

# 高延时非可靠端到端空间自组织网络研究<sup>①</sup>

周 健<sup>1,2</sup>, 孙丽艳<sup>1</sup>, 段爱华<sup>1</sup>, 施文君<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(安徽财经大学 管理科学与工程学院, 蚌埠 233041)

<sup>2</sup>(北京邮电大学 计算机学院, 北京 100876)

**摘 要:** 自组织网络具有主动应对环境变化的能力, 在空间通信应用中具有广阔的前景. 然而深空长延时、非可靠端到端的传输特点导致地面自组织网络无法直接应用于空间通信, 本文分析支撑空间自组织网络的特殊资源, 并根据空间距离和实体密度对空间自组织网络进行分类: 星地自组织网络、星间自组织网络、星内自组织网络和星际自组织网络, 分析并比较上述四种自组织网络的性能. 从网络架构、路由协议、安全管理、网络协议等方面分析空间自组织网络的研究方向. 在“预备-存储-转发-处理”机制上, 提出未来空间网络区域自治, 全网协作的架构.

**关键词:** 空间自组织网络; 宽覆盖; 高延时; 非可靠端到端; 空间拓扑

引用格式: 周健, 孙丽艳, 段爱华, 施文君. 高延时非可靠端到端空间自组织网络研究. 计算机系统应用, 2018, 27(4): 18-26. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/6257.html>

## Research on Space Self-Organizing Network with High Latency and Non-Reliable End-to-End Link

ZHOU Jian<sup>1,2</sup>, SUN Li-Yan<sup>1</sup>, DUAN Ai-Hua<sup>1</sup>, SHI Wen-Jun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(School of Management Science and Engineer, Anhui University of Finance and Economics, Bengbu 233041, China)

<sup>2</sup>(School of Computer Science, Beijing University of Post and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** The self-organizing network has the capability of actively adapting to the change of space environment. Therefore, it has a wide application prospect in space communication. This study analyzes the especial space resource for space self-organizing network, and according to the distance among space objects, the density and application scenarios space self-organizing networks are classified into four types including spatial-terrestrial self-organizing network, intra-satellite self-organizing network, inter-satellite self-organizing network, and interplanetary self-organizing network, whose networks performance are compared and analyzed. Finally, the directions of research in space self-organizing networks are introduced including network structure, network protocol, security management, and router protocol. A space network structure is suggested for local automatic and whole collaboration based on the mechanism “preparation-storage-forward-handle”.

**Key words:** space self-organizing network; wide coverage; high latency; non-reliable end-to-end; spatial topology

空间通信是空间探索的必备条件, 电路交换网络难以满足空间探索的需求, 建立多跳包交换网络将增强人类空间探索的能力<sup>[1,2]</sup>, 因此空间数据系统咨询委员会 (Consultative Committee for Space Data Systems,

CCSDS) 从九十年代开始空间网络研究, 其目的是建立若干行星附近的近空网络, 并通过星际主干网络将这些近空网络连接起来, 提高空间网络通信效率<sup>[3,4]</sup>, 如火星探测任务中建立多跳的通信网络, 在火星表面部署

① 基金项目: 国家自然科学基金 (61402001, 61402147); 安徽省高等学校自然科学基金 (KJ2013B001); 安徽财经大学重点项目 (ACKY1517ZDB)

收稿时间: 2017-03-07; 修改时间: 2017-04-10; 采用时间: 2017-07-17; csa 在线出版时间: 2018-03-31

传感器网络,在环日轨道部署多跳传输网络,将地面无线网络扩展到整个太阳系,提供空间实体的合作,不仅技术成熟节约成本,而且提高通信质量<sup>[5]</sup>。未来,将太阳系内不同轨道上的各种卫星、星座和航天器等太空信息资源进行有机连接,构建集成化、智能化、综合一体的互联网,支撑更远距离的深空探测任务<sup>[6]</sup>。

空间飞行器以集群式方式的执行空间任务,但是需要组网技术支撑<sup>[7]</sup>。自组织网络(Self-organization Networks, SN)是一种分布式、自治、多跳网络,无固定基础设施<sup>[8]</sup>,支撑任意的网络拓扑,较远的两个终端的通信可借助其它节点进行分组转发,因此移动终端具有路由和分组转发功能。它具有自治管理、快速部署、容忍损毁和拓扑变化的特点<sup>[9]</sup>,不仅适应飞行器群组的网络通信,如航空自组织网络(Aeronautical Ad Hoc Network)、飞行器自组织网络(Flying Ad Hoc Network),也契合深空网络的环境,既可以作为深空主干网络<sup>[10]</sup>,也可用于行星探测的传感器网络,自组织性能减少了地面干预,提高自主运行程度,因此自组织网络在空间具有广阔的应用前景,把部署在空间中的自组织网络称为空间自组织网络(Space Self-organization Networks, SSN)。美国航天局(NASA)早期在开展地球环境监测技术研究时就提出 sensor-web 构想,即由小型卫星群、天基和低级设备互联构成有机统一的信息系统;Shen 将这一构想推广到了星际探测通信体系结构中,提出了 Ad Hoc Space Network<sup>[11]</sup>的概念,此后又涌现了 Satellite Sensor Network<sup>[12]</sup>、Space-based WSN<sup>[13]</sup>等概念。但是空间环境与地面环境显著不同,广阔的部署面积,遥远距离、超长飞行时间、开放复杂空间环境、高昂运输成本、受限制的支撑平台,后期维护困难,这些因素导致地面自组织网络技术应用于空间通信将会面临巨大的挑战<sup>[14]</sup>。

