

基于小波 EBCOT 的图像 IP 网络传输控制策略

张 方 吴成柯 肖 嵩

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室 西安 710071)

摘 要 为了使当前“尽力而为”的网络提供视频流服务时满足 QoS 要求,文章提出一种基于小波 EBCOT 的图像 IP 网络传输控制策略.通过采用基于小波 EBCOT 的渐进可分级编码方法,对压缩后的比特流按其重要性分层打包传输,同时根据对当前网络可用带宽的估计及信道状态的判断,区分网络拥塞及不可靠传输两种不同情况进行自适应不等重丢包保护 AUPLP.软件仿真表明,该文算法可大大增强小波 EBCOT 编码后数据的抗误码能力,在发生数据拥塞时有助于缓解网络的过负载状况,在发生不可靠传输时接收端解码图像能平均提高 1.2dB 的 PSNR.

关键词 渐进可分级编码;小波;EBCOT;视频流;AUPLP

中图法分类号 TP391

Streaming Video Transmission and Controlling Strategy Based on Wavelet EBCOT Coding Over IP Network

ZHANG Fang WU Cheng-Ke XIAO Song

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071)

Abstract In order to meet the requirements of QoS to transmit video streaming over present best-effort network, a new streaming video transmission and controlling strategy based on wavelet EBCOT coding over IP network is proposed in this paper. The strategy analyzes the bit streams encoded by EBCOT and them into multiple transmission layers according to different importance, then applies unequal packet loss protection to them according to the network bandwidth estimation and channel state. The experimental results show that the proposed scheme can highly improve the error resilience of the bit stream, as well as efficiently relieve the IP network congestion, and it can obtain up to 1.2dB in PSNR when the transmission is unreliable.

Keywords progressive scalable coding; wavelet; EBCOT; streaming video; AUPLP

1 引 言

随着 Internet 网络日新月异的发展及可用带宽资源的不断增大,越来越多新颖的服务类型正不断涌现并占有越来越大的比重.为了使当前“尽力而为”

(best-effort)的网络上传输视频流满足业务服务质量(Quality of Service, QoS)的要求,具有对时变网络带宽的自适应能力及抗误码性能的传输控制策略就显得格外重要.最近的研究表明,渐进可分级的视频编码及分层传输控制方案可以有效地解决视频流 IP 网络传输时的大部分问题.从图像编码的角度来

收稿日期:2002-12-29;修改稿收到日期:2003-07-09.本课题得到国家自然科学基金(60372043)资助.张 方,男,1977 年生,博士研究生,主要从事图像压缩编码、网络多媒体业务及视频流的网络传输等方面的研究工作. E-mail: zfang@xidian.edu.cn. 吴成柯,男,1938 年生,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工作. 肖 嵩,女,1977 年生,博士研究生,主要从事图像压缩编码、联合信源信道编码等方面的研究工作.

看,渐进可分级使得视频流数据可以适应特殊的网络变化和不同的带宽条件,在 Internet 上传输尽可能好的业务质量;从网络结构的角度来看,分层传输可以使大量不同接入类型、拥有不同可用资源的用户在任何时间接收任何需要的视频流,即支持视频单播(unicast)和多播(multicast)业务。

本文提出一种基于小波 EBCOT(Embedded Block Coding with Optimized Truncation)^[1]的图像 IP 网络传输控制策略.主要思想是采用基于小波 EBCOT 的压缩编码,并对编码后的比特流按其重要性分层打包传输,同时根据对当前网络可用带宽资源的估计及信道状态的判断,区分网络拥塞及不可靠传输两种不同情况进行自适应不等重丢包保护(Adaptive Unequal Packet Loss Protection, AUPLP).由于小波 EBCOT 算法的内嵌编码特性(渐进传输和码率可调)使其作为一种渐进可分级编码方法便于进行分层传输和控制,根据当前不同的 IP 网络状态,在数据拥塞时,通过少传甚至不传非重要的数据层(图像的高频分量)来降低服务器端等待传输的视频流速率;当发生不可靠传输时,在不传非重要图像层的同时通过纠错编码增强对小波 EBCOT 编码后码流中重要数据层的保护力度.仿真结果表明,本文方法可以大大增强网络视频流业务中经过小波 EBCOT 编码后数据的鲁棒性及抗误码能力,在发生数据拥塞时有助于缓解网络的过负载状况,在发生不可靠传输时接收端解码图像能平均提高 1.2dB 的 PSNR.

