

# 基于能力分析的天基资源虚拟化方法的设计与实现

刘红林<sup>1,2</sup>, 李英玉<sup>1</sup>, 杨震<sup>1</sup>, 王广钰<sup>1</sup>, 贺欢<sup>1</sup>

(1. 中国科学院国家空间科学中心 中国科学院复杂航天系统电子信息技术重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学 计算机科学与技术学院, 北京 100049)

**摘要:** 随着小卫星技术以及卫星组网技术的飞速发展, 天基资源的规模呈爆发式增长, 依赖多种类卫星节点提供的卫星能力, 完成多星协同的复杂空间任务, 向普通大众用户提供可用的、即时的卫星信息服务, 成为未来发展的趋势。针对多类异构卫星, 提出一种面向用户的应用层天基资源能力虚拟化方法。分析了即时观测信息服务的用户需求及天基资源的属性特征, 综合时间、空间、能源、存储等约束条件, 将天基资源按照时空逻辑, 分层抽象虚拟化成面向用户的服务能力, 建立了适用于大规模异构卫星、统一标准的应用层天基资源虚拟化方法, 并设计了计算模型。选取具有代表性的卫星平台、载荷等, 针对在轨实时虚拟化的需求, 设计并实现了在轨虚拟化算法。试验证明, 算法时效性可以满足星上实时计算要求。

**关键词:** 天基资源; 资源虚拟化; 卫星能力分析

**中图分类号:** V 19      **文献标志码:** A

**DOI:** 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.04.008

## Design and Implementation of Space-Based Resource Virtualization Method Based on Capability Analysis

LIU Honglin<sup>1,2</sup>, LI Yingyu<sup>1</sup>, YANG Zhen<sup>1</sup>, WANG Guangyu<sup>1</sup>, HE Huan<sup>1</sup>

(1.Key Laboratory of Electronics and Information Technology for Space System, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2.School of Computer Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** With the rapid development of small satellite technology and satellite networking technology, the scale of space-based resources is exploding. Relying on the satellite capabilities provided by various types of satellite nodes, it has become a future development trend to complete multi-satellite coordinated complex space tasks and provide the general public with available and real-time satellite information services. Therefore, in this paper, a user-oriented application layer space-based resource capability virtualization method is proposed for multiple heterogeneous satellites. The user requirements of real-time observation information services and the attribute characteristics of space-based resources are analyzed. The constraint conditions such as time, space, energy, and storage are integrated. The space-based resources are hierarchically and abstractly virtualized into user-oriented service capabilities according to the space-time logic. A method suitable for large-scale heterogeneous satellites and application layer-based resource virtualization with unified standards is established, and the computational model is designed. Representative satellite platforms, loads, etc. are selected to design and implement the in-orbit virtualization algorithm according to the in-orbit real-time virtualization requirements. The experimental results show that the timeliness of the algorithm can meet the real-time calculation requirements on the satellites.

**Key words:** space-based resource; resource virtualization; satellite capability analysis

收稿日期: 2019-04-04; 修回日期: 2019-05-20

基金项目: 中国科学院重点部署项目(ZDRW-KT-2016-02)

作者简介: 刘红林(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为天基资源组织、集群智能。

通信作者: 李英玉(1976—), 女, 博士研究生, 副研究员, 主要研究方向为信息组织、大数据分析、空间信息服务及空间任务仿真。

## 0 引言

随着卫星技术的高速发展,天地一体化、天基信息港、SpaceX 星链等大规模多星组网的计划相继被提出,以提供增强的卫星通信、导航等服务。在卫星遥感领域,通过多星组网、协同观测可形成覆盖全球、实时更新地球影像的数据网络,可以为国防、应急救援、国民经济、民生领域的众多不同种类用户提供即时的观测服务,对提升天基资源利用效率,促进商业航天行业快速发展,具有重大的战略意义。

## 1 应用场景分析

天基大规模组网条件下,在卫星数量大幅增长的同时,用户数量也将呈现爆发式增长,用户种类越来越多样化、个性化,用户需求提交的时间、空间随机分布,同时对信息获取的时效性要求越来越高,希望得到即时服务响应,这对天基资源调度技术提出了新的挑战。传统的卫星规划与调度方法,难以应对卫星数量大幅增加带来的解空间维数爆炸问题,无法实现对用户需求的即时响应。

资源虚拟化(Resource Virtualization)是一种资源管理技术,是将各种实体资源,如服务器、网络、内存及存储等,予以抽象、转换后呈现出来,打破实体结构间的不可切割的障碍,使用户能够以更好的方式来应用这些资源。采用天基资源虚拟化的方法,将大规模天基资源调度问题转化为针对随机用户需求的资源分配问题,为解决大规模天基资源的调度问题,提供了一种新的思路。

