

延迟/中断容忍网络技术在载人登月通信中的应用研究

王洋, 赵燕, 赵锦瑾, 任凯, 宫长辉

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 针对未来构建天地一体化空间网络的需求, 分析了载人登月网络的特点以及目前地面网络广泛应用的 TCP/IP 协议应用于载人登月网络所遇到的一系列问题; 针对这些问题, 提出了使用延迟/中断容忍网络 (DTN, delay/disruption tolerant network) 体系来构建载人登月网络的设想, 并设计了载人登月网络协议体系架构; 最后通过在测试平台上进行真实的文件传递试验来对基于 DTN 技术的载人登月网络进行性能仿真, 并对利克里德传输协议 (LTP, licklider transmission protocol) 的参数进行理论上的优化分析; 仿真结果表明, 在地月信道误码率较高的情况下, 采用 LTP segment 大小为 400 Bytes, 相比于 LTP segment 大小为 1 400 Bytes、800 Bytes 和 100 Bytes, 分别提高了 17 540 Bytes/s、4 160 Bytes/s 和 47 000 Bytes/s 的有效吞吐量。

关键词: 延迟/中断容忍网络; 载人登月; 测试平台; LTP; 优化分析

Application and Analysis of Delay/Disruption Tolerant Network in Manned Lunar Network

WANG Yang, ZHAO Yan, ZHAO Jinjin, REN Kai, GONG Changhui

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: Aiming at the requirement of building the space-ground integrative network in the future, the characteristic of the manned lunar network and a series of problems that will occur when the TCP/IP protocol suite is applied to the network are analyzed. To solve these problems, the idea of using Delay/Disruption Tolerant Network (DTN) to build the manned lunar network is proposed, as well as the protocol architecture of the network is designed. Finally, the performance of manned lunar network based on Delay/Disruption Tolerant Network technology is emulated by file-transfer experiments using the testbed. Besides, the parameter selection of Licklider Transmission Protocol (LTP) is analyzed theoretically, and the experimental results indicate that the improvements of 17 540 Bytes/s, 4 160 Bytes/s, and 47 000 Bytes/s in effective throughput can be obtained with LTP segment size of 400 Bytes, compared with that with LTP segment size of 1400 Bytes, 800 Bytes, and 100 Bytes respectively at high bit error rate.

Keywords: Delay/Disruption tolerant network; manned lunar network; DTN testbed; licklider transmission protocol; optimization analysis

0 引言

载人深空探测是一个国家综合实力的重要体现, 在政治、经济和科技发展方面具有十分重要的战略意义。测控通信作为地面与航天器的连接纽带, 是深空探测任务成功的重要保证之一^[1]。针对载人航天器测控通信的高可靠性、高测控覆盖率、长时间连续测控、高数据传输速率等需求, 我国载人航天器采用了统一 S 波段测控通信体制, 构建了以中继卫星系统为主的天基测控通信系统, 同时, 采用了天地一体化的网络测控通信模式。但是, 目前我国空间数据系统中, 卫星通信的方式大多是面向数据链路的通信, 空间数据中继尚未实现联网, 各航天器之间的通信仍然采用点对点的空空通信体制, 未形成空空、空地、天地一体化的网络体制。目前这种通信体制严重影响了各类航天器

的无缝测控, 尤其影响未来大数据时代对航天器自身数据信息的开发利用^[2]。因此, 目前的空间数据系统现状已经难以适应今后空间呈现出的由空间站、载人深空探测器、卫星群等构成的复杂空间通信架构, 在网络互联技术迅猛发展地推动下, 新一代的空间网络—行星际互联网 (IPN, interplanetary network)^[3]应运而生, 为空间任务提供通信服务。IPN 是美国航空航天局 (NASA, national aeronautics and space administration) 喷气推进实验室 (JPL, jet propulsion laboratory) 为深空探测需求提出的网络测控方案, 希望将地面互联网扩展到整个太阳系, 最终为太阳系中的各类航天器提供像地面互联网一样的数据通信服务。目前我国航天器已经实现了将地面网络扩展到近地空间网络的初步验证, 而将近地空间网络扩展到深空航天器, 如

收稿日期: 2022-06-22; 修回日期: 2022-06-27。

作者简介: 王洋 (1984-), 女, 河北秦皇岛, 博士, 工程师, 主要从事航天器通信系统总体设计方向的研究。

引用格式: 王洋, 赵燕, 赵锦瑾, 等. 延迟/中断容忍网络技术在载人登月通信中的应用研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(7): 286-291.

