

基于SysML的卫星通信系统设计与验证研究

廖 灿^{1,2}, 赵 天¹, 冯 旭¹, 肖双爱¹

(1.中国电子科技集团有限公司电子科学研究院, 北京 100041;

2.北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要: 卫星通信系统作为承载天地一体化信息网络的重要组成部分, 正成为当前研究的热点。采用目前最常用的数字化设计语言SysML对卫星通信系统进行需求分析、功能分解、设计综合, 并对设计方案进行初步验证, 结果表明本文设计的卫星通信系统架构及业务流程具有一定的稳健性。通过将SysML应用于卫星通信系统的数字化设计, 本研究可为卫星通信系统中关键技术的设计与验证提供支撑。

关键词: 卫星通信系统; 系统建模; 数字化设计; 设计与验证

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2021034

Research on Satellite Communication System's Design and Verification Based on SysML

LIAO Can^{1,2}, ZHAO Tian¹, FENG Xu¹, XIAO Shuangai¹

1.China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China

2.Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract: As an important part of the space-integrated-ground information network, the satellite communication system has become a research hotspot. The system modeling language (SysML), which is the most popular digital design language, was adopted to analyzing requirements, decomposing functions and synthesizing designs of the satellite communication system. The verification result indicated that the architecture and the service process of the satellite communication system designed in this paper is of robustness to some degree. By used SysML in the digital design of satellite communication system, this research supported the key technologies' design and verification in the satellite communication system.

Keywords: satellite communication system, system modeling, digital design, design and verification

1 卫星通信系统概述

近年来, 各国航天技术迅猛发展, 空间经济等的战略地位日益显著, 争夺空间的优势逐渐成为世界各国壮大航天力量的重要手段, 而计算机网络和移动通信等信息技术的发展, 又促使人们以新的角度去研究如何将航天技术和信息技术结合起来。卫星通信系统是采用“天基组网, 天地互联”的思路, 由分布在高、中、低轨的具备传输交换等功能的异型异构卫星节点及地面配套设施互联构成, 通过星间、星地以及地面链路而形成的综合性信息网络系统^[1-2]。作为利用空间和控制空间的战略平台, 卫星

通信系统可以实现全天候全球覆盖; 作为网络空间的重要信息子网, 卫星通信系统能够在网络空间对抗中提供信息获取、信息处理、信息传输和信息分发等功能, 对于空间站数据回传、远洋测控以及极地科考等领域^[3-5]具有重要意义。

卫星通信系统作为承载天地一体化信息网络的重要组成部分, 正成为当前的研究热点。美国等国家近年来进行了大量有关的研究, 以满足自身的国防或航天任务需求。美国国防部在20世纪90年代提出将IP运用到空间网络的方案; 欧盟的欧洲技术平台提出“一体化卫星通

收稿日期: 2021-04-30; 修回日期: 2021-08-10

基金项目: 本研究获得第68批中国博士后科学基金资助(资助编号: 2020M680632)

Foundation Item: This research is supported by the China Postdoctoral Science Foundation(No. 2020M680632)

信计划”以及全球通信一体化空间架构。此外，一些商业公司也推出了一系列卫星通信系统计划，虽然早期的卫星通信系统概念如“铱星”“全球星”等遭受到了挫折，但近几年又涌现出一批提供全球宽带服务的大型低轨卫星星座计划，如TeleSat、OneWeb、SpaceX等。这些新兴星座联网计划引进了更多先进技术，从而在降低制造成本和发射成本的同时，提供更高的性能。表1展示了TeleSat、OneWeb和SpaceX的星座计划相关参数^[6]。

表1 TeleSat、OneWeb和SpaceX的星座计划相关参数

星座	卫星总数/颗	轨道面数量/个	每个轨道面上的卫星数量/颗	轨道面高度及倾角
Telesat	117	6	12	1 000 km (99.5°)
		5	9	1 248 km (37.4°)
OneWeb	720	40	18	1 200 km (87.9°)
SpaceX	4 425	32	50	1 150 km (53°)
		32	50	1 110 km (53.8°)
		8	50	1 130 km (74°)
		5	75	1 275 km (81°)
		6	75	1 325 km (70°)

卫星通信系统具备多层次组网、多功能融合、天地一体化运行管控等特点，涉及领域范围广、技术跨度大，是典型的复杂大系统。运用数字化设计方法，对卫星通信系统进行顶层设计，以及关键技术、业务流程的试验验证，可以全面、准确、及时地分解/分析卫星通信系统的主要功能，从而为卫星通信系统在顶层规划、技术研发、系统研制等方面提供有力的技术支撑，以有效降低建设风险。

2 系统建模语言发展现状

随着系统规模的快速增长，系统的技术难度、复杂度以及集成度越来越高，传统的研制模式已难以支撑任务需求，数字化设计应运而生。数字化设计是一种应用建模方法的规范方式，用于支持系统需求、设计、分析、验证和确认活动。这些活动从概念设计阶段开始，贯穿整个开发过程及后续的生命周期阶段，包含行为分析、系统架构、需求追溯、性能分析、仿真和测试等内容^[7-9]。

