

基于改进遗传算法的SAR多星协同复杂区域观测规划

石鑫¹, 邢孟道^{1,2}, 张金松², 刘会涛², 王虹现¹

1. 西安电子科技大学 雷达信号处理全国重点实验室, 西安 710071;

2. 西安电子科技大学 前沿交叉研究院, 西安 710071

摘要: 遥感卫星大范围区域观测在地图绘制、灾害救援等领域均具有重要作用。SAR遥感卫星具有不受云雾夜间环境影响的特点, 研究SAR多星协同区域观测技术具有重要意义。针对当前缺乏SAR多星协同对复杂区域快速观测规划方法的问题, 本文首先对大范围复杂区域覆盖率计算进行分析, 提出了结合高斯投影、网格划分与几何运算的复杂区域覆盖率计算方法; 然后对SAR条带成像模式进行覆盖分析, 提出了结合角度限制和二维分解的候选区域分解方法; 最后提出了结合贪婪算法初始化、精英保留策略和3次适应度函数的改进遗传算法用于区域覆盖率优化。本文选取4颗在轨SAR卫星和3个区域目标进行仿真实验, 实验结果证明本文方法在北京市、天津市、上海市3个区域都能够实现优异的区域覆盖率优化, 相比贪婪算法, 本文方法在上述3个区域的覆盖率分别提升3.17%、2.94%、9.02%。该算法可为SAR多星协同区域观测系统的建立提供技术基础。

关键词: 遥感, 星载SAR, 多星协同, 区域观测, 覆盖计算, 区域分解, 遗传算法

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 石鑫, 邢孟道, 张金松, 刘会涛, 王虹现. 2024. 基于改进遗传算法的SAR多星协同复杂区域观测规划. 遥感学报, 28(7): 1822-1834

Shi X, Xing M D, Zhang J S, Liu H T and Wang H X. 2024. SAR multi-satellite collaborative complex area observation planning based on improved genetic algorithm. National Remote Sensing Bulletin, 28(7): 1822-1834 [DOI:10.11834/jrs.20243258]

1 引言

遥感卫星对地观测具有可覆盖区域广、持续时间长、不受空域国界限制等独特优势, 在民用领域发挥重要作用(贺仁杰, 2004)。大范围区域目标快速观测对高精度地图绘制、目标搜索、自然灾害紧急救援等方面具有重要的意义(阮启明, 2006), 因此对区域目标观测的时效性和覆盖率提出了更高的要求。单颗遥感卫星单次波束覆盖范围有限, 且受到轨道、载荷、分辨率、重访周期等限制无法实现任意大范围区域任务的快速观测响应(李春升等, 2016), 利用多星协同技术是解决大范围区域快速观测任务的主要手段(Du等,

2020)。相比于点目标规划调度, 大范围区域目标规划更加复杂(Hu等, 2021), 且人工规划的方式无法满足日益复杂的卫星运行管控需求, 研究高效的多星协同区域目标任务规划系统对提高遥感卫星的观测时效、提升卫星运管系统的智能化程度具有重要意义。

光学成像卫星和SAR成像卫星是两类主要的遥感观测卫星且各有特点, 光学卫星图像更加直观、清晰、易于判读, 但是光学卫星易受光照条件、云雾、雾霾等环境的影响导致遥感图像获取不可控, 而SAR卫星具备全天时、全天候、作用距离远等优势(Sun等, 2021), 使得SAR遥感观测更加稳定可控。当前, 光学卫星发展较快且在

收稿日期: 2023-07-11; 预印本: 2024-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 62371376, 62331020); 中央高校基本科研业务费专项资金(编号: 20199234731, 20103227364); 雷达信号处理全国重点实验室支持计划项目(编号: KGJ202201)

第一作者简介: 石鑫, 研究方向为SAR多星协同任务规划及SAR图像智能解译。E-mail: shixinxd@163.com

通信作者简介: 邢孟道, 研究方向为雷达成像理论与方法、空时频多维稀疏信号处理、合成孔径激光雷达成像、微波光子合成孔径雷达成像、电磁散射与图像智能处理及智能任务规划等。E-mail: xmd@xidian.edu.cn

轨光学卫星数量多(周晓青等, 2022), 因此光学多星协同区域目标观测规划技术起步较早也发展较快。相对而言, SAR卫星协同观测任务规划技术涉及面更广、更复杂导致发展较慢。近年来SAR系统体制和成像技术发展迅速, 微小型SAR卫星组网已成为主流发展趋势(邓云凯等, 2020), 并且SAR卫星发射数量不断增加(张永贺等, 2022), 为充分发挥SAR多星协同观测的性能, 迫切需要研究SAR多星协同区域观测任务规划技术。

当前针对SAR成像卫星的区域观测协同任务规划技术研究较少。Wei(2013)对SAR调度问题进行分析并研究了点目标的调度问题, 通过蚁群算法和模拟退火算法进行求解。王聪(2014)研究了编队干涉SAR对地测绘任务规划方法, 提出了具有约束满足特性的区域分解方法, 设计了混合遗传模拟退火算法为基础的模型求解框架。Kim和Chang(2015)研究了基于最小系统响应时间的SAR卫星的规划调度, 首先通过条带模式进行感兴趣区域观测并进行相关变化检测, 然后使用聚束模式对点目标进行精细观测。Kim和Chang(2020)还研究单星多次航过感兴趣区域中多个点目标的快速调度算法, 并考虑指令上传和数据下传。从当前SAR卫星规划技术发展现状分析可知, 当前SAR卫星规划任务以点目标为主, 且规划对象多以单星或者双星为主, 对多星区域观测规划技术缺乏研究。

光学卫星在轨数量多且发展速度快, 因此当前光学多星协同观测规划技术研究较多。在光学卫星区域规划研究中, 将区域目标的调度规划过程分为两个阶段: 第1个阶段为区域目标的分解; 第2个阶段为区域目标的调度规划。美国空间成像公司对Landsat系列光学成像卫星进行规划时通过预定义参考系统进行分割, 法国SPOT光学成像卫星根据网格参考系统进行区域目标的分割, 此类方法工作量小、操作简单, 适用于星载传感器固定且垂直于星下线的光学单景成像卫星(阮启明等, 2006)。Lemaître等(2002)提出基于相邻等宽矩形条带的光学成像卫星区域分割方法, 依据卫星轨道运动方向和成像幅宽将区域目标分解为固定宽度的平行条带, 在此基础上进行区域观测规划, 此方法能够简化分割图像的预处理和后处理工作。阮启明(2006)提出了一种结合区域目

标特性与光学载荷覆盖范围的区域分割方法, 考虑卫星观测范围与目标区域的覆盖关系, 采取有重叠的相邻等宽矩形条带分割方法, 丰富了备选区域并增加了求解空间。白保存等(2008)提出了基于立体几何的区域分解方法, 通过光学卫星成像立体几何计算卫星的覆盖范围并基于卫星运动方向和固定角度偏差进行区域划分。余婧等(2015)基于变化相机视场角进行相邻有重叠不等宽条带划分方法, 以此构建了光学敏捷卫星同轨多条带拼幅成像工作模式。Zhu等(2019)提出最长基本覆盖模式对光学卫星区域目标进行分解, 通过对网格空间的充分利用进行候选区域生成, 并能通过改变网格空间改变候选区域的细粒度。从光学卫星区域任务规划的发展来看, 光学卫星的区域分解方法与光学卫星的成像模式、覆盖范围等紧密结合。

SAR卫星与光学卫星具有不同的成像机理和成像模式(李春升等, 2016), 因此对于SAR观测区域分解应该与SAR卫星成像特点密切结合。光学卫星规划和SAR卫星规划的一个不同体现在下视角角度上。光学卫星为下视成像, 可以通过卫星姿态调整实现侧视成像, 但是受限于卫星姿态调整能力, 且侧视成像会导致光学成像分辨率下降(Xu等, 2020)以及图像扭曲(Niu等, 2018), 因此光学卫星一般侧摆角度较小, 在进行覆盖计算时多进行平面假设以简化问题。SAR卫星因其特殊的成像机理需要侧视成像, 并且SAR卫星在卫星姿态调整基础上, 还可以通过相控阵方式进行扫描角度调节, 并且对于SAR卫星下视角角度越大, 地距分辨率越接近斜距分辨率, 所以SAR卫星通常具有更大的下视角角度和宽广的可覆盖范围, 导致区域分解受地球曲面影响更加严重, 不能进行平面近似。针对此问题, 本文以实现精确的覆盖计算为研究对象, 拟在计算星载SAR条带成像覆盖范围时采用精确的椭球计算方法, 并且在计算区域覆盖面积使用高斯投影, 保证覆盖计算的准确性。除此之外, 在区域分解时对宽广的下视角角度范围进行限制预处理, 提高优化速度并减少计算浪费, 以期为后续的优化算法提供精简的候选分解区域。

