1</sup> WU Cheng-Ke<sup>2</sup> XIAO Song<sup>2</sup> DU Jian-Chao<sup>2</sup>

(The Telecommunication Engineering Institute, AFEU, Xi'an 710077)<sup>1</sup> (ISN National Key Lab., Xidian University, Xi'an 710071)<sup>2</sup>

**Abstract** It is an efficient system to protect the embedded image data unequally using the interleaver-based structure in order to combat the packet loss in packet erasure channel. In this paper, it is shown that the total number of the decoded source symbols can be increased by rearranging the source symbols within the runs of the same channel code rate in a vertical direction instead of the original horizontal direction, which results in the performance improvement to the original system. The relevant formulas are developed to describe the expected peak signal-to-noise ratio (PSNR) at the receiver based on the rearrangement. By considering the rearrange effect and the minimum quality requirement, a new algorithm based on local search is presented to allocate the transmission bit budget between the source and channel codes. Experiments are carried out with the source coders of SPIHT and JPEG2000 and with the network model of two-state Markov. The results show that the new algorithm can provide significantly higher expected PSNR especially in the cases of small number of packets and large packet length compared to the previous algorithm under the same probability of failure, i. e., the probability that the quality of the decoded image is below the minimum quality requirement.

**Keywords** Joint source/channel coding, Unequal loss protection, Quality of service, Image communication, Image coding

## 1 引言

在包交换网络(例如 Internet 和 ATM 网络)中,由于拥塞等原因导致的包丢失现象不可避免。基于小波变换的 SPIHT 和 JPEG2000 编码器产生的码流是一种内嵌式码流,它们按照对恢复图像质量贡献的大小对编码数据进行排序,贡献大的重要信息放在码流的前部,对于位置在后面的码流部分的解码依赖于前面部分的正确解码。这种内嵌式码流允许解码端终止于任何所需的码率并进行解码,实现逐渐浮现式的图像传输。但是,这种内嵌式码流对包丢失现象很敏感,当网络传输中发生包丢失现象时,解码端仅能利用位于第一个丢包现象发生位置以前的码流数据进行解码,而位于其后面的其它码流数据即使正确收到也无法用于解码。由于基于自动请求重传(ARQ)的差错控制方案要引入延迟,而延迟对于实时应用一般是不能容忍的,因此基于前向纠错(FEC)的方案受到许多学者的重视和研究<sup>[1~7]</sup>。

Mohr 等<sup>[1]</sup>根据内嵌式码流的特点提出了包丢失不等保

护(ULP)方案,它将码流分成不等长度  $L$  的码段,每码段信源符号加上不等长度的 RS 码冗余符号组成包数为  $N$ 、每包包含  $L$  符号的  $L \times N$  交织器矩阵。在交织器矩阵中,每行对应一个信道码,每列对应一个数据包,根据信源码段重要性由高到低递减的特点,采用保护能力由强到弱、码率不同而码长固定的系统( $N, k$ )RS 码进行保护。在此 ULP 方案中,关键问题是如何快速有效地进行信源/信道码率分配,以使保护性能最佳。典型的 ULP 码率分配算法可参阅文[2~5],其中文[5]中的局部搜索算法在多数情况下运算速度最快。这些 ULP 码率分配算法仅以解码端得到的期望质量最大或期望失真值最小作为优化的目标,而没有考虑解码图像的最小质量要求。实际上,从服务质量(QoS)的观点看,当解码端得到的恢复图像质量小于某一质量阈值时,由于图像内容无法辨认而没有任何实际用途,当这种情况发生时对用户来说就视为传输失败。为此 Grangetto 等<sup>[6]</sup>提出了在保证传输失败概率小于给定概率阈值的前提下使期望质量最大的码率分配思想。文[6]同时提出了把满足最小图像质量要求的初始码流

<sup>\*</sup>)国家自然科学基金(No. 60532060, No. 60372043)。杨亚东 博士,主要从事图像编码、图像及视频的网络传输等方面的研究;吴成柯 教授,博士生导师,主要从事图像处理、图像通信、计算机视觉等方面的研究;肖 嵩 副教授,博士,主要从事图像编码、联合信源信道编码等方面的研究;杜建超 博士,主要从事视频编码与传输、网络多媒体业务等方面的研究。