## 1 空间网络支撑资源

空间成员依赖一些特定的网络资源建立网络。

(1) 频谱资源,频率资源是一种有限的、不可再生的自然资源。不仅地面无线网络和空间无线网络竞争频谱资源,而且空间网络也在竞争频谱资源,美国 GPS 系统和俄罗斯的格洛纳斯卫星导航系统已占用了 80% 的“黄金导航频段”。目前空间通信使用的频段包括: C 波段、Ku 波段、UHF 波段、S 波段等,这些波段具有不同的物理传输特性。未来动态分配频谱模

式如认知无线电是自组织深空网络频率资源管理的一个重要选择。

(2) 轨道资源,空间实体依据轨道运行,不同轨道的通信实体具有不同的性能。在环绕行星的轨道方面,以对地静止轨道位置资源为例,静止轨道固定在距地 35 786 公里处,一颗静止卫星可以覆盖地球表面约 40% 的区域,且地球站天线容易跟踪,信号稳定,因此大多数通信卫星、广播卫星、气象卫星都选用静止轨道位置。但是轨道资源有限,且一条轨道上可支撑的空间实体也是有限的,同一频段、覆盖区域相同或部分重叠的对地静止卫星相互间隔一定的距离,例如两颗卫星之间需要在经度上间隔不小于 2 度,导致在整个对地静止轨道上的同频段卫星通常不会超过 150 个。在环日轨道方面,太阳系内的轨道资源具有特殊性质,根据太阳系内九大行星的运行轨道将太阳系内的通信分成九层,每一层次的距离、部署密度、与地球的关系都显著不同,如行星轨道遵循开普勒三大定律。

(3) 空间位置资源,如同轨道资源一样,空间中的一些特殊地理位置具有通信优势,如拉格朗日点,拉格朗日点是一组天体力学的平衡点,具有不变的位置和稳定的环境,在日地系统、地月系统中均存在五个拉格朗日点。在这些点放置中继探测器、卫星或者空间站,可以建立一个稳固的深空通信节点,保持中继卫星和行星的稳定拓扑关系。未来利用地月系统、日地系统、日金系统和日火系统的四个拉格朗日点构造骨干网络节点,优化网络通信。

(4) 空间实体的能力,空间实体的能力受到严格的限制,一方面空间实体的体积受到限制,因此携带的电池、存储器和计算器都是有限的,而且后期维护或替换基本不可行;一方面,空间网络的实体节点受空间物理支配,在空间的位置按照一定的规律动态变化,导致空间互联网的拓扑结构也随时间进行有规律的变化,空间的拓扑位置也限定了空间实体的能力,如离太阳越远的空间实体,在环日轨道上具有较大的周期,较小的速度、角速度和加速度。

(5) 时间同步,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,称为时间漂移,空间实体隔一定的时间就需要进行时间校正工作。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,基于存储转发模式难于精确控制时间,导致时间数据

的非正确性。

(7) 拓扑结构, 拓扑的剧烈变化导致频繁的网络分割, 网络节点的密度随时间和空间不同而剧烈变化, 一方面导致空间实体在不同的区域内切换, 导致系统资源浪费; 一方面可能会导致某一时间内节点过于密集, 或者过于稀疏, 稀疏地区的连通性会降低。

(8) 信道链路质量, 通信容量和通信带宽, 它们是空间通信中最稀缺的资源. 链路带宽受到硬件性能、存储容量和传输能量等限制. 信道误码率为  $10^{-4}$  到  $10^{-3}$  之间, 而空间网络的信道最差误码率为  $10^{-1}$ , 空间信道与地面信道之间的显著差异, 使得 TCP/IP 协议中的拥塞、数据包确认、重传机制难于应用于空间网络。

(9) 天体路径关系, 以太阳系为例, 太阳系内最重要的星体为太阳和九大行星, 九大行星运行具有明显规律, 共面、逆行和环绕. 天体在运行中距离发生改变, 由此对网络通信产生影响。

表1 地面自组织网络与空间自组织网络支撑资源对比

支撑资源名称	地面自组织网络	空间自组织网络
频谱资源	竞争使用,	竞争使用
无线信号方向	全向	定向或全向
移动轨迹资源	随机游走模型	环日轨道、环行星轨道
位置资源	地面环境无特殊节点	拉格朗日
实体的能力	有限, 可替换	有限, 不可替换
时间同步	一般	时间漂移, 定期调整
拓扑结构	覆盖面积有限, 二维结构	覆盖面积较大, 三维结构
端到端	可靠的	非可靠的
信道链路质量	误码率为 $10^{-1}$	误码率为 $10^{-4}$ 到 $10^{-3}$ 之间

## 2 空间自组织网络

未来空间网络的建立以火星探测为目标, 因此空间通信技术的应用主要从地球扩展到太阳系区域. 因此考察空间自组织网络技术的应用, 从延时、距离、密度、覆盖范围和网络规模进行分类。

### 2.1 星地互联自组织网络

星地互联自组织网络是指新一代低轨卫星网络和地面无线自组织网络组成的星地一体化网络<sup>[15]</sup>, 如通过铱星网络、O3b 卫星网络或 OneWeb 组成空间自组织网络与地面自组织网络进行通信. 星地互联自组织网络由行星表面的多个实体和该行星轨道上的多个实体组成的自组织网络, 网络成员分为两大类, 地表的网络实体和轨道上的实体, 广泛的应用于地球观测应用和行星的深空探测任务, 如图 1 所示, Ad Hoc 科学地球观测卫星网络 (SEO) 由多个地面站和多个卫星动态

