DOI:10.3724/zrht.1674-5825.2025044

基于MBSE的载人航天测控通信单机产品的建模研究

霍卫杰，段欣欣，马淑君，汪思冒，陈 雨
(上海航天电子技术研究所,上海 201109)

摘 要：针对载人探月工程任务中测控通信业务类型多样、物理接口复杂的特点,提出了面向测控通信类单机产品正向设计的MBSE建模架构,开展载人月球探测领域S频段通信机产品的建模实践。结合S频段通信机的研制流程,逐步构建其逻辑层、物理层和设备层3层模型,通过模型解析和模型扩展的方式,保证单机由方案设计到详细设计的数据同源性;3层模型架构中,通过模型封装兼顾了不同应用场景下的系统级仿真验证。首先,通过载人航天工程任务测控通信场景的建模以及基于绑定引用的权衡计算,S频段通信机逻辑层模型获取单机的功能、性能和接口需求;其次,在S频段通信机逻辑层的建模中,以状态机模型为核心仿真实现单机的功能需求,并将行为及参数进一步向模块分解。在物理层建模中,主要由Matlab、Modelica等语言实现,通过高级建模语言实现单机整机级性能参数的建模与仿真,得到器件级指标;在设备层建模中,则由MBD的方法实现;最后,通过单机逻辑层、物理层模型的映射和转换,实现了对单机详细设计的约束,并基于模型形成描述单机信息接口节点特性的接口数据单。

关键词：基于模型的系统工程；载人探月测控通信；SysML建模；状态机模型；接口数据单
中图分类号:V57; V443 **文献标识码**:A **文章编号**:1674-5825(2026)01-0013-14

Modeling of Manned Space TT&C Communication Product Based on MBSE

HUO Weijie, DUAN Xinxin, MA Shujun, WANG Simao, CHEN Yu
(Shanghai Institute of Aerospace Electronics, Shanghai 201109, China)

Abstract: Considering the various types of tracking, telemetry, and control (TT&C) communication services and the complex physical interfaces in manned space missions, this study developed an MBSE-based modeling architecture for TT&C product design and applied the model to an S-band communicator for a manned lunar landing project. Based on the development process of the S-band communicator, a three-layer model comprised of logic, physical, and device layers was constructed. Model parsing and expansion ensured data homology from the conceptual to detailed design stages. Within the three-layer model architecture, model encapsulation accommodates system-level verification for different application scenarios. First, the function, performance, and interface requirements of the S-band communicator were obtained by applying the logic layer model to analyze the manned lunar landing mission TT&C communication scenario and performing tradeoff calculations based on binding reference. Second, in the logic layer model, the functional requirements of the S-band communication were satisfied by the state machine model simulation, and the behavior and parameters were further decomposed in the module. In the physical layer model, Modelica and Matlab were used to model and simulate the physical performance parameters of the TT&C product. The device layer

收稿日期:2024-12-24; 修回日期:2025-10-20
第一作者:霍卫杰, 男, 博士, 工程师, 研究方向为宇航电子产品MBSE应用。E-mail:hwj8983154@sjtu.edu.cn
引用格式:霍卫杰,段欣欣,马淑君,等. 基于MBSE的载人航天测控通信单机产品的建模研究[J]. 载人航天,2026,32(1):13-26. Huo W J,Duan X X,Ma S J,et al. Modeling of manned space TT&C communication product based on MBSE[J]. Manned Spaceflight,2026,32(1):13-26.

model was executed using the MBD method. By mapping and transforming the logical layer model, an interface control document sheet for the S-band communicator was developed, which describes the characteristics of the electrical interface pins.

Key words: Model-based systems engineering; manned lunar landing; TT&C communication; state machine; interface data sheet.

1 引言

针对载人航天任务规模庞大、系统复杂、可靠性要求高等特点，基于模型的系统工程(Model-Based Systems Engineering，MBSE)在国内载人航天工程中的任务分析[1]、系统设计[2]、系统仿真[3]、系统研制[4]、故障分析[5]等方面已取得了一定的应用。

载人航天器升空后，测控通信系统完成航天器的测轨、遥控、遥测、话音通信等重要功能，在载人航天中有着极其重要的作用[6]。载人航天器测控通信产品涉及到人、服、着陆器、地面站等多个业务对象，业务类型和传输速率多样，接口复杂。与此同时，载人航天工程快速发展带来大量型号研制任务，单机产品的研制周期被大大压缩，软硬件设计均较为复杂的测控通信类产品面临巨大挑战。一方面，硬件设计若仍按照方案设计—详细设计—器件申购—产品研制的流程，极易由于关键器件采购周期长而造成交付延期；另一方面，大量软件的快速迭代，易带来继承性设计中局部修改影响域分析不足、对外接口考虑不周、初始化配置不匹配等诸多问题。此类问题的本质在于未能构建产品的权威真相源模型，软硬件协同设计能力差，进而无法有效地控制、跟踪更改设计并进行全面溯源。因此，为提高研制效率，提高产品质量，需改善当前的研制模式，验证和确认前置。

国外MBSE的建模研究覆盖了从系统级到产品级再到电气接口的多个层级。Kaslow等[7]创建了RAX立方星基于SysML语言可执行模型，综合SKT-Matlab-Model Center仿真工具，通过通信链路仿真，计算不同轨道下的数传速率。Spangelo等[8]进一步分析了立方星测控分系统的功能性能，基于ParaMagic综合分析了不同场景下数据速率和SNR对链路特性的影响。Grob等[9]以测控天线为研究对象，通过链路公式和天线增益计算，研究卫星测控分系统与天线之间的需求传递及参数依赖关系，从而提出测控分系统基于模型正向设计流程。Shames等[10]运用SysML语言对接口进行建模，参考网络系统提出通信接口的多层模型，描述了接口逻辑层至物理层的属性，还可模拟接口间交互行为。Mckelvin等[11]基于SysML定制开发特定领域模型语言，对飞行器的电子信息接口进行建模，并提出子系统接口层、装配接口层、物理引脚接口层的接口设计架构。

国内目前对通信领域的MBSE建模研究更多集中于任务层和系统层。在顶层方法论方面，面对信息域和物理域跨域协同设计的难题，陈竹梅等[12]从体系作战效能出发，提出了基于MBSE的跨域协同设计RFLP方法论，以解决电子信息系统跨域协同设计的问题。在卫星通信领域，Yao等[13]基于SysML语言对卫星发射任务中测控通信系统的静态和动态活动进行建模，探索将SysML模型映射到Petri网通过仿真实验的验证开展可靠性分析。刘红杰等[14]提出了小卫星测控分系统模型架构和建模仿真的主要工作流程，通过自顶向下的指标分解和测控产品模型库的匹配选择，形成测控单机的技术指标要求。

在航空通信领域，贾馥源[15]采用Arcada的建模理论，构建了机载通信系统的OA、SA、LA、PA各层模型，结合Simulink通信组件的仿真实现了全任务的验证和确认。在车地通信领域，刘中田等[16]运用SysML活动图对高铁动车的无线广播通信场景进行建模，通过SysML语言向概率模型检验语言PRISM的转换，形成考虑无线通信信道的概率验证模型。在复杂电子装备领域，张然等[17]开展了以场景为导向的雷达系统设计，提出了雷达系统与分系统设计的3层仿真验证方法，将部分调试阶段的验证环节提前到系统设计初期。

综上所述，现有国内基于MBSE的通信领域研究更侧重于系统级的建模仿真与验证，而基于模型开展测控通信单机正向设计的研究尚未开展。以应答机或通信机为代表的宇航测控通信类单机，其本身就是小型的复杂系统[18]。目前，在小型化、集成化、通用化、高性能的研制要求和软件无线电技术发展的推动下，以模型驱动的开发模式成为重要趋势。为此本文提出通信单机产品的3层模型架构，支撑单

