

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

吴政城^{1,2}, 倪少杰^{1,2}, 刘文祥^{1,2}, 肖 伟^{1,2}, 李宗楠^{1,2}

(1. 国防科技大学电子科学学院, 湖南 长沙 410073;

2. 卫星导航技术重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 低轨卫星在通信、导航、遥感等领域应用广泛, 对满足通信需求、提升导航定位精度具有重要意义。完好性监测技术是卫星导航系统安全与可靠运行的重要保障, 随着低轨技术的成熟发展与海量低轨卫星的逐步应用, 亟待开展高中低轨混合星座条件下系统及用户的完好性监测技术研究。提出一种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, 在传统最佳几何精度因子选星法的基础上, 通过引入遗传算法, 构造基于卫星几何观测矩阵特征斜率线性加权的适应度因子, 以实现用户保护水平向保护限值的快速收敛。相较于传统算法, 此算法通过优化选星的方式, 进一步提升了接收机的完好性。在 CAT I 精密条件下, 对于“北斗+StarNet-1”星座, 此算法全球范围可用性水平平均增强了 5.60%, 对于东半球中纬地区和东半球低纬地区增强效果最佳, 全球范围可用性水平分别增强了 7.01%和 6.42%。

关键词: 遗传算法; 接收机自主完好性监测; 高中低轨混合; 加权适应度因子

中图分类号: TN927.2

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2023043

Integrity Monitoring Technology of Mixed Constellation of High, Medium and Low Orbit Navigation Based on Genetic Algorithm Star Selection

WU Zhengcheng^{1,2}, NI Shaojie^{1,2}, LIU Wenxiang^{1,2}, XIAO Wei^{1,2}, LI Zongnan^{1,2}

1. College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

2. Key Laboratory of Satellite Navigation Technology, Changsha 410073, China

Abstract: Low-orbit satellites are widely used in communication, navigation, remote sensing and other fields, which is of great significance to meet the needs of communication and improve the accuracy of navigation and positioning. Integrity technology is an important guarantee for the safe and reliable operation of satellite navigation system. With the mature development of low orbit technology and the gradual application of a large number of low orbit satellites, it is urgent to develop the system integrity monitoring technology under the condition of mixed constellation of high and low orbits. This paper proposed a hybrid constellation integrity monitoring technology for high, middle and low orbit navigation based on genetic algorithm for star selection. On the basis of the traditional optimal geometric accuracy factor selection method, genetic algorithm was introduced to construct a fitness factor based on the linear weighted feature slope of the satellite geometric observation matrix, so as to achieve rapid convergence of user protection level to protection limit. This method further improved the integrity of the receiver by optimizing the way of star selection. Under the accuracy requirement of CAT I, for the "BeiDou+StarNet-1" constellation, the global availability level of the proposed algorithm was 5.60%, and the enhancement effect was the best for the mid-latitude and low-latitude of the Eastern Hemisphere, which were increased by 7.01% and 6.42%, respectively.

Keywords: genetic algorithm, receiver autonomous integrity monitoring, high and low medium rail mix, weighted fitness factor

0 引言

完好性监测技术手段指的是一种系统当出现故障导致定位超过某阈值或不适合导航的情况时,能够及时向用户发出警告的能力^[1],与精度、连续性和可用性并称为全球导航卫星系统的 4 种导航服务性能指标^[2]。在民航领域,为使飞行器按照规定要求保障飞行安全和乘客人身安全,完好性监测的研究至关重要^[3]。现有的 GNSS 完好性监测技术在 CAT I 精密条件下仿真的全球可用性水平仅有 37.47%。

近年来,越来越多的低轨卫星已经升入太空辅以加强我国整体的卫星导航系统建设。目前,一些国家和地区已经开始探索利用低轨卫星进行导航服务的可行性。美国 SpaceX 公司计划于 2019 年到 2024 年在太空搭建约 1.2 万颗低轨卫星,实施“Starlink”的卫星互联网计划^[4],现已发射超过 5 000 颗。国内北斗三号已完成组网建设,整个星座有 50 颗卫星,未来还将建设更加完善、更加融合、更加泛在的定位导航授时(Positioning, Navigation and Timing PNT)体系。低轨卫星导航系统具有卫星轨道低、信号功率大、星座构型变化快等特点,在全球高精度应用方面有更大的优势^[5],也为导航完好性监测带来了技术革新和新机遇。关于低轨增强接收机自主完好性监测(Receiver Autonomous Integrity Monitoring, RAIM)算法的现有研究包括:卢广毅等^[6]根据 STK 软件仿真进行增强星座系统的有关模拟,在北斗系统上新增 66 颗低轨卫星,得出在最小可探测偏差和故障检测率两个方面性能有了提升的结论;王文博等^[7]基于低轨星座模拟,分析了低轨卫星高度屏蔽角与导航卫星的差异,进一步分析低轨卫星高度屏蔽角、等效误差水平(GNSS 卫星与低轨卫星观测误差比值)与保护水平、RAIM 可用性增强效果的关系;王利等^[8]重点仿真 3 种典型低轨增强星座,分析了 3 种低轨卫星星座与全球 RAIM 增强效果的关系,以及与亚太、非亚太测站 RAIM 故障检测能力的关系;石涛等^[9]利用并行遗传算法对高轨卫星进行导航选星。综上可知,低轨卫星的加入对完好性增强有帮助,提高了最小可探测偏差、故障检测率和全球可用性效果,但这些算法大都是基于现有小规模低轨星座展开分析的,对于未来低轨海量星座,其算法复杂性和实效性将成倍增加,而选星算法也没有对低轨增强进行进一步分析。

针对低轨增强后可见卫星冗余度高影响 RAIM 可用性,为进一步提高可用性,本文充分考虑低轨卫星加入后在用户可视域范围内与中高轨卫星的冗余,提出基于遗

传算法剔除部分卫星,在降低可见卫星冗余度的同时,保持可见卫星几何构型负面影响尽可能得小,以提高可用性水平。

1 RAIM 算法及其可用性分析

1.1 线性化伪距观测方程

伪距定位中导航接收机的线性化伪距残余方程^[10]为

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}\mathbf{x} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{y}$ 为 $n \times 1$ 伪距观测向量; $\mathbf{G}$ 为 $n \times 4$ 观测矩阵; $\mathbf{x}$ 为 4×1 待估状态向量; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为 $n \times 1$ 伪距观测噪声向量,表示各伪距观测向量的测量误差, $\boldsymbol{\varepsilon} \sim N(0, \mathbf{D})$, $\mathbf{D}$ 为观测噪声的协方差矩阵, n 为可见卫星数量。

