

doi: 103969/j.issn.0490-6756.2017.03.009

卫星网络中基于阻尼反馈机制的自适应可靠传输协议

闫宇轩¹, 王俊峰¹, 刘立祥²

(1. 四川大学计算机学院, 成都 610065;

2. 中国科学院软件研究所综合信息系统技术国家级重点实验室, 北京 100190)

摘要: 本文提出了一种基于阻尼反馈机制的自适应可靠传输协议(SATP, Adaptive Transport Protocol in Satellite Networks). 该协议采用带有滤波的带宽估计算法, 引入阻尼阈值参数, 设计了一种自适应的拥塞避免机制, 针对不同带宽时延和不断变化的网络情况, 自适应的调整传输策略, 解决了传统可靠传输协议在高带宽时延积的卫星网络中不能充分利用带宽, 且不能适应卫星网络时延抖动和卫星相对运动的问题. 最后, 通过软件和硬件结合的方式搭建卫星网络仿真平台进行协议性能测试, 实验结果表明 SATP 协议在卫星网络中可保持较高的吞吐量, 较之经典卫星传输协议最高可高出 46%, 且拥有较好的公平性.

关键词: 卫星通信; SATP 传输协议; 阻尼反馈; 带宽估计

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 0490-6756(2017)02-0273-07

An adaptive reliable transport protocol based on damping feedback mechanism in satellite networks

YAN Yu-Xuan¹, WANG Jun-Feng¹, LIU Li-Xiang²

(1. College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. National Key Laboratory of Integrated Information System Technology, Institute of Software Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: This paper proposes an adaptive reliable transport protocol based on damping feedback mechanism in satellite networks (SATP) which uses filtering techniques to improve the stability and reliability of available bandwidth estimation and contains a new adaptive congestion avoidance algorithm. It adjusts the transmission strategy adapting to the different bandwidth-delay product and the change of network conditions by the use of damping thresholds to deal with the problem that the utilization of conventional reliable transport protocols declined significantly in satellite communications due to the high bandwidth-delay product, delay jitter and satellite relative motion. The performance of SATP is evaluated through a satellite simulation platform of integrated hardware and software components. Simulations demonstrate that SATP can achieve up to 46 percent higher throughput than classic satellite transmission protocol in different satellite networks topologies and share the link resource fairly.

Keywords: Satellite communication; SATP; Damping feedback; Bandwidth estimation

收稿日期: 2016-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(91338107, 91438120, 91438119); 教育部博士点基金(20130181110095)

作者简介: 闫宇轩(1992-), 女, 硕士生, 研究方向为计算机网络与信息系统. E-mail: joanna_yyx@qq.com

通讯作者: 王俊峰. E-mail: wangjf@scu.edu.cn

1 引言

卫星通信是利用人造地球卫星作为中继站来转发无线电波,从而实现两个或多个地球站之间传输数据的通信技术.目前我国地面通信网络只覆盖了约 15% 的国土面积,而人口稀少的偏远地区,比如草原、森林及海岛,因其业务量极少,铺设通信设备成本巨大,未来也无法覆盖地面通信网络,此时卫星通信就成为首选的通信方式.此外,卫星通信还可用于气象预报、灾害监测、导航定位、电视广播、国家防御等经济和军事领域,可以预见,卫星通信未来将成为全球通信系统的重要组成部分,具有地面通信无法取代的地位^[1].

但是由于卫星网络具有信号信噪比低、信号传输距离遥远、以及网络环境不稳定等特点,导致在卫星网络中链路误码率居高不下,传输协议测量到的往返时延 RTT(Round-Trip Time)不仅明显高于地面网络,而且存在抖动剧烈的现象,使得现有地面传输协议在卫星通信环境中带宽利用率低^[2],不能满足现代卫星通信的需求.