## 2 天基资源虚拟化面临的主要问题

天基资源由于其轨道运动造成的高时空动态特性,以及资源受限带来的复杂约束问题,难以直

接使用地面计算机或网络资源常用的虚拟化方法。

成像观测卫星大多为低轨卫星,低轨卫星相对于地面移动速度快,轨道周期短,卫星在空间中位置变化迅速,具有很高的动态性。由于星间通信受到距离的限制,各个不同轨道上的卫星轨道参数不同,相对运动变化大,可通信时间短。在多星组网情况下,卫星拓扑时刻在动态变化,对地覆盖区域差异较大。对不同的时间、不同的目标区域,其上空能够实现探测覆盖的卫星不同。由于这些卫星的运动特性,导致了天基资源的高时空动态性。

天基资源在提供服务时会受到平台姿态、能源、存储、卫星运动状态,以及其自身的轨道能力、平台资源、载荷能力等的约束。星上物理设备与载荷由于其自身的能力与属性造成设备级约束,例如,遥感载荷受到工作条件(天时、天候)、工作模式(如 SAR 的条带、聚束、凝视等)、连续执行任务时的最小转换时间等的约束;激光、微波星间通信载荷受到通信距离、数据传输速率、工作准备时间、瞄准跟踪能力、天线波束角等约束;星上计算设备受到节点数量、计算能力、IO 能力等约束;数据存储设备受到存储容量、IO 能力等约束。基于星上设备与载荷实现特定功能时,除受到基础的约束之外,各个功能的约束之间存在耦合关系,例如,成像功能与星间通信功能同时受到能源、姿态机动、存储余量的约束,此外成像功能受到空间位置的约束,星间通信功能受到星间可见性约束。各个功能间的耦合性如图 1 所示。这些复杂的约束问题是导致传统的卫星规划与调度的难点之一。

虚拟化技术在地面的计算中心和云服务 etc 应用中已经广泛实施,对于解决各项数据资源不能充分利用、系统兼容性较低等问题上具有重要的作用,同时可以有效整合各种服务资源,实现高低性

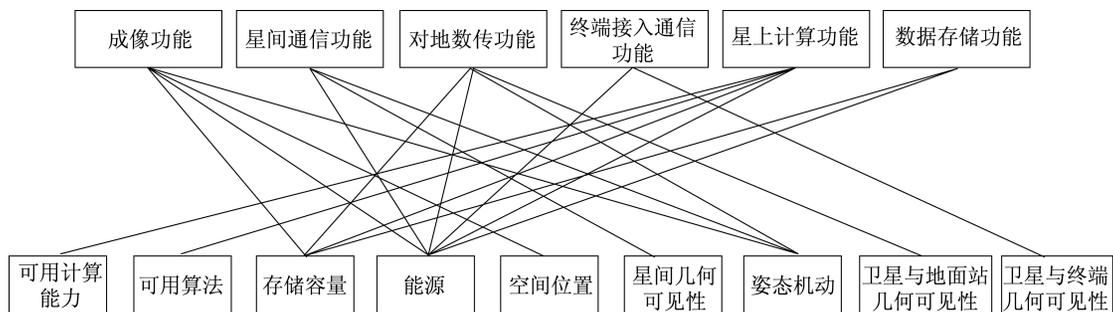


图 1 功能间的约束耦合

Fig.1 Constraint couplings among functions

能间的负载均衡。虚拟化技术主要分为服务器虚拟化、网络虚拟化以及计算机设备虚拟化。服务器虚拟化<sup>[1]</sup>借助拆分、结合、迁移等措施最大限度利用服务器性能,减轻配置工作。网络功能虚拟化(Network Functions Virtualization, NFV)<sup>[2]</sup>基于虚拟化技术,用软件实现网络功能,以代替传统硬件加软件方式实现各种网络功能或网络设备。计算机设备虚拟化主要提高了计算机的存储内存,其次提高了利用效率。这些虚拟化技术均不符合天基资源虚拟化的应用场景。

对虚拟化技术在航天领域的应用研究,王京等<sup>[3]</sup>分析了卫星平台虚拟化的必要性,提出卫星移动通信星载平台应适应多种应用场景和传输体制,灵活的空/时/频资源调配能力是通信卫星平台上卫星平台虚拟化的核心。王睿等<sup>[4]</sup>针对天基信息网络的资源调度,研究了虚拟资源生成算法和动态管理的体系结构,设计了基于不同约束的网络层资源调度方法。航天测控中心<sup>[5]</sup>为降低系统的复杂性和维护难度,引入虚拟化技术来提高航天测控中心系统的快速恢复能力,提升系统的可扩展性、易恢复性以及运行效率,目的是为了升级地面中心系统。孙海洋等<sup>[6]</sup>对作战资源提出了一种基于接口和事件驱动架构的虚拟化方法,主要对物理资源、作战能力资源和服务资源进行服务注册、封装、组合等服务相关技术研究。

