

引文格式: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.DOI:10.13203/j.whugis20210567



Citation: WANG Li, LI Yi, SHU Bao, 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. DOI: 10.13203/j.whugis20210567

## 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

王利<sup>1,2,3</sup> 李一<sup>1,2,3</sup> 舒宝<sup>1,2,3</sup> 田云青<sup>1,2,3</sup> 王冰洁<sup>1</sup>

1 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054

2 地理信息工程国家重点实验室,陕西 西安,710054

3 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室,陕西 西安,710054

**摘要:**接收机自主完好性监测(receiver autonomous integrity monitoring, RAIM)是终端用户高可靠导航定位的保障,低轨卫星的发展为完好性监测带来新的机遇,然而不同低轨星座增强下的终端RAIM性能可能会存在显著差异。基于高轨道倾角(80颗)、中轨道倾角(120颗)和混合轨道倾角(168颗)3种典型的低轨星座,系统评估了低轨卫星增强下的北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)RAIM可用性及故障检测效果。仿真计算结果表明:对于高纬区域,高轨道倾角增强下的RAIM可用性效果最好,而在中、低纬区域,中轨道倾角星座增强下的RAIM可用性效果最优;在全球范围内,高轨道倾角、中轨道倾角和混合轨道倾角星座增强下非精密进近阶段的RAIM可用性较BDS分别提升30.5%、29.0%和41.0%。由此可知,由不同轨道倾角组成的混合星座可较好地弥补可视卫星在空间覆盖上的缺陷,其全球RAIM可用性增强效果最优,增强后的RAIM可检测到的最小伪距偏差较之前平均减小33.3 m。

**关键词:**低轨导航增强;北斗卫星导航系统;接收机自主完好性监测;RAIM可用性;故障检测

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2022-09-06

DOI:10.13203/j.whugis20210567

文章编号:1671-8860(2023)05-0678-09

## RAIM Performance Analysis of Three Typical Low-Orbit Augmentation Constellations Combined with BDS Applications

WANG Li<sup>1,2,3</sup> LI Yi<sup>1,2,3</sup> SHU Bao<sup>1,2,3</sup> TIAN Yunqing<sup>1,2,3</sup> WANG Bingjie<sup>1</sup>

1 College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 State Key Laboratory of Geographic Information Engineering, Xi'an 710054, China

3 Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, China

**Abstract:** Objectives: Receiver autonomous integrity monitoring (RAIM) is the guarantee of highly reliable navigation and positioning for terminal users, and the development of low earth orbit (LEO) satellites brings new opportunities for integrity monitoring. However, there may be significant differences in terminal RAIM performance under different LEO constellation enhancements. Methods: We systematically evaluate the RAIM availability and fault detection effects of the BeiDou navigation satellite system (BDS) under LEO satellite augmentation based on three typical LEO constellations: High-inclination (80 satellites), mid-inclination (120 satellites) and mixed-inclination constellations (168 satellites). Results: The simulation results show that the RAIM availability effect under the high-inclination constellation enhancement is most effective in high-latitude regions, while in the mid- and low-latitude regions, the RAIM availability effect under the mid-inclination constellation enhancement is the best. After adding the

基金项目:国家自然科学基金(42004024,41877289,42174006,42127802);国家重点研发计划(2021YFC3000503,2021YFC3000501);中国博士后科学基金(2020M673321);长安大学研究生科研创新实践项目(300103722041)。

第一作者:王利,博士,教授,主要从事卫星导航定位测量数据处理和地质灾害变形监测方面的研究工作。wangli@chd.edu.cn

通讯作者:舒宝,博士,副教授。baos613@163.com

high-inclination, mid-inclination, and mixed-inclination constellations, the global RAIM availability in the non-precision approach phase is improved by 30.5%, 29.0%, and 41.0% than that of the BDS, respectively. **Conclusions:** It can be seen that the hybrid constellation composed of different orbital inclinations can compensate for the defects in spatial coverage of the visible satellites, and its global RAIM availability enhancement effect is optimal, and the minimum pseudorange deviation detected by the enhanced RAIM is reduced by 33.3 m compared with the previous one.

**Key words:** low earth orbiter navigation augmentation; BeiDou navigation satellite system (BDS); receiver autonomous integrity monitoring (RAIM); RAIM availability; fault detection

全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)的4种导航服务性能<sup>[1]</sup>分别指完好性、连续性、精度和可用性(integrity, continuity, accuracy and availability, ICAA)。其中,完好性是指当系统定位误差超限或不可用于导航时,系统及时向用户告警的一种能力<sup>[2]</sup>。对于涉及生命安全的用户来说,完好性的作用比精度更加重要。为保证GNSS向用户提供可靠的导航定位服务,完好性监测技术成为卫星导航技术的研究热点,并受到自动驾驶及民用航空等相关行业的广泛关注<sup>[3-4]</sup>。

