

QoS保证网络中的节点状态研究

韩琳娜^{1,2}, 李倩², 马正新², 胡捍英¹

(1. 信息工程大学通信工程系, 河南郑州 450002; 2. 清华大学电子工程系微波与数字通信国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 网络资源的使用情况主要通过节点状态信息表达, 其参数的选择在很大程度上决定了网络能支持怎样的QoS要求。通过分析现有网络机制, 选择节点延时的概率密度函数作为节点状态信息参数, 利用滤波器算法使其正态化, 验证此节点状态函数应用于现有网络各类调度算法后, 保持正态分布形式不变。这种节点状态的可描述化使得通过求解网络路径各节点延时的概率密度函数来有效地估计本路径的各度量参数变为现实。节点延时的正态化形式使节点状态获取、更新、业务分配、接纳控制及调度机制的计算变得简单, 并在一定程度上有利于提高节点状态的平稳性, 提高网络效率, 达到为网络业务提供相应的统计服务质量保证的目标。

关键词: 节点状态; 节点延时; 概率函数; 反馈滤波器; 正态分布函数

中图分类号: TN91 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2005)05-0041-05

网络承载的信息业务逐渐由纯数据业务传输发展成数据、语音、图像、视频等多媒体综合业务的传输, 这些综合业务, 特别是实时多媒体业务对网络提出了更高、更广泛的服务质量(Quality of Service)要求。目前公认的QoS分为用户级QoS和网络级QoS。用户级QoS是指用户在一次业务传输过程中向网络提出的QoS要求^[1]。网络级QoS是指在某一时刻或一段时间内各个网络组成元素(例如传输链路、路由器)能够为经由的所有业务提供的QoS要求。本文研究针对网络级QoS。

网络资源的使用情况主要通过节点状态信息表达, 节点状态信息参数的选择在很大程度上决定了网络能支持怎样的QoS要求, 包括路由机制、接纳控制机制和调度机制, 是实现满足QoS要求网络的关键条件。常用的节点状态信息包括路由节点的可用带宽、延时和延时抖动等。现在网络中绝大部分QoS业务, 特别是实时多媒体业务(如IP电话、电视会议)的QoS要求直接表现为对端到端延时的要求。本文从节点状态信息的选择和对现有网络机制的影响上分析, 选择节点延时, 即数据包从到达离开路由节点所经历的延时作为网络节点的状态信息。由于网络中均为多端口路由器, 忽略节点对数据包的处理延时, 节点延时实际为数据包在某端口输出链路上的延时。此时用概率统计特征描述节点状态最为合理。

关于状态信息不准确的概率路由的问题, Guerin等在文献[2]中进行了分析, 发现基于节点状态的统计信息计算路径满足QoS要求的概率非常困难, 尤其对加性度量参数, 如链路延时等。由于网络中各节点业务的到达和离去的随机性导致节点状态为随机量, 节点状态独立即成为以节点延时为状态参数研究路由问题时经常使用的假设条件。目前许多针对网络中路径延时特性的研究都基于各节点延时独立的假设。Lorenz基于这一假设, 给出链路延时为某些特殊分布(如均匀分布和负指数分布)时近似最优的端到端延时的分解方案^[3]。文献[4]指出保证路径延时概率分布在业务传输延时内的空间保持概率足够大是实现QoS路由目标的基本条件。根据以上的独立性假设和QoS路由目标分析, 使网络可以提供相应的QoS服务, 就必须控制节点状态, 使数据包在该节点的延时概率分布平稳或在一段时间内保持不变, 这可以通过业务接纳控制、路由选择、业务整形调度等实现。

收稿日期: 2005-04-04

基金项目: 国家高技术研究发展(“863”计划)基金资助项目(2001AA115126)

