

MPLS 网络中保证服务质量的多径路由选择策略

牛志升, 段 翔, 刘 进

(清华大学电子工程系微波与数字国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 本文提出了一种在多协议标签交换(MPLS, Multiple Protocol Label Switching)网络中保证服务质量(QoS, Quality-of-Service)的多径路由选择策略,其核心思想是引入多路径分散业务量机制,在保证用户服务质量要求的同时达到增加网络呼叫接受率和平衡网络负载的目的.文中着重讨论了用户端对端服务质量要求的多路分解和分配问题,在此基础上提出了多径路由的分支路径选择策略,并研究了策略中的关键参数 K 对该策略性能的影响.数值结果显示多路径分散业务量在网络负载均衡方面的重要意义,并且表明用户的要求相对网络资源越高使用多径传输的优势越明显.

关键词: 多协议标签交换(MPLS); 服务质量保证; 多径路由; 分散业务量

中图分类号: TN915.81 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2001)12-1638-04

A QoS-Guaranteed Multipath Routing Policy for MPLS Networks

NIU Zhi-sheng, DUAN Xiang, LIU Jin

(State Key Labs on Microwave and Digital Communication, Dept of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In this paper, we propose a QoS(Quality-of-Service)-guaranteed multipath routing policy in MPLS(Multiple protocol label Switching) networks. The key idea is traffic dispersion throughout the network, so that the load of the network can be balanced and call admission ratio is increased while user-required QoS being guaranteed. We first discuss the decomposition and allocation issues of end-to-end QoS constraints on paths. Based on these analyses, we present the traffic dispersion path selection strategy used by multipath routing, and also investigate the critical parameter K 's effect on the performance of above path selection strategy. Numerical results show the effectiveness of multipath routing in traffic dispersion, load balancing, and call-admission-ratio improvement. We also conclude that the advantage of using multipath routing becomes more obvious as the users' requests for network resources get stricter.

Key words: MPLS; QoS-guarantees; multipath routing; traffic dispersion

1 引言

MPLS 是一种高性能的网络路由及包转发机制.在 MPLS 网络中,边缘的标签交换路由器(LSR) 只需将标签附加在数据包的包头,而网络内部现存的路由器和 ATM 交换机就可以根据标签进行包转发,这样简化了路由查询过程,提高了包转发的速度^[1].图 1 示出了一个典型的 MPLS 网络运行环境. IP (Internet protocol) 包从传统路由器转发到 LSR, LSR 根据其所属的业务流将标签附在 IP 包前面,通过第 2 层的高速 ATM 硬件结构交换到出口链路. MPLS 网络内部的 LSR 处理带标签的 IP 包时,根据标签查找映射表,决定交换的出口,并换上新标签交换出去.由于标签交换是针对第 3 层的 IP 包而言,因此 MPLS 是一种第 3 层交换机制.在 MPLS 网络的出口处, LSR 将标签从 IP 包前面除去,然后转发给相连的传统路由器. MPLS 集成了第二层高速多业务交换能力和第三层灵活的路由机制,非常适用于构建具有可扩展性的高速 IP-over-ATM 网络.

对于要求保证服务质量的业务, MPLS 是面向连接的网络协议.图 1 中画出了两条标签交换路径 LSP_a 和 LSP_b, 分别用于传输业务流 IP_a 和业务流 IP_b. 因此,在业务流的连接过程中,所有数据包都沿同一路径传输.这在有些情况下会降低呼

叫接受率或网络的吞吐量.例如,设链路 LSR1-LSR2 为 LSP_a 上的瓶颈节点,若 IP_a 在某段时间内的业务量非常大,它可能使链路 LSR1-LSR2 发生拥塞,而 LSP_b 经过的链路可能还有很多剩余带宽.这样,需要使用链路 LSR1-LSR2 的新的呼叫将无法接入,同时使用链路 LSR1-LSR2 的 LSP 将会由于链路的拥塞而造成延时增大或数据包丢失,从而导致全网吞吐量的降低.

