

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201510012

集群航天器网络发展现状及关键技术

陈 庆, 张锦绣, 曹喜滨

(哈尔滨工业大学 卫星技术研究所, 哈尔滨 150001)

摘 要: 为研究新兴集群航天器网络的发展现状及其亟需解决的关键技术难题, 对目前该领域的文献进行了分析与总结. 集群航天器是一种通过无线链路进行信息交互的, 多航天器间协同工作的新型航天器构架, 服务于未来日益复杂多样的空间探索任务. 首先, 结合卫星集群的定义, 明晰了集群航天器网络的概念. 然后, 分析目前分布式协同工作的空间探索任务, 阐述了集群航天器的发展历程, 并从图论和轨道动力学角度描述了集群航天器网络的特征. 最后, 总结了集群航天器网络发展过程中亟需解决的关键技术难题, 包括网络拓扑控制技术、路由技术、空间互联协议技术、协议跨层资源调配技术等, 并结合其他领域研究热点提出了相应的发展建议. 研究表明, 集群航天器网络的技术研究尚处于初始阶段, 仍有许多技术难题亟需解决, 同时, 成熟的互联网、移动传感器网络等可作为关键技术难题突破的参考.

关键词: 集群航天器网络; 拓扑控制; 数据路由; 空间互联协议; 跨层资源调配

中图分类号: V11

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2017)04-0001-07

Development status and key technology of spacecraft cluster network

CHEN Qing, ZHANG Jinxiu, CAO Xibin

(Research Center of Satellite Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To study the development status and technical problems of the emerging spacecraft cluster network, this paper analyzes the latest literatures in this field. Spacecraft cluster is a kind of novel multiple spacecraft collaborative work framework, which performs information interaction via wireless links and serves to the increasingly complex and diverse space exploration missions in the future. First, this paper makes the concept of spacecraft cluster network clear by involving the definition of satellite cluster. Then, it analyzes the current status and development course of the distributed space exploration missions as well as describes the spacecraft cluster network from the perspective of theory and orbital dynamics. Finally, it summarizes the key technical problems when studying spacecraft cluster network, including topology control strategies, data routing algorithm, space inter-communication protocol, cross-layer resource allocation algorithms. It also puts forward some corresponding suggestions of development. The result shows that technologies in spacecraft cluster network are still at the initial stage, and several key technical problems need to be solved. Some mature networks, e.g., Internet and Mobile Sensor Network, can serve as technical reference models for the breakthrough of these problems.

Keywords: spacecraft cluster network; topology control; data routing; space inter-communication protocol; cross-layer resource allocation

随着航天事业飞速发展, 航天器所承担的各类空间科学探索任务愈发复杂多样, 传统依赖单颗大卫星的空间任务解决方案成本高昂, 灵活性差, 难以满足当前日益增长且复杂多变的航天任务需求. 传统的大卫星研发和维护难度大, 研制周期长, 实际应用中存在较长的真空期; 其次, 单颗大卫星需要实现的功能复杂繁多, 一定程度降低了其可靠性和安全性^[1].

同时, 伴随着高新技术产业飞速发展, 航天器的集成化程度不断提高, 单颗航天器的质量、体积和成本随之下降, 数据处理能力、自主性等性能也相应提升^[2]. 近几年, 微小卫星技术在航天领域的工程应用愈发被重视. 2014年, 全球共发射近300颗卫星, 近1/2卫星的质量小于10 kg^[3]. 由于微小卫星具有研发应用成本低, 平台通用性强等优势, 大批企业、研究机构、学校等开始投资研发基于微小卫星技术的各类产品, 如谷歌的互联网卫星计划^[4].

考虑到目前单颗大卫星面临的问题以及多颗微小卫星组网协同工作的优势, 已有许多基于网络服务的分布式航天器项目被提出^[5-8]. 集群航天器(spacecraft cluster)^[9]是近几年继星座、编队之后兴起的一种分布式航天器系统, 结合了航天器编队飞

收稿日期: 2015-10-08

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(91438202); 国家自然科学基金(61273096); 黑龙江省自然科学基金重点项目(ZD201414)

作者简介: 陈 庆(1989—), 男, 博士研究生;

张锦绣(1978—), 男, 教授, 博士生导师;

曹喜滨(1963—), 男, “长江学者”特聘教授, 博士生导师

通信作者: 曹喜滨, xbciao@hit.edu.cn

行的优点,又融入了模块化航天器(fractionated spacecraft)^[10]的理念,使其设计更为灵活多变、响应更快速、生存能力更强、功能可重构,为未来自然灾害灾情快速评估等突发的对地观测任务以及大规模小行星探测等科学研究任务的顺利展开带来了巨大优势。

