

## 深空通信网络协议的发展与展望

安建平<sup>1</sup>, 靳松<sup>1</sup>, 许军<sup>1</sup>, 张宇<sup>1</sup>, 邵立伟<sup>2</sup>

(1.北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081; 2. 中山北京理工大学研究院, 广东 中山 528400)

**摘 要:** 分析了发展深空通信网络的需求, 结合深空通信网络的特点, 对深空通信网络协议体系和路由策略等的技术现状进行了综述, 对其中的关键技术进行了分析, 并对深空通信网络的未来发展进行了展望。

**关键词:** 深空探测; CCSDS; 协议体系架构; DTN; 路由协议

**中图分类号:** TN927+.23

**文献标识码:** A

## Development and outlook of deep space communication network protocol

AN Jian-ping<sup>1</sup>, JIN Song<sup>1</sup>, XU Jun<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>, SHAO Li-wei<sup>2</sup>

(1. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Research Institute of BIT in Zhongshan, Zhongshan 528400, China)

**Abstract:** The demand of developing deep space communication network was analyzed. Combining the characteristics of the deep space communication network, the deep space communication network architecture and transport protocols were summarized. Through introducing some key technology of the deep space communication network, the development direction of future deep space communication network is put forward and bright prospects are shown.

**Key words:** deep space exploration, CCSDS, network protocol architecture, DTN, routing protocol

### 1 引言

深空探测是在人造卫星、载人航天等领域取得重大成就的基础上, 向更广阔的太阳系及太阳系外空间发展和探索的空间活动, 对于人类认识宇宙的起源与发展、开发利用空间资源具有重要意义。随着人类对宇宙的探索愈发深入, 深空探测越来越得到世界各国的重视。

作为人类在新世纪的 3 大航空活动之一, 深空探测不仅在民用方面有着广泛的前景, 在军事、政治方面也有着举足轻重的地位, 世界各航天大国已制定了探测计划, 甚至制定了登陆火星的时间表<sup>[1]</sup>, 并展开了激烈的竞争。进入 21 世纪, 人类迎来了深空探测活动的新热潮。迄今为止, 人类已经探测了太阳系的

8 大行星和太阳、彗星、小行星以及月球, 并实现了在火星、金星、土卫六等天体上的软着陆<sup>[1]</sup>。

2007 年 1 月, 中国国防科学技术工业委员会发布了《“十一五”空间科学发展规划》, 将火星探测作为中国“十一五”期间太阳系探测领域的关键科学问题<sup>[2]</sup>。2011 年 7 月, 科技部发布的《国家“十二五”科学和技术发展规划》, 将深空探测作为大力开展的前沿技术研究内容之一<sup>[3]</sup>。随着中国火星探测任务于 2016 年 5 月正式立项<sup>[4]</sup>, 我国空间探测进入深空探测时代。以载人登月、火星探测、小行星探测为标志的未来载人深空探测任务, 对通信的可靠性、实时性、多类型业务(包括图像、语音等)调度能力及数据吞吐率等要求将大大提升, 这就对深空通信网络提出了新的需求及挑战。

收稿日期: 2016-05-09; 修回日期: 2016-06-15

基金项目: 广东省省级科技计划基金资助项目(No.2015B010101002); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(No.2015AA015701); 国防重点实验室基金资助项目(No.60421040101162104002)

**Foundation Items:** The Science Foundation of Guangdong Province(No.2015B010101002), The National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(No.2015AA015701), National Defense Key Laboratory Foundation of China(No.60421040101162104002)

深空通信网络以空间星座节点、探测器节点及地面节点构成,以满足数据可靠高效传输、网络覆盖范围大、组网灵活迅速、不受地理环境限制的发展需求,为各种空间探测任务提供通信支持服务。深空通信网具有以下特点。

1) 网络拓扑动态变化、物理链路间歇中断、延迟大。在深空通信网络中,网络节点之间距离可能大,物理链路具有大尺度特性,导致通信延迟大。此外,各中继节点、卫星及航天器都处于高速相对运动状态,导致通信链路高速动态变化以及网络拓扑的动态变化。同时,数据传输容易受到各种外界因素影响而产生失真,如宇宙射线、阴影效应、电离效应等影响,数据传输误码率较高。稳定可靠的点对点连接不复存在,链路处于间歇式通信状态。上述特性为网络设计带来了困难,要求网络从系统架构上要有相应的策略来保证网络的连通性和可靠性。

2) 网络高度异构、协议多样。深空通信网络需要整合现有的基础设施和现存空间探测通信网络互连互通,同时与现有的多种通信协议兼容。然而,空间节点业务种类繁多、不同节点的功能、运行状态、接入及传输能力等方面的较大差异,使通信协议标准自成体系,深空通信网络成为一种高度异构的网络系统。

3) 资源受限。受空间平台制约,星上通信设备通常要求体积小、重量轻、功耗低,各模块间功率资源分配受到严格的限制,同时,空间平台所使用的宇航级抗辐照器件性能远低于地面商用器件,这就要求组网过程中所涉及的协议、算法和策略的复杂度尽可能低。

4) 数据量大且需要数据共享。未来深空探测会涉及到行星表面网络中的行星车、飞行器、着陆器等多航天器的协同工作,将会有大量形式多样(科学数据、音/视频等)的信息需要在卫星和多航天器间共享,为深空通信网络的吞吐量、兼容性等带来了新的挑战。

基于深空通信网络的特点,本文将从深空通信网络的体系架构和传输控制协议、路由策略等方面,介绍深空通信组网技术发展现状,对相关关键技术研究进行分析,并对深空通信网络的未来发展前景进行展望。

## 2 深空通信网络协议体系结构

为了满足未来深空探测的需求,世界各国在继

续完善卫星及探测器系统的种类和提高空间平台系统功能的基础上,开展了深空通信网络协议体系结构研究,旨在充分利用各类空间平台资源,建立一体化的深空通信网络。

深空通信网络经过近半个世纪的发展,逐渐产生了多种网络协议体系结构,其中包括空间 IP 协议体系结构、空间数据系统咨询委员会(CCSDS, Consultative Committee for Space Data Systems)协议体系结构和容忍延迟/中断网络(DTN, delay/disruption tolerant network)协议体系结构。

### 2.1 空间 IP 协议体系结构

由于地面 Internet 取得了巨大成功,美国国家航空和宇宙航行局(NASA, National Aeronautics and Space Administration)也致力于将 TCP/IP 协议体系作用于空间通信环境的研究中。研究人员最初试图将 TCP/IP 协议族直接移植至空间探测网,如美国哥达德航天中心在 2001 年启动了 OMNI (operating mission as nodes on the Internet) 研究项目<sup>[5]</sup>。该项目旨在利用成熟的地面商用 TCP/IP 协议进行空间通信,强调尽量使用地面商用协议来解决空间组网问题,实现地面终端至空间平台全 IP 化,取得了较好的实验效果<sup>[6]</sup>。

