



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

沈 欣^{1,2} 刘 钰 霖^{1,2} 李 仕 学^{1,2} 姚 瑕 璞^{3,4}

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

2 地球空间信息技术协同创新中心,湖北 武汉,430079

3 华中师范大学教育信息技术学院,湖北 武汉,430079

4 武汉大学资源与环境科学学院,湖北 武汉,430079

摘要:针对定位、导航、授时、遥感、通信一体的天基信息实时服务系统对遥感信息高时间分辨率获取的需求,提出了基于改进粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法的遥感卫星星座优化设计方法。基于 $6N$ 和 $3+4P$ 星座构型,以重访时间间隔作为优化目标,采用改进的PSO算法对星座优化模型进行求解,分别针对全球覆盖和区域覆盖任务进行了仿真对比试验。仿真结果表明,提出的方法适用于低轨遥感卫星星座设计,满足高时间分辨率要求。

关键词:卫星遥感;星座设计;重访周期;改进 PSO 算法

中图分类号:P236

文献标志码:A

随着卫星遥感应用领域的不断拓展,广大用户对卫星遥感信息的需求日益体现出高时间分辨率的特点,采用卫星组网形成卫星星座的方法成为近年来遥感卫星系统发展的趋势,例如美国的 Planet 星座^[1]、中国的吉林一号^[2]、珠海一号^[3]等。

卫星星座优化设计作为遥感卫星系统总体设计的重要环节,对遥感卫星的覆盖性能有决定性影响。星座设计是根据任务要求,通过优化设计星座中卫星的轨道参数,提供满足用户覆盖性能要求的星座构型和轨道参数。

现有的星座设计研究中,常将优化设计问题抽象为优化问题,通过构建优化模型并对模型进行求解,得到最优的星座设计方案。一般将卫星轨道参数作为模型的决策变量,星座的覆盖性能作为模型目标函数或约束条件,如单重覆盖百分比^[4]、覆盖持续时间^[5]、目标区域覆盖重数^[6]、访问间隔时间^[7]、时间分辨率^[8]等。对遥感卫星星座而言,通常采用时间分辨率、空间分辨率、幅宽等指标描述遥感卫星星座的覆盖性能^[9]。

由于星座设计面向目标的多样性,如全球覆盖、区域覆盖等,星座优化模型求解目前尚无较通用的方法。近年来,国内外学者普遍采用群智能算法求解星座优化问题,可有效解决参数离散连续混合、目标函数非线性等问题,扩展星座设计的解空间。目前用于星座设计的主要群智能优化算法有遗传算法(genetic algorithm, GA)^[10]、差分进化(differential evolution, DE)算法^[11]、粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法^[12]、蚁群算法、免疫算法等。其中,GA 是一种模拟生物进化机制的随机搜索方法,鲁棒性和通用性强,是最早被引入星座优化设计领域的群智能优化算法,并在星座设计应用中不断改进。文献[13]利用 GA 分别针对获取最大分辨率图像和最长访问时间的两个任务目标进行轨道优化;文献[14]采用多目标 GA 方法解决重访时间目标之间的矛盾问题;文献[15]基于 GA 进行低轨/中轨、中轨/高轨、低轨/高轨的混合轨道星座设计。DE 算法具有进化算子简单、控制参数少、搜索稳定等优点,在连续优化问题中效率较高。文献[16]利用 DE

收稿日期:2018-09-12

项目资助:国家重点研发计划(2016YFB0500801);国家自然科学基金(41501383,91538106,41501503,41601490);中国工程院重大咨询研究(2017-ZD-01)。

第一作者:沈欣,博士,副研究员,主要从事卫星轨道优化与成像任务规划研究。xinshen@whu.edu.cn

通讯作者:刘钰霖,硕士生。yulinliu@whu.edu.cn

算法针对中国地区设计了多组通信卫星星座优化方案;文献[17]讨论了 DE 算法对 Delta 星座、Sigma 星座、Rosette 星座、Star 星座等特定构型星座优化设计的方法。PSO 算法是一种模拟鸟类群体社会行为的智能搜索算法,算法易于实现,搜索效率高,且具有实数编码的特点,是当前星座优化模型求解中应用最普遍的方法。文献[18]利用多目标粒子群算法得到了导航星座优化方案;文献[19]提出了自适应变异的粒子群算法,对低轨道和椭圆轨道组成的混合卫星星座进行了研究。此外,文献[20]提出基于约束支配的改进非支配近邻免疫算法来优化低轨间歇覆盖通信星座;文献[21]基于自适应连续蚁群算法对星座的覆盖性能进行优化。