数字化设计从时间、空间上将涉及上百种跨学科领域的复杂大型系统的开发、运行和维护过程进行了整理和规范，使得系统在各种约束中始终按照生命周期框架的定义得以有序进行。由于数字化设计需要很强的沟通环境，需要和不同领域的人员进行沟通和交流，所以在这样的环境下，保持某习惯语言领域的独立性，并且使

交流方法尽可能简单极为重要。

系统建模语言（System Modeling Language, SysML）是目前最常用的数字化设计语言^[10-11]，通过对统一建模语言（Unified Model Language, UML）进行重用和扩展，消除了不同建模语言在表达方式上的不一致，规范了符号和语义。其创建的模型便于各领域的工程师阅读和理解，也便于计算机理解和处理，使得数字化设计人员能够严格地描述他们所设计的内容，并通过工具对设计实例进行自动化分析和验证。SysML是一种通用的图形化建模语言，定义了包括活动图、序列图、状态机图、用例图、需求图、模块定义图、内部模块图、参数图以及包图在内的9种图，用于描述、分析、设计和验证那些包含了硬件、软件、设备、人员和信息的复杂系统，提供了建模系统需求、行为、结构和参数进行图形化表现的语义基础。其功能见表2。

表2 SysML建模功能

图类型	功能说明
需求图	需求图以图形的方式描述了系统的需求，说明了需求之间的相互关系，如包含、继承和复制等。这些需求一般都是要求系统完成某一特定功能，并且具备完成这一功能的条件以及性能
模块定义图	模块定义图将结构元素及其之间的关系通过模块表示出来。模块定义图中包含的元素有模块、执行者、值类型、约束模块、流说明和接口，这些元素是系统中其他内容的基础。一个模块一般拥有组成部分属性、引用属性、值属性、约束属性和端口这5种结构特性。通过模块定义图可以表示系统层级关系树和分类树
内部模块图	内部模块图反映某个模块的内部结构、模块内部各个部分的属性以及各个内部模块之间的连接。内部模块图表达的是各个内部模块如何有效地组合才能实现一个有效的实例
用例图	用例图描述了执行者如何使用系统来实现某一目标。用例图中定义的执行者用例指代用户或其他的交互系统。用例通常被定义为由系统执行的一系列操作，并产生对于执行者有价值的观察结果
活动图	活动图主要展示的是基于输入输出和控制的活动，以及该活动如何将输入转换为输出。通过活动图的方式科学显示整个系统操作的完整流程
序列图	序列图是一种动态视图，用以展示系统各个元素之间的调用操作和信息的交互
状态机图	状态机图着重表示模块的状态以及由时间触发的状态之间的转换
参数图	参数图用于表示约束和系统属性之间的关系，这些约束一般是等式或不等式。参数图和内部模块图都能展示一个模块的内部结构，但是参数图着重于表现值和约束之间的关系
包图	包图用于表示各个模型元素之间的层级关系，通过包的方式管理各个模块，并通过其反映各个模块之间的关系，使得系统模型的管理更加清晰和方便

3 基于SysML的卫星通信系统设计

3.1 任务背景

卫星通信系统涉及多个学科领域的专业知识，而各学科领域拥有各自专业的建模语言，不便于系统工程人员阅读和理解。SysML通过统一建模符号和语义，消除了不同建模语言在表达方式上的不一致，在满足系统数字

化设计需求的同时，也便于不同领域工程师的掌握和使用。将SysML应用于卫星通信系统，相比传统的设计方法具有信息集中、可追溯性强等优势。

在此背景下，本研究以应急救援通信保障^[12]为例，对卫星通信系统进行基于SysML的建模研究。在预警阶段，运用遥感卫星对灾害频发地区进行常态化监视，通过对遥感回传数据进行实时处理分析，可以提高对地震、洪涝、森林火灾等自然灾害的应急时间窗口；在救灾阶段，运用卫星通信系统为灾区救援提供通信保障、信息传输服务；在灾后重建阶段，运用地面信息港对灾区态势、受灾统计信息、现场视频等时空大数据进行分析处理，可以提升规划效率、完善救灾资源配置等。

