

基于反馈的区分服务网络拥塞管理方案研究*

李 昕^{1,2a}, 陈 浩¹, 陈 坚^{2b}

(1. 湖南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410012; 2. 湖南工学院 a. 计算机与信息科学系; b. 电气与信息工程系, 湖南 衡阳 421001)

摘 要: 为了有效解决 RED 算法拥塞响应滞后以及在聚集类之间公平性不足的问题, 提出建立一种基于早期拥塞指示反馈的区分服务网络模型, 并在该模型上采用优先级早期随机检测算法。在网络入口节点对分组进行分类、聚集与监测, 各队列按优先级设置不同队列长度阈值, 当平均队列长度或各队列长度达到相应阈值范围时, 立即触发不同程度拥塞指示包向源端反馈。使用改进的 NS 进行了仿真实验, 实验结果表明该算法使得拥塞指示能尽可能快地到达 TCP 源, 有效地降低路由器中的丢包率。提高网络利用率, 并且为不同的聚集类提供不同优先级服务, 保障了聚集类的公平性。

关键词: 拥塞控制; 优先级早期随机检测; 早期拥塞指示; 丢包率; 公平性

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)08-3088-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.08.075

Scheme research of congestion management in DiffServ networks based on feedback

LI Xin^{1,2a}, CHEN Hao¹, CHEN Jian^{2b}

(1. School of Information Science & Engineering, Hunan University, Changsha 410012, China; 2. a. Dept. of Computer & Information Science, b. Dept. of Electrical & Information Engineering, Hunan Institute of Technology, Hengyang Hunan 421001, China)

Abstract: In order to solve the problem of RED algorithm in both response delay and lack of fairness between aggregations, this paper proposed the establishment of early congestion notification feedback based on DiffServ network model, and used the priority early random detection algorithm. In the entrance of the DiffServ network it classified, aggregated and monitored the arriving packets, and set each queue according to their priority to a different queue length threshold. When the average queue length or some one queue length reached the corresponding threshold range, it sent varying degrees of congestion indication packet immediately to the TCP source. It gave some experiments in the paper using modified NS simulator. The experiments show that the algorithm ensures the congestion notification can reach the TCP source as quickly as it can, so effectively reduces the packet loss rate of the router and improves network utilization. At the same time, the algorithm can provide different priority services for different aggregations, and ensure the fairness.

Key words: congestion control; priority RED; early congestion notification; packet loss rate; fairness

0 引言

随机早期检测 (random early detection, RED) 算法^[1] 是一种主动队列管理技术, 它根据一定的概率判断拥塞的出现, 对到达的包进行标记或丢弃, 作为拥塞指示通知发送方, 丢包或标记的概率由平均队列长度确定。RED 算法如下:

包到达事件:

计算平均队列长度 avg

if $min_{th} \leq avg < max_{th}$

计算概率 $pa = f(avg)$

根据 pa : 标记到达的包

else if $max_{th} \leq avg$

标记到达的包

实验表明, RED 算法可以有效地减少路由器上的丢包, 使得路由器平均队列长度维持在一个相对稳定的状态。此外, RED 算法还具有减少排队延时、提高链路利用率、避免全局同

步等优点, 因此 RED 算法及其改进算法成为研究的热点。以“2000RED 算法”作为关键字在 Google 上的检索记录约为 1 120 000 条, 以“2005RED 算法”作为关键字在 Google 上的检索记录约为 1 980 000 条, 以“RED 算法”为关键字在 Google 的检索记录约为 9 180 000 条。

然而, RED 算法也存在一些不足: a) RED 算法没有考虑到针对不同 DSCP 的数据流提供不同优先级别的服务质量; b) 文献[2,3]指出 RED ECN 消息的发生严重滞后。图 1 显示了 RED ECN 消息传输过程。从图 1 可以看出, 拥塞指示并不是直接发送给 TCP 数据源, 而是随着数据包到达 TCP 接收方, 由接收方在 ACK 包头中设置 ECN-echo 位, ACK 包到达发送方后, 发送方检查到 ECN-echo 位后, 才确定在路由器中产生早期拥塞, 调整数据的发送速度。在此过程中, 过程③可能发生带有 ECN 位的包丢弃情况, 而⑤可能丢弃含 ECN-echo 位的包, 导致②~⑥过程中, 虽然路由器发现了拥塞并发出早期拥塞指示, 但是 TCP 发送方没有得到拥塞指示, 仍以原速度向路由器