本文针对定位、导航、授时、遥感、通信(positioning, navigation, timing, remote sensing, communication, PNTRC)一体的天基信息实时服务系统中对遥感信息小时级甚至分钟级时间分辨率的要求^[22],提出了基于改进的 PSO 算法的高时间分辨率全球覆盖和区域覆盖遥感卫星星座优化设计的方法。首先,以平均重访时间间隔为目标函数,卫星轨道参数为决策变量构建星座设计的数学模型;然后,针对星座优化设计模型求解的要求,提出改进的 PSO 算法进行优化模型求解;最后,分别针对全球覆盖、区域覆盖要求,采用 6N、3+4P 两种星座对本文提出的星座设计方法进行验证和对比分析。仿真结果表明,该方法适用于低轨道全球覆盖和区域覆盖星座设计,可满足 PNTRC 系统对遥感信息快速响应的需求。

1 星座设计问题优化建模

1.1 数学模型

本文将星座设计问题抽象为单目标优化问题,构建优化模型如下:

$$\min F = f(a_0, a_1 \dots a_n, i_0, i_1 \dots i_n, e_0, e_1 \dots e_n),$$

$$\Omega_0, \Omega_1 \dots \Omega_n, \omega_0, \omega_1 \dots \omega_n, M_0, M_1 \dots M_n \quad (1)$$

其中, $a_j \in [a_j^L, a_j^U]$, $i_j \in [i_j^L, i_j^U]$, $e_j \in [e_j^L, e_j^U]$, $\Omega_j \in [\Omega_j^L, \Omega_j^U]$, $\omega_j \in [\omega_j^L, \omega_j^U]$, $M_j \in [M_j^L, M_j^U]$, $j = 1, 2 \dots n$ 。式中,目标函数为星座对目标的平均重访时间间隔,是表征星座时间分辨率指标最常用的指标;决策变量为星座中每颗卫星的轨道参数,包括半长轴 a 、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 ; $a_j^L, a_j^U, i_j^L, i_j^U, e_j^L, e_j^U, \Omega_j^L, \Omega_j^U, \omega_j^L, \omega_j^U, M_j^L, M_j^U$ 分别为 6 个轨道参数第 j 维的上下界。

本文提出的星座设计模型中的决策变量可采用 $6N$ 星座、 $3+4P$ 星座两种形式表达,兼顾了固定构型和非固定构型星座的设计需要。

1) 非固定构型星座($6N$ 星座^[7])。对于一个由 N 颗卫星构成的通用星座,共有 $6N$ 个优化参数,直接作为模型的决策变量。

2) 固定构型星座($3+4P$ 星座^[23])。星座共有 P 个轨道面,星座中每颗卫星的半长轴、倾角及偏心率都相同,具有稳定的构型。每个轨道面内的卫星数为 $Q_j, j = 1, 2 \dots P$ 。则星座中卫星数为 $T = \sum_{j=1}^P Q_j$ 。采用 $3+4P$ 星座时,决策变量包括 $a, e, i, Q_j, \Omega_j, \omega_j, M_j, j = 1, 2 \dots P$, 共 $3+4P$ 个待优化的参数。各个轨道面内的卫星参数如下:

$$\begin{cases} a_{j,k} = a, e_{j,k} = e \\ i_{j,k} = i, \Omega_{j,k} = \Omega_j \\ \omega_{j,k} = \omega_j, M_{j,k} = M_j + (k-1) \cdot \frac{2\pi}{Q_j} \end{cases} \quad (2)$$

1.2 遥感卫星星座参数边界设置

对遥感卫星星座而言,轨道高度直接影响遥感卫星成像传感器的地面分辨率与地面覆盖带宽度。同时考虑大气阻力对工作寿命的影响,本文限定卫星的轨道高度为 500~700 km。为保证星载传感器对所有星下点具有相同的空间分辨率,卫星设定为圆轨道,偏心率 $e=0$ 。卫星的轨道倾角范围取决于卫星的覆盖范围或区域, Ω, ω 和 M 的取值范围为 $[0, 360^\circ]$ 。由于采用圆轨道,实际优化过程中, $6N$ 星座中需要优化的决策变量是每颗卫星的半长轴、倾角、升交点赤经和平近点角; $3+4P$ 星座中优化的决策变量是星座的半长轴、倾角、每个轨道面的升交点赤经、近地点幅角、每个轨道面第一颗星的平近点角(起始相位)以及每个轨道面上均匀分布的卫星个数。

2 改进的 PSO 算法

2.1 标准 PSO 算法

Kennedy 和 Eberhart 在 1995 年提出了 PSO 算法。标准 PSO 算法中,设优化问题的搜索空间为 d 维,粒子数为 n ,第 i 个粒子的位置 $x_i = [x_{i1} \ x_{i2} \ \dots \ x_{id}]$,第 i 个粒子的速度 $v_i = [v_{i1} \ v_{i2} \ \dots \ v_{id}]$,第 i 个粒子当前搜索到的最佳位置为 $p_{best,i} = [p_{i1} \ p_{i2} \ \dots \ p_{id}]$,粒子群当前搜索到的最佳位置为 $g_{best} = [g_1 \ g_2 \ \dots \ g_d]$ 。一般来说,粒子的位置和速度都是在连续

