

空间信息网络协议体系分析

陈宇, 孟新, 张磊

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

摘要:随着我国航天活动和空间探索工程的逐步开展,已有的空间信息传输方式已不适用于未来复杂空间操作,我国建立空间信息网络对国防和军队信息化建设意义重大。文中介绍目前国际上研究和应用的四种空间信息网络协议体系:基于CCSDS的协议体系、基于TCP/IP的协议体系、将CCSDS与TCP/IP结合的协议体系、基于容延迟/中断网络的协议体系。介绍这些协议体系架构、协议组成和功能,并进行分析和比较,总结出这些协议体系用于空间信息传输的优势和待解决的问题。

关键词:空间信息网络;空间数据系统咨询委员会;OMNI;TCP/IP;DTN

中图分类号:TP393

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2012)06-0001-05

Analysis of Protocol of Space Information Network

CHEN Yu, MENG Xin, ZHANG Lei

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: With the development of the space activities and the space exploration, the traditional spatial information transmission is not applicable to complex space operations. It is significant to build space information network for national defense and army informationization. It analyzes and contrasts the frameworks of protocol which is based CCSDS, TCP/IP, CCSDS and TCP/IP, delay/disruption tolerant networks respectively. Introduce the constitution and function of the protocols, and analyses and compares these protocols, and summarizes the advantages and unsolved questions when these protocols apply to spatial information transmission.

Key words: space information network; CCSDS; OMNI; TCP/IP; DTN

0 引言

空间信息网络是包含地面互联网和天基测控网在内的一体化网络,是空间信息获取、存储和分发的统一平台,实现空间信息的管理、共享和利用,对国防和军队信息化建设将起到不可估量的促进作用。为加快我国空间信息网络的建设,需要研究当前国际航天大国的空间信息网络的先进理论,提出我国自己的空间信息网络的体系结构和协议体系。文中针对目前国外研究和使用的空间信息网络协议体系,进行介绍、分析和比较。

1 空间信息网络协议体系的研究现状

从目前国际航天任务中空间信息网络协议体系的研究和应用情况来看,主要有四种研究方向:基于CCSDS的协议体系、基于TCP/IP的协议体系、将

CCSDS与TCP/IP结合的协议体系、基于容延迟/中断网络的协议体系。

1.1 基于CCSDS的协议体系

空间数据系统咨询委员会(CCSDS)致力于空间通信协议的统一与推广,很多CCSDS建议已成为ISO正式标准,广泛应用于国际空间项目。

CCSDS制定了分组遥测协议(TM)^[1]、分组遥控协议(TC)^[2]、高级在轨系统协议(AOS)^[3]。后来CCSDS对这三个协议重构,制定了空间分组协议(SPP)、TM/TC/AOS空间数据链路协议(SDLP)、TM/TC同步与信道编码(SCC)协议等,用来替代以前的标准。

1999年,CCSDS制定了空间通信协议(SCPS, space communications protocol specification),SCPS协议针对空间传输环境特性,修改和扩展了TCP/IP协议族,制定了网络层协议SCPS-NP^[4]、安全协议SCPS-SP^[5]、传输协议SCPS-TP^[6]、文件传输协议SCPS-FP^[7]。

CCSDS定义的协议体系结构^[8]包括:应用层、传输层、网络层、数据链路层、物理层。其中,每层包含几个可组合的协议。图1为CCSDS空间通信协议参考

收稿日期:2011-10-31;修回日期:2012-01-31

基金项目:载人航天领域预先研究项目(030104)

作者简介:陈宇(1975-),女,工程师,硕士,主要研究方向为卫星通信和空间网络;孟新,研究员,博士生导师,主要研究方向为空间信息处理技术、航天任务地面系统技术。

