

文章编号: 2095-4980(2019)06-1086-05

一种面向分布式星群的混合拓扑

刘 凯, 章宇兵, 陆 洲, 周 彬

(中国电子科学研究院 天基信息系统研究所, 北京 100041)

摘 要: 针对分布式星群内无线网络的高可靠、灵活交换和低实现复杂度的需求, 提出一种面向分布式星群的混合拓扑结构。通过在星群内各颗卫星配置模拟交换载荷实现模拟域的无中心拓扑, 在交换卫星配置数字交换载荷实现数字域的双中心拓扑。理论及数值分析表明, 混合拓扑结构具备与无中心拓扑结构相同的拓扑可靠性及较低的实现复杂度, 同时能够提供波束/波长级、子带级和分组交换颗粒度。

关键词: 分布式星群; 群内无线网络; 混合拓扑; 星上交换; 可靠性

中图分类号: TN914.42

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201906.1086

A hybrid topology for distributed satellite clusters

LIU Kai, ZHANG Yubing, LU Zhou, ZHOU Bin

(Institute of Space Information Systems, China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China)

Abstract: A hybrid topology is proposed in order to satisfy high reliability and flexibility, low implementation complexity of wireless network in a satellite cluster. In a satellite cluster employing the proposed topology, a meshed topology in analog domain is realized by deploying analog switching payload in each satellite; a two-center topology in digital domain is achieved by deploying digital switching payload in the two switching satellites. Theoretical and numerical analysis demonstrates that, the topology reliability of hybrid topology is the same as that of meshed topology, while the implementation complexity is lower than that of meshed topology. Furthermore, the switching granularities of beam/wavelength, sub-band and packet are achieved in a satellite cluster with the hybrid topology.

Keywords: distributed satellite clusters; wireless network in a satellite cluster; hybrid topology; onboard switching; reliability

空间信息网络由于其独特的空间优势, 在对地观测、应急通信、航天测控、航空运输和国家战略利益拓展等方面具有地面网络无法替代的地位; 同时空间信息网络与地面网络融合发展, 已逐渐成为各国竞争的战略高地^[1-2]。全球相关机构和组织已投入大量的人力和物力开展空间信息网络相关技术研究及实验验证, 美国国家航空航天局(NASA)的空间传感网、欧空局(ESA)的EDRS计划、美国国家科学基金会(NSF)的国家生态观测网络以及中国2030重大工程“天地一体化信息网络”等^[1,3-5]。受平台能力的局限性以及建造部署周期长等限制因素, 传统的单个卫星难以满足空间信息网络对网络节点提出的多种应用需求(如宽带接入、中继传输、在轨处理等)。分布式星群(Distributed Satellite Clusters)利用无线网络将多个模块卫星整合等效为一颗大卫星, 能够降低单一卫星的研发难度, 增强节点可靠性和迭代升级能力, 提升空间资源效益。多个模块卫星可以为编队飞行的非同步轨道卫星, 也可以为位于同一轨位的同步轨道卫星^[6-7]。不同于地面网络设计, 分布式星群面临各种空间辐射效应的影响, 如总剂量效应(Total Ionizing Dose, TID)、单粒子翻转(Single Event Upset, SEU)、单粒子功能中断(Single Functional Interrupt, SEFI)等^[8]。因此, 分布式星群应具备较高的可靠性。

星群内无线网络的拓扑结构决定了分布式星群的可靠性和单星的实现复杂度。目前, 分布式星群的拓扑结构有无中心拓扑结构(no center topology)和单中心拓扑结构(one center topology)。前者典型系统是美国的F6计划^[9], 后者典型系统是美国的星群计划(星簇)计划^[10]。在无中心拓扑结构中, 星群内的任意卫星能够实现一跳

收稿日期: 2018-04-20; 修回日期: 2018-06-06

基金项目: 中国博士后科学基金面上资助项目(2017M620061); 中国电子科学研究院创新基金项目

互连，因此任意卫星失效不影响分布式星群内正常卫星间的连通性，提高了分布式星群的可靠性。但由于每颗卫星需具备与其他卫星的星间链路和数字处理能力，提高了每颗卫星的实现复杂度。在单中心拓扑结构中，卫星分为任务卫星(Traffic Satellite, TS)和交换卫星(Switch Satellite, SS)。任务卫星协同完成特定任务，交换卫星为任务卫星间通信以及对地通信提供链路。由于每颗卫星专注自己的任务设计，简化了每颗卫星的实现复杂度。但交换卫星的失效会造成任务卫星间的不连通，因此拓扑可靠性低。随着星间传输速率的提升，会造成单颗交换卫星难以满足容量需求。因此，分布式星群的拓扑结构应该平衡星群内的可靠性和单星的实现复杂度。

