



引文格式:柳景斌,毛井锋,吕海霞,等.BDS/GPS组合定位可靠性分析与粗差探测研究[J].武汉大学学报(信息科学版), 2023,48(2):214-223.DOI:10.13203/j.whugis20210522

Citation: LIU Jingbin, MAO Jingfeng, LÜ Haixia, et al. Reliability Analysis and Gross Error Detection of BDS/GPS Combined Positioning[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(2): 214-223. DOI: 10.13203/j.whugis20210522

BDS/GPS组合定位可靠性分析与粗差探测研究

柳景斌¹ 毛井锋¹ 吕海霞² 古富强³ 李航^{1,4}

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 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

3 重庆大学计算机学院,重庆,400044

4 广州中海达卫星导航技术股份有限公司,广东 广州,511400

摘要:全球导航卫星系统多系统融合定位是未来无人驾驶等智能应用的关键基础设施,无人驾驶等智能应用经常需要面对城市等复杂环境,由于受到建筑物的遮挡与多路径的影响,观测值出现误差的概率也在不断增加,因此分析多系统融合定位可靠性并进行粗差的探测识别,确保定位结果准确可靠具有重要意义。基于可靠性理论与假设检验粗差探测方法,采用MGEX(multi-GNSS experiment)测站数据进行可靠性评估与粗差探测实验。实验结果表明,BDS(BeiDou navigation satellite system)/GPS(global positioning system)组合下,双频IF(ionospheric-free)组合定位解算的最小可探测粗差与最大不可探测粗差对定位的影响值较单BDS解算分别下降了7.105 m、22.368 m,双系统较单系统可靠性提升明显。BDS/GPS组合下,双频IF组合定位解算的最小可探测粗差与最大不可探测粗差对定位的影响向量较单频解算结果下降了4.105 m、1.621 m,双频数据较单频数据的可靠性更优。基于可靠性评估结果开展了模拟粗差探测实验,结果表明,双频观测值包含单粗差时,BDS粗差探测成功率与识别率分别为99.96%、90.56%;BDS/GPS组合粗差探测成功率与识别率分别为99.96%、99.05%。包含双粗差时,BDS粗差探测成功率与识别率分别为100%、65.67%;BDS/GPS组合粗差探测成功率与识别率分别为100%、71.91%。结果表明多系统组合定位能够更好地探测和识别粗差观测值。

关键词:北斗三号全球导航卫星系统;多频多系统;可靠性评估;粗差探测;融合定位

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2022-01-12

DOI:10.13203/j.whugis20210522

文章编号:1671-8860(2023)02-0214-10

Reliability Analysis and Gross Error Detection of BDS/GPS Combined Positioning

LIU Jingbin¹ MAO Jingfeng¹ LÜ Haixia² GU Fuqiang³ LI Hang^{1,4}

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

2 GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 School of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China

4 Guangzhou Zhonghaida Satellite Navigation Technology Co. Ltd, Guangzhou 511400, China

Abstract: Objectives: The continuous improvement and progress of the global navigation satellite system (GNSS) provides a strong foundation for multi-system fusion localization, and with the increase in the number of satellites deployed for multi-system positioning, the probability of gross observational errors is also constantly increasing. Therefore, it is of great significance in satellite positioning to correctly evaluate the quality of the observations and eliminate the errors. **Method:** Based on reliability theory and the gross error detection method, the minimum detective bias (MDB) and minimum detective error (MDE) are calculated to analyze reliability of multi-GNSS experiment (MGEX) data. Based on these calculation results, we designed and implemented gross error detection experiments. **Results:** The MDB and MDE values for the

基金项目:国家自然科学基金(41874031,42111530064);国家重点研发计划(2021YFB2501102);武汉市知识创新专项基础研究项目(2022010801010109)。

