

基于仿真的高速长距离网络中 TCP 协议性能评价^{*}

杨 征 吴玲达

(国防科技大学信息系统与管理学院 长沙 410073)

摘 要 新的传输控制协议不断涌现,迫切需要一个系统的评价体系。提出了一个系统的和可重复的评价方法,定义了一系列性能测度集和仿真用例,基于 NS2 对最近几年提出的几个具有代表性的高速长距离网络中 TCP 协议 High-Speed TCP、Scalable-TCP、FAST-TCP、BIC-TCP 以及 H-TCP 的性能进行了比较和评价。仿真结果表明,通过一致的应用性能测度和标准仿真用例可以获得有价值的结论。

关键词 拥塞控制,性能评价,高速长距离网络,仿真

Simulation-based Performance Evaluation of TCP Protocols for High-Speed Long Distance Networks

YANG Zheng WU Ling-Da

(Multimedia R&D Center, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract Recently, there are some new transmission control protocols for high-speed long distance networks have been presented, so a real need has developed for systematic evaluation architecture. In this paper we present a systematic and repeatable evaluation manner, and a series of performance metrics and simulation benchmark were defined. The NS2-based simulation experimental results evaluating the performance of the High-Speed TCP, Scalable-TCP, FAST TCP BIC-TCP, and H-TCP proposals were presented. The results demonstrate that consistent application of performance metrics and standardized simulation benchmark can yield results of considerable value.

Keywords Congestion control, Performance evaluation, High-speed long distance networks, Simulation

1 引言

TCP 拥塞控制算法无疑是当前 Internet 获得巨大成功的重要原因之一。然而,最近几年,人们越来越清楚地意识到 TCP 基于 AIMD 的拥塞控制算法在高速长距离等高带宽延迟积(bandwidth delay product, BDP)网络中性能非常低下。问题的根本原因是 TCP 的拥塞避免阶段需要花费很长的时间来增长拥塞窗口以及完全利用有效带宽。目前已提出了许多解决这个问题的方案,早期的工作包括 Floyd 提出的 High-Speed TCP^[1]、Kelly 提出的 Scalable-TCP^[2]和 Low 等人提出的 FAST TCP^[3],最近的工作有 Xu 等人提出的 BIC-TCP^[4]以及 Shorten 等人提出的 H-TCP^[5]。

由于在这一领域已经做了大量的工作,因此,迫切需要一个系统的评价体系^[6],包括评价的平台和准则,来确定一个候选方案,从而进一步优化与改进。然而,评价这些新的协议并不是件容易的事,主要的困难就是缺乏一个统一的性能测度集^[7]。正由于此,不同的研究者通常都采用突出其协议特点的性能测试,而忽略或不强调其他方面。另一方面,多数新的协议实现都伴随着与拥塞控制无关的网络协议栈的改变,从而导致性能的评价缺乏统一的基础。因此,基于这样一个事实,也就不奇怪为什么基于当前可获得的公布的测试结果很难得出一个一致的结论^[8]。

本文的目标是提出一个系统的和可重复的方式来评价各竞争 TCP 方案的性能。文[8]采用了测试床的测试方法。文[9]和[10]则在实际网络中比较和评价新协议。众所周知,测试床方法代价昂贵,且不灵活;而实际网络测试方法则存在不可控性和不可重现性。本文采用的是基于仿真的协议性能评价。我们的方法是定义一系列性能测度集和标准仿真用例,

目标不在于给出各协议在性能测度上的绝对指标,而是各协议之间各测度上的相对值,即以标准 TCP 性能为比较基准,对所有协议采用相同的性能测度和仿真用例。特别地,本文给出了关于 High-Speed TCP、Scalable-TCP、FAST TCP 和 BIC-TCP 以及 H-TCP 的仿真结果,通过分析这些仿真结果,评价各协议的性能优劣。

2 高速长距离网络 TCP 协议

在进行仿真试验之前,我们非常简要地介绍一下这些协议的基本操作,感兴趣的读者可以参考原始文献,获得更为详细的信息。

2.1 High-Speed TCP(HS-TCP)^[1]

HS-TCP 的基本思想是采用一个模式切换,即当拥塞窗口较小时,采用标准 TCP 窗口增长机制,当拥塞窗口较大时,采取更为积极的窗口增长和更为缓和的窗口减少算法,使得一方面 HS-TCP 在小拥塞窗口时与标准 TCP 兼容,另一方面,在大拥塞窗口时能有效利用网络带宽。