机基于MBSE的正向设计,并以S通信机为例,详细阐述了单机产品3层模型的详细建模过程。

2　通信类单机的3层模型架构

本文提出的通信单机3层模型架构如图1所示,其中包含逻辑层、物理层及设备层。

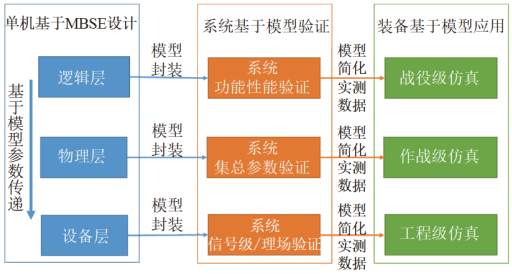


图 1　通信单机3层模型架构
Fig. 1　Three-layer model of the product

1)逻辑层模型侧重对产品的功能逻辑进行建模,描述单机性能指标的模型参数,设置为其理想状态值。在通信机逻辑层模型的构建中,以分系统的SysML模型为输入,捕获通信机的功能、性能、接口要求,并结合同类型产品的功能原理进行建模。通信机逻辑层模型以状态机为核心,实现单机功能的设计并向单机内部模块进行分配。通过活动图仿真,通信机逻辑层模型还可实现单机指令解析、理想遥测状态返回、数据帧格式解析等功能,从而可供分系统层的数据对接和功能性能验证。

2)物理层模型侧重对产品进行数学物理建模。在通信机物理层模型的构建中,以通信机逻辑层的功能、性能需求作为输入,将通信机及其关键模块简化为时不变的线性定常系统,构建单机模块基于传递函数、差分方程等形式的数学模型、算法模型。基于模型开展时频域的计算与验证,分析系统稳态输出和动态响应性能,基于此可实现单机内部模块关键参数的设计与确认。物理层模型可输出对设备层模型关键器件的功能、性能要求。物理层模型可支撑系统级的集总参数分析仿真。

3)在通信机设备层模型的构建中,以逻辑层、物理层模型捕获的通信机各模块的功能、性能、接口需求作为输入,通过异构模型解析和参数传递的方式,结合MBD相关技术实现单机设备的结构、热控、硬件电路、软件代码等方面的具体工程设计。因此,单机的设备层模型包含单机的几何模型、接口模型、电路模型、软件算法模型、物理场模型等单机详细设计的要素。可通过基于元模型的技术[19]和SysML语言的扩展机制[20]实现上层模型向设备层模型进行设计参数和约束的传递。

MBSE的框架下,确保单机3层模型之间的数据同源及模型关联至关重要。本文研究中,逻辑层、物理层模型之间通过SysML模型的底层数据解析方式进行关联;逻辑层、设备层模型之间通过SysML语言的元模型扩展机制进行关联;基于模型实现数据传递,保证模型之间的数据同源。具体而言,由于SysML模型中的各类元素及其关系均以XML节点形式表示,基于SysML语言的逻辑层模型捕获单机的架构及关键参数指标后,通过解析建模工具导出的.xml或.mo文件,获取物理层模型所需的参数信息,实现数据的传递。基于构造型(Stereotype)的领域专用语言扩展机制可以实现SysML语言的轻量级扩展,对标详细设计领域的模型要素,对进一步开展详细设计的模型元素(如对外接口类型)进行继承、细化和语义扩展,使得SysML模型在拥有逻辑层模型架构和模型关联关系的基础上,局部剖面得到进一步精细化与拓展。最终通过模型转换的方式,向下游设备层模型输出包含上一层所需特征的领域专业模型。

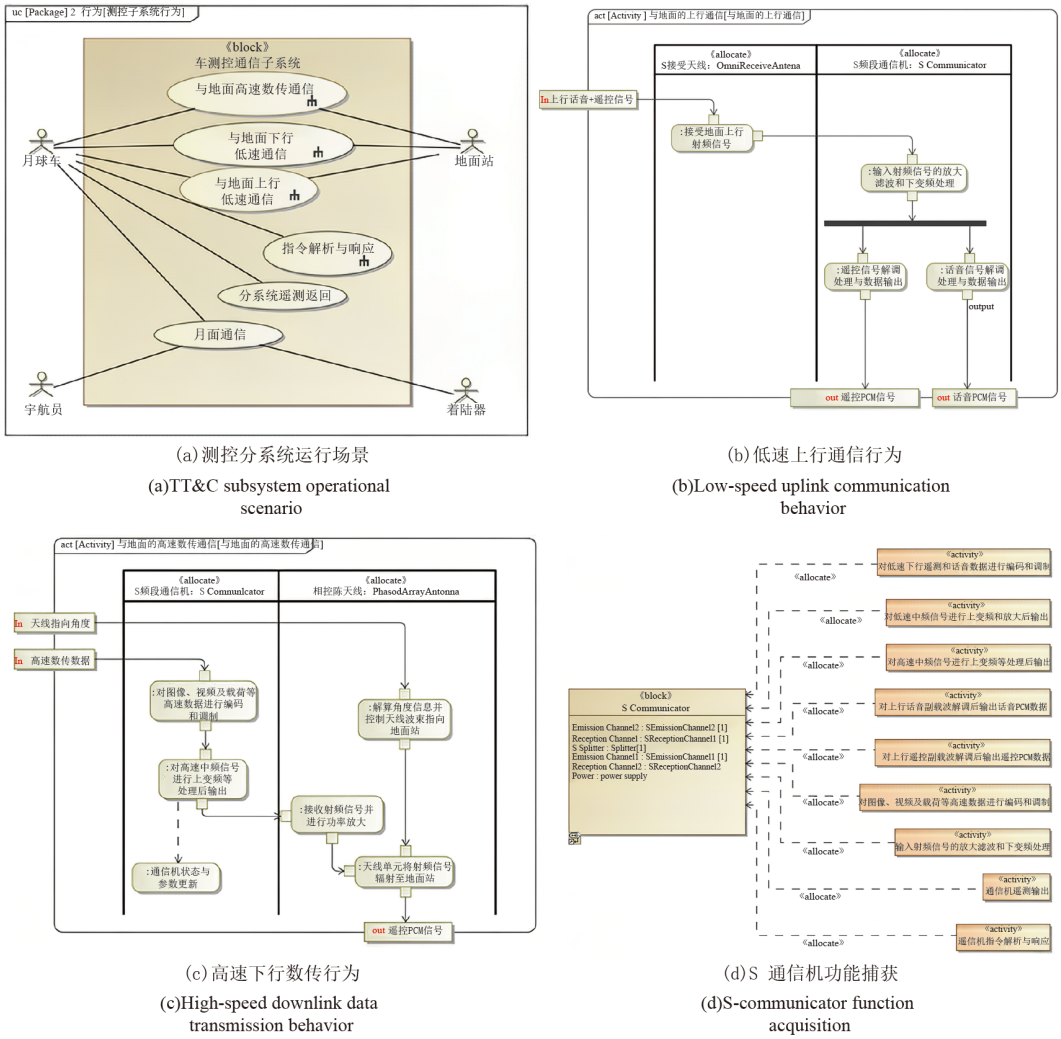
如图1所示,单机建模过程中,同时充分考虑分系统/系统层的验证和装备整体数字模型的构建。具体而言,单机各层模型可通过模型封装用于系统级各阶段的闭环验证,并进一步通过模型简化、结合实测数据支撑数字装备在任务级、系统级、工程级等不同场景下的仿真运行[21]。本文以载人航天工程的S通信机为例,提供单机建模的详细案例。

3　基于模型的S通信机需求捕获

3.1　基于场景分析的S通信机功能捕获

参照文献[22-24],对月面活动场景下月球车测控分系统的S通信机开展建模分析。月球车测控分系统主要承担月球车与地面站、月球车与着陆器、以及月球车与航天员之间的测控、话音、视频和科学数据通信等任务。

为捕获S通信机功能需求,首先开展测控分系统的用例分析。如图2(a)所示,从地面站、月球车、航天员、着陆器等测控分系统的“用户交互”视角分析测控分系统需提供的功能与服务,形成分系统的在



