

SUN Zhengbo, ZHOU Xiaoguang, YI Yujiang. Payload Application and Resource Management for GEO Satellite-based Electromagnetic Spectrum Monitoring (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(6): 1607–1616. CSTR:32142.14.cjss.2024-0096. DOI:10.11728/cjss2025.06.2024-0096

高轨电磁频谱监测载荷应用及资源管控

孙正波 周晓光 义余江

(西南电子电信技术研究所 成都 610041)

摘要 电磁频谱监测是对电磁频谱这种重要战略资源进行分配、应用和管理的关键环节,是政府无线电管理部门的一项重要任务。电磁频谱监测的手段较多,但多以地基为主,存在较大的局限性。基于天基平台的电磁频谱监测系统 (Electromagnetic Spectrum Monitoring Systems) 是广域电磁频谱监测的有效途径和研究热点,相关产业随着航天、电子和信息等技术的发展逐渐规模化。与低轨电磁频谱监测相比,高轨电磁频谱监测具有任务响应速度快、数据接收处理时效性高、可全天时全天候连续监测等优点。与高轨电磁频谱监测相关的公开报道很少。本文从高轨电磁频谱监测的体制特点出发,对载荷资源应用模式、载荷资源管控技术、应用系统等进行研究和针对性设计,并提出需要进一步攻研的关键技术,以期对该类卫星的设计和应用有一定指导意义。

关键词 电磁频谱监测, 高轨卫星, 载荷应用模式, 载荷资源管控, 任务规划

中图分类号 V44, V474

Payload Application and Resource Management for GEO Satellite-based Electromagnetic Spectrum Monitoring

SUN Zhengbo ZHOU Xiaoguang YI Yujiang

(Southwest Electronics and Telecommunication Technology Research Institute, Chengdu 610041)

Abstract The electromagnetic spectrum is a vital strategic resource. Electromagnetic spectrum monitoring is a crucial aspect of the allocation, utilization, and management of this resource, serving as a key responsibility of government radio regulatory authorities. Although multiple methods are employed for electromagnetic spectrum monitoring, the predominant reliance on ground-based systems introduces significant limitations. The satellite-based Electromagnetic Spectrum Monitoring (ESM) systems is an effective approach and a research hotspot for wide area surveillance. The satellite-based electromagnetic spectrum monitoring industry has gradually scaled up with the development of aerospace, electronic, and information technologies. Compared to Low Earth Orbiting (LEO) ESM, Geostationary Earth Orbiting (GEO) ESM has the advantages of fast task response speed, high timeliness of data reception and processing, and ability for long-time continuous surveillance. There is scarce public reporting on GEO satellite-based ESM. Starting from the features of GEO satellite-based ESM, in this paper, operation modes

2024-07-30 收到原稿, 2024-12-23 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

of payload resources, payload resource management and control technology, and application systems are studied. Besides, some key technologies deserving deep research are briefly described. It is hoped that this paper will provide some guidance for the design and application of such satellites.

Key words Spectrum monitoring, GEO satellite, Payload application mode, Payload resource management, Mission planning

0 引言

随着电子信息技术的进步,电磁频谱的应用越来越广泛,在国防、经济、教育等领域发挥着越来越重要的作用,同时其稀缺性、资源应用与资源受限之间的矛盾也越来越突出^[1].与所有稀缺资源一样,电磁频谱的使用不可随意为之,必须遵守国家相关法律法规,在各级无线电管理部门指导下有序进行.广域高效准确的电磁频谱监测是科学合理有效实行电磁频谱管理和规划的前提,及时发现异常信号并确定位置意义重大.

电磁频谱监测的主要任务是接收空域电磁信号,进行快速测量分析,掌握空间电磁态势,及时发现干扰信号或非法用频信号并对辐射源进行定位.长期以来,电磁频谱监测主要依赖地基装备进行.地基装备覆盖地域小,通常只能实现视距范围监测,在10~100 km量级的监测区域内、提供5~10 km (C.E.P)的辐射源定位精度,导致在实际工作中需要付出大量的人力和时间详细排查,效率低下^[2].

随着航天产业的迅猛发展,通信、导航、遥感、气象、侦察等各种卫星纷纷涌现.天基平台因其能突破国界和地理障碍,有效覆盖传统地基装备难以监测的偏远地区,具备良好的时效性和宽广的覆盖性而备受关注.基于天基平台的电磁频谱监测应运而生^[3,4].而通信、导航等卫星面临的有意或无意干扰日趋严重,干扰信号的监测定位也有必要依托天基平台开展^[5].

天基电磁频谱监测最开始用于军事领域.自20世纪60年代至今,美、俄等国发展了多种类型卫星,配置信号接收载荷,收集了大量信号数据.2015年以来,随着火箭发射成本的降低和卫星制造能力的提升,商业小卫星迅速发展,并开始为民用电频谱监测领域发挥重要作用,其中典型的有美国Hawkeye 360、卢森堡Kleos Space、法国Unseenlabs等系

统^[6,7].近年来,微纳卫星由于集成度高、费效比低、研制周期短,以及可通过一箭多星或搭载发射入轨等优点,引起了军民商各行业广泛关注^[2].

