

面向通导遥一体化的多目标协同星座架构的优化设计 ——针对中国全域灾害响应及城市监测

赵益晟^{1,2}, 周浩^{1,3}, 解畅飞⁴, 金谷菁⁵, 刘垚圻³, 韩银和³

(1. 国科大杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024;

2. 北京中科天算科技有限公司, 北京 100094;

3. 中国科学院计算技术研究所, 北京 100089;

4. 加利福尼亚大学尔湾分校, 加利福尼亚 尔湾 92697;

5. 南卫理公会大学, 得克萨斯 达拉斯 75205)

摘要: 针对全球气候变化背景下我国极端灾害损失加剧与现有卫星系统在应急响应中存在的三重短板, 即卫星数据回传窗口期受限、通导遥分立部署导致端到端时延增加、单一卫星失效引发高危区域响应延误, 提出“中高轨通信导航中继层+异构低轨感知层”的通导遥一体化星座架构。中高轨卫星通过Ka频段星间链路实现低轨卫星跨境数据的实时回传, 并基于星基增强系统广域差分改正数将低轨定位精度提升至厘米级; 低轨层针对中国城市群与林火高危区, 创新设计了混合倾角异构、晨昏轨道群组化和功能分层解耦3种载荷异构(可见光/红外/合成孔径雷达)的轨道协同方案, 并集成小型化导航载荷实现快速感知与精准定位的一体化。仿真实验结果表明, 晨昏轨道群组化方案在覆盖均衡性与多载荷协同性上的表现均优于混合倾角异构和功能分层解耦方案, 该星座设计方案可以为城市灾害防御提供关键技术支撑。

关键词: 星座设计; 通导遥一体化; 多轨协同; 快速重访; 载荷异构

中图分类号: V412.4

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2026003

Optimization Design of Multi-Objective Cooperative Constellation Architecture for Integrated Communication, Navigation and Remote Sensing: Targeting Disaster Response and Urban Monitoring Across China

Zhao Yisheng^{1,2}, Zhou Hao^{1,3}, Xie Changfei⁴, Jin Gujing⁵, Liu Yaoqi³, Han Yinhe³

1. Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China

2. Beijing Zhongke Tiansuan Technology Co., Ltd., Beijing 100094, China

3. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100089, China

4. University of California, Irvine, Irvine 92697, USA

5. Southern Methodist University, Dallas 75205, USA

Abstract: Addressing the exacerbated extreme disaster losses in China under the context of global climate change and the triple gaps of existing satellite systems in emergency response—limited satellite data return windows, increased end-to-end latency due to segregated deployment of communication, navigation and remote sensing, and single-satellite failures causing response delays in high-risk areas, a constellation architecture integrating communication, navigation and remote sensing is proposed, featuring a "medium-high orbit communication and navigation relay layer + heterogeneous low orbit sensing layer". The medium-high orbit satellites enable real-time cross-

收稿日期: 2025-08-18; 修回日期: 2025-11-25

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2022YFB3902802); 国家自然科学基金 (No. 62025404); 北京市自然科学基金 (No. L241013, No. L258047)

Foundation Items: National Key Research and Development Program of China (No.2022YFB3902802), The National Natural Science Foundation of China(No. 62025404), The Beijing Natural Science Foundation(No. L241013, No. L258047)

border data downlinking for low orbit satellites via Ka-band inter-satellite links and enhance low orbit satellites positioning accuracy to the centimeter level using SBAS wide-area differential corrections. For China's urban agglomerations and high-risk forest fire zones, the low orbit layer innovatively designs three types of orbit synergy schemes featuring payload heterogeneity (visible light/infrared/SAR): mixed-inclination heterogeneous architectures, dawn-dusk orbit clusters, and functionally layered disaggregation. It integrates miniaturized navigation payloads to achieve integrated rapid sensing and precise positioning. Simulation results show that the dawn-dusk orbit cluster scheme outperforms the mixed-inclination heterogeneous and functionally layered disaggregation schemes in terms of coverage uniformity and multi-payload synergy. This constellation design can provide crucial technical support for urban disaster prevention. **Keywords:** constellation design, integrated communication, navigation and remote sensing, multi-orbit synergy, rapid revisit, payload heterogeneity

0 引言

随着全球气候变化加剧,中国近年来极端自然灾害频发。2023年我国洪涝灾害造成直接经济损失超3 000亿元^[1]。在城镇化率即将突破70%的当下,城市灾害防御与安全监测面临严峻挑战^[2]。同时,现有卫星系统在应对复杂灾害等场景时存在显著短板:低轨卫星在境外不可见区获取的敏感数据(如边境火情、海洋动态),需等到国土覆盖窗口期才能进行数据下传,而窗口期时长约为10 min,这就导致应急响应的时效性难以保障;通信中继卫星^[3]与遥感卫星^[4]的分立部署,导致火点坐标信息需经多轮地面站周转,极大增大了端到端时延;当专用火情卫星^[5]因气象等因素失效时,会导致缺乏实时导航定位的救援队伍在高危区域出现长时间延误。

在此背景下,通导遥一体化星座与星座化灾害监测^[6]成为国际研究热点。当前卫星星座系统的架构设计始终围绕轨道资源利用效率与多任务协同能力两大核心展开。传统中高轨通信卫星凭借广域覆盖特性在通信中继领域具有不可替代性^[7-8],尤其在解决低轨卫星境外数据传输盲区问题上表现出显著优势:当低轨卫星飞离中国本土时,可通过Ka频段星间链路实现低轨卫星和中高轨卫星的遥感数据直传,中高轨通信卫星依靠其稳定的覆盖范围可显著增强低轨卫星的数据回传能力。在导航增强领域,以北斗星基增强系统(satellite-based augmentation system, SBAS)为代表的中高轨星座通过地基监测网实时计算轨道误差、钟差及电离层延迟参数,生成差分改正数,为低轨遥感卫星提供厘米级定位支撑^[9-10]。这种“中高轨辅助+低轨精密增强导航”的协同模式已在当前研究中得到验证^[11],但其在应急响应场景中的实践应用仍有待突破。

低轨星座的常用设计策略主要分为两类。其一为解析法结合人工优选,即利用解析模型生成星座参考码,辅以数值仿真,再通过人工筛选确定最优方案。此方法

效率较高,能较快产出符合任务要求的星座。实例包括王茂才团队^[12]通过参数初选与仿真择优设计的双层对地观测星座,以及Ulybyshev^[13]运用解析覆盖分析设计的近极轨与赤道圆轨道弱对称非均匀星座。其二则是基于优化算法的求解策略,旨在寻找轨道或星座参考码的最优解。文献^[14-17]采用遗传算法、多目标进化算法、改进粒子群算法等设计了多种任务星座。近年来,Walker- δ 构型作为Walker星座的重要子类,因其对称特性成为区域覆盖优化的主流方案^[18]。郑鹏飞等^[19]针对最小卫星数量实现低重访时间覆盖的问题,提出一种低轨Walker-链形星座及其设计方法,该方案在覆盖性和星间链路角度上均优于常规 δ 星座和共地面轨迹(repeat ground track, RGT)星座。但对于载荷异构的情况而言,解析模型通常基于特定假设(如卫星同构、轨道对称),难以统一描述异构载荷的性能差异(如不同载荷的视场角、分辨率和工作模式)。构建可同时评估多种载荷覆盖性能与协同工作能力的通用解析模型极为困难。此外,异构化显著增加了优化问题的维度。除轨道参数外,还需优化每颗卫星的载荷类型与配置、载荷间的任务分配逻辑等,这导致搜索空间呈指数级增长。

对此,面向中国全域灾害响应及城市监测需求,本文提出通过人工经验生成多个候选星座,再通过仿真筛选的方式完成载荷异构的通导遥一体化星座设计,以解决载荷异构星座设计难以求解的问题。在本文后续内容中,将介绍提出的“中高轨通信导航中继层+异构低轨感知层”的卫星星座架构:一方面强化中高轨卫星的双重功能,即通过激光星间链路^[20]构建跨境数据传输网,又利用SBAS^[21]增强机制保障低轨星座坐标精度;另一方面针对中国全域全时的灾害监测以及城市精细化治理需求,设计3种载荷异构(可见光(VIS)/红外(IR)/合成孔径雷达(SAR))、轨道协同的低轨星座方案,同时在低轨卫星上集成小型化导航增强载荷^[22],实现应急场景下快速感知与精准定位的一体化服务。

