

一种自适应差错校验方法

林 鹰^{1,2}, 葛 亮¹, 窦润亮³

(1. 重庆交通大学 管理学院, 重庆 400074;

2. 天津大学 计算机科学与技术学院, 天津 300072; 3. 天津大学 管理学院, 天津 300072)

(dl@tju.edu.cn)

摘 要:提出了一种根据丢包率变化趋势动态调整纠错方式的自适应差错校验方法。通过设置丢包率阈值, 分别采用基于 RDP 协议的差错重传法和基于码率估测的动态分割图像法来解决在丢包率较低和较高条件下的视频差错校验工作, 既优化了传输速率, 又保证了视频图像的完整清晰。

关键词:自动重传请求; 前向纠错; 丢包率

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A

Adaptive error-check solution

LIN Ying^{1,2}, GE Liang¹, DOU Run-liang³

(1. School of Management, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. School of Computer Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. School of Management, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: An adaptive error checking solution on the basis of estimation of the change trend of packet-loss rate was proposed. By setting the threshold value of packet-loss rate, the solution took advantage of the improved auto repetitive request supported by RDP to realize real-time transportation at a low packet-loss rate, and used the improved forward error correction, a method of dynamically decollating images on the basis of varying sending rate, to solve the problem of error checking at a low transmission rate.

Key words: auto repeat request; forward error correction; packet-loss rate

0 引言

网络环境不稳定严重影响了多媒体视频流的实时传输, 当传输信道内发生大规模拥塞时, 丢包率骤然提高, 传输质量剧烈下降, 如果信道丢包率高于 15% 时, 视频码流将变得支离破碎, 出错图像基本无法恢复^{[1]137}, 为了保证视频图像的完整和清晰, 视频接收方一般都采用差错校验来修复和还原被损视频。自动重传请求和前向纠错方法是最为常用的差错校验方法, 在信道带宽保持平稳的条件下能得到很好的效果, 但二者对频繁变化的信道环境极不敏感, 纠错效果很差, 而且差错校验会占用大量带宽, 往往导致传输信道进一步恶化^{[2]219}, 总而言之, 在带宽无规则变化下实现高质量的视频传输依然是没有解决的瓶颈问题。基于此, 本文提出了一种自适应差错校验方法来解决在丢包率不稳定条件下的视频纠错工作。

1 几种差错校验方法的比较

当前所采用的差错校验纠正的方法主要有自动重传请求法、前向纠错方法。

1.1 自动重传请求

自动重传请求法 (Auto Repeat Request, ARQ) 的工作原理是接收方校验收到的数据是否存在差错, 若出现差错, 向发送方发送请求重传的数据报文, 如数据没有发生畸变, 通知发送方继续传输^{[3]144}。ARQ 法对数据报文采取了三种处理方式: 停等式 ARQ, 回退 n 帧 ARQ, 以及选择性重传 ARQ。视频

码流的网络传输一般采用选择性重传 ARQ 方法, 接收方发现差错之后, 发送附有出错视频帧编号的数据报文, 发送方获得通知之后, 只发送出错的视频帧而不是重传全部视频码流。

ARQ 法减少了重传信息量, 降低了系统资源开销, 保证了传输的实时性。此种方法固然效率很高, 但是不适用于带宽狭窄的情况。当网络中发生了拥塞, 视频码流发生丢帧、突发错误的几率增大, 必然导致增大重传数据量, 极易造成传输环境的进一步恶化, 另外, 由于出错比率不断增加, 发送方不得不多次重传相同的数据, 造成严重的时延, 无法保证视频传输的实时性。

1.2 前向纠错

前向纠错方法 (Forward Error Correction, FEC)^{[4]535} 采用单工通信模式, 接收方单方面进行差错校验与差错复原。在传输过程中, 发送方附加一定的冗余纠错码 (RS 或 BCH) 供接收方修正突发错误, 在纠错过程中, 接收方不向发送方发送校验结果数据报文, 发送方则持续发送视频码流。

使用 FEC 方法的优点是, 接收方单方面负责差错校验, 发送方无需提供速率调节以及重传工作, 这样可以减少传输双方的通信次数, 提高信道利用率; 冗余纠错码具有强大的纠错功能, 即使少数冗余码在传输中丢失, 也不会对视频质量带来很大的影响。