单颗卫星的交换体制决定了分布式星群内无线网络的交换颗粒度和单星实现复杂度。目前，星上交换面向微波链路和激光链路有不同的交换形式。面向微波链路的星上交换体制主要有微波矩阵、信道化交换、分组交换；面向激光链路的星上交换体制主要是波长交换^[11]。微波矩阵和波长交换在模拟域完成，不需要进行星上处理，实现复杂度低，适用于大颗粒度、大容量的星上交换需求。由于光交换开关矩阵具有良好的 SWaP(Size Weight and Power)性能，采用基于微波光子学的方式实现微波交换是发展趋势之一^[12-13]。信道化交换实现用户子载波级的交换，典型的系统是美国的 WGS 系统^[14]。分组交换实现数据分组级的交换，典型的系统是美国的 Spaceway-3 系统^[15]。由于信道化交换和分组交换在数字域完成，对星上处理能力要求高，提高了单星实现复杂度，适用于小容量、细颗粒度的灵活交换场景。对分布式星群的单星交换体制设计，应分别考虑不同卫星的交换需求，平衡交换容量、灵活性和实现复杂度。

1 分布式星群混合拓扑结构

如图 1 所示，一个分布式星群包括 N 颗卫星，根据其实现的功能不同分为 2 种：a) 交换卫星：具备与其他分布式星群、地面设施之间的高速通信链路和较强的星上处理能力，能够为分布式星群内的其他卫星提供模拟域和数字域交换能力和高速通信能力，如图 1 中的 SS_1, SS_2 ；b) 任务卫星：具备独立或与其他任务卫星协同完成特定任务的能力，并且具备模拟域交换的能力，如图 1 中的 $ST_1, ST_2, \dots, ST_{N-2}$ 。

一个分布式星群包括如下链路：a) 群间链路(inter-cluster link)：用于实现不同分布式星群之间的信息交互；b) 星地链路(satellite-ground link)：用于实现分布式星群与地面站间的信息交互；c) 群内链路(inner-cluster link)：用于实现分布式星群内部各星间的信息交互。群内链路分为群内模拟链路和群内数字链路，群内模拟链路用于实现分布式星群内各星间模拟域的信息交互，如图 1 中的实线所示；群内数字链路用于实现分布式星群内各星间数字域的信息交互，如图 1 中的虚线所示。

值得注意的是，本文考虑群内模拟链路和群内数字链路可以是在一种物理链路上不同的逻辑链路，因此并未增加星间链路收发装置的复杂度。

如图 1 所示，采用混合拓扑结构的分布式星群中，任一卫星包含 $N-1$ 条群内模拟链路，实现与星群内的其他 $N-1$ 颗卫星模拟域互连。因此，从模拟域角度分析，任意 2 颗卫星间能够实现模拟域的一跳互连，分布式星群为无中心网络。任一任务卫星包含 2 条群内数字链路，实现与 2 颗交换卫星(SS_1 和 SS_2)的数字互连；每颗交换卫星包含 $N-1$ 条群内数字链路，实现与星群内的其他 $N-1$ 颗卫星的数字互连。因此，从数字域角度分析，任意 2 颗任务卫星均需通过交换卫星实现数字域互连，分布式星群为双中心网络，网络中心为 SS_1 和 SS_2 。

2 分布式星群星上交换架构

根据实现功能的不同，卫星内部载荷可分为 2 种：a) 交换载荷：用于实现分布式星群内部以及与其他分布式星群和地面设施间互连的载荷。交换载荷分为模拟交换和数字交换载荷。b) 业务载荷：用于实现特定功能的载荷，如侦察、成像等。业务载荷分为模拟域业务载荷(如天线、射频等)和数字域业务载荷(如信号处理机等)。