配置而成. 地面和空间实体在性能和功能上具有显著差异, 轨道上的实体比地表实体具有更高的速度, 覆盖面积更大, 不受地形影响, 但是运行轨迹固定, 管理复杂, 而地表的实体密度大于空间的实体密度, 行动自由, 因此星地互联自组织网络既能克服地理环境的局限, 也能提供大容量、低时延的网络覆盖, 克服地面环境对地面自组织网络的通信限制, 反之地面自组织网络可以提供更为精确的操作. 星地互联自组织网络一跳的传输延时时间根据轨道的位置在 30 ms (LEO) 到 300 ms (GEO) 之间, 网络带宽在 10 Mbit/s 到 10 Gbit/s 之间, 随着轨道高度的增加, 在 GEO、MEO、LEO 上的卫星密度逐渐减小, 单个轨道内的实体数量从几十个到几百颗不等. 因此星地互联自组织网络具有明显的层次性, 每层具有不同的物理属性。

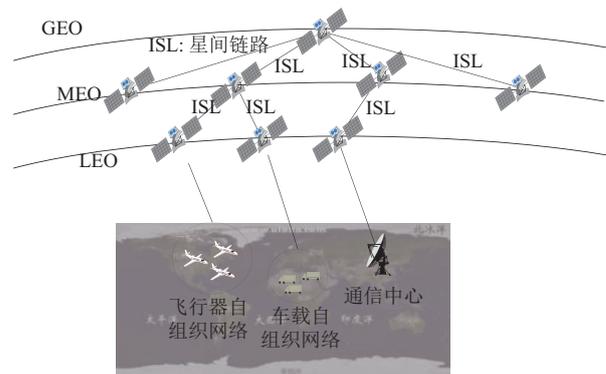


图1 星地互联自组织网络

### 2.2 星内自组织网络

星内自组织网络是指部署在分布式集群空间飞行器系统中的一种网络, 分布式集群空间飞行器系统中各组成部件的通信呈现自组织网络性质. 分布式集群空间飞行器系统<sup>[16]</sup>是指空间实体分解发射到空间, 并在空间自由组合, 运行在不同轨道的空间实体分解的模块通过组网构成一个异构集合群体, 各模块可被替代, 各个模块之间具有数据信息的交换的能力, 实现不同模块之间的资源共享和分布式计算, 提高空间系统对不确定性的快速反应能力. 在特定的空间任务中, 空间模块可以加入、退出、合并、分裂、替换, 集群能够快速地完成集群组建、构型变化及模块飞行器分离/切换等操作, 自组织网络在分布式集群空间飞行器系统中的应用提高空间系统对不确定性的快速反应能力和自主管理能力。

根据这一构思, 2006年美国国防预先研究计划局(DARPA)提出“分离模块化航天器”的概念, 并制定了“未来、快速、灵活、模块化、自由、飞行”的F6计划, 航天器按功能分解为有效载荷、动力、能源、控制和通信等专门模块, 将这些模块物理分离, 各模块通过多次发射在空间形成分布式结构, 通过编队飞行和无线传输方式构成一颗虚拟的大卫星, 经过轨道周期调整行程初始构型, 通过信息交互方式建立网络的初始资源配置及初始路由信息, 完成特定的任务. 无线传输技术、编队飞行控制技术、网络化技术和分布式计算技术成为F6计划的关键技术, 其中网络化技术的目标是使“分离模块航天器”构成一个自组织网络, 功能模块自组织加入到网络中, 网络规模随着模块的加入自适应扩展, 具有高可靠性和高可用性. 由于“分布式集群空间飞行器”系统有一定的作用半径, 因此星内自组织网络的成员距离是有限的, 星内分散的成员距离在几米到几十米距离之间, 集群间传输控制指令而非数据, 因此对带宽较低, 密度与地面自组织网络相似, 但是与地面自组织网络不同, 星内自组织网络不仅是异构的, 而且需要多个异构实体组合具有功能性, 单个的实体不具有功能性. 星内自组织网络以功能为导向, 强调成员间通过通信进行协作.

### 2.3 星间集群自组织网络

星间自组织网络是指由多颗同构的空间实体以自组织网络形式通信, 空间实体身份对等, 承担数据转发任务. 根据空间实体距离的大小, 分为三种: (1) 星群; (2) 星座; (3) 编队飞行. 距离分布从几十米到几千米<sup>[17]</sup>. 根据轨道位置, 分为单轨道和多轨道.

卫星星座部署在单一轨道内, 环绕卫星位于多边形的顶点, 并相对于某一参考卫星(或虚拟卫星-基准点)形成特定的编队构形在轨道上飞行. 以编队飞行绕飞轨道(Flying Around Orbit)的卫星群(Satellite Cluster)组成空间自组织网络, 空间距离较近, 飞行器群同构, 例如AFRL计划在2004年发射三颗卫星在椭圆轨道上飞行, 卫星相对距离为100米到5公里. 卫星星座布置在多个不同的轨道上, 如图2所示, 形成一个三维的拓扑结构. 如多个卫星组成环绕不同轨道的Delta星座和玫瑰星座. 如多个立方体纳形卫星可以组合成一个微型卫星<sup>[18]</sup>, 在以星座组网或星群编队的形式执行分布式空间任务方面, 具有极大的优势.

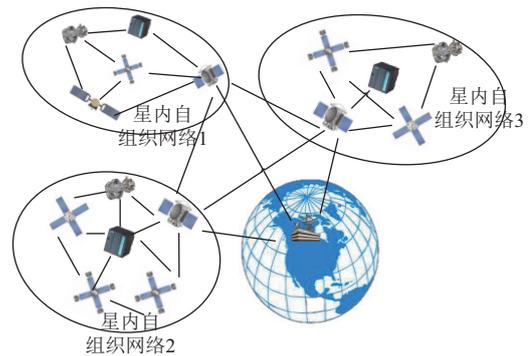


图2 基于F6结构的卫星组件群

皮纳卫星体现航天器微型化趋势. 文献[19]将地面Ad Hoc网络的概念引入到皮纳卫星集群飞行任务中, 提出了皮纳卫星Ad Hoc网络的概念. 皮纳卫星在质量、体积和功耗上要求更为苛刻, 纳卫星重量在10 kg以下, 皮卫星在1 kg以下. 卫星的距离在1 m到10 m之间. 要求控制精度较高. NASA提出的ANTS计划(Autonomic Nano Technology Swarm)中的PAM计划预计于2020~2025年构建由1000颗皮卫星组成的集群航天器系统, 用于对小行星带进行科研观测, 此系统的拓扑具有规律性, 每颗皮星都将搭载特定的检测设备以及智能化的星载计算机, 使得整个分布式系统针对空间任务的不同工况具有自主性, 能够智能调配网络中资源以保证任务的顺利执行.