从以上研究可以看出,虚拟化技术在航天领域已经成为技术发展的必然趋势,在航天测控应用系统中可以借鉴已有地面成熟的虚拟化及服务相关技术,但对天基资源的管控方面,目前主要开展的是链路层及网络层通信资源的相关研究,在面向用户需求的应用层天基资源虚拟化方面还未涉及。因此,本文针对多种类异构观测卫星高效管理与应用问题,提出天基资源虚拟化整合技术,将观测卫星上的各项物理资源进行虚拟化,形成面向用户需求的各项服务能力。

### 3 用户需求分析

随着综合国力的提升,地理影像信息在军事和民用领域的应用越来越广泛,同时在各项战略层面也越来越重要。随着信息化技术的飞速发展,各个领域的用户对卫星观测的需求呈现爆发式增长,而目前卫星的直接用户主要是卫星的管控部门,卫星

受益用户范围局限。基于现有的观测需求进行调研分析,可以得知对天基资源信息有较强需求的用户所在的领域包括军事、农业、防灾减灾、国土资源等。

1) 军事用户需求。军事信息的获取至关重要,主要包括战略目标的监视、战术目标的监视、重点区域的监视、军事地图绘制等。

2) 农业用户需求。包括农用地的管理、高标准农田的建设、农业产量的预测、旱情预测、土壤质量的监测等。

3) 防灾减灾用户需求。包括自然灾害的监测预警、防灾减灾信息的管理与服务、自然灾害防御工程建设的支撑服务、自然灾害应急信息服务、灾后重建的信息支持服务等。

4) 国土资源用户需求。包括自然资源调查、矿产资源调查、地灾防治和地质环境保护、重要经济区和城市群地质环境调查等多个领域。

观测卫星的用户分布在不同的领域,观测需求的提交有多用户并发的特点。对于时效性要求较高的任务,例如军事目标检测跟踪、震后影像快视分析任务,要求观测卫星能够即时做出响应,为高时效性任务提供即时观测服务。同时对于复杂空间任务,由于单一卫星能力有限,需要多种能力卫星协同观测,例如“对海上超过  $N$  米的目标进行自动连续跟踪”就需要低分辨率宽幅观测卫星、在轨目标识别监测算法、高精度成像卫星等协同完成。

针对观测任务的用户需求,其本质是为了通过各种方法方便、快捷地获取需要观测的特定区域、特定时间范围的影像信息。因此,需要观测卫星的载荷特性与参数,分析卫星资源的约束,形成可供用户选择的服务能力。

### 4 天基资源能力分析

天基资源按照卫星硬件基本功能划分,可以分为有效载荷与卫星平台两部分。卫星平台是为有效载荷正常工作提供支持和保证的各分系统的总称,主要功能包括支持有效载荷,保持有效载荷的正确指向,维持有效载荷的合适温度,提供电源、指令和遥测,使有效载荷处于正确的轨道,提供数据存储和通信功能等。典型的卫星平台可以分为 4 个分系统:姿态与轨道控制系统、电源系统、星务管理系统、有效载荷数据管理系统。有效载荷是卫星上

直接为实现卫星在轨运行任务的仪器、设备,主要包括可见光、红外、多光谱等光学传感器,雷达(SAR等)和电子侦察等类型载荷。搭载不同载荷类型的对地观测卫星具有不同的特点,可采集不同类型的数据,适用于不同的场景。

依托于卫星平台与其搭载的有效载荷,本文讨论的天基资源包括了计算资源、通信资源、存储资源、观测资源、能源资源等,见表1。

表1 天基资源分类

Tab.1 Classification of space-based resources

资源类型	资源功能
计算资源	多线程、分布式处理观测数据
通信资源	形成星间链路、完成观测数据与任务信息传输
存储资源	存储观测数据与相关信息
观测资源	光学成像、微波遥感等成像载荷
能源资源	太阳能帆板、蓄电池等为卫星提供电能

天基资源受卫星在轨运行高动态等特性的影响,分析各类天基资源的特点如下:

1) 传感器探测约束条件复杂。主要指各个有效观测载荷的约束,按照影响程度可以分为以下几类:观测条件与观测能力约束、最大最小开机时间约束、动作切换时间约束、唯一性动作约束、能源约

束、存储约束等。

2) 时空高动态。成像观测卫星大多为低轨卫星,低轨卫星相对于地面的移动速度快,轨道周期短,各个不同轨道上的卫星可通信时间短,卫星拓扑时刻在动态变化。

3) 大传输时延。星上链路带宽较窄,传输速度低,导致传输时延较大。

4) 星上计算、存储、能源资源有限。卫星受重量和体积的限制,大容量存储空间受限;星上搭载的蓄电池和太阳能帆板较小,能源供给不充足;搭载的GPU考虑到功耗,算力也有限。