构建载人登月网络,会遇到前所未有的的一系列问题^[4]。因此,本文着重分析了载人登月探测网络中的难点,引入了延迟/中断容忍网络技术来解决这些难点,对载人登月通信网络体系进行了设计,最后进行了试验仿真和优化分析。

1 载人登月通信网络的难点

载人登月通信网络的上行通信链路主要负责传输遥控指令、注入指令、话音数据、图像数据及应答数据;下行通信链路负责传输平台遥测数据、延时遥测数据、生理遥测、话音数据、图像数据、有效载荷数据等。但是,由于载人登月通信网络不同于常见的地面互联网,它具有特殊的环境特点,使得广泛应用于地面互联网的TCP/IP网络体系应用于载人登月网络时性能急剧下降。载人登月网络的特点主要体现在以下几个方面^[5]:

- 1) 通信距离远,传播时延巨大。月球距离地球约38万公里,最小传播时延为1.21 s,最大传播时延为1.35 s。
- 2) 无线链路频繁中断。
- 3) 信道速率不对称。载人登月下行链路速率较高,而上行链路速率较低。
- 4) 信号传播环境复杂,误码率非常高,通常达到 10^{-1} 。

因此,TCP/IP网络体系和协议用于载人登月网络时,不适用性主要体现在:

- 1) TCP的三次握手机制及慢启动算法不适用于深空长时延和有限的连接机会条件,会浪费宝贵的带宽资源,发送速率增加缓慢,有效吞吐量较低。

- 2) 在TCP/IP网络体系中,链路如果中断会导致数据丢失。

- 3) 载人登月网络中受限的上行信息速率不能有效地支持接收端产生的大量的应答数据的传输,导致应答数据的延迟和丢失,进一步会导致TCP降低报文发送速率,从而降低有效吞吐量。

- 4) 当TCP运行于误码率较高的载人登月环境时,会将信道误码而导致的网络丢包认为是网络拥塞,进而会降低报文发送速率以避免拥塞,这会进一步降低网络的有效吞吐量。

1998年,NASA JPL开始了对行星际互联网的研究。2002年,Kevin Fall提出了延迟/中断容忍网络(DTN, delay/disruption tolerant network)的概念来描述行星际互联网的体系结构^[6]。DTN体系结构是目前国际上公认的用于行星际互联网的协议体系架构,针对载人登月、载人火星探测等深空探测场景研究DTN应用,将是未来测控通信领域的重要研究课题,为未来载人登月、载人登陆火星、建立行星际互联网提供了一种重要的技术途径^[7]。

2 延迟/中断容忍网络的概念及研究现状

2.1 延迟/中断容忍网络及束协议

DTN是一个适用于“挑战性网络”的通用协议体系,“挑战性网络”即链路频繁中断、高误码率、长时延、上下行数据速率不对称的网络,比如地面军用Ad hoc网络、

IPN网络和无线传感器网络等。DTN中最重要的理念是“存储转发”,是当空间网络节点(比如探测器、中继卫星或者其他类似航天器)发现网络的下一跳不可达时的保存数据的一种机制。图1为DTN中存储转发机制示意图^[6]。图1中存储器(例如硬盘)可以无限期地保存消息,它们被称为永久性存储器,区别于互联网路由器中的存储芯片和缓冲区所提供的短时间存储器。

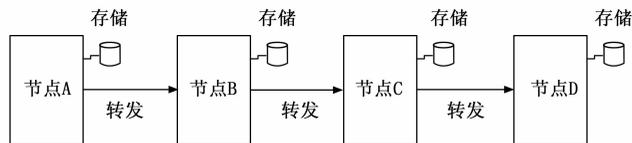


图1 DTN的存储转发机制

如图2所示,DTN体系引入了一个新的协议——束协议(BP, bundle protocol)^[8],该协议覆盖在原来网络协议栈的底层协议之上,用来实现消息的存储转发。束协议将底层协议连接起来,使得源应用程序可以跨越运行在不同网络环境中的不同的底层协议来与目的端的应用程序进行通信。而束协议下面的底层协议则需要根据不同的网络环境而进行针对性选取。同时,束协议还可以支持点到点的重传,该功能被称为“保管传输”,是一个可选功能。



