

卫星网络可靠传输协议 ACK 机制研究与性能分析

王金苗¹ 许鹏文²

(装备指挥技术学院训练部 北京 101416)¹ (装备指挥技术学院装备采办系 北京 101416)²

摘要 基于近地轨道卫星网络特点,分析了现有空间信息传输可靠传输协议 ACK 改进机制,以 SCPS-TP 协议提出的 SNACK 机制为研究对象,对几种典型的 TCP 扩展协议进行了仿真实验和性能比较分析。

关键词 卫星网络, ACK 机制, SCPS-TP 协议, 选择性否定应答

中图分类号 TP393 文献标识码 A

Research and Performance Analysis of Reliable Transport Protocol ACK Mechanism over Satellite Networks

WANG Jin-miao¹ XU Peng-wen²

(Department of Training, the Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China)¹

(Department of Equipment Acquisition, the Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China)²

Abstract Based on near-earth orbit satellite network, analyzed the existing reliable transport protocol ACK mechanism for space communications. Studied on the SCPS-TP SNACK mechanism, spatial information to improve transport to SCPS-TP SNACK mechanism, did the simulation experiments and performance comparison analysis for several typical TCP extensions protocol.

Keywords Satellite network, ACK, SCPS-TP, SNACK

传输控制协议 TCP 是当前标准互联网两大传输层协议之一,其采用窗口发送、逐帧应答、超时重发的方式实现差错和流量控制,在地面网络环境中表现出很好的性能。与地面环境具有明显不同的是,卫星链路环境具有不对称信道、高信道误码率、长传输延迟和轨间链路延时持续变化等特点,这为互联网协议应用于卫星网络等空间通信环境带来了严重挑战^[1-4]。因此,研究适合卫星网络的传输控制协议,对于提高空间信息传输效率和卫星资源的有效利用率具有重要意义。

卫星网络的遥测及遥控信息传输中一种非常典型的现象是:航天器与地面站间的通信链路在一个方向上实施高速配置,而在相反方向实施较低速率的信道配置。如果卫星遥测信道所传送的数据较为可靠, TCP 确认信息所产生的业务量就可以较为轻松地在此反向信道上传输。否则,过多的 ACK 数据可能会堵塞反向信道,造成卫星链路信息传输效率降低。

本文针对非对称卫星链路的 ACK 控制算法进行分析,以 SCPS-TP 协议^[5]采用的 SNACK 机制为研究对象,对于实现不同 ACK 选项的可靠传输协议进行了性能仿真分析。

1 面向非对称性卫星链路的 ACK 控制算法

卫星链路的非对称性主要表现在信道容量和误差特性两方面。用于数据传输的下行链路(从卫星等航天器到地面终端)带宽通常要远远大于传输指令和 ACK 信息的上行链路(从地面终端到卫星等航天器)带宽,有时候比例会达到 1000:1。由于 TCP 接收端通常每隔一个数据段进行一次确认,由此可知确认所需信道容量与数据传输信道容量成正比,

而且是数据段大小的函数。对于一个长度为 1024byte 的数据段来说,当下行链路与上行链路的带宽比小于 50:1 的时候, TCP 协议的吞吐量通常不会受到影响;但是在下行与上行链路带宽比较高的时候,吞吐量会受到确认信道容量的影响。研究表明,直接把传统的 TCP 协议运用到卫星网络中,会极大地降低协议性能,并造成宝贵的卫星资源的严重浪费^[6,7]。

为了解决类似卫星链路的不对称信道问题,各种 TCP 扩展协议已提出了一些 ACK 控制算法^[2],主要包括 Delay ACK 机制、SACK (Selective Acknowledgment) 机制、SNACK (Selective Negative Acknowledgment) 机制和 Delay SNACK 机制。

TCP ACK 机制的最简单版本是对每个接收到的数据报文进行确认。因此,对于每个发送于网络中的数据报文将会在反向信道上产生一个 ACK 报文。RFC 1122 建议接收端接收多个报文后确认一次,而非单个报文确认一次,即延迟 ACK 机制 (Delay ACK)。延迟 ACK 已经在现在的互联网中实现作为缺省的确认机制,因而在此机制中,由 ACK 报文引起的网络流量可能比原始的 ACK 机制减少一半。

