

QoS 测量综述^{*)}

侯孟书 卢显良

(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都610054)

摘 要 详细阐述了 QoS 测量的主要参数:包丢失率、吞吐量、延迟和延迟变化,并且比较了标准化组织 ITU-T 和 IETF 对这些参数定义的异同;然后分析了 QoS 测量的方法以及国内外相关领域的研究现状;最后总结了 QoS 测量的两类主要应用:网络性能评估和网络推测。

关键词 QoS 测量,主动测量,被动测量,性能评价,网络推测

A Survey on QoS Measurement

HOU Meng-Shu LU Xian-Liang

(College of Computer Science and Engineering, UESTC of China, Chengdu 610054)

Abstract Firstly, this paper elaborates some primary parameters of QoS measurement, including packet loss, throughput, delay, delay variation, and compares the definition of QoS parameters by ITU-T with its by IETF. Secondly, gives the class of QoS measurement and its research trend in the world. Lastly, it presents two primary applications of QoS measurement: network performance evaluation and network inference.

Keywords QoS measurement, Active measurement, Passive measurement, Performance evaluation, Network inference

1 引言

随着 Internet 的飞速发展,网络的规模和复杂性不断增加,新型的网络应用不断涌现,例如 VoIP、视频点播、网络会议等,而这些新型的网络应用的一个共同的特征就是对网络提出服务质量(QoS)要求。当实现具有 QoS 保证的网络时,精确的 QoS 测量是必须的,通过 QoS 测量,可以更深入了解和分析具有 QoS 保证网络的整体拓扑结构、网络流量特征和网络行为,发现网络瓶颈,优化资源配置,从而更好地实现 QoS 保证的网络。

2 QoS 参数

QoS 参数是 QoS 测量的重要内容,对 QoS 参数的定义是 QoS 测量的基础和前提。目前对网络性能参数的标准化在两个国际标准化组织中分别进行:ITU 的 SG13 工作组和 IETF 的 IPPM WG (IP Performance Metric Working Group) 工作组。其中,ITU 的研究是针对包括 ATM、帧中继等各种数据网络的,在近几年也专门对 IP 网络的性能参数进行了研究。

2.1 ITU-T 的 QoS 参数

ITU-T 对网络性能参数的定义来源于对数据网络(包括 ATM、帧中继等)性能参数的研究。在文档 I350^[1]中,ITU-T 提出了一个 3×3 的矩阵方法,每一行分别代表通讯过程的三个阶段:接入(access)、数据传输(user information transfer)和断开连接(release of connection)。每一列分别代表网络性能三个方面:速度(speed)、准确度(accuracy)和可靠性(dependability)。这样共定义了 9 个基本的性能参数。网络性能和

QoS 参数的对应情况如表 1。

表 1 性能标准和 QoS 参数对应情况表

性能标准	QoS 参数
速度	延迟(delay)
	吞吐量(throughput)
准确度	错误概率(probability of error)
	误插概率(probability of mis-insertion)
可靠性	丢失概率(probability of loss)

文档 I380^[2]中定义了 IP 性能参数。在定义 IP 性能参数之前,ITU-T 首先定义了四类 IP 包传送结果,定义 IP 包传送结果的目的是:通过在测量点上观测 IP 包的传送来评估一个网络的端到端 QoS 性能。四类传送结果如下:

- 1)成功 IP 包传送结果:在 T 时间内,包(该包的所有分片)到达目的地,且包头和内容均无误。
- 2)错误 IP 包传送结果:在 T 时间内,包到达目的地,但是包头损坏或内容有误。
- 3)丢失 IP 包传送结果:在 T 时间内,包没有到达目的地,或在 T 时间后到达目的地。
- 4)虚假 IP 包传送结果:接受到的包是虚假的。

通过对以上四类 IP 包传送结果的定义,来说明以下性能参数:

1)IP 包传输延迟 IPTD(IP packet transfer delay) IP 包传输延迟是为成功 IP 包传送结果和错误 IP 包传送结果而定义的。IP 包传输延迟的值为 $T_{start} - T_{end}$,其中 T_{start} 为包传输的开始时间, T_{end} 为包到达目的地的时间, $T_{end} > T_{start}$, $T_{end} - T_{start} < T_{max}$,如果包分片, T_{end} 是最后一个分片到达的时间。

2)IP 包传输延迟的平均值 IPTD 的算术平均值。

^{*)} 本文受国家 95 重点攻关项目支持。侯孟书 博士研究生,主要研究方向:计算机网络,分布式系统,网络测量。卢显良 教授,博士生导师,主要研究方向:计算机网络,分布式系统,信息安全。

3) IP 包延迟变化 IPDV (IP packet delay variation) 两点之间的 IP 包延迟变化是测量的 IPTD 值与 IPTD 参照值之差。通常将 IPTD 的算术平均值作为 IPTD 的参照值。

4) IP 包错误率 IPER (IP packet error ratio) 错误 IP 包传送结果与成功 IP 包传送结果加上错误 IP 包传送结果的比值。

5) IP 包丢失率 IPLR (IP packet loss ratio) 丢失 IP 包传送结果与所有传送 IP 包总数的比值。

6) 虚假包率 单位时间内虚假 IP 包数。

在文档 I380 的附录中定义了以下两个参数:

7) IP 包吞吐量 IPPT (IP packet throughput) 单位时间内成功传送的包的数量。

8) 基于字节的 IP 包吞吐量 IPOT (octet based IP time packet throughput) 单位时间内成功传送的所有包的字节总数。

2.2 IETF 的 QoS 参数

IETF 作为 Internet 网络协议与标准的制订者,一直在进行 IP 网络的性能研究,并专门成立 IP 性能度量工作组 IPPM WG,进行网络性能度量的标准化工作。到目前为止,IPPM 已经提出了多个 RFC 及草案,涵盖了 IP 性能度量的框架、主要的性能参数,以及网络性能管理等方面的内容。其中 RFC2330^[3] 定义了连通性、单向延迟、回路延迟、包丢失率等度量值,目的是通过引入一些标准化度量值来定量地刻画网络特征,使用户和网络服务提供商更好地理解网络的性能和可靠性。

IPPM WG 定义的度量值有:

1) 连通性 连通是任何网络服务的基本假设。在 RFC2678^[4] 中定义了单向和双向的连通度量值。

2) 单向延迟 (One-way Delay) 是网络传播延迟的基本定量特征。RFC2679^[5] 定义了单向延迟度量值,并指出进行测量单向延迟的动机,以及用测量单向延迟代替测量回路延迟的原因。

3) 回路延迟 (Round-trip Delay) RFC2681^[6] 定义了回路延迟:在线时 (wire-time) T, P 类型包 (Type-P packet) 的第一个比特位从源端 Src 向目的端 Dst 发送,目的端 Dst 收到后,立即将 P 类型包返回到源端 Src。源端 Src 在线时 (T+dT) 收到 P 类型包的最后一个比特位, dT 就是回路延迟。

4) 包丢失率 (packet loss) RFC2680^[7] 定义了包丢失率。如果一个包不能在合理的时间段内到达目的地,则认为包丢失。这个合理的时间段依赖于测量得到的单向延迟。

5) IP 包的延迟变化 ipdv (IP packet delay variation) IP 包的延迟变化是在 RFC3393^[8] 中定义的。它基于度量值单向延迟,定义为同一数据流中的两个包的单向延迟之差。例如,假设在同一数据流中选取包 P₁ 和包 P₂,其单向延迟分别为 dT₁ 和 dT₂,则 IP 包的延迟变化为 |dT₁-dT₂|。

2.3 ITU-T 与 IETF 定义的 QoS 参数比较

从上面的定义可以看出,两个标准化组织制定的网络性能参数都包括以下 QoS 参数:延迟、延迟变化、丢包率等。延迟在很大程度上体现了网络的拥塞状况,对许多业务来说是具有决定性的,特别是一些实时业务。同时,延迟也体现了网元的性能,网络延迟的最小值可近似看成路由器转发延迟和链路传送延迟的总和。延迟变化对一些实时业务如 VoIP、视频业务至关重要。丢包率体现了网络的可靠性,丢包率的大小对传输层乃至应用层的服务都会产生很大的影响。