为此,研究人员结合卫星网络的特性,对传统传输协议进行了改进或者提出了新的传输协议.针对高时延及时变时延的通信环境,Dina Katabi 等人提出的 XCP 协议通过显式拥塞通知 ECN(Explicit Congestion Notification)判断网络拥塞情况调整发送策略^[3];Tarik Taleb 等人提出的 REF-WA 协议利用往返时延计算反馈函数调整窗口,优化瓶颈链路的容量分配^[4].上述协议在卫星链路误码率升高时,带宽利用率下降剧烈.针对高误码率的网络环境,金凤林等人提出的 TP_Satellite+ 协议基于数据包优先级判断丢包原因,避免误码丢包降低发送速率^[5];Zhihong Ren 等人提出的无比率编码协议通过对数据进行编码避免数据重传提高协议的传输速率^[6].上述协议或是需要具有优先级控制策略的设备,或是冗余的数据传输消耗了卫星网络有限的带宽和硬件资源,不是卫星网络传输的最佳方案.CCSDS 提出的 SCPS-TP 协议利用首部压缩、减少握手次数、速率控制等机制提高在高时延高误码率环境中的传输性能,但是该协议不能克服卫星网络的时延抖动和卫星相对运动对协议造成的影响^[7].

本文在分析卫星网络通信特点的基础上,提出了一种基于阻尼反馈机制的自适应可靠传输协议 SATP(Adaptive Transport Protocol in Satellite

networks).该协议在保持对传统的传输协议兼容的同时,针对卫星网络高时延、存在时延抖动和卫星相对运动导致时延变化的问题,引入阻尼阈值参数设计了一种新型的自适应拥塞避免机制,同时使用带滤波的带宽估计机制,根据不同网络情况调整数据发送策略.实验表明,该协议在卫星网络中的传输性能明显优于经典卫星传输协议,适用于卫星网络数据传输.

2 SATP 协议设计

传输控制协议从控制方式上可分为基于丢包的拥塞控制算法和基于时延的拥塞控制算法两大类.由于卫星网络具有高误码的特性,大量的非拥塞丢包会严重影响基于丢包的拥塞控制算法的控制能力,所以本文采用基于时延的拥塞控制算法.

2.1 带宽估计机制

卫星网络具有高时延的特性,使得传统传输控制协议产生传输效率低的问题.这是因为传统传输控制协议在拥塞避免阶段窗口增长缓慢.理想状态下每经过一个 RTT 窗口增大 1,那么窗口增大到 N 所用的时间为 $N \times RTT$.当协议用于卫星网络数据传输时,RTT 为地面网络的几倍甚至几十倍,此时窗口增大到 N 所用的时间也增大到原来的几倍甚至几十倍,窗口调节缓慢使得传输过程中窗口长期保持在过小的水平,影响数据包发送速率,从而导致传统传输控制协议在卫星网络中吞吐量低.

针对卫星网络高时延影响传输效率的问题,提高传输协议在高带宽时延积卫星网络中的带宽利用率,SATP 协议利用带宽估计机制.协议对当前路径的带宽进行实时采样以及滤波处理,产生稳定的带宽估计值,利用这个带宽估计值,SATP 协议就可以在拥塞避免阶段根据可用带宽修改窗口大小,从而解决高时延导致的传输控制协议窗口增长缓慢问题.

具体方法如下:SATP 协议在每个 RTT 内测量一次带宽估计值作为样本进行存储,测量方法如式(1)所示.

$$OBW(t) = \frac{Data(t) - Data(t-1)}{\Delta T(t)} \quad (1)$$

其中, $OBW(t)$ 为 t 时刻测量的带宽估计值样本; $Data(t)$ 为 t 时刻收到的数据总量; $\Delta T(t)$ 为 t 时刻到 $t-1$ 时刻经历的时间.