SACK 是 TCP Reno 的一个衍生版本。SACK 机制允许接收端在返回 Duplicate ACK 时,将已经收到的数据区段(连续收到的数据范围)返回给传送端,数据区段与数据区段之间的间隔就是接收端未收到的数据。通过这些信息,传送端就知道哪些是已经收到的,哪些是该重送的,因此 SACK 的传送端可以在一个 RTT 时间内重送一个以上的数据报文。

王金苗(1976—),男,硕士生,讲师,主要研究方向为计算机技术, E-mail: wjmcomm96@163.com; 许鹏文(1968—),男,硕士,副教授,主要研究方向为计算机技术。

以上 Delay ACK 机制和 SACK 机制均可用于处理非对称信道中主要由缓冲溢出引起的数据包损失问题,但在卫星信道中数据包损失更多的是源于带宽不对称、高误码率和长链路延迟的综合因素,以上算法未能有效解决空间的数据丢失问题。

SNACK 是一个否定性确认机制,能够在高比特率的情况下确认较大数量的数据包。SNACK 选项长度可变,包括 5 个数据域:标准 TCP 协议定义的类型域、长度域(不采用位向量的时候为 6),强制定义的错误偏移量域、长度域(域长度均为 16bit)、可选的可变长位向量。偏移量指示了接收端数据队列中的第一处错误与已确认接收到的信息间的偏移量,单位为 MSS(Maximum Segment Size, 最大分段大小);长度域描述了该缺失数据包(并不一定是收端缓冲区存储的第一个数据包)的大小,单位是 MSS;位向量包含了其余已检测出的存在于接收队列中的错误,位向量由 0 和 1 组成,0 表示对应位置上一个 MSS 长度的数据块丢失,1 表示成功接收,如果不足整字节,在最后一个 1 之后补 0 补足八位。

图 1 左是接收端的数据队列,共存在 3 处错误。第一处错误在成功接收到第一个数据包后马上就发生了,因此偏移量为 0,并占用 2 个 MSS。依据 SNACK 选项数据段要求,此处采用位向量,则由数据接收端产生的 SNACK 数据段将如图 1 右所示。

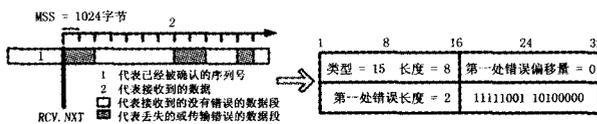


图 1 TCP 接收端数据队列及其生成的 SNACK 数据段

当存在乱序队列时,数据接收端扫描接收缓冲区,建立 SNACK 选项并通过 ACK 数据段发送出去。基于接收的 SNACK 选项,数据发送端会立即重传所必需的数据段来填充被标记的缺失数据包。由于 SNACK 选项可触发重传机制,因此就可以不依赖于快速重传算法来探测丢包现象。

在高度不对称卫星链路中,为了避免反向信道拥塞引起的 SNACK 丢失,也可考虑在反向链路中依靠延迟的 SNACK (Delay SNACK 机制)来调节 ACK 流,这时需要在接收端维护一个时间参数 T 来支持 Delay SNACK,每隔 T 时间段发送一个 SNACK。如果没有包损失,SNACK 块没有变化,接收端延迟 SNACK;否则,对于一个更新的块,立即发送一个新的 SNACK。

2 SCPS-TP 协议的 SNACK 解决方案

2.1 SCPS-TP 协议

SCPS-TP 协议是空间通信协议标准(SCPS 协议簇)中适应空间通信需求的最重要的应用,它对于空间通信链路定制了多项策略,使得空间通信网络端到端数据传输性能的改善有较大提高。

SCPS-TP 协议由标准 TCP 协议修订而成,包括一系列协议扩展项和功能增强项,涵盖了对协议使用手段和协议规范的改动。该协议的某些扩展项是对标准 TCP 规范的恰当修改,而另一些扩展项则确保不会影响网络系统的互操作性。

SCPS-TP 协议采用了 RFC1323 规定的时间戳和窗口扩展选项,并建议使用选择性非确认 SNACK 选项。此外,SCPS-TP 协议还使用选择性速率控制机制取代了在带宽非