经最小二乘法求解线性方程组为

$$\hat{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{y} \\ \Delta \mathbf{z} \\ \Delta \delta t_u \end{bmatrix} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{y} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{y}$ 本质上是定位前伪距观测向量与计算量的差值, $\hat{\mathbf{x}}$ 是定位后用户位置和钟差估计向量。

根据状态估计向量计算估计后的伪距残差向量为

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{y} - \mathbf{G}\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{y} - \mathbf{G}(\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{y} = (\mathbf{I}_n - \mathbf{G}(\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T) \boldsymbol{\varepsilon} \quad (3)$$

$\hat{\mathbf{y}}$ 为定位后伪距残余观测向量,此时可以简化地把 $\mathbf{G}(\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T$ 定义为 $\mathbf{P}$,

$$\mathbf{P} = \mathbf{G}(\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \quad (4)$$

$$\mathbf{I}_n - \mathbf{G}(\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \text{ 定义为 } \mathbf{S},$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{I}_n - \mathbf{G}(\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \quad (5)$$

1.2 最小平方残余法

残余平方和定义为

$$\begin{aligned} \text{SSE} &= \hat{\mathbf{y}}^T \hat{\mathbf{y}} = \boldsymbol{\varepsilon}^T (\mathbf{I}_n - \mathbf{G}(\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T)^2 \boldsymbol{\varepsilon} \\ &= \boldsymbol{\varepsilon}^T (\mathbf{I}_n - \mathbf{G}(\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T) \boldsymbol{\varepsilon} \\ &= \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{S} \boldsymbol{\varepsilon} \end{aligned} \quad (6)$$

一般假设残余分量 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为互相独立零均值正态分布,所以 SSE 满足自由度为 $n-4$ 的卡方分布。

对于卫星的故障探测,在没有故障的卫星情况下, SSE / σ_0^2 服从自由度为 $n-4$ 的卡方分布。然而,当存在故障卫星时,故障卫星的伪距残余误差会带来均值偏移,使得故障卫星的均值不再满足为 0 的条件。这种情况下,需要引入非中心化的参数,并考虑自由度为 $n-4$ 的非中心卡方分布。通过比较故障前后的分布差异,可以进行假设检

验来检测卫星是否存在故障^[11]

$$\begin{cases} \text{SSE} / \sigma_0^2 \sim \chi^2(n-4), H_0 \\ \text{SSE} / \sigma_0^2 \sim \chi^2(n-4, \lambda), H_1 \end{cases} \quad (7)$$

其中 H_0 为无故障卫星, H_1 为有故障卫星。

通过假设检验, 根据给定虚警概率 P_{fa} 、漏警概率 P_{md} 和可见卫星数 N 计算卡方非中心化参数 λ 和检验门限值 T_D 。

$$P_{fa} = \int_{T_D}^{+\infty} f_{\chi^2_{n-4}}(x) dx \quad (8)$$

$$P_{md} = \int_0^{T_D} f_{\chi^2_{n-4, \lambda}}(x) dx \quad (9)$$

1.3 RAIM 可用性分析判定

根据可见卫星数 N 、卡方非中心化参数 λ 和检验门限值 T_D 进行可用性的判定。RAIM 可用性判定公式^[7]为

$$B = \text{bool}(\text{HPL}_i \leq \text{HAL}, \text{VPL}_i \leq \text{VAL}) \quad (10)$$

$$\text{ava}_{\text{RAIM}} = \frac{\sum_{t=t_1, \text{步长}=T}^{t_2} \text{bool}(N_s \geq N_r) B}{(t_2 - t_1) / T + 1} \quad (11)$$

式中, B 为保护水平满足条件的布尔函数, N_s 和 N_r 分别为当前时刻的可见卫星数和 RAIM 需求的卫星数。水平保护级 (Horizontal Protection Level, HPL) 和垂直保护级 (Vertical Protection Level, VPL) 分别表示当前时刻水平方向和垂直方向上 RAIM 的最大不可检测定位误差, 需满足水平保护级和垂直保护级都分别低于水平告警限值 (Horizontal Alert Limit, HAL) 和垂直告警限值 (Vertical Alert Limit, VPL)^[12], 表示几何最大误差低于告警要求。其中 HPL 和 VPL 表达式为

$$\begin{cases} \text{HPL} = \max\{\text{Hslope}_i\} \times \text{pbias} \\ \text{VPL} = \max\{\text{Vslope}_i\} \times \text{pbias} \end{cases} \quad (12)$$

式中, pbias 为卡方检验的最小可检测偏差, $\text{pbias} = \sqrt{\lambda}$, λ 为卡方检验的非中心化参数。 $\max\{\text{Hslope}_i\}$ 和 $\max\{\text{Vslope}_i\}$ 分别为所有可见卫星中最大的水平特征斜率和最大的垂直特征斜率, 其中 $i=1, 2, \dots, n$, 特征斜率越大, 其出现问题更难被检测出来, 第 i 颗卫星的特征斜率^[13]为

$$\begin{cases} \text{Hslope}_i = \sigma_i \sqrt{P_{1i}^2 + P_{2i}^2} / \sqrt{S_{ii}} \\ \text{Vslope}_i = \sigma_i \sqrt{P_{3i}^2} / \sqrt{S_{ii}} \end{cases} \quad (13)$$

式中, σ_i 为第 i 颗卫星的距离测量误差, P_{1i} 为 P 矩阵中第一行第 i 列元素, P_{2i} 为 P 矩阵中第二行第 i 列元素, P_{3i} 为 P 矩阵中第三行第 i 列元素, S_{ii} 为 S 矩阵中第 i 行第 i 列元素。后续根据以上参数进行特征斜率的计算, 从而进行可用性分析的仿真。

2 基于遗传算法选星的完好性监测方法

2.1 基于精度和完好性综合分析的星座构型设计

几何精度因子 (Geometric Dilution of Precision, GDOP) 是用于估计定位误差的量^[14-15], 通过 $G^T G$ 转置矩阵和行列式求逆可以得到^[16]

$$\begin{aligned} \text{GDOP}^2 &= \text{PDOP}^2 + \text{TDOP}^2 \\ &= \frac{\sum_{c=1}^4 (S^{cijk})^2}{9(V^{ijkl})^2} + \frac{\sum_{c=1}^4 (V_r^{cijk})^2}{(V^{ijkl})^2} \end{aligned} \quad (14)$$

