

# Internet 多媒体分层组播 JSCC 差错控制率失真优化

胡 飞 朱耀庭 朱光喜

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)

**摘 要** 针对 Internet 多媒体群组通信中同时存在的带宽异构性和包丢失率异构性,文中将分层组播和接收者驱动的思想扩展到 FEC 差错控制中,提出一种分层 FEC 组播差错控制方法 LM-FEC. LM-FEC 通过不同的组播组发送信源编码层和各信源层的 FEC 校验数据,为接收者根据信道带宽和数据包丢失率实施差错控制提供更加灵活的选择.文中用 FH-MDP 模型描述接收者行为,通过 JSCC 率失真优化确定编码层内和编码层间的速率分配,JSCC 率失真优化采用变量替换和动态规划算法求解.实验表明,该文提出的差错控制方法能够有效改善重建多媒体信号的回放质量.

**关键词** Internet;多媒体通信;差错控制;分层组播;JSCC;率失真  
中图法分类号 TP393

## RD Optimization in JSCC-Based Error Control on Internet Multimedia Layered Multicast

HU Fei ZHU Yao-Ting ZHU Guang-Xi

(Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

**Abstract** Because of the heterogeneities of Internet, error control in multimedia multicast communications over the Internet is much more complicated than that in end-to-end context. Normally the bandwidth heterogeneity and packet loss rate heterogeneity in multimedia group communications based on IP multicast technology are studied separately. This paper aims at the concurrence of Internet heterogeneities of bandwidth and packet loss rate and presents a new error control scheme LM-FEC for Internet multimedia group communications, by combining the idea of layered multicast and receiver-driven into FEC-based error control technology. In LM-FEC, layered multimedia source packets and FEC verifying packets of each source layer are multicast by the sender in different groups, therefore the receiver can implement error control on a flexible receiver-driven way. According to the available bandwidth and packet loss rate of the channel, which may change dynamically, and the real-time requirement from multimedia information, the receiver enters into or quits from some of multicast groups to obtain the reconstruction multimedia information with quality as best as possible. In this way, LM-FEC deals with unitively the bandwidth heterogeneity and packet loss rate heterogeneity in Internet multimedia group communications. With the receiver-driven way, LM-FEC doesn't need any feedback information. Thus means no feedback channel is required and the feedback implosion problem to which feedback based error control scheme is prone can be avoided totally. Receiver's action determines the inter layers and intra layers rate allocation of the available bandwidth. In this paper, an FH-MDP model is used to describe receiver's action. Receiver decides its policy with JSCC rate-distortion optimization. The optimization is solved with variable alternation scheme and dynamic programming

algorithm. Simulative experiments are implemented to evaluate the performance of LM-FEC compared with PET and RLM in Internet multimedia multicast communications. The results show considerable gains on reconstructed video quality can be obtained with LM-FEC.

**Keywords** Internet; multimedia communications; error control; layered multicast; JSCC; rate-distortion

## 1 引言

采用 IP 组播技术的多媒体群组通信逐渐成为 Internet 中的一类重要应用. 由于 Internet 只提供尽力(best-effort)传输服务,数据包丢失不可避免<sup>[1]</sup>. 而多媒体信息具有严格的实时性要求,对丢失非常敏感<sup>[2]</sup>,TCP 协议并不适合于多媒体信息传输的差错控制. 对于拥有多个成员的多媒体群组通信,成员异构性问题使得差错控制更加复杂.

Internet 群组通信成员异构性是由 Internet 的开放性所决定的,主要表现为带宽异构性和包丢失率异构性. 由 McCanne 提出并应用于 RLM 协议的接收者驱动分层编码(Receiver-driven Layered Coding)技术<sup>[3]</sup>是现有多媒体群组通信系统处理 Internet 带宽异构性的基本方法. 这种方法将多媒体信息编码为多个信源层,每个信源层通过不同的组播组发送. 接收者主动选择加入或退出其中的一个或几个组播组,最佳地利用可得带宽.

