

# 卫星网络传输层协议分析与改进

王华顺, 孙力娟, 肖 甫, 王汝传  
(南京邮电大学 计算机学院, 江苏 南京 210003)

**摘 要:** TCP/IP 协议的成熟极大地促进了地面网络的发展, 然而传统 TCP/IP 协议难以直接高效地应用于卫星网络。文中针对卫星网络固有的大带宽时延积、高误码率等特点以及卫星网络中 UDP 流的资源争用问题, 深入对比分析了传统 TCP 协议在卫星网络中的缺点, 并针对多媒体数据流引入 TFRC 机制, 从而实现卫星网络 TCP 流量和 UDP 流量竞争情况下带宽的公平分配。实验表明: TFRC 机制的引入可以有效解决流量带宽竞争问题, 较好地实现卫星网络带宽的公平性。

**关键词:** 卫星网络; 传输控制协议; 友好速率控制; 公平性

**中图分类号:** TP393.41

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2009)08-0058-04

## Improvement and Analysis of Transport Layer Protocol on Satellite Network

WANG Hua-shun, SUN Li-juan, XIAO Fu, WANG Ru-chuan

(College of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** The maturity of TCP/IP protocol prompts the progress of ground network greatly; however, traditional TCP protocol can't be directly applied to the satellite network efficiently. In view of instinct character such as big time delay product, high-error rate of satellite network and the problem of the resource competition of UDP, analyzed the defect of traditional TCP on satellite network deeply and introduced the TFRC mechanism into multi-media data flow so as to realize the fair utilization of bandwidth. Simulation results showed that with TFRC mechanism introduced, can achieve the fairness of bandwidth greatly in satellite network.

**Key words:** satellite network; TCP; TFRC; fairness

### 0 引 言

随着通信网络技术的迅速发展, Internet 得到了迅速的发展和普及。与此同时, 各种新的业务需求如远程教育、电视会议、远程医疗的产生对网络带宽又提出了新的要求, 现有的地面网络已不能完全满足用户的需求。交互的、高速的、和因特网结合的新一代卫星通信网络很好地解决了这些问题。卫星通信的覆盖面积广、通信费用与距离无关、不受地面自然灾害影响等固有的优点, 很好地适应了当前迅猛发展的 Internet 业务的需要, 这使得它成为当前的研究热点。

卫星网络不同于地面网络, 它具有很多自身特点,

具体突出表现在以下两个方面:

1) 带宽时延积大: 由于地面站与卫星之间以及卫星与卫星之间的传输距离较远, 所以会导致卫星链路上传输时延比较大, 如在 GEO 系统中往返时延(RTT)会达到 500 毫秒以上。同时有限的星上处理能力, 以及星-星、星-地链路的频繁切换等因素也会造成传输时延的增加。卫星信道一般还具有较高的带宽, 所以带宽时延积较大。

2) 高误码率: 由于天空网络环境的复杂性, 以及雨衰、电磁干扰等因素的影响使得卫星链路具有远高于与地面网络的误码率, 大约为  $10^{-6} \sim 10^{-4}$  数量级。

TCP/IP 协议构成了互联网的基础, 极大地促进了互联网的发展, 但是早期的 TCP 协议是以低速的地面网络为参考进行设计的, 因此它很好地适应了地面网络条件。而由于卫星网络具有以上不同于地面网络的特点, 使得传统的 TCP、UDP 协议无法直接高效地应用于卫星网络, 不能很好地发挥协议本身特性, 所以有必要对其进行改进使其更好地适应卫星网络。文中针对卫星网络的特点围绕 TCP、UDP 两个传输层协议

收稿日期: 2008-12-05; 修回日期: 2009-02-23

基金项目: 国家高新技术研究计划(2006AA01Z219, 2008AA701201), 江苏省博士后基金(0801019C); 南京邮电大学攀登计划项目(NY207022)

作者简介: 王华顺(1982-), 男, 山东德州人, 硕士研究生, 研究方向为卫星网络通信协议、基于通信网络的计算机应用技术; 孙力娟, 教授, 博士生导师, 研究方向为卫星网络、无线传感器网络、演化计算等。