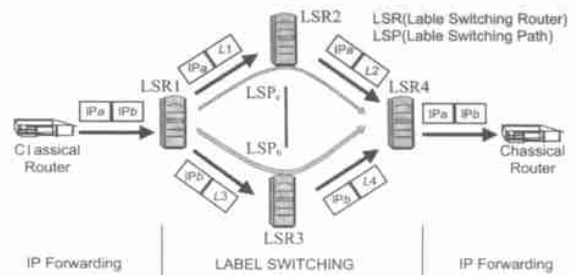


图 1 MPLS 网络运作结构示意图

如果在 MPLS 连接层次上采用多路径分散业务量的思想,即将一个业务流的数据包分散在两条或更多的标签交换

收稿日期:2000-06-24;修回日期:2001-02-19

基金项目:教育部重点实验室访问学者基金资助项目

路径传递,有以下优点:

(1) 有利于平衡网络负载. 显然, 将一个较大业务量的数据流分散到几条分支路径上, 可以避免网络中某部分发生拥塞而其他部分却比较空闲, 从而增加呼叫接受率, 提高网络的吞吐量;

(2) 可以降低呼损率. 如果能将用户数据流, 尤其是大量业务量的数据流分散到几条路径上, 可以降低对每条路径的要求, 从而增加被接受的概率;

(3) 可以提高对突发情况的应变能力. 如果某个节点或链路出现故障, 网络可以较快地将用户数据流转移到其它分支路径上. 随后网络可以重新选路, 也可以与用户协商进行降低服务质量或中断连接的操作;

(4) 对于面向连接的数据包的重新排序问题, 由于可以采用合适的路由算法保证各分支路径上的服务质量, 可以控制各分支支路的延时大小, 使得各数据分组到达时间在可预测与可控制的范围之内, 在此基础上利用文献[11]等提出的办法就可以很好地减少重新排序所花费的时间.

为了在 MPLS 环境中使用分散业务流的思想寻找满足用户 QoS 要求的多条分支路径, 路由算法需要解决的问题有:

(1) 多径传输的选取, 即确定何时使用多径传输; (2) 用户 QoS 要求的分解, 即确定每条支路上的 QoS 要求同用户提出的 QoS 要求的关系; (3) 各分支路径的选择策略.

IETF (Internet Engineering Task Force) 将对业务量工程的扩展加入到 MPLS 的标签分发协议中以支持显式路由 (explicit route)^[2]. 所谓业务量工程, 是指怎样建立显式路径使在满足业务需求带宽的同时网络性能得到优化^[3]. MPLS 协议中对业务量工程的扩展为具有业务量工程能力的显式路由提供了可能性. 然而, IETF 并没有制定具体的明晰路由算法和网络优化目标. 参考文献[6]提出了一种基于周期探测多路径和重新分配业务流量的方案, 但是这也并没有解决 IETF 指定的业务量工程的需求.

另外一些文献则深入研究了网络负载和链路容量分配的问题^[7-9], 这类问题主要是对网络设计进行优化, 即给定边缘节点的网络业务量, 设计出最佳的网络拓扑结构和链路容量以使得网络资源得到最优利用. 而在本文中考虑的问题与网络负载问题有所不同, 这里着重于网络运营中的性能优化, 而不是网络设计或链路容量分配.

Villanizer^[10]提出了一个基于同开销负载均分的多路径路由算法, 用以解决网络负载的不平衡分布问题. 但是他没有考虑服务质量保证的问题. 文献[5]提出了一种可以在满足用户带宽要求的前提下平衡网络负载的单路径及多路径路由方案, 但是该方案只能满足带宽要求而不能提供其他的服务质量保证. 有些关于分散业务量的文献则强调如何减少重新排序所花费的时间^[11]等等.

因此, 在本文中采用多路径分散业务量的思想, 把在前序工作中提出的保证服务质量的路由算法^[14]用到 MPLS 网络中, 提出一个适用于 MPLS 的高性能多路径路由选择策略. 该路由算法可以在保证多种用户服务质量的前提下使用多路径分散业务量, 达到平衡网络负载, 优化网络资源利用的目的.