1 集群航天器网络概念

目前,对于由多颗微小卫星协同工作的系统,学术界普遍采用卫星集群(satellite cluster)的概念,但由于侧重点不同,对其定义存在差异。本文为了方便讨论,基于航天器集群飞行的概念^[11],给出如下定义:集群航天器是一类由多个近距离相伴飞行的航天器构成的分布式系统,如图 1 所示。

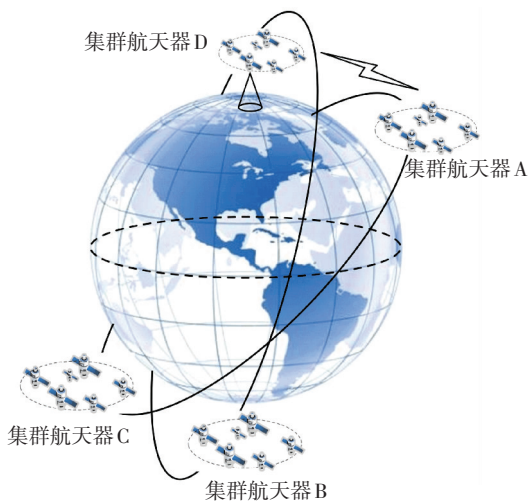


图 1 集群航天器示意

Fig.1 Illustration of spacecraft cluster

不同于卫星集群,集群航天器概念更加宽泛,该分布式系统不仅含有各类卫星,还可以包括空间站、传感器网络等其他空间系统,可理解为各类异构系统构建的空间分布式航天器系统。由集群航天器内各个航天器基于无线通信链路构建的信息交互网络,即为集群航天器网络(spacecraft cluster networks)。该分布式网络内部资源采用全局管理方式,各个航天器地位平等,可以任意调用其他航天器资源以完成空间任务。另外,类似于移动无线自组织网络(mobile ad hoc networks, MANETs),集群航天器网络拓扑随时间改变,且变化规律具有周期性和可预测的特点。

近几年,空间信息网络^[12-13]作为一个以多种空间平台(如同步卫星或中、低轨道卫星、平流层气球等)为载体,实时获取、传输和处理空间信息的网络系统,得到了广泛的讨论与研究。空间信息网络的设计理念也是一个信息共享的分布式网络系统,而集

群航天器网络则是构成该信息网络的一类网络系统,承担着空间信息采集与传输的任务,如图 2 所示。

同时,空间信息网络技术的发展面临着诸多关键技术,如网络存在物理环路,传输时延大、误码率高,空间网络协议不完善,空间网络带宽受限,异构网络的互联互通问题,安全性问题,网络扩展问题等。而航天器集群网络作为空间信息网络的主要构成成员之一,也面临着类似的问题。

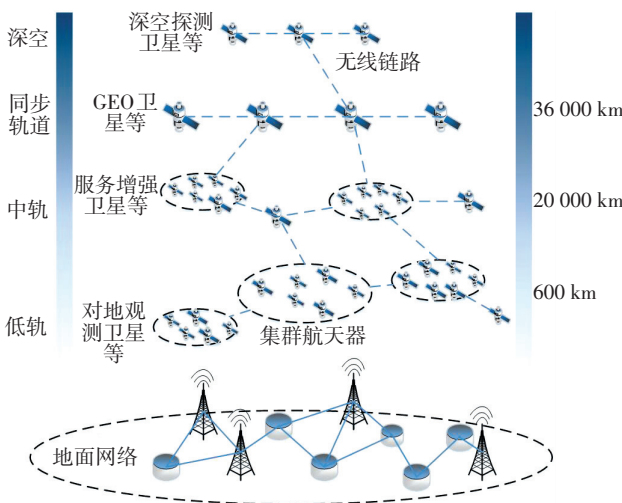


图 2 空间信息网络组成

Fig.2 Composition of space information network

2 集群航天器发展概况

为有效提高航天器的灵活性和机动性,同时降低空间探索任务的研发成本和风险,美国麻省理工学院的 Mathieu 等^[14-15]于 2005 年提出了模块化航天器概念(assessing the fractionated spacecraft concept),打破了常规整体式航天器构建理念,将传统航天器依照载荷功能不同划分为多个模块航天器,并基于无线通信、无线能量传输等关键技术实现整星的功能。2007 年,美国国防高级研究项目局(DARPA)率先基于模块化航天器这一理念提出了 F6 项目^[16](future, fast, flexible, fractionated, free-flying spacecraft),并计划于 2015~2016 年期间进行系统在轨演示验证。2013 年,由于无线能量传输等关键技术遭遇技术瓶颈以及 F6 项目庞大的经费开支,DARPA 终止了该项目的继续研发,并将其取得各项成果作为技术储备运用到后续的各个项目中,如“凤凰”(phoenix)计划^[17]等。

F6 计划的取消并未阻碍其多航天器分布式协同工作的核心理念的广泛传播。当前,全球范围内各大研究机构已经认识到这一理念的独特优势,针对集群航天器联网工作问题,结合不同的应用需求,提

出了众多研究计划.