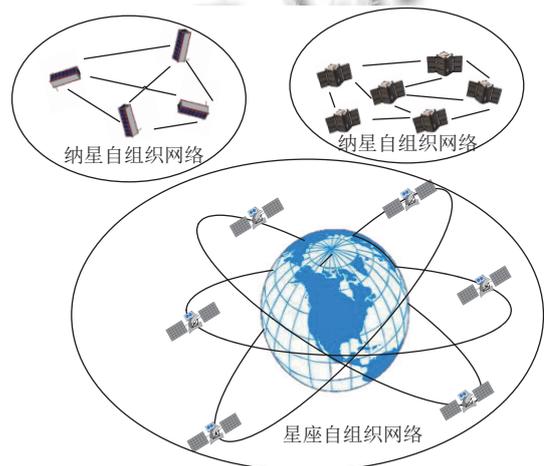


图3 立方体星空网络结构组成

空间实体分布密度依赖轨道特点和卫星性能, 分布在同一轨道内的卫星, 间隔2~3度, 因此同一轨道内的卫星最多150颗, 而皮纳卫星受限体积和质量, 因此空间传输距离有限, 皮纳卫星群的密度较大.

### 2.4 星际自组织网络

为了实现行星间的信息传输,一种通用信息交换网络星际英特网 (Interplanetary Internet Network, IPN) 被提出,并作为空间主干网提供行星间的互联互通. 目前, IPN 只是提出一个框架,具有传输延时大、传输损耗大、断续通信、信道误码率高等缺陷,采用 Internet 的 TCP/IP 技术是不能满足星际间的传输需求.

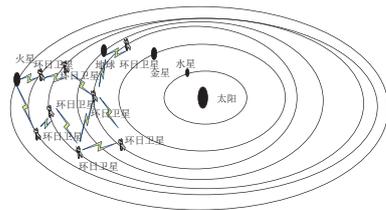


图4 星际自组织网络

将自组织网络应用在星际主干网络中,称为星际自组织网络 (Interplanetary Self-organization Network, IPSN). 空间实体被部署在不同的行星轨道上,传输距离在两个行星之间的最长和最远距离之间,如火星和

地球之间的距离在 5500 万公里到 4 亿公里之间. 行星之间的超远距离,使得传输延时单位在分钟,甚至小时. 由于空间实体被部署在不同的行星附近,因此星际自组织网络的密度非常稀疏. 地球与其他行星之间的光时也是随着时间变化的,大约一年时间能够偏移 1 s 到 270 ms 不等,提供准确的同步支持在星际自组织网络很重要. 高速移动性、较大的覆盖面积导致链路的状态较大,信号传播模型和天线的结构是物理层关注的焦点,因此 MAC 层设计是一个显著挑战,而目前的 IEEE 802.11 协议的物理层和链路层也不适用长距离的通信传输,如基于全方向的天线和信道模式. 星际间的长时间链路需要保存一些信息: 拓扑管理, 路径计算, 异构网络管理, 因此星际自组织网络的实体具有较强的存储、计算等能力.

如表 2 所示,给出四种不同空间自组织网络的对比,星内自组织网络与地面自组织网络较为相似,但是具有异构性,而星际自组织网络与地面网络的差距最大,星地互联自组织网络具有不同的层次结构,星间自组织网络覆盖面积比地面自组织网络大.

表 2 空间自组织网络的比较 (AU 为一个地日距离, 7.9 km/s 为第一宇宙速度, 11.2 km/s 为第二宇宙速度.)

网络名称	覆盖范围	距离	密度	轨道位置	
星地互联自组织网络	行星	几千到几万公里之间	一般	多个行星轨道	
星内自组织网络	行星	几十米到几百米之间	一般	多个行星轨道	
星间集群自组织网络	行星	几百米到几公里之间	一般	多个行星轨道	
星际自组织网络	恒星	0.5AU到几个AU之间	稀疏	多个环日轨道	
网络名称	延时	端到端链路	速度	异构	功能
星地互联自组织网络	30 ms-300 ms	一般	<7.9 km/s	地表与空间实体异构	完整
星内自组织网络	<10 ms	较好	<7.9 km/s	异构	部分
星间集群自组织网络	<100 ms	较差	<7.9 km/s	同构	完整
星际自组织网络	几十分钟到几十小时之间	很差	<11.2 km/s	同构	完整

### 3 研究方向

未来空间探索具有四个趋势, (1) 长距离探索, 空间探测从近地空间、月地空间过度到深空空间, 空间探测区域从地球区域扩展到太阳系区域, 以火星探测为核心内容的深空探测; (2) 轨道环绕, 从飞行轨道上看, 从飞掠勘察探测逐步过渡为更为深入的长期环绕遥感探测; (3) 从飞行器能力上, 短期的低智能探测器将逐步过渡到具高度自主性的移动机器人探测器; (4) 从空间实体规模看, 近地轨道单探测器的观测任务将逐渐过渡到多探测器阵列观测灵活性更强的探测任务. 自组织空间网络的发展需要满足上述发展趋势.