通过区域分解后可以将多星协同区域规划问题数学建模为一个整数规划问题进行调度规划求解, 调度规划方法一般分为精确求解算法和启发

式算法两大类,适用于光学卫星和SAR卫星。传统的精确求解方法随着求解规模的增加会急剧增加求解时间和计算量。进化计算方法在复杂优化领域应用广泛且取得了不错的结果(Zhan等, 2022),且对求解规模增加不敏感,其中遗传算法在成像卫星规划中表现优异(Song等, 2023),因此开展基于遗传方法的SAR多星协同区域观测任务规划方法研究具有重要意义。

2 研究方法

2.1 整体流程

本文开展SAR多星协同区域目标观测任务规划技术研究,以区域目标最大覆盖面积为优化目标。由于当前星载SAR中条带成像模式应用范围最为广泛,为简化研究内容,本研究中SAR卫星统一使用条带成像模式。对于聚束、滑聚等其他成像模式,所提区域目标规划方法同样适用,但是需要根据具体的成像模式进行覆盖范围计算与访问计算。

本文方法整体流程图如图1所示。输入为区域目标、规划时间段和卫星载荷参数,通过卫星工具包进行轨道递推和访问计算,最后通过本文所提区域规划方法进行区域覆盖规划。

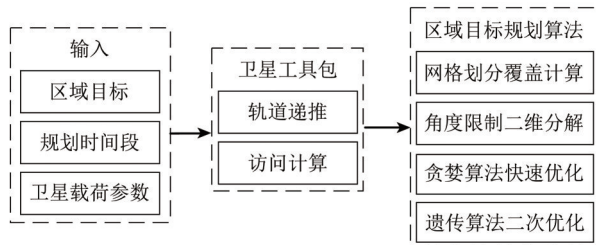


图1 SAR多星协同区域观测规划方法流程图

Fig. 1 Flowchart of the SAR multi-satellite cooperative regional observation method

本文所提区域规划算法包含3个部分:首先是对规划区域进行网格划分和覆盖计算的基础部分;然后是进行角度限制和两维分解的预处理部分;最后分别是使用贪婪算法进行快速优化、使用遗传算法进行2次优化的两阶段优化部分。

2.2 星载SAR条带模式覆盖范围

星载SAR条带模式成像几何模型如图2所示,卫星沿轨道飞行,从点 S_1 开始录取数据,到点 S_2

停止录取数据。SAR波束近似为椭圆形,方位向波束宽度为 θ_a ,距离向波束宽度为 θ_r ,波束中心下视角为 θ_{center} 。为满足成像的合成孔径时间要求,实际有效成像区域可近似为ABDC灰色矩形区域,因此只需要确定矩形区域的4个顶点,即可确定覆盖区域。 A 、 B 点为卫星在 S_1 点分别以角度 $(\theta_a/2, \theta_{center} - \theta_r/2)$ 和 $(\theta_a/2, \theta_{center} + \theta_r/2)$ 发出的波束射线与地面相交的点, $(\cdot)$ 中第一个角度为方位向角度,第二个角度为距离向角度, C 、 D 点为卫星在 S_2 点分别以角度 $(-\theta_a/2, \theta_{center} - \theta_r/2)$ 和 $(-\theta_a/2, \theta_{center} + \theta_r/2)$ 发出的波束射线与地面相交的点。

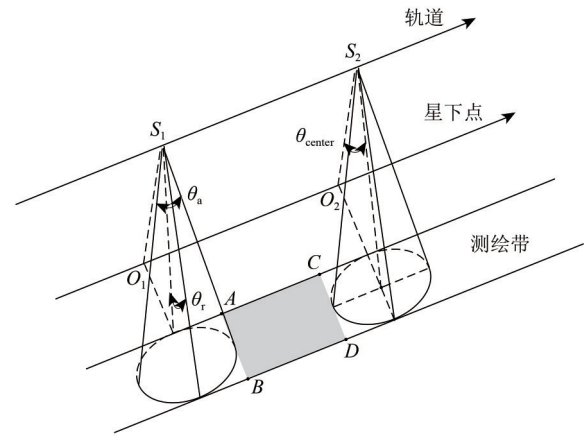


图2 星载SAR条带模式成像几何模型

Fig. 2 Geometry of spaceborne SAR strip mode imaging

对于方位角为 θ_a ,距离角为 θ_r 的波束射线,在天线坐标系中的波束射线方向 $\vec{Q}_i$ 可表示为

$$\vec{Q}_i = [\sin \theta_a; \cos \theta_a \sin \theta_r; \cos \theta_a \cos \theta_r] \quad (1)$$

在已知卫星轨道六根数后,可以根据轨道外推获得卫星在任意时刻的位置。在时刻 t ,卫星在地球固定坐标系位置为 $S_i = (x_i, y_i, z_i)$ 。卫星在时刻 t 以波束方向 (θ_a, θ_r) 照射在地球表面1点 P_i ,设卫星到波束照射点 P_i 之间的距离为 d_i 。

在时刻 t ,由卫星轨道坐标系和地固坐标系的转换关系得到旋转矩阵 R_i ,因此可以得到波束在地固坐标系的方向为 $\vec{Q}_{fixed} = R_i \vec{Q}_i$,卫星和照射点之间的向量可以表示为 $\vec{S_i P_i} = d_i \vec{Q}_{fixed}$,则点 P_i 在地球固定坐标系中的坐标可以表示为

$$P_i = S_i + \vec{S_i P_i} \quad (2)$$

同时,点 P_i 还位于地球表面,满足椭球方程,由此可以解出距离 d_i ,进而可以得到点 P_i 的坐标。

通过上述方式即可确定任意波束射线与地面相交点的位置,进而可以求得ABDC矩形区域位置。

2.3 区域覆盖面积计算方法

要完成对区域目标的观测规划，需要对区域目标的当前覆盖情况进行描述。区域目标经纬度跨度大，且经纬度空间不是标准的距离单位，在经纬度空间进行网格划分不合理，会导致覆盖面积计算不准确。高斯投影变形小且投影精度高，本文使用高斯投影与高斯反投影进行经纬度空间与平面空间的转换，在高斯投影平面进行网格划分与覆盖计算。为保证高斯投影的精度，以目标区域所在的中心经度为投影中心线进行投影，如图3所示。

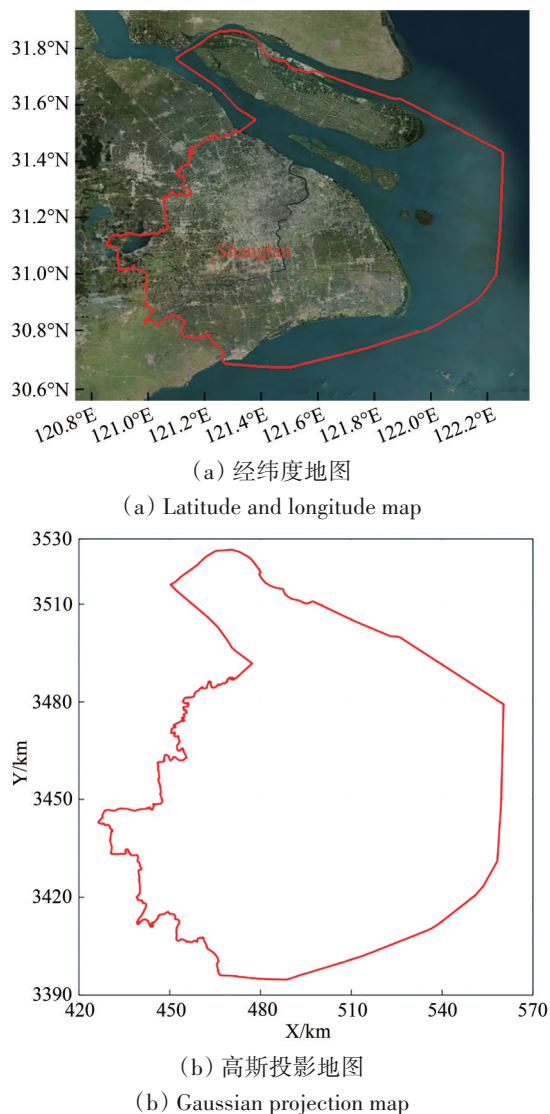


图3 上海市经纬度地图与高斯投影地图对比

Fig. 3 Comparison of the longitude and latitude map and Gaussian projection map of Shanghai

