

融合遗传蚁群算法的区域覆盖卫星星座优化算法^{*}

华冰,王培源,吴云华,陈志明
(南京航空航天大学 航天学院,江苏 南京 211106)

摘要:针对特定区域覆盖并密集重访的卫星星座优化设计问题,采用回归轨道和共星下点轨迹星座的设计方案,提出特定区域内重点地区权值排序覆盖并融合遗传蚁群算法优化求解卫星星座轨道参数的方法。分析区域覆盖星座的设计需求,建立回归轨道覆盖区域模型,利用遗传蚁群算法计算出最优轨道根数,使用共星下点轨迹星座求解算法求出所有星座参数。仿真实验结果表明优化设计的星座满足对于区域目标的覆盖时间和重访次数需求,并对重要地点按照权值排序进行了侧重性覆盖和重访,验证了算法的可行性。

关键词:重点权值排序;星座优化设计;特定区域覆盖;遗传蚁群算法
中图分类号:TN919.5 **文献标志码:**A **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**
文章编号:1001-2486(2023)02-164-08



听语音
与作者
聊科研

Regional coverage satellite constellation optimization algorithm fused with genetic ant colony algorithm

HUA Bing, WANG Peiyuan, WU Yunhua, CHEN Zhiming
(College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: In order to optimize the design of satellite constellations with specific area coverage and intensive revisits, a design scheme of regression orbit and co-subsatellite point trajectory constellation was adopted, and a method to optimally solve the satellite constellation orbit parameters by integrating genetic ant colony algorithm with the weight ranking coverage of key areas in specific area was proposed. The design requirements of the regional coverage constellation were analyzed, a regression orbit coverage area model was established, the optimal orbit root number was calculated by using the genetic ant colony algorithm, and all the constellation parameters were solved through using the co-subsatellite point trajectory constellation solution algorithm. The simulation results show that the optimized constellation meets the coverage time and revisit frequency requirements for the area target, and provides focused coverage and revisits of important locations in order of weight, which verifies the feasibility of the algorithm.

Keywords: importance weight ranking; constellation optimization design; specific area coverage; genetic ant colony algorithm

由于全球人口和资源分布不均、局部自然灾害频发,建设和维护一个全球覆盖的卫星星座的成本极大。随着航天任务场景的不断细分,卫星星座设计由最初的面向全球的全面覆盖转变为面向重点区域的局部覆盖。这就使得构建区域性卫星星座成为航天任务的一个关注重点,其难点在于特定区域的地理位置和不规则的边界形状加之地球自转引起的复杂时空关系,使得传统的典型星座设计方法不再适用。区域覆盖任务多用于为特定区域提供密集的通信和监视,因此特定区域覆盖的星座设计需要重点关注对于目标区域的覆盖时长、覆盖率和重访次数等特性。

针对区域覆盖的卫星星座的设计过程是一个典型的多目标、多变量、非线性的问题。在国际上,Meziane-Tani等采用多目标遗传算法(multi-objective genetic algorithms, MOGA)在提高卫星覆盖率、最小化卫星总数和降低卫星高度之间进行权衡。通过实验找出平均适应度函数改善最显著的适应度函数的权重分布,计算出了不同高度范围下的优化星座设计,结果表明,与传统几何设计相比,利用MOGA设计的星座尺寸明显减小^[1]。Lee等总结了重复地轨轨道和共同地轨星座的循环卷积性质,这种星座构型使得区域覆盖星座设计线性化,即可以同时优化多个目标区域和多个具有不同轨道特征

^{*} 收稿日期:2021-04-07
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61973513)
作者简介:华冰(1978—),女,辽宁抚顺人,副研究员,博士,硕士生导师,E-mail:huabing@nuaa.edu.cn

的子星座;并且提出了 While-Loop 和二进制整数规划两种方法,旨在利用尽可能少的卫星数优化设计一个星座。实验表明,While-Loop 方法提供了一个计算效率高的近似,而二进制整数规划方法产生最优解^[2]。Shtark 等开发一种基于遗传算法和梯度优化的低轨卫星(low earth orbit, LEO)星座优化设计方法。星座设计目标包括总覆盖时间、重访时间和几何精度稀释百分比,最终仿真实验结果表明设计星座可以满足多个设计目标,降低了发射、建造和维护成本^[3]。