图2 束协议的覆盖图

2.2 汇聚层协议

在DTN网络中,束协议下面的底层协议被叫做汇聚层协议,用来支持束交换,可使用已有地面互联网传输层协议,例如TCP协议和UDP协议。TCP是会话式的,但是在具有长时延、断续连接的链路上,非会话式协议可能会更加实用。因此,为实现深空环境中的高效可靠传输,针对深空断续通信和高链路延迟特性设计了利克里德传输协议(LTP, licklider transmission protocol)^[9]。为了避免束协议与汇聚层协议之间数据格式不匹配的问题,同时也为了保证汇聚层协议的性能,增加了一个汇聚层适配器(CLA, convergence layer adaptor)充当与汇聚层的接口。目前支持汇聚层协议的汇聚层适配器有基于LTP的CLA、基于TCP的CLA和UDP的CLA等。

LTP是目前用于深空通信的最合适的汇聚层协议。它区别于TCP的特性主要在于以下几个方面:

- 1) LTP不需要提前建立连接,即没有三次握手的过程。

- 2) 为了高效利用断续通信的带宽资源,LTP引入会话的概念^[9]。一次会话发送一个LTP块(block),LTP设计理念为同时传输多个会话来最大化通信链路利用率^[10]。

- 3) LTP没有拥塞控制策略,但是可以通过遵循计划好的连接时间和数据速率来避免网络拥塞。

4) LTP 的汇聚层适配器具有束汇聚功能, 可以将多个束汇聚为一个会话, 大大地减少了需要在上行链路中传输的应答数据。

5) 当链路中出现误码时, 由于 LTP 没有拥塞控制策略, 所以不会减小发送速率, 对于需要可靠传输的数据, 仅通过重传来保证其可靠性, 大大提高了网络的吞吐量。

6) LTP 的连接具有单向性, 设计来源于深空任务中的数据流通常是单向的, 航天器中的遥控数据量通常非常少。因此, LTP 不能像 TCP 那样在传输数据时顺便把应答数据捎带传送, LTP 的应答数据具有专门的数据格式。

2.3 LTP 的传输操作过程

LTP 被设计为能够同时传输多个会话 (即 LTP block) 来最大化通信链路利用率。一个 LTP block 可包含两部分数据 (也可以只有某一部分), 第一部分为可靠传输的数据, 被命名为“红色部分”, 为保证能被接收端可靠接收, 采用了应答和重传机制。第二部分为不可靠传输的数据, 被命名为“绿色部分”, 对该部分数据没有使用应答和重传机制。一个 LTP block 被分割为若干个 LTP 数据段 (LTP segments) 传输, 为检测 LTP block 的接收状态, 将一些 LTP segments 标记为检验点 (checkpoints, CP), 其中“红色部分”的最后一个 LTP segment 必须被标记为 CP。当一个 CP 到达, 接收端就会将一个对应的报告段 (RS, report segment) 反馈给发送端。如果接收端已经接收到该 LTP block 中“红色部分”的所有 LTP segments, 那么该 RS 为一个肯定的应答 (ACK, acknowledgment), 否则该 RS 为一个否定的应答 (NAK, negative acknowledgment), 丢失的 LTP segments 将被重传。发送端一旦接收到 RS, 则反馈一个相应的报告应答段 (RA, report acknowledgment) 给接收端。CP 和 RS 均设计了超时重传机制 (RTO, retransmission timeout), 设计师可以设置 RTO 时间, 一旦相应的定时器超时, CP 和 RS 将被重传。图 3 给出了一个 LTP block 的传输操作过程。

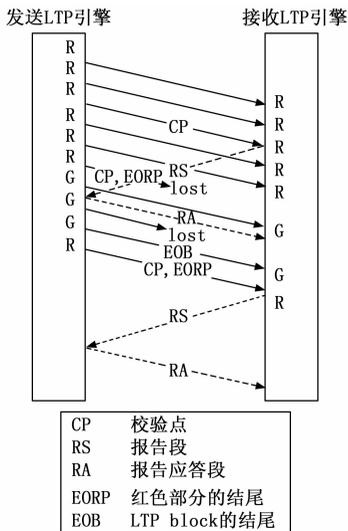


图 3 一个 LTP block 传输操作过程

2.4 DTN 的研究现状

近年来国内对 DTN 的研究主要集中在地面网络的路由方面^[11-12], 对空间 DTN 的研究还相对较少, 文献 [13] 关注于地火通信场景, 给出了一种 LTP 文件传递时延的理论建模方法并进行试验验证, 并未考虑优化设计问题, 文献 [14-15] 将 DTN 应用于地火通信场景, 研究了跨层包大小的优化设计, 但并未进行真实文件传输试验验证。国外对 DTN 应用于空间通信的研究主要集中在 BP 协议在深空场景下的理论建模^[16-17]、LTP 与其他可靠传输协议的性能对比^[18-20]以及 LTP 理论建模等方面^[21-23], 而在工程背景下如何对 LTP 进行应用优化以达到尽可能高的实际效率方面尚未充分开展深入的定量和定性研究。