应急救援通信保障应用场景如图1所示。

通过对应急救援通信保障任务进行分析，其涉及的

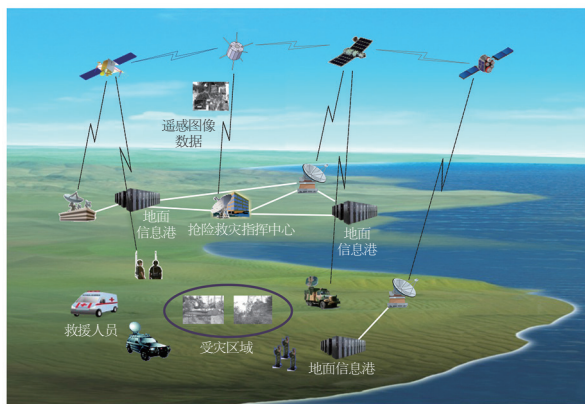


图1 应急救援通信保障应用场景

对卫星通信系统的功能需求包括：天基网络接入、天基信息传输、天基信息处理以及天基运维管控等。其中，天基网络接入作为卫星通信系统安全防护的第一道防线，需具备防止非法节点加入、鉴别用户权限等功能，以保障卫星通信系统的运行安全和数据安全。天基信息传输以卫星作为节点进行信息传输及信息交换，同时与陆基、海基及空基信息平台进行相互联通，形成天、空、地一体化的信息交换网络，完成空间及地面的综合信息传送任务，包含天基路由转发和数据中继等形式。天基信息处理是通过星上载荷实现信息的采集、分析及下发等功能，实现对受灾区域的态势感知等。天基运维管控面向不同任务需求，提供星上轻量级的核心网络管理功能，支持网络资源按需分配、用户预分配等策略，为各类用户提供网络服务保障。

应急救援通信保障需求图如图2所示。

3.2 系统分析

通过对应急救援通信保障任务背景进行分析可知，该任务涉及的用户包括遥感卫星、地面信息港、后方指挥中心、前方指挥中心以及前线救援队伍等，其用例图如图3所示。

3.3 功能分解

对应急救援通信保障任务进行分析，该任务可分解为如下过程：

(1) 灾害发生后，位于安全区域的后方指挥中心向

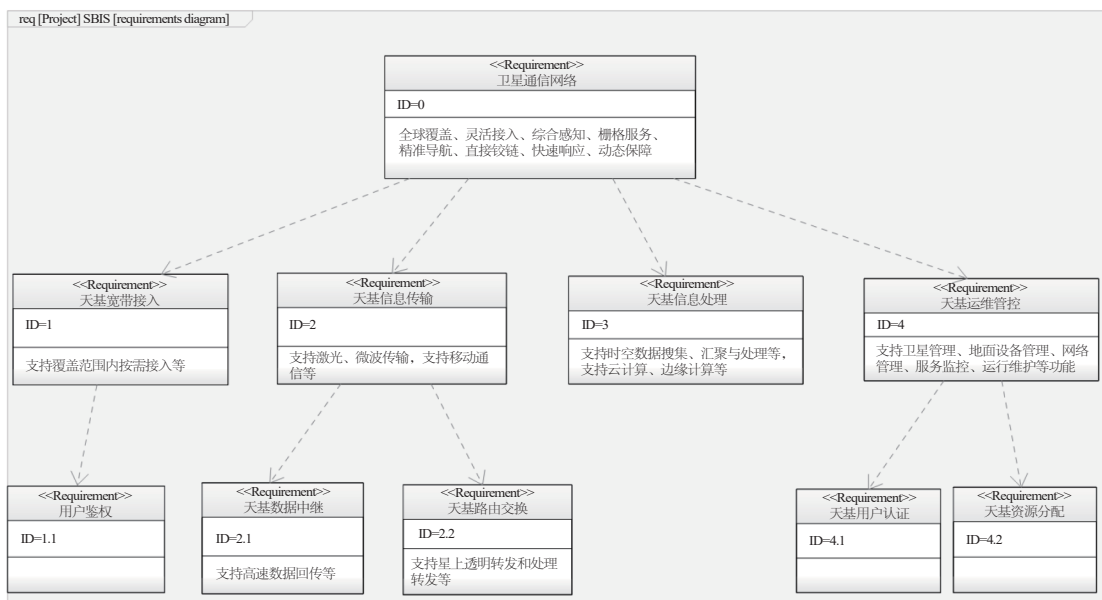


图2 应急救援通信保障需求图

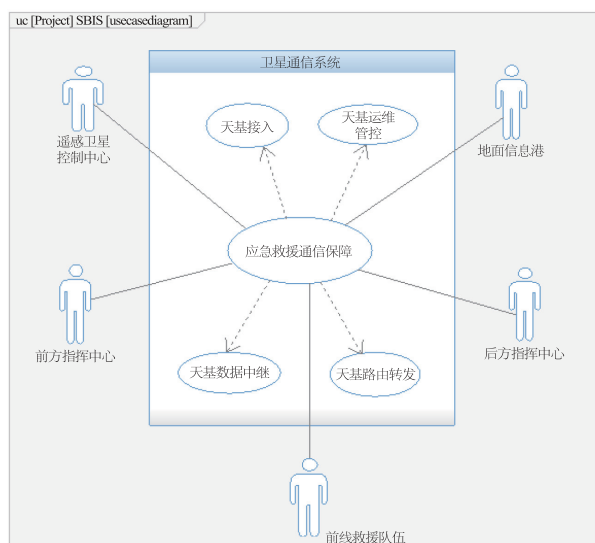


图3 应急救援通信保障用例图

地面信息港请求灾害区域遥感图像；

(2) 地面信息港向遥感卫星控制中心请求受灾区域遥感图像，遥感卫星控制中心通过调度遥感卫星重点扫描受灾区域，将遥感图像通过高轨卫星中继业务进行数据回传至前方指挥中心和后方指挥中心；