的实数空间内进行取值。每个粒子的位置更新方程为:

$$\begin{cases} v(t+1) = w \cdot v(t) + c_1 r_1 \cdot (p(t) - x(t)) + \\ c_2 r_2 \cdot (g(t) - x(t)) \\ x(t+1) = x(t) + v(t+1) \end{cases} \quad (3)$$

式中, c_1, c_2 为正常数, 称为加速因子, 常取为 1.496; r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 间的随机数, 惯性权重 w 的取值范围为 $[0, 1]$ 。粒子群初始位置和速度随机产生, 根据式(3)、式(4)进行迭代寻优。迭代终止条件一般为达到最大迭代次数。

PSO 算法易于实现, 参数空间小, 且采用的实数编码方式能较好地解决实值优化问题, 对连续优化问题和离散优化问题都有较好的效果。

2.2 改进 PSO 算法

采用群智能优化算法求解星座优化模型, 需要计算种群中的所有粒子的适应度值(目标函数)。平均重访时间间隔计算无显式的解析表达式, 需要依赖计算机仿真, 较长的仿真时间可保障结果的可靠性, 但计算消耗较大。随着种群的迭代, 算法的计算消耗将呈线性增长。因此, 模型求解算法对收敛性能和全局搜索能力提出了更高要求。面对星座优化模型中计算消耗大的情况, 本文针对标准 PSO 收敛速度和全局搜索能力的不足做了改进。

标准的 PSO 算法中, 各个粒子根据个体历史极值和种群最优值来更新自己的位置, 其前进方向有很大的局限性。如果种群最优值只是一个局部最优解, 整个种群依然会向它靠拢, 无法探索更优的空间。造成这种停滞的根本原因在于粒子单纯地向种群最优值看齐, 而无法向周围的同伴学习。本文在标准 PSO 算法的基础上, 重新设置更新规则, 使用较优粒子的历史最优值 P_{win} 来代替自身的历史最优值, 使用全体粒子的平均值 P_{center} 来代替种群中个体的最优值, 即:

$$\begin{cases} v(t+1) = c_1 v(t) + c_2 (P_{\text{win}} x(t) - \\ P_{\text{lose}} x(t)) + c_3 \cdot \varphi (P_{\text{center}} x(t) - P_{\text{lose}} x(t)) \\ x(t+1) = x(t) + w v(t+1) \end{cases} \quad (4)$$

式中, 惯性权重 w 和最优值均值权重 φ 取值范围为 $[0, 1]$ 。在每次迭代时, 将粒子 i 与 j 进行比对, 分出优劣。较差粒子通过跟踪较优粒子的历史最优位置 P_{win} 和种群最优值参数均值 P_{center} 来更新自己的速度和位置。历史最差位置则为 P_{lose} 。

改进的 PSO 算法具体流程如下:①初始化一群粒子(规模为 m), 位置随机, 速度为零。②计算种群中各个粒子历史最优参数均值。③随机挑选

两个不同的粒子, 对比其适应度, 找出较优和较劣粒子。④使用式(4)对较劣的算子参数进行优化。⑤依次挑选粒子进行比对, 保证所有粒子均参与优化或被优化。⑥进行下一次迭代, 直到满足终止条件。

改进的算法通过改变粒子的进化策略, 在劣势粒子的速度和位置更新中引入 P_{center} , 增强粒子间的交流学习, 提高了粒子的多样性, 克服由局部极值引起的早熟现象。在搜索过程中, 由较优粒子的历史最优值和种群平均值决定粒子运动的速度和方向, 以此来寻找最优解。

3 仿真实验与分析

根据全球覆盖和区域覆盖两种需求, 本文分别采用 $6N$ 和 $3+4P$ 星座构型, 设计了 4 组仿真实验, 验证本文方法的有效性。

仿真时间设为 2013 年 11 月 2 日 04:00:00 协调世界时(coordinated universal time, UTC)至 2013 年 11 月 3 日 04:00:00(UTC), 遥感卫星采用光学卫星和合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)卫星, 星座的卫星总数量为 10 颗。光学卫星的传感器的最大视场角为 45° , 考虑光照条件, 有效成像设置为当地时间 6:00~18:00; SAR 的入射角为 $20^\circ \sim 60^\circ$, 最小侧视角 17.1° , 最大侧视角 67.8° 。仿真实验采用 Visual Studio2017 结合卫星仿真工具软件 STK(Satellite Tool Kit)计算对目标的重访时间间隔。