模型。

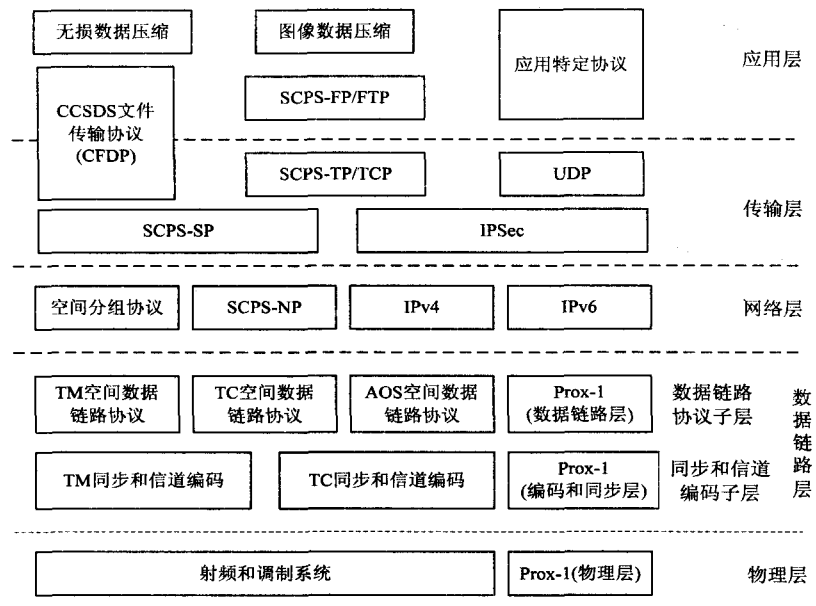


图 1 CCSDS 空间通信协议参考模型

1) 物理层。

CCSDS 定义了射频和调制系统,规定了航天器和地面测控站间的物理层协议。该协议中 Prox-1 链路协议定义了邻近空间链路的物理层特性。

2) 数据链路层。

CCSDS 数据链路子层定义了在空中链路上用数据包(如数据帧)传输数据的方法。同步和信道编码子层定义了在空中链路上传输“帧”的同步和信道编码的方法。

CCSDS 数据链路协议子层包含四个协议:TC 空间数据链路协议、TM 空间数据链路协议、AOS 空间数据链路协议、Prox-1 空间链路协议的数据链路层。以上协议规定了空间链路中传输数据的能力,统称为 SDLP (space data link protocol,空间数据链路协议)。与之对应,CCSDS 还规定了数据链路层的同步和信道编码子层的三个规范:TM 同步和信道编码、TC 同步和信道编码、Prox-1 空间链路协议的编码和同步层协议。

TM 的最核心的思想是虚拟信道 (Virtual Channel),虚拟信道对多个数据流的信道进行动态管理,也就是每个信源以时分复用的方式虚拟独占通信链路,这样使多个数据流在同一条通信链路上传输数据,使 TM 在单个通信链路上实现了复用,提高了信道的利用率。

TC 的体系层次结构自下而上分别为:物理层、信道编码层、分段层、分包层、系统管理层、应用过程层。其中,分段层使用“多路访问指针”技术,也就是在虚拟信道复用之前先进行信道复用,这样极大地优化了信道的优先级分配,提高了传输效率。

在空间链路上,AOS 提供双向的数据传输,包括声

频、视频、低速处理数据、高速遥测数据。AOS 支持在同一链路上传输不同类型的数据。为此,AOS 提供多种传输机制,如同步传输、异步传输、等时传输;提供多种用户数据格式,如比特流、字节块、数据包等;提供多种等级的差错管理。AOS 是包含空间链路的天地一体化网络,实现星地交互支持,能够提高信道利用率,降低成本,保证高质量的数据传输。

3) 网络层。

CCSDS 规定了两个网络层协议:空间分包协议 SPP、SCPS-NP,实现了空间网络的路由功能。

SPP 基于无连接,不保证数据的顺序发送和完整性。SPP 的核心是提前配置 LDP (Logical Data

Path),并用 Path ID 代替完整的端地址来标识 LDP,从而提高空间信息传输效率,但只适合静态路由的通信场合。LDP 是单向的,可以是点到点或组播路由。不同用户(对应于不同的 LDP)可以利用复用/去复用方法共享逻辑信道。

与标准 IP 协议相比,SCPS-NP 协议有三方面改进:NP 提供 4 种包头供用户在效率和功能之间选用;既支持面向连接的路由也支持面向无连接的路由;与 ICMP 相比,SCPS 控制信息协议 SCMP 提供了链路中断消息。

因特网的 IPv4 和 IPv6 分组也可以通过空间数据链路协议传输,与 SPP、SCPS-NP 可以复用或独用空间数据链路。

4) 传输层。

CCSDS 传输协议 SCPS-TP,向空间通信用户提供端到端传输服务。TP 针对网络拥塞、误码或链路中断导致的数据丢失,能够进行识别和区分处理,并实现了头部压缩、选择否定确认、时间戳、速率控制等功能。

