

面向导航卫星失效的低轨星座选星方法

薛文¹, 贾张敏², 郭雯¹, 张勤昊³, 房彦龙⁴

(1. 航天工程大学, 北京 101416; 2. 国防大学联合作战学院, 北京 100091;
3. 中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214400; 4. 太原卫星发射中心, 山西 太原 030001)

摘要: 中轨导航星座面临卫星退役、信号干扰等场景下导航性能降级的问题。首先, 对 Walker 24/3/1 中轨导航星座进行卫星失效性能分析, 确定影响星座最大的失效模式。其次, 利用现有部署的低轨大规模星座进行导航增强, 确定单星选取和轨道面选取两种导航增强方案。最后, 与参考导航星座性能进行对比确定最优方案。旨在快速弥补中轨星座卫星失效后性能降级的不足, 从而降低成本并提高星座整体服务性能。

关键词: 卫星失效; 低轨大规模星座; 低轨导航增强; 星座选星

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2025002

LEO Constellations Satellite Selection Methods for Navigation Satellite Failure

XUE Wen¹, JIA Zhangmin², GUO Wen¹, ZHANG Qin hao³, FANG Yanlong⁴

1. Space Engineering University, Beijing 101416, China

2. Joint Warfare College, National Defense University, Beijing 100091, China

3. China Satellite Maritime Survey and Control Department, Jiangyin 214400, China

4. Taiyuan Satellite Launch Center, Taiyuan 030001, China

Abstract: The MEO navigation constellation confronts the issue of deteriorated navigation performance in the circumstances of satellite decommissioning and signal interference. Firstly, the satellite failure performance of Walker 24/3/1 MEO navigation constellation was analyzed to identify the failure mode that had the greatest impact on the constellation. Secondly, the navigation enhancement scheme of single star selection and orbital plane selection was determined by utilizing the existing LEO large-scale constellation. Finally, the optimal scheme was ascertained by comparing with the performance of the reference navigation constellation. The aim of this paper is to promptly compensate for the performance degradation following the failure of MEO constellation satellites, thereby reducing the cost and enhancing the overall service performance of the LEO constellation.

Keywords: satellite failure, LEO large-scale constellation, LEO navigation enhancement, constellation satellite selection

0 引言

随着北斗全球组网的建设完成, 以及 GPS、GLONASS 和 Galileo 卫星逐步现代化, 全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 提供的位置、导航与授时 (Positioning, Navigation and Timing, PNT) 服务日益完善^[1-2]。然而, 相较于低轨卫星快速变化的几何构型来说, 中高轨导航卫星精密单点定位 (Precise Point Posi-

tioning, PPP) 收敛到厘米级的定位精度需要较长的时间。近年来, 随着集成技术与低轨微小卫星技术的快速发展以及日益增长的人口对互联网的需求, 集通导遥于一体的低轨卫星已成为各国关注的焦点^[3-5]。成熟的商业发射、星座管控模式给现有导航模式带来了新的技术解决方案^[6-8]。低轨大规模星座逐渐部署, 在轨运行的低轨卫星数量呈爆炸式增长。与中高轨卫星相比, 低轨导航卫星传输时延低、距离地面近、自由空间损耗小、多普勒频移现象明显, 有

收稿日期: 2024-10-11; 修回日期: 2025-02-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61403416)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61403416)

着更好的定位效果^[9-10]。信号强度高可以改善复杂环境下信号定位效果，提升抗干扰、防欺骗能力。搭载通信和遥感载荷，便于卫星宽带互联网接入和数据传输。同时，低轨卫星轨道高度低，单星对地覆盖面积小，若要满足中高轨导航卫星同样的定位性能，则需要几百颗卫星^[11-13]。

GNSS的安全、稳定运行与国家的经济和政治密切相关。通过实验仿真可知，任意一颗或两颗导航卫星的失效对全球导航星座系统性能影响较小，随着失效卫星的增多势必会对导航服务性能造成影响。分析导航星座中存在的薄弱环节对于导航系统整体性能以及稳定运行具有重要的意义^[14]。在导航卫星失效方面，罗胜中等^[15]对近 10 年卫星在轨故障进行了分析，将故障等级分为灾难性、严重、一般和轻微故障 4 级。同时，总结了 6 类灾难性及严重在轨故障模式。徐炜等^[16]选取可见卫星数、DOP 值、系统可用性作为评估指标，分析了倾斜轨道卫星 (IGSO)、地球静止轨道卫星 (GEO) 失效后对星座性能的影响。参考文献^[17]给出了卫星失效模式的定义，分析了单星、双星不同失效模式下亚太地区导航星座的服务性能，并建立基于遗传算法的导航星座重构构型的优化设计模型。