Hawkeye 360, Kleos Space, Unseenlabs等系统全部采用低轨运行.相比中高轨,低轨监测系统距离地表更近,接收信号功率更强,更便于信号检测识别,但是同时也存在过境时间窗口有限,难以实现区域连续监测的缺点.增加卫星数量,虽可缩短重访周期,提升区域监测时长,成本也随之大幅提升.对各级无线电管理部门来说,频谱监测需要重点关注的是我主权范围内的区域,而对固定区域进行连续监测正是高轨卫星的优势.

美国最早开展了高轨卫星信号监测,主要用于军事领域*,其可以有效地对直径3000 km以上区域实现信号监视.在民用领域,目前尚无基于高轨天基平台的电磁频谱监测报道,推测其主要原因是高轨卫星制造和发射成本较高.飞速发展的无线业务让航天器面临的电磁环境越来越复杂,为避免在自身工作频段内受到各种有意或无意的干扰,通信、导航等卫星逐渐加装干扰信号监视定位设备,这也是一类基于高轨平台的电磁频谱监测.

本文针对基于高轨平台的电磁频谱监测,重点分析研究体制特点、载荷资源应用模式、载荷资源管控技术、地面应用系统设计等几个方面,并特别提出面向复杂监测任务载荷的集散式拆分合并规划流程.本文的研究内容和相关成果,既适用于专用电磁频谱监测卫星,也适用于通信、导航等卫星搭载的电磁频谱监测载荷.

1 体制特点

由于位于同步或准同步轨道,与通常采用的中低轨道卫星相比,高轨卫星开展电磁频谱监测具备以下

* US reconnaissance satellites: <http://en.wikipedia.org/wiki/>. Military Spacecraft – USA: http://space.skyrocket.de/doc_sdat/. Jonathan's Space Report News: <http://spaceref.com/>

特点.

(1) 卫星具备对关注地区电磁频谱进行全天时、全天候连续监测能力, 但不能全球监视.

(2) 由于卫星对固定区域一直可见, 具备实时响应能力, 频谱监测任务上注和监测数据下传都不受时间窗口限制.

(3) 连续监测和实时响应使得使用方式多样, 地面应用系统需具备任务实时规划和动态调整能力.

(4) 连续监视意味着数据连续下传, 地面应用系统需具备数据自动化处理能力.

(5) 信号传输的方向性导致信号接收受限, 卫星只能接收朝向自身的主瓣信号或较强的旁瓣信号, 且由于链路传输损耗大使信号变得微弱; 接收天线波束越宽, 则接收信号的混叠越严重, 信号处理难度越大.

(6) 距离地面太远, 依靠单星天线阵的定位精度难以提升, 需要采用其他方式解决干扰信号定位能力.

需要特别指出的是, 卫星对地球表面辐射源信号的有效接收, 不仅依赖于天线方向图对地覆盖, 更主要是依靠辐射源天线方向图对卫星覆盖, 形象地说, 只有双穿屏时才能实现信号接收. 如图 1 所示, 对于某个特定发射站, 只有阴影所示的波束交叠部分才能正常接收到信号. 一般情况下, 低频段信号辐射方向图较宽, 更容易被接收, 而中高频段信号比较难以满足双穿屏条件.

2 载荷资源应用模式

根据监测对象情况, 高轨电磁频谱监测卫星载荷应该至少具备以下三项功能: 星载信号接收, 频段范围一般为 VHF 至 SHF, 由不同天线和接收机完成,

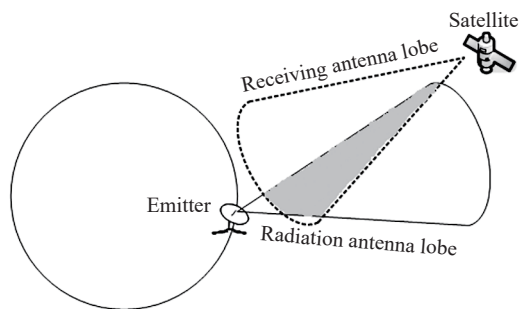


图 1 电磁频谱监测卫星信号接收

Fig. 1 Satellite-based signal reception for electromagnetic spectrum monitoring

可实现 10 W 信号的有效监测; 星载信号处理, 实现数据采集、信号检测和常规信号解调等功能; 星地高速数传, 将卫星监测载荷获取的数据及时可靠传输至地面.

2.1 单星应用模式

单星应用是高轨电磁频谱监测卫星载荷的主要使用方式, 主要涉及两个方面: 一是对区域内信号进行扫描检测识别, 掌握信号频率、带宽、调制方式、编码方式等基本特征, 形成信号态势; 二是对干扰信号或非法信号进行定位, 掌握辐射源精确位置, 为执法部门采取行动提供支撑.

对于高轨卫星而言, 由于其相对静止的特性和较远的探测距离, 利用星载天线阵进行测向定位是目前比较有效的单星定位方式, 但精度较低. 对于 0.5° 的测角精度, 500 km 的低轨卫星定位精度可达 20 km, 而高轨卫星定位精度仅为 500 km^[8]. 通过多次定位可以提高高轨卫星定位精度. 文献 [8] 仿真了倾角为 20° 的准静止轨道卫星多次定位情况, 其精度可提升至 60 km 左右. 但在实际工程应用中, 利用某静止轨道卫星数据, 多次定位之后精度仅能达 300 km 左右.

