

祝会忠,范海怡,蒋春华,等.基于遗传算法的低轨卫星轨道预报伪随机脉冲参数优化[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2026,45(4):452-458.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20260002

Zhu Huizhong, Fan Haiyi, Jiang Chunhua, et al. Optimization of pseudo-stochastic pulse parameters in LEO orbit determination and forecasting based on genetic algorithm[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2026, 45(4): 452-458. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20260002

基于遗传算法的低轨卫星轨道预报伪随机脉冲参数优化

祝会忠¹, 范海怡¹, 蒋春华¹, 罗振宇²

(1. 辽宁工程技术大学 测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 山东大学 空间科学与技术学院, 山东 威海 264209)

摘要: 为在简化动力学定轨中合理设置伪随机脉冲参数, 提出一种基于遗传算法的伪随机脉冲参数优化策略。基于GRACE-FO卫星对该策略的适用性加以分析, 并选择传统经验脉冲参数确定方法作为对照, 验证该策略的有效性。研究表明: 采用该策略后GRACE-C与GRACE-D卫星轨道确定精度较传统方法最高可提升38.5%, 单天最优精度达11.5 mm; 在轨道预报方面, 1 h、2 h和3 h预报最优精度分别为27.9 mm、52.1 mm和72.7 mm, GRACE-C和GRACE-D卫星在3 h的预报精度分别平均提高46%和23%; 该策略对A方向的误差改善最显著, 对C方向和R方向的影响相对较小。研究结论为提升轨道确定及预报精度提供参考。

关键词: 低轨卫星; 简化动力学定轨; 轨道预报; 伪随机脉冲参数; 遗传算法

中图分类号: P228

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2026)04-0452-07

Optimization of pseudo-stochastic pulse parameters in LEO orbit determination and forecasting based on genetic algorithm

Zhu Huizhong¹, Fan Haiyi¹, Jiang Chunhua¹, Luo Zhenyu²

(1. School of Surveying, Mapping and Geography, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. School of Space Science and Technology, Shandong University, Weihai 264209, China)

Abstract: To optimize the pseudo-random pulse parameters in reduced-dynamic orbit determination, a genetic algorithm-based optimization strategy for pseudo-random pulse parameters is proposed. The applicability of this strategy is analyzed using GRACE-FO satellites, and its effectiveness is validated by comparing it with the traditional empirical pulse parameter determination method as a benchmark. The results show that the proposed strategy improves the orbit determination accuracy for the GRACE-C and GRACE-D satellites by up to 38.5% compared to traditional methods, achieving a peak single-day accuracy of 11.5 mm. In terms of orbit prediction, the optimal accuracies for 1 h, 2 h, and 3 h predictions are 27.9 mm, 52.1 mm, and 72.7 mm, respectively. The 3 h prediction accuracy for GRACE-C and GRACE-D improves by an average of 46% and 23%, respectively. The strategy yields the most significant error improvement in the A-direction, while its impact on the C-direction and R-direction is relatively smaller. These findings provide a reference for improving both the accuracy of orbit determination and prediction.

Keywords: low-earth orbit (LEO) satellites; reduced-dynamic orbit determination; orbit prediction; pseudo-stochastic pulse parameters; genetic algorithm

0 引言

低地球轨道 (low earth orbit, LEO) 卫星是运

行在距地表面约500~2 000 km高度轨道上的卫星^[1], 在众多领域发挥重要作用。与中高轨道卫星相比, LEO卫星具有运行速度快、传播时延低以

收稿日期: 2026-03-06 修回日期: 2026-05-23 接受日期: 2026-06-08 责任编辑: 黄琦

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42030109; 42074012); 辽宁省“兴辽英才计划”项目资助 (XLYC2203162)

作者简介: 祝会忠 (1983-), 男, 河南 安阳人, 博士, 教授, 主要从事GNSS高精度数据处理及应用方面的研究。

E-mail: zhuhezhuizhong@whu.edu.cn

及路径损耗小等特性。LEO增强GNSS有助于缩短精密单点定位收敛时间,提高有遮挡环境下的定位性能,进而提高综合定位导航授时性能^[2-3]。目前全球多国已公布并持续推进低轨卫星星座计划^[4-6]。精密定轨和预报是LEO导航增强应用的基础和关键^[7-9],开展低轨卫星的定轨和预报优化对于实际工程应用具有重要价值。

