

# 基于 SWE 的空天资源对地观测协同任务规划服务模型\*

李 军, 李 军, 钟志农, 胡卫东, 陈 浩  
(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘 要:**空天协同对地观测是对地观测领域的新趋势。为解决现有空天资源规划调度系统相对独立、协同困难的问题,分析总结了 SWE(Sensor Web Enablement)标准,并在此基础上提出了空天资源对地观测协同任务规划服务模型。在此模型中,为实现观测资源共享,建立了空天观测资源传感器描述模型,能够描述典型空天资源的载荷平台、观测机理、定位信息、使用约束和工作特性等信息;为简化观测请求交互流程,基于 SOA 技术对 SWE 标准操作进行封装及简化,用户可以在不了解观测平台细节信息的情况下提交观测数据请求。为验证模型有效性,构建了空天资源对地观测协同任务规划实验平台,结果表明该模型具有较强的可实现性和适应性。

**关键词:**传感器网整合框架;遥感;任务规划;调度;空天协同;多智能体系统

**中图分类号:**TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)03-0108-06

## A service model based on SWE for space-aeronautics cooperation earth observing operations

LI Jun, LI Jun, ZHONG Zhinong, HU Weidong, CHEN Hao

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:**The coordinated observation technique of air and space assets has been increasing in recent years and this trend of earth observation area is expected to continue in the future. A service model for space-aeronautics cooperation earth-observing operations is proposed after analyzing the SWE (Sensor Web Enablement) standard. In this model, in order to provide a common framework for air and space assets, the sensor model language of space-aeronautics observing resources was constructed. The primary focus of this language is to define processes and processing components associated with the measurement and post-measurement transformation of observations. Through introducing the inheritance mechanism, the proposed language can provide more robust definitions of platform, measurement, location, position, constraints and other characters. Besides, to shorten the data acquisition cycle, the standard interface of SWE was encapsulated, and a common end-user can request data directly without detailed knowledge of the platforms state and capabilities. To test the performance of proposed model, some experiments were designed and the simulations and analysis display the feasibility and the adaptability of the proposed model.

**Key words:**Sensor Web Enablement (SWE); remote sensing; task planning; scheduling; space-aeronautics cooperative; multi agent systems

当前,空间对地观测已经进入多平台、多传感器、多角度发展阶段。一般认为距地球表面 100km 以上的空间为“天”,在这一区域,国内外已经发射了大量可用于地球陆表监测的遥感卫星。在距地球表面 100km 以下的空间里,以无人机、临近空间飞行器为代表的一系列新型空基观测技术也得到了快速发展,针对单一平台规划调度问题已有较多研究成果。但单一平台观测资源由于其固有限制,所能发挥的观测效能较为有限,难以满足复杂观测需求,需要多平台多类型传感器互补提升对地观测的时间分辨率、空间覆盖范围,并为地理信息数据处理和多传感器数据融合

提供支持。空天一体化协同对地观测是航空航天技术未来发展的趋势,空天平台协同观测任务规划问题已成为对地观测领域的重要课题。

传统的空间对地观测平台控制系统往往与地面应用系统架构紧密耦合,以便于优化接口设计。因此,其资源规划调度系统具有相对独立和自治的特点,完成空天协同观测任务一般需要向不同的观测平台系统提交任务请求,协调难度较大。为了克服这些不便,实现异构传感器网络的连接和传感器资源的共享,美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的 Kevin Delin 于 1999 年提出了 Sensor Web 的概

\* 收稿日期:2012-09-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61174159,61101184)

作者简介:李军(1985—),男,甘肃酒泉人,博士研究生,E-mail:lijun@nudt.edu.cn;