如图4所示，不同的SAR卫星具有不同的轨道和载荷参数，多星协同对复杂区域目标的覆盖情

况表现为多方向不等宽不等长矩形条带覆盖，因此直接计算卫星对复杂区域目标的覆盖面积困难。当前区域规划的通常做法是进行网格划分，计算每个条带矩形对每个网格的覆盖情况，进而得到整个区域的覆盖情况，采用 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 大小的网格对上海区域外接矩形框进行网格划分结果如图5(a)所示。在此基础上，通过目标区域对每个网格的相交情况计算可以得到真实复杂区域的网格化表示，结果如图5(b)所示。

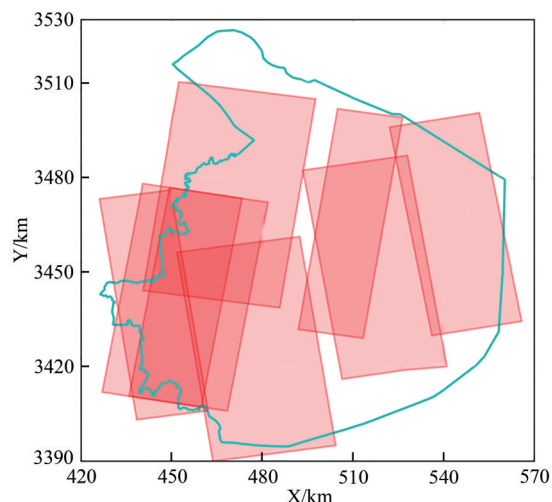


图4 多方向矩形条带对上海区域覆盖图

Fig. 4 Multi directional rectangular strips covering the Shanghai area

为计算每次条带模式成像的矩形覆盖对复杂区域目标的覆盖情况，本文将条带覆盖矩形的4个点投影到高斯投影空间，然后得到矩形覆盖区域的4条边的直线表达式。对区域划分网格依次进行判断是否在矩形覆盖范围内，进而完成条带成像覆盖复杂区域的面积计算，结果如图6所示。

2.4 角度限制预处理

SAR卫星可以通过卫星姿态调整或者相控阵的方式改变波束中心下视角角度，进而改变单次成像的观测范围。因SAR卫星的波束中心下视角调整范围较大，因此SAR卫星在距离向的可调整观测范围较大，但是实际观测距离向波束宽度并不大，实际观测距离向幅宽较小。对区域目标的每1次访问，并不是整个可观测角度都可以对目标进行完成访问，部分角度下无法观测到目标区域，此时会造成访问资源浪费。同时使用整个可观测角度进行优化会导致优化变量维度高，造成计算

浪费。因此需要对 SAR 卫星的观测角度进行限制，结合 SAR 卫星可观测范围和区域目标特征进行角

度限制。

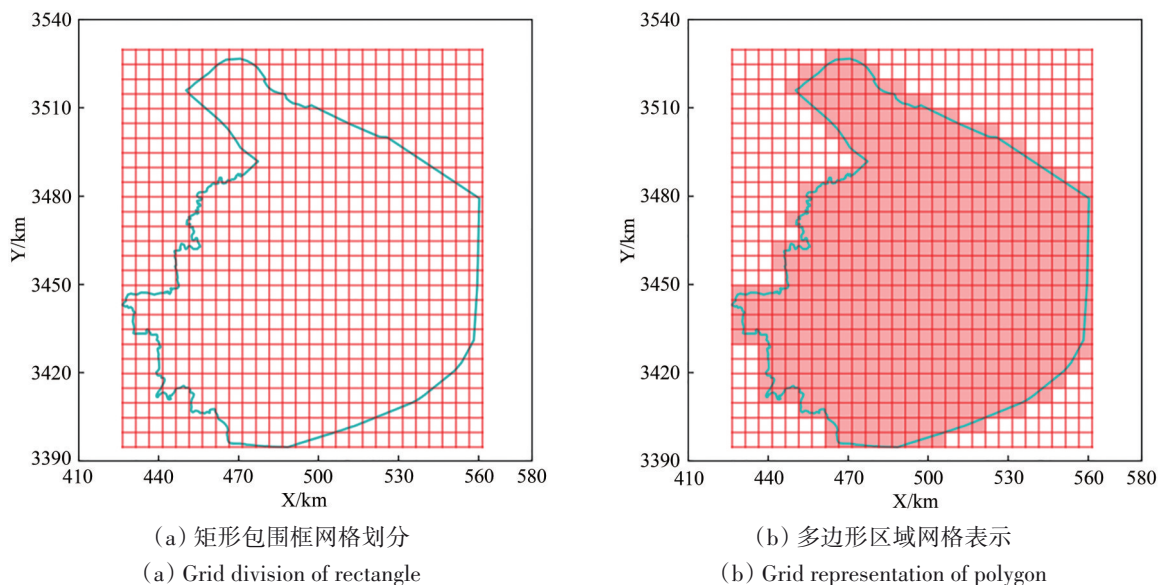


图5 复杂区域网格划分与网格表示

Fig. 5 Grid division and representation of the Shanghai region

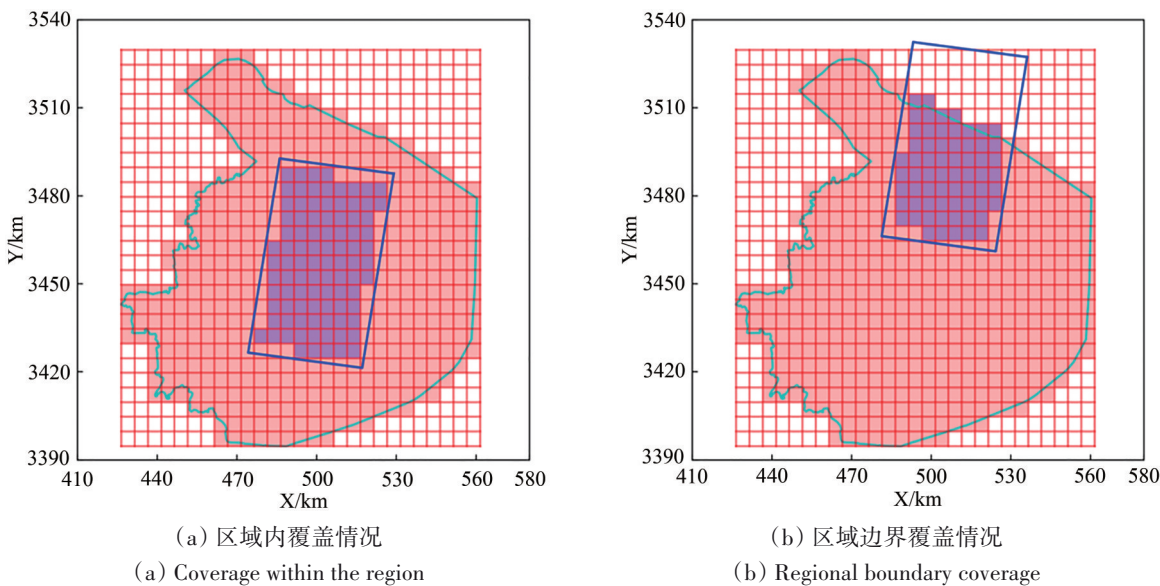


图6 区域内部和边界的两种条带覆盖情况

Fig. 6 Two types of strip coverage within and at the boundaries of the region

对区域目标的角度限制思路如图 7 (a) 所示，区域目标为绿色多边形区域，SAR 卫星可观测区域为 $V_1V_2V_4V_3$ 矩形区域。角度限制计算在高斯投影平面进行：首先将轨道星下点近似为直线 $S_1^*S_2^*$ ；然后遍历绿色区域目标顶点，找到区域目标顶点中离星下点直线最近和最远的两个顶点，分别为 $T_{\min}$ 和 $T_{\max}$ 。其中，过点 $T_{\min}$ 作与 $S_1^*S_2^*$ 平行的直线，交 V_1V_2 于点 L_1 ，交 V_3V_4 于点 L_3 ；过点 $T_{\max}$ 作与 $S_1^*S_2^*$ 平

行的直线，交 V_1V_2 于点 L_2 ，交 V_3V_4 于点 L_4 。计算 L_1 点和 L_2 点的下视角分别为 $\theta_{\min}$ 和 $\theta_{\max}$ ，即为目标区域限制下视角范围。将目标区域限制下视角范围与可观测下视角范围作交集，既为实际下视角限制角度范围。