目前低轨卫星精密定轨^[10-11]方法有3种:运动学^[12]、动力学^[13]以及简化动力学^[14]。其中,简化动力学定轨方法凭借在动力学模型误差处理方面的灵活适配性,在低轨卫星精密定轨领域得到广泛应用^[15]。该方法兼顾运动学定轨的高精度优势与动力学定轨的约束特性,弥补了单一方法的不足,已成为低轨卫星高精度定轨的主流技术框架^[16]。为进一步提升定轨精度,该方法通常引入伪随机脉冲参数^[17],用以吸纳动力学模型中未被精确建模的误差分量,有效抑制模型残差对轨道解算结果的影响。已有学者对此开展优化策略研究。韩保民等^[18]探讨了在简化动力学定轨中引入伪随机脉冲参数的效果。王广哲等^[19]通过优化随机脉冲参数与估计天线相位中心变化,提升低轨卫星的简化动力学定轨精度。罗振宇等^[20]通过改变重力场模型及优化随机脉冲参数,进一步提升了定轨及预报精度。传统方法对于伪随机脉冲参数的处理多依赖经验,难以精准补偿动力学模型的误差,因此亟需更优的解决办法。遗传算法可在多参数、多极值的搜索空间中逼近全局最优解^[21-24],为伪随机脉冲参数优化提供了新思路。

本文提出一种基于遗传算法的伪随机脉冲参数优化策略,基于GRACE-FO卫星数据^[25]开展优化定轨研究,分析遗传算法优化伪随机脉冲参数后LEO定轨精度及轨道预报精度的提升情况,以及预报时长递增过程中不同轨道分量的误差演化规律,为轨道确定及预报精度提升提供参考。

1 LEO简化动力学定轨原理

简化动力学定轨是一种结合运动学定轨和动力学定轨优势的定轨方法。作者采用高精度GNSS数据处理软件PANDA进行LEO简化动力学定轨与预报,利用星载GPS双频观测值及简化动力学模型,将遗传算法优化后的伪随机脉冲参数引入卫星运动方程,采用最小二乘法对GRACE-C/D卫星相关轨道参数进行联合估计,解算低轨卫星精密轨道,并通过数值积分进行轨道外推。

1.1 观测方程和动力学方程

在简化动力学定轨时,需参考低轨卫星的观

测数据与GNSS卫星的精密星历。低轨卫星的观测方程为

$$p_i^s = \rho_i^s + c(\delta_i - \delta^i) + I_i^s + M_p^s + \varepsilon_i^s, \quad (1)$$

$$L_i^s = \rho_i^s + c(\delta_i - \delta^i) - I_i^s + \lambda_i^s N_i^s + M_L^s + \zeta_i^s, \quad (2)$$

式中:s代表卫星; i 为观测值频段号; L 、 p 分别为伪距和载波相位观测值; ρ_i^s 为卫星与测站间的几何距离; c 为真空中光速; δ_i 、 δ^i 分别为接收机钟差和卫星钟差; I_i^s 为频率 i 上的电离层延迟误差; λ_i^s 为载波波长; N_i^s 为载波整周模糊度; M_p^s 、 M_L^s 分别为伪距和载波相位观测值的其他误差; ε_i^s 、 ζ_i^s 分别为伪距和载波相位的观测噪声及其他未模型化误差。

低轨卫星在轨运行时除受到地球重力外,还受到海潮、固体潮、太阳辐射压和大气阻力等因素影响。依据力学模型建立的低轨卫星动力学方程为

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{GM}{R^3} \mathbf{r} + \mathbf{f}(t, \mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, q_1, q_2, \dots, q_d), \quad (3)$$

式中: $\mathbf{r}$ 、 $\dot{\mathbf{r}}$ 、 $\ddot{\mathbf{r}}$ 分别为低轨卫星在惯性坐标系下的位置、速度、加速度向量; G 为地球的引力常数; M 为地球质量; R 为卫星到地心距离; $q_1, q_2, \dots, q_d$ 为未知的摄动力参数; $\mathbf{f}(t, \mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, q_1, q_2, \dots, q_d)$ 为其他摄动力引起的加速度; t 为时间。

1.2 伪随机脉冲参数和简化动力学定轨

伪随机脉冲参数是在特定历元时刻沿预定方向施加的瞬时速度增量,在建立卫星运动方程时可作为力模型,吸收未模型化的动力学误差。通常以固定时间间隔在径向(A)、切向(C)和法向(R)三个方向上设置相应的伪随机脉冲参数。其表达式为

$$p_i = a_i \cdot \delta(t - t_i) \cdot e(t), \quad (4)$$

式中: a_i 为时刻 t_i 的加速度; $\delta(t - t_i)$ 为狄拉克函数, $t \neq t_i$ 时,取0, $t = t_i$ 时,取1; $e(t)$ 为某一预设方向。