李军(通信作者),男,教授,博士,E-mail:junli@nudt.edu.cn

念<sup>[1]</sup>。基于此概念,开放地理空间联盟(Open Geospatial Consortium,OGC)建立了传感器网络整合框架(Sensor Web Enablement,SWE),旨在整合不同平台、不同类型的传感器观测资源,通过服务的方式实现传感器资源的注册、查找、应用及观测数据订阅和发布等功能,为构建基于网络的多平台多类型传感器网络提供一个标准的平台<sup>[2]</sup>。目前,SWE已经成为了传感器网络事实上的工业标准。为了验证并推进 Sensor Web 技术的发展,NASA 地球科学实验室资助了 35 个先进信息系统技术项目,覆盖了 Sensor Web 的各个研究方向,包括 Sensor Web 概念定义, Sensor Web 建模技术,小型化传感器技术等<sup>[3]</sup>。NASA 基于 SWE 构建了 Sensor Web 2.0 观测系统,支持包括 EO-1 在内的 3 颗卫星、1 架无人机和多个地面传感器联合观测,多类型传感器资源可即插即用,并开展了森林火灾预警、火上喷发及熔岩流动预警及洪灾预警等试验,取得了丰富成果<sup>[4]</sup>。此外,在文献<sup>[5]</sup>中还介绍了其他 18 个传感器网项目。国内武汉大学的陈能成<sup>[6-7]</sup>等在 SWE 的基础上提出了灵活的传感器观测服务模型和传感器调度服务模型,将传感器、传感器系统和数据中心抽象为虚拟传感器,然后利用灵活中间件来进行传感器调度。总体而言,已有的 SWE 研究工作侧重于两个方面:一是对不同类型的传感器进行统一建模,对传感器观测动作调度及传感器观测数据获取过程进行规范化;二是面向具体应用分析多平台传感器的协同观测流程并进行实验。而空天协同观测任务存在“过度订购”(Over Subscription)情况<sup>[8]</sup>,需要对空天传感器资源进行协同任务规划,提高任务完成度和资源利用率。SWE 的相关研究基本解决了传感器调度层面的问题,但在协同任务规划层面还需要进一步研究。

为了有效解决空天资源对地观测协同任务

规划问题,本文研究分析了 SWE 相关标准,结合空天观测资源的实际应用需求,提出了基于 SWE 的空天资源对地观测协同任务规划服务模型,并通过案例分析验证了该模型的可实现性和有效性。

### 1 SWE 信息模型和接口模型概述

OGC 的 SWE 工作组为了将各类传感器整合到地理信息网络中,制定了一系列标准来实现 Sensor Web 的规范化。SWE1.0 标准于 2006 年至 2007 年陆续发布。在 SWE1.0 的基础上,OGC 的 SWE 小组对标准进行了总结和调整,于 2011 年开始陆续发布 SWE2.0 标准。SWE 包括信息模型和功能模型两个部分(如图 1 和图 2 所示)。SWE 2.0 信息模型包括以下组件:

1) SWE 通用数据模型(SWE Common 2.0, SWE Common Data Model 2.0)<sup>[9]</sup>:其作用是建立 SWE 通用数据模型,为 SWE 其他标准(如 O&M 2.0 和 SensorML 2.0)提供统一的数据模型,降低 SWE 各项标准有关数据模型描述的冗余程度;

2) 观测与测量(O&M 2.0, Observation & Measurement 2.0)<sup>[10]</sup>:为描述传感观测和测量数据提供通用模型和 XML 编码结构,其数据结构采用 SWE Common 2.0 标准;

3) 传感器建模语言(SensorML 2.0, Sensor Model Language 2.0):为描述传感器和传感器观测处理方法提供通用模型和 XML 编码结构,第二代 SensorML 的数据模型部分被抽离出来形成 SWE Common 2.0 标准的一部分;

4) 事件模式标记语言(EML, Event Pattern Markup Language):描述复杂的事件进程;