采集到的带宽估计值样本通过指数加权移动平均滤波算法(EWMA)计算得到稳定的带宽估计

值,带宽估计函数定义 $BW(t)$ 为式(2).

$$BW(t) = (1 - a(t)) \times OBW(t) + a(t) \times BW(t-1) \quad (2)$$

其中, $BW(t)$ 为 t 时刻经过 EWMA 滤波之后的带宽估计值; $a(t)$ 为 t 时刻 EWMA 加权因子. 不同的 EWMA 加权因子 a 对 EWMA 的滤波效果产生影响^[8], 本文采用 Goldoni 提出的利用十字过滤线 (VHF) 修正 EWMA 的加权因子的算法^[9], 对 a 进行实时修正, 具体如式(3)所示.

$$a(t) = b \times \frac{\Delta \max(t)}{\sum_{k=t-M}^t |OBW(k) - OBW(k-1)|} \quad (3)$$

其中, b 为 VHF 的常数因子; M 为 VHF 样本窗口大小; $\Delta \max(t)$ 为 t 时刻最新的 M 个测量的带宽估计值的最大值和最小值之差, 即样本的极差.

2.2 自适应拥塞避免机制

卫星网络时变时延的特性, 也会使得传统传输控制协议产生传输效率低的问题. 这是因为卫星网络中往返时延增大的原因分为 3 种: 网络出现拥塞数据包开始排队, 卫星网络环境不稳定导致的时延抖动, 卫星相对运动带来的传播时延增加. 而传统基于时延的传输协议认为往返时延增大是由于网络出现拥塞, 却没有考虑网络的时延抖动和卫星运动这种非拥塞原因导致的时延变化, 这使得传统基于时延的传输控制协议在卫星网络中, 因误判时延增长的原因导致吞吐量下降.

针对时延抖动和卫星相对运动影响吞吐量的问题, SATP 协议采用基于阻尼反馈机制的拥塞避免算法, 通过实时感知网络的时延变化和拥塞情况, 调整协议的控制参数以及发送策略, 从而实现时变时延的自适应.

首先, 定义基准吞吐量和实际测量吞吐量的落差 $\Delta(T)$, 如式(4)所示.

$$\Delta T(t) = T_{\text{base}}(t) - T_{\text{actual}}(t) \quad (4)$$

$$W(t) = \begin{cases} \max(W(t-1) + \text{MAXSEG}, BW(t) \times \text{SRTT}), \Delta T(t) \leq DT_l(t-1) \\ W(t-1), DT_l(t-1) < \Delta T(t) < DT_h(t-1) \\ W(t-1) - \text{MAXSEG}, \Delta T(t) \geq DT_h(t-1) \end{cases} \quad (7)$$

其中, $W(t)$ 为 t 时刻窗口大小, MAXSEG 为最大报文长度, SRTT 为平滑后的 RTT 值. 当 ΔT 小于 DT_l 时, 证明实际吞吐量和期望吞吐量较为接近, 网络比较空闲, 可以根据 $BW(t)$ 增大窗口, 反之需

其中, $T_{\text{base}}(t)$ 为 t 时刻的基准吞吐量, 如式(5)所示. $T_{\text{actual}}(t)$ 为 t 时刻的实际测量吞吐量, 如式(6)所示.

$$T_{\text{base}}(t) = \frac{\text{Window Size}(t)}{\text{RTT}_{\text{base}}(t)} \quad (5)$$

$$T_{\text{actual}}(t) = \frac{\text{Byte}(t)}{\text{RTT}_{\text{actual}}(t)} \quad (6)$$

其中, $\text{Window Size}(t)$ 为 t 时刻拥塞窗口大小, 即在网络中传输的字节数; $\text{RTT}_{\text{base}}(t)$ 为 t 时刻的基准往返时延, 即网络空闲时的 RTT, 本文中为所有实测 RTT 中的最小值. $\text{Byte}(t)$ 为 t 时刻协议记录的包从发出到接收这个包的 ACK 之间发送的数据量; $\text{RTT}_{\text{actual}}(t)$ 为 t 时刻这个包的 RTT.

