

无线接入网络中组播拥塞控制机制的研究^{*}

刘彦 张冠湘 杨宗凯 杜旭

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉430074)

摘要 随着无线技术的迅速发展和无线设备的日益普及,如何有效地提高传统的组播拥塞控制机制在无线网络中的性能是一个急需解决的课题。本文提出了一种新的组播拥塞控制机制,该机制通过对无线链路上的随机丢失分组和网络中的拥塞丢失分组进行辨别并采取相应的处理措施,有效地提高了传统的组播拥塞控制机制在无线网络中的性能,同时保证了在有线网络环境中的 TCP 友好性。

关键词 拥塞控制,组播,无线链路

Research on Multicast Congestion Control over Wireless Access Links

LIU Yan ZHANG Guan-Xiang YANG Zong-Kai DU Xu

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

Abstract With the quick development of wireless technologies and increasing popularity of wireless devices, it is important and necessary to provide efficient multicast congestion control schemes to wireless environment. In this paper, we propose an enhanced multicast congestion control scheme, called EPGMCC, which achieves significant performance improvement over traditional multicast congestion control schemes over loss-prone wireless access links. The key idea of EPGMCC is to discriminate random loss from congestion loss according to the measured network congestion level, and take different actions accordingly. Our extensive simulation results demonstrate the improvement achieved by EPGMCC over wireless access networks.

Keywords Congestion control, Multicast, Wireless links

1 引言

随着无线传输技术的迅速发展及无线网络的日益普及,无线接入成为了一种日益普及的网络接入方式。无线接入链路具有有线链路的低传输时延特性,同时也具有传统无线系统的高传输误码率(high bit error rates)特性。当针对有线网络环境设计的传统的拥塞控制机制^[1,2]运行于无线接入网络上时,因无线链路上传输误码引起的分组丢失也被拥塞控制机制当作网络拥塞的信号,从而触发了不必要的拥塞避免机制,造成会话的吞吐量降低,网络资源利用率下降。

近年来,如何有效地提高拥塞控制机制在无线链路上的性能成为了互联网研究领域的一个热点课题。目前已有的解决方案主要可以分为两类。第一类方案对分组丢失进行分类:因无线链路上传输误码造成的丢失称为随机丢失,因网络拥塞造成的分组丢失称为拥塞丢失。拥塞控制机制针对不同的丢失类型采用不同的发送速率调整策略,以避免不必要的发送速率降低。这一类方案被称为端到端机制, TCP Veno^[3,4]是其中的代表协议。第二类方案在无线节点对分组的随机丢失进行屏蔽,使数据的发送端“看”不到随机丢失的分组。这类机制的设计思想是局部产生的问题在本地解决,传输层的协议不必做任何修改来适应不同类型链路的特性。它们采取机制使得易产生分组丢失的无线链路表现为有效带宽降低了的高性能链路。这一类方案包括可靠的无线链路层协议(如 AIRMAIL^[5])和 TCP-aware 的链路层协议(如 snoop 协议^[6])。

然而,上述方案基本上都是为了解决单播拥塞控制机制

在无线链路上的性能下降问题。如何有效地提高组播拥塞控制机制^[1,2,9]在无线接入网络中的性能,目前还没有解决方案。随着视频会议、远程教育、数据分发、协同计算等组播应用日益普及,如何有效地提高组播拥塞控制机制在无线接入网络中的性能,是一个重要的、必须解决的课题^[7]。

本文提出了一种新的组播拥塞控制协议-EPGMCC (Enhanced Pragmatic General Multicast Congestion Control)。该协议采用发送端机制和接收端机制相结合的方式,显著提高了组播拥塞控制机制在无线接入网络中的性能。在发送端, EPGMCC 采用了 TCP Veno^[3]中的分组丢失类别辨别和拥塞窗口调整机制,以解决分组随机丢失引起的不必要的发送速率降低的问题;在接收端,引入了一种新的度量——“转发路径时延的变化量”作为判断分组随机丢失及拥塞丢失的依据,从而帮助接收者更准确地估计分组丢失率,使得发送者能选择出正确的组代表。我们利用 ns-2 仿真环境进行了一系列的仿真实验,实验结果表明 EPGMCC 能有效地提高组播拥塞控制机制在无线网络中的性能,同时保证了在有线网络环境中的 TCP 友好性。