1 通导遥融合星座：中高轨卫星

在通导遥融合星座架构中，中高轨（中地球轨道（medium earth orbit, MEO）/地球静止轨道（geostationary earth orbit, GEO））卫星作为空间核心枢纽，通过多维度协同机制实现全域立体保障，其核心是利用高轨持续覆盖性和精密时空基准传递功能。MEO/GEO 卫星构建的空间骨干网通过 Ka 频段星间链路组网，可实时捕获低轨卫星在境外不可见区获取的敏感数据（如边境火情、海洋动态），从而有效突破全域感知数据的实时回传瓶颈。GEO 卫星搭载高灵敏度红外载荷（视场角±15°，空间分辨率 4 km）实施昼夜连续扫描，其凝视观测模型服从扫描覆盖方程：

$$A_{scan} = 2\pi R_e^2 (1 - \cos \alpha)$$

其中， $\alpha = \arctan\left(\frac{r_{sat}}{R_e} \tan \theta_{FOV}\right)$ ， r_{sat} 为卫星轨道半径， R_e 为地球半径， θ_{FOV} 为传感器视场角，单星即可实现东半球每小时 1 次全谱监测。

此外，卫星导航定位的原始伪距观测值 ρ_{raw} 包含四维误差源：

$$\rho_{raw} = \rho_{true} + \delta_{orb} + \delta_{clk} + \delta_{iono} + \delta_{trop} + \epsilon$$

其中， ρ_{true} 代表卫星与接收机的真实距离， δ_{orb} 代表轨道误差， δ_{clk} 代表钟差， δ_{iono} 代表电离层延迟， δ_{trop} 代表对流层延迟， ϵ 为多路径噪声。本系统通过中高轨 SBAS 卫星播发的差分改正数 $\Delta\rho$ 直接修正前 4 项误差：

$$\Delta\rho = \delta_{orb} + \delta_{clk} + \delta_{iono} + \delta_{trop}$$

其核心在于将传统单站差分技术升级为广域全网联合估计模式，使低轨遥感卫星定位误差从米级压缩至厘米级。

异构感知通导遥一体化星座架构如图 1 所示。

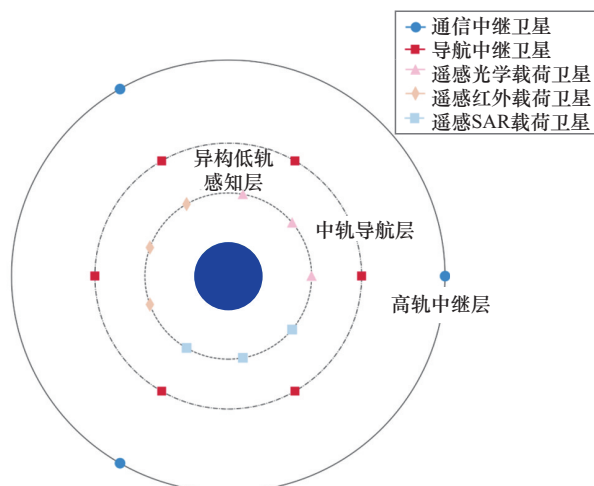


图 1 异构感知通导遥一体化星座架构

2 通导遥融合星座：低轨遥感星座设计方案

本文针对中国全域灾害响应及东部城市群持续监测的核心目标，提出载荷异构、轨道协同的 3 种创新架构。

2.1 混合倾角异构设计方案

该方案划分轨道层，太阳同步轨道（sun-synchronous orbit, SSO）卫星主攻火点检测，倾斜轨道 SAR 卫星专注夜间监测，卫星总数为 16 颗（含 3 颗 SSO 卫星）。

(1) SSO-1~3 星：运行于高度 500 km、倾角 98° 的太阳同步轨道，每天于当地时间 10:30 过境。卫星通过稳定的太阳高度角确保红外多光谱数据（覆盖短波红外区（short wave infrared region, SWIR）和中波红外区（middle wave infrared region, MWIR））的高度可比性，可实现对横断山脉、大兴安岭及秦岭等复杂地形的日间火点精准检测，其短时重访能力有助于提升山地火灾的动态跟踪效率。

(2) SAR-1~8 星：运行于高度 600 km、倾角 40° 的轨道，8 颗卫星按升交点赤经（right ascension of ascending node, RAAN）相差 45° 的设计形成协同编队，降交点地方时覆盖 00:00-02:00 的深夜时段，专为夜间监测设计。搭载的 C 频段 SAR 载荷在聚束模式下分辨率达 5 m，可穿透黑暗与云层，对华北平原、长三角等经济核心区开展高精度城市建设和火势蔓延监测，凭借高夜间覆盖精度和低重访周期保障了卫星全天候响应能力。

(3) 可见光（visible, VIS）-1~5 星：部署于 550 km 高度的近地轨道，采用 42° 倾角结合 72° RAAN 差的设计，形成对京津冀、珠三角等城市群的高频重访网络。卫星搭载的高分辨率可见光载荷在协同机制中扮演关键角色：白天接收 SSO 卫星的火点预警后，可快速对目标区域进行高清成像验证；同时独立支撑城市精细化监测需求，为规划、环保等领域提供亚米级地表观测数据。

2.2 晨昏轨道群组化设计方案

(1) LE-01~02 星：运行于高度 500 km 的太阳同步轨道，升交点地方时（local time of ascending node, LTAN）= 10:30，RAAN=110°，重复周期 15 天，首次升交点经度 85°，平近点角相差 180°，可搭载红外载荷，负责我国山地林区午间火点检测。

(2) LE-03~05 星：采用高度 550 km、倾角 42° 的 Walker Delta 构型，RAAN 相差 120°，真近点角相差 120°，可搭载 C 频段 SAR 载荷，负责中国东南部地区夜间地表监测。

(3) LE-06~08 星：高度 600 km、倾角 97° 的圆轨道卫

星, RAAN相差 120°, 可搭载可见光与短波红外载荷, 全天候负责地表覆盖制图工作。

(4) LE-09~10星: 高度 520 km、倾角 53°的圆轨道卫星, RAAN分别为 45°、135°, 平近点角相差 180°, 可搭载可见光与中波红外载荷, 负责傍晚火点复验和环境参数反演。

(5) LE-11~12星: 运行于高度 530 km 的太阳同步轨道, LTAN=13:30, 重复周期 45 天, 首次升交点经度 85°, RAAN=130°, 平近点角相差 180°, 可搭载 X 频段 SAR 载荷, 负责青藏高原、横断山区雨季成像任务。

2.3 功能分层解耦设计方案

(1) TS-01~03星: 运行于高度 600 km 的太阳同步轨道, LTAN=21:30, RAAN=250°, 平近点角相差 120°, 搭载 SAR 载荷 (C+X 双频段), 主要负责中国全境昼夜成像 (以夜间为主)。

(2) TS-04~05星: 运行于高度 600 km 的太阳同步轨道, LTAN=03:30, RAAN=340°, 平近点角相差 180°, 搭载 SAR 载荷 (C+X 双频段), 主要负责中国全境昼夜成像 (以夜间为主)。

(3) TS-06~08星: 运行于高度 500 km 的太阳同步轨道, LTAN=11:20, RAAN=97.35°, 平近点角相差 120°, 搭载红外载荷, 主要负责西南林区 (横断山脉) 精准火点识别。

(4) TS-09~10星: 高度 580 km、倾角 40°的圆轨道卫星, RAAN=45°, 平近点角相差 180°, 搭载可见光载荷, 负责东南沿海、东北平原快速普查。

(5) TS-11~12星: 高度 580 km、倾角 30°的圆轨道卫星, RAAN=10°, 平近点角分别为 120°、300°, 搭载可见光载荷, 负责东南沿海、东北平原快速普查。

(6) TS-13~15星: 运行于高度 510 km 的太阳同步轨道, LTAN=01:40, RAAN=312.35°, 平近点角相差 120°, 搭载红外载荷, 负责大兴安岭、长白山林区三维火点定位。