#### 3.1 空间网络协议栈

在网络结构中, 将空间不同轨道的各种卫星、星座和航天器等太空信息资源进行有机连接, 构建集成化、智能化、综合一体的太空信息网络需要网络协议支撑. 目前鲜有文献论述自组织网络协议栈, 或是改进协议栈中某个层次, 或是重新构造物理层. 空间网络协议栈的研究集中空间互联网协议<sup>[20]</sup>, 主要有四种: (1) 空间 IP 协议, 与地面通信无需协议转换, 技术成熟, 但是极高的延时对于基于端到端重传协议和短延时的 TCP 来说是满足不了深空传输性能要求. (2) 自主开发的空通信协议 SCPS, 基于 TCP/IP 的重传机制仍旧限制 SCPS 的应用前景. (3) CCSDS 高级在轨系统标

准,CCSDS 体系结构不完整,难于和地面网络互连,必须进行协议转换。(4)DTN 协议<sup>[21-23]</sup>,DTN 引入捆绑层,进行虚信息的发送而不是分组交换,不假定在发送端和接收端存在端到端的路径,解决了高延时和高误码率的问题,目前 DTN 协议主要构建在基于窗口和多次握手的 TCP/IP 协议基础上<sup>[24]</sup>。四种协议主要借鉴 Internet 协议,因此距离空间自组织网络的应用需求还有一定距离。未来,IPV4 地址规模不能满足空间需要,协议栈中空间地址需要进一步扩展;可靠传输协议需要适应空间物理属性,协议栈中存储空间属性知识,有利于数据转发效率。

### 3.2 空间自组织网络路由协议

空间自组织网络路由协议:空间自组织网络的路由协议设计是一个关键问题,由于空间环境复杂、误码率较高、延时较大、无全局信息给路由设计带来巨大的障碍。极端的环境限制和无法获得及时的维护,空间路由设计需要分布式处理和本地决策,以实现路由的自治和可重组。

目前空间路由设计主要分为两类:一类基于空间位置属性预测的路由协议<sup>[24]</sup>,空间自组织网络的实体具有显著的运行规律,空间中节点在一定范围内绕飞,组成的拓扑结构具有周期性,航天器和天体之间的运动规律具有确定性,因此针对航天任务的路由算法与传统的基于预测的地面路由算法具有本质的不同,专门针对提出了连接图路由算法在算法中假定链路的连接机会是计划好或者规划好的而不是预测或发现的。利用空间实体的轨道知识提高路由选择质量<sup>[25]</sup>,文献<sup>[26]</sup>在测试床的基础上设计 Contract Graph Router,能够根据天体运行规律预测实体的运行轨道,因此空间实体具有全局路由的拓扑结构,并在此基础上验证了多条通信比单跳通信具有更好的传输效率。一类通过优化现有协议性能的路由协议,文献<sup>[27]</sup>中研究了基于 DTN 的路由协议的最大吞吐量问题,并且考虑了端到端的时变对拓扑结构的影响问题,文献<sup>[28,29]</sup>基于能量和链路状态设计包的阻塞因子,为拥塞控制策略使用。目前路由研究主要集中于环绕地球的行星轨道的卫星星座、星地网络和飞行编队,上述的路由设计,距离和延时都较短<sup>[30,31]</sup>。SGR 路由协议基于层次结构<sup>[32]</sup>,分为两个部分外部 SGR 和内部 SGR,前者使用基于位置预测的方向性广播解决不自治域之间的数据传输问题,后者采用接受者初始化按需路由 RIRO 解决自治

域内的数据传输问题。

自组织网络中有两类路由,先验式路由维护全局网络信息,难于在覆盖范围巨大,长延时的空间范围内维护一致的、及时的、准确的路由信息。反应式路由包括按需距离矢量路由协议(AODV)和动态源路由协议(DSR)。AODV 记录下一条时间,鉴于空间实体的轨道具有可预期性,因此将下一条的选择应与空间实体的物理特性和轨道运行规律相结合,适合网络规模较大,距离较近的空间网络。DSR 中每个节点记录整个路由,因此路由信息结构多于 AODV,路由表的维护也应与空间实体的物理特性和轨道运行规律相结合,适合网络规模稀疏,距离较远的空间网络。巨大的覆盖面积使得实际应用中需要多种路由机制的组合使用。将 DTN 路由技术应用于 Ad Hoc 网络的 AODV 和 DSR 中,利用“存储、携带、转发”的机制,以及在空间中一些特殊的位置部署转发节点,能够提高数据转发的成功率<sup>[33]</sup>。进一步将未来空间路由的一项重要指标是优化能源,降低数据传输的能源消耗极大的提高空间实体的生命周期。星图识别的导航应用于空间网络路由设计<sup>[34]</sup>,空间实体通过识别空间星座寻找可达路径,使得空间实体的路由选择具有自主应对环境的能力。

### 3.3 空间自组织网络安全管理

空间自组织网络的安全包含两个方面,网络信息传输的数据安全和支撑网络硬件设备的物理安全。

在物理安全性上,空间实体很容易被捕获或者损毁,宇宙辐射或太阳耀斑可能引发实体重启,空间物体的碰撞很容易造成单点失效问题。

在数据安全性上,数据传输的跨越距离如此之长,空间覆盖面积大、环境更加开放,空间自组织网络安全威胁更加严重,很容易被攻击者窃取篡改,因此提供加密和认证是十分必要的<sup>[35]</sup>。一方面,在集中式的安全管理策略建立认证中心 CA 或密钥管理中心 KMC 的方式难以实现覆盖空间网络,很容易造成单点失效和拒绝服务问题,造成网络拥塞和服务的长时间延时;一方面,基于身份的密钥减少密钥分发和验证、提高自组织空间网络管理效率,无需在线密钥管理中心支持,但是系统安全性有赖于基于双线性对的主密钥<sup>[36,37]</sup>;最后,长距离传输必然导致长延时效应,数据在传输中保留时间的不确定性、高速飞行<sup>[38]</sup>和非可靠端到端导致空间网络很容易遭受重放攻击,基于时间的抗中间人攻击的密钥协议无法应用具有时间漂移的空间网络