收稿日期: 2011-12-20; 修回日期: 2012-02-01 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60803130); 湖南工学院科研项目(HGY0549, HY09007); 衡阳市科技计划项目(2011KJ27)

作者简介: 李昕(1979-), 女, 湖南衡阳人, 讲师, 硕士, 主要研究方向为网络服务质量(xin_li@163.com); 陈浩(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为网络安全、图像识别; 陈坚(1981-), 男, 讲师, 硕士, 主要研究方向为信号处理、计算机仿真。

发送数据。

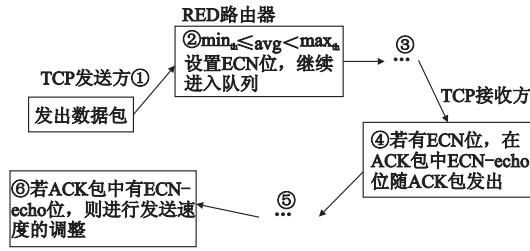


图1 RED ECN消息传输过程

针对这些问题,本文将早期拥塞指示反馈的思想引入区分服务模型^[4-12],建立一个基于早期拥塞指示反馈的区分服务网络模型(DiffServ based on early congestion notification feedback, DS-ECNF),并在此模型上采用优先级早期随机检测算法(priority RED)。

1 系统结构

1.1 基本机制

在网络入口节点,对到达的分组首先根据分组包头的DSCP标记分为不同的聚集。计量器负责监视各聚集类的平均队列长度及总平均队列长度,并通过整形器保证聚集的平均队列长度不会超过预约带宽。当平均队列长度达到阈值范围,将视聚集类的平均长度与类阈值关系,触发不同优先级的拥塞指示包(ECN packet, ECNP),并直接向发送方发出,一方面使得拥塞指示能尽可能快地到达TCP源,减少丢包率;另一方面,提高了各聚集类之间的公平性。

1.2 入口节点

入口节点的结构如图2所示。在入口节点,到达的分组首先根据分组包头的DSCP标记将分组分为不同的聚集。计量器负责监视聚集队列的平均队列长度,并通过整形器保证聚集的平均队列长度不会超过最大阈值,超过的通信量将被丢弃。当通信量介于最小与最大阈值之间时,触发不同的ECNP,通知源端降低发送速率,从而降低丢包率。

1.3 优先级早期随机检测算法

假设需要对 n 个业务提供有区别服务,每个业务一个优先级,分别为 $c_1, c_2, \dots, c_n$,假定 $(1 > c_1 > c_2 > \dots > c_n > 0)$,且 $\sum c_i = 1$ 。队列的主要参数类似RED的阈值参数 $(\min_{th}, \max_{th}, \max_p, w)$,分别代表平均队列长度的最小值、最大值、最大丢包率及新数据包对平均队列长度的影响权重,对每个聚集类 i 有一个聚集类阈值参数 $(c_i \times \min_{th}, c_i \times \max_{th})$ 。以下为优先级早期随机检测算法:

数据包到达事件:

根据数据包头DSCP值,确定所属服务等级,假定为 i ;

计算 avg 及 avg_i : $avg = avg \times (1 - w) + L \times w$;

$avg_i = avg_i \times (1 - w) + L \times w$; $/$ * avg_i 为聚集类 i 的平均队列长度,

L 为新到达数据包长度 * /

if $avg < \min_{th}$ 数据包入队;

else if $avg < \max_{th}$

if $avg_i < c_i \times \min_{th}$ 数据包入队;

else if $avg_i < c_i \times \max_{th}$

$\{ p = (avg_i - c_i \times \min_{th}) \times \max_p / (\max_{th} - \min_{th})$

以概率 p 丢弃聚集类 i 的数据包;

触发低优先级ECNP;

else $\{ p = (avg - \min_{th}) \times \max_p / ci \times (\max_{th} - \min_{th})$

以概率 $\min(p, 1)$ 丢弃聚集类 i 的数据包;

触发中优先级ECNP;

else $\{$ 丢弃聚集类 i 的数据包;

触发高优先级ECNP;