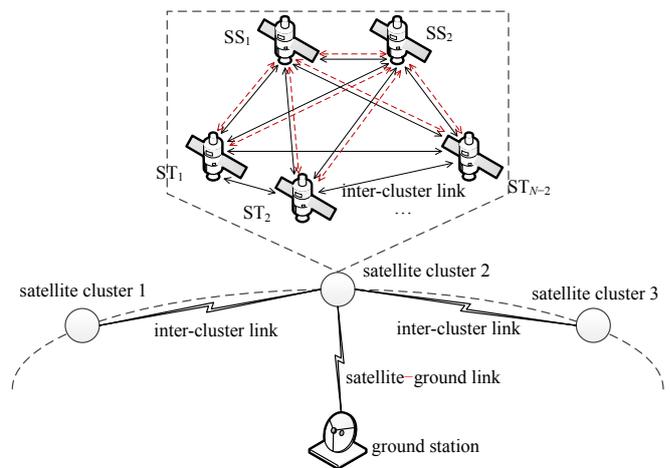


Fig.1 Hybrid topology of a distributed satellite cluster

图1 分布式星群混合拓扑结构

2.1 交换卫星的交换架构

交换卫星的交换架构如图 2 所示。交换载荷(虚线以上部分)包括光域交换和数字域交换两部分。由于光交换良好的 SWaP 性能,因此,模拟域交换采用微波光子学的方式实现。光域交换完成星间链路 1~N-1 和星群间激光链路、微波链路的模拟域交换。对于微波链路,需经过光电/电光变换(Optoelectric/Electro-Optical conversion, OE/EO)模块接入光交换。需要进行数字域交换的业务送入可重构数字交换,完成业务的数字域交换。数字域交换包括分组交换和信道化交换,采用可重构平台实现 2 种交换形式的动态调整。

模拟业务载荷接入光域交换,实现交换卫星的模拟业务载荷与其他卫星的模拟业务载荷间的互连;数字业务载荷接入可重构数字域交换,实现交换卫星的数字业务载荷,为其他卫星的载荷提供服务。

2.2 任务卫星拓扑架构

任务卫星的交换架构如图 3 所示。交换载荷(虚线以左部分)包括光域交换和数字域交换两部分。模拟域交换采用微波光子学的方式实现群内模拟链路 1~N-1 的模拟域交换。业务载荷接入光域交换实现任务卫星的业务载荷与其他卫星的业务载荷间的互连。

3 性能分析

3.1 可靠性分析

采用导致星群内出现不连通的正常卫星所需的最小失效卫星数量来衡量分布式星群的拓扑可靠性 R :

$$R = \min_F \{F | \text{导致星群出现不连通真子集的} F\} \quad (1)$$

式中 F 为失效卫星数量, $0 \leq F \leq N$ 。

不同拓扑结构的可靠性如表 1 所示。在无中心拓扑中,任意卫星间都存在群内链路,因此任意数量的卫星失效不影响剩余正常卫星的互联互通,无中心拓扑可靠性为 N 。在单中心拓扑中,任意 2 颗任务卫星间的互通均需通过交换卫星。当交换卫星失效时,会导致任务卫星间无法互连,而任务卫星的失效不影响其他正常卫星的互连,因此单中心拓扑可靠性为 1。在混合拓扑结构中,由于模拟域是无中心拓扑,因此混合拓扑在模拟域的可靠性为 N ;数字域内任意 2 颗任务卫星需通过 2 个交换卫星互连,当 2 颗交换卫星失效时,会导致任务卫星间无法互连,而任务卫星的失效不影响其他正常卫星的互连,因此混合拓扑结构在数字域的可靠性为 2。

3.2 交换能力分析

采用分布式星群具备的交换容量 C_{sc} 和交换颗粒度来衡量交换能力。分布式星群的交换容量定义为分布式星群能够接收的进入交换载荷的业务量,星群交换容量分为模拟交换容量 C_{sca} 和数字交换容量 C_{scd} 。

