

天地一体化信息网络协议体系与传输性能简析

Network Protocol System and Transmission Performance of Integrated Space and Terrestrial Information Network

杨冠男/YANG Guannan
李文峰/LI Wenfeng
张兴敢/ZHANG Xinggan
(南京大学, 江苏 南京 210093)
(Nanjing University, Nanjing 210093, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 04-0039-007

摘要: 对于中国天地一体化信息网络 (ISTIN) 的构建, 针对可能采用的两种网络协议体系, 即传输控制协议 (TCP)/IP 和容迟容断网络 (DTN), 以 3 颗地球静止轨道 (GEO) 卫星组成天基骨干网络为例, 分析了 3 种基本传输场景下的主要挑战, 通过计算机半实物仿真开展了协议传输性能的测试。试验结果表明: 尽管 DTN 协议与 TCP-Hybla 改进协议能够获得较好的传输性能, 由于时延与误码率 (BER) 等参数存在较大的动态范围, 没有一种协议能够在所有传输场景下保持传输性能始终最优。天地一体化信息网络协议体系的性能仍有待进一步提高。

关键词: ISTIN; 协议; 传输性能

Abstract: Two different network architectures are discussed in this paper: transmission control protocol (TCP)/IP and delay-and disruption-tolerant networking (DTN) for future integrated space and terrestrial information network (ISTIN) in China. A simple space backhaul network consisted of 3 geostationary orbit (GEO) satellites is analyzed and categorized as 3 basic transmission scenarios, in which the challenges for network architecture are stated. Computer emulations are conducted to study the transmission performance of different protocols. The results show that although TCP-Hybla and DTN both have better performance compared to the classical terrestrial TCP, with high dynamic delays and bit error rate (BER), no protocol is always optimal in transmission performance throughout different scenarios. The performance of network architectures of ISTIN should be improved further.

Key words: ISTIN; network protocol; transmission performance

天地一体化信息网络是中国国防信息化和信息化社会建设的重要基础设施。天地一体化信息网络中的“天”是指由卫星等航天器作为主要节点组成的天基网络, 而“地”主要指由地面站网络、卫星应用专网、互联网以及各类地面用户等共同组成的地球表面网络。通过网络架构与协议体系层面的设计, 屏蔽天、地各类系统在技术体制层面的差异, 为用户提供跨系统的、无需区分天地的各种服务与应用, 实现一体化信息获取、共享与利用是未来天地一体化信息网络发展的主要目标^[1]。

根据是否采用星间链路, 我们可以将天地一体化信息网络分为:

(1) 天星地网。典型系统如国际海事卫星 (Inmarsat) 的宽带全球网络

(BGAN) 系统, 由 3 颗 Inmarsat IV 卫星与地面站网络组成, 民用数据业务采用星状拓扑, 经过卫星中继落地后通过地面站实现区内数据交换, 互联网接入或通过地面站网络实现跨区的数据交换。BGAN 从 2012 年开始提供航空宽带卫星业务 (SB-Sat), 通过原航空宽带网络面向低轨道 (LEO) 卫星提供近实时的 IP 业务, 速率最高可达 475 kbit/s^[2], 由此实现了以地面

网络为骨干的天地一体化的网络。

(2) 天基网络。典型系统如铱星通信系统, 数据的交换完全通过星间链路完成。

(3) 天网地网。它是前两种形式的整合, 典型系统如美国军方规划的全球信息栅格 (GIG) 拟构建的通信基础设施, 原计划天基部分转型卫星通信系统 (TSAT) 通过 TSAT 卫星间的星间链路实现空间宽带网络, 并与

收稿时间: 2016-05-20

网络出版时间: 2016-06-29

基金项目: 中国工程院重大咨询研究项目 (2016-ZD-05); 国家自然科学基金 (61401194); 江苏省卫星通信与导航协同中心自立项目 (SatCN-201407、SatCN-201410)

GIG的地面网络,以及无线网络实现一体化。

由于政治、经济等原因,中国天地一体化信息网络的建设和面临的主要制约因素之一在于地面站设站受限,地面站基本位于中国境内。与其他一些国家类似系统相比,难以实现全球分布的地面站网络。因此,为保障信息的及时获取与分发,必须重点发展天基网络基础设施,并依托天基网络,与可利用的地面网络资源构建中国天地一体化信息网络。

1 天地一体化信息网络协议体系

由于包含天基网络和地面网络两个组成部分,天地一体化信息网络将是一个复杂异构的网络系统^[3],涉及各种网络协议,如图1所示。网络一体化的发展目标必须通过网络协

议体系的统一来实现^[4]。

1.1 地面网络协议体系

从19世纪60年代计算机网络发展开始,网络协议技术已经经历了半个多世纪的发展,地面互联网已经形成了以传输控制协议(TCP)/IP协议体系为主的网络架构。TCP/IP协议体系发源于计算机网络,是一种以主机为中心的网络协议体系,IP地址直接对应到主机,主机与主机之间的数据可靠传输采用“端到端原则”。随着移动通信技术的发展,移动互联网的兴起使得IP地址动态变化问题日益显著,通过移动IP技术可以保证节点漫游过程中的网络连接。从2000年左右,主要针对当前以点对点通信为基础的TCP/IP网络体系架构中的关键先天缺陷,主要包括可扩展性问题、动态性问题和安全可控性问题^[5]

