

DaaC: 空间信息网络体系结构建模方法

于少波, 吴玲达, 张喜涛

(航天工程大学复杂电子系统仿真实验室, 北京 101416)

摘 要: 作为打赢未来高科技战争和夺取制天权的关键所在, 空间信息网络具有重要的使命地位和军事价值。介绍了空间信息网络的基本概念、内涵和运行机理, 论述了空间信息网络总体拓扑结构。系统阐述了当前空间信息网络体系结构研究现状和几种典型体系结构设计方法, 从而引出所研究的科学问题和解决思路。结合数据即中心 (DaaC, data as a center), 探索一种空间信息网络体系结构模型。DaaC 方法为空间信息网络体系结构设计提供了一种新的思路, 体系结构建模方法旨在为空间信息网络基础理论和关键技术的研究提供体系结构方面的支撑。

关键词: 空间信息网络; 数据即中心; 体系结构; 模型

中图分类号: TP302

文献标识码: A

DaaC: an architecture modeling of space information network

YU Shao-bo, WU Ling-da, ZHANG Xi-tao

(Science and Technology on Complex Electronic System Simulation Laboratory, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: As a key to ensure the victory in the future high-tech war and seize the power of heaven, space information network (SIN) has important mission status and military value. The concept, connotation and operation mechanism were introduced, and the overall topology structure of SIN was discussed. The research status of SIN architecture and several typical architecture design methods were described, and the scientific issues and solutions were brought out. Combining the thought of DaaC (data as a center), an architecture model of SIN was explored. Furthermore, DaaC provides a new way for the architecture design of SIN, and the aim of the architecture modeling approach is to provide architectural support for the basic theory and key technical research of SIN.

Key words: space information network, data as a center, architecture, model

1 引言

如何最大效率地发挥地球上空数以百计颗卫星、成千上万架有/无人飞机的作用, 支持人类社会可持续发展的同时, 更好地服务于新时期国防和军队建设, 同时为夺取制天权、占据制天优势而服务, 是一个尚待解决和具有重要战略价值的新命题, 当前, 世界主要航天国家都在积极探索和展开相关方面的研究^[1]。作为国家重要基础设施的空间信息网络 (SIN, space information network) 在这里扮演着

重要的角色, 其在服务远洋航行、应急救援、导航定位、航空运输、航天测控等重大应用的同时, 向下可支持遥感探测, 向上可支持月球探测, 正在并将逐步将人类科学、生产活动拓展至空间乃至深空是全球范围的研究热点^[2]。空间信息网络作为信息网络学科的发展前沿, 其大时空跨度下体系结构的研究是一个具有重要意义的核心科学问题^[2]。

体系结构 (architecture) 源于建筑学中设计与构造的含义, 后来引入到计算机技术、系统工程等领域, 然而, 关于体系结构的定义和认识也在不断地

收稿日期: 2017-09-07

基金项目: 部级基金资助项目; 重点实验室基金资助项目 (No.6142010010301)

Foundation Items: Funded Project of Ministry, Key Laboratory Funded Project (No.6142010010301)

深化和完善。截至目前,学术界比较一致的认识是指系统(网络)的组成结构及其相互关系,以及指导系统(网络)设计与发展的原则和指南。如同建筑设计一样,美军在进行 C4ISR 系统建设时,要求先设计出系统的体系结构,并根据体系结构确定相应的投资和开发计划,指导系统的研制和建设。

类比于空间信息网络,世界各国在进行空间信息网络建设时,对空间信息网络体系结构设计具有重要的作用。空间信息网络体系结构是空间信息网络建设的蓝图,是空间信息网络建设中不可缺少的环节,在其整个生命周期中都发挥着重要的作用。然而,空间信息网络的发展还处于初级阶段,对其的相关研究还有许多工作要开展,特别是空间信息网络体系结构的建模与设计,虽然已有部分研究展开,但还需要进行不断地深入与完善。为此,结合空间信息网络的发展趋势及总体框架,本文基于已有在系统体系结构设计上成功实现的方法和技术,在前人工作的基础上进行改进、优化和综合,以探索一种适合空间信息网络体系结构设计的建模方法,从而为空间信息网络基础理论和关键技术的研究提供体系结构设计方面的支撑。