可以看出, $T_{\text{base}}(t)$ 反映了 t 时刻协议的最大可能吞吐量, $\Delta T(t)$ 反映了 t 时刻理想网络状况与实际网络状况之间的落差 ΔT . 传统传输协议认为如果存在落差, 那么网络已经开始拥塞, 此时发送方减小窗口缓解网络拥塞, 通过降低 RTT 使得 T_{actual} 更接近 T_{base} 来减小 ΔT . 然而卫星网络传输中, 拥塞、时延抖动或卫星相对运动都会导致落差的产生. 在网络不拥塞时, 如果存在时延抖动或卫星相对运动, 此时的落差 $\Delta T(t)$ 不会趋近于 0. 所以不能一味的认为存在落差就是网络开始拥塞, 而错误的降低窗口.

SATP 协议假定存在某个值 \widehat{DT} , 使得 $\Delta T = \widehat{DT}$ 时, 协议能够取得最佳的吞吐量. 在传输过程中, SATP 协议通过阻尼的方法维持每一时刻的 $\Delta T(t)$ 尽量在 \widehat{DT} 附近, 来保证尽可能的以最佳的吞吐量进行传输.

定义阻尼阈值 DT 对 ΔT 进行限制, 使得 ΔT 在 DT 左右波动, 同时为了保证协议在 ΔT 变化时的稳定性, 定义容忍区间 (DT_l, DT_h) , 其中 $DT_l = \lfloor DT - 1 \rfloor, DT_h = \lceil DT \rceil$, 当落入容忍区间时, 认为 $\Delta T \approx DT$ 而无需调整窗口, 具体控制方式如式(7)所示.

要减小窗口.

考虑到时延抖动和网络流量变化对 ΔT 的影响, DT 不能一成不变, 协议根据实际网络状况自适应的调整阻尼阈值 DT , 如式(8)所示.

$$DT(t) = \begin{cases} DT(t-1) - \delta(t), T_{\text{actual}}(t) < T_{\text{actual}}(t-1) \text{ AND } \Delta T(t) \leq DT_l(t-1) \\ DT(t-1) + \delta(t), T_{\text{actual}}(t) < T_{\text{actual}}(t-1) \text{ AND } \Delta T(t) \geq DT_h(t-1) \\ DT(t), \text{ OTHERS} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\delta(t)$ 为 t 时刻平均法阻尼阈值调整因子, $\delta(t) = \frac{|DT(t-1) - \Delta T(t)|}{2}$. 当 ΔT 大于 DT_h 且此时的实际吞吐量大于上一时刻时, 利用式(7)应当减小窗口, 但此时的实际吞吐量呈上升趋势, 表明此时的 $DT(t)$ 偏小, 可以增大 $DT(t)$ 来适应新的网络状况, 获得更高的吞吐量.

此外, 针对卫星网络高误码率的特性, 本文采用选择性否定确认(SNACK)机制来处理丢包. 不同于传统传输协议通过重复确认(Dup ACK)机制来通告某一数据包丢失, SNACK 机制利用报文的选项字段携带 SNACK 信息, 可以一次性准确的通告多个数据包丢失, 从而减少协议丢包后的等待时间以及重复重传, 克服卫星链路误码导致的大量非拥塞丢包对传输性能造成的影响.

3 仿真实验

3.1 仿真场景

由于使用真实的卫星进行测试难度大, 使用 NS2

等网络仿真工具成为卫星网络和科学研究中最常用的仿真方法^[10,11], 但由于仿真器内部的模型完整性较低, 导致仿真结果并不能完全体现协议的真实性能^[12]. 为了更贴近真实的卫星通信场景, 本文采用硬件和软件结合的方式^[12]搭建卫星网络仿真平台对协议性能进行测试, 该仿真平台通过卫星星座模型映射链路参数, 搭配硬件平台仿真卫星信道, 能够实现不同卫星拓扑, 动态模拟不同轨道卫星的通信链路环境. 本文主机使用内存为 1 GB 的 Linux 操作系统, 协议发送和接收缓存均为 2 倍带宽时延积(BDP), 使用 FTP 发送数据流, 单次实验测试时间为 200 s.

