

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2021.05.007

基于遗传算法的寻优解卫星星座优化设计策略

水浩然¹, 陈勇², 陈宏新¹

- (1. 北京京航计算通讯研究所, 北京 100074;
2. 海装重大专项装备项目管理中心, 北京 100083)

摘要: 卫星星座优化设计与直接部署卫星或普通迭代计算后部署卫星等方法不同, 目的是在有限的资源中达到更好的星座观测效果。通过使用遗传算法(Genetic Algorithm), 在卫星星座构型模型的基础上, 得到星座种群内对目标观测实效性较强、重访周期较短的卫星个体, 并使用较优的卫星个体生成 Walker 星座组网, 实现了生成的星座对目标区域的高精度观测与覆盖。这种方法避免了复杂的计算与主观上的加权计算, 在经济成本和观测效果相互制约的前提下, 得到了更加高效的卫星星座构型设计策略。将此优化设计策略用于选定的卫星星座构型中, 通过仿真实验表明, 基于遗传算法优化后的“深圳一号”卫星星座相较于其优化前的部署, 其对目标区域及全球区域的整体观测性能提升了 90% 以上。

关键词: 星座优化设计; 卫星星座构型; 遗传算法

中图分类号: V11

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2021)05-0045-09

Optimal Design Strategy of Satellite Constellation Based on Genetic Algorithm

SHUI Hao-ran¹, CHEN Yong², CHEN Hong-xin¹

- (1. Beijing Jinghang Institute of Computing and Communication, Beijing 100074, China;
2. Project Management Center for Major Special Equipment of Marine Equipment, Beijing 100083, China)

Abstract: Satellite constellation optimization design is different from methods such as direct deployment of satellites or deployment of satellites after ordinary iterative calculations, and the purpose is to achieve better constellation observation effects in limited resources. Through the use of genetic algorithm, based on the satellite constellation configuration model, the satellites in the constellation that are more effective in target observation and have a short revisit period are obtained, and the optimal satellites are used to generate the Walker constellation network, which achieves high-precision observation and coverage of the target area by the results. The method avoids complicated calculations and subjective weighting calculations, and obtains a more efficient satellite constellation configuration design strategy under the premise of mutual constraints on economic costs and observation effects. By using this optimization design strategy in the selected satellite constellation configuration, compared with the deployment before optimization, the optimized “Shenzhen-1” satellite constellation improves the overall observation performance of the target area and the global region by 90%.

收稿日期: 2020-10-21; 修订日期: 2020-11-27

基金项目: “十三五”装备预研基金(JZX6J201912010857)

作者简介: 水浩然(1994-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事计算机技术、软件测评方面的研究。

通信作者: 陈勇(1979-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事导航、制导与控制方面的研究。

Key words: Constellation optimization design; Satellite constellation configuration; Genetic algorithm

0 引言

卫星星座优化设计本质上是卫星部署合理性问题。在优化设计前,需要对选定的卫星星座构型的轨道模型进行分析。针对轨道参数策略上的设定,以偏心率与近地点幅角不变为前提,修改轨道倾角和轨道半长轴,再使用改变的参数推算出卫星轨道的升交点赤经与真近点角。以这些参数去部署卫星星座,相较于最原始的部署办法,可以实现增大卫星星座观测目标区域和缩短重访周期的效果。但这些办法仅仅是卫星星座优化设计的第一步,采用不同的轨道模型也可以实现不同的星座观测效果。

周砚茜和 T. Liu 等提到,卫星星座的发展具有数量集群越来越多、网络效果特性繁多、网络品种繁茂等情况^[1-2]。蒋炫佑和 A. Tosyali 等陈述了符合高斯算法的 M-APSK 信号卫星组网搭建规则,并利用这种卫星组网搭建规则实现了新型星座构型的搭建,大幅降低了星座的设计难度,也有效提高了卫星星座性能^[3-4]。田野和 M. Bonnet 等关于当前全球低轨卫星发展的现状做了较多专业研究,针对有关部分低轨卫星星座组网策略,组合星座能够同时完成全球覆盖,并能实现 DOP 值与可见星数量在全球区域内的均匀分布^[5-6]。E. A. Mikrin、T. Shtark、H. Xu 和关梅倩等引出了导航卫星系统设计的低轨化办法^[7-10]。刘海蛟等提出了低轨卫星拥有轻盈、延时间隔短和成本较低等特点,通过星座融合可实现全球范围内的无空白区域覆盖^[11]。蒋季给出了针对全球范围内的覆盖星座设计方案^[12]。刘洋等通过激光链路的手段为星座体系输入动力,使星座体系能够实现对我国领土面积的无缝观测效果^[13],极大提升了星座对中国区域的监测效率。