在星座选星方面，石涛等^[18]将加权精度衰减因子 (WDOP) 作为适应度评判标准，利用多种群并行遗传算法快速选择当前最优可见星组合，在降低运算量以保证服务实时性的同时，解决了可见星数量冗余的问题。余德茨等^[19]采用基于灰狼优化算法的快速选星方法，可保证在获得理想几何构型的同时大幅减少接收机运算量。王尔申等^[20]提出了一种基于混沌粒子群优化 (CPSO) 的组合导航选星算法，该方法将几何精度衰减因子 (GDOP) 作为适应度函数，可减轻多星座组合接收机的处理负担。吴政城等^[21]在几何精度衰减因子选星法的基础上引入遗传算法，将卫星几何观测矩阵特征斜率作为适应度因子，开展高中低轨导航混合星座完好性监测技术。王晓君等^[22]通过高度角阈值条件并结合卫星高度角、方位角，分析几何布局，构造最大四面体体积，选出参与定位解算的卫星组合，解决了传统方法不能有效反映遮挡情况的问题。

相较于传统的中轨导航星座选星方法，本文主要在中轨导航星座卫星失效后，对已部署的低轨星座进行卫星选取，并利用选取的卫星进行导航增强。其中，低轨导航星座卫星的选取包括单星选取以及轨道面选取。

1 星座卫星失效分析

1.1 导航性能指标

精度衰减因子 (Dilution of Precision, DOP) 常用来

评估卫星星座的服务性能，反映了星座几何构型对导航精度的影响。DOP 值越小，导航性能越好，反映了卫星在空间中分布更均匀。当伪距测量误差不相关时，每颗卫星的测量误差之间没有相关性。这使得误差协方差矩阵是一个对角矩阵，其中对角线上的元素是每颗卫星测量误差的方差。当误差同分布时，每颗卫星的测量误差具有相同的方差 σ_{URE}^2 ，误差协方差矩阵的对角线上的所有元素都是相同的。导航定位误差公式为

$$\text{cov}(dX) = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \sigma_{\text{URE}}^2 \quad (1)$$

其中， cov 为位置和钟差误差的协方差， σ_{URE}^2 为伪距测量方差， $(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1}$ 是用户的测距方差到位置误差的放大因子矩阵， \mathbf{H} 为用户可见性方向余弦矩阵。

在星座设计中，一般采用位置精度衰减因子 (Position Dilution of Precision, PDOP)、几何精度衰减因子 (Geometric Dilution of Precision, GDOP) 评估导航星座性能，而本文只考虑位置精度。导航星座精度衰减因子各个 DOP 可以用 $(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1}$ 的分量来表示， D_{ij} 表示矩阵中的不同数据， $(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1}$ 公式为

$$(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} \end{bmatrix} \quad (2)$$

PDOP 公式为

$$\text{PDOP} = \sqrt{D_{11} + D_{22} + D_{33}} \quad (3)$$

1.2 失效模式及星座可用性

根据失效卫星所处的轨道面以及失效卫星的数量，本文将失效模式分为单星失效、双星失效和多星失效，其中卫星失效又分为共面卫星失效和非共面卫星失效^[17]。文中失效卫星 mn 表示第 m 个轨道面第 n 颗卫星，如失效卫星 11 表示第 1 个轨道面第 1 颗卫星。

星座可用性即星座值 (Constellation Value, CV) 可以衡量卫星失效时不同星座构型的导航性能，反映星座在特定阈值下的可用性，CV 计算公式如下^[23]

$$\text{CV} = \frac{\sum_{t=t_0}^{t_0+\Delta T} \sum_{j=1}^L \text{bool}(\text{PDOP}_{t_j} \leq \text{Th}_{\text{DOP}}) \times \text{area}_j}{\Delta T \times \sum_{j=1}^L \text{area}_j} \quad (4)$$

式中， t_0 为仿真的初始时刻， ΔT 仿真的总时长， PDOP_{t_j} 为 t 时刻第 j 个网格 PDOP 值， Th_{DOP} 为精度衰减因子阈值， bool 为布尔函数， L 为网格点总数， area_j 为第 j 个网格点的面积。

1.3 基于NSGA-II算法的低轨卫星星座选星模型

1994年 Srinivas 和 Deb^[24]提出的非支配排序遗传算法 (NSGA), 较传统的算法有很好的优化效果。2002年 Deb 等^[25]又提出了 NSGA-II 算法, 相较于第一代算法, NSGA-II算法引入了快速非支配排序法来减少耗时, 采用了精英策略保留优秀个体, 摒弃共享半径采用拥挤度方法使解集在目标空间中更加均匀。选用多样性评价指标中的超体积指标 (HV) 作为衡量准则, 其中超体积指标越大则表明解集越优^[26-27]。