等,未来网络的研究试图从根本上解决这些制约网络未来发展的的问题。在这些研究工作中,研究人员已经提出了信息中心网络(ICN)^[6]等多种区别于传统TCP/IP的新型协议体系。

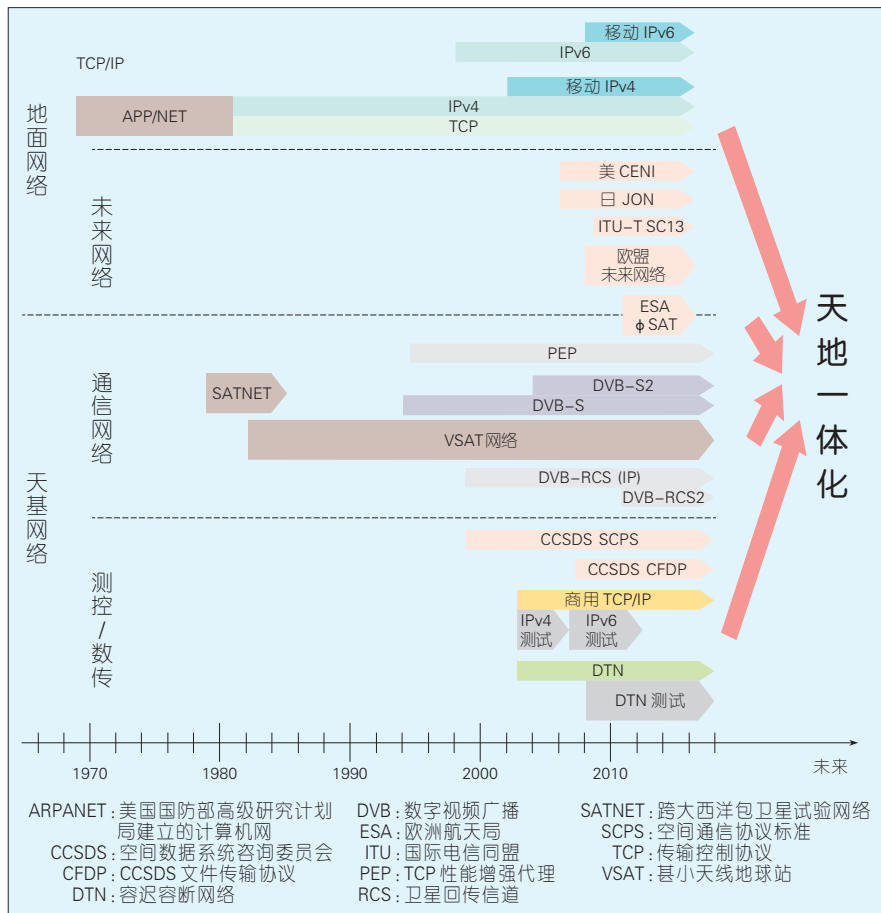
1.2 天基网络协议体系

1.2.1 卫星通信网络协议体系

在还没有光纤的年代,最早的跨洋网络线路是通过卫星中继实现的。卫星通信网络起源于卫星广播系统,物理层、数据链路层协议多采用数字视频广播(DVB)系列协议。随着第4代(4G)、第5代(5G)移动通信技术的发展,卫星通信也已成为4G、5G标准中的重要组成部分。由于互联网应用以地面为主,作为地面互联网在空间的延伸,卫星通信网络主要采用TCP/IP协议体系^[7]。然而,起源于计算机网络的传统TCP协议在面临具有较大带宽、较长时延、较高误码率的卫星信道时,其传输效率大打折扣。解决这一问题的办法并不复杂,主要采用TCP性能增强代理(PEP)的方式^[8],将空间段与地面段分割开来,空间段使用优化后的TCP协议,可以大大提高传输性能。然而,由于关口站采用PEP方式打破了端到端传输原则,因此无法应用原有网络安全机制,可能给卫星网络带来潜在的安全风险^[9]。随着未来网络的研究,卫星网络在未来网络中的地位与作用也正受到日益关注。

