

# 一种在区分服务网络中新的三色标记器<sup>\*</sup>)

郝俊瑞<sup>1</sup> 余少华<sup>1,2</sup>

(华中科技大学计算机科学与技术学院 武汉 430074)<sup>1</sup> (武汉邮电科学研究院 武汉 430074)<sup>2</sup>

**摘要** 研究了在区分服务体系结构中传统的标记算法,传统的标记算法不能提供标记的准确性和按比例共享带宽的公平性。在此基础上,提出了一种改进的标记算法。该算法在进行数据包的标记时,同时考虑平均速率和瞬时速率两个参数,提高了标记的准确性。当流的速率超过目标速率时,按照正比于数据流的速率的概率将超过速率的流标记为黄色,这样提高了对剩余带宽的公平共享性。试验证明,ITCM算法与传统的标记算法相比,不仅能提高吞吐量,还可以达到剩余带宽的按比例共享。

**关键词** 三色标记器,区分服务,QoS,按比例公平性

## An Innovation Three Color Marker in DiffServ Networks

HAO Jun-rui<sup>1</sup> YU Shao-hua<sup>1,2</sup>

(College of Computer Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)<sup>1</sup>

(Wuhan Research Institute of Posts & Telecommunications, Wuhan 430074, China)<sup>2</sup>

**Abstract** The traditional traffic markers cannot provide precision of marking and proportional fairness in the current Differentiated Service (DiffServ) networks. To solve these problems, the Innovation Three Color Marker (ITCM) algorithm is proposed in this paper. ITCM algorithm calculates both the long term average rate and the instantaneous rate of traffic when marking the packet. Moreover, ITCM algorithm achieves the proportional fair sharing among aggregates by marking the packet as yellow with probability in proportion to CIR. This paper has compared the performance of ITCM marker with traditional markers. Simulation results show that ITCM algorithm performs better than traditional markers in the case of under-subscription. It not only achieves the target rate, but also achieves proportional fairness of sharing the excess bandwidth.

**Keywords** Three color marker, Diffserv, Proportional fairness, Quality of service

## 1 引言

区分服务(DiffServ)<sup>[1]</sup>体系结构是IETF大力推广的在互联网上实施服务质量(QoS)的解决方案。在区分服务体系结构中,IP流被分成不同的转发类,这些流在网络的边缘被标记为不同的优先级,在网络的核心部分根据丢弃策略,在发生拥塞时,根据其标记的优先级进行丢弃。区分服务体系结构可以在当前的尽力而为网络上提供QoS服务。最常用的方法是被IETF定义的加速转发逐跳行为(EF PHB)<sup>[2]</sup>和确保转发逐跳行为(AF PHB)<sup>[3]</sup>。前者主要是保证一个最小的延迟而后者则是要确保最小的吞吐量。为了确保最小的吞吐量引入了目标速率或者称为额定信息速率的概念。为了实现上述目标,区分服务引入了两个重要机制:边缘路由器的流量调节器中的数据包的标记机制和核心路由器中的队列管理机制。数据包的标记机制在网络边缘根据业务规格(SLA)对IP数据包进行监控和标记。如果被测量的流符合业务规格,那么在这个流中的数据包就被标记为高的优先级,而对于那些不符合规格的流则标记为低的优先级,享受尽力而为的服务。

在当前的区分服务结构中,最常用的标记器是基于令牌桶(Token Bucket)的标记器<sup>[4-7]</sup>和基于滑动窗口的标记

器<sup>[8-10]</sup>。这些标记算法中使用两个目标速率:额定信息速率(Committed Information Rate CIR)和峰值信息速率(Peak Information Rate PIR)。前者是用户要求的要保证的业务的最小吞吐量;后者是在网络有剩余带宽时业务要达到的信息速率。一般情况下峰值信息速率要高于额定信息速率。当前的区分服务框架中的标记器主要有两个问题:1)业务流不能按比例共享网络的剩余带宽,也就是不能达到“与目标速率成比例的公平性”;2)业务流被标记为是否符合规格的准确性不够。所谓“与目标速率成比例的公平性”定义如下:在网络欠载时,所有的业务流应该得到与目标速率成比例的剩余带宽;在网络过载时,所有的业务流应该经历与目标速率成比例的吞吐量下降。这种公平性实际上就是比例公平性。对于标记的准确性有两层含义:从提供QoS保证的角度出发,应该将符合SLA条件的数据包尽可能高概率地标记为符合规格的(in-profile)。反之,网络的有效带宽应该限制被那些不符合SLA条件的流所占用。这要求标记器既要考虑数据包的平均速率,又要考虑数据包的瞬时速率。