对于 Internet 多媒体组播通信差错控制,早期的 MBONE 工具(如网络视频工具 nv)只采用了简单的信源容错编码,未考虑丢失数据包的恢复. LVMR<sup>[4]</sup>,STORM<sup>[5]</sup>,TMTP<sup>[6]</sup>等协议采用了基于自动请求重传(Automatic Repeat reQuest,ARQ)的差错控制机制,这类方法容易引起请求风暴,而且要引入至少一个 RTT 的时延. PET<sup>[7]</sup>方法将前向纠错(Forward Error Correction,FEC)编码引入分层组播,通过采用不同参数的 FEC 编码为不同的信源层进行区分保护,在解决带宽异构性的同时提供一定的差错控制能力. 但由于每个层的 FEC 参数固定,PET 未能很好地解决包丢失率异构性问题. 本文借鉴 PET 的思想,将分层组播和接收者驱动的思想进一步扩展到 FEC 差错控制中,以统一解决 Internet 多媒体群组通信中的带宽异构性和包丢失率异构性问题.

差错控制通过恢复丢失数据包降低了多媒体信息的失真,但同时又由于占用信源数据的可用带宽而使得多媒体信息的失真度增加. 基于率失真的联

合信源信道编码(Joint Source-Channel Coding, JSCC)通过优化信源编码和信道编码速率分配使接收者信号失真最小化. 文献[8,9]研究了单播多媒体通信中的 JSCC 速率分配率失真优化问题;在文献[10]中,Chande 等将接收者行为描述为有限阶段马尔可夫决策过程(Finite Horizon Markov Decision Process,FH-MDP);文献[9]和文献[11]分别描述了一种 JSCC 速率分配优化估计算法和动态规划算法. 这些文献研究的都是单播中的速率分配问题. 而在组播环境中,JSCC 速率分配优化不仅要确定编码层内(Intra-layer)的 JSCC 速率分配,而且还要确定编码层间(Inter-layer)的速率分配. 本文的研究工作将上述文献的部分思想扩展到组播通信领域.

针对 Internet 多媒体群组通信中的带宽异构性和包丢失率异构性问题,本文将分层组播和接收者驱动的思想扩展到差错控制中,提出一种分层 FEC 组播(Layered Multicast FEC,LM-FEC)差错控制方法. 通过将分层的源数据包和各层的 FEC 校验数据包以不同的组播组发送,为接收者进行差错控制提供更加灵活的选择. 接收者根据信道可用带宽和数据包丢失率,通过 JSCC 率失真优化计算,确定加入哪些源数据组播组和 FEC 校验数据组播组,选择的结果即决定了编码层内的速率分配和编码层间的速率分配. 接收者行为用 FH-MDP 模型描述. JSCC 率失真优化通过对 FH-MDP 过程采用变量替换和动态规划算法求解最优策略实现. 实验结果表明,相对于 RLM 和 PET,LM-FEC 能够分别获得 2.5~8dB 和 0.8~1.4dB 的信号质量改善.

## 2 LM-FEC 差错控制模型

借鉴 PET 为分层组播提供 FEC 保护的思想,本文将分层组播和接收者驱动的思想扩展到差错控制中,提出分层 FEC 组播(LM-FEC)差错控制方法,以统一解决 Internet 群组通信中的带宽异构性和包丢失率异构性问题.

本文采用嵌套信源分层编码,即只有低层数据存在,才能对上一层解码,同时每一层都进一步降低

解码失真. 文献[12, 13]分别描述了音/视频嵌套分层编码. 本文假设一段多媒体信号分层编码后得到的数据包组成一个信源编码块 SCB(Source Coding Block), SCB 中的第  $l$  个数据包对应第  $l$  个信源编码层,  $l=1, 2, \dots, L$ .