2 基于小波 EBCOT 的图像编码算法

小波 EBCOT 是最新静态图像压缩标准 JPEG2000 的核心算法.在此之前,基于小波的图像压缩编码还包括 Shapiro 的 EZW(Embedded Zero-tree Wavelet Compression)^[2]算法、Said 和 Pearlman 的 SPIHT (Set Partitioning in Hierarchical Trees)^[3]算法、Taubman 和 Zakhor 的 LZC(Layered Zero Coding)^[4]算法.与它们相类似,EBCOT 也是用小波变换进行子带采样,然后对小波系数进行量化和编码。

在 EBCOT 算法中^[1,5],将离散小波变化后的每一个系数子带都分解成更小的子块——编码块(例如 64×64),并对每一个编码块 B_i 进行独立编码产生基本码流 C_i , C_i 可根据需要取不同的长度 $L_i(x)$.假定编码块 B_i 的失真为 $D_i(x)$,最终压缩数据的长度为 L_{\max} ,则每一个编码块的截断点可以自

由选择,只需满足 $\sum L_i(x) \leq L_{\max}$ 即可.如果用所有编码块的失真之和来表示重建图像的失真,即 $D = \sum D_i(x)$,因为 C_i 的截断点可以在相对应的编码块 B_i 压缩完成后根据 $D_i(x)$ 或者 D 进行,所以称为“压缩后率失真优化”(Post-Compression Rate-Distortion Optimization, PCRDOpt)算法^[5].最终的压缩数据由各个编码块的码流 C_i 组成封包流(Packstream),每一个编码块都在一个固定的分辨率上,从而这种简单的封包形式具有“分辨率可伸缩性”.同时,因为每一个编码块只影响图像的一个区域,所以此封包形式还具有一定的“空间可伸缩性”.另外,小波 EBCOT 通过质量层结构编码实现了数据流“SNR 失真率可伸缩”的目标,从而可以实现 IP 网络分层传输的服务.如图 1 所示,每一个质量层 Q_i 由不同编码块的一部分码流组成,并且编码块在某一层中码流可为零(例如在 Q_1 中就不包含 B_3 的位流).当基于小波 EBCOT 的编码视频流在 IP 网络上传输时,可根据用户的不同要求,分层传输分辨率可分级、空间可分级、SNR 可分级任意组合的数据分组报文.出于通用和示例的目的,本文仅着重讲解 SNR 可分级的视频流在 IP 网络上的传输控制策略。

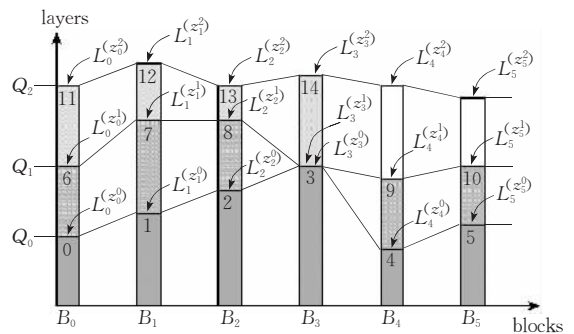


图 1 小波 EBCOT 编码码流结构图

3 当前 IP 网络可用带宽估计及状态判断

IP 网络的实际工作状态相当复杂,在构造数学模型的基础上可以用两个参数来做定性分析:(1)丢包率 P_L (Packet Loss Rate);(2)环回时间 RTT (Round-Trip Time).首先,当 IP 网络路由器或网关检测到网络拥塞时,会丢弃超出当前带宽资源的数据报文,并且 Internet 的不可靠传输(特别在无线网络中)也会导致数据的不可靠接收或者丢失;其次,网络拥塞时数据的环回时间会加长.因此,依据 P_L 和 RTT 的综合分析可以对当前可利用的 IP 网络带宽资源做