3 基于 DTN 的载人登月网络体系结构设计

未来载人登月通信网络主要由地面网络、近地网络、地月网络、近月网络和月面网络等组成, 如图 4 所示, 整个网络中包含指控中心、地面站、地球中继卫星、月球中继卫星、载人飞船及宇航员等系统。各网络的组合及特点分析如下。

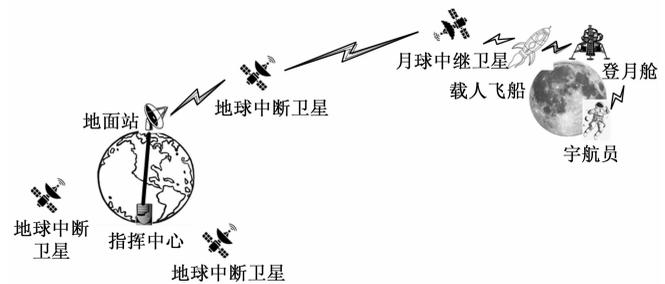


图 4 载人登月通信场景

1) 地面网络:

地面网络主要由指挥控制中心和地面站组成, 通过光纤进行互连。光纤信道的数据速率较高、时延较小, 且误码率极低。

2) 近地网络:

近地网络主要由地面站、地球中继卫星等组成, 通过卫星链路进行互连。

3) 地月网络:

地月网络主要由地球同步中继卫星、月球中继卫星等组成。载人飞船绕月飞行的高度一般在几百公里的距离, 覆盖范围较小, 因此需要发射一到两颗月球高轨中继卫星来提供通信支持。地月之间的通信距离较远, 上下行链路具有非对称性、误码率高和易中断等特点。

4) 近月网络:

近月网络主要由月球中继卫星、载人飞船和登月舱等组成, 接入网络传输距离较近但可能会因遮挡导致链路的中断。

5) 月面网络:

月面网络主要由载人飞船、登月舱和宇航员等组成, 通过无线电组成一个小型区域网络。

这五种网络场景的环境特性各异, 属于异构网络, 需要利用网络协议实现互联互通。经过上述分析, 使用 DTN

作为载人登月网络的协议栈结构。该协议体系是一种覆盖层协议体系, 束协议将各种异构网络连接起来, 在束协议的支持下, 根据不同的底层环境特性来选取不同的汇聚层协议, 例如可以选择 TCP/IP 协议、LTP 协议等不同类型网络的底层协议。图 5 为作者设计的一种基于 DTN 的载人登月网络体系结构方案。通过使用束协议, 不仅可以实现异构网络的互联互通, 还可以通过束协议的“存储—转发”机制来应对链路的中断, 使得链路在中断的时候, 可以自动地将数据保存在 DTN 节点中的大容量存储器中, 当检测到链路连接时, 又可以自动地将数据转发出去。基于 DTN 的载人登月网络中各子网可以设计如下。

1) 地面网络: 地面网络采用 BP/TCP/IP/以太网或 BP/UDP/IP/以太网协议栈来进行数据传输, 对传输数据进行 6 层数据处理, 分别是应用层、束层、汇聚层、网络层、数据链路层、物理层。

2) 近地网络: 使用 BP/TCP/IP/AOS/物理层协议或 BP/UDP/IP/AOS/物理层协议, 其中, 数据链路层采用 CCSDS 推荐的高级在轨数据系统 (AOS, advanced orbiting system) 空间数据链路协议^[24], 使用 IP over CCSDS^[25]进行协议的转换。

3) 地月网络: 使用 BP/LTP/AOS/物理层协议栈, 将 LTP segments 放入 AOS 帧中。TCP 不能用于深空链路, 而 UDP 协议不保证可靠性, LTP 协议是专门针对深空链路设计的汇聚层协议, 可以通过重传来保证数据的可靠性。

4) 近月网络: 使用 BP/LTP/近距空间链路协议。近距 (Proximity-1) 空间链路协议^[26]覆盖数据链路层和物理层, 是 CCSDS 开发的一种用于中继卫星、着陆器及探测器之间的近距离通信的空间链路协议。