其中 SWE Common 2.0 和 O&M 2.0 已成为正式标准,SensorML 2.0 和 EML 尚未发布为正式标准<sup>[5]</sup>。

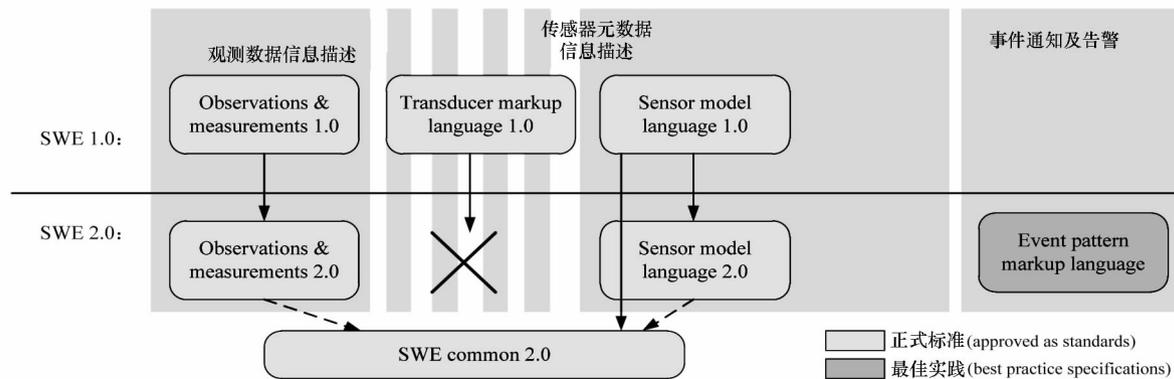


图 1 SWE 信息模型<sup>[7]</sup>

Fig. 1 SWE information model

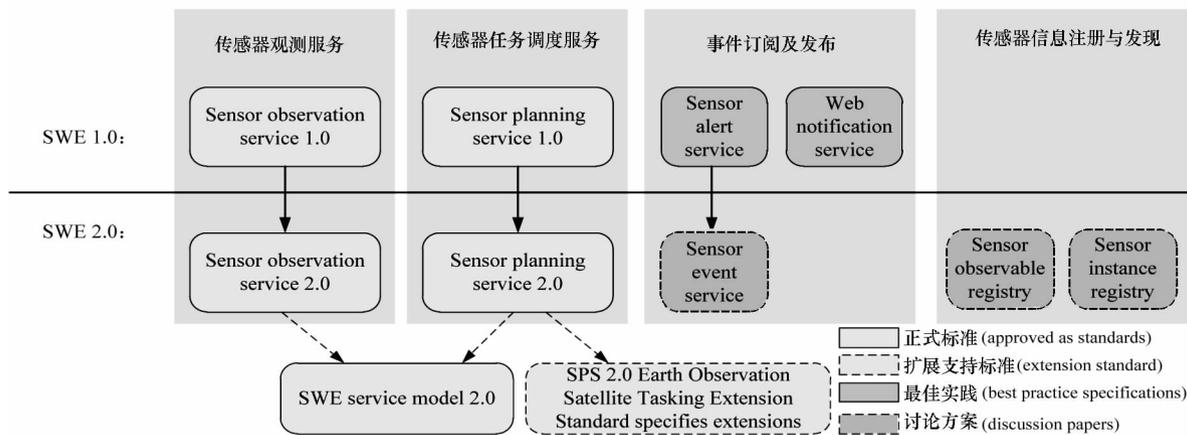
图 2 SWE 功能接口模型<sup>[7]</sup>

Fig. 2 SWE interface model

SWE 2.0 功能模型包括以下组件:

1) SWE 通用服务模型 (SWES 2.0, SWE Service Model 2.0)<sup>[11]</sup>:其作用是建立 SWE 通用服务模型,为 SWE 其他标准(如 SPS 2.0 和 SOS 2.0)提供统一的服务模型,降低 SWE 各项标准有关服务模型描述的冗余程度。SWES 2.0 引入了继承机制,其提供的通用服务包括传感器的描述、更新、插入和删除等方面;