(a) 测控分系统运行场景

(a)TT&C subsystem operational scenario

(b) 低速上行通信行为

(b)Low-speed uplink communication behavior

(c) 高速下行数传行为

(c)High-speed downlink data transmission behavior

(d) S 通信机功能捕获

(d)S-communicator function acquisition

图 2 基于场景的S通信机功能捕获

Fig. 2 Functions of the S-communicator

各种任务下的使用场景。然后，运用活动图对用例场景进一步细化，获得该运行场景下对S通信机的功能需求。如图2(b)所示，“地面上行低速通信”活动中，通过逻辑层行为的分析及功能分解，向S通信机分配了“输入射频信号的下变频处理”、“遥控信号解调与数据输出”以及“话音信号解调与数据输出”等功能。如图2(c)所示，“高速下行数传行为”活动中，向S通信机分配了对视频图像等“高速数据的编码和调制”等功能。最后，对S通信机所有涉及的测控分系统任务用例中分配的功能进行汇总及聚类，形成了S通信机功能的最大包络，通过“allocate”关系捕获的通信机的功能需求如图2(d)所示。于是基于自然语言描述的测控分系统的功能分配演变为对S通信机产品的功能需求。

参考相关同类产品的设计，结合Magic Grid方法论，通过分系统的功能分析，可进一步实现分系统的架构设计，捕获单机间的功能逻辑接口。

3.2 基于绑定引用的通信链路分析与参数权衡

月球车测控分系统对地面的通信链路计算中涉及多个地面站、多体制的通信信号以及测控分系统内多个参数耦合的影响。目前工程中的通信链路分析多采用STK仿真结合Excel进行计算校核，未建立链路参数与测控产品属性之间内在关联。

测控链路的权衡分析中，需要综合考量不同地面站的天线参数、卫星轨道参数、测控信号的射频属性、测控分系统内部单机的增益及损耗等属性。基于模型的链路计算中，建立地面站、测控信号、测控单机等相关方的模型，将参数与模型绑定，随模型配置变化，相关参数自动更新。为实现多测控体制通信场景下，多指标影响的链路分析与参数权衡，进一

步采用绑定引用和实例配置的建模方案。SysML语言中,“绑定引用”(Bound reference)模型提供了对“系统变体”内部“产品变体”元素的快捷访问机制[25]。

首先,建立地面站、射频信号、S通信机的模板模型,从而形成相关模型的多个实例。如基于“上行话音信号”模型,可构建“码速率1话音信号”和“码速率2话音信号”等码速率各不相同的话音信号实例模型。如图3所示,基于“地面站”模型可进一步构建天线参数各不相同的“地面站1”、“地面站2”等实例模型;其次,根据链路计算的相关方程,建立测控链路计算的参数图模板,如图4所示;然后,建立测控链路计算上下文,对于参数可变的变体模型,如地面站、射频信号、S通信机等采用绑定引用模型,如图5所示;最后,通过构建不同变体对应的计算实例,如“地面站2下行低速(速率1)通信链路分析”等,计算不同场景下的链路余量。

如表1所示,采用某测控分系统方案的条件下,18 m地面站的下行低速和高速通信的链路余量均不满足大于3 dB的要求。通过采用收发天线分开、提高天线的增益、降低S通信机的噪声系数的改进方案,降低了链路的馈线损耗,满足了链路余量大于3 dB的要求。

