基于 UDP 的传输协议性能比较与分析 *

李一鸣[a,b], 任勇毛[a], 李 俊[a]
(中国科学院 a. 计算机网络信息中心; b. 研究生院, 北京 100190)

摘 要: 在介绍协议基本原理的基础上,通过实验,对几种典型的基于 UDP 的传输协议的吞吐率、公平性、后向兼容性、传输效率等性能指标作出了比较全面的评价,并实验分析了各种参数对传输性能的影响。最后总结实验结果,提出了本领域开放性的问题及有待进一步研究的方向。

关键词: UDP; 高速长距离网络; 传输协议; 性能评价
中图分类号: TP393 **文献标志码**: A **文章编号**: 1001-3695(2010)10-3906-05
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.10.082

Comparison and evaluation of UDP-based transport protocol performance

LI Yi-ming[a,b], REN Yong-mao[a], LI Jun[a]
(*a. Computer Network Information Center, b. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *China*)

Abstract: After introducing the basic principle of these protocols, this paper fully examined the throughput rate, fairness, backward compatibility, transmission efficiency and responsiveness of these typical UDP-based transport protocols. And also simulated the arguments of network such as RTT, buffer size in a wide range to evaluate the impact of these factors to these protocols. At last, concluded the experimental results, raised open questions and future research directions.

Key words: UDP; fast long distance network; transport protocol; performance evaluation

0 引言

由于传统 TCP 不适应高速长距离网络[1],研究人员对 TCP 提出了许多改进方案,以提高传输性能,充分利用带宽。但是在研究这些新协议的同时要求尽量保持对原始 TCP 的兼容性,在带宽时延积较小的时候其行为与标准 TCP 相似。在这方面作出的尝试有 Floyd 的 HS-TCP[2], Kelly 的 Scalable-TCP[3], Wei 等人的 FAST-TCP[4], Xu 等人的 BIC TCP[5], Leith 等人的 H-TCP[6]。他们都在 TCP 改进方面作了许多有益的尝试,但是这些传输协议都是基于 TCP 的。由于 TCP 本身复杂的拥塞控制和流量控制机制限制,使得基于 TCP 的改进协议在高速长距离网络中传输性能仍然不够理想。相对而言,UDP 传输速率很高。但是 UDP 本身无法保证数据传输的可靠性,因此,新协议的设计目标是能够将数据传输效率和可靠性结合起来。同时在高速长距离网络中往往包含一些光通信设备,通常数据传输的可靠性较高,有些甚至是保留的专用链路,利用 UDP 这种无连接无状态的特点可以极大地提高网络设备的效率,有效提高数据传输速率。因此针对高速网络产生了一些基于 UDP 的同时能够保证可靠性的新型协议。比较著名的包括 RBUDP[7]、Gu 等人的 UDT[8]、Meiss 的 Tsunami[9]、Eckart 等人的 PA-UDP[10],这些协议都以 UDP 为基础,并在此基础上加入了一定的机制来保证数据传输的可靠性。

目前对于基于 TCP 比较分析,已经有许多人作过探索,但是缺乏对于 UDP 的比较分析,本文提出了一个系统性的测试平台来对各个基于 UDP 的高速传输协议进行全面的评价分析。

1 基于 UDP 的高速传输协议

到目前为止,典型的基于 UDP 的高速传输协议主要有 RBUDP、Tsunami、UDT、PA-UDP 等。下面对这些协议进行简要介绍。

1.1 RBUDP

RBUDP 十分简单,它以设定的速率发送 UDP 数据包承载有效数据,并通过 ACK 和重传来保证数据传输的可靠性。为了避免 TCP 的每包确认机制给网络带来的额外负担以及高速长距离网络的大 RTT 延迟确认带来的影响,它选择等待所有数据传输完成后,收到发送方的 DONE 信号,再返回一个全局的 ACK,称为错位位图,根据这个错误位图,发送方可以重传那些没有被正确接收的数据包循环这个过程,就可以保证数据接收的可靠性。

