

基于MBSE的卫星通信系统建模与仿真

李文屏¹, 白鹤峰¹, 赵毅², 武磊磊¹, 王晓婷¹

(1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;

2. 中国空间技术研究院西安分院, 陕西 西安 710000)

摘要: 针对复杂卫星通信系统建设与应用中面临的设计、描述、验证、确认等问题, 提出基于MBSE开展卫星通信系统立项论证、顶层设计和工程建设的设计方法。参考美国国防部体系结构框架(DoDAF), 使用系统架构设计工具(SA)构建卫星通信系统的功能模型、节点模型和流程模型等系统视图(SV), 开展基于模型驱动的数字仿真, 通过分析仿真数据验证系统设计的正确性、合理性和可行性。结果表明采用该方法在系统设计阶段能够有效识别风险, 验证和确认设计方案, 为卫星通信系统立项论证、顶层设计和工程建设提供有力支撑。

关键词: MBSE; DoDAF; 卫星通信; 系统视图; 建模与仿真

中图分类号: TN927

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2021009

Modeling and Simulation of Satellite Communication System Base on MBSE

LI Wenping¹, BAI Hefeng¹, ZHAO Yi², WU Leilei¹, WANG Xiaoting¹

1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China

2. China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710000, China

Abstract: A method based on model-based systems engineering (MBSE) for the demonstration, top-level design and engineering construction of the satellite communication system was introduced, which was aim at the problem of design, description, verification and validation in the construction and application of complex satellite communication system. According to the system design standard base on department of defense architecture framework (DoDAF), the system views (SV) such as function model, node model and process model were built by using the system architecture (SA) design software. Through the digital simulation based on model driven and the analysis of simulation data, the correctness, rationality and feasibility of the system design were verified. The results showed that this method can effectively identify risks in the system design stage, verify and confirm the design scheme, and provide strong support for project demonstration, top-level design and engineering construction of satellite communication system.

Keywords: MBSE, DoDAF, satellite communication, system view, modeling and simulation

1 引言

随着卫星规模化部署、星间链路、在轨处理交换等技术逐渐成熟, 通信卫星将改变传统的单点透明转发器模式, 逐步向多星组网通信、星上路由交换、在轨管理控制等方向发展, 星座规模结构、星间组网方式、星地协同关系、信息交互流程将日趋复杂。如何构建天地一体化卫星通信系统成为大型复杂系统设计和工程建设面临的难题。

传统的基于文档的航天系统设计模式^[1]难以适应复

杂卫星通信系统的设计开发需求, 基于模型的系统工程(Model-Based Systems Engineering, MBSE)为复杂卫星系统设计开发提供了一种有效的解决方案^[2-4]。MBSE采用统一的体系结构框架对系统需求、设计、测试等所有信息元素进行标准化视图描述并相互关联, 便于各方人员在不同阶段进行理解 and 交流, 避免系统描述的不一致性; 通过图形化表达、数字化模型对系统需求、功能、流程和接口关系等进行早期设计、验证和确认, 避免实

物集成后再验证确认带来的技术状态更改风险和项目进度推迟风险,可有效地解决复杂卫星通信系统设计开发中存在的问题。

2 MBSE概述

2007年,国际系统工程学会(International Council on System Engineering, INCOSE)将MBSE定义为对建模的形式化应用,用来支持系统的需求、设计、分析、验证和确认活动。这些活动开始于概念设计阶段并持续到整个开发和以后的寿命周期阶段。经典的MBSE开发过程包括瀑布模型、螺旋模型、V模型等。MBSE基于统一的体系结构框架,运用结构化的建模方法,采用图形化的建模语言和商业化的建模软件,为系统设计、开发、验证和确认等提供一系列方法论集。

2.1 体系结构框架

参考文献[5]将体系结构框架定义为:对描述系统结构的产品进行定义的一系列规则的集合,其核心思想是从不同视角来组织和分析模型产品,为复杂系统的理解、比较和集成提供共同的架构基础。国防领域最先采用体系结构框架的是美军的C⁴ISR系统。美国国防部于1997年发布了第一版C⁴ISR体系结构框架^[6],2004年改名为国防部体系结构框架DoDAF1.0^[7],目前已发展到DoDAF2.0^[8]。