2 多路径分散业务量的路由选择策略

2.1 多径传输的选取

根据优化目标的性质, 可以决定是否使用多径传输. 一般来说, 用户的服务质量要求以约束的形式提出, 而不必对其进行优化. 如果用户除了提出约束要求外还提出了优化要求, 这里以带宽、延时和丢失率这三种最通常的路径属性为例, 分别讨论如下:

(1) 带宽优化目标. 对于以带宽作为目标值的优化要求, 用户是希望目标值越大越好. 这种情况使用多径传输最能发挥其优越性, 但仅需要采用通常的路径选择方法, 按一般寻路算法先找出最宽的一条路径, 然后将组成该路径的各链路带宽减去路径带宽, 再寻找下一条最宽的路径, 直至搜寻出所有的路径为止;

(2) 延时优化目标. 优化的目标是使得目标值尽量小. 在这种情况下, 使用多径传输会损害目标值, 原因是, 使用多路传输最终得到的目标值等于各分支路径中的最大延时. 因此该情况使用多径传输无法使目标值得到改善;

(3) 丢失率优化目标. 以丢失率为优化目标值和延时的情况相似. 与单径传输相比, 这时得到的目标函数值是各分支路径丢失率之加权和. 只要有其中一个支路的目标值比单径传输时的差, 最终得到的目标值就会受到损害.

从以上讨论可看出, 多路径传输对于用户提出的优化要求所能带来的改善是十分有限的. 而对于网络管理者或运营者来说, 采用多路径传输策略却能显著优化网络性能. 因此, 用户的服务质量要求应以约束的形式出现, 在这种情况下我们研究多路径传输的路由选择策略及其对网络性能的优化.

2.2 用户 QoS 要求的分解

对于 QoS 要求的分解问题, 即用户给定服务质量要求后如何确定各分支路径上的 QoS 要求, 可以按 QoS 的种类分别处理. 文中仍以带宽、延时和丢失率为例来进行讨论.

(1) 对带宽要求, 只要各分支路径上的要求之和大于或者等于用户提出的服务质量要求, 即可满足用户的要求;

(2) 对于延时, 必须使各分支路径上的延时要求小于或者等于用户提出的要求, 才能使多路径提供的服务质量达到用户的要求;

(3) 对于丢失率这种非加性属性, 情况较为复杂. 设用户数据总量为 A , 同时使用的分支路径数为 n , 采用随机分配策略, 则通过各分支路径传输的业务量为 A/n . 设用户要求的丢失率为 α , 则各支路的丢失率要求 α_i 应满足

$$\sum_{i=1}^n \frac{A}{n} \alpha_i = A \alpha \quad (1)$$

$$\text{即} \quad \sum_{i=1}^n \alpha_i = n \alpha \quad (2)$$

从式(2)可知, 一种可行的策略是让每条支路的丢失率都小于或者等于用户要求的丢失率, 也可以使用满足式(2)的任何方案分配分支路径的丢失率.

2.3 分支路径的选择

确定了分支路径上的 QoS 要求以后, 剩下的问题就是确定分支路径的选择策略, 即怎样选择分支路径, 可以使之既保

证用户的服务质量约束目标,又能实现网络优化的目标. 这里的关键问题是确定各条链路的费用权重,在此基础上进行优化目标的设计. 应当考虑的相关因素包括:

(1) 单条路径传输的相关优化目标. 尽管使用多径传输, 仍然需要将寻找单一路径时相关的优化目标考虑进去. 如果希望平衡网络负载, 可通过赋予大带宽的空闲链路较小的费用权重实现. 如果希望优先使用成本较低的链路, 则应使相应的链路具有较小的费用权重;

(2) 增加可靠性及分散业务量. 这是多径传输特有的优化目标. 实现方式是让同一业务的其他支路用过的链路费用权重较高, 而没有用过的链路费用低. 这就会使各支路使用的链路尽量不同, 以实现网络负载平衡, 并增加连接的鲁棒性.

我们采用的权重是 $C_L = C_0 + pKC_0$ (3) 其中: p 是该链路已被同一业务的其它分支路径使用过的次数 ($p=0, 1, 2, \dots$); C_0 是该链路的原始费用权重, 由上面(1)中方法确定; K 是一个常数用于调整支路路径分散的程度, K 越大, 各分支路径使用同一的链路的可能性就应该越小. 通常, 取 $K=1.0$, 即当一条链路被使用过 n 次以后费用将是其原始费用的 $(n+1)$ 倍. 这样实际上可以引导路由选择机制在选择链路时使网络的负载得到平衡. 设有两条平行的链路 L_1 和 L_2 , 带宽分别为 BW_1 和 BW_2 . 设 $BW_1 > BW_2$, 且有 $BW_1 = a \cdot BW_2 (a > 1)$. 由此可得两条链路的初始费用权重 $C_0^{(2)} = a \cdot C_0^{(1)}$. 当路由选择机制选择路径时, 会首先使用链路 L_1 . 这样, 链路 L_1 的权重将变为 $2C_0^{(1)}$. 如果此时 L_1 的费用权重仍然小于 L_2 , 则下次路由由算法仍将选择 L_1 . 直到 L_1 被使用过 $\lfloor a \rfloor$