部分作为一个整体看待,对它们采用足够强度的等保护,而对剩余码流部分采用不等保护的混合丢包保护(HLP)方案。

对于现有的 ULP/HLP 方案,我们注意到两点事实:其一,对于某种网络丢包状况,接收端可用于解码的信源符号由两部分组成,第一部分由能够通过信道解码正确恢复的信源码段组成,第二部分位于不能通过信道解码正确恢复的信源码段中,这些码段接收到的信源符号中有一部分也可以用于解码,这些可用的信源符号在位置上与前一部分信源符号相连接,其数目与第一个包丢失发生的位置有关。对于现有方案的信源符号排列方式,可用于解码的第二部分信源符号数目较少,因此许多文献<sup>[1-6]</sup>在码率分配时仅考虑第一部分信源符号对期望质量的影响,而忽略了第二部分信源符号的作用。其二,码率分配最优解中的同一信道码率常常呈现较长的游程,即交织器中连续多行采用相同码率的 RS 码,特别是在包数  $N$  较小而包长度  $L$  较大的情况下,此时的码率总数较少,而码率是单调非减的,因此出现较长码率游程的概率较大。基于以上事实,本文提出通过对同一码率游程内的信源符号进行重新排列,能够增加用于解码的第二部分信源符号数,同时又不影响用于解码的第一部分信源符号数,因此获得期望质量的改善。在此改进的基础上,本文导出了考虑所有可用解码信源符号的期望质量计算式,并结合文[5]算法的思想,提出了一种基于局部搜索的码率分配新算法以寻找考虑最小质量要求和重排效果时的近似最优解。

本文第 2 节给出码率游程内信源符号的重排方法,并导出相应的期望质量计算式;第 3 节介绍本文基于局部搜索的码率分配算法;第 4 节给出仿真结果,并与现有方案进行性能比较;最后是本文的研究结论。

## 2 信源符号重排与期望 PSNR 值的数学推导

假设采用  $N$  个包,每包  $L$  个符号传输内嵌图像码流,信源编码器的  $\phi(r)$  函数已知,这里,  $\phi(r)$  表示利用  $r$  个信源符号解码对应的 PSNR 值(峰值信噪比),  $p_N(n)$  表示  $N$  包中有  $n$  包丢失的概率。在原始 ULP/HLP 方案中,码流被分成  $L$  码段:  $S_1, \dots, S_L$ , 每个码段采用某种码率的系统 RS 码进行保护,构成  $L \times N$  交织器矩阵。参照图 1(a),图中每行对应某种码率的 RS 码,每列对应一个数据包,阴影方框对应保护符号,空白方框对应信源符号。

设  $m_i$  为第  $i$  行的信源符号长度,  $m_i \in \{1, \dots, N\}$ , 则第  $i$  行对应的系统 RS 码为  $(N, m_i)$ , 相应的 RS 码冗余符号数为  $f_i = N - m_i$ 。如果  $N$  包中有  $f_i$  包丢失,根据 RS 码的纠删特性,最多含有  $m_i$  信源符号的码段能被全部正确恢复<sup>[4]</sup>。由于内嵌式码流对当前信源符号的解码依赖于所有位于其前面的信源符号,因此通过添加约束条件:

$$f_1 \geq f_2 \geq \dots \geq f_L \quad (1)$$

若  $f_i$  包丢失,则所有前  $i$  行中的信源符号都可以被正确恢复。用  $L$  元组符号  $(f_1, f_2, \dots, f_L)$  表示某种码率分配方案。