1.2 Tsunami

从设计上讲,该协议并没有将文件传输作为一个单纯的协议设计问题,而利用了很多文件传输的性质,如文件的发送端和接收端都能够随机存取文件,这样就不用考虑数据块的到达顺序问题。同时将该协议设计成一个用户空间的应用程序,可以最大限度地增加它的适用面,不需要对协议栈作任何改变。最后该协议对网络延迟并不敏感,通过设置错误率阈值的方法

收稿日期: 2010-04-07; **修回日期**: 2010-05-12 **基金项目**: 国家"863"计划资助项目(2007AA01Z214)

作者简介:李一鸣(1985-),男,江西南昌人,硕士,主要研究方向为高速传输协议(liyiming@cstnet.cn);任勇毛(1981-),男,助理研究员,博士,主要研究方向为高速网络、传输协议;李俊(1968-),男,研究员,博导,博士,主要研究方向为下一代互联网、高速网络等.

防止出现吞吐率严重下降的现象。

Tsunami 的系统结构[9] 如图 1 所示。其工作流程具体如下:发送方等待接收方发来文件请求,发送方根据初始参数进行初始化并根据协商的端口进行文件传输,接收端周期性地向发送方反馈重传请求、错误率以及传输完成等报文。发送端根据这些反馈数据重传要发送的报文,调整发送数据之间的延迟等。从系统图中可以看出,接收端有两个重要的线程,即网络线程(network thread)和磁盘线程(disc thread)。网络线程负责网络通信,维持重传队列和将已经就绪的数据放入环形缓冲区的工作;而磁盘线程就负责将环形缓冲区中的数据写入磁盘。服务器端会为每一个文件传输请求开辟一个服务线程(service thread),负责所有的网络和磁盘活动。

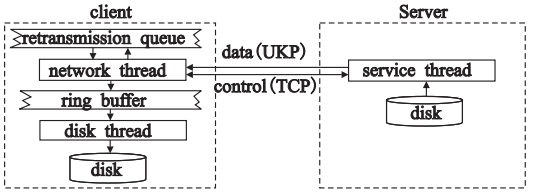

图1　Tsunami 系统结构[9]

总体来说,该协议主要有以下几个特点:使用 TCP 流来传输控制信息,使用 UDP 来传输文件数据,采用包间延迟而不是滑动窗口来管理传输速率进行拥塞控制。

1.3　UDT

UDT 也是一个基于 UDP 的传输协议,它的拥塞控制协议以共享链路为目标,这是目前惟一一个以此为目标的基于 UDP 的传输协议。UDT 主要解决两方面的问题:a)设计和实现一个功能和效率满足需求的传输协议;b)可应用于 Internet 的拥塞控制算法,同时保证效率、公平性和稳定性。

保证数据传输可靠性方面,发送端和接收端都维护一个包丢失列表,记录丢包序号。接收方以固定的时间段发送 SACK,一旦检测到丢包时间就发送 NACK,显式反馈给发送方,通过这种方式保证数据传输可靠性。此外还采用了数据压缩等方式,传递更多信息避免在已经拥塞的链路上发送更多数据包。根据 UDT 协议的设计,它还包括了一套拥塞控制算法,主要的方式是采用速率控制和窗口控制。速率控制用于调整发送包的时间周期,根据先验知识获得的初始值为 0.01 s。此后根据接收端反馈的丢包率是否超过阈值来决定下一周期的发送速率。UDT 协议的速率控制使用的是 DAIMD 算法,类似于 BIC-TCP 采用递减式的窗口增加方式,很好地避免了拥塞。同时采用基于时间的速率调整方式,使其能够快速达到最大带宽。此外,UDT 还采用了带宽估计算法,采用 PP-packet pair 方式,以 16 个包为一组,最后 1 个为包对,接收方通过记录包对的到达时间,结合上次的记录可以估算出链路带宽,并在 ACK 中进行反馈。因此,这些机制保证了 UDT 协议能够有效地利用带宽,在可靠数据传输的同时能够保证共享带宽。