在卫星环境下的传输性能问题进行了分析、比较,并提出了改进方法。

## 1 卫星 TCP 协议传输性能分析

### 1.1 大带宽时延积对 TCP 的影响及改进

TCP 协议是面向连接的端到端数据传输层协议,向应用层提供面向字节流的可靠的服务。为了管理数据流,TCP 采用了拥塞控制机制,即发送端根据估计的网络状况和接收端的接收能力适时调整数据发送的速率。TCP 的拥塞控制主要包括慢启动、拥塞避免,后来的 TCP Reno 又加入了快速重传、快速恢复机制。

慢速启动算法用于渐进地增加 TCP 的拥塞控制窗口,以避免在 TCP 连接传送数据的初始阶段向网络发送不适量的数据而导致拥塞<sup>[1]</sup>,该算法基于收到的确认数来增加 TCP 的拥塞窗口。具体地说,当建立新的 TCP 连接时,拥塞窗口初始化为一个数据包大小。源端按照拥塞窗口大小发送数据,每收到一个 ACK 确认,拥塞窗口就增加一个数据包发送量,这样拥塞窗口就将随着回路响应时间 RTT 呈指数增长,当增加到某个阈值,便进入拥塞避免阶段。

拥塞避免策略将以更为缓慢的速度增加拥塞窗口尺寸。在这个期间,每接收到一个确认数据包,拥塞窗口增加的长度为当前拥塞窗口长度的倒数<sup>[2]</sup>。TCP 的慢启动过程是基于 RTT 的,平均每一个 RTT 周期调整一次。但是卫星网络有很大的网络延时,这就使得它的慢启动过程会消耗很长的时间,而卫星网络又有较大的网络带宽,这就进一步增长了慢启动的时间,使得系统要经历较长的时间才能填充带宽,造成网络带宽的浪费,严重影响系统吞吐率。TCP 传输最大速率的计算方法为最大发送窗口与 RTT 倒数的乘积,标准的 TCP 发送窗口为 65535 字节,而卫星网络(GEO)的 RTT 一般大于 500ms,因此,网络对应最大的速率约为 1Mbps,根本无法充分利用卫星 Gbit 级的带宽。即使在 TCP 处于平稳工作状态时,仍然会因较大的 RTT 而影响卫星网络的传输速率。

目前已有几种解决上述问题的改进方法<sup>[3~5]</sup>:增大初始拥塞窗口字节数和增大窗口的递增步长,大初始窗口的方法将初始窗口从 1 MSS(maximum segment size)增加到大于 1 的某个定值,从而减少从小初始窗口探寻可用网络带宽造成的额外的 RTT。这些改进算法都致力于在具有长延时的链路上迅速地打开拥塞窗口,减少慢启动所需要的时间,迅速提高数据发送端的发送速率,提高整体系统的传输效率。仿真结果表明这些改进有助于提高 TCP 在卫星网络上的传输效率。

### 1.2 高误码率对 TCP 的影响

TCP 最初是针对地面具有较小误码率的有线网络设计的,所以由误码造成分组的丢失非常少,因此分组的丢失就意味着在源主机和目的主机之间的某处网络上发生了拥塞。而卫星信道易受到射线、雨衰等自然条件的干扰,具有较高的误码率,这对 TCP 协议有很大的影响。TCP 拥塞控制中将所有的分组丢失,全部视为由网络拥塞引起的。而在卫星环境下分组的丢失常常是因为误码引起的。此时,如果仍然采用传统的 TCP 协议,就会错误地认为发生了网络拥塞,使发送方错误地减小发送数据的速率。而实际情况是发送方应当尽快重传损坏的分组加大发送窗口,而不是减小发送窗口。

针对该问题的解决,主要集中在如何区分丢包是由误码引起的还是由拥塞引起,并由此作出正确的拥塞控制决策。目前很多的解决方案是通过端统计方法来实现的<sup>[6~10]</sup>,在端结点应用相应的丢失区分算法 LDA<sup>[6]</sup>(Loss Differentiate Algorithm)来判断包是由拥塞引起的还是无线误码引起的,如果是拥塞引起的包丢失就触发拥塞控制机制降低源端发送速率,否则保持原发送速率不变。如 TCPW 协议<sup>[7]</sup>就是通过 TCP 源端不停地检测 ACK 的到达速率,然后根据带宽估计算法计算出当前连接的带宽,以决定进行如何的拥塞控制,Biaz 则提出了一种在发送端通过包到达时间间隔(inter-arrival time)来区分丢失的方法<sup>[8]</sup>。这些算法的原理是只依靠端系统根据接收到的包的特性(时延抖动等)对丢包原因进行判断。网络探测也是解决这类问题的一种重要方法,它的基本思路就是当发生丢包时,由发送端发送一些轻量级的探测数据报,以进行丢包情况探测,如果在一定时间收到了这些数据报的回复,则认为网络没有发生拥塞,反之则认为网络发生了拥塞,应降低发送方的发送速率<sup>[9,10]</sup>。上述的各种方法在一定程度上改善了卫星链路的通信效率,但是它还存在分辨率不是太高的缺点,丢包的高精度区分对卫星链通信的改善有着重要意义,这也是当前研究的一个热点。