1.2.2 航天测控通信网络协议体系

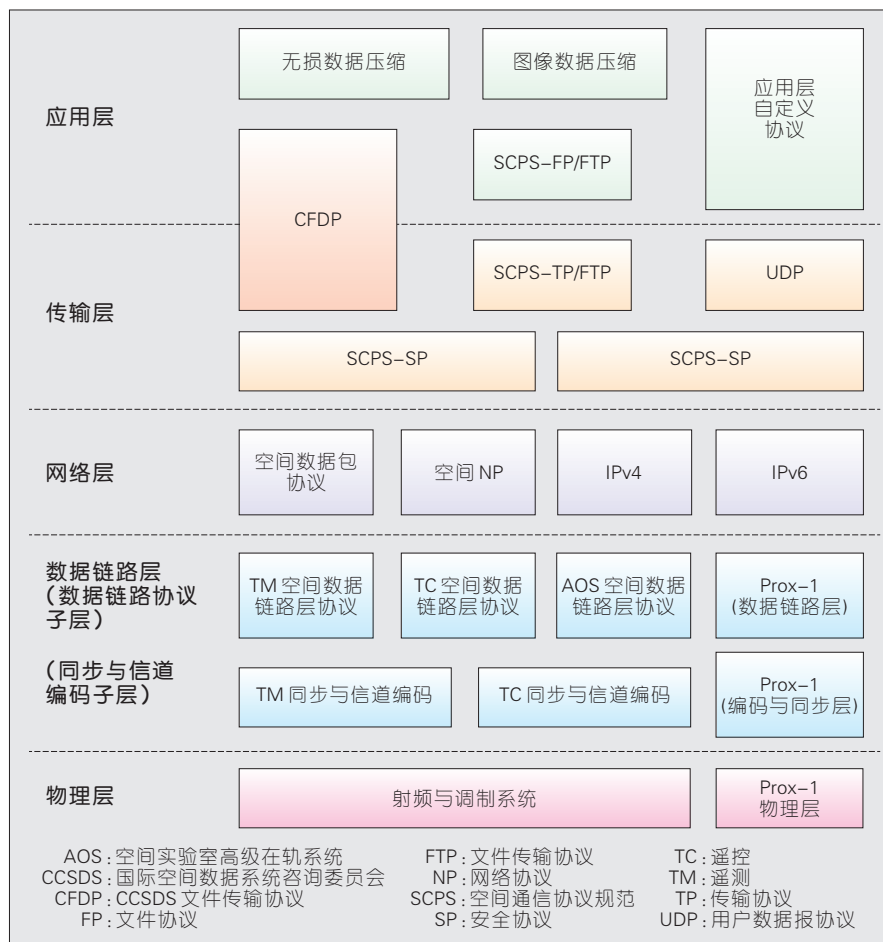
航天测控通信相关的网络协议国际标准主要由国际空间数据系统咨询委员会(CCSDS)制定,由于航天任务自身的特殊业务需求,CCSDS有针对性地制定了大量物理层、数据链路层协议的国际标准,为不同国家航天任务之间开展协作与资源共享提供了统一的通信接口。CCSDS还曾经根据空间特性制定了空间通信协议规范(SCPS),包含重新定义的其



▲图1 天地一体化信息网络相关网络协议技术发展

文件协议 (SCPS-FP)、传输协议 (SCPS-TP)、网络协议 (SCPS-NP) 和安全协议 (SCPS-SP) 等完整的网络协议体系, 用以实现空间信息系统的组网, 如图 2 所示。但是, 由于开发维护成本高昂等问题, 目前 SCPS 协议族中除了支持 PEP 方式的 SCPS-TP 协议仍然在一些商用设备中使用而得到继续维护外, 其他协议在 CCSDS 已全部停止维护更新了, 并建议采用容迟容断网络 (DTN) 协议体系^[10]或 IP over CCSDS 方式统一到 TCP/IP 协议体系。

DTN 协议起源于美国国家航空航天局 (NASA) 星际互联网的研究, 主要克服星际通信中可能出现的长时间中断、延迟、恶劣的信道质量等挑战^[11], 其协议体系如图 3 所示。与传统 TCP/IP 层结构相比, DTN 协议体系在应用层和传输层之间引入了一个束协议层 (BP), 并通过其中的汇聚层 (CLA) 实现不同传输协议的转换。BP 可以通过使用持久存储+转发的方式来克服网络的间歇性连接问题。DTN 中定义另外一个重要的新协议是 Licklider 传输协议 (LTP)^[12]。LTP 既可以实现类似 TCP 的可靠传输, 又可以设置成类似用户数据报协议 (UDP) 的不可靠传输。LTP 可以不需要网络层协议而直接工作在数据链路层之上, 可以应对具有较大带宽延迟积的通信环境, 使数据在长延迟、可变长中断的通信环境中无丢失的传输, 不需要依靠稳定的通信往返延迟。由此可见, DTN 与 TCP/IP 相比是两种完全不同的协议体系。需要特别指出的是: DTN 由于采用覆盖网络的形式, 通过 CLA 兼容各种网络协议, 并且提供了一种网络协议演进的可能。目前, DTN 中的两个最主要的协议 BP 和 LTP 已经在 CCSDS 完成了空间网络协议的标准化, 并已在国际互联网工程任务组 (IETF) 开展作为互联网协议的标准工作。在实际应用中, 国际空间站上的实验载荷数据传输业务正全面