3 仿真实验

3.1 仿真设置

本文基于中国地理空间特性与区域需求差异性, 设计了双维度实验场景。在城市群维度, 针对京津冀城市群、长三角城市群、粤港澳大湾区和成渝地区双城经济圈, 各选择一个代表性城市细粒度计算卫星的区域重访时间, 分别是北京、上海、广州和成都; 在生态安全维度, 基于 2024—2025 年国家林业和草原局森林草原火险趋势分析, 根据火险等级分布特征选取五大重点区域, 在横断山脉极端危险区、大兴安岭重点林区、西南喀斯特火险区、东南丘陵速燃区和新疆林区各选择了一个代表性城市细粒度计

算卫星的区域重访时间, 分别是香格里拉、漠河、红河哈尼族彝族自治州 (以下简称红河州)、丽水和布尔津。

为确保星座设计紧密契合全域灾害响应与城市监测的应用需求, 本文对其核心性能指标进行论证分析。灾害应急场景对时效性要求极高, 核心区域重访周期要求优于 4 h; 城市常态化监测则须具备每日至少 1 次的重访能力。实际全域灾害响应须依托 SAR 载荷以及红外载荷实现全天候监测, 也存在光学载荷提供高精度可见光成像的需求; 城市常态化监测则须依托高分辨率光学载荷实现亚米级分辨率观测。因此, 本文的星座设计需以高频重访与多功能载荷协同为核心目标, 兼顾灾害应急与城市管理对分辨率和载荷类型的双重需求。

本文基于卫星工具包 (satellite tool kit, STK) 构建低轨遥感星座重访时间仿真模型, 该模型通过精确计算星座中任意卫星对特定地面目标的连续两次可观测时间间隔实现, 其核心流程如下。

① 首先依据任务需求构建包含轨道根数 (包括半长轴 a 、偏心率 e 、倾角 i 、升交点赤经 Ω 、近地点幅角 ω 、平近点角 M)、卫星数量 N 和相位分布等参数的星座模型。

② 设置传感器特性参数和地面目标点纬度 ϕ 、经度 λ 。

③ 系统通过高精度轨道预报器推算卫星轨迹, 结合地球自转模型, 计算每个卫星传感器对目标的访问窗口。

④ 遍历所有访问事件, 提取相邻访问开始时间 t_k 与 t_{k+1} 的时间差 $\Delta t_k = t_{k+1} - t_k$, 并以这些差值的最小值、最大值、均值及统计分布等指标量化重访性能。

核心数学关系可表述如下。

访问条件判定, 即当卫星 S_i 与地面目标 T 满足几何可见性时触发访问:

$$\cos \theta \geq \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right)$$

其中, θ 为卫星相对目标的观测角, α 为传感器半视场角。

重访时间计算, 即对于目标 T 的所有访问时间序列 $\{t_0, t_1, \dots, t_m\}$, 重访时间序列为:

$$\{\Delta t_k\}_{k=0}^{m-1}, \Delta t_k = t_{k+1} - t_k$$

统计表征, 星座对 T 的重访能力由以下统计量描述。

• 最小重访时间: $\Delta t_{\min} = \min (\Delta t_k)$ 。

• 最大重访时间: $\Delta t_{\max} = \max (\Delta t_k)$ 。

• 平均重访时间: $\bar{\Delta t} = \frac{1}{m} \sum_{k=0}^{m-1} \Delta t_k$ 。

• 百分位重访时间 (如 P_{99}): $F(\Delta t_p) = 0.99$ 。

其中, $F(\cdot)$ 为 Δt_k 的累积分布函数。

在实际操作中, STK 通过离散时间步长进行快速访问

计算，并输出全球或区域重访统计热力图。例如，针对有 N 颗太阳同步轨道卫星的星座，设置仿真时长 T_{sim} 和时间步长 δt ，系统自动执行迭代：初始化时间 $t = 0$ ，对每个 t 判断目标是否被任意卫星 S_i 覆盖，记录访问区间 $\{[t_s, t_e]_j\}$ ，合并重叠区间后提取 Δt_k 序列，最终生成覆盖性能报告。该流程严密耦合了轨道力学、几何光学及统计分析模型，为星座设计提供关键量化依据。根据上述星座设计方案，本文在 STK 上进行了仿真实验。

3.2 仿真结果

3.2.1 3 种星座设计方案重访差异分析

本文选用的 3 种星座设计方案包括混合倾角异构设计

方案、晨昏轨道群组化设计方案、功能分层解耦设计方案，这 3 种星座设计方案对不同位置城市的重访能力存在差异，同时引入了 Walker 设计方案作为基线方案进行比较。基于以上差异，本文对已选取的 9 个国内代表性城市进行系统分析，以评估各星座设计方案针对不同地理位置等条件下的重访能力。实验结果旨在横向比较各类星座设计方案的综合重访能力，为后续星座设计优化与工程化应用提供数据支持。

图 2 为不同星座设计方案的主要城市覆盖详细时间段，时间为 2025 年 7 月 10-16 日，以线段方式展现给定城市的卫星重访时间段。其中，图 2 中连续的线段代表该城市在

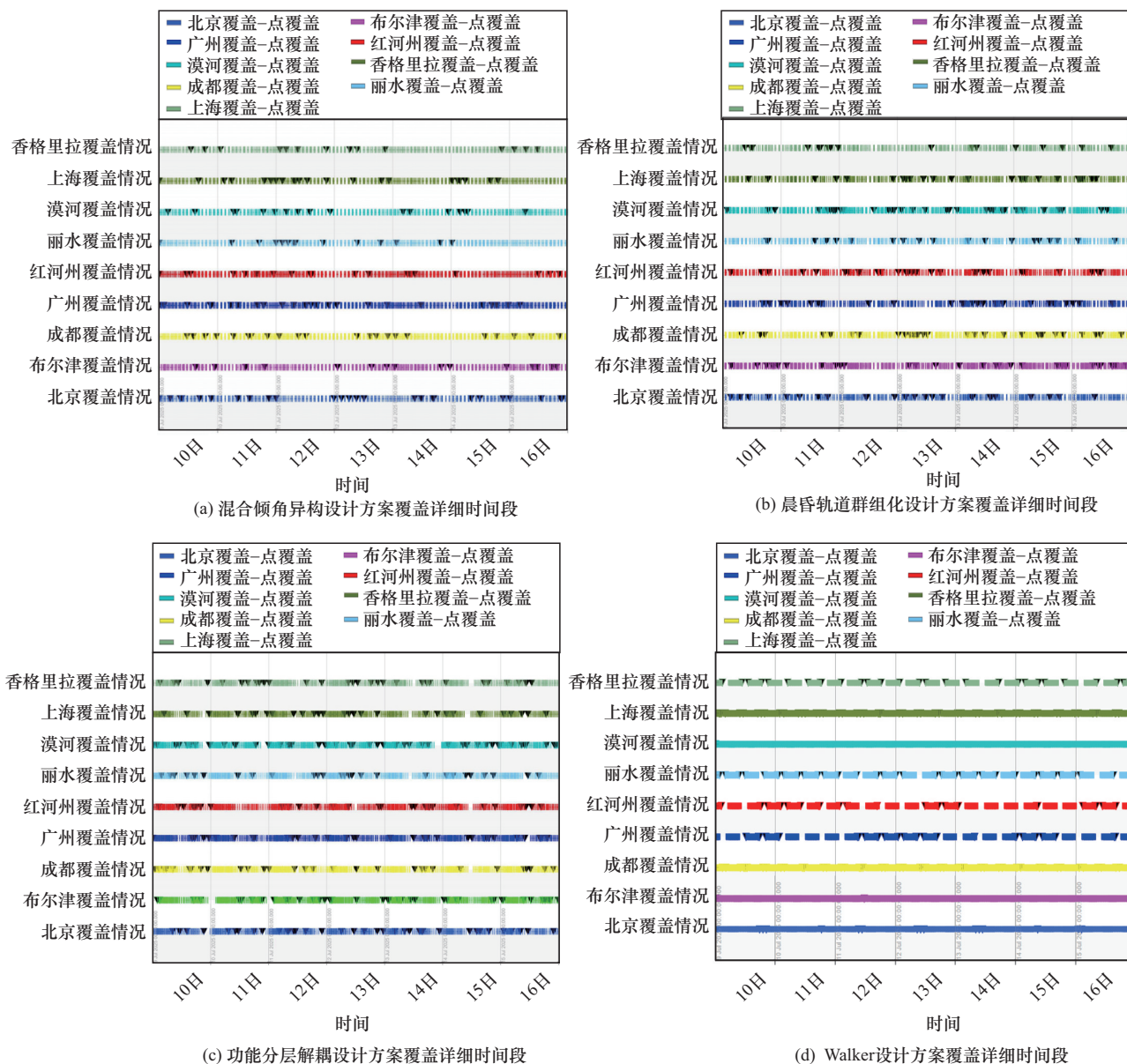


图 2 不同星座设计方案的主要城市覆盖详细时间段

对应时间段内处于连续访问状态，线段中断则代表该城市此时未被访问，线段中出现倒三角符号表示该城市在此时正在被多颗卫星扫描。

图 2 通过对比 9 个代表性城市的覆盖时间线，可直观发现：前 3 种设计方案在各城市间的覆盖分布较为均匀，而传统 Walker 设计方案虽对部分城市的覆盖较频繁，但在明显均衡性不足的问题，部分城市存在明显观测间隙。