8 个主要的测试场景如表 1 所示, 每个场景的链路参数如表 2 所示. 本文设计的测试场景分别测试了 LEO 卫星与 LEO 卫星, GEO 卫星与 GEO 卫星, LEO 卫星与 GEO 卫星, LEO 卫星与 GND 之间通信时的协议性能. 仿真平台使用的卫星星座模型充分考虑了真实卫星网络环境, 测试的所有场景均实时模拟了卫星网络高时延、时延抖动和卫星相对运动导致的时延变化.

表 1 基于 SIIN 卫星网络仿真平台的测试拓扑

Tab. 1 Topologies used in simulation based on SIIN

拓扑编号	拓扑详情
拓扑 1	同轨道面 6 颗 Walker 星座 LEO 卫星拓扑, 相邻两个 LEO 卫星间传输数据
拓扑 2	同轨道面 7 颗 Walker 星座 LEO 卫星拓扑, 相邻两个 LEO 卫星间传输数据
拓扑 3	同轨道面 8 颗 Walker 星座 LEO 卫星拓扑, 相邻两个 LEO 卫星间传输数据
拓扑 4	6 轨道面 Walker 星座 LEO 卫星拓扑, LEO11 与 LEO61 卫星间传输数据, 直至断开
拓扑 5	GEO 卫星 GM-02 与 GEO 卫星 TL2-03 间传输数据
拓扑 6	GEO 卫星 Ka-GEO-05 与 GEO 卫星 TL2-04 间传输数据
拓扑 7	同轨道面 6 颗 Walker 星座 LEO 卫星拓扑, 地面站喀什与上方一颗 LEO 卫星传输数据, 直至该 LEO 运行超过覆盖范围
拓扑 8	同轨道面 7 颗 Walker 星座 LEO 卫星拓扑, GEO 卫星 Ka-IGSO-02 与一颗 LEO 卫星传输数据直至断开

表 2 不同卫星通信场景的链路参数

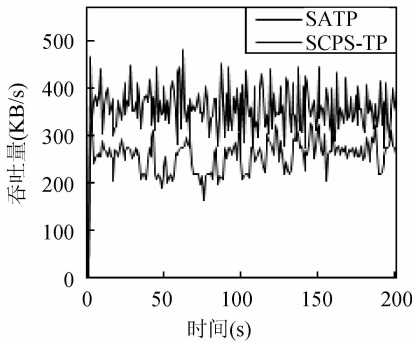
Tab. 2 Simulation parameters of satellite network topologies

测量节点	拓扑编号	节点间距离(Km)	端到端平均 RTT(ms)	误码率
LEO-LEO	拓扑 1	7819.14	52	8.26E-07
	拓扑 2	6732.45	44	6.25E-07
	拓扑 3	5984.51	38	4.71E-07
	拓扑 4	5609.56	60	4.71E-07
GEO-GEO	拓扑 5	15165.73	100	3.87E-06
	拓扑 6	25914	170	9.74E-06
GND-LEO	拓扑 7	2319.14	25	2.68E-08
LEO-GEO	拓扑 8	35100.82	250	1.85E-05

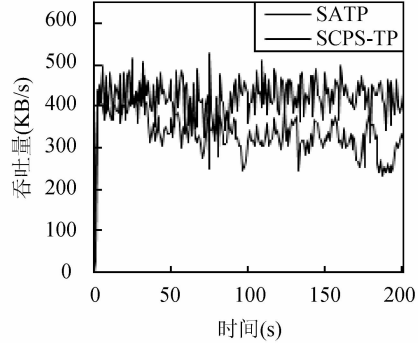
3.2 结果与分析

图 1 所示为 LEO-LEO 卫星传输测试结果, 该图表明卫星之间的时延相对地面网络明显增加, 且卫星之间的时延存在抖动时, SATP 协议在不同卫星网络拓扑的 LEO 卫星之间数据传输吞吐量均优