2) 传感器调度服务 (SPS 2.0, Sensor Planning Service 2.0)<sup>[12]</sup>:其主要目的是实现传感器调度的互操作,以服务的方式向用户提供传感器基本信息、传感器观测调度方法,判定传感器观测请求的可行性,调度传感器执行任务,以及更新任务执行信息,调整、删除传感器观测任务等。第二代 SPS 的变化主要体现在两个方面:一是对传感器调度术语进行了规范,降低调度状态的二义性;二是增加了发布与订阅功能,摆脱对 WNS 的依赖。EO SPS (SPS 2.0 Earth Observation Satellite Tasking Extension Standard specifies extensions) 标准是 SPS2.0 的扩展版本,是专门针对天基对地观测传感器来制定发布的,提供了调用各类天基对地观测传感器的标准互操作方法<sup>[13]</sup>;

3) 传感器观测服务 (SOS 2.0, Sensor Observation Service 2.0):其作用与 SOS 1.0 相同,是响应用户的需求,请求、过滤和获取传感测量数据以及传感系统信息;

4) 传感器事件服务 (SES, Sensor Event Service):其作用与 SAS 相似,是根据给定的条件,判定来自传感器的数据是否构成事件,如构成则触发事件,根据相应规则安排下一步进程;

5) 传感器观测注册 (SOR, Sensor Observable Registry):其作用是为管理传感器元数据提供网

络接口,方便用户对传感器元数据、状态信息和功能信息进行管理;

6) 传感器实例注册 (SIR, Sensor Instance Registry):其作用是为获取观测现象定义及不同观测现象之间的语义信息提供网络接口;

其中 SWES 2.0、SPS 2.0 和 SOS 2.0 已成为正式标准,SES、SOR 和 SIR 尚未发布为正式标准<sup>[5]</sup>。

## 2 基于 SWE 的空天资源对地观测协同任务规划服务模型

在构建空天资源对地观测协同任务规划服务模型时,需要考虑空天平台观测载荷在运行方式、观测模式、使用约束和成像机理等方面的差异,结合现有传感器元数据、数据交换标准和传感器建模现状的基础,建立起能够描述观测资源系统、部件、参考系、处理方法、时空位置、拓扑关系的观测资源描述模型,为实现观测资源共享奠定基础。在此基础上,构建基于分布式架构的空天资源协同规划模型,以满足空天协同观测系统的松散耦合、配置灵活、具有高可扩展性和伸缩性的业务需求。使用 SWE 标准可以部分满足以上需求,但以下几个方面需要改进:

1) 传感器建模语言 (SensorML) 是一种通用的传感器资源描述模型,需要结合空天资源协同任务规划的需求对其进行细化和完善,明确任务规划所需传感器资源信息接口(包括平台运动方式、位置信息、平台使用约束、载荷观测类型、载荷使用约束等)。

2) 传感器调度服务 (SPS) 的交互过程较为繁琐,包括查询获取空天资源信息、访问计算或可达性计算、挑选观测资源、提交任务请求、确认任务

信息等步骤。当观测任务较为复杂,空天资源数量较多时,在候选传感器资源中挑选合适的观测资源将成为一项艰巨的任务。因此,需要简化用户与传感器控制系统的交互流程,并提供观测资源访问计算等服务。

3) 在标准的传感器调度服务过程中,用户需自行判断传感器观测行为能否满足观测需求,而且提交观测请求时需严格遵循该传感器所要求的任务请求格式,这就要求用户了解传感器的细节