相应的变分方程为

$$\ddot{\mathbf{Y}}_a = \mathbf{A} \cdot \mathbf{Y}_a + a_i \delta(t - t_i) \cdot e(t), \quad (5)$$

式中: $\ddot{\mathbf{Y}}_a$ 为初始历元6个轨道根数对应偏导数的线性组合; $\mathbf{A}$ 为系数矩阵。

1.3 定轨及预报策略

低轨卫星与GNSS卫星之间的传输不受对流层影响,故不考虑对流层延迟。低轨卫星GRACE-FO的数据解算策略见表1。

表 1 低轨卫星数据解算策略
Tab.1 Data processing strategies for low earth orbit satellites

解算分类	设置项/参数	解算策略
观测数据处理	观测值类型	非差无电离层组合观测
	采样间隔	10 s
	截止高度角	1°
	GNSS 卫星天线相位改正 PCV	采用 igs14.atx 天线文件改正
	模糊度参数	常数,浮点解
	卫星钟差	白噪声估计
摄动力模型	积分步长	5 s
	低轨卫星姿态	采用姿态文件
	地球重力场	EGM2008 150 阶
	三体摄动	JPL DE405
	海洋潮汐	FES 2004
	相对论效应	IERS 2010
	固体潮、极潮	IERS 2010
	太阳光压	Macro 模型
	大气密度模型	DTM 94
	伪随机脉冲参数	A、C、R 方向

2 伪随机脉冲参数优化设计

遗传算法为模拟自然界生物遗传、变异、选择和交叉等进化过程的全局优化概率搜索算法。该算法具有全局搜索能力强、自适应性高、鲁棒性好且不依赖问题模型特性等特点，能够有效规避局部最优解陷阱，在多参数、多极值、非线性、约束复杂的搜索空间中表现出独特优势。

在 LEO 轨道确定及预报伪随机脉冲参数优化时，遗传算法通过交叉、变异和基于个体适应性的选择过程来搜索最优解。算法首先随机生成初始种群，种群内单个个体对应一组解决方案，将 A、C 和 R 三个方向的随机脉冲参数整合为一组待优化变量。基于式 (6) 所定义的目标函数求得个体适应度，将种群按目标函数值从低到高排序，循环优化过程，直至达到最大迭代次数或满足预设的终止条件时终止。每一代通过交叉和变异操作生成新后代，采用精英保留策略进行个体选择，保留适应度最高的 50% 个体作为父代，以确保精英能够延续并逐步逼近全局最优解。交叉和变异操作可维持种群个体的随机性与多样性，避免过早收敛。

$$F=\alpha\sqrt{\frac{\sigma_A^2+\sigma_C^2+\sigma_R^2}{3}}+\beta\sigma,$$
 (6)

式中： σ_A 、 σ_C 、 σ_R 分别为定轨结果与参考轨道在 A、C、R 方向的误差； σ 为内符合精度； α 、 β 为比例系数。

目标函数可以反映伪随机脉冲优化性能，其值

越小，说明适应度越高，优化程度越好，定轨及轨道外推的精度越高。遗传算法具体运算流程见图 1。

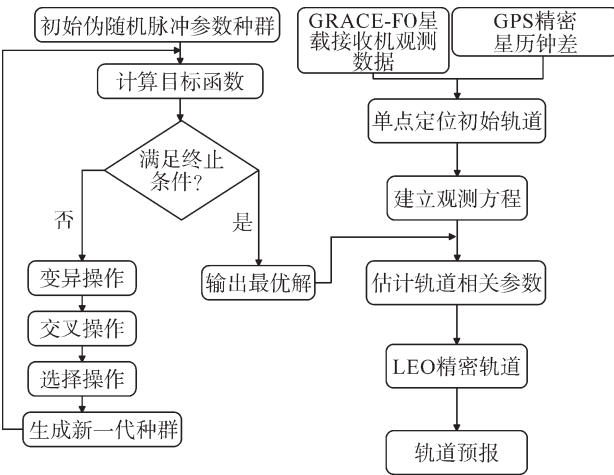


图 1 遗传算法流程
Fig.1 Genetic algorithm process

设置合理的参数对于优化算法性能至关重要。在满足定轨需求、兼顾优化精度与计算效率的前提下，综合考虑参数维度与解的质量，经多次实验探索，最终确定种群规模为 100，变异率为 0.03，最大迭代次数为 10，收敛判据为连续两代最优适应度的变化率小于 0.1%。

3 结果分析

为验证本文所提遗传算法优化策略的有效性，设计两种实验策略开展 LEO 定轨及预报的对比分析。策略一：采用传统经验参数法，将 A、C、R 三个方向的伪随机脉冲参数均设置为 90；策略二：