($\lfloor a \rfloor$ 为小于 a 的最大整数) 次后, 它的费用权重变为 $C_L^{(1)} = C_0^{(1)} + pKC_0^{(1)} = C_0^{(1)}(1 + \lfloor a \rfloor \cdot a \cdot C_0^{(1)} = C_0^{(2)}$ (4)

此后, 路由选择机制开始使用 L_2 . 而使用一次 L_2 后, L_2 费用权重变为 $2C_0^{(2)} = 2a \cdot C_0^{(1)}$, 此后路由选择机制又将使用 $\lfloor a \rfloor$ 次 L_1 , 以此类推. 如果采用随机分配策略, 则每条路径上分担的业务量相等, 设为 T . 则分散在 L_1 和 L_2 上的业务量分别为 $\lfloor a \rfloor T$ 和 T , 刚好使两条链路上的剩余带宽不破坏 a 倍的关系 $BW_1 - \lfloor a \rfloor T = aBW_2 - T \cdot a \cdot (BW_2 - T) = a \cdot BW_2 (5)$ 这样各条链路的使用率基本相同, 实现了网络负载平衡.

确定了各分支路径的服务质量要求以及链路的费用权重之后, 分散业务量的多路径路由选择算法就等价于寻找多条分别满足各自服务质量要求的最优路径问题. 这样, 我们可以逐次运用文[14]中提出的路由算法, 每次寻找一条分支路径, 直到找到全部分支路径为止.

在文[14]中提出的多约束优化路由选择算法, 是基于文献[13]中提出的多标号搜索算法的改进算法, 其主要思想是限制每个节点在路径搜索过程中保留的标号的个数, 从而将原始多标号算法的指数级复杂度降低为多项式级. 如果设网络节点数为 n , 每个节点最多与 E_M 个节点相连, 约束的个数为 C , 则原始多标号法的复杂度为 $O(n^2(E_M - 1)^{2(n-1)}C)^{[13]}$. 而如果使用文[14]中提出的改进多标号法, 令各节点最多保留 L_M (常数) 个标号, 则寻找一条满足多约束分支路径的算法复杂度为 $O(n^2L_M^2C)$. 设使用的分支路径数目为 N_P , 则整个算法的复杂度为 $O(N_P n^2 L_M^2 C)$. 这样, 就可以在多项式级的算法复杂度内实现分散业务量多路径路由选择策略.

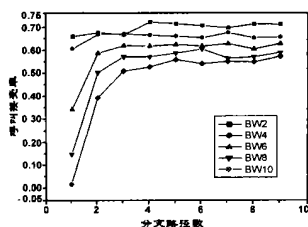


图2 呼叫接受率与分支路径数目之间的关系

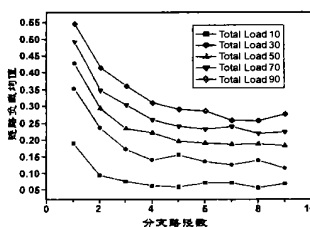


图3 链路平均负载与分支路径数的关系

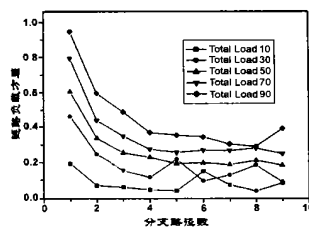


图4 链路负载方差与分支路径数的关系

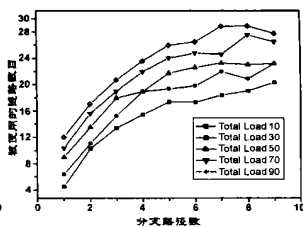


图5 被使用链路数与分支路径数的关系

3 数值结果

我们构建的实验网络由 21 个节点组成, 每个节点的平均邻接链路数是 2.7. 为了体现多径传输分散业务量的特点, 赋予各链路的费用权重代表与该链路的带宽倒数成正比. 实验中设链路的带宽属性均匀分布在 (0, 10Mbps) 范围内, 延时属性均匀分布在 (0, 200ms) 内. 因此, 链路的费用权重为 C_c/BW (BW 为该链路的带宽, C_c 为常数在本试验中为 500). 用户提出的服务质量约束要求是带宽和延时. 这样采用我们提出的分散业务量多径路由选择策略, 对用户的服务质量约束要求进行分解, 并寻找满足带宽和延时要求分支路径. 使用用户约束目标和网络优化目标得到统一实现. 实验中设定 $K=1.0$.