传输层数据一般由网络层协议传输,在一些情况下传输层数据也可以直接由链路层协议传输,Internet 的 TCP 和 UDP 可以运行于 IPv4、IPv6、SCPS-NP 之上。

SCPS 安全协议 (SCPS-SP) 和 Internet 安全协议 (IPSec) 可以和传输层协议配合使用,提供端到端的数据保护。

5) 应用层。

CCSDS 开发了三个应用层协议:图像数据压缩、无损数据压缩、SCPS 文件协议 SCPS-FP。空间任务也可以选用非 CCSDS 建议的应用协议,来满足空间任务的特定需求。应用层数据一般由传输层协议负责传

输,一些情况下,应用层数据也可以由网络层协议进行传输。Internet 中的应用协议可以基于 TCP、SCPS-TP、UDP。

CCSDS 文件传输协议 (CFDP, CCSDS File Delivery Protocol) 集成了传输层和应用层功能。支持端到端的文件传输,这些端可以是卫星、地面站或中继星。用户只需确定传输时间和文件的目的地,CFDP 负责随着端到端连接的变化进行动态路由。从内核结构来看,CFDP 包括两个协议:核心文件传输协议和扩展文件传输协议。核心文件传输协议保证点到点的文件传输,扩展文件传输协议提供端到端的文件传输。

1.2 基于 TCP/IP 的协议体系

2002 年,NASA 哥达德航天中心设立了 OMNI 项目^[9],该项目的目的是为未来空间任务提供寻址能力、标准互联网协议及网络应用能力,使用户能够随时随地与其航天器之间建立端到端连接。为此,OMNI 将地面商用 Internet 技术用于航天器,把空间网络和地面网络进行整合,确保所有网络节点如同运行在 Internet 节点上,实现地面终端用户到航天器的全 IP 互联,体现出与 CCSDS 不同的技术发展思路。2002 年 8 月,“航天飞机上的通信导航论证”任务中,进行了 OMNI 通信架构和操作概念的配置和测试,获得了良好的效果。

OMNI 使用的基于 TCP/IP 协议体系如图 2 所示。

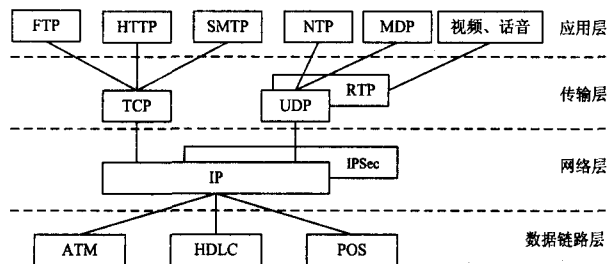


图 2 基于 TCP/IP 的协议体系

1) 数据链路层。

OMNI 选用商业路由器使用的数据链路层协议,如 HDLC(适用于数据速率低于 45Mbit/s 情况)、POS(适用于数据速率高于 45Mbit/s 情况)、ATM 等。其目的是使空地链路和商业路由器能够在数据链路层上直接接口。

2) 网络层。

在网络层,OMNI 选用 IP 协议。使用 IETF 标准路由协议,如 RIP、OSPF、BGP 等。使用移动 IP(RFC 3344)等协议来解决单址航天器飞过多个地面站的移动问题。使用移动网络(RFC 3963)等协议解决多址航天器经过多个地面站的移动问题。

3) 传输层。

OMNI 选用 TCP 和 UDP 协议。利用 UDP 协议传输航天器实时遥测数据和有效载荷数据。在异常情况下,对航天器进行盲控。在正常情况下,利用 TCP 协议对航天器进行控制、传送与移动 IP 协议等相关的信令信息等。选用实时传输协议(RTP)支持实时多媒体通信。RTP 协议族包括二个协议:数据传输协议(RTP)和控制协议(RTCP)。RTP 负责传输带有实时信息的数据包,一般在 UDP 之上工作,在此基础上增加时标、序列号等信息,接收端使用 RTP 同步视频、音频数据。RTCP 负责监视网络服务质量、通信带宽等,并将其通知给发送端。