(3) 卫星通信系统地面管控节点调动卫星波束资源，保障受灾区域通信能力；

(4) 建立位于受灾区域的前方指挥中心和位于安全区域的后方指挥中心的卫星通信链路；

(5) 后方指挥中心根据遥感信息，分析受灾情况，制定救援方案，并将救援方案通过卫星通信链路发送给前方指挥中心；

(6) 前方指挥中心派遣多个救援分队前往受灾区域，并通过短报文与救援分队进行联系；

(7) 各救援分队之间，以及救援分队与前方指挥中心、后方指挥中心之间的语音、图像和视频传输业务通过低轨卫星传输。

活动图以活动的方式组织功能需求，并展示活动之间是如何关联的。在卫星通信系统数字化设计过程中，用活动图可以描述卫星通信系统在应急救援通信保障任务场景下的整体功能流。以获取受灾区域遥感信息为例，其活动图如图4所示。

时序图描述的是系统中各对象相互之间传送消息的先后顺序，反映的是各对象在时间上的动态协作关系。时序图根据控制流指定了一连串的交互。控制流是通过对象生命线之间发送和接收消息来定义的。消息包含了控制流和数据流，它发起接收消息的对象的行为，并把

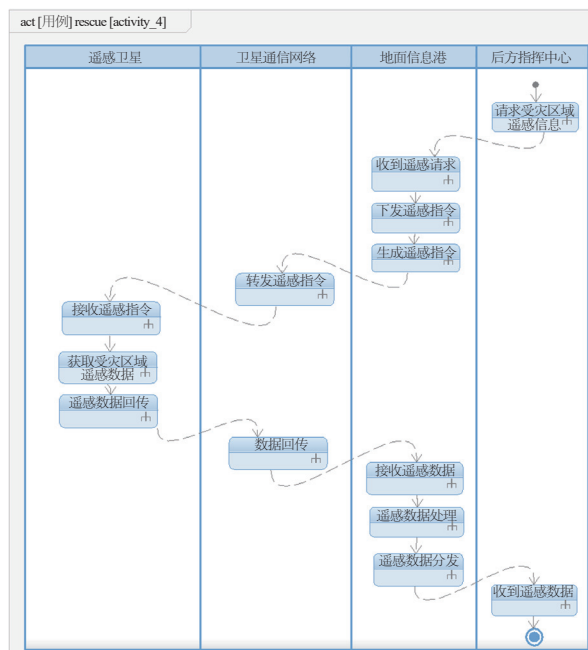


图4 获取受灾区域遥感信息活动图

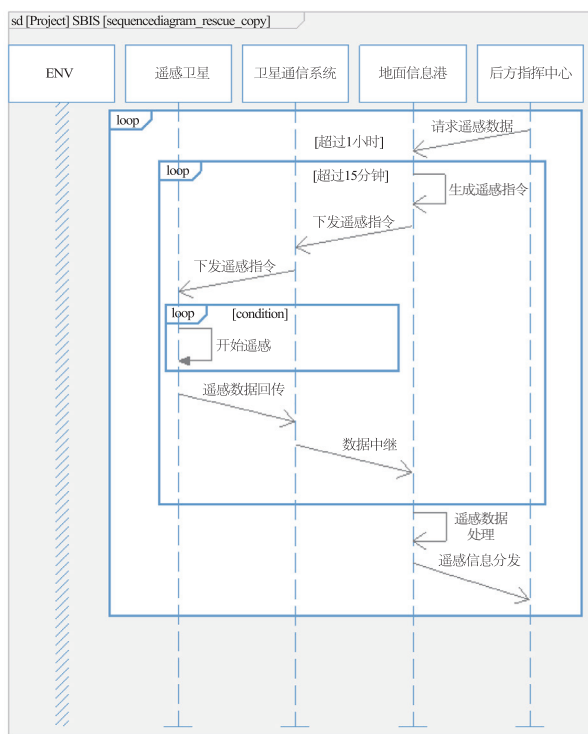


图5 遥感数据回传时序图

输入传给行为，消息的时间顺序和它在序列图上的垂直位置相关。在卫星通信系统数字化设计过程中，采用时序图可以描述卫星通信系统、遥感卫星、地面信息港、前方指挥中心、后方指挥中心等多个对象完成应急通信保障任务中的信息、事件等交互过程。根据分析，卫星