图 2 显示了对于不同的用户要求带宽, 呼叫接受率与分支路径数量的关系. 图中 BW2 的曲线表示连接请求的带宽要求在 (0, 2Mbps) 间, BW4 的曲线表示连接请求的带宽要求在

(2Mbps, 4Mbps) 间, 其余类推. 从图 2 中可以看出, 用户要求的带宽相对链路带宽比例很小时, 呼损率较低, 使用多径传输没有显著效果. 带宽约束要求达到链路平均带宽时 (图中对应 BW6 的曲线), 使用 3 条支路后呼叫接受率从 0.32 增加到 0.6 以上, 随后进入平稳阶段, 呼叫接受率并不随分支数量的增加显著变化. 随着用户带宽要求的不断增加, 单径传输的呼叫接受率迅速下降. 当带宽约束要求超过链路最大值的 2/3 时, 接受率已不足 0.15 (图中 BW8 对应的曲线). 而多径传输的效果逐渐显示出来, 使用 2 条分支路径时呼叫接受率即可达 0.5, 分支路径为 3 时接近 0.6. 即使要求的带宽接近链路带宽的最大值, 使用 4 条分支路径可以使接受率从单径传输的接近 0 提高到 65%. 同样可以从图 2 中看出的是, 当分支路径数超过 4 条以后, 呼叫接受率基本上不随分支路径数的增加而提高.

图 3~ 图 5 显示了各条被使用的链路上负载的均值、方

差,以及被使用的链路数目随分支路径数目变化的情况.其中 $TotalLoad\ n$ 的曲线表示网络中各链路总负载量之和为 n Mbps.链路的平均负载是百分比,即该条链路的总负载量与之带宽的比值.从这些图上可以清楚地看出,分支路径数越大,每条链路上的平均负载就越小,负载方差也越小,同时分支路径使用过的链路数也就越多.这充分体现了业务量分散的多径传输在网络负载均衡显示出的优越性.

图 6~图 8 显示了不同 K 值对于分支路径所使用的链路“分散程度”的影响.横坐标是链路被使用的次数,纵坐标代表被使用过该次数链路在总链路数中所占的比例.图中 $Path\ No.\ n$ 的曲线代表了分支路径数为 n 时链路使用次数的分布情况.例如平面上 $(2, 0.16)$ 点表示同时被 2 条分支路径所使用的链路占总的被使用过链路数的 16%.曲线越尖锐,即在横轴等于 1 时取值越大,各分支路径同时使用的链路就越少,

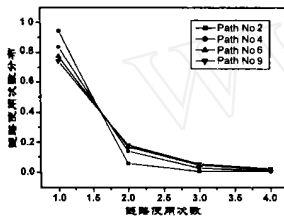


图 6 $K=0.1$ 时链路使用次数分布

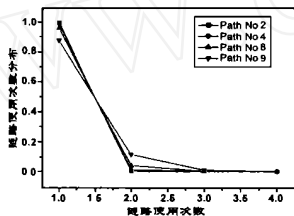


图 7 $K=1.0$ 时链路使用次数分布

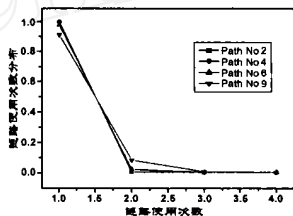


图 8 $K=1.8$ 时链路使用次数分布

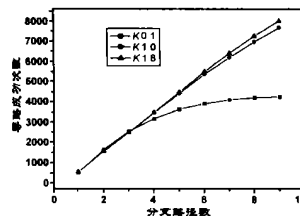


图 9 不同 K 值与寻路成功次数的关系

4 结论

本文采用多径传输分散业务量的思想,提出了一个适用于 MPLS 网络的保证服务质量多路径路由选择策略,其特点是使用多分支路径分担用户提出的服务质量约束要求.在保证服务质量的同时达到平衡网络负载和增加可靠性的目的.数值结果从各个方面分析了多路径分散业务量传输的优点和可行性.当用户的约束要求相对于网络资源较高时,多路径传输可以大大提高用户的呼叫接入率,而分支路径超过一定数目以后呼叫接受率提高很小.同时,通过仿真分析了提出的多路径路由选择策略中关键参数对分散业务量传输性能的影响.数值结果还说明多径分散业务量机制还在均衡网络负载,提高连接的可靠性等方面有非常重要的意义.