其中,

$$V^{ijkl} = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} X^{ij} & Y^{ij} & Z^{ij} \\ X^{ik} & Y^{ik} & Z^{ik} \\ X^{il} & Y^{il} & Z^{il} \end{vmatrix} \quad (15)$$

V^{ijkl} 表示以 i, j, k, l 为顶点的四棱锥体积, X^{ij} 表示以 i 为起点指向 j 点的向量的 x 分量, 同理可表示 X^{ik} 、 X^{il} 、 Y^{ij} 、 Y^{ik} 、 Y^{il} 、 Z^{ij} 、 Z^{ik} 、 Z^{il} 。

$$\begin{aligned} (S^{ijk})^2 &= (S_{XY}^{ijk})^2 + (S_{YZ}^{ijk})^2 + (S_{ZX}^{ijk})^2 \\ &= \frac{1}{4} \left[\left(\begin{vmatrix} X^{jk} & Y^{jk} \\ X^{ik} & Y^{ik} \end{vmatrix} \right)^2 + \left(\begin{vmatrix} Y^{ij} & Z^{ij} \\ Y^{ik} & Z^{ik} \end{vmatrix} \right)^2 + \left(\begin{vmatrix} Z^{ij} & X^{ij} \\ Z^{jk} & X^{jk} \end{vmatrix} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (16)$$

r 为坐标轴原点, S_{XY}^{ijk} 表示 i, j, k 点在 xry 坐标平面投影的面积, S_{YZ}^{ijk} 表示 i, j, k 点在 yrz 坐标平面投影的面积, S_{ZX}^{ijk} 表示 i, j, k 点在 xrz 坐标平面投影的面积。

$$V_r^{ijk} = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} X_r^i & Y_r^i & Z_r^i \\ X_r^j & Y_r^j & Z_r^j \\ X_r^k & Y_r^k & Z_r^k \end{vmatrix} \quad (17)$$

X_r^i 表示坐标系中以 r 为原点, i 向量在 x 轴方向的分量; Y_r^i 表示坐标系中以 r 为原点, i 向量在 y 轴方向的分量; Z_r^i 表示坐标系中以 r 为原点, i 向量在 z 轴方向的分量; V_r^{ijk} 表示以 r, i, j, k 为顶点的四棱锥体积^[17]。

对应几何模型如图 1 所示。

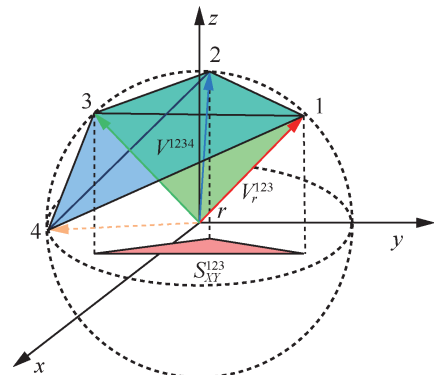


图1 导航卫星分布几何模型

图 1 中 V^{1234} 为以序号 1、2、3、4 共 4 颗卫星为顶点组合的三棱锥体积, V_r^{123} 为以球心 r 和序号 1、2、3 的 3 颗卫星为顶点组合的三棱锥体积, S_{xy}^{123} 为序号 1、2、3 的 3 颗卫星对 xy 坐标面投影的面积。可知, 当卫星 4 的星地矢量与其中任一卫星的星地矢量相关性高时, 即卫星 4 的星地矢量与某一卫星的星地矢量夹角小时, V^{1234} 极小, 此时 GDOP 极大, 满足卫星以小星群的方式分布, 小星群内卫星星地矢量相关性较高, 群与群之间卫星星地矢量相关性较低。为构建良好的星座构型, 要综合考虑星群之间卫星星地矢量相关性较低, 星群内卫星星地矢量相关性较高。

2.2 基于遗传算法的低轨增强的 RAIM 可用性分析

2.2.1 仰角和方位角的计算方法

对于地心地固 (Earth Centered Earth Fixed, ECEF) 坐标系下卫星 $S(x^i, y^i, z^i)$ 与地面站坐标 $D(x_d, y_d, z_d)$ 已知的情况下, 仰角和方位角的计算公式为^[18]

$$\text{Elevation} = \frac{|z^i - z_d|}{\|S - D\|_2} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{|z^i - z_d|}{\sqrt{(x^i - x_d)^2 + (y^i - y_d)^2 + (z^i - z_d)^2}} \\ \text{Azimuth} &= \frac{\sqrt{(x^i - x_d)^2 + (y^i - y_d)^2}}{\|S - D\|_2} \quad (19) \\ &= \frac{\sqrt{(x^i - x_d)^2 + (y^i - y_d)^2}}{\sqrt{(x^i - x_d)^2 + (y^i - y_d)^2 + (z^i - z_d)^2}} \end{aligned}$$

其中, Elevation 为仰角, Azimuth 为方位角, $\|\cdot\|_2$ 为 2-范数, 仰角要大于高度屏蔽角 α_{Alarm} , 即

$$L_E = \text{bool}(\text{Elevation} \geq \alpha_{\text{Alarm}}) \quad (20)$$

若 L_E 为 0, 即星地矢量仰角低于高度屏蔽角, 将直接剔除该卫星。

2.2.2 遗传算法选星剔除

遗传算法是一种模拟自然基因进化过程的算法, 将相应的编码模拟为自然界的 DNA 进行交叉、复制和变异以得到最优进化的过程^[19]。对当前时刻地面站位置的可见卫星数进行编码操作, 选择保留的卫星编码为 1, 选择剔除的卫星编码为 0。

$$L_R = \begin{bmatrix} L^1 \\ \vdots \\ L^{i+j} \end{bmatrix} \quad (21)$$

其中, $L_R^k, k=1, 2, \dots, (i+j)$ 为随机 0 和 1, L_R 为随机二进制编码分布。取 N 组随机二进制编码为初始父群 GP_0 。

设函数 RemoveZero 为剔除矩阵全 0 行, 可见卫星数 n 对应的卡方最小可检测偏差为 pbias_n , 适应度按照实际需求给定^[9], 本文的重点在于对适应度的设计, 本文适应度的计算为

$$F = \frac{1}{\max(\text{VAL} \cdot \text{Hslope}_{ci} + \text{HAL} \cdot \text{Vslope}_{ci})} \times \frac{1}{\text{pbias}_n} \quad (22)$$