2.2 Scalable TCP(S-TCP)^[2]

S-TCP 的基本思想是使得拥塞事件之后的窗口恢复时间独立于拥塞窗口大小,类似于 HS-TCP, S-TCP 也采用了一个高速/低速模式切换。

2.3 BIC-TCP^[4]

BIC-TCP 的主要特征是其独特的窗口增长函数。当探测到一个分组丢失事件, BIC 以乘性因子减少其窗口。减少前的窗口值记为 maximum, 刚减少后的窗口值记为 minimum。BIC-TCP 使用这两个参数执行二值搜索。

2.4 FAST TCP^[3]

与 HS-TCP、S-TCP 和 BIC-TCP 依赖于分组丢失来调整

^{*} 国家“863”计划青年基金项目(2002AA717019)。杨 征 博士生,研究方向为计算机网络、卫星通信网络系统;吴玲达 教授,研究方向为多媒体通信、多媒体信息系统与虚拟现实技术。

拥塞窗口不同,FAST TCP采用队列延时和分组丢失来评估拥塞和调整窗口。当拥塞程度较轻时,队列延时是主要的拥塞信号,FAST TCP工作在一个严格小于最大队列延时的平衡队列延时(即目标队列延时)附近。当拥塞程度较重时,分组丢失成为了主要的拥塞信号,FAST TCP减轻拥塞程度,从而将系统带回到轻度拥塞区域,使得其能够重新稳定在目标队列延时附近。

2.5 H-TCP^[5]

H-TCP采用最近一次拥塞事件到当前之间的逝去时间 Δ ,而不是拥塞窗口cwnd作为路径BDP的指示。因此,AIMD增长因子 α 为 Δ 的函数,且 α 也随RTT的变化而变化,从而减少不公平性。基于路径上队列大小的估计调整AIMD减少因子 β ,从而改善路径利用率。

3 性能评价准则与仿真实验

3.1 性能评价准则

在设计和比较拥塞控制算法时,需要一定的评价准则。然而,人们在关于评价新的拥塞控制算法的性能准则集到底由哪些要素组成这一问题上还没有达成一致意见^[7]。从用户的角度出发,可以比较端系统的吞吐率、丢失率和延迟等指标,这些是用户所关心的。由于拥塞控制算法对整个网络系统都有影响,在评价算法时更应该从整个系统的角度出发进行考虑。以下就是几个最基本的性能评价准则。

(1)效率(Efficiency):效率也就是有效网络资源的利用率,众所周知,TCP的效率是受网络中队列缓存量的影响的,对于一个单流(或者多个同步流)链路,随着队列缓存量减少到链路带宽延迟积以下,利用率也随着下降。此外,链路传播延时对效率也是有影响的。因此,我们希望通过仿真实验能刻画这些参数的影响。

(2)公平性(Fairness):目前还没有关于公平性的统一的正式定义。公平性评价的主要方法包括Max-Min Fairness, Fairness Index和Proportional Fairness。我们这里所指的公平性是指采用相同TCP拥塞控制算法的竞争流之间的吞吐量之比。

(3)兼容性(Compatibility):兼容性对于一个需要配置到Internet上的新协议来说是一个最基本的和实际的需求,也就是说,新协议的配置将不会对采用传统协议的用户带来较大的负面影响,因此也称作TCP友好性(TCP friendly)。

(4)响应性(Responsiveness):网络状况不是静态的,响应性指的是当网络状况改变时,如流的加入或离开,协议快速获取和释放带宽的能力。

3.2 仿真实验的配置

为了对HS-TCP、S-TCP、BIC-TCP、FAST TCP和H-TCP之间的性能进行比较,我们在NS2^[11](版本为NS2.28)平台上进行了一系列的仿真(这些协议的NS实现都可以从Internet上下载)。

1)网络拓扑:实验中采用一个单瓶颈链路的哑铃型拓扑。拓扑参数包括:瓶颈链路带宽从1Mbps到250Mbps之间变化,具体地我们选择1Mbps,10Mbps,100Mbps和250Mbps,链路往返延时(RTT)在16ms到320ms之间变化,具体地,我们选择了16ms,40ms,80ms,160ms和320ms。仿真采用Drop Tail队列管理策略。

2)TCP流设置:分组大小为1000比特;最大窗口足够大不至于成为瓶颈;随机设置各流发送时间以避免相位影响;TCP流采用修改版的大拥塞窗口有限慢启动算法。发送端和接收端采用的TCP代理为TCP SACK。采用FTP作为通