## 2 卫星 UDP 协议传输性能及改进机制

UDP 协议是非面向连接的数据传输层协议,在正式通信前不必与对方先建立连接,直接向接收方发送数据,是一种不可靠的通信协议。正是由于 UDP 协议不关心网络数据传输的一系列状态,使得 UDP 协议在数据传输过程中节省了大量的网络状态确认和数据确认的系统资源消耗,大大提高了 UDP 协议的传输速度,而且 UDP 无需连接管理,可以支持海量并发连

接<sup>[11]</sup>。UDP 的这些优势都非常适合于卫星网络通信,特别是基于卫星网络的实时消息和实时媒体流的通信。

目前将 UDP 应用于卫星网络的突出问题,就是资源争用问题及对 TCP 的友好性问题。TCP 提供严格的拥塞控制机制以保证网络的稳定性和带宽公平性,而 UDP 没有采用拥塞控制机制,这使得在 UDP、TCP 共存的网络环境下,当发生网络拥塞时,TCP 会因为检测到拥塞而触发拥塞管理机制,按照一定的策略降低发送方的发送速率,而此时如果 UDP 流增大会进一步促使 TCP 流发送方的速率的降低,最终使得 TCP 流得不到公平的带宽、甚至“饿死”,严重情况下有可能造成网络崩溃<sup>[12,13]</sup>。卫星网络由于其在战争及自然灾害的特殊用途,就更不能容忍这种状况,因此对于卫星网络中基于 UDP 应用和基于 TCP 应用的带宽公平共享问题具有重要意义。

卫星网络中 UDP 的应用多是多媒体数据流,基于此,文中引入 TFRC 协议,该协议既满足了卫星网络环境下实时多媒体流的要求,又很好地实现和 TCP 协议的友好性。TFRC 是基于数学模型的 TCP 友好拥塞控制机制,它在防止网络拥塞崩溃的同时充分利用瓶颈链路带宽,对 TCP 流公平而且平滑地进行速率调节。TFRC 既可以实现与 TCP 流的公平性的共享带宽,又不会因为单个包的丢失而将速率减半造成抖动,能够保持相对稳定的发送速率,较适合于基于 UDP 的多媒体流传输的应用。在具体算法实现中,TFRC 采用了 TCP-Reno 的吞吐量公式<sup>[14]</sup>,即:

$$T = \frac{S}{R \sqrt{2bP/3} + t_r \text{RTO} \sqrt{3bP/8P(1 + 32P^2)}}$$

其中  $T$  为吞吐量(单位:B/s), $S$  为数据包的大小(单位:B); $R$  为往返时延  $RTT$ (单位:秒); $P$  为稳定状态下的丢包事件率,它是在一个发送窗口内发生的丢包事件数与发包总数的比值; $t_r$  RTO 为重传时钟(单位:秒),一般直接设置为  $4 * RTT$ ,这种粗粒度的 RTO 计算公式也被证明是简单有效的; $b$  是单个 TCPACK 表示接收的报文数,比如接收端收到 2 个数据包,便发送 1 个 ACK,则  $b$  设置为 2,由于很多实现没有采用延迟的 ACK,所以 RFC 建议设置为  $b = 1$ 。

其基本实现过程是在接收端检测网络的拥塞信号(这里利用的是丢包率),并将信号反馈给发送端,而发送端利用以丢包率和回环时间为变量的吞吐量公式来调整发送速率,以适应网络拥塞的情况,如果发送端没

有收到反馈也会减小发送速率。TFRC 传输有很好的稳定性,同时它并不是发现丢包就直接减半发送速率,而是在持续发现几个丢包事件后开始减半的,因此适合于多媒体流的应用。由于需要对 TCP 保持友好性,TFRC 使用的是在 TCP-Reno 协议中定义的吞吐量计算公式。