出准确的估计。

本文用 Gilbert-Elliot 模型来分析 IP 网络的丢包率 P_L , 这也是一种两状态 Markov 模型, 如图 2 所示。显然, 任何时刻网络都处于好 (G) 或坏 (B) 两状态之一。在 G 状态, 信道误码率 (P_G) 较低, 而在 B 状态, 信道误码率 (P_B) 较高。状态之间的转换概率可以计算如下:

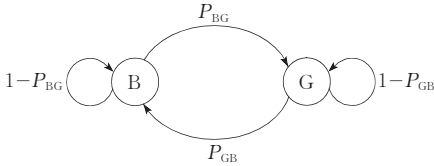


图 2 Gilbert-Elliot 模型

$$P_{BG} = \frac{n_{BG}}{n_B}, \quad P_{GB} = \frac{n_{GB}}{n_G}.$$

其中 n_B 表示测试时间序列内处于状态 B 的次数; n_G 表示测试时间序列内处于状态 G 的次数; n_{BG} 表示测试时间序列内状态变换组合 B→G 出现的次数; n_{GB} 表示测试时间序列内状态变换组合 G→B 出现的次数。从而, 稳态丢包率可定义如下:

$$P_L = \pi_B = \frac{P_{GB}}{P_{BG} + P_{GB}} = \frac{n_B n_{GB}}{n_B n_{GB} + n_G n_{BG}} \quad (1)$$

对 IP 网络数据报文环回时间 RTT 的估计可以采用如下公式:

$$RTT = \alpha \times \overline{RTT} + (1 - \alpha) \times (now - ST1 - \Delta T) \quad (2)$$

其中 \overline{RTT} 表示当前分组环回时间, now 为发送方收到应答报文的时刻, $ST1$ 为数据被发送的时刻, ΔT 是接收方对报文分组的处理时间, α 是加权系数, 通常设定为 0.875。

综合丢包率 P_L 和分组环回时间 RTT 的作用, 可以估算当前可得到的带宽资源为

$$\left\{ \underbrace{L_0^{(z_0^0)}, L_1^{(z_1^0)}, L_2^{(z_2^0)}, \dots, L_n^{(z_n^0)}}_{Q_0}, \underbrace{L_0^{(z_1^1)}, L_1^{(z_1^1)}, L_2^{(z_2^1)}, \dots, L_n^{(z_n^1)}}_{Q_1}, \dots, \underbrace{L_0^{(z_0^{m-1})}, L_1^{(z_1^{m-1})}, L_2^{(z_2^{m-1})}, \dots, L_n^{(z_n^{m-1})}}_{Q_{m-1}} \right\},$$

其中 n 为一帧图像内编码块的数目, $m \rightarrow \infty$ 为压缩数据分组的层数。接收端参与解码的层数越多, 恢复的图像质量越高, 并且各质量层重要性满足:

$$I(Q_0) > I(Q_1) > I(Q_2) > \dots > I(Q_{m-1}) \quad (4)$$

为了便于分析及保证算法的通用性, 假设小波 EBCOT 编码码流各质量层码流长度相等, 即

$$\begin{cases} L(Q_0) = L(Q_1) = L(Q_2) = \dots = L(Q_{m-1}) = L_{\text{const}} \\ \sum_{i=0}^{m-1} L(Q_i) = L_{\text{max}} \end{cases}$$

取 IP 网络带宽变化范围为 $W \in [W_{\min}, W_{\max}]$, 即最坏情况下网络可利用带宽为 W_{\min} , 最好情况下网络可利用带宽为 W_{\max} 。在 AUPLP 工作的初始条件

$$W_{\text{cur}} = \frac{\text{Const}}{RTT + \sqrt{P_L}} \quad (3)$$

这里的 Const 为常数, 通常依据接收方采取的应答方式取为 1.22 或者 1.31^[6]。

假设式(3)中三个物理量的变化分别为 ΔW_{cur} , ΔRTT 和 ΔP_L , 则如下方程组成立:

$$\begin{cases} \Delta W_{\text{cur}}^{RTT} = \frac{\partial W_{\text{cur}}}{\partial RTT} \Delta RTT = -\frac{1}{(RTT + \sqrt{P_L})^2} \Delta RTT \\ \Delta W_{\text{cur}}^{P_L} = \frac{\partial W_{\text{cur}}}{\partial P_L} \Delta P_L = -\frac{1}{2(RTT + \sqrt{P_L})^2 \sqrt{P_L}} \Delta P_L \\ \Delta W_{\text{cur}} = \Delta W_{\text{cur}}^{RTT} + \Delta W_{\text{cur}}^{P_L} \end{cases}$$

其中 $\Delta W_{\text{cur}}^{RTT}$ 表示由于 ΔRTT 引起的带宽变化量, $\Delta W_{\text{cur}}^{P_L}$ 表示由于 ΔP_L 引起的带宽变化量。从而当前网络状态可以判断如下:

(1) 当 $W_{\text{cur}} \downarrow$ 时, 如果 $|\Delta W_{\text{cur}}^{RTT}| \geq |\Delta W_{\text{cur}}^{P_L}|$, 网络处于拥塞状态; 如果 $|\Delta W_{\text{cur}}^{RTT}| < |\Delta W_{\text{cur}}^{P_L}|$, 则网络处于不可靠传输状态。

(2) 当 $W_{\text{cur}} \uparrow$ 时, 如果 $|\Delta W_{\text{cur}}^{RTT}| \geq |\Delta W_{\text{cur}}^{P_L}|$, 与不可靠传输因素相比较而言, 网络的拥塞状况有所缓解; 如果 $|\Delta W_{\text{cur}}^{RTT}| < |\Delta W_{\text{cur}}^{P_L}|$, 同上一次可利用带宽的估算相比, 网络的不可靠传输 (比如误码率) 有所改善。

4 网络传输控制策略

综合前面的分析, 本文通过一种新颖的自适应不等重丢包保护 (AUPLP) 策略来实现小波 EBCOT 编码码流在 IP 网络的传输控制。

理论上讲小波 EBCOT 编码码流可以包含任意数目的质量层, 表示为

中, 预设一个标准带宽 W_{std} , 当利用这一资源传送小波 EBCOT 编码码流分组数据时, 接收端可以得到满足正常要求的解码重建图像, 其传输层数为 m_{std} , 显然有 $W_{\text{std}} \in [W_{\min}, W_{\max}]$ 。

AUPLP 根据式(3)估算出当前可利用网络带宽 W_{cur} , 在 $W_{\text{cur}} > W_{\text{std}}$ 时, 以一个传输层 (也就是质量层) 为单位通过多传或少传来适应网络带宽的时变、起伏; 在 $W_{\text{cur}} \leq W_{\text{std}}$ 时, 根据对网络处于拥塞状态还是不可靠传输状态的判断, 通过前向纠错编码 FEC (Forward Error Coding) 提高重要层数据保护力度及增加、减少传输层等几种方法自适应组合的处理方法, 在适应网络带宽变化的同时, 尽可能提高

数据传输的抗误码及鲁棒性能. 为了定性分析当前可利用网络带宽的变化量, 将 $[W_{\min}, W_{\max}]$ 分成一个个的小区间, 在 $(W_{\text{std}}, W_{\max}]$ 内区间的划分宽度为 L_{const} , 即

$$\text{Sect}^H(i) = (W_{\text{std}} + i \times L_{\text{const}}, W_{\text{std}} + (i+1) \times L_{\text{const}}],$$

其中 $i=0, 1, \dots, S_{\text{num}}^H - 1$, 区间数目 $S_{\text{num}}^H = \left\lceil \frac{W_{\max} - W_{\text{std}}}{L_{\text{const}}} \right\rceil_{\text{int}}$,

$\lceil g \rceil_{\text{int}}$ 表示取大于并最靠近 g 的整数的运算; 在 $[W_{\min}, W_{\text{std}})$ 内划分 m_{std} 个区间, 则区间跨度为 $\text{Sect}^L_{\text{step}} = \frac{W_{\text{std}} - W_{\min}}{m_{\text{std}}}$, 区间表示为

$$\text{Sect}^L(j) = [W_{\min} + j \times \text{Sect}^L_{\text{step}}, W_{\min} + (j+1) \times \text{Sect}^L_{\text{step}}),$$