1.4　PA-UDP

该协议同样是以 TCP 传输控制信号,UDP 来发送数据,但是它更加关注的是终端系统的性能是否能够适应于高速的数据传输。因为一旦网络传输速率超过终端系统的处理能力,如 CPU、网卡、磁盘等,仍然一味提高网络传输速率就是没有意义的。PA-UDP(performance adaptive UDP)的设计目标就是在适应终端性能的前提下尽可能地提高吞吐率。通过建立数学模型,该协议注重两方面的缓存,一是应用程序缓存,另一个是内核的接收缓存。对于应用程序缓存接收速率与磁盘速率满足关系 $r(\mathrm{recv}) = \alpha r(\mathrm{disk})$(其中 $\alpha = \dfrac{1}{1-\dfrac{m}{f}}$),式中 m 为缓冲区大小,f 为文件大小。满足此关系时,能够使其发送完文件时缓冲区正好用完,达到充分利用缓冲区的目的。而对于内核 UDP 接收缓存较小,需要缩短 CPU 的潜伏时间来保证高效的数据传输。另外在发送端也通过数学建模计算出在较高精度的时间片上对发送速率进行及时的调整,以保证传输质量。

在具体实现中,PA-UDP 采用简单的三次握手来实现速率的协商,由发送方发出的第一个 SYN 包中发出一个带有限制的速率询问,接收方根据自身系统参数,如缓冲区大小、磁盘读写速率、接收速率、CPU 频率等,选择接受发送方提出的速率或者将其向下调整至适合终端性能的速率大小,并通过 SYN-ACK 反馈给发送端。

文件数据通过 UDP 端口发送,接收方周期性地检查丢包情况并通过 TCP 通道返回给发送方。对数据包的确认采用的也是 NACK 的方式,以减少网络中不必要的数据传输。

2　比较目标

这里仅仅客观比较协议公认的比较重要的几个特点,来帮助人们正确选择需要使用的协议以及选择研究方向等。比较过程仍然采用标准 TCP 的性能表现作为比较的基准值。本文比较的目标主要有以下几点:

1)吞吐率

在高速网络环境中,为了满足各项科研活动的需要,吞吐率是摆在首要位置的。比如中国科学院高能物理所与法国里昂之间进行 LCG(大型强子对撞机计算网格)至少要达到 20 MBps 的最低要求[1]。可见,对于吞吐率的要求在 e-science 应用是十分重要的,因此高速网络传输协议必须能够在高速网络环境中实现高吞吐率。

2)公平性

对公平性较普遍的共识是在同一个瓶颈链路上,如果两个流的往返时延比较接近,那么它们的吞吐率也应当比较接近。在标准 TCP 的拥塞控制算法中,当两个并行流通过同一个瓶颈链路时,两个流的往返时延 RTT 不同,两个流的吞吐率也会不同,具有较短往返时延的流能够实现较大的吞吐率。因此在评价一个协议是否具有公平性时,往返时延 RTT 是一个重要的考量因素。

按照如下方法来设计实验:即在同一个瓶颈链路中,运行两个并行的流,在同样的传输协议、队列大小、链路带宽以及往返时延情况下,测量两个流各自达到的吞吐率,依此评价该传输的公平性。

3)友好性

由于目前 TCP 仍然是应用得最为广泛的协议,本文特别

测试一下新的网络协议是否能够兼容现有 TCP,采用的方法与公平性测试相同,只是将其中的一个流换成 TCP 流,视两者是否能够很好地协同工作而作出评价。

4)效率

本文称链路利用率为效率,标准 TCP 的链路利用率受到队列大小的影响,当链路中的队列大小小于带宽时延积(BDP)时,标准 TCP 的链路利用率随着队列的减小而减小。因此,针对高速网络的特点和 TCP 在效率上的表现,需要测试两方面的内容,一是队列大小对协议传输效率的影响,另外一个就是往返时延 RTT 的影响。