其中,

$$G_c = \text{RemoveZero}(GL_R^{kT}) \quad (23)$$

$$S_c = I_{nc} - G_c(G_c^T G_c)^{-1} G_c^T \quad (24)$$

$$P_c = (G_c^T G_c)^{-1} G_c^T \quad (25)$$

$$\begin{cases} \text{Hslope}_{ci} = \frac{\sigma_i \sqrt{P_{c1i}^2 + P_{c2i}^2}}{\sqrt{S_{cii}}} \\ \text{Vslope}_{ci} = \frac{\sigma_i \sqrt{P_{c3i}^2}}{\sqrt{S_{cii}}} \end{cases} \quad (26)$$

其中 F 为适应度, T 为遗传算法循环次数, L_R^{kT} 为第 T 次循环后卫星群的编码, G_c 为经过遗传算法剔除后的观测矩阵, I_{nc} 为和 G_c 同阶数的单位矩阵, S_c 和 P_c 分别为剔除后的 S 矩阵和 P 矩阵, Hslope_{ci} 和 Vslope_{ci} 为剔除后第 i 颗卫星的 Hslope 和 Vslope 。流程图如图 2 所示。

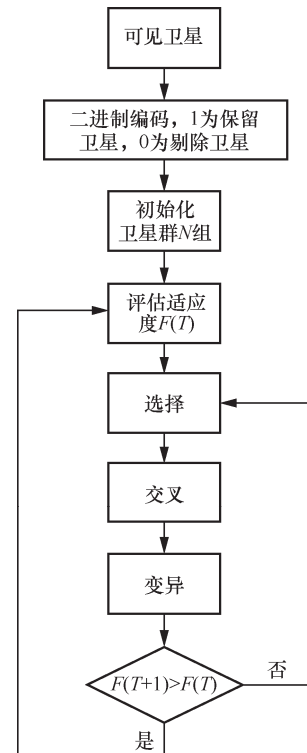


图 2 基于遗传算法选星的流程图

考虑满足式(10)中剔除后卫星的 VPL 和 HPL 要分别略

小于 VAL 和 HAL, 基于加权的思想^[20-21], 本文提出 VPL 和 HPL 要与 VAL 和 HAL 进行相应的加权计算, 即满足式(27)越小越好。

$$\rho = \frac{\text{VPL}}{\text{VAL}} + \frac{\text{HPL}}{\text{HAL}} \quad (27)$$

其中, ρ 越小越好, 为了更快收敛和满足公式要求, 提高可用性水平, 考虑 ρ 的公式关系, 适应度由卡方最小可检测偏差和基于遗传算法剔除卫星后的特征斜率经 VAL 和 HAL 阈值加权得到, 适应度越大, 剔除卫星后效果越好, 见式(22)。

然后进行复制、交叉和变异操作: 选取 $N/4$ 组适应度高的组别, 复制到 $N/4$ 组适应度低的组别, 根据概率为 p_c 进行交叉以及概率为 p_m 进行变异(交叉和变异示意图 3 所示), 得到组数为 N 的子群。如果 F 值变好, 此时子群就是下一步遗传的新父群 GP_1 ; 如果 F 值变差, 保留上一步的父群, 进行 M 次循环遗传直到适应度 F 平稳^[22-23]。

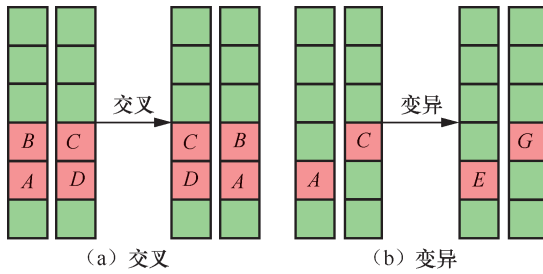


图3 遗传算法交叉和变异示意

如果当前适应度优于上一次循环适应度, 则复制、交叉和变异操作有效, 否则, 保留上次循环结果为最优。

2.2.3 低轨增强 RAIM 可用性的计算方法

$S^i = (x^i, y^i, z^i)$ 为剔除前 GNSS 中高轨卫星坐标, $S^j = (x^j, y^j, z^j)$ 为剔除前低轨卫星坐标, 经过遗传算法的剔除后, 保留 GNSS 中高轨卫星坐标序号为 p , 低轨卫星坐标序号为 q , 即 $S^p = (x^p, y^p, z^p)$ 为剔除后 GNSS 中高轨

卫星(GNSS_{opt})坐标, $S^q = (x^q, y^q, z^q)$ 为剔除后低轨卫星(LEO_{opt})坐标。基于遗传算法的低轨增强的线性化观测矩阵为

$$\mathbf{H}_{\text{GNSS}_{\text{opt}} + \text{LEO}_{\text{opt}}} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & h_{1,3} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{p,1} & h_{p,2} & h_{p,3} & 1 \\ h_{(p+1),1} & h_{(p+1),2} & h_{(p+1),3} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{(p+q),1} & h_{(p+q),2} & h_{(p+q),3} & 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

其中, p 为可见的 GNSS 中高轨卫星数量, q 为可见的低轨卫星数量。此时保护水平为

$$\begin{cases} \text{HPL}^{\text{GNSS}_{\text{opt}} + \text{LEO}_{\text{opt}}} = \text{Hslope}_{\text{max}}^{\text{GNSS}_{\text{opt}} + \text{LEO}_{\text{opt}}} \times \text{pbias}^{\text{GNSS}_{\text{opt}} + \text{LEO}_{\text{opt}}} \\ \text{VPL}^{\text{GNSS}_{\text{opt}} + \text{LEO}_{\text{opt}}} = \text{Vslope}_{\text{max}}^{\text{GNSS}_{\text{opt}} + \text{LEO}_{\text{opt}}} \times \text{pbias}^{\text{GNSS}_{\text{opt}} + \text{LEO}_{\text{opt}}} \end{cases} \quad (29)$$

基于遗传算法的低轨增强 RAIM 可用性判定公式为

$$\text{ava}_{\text{RAIM}} = \frac{\sum_{t=t_1, \text{步长}=T}^{t_2} \text{bool}(N_s^{\text{GNSS}_{\text{opt}} + \text{LEO}_{\text{opt}}} \geq N_r)}{\sum_{t=t_1, \text{步长}=T}^{t_2} 1} \times \text{bool}(\text{PL}_t^{\text{GNSS}_{\text{opt}} + \text{LEO}_{\text{opt}}} \leq \text{AL}) \quad (30)$$