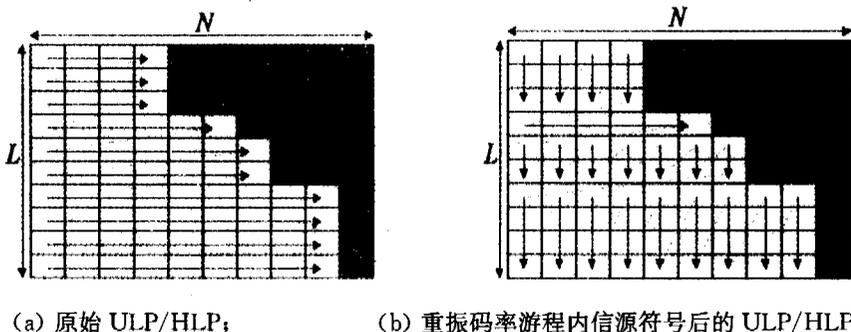


图 1 ULP/HLP 示意图

### 2.1 重排码率游程内的信源符号

引入两个离散随机变量  $X$  和  $Y$ , 其中,  $X$  表示丢包数;  $Y$  表示第一个包丢失发生在交织器矩阵的第  $Y+1$  包, 显然,  $0 \leq X \leq N, 0 \leq Y \leq N - X$ 。对于码率分配方案  $F = (f_1, \dots, f_L)$ , 当  $f_i \geq X > f_{i+1}$  时,  $0 \leq Y \leq N - f_{i+1} - 1$ , 接收端可以用于解码的信源符号由两部分组成, 第一部分由位于前  $i$  行的信源符号组成, 这些信源符号可以通过信道解码正确恢复, 对应信源符号数为  $r_i = \sum_{k=1}^i m_k = iN - \sum_{k=1}^i f_k$ ; 第二部分位于第  $i+1 \sim L$  行的信源符号中, 这些的信源符号虽然不能通过信道解码恢复, 但它们中存在部分接收到的信源符号也可以用于解码, 该部分可用的信源符号数目与第一个包丢失发生的位置有关, 在原始 ULP/HLP 方案的交织器中, 信源符号是按照从上到下从左到右的顺序排列, 由图 1(a) 可知, 此时仅有第  $i+1$  行、数量为  $Y$  的信源符号可用于解码, 因此总共可用于解码的信源符号数为  $r_i + Y$ , 得到的解码图像质量为  $\phi(r_i + Y)$ 。如果改变同一码率游程内信源符号排列方式, 将原方案的逐行排列改成逐列排列, 如图 1(b) 所示, 假设第  $i+1$  行信道码的码率游程长度为  $L_{i+1} (L_{i+1} \geq 1)$ , 则第  $i+1 \sim L$  行中可用于解码的信源符号数变为  $L_{i+1} Y$ , 总共可用于解码的信源

符号数变为  $r_i + L_{i+1} Y$ , 得到的解码图像质量为  $\phi(r_i + L_{i+1} Y)$ 。而内嵌式码流的  $\phi(r)$  函数是单调非减的, 显然, 只要  $L_{i+1} > 1$  且  $Y \neq 0$  就可以获得性能改善, 而且码率游程长度  $L_{i+1}$  越大, 获得的性能改善幅度也越大。这就是重排码率游程内的信源符号能够带来性能改善的原因。

### 2.2 期望 PSNR 计算式的推导

经过对码率游程内的信源符号重新排列后, 在  $f_i \geq X > f_{i+1}$  条件下, 利用所有可用信源符号解码, 期望 PSNR 为  $\phi(F) = \sum_{j=0}^{N-f_{i+1}-1} \phi(r_i + L_{i+1} j) P(Y=j | f_i \geq X > f_{i+1})$ , 接收端得到该期望 PSNR 的概率为  $P_i(F) = P(f_i \geq X > f_{i+1})$ 。因此, 对于某种码率分配方案  $F = (f_1, f_2, \dots, f_L)$ , 重建图像的期望 PSNR 为

$$E[\text{PSNR}](F) = \sum_{i=0}^L P_i(F) \phi_i(F) = P(N \geq X > f_1) \sum_{j=0}^{N-f_1-1} \phi(L_1 j) P(Y=j | N \geq X > f_1) + \sum_{i=1}^{L-1} P(f_i \geq X > f_{i+1}) \sum_{j=0}^{N-f_{i+1}-1} \phi(r_i + L_{i+1} j) P(Y=j | f_i \geq X > f_{i+1}) + P(f_L \geq X \geq 0) \phi(r_L) \quad (2)$$

利用条件概率公式把上式中各项的计算简化为

$$P_0(F)\phi_0(F) = \sum_{j=0}^{N-f_1-1} \phi(L, j)P(Y=j, N \geq X > f_1) \quad (3)$$

$$P_L(F)\phi_L(F) = P(f_L \geq X \geq 0)\phi(r_L) = \phi(r_L) \sum_{k=0}^{f_L} p_N(k) \quad (4)$$

$$P_i(F)\phi_i(F) = \begin{cases} 0, & f_i = f_{i+1} \\ \sum_{j=0}^{N-f_{i+1}-1} \phi(r_i + L_{i+1}, j)P(Y=j, f_i \geq X > f_{i+1}), & f_i > f_{i+1} \end{cases}$$

(5)