5)响应性

因为网络环境的复杂多变,一个好的传输协议应该能够尽快适应各种网络变化情况。例如当有新的数据流加入时,能够释放一定的带宽,以免使其他数据流发生饥饿的情况。当其他数据流完成传输过程释放网络带宽时,需要尽快地申请这一部分网络带宽,以免造成带宽的浪费。实验中通过对软路由的丢包率配置分析丢包率对吞吐率的影响。

3　协议评价分析

为了能够顺利进行各种协议的比较分析,搭建了 FLDnet 实验床,该实验床由两台终端服务器通过千兆以太网链路连接中间的网络仿真器构成,如图 2 所示。

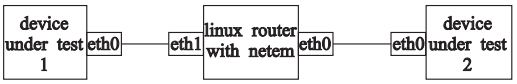

图2　FLDnet结构图

网络仿真器 netem 可以改变链路的瓶颈带宽、延迟、丢包率,以及对不同的流进行不同的配置,因此非常适合仿真各种网络环境。在实验中,往返时延取值在 16 ~ 320 ms,带宽变化为 10 ~ 622 Mbps,中间的路由器采用 drop-tail 路由调度算法,其缓存取值为 50% ~ 100% BDP。

1)吞吐率

如图 3 所示,这里比较了 RBUDP、Tsunami、UDT、PA-UDP 以及 TCP 在同一网络环境下的吞吐率变化情况。协议实现版本为 RBUDP v1.0, Tsunami v1.1 build38, UDT v4.6, TCP Reno。图中所显示的是往返时延为 320 ms,链路中缓存设置等于带宽时延积时,各个带宽下各个协议的带宽利用率情况。本文的实验结果表明,标准 TCP 在这样的网络环境中是无法合理地使用带宽,基于 UDP 的传输协议弥补了这方面的不足,总体而言,它们的传输效率都要好于用 TCP 进行的传输。其中,PA-UDP 在所有的带宽中带宽利用率都很高,因为 PA-UDP 的主要思想是关注终端系统上的资源使用情况,根据终端主机上的性能数据实时调整发送速率,所以丢包情况要优于其他协议。可见在高速网络环境中,不能一味地提高网络传输速率,而忽视了终端的处理性能是否能够适应高速的网络传输。RBUDP 和 Tsunami 在带宽利用率上表现出了一定的相似性,都是伴随着带宽的增大利用率有一定下降,Tsunami 的利用率稍高,RBUDP 和 Tsunami 协议的思想有相似性,但是 Tsunami 不需要等待所有的数据传输完成以后再进行反馈,对链路网络状况的感知比 RBUDP 好一些,能够比较及时地作出速率调整,从而提高传输效率。UDT 协议表现出一定的不稳定性,这与它复杂的控制算法有一定关系,在带宽较低时,UDT 的带宽估计机制不能有效工作,理想发送速率估计不准确,导致每个时段的发送速率方差较大,造成吞吐率的抖动。

2)公平性

在同一条链路上运行同种协议的两个并行流,测量它们的吞吐率比值,据此得到不同 RTT 情况下的公平性比较结果。

目前被广泛使用的评价参数有最大最小公平系数,假定一组 K 个并行流的速率分别为 $R=\{r_1,r_2,\cdots,r_K\}$,$r_{\min}$ 和 $r_{\max}$ 分别是其中的最大速率和最小速率,定义最大最小公平性系数为 $f_R=\frac{r_{\min}}{r_{\max}}$,本文采用这个系数作为公平性的判断标准。