信息并熟悉 SWE 的相关标准,使用门槛较高。

4) 传感器调度服务 (SPS) 的作用是响应用户的需求,对用户提交的传感数据请求进行可行性判定,其本身并没有优化功能,难以同时规划处理多个传感器进行协同观测。

基于以上分析,我们采用面向服务模式对 SWE 标准服务进行封装,提出了一种空天资源对地观测协同任务规划服务模型(如图 3 所示),整个规划模型可划分为以下四层。

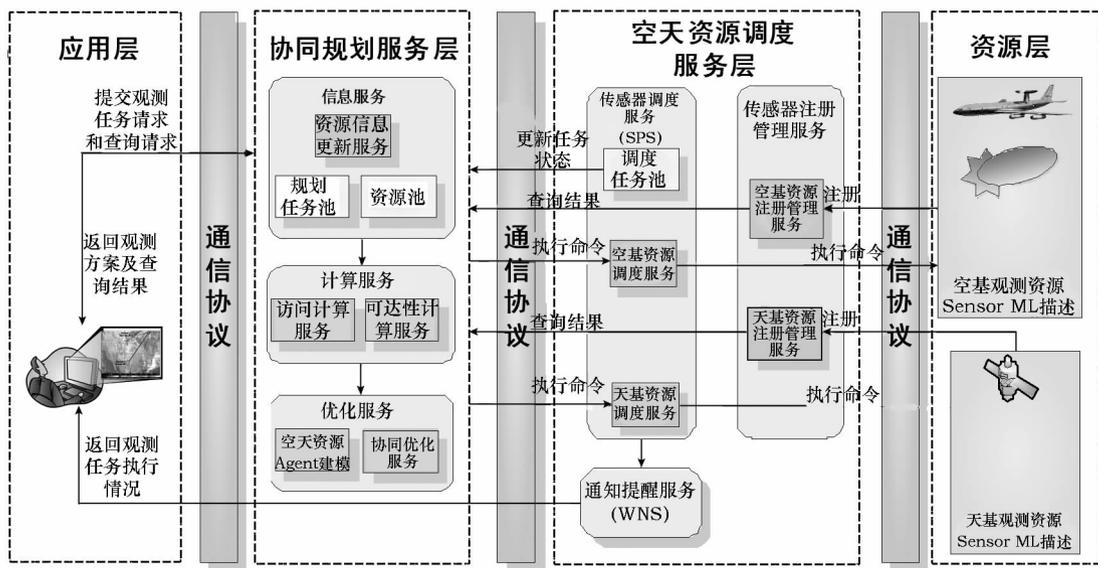


图 3 基于 SWE 的空天资源对地观测协同任务规划服务模型

Fig. 3 A architecture based on SWE for space-aeronautics cooperation earth observing operations

### 2.1 资源层

包括各类空基观测资源节点和天基观测资源节点。我们在参考现有标准的基础上,分析了典型遥感卫星、机载观测平台、观测资源的载荷平台、观测机理、定位信息、使用约束和工作特性,结合空天

资源协同任务规划的信息需求,采用层次化继承描述机制建立了空天观测资源传感器描述模型(如图 4 所示),降低空天观测资源及观测数据描述的重复杂余工作。空天观测资源传感器描述模型符合 SensorML 标准,能够通过 OGC 发布的 XSD 校验。