本文针对以上问题提出了一种新的三色标记器算法(Innovation Three Color Marker ITCM)。ITCM算法基于以下的原则:1)在判断流是否符合规格时,既要计算该流的长期历史平均速率,同时还要考虑该流的瞬时速率,也就是突发性。

<sup>\*</sup>基金项目:国家“863”项目 MSR 城域网实用化项目(项目编号:2005AA121411)资助。郝俊瑞 博士研究生,主要研究方向为城域以太网;余少华 博士,教授,博士生导师,研究方向为城域以太网和 IP 网络。

2)当流的速率超过目标速率时,按照正比于数据流速率的概率将超过速率的流标记为低优先级,这样提高了对剩余带宽的公平共享性。ITCM算法与其他算法相比的优点在于以下几个方面。首先,与文献[4,8,9]和文献[14]比较,ITCM算法考虑了流的瞬时特性;对于被长期历史特性平滑掉的超过规格的突发流量,ITCM算法可以将其标记出来,这提高了算法标记的准确性。第二,ITCM算法不仅能达到目标速率,而且能支持按比例公平的共享带宽。第三,ITCM算法不像文献[11,12,15]和文献[18]那样,还需要额外的信令机制或协议。

文章第2部分简单介绍了传统的标记器,并且分析了它们存在的缺点;第3部分给出了ITCM算法的理论基础和ITCM算法的实现;在第4部分中给出了和传统算法的仿真比较结果;最后总结全文。

## 2 问题分析

标记器是根据用户的业务规格(SLA)来标记流的,符合业务规格(in-profile)的流将被标记为高优先级,它将得到最好的服务(发生拥塞时最后被丢弃)。对于那些不符合业务规格(out-profile)的流将被标记为低优先级,在发生拥塞时将首先被丢弃。根据检查流的规格性的机制不同,可以将标记器分为两种类型:基于令牌桶的标记器和基于滑动窗口的标记器。

基于令牌桶的标记器在很多研究中被使用。令牌桶标记器使用一个或多个令牌桶来测量数据包的发送速率。一个单独的令牌桶标记器是很容易实现的:当一个数据包到达时,如果令牌桶中有令牌,则该数据包被标记为in-profile,如果令牌桶中没有令牌,则数据包被标记为out-profile。为了提高对剩余带宽的公平共享,IETF提出了单速率三色标记算法srTCM<sup>[4]</sup>和双速率三色标记算法trTCM<sup>[5]</sup>。在三色标记算法中使用两个令牌桶,其中一个装的是绿色令牌,另一个是黄色令牌。当一个数据包到达时,如果绿色和黄色令牌都有,则该数据包被标记为绿色;如果只有黄色令牌,则数据包被标记为黄色;否则,它被标记为红色。令牌桶中的令牌随着标记的数据包而减少,该算法很容易实现。

但是,令牌桶标记器有一个缺点:第一,桶的大小不容易确定;第二,令牌桶算法的性能对桶的大小很敏感。当令牌桶的大小被设置为一个较小的值时,令牌桶不能很好地平滑IP流的突发特性,这样导致了被标记为in-profile的数据包的速率小于目标速率。如果令牌桶的大小被设置为一个较大的值,那么被标记为in-profile的数据包的速率则大于目标速率,这是因为有一部分不符合SLA的数据包也被标记为in-profile。一个有效的标记器应该避免这样的缺点,令牌桶标记器不能达到标记的准确性和公平性。

另一类是基于时间滑动窗口(Time Sliding Window, TSW)的标记器,其典型代表是D. Clark等在文献[7]中提出的一种tswTCM算法。当一个数据包到达时,标记器计算数据包的平均到达速率。如果计算的平均速率小于CIR,则将该数据包标记为绿色,否则将数据包以不同的概率标记为绿色、黄色或者红色。tswTCM算法如图1所示。

在tswTCM算法中,当时间滑动窗口取比较大的值时,该算法保持了一个长期的历史,不能很好地反映TCP流量的动态特性;它会将流量的突发性平滑掉。当时间滑动窗口取一个较小的值时,它保持了一个较短的历史时间,该算法能更