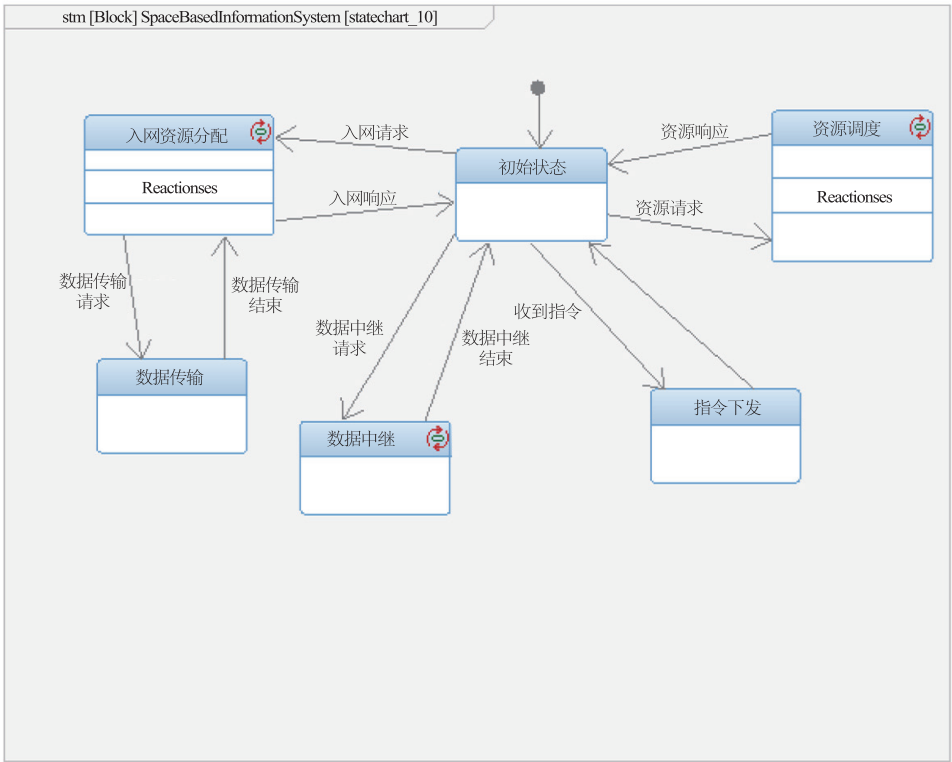


图6 卫星通信系统状态机图

通信系统遥感数据回传时序图如图5所示。

状态机图通过状态以及状态之间的转移对离散行为建模，它把行为表示为对象的状态历史。在状态的转移、进入和退出过程中会调用活动，并指定相关的事件和守卫条件。在卫星通信系统数字化设计过程中，采用状态机图可以描述卫星通信系统、遥感卫星、地面信息港、前方指挥中心、后方指挥中心等对象在每个阶段的状态变迁。

根据前文分析，卫星通信系统状态机图如图6所示。

遥感卫星状态机图如图7所示。

地面信息港状态机图如图8所示。

后方指挥中心状态机图如图9所示。

3.4 设计综合

设计综合负责将选定方案的功能架构变为物理架构，并完成配置项、系统元素以及内部物理接口、外部物理接口的定义。综合前文分析，为支撑卫星通信系统完成应急通信保障任务，卫星通信系统各相关方关联关系如图10所示。