目标函数取位置精度衰减因子和用于导航增强的选星数量, 采用 2σ 原则尽可能避免数据出现极值的情况。目标函数如下所示

$$\begin{cases} f_1 = \text{mean}(\text{PDOP}) \\ f_2 = \text{min}(\text{Total}) \end{cases} \quad (5)$$

式中, PDOP取平均值, Total为可见卫星数取最大值。

约束条件如下

$$\text{mean} \left(\text{PDOP}_{\text{latitude}_{\text{低轨} + \text{MEO}}}^n \leq Q \right) \quad (6)$$

式中, m 、 n 为中轨失效后与低轨组成的混合星座在南北纬 $m \sim n$ 之间的平均 PDOP。 Q 为阈值, 是一个常数, 使得混合星座导航性能达到或优于未失效时的性能。

基于 NSGA-II 算法的星座选星优化模型如图 1 所示。

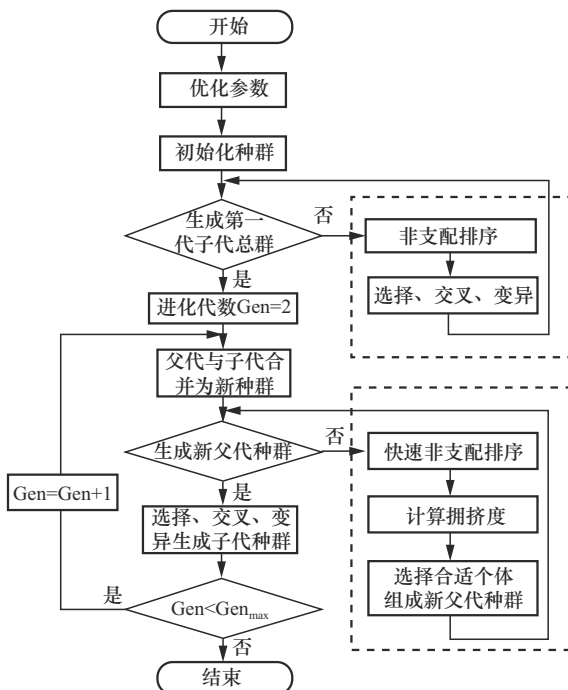


图 1 基于 NSGA-II 算法的星座选星优化模型

2 仿真结果与分析

2.1 卫星失效

本文给出了一个具有普适性的 MEO 全球导航星座, 以 24 颗 MEO 卫星组成的 Walker 24/3/1 全球导航星座为例, 星座卫星轨道高度为 20 000 km, 轨道倾角为 55° , $\text{PDOP} \leq 4$, 采用 2σ 原则, 最小观测仰角为 5° , 网格为 $5^\circ \times 5^\circ$, 步长为 60 s。仿真分析了 24 h 内部分卫星失效对全球范围内导航服务性能的影响。

通过前期仿真实验数据分析可知, 每个轨道面失效一颗卫星对导航星座整体性能影响最大, 对每个轨道面失效 1 颗卫星仿真 512 次, 以卫星失效模式中星座最小 CV (83.9751%) 作为输入条件, 即 14-22-35 (第 1 个轨道面第 4 颗卫星, 第 2 个轨道面第 2 颗卫星, 第 3 个轨道面第 5 颗卫星)^[28]。每个轨道面失效 1 颗卫星, 共仿真 512 次, 最差的 10 颗卫星失效模式见表 1。

表 1 最差的 10 颗卫星失效模式

编号	失效模式	最小 CV	编号	失效模式	最小 CV
1	14-22-35	83.975 1%	6	15-23-36	84.200 6%
2	12-28-33	84.095 2%	7	16-21-37	84.208 4%
3	11-24-32	84.105 3%	8	17-25-33	84.208 5%
4	15-23-31	84.111 1%	9	14-27-35	84.208 8%
5	18-26-34	84.117 6%	10	18-23-31	84.218 2%

14-22-35 卫星失效空间相位如图 2 所示, 其中 P_1 、 P_2 、 P_3 为星座的 3 个轨道面, 横坐标表示星座轨道面的升交点赤经, 纵坐标表示每个轨道线卫星相位。蓝色表示正常卫星, 红色表示失效卫星。