2 性能分析

2.1 收敛性分析

本算法相比RED算法能使TCP源端更早感知拥塞,从而有效降低拥塞的发生,降低丢包率。TCP是一种可靠的端到端的传输层控制协议,拥塞控制主要原理依赖于一个拥塞窗口(cwnd)来控制,TCP还有一个对端通告的接收窗口(rwnd)用于流量控制。Cwnd窗口值的大小就代表能够发送出去的但还没有收到ACK的最大数据报文段,显然窗口越大那么数据发送的速度也就越快,但是也越有可能使得网络出现拥塞,然而如果窗口值为1,每发送一个数据,都要等到对方的确认才能发送第二个数据包,显然数据传输效率低下。TCP的拥塞控制算法就是要在两者之间权衡,选取最好的cwnd值,从而使得网络吞吐量最大化且不产生拥塞。权衡的方法就是TCP发送方根据收到ACK应答包中rwnd的大小调整发送窗口的大小,TCP真正的发送窗口 $= \min(rwnd, cwnd)$ 。RED算法就是在这个基础上来实施的。在网络早期拥塞发生时,至少经过RTT时间(甚至更长时间,假如数据丢失),TCP源端依然可能正常接收ACK报文,从而加大发送窗口,导致数据发送速度加快,从而导致更严重的拥塞早日到来。而本方案中,在靠近源端口的边缘路由器采用早期拥塞指示反馈,能在预测到拥塞将发生的第一时间通知TCP源端,从而使源端能更快调整下一次的发送窗口大小,降低cwnd,从而减缓数据发送速度,进而缓解路由器的拥塞程度,降低丢包率。

2.2 公平性分析

本算法能在提供区分服务的同时,保障不同优先级聚集类的公平性。在网络总需求远小于网络供应时,所有的需求都能满足,不存在公平性问题。而当网络需求远大于网络供应时,无论采取什么控制方法,都会丢包,公平性也体现不明显。不同算法的优越性是体现在网络需求比网络供应稍大时,如何合理进行资源分配,使得资源的利用率达到最大。本算法的核心思想是将聚集类 i 平均长度 avg_i 和队列的平均长度 avg 与资源分配的阈值 $(c_i \times \min_{th}, c_i \times \max_{th})$ 及 $(\min_{th}, \max_{th})$ 进行比较,从而对拥塞的程度进行监控。其中聚集类 i 的优先级由 ci 来体现,优先级越高, c_i 越大 $(1 > c_1 > c_2 > \dots > c_n > 0)$,且

$$\sum c_i = 1 \quad (1)$$

$\max_{th}$ 通常设置为 $\min_{th}$ 的2倍或3倍,本算法中为

$$\max_{th} = 2\min_{th} \quad (2)$$

a) 高优先级的聚集类对资源的占用率比低优先级的聚集类对资源的占用率高。

假定有 i 和 j 两类聚集类,其中, i 为高优先级, j 为低优先级,则聚集类 i 对资源的占用率最小为 $c_i \times \min_{th}$,聚集类 j 对资源的占用率最小为 $c_j \times \min_{th}$,由于 $c_i > c_j > 0$,故 $c_i \times \min_{th} > c_j \times \min_{th}$ 。同理,聚集类 i 对资源的最大占用率 $c_i \times \max_{th}$ 超过聚集类 j 对资源的最大占用率 $c_j \times \max_{th}$ 。

b) 在高优先级聚集类缺失的情况下,低优先级聚集类可以使用高优先级聚集类的资源。

假定某段时刻只有一个聚集类 k 到达,则此时

$$\text{avg}_k = \text{avg} \quad (3)$$

当 $\text{avg}_k = c_k \times \max_{th}$ 时,与式(2)联立,即有 $\text{avg}_k = 2c_k \times \min_{th}$ 。由式(1)得 $c_k \ll 1/k$,则有 $\text{avg}_k \ll 2\min_{th}/k$,当 $k > 2$ 时, $\text{avg}_k < \min_{th}$ 。由式(3)知,此时 $\text{avg} < \min_{th}$,尚处于网络需求小于网络供应阶段,按本算法,数据流入队。所以,本算法在保障高优先级数据流的同时,并没有降低低优先级数据流的服务质量。当有几个优先级不同的聚集类存在时, $\text{avg} > \text{avg}_j$,故当 $\text{avg} < \min_{th}$ 不成立时,按优先级占用有限资源,公平分配,且优先级低的聚集类 k 可以保障至少占用 $c_k \times \min_{th}$ 的资源。

2.3 仿真实验

本节将利用改进的网络仿真器 NS 评价 DS-ECNF 模型性能。实验用的拓扑结构如图3所示。它由4个源节点(S_1, S_2, S_3, S_4)和1个目的节点 D 以及连接它们的两个边缘路由器节点和一个核心路由器节点(E_1, Core, E_d)构成。节点 E_1 和 Core 之间链路的队列管理算法是 PRED, Core 到 E_d 为 RR 轮询方式调度。