基于遗传算法迭代寻优获取伪随机脉冲参数最优组合。选取2022年7月27日至30日采集的GRACE-C、GRACE-D卫星数据,融合低轨卫星观测数据、低轨卫星姿态数据以及GNSS精密产品进行定轨,以JPL发布的GRACE-FO精密轨道作为参考真值。

3.1 遗传算法迭代结果

以2022年第209天GRACE-C/D卫星观测时段为例,采用遗传算法对伪随机脉冲参数迭代寻优的收敛过程如图2所示。随着迭代次数的增加,目标函数值先显著下降后逐渐平稳,说明算法能够较快获得优化结果。经10次迭代寻优后,GRACE-C、GRACE-D卫星对应的目标函数均达到收敛状态,二者收敛后的目标函数值分别为23.7 mm、24.1 mm。选取2022年第208天至第211天数据开展重复性验证实验,结果表明,遗传算法在10次迭代上限内均可实现稳定收敛,证明算法具备良好的鲁棒性与可靠性。

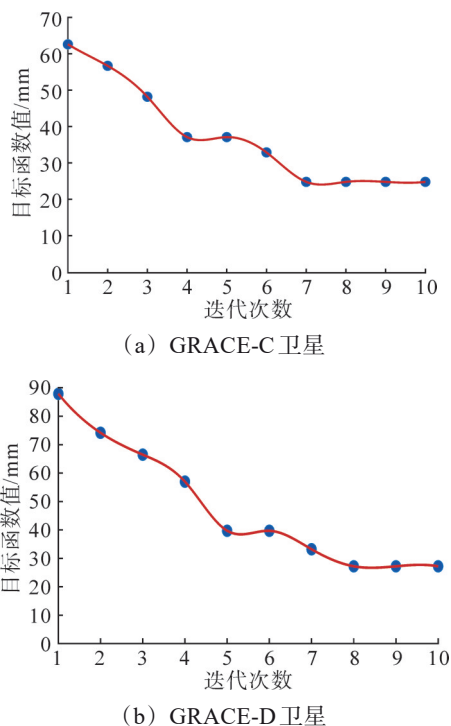


图2 遗传算法优化GRACE-C/D卫星定轨迭代收敛曲线

Fig.2 Genetic algorithm optimization convergence curve of GRACE-C/D satellite orbit determination

3.2 优化前后定轨精度分析

将经遗传算法优化后的伪随机脉冲参数代入LEO简化动力学定轨模型,参数优化前后定轨精度对比见图3。其中, RMSE为均方根误差,用于衡量预报轨道或确定轨道的精度。

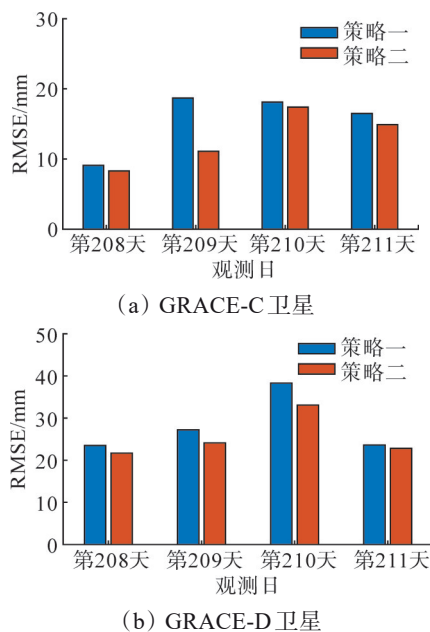


图3 优化前后GRACE-C/D卫星定轨精度对比

Fig.3 Comparison of orbit determination accuracy before and after parameter optimization for GRACE-C/D satellites

由图3可知,采用伪随机脉冲参数优化方案后,GRACE-C、GRACE-D卫星的定轨精度均有不同程度提升,GRACE-C卫星的定轨精度提升幅度更高。以2022年第209天为例,GRACE-C卫星的定轨精度由18.3 mm提升至11.5 mm,提升38.5%;GRACE-D卫星的定轨精度由27.2 mm提升至24.1 mm,提升11.4%。整体来看,优化后GRACE-C、GRACE-D卫星的定轨精度均可提升5%~38%,证实遗传算法优化策略在增强LEO卫星精密定轨性能方面的有效性。