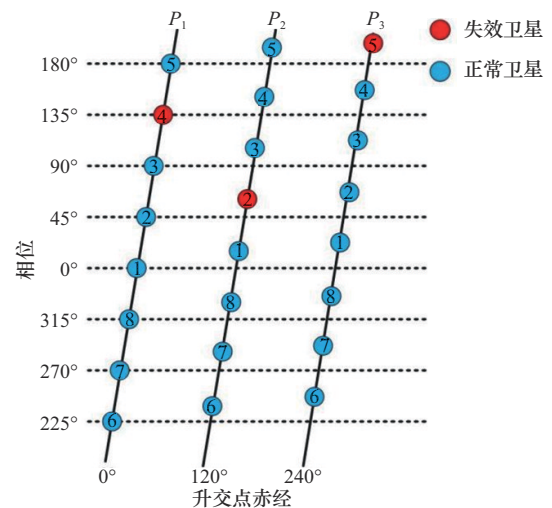


图 2 14-22-35 卫星失效空间相位

2.2 低轨倾斜星座单星选取

以现有 Starlink 星座构型仿真参数为例，其中，低轨倾斜星座参数为 $h = 550 \text{ km}$ 、 $i = 53^\circ$ 、 $P = 72$ 颗、 $P_num = 22$ 颗。低轨极轨星座参数为 $h = 22 \text{ km}$ 、 $i = 70^\circ$ 、 $P = 36$ 颗、 $P_num = 20$ 颗。对目标亚太区域进行过境时长计算，从中选出过境时长最长的 300 颗卫星，部分卫星过境时长见表 2。

表 2 中 AreaTarget 表示亚太地区，区域经度为 $30^\circ \sim 180^\circ$ ，纬度为 $-70^\circ \sim 70^\circ$ 。以 Satellite6909 为例，6909 表示第 69 个轨道面中的第 9 颗卫星。对 300 颗卫星进行轨道面区分，分为 28 个轨道面，轨道面编号为 42~69，每个轨道面卫星数量在 4~11 颗。星座选星空间构型如图 3 所示。

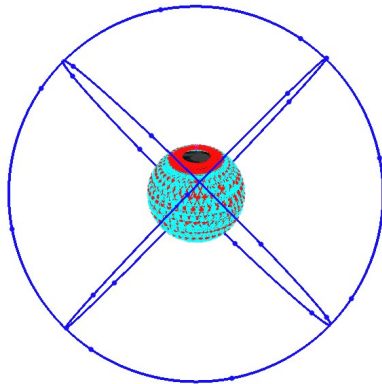


图 3 星座选星空间构型

利用 NSGA-II 算法对 28 个轨道面共计 300 颗卫星进行选星。优化参数集为每个轨道面卫星数量，种群规模为 30 个，进化次数为 300 次。

低轨星座的优化参数集为

$$X = \{P, P_num\} \quad (7)$$

星座优化参数上下限为

$$\begin{cases} X_{low} = \{1, 1\} \\ X_{up} = \{28, \max(P_num)\} \end{cases} \quad (8)$$

式中， P 、 P_num 表示参数集为轨道面以及每个轨道面卫星数量， X_{low} 、 X_{up} 表示优化变量的上下界， $\max(P_num)$ 为每个轨道面最大卫星数。

$$\min \left(\text{PDOP}_{\text{latitude}_{\text{低轨} + \text{MEO}} \atop \substack{n = 70 \\ m = -70}} \leq Q \right) \quad (9)$$

式中， $\text{PDOP}_{\text{latitude}_{\text{低轨} + \text{MEO}} \atop \substack{n = 70 \\ m = -70}}$ 为中轨失效后与低轨组成的混合星座在南北纬 70° 之间的最小 PDOP， Q 为阈值，是一个常数，这里取 $Q = 2$ 为 24MEO 星座构型对亚太地区的平均 PDOP 值，使得混合星座导航性能达到或优于未失效时的性能。

低轨超大规模混合星座经典的单星选取优化结果如图 4 所示，从图中可以看出，虽然选出过境时长最长的 300 颗卫星，但相关卫星并未形成一个整体，经典的单星选取方案并未取得很好的效果。中轨导航星座未失效时，PDOP 最小为 2.104，仿真全部的 300 颗卫星以及中轨失效后组成混合导航星座，PDOP 由原来的 2.709 1 变为 2.046 2，较之前提升了 0.057 8。