第一作者:柳景斌,博士,教授,博士生导师,主要从事多源室内外无缝融合定位研究。ljb04@163.com

通讯作者:毛井锋,硕士生,主要研究多源融合定位。15827289218@163.com

dual-frequency solution in fused BDS (BeiDou navigation satellite system)/GPS (global positioning system) positioning were smaller than the value in the solution from BDS alone, 7.105 m and 22.368 m respectively. Unlike the single-frequency solution, the dual-frequency BDS/GPS combination reduced the MDB by 4.105 m and the MDE by 1.621 m. When adding single gross error to the double-frequency BDS observations, the gross error detection success rate was 99.96% and gross error recognition rate was 90.56%. For the combined system, these values were 99.96% and 99.05% respectively. When adding double gross errors to BDS observations, the gross error detection success rate were 100% and gross error recognition rate was 65.67%, while the gross error detection success for the combined system was 100%, and 71.91% respectively. **Conclusions:** The MDB and MDE values for multi-system and multi-frequency positioning solutions decline. Furthermore, the gross error recognition rate for the multi-system positioning is higher than a single system alone.

Key words: BeiDou-3 global navigation satellite system; multi-frequency and multi-system; reliability analysis; gross error detection; fusion positioning

全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)是未来无人驾驶等智能应用的时空关键基础设施。GNSS 卫星定位具有全天候、全天时、高精度等优势,然而在城市等复杂环境中卫星信号易受建筑物遮挡或反射,定位可靠性便成为了智能系统的一个关键问题。北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)是中国自主研发,独立运行的卫星导航系统,目前已完成全球卫星导航系统的建设。北斗全球卫星导航系统,即 BDS-3 系统由 5 颗地球静止轨道卫星(geostationary earth orbit, GEO)、5 颗倾斜同步轨道卫星(inclined geosynchronous orbit, IGSO)和 24 颗中圆轨道卫星(medium earth orbit, MEO)组成^[1]。BDS-3 系统于 2017-05 开始发射组网卫星^[2],并于 2020-06 正式组网完成,随后开始面向全球提供完整的开放服务^[3-4]。BDS-3 的组网完成极大程度地提升了 BDS 的覆盖范围与服务能力^[5]。目前 BDS-2 与 BDS-3 同时在轨提供服务,截至 2021-04, BDS 在轨 61 颗卫星,其中 56 颗卫星正常工作,另有 4 颗卫星在轨实验,1 颗卫星在轨测试。美国 GPS(global positioning system)的空间结构由 24 颗工作卫星及相应的备份卫星组成,2011-07, GPS 实现了对卫星星座的扩展,对 3 颗卫星进行重新定位和调整,由此实现了 24+3 的理想卫星星座构型,其覆盖范围和服务能力得到了进一步的扩大与增强,目前在轨运行卫星超过 30 颗。GNSS 系统组合定位可以提供更多的卫星定位数目及更好的卫星几何强度^[6],但在实现更高精度定位的同时,其受到诸如电离层、对流层、多路径等未精确修正误差^[7-8]的影响也随之增大,因此对 GNSS 数据的质量控制

提出了新的要求。

荷兰 Baarda^[9]于 1967—1968 年提出了测量系统的可靠性理论。他从单一备选假设出发,研究了平差系统发现单个模型误差能力及不可发现的模型误差对于平差结果的影响大小,前者被称为内部可靠性,后者则被称为外部可靠性。Teunissen^[10-11]和李德仁等^[12]都对该理论进行了深入研究和完善。可靠性研究对于测量系统的优化设计以及数据质量控制都具备极为重要的意义,在 GNSS 定位中,通过相应的可靠性理论分析,可以充分反映不同系统抗御模型误差的能力,更好地实现对于 GNSS 数据的评估。

可靠性理论分析为粗差探测提供了相应的理论基础,通过分析系统的内部可靠性与外部可靠性,可以得到理论上 GNSS 观测值中可探测误差的最小阈值,以及该误差对于定位结果的影响。可靠性体现了接收机自主完备性检测(receiver autonomous integrity monitoring, RAIM)和识别粗差的能力,而其中外部可靠性则体现了 RAIM 对于定位结果的保护程度,从而为实际的观测值误差剔除提供相应的判断标准。

粗差的检测和剔除是在 GNSS 的观测值域进行的统计假设检验,与卫星数量与卫星几何结构相关。而卫星数量增多则同样增加了卫星发生故障的概率,杨元喜等^[13]利用稳健估计理论提出了接收机故障探测和识别算法;Sun^[14]将深度神经网络用于接收机自主完备性检测;韩清清^[15]使用了改进的 Hatch 滤波算法用于 RAIM 算法中。此外,诸如距离比较法、最小二乘法和奇偶矢量法等都有较为深入和广泛的研究^[16-21]。