FEC 方法的缺点: 1) 由于单工通信的原因, 发送方无法感应传输环境的变化, 依旧盲目的定速传输, 导致大量丢包; 2) 若传输过程中丢失过多的冗余纠错码, 将严重影响纠错效

收稿日期: 2008-07-04; 修回日期: 2008-09-17。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60603027); 重庆市财政局重点科技项目 (2007); 重庆科委软科学重点项目 (CSTC 2007CE9006)。

作者简介: 林鹰 (1962-), 男, 重庆人, 教授, 博士, 主要研究方向: 计算机信息系统、系统工程、智能自动化; 葛亮 (1981-), 男, 天津人, 助教, 硕士研究生, 主要研究方向: 计算机信息系统; 窦润亮 (1977-), 男, 天津人, 讲师, 博士, 主要研究方向: 遗传算法、系统分析与协调。

果,而且,由于没有采用重传机制,接收方无法再次获得丢失的纠错码,导致视频图像无法恢复;3)由于纠错码附带大量的运动补偿估计信息,在带宽狭窄的情况下可能会引发信道堵塞,造成传输环境恶化。

综上所述,对于远程视频传输而言,需要兼顾传输的实时性和视频的完整性,但由于传输信道不稳定,采用单一的传输方法很难取得较好的效果,视频质量必然会遭受某种程度的缺损,因此应采用估测传输信道变化趋势、自适应调整纠错方式的综合校验策略。

2 基于 RDP 协议的差错重传方案

由于网络信道的不稳定,极易导致视频帧或视频数据包在传输过程中丢失,为了确保完整可靠地传输监控视频,接收方需对所接收的视频数据进行差错校验,如果发生缺损,接收方及时向发送方提交附有校验结果的数据报文,请求重新发送缺失的视频数据。若要实现此类信息反馈,需借助网络数据传输协议。随着网络技术的发展,传输协议不断的改进,近来公布的多项支持大批量流媒体数据实时传输的网络协议都可以提供较好的支持功能,尤其是可靠数据传输协议(Reliable Data Protocol, RDP)的综合效果最好。

RDP 协议为每个传输层连接端口提供一个全双工通信信道;它尝试可靠地发送所有用户信息,一旦发送失败,将向用户报告错误,它的扩展 IP 数据报服务能保证可靠传输;它在数据段头加载校验码和序列号来侦测并删除所有损坏的数据段。和 TCP 相比, RDP 提供的功能更为简捷,它对流媒体传输的控制功能,缓冲以及连接管理模式都是相当简单的^{[5]1051}。对于视频传输而言, RDP 数据包(RDP 数据包的结构如图 1 所示)提供了强大的数据目录指引功能,帮助接收方完成时序重组、丢帧统计。基于 RDP 协议的强大功能,作者提出一种以 RDP 数据包为视频数据目录载体的差错校验方案—— SARQ。

SYN	ACK	EAK	RST	NUL	0	Version No	Header Length
Source Port							
Destination Port							
Data Length							
Sequence Number							
Acknowledgement Number							
Checksum							
Variable Header Area							

图 1 RDP 数据包结构图

视频传输一般分为两种方式:视频帧传输和视频数据包传输。二者的传输原理不同,导致差错校验机制迥异。为了更好地兼容这两种视频格式,本文改进了原始的 RDP 数据包格式,将无用的属性全部删除,又新增了少许自定义属性。由于在使用视频数据包格式传输时,一个包内可能封装了多个视频帧,接收方必须验证全部视频帧是否已被完整接收,所以在 RDP 协议头添加了数据接收列表(Data Sequence)属性,记录了封装在视频数据包中的视频帧列表。由于剔除了多个无用属性, RDP 数据包的体积明显缩小,不会因为体积过于庞大而引起信道拥塞。改进的 RDP 数据包结构如图 2 所示。

SYN	ACK	EAK	RST
Source Port			
Destination Port			
Data Length			
Data Sequence			
Checksum			

图 2 改进后的 RDP 数据包结构

发送方每次发送视频帧或视频数据包时,都会为其附上

RDP 数据包,登记所发送的视频数据,接收方接收到视频数据后,首先检查 RDP 数据包所载信息,而后进行差错校验。如果系统传输的是实时视频码流,通过同步码(SYN)和序列号(ACK)标识查看视频帧是否按照时序依次接收,是否出现过序号中断。如果传输的是视频数据包,接收方通过序列号(ACK)可以验证数据包序号是否完整,是否出现空缺标号,利用数据接收列表(Data Sequence)判断数据包所封装的视频帧是否丢失。接收方在做完差错校验之后,记录丢失视频帧的编号或视频数据包的标号,以反馈数据报文格式发出,通知发送方重传视频数据。