同时，为了直观比较不同星座设计方案对不同城市的重访时间差异，本节对 3 种星座设计方案及 Walker 设计方案的重访概率进行分析。重访概率反映了特定城市从观测请求发起后，在特定时间内被星座成功访问的概率，重访概率曲线的斜率越大，表明星座对该城市的综合重访能力越强。不同星座设计方案针对不同城市的重访概率如图 3 所示。

从图 3 (a) 可以看出，混合倾角异构设计方案针对不同城市重访能力的差异较大，其中布尔津与漠河的整体重访概率较低，广州与红河州的重访概率则较高。这可能是由于广州与红河州的纬度较低，而混合倾角异构设计方案的纬度敏感性较高，针对纬度较低地区的重访能力更优，上述两个城市的 30 min 重访概率接近 95%。同时，混合倾角异

构设计方案下所选城市的重访概率达到 100% 需要约 75 min。

图 3 (b) 为晨昏轨道群组化设计方案针对不同城市的重访概率，可以看出所选城市间的重访概率差异相较于混合倾角异构设计方案更小，初始重访概率总体标准差为 3.13，与混合倾角异构设计方案相比，该方案下所选城市相应的 30 min 重访概率均未超过 95%，同时该方案整体城市重访概率达到 100% 所需时间约 90 min。

图 3 (c) 为功能分层解耦设计方案针对不同城市的重访概率，该方案下所选城市的重访概率整体差异较小，同时所选城市 20 min 的重访概率接近 85%，但整体城市重访概率达到 100% 所需时间超过 180 min，远高于前两种方案。

图 3 (d) 为 Walker 设计方案针对不同城市的重访概率。与覆盖详细时间段的描述类似，重访概率也能看出该方案针对不同城市的重访性能存在显著差异，且整体呈现较为明显的两极化趋势：以北京、上海为代表的城市在请求发起后短时间内即实现极高的重访概率，而部分区域则需等待更长时间才能达到同等概率水平。这一现象反映出该设计方案在区域服务均衡性方面存在局限。

此外，本文使用箱型图展示各城市重访时间的分布特

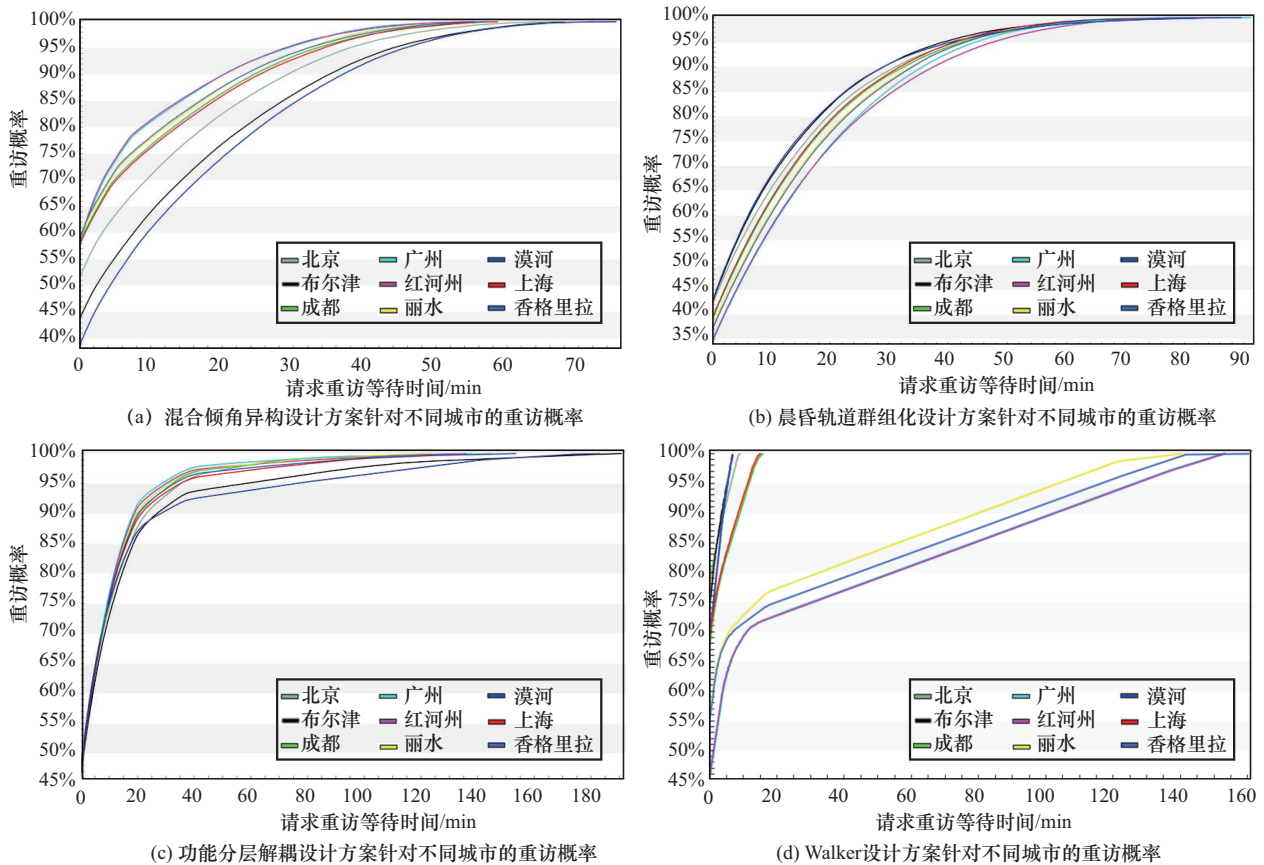


图 3 不同星座设计方案针对不同城市的重访概率

征，主要统计量包括中位数、最大值、最小值和离群点等。3种星座设计方案的重访时间箱型图如图4所示。

在图4(a)给出的混合倾角异构设计方案中，漠河的重访时间间隔中位数与最大值均为最高，重访时间中位数达到19.5 min；而红河州的重访时间间隔中位数最小，仅为9.1 min。晨昏轨道群组化设计方案下不同城市的重访时

间间隔中位数均位于15~25 min之间。而功能分层解耦设计方案下各城市的重访时间间隔中位数均小于15 min，且城市间差异更小。整体来看，3种星座设计方案存在较大性能差异：混合倾角异构设计方案在低纬度城市展现出优异的重访效率，但在高纬度城市重访能力较差，整体需要75 min实现全覆盖；晨昏轨道群组化设计方案的重访概率