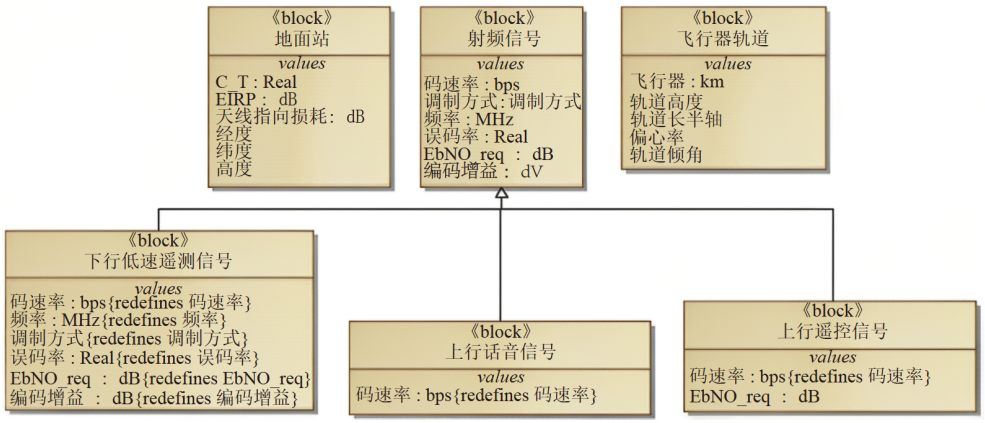


图 3　测控链路相关模型定义

Fig. 3　BDD defining the model structure

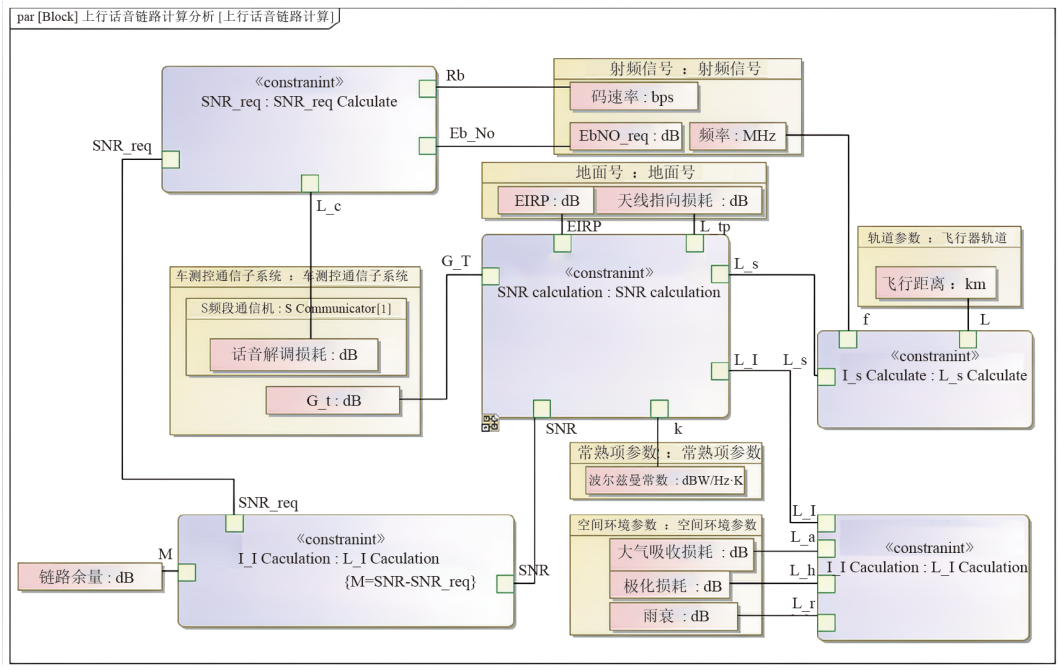


图 4　测控链路计算参数图模板

Fig. 4　Parameter diagram for link budget calculations

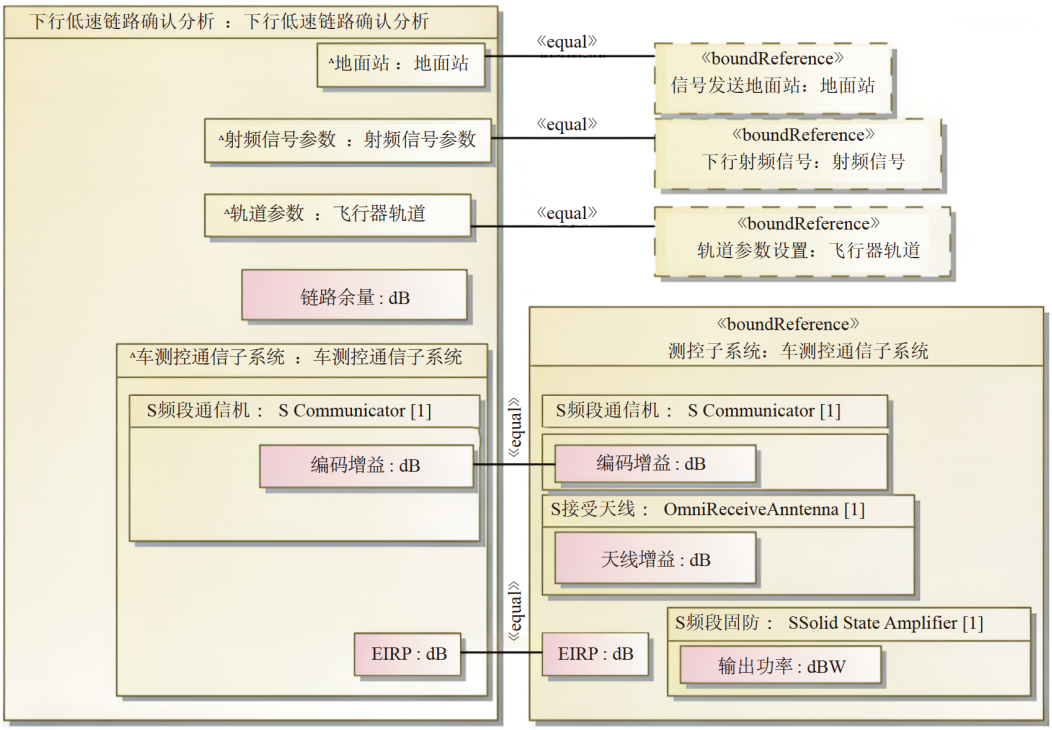


图 5 基于变体的链路计算上下文定义
Fig. 5 Context of link budget calculations

表 1 志愿者代谢预测公式常量计算结果
Table 1 Calculated constants for the metabolism prediction function of volunteers

序号	链路名称	飞行器轨道.轨道参数设计-飞行器距离/kM	下行低速数据链路计算分析-下行低速链路确认分析-链路余量/dB
1	地面站1下行高速链路分析	400000	-7.4218
2	地面站1下行遥测+话音(速率2)	400000	-2.8667
3	地面站2下行高速链路分析	400000	9.3782
4	地面站2下行遥测+话音(速率2)	400000	13.9333
5	地面站3下行高速链路分析	400000	4.5782
6	地面站3下行遥测+话音(速率2)	400000	9.1333
7	地面站4下行高速链路分析	400000	0.5782
8	地面站4下行遥测+话音(速率2)	400000	5.1333

通过链路分析和参数权衡最终形成对S通信机射频性能参数的要求。通过分系统层关键指标的进一步分解,初步确定单机的关键性能指标。

4 S通信机模型构建

4.1 通信机逻辑层模型

S通信机的逻辑层模型由描述单机需求、功能、结构、参数的SysML模型及相应视图实现。逻辑层模型以单机的功能逻辑描述及方案实现为核心。其中,单机逻辑层的需求来自于分系统层捕获的功能、性能、接口需求,并结合同类产品的研制要求汇总得到,由SysML语言需求模型进行承载。

4.1.1 S通信机功能建模

通信机的逻辑层功能模型一方面要模拟“实现”分系统向单机所分配的行为,另一方面还需将功能进行细化分解,分配至单机的组成模块。结合同类产品工作原理,以SysML语言的状态机图为主,对S通信机的功能行为进行建模。状态机的各个“状态”描述了单机不同的工作模式,在每个具体工作模式中“实现”了场景分析捕获的单机功能需求,并通过活动图的泳道将单机的功能进一步划分至模块。

S通信机的状态机模型如图6所示。为应对时变的通信机运行环境,状态机模型的正常运行过程抽象为周期性的循环过程。正常运行过程中,通信机工作模式的切换、遥控指令响应、遥测处理为3个并行的进程。每个循环周期内,状态机模型通过解析并响应遥控指令,对其自身的工作状态、工作模式进行设定。对于每种运行状态下的具体运行模式,由

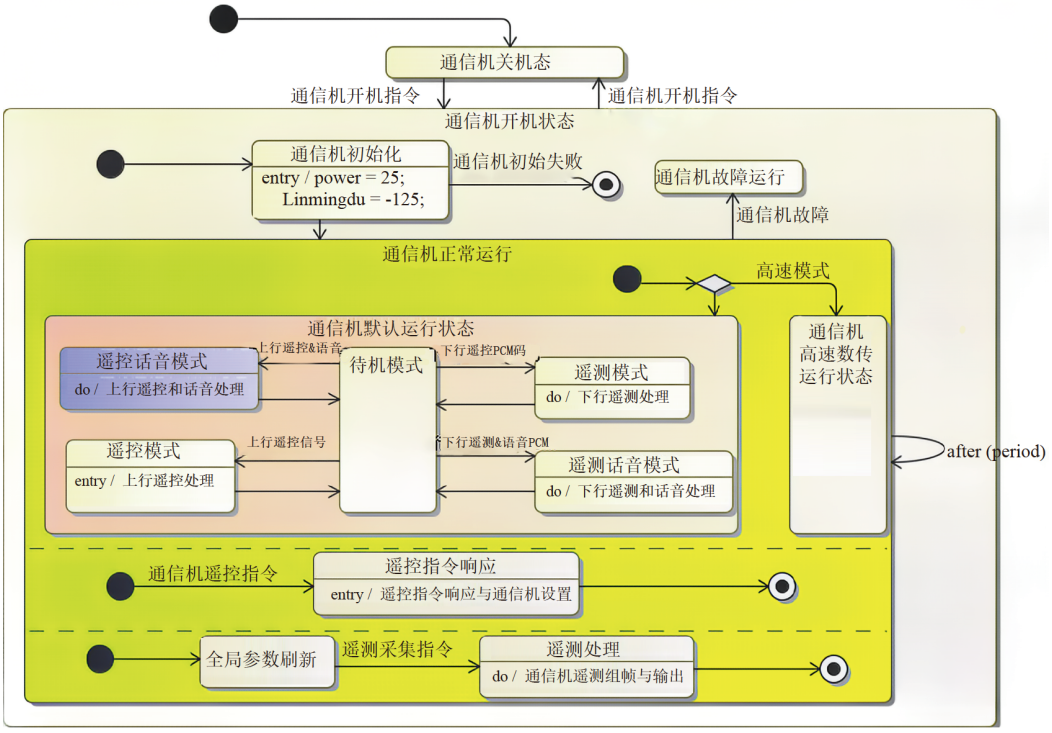


图 6　通信机的状态机模型

Fig. 6　State machine of the S-communicator

通信机当前的信息与射频信号输入共同决定,例如同时接收到上行的遥控与话音射频信号时,则转入“遥控话音模式”。如图7所示,通过活动“上行遥控和话音处理”进一步对“遥控话音模式”状态进行细化;在活动图内部,通过功能的细化和分解分配捕获S通信机内部模块的功能需求。

如图8所示,通过以上分析对S通信机状态机模型的详细设计,实现了S通信机工作模式设置和功能分解,捕获单机内部模块的功能需求,并通过“trace”、“refine”等关系形成与allocated action模型之间的溯源关系。

通过逻辑层模型的功能建模,可进一步实现单机架构及组成的设计。

4.1.2　S通信机功能模型验证

为实现通信机逻辑功能层的仿真,配合分系统总体模型实现逻辑层闭环的验证,如图9所示,定义S通信机的输入输出信号、信息及遥控遥测。例如,定义逻辑层遥控信号、逻辑层话音信号、遥控PCM码、话音PCM码等。其中,输入输出的射频信号包含信号的参数属性,如码速率、信息传输单元等基带属性,功率、信噪比等射频指标。输入输出信号的射频参数属性(如信号功率)会随着信号流经天线、测控固放、滤波器、放大器等模型,发生相应变化。

在通信机状态机的活动图行为中,运用Opaque Action进一步进行逻辑层仿真。具体而言,通过输入输出信号属性参数的变化,模拟通信机不同场景下的上行信号的捕获、解调以及下行信号的调制与发射。通过对PCM码帧格式的解析实现数据对接。对通信机指令进行解析与响应,并模拟产生关键遥测,从而模拟S通信机的全部工作流程。

如图10所示,建立S通信机模型测试上下文模型及对应的测试UI,对S通信机逻辑层模型进行验证。基于状态机的S通信机逻辑层模型可通过代码转换或函数封装的形式用于系统级的功能仿真验证。