例如,发送方在发送视频数据包时,为了调整数据包体积,可能会将一个关键帧和数个与其同步的参考帧封装并压缩在一个包中(如图 3 所示), Data Sequence 属性将记录它们的顺序号:1—0、1—1 等,接收方接收数据包之后,检查视频帧是否与顺序号相匹配,如有缺失帧位,将会以此序号为依据要求发送方重新传送。

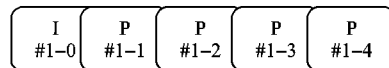


图 3 封装视频帧结构

3 基于码率变化的动态图像分割算法

3.1 差错隐藏算法的对比研究

解码端的差错隐藏是一种有效对抗信道干扰的方法。它通常根据图像视频在时间和空间上邻接的像素是平滑地变化的特点,利用运动补偿技术,以当前帧和参考帧的联系来恢复丢失的信息,可以使受损的图像在某种程度上得到修复。其中边界匹配算法和解码端运动估计算法是有代表性的两种恢复运动信息的匹配算法。

边界匹配算法是一种选择最优的运动矢量重建受损视频块的方法^[6]。在修复受损图像时, BMA 首先创建运动矢量候选集合,然后用所有的候选矢量匹配受损区域,检查修复后的宏块内外边界的变化,最终采用变化最小的候选运动矢量作为最优运动补偿。在实际应用中,由于 BMA 对空域的平滑特征敏感,当边界处发生像素值跃变时,将使匹配误差增大,对于有垂直或水平边缘穿越受损块的情况,此算法可以有效地选择最优的预测矢量,但当存在其他方向边缘时,尤其是在存在倾斜边缘穿越受损块的情况下,边界匹配算法所选择的矢量获得的补偿效果十分有限。

解码端运动估计方法利用丢失宏块的周边可获得的像素去参考帧中进行搜索,得到与这些像素最匹配的结果,并记录下这个最佳匹配所对应的运动信息,包括运动矢量及参考帧索引^[7]。这样,基于运动的一致性,可以认为此运动信息为丢失宏块运动信息的恢复,并利用恢复的运动信息恢复出整个宏块的像素值。其中最佳匹配是根据计算当前宏块的周围像素值与相应的替换宏块周围的像素值的平均绝对值误差(MAD)来确定对于可能的运动集合的选择,如式(1)所示,根据实际需要,可以进行适当的调整。

$$MAD = \frac{1}{N} \sum_{(i,j) \in \Omega} |F_{i,j} - F_{i+e_x, j+e_y}^r| \quad (1)$$

由于宏块周围的像素本身并不能保证处于一致的运动,因此以这些像素进行匹配得到的运动估计,很可能对于宏块中的某些像素是不准确的。而且,随着视频标准不断发展,宏块已经可以划分为更大的比例进行运动估计(如 4×4),这样导致当宏块内部像素存在不同运动过程时,时间域差错掩盖

复杂度增大,如果只采用同一种运动信息分析所有像素的方法效果肯定会受到影响。

3.2 自适应调整码率的动态图像分割算法

FEC 是一种在解码端进行差错修复的方法,它所采用的单工通信方式虽然会减少资源的消耗,但是同时会造成传输双方缺少必要的通信,发送方只能盲目地按照恒定速率连续传输码流,如果带宽骤然变窄,错误码段激增,势必会增加纠错时延。为此,本文提出一种发送方自动调整码率的优化 FEC 方法,由于 RDP 协议对网络传输可靠性提供保障,实时跟踪信道变化情况,因此,接收方利用 RDP 协议这一特点,周期性向发送方发送 RDP 反馈数据报文,供发送方评估传输环境,计算并调整码流发送速率,使之与当前带宽相匹配,降低发送速率与传输速率差值过大,避免数据包大量丢失。

在得到接收方回应的信道质量反馈报文后,发送方可以采用带宽估测算法计算理想的视频传输速率。本文选用的是 TFRC(TCP-Friendly Rate Control)算法,如式(2)所示:

$$T = \frac{S}{RTT \sqrt{\frac{2bP}{3}} + t_{RTO} \sqrt{\frac{3bP}{8}}(1 + 32P^2)} \quad (2)$$