3 仿真结果与分析

仿真实验所用数据为北斗三号卫星双行星历数据, 时间范围 2023-08-21 06:08:33—2023-08-22 06:08:33, 共 50 颗卫星, 其中卫星波束角为 90° , 高度屏蔽角为 5° , 低轨卫星仿真数据“StarNet-1”和“StarNet-2”, 具体数据见表 1, 仿真时长 24 h, 采样间隔 30 s, 虚警概率为 1×10^{-5} , 漏警概率为 1×10^{-3} , 先验观测噪声均方根为 6 m ^[8], 告警限值选用 CAT I^[24]精密条件, 水平告警限值 40 m, 垂直告警限值 10.0~35.0 m, 仿真使用 10 m 垂直告警限值。

3.1 低轨增强下保护水平仿真对比分析

将全球划分成 $6^\circ \times 6^\circ$ 的网格点, 每个网格点建立一个地面接收站, 对全球的可见卫星数 HPL 和 VPL 进行仿真

表 1 低轨星座设计参数

星座参数	设置			
	StarNet-1(108 颗)	StarNet-2(384 颗)		
轨道类型	LEO	LEO	LEO	LEO
卫星数/颗	108	108	216	60
星座构型	Walker 108/12/1	Walker 108/12/1	Walker 216/12/1	Walker 60/6/1
轨道倾角	50°	50°	50°	86.5°
轨道高度/km	1 150	1 150	1 150	1 175

分析。其中北斗卫星轨道数据来自 Celestrak 公布的双行星历.TLE 文件,低轨卫星数据来自“StarNet-1”和“StarNet-2”低轨卫星 STK 仿真轨道数据。图 4 是北斗卫星星座和 StarNet-1 低轨星座增强后全球可见卫星数分布和保护水平,北斗星座记为“Star I”,“北斗+StarNet-1”星座记为“Star II”。

根据图 4 所示,从经度上看,VPL 和 HPL 主要在 $0^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{W}$ 数值较大,VPL 均值为 23.48, HPL 均值为 24.57,这与北斗卫星分布有关,特别是 GEO 和 IGSO 卫星都时刻分布于东亚地区,对于东亚地区而言,可见卫星几何构型较好,VPL 和 HPL 相对较低,均值分别为 10.97 和 9.81;从纬度上看,赤道附近数值较低,VPL 和 HPL 分别为 13.31 和 12.35, 45° 南北纬度左右的中纬地区较高,VPL 和 HPL 分别为 18.53 和 20.21,两级地区数值较低,VPL 和 HPL 分别为 13.58 和 11.63。对于赤道区域,可见卫星相对几何构

型较好,VPL 和 HPL 较低,而中纬地区几何构型较差,VPL 和 HPL 较高,两级地区几何构型较好,VPL 和 HPL 较低。

根据图 4 所示,比较北斗和“北斗+StarNet-1”可看出,经过低轨增强后,可见卫星数、HPL 和 VPL 都有了不同程度的优化。由表 2 可见,高纬区域可见卫星数、HPL 和 VPL 没有变化,原因是 StarNet-1 没用极轨卫星,对极地地区没有影响,说明卫星数量增多对高纬地区完好性不一定有增强效果,原因主要是和星座构型有关。别的地区都有不同程度的优化,特别是中纬 $0^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{W}$ 有明显的优化,可见卫星数增加了 21.71%, HPL 降低了 44.69%, VPL 降低了 45.26%。其中“Star I”为北斗星座,“Star II”为“北斗+StarNet-1”星座,Low Lat 为低纬地区, Mid Lat 为中纬地区, High Lat 为高纬地区, W 范围为 $120^{\circ}\text{W}\sim 0^{\circ}$, E 范围为 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$ 和 $180^{\circ}\text{W}\sim 120^{\circ}\text{W}$ 。