在国内,马剑等以卫星最少数目和重访覆盖时间为目标,建立了“圆形轨道-目标点”数据库,以全局搜索所有回归轨道以及共星下点轨迹星座,利用遗传算法对轨道参数结果进行优化求解,得出最终星座参数,但是这样会因为搜索步长的精度影响最终计算结果的精度^[4];马原野同样利用遗传算法进行了星座优化设计^[5];Xiong 等采用基于偏好的多目标进化算法 HMOEA-T 来解决区域覆盖的偏好问题,其实验结果表明,将偏好信息集成到优化过程中具有一定的优势,并将其与 T-MOEA/D 算法、T-NSGA-III 算法进行了对比研究,结果表明 HMOEA-T 算法具有较强的竞争力和更好的性能^[6];姜兴龙等利用改进的非支配近邻免疫算法优化多约束条件的星座设计问题^[7];于彦君等利用改进的模拟退火算法结合改进等面积网格点覆盖法,并且以卫星数目最少和满足重访时间为目标,设计了针对不规则区域成像的卫星星座构型的方法^[8];孟少飞等将星座对经纬度的覆盖转化为对维度带上任意点的二维图的覆盖,并在这个基础上研究了四重对地覆盖星座构型,从而避开了覆盖性能统计的复杂过程^[9]。

国内外针对区域覆盖的星座设计都考虑到了总覆盖时间、重访次数、覆盖率等多个目标问题,也采用了多种智能算法去优化星座设计,但主要问题在于没有考虑到现实任务场景中覆盖区域内某些重要地点的优先级次序。因此,针对特定区域覆盖的星座设计主要难点在于:利用智能算法提高星座对于覆盖区域的重要地点的覆盖时间和重访次数,保证其任务需求和重要地点的权值排序。为了解决上述问题,本文建立区域重点权值排列模型确定地区覆盖的优先级,采用动态判定的方法来决定遗传算法和蚁群算法的融合时间,以此保证优化结果的精度和准确度。

1 区域覆盖重点权值与星座设计

1.1 重点权值区排序覆盖

传统的区域覆盖设计只考虑卫星星座在特定的任务周期内完全覆盖和密集重访,这样设计的缺陷在于无法聚焦一个或多个重要地点,非重要价值地点可能会消耗过多重访时间和密度。

因此,对于所要覆盖的区域,设定重点权值 σ ,在规划星座时按照地点和地区的重要权值 σ 进行排序,重要性越高的地点,重点权值 σ 越大,在星座完全覆盖的情况下会得到更加密集的卫星重访。如图1所示的重点地区标注为:目标1、目标2、目标3、目标4、目标5、目标6、目标7。

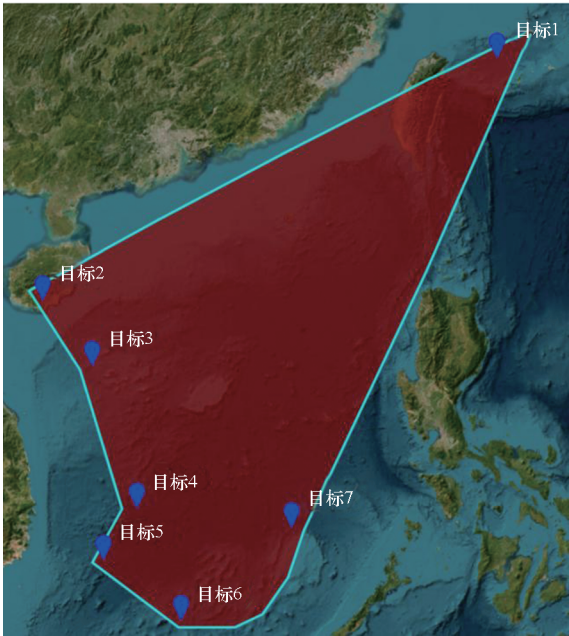


图1 重点权值地点

Fig. 1 Important place

目标1~7的重点权值分别为 σ_i ,如表1所示。其他未注明地点的重点权值都为 σ_c ,且 σ_c 均为1。根据各个地点的权值进行递减排序,此时从高到低的重要性排序为:目标4、目标6、目标5、目标7、目标1、目标2、目标3。设计的星座会优先保证这些重要地点的覆盖和重访。

区域为一定范围内的地点,利用加权积分法可以求解出小范围区域的重点权值 σ_z^i 。对地点重点权值 σ_i 或者对区域重点权值 σ_z^i 进行排序,就能确定出卫星星座覆盖和重访的优先级。

轨道上卫星的圆形传感器的覆盖面积大小受轨道高度 h 影响,卫星圆形传感器在地球表面的投影可以近似看作二维圆形,如图2所示。

表 1 重要地点权值

Tab. 1 Weight ranking of important place

目标地点	重点权值 σ_i
目标 1	4.57
目标 2	4.12
目标 3	3.76
目标 4	9.80
目标 5	8.98
目标 6	9.69
目标 7	8.88