2 问题描述

空间信息网络是从天基综合信息网、天基信息系统和空间信息系统等概念的基础上,结合发展需求和趋势而逐渐演变出的一个新概念,由于其尚处于起步阶段,并未有一个权威和统一的定义。在“天地一体化高峰论坛”中,专家给出的定义为以地面网络为基础,以空间网络为延伸,覆盖太空、空中、陆地、海洋等自然空间,为天基、空基、陆基和海基各类用户活动提供信息保障的基础设施^[2]。在“空间信息网络基础理论与关键技术”重大研究计划年度项目指南中,其定义为以空间平台为载体,实时获取、传输和处理空间信息的网络系统^[3]。结合本文现阶段已有研究积累,认为第 2 种定义更能直观准确地表达空间信息网络的内涵,所以本文遵从第 2 种定义,后续研究都是在该定义的基础上而开展。

文献[4]围绕空间信息网络的需求与挑战提出了一种空间信息网络总体架构的初步设想,同时,认为从网络总体角度考虑,追求简洁的架构应该是

复杂系统设计的一个基本出发点。本文在该架构的基础上,针对不同层次子网络拓扑结构的特点,构造了空间信息网络总体拓扑结构,如图 1 所示。

在空间信息网络顶层架构设计时,其基本思路是:构建天基(GEO+LEO)骨干网,解决全球覆盖问题;构建平流层(near space)骨干网,解决区域加强问题;与陆地(ground)骨干网互联融合,解决天空地一体化问题,所以重点从静止轨道、中低轨道、临近空间和地面 4 个层次来考虑。其中,静止轨道子网络遵循星型拓扑结构,中、低轨道子网络遵循星座拓扑结构(中文以环形拓扑展示),临近空间子网络也遵循星座拓扑结构,然而,其结构要相对简单一些。需要特别说明的是,上述拓扑结构只是空间信息网络拓扑的简化描述,现实中空间信息网络的结构要复杂很多,但其机制和原理是相通的。

如图 1 所示,在静止轨道、中低轨道、临近空间和地面 4 个域构建了其总体拓扑结构,实线表示在同一平台内部的连接关系,虚线表示跨平台之间的连接关系。其中,节点度 D 表示相应节点所连接的有效边数,连接的有效边数不同,则对应的 D 不同。

针对空间信息网络的体系结构的研究,国内外学者已经进行了一些初步探索,张登银等^[5]提出一种基于 3D-Mesh 网络的体系结构。Mukherjee 等^[6]系统归纳了空间网络和深空网络的架构形式。特别是自 2013 年以来,由中国国家自然科学基金委员会牵头,连续开展的“空间信息网络基础理论与关键技术”重大研究项目中,投入大量基金资助空间信息网络模型与高效组网机理科学问题的研究,吸引了来自地方院校、军内院所的相关专家团队开展相关方面的研究。

张威等^[7]针对空间信息网络中节点、链路不断变化,拓扑动态变化等特点,依据网络中节点的不同特性,把节点分为不同的簇,提出一种分层自治域网络结构模型,同时,针对空间星际互联网的拓扑结构会随着节点的增减、航天器运动等发生动态变化的现象,应用分簇组网思想,将整体上是高动态变化的星际互联网划分为一个个局部具有弱动态变化的子网络,实现了星际互联网内各动态因素之间的解耦合,从而提高了其管理控制的效率^[8]。