有效地包容TCP流量的动态特性,但是它会更多的数据包标记为in-profile。

```

avg-rate = Estimated Avg Traffic Sending rate
if (avg-rate <= CIR)
  The packet is marked as green;
else if (avg-rate <= PIR) AND (avg-rate > CIR)
  calculate P0 = (avg-rate - CIR) / avg-rate
  with probability P0 the packet is marked as yellow;
  with probability (1-P0) the packet is marked as green;
else
  calculate P1 = (avg-rate - PIR) / avg-rate;
  calculate P2 = (PIR - CIR) / avg-rate;
  with probability P1 the packet is marked as red;
  with probability P2 the packet is marked as yellow;
  with probability (1-(P1+P2)) the packet is marked as green;

```

图1 tswTCM标记算法

现在来分析一下tswTCM算法将数据包标记为黄色和红色的过程,以及在汇聚流中共享剩余带宽的不公平性。对于流量小于CIR的流,tswTCM算法将所有数据包标记为绿色,没有数据包被标记为黄色和红色。当流量速率超过CIR,小于CIR部分的流将被标记为绿色,剩余的部分根据计算所得的概率将被标记为黄色或者红色;当平均速率大于PIR时,数据包被标记为黄色的概率将随着发送速率的增加而减少,而标记为红色数据包的概率随着发送速率的增加而增加;这将有助于惩罚有侵略性的发送者。然而,当流量的平均速率大于CIR而小于PIR时,数据包被标记为黄色的概率和被这个汇聚流定义的剩余带宽成比例,而不是和汇聚流的CIR成比例。当平均速率大于PIR时,数据包被标记为黄色的概率将随着发送速率的增加而减小,而数据包被标记为红色的概率将随着发送速率的增加而增加。这种情况导致了那些业务带宽较小的用户得到了比他应该得到的带宽更多的带宽,而那些业务带宽较大的用户却得到了比他应该得到的带宽更少的带宽。这就是在有额外带宽时的不公平性的体现。

通过上面的分析可以看出,这两种传统的标记器有两个共同的缺点:1)它们不能准确地同时反映数据包的长期平均速率和瞬时速率。当这些方法关注于数据流的长期平均特性时,它们不能达到目标速率,而当它们关注于数据包的瞬时速率时,它们将过多的数据包标记为In-profile。2)在分配剩余带宽的问题上存在不公平性。这种不公平性导致了在有剩余带宽时,小业务用户受益即获得了高于自己应得比例的剩余带宽,而大业务客户则得到了相对较少的剩余带宽。

## 3 ITCM 算法

基于以上的分析,本文提出了Innovation Three Color Marker(ITCM)算法。在测量IP数据包的速率时,ITCM不仅测量IP数据包的长期平均速率,同时测量每个IP数据包到达时的瞬时速率。在进行标记算法时,ITCM算法既考虑了流的长期历史特性,又兼顾流的瞬时特性,同时考虑流在享用剩余带宽时的公平性。在标记数据包的时候,ITCM按照正比于CIR的概率将数据包标记为黄色。在这一节中,首先给出ITCM算法的理论基础,然后给出ITCM的具体实现。

首先给出算法中使用的变量和符号:假定从开始到现在时间为 $t$ ,IP数据包的发送速率为 $R_t$ ;在下一个 $\Delta t$ 时间间隔内,接收到的新的IP数据包的长度为 $\Delta s$ ,则可以这样来计算在 $t+\Delta t$ 时间内当前IP数据包的平均速率 $R_{t+\Delta t}$ :

$$R_{t+\Delta t} = \frac{(R_t \times t) + \Delta s}{t + \Delta t} \quad (1)$$

将(1)式变形可得:

$$R_{t+\Delta t} = R_t \times \left( \frac{t}{t+\Delta t} \right) + \frac{\Delta s}{\Delta t} \times \left( \frac{\Delta t}{t+\Delta t} \right) \quad (2)$$

$$R_{t+\Delta t} = R_t \times \left( 1 - \frac{\Delta t}{t+\Delta t} \right) + \frac{\Delta s}{\Delta t} \times \left( \frac{\Delta t}{t+\Delta t} \right) \quad (3)$$

$$R_{t+\Delta t} = R_t + \left( \frac{\Delta s}{\Delta t} - R_t \right) \times \left( \frac{\Delta t}{t+\Delta t} \right) \quad (4)$$

(4)式变得很容易理解,其中  $R_{t+\Delta t}$  为下一次的预测值,  $R_t$  为本次的测量值;  $\frac{\Delta s}{\Delta t} - R_t$  为本次测量值与预测值的偏差,这种

