

基于 DTN 的空间网络互联服务研究综述

林 闯¹ 董扬威¹ 单志广²

¹(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

²(国家信息中心信息化研究部 北京 100045)

(chlin@tsinghua.edu.cn)

Research on Space Internetworking Service Based on DTN

Lin Chuang¹, Dong Yangwei¹, and Shan Zhiguang²

¹(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

²(Department of Informatization Research, State Information Center, Beijing 100045)

Abstract The increasing demand on space communication stimulates the internetworking and space-ground integration for space communication systems. Space networks are featured in heterogonous subnets, dynamic topology, large transmission delay, and high link errors. TCP/IP protocol suite requires stable connectivity and short transmission delay, which cannot be satisfied in space networks. As a result, existing protocols for the current Internet cannot be directly applied to space networks. Delay/disruption tolerant network (DTN) is a general message-oriented overlay network architecture that can be adapted to space networks. This makes DTN a very promising approach for interconnecting space communication systems. This paper first demonstrates the system architecture which applies DTN in space internetworking service (SIS), and then analyzes the key components and working patterns including protocol stack, message forwarding mechanism, naming and addressing, licklider transmission protocol (LTP), etc. Then we give a real scenario of Mars exploration. By surveying some key technologies and research trends, we analyze some technical problems to be solved and propose some future research directions including routing, security, and QoS control. And then, we introduce related development efforts, practice, and aircraft verification projects. Finally, we analyze the prospects for the research and application of DTN and SIS technologies in China.

Key words delay/disruption tolerant network (DTN); space internetworking service (SIS); routing; security; QoS

摘 要 空间通信需求的迅猛增长促使空间通信向网络化和天地一体化的方向不断发展. 空间网络具有子网异构、网络拓扑不断变化、链路传输延迟大、链路误码率高等特点. TCP/IP 网络协议族需要连续稳定的网络连接和较短的传输时延, 空间网络不能满足这些条件, 因此相关协议不能直接应用于空间网络. 延迟/中断容忍网络(delay/disruption tolerant network, DTN)是一种通用的面向消息的覆盖层网络体系结构, 能够适应空间网络的特点, 是实现空间网络互联的有效连接方式. 首先阐述了 DTN 应用于空间网络互联服务(space internetworking service, SIS)的体系结构, 分析了组成要素和工作模式, 包含协议栈构成、消息转发机制、命名与寻址机制等, 介绍了支撑空间 DTN 应用的 LTP(licklider transmission

收稿日期: 2013-06-03; 修回日期: 2013-09-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(60932003, 61070021); 国家“九七三”重点基础研究发展计划基金项目(2010CB328105)

通信作者: 林 闯(chlin@tsinghua.edu.cn)

protocol)协议,并给出了火星探测场景实例;然后针对路由机制、安全机制和服务质量控制3个重点研究方向,阐述了关键技术和进展情况,分析了存在的问题和下一步的研究方向;然后介绍了相关的开发、实践和飞行验证项目;最后分析了在中国开展基于DTN的SIS研究及应用前景。

关键词 延迟/中断容忍网络;空间网络互联服务;路由;安全;服务质量

中图法分类号 TP393.02

随着空间任务不断增加,通信需求也在不断增长.为了实现空间通信资源的高效开发和使用,产生了空间数据系统组网的需求.同时,地面网络技术的飞速发展和成熟应用也为空间网络互联提供了发展思路和技术支持.

开发空间通信系统和数据系统的国际组织CCSDS提出了很多空间应用标准,在航天器和地面支持系统中广泛应用.当前的空间任务中,通信的地面段采用TCP/IP协议;地面段与空间段的连接主要采用CCSDS SLE^[1]标准,或在地面站设置网关完成协议转换;而空间段采用逐跳控制方式完成通信.与TCP/IP网络的工作模式相比,用户之间的端到端连接被隔离成几段,不同段之间的机制差异较大,转换整合过程复杂;空间段连接主要靠人工管理与配置,灵活性差,资源利用效率低.另一方面,空间网络大时延、间歇式连接、非对称链路和大性噪比的特点使得TCP/IP协议无法直接应用于空间段^[2],因此需要新的体系结构的支持.

空间网络互联服务(space internetworking service, SIS)^[3]是CCSDS交互技术的重要组成部分,其目标是通过提供相关服务和协议,在空间通信实体间实现网络化的交互. SIS独立于特定的链路层技术和应用层语义,解决空间任务中异构网络的互联问题,提供端到端的数据传输服务.

NASA/JPL最早开始了行星际互联网(interplanetary networking, IPN)的研究^[4],其目标是为行星际空间网络提供端到端的连接.与TCP/IP网络基于包的存储转发不同,IPN借鉴了邮件的传输模式,将一次事务的信息尽量多地打包在一起,在适当的时机将打包数据发送到下一个节点.基于IPN的体系结构,结合地面移动网络、AdHoc网络、传感器网络等受限网络的特征,提出了延迟容忍网络(delay tolerant networking, DTN)的框架^[5-6]. DARPA资助的部分项目又提出了中断容忍网络的概念(disruption tolerant networking, DTN).两者融合成为延迟中断容忍网络DTN.其后DTN网络得到广泛的研究.与传统方式相比,基于DTN体系结构实现空间

网络互联具有明显优势^[7],CCSDS最终将这一方向纳入了其标准开发体系,将其作为SIS的发展方向^[8].

除了基于DTN的空间网络外,还有一类以通信为应用目标的卫星网络,其空间设施可由近地轨道卫星、中地球轨道卫星和地球静止轨道卫星组成.典型的有铱星系统和多层卫星网络.这一类空间网络虽然拓扑结构也不断变化,但是存在2个特点:一是轨道相对较低,传输延迟较小;二是卫星部署较多,通信节点之间存在端到端的瞬时全程连接.这种以实时通信为主要目标的网络仍适合TCP/IP协议为核心构建体系结构,重点是需要适应动态网络拓扑的路由机制,非本文讨论的内容.

1 体系结构和应用模式

1.1 基于DTN的SIS体系结构

DTN是一种通用的面向消息的覆盖层网络体系结构,可以处理具有间歇式连接和大传输延迟特性的网络互联问题和异构网络互联问题.文献[9]描述了DTN网络的体系结构. DTN应用于SIS时,可以构建图1所示的体系结构,其中DTN相关组件主要由消息转发机制、节点与端点机制、命名与寻址机制、路由与转发机制、安全机制、服务质量保障机

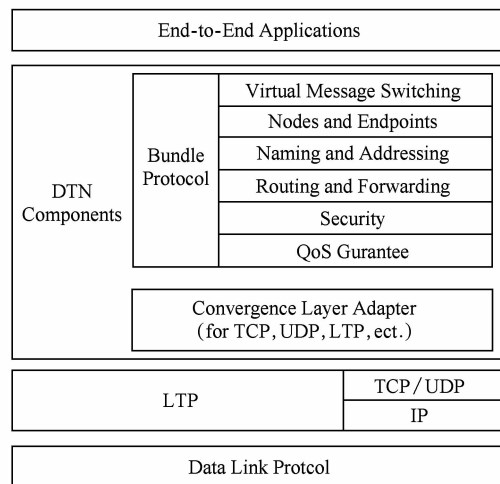


Fig. 1 The architecture of SIS based on DTN.