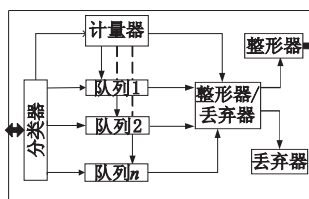


图2 入口节点结构

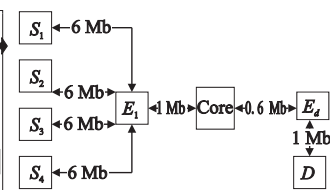


图3 网络拓扑结构

1) PRED 与 RIO-D 算法丢包率及拥塞响应时间对比实验

在 NS-2 中,区分服务网络的 RED 算法的应用为 RIO-D。在 E_1 设置一个物理队列两个虚拟队列,仅在 S_1 和 S_2 产生 FTP 流,利用随机数来设定每个数据源 ftp 开始时间和延迟。RIO 的队列长度阈值参数为 (10, 30, 0.02), PRED 的队列阈值参数为 (15, 45, 0.5), 优先级分别为 0.6 和 0.4。仿真时间为 25 s。丢包率情况统计见表1,拥塞响应时间见表2。

表1 RIO 及 PRED 算法丢包率情况

算法	流	发送包数	丢失包数	丢失率
RIO-D 算法	ftp1 ($S_1 \rightarrow d$)	1 396	135	0.098 612
	ftp2 ($S_2 \rightarrow d$)	1 640	20	0.012 195
	合计	3 036	155	0.051 054
PRED 算法	ftp1 ($S_1 \rightarrow d$)	1 436	49	0.034 123
	ftp2 ($S_2 \rightarrow d$)	1 560	84	0.053 846
	合计	2 996	133	0.044 392

表2 包 1134、4039 在各队列中到达和离开时间

	TCP 包 1134	ACK4039
S_2	5.51 3 981	17.581 2
E_1	5.5 16 371 1	17.580 15
E_1	5.6 428 711	17.580 15
Core	5.6 52 191 1	17.578 83
Core	5.652 191	17.584 11
E_d	5.660 611	17.578 83
E_d	5.660 611	17.578 83
D	5.660 611	17.578 08

从表1可以看出,高优先级的 ftp1 流的丢包率从 0.098 612 降为 0.034 123,降幅为 65.4%。虽然较低优先级的 ftp2 流的丢包率从 0.012 195 上升到 0.053 846,然而总的丢包率从 0.051 054 降为 0.044 392,降幅为 17.6%。以上数据表明,在网络资源不足的情况下,PRED 算法在降低总丢包率的情况下,极大地保障了高优先级数据的优先级;且 PRED 算法中,ftp1 流的优先级系数为 0.6,ftp2 的优先级系数为 0.4,其丢包率分别为 0.034

123 与 0.053 846,可见高优先级数据流与低优先级数据流丢包率与其优先级系数近似成反比,高优先级数据流丢包率低,低优先级数据流丢包率则较高。

在执行 RIO 算法的 TR 文件中,对标记为 1134 数据包进行跟踪,该包属于 S_2 节点 5 号端口与 D 节点的 0 号端口所产生的 TCP 连接,当它通过路由器时,产生 ECN 指示,当它到达 D 节点 0 号端口时,产生的标记为 4039,表2分别给出了这两个包到达各个队列和节点的时间和离开时间。

由于 RT 的存在,TCP 发送方对拥塞指示响应滞后了。在 12.067 的时间段内,虽然路由器检测到早期拥塞,但是拥塞指示不能及时返回 TCP 数据源,因而在这个时间段内,与 1134 包同属于一个 TCP 连接的包 1399、1472、1894、1924、2257、2463、2774、2907 等在到达 RED 路由器后,又产生了拥塞指示,平均队列长度始终超过最大阈值状态,路由器不断标记 ECN 位,甚至出现了丢包现象。采用 PRED 算法,对 ns 进行改进,增加反向传输指针,同样,选择一个产生 ECN 信息的包进行了跟踪,表3给出了相应的跟踪结果。

表3 包 144、87 在各队列中到达和离开时间

S_1	E_1	Core	E_d	D
TCP 包 144	0.448 524	0.450 911		
			→	
ACK 包 87	0.453 721	0.450 911		
			←	