信道编码采用数据包层 FEC 编码实现. 信道编码对各个信源编码层独立进行. 每个信源编码层被分割为长度相同的块, 每个块包含  $K$  个源数据包, 即  $K$  个 SCB 在该层的数据包. 然后对每个块通过参数为  $(N, K)$  的 FEC 编码得到  $N-K$  个校验数据包. 源数据包与 FEC 数据包一起组成信道编码块(Channel Coding Block, CCB). FEC 编码长度  $N$  由所有接收者所需的最大冗余量决定, 不同层的  $N$  取值可以不同.

图 1 描述了分层 FEC 组播模型. 在组播发送方, 信源数据的分层组播与 McCanne 的方法类似. 每一信源编码层  $l$ , 即所有 SCB 的第  $l$  个数据包用一个组播流发送. 同时, 对应于每个信源编码层  $l$ , 每个 CCB 的每一个 FEC 数据包也用一个单独的组

播组发送, 同层的 CCB 的相同层的 FEC 数据包组成一个组播流. 这样每个源数据层对应于  $N-K$  个 FEC 校验层. 由于接收者进行差错检测并实施差错控制需要一定的时间, 各 FEC 数据包层的组播发送分别以递增的时延滞后于源数据包层, 延迟周期称为时段, 以 SCB 时间长度为单位.

在组播接收方, 接收者可以根据所拥有信道的可用带宽和数据包丢失率, 选择接收全部信源数据层的一部分以及属于所接收的信源数据层的任何一个或多个 FEC 校验层. 如果接收者发现源数据包丢失发生, 它可以通过加入(并很快退出)传输延迟一个时段的 FEC 校验数据包的组播组来接收校验数据包, 以恢复丢失的源数据包. 如果未正确收到足够的 FEC 数据包, 该接收者加入传输进一步延迟了一个时段的 FEC 数据包的组播组, 以再次接收或获得更多的校验数据包. 如此进行下去, 直到恢复丢失数据包或超时为止. 图 1 中, 时段数  $D=2$ , 每个 CCB 包含  $K=2$  个源数据包和  $N-K=2$  个校验数据包, 每个校验数据包被依次延迟一个时段发送.

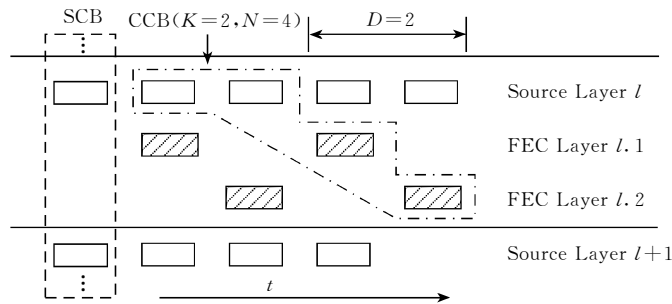


图 1 LM-FEC 差错控制模型

### 3 FH-MDP 模型

接收者决定加入哪些源数据组播组和校验数据组播组的控制过程称为策略. 依赖于信道参数的动态性, 接收者策略是一个随机过程. 借鉴文献[10]的方法, 本节用 FH-MDP 模型描述接收者行为. MDP 是一种序贯无后效性马尔可夫决策过程<sup>[14]</sup>. 一个具有有限阶段  $D$  的 MDP 是一个  $D$  步转移的随机过程, 每一步具有多个可能的状态, 每个状态受某种行动  $a$  影响, 以概率向下一状态转移. 所有阶段的行动组成策略.

在 LM-FEC 中, 设策略向量  $\pi = \{\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_{l-1}\}$ , 其中  $\pi_l$  为第  $l$  层的策略分量.  $\pi_l$  由各个阶段的行动组成:  $\pi_l = \{a'_0, a'_1, \dots, a'_{D-1}\}$ . 对于第  $l$  层的一个

CCB, 设接收者状态  $T^l = \{s, v, d\}$ , 其中  $s$  为收到的源数据包数目,  $v$  为 FEC 校验数据包数目,  $d$  为所处的决策时段数. 初始状态下,  $s=v=d=0$ ; 在每个决策时段  $d=0, 1, \dots, D-1$  的开始, 接收者可以采取行动  $a'_d$ , 通过加入一定数量的组播组, 接收  $a'_d$  个数据包. 接收者所采取的每个行动都将影响接收者状态  $T^l$ , 使之以一定概率向下一状态转移, 直至最终状态. 策略分量  $\pi_l$  确定了分层 FEC 组播中的层内 JSCC 速率分配, 而策略向量  $\pi$  决定着层间的速率分配.