图1 基于DTN的空间网络互联体系结构

制和汇聚层适配器组成,相关协议在 OSI 层次模型中处于传输层之上,应用层之下。

束协议(bundle protocol, BP)^[10]是 DTN 核心协议,数据束(bundle)是 DTN 网络的数据传输单元,长度可变。数据束由不同功能的数据块组成,基本块中包含数据源、数据目标、数据生命期等控制信息,有效载荷块为实际传输的数据,另外可通过增加扩展块来提供附加功能。

DTN 采用基于消息的传输机制。为适应大延迟、间歇式连接的特点,尽量减少端到端的交互,尽量将一次数据传输事务的相关信息全部打包在一个数据束后传输。DTN 节点接收到数据束后,可以长时间存储接收的数据,在适当的传输时机发送到下一个 DTN 节点。传输的过程中数据束可能被分割重组。

DTN 引入了节点和端点的概念。节点是接收和发送数据束的实体,执行 BP 协议。端点是节点的集合,也是发送数据束的源和接受数据束的目标,一个端点可能包含一个或数个节点,只能包含一个节点的端点叫作单实例端点。节点需要注册到一个或多个端点中,注册信息保存在某些节点中,作为路由与转发的依据。数据束可以根据应用程序要求发送到端点中的任意一个节点、指定的节点和多个节点。

在命名与寻址方面,DTN 采用 URI^[11]命名网络中的端点和节点地址。为适应穿越异构网络的需求,DTN 采用迟绑定的机制。这里绑定是指将 DTN 地址解析为下一层地址的过程。在 Internet 中采用早绑定的策略,即在传输之前就将 DNS 地址解析为 IP 地址。DTN 网络环境下,这种工作模式不再可行,而是逐跳完成地址解析,即通过路由计算得到下一跳 DTN 节点后,根据当前节点和下一跳节点的连接方式,完成底层协议地址解析工作,直到传输到最后一个 DTN 节点前才执行目标节点的解析。

在拓扑动态变化的 DTN 网络中,传统的基于静态拓扑的网络路由协议不再适用。目前提出了大量的 DTN 路由算法,分类方法也很多,基于网络拓扑变化的随机特性可以分为随机性路由算法和确定性路由算法。随着网络拓扑结构及其变化过程确定性的增强,有相应的确定性较强、效率较高的路由算法。对于空间网络来说,卫星轨道是事先计算,通信计划事先确定,因此网络拓扑及其变化具有较强的确定性,适合具有较强确定性的路由方法^[12],本文将第 2 节深入讨论这一类方法在 SIS 中的应用。空间具有一定随机性的子网主要是着陆器子网,规模

相对较小,本文不作重点阐述。

在安全机制方面,DTN 网络由于环境开放,更容易受到来自网络的攻击。DTN 网络节点和网络资源更加有限,需要保护对网络资源的使用。另一方面,DTN 大时延、非实时连接的方式使得网络密钥的分发与验证更加困难。因此需要独特的安全体系的支持。束安全协议(bundle security protocol, BSP)^[13-14]为 DTN 提供了基本安全机制,包含机密性、完整性和身份认证的支持,本文第 3 节将讨论基于 DTN 的 SIS 安全问题。

在服务质量保障方面,DTN 提供了一些基本的支持。数据束具有 3 种可选的优先级,DTN 中继节点可以据此提供区分服务;数据束可选择可靠传输与非可靠传输 2 种服务,可供具有不同的可靠性需求的用户选择;数据的生命周期也是对服务质量的需求,是中继节点作出路由和转发决策的依据;提供了可选的传输状态报告机制。本文第 4 节将讨论基于 DTN 的 SIS 服务质量保障问题。

在异构的网络中,支撑 BP 的传输层协议各不相同,为此针对每一个传输层协议,需要实现一个会聚层适配器,为 BP 的基本操作提供统一的接口,不同协议的会聚层适配器复杂度与实现方式和功能可能有很大差异。

1.2 LTP 传输层协议

在星际网络之间的长距离传输中,传统的 TCP 协议难以提供有效的数据传输,需要独特的传输协议来支持。LTP(licklider transmission protocol)协议^[15-16]是一种点对点的传输层协议,主要应用于深空网络的大延迟网络。

LTP 协议将数据分割成数据段后传输。数据段可标识为红色或绿色部分,红色部分需要返向确认,提供可靠服务;绿色部分不需要返向确认,提供不可靠服务。在传输前,LTP 协议根据空间链路连接计划和实际环境,建立单向会话,开始数据传输,多个数据传输会话可并发进行。传输前不需要握手,根据计划直接开始传输。

为提高链路使用效率,协议采用选择重传的策略。发送红色数据段之前,启动定时器,接收端接收后,对需要可靠传输的部分发送一个应答报告。发送端接收到应答报告后,根据报告补发未接收到部分。如果发送端定时器到期后仍未接收到应答报告则启动重传。

空间网络连接的中断特性使得协议引擎难以准确地设置定时器的时间,因此需要操作环境的配合。

定时器按照链路永久可用的状态,根据链路速率、节点间距离等信息,计算和设置过期时间;操作环境通过轨道计算、飞行计划等得到链路的可用信息.链路不可用时,操作环境通知定时器挂起,链路可用时操作环境通知定时器恢复.

1.3 应用模式实例

IPN 是基于 DTN 的 SIS 最具代表性的应用,也是 DTN 研究的历史起源. DTN 的研究成果也可应用于近地空间以及月球探测等卫星通信环境.

图 2 所示为火星探测的一个场景,由地面段网络和空间段网络组成,其协议栈如图 3 所示. 支持 DTN 的设施有控制中心、地面站、轨道器、火星网络的 DTN 入口以及火星网络终端. 地面段网络由 IP 网络连接. 火星网络可能是单一着陆器,也可能是几个移动机器人构成的 Ad Hoc 网络或者 IP 网络. 对空间段的每一跳,传输层采用 LTP 协议,数据链路层和物理层采用 CCSDS 定义的数据链路层和物理层协议.

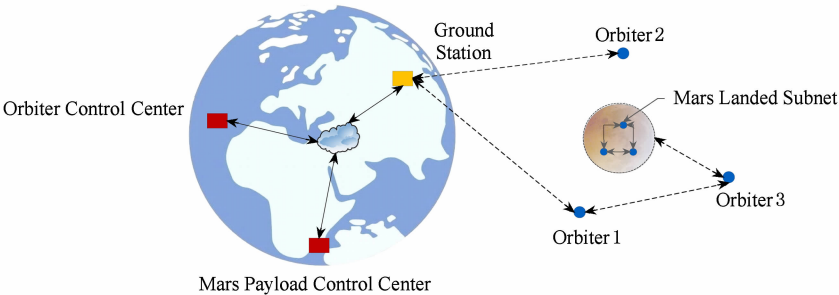


Fig. 2 Network topology of Mars exploration scenario.
图 2 火星探测网络拓扑

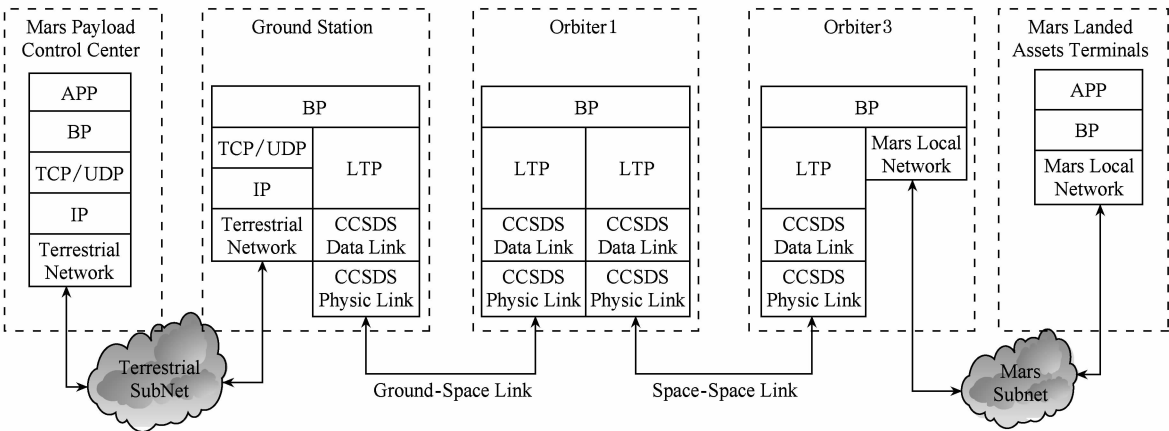


Fig. 3 Network protocol stack of Mars exploration scenario.
图 3 火星探测网络协议栈

2 路由机制

2.1 确定性 DTN 网络路由问题

空间网络连接的建立和中断可以通过航天器的轨道计算和飞行计划得到,其拓扑变化是一个确定的过程. 文献[17]最早对确定性 DTN 网络进行了形式化的描述. 比较了 3 种不同的路由方法,包含:

- 1) 基于零知识的首次接触发送法(first contact, FC).
- 2) 基于部分知识的算法,这一类又包含基于连接信息知识概要的最小期望延迟算法(minimum

expected delay, MED);基于所有接触知识的最早提交算法(earliest delivery, ED);基于接触知识和本地队列知识的最早提交算法(earliest delivery with local queue, EDLQ);基于接触知识和全局队列的最早提交算法(earliest delivery with all queue, EDAQ).

- 3) 基于所有连接信息、全部节点状态和所有传输需求的线性规划算法(linear programming, LP).
- 这 3 种方法所使用的信息逐渐增多,利用较多知识的算法在传输延迟和提交率两方面都表现出优势,网络的间歇性越大这种区别表现得越明显.
- FC 性能很差,只能作为性能比较的基础. 随着

负载增加,ED 算法性能恶化速度加快,不能处理拥塞问题.EDLQ 算法在性能上表现与 EDAQ 算法差异较小.线性规划需要知道未来的负载需求,实践中是一个很大的强约束条件.因此基于部分知识的路由方式是研究的重点.考虑到在 DTN 网络中节点难以及时获得全局队列信息,EDLQ 可能是更加现实的选择.

基于部分知识的算法可在 Dijkstra 算法的基础上改造,用于寻址最短路径,其伪代码如图 4 所示:

```
Input:  $G=(V,E),s,T,W(e,t);$ 
Output:  $L;$ 
①  $Q \leftarrow \{V\};$ 
② for each node  $v \in V$ 
③   if  $v \neq s$ 
④      $L[s] \leftarrow 0, L[v] \leftarrow \infty;$ 
⑤   end if
⑥ end for
⑦ while  $Q \neq \{\}$  do
⑧   let  $u \in Q$  that satisfy  $L[u] = \min_{x \in Q} L[x];$ 
⑨    $Q = Q - \{u\};$ 
⑩   for each edge  $e \in E$  that start form  $u$ , do
⑪     if  $L[v] > (L[u] + W(e, L[u] + T))$ 
⑫        $L[v] \leftarrow (L[u] + W(e, L[u] + T));$ 
⑬     end if
⑭   end for
⑮ end while
```

Fig. 4 Shortest path first algorithm based on partial knowledge.

图 4 基于部分知识的最短路径算法

网络的拓扑由有向多图 $G=(V,E)$ 表示, V 为节点集, E 为边集, S 为源节点, T 为当前时间, $W(e,t)$ 为权重函数,表示消息在时刻 t 沿边 e 发送的代价(一般为时延), L 为一个数组,表示节点通过最短路径到达其他节点的代价.

根据对网络知识的了解程度,可以确定不同的权重函数 $W(e,t)$. 如果只能得到较少的连接信息,则可以将 $W(e,t)$ 设为常数,如果能够得到较多的信息,则 $W(e,t)$ 可进一步细化为 $W(e,t) = W'(e,t,m,s)$, 其中, e 为边, t 为计算权重函数的时刻, m 为消息大小, s 为设置权重的节点(开始 dijkstra 算法的节点). 其计算方法为

$$W'(e,t,m,s) = t'(e,t,m,s) - t + d(e,t),$$
$$t'(e,t,m,s) = \min \left\{ t'' \mid \int_{x=t}^{t''} c(e,x) dx \geq (m + Q(e,t,s)) \right\},$$

其中, $c(e,x)$ 为容量延迟函数, $d(e,t)$ 为传输延迟函数, $Q(e,t,s)$ 为排队延迟函数,其中的 s 用于区分本地队列和全局队列, $t'(e,t,m,s)$ 表示将 m 沿边 e 注

入到网络中的最早时间.

如果不能得到队列信息,则排队延迟 $Q(e,t,s)$ 为 0. 如果能得到队列信息,则排队延迟 $Q(e,t,s)$ 为边 e 在时刻 t 已入队列数据的发送时长.

2.2 CGR 路由算法

目前在空间网络应用中,CGR(contact graph routing)路由算法^[18-19]开展的研究应用较多.CGR 为星际 DTN 网络的路由需求构建,也适用于部分确定性的地面网络、地球卫星通信等场景.CGR 根据接触图(contact graph)完成路由计算,不适合网络拓补实时发现以及网络拓补变化具有随机性的网络,对拓补临时变化的适应性较差.算法没有考虑队列的使用情况.算法要求一次接触过程中的链接状态固定,如接触过程中状态变化(例如距离变化导致传输延迟的变化达到不能忽略的程度),需要将一次接触分解为多个接触.

CGR 算法过程如图 5 所示.网络初始化或者飞行计划发生变化时,通过已有链路将接触计划和距离信息发送到路由节点.路由节点根据这些信息得到接触图.对需要转发的数据束,节点根据发送目标和接触图启动路由计算程序(contact review procedure, CRP),得到能将数据束在截止时间前传送到目标的邻节点.CRP 程序在 dijkstra 算法的基础上改造,同时计算出所有有效路径.最后启动转发程序(forward bundle procedure),根据选择标准(最少跳数、最低延迟等)选择适当的邻节点完成转发.

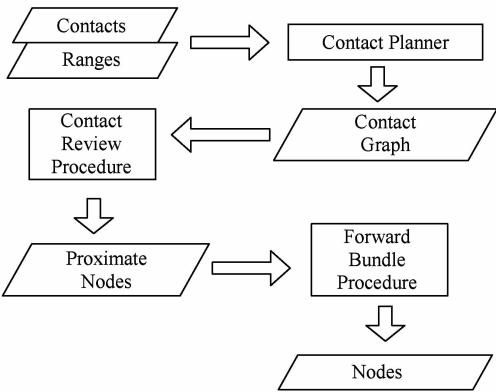


Fig. 5 CGR routing algorithm.

图 5 CGR 路由算法

CGR 算法没有考虑多播问题.文献[20]分析了 CGR 路由算法的性能,提出了多播情况下的 CGR 算法(MD-CGR),指出 MD-CGR 算法是 NP 完全问题,但是根据工程实践情况作出一些假设后,能够在多项式时间内求解.

文献[21]针对 CGR 算法存在的路由震荡问题

作了改进.文献[22]考察了 CGR 算法在 LEO 轨道卫星对地观测、数据转运等场景中的应用.

2.3 其他确定性路由算法

文献[23]对确定性的 DTN 网络提出时空图路由算法.该方法在网络拓扑中增加时间维度,首先使用连接信息构造时空图模型,然后在时空图模型的基础上查找最优路径,最后生成时空路由表.查找算法可采用改造的 Floyd-Warshall 算法、Dijkstra 算法或线性整数规划实现.