而利用遗传算法的优化策略,对卫星星座个体编码、构造适应度函数及演化等手段也可以实现较好的优化结果。马原野^[14]与沈欣等^[15]提出了使用优化算法进行快速优化的设计策略。陈宏君选用遗传算法寻找搭建数学模型的最优解,调节遇到各个问题之间的问题,提升了卫星星座的整体效能,极大节约了经济资源与时间资源^[16]。刘蕊蕊等使用遗传算法对 BP 神经网络进行算法优化,提高了面相优化问题的收敛性,同时验证了算法的有效

性^[17]。谷加臣等利用基于遗传算法的神经网络研究方法为本领域内的研究提供了多种借鉴^[18]。侯远韶基于蚁群优化办法对决定的路径实行维度升迁的划分,以达到目的功效性能的提高^[19]。胡炬琿结合遗传算法与蚁群算法,搭配使用两种算法的优化特性,巧妙地规避掉算法约束^[20]。熊起利用遗传与蚁群结合方法建模,妥善总结出支持其研究的办法^[21]。

本文主要基于遗传算法,在选定的卫星星座构型中,寻找卫星星座较优解。本文区别于其他研究学者在面向星座优化设计问题中使用的加权赋值和主观优化等办法,通过使用遗传算法并结合个体编码、适应度函数等手段,打破选定方案中的一部分固有约束,将星座内的卫星个体逐个编码,通过科学的计算,实现对星座内最优解的寻找,并使用寻找到的最优解构建 Walker 星座组网,进而得到更加高效的星座构型优化模型。

1 卫星星座构型优化设计理论

星座的优化设计必然无法脱离对轨道理论的选用和对星座构型的选取。在引入使用的优化设计策略前,需要先行探讨选用的卫星星座构型,涉及使用到的卫星星座设计理论。

1.1 “深圳一号”卫星星座构型

选取“深圳一号”卫星星座构型作为优化算法使用并执行的基础构型^[22]。图 1 所示为“深圳一号”卫星星座组网的几何设计图。

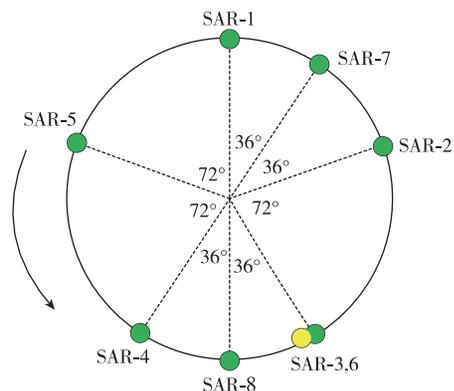


图 1 “深圳一号”卫星星座组网几何设计图

Fig. 1 “Shenzhen-1” satellite constellation network geometric design diagram

“深圳一号”卫星星座构型对应的有关参数见表 1, 含有所用到的星座属性与指标。

表 1 卫星星座构型轨道属性与指标

Tab. 1 Satellite constellation configuration orbit attributes and indicators

序号	轨道属性	数值	备注
1	轨道高度/km	530.257	太阳同步回归轨道
2	轨道半长轴/km	6908.39	地球参考半径 6378.14km
3	轨道倾角/(°)	97.5217	
4	轨道偏心率	0	
5	回归周期/d	10	
6	重访周期/d	2	
7	全球覆盖周期/d	15	
8	降交点地方时	06:00:00AM	

1.2 卫星坐标系

卫星星座优化计算量庞大, 为了便捷使用计算法则、利用计算程序, 选取代表卫星惯性运动的坐标系, 分别定义为卫星轨道坐标系和地心赤道惯性 (Earth-Centered Inertial, ECI) 坐标系, 图 2 所示为两坐标系的几何示意图。

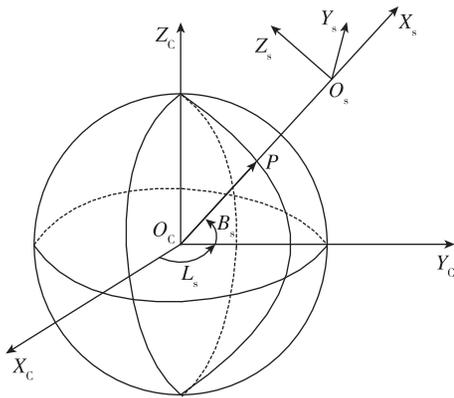


图 2 两坐标系几何示意图

Fig. 2 Geometry diagram of two coordinate systems

1.3 卫星轨道参数

卫星星座的优化设计, 需要首先对涉及的卫星星座设计优化模型进行研究, 引入轨道六根数: 轨道半长轴 a 、轨道倾角 i 、偏心率 e 、升交点赤经 Ω 、近地点幅角 ω 和平近点角 M , 这里提到的 6 个轨道参数称为经典轨道六根数^[23]。本文选用通常默认研究的右手惯性坐标系, 若有时刻 t 下对应的卫星参数 f, r , 则用式(1)表示