4) 应用层。

OMNI 选用 NTP 协议用于实现航天器与地面之间的时间同步,选用 FTP 实现可靠文件传输,选用 SMTP 进行存贮转发式的科学数据传输,和其它用于传输视频、语音的应用层协议。OMNI 选用基于 UDP 的 MDP 协议来解决数据传输的问题。MDP 协议是一种基于选择性重传的组播协议,可以工作于往返传输时延是小时或天为量级的通信环境,允许链路不对称达到 1000:1 的比例,甚至可以在单向链路的环境中工作,并且能够通过多次连接传输一个文件,特别适合空间通信环境。

1.3 CCSDS 与 TCP/IP 结合的协议体系

2000 年 10 月,喷气动力实验室启动 Next Generation Space Internet(NGSI)项目,研究使用 CCSDS 协议和 IP 协议将空间网络和地面网络进行互联,实现支持未来航天任务的“空间因特网”。NGSI 使用将 CCSDS 和商业标准相结合的方式。由于 CCSDS 建议是专门针对空间链路设计,并且已经在多次航天任务中成功应用,为保护已有投资,在数据链路层继续使用 CCSDS 建议。而在网络层使用 IP 及其扩展技术。在传输层和应用层使用商业标准协议和 CCSDS 协议,或其他适合空间任务的协议。CCSDS 与 TCP/IP 结合的协议体系如图 3 所示。

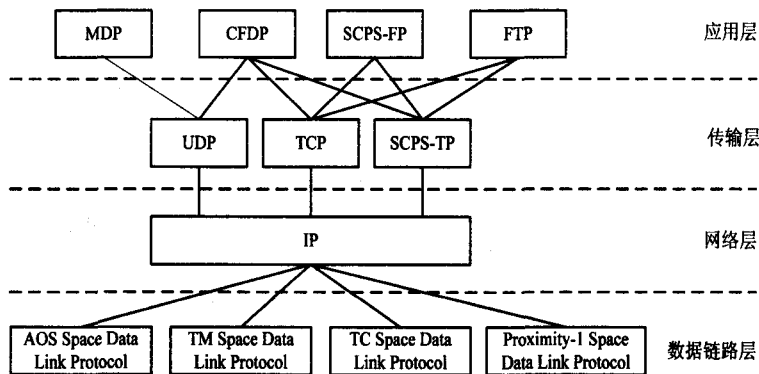


图 3 CCSDS 与 TCP/IP 结合的协议体系

1.4 基于容延迟/中断网络的协议体系

容延迟/中断网络 (Delay/Disruption Tolerant Networks, DTN) 是指能够在长延时、断续连接等受限网络环境中进行通信的新型网络体系。DTN 的概念在 2003 年由美国推进试验室最先提出^[10], 之后因特网研究任务组 (IRTF) 在星际网络研究组 (IPNRG) 的基础之上组建了容延迟/中断网络研究组 (DTNRG) 对 DTN 进行研究, 于 2007 年提出了 DTN 网络体系结构^[11] 和 Bundle 协议 (BP)^[12], 2008 年定义了汇聚层协议, 包括 TCPCLP (TCP Convergence Layer Protocol)^[13] 协议、Saratoga^[14] 协议、Licklider (Licklider Transmission Protocol, LTP)^[15-17] 协议等, 同时, 为了改进 BP 协议的不足, 制定了补充方案^[18]。目前, 研究人员在 DTN 的相关领域里进行广泛研究, 并且开展了具体部署和试验。

容延迟/中断网络体系的核心方法是在应用层和下层 (数据链路层或传输层) 之间加入中间层, 即束层 (bundle layer)。图 4 为容延迟/中断网络协议栈体系结构。

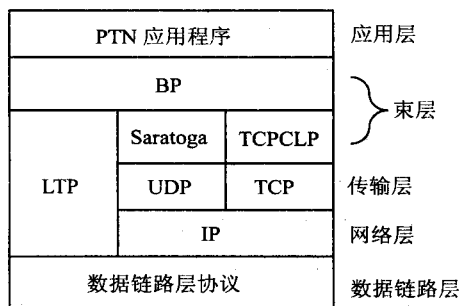


图 4 DTN 协议栈体系结构

从图 4 中可以看出, 束层包括 BP 协议和汇聚层协议。BP 协议通过 TCPCLP 应用于 TCP 之上, 通过 Saratoga 应用于 UDP 之上, 通过 LTP 应用于数据链路层或 UDP 之上, 为 DTN 应用程序提供服务。DTN 中 BP 协议是主要协议, 使用 BP 协议数据单元“束” (bundle) 进行数据传输, 使用不同的汇聚层协议, 使 BP 协议适用于所有网络环境。