DoDAF2.0提供了8个视角52个视图产品,如图1所示^[9],用于从不同的角度或层次对复杂系统的结构和动态行为进行描述。

全视图(AV)描述了任务目标、运作概念和运行环境,并提供相关术语。

数据与信息视图(DIV)描述了业务信息需求和结构化的业务流程规则。

标准视图(StdV)提供了控制系统各部分组合、交互和依赖性的规则,包括技术标准、执行惯例、标准

选项、规则 and 标准。

能力视图(CV)描述了主要能力需求、能力发展安排和能力的部署等问题。

作战视图(OV)描述了组织、任务或执行的活动,以及在完成任务过程中需要交换的信息。

服务视图(SvcV)说明了系统、服务以及支持作战活动的功能性的组合关系。

系统视图(SV)描述了系统结构、互联互通性和系统功能方面的信息。

项目视图(PV)说明了项目计划及组织关系,每个项目负责交付的系统或功能。

2.2 建模方法分类

体系结构建模方法研究是以某个体系结构框架为主要依据,在系统开发方法论指导下,得到符合该框架的体系结构描述的过程。体系结构框架为设计体系结构产品提供了若干指导原则、基本步骤、标准实体及其关系,并推荐了产品的描述形式,但并没有明确地指定对体系结构进行具体设计与分析的方法、技术和详细的过程。体系结构建模方法主要包括结构化建模方法^[10]和面向对象的建模方法^[11]。

结构化建模方法主要源于系统工程实践,是面向过程或数据流的自顶向下、逐步求精的方法。该方法首先在初始图形中描述系统最一般、最抽象的特征,以确定系统的边界和功能概况,然后对初始图形中所包含的各部分进行逐步分解,形成对系统较为详细的描述,并得到较为细化的图形表示。这样经过多次分解,直到最终得到的图形细致到足以描述整个系统的功能为止。该方法直观形象、简单易读、方便交流,适用于作战视图开发,但可移植性不足、对变化敏感。

面向对象的建模方法源于软件工程领域,是一种自底向上归纳和自顶向下分解相结合的方法。该方法以“自上而下、宽度第一”和基于事件的交互作用两个基本

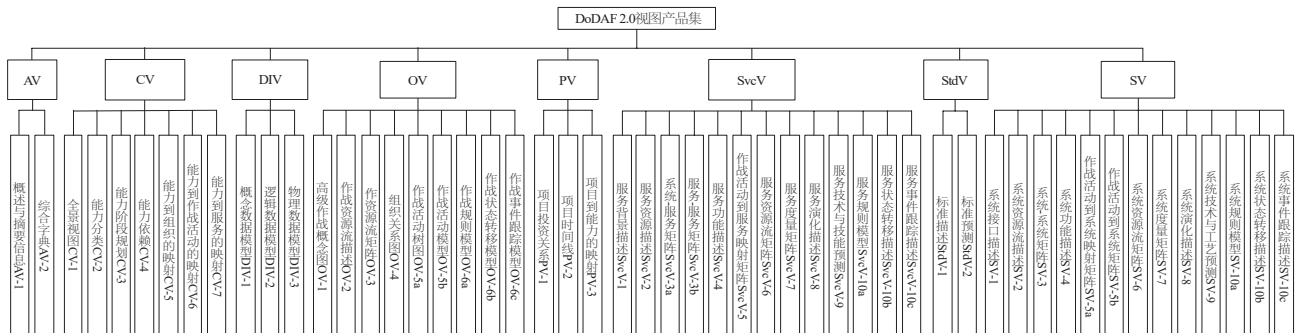


图1 DoDAF2.0视图产品集

原则,采用统一建模语言(Unified Modeling Language, UML)对体系结构产品进行开发,利用UML的结构图、行为图和交互图得到主要的体系结构产品。该方法建模规范、可重用性好,便于软件实现,适用于系统视图开发,但开发效率低、周期长。