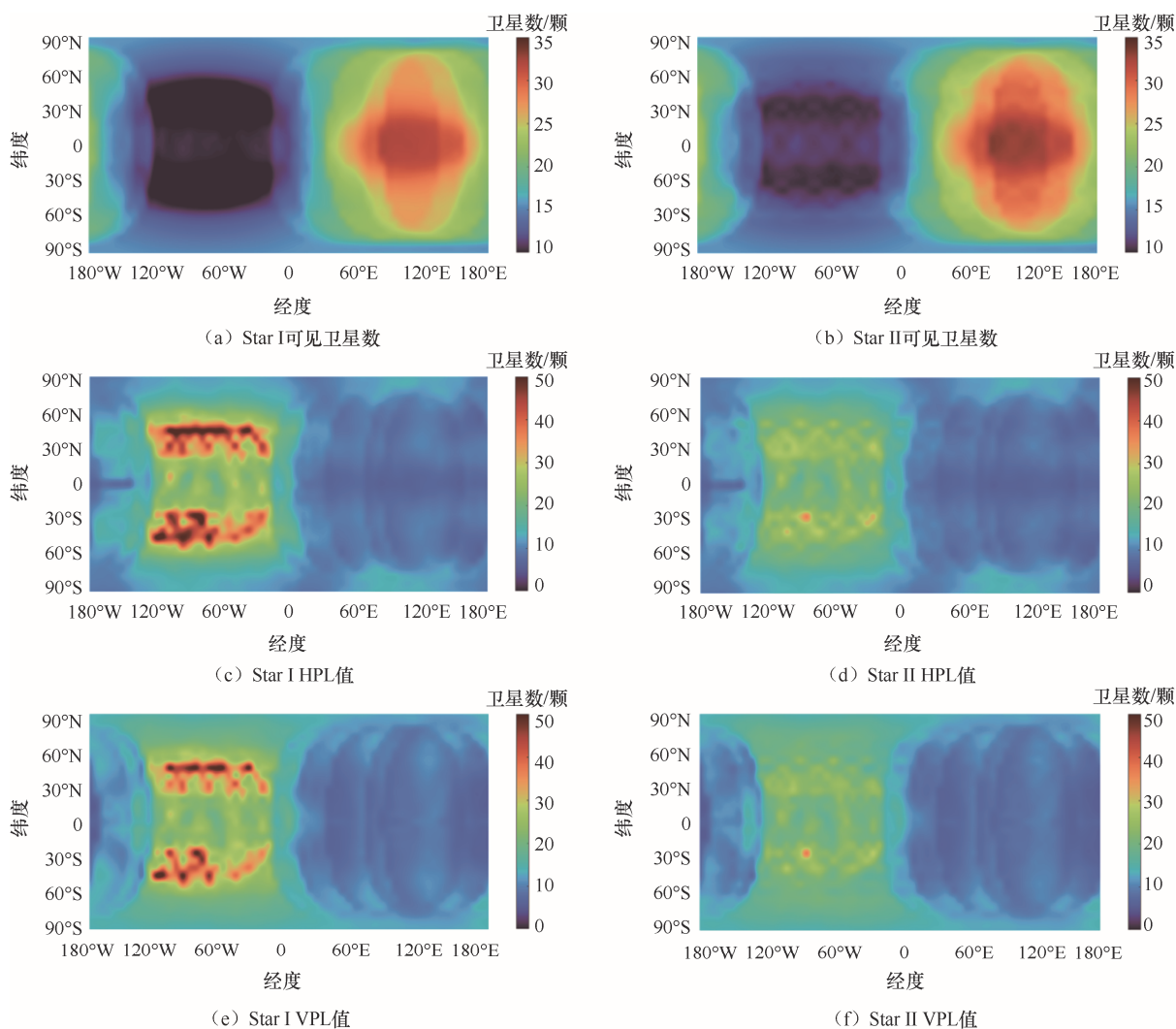


图 4 北斗卫星星座和 StarNet-1 低轨星座增强后全球可见卫星数分布和保护水平

表 2 低轨增强前后可见卫星数、HPL 和 VPL 值

对比项	方案	高纬地区		中纬地区		低纬地区	
		W	E	W	E	W	E
N_{sat} /颗	Star I	15	16	10	21	11	24
	Star II	15	16	12	23	11	25
HPL	Star I	12.60	11.15	38.95	10.84	22.16	7.44
	Star II	12.60	11.15	21.54	9.60	19.69	7.22
VPL	Star I	14.28	13.23	34.47	10.56	21.70	9.11
	Star II	14.28	13.23	18.87	9.05	19.38	8.67

3.2 基于遗传算法剔除卫星前后 RAIM 可用性仿真对比分析

绘制“北斗+StarNet-1”低轨增强全球可用性水平分布图，分析 RAIM 可用性全球分布情况。选择遗传算法剔除卫星，分析低轨剔除是否具有进一步增强效果。

图 5 是仿真全球“北斗+StarNet-1”星座基于遗传算法剔除卫星后全球 RAIM 可用性分布。“北斗+StarNet-1”星座记为“Star II”，剔除卫星后星座记为“Star III”。

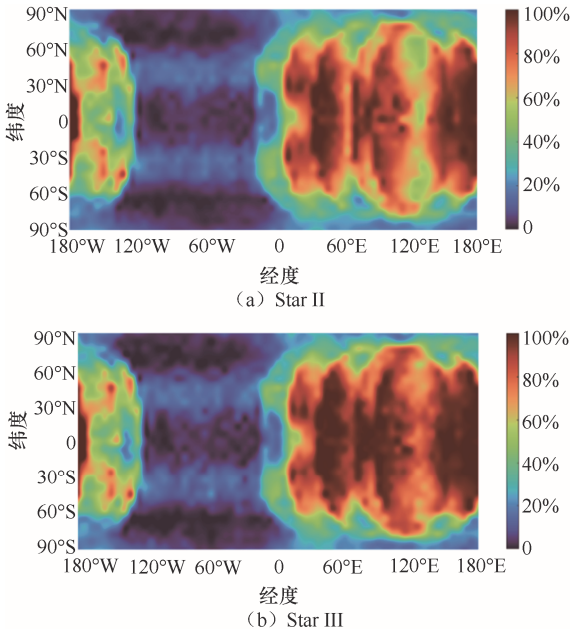


图 5 仿真全球“北斗+StarNet-1”星座基于遗传算法剔除卫星后全球 RAIM 可用性分布

由图 5(a)可知，RAIM 的可用性大小大致与 HPL 和 VPL 分布相反，从经度上看，主要在 0~120°W 数值较小；但纬度上分布规律并不相反，赤道附近数值较低，45°南北纬度左右的中纬地区较高，两级地区数值较低，这是由于 RAIM 可用性不仅仅受几何构型影响，还与冗余度即可

见卫星数有关，中纬地区可见卫星数相对较低，综合影响导致中纬地区 RAIM 可用性较高。

由图 5(b)可知，遗传算法剔除卫星后全球可用性水平有进一步增强，根据表 3 可知西半球高纬地区增强了 2.46%，东半球高纬地区增强了 4.87%，西半球中纬地区增强了 2.30%，东半球中纬地区增强了 7.01%，西半球低纬地区削弱了 13.92%，东半球低纬地区增强了 6.42%，全球范围平均增强了 5.60%。东半球中低纬增强效果较好是由于本身可见卫星数较多，可见卫星几何构型较好；西半球低纬地区出现可用性削弱是由于本身几何构型较差；东西半球高纬可用性增强是因为 StarNet-2 引入极轨卫星。具体数据见表 3，其中“Star II”为“北斗+StarNet-1”星座，“Star III”为经过遗传算法剔除卫星后“北斗+StarNet-1”星座。

表 3 基于遗传算法剔除卫星前后 RAIM 可用性水平

方案	高纬地区		中纬地区		低纬地区		全球平均值
	W	E	W	E	W	E	
Star II	7.32	18.88	16.94	71.87	5.10	75.81	41.94
Star III	7.50↑	19.80↑	17.33↑	76.91↑	4.39↓	80.68↑	44.29↑

表注：↑为数值优化，↓为数值劣化，单位为%

3.3 基于遗传算法剔除卫星前后 GDOP 仿真对比分析

对于不同星座的低轨增强进行 GDOP 比较分析，低轨星座分别选取“StarNet-1”和“StarNet-2”，以分析“北斗+StarNet-1”“北斗+StarNet-2”以及通过遗传算法剔除卫星后的低轨增强 GDOP 变化，其中 Star I、Star II 和 Star III 沿用表 2 和表 3 中的缩写方式，“北斗+StarNet-2”星座记为 Star IV，经过遗传算法剔除卫星后的“北斗+StarNet-2”星座记为 Star V。不同星座的 GDOP 如图 6 所示。