1.4.1 BP 协议

束层协议支持以下特性: 保管机制、分段和重组、端到端的可靠性、路由功能、端到端的安全能力。

BP 协议的最大特点是采用存储转发机制和保管机制。例如, Internet 中的路由器不追踪它转发的分组, 也不关心超出传输路径上位于它下一跳路由器以外的数据的传输。而在容延迟/中断网络中, DTN 路由器必须为每个转发的数据分组保存一个副本, 只有在它确认已经成功地将数据分组转发到下一跳路由器之后才删除副本。这种保管机制保证数据不会在传输中丢失, 即使通信链路断开也能保证可靠的数据传输。

束包含至少两个数据块, 前面数据块为基本块, 基

本块之后为可选的变长的载荷字块和扩展块。基本块包含类似 IP 首部的一些信息, 以及 BP 协议独有的时间戳、生存时间、服务等级标志、报告节点、保管节点等。

DTN 的分段有两种形式: 主动分段和被动分段。DTN 的分段与重组的设计主要用于改善 bundle 传输效率, 但分段使加密和认证复杂化。BP 协议不提供校验和机制, 可靠性和安全机制通过扩展协议或其它协议来提供。

1.4.2 汇聚层协议

汇聚层协议包括 TCPCLP、LTP 以及 Saratoga 协议。

1) TCPCLP 协议。

TCP 可以作为 DTN 的汇聚层协议, 此时 TCP 汇聚层被命名为 TCPCL。先建立 TCPCL 连接, 在 TCPCL 连接上, 束进行双向传输。TCPCL 连接和 TCP 连接同时建立和关闭并一一对应。

2) LTP 协议。

LTP 协议是用于深空环境的点到点协议, 是束协议的标准基本汇聚层协议, 广泛适用于各种网络。运行于数据链路层之上或 UDP 之上。

LTP 是用来取代 TCP 和 IP 协议的, 它的高延时的空间通信链路上为 BP 协议提供汇聚层服务。LTP 提供单向传输服务, 它通过使用两个独立的单向通信链路来实现双向通信的功能。LTP 提供选择重传机制, 发出数据之后等待对端确认, 收到对端确认报文之后 LTP 才传输新的数据。

LTP 具有以下特点: 支持无数据丢失同时容忍链路中断服务、采用低容量或非对称链路上的最小开销进行设计、可对分片进行扩展、可取消对个别块的传输或接收、加速重传、部分可靠性。

LTP 将数据块分为红色和绿色两个部分。红色部分的传输需要有确认和重传机制, 接收端必须发送接收报告, 对红色数据进行确认, 并且在必要时重传红色数据。绿色部分数据不需要可靠传输, 不需要确认和重传。红色和绿色部分的长度都可以为零。当绿色部分的长度为 0 时, 即数据块全为红时, LTP 协议提供类似于 TCP 协议的功能; 而当红色部分的长度为 0 时, 即数据块全为绿时, LTP 协议提供类似于 UDP 协议的功能。通过 LTP 协议, 未被接收端接收到而需要重传的消息得到了保存, 从而使 DTN 有能力克服受限网络通信链路中断的问题。

3) Saratoga 协议。

Saratoga 协议是一个基于 UDP 的简单的汇聚层协议, 其特点是能充分利用链路, 适合深空链路不对称的环境。

Saratoga 使用最低有效带宽基于否定确认的自动重传机制,并且具有文件校验和机制,用于检查传输错误,从而具有可靠传输的能力。Saratoga 协议是一种点对点协议,主要实现文件单跳传输特别是大文件单跳传输,通过使用文件偏移量说明符来有效传输不同尺寸的文件。节点使用标志信息说明节点的存在、容量和需求。当接收方拒绝或接收本次数据传输之后,生成并回送一个描述性报文,包括拒绝接收或空缺数据边界的信息,利用这个信息进行选择性重传。Saratoga 协议能够传输任意数据报文,能够在束交换和文件传输之间执行映射。

目前已有以下项目采用了 DTN 体系结构:NASA 的 SSTL 灾难监测星座(UKDMC)项目、JPL 的行星际覆盖网络(ION)、NASA 的深度撞击网络(DINET)。