TCP/IP 协议体系能缩减空间组网成本,同时易于升级,协议兼容性强,但也存在诸多问题。

TCP 协议是面向连接的协议,设计传输延迟很小,在数据交换之前需要先交换报文,完成“3 次握手”并建立连接,同时 TCP 协议所具有的慢启动等拥塞控制机制必须通过收端发送应答(ACK, acknowledgement)来调整发送窗口大小,动态调整信息发送速率,以避免网络阻塞,这些措施在高时延、高误码率的深空信道中会带来较大的延迟。以火星探测为例,当火地距离最近时,电磁波从地球到达火星需要 4 min,而往返时间(RTT, round trip time)为 8 min,文献[7]在数据分组长为 1 500 byte,且每分组数据均需要反馈的前提下,计算出了 TCP 在 RTT 为 8 min 时,不同分组丢失率(假设分组长为 1 500 byte)对应的吞吐量。其中,要达到百万比特速率量级的传输速率要求分组丢失率需要在  $10^{-10}$  数量级,对应的误比特率更低,不符合深空信道高时延、高误码率的特点。

针对大时延断续的空间应用环境,国际互联网工程任务组(IETF, Internet Engineering Task Force)对 TCP 协议进行了一些改进。在 RFC1072 中提出

了选择应答方式 (SNACK), 在一个 ACK 信号中包含多个分组成功接收的应答信息, 减少了 ACK 次数<sup>[8]</sup>。在 RFC1379 中提出了 T/TCP (transaction TCP), 只需要在第一个 TCP 连接时进行 3 次握手, 其后的连接过程可跳过握手过程直接传送数据信息<sup>[9]</sup>。在 RFC1323 中, 使用了窗口扩大选项和时间戳选项, 增加 TCP 的最大窗口, 使 TCP 对 RTT 的测量更加精确, 同时还针对在高速率下可能发生的序号回绕问题提供保护<sup>[10]</sup>等。

文献[11]提出了 TCP-Peach, 采用了突发启动和快速恢复算法, 但其需要在链接路径上的路由器具有优先权鉴别机制, 且会导致额外的开销。而在 TP-Planet<sup>[12]</sup>中, 提出了一种基于比特的 AIMD (additive increase and multiplicative decrease) 拥塞控制机制, 用于替代 TCP 的慢启动机制, 提升了链路资源利用率, 但需要节点支持相应的服务质量保证, 且在超长时延和时断时续链路场景下效果有限。

综上所述, TCP/IP 协议的流量及拥塞控制等传输控制机制在延迟较低, 误码率较低的空间链路得到了成功应用, 但在延迟大、网络拓扑快速变化、链路时断时续、信道误码率高的深空环境中并不适用。而目前提出的诸多改进的 TCP 方案虽然一定程度缓解了由深空环境高延迟、高误码率及链路时断时续带来的数据传输问题, 但其只考虑了端到端的

情况, 并未考虑整个网络的行为特性, 缺乏针对整体网络的优化。

## 2.2 CCSDS 协议体系结构

空间数据系统咨询委员会成立于 1982 年, 旨在制定通用的空间数据及信息系统标准。经过多年发展, CCSDS 协议体系已较为成熟, 整体协议栈功能较为完善, 具有较为灵活的协议配置能力。在我国的航天工程中, 神舟飞船、风云卫星和嫦娥探月卫星等均采用了 CCSDS 标准协议<sup>[13]</sup>。由于 CCSDS 协议的标准性, 其在一定程度上解决了不同国家的航天器的互连互通问题。CCSDS 标准网络体系架构如图 1 所示。

CCSDS 协议体系包括物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层。其中, 每一层又包括若干子层及多种可供组合的协议。

对不同的通信场景, CCSDS 定义了 4 种数据链路层协议: 用于遥测的 TM 协议<sup>[14]</sup>、用于遥控的 TC<sup>[15]</sup> 协议、高级在轨系统 AOS 协议<sup>[16]</sup>和近距离 Proximity-1 通信协议<sup>[17]</sup>。而针对网络层, 针对不同应用, CCSDS 建议采用空间分组协议 (SPP)<sup>[18]</sup>、SCPS-NP 或成熟的 TCP/IP 协议族<sup>[19]</sup>。在传输层及应用层, 则可选用 SCPS-SP<sup>[20]</sup>、CCSDS 文件传输协议等协议。

空间通信协议规范(SCPS, space communication protocol specification)于 1999 年提出, 其针对空间

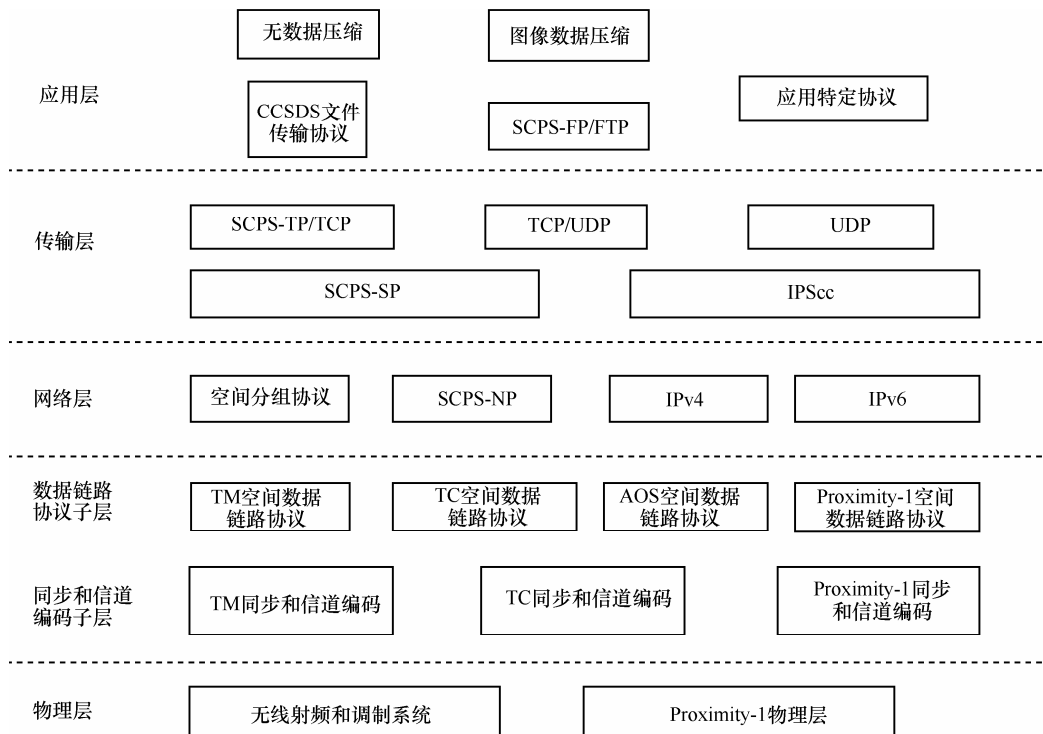


图 1 CCSDS 标准网络体系架构

数据传输特性，以地面互联网为基础，修改并扩展了 TCP/IP 协议族，制定了空间通信协议规范—网络协议（SCPS-NP）、空间通信协议规范—安全协议（SCPS-SP）、空间通信协议规范—传输协议（SCPS-TP）及空间通信协议规范—文件协议（SCPS-FP）<sup>[21]</sup>。其中，SCPS-TP 是 SCPS 协议的必备协议，而其他 3 个协议可用 TCP/IP 协议族中相关协议进行替换<sup>[22]</sup>。

针对空间通信场景，CCSDS 对 TCP 协议做出修改和扩展，提出 SCPS-TP 协议<sup>[23]</sup>，增加了对事务 TCP 的支持，免除了 3 次握手机制<sup>[9]</sup>，扩大了窗口大小，改进 RTT 估计机制和防止序号回绕<sup>[10]</sup>，增加了选择否定应答（SNACK, selective negative acknowledgement）反馈方式等，扩展选项支持基于速率的流量控制机制，使其适应链路的高时延和不对称等特性<sup>[24]</sup>。