利用多站时差/频差定位体制, 将高轨电磁频谱监测载荷作为一个站, 与另外的高轨/低轨监测载荷、透明转发通信卫星或地面监测站组合, 可形成高轨多星、高低轨、星地等不同协同定位体制 (见 图 2 和 图 3), 大幅提高辐射源定位精度^[8-11].

2.2 多星协同应用模式

随着电磁频谱监测卫星资源的不断丰富和发展, 不同轨道卫星资源配合使用成为一种可行的方式, 这也是发挥不同体制卫星效能优势的必由之路. 目前主要有以下两类.

一是高低轨协同应用, 这种方法可以同时发挥高轨卫星持续监视控收、任务实效性高和低轨卫星定位能力强、瞬时监测波束相对较宽的优势, 共同实现对特定区域或者信号的最优监测效果. 根据协同应用任务的发起方不同可以将其分为高轨引导低轨、低轨引导高轨、高低轨协同定位等三种情况. 通常高低轨协同监测定位的精度可达 km 量级, 其主要采用时差/频差体制, 三星及以上的协同定位通常采用时差体制. 为解决卫星之间时频同步问题, 需要利用参考信号进行校正.

二是高轨多星协同应用, 主要分为两种. 一种是

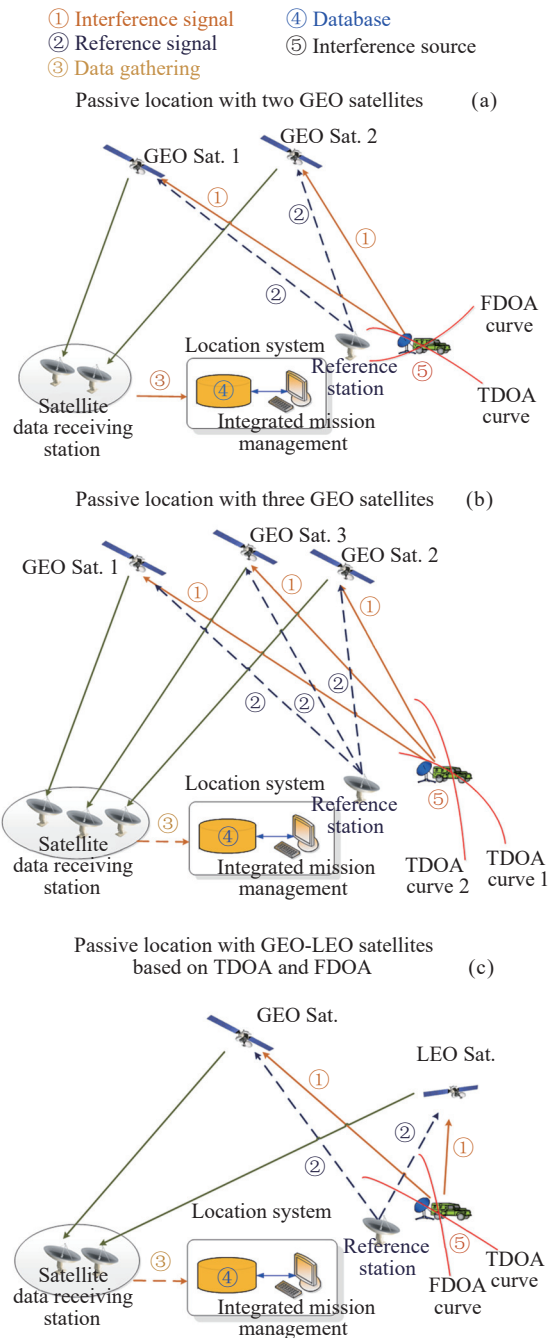


图2 多星协同定位原理

Fig. 2 Principle of multi-satellite collaborative location

将不同高轨电磁频谱监测卫星获得的数据进行融合,生成范围更大、要素更齐全、特征更准确的区域频谱数据。另一种是为弥补高轨卫星测向定位能力的不足,对具备共视区域的两颗及以上的高轨卫星进行组合,通过同步双星或三星信号定位技术,将干扰源的

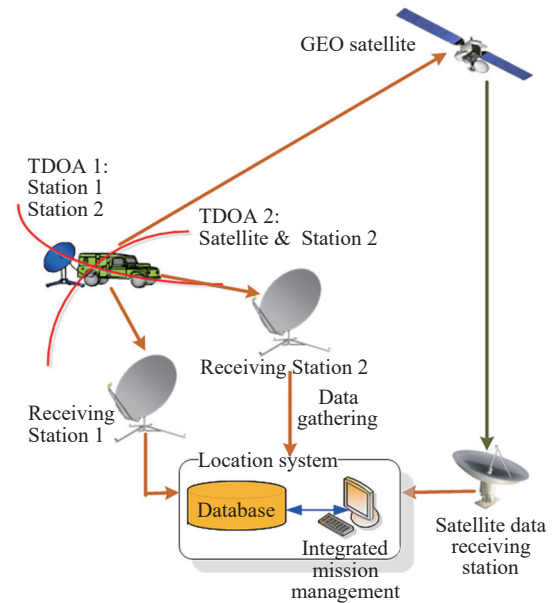


图3 星地联合时差定位原理

Fig. 3 Principle of satellite-ground collaborative location based on TDOA

定位精度提高到 30 km 以内. 对多星协同定位来说,利用参考信号进行误差校正也是必要的.