虽然 ITU-T 与 IETF 对 QoS 参数的定义有许多共同点,但是也有不同之处。

1) 定义的侧重点不同 ITU-T 定义侧重在网络对 IP 包

的实际传输结果,而 IETF 则更注重对业务的支持,“P 类型包 (Type-P packet)”的概念就是为了使每个参数的具体测量都与所承载的上层应用联系起来。

2) 测量框架不同 IETF 在 RFC2330 中,明确定义了参数测量中所采用的附加随机抽样方法以及在结果统计中所使用的统计分布方法,而 ITU-T 对测量框架的研究略显不足。

3) 参数不同 ITU-T 提出了虚假 IP 包,它使得其定义参数更为全面,但是这个参数仅在测量中 useful,即判断是不是测试包。

通过 ITU-T 和 IETF 对延迟变化的定义可以看出它们之间的有如下转换关系:

对任意选定的包 P₀,作为 ipdv 测量的起始包,测量得到系列包的 ipdv 值,则有:

$$IPDV(k) = IPDV(0) + \sum_{i=1}^k ipdv(i)$$

已知 IPDV 的测量值,包对 P_k 和 P_{k-1} 的 ipdv 值为:

$$ipdv(k) = IPDV(k) - IPDV(k-1)$$

3 QoS 测量的分类

QoS 测量有很多分类方法。按照测量过程中是否向网络中发送探测包,可分为主动测量和被动测量;按照测试系统所处的位置,可分为基于路由器的测量、端到端的测量以及路由器协助的测量;按照测量点的分布,可分为单点测量与多点测量;按照与被测量网络的关系,分为协作式测量与非协作式测量;按照测量所采用的协议,分为基于 ICMP 协议的测量、基于 TCP/IP 协议的测量、基于 SNMP 协议的测量;根据测量的内容,分为拓扑测量与性能测量。

3.1 被动测量

被动测量是通过在监视点对业务流量的记录,采集流经该监视点的业务流量信息。被动测量通常用于与网元相关的度量值,例如链路的吞吐量和包的大小统计,但严格来说它们不是 QoS 参数。被动测量的 QoS 参数有:带宽、特定协议(如:TCP 和 RTP)的丢包率、延迟以及延迟变化。

被动测量有三种主要的方式:第一种方式是通过 SNMP 协议采集数据,并提交给服务器进行处理。很多设备厂商都有基于这种方式的解决方案,如 CISCO 的 Netflow。现在大量的工具如 CAIDA Cflowd 和 CESNET^[9] 可以分析 Netflow 产生的数据。第二种方式是在指定线路上采集数据。这种方法对 OC-48 (2.5 Gbit/s) 或 OC-192 (10 Gbit/s) 等高速链路不太合适,因为超出了 64 位 PCI 总线的能力。为了解决该问题,通常对数据进行智能过滤、聚合和压缩等,并将这些功能直接集成到适配卡中,Clea^[10] 中给出了该类适配卡的设计原理。系统 DAG 就是这种类型的测量工具,该项目开发的硬件和软件分析工具,能实时监控高性能光纤网络。第三种方式是在一台主机上有选择地进行数据采集和分析,但是它处理的不是 QoS 参数,NIOP 和 ETHR 是这种类型的工具。

目前开展的被动测量项目有:受美国国家科学基金会 NSF 资助的美国应用网络研究国家实验室 NLANR 的测量项目 PMA;Berkeley University 和 IBM 共同开发的 SPAND 项目,它通过对捕捉到的 TCP/UDP 分组进行分析得到带宽、丢包率等;IST 的 SCAMPI 项目,它的目标是开发一个可扩展的 Internet 监控平台,用于流量工程、分析流量特征和网络诊断。