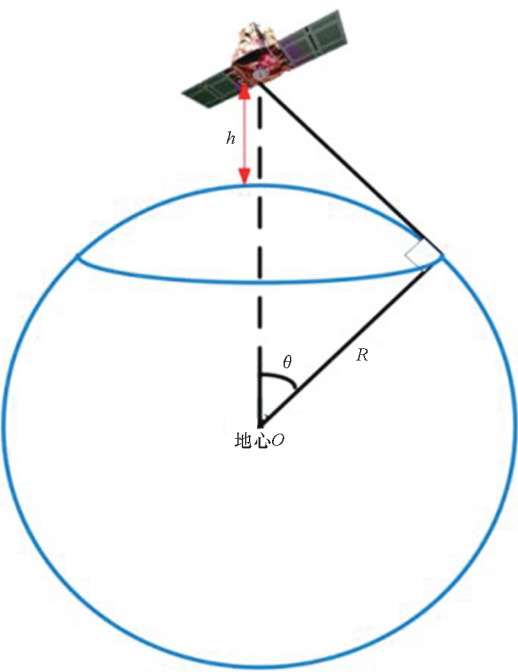


图 2 卫星覆盖面积
Fig. 2 Satellite coverage area

已知卫星轨道高度 h , 地球半径 R (取 6 378. 14 km) 和地心夹角 θ , 卫星覆盖面积和投影面积如式(1)^[10]所示:

$$A_c = 2\pi R^2 (1 - \cos\theta) = 2\pi R^2 h (R + h) \quad (1)$$

针对此种方法, 提出如图 3 所示的总体星座设计方案: 首先分析目标区域分布, 根据任务覆盖重访需求确定重点地区权重; 其次, 由于在回归轨道上的卫星会重复上一个周期卫星的运动轨迹, 方便用来对于特定区域进行周期性反复观测, 因此选择卫星轨道为近地圆形回归轨道; 接着利用共星下点轨迹星座构型设计轨道模型; 之后利用智能算法计算优化处理, 经过优化和局部调整得出结果; 最后经过实验验证, 便可以输出最终设计成果。

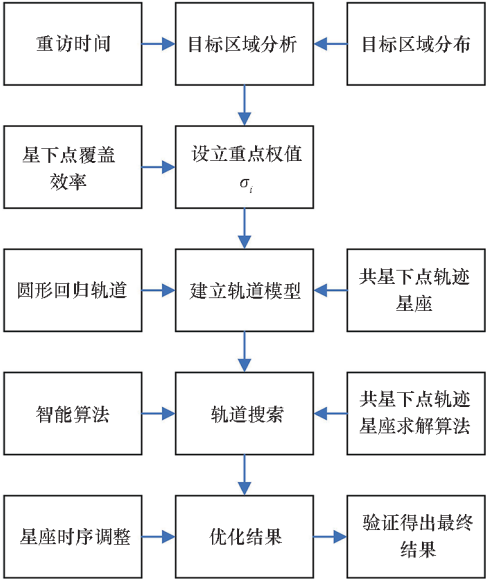


图 3 星座设计总体方案
Fig. 3 Overall plan of constellation design

1.2 回归轨道的共星下点轨迹星座模型

回归轨道的星下点轨迹有周期性的特点, 地球自转角速度为 ω_E , 卫星角速度为 ω , 轨道周期为 T , 回归圈数为 N , 回归天数为 D , 其轨道满足式(2):

$$NT(\omega_E - \omega) = 2\pi D \quad (2)$$

共星下点轨迹星座是卫星轨道和星下点轨迹完全重合的星座构型, 在经历回归周期之后, 卫星依次经过 m 个地点之后又重新回归。

在进行星座设计之前, 首先需要对卫星星座运行进行建模, 接着利用解析法求解卫星在 J2000 坐标系中的位置、速度; 然后根据几何法求解卫星星下点轨迹和覆盖区域, 其中地球引力非球形摄动对近地轨道会产生较大影响, 主要有 J_2 、 J_3 、 J_4 摄动, 在不影响太大精度和简化计算量的因素下, 只用 J_2 摄动计算^[11], J_2 摄动的取值为 0. 001 082 629 2。

共星下点轨迹星座相邻轨道面卫星在 J_2 摄动下满足式(3)的条件, 其中, μ 的取值为 $3. 986\ 004 \times 10^{14}\ \text{m}^3/\text{s}^2$, a 为卫星轨道半轴长。

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\Omega}{\omega_E - \dot{\Omega}} &= \frac{\Delta u}{\omega + \dot{u}} \\ &= \frac{\Delta\Omega}{\sqrt{\frac{\mu}{a^3}} \left[1 - \frac{3}{2} J_2 \left(\frac{R}{a} \right)^2 (1 - 4 \cos^2 i) \right]} \\ &= \frac{\Delta u}{\omega_E + \frac{3}{2} J_2 \left(\frac{R}{a} \right)^2 \sqrt{\frac{\mu}{a^3}} \cos i} \end{aligned} \quad (3)$$