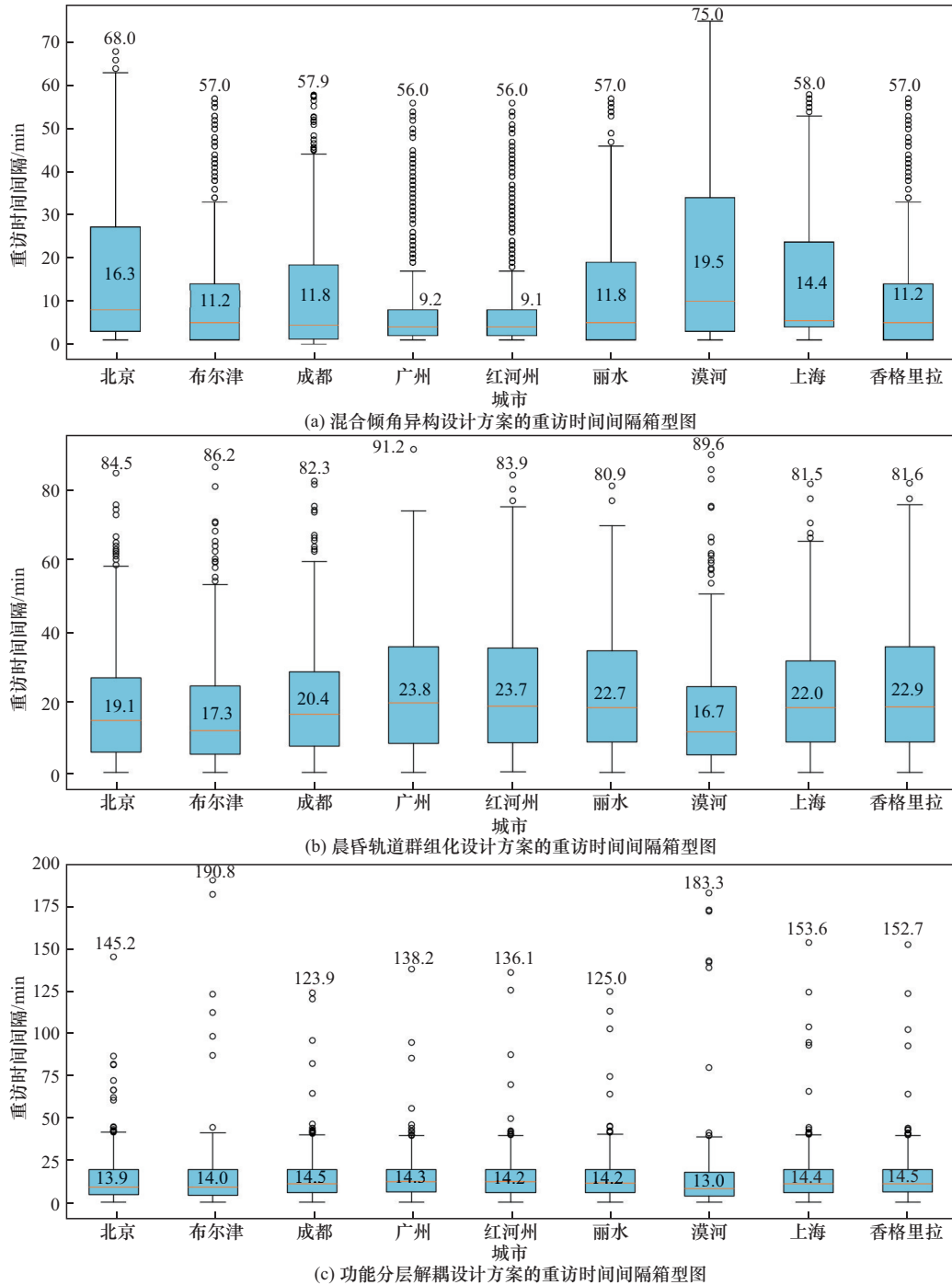


图4 3种星座设计方案的重访时间间隔箱型图

分布均衡，但 30 min 重访概率未超 95%，整体覆盖时间延长至 90 min；在功能分层解耦设计方案下，多数城市具备 20 min 85% 重访概率的快速响应能力。箱型图进一步揭示，功能分层解耦设计方案下所选城市的整体重访时间差异相较于另外两种方案更小。

3.2.2 晨昏轨道群组化设计方案重访差异

针对整体重访效率差异较小且重访时间表现较优的晨昏轨道群组化设计方案，依次进行了 3 种不同规模的缩减调整，分别为：移除 LE08 卫星；移除 LE08 与 LE05 两颗卫星；进一步移除 LE08、LE05 和 LE12 这 3 颗卫星。晨昏轨道群组化设计减少卫星数量的重访概率如图 5 所示。

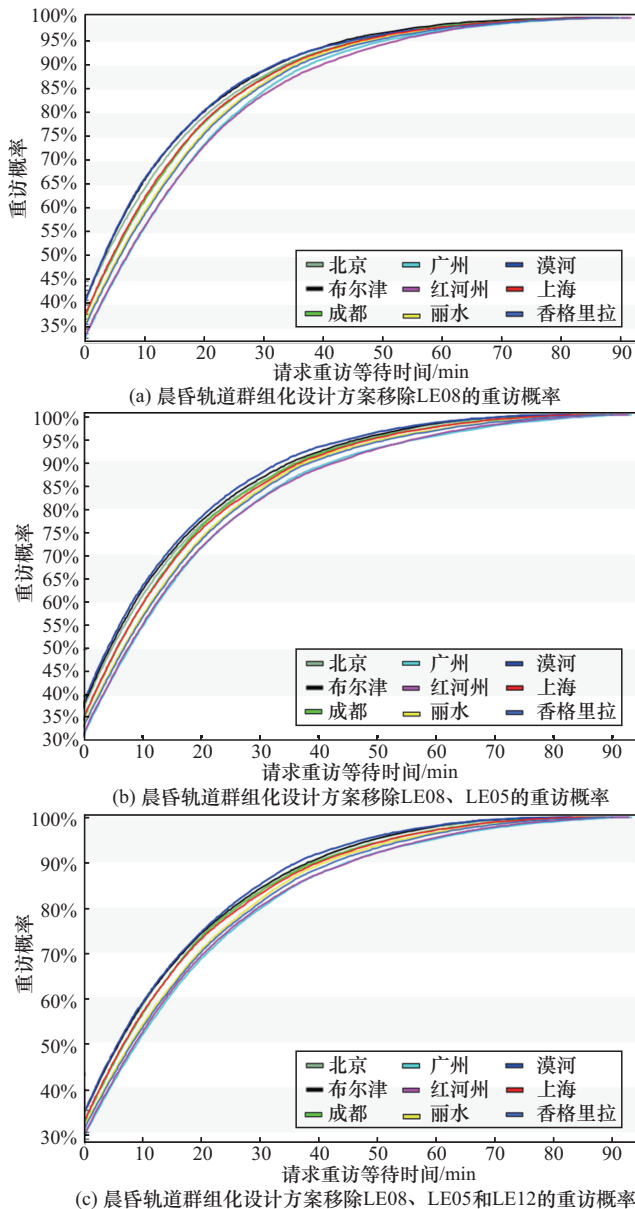


图 5 晨昏轨道群组化设计方案减少卫星数量的重访概率

总体来看，随着卫星数量的减少，系统整体重访概率下降，具体表现为部分城市达到同等覆盖水平所需时间延长。计算可得原始方案的平均重访时间为 20.96 min，展现出较优的系统性能。在依次移除部分卫星后，重访时间出现递增：移除 LE08 后，平均重访时间上升至 21.98 min；继续移除 LE05，该时间进一步增至 22.93 min；当同时移除 LE08、LE05 和 LE12 这 3 颗卫星后，平均重访时间达到 24.54 min，系统性能衰减最为显著。从各城市的重访概率变化曲线来看，重访概率爬升速率均随卫星数量的降低而有所放缓，这表明关键卫星的缺失对系统初期的覆盖性能影响尤为明显。

综上所述，卫星数量的削减对晨昏轨道群组化设计方案的覆盖性能具有系统性影响。该分析为优化星座构型、平衡系统性能与规模成本提供了理论依据。

3.2.3 3 种星座设计方案不同遥感模态的重访差异

遥感卫星载荷存在多种遥感模态，不同的成像特性导致不同遥感模态的适用场景和重访时间存在差异，本节对 3 种星座设计方案的红外、SAR、可见光 3 种遥感模态，采用箱型图进行城市重访时间分析。3 种星座设计方案的红外全天重访时间箱型图如图 6 所示。

图 6 (a) 为混合倾角异构设计方案的红外全天重访时间间隔箱型图，可以看出，不同城市的重访时间间隔中间数均大于 60 min，且不同城市间性能差异较大。图 6 (b) ~ 图 6 (c) 分别为晨昏轨道群组化设计方案、功能分层解耦设计方案的红外全天重访时间间隔箱型图，这两种方案针对不同城市红外重访时间间隔差异较小，且整体重访时间间隔相较于混合倾角异构设计方案更低。