2.3 建模仿真软件

MBSE的数字化表达和计算机实现离不开图形化的建模语言和商业化的建模软件,常用的建模语言包括基于结构化方法的IDEF(ICAM DEFinition Method)建模语言和基于面向对象方法的UML。

在体系结构工程领域中,DoDAF是应用广泛、行业领先的体系结构框架,采用DoDAF方法能够对复杂系统进行建模分析,通过仿真研究系统间逻辑关系。基于MBSE开发了支持DoDAF方法的多种建模软件,其中比较典型的有IBM公司收购和开发的SA(System Architect)软件,受到航天领域系统设计人员的重视与应用。SA为开发系统架构提供了集成开发环境,支持IDEF、UML、业务流程建模与标注(Business Process Modeling Notation, BPMN)等多种建模语言,是开发复杂大型系统的得力支撑工具。

SA支持最新的DoDAF2.0框架,支持作战视图和系统视图开发,能够对复杂系统进行建模,对业务流程进行仿真;为复杂系统分析、评估提供定量化的依据;通过研究系统间的逻辑关系,找出和改进现有系统的不足^[12]。

3 卫星通信概述

以美军卫星通信系统^[13]为例,卫星通信系统按照业务类型分为宽带通信系统、窄带通信系统、防护通信系统、中继系统四大系列,系统由空间段、地面段和用户段组成。经过多年发展,美国军事卫星通信系统已经成为技术水平高、在轨数量多、体系完善的天基信息系统,通常采用天星地网和天地组网等组网方式,实现覆盖全球的互联互通网络。美国军事卫星通信系统如图2所示。

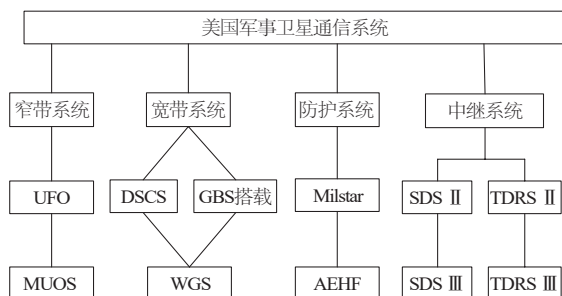


图2 美国军事卫星通信系统

宽带全球卫星(Wideband Global Satellite, WGS)系统是美国有史以来带宽最高、通信容量最大的宽带卫星通信系统。空间段由10~12颗同步轨道卫星构成。目前在轨10颗WGS卫星,分别为WGS-1到WGS-10,可覆盖全球。地面段包括4个区域卫星通信支持中心和5个宽带卫星通信运作中心,通过全球信息栅格(GIG)在地面实现互联互通。用户段包括车载终端、舰载终端、机载终端和便携终端等。节点涉及用户链路、馈电链路和地面链路,面向各类用户提供固定业务、全球广播业务、机载数据回传业务、动中通移动业务、小孔径终端业务等服务,构成规模庞大的复杂网络系统。WGS系统组成如图3所示。

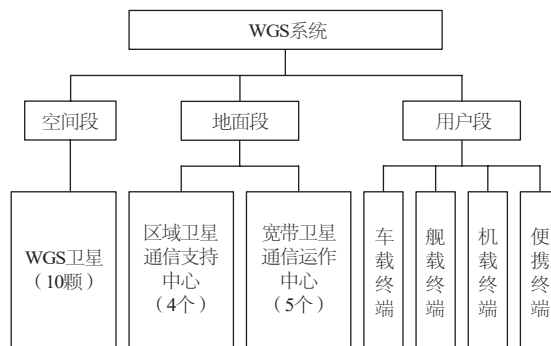


图3 WGS组成

4 系统建模

以WGS系统空间段、地面段、用户段为参考对象,考虑未来星上网控、在轨交换、多星组网等发展需求,采用基于模型的系统工程方法对复杂卫星通信系统建模与仿真。针对未来复杂卫星通信系统节点规模大、功能任务多、星地耦合强、接口关系复杂、业务流程多样等系统设计难题,采用SA建模工具软件开展系统功能建模、节点建模和流程建模,通过仿真生成系统—系统矩阵(SV-03)、系统资源流矩阵(SV-06)、系统接口关系报告等。