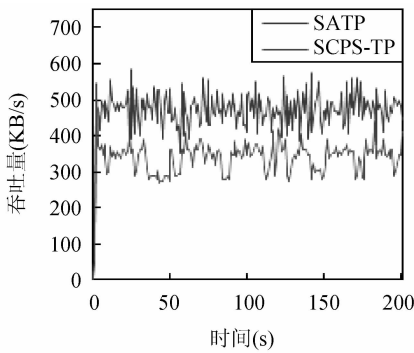
于 SCPS-TP 协议. 图 1(d) 中由于卫星结点相对运动直至最后连接断开, 协议的吞吐量都处于下降状态, 但是 SATP 协议由于对带宽和时延的自适应特性, 在卫星结点相对运动的过程中仍可保持较高的吞吐量.



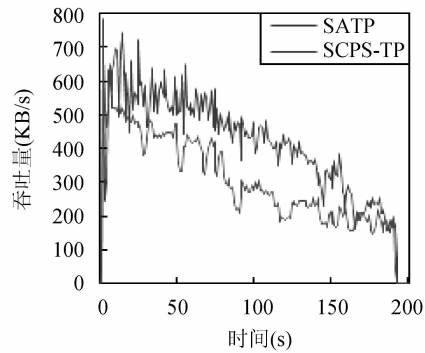
(a) 拓扑 1 场景协议吞吐量对比
(a) Throughput comparison of topology 1



(b) 拓扑 2 场景协议吞吐量对比
(b) Throughput comparison of topology 2



(c) 拓扑 3 场景协议吞吐量对比
(c) Throughput comparison of topology 3



(d) 拓扑 4 场景协议吞吐量对比
(d) Throughput comparison of topology 4

图 1 LEO-LEO 卫星传输测试结果

Fig. 1 Throughput performance between LEO satellites

表 3 分别为图 1 的 (a)~(c) 环境中 SATP 协议和 SCPS-TP 协议对应的平均吞吐量及性能对比结果, 图表显示 SATP 协议在对比协议中优势明显, 尤其是拓扑 1 中 SATP 协议比 SCPS-TP 协议吞吐量高 46%.

图 2 所示为 GEO-GEO 卫星传输测试结果, 表 4 所示分别为图 2 中 SATP 协议和 SCPS-TP 协议对应的平均吞吐量及性能对比结果, 此图表显示卫星之间的时延进一步增加, 且时延仍存在抖动时, SATP 协议在不同 GEO 卫星之间数据传输性能也优于 SCPS-TP 协议.

图 3 和图 4 分别为 GND 和 GEO 卫星到 LEO 卫星传输测试结果, 图表结果表明 SATP 协议无论是在 GND 到 LEO 卫星这种相对运动剧烈的拓扑, 还是在 GEO 卫星到 LEO 卫星这种相对运动

较小, 但传输时延较大的拓扑中, 均能适应时延的变化得到较好的传输效果.

表 3 LEO-LEO 卫星传输测试平均吞吐量

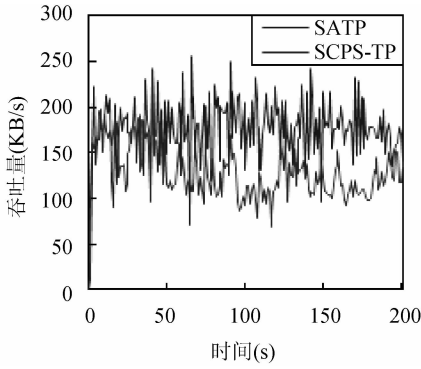
Tab. 3 Average throughput between LEO satellites