3 种星座设计方案的 SAR 全天重访时间间隔箱型图如图 7 所示。

如图 7 (a) 所示，混合倾角异构设计方案的 SAR 全天重访时间间隔在不同城市间差异较大，广州的重访时间间隔中位数仅为 15.3 min，而上海和北京的中位数均大于 40 min。从图 7 可以看出，相较于另外两种方案，晨昏轨道群组化方案的 SAR 全天重访时间间隔在不同城市间差异较小。

3 种星座设计方案的可见光全天重访时间间隔箱型图如图 8 所示。

由图 8 可知，相较于其他两种方案，混合倾角异构设计方案的可见光全天重访时间间隔在不同城市间差异较小。相对其他城市来说，高纬度地区（如漠河、布尔津等），箱体较长，且数据波动较大。图 9 为 3 种星座设计方案不同遥感模态的重访时间热力图。由图 9 可知，混合倾角

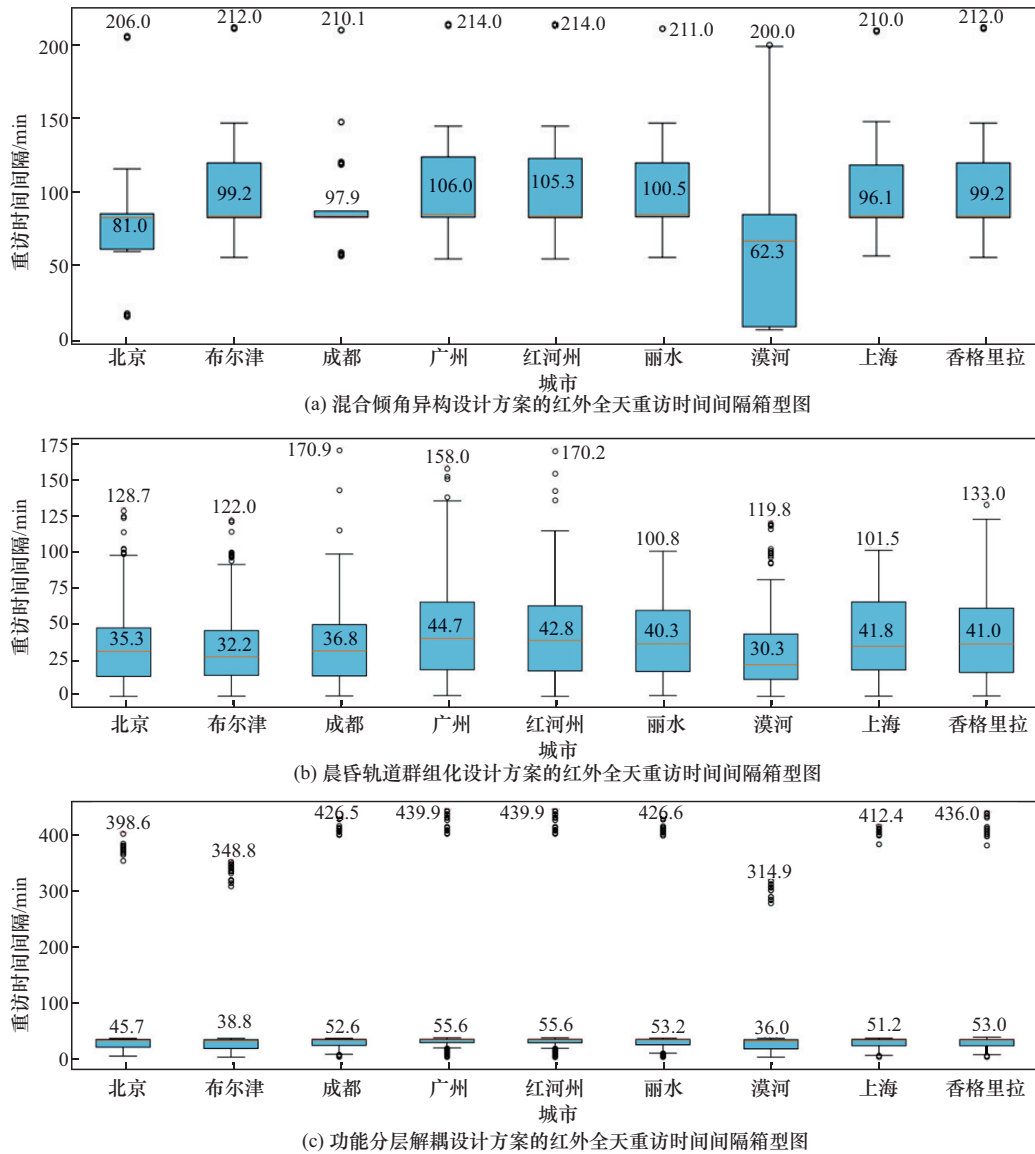
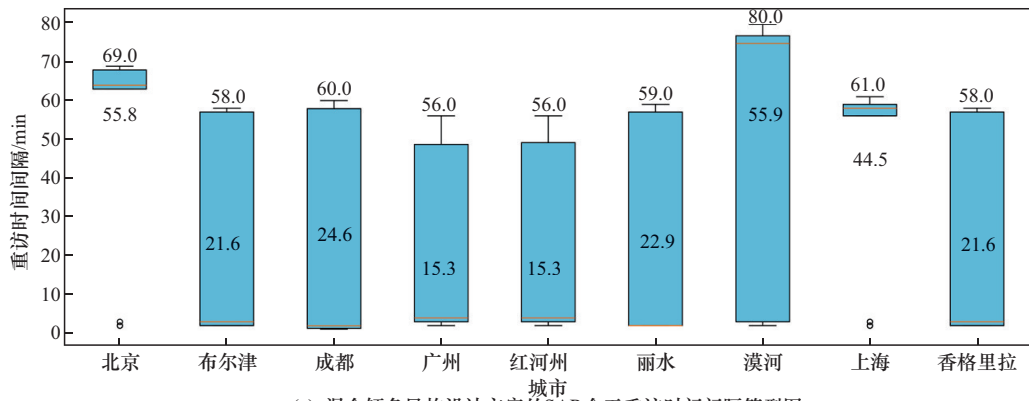


图 6 3 种星座设计方案的红外全天重访时间间隔箱型图

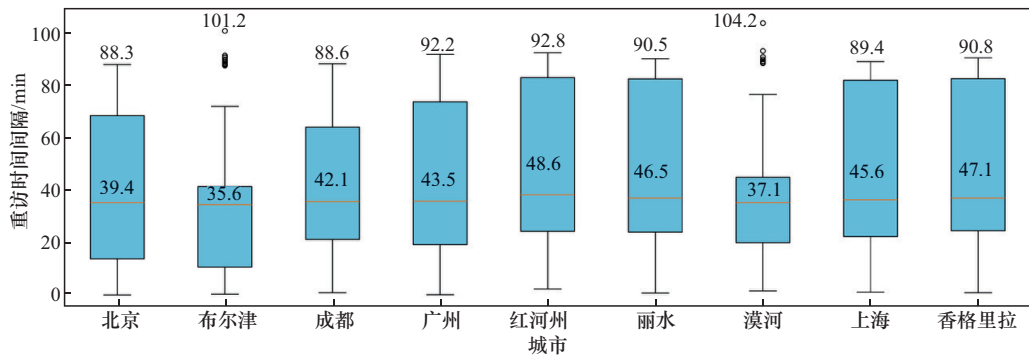
异构设计方案在 SAR 方式下的平均重访时间最短，为 30.83 min，不同遥感模态下的重访时间均值为 58.8 min，总体方差为 692.4，总体标准差为 26.31；晨昏轨道群组化设计方案在红外成像方式下的平均重访时间最短，为 38.36 min，不同遥感模态下的重访时间均值为 39.2 min，总体方差为 7.08，总体标准差为 2.66；功能分层解耦设计方案则在可见光成像方式下的平均重访时间最短，为 28.92 min，不同遥感模态下的重访时间均值为 44.9 min，总体方差为 136.1，总体标准差为 11.67。