图 3 F6 计划概念

Fig.3 Illustration of F6 program

2.1 EDSN

NASA 提出的 EDSN 项目^[18] (edison demonstration of smallsat networks),通过一箭多星技术将 8 颗 CubeSat 卫星送入 500 km 高度的轨道,并基于星间组网通信技术构成松散的集群航天器网络,以验证星间通信能力以及组网技术,如图 4 所示.每颗卫星重约 2 kg,为 1.5 U 的 CubeSat 纳卫星,均搭载了一个监测空间环境的辐射变化情况的辐射探测器.EDSN 作为集群航天器网络技术的验证项目,为未来构建能够容纳上百颗卫星的分布式集群网络奠定了技术基础.

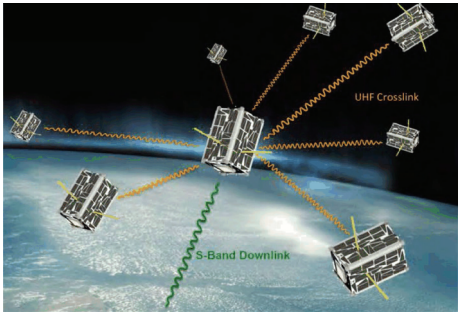


图 4 EDSN 小卫星项目

Fig.4 Illustration of EDSN project

2.2 ANTS

ANTS 计划^[19] (the autonomic nano technology swarm)是由 NASA 提出的一项用于发现和开发空间资源的航天发展战略规划.该计划依据技术发展的不同阶段,制定了一系列空间探测任务,如 ALI (Autonomous Lunar Investigator)、PAM (Prospecting Asteroid Mission)、SARA (Saturn Autonomous Ring Array)等.其中,PAM 计划预计于 2020~2025 年构建由 1 000 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.类似于社会性生物集群智能行为,每颗皮星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.

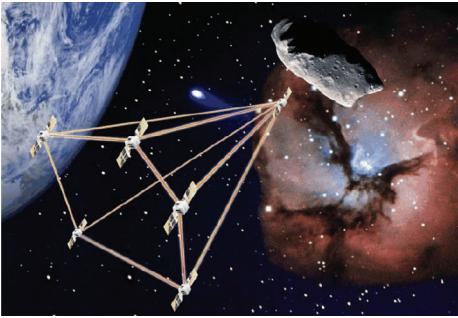


图 5 ANTS 小行星探测任务

Fig.5 Illustration of ANTS in asteroids exploration

2.3 L5SWS

2014 年 7 月,美国 Keck 研究所为监测地球电磁场和太阳风暴,并对其进行早期预报,提出 L5SWS 计划^[20-21] (space weather prediction with satellite at L5).该计划将发射 5 颗卫星至 L5 拉格朗日点,其中 1 颗卫星作为母星和地面进行 S/Ka 频段通信,其余 4 颗搭载不同载荷的子星分布在母星周围,构成一个星型的通信拓扑集群网络.区别于传统大型化学推进的太空天气预报卫星,这个项目将搭建的集群网络不仅能够有效地节省成本,而且面向的空间任务更加灵活,可靠性更强.

3 集群航天器网络表征

集群航天器网络内各航天器周期性地相互绕飞,通过基于无线通信链路的信息共享构成一个协同工作的分布式网络系统.参考地面成熟的网络系统,如 MANETs 等,集群航天器网络描述可以采用图论相关理论.

集群航天器网络内,若将单颗航天器看作一个网络节点 V ,两颗航天器之间的无线通信链路(所有航天器地位平等)看作无向边 E ,那么整个集群网络 G 可表示为 $G_t = (V_t, E_t)$,且其邻接矩阵 $A_t = (a_{ij})_t$ 满足如下条件:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{若 } (i,j) \in E; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

集群航天器网络内各航天器在一定范围内相互绕飞,如图 6 所示,其网络拓扑结构会不断改变,即邻接矩阵 $A_t = (a_{ij})_t$ 随时间变化.同时,由集群航天器的定义可知,该航天器系统必须满足在一定时间内近距离相伴飞行条件.文献[11]中指出了航天器集群飞行的基本条件是有界性,同时依据 C-W 方程得到航天器的初始状态应满足的约束:

$$\dot{y}(t_0) = -2nx(t_0).$$

式中: n 为主航天器的轨道角速度; $x(t_0)$ 、 $\dot{y}(t_0)$ 为其他航天器初始时刻的位置和速度分量.

一个集群内航天器一般处于同一轨道高度,且

为了满足不同空间任务需求,网络内包含多种载荷类型的航天器,且分布在相对距离从几百米到几十千米的范围内.集群航天器网络作为空间信息网络的重要组成成员,其基于网络的分布式协同工作模式,以及周期性相互运动的特性,为该集群网络的发展提出了诸多挑战,涉及航天器硬件和软件领域,如小型化的载荷研制、智能化的网络通信协议设计等.