角度计算如图 7 (b) 所示。其中， O 为地球中心，向量 $\overrightarrow{S_iL_i}$ 与向量 $\overrightarrow{S_iO}$ 夹角为 $\theta_{\min}$ ，同理可得 $\theta_{\max}$ ，具体计算公式如下：

$$\theta_{\min} = \arccos\left(\frac{\overrightarrow{S_1 L_1} \cdot \overrightarrow{S_1 O}}{|\overrightarrow{S_1 L_1}| \cdot |\overrightarrow{S_1 O}|}\right) \quad (3)$$

$$\theta_{\max} = \arccos\left(\frac{\overrightarrow{S_1 L_2} \cdot \overrightarrow{S_1 O}}{|\overrightarrow{S_1 L_2}| \cdot |\overrightarrow{S_1 O}|}\right) \quad (4)$$

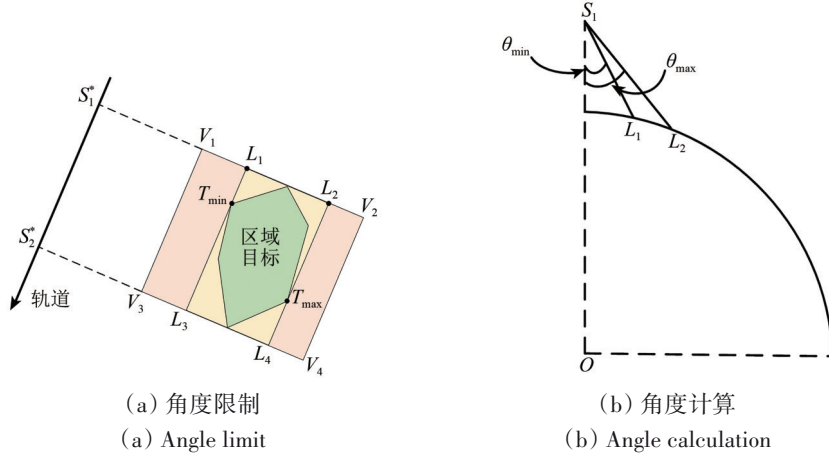


图7 区域目标的角度限制以及角度计算

Fig. 7 Angle limitation and calculation of region target

采用两颗卫星对上海区域进行限制角度计算的两个情况，结果如图8所示。黄色矩形区域为卫星可观测矩形范围，蓝色矩形区域为限制角度后

的观测区域，图8(a)为标准情况，图8(b)为边界情况。

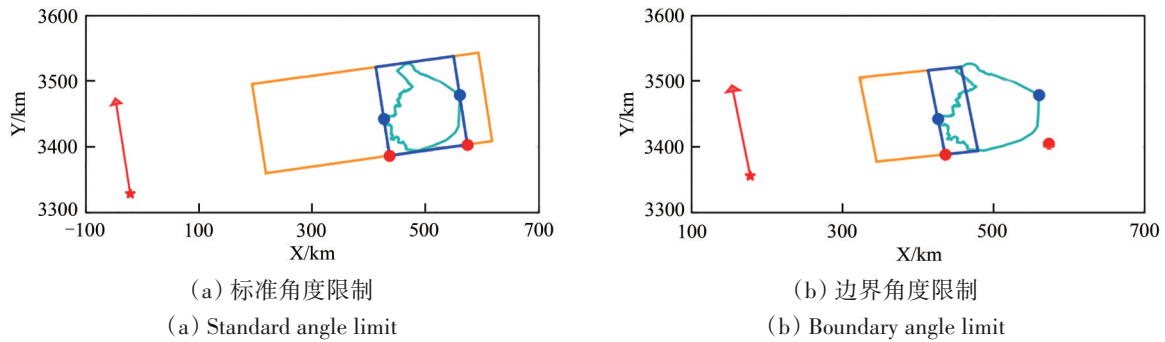


图8 角度限制计算中的两种情况

Fig. 8 Two situations in angle limit calculation

2.5 区域分解方法

对于大范围区域目标，SAR卫星单次成像只能覆盖部分区域，需要多星多次成像进行联合覆盖。单次成像需决策卫星实际观测范围，对于星载SAR条带成像模式可以简化为控制两个参数，开始录取数据时间和波束中心下视角。综合考虑卫星存储以及能源消耗，在本文中固定有效数据录取时间为10 s，因此确定数据开始录取时间后即可确定数据录取结束时间，进而决定方位向数据录取范围。通过波束中心角度控制即可确定距离向数据录取范围。因此对于SAR卫星单次访问区域目标需要确定开始录取时间和波束中心下视角两个参数。设定固定的数据录取时间为10 s，为综

合考虑数据存储约束、数传约束，并为简化问题研究而设定的值，实际工程中需要根据不同成像模式、卫星存储约束、数传约束、以及用户需求决定具体数据录取时间。

对于SAR多星系统对于区域目标的每1次访问，按照开机录取时间和波束中心下视角两个参数进行区域分解，可得到诸多候选观测目标。后续通过优化算法从每1次访问的诸多候选观测目标中选择一个观测目标，最终形成观测计划，因此区域划分是区域目标观测的基础工作，区域划分的好坏以及可行性直接决定了区域规划算法的可行性。

在本方法中，开机时间和波束中心角度都进行

等间隔采样，构建有一定冗余的候选区域。图9（a）为固定观测角度，按照时间维度进行分解的结果，时间间隔选择3 s；图9（b）为固定开机时间，按

照波束中心下视角维度进行划分的结果，角度间隔为1°；同时按照时间和角度两个维度进行分解，即可得到此次访问的候选区域分解列表。

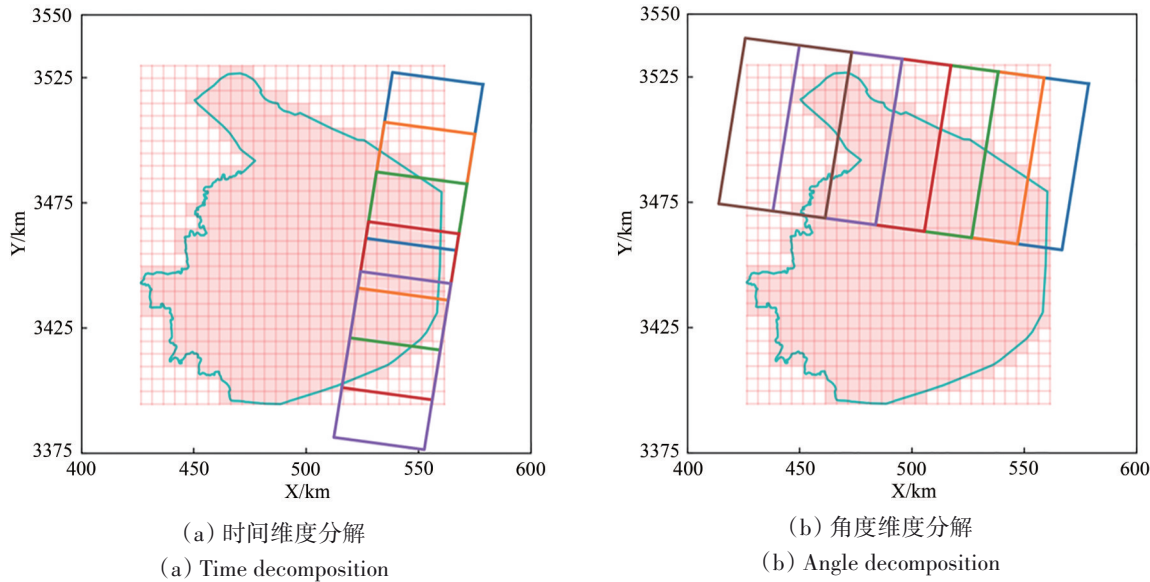


图9 单次访问时间 and 角度维度分解结果
Fig. 9 Time and angle decomposition results of a single access

所提方法对于每1次访问都进行时间和角度的二维分解，保证候选区域与卫星的轨道方向、SAR载荷的可观测范围、目标的区域特性相匹配，保证后续优化工作的可行性。

2.6 改进遗传算法

SAR 多星协同观测区域目标，在规划时间段内可访问目标区域的总次数为 n 次，构建长度为 $2n$ 的染色体，编码方法采用整数编码，按照访问时间顺序进行编码，奇数位基因表示此次访问数据录取时间段编号，从0开始编号，-1表示此次不开机。偶数位基因表示此次访问下视角编号，从0开始编号。如图10所示，对于访问1，表示在第1个时间段开机，选择第2个下视中心角。