4.2　通信机物理层模型

S通信机的物理层模型将单机简化为线性系统,进行关键模块的数学建模,实现单机方案设计。通过模型设计提前捕获关键元器件的性能需求。具体而言,通过SysmL模型的解析,实现逻辑层模型向物理层模型的参数传递;通过结构化文本的解析与映射,将物理层模型的计算结果向逻辑层模型传递支撑系统级集总参数仿真,向设备层模型传递支撑单机详细设计。

S通信机的关键指标为接收灵敏度,如式(1)所

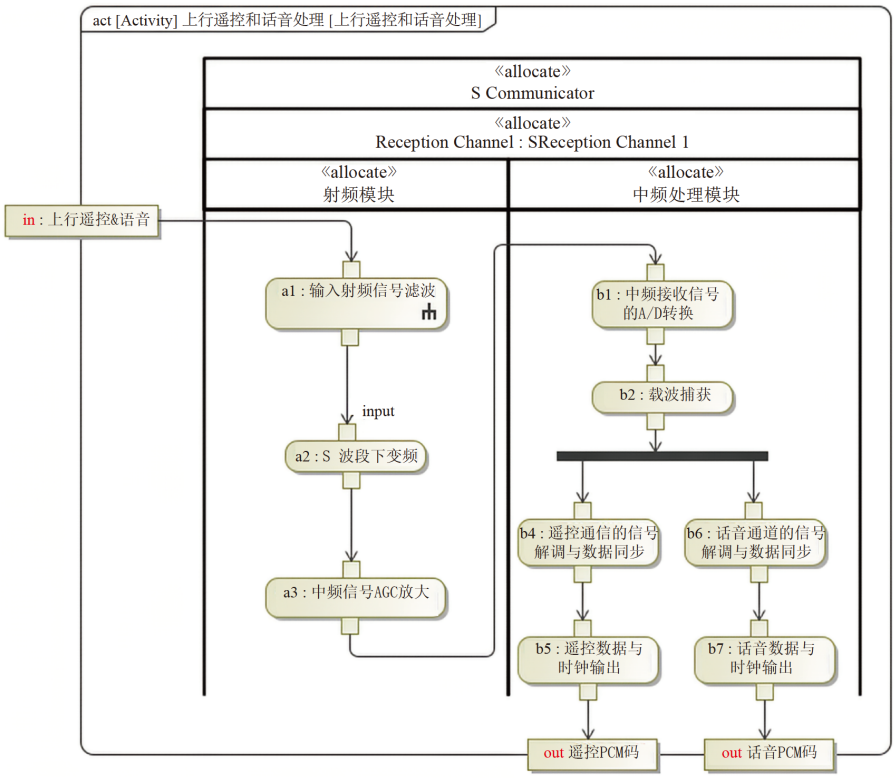


图 7 通信机对上行遥控和话音处理活动图

Fig. 7 Activity program of S-communicator uplink communication

示[26]。

$$P_{\min}(\mathrm{dB}) = 10 \cdot \log_{10}(kT_0) + \log_{10}(B) + NF(\mathrm{dB}) + SNR_{\min} \tag{1}$$

式中：k为波尔兹曼常数；T_0为环境温度；B为接收机带宽；NF为接收机噪声系数。$SNR_{\min}$表示由调制方式和误码率决定的解调需要的最低信噪比。

为提高通信机接受灵敏度，需降低通信机的噪声系数，减少通信机的接收带宽[27]。通信机的带宽由锁相环的带宽决定。降低锁相环的带宽一方面会提高通信机的灵敏度，同时也会带来锁相环动态响应性能的下降，造成较大的相位误差。为此需综合考虑通信机的接受灵敏度、扫描速率以及扫描频率范围等指标，兼顾链路信噪比和多普勒频移影响，进行锁相环的权衡设计。

结合典型USB通信机设计[28]，S通信机接收S波段上行信号，经2次下变频和自动增益控制后输出中频信号。其中，一路中频信号经窄带滤波后由二阶锁相环进行载波锁相与跟踪。锁相环的原理图如图11所示。

通过对鉴相器的线性化近似，基于有源环路滤波器（传递函数为$A_F(s)$）的二阶锁相环系统，锁相环的传递函数$H_0(s)$及误差传递函数$H_E(s)$分别如式(2)~(4)所示[29]。

$$A_F(s) = A_f \frac{1+\tau_2 s}{1+\tau_1 s} \tag{2}$$

$$H_O(s) = \frac{\omega_n s\left(2\zeta - \dfrac{\omega_n}{K}\right) + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \tag{3}$$

$$H_E(s) = \frac{s\left(s + \dfrac{\omega_n^2}{K}\right)}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \tag{4}$$

式中，τ_1、τ_2为环路滤波器的时间常数，ζ为环路阻尼系数，ω_n为环路无阻尼振荡频率(rad/s)，K为总的增益系数，$K=A_f \cdot A_d \cdot A_0$。其中$A_f$为环路滤波器的直流增益，$A_d$为鉴相器的灵敏度(V/rad)，$A_0$为压控震荡器的灵敏度(rad/s/V)。

4.2.1 基于模型的锁相环设计

通过解析通信机逻辑层SysML模型输出的xml或mo格式文件，得到锁相环设计的相关参数，包括捕获灵敏度、信号带宽、噪声系数、上行扫描速率、扫描范围等指标。

根据锁相环系统的误差传递函数$H_E(s)$，结合载

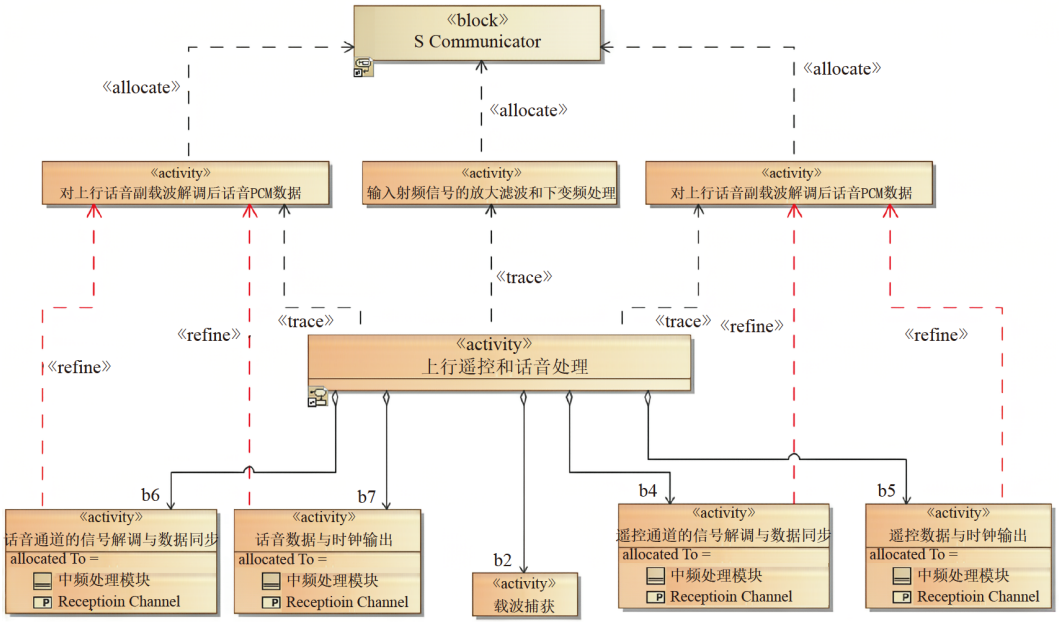


图 8　通信机功能向内部模块分解

Fig. 8　Function deposition of the S-communicator

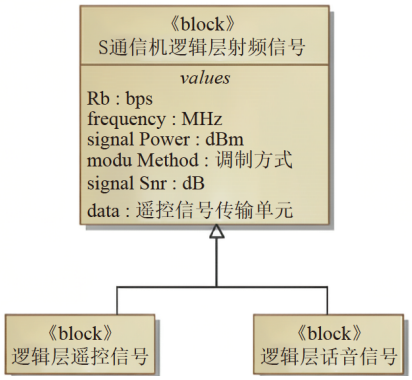


图 9　通信机的射频信号与遥控指令定义

Fig. 9　RF signal and command definitions

人测控产品的研制经验[30],对环路的主要参数进行设计。为保证环路跟踪的稳定性,载波锁相环最大的稳态相差可设定θ_e为3°。根据环路直流增益与输入频率变化范围、稳态相差之间的关系$\Delta\omega=\sin(\theta_e)\cdot K$,考虑上行载波多普勒范围(±115 kHz),可估算得到载波环的环路直流增益K为3.7×10^4。考虑稳态相差与特征频率、载波扫描速率的关系:$\Delta\omega/\omega_n^2=\sin(\theta_e)$,根据载波多普勒导致的最大频率斜升速率(30 kHz/s),可估算载波环的振荡频率ω_n为1500 rad/s。为获得锁相环特性良好的瞬态响应,一般取ζ=0.707。根据式(1)、(2),可进一步确定确定环路的时间常数τ_1、τ_2。