$$\begin{cases} x = r \cos f \\ y = r \sin f \\ z = 0 \end{cases} \quad (1)$$

依据 ECI 坐标系之间的推导关系, 计算出速度矢量和位置矢量由式(2)和式(3)表示

$$\mathbf{r}_0 = r \cos f \cdot \mathbf{p}_0 + r \sin f \cdot \mathbf{q}_0$$

$$= a \cdot (\cos E - e) \cdot \mathbf{p}_0 + a \sqrt{1 - e^2} \sin E \cdot \mathbf{q}_0 \quad (2)$$

$$\mathbf{r}_{or} = -\frac{\sqrt{a} \sin E}{r} \cdot \mathbf{p}_0 + \frac{\sqrt{a} \cdot \sqrt{1 - e^2} \cos E}{r} \cdot \mathbf{q}_0 \quad (3)$$

式(2)和式(3)中, E 为偏近点角; \mathbf{p}_0 和 \mathbf{q}_0 分别为 x 轴和 y 轴的单位向量, 以这些向量可以表示出轨道倾角 i 、升交点赤经 Ω 和近地点幅角 ω , 具体函数表达式如式(4)所示

$$\begin{cases} p_x = \cos \Omega \cos \omega - \sin \Omega \sin \omega \cos i \\ p_y = \sin \Omega \cos \omega + \cos \Omega \sin \omega \cos i \\ p_z = \sin \omega \sin i \\ q_x = -\cos \Omega \sin \omega - \sin \Omega \cos \omega \cos i \\ q_y = -\sin \Omega \sin \omega + \cos \Omega \cos \omega \cos i \\ q_z = \cos \omega \sin i \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)推导得式(5)

$$\begin{cases} \mathbf{h}_0(h_x, h_y, h_z) \\ \mathbf{r}_0 \times \mathbf{r}_{or} = \mathbf{h}_0 \\ h = |\mathbf{h}_0| = \sqrt{h_x^2 + h_y^2 + h_z^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中, \mathbf{h}_0 为积分矢量, 再联系惯性轨道公式间的转换关系, 推出式(6)

$$\begin{cases} h_x = h \sin \Omega \sin i \\ h_y = -h \cos \Omega \sin i \\ h_z = h \cos i \end{cases} \quad (6)$$

在式(6)的基础上计算得到式(7)和式(8)

$$\begin{cases} \cos i = h_z / h \\ \tan \Omega = h_x / -h_y \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \mathbf{r}_{or} \times \mathbf{h}_0 = \mu(\mathbf{r}_0 + r\mathbf{e}_0) / r \\ \mathbf{e}_0 = (\mathbf{r}_{or} \times \mathbf{h}_0) / \mu - \mathbf{r}_0 / r \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中, μ 为引力常量, 为定值; 向量 \mathbf{e}_0 的表示向量为 $\mathbf{e}_0(e_x, e_y, e_z)$, 故结合向量模计算规则计算可得离心率表达式(9)

$$e = |\mathbf{e}_0| = \sqrt{e_x^2 + e_y^2 + e_z^2} \quad (9)$$

联立上述推导出的算式, 利用圆锥曲线之间半长轴 a 与 h 的关系, 得到半长轴与近地点幅角表达式(10)和式(11)

$$a = h^2 / (\mu(1 - e^2)) \quad (10)$$

$$\omega = \arctan(e_z / \sin i (e_y \sin \Omega + e_x \cos \Omega)) \quad (11)$$

引入升交点角距 u , 通过式(12)表示

$$u = \arctan(z / (y \sin \Omega + x \cos \Omega) \sin i) \quad (12)$$

再由式(13)算出真近点角 f

$$f = u - \omega \quad (13)$$

根据真近点角与偏心率之间的关系, 得到偏近点角 E 由式(14)表示

$$\operatorname{tg}(E/2) = \sqrt{\frac{1-e}{1+e}} \operatorname{tg}(f/2) \quad (14)$$

将以上计算出的相关表达式联立, 再结合开普勒方程, 推出平近点角由式(15)表示

$$M = E - e \cdot \sin E \quad (15)$$

综上, 根据计算得到所需要使用到的全部轨道六根数参数, 整理后如表 2 所示。

表 2 轨道六根数

Tab. 2 Six numbers of classic satellite orbits

序号	轨道参数名称	物理符号
1	半长轴	a
2	偏心率	e
3	轨道倾角	i
4	升交点赤经	Ω
5	近地点幅角	ω
6	平近点角	M

2 遗传算法

根据达尔文的自然进化理论, 集群内有三种进化形式: 适者生存、杂交和突变。相应的遗传算法称为选择、交叉和变异。遗传算法利用这三种形式寻找最优解。本文将以遗传算法的理论和应用展开研究。