2 EPGMCC 的设计

EPGMCC 的基本思想是通过有效地区分分组的随机丢失和拥塞丢失并采取相应的处理措施来提高传统的组播拥塞控制机制在无线接入网络中的性能,它采用接收端机制与发送端机制相配合的方式来达到这一目标:

(1)接收端机制:我们引入“转发路径时延的变化量”这一度量在接收端对分组的随机丢失和拥塞丢失进行辨别,根据

^{*}基金项目:国家自然科学基金资助项目(60202005)。刘彦 博士研究生,主要研究方向为网络传输技术;张冠湘 博士研究生,研究方向为网络计费与拥塞控制;杨宗凯 教授,博士生导师,研究方向为现代通信理论。

辨别结果测量分组丢失率 p , 并将测量结果通过 ACK 或 NAK 消息反馈给发送端, 以帮助发送端选择正确的组代表。

(2) 发送端机制: 发送端利用收到的 ACK 或 NAK 测量到接收端的回环时间 (RTT), 并将分组丢失率 p 和回环时间 RTT 代入 TCP 流量模型^[3], 计算出该接收端的期望接收速率。具有最小期望接收速率的接收者被选择为组代表。发送端通过在它和组代表之间运行一个基于窗口的控制环 (window-based control loop) 来调整发送速率, 实现拥塞控制。传统的窗口调整机制针对于有线网络环境设计, 在无线网络环境中, 无线链路上分组的随机丢失被错误地当成了网络拥塞信号, 从而触发了不必要的拥塞窗口减半, 造成发送速率的过度降低。我们采用了 TCP Veno^[3] 中的分组辨别机制和拥塞窗口调整机制来解决这个问题。

2.1 接收端机制

接收端接收到数据, 将根据分组的接收情况对分组丢失率进行测量。为了让测量得出的分组丢失率能真实反映该接收者路径上的拥塞情况, 应该尽量减小无线链路上随机丢失对分组丢失率的影响。为了在接收端有效地辨别出分组的随机丢失和拥塞丢失, 我们引入“转发路径时延的变化量”这一度量。

如图1所示, 转发路径时延, D_{-r_i} , 定义为从分组被发送者 S 发出到被接收者 R 收到之间的时间间隔:

$$D_{-r_i} = t_{-r_i} - t_{-i} \quad (1)$$

式中, t_{-r_i} 和 t_{-i} 分别为第 i 个分组被接收者 r 收到的时间和被发送者发出的时间。我们将转发路径上缓存中分组个数为零时的转发路径时延标识为 $BaseDelay$ 。 $BaseDelay$ 是转发路径上发送时延和传播时延的总和。以 N 标识转发路径上缓存中的分组个数, 可得 D_{-r_i} 和 $BaseDelay$ 之间有如下关系:

$$D_{-r_i} = BaseDelay + \frac{N}{\mu_f} \quad (2)$$

式中 μ_f 为转发路径上瓶颈链路的带宽。由上式可得:

$$N = \mu_f * (D_{-r_i} - BaseDelay) = \mu_f * \Delta D_{-r_i} \quad (3)$$

由(3)式可知, N 可由 μ_f 和 ΔD_{-r_i} 的乘积估计得出。由于 μ_f 受网络中瞬时流量的影响较小, 并且在组播组的每个接收端估计 μ_f 的大小很困难, 在 EPGMCC 协议中, 我们用转发路径时延的变化量, ΔD_{-r_i} , 对转发路径上缓存中的分组个数 N 进行估计。这样, ΔD_{-r_i} 就成了网络是否处于拥塞状态的一个标识。具体地, 当 $\Delta D_{-r_i} < \alpha$ 时, 我们认为网络处于非拥塞状态, 此时发生的分组丢失被认为是随机丢失; 反之则处于拥塞状态, 分组丢失为拥塞丢失。我们的实验结果表明, 在 α 取值为 $0.8 * \max\{\Delta D_{-r_i}\}$ 时, 能获得比较理想的结果。