由于卫星体积与重量的限制,各类资源可用容量较低,导致工作模式受限。比如,能源余量将影响各项需求任务和卫星常规任务的执行,卫星姿态改变时不能进行对地观测和星地信息的传输,对地成像前需要进行载荷预热和姿态调整等开机前准备。星上各种设备的约束是虚拟化的主要影响因素,满足用户需求的4种天基资源能力的计算和规划也受卫星平台和时空的约束。

根据满足用户需求相关的任务满足度和任务时效性,选取时空属性进行统一描述,并且使用时间、空间、存储、能源作为主要约束条件,如图2所示。

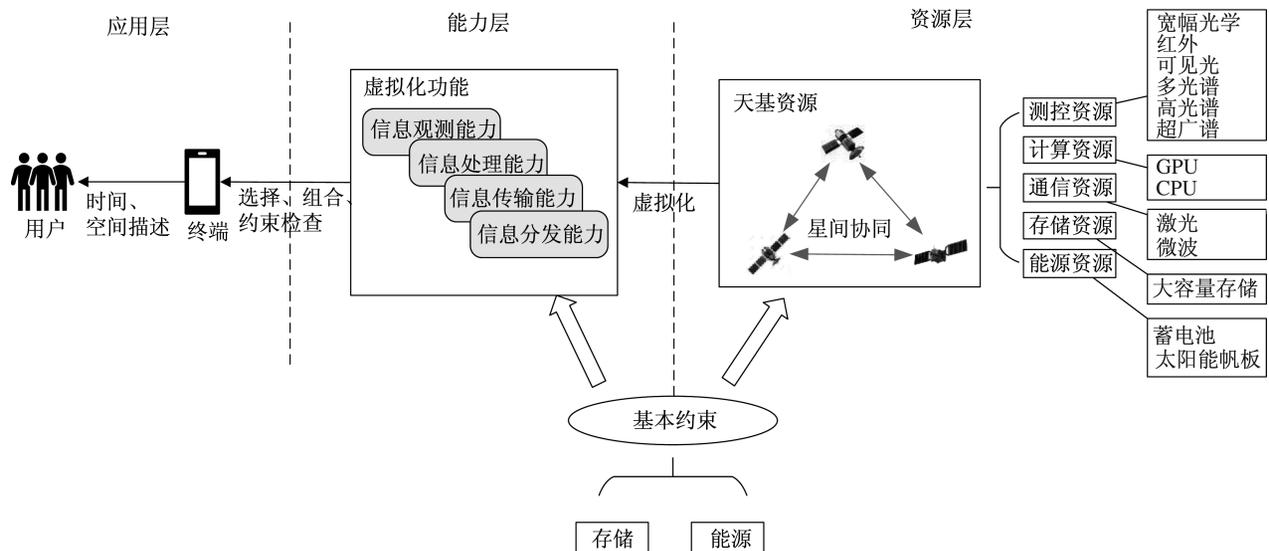


图2 用户需求与天基资源分析

Fig.2 Analysis of user requirements and space-based resources

在执行任务过程中,存储与能源作为强约束,导致其他卫星资源之间存在较强的耦合性,由于观测任务的固有属性,又受到时间与空间的约束。卫

星资源的强耦合、高约束的特性是传统任务规划过程中的主要难点,通过虚拟化方法将底层的天基资源进行解耦,并抽象成面向用户需求的服务能力,

可以有效地整合天基资源,并简化用户对天基资源的使用难度。

综合各类观测任务与星间协同任务的需求,结合卫星提供的各类资源,可以为用户提供的服务能力分为 4 类,见表 2。

将 4 种能力按照时间与空间的维度展现给用户,用户通过能力的组合,可以实现对各类观测需求的支持。同时可以使得底层参数与计算对用户透明,实现天基资源能力对用户可见即可用的目的。

表 2 服务能力类型

Tab.2 Service capability types

服务类型	服务内容	举例
信息观测能力	提供影像、数据、情报等	点目标观测/区域目标观测
信息处理能力	提供数据处理的服务	目标识别
信息传输能力	提供星间信息传输的服务	即时通信服务、星间协同观测
信息分发能力	分发信息到对应用户或者用户组	数据推送

1) 信息观测能力是指天基资源对用户提供服务的能力,主要指对用户目标的观测能力,包括对地面点目标、区域目标的观测能力多种手段结合的协同观测能力。

2) 信息处理服务能力是指对各种探测数据进行目标识别、压缩处理、数据分析的能力。

3) 信息传输能力是指通过微波、激光等星间链路进行星间信息传输的能力。

4) 信息分发能力是指对区域内用户分发较大内容数据,进行星地传输的能力。

源的时空高动态性、资源之间的强耦合性,为天基资源的虚拟化和使用带来困难。本节首先分析基于能力分析的天基资源虚拟化层次架构,然后设计天基资源虚拟化计算模型,最后给出天基资源能力的表达形式。