2.1 遗传算法概念

遗传算法 (Genetic Algorithm) 又称为 GA 算法^[24], 它的使用规则类似于概率进化算法, 其核心思想引自达尔文的自然进化理论。利用遗传算法通过个体编码的方式代替聚类中的个体, 并利用适应度函数研究聚类中问题的约束, 最终实现对其遗传机制的模拟和仿真。图 3 所示为遗传算法概念流程图^[25]。

2.2 遗传算法应用

在利用遗传算法优化卫星星座设计时, 需要对卫星星座群中的卫星个体进行编码和建模^[26]。如

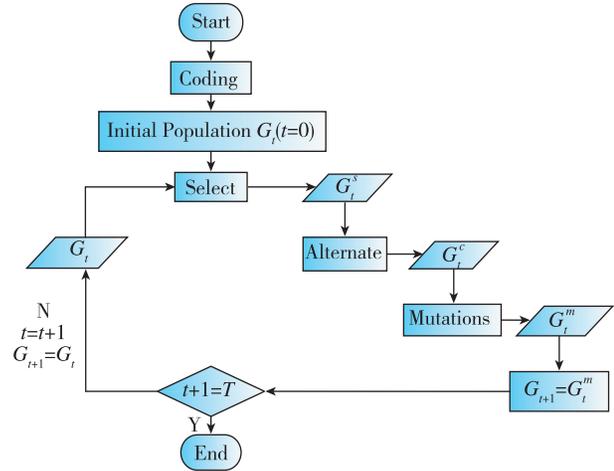


图 3 遗传算法概念流程图

Fig. 3 Genetic algorithm concept flow chart

果星座内含有卫星总数为 K_{\max} , 则卫星星座集群内轨道建模后染色体情况如图 4 所示。

a1	e1	i1	Ω 1	ω 1	M1	FLAG1	...	aK	eK	iK	Ω K	ω K	MK	FLAGK
----	----	----	------------	------------	----	-------	-----	----	----	----	------------	------------	----	-------

图 4 卫星星座集群轨道染色体图

Fig. 4 Satellite constellation cluster orbit chromosome map

图 4 中的物理符号与 1.3 节推导出的 6 个轨道根数的含义相同, 编码规则是从第一颗星到第 K 颗星。这样编码后星座染色体长度即星座卫星数如式(16)所示

$$K = \sum_{K=1}^{K_{\max}} FLAGK \quad (16)$$

假设该优化方案中卫星星座的总周期为 T , 总周期内的卫星数为 $SNum$ 。卫星在星座中执行命令的选择顺序是根据周期中的开始时间到结束时间来安排的。换句话说, 当 $T_i < T_j$ 且 $i < j$ 时, 对应星座循环下的排序规则如式(17)所示

$$TSNum_i \ll TSNum_j \quad (17)$$

其中, \ll 表示式子中左边的顺序在右边之前。当星座内所有卫星个体被有序排序后, 有集合 $TASN$, 如式(18)所示

$$TASN = \{TSNum_1, \dots, TSNum_{SNum}\} \quad (18)$$

式(17)和式(18)推导关系满足式(19)

$$i < j \Leftrightarrow TSNum_i \ll TSNum_j \Leftrightarrow T_i < T_j \quad (19)$$

在遗传算法的编码个体算法组中, GE 、时间周期和资源等可以表示为一个算法组, 其中 GE 为单个卫星的编码集, 即周期时段内个体编码能对应相同卫星任务下的个体编码, 为 $1 \times SNum$ 维数学向量, 是一个有序的排列组合, 以式(20)表述

$$GE = [5, 4, 3, 2, 1], SNum = 5 \quad (20)$$

其中, GE 为卫星个体编码集合, GE 内的编码顺序也决定了面向任务中的排列顺序, 如式 (21) 所示

$$TSeq = \{T_{GE_1}, T_{GE_2}, T_{GE_3}, T_{GE_4}, T_{GE_5}\} \\ = \{T_{GE_5}, T_{GE_4}, T_{GE_3}, T_{GE_2}, T_{GE_1}\} \quad (21)$$