被动测量的优点是不增加网络负载,对网络的行为没有影响。缺点是由于被动测量是测量单个点,很难对网络的端到端性能进行测量,且易产生安全问题。

3.2 主动测量

主动测量是向网络中发送探测包,通过测量该探测包的传送情况来分析网络的性能。用于主动测量的工具很多,其中最常用的工具是 ping,用 ping 测量连通性、回路延迟以及包丢失率等。但是由于“死 ping 攻击”的影响,使 ping 测量受到了限制。另一个常用的工具是 netperf,它可用于测量 tcp 和 udp 包的吞吐量以及 udp 包的丢失率。第三个常用的工具是 RUDE/CRUDE^[11],用于单向延迟、单向延迟变化和包丢失率的测量。

目前开展的主动测量项目有:美国的 NIMI 项目,利用 ping, traceroute, mtrace 等工具进行主动测量;AMP 项目,采用 Ping 进行 RTT(round-trip times)、丢包率以及拓扑等测量;Surveyor 测量 Internet 路径性能,包括单向延迟、路由测量等;AIDA 开展网络测量、分析、可视化工具的研发,研究对象包括 Internet 拓扑结构、负载、性能、路由等;加拿大国家研究机构使用 perl script 跟踪对 TRIUMF 感兴趣的节点。通过 tracert 定时采集数据并生成网络可视化图;欧洲的 PP-NCG 项目,监视全欧洲某些粒子物理研究所的网络端到端性能。

主动测量的优点是对测量过程的可控性比较高,易于对端到端的性能进行测量。缺点是它的入侵特征,增加了网络负担,因此设计主动测量工具时应该仔细处理探测包,以免结果有误。

3.3 端到端的 QoS 测量

按照测试系统所处的位置,可分为基于路由器的测量、端到端的测量以及路由器协助的测量。基于路由器的测量方法是通过路由器直接获取统计数据,因而具有较高的测量精度,但是它有很大的局限性^[12]。与此相反,虽然端到端测量的精度低于基于路由器的测量,但是它只需要端系统的支持,因此具有很好的灵活性,对于某些跨越多个运营商的测量问题,端到端的测量技术可能是最佳的选择。

4 QoS 测量的应用

4.1 QoS 性能评估

通过 QoS 测量,使用户和网络服务提供商对网络的 QoS 性能有一个清晰的认识,对是否满足服务等级协定 SLA(Service Level Agreement)保证的 QoS 提供可靠的依据。对用户而言,根据 QoS 测量的结果,判断是否得到了网络服务提供商承诺的服务;对网络服务提供商而言,根据 QoS 测量的结果,对服务质量进行评估,并根据评估的结果优化网络和调整 QoS 计费。

通过 QoS 测量确认网络体系结构与设计方案的流量工程和资源分配机制,以便在网络的设计与规划中进行 QoS 评估,欧洲信息社会技术 IST 的 AQUILA^[13]项目中的 DMA(distributed QoS measurement architecture)就是用来评估和验证 AQUILA 的体系结构和资源分配机制的。AQUILA 中的测量方法有主动和被动测量。主动测量用类应用流和探测流完成,类应用流模拟真实的端用户应用流,而探测流用来监视网络行为。被动测量从不同的网元中采集数据。为了实现不同的测量方法,AQUILA 开发了三个工具:为测量单个流和聚合流端到端 QoS 的具有类应用流负载生成器的测量代理、为主动网络探测而监测路径性能特征的测量代理、为负载分析而从路由器采集管理信息的路由器 QoS 监测器。AQUILA 还设计了一个测量用数据库,用于存放测量结果,以便进行性能分析。

4.2 网络推测

随着 Internet 的规模不断增长,其性能的可知性越来越小,由于诸多复杂的因素,往往通过建模、测量和仿真来理解网络的行为^[14]。网络推测是利用网络的部分测量信息通过推

导来获得网络未知性能的估计和预测,如利用端到端的分组延迟和丢失信息可以获得网络内部链路的 QoS 性能。根据网络推测的目的,QoS 测量的网络推测可分为:拓扑推测、时延推测、丢包率推测、可用带宽推测以及路由器等节点设备的调度机制与参数的推测。