这里 $j=0, 1, \dots, m_{\text{std}} - 1$. 定义 t 为表示时间段的自变量, $f(t)$ 为第 t 个时间段传输的层数, $FEC(t)$ 为第 t 个时间段传输层中受 FEC 纠错保护的层数, 显然 $f(t) \geq FEC(t)$ 成立. 具体算法描述如下:

$$\left\{ \underbrace{L_0^{(z_0^0)}, L_1^{(z_1^0)}, L_2^{(z_2^0)}, \dots, L_n^{(z_n^0)}}_{Q_0}, \underbrace{L_{\text{const}} + L_{\text{FEC}}}_{Q_1}, \dots, \underbrace{L_{\text{const}} + L_{\text{FEC}}}_{Q_{FEC(t)-1}}, \dots, \underbrace{L_{\text{const}}}_{Q_{f(t)-2}}, \underbrace{L_{\text{const}}}_{Q_{f(t)-1}} \right\}$$

其中 L_{FEC} 表示码长为 L_{const} 的一个传输层经过 FEC 纠错编码后增加的冗余部分的长度, 则总的码流长度 (对应于传输所需的网络带宽资源) 为

$$L(t) = FEC(t) \times L_{\text{FEC}} + f(t) \times L_{\text{const}}.$$

5 仿真结果及分析

从上面的算法分析知道, 本文提出的 AUPLP 策略不仅可以提高数据传送的抗误码性能、鲁棒性, 并且由于其根据估计到的可利用带宽资源实时调节发送速率, 因此能适时有效缓解网络的拥塞程度. 我们通过软件仿真对算法的有效性 & 性能做了测试, 测试对象采用标准 512×512 的灰度图像 Lena. 由于小波 EBCOT 编码后生成的码流的重要性不同 (表示排序信息的比特要比表示小波系数值信息及符号信息的比特重要), 即使每组码流中产生的错误比特数相同且每个比特具有相同的错误概率, 在不同重要性位置上的比特发生的错误都将会给接收方重建图像的质量造成不同程度的影响^[7], 因此以下所有参数都是以概率最大的解码结果为准.

图 3 所示为本文 AUPLP 方法的仿真结果, 其中小波 EBCOT 压缩 8 倍, 编码块为 64×64 , 取 $m=16$ 且 $m_{\text{std}}=12$, 我们在率失真优化及质量层等长两个约束条件下选取压缩码流的传输层截断点, 从而实现 $L_{\text{const}}=16384\text{bits}$, FEC 纠错编码选用速率为 $3/4$ 及 $4/9$ 的 RCPC 码^[7], 交织深度为 80 时, 假定 $\Delta RTT=0$

1. 根据式(1), (2), (3) 分别计算 $P_L(t)$, $RTT(t)$ 和 $W_{\text{cur}}(t)$;
 2. 如果 $W_{\text{cur}}(t) \geq W_{\text{std}}$ 且 $W_{\text{cur}}(t) \in \text{Sect}^H(i)$, 取 $f(t) = m_{\text{std}} + i$ 且 $FEC(t) = 0$;
 3. 如果 $W_{\text{cur}}(t) < W_{\text{std}}$ 且 $\Delta W_{\text{cur}}(t) < (-1) \times \text{Sect}^L_{\text{step}}$, 当 $|\Delta W_{\text{cur}}^{RTT}(t)| > |\Delta W_{\text{cur}}^{PL}(t)|$ 时, 取 $f(t) = f(t-1) - 1$ 且 $FEC(t) = FEC(t-1)$; 当 $|\Delta W_{\text{cur}}^{RTT}(t)| \leq |\Delta W_{\text{cur}}^{PL}(t)|$ 时, 取 $f(t) = f(t-1) - 1$ 且 $FEC(t) = FEC(t-1) + 1$, 受 FEC 保护层数的增加是沿着式(4)表示的传输层重要性顺序的方向;
 4. 如果 $W_{\text{cur}}(t) < W_{\text{std}}$ 且 $\Delta W_{\text{cur}}(t) > \text{Sect}^L_{\text{step}}$, 当 $\Delta W_{\text{cur}}^{RTT}(t) > \Delta W_{\text{cur}}^{PL}(t)$ 时, 取 $f(t) = f(t-1) + 1$ 且 $FEC(t) = FEC(t-1)$; 当 $\Delta W_{\text{cur}}^{RTT}(t) \leq \Delta W_{\text{cur}}^{PL}(t)$ 时, 取 $f(t) = f(t-1)$ 且 $FEC(t) = FEC(t-1) - 1$, 受 FEC 保护层数的减少是沿着式(4)表示的传输层重要性顺序的反方向;
 5. 回到步骤 1 开始下一个时间段的传输控制.
- 据此, 任意 t 时刻的传送数据分组表示如下:

时 P_L 变化而引起 W_{cur} 变化, 此时 $L_{\text{FEC}} = 5462\text{bits}$. 假定在带宽为 W_{std} 时传输完 m_{std} 层数据所需的时间为 Δt_{std} , 则图 3 中横坐标表示该时间段内网络能提供的传输总流量. 为了比较, 我们将文献[8]中的不等重错误保护 (Unequal Error Protection, UEP) 方法应用到小波 EBCOT 中, 实验结果曲线如图 3 中所示. 比较发现, 本文算法比单纯的小波 EBCOT 有平均 1.2dB 的编码增益, 在可利用带宽较高时, 本文 AUPLP 方法的抗误码性能接近 UEP 方法, 而在可利用带宽较低时, AUPLP 性能明显优于 UEP 方法. 这是因为此种实验条件下 AUPLP 根据对 W_{cur} 的估计, 通过丢弃不重要的传输层来提高 FEC 纠错编码可利用的冗余, 同时缓解网络拥塞情况, 改善由于 IP 网络路由器或网关的丢弃导致的丢包率, 因此码流整体的抗误码性能要优于仅作纠错编码保护、没

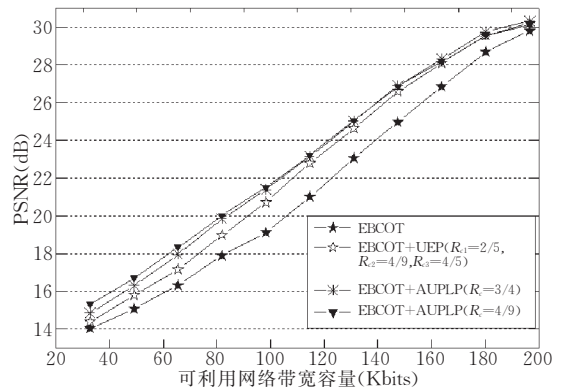


图 3 Lena 图像软件测试结果

有改善丢包率的 UEP 方法. 特别的, 网络拥挤时服务器端固定码流的输出会导致拥塞更加严重, 从而丢包率更大; 当路由器或网关端待发送数据报文越多时,

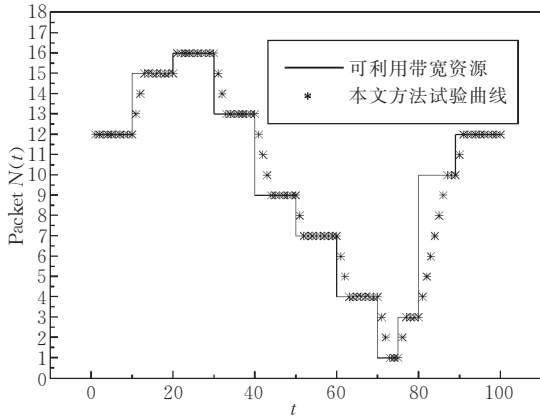


图 4 采用本文方法时发送端缓冲区中待发送数据分组数目

RTT 就越大, 而实时减少待发送的数据, 会使 RTT 逐渐降低到正常情况.