晏坚等^[9]提出了一种基于软件定义网络的空间

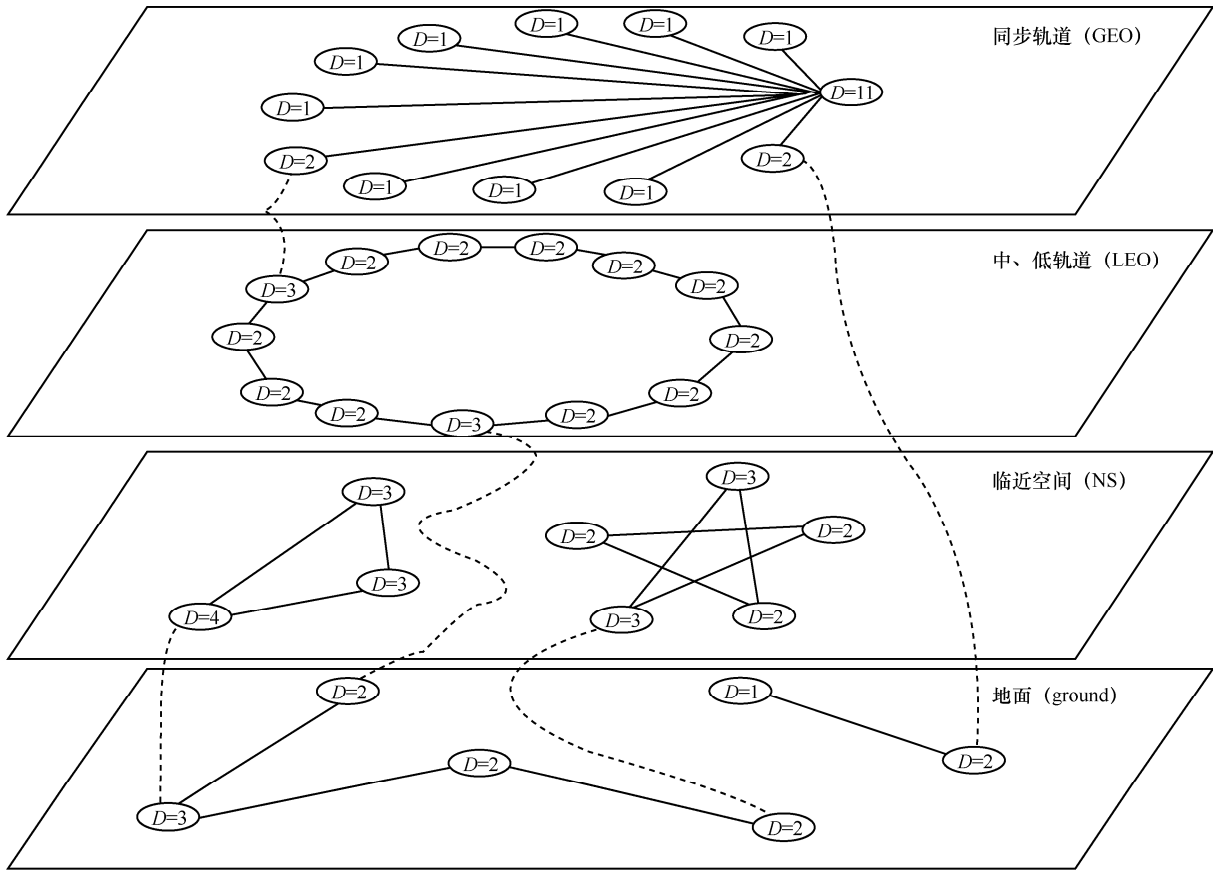


图 1 空间信息网络总体拓扑结构

信息网络协议体系架构, 通过把业务、控制和管理这 3 个方面分离来克服空间信息网络断续、长延时、异构和多业务的挑战。来自四川大学、北京航空航天大学、武汉大学、香港理工大学、西安电子科技大学、南京理工大学和中国科学院等院所的研究团队也开展和进行了较为深入的研究, 也取得了可观的研究成果^[10]。