天基资源虚拟化的目标是将多类天基资源虚拟化为信息的获取、处理、传输和分发能力,在共用底层异构资源的情况下,能够为用户提供稳定的信息服务。

据此将天基资源虚拟化设计为多层次计算模型,由底层到顶层分别是设备层、功能层和能力层,如图 3 所示。

### 5 天基资源虚拟化方法

通过上述的天基资源的特点可以看出,天基资



图 3 天基资源虚拟化层次结构图

Fig.3 Hierarchical diagram of space-based resource virtualization

设备层是将卫星平台和有效载荷等硬件设备做统一驱动,作用是获取卫星数据,包括观测载荷类型、激光载荷类型、微波载荷类型、计算设备、能源设备、姿控设备和星上存储设备。

功能层是根据具体设备的功能设计功能计算模型,计算模型根据各个载荷设备的特点,综合时间、空间、存储、能源的主要约束,计算能源、存

储、观测、处理等时空属性数据,包括观测数据量计算模型、平台机动计算模型、卫星轨道计算模型、对地覆盖计算模型、可见性计算模型等。

能力层是结合用户需求的时空范围,计算与用户需求相关的信息观测、处理、传输和分发能力,同时在计算卫星能力时,需要对能源存储进行统一约束检查。具体计算模型及过程如图 4 所示。

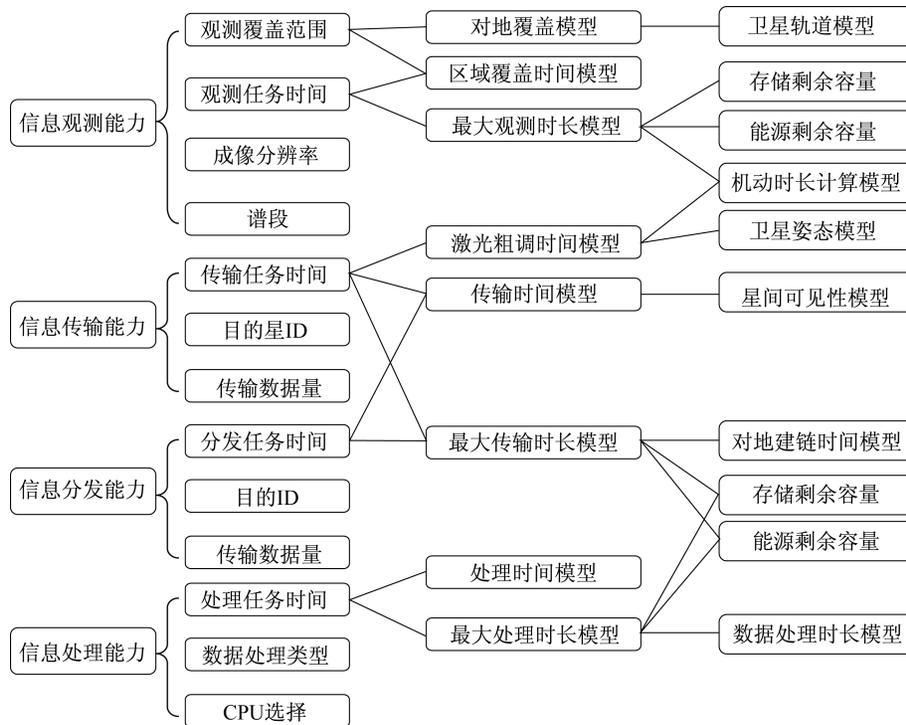


图 4 典型计算模型调用关系

Fig.4 A typical computational model call diagram

1) 信息观测能力。受到能源与存储剩余容量的约束,计算观测载荷产生数据量的速率,根据卫星轨道、太阳高度角、姿态调整等的综合计算,得出观测时空条带列表。

2) 信息处理能力。考虑特定任务的计算速度与 GPU 的能耗,综合存储空间的约束,计算出数据处理时长列表。

3) 信息传输能力。包括星间微波和激光通信,在能源与存储的约束之上,需要综合星间距离、姿态调整机动时长等因素,最终计算出信息传输能力时段列表。

4) 信息分发能力。受能源与存储约束,根据卫星轨道计算星地可见时间段,综合卫星姿态调整机动时长的计算,得到星地信息分发能力时段列表。

通过上述计算模型,将 4 种天基资源能力组合

成能力列表的形式呈现出来。通过能力列表在时间和空间维度上的描述,用户可以选择、组合、订购所需要的能力。能力列表的设计见表 3。

以单星为例,根据卫星轨道、时间、空间、存储、能源的主要约束,调用各层次虚拟化的计算模型,计算出各个能力列表,能力列表在时间轴上体现如图 5 和图 6 所示。

## 6 天基资源虚拟化方法的部署与仿真测试结果

在对地观测卫星大规模组网的情况下,通过虚拟化方法将各个卫星的资源抽象成服务能力,并将服务能力通过星间与星地链路下载到地面。用户使用手持终端,通过小型天线与卫星建立链接,获得卫星的服务能力列表。用户可在线进行交互、选