上述研究内容中,或是因为研究时间较早,

未能较好地评估和测试到BDS-3卫星,或是并未从可靠性理论出发,从理论上分析粗差探测的限值并依此进行实验。考虑到MGEX(multi-GNSS experiment)测站数据具备长时间、连续的特点,更加有利于对GNSS数据进行较长时间的可靠性评估并分析其结果在长时间状态下的稳定性,本文利用可靠性理论与基于 χ^2 检验的粗差探测方法^[12,22-24],使用MGEX测站观测数据进行了BDS以及BDS/GPS组合定位的可靠性评估,并基于评估结果模拟单粗差及双粗差,进行了粗差探测与识别实验,比较不同场景下的粗差识别率。

1 可靠性计算与粗差探测方法

1.1 GNSS加权最小二乘估计数学模型

GNSS观测值的 Gauss-Markov 模型可以表示如下:

$$L = AX + \epsilon, \epsilon \sim N(0, \sigma_0^2 P^{-1}) \quad (1)$$

式中, A 为 $n \times u$ ($n - u > 1$) 列满秩设计阵; X 为 $u \times 1$ 维待估计参数向量, 可以表示为: $X = (x_r \ y_r \ z_r \ t_r)^T$, 在多系统组合定位中, 需要添加时间系统差异参数一同求解, 如采用 BDS 与 GPS 组合定位时, 需要增添一个 BDS 与 GPS 时间差异参数 $t_r = [t_{r, \text{GPS}} \ t_{r, \text{BDS-GPS}}]^T$; L 为 $n \times 1$ 维观测向量, n 即为参与定位的卫星数目总和; ϵ 为误差噪声向量; P 为观测权矩阵, 表达式为:

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

式中, σ_0 为单位权标准差, 取其值为 1 m; σ_i^2 为观测值误差方差, 一般由卫星星历和钟差误差方差、电离层延迟误差方差、对流层延迟误差方差等组合相加得到, 给出相应计算公式如下^[24-25]:

$$\sigma_i^2 = \sigma_{\text{URA}, i}^2 + \sigma_{\text{ion}, i}^2 + \sigma_{\text{trop}, i}^2 + \sigma_{\text{user}, i}^2 \quad (3)$$

式中, $\sigma_{\text{user}, i}^2$ 为包括多路径效应、测距码噪声等接收机端的综合误差; $\sigma_{\text{URA}, i}$ 为用户距离误差(user range accuracy, URA), 可以通过解码导航电文获得, 在 GPS、BDS-3 和 Galileo (Galileo satellite navigation system) 中, 该值一般为 2.4 m, 而在 GLONASS(global navigation satellite system) 中, 该值则为 5 m^[25]; $\sigma_{\text{ion}, i}$ 为电离层延迟误差的标准差:

$$\sigma_{\text{ion}, i} = F(\theta_i) \sigma_{\text{UIVE}, i} \quad (4)$$

式中, $\sigma_{\text{UIVE}, i}$ 为天顶方向的电离层改正标准差; θ_i 为对应卫星的高度角; $F(\theta_i)$ 则为对应的投影函数。当采用无电离层组合观测值进行定位解算

时, 可将 $\sigma_{\text{ion}, i}$ 设为 0; σ_{trop} 为对流层延迟改正标准差, 其建模公式如下^[26]:

$$\sigma_{\text{trop}, i} = \sigma_t \cdot m(\theta_i) \quad (5)$$

在实验计算中取 $\sigma_t = 0.12$ m, 相应 $m(\theta_i)$ 表示为^[26-27]:

$$m(\theta_i) = \frac{1.001}{\sqrt{0.002\ 001 + \sin^2(\theta_i)}} \quad (6)$$

$\sigma_{\text{user}, i}^2$ 相应可采用高度角模型进行建模:

$$\sigma_{\text{user}, i} \approx \sqrt{a^2 + b^2 / \sin^2(\theta_i)} \quad (7)$$