在图 4 中,绘制了在带宽为 622 Mbps,往返时延 160 ms 的情况下,两个并行流在实验环境中传输 2 GB 大小文件得到的测试结果。

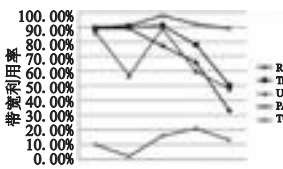

图3　各协议带宽利用率

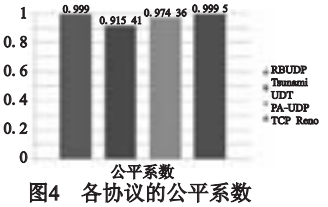

图4　各协议的公平系数

由此可见,各个基于 UDP 的高速网络传输协议在相同 RTT 的网络环境中都能够得到较好的公平性。这是因为多数基于 UDP 传输协议在发送数据的时候,到下一次收到接收方发来的反馈都有一定的时间差,然后发送方再根据这个时间差来调整发送速率等。此前,发送方一直保持着同样的发送速率,在所有网络环境相同。初始速率设定相同的情况下,两个并行流在路由器上被缓存和被丢弃的概率相同,因此丢包率也保持了基本相当的水平,发送方据此作出的调整也基本相同,能够达到同样的吞吐率,保证公平性。这一点在 RBUDP 协议中表现得尤其明显。

3)友好性

在这一部分中,主要考察这几个基于 UDP 的传输协议是否能与 TCP 流在同一个瓶颈链路中共同工作。

在实验中初始速率设置为 90% 的网络带宽,其他网络条件,如往返时延、队列大小、延时等都相同。首先建立 TCP 的连接,待传输稳定以后开始使用 UDP 进行文件传输,并且观察两者吞吐率变化情况。通过在瓶颈链路上采用 tcpdump 抓包,再采用 tcptrace 分析数据包,最后采用 xplot 画图。可以观察到 TCP 吞吐率的变化情况。

由于除了 UDT 以外,RBUDP、Tsunami、PA-UDP 都需要手动设置传输速率。通过本文的实验观察,RBUDP 和 Tsunami 一旦开始传输数据,TCP 的吞吐率如图 5 所示,离散点表示即时速率,实线表示平均吞吐率。可见,一旦开始使用 RBUDP 或者 Tsunami 传输数据,TCP 连接的吞吐率下降速度很快,即时速率很低,而 RBUDP 和 Tsunami 仍然按照设定的速率进行传输,可见对瓶颈链路上的其他数据流没有任何感知作用,不具备 TCP 友好性。

PA-UDP 与上述两者有所不同,相比之下,它更加关注终端上的处理性能是否能够满足数据传输的要求。如 RBUDP 和 Tsunami 一样一开始首先就按照初始设定速率不停地发送 UDP 包,那么瓶颈链路将很快被 UDP 包占据,TCP 流将很快出现饥饿现象。PA-UDP 的反馈速度较前两者快,能够及时调整发送速率,而此时 TCP 流的速率也在下降,当达到一定的平衡后,如图 6 所示,为原来 40% 左右的发送速率,即可保持稳定,不会出现严重的不公平现象。因此在 TCP 友好性方面,PA-UDP 比 RBUDP 和 Tsunami 好。

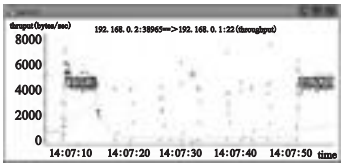

图5　TCP吞吐率(RBUDP并行)

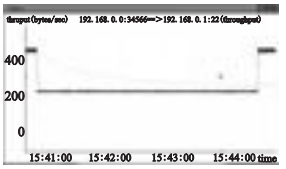

图6　TCP吞吐率(PA-UDP并行)

UDT 协议具备带宽探测功能,能够根据网络状况来决定发送速率。其发送速率调整的粒度较小,因此与前面几种协议相比具有较好的 TCP 友好性,但是带宽不是很稳定,有一定的抖动。图 7 为 TCP 吞吐率(UDT 并行)。从图 7 中即时速率可以看出,TCP 的即时速率有一定分散,导致滑动平均线有一定的抖动,但是总体吞吐率基本维持在可用带宽的一半左右,因此,UDT 的 TCP 友好性比较好,这与 UDT 本身的拥塞控制算法有着密切关系。