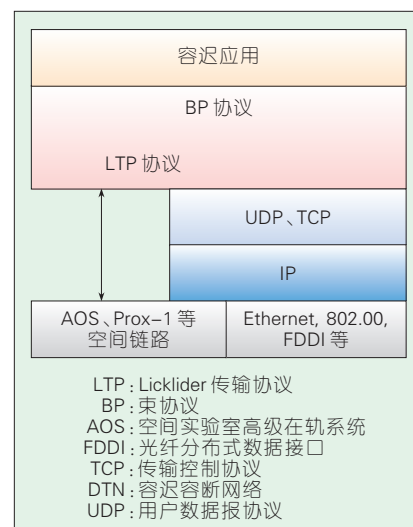


▲图 2 原 CCSDS SCPS 协议体系

采用 DTN 协议。

1.3 网络协议的天地一体化

从上面的分析可以看出: 天地一体化信息网络涉及的各类网络体系庞杂, 尽管地面互联网经过不断的发展和完善已经形成了以 TCP/IP 为主的协议体系, 但是随着网络规模、应用的不断突破, 这一相对成熟的体系也面临着新的挑战, 未来网络的研究中正在不断探索各类新型网络协议体系。相比而言, 受到传输环境、星上载荷能力、网络物理架构等多种因素的制约, 天基网络协议的研究与应用面临不同的挑战, 并且远远落后于地面网络的发展。目前较为成熟的协议体系仍然以 TCP/IP 为主, 在 NASA 的推动下 DTN 协议也正在快速发展并逐步投入实用。两种网络协



▲图 3 DTN 网络协议体系

议体系特性的比较如表 1 所示。简单来说, TCP/IP 协议体系起源于地面计算机网络, 通过 TCP/IP 实现天地一

▼表1 一体化网络协议比较

	TCP/IP 协议	DTN 协议
起源	地面网络	深空通信
一体化形式	IP 协议	BP 协议
优点	协议较为成熟、开发成本低	采用覆盖网络形式,协议兼容性、可扩展性较好,容迟容断、适应恶劣通信环境
缺点	延迟容忍、中断恢复差,对移动性支持较差,改进协议引起安全性问题	技术仍未完全成熟,未经过大规模网络应用
目前应用	地面网络、移动通信网络、卫星通信网络、LEO 飞行器测控通信等	深空通信网络、空间信息网络、地面断续通信网络等
TCP: 传输控制协议 DTN: 容迟容断网络 LEO: 低轨道 BP: 束协议层		

一体化的发展思路是地面网络协议体系向上延伸,而 DTN 协议体系起源于深空通信,应用于天地一体化是星际互联网协议体系向下拓展,两者都要考虑天地一体化信息网络的特殊性。

2 天地一体化信息网络条件下的传输场景与协议性能

在分析了目前较为成熟的网络协议体系后,我们通过实验比较了 TCP/IP、DTN 两种协议体系在天地一体化信息网络环境下的传输性能。传输性能的改善是传统卫星网络研究中研究最为深入的领域,然而由于中国天地一体化信息网络星地架构的特殊性,过往文献对传输性能的分析可能并不与之符合,相关性能测试的结果和分析将对未来实际系统的建设提供重要的参考。

2.1 天地一体化信息网络传输场景

中国天地一体化信息网络必须

以天基网络为主体,网络协议性能与天基网络物理架构紧密相关。目前中国已经提出了多种网络架构^[13-15]方案,包括地球静止轨道(GEO)覆盖方案、LEO 覆盖方案及其他多层覆盖方案等。网络架构方案与工程建设周期、成本、技术难度等多种因素有关,我们不做深入探讨。在这篇文章中,我们采用了最简单的 3 颗 GEO 卫星实现准全球覆盖的天基骨干网络方案作为试验场景。

考虑空间信息传输的过程,事实上经过简化后,我们可以得到如图 4 所示的 3 种基本传输场景:图 4 中(a)表示的是 LEO 或中高轨道(MEO)过顶时,数据直接通过星地链路发送的场景;图 4(b)表示的是 LEO 或 MEO 卫星离开地面站通信窗口后,通过骨干网络 GEO A 卫星一跳传输的场景;图 4(c)表示超出 GEO A 卫星覆盖范围后,通过 GEO A 和 GEO C 两跳传输的场景。

传输场景的变化主要带来两方面链路特性的变化:传输时延的显著变化,误码率的显著变化。显然,由于通信距离最短,没有中继,在相同的卫星地面通信设备参数条件下,场景 1 信道质量最好,误码率最小,传输时延最短;与之相反,由于传输距离最长,且经过两次中继,如果 GEO 卫星没有星上处理,仅作透明转发,场景 3 的误码率和传输时延都将显著提高。我们注意的是:由于中低轨卫星的移动,传输时延是时变的,场景 1 相应的传输时延大约在 3 ~ 60 ms;场景 2 相应的传输时延大约在 200 ~ 250 ms;场景 3 相应的传输时延大约在 480 ~ 500 ms。

2.2 网络协议设置

我们主要考虑 TCP/IP 协议体系和 DTN 协议体系下的协议传输性能这一技术指标。对于 TCP/IP 的协议体系,我们主要测试了两种不同的 TCP 协议,分别是 TCP-Cubic 和 TCP-Hybla。TCP-Cubic 采用 Cubic 拥塞控制算法,适应于高时延带宽积的网络(长肥网络(LFN)),Linux 系统内核默认的 TCP 协议通常采用 Cubic 算法。TCP-Hybla 主要针对具有较长时延,较高误码率的卫星或地面无无线链路,改进了拥塞控制算法。TCP-Hybla 可以应用于 PEP 方式卫星段的传输以改善卫星网络的传输效率。