偏差主要来源于 IP 流的突发性。而  $\frac{\Delta t}{t+\Delta t}$  可以看作是这

种偏差的权重因子。因此(4)式可以理解: IP 的预测速率等于上次测量速率加上本次测量速率与上次测量速率的偏差乘以权重因子。由(4)式可以明显看出,该测量方法可以很好地平滑 IP 流的突发特性。(2)式是一个递推公式,本质上是一个二阶差分方程,但由于  $\frac{\Delta s}{\Delta t}$  是个随机变量,因此(4)式无解析

解。由(4)式可知,  $R$  的值会随真值  $\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{s}{t}$  而随机地上下波动。对(4)式两边取期望得:

$$E(R_{t+\Delta t}) = E(R_t) + E \left[ \left( \frac{\Delta s}{\Delta t} - R_t \right) \times \left( \frac{\Delta t}{t+\Delta t} \right) \right] \quad (5)$$

假设  $\frac{\Delta s}{\Delta t} - R_t$  与  $\frac{\Delta t}{t+\Delta t}$  相互独立,则可得到:

$$E(R) = E \left( \frac{\Delta s}{\Delta t} \right) \quad (6)$$

(6)式说明,尽管  $\frac{\Delta s}{\Delta t}$  是个随机变量,  $R$  会随  $\frac{\Delta s}{\Delta t}$  上下波动,但  $R$  最终会反映  $\frac{\Delta s}{\Delta t}$  的真实情况。用(2)式测量 IP 数据包的平均速率  $R_L$ ,在测量 IP 数据包的到达速率时,可取单个 IP 数据包为  $\frac{\Delta s}{\Delta t}$  测量样本,此时  $\Delta t$  即为当 IP 数据包到达时,此 IP 数据包与上一个 IP 数据包到达时刻之差,而  $\Delta s$  为此 IP 数据包的长度。 $\frac{\Delta s}{\Delta t}$  即为瞬时速率  $R_s$ 。

设用户的额定速率为  $CIR$ ,额定突发流量为  $CBS$ ,峰值速率为  $PIR$ ,峰值突发流量为  $PBS$ 。平均速率代表了数据流的长期历史特性,它平滑了 IP 流的突发性。这导致了一些突发流量超过  $CBS$  的不符合规格的数据流的平均速率却小于  $CIR$ 。在传统的标记算法中,包括 tswTCM 和令牌桶标记算法,这样的数据流被标记为 In-profile,因为它们不能测量数据流的突发性。为了避免这种情况,ITCM 算法在每当数据包到达时,如果数据包的长期平均速率小于  $CIR$ ,则计算数据包的瞬时速率。这样提高了数据包标记的准确性,有效地限制了不符合规格的流消耗有效的带宽。

在网络欠载的情况下,网络的额外带宽是被标记为黄色和红色的数据包占用的。为了达到额外带宽的按比例共享,黄色数据包的标记变得非常重要。当数据包的平均速率超过  $PIR$  时,ITCM 算法按照正比于  $CIR$  的概率将数据包标记为黄色。为了解决网络中剩余带宽被共享的不公平性,和  $CIR$  成比例的概率将数据包标记为黄色,这种方法达到了很好的公平性。这提高了按比例共享额外带宽的公平性。ITCM 算法的具体实现如图 2 所示。

在 ITCM 算法中当长期平均速率  $R_{temp} < CIR$  时,计算该数据包的瞬时速率  $R_s$ ,如果  $R_s < CIR$ ;该数据包显然是符合