作者简介: 韩琳娜(1979-), 女, 山东临沭人, 博士生, 主要从事通信系统、网络理论等技术研究。

1 节点状态信息的选择

1.1 研究背景

本文考虑的网络支持大小不同的信息包,具有任意的连接和交换的拓扑结构^[5]。假设连接具有有界延迟,数据包在无阻塞的通路中交换。例如在数据包到达一个输入连接节点时,可以直接选路去相应的输出节点而不会出现交换的冲突;输出目的地不同的数据包不会互相干扰,仅在交换的输出节点需要排队。

1.2 节点状态信息的选择

现有网络研究中,节点状态信息的定义有多种,目前简化定义主要有以下 3 种:①剩余出口带宽:通过统计节点某出口的线路上无信息传输时间 T_{non} ,可知 $W_{\text{non}} = \frac{T_{\text{non}}}{T} W$ (T 为统计时长, W 为出口物理带宽);②缓冲区排队长度:统计节点输出缓冲区的业务队列长度的均值或概率函数作为节点状态;③节点延时:以数据包经过此节点所需要的时间的均值或概率函数作为节点状态。

可从网络的确定性 QoS 保证和统计性 QoS 保证两方面进行分析。统计保证就是从统计意义上保证业务的 QoS 要求,Guérin 提出将网络的状态看作随机变量^[6],用它的概率函数作为状态信息,统计地保证为业务提供的服务质量;确定性保证即为业务提供确定的 QoS 参数,对于连续流媒体业务,确定性保证过于保守。对突发性较强的 VBR 视频和带激活功能的语音业务,确定性保证造成带宽资源的浪费;统计保证通过容忍少量丢包,大大提高了网络的利用率。网络中绝大部分 QoS 业务,特别是实时多媒体业务(例如:IP 电话、电视会议)的 QoS 要求都直接表现为对端到端延时的要求,业务在网络中各节点的延时是随机变量,对于随机变化的量,用它的瞬时值或单个统计值描述它的状态是不准确的,不准确的状态信息会导致路由选择失败和网络性能下降。采用节点延时的概率密度函数作为状态信息,可以通过运算,把所有的路径参数表示为这一状态信息的函数。

1.3 完备性、简单性分析

网络节点状态定义的合理性分析必须考虑描述完备性和简单性这两方面的因素。下面基于这两点,从节点状态的平稳性对网络效率的影响和节点状态的不确定性对 QoS 路由的影响两个方面,对定义的节点状态参数进行分析。

首先分析描述完备性。节点状态是网络信道描述的基本参数,选择的状态必须能尽量完整描述节点的传输特征。在分组网中,衡量所有业务服务质量的最根本的标准是数据包的传输延时。业务的 QoS 要求从根本上是对路径传输延时特性的要求。选择数据包的延时的概率密度函数作为节点状态信息。假设网络中节点状态是彼此独立的,那么所有路径参数都可描述为状态信息的函数。它符合 QoS 网络对状态信息完备性的要求。

第 2 是描述简单性。简单的状态描述可以简化理论研究和工程实现的复杂性。设网络用 $G = \{V, E\}$ 表示,其中 V 是网络所有路由节点的集合, E 是网络中所有有向链路的集合。以各链路的延时作为节点状态,假设它们在统计过程中是平稳的。 P 是 G 中的一条路径,它由 n 条链路 $p_1, p_2, \dots, p_n (p_i \in E)$ 组成,延时分别为 $d_{p1}, d_{p2}, \dots, d_{pn}$,假设各链路的概率密度函数分别是 $f_{p1}(d_{p1}), f_{p2}(d_{p2}), \dots, f_{pn}(d_{pn})$ (d_p 表示路径 p 的总延时),接入业务的最大延时要求为 D 。假设 $f_p(d_p)$ 在业务传输期间保持不变,如果 $d_{p1}, d_{p2}, \dots, d_{pn}$ 是相互独立的,那么路径 p 能提供的服务质量参数的概率密度函数为: $f_p(d_p) = f_{p1}(d_{p1}) \otimes f_{p2}(d_{p2}) \cdots \otimes f_{pn}(d_{pn})$ 。