为验证本文改进 PSO 算法的优越性, 分别与 DE 算法、PSO 算法和 PSODE 算法进行对比实验。仿真实验中, 改进 PSO 算法的惯性权重 w 设为 1, 以保证搜索的广度, 最优值均值权重 φ 设为 0.15; PSO 算法的加速因子 c_1, c_2 根据经验取常数 1.496; 惯性权重 w 取 1; r_1, r_2 取 $[0, 1]$ 间的随机数; DE 算法的缩放因子 F 取 $[0.7, 0.9]$ 之间的随机数; 交叉概率 CR 取 $[0.95, 1.0]$ 之间的随机数。在对比实验中, 4 种遗传算法的种群规模均为 60, 进化代数均为 500 代, 并控制 4 种算法在初始化种群相同的条件下进行迭代, 有利于对 4 种算法的优化效果进行对比。

3.1 全球覆盖星座

为计算星座对全球范围目标的覆盖时效性, 在全球纬度 $[-80^\circ, 80^\circ]$ 范围内, 以 40° 的纬度间隔、 60° 的经度间隔将全球划分为网格图, 落在服务区内的 30 个网格点作为特征点, 根据高分辨率全球覆盖星座对 30 个特征点的平均重访时间间隔

进行综合统计分析。全球覆盖星座中卫星轨道倾角的取值范围设为 $[80^\circ, 100^\circ]$, SAR 的卫星数量 N 取值范围为 $[0, 10]$, 光学卫星数量为 $10 - N$ 。

1) 6N 星座优化设计

采用改进 PSO 算法对全球覆盖 6N 星座进行优化设计, 当平均重访时间收敛(时间分辨率最高)时, 卫星的轨道参数优化结果见表 1。卫星类型均为 SAR。

表 1 全球覆盖的 6N 星座优化结果

Tab. 1 Results of 6N Constellation Optimization of Global Coverage

卫星序号	a/km	$i/(\text{°})$	$\Omega/(\text{°})$	$M/(\text{°})$
1	7 046.42	89.953 5	140.534	194.904
2	7 016.19	87.408 1	319.553	191.599
3	7 065.60	91.716 4	106.261	197.019
4	7 062.63	88.875 1	75.187	198.590
5	7 012.68	87.751 4	294.256	193.195
6	7 006.42	87.659 3	349.364	201.453
7	7 048.61	90.646 4	181.401	199.291
8	7 012.21	87.511 6	272.310	194.914
9	7 045.46	93.404 7	202.762	198.894
10	6 983.86	92.978 3	224.720	202.592

4 种优化算法对该通用 6N 星座的平均重访时间为 17.11 min(DE)、22.85 min(PSO)、21.81 min(PSODE)以及 16.24 min(改进 PSO)。改进 PSO 算法的优化结果优于 DE、PSO 及 PSODE 算法。优化后的星座由 10 个不同的轨道面组成, 对全球目标点的平均重访时间约为 16.24 min。4 种算法的进化过程如图 1 所示, 在初代种群一致的情况下, PSO 算法和 PSODE 算法容易陷入局部最优解; DE 算法收敛速度较慢, 迭代终止时还未收敛; 改进的 PSO 算法于 300 代左右收敛, 收敛速度快于 DE。

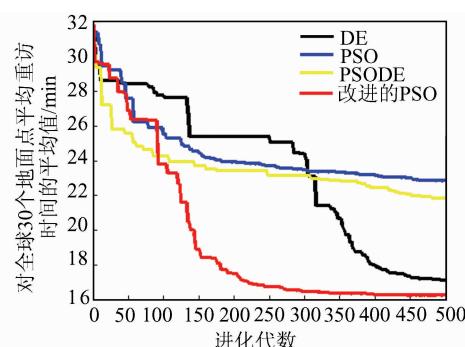


图 1 全球覆盖的 6N 星座 DE、PSO、PSODE、改进的 PSO 进化过程

Fig. 1 Evolution of DE, PSO, PSODE and Improved PSO Algorithms of Global Coverage, 6N Constellation

此外, 多次试验结果表明, SAR 的数量为 10, 光学卫星的数量为 0 时, 星座时间分辨率最高。

与光学卫星相比, SAR 具有全天候、全天时工作的特点, 可弥补可见光的不足, 对提高星座的时间分辨率有极大的优势。后续试验不再以 SAR 的数量作为待优化参数, 将 SAR 的数量设为 10, 即星座全部由 SAR 卫星组成。

2) 3+4P 星座优化设计

采用改进的 PSO 算法对全球覆盖 10 颗 SAR 卫星组成的 3+4P 星座进行优化设计, 星座优化结果见表 2。各卫星 $a = 7 069.21 \text{ km}$, $i = 92.0952^\circ$ 。分别采用 DE、PSO、PSODE 和改进 PSO 算法进行对比试验, 4 种优化算法对 3+4P 规则构型星座的平均重访时间为 19.23 min (DE)、18.44 min(PSO)、16.37 min (PSODE) 以及 16.10 min(改进 PSO)。4 种算法的进化过程对比如图 2 所示。