文献[24]提出了可预计链路状态路由算法.该方法假设网络拓扑在时间段 $[t', t'']$ 内是静态的,并以拓扑快照 $S_i = \langle t_i, G_i \rangle$ 来表示.拓扑快照序列 $S = \langle S_0, S_1, \dots \rangle$ 表达了网络拓扑的变化过程,通过拓扑信息管理协议,在每个路由节点上维护快照序列.节点基于快照序列完成路由计算.

2.4 路由模式选择

空间网络节点要根据节点掌握的信息和传输需求选择适当的路由模式.空间骨干节点的接触信息可以通过轨道计算和飞行计划确定,节点的队列信息可以通过航天器的遥测参数得到,负载可以通过飞行计划确定,其内容也是确定的,因此基于完全信息的线性规划算法在理论上是完全可行的.文献[17]对确定性 DTN 网络中基于线性规划的方法作了形式化描述.

地面控制中心掌握路由所需要的全部信息,可选择在控制中心完成路由计算或由空间节点完成路由计算.如果在控制中心完成路由计算,可以将结果以路由策略的形式分发到中间节点,也可以由中心在数据束的尾部添加包含路由信息的扩展数据块,中间节点根据其中信息转发.如果由空间节点完成路由计算,需要将相关信息传输到空间节点.这2种方式都将会产生新的通信负载和节点计算资源消耗.

基于全部信息的线性规划算法虽然理论上可以得到最优解,但在实际应用中存在一定的局限性.首先,飞行计划可能处于变化之中,基于未来的负载来计算的最优解可能失去意义;其次这种计算的结果是静态的,不能适应网络状态的任何状态变化;另外,空间网络的大延迟特性使得路由的输入信息具有滞后性.因此,探索有效的基于部分信息的动态路由计算方法是空间网络路由的主要研究方向.为实现这类算法,控制中心首先需要将网络的接触信息沿已有路径送到路由节点,节点根据接触信息、本地队列/邻近节点队列/全局队列使用情况、以及其他反馈信息动态完成路由的计算.

路由方式可以选择前摄式路由和反应式路由.

前摄式路由也称表格式路由,路由节点根据网络拓扑计算到达其他节点的下一跳后存储在路由表中,负载数据到达后根据路由表转发;在反应式路由中,数据到达节点后,再根据目标计算传输路径.空间网络中传输路径是时变过程,如果采用前摄式路由,则路由表中还需要包含时间信息,每次拓扑变化后需要重新计算并存储,需要消耗一定的资源.若采用反应式路由,接收到数据后再根据其目标实时计算路径,造成一定的延迟.方式的选择取决于载荷数量、节点数量、节点资源和传输延迟要求等指标.如果路由方法使用了节点的队列信息,路径选择与当前队列状态相关,只能选择反应式路由.反应式路由情况下可以采用路由缓存、基本块预取等方法减少等待延迟.

3 安全机制

3.1 DTN 网络的安全威胁

对数据机密性保护、完整性验证、身份认证是对 DTN 安全机制的基本要求.除此之外,DTN 网络资源具有稀缺性,为此在安全机制建设方面建立了几个根本的目标^[25]:迅速的阻止非授权应用的数据在 DTN 网络的传播;阻止非授权应用控制网络基础设施;阻止授权节点发送超过允许的速率或优先级的数据;尽快抛弃损毁的数据;尽快发现并排除恶意节点和被盗用的节点.

DTN 网络可能受到网络中非 DTN 节点的攻击,这些节点可能通过伪装、比特翻转等常规的方式攻击网络,但从另一个角度,DTN 节点也可以利用底层协议的安全机制.

DTN 网络环境更容易受到拒绝服务攻击,在安全结构设计上也必须加以考虑,一方面是让攻击方难以生成有效的消息;另一方面是抑制生成的拒绝攻击数据.安全协议本身也要避免成为拒绝服务攻击的对象.

3.2 束安全协议(bundle security protocol, BSP)框架

BSP 为 DTN 提供了基本安全机制,包含端到端安全和逐跳安全.端到端安全包含载荷数据的机密性和完整性;逐跳安全保护网络的资源,防止非法使用.

每个数据束有一定的安全策略要求.安全策略在一条安全路径上实施,安全路径不一定是从数据束源到数据束目标的全程路径,可以在任何一段路径之间执行一定的安全策略;安全路径可以互相包含,但一般要避免交叉. BSP 定义了一系列的密码套件,每个套件规定了一组机密性、完整性验证和身

份验证的算法和执行过程.安全节点根据数据束的传输要求、安全策略以及加密套件定义,完成加解密、完整性验证和身份验证.

图 6 为从节点 1($Node_1$)到节点 5($Node_5$)的安全传输过程中,BSP 协议数据块的处理过程.PCB

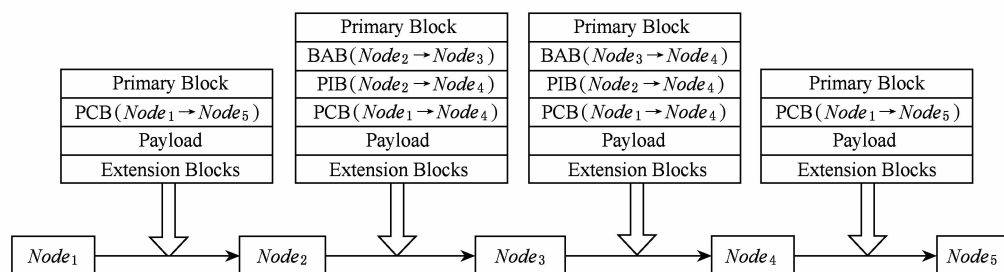


Fig. 6 Bundle processing in BSP.

图 6 BSP 协议中数据束处理过程

$Node_1$ 对数据载荷进行了加密处理,替换掉载荷数据块,将加密方式、安全目标节点等信息放在载荷加密数据块 $PCB(Node_1 \rightarrow Node_5)$ 中,送到安全目标 $Node_5$, $Node_5$ 解密后交给应用程序.对扩展数据块也可以同样处理. $Node_2$ 对载荷数据和加密数据进行了完整性校验,将校验算法、校验结果和安全目标节点等信息放在载荷完整性校验数据块 $PIB(Node_2 \rightarrow Node_4)$,到达安全目标 $Node_4$ 后完成检验,移除该块. $Node_3$ 也可以进行检查,抛弃受损的数据束.为了节约 DTN 网络资源,尽快地抛弃非法数据块,身份验证以逐跳的方式完成,在相邻的安全节点间完成. $Node_2$ 对数据束进行了数字签名,放入 $BAB(Node_2 \rightarrow Node_3)$, $Node_3$ 检查后移除该数据块,再次签名,交下一节点处理.

3.3 基于 DTN 的 SIS 安全

网络可能受到各种各样的攻击.空间网络是一个封闭网络,因此消除了一些攻击方进入系统的机会.在卫星通信中,射频的干扰源很容易就能定位发现,而且这种干扰是违法国际法的行为,一般不考虑这种攻击.历史证明,网络层、传输层、应用层和不完善的代码是网络中最容易被攻击的地方.

空间 DTN 网络可以直接应用 BSP 协议的 PCB, PIB 实现载荷机密性、完整性、数字签名的保护,应用 BAB 实现逐跳的网络资源应用授权的保护.文献[26]在空间网络的场景中应用 BSP 协议和 CCSDS SLE 数据链路加密 2 种机制,比较的结果表明:如果采用 BSP 安全机制,网络的体系结构复杂度将大大降低,从而降低被攻击的风险;另一方面,传输层控制环路的数量也大大减少,从而较少了封装的次数.