3.3 优化前后轨道外推精度对比

基于优化后的伪随机脉冲参数,采用简化动力学方法解算初始轨道和动力学参数,并通过积分进行轨道预报。3 h内GRACE-C/D卫星在不同策略下沿A、C、R方向的轨道外推精度对比分别见图4、图5。GRACE-C卫星的误差曲线形态相对平缓,优化后RMSE显著降低。GRACE-D卫星的轨道外推精度变化情况与GRACE-C卫星有所不同:优化前其误差增长模式与GRACE-C卫星类似,但整体误差更大,且部分观测日误差发散较为剧烈;优化后其误差增幅有所减小,增速变缓,整体优化效果弱于GRACE-C卫星。整体来看,伪随机脉冲参数优化对A方向影响最大,对C方向影响次之,对R方向影响最小。

优化前后GRACE-C/D卫星1 h、2 h、3 h的预报精度对比见图6,优化后预报精度提升比例见表2。

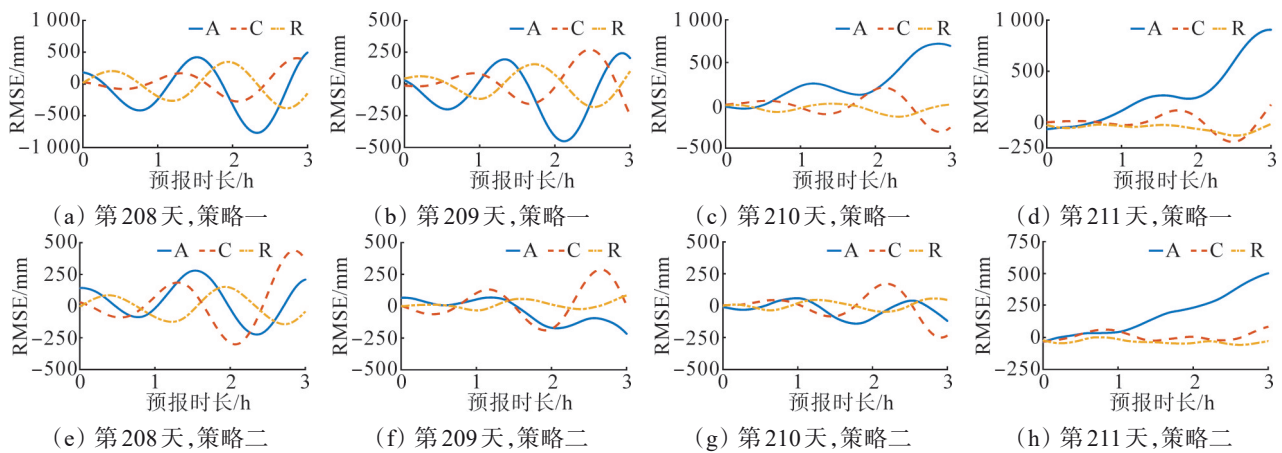


图4 优化前后 GRACE-C 卫星轨道外推精度对比

Fig.4 Comparison of orbit extrapolation accuracy of GRACE-C satellite before and after optimization

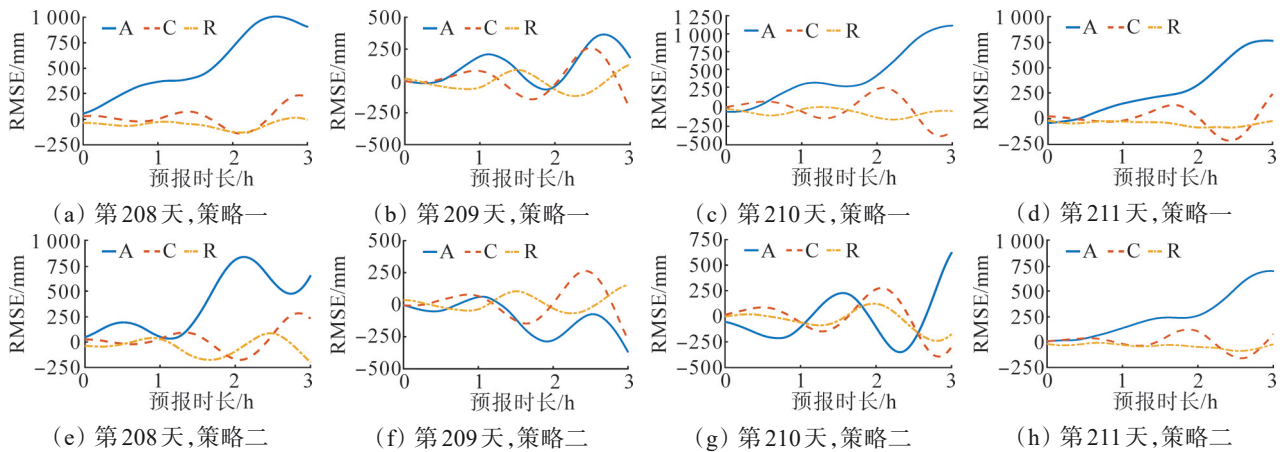


图5 优化前后 GRACE-D 卫星轨道外推精度对比

Fig.5 Comparison of orbit extrapolation accuracy of GRACE-D satellite before and after optimization