接收机自主完好性监测(receiver autonomous integrity monitoring, RAIM)是基于一致性检验理论对冗余观测信息进行监测的技术,是完好性监测的重要手段<sup>[5-6]</sup>。传统RAIM算法仅提供非精密进近阶段(non precision approach, NPA)的水平引导服务,但鉴于北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)迈进全球服务新时代<sup>[7]</sup>,提供了更为丰富的导航信息,且民航用户对垂直引导需求日渐强烈<sup>[8]</sup>,基于BDS的RAIM算法在垂向引导服务中的性能有待验证,这也是民航用户迫切解决的问题。此外,RAIM算法在多故障、小故障检测和保护水平计算上仍存在缺陷与不足<sup>[6]</sup>。针对上述问题,有学者通过粗差检验理论或对误差项建模来优化检验统计量,以提高RAIM算法的性能。如刘一等<sup>[9]</sup>提出一种基于观测数据集密度中心的多粗差探测RAIM算法,实现对多个粗差的成功探测及识别,有效提高了多系统定位的可靠性;张亚彬等<sup>[10]</sup>在RAIM算法中引入信号间校正(inter signal correction, ISC)参数,显著提升了RAIM算法的性能;王煜东等<sup>[11]</sup>分析了不同特征斜率的卫星对定位解的贡献,提出基于特征斜率加权的最小二乘RAIM算法,改进后RAIM算法的故障检测率明显提高;韩清清等<sup>[12]</sup>基于Hatch滤波提出了单星小故障检测算法,该算法提高了卫星的使用率,并对可用性有较大提升;赵昂等<sup>[13]</sup>提出一种

抗差估计的保护水平重构方法,可在保障特定要求定位精度的前提下降低告警频率;韩清清等<sup>[14]</sup>采用最大值最小化方法对完好性及连续性风险进行合理分配,提高单星座增强型接收机自主完好性监测(advanced RAIM, ARAIM)的可用性。另有学者尝试通过多星座融合来增加冗余观测量信息,以改善算法性能,如王文博等<sup>[15]</sup>充分利用当前多星座的导航定位资源,介绍了BDS/GPS组合RAIM算法的应用,并阐明多星座对RAIM算法性能的优势;田云青等<sup>[16]</sup>通过仿真预测和航空实测数据来评估单BDS及其组合系统ARAIM算法的可用性,结果表明GNSS组合能大幅提高ARAIM算法的可用性。

近年来,越来越多低轨卫星成功发射,低轨卫星以其星座和信号的独特优势<sup>[17]</sup>逐步受到全球卫星导航领域的关注和青睐,有望成为新一代卫星导航系统发展的新增量<sup>[18]</sup>。低轨卫星的发展也为终端完好性监测带来新的发展机遇<sup>[19]</sup>。针对RAIM现存的问题,王文博等<sup>[20]</sup>基于低轨星座模拟数据,分析高度遮蔽角和等效误差水平对低轨星座增强BDS保护水平和RAIM可用性的影响;卢广毅等<sup>[21]</sup>依据仿真设计低轨星座,对比分析单GNSS和低轨增强下GNSS的故障检测率。目前,OneWeb、SpaceX<sup>[22]</sup>、Samsung、中国航天科技集团<sup>[23]</sup>和航天科工集团已公布各自的商用星座计划,然而不同低轨星座增强下的RAIM性能可能会存在显著差异。基于此,本文仿真高轨道倾角、中轨道倾角和混合轨道倾角3种典型的低轨星座,系统评估了不同低轨星座增强下的RAIM在全球范围内及不同纬度区域的可用性及故障检测效果。

## 1 RAIM 算法

线性化的GNSS观测方程如下:

$$\mathbf{y} = \mathbf{Ax} + \boldsymbol{\epsilon} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{y}$ 为伪距观测量; $\mathbf{A}$ 为观测矩阵; $\mathbf{x}$ 为未知参

数向量;  $\epsilon$  为伪距观测误差。

伪距残差向量  $v$  为:

$$v = y - \hat{y} = (I - A(A^T P A)^{-1} A^T P) \epsilon \quad (2)$$

式中,  $P$  为观测权矩阵, 可表示为:

$$P = \text{diag}\left(\frac{\sigma_0^2}{\sigma_1^2}, \frac{\sigma_0^2}{\sigma_2^2}, \dots, \frac{\sigma_0^2}{\sigma_n^2}\right) \quad (3)$$

式中,  $\sigma_0$  为单位权标准差, 其值为 1 m;  $\sigma_i = 1/\sin E_i$ , 其中,  $E_i$  是第  $i$  颗卫星的高度角。

伪距残差向量的协因数矩阵  $Q_v$  为:

$$Q_v = P^{-1} - A(A^T P A)^{-1} A^T \quad (4)$$

验后单位权中误差  $\hat{\sigma}$  为:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{v^T P v / (n - m - 3)} \quad (5)$$

式中,  $n$  为观测值个数;  $m$  为卫星系统数。在后续仿真过程中, 将低轨卫星视为除 BDS 以外的系统平台来发射导航信号, 并与 GPS 时空基准保持一致。

RAIM 算法的主要内容如下:

1) 保护水平计算。RAIM 算法的可用性通过计算导航用户自身的保护水平(protection level, PL)进行判断。根据定位误差方向可分为水平保护级(horizontal protection level, HPL)和垂直保护级(vertical protection level, VPL), 计算如下:

$$\begin{cases} H_P = \delta H_{\max} \times \sigma_{\text{obs\_noise}} \times \sqrt{\lambda} \\ V_P = \delta V_{\max} \times \sigma_{\text{obs\_noise}} \times \sqrt{\lambda} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $H_P$ 、 $V_P$  分别表示 HPL、VPL;  $\delta H_{\max}$  和  $\delta V_{\max}$  分别为每颗卫星对应的水平精度因子及垂直精度因子变化的最大值;  $\sigma_{\text{obs\_noise}}$  为先验观测噪声均方根;  $\lambda$  为非中心化参数, 可通过下式求得:

$$\int_0^{T^2} f_{\chi^2_{(n-m-3,\lambda)}}(x) dx = P_{md} \quad (7)$$

式中,  $T$  为统计量的检验阈值, 可由误警率确定;  $P_{md}$  为漏警率。

当 HPL 小于水平告警限值(horizontal alert level, HAL), 且 VPL 小于垂直告警限值(vertical alert level, VAL)时, 则认为 RAIM 算法可用。