2.3 星地协同应用模式

本质上天基电磁频谱监测是一种监测平台的扩展,相当于把地基监测平台搬移到了天上. 由于平台的特殊性,天基电磁频谱监测具有其他平台不可替代的特殊作用. 因此,高轨天基电磁频谱监测卫星在应用中可以与传统地基平台结合,产生星地协同应用效益,其核心在于发挥高轨卫星的连续监测优势,改善其定位能力的不足. 星地协同监测的主要方式是利用双方监测结果互相引导开展重点信号监测,特别是利用高轨卫星接收的信号和地面接收的信号进行相关处理,开展信号关联、信号协同定位(见图3)、多源信息融合等.

3 载荷资源管控技术

3.1 需求统筹与载荷任务生成

天基电磁频谱监测载荷的任务必须明确到执行起止时间、工作频率、带宽、增益控制方式、采样率、数据抽取率、量化深度等详细参数,不同参数间常存在关联性. 对许多操作人员来说,具体设置这些参数存在一定困难,需要资源管控系统根据载荷使用约

束, 将用户简单粗略的监测需求统筹转化为参数完整合理的订单式任务^[12].

需求统筹与任务生成主要分为需求提报、可见性分析、资源可用性分析、模式匹配性分析、监测任务生成、任务比较与选择六步, 如图 4 所示. 其中关键步骤是模式匹配性分析, 核心是载荷工作模型、监测信号模型以及载荷信号间映射关系的构建. 为充分满足用户应用习惯, 有必要对大量历史监测任务和对应监测结果进行智能关联学习, 获得不同场景下的监测策略和任务优化配置等有价值的先验知识. 将这些先验知识固化成模板纳入模式匹配性分析环节, 能为任务快速准确生成提供有力支撑. 经向量化处理后, 任务和模板之间的相似性度量可以使用基于余弦的相似度、基于条件概率的相似度等方法进行计算. 在实际工程中, 考虑到用户通常只能使用本单位内部历史数据和信息, 更适合采用余弦相似性度量, 即

$$\cos(i, j) = \frac{\sum_{u \in U} R_{u,i} \cdot R_{u,j}}{\sum_{u \in U} R_{u,i}^2 \sum_{u \in U} R_{u,j}^2}.$$

其中, U 表示同时对任务 i 和 j 进行标记的信号集合, 通常包括归一化处理后的频率、带宽、调制方式、多址方式、编码方式、效益等, $R_{u,i}$ 或 $R_{u,j}$ 即为第 i 或 j 个任务针对第 u 个指标的取值. 每个任务都可以生成一个向量, 将所有任务对应向量组成一个“信号-任务”矩阵, 则任务 i 与 j 之间的相似度定义即为“信号-任务”矩阵第 i 列向量与第 j 列向量的余弦值.

3.2 载荷任务规划

3.2.1 任务规划模式

根据高轨电磁频谱监测卫星体制特点及用户具

体应用需求, 卫星任务规划需具备常规定时规划和快速响应规划两种模式. 其中常规定时模式为在用户设定的时间进行任务规划和遥控指令数据上注, 一般一次需要规划和上注的任务数量较多 (上限由载荷任务管理能力确定); 快速响应模式则在有紧急需求时, 临时进行已规划任务的调整和新任务的插入. 从时效性上看, 快速响应流程任务要求比较紧急, 要求进行及时的任务处理和响应, 因此必须在任务到达时进行实时编排和任务控制.

3.2.2 面向任务集散式拆分合并的规划

可将高轨天基电磁频谱监测载荷任务规划看作一个约束满足问题 (Constraint Satisfaction Problem, CSP), 在求解时利用约束传播方法 (constraint propagation) 进行推理可有效缩小可行解搜索空间^[13-16]. 约束规划的建模与求解可以分离, 针对同一描述模型可以采用各种不同类型的算法求解^[17].

与低轨电磁频谱监测卫星相比, 高轨电磁频谱监测卫星资源具有很强的连续性, 可执行长达数天的连续监测. 然而, 由于用户众多、需求多样、数传资源通道带宽有限, 必然导致多数监测任务的资源需求冲突严重. 通过对监测任务时间窗口进行动态拆分和组合优化, 解决任务时间冲突和资源紧张问题, 是提高任务编排成功率和载荷资源利用率的必要手段. 一定程度上可以认为, 任务规划的动态性是高轨资源管控与低轨资源管控最大的不同, 也是其难点之一.

星载电磁频谱监测载荷通常会让同一个监测任务一次性完成多种功能, 例如采样、FFT、参测、解调等. 为充分利用卫星监测资源, 有必要对监测参数相同或相近的任务进行整合, 将不同用户的监测需求整