本文采用双状态马尔可夫模型<sup>[7]</sup>作为网络丢包模型,此时,(5)、(3)式中的二维联合概率可由以下二式计算:

$$P(Y=j, f_i \geq X > f_{i+1}) = \sum_{k=f_{i+1}+1}^{f_i} P(Y=j, X=k) = \sum_{k=f_{i+1}+1}^{f_i} P(O^j 1)R(k, N-j) = \sum_{k=f_{i+1}+1}^{f_i} P(1)P(O^j | 1)R(k, N-j) = P(1)G(j+1) \sum_{k=f_{i+1}+1}^{f_i} R(k, N-j)$$

$$P(Y=j, N \geq X > f_1) = P(1)G(j+1) \sum_{k=f_1+1}^N R(k, N-j)$$

这里,“0”表示正确接收,“1”表示丢包,“O<sup>j</sup>”表示连续正确接收 j 个包;R(k, N-j)表示在一个丢包发生后面的 N-j-1 包中有 k-1 丢包发生的概率;G(j+1)=P(O<sup>j</sup> | 1);P(1)为平均丢包率。关于概率函数 G(·),R(·, ·)以及 p<sub>N</sub>(·)的计算方法可参考文[7]。

在原始 ULP/HLP 方案中,由于可用于解码的第二部分信源符号数目相对较少,因此许多文献<sup>[1~6]</sup>都忽略了该部分信源符号对期望 PSNR 的影响,而仅考虑可用于解码的第一部分信源符号。此时,期望 PSNR 近似计算式为<sup>[5]</sup>

$$E[\text{PSNR}](F) = \sum_{i=0}^L P_i(F)\phi(r_i) \quad (6)$$

### 3 基于局部搜索的码率分配算法

本节采用 HLP 方案,以期望 PSNR 为目标函数,在对传输失败概率进行约束的条件下,利用局部搜索算法求解码率分配的近似最优解。

假设解码图像的最小质量阈值为 PSNR<sub>min</sub>;给定传输失败概率阈值 P<sub>0</sub>;V<sub>min</sub>为满足最小质量要求的初始部分信源符号数;V<sub>min</sub>所在行的最大行索引号为 q, q ≤ L;Ω 为由 L 元组元素(f<sub>1</sub>, f<sub>2</sub>, ..., f<sub>L</sub>)组成的集合,这里, f<sub>1</sub> = f<sub>2</sub> = ... = f<sub>q</sub> = f<sub>a</sub>, f<sub>a</sub> ≥ f<sub>q+1</sub> ≥ ... ≥ f<sub>L</sub>, f<sub>i</sub> ∈ {0, ..., N-1}, i = 1, ..., L。HLP 方案的最优码率分配问题可描述为:给定 N、L、p<sub>N</sub>(n)、φ(r)、最小质量阈值 PSNR<sub>min</sub>及传输失败概率阈值为 P<sub>0</sub>,最优码率分配方案 F\* = (f<sub>1</sub>, ..., f<sub>L</sub>) ∈ Ω 是满足下式的解:

$$\begin{cases} F^* = \arg \max_{F \in \Omega} E[\text{PSNR}](F) \\ \text{s.t.} & P_f < P_0 \end{cases} \quad (7)$$

在 HLP 方案中,对初始部分信源符号 V<sub>min</sub>采用(N, N-f<sub>a</sub>)系统 RS 码进行等保护。为满足 P<sub>f</sub> < P<sub>0</sub> 条件,由于传输失败概率 P<sub>f</sub> = P(X > f<sub>a</sub>) = ∑<sub>k=f<sub>a</sub>+1</sub><sup>N</sup> p<sub>N</sub>(k),据此可确定 f<sub>a</sub> 的最小值 f<sub>a,min</sub>。与文[6]相同,本文取 f<sub>a</sub> = f<sub>a,min</sub>,即对 V<sub>min</sub>采用(N, N-f<sub>a,min</sub>)RS 码进行等保护,此时 V<sub>min</sub>所在行的最大行检索号 q = ⌈ V<sub>min</sub> / (N-f<sub>a,min</sub>) ⌋。

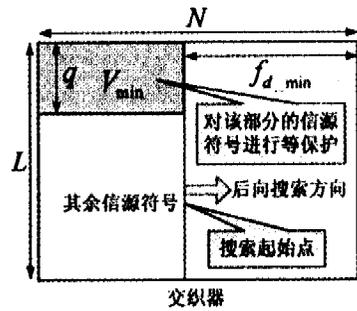


图2 基于局部搜索的 HLP 算法示意图

确定了对前 q 行进行等保护的 RS 码,根据(1)式的约束条件,其余各行的信道码应使用比前 q 行 RS 码更少的保护符号。按照迭代改进算法的思想,我们选取等保护 F<sub>a</sub> = (f<sub>a,min</sub>, ..., f<sub>a,min</sub>) ∈ Ω 作为搜索的起始点,通过适当定义邻域,对位于 q+1~L 行信源符号进行不等保护的 RS 码由局部搜索方法确定,称这种搜索为后向搜索。图 2 给出了本文基于局部搜索的 HLP 算法的示意图。