空间信息网络作为未来航天领域发展的新形态, 是未来空/天一体网络的发展趋势, 也是未来支持全球作战、战区和战术应用的综合信息网络, 具有重要的军事价值和使命地位。对于空间信息网络的建设和发展始终要站得要高, 以体系化的思想来规划和设计空间信息网络的建设和发展, 要重视多种空间资源的统一规划和管理。虽然, 针对空间信息网络模型的科学问题具有一定的研究成果, 但是, 截至目前, 关于该科学问题的研究成果很少, 还很不成熟。然而, 结合其定义可知, 空间信息网络的实质是一个网络系统, 或可以认为是一个复杂巨系统, 这就启示是否可以借鉴已有关于系统(如空间信息系统、多卫星系统、军事航天系统等)的

体系结构建模方法和技术来分析和研究空间信息网络的体系结构。

基于上述思考, 通过研究相关文献可知, 目前在体系结构建模方面的研究主要有基于 UML 的体系结构建模方法, 它是一种面向对象的分析方法, 将体系结构设计分为分析、综合和评估几个阶段; 基于活动的设计方法, 该方法以活动为出发点, 以体系结构核心实体对象为基础, 进行体系结构要素和产品描述; 面向服务的体系结构建模方法, 该方法能够从整体上描述系统的体系结构, 从而提高了体系结构设计的灵活性和适应性^[11]。

结合空间信息网络的拓扑组成结构可知, 空间信息网络节点繁多, 不同节点差异性大, 且作为一个服务于大范围 and 广域的网络系统, 其业务种类繁多, 需求差异也较大, 具有较明显的多层性、动态性、异质异构性、高维多元等特征, 而这些特征一方面成为空间信息网络区别于其他网络系统的依据, 另一方面, 这些特征为空间信息网络的建设和发展提出了更大的挑战。当前已经存在的体系结构描述和建模方法, 已经不能很好地满足空间信息网

络的需求，为此，本文在已有方法的基础上，通过充分利用基于活动的灵活性、面向服务的精确性、面向对象的重用性等优点，结合 DaaC 思想，提出一种改进的适合于空间信息网络体系设计的建模方法。

3 基于 DaaC 的空间信息网络体系结构模型

空间信息网络体系结构是指空间信息网络的组成单元的结构、关系以及制约其设计的原则和指南，对其体系结构进行描述和建模，是开展空间信息网络后续一系列研究的前提和基础。借鉴以往对天基综合信息网、空间信息系统等研究对象开展的描述和建模技术，引入数据即中心（DaaC）思想，综合基于活动、面向服务、面向对象等建模的实现，进行基于 DaaC 的空间信息网络体系结构建模的初步探索，具体从体系结构建模思想、体系结构建模流程和体系结构建模实现这 3 个方面展开，下面分别进行详细论述。

3.1 DaaC 体系结构建模思想

产品即中心（PaaC, product as a center）^[12]是在体系结构框架设计之初，人们为满足体系结构设计和建模的需求而提出的一种思想，其本质和核心是将具有重用性和互操作性的数据组成“产品”，最常见的产品有图形表示或文档表示等。曾在体系结构描述和建模初期发展的一段时间内，PaaC 思想都被认为是解决相关问题的最佳选择，即基于 PaaC 的思想去理解大范围的数据、项目和活动。目前，结合发展需求和趋势，逐渐由 PaaC 转向了 DaaC。

DaaC 体系结构建模思想，是以体系结构核心实体对象为基础，以空间数据的分析、收集、描述、存储和管理等过程构建空间信息网络体系结构的全生命周期。不同于 PaaC 的体系结构，DaaC 的体系结构具有数据可重用性高、开发效率高的特点，能够保证空间信息网络体系结构之间的一致性，并可以通过生成空间信息体系结构的数据报告，实现对空间信息网络的分析的目的。

在 DaaC 体系结构设计中，体系结构对象可分为 3 个对象类，即实体、联系和属性，实体是指体系结构数据存储与处理数据的对象，联系是指实体之间的关系，属性是用来辨别实体和联系对象的特征的方式。图 2 所示为体系结构对象之间的属性关系。