4.2.1 网络拓扑推测 网络拓扑结构是非常有用的信息。通过网络拓扑结构,可以进行网络故障的诊断、网络仿真以及网络协议和应用的评价^[15]。目前,网络拓扑结构的获得主要基于以下协议:SNMP 协议、ICMP 协议和边界网关协议(BGP)。基于 SNMP 协议的方法主要利用简单网络管理协议(SNMP)通过管理信息库(MIB)进行拓扑关系的获取,这种方法适合于在具有管辖权的网络范围内进行。基于 ICMP 协议的方法通过 tracert 实现,但是当网络装有防火墙时,则无法进行。在拓扑关系显示方面,多数项目显示的是逻辑拓扑关系图,如 CAIDA 的 Skitter 项目。

4.2.2 网络链路的丢包率和延迟推测 随着网络规模的增长及网络多样化,网络内部性能的测量越来越困难,任何一个组织只有对网络的部分管辖权,商业因素阻止了组织间共享网络性能信息,而网络的内部性能对评价和改进动态路由算法和流量传输协议非常重要。解决该问题的有效方法是利用单播或多播端到端的 QoS 测量,根据链路的丢包率和延迟与测量到的性能参数的内在关系,来推测网络链路的丢包率和延迟。由于这种推测仅仅使用端主机的测量信息,因此不需要拥有对内部节点的管理控制访问权限。早期的推测算法使用组播,例如文[16]是基于组播的对丢包率的推测,文[17]是基于组播的对延迟分布的推测,文[18]是基于组播的对延迟变化的推测。但是由于组播配置的限制,现在更多的是使用单播技术,例如文[19]是基于单播的对丢包率的推测,文[20]是基于单播的对延迟的推测。

4.2.3 可用带宽推测 可用带宽是动态的,是指某一时刻在给定链路上发送数据可用的最大带宽。可用带宽的大小随该链路中其它的流量的变化而变化,在数值上它始终小于或等于该链路的容量带宽。链路的可用带宽无论是对理论研究还是对实际应用都非常重要,是拥塞控制、QoS 管理以及流量工程等的关键参数。但是由于可用带宽的动态性,直接测量很困难,因此通常通过端到端的 QoS 测量来估计和推测可用带宽,在这方面人们研究了大量的算法,从 Keshav's 的包对^[21]到 Carter 和 Crovella's 的 cprobe^[22],但是如何快速精确地测量端到端的可用带宽,至今还没有有效的方法。这是因为:a)如何精确地定义可用带宽还没有形成一致的意见;b)可用带宽是动态的,随时间而变化;c)在大范围的时间尺度内,表现高度变化性^[23]。

4.2.4 路由器分组调度机制和参数的推测 通过测量基本的性能参数如丢包率和延迟,用户可以对其所获得的服务进行评估。但这种测量不能揭示网络核心 QoS 功能,例如服务的机制。路由器调度类型和参数推测使得用户能够通过假设检验,极大似然估计和已知的服务等级等来推测网络系统的分组调度机制和参数。例如为了推测路由器的分组调度机制,从发送端同时高速发送不同服务类型的分组,如果接收端收到了每个服务类型的分组,则该系统的调度机制是严格优先级 SP(strict priority),如果接受端收到了权值高的服务类型分组,则该系统的调度机制是加权公平队列 WFQ(weighted fair queuing)的变体^[24]。

小结 近年来,Internet 技术及其应用都发生了很大的变化,QoS 保证业务的增加是 Internet 承载业务的最大变化。提供 QoS 必然要求精确的 QoS 测量技术。QoS 参数的定义是 QoS 测量的基础,目前国际标准化组织 ITU-T 和 IETF 在进行这项工作,它们都对丢包率、延迟、延迟变化和吞吐量等

