

SCPS-TP SNACK 在卫星网络中的性能分析

李宗利^{1,2,3}, 孟新¹, 张胜磊⁴, 刘淑茜⁵

(1. 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190;

2. 中国科学院研究生院, 北京, 100049; 3. 中国太原卫星发射中心, 太原, 030027;

4. 北京航天飞控中心, 100094; 5. 中国人民解放军 63999 部队, 北京, 100094)

摘要: 由于卫星链路的特性, 传统的 TCP/IP 不能直接应用于卫星网络中。为保证空间链路可靠的端到端数据传输, 现已形成了一个标准的空间通信协议 SCPS, 它是 TCP/IP 协议的扩展, 特别是传输层协议 SCPS-TP。分析了 SCPS 协议体系结构, 研究了 SCPS-TP 技术框架及其采用的 SNACK 关键技术, 并以此关键技术为切入点, 仿真研究 SCPS-TP 的性能及其与 TCP 协议在吞吐率及链路利用率方面的比较, 得出 SCPS-TP 在宽带、高误码率及大时延通信环境下的性能比 TCP 要明显优越, 更适合于大带宽时延积的卫星通信环境。

关键词: SCPS-TP; SNACK; 卫星网络; TCP; 吞吐率; 链路利用率

中图分类号: TP391.9 V11 **文献标识码:** A **文章编号:**

Performance Analysis of SCPS-TP SNACK in Satellite Networks

LI Zong-li^{1,2,3}, MENG Xin¹, ZHANG Sheng-lei⁴, LIU Shu-qian⁵

(1. Center for Space Science and Applied Research, CAS, Beijing, 100190, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing, 100049, China;

3. Taiyuan Satellite Launching Center, Shanxi Taiyuan, 030027, China;

4. Beijing Aerospace Command Control Centre, 100094, China;

5. PLA No.63999, Beijing, 100094, China)

Abstract: TCP/IP cannot be used in the satellite network directly because of the characteristics of the satellite links. The Space Communications Protocol Standards (SCPS) has proposed to guarantee the safety of the end-to-end data transportation of the space links; it is the extension for space communication of TCP/IP, especially for the transport protocol SCPS-TP. The architecture of SCPS protocol was analyzed; the technical architecture of SCPS-TP and its key technology SNACK (Selective Negative Acknowledgement) were discussed. Focused on SNACK technology, the throughput and link utilization of SCPS-TP SNACK was simulated and compared to TCP. As a result, SCPS-TP SNACK performs much better in terms of throughput, link utilization in wide band, high Bit Error Rate and long round-trip delay communication environment than TCP, and it is more proper for satellite channel that has big time-delay bandwidth product.

Key words: SCPS-TP; SNACK; satellite network; TCP; throughput; link utilization

引言

随着空间任务复杂度越来越高, 尤其是载人航天和深空飞行任务的开展, 对天-地间数据通信的要求已大大不同于以往的常规任务, 这不仅表现在数据量激增, 通信效率需要大大提高, 而且由于航天器自主性增强, 需要更具可操作性的数据传输和处理方式, 要求航天器对地传输模式向星际中继模式转变, 要求当前简单的数据交换向网络传输转变。在此转变过程中, 对作为支撑和关键技术之一的空间数据通信协议进行深入研究, 能为天基网络构建和空间数据通信奠定必需的技术基础; 能为空间数据网管理, 端到端数据流通及各类空间任务的顺利完成提供强有力的保证。

基于上述背景, 本文将 TCP 作为比较对象, 对宽带卫星网络的数据传输协议—SCPS-TP

(Space Communications Protocol Standards-Transfer Protocol)进行了仿真对比分析,重点研究了其采用的 SNCAK (Selective Negative Acknowledgement, 选择性否定确认)关键技术。

1 概述

空间数据通信由六七十年代的专用通信协议,发展到八十年代 CCSDS (Consultative Committee for Space Data Systems) 制定的空间链路协议^[1]。随着对空间任务的需求增加,呈现出卫星、空间站、航天飞机及各类探测传感器网络构成的复杂空间通信网络,原有的通信协议已经不能适应这种需求,需要开发新的协议以支持数据的端到端可靠传输。围绕该命题,主要的研究思路聚焦在如何将 TCP/IP 协议应用于空间通信中。