4.1 功能模型

从卫星通信系统使用要求和功能设计出发,构建系统功能模型,生成系统功能描述(SV-04)。系统功能模型包括任务筹划及评估、卫星管控、用户服务、网络运维、载波监视、有效载荷、用户通信等一级功能。根据设计的侧重点不同,进一步对一级功能进行详细设计和分解。根据星地之间的通信业务流程和系统接口设计需要,一级功能可进一步分解为二级功能和三级功能等。系统功能描述如图4所示,一级到二级的功能分解见表1。

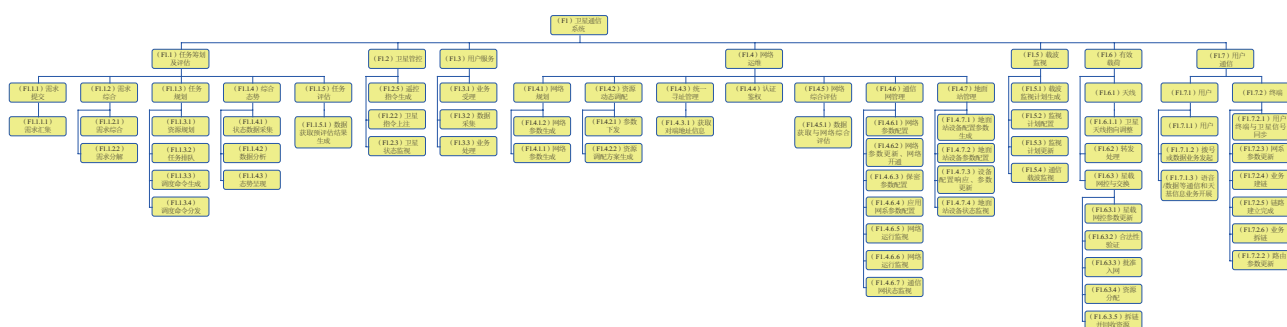


图4 卫星通信系统功能描述

表1 一级到二级的功能分解

一级功能	二级功能
任务筹划及评估	需求提交、需求综合、任务规划、综合态势、任务评估等
卫星管控	遥控指令生成、卫星指令上注、卫星状态监视等
用户服务	业务受理、数据采集、业务处理等
网络运维	网络规划、资源动态调配、统一寻址管理、认证鉴权、网络综合评估、通信网管理、地面站管理等
载波监视	载波监视计划生成、监视计划配置、监视计划更新、通信载波监视

4.2 节点模型

从卫星通信系统物理部署出发，构建系统节点模型，生成系统接口描述（SV-01）。系统节点模型包括空间段节点模型、地面段节点模型和用户段节点模型。空间段节点包括2颗宽带通信卫星模型。地面段节点包括1个区域卫星通信支持中心模型、1个宽带卫星运作中心模型和1个卫星地面站模型。用户段节点包括用户终端模型。系统节点部署关系如图5所示。其中，卫星模型由卫星平台和有效载荷组成，跟通信业务密切相关的有效载荷包括天线分系统、转发器分系统和星载网控与交换分

系统。根据设计需要，分系统可以进一步划分为处理单机、部件和组件等。

4.3 流程模型

从卫星通信系统通信业务流程出发，构建系统数据流程模型，采用活动图的方式，生成系统功能描述。系统数据流程模型包括建网流程模型、入网流程模型和用网流程模型。

建网流程模型主要根据用户需求，调配网络资源，配置网络参数，发生在系统初始化状态建立时或重大任务需调整网络状态时。流程包括需求筹划、任务规划、计划制定、指令注入和指令响应5个步骤，参与建网流程的系统节点模型包括宽带卫星运作中心、区域卫星通信支持中心、卫星地面站、宽带通信卫星等。系统建网流程如图6所示。