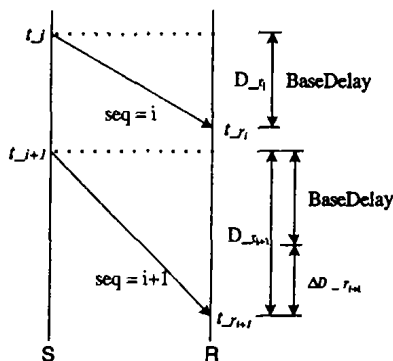


图1 转发路径时延

接收者利用滑动窗口平均机制估计分组丢失率:

$$P_{-i} = W * P_{-i-1} + (1-W) * \chi_{-i}$$

式中 W 为 0 到 1 之间的常数 (推荐值为 500/65536), χ_{-i} 的取值

如下:

$$\chi_{-i} = \begin{cases} 0, & \text{第 } i \text{ 个分组被成功接收,} \\ 0.1, & \text{第 } i \text{ 个分组被丢失并且 } \Delta D_{-r_i} < \alpha, \\ 0.9, & \text{第 } i \text{ 个分组被丢失并且 } \Delta D_{-r_i} \geq \alpha. \end{cases}$$

在对 ΔD_{-r_i} 的测量中, 并不需要发送者和接收者之间的时钟同步, 只要发送者和接收者的时钟差为常数, 这一差值在 $D_{-r_i} - BaseDelay$ 的运算中即会抵消。

为了协助发送者调整发送速率, 作为组代表的接收者需要对接收到的每个数据分组进行确认。而为了避免反馈爆炸问题 (ACK Implosion), 非组代表的接收者只需在检测到分组丢失时向发送者发出否定确认报文 (NAK), 以帮助发送者即时地选择正确的组代表。

2.2 发送端机制

收到接收者发出的 ACK 或 NAK, 发送端将反馈中的分组丢失率 p 和测量得出的回环时间 (RTT) 代入文 [8] 中的 TCP 流量模型计算该接收者的期望接收速率:

$$T =$$

$$\frac{8s}{RTT * (\sqrt{2 * p/3 + 12 * \sqrt{3 * p/8 * p * (1 + 32 * p^2)}})}$$

式中 T 为接收者期望的接收速率 (单位为 bit/s), s 为数据分组的长度 (单位为 byte)。选择具有最小期望接收速率的接收者作为组代表。一个基于窗口的控制环在发送端和组代表之间运行, 以调整发送速率, 实现拥塞控制。

为避免无线链路上分组随机丢失引起的不必要的拥塞窗口减半, EPGMCC 在发送端采用了 TCP Veno^[3] 中的分组丢失辨别机制和拥塞窗口调整机制。Veno 对网络中瓶颈链路上缓存中的分组数目 (以 N 标识) 进行估计, 并将此作为网络拥塞状态的标志。 N 由下式可得:

$$N = \mu_f * (RTT - BaseRTT) \\ = \left(\frac{W}{BaseRTT} - \frac{W}{RTT} \right) * BaseRTT$$

式中 μ_f 为瓶颈链路的带宽, RTT 和 $BaseRTT$ 分别为测量得到的回路时间及最小回路时间, W 为拥塞窗口的大小。

在 EPGMCC 中, 我们沿用了将 N 作为网络拥塞状况的标志并以此为依据调整拥塞窗口大小的思想。当 $N \geq \beta$ 时, 网络被认为处于拥塞状态, 此时发生的分组丢失被认为因网络拥塞引起, 相应的拥塞窗口调整措施为将窗口减半, 以避免网络崩溃的发生; 当 $N < \beta$ 时, 网络处于非拥塞状态, 此时的分组丢失被当成无线链路上传输错误引起的随机丢失, 所采取的拥塞窗口调整措施为将窗口适当减小而不是减半, 以避免发送速率的过量降低。文 [3] 中指出, 根据实验结果, 当 $\beta = 3$ 时可以得到比较好的结果。 EPGMCC 的窗口调整机制如下所示 (W 为拥塞窗口大小, T 为可以发送的分组数目):

- 初始状态 (启动时或超时后)
 $W = T = 1$
- 收到 ACK, 没有分组丢失
 if ($W < SSTHRESH$) then // 慢启动
 { $T = T + 2$
 $W = W + 1$
 } else // 加性增加
 { if ($N < \beta$)
 { $T = T + (1 + 1/W)$
 $W = W + 1/W$
 } else
 { if ($f = 1$)
 { $T = T + (1 + 1/W)$
 $W = W + 1/W$
 $f = 0$
 } else $f = 1$
 }
 }
- 发送分组
 $T = T - 1$
- 收到 ACK, 有分组丢失 (如果接收到的 ACK 报告一个数据分组未被确认, 而该分组后的三个以上的分组已经被确认, 则该分组被认

```

为已经丢失)
if( $N < \beta$ )
{  $T = T - W * (1/5)$ 
   $W = W * (4/5)$ 
}
else
{  $T = T - W/2$ 
   $W = W/2$ 
}