表 2 全球覆盖的 3+4P 星座优化结果

Tab. 2 Results of 3+4P Constellation Optimization of Global Coverage

卫星序号	轨道序号	$\Omega/(\text{°})$	$\omega/(\text{°})$	$M/(\text{°})$
1	1	230.593	128.297	165.882
2	1	230.593	128.297	345.882
3	2	303.473	130.666	229.669
4	2	303.473	130.666	49.669
5	3	97.069	123.798	223.744
6	3	97.069	123.798	43.744
7	4	266.548	129.505	197.998
8	4	266.548	129.505	17.998
9	5	208.771	135.855	214.063
10	5	208.771	135.855	34.063

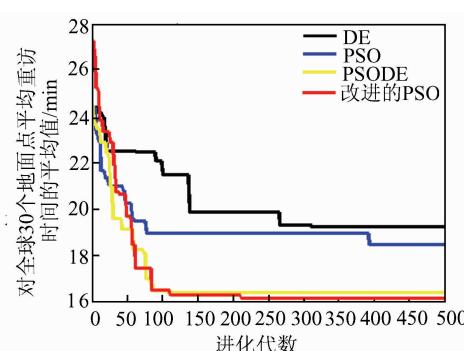


图 2 全球覆盖的 3+4P DE、PSO、PSODE、改进的 PSO 进化过程

Fig. 2 Evolution of DE, PSO, PSODE and Improved PSO Algorithms of Global Coverage, 3+4P Constellation

由以上试验结果可以看出, 改进 PSO 算法优化结果最佳, 优化后的规则星座由 5 个轨道面组成, 每个轨道面均匀分布 2 颗卫星, 对全球目标平均重访时间为 16.10 min。改进 PSO 算法和 PSODE 算法的收敛速度和优化结果均优于 PSO 算法和 DE 算法。PSODE 算法的优化结果较好,

但每一次迭代耗时约为 PSO、DE 及改进 PSO 算法的 2 倍。在优化结果相当的情况下, 改进 PSO 的优化效率高于 PSODE 算法。因此, 改进 PSO 算法在收敛速度、优化结果和优化效率等方面优于 3 种传统算法。

3.2 区域覆盖星座

与全球覆盖的星座设计不同, 区域覆盖星座侧重于对特定区域进行连续有效观测。本节针对区域覆盖星座, 分别对 6N、3+4P 星座进行优化求解。选择的任务覆盖区域为湖北省, 在湖北省范围内随机生成 30 个离散点作为时间分辨率指标计算的目标点, 任务区域如图 3 所示。

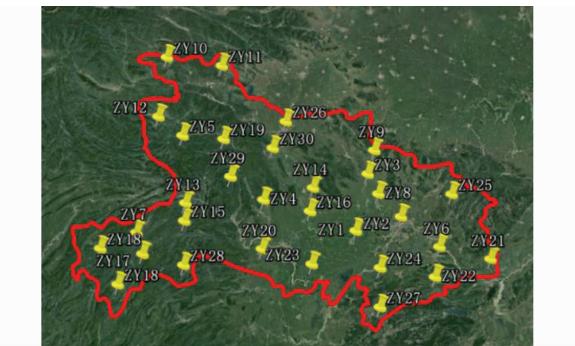


图 3 任务区域

Fig. 3 Task Area

由于所选区域的纬度范围为 $[29^{\circ} 05', 33^{\circ} 20']$, 将区域覆盖星座的轨道倾角设置为 $[40^{\circ}, 140^{\circ}]$, 使星座对目标区域更有针对性。

1) 6N 星座优化设计

采用改进的 PSO 算法对区域覆盖 6N 卫星星座进行优化设计, 星座优化结果见表 3。分别采用 DE、PSO、PSODE 和改进的 PSO 算法, 对 6N 全球覆盖星座进行优化试验, 4 种优化算法的平均重访时间为 6.35 min(DE)、7.94 min(PSO)、6.80 min(PSODE) 以及 5.14 min(改进 PSO)。其进化过程如图 4 所示。

表 3 区域覆盖的 6N 星座优化结果

Tab. 3 Results of 6N Constellation Optimization of Regional Coverage

卫星序号	a/km	$i/(\text{°})$	$\Omega/(\text{°})$	$M/(\text{°})$
1	6 884.98	139.671	181.55	126.973
2	7 024.33	40.609	89.241	313.473
3	6 980.98	139.968	306.291	120.377
4	7 040.32	138.825	155.618	134.174
5	6 992.51	139.873	84.230	134.792
6	6 977.69	139.100	156.441	130.819
7	7 022.10	139.363	219.767	128.228
8	7 012.10	139.973	355.456	120.036
9	6 968.90	40.413	213.041	303.421
10	6 963.40	139.967	267.747	122.344