传统 TCP 协议属于端到端协议，在中间节点不存在 TCP 协议层，导致网络无法迅速感知发生在中间节点的分组丢失现象，造成不必要的时延。其派生的 SCPS-TP 也不具有中间节点感知属性，对于空间多跳网络，SCPS-TP 将会造成链路利用率下降<sup>[25-27]</sup>。

针对地面 Internet 网络中 FTP 协议无法多连接传输、不支持传输暂停和续传、难以处理错序数据分组等问题，以及 TCP 协议“握手机制”在空间数据通信中效率较低，空间数据咨询委员提出了 CCSDS 文件传输协议(CFDP, CCSDS file delivery protocol)<sup>[28]</sup>。

CFDP 协议可以与传输层协议协同工作，也可直接作为传输层使用。CFDP 协议的典型特点是采用肯定应答（ACK）和否定应答（NAK）混合的应答机制。ACK 信息只用于控制数据分组的交互，仅在文件尾部传输或者在传输过程结束时出现。NAK 信息则在接收协议数据单元发生错误或者丢失时，由接收端反馈发出，其定义了 4 种 NAK 模式：立即 NAK、异步 NAK、触发 NAK 和延时 NAK<sup>[28]</sup>。CFDP 协议的反馈机制效率高于 TCP/IP 协议，但为了确保可靠传输，仍必须将少量确认信息反馈多次，当传输距离较大时，信息交互时间较长，降低了的链路吞吐量。

### 2.3 行星际互联网和 DTN 协议体系结构

1998 年，美国喷气推进实验室(JPL)开始着手进行行星际互联网(IPN, interplanetary network)的研究，其基本元素包括骨干网、外部网及行星网<sup>[29]</sup>，其基本设想是在距离较近的网络节点之间部署基

于 TCP/IP 的互联网络并同时建立适用于长延迟、高误码率信道的 IPN 空间骨干网络，用于连接这些外部网及行星网，创建低延时与高延时环境的中继网关<sup>[30]</sup>。

通过研究发现，在通信时延高、信道误码率大的深空空间环境中，数据传输只能通过逐跳（hop-by-hop）传输的形式。2002 年，Intel 公司伯克利研究实验室 Fall 等科学家首次提出了 DTN 的概念<sup>[31,32]</sup>，并于 2007 年公布了第一份体系结构文档——RFC4838<sup>[33]</sup>，针对 DTN 网络的发展目标，应用背景和运行机制等给出了系统的说明，其网络协议体系结构如图 2 所示。

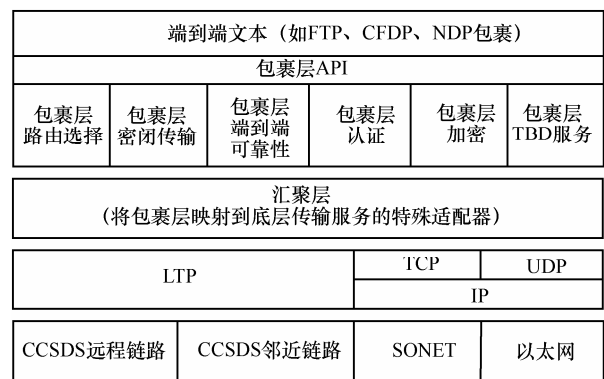


图 2 DTN 网络协议体系结构

DTN 网络的核心是 Bundle 层<sup>[34]</sup>，它是一种面向消息的端到端的覆盖层，位于传输层和应用层之间，形成一个网络覆盖层。为了互操作性，Bundle 层的命名采用统一的资源识别符，可用同样的命名语法来封装多种命名寻址模式。Bundle 层提供了一种近似于网关（gateway）的功能，兼容底层各个协议，为它们提供了一定的互操作性。

Bundle 层分为 3 个子层，其中，应用代理子层的功能是为 Bundle 层与应用层提供接口服务，Bundle 层协议运行在协议代理子层，汇聚层则负责 Bundle 层协议与下层协议的协议转换及接口处理工作，使 Bundle 层能够独立于下层协议之上<sup>[34]</sup>。

DTN 网络协议是以 Bundle 协议为核心构建的，且兼容 CCSDS 及 TCP/IP 协议体系，包括以下协议。

#### 1) Bundle 协议

Bundle 协议<sup>[35]</sup>由 DTNRG 提出，是一种覆盖层协议，运行于 Bundle 层，主要功能包括：基于保管方式的重传机制、处理链路时断时续的情况、可利用预先设定、预测和随机的链路连接、覆盖层端绑定网络终端标识符并形成网络地址<sup>[36]</sup>。

Bundle 协议具有 2 大特性：存储转发的消息交换和保管传递协议。其协议数据单元被称为 Bundle，一个 Bundle 至少包含 2 个 Bundle 块，即一个主 Bundle 块和一个 Bundle 承载块<sup>[35]</sup>。主块包含了一些 Bundle 路由的基本信息，应用数据单元被置于 Bundle 承载块中。整个 Bundle 沿着一个可以到达目的地的路径，从一个节点上的存储单元转发至另一个节点上的存储单元中，直至到达目的节点。节点是否接收消息并进行存储取决于该节点的当前资源、路由情况、消息的优先级、生存时间及网络安全情况等因素。在不存在端到端直达路径的情况下，若一个中继网络节点选择保管一个 Bundle，它就对这个 Bundle 负有全部的责任，从而将可靠传输的责任进行逐跳转移，改善了端到端的可靠性<sup>[34]</sup>。

#### 2) LTP 协议

LTP (licklider transmission protocol) 协议<sup>[37]</sup>可作为一种汇聚层或者传输层协议，其设计初衷是为在高延迟、频繁中断链路中传输的数据提供可靠性保障，其核心设计思路继承于 CFDP 协议，典型应用是解决深空探测器和地面站之间一跳式长距离通信的问题<sup>[38]</sup>。该协议可完美支持 Bundle 层协议，可配置并搭建 Bundle/LTP 的协议结构。

LTP 是一种点到点协议，它采用选择性自动重传机制以恢复丢失的数据，并未考虑路由或者拥塞控制等问题。

#### 3) Saratoga 协议

Saratoga 协议<sup>[39]</sup>最初用于 LEO 卫星星座的遥感图像传递，是一种简洁的轻量级内容分发协议，下层通常采用 UDP 方式<sup>[40]</sup>。为了充分利用有限的链路连通时间，Saratoga 协议在共享链路上停止使用标准的拥塞控制机制，同时采用简单的自动重发请求 (ARQ, automatic repeat request) 机制实现分组丢失控制。其支持节点间断续传输，适用于高延迟且链路时断时续的非对称网络<sup>[41]</sup>。

由于采用了 ARQ 机制，Saratoga 协议在数据传播时延较大时，接收端的应用层将会等待很长时间才能收到数据，特别是在链路分组丢失率较高的情况下，数据将会多次重传，协议表现较差。

#### 4) DS-TP

DS-TP (data space transfer protocol) 协议<sup>[42]</sup>是一种适用于深空环境的文件传输协议，其继承了基于传输速率变化的协议处理方式及 SNACK，同时针对高误码率环境下的文件传输问题，在重传机制