不同拓扑结构的 C_{sc} 和颗粒度如表 2 所示,其中, r 为每条星间链路速率, α 为需要进行数字交换的业务比例, $0 < \alpha < 1$ 。对于无中心拓扑结构, C_{scd} 可在 $[(N-1)r, N(N-1)r]$ 范围内动态调整,交换颗粒度为数据分组。当 $C_{scd}=(N-1)r$ 时,无中心拓扑中各星间能够互为备份,星群内网络负载低,网络稳定性高;当 $C_{scd}=N(N-1)r$ 时,无中心拓扑中各星接入不同业务,星群内的网络负载高。对于单中心拓扑结构, $C_{scd}=(N-1)r$,交换颗粒度为数据分组。对于混合拓扑结构, C_{sca} 可在 $[(N-1)r, N(N-1)r]$ 范围内动态调整,交换颗粒度为波束/波长。当 $C_{sca}=(N-1)r$ 时,混合拓扑中各星间能够互为备份,星群内的网络负载低,网络稳定性高;当 $C_{sca}=N(N-1)r$ 时,混合拓扑中各星完成不同业务的交换,星群内的网络负载高。 C_{scd} 可在 $[\alpha(N-1)r, 2\alpha(N-1)r]$ 范围内动态调整,交

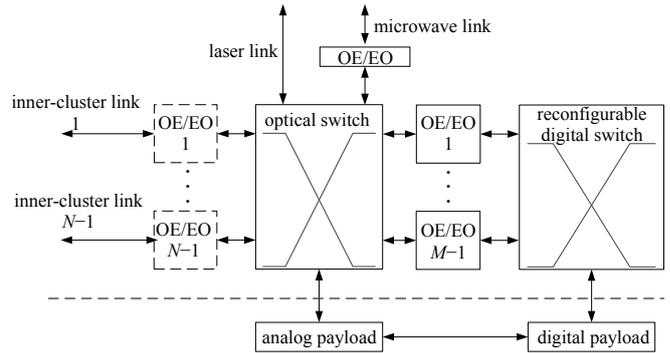


Fig.2 Switch architecture of switch satellite in hybrid topology
图2 交换卫星的交换架构

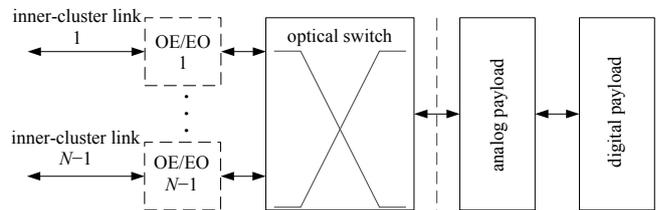


Fig.3 Switch architecture of traffic satellite in hybrid topology
图3 任务卫星的交换架构

表1 不同拓扑结构的可靠性

Table1 Reliability of different topologies	
topology	R
no center topology	N
one center topology	1
hybrid topology (in analog domain)	N
hybrid topology (in digital domain)	2

换颗粒度为子带或分组。当 $C_{scd}=\alpha(N-1)r$ 时，混合拓扑中 2 颗交换卫星能够互为备份，交换卫星的负载低；当 $C_{scd}=2\alpha(N-1)r$ 时，2 颗交换卫星完成不同业务的交换，负载高。

表2 不同拓扑结构的交换能力
Table2 Switching ability of different topologies

topology	C_{sca}	C_{scd}	granularity
no center topology	0	$[(N-1)r, N(N-1)r]$	packet
one center topology	0	$(N-1)r$	packet
hybrid topology	$[(N-1)r, N(N-1)r]$	$[\alpha(N-1)r, 2\alpha(N-1)r]$	beam/wavelength, sub-band, packet

不同拓扑结构的 C_{scd} 最大值如图 4 所示。通过比较可以得出，无中心拓扑能够提供最大的数字域交换能力，且随 N 的增长呈平方增长；单中心拓扑结构和混合拓扑结构所能提供的最大数字域交换能力随 N 的增长呈线性增长。当 $2\alpha > 1$ 时，混合拓扑结构能够提供比单中心拓扑结构更大的数字域交换能力。同时混合拓扑结构能够提供与无中心拓扑结构相同容量的模拟域交换容量。

3.3 实现复杂度分析

采用单星的群内链路数量 L 和单星交换容量 C_s 来衡量单星的实现复杂度。群内链路数量决定了构建星群内传输所需的链路设备数量和交换端口数量；交换容量决定了构建星群内组网所需的交换载荷复杂度。单星交换容量分为模拟交换容量 C_{sa} 和数字交换容量 C_{sd} 。