入网流程模型主要用于建立用户在网状态，发生在用户终端开机时。流程包括终端入网1个步骤，参与入网流程的系统节点模型包括用户终端、宽带通信卫星、区域卫星通信支持中心和卫星地面站等。系统入网流程如图7所示。

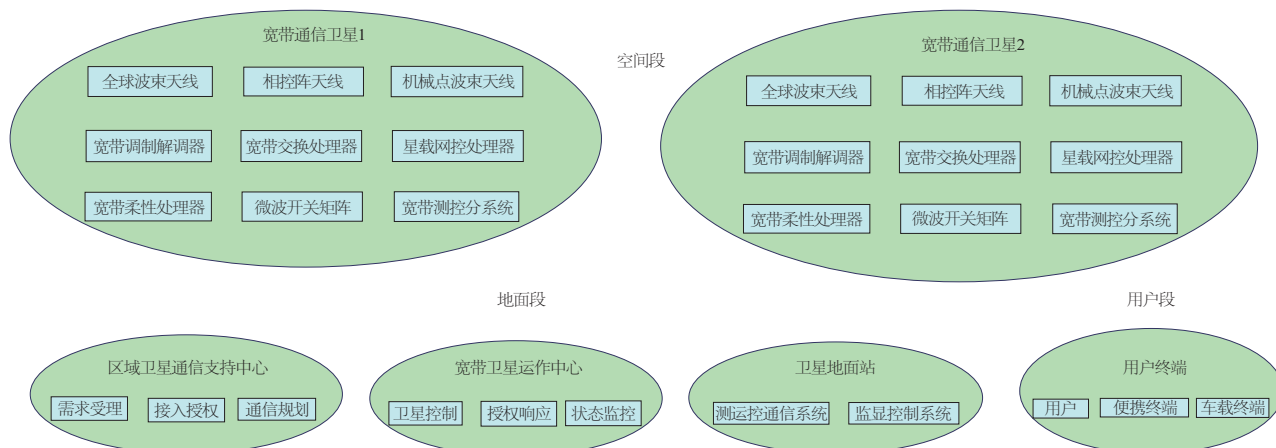


图5 系统节点部署关系

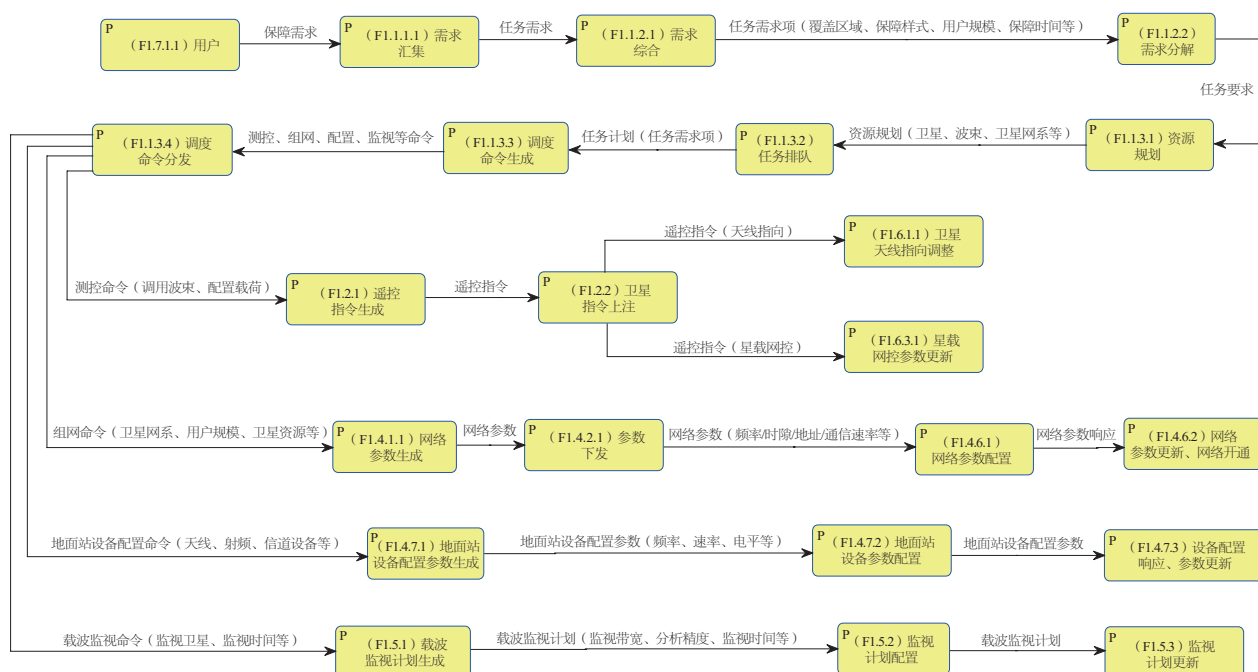


图6 系统建网流程

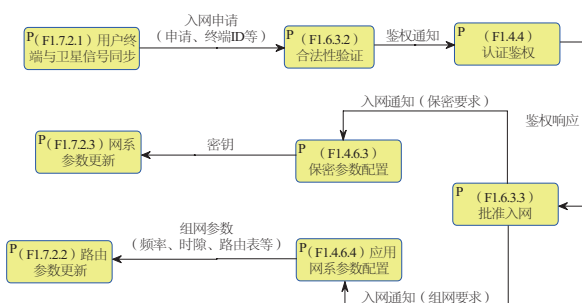


图7 系统入网流程

用网流程模型主要用于用户业务通信，发生在用户呼叫和挂断时。流程包括呼叫申请、星上转发、寻呼及资源分配和呼叫响应4个步骤，参与的系统节点包括主叫用户终端、宽带通信卫星、区域卫星通信支持中心、卫星地面站和被叫终端等。系统用网流程如图8所示。

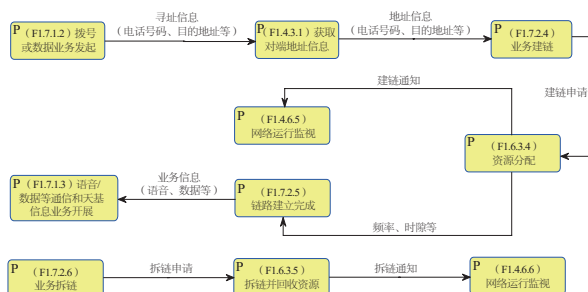


图8 系统用网流程

5 软件仿真