对于 DTN 的协议体系,主要测试

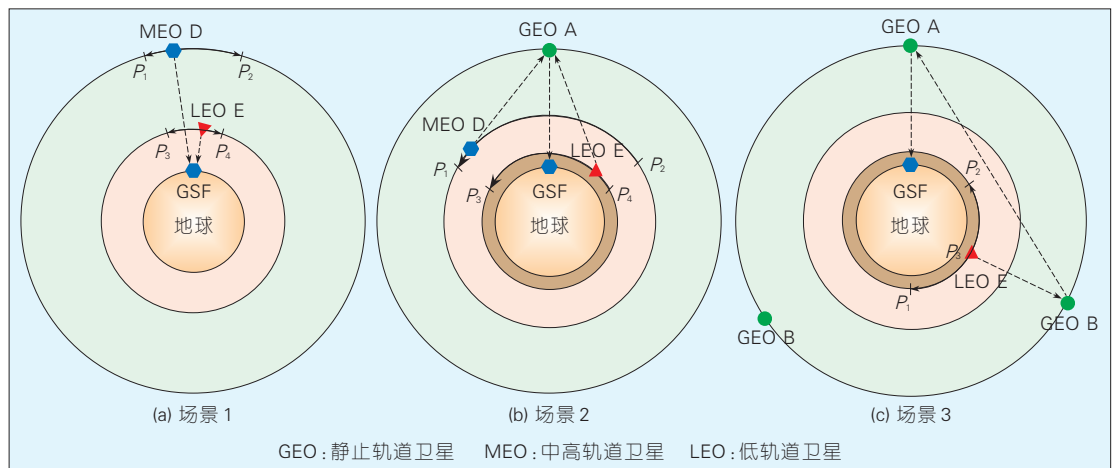


图 4 天地一体化信息网络传输场景

GEO: 静止轨道卫星 MEO: 中高轨道卫星 LEO: 低轨道卫星

BP 协议通过 CLA 结合 TCP、UDP、LTP 等各种不同的传输方法。考虑到 BP 适配 TCP 协议时,由于存在额外的 BP 层的协议开销,DTN (BP+TCP) 的传输性能必然逊于单纯的 TCP 协议;而 BP 适配 UDP 时,由于 UDP 的非可靠传输,在挑战性的网络环境中其传输性能会急剧下降。因此,对于 DTN 协议体系,我们主要测试了 BP+LTP 的协议组合,其中 BP 协议未开启托管传输,LTP 协议采用红色模式。

因此,文中我们主要测试比较以下 3 种传输方式:TCP-Cubic、TCP-Hybla、BP+LTP 在不同的信道特性下的传输性能。

3 仿真环境与实验结果

3.1 仿真环境与参数设置

为了获得尽可能接近实际的试验结果,我们采用计算机半实物模拟的仿真方式,利用两台安装 Ubuntu14.04 操作系统的计算机分别模拟不同场景中的源节点和目的节点,即卫星与地面站。两台计算机上分别安装了 ION-DTN (v3.4) 协议栈以及 Linux 内核自带的 TCP 协议,通过命令可以设置实际使用的拥塞算法。利用广泛应用的软件信道模拟器 Netem 模拟两个节点间的卫星链路的特性,具体包括链路时延、信道丢包率、信道带宽等参数。需要注意的是:在实验过程中,对于所采用的各种协议我们没有做任何优化,全部采用了默认的参数。仿真相关参数配置如表 2 所示。

3.2 试验结果与传输性能分析

在上述仿真环境下,我们测试了 2.1 节中讨论的(图 4)3 种典型场景下不同网络协议的传输性能。

3.2.1 链路时延对传输性能的影响

考虑较低的误码率(10^{-7})、较小的信道非对称(1:10)条件下,传输时延对有效吞吐量的影响。根据表 2

仿真相关参数配置参数,试验中单向传输时延从 3 ms 一直增加到 1 s,图 5 给出了仿真结果。从图中可以注意到当传输时延非常小时,TCP-Cubic 和 TCP-Hybla 一样,传输性能都好于 DTN;但随着时延的增长,TCP-Cubic 的性能出现了显著的恶化,当时延较长时,例如经过一跳或两跳传输时,TCP-Cubic 的传输速率不足信道带宽的 30%;TCP-Hybla 和 BP+LTP 协议性能都好于 TCP-Cubic,但是也都出现了显著的性能下降,无法实现信道容量的充分利用。TCP-Hybla 取得了最好的性能,这和我们的直觉可能存在差异,通常我们会认为在时延较长的情况下,DTN 显然应该有更好的性

能,但并非如此。因 DTN 中容迟容断所指的长延迟是指在星际通信中分钟级、小时级,甚至更大的时延,天地一体化信息网络条件下的传输时延并不是 TCP 完全无法工作的。