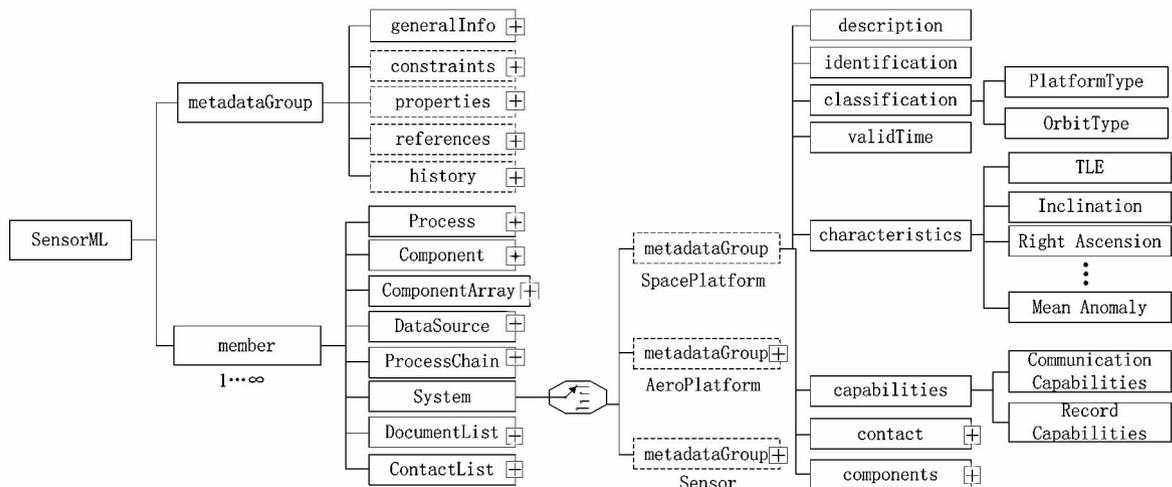


图 4 空天观测资源传感器描述模型

Fig. 4 Space-aeronautics observing resources sensor model language

### 2.2 空天资源调度服务层

包括资源节点调度服务和通知提醒服务,提供空基观测资源和天基观测资源的注册服务、查询服务等基本管理功能以及告警通知、观测数据通知等信息服务。这一层严格遵循 SWE 中的 SPS 标准和 WNS 标准,并在此基础上增加了传感器注册管理服务,采用松耦合的方式与资源层及协同规划服务层进行交互。这种设计架构是为了及时更新利用 SWE 的最新标准和研究成果,而不影响与系统其他层次的交互;此外,保留 SWE 标准操作接口可以使专业用户对传感器资源进行细粒度的操作,执行一些专业性较强的观测任务。

### 2.3 协同规划服务层

协同规划服务层是空天资源对地观测协同任务规划的核心部分,主要提供信息服务、计算服务和优化服务,其服务流程如图 5 所示,下面予以详细介绍。

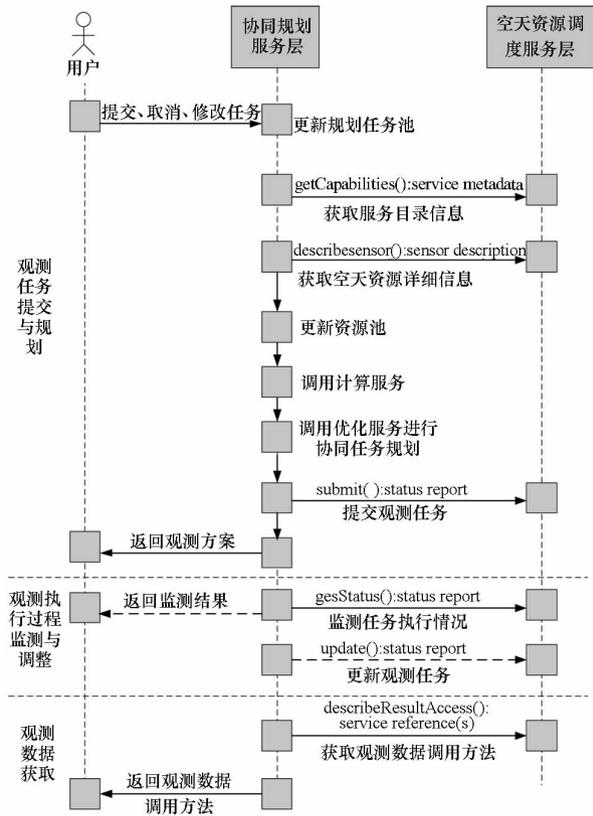


图 5 协同任务规划服务流程

Fig. 5 Coordinate task planning service process

#### (1) 信息服务

主要是提供观测任务及观测资源的即时信息。由于观测任务和观测资源都处于动态变化中,协同规划服务层内部维护一个规划任务池和一个资源池。资源池可采用周期更新方式或事件触发更新方式,更新时首先采用 SPS 标准接口