其中: T 为计算出的发送速率上限, RTT 为数据包的往返时间, t_{RTO} 为 TCP 超时重传时间, P 为丢包事件率, S 为数据包的大小。如果接收方在每一个 RTT 间隔内都能收到数据,则向发送方反馈丢失事件率,保证发送方可持续获得丢包率参数。

传统的 FEC 方法采用了基于全图像素点运动估测的纠错方法,即对整幅图像每个像素点的运动趋势加以估测并生成包含时空区域运动估算的 RS 纠错码。在差错校验过程中,接收方获取纠错码的像素运动估测值,检查像素点的运动变化是否符合估测的运动趋势,如果发生差错,接收方参照纠错码还原出原始图像。由于 RS 纠错码的冗余度较高,在网络状态良好的情况下,可以较好地恢复受损图像,但在信道环境恶劣的情况下,纠错码大量丢失会导致原始图像无法完整还原,出现严重的马赛克。另外,由于 RS 码携带大量的冗余数据,增加了接收方差错分析的复杂度,出现较大时延。基于此,在保证发送方可自适应调整发送码率的前提下,本文提出了一种动态分割图像的差错校验方案——SFEC。

为了降低纠错码冗余度对差错校验工作的影响,SFEC 采用像素点区域延伸方法来扩张纠错范围,即由传统的像素点纠错扩展为图像块纠错,以宏块区域作为参照客体进行运动补偿估测,降低纠错码冗余度。本文采取的是偶数平方分割方式,即按照 2×2 、 4×4 、 8×8 等格式切分图像,切割后的图像如图 4(a)和图 4(b)所示。

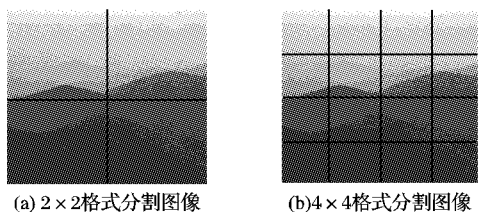


图4 两种格式的分割图像

为了确保纠错码冗余度与传输带宽相匹配,SFEC 根据当前网络传输速率变化动态分割图像,调整纠错码冗余度。

1) 计算期望传输速率。先设置 k 个丢包率变化范围区间,通过多次试验测量每个变化区间传输速率平均值 p_e ,并根据变化区间在实验过程中的出现概率赋予相应权重 m_i ,据此求出传输速率期望值。

2) 在实际传输码流时,首先按照 TFRC 法估算出当前网络传输速率 p_t ,然后利用式(3)计算出分割系数 h 。

$$h = \frac{\sum_{i=1}^k m_i p_e}{p_t}; 0 < m_i < 1; \sum_{i=1}^k m_i = 1 \quad (3)$$

3) 当 $h < 1$ 时,说明当前传输速率大于期望速率,信道传输质量良好,满足大数据量实时通信,视频图像无需分块纠错,依然采用基于全图像素纠错方法;当 $h > 1$ 时,表明当前网络已发生拥塞,且 h 值越大代表丢包情况越严重,冗余纠错码丢失几率越大,此时采用公式(4)计算图像分割的块数。

$$N = \left(\frac{1}{l_a \times h} \right)^2; 0 < l_a < 1 \quad (4)$$

其中: l_a 为分割相关系数,与图像大小和格式有关,并保证 $1/(l_a \times h)$ 为偶数。

通过式(4)可以看出,图像分割的块数 N 与分割系数 h 成反比,与当前传输速率估算值 p_t 成正比关系,即网络传输速率越低,图像分割块数越少,等同于延展像素点,降低图像分辨率,降低纠错码的冗余信息,利于带宽狭窄状态下的视频差错校验。

4 自适应方案实现流程

本文提出一种随着丢包率变化情况动态调整纠错方案的自适应差错校验方法。在传输开始前,发送方和接收方都共同默认一个事先设定好的丢包率阈值,此值一般根据用户对视频质量要求和传输实时程度自定义设置,传输双方借助 RDP 协议建立连接,发送方捕获接收方发送的信道传输质量反馈包,其中载有接收方已收到数据包包数,利用式(5)计算当前的丢包率,参照 TFRC 方法估算传输速率,按照丢包率变化采用不同的差错校验手段。