```

此后,在下一个RTT时间内,不再对窗口做任何调整。

上述机制对传统的拥塞窗口调整机制的修改基于以下考虑:对加性增加机制的修改,当 $N \geq \beta$ 时,网络资源已处于或接近于充分利用的状态,拥塞窗口在每两个RTT的时间内增加1,这样能延长组播组以理想速率发送数据的时间;否则,则按照传统拥塞控制机制中的窗口调整策略进行调整。在网络资源接近于充分利用状态时,减慢拥塞窗口增加的速度可以延时因网络中缓存溢出导致的分组丢失的发生,从而可以减小拥塞窗口的振荡频率,提高组播组的吞吐量。对乘性减小机制的修改,当 $N < \beta$ 时,网络资源未被充分利用,此时的分组丢失很可能是因无线链路上分组的随机丢失引起,须将拥塞窗口减小1/5而不是原来的1/2,以避免发送速率降低过度。

3 性能仿真

在本节中,我们将利用ns-2网络仿真器^[10]对EPGMCC的性能进行评估。在仿真实验中,为了和目前的网络情况保持一致,我们使用drop-tail作为路由器的缓存管理策略。

在仿真中,我们采用的基本的拓扑结构如图2所示。图中网络采用了单瓶颈链路的拓扑,L1为该网络中的瓶颈链路,其链路容量为 μ ,传输时延为 τ ,缓冲区的队列长度为 B 。组播组的发送者和接收者分别以 S 和 R 标识。接收者分别通过以下两种链路接入网络:有线链路的容量为10Mbit/s,传输时延为0.1ms;而无线链路的容量为2Mbit/s,传输时延为0.1ms,随机丢包率为1%。

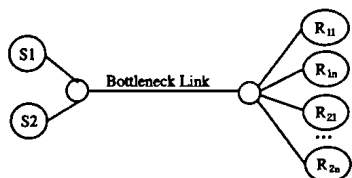


图2 仿真拓扑

3.1 友好性

为了评估EPGMCC协议的TCP友好性和协议内友好性(intra-protocol fairness),我们在图2所示的网络中,让两个EPGMCC组播组和一个TCP连接共享网络带宽。网络中所有的接入链路都采用有线链路,瓶颈链路L1的配置为 $\mu = 1.6\text{Mbit/s}$, $\tau = 50\text{ms}$ 和 $B = 28$,EPGMCC和TCP发送的数据分组具有相同的分组长度506Bytes。图3为在上述网络状况中两个EPGMCC组播组和一个TCP连接接收到的分组数目变化情况。从图中可以看到,网络中的三个会话在仿真时间内收到的分组个数大致相同,由于这些分组具有相同的分组长度,因此可以说两个EPGMCC组播组和一个TCP连接是以公平的方式共享网络中的带宽。也就是说,在有线网络环境中,EPGMCC协议保持了传统拥塞控制协议的TCP友好性和协议内友好性。

值得指出的是,EPGMCC的TCP友好性仅针对于有线网络环境而言。由于EPGMCC协议的设计初衷是为了解决传统的组播拥塞控制协议在无线链路上的性能下降问题,因此在无线网络环境中,EPGMCC协议的性能要超过传统的拥

塞控制协议(如TCP)。我们在3.3节的仿真结果中会对无线网络中EPGMCC的性能进行仿真讨论。

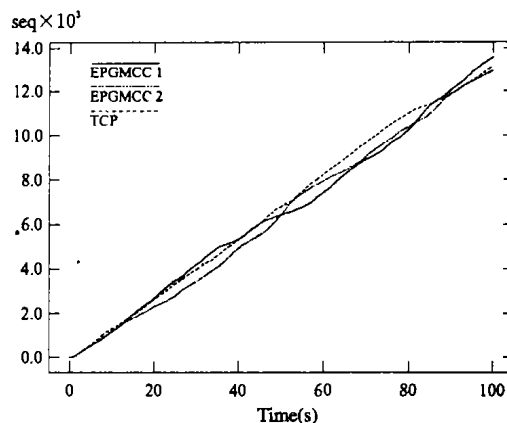


图3 EPGMCC协议的友好性

3.2 灵敏性

能否对网络中可利用带宽的变化作出即时有效的响应也是评价一个拥塞控制机制的重要指标。并且,在组播拥塞控制机制中,接收者加入或是离开组播组,MCC机制必须能即时响应并选择出争取的组代表。为了验证EPGMCC协议的灵敏性,我们采用了星形的网络拓扑结构,4个接收者分别通过10,5,2,1Mbit/s的接入链路接入网络,接入链路的延时相同。在仿真开始时,仅有通过10Mbit/s链路接入的接收者加入组播组;其余的接收者以50s的时间间隔、按照链路带宽较高的接收者先加入的顺序依次加入组播组;在200s时间之后,接收者以50s的时间间隔、按照相反的顺序离开组播组。