4)效率

网络传输协议的效率主要观察其在网络缓存以及延迟变化的情况下能否继续保持良好的性能。路由器的内部缓存是分组网络的重要组成部分,大容量的缓存能够很好地吸收链路上以突发速率到达的业务,同时能够对数据包进行缓存以提高链路利用率;但同时也可能引起数据包排队时延的增大,引发时延抖动,降低流的吞吐率[11]。小缓存的路由器还能够推动全光路的建设,降低设计复杂度增加扩展性。这里并不讨论路由器缓冲区设计,而关注各种缓冲大小对协议传输性能带来的影响。如图 8 所示,设置缓冲区大小为 1%,2%,4%,6%,8%,10%,20%,40%,60%,80%,90%,100% BDP,带宽为 100 Mbps,RTT 为 160 ms 的情况下,测试得到各个协议的吞吐率,当缓冲区大小为 1% BDP 时,只能容纳一个数据包。可见对各个基于 UDP 的协议来说,对缓冲区大小设置非常敏感,多数 UDP 数据包在发送时并不作速率控制,因此若缓冲区较小时,丢包现象严重,而其滞后的反馈机制和带宽估计造成了此类协议的吞吐率低下,伴随着缓冲区的增大,吞吐率有了明显的提升,大约扩大至 80% BDP 时,吞吐率基本稳定且维持在较高水平,唯独 UDT 只能到接近 50% 的带宽,这主要是因为它的反馈机制要求它与接收方频繁通信从而不断地调整发送速率,造成一定的通信开销和速率抖动,在降低时延的情况下也能够达到 80% 以上的带宽利用率。

RTT 的抖动在复杂多变的网络环境中也是很常见的,因此有必要研究一下 RTT 对传输协议性能带来的影响。如图 9 所示,在 100 Mbps 带宽下,路由缓存为 100% BDP,调整 RTT 的范围是 16、40、80、160、320 ms 得到如图所示的结果。与图 8 显示的结果一致,即 RBUDP,Tsunami,PA-UDP 对 RTT 的改变不敏感,在缓存充足的情况下,不会影响传输性能。惟一受到较大影响的是 UDT 协议,但是它所具备的带宽探测性质是其他协议所不具备的,因此在链路环境不是很明朗时使用 UDT 协议还是比较方便的,而在一些预留链路中,已知网络带宽且不会随时改变的情况下,使用其他协议能够带来明显的性能提升。

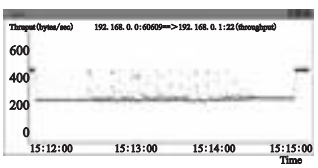

图7　TCP吞吐率(UDT并行)

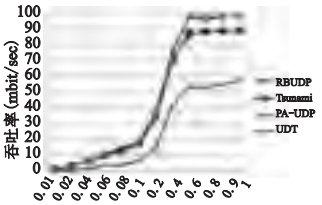

图8　吞吐率与缓存的关系

5)响应性

TCP 的响应函数用来描述丢包率和发送速率的关系,通过调整响应函数的斜率和截距等,能够改变 TCP 的性质,如使其变得更有侵略性,从而适应高速网络环境。因此,观察这个响应函数成为了解协议性质的一种重要手段。

通过 NETEM,在 FLDnet 实验床上模拟出各种丢包率,RBUDP、Tsunami、PA-UDP 协议不同于 TCP 能够很快地调整发送速率,而是在一定时间内按照一定的速率发送数据,因此,初始发送速率对于协议的传输性能有着十分重要的意义。图 10 为各协议丢包率与吞吐率关系。从图 10 中可以看出,RBUDP 和 Tsunami 在丢包率 1e-7 至 1e-3 吞吐率变化不明显,这是因为在这样的发送速率下,丢包造成的数据缺失只需要以设定的发送速率发送,很快可以得到弥补,而当丢包率再变大时,Tsunami 可能需要重传整块数据,因而造成了吞吐率的严重下降。PA-UDP 的原型系统对丢包率十分敏感,丢包率超过 1e-4 时文件无法顺利传输,因此此处仅测试了一部分数据,但吞吐率下降的趋势是明显的。UDT 协议对 RTT 和缓冲区大小都比较敏感。