5) 月面网络: 月面网络采用 BP/TCP/IP/World Interoperability for Microwave Access (Wimax) 或 BP/UDP/IP/Wimax 协议栈^[27]来进行数据传输。

4 仿真场景及网络试验平台的搭建

针对载人登月场景, 搭建了网络试验平台, 如图 6 所示, 该平台包含四个节点, 其中一个节点模拟地月链路, 另外三个节点分别模拟载人飞船、月球中继卫星和深空地面站。我们选取的实现协议栈的软件叫做 Interplanetary Overlay Network (ION)^[10], 用来实现 DTN 中束协议以及 LTP 协议。该测试平台使用 Linux Kernel 中的 Network

Emulator (网络模拟器, NETEM) 来模拟信道随机错误、上下行链路非对称速率以及链路传播时延, 可真实地模拟地月链路的特性。

本试验中使用 2 s 作为地月链路时延, 上下行链路速率的非对称比为 20 kbps: 2 Mbps (即 1: 100)。地月链路和近月链路采用 LTP 作为汇聚层协议。传递文件大小为 8 MBytes, 束大小为 1 KBytes, LTP 汇聚 (即 LTP block) 大小设置为 0.25 MBytes, 即一个文件包含 8 000 个束, 约 240 个束被汇聚到一个 LTP block 中, 然后被分为多个 LTP segments 在数据链路上传输。

5 试验结果及优化分析

5.1 试验结果

本文开展的试验仿真中采用了不同的 LTP segment 大小, 希望可以根据任务环境因素以有效吞吐量为优化目标进行长度优化设计。一组试验中选取 LTP segment 大小为文献 [18-20] 仿真中常用的 1 400 Bytes (仿真平台中数据链路层的最大 MTU 长度), 同时另外三组试验中选取 LTP segment 大小分别为 800 Bytes、400 Bytes 和 100 Bytes, 将四组试验得到的有效吞吐量性能进行对比, 见图 7。

从图 7 可以看出, 随着信道误码率的增加, 有效吞吐量逐渐降低, 例如当 LTP segment 大小为 1 400 Bytes, 信道误码率为 0、 10^{-6} 和 10^{-5} 时, 有效吞吐量分别为 209 424 Bytes/s、190 340 Bytes/s 和 149 883 Bytes/s。同时可以看出不论在何种误码率条件下, 当 LTP segment 大小为 100 Bytes 时, 有效吞吐量均最低, 约为 130 000 到 120 000 Bytes/s。而在较低误码率条件 (0 或 10^{-6}) 下, LTP segment 大小为 1 400 Bytes、800 Bytes 和 400 Bytes 时, 有效吞吐量性能差别不大, 信道误码率为 0 时, 约为 200 000 Bytes/s, 信道误码率为 10^{-6} 时, 约为 192 000 Bytes/s。当信道误码率较高时 (10^{-5}), 选取 LTP segment 大小为 400 Bytes 将得到较高的有效吞吐量, 相比于 LTP segment 大小为 1 400 Bytes、800 Bytes 和 100 Bytes 分别提高了 17 540 Bytes/s、4 160 Bytes/s 和 47 000 Bytes/s。

5.2 理论优化分析

整个文件传递时间包括文件发送时间、传播时间和排队处理时间。在该试验中, 文件的发送时间可以计算为:

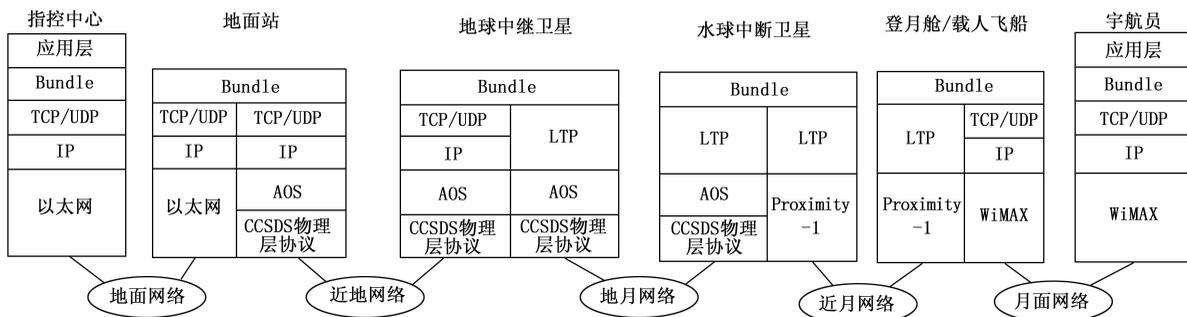


图 5 基于 DTN 的载人登月网络体系结构

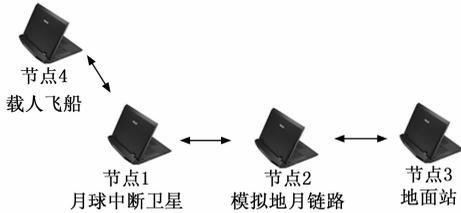


图 6 网络试验平台

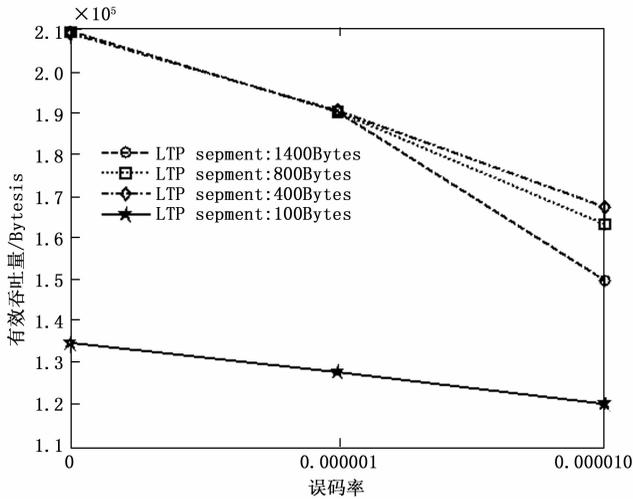


图 7 采用四种 LTP segment 大小，在不同误码率下的有效吞吐量对比图

$$T_{trans} = \frac{L_{file}}{R_{data}} = \frac{8}{0.25} = 32 \text{ s} \quad (1)$$

其中： L_{file} 为文件大小， R_{data} 为下行链路数据速率。

对于地月通信环境，仿真中假设地月信道的传播时延为 2 s，远小于发送文件的时间 T_{trans} ，所以由重传导致的往返传播时间和文件发送时间并不是简单的相加关系。在一定的误码率条件下，若 LTP segment 大小变小，则每个 LTP segment 的丢失概率减小，但是因为 LTP block 大小不变，所以产生的原始 CP 的个数不变。因此，传输中丢失的 CP 的个数将会变小，这样就降低了 LTP block 的传输回合的个数。本文给出当 LTP segment 大小不同时，传输每个 LTP block 所需的传输回合的数目，定量地分析 LTP segment 大小对于文件传递时间和有效吞吐量的影响。

设每个 LTP segment 的长度为 L_{seg} ，信道的误码率为 p_e ，则每个 LTP segment (包括 CP) 的丢失概率为：

$$p_{CP} = p_{seg} = 1 - (1 - p_e)^{8 \times L_{seg}} \quad (2)$$

设每个 LTP block 中包含的 LTP segments 个数为 N_{seg} ，通过对 LTP block 的传输操作过程进行建模分析，可以得到每个 LTP block 的传输回合数等于 k 的概率，表示为：

$$p(G_{block} = k) = \sum_{s=0}^{k-1} [p(G_{segs} = k-s) \cdot p(G_{CP} = s)] = \sum_{s=0}^{k-1} [(1 - p_{seg}^{k-s})^{N_{seg}-1} - (1 - p_{seg}^{k-s-1})^{N_{seg}-1}] \cdot C_{k-1}^s \cdot p_{CP}^s \cdot (1 - p_{CP})^{k-s} \quad (3)$$

其中：随机变量 G_{block} 是一个 LTP block 所经历的传输回合数，随机变量 G_{CP} 是当一个 LTP block 被传输成功时丢

失的 CP 总数。 G_{segs} 表示在一个 LTP block 中普通 (不包括 CP) 的 LTP segments 的传输回合数。

因此，每个 LTP block 的传输回合数的均值可以计算如下：

$$E(G_{block}) = \sum_{k=1}^{\infty} k \times p(G_{block} = k) \quad (4)$$

根据公式 (4) 可以得到在 LTP segment 大小不同时，传输每个 LTP block 所需的传输回合的数目，见图 8。当误码率较低时 (0 或 10^{-6})，LTP segment 大小的改变对于每个 LTP block 的传输回合数的均值几乎没有任何影响。而当误码率较高时 (10^{-5})，在 LTP segment 为 1 400 Bytes, 800 Bytes, 400 Bytes 和 100 Bytes 时，需要的传输回合数的期望值分别为 3.456 8、2.972 5、2.583 4 和 2.199 7，即 LTP segment 大小越大，需要的传输回合数越多。因此，考虑到 LTP segments 重传对文件传递时间造成的影响，应该是在有误码存在时尤其是误码率高的条件下，LTP segment 大小越大所需的文件传播时间越大，也就造成文件传递时间的增大，有效吞吐量的降低。