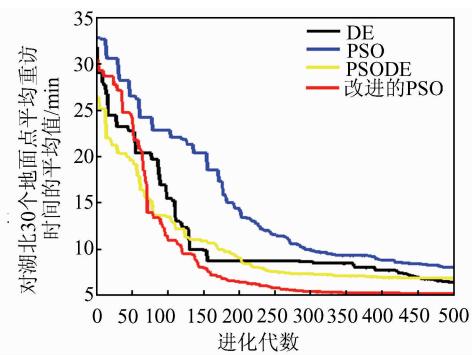


图 4 区域覆盖的 6N 星座 DE、PSO、PSODE、改进的 PSO 进化过程

Fig. 4 Evolution of DE, PSO, PSODE and Improved PSO of Regional Coverage, 6N Constellation

对试验结果进行分析, 改进 PSO 算法优化后的星座由 10 个轨道面构成, 对湖北省区域平均重访时间为 5.14 min。改进 PSO 算法优化后的星座时间分辨率高于 DE、PSO、PSODE 算法的优化结果, 收敛速度也快于 PSO 算法和 DE 算法。

2) 3+4P 星座优化设计

采用改进的 PSO 算法对区域覆盖 3+4P 卫星星座进行优化设计, 星座优化结果见表 4。各卫星 $a = 7 069.62 \text{ km}$, $i = 139.985^{\circ}$ 。分别采用 DE、PSO、PSODE 和改进的 PSO 算法, 对 3+4P 全球覆盖星座进行优化试验。4 种优化算法的平均重访时间为 4.20 min(DE)、4.36 min(PSO)、4.13 min(PSODE) 以及 4.01 min(改进 PSO)。其进化过程如图 5 所示。

表 4 区域覆盖的 3+4P 星座优化结果

Tab. 4 Results of 3+4P Constellation Optimization of Regional Coverage

卫星序号	轨道序号	$\Omega/(\text{°})$	$\omega/(\text{°})$	$M/(\text{°})$
1	1	121.064	147.938	155.529
2	2	200.380	146.841	104.505
3	3	174.650	149.257	226.854
4	3	174.650	149.257	46.854
5	4	260.288	149.770	102.424
6	4	260.288	149.770	282.424
7	5	126.261	150.311	303.326
8	5	126.261	150.311	33.326
9	5	126.261	150.311	123.326
10	5	126.261	150.311	213.326

由以上结果可得, 改进 PSO 算法优化后的星座由 5 个轨道面构成, 每个轨道面上分别均匀分布 1-1-2-2-4 颗星, 对湖北省区域平均重访时间为 4.01 min。由于 3+4P 星座的决策变量个数小于 6N 星座, 算法的搜索空间减小, 收敛速度快, 4 种算法均在 50 代左右收敛, 改进的 PSO 的优化结果略优于其他 3 种传统算法。

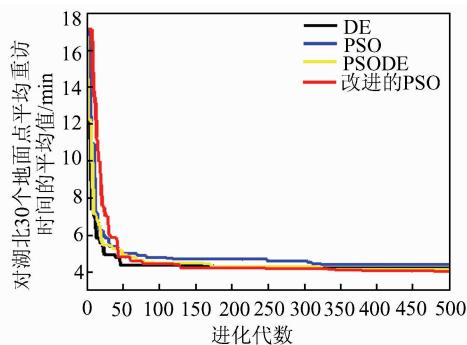


图 5 区域覆盖的 3+4P 星座 DE、PSO、PSODE、改进的 PSO 进化过程

Fig. 5 Evolution of DE, PSO, PSODE and Improved PSO of Regional Coverage, 3+4P Constellation

3.3 试验结论

本文通过以上 4 组仿真试验验证了改进 PSO 算法的有效性,适用于全球和区域覆盖卫星星座优化设计。改进 PSO 算法优化后星座的时间分辨率均高于其他 3 种对比算法;改进 PSO 算法的收敛速度快于 DE、PSO、PSODE 算法,同时有效避免了陷入局部最优解。

4 结语

本文针对高时间分辨率遥感卫星星座设计这一问题,提出了基于改进 PSO 算法的星座设计方法。通过求解 $6N$ 、 $3+4P$ 两种形式的决策变量,兼顾固定构型和非固定构型星座的设计需要,得到了适用于全球/区域覆盖的星座优化设计方案。仿真试验表明,本文方法对低轨遥感卫星星座设计具有较好的适用性,可满足未来 PNTRC 系统中遥感卫星星座时间分辨率的要求。未来可在遥感数据快速获取的基础上,研究基于天基通信网络的数据传输,实现数据快速回传。