过TCP连接传输数据的应用。所有这些实验时间都是600秒。

我们将通过仿真实验对HS-TCP、S-TCP、BIC-TCP、FAST TCP和H-TCP在效率、公平性、兼容性、响应性等几个方面的性能进行了比较。

3.3 仿真实验设计

(1)公平性

为了评价公平性,我们考虑两个TCP流,并且提出了下面的实验:

①相同条件下的公平性

测量在相同网络状况下每个流的平均吞吐量,也就是说,两个流采用相同的拥塞控制算法、有相同的传播延时、共享瓶颈链路。我们设计了一组实验,包括了不同的带宽和传播延时,队列大小与带宽延迟积成固定比例(20%和100%分别对应较小和较大的队列)。

②不同RTT之间的公平

测量两个流各自的平均吞吐量,其中第一个流的传播延时固定不变,而第二个流从16ms到320ms之间变化,同样设计了一组实验,包括了不同的带宽和第二个流的传播延时,队列大小与带宽延迟积成固定比例。

(2)兼容性

为了评价兼容性,我们重复前面公平性(II)中的测量,但是第一个流采用标准TCP算法,第二个流采用新的TCP拥塞控制算法。

(3)效率

为了评价效率,即链路利用率,我们考虑两个相同RTT的TCP流,并设计了如下实验:

•效率vs.队列大小:传播延时固定为160ms,队列大小从1%到100%BDP之间变化,测量平均吞吐量。

•效率vs.传播延时变化:队列大小为BDP的固定比例,传播延时从16ms到320ms之间变化,测量平均吞吐量。

(4)响应性

为了评价协议的响应性,我们设计实验测量在启动第二个流后,第一个流的收敛时间。我们建议在测试过程中,重复进行多次,第二个流的启动时间随机分布在第一个流整个拥塞周期上,这样,我们可以独立于特定的启动时间来评价平均的收敛性能。

4 仿真结果

限于篇幅,我们只给出一些有代表性的仿真结果。除非特别说明,瓶颈链路带宽均为250Mbps。

4.1 效率

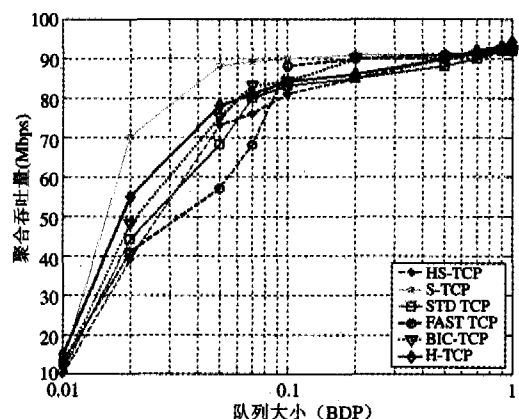


图1 队列大小对效率的影响

图 1 给出了随队列大小变化的两个 TCP 流聚合吞吐量曲线图,两个流有相同链路传播延时,固定为 160ms,瓶颈链路为 100Mbps。图 2 给出了随传播延时变化的聚合吞吐量曲线图,队列大小固定为 20%BDP。

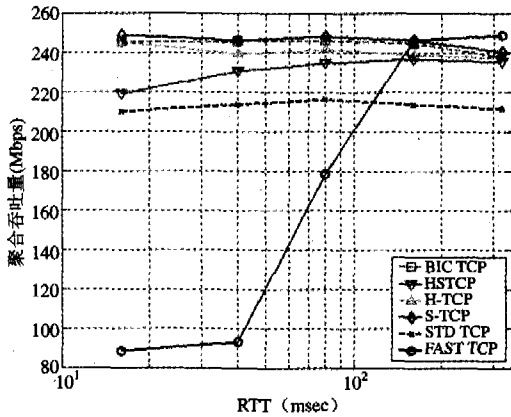


图 2 传播延时对效率的影响

4.2 公平性

图 3 给出了两个共享瓶颈链路 TCP 流的吞吐量之比,两个流有相同的链路传播延时,且传播延时从 16ms 到 320ms 之间变化。图 4 给出了两个不同链路传播延时 TCP 流的吞吐量之比,第一个流的链路传播延时固定为 160ms,第二个流的链路传播延时从 16ms 到 320ms 之间变化。图中给出了队列大小为 20% BDP 的结果,当队列大小为 100%BDP 时,我们获得了类似的结果。