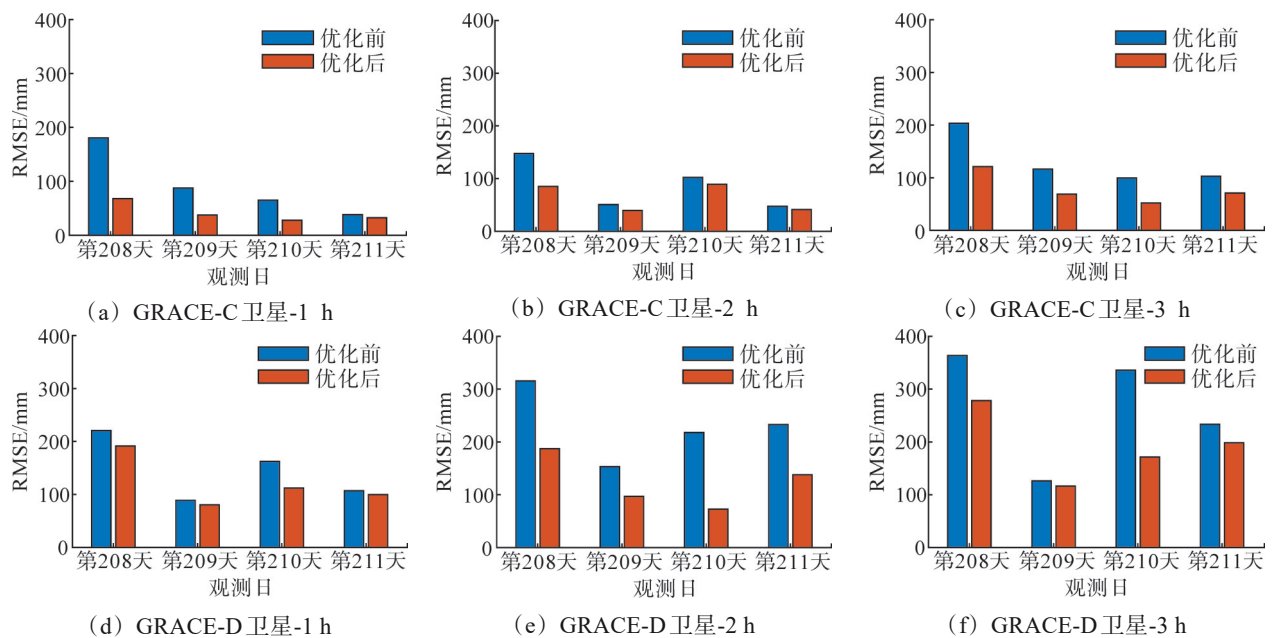


图6 优化前后 GRACE-C/D 卫星 1 h、2 h、3 h 的预报精度对比

Fig.6 Comparison of 1 h, 2 h and 3 h prediction accuracy of GRACE-C/D satellites before and after optimization

表2 优化后 GRACE-C/D 卫星 1 h、2 h、3 h 的预报精度提升幅度
Tab.2 Improvement margin of prediction accuracy for GRACE-C/D satellites at 1 h, 2 h, and 3 h after optimization

指标	1 h 预报精度提升幅度/%		2 h 预报精度提升幅度/%		3 h 预报精度提升幅度/%	
	GRACE-C 卫星	GRACE-D 卫星	GRACE-C 卫星	GRACE-D 卫星	GRACE-C 卫星	GRACE-D 卫星
平均值	47.94	20.12	39.98	15.16	46.20	23.86
最大值	62.36	42.24	47.69	31.10	66.61	48.97
最小值	14.92	3.22	31.03	6.82	36.73	8.00