综合仿真结果与实际需求，本文认为晨昏轨道群组化设计方案为最优选择。该方案虽在单一重访性能指标上未达极致（如低纬城市重访效率略低于混合倾角方案），但

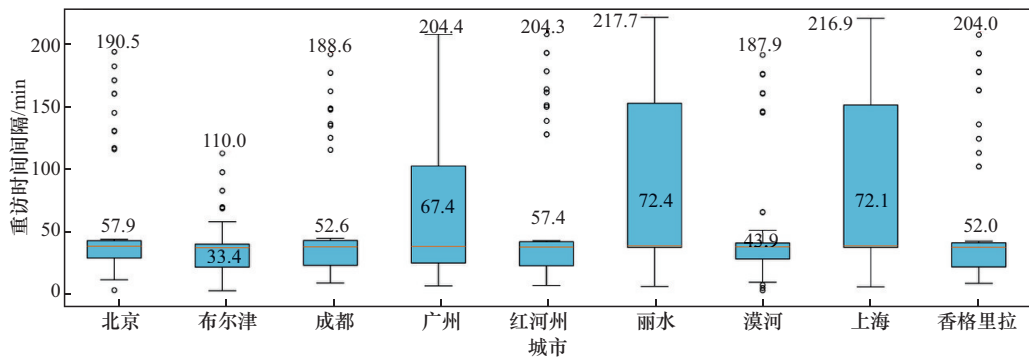
其在全域覆盖均衡性、多载荷协同能力及抗失效风险性上表现最佳。具体而言：其一，全国 9 个代表性城市的初始重访概率标准差为 3.13%，相对优于混合倾角异构设计方案的 6.67%，有效弥补了高纬度等特殊地区的性能短板；其二，红外载荷平均重访时间为 38.36 min，显著优于混合倾角异构设计方案的 60 min 以上，对森林草原火等高温目标的持续跟踪能力更强；其三，功能分层解耦设计方案虽具备 20 min 内 85% 的快速响应能力，但其完全覆盖耗时超 180 min，难以满足全域应急需求。晨昏轨道群组化设计方案则通过卫星功能模块化部署（如 TS-01~05 主攻夜间成像，TS-13~15 专精三维火点定位），在保障 20 min 内近 80% 重访概率的同时，可在 91 min 内实现全国



(a) 混合倾角异构设计方案的SAR全天重访时间间隔箱型图



(b) 晨昏轨道群组化设计方案的SAR全天重访时间间隔箱型图



(c) 功能分层解耦设计方案的SAR全天重访时间间隔箱型图

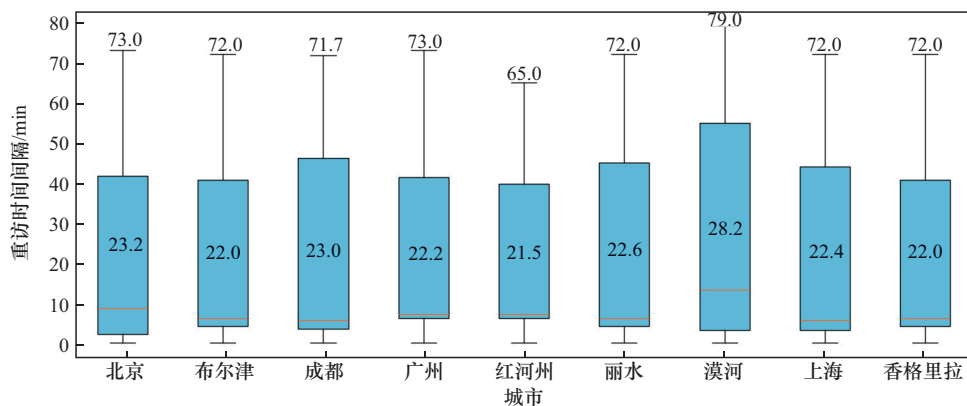
图7 3种星座设计方案的SAR全天重访时间间隔箱型图

100%可靠覆盖，更契合中国复杂地理环境下一体化灾害监测的实战要求。

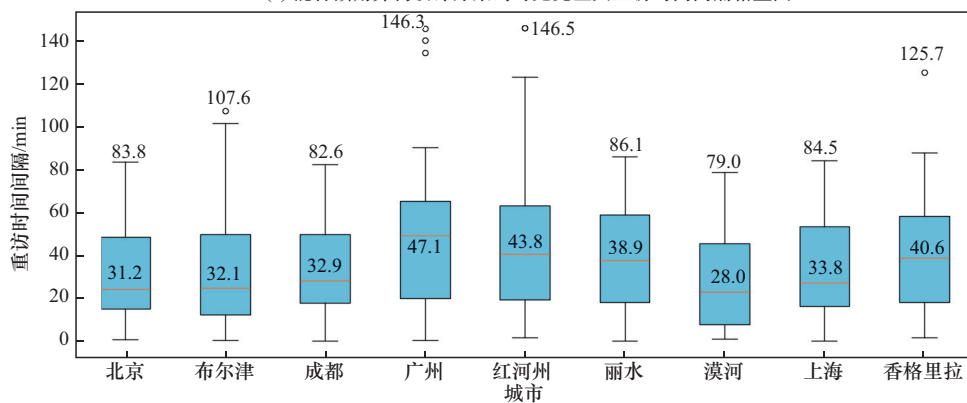
4 结束语

本文针对中国城镇化进程中灾害防御的迫切需求，系统性突破了传统卫星架构在应急响应中的核心瓶颈，构建了“中高轨骨干中继+低轨异构协同”的通导遥融合星座体系。该体系通过中高轨卫星的激光星间链路实现跨境数据实时回传，并依托SBAS广域差分技术将低轨定位精度提升至厘米级；创新提出的3种异构低轨星座设计兼顾了

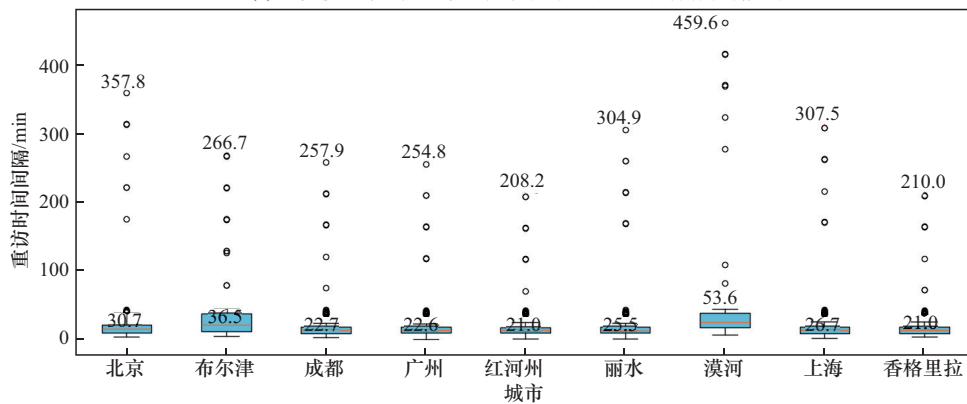
复杂地理环境下的全天候监测能力与城市精细化治理需求。实验结果表明，晨昏轨道群组化设计方案在9个典型城市的重访能力上呈现显著优势：其全域初始重访概率标准差仅3.13%，较混合倾角异构设计方案降低50%以上，同时有效克服了高纬度城市的响应短板；在红外监测关键指标上，实现平均重访38.36 min，较混合倾角异构设计方案时效性提升约60%，大幅强化对林火目标的持续跟踪能力；虽在低纬城市峰值重访效率上略低于混合倾角异构设计方案，但凭借模块化卫星部署，可在91 min内实现100%国土可靠覆盖，显著优于功能分层解耦设计方案180 min