根据文献[28-29], 取经验值 $a = 0.004$ m, $b = 0.003$ m。

由最小二乘定理可知, 其对应最小二乘解为^[30]:

$$\hat{X} = (A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (8)$$

对应残差计算公式可以表示为:

$$V = A \hat{X} - L = (I - A(A^T P A)^{-1} A^T P) L \quad (9)$$

令 $(I - A(A^T P A)^{-1} A^T P) = S$, 则 S 被称为敏感性矩阵, 该矩阵反映了观测值与残差之间的影响关系^[24]。在观测值相互独立时, 观测值的协方差矩阵为对角矩阵, 则有:

$$\sigma_{v_i}^2 (\sigma_i^2)^{-1} = s_{ii} \quad (10)$$

式中, s_{ii} 是敏感矩阵对角线上的元素; σ_i 是观测值 L_i 的中误差; σ_{v_i} 是其对应残差的中误差。

敏感矩阵 S 是由卫星的几何强度以及观测值的方差阵所共同决定的, 其相应特性如下: S 是幂等对称矩阵, 其每一行元素的和都为 0; 其特征值为 0 或 1, 而矩阵的迹为观测系统的多余观测方程数, 即 $\text{trace}(S) = n - u$, 其中, u 为未知参数的个数; 而对角线上的元素 s_{ii} 是该观测值在总的多余观测数中所占的分量。当多余的观测值的个数大于等于 2 时, 便可以进行粗差的识别。

1.2 可靠性计算方法

系统可靠性主要通过内部可靠性与外部可靠性进行衡量。在一定的假设检验条件下, 将系统发现、区分不同误差的能力称为内部可靠性, 将不可发现、不可区分的误差对于定位结果的影响称为外部可靠性。内部可靠性衡量方式为能以一定的检验功效 β 通过显著性水平 α 的统计检验可发现粗差的下界值; 外部可靠性则通过不可发现、不可区分的误差对定位结果的影响向量长度来衡量^[12]。而 α 与 $1 - \beta$ 又可称为误警概率与漏检概率, 其对应取值可参考 GNSS 定位可靠性研究中的取值^[9,12,31-33], 通常在实验研究中可取误

警概率 $\alpha = 0.1\%$ 与漏检概率 $1 - \beta = 20\%$ 。

1.2.1 内部可靠性

在 GNSS 定位解算中, 在给出显著性水平 α 及检验功效 β 的前提下, 可以计算出每颗卫星观测值可探测出的最小粗差 MDB (minimum detectable biases), 具体公式如下^[24]:

$$\nabla_0 b_i = \frac{\delta}{\sqrt{\mathbf{e}_i^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{D}_v \mathbf{D}^{-1} \mathbf{e}_i}} \quad (11)$$

式中, $\nabla_0 b_i$ 即为最小可探测粗差; δ 为非中心化参数; \mathbf{D} 为观测值协方差矩阵; \mathbf{D}_v 为残差向量精度, 可由下式表示:

$$\mathbf{D}_v = \mathbf{D} - \mathbf{A}(\mathbf{A}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \quad (12)$$

式中, \mathbf{e}_i 为相应的模型向量。当某一观测值 L_i 中存在粗差时, 相应的模型向量表示如下:

$$\mathbf{e}_i = (0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0)_{1 \times n} \quad (13)$$

式中, n 为参与定位的卫星总数量, 在多系统融合定位中, 即为所有可观测卫星总数。

参数 δ 与误警概率 α 以及漏检概率 $1 - \beta$ 互为函数关系。本文取 $\alpha = 0.1\%$, $1 - \beta = 20\%$, 此时非中心化参数 $\delta \approx 4.13$ 。在部分关于生命安全的 GNSS 应用中会设定更小的误警概率与漏检概率以确保绝对的安全, 此时非中心化参数也会随之变大。

在 GNSS 定位数学模型中, 通常假设不同卫星的观测值之间相互独立, 于是式(11)简化为:

$$\nabla_0 b_i = \sigma_i \frac{\delta}{\sqrt{s_{ii}}} \quad (14)$$

在 GNSS 定位解算中, 在给出显著性水平 α 以及检验功效 β 的前提下, 可以通过上述公式计算出每颗卫星观测值可探测出的最小粗差。该粗差下界值是由误警概率 α 、漏检概率 $1 - \beta$ 、卫星的几何强度以及观测误差所共同决定的。而可以探测的粗差下界值 $\nabla_0 b_i$ 即可作为衡量系统的内部可靠性的指标。