本文通过查阅相关资料选取一种可行的卫星通信系统部署方案作为下一步设计验证的初始方案。其卫星星座参数见表3。

卫星通信系统是由大量的低轨卫星通过星间链路形成的互联互通的信息系统，为地面用户提供网络接入、数据传

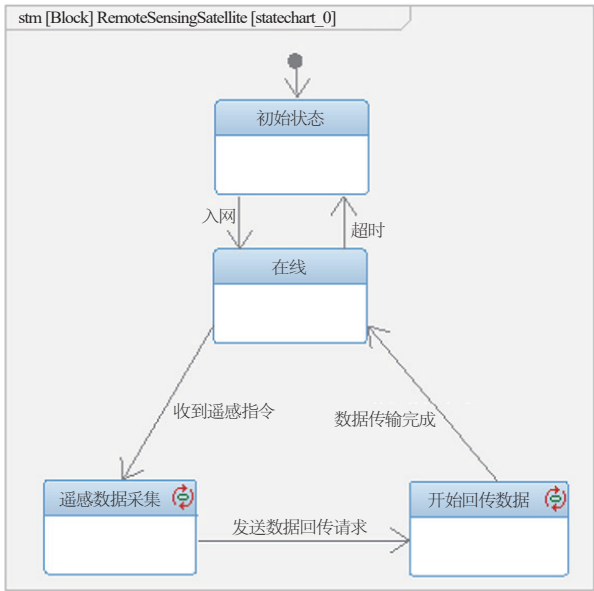


图7 遥感卫星状态机图

表3 本文选用的卫星通信系统星座参数

参数	值
卫星数/颗	120
轨道数/个	12
每条轨道上卫星数/颗	10
轨道倾角	84°
轨道高度/km	1 025
轨道周期	约1.76 h

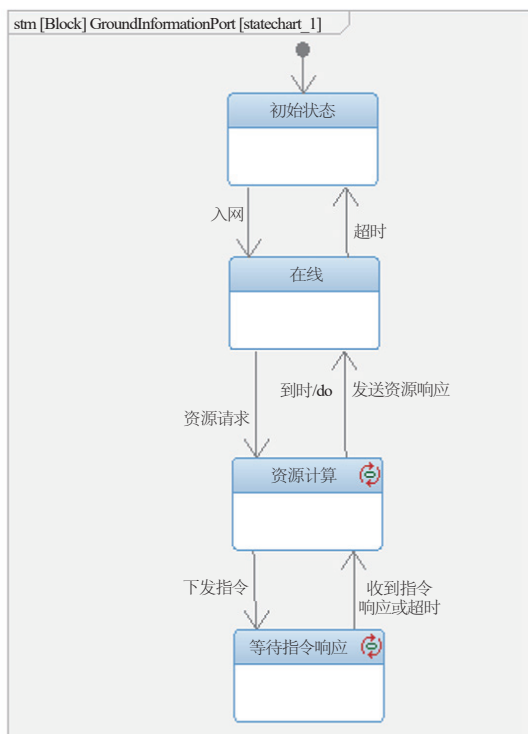


图8 地面信息港状态机图

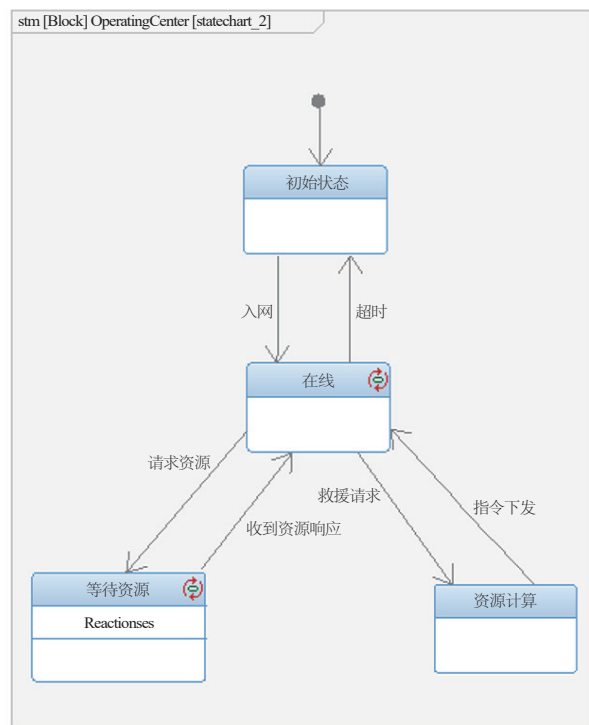


图9 后方指挥中心状态机图

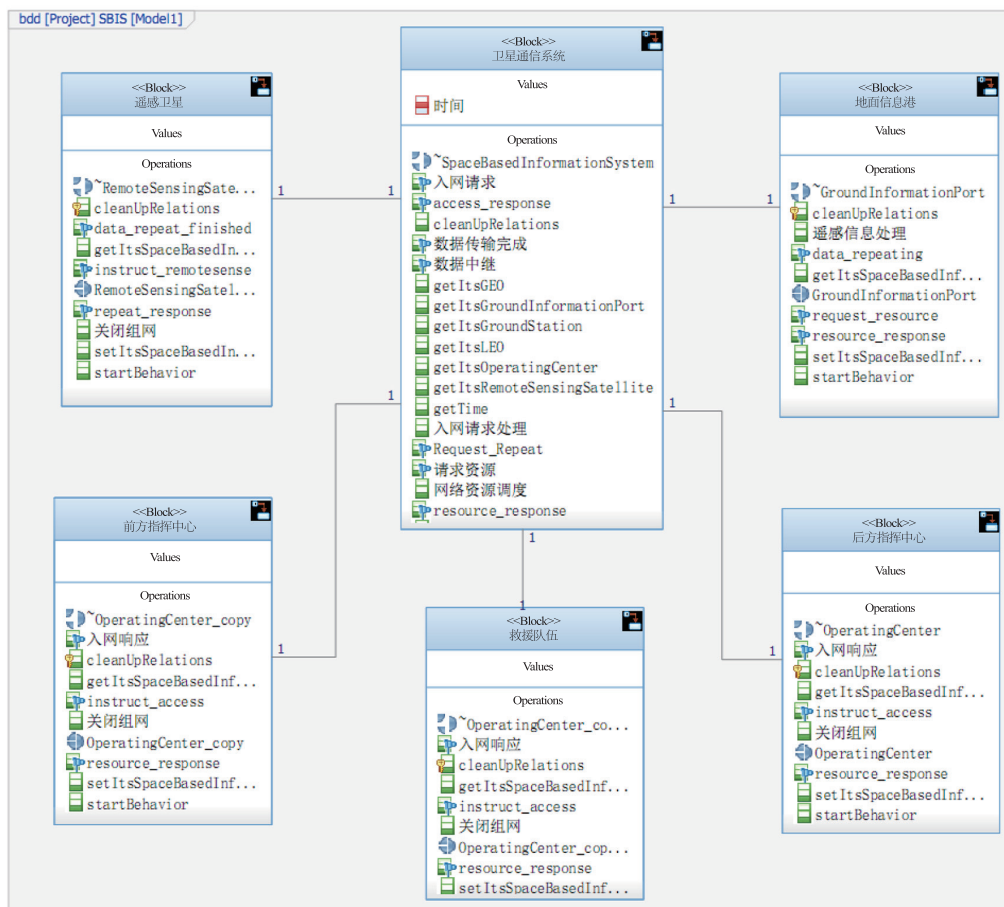


图10 卫星通信系统各相关方关联关系

输等服务。理论上,卫星通信系统的星座部署方案存在多种可能。采用数字化设计方法,利用数字化设计效率高、成本低等优势,通过不断对初始方案进行设计、验证、迭代与优化,最终可以得到满足各项要求的设计方案。

3.5 设计验证