3.2.2 误码对传输性能的影响

考虑误码率对不同协议传输性能的影响,假设 1:10 信道非对称,图 6 给出了在图 4 中 3 种传输场景下的有效吞吐量。首先,在 3 个场景中,即 3 种不同时延条件下,误码率的增加都引起了有效吞吐量的显著恶化,TCP-Cubic 性能在 3 种协议中是最差的。我们可以注意到:在高误码率(10^{-5})条件下,不同的协议都只能获

▼表 2 仿真相关参数配置参数

试验参数	设置/值
BP 托管传输	否
LTP 红/绿设置	红色
束大小/ bytes	1 000
ACK(RS)包大小/ bytes	70
LTP 块大小/bytes	240
LTP 分段大小/ bytes	1 400
MTU 大小/bytes	1 500 (所有协议栈)
BER	$10^{-7} \sim 10^{-5}$
单向链路时延	3 ms, 50 ms, 110 ms, 250 ms, 500 ms, 1 s
传输文件大小/ bytes	10 000 000
样本数量	每种协议配置独立测试 16 次

BER: 信道误码率 BP: 束协议层 LTP: Licklider 传输协议 MTU: 最大传输单元

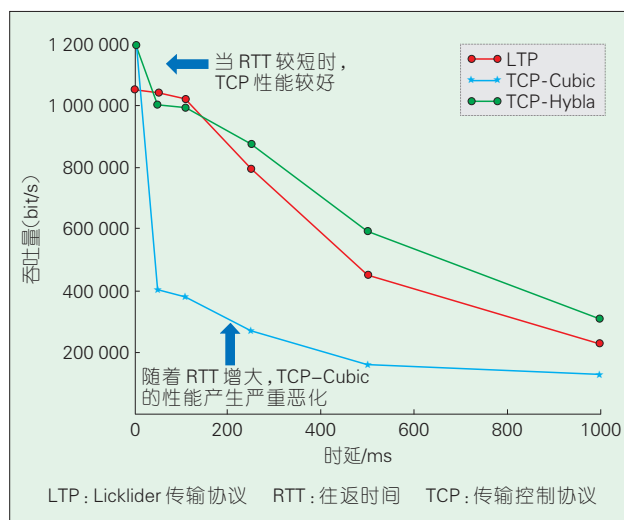


图 5 传输时延对传输性能的影响

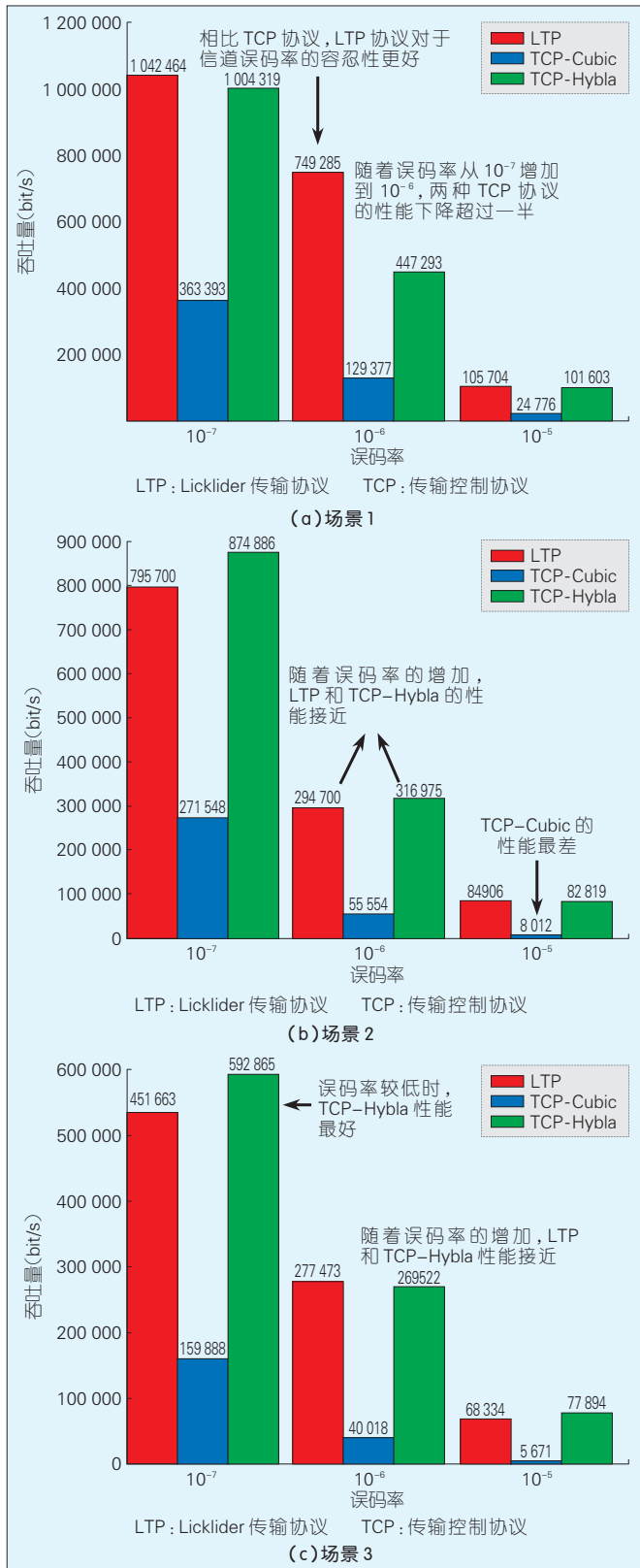


图 6 不同传输场景中,信道非对称率为 1:10 条件下,误码率对有效吞吐量的影响

得非常差的传输性能, TCP-Cubic 几乎不可用, 而 TCP-Hybla 和 BP+LTP 略

好。其次, 不同于想象, 在时延较长 (场景 3) 但误码率较低 (10^{-7}) 情况