上进行了改进。

DS-TP 协议采用了双自动重传技术。在高误码率环境下，采用这种机制可以使丢失数据分组在一个固定的时延内成功接收。但由于其在整个传输数据分组中加入了一定的冗余，使其在带宽利用率方面效率不高。

#### 5) DTTP 协议

针对火星任务设计的 DTTP (delay-tolerant transport protocol for space Internet work) 协议参考了 DTN 网络架构中 Bundle 协议的存储转发与保管传输制定保证可靠性的传输机制，同时引入了并行数据传输理念，将数据分组进行网络编码，并划分成细小的数据块并通过不同信道传输，提升了传输可靠性，降低了数据分组重传概率，在深空环境中协议性能较好<sup>[43]</sup>。

结合以上协议，国际上一些研究机构已经针对 DTN 网络进行了验证测试实验，其中，最具代表性的有 UK-DMC 卫星、星际覆盖网络 ION、深度撞击网络实验以及 DTN2。

萨里卫星技术有限公司制造的灾害监视星座 (UK-DMC) 卫星是第一次使用 Bundle 层协议来传输数据的卫星网络。卫星拍摄的高清图像被分为一个个 Bundle，分 3 跳逐跳传到地面，最终到达接收节点<sup>[44]</sup>。最新的 DMC 卫星下行链路最快可达 80 Mbit/s，并且使用 Sataroga 协议从卫星上下载数据，使近地空间网络与地面网络得到了互连互通。

JPL 开发了一种新型 DTN 体系结构的实现平台，称为行星际覆盖网络 (ION, interplanetary overlay network)<sup>[45]</sup>。ION 专用于深空环境，具有代码开源化、结构模块化等特点，采用了 Bundle 层协议，同时结合 CFDP 和 LTP 协议，保证网络的顺利运行。基于此，2008 年 NASA 实施了 DTN 网络架构的第一次深空飞行验证，称为深度撞击网络 (DINET, deep impact network)<sup>[40]</sup>。项目组向距地  $3.2 \times 10^7$  km 的空间区域发射实验探测器，地面操作中心产生和接收实验通信数据流、遥测遥控指令及探测器控制信息，在地面数据库中实时存储空间节点飞行器的相关测试信息，以监视网络的操作状态和性能（如包裹吞吐量、传输时延等）。在实验中，专家成功向空间探测器节点传输了 12 张高清图像，初步验证了 DTN 网络的实用性<sup>[45]</sup>。

DTN2 由加州大学伯克利开发，其采用了资源受限的嵌入式方式，以模拟空间平台，同时内嵌了

DTN 协议架构中各个层的模块,并提供了标准的应用程序界面(API, application program interface),很好地支持了实验测试、扩展功能及实用部署<sup>[46]</sup>。DTN2 的核心组件是 Bundle 路由模块,它收集详细的网络链路状态信息(如链路传播时延、信道中断情况等)来计算路由,然后将计算好的最优路由信息转发给 Bundle 转发模块,做到路由平面与转发平面分离,提高了系统的可扩展性<sup>[47]</sup>。

## 2.4 小结

综合分析以上深空通信网络体系结构及传输协议的研究成果及技术现状,得出以下特点。

1) 受限于 TCP 的拥塞控制及反馈重传机制,空间 TCP/IP 协议体系适用于延迟相对较低,拓扑变化较小,链路质量相对稳定的空间网络,而对节点距离较大的深空环境则不适用。

2) 尽管 CCSDS 协议体系得到了成功应用,但针对不同场景,必须人工切换不同的协议,协议间不能进行自适应切换,各协议间存在兼容问题,同时其设计初衷是为了星地点对点通信,缺乏对整体网络的优化。

3) DTN 协议体系与前 2 种协议体系相比,不假设存在端到端直射路径,数据分组采用逐跳和存储转发方式进行传输,提升了数据传输的可靠性;摒弃了 TCP 协议的建链方式及拥塞控制机制,采取了新的分组丢失重传控制机制,大幅降低了数据传输所需重传频率,使 DTN 协议体系下的传输协议更适合于延迟很高、链路通断频繁、链路质量变化较快的深空通信网络;引入了 Bundle 层作为处理不同类型网络协议的覆盖层,一定程度上解决了不同协议间的兼容问题。

综上所述,3 种协议体系结构并非单纯的技术演进,而是互相依存的,而 DTN 协议体系的思想更适合深空环境,必将成为深空通信网络的主流协议体系。未来深空通信网络应借鉴其他 2 种协议体系结构的优点,在 DTN 网络体系结构基础上,针对不同空间探测任务,进一步研究新型传输协议及拥塞控制机制等关键技术,提升网络的有效性及可靠性。

## 3 深空通信网络路由协议

深空通信网络的路由算法最早的研究均借鉴于地面 Internet 网络,但是由于深空通信网络的拓扑结构与地面网络有着本质不同,使深空通信网络存在一些独特的问题:1) 空间节点间相对运动,

网络拓扑实时变化;2) 网络中的负载变化,造成了不均匀的流量分布;3) 空间平台节点资源受限,星上设备信号处理能力较低,路由算法复杂度不能过高;4) 空间节点间信号传播时延远大于地面 Internet 网络,同时存在链路时断时续,信道误码率较大等特征。结合以上特点,研究人员提出了多种解决方案,可将相关路由算法分为以下 4 类<sup>[48]</sup>。

### 3.1 基于扩散方式的路由

Vahdat 和 Becker 于 2000 年提出基于泛洪转发机制的传染路由算法(epidemic routing)<sup>[49]</sup>,其核心思想是网络中的节点接收到数据分组后,尽可能将其转发至所有能够接触到的其他节点。网络中的所有节点均需要保存并维护一张摘要矢量信息表以记录本地缓存中数据分组信息。当两节点可见并建立连接后,交换各自的摘要矢量信息表,并向对方节点请求本节点没有的数据分组,之后对摘要矢量信息表完成更新,以此类推。当网络链路带宽及节点缓存资源充足时,传染路由协议能保持很高的信息投递率和较低的传输时延<sup>[50]</sup>。

由于传染路由协议采用泛洪方式进行路由,没有利用网络先验知识,转发数据分组时,具有极大的盲目性,网络中传输并缓存着大量重复分组,极易造成网络拥塞及带宽和存储资源不足。

为了减少网络资源的消耗及浪费,文献[51]提出了喷射等待(SW, spray and wait)路由算法,旨在限制重复传送的副本数量以优化传染路由的效率,节省了网络节点的缓存资源,增加了数据传输时延。文献[52]则分析了节点能量对于传染路由选择的影响,研究了 DTN 网络中各节点能量与网络整体服务质量的关系,提出最佳能量感知的传染路由策略。

### 3.2 基于链路代价的路由

鉴于传染路由协议的低效率及盲目性,文献[53]从节点能够获取的网络先验知识数量出发,相继提出了最先接触(FC, first contact)算法、最小期望时延(MED, minimum expected delay)算法、最早投递(ED, earliest delivery)算法、基于本地缓存队列的最早投递(EDLQ, earliest delivery with local queue)算法、基于全局缓存队列的最早投递(EDAQ, earliest delivery with all queue)算法和线性规划(LP, linear program)算法等的设计思想,其详细信息及所需先验知识关系如图 3 所示。这些算法为基于链路代价的路由协议设计提供了思路 and 方向。