TCP/IP 协议是当前 Internet 中最为广泛使用的协议,经过不断的改进,形成了 TCP-Tahoe、TCP-Reno、TCP-New Reno、TCP-SACK 等版本,对地面网络形成了一个非常高效、可靠、健壮的协议簇,表现出了较高的传输性能。但是,当它运行在卫星通信环境下时,却面临着诸如高误码率、长往返时延、非对称信道、间歇性链路中断等问题,大大影响了其性能,阻碍了在卫星数据传输中的应用^[2]。为使 TCP/IP 协议更适用于卫星网络环境,人们提出了许多扩展改进方案,其中最为著名的扩展协议是 SCPS 协议。

2 SCPS 协议体系结构

SCPS 是由 NASA JPL (美国航空航天局喷气动力实验室)和 CCSDS 组织设计开发的专门用于解决一系列空间信道的问题并提供可靠空间数据通信的协议簇,现已收录到 MIL (Military Specifications, 军用规格)和 ISO (International Organization for Standardization, 国际标准化组织)中。在 SCPS 协议设计中综合考虑了空间通信中传输时延大、信号电平弱、信道噪声大、多普勒频移大、空-地通信频繁中断等问题。其设计目标是:支持高效、可靠的空-地数据传输;适应发展中的多节点任务配置对空间网络路由功能的要求;提供广泛应用的互联网络的兼容性和互操作性;增进任务间、机构间、国家间的协作和互操作;大幅度降低运行费用。

SCPS 协议以 Internet 协议为基础,照搬了其协议层次模型,但根据空间与地面的差异对 IP、IP-SEC、TCP/UDP、FTP 协议根据空间环境特点在仿制的同时进行了若干修改和扩充,解决了 Internet 协议在空间通信中面临的一系列问题,相应开发了 SCPS 网络协议 (SCPS-NP)、安全协议 (SCPS-SP)、传输协议 (SCPS-TP) 和文件协议 (SCPS-FP),其中 SCPS-TP 在使用 SCPS 协议时是必须使用的,而其他三个协议可以用 TCP/IP 协议簇中的协议代替。SCPS 协议在低层协议的支持下,构成完整的网络模型,实现包括空-地、空-空的端到端连接。

在 SCPS 协议簇中,SCPS-FP 面向对航天器控制命令、软件加载和控制信息下载的优化处理;SCPS-TP 为这些命令和数据跨越一个或多个不可靠空间链路时提供端到端的可靠传输;SCPS-SP 为命令和信息提供端到端的保密性和完整性;SCPS-NP 支持信息经过空间数据链路是无连接和面向连接的路由。可见,SCPS-FP 主要面对应用,SCPS-SP 是独立于算法的可选协议,而 SCPS-NP 和 SCPS-TP 在空间链路应用上与 TCP/IP 更具有可比性,因此,本文从 SCPS-TP SNACK 关键技术为切入点,研究其性能及其与 TCP 协议的相关比较。

3 SCPS-TP SNACK 协议分析

3.1 SCPS-TP 协议技术框架

对于 TCP, SCPS-TP^[3]所做的重要修改包括识别数据丢失源(拥塞、传输错误、传输中断),卫星网络默认的数据丢失原因是链路恶化导致的传输错误而非地面网络默认的数据拥塞^[4];采用 SNACK 和包头压缩技术来减小误码率 (BER: Bit Error Rate);采用速率控制、延时 SNACK (SNACK-Del) 及包头压缩用来解决前向反向链路非对称问题。其中,采用的 SNACK 技术大大改善了 SCPS-TP 在高误码率环境下的表现,提高了其链路利用率及吞吐