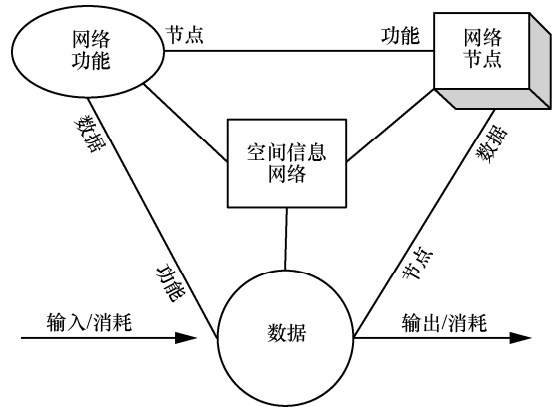


图 2 体系结构对象之间的属性关系

如图 2 所示，数据、功能、节点、网络过程代表手动建立实体的过程，需求线代表数据之间的联系，网络功能和数据交换提供需求线的属性，组织是网络、知识性能、网络能力属性的联合体。具体表现为：网络在某一网络节点上发挥相应的网络功能的作用；数据由网络功能产生、消耗和应用；网络功能和网络节点相关联的接口都是网络。

3.2 DaaC 体系结构建模流程

结合上述建模思想和空间信息网络框架，按照体系结构框架确定的基本原则和具体规则，体系结构开发的流程如图 3 所示。

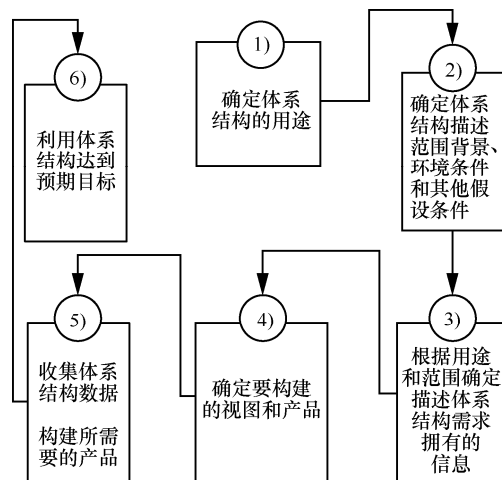


图 3 体系结构开发流程

如图 3 所示，在开发体系结构流程中，共分 6 步，前 4 步基本上是确定构建体系结构的用途和目的、确定体系结构的范围、确定描述体系结构需要拥有的信息以及确定要构建的视图和产品。在上述 4 个步骤中，使用人员和用户起着决定性作用，也要求体系结构开发人员参与其中。后 2 步基本上是开发符合需求的体系结构产品，主要有体系结构开

发人员来完成。

由于每个体系结构描述的内容是不同的, 每个体系结构都服务于不同的需求, 每个体系结构描述代表的是不同的瞬间状态, 所以体系结构的开发是一个反复迭代的过程, 即重复上述所示的开发流程和步骤。而且, 该体系结构模型同样适用于多任务多目标需求的建模, 即针对不同时效性、不同任务类型的体系结构同样适用。针对具有显著动态特征的空间信息网络, 可以将不同时刻的体系结构通过构造“瞬间快照”来描述, 而一个有序的时间序列可以完整地体现其动态变化的过程。同时, 也可以实现对体系结构描述的完善和不断更新。

3.3 DaaC 体系结构建模实现

体系结构框架是一种规范化描述体系结构的方法, 其定义的体系结构产品构成了体系结构设计的基本语法规则, 是设计和开发体系结构的指南。在进行体系结构建模实现之前, 前提条件是已经掌握了部分可用于体系结构建模的数据, 这些数据通过前期的采集、组织后, 被有效地存储和管理起来, 以便后期使用。