式(4)为计算卫星 J2000 坐标系下的星下点轨迹方程, 由球面三角函数可得星下点轨迹的赤纬和

赤纬函数式,其中 $\delta, \alpha, i, \Omega, u$ 分别为赤纬、赤经、轨道倾角、升交点赤经和纬度幅角。卫星对地覆盖带是以卫星星下点轨迹为中心线、卫星传感器的视场轨迹为边界的模型,覆盖边界的赤经和卫星星下点赤经相同,赤纬根据卫星视场角度的大小做上下位移。覆盖带上下界的函数如式(5)所示,覆盖带宽度 D_0 如式(6)所示。其中, θ_0 为卫星圆形传感器的半角度, S_{G0} 为任意时刻的格林尼治恒星时。

$$\begin{cases} \delta = \begin{cases} \arctan(\cos i \cdot \tan u) + \Omega - S_{G0} - (\omega_E - \dot{\Omega})(t - t_0) \\ \pi + \arctan(\cos i \cdot \tan u) + \Omega - S_{G0} - (\omega_E - \dot{\Omega})(t - t_0) \end{cases} \\ \alpha = \arcsin(\sin i \cdot \sin u) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \delta = D_0 \pm \begin{cases} \arctan(\cos i \cdot \tan u) + \Omega - S_{G0} - (\omega_E - \dot{\Omega})(t - t_0) \\ \pi + \arctan(\cos i \cdot \tan u) + \Omega - S_{G0} - (\omega_E - \dot{\Omega})(t - t_0) \end{cases} \\ \alpha = \arcsin(\sin i \cdot \sin u) \end{cases} \quad (5)$$

$$D_0 = R \cdot \left[\arcsin \frac{(R+h) \cdot \sin \theta_0}{R} - \theta_0 \right] \quad (6)$$

当然,仅仅依靠这样计算出来的结果还是存在精度不够的问题,因此在建模完成之后,需要利用智能算法进行下一步的优化计算。

2 融合遗传蚁群算法的区域覆盖星座设计

遗传算法是一种启发智能算法,其全局搜索能力强,但反馈信息能力弱,会导致很多不必要的迭代计算,同时遗传算法也存在未成熟收敛和陷入局部最优解的现象^[12]。蚁群算法是一种群体智能算法,分布并行和全局收敛的能力强,但前期积累能力弱。融合算法可以克服两种算法的各自缺陷,形成两种算法的优势互补^[13]。