2) 故障检测及识别。在 RAIM 算法可用的前提下, 故障检测将验后单位权中误差  $\hat{\sigma}$  与故障检测阈值  $\sigma_T$  进行比较。若  $\hat{\sigma} > \sigma_T$ , 表明当前历元存在故障卫星, 要进行故障识别及剔除。 $\sigma_T$  计算如下:

$$\sigma_T = \sigma_{\text{obs\_noise}} \times T / \sqrt{n - m - 3} \quad (8)$$

采用巴尔达数据探测法识别故障卫星, 通过伪距残差向量  $v$  构造统计量  $d_i$ ,  $d_i$  计算如下:

$$d_i = \frac{|v_i|}{\sigma_{\text{obs\_noise}} \times \sqrt{Q_{v_i}}} \quad (9)$$

将误警率  $P_{fa}$  平均分配到  $n$  颗卫星, 并借助标准正态分布的概率密度函数, 通过下式求得统计量  $d_i$  的检验阈值  $T_d$ :

$$P(d_i > T_d) = \int_{T_d}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = P_{fa}/2n \quad (10)$$

若  $d_i > T_d$ , 则表明该历元的第  $i$  颗卫星存在故障, 识别并剔除故障卫星。

## 2 低轨星座及观测值仿真

目前, 大多数低轨星座尚处于方案论证或系统建设阶段, 缺少低轨卫星的实测导航数据<sup>[24]</sup>。因此, 本文将模拟地面监测站的低轨卫星观测数据用于后续低轨卫星增强下的 BDS RAIM 性能分析。

### 2.1 星座仿真

本文所设计的低轨星座采用的是 Walker 构型, Walker 星座由轨道高度和轨道倾角均相同的圆轨道卫星组成, 星座中所有轨道面均匀分布, 同一个轨道面内卫星均匀分布, 且不同轨道面间卫星的相位保持一定的相对关系<sup>[25]</sup>。Walker 星座构型可由参数组  $N/P/F$  表示, 其中,  $N$  为星座中卫星总数,  $P$  为轨道面个数,  $F$  为星间相位因子。

本文基于高轨道倾角、中轨道倾角和混合轨道倾角 3 种典型的低轨星座, 系统评估了低轨星座增强下的 BDS RAIM 性能。在卫星数量上采用 80 颗、120 颗、168 颗 3 种方案, 其中 80 颗卫星方案为文献[26]中提出的高轨道倾角星座, 120 颗为微厘空间采用的卫星数<sup>[19]</sup>, 168 颗是浙江时空道宇科技有限公司计划采用的卫星总数<sup>[27]</sup>。在卫星轨道高度方面, 与目前大多数商业公司采用的轨道高度 800 km 相近。在卫星轨道倾角上, 由于全球变暖导致夏季海冰消融, 北冰洋地区航海贸易日渐繁荣, 且极地航线航程短, 节约燃油, 但对完好性要求较高<sup>[28]</sup>。因此, 除中倾角星座仅采用中轨道倾角外, 其他两种方案均包含高轨道倾角的低轨卫星, 以满足高纬地区的完好性需求。表 1 为低轨星座的参数配置, 低轨星座三维空间构型如图 1 所示。

### 2.2 观测值模拟

地面监测站的非差伪距和载波相位观测值仿真公式如下:

$$P_{r,j}^s = \rho_{r,j}^s + t_r - t^s + T_r^s + I_{r,j}^s + b_{r,j} - b_j^s + e_{r,j}^{s,p} \quad (11)$$

表 1 低轨星座设计参数

Tab.1 Parameters of Low Earth Orbit Constellation Design

星座参数	设置		
	高轨道倾角星座(80 颗)	中轨道倾角星座(120 颗)	混合轨道倾角星座(168 颗)
轨道类型	LEO	LEO	LEO
卫星数/颗	80	120	132
星座构型	Walker 80/5/1	Walker 120/12/0	Walker 132/12/1
轨道倾角/(°)	78	55	50
轨道高度/km	800	800	800



图 1 低轨星座三维空间构型

Fig.1 3D Configuration of Low Earth Orbit Constellations

$$L_{r,j}^s = \rho_{r,j}^s + t_r + t^s + T_r^s - I_{r,j}^s + \lambda_j N_{r,j}^s + B_{r,j}^s - B_j^s + \epsilon_{r,j}^{s,l} \quad (12)$$

式中,  $s$ 、 $r$  和  $j$  分别代表卫星、接收机和频段号;  $P_{r,j}^s$  和  $L_{r,j}^s$  分别是伪距和载波相位观测值;  $\rho_{r,j}^s$  为卫星相位中心和接收机天线之间的几何距离;  $t^s$  和  $t_r$  分别为卫星钟差和接收机钟差;  $I_{r,j}^s$  和  $T_r^s$  分别为接收机至卫星视线方向的电离层和对流层延迟;  $b_{r,j}$  和  $b_j^s$  分别对应接收机和卫星的码硬件延迟;  $\lambda_j$  为频率  $j$  对应的载波波长;  $N_{r,j}^s$  为整周模糊度;  $B_{r,j}^s$  和  $B_j^s$  分别对应接收机和卫星的相位延迟;  $\epsilon_{r,j}^{s,p}$  和  $\epsilon_{r,j}^{s,l}$  分别对应伪距和载波的观测噪声。