### 3 实验结果

为验证在卫星网络中引入 TFRC 机制既可以满足基于 UDP 流媒体应用又可以实现很好的带宽公平,利用 NS 网络仿真工具对引入该机制前后的瓶颈带宽公平性进行了仿真比较,图 1 是利用 NS 仿真工具在 TCP、UDP 流共享的网络下得出的仿真曲线。

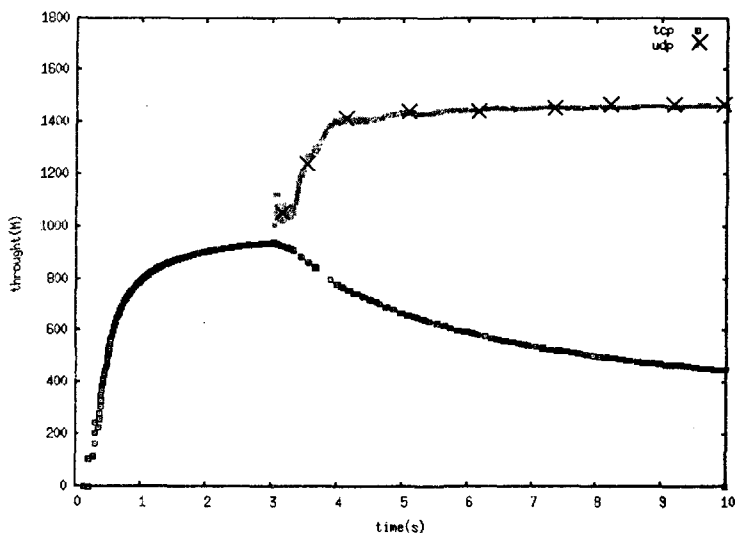


图 1 TCP 流、UDP 流共存网络下的带宽公平性

基于 TCP 的数据流在 0.1 秒启动,按照拥塞控制策略经历慢启动阶段、拥塞避免阶段,在 3.0 秒时基于 UDP 的数据流启动,此时 TCP 流检测到网络拥塞,便降低自身的发送速率以缓解拥塞,而 UDP 由于没有拥塞控制所以不会降低发送速率,一直增长到某个稳定状态,并一直维持该状态,直到 10.0 秒关闭该数据流。从图中可以明显看到由于 UDP 流的加入而引起 TCP 流的急剧下降,导致带宽的不公平性问题。

引入 TFRC 后重复上述仿真,基于同样的上层应用而且其他实验参数也与图 1 实验中的配置参数完全一致,再次利用 NS 得出的仿真结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出,在 3.0 秒多媒体流启动后,TCP 的应用流并没有出现急剧下降的情况,而只是波动性变化,很好地实现了带宽的公平性。实验表明将 TFRC 应用于卫星网络可以很好地实现链路带宽的公平分配,从而保证 TCP 流的公平性,提高卫星网络稳定性。

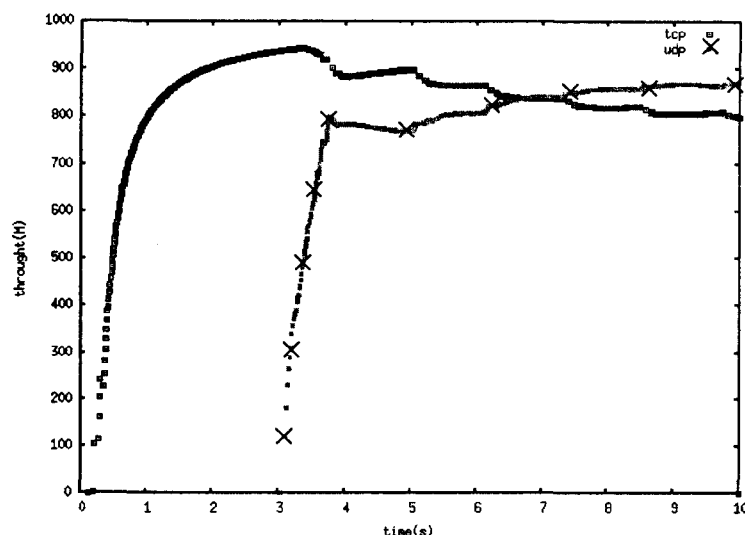


图2 TCP流、TFRC流共存网络下的带宽公平性

#### 4 结束语

卫星网络具有诸多地面网络无法比拟的优点,这使得它成为当前研究的热点,但是它的大时延、高误码等特点又使传统协议性能无法很好地发挥。文中针对卫星网络的这些特点,对传统的TCP、UDP进行了深入分析并提出改进意见,对于UDP流的资源争用,引入了TFRC协议机制,并通过仿真实验给出了引入前后的对比效果,结果表明该协议很好地实现了网络带宽的公平性。