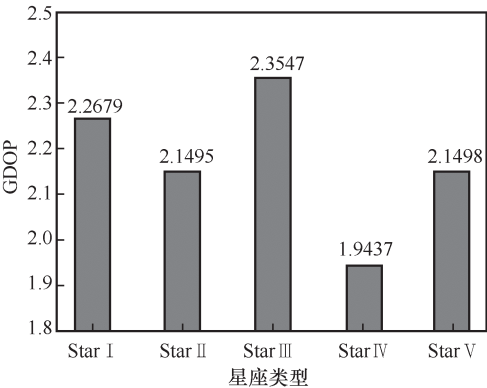


图 6 不同星座的 GDOP

由图6可知, GDOP比较结果为 $\text{Star IV} < \text{Star II} < \text{Star V} < \text{Star I} < \text{Star III}$, 相对于北斗星座来说, “北斗+StarNet-1”和“北斗+StarNet-2”星座的低轨增强降低了GDOP, 分别降低了5.22%和14.30%, 符合卫星数增多GDOP大致变小的规律。在此基础上利用遗传算法剔除卫星对低轨增强的GDOP有增加, 增加了9.45%和10.60%, 符合剔除卫星后GDOP大致变大的规律。“北斗+StarNet-2”剔除后GDOP比北斗GDOP大, “北斗+StarNet-2”剔除后和“北斗+StarNet-1”剔除前GDOP几乎一致, 说明两者精度一致, 综合考虑, 增加低轨和剔除部分卫星对GDOP的影响不大。

3.4 不同类型卫星星座的低轨增强 RAIM 可用性仿真对比分析

对于不同星座的低轨增强RAIM可用性分析, 低轨星座分别选取“StarNet-1”和“StarNet-2”, 以分析“北斗+StarNet-1”“北斗+StarNet-2”以及通过遗传算法剔除卫星后的低轨增强RAIM可用性水平。不同星座的RAIM值如图7所示。

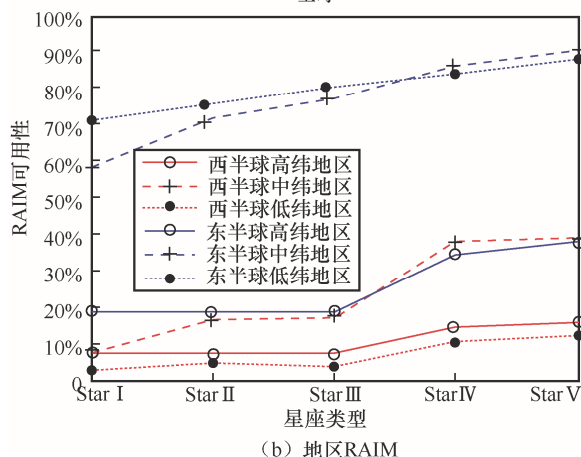
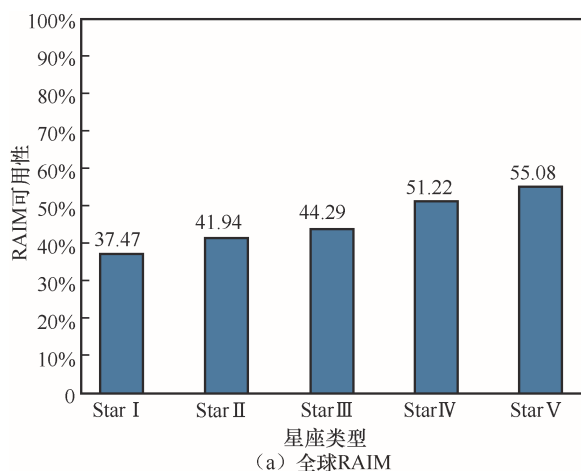


图7 不同星座的RAIM值

由图7(a)可知, 可用性水平比较结果为 $\text{Star I} < \text{Star II} < \text{Star III} < \text{Star IV} < \text{Star V}$, 相对于北斗星座来说, “北斗+StarNet-1”和“北斗+StarNet-2”星座的低轨增强对可用性确有提升, 分别提升11.93%和36.70%。在此基础上利用遗传算法剔除卫星对低轨增强的可用性有进一步提升, 对“北斗+StarNet-1”和“北斗+StarNet-2”经剔除后相对于剔除前可用性分别提升5.60%和7.54%。后者的提升效果更佳, 是由于可见卫星数更多, 星座几何构型相对较好, 冗余度更高, 优化空间更大。

由图7(b)和表4可知, 不同地区星座的变化对RAIM可用性影响不同, 对于东半球中低纬地区, “StarNet-1”和“StarNet-2”的加入以及经过遗传算法剔除后的可用性都有明显增加, 而对于东半球高纬地区和西半球高纬地区而言, “StarNet-1”的加入可用性不变, 在经过遗传算法剔除后增加效果也很低, 仅有2.46%和1.06%, 这是由于当前区域可见卫星数较少, 可优化剔除卫星数上限低。对于西半球中低纬地区, 加入“StarNet-1”可用性有明显增加, 增加了136.92%和96.15%, 而经过遗传算法剔除部分卫星后, 西半球低纬地区可用性降低。

表4 根据遗传算法剔除卫星的低轨增强可用性水平

方案	高纬地区		中纬地区		低纬地区		全球平均
	W	E	W	E	W	E	
Star I	7.32	18.88	7.15	58.52	2.60	71.21	37.47
Star II	7.32	18.88	16.94	71.87	5.10	75.81	41.94
Star III	7.50	19.08	17.33	76.91	4.39	80.68	44.29
Star IV	14.68	34.58	38.10	86.04	10.71	83.96	51.22
Star V	15.87	38.13	38.89	90.62	12.30	88.33	55.08

表注: 红色为当前区域最大值, 绿色为当前区域最小值, 单位为%

4 结束语

本文通过研究低轨增强和基于遗传算法剔除卫星的低轨增强对完好性的影响得出以下3点结论。

第一, 低轨导航增强对完好性保护水平有增强作用, 文中倾角低轨卫星对中纬地区的保护水平增强效果更佳, 极轨星座对高纬地区的保护水平增强效果更佳。

第二, 基于遗传算法剔除卫星后RAIM可用性有明显增强, 在CAT I精密条件和“北斗+StarNet-1”星座条件下, 全球平均可用性水平为41.94%, 选用遗传算法剔除卫星后提高全球可用性水平5.60%, 对于东半球中纬地区和东半球低纬地区增强效果最佳, 分别提升7.01%和6.42%。

第三, 基于遗传算法剔除卫星后对GDOP也有影响,

对于本文在 CAT I 精密条件和“北斗+StarNet-1”星座条件下, 相对剔除卫星前低轨增强降低了 5.22%, 说明在实际运用中, 要考虑精密条件和 RAIM 可用性两个标准去综合选择最优方案。