SLA 规范的,被标记为绿色;如果  $R_s > CIR$ ,并且  $\Delta s < CBS$ ;则仍然标记为绿色。因为虽然  $R_s > CIR$ ,但  $\Delta s$  并没有超过  $CBS$ ,说明只是一次小的突发流量,仍然符合规范,标记为绿色。如果  $\Delta s > CBS$ ,则表明  $\Delta s$  超过了规定的突发流量;并且造成了瞬时速率  $R_s > CIR$ ,  $R_{temp} < CIR$  说明长期历史平均将该突发流量平滑掉,没有能反映流量的真正特性,该突发流量在瞬时间内占用过多的带宽,是不符合规范的,所以将其标记为黄色。

```

Innovation Three Color Marker :
Initialize:
R_L=0;R_s=0;R_temp=0;
Δt=0; t=0;
last_time=now;
when a packet arrives:
Δs=the length of the packet;
Δt=now-last_time;
last_time = now;
R_s = Δs/Δt; g=Δt/(t+Δt);
R_temp=R_L×(1-g)+R_s×g;
if (R_temp<CIR){
    If(R_s<1.33×CIR)or [(R_s>1.33×CIR)and(Δs<CBS)]
        The packet is marked Green.
        R_L=R_temp;
        t=t+Δt;
    If(R_s>1.33×CIR)and(Δs>CBS)
        The packet is marked yellow.
        R_L=R_temp;
        t=t+Δt;
}
else if(CIR<R_temp<PIR) {
    the packet is marked yellow;
    R_L=R_L×(1-g);
    t=t+Δt;
}
else if(R_temp>PIR) {
    p=(PIR/R_temp) ×(1-total_cir/total_bandwidth);
    if (p>=0){
        the packet is marked yellow with probability with p,
        and is marked red with probability 1-p.
    }
    else{
        the packet is marked as red;
    }
    R_L=R_L×(1-g);
    t=t+Δt;
}

```

图 2 ITCM 算法的具体实现

当  $CIR < R_{temp} < PIR$  时,该数据包被标记为黄色。

当  $R_{temp} > PIR$  时,该数据包以概率  $p$  标记为黄色;以概率  $1-p$  标记为红色。标记为黄色的概率正比于它们的额定信息速率  $CIR$ ,这样可以让各个流按比例共享剩余带宽。

$$P = \left( \frac{PIR}{R_{temp}} \times \frac{excess\_bandwidth}{total\_cir} \right) \quad (7)$$

在计算数据包的长期平均速率  $R_L$  时,被标记为黄色和红色的数据包不再记入绿色数据包的速率;如图中的  $R_L = R_{temp}$ 。这是因为被标记为黄色和红色的数据包是超过  $CIR$  的部分,在发生拥塞时将首先被丢弃,所以不被记入到绿色数据包中。比例因子  $excess\_bandwidth/total\_cir$  可以在路由器上根据业务情况进行配置,该因子在某种程度上可以反映路由器的拥塞程度。

从公式(7)可以知道在网络欠载的情况下,标记为黄色的数据包的概率正比于它们的  $CIR$  和它们的额外带宽;这样提高了对额外带宽的公平共享性。在网络过载时,黄色数据包标记的概率小于 0,这时数据包以概率 1 标记为红色。

在 ITCM 算法中,如果数据包的速率超过了它们的 SLA

规定的业务速率,则所有的数据包被标记为黄色或红色,没有数据包被标记为绿色。这样可以使源数据流更好地遵从业务SLA的规定。发送者不得不面对业务质量的降低,比如被标记为黄色的数据包将有更大的延迟。而在传统的标记算法中,当业务速率超过它的CIR时,会将一部分数据包标记为绿色。然而,平均速率超过CIR意味着数据源正在以超过SLA规定的速率发送它的数据,同时网络也有剩余带宽。

#### 4 仿真试验

在这一节中比较ITCM算法和传统标记算法的性能。这里选取的传统算法包括双速三色标记算法(trTCM)和基于时间滑动窗口的三色标记算法(tswTCM)。仿真实验使用NS-2网络仿真器。

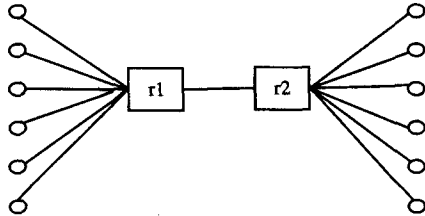


图3 试验所用的网络拓扑

实验使用的网络拓扑如图3所示:有一组源主机和一组目的主机。源主机发送流量通过边界路由器R1和R2到达目的主机。每个主机上有一个流,R1和R2是边界路由器,负责监测和标记流量。

##### 实验1:与令牌桶算法进行准确性的比较

该实验是用来证明ITCM算法可以达到较高的准确性。在实验中有6个TCP连接,其中5个要求确保服务(Assured Service);另外一个要求尽力而为服务。所有的TCP连接有相同的RTT(Round Trip Time)值,R1和R2之间连接的带宽是35Mbps。分别比较在CBS值较大和较小的两种情况下,令牌桶算法和ITCM算法的性能。在第一种情况,CBS的值设置为100kbps,在第二种情况下,CBS的值设置为2Mbps。表1和表2给出了标记为in profile数据包的平均速率,以及在目的主机收到的被标记为OUT数据包的平均速率。