式(21)的含义是, 当集群内的卫星个体被编码后, 即便打乱个体的排列组合, 也能准确地地在集群中找到其对应的卫星星座个体。

以上工作全部完成后, 引入适应度函数 $F^{[27]}$, 函数 F 包含对卫星星座轨道模型计算方面的约束 A 和对卫星星座设计经济成本的约束 B , 在此不再深入展开两项子函数内容。两子函数共同组成卫星星座优化的适应度函数 F 。

2.3 遗传算法策略

按照步骤执行遗传算法策略。卫星星座优化设计的建模及算法步骤如下:

步骤 1: 选用实验卫星星座构型(“深圳一号”卫星星座构型), 对需要实验的星座进行前期轨道预处理(轨道参数优化调整等);

步骤 2: 将卫星星座构型下的卫星进行编码建模, 实现种群到个体之间的一一对应;

步骤 3: 引入遗传算法内的适应度函数, 将轨道计算约束及资源约束函数代入函数内, 生成一致约束函数, 通过前步骤处理和后续算法, 在卫星星座整体范围内寻找最优单星解, 即对目标区域和范围重访周期更短、观测范围更大的卫星;

步骤 4: 重复步骤 3, 寻找在集群样本内效果最好的几组单星解;

步骤 5: 使用步骤 4 得到的几组较优解卫星个体生成 Walker 星座, 组成最优解形成的卫星星座种群。使用最优解形成的星座种群对原观测目标进行观测, 得到优化结果。

3 算法实现及实验分析

依照选定的“深圳一号”卫星星座构型, 保持太阳同步轨道方案, 引入摄动模型和轨道性能评判标准。执行上述操作完毕后, 根据覆盖计算后取值轨道高度可优化范围内的最小值 420km, 图 5 所示为覆盖计算平面示意图。

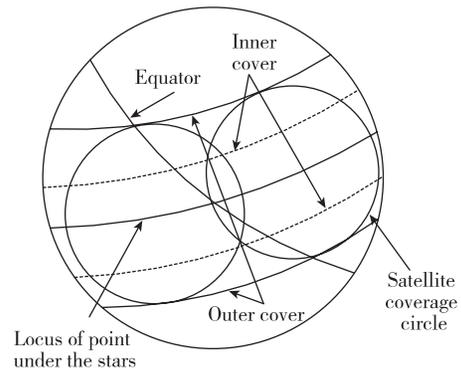


图 5 覆盖计算平面示意图

Fig. 5 Schematic diagram of coverage calculation plane

代入卫星 SAR 传感器 $11^\circ \sim 60^\circ$ 对地观测范围, 优化后的卫星星座构型基本信息如表 3 所示。

表 3 优化后的卫星星座构型基本信息表

Tab. 3 Basic information of optimized satellite constellation configuration

仿真场景	2020 年 7 月 1 日 12:00:00 至 2020 年 7 月 12 日 12:00:00					
摄动背景	J_2 摄动					
星座 SAR 卫星数目	8 颗 ($11^\circ \sim 60^\circ$ 对地观测范围)					
卫星编号	半长轴/km	偏心率	轨道倾角/ $^\circ$	近地点幅角/ $^\circ$	升交点赤经/ $^\circ$	真近点角/ $^\circ$
1						0
2						36
3						72
4						144
5	6798.147	0	97.1079	0	0	145
6						180
7						216
8						288

根据表 3 数据优化后的卫星星座重访周期约为 0.5 天, 星座优化后重访周期示意图如图 6 所示。

图 6 中, 一竖格代表 1 天, 不同颜色的条段代表星座内每个卫星对目标的观测时长。可以看出, 一



图6 星座优化后重访周期示意图

Fig. 6 Diagram of revisit cycle after constellation optimization

个竖格内出现两次条段,即代表卫星星座重访周期约为0.5天。

优化星座在重访周期内对中国区域的覆盖时长如表4所示。

表4 优化星座在重访周期内对中国区域覆盖时长表

Tab. 4 Optimized constellation's coverage time table in China during the revisit period

卫星序号	监测目标区域周期内总时长/s
卫星 1	32094.621
卫星 2	32138.724
卫星 3	31929.431
卫星 4	32012.179
卫星 5	32009.300
卫星 6	32142.813
卫星 7	32041.164
卫星 8	32173.883

根据优化算法的使用步骤,利用遗传算法中的适应度函数得到一组帕累托解(Pareto)^[28-30],然后

通过式(16)中的编码方法,根据染色体编码的FLAG性质选择得到的解卫星个体。一组卫星解对应一个星座所有构型的基本轨道参数,包括重访周期、观测范围的经纬度和经纬度覆盖率等。表5所示为通过遗传算法获得的星座中较好的卫星个体解。

表5 遗传算法得到的星座内较好卫星个体解

Tab. 5 Better individual satellite solutions in the constellation obtained by genetic algorithm