(a) 混合倾角异构设计方案的可见光全天重访时间间隔箱型图



(b) 晨昏轨道群组化设计方案的可见光全天重访时间间隔箱型图



(c) 功能分层解耦设计方案的可见光全天重访时间间隔箱型图

图 8 3 种星座设计方案的可见光全天重访时间间隔箱型图

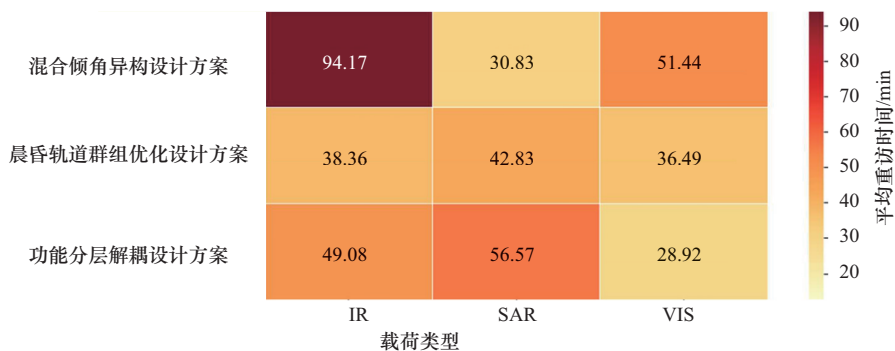


图 9 3 种星座设计方案不同遥感模态的重访时间热力图

的完全覆盖耗时。该方案同时平衡了载荷协同能力: 3种载荷的平均重访时间为39.22 min, 标准差为2.66 min, 均优于另外两种方案。通过对晨昏轨道群组化设计方案开展卫星规模敏感性分析进一步发现, 该方案系统性能对卫星数量变化表现敏感: 原始方案平均重访时间为20.96 min, 移除方案中的LE08、LE05和LE12共3颗关键卫星后, 重访时间延长至24.54 min, 且各城市覆盖概率爬升速率显著放缓, 这验证了卫星数量变化对该星座设计在规模变化下的性能影响。仿真验证结果表明, 其所选城市在20 min内均能达到近80%的重访概率, 该方案兼顾全域覆盖均衡性、载荷均衡性及快速响应需求, 为复杂地理环境下的灾情全时监测提供最优技术路径。

参考文献

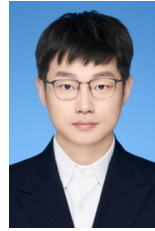
- [1] 应急管理部. 2025年上半年全国自然灾害情况通报[J]. 职业卫生与应急救援, 2025, 43(4): 544.
Ministry of Emergency Management. National bulletin on natural disasters in the first half of 2025[J]. Occupational Health and Emergency Rescue, 2025, 43(4): 544.
- [2] 梁炳伟, 雒占福. 近十年来中国地级及以上城市新型城镇化水平空间格局演变及收敛性分析[J]. 现代城市研究, 2017(5): 67-74.
Liang B W, Luo Z F. Spatial pattern and convergence of the level of new urbanization in Chinese Cities at prefecture-level in recent 10 years[J]. Modern Urban Research, 2017(5): 67-74.
- [3] 蒋忠元, 王森, 王启舟, 等. 低轨卫星多星协同及星地协同遥测算一体化技术[J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(1): 60-75.
Jiang Z Y, Wang S, Wang Q Z, et al. LEO multi-satellite coordination and satellite-ground coordination remote sensing communication and computation integration technology[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2024, 5(1): 60-75.
- [4] 段四波, 茹晨, 李召良, 等. Landsat 卫星热红外数据地表温度遥感反演研究进展[J]. 遥感学报, 2021, 25(8): 1591-1617.
Duan S B, Ru C, Li Z L, et al. Reviews of methods for land surface temperature retrieval from Landsat thermal infrared data[J]. Journal of Remote Sensing, 2021, 25(8): 1591-1617.
- [5] Hope E S, Mckenney D W, Johnston L M, et al. A cost-benefit analysis of wildfiresat, a wildfire monitoring satellite mission for Canada[J]. PLoS One, 2024, 19(5): e0302699.
- [6] 蔚保国, 鲍亚川, 杨梦焕, 等. 通导一体化概念框架与关键技术研究进展[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(2): 1-14.
Yu B G, Bao Y C, Yang M H, et al. Conceptual framework and research progress on communication and navigation integration[J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(2): 1-14.
- [7] 谢卫莹, 王子璇, 李云松. 高效通信的在轨分布式高光谱图像处理[J]. 测绘学报, 2024, 53(4): 589-598.
Xie W Y, Wang Z X, Li Y S. Efficient-communication on-orbit distributed hyperspectral image processing[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2024, 53(4): 589-598.
- [8] 乔鹏昊, 李润青, 钱冀婧. 基于双层优化的多目标覆盖星座优化设计[J]. 宇航学报, 2024, 45(9): 1396-1407.
Qiao P H, Li J Q, Qian Y J. Satellite constellation design for multi-objective coverage based on double-layer optimization[J]. Journal of Astronautics, 2024, 45(9): 1396-1407.
- [9] 郭丽荣. 低轨道卫星星座的拓扑结构设计[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
Guo L R. Topological structure design of low earth orbit satellite constellations[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [10] Yang Y X, Mao Y, Ren X, et al. Demand and key technology for a LEO constellation as augmentation of satellite navigation systems[J]. Satellite Navigation, 2024, 5(1): 11.
- [11] Guo L, Liu J Y, Sheng M, et al. Constellation topology design for maximum capacity of LEO satellite networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2025, 73(6): 4321-4334.
- [12] 王茂才, 罗鑫, 宋志明, 等. 双层协同对地观测卫星星座设计[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(2): 100-105.
Wang M C, Luo X, Song Z M, et al. Double-layered satellite constellation design for earth cooperative observation[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(2): 100-105.
- [13] Ulybyshev S Y. Designing nonuniform satellite systems for continuous global coverage using equatorial and polar circular orbits[J]. Cosmic Research, 2016, 54(4): 303-312.
- [14] 马剑, 孟雅哲, 朱小龙, 等. 特定区域密集观测的低轨卫星星座最优设计方法[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48(2): 170-184.
Ma J, Meng Y Z, Zhu X L, et al. Optimal design of low-earth-orbit satellite constellation for regional fast revisit[J]. SCIENTIA SINICA Technologica, 2018, 48(2): 170-184.
- [15] Singh L A, Whittecar W R, Diprinzio M D, et al. Low cost satellite constellations for nearly continuous global coverage[J]. Nature Communications, 2020, 11: 200.
- [16] 贺波勇, 曹静, 周庆瑞, 等. 对地协同观测混合星座多目标优化设计[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(1): 224-232.
He B Y, Cao J, Zhou Q R, et al. Multi-objective optimization of earth cooperative observation hybrid satellite constellation[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(1): 224-232.
- [17] 沈欣, 刘钰霖, 李仕学, 等. 一种基于改进 PSO 算法的高时间分辨率遥感卫星星座优化设计方法[J]. 武汉大学学报(信息科学

版), 2018, 43(12): 1986-1993.

Shen X, Liu Y L, Li S X, et al. An optimization design method for high temporal resolution remote sensing satellite constellation based on improved PSO algorithm[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(12): 1986-1993.

- [18] 李胜西, 李海阳, 何湘粤. 面向全球快速重访的限制性 Walker 星座设计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2024, 46(12): 4149-4156.
Li S X, Li H Y, He X Y. Design method of restricted Walker constellation for global rapid revisit[J]. Systems Engineering and Electronics, 2024, 46(12): 4149-4156.
- [19] 郑鹏飞, 陈宏宇, 郭崇滨. 低轨巨型链形星座解析设计及效能分析[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(1): 148-157.
Zheng P F, Chen H Y, Guo C B. Analytical design and performance analysis of LEO mega chain satellite constellation[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(1): 148-157.
- [20] Toyoshima M. Recent trends in space laser communications for small satellites and constellations[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(3): 693-699.
- [21] Zhang Z T, Wang H. Integrated BeiDou satellite-based augmentation system framework combining B2a and B1C services[J]. GPS Solutions, 2025, 29(2): 74.
- [22] Walter T. Satellite based augmentation systems[M]//Montenbruck O, Gill E. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Cham: Springer International Publishing, 2017: 339-361.

[作者简介]



赵益晟 (1996-), 男, 博士, 国科大杭州高等研究院助理研究员, 主要研究方向为天基计算和星载智能处理。

周浩 (1997-), 男, 中国科学院计算技术研究所博士生, 主要研究方向为天基计算系统设计及应用。

解畅飞 (2004-), 男, 加利福尼亚大学尔湾分校本科生, 主要研究方向为通导遥一体化星座设计。

金谷菁 (2000-), 女, 南卫理公会大学硕士生, 主要研究方向为通导遥一体化星座设计。

刘垚圻 (1995-), 男, 博士, 中国科学院计算技术研究所副研究员, 主要研究方向为计算机体系结构、天基容错计算、通导遥算一体化。

韩银和 (1980-), 男, 博士, 中国科学院计算技术研究所研究员, 主要研究方向为计算机体系结构和芯片、智能机器人、智能硬件、数据计算芯片和计算系统。