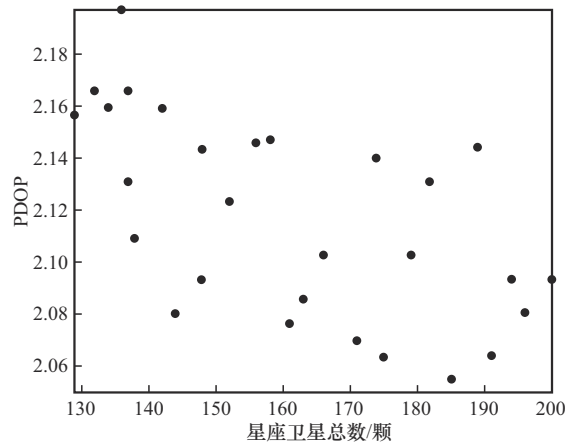


图 4 经典的单星选取优化结果

2.3 低轨倾斜星座轨道面选取

利用 NSGA-II 算法对 72 个轨道面进行选取。优化参

表 2 300 颗卫星中部分卫星过境时长

卫星编号	过境时长/s	卫星编号	过境时长/s	卫星编号	过境时长/s
AreaTarget-To-Satellite6909	47 693.477	AreaTarget-To-Satellite6208	47 702.566	AreaTarget-To-Satellite5716	47 709.377
AreaTarget-To-Satellite6908	47 693.668	AreaTarget-To-Satellite4819	47 702.628	AreaTarget-To-Satellite5715	47 709.443
AreaTarget-To-Satellite6907	47 693.804	AreaTarget-To-Satellite6209	47 702.666	AreaTarget-To-Satellite5413	47 709.445
AreaTarget-To-Satellite6906	47 693.880	AreaTarget-To-Satellite4818	47 702.747	AreaTarget-To-Satellite5714	47 709.451
AreaTarget-To-Satellite4203	47 693.902	AreaTarget-To-Satellite6210	47 702.788	AreaTarget-To-Satellite5521	47 709.473

数据集为星座轨道面升交点赤经，种群规模为 30 个，进化次数为 300 次。

$$X = \text{orbit}_{i=1}^{j=72} \text{satellite} = 22 \quad (10)$$

式中， $\text{orbit}_{i=1}^{j=72}$ 表示优化参数集共 72 个轨道面， $\text{satellite} = 22$ 表示每个轨道面 22 颗卫星。目标函数与约束条件同上述相同。

低轨倾斜星座轨道面选取优化结果如图 5 所示，PDOP 值见表 3。

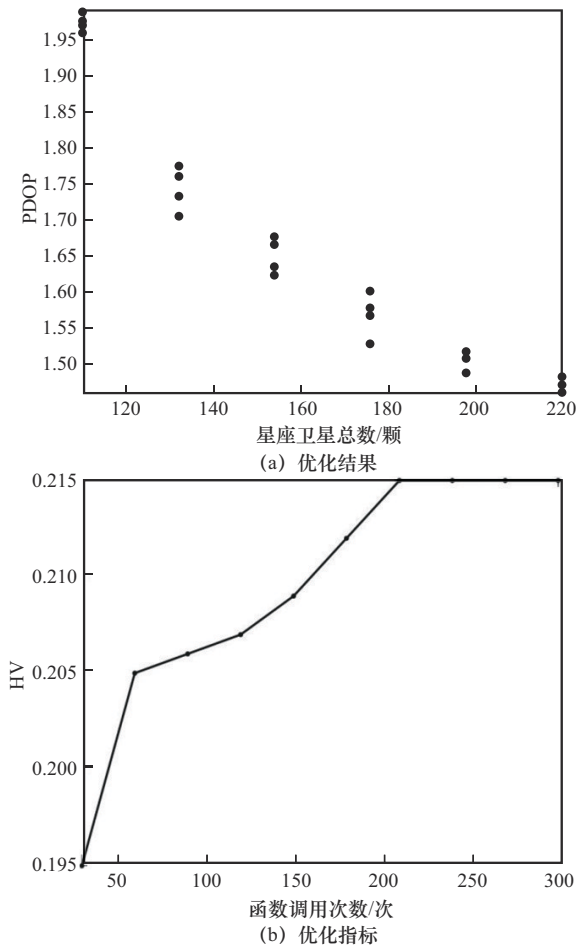


图 5 低轨倾斜星座轨道面选取优化结果

表 3 低轨倾斜星座 PDOP 值

方案	轨道面编号	PDOP 值
1	72_69_54_36_17	1.957
2	69_63_45_25_16	1.971
3	71_51_46_24_9	1.978
4	67_57_28_22_9	1.981
5	70_40_22_12_5	1.992

图 5 (a) 以中低轨倾斜星座 PDOP 值和低轨倾斜星座卫星选取总数为目标函数。当低轨倾斜星座选取 5 个轨道面即 110 颗卫星，平均 PDOP 值约为 1.95。随着选取轨道面的增加，平均 PDOP 值逐渐减少，当低轨倾斜星座选取的轨道面增加至 10 个，中低轨混合星座 PDOP 为 1.45。在兼顾星座性能、成本的基础上，低轨倾斜星座选取 5 个轨道面即可满足中轨卫星失效后中纬度地区的导航增强服务。图 5 (b) 评价指标 HV 在 220 次出现收敛，表明优化结果的可行性。通过对比低轨倾斜星座优化结果及仿真数据，5 种方案中最小 PDOP 值为 1.957，最大 PDOP 值为 1.992。方案 1 的 PDOP 值略优于其他 4 种方案，选择方案 1 作为导航增强的低轨倾斜星座。