但是，对文件传递时间而言，还有一个重要的影响因素是排队处理时间，对于地火通信场景来说，排队处理时间相对于传播时延较小，完全可以忽略；但是对于地月通信，通常单向传播时延为 1 到 2 s，不能忽略排队处理时间的影响。排队处理时间的估计问题，需要一种完全不同的预测和分析方法，是未来研究的一个重点，这里仅定性地进行分析。与图 7 进行对比分析，可以看到当误码率较低时，排除掉 LTP segment 大小等于 100 Bytes 的情况，LTP segment 大小的改变对于有效吞吐量几乎没有任何影响；而当误码率较高时 (10^{-5})，排除掉 LTP segment 大小等于 100 Bytes 的情况，LTP segment 大小越大，文件传递时延越大，有效吞吐量越低，这都与上述的理论推导一致。而当 LTP segment 大小为 100 Bytes，各种信道误码率下有效吞吐量都很低的原因在于 LTP segment 的长度太小了，导致整个文件所需分割的 LTP segment 个数很多。可以计算出当 LTP segment 为 100 Bytes、400 Bytes、800 Bytes 和 1 400 Bytes 时，所需首次传输的 LTP segments 个数分别为 92 467、21 333、10 533 和 6 000，所以 LTP segment 大小为 100 Bytes 导致了过多的数据排队和处理时间，相比于 LTP segment 为 400 Bytes、800 Bytes 和 1 400 Bytes，大大增加了文件的传递时延，降低了有效吞吐量。

6 结束语

载人登月网络具有高误码率、长传播时延、链路连接易中断、上下行链路速率非对称等“挑战性网络”特点，这都使得在地面上运行良好的 TCP/IP 协议族不能应用于该网络。针对这一问题，本文设计了基于 DTN 的载人登月通信网络协议体系，并搭建了地月仿真平台进行了试验仿真。仿真结果表明：DTN 可以很好地应用于载人登月通信场景，且当信道误码率较低时 (如 10^{-6})，宜采用长度较大的 LTP segment，而当信道误码率较高时 (如 10^{-5})，宜采用长度较小的 LTP segment，但是 LTP segment 太小会导致

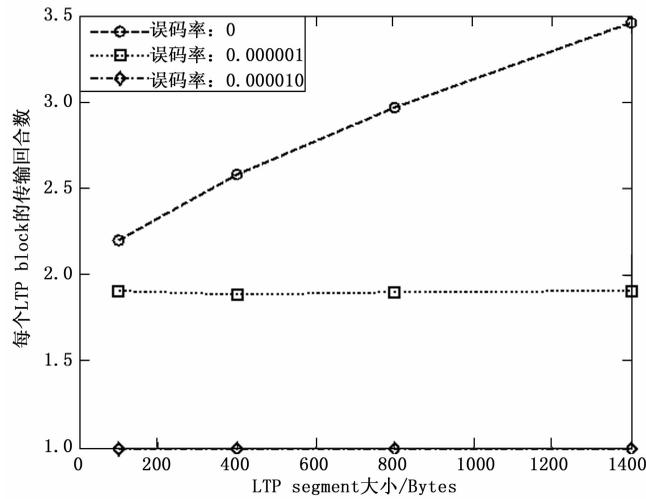


图8 采用不同 LTP segment 大小,在不同误码率下的每个 LTP block 传输回合数的对比图

额外的处理时间,采用 LTP segment 为 400 Bytes,可以提高整个系统的有效吞吐量,相比于 LTP segment 大小为 1400 Bytes、800 Bytes 和 100 Bytes 有效吞吐量分别提高了 17 540 Bytes/s、4 160 Bytes/s 和 47 000 Bytes/s。同时,也从理论上对 LTP segment 参数优化选取进行了分析验证。DTN 是一种通用的体系结构,尤其适合于深空通信环境,未来还需针对其应用于更远距离的载人深空探测,比如载人火星探测时的性能进行研究和分析。

参考文献:

[1] 张乃通,李 晖,张钦宇. 深空探测通信技术发展趋势及思考 [J]. 宇航学报,2007,28 (4): 786-793.