运用SA软件，对WGS卫星通信系统的功能模型、节点模型和建网、入网、用网流程进行数字化、可视化表达，定义系统之间的接口关系，验证系统功能、节点部署和运行流程的设计合理性，显示并辅助设计者纠正系统功能设计的冗余与不足、接口关系和业务流程的逻辑错误。

设置系统节点与系统功能关联矩阵，生成系统关系矩阵（如图9所示）和数据交换矩阵（如图10所示，提供入网、用网流程，便于显示）。根据源系统节点与目的系统节点之间的数据交换需求，生成系统之间的接口关系和数据交换关系，保证系统节点部署方式的可行性、业务流程的合理性和确保系统功能划分和分解的准确性。

进一步分析仿真结果，能够识别系统中的关键节点和功能，验证系统流程设计的正确性和合理性，优化系统业务流程、功能组成和系统部署方式，定义系统节点之间的接口关系。SA软件还可生成系统业务流程脚本，为场景可视化显示系统输入。

6 结束语

本文提出的基于MBSE的系统建模方法能够有效构建功能模型、节点模型和流程模型，开展系统功能、接口关系和工作流程等验证和确认。下一步要开展的工作是利用SA等MBSE系统架构设计工具与STK等轨道场景仿真工具联合开展卫星通信系统建模仿真。