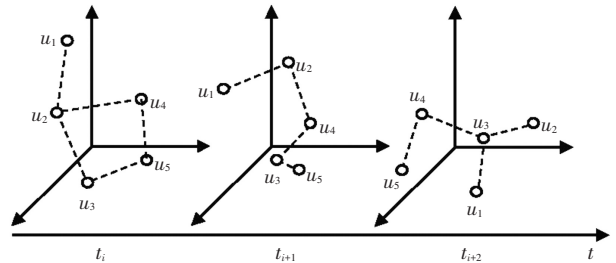


图 6 集群航天器拓扑时变

Fig.6 Illustration of time variant topology of spacecraft cluster

4 关键技术发展现状分析

传统的卫星网络技术研究主要是集中在以星座组网以及编队飞行卫星组网两个方面.新兴的集群航天器网络的节点数目要远大于编队和星座系统,并可依据空间任务需求进行扩展.同时,由于星间相对运动的影响,集群网络拓扑更新和维护更加频繁.另外,目前出于空间探索项目成本考虑,集群航天器系统一般采用 CubeSat 这一类的超小型卫星,携带的载荷有限,生命周期一般较短,那么为了尽可能获得最长的网络服务时间,该集群系统对整个网络数据传输的能耗控制要求较高.

虽然目前集群航天器组网领域的研究还在初步阶段,但是地面相关组网技术的研究已经十分成熟,在欠缺资源条件下自组织网络协议及相关理论等方面也卓有成效.参考地面无线传感器网络等技术进展^[22-23],并结合空间分布式网络自身的特性,为解决集群航天器稳定组网难题,依据 OSI 协议栈自下而上的分层模型,将其面临的关键技术划分为:网络拓扑控制技术、数据路由技术、空间互联协议、跨层资源调配技术等,即设计一套面向分布式空间网络系统的智能化的网络通信协议.

4.1 网络拓扑控制技术

网络拓扑结构是研究网络的基础,描述了网络中各节点的状态以及相互连接方式,对其整体特性的分析能够全面地了解整个网络系统的性能与状态,为网络性能的优化提供参考.网络拓扑控制的目的是为了面向不同的网络任务需求,优化节点状态和网络连接方式,维护整个网络性能稳定.

拓扑控制算法是网络拓扑控制的实现方法,种类较多,且分类依据不统一,包括算法的假设条件、节点

发射功率是否相同、拓扑构建参考信息来源、生成的拓扑结构、所参考的理论模型等.考虑到本文研究对象集群航天器网络中容错能力的重要性,现将拓扑控制算法依据网络的容错特性进行分类,见表 1.

表 1 拓扑控制算法分类

Tab.1 Classification of topology control algorithms

无容错			有容错	
基于节点度	单连通	强连通	k 连通	自主恢复
LMA/ LMN 等	CBTC、 YG 等	ERNG (MG) 等	FGSS/ FLSS 等	WMFDS 等

基于节点度的拓扑控制算法不具备容错能力,且不一定保证网络连通,代表性算法包括:LMA/LMN^[24]、MobileGrid^[25]和 LINT/LILT^[26]等.单连通拓扑控制算法以基于邻近图理论的算法为主,如 CBTC^[27]、RNG^[28]、GG^[29]、YG^[30]等,还包括各类层次型拓扑,如 LEACH^[31]、HEED^[32]等.为了适用于异构网络,Li 等^[33]基于 MG 模型提出了强连通拓扑算法,包括 RNG(MG)、ERNG(MG)等.

具有拓扑容错能力的控制算法可大致分为 k 连通和拓扑自主恢复两种.FGSS/FLSS^[34]、STPS 等是典型的 k 连通拓扑控制算法,确保网络中每个节点的可通信链路数目大于某一数值.拓扑自主恢复算法主要通过引入故障检测算法实现,如 Staddon 等^[35]通过分析整个网络的拓扑数据,定位失效节点,从而实现拓扑自主恢复.

现有服务于无线网络的拓扑控制技术大多应用于 MANETs 等,其网络模型和集群航天器网络模型存在区别.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.

同时,本文为了明确后续的研究工作,对集群航天器网络拓扑控制给出如下定义:在尽量保证网络连通性的前提下,结合集群航天器网络特点,针对不同的应用场景,通过节点发射功率的调节和邻居节点的选择,形成优化的网络结构,以保证空间任务稳定高效地完成.

4.2 数据路由技术

数据路由协议是 MANETs 的关键技术之一,依据拓扑控制信息确定稳定可靠的数据传输路径,从而为协议上层各类应用的实现提供必要的数据通信支持.MANETs 路由协议依据业务对象的数目可分为单播路由和组播路由两种,详细分类见表 2.