2.4 低轨极轨星座轨道面选取

利用 NSGA-II 算法对 36 个轨道面进行选取。优化参数集为星座轨道面升交点赤经，种群规模为 30 个，进化次数为 300 次。

$$X = \text{orbit}_{i=1}^{j=36} \text{satellite} = 20 \quad (11)$$

式中， $\text{orbit}_{i=1}^{j=36}$ 表示优化参数集共 36 个轨道面， $\text{satellite} = 20$ 表示每个轨道面 20 颗卫星。目标函数同上述相同。

故约束条件如下

$$\min \left(\text{PDOP}_{\substack{n = \pm 90 \\ \text{latitude}_{\text{低轨} + \text{MEO}} \\ m = \pm 70}} \leq Q \right) \quad (12)$$

式中， $\text{PDOP}_{\substack{n = \pm 90 \\ \text{latitude}_{\text{低轨} + \text{MEO}} \\ m = \pm 70}}$ 为中轨失效后与低轨组成的混合星座在南北纬 70°~90°之间最小的 PDOP 值， Q 值依然取 2。

低轨极轨星座轨道面选取优化结果如图 6 所示，PDOP 值见表 4。

图 6 (a) 以中低轨极轨星座 PDOP 值和低轨极轨星座卫星选取总数为目标函数。当低轨极轨星座选取 2 个轨道面即 40 颗卫星，平均 PDOP 值约为 2.0 时，随着选取轨道面的增加，平均 PDOP 值逐渐减少，当低轨倾斜星座选取的轨道面增加至 6 个，中低轨混合星座 PDOP 为 1.4。在兼顾星座性能、成本的基础上，低轨极轨星座选取 2 个轨道面即可满足中轨卫星失效后两极地区的导航增强服务。图 6 (b) 评价指标 HV 在 180 次出现收敛，表明优化结果的可行性。通过对比低轨极轨星座优化方案 1~方案 5，5 种方案中最小 PDOP 值为 2.0021，最大 PDOP 值为 2.0097。方案 1 的 PDOP 值略优于其他 4 种方案，选择方案 1 作为导航增强的低轨极轨星座。

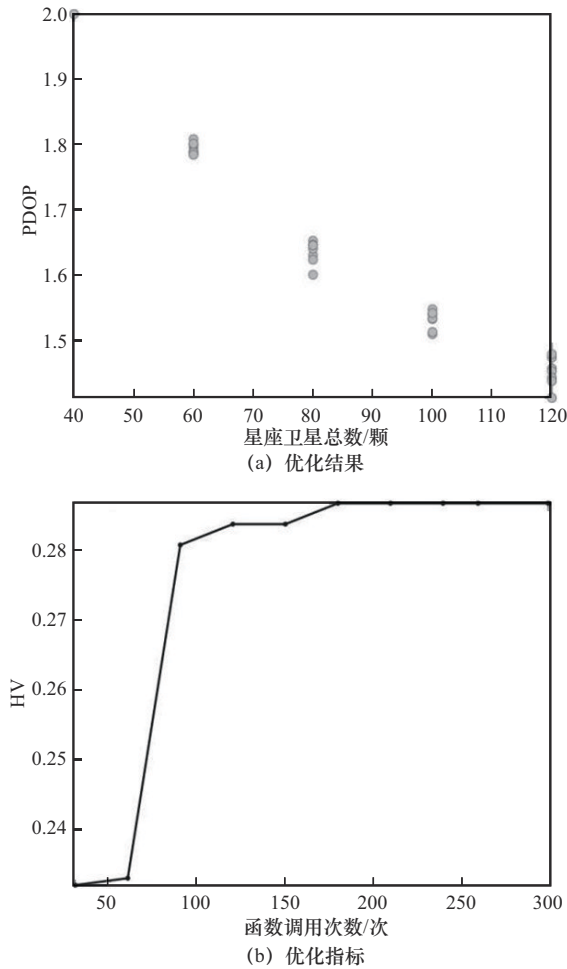


图 6 低轨极轨星座轨道面选取优化结果

表 4 低轨极轨星座 PDOP 值

方案	轨道面编号	PDOP 值
1	24_5	2.002 1
2	28_9	2.005 6
3	36_16	2.006
4	23_6	2.007 6
5	25_7	2.009 7

不同星座场景导航性能对比如图 7 所示。

由图 7 可知，中轨 24MEO 卫星失效后性能降级，通过仿真 300 颗单星选取方案，混合星座的最小 PDOP 值为 2.046 2，而星座 PDOP 平均值较大，未能恢复失效前的导航水平。对于轨道面选取，在保证性能的前提下，选取的卫星数量最少，且混合星座的导航服务得到了较大提升。