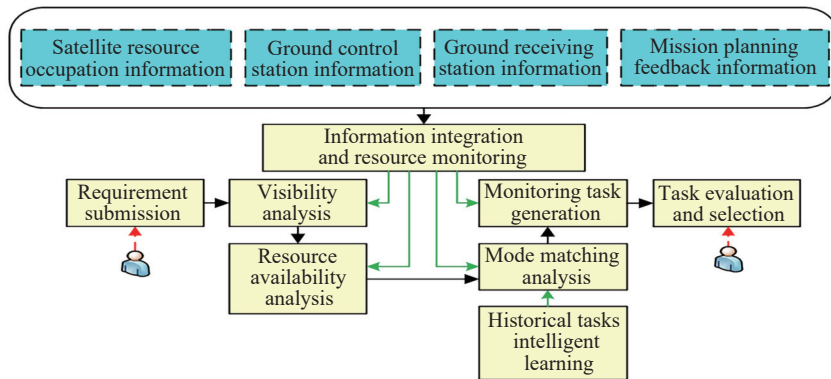


图 4 需求统筹与任务生成流程

Fig. 4 Process of requirements analysis and tasks generation

合进一个任务里面完成. 实现这种整合的主要步骤是离散式拆分 (Discretized Splitting) 与集聚式合并 (Aggregative Uniting), 如图 5 所示. 拆分方式主要有两种, 一种是将执行时间较长、模式组合较复杂的任务拆分为时间较短、模式组合较简单的任务, 给合并创造更大的空间, 是合并的重要举措; 另一种是把长时任务裁剪为一个或多个短时任务, 并将其插入载荷空闲通道, 插入任务的时长与空闲通道时长一致. 对应这两种拆分方式, 规划流程也有两种.

第一种是任务时域和功能域一次性完全拆分的规划, 主要步骤如下.

步骤 1 设待规划任务集为 $\{\text{Task}\}$, 对所有任务

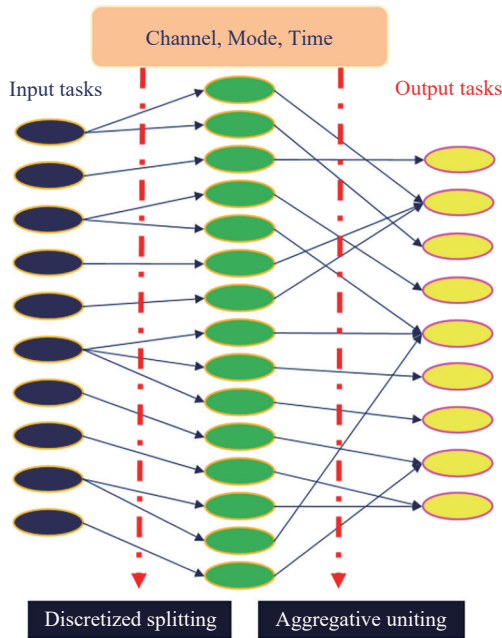


图 5 任务动态集散式拆分合并

Fig. 5 Dynamic splitting and uniting for task scheduling

进行拆分, 形成子任务全集 $\{\text{splitTask}\}$, 每个子任务时长为最小有效监测时长 (任何载荷都存在一个时长 $t_{\min}$, 小于 $t_{\min}$ 时采集的数据无意义), 参数配置为载荷最简工作方式.

步骤 2 利用遗传演化和启发式搜索等方法, 针对任务集 $\{\text{splitTask}\}$, 求解获得满足载荷使用约束条件、效益目标函数最大的预执行任务集 $\{\text{prePlan}\}$.

步骤 3 对预执行任务集 $\{\text{prePlan}\}$ 进行合并, 并利用步骤 2 的方法进行约束检测, 若有不满足约束的情况, 则根据任务影响域进行回退迭代调整, 形成最终的可执行任务集 $\{\text{Plan}\}$.

第二种是任务功能域一次性拆分、时域适应性拆分的规划, 主要步骤如下.

步骤 1 设待规划任务集为 $\{\text{Task}\}$, 对所有任务进行拆分, 形成子任务全集 $\{\text{splitTask}\}$, 每个子任务时长不变, 但参数配置为载荷最简工作方式.

步骤 2 利用遗传演化和启发式搜索等方法, 针对任务集 $\{\text{splitTask}\}$, 求解获得满足载荷使用约束条件、效益目标函数最大的预执行任务集 $\{\text{prePlan}\}$.

步骤 3 对任务集 $\{\text{splitTask}\}$ 中未规划成功的任务子集 (即 $\{\text{splitTask}\} - \{\text{prePlan}\}$), 按效益优先的原则选择任务拆分后插入到载荷空闲通道内, 插入成功的拆分子任务加入预执行任务集 $\{\text{prePlan}\}$ 中.

步骤 4 对预执行任务集 $\{\text{prePlan}\}$ 进行合并, 并利用步骤 2 的方法进行约束检测, 若有不满足约束的情况, 则根据任务影响域进行回退迭代调整, 形成最终的可执行任务集 $\{\text{Plan}\}$.

针对表 1 所列三种不同应用场景, 两种规划流程各有优劣, 需根据工程实际条件和需求进行选择. 下面以一种简单情况为例进行说明. 假设用户 A 和 B 分别提交了任务集 $\{\text{Task}_{A,i}\}$ 、 $\{\text{Task}_{B,i}\}$ ($i \in \{1, 2\}$), 每个任务都可拆分成 2 个子任务且每个子任务占用

表 1 两种规划流程的比较

Table 1 Comparison of two scheduling procedures

场景	特性	流程一	流程二
场景一	任务一次可完成的功能组合多, 同时拆分后子任务差异性小, 可合并性强, 待规划任务数量大	优化效果更好 时效性差	优化效果其次 时效性好
场景二	任务一次可完成的功能组合少, 同时拆分后子任务差异性大, 任务可合并性弱	优化效果相当 时效性差	时效性好
场景三	任务在功能上不能合并, 待规划任务数量大	优化效果相当 时效性很差	时效性很好