主动式单播路由经路由表驱动,周期性地更新信息,如基于距离的 WRP^[36]算法,但该种路由方式开销较大,占用较多资源.目前,已有许多方法被提出用以改善这种情况,如功率感知路由度量.按需响应式

单播路由仅仅维护路由表中部分关键节点的信息,如基于无环路径路由机制的 ADOV^[37]算法.组播路由是一种面向多个业务对象的路由方式,要么通过共享组播路由树,要么通过泛洪实现路由构建与维护.

表 2 MANETs 路由算法分类

Tab.2 Classification of MANETs routing algorithms

单播路由		组播路由	
主动式	按需响应式	基于树结构	基于网状结构
WRP、DSDV、 OLSR 等	AODV、 DSR 等	MAODV、 ADMR 等	ODMRP、 CAMP 等

受限于航天器上资源不足,集群航天器网络路由技术首要解决的一个关键性问题降低数据传输的能量消耗,提高系统资源的利用率.能量优化路由作为一个能够降低无线网络通信能量消耗的重要手段已经成为当前研究的热点问题.近年来,很多针对地面网络能量优化的路由协议不断出现,成为集群航天器组网的重要技术参考,基于概率分布实现负载均衡的能量感知路由^[38]等.

目前,空间网络路由技术的研究方向除了提高资源利用率,降低系统开销,还包括面向深空网络的容延迟路由技术,如 DTN 路由技术^[39].该技术主要应用于高延迟的深空通信网络,提供了一种具备“储存、携带、转发”功能的路由能力.

4.3 空间互联协议技术

空间通信协议是集群航天器网络通信的核心技术,直接影响到组网通信服务质量,以及网络的兼容性、可扩展性等.目前,空间通信协议的研究方向主要包括 CCSDS 协议体系^[40]、TCP/IP 协议体系^[41]以及 DTN(delay/disruption tolerant networks)协议体系^[39].

空间数据系统咨询委员会(CCSDS)基于 TCP/IP 协议进行修改和扩展,提出了适用于空间环境的通信协议体系,包括安全协议 SCPS-SP、传输协议 SCPS-TP、网络层协议 SCPS-NP 以及文件传输协议 SCPS-FP 等^[42].在协议物理层,CCSDS 在 Prox-1 协议中定义了邻近空间链路的特性.在数据链路层,引入虚拟信道思想,对多个数据流进行动态管理,从而给定了 3 个编码规范:TM 同步和信道编码、TC 同步和信道编码以及 Prox-1 空间链路协议的编码.在网络层,类似于 TCP/IP 协议中的 UDP 和 TCP,同样规定了有无“握手”两种情况下的路由协议:SP 和 SCPS-NP.在传输层和应用层,CCSDS 同样提出了针对空间任务特性的相关技术策略,如传输协议 SCPS-TP 等.

TCP/IP 协议体系是指在轨卫星直接采用商用的 IP 设备,并进行简单的功能扩展,如路由器添加支持信道纠错/译码功能等.但该体系目前运用到航天器

组网通信还存在一些问题,如针对高延时的空间网络,建立在小传输延时的 TCP/IP 协议不太适用等.

DTN 协议体系是一种面向高延时、高误码率、带宽不对称等空间特性的信息传输的协议框架,在传统互联网 5 层协议栈的应用层和传输层之间引入“包裹层”,数据以“包裹”的形式进行异步通信^[43].DTN 协议体系的思想能够有效地优化不同网络间底层协议,解决空间组网通信面临的一些问题.但是,该体系尚只有一个框架,许多关键技术仍在开发中.目前,学术界针对该体系的研究主要包括:DS-TP (deep-space transport protocol) 协议、BP (bundle protocol) 协议、CFDP (CCSDS file delivery protocol) 协议和 LTP (licklider transmission protocol) 协议.

4.4 协议跨层资源调配技术

传统的有线网络分层协议中物理层、数据链路层、网络层和传输层层间数据相互独立,互不影响.但无线网络信号以广播的形式传输,由于传输介质不可靠,带宽紧缺等,无线网络中数据干扰、信号衰落等情况远比有线网络复杂,致使无线网络的服务质量 QoS 难以保障,特别是在工况更为复杂的空间环境中.

跨层资源调配技术通过各协议层资源共享,自适应调节各协议部分的资源分配,实现通信性能的提高.跨层设计方法^[44]的核心思想就是将通信协议作为一个整体进行设计,模糊层与层之间的界限,并依据应用需求和当前系统状态联合优化.结合排队论、信息论等相关理论,普林斯顿大学的 Chiang 等^[45]提出了“Layering as optimization decomposition”的跨层设计框架.Ruzzelli 等^[46]通过耦合 MAC 层和路由数据提出了 MERLIN 协议,在降低网络传输时延的同时延长网络寿命.GeRaF 协议^[47]综合了基于地理位置额 MAC 和路由算法,通过将转发区域划分为若干个子区域,依据地理位置优先性决定每个子区域的优先权,实现数据的快速传递.类似于 GeRaF 协议,MACRO 协议^[48]利用每个节点的功率控制的特征提高能量的利用率.