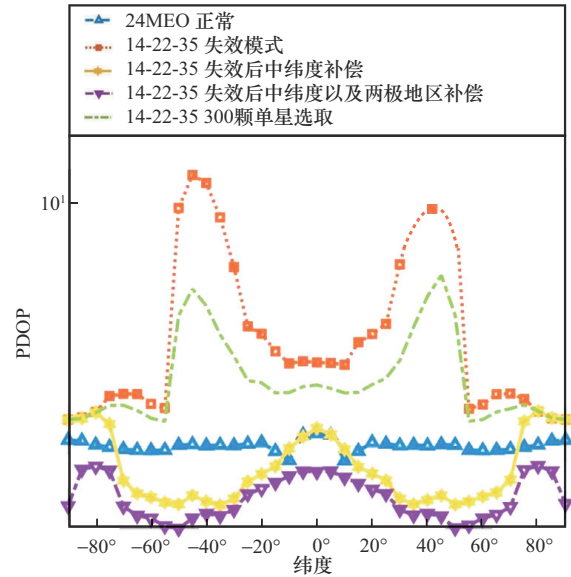


图 7 不同星座场景导航性能对比

3 结束语

低轨大规模星座如果仅专注于通信、导航、遥感等特定领域，可能会存在一定程度的卫星资源利用不足的情况，需通过现已部署的低轨星座进行导航增强。仿真结果表明，经典的单星选取方案并未取得很好的效果。中轨导航星座未失效时，PDOP 值最小为 2.104，仿真全部的 300 颗卫星以及中轨失效后组成混合导航星座，PDOP 值由原来的 2.709 1 变为 2.046 2，较之前提升了 0.057 8。

轨道面选取方案，低轨倾斜星座需 5 个轨道面共 110 颗卫星，可满足中轨卫星失效后中纬度地区的导航增强服务星座，低轨极轨星座需 2 个轨道面共 40 颗卫星，可满足中轨卫星失效后两极地区的导航增强服务。相较于单星选取方案，轨道面选取方案所需卫星数量少，性能提升高，可快速弥补中轨星座卫星失效后性能降级的不足，从而降低成本提高星座整体卫星服务性能。

参考文献：

[1] 王磊, 李德仁, 陈锐志, 等. 低轨卫星导航增强技术: 机遇与挑战 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(2): 144-152.
WANG L, LI D R, CHEN R Z, et al. Low earth orbiter (LEO) navigation augmentation: opportunities and challenges[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(2): 144-152.

[2] 张小红, 马福建. 低轨导航增强 GNSS 发展综述[J]. 测绘学报, 2019, 48(9): 1073-1087.
ZHANG X H, MA F J. Review of the development of LEO