### 4 率失真分析

在 LM-FEC 中, 策略向量  $\pi$  决定总的传输速率  $R(\pi)$  和信号失真  $D(\pi)$ . 为简洁起见, 我们用数据包数表示传输速率. 各层的传输速率  $R_l$  由策略分量  $\pi_l$

确定,显然,

$$R(\boldsymbol{\pi}) = \sum_l R_l = \sum_l \sum_d a_d^l \quad (1)$$

但由于采用嵌套分层编码,信号失真  $D(\boldsymbol{\pi})$  不能类似直接分解为各层信号失真  $D_l$  的线性和。

本文假设所有数据包丢失是相互独立过程<sup>①</sup>, 包丢失概率为  $\epsilon$ ; 设层  $l$  经过 FEC 编码保护和有丢失的传输后到达接收端时残余丢失率为  $\epsilon_l$ 。在策略  $\pi_l$  下,接收者参与接收第  $l$  层的源数据包和校验数据包数的和为  $R_l$ ,其取值可为  $0, K, K+1, \dots, K+N$ 。设一个参数为  $(R_l, K)$  的 CCB 中能够正确到达接收端的源数据包期望数为  $M(R_l, K)$ :

当  $R_l=0$  时,接收者不参与接收层  $l$  的数据,  $M(R_l, K)=0$ ;

$$\text{当 } R_l \geq K \text{ 时, } M(R_l, K) = \sum_{i=0}^{R_l} \binom{R_l}{i} \epsilon^{R_l-i} (1-\epsilon)^i \cdot M(R_l, K|i), \text{ 这里 } M(R_l, K|i) = \begin{cases} K, & i \geq K \\ iK/R_l, & i < K \end{cases}.$$

因此可以得到  $\epsilon_l = 1 - M(R_l, K)/K$ 。

在采用嵌套分层编码的 LM-FEC 中,如果某个 SCB 的层  $l$  的源数据包或者任意一个低层的源数据包丢失,因包含的多媒体信息不能够被正确解压,该源数据包等同于丢失,即其丢失概率期望为  $E \prod_{l'=0}^l (1-\epsilon_{l'})$ 。层  $l$  的源数据包丢失将导致信号失真增加一个随机量  $\Delta d^l$ 。由于随机量  $\Delta d^l$  独立于数据包丢失过程,增加的失真期望为  $E \left( 1 - \prod_{l'=0}^l (1-\epsilon_{l'}) \right) \times D_l$ , 这里  $D_l = E \Delta d^l$ 。至此我们可以得到,当给定策略向量  $\boldsymbol{\pi}$  时,每个 SCB 的失真期望为

$$D(\boldsymbol{\pi}) = \sum_l \left( 1 - \prod_{l'=0}^l (1-\epsilon_{l'}) \right) \times D_l \quad (2)$$

## 5 策略优化

在给定可用信道带宽的条件下,最优策略应该使接收者信号失真最小。由上节分析,对于给定的策略向量,可以得到相应的传输速度和失真期望。我们通过拉格朗日函数进行策略优化,使失真期望在传输速率受限的前提下最小化,也即求解一个最优策略向量  $\boldsymbol{\pi}$ , 使拉格朗日函数  $J(\boldsymbol{\pi}) = D(\boldsymbol{\pi}) + \lambda R(\boldsymbol{\pi})$  最小。

由式(1)和(2),

$$J(\boldsymbol{\pi}) = D(\boldsymbol{\pi}) + \lambda R(\boldsymbol{\pi}) = \sum_l \left[ \left( 1 - \prod_{l'=0}^l (1-\epsilon_{l'}) \right) D_l + \lambda R_l \right] \quad (3)$$