表1 令牌桶算法和ITCM算法在CBS值较小的情况下的比较

| Flow | Token Bucket |      |      |       | ITCM |      |       |
|------|--------------|------|------|-------|------|------|-------|
|      | CIR          | IN   | OUT  | Total | IN   | OUT  | Total |
| 0    | 1            | 0.72 | 0.63 | 1.35  | 0.89 | 0.34 | 1.23  |
| 1    | 2            | 1.39 | 0.52 | 1.91  | 1.71 | 0.41 | 2.12  |
| 2    | 5            | 3.58 | 0.44 | 4.02  | 4.47 | 0.39 | 4.86  |
| 3    | 10           | 8.66 | 0.61 | 9.27  | 9.29 | 0.31 | 9.6   |
| 4    | 15           | 12.4 | 0.34 | 12.7  | 14.2 | 0.47 | 14.7  |
| 5    | 0            | 0.83 | 0.83 | 0     | 0.78 | 0.78 | 0     |

表2 令牌桶算法和ITCM算法在CBS值较大的情况下的比较

| Flow | Token Bucket |      |      |       | ITCM |      |       |
|------|--------------|------|------|-------|------|------|-------|
|      | CIR          | IN   | OUT  | Total | IN   | OUT  | Total |
| 0    | 1            | 1.5  | 0.19 | 1.69  | 1.1  | 0.09 | 1.19  |
| 1    | 2            | 2.6  | 0.33 | 2.93  | 2.15 | 0.16 | 2.31  |
| 2    | 5            | 5.98 | 0.56 | 6.54  | 5.27 | 0.27 | 5.54  |
| 3    | 10           | 10.6 | 0.41 | 11.0  | 10.2 | 0.31 | 10.5  |
| 4    | 15           | 15.7 | 0.72 | 16.4  | 15.3 | 0.32 | 15.6  |
| 5    | 0            | 0.92 | 0.92 | 0     | 0.89 | 0.89 | 0     |

表1是令牌桶算法和ITCM算法在CBS=100kbps时的

比较结果。从表1中可以看出,虽然ITCM和令牌桶算法标记为In的数据包的速率都比CIR值小,但是ITCM算法更接近于CIR。令牌桶算法比ITCM算法小的原因是因为当桶的大小较小时,令牌桶算法不能很好地平滑IP流量的突发特性。而ITCM算法同时考虑了数据流的长期特性和瞬时突发特性。表1表明ITCM算法比令牌桶算法在较小的CBS时能更准确地标记流。

在CBS较大时令牌桶算法和ITCM算法的比较结果如表2所示。当CBS值较大时,令牌桶算法表现得相对要好些。令牌桶算法标记数据包为In的速率超过了CIR和ITCM算法标记为In的速率。这意味着令牌桶算法将一些不符合SLA要求的数据包标记为In。当数据数据包的平均速率比CIR小时,ITCM将瞬时速率超过PIR的数据包标记为黄色。这种做法减轻了不符合规格的数据数据包消耗过多的带宽。从表2中可以看出ITCM能进行比令牌桶算法更准确的标记。这同时也说明了令牌桶算法对于令牌桶大小的敏感性。

从表1和表2中可以看出,ITCM算法比令牌桶算法,无论在CBS较大还是较小的情况下的准确性都要高。

##### 实验2:在网络欠载下的性能比较

在该实验中比较ITCM算法和trTCM以及tswTCM算法的按比例公平性。实验使用的拓扑图3所示,五个数据流共享R1到R2之间的链路。试验将在不同的网络负载情况下比较三种算法以及理想情况下的吞吐量。在这里定义的网络负载为所有数据流占用的总的带宽与链路提供的带宽之间的比值。理想的吞吐量是数据流按比例应该获得的带宽,它是这样计算的:  $goodput = CIR + (excess\_bandwidth \times CIR/total\_cir)$ 。