数传资源相同, 记为

$$\begin{aligned} \text{Task}_{A,1} &= \text{splitTask}_{A,1,1} + \text{splitTask}_{A,1,2}, \\ \text{Task}_{A,2} &= \text{splitTask}_{A,2,1} + \text{splitTask}_{A,2,2}, \\ \text{Task}_{B,1} &= \text{splitTask}_{B,1,1} + \text{splitTask}_{B,1,2}, \\ \text{Task}_{B,2} &= \text{splitTask}_{B,2,1} + \text{splitTask}_{B,2,2}. \end{aligned}$$

假设 $\text{splitTask}_{A,1,1}$ 与 $\text{splitTask}_{B,2,2}$ 、 $\text{splitTask}_{A,2,2}$ 与 $\text{splitTask}_{B,1,1}$ 、 $\text{splitTask}_{A,1,2}$ 与 $\text{splitTask}_{B,2,1}$ 三对子任务功能重合, 则四个任务可重组为三个, 即

$$\begin{aligned} \text{Task}_1 &= \boxed{\text{splitTask}_{A,1,1}} + \boxed{\text{splitTask}_{A,1,2}}, \\ \text{Task}_2 &= \text{splitTask}_{A,2,1} + \boxed{\text{splitTask}_{A,2,2}}, \\ \text{Task}_3 &= \text{splitTask}_{B,1,2}. \end{aligned}$$

其中加框的子任务同时满足用户 A 和 B 的需求。可见, 在不影响用户需求满足的情况下, 上述拆分合并可将任务数量减少 25%, 为执行更多的监测任务留出空间; 考虑到数传因素, 由于 Task_3 仅含一个子任务, 则上述拆分合并可使数传资源的占用减少 37.5%, 意味着可以在有限的数传资源下执行更多更复杂的任务。这是场景一所对应的情况。但是如果子任务可合并性太弱甚至不可合并, 那么上述拆分合并的优化效果就会大打折扣, 这就是场景二和场景三所对应的情况。

4 应用系统设计

4.1 系统组成与工作原理

为充分发挥高轨天基平台全天时全天候连续监测和实时星地配合工作的优势, 挖掘载荷资源潜力, 高效发挥特色效能, 应着重发展地面应用系统, 其关键技术体现在两个方面: 一是高效的载荷资源管控技术, 通过星地一体动态任务规划, 完成不同监测资源的优化调度, 卫星测控指令通过地面上注星务计算机后, 卫星能安全可靠执行; 二是流畅的载荷数据流处理技术, 基于全流程自动序贯架构进行卫星数传数据接收解调、载荷源包数据解帧、监测信号检测识别、混叠信号分离、信号特征提取、干扰源定位等, 将卫星载荷获得的原始数据快速处理成不同类型不同级别的信息, 并及时提供用户应用。

在功能上可将应用系统设计为应用管理与运行控制、数据接收处理、数据管理与服务、数据应用分析、基础资源支撑五部分。

(1) 应用管理与运行控制。主要接收汇总用户监测需求, 结合卫星和载荷使用约束条件, 统筹规划后

生成卫星载荷工作计划并通过地面站上注卫星执行; 实现用户权限控制、资源管理、统计分析等工作, 完成卫星运行状态、地面设备状态、任务执行状态监视。

(2) 数据接收处理。实时接收卫星下传数据, 完成信号变频放大、解调解帧、任务关联、信号检测、频谱生成、盲信号分离、信号特征参数提取等。卫星监测数据的接收可通过共用测控天线完成。

(3) 数据管理与服务。按标准对各环节数据进行编目整理和标注, 存入文件系统和数据库, 并面向各类用户提供共享分发服务。基于分布式存储、云平台和大数据平台的数据管理与服务, 是开展以数据为中心的智能处理的重要依托。

(4) 数据应用分析。主要完成频谱监测需求提报、各级数据接收、综合信息展示, 并结合自身业务开展特定信号分析处理、干扰源定位、数据融合与挖掘分析等工作, 是为行政执法提供非法用频谱信息的重要支撑。

(5) 基础资源支撑。提供计算、存储、网络、操作系统等支撑系统稳定运行的基础性环境。

理论上, 电磁频谱监测载荷可以完成从信号接收、采集、检测、测量到辐射源定位等一系列工作, 仅需将数据量较小的处理结果传至地面。但在实际工程实践中, 受空间复杂环境、器件水平和技术能力限制, 载荷设计不宜过于复杂, 或者说不宜令其承担较多的处理任务^[15]。大量的数据处理工作需要由应用系统完成。对高轨电磁频谱监测来说, 测控不受时间窗口限制、全天时全天候数据接收等体制特点更需要应用系统具备高时效任务响应能力和高时效数据处理能力。

高轨天基电磁频谱监测应用系统与低轨天基电磁频谱监测应用系统可采用相同的体系架构, 在数据分析处理方面也存在许多相同的技术^[18], 但差异也较明显, 如表 2 所示。

4.2 场景仿真

对监测载荷资源管控和任务规划场景进行仿真。仿真实验在配置为联想 SR650、Intel Xeon Gold 6130 CPU、6×32 GB 内存、Windows 10 操作系统的台式电脑上进行, 编码采用 C[#]。采用相对随机的方式生成任务规划所需的监测任务和时间窗口, 任务在设定区域内呈均匀分布, 规划周期为一天, 单个任务持续探测时间在区间 [60 s, 600 s] 内随机生成, 接收站设为 1 个, 卫星的初始轨道根数如表 3 所示。

图 6 给出了低轨与高轨天基电磁频谱监测卫星待监测任务的地理空间分布情况. 图 7 和图 8 表示 8 颗低轨和 1 颗高轨卫星对相同目标区域内 100 个任务规划 10 次的结果. 图 7 表示高轨和低轨卫星规划所占的平均收益, 图 8 表示任务规划完成率. 可以看出对于区域性电磁频谱监测, 由于高轨卫星覆盖范围更广, 可完成的任务更多, 且在处理时效性要求高的任务时更有优势. 而由于受限于接收站数量、运行轨道高度以及地影和阳照的约束影响, 低轨卫星在区域电磁频谱监测上的表现不如高轨卫星.