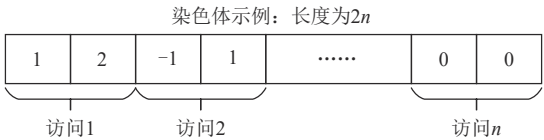


图10 染色体整数编码方法
Fig. 10 Chromosome integer encoding method

表1为访问1在不同下视角与开始时间下的网格覆盖数量，对图10中的访问1编码数据与表1进行查询可知，图10中访问1的开机时间为5 h 54 min 52 s，

波束中心下视角为34.8°，进而可以获得此情况下的区域覆盖情况，覆盖区域网格数为90。对于图10中的访问2开机时间段为-1，表示此次访问不进行观测。

表1 访问1在不同下视角与开始时间下的网格覆盖数量
Table 1 Number of grid coverage corresponding to different perspectives and start times of access 1

开始时间	不同视角					
	32.8°	33.8°	34.8°	35.8°	36.8°	32.8°
5:54:49	34	51	63	75	65	34
5:54:52	61	79	90	94	73	61
5:54:55	82	88	91	95	81	82
5:54:58	73	88	92	93	90	73
5:55:01	46	66	80	82	70	46

通过多个染色体构建优化种群，采用随机初始化方法对种群进行初始化。为提高算法的优化速度以及取得Pareto最优解的能力，使用贪婪算法对问题进行优化，并将优化结果保存为种群中的1个染色体。采用精英保留策略，保证已经得到的满意解不会丢失，以此保证算法的收敛速度和性能。

多星协同区域观测目的是要实现尽可能大的观测区域覆盖，因此适应度函数与覆盖面积正相关。线性面积覆盖适应度函数形式如式（5）， x 表

示覆盖率。但是线性适应度函数在整个覆盖范围给与的奖励相同，这样不利于摆脱局部最优解。本文提出3次面积适应度函数如式（6）所示，随着覆盖率的提升给与的奖励也会增加，更加有利于实现更大面积覆盖。图11为2种适应度函数的对比图像。

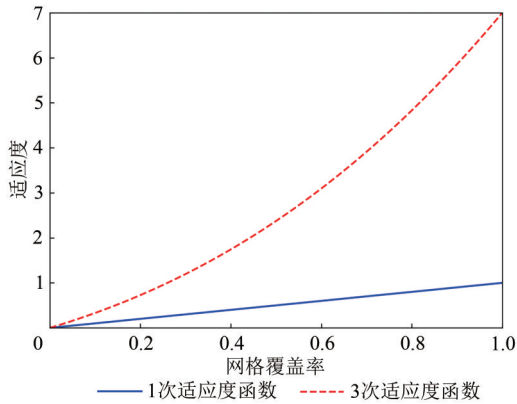


图11 不同网格覆盖率下两种适应度函数对比

Fig. 11 Comparison of two fitness functions under different grid coverage rates

$$\text{fitness}(x) = x \quad (5)$$

$$\text{fitness}(x) = (x + 1)^3 - 1 \quad (6)$$

选择算子采用轮盘赌方法，通过计算种群中每个染色体个体的适应度，然后根据各自适应度确定被选择概率，最后通过轮盘赌的形式选择下一代种群，适应度越大的个体具有更大的概率被保留。

交叉算子采用以单次访问为最小粒度的单点交叉，如图12所示。可见：染色体长度 n 为8，所以表示有4次访问机会；从4次访问机会中随机选取1次作为交叉点，图12选取访问2作为交叉点，染色体1和染色体2进行交叉操作得到新染色体1，新染色体1由染色体1交叉点之前部分和染色体2交叉点之后部分构成。



图12 以单次访问为最小粒度的单点交叉操作

Fig. 12 Single-point crossover operation with single visit as the minimum granularity

变异操作采用以单次访问为最小粒度的随机变异，如图13所示，染色体的访问2对应的基因发生变异，访问2的开机时间段变为编号为1的时间段，访问2的角度变为编号为2的时间段。

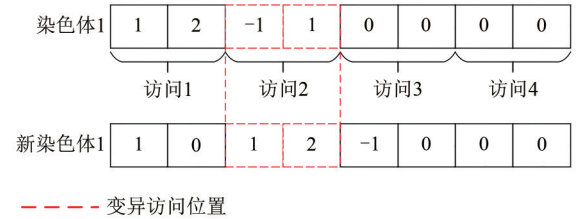


图13 以单次访问为最小粒度的随机变异操作

Fig. 13 Random mutation operation with single access as the minimum granularity

3 结果与分析

3.1 仿真场景

本文选择4颗SAR卫星进行组网仿真，以验证本文所提方法。本文仿真的组网SAR卫星分别为高分三号01星、高分三号02星、高分三号03星、海丝一号，规划时间为北京时间2022年8月15日0点到2022年8月20日0点。卫星轨道数据使用两行轨道参数TLE（Two Line Elements）格式，4颗卫星轨道数据如表2所示，轨道递推方法采用简化常规模摄动模型SGP4（Simplified General Perturbation 4）。4颗卫星的单轨星下点轨迹如图14所示。

本文仿真中高分三号3颗卫星统一使用超精细条带模式，入射角为 20° — 50° ，卫星高度近似为755 km，通过简化计算波束下视角变化范围为 17.6° — 39.2° 。在本文仿真中海丝一号卫星成像采用条带模式，入射角范围为 20° — 35° ，高度512 km，通过简化计算波束下视角变化范围为 18.2° — 30.4° 。

SAR卫星实际规划中需要考虑波位参数，通过合理选择脉冲重复频率PRF（Pulse Repetition Frequency）和入射角保证回波信号同时避开发射截止区和星下点回波窗，同时满足距离模糊度、方位模糊度、成像幅宽、分辨率等限制条件。为简化本文研究问题便于分析处理，本文对波位参数进行简化处理，设定距离向波束宽度固定为 2.0° 。

实验选择北京市、天津市、上海市3个区域进行仿真实验，3个区域各自轮廓如图15所示。

本方法所使用遗传算法的种群数量为120，迭代次数为100，交叉概率为0.8，变异概率为0.1。

表2 卫星TLE轨道参数以及传感器参数
Table 2 Satellite TLE orbit parameters and sensor parameters

卫星	TLE轨道参数	入射角/(°)	下视角/(°)	波束宽度/(°)
高分三号01星	1 41727U 16049A 22226.53759008 .00000010 00000-0 16333-4 0 9993	20—50	17.6—39.2	2.0
	2 41727 98.4086 233.9978 0001763 100.1507 259.9889 14.42215947316469			
高分三号02星	1 49495U 21109A 22226.29358493 .00000006 00000-0 15009-4 0 9996	20—50	17.6—39.2	2.0
	2 49495 98.4136 232.8902 0001436 84.7726 275.3631 14.42211303 38108			
高分三号03星	1 52200U 22035A 22226.33584824 .00000010 00000-0 16134-4 0 9992	20—50	17.6—39.2	2.0
	2 52200 98.4152 233.5147 0001424 92.0335 268.1028 14.42212036 18650			
海丝一号	1 47297U 20102B 22226.59550883 .00001695 00000-0 79763-4 0 9998	20—35	18.2—30.4	2.0
	2 47297 97.4332 322.9536 0004430 225.0432 249.0643 15.20917794 91180			

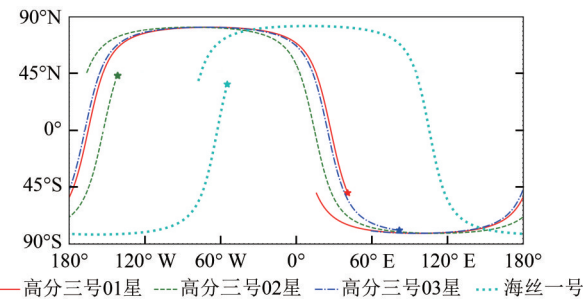


图14 4颗卫星的单轨星下点轨迹
Fig. 14 Single orbit substellar point trajectories of four satellites

3.2 结果与分析

使用不同算法对3个实验区域进行访问实验结

果如图表3所示。改进遗传1为使用贪婪算法初始化和精英保留策略的遗传算法，改进遗传2为使用3次面积适应度函数的遗传算法。从表3可以看出，通过使用贪婪算法和使用精英保留策略，能够进一步优化覆盖率。在此基础上，进一步使用3次函数形式的适应度函数，能够进一步提高覆盖率，证明本文改进算法的有效性。对比3个区域，所提算法都有覆盖率提高效果，但是提升效果不一，原因在于形状、位置、访问次数等差异导致各自陷入局部最优程度不一致，但是所提算法在3个区域都能实现效果提升证明所提方法的鲁棒性。