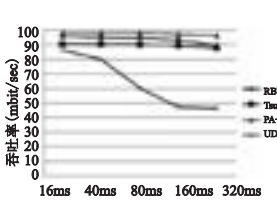

图9　吞吐率与往返时延关系

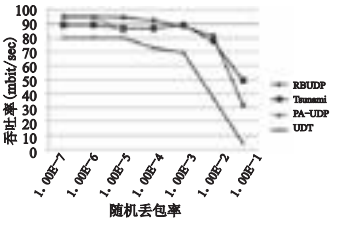

图10　各协议丢包率与吞吐率关系

4　总结与开放性问题

综上所述,本文对基于 UDP 的传输协议各个性能分析总结如表 1 所示。

表 1　性能评价小结

比较项	传输协议			
	RBUDP	Tsunami	UDT	PA-UDP
吞吐率	较高	较高	较高(抖动)	最高
公平性	较好	较好	较好	较好
友好性	非友好	非友好	友好	友好
效率	高	高	低	高
响应性	高	高	较高	低

在高速网络环境逐渐普及的今天,研究人员针对传统 TCP 在数据传输方面的缺陷,提出了许多改进方法,从解决传输效率低的问题,到 TCP 友好性、公平性等方面作了许多研究,仍未能跳出 TCP 的局限性,而最近出现的基于 UDP 的可靠传输协议弥补了这方面的不足,但同时又引入了一些新的问题。

除了 UDT,注意到 RBUDP、Tsunami、PA-UDP 在开始数据传输之前都需要进行手动配置发送速率,这要求用户在发送数据之前就清楚点对点的带宽,而且在数据传输过程中网络参数变化较小,对于分组网络不能像电路交换那样预留出一条点到点的通信链路,这种专用链路代价较高,尚不普及,因此,不能自动进行带宽探测并且进行实时调整是此类协议的一个弊端,而且设定的速率与真实的网络带宽存在不匹配的情况,如设定的速率超过实际带宽时会出现很多重传,导致传输效率低下。还有一些问题如 RBUDP 所发送文件的大小限制,PA-UDP 协议对丢包率的低容忍度,都影响了协议的广泛应用。此外,它们的反馈机制都比较差,设置速率不匹配网络带宽时,不能够及时地调整发送速率,从而造成网络带宽的浪费或者拥塞现象的发生。

对于 UDT,该协议能够主动探测带宽,能够进行实时拥塞控制。但从实验结果来看,对带宽的探测不够准确,造成吞吐率的抖动较大,网络带宽利用率不足,与 Tsunami 等协议相比吞吐率较低,同时在较大 RTT 网络环境中,吞吐率有所下降,而大 RTT 在高速长距离网络中比较常见。所以针对大 RTT 还应该作出相应的优化,包括拥塞控制算法、路由器缓存大小等。

5 结束语

本文对多种基于 UDP 的高速网络传输协议进行了评价分析,针对网络传输中的往返时延 RTT、瓶颈路由器的缓存、带宽等不同条件,测试了这些协议的吞吐率、公平性、友好性、效率、响应性等,对此类协议的优缺点进行了总结,并且进一步提出了存在的问题以及改进方向,明确了下一步的研究思路。

参考文献:

[1] 任勇毛,秦刚,唐海娜,等.高速长距离光网络传输协议性能分析[J]. 计算机学报,2008,31(10):1679-1686.

[2] FLOYD S. HighSpeed TCP for large congestion windows[S]. 2003.