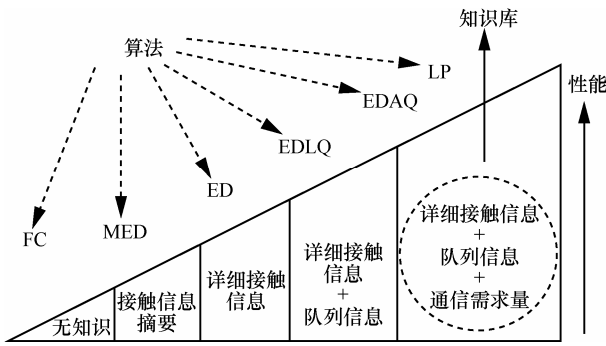


图 3 算法所需先验知识与算法预期性能关系

基于链路代价的路由协议要求在数据分组传递过程中，中继节点首先需要对某一种或多种网络先验信息进行统计，并依照相应准则计算出转发链路代价函数，并以该结果决定数据直接转发或继续存储在节点中直至找到合适的链路。

通过考察两节点间的链路通断规律，文献[48]介绍了以链路的最小评估期望时延（MEED, minimum estimated expected delay）作为路由转发的代价函数，在链路最小评估期望时延的计算时，节点不需要全网络的先验知识，仅根据本地信息进行计算，同时在中间节点处进行路由重算，以保证中间节点对机会链路的利用率。

文献[54]将以不同节点之间的分组转发概率为每条链路的代价值，提出了 P<sub>Ro</sub>PHET 路由协议，该算法基于节点之间的历史相遇信息，网络中全部节点需要统计并保存一段时间内所有相遇节点的历史信息，并以该信息为判据，制定相应的路由策略。实验结果表明，在网络资源受限的前提下，其数据分组投递成功率比传染路由高约 40%<sup>[54]</sup>。文献[55]在 P<sub>Ro</sub>PHET 路由协议的基础上，针对节点短时间内多次可见引发的链路代价值增长过快等情况，进一步优化了路由策略，提高了 P<sub>Ro</sub>PHET 路由协议在突发状况下的性能。文献[56]提出 MaxProp 协议，该协议利用最短路径算法评估消息传输的概率成本并对消息进行优先级划分，节点优先传输队列中优先级高的消息，网络发生拥塞时则删除优先级低的消息。

文献[57]对传染路由算法、喷射等待路由算法、P<sub>Ro</sub>PHET 算法及 MaxProp 算法进行了比较，对 4 种算法的数据分组传输成功率（packet delivery ratio）、传输代价（delivery cost）及平均数据分组传输时延（average packet delay）进行了仿真实验，结果显示 MaxProp 算法具有更好的传输成功率及平均数据分组传输时延，而喷射等待路由算法和

P<sub>Ro</sub>PHET 算法的传输代价更小。

### 3.3 基于移动模型的路由

实际深空通信网络中的节点，其运动轨迹均呈现一定的规律性，而并非完全随机的运动。因此，应该在路由协议设计中加入对节点移动模型的考虑。

接触图路由算法（CGR, contact graph routing）<sup>[58,59]</sup>是一种典型的基于移动模型的路由协议，由 NASA 喷气动力实验室的 Burleigh 等提出。该算法最初是用于 IPN 网络以克服空间信道延时大、链路时断时续的问题。由于空间探测器及卫星的相对位置已知，节点间的链路通断时间等信息可以事先预知，可以比较准确地对节点的运动轨迹进行建模，使网络中节点的移动模型信息可以得到充分利用。图 4 为 CGR 路由算法的整个处理流程。

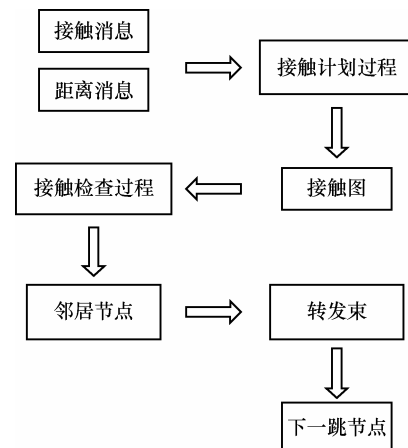


图 4 CGR 算法处理流程

CGR 需要根据接触计划（contact plan）来构造整个网络的接触图，该计划中包含了接触消息和距离消息，并在网络生成时提前分发至所有网络节点。接触计划随着时间推移会不断更新，增加新的接触机会并删除旧的接触机会。在转发信息时，节点利用连接检查过程（CRP, contact review procedure）算法，基于该节点当前的接触图，依据预先设定的标准（跳数最少、最低时延及最长可见时间等）选择相匹配的最优相邻节点完成信息转发。在下一跳节点，CGR 会执行相同的处理过程，直至到达目的节点<sup>[60]</sup>。

文献[61]针对空间环境，对 CGR 路由进行了改进，分析了 CGR-ETO（CGR with earliest transmission opportunity）和超额预订管理 2 种机制的性能。CGR-ETO 通过利用各节点中存储队列的信息，旨在增加预测 Bundle 传输时间的准确性，优化路由选

择。超额预订管理机制主动处理 Bundle 超额申请的问题,旨在保证高优先级 Bundle 的顺利传输。文献[62]将 CGR 算法用于近地卫星组网,并通过 OPNET 工具进行了性能仿真,结果显示,CGR 算法具有较高的资源利用率。

### 3.4 基于编码的路由

深空信道条件恶劣,数据传输误码率较高。针对这个问题,有研究人员将网络编码引入路由协议并证明网络编码可提高网络利用率<sup>[53]</sup>。

基于编码的路由协议需要在源节点数据进行分块及编码操作,在目的节点进行数据重组和译码。与上述路由算法相比,在网络负载相同的前提下,具有较低的传输延迟,但编解码操作会引入较高的计算复杂度,增加编码时延。目前,基于编码的路由协议主要采用纠错码及网络编码<sup>[63]</sup>。

Wang 等<sup>[64]</sup>提出了一种基于纠错码的路由算法,能够保证在网络连接最差情况下的性能,但是在链路状态较好时,存在不能充分利用接触机会传输数据的问题,性能不具备优势。

文献[65]在 PROPHET 路由算法中引入网络编码的思想并进行了仿真,结果表明,采用网络编码后,数据投递率的平均值得到了大幅度提升。

针对网络编码对信息传输时延的影响,文献[66]分析了网络编码之中端对端的统计时延性能。文献[67]研究了会话间网络编码的最小解码延迟问题。文献[68]考虑了带反馈的删除信道模型,并提出了信息丢失与解码时延的延迟最小化问题,证明了该问题是 NP 困难问题,并提出了启发式的在线算法。文献[69]分别从已知信道信息和未知信道信息 2 种情况分析了网络编码对下行链路文件传输延迟的改善情况。

### 3.5 小结

综合以上分析,基于扩散方式的路由算法拥有较好的信息投递率和较低的传输时延,但是需要占用大量的网络带宽及存储资源,资源利用率低。基于链路代价评估的路由结合网络的先验知识,大幅度提升了网络资源利用率,在网络资源受限时,具有更好的数据投递成功率和延迟,但是要求网络中节点具有较强大的计算能力。基于移动模型的路由将节点运动模型加入算法中,更适用于节点运动模型可准确获得情况。基于编码的路由协议通过网络编码方式提高了系统的吞吐量,但编解码算法会引入冗余信息并具有较高的计算复杂度,增加编码时