1.4 节点延时概率函数正态化的意义

保证路径延时概率分布在业务传输延时 τ 内的空间保持概率足够大是实现 QoS 路由目标的基本条件。为达到网络的 QoS 要求,就必须控制节点状态,使数据包在该节点的延时概率分布平稳或在一段时间内保持不变,这可以通过业务接纳控制、路由选择、业务整形调度等机制实现。进一步设想,在保证节点延时概率分布平稳的前提下,通过某些控制机制或调度策略将延时概率整形成可以解析表示,甚至是我们熟悉的分布(比如正态分布),则对于整个网络业务传输,从节点状态获取、更新、发布到路由选择、业务分配,分析和计算的复杂性都会因此大大降低。

例如寻路过程,假设数据包在各节点的延时概率分布满足相互独立的要求,则某段链路的延时概率分布可以由链路中各节点的延时概率分布进行卷积运算得出。例如对于链路 $p = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$, N 为链路的总

跳数。令链路中第 i 个节点延时的概率分布为 $f_{p1}(d_{p1}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{(d_{p1}-\mu_1)^2}{2\sigma_i^2}}$, 则整条链路延时的概率分布 $f_p(d_p) = f_{p1}(d_{p1}) \otimes f_{p2}(d_{p2}) \otimes \dots \otimes f_{pn}(d_{pn})$ 。对于独立的正态分布 $f_p(d_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} e^{-\frac{(d_p-\mu_p)^2}{2\sigma_p^2}}$ ($\mu_p = \mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_N; \sigma_p = \sigma_1 + \sigma_2 + \dots + \sigma_N$), 延时超过延时界 D 的概率即丢包率 $L_p = \int_0^\infty f_p(t) dt = 1 - \Phi(\frac{D-\mu_p}{\sigma_p})$ 。则对于那些对端到端延时有严格要求的业务如实时交互业务、各种多媒体业务等, 可以按照计算出的丢包率选择路由, 这样的路由选择过程可以得到准确而简单的概率计算支持

节点状态的变化用两个概率之间的方向散度来描述, 由于状态不是突变的, 这种方向散度应该是平滑非减的单调曲线, 节点状态更新机制在散度达到某个门限时被触发。方向散度的定义为

$$J = I(p_2, p_1; d) + I(p_1, p_2; d) \quad (1); I(p_2, p_1; d) = \sum_{k=1}^K p_2(d_k) \log \frac{p_2(d_k)}{p_1(d_k)} \quad (2); I(p_1, p_2; d) = \sum_{k=1}^K p_1(d_k) \log \frac{p_1(d_k)}{p_2(d_k)} \quad (3)$$

当节点延时概率为正态分布时, 这种散度的计算也相对简单易实现。

2 正态化的实现

通过前面分析可知, 如果可以通过某些节点状态的控制调度机制将数据包在节点的延时概率整形成正态分布, 那么网络将在对业务进行传送时发挥最大的效率。下面提出了一种节点状态控制机制, 利用反馈滤波器整形算法, 在一定的带宽范围内将某些业务源模型的数据包在节点的延时概率整形成正态分布。

假设每个包的服务时间及发送时延是一常数, 在节点缓冲区排队的数据包存在等待时延 τ_i 。反馈滤波器的思想是以第 $i-1$ 个数据包的时延反馈来控制第 i 个数据包的时延, 达到对时延概率函数整形的目的。选择反馈滤波器 $\tau_n'' = f(\tau_n') = k/r + a(\tau_n' - k/r)$ 。整形过程如下:

①原始业务按时刻表发送, 数据包 i 到达, 记录到达时间; ②按照第 $i-1$ 个数据包输出时间 $T_{out(i-1)}$ 计算等待延时 τ_i' 。若 $T_{out(i-1)} \geq T_{in(i)}$, 则 $\tau_i' = T_{out(i-1)} - T_{in(i)}$, 否则 $\tau_i' = 0$; ③根据 $\tau_n'' = f(\tau_n') = k/r + a(\tau_n' - k/r)$ 得到该数据包的延时 τ_i'' 。比较 τ_i' 和 τ_i'' , 选择较大的作为第 i 个数据包的延时值, 即 $\tau_i = \max(\tau_i', \tau_i'')$; ④根据每个数据包的延时, 计算本数据包的输出时间 $T_{out(i)} = T_{in(i)} + \tau_i + T_{service}$, 并按生成的延时将数据包发送出去; ⑤下一数据包到达, 转①。