本文的体系结构建模实现以 DoDAF2.0 (美国国防部体系结构框架 2.0) 为蓝本展开, DoDAF2.0 是在 DoDAF1.0 和 DoDAF1.5 基础上的升级和完善。一方面, DoDAF2.0 更加重视数据在网络全生命周期的重要性, 另一方面, DoDAF2.0 与本文的 DaaC 思想很好地相互吻合, 同时, DoDAF2.0 在天基信息系统和空间信息系统体系结构的描述与建模的成功使用, 这都为本文基于 DoDAF2.0 实现空间信息网络体系结构的描述与建模提供了可能性和可行性。同时, 截至目前, 美国已经开发了 5 版体系结构框架, 形成了一套较为科学、规范的体系结构设计方法, 特别是在 2009 年, DoDAF2.0 版正式发行, 也成为当前最新使用范围最广的体系结构设计指南。综上所述, DoDAF2.0 是实现本文基于 DaaC 思想进行空间信息网络体系结构建模的最佳选择。

DoDAF2.0 主要基于视角的方式进行体系结构的部分表示, 是围绕数据、模型和视图来组织的, 将这些体系结构数据通过可理解的方法组织起来, 从而实现体系结构视图建模的目的。为此, 在 DoDAF2.0 中定义了 8 类视角模型, 分别为全视角、能力视角、数据和信息视角、作战视角、项目视角、服务视角、标准视角和系统视角, 如图 4 所示。

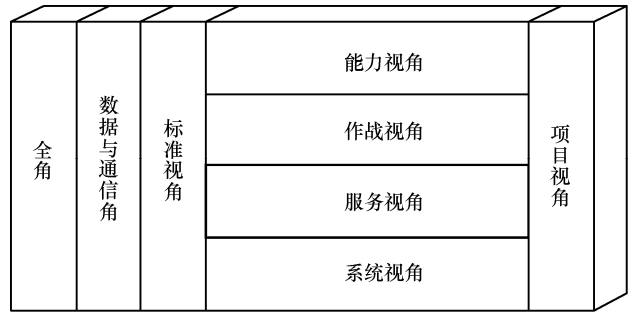


图 4 DoDAF2.0 中的体系结构视角

上述视角在进行具体某一体系结构设计时, 需要结合具体任务需求进行选择, 而并非全部都涉及和涵盖。其中, 在上述视角中, 不同视角还可以具体划分为多类子视角, 从而实现全面描述体系结构的目的。

类比于系统视角, 结合空间信息网络的特点, 结合需求可以构建其网络视角 (NV, network view), 用来几种反应支持任务中的各种子网络、相互交织性和与其他子网络功能的信息, 从而可以取代系统视角的作用。因此, 可知网络视角包括网络接口 NV-1、网络关系矩阵 NV-3、网络功能 NV-4、网络规则模型 NV-10 等网络体系结构视角模型, 从而实现分析不同子网络之间的连接关系的目的, 表 1 所示为其视角与描述对应的关系分析, 本节只选择其中几类来举例说明。

如表 1 所示, 在系统视角的基础上, 设计了针对空间信息网络的网络视角, 表 1 选择了其中的 4 类进行进一步解释说明, 在 DoDAF2.0 中, 诸如上述子视角有 40 余种, 基本能够满足体系结构视角模型建立的所有需求。

表 1 几类 DoDAF2.0 中网络视角子模型

视角模型	描述
NV-1: 网络接口	对网络及其相互之间关系的确定
NV-3: 网络关系矩阵	在制定体系结构关系描述中网络之间的关系
NV-4: 网络功能	网络执行的功能和网络功能之间的网络数据流
NV-10: 网络规则模型	明确了由于网络设计或执行某方面而影响网络功能的限制条件

综上所述, 基于 DaaC 的空间信息网络体系结构建模方法, 能够确保所有的的基本数据以支持各种各样的分析任务的同时, 还确保了体系结构描述中各视图间隔协调一致。体系结构设计开发过程中创建的上述各种视图提供了对底层体系结构数据的形象表达, 传递着来自体系结构描述的、特定为设计决策用户所需要的有用信息, 用户可以根据自己

的需求, 从不同视角来进行体系结构模型的建立。这种基于 DaaC 思想能够充分利用体系结构数据, 也满足当前大数据环境下, 数据量庞大、数据价值密度低等需求, 在满足实现体系结构建模的同时, 还符合当前及今后的发展趋势, 值得推广和提倡。