getCapabilities 发送查询请求,从空天资源调度服务层获取服务目录信息,其中会包含空天资源目录信息,然后根据资源目录逐个调用 DescribedSensor 查询命令获取各个空天观测资源的细节信息。规划任务池为空天资源协同任务规划服务提供任务信息,任务的执行状态信息可通过查询 SPS 的调度任务池来获取,主要包括未安排、已安排、未执行、已执行及执行失败等状态。此外,观测任务提交后,信息服务还提供观测任务的执行状态信息,若观测任务已执行,则调用 DescribeResultAccess 查询命令获取观测数据的调用服务方法并返回给用户,用户可通过传感器观测服务(SOS)获取观测数据。

#### (2) 计算服务

主要提供针对天基平台的访问计算服务和针对空基平台的可达性计算服务。天基平台的访问计算服务即计算资源池中的卫星对规划任务池中新增任务的访问窗口,空基平台的可达性计算服务即计算资源池中的空基资源对规划任务池中新增任务的相对距离和访问可行性。

#### (3) 优化服务

由于观测任务和资源是动态变化的,空天资源协同任务规划也应该是一个连续的、动态的过程。考虑到空天观测资源的异构性,我们采用多 Agent 方法对空天观测资源进行建模,基于纳什均衡理论进行空天资源协同任务规划<sup>[14]</sup>,即每一个空天资源 Agent 都以最大化整体观测效益为目的进行任务规划,不断迭代直至任何一个空天资源 Agent 都不能通过改变自身观测方案进一步提高整体观测方案优化性时达到纳什均衡状态,当规划任务池或资源池信息发生变化时,则在当前规划方案基础上进行进一步迭代优化。这种规划方法能够使任务与资源之间处于一种动态的优化平衡状态,提高空天资源对地观测系统的鲁棒性。

### 2.4 应用层

用户可向协同任务规划层提交任务请求,且只用提供任务的基本属性即可(例如目标经纬度、观测时间要求、观测方式、分辨率要求等),而无需通过 getCapabilities 和 DescribedSensor 等操作了解观测资源的细节信息并按照 SWE 标准提交任务请求。当然,专业用户也可以遵循 SWE 标准,通过 Web Service 的方式直接向空天资源调度服务层提交任务请求,以便于执行一些专业性较强的复杂观测任务。

## 3 实例研究

目前空天协同任务规划调度领域尚没有公认

的 Benchmark 测试问题集或公开可比较的算法运行结果。为了验证该模型的可行性及有效性,我们基于此模型搭建了空天资源对地观测协同任务规划实验平台。实验仿真了6颗卫星、10架无人机对随机生成的目标数据集进行协同观测,以任务满足度和观测目标的时间分辨率作为优化目标。卫星和无人机采用2.1节提出的空天资源传感器描述模型进行描述。卫星访问时间窗口通过STK来进行计算。

多 Agent 协同优化平台基于 JADE<sup>[15]</sup> 进行构建。其中卫星 Agent 基于遗传算法进行协同观测优化,无人机 Agent 基于粒子群算法进行协同观测优化,每个 Agent 都以最大化空天资源传感器网络整体观测效益为目标进行规划并发布规划结果,并根据其他 Agent 的观测方案调整自身的观测动作序列,不断迭代优化直至任何一个空天资源 Agent 都不能通过改变自身观测方案进一步提高整体观测方案优化性时达到纳什均衡状态,算法结束。

实验结果如表1所示,算例 PH310、PH311、PH312 分别为只利用卫星进行观测、只利用无人机观测和利用空天资源协同观测,分析对比三个算例的规划结果可知,空天资源协同观测的任务规划观测方案明显优于单一平台任务规划观测方案,表明空天平台具有观测的互补性,而本文提出的方法能够有效利用这种互补性,规划安排不同平台的资源进行协同观测;算例 PH313、PH314 是两个观测任务“过度订购”的应用场景,规划结果表明,本文提出的方法能够有效处理空天协同观测任务“过度订购”的情况。实验结果表明,本文提出的空天资源对地观测协同任务规划服务模型能够有效协同利用不同平台的观测资源进行协同观测,具有较强的可实现性。