卫星通信组网阶段主要包括终端发送组网请求、卫星节点响应组网请求、星间链路建立、星间数据传输、星地链路建立以及星地数据传输等流程。利用数字化设计工具的自动生成代码功能,将模型中各节点状态的变迁信息打印输出,可以更加精确地排查系统在设计过程中存在的错误,进而对系统模型的功能完备性进行验证。

遥感数据回传过程中各节点的状态信息输出如图11所示。

受灾区域与地面指挥控制中心建立卫星通信链路过程中各节点的状态信息输出如图12所示。

可以看出,遥感数据回传以及卫星通信链路建立过程与设计一致。为了验证设计的稳健性,本研究在事

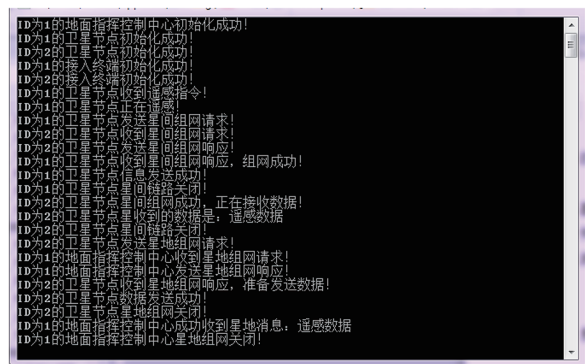


图11 遥感数据回传过程中各节点的状态信息输出

件面板中设计了“发送入网请求”“收到入网响应”等事件生成按钮,如图13所示。在不同场景下通过事件面板随机生成并注入事件,如通过随机重复甚至多次注入“发送入网请求”事件来模拟星地链路受到干扰的场景,通过多次注入“发送资源请求”来模拟通信链路异常中断的场景等,试验结果均能保持一致。这表明采用基于SysML的卫星通信系统数字化设计方法对卫星通信系统的设计方案具有一定的验证能力。

4 总结与展望

通过系统建模语言在卫星通信系统中的实践,本文设计了一套卫星通信系统模型,并对其功能逻辑的完备性进行了初步验证,有效降低了卫星通信系统前期的试验成本及风险,支撑了卫星通信系统中相关关键技术验证工作的