1.2.2 外部可靠性

如果观测值 L_i 的粗差小于 $\nabla_0 b_i$, 在已定的误警概率 α 和漏检概率 $1 - \beta$ 下, 该粗差无法被检测到; 而未被探测到的粗差将会相应地影响到参数解结果。其对应影响可以表示为:

$$\Delta \hat{\mathbf{x}}_i = \begin{bmatrix} \Delta \hat{x} \\ \Delta \hat{y} \\ \Delta \hat{z} \\ \Delta \hat{c} \hat{t}_r \end{bmatrix} = (\mathbf{A}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{e}_i \nabla_0 b_i \quad (15)$$

式中, $\Delta \hat{\mathbf{x}}_i$ 也被称为影响向量。 $\Delta \hat{x}_i$ 的模便可作为

外部可靠性的衡量尺度 (minimum detectable error, MDE)^[31], 令 $(\mathbf{A}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T = \mathbf{B}$, 则影响向量的模可以表示为:

$$\|\Delta \hat{\mathbf{x}}_i\| = \left\| \begin{bmatrix} \Delta \hat{x} \\ \Delta \hat{y} \\ \Delta \hat{z} \\ \Delta \hat{c} \hat{t}_r \end{bmatrix} \right\| = \sqrt{\nabla_0 b_i \mathbf{e}_i^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{B} \mathbf{D}^{-1} \mathbf{e}_i \nabla_0 b_i} \quad (16)$$

1.3 粗差探测与识别方法

当观测值的随机模型均正确时, 可得到原假设:

$$H_0: E(\Delta) = 0, \text{ 即 } E(\mathbf{Z}) = \mathbf{H}\mathbf{X} \quad (17)$$

而当观测值不仅受到随机误差的影响, 同时还受到粗差的干扰时, 即可得到对应的备选假设:

$$H_a: E(\Delta) = b, b \neq 0, \text{ 即 } E(\mathbf{Z}) = \mathbf{H}\mathbf{X} + b \quad (18)$$

观测值误差可以通过敏感矩阵投影到残差上, 当观测误差服从期望值为 0 的高斯分布, 则 $\mathbf{V}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{V}$ 服从 δ 为 0、自由度为 $l - n$ 的 χ^2 分布, 而当观测值受到粗差干扰时, 相应的非中心化参数也不再为 0。故可将 $\mathbf{V}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{V}$ 作为统计量进行相应假设检验。在误警概率 α 已知时, 可以计算得到检验限值 $T_{1-\alpha}^2$ 。值得注意的是, 在计算检验限值时, 需要考虑到每个历元有 n 颗卫星, 存在 n 组观测值, 故相应公式为:

$$\alpha' = \alpha/n \quad (19)$$

当得到了对应的检验限值, 即可进行检验, 若:

$$\mathbf{V}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{V} < T_{1-\alpha'}^2 \quad (20)$$

则可以认为观测值中不存在粗差, 相反则认为观测值中存在粗差, 需要进行相应的剔除, 依次遍历排除单颗/双颗卫星, 直到遍历完成后剩余观测值所构成的 $\mathbf{V}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{V}$ 统计量小于限值, 且为遍历计算结果的最小值^[34-36]。

2 可靠性分析

2.1 可靠性分析数据

考虑到 MGEX 测站的观测数据具备时间长、连续性好, 一般情况下无遮挡干扰且支持最新 BDS-3 观测值的特点, 较为适宜分析现阶段 BDS 以及 BDS/GPS 融合数据在较长时间下的可靠性以及相应波动变化情况, 故本文实验选取 MGEX 测站 WUH2 与 JFNG 于 2021 年年积日 110 天 (2021-04-20) 的全天观测数据进行实验, 对于组