低轨卫星观测值主要是计算式(11)和式(12)中的右项之和。几何距离为:

$$\rho = \sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2} \quad (13)$$

式中,  $(X^s, Y^s, Z^s)$ 、 $(X_r, Y_r, Z_r)$  分别为卫星和测站的坐标, 通过卫星工具包(satellite tool kit, STK)导出卫星坐标, 测站坐标从国际 GNSS 服务(international GNSS service, IGS)获得, 在计算几何距离的过程中, 要考虑天线相位中心偏差(phase center offset, PCO)和天线相位中心变化(phase center variation, PCV)改正, 对于低轨卫星, 此项改正在此设为零。接收机钟差采用真实数据多系统精密单点定位(precise point positioning, PPP)估计的结果仿真, 卫星钟差根据卫星号(pseudo random noise, PRN)来仿真, 对于低轨卫星, 则假设其与现存卫星的 PRN 相对应。对流层延迟仿真通过 Saastamoinen 及全球映射函数

(global mapping function, GMF) 模型得到。本文采用的是双频消电离层组合, 为简化仿真操作, 未顾及电离层对观测的影响。模糊度参数对每颗卫星的每个频率用一个不同的整数进行模拟<sup>[29]</sup>。码偏差基于多系统码偏差文件仿真得到。为使模拟观测数据更符合真实情况, 要对伪距观测噪声  $e$  和载波相位噪声  $\epsilon$  进行模拟, 拟采用均值为零、标准差与高度角相关的高斯噪声进行仿真<sup>[24]</sup>, 天顶方向的伪距噪声设为 1 m, 相位噪声设为 5 mm。伪距观测值噪声模拟结果见图 2。

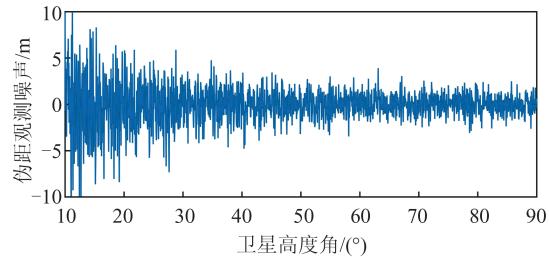


图 2 伪距观测噪声模拟情况

Fig.2 Simulation of Pseudorange Observation Noise

### 3 算例与分析

实验数据为 2020 年第 323 天的广播星历、9 个 MGEX (multi-GNSS experiment) 测站的 BDS 观测数据及低轨卫星仿真数据, 观测数据的采样间隔为 30 s, 截止高度角为 5°, 漏警率  $P_{md}$  为  $1 \times 10^{-3}$ , 误警率  $P_{fa}$  为  $1 \times 10^{-5}$ , 先验观测噪声均方根  $\sigma_{obs\_noise}$  设为 6 m, 其他参数由 NPA 阶段给定。为更真实地反映低轨导航增强的效果, BDS 采用实测数据, 实验中不区分北斗二号和北斗三号。此外, 本文设计的 4 种实验方案为单 BDS、基于 80 颗低轨卫星增强 BDS(简称 BDS+80LEO)、基于 120 颗低轨卫星增强 BDS(简称 BDS+120LEO) 和基于 168 颗低轨卫星增强 BDS(简称 BDS+168LEO)。MGEX 测站分布如图 3 所示。实验分析的内容包括:

1) 分析 3 种典型低轨星座在全球范围内对可

见卫星数的分布情况;

2)利用广播星历及低轨卫星轨道数据来仿真低轨卫星增强下NPA阶段的RAIM可用性,并从不同纬度区域来评估3种典型低轨星座对RAIM可用性的增强效果;

3)基于改善幅度最优的低轨星座来研究其对RAIM故障检测的影响。

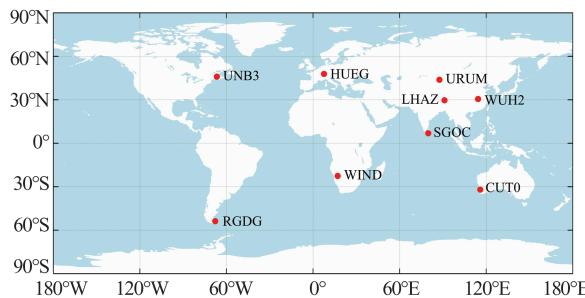


图3 MGEX测站分布图

Fig.3 Distribution of MGEX Stations

### 3.1 可见卫星数分析

由于RAIM算法取决于可见卫星数及导航用户与卫星间的几何构型<sup>[15]</sup>,因此,本文分析低轨星座加入对可见卫星数的增强效果,BDS及3种典型低轨星座的全球可见卫星数分布见图4。

从图4可以看出,由于BDS在亚太地区部署一定数量的GEO和IGSO卫星,亚太地区较其他地区可见卫星数多,其平均可见卫星数多达25颗。对于低轨星座而言,高轨道倾角星座采用单

一轨道倾角,高纬地区的平均可见卫星数在8颗左右,而中、低纬地区的平均可见卫星数仅3颗左右,整体呈现从两极向赤道递减的趋势。与高轨道倾角星座相对应的中轨道倾角星座也采用单一轨道倾角,中、低纬区域低轨卫星的可见数显著提升,高纬地区增幅较小。混合轨道倾角星座的特点是采用不同轨道倾角组成异构星座,其中有36颗低轨卫星采用85°的轨道倾角,与中轨道倾角星座相比,能更好地覆盖高纬地区。综上所述,由不同轨道倾角组成的异构星座<sup>[30]</sup>可较好地弥补可视卫星在空间分辨率上的缺陷,以较好地覆盖全球。