在 $\tau_n'' = f(\tau_n') = k/r + a(\tau_n' - k/r)$ 中, 参变量为反馈系数 a , k 为期望的平均队长, 是与该算法引入的时延代价相关的变量, 在达到整形效果的前提下 k 越小越好。对于给定的带宽, 我们希望通过调整参数 a , 以最小的延时代价 k 得到满意的整形效果。整形效果用方向散度 H 衡量(方向散度的定义见式(1~3))。为了达到在期望的平均队长 k 尽可能小的情况下, 散度 J 可以接受甚至为最小值的算法目标, 我们将延时代价作为优化的软约束即优化目标, 将整形效果散度 J 作为硬约束条件, 建立参数选择的优化模型如下:

$$\min k$$

$$\text{s. t. } J < J_{\text{uper}}; 0 \leq a \leq 1$$

$$J = \sum_{m=1}^M p_2(t_m) \log \frac{p_2(t_m)}{p_1(t_m)} + \sum_{m=1}^M p_1(i_m) \log \frac{p_1(i_m)}{p_2(\tau_m)}$$

$$\tau_n'' = f(\tau_n') = k/r + a(\tau_n' - k/r)$$

$$\tau_n = \max(\tau_n', \tau_n'')$$

其中 $t \in N(E(\tau), D(\tau)); n = 1, 2, \dots, N$ (N 为仿真节点数)。

对于不同的带宽, 按照模型搜索满足 J 要求 ($J < J_{\text{uper}}$) 且使 k 最小的反馈系数 a , 并以此最优的 k 和 a 来建立反馈滤波器。但在负载过重的情况下, 使 $J < J_{\text{uper}}$ 时, 得到的 k 值太大, 引入过大的延时代价, 失去了整形的意义。在实际搜索中对 k 做一定的限制, 令 $k \leq 20$ 。如果在 $k \leq 20$ 的限度内没有找到满足 $J < J_{\text{uper}}$ 的反馈系数 a , 就放弃搜索, 以可以得到最小的 J 对应的 a 作为选出的反馈系数, 将限制条件和优化目标做相应的调整。

按照上面的优化模型, 分别对泊松业务源和间歇泊松业务源应用反馈滤波器, 按照不同的负载程度即带宽与数据包到达率的比值进行搜索, 表 1 是得到的各种参数及仿真数据。从表中可以看出反馈系数随带宽

的变化趋势不明显,说明对各种带宽,滤波器的稳定性较好。但 a 选取的值普遍接近 1,说明反馈的控制力度比较小,尤其是当带宽较小负载较重时表现明显。

表 1 搜索得到的参数表

Poisson 源					on/off 源				
r/W	a	k	$J_{\min}$	aver_len	r/W	a	k	$J_{\min}$	aver_len
0.50	0.880 0	7	0.010 0	3.534 8	0.50	0.880 0	7	0.010 0	3.534 8
0.55	0.860 0	6	0.009 2	3.408 2	0.55	0.860 0	6	0.009 2	3.408 2
0.60	0.840 0	5	0.008 2	3.112 6	0.60	0.840 0	5	0.008 2	3.112 6
0.65	0.840 0	5	0.008 0	3.367 5	0.65	0.840 0	5	0.008 0	3.367 5
0.70	0.890 0	6	0.008 6	3.815 5	0.70	0.890 0	6	0.008 6	3.815 5
0.75	0.930 0	9	0.007 1	5.722 9	0.75	0.930 0	9	0.007 1	5.722 9
0.80	0.950 0	11	0.009 0	7.144 8	0.80	0.950 0	11	0.009 0	7.144 8
0.85	0.980 0	18	0.009 5	10.055 9	0.85	0.980 0	18	0.009 5	10.055 9
0.90	0.980 0	20	0.019 5	14.489 3	0.90	0.980 0	20	0.019 5	14.489 3