参考文献:

- [1] SPILKER J J, AXELRAD P, PARKINSON B W, et al. Global Positioning System: Theory and Applications, Volume I[M]. Washington DC: AIAA, 1996.
- [2] 朱祺. 面向精密近近的北斗接收机自主完好性监测研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
ZHU Q. Research on autonomous integrity monitoring of Beidou receiver for precision approach[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [3] WANG E S, JIA C Y, TONG G, et al. Fault detection and isolation in GPS receiver autonomous integrity monitoring based on chaos particle swarm optimization-particle filter algorithm[J]. Advances in Space Research, 2018, 61(5): 1260-1272.
- [4] 王羽, 李清, 李克军, 等. Starlink 星座应用现状及分析[J]. 天地一体化信息网络, 2023, 4(2): 93-102.
WANG Y, LI Q, LI K J, et al. Application status and analysis of starlink constellation[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2023, 4(2): 93-102.
- [5] 卢璠, 张弓, 申建华, 等. 低轨增强星座对卫星导航系统能力提升分析[J]. 卫星应用, 2020(2): 49-54.
LU Y, ZHANG G, SHEN J H, et al. Analysis on the improvement of satellite navigation system capability by LEO enhanced constellation[J]. Satellite Application, 2020(2): 49-54.
- [6] 卢广毅, 赵春梅, 邵银星. 低轨卫星增强北斗系统完好性性能分析[J]. 测绘科学, 2021, 46(5): 8-13.
LU G Y, ZHAO C M, SHAO Y X. Integrity performance analysis of LEO enhanced BDS[J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(5): 8-13.
- [7] 王文博, 徐颖. 基于低轨星座增强的北斗系统 RAIM 可用性分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(11): 1158-1163.
WANG W B, XU Y. Analysis of RAIM availability based on LEO-augmented BDS[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(11): 1158-1163.
- [8] 王利, 李一, 舒宝, 等. 三种典型低轨增强星座与北斗系统联合应用的 RAIM 性能分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(5): 678-686.
WANG L, LI Y, SHU B, et al. RAIM performance analysis of three typical low-orbit augmentation constellations combined with BDS applications[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(5): 678-686.
- [9] 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, 2022.
SHI T, ZHUANG X B, LIN Z J, et al. A satellite navigation selection method for high orbit satellites based on parallel genetic algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022.
- [10] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2022.
XIE G. Principles of GPS and receiver design[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2022.
- [11] 韩清清. GNSS 接收机自主完好性监测算法优化及性能分析[D]. 西安: 长安大学, 2020.
HAN Q Q. Optimization and performance analysis of autonomous integrity monitoring algorithm for GNSS receiver[D]. Xi'an: Changan University, 2020.
- [12] LUO S L, WANG L, TU R, et al. Satellite selection methods for multi-constellation advanced RAIM[J]. Advances in Space Research, 2020, 65(5): 1503-1517.
- [13] SONG D, SHI C, WANG Z P, et al. Correlation-weighted least squares residual algorithm for RAIM[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(5): 1505-1516.
- [14] ACHARYA R. Satellite navigation[M]. Understanding Satellite Navigation. Amsterdam: Elsevier, 2014.
- [15] YARLAGADDA R, ALI I, AL-DHAHIR N, et al. GPS GDOP metric[J]. IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation, 2000, 147(5): 259-264.
- [16] SANTERRE R, GEIGER A, BANVILLE S. Geometry of GPS dilution of precision: revisited[J]. GPS Solutions, 2017, 21(4): 1747-1763.
- [17] 丛丽, Ahmed I Abidat, 谈展中. 卫星导航几何因子的分析和仿真[J]. 电子学报, 2006, 34(12): 2204-2208.
CONG L, ABIDAT A, TAN Z Z. Analysis and simulation of the GDOP of satellite navigation[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(12): 2204-2208.
- [18] 埃利奥特·D.卡普兰, 克里斯朵夫·赫加蒂盖. GPS/GNSS 原理与应用(第3版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2021.
KAAPLAN D E, HEGA C. Principles and applications of GPS/GNSS[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2021.
- [19] 葛继科, 邱玉辉, 吴春明, 等. 遗传算法研究综述[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(10): 2911-2916.
GE J K, QIU Y H, WU C M, et al. Summary of genetic algorithms research[J]. Application Research of Computers, 2008, 25(10): 2911-2916.
- [20] 王梦丽, 孙广富, 王飞雪, 等. 混合星座导航系统的加权几何精

度因子分析[J]. 中国空间科学技术, 2007, 27(5):50-56.

WANG M L, SUN G F, WANG F X, et al. Weighted geometric dilution of precision's analysis for mixed constellation navigation system[J]. Chinese Space Science and Technology, 2007, 27(5):50-56.

- [21] WON D H, AHN J, LEE S W, et al. Weighted DOP with consideration on elevation-dependent range errors of GNSS satellites[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(12): 3241-3250.

- [22] 曾文飞, 张英杰, 颜玲. 遗传算法的基本原理及其应用研究[J]. 软件导刊, 2009, 8(9): 54-56.

ZENG W F, ZHANG Y J, YAN L. Research on the Basic Principles and Applications of Genetic Algorithm[J]. Software Guide, 2009, 8(9): 54-56.

- [23] 张兆龙, 王跃钢, 腾红磊, 等. 一种基于遗传算法和 BP 神经网络的选星方法[J]. 物探与化探, 2017, 41(5):946-950.

ZHANG Z L, WANG Y G, TENG H L, et al. A satellite selection algorithm based on genetic algorithm and BP neural network[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(5): 946-950.

- [24] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统星基增强服务性能评估方法[Z]. 2022.

[作者简介]



吴政城 (1999—), 男, 国防科技大学硕士生, 主要研究方向为卫星导航。



倪少杰 (1978—), 男, 博士, 国防科技大学研究员, 主要研究方向为导航与时空技术、卫星载荷与导航终端设计。



刘文祥 (1981—), 男, 博士, 国防科技大学副研究员, 主要研究方向为星基导航与定位技术。



肖伟 (1992—), 男, 博士, 国防科技大学讲师, 主要研究方向为卫星导航。



李宗楠 (1990—), 女, 博士, 国防科技大学讲师, 主要研究方向为北斗/GNSS、低轨卫星的实时高精度定轨定位技术研究及应用、多源信息融合高精度定位方向。