率，是 SCPS-TP 中最重要的扩展之一，本文仅对 SCPS-TP SNACK 技术进行重点研究。

3.2 SNACK 技术分析

传统使用的 ACK 信息只能包含一个传输窗口内的一处错误，如果 TCP 包在一个窗口中出现了多个错误，那么我们不得不发送多个 ACK 信息通知发送端，这对于上行信道受到严格限制，上下行链路容量比在 10:1 到 1000:1 之间的非对称、长往返时延的卫星信道来说无疑是非常不利的^[5]。而 SNACK 如其所隐含的意思，是一个选择性发送否定确认的过程（数据接收端通知发送端哪些数据没有接收到），并且在一个 SNACK 中可包含多个数据段传输的错误信息，因此，采用 SNACK 技术可以大大改善卫星信道的传输性能。

SNACK 选项数据段包括类型、长度、错误偏移量、错误长度及位向量五部分。其中，类型占用第一个字节，其值为常量 15；长度占用第二个字节，其值是 SNACK 选项所占用的字节数，不采用位向量的时候为 6；错误偏移量占用顺序的两个字节，其值代表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)；错误长度字段占用顺序的两个字节，其值代表第一处错误的长度，单位是 MSS；位向量占用后续的字节，属于可选字段，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，共存在三处错误。第一处错误在成功接收到第一个数据段后马上就发生了，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。

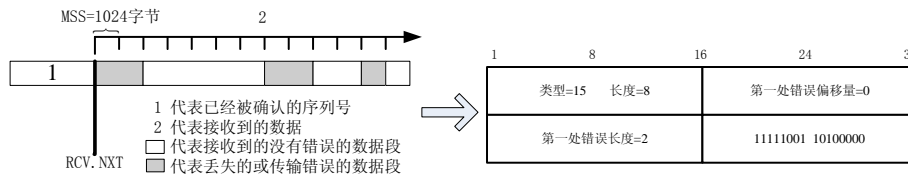


图 1 TCP 接收端数据队列及其生成的 SNACK 数据段

4 SCPS-TP SNACK 性能仿真分析

基于前面的分析，本文使用 NS2^[6] (Network Simulator v2) 软件建立了 SCPS-TP 协议仿真模型，研究了 SCPS-TP SNACK 在宽带卫星网络中的性能表现，在吞吐量及链路利用率方面与 TCP 协议及其相关改进版本进行了比较研究^[7]。

4.1 吞吐量性能仿真分析

本文采用典型的 Iridium 极轨星座网络模型，轨道高度 780km；轨道面 6 个；每一轨道面卫星数 11 颗；每颗卫星具有四条星间链路；无反向缝链路；星间链路纬度阈值为 60°。仿真中采用的数据发送终端位于北京（纬度 39.9°，经度 116.4°），接收终端位于广州（纬度 23.1°，经度 113.3°），由于是星座仿真，因此，卫星终端位置的不同不会对结果有多大影响。详细的仿真参数如下表。

表 1 Iridium 星座吞吐量仿真参数表

参数	值
上行、下行链路带宽	2Mb
BER	$10^{-7}/2 \sim 10^{-5}$
误差模型	随机模型
数据包大小	1000 字节
数据队列长度限制	125 个数据包
队列调度类型	Drop Tail
星间链路带宽	25Mb

下图是 Iridium 星座采用不同协议随 BER 变化的吞吐率，采用的协议分别是 Tahoe、Reno、SACK 和 SNACK，BER 变化范围从 0.5×10^{-7} 到 10^{-5} 。由仿真结果可见，传输延迟加上高 BER 是导致吞吐率下降的主要原因，当 BER 很小时，错误很少发生，各协议性能相当；随着 BER 的上升，吞吐率下降，BER 在 10^{-5} 的时候下降的尤为明显，在 BER 为 10^{-4} 的时候基本没有数据可以发送出去。但在此过程中，SNACK 比 Tahoe 及其他常规 TCP 都有更好的吞吐率。