整形算法引入的延时代价与 k 成正比。图 1 中表示了在 $r/W=0.7$, $a=0.890 0$ 的条件下,散度 J 随 k 的变化曲线,横轴表示 k 的变化,纵轴表示散度 J 。可以看出随着 k 的增大,延时分布与正态分布的散度大致成下降趋势,当 k 增到某一值后,散度较小并趋于平稳。

算法代价直接表现为这种机制增加了数据包传输的延时。做出部分 k 值的延时概率分布,并进行比较如图 2 所示,图中折线为整形后得到的概率函数的正态分布曲线,平滑曲线为标准正态分布曲线,按 k 值由小到大排列。可见随着 k 的增大整形效果变得理想。但同时引入的延时代价也变大,在实际网络应用中,可以根据需要选择折中点,即在保证一定整形效果要求(散度上界)的前提下使 k 最小即代价最小。应用本文所述的优化模型得到 $k=6$ 为最佳选择。

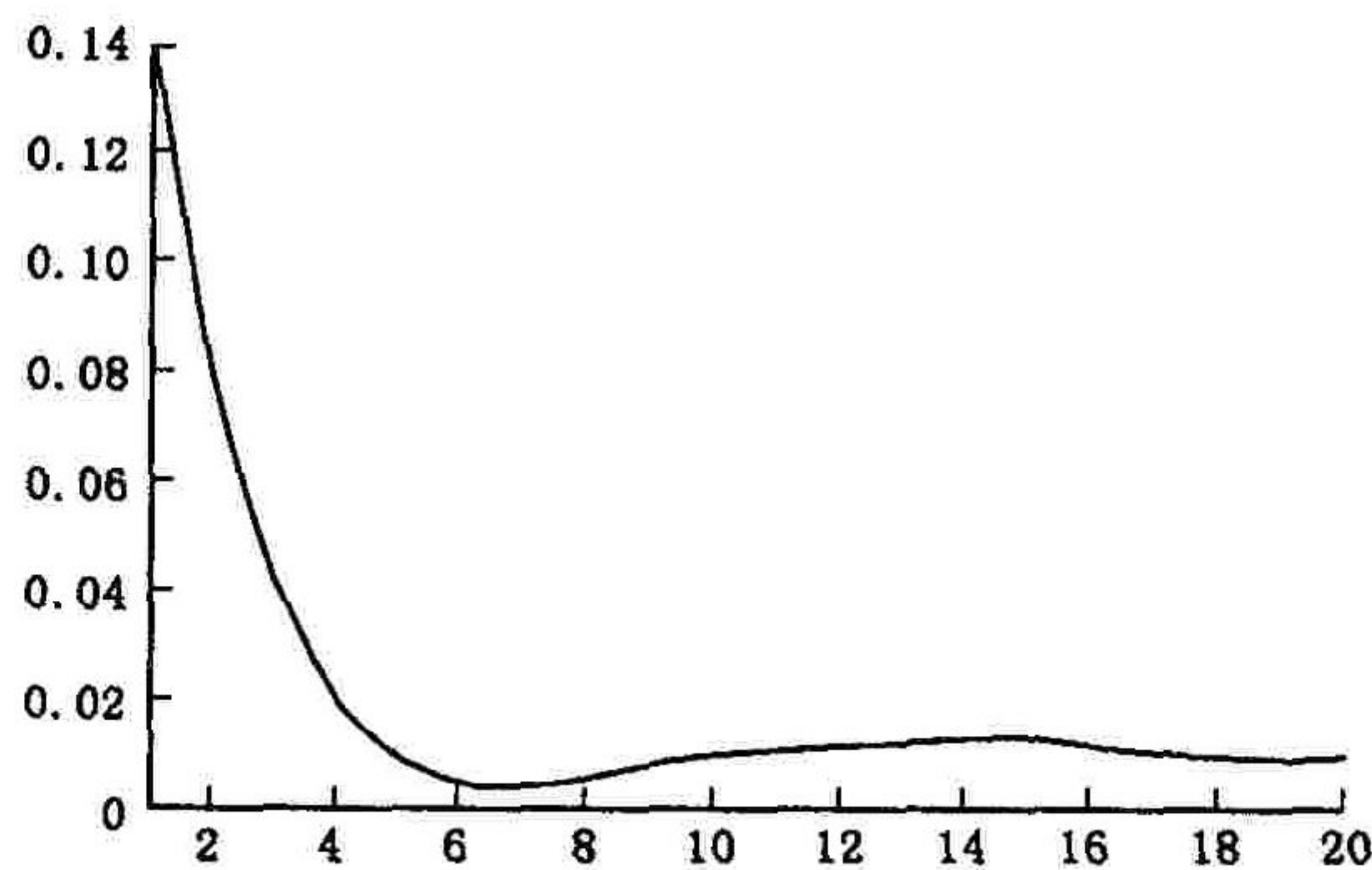
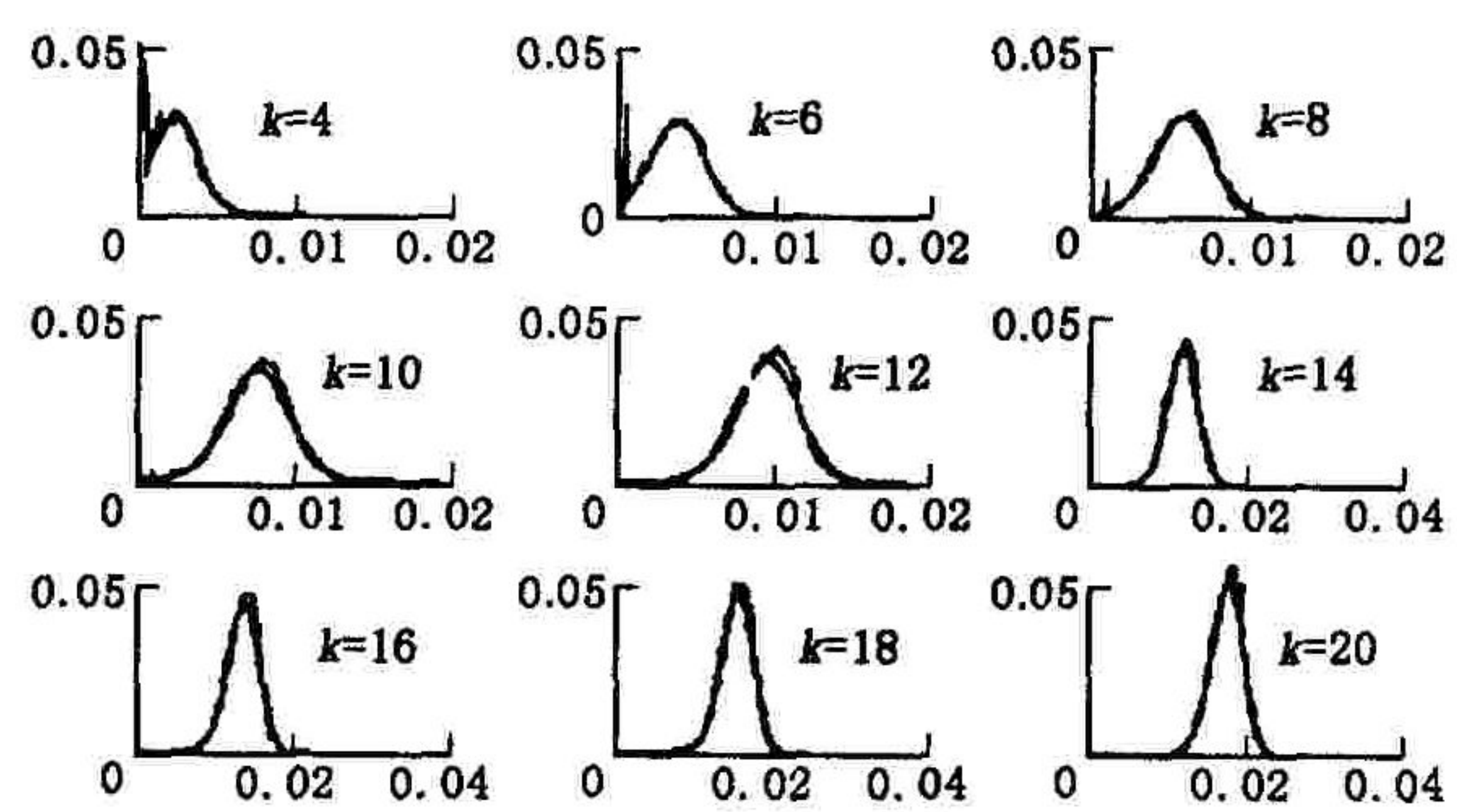