#### 3.1 邻域定义

邻域由一组候选解组成,根据以上讨论,后向搜索的邻域定义如下。

定义 1 设 F = (f<sub>a</sub>, ..., f<sub>a</sub>, f<sub>q+1</sub>, ..., f<sub>L</sub>) ∈ Ω, F 的后向搜索邻域 N(F) 由 Ω 中的 L-q 个元素 (f<sub>a</sub>, ..., f<sub>a</sub>, f<sub>q+1</sub>, ..., f<sub>L-1</sub>, f<sub>L</sub>-1), (f<sub>a</sub>, ..., f<sub>a</sub>, f<sub>q+1</sub>, ..., f<sub>L-1</sub>-1, f<sub>L</sub>-1), ..., (f<sub>a</sub>, ..., f<sub>a</sub>, f<sub>q+1</sub>-1, ..., f<sub>L-1</sub>-1, f<sub>L</sub>-1) 组成。

#### 3.2 基于局部搜索的 HLP 算法

综合以上分析,基于局部搜索的 HLP 算法可描述如下。

1) 初始化:选取最小质量阈值 PSNR<sub>min</sub> 及传输失败概率阈值 P<sub>0</sub>;根据编码器的 PSNR-率曲线函数 φ(r) 计算满足最小质量要求的初始部分信源符号 V<sub>min</sub>;计算 f<sub>a,min</sub>, 并取 f<sub>a</sub> = f<sub>a,min</sub>;计算 V<sub>min</sub> 所在行的最大行检索号 q;令 F = (f<sub>a</sub>, ..., f<sub>a</sub>)。

2) 后向搜索:

if N(F) = ∅ then 停止

else 计算 C = arg max<sub>S ∈ N(F)</sub> E[PSNR](S)

if E[PSNR](C) > E[PSNR](F) then 置 F = C, 返回 2)

else 停止

由于 SPIHT 与 JPEG2000 编码器的 φ(r) 函数的特性不同, SPIHT 编码器的 φ(r) 近似为单调增的上凸函数,而 JPEG2000 编码器的 φ(r) 呈阶梯型上升的特性。通过仿真实验发现,与文[5]的讨论类似,对于 SPIHT 编码器,直接对其 φ(r) 数据进行后向搜索就可得到较满意的结果;而对于 JPEG2000 编码器,如果仍然同样处理,则常常会导致搜索过程过早结束,不能得到满意的结果。为了克服这一问题,对于 JPEG2000 编码器,在进行后向搜索前,首先将其 φ(r) 曲线上对应其余信源符号部分的 PSNR 值跳变点相连接构成分段仿射函数,然后对此分段仿射函数数据进行后向搜索。

#### 3.3 算法复杂度分析与重排信源符号的策略选择

在最坏情况下,本文后向搜索从起始点 (f<sub>a</sub>, ..., f<sub>a</sub>) 开始

搜索,结束于 (f<sub>a</sub>, ..., f<sub>a</sub>, f<sub>q+1</sub>, ..., 0), 总共搜索 f<sub>a</sub> 次,共需计算 (L-q)f<sub>a</sub>+1 次期望 PSNR 值,并进行 (L-q)f<sub>a</sub> 次比较,因此搜索算法在最坏情况下的计算复杂度为 O((L-q)f<sub>a</sub>)。

至于期望 PSNR 的计算,由于(2)式是进行码率游程内信

源符号重排时的期望 PSNR 精确计算式,而(6)式是原始 ULP/HLP 方案期望 PSNR 的近似计算式,因此在性能优先的情况下,在搜索过程中,利用(2)式计算期望 PSNR 能够获得最佳的性能,称该种局部搜索算法为 HLP-LS1 算法。考虑到(2)式的计算复杂度要比(6)式高许多,在速度优先的情况下,在搜索过程中,可以先不进行码率游程内的信源符号重排,而利用(6)式计算期望 PSNR。当搜索过程完成后,再进行码率游程内的信源符号重排,利用(2)式计算最终的期望 PSNR,称该种局部搜索算法为 HLP-LS2 算法。显然,HLP-LS2 算法与 HLP-LS1 算法相比较,在获得加速的同时会导致