#### 参考文献:

- [1] 依那,金野,梁庆林.卫星链路TCP传输性能分析[J].真空电子技术,2003,32(2):25-29.
- [2] 龙飞,王勇前,曹志刚,等.卫星因特网接入TCP/IP协议的改进与发展[J].清华大学学报,2001,41(7):17-20.

(上接第57页)

一个可选方案<sup>[10]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 周潇.基于Web Service的PKI研究与实现[D].上海:华东师范大学,2007.
- [2] 饶元,冯博琴.新网络体系结构——Web Service研究综述[J].计算机科学,2004,31(5):1-4.
- [3] 李艳霞,巩九洲,黎玉琴.一种基于Web Services的信息集成方案[J].计算机技术与发展,2008,18(9):105-107.
- [4] 陈振邦,王戟,董威,等.面向服务软件体系结构的接口模型[J].软件学报,2006,17(6):1459-1469.
- [5] 吴广印.基于Web Service构架的资源共享技术研究与应用[J].情报学报,2007,26(6):851-857.
- [6] 顾宁,刘家茂,柴晓路.Web Service原理与研发实践

- [3] 贾刚,钟亦平,张世永.UDP数据流对TCP数据流影响的分析和模拟[J].计算机工程,2003,29(7):143-146.
- [4] 王彬,吴铁军.基于显式速率的TCP友好的UDP拥塞控制策略[J].电路与系统学报,2003,8(5):43-48.
- [5] 郑四海,李腊元.一种实时多媒体数据流传输算法及其在NS2上的实现[J].武汉理工大学学报,2008,32(1):47-50.
- [6] 张怡.无线网络中TCP友好拥塞控制[D].南京:南京理工大学,2006.
- [7] 王彬.TCP/IP网络拥塞控制策略研究[D].杭州:浙江大学,2004.
- [8] 王满喜,胡向晖,马刘非.混合式网络拥塞控制算法[J].电子科技大学学报,2006,36(3):20-25.

- [9] 赵飞,叶震.UDP协议与TCP协议的对比分析与可靠性改进[J].计算机技术与发展,2006,16(9):120-122.
- [10] 胡吉明,刘少君.状态协议分析技术在TCP中的应用[J].计算机技术与发展,2006,16(3):212-215.
- [11] 曾晶萍,杨文俊,彭力.TCP友好速率控制协议的分析及应用[J].计算机技术与发展,2007,17(1):111-113.
- [12] Biaz S, Vaidya N. Discrimination congestion losses from wireless losses using interarrival times at the receiver[C]//In Proc. IEEE Symp. Application-Specific Systems and Software Engineering and Technology. Richardson, TX: [s. n.], 1999: 10-17.
- [13] Handley M, Floyd S. TCP Friendly Rate Control (TFRC): Protocol Specification[S]. IETF RFC 3448, 2003.
- [14] Wen P, Cao J, Li Y. Design of High-performance Networked Real-time Control Systems[J]. Control Theory & Applications, 2007, 1(5):1329-1335.

[M].北京:机械工业出版社,2007.

- [7] Curbera F. Unraveling the Web Services Web: An Introduction to SOAP, WSDL, and UDDI[J]. IEEE Internet Computing, 2002, 6(2):86-93.
- [8] Tilkov S. A Brief Introduction to REST[EB/OL]. 2007-12-10. <http://www.infoq.com/articles/rest-introduction;jsessionid=5464B81EB79C0B256B3DA9F7CD942DF6>.
- [9] Fielding R T. Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures[D]. California: University of California, 2000.
- [10] Beyer D, Chakrabarti A, Henzinger T A. Web service interfaces[C]//Proceedings of the Fifteenth International World Wide Web Conference (WWW 2005). Chiba: ACM Press, 2005.