结合同类产品中鉴相器(1 V/rad)、压控振荡器(A_0=2 kHz/V)的选用,参照式(2)、(3)可初步设计得到锁相环系统传递函数。对锁相环数学模型通过MatLab/Simulink仿真,得到的时频域的仿真结果如图12所示。

通过时频域的计算仿真结果可知,环路的相位裕度达到77°,满足系统稳定性的要求。环路的3 dB带宽为858 Hz,据此可进一步确定载波锁相环的快捕带指标($2\zeta\omega_n$),为后续设计提供参考。

为进一步验证锁相环的性能,还需校核环路的信噪比$(S/N)_L$指标。环路信噪比较低时会造成相位抖动、周跳甚至环路失锁,要求环路信噪比门限为6 dB。根据估算的环路参数,可进一步计算得环路的信噪比,如式(5)~(6)所示[31]。

$$(S/N)_L=(S/N)_i\cdot(B_i/B_L) \tag{5}$$

$$B_L=\frac{\omega_n}{8\zeta}(1+4\zeta^2) \tag{6}$$

式中,B_i,B_L分别为输入信号的带宽、环路的等效噪声带宽,$(S/N)_i$为环外信噪比。其中,环路的输入信噪比$(S/N)_L$可由通信机的灵敏度和噪声系数进行计算获得。带入数据得到环路的信噪比为20 dB,满足信噪比要求。

根据环路滤波器的时间常数,可进一步提出滤波器电容及电阻参数等器件级的指标要求。

4.2.2　基于模型的噪声特性分析

S通信机采用USB体制,上行的复合调相信号$V(t)$



图 10　通信机逻辑层模型的测试UI设计

Fig. 10　UI for S-communicator state-machine testing

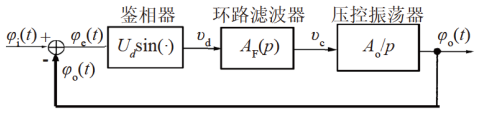


图 11　S 通信机的锁相环原理图

Fig. 11　PLL diagram of the S-communicator

的表达式见式(7)。

$$V(t)=V_0\cdot\cos(\omega_0 t+\sum_{i=1}^{k}m_i\sin\omega_i t+\theta_0) \tag{7}$$

式中，t表示时间，V_0为S频段主载波幅值，ω_0为主载波频率，m_1，m_2，m_3，m_4分别为遥控、话音、主测距音、次测距音的调制指数，ω_1，ω_2，ω_3，ω_4分别为遥控、话音、主测距音、次测距音副载波的频率，θ_0表示载波信号的初始相位。将式(7)基于贝赛尔函数展开后可知，PM调制信号由单一正弦波调制时就会产生多边波成分，调频整数倍处产生寄生成分。调制频率的频移成分、多普勒的频移成分，相位噪声均会叠加至载波及副载波上。因此载波环路相位噪声和干扰会极大的影响载波信号的捕获和解调，环路相位噪声会随着输入信噪比的降低而恶化，环路噪声输出又会影响本振的相噪指标。为此需在详细设计初评估环路的噪声特性。

基于锁相环回路的模型，得到锁相环相位噪声输出拉式变换$\theta_{out}(s)$如式(8)所示[32]。

$$\theta_{out}(s)=\left[\theta_{in}(s)+\frac{U_{pd}(s)}{A_d}\right]H(s)+\theta_{voc}(s)[1-H(s)] \tag{8}$$

式中，$\theta_{in}(s)$、$U_{pd}(s)$、$\theta_{voc}(s)$分别为等效输入相位噪声、鉴相器输出等效相位噪声、压控振荡器内部等效相位噪声，A_d为鉴相器的灵敏度，$H(s)$为系统的传递函数。环路滤波器产生的噪声对压控振荡器进行调频，可等效为压控振荡器产生的相位噪声[33]。

因各类噪声强度较弱、统计独立，噪声用独立的等效噪声源表征可分别得到各类相位噪声在锁相环路传递增益的仿真曲线，如图13(a)所示。图中，环路对输入相位噪声和鉴相器相位噪声呈现低通特性，而对VOC的相位噪声呈现高通特性。为此，可根据器件的噪声功率谱(图13(b))对锁相环进一步设计，使得环路总的输出噪声方差降低，同时使得环路带宽兼顾对低频噪声分量和高频噪声分量的抑制。通过以上分析可知，基于传递函数，通过以上通信机物理层模型的建模，可以实现通信机内部模块参数的设计，并实现单机详细设计前的功能性能验证。

基于S通信机物理层模型，一方面可通过Simulink/Matlab的模型转换与细化，实现单机射频模块、基带算法模块详细设计；另一方面通过向Modelica等多领域系统级仿真模型的转换与封装，支撑分系统/系统层集总参数仿真验证。

4.3　通信机设备层模型

S通信机的设备层模型应用于单机产品的详细设计。通信机的逻辑层、物理层模型实现S通信机的架构与方案设计，通过模型解析和参数传递的方式向单机设备层模型传递初步设计参数。硬件设计