表 3 天基资源能力列表设计

Tab.3 Design of space-based resource capability lists

信息观测能力			信息处理能力		
序号	名称	说明	序号	名称	说明
1	编号	信息获取能力的编号	1	编号	信息处理能力的编号
2	时间段	观测的开始、结束时刻	2	时间段	处理的开始、结束时刻
3	分辨率	数据的空间分辨率	3	处理类型	信息处理的数据类型
4	覆盖范围	覆盖的区域的描述	4	处理大小	处理数据大小
5	波段	数据类型	5	处理速率	单景数据的处理时间
信息传输能力			信息分发能力		
序号	名称	说明	序号	名称	说明
1	编号	信息传输能力的编号	1	编号	信息分发能力的编号
2	时间段	星间传输开始、结束时刻	2	时间段	星地传输开始、结束时刻
3	交互对象	传输的卫星 ID	3	交互对象	传输的地面站 ID
4	传输速度	微波或激光传输速率	4	传输速度	激光传输速率
5	数据容量	传输数据大小	5	数据容量	传输数据大小

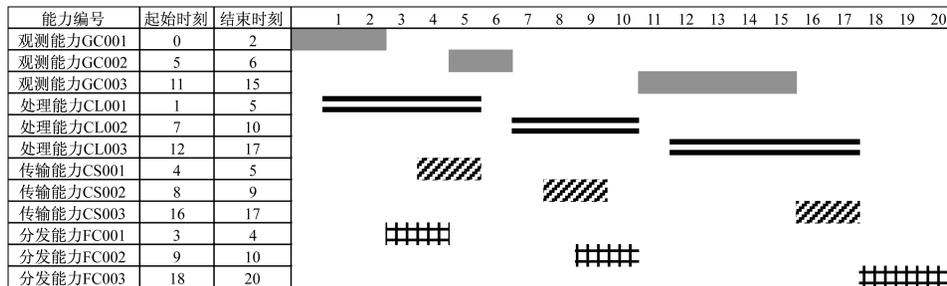


图 5 能力列表甘特图

Fig.5 Gantt chart of capability lists

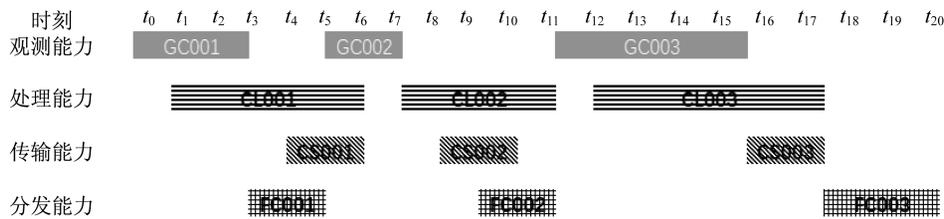


图 6 能力列表时间图

Fig.6 Time chart of capability lists

择、组合所需要服务能力,并提交需求,星上收到需求后,通过自组织多星协同、分析用户需求、自动规划任务,对能力进行订购确认,同时生成任务计划列表,安排任务执行,最终将得到的数据信息下传用户。该机制支持多个用户同时进行能力的订购,当用户需求存在冲突时,通过卫星根据用户等级进行冲突的消解,返回订购消息。

天基资源虚拟化方法是上述的使用场景关键技术,因此,设计并实现相应的虚拟化功能,进行仿

真试验。天基资源能力虚拟化方法的仿真试验将通过构建星地部署,在开发板上开发和搭建星上在轨组织分系统,使用平板作为用户终端,使用虚拟网络进行用户与卫星的交互,模拟仿真用户使用场景与天基信息服务模式,通过对系统的功能和流程测试,获得各项时间指标,对比试验结果。

本次仿真试验主要针对 3 种观测载荷,分别是 SAR、高分光学、宽幅光学载荷;2 种星间链路类型,分别是激光、微波通信;以及 3 种星上处理算法,分

别是目标识别算法、影像切片裁剪算法和海域目标检测识别算法。卫星集群以 3 颗星为例,3 颗星的轨道采用低轨(500 km)walker 星座(倾斜角 84.7°),运行在相邻轨道面上。3 颗星的观测载荷分别设置为 SAR 载荷、高分光学载荷和宽幅光学载荷。星间通信使用微波载荷,并设置微波载荷数据传输速率为 500 bit/s。星地通信使用激光载荷,并设置星地激光传输速率为 2 Mbit/s。