期望 PSNR 性能的下降。

#### 4 实验结果及分析

作者采用 C 语言实现了本文提出的基于码率游程内信源符号重排的两种局部搜索算法——HLP-LS1 和 HLP-LS2,这两种新算法与文[6]的 HLP 算法 C 语言程序在运行 Windows XP 操作系统配置为 1.6GHz Pentium 4 CPU、内存为 256Mbytes 的同一台 PC 机上进行对比仿真实验。在所有实验中,选取图像最小质量阈值  $PSNR_{min}=25dB$ ,传输失败概率阈值  $P_f=0.5\%$ ,网络丢包模型采用双状态马尔可夫模型。

表 1 SPIHT/JPEG2000 码流实验结果

图像	L	文[6]算法			HLP-LS1 算法			HLP-LS2 算法		
		PSNR(dB)	耗时(ms)	层数	PSNR(dB)	耗时(ms)	层数	PSNR(dB)	耗时(ms)	层数
Lena (SPIHT)	50	30.55	4.1	12	30.72	4.7	2	30.58	0.5	10
	100	33.60	8.6	15	33.74	10.0	4	33.64	1.9	17
	200	36.68	17.7	22	36.84	29.2	6	36.72	7.7	24
Peppers (SPIHT)	50	30.09	3.6	12	30.20	3.6	3	30.13	0.5	13
	100	32.97	8.9	18	33.11	9.4	4	33.02	1.7	20
	200	35.35	18.1	24	35.46	27.8	2	35.38	7.3	29
Lena (JPEG2000)	50	30.00	3.1	7	30.19	3.9	2	30.08	0.5	8
	100	33.23	6.9	10	33.49	10.5	3	33.31	1.9	10
	200	36.48	14.4	15	36.66	37.3	2	35.57	8.0	15
Peppers (JPEG2000)	50	29.63	3.1	7	29.85	3.3	2	29.70	0.3	10
	100	32.73	7.2	9	32.82	9.2	3	32.77	1.6	11
	200	35.16	15.0	15	35.22	37.7	4	35.19	8.1	21

表 1 给出了对于 8bpp、 $512 \times 512$  Lena 和 Peppers 两种标准灰度图像分别采用 SPIHT 编码器<sup>[9]</sup>及 JPEG2000 编码器<sup>[8]</sup>产生的码流进行仿真的实验结果,其中 JPEG2000 编码器采用 Kakadu C++ 软件<sup>[8]</sup>,码流分为 50 个质量层。表中耗时是指除了读取编码器  $\phi(r)$  数据操作外算法各自所需操作的总耗时;期望 PSNR 值由编码器的实际  $\phi(r)$  数据进行计算;表中层数是指算法码率分配结果中实际包含的码率游程数目,即不同码率的 RS 码数目。仿真时取包数  $N=120$ ,网络丢包模型参数取平均丢包率  $P_b=0.1$ ,平均突发长度  $L_b=9.57$ <sup>[7]</sup>。表中包长度  $L$  的单位为字节。由于表中 3 种算法等保护的选取方法相同,它们的实际传输失败概率是相等的,均为  $P_f=0.45\%$ (表中未列出)。

由表中可以看出,在同样的传输失败概率下,本文两种算法——HLP-LS1 和 HLP-LS2 的期望 PSNR 值均优于文[6]算法,其中 HLP-LS1 算法对期望 PSNR 值的改善最大,改善幅度在 0.06~0.26dB 之间,多数情况下的改善幅度超过 0.15dB,而该算法的运行速度要比文[6]算法稍慢;HLP-LS2

算法对期望 PSNR 值的改善较小,改善幅度在 0.03~0.09dB 之间,而运行速度比文[6]算法快许多,特别是在包长度  $L$  较小时,加速幅度更大。从表中还可以发现,HLP-LS1 算法产生的层数比其它两种算法要少得多,而层数少意味着发送端为把码率分配结果告诉接收端所需传输的辅助信息的减少<sup>[7]</sup>。因此,HLP-LS1 算法还具有辅助信息少的优点。

为考察包数变化对算法期望 PSNR 性能的影响,在保持网络丢包模型参数  $P_b=0.1$ , $L_b=9.57$  不变情况下,把包长度固定为  $L=200$  字节,而包数从 40~200 变化,采用 Lena 图像和 SPIHT 编码器进行实验,分别将 HLP-LS1 和 HLP-LS2 算法相对文[6]算法期望 PSNR 值增加量的变化情况绘制于图 3(a)中。为考察信道参数变化对算法期望 PSNR 性能的影响,在  $N=120$ , $L=100$  字节的条件下,首先将平均突发长度固定为  $L_b=9.57$ ,而使平均丢包率在 0.02~0.2 之间变化,然后将平均丢包率固定为  $P_b=0.1$ ,而使平均突发长度在 4~12 之间变化,同样采用 Lena 图像和 SPIHT 编码器进行实验,将 3 种算法的期望 PSNR 值变化情况分别绘制于图 3(b)和(c)。