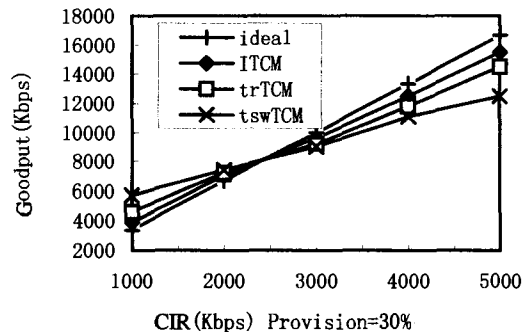


图4 负载为30%时的吞吐量

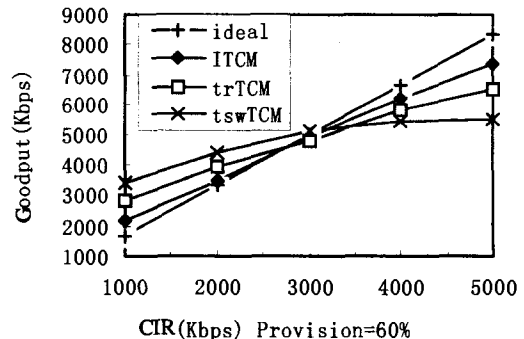


图5 负载为60%时的吞吐量

数据流的目标速率被设置为{CIR<sub>i</sub> = iMbps}。R1到R2的链路带宽根据负载情况设置为不同的值。在负载为30%

的情况下,带宽被设置为 50Mbps;负载为 60%时,带宽被设置为 25Mbps;负载为 90%时,带宽被设置为 16.7Mbps。对于 trTCM 算法,令牌到达的速率设置为和它们的 CIR 相等, CBS 设置为 500kbps, EBS 被设置为 600kbps, PIR 被设置为 1.2 倍的 CIR。图 4, 5 和 6 给出了三种算法分别在负载 30%, 60% 和 90% 情况下的性能比较情况。

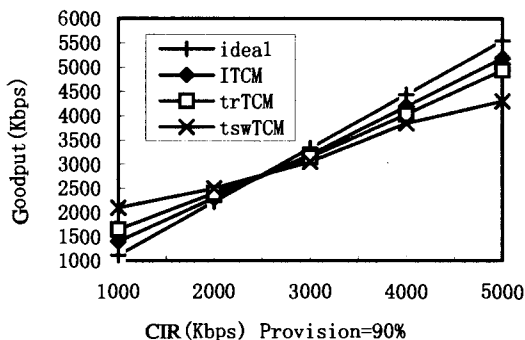


图 6 负载为 90% 的吞吐量

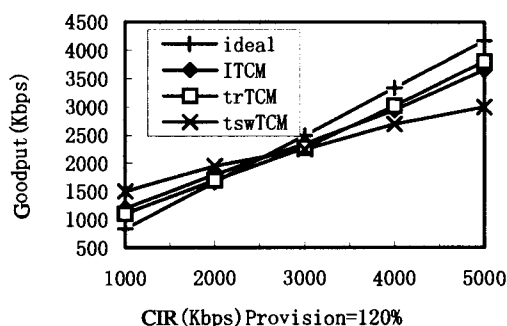


图 7 负载为 120% 的吞吐量

从图 4, 5 和 6 中可以看出, 当数据流有较小的目标速率时 ( $CIR=1, 2\text{Mbps}$ ) 得到的实际带宽比它们应该得到的带宽要多; 而当数据流有较大的目标速率时 ( $CIR=3, 4, 5\text{Mbps}$ ), 得到的实际带宽要小于它们应该得到的带宽。从图中可以看出, 在三种不同网络负载的情况下 ITCM 算法的实际占用带宽是最接近于理想值的。而 tswTCM 与理想值的差距是最大的, trTCM 算法的实际占用带宽在 tswTCM 和 ITCM 之间。在三种情况下 ITCM 算法都优于 trTCM 和 tswTCM 算法, 这表明 ITCM 算法在网络欠载的情况下能获得更好的额外带宽的按比例共享特性。

#### 实验 3: 在网络过载下的性能比较

该实验比较在网络负载超过链路实际带宽时 ITCM 和传统标记器的性能。使用和前面实验相同的网络拓扑结构, 数据流的目标速率仍然设置为:  $\{CIR_i = i\text{Mbps}\}$ 。在这种情况下, 链路的带宽设置为 12.5Mbps, 这种情况的负载为 120%。图 7 给出了 ITCM 算法和其他算法在此情况下的性能比较。

从图 7 中可以看出, ITCM 算法的曲线接近于令牌桶算法的曲线, 表明 ITCM 算法的性能在网络过载情况下的性能并没有比传统的标记器表现得更好。这主要是因为, 在网络过载情况下, 如果数据包的平均速率超过 PIR, ITCM 算法以概率 1 将数据包标记为红色, ITCM 算法在网络过载的情况下的按比例共享特性相比传统的标记算法没有显著提高。