GRACE-C、GRACE-D 卫星经优化后, 在第 208 天至第 211 天预报精度均有显著提升。其中 GRACE-C 卫星 1 h、2 h、3 h 的预报最优精度分别为 27.9 mm、52.1 mm、72.7 mm, 轨道预报精度平均提升 44.71%; GRACE-D 卫星 1 h、2 h、3 h 的预报最优精度分别为 39.6 mm、80.4 mm、116.2 mm。轨道预报精度平均提升 19.71%。整体来看, GRACE-C 卫星在相同观测日内的预报精度及提升幅度均优于 GRACE-D 卫星。从不同预报时长对应的定轨精度来看, 3 h 轨道预报精度提升幅度最大, GRACE-C、GRACE-D 卫星轨道预报精度提升的最大值分别为 66.61%、48.97%。造成双星预报性能差异的原因是 GRACE-C 可见卫星数量多于 GRACE-D, 观测几何条件相对更优, 因此其定轨与预报精度整体优于 GRACE-D 卫星。

4 结论

为提升低轨卫星的轨道确定及预报精度, 提出一种基于遗传算法的伪随机脉冲参数优化策略, 并通过 GRACE-FO 卫星数据验证该策略的有效性, 主要结论如下。

(1) 参数优化策略可有效提升简化动力学定轨整体性能。相较于传统定轨方法, 该策略可显著削弱非保守力模型误差的影响, 提高低轨卫星简化动力学定轨精度, 可为高精度定轨提供可靠的参数配置方案。

(2) 双卫星优化效果存在显著差异。伪随机脉冲优化策略对 GRACE-C、GRACE-D 卫星的轨道外推精度均有正向提升作用, 但优化增益存在差异。整体来看, GRACE-C 卫星对该优化策略的适配性更好, 轨道误差抑制能力及长期预报稳定性均优于 GRACE-D 卫星。

(3) 误差改善效果存在方向差异性。伪随机脉冲参数优化对轨道不同方向误差的修正效果呈显著分层特征。对 A 方向的模型误差补偿效果最为显著, 可有效抑制该方向误差随预报时长的发散累积现象; 对 C 方向的模型误差具有一定修正作用, 而对 R 方向的模型误差优化效果有限。

(4) 参数优化策略可有效抑制轨道误差时序累积, 长期预报优势显著。传统经验参数下, 轨道预报误差会随外推时长的增加快速增长, 而经遗传算法优化参数后, 轨道误差增速大幅放缓, 有效缓解了短期轨道外推的误差累积效应。随着外推时间的延长, 该优化策略的精度增益优势逐步凸显。

基于遗传算法优化的伪随机脉冲参数优化策略可为低轨卫星相关研究提供可靠的参数优化支撑。未来可结合深度学习进一步优化参数自适应能力, 以应对更复杂空间环境下的轨道预报挑战。

参考文献(References):

[1] 陈全,杨磊,郭剑鸣,等.低轨巨型星座网络:组网技术与研究现状[J].通信学报,2022,43(5):177-189.
Chen Quan,Yang Lei,Guo Jianming,et al.LEO mega-constellation network: networking technologies and state of the art[J].Journal on Communications,2022,43(5): 177-189.

[2] Giordani M,Zorzi M.Non-terrestrial networks in the 6G era: challenges and opportunities[J].IEEE Network,2021, 35(2):244-251.

[3] 蒋世俊,李星星,付元辰,等.城市复杂环境低轨增强BDS精密定位方法[J].导航定位学报,2025,13(2):49-56.
Jiang Shijun,Li Xingxing,Fu Yuanchen,et al.Toward high-precision positioning in urban environments with LEO enhanced BDS[J]. Journal of Navigation and Positioning,2025,13(2):49-56.

[4] Alghisi M,Zallem N,Biagi L.Improvements in PPP by integrating GNSS with LEO satellites:a geometric simulation[J].Sensors,2025, 25(14):4427.

[5] 刘婧,郝金明,杨颜,等.LEO多星座增强BDS精密单点定位性能评估[J].测绘科学技术学报,2024,40(5):464-469.
Liu Jing,Hao Jinming,Yang Yan,et al.Performance evaluation of LEO multi-constellation enhanced BDS precision point positioning [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2024, 40(5): 464-469.

[6] Wang L,Chen R Z,Xu B Z,et al.The challenges of LEO based navigation augmentation system: lessons learned from Luojia-1A satellite[C]//中国卫星导航学术年会组委会.China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2019 Proceedings. Singapore: Springer,2019:298-310.

[7] 赵兴隆,钟世明,欧吉坤,等.LEO星座增强GNSS的精密单点定位初步分析[J].大地测量与地球动力学,2020,40(6): 624-628.