2 结束语

CCSDS 协议体系借鉴地面计算机网络的思想,其设计考虑到未来航天任务的新需求。CCSDS 建议是专为航天任务“量身定做”的协议,协议性能好,自身的协议体系完善,国际航天界广泛采用。待解决的主要问题有:不能与地面 Internet 直接互联,必须进行协议转换;能够支持静态路由,但是移动接入的能力差,没有很好地解决动态路由;和 TCP/IP 协议相比,CCSDS 开发、测试、维护的费用较高。

TCP/IP 协议的优势在于降低航天任务开发和维护的成本;空间信息网网络与地面互联网之间的互联互通性较好;既支持静态路由,又支持动态路由和移动接入。

TCP/IP 的主要问题是:由于 TCP/IP 具有更为复杂和完善的功能,这就要求航天器具备更高的处理能力;与专为空间通信量身定制的专用协议相比,IP 的效率低。

将 CCSDS 与 TCP/IP 结合的协议体系,一方面利用了商业 TCP/IP 标准的资源和优良的互通性,另一方面在一定程度上继承了现有 CCSDS 资源。

基于 DTN 的协议体系针对深空环境设计,为更远期的发展设计,涵盖了上述三种协议体系,是更高一级的协议体系。然而,DTN 还面临一些需要解决的关键技术问题:可靠性问题、拥塞控制问题、存储转发和保管传递策略问题、路由问题、安全性问题、时间同步问题。

建议研究人员在深入研究国内外空间信息网络协议体系的基础之上,结合我国航天工程发展现状,开展

我国空间信息网络协议体系的研究。

参考文献:

- [1] TM Space Data Link Protocol. Recommendation for Space Data System Standards, CCSDS 132.0-B-1, Blue Book, Issue 1 [S]. Washington D C: CCSDS, 2003.
- [2] TC Space Data Link Protocol. Recommendation for Space Data System Standards, CCSDS 232.0-B-1, Blue Book, Issue 1 [S]. Washington D C: CCSDS, 2003.
- [3] AOS Space Data Link Protocol. Recommendation for Space Data System Standards, CCSDS 732.0-B-2, Blue Book, Issue 2 [S]. Washington D C: CCSDS, 2006.
- [4] Space Communications Protocol Specification (SCPS) - Network Protocol, CCSDS 713.0-B-1, Blue Book [S]. 1999.
- [5] Space Communications Protocol Specification (SCPS) - Security Protocol, CCSDS 713.5-B-1, Blue Book [S]. 1999.
- [6] Space Communications Protocol Specification (SCPS) - Transport Protocol, CCSDS 714.0-B-2, Blue Book [S]. 2006.
- [7] Space Communications Protocol Specification (SCPS) - File Protocol, CCSDS 717.0-B-1, Blue Book [S]. 1999.
- [8] Overview of space communications protocols. Report concerning space data system standards, CCSDS 130.0-G-2. Green Book, Issue 2 [S]. Washington D C, USA: [s. n.], 2007.
- [9] Israel D, Hogle K, Parise R, et al. Space communications demonstration using internet technology [C]//International Telemetry Conference ITC/USA 2002. San Diego, CA: [s. n.], 2002.
- [10] Fall K. A Delay-tolerant Network Architecture for Challenged Internets [C]//Proceedings of the 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures and Protocols for Computer Communications. Karlsruhe, Germany: ACM, 2003: 27-34.
- [11] Cerf V, Burleigh S, Hooke A, et al. Delay Tolerant Network Architecture [S]. IETF RFC4838, 2007.
- [12] Scott K, Burleigh S. Bundle Protocol Specification [S]. IETF RFC5050, 2007.
- [13] Demmer M. Delay Tolerant Networking TCP Convergence Layer Protocol [S]. 2008.
- [14] Wood L. Using Saratoga with a Bundle Agent as a Convergence Layer for Delay-Tolerant Networking [S]. 2009.
- [15] Burleigh S, Ramadas M, Farrell S. Licklider Transmission Protocol - Motivation [S]. RFC5325, 2008.
- [16] Ramadas M, Burleigh S, Farrell S. Licklider Transmission Protocol - Specification [S]. RFC5326, 2008.
- [17] Farrell S, Ramadas M, Burleigh S. Licklider Transmission Protocol - Security Extensions [S]. RFC5327, 2008.
- [18] Wood L. Using HTTP for Delivery in Delay/Disruption-Tolerant Networks [S]. 2009.