集群航天器网络对网络 QoS 的要求远远高于常规商用通信网络.源于有线网络的传统分层网络协议灵活性差,难以满足未来空间任务的发展需要,而利用协议跨层资源调配技术提高网络质量,增强网络自适应性、灵活性能有效满足未来复杂多变空间任务需求.

5 集群航天器网络技术发展建议

结合当前航天技术发展现状以及未来航天产业的潜在需求,集群航天器网络的主要研究任务可分

为以下几点:

1) 针对以 CubeSat 等超小型航天器为主的大规模集群航天器组网信息传输需求,探索在欠缺资源条件下建立面向集群任务需求的空间网络拓扑管理优化的新方法和新机理。

2) 结合地面网络路由技术的最新发展,以及集群航天器网络拓扑可预知以及链路的连通时变特性,提出一种面向集群航天器群内和群间的网络路由算法。

3) 分析现有空间互联协议特性,提出一种适合中国空间探索任务需要以及空间信息网络建设需求,并能兼容国际通用空间协议 CCSDS 的网络通信协议体系。

4) 基于当前的研究热门机器学习理论,并结合地面跨层设计的最新进展和空间网络通信需求,构建具备自我学习能力的高可靠性协议跨层资源调度技术。

6 结 论

1) 集群航天器是一类由多个近距离相伴飞行的航天器构成的分布式系统.由集群航天器内各个航天器成员基于无线通信链路构建的信息交互网络即为集群航天器网络。

2) 众多研究机构、企业等依据集群航天器理念研究并提出了各种未来微小型航天器分布式协同工作方案,如 EDSN^[18]、ANTS^[19]等.但目前这类空间探索任务处于集群航天器核心技术初始研究与验证阶段,为实现集群航天器的大规模应用仍有大量问题亟需解决。

3) 面向集群航天器的智能分布式协同工作通信协议的研究包括网络拓扑控制技术、数据路由技术、空间互联协议、跨层资源调配技术等关键技术.这些技术在互联网、物联网等其他领域已被广泛且深入研究,可作为集群航天器关键技术难题研究与突破的参考。

4) 随着航天器微小型化、批量化等各项关键技术的发展,航天器成本不断降低,空间资源的商用项目和科学研究项目将得到更加广泛的重视.可以预见,未来空间任务的一个重要研究方向是突破集群航天器网络的各项关键技术,实现集群航天器的大规模应用。

参考文献

[1] 贾世楼,曹喜滨.发展微小卫星迎接 21 世纪挑战[J].世界科技研究与发展,1998,20(6):102-106. DOI: 10.16507/j.issn.1006-6055.1998.06.033.
JIA Shilou, CAO Xibin. Developing micro satellite and receiving challenge in the 21 st century[J]. World Sci-tech R&D, 1998, 20(6):102-