首先从每个种群中选择出最优个体,同时计算个体后代的进化率,以此来保证遗传算法和蚁群算法的融合^[13]。遗传蚁群算法流程如图4所示。

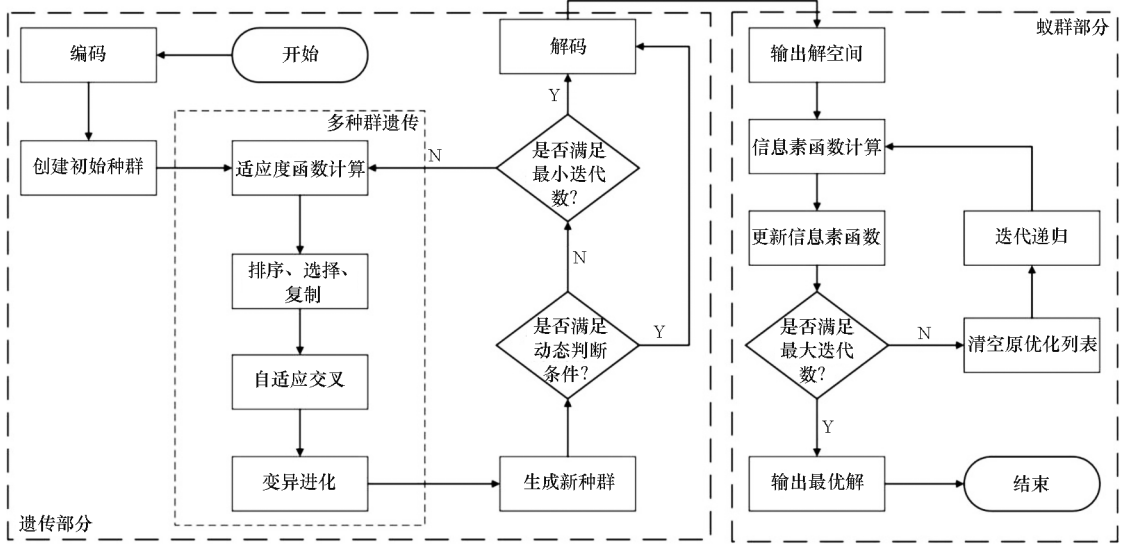


图4 遗传蚁群算法流程

Fig. 4 Genetic ant colony algorithm flow chart

当特定覆盖区域和覆盖任务执行时间已定,则卫星星座完全覆盖目标区域的基本条件是:各卫星传感器对目标区域的累积覆盖面积之和大于或等于目标区域面积^[14];覆盖时间达到任务执行时间。以网格点法计算覆盖率,卫星 s 开始覆盖特定区域 A 的时间记为 t_0 ,完全运行出特定区域 A 的时间记为 t_m 。遗传部分的适应度函数符合优化目标,适应度函数为卫星沿轨道在过顶时间内的覆盖面积函数,因此其可表示为:

$$F = \frac{1}{\sum \sigma_k \cdot \int_{t_0}^{t_m} [f_s^k(x) - g_s^k(x)] dx} \quad (7)$$

其中, σ_k 为 k 地点所在区域的重要性权值, $f_s^k(x)$ 、 $g_s^k(x)$ 为卫星覆盖带外侧函数。

接着在遗传操作中采用自适应交叉操作,先判断当前种群的执行代数,若小于 $G_{\min}$,执行固定的交叉概率;反之则执行自适应的交叉概率 P_z :

$$P_z = \begin{cases} P_c, \Delta F_n \leq 0 \\ \frac{P_c(F_m - F_b)}{\Delta F_n}, \Delta F_n > 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中, P_c 为固定交叉概率, F_m 为种群的最大适应度值, F_b 为最小适应度值。

其中动态判定的步骤如下:

1) 遗传操作中,为了确定迭代范围,设定最

小迭代次数 $G_{\min}$ 和最大迭代次数 $G_{\max}$ 。

2) 如果在迭代次数的范围内,连续 n 代都满足式(9)和式(10)的动态判断条件,那么就可以停止遗传算法的操作。

$$\Delta F_n = F_m - F_a \tag{9}$$

$$\Delta F_n < \Delta F_{n-1} \tag{10}$$

其中, F_a 代表平均适应度值。

蚁群算法部分的关键函数如下:

1) 信息素函数:

$$\tau = \sum \sigma_k \int_{t_0}^{t_m} [f_s^k(x) - g_s^k(x)] dx \tag{11}$$

蚁群算法部分的信息素函数与遗传算法部分的适应度函数互为倒数关系。

2) 信息素更新模型:

$$\begin{cases} \tau_{ij}(t+1) = \rho \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij} \\ \Delta \tau_{ij} = \sum_{k=1}^n \tau_{ij}^k(t) \end{cases} \tag{12}$$

式中: τ_{ij}^k 为蚂蚁 k 释放的信息素浓度; ρ 表示信息素的启发挥发程度, $0 < \rho < 1$ 。

3 仿真实验与覆盖性分析

仿真实验设计为:实现对北纬 3° 至 19° 、东经 108° 至 120° 区域(按照两个经纬度为单位划分)的密集观测;任务观测时间设置为 2025 年 3 月 20 日 0 时 0 分(UTC)至 2025 年 3 月 27 日 0 时 0 分(UTC);要求对于整个目标区域实现全覆盖,如图 5 所示。

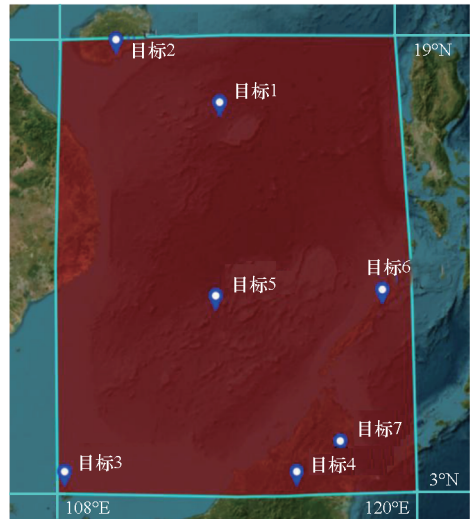


图 5 仿真实验设计区域

Fig. 5 Simulation experiment design area

重要地点的权值设置如表 2 所示,本次仿真实验设计的卫星星座目标是对于目标区域实现小

于 1 h 的密集重访,并且对于重点地点进行侧重点性重访和卫星覆盖资源的倾斜。仿真实验参数如表 3 所示。

表 2 仿真实验中重要地点权值排序
Tab. 2 Weight ranking of important place in simulation experiment

目标地点	经纬度	重点权值
目标 1	16.02°N;113.34°E	5.23
目标 2	18.67°N;109.56°E	4.17
目标 3	4.02°N;108.99°E	9.53
目标 4	4.01°N;116.03°E	9.09
目标 5	9.98°N;112.99°E	8.52
目标 6	10.03°N;119.03°E	8.04
目标 7	5.81°N;117.33°E	8.86