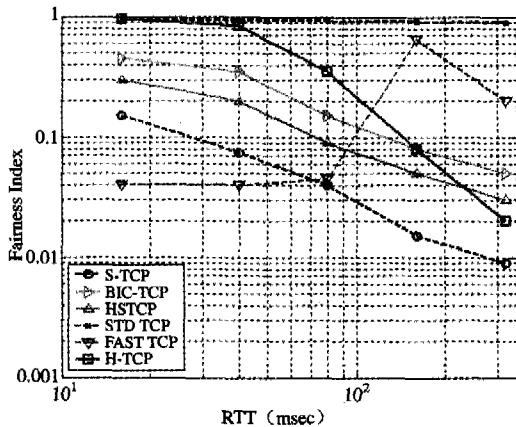


图 3 相同条件下公平性指数

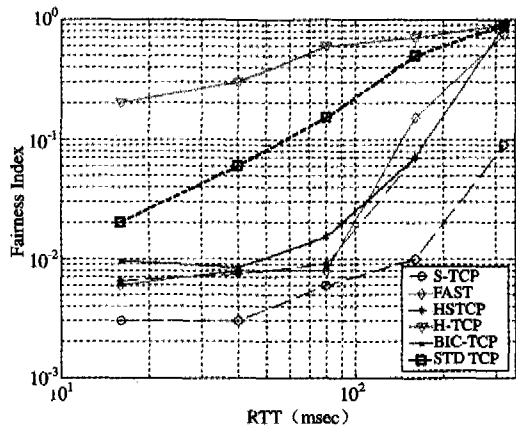


图 4 RTT 公平性指数

4.3 兼容性

图 5 给出了两个共享瓶颈链路且具有相同链路传播延时

TCP 流的吞吐量之比。第一个流采用标准 TCP 算法,第二个流运行新的 TCP 变种算法。

4.4 响应性

图 6 给出了测量到的在第二个流启动之后第一个流的收敛时间。图中,给出了随链路传播延时变化的收敛时间曲线(两个流有相同的链路传播延时)。

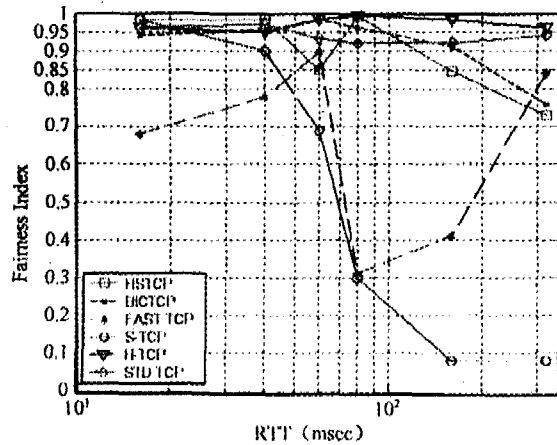


图 5 不同传播延时条件下 TCP 友好性指标

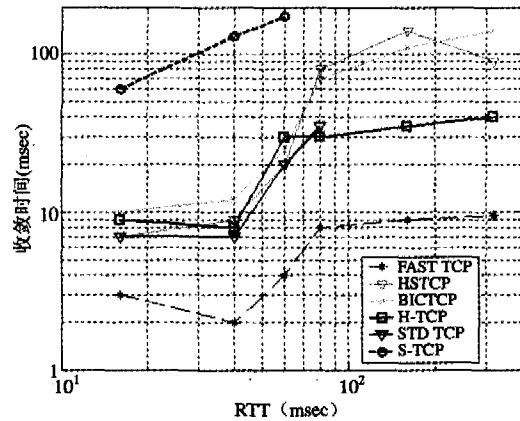


图 6 不同传播延时情况下网络收敛时间

5 比较与分析

5.1 效率

从图 1 中可以看出,当队列大小在 10%BDP 以上时,新的协议都获得了比标准 TCP 要好的吞吐量性能。然而,当队列大小低于 2%BDP 时,所有协议的吞吐量都急剧下降(FAST TCP 在低于 8%BDP 左右时就开始下降了)。实际上,这种吞吐量下降是由于小规模分组突发导致队列溢出而造成的。从图 2 中可以看出,除了 FAST TCP 以外,其他协议在不同链路延时情况下,都获得了比标准 TCP 要好的吞吐量性能。当 RTT 大于 10² 数量级以后,FAST TCP 也获得了比标准 TCP 更高的吞吐量。