5 结语

基于高轨天基平台的电磁频谱监测, 在实时任务

表 2 低轨与高轨天基电磁频谱监测应用系统比较
Table 2 Comparison of LEO and GEO satellite-based ESM application systems

参量	低轨天基电磁频谱监测应用系统	高轨天基电磁频谱监测应用系统
测控站数量	为保证测控时效性, 通常需要多个	一个即可
接收站数量	为保证接收时效性和数据量, 通常需要多个	一个即可
地面站使用	卫星过境时间有限, 地面站可由不同卫星系统共用	通常由固定卫星独立占用, 一般不共用
地面站天线口径	相对较小	相对较大
任务规划时效性	要求相对较低	要求高
数据处理时效性	要求相对较低	要求高

响应、区域全天时全天候连续监测等方面具有明显优势, 如何开展有效的管理和应用将直接影响卫星载荷效能的发挥. 本文重点探讨了卫星载荷资源应用模式和管控技术, 部分成果已经应用于实际系统. 本文研究侧重于顶层流程体系, 具体的管理应用还需要大量细致的关键技术支撑.

(1) 临机任务规划. 电磁频谱监测服务于电磁频谱管理. 星地一体联动及时发现异常信号并有针对性地开展细微特征测量和位置确定意义重大. 在批量完成任务规划并上注卫星后, 需要根据突发情况对已上注任务进行及时调整, 包括插入新任务、调整监测通道或执行时间等. 算法需要保证临机规划的迅捷高效与综合效益最大化.

(2) 微弱信号处理. 同步轨道卫星与辐射源距离远, 接收到的很多是旁瓣辐射信号, 信噪比比地面监测站接收时低得多. 只有大力提升微弱信号检测、测

表 3 卫星初始轨道根数
Table 3 Orbital elements of satellites

Parameters	GEO	LEO
Semimajor axis/km	42164.9	7066.56
Eccentricity	0.0002965	0.0014698
Inclination/(°)	3.2155	97.9165
Argument of perigee/(°)	150.874	204.361
RAAN/(°)	27.9009	276.394
Mean anomaly/(°)	259.812	155.69



图 6 任务空间分布
Fig. 6 Distribution of tasks

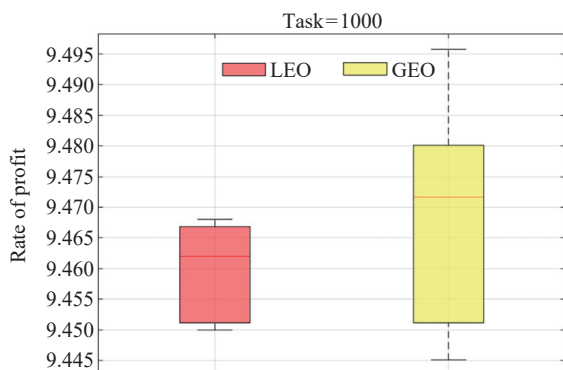


图7 任务规划收益率

Fig. 7 Rate of profit for task scheduling

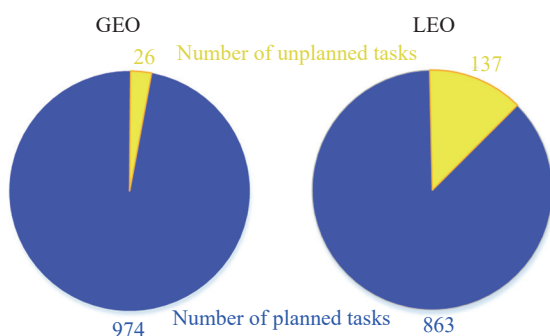


图8 任务规划完成情况

Fig. 8 Completion of task scheduling

量、识别、解调等方面能力,高轨电磁频谱监测的优势才能真正发挥出来。

(3) 混叠信号分离. 高轨卫星监测范围广, VHF、UHF 等频段瞬时覆盖可达数千公里, 同频混叠现象突出. 根据源信号在功率、载频、带宽、是否突发等方面的差异, 混叠样式很多, 一般分为非对称混叠、对称混叠、TDMA 信号混叠、周期性脉冲信号与连续信号混叠等. 针对混叠样式不同, 需采用不同的检测和分离策略。

(4) 高轨单星定位. 干扰源定位是电磁频谱监测的一项重要职能. 利用高轨多星、高低轨、星地等协同定位方式可以获得较高的定位精度, 但占用资源较多, 代价较大. 常规的高轨单星测向定位占用资源少, 但精度低, 需要在定位体制上开展创新性研究。