表 3 仿真实验参数
Tab. 3 Experimental simulation parameters

参数符号	参数名称	设值
$G_{\min}$	最小迭代数	333
$G_{\max}$	最大迭代数	2 300
P_c	固定交叉概率	0.89
P_m	变异概率	0.03
M	种群数目	2
m	蚂蚁数量	100
a	信息素重要因子	1
ρ	信息素挥发因子	0.3
θ_0	圆形传感器半角度	45°

设定星座中所有卫星所负载的圆形传感器的半角度为 45° ,卫星在 350 ~ 1 500 km 的低轨上运行。

根据初始实验仿真参数,结合前文中所述的共星下点轨迹星座求解算法计算所有卫星的初始开普勒六根数,结果如表 4 所示。其中所有的轨道半径为 6 932.46 km,偏心率为 0,近地点幅角为 0,表中不再列出。

据此建立了相对应的星座,图 6 为该星座在目标区域内的三维模型,图 7 为二维空间下卫星星座对地覆盖图。由图 6、图 7 可以看到,其星下点轨迹能够对特定目标区域完全覆盖,且对于重要性权值最高的地点覆盖性更密集,满足设计实验中的要求。

表 4 卫星初始轨道参数
Tab.4 Satellite initial orbit parameters

				单位:(°)			
卫星编号	i	Ω	u	卫星编号	i	Ω	u
Sat_01	18.76	173.00	296.28	Sat_25	11.61	121.60	21.56
Sat_02		188.04	70.66	Sat_26		136.64	155.94
Sat_03		203.08	205.05	Sat_27		151.68	290.34
Sat_04		218.12	339.44	Sat_28		166.72	64.72
Sat_05		233.16	113.82	Sat_29		181.76	199.11
Sat_06		248.20	248.21	Sat_30		196.80	333.50
Sat_07		263.25	22.60	Sat_31		211.85	107.88
Sat_08		278.29	156.98	Sat_32		226.89	242.28
Sat_09		293.33	291.38	Sat_33		241.93	16.66
Sat_10		308.37	65.75	Sat_34		256.97	151.04
Sat_11		323.41	200.15	Sat_35		272.01	285.44
Sat_12		338.45	334.53	Sat_36		287.05	59.82
Sat_13		353.49	108.92	Sat_37		302.09	194.21
Sat_14		8.53	243.31	Sat_38		317.13	328.60
Sat_15		23.57	17.69	Sat_39		332.17	102.98
Sat_16		38.61	152.08	Sat_40		347.21	237.38
Sat_17		53.66	286.48	Sat_41		2.26	11.76
Sat_18		68.70	60.86	Sat_42		17.30	146.15
Sat_19		83.74	195.25	Sat_43		32.34	280.54
Sat_20		98.78	329.64	Sat_44		47.38	54.92
Sat_21		113.82	104.01	Sat_45		62.42	189.31
Sat_22		128.86	238.42	Sat_46		77.46	323.70
Sat_23		143.90	12.79	Sat_47		92.50	98.08
Sat_24		158.94	147.18	Sat_48		107.54	232.48

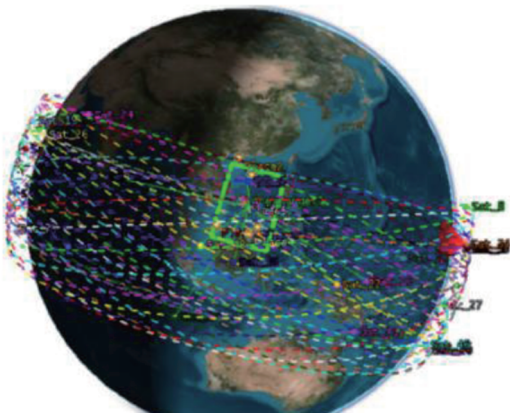


图 6 共星下点轨迹星座三维分布图
Fig.6 3D modeling of co-subsatellite point trajectory constellation

在构建了共星下点轨迹星座的基础上,通过大量 STK 仿真数据,图 8 给出了整个任务执行期内所有星座卫星对于特定目标的最大重访时间,

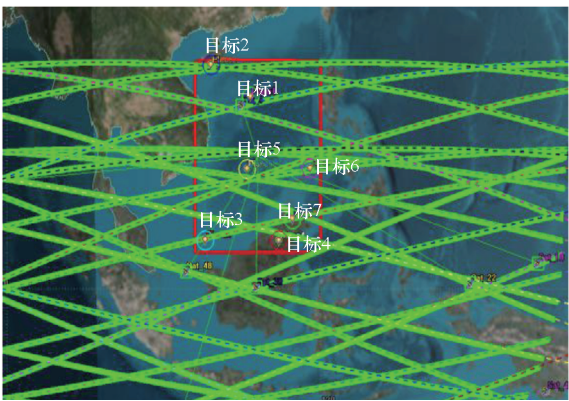


图 7 二维空间下卫星星座对地覆盖图
Fig.7 Satellite constellation ground coverage map in the 2D space