不同拓扑结构下单星群内链路数量如表 3 所示。无中心拓扑，单星的群内链路数量为 $N-1$ ；单中心拓扑，交换卫星的群内链路数量为 $N-1$ ，任务卫星的群内链路数量为 1；混合拓扑结构，当群内数字链路和群内模拟链路在同一物理链路上承载时，单星的群内链路数量为 $N-1$ 。因此，混合拓扑结构具备与无中心拓扑相同的单星星间链路数量。

不同拓扑结构下单星模拟交换容量 C_{sa} 和单星数字交换容量 C_{sd} 如表 4 所示。在无中心拓扑中，每颗卫星均进行数字域交换，因此其单星数字域交换容量为 $(N-1)r$ 。在单中心拓扑中，任务卫星不具备交换能力，简化了任务卫星的设计；交换卫星完成所有业务的数字域交换，交换容量为 $(N-1)r$ 。在混合拓扑结构中，任务卫星具备模拟域交换能力，交换容量为 $(N-1)r$ ；交换卫星的模拟域交换容量为 $(N-1)r$ ，数字域交换容量为 $\alpha(N-1)r$ 。由于模拟交换具有比数字域交换更低实现复杂度，因此混合拓扑中交换卫星的交换载荷实现复杂度低于无中心拓扑结构中的卫星和单中心拓扑中的交换卫星；混合拓扑中的任务卫星实现复杂度低于无中心拓扑中的卫星，但高于单中心拓扑中的任务卫星。不同拓扑结构的 C_{sd} 最大值如图 5 所示。通过比较可以得出，无中心拓扑的单星复杂度与单中心拓扑中的交换卫星具备相同的数字交换容量需求，且高于混合拓扑结构中的单星交换容量需求。虽然混合拓扑结构中每颗卫星的模拟域交换容量需求增加，但其实现复杂度远低于数字域交换。

表4 不同拓扑结构的单星交换容量 C_{sa} 和 C_{sd}
Table4 C_{sa} and C_{sd} of different topologies

topology	C_{sa}	C_{sd}
satellite in no center topology	0	$(N-1)r$
switch satellite in one center topology	0	$(N-1)r$
traffic satellite in one center topology	0	0
switch satellite in no hybrid topology	$(N-1)r$	$\alpha(N-1)r$
traffic satellite in no center topology	$(N-1)r$	0

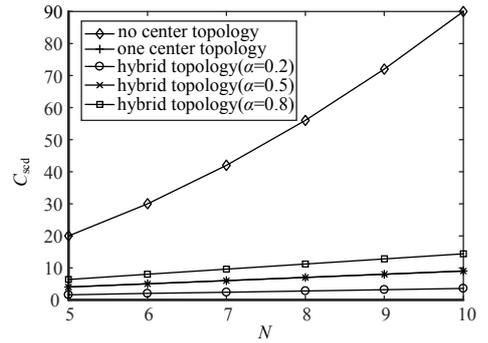


Fig.4 Maximum of C_{scd} in different topologies
图4 不同拓扑结构的 C_{scd} 最大值

表3 不同拓扑结构的 L

Table3 L of different topologies

topology	L
satellite in no center topology	$N-1$
switch satellite in one center topology	$N-1$
traffic satellite in one center topology	1
satellite in no hybrid topology	$N-1$

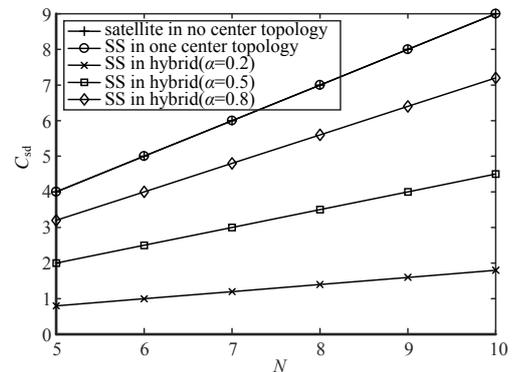


Fig.5 C_{sa} in different topologies
图5 不同拓扑结构的 C_{sa}

4 结论

本文提出了一种面向分布式星群的混合拓扑结构以满足星群内网络的高可靠、灵活交换和低实现复杂度的需求。通过在各颗卫星配置模拟交换载荷并在交换卫星配置数字载荷，混合拓扑结构在模拟域为无中心拓扑，

在数字域为双中心拓扑。分析表明,混合拓扑具备与无中心拓扑相同的可靠性;通过将大容量模拟交换和灵活的数字交换配置在不同卫星,混合拓扑具备比单中心拓扑更高的星群容量,并能够实现多种颗粒度的交换,同时降低了实现复杂度。