### 5.1 变量替换

我们采用多变元最小化问题中的变量替换法<sup>[15]</sup>

迭代求解最优策略向量,每次只保留一个变量而固定其他所有变量为常量,使目标函数  $J(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_L)$  最小化,循环进行直至收敛。过程如下:

设  $\boldsymbol{\pi}^{(0)}$  为策略向量的一个任意的初始值,  $\boldsymbol{\pi}^{(t)} = (\pi_1^{(t)}, \pi_2^{(t)}, \dots, \pi_L^{(t)})$  为第  $t$  ( $t=1, 2, \dots$ ) 步策略向量。在第  $t$  步,对于  $l \neq l_t$ , 使  $\pi_l^{(t)} = \pi_l^{(t-1)}$ ; 对唯一的变量元素  $\pi_{l_t}^{(t)}$  进行优化,由式(3)有

$$\begin{aligned} \pi_{l_t}^{(t)} &= \arg \min_{\pi_{l_t}} J(\pi_1^{(t)}, \dots, \pi_{l_t}^{(t)}, \pi_l, \pi_{l+1}^{(t)}, \dots, \pi_L^{(t)}) \\ &= \arg \min_{\pi_{l_t}} S_l^{(t)} \epsilon_l + \lambda R_l, \end{aligned}$$

其中,  $S_l^{(t)} = \sum_{l'=l}^l \prod_{l' \neq l}^{l'} (1-\epsilon_{l'}^{(t)}) D_{l'}$ , 其值为常量。

由于  $J(\boldsymbol{\pi})$  非递增而且存在下确界,因此可以保证上述迭代最终收敛。实际应用中总层数  $L$  取值往往不是太大,迭代的次数通常是可以接受的,这一点通过文献[9]和本文实验得到证实。策略分量  $\pi_l$  的优化可用动态规划方法实现。

### 5.2 动态规划

对于层  $l$  一个给定的 CCB, 设  $M_{\pi_l}$  为在策略  $\pi_l$  下恢复的源数据包期望数;  $N_{\pi_l}$  为在策略  $\pi_l$  下参与接收的数据包期望数。由于  $\epsilon_l = (K - M_{\pi_l})/K$ , 并且  $R_l = N_{\pi_l}$ , 最小化  $J(\pi_l) = S \epsilon_l + \lambda R_l$  等价于最小化  $\tilde{J}_{\pi_l} = -S M_{\pi_l} + \lambda N_{\pi_l}$ 。策略  $\pi_l$  作用于接收者状态  $T = (s, v, d)$  等价于对该状态采取行动  $a_T^l = \pi_l(T)$ 。设状态  $T$  在策略  $\pi_l$  影响下转移到下一状态  $T' = (s', v', d')$ ,  $P(T'|T, \pi_l)$  为转移概率。设  $\Delta M(T'|T, \pi_l)$  为转移过程中恢复的源数据包数,可以得到

$$\Delta M(T'|T, \pi_l) = \begin{cases} K - s, & s + v < K, s' + v' \geq K \\ s' - s, & \text{其它} \end{cases};$$

设  $\Delta N(T'|T, \pi_l)$  为转移过程中参与接收的数据包数,显然

$$\Delta N(T'|T, \pi_l) = a_T^l.$$

再设  $M_{\pi_l}(T)$  为在策略  $\pi_l$  下从状态  $T$  开始恢复源数据包的期望数,  $N_{\pi_l}(T)$  为在策略  $\pi_l$  下从状态  $T$  开始参与接收的数据包的期望数。当  $T = (s, v, d)$  为最终状态时 ( $d = D-1$ ),  $M_{\pi_l}(T) = N_{\pi_l}(T) = 0$ ; 当  $T$  为非最终状态时 ( $d \neq D-1$ ):

$$M_{\pi_l}(T) = \sum_{T'} P(T'|T, \pi_l) [\Delta M(T'|T, \pi_l) + M_{\pi_l}(T')],$$

$$N_{\pi_l}(T) = \sum_{T'} P(T'|T, \pi_l) [\Delta N(T'|T, \pi_l) + N_{\pi_l}(T')],$$