其中最大重访时间均小于 3 600 s,部分卫星重访时间小于 2 800 s,完全满足重访时间小于 1 h 的设计要求。

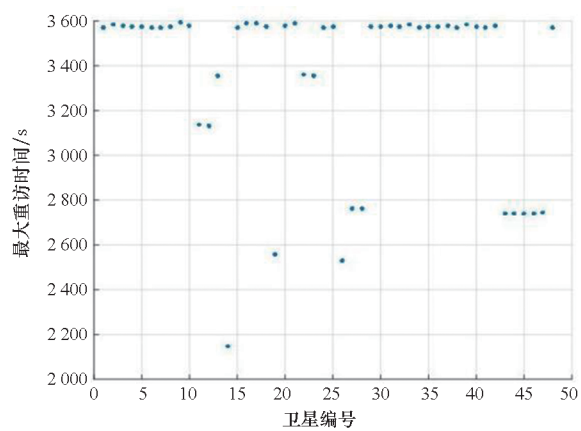


图 8 星座最大重访时间

Fig. 8 Maximum revisit time of constellation

接着对设立了重点权值 σ_i 的地点进行全周期累积覆盖时间分析,如图 9 所示。对应重点权值最高的目标 3 与目标 4 的全周期覆盖时间最长,且领先目标 1 和目标 2 约 40%,领先目标 5、目标 6 和目标 7 的范围为 3% ~ 10%,很好地反映出设置的重点权值排序对于重点地点的侧重性重访有较好的效果。

统计整个任务执行周期内卫星星座对于重要

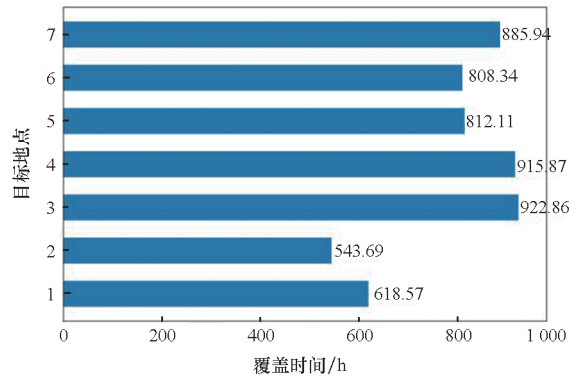


图 9 重点目标全周期覆盖时间

Fig. 9 Key target coverage time

地点的每日重访频次,如表 5 所示。对应重点权值最高的目标 3 获得了最高的重访频率,超越其他所有地点。重点权值依次递减的目标 4、目标 7、目标 5、目标 6、目标 1、目标 2 所获得的重访次数依次降低。所有重要目标点的重访频次的标准偏差均小于 3.5,处于较低水平。

重点目标的单位重访频率如图 10 所示。每一个重要地点在单位时间内所获得重访次数的上下幅值波动变化小,并且层次分明体现出重要权值的排序。

表 5 重要目标单位周期重访频次统计

Tab. 5 Statistical table of revisit frequency of important places unit period

目标地点	3 月 20 日	3 月 21 日	3 月 22 日	3 月 23 日	3 月 24 日	3 月 25 日	3 月 26 日	标准差
目标 1	606	601	600	601	599	602	601	2.06
目标 2	509	504	504	505	504	504	506	1.73
目标 3	896	889	890	889	890	889	890	2.37
目标 4	847	841	841	842	841	842	840	2.14
目标 5	813	805	804	807	803	806	804	3.12
目标 6	798	793	793	793	794	793	792	1.81
目标 7	825	818	818	819	818	818	818	2.42