5.2 公平性

从图 3 中我们可以发现,标准 TCP 在所有条件下都能确保竞争流获得相同的平均吞吐量(差异在 5%范围之内),而高速 TCP 变种大多表现出明显的不公平性,其中 FAST TCP 和 S-TCP 公平性指数表现出非常大的变化,BIC-TCP 和 HSTCP 同样表现出明显的不公平性。公平性最好的是 H-TCP。图 4 给出的是 RTT 公平性,从图中可以看出,除了 H-TCP,其他协议都表现出比标准 TCP 大得多的 RTT 不公平性。不

公性程度比标准 TCP 将近大了一个数量级,长 RTT 流最终有可能会“饿死”,如 S-TCP。

5.3 兼容性

图 5 给出了高速网络下,新 TCP 变种与标准 TCP 协议的不公平性,从图中可以看出,S-TCP 和 FAST TCP 表现出非常大的不公平。

5.4 响应性

从图 6 中可以看出,S-TCP,HS-TCP 和 BIC-TCP 表现出非常慢的收敛速度,甚至不收敛(S-TCP)。收敛最快的是 FAST TCP,这是因为 FAST-TCP 同时采用队列延时和分组丢失来评估拥塞和调整窗口,使得其能够迅速将队列长度稳定在目标队列附近。

结论 本文给出了基于仿真的高速长距离网络 TCP 变种协议的性能评估。我们发现,许多最近提出的新的高速 TCP 变种协议在一些简单的仿真测试中并未表现出特别好的性能,如 S-TCP 和 FAST TCP 在表现出明显的不公平性,除 H-TCP 外,其他协议均表现出非常大的 RTT 不公平性;此外,尽管多数协议在高速长距离网络中都能够有效地利用链路资源,但是对网络状况改变响应慢,需要较长的收敛时间。我们认为,通过一致的应用性能测度和标准仿真实例可

以获得有价值的结论。通过比较和分析现有协议的性能,可以为我们设计新的协议提供很好的基础。

参考文献

- 1 Floyd S. High-Speed TCP for Large Congestion Windows. IETF RFC 3649, December 2000
- 2 Kelly T. Scalable TCP: Improving Performance on HighSpeed Wide Area Networks. Computer Communication Review, April 2003
- 3 Jin C, Wei D X, Low S H. FAST TCP: motivation, architecture, algorithms, performance. In: Proc. IEEE INFOCOM, 2004
- 4 Xu L, Harfoush K, Rhee I. Binary Increase Congestion Control for Fast Long-Distance Networks. Proc INFOCOM, 2004
- 5 Leith D J, Shorten R N. H-TCP Protocol for High-Speed Long-Distance Networks. Proc 2nd Workshop on PFLDnet, Argonne, Canada, 2004
- 6 Wei D X, Cao P, Low S H. Time for a TCP Benchmark Suite: [Technical report]. Aug 2005
- 7 Floyd S. Metrics for the Evaluation of Congestion Control Mechanisms. draft-irtf-tmrg-metrics-01.txt, Oct. 2005
- 8 Li Y, Leith D, Shorten R N. Experimental Evaluation of TCP Protocols for High-Speed Networks. [Technical report]. Feb 2005
- 9 Bullot H, Cottrell R L, Jones R H. Evaluation of Advanced TCP Stacks on Fast Long-Distance Production Networks. In: Proc. 2nd Workshop on PFLDnet, Argonne, Canada, 2004
- 10 Kumazoe K, Hori Y, Tsuru M, et al. Transport Protocols for Fast Long-Distance Networks: Comparison of Their Performance in JGN. In: Proc. of SAINT2004 Workshops, Tokyo, Japan, 2004
- 11 The network simulator ns2. Available at: <http://www.isi.edu/nsnam/ns>

(上接第 45 页)