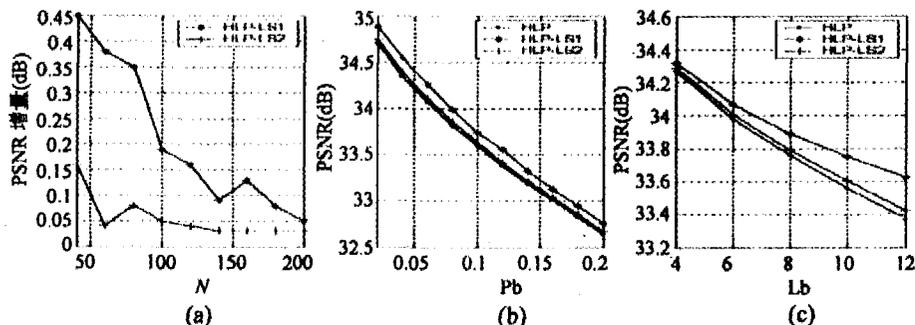


图 3 包数及信道参数变化时算法的期望 PSNR 性能(Lena)

表1给出了基于上述讨论从网格1到网格5的不同层六角网格中的凸缘边缘的比较。共有7个凸缘图像的特征:外形轮廓、顶部的椭圆、圆柱体、圆柱体的阴影、左边的螺孔、中间的螺孔和右边的螺孔。

通常,从较低分辨率层到较高分辨率层操作,也就是从网格5到网格1,所检测到的图像边缘越来越精确,伴随各种不同图像特征的新边缘出现了。然而,我们的实验遇到一个情形,在较低分辨率层检测到的一个特征,即网格2上的中间螺孔,并没有在较高分辨率层检测到,因为网格1中的噪声足以抑制中间螺孔的出现。一个更包容的方案可以让较低分辨率层得到的结果指导在较高分辨率层中的边缘的构造,使得此类“消失”的特征不再发生。

表1 三维凸缘物体在六角网格金字塔结构中的分析

边缘特征	在第几层网格观察到
外形轮廓	5(没有形状);4(右边拉伸); 3(只有顶端的外形轮廓);2;1
顶部的椭圆	2;1
圆柱体	
圆柱体的阴影	
左边的螺孔	1
中间的螺孔	2
右边的螺孔	

**结论和建议** 在此项研究中,我们介绍了1:3和1:4面积比两类六角网格金字塔,并且分别用于实验。1:4面积比金字塔较1:3面积比金字塔更好,这是由于基于1:4面积比金字塔,六角像素在各层网格中的方向是不变的,为一层网格开发的算法可以应用于金字塔中的所有层网格。

较小像素的六角网格中可以识别物体边缘更多的特征,在池形物体边缘检测的实验中,六角网格1,即最小像素的六角网格中构成的物体边缘最接近于真实的池形物轮廓;而在六角网格4,即最大像素的六角网格中构成的物体边缘与真实池形物轮廓最不同,仅从六角网格4得到的物体边缘几乎

不能识别池形物。在三维凸缘的边缘检测实验中,应用边缘检测算法可以在较小像素网格中识别凸缘较多的特征,凸缘边缘可以在六角网格1,2和3的数字图像上得到识别,凸缘的圆柱体顶部的椭圆可以在六角网格1和2中被识别,凸缘右边的螺孔只能在六角网格2中被观察到。

反射带来的明亮斑点和条纹作为噪声抑制了较高分辨率层六角网格中的特征检测。在实验中,凸缘的其中一个特征不能在高分辨率层网格构成的图像上观察到,而能在较低分辨率层网格构成的图像上看到。因此,特别是对于含有大量混乱细节和/或精细纹理的图像,有必要使用较低分辨率层获取的结果来指导搜索较高分辨率层中的模式。

此项研究中的边缘点确定算法需对一维物体的特殊情况加以补充。举例来说,如果图像中包含窄带形状,窄带的宽度稍稍比一个像素的尺寸小一些,而边缘点只要其方向彼此相反既可位于像素的中心,也可位于像素的棱边。这一规则的增加会生成更加精确的窄带检测。