图4为在上述网络条件中得到的组播组的吞吐量。从图中可以看出,当有新的成员加入组播组时,EPGMCC协议能根据新的接收者的接收能力迅速地调整发送速率,有效地避免了网络拥塞的发生。当接收者离开组播组时,EPGMCC也能对组成员的离开做出即时正确的响应,根据余下组成员的接收能力迅速地调整发送速率,有效地利用网络资源。仿真结果表明,EPGMCC协议能对网络状况的变化做出即时有效的响应,具有良好的灵敏性。

3.3 性能

EPGMCC协议的目标是通过分组丢失的原因进行辨别并采取相应的处理措施来提高传统组播拥塞控制机制在无线接入网络中的性能。上一小节我们通过仿真分析了协议中分组丢失判别机制的准确性,本小节我们将验证无线网络中EPGMCC协议的性能提高。

我们在图2所示的网络中,先让一个EPGMCC组播组和一个1Mb/s UDP flow共享网络带宽,然后让一个PGMCC^[1]组播组和一个1Mb/s UDP flow共享网络资源。图4为在上述情况中EPGMCC和PGMCC实现的吞吐量比较。网络中瓶颈链路的配置为 $\mu = 1.6\text{Mbit/s}$, $\tau = 80\text{ms}$ 及 $B = 20$,组播组的接收者通过无线链路接入网络。我们修改无线链路上的随机丢包率以观察EPGMCC协议在不同状态的无线链路上的性能提高。从图5可以看到,当接入链路为没有随机丢包的有线链路时,EPGMCC和PGMCC得到的吞吐量基本相同。这说明在有线网络环境中,EPGMCC和传统的拥塞控制协议公平地共享网络资源,这与3.1节中得到的结果相同。当接入链路上的分组随机丢失率大于0时,EPGMCC协议实现的吞吐量要明显大于PGMCC协议的吞吐量。在随机丢失率为1%时,

(下转第50页)

统开销。

从文[4]我们知道,在一个RRP过程中,MN和CN在交换Payload之前,至少要交换6条控制信息。而从图2和图3我们可知,MN和CN在交换Payload之前,只需要交换4条控制信息。从冗余的角度来看,采用Kerberos方法减少了冗余通信,提高了系统通信的性能。

结论 综上所述,与文[4]中的RRP方法相比,采用Kerberos方法来构建MN与CN的通信安全,至少有以下优点:解决了第三方的攻击问题;减少了保护绑定更新所需交换的信息;减少了保护绑定更新所需的冗余通信;使用了较小的密钥长度达到了同样的保密效果。

未来的工作 该文提出的是一个用Kerberos保护MN与CN通信的BU的安全方案,下一步要通过编写代码实现Kerberos。然后通过MIPL(Mobile IPv6 for Linux)来实现,并

进一步比较二者之间性能。验证Kerberos在移动IPv6下的优越性。

参考文献

- 1 Secure Mobile IPv6 Binding Updates with Identity-based Signature. Warodom Werapun, Apinetr Unakul, 2004
- 2 <http://en.wikipedia.org/wiki/Diffie-Hellman>
- 3 http://soft.winzheng.com/infoView/Article_296.htm
- 4 Kerberos Authentication Protocol, Hanyil
- 5 Johnson D, Perkins C, Arkko J. Mibility Support in IPv6. RFC3775, June 2004
- 6 Kaufman C, Perlman R, Spciner M. Network Security Private Communication in a Public World Second Edition. ISBN 7-5053-9945-4

(上接第32页)