系统功能 \ 系统节点	宽带通信卫星1	宽带通信卫星2	区域网信服务中心	卫星测控通信站	卫星通信管控中心	用户终端
(F1.6.3.2) 合法性验证	X					
(F1.6.3.3) 批准入网	X					
(F1.6.3.4) 资源分配	X					
(F1.6.3.5) 拆链并回收资源	X					
(F1.6.3.6) 回收资源						
(F1.6.3) 星载网控与交换						
(F1.6) 有效载荷						
(F1.7.1.1) 拨号或数据业务发起						X
(F1.7.1.2) 语音/数据等通信和天基信息业务开展						
(F1.7.1) 用户						
(F1.7.2.1) 用户终端卫星信号同步						X
(F1.7.2.2) 路由参数更新	X					
(F1.7.2.3) 网系参数更新	X					
(F1.7.2.4) 业务建链						X
(F1.7.2.5) 链路建立完成	X					
(F1.7.2.6) 业务拆链						X

图9 系统关系矩阵

数据交换需求	源系统功能	源系统节点	源系统实体	目的系统功能	目的系统节点	目的系统实体
入网申请	信号同步	用户终端	车载终端	合法性验证	宽带通信卫星1	全球波束天线
入网申请	信号同步	用户终端	车载终端	合法性验证	宽带通信卫星1	宽带调制解调器
入网申请	信号同步	用户终端	车载终端	合法性验证	宽带通信卫星1	宽带交换处理器
入网申请	信号同步	用户终端	车载终端	合法性验证	宽带通信卫星1	星载网控处理器
鉴权通知	合法性验证	宽带通信卫星1	星载网控处理器	认证鉴权	区域网信服务中心	综合管控系统
鉴权响应	认证鉴权	区域网信服务中心	综合管控系统	批准入网	宽带通信卫星1	星载网控处理器
入网通知	批准入网	宽带通信卫星1	星载网控处理器	保密参数配置	卫星通信管控中心	星载网控处理器
密钥	保密参数配置	卫星通信管控中心	综合管控系统	网系参数更新	宽带通信卫星1	宽带交换处理器
入网通知	批准入网	宽带通信卫星1	星载网控处理器	应用网系参数配置	宽带通信卫星1	星载网控处理器
组网参数	网系参数配置	宽带通信卫星1	星载网控处理器	路由参数更新	宽带通信卫星1	宽带交换处理器
寻址信息	拨号或数据业务发起	用户终端	车载终端	获取对端地址信息	宽带通信卫星1	星载网控处理器
地址信息	获取对端地址信息	宽带通信卫星1	星载网控处理器	业务建链	用户终端	车载终端
建链申请	业务建链	用户终端	车载终端	资源分配	宽带通信卫星1	星载网控处理器
建链通知	资源分配	宽带通信卫星1	星载网控处理器	网络运行监视	卫星通信管控中心	监显控制系统
时频资源	资源分配	宽带通信卫星1	星载网控处理器	链路建立完成	宽带通信卫星1	宽带交换处理器
时频资源	资源分配	宽带通信卫星1	星载网控处理器	链路建立完成	宽带通信卫星1	宽带调制解调器
业务信息	链路建立完成	宽带通信卫星1	宽带交换处理器	通信业务开展	用户终端	车载终端
业务信息	链路建立完成	宽带通信卫星1	宽带调制解调器	通信业务开展	用户终端	车载终端
拆链申请	业务拆链	用户终端	车载终端	拆链并回收资源	宽带通信卫星1	星载网控处理器
拆链通知	拆链并回收资源	宽带通信卫星1	星载网控处理器	网络运行监视	卫星通信管控中心	监显控制系统

图10 数据交换矩阵

参考文献：

- [1] 王昆生, 袁建华, 陈洪涛, 等. 国外基于模型的系统工程方法研究与实践[J]. 中国航天, 2012(11): 52-57.
WANG K S, YUAN J H, CHEN H T, et al. Research and practice of model-based system engineering methods abroad[J]. Aerospace China, 2012(11): 52-57.
- [2] JEFF A E. Survey of model-based system engineering (MBSE) methodologies[J]. INCOSE MBSE Initiative, 2008: 1-70.
- [3] WASEEM M, SADIQ M. Application of model-based systems engineering in small conceptual design-A SysML approach[J]. IEEE Aerospace& Electronic Systems Magazine, 2018, 33(4): 24-34.
- [4] LASORDA M, BORKY J M, SEGAR M. Model-based architecture and programmatic optimization for satellite system-of-systems architecture[J]. Systems Engineering, 2018, 21(4):372-387.
- [5] ZACHMAN J A. A framework for information systems architecture[J]. IBM Systems Journal, 1987, 26(3): 276-292.
- [6] C⁴ISR Architecture Working Group. C⁴ISR architecture framework