从表3可以发现,当 TCP144 包在时刻 0.450 911 到达路由器队列,根据 PRED 算法确定需要发送拥塞指示,就立刻产生 ECN 包 87 沿相反方向发送给 TCP 源节点 S_1 ,于时刻 0.453 721 到达 TCP 源 S_1 , S_1 立即检查 ECN 包中携带的 ECN 信息(丢包、概率 ECN、平均队列超出阈值),对数据的发送速度作出相应的调整,整个响应时间 $RT=0.005 197$ s,与 RIO 算法实验比较,响应时间大大缩短。

2) PRED 算法中 TCP 流和 UDP 流实验对比

继续对 PRED 算法的性能进行仿真实验,为了突出显示 PRED 在公平性方面的性能,此次实验将增加源 S_3 和 S_4 。实验的参数设置同前。第一次实验从 S_1 到 S_4 均用随机数产生 FTP 流,第二次实验在 S_1 到 S_3 用随机数产生 FTP 流,在 S_4 产生 ON/OFF 的 CBR 流。吞吐量情况分别如图4、5所示。

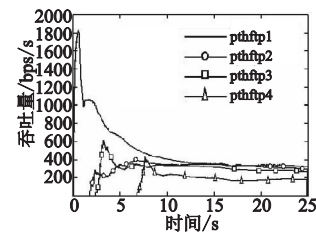


图4 四个TCP流的吞吐量情况

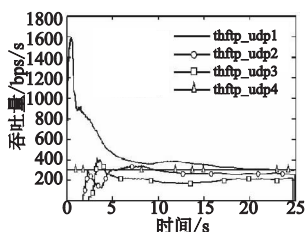


图5 三个TCP和一个UDP流吞吐量情况

图4及图5中,横坐标为时间(整个仿真时间25 s),纵坐标代表吞吐量。图4中 pthftp1、pthftp2、pthftp3、pthftp4 分别代表源端为 S_1, S_2, S_3, S_4 的 TCP 数据流,图5中, thftp-udp1、thftp-udp2、thftp-udp3、thftp-udp4 分别代表源端为 S_1, S_2, S_3 的 TCP 流及源端为 S_4 的 UDP 数据流,优先级系数分别为 0.4、0.3、0.2 和 0.1。对图4、5 综合分析可以看出,高优先级的 TCP 流比低优先级的 TCP 流对资源的占有率高,符合 PRED 中对资源占有的优先级设置;而 UDP 数据源因为缺少源端的流量控制,对资源的占有率维持水平,相比其他算法中,UDP 数据源挤占 TCP 数据源资源,PRED 算法具有更好的 TCP 友好性。(下转第 3115 页)

实验中发现网络的生存时间受漏斗效应的影响很明显,跳数为1的簇内节点成为了整个网络生存时间的瓶颈,采用基于密集簇的簇首轮换算法后,仅需要通过在靠近汇聚节点的簇内增加相应的转发节点(不主动发送非周期性数据),就能大大延长网络的生存时间。在实验中通过在原来每个簇六个节点的基础上增加相应的转发节点的结果如表4所示,网络增加六个转发节点(增加了9%的节点数量)即将生存时间从202.3天延长至293.4天(延长了45%),说明采用基于密集簇的簇首轮换算法后能够以较小的代价解决漏斗效应。

表4 添加 ERN 节点后的网络生存时间

一跳簇节点 添加个数	两跳簇节点 添加个数	最先死亡节点 所在簇的跳数	生存时间 /天
0	0	1	202.3
1	0	1	236.0
2	0	2	246.2
3	0	2	248.6
4	2	3	293.4

5 结束语

本文首先分析面向输电线路在线监测的线状无线传感器网络的特点,并根据其在拓扑结构上线性、规律性的局部密集的特征提出了基于密集簇的分簇和簇首轮换算法,它具有分布式、控制开销小、网络维护简单的特点,能够很好地均衡簇内能量消耗。同时在这些特点上提出了基于命名机制的路由算法,利用拓扑本身的位置信息减少路由建立和维护开销,并能够很好地应对簇首轮换对路由的影响。通过仿真实验验证了分簇算法在能量均衡和提高网络生存时间的有效性。仿真实验还表明在基于密集簇的簇首轮换算法和基于命名机制的路由算法框架下,可以简单地通过部署少量转发节点来均衡簇间的能量消耗。在将来的工作中,将研究网络中具有少量部署在输电线路上的传感器时(如舞动传感器)对当前分簇算法的影响,同时还将研究和设计 MAC 协议来适应这种分簇算法以满足输电线路监测的应用。