### 3.2 低轨星座增强下的RAIM可用性分析

在分析低轨星座对可见卫星数增强的基础上,进一步研究基于低轨星座增强的BDS RAIM可用性。本次实验按 $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ 的格网点间隔对全球进行划分,为较好地评价RAIM算法的可用性效果,在此引入评价指标 $P_{\text{coverage}}$ ,是指在全球范围内,民航用户在NPA阶段满足RAIM算法可用的格网点占比,计算如下:

$$P_{\text{coverage}} = \frac{n}{N} \quad (14)$$

式中,n为 $\text{HPL} \ll \text{HAL}$ 且 $\text{VPL} \ll \text{VAL}$ 的格网点;N为格网点总数。

在全球范围内,单BDS和BDS+LEO的RAIM可用性分布如图5所示。

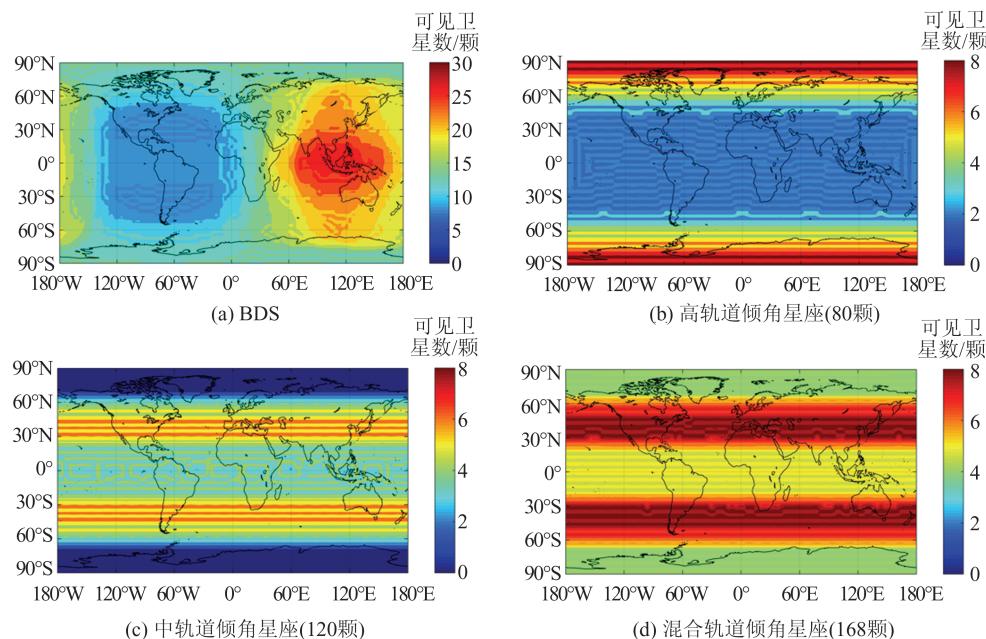


图4 BDS及低轨星座的全球可见卫星数分布图

Fig.4 Global Distribution of Numbers of Visible Satellites of BDS and the Designed Low Earth Orbit Constellations

为更好地定量分析低轨星座在不同纬度区域对NPA阶段RAIM可用性的贡献,将全球划分为低、中和高纬地区,其中,南/北纬60°至南/北纬90°为高纬地区,南/北纬30°至南/北纬60°为中纬地区,南/北纬30°之间为低纬地区。不同组合系统在不同区域内的RAIM可用性统计信息见表2。

从图5(a)可以看出,在全球范围内,BDS在NPA阶段的RAIM可用性仅为56.9%,由于RAIM可用性在很大程度上取决于可见卫星数,东半球的平均RAIM可用性均在80%以上,西半球的RAIM平均可用性仅为50%左右,东半球的RAIM可用性明显优于西半球。由图5可知,在全球范围内,加入高轨道倾角、中轨道倾角和混合轨道倾角3种典型的低轨星座后,对应NPA阶

段的RAIM可用性分别提升了30.5%、29.0%和41.0%,即3种典型低轨星座增强下的RAIM可用性效果均很可观,其中,在全球范围内,混合轨道倾角星座增强下的RAIM可用性改善幅度最大。从图4、图5和表2可以看出,在高纬地区,高轨道倾角星座和混合轨道倾角星座的覆盖效果较好,改善了BDS在高纬区域覆盖效果较差的现象,其对应的NPA阶段的RAIM可用性均可达到100%,相比于BDS的RAIM可用性,约提升37.1%,但考虑到星座部署成本,高轨道倾角星座增强下的RAIM可用性效果明显优于混合轨道倾角和中轨道倾角星座。而在中、低纬地区,中轨道倾角星座对应的NPA阶段的RAIM可用性均在99%以上,显著优于混合轨道倾角和高轨道倾角星座。