EPGMCC协议的吞吐量比PGMCC提高了将近40%((354-254)/254)。

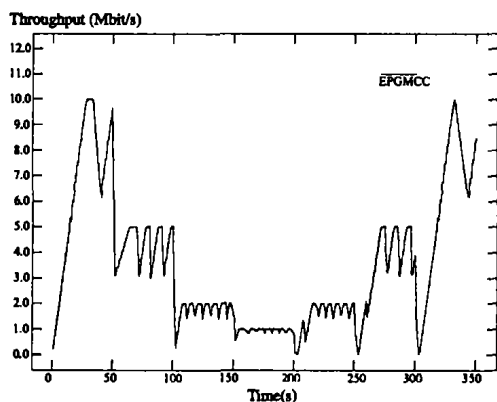


图4 EPGMCC的灵敏性

从仿真结果可知,在有线网络环境中,EPGMCC协议保持对传统组播拥塞控制协议的友好性;同时,在无线网络环境中,EPGMCC有效地提高了传统协议的吞吐量。当无线链路上的随机丢失率为1%时,EPGMCC协议的吞吐量比传统的PGMCC提高了将近40%。

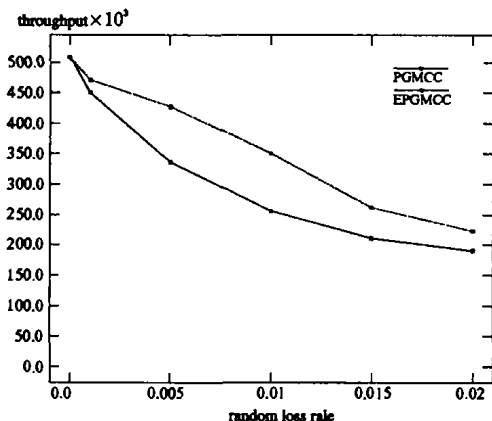


图5 EPGMCC与PGMCC的吞吐量比较

结论 为了解决传统的组播拥塞控制协议在无线接入网络中的性能下降问题,本文提出了一种新的组播拥塞控制协

议EPGMCC。该协议通过在组播组的发送端和接收端对网络的拥塞状态进行估计,并以此为依据辨别分组的丢失原因,对于因网络拥塞发生的分组丢失和因无线链路传输错误发生的分组随机丢失区别对待,从而有效地提高了组播拥塞控制协议在无线网络中的性能。仿真结果表明,在有线网络环境中,EPGMCC协议实现了良好的TCP友好性;在无线网络环境中,EPGMCC协议能较准确地辨别出分组的随机丢失,从而有效地提高了组播拥塞控制协议的性能。当无线链路上的随机丢失率为1%时,EPGMCC协议的吞吐量比传统的PGMCC提高了将近40%。

在本文提出的组播拥塞控制协议中,如何有效地辨别分组的丢失原因并采取适当的处理措施是提高组播组性能的关键。我们将在以后的工作中进行更深入的研究。

参考文献

- 1 Rizzo L. PGMCC: A TCP-friendly Single-Rate Multicast Congestion Control Scheme. ACM SIGCOMM '00, Aug. 2000
- 2 Widmer J, Handley M. Extending Equation-Based Congestion Control to Multicast Applications. ACM SIGCOMM'01, San Diego, Aug. 2001
- 3 Fu C P, Liew S C. TCP Veno: TCP Enhancement for Transmission Over Wireless Access Networks. IEEE Journal of Selected Areas in Communications, Feb. 2003
- 4 Fu C P. TCP Veno: End-to-end Congestion Control over Heterogeneous Networks, [Ph. D dissertation]. July, 2001. <http://www.broadband.ie.cuhk.edu.hk>
- 5 Ayanoglu E, Paul S, LaPorta T F, et al. AIRMAIL: A link-layer protocol for wireless networks. ACM ACM/Baltzer Wireless Networks J, 1995(1): 47~60
- 6 Balakrishnan H, Seshan S, Katz R H. Improving reliable transport and handoff performance in cellular wireless networks. ACM Wireless Networks, 1995(1)
- 7 Mankin A, Romanow A, Bradner S, Paxson V. IETF criteria for evaluating reliable multicast transport and application protocols. RFC2357, June 1998
- 8 Padhye J, Firoiu V, Towsley D, Kurose J. Modeling TCP Throughput: A Simple Model and its Empirical Validation. In: Proc ACM SIGCOMM, 1998
- 9 苏晓丽,郑明春,李锦涛,孟强.一种基于速率的组播拥塞控制算法及其性能分析.电子学报, Feb. 2004. 330~334
- 10 VINT Project. Network Simulator version 2 (ns-2). <http://www.isi.edu/nsnam/ns>