(上接第3090页)

3 结束语

本文通过理论证明及对仿真实验进行的数据分析表明, PRED 在保证网络利用率的同时,有效降低路由器的丢包率,及确保不同优先级的聚集类公平性。此外,本文通过分析说明在边缘路由器中采用 PRED 算法能发挥最有效的作用,在主干路由器中不适合采用,以避免占用网络带宽和增加路由器的开销。本文尚未对各聚集类数据流的公平性进行分析,下一步将对各聚集类的公平性进行研究。

参考文献:

- [1] FLOYD S, JACOBSOM V. Random early detection gateways for congestion avoidance[J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 1993, 1(4): 397-413.
- [2] BRADEN R. IETF RFC 2309, Recommendations on queue management and congestion avoidance in the Internet[S]. 1998.
- [3] 李磊, 施鸿宝. 早期确定性拥塞指示算法[J]. *计算机工程*, 2002, 28(1): 85-88.

参考文献:

- [1] YI Yang, DIVAN D, HARLEY R G, *et al.* Power line sensor net: a new concept for power grid monitoring[C]//Proc of Power Engineering Society General Meeting. 2006: 8.
- [2] YI Yang, LAMBERT F, DIVAN D. A survey on technologies for implementing sensor networks for power delivery systems[C]//Proc of Power Engineering Society General Meeting. 2007: 1-8.
- [3] LEON R A, VITTAL V, MANIMARAN G. Application of sensor network for secure electric energy infrastructure[J]. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2007, 22(2): 1021-1028.
- [4] HUNG K S, LEE W K, LI V O K, *et al.* On wireless sensors communication for overhead transmission line monitoring in power delivery systems[C]//Proc of the 1st IEEE International Conference on Smart Grid Communications. 2010: 309-314.
- [5] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660-670.
- [6] LINDSEY S, RAGHAVENDRA C S. PEGASIS: power-efficient gathering in sensor information systems[C]//Proc of IEEE Aerospace Conference. 2002: 1125-1130.
- [7] YOUNIS O, FAHMY S. Distributed clustering in Ad-hoc sensor networks: a hybrid, energy-efficient approach[C]//Proc of IEEE INFOCOM. 2004: 629-640.
- [8] 吴华君, 张自力, 李卫. 一种适用于煤矿井下无线传感网的能量均衡路由协议[J]. *计算机科学*, 2011, 38(4): 145-150.
- [9] 于永华, 李丽芬, 朱永利. 长链型数据收集传感器网络的负载均衡研究[J]. *计算机应用研究*, 2010, 27(7): 2724-2726.
- [10] 林俊如, 朱宝晖. A wireless sensor networks hybrid MAC protocol for overhead transmission line monitoring [R]. 2011.
- [11] BUETTNER M, YEE G V, ANDERSON E, *et al.* X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks[C]//Proc of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM, 2006: 307-320.

- [4] 庞斌, 高文. 区分服务网络基于覆盖的拥塞管理方案[J]. *软件学报*, 2003, 14(2): 305-311.
- [5] RATHGEB K, FLOYD S. IETF RFC 2481, a proposal to add explicit congestion notification (ECN) to IP[S]. 1999.
- [6] FENG W C, KANDLUR D D, SAHA D, *et al.* A self-configuring RED gateway[C]//Proc of INFOCOM. 1999: 1320-1328.
- [7] LI Lei, PAN Yong, SHI Hong-bao. An adaptive model of RED/ECN parameters[C]//Proc of International Conference on Communication Technology Proceedings. 2000: 707-711.
- [8] FLOYD S. TCP and explicit congestion notification[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 1994, 24(5): 8-23.
- [9] 高文宇, 王建新, 陈松乔. PFFD: 一种基于预测的公平的主动队列管理算法[J]. *计算机研究与发展*, 2006, 43(2): 204-210.
- [10] 刘明, 窦文华, 张鹤颖. 自适应的 PIP 主动队列管理机制[J]. *计算机研究与发展*, 2007, 44(2): 201-207.
- [11] 汪浩, 严伟. 基于自相似聚合业务流量的 AQM 算法性能评价[J]. *软件学报*, 2006, 17(9): 1958-1968.
- [12] 周川, 张璐, 陈庆伟. 基于显示拥塞指示的自适应主动队列管理算法[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(23): 7577-7580.