令  $\tilde{J}_{\pi_l}(T) = -S M_{\pi_l}(T) + \lambda N_{\pi_l}(T)$ ,  $\Delta \tilde{J}(T'|T, \pi_l) = -S \Delta M(T'|T, \pi_l) + \lambda \Delta N(T'|T, \pi_l)$ , 当  $T$  为最

① 尽管有研究表明 Internet 中数据包丢失表现出长相关性,但由于多媒体信息传输具有周期性,而且在一个周期内数据包持续发送时间非常短,因此对于一个多媒体会话,可以认为包丢失过程是近似独立的。

终状态时,  $\tilde{J}_{\pi_l}(T)=0$ ; 当  $T$  为非最终状态时:

$$\tilde{J}_{\pi_l}(T) = \sum_{T'} P(T' | T, \pi_l(T)) \cdot [\Delta \tilde{J}(T' | T, \pi_l(T)) + \tilde{J}_{\pi_l}(T')]$$

由上式, 对每一个非最终状态  $T=(s, v, d)$ , 可以得到

$$\pi_l^*(T) = \arg \min_{\pi_l(T)} \sum_{T'} P(T' | T, \pi_l(T)) \cdot [\Delta \tilde{J}(T' | T, \pi_l(T)) + \tilde{J}_{\pi_l}(T')] \quad (4)$$

由式(4), 每个  $\pi_l^*(T)$  可以从最终状态递归计算得到. 其中  $P(T' | T, \pi_l(T))$  可以通过概率分析得到, 文中不再详述. 所有的  $\pi_l^*(T)$  (即  $a_{T'}^*$ ) 组成策略分量,  $\pi_l^*$  对所有的  $\pi_l$  和  $T$  均满足  $\tilde{J}_{\pi_l^*}(T) \leq \tilde{J}_{\pi_l}(T)$ . 对于初始状态  $T^0=(0, 0, 0)$ ,  $\tilde{J}_{\pi_l^*} \leq \tilde{J}_{\pi_l}$ , 因此  $\pi_l^*$  使得  $\tilde{J}_{\pi_l}$  最小, 即  $\pi_l^*$  为所求的最优策略分量.

## 6 实验分析

实验仿真了 Internet 中的视频分层组播通信. 实验以重建视频信号的峰值信噪比 PSNR 为评价指标, 通过与 RLM, PET 方法的对比, 检验了 LM-FEC 在包丢失率异构和带宽异构环境下的差错控制性能. 实验在 Red Hat Linux 6.2 平台上进行, 网络环境为 10M Ethernet.

实验所用视频源为 QCIF 格式的视频序列 foreman, 帧率 25fps, 长度为 400 帧. 分层编码采用 3D-SPIHT<sup>[12]</sup> 实现, 输出速率为 200Kbps, 总层数  $L$  为 16, 数据包大小为 1KB. RLM 不采用 FEC 编码保护, 接收者根据文献[3]描述的方法确定加入哪些组播组. PET 各层 FEC 参数采用文献[7]描述的动态规划优化算法计算得到,  $K=4, N$  最大取值为 8. 为保持与 PET 相同的时延性能, LM-FEC 参数取值为  $D=2, K=2$ , 对应的 FEC 参数为 (2, 2).

实验平台由三台计算机组成, 分别作为视频发送者、Internet 仿真机及视频接收者. 视频发送者对视频序列进行分层编码和 FEC 编码; Internet 仿真机转发组播数据包并仿真概率独立的包丢失行为; 视频接收者采用不同的差错控制方法对丢失的数据包进行恢复. 正确收到的视频数据包用文件记录下来, 视频信号的重建和失真分析最后以离线方式计算完成.