参 考 文 献

- [1] Liao Yongsheng. Revelation of “Pigeon”—Analysis of Planetary Laboratory’s Micro Remote Sensing Satellite Program[J]. *Chinese Surveying*, 2015(6):42-44(廖永生.“鸽子”的启示——行星实验室公司微小遥感卫星计划分析[J]. 中国测绘, 2015(6):42-44)
- [2] Zhang Zhaocai. Jilin Satellite Group Star[J]. *Satellite Applications*, 2015(11):89(张召才. 吉林一号卫星组星[J]. 卫星应用, 2015(11):89)
- [3] Yun Hang. “Zhuhai-1” Remote Sensing Micro-nano Satellite Constellation Starting Star [J]. *Satellite Applications*, 2017(6):78(云行.“珠海一号”遥感微纳卫星星座首发星[J]. 卫星应用, 2017(6):78)
- [4] Wei Jiaolong, Cen Zhaoxi. Optimization of Regional Coverage Satellite Constellations Based on Ant Colony Algorithm[J]. *Journal of Communication*, 2006, 27(8): 62-66(魏蛟龙, 岑朝辉. 基于蚁群算法的区域覆盖卫星星座优化设计[J]. 通信学报, 2006, 27(8): 62-66)
- [5] Gao Chaoqun, Yang Dongkai, Qiu Xuejing, et al. Constructing LEO-R Ocean Remote Sensing Constellation Using BeiDou System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(9): 1 342-1 348(高超群, 杨东凯, 裴雪敬, 等. 利用北斗系统构建 LEO-R 海洋遥感星座的理论研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(9): 1 342-1 348)
- [6] Mortari D, Sanctis M D, Lucente M. Design of Flower Constellations for Telecommunication Services[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(11): 2 008-2 019
- [7] Zeng Yujiang. Satellite Constellation Design Based on Genetic Algorithm[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007(曾喻江. 基于遗传算法的卫星星座设计[D]. 武汉:华中科技大学, 2007)
- [8] Han Ying, Fu Yang. Spatial and Temporal Characteristics of GNSS-R Ocean Remote Sensing Satellite Constellation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(2): 208-211(韩英, 符养. 利用卫星星座对 GNSS-R 海洋遥感时空特性进行研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(2): 208-211)
- [9] Shen Xin. Research on Key Technologies of Orbit Design for Optical Remote Sensing Satellite[D]. Wuhan: Wuhan University, 2012(沈欣. 光学遥感卫星轨道设计若干关键技术研究[D]. 武汉:武汉大学, 2012)
- [10] Wang Xufa. Genetic Algorithm and Its Application [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 1995, 23(2):9-10(王煦法. 遗传算法及其应用[J]. 小型微型计算机系统, 1995, 23(2):9-10)
- [11] Yang Qiwen, Cai Liang, Xue Yuncan. A Survey of Differential Evolution Algorithms[J]. *Pattern Recognition & Artificial Intelligence*, 2008, 21(4):506-513(杨启文, 蔡亮, 薛云灿. 差分进化算法综述[J]. 模式识别与人工智能, 2008, 21(4):506-513)
- [12] Kennedy J, Eberhart R C, Shi Y. Swarm Intelligence [M]//Swarm Intelligence. Sanfrancisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 2001:187-219
- [13] Abdelkhalik O M O. Orbit Design and Estimation for Surveillance Missions Using Genetic Algorithms [D]. Texas: Texas A&M University, 2005

- [14] Williams E A, Crossley W A, Lang T J. Average and Maximum Revisit Time Trade Studies for Satellite Constellations Using a Multiobjective Genetic Algorithm [J]. *Journal of the Astronautical Sciences*, 2001, 49(3):385-400
- [15] Asvial M, Tafazolli R, Evans B G. Genetic Hybrid Satellite Constellation Design[C]. International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit, Yokohama, Japan, 2003
- [16] Zhao Ke. Common Ground Track Regional Communication Satellite Constellation Optimization Design and Simulation [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2012(赵科. 共地面轨迹区域通信卫星星座优化设计与仿真[D]. 武汉:中国地质大学(武汉), 2012)
- [17] Xiao Baoqiu. Satellite Constellation Optimal and Design Using Specific Configuration Constellation[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2013(肖宝秋. 特定构形卫星星座优化设计[D]. 武汉:中国地质大学(武汉), 2013)
- [18] Meng Bo, Yi Chengjun, Han Chao. Optimization of Navigation Satellite Constellation by Multi-objective Particle Swarm Algorithm[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(7): 1 285-1 291(蒙波,伊成俊,韩潮. 基于多目标粒子群算法的导航星座优化设计[J]. 航空学报, 2009, 30 (7): 1 285-1 291)
- [19] Meng Bo, Han Chao. Optimization of Hybrid Constellation by Modified Particle Swarm Algorithm [J]. *Aerospace Shanghai AER*, 2010, 27(1):36-39(蒙波,韩潮. 基于改进粒子群算法的混合卫星星座优化设计[J]. 上海航天,2010,27(1):36-39)
- [20] Jiang Xinglong, Jiang Quanjiang, Liu Huijie, et al. Design Optimization of Hybrid LEO Constellation Using Modified Non-Dominated Neighbor Immune Algorithm[J]. *Journal of Astronautics*, 2014, 35 (9): 1 007-1 014(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):1 007-1 014)
- [21] Quan Chao. Satellite Constellation Design with Adaptively Continuous Ant System Algorithm[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2007, 20(4):297-303
- [22] Li Deren, Shen Xin, Li Dilong, et al. On Civil-Military Integrated Space-Based Real-Time Information Service System [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42 (11): 1 501-1 505(李德仁, 沈欣, 李迪龙, 等. 论军民融合的卫星通信、遥感、导航一体天基信息实时服务系统[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42 (11):1 501-1 505)
- [23] Wang Rui, Ma Xingrui, Li Ming. Optimization of Regional Coverage Satellite Constellations by Genetic Algorithm [J]. *Journal of Astronautics*, 2002, 23 (3):24-28(王瑞, 马兴瑞, 李明. 采用遗传算法进行区域覆盖卫星星座优化设计[J]. 宇航学报, 2002, 23(3):24-28)