图 1 散度变化曲线图

图 2 对于不同的 k 值,延时概率函数分布与正态分布比较

3 经调度机制后正态不变性仿真结果及分析

下面利用 EDF 和 WFQ 这两种最基本的调度机制,验证将节点状态概率函数整形为正态分布的合理性,即其正态化形式经由节点调度后仍保持不变。网络拓扑如图 3 所示。

图中 $\text{src}0 \sim \text{src}6$ 为业务源节点。针对仿真要求,它可以生成具有不同延时要求的正态业务流。为方便调度节点以及接收节点的设计,数据包的延时要求由数据包自身携带。 $q0 \sim q5$ 为调度节点,运行调度机制。 sink 为接收和数据统计节点。它从数据包中提取包的延时要求,与该包的实际排队时间(总延时时间减去传输时间)进行比较,判断是否超时,统计和记录超时的概率。该节点还负责首先判别该包所属的业务流,并针对每个流单独进行统计和记录。

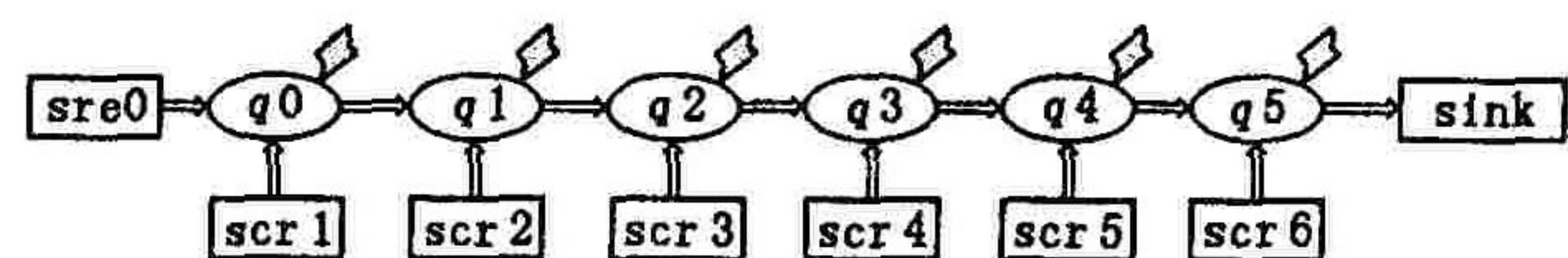


图 3 仿真中的网络拓扑结构图

用 Lilliefors 检验在 95% 的置信度下来评价经 WFQ 和 EDF 调度后的延时概率函数服从正态分布的假设是否成立。检验结果见表 2,其中 H 是检验结果,1 表示不服从正态分布;0 表示服从正态分布。 p 为检验的

p 值, JBSTAT 为检验的统计量, CV 为是否拒绝零假设的临界值。假设检验结果证明其基本符合正态分布。

4 结论和展望

在分析现有网络业务接入、路由机制、调度机制和网络资源的有效利用率的基础上,基于网络中各节点延时独立的假设,通过对网络中各节点延时的统计,本文定义节点延时的概率密度函数为节点状态参数,并利用滤波器在源节点发包时将数据包的发送延时的概率密度函数整形成正态分布,仿真数据流在节点经过调度输出后,其概率密度函数仍具有正态分布的特性,即节点状态趋于稳定,验证了定义的合理性。则节点状态的可描述使得网络传输中可以通过路径中各节