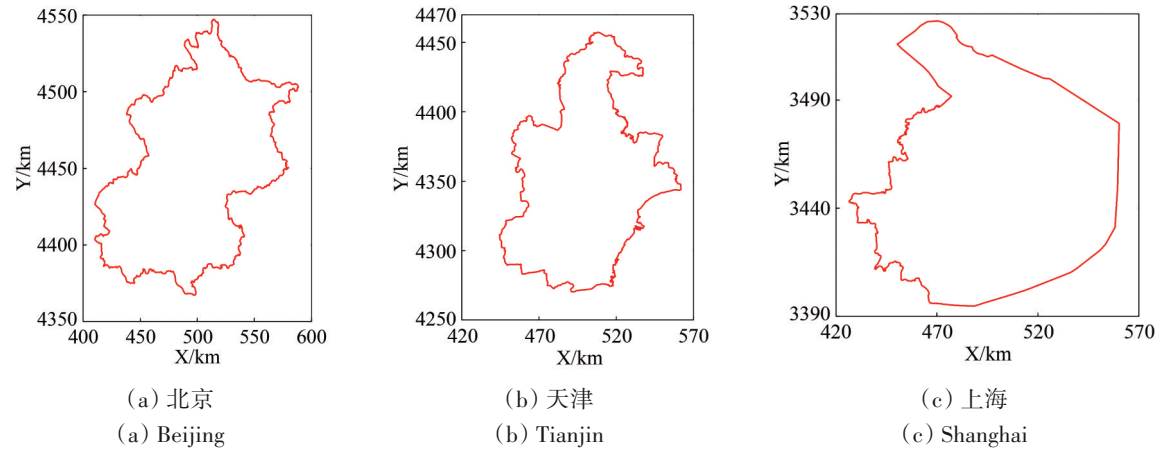


图15 北京、天津和上海3个区域的高斯投影图对比
Fig. 15 Comparison of Gaussian projection maps in three regions: Beijing, Tianjin and Shanghai

表3 不同算法在3个区域上的优化结果对比
Table 3 Comparison of optimization results of different algorithms in three regions

算法	北京覆盖率	天津覆盖率	上海覆盖率	算法	北京覆盖率	天津覆盖率	上海覆盖率
贪婪算法	71.39	82.35	76.35	改进遗传1	74.17	84.74	83.57
遗传算法	71.52	79.04	79.56	改进遗传2	74.56	85.29	85.37

注:加粗数值表示最优数值。

图 16 为表 2 中 4 种不同算法在上海区域的覆盖优化曲线变化图, 黄色方形虚线为贪婪算法结果, 贪婪算法不需要迭代优化, 所以在图 16 中表示为 1 条直线。蓝色 X 形虚线为原始遗传算法优化曲线, 原始遗传算法虽然能够实现优化, 但是优化过程不稳定, 且优化效果不够好。绿色三角虚线为添加贪婪算法初始化和精英保留策略的遗传算法, 能够在贪婪算法基础上继续优化, 但是一段时间后收敛不再继续优化。红色圆形实线为添加 3 次适应度函数的遗传算法结果, 能够实现效果最好的覆盖优化, 证明所提 3 次适应度函数有利于更大面积覆盖优化。

图 17 为北京市、上海市、天津市 3 个区域目标的覆盖结果图, 左侧为贪婪算法优化结果, 右侧为改进遗传算法优化结果, 本文仿真采用固定距离向波束宽度为 2° , 因此随着下视角增大, 幅宽也会

相应增大, 覆盖结果表现出不同的距离向幅宽。从图 17 中可以直观看出, 改进遗传算法 2 对区域的覆盖率更高。

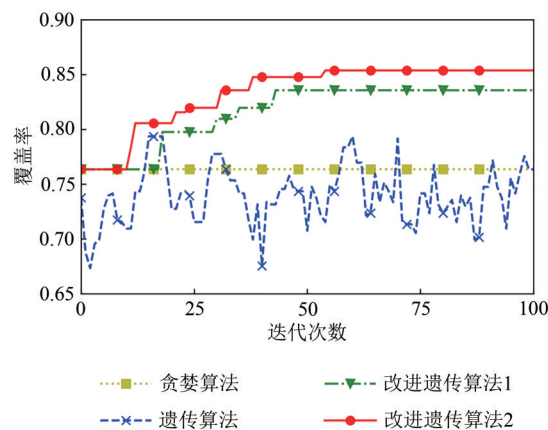


图 16 上海区域不同算法下覆盖率差异

Fig. 16 Optimization curves for different algorithms in the Shanghai region

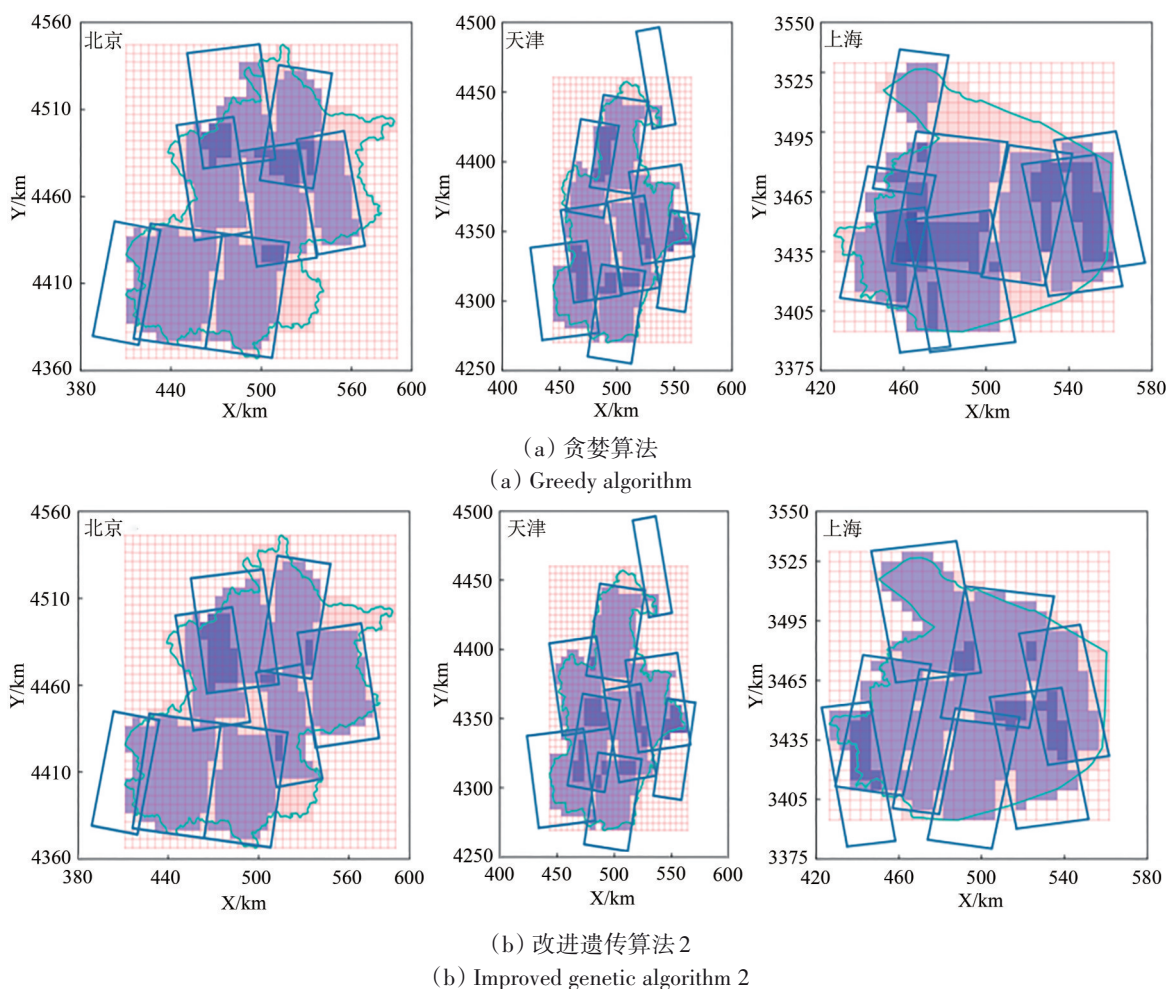


图 17 不同算法下北京市、天津市、上海市 3 个区域的覆盖结果图

Fig. 17 Coverage results of Beijing, Tianjin, and Shanghai under different algorithms