(下转80页)

- [9] 刘政训, 张海博. AIS在海事智能信息化监管中的应用及存在问题探讨[J]. 中国海事, 2019(8): 45-48.

LIU Z X, ZHANG H B. On the application of AIS in Maritime Intelligent IT Management and the Existing Problems[J]. China Maritime, 2019(8): 45-48.

- [10] 姚治萱. VDES通信技术应用及其发展趋势[J]. 世界海运, 2019(2): 34-38.

YAO Z X. The application and development trend of VDES communication technology[J]. World Shipping, 2019(2): 34-38.

[作者简介]



李振 (1983-), 中国交通通信信息中心工程师, 主要研究方向为卫星通信、水上无线电通信和信息化系统建设。

(上接74页)

version 2.0[R]. 1997.

- [7] DoD Architecture Framework Working Group. DoD architecture framework version 1.0[R]. 2004.

- [8] DoD Architecture Framework Working Group. DoD architecture framework version 2.0[R]. 2009.

- [9] 申泓基, 占国熊, 李明浩, 等. 基于DoDAF的系统工程建模方法研究[C]//中国系统工程学会第19届学术年会. 北京: [出版社不详], 2016:1-7.

SHEN H J, ZHAN G X, LI M H, et al. Data-centric and model-based systems engineering with department of defense architectural framework[C]// The 19th Annual Conference of Chinese Society of Systems Engineering. Beijing: [s.n.], 2016:1-7.

- [10] WAGENHALS L W, SHIN I, KIM D, et al. C⁴ISR Architectures: II. A structured analysis approach for architecture design[J]. Systems Engineering, 2000, 3(4):248-287.

- [11] BIENVENU M P, SHIN I, LEVIS A H. C⁴ISR Architectures: III. An object-oriented approach for architecture design[J]. Systems Engineering, 2000, 3(4):288-312.

- [12] DELLIGATTI L. SysML distilled: A brief guide to the systems modeling language[M]. New Jersey: Addison-Wesley Professional, 2013.

- [13] 陈亮. 美国军事卫星通信系统发展研究[J]. 通信技术, 2014(4): 354-358.

CHEN L. Development of the U. S. MILSATCOM [J]. Communications Technology, 2014(4): 354-358.



赵玉民 (1964-), 中国交通通信信息中心高级工程师, 科技部专家库专家、天地一体化卫星联盟理事、中国卫星技术应用大会专家委员会委员, 中国智能交通协会水上交通智能化分委会副主任委员, 主要从事卫星通信、信息化技术发展、系统建设、应用开发和管理等工作。



薛广月 (1982-), 中国交通通信信息中心高级工程师, 主要从事卫星应用、北斗导航、信息融合、交通运输大数据等研究工作。



艾云飞 (1987-), 中国交通通信信息中心工程师, 主要研究方向为交通安全、通信信息、交通运输规划与管理。

[作者简介]



李文屏 (1984-), 北京跟踪与通信技术研究所助理研究员, 主要从事卫星通信系统总体设计工作。



白鹤峰 (1971-), 北京跟踪与通信技术研究所研究员, 主要从事卫星系统总体设计工作。



赵毅 (1982-), 中国空间技术研究院西安分院工程师, 主要从事卫星通信系统设计与仿真工作。



武磊磊 (1983-), 北京跟踪与通信技术研究所助理研究员, 主要从事宽带卫星通信系统设计工作。



王晓婷 (1981-), 北京跟踪与通信技术研究所助理研究员, 主要从事卫星通信及天基网络信息体系设计工作。