[2] 李宁宇,谭维织. 空间因特网与空间测控 [J]. 空间电子技术,2009,6 (3): 116-121.

[3] JACKSON J. The Interplanetary Internet [J]. IEEE Spectrum, 2005, 42 (8): 31-35.

[4] 叶培建院士谈深空探测技术发展趋势和目标 [J]. 计算机测量与控制,2010,18 (11): 2454-2455.

[5] 王昱霖,张更新,张 威,等. 深空探测与行星际互联网 [J]. 国际太空,2012 (8): 36-40.

[6] FALL K. A Delay-Tolerant Network architecture for challenged internets [C] // Karlsruhe, Germany: ACM SIGCOMM, 2003: 27-34.

[7] 叶建设,宋世杰,沈荣骏. 深空通信 DTN 应用研究 [J]. 宇航学报,2010,31 (4): 941-949.

[8] SCOTT K, BURLEIGH S. Bundle Protocol specification, IETF RFC 5050 [Z]. Pasadena: NASA Jet Propulsion Laboratory, 2007.

[9] RAMADAS M, BURLEIGH S C, FARRELL S. Licklider Transmission Protocol-specification, IETF RFC 5326 [Z]. Pasadena: NASA Jet Propulsion Laboratory, 2007.

[10] BURLEIGH S C. Interplanetary Overlay Network (ION) design and operation V4.1.1 [EB/OL]. Pasadena: NASA Jet Propulsion Laboratory, 2021. [2022-06-20]. <https://sourceforge.net/projects/ion-dtn/>.

[11] 马继红,杨文涛,白跃彬. DTN 中基于贝叶斯的节点相遇概率预测方法 [J]. 计算机测量与控制,2016,24 (4): 185-188.

[12] 苏金树,胡乔林,赵宝康,等. 容延容断网络路由技术 [J]. 软件学报,2010,21 (1): 119-132.

[13] 王 洋,杨 宏,陈晓光,等. 深空通信 LTP 传递时延的理论建模及试验验证 [J]. 系统仿真学报,2017,29 (3): 479-486.

[14] 王 洋,杨 宏,陈晓光,等. 面向深空通信的 DTN 网络跨层包大小的优化设计 [J]. 宇航学报,2017,38 (5): 533-541.

[15] 王 洋,杨 宏,陈晓光,等. 深空 DTN 网络中 LTP 协议的额外传输开销优化 [J]. 航天器工程,2017,26 (3): 78-83.

[16] SABBAGH A, WANG R H, ZHAO K L, et al. Bundle protocol over highly asymmetric deep-space channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16 (4): 2478-2489.

[17] ZHAO K L, WANG R H, BURLEIGH S C, et al. Performance of bundle protocol for deep-space communications [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2016, 52 (5): 2347-2361.

[18] WANG R H, WEI Z G, DAVE V, et al. Which DTN CLP is best for long-delay cislunar communications with channel-rate asymmetry? [J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18 (6): 10-16.

[19] YU Q, WANG R H, WEI Z G, et al. DTN Licklider Transmission Protocol over asymmetric space channels [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 28 (5): 14-22.

[20] WANG R H, WEI Z G, ZHANG Q Y, et al. LTP aggregation of DTN bundles in space communications [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49 (3): 1677-1691.

[21] YANG Z H, WANG R H, YU Q, et al. Analytical characterization of Licklider Transmission Protocol (LTP) in cislunar communications [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50 (3): 2019-2031.

[22] YU Q, BURLEIGH S C, WANG R H, et al. Performance modeling of Licklider Transmission Protocol (LTP) in deep-space communication [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2015, 51 (3): 1609-1619.

[23] YANG G N, WANG R H, BURLEIGH S C, et al. Analysis of Licklider Transmission Protocol for reliable file delivery in space vehicle communications with random link interruptions [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68 (4): 3919-3932.

[24] CCSDS. AOS space data link protocol, CCSDS 732.0-B-4 [Z]. Washington: CCSDS, 2021.

[25] CCSDS. IP over CCSDS space links, CCSDS 702.1-B-1 [Z]. Washington: CCSDS, 2012.

[26] CCSDS. Proximity-1 space data link protocol—data link layer, CCSDS 211.0-B-6 [Z]. Washington: CCSDS, 2020.

[27] GIFFORD K, BRAHAM S. Wireless network systems to support NASA's exploration vision [C] // In 2007 American Institute of Aeronautics and Astronautics Conference, Rohnert Park, California, May 7-10, 2007.