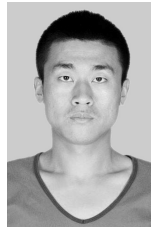
4 结束语

本文探索性地结合 DaaC 思想, 寻找一种适合空间信息网络的体系结构建模方法, 旨在为空间信息网络体系结构设计探索一条新的道路, 更好地服务于空间信息网络的建设和。DaaC 体系结构建模思想是以体系结构核心实体对象为基础, 以空间数据的分析、收集、描述、存储和管理等过程构建空间信息网络体系结构的全生命周期, 具有灵活、可重用性高等优点, 是当下及未来体系结构建模发展的趋势。然而, 本文只是对体系结构建模的初步探索, 结合本文设计的 DaaC 体系结构建模流程, 以 DoDAF2.0 为蓝本, 进行模型的实现和案例分析是下一步研究的内容, 也是验证本文建模方法有效性和可行性的有效手段。

参考文献:

- [1] 李德仁, 沈欣, 龚健雅, 等. 论我国空间信息网络的构建[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(6): 711-715.
LI D R, SHEN X, GONG J Y, et al. On construction of China's space information network [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(6): 711-715.
- [2] JIANG C, WANG X, WANG J, et al. Security in space information networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(8): 82-88.
- [3] 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 the key technology of space synthesis information network based on DTN [D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.
- [4] 王敬超, 于全. 基于分布式星群的空间信息网络体系架构与关键技术[J]. 中兴通讯技术, 2016, 22(4): 9-13.
WANG J C, YU Q. System architecture and key technology of space information network based on distributed satellite clusters [J]. ZTE Technology Journal, 2016, 22(4): 9-13.
- [5] 张登银, 刘升升. 基于 Mesh 的空间信息网络体系结构研究[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(8): 69-73.
ZHANG D Y, LIU S S. Research on Mesh-based architecture for space information network[J]. Computer Technology and Development, 2009, 19(8): 69-73.
- [6] MUKHERJEE J, RAMAMURTHY B. Communication technologies and architectures for space network and interplanetary internet[J]. IEEE Communication Surveys & Tutorials, 2013, 15(2): 881-897.
- [7] ZHANG W, ZHANG G, GOU L, et al. Delay minimization topology control in planetary surface network: an autonomous systems approach[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2015, 5: 1-13.
- [8] 张威. 空间信息网络拓扑控制理论与方法[D]. 南京: 解放军理工大学, 2016.
ZHANG W. Topological control theory and method of space information network[D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2016.
- [9] LIN P, KUANG L, CHEN X, et al. Adaptive subsequence adjustment with evolutionary asymmetric path-relinking for TDRSS scheduling[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2014, 25(5): 800-810.
- [10] 董飞鸿. 空间信息网络结构优化设计与研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2016.
DONG F H. Optimal design and research of space information network structure [D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2016.
- [11] 简平, 熊伟. 基于活动的 C4ISR 体系结构建模方法研究[J]. 装备学院学报, 2009, 20(5): 50-55.
JIAN P, XIONG W. Research on activity based methodology of modeling C4ISR system architecture [J]. Journal of Equipment Academy, 2009, 20(5): 50-55.
- [12] 熊伟, 刘德生, 简平, 等. 空间信息系统建模仿真与评估技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
XIONG W, LIU D S, JIAN P, et al. Spatial information system modeling and simulation technology assessment [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.

作者简介:



于少波 (1990-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 航天工程大学博士生, 主要研究方向为空间信息网络动态拓扑演化及可视化。



吴玲达 (1962-), 女, 上海人, 博士, 航天工程大学研究员、博士生导师, 主要研究方向多媒体信息系统与虚拟现实技术、网络可视化。



张喜涛 (1989-), 男, 河南平顶山人, 航天工程大学博士生, 主要研究方向为空间信息网络的多元特性及可视分析。