参考文献:

[1] Cisco Systems, Inc. Cisco MPLS controller software configuration guide (Release 9.3.0) April 2000, URL :[ftp://ftp.cisco.com/](http://ftp.cisco.com/)

[2] D Awduche et al. Requirements for Traffic Engineering Over MPLS [J]. RFC2702, Sep. 1999.

[3] A Ghanwani, et al. Traffic engineering standards in IP networks using MPLS [J]. IEEE Comm. Magazine, Dec. 1999, 37, (12) :49 - 53.

[4] G Swallow. MPLS advantages for traffic engineering [J]. IEEE Comm. Magazine, Dec. 1999, 37(12) :54 - 57.

[5] Y Wang, Z Wang. Explicit routing algorithms for internet traffic engineering [J]. IEEE INFOCOM 2000.

[6] A E I Widjaja Mate :MPLS adaptive traffic engineering [J]. Internet draft, IETF, Aug 1998, draft-widjaja-mpls-mate-00. txt

[7] M Gerla et al. Topology design and bandwidth allocation in ATM net-

分散程度就越高,这时网络负载均衡性能和连接的可靠性也就越好.很明显,大的 K 值能够引导路径选择策略使用的链路分布更广.从图上看出,随着 K 值的增大,链路使用次数分散程度特性逐渐改善.图 7 表明 $K=1.0$ 时各链路分布特性曲线比 $K=0.1$ (图 6) 时尖锐,这与我们的分析相符合.同时图中显示出当 $K=1.0$ 后继续增大 K 值对分布特性影响不甚明显 (图 8 中 $K=1.8$).而小的 K 值将导致寻找分支路径的可靠性降低,或者从另一个角度来说,为保证寻找到满足约束条件的多条分支路径,必须花费更多的寻路时间和资源.这一点从图 9 上可以看出.横坐标代表分支路径数,纵坐标为寻路成功的总次数.图 9 很明确地显示出 K 值较小时寻路成功次数远低于其它 K 值.同样, $K>1.0$ 后呼叫接受次数随 K 值没有太大变化,这说明 $K=1.0$ 已经能够引导路由选择机制使用链路分布特性较好,同时呼叫接受性能也已经趋近于网络的上限.

works [J]. IEEE JSAC, 1989, 7:1253 - 1262.

[8] M Lee J Yee. A logical topology and discrete capacity assignment algorithm for re-configurable networks [J]. Operations Research, 1995, 43:102 - 116.

[9] T NGD Hoang. Joint optimization of capacity and flow assignment in a packet switched communications network [J]. IEEE Trans. Comm, 1998, 35:202 - 209.

[10] C Villamizar. OSPF optimized Multipath. Internet draft [J]. IETF, March 1998, draft-ietf-ospf-omp-00. txt

[11] E Gustafsson, G Karlsson. A literature survey on traffic dispersion [J]. IEEE Network, 28 - 36, March/ April 1997.

[12] M Kodialam, T V Lakshman. Minimum interference routing with applications to MPLS traffic engineering [J]. IEEE INFOCOM 2000

[13] J M Jaffe. Algorithm for finding path with multiple constraints [J]. networks, 1984, 14:95 - 116.

[12] 刘进,牛志升,郑君里.多约束 ATM 网络路由选择的改进多标号算法 [J]. 电子学报, Oct. 1999, 27(10) :4 - 7.

作者简介:



牛志升 男. 1964 年生于湖北卢龙. 分别于 1989 年和 1992 年获日本丰桥技术大学的工学硕士和工学博士学位. 现为清华大学电子工程系教授, IEEE ComSoc Asia-Pacific Board 委员. 主要从事宽带通信网络的流量控制技术、IP/ATM 网络的服务质量控制以及宽带无线接入技术的研究.