参考文献

[1] COTTON M, WEPMAN J, KUB J, *et al.* An overview of the NTIA/NIST spectrum monitoring pilot program [C]//*IEEE Wireless Communications and Networking Con-*

ference (WCNC)-Workshop-International Workshop on Smart Spectrum, New Orleans. 2015: 217-222

- [2] SU Hang, MA Qin, *et al.* Micro-satellite based electromagnetic spectrum detection system technologies[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2018, **6**: 6-10 (苏杭, 马琴等. 基于微纳卫星的电磁频谱监测系统技术 [J]. 航天电子对抗, 2018, **6**: 6-10)
- [3] WANG Yunfeng, DING Xiaojin, HONG Tao, *et al.* Distributed-satellite-clusters-based spectrum sensing with two-stage phase alignment. *Sensors*, 2022, **22**(11): 3983
- [4] DING Xiaojin, ZOU Yulong, ZHANG Gengxin. Deep learning for satellites based spectrum sensing systems: a low computational complexity perspective[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, **72**(1): 1366-1371
- [5] MORALES-FERRE Ruben, RICHTER Philipp, FALLETTI Emanuela, *et al.* A survey on coping with intentional interference in satellite navigation for manned and unmanned aircraft[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, **22**(1): 249-291
- [6] HAO Caiyong. Development and Trend of Satellite-based Radio Monitoring[J]. *China Radio*, 2022(12): 21-24 (郝才勇. 星载无线电监测发展现状与趋势 [J]. 中国无线电, 2022(12): 21-24)
- [7] KULAKAYEVA Aigul, AITMAGAMBETOV Altay, DAINKO Yevgeniya, *et al.* Improvement of signal reception reliability at satellite spectrum monitoring system[J]. *IEEE Access*, 2022, **10**: 101399-101407
- [8] GUO Fucheng, FAN Yun, ZHOU Yiyu. Localization Principles in Space Electronic Reconnaissance[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2012 (郭福成, 樊昀, 周一宇等. 空间电子侦察定位原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012)
- [9] HAO Caiyong, FENG Daquan, ZHANG Qinyu, *et al.* Satellite-based radio spectrum monitoring: architecture, applications, and challenges[J]. *IEEE Network*, 2021, **35**(4): 20-27
- [10] HO K C, CHAN Y T. Geolocation of a known altitude object from TDOA and FDOA measurements[J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 1997, **33**(3): 770-783
- [11] HO K C. Bias reduction for an explicit solution of source localization using TDOA[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, **60**(5): 2101-2114
- [12] CHEN Wanyu, CAI Fei, CHEN Honghui, *et al.* An intelligent information recommendation service for combat task planning[J]. *Journal of Command and Control*, 2023, **9**(2): 175-181 (陈婉玉, 蔡飞, 陈红辉等. 面向作战任务规划的信息主动推荐服务 [J]. 指挥与控制学报, 2023, **9**(2): 175-181)
- [13] TAN Yuejin, LI Jufang, XU Yifan. Military task planning and control technology[J]. *Military Operations Research and Systems Engineering*, 2010, **24**(4): 23-28,60 (谭跃进, 李菊芳, 徐一帆. 军用任务规划与管控技术 [J]. 军事运筹与系统工程, 2010, **24**(4): 23-28,60)
- [14] ZHU Jiangnan, HUANG Wei. Mission planning for electronic reconnaissance satellites oriented the insertion of the

- new missions[J]. *Fire Control & Command Control*, **36**(7): 174-177 (祝江汉, 黄维. 面向新任务插入的电子侦察卫星任务规划方法 [J]. 火力与指挥控制, **36**(7): 174-177)
- [15] LIU Gang, WANG Jianjiang, LI Zhimeng. The model of whole cycle mission planning for satellite observation[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2013, **35**(4): 62-66 (刘刚, 王建江, 李志猛. 卫星对地观测任务全周期规划模型 [J]. 国防科技大学学报, 2013, **35**(4): 62-66)
- [16] JIANG Xiao, XU Rui, ZHU Shengying. Research on task planning problems for deep space exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, **5**(3): 262-268 (姜啸, 徐瑞, 朱胜英. 基于约束可满足的深空探测任务规划方法研究 [J]. 深空探测学报, 2018, **5**(3): 262-268)
- [17] DU Yonghao. Research on the General-purpose Scheduling Engine for Satellite Task Scheduling Problems[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021 (杜永浩. 面向任务调度问题的通用化调度引擎研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2021)
- [18] XIA Rui, WANG Jingchao, DENG Boyu, *et al.* LEO Constellation-based electromagnetic monitoring intelligent processing framework and a review of key technologies[J].

Chinese Journal of Engineering, 2023, **45**(5): 807-818 (夏瑞, 王敬超, 邓博宇等. 低轨电磁频谱监测智能处理框架与关键技术综述 [J]. 工程科学学报, 2023, **45**(5): 807-818)

作者简介



孙正波 男, 1975 年出生于山东省青岛市, 博士, 现在西南电子电信技术研究所正高级工程师、重点实验室主任、博士生导师, 主要研究方向为卫星系统设计应用、信号处理与定位技术.

E-mail: szb_57@sina.com



周晓光 男, 1981 年出生于云南省昭通市, 博士, 现为西南电子电信技术研究所高级工程师, 主要研究方向为信号处理、卫星载荷应用管理、卫星地面系统设计.

E-mail: xguang.zhou@foxmail.com