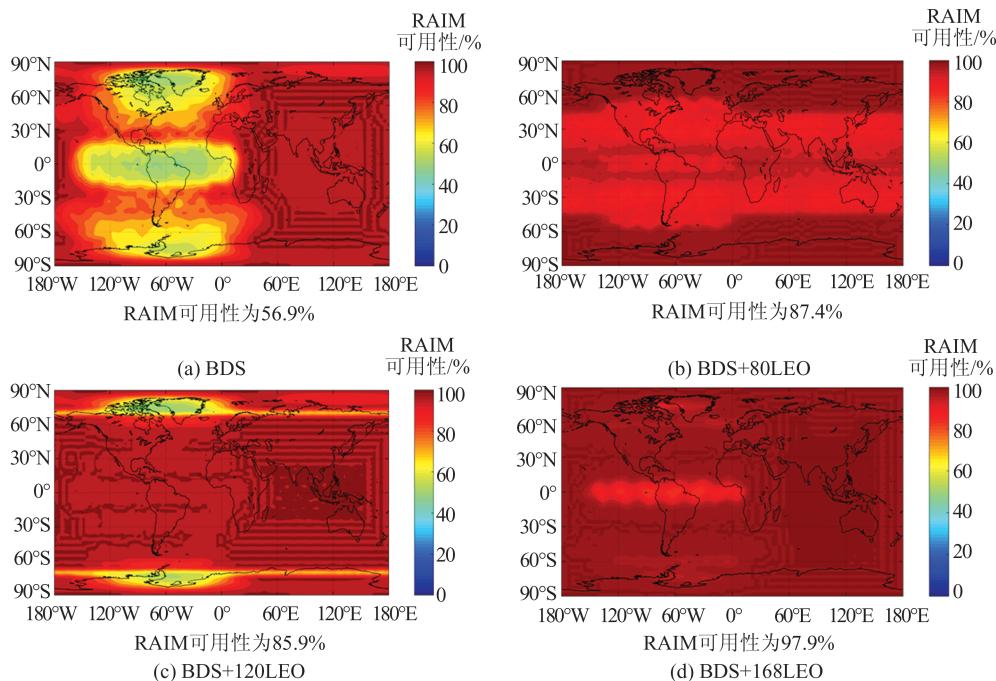


图5 不同组合系统的RAIM可用性全球分布图

Fig.5 Global Distribution of RAIM Availability of Different Combination Systems

表2 不同组合系统的RAIM可用性

Tab.2 RAIM Availability Statistics of Different Combination Systems

方案	区域	NPA阶段的RAIM可用性/%(HAL=556 m, VAL=220 m)		方案	区域	NPA阶段的RAIM可用性/%(HAL=556 m, VAL=220 m)	
		高纬地区	中纬地区			高纬地区	中纬地区
BDS	高纬地区	62.92		BDS+120LEO	高纬地区	60.97	
	中纬地区	52.55			中纬地区	99.29	
	低纬地区	55.49			低纬地区	100	
BDS+80LEO	高纬地区	100		BDS+168LEO	高纬地区	100	
	中纬地区	75.51			中纬地区	100	
	低纬地区	82.37			低纬地区	93.82	

### 3.3 低轨星座增强下的RAIM故障检测效果

为较好地分析低轨卫星的加入对RAIM故障检测的影响,此处仅采用混合轨道倾角星座进行测试。鉴于当前安全形势和BDS地面监测站部署的实际情况,本文评估了仅依靠国内监测站开展相关RAIM分析的可行性。在实验中,间隔10个历元对参与定位的某颗卫星人为添加故障,故障

卫星编号不确定,以此来模拟卫星的随机故障情形,偏差从0 m递增到200 m,取10 m作为步长,利用最小二乘RAIM残差法分别对BDS和BDS+LEO进行故障检测,并对其结果进行统计。因图幅限制,图6仅展示了RGDG及WUH2测站的故障检测结果,其他测站的故障检测性能统计信息见表3。

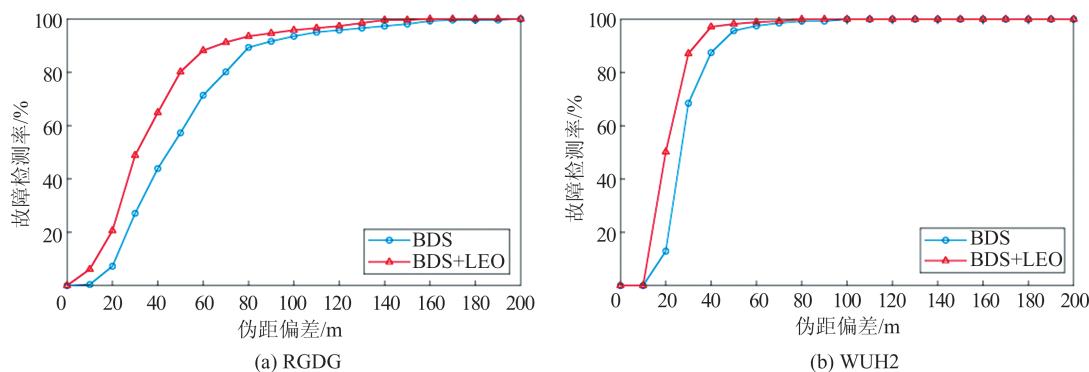


图6 不同组合系统的故障检测率对比图

Fig.6 Comparison of Fault Detection Rates of Different Combination Systems

表3 RAIM算法检测到的最小伪距偏差(故障检测率=100%)/m

Tab.3 The Smallest Pseudorange Deviation Detected by the RAIM Algorithm (Fault Detection Ratio=100%)/m

方案	亚太区域测站					非亚太区域测站			
	CUT0	LHAZ	SGOC	URUM	WUH2	HUEG	RGDG	UNB3	WIND
BDS	130	130	110	140	100	200	200	180	190
BDS+LEO	110	110	90	110	80	150	160	120	150

根据图6,在单BDS的情形下,当伪距偏差为60 m时,WUH2测站的故障检测率为97.5%,而RGDG测站故障检测率仅为71.4%,RAIM算法的故障检测率随着伪距偏差的增大而提高,在WUH2和RGDG测站分别添加100 m和200 m伪距偏差时,RAIM算法才能检测出全部故障。在加入低轨卫星后,WUH2和RGDG测站的故障检测效果均有一定程度的改善,其故障检测率分别在80 m和160 m处达到100%。结果表明:单BDS下,WUH2测站的RAIM算法能检测出较小的故障,即WUH2测站的RAIM故障检测效果优于RGDG测站。这是因为RAIM算法基于冗余观测量来检测故障,并与导航用户和卫星之间的几何分布有关,WUH2测站相比于RGDG测站具有较多的可见卫星和较小的精度衰减因子。同时,低轨卫星的加入在一定程度上改善了用户与卫星的几何构型。