An Optimization Design Method for High Temporal Resolution Remote Sensing Satellite Constellation Based on Improved PSO Algorithm

SHEN Xin^{1,2} LIU Yulin^{1,2} LI Shixue^{1,2} YAO Huang^{3,4}

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University,

Wuhan 430079, China

2 Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China

3 School of Educational Information Technology, Central China Normal University, Wuhan 430079, China

4 School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Satellite constellation design optimization as an important part of the overall design of the remote sensing satellite system, has a decisive influence on the coverage performance of remote sensing satellites. In order to meet the demand for higher temporal resolution of remote sensing information for the space-based real-time information service system, a design method for remote sensing satellite constellation based on improved particle swarm optimization (PSO) is proposed. The improved PSO introduces P_{center} in the speed and position update inferior particles to enhance the learning between particles and improve the diversity of particles. Based on the $6N$ and $3+4P$ constellation configuration, the revisited time interval is used as the optimization goal. The improved PSO is used to solve the constellation optimization model. Four simulation experiments are performed for the global coverage and regional coverage tasks. The effectiveness of the improved PSO is verified by the simulation experiments;

① the improved PSO effectively optimizes the temporal resolution of the constellation; ② the improved PSO converges faster than the contrast algorithm and avoids falling into the local optimal solution. The proposed method has good applicability to the design of low-orbit remote sensing satellite constellation, which can meet the temporal resolution requirements of remote sensing satellite constellation in the future PNTRC (positioning, navigation, timing, remote sensing, communication) system.

Key words: satellite remote sensing; constellation design; revisit time; improved PSO algorithm

First author: SHEN Xin, PhD, associate professor, majors in satellite orbit optimization and imaging task planning, E-mail: xinshen@whu.edu.cn

Corresponding author: LIU Yulin, postgraduate. E-mail: yulinliu@whu.edu.cn

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFB0500801; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41501383, 91538106, 41501503, 41601490; Consulting Research of Chinese Academy of Engineering, No. 2017-ZD-01.

(上接第 1985 页)

Extension of Reliability Theory of Surveying Adjustment into Spatial Data Analytics

SHU Hong^{1,2} SHI Wenzhong³

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University,
Wuhan 430079, China

2 Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China

3 Joint Spatial Information Research Laboratory, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Hong Kong, China

Abstract: Reliability is one quality element of analysis results, and also one optimization criteria of analytical models construction. In surveying and mapping, Li Deren proposes two multi-dimensional alternative hypothesis of model errors discrimination and the gross error elimination of posterior error variance-based weight iterative algorithm. With the promotion of electromagnetic physics and ubiquitous computing, the surveying and mapping technologies have evolved into the geospatial information technologies. Accordingly, the reliability theory is extended from gross error processing, outlier analysis until credible service computation, and its analytical method is developed from statistical inference, optimization computation to logical reasoning. With the metaphor of linguistics, gross error processing can be considered as grammar analysis, outlier analysis considered as semantic analysis, and credible service computing considered as pragmatic analysis. Roughly, here the reliability of spatial data analysis is formalized. Generally, the criterions of object function in optimization are energy minimization of physic systems, information maximization of data systems, and risk minimization of user decision systems. Nowadays, reliability modeling is holistic by considering the dialectical properties of the normal and anomaly, the interior and exterior, the static and dynamic, the subjective and objective. Upon the requirement of eco-social developments, internet-related big data is mostly related to human mental models, which brings us the great difficulties of modeling human irrationality and spatial cognition.

Key words: gross error; trustworthiness; reliability; surveying adjustment; spatial analysis; big data

First author: SHU Hong, PhD, professor, specializes in multivariate spatiotemporal statistics, remote sensing data assimilation, integrated navigation positioning, and space-time commonsense reasoning. E-mail: shu_hong@whu.edu.cn

Foundation support: Key Project of the National Natural Science Foundation of China, No. 41331175; the National Key Research and Development Program of China, Nos. 2017YFB0503604, 2016YFB0502204.