卫星编号	半长轴/km	轨道倾角/(°)	经纬度覆盖率/%
卫星 W1	6798.147	158.56	100
卫星 W2	6798.147	133.56	100
卫星 W3	6798.147	98.56	100

其中,W1卫星是深圳为主的大湾区重点监测建设单位的最优单星方案,利用W1卫星生成的Walker星座实现对大湾区目标的精准监测和覆盖。W2卫星和W3卫星是较好的单星,可以帮助W1卫星生成的星座弥补监测缺失的区域,它们生成的Walker星座也扩大了对全球范围内目标的监测与覆盖。

因此,通过遗传算法构造个体编码下的适应度函数,并结合之前的知识得到优化方案,即在每个轨道平面有8颗卫星的前提下,使用3个Walker星座生成6个轨道平面的48颗卫星。遗传算法优化后的卫星星座构型详细参数如表6所示。

表6 遗传算法优化生成的卫星星座构型详细参数表

Tab. 6 Detailed parameter table of satellite constellation configuration generated by genetic algorithm optimization

仿真场景	2020年7月1日12:00:00至2020年7月12日12:00:00					
摄动背景	J_2 摄动					
星座SAR卫星数目	48颗(11°~60°对地观测范围)					
3组Walker星座 单星对应编号	半长轴/km	偏心率	轨道倾角/(°)	近地点幅角/(°)	升交点赤经/(°)	真近点角/(°)
W1			158.56			
W2	6798.147	0	133.56		0	
W3			98.56			

根据表6卫星星座构型仿真,得到使用遗传算法优化生成卫星星座的重访周期为0.07天,如图7所示。

图7中,一竖格代表1天,不同颜色的条段代表星座内每个卫星对目标的观测时长。可以看出,一个竖格内出现非常稠密的周期条段,通过辅助软件STK读出卫星星座的重访周期约为0.07天。

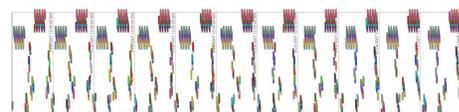


图7 遗传算法优化生成卫星星座的重访周期示意图

Fig. 7 Schematic diagram of revisit cycle of satellite constellation optimized by genetic algorithm

在改变参数配置优化模型的基础上,利用遗传算法得到由上述最优解组成的卫星星座优化模型。将模拟实验得到的所有数据与“深圳一号”优化基础模型的数据统计结合在同一表中进行对比分析,如表 7 所示。

表 7 采用遗传算法得到的优化模型与“深圳一号”优化模型性能对比表

Tab. 7 Performance comparison between the optimized model obtained by genetic algorithm and the optimized model of “Shenzhen-1”

性能名称	“深圳一号” 优化模型	遗传算法优化 生成模型	优化提升效率/%
对深圳市 监测总时长	2565.059s	140783.101s	98.19
对深圳市 重访周期	2 天	0.07 天	96.50
对大湾区 重访周期	2 天	0.07 天	96.50
对中国区 域监测时长	61570.107s	732148.357s	91.59
对中国区 域重访周期	1.8 天	0.03 天	98.33
系统平均 重访周期	2.15 天	0.06 天	97.21
覆盖经纬 度区域	经度 $\pm 180^\circ$ 纬度 $\pm 82.5^\circ$	经度 $\pm 180^\circ$ 纬度 $\pm 90^\circ$	91.67

表 7 中,“深圳一号”优化模型列下的数据表示“深圳一号”卫星星座对目标区域及全球区域的观测数据;遗传算法优化生成模型列下的数据表示基于遗传算法优化后的“深圳一号”卫星星座对目标区域及全球区域的观测数据。由仿真实验结果并对比两列数据得知:

1)采用遗传算法生成的优化星座整体重访周期大幅缩短,对深圳市、大湾区及中国区域重访周期大幅缩短。

2)采用遗传算法优化生成的星座对空间范围实现无缝覆盖,经纬度优化效果达到数值范围内的最大值,实现 100%经纬度覆盖。

3)采用遗传算法策略可以使“深圳一号”卫星星座对目标区域及全球区域的整体观测效率提升 90%以上。

4 结论

1)讨论了 J_2 摄动因素影响,对星座内卫星的轨道模型进行论证分析,结合遗传算法的个体编码和

适应度函数,对“深圳一号”原模型的卫星星座进行优化,使基于“深圳一号”卫星星座构型优化模型的观测效果优于原星座模型的观测效果。

2)全面地提升卫星星座的覆盖性能,提高整体效率和观测效果,使整个卫星星座更具合理性、多样性和鲁棒性等。

3)采用遗传算法优化生成的卫星星座对空间范围实现无缝覆盖,经纬度优化效果达到数值范围内的最大值(即全球观测覆盖)。优化后的“深圳一号”卫星星座对目标区域及全球区域的整体观测效率提升 90%以上。