假定可利用带宽资源沿时间自变量的函数满足泊松分布, 我们根据软件测试结果绘制出了采用本文方法时发送端缓冲区中等待发送的分组数据 (也就是传输层) 数目 $\text{Packet } N(t)$ 的时间统计变化图, 如图 4 示. 这里的横坐标单位为 Δt_{std} , 图中的网络可利用带宽资源曲线是用小节 4 中区间段表示的一组满足泊松分布的假想数据, 叠加到该图上只是为了作曲线形状比较. 显然, 采用本文方法时视频流传送速率能实时适应网络带宽的时变、起伏, 从而在拥塞时有效缓解网络过载状况, 但同时可以看出, 由于本文 AUPLP 方法是逐层控制的, 因此对网络带宽剧烈变化的响应还不够迅速. 图 5 所示为不同方法在相同试验条件下 RTT 和 P_L 均有变化时的一组图像.



(a) EBCOT (25.56dB)



(b) EBCOT+UEP (26.20dB)



(c) EBCOT+AUPLP (27.03dB)

图 5 不同方法的解码端重建图像

6 结 论

本文提出了一种基于小波 EBCOT 的图像 IP 网络传输控制策略, 其采用基于小波 EBCOT 的压缩编码, 并对编码后的比特流在其原有质量层的基础上依据重要性分层打包传输, 通过对当前网络可用带宽的估计及信道状态的判断, 区分网络拥塞及不可靠传输两种不同情况进行自适应不等重丢包保护 AUPLP. 在网络数据拥塞时, 通过少传甚至不传非重要的数据层 (图像的高频分量) 来降低服务器端等待传输的视频流速率; 当发生不可靠传输时, 在不传非重要图像层的同时通过纠错编码增强对小波 EBCOT 编码后码流中重要数据层的保护力度. 试验证明本文方法可以大大增强网络视频流业务中经过小波 EBCOT 编码后数据的鲁棒性及抗误码能力, 在发生数据拥塞时有助于缓解网络的过载状

况, 在发生不可靠传输时接收端解码图像能平均提高 1.2dB 的 PSNR.

由于 IP 网络上多种业务并存, 不同协议的数据报文之间应该公平竞争、占用当前可利用网络带宽. 而本文方法依据 RTT , P_L 估计出的是当前总的可利用资源, 为了不因图像数据的传输影响网络上的其他业务 (如 HTTP, FTP 等), 更进一步的研究重点应该放在 AUPLP 与具有 TCP 友好特性的传输协议相结合的传输控制策略上.

参 考 文 献

- 1 Martin Bolek. JPEG 2000 part I final draft international standard (corrected and formatted). ISO/IEC JTC1/SC29 WG1, 2000
- 2 Shapiro J. M. Embedded image coding using zerotree of wavelet coefficients. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(12): 3445~3462

- 3 Said A. , Pearlman W. . A new, fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees. *IEEE Transactions on Circuit and System for Video Technology*, 1996, 6(3): 234~250
- 4 Taubman D. , Zakhor A. . Multi-rate 3-D subband coding of video. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1994, 9(3): 572~588
- 5 Taubman D. . High performance scalable image compression with EBCOT. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 15(4): 1158~1170
- 6 Zhang Qian, Zhu Wen-Wu, Zhang Ya-Qin. Resource allocation for multimedia streaming over the internet. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2001, 9(3): 339~355
- 7 Xiao Song, Wu Cheng-Ke, Chen Jun. A new adaptive UEP method of progressive image over noisy channel. *Chinese Journal of Electronics*, 2002, 7(11): 322~326
- 8 Alatan A. Aydin, Zhao Min-Yi, Ali N. Akansu. Unequal error protection of SPIHT encoded image bit streams. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, 2000, 18(6): 814~817



ZHANG Fang, born in 1977, Ph. D. candidate. His research interests include video compression and streaming video over the Internet.

WU Cheng-Ke, born in 1938, professor, Ph. D. supervisor. His research interests include image processing and communication, computer vision and computer graphics.

XIAO Song, born in 1977, Ph. D. candidate. Her research interests include image compression and joint source-channel coding.