图 2 和图 3 分别描述了带宽为 50Kbps 和 150Kbps 的接收者在不同数据包丢失率下重建视频信号的失真度, 数据包丢失率分别取值为 5%, 10%, 15%, 20%. 实验结果表明, LM-FEC 能够明显改善重建视频信号质量. 相对于 RLM 和 PET, LM-FEC 的 PSNR 增益分别达到 2.5~8dB 和 0.8~1.4dB.

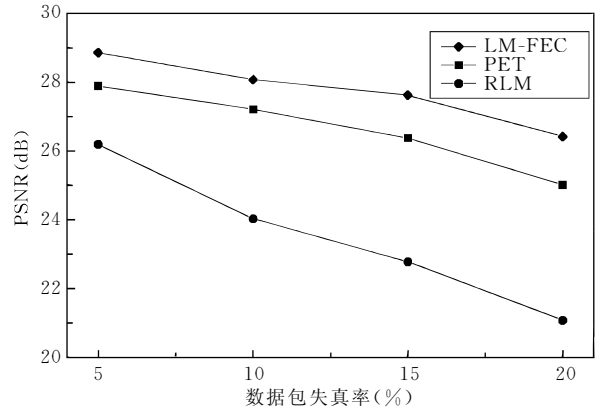


图 2 实验结果比较(50Kbps)

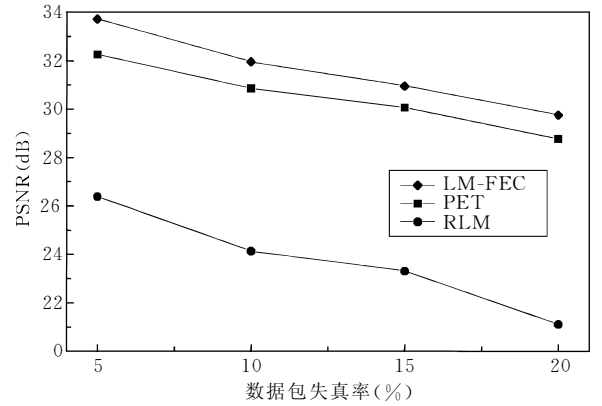


图 3 实验结果比较(150Kbps)

当接收者可用带宽相对较低时(50Kbps, 图 2), LM-FEC 差错控制性能优势明显, 而且这一优势随着数据包丢失率增加而增强. 数据包丢失率较低时(5%), RLM 受包丢失率影响较小, 而 PET 能够以较低 FEC 冗余度为各组播层提供很好的保护, 三种方法的信号失真差距相对不大; 但当数据包丢失率达 20% 时, 由于 PET 的 FEC 保护能力下降, 而 LM-FEC 通过率失真优化对层内速率和层间速率作最优分配, 其 PSNR 比 PET 高 1.4dB, 比 RLM 则高出 5dB 以上.

随着接收者可用带宽增加(150Kbps, 图 3), LM-FEC 和 PET 受包丢失率的影响稍有减弱, 整体信号质量上升 3~5dB, PSNR 下降速度趋缓. 由于可用带宽增加, PET 能够为组播层提供更高的 FEC 冗余度保护, 因此两种方法之间的差距稍有下降, 在 0.8~1dB 左右. 然而 RLM 的信号质量随着带宽增加并无明显改观, 只有 0.1~0.5dB. 这主要是因为采用嵌套分层编码方法时, 如果低层数据丢失, 高层数据即使正确收到, 由于无法正确解码而等同于丢失. 同时随着数据包丢失率增加, RLM 的信号失真明显增加. 当数据包丢失率为 20% 时, LM-FEC 的

PSNR 高出 RLM 约 8dB,这也表明,尽管 RLM 方法具有带宽自适应性,但带宽利用率并不理想.