参考文献

- [1] 周砚茜,冯旭哲,代建中.卫星星座设计仿真软件综述[J].计算机与现代化,2019(8):63-68+84.
Zhou Yanxi, Feng Xuzhe, Dai Jianzhong. Review on satellite constellation design and simulation software [J]. Computer and Modernization, 2019(8): 63-68+84(in Chinese).
- [2] Liu T, Zhang B, Yuan Y, et al. On the application of the raw-observation-based PPP to global ionosphere VTEC modeling: an advantage demonstration in the multi-frequency and multi-GNSS context[J]. Journal of Geodesy, 2020, 94(1): 1-20.
- [3] 蒋炫佑,魏以民,王雷,等.逼近高斯信道容量的 M-APSK 调制星座优化设计[J].信息技术与网络安全,2018,37(12):52-57.
Jiang Xuanyou, Wei Yimin, Wang Lei, et al. Optimal design of M-APSK modulation constellation approaching Gaussian channel capacity[J]. Information Communication, 2018, 37(12): 52-57(in Chinese).
- [4] Tosyali A, Kim J, Choi J, et al. New node anomaly detection algorithm based on nonnegative matrix factorization for directed citation networks[J]. Annals of Operations Research, 2020, 288(1): 457-474.
- [5] 田野,张立新,边朗.低轨导航增强卫星星座设计[J].中国空间科学技术,2019,17(10):1-6.
Tian Ye, Zhang Lixin, Bian Lang. Design of LEO satellites augmented constellation for navigation[J]. Chinese Space Science and Technology, 2019, 17(10): 1-6(in Chinese).
- [6] Bonnet M, Demaldent E. The eddy current model as a low-frequency, high-conductivity asymptotic form of the maxwell transmission problem[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2019, 77(8): 2145-2161.
- [7] Mikrin E A, Mikhailov M V, Orlovskii I V, et al.

- Circumlunar spacecraft navigation using the measurements from global navigation satellite systems GLO-NASS, GPS, Galileo and BeiDou[J]. *Gyroscopy and Navigation*, 2019, 10(4): 187-195.
- [8] Shtark T, Gurfil P. Low earth orbit satellite constellation for regional positioning with prolonged coverage durations[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(8): 2469-2494.
- [9] Xu H, Hsu L T, Lu D, et al. Sky visibility estimation based on GNSS satellite visibility: an approach of GNSS-based context awareness[J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(2): 1-15.
- [10] 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心. S07卫星导航增强技术[C]// 第九届中国卫星导航学术年会, 2018.
Academic Exchange Center of China Satellite Navigation System Management Office. S07 satellite navigation enhancement technology[C]// Proceedings of 9th China Satellite Navigation Academic Annual Conference, 2018(in Chinese).
- [11] 刘海蛟, 秦鹏, 王妮炜, 等. 低轨星座体系结构设计及资源调度算法研究[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2018, 13(6): 631-635.
Liu Haijiao, Qin Peng, Wang Niwei, et al. Research on architecture design and resource allocation algorithm of LEO constellation[J]. *Journal of CAEIT*, 2018, 13(6): 631-635(in Chinese).
- [12] 蒋季. 面向局部高容量和广域补充覆盖的低轨卫星通信系统星座设计[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
Jiang Ji. Constellation design of low-orbit satellite communication system for local high-capacity and wide-area supplementary coverage[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications (BUPT), 2019(in Chinese).
- [13] 刘洋, 刘武, 戴媛媛, 等. 面向应急通信的低轨短数据通信星座优化设计[J]. *现代电子技术*, 2019, 42(5): 19-22+26.
Liu Yang, Liu Wu, Dai Yuanyuan, et al. Optimization design of LEO short data communication constellation for emergency communication[J]. *Modern Electronics Technique*, 2019, 42(5): 19-22+26(in Chinese).
- [14] 马原野. 近地全球重访星座轨道快速优化设计研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2019.
Ma Yuanye. Research on the rapid optimization design of the near-Earth global revisit constellation orbit[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences(National Center for Space Science, Chinese Academy of Sciences), 2019(in Chinese).
- [15] 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 Xin, Liu Yulin, Li Shixue, 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(in Chinese).
- [16] 陈宏君. 遗传算法在计算机网络优化设计中的应用[J]. *哈尔滨师范大学自然科学学报*, 2018, 34(3): 89-93.
Chen Hongjun. Application of genetic algorithm in computer network optimization design[J]. *Natural Science Journal of Harbin Normal University*, 2018, 34(3): 89-93(in Chinese).
- [17] 刘蕊蕊, 于合谣, 冀鹏飞. 基于遗传算法改进的 BP 神经网络算法[J]. *德州学院学报*, 2017, 33(4): 38-41.
Liu Ruirui, Yu Heyao, Ji Pengfei. Improved BP neural network algorithm based on genetic algorithm[J]. *Journal of Dezhou University*, 2017, 33(4): 38-41(in Chinese).
- [18] 谷加臣, 丁桂强, 刘朝阳, 等. 基于遗传算法神经网络的电子对抗效能评估方法研究[J]. *通信对抗*, 2017, 36(2): 45-49.
Gu Jiachen, Ding Guiqiang, Liu Chaoyang, et al. Research on the effectiveness evaluation method of electronic warfare based on genetic algorithm neural network[J]. *Communication Countermeasures*, 2017, 36(2): 45-49(in Chinese).
- [19] 侯远韶. 基于蚁群优化的特征基因选择算法[J]. *中州大学学报*, 2019, 36(6): 120-123.
Hou Yuanshao. Feature gene selection algorithm based on ant colony optimization[J]. *Journal of Zhongzhou University*, 2019, 36(6): 120-123(in Chinese).
- [20] 胡炬琿. 遗传-蚁群混合算法在排课系统中的研究与应用[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
Hu Juhui. Research and application of genetic-ant colony hybrid algorithm in class scheduling system[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019(in Chinese).
- [21] 熊起. 基于遗传蚁群组合算法优化 SVM 模型的边坡位移预测研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2019.
Xiong Qi. Research on slope displacement prediction based on genetic ant colony combination algorithm to optimize SVM model[D]. Ganzhou: Jiangxi University of