非亚太地区测站提升显著,RAIM算法可检测到的最小伪距偏差较之前平均减小47.5 m,这与RAIM算法及导航用户和卫星之间的几何构

型有关,单BDS下,亚太地区测站几何分布已较好,加入低轨卫星后,其几何构型改善效果不明显,从而使亚太地区测站的故障检测效果相较于非亚太地区测站改善幅度较低,其对应的RAIM算法可检测到的最小伪距偏差较之前平均减小22 m。总之,RAIM算法取决于可见卫星数及几何构型,低轨卫星加入后,RAIM算法的故障检测效果均有不同程度的改善,所选9个MGEX测站对应低轨星座增强下RAIM可检测到的最小伪距偏差较之前平均减小33.3 m。

## 4 结语

GNSS完好性监测相关领域的研究已成为国内外研究热点之一,低轨卫星的快速发展为GNSS完好性研究提供了新契机。本文对高轨道倾角(80颗)、中轨道倾角(120颗)和混合轨道倾角(168颗)3种典型的低轨星座进行仿真,评估了基于低轨星座增强下的RAIM性能,得出如下结论:

1)3种低轨卫星在不同纬度区域的RAIM增强效果存在显著差异,对于高纬区域,高轨道倾

角增强下的 RAIM 可用性效果明显优于中轨道倾角和混合轨道倾角星座,而在中、低纬区域,中轨道倾角星座增强下的 RAIM 可用性明显优于高轨道倾角和混合轨道倾角星座。

2)3 种典型低轨星座增强下的 RAIM 可用性效果均很可观。在全球范围内,加入高轨道倾角、中轨道倾角和混合轨道倾角 3 种典型的低轨卫星后,NPA 阶段的 RAIM 可用性分别提升 30.5%、29.0% 和 41.0%,其中,由不同轨道倾角组成的混合星座可较好地弥补可视卫星在空间分辨率上的缺陷,以达到较好的全球覆盖效果。

3)在 RAIM 故障检测方面,由于 RAIM 算法取决于可见卫星数及几何构型,相较于非亚太测站,亚太测站可检测出小故障,但在低轨卫星加入后,非亚太测站的改善幅度优于亚太测站,所选的 9 个 MGEX 测站对应低轨星座增强下的 RAIM 可检测到的最小伪距偏差较之前平均减小 33.3 m。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Chen Jinping. Research of GPS Integrity Augmentation[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2001. (陈金平. GPS 完整性增强研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2001.)
- [3] Zhan Xingqun, Su Xianli. GNSS Integrity Monitoring and Assisted Performance Enhancement Technology[M]. Beijing: Science Press, 2016. (战兴群, 苏先礼. GNSS 完好性监测及辅助性能增强技术[M]. 北京: 科学出版社, 2016.)
- [4] Wang Ershen, Yang Di, Hong Chen, et al. Research Progress of ARAIM Technology[J]. *Telecommunications Science*, 2019, 35 (8): 128–138. (王尔申, 杨迪, 宏晨, 等. ARAIM 技术研究进展[J]. 电信科学, 2019, 35(8): 128–138.)
- [5] Yang Y X, Xu J Y. GNSS Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM) Algorithm Based on Robust Estimation[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2016, 7(2): 117–123.
- [6] Luo Silong. Research on Theory, Performance Assessment and Optimization of GNSS User-Based Integrity Monitoring Algorithm[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019. (罗思龙. GNSS 用户级完好性监测算法理论、性能评估及优化研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.)
- [7] Zhou Yan. Press Conference for the Completion of BeiDou-3 Global Satellite Navigation System [EB/OL]. [2021-10-19]. [http://www.beidou.gov.cn/yw/xwzx/202008/t20200803\\_20935.html](http://www.beidou.gov.cn/yw/xwzx/202008/t20200803_20935.html). (周雁. 北斗三号全球导航卫星系统建成开通新闻发布会召开[EB/OL]. [2021-10-19]. [http://www.beidou.gov.cn/yw/xwzx/202008/t20200803\\_20935.html](http://www.beidou.gov.cn/yw/xwzx/202008/t20200803_20935.html).)
- [8] GPS-Galileo Working Group C ARAIM Technical Subgroup Milestone 3 Report [EB/OL]. [2021-10-19]. <https://www.gps.gov/policy/cooperation/europe/2016/working-group-c/ARAIM-milestone-3-report.pdf>.
- [9] Liu Yi, Gu Shouzhou, Bian Shaofeng, et al. A New RAIM Algorithm Based on the Density Center of Observed Dataset[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(12): 1900–1906. (刘一, 谷守周, 边少峰, 等. 一种基于观测数据集密度中心的新型 RAIM 算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(12): 1900–1906.)
- [10] Zhang Yabin, Wang Li, Fan Lihong, et al. Detection and Identification of RAIM Fault Based on Inter-Signal Correction Parameters[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2018, 35(1): 49–54. (张亚彬, 王利, 范丽红, 等. ISC 参数改正的 RAIM 故障检测和识别[J]. 测绘科学技术学报, 2018, 35(1): 49–54.)
- [11] Wang Yudong, Xu Chengdong, Zheng Xue'en. An RAIM Algorithm Based on Slope-Weighted Least Square Method[J]. *Electronics Optics & Control*, 2020, 27(3): 13–16. (王煜东, 许承东, 郑学恩. 基于斜率加权的最小二乘 RAIM 算法研究[J]. 电光与控制, 2020, 27(3): 13–16.)
- [12] Han Qingqing, Wang Li, Luo Silong, et al. An Improved Hatch Filtering Smoothing Algorithm and RAIM Performance Analysis[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2019, 36(3): 250–256. (韩清清, 王利, 罗思龙, 等. 改进的 Hatch 滤波平滑算法及 RAIM 性能分析[J]. 测绘科学技术学报, 2019, 36(3): 250–256.)
- [13] Zhao Ang, Yang Yuanxi, Xu Yangyin, et al. A Method of Protection Level Reconstruction Based on Robust Estimation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46 (1): 96–102. (赵昂, 杨元喜, 许扬胤, 等. 一种使用抗差估计的保护水平重构方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(1): 96–102.)
- [14] Han Qingqing, Wang Li, Luo Silong, et al. Optimal Allocation of Risk Probability Based on ARAIM Algorithm[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(12): 1751–1761. (韩清清, 王利,