[3] KELLY T. Scalable TCP: improving performance in highspeed wide area networks[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2003,33(2):83-91.

[4] JIN Cheng, WEI D X, LOW S H, *et al*. FAST TCP: motivation, architecture, algorithms, performance[J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2006,14(6):1246-1259.

[5] XU Li-song, HARFOUSH K, RHEE I. Binary increase congestion control (BIC) for fast long-distance networks[C]//Proc of IEEE INFOCOM. 2004:2514-2524.

[6] LEITH D J, SHORTEN R. H-TCP protocol for high-speed long distance networks[C]//Proc of the 2nd Workshop on Protocols for Fast Long Distance Networks. 2004.

[7] HE E, LEIGH J, YU O, *et al*. Reliable blast UDP:predictable high performance bulk data transfer[C]//Proc of IEEE International Conference on Cluster Computing. 2002:317-324.

[8] GU Yun-hong, GROSSMAN R L. UDT:UDP-based data transfer for high-speed wide area networks[J]. Computer Networks, 2007,51(7):1777-1799.

[9] MEISS M R. Tsunami: a high-speed rate-controlled protocol for file transfer[EB/OL]. (2004-09-28). http://Steinbeck. ucs. indiana. edu/~mmeiss/papers/tsunami. pdf.

[10] ECKART, HE Xu-bin, WU Qi-shi. Performance adaptive UDP for high-speed bulk data transfer over dedicated links[C]//Proc of IEEE Symposium on Parallel and Distributed Processing. 2008:1-10.

[11] 李玉峰,邱菡,兰巨龙,等. TCP 流竞争拥塞及拥塞链路的缓存需求研究[J]. 软件学报,2008,19(6):1499-1507.

(上接第 3901 页)

参考文献:

[1] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, *et al*. Wireless sensor networks: a survey[J]. Computer Networks,2002,38(4):393-422.

[2] LAN-MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society. Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specification[S]. 1997.

[3] ERGEN S C, VARAIYA P. PEDAMACS:power efficient and delay aware medium access protocol for sensor networks[J]. IEEE Trans on Mobile Computing,2006,5(7):920-930.

[4] HOLYER I. The NP-completeness of edge colouring[J]. SIAM Journal on computing,1981,10(4):718-720.

[5] RAMANATHAN S, LLOYD E. Scheduling algorithms for multi-hop radio network[J]. IEEE/ACM Trans on Networking,1993,1(2):166-177.

[6] MAO Jian-lin, WU Zhi-ming, WU Xing. A TDMA scheduling scheme for many-to-one communications in wireless sensor networks[J]. Computer Communications,2007,30(4):863-872.

[7] NGO C Y, LI V O K. Centralized broadcast scheduling in packet radio networks via genetic-fix algorithms[J]. IEEE Trans on Communications,2003,51(9):1439-1441.

[8] CHAKRABORTY G. Genetic algorithm to solve optimum TDMA transmission schedule in broadcast packet radio networks[J]. IEEE Trans on Communications,2004,52(5):765-777.

[9] BAI Rong-gang, QU Yu-gui, GUO Yang, *et al*. An energy-efficient TDMA MAC for wireless sensor networks[C]//Proc of the 2nd IEEE Asia-Pacific Service Computing Conference. 2007:69-74.

[10] KIM H S, HAN K J. A power efficient routing protocol based on balanced tree in wireless sensor networks[C]//Proc of the 1st International Conference on Distributed Frameworks for Multimedia Applications. 2005:138-143.

[11] KRISHNAMACHARI B, ESTRIN D, WICKER S. Impact of data aggregation in wireless sensor networks[C]//Proc of the 22nd International Conference on Distributed Computing System. 2002:575-578.

[12] ROWE A, GUPTA V, RAJKUMAR R. Low-power clock synchronization using electromagnetic energy radiating from AC power lines[C]//Proc of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. 2009: 211-224.