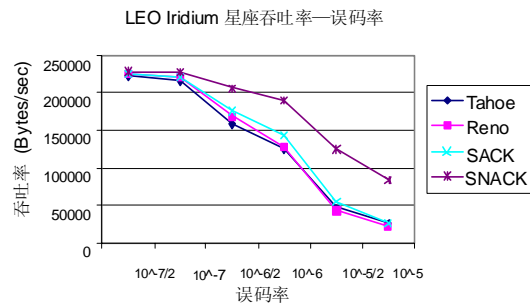


图 2 Iridium 星座中不同协议随 BER 变化的数据吞吐率

4.2 链路利用率性能仿真分析

在高时延网络中，链路的利用率一般都比较小，再加上高误码率，更加导致了利用率的减小。本文选择了时延比较长，距地大约 35800km 的 GEO 卫星进行链路利用率仿真，比较了 SNACK、SNACK-Del 与其他 TCP 协议在不同误码环境下的链路利用率，仿真参数与表 1 一致，另外设置双程时延为 496ms，SNACK 时延为 70ms。

由图 3 仿真结果可见，SNACK 的链路利用率要比其他的 TCP 协议好很多，如果使用了所有 SCPS-TP 所采用的技术，则性能将会更好。此处有两个版本的 SNACK，分别是 SNACK-Del 和常规 SNACK。如前所述，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，提高带宽利用率。

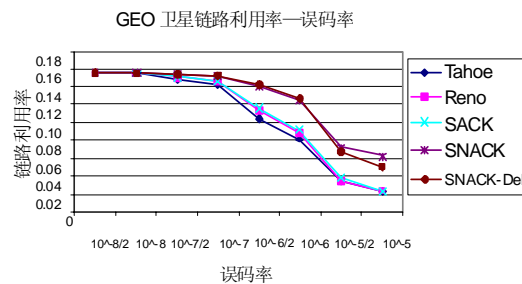


图 3 不同协议在 GEO 卫星上的链路利用率

5 结论

SCPS-TP 协议中默认数据的丢失源是链路恶化引起的数据传输错误，当检测到错误时，给数据发送端发送 SNACK 信息通知其重传，这种方式特别有利于具有大的数据传输窗口的卫星通信网络。本文对 SCPS-TP 协议使用的 SNACK 关键技术进行了详细的分析和仿真对比，从仿真结果来看，采用 SNACK 技术后，SCPS-TP 改进了 TCP 协议在卫星通信环境下的性能，在宽带、高误码率、大时延的卫星通信环境下的数据吞吐率及链路利用率均优于 TCP-Tahoe、TCP-Reno、TCP-SACK 等 TCP 协议。因此，SCPS-TP 更适用于大带宽时延积的卫星通信环境。

参考文献:

- [1] CCSDS Advanced Orbiting Systems, Networks and Data Links: Architectural Specification[R], Blue Book, CCSDS 701.0-B-3, June 2001
- [2] E Criscuolo, K Hogue, R Parise. Transport Protocols and Applications for use in space[C]. 2001 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, 2001
- [3] CCSDS 714.0-B-1. Space Communications Protocol Specification — Transport Protocol (SCPS-TP) [R]. Blue Book. Issue 1. May 1999.
- [4] Rohit Goyal, Raj Jain, Mukul Goyal. Traffic Management for TCP/IP over Satellite ATM Networks[J]. IEEE Communications, 1999, 37(3):56-61
- [5] 屠翊, 王汝传, 黄明科等. 基于 TCP/IP 的卫星通信传输链路的改进[J]. 江苏通信技术, 2004, 20(1):1-4.
- [6] Network simulator: ns-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [7] 高丽娟, 蒋太杰, 赵洪利. 单层与多层卫星网络的性能分析与仿真 [J]. 微计算机信息, 2008, 3-1: 175-179

本文作者创新点: 提出了端到端的空地数据传输思想, 使用 NS2 软件实现了 SCPS-TP SNACK 技术, 与常规 TCP 协议进行了相关对比分析, 具有一定的工程应用价值。

作者简介: 李宗利 (1964-), 男, 陕西岐山人, 太原卫星发射中心技术部主任, 研究员, 主要从事空间信息与仿真技术、航天测控技术研究;

Biography: Li Zong-li (1964-), Male, Shanxi, Taiyuan Satellite Launching Center, Professor, Spaceflight TT&C, Space information and Simulation Technology.