延,消耗更多能量。未来空间探测任务具有不同场景及不同网络拓扑,很难找到一种通用的路由协议,必须根据特定的网络拓扑结构及节点资源情况设计与之相匹配的路由策略。

## 4 深空通信网络的技术展望

由于空间探测任务种类繁多,各任务对网络性能的需求也不尽相同,再加上现有空间应用设备多采用专一设备,兼容性及其可扩展性较差,造成多种网络体系结构并存,多种网络协议交织,网络的管理复杂且成本高昂<sup>[70]</sup>。针对以上问题,本文认为需要引入新的组网思路和技术来构建深空通信网,以下举例说明。

### 1) 软件定义网络架构

软件定义网络(SDN, software defined networking)是一种新型的网络架构<sup>[71]</sup>,它将网络的控制平面与数据转发平面进行分离,从而简化了网络设备的结构,并通过统一、开放的应用程序接口,将网络设备、资源进行抽象、虚拟化表达,从而实现可编程化控制底层硬件,实现对网络资源灵活的按需调配<sup>[72]</sup>。

在 SDN 中,定义了网络操作系统(network operating system)<sup>[73]</sup>的概念,其负责对全网络进行适配及管理,可以针对采用不同的体系结构、不同协议的网络进行可编程化的配置与管理。这种集中式的管理方式从根本上实现了网络的融合,降低了网络管理和维护开销,提高了网络性能,并且具有良好的可扩展性,可以通过模块的升级来实现对未来新协议的兼容。SDN 网络架构如图 5 所示。

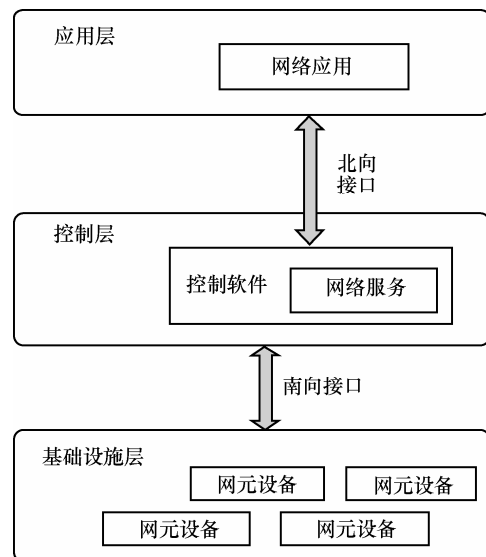


图 5 SDN 网络架构

## 2) 内容中心网络

传统互联网“以主机为中心”的思想在深空通信网络中存在着一些问题<sup>[74]</sup>：① 网络中相同的内容有可能存储在多个节点，如果用户指定的节点距离较远，用户将经历很大的服务时延，如果用户指定的节点负载较重，则用户的内容请求可能无法获得响应；② 不易实现内容共享，具体来说，当多个用户请求同一内容对象时，需要为每个用户与拥有该内容对象的节点间建立端到端连接，造成了在多条端到端通信所经过的相同链路上可能反复传输相同内容对象。这些问题在链路资源宝贵，链路状态时断时续，传播时延很长的深空通信网络中更为突出。

作为一种重要的未来网络架构，内容中心网络 (CCN, content-centric networking) 用解决传统互联网“以主机为中心”的通信模式与快速增长的内容递送需求之间的矛盾<sup>[75]</sup>。用户更关心的是内容本身，而非从哪个节点获取。为此，CCN 摒弃了“主机地址”，而是赋予内容对象一个唯一的标识，颠覆了传统网络架构。用户直接通过使用内容 ID 请求所需求的数据内容。网络节点在识别内容 ID 后，根据内容所处节点位置及用户位置等信息，找到最优的内容提供者，并根据内容 ID 而不是 IP 地址对所获取内容进行路由，避免重复信息在网络中传播<sup>[74]</sup>。同时，CCN 通过在每个节点设置缓存，节省了大量的传输带宽资源。目前已有一些 CCN 架构被提出，其中，最具代表性的 3 种为 DONA<sup>[76]</sup> (data-oriented network architecture)、NDN<sup>[77]</sup> (named data networking) 和 PURSUIT<sup>[78]</sup> (publish subscribe internet technology)。

## 3) 结合喷泉编码的多路径并行路由

深空通信网络拓扑动态变化，链路间歇中断，这使空间节点必须高效利用有限的链路持续时间。而又由于空间节点可能同时与多个其他空间节点可见并建立连接，所以可通过引入多路径并行传输技术，提高链路利用率，提升网络吞吐量。

早在 1999 年，互联网中出现了适用于多路由传输的 OSPF-OMP<sup>[79]</sup> 协议。2001 年，支持 ECMP (equal-cost multipath routing) 多径路由的 MPLS (multiple protocol label switching) 协议<sup>[80]</sup> 被公布。Byers<sup>[81]</sup> 从速度和冗余等方面对基于 Tornado 码的多源并行下载性能进行了分析，提出了一种基于 Tornado 码、在广播和多播情况下传输可靠数据的

喷泉编码方案<sup>[82]</sup>。Li 等<sup>[83,84]</sup> 提出了一种基于渗流的并行路由架构。这些研究展示了喷泉编码与并行路由相结合对性能的提升，描述了喷泉码和并行路由的联合机制。

除以上 3 种技术之外，全新互联网设计 (clean state design for the Internet)、全球网络创新环境 (GENI, global environment for network innovations) 等研究项目的思路也可为未来深空通信网络提供启发、借鉴与参考<sup>[85]</sup>。总之，未来深空通信网络需结合 DTN 与新型互联网技术，针对多种探测任务需求，构建一体化深空通信网络。

## 5 结束语

本文结合深空通信网络的特点，综述了深空通信网络技术的发展，包含网络协议体系架构和路由策略，分析了不同技术的优缺点，并结合对深空探测任务需求，对深空通信网络技术未来发展方向进行了展望。

## 参考文献:

- [1] 吴伟仁, 刘晓川. 国外深空探测的发展研究[J]. 中国航天, 2004, (1): 26-30.  
WU W R, LIU X C. A survey of deep space exploration activities abroad[J]. Aerospace China, 2004, (1): 26-30.
- [2] 陈全育. 国家发布《“十一五”空间科学发展规划》[J]. 中国航天, 2007, (5): 17.  
CHEN Q Y. National post “‘Eleventh Five-Year’ space science development plan” [J]. Aerospace China, 2007, (5): 17.
- [3] 国家“十二五”科学和技术发展规划[N]. 科技日报, 2011-07-14(005).  
National “Twelve Five-Year” scientific and technological development[N]. Science and Technology Daily, 2011-07-14(005).
- [4] 黄康. 火星探测任务立项 2020 年前后发射探测器[N]. 工人日报, 2016-04-23(002).  
HUANG K. Mars mission project after 2020 launch detector[N]. Worker Daily, 2016-04-23(002).
- [5] 周建国. 基于 DTN 的空间综合信息网络关键技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.  
ZHOU J G. Research on key technologies of spatial information network based on DTN[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.
- [6] 杨晓剑. IP 协议与 CCSDS 协议的转换[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.  
YANG X J. The conversion between IP protocol and CCSDS protocol[D]. Nanjing: Nanjing Institute of Technology, 2006.
- [7] BURLEIGH S, RAMADAS M, FARRELL S. Licklider transmission protocol-motivation [J]. Optics Letters, 2006, 29(10): 1051-3.
- [8] EGGERT L. Moving the undeployed TCP extensions RFC 1072, RFC 1106, RFC 1110, RFC 1145, RFC 1146, RFC 1379, RFC 1644, and RFC 1693 to historic status[M]. Heise Zeitschriften Verlag, 2011.