对称环境下所使用的标准 TCP ACK 时钟。

2.2 SNACK 选项

SCPS-TP 的 SNACK 选项是从选择性应答机制(SACK)和否定应答机制(NAK)的思想发展而来的,既可提高带宽利用率又可提高丢包恢复能力。SNACK 选项(位于确认数据段中)可以对接收端缓存中的多个缺失数据段进行标识。通过快速地提供更多的有关丢失数据段的信息,SNACK 选项能够加快数据恢复的速度、避免发端窗口受限,允许在等待获知丢失数据段信息时耗尽管道容量。卫星网络信息传输中出现的丢包现象,可能是由误码而非拥塞引起的,为了在出现丢包时仍保持持续传输数据的能力,当确定使用拥塞控制处理丢包时,SNACK 可保持通信管道容量工作在饱和状态下,并允许在丢包恢复过程中数据传输能够持续工作在满负荷的瓶颈状态下。

在不具备选择性确认信息的情况下,TCP 协议利用 ACK 序号来识别接收端至多一个缺失数据段。利用简单的累积确认以及快速重传算法,TCP 协议可以有效恢复每个窗口的某个丢包。尽管如此,由于接收端必须通过接收新数据来增加 ACK 序号,因此 TCP 协议要耗费 1 个 RTT 时间来发送信号通告该乱序队列中每个额外的缺失数据段。基于接收的 SNACK 选项,数据发送端会立即重传所有必需的数据段来填充被标记的缺失数据包。

当存在乱序队列时,接收端将扫描接收缓冲区,建立 SNACK 选项并通过 ACK 数据段发送出去。由于 TCP 头部的限制,单一 SNACK 选项无法代表整个序列空间。这种情况下可以传送多个 SNACK 选项,选项包含了对接收缓冲区内缺失数据包的连续记录。

3 仿真实验和性能分析

基于前面的分析,本文使用 NS2 软件^[8,9]建立了一个实现 SNACK 选项的类 SCPS-TP 协议的仿真模型,研究了 SNACK 在近地轨道卫星网络中的性能表现,在吞吐量及链路利用率方面与 SACK 机制和其他 ACK 机制进行了分析比较。

3.1 实验配置

本文选取的仿真场景为具有较长时延的中低轨卫星网络的星地链路之间遥测、遥控业务空间信息传输过程。仿真参数配置见表 1。

表 1 仿真参数配置

仿真选项	参数值
轨道高度	500km
链路带宽	上行 1kbps,下行 4kbps
误码率	$10^{-5}, 10^{-6}, 10^{-7}$
错误模型	随机
随机种子数量	10 个种子
包尺寸	100 bytes
队列长度	32 packets
排队类型	Drop Tail
仿真时间	550s
SNACK Delay	50ms
窗口尺寸	32 packets

3.2 实验结果及分析

在上行速率 1kbps、下行速率 4kbps 的不对称卫星链路情况下,比较了 SNACK、Delay SNACK、SACK 和 ACK 机制

(下转第 292 页)

参考文献

- [1] 张清理,李兵兵. 无线电频谱监测与分析系统设计与实现[J]. 电子科技, 2005, (5): 17-20
- [2] 刘海岩,梁建龙. 基于中间件的分布式系统开发过程的研究[J]. 计算机应用研究, 2004(1): 85-87
- [3] 耿晓飞. 基于软件无线电的无线电监测技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2006
- [4] 吴卿. 面向谱适计算的自适应中间件模型与方法研究[D]. 杭

州: 浙江大学, 2006

- [5] 刘玉军,姜美雷. 基于 UDP 协议的应用层实时中间件[J]. 计算机工程与设计, 2009(12): 92-95
- [6] 张慧慧. 基于中间件技术应用控制平台的设计与实现[D]. 西安: 电子科技大学, 2006
- [7] 李琪林. 面向分布对象环境的可信中间件关键技术研究[D]. 西安: 电子科技大学, 2006
- [8] 陶然. 地市级无线电监测与测向系统的设计与应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2007

(上接第 272 页)