## 参考文献

- 1 Mahowald M A, Mead C. The Silicon Retina. *Scientific American*, 1991, 264(5): 76~82
- 2 Golay M J E. Hexagonal parallel pattern transformations. *IEEE Transactions on Computers*, 1969, C-18(8): 733~740
- 3 Deutsch E S. On parallel operations on hexagonal arrays. *IEEE Transactions on Computers*, 1970, C-19(10): 982~983
- 4 Deutsch E S. Thinning algorithms on rectangular, hexagonal, and triangular arrays. *Communications of the ACM*, 1972, 15(9): 827~837
- 5 LU Xi-Qun, CHEN Chun. Research on Hexagonal Sampled Digital Images. *Journal of Image and Graphics*, 2004(6)
- 6 Watson A B, Ahumada A. A hexagonal orthogonal-oriented pyramid as a model of image representation in visual cortex. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1989, 36(1)
- 7 Watson A B. Recursive, in-place algorithm for the hexagonal orthogonal oriented quadrature image pyramid. *SPIE Advances in image compression and automatic target recognition 1099*, 1989
- 8 Crow F C. The aliasing problem in computer-generated shaded images. *CACM*, 20(12)
- 9 Stimets R W, Wu Liying, Rajasekharan K. Rapid recognition of object outlines in reduced resolution images. *Pattern Recognition*, 1986, 19(1): 21~33

(上接第241页)

从图3(a)可见,当包数 $N$ 从40~200变化,HLP-LS1算法相对文[6]算法的期望PSNR增加量近似从0.45dB单调递减到0.05dB;而HLP-LS2算法相对文[6]算法的期望PSNR增加量在0.05dB左右变化。因此,小的包数、较大的包长度有利于HLP-LS1算法获得较大幅度的期望PSNR性能改进;而HLP-LS2算法的性能改进幅度较小,基本上稳定在0.05dB左右。另外,由图3(b)、(c)可以看出,当信道条件变化时,本文HLP-LS1和HLP-LS2算法的期望PSNR值能够稳定地优于文[6]算法。当平均突发长度由小变大时,该两种算法的性能改进有明显增加的趋势。

**结论** 本文在原ULP/HLP方案的基础上,通过对码率游程内的信源符号进行重新排列,增加了接收端用于解码的信源符号总数,从而提高了重建图像的质量,在此改进的基础上,导出了重排时的期望PSNR计算式,提出了在性能优先和速度优先两种情况下的重排策略,以及考虑重排效果和最小质量要求的基于局部搜索的信源/信道码率分配算法——HLP-LS1和HLP-LS2。实验结果表明,两种算法的期望PSNR性能都优于文[6]算法,其中HLP-LS2算法的改善幅度较小,但运行速度快,而HLP-LS1算法的改善幅度较大,但运行速度稍慢,同时发现HLP-LS1算法有利于辅助信息

的减少。

## 参考文献

- 1 Mohr A E, Riskin E A, Ladner R E. Unequal loss protection: graceful degradation of image quality over packet erasure channels through forward error correction [J]. *IEEE J Select Areas Commun*, 2000, 18(7): 819~828
- 2 Mohr A E, Ladner R E, Riskin E A. Approximately optimal assignment for unequal loss protection [A]. In: *ICIP'2000, Vol 1 [C]*. Vancouver: IEEE press, 2000. 367~370
- 3 Puri R, Ramchandran K. Multiple description source coding through forward error correction codes [A]. In: *Proc. 33rd Asilomar Conf. Signals, Systems, and Computers, Vol 1 [C]*. Pacific Grove, CA: IEEE Press, 1999. 342~346
- 4 Dumitrescu S, Wu X, Wang Z. Globally optimal uneven error-protected packetization of scalable code streams [J]. *IEEE Trans Multimedia*, 2004, 6(2): 230~239
- 5 Stankovic V, Hamzaoui R, Xiong Z. Real-time error protection of embedded codes for packet erasure and fading channels [J]. *IEEE Trans Circuits Syst Video Tech*, 2004, 14(8): 1064~1072
- 6 Granello M, Magli E, Olmo G. Ensuring quality of service for image transmission: hybrid loss protection [J]. *IEEE Trans Image Processing*, 2004, 13(6): 751~756
- 7 Horn U, Stuhlmüller K, Link M, et al. Robust Internet video transmission based on scalable coding and unequal error protection [J]. *Image Communication (Special Issue on Real-time Video over the Internet)*, 1999, 15(1-2): 77~94
- 8 Taubman D, Marcellin M. *JPEG2000: Image Compression, Fundamentals, Standards, and Practice [M]*. USA: Kluwer Academic Publishers, 2002
- 9 Said A, Pearlman W A. A new fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees [J]. *IEEE Trans Circuits Syst Video Tech*, 1996, 6(3): 243~250