下, DTN 协议并没有获得最优的传输性能, 反而 TCP-Hybla 的有效吞吐量是最佳的。这一结果好像与容迟容断网络的名称不符, 但事实上, 同样在有限的时延下, DTN 容迟容断的特性并不能很好的体现出来, 反而较高的协议开销可能引起了传输性能的下降。另一方面, 在 3 种场景下, 我们可以注意到, 总的来说 DTN 与 TCP-Hybla 的传输性能基本相当, 但是当误码率从 10^{-7} 变化到 10^{-6} 甚至更高时, TCP-Hybla 的性能基本都下降了超过一半, 而 DTN (主要是 LTP 协议) 受误码率的影响相对较小。

4 结束语

针对 TCP/IP 和 DTN 两种相对较为成熟的网络协议体系, 从传输性能的实验结果可以观察到:

(1) 在天地一体化信息网络通过 GEO 卫星作为骨干网络形成准全球覆盖的条件下, 时延和误码对不同协议体系的传输性能都有显著的影响, TCP 改进协议与 DTN 具有相对较好的传输性能。

(2) DTN 协议容时容断的特性在有限的时延和信道非对称率条件下并不能为传输性能带来显著的提升。需要注意的是: 测试中 TCP 协议是内核实现, 而星际覆盖网络 (ION)-DTN 协议则工作在用户空间, 因此本身可能存在一定的性能差异。

(3) 由于中国天地一体化信息网络主要依赖天基网络, 在不同的场景下, 传输时延、误码率存在较大的动态范围, 这对协议传输性能带来了巨大的挑战。

就实验结果看, 并没有一种协议能够在各种传输条件下始终保持传输性能最优。这也意味着尽管在卫星网络等领域对网络传输性能的改进与优化已经较为深入, 但是天地一体化信息网络具有完全不同的技术挑战, 即使是在传输性能方面仍有改进的空间, 在网络协议体系的各个层面还存在着很多问题有待于进一步

探索。

致谢

本研究得到美国 Lamar 大学王汝海教授, 南京大学范晨阳、张文瑞的帮助和支持, 谨致谢意!