对天基资源能力虚拟化方法进行仿真试验,分别在 3 个装有 PetaLinux 系统的开发板(ZedBoard Zynq-7000)和搭载 Android 5.1.1 系统的平板电脑等基础硬件上搭建仿真环境。用开发板模拟卫星,平板电脑模拟用户的需求操作,通过路由器模拟微波星间链路,仿真环境架构如图 7 所示。

一个典型的试验流程为:3 颗星将各自的资源状态信息通过星间链路动态更新给主星,主星保留 3 颗星的资源状态信息。用户通过终端提出观测请求,观测请求包括观测区域范围、观测时间范围、载荷约束等,主星接收用户的观测请求后调用观测时间区间计算模型、数据处理时间计算模型和激光传

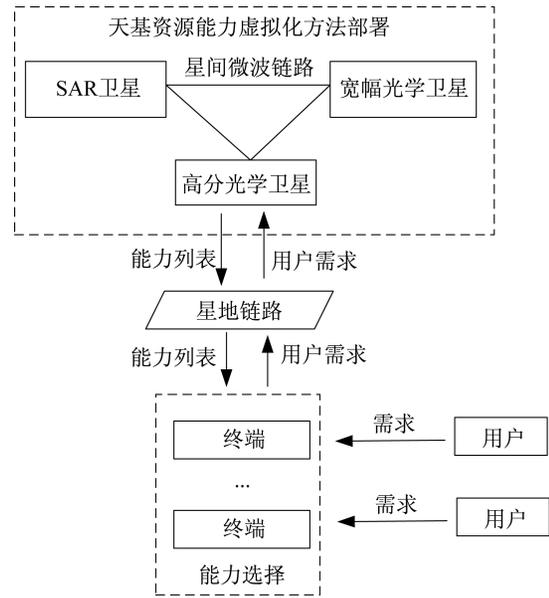


图 7 仿真环境架构

Fig.7 Simulation environment architecture

输时间区间计算模型,计算 3 颗星的能力列表,然后将生成的能力列表下传给用户终端供用户选择,用户终端示意图如图 8 所示。

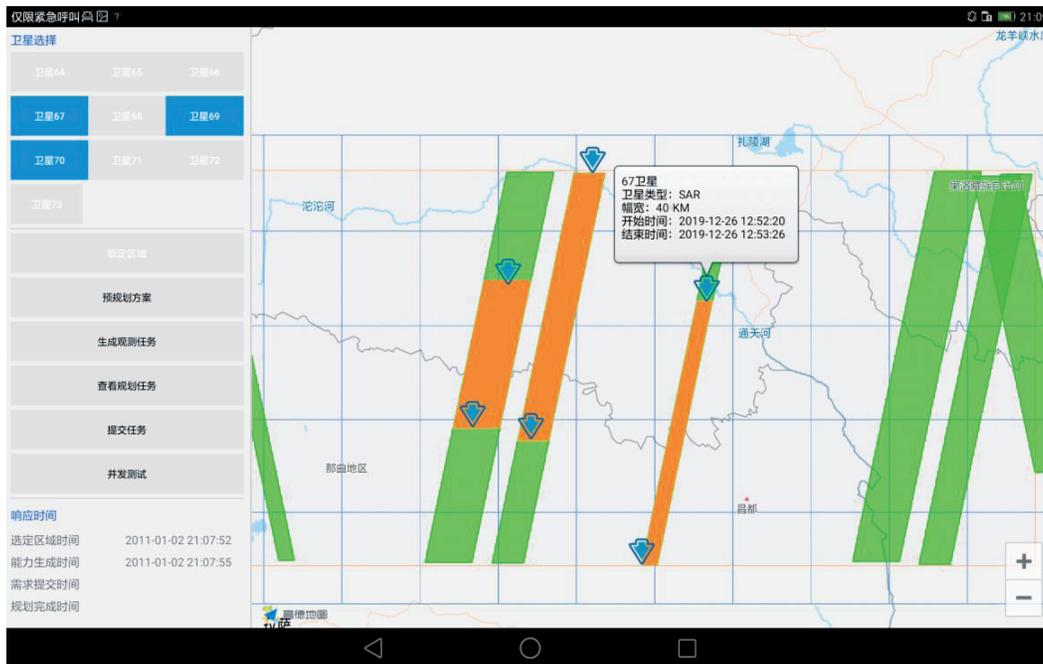


图 8 用户终端示意图

Fig.8 Schematic diagram of the user terminal

仿真测试中各个阶段所用时间及指标设计要求见表 4,资源占用情况见表 5。

由测试结果可知,在不考虑载荷、链路等故

障的前提下,天基资源能力虚拟化算法可以支持用户的即时信息服务响应,满足高时效性任务需求。

表 4 仿真测试结果

Tab.4 Simulation test results

测试流程	测试时间/s	指标要求/s
天基资源能力列表计算	8.0	≤10
天基资源能力动态更新	7.8	≤10
能力提交约束检查	6.9	≤10

表 5 资源占用情况

Tab.5 Resource occupancy

资源	占用情况
计算时 CPU 占用/%	88.6
计算时内存占用/MB	14.32
计算时存储占用/MB	92.86
待机时 CPU 占用/%	9.3
待机时 CPU 占用/MB	9.75