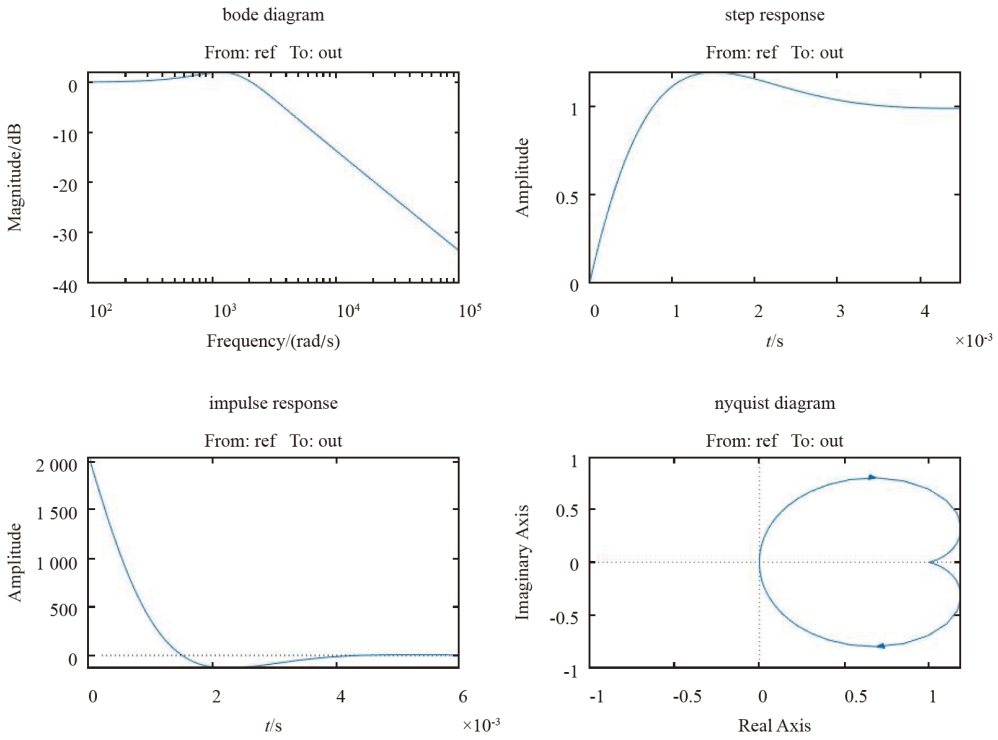


图 12　锁相环频率响应与时域响应性能

Fig. 12　PLL frequency and time response

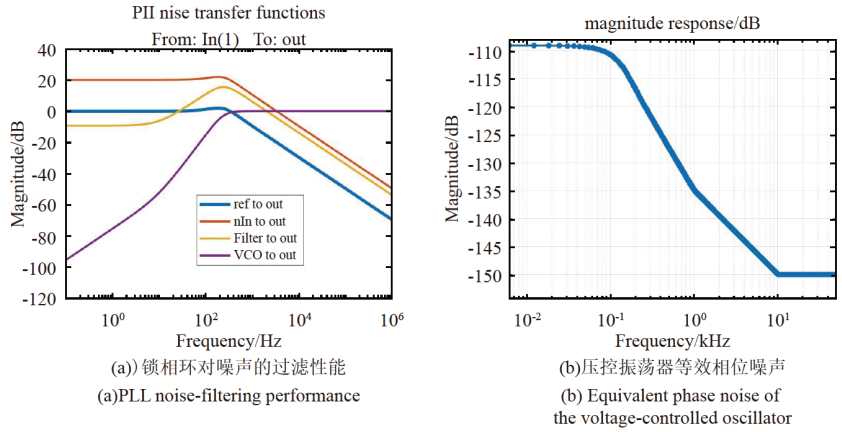


图 13　锁相环相位噪声性能分析

Fig. 13　PLL phase noise analysis

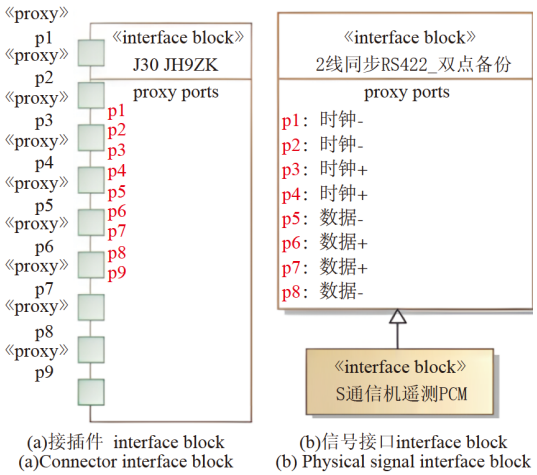
中,基于SysML的profile机制,定制元模型实现模型贯通;软件设计中,基于物理层形成的单机Matlab/simulink算法模型,利用Matlab软件的代码自动生成功能,形成C++、Verilog-HDL语言的核心代码。

4.3.1　基于模型的单机接口数据单生成

通信单机产品详细设计中,单机对外接口节点设计是重要的内容。通过基于模型的S通信机接口设计,可保证接口数据的同源。

为此,在通信机设备层模型中,构建接插件器件库、逻辑—物理映射接口库。如图14所示,接插件器件库中,采用interface block定义典型的电气接插件及其节点号。逻辑—物理映射接口库中,应用interface block 定义典型的信号与电气接口(如RS-422接口、OC门指令接口)及其物理节点(如时钟+、数据+等),同时定义接口的电压、电流等电气特性。通过接口的继承,创建月球车测控分系统及S通信机的对外接口,如遥测PCM信号接口、OC遥控指令接口等。

基于SysML的profile扩展机制,实现通信机设备接口电气节点ICD的获取。首先利用逻辑—物理映



(a)接插件 interface block (b)信号接口interface block
(a)Connector interface block (b) Physical signal interface block

图 14 设备层的接口模型定义与映射
Fig. 14 Interface description and mapping

射接口interface block代替逻辑层接口interface，定义单机模型对外接口；其次，建立接口映射上下文，将单机设备层模型的电气接插件节点与逻辑—物理映射接口的相应节点相关联。最后，如图15所示，基于自定义的接口ICD表形成面向型号应用的接口数据单。

5 结论

本文针对载人航天领域单机产品基于模型开展正向设计的迫切需求，结合测控通信机的研制流程，提出了单机产品自顶向下的逻辑层、物理层、设备层3层模型架构，以月面活动体系下的月球车测控类产品S通信机为例开展了详细建模，得到如下结论。

1)通信机的逻辑层模型通过测控分系统的功能分解和参数分析获取。其中，通过多测控场景的用例分析捕获单机功能架构，多通信任务的链路分析进行单机关键参数的权衡。链路分析中进一步采用基于绑定引用的变体建模方案，提高了分析效率，为多方案优选提供更为便捷的实现方式。

2)通信机的逻辑层模型以状态机为核心。通过状态机对单机的在轨全生命周期工作逻辑进行设计，并向模块进行功能分解与分配。基于状态机，对单机的输入输出数据结构开展详细建模；并利用建模软件基于脚本语言的可执行仿真功能，对S通信机理想态的主要工作流程、数据流及遥控遥测信息流进行仿真。从而实现单机系统性功能验证，并支撑上层系统级仿真。

3)通信机的物理层模型以系统数学函数为核心，承接逻辑层模型捕获的关键技术参数，实现单机内部模块的参数设计。具体而言，借助Matlab等高级建模语言的数值计算功能，开展系统级的时频域分析，验证单机关键模块的频率响应、动态响应、噪声过滤等性能，进一步输出对关键器件的技术要求。

#	Tagged Value(Connector End A)	节点电气特征	Part A	Part A	Part B	Part B
1	property Path = S 通信机，3线RS422	极性="-" 电流=0.04 电压=5.0	S通信...	p1 : ...	J30JH...	2
2	property Path = S 通信机，3线RS422	极性="-" 电流=0.04 电压=5.0	S通信...	p2 : ...	J30JH...	12
3	property Path = S 通信机，3线RS422	极性="+" 电流=0.04 电压=5.0	S通信...	p3 : ...	J30JH...	3

(a)SysML模型自定义白盒ICD
(a) Custom white-box ICD from SysML models

类型	极性	电流(A)	电压(V)	信息内容	接插件名称	节点号
RS422	−	0.04	5.0	上行遥控PCM码门控信号−	J30JHT21Z	2
RS422	−	0.04	5.0	上行遥控PCM码门控信号−	J30JHT21Z	12
RS422	+	0.04	5.0	上行遥控PCM码门控信号+	J30JHT21Z	3
RS422	+	0.04	5.0	上行遥控PCM码门控信号+	J30JHT21Z	13
RS422	−	0.04	5.0	上行遥控PCM码门控信号−	J30JHT21Z	4
RS422	−	0.04	5.0	上行遥控PCM码门控信号−	J30JHT21Z	14
RS422	+	0.04	5.0	上行遥控PCM码门控信号+	J30JHT21Z	5

(b)经处理后Excel形式接口数据单
(b) Processed interface data sheet in Excel

图 15 基于模型的接口数据单
Fig. 15 Model-based ICD

4)通信机的设备层模型基于SysML的扩展机制进行构建。对标产品研制的具体设计图纸和技术文档,通过基于元模型扩展后的模型转换,实现由方案设计向详细技术设计的传递与映射。以单机设备的接口数据交接单文件为例,通过归纳和抽象接口数据单的数据要素,定制元模型,提出基于模型的ICD表生成方案。

本文提出的建模方法同时兼顾单机模型能够支撑系统级的仿真验证,支持数字装备的运行仿真。本文提出的方法不仅适用于测控通信机类产品,也可进一步推广至其他产品基于模型的设计流程中。

参考文献(References)

[1] 张有山, 杨雷, 王平, 等.基于模型的系统工程方法在载人航天任务中的应用探讨[J].航天器工程, 2014, 23(5):121-128.
Zhang Y S, Yang L, Wang P, et al. Discussion on application of model-based systems engineering method to human spaceflight mission [J]. Spacecraft Engineering, 2014, 23(5):121-128 (in Chinese).

[2] 彭坤, 袁文强, 黄震, 等.基于模型的载人登月飞船系统设计应用探讨[J].载人航天, 2022, 28(1):1-9.
Peng K, Yuan W Q, Huang Z, et al. Discussion on model based design and application of manned lunar spacecraft system [J]. Manned Spaceflight, 2022, 28(1):1-9 (in Chinese).