106. DOI: 10.16507/j.issn.1006-6055.1998.06.033.
[2] 孙杰,孙兆伟,赵阳.微型航天器模块化设计及其关键技术研究[J].哈尔滨工业大学学报,2007,39(12):1908-1911. DOI: 10.3321/j.issn:0367-6234.2007.12.014.
SUN Jie, SUN Zhaowei, ZHAO Yang. Key technologies of modular design of micro-spacecraft facing micro-spacecraft family[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(12):1908-1911. DOI: 10.3321/j.issn:0367-6234.2007.12.014.
[3] 陈旭光,高浩.美国航天基金会发布 2015 年《航天报告》[J].卫星应用,2015(9):53-54.
[4] 朱贵伟.冷静看待谷歌互联网卫星计划[J].国际太空,2014(7):10.
[5] ENGELEN S, VERHOEVEN C J M, BENTUM M J. OLFAR a radio telescope based on nano satellites in moon orbit[C]//Proceedings of the 24th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. Utah: AIAA, 2010.
[6] SUNDARAMOORTHY P P, GILL E, VERHOEVEN C J M. Systematic identification of applications for a cluster of femto-satellites [C]//Proceedings of the 61st International Astronautical Congress. Prague, CZ: International Astronautical Federation, 2010.
[7] CURTIS S A, MICA J, NUTH J, et al. ANTS (Autonomous Nano Technology Swarm): an artificial intelligence approach to asteroid belt resource exploration[C]// Proceedings of the 51st International Astronautical Congress. Rio de Janeiro (Brazil): AIAA, 2000.
[8] LIEWER P C, KLESH A T, LO M W, et al. Advances in solar sailing[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014: 269-288. DOI:10.1007/978-3-642-34907-2.
[9] 张锦秀,曹喜滨,兰盛昌.分离式集群航天器新概念及发展趋势研究[C]//中国空间科学学会第七次学术年会会议手册及文集.北京:中国空间科学学会,2009.
ZHANG Jinxiu, CAO Xibin, LAN Shengchang. Advanced concept and development tendency of fractionated swarm spacecraft [C]// China's Space Science Society Academic Conference Handbook And Corpus For The Seventh Time. Beijing: Chinese Society of Space Research, 2009.
[10] MATHIEU C, WEIGEL A L. Assessing the fractionated spacecraft concept [C]// SPACE Conferences and Exposition. San Jose: AIAA, 2006: 7212. DOI: 10.2514/6.2006-7212.
[11] 党朝辉.航天器集群边界建模与控制方法研究[D].长沙:国防科学技术大学,2015.
[12] 黄英君.空间综合信息网络管理关键技术研究及仿真[D].长沙:国防科技大学,2006.
HUANG Yingjun. Research and simulation of the aerospace integrated information network management[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
[13] 王晓海.天基综合信息网络的发展[J].中国航天,2007,(1):25-27.
WANG Xiaohai. Development of space-based integrated information network[J]. Aerospace China, 2007, (1): 25-27.
[14] MATHIEU C, WEIGEL A L. Assessing the flexibility provided by fractionated spacecraft [C]//Proceedings of the AIAA Space 2005 Conference and Exposition. Long Beach, California: AIAA, 2005. DOI: 10.2514/6.2005-6700.
[15] BROWN O, EREMENKO P. The value proposition for fractionated space architectures [C]//Proceedings of the AIAA Space 2006 Conference & Exposition. San Jose, California: AIAA, 2006. DOI: 10.2514/6.2006-7506.
[16] DARPA TTO. System F6 On-Orbit Demonstration Testbed Broad Agency Announcement, Amendment 1. DARPA-BAA-12-32 [R/OL]. [2012-05-11]. <https://www.fbo.gov/spg/ODA/DARPA/CMO/DARPA-BAA-12-32/listing.html>.
[17] BARNHART D, SULLIVAN B, HUNTER R, et al. Phoenix project status 2013 [C]//Proceedings of the AIAA Space 2013 Conference and Exposition. San Diego, CA: AIAA, 2013. DOI: 10.2514/6.2013-5341.
[18] LOURA HALL. Edison Demonstration of Smallsat Networks (ED-