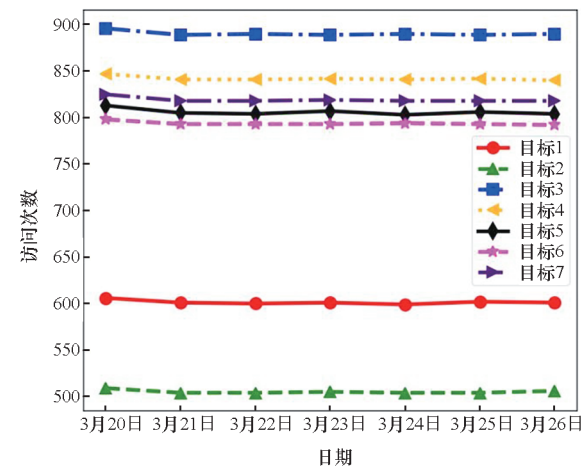


图 10 重点目标单位重访频率

Fig. 10 Key target revisit frequency results

因此,由重点权值指导的星座设计在全任务周期以及单位时间内都可以完全满足访问侧重性的需求。

4 结论

本文总结了区域覆盖性卫星星座的设计方法,并提出了重点权值排序的优先覆盖方法。这种方法被应用在特定区域的重要性排序上,有利于局部特定地点的标记和突出。

融合遗传蚁群算法对特定区域密集重访的星座进行了优化设计,并进行了仿真分析,计算统计和绘制出了星座卫星的最大重访时间、对于重要地点的全周期覆盖时间以及单位时间内的重访频

次。重点权值越高的地点会获得更高的覆盖时间与更密集的重访频率。在任务全周期和单位时间内,星座对于重要地点的重访次数都相对稳定,没有上下大幅波动的情况。

实验结果表明,该算法可以满足星座设计需求,同时具有很好的稳定性。

参考文献 (References)

[1] MEZIANE-TANI I, MÉTRIS G, LION G, et al. Optimization of small satellite constellation design for continuous mutual regional coverage with multi-objective genetic algorithm[J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2016, 9(4): 627 – 637.

[2] LEE H W, SHIMIZU S, YOSHIKAWA S, et al. Satellite constellation pattern optimization for complex regional coverage[EB/OL]. (2020 – 10 – 06) [2021 – 03 – 02]. <https://arxiv.org/abs/1910.00672v2>.

[3] SHTARK T, GURFIL P. Regional positioning using a low Earth orbit satellite constellation[J]. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 2018, 130: 14.

[4] 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. (in Chinese)

[5] 马原野. 近地全球重访星座轨道快速优化设计研究[D]. 北京: 中国科学院国家空间科学中心, 2019.

MA Y Y. Research on rapid optimization design of global revisit constellation in low earth orbit[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)

[6] XIONG M H, XIONG W. Preference-based evolutionary many-objective optimization for regional coverage satellite constellation design [C]//Proceedings of the International Conference on Mathematics, Big Data Analysis and Simulation and Modelling (MBDASM 2019), 2019.

[7] 姜兴龙, 姜泉江, 刘会杰, 等. 采用改进非支配近邻免疫

算法的低轨混合星座设计优化[J]. 宇航学报, 2014, 35(9): 1007 – 1014.

JIANG X L, JIANG Q J, LIU H J, et al. Design optimization of hybrid LEO constellation using modified non-dominated neighbor immune algorithm [J]. Journal of Astronautics, 2014, 35(9): 1007 – 1014. (in Chinese)

[8] 于彦君, 王峰, 苗悦. 不规则区域成像覆盖星座构型优化设计[J]. 空间科学学报, 2019, 39(4): 494 – 501.

YU Y J, WANG F, MIAO Y. Optimal design of constellation configuration for irregular imaging area coverage based on improved simulated annealing algorithm[J]. Chinese Journal of Space Science, 2019, 39(4): 494 – 501. (in Chinese)

[9] 孟少飞, 刘新学, 杨其, 等. 一种对地四重覆盖星座构型设计方法[J]. 宇航学报, 2017, 38(11): 1160 – 1167.

MENG S F, LIU X X, YANG Q, et al. A constellation design method for quadruple continuous earth coverage[J]. Journal of Astronautics, 2017, 38(11): 1160 – 1167. (in Chinese)

[10] LO M W. Satellite-constellation design [J]. Computing in Science & Engineering, 1999, 1(1): 58 – 67.

[11] 莫宇. 低轨卫星通信星座多目标优化设计[D]. 长沙: 国防科技大学, 2016.

MO Y. Multi-objective optimization design of LEO satellite constellations for communication [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016. (in Chinese)

[12] 刘思航. 基于遗传算法的全球卫星通信系统星座设计[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.

LIU S H. Design of constellation in global satellite communication systems based on genetic algorithm [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018. (in Chinese)

[13] 刘敏俊. 蚁群算法与遗传算法的融合与性能研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.

LIU M J. Research on integration and performance of ant colony algorithm and genetic algorithm [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013. (in Chinese)

[14] 李勇军, 赵尚弘, 吴继礼. 一种低轨卫星星座覆盖性能通用评价准则[J]. 宇航学报, 2014, 35(4): 410 – 417.

LI Y J, ZHAO S H, WU J L. A general evaluation criterion for coverage performance of LEO constellations[J]. Journal of Astronautics, 2014, 35(4): 410 – 417. (in Chinese)