DTN 安全策略可以部署 BP 上,也可以部署在

(payload confidentiality block)为加密数据块,PIB (payload integrity block)为完整性校验数据块, BAB(bundle authentication block)为数据束身份认证数据块.安全路径的起点在数据束中添加相关数据块,在安全路径的终点处理并移除.

其他不同层次之上,需要综合考虑需求和效率来选择.对星际的点点对网络,LTP 安全协议^[27]也提供了一定的安全机制.LTP 安全协议是 LTP 协议的扩展,协议同样通过扩展块,提供加密、完整性和数字签名的服务.协议还提供了一种基于 Cookie 的扩展块机制,可以抵抗拒绝服务攻击.对 SIS 的地面段,在 BP 的底层可以直接采用 TCP/IP 网络的安全机制.

安全策略是空间通信网络建设的重要内容.空间网络中的通信一般涉及多个机构.空间网络基础设施、控制中心、载荷设施等一般都由不同的机构来控制.目前,空间任务涉及到更多的国际合作,使得安全管理的机制更加复杂.为实现跨机构的协作,在空间通信领域,需要有一个国际的证书颁发机构.骨干网络为空间任务提供服务时,需要根据合同,实施基于策略的路由.总之,未来空间 DTN 网络的安全策略、密钥管理还是一个需要深入研究的问题.

安全机制的引入必然引起网络带宽资源、计算资源、存储资源的消耗.空间网络这些资源都极为有限,在安全路径、安全区域的设计上必须要考虑这些约束条件,结合具体的网络环境,寻求高效的安全机制.提供可选的安全策略,避免不必要的资源消耗;在适当的网络层次提供安全,提高资源使用效率;细化分析全程数据链路,仅在必要的路径段和需要的数据块提供安全保护.例如,两个远离地球的航天器之间利用定向天线通信时,其通信时段、天线指向、频率、编码方式、调制方式等都是事先计划好的,这种情况下物理连接已经提供了相当强的信任关系,不必提供 BAB 验证.

4 QoS 机制

4.1 空间 DTN 网络 QoS 需求

网络 QoS 指标主要包含吞吐量、差错率、端到端延迟、延迟抖动等,不同的业务数据对这些服务质量的指标有不同的需求.

空间网络的业务数据主要有航天器遥测参数、遥控指令、测定轨数据、有效载荷的业务数据、航天器的时间统一勤务数据、载人航天中的语音和视频图像多媒体通信、报文数据等,不同业务应用对服务质量的要求如表 1 所示. 其中遥测数据的传输有实时传输和延时传输两种方式,实时传输要求时延和抖动小,延时传输要求较低;遥控指令包含立即执行指令和定时执行指令,立即执行指令要求时延和抖动小,定时执行要求较低;对航天器的遥测参数、测定轨数据和载荷业务数据,数据冗余量较大,测量过程中还存在非正常测量的劣值,可通过后期的数据处理来排除异常数据,对差错率的要求较低.

Table 1 QoS Needing of Space Data
表 1 空间网络业务数据 QoS 需求

Data Type	Throughput	Error Rate	Delay	Jitter
Telemetry	Big	Less	Variable	Variable
Telecommand	Small	None	Variable	Variable
Orbit Measuring	Big	Less	Large	Large
Payload	Big	Less	Large	Large
Time Synchronization	Small	None	Little	Little
Video & Audio	Big	More	Little	Little
Mail	Small	None	Large	Large

4.2 队列管理与调度

网络节点的队列管理是 QoS 管理的重要环节,节点需要灵活地调度各类数据,以达到其 QoS 要求. 数据束基本块中提供了服务质量控制标识,网络节点根据其值,提供不同的服务质量选择. 控制标识主要包含:1)优先级选择,提供了 3 种基本的优先级和一种自定义的优先级;2)状态报告选择,确定节点是否报告传输状态;3)异常处理,确定节点在各种异常情况下的行为. 另外,数据束在 DTN 网络中传输过程中的有效期也是节点进行队列管理的依据. 节点可根据这些输入来调度数据束的发送顺序,完成正常和异常情况下的处理.

文献[28]描述了一个新的 QoS 框架. 将应用的 QoS 需求重新进行了分类,可分为同步传输、最小

速率保证、有时限要求的大容量数据传输和尽力而为传输 4 种. 设计了一个基于 FIFO 队列和漏桶算法的调度器,仿真证明了这种策略的有效性. 文献[29-30]提出采用无速率编码机制,根据数据束的大小、QoS 要求以及链路状态,决定编码参数,实际上是在 QoS 和链路容量之间的一种动态平衡.

4.3 拥塞控制与 QoS 路由

拥塞控制是提高网络服务质量的方法之一,拥塞的发生导致传输时延的延长和丢包的发生. 空间 DTN 网络主要需要考虑 2 种拥塞情况:一种是网络节点缓存不够,无法接收数据;另一种是负载太大,链接容量不够,导致数据束不能在截止时间前抵达. 两种拥塞情况的处理需要不同的控制机制.

IP 网络中的 TCP 协议主要借助于实时的端到端反馈判断网络中出现的拥塞,进而控制发送端的发送速度. DTN 网络的特点使得拥塞信息不能及时的传递,使得这种拥塞控制机制不再适用.

BP 的托管传输机制提供了一定的拥塞控制能力. 数据束可以以托管方式实现可靠传输,也可以以非托管方式实现不可靠传输. 托管方式下,下一节点接收到数据束以后,将确认信息反馈到上一个节点,通过逐跳确认保证信息的可靠传输;节点若判断可能发生拥塞,不能接收时将拒绝信息反馈到上一节点,等待拥塞的缓解.

QoS 路由是避免拥塞发生的另一种方式. 对于静态的路由方式,可基于全局信息规划的路径,以全局最优的方式完成数据转发,从而尽量避免拥塞的发生. 在动态的路由方式中,拒绝托管和动态路由联合起来在一定程度上提供了多路径情况下的负载平衡能力. 如图 7 所示,数据束到达 $Node_1$ 后,其路由算法选择了经过 $Node_2, Node_3$ 到达 $Node_5$ 的路径. 传输到 $Node_2$ 后继续选择该路径,但传输过程中拒绝托管. $Node_2$ 在一段时间内将 $Node_3$ 作为拒绝服务节点,重新计算路径,选择了经过 $Node_4$ 到达 $Node_5$ 的路径, $Node_4$ 拒绝托管,则接续将 $Node_4$

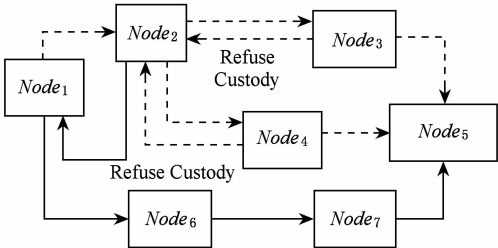


Fig. 7 Load balance in DTN dynamic routing.
图 7 DTN 动态路由的负载均衡

作为拒绝服务节点,重新计算路由.新计算的路径为 $Node_1, Node_6, Node_7, Node_5$,也可能等待 $Node_3, Node_4$ 拥塞解除.与静态的路由机制相比,这种机制下有一个回溯的过程,因此存在资源浪费和时间消耗的问题,优点是能够适应网络状态的变化.