(NewReno)在不同误码率条件下的平均吞吐量和链路利用率,仿真结果如图 2、图 3 所示。

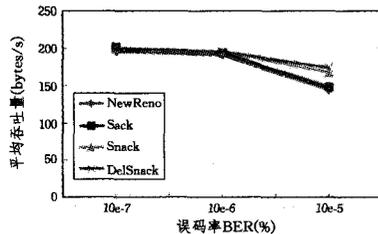


图 2 不同误码率下的平均吞吐量比较

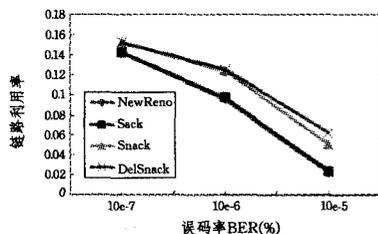


图 3 不同误码率下的链路利用率比较

图 2 是不同误码率下实现不同 ACK 机制的平均吞吐量比较。从图中可以看出,在误码率低于 10^{-6} 时,4 种协议的平均吞吐量随误码率的增加差别不大;在误码率高于 10^{-6} 时,卫星信道随误码率(BER)的增加,吞吐量随之减弱;当 BER 达到 10^{-5} 时,表现得更为突出。在高误码率情况下,SNACK 机制和 Delay SNACK 机制相比其他 ACK 机制能取得更好的吞吐量性能。

图 3 是不同误码率下实现不同 ACK 机制的链路利用率的比较。从图中可以看出,SNACK 机制和 Delay SNACK 机制相比其他 ACK 机制取得更好的链路利用率。其中,SNACK-Del 可以将多个错误信息放在一个 SNACK 中,这样有利于提高传输效率,同时有助于等待即将到达的被延迟的和顺序错误的数据包,减免不必要的重传,相比常规 SNACK,可提高更多的带宽利用率。

结束语 SCPS-TP 协议提出的 SNACK 机制,在中低

轨、前/返向信道的带宽容量的不对称性较低(小于 100:1)时,相比于 TCP 表现出了较好的空间通信适应性。本文实验结果表明,在高误码率情况下,SNACK 机制相比其他 ACK 机制能取得更好的吞吐量性能;在 SNACK 的两个版本中,SNACK-Del 可以将多个错误信息放在一个 SNACK 中,更有利于提高传输效率。

SCPS-TP 作为基于 TCP 扩展的传输层协议,是所有 CCSDS SCPS 中最为成熟并得到实际应用的协议。虽然 CCSDS 正按照既定的目标在演进,但 SCPS 标准的开发与存进并非如此。SCPS 的标准化不再是 CCSDS 的活跃领域,未来需要做的工作是参考 SCPS-TP 协议的多项改进策略,在拥塞控制和流量控制等机制适应于空间特别是长距离链路方面提出更好的协议算法。

参考文献

- [1] Durst R C, Miller G J, Travis E J. TCP Extensions for Space Communications[J]. Wireless Networks, 1997, 3(5): 389-403
- [2] 陈明玉,程子敬. SCPS-TP 协议在卫星通信系统中的应用研究[J]. 电子设计工程, 2010, 18(8): 1-3
- [3] 梁义,拱长青. 空间数据通信协议 SCPS-TP 应用研究[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2010, 27(1): 68-71
- [4] 叶建设,万鹏,宋世杰. 地月通信链路传输协议的研究与性能分析[J]. 计算机工程, 2010, 36(15): 15
- [5] Consultative Committee for Space Data Systems. Space Communications Protocol Specification-Transport Protocol (SCPS-TP) [S]. CCSDS 714. 0-B-2, October 2006
- [6] 王平,顾学迈. LEO 卫星网络中 TCP 协议性能及路由策略研究[J]. 南京理工大学学报, 2007, 31(1): 85-88
- [7] 顾明,张军. SCPS-TP 协议用于 LEO 卫星网的性能分析与改进[J]. 遥测遥控, 2007, 28(1): 30-33
- [8] Stevens W R. TCP/IP Illustrated, Volume I [M]. MA: Addison-Wesley Reading, 1994: 236-237
- [9] The Network Simulator NS-2, Web site[OL]. <http://www.isi.edu/nsname/ns/>