为固定的 36kbps,使用 TM5 进行码率控制,目标码率 192kbps,在仿真试验中,假设基本层受到很好保护,没有包丢失。

MPEFC 选用 $\pi = \{(9,9), (11,9), (13,9), (13,9)\}$ 作为 RS 可用的编码矢量;RCPC 码产生多项式为 (133,171),母码率为 1/2,穿孔周期 $P=4$,因而可用的 RCPC 编码矢量为 $\gamma = (4/5, 4/6, 4/7, 4/8)$,接收端采用软维特比解码。使用平坦瑞利衰落信道加上加性高斯白噪声作为无线试验信道,峰值信噪比 (PSNR) 作为视频质量量度。我们仿真试验了在式 (6) 的框架下,多乘积码传输和单链路层传输 (没有传输层的 RS 码保护) 在相同目标码率情况下的解码质量的测试,同时也做了无保护传输的仿真测试,三者的比较结果如图 3。左图是在固定无线链路平均信噪比 SNR 为 8dB 的情况下,视频解码 PSNR 值随有线链路包丢失率的变化曲线,在包丢失率很低的情况下 (2% 以下),无保护和单链路层保护的解码 PSNR 值比乘积码方案最大分别高出 0.1dB 和 0.2dB,原因是无保护和单链路层保护情况下信道无需保护比特和需要少量的保护比特,更多的比特数用于信源编码;在包丢失率高的情况下,多乘积码保护方案优势明显,如包丢失率 30% 时,多乘积码保护比单链路层保护高出 0.6dB,比无保护传输高出 1.6dB。图 3 右图是在有线链路包丢失率等于 15%,视频解码质量随无线链路平均信噪比值变化曲线,多乘积码保护方案优势同样明显。图 4 是在有线链路平均包丢失率为 15% 和无线链路平均信噪比为 8dB 情况下各帧解码的 PSNR 值分布曲线和 PSNR 值分段统计情况,可以观察到,多乘积码方案不仅视频解码的平均 PSNR 值高于其它两种情况,而且,视频质量的变化要平滑得多。

结论 基于 IP 无线网络视频传输丢包的特点,我们运用多乘积码 FEC (MPFEC) 结构对 FGS 增强层比特平面实施不平等差错保护 (BPUEP),还提出了一个率失真优化的信源-信道联合编码的码率配置算法,仿真结果显示出该算法在提高接收端视频质量方面的优势。该算法的特点是:首先,改变了原文 [7] 中搜索步长 ΔR 不能自适应调整的缺点,使其能够

在一定程度上自适应调整;其次,选择最佳的保护粒度使被保护的比特平面和数据包能够正确接收和解码;其三,在信道码率不够的条件下,尽可能使更多的比特平面和数据包获得必要的保护;最后,在信道码率充足的情况下,前面的比特平面获得比后面的比特平面更好的保护粒度,实现不平等保护,使得接收端解码视频质量尽可能高。需要进一步工作的是:算法的结果还不是全局最优结果,需进一步改进。

参考文献

- 1 Zhang Q, Zhu W W, Zhang Y Q. Channel-Adaptive Resource Allocation for Scalable Video Transmission Over 3G Wireless Network. IEEE Transactions On Circuits and Systems for Video Technology, 2004, 14(8): 1049~1063
- 2 Cheung G, Tan W T, Yoshimura T. Rate-distortion optimized application-level retransmission using streaming agent for video streaming over 3G wireless network. Proceedings IEEE Inf Conf Image Processing, Rochester, New York, Sept. 2002
- 3 Celandroni N, Pototi F. Maximizing single connection TCP good put by trading bandwidth for BER. Int J of Commun Syst, Feb. 2003, 16: 63~79
- 4 Sherwood P G, Zeger K. Error protection for progressive image transmission over memoryless and fading channels. IEEE Trans Comm, 1998, 46: 1555~1559
- 5 Zhai Fan, Eisenberg Y, Pappas T N, et al. Rate-Distortion Optimized Product Code Forward Error Correction for Video Transmission over IP-Based Wireless Networks. Proceedings IEEE International Conf Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2004, 5: 857~860
- 6 Zhao S J, Xiong Z X, Wang X D. Optimal Resource Allocation for Wireless Video over CDMA Networks. IEEE Trans on Mobile Computing, 2005, 4(1): 56~67
- 7 Cheng L J, Zhang M J, Chen L. Rate-distortion Optimized Unequal Loss Protection for FGS Compressed Video. IEEE Transactions on Broadcasting, 2004, 50(2): 126~131
- 8 Wu F, Li S, Zhang Y Q. A framework for efficient progressive fine granularity scalable video coding. IEEE Trans Circuits Syst Video Technol, 2001, 11(3): 332~344
- 9 Hagenauer J. Rate-Compatible Punctured Convolutional Codes (RCPC Codes) and their Applications. IEEE Trans on Commun, 1998, 36(4): 389~400
- 10 Zhang X M, Vetro A, Shi Y Q, et al. Constant quality constrained rate allocation for FGS video coded bitstreams. In: SPIE Conference on Visual Communications and Image Processing (VCIP). 2002, 4671: 817~827
- 11 Stankovic V, Hamzaoui R, Xiong Z. Product code error protection of packetized multimedia bitstreams. In: Proc. IEEE ICIP, Barcelona, Spain, 2003. 177~180