表2 调度后节点状态分布与正态分布拟合的 Lilliefors 假设检验结果

调度机制	节点	均值	方差	p	JBSTAT	CV	H
WFQ	q_0	0.009 9	0.005 1	0.036 2	0.095 6	0.088 2	1
	q_1	0.028 7	0.009 6	NAN	0.526 0	0.088 2	0
	q_2	0.061 0	0.017 4	NAN	0.072 8	0.088 2	0
	q_3	0.106 4	0.025 7	NAN	0.064 7	0.088 2	0
	q_4	0.161 0	0.037 2	0.064 7	0.085 8	0.088 2	0
	q_5	0.245 0	0.064 3	0.071 2	0.092 8	0.088 2	0
EDF	q_0	0.010 6	0.004 4	NAN	0.072 5	0.088 2	0
	q_1	0.016 6	0.005 2	0.092 5	0.081 3	0.088 2	0
	q_2	0.020 9	0.005 7	0.171 3	0.075 1	0.088 2	0
	q_3	0.023 3	0.005 4	NAN	0.056 2	0.088 2	0
	q_4	0.026 0	0.005 5	0.015 6	0.106 7	0.088 2	1
	q_5	0.028 3	0.006 4	NAN	0.063 0	0.088 2	0

点的延时的概率密度函数求解路径延时的密度函数,从而有效地估计路径的各度量参数,并以概率的形式表示路径可以为业务提供的服务质量,使得节点状态获取、更新、业务分配、调度及接纳控制机制的计算变得简单,达到统计保证标准,提高了网络利用率,也为基于统计的 QoS 路由的选择提供直接的参考依据。

参考文献:

- [1] Xiao X, Ni L M. Internet QoS: A Big Picture[J]. IEEE Network March - April, 1999, 13(2): 8 - 18.
- [2] Guerin R, Peris V. Quality - of - Service in Packet Networks Basic Mechanisms and Directions[J]. Computer Networks, 1999, 31(3): 169 - 179.
- [3] Lorenz D H, Orda A. QoS Routing in Networks with Uncertain Parameters[A]. IEEE INFOCOM98[C]. San Francisco, 1998.
- [4] Zhu H L, Hang D M, Ma Z X, et al. Quality of Service Routing: Problems and Solutions[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31: 109 - 116.
- [5] Banerjee A, Keshav S. Queueing Delays in Rate Controlled Networks[A]. IEEE INFOCOM93[C]. San Francisco, 1993.
- [6] Guerin R, Orda A. QoS Routing in Networks With Inaccurate Information: Theory and Algorithms[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1999, 7(3): 350 - 364.

(编辑: 门向生)

Research on Node -state in QoS -Based Networks

HAN Lin - na^{1,2}, LI Qian², MA Zheng - xin², HU Han - ying¹

(1. Department of Communication Engineering, Information and Engineering University, Zhengzhou, Henan 450002, China; 2. State Key Laboratory on Microwave and Digital Communication, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Node - state information is an important factor in QoS research. The Probability Mass Function (PMF) of delay at each node is taken as state information and a filter algorithm is proposed and used for normalizing it. And the simulation proves that the PMF is still a normal distribution function through scheduler. Experimental results and theoretical analysis show that the method is effective and feasible in simplifying the network calculation and improving the stability of node - state to meet the corresponding statistical guarantees.

Key words: node - state; node - delay; probability mass function; feedback filter; normal distribution function