[3] 彭坤, 韩冬, 刘霞, 等.基于SysML和Modelica的载人月球探测航天器总体设计与仿真验证[J].宇航学报, 2023, 44(9):1460-1470.
Peng K, Han D, Liu X, et al. System Design and simulation verification of manned lunar exploration spacecraft based on SysML and Modelica [J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(9): 1460-1470 (in Chinese).

[4] 王为, 彭坤.MBSE技术在我国载人航天器研制中的应用[J].航天器工程, 2022, 31(6):69-75.
Wang W, Peng K. Application of MBSE technology in development of china manned spacecraft [J]. Spacecraft Engineering, 2022, 31(6):69-75 (in Chinese).

[5] 胡云鹏, 张亚男, 彭祺擘, 等.基于SysML的载人航天故障模式分析及建模方法[J].载人航天, 2023, 29(2):238-246.
Hu Y P, Zhang Y N, Peng Q B, et al. SysML based failure analysis and modeling method for manned space project [J]. Manned Spaceflight, 2023, 29(2):238-246 (in Chinese).

[6] 刘嘉兴.载人航天USB测控系统及其关键技术[J].宇航学报, 2005, (6):743-747.
Liu J X. Key Technologies of the USB TT&C system for manned space flight [J]. Journal of Astronautics, 2005, (6):743-747 (in Chinese).

[7] Kaslow D, Soremekun G, Kim H, et al.Integrated Model-Based Systems Engineering (MBSE) applied to the Simulation of a CubeSat mission[C]//2014 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2014: 1-14.

[8] Spangelo S C, Cutler J, Anderson L, et al. Model Based Systems Engineering (MBSE) applied to Radio Aurora Explorer (RAX) CubeSat mission operational scenarios[C]//2013 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2013: 1-18.

[9] Grob J, Rudolph S. Dependency Analysis in complex system design using the FireSat example[J]. INCOSE International Symposium, 2012, 22(1): 1856-1869.

[10] Shames P M, Sarrel M A, Friedenthal S.A representative application of a layered interface modeling pattern[C]// INCOSE International Symposium. Edinburgh, Scotland: INCOSE, 2016, 26(1): 138-159.

[11] Mckelvin M L, Jimenez. A specification and design of electrical flight system architectures with SysML [C]// Infotech@Aerospace 2012. Garden Grove, California: AIAA, 2012:2534, 2546.

[12] 陈竹梅, 雷川, 龚光红, 等.效能主导的复杂电子信息系统跨域协同设计关键问题与方法论[J].中国电子科学研究院学报, 2020, 15(5):403-414.
Chen Z M, Lei C, Gong G H, et al. Key issues and methodology on cross-field co-design of complicated electronic information system dominated by effectiveness [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2020, 15 (5):403-414 (in Chinese).

[13] Yao Z Y, Wu X Y, Wu X Y. A SysML description for TT&C system[C]//lobal Reliability and Prognostics and Health Management. Nanjing, China: IEEE, 2021: 1-4.

[14] 刘红杰, 窦骄, 沈鹏, 等.一种基于MBSE的小卫星测控分系统建模设计方法[J].遥测遥控, 2022, 43(3):54-61.
Liu H J, Dou J, Shen P, et al. A modeling design method of small satellite TT&C subsystem based on MBSE [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(3):54-61 (in Chinese).

[15] 贾馥源.基于MBSE的机载通信系统建模研究与验证[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
Jia F Y. Modeling and Verification of Airborne Communication System Based MBSE [D].Chendu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020 (in Chinese).

[16] 刘中田, 张茜, 赵焕.CTCS-1级列控系统无线广播通信场景建模与验证[J].北京交通大学学报, 2023, 47(2):1-12.
Liu Z T, Zhang X, Zhao H. Modeling and verification of radio broadcast communication scenario for CTCS-1 train control system [J].Journal of Beijing Jiaotong University, 2023, 47 (2):1-12 (in Chinese).

[17] 张然, 李源, 王昊, 等.场景导向的雷达系统模型设计与仿真方法研究[J].图学学报, 2024, 45(2):284-291.
Zhang R, Li Y, Wang H, et al. Research on scenario-oriented radar system model design and simulation [J]. Journal of Graphics, 2024, 45(2):284-291 (in Chinese).

[18] Wilkins D E B. From HF radio to unified S-band: An historical review of the development of communications in the space age[J]. Acta Astronautica, 1989, 19(2): 171-190.

[19] 鲁金直, 王国新, 阎艳, 等.基于多架构建模语言的系统工程建模方法[J].系统工程学报, 2023, 38(2):146-160.
Lu J Z, Wang G X, Yan Y, et al. System engineering modeling methodology based on multi-architectural modeling language [J]. Journal of Systems Engineering, 2023, 38 (2):146-160 (in Chinese).

[20] Biggs G, Sakamoto T, Kotoku T. A profile and tool for modelling safety information with design information in SysML [J]. Software & Systems Modeling, 2016, 15(1): 147-178.

[21] 张卫华.工程级与交战级联合建模与仿真关键技术研究[D].

长沙: 国防科学技术大学, 2006.
Zhang W H. Research on the Key Technologies of Joint Modeling and Simulation for Both Engineering and Engagement-Level [D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2006 (in Chinese).

[22] 罗小桃, 张崇峰, 胡震宇, 等.我国首次载人月球车任务需求分析[J].载人航天, 2019, 25(5):693-698.
Luo X T, Zhang C F, Hu Z Y, et al. Requirement analysis of the First manned lunar rover in China [J]. Manned Spaceflight, 2019, 25(5):693-698 (in Chinese).

[23] 朱珂, 李彦欣, 王丹, 等.载人月球探测月面通信网总体架构及关键技术研究[J].宇航学报, 2023, 44(9):1423-1435.
Zhu K, Li Y X, Wang D, et al. Research on system architecture and key technologies of lunar communication network for manned lunar Exploration [J]. Journal of Astronautics, 2023, 44 (9):1423-1435 (in Chinese).

[24] Harrison D A, Ambrose R, Bluethmann B，et al. Next generation rover for lunar exploration[C]// 2008 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2008: 1-14.

[25] Friedenthal S. A Practical Guide to SysML: The Systems Modeling Language [M].Morgan Kaufmann, 2015:199-205.

[26] Pratt T, Jeremy E.Allnutt. Satellite Communications [M]. John Wiley & Sons, 2019:215-221.

[27] Banerjee D. PLL Performance, Simulation and Design [M]. Dog Ear Publishing, 2006:20-24.

[28] 金骏, 黄波, 崔锐, 等.空间站USB测控体制锁相接收机的设计与实现[J].上海航天, 2022, 39(S2):154-160.
Jin J, Huang B, Cui R, et al. Design and realization of Phase-Locked receiver for USB TT&C system of space station [J]. Aerospace Shanghai, 2022, 39(S20:154-160 (in Chinese).

[29] 郑继禹.锁相技术.第2版[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012: 43-58.
Zheng J Y. Phase-Locked Technology. 2nd ed. [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2012: 43-58 (in Chinese).

[30] Mysoor N R, Kayalar S, Lane J P, et al. Performance of a Ka-band transponder breadboard for deep space applications[C]// IEEE Aerospace Conference. Snowmass, CO, USA: IEEE, 1997: 547-557.

[31] 王文伟, 欧阳尚荣, 陆灵君, 等.嫦娥五号轨道器X频段应答机设计与在轨验证[J].上海航天, 2022, 39(S1):40-47.
Wang W W, OuYang S R, Lu L J, et al. Design and on-orbit verification for the X-band transponder of Chang'e 5 lunar orbiter[J]. Aerospace Shanghai, 2022, 39(S1):40-47 (in Chinese).

[32] Stephens D R .Phase-Locked Loops for Wireless Communications [M].Springer US, 1998: 80-88, 113-126.

[33] Young Wan Kim , Jae Du Yu . Phase noise model of single loop frequency synthesizer[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2008, 54(1): 112-119.

（责任编辑:孙京霞）