- [9] BRADEN R. T/TCP—TCP extensions for transactions functional specification [M]. RFC 1644. 1994.
- [10] JACOBSON V, BRADEN R, BORMAN D. TCP extensions for high performance. RFC1323, proposed standard[S]. Request for Comments Network Working Group IETF, 1992.
- [11] AKYILDIZ I F, MORABITO G, PALAZZO S. TCP-peach: a new congestion control scheme for satellite IP networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2001, 9(3):307-321.
- [12] AKAN O B, FANG J, AKYILDIZ I F. TP-planet: a reliable transport protocol for interplanetary Internet[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(2):348-361.
- [13] 孙辉先, 陈小敏, 白云飞, 等. CCSDS 高级在轨系统及在我国航天器中的应用[J]. 航天器工程, 2003, (1):12-18.  
SUN H X, CHEN X M, BAI Y F, et al. CCSDS advanced orbiting systems and application in China space craft[J]. Spacecraft Engineering, 2003, (1):12-18.
- [14] CCSDS. TM space data link protocol [S]. CCSDS 1320-B-1. 2003.
- [15] CCSDS. TC space data link protocol [S]. CCSDS 2320-B-2. 2010.
- [16] CCSDS. AOS space data link protocol [S]. CCSDS 7320-B-2. 2006.
- [17] CCSDS. Proximity-1 space link protocol [S]. CCSDS 2110-B-2. 2003.
- [18] CCSDS. Space packet protocol [S]. CCSDS 1330-B-1. 2003.
- [19] FALL K R, STEVENS W R. TCP/IP illustrated, volume 1: the protocols [M]. Addison-Wesley, 2011.
- [20] Space communications protocol specification(SCPS)-security protocol(SCPS-SP), recommendation for space data system standards[S]. CCSDS 713.5-B-1. 2006.
- [21] 周有喜. 深空通信中的若干关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.  
ZHOU Y X. Some key deep space communication technology[D]. Xi'an: Xidian University, 2007.
- [22] 廖勇. 统一信息网空间数据通信传输协议研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.  
LIAO Y. Studies of space data communication transport protocol in unified information[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [23] CCSDS. Space communications protocol specification (SCPS)—transport protocol (SCPS-TP) [M]. CCSDS 7140-B-2. 2006.
- [24] FOX R. TCP big window and NAK options [M]. RFC 1106. 1989.
- [25] WANG R, HORAN S. Protocol testing of SCPS-TP over NASA's ACTS asymmetric links[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(2): 790-798.
- [26] DURST R, FEIGHERY P, TRAVIS E. User's manual for the SCPS transport protocol[M]. WN 97W0000018, McLean, Virginia. 1997.
- [27] KOTA S L. Broadband satellite communications for Internet access [M]. Springer, 2004.
- [28] CCSDS. CCSDS file delivery protocol (CFDP) [M]. CCSDS 7270-B-4. 2007.
- [29] CERF V, BURLEIGH S, HOOKE A, et al. Interplanetary Internet (IPN): architectural definition[S]. 2001.
- [30] AKYILDIZ I F, AKAN Ö B, CHEN C, et al. Interplanetary Internet: state-of-the-art and research challenges [J]. Computer Networks, 2003, 43(2): 75-112.
- [31] BURLEIGH S, HOOKE A, TORGERSON L, et al. Delay-tolerant networking: an approach to interplanetary Internet [J]. Communications Magazine, IEEE, 2003, 41(6): 128-136.
- [32] FALL K. A delay-tolerant network architecture for challenged internets [C]//ACM SIGCOMM 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. Karlsruhe, Germany, c2003: 27-34.
- [33] CERF V, BURLEIGH S, HOOKE A, et al. Delay-tolerant networking architecture[M]//Heise Zeitschriften Verlag, 2007.
- [34] 卞正国. 深空信道中束协议 (BP) 的性能分析[D]. 苏州: 苏州大学, 2015.  
BIAN Z G. Performance modeling of bundle protocol(BP) over deep-space channels[D]. Suzhou: Soochow University, 2015.
- [35] SCOTT K L, BURLEIGH S. Bundle protocol specification[S]. RFC 5050. 2007.
- [36] 叶建设, 宋世杰, 沈荣骏. 深空通信 DTN 应用研究[J]. 宇航学报, 2010, (4):941-949.  
YE J S, SONG S J, SHEN R J. Deep space communications DTN research[J]. Journal of Astronautics, 2010, (4):941-949.
- [37] RAMADAS M, BURLEIGH S, FARRELL S. Licklider transmission protocol specification[S]. RFC 5326. IRTF DTN Research Group. 2008.
- [38] 王堃, 于悦, 张玉华, 等. DTN 网络中的基于 Bundle 协议的数据分组发送算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, (S1): 285-289.  
WANG K, YU Y, ZHANG Y H, et al. Packet sending algorithm based on bundle protocol in DTN networks[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2012, (S1):285-289.
- [39] SMITH C, EDDY W M, IVANCIC W, et al. Saratoga: a scalable data transfer protocol[J/OL]. <http://mirror.physik-pool.tu-berlin.de>.
- [40] SARKAR M, SHUKLA K K, DASGUPTA K S. A survey of transport protocols for deep space communication networks[J]. International Journal of Computer Applications, 2011(31):25-32.
- [41] WOOD L, EDDY W M, IVANCIC W, et al. Saratoga: a delay-tolerant networking convergence layer with efficient link utilization[C]//Satellite and Space Communications, 2007 IWSSC'07 International Workshop. c2007: 168-172.
- [42] PSARAS I, PAPASTERGIOU G, TSAOUSSIDIS V, et al. DS-TP: deep-space transport protocol[C]//Aerospace Conference. c2007: 168-172.
- [43] SAMARAS C V, TSAOUSSIDIS V. Design of delay-tolerant transport protocol (DTTP) and its evaluation for Mars [J]. Acta Astronautica, 2010, 67(7): 863-880.
- [44] 马柯. 延迟容忍网络关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.  
MA K. Research on key technologies in delay tolerant network[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011.
- [45] 王静. 空间通信与星际组网技术的发展[J]. 计算机与网络, 2014, (12): 53-57.  
WANG J. Evolution of space communication and interplanetary networking technology[D]. Computer&Network, 2014, (12): 53-57.
- [46] DTN Research Group. Dtn2Documentation[EB/OL]. <http://www.dtnrg.org/wiki/Dtn2Documentation>.
- [47] 王晓琳. DTN 协议在 Android 移动终端的实现[D]. 天津: 天津大学, 2012.  
WANG X L. The implementation of DTN protocol in Android mobile