$$r_{loss} = \frac{n_t - n_r}{n_t} \times 100\% \quad (5)$$

其中: r_{loss} 为丢包率, n_t 为发送方发送的数据包总数, n_r 为接收方接收的数据包数量。

当丢包率小于预设的阈值时调用 SARQ 方法,发送方按照估算速率发送码流片段或视频数据包,接收方在接收到视频数据后进行时序重组和差错校验,而后向发送方传送 RDP 数据包,通知其重新传输正确数据;当丢包率大于预设阈值时调用 SFEC 方法,发送方以匹配当前网络带宽的传输速率发送视频帧以及经过图像分割算法处理过的运动预测纠错码,接收方负责差错校验和图像还原,并向发送方反馈网络状态反馈数据报文。具体流程如图 5 所示。

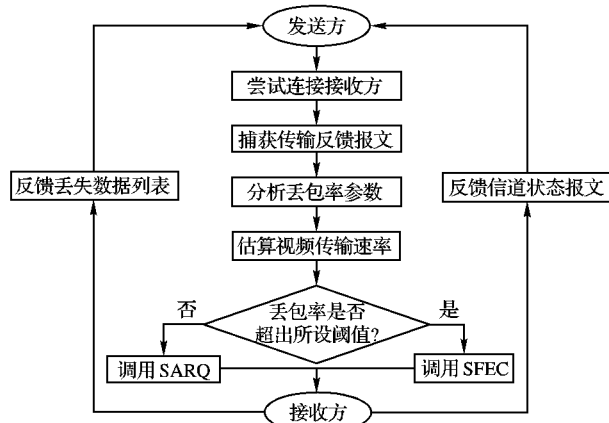


图5 自适应差错校验方案实现流程

5 仿真与分析

本文测试序列选用“Foreman”片段, QCIF 格式, YUV 取样格式为 4:2:0, 编码帧数为 20 帧, 编码后帧频为 10 fps。传输的开关时间服从指数分布, 开和关的时间都为 400 ms, 传输处于开的状态传输速率为 512 kbps。设置丢包率阈值为 0.1, 并控制丢包率范围为 (0, 0.3)。测试结果如表 1、2 所示。

表 1 丢包率为 (0, 0.1] 区间的对比数据

方法	PSNR/dB	比特率/kbps	编码时间/s
自适应差错校验 (SARQ)	37.14	29.45	37.92
传统方法 (ARQ)	36.88	25.13	45.17

表 2 丢包率为 (0.1, 0.3) 区间的对比数据

方法	PSNR/dB	比特率/kbps	编码时间/s
自适应差错校验 (SFEC)	35.11	26.29	43.73
传统方法 (FEC)	28.46	20.36	54.82

在丢包率为 (0, 0.1] 区间范围内, 我们采用了 SARQ 方法, 接收方按照改进的 RDP 协议数据包格式向发送方传输差错数据清单, 作为对比, 传统方法采用基于 TCP 传输协议的差错重传方法, 以 TCP 反馈数据报文记载差错数据列表。由于丢包率较小, 网络环境损失数据较少, 实验效果不是非常明显, 但是也可观测到自适应方法可以获得较好的效果。在丢包率为 (0.1, 0.3) 区间的传输环境下, 传输双方采用 SFEC 方法进行差错校验, 通过分析丢包率变动导致的带宽变化趋势, 采用 8×8 和 16×16 方式分割视频图像, 随着丢包情况的变化调整纠错码体积, 而传统方法采用 FEC 方法, 试验表明在此模拟通信环境中, 自适应差错校验方法比传统纠错方法取得更好的效果, 无论在优化传输速率环节上, 还是在保证图像质量环节上, 自适应差错校验方法更胜一筹。

6 结语

网络带宽的不稳定变化是困扰远程视频实时传输的首要

问题, 信道带宽狭窄会严重阻碍视频码流的实时传输, 而且会造成图像错误无法复原。为了解决在信道环境动态改变条件下的视频质量和传输速率优化问题, 本文提出了一种自适应差错校验方案, 在丢包率较低的情况下采用基于 RDP 数据包差错校验方法, 而在丢包率较高的情况下, 采用动态分割图像区域纠错方法, 在实际试验中, 很好地完成视频码流实时传输工作, 图像质量也保持完整清晰。但如果信道环境更为恶劣, 尤其当丢包率超过 50% 时, 使用此方法依旧会出现较大时延, 此问题有待进一步研究。