5 协议实现与工程应用

5.1 DTN 协议实现

基于 DTN 协议体系有许多开源的实现代码.其中 DTN2^[31]是研究和实际应用最广泛的 DTN 实现,用 C++ 编写,支持 Unix/Linux 和 Mac OS 平台.DTN2 协议主体包含 BP 和 BSP 协议的实现,支持托管传输;在路由协议方面包含静态路由、基于洪泛和传染的路由以及基于概率的 PROPHET^[32]路由等;在传输层的支持方面,包含 TCP 汇聚层适配器、蓝牙会聚层适配器以及 LTP 适配器等实现.DTN2 提供了丰富应用支持,包含应用层 api、文件系统支持、数据库系统支持.DTN2 实现的主要目标是展示和研究 DTN 体系结构的方方面面,在性能提升方面强调较少.

ION^[33-34](interplanetary overlay network)是另一款专门针对空间网络应用的实现,主要由喷气推进实验室负责开发.ION 用 C 编写,支持 Linux, Mac OS, Solaris, VxWorks 等平台.实现的内容主要包含 BP 协议、LTP 协议、CGR 路由算法、CCSDS 的文件传输协议 CFDP^[35]和异步消息服务 AMS^[36].ION 的设计充分考虑空间网络的特性,针对节点资源紧张、链路前返向速率严重不对称、安全性要求高等空间网络独有的特性作了针对性设计,包含压缩的数据束头编码^[37]、优化的存储访问机制等特性.

另外还有 POSTELLATION, IBR-DTN 等针对特定平台和场合的研究性、实验性的 DTN 实现.

5.2 基于 DTN 的空间网络应用

NASA 开展了广泛的基于 DTN 的空间网络互联研究.在其深度撞击航天器(deep impact)中基于 DTN 体系结构进行了数据传输飞行验证^[38],参加的设施包含地面网络与地面站、深度撞击航天器以及火星和火卫一的着陆器,所有节点都部署了 ION.在 27 天的实验中,项目成功地将 300 幅图像从地面传到深度撞击航天器后传回,验证了基于 DTN 的空间网络数据传输的诸多环节,包含数据束的生成、传输、获取、动态路由计算、拥塞控制、优先

级控制、托管传输和自动重传.

在国际空间站应用环境中,也进行了 DTN 应用飞行验证实验^[39],项目成功地将空间站上的生物实验设施所产生的载荷数据传到地面控制中心.灾难检测星座(disaster monitoring constellation, DMC)中也开展基于 DTN 的数据传输飞行验证实验^[40].DMC 由一些近地轨道卫星组成星座,对地拍照后存储于卫星上,适当的时机再通过地面站传回控制中心.

文献[41]描述了在 NASA 的空间网络环境中按需提供快速上行数据服务的方案.NASA 的数据中继卫星系统受资源限制,难以为所有的服务目标提供实时的上行控制链路服务.方案提出了一种动态的按需服务的方式,通过 DTN 协议栈的使用,避免了大量定制软件的研制,能够以一种清晰、简洁的方式,满足服务的数据传输需求.

ESA 资助的“扩展 Internet 到太空”^[42]是一个研究开发项目,其目标包含评价测试 DTN 相关协议在 SIS 中的应用、为 ESA 的空间网络互联政策提供支持等.项目主体是一个实验台,实现了 CCSDS 和 DTN 的诸多协议,可以在这个平台上开展各种开发、测试和部署工作.

DTN 为 SIS 提供了有效的解决方案,但是目前太空中已经部署了大量各种类型的资产,不可能一步到位地在其中部署 DTN 协议.大部分空间资产使用了 CCSDS 的各类协议,为此 CCSDS 提出了 DTN 体系与现有的协议体系共存,并最终发展到以 DTN 为主的体系结构演进方案^[8].以 CFDP 协议为例,可以通过将 CFDP 底层支持协议置换为 DTN 相关协议,从而得到异构连接、动态路由和可靠性保障等特性,充分发挥了 DTN 体系结构的优势.

6 关键问题和研究方向

6.1 路由问题

1) 路由方式组合使用

考虑到空间网络环境的多样性,实际可能需要多种路由机制的结合使用.如在跨组织机构的任务中,可能在部分网段根据服务合同指定路由策略,部分网段动态计算.在着陆器网络中,拓扑变化可能有一定的随机性,在此环境中可采用基于拓扑发现的路由方式.基于已有知识的路由、基于发现的路由、具有一定随机性的路由在空间网络的结合应用是值得进一步研究的方向.文献[43]将 CGR 路由算法与基于发现的路由算法相结合,从而提高了性能.

2) 多播路由问题

空间网络中存在对可靠多播的需求. 如动态路由方法中,路由计算基于掌握的网络拓扑和节点端点的注册关系,这些知识需要可靠的传递到相关节点. 文献[44-45]研究了 DTN 网络的可靠多播问题,针对空间网络特性的可靠多播有待进一步研究.

3) QoS 路由

对路由协议的改进也可以提高 QoS 的保障水平. 文献[46]提出了一种在行星际网络中的基于逐跳信息交换的流控制方法,该方法在相邻的节点之间交换节点的状态信息,从而为路由提供更多的输入信息,改善拥塞问题. 但在空间网络环境中,节点信息可能难以及时交换,因此这一方法具有一定的局限性.

6.2 安全问题

1) 密钥管理与验证问题

DTN 网络节点无法实时交互,网络节点无法实时与密钥服务器或证书服务器连接,导致密钥管理和验证困难. 在针对密钥分发和管理问题的研究中,文献[47]提出了一种在 DTN 网络中进行密钥交换的机制;文献[48]提出一种在口袋 DTN 中交换公钥的机制.

在 BP 协议和 BSP 协议的设计上,DTN 网络将密钥分发机制与验证机制分离,这种设计为密钥分发研究提供了便利. 基于 ID 的加密策略(IBC)^[49]使用一个密码生成器,以 ID 为输入参数,得到节点的公钥. 基于 IBC 还有一些衍生的密钥分发方法^[50-51]. IBC 相当于“群认证”,这种方法减少了密码分发的信息量,但是密码生成器在初始阶段还是需要一个全局参数作为输入,本质上对这个全局参数的管理与对公钥的管理相同,也没有解决实时确认和密钥撤销的问题.

2) 重放攻击的处理

DTN 网络对重放攻击的处理具有一些新特点. 一般来说,数据束具有唯一标识,节点重复收到同一数据束后应该抛弃,但是在一些路由协议中,节点可能在资源受限的情况下,将数据暂存到临近节点,适当的时机取回来. 一种解决策略是最终目标节点负责剔除重复数据后再将载荷送给应用程序,但这并没有解决中间节点的资源消耗问题. 节点为了完成重复探测,需要保留一定时期的数据,但在 DTN 网络大时延的尺度下,保留时间的长度难以给出一般的结果. 综合来看,重放攻击的处理与具体的网络环境和路由协议相关.

6.3 QoS 机制

1) 基于模型的 QoS 评价

由于空间资源稀缺,难以进行较大规模的飞行验证,现有的飞行验证项目都只有很少的节点,应用场景也不复杂,对空间网络的性能验证并不充分,需要对服务质量进行充分的评价与验证.

在不能进行大规模飞行验证的前提下可以开展基于模型的评价. 典型的网络服务质量模型评价方法包括排队模型、Markov 过程模型以及随机 Petri 网模型. 网络可以看成是一个顾客-服务员的排队系统,将延迟因素加入到排队模型中,可以很好地表达 DTN 网络的服务模型. Markov 过程模型可以方便地刻画系统状态的变化规律和评估系统的性能指标,也被广泛用评价网络的服务质量. 随机 Petri 网 (SPN)能够较好地刻画复杂的系统行为,尤其是并发、同步、互斥和冲突行为.