- terminal[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [48] 白云飞. 基于链路代价综合评估和网络编码的延迟容忍网络路由优化研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2012.  
BAI Y F. Research on delay tolerant network routing optimization based on synthetic estimation of contact metrics and network coding[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012.
- [49] VAHDAT A, BECKER D. Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks[D]/Master Thesis, 2000.
- [50] 张俊宝. 延迟容忍网络路由协议研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.  
ZHANG J B. Study on routing protocols in delay tolerant networks[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.
- [51] SPYROPOULOS T, PSOUNIS K, RAGHAVENDRA C S. Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks[C]/ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking. ACM, c2005: 252-259.
- [52] KHOUZANI M, ESHGHI S, SARKAR S, et al. Optimal energy-aware epidemic routing in DTNs[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60(6):1554-1569.
- [53] JAIN S. Routing in a delay tolerant network[C]/ACM SIGCOM. c2004: 145-158.
- [54] LINDGREN A, DORIA A, SCHELÉN O. Probabilistic routing in intermittently connected networks[J]. ACM Sigmobile Mobile Computing & Communications Review, 2003, 7(3): 19-20.
- [55] LEE H J, NAM J C, SEO W K, et al. Enhanced PROPHET routing protocol that considers contact duration in DTNs[C]/International Conference on Information Networking. IEEE, c2015: 523-524.
- [56] BURGESS J, GALLAGHER B, JENSEN D, et al. MaxProp: routing for vehicle-based disruption-tolerant networks[J]. Proceedings-IEEE INFOCOM, 2006, 6:1-11.
- [57] ABDELKADER T, NAIK K, NAYAK A, et al. A performance comparison of delay-tolerant network routing protocols[J]. IEEE Network, 2016, 30(2):46-53.
- [58] BEZIRGIANNIDIS N, CAINI C, PADALINO M D D, et al. Contact graph routing enhancements for delay tolerant space communications[C]/Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the, Signal Processing for Space Communications Workshop. c2014: 17-23.
- [59] ARANITI G, BEZIRGIANNIDIS N, BIRRANE E, et al. Contact graph routing in DTN space networks: overview, enhancements and performance[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(3): 38-46.
- [60] 杨锋, 虞万荣, 刘波, 等. 基于接触关系的空间 DTN 网络容量约束路由算法[C]/微处理器技术论坛. c2012.  
YANG F, YU W R, LIU B, et al. Capacity restricted foremost routing algorithm for space DTN based on contact graph[C]/Microprocessor Technology Forum. c2012.
- [61] BEZIRGIANNIDIS N, CAINI C, TSAOUSSIDIS V. Analysis of contact graph routing enhancements for DTN space communications[J]. International Journal of Satellite Communications & Networking, 2015, doi:10.1002/sat.1138.
- [62] ZHU L, YONG L I, ZHANG J, et al. Application of contact graph routing in satellite delay tolerant networks[J]. Chinese Journal of Space Science, 2015, 35(1): 116-125.
- [63] 杨炎. 延迟容忍网络路由算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.  
YANG Y. Research on delay tolerant network routing algorithm[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.
- [64] WANG Y, JAIN S, MARTONOSI M, et al. Erasure-coding based routing for opportunistic networks[C]/ACM SIGCOMM Workshop on Delay Tolerant Networking. ACM, c2005: 229-236.
- [65] WIDMER J, BOUDECE J Y L. Network coding for efficient communication in extreme networks[C]/The Workshop on Delay Tolerant Networking & Related Networks. c2005: 430-431.
- [66] RAAYATPANAH M A, FATHABADI H S, KHALAJ B H, et al. Bounds on end-to-end statistical delay and jitter in multiple multicast coded packet networks[J]. Journal of Network & Computer Applications, 2014, 41(5):217-227.
- [67] BOURTSOULATZE E, THOMOS N, FROSSARD P. Decoding delay minimization in inter-session network coding[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(6):1944 - 1957.
- [68] DRINEA E, FRAGOULI C, KELLER L. Delay with network coding and feedback[J]. Physical Communication, 2009, 6: 844-848.
- [69] ERYILMAZ A, OZDAGLAR A, MEDARD M. On delay performance gains from network coding[C]/Information Sciences and Systems. c2006: 864-870.
- [70] 陈晨, 谢珊珊, 张潇潇, 等. 聚合 SDN 控制的新一代空天地一体化网络架构[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, (5): 450-454.  
CHEN C, XIE S S, ZHANG X X, et al. A new space and terrestrial integrated network architecture aggregated SDN[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2015, (5): 450-454.
- [71] BERTAUX L, MEDJIAH S, BERTHOUS P, et al. Software defined networking and virtualization for broadband satellite networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(3):54-60.
- [72] 赵慧玲, 冯明, 史凡. SDN——未来网络演进的重要趋势[J]. 电信科学, 2012, 28(11): 1-5.  
ZHAO H L, FENG M, SHI F. SDN—Important trend in future network evolution[J]. Telecommunications Science, 2012, 28(11): 1-5.
- [73] FOUNDATION O N. Software-defined networking: the new norm for networks[J/OL]. <http://dcis.uohyd.ac.in/~apcs/acn/wp-sdn-newnorm.pdf>.
- [74] 任婧. 内容中心网络架构及相关技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.  
REN J. Related technologies of information-centric network implementation[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [75] AHLGREN B, DANNEWITZ C, IMBRENDA C, et al. A survey of information-centric networking (draft)[J]. Communications Magazine IEEE, 2011, 50(7): 26-36.
- [76] KOPONEN T. A data-oriented network architecture[M]. Teknillinen Korkeakoulu, 2008.
- [77] ZHANG L, AFANASYEV A, BURKE J, et al. Named data networking[J]. ACM Sigcomm Computer Communication Review, 2014, 44(3): 66-73.
- [78] XUE T, ZHOU R. A content-based publish-subscribe routing protocol

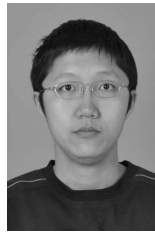
in mobile ad hoc network[J]. SSRN Electronic Journal, 2010, 36: 1-4.

- [79] VILLAMIZAR C. Ospf optimized multipath (ospf-omp) [M]. draft-ietf-ospf-omp-02. 1999.
- [80] ROSEN E, VISWANATHAN A, CALLON R. Multiprotocol label switching architecture[S]. RFC 3031. 2001.
- [81] BYERS J W, LUBY M, MITZENMACHER M. Accessing multiple mirror sites in parallel: using Tornado codes to speed up downloads[C]//The INFOCOM'99 Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. c1999: 275-283.
- [82] BYERS J W, LUBY M, MITZENMACHER M, et al. A digital fountain approach to reliable distribution of bulk data [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1998, 28(4): 56-67.
- [83] LI X, LU J, YANG J, et al. A novel routing and data transmission method for stub network of internet of things based on percolation[C]//The Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPs). c2011: 201-205.
- [84] LU J, AN J, LI X, et al. A percolation based M2M networking architecture for data transmission and routing [J]. KSII Transactions on Internet and Information Systems, 2012, 6(2): 649-663.
- [85] 马少武, 詹念武, 王晓湘. 未来网络研究进展[J]. 信息通信技术, 2012, (6): 81-87.
- MA S W, ZHAN N W, WANG X X. Progress of future network research[J]. Information and Communications Technologies, 2012, (6): 81-87.

#### 作者简介:



安建平 (1965-), 男, 山西原平人, 北京理工大学教授, 主要研究方向为卫星与空间通信、无线宽带通信与网络、空间信号处理技术。



靳松 (1990-), 男, 山西临汾人, 北京理工大学博士生, 主要研究方向为深空通信技术、DTN 网络。



许军 (1991-), 男, 陕西宝鸡人, 北京理工大学硕士生, 主要研究方向为通信网络与协议、下一代互联网 NDN。



张宇 (1972-), 男, 山西原平人, 北京理工大学讲师, 主要研究方向为通信网络性能分析与优化、协议设计、建模与仿真。



邵立伟 (1979-), 男, 河北保定人, 中山北京理工大学研究院助理研究员, 主要研究方向为无线通信技术、空间通信技术及网络协议。