QoS 参数进行了定义,但强调的重点有所不同。这是因为 ITU-T 的定义来源于对数据网络(包括 ATM、帧中继等)性能参数的研究,而 ATM 和 IP 网有着本质的不同:IP 网是分片的且无连接。测量有很多分类标准。常用的是按照测量过程中是否向网络中发送探测包,分为主动测量和被动测量。主动测量适合对端到端的 QoS 参数进行测量,而被动测量通常用于与网元相关的度量值。在实际的测量过程中,具体采用哪种测量方法,要视实际情况而定。QoS 测量的应用是多方面的,其中 QoS 性能评估和网络推测是其主要的应用。

参考文献

- 1 ITU-T Recommendation I350. General aspects of quality of service and network performance in digital networks, including ISDN. March 1993
- 2 ITU-T Recommendation I380. Internet protocol data communication service-IP packet transfer and availability performance parameters. Feb. 1999
- 3 Paxson V, Almes G, Mahdavi J, et al. Framework for IP performance metrics. RFC2330, IETF, May 1998
- 4 Mahdavi J, Paxson V. IPPM metrics for measuring connectivity. RFC2678, IETF, Sept. 1999
- 5 Almes G, Kalidindi S, Zekauskas M. An one-way delay metric for IPPM. RFC2679, IETF, Sept. 1999
- 6 Almes G, Kalidindi S, Zekauskas M. A round-trip delay metric for IPPM. RFC2681, IETF, Sept. 1999
- 7 Almes G, Kalidindi S, Zekauskas M. An one-way packet loss metric for IPPM. RFC2680, IETF, Sept. 1999
- 8 Demichelis C, Chimento P. IP packet delay variation metric for IP performance metrics. RFC3393, IETF, Nov. 2002
- 9 Kosnar T. Traffic analysis and infrastructure monitoring in CES-NET2 network. passive and active measurement workshop, Amsterdam, April 2001
- 10 Cleary J, Donnelly S, Graham I, et al. Design principles for accurate passive measurement. passive and active measurement workshop, Hamilton, New Zealand, April 2000
- 11 Laine J, Saaristo S, Prior R. RUDE and CRUDE: Real-time UDP data emitter and collector, May 2001. <http://cvs.atm.tut.fi/rude/>.

- 12 程时端. IP QoS 技术的现状与发展趋势. 中兴通讯技术, 2003, 48
- 13 Strohmeier F, Dorken H, Hechenleitner B. AQUILA: distributed QoS measurement. In: 8th Intl. Conf. on Advances in Communications and Control, Crete Greece, 2001
- 14 Salamatian S, Fdida S. A framework for interpreting measurement over internet. Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication, 2003. 87~94
- 15 Andersen D G, Feamster N, Bauer S, et al. Topology inference from BGP routing dynamics. ACM SIGCOMM Internet Measurement Workshop, 2002. 243~248
- 16 Caceres R, Duffield N G, Horowitz J, et al. Multicast-based inference of network internal loss characteristics. IEEE Trans on Information Theory, 1999, 45:2462~2480
- 17 Presti F L, Duffield N G, Horowitz J, et al. Multicast-based inference of network-internal delay distributions. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 10(6): 761~775
- 18 Duffield N G, Presti F L. Multicast inference of packet delay variance at interior network links. IEEE Infocom 2000, 2000. 1351~1360
- 19 Duffield N G, Horowitz J, Presti F L, et al. Network delay tomography from end-to-end unicast measurements. In: Proc. of the 2001 Intl. Workshop on Digital Communications 2001-Evolutionary Trends of the Internet, Sept. 2001
- 20 Duffield N G, Presti F L, Paxson V, et al. Inferring link loss using striped unicast probes. In: proc. of IEEE Infocom, 2001, 2: 915~923
- 21 Keshav S. A control-theoretic approach to flow control. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1995, 25(1): 188~201
- 22 Carter R L, Crovella M E. Measuring bottleneck link speed in packet-switched networks. performance evaluation, 1996, 28:297~318
- 23 Jain M, Dovrolis C. End-to-end available bandwidth: measurement methodology, dynamics, and relation with TCP throughput. IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), 2003, 11(4): 537~549
- 24 Kuzmanovic A, Knightly E W. Measurement-based characterization and classification of QoS-enhanced systems. IEEE Trans. on parallel and distributed systems, 2003, 14(4): 671~685