表1 协同任务规划结果

Tab.1 Coordinate task planning result

规划 批号	目标 数量	卫星 数量	无人机 数量	安排目 标数量	观测 次数
PH310	100	6	0	82	95
PH311	100	0	10	47	86
PH312	100	6	10	97	124
PH313	150	6	10	131	183
PH314	200	6	10	165	237

## 4 结论

在研究分析 SWE 标准的基础上,面向空天资源联合对地观测的实际需求提出了空天资源对地观测协同任务规划服务模型。该模型采用 SOA

技术以松耦合的方式进行构建,在保留 SWE 标准接口的基础上进行了接口封装和功能扩展,具有较强的灵活性和可扩展性。本文基于此模型搭建了空天资源对地观测协同任务规划实验平台并进行了仿真实验。实验结果表明该模型具有较强的可实现性和实用性。

## 参考文献 (References)

- [1] Delin K, Jackson S, Some R. Sensor webs [R]. NASA tech Briefs, 1999.
- [2] Botts M, Percival G, Reed C, et al. OGCR sensor web enablement: Overview and high level architecture [C]// Proceedings of GeoSensor Networks, 2nd International Conference, Boston, MA, USA, October, 2006.
- [3] Moe K. 2008 report from the earth science technology office (ESTO) advanced information systems technology (AIST) sensor web technology meeting [R]. NASA Technical Report, 2008.
- [4] Mandl D, Cappelaere P, Frye S, et al. Sensor Web 2.0: Connecting Earth's Sensors via the Internet. [EB/OL]. Available: [http://esto.nasa.gov/conferences/estc2008/papers/Mandl\\_Daniel\\_A8P1.pdf](http://esto.nasa.gov/conferences/estc2008/papers/Mandl_Daniel_A8P1.pdf).
- [5] Bröring A, Echterhoff J, Jirka S, et al. New generation sensor web enablement [J]. Sensors, 2011, 11(3):2652-2699.
- [6] Chen Z, Chen N, Di L, et al. A flexible data and sensor planning service for virtual sensors based on web service [J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(6):1429-1439.
- [7] Chen N, Di L, Yu G, et al. Geo-Processing workflow driven wildfire hot pixel detection under sensor web environment [J]. Computer & Geosciences, 2010, 36(3):362-372.
- [8] 陈浩,李军,唐宇,等.基于动态罚函数遗传算法的电磁探测卫星多星规划方法 [J].国防科技大学学报,2009,31(2):44-50.  
CHEN Hao, LI Jun, TANG Yu, et al. An approach for electromagnetic detection satellites scheduling based on genetic algorithm with dynamic punish function [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2009, 31(2):44-50. (in Chinese)
- [9] Robin A. SWE common data model encoding standard 2.0 [R]. Open Geospatial Consortium, 2011.
- [10] Cox S. Observations and measurements—XML implementation 2.0 [R]. Open Geospatial Consortium, 2010.
- [11] Echterhoff J. SWE Service model implementation standard 2.0 [R]. Open Geospatial Consortium, 2010.
- [12] Simonis I, Echterhoff J. Sensor planning service implementation standard 2.0 [R]. Open Geospatial Consortium, 2010.
- [13] Robin A, Merigot P. Sensor planning service interface standard 2.0—earth observation satellite tasking extension 2.0 [R]. Open Geospatial Consortium, 2011.
- [14] Wang C, Li J, Jing N, et al. A distributed cooperative dynamic task planning algorithm for multiple satellites based on multi-agent hybrid learning [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(4):493-505.
- [15] Bellifemine F L, Caire G, Greenwood D. Developing multi-agent systems with JADE [M]. Hoboken: Wiley, 2007.