- Science and Technology, 2019(in Chinese).
- [22] 中科遥感 SAR 新型卫星星座首发星“深圳一号”正式启动[J]. 红外, 2017, 38(9): 50.
The first star of the new SAR satellite constellation of Zhongke Remote Sensing “Shenzhen One” is officially launched[J]. Infrared, 2017, 38(9): 50(in Chinese).
- [23] 曹华文, 李传荣, 李子扬, 等. 基于 J_2 摄动模型的卫星轨道预测算法精度评估[J]. 遥感信息, 2012, 27(6): 21-27.
Cao Huawen, Li Chuanrong, Li Ziyang, et al. Accuracy evaluation of satellite orbit prediction algorithm based on J_2 perturbation model[J]. Remote Sensing Information, 2012, 27(6): 21-27(in Chinese).
- [24] 武飞, 段丽华, 张昆峰. 基于 NSGA-II 的伺服系统控制参数多目标优化设计[J]. 导航定位与授时, 2015, 2(5): 14-21.
Wu Fei, Duan Lihua, Zhang Kunfeng. Multi-objective optimization design of servo system control parameters based on NSGA-II [J]. Navigation Positioning and Timing, 2015, 2(5): 14-21(in Chinese).
- [25] 宋丹, 许承东, 胡春生, 等. 基于遗传算法的多星座选星方法[J]. 宇航学报, 2015, 36(3): 300-308.
Song Dan, Xu Chengdong, Hu Chunsheng, et al. Multi-constellation star selection method based on genetic algorithm[J]. Acta Astronautica Sinica, 2015, 36(3): 300-308(in Chinese).
- [26] 张洲宇, 曹云峰. 采用局部约束线性编码的像素级舰船目标图像融合[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(2): 120-129.
Zhang Zhouyu, Cao Yunfeng. Pixel-level ship target image fusion using local constrained linear coding[J]. Navigation Positioning and Timing, 2021, 8(2): 120-129(in Chinese).
- [27] 李东新, 彭云, 常青, 等. 基于粒子群算法的伪卫星布站优化设计[J]. 导航定位与授时, 2015, 2(5): 44-51.
Li Dongxin, Peng Yun, Chang Qing, et al. Optimal design of pseudolite deployment based on particle swarm algorithm [J]. Navigation Positioning and Timing, 2015, 2(5): 44-51(in Chinese).
- [28] Ge Y, Liu X, Li Y. Pareto optimal control of the mean-field stochastic systems by adaptive dynamic programming algorithm[J]. ISA Transactions, 2020, 102(12): 81-90.
- [29] Yang C, Ding J, Jin Y, et al. Offline data-driven multiobjective optimization: knowledge transfer between surrogates and generation of final solutions[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2020, 24(3): 409-423.
- [30] Lee K M, Hong J Y, Chae C G, et al. Determining the best fitness function of genetic algorithm for improved fault recovery in substation[J]. Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 2020, 69(6): 745-751.

(编辑:孟彬)