吞吐量(KB/s)	拓扑 1	拓扑 2	拓扑 3
SATP	347.02	423.05	478.13
SCPS-TP	237.58	333.34	348.00
性能提升	46%	27%	37%

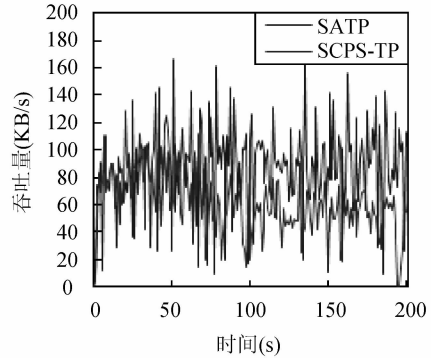
表 4 GEO-GEO 卫星传输测试平均吞吐量

Tab. 4 Average throughput between GEO satellites

吞吐量(KB/s)	拓扑 5	拓扑 6
SATP	173.36	87.23
SCPS-TP	148.54	64.23
性能提升	17%	36%



(a) 拓扑 5 场景协议吞吐量对比
(a) Throughput comparison of topology 5



(b) 拓扑 6 场景协议吞吐量对比
(b) Throughput comparison of topology 6

图 2 GEO-GEO 卫星传输测试结果

Fig. 2 Throughput performance between GEO satellites

使用拓扑 1 场景测试相同的两条 SATP 协议数据流同时传输数据的公平性,如图 5 所示.采用 Jain 公平性指数公式^[14]计算协议吞吐量公平性,如式(9)所示.

$$J = \frac{(\sum_{i=1}^s x_i)^2}{s \sum_{i=1}^s x_i^2} \quad (9)$$

其中, x_i 为第 i 个连接的吞吐量; s 为参与计算的连接总数; J 为 Jain 公平指数,公平指数为 1 代表所有连接占用同样多的链路资源. SATP 协议公平性结果为 0.996,可以看出 SATP 协议在卫星链路上的可以拥有较好的公平性.