中. 一些新的密钥协议和认证方案被应用于空间网络中, 如基于单加密密钥多解密密钥的密钥交互协议本地化的更新密钥减少通信延时和网络负载<sup>[39-41]</sup>, 基于属性的加密解密密钥协议适用于星内自组织网络, 群授权提高认证的灵活性和效率性, 而且经过的多次加密解密不能破坏源的认证过程<sup>[42]</sup>. 空间网络的安全研究主要集中在卫星的密钥管理, 适合星地、星内合星间的自组织网络, 而对于星际自组织网络, 长时间的延时和非同步性破坏了上述密钥管理的运行基础.

### 3.4 拓扑和移动模型研究

自组织网络应用不同的环境, 具有不同的移动模型. MANET 网络的移动模型为 Random Waypoint Mobility Model, 随机路点移动模型. VANET 网络的移动模型基于公路结构, FANET 的移动模型空间飞行轨迹, 空间自组织网络的移动模型是环行星或环日轨道结构, 飞行的轨迹具有较强的可预测性.

为保持飞行姿态和轨道, 空间实体必须保持一定的速度, 如为达到环绕地球的第一宇宙速度和环日的第二宇宙速度, 这些空间实体的运动速度远高于地面的无线自组织网络实体的速度.

空间网络的拓扑结构和移动也导致网络覆盖区域的不同, 如 Iridium 几乎中 66 颗卫星提供实施全覆盖的地球通信<sup>[43]</sup>, A-Train 计划中 6 个同步卫星提供地球大气和表面的三维数据<sup>[44]</sup>.

集群航天器网络拓扑变化频繁, 网络中传输的数据包含各类控制参数, 如编队控制指令等, 网络对数据传输时延、丢包率等指标的要求更为严格. 拓扑和移动模型决定“预备-存储-转发-处理”机制性能.

### 3.5 空间自组织网络架构

空间自组织网络架构决定未来空间网络的性能和属性<sup>[45]</sup>. 未来火星探测空间网络的建立有赖于合理的网络架构设计. NASA SPACE Communication 提出空间通信结构 (Space Communication & Navigation Architecture, SCNA), 包括四层结构, 网络层 (overlapping network)、安全层 (security)、频谱管理层 (RF Spectrum) 和导航层 (Navigation architecture). 该结构建立在空间实体的部署位置基础上, 未来空间自组织网络架构也应满足此要求, 但是该结构未考虑空间物理特性, 以及复杂结构导致的大规模数据和处理的失效性, 特别是空间的时空结构、星图结构、以及分布式

飞行器分离模块的结构等.

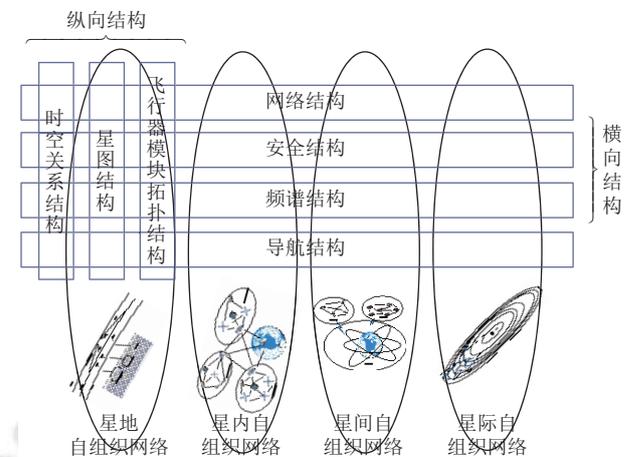


图5 空间自组织网络架构

空间自组织网络的整体结构由上述四种不同的空间自组织网络融合而成, 建立以星际自组织网络为主干网, 星内/星间自组织网络为转发网, 星地自组织网络为末端的空间一体化网络, 网络容忍空间实体的拓扑结构变化, 自治区域无中心网络. 其中星际自组织网络覆盖面积广阔, 长距离的传输延时使得协议栈中的链路协议和路由协议难于建立可靠的端到端链接, 在时空结构的基础上建立存储转发机制, 如图6所示; 星内自组织网络距离较近, 一次任务由多个模块完成, 因此对星内自组织网络的实时通信要求较高, 在分布式飞行器分离模块的基础上建立即时通信网络; 星间自组织网络和星地自组织网络基于星图结构建立可靠通信网络, 如图6所示. 空间自组织网络的实体根据本地的空间属性自治的管理通信资源, 提高通信效率.

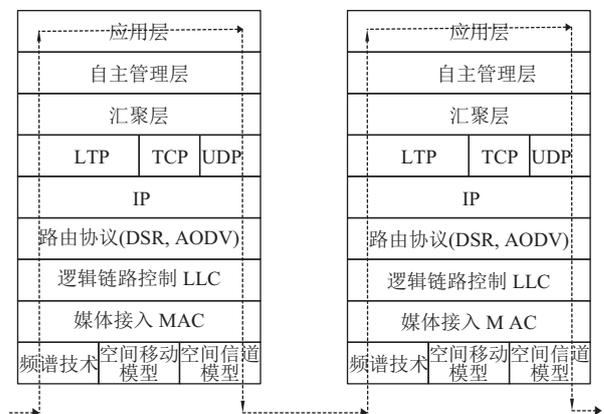


图6 基于 DTN 的自组织网络协议栈

#### 4 空间自组织网络发展的几点建议

结合当前空间技术发展现状以及未来空间任务的需求,空间自组织网络的主要研究任务可分为以下几点:

(1) 以皮纳卫星为组网对象,探索基于微型卫星的空间自组织网络技术,探索在欠缺资源条件下建立面向集群任务需求的空间自组织网络资源管理优化的新方法和新机理。

(2) 基于地面自组织网络与 DTN 网络的融合,探索 DTN 网络的汇聚层和自组织网络的路由层、传输层融合方法。

(3) 研究空间实体的物理运动规律和信息传播之间的规律,从而建立空间的信息物理网,结合空间飞行器运行轨道、特殊物理位置点和资源调度设计空间自组织网络的路由发现机制,改进现有的自组织网络路由协议,将空间属性融入协议中,提高位置预测概率进而提高存储转发策略的成功率。

(4) 部署空间 PKI 基础设施,设计延时少、交互少、更新规模少的群组密钥管理方案,提高空间网络的安全。

(5) 建立空间数据库,通过空间数据库的大数据分析为空间网络提供预测。

#### 5 结束语

空间自组织网络的提出适应未来空间技术的需求。首先,编队飞行、分离模块航天器、星簇结构、卫星集群等分布式空间体系结构相关概念相继被提出,多航天器协同开展空间任务成为空间技术发展的一个重要趋势。其次,整体式的航天器构造成本高昂,各部分耦合程度较高,单个部件的损毁影响整个航天器的寿命因此深空探索自主系统体系结构将由集中式自主运行模式向分布式自主运行模式发展。最后,针对深空的探测活动日益增多,如何利用网络技术支撑空间探索,需要在空间部署主干网络,主干网络的性能决定空间探索的效率。综合上述,自组织网络的内在特性能够主动应对环境的变化,自治调整网络属性,无需人工干预的前提下提高通信效率,因此自组织网络在空间中具有广阔的应用前景。

#### 参考文献

- 1 Wu WR, Liu WW, Qiao D, *et al.* Investigation on the development of deep space exploration. *Science China Technological Sciences*, 2012, 55(4): 1086–1091. [doi: 10.1007/s11431-012-4759-z]
- 2 Rucker MA, Thompson S. Developing a habitat for long duration. deep space missions. *Global Exploration 2012 Conference*. 2012. 1–10.
- 3 Choi KK, Maral G, Rumeau R. A new generation space communication protocol standard for multi-hopped file transfer. *Proceedings of the IEEE 49th Vehicular Technology Conference*. Houston, TX, USA. 1999, 1. 161–165.
- 4 Schier JS, Rush JJ, Dan Williams W, *et al.* Space communication architecture supporting exploration and science: Plans and studies for 2010–2030. *1st Space Exploration Conference: Continuing the Voyage of Discovery*. Orlando, Florida, USA. 2005, 1. 129–161.
- 5 Net MS, Del Portillo I, Cameron B, *et al.* Architecting space communication networks under mission demand uncertainty. *Proceedings of 2015 IEEE Aerospace Conference*. Big Sky, MT, USA. 2015. 1–10.
- 6 Reinert JM, Barnes P. Challenges of integrating NASAs space communication networks. *Proceedings of 2013 IEEE International Systems Conference*. Orlando, FL, USA. 2013. 475–482.
- 7 陈庆,张锦绣,曹喜滨. 集群航天器网络发展现状 & 关键技术. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(4): 1–7. [doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.201510012]
- 8 Camp T, Boleng J, Davies V. A survey of mobility models for ad hoc network research. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2002, 2(5): 483–502. [doi: 10.1002/(ISSN)1530-8677]
- 9 Yang H, Luo HY, Ye F, *et al.* Security in mobile ad hoc networks: Challenges and solutions. *IEEE Wireless Communications*, 2004, 11(1): 38–47. [doi: 10.1109/MWC.2004.1269716]
- 10 Azman MA, Ariffin SHS, Faisal N, *et al.* Auto mobile ad hoc mechanism in delay tolerant network. In: Sulaiman H, Othman M, Othman M, *et al.* eds. *Advanced Computer and Communication Engineering Technology*. Cham: Springer, 2015, 315: 915–924.
- 11 Shen CC, Rajagopalan S, Borkar G, *et al.* A flexible routing architecture for ad hoc space networks. *Computer Networks*, 2004, 46(3): 389–410. [doi: 10.1016/j.comnet.2004.06.013]
- 12 Vladimirova T, Wu XF, Bridges CP. Development of a satellite sensor network for future space missions. *Proceedings of 2008 IEEE Aerospace Conference*. Big Sky, MT, USA. 2008. 1–10.
- 13 Sear RP, Jackson G. Opportunities and challenges of wireless sensor networks in space. *International Astronautical Federation*, 2010, 28(87): 517–521.
- 14 Wu WR, Liu WW, Jiang YP. Development of deep space exploration beyond the moon (I). *Aerospace China*, 2011, 7: 9–12.
- 15 杨昕,孙智立,刘华峰,等. 新一代低轨卫星网络和地面无线自组织网络融合技术的探讨. *中兴通讯技术*, 2016, 22(4): 58–63.
- 16 马宗峰,辛明瑞,申景诗,等. 分布式集群空间飞行器综述. *航天器工程*, 2013, 22(1): 101–105.
- 17 林来兴. 分布式小卫星系统的技术发展与应用前景. *航天*