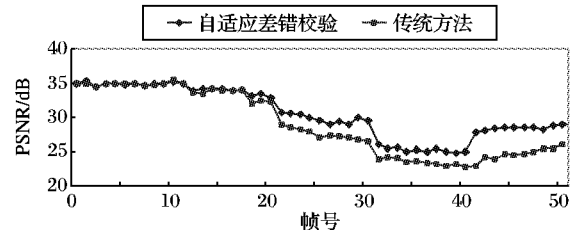


图 6 自适应差错校验与传统方法在丢包率 (0, 0.3) 区间信噪比

参考文献:

- [1] 王珂, 刘志勤. 基于 P2P 覆盖网的流媒体高质量传输策略[J]. 计算机工程, 2007, 33(15): 137-139.
- [2] 范新南, 邢超. 基于 Internet 的端到端视频传输技术研究[J]. 计算机工程, 2007, 33(3): 218-220.
- [3] 王锋, 朱光喜, 张珍明, 等. 基于 IP 无线网络 FGS 视频传输的多乘积码方案[J]. 计算机工程与应用, 2006(29): 143-147.
- [4] YING LIN, LIANG GE. Study on real-time video transportation for national grain depot[C]// CCTA 2007. Boston: Springer, 2007: 533-541.
- [5] ZHANG Q, ZHU W W, ZHANG Y Q. Channel-adaptive resource allocation for scalable video transmission over 3G wireless network[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2004, 14(8): 1049-1063.
- [6] 马国强, 郭宝龙, 冯宗哲. 传输图像的子波域插值恢复算法[J]. 电子学报, 2002, 30(4): 552-555.
- [7] 马鑫, 杨小康, 宋利. 自适应时域差差错掩盖方法[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(10): 1782-1785.

(上接第 4 页)

计算得到的最优值和理论最优值非常接近, 并且同时也和仿真结果保持一致。

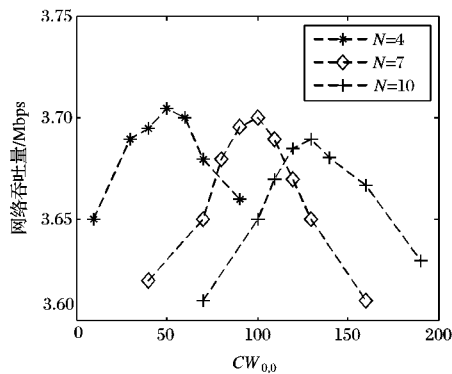


图 5 网络吞吐量随 $CW_{0,0}$ 的变化

参考文献:

- [1] WANG C G, LI B, LI L M. A new collision resolution mechanism to enhance the performance of IEEE 802.11 DCF[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2004, 53(41): 1235-1246.
- [2] 李晓峰, 鄢楚平. 一种基于 IEEE 802.11 的无线自组网 MAC 协议[J]. 计算机应用, 2007, 27(2): 275-281.
- [3] YANG Y, WANG J, KRAVETS R. Distributed optimal contention window control for elastic traffic in single-cell wireless LANs[J].

- IEEE/ACM Transactions on Networking, 2007, 15(6): 1373-1386.
- [4] IEEE 802.11, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and physical layer (PHY) specifications[S]. 2007.
- [5] DOVROLIS C, RAMANATHAN P. A case for relative differentiated services and the proportional differentiation model[J]. IEEE Network, 1999, 13(5): 26-34.
- [6] YOON J, YUN S, KIM H, et al. Maximizing differentiated throughput in IEEE 802.11e wireless LAN[C]//Proceedings of IEEE Conference on Local Computer Networks. Tampa, USA: IEEE Press, 2006: 411-417.
- [7] LEE S J, AHN C, SHIN J. Control parameter setting of IEEE 802.11e for proportional throughput differentiation[C]//Proceedings of ICOIN'06. Sendai, Japan: Springer, 2006: 122-131.
- [8] BANCHS A, VOLLERO L. Throughput analysis and optimal configuration of 802.11e EDCA[J]. Computer Networks, 2006, 50(11): 1749-1768.
- [9] XIAO Y. Performance analysis of priority scheme for IEEE 802.11 and IEEE 802.11e wireless LANs[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(4): 1506-1515.
- [10] LI B, BATTISTI R. Performance analysis of an enhanced IEEE 802.11 distributed coordination function supporting service differentiation[C]//Proceedings of QoFIS. Heidelberg, Berlin: Springer, 2003: 152-161.