**结束语** 在本文中, 首先分析了在当前的区分服务体系

结构中使用的传统标记器的缺点: 它们不能达到标记的准确性, 不能实现按比例共享剩余带宽。基于以上分析, 本文提出了一种新型的标记算法, 称为 ITCM 算法, 来提高标记的准确性和按比例共享剩余带宽的公平性。ITCM 算法的主要思想基于以下两点: 第一, ITCM 在标记数据包时, 同时计算数据包的长期平均速率和瞬时速率; 第二, 当数据包的平均速率大于 PIR 时, ITCM 算法以正比于 CIR 的概率标记数据包为黄色。在最后比较了 ITCM 算法和传统的标记算法 trTCM 和 tswTCM。实验结果表明 ITCM 算法在网络欠载的情况下的性能非常好。它不仅能达到目标速率, 而且也大大提高了数据流按比例共享剩余带宽的公平性。另外, 本文比较了 ITCM 和传统标记算法在网络过载情况下的性能。从实验结果来看 ITCM 的性能和传统算法在网络过载情况下的性能接近, 没有太多改善。当然, 网络中大多数情况是欠载的情况。在未来的研究中, 将着重提高 ITCM 算法在网络过载情况下的性能。

#### 参考文献

- [1] Blake S, Black D, Carlson M, et al. An architecture for differentiated services. RFC 2475, December 1998
- [2] Jacobson V, Nichols K, Poduri K. An expedited forwarding phb. RFC 2598, June 1999
- [3] Heinanen J, Baker F, Weiss W, et al. Assured forwarding phb group. RFC 2597, June 1999
- [4] Heinanen J, Guerin R. A single rate three color marker. RFC 2697, September 1999
- [5] Heinanen J, Guerin R. A two rate three color marker. RFC 2698, September 1999
- [6] Sahu S, Nain P, Diot C, et al. On achievable service differentiation with token bucket marking for TCP// Proceedings of ACM SIGMETRICS. 2000; 23-33
- [7] Su H, Atiquzzaman M. Performance modeling of differentiated service network with a token bucket marker// 11th IEEE Workshop on Local and Metropolitan Area Networks. Boulder CO., USA, March 2001; 81-82
- [8] Chait Y, Hollot C, Misra V, et al. Providing throughput differentiation for tcp flows using adaptive two color marking and multi-level AQM// Proceedings of IEEE INFOCOM. 2001
- [9] Clark D, Fang W. Explicit allocation of best effort packet delivery service. IEEE/ACM Trans. on Networking, 1998, 6(4): 362-373
- [10] Fang W, Seddigh N, Nandy B. A time sliding window three color marker (tswtcm). RFC 2859, June 2000
- [11] Lin W, Zheng R, Hou J. How to make assured service more assured// Proceedings of IEEE ICNP. 1999
- [12] Zhang M, Wang R, Peterson L, et al. Probabilistic packet scheduling: Achieving proportional share bandwidth allocation for TCP flows// Proceedings of IEEE INFOCOM. June 2002
- [13] Feng W, Kandlur D, Saha D, et al. Adaptive packet marking for maintaining end-to-end throughput in a differentiated-services internet. IEEE/ACM Trans. on Networking, 1999, 7(5): 685-697
- [14] Kumar K, Ananda A L, Jacob L. A memory-based approach for a TCP-friendly traffic conditioner in diffserv networks// Proceedings of the 9th ICNP. Riverside, California, USA, 2001; 138-145
- [15] Yeom I, Reddy A L N. Impact of marking strategy on aggregated flows in a differentiated services network// International Workshop on QoS. London, UK, May 1999; 156-158
- [16] Andrikopoulos I, Wood L, Pavlou G. A fair traffic conditioner for the assured service in a differentiated services internet. IEEE ICC, 2000
- [17] Malouch N, Liu Z. Performance analysis of TCP with RIO routers// Proceedings of IEEE Globecom. Nov. 2002
- [18] Yeom I, Reddy A L N. Modeling TCP behavior in a differentiated services network. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2001, 9(1); 31-46
- [19] El-Gendy M A, Shin K G. Equation-based packet marking for assured forwarding services// Proceedings of IEEE INFOCOM. June 2002
- [20] Seddigh N, Nandy B, Piedad P. Bandwidth assurance issues for TCP flows in a differentiated services network// Proceedings of IEEE Globecom. 1999
- [21] Su H, Atiquzzaman M. Itswtcm: A new aggregate maker to improve fairness in diffserv// Proceedings of IEEE Globecom. 2001; 1841-1846