- navigation-augmented GNSS[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(9): 1073-1087.
- [3] YANG Y X, MAO Y, SUN B J. Basic performance and future developments of BeiDou global navigation satellite system[J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1(1): 1.
- [4] YANG Y X, REN X, JIA X L, et al. Development trends of the national secure PNT system based on BDS[J]. *Science China Earth Sciences*, 2023, 66(5): 929-938.
- [5] 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.
- [6] YIN K, LI R, WANG C, et al. Credibility research of BeiDou navigation satellites based on LEO constellation enhancement[M]// *China Satellite Navigation Conference (CSNC 2022) Proceedings*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 196-209.
- [7] GUAN M Q, XU T H, GAO F, et al. Optimal walker constellation design of LEO-based global navigation and augmentation system [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(11): 1845.
- [8] LIU J, HAO J M, YANG Y, et al. Design optimisation of low earth orbit constellation based on BeiDou Satellite Navigation System precise point positioning[J]. *IET radar, sonar & navigation*, 2022, 16(8): 1241-1252.
- [9] MA F J, ZHANG X H, LI X X, et al. Hybrid constellation design using a genetic algorithm for a LEO-based navigation augmentation system[J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(2): 62.
- [10] TENG Y H, JIA X L, PENG G. LEO navigation augmentation constellation design and precise point positioning performance analysis based on BDS-3[J]. *Advances in Space Research*, 2023, 72(6): 1944-1960.
- [11] JIANG C H, LUO Z Y, GUAN M Q, et al. Low orbit regional enhanced navigation constellation for BDS3 design based on Bayesian optimization algorithm[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2024.
- [12] HUANG S, COLOMBO C, BERNELLI-ZAZZERA F. Multi-criteria design of continuous global coverage Walker and Street-of-Coverage constellations through property assessment[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 188: 151-170.
- [13] HAN Y, WANG L, FU W J, et al. LEO navigation augmentation constellation design with the multi-objective optimization approaches[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(4): 265-278.
- [14] SHIVELY C. Satellite criticality concepts for unavailability and unreliability of GNSS satellite navigation[J]. *Navigation*, 1993, 40(4): 429-450.
- [15] 罗胜中, 袁俊刚. 卫星在轨主要故障模式、原因分析及措施建议 [J]. *航天器环境工程*, 2021, 38(4): 480-486.
- LUO S Z, YUAN J G. Analysis of main fault modes and their causes with supposed countermeasures for satellites in orbit[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2021, 38(4): 480-486.
- [16] 徐炜, 徐梅, 严超, 等. BDS 卫星失效对区域定位精度的影响评估[J]. *大地测量与地球动力学*, 2018, 38(11): 1133-1136.
- XU W, XU M, YAN C, et al. Evaluation of the impact of BDS satellite failure on regional positioning performance[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2018, 38(11): 1133-1136.
- [17] 赵双, 张雅声, 戴桦宇, 等. 卫星导航系统失效性能分析与重构方法研究[J]. *空间控制技术与应用*, 2018, 44(2): 49-55.
- ZHAO S, ZHANG Y S, DAI H Y, et al. Failure performance and reconstruction method of satellite navigation system[J]. *Aerospace Control and Application*, 2018, 44(2): 49-55.
- [18] 石涛, 庄学彬, 林子健, 等. 基于并行遗传算法的高轨卫星导航选星方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2023, 49(12): 3528-3536.
- SHI T, ZHUANG X B, LIN Z J, et al. Satellite selection based on parallel genetic algorithm for high orbit autonomous satellite navigation[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2023, 49(12): 3528-3536.
- [19] 余德茨, 李厚朴, 纪兵, 等. 基于灰狼优化算法的快速选星方法 [J]. *系统工程与电子技术*, 2023, 45(5): 1489-1495.
- YU D Y, LI H P, JI B, et al. Fast satellite selection method based on grey wolf optimization algorithm[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2023, 45(5): 1489-1495.
- [20] 王尔申, 贾超颖, 曲萍萍, 等. 基于混沌粒子群优化的北斗/GPS 组合导航选星算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2019, 45(2): 259-265.
- WANG E S, JIA C Y, QU P P, et al. BDS/GPS integrated navigation satellite selection algorithm based on chaos particle swarm optimization[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2019, 45(2): 259-265.
- [21] 吴政城, 倪少杰, 刘文祥, 等. 基于遗传算法选星的高中低轨导航混合星座完好性监测技术[J]. *天地一体化信息网络*, 2023, 4(4): 61-70.
- WU Z C, NI S J, LIU W X, et al. Integrity monitoring technology of mixed constellation of high, medium and low orbit navigation based on genetic algorithm star selection[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2023, 4(4): 61-70.
- [22] 王晓君, 黄婧如, 姚远, 等. 一种星座遮挡场景下的 GNSS 接收机选星策略[J]. *无线电工程*, 2024, 54(7): 1687-1693.
- WANG X J, HUANG J R, YAO Y, et al. A GNSS receiver satellite selection strategy in constellation occlusion scenario[J]. *Radio Engineering*, 2024, 54(7): 1687-1693.
- [23] 王许煜, 胡敏, 张学阳, 等. 基于 Petri 网的导航卫星星座备份策略分析评估方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2021, 43(2): 434-442.
- WANG X Y, HU M, ZHANG X Y, et al. Analysis and evaluation

method of navigation satellite constellation backup strategy based on Petri net[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(2): 434-442.

- [24] SRINIVAS N, DEB K. Multi-objective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms[J]. Evolutionary Computation, 1994, 2(3): 221-248.
- [25] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [26] TIAN Y, CHENG R, ZHANG X Y, et al. PlatEMO: a MATLAB platform for evolutionary multi-objective optimization educational forum[J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2017, 12(4): 73-87.
- [27] 王丽萍, 任宇, 邱启仓, 等. 多目标进化算法性能评价指标研究综述[J]. 计算机学报, 2021, 44(8): 1590-1619.
WANG L P, REN Y, QIU Q C, et al. Survey on performance indicators for multi-objective evolutionary algorithms[J]. Chinese Journal of Computers, 2021, 44(8): 1590-1619.
- [28] XUE W, HU M, RUAN Y J, et al. Research on design and staged deployment of LEO navigation constellation for MEO navigation satellite failure[J]. Remote Sensing, 2024, 16(19): 3667.

[作者简介]



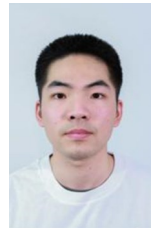
薛文 (1995-), 男, 航天工程大学博士生, 主要从事低轨大规模卫星星座设计及导航星座设计研究工作。



贾张敏 (1984-), 男, 国防大学联合作战学院硕士生, 主要研究方向为导航战。



郭雯 (2000-) 女, 航天工程大学硕士生, 主要研究方向为连续小推力轨道确定。



张勤昊 (2000-), 男, 中国卫星海上测控部助理工程师, 主要研究方向为运筹与任务规划。



房彦龙 (2001-), 男, 太原卫星发射中心助理工程师, 主要研究方向为雷达信号处理分析、微小卫星测量技术。