## 7 结束语

大规模卫星组网必将成为今后商业研究的重点与趋势,由此带来的卫星管控复杂度与工作量也大幅提升。本文针对大规模异构卫星组网协同观测中多种类天基资源统一描述问题,开展了天基资源能力虚拟化研究,构建了多层次天基资源虚拟化方法并设计了能力计算模型。该方法可以支持多用户操作,底层技术参数对用户透明,具有使用便捷、响应快速的特点。最后针对星上在轨实时虚拟化的需求,选择具体载荷实例设计了在轨天基资源虚拟化算法,开展了地面验证试验,结果表明:算法时效性可以满足星上实时计算要求。可在大规模卫星组网的场景下,如何进行高效的天基资源调度和协同管理机制,提供一定的思考和技术基础。

## 参考文献

- [1] 高振亭. 计算机实验室中服务器虚拟化技术的有效应用[J]. 电子技术与软件工程, 2018(10):143.
- [2] 陈鸣,陶小妹,胡超,等. 基于网络功能虚拟化的网络试验平台的设计与实现[J]. 计算机学报, 2018, 41(9): 2016-2028.
- [3] 王京,赵明,高镇. 卫星平台虚拟化:满足多种卫星移动通信需求的必然选择[J]. 中兴通讯技术, 2015, 21(2): 39-43.
- [4] 王睿,韩笑冬,王超,等. 天基信息网络资源调度与协同管理[J]. 通信学报, 2017, 38(增刊1):104-109.
- [5] 王元. 虚拟化技术在航天测控中心系统设计中的应用研究[C]//第八届中国卫星导航学术年会论文集:S08 测试评估技术. 2017:4.
- [6] 孙海洋,张安,高飞. 云协同中作战资源两阶段虚拟化方法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(5):1036-1042.
- [7] 柳罡,陆洲,胡金晖,等. 基于云架构的天基信息应用服务系统设计[J]. 中国电子科学研究院学报, 2018, 13(5):526-531,544.
- [8] 马天琦. 天基平台互联终端技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2018.
- [9] 王之,邓畅霖,郭薇,等. 天基信息港的多源信息融合任务调度研究[J]. 中国空间科学技术, 2018, 38(3):76-84.
- [10] 张满超,王彝. 天基资源信息服务体系构建[J]. 指挥信息系统与技术, 2017, 8(5):62-69.
- [11] 王睿,韩笑冬,王超,等. 天基信息网络资源调度与协同管理[J]. 通信学报, 2017, 38(增刊1):104-109.
- [12] 李俊. “互联网+天基信息应用”服务模式研究[C]//第四届高分辨率对地观测学术年会论文集. 2017:18.
- [13] 李德仁. 建设军民深度融合的空天信息实时服务系统[J]. 网信军民融合, 2017(2):23-27.
- [14] 李斌,刘乘源,章宇兵,等. 天基信息港及其多源信息融合应用[J]. 中国电子科学研究院学报, 2017, 12(3): 251-256.
- [15] 李德仁. 论“互联网+”天基信息服务[J]. 遥感学报, 2016, 20(5):708-715.
- [16] 李婷,胡建平,徐会忠. 天基信息网络的软件定义网络应用探析[J]. 电讯技术, 2016, 56(3):259-266.
- [17] 邓罡,龚正虎,王宏,等. 现代数据中心网络资源管理技术分析综述[J]. 通信学报, 2014, 35(2):166-181.
- [18] 沈荣骏. 我国天地一体化航天互联网构想[J]. 中国工程科学, 2006(10):19-30.
- [19] 代树武,孙辉先. 卫星的智能规划与调度[J]. 控制与决策, 2003(2):203-206.
- [20] 袁孝康. 天基综合信息网络构想[J]. 上海航天, 2001(1):12-15.
- [21] LONG J, LI C, ZHU L, et al. Satellite cloud architecture based on resource virtualization technology [C]//2018 11th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA). [S.l.]:IEEE, 2018: 125-129.
- [22] YANG C, CHAI X, ZHANG F. Research on co-simulation task scheduling based on virtualization technology under cloud simulation [C]// Asia Sim 2012. Berlin Heidelberg: Springer, 2012.
- [23] PELTON E J N, MADRY S, CAMACHOLARA S. Handbook of satellite application [C]//Handbook of satellite applications. New York: Springer, 2013.
- [24] BERTAUX L, MEDJIAH S, BERTHOUS P, et al. Software defined networking and virtualization for broadband satellite networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(3):54-60.