- Zhao Xinglong, Zhong Shiming, Ou Jikun, et al. Precise point positioning primary analysis of GNSS enhanced with LEO constellation[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2020, 40(6): 624-628.
- [8] 赵亚飞, 闫冰, 孙耀华, 等. 低轨星座通导一体化: 现状、机遇和挑战[J]. *电信科学*, 2023, 39(5): 90-100.
- Zhao Yafei, Yan Bing, Sun Yaohua, et al. Communication and navigation integration for LEO constellations: status, opportunities, and challenges[J]. *Telecommunications Science*, 2023, 39(5): 90-100.
- [9] 高猛, 徐爱功, 祝会忠, 等. BDS 多频非组合伪距单点定位方法[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2018, 37(2): 381-388.
- Gao Meng, Xu Aigong, Zhu Huizhong, et al. The method of multi-frequency un-combined pseudorange single point positioning based on BDS[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2018, 37(2): 381-388.
- [10] 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: 11.
- [11] 赵齐乐, 刘经南, 葛茂荣, 等. CHAMP 卫星 cm 级精密定轨[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2006, 31(10): 879-882.
- Zhao Qile, Liu Jingnan, Ge Maorong, et al. Precision orbit determination of CHAMP satellite with cm-level accuracy[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(10): 879-882.
- [12] Li X X, Zhang K K, Meng X G, et al. Precise orbit determination for the FY-3C satellite using onboard BDS and GPS observations from 2013, 2015, and 2017[J]. *Engineering*, 2020, 6(8): 904-912.
- [13] Švehla D, Rothacher M. Kinematic and reduced-dynamic precise orbit determination of low earth orbiters[J]. *Advances in Geosciences*, 2003, 1: 47-56.
- [14] Jäggi A, Hugentobler U, Beutler G. Pseudo-stochastic orbit modeling techniques for low-earth orbiters[J]. *Journal of Geodesy*, 2006, 80: 47-60.
- [15] Yunck T P, Bertiger W I, Wu S C, et al. First assessment of GPS-based reduced dynamic orbit determination on TOPEX/Poseidon[J]. *Geophysical Research Letters*, 1994, 21(7): 541-544.
- [16] Zhao X L, Zhou S S, Ci Y, et al. High-precision orbit determination for a LEO nanosatellite using BDS-3[J]. *GPS Solutions*, 2020, 24: 102.
- [17] 张兵兵. 随机脉冲对简化动力学定轨影响分析[D]. 淄博: 山东理工大学, 2014: 33.
- [18] 韩保民, 朱秀英, 柳林涛, 等. 伪随机脉冲估计及其在简化动力学定轨中的应用[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2007, 32(5): 466-469.
- Han Baomin, Zhu Xiuying, Liu Lintao, et al. Estimation of pseudo-stochastic pulses and their applications in reduced-dynamic orbit determination[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(5): 466-469.
- [19] 王广哲, 郭金运, 郭恒洋, 等. HY-2B 星载 GPS 数据质量及简化动力学精密定轨分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2022, 42(5): 472-476, 550.
- Wang Guangzhe, Guo Jinyun, Guo Hengyang, et al. Analysis of HY-2B onboard GPS data quality and reduced-dynamic precise orbit determination[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2022, 42(5): 472-476, 550.
- [20] 罗振宇, 蒋春华, 范海怡, 等. 不同重力场模型下低轨卫星的简化动力学定轨与轨道外推[J]. *大地测量与地球动力学*, 2025, 45(5): 494-499.
- Luo Zhenyu, Jiang Chunhua, Fan Haiyi, et al. Reduced dynamic precise orbit determination and orbital extrapolation of LEO satellites under different gravity field models[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2025, 45(5): 494-499.
- [21] Dubey R, Agrawal J. An improved genetic algorithm for automated convolutional neural network design[J]. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 2022, 32(2): 747-763.
- [22] 关梅倩. 地月空间综合 PNT 星座设计及导航定位性能分析[D]. 济南: 山东大学, 2022: 32.
- [23] 张海洋, 罗伟怡, 徐晓鸣, 等. 基于改进遗传算法的生产线平衡优化[J]. *机电工程技术*, 2021, 50(3): 40-43.
- Zhang Haiyang, Luo Weiyi, Xu Xiaoming, et al. Production line balance optimization based on improved genetic algorithm[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2021, 50(3): 40-43.
- [24] 黄益绍, 袁朋涛. 基于遗传算法的车辆纵向跟随模糊 PID 控制[J]. *公路与汽运*, 2025, 41(1): 12-17.
- Huang Yishao, Yuan Pengtao. Vehicle longitudinal following fuzzy PID control based on genetic algorithm[J]. *Highways & Automotive Applications*, 2025, 41(1): 12-17.
- [25] Benaraba N, Touati F, Benyahia S, et al. Jointly estimating recharge and groundwater withdrawals of the NWSAS by inverting GRACE/GRACE-FO gravity data[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2022, 67(15): 2215-2231.