合观测值的频点, GPS选择L1/L2进行组合, BDS选择BDS-2与BDS-3共有的B1I/B3I进行组合, 相应的定位配置如表1所示。

表1 实验定位配置

Tab.1 Experimental Position Configuration

参数	策略
定位模式	单点定位
卫星系统	BDS-2/BDS-3, BDS-2/BDS-3/GPS
星历	多系统广播星历p文件
频率	L1/L2, B1I/B3I
截止高度角/(°)	10
对流层	Saastamoinen模型
电离层	Klobuchar模型/IF组合
接收机钟差	白噪声, 估计系统间偏差

2.2 单历元可靠性分析

参考Baarda^[9]、Teunissen^[10]在GNSS可靠性相关研究中的误警与漏检概率取值方法^[26-28], 本文中的实验选择在误警概率 $\alpha = 0.1\%$ 与漏检概率 $1 - \beta = 20\%$ 下进行, 以WUH2测站在2021-

04-20T00:00:00时的数据进行逐颗卫星的可靠性解算, 结果见表2和表3。

从表2中可以分析发现, 在该时刻BDS卫星数量为14颗, 而GPS卫星数量为7颗。BDS可探测的粗差下界值在12.315~19.053 m。此时, 不可探测粗差对于定位结果的最大影响在2.945~20.025 m。在加入了GPS系统后, 总卫星数量达到了21颗, 保持相同的误警概率和漏检概率, 则最小可检测误差保持在12.102~15.910 m, 而相应的不可探测粗差对于定位结果的最大影响向量在1.861~7.588 m。多系统组合的情况下, 由于卫星数量增多, 卫星的几何结构增强, 多数卫星数据的可探测粗差下界值与不可探测误差对于定位结果的最大影响都在不断减小。而在不同卫星之间, 由于卫星的高度角等因素的影响, 导致同一个历元中的不同卫星数据的可靠性计算结果存在差异, 但可以分析到双系统相较单系统卫星间的可靠性计算结果差异更小。

表2 BDS单历元内外可靠性解算结果/m

Tab.2 BDS Single Epoch Internal and External Reliability Results/m

卫星号	MDB	MDE	卫星号	MDB	MDE	卫星号	MDB	MDE
C06	12.677	7.173	C16	12.561	6.832	C34	14.962	5.953
C07	12.315	5.612	C23	19.053	20.025	C39	12.433	6.124
C09	12.545	4.127	C24	16.499	11.309	C40	12.501	3.389
C10	12.738	2.945	C25	13.325	4.808	C41	12.897	4.437
C12	15.184	7.623	C33	16.920	10.237			

表3 BDS/GPS单历元内外可靠性解算结果/m

Tab.3 BDS/GPS Single Epoch Internal and External Reliability Results/m

卫星号	MDB	MDE	卫星号	MDB	MDE	卫星号	MDB	MDE
C06	14.882	7.111	C24	12.224	3.859	G03	14.908	6.461
C07	13.063	4.031	C25	12.102	3.572	G16	12.684	2.985
C09	14.564	6.072	C33	12.242	2.850	G22	14.619	5.171
C10	13.328	5.690	C34	12.359	1.861	G26	13.952	3.859
C12	15.282	6.069	C39	14.235	4.865	G29	12.135	3.659
C16	13.514	4.059	C40	12.176	3.815	G31	12.233	2.441
C23	15.910	6.099	C41	14.722	7.588	G32	12.407	2.007

2.3 多历元可靠性分析

采用本文的理论数学模型, 采用WUH2测站于2021-04-20的数据进行可靠性解算, 将每个历元中MDB以及MDE最大值进行输出, 作为衡量该历元内外可靠性的标准。分析比较解算结果分别在不同星座频率组合下的差异。图1和图2分别展示了使用单频观测值与双频无电离层组合观测值进行解算的结果在PDOP值、卫星个数及内外可靠性上的差异。

由图1和图2分析可知, BDS/GPS组合全天可测卫星数量维持在14~23颗, PDOP值均维持在10以内, 两种电离层处理模式解算出的MDB值均基本在40 m以内, MDE值则基本保持在50 m以内。表4给出了不同处理方式下的MDB及MDE统计值。