- SN) [EB/OL]. (2013-11-04) [2015-09-03]. http://www.nasa.gov/directorates/spacetechnology/small_spacecraft/edsn.html#_VH2vEXBmsk.
- [19] CLARK P E, CURTIS S A, RILEE M L. ANTS: applying a new paradigm to Lunar and planetary exploration [C]//Proceedings of Solar System Remote Sensing Symposium. Greenbelt, MD: NASA Goddard Space Flight Center, 2002: 20-21. DOI: 10.1007/978-0-306-47970-0_7.
 - [20] NORTON C D, PELLEGRINO S, JOHNSON M. Findings of the KECK institute for space studies program on small satellites: a revolution in space science [C]//Proceedings of the 27th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. Logan, UT: NASA, 2013.
 - [21] LIEWER C, KLESH T, LO W, et al. A fractionated space weather base at L5 using CubeSats and solar sails [J]. *Advances in Solar Sailing*. Springer Berlin Heidelberg, 2014: 269-288.
 - [22] 钱志鸿, 王义君. 面向物联网的无线传感器网络综述 [J]. *电子与信息学报*, 2013, 35 (1): 215-227. DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00876.
QIAN Zhihong, WANG Yijun. Internet of things-oriented wireless sensor networks review [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35 (1): 215-227. DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00876.
 - [23] 尚兴宏. 无线传感器网络若干关键技术的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
SHANG Xinghong. Research on several key technologies of wireless sensor networks [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2013.
 - [24] KUBISCH M, KARL H, WOLISZ A, et al. Distributed algorithms for transmission power control in wireless sensor networks [C]//Proceedings of the 2003 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Record. New Orleans, LA: IEEE, 2003: 558-563. DOI: 10.1109/WCNC.2003.1200410.
 - [25] LIU Jilei, LI Baochun. MobileGrid: capacity-aware topology control in mobile ad hoc networks [C]//Proceedings of 11st International Conference on Computer Communications and Networks. Washington, DC: IEEE, 2002: 570-574. DOI: 10.1109/ICCCN.2002.1043127.
 - [26] RAMANATHAN R, ROSALES-HAIN R. Topology control of multi-hop wireless networks using transmit power adjustment [C]//Proceedings of the 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Piscataway, NJ: IEEE, 2000: 404-413. DOI: 10.1109/INFCOM.2000.832213.
 - [27] WATTENHOFER R, LI Li, BAHL P, et al. Distributed topology control for power efficient operation in multihop wireless ad hoc networks [C]//Proceedings of the 20th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society. Washington, DC: IEEE, 2001: 1388-1397. DOI: 10.1109/INFCOM.2001.916634.
 - [28] TOUSSAINT G T. The relative neighborhood graph of finite planar set [J]. *Pattern Recognition*, 1998, 12 (4): 261-268. DOI: 10.1016/0031-3203(80)90066-7.
 - [29] GABRIEL K R, SOKAL R R. A new statistical approach to geographic variation analysis [J]. *Systematic Biology*, 1969, 18 (3): 259-278. DOI: 10.2307/2412323.
 - [30] YAO A C. On constructing minimum spanning trees in k -dimensional spaces and related problems [J]. *Siam Journal on Computing*, 1982, 11 (4): 721-736. DOI: 10.1137/0211059.
 - [31] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C]//Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Washington, DC: IEEE, 2000: 8020. DOI: 10.1109/HICSS.2000.926982.
 - [32] YOUNIS O, FAHMY S. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2004, 3 (4): 366-379. DOI: 10.1109/TMC.2004.41.
 - [33] LI Xiangyang, SONG Wenzhan, WANG Yu. Localized topology control for heterogeneous wireless sensor networks [J]. *ACM Transaction on Sensor Network*, 2006, 2 (1): 129-153. DOI: 10.1145/1138127.1138132.
 - [34] LI Ning, HOU J C. Localized fault-tolerant topology control in wireless ad hoc networks [J]. *IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems*, 2006, 17 (4): 307-320. DOI: 10.1109/TPDS.2006.51.
 - [35] STADDON J, BALFANZ D, DURFEE G. Efficient tracing of failed nodes in sensor networks [C]//Proceedings of ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications. New York, NY: ACM, 2002: 122-130. DOI: 10.1145/570738.570756.
 - [36] MURTHY S, GARCIA-LUNA-ACEVES J J. An efficient routing protocol for wireless networks [J]. *Mobile Networks and Applications*, 1996, 1 (2): 183-197. DOI: 10.1007/BF01193336.
 - [37] PERKINS C E, ROYER E M. Ad-hoc on-demand distance vector routing [C]//Proceedings of the Second IEEE Workshop on mobile Computer systems & Applications. Washington, DC: IEEE Computer Society, 1999: 90-100. DOI: 10.1109/MCSA.1999.749281.
 - [38] SHAH R C, RABAEY J M. Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks [C]//Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC. Orlando, FL: IEEE, 2002: 350-355. DOI: 10.1109/WCNC.2002.993520.
 - [39] PAPASTERGIOU G, PSARAS I, TSAOUSSIDIS V. Deep-space transport protocol: a novel transport scheme for space DTNs [J]. *Computer Communications*, 2009, 32 (16): 1757-1767. DOI: 10.1016/j.comcom.2009.02.012.
 - [40] The Consultative Committee for Space Data Systems. Report. concerning space data system standards: Overview of space communications protocols: CCSDS 130.0-G-2. Green Book, Issue 2 [S]. Washington, DC: CCSDS, 2007.
 - [41] ISRAEL D, HOGIE K, PARISE R, et al. Space communications demonstration using internet technology [C]//Proceedings of the International Telemetering Conference ITC/USA. [S.l.]: International Foundation for Telemetering, 2002.
 - [42] The Consultative Committee for Space Data Systems. Space Communications Protocol Specification (SCPS) -Network Protocol (SCPS-NP): CCSDS 713.0-B-1, Blue Book, Issue 1 [S]. Newport Beach, California: CCSDS, 1999.
 - [43] CERF V, BURLEIGH S, TORGERSOEN L, et al. Delay-tolerant networking architecture [J]. *Heise Zeitschriften Verlag*, 2007: 1-35. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.004.
 - [44] GOLDSMITH A J, WICKER S B. Design challenges for energy-constrained ad hoc wireless network [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2002, 9 (4): 8-27. DOI: 10.1109/MWC.2002.1028874.
 - [45] CHIANG M, LOW S H, CALDERBANK A R, et al. Layering as optimization decomposition: a mathematical theory of network architectures [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95 (1): 255-312. DOI: 10.1109/JPROC.2006.887322.
 - [46] RUZZELLI A G, O'HARE G M P, JURDAK R. MERLIN: cross-layer integration of MAC and routing for low duty-cycle sensor networks [J]. *Ad Hoc Networks*, 2008, 6 (8): 1238-1257. DOI: 10.1016/j.adhoc.2007.11.012.
 - [47] ZORZI M, RAO R R. Geographic random forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor networks: energy and latency performance [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2003, 2 (4): 337-348. DOI: 10.1109/TMC.2003.1255648.
 - [48] FERRARA D, GALLUCCIO L, LEONARDI A, et al. MACRO: an integrated MAC/routing protocol for geographic forwarding in wireless sensor networks [C]//Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Miami, FL: IEEE, 2005: 1770-1781. DOI: 10.1109/INFCOM.2005.1498457.