- 罗思龙, 等. ARAIM 算法的风险概率优化分配 [J]. 测绘学报, 2021, 50(12): 1751-1761.)
- [15] Wang Wenbo, Zhang Pengfei, Xu Chendong, et al. The Research on Parity Vector RAIM Algorithm Based on BDS/GPS Multi-constellation [C]// The 7th China Satellite Navigation Conference, Changsha, China, 2016. (王文博, 张鹏飞, 徐承东, 等. 基于 BDS/GPS 的奇偶矢量 RAIM 算法研究 [C]// 第七届中国卫星导航年会, 中国, 长沙, 2016.)
- [16] Tian Yunqing, Wang Li, Shu Bao, et al. Evaluation of the Availability of BDS ARAIM [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(7): 879-890. (田云青, 王利, 舒宝, 等. 北斗系统 ARAIM 可用性评估 [J]. 测绘学报, 2021, 50(7): 879-890.)
- [17] Wang Lei, Chen Ruizhi, Li Deren, et al. Quality Assessment of the LEO Navigation Augmentation Signals from Luojia-1A Satellite [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2191-2196. (王磊, 陈锐志, 李德仁, 等. 珞珈一号低轨卫星导航增强系统信号质量评估 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2191-2196.)
- [18] Lu Yun, Zhang Gong, Shen Jianhua, et al. Analysis on the Improvement of Satellite Navigation System Capability by LEO Enhanced Constellation [J]. *Satellite Application*, 2020(2): 49-54. (卢鋆, 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.)
- [19] Zhang Xiaohong, Ma Fujian. Review of the Development of LEO Navigation-Augmented GNSS [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(9): 1073-1087. (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.)
- [20] Wang Wenbo, Xu Ying. Analysis of RAIM Availability Based on LEO-Augmented BDS [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2020, 40(11): 1158-1163. (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.)
- [21] Lu Guangyi, Zhao Chunmei, Shao Yinxing. Low-Track Enhanced GNSS Positioning Fault Detection Based on RAIM Algorithm [C]// The 11th China Satellite Navigation Conference, Chengdu, China, 2020. (卢广毅, 赵春梅, 邵银星. 基于 RAIM 算法的低轨增强 GNSS 定位故障检测 [C]//第十一届中国卫星导航年会, 中国, 成都, 2020.)
- [22] SpaceX. To Build 4 000 Broadband Satellites in Seattle [EB/OL]. [2021-10-19]. <https://spacenews.com/spacex-opening-seattle-plant-to-build-4000-broadband-satellites/>.
- [23] Meng Yansong, Bian Lang, Wang Ying, et al. Global Navigation Augmentation System Based on Hongyan Satellite Constellation [J]. *Space International*, 2018(10): 20-27. (蒙艳松, 边朗, 王瑛, 等. 基于“鸿雁”星座的全球导航增强系统 [J]. 国际太空, 2018(10): 20-27.)
- [24] Ma Fujian. Research on the Key Technologies for GNSS Precise Positioning Augmented with LEO Constellation [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018. (马福建. 低轨星座增强 GNSS 精密定位关键技术研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2018.)
- [25] Chen Yu, Zhao Lingfeng, Liu Huijie, et al. Analysis of Configuration and Maintenance Strategy of LEO Walker Constellation [J]. *Journal of Astronautics*, 2019, 40(11): 1296-1303. (陈雨, 赵灵峰, 刘会杰, 等. 低轨 Walker 星座构型演化及维持策略分析 [J]. 宇航学报, 2019, 40(11): 1296-1303.)
- [26] Guan Meiqian, Jiao Wenhui, Jia Xiaolin, et al. LEO Satellite Constellation Design Based on Navigation Augmentation [C]// The 9th China Satellite Navigation Conference, Harbin, China, 2018. (关梅倩, 焦文海, 贾小林, 等. 基于导航增强的低轨卫星星座设计 [C]//第九届中国卫星导航年会, 中国, 哈尔滨, 2018.)
- [27] Shen Yefeng, Zhang Yi. Design for LEO Satellite Navigation Augmentation System Based on Integrated Communication and Navigation [C]//The 11th China Satellite Navigation Conference, Chengdu, China, 2020. (沈叶锋, 张一. 基于通导一体化的低轨卫星导航增强系统设计 [C]. 第十一届中国卫星导航年会, 中国, 成都, 2020.)
- [28] Overland J E, Wang M Y. When will the Summer Arctic be Nearly Sea Ice Free? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(10): 2097-2101.
- [29] Li X X, Ma F J, Li X, et al. LEO Constellation-Augmented Multi-GNSS for Rapid PPP Convergence [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(5): 749-764.
- [30] 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.