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 Deren, SHEN Xin,GONG Jianya,et al. On construction of China's space information network[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015,40(6):711-715.)
- [2] 徐小玲,段然,崔维嘉,等. GEO 卫星 LTE 跨层资源调度算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(4):575-579. (XU Xiaoling,DUAN Ran,CUI Weijia,et al. A cross-layer based resource scheduling algorithm for multimedia traffic in GEO satellite LTE networks[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(4):575-579.)
- [3] NASA tracking and data relay satellite system[EB/OL]. [2010-08-26]. <http://www.spacecomm.nasa.gov/spacecomm/tdrss/>.
- [4] 杨红俊. 国外数据中继卫星系统最新发展及未来趋势[J]. 电讯技术, 2016,56(1):109-116. (YANG Hongjun. Latest development progress and trends of foreign data relay satellite systems[J]. Telecommunication Engineering, 2016,56(1):109-116.)
- [5] 李凤华,殷丽华,吴巍,等. 天地一体化信息网络安全保障技术研究进展及发展趋势[J]. 通信学报, 2016,37(11):156-168. (LI Fenghua,YIN Lihua,WU Wei,et al. Research status and development trends of security assurance for space-ground integration information network[J]. Journal on Communications, 2016,37(11):156-168.)
- [6] 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):9-18. (WANG Jingchao,YU Quan. System architecture and key technology of space information network based on distributed satellite clusters[J]. ZTE Technology Journal, 2016,22(4):9-18.)
- [7] 秦勇,惠蕾放,刘晓旭,等. 分布式空间系统星间通信组网技术研究综述[J]. 空间电子技术, 2015(4):1-10. (QIN Yong, HUI Leifang,LIU Xiaoxu,et al. Survey:inter-satellite networking technologies of distributed space systems[J]. Space Electronic Technology, 2015(4):1-10.)
- [8] MAURER R H,FRAEMAN M E,MARTIN M N,et al. Harsh environments space radiation environment effects and mitigation[J]. Johns Hopkins APL Technical Digest, 2008,28(1):17-29.
- [9] BROWN O,EREMENKO P. Value-centric design methodologies for fractionated spacecraft: progress summary from phase 1 of the DARPA system F6 program[C]// AAIA Reinventing Space Conference. Pasadena,California,USA:[s.n.], 2009:1-15.
- [10] ORNDORFF G A,ZINK B F,COSBY J D. Clustered architecture for responsive space[C]// 5th Responsive Space Conference. Los Angeles,CA,USA:[s.n.], 2007:7.
- [11] MAIER M,REISSLEIN M. Trends in optical switching techniques: a short survey[J]. IEEE Network, 2008,22(6):42-47.
- [12] 曾智龙,刘兴,孙晖,等. 空间激光通信最新进展及发展建议[J]. 光通信技术, 2017(6):1-5. (ZENG Zhilong,LIU Xing, SUN Hui,et al. Latest developments of space laser communications and some development suggestions[J]. Optical Communication Technology, 2017(6):1-5.)
- [13] 赵尚弘,李勇军,朱子行,等. 星上微波光子技术应用研究进展[J]. 空间电子技术, 2012(4):14-27. (ZHAO Shanghong, LI Yongjun,ZHU Zihang,et al. Research progress of microwave photonics technologies for on-board application[J]. Space Electronic Technology, 2012(4):14-27.)
- [14] GUPTA Rohit. Network centric waveform operation over the WGS[C]// MILCOM,Military Communications Conference. Baltimore,MD,USA:IEEE, 2011(5):1690-1695.
- [15] Spaceway-3[EB/OL]. [2018-06-06]. <http://www.hughes.com/technologies/satellite-platforms/spaceway-3-1>.

作者简介:



刘 凯(1986-),男,山东省潍坊市人,博士,博士后,工程师,主要研究方向为天基网络与星上交换技术,email:liukai.v@gmail.com.

章宇兵(1971-),男,郑州市人,硕士,研究员,主要研究方向为航天综合电子信息系统。

陆 洲(1971-),男,上海市人,硕士,研究员,主要研究方向为卫星通信。

周 彬(1966-),男,郑州市人,学士,研究员,主要研究方向为航天综合电子信息系统。