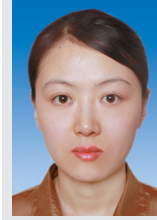
参考文献

- [1] 张乃通, 赵康健, 刘功亮. 对建设我国天地一体化信息网络的思考[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(3): 223-230
- [2] JOHNSTON B, HASLAM M, TRACHTMAN E, et al. SB-SAT-Persistent Data Communication LEO Spacecraft Via the Inmarsat-4 GEO Constellation[C]// Proceedings of 6th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference. USA: IEEE, 2012:2329-7093
- [3] 李德仁, 沈欣, 龚健雅, 等. 论我国空间信息网络的构建[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(6): 711-715
- [4] BURLEIGH S, VINTON C, CROWCROFT J, et al. Space for Internet and Internet for Space [J]. Ad Hoc Networks, 2014, 23(12):80-86
- [5] 谢高岗, 张玉军, 李振宇, 等. 未来互联网体系结构研究综述[J]. 计算机学报, 2012, 35(6): 1109-1119
- [6] AHLEGREN B, DANNEWITZ C, IMBRENDA C, et al. A Survey of Information-Centric Networking [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(7): 26-36
- [7] SUN Z. Satellite Networking: Principles and Protocols [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2005
- [8] LUGLIO M, SANADIDI M, GERLA M, et al. On-board Satellite "Split TCP" Proxy [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(2): 362-370. DOI: 10.1109/JSAC.2003.819987
- [9] CAINI C, CRUICKSHANK H, FARRELL S, et al. Delay-and Disruption-Tolerant Networking (DTN): An Alternative Solution for Future Satellite Networking Applications [C]// Proceedings of the IEEE. USA: IEEE, 2011, 99(11): 1980-1997. DOI: 10.1109/JPROC.2011.2158378
- [10] CCSDS. On Current Status of the SCPS Protocol Suite in CCSDS[EB/OL]. http://public.ccsds.org/publications/scps.html
- [11] FARRELL S, CAHILL V, GERAGHTY D, et al. When TCP Breaks: Delay- and Disruption-Tolerant Networking [J]. IEEE Internet Computing, 2006, 10(4): 72-78. DOI: 10.1109/MIC.2006.91
- [12] YU Q, BURLEIGH S, WANG R, et al. Performance Modeling of Licklider Transmission Protocol (LTP) in Deep-space Communication[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2015, 51(3): 1609-1620. DOI: 10.1109/TAES.2014.130763
- [13] 黄惠明, 常呈武. 天地一体化天基骨干网络体系架构研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(5): 460-467
- [14] 姜会林, 刘显著, 胡源, 等. 天地一体化信息网络的几个关键问题思考[J]. 兵工学报, 2014, 35: 96-100
- [15] 王闯, 张洪, 张威, 等. 基于无速率码实现全球信息分发的双层卫星网络设计[J]. 空间电子技术, 2015 (3): 74-80
- [16] MORTARI D, SANCTIS M, LUCENTE M. Design of Flower Constellations for Telecommunication Services [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11): 2008-2019
- [17] I. F. Akyildiz, E. Ekici, M. Bender. MLRS: A Novel Routing Algorithm for Multi-layered Satellite IP Networks [J]. IEICE Transactions on Networking, 2002, 10(3): 411-424
- [18] LI Y, ZHAO S, WU J, et al. Designing of a Novel Optical Two-Layered Satellite Network [C]//IEEE Computer Science and Software Engineering Conference. USA: IEEE, 2008: 976-979. DOI: 10.1109/CSSE.2008.1262
- [19] YIN Z, ZHANG L, ZHOU X, et al. Qos-Aware Multicast Routing Protocol for Triple-Layered LEO/HEO/GEO Satellite IP Network [C]//IEEE Global Mobile Congress. USA: IEEE, 2010: 1-6. DOI: 10.1109/GMC.2010.5634567
- [20] TABLE T, FADLULAH Z, TAKAHASHI T, et al. Tailoring ELB for Multi-Layered Satellite Network [C]//IEEE Communications Conference. USA: IEEE, 2009:1-5
- [21] WANG J, HU Y, ZHOU H, et al. Topological Dynamics Characterization for Layered Satellite Networks [C]//IEEE Performance Computing and Communication Conference. USA: IEEE, 2006: 349-356. DOI: 10.1109/2006.1629426
- [10] O3b Networks [EB/OL]. [2016-05-06]. http://www.o3bnetworks.com
- [11] CORRIE L, GREENHUT D, HAZLEHUIST R, et al. Simulating the GPS Constellation for High Fidelity Operator Training [C]//Position Location and Navigation Symposium. USA: IEEE, 1996: 222-229. DOI: 10.1109/PLANS.1996.509081
- [12] JIANG Z, PETIT G, HARMENEGNIES A, et al. Comparison of the GLONASS Orbit Products for UTC Time Transfer [C]// Frequency Control and the European Frequency and Time Forum. USA: IEEE, 2011: 1-6. DOI: 10.1109/FCS.2011.5977739
- [13] GAO Z, GUO Q, NA Z. Novel Optimized Routing Algorithm for LEO Satellite IP Networks [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011, 22(6): 917-925
- [14] SMITH D, HENDRICKSON R. Mission Control for the 48-Satellite Globalstar Constellation [C]//IEEE Military Communications Conference. USA: IEEE, 1995: 828-832. DOI: 10.1109/MILCOM.1995.483643
- [15] ILCEV S. Orbcomm Space Segment for Mobile Satellite System (MSS) [C]// Telecommunication in Modern Satellite Cable and Broadcasting Services. USA: IEEE, 2011:689-692. DOI: 10.1109/TELSKS.2011.6143205

← 上接第 23 页

Communication System [C]//Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control. USA: IEEE, 2011: 619-621. DOI: 10.1109/IMCCC.2011.159

作者简介



杨冠男, 南京大学电子科学与工程学院博士生, 南京大学金陵学院讲师; 主要研究领域为空间信息网络、卫星通信、无线传感器自组网络; 参加基金项目 2 项; 已发表论文 6 篇。



李文峰, 南京大学电子科学与工程学院助理研究员; 目前主要研究领域为空间通信及空间信息网络; 先后主持和参加基金项目 10 余项; 已发表论文 10 余篇。



张兴啟, 南京大学电子科学与工程学院教授、博士生导师, 国务院政府特殊津贴专家; 目前主要从事雷达信号处理、通信信号处理研究; 先后主持和承担国家“863 计划”项目、国防科研项目及江苏省科技计划项目 30 余项; 荣获省部级科技进步二等奖 3 项、三等奖 2 项; 发表学术论文 100 余篇, 申请/授权国家发明专利 20 多项。

作者简介



张威, 解放军理工大学博士研究生; 主要从事空间信息网络体系架构、拓扑控制、星座设计方面的研究; 发表论文 19 篇。



张更新, 解放军理工大学教授、博士; 主要研究领域为空间信息网络、卫星通信、深空通信; 负责国家自然科学基金、国家“863”计划、国家科技重大专项等各类项目 20 余项; 发表论文 90 余篇, 出版专著教材 5 部。



苟亮, 解放军理工大学博士; 主要从事卫星通信、深空通信、网络编码等方面的研究; 发表论文 15 篇, 其中被 SCI 检索 4 篇。