排队 Petri 网 (queueing Petri net, QPN)模型^[52]在 Petri 网节点中引入排队机制,能够更好地表达排队网络模型. 对数据束通过 DTN 网络节点的过程,可以建立如图 8 所示的排队服务 QPN 模型,图 8 中所用符号如表 2 所示. 通过对 QPN 模型

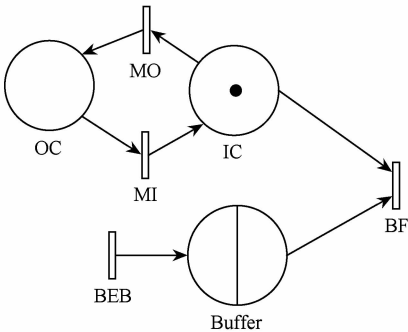


Fig. 8 QPN model of queuing and service in DTN a node.
图 8 DTN 节点排队服务 QPN 模型

Table 2 Notations
表 2 符号说明

Notation	Type	Function
OC	Ordinary Place	Model the state of out of contacts
IC	Ordinary Place	Model the state of in contacts
Buffer	Queueing Place	Model the buffer that holding bundles
MO	Transition	Model the state transition of moving out of contacts
MI	Transition	Model the state transition of moving into contacts
BEB	Transition	Model bundles entering buffer
BF	Transition	Model bundle forwarding

分析可以得到传输的服务质量特性,如延迟、抖动等.文献[53]利用 QPN 评价了 DTN 网络的中数据束的分割、调度和缓存等行为对服务质量的影响.

2) 时间同步问题

在空间网络业务应用中,时间同步数据具有一定的特殊性.航天器在生命周期时钟存在漂移,隔一定的时间就需要进行时间校正工作.时间统一数据包含当前的时间信息,中间节点对数据的暂存影响到时间数据的正确性.在传统的非网络式的空间任务中,各传输环节的延迟都是固定的,可以在数据源修正后发送.在 DTN 网络中,各中间环节的排队延迟是变化的,以往的机制不再适用.

在 DTN 网络节点延迟中,不确定性来自于 2 个方面:一个是排队延迟;另一个是连接暂停的延迟.排队延迟有 2 种处理方式:一种是节点准确计算所用的排队时间后修正数据;另一种是为时间统一数据提供最高优先级,并避免并发的时间统一数据发送.在连接暂停延迟方面需要增加暂停时间修正数据块.时间统一数据的处理涉及排队问题、加密问题以及跨组织机构等方面的问题,有待进一步的深入研究.

3) 数据束分割问题

DTN 数据束的大小是任意的.在传输过程中,可能无法一次完整传递整个束,因此需要对束进行分割,被分割的束在目标节点被重组.另外,分割也可以利用碎片化的连接时段,提高连接效率.束协议提供两种分割方式:传输前在源节点主动将束分割,称为前瞻式分割;束传输过程中连接中断,将已传部分和未传部分包装成 2 个束,称为反应式分割.

文献[54]广泛讨论了 DTN 中的数据束分割问题.文献[55-56]分析了束分割的长度选择问题.已有的研究主要针对随机移动的网络,其对网络拓扑的假设并不符合空间网络的情况,空间网络中的分割问题需要进一步的深入研究.

7 结 论

基于 DTN 的空间网络互联的体系结构逐渐成熟,关键技术不断完善,具有广阔的应用前景.文献[57]针对我国航天网络的具体情况,阐述了建设我国天地一体化航天互联网的重要意义.近年来,我国相继发射了“神舟”系列飞船、“天链”系列数据中继卫星、“嫦娥”系列月球探测器等.测控网由地基向天地基一体化发展,空间任务由近地空间向深空发

展,航天器数量增加迅速.在此大背景下,基于 DTN 实现空间网络互联,建成一体化的空间网络,可以满足多用户、多业务、动态、可扩展的数据传输需求,提高通信系统的开发和使用效率.另外,航天领域经常开展各类形式的国际合作,如测控资源的共享使用、卫星搭载、项目合作等,我国也在航天领域与其他航天机构广泛开展了合作,这也要求我们开展进一步研究与应用.

参 考 文 献

- [1] CCSDS. CCSDS 910.3-G-3. Cross support concept part 1: space link extension [S]. Washington: CCSDS, 2006
- [2] Durst R C. Why not use the standard internet suite for the interplanetary internet [EB/OL]. [2013-05-17]. <http://www.ipnsig.org/techinfo.htm>
- [3] CCSDS. Space internetworking services area [EB/OL]. [2013-05-17]. <http://public.ccsds.org/publications/SIS.aspx>
- [4] Cerf V. Interplanetary Internet (IPN): Architectural definition [EB/OL]. [2013-05-17]. <http://www.ipnsig.org/reports/memo-ipnrg-arch-00.pdf>
- [5] Fall K. A delay-tolerant network architecture for challenged internets [C] //Proc of ACM SIGCOMM 2003. New York: ACM, 2003: 27-34
- [6] Cerf V, Berleigh S, Hooke A, et al. Delay-tolerant network architecture: The evolving interplanetary internet [EB/OL]. [2013-05-17]. <http://tools.ietf.org/html/draft-irtf-ipnrg-arch-01>
- [7] Burleigh S, Hooke A, Torgerson L. Delay-tolerant networking: An approach to interplanetary internet [J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(6): 128-36
- [8] CCSDS. CCSDS 734.0-G-1 Rationale, scenarios, and requirements for DTN in space [S]. Washington: CCSDS, 2010
- [9] Cerf V, Burleigh S, Hooke A, et al. Delay-tolerant networking architecture [EB/OL]. [2013-05-07]. <http://tools.ietf.org/html/rfc4838>
- [10] Scott K, Burleigh S. Bundle protocol specification [EB/OL]. [2013-05-17]. <http://tools.ietf.org/html/rfc5050>
- [11] Lee T B, Fielding R, Masinter L. Uniform resource identifier (URI): Generic syntax [EB/OL]. [2013-05-17]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3986.txt>
- [12] Komnios I, Diamantopoulos S, Tsaoussidis V. Evaluation of dynamic DTN routing protocols in space environment [C] //Proc of IWSSC 2009. Piscataway, NJ: IEEE, 2009: 191-195
- [13] Symington S, Farrell S, Weiss H, et al. Bundle security protocol specification [EB/OL]. [2013-05-17]. <http://tools.ietf.org/html/rfc6257>