文中暂时没有考虑差错控制引入的时延.事实上,LM-FEC 由于 FEC 编码和 FEC 延迟组播增加了接收端时延.但是在实际应用中,大多数群组通信是非交互式的,可以容忍一定的时延.即使对于交互式应用,LM-FEC 也可以通过限制 FEC 参数( $K$ ,  $N$ )和时段数  $D$  来对时延进行控制.极端情况下,当  $D=0$  时,接收端时延决定于 FEC 编码块长度  $K$ ,此时 LM-FEC 等价于 PET;进一步地,当  $N=0$  时,LM-FEC 等价于 RLM,此时引入时延为 0,同时也失去了 FEC 差错控制能力.因此可以认为 LM-FEC 包含了 RLM 和 PET 作为其特殊情况.

## 7 结 论

本文提出一种分层 FEC 组播差错控制方法 LM-FEC,以统一解决 Internet 多媒体群组通信中的带宽异构性和包丢失率异构性问题.LM-FEC 将分层的源数据包和各层的 FEC 校验数据包以不同的组播组发送,接收者根据信道可用带宽和数据包丢失率,通过 JSCC 率失真优化计算,决定编码层内的速率分配和编码层间的速率分配.文中用 FH-MDP 模型描述接收者行为,通过 JSCC 率失真优化确定最优策略,JSCC 率失真优化采用变量替换和动态规划算法求解.实验表明,本文提出的差错控制方法能够有效改善 Internet 多媒体分层组播通信中的重建信号质量.

## 参 考 文 献

- 1 Cidon I, Khamisy A, Sidi M. Analysis of packet loss processes in high-speed networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1993, 39(1): 98~108
- 2 Farber N, Stuhlmuller K W, Girod B. Analysis of error propagation in hybrid video coding with application to error resili-

ence. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Kobe, Japan, 1999. 550~554

- 3 McCanne S R. Scalable compression and transmission of Internet multicast video[Ph D dissertation]. University California, Berkeley, 1996
- 4 Paul S. Multicasting on the Internet and Its Applications. Norwell, MA: Kluwer, 1998
- 5 Xu X R *et al.* Resilient multicast support for continuous-media applications. In: Proceedings of the NOSSDAV'97, Washington University, St. Louis, 1997. 426~437
- 6 Yavatkar R, Griffioen J, Sudan M. A reliable dissemination protocol for interactive collaborative applications. In: Proceedings of ACM Multimedia, San Francisco, California, 1995. 333~344
- 7 Albanese A *et al.* Priority encoding transmission. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1996, 42(6): 1737~1747
- 8 Philip A C, Zhou R M. Rate-distortion optimized streaming on packetized media. Technical Report MSR-TR-2001-35, Microsoft Research, redmond, 2001. 242~261
- 9 Ruf M J, Modestino J W. Operational rate-distortion performance for joint source and channel coding of images. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1999, 8(3): 305~320
- 10 Chande V, Jafarkhani H, Farvardin N. Joint source-channel coding of images for channels with feedback. In: Proceedings of IEEE Information Theory Workshop, San Diego, CA, 1998. 312~320
- 11 Chande V, Farvardin N. Progressive transmission of images over memoryless noisy channels. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(6): 850~860
- 12 Kim B-J, Pearlman W A. An embedded wavelet video coder using three-dimensional set partitioning in hierarchical trees (SPIHT). In: Proceedings of Data Compression Conference, Snowbird, 1997. 251~260
- 13 Lu Z, Pearlman W A. An efficient, low-complexity audio coder delivering multiple levels of quality for interactive applications. In: Proceedings of IEEE Workshop on Multimedia Signal Processing, Redondo Beach, CA, 1998. 529~534
- 14 Puterman M L. Markov Decision Processes. New York: Wiley, 1994
- 15 Fletcher R. Practical Methods of Optimization. 2nd Version. New York: Wiley, 1987

**HU Fei**, born in 1973, Ph. D. candidate. His research interests include the design of algorithms and systems for reliable transmission of multimedia information over packet switch communications networks.

**ZHU Yao-Ting**, born in 1939, professor and Ph. D. supervisor. His research interests include communications and electronic system technology.

**ZHU Guang-Xi**, born in 1945, professor. His research interests include multimedia signal processing and information network technology.