观察图 17 区域优化覆盖结果以及图 18 (a) 可以看出, 部分网格在条带覆盖边界区域, 由于划

分网格较大, 导致网格没有全部位于条带覆盖范围内, 因此在计算面积时没有计算这种网格区域,

导致覆盖区域计算不准确。

解决此问题方法为提高网格划分的精细度，图 18 为采用不同大小的网格划分后的区域覆盖结果，可以看出采用更加精细网格划分后区域覆盖计算更加精准。

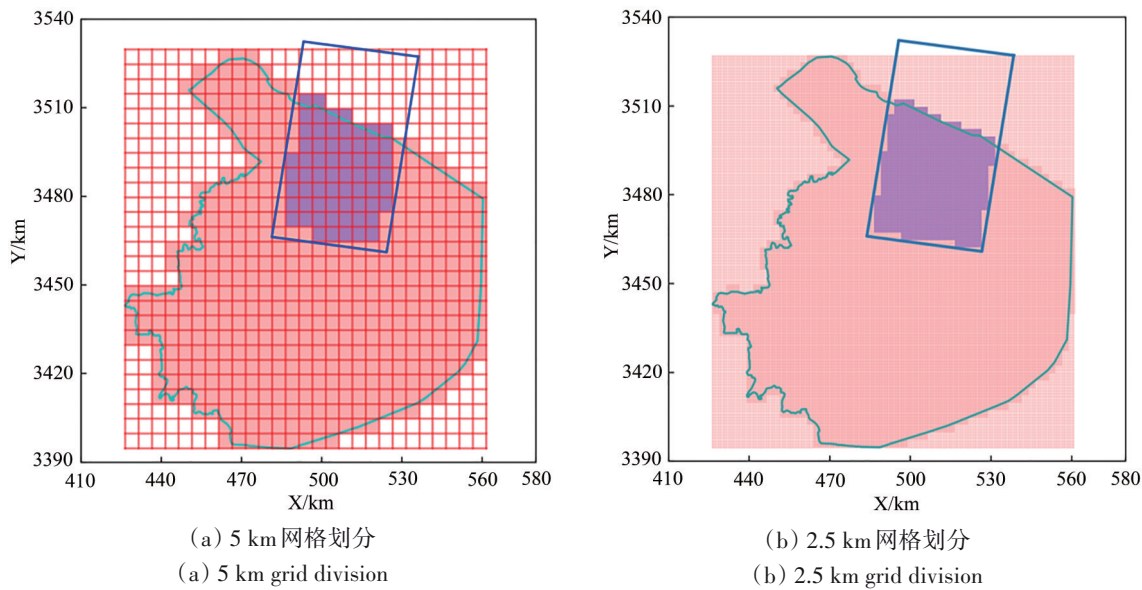


图 18 不同精细网格覆盖结果
Fig. 18 Different fine grid coverage results

在精细网格基础上，对上海区域采用上述几种算法进行优化，结果如表 4 和图 19 所示。在精细网格划分条件下，本文所提算法依旧能够实现优异的优化结果，证明算法的通用性和稳定性。

表 4 精细网格下算法优化结果
Table 4 Algorithm optimization results under fine grid

参数	贪婪算法	遗传算法	改进遗传 1	改进遗传 2
覆盖率	84.19	83.40	88.74	91.49

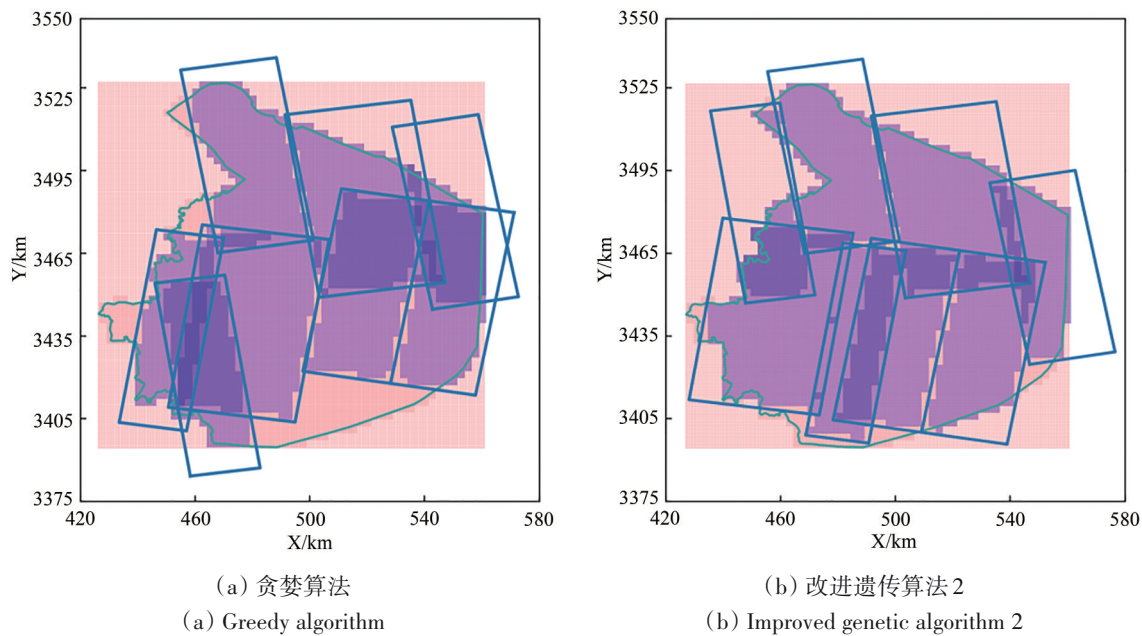


图 19 精细网格下两种算法的优化结果
Fig. 19 Optimization results of two algorithms under fine grid

4 结 论

为优化SAR多星协同复杂区域覆盖规划技术, 本文构建了一个可行的SAR多星协同复杂区域观测规划流程, 提出了一种适合SAR多星条带成像模式的复杂区域覆盖规划方法。主要结论如下: (1) 现有的区域规划针对简单形状区域进行研究, 本文提出了一种结合高斯投影、网格划分与几何运算的复杂大范围区域覆盖面积计算方法; (2) 针对SAR卫星具有宽广下视角范围的特点, 提出了结合角度限制与二维分解的区域分解方法, 所提方法能够实现高效可行的区域分解; (3) 针对当前SAR多星区域覆盖规划方法人在环路、效率低下的问题, 提出了结合贪婪算法、精英保留策略、3次适应度函数的改进遗传算法, 能够实现高效优异的区域覆盖结果。

由于SAR卫星规划需要考虑成像波位的选择, 对PRF和入射角产生更多的限制条件, 并且还要考虑距离模糊度、方位模糊度等因素对成像质量的影响, 这都将增加本文规划模型的复杂度。因此, 本文进行了简化处理。后续研究将深入结合SAR卫星成像信号处理特点, 开展考虑SAR成像波位、SAR图像质量的SAR多星协同复杂区域覆盖规划方法研究。

参考文献(References)