- [14] Farrell S, Symington S F, Weiss H, et al. Delay-tolerant networking security overview [EB/OL]. [2013-05-017]. <http://tools.ietf.org/html/draft-irtf-dtnrg-sec-overview-06>
- [15] Burleigh S, Ramadas M, Farrell S. Licklider transmission protocol-motivation [EB/OL]. [2013-05-17]. <http://tools.ietf.org/html/rfc5325>
- [16] Ramadas M, Burleigh S, Farrell S. Licklider transmission protocol-specification [EB/OL]. [2013-05-17]. <http://tools.ietf.org/html/rfc5326>
- [17] Sushant J, Kevin F, Rabin P. Routing in a delay tolerant network [C] //Proc of ACM SIGCOMM 2004. New York: ACM, 2004: 145-158
- [18] Burleigh S. Contact graph routing [EB/OL]. [2013-05-17]. <http://tools.ietf.org/html/draft-burleigh-dtnrg-cgr-01>
- [19] Burleigh S. Dynamic routing for delay-tolerant networking in space flight operations [EB/OL]. [2013-05-17]. <http://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2008-3406>
- [20] Edward B, Scott B, Niels K. Analysis of the contact graph routing algorithm; Bounding interplanetary paths [C] //Proc of IAC 2010. Paris: IAF, 2010: 108-119
- [21] Segui J, Jennings E, Burleigh S. Enhancing contact graph routing for delay tolerant space networking [C] //Proc of GLOBECOM 2011. Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 1-6
- [22] Caini C, Firrincieli R. Application of contact graph routing to LEO satellite DTN communications [C] //Proc of ICC 2012. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 3301-3305
- [23] Merugu S, Ammar M H, Zegura E W. Routing in space and time in networks with predictable mobility [EB/OL]. [2013-05-17]. ftp://ftp.cc.gatech.edu/pub/tech_reports/2004/GIT-CC-04-07.pdf
- [24] Fischer D, Basin D, Engel T. Topology dynamics and routing for predictable mobile networks [C] //Proc of ICNP 2008. Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 207-217
- [25] Bindra H S, Sangal A L. Considerations and open issues in delay tolerant network's (DTNs) security [J]. *Proceedings of Wireless Sensor Network*, 2010, 2(8): 645-648
- [26] Ivancic W D. Security analysis of DTN architecture and bundle protocol specification for space-based networks [C] //Proc of 2010 IEEE Aerospace Conf. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 1-12
- [27] Farrell S, Ramadas M, Burleigh S. LTP Security Extensions [EB/OL]. [2013-05-17]. <http://tools.ietf.org/html/rfc5327>
- [28] Tsao P, Wang S Y, Gao J L. Space QoS framework over a delay/disruption tolerant network [C] //Proc of 2010 IEEE Aerospace Conf. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 1-5
- [29] Cola T, Marchese M. Adaptive erasure coding for interplanetary networks with incomplete channel side information [C] //Proc of GLOBECOM 2008. Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 1-5
- [30] Cola T D, Erns H, Marchese M. Joint application of CCSDS file delivery protocol and erasure coding schemes over space communications [C] //Proc of ICC 2006. Piscataway, NJ: IEEE, 2006: 1909-1914
- [31] DTN Research Group. Dtn2Documentation [EB/OL]. [2013-05-17]. <http://www.dtnrg.org/wiki/Dtn2Documentation>
- [32] Lindgren A, Doria A, Davies E, et al. Probabilistic routing protocol for intermittently connected networks [EB/OL]. [2013-05-17]. <http://tools.ietf.org/html/draft-irtf-dtnrg-prophet-10>
- [33] Burleigh S. Interplanetary overlay network an implementation of the DTN bundle protocol [C] //Proc of CCNC 2007. Piscataway, NJ: IEEE, 2007: 27-34
- [34] Burleigh S. Interplanetary overlay network design and operation V1.8 [EB/OL]. [2013-05-17]. <https://ion.ocp.ohiou.edu/legacy/ION.pdf>
- [35] CCSDS. CCSDS 727. 0-B-4 CCSDS file delivery protocol [S]. Washington, DC: CCSDS, 2007
- [36] CCSDS. CCSDS 735. 1-B-1 Asynchronous message service [S]. Washington, DC: CCSDS, 2011
- [37] Burleigh S. Compressed bundle header encoding (CBHE) [EB/OL]. [2013-05-18]. <http://tools.ietf.org/html/draft-irtf-dtnrg-cbhe-09>
- [38] Wyatt J, Burleigh S, Jones R, et al. Disruption tolerant networking flight validation experiment on NASA's EPOXI mission [C] //Proc of SPACOMM 2009. Piscataway, NJ: IEEE, 2009: 187-196
- [39] Jenkins A, Kuzminsky S, Gifford K K, et al. Delay/disruption-tolerant networking: Flight test results from the international space station [C] //Proc of IEEE Aerospace Conf 2010. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 1-8
- [40] Wood L, Ivancic W, Eddy Wm, et al. Use of the delay-tolerant networking bundle protocol from space [C] //Proc of IAC 2008. Paris: IAF, 2008: 3123-3133
- [41] Israel D J, Davis F, Marquart J. A DTN-based multiple access fast forward service for the NASA space network [C] //Proc of SMC-IT 2011. Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 61-65
- [42] Internetworked Systems Lab. Projects [EB/OL]. [2013-05-17]. <http://www.intersys-lab.org/pages/projects.php>
- [43] Farrell S. Endpoint discovery and contact graph routing in space and terrestrial DTNs [C] //Proc of ASMS 2010 and SPSC 2010. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 89-93
- [44] Srinivasan K, Ramanathan P. Reliable multicasting in disruption tolerant networks [C] //Proc of GLOBECOM 2010. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 1-5
- [45] Ali A, Chahed T, Altman E, et al. A new proposal for reliable unicast and multicast transport in Delay Tolerant Networks [C] //Proc of PIMRC 2011. Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 1129-1134
- [46] Rango F D, Tropea M, Laratta G B, et al. Hop-by-hop local flow control over interplanetary networks based on DTN architecture [C] //Proc of ICC 2008. Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 1920-1924
- [47] Menesidou S A, Katos V. Authenticated key exchange (AKE) in delay tolerant networks [C] //Proc of SEC 2012. Berlin: Springer, 2012: 49-60

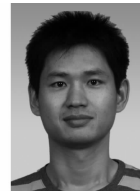
- [48] Jia Zhongtian, Lin Xiaodong, Tan Senghua, et al. Public key distribution scheme for delay tolerant networks based on two-channel cryptography [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2012, 35(3): 905-913
- [49] Asokan N, Kostianen K, Ginzboorg P, et al. Applicability of identity-based cryptography for disruption-tolerant networking [C] //Proc of MobiSys 2007. New York: ACM, 2007: 52-56
- [50] Ahmad N, Cruickshank H, Sun Zhili. ID based cryptography and anonymity in delay/disruption tolerant networks [C] //Proc of PSATS 2013. Berlin: Springer, 2010: 265-275
- [51] Patra R, Surana S, Nedeveschi S. Hierarchical identity based cryptography for end-to-end security in DTNs [C] //Proc of ICCP 2008. Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 223-230
- [52] Bause F, Kemper P. QPN-Tool for qualitative and quantitative analysis of queueing petri nets [C] //Proc of the 7th Int Conf on Modelling Techniques and Tools for Computer Performance Evaluation. Berlin: Springer, 1994: 321-334
- [53] Gunasekaran R, Mahendran V, Murthy C S R. Performance modeling of delay tolerant network routing via queueing Petri nets [C] //Proc of WoWMoM 2012. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 1-6
- [54] Pitkanen M, Keranen A, Ott J. Message fragmentation in opportunistic DTNs [C] //Proc of WoWMoM 2008. Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 1-7
- [55] Ginzboorg P, Niemi V, Ott J. Fragmentation algorithms for DTN links [J]. Computer Communications, 2013, 36(3): 279-290

- [56] Ginzboorg P, Niemi V, Ott J. Message fragmentation for a chain of disrupted links [C] //Proc of WoWMoM 2012. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 1-7
- [57] Shen Rongjun. An envision of space-ground intergrated spacenetworking in china [J]. Engineering Sciences, 2006, 10(1): 19-30 (in Chinese)
(沈荣骏. 我国天地一体化航天互联网构想[J]. 中国工程科学, 2006, 10(1): 19-30)



of network services.

Lin Chuang, born in 1948. PhD, professor and PhD supervisor. Fellow member of China Computer Federation. His main research interests include performance evaluation, stochastic Petri net and quality



Dong Yangwei, born in 1977. PhD candidate. His main research interests include performance evaluation, space networking and quality of network services (dongyw10@126.com).



Shan Zhiguang, born in 1974. PhD, professor of Informatization Research Department of the State Information Center of china. Senior member of China Computer Federation. His main research interests include computer networks, performance evaluation, and Petri nets (shanzhiguang@263.net).