- 器工程, 2010, 19(1): 60–66.
- 18 Bourke J, Udrea B, Nayak M. Pirarucu: The Mars moon prospector. Proceedings of 2016 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA. 2016. 1–6.
- 19 Drentschew M, Marszalek M, Zeiger F, *et al.* Nano-satellite based mobile ad-hoc networks-a requirements study. Accepted for 1st International SPACE World Conference, 2010.
- 20 安建平, 靳松, 许军, 等. 深空通信网络协议的发展与展望. 通信学报, 2016, 37(7): 50–61.
- 21 Caini C, Cruickshank H, Farrell S, *et al.* Delay-and disruption-tolerant networking (DTN): An alternative solution for future satellite networking applications. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11): 1980–1997. [doi: [10.1109/JPROC.2011.2158378](https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2158378)]
- 22 林闯, 董扬威, 单志广. 基于 DTN 的空间网络互联服务研究综述. 计算机研究与发展, 2014, 51(5): 931–943. [doi: [10.7544/issn1000-1239.2014.20130769](https://doi.org/10.7544/issn1000-1239.2014.20130769)]
- 23 Wang RH, Taleb T, Jamalipour A, *et al.* Protocols for reliable data transport in space internet. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009, 11(2): 21–32.
- 24 Chen C, Chen ZS. Routing different traffic in deep space networks. Proceedings of 2007 International Workshop on Satellite and Space Communications. Salzburg, Austria. 2007. 237–241.
- 25 El Alaoui S, Palusa S, Ramamurthy B. The interplanetary internet implemented on the GENI testbed. Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). San Diego, CA, Chile. 2015. 1–6.
- 26 Xing YL, Ge N, Wang YZ. Resource-constrained maximum network throughput on space networks. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2015, 26(2): 215–223. [doi: [10.1109/JSEE.2015.00026](https://doi.org/10.1109/JSEE.2015.00026)]
- 27 Bardi M, Guo W, Xie P. Research on multicast routing for deep space networks based on DTN. Proceedings of International Conference on Cyberspace Technology (CCT 2014). Beijing, China. 2015. 1–5.
- 28 Wang JJ, Jiang CX, Zhang HJ, *et al.* Aggressive congestion control mechanism for space systems. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2016, 31(3): 28–33. [doi: [10.1109/MAES.2016.150117](https://doi.org/10.1109/MAES.2016.150117)]
- 29 Caini C, Firrincieli R. Application of contact graph routing to LEO satellite DTN communications. Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Communications. Ottawa, ON, Canada. 2012. 3301–3305.
- 30 Diana R, Lochin E, Franck L, *et al.* A DTN routing scheme for quasi-deterministic networks with application to LEO satellites topology. Proceedings of 2012 IEEE Vehicular Technology Conference. Quebec City, QC, Canada. 2012. 1–5.
- 31 Chen C, Chen ZS. Towards a routing framework in ad hoc space networks. International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing, 2010, 5(1): 44–55. [doi: [10.1504/IJAHUC.2010.030002](https://doi.org/10.1504/IJAHUC.2010.030002)]
- 32 李陟, 姜怡, 李千目, 等. 基于稳定闭域的异构无线网络混合路由策略. 通信学报, 2012, 33(9): 95–104.
- 33 张磊, 何昕, 魏仲慧, 等. 基于星图识别的空间目标快速天文定位. 光学精密工程, 2014, 22(11): 3074–3080.
- 34 Jiang CX, Wang XX, Wang J, *et al.* Security in space information networks. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(8): 82–88. [doi: [10.1109/MCOM.2015.7180512](https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7180512)]
- 35 Liu YC, Zhang AX, Li JH, *et al.* An anonymous distributed key management system based on CL-PKC for space information network. Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). Kuala Lumpur, Malaysia. 2016. 1–7.
- 36 杨德明, 慕德俊, 许钟. Ad hoc 空间网络密钥管理与认证方案. 通信学报, 2006, 27(8): 104–107.
- 37 Zhou J, Sun LY, Zhou XW, *et al.* High performance group merging/splitting scheme for group key management. Wireless Personal Communications, 2014, 75(2): 1529–1545. [doi: [10.1007/s11277-013-1436-x](https://doi.org/10.1007/s11277-013-1436-x)]
- 38 Zhou J, Zhou XW. Anonymous shared certificate entity authentication protocol. Wireless Personal Communications, 2013, 72(4): 2761–2772. [doi: [10.1007/s11277-013-1179-8](https://doi.org/10.1007/s11277-013-1179-8)]
- 39 Wang XF, Deng J, Kostas T, *et al.* Dynamic autonomous routing technology for IP-based satellite ad hoc networks. Proceedings of the 9085, Sensors and Systems for Space Applications VII. Baltimore, Maryland, United States. 2014. 9085: 90850P.
- 40 Zhou J, Zhou XW. Autonomous shared key management scheme for space networks. Wireless Personal Communications, 2013, 72(4): 2425–2443. [doi: [10.1007/s11277-013-1156-2](https://doi.org/10.1007/s11277-013-1156-2)]
- 41 Du XH, Chen XY, Wang YD, *et al.* A new secure group correspondence mechanism in space network. Proceedings of 2009 International Forum on Computer Science-Technology and Applications. Chongqing, China. 2009. 188–192.
- 42 Heidinger A, Foster M, Botambekov D, *et al.* Using the NASA EOS a-train to probe the performance of the NOAA PATMOS-x cloud fraction CDR. Remote Sensing, 2016, 8(6): 511. [doi: [10.3390/rs8060511](https://doi.org/10.3390/rs8060511)]
- 43 Budenske JR, Win KS. Space network architecture technologies. Proceedings of 2002 IEEE Aerospace Conference. 2002, 3: 3-1061–3-1069.
- 44 Sanchez M, Selva D, Cameron B, *et al.* Exploring the architectural trade space of NASAs space communication and navigation program. Proceedings of 2013 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA. 2013. 1–16.
- 45 Net MS, del Portillo I, Cameron B, *et al.* Integrated tradespace analysis of space network architectures. Journal of Aerospace Information Systems, 2015, 12(8): 564–578. [doi: [10.2514/1.I010356](https://doi.org/10.2514/1.I010356)]