(上接第31页)

隔向 MN 发送 Echo Request 报文,然后通过比较快速切换前后的往返时间(RTT)可以看出隧道操作所引入的端对端时延,图5为测试结果。由该图可以看出,在第13个 Echo Request 报文处开始切换,并在第29个报文处完成快速切换(快速切换时延大致为160ms),之后 MN 仍用以前的转交地址 aCoa 通过 AR 之间的隧道进行通信,直至在第94个报文处完成向 HA/CN 注册过程,至此整个切换完成,此后 MN 开始使用新的转交地址 nCoa。快速切换前后 RTT 相差小于0.5ms,说明 AR 的隧道操作对于端对端时延基本上没有影响,因此 AR 的隧道实现是高效的。

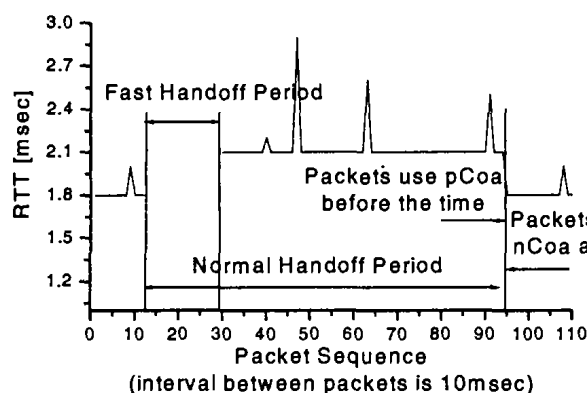


图5 切换过程中 ping 报文的往返时间

结论 在本文中,我们提出了一种基于 L2 Trigger 的快速切换方案。和 IETF 的快速切换方案相比,本方案利用链路

层信号触发网络层的切换过程,并通过快速 RA 机制显著减少了移动检测时延,从而加快了整个快速切换过程。最后,我们在基于网络处理器的路由器和 Linux 主机上实现了此方案。测试结果表明,实验系统具有低切换时延特性;此外,由于隧道操作由硬件高效实现,因此快速切换前后的端对端时延抖动较小。下一步将对快速切换情形下的 AAA 机制进行研究。

参考文献

- 1 Johnson D B, Perkins C. Mobility support in IPv6, draft-ietf-mobile-ipv6-15. txt(work in progress), July 2001
- 2 Dommety G. Fast Handovers for Mobile IPv6, draft-ietf-mobileip-fast-mip-v6-04. txt(work in progress), Nov. 2001
- 3 Yokota H, et al. Link Layer Assisted Mobile IP Fast Handoff Method over Wireless LAN Networks. In: proc. of ACM Mobicom 2002, Sep. 2002
- 4 Cornall T, et al. Layer 2 triggers improve Handover in Wireless Mobile IPv6. In: proc. of 2nd ATCrc Telecommunication & Networking Conf. Oct. 2002
- 5 ANSI/IEEE Std 802. 11, 1999 Edition Part 11: Wireless LAN Medium Access Control(MAC)and Physical Layer(PHY)Specifications
- 6 Mishra A, et al. An Empirical Analysis of the IEEE 802. 11 MAC layer Handoff Process. Dept of Computer Science University of Maryland: [CS Technical Report Number CS-TR-4395]
- 7 Narten T, et al. Neighbor Discovery for IP Version 6 (IPv6), RFC2461, Dec. 1998
- 8 Andersen T W, Lildballe A. Seamless Handoff in Mobile IPv6: [Master Thesis]. June 2001
- 9 Thomson S, Narten T. IPv6 Stateless Address Autoconfiguration. RFC2462, Dec. 1998
- 10 Kempf J, Pentland B. IPv6 Fast Router Advertisement, draft-mkhalil-ipv6-fastra-02. txt, Oct. 2002