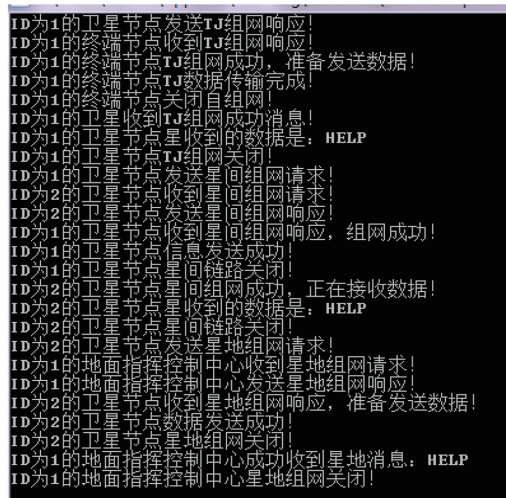


图12 受灾区域与地面指挥控制中心建立卫星通信链路过程中各节点的状态信息输出

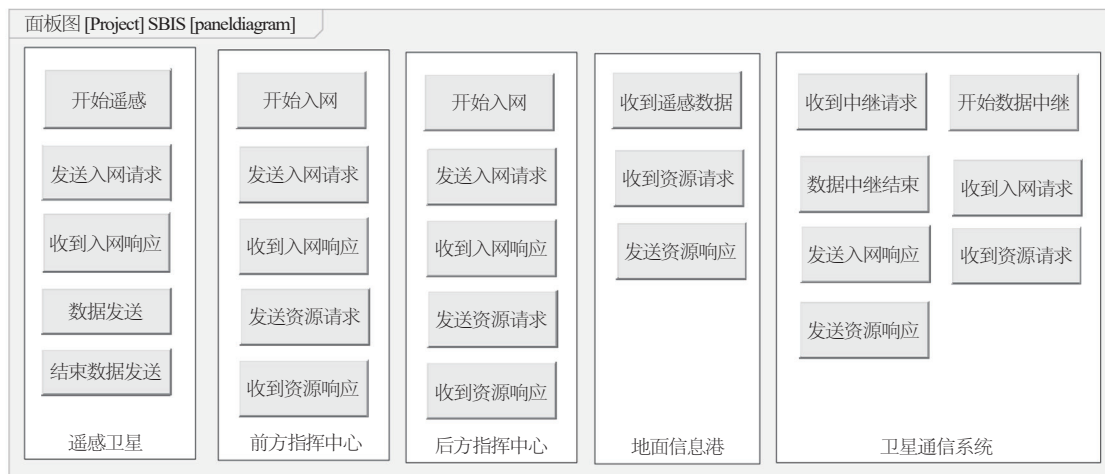


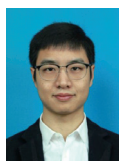
图13 事件面板

开展。下一步将继续细化卫星通信系统模型，对卫星通信系统设计方案性能进行更为精确的性能验证。

参考文献：

- [1] 吴巍. 天地一体化信息网络发展综述[J]. 天地一体化信息网络, 2020,1(1): 1-16.
WU W. Survey on the development of space-integrated-ground information network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 1-16.
- [2] 翟立君, 潘沐铭, 汪春霆. 卫星5G技术的发展和展望[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(1): 1-9.
ZHAI L J, PAN S M, WANG C T. Development and prospect of satellite 5G technology[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(1): 1-9.
- [3] 李振, 赵玉民, 薛广月, 等. 海洋交通运输行业卫星通信应用需求分析[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(1): 75-80.
LI Z, ZHAO Y M, XUE G Y, et al. The requirements analysis of satellite application in marine transportation industry[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(1): 75-80.
- [4] 刘永健, 李斌成, 王妍哲. 天基物联网发展与应用关键问题初探[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(1): 81-86.
LIU Y J, LI B C, WANG Y Z. Key issues in development and application of the sky-based Internet of Things[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(1): 81-86.
- [5] 胡桥, 郑作亚, 柳罡, 等. 基于地面信息港的灾害遥感应用服务初探[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2): 121-127.
HU Q, ZHENG Z Y, LIU G, et al. Discussion on disaster remote sensing application service based on ground information port[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(2): 121-127.
- [6] 杨文翰, 花国良, 冯岩, 等. 星链计划卫星网络资料申报情况分析[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(1): 60-68.
YANG W H, HUA G L, FENG Y, et al. Analysis of the starlink satellite network filing application[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(1): 60-68.
- [7] 李文屏, 白鹤峰, 赵毅, 等. 基于MBSE的卫星通信系统建模与仿真[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(1): 69-74, 80.
LI W P, BAI H F, ZHAO Y, et al. Modeling and simulation of satellite communication system base on MBSE[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(1): 69-74, 80.
- [8] 徐晖, 缪德山, 康绍莉, 等. 面向天地融合的卫星网络架构和传输关键技术[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2): 2-10.
XU H, MIAO D S, KANG S L, et al. Network architecture and key technologies for the integrated satellite and terrestrial mobile communication system[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(2): 2-10.
- [9] 刘立祥, 刘帅军. 大型低轨星座网络规划方法与仿真分析[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2): 87-93.
LIU L X, LIU S J. Network planning method and simulation analysis for large-scale low earth orbit satellite constellation networks[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(2): 87-93.
- [10] 王文浩, 毕文豪, 张安, 等. 基于MBSE的民机系统功能建模方法[J]. 系统工程与电子技术, 2021.
WANG W H, BI W H, ZHANG A, et al. Function modeling method of civil aircraft aystem based on MBSE[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021.
- [11] 鲍阳, 杨志斌, 杨永强, 等. 基于限定中文自然语言需求的SysML模型自动生成方法[J]. 计算机研究与发展, 2021, 58(4): 706-730.
BAO Y, YANG Z B, YANG Y Q, et al. An automated approach to generate SysML models from restricted natural language requirements in Chinese[J]. Journal of Computer Research and Development, 2021, 58(4): 706-730.
- [12] 胡轶之, 王鸿燕, 欧阳斯达, 等. 基于资源三号以及多源数据统筹的应急遥感服务保障[J]. 卫星应用, 2020(10): 26-31.
HU Y Z, WANG H Y, OUYANG S D, et al. Emergency remote sensing service guarantee based on Ziyuan No. 3 and multi-source data coordination[J]. Satellite Application, 2020(10): 26-31.

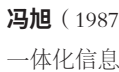
[作者简介]



廖灿（1989—），男，博士，主要研究方向为复杂系统仿真、基于模型的系统工程。



赵天（1993—），硕士，主要研究方向为系统仿真、网络仿真、人工智能。



冯旭（1987—），男，博士，高级工程师，主要研究方向为天地一体化信息网络架构、天地融合协议体系、新型传输协议等。



肖双爱（1987—），女，研究员，主要研究方向为电子信息系统总体设计、系统仿真、网络技术研究等。