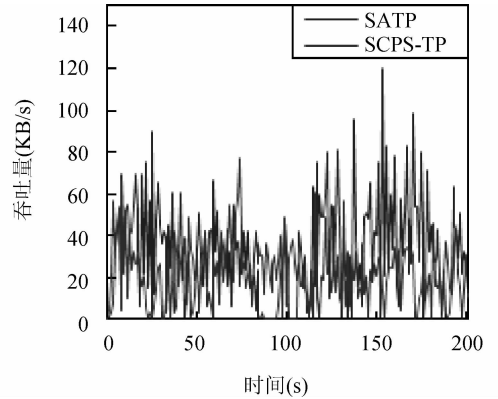


图 4 GEO-LEO 卫星传输测试结果
Fig. 4 Throughput performance between GEO and LEO

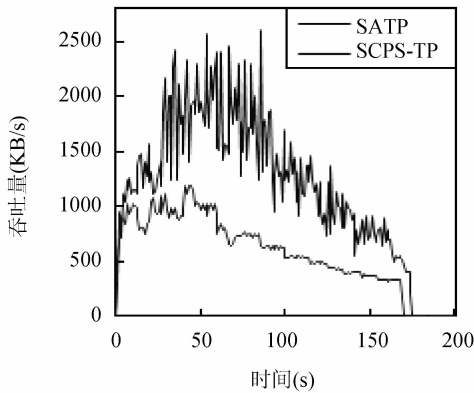


图 3 GND-LEO 卫星传输测试结果
Fig. 3 Throughput performance between GND and LEO

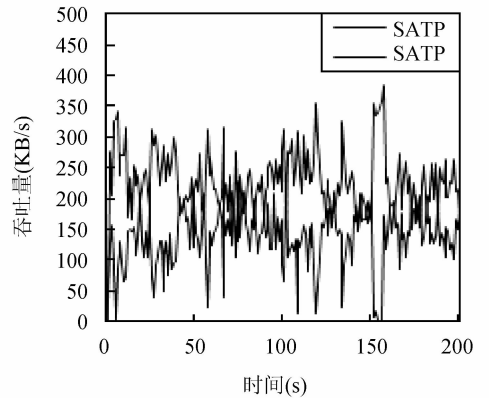


图 5 SATP 协议公平性测试
Fig. 5 Fairness analysis of SATP

4 结 论

本文分析了卫星网络通信环境中传统传输协议存在的问题,提出了一种新型的应用于卫星网络的自适应传输协议 SATP. 协议利用带宽估计机制,使用 EWMA 滤波算法对带宽估计值进行滤波,解决了传输协议在高带宽时延积的卫星网络中

不能充分利用带宽的问题;协议提出了一种基于阻尼反馈的拥塞避免机制,通过阻尼阈值来判断网络当前的状况并调整窗口大小,使协议吞吐量保持在较高的水平,从而解决了传输协议不能适应时延抖动和卫星相对运动导致的时延变化的问题,提高协议在卫星网络中的传输性能. 本文还通过硬件和软

件结合的方式搭建卫星网络仿真平台进行测试, 实验结果表明 SATP 协议在卫星网络的不同拓扑中均可达到较高的吞吐量, 较之经典卫星传输协议最高可提升 46%, 且拥有较好的公平性.

参考文献:

- [1] 易克初, 李怡, 孙晨华, 等. 卫星通信的近期发展与前景展望[J]. 通信学报, 2015, 36(6): 157.
- [2] 罗万明, 林闯, 阎保平. TCP/IP 拥塞控制研究[J]. 计算机学报, 2001, 24(1): 1.
- [3] Katabi D, Handley M, Rohrs C. Congestion control for high bandwidth-delay product networks [J]. Comput Commun Rev, 2002, 32(4): 89.
- [4] Taleb T, Kato N, Nemoto Y. REFWA: an efficient and fair congestion control scheme for LEO satellite networks [J]. IEEE ACM Trans Network, 2006, 14(5): 1031.
- [5] 金凤林, 刘炯, 崔玉萍. 一种适合于深空星际互联网的传输控制协议[J]. 计算机科学, 2013, 40(1): 37.
- [6] Ren Z, Wang Z, Guo Q. Rateless codes based file delivery protocols in deep space communications [C]// Proceedings of 2014 International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies. Hefei: IEEE, 2014.
- [7] Space Communications Protocols Specification(SCPS)-Transport Protocol (SCPS-TP). Recommendation for space data systems standards[R]. Washington: CCSDS, 2006.
- [8] 林韬, 王登运, 王忆文, 等. 基于 EWMA 的一维条码图像降噪[C]//第十五届计算机工程与工艺年会暨第一届微处理器技术论坛论文集. 上海: 微处理器技术论坛, 2011.
- [9] Goldoni E, Rossi G F, Gamba P. Improving available bandwidth estimation using averaging filtering techniques[EB/OL]. (2008-05-23). [2016-01-22]. <http://netlab-mn.unipv.it/publications/tr-netlab2008-01.pdf>
- [10] 刘雨杭. 基于宽带卫星网络的 TCP 协议传输性能的研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2015.
- [11] 吴珂, 王俊峰, 罗琴. 中国空域国内航班飞行拓扑分析[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2016, 53(1): 73.
- [12] 郭一辰, 陈靖, 张黎, 等. 大规模无线移动自组织网络混合模拟测试方法[J]. 计算机应用, 2013, 33(1): 101.
- [13] 凌翔, 卓永宁, 胡剑浩. 卫星信道基带残留误码分布特性拟合与模拟[J]. 电子科技大学学报, 2010, 39(2): 192.
- [14] Jain R, Chiu D M, Hawe W R. A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer system [M]. Hudson, MA: Eastern Research Laboratory, Digital Equipment Corporation, 1984.