- Bai B C. 2008. Modeling and optimization algorithms for imaging satellites scheduling problem with task merging. Changsha: National University of Defense Technology (白保存. 2008. 考虑任务合成的成像卫星调度模型与优化算法研究. 长沙: 国防科学技术大学)
- Deng Y K, Yu W D, Zhang H, Wang W, Liu D C and Wang R. 2020. Forthcoming spaceborne SAR development. Journal of Radars, 9(1): 1-33 (邓云凯, 禹卫东, 张衡, 王伟, 刘大成, 王宇. 2020. 未来星载SAR技术发展趋势. 雷达学报, 9(1): 1-33) [DOI: 10.12000/JR20008]
- Du Y H, Wang T, Xin B, Wang L, Chen Y G and Xing L N. 2020. A data-driven parallel scheduling approach for multiple agile earth observation satellites. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 24(4): 679-693 [DOI: 10.1109/TEVC.2019.2934148]
- He R J. 2004. Research on Imaging Reconnaissance Satellite Scheduling Problem. Changsha: National University of Defense Technology (贺仁杰. 2004. 成像侦察卫星调度问题研究. 长沙: 国防科学技术大学)
- Hu X X, Zhu W M, Ma H W, An B, Zhi Y L and Wu Y. 2021. Oriental variable-length strip covering problem: a branch-and-price-based algorithm. European Journal of Operational Research, 289(1): 254-269 [DOI: 10.1016/j.ejor.2020.07.003]
- Kim H and Chang Y K. 2015. Mission scheduling optimization of SAR satellite constellation for minimizing system response time. Aerospace Science and Technology, 40: 17-32 [DOI: 10.1016/j.ast.2014.10.006]
- Kim H and Chang Y K. 2020. Optimal mission scheduling for hybrid synthetic aperture radar satellite constellation based on weighting factors. Aerospace Science and Technology, 107: 106287 [DOI: 10.1016/j.ast.2020.106287]
- Lemaître M, Verfaillie G, Jouhaud F, Lachiver J M and Bataille N. 2002. Selecting and scheduling observations of agile satellites. Aerospace Science and Technology, 6(5): 367-381 [DOI: 10.1016/S1270-9638(02)01173-2]
- Li C S, Wang W J, Wang P B, Chen J, Xu H P, Yang W, Yu Z, Sun B and Li J W. 2016. Current situation and development trends of spaceborne SAR technology. Journal of Electronics and Information Technology, 38(1): 229-240 (李春升, 王伟杰, 王鹏波, 陈杰, 徐华平, 杨威, 于泽, 孙兵, 李景文. 2016. 星载SAR技术的现状与发展趋势. 电子与信息学报, 38(1): 229-240) [DOI: 10.11999/JEIT151116]
- Niu X N, Tang H and Wu L X. 2018. Satellite scheduling of large areal tasks for rapid response to natural disaster using a multi-objective genetic algorithm. International Journal of Disaster Risk Reduction, 28: 813-825 [DOI: 10.1016/j.ijdrr.2018.02.013]
- Ruan Q M. 2006. Research on photo-reconnaissance satellites scheduling problem for area targets observation. Changsha: National University of Defense Technology. (阮启明. 2006. 面向区域目标的成像侦察卫星调度问题研究. 长沙: 国防科学技术大学)
- Ruan Q M, Tan Y J, Li J F and Chen Y W. 2006. Research on segmenting and selecting of area targets. Science of Surveying and Mapping, 31(1): 98-100 (阮启明, 谭跃进, 李菊芳, 陈英武. 2006. 对地观测卫星的区域目标分割与优选问题研究. 测绘科学, 31(1): 98-100)
- Song Y J, Wei L N, Yang Q, Wu J, Xing L N and Chen Y W. 2023. RL-GA: a reinforcement learning-based genetic algorithm for electromagnetic detection satellite scheduling problem. Swarm and Evolutionary Computation, 77: 101236 [DOI: 10.1016/j.swevo.2023.101236]
- Sun G C, Liu Y B, Xiang J X, Liu W K, Xing M D and Chen J L. 2022. Spaceborne synthetic aperture radar imaging algorithms: an overview. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 10(1): 161-184 [DOI: 10.1109/MGRS.2021.3097894]
- Wang C. 2014. Research on the scheduling method of the formation flying InSAR mapping mission. Harbin: Harbin Institute of Technology (王聪. 2014. 编队干涉SAR对地测绘任务规划方法研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学)
- Wei J. 2013. The mission planning model and improved Ant Colony solving algorithm for networking SAR satellites//Proceedings of the 2013 International Conference on Management Science and Engineering 20th Annual Conference Proceedings. Harbin: IEEE: 14-19 [DOI: 10.1109/ICMSE.2013.6586256]

- Xu Y J, Liu X L, He R J and Chen Y G. 2020. Multi-satellite scheduling framework and algorithm for very large area observation. *Acta Astronautica*, 167: 93-107 [DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.10.041]
- Yu J, Xi J J, Yu L J and Jiang F H. 2015. Study of one-orbit multi-stripes splicing imaging for agile satellite. *Spacecraft Engineering*, 24(2): 27-34 (余婧, 喜进军, 于龙江, 蒋方华. 2015. 敏捷卫星同轨多条带拼幅成像模式研究. *航天器工程*, 24(2): 27-34) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-8748.2015.02.005]
- Zhan Z H, Shi L, Tan K C and Zhang J. 2022. A survey on evolutionary computation for complex continuous optimization. *Artificial Intelligence Review*, 55(1): 59-110 [DOI: 10.1007/s10462-021-10042-y]
- Zhang Y H, Zhang X, Wang S B, Wei C Q and Wu Q S. 2022. Development status and analyses of micro SAR satellite. *Spacecraft Engineering*, 31(5): 119-125 (张永贺, 张旭, 王韶波, 魏楚奇, 吴秋诗. 2022. 微小型 SAR 卫星发展现状及分析. *航天器工程*, 31(5): 119-125) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-8748.2022.05.016]
- Zhou X Q, Peng M Y and Hu F. 2022. Current status and prospects of land remote sensing satellite development in China. *Satellite Application*, (9): 14-19 (周晓青, 彭明媛, 胡芬. 2022. 我国陆地遥感卫星发展现状与展望. *卫星应用*, (9): 14-19) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-9030.2022.09.004]
- Zhu W M, Hu X X, Xia W and Sun H Q. 2019. A three-phase solution method for the scheduling problem of using earth observation satellites to observe polygon requests. *Computers and Industrial Engineering*, 130: 97-107 [DOI: 10.1016/j.cie.2019.02.014]

SAR multi-satellite collaborative complex area observation planning based on improved genetic algorithm

SHI Xin¹, XING Mengdao^{1,2}, ZHANG Jinsong², LIU Huitao², WANG Hongxian¹

1. National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. Academy of Advanced Interdisciplinary Research, Xidian University, Xi'an 710071, China

Abstract: Large-scale regional observations by remote-sensing satellites play an important role in mapping, disaster relief, and other fields. The efficiency of single-satellite observation is low, and multisatellite collaborative observation is the main means for rapidly observing large areas. To date, multisatellite collaborative observation is mostly studied on optical remote-sensing satellites, but research on the collaborative observation of SAR satellites is limited. Moreover, SAR satellites have imaging mechanisms and modes distinct from those of optical satellites, and thus the optical satellite collaborative planning method cannot be fully applied to SAR satellites. For the optimization of the performance of SAR multisatellite collaborative observation, research into SAR multisatellite collaborative regional observation technologies is crucial.

First, the coverage calculation of large-scale complex areas was analyzed, and a complex area coverage calculation method that combines Gaussian projection, grid division, and geometric operations and can realize the coverage calculation of any complex area, was proposed. Then, an accurate coverage analysis was performed on the SAR strip imaging mode, and a candidate area decomposition method combining angle restriction and two-dimensional decomposition was established. Optimization efficiency was improved by reducing the optimization space through angle restriction, and complex continuous optimization problems were discretized through two-dimensional decomposition. These approaches allowed the use of genetic algorithms for optimization. Finally, an improved genetic algorithm combining greedy algorithm initialization, elite retention strategy, and cubic fitness function was formulated for regional coverage optimization. Chromosome encoding, crossover, and mutation operations were designed for optimization, an optimal retention strategy was used to improve optimization speed and stability, and the cubic fitness function was used to improve the optimization effect.

This study selected four on-orbit SAR satellites, namely, GF-3 01, GF-3 02, GF-3 03, and HISEA-1, and three regional targets, namely, Beijing, Tianjin, and Shanghai, for simulation experiments. The simulation time was 5 days, and the orbit data included real TLE data. The SGP4 orbit propagation model was used, and the beam parameters of the SAR satellite were reasonably simulated. Experimental results show that the coverage rates of the proposed method on three regional targets in Beijing, Tianjin, and Shanghai increased by 3.17%, 2.94%, and 9.02% compared with the coverage rates obtained with the greedy algorithm. In fine grids, the coverage result of the proposed method in the Shanghai area was 7.3% higher than that of the greedy algorithm.

This study analyzes the SAR multisatellite collaborative complex area coverage planning technology, constructs a feasible SAR multisatellite collaborative complex area observation planning process, and proposes a complex area coverage planning method suitable for the SAR multisatellite strip imaging mode. This algorithm can provide a technical basis for the establishment of a SAR multisatellite collaborative regional planning system. However, the proposed method simplifies constraints at the imaging signal processing level of SAR satellites, and subsequent research will conduct in-depth research on the characteristics of SAR satellite imaging signal processing.

Key words: remote sensing, spaceborne SAR, multi-satellite collaboration, regional observation, coverage calculation, regional decomposition, genetic algorithm

Supported by National Nature Science Foundation of China (No. 62371376, 62331020); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 20199234731, 20103227364); Stabilization Support of National Radar Signal Processing Laboratory (No. KGJ202201)