通过表4可以得到, 采用BDS单频以及双频数据解算的MDB均值分别为28.342 m与24.661 m, 标准差分别为8.858 m与6.735 m; 单频

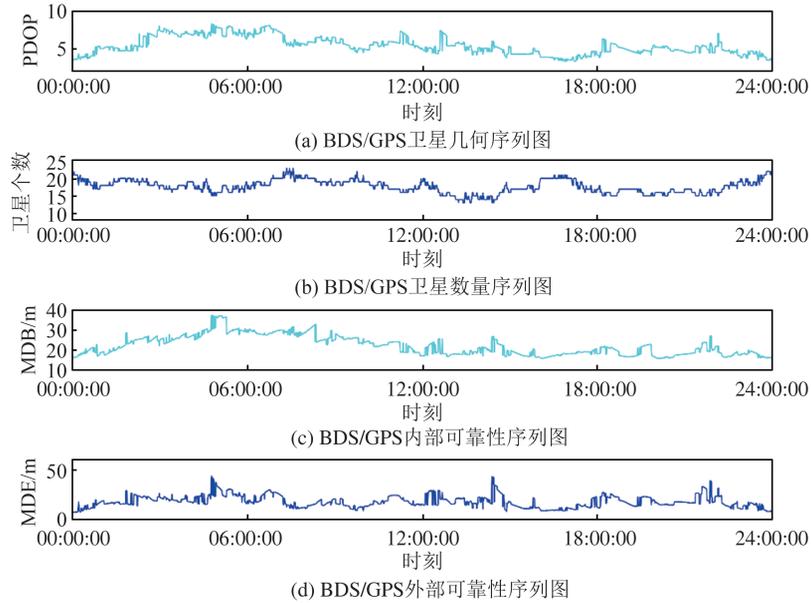


图 1 单频数据 BDS/GPS 可靠性结果 (WUH2 测站)

Fig.1 Single-Frequency Data BDS/GPS Reliability Results (WUH2 Station)

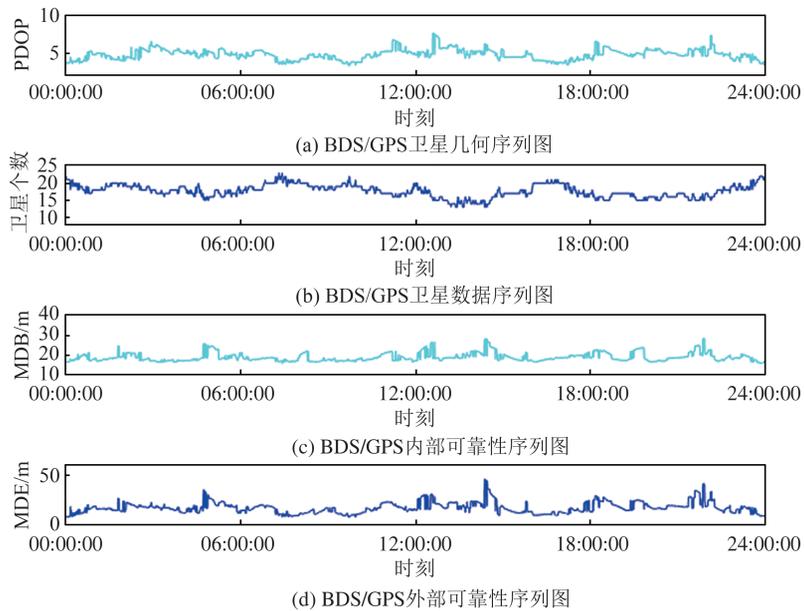


图 2 双频数据 BDS/GPS 可靠性结果 (WUH2 测站)

Fig.2 Dual-Frequency Data BDS/GPS Reliability Results (WUH2 Station)

表 4 多系统单频与双频的可靠性统计/m

Tab.4 Multi-system Single-Frequency and Dual-Frequency Reliability Statistics/m

统计值	单频(电离层模型改正)		双频(无电离层组合)	
	BDS	BDS/GPS	BDS	BDS/GPS
MDB 均值	28.342	22.156	24.661	18.673
MDB 标准差	8.858	4.904	6.735	2.191
MDE 均值	38.647	17.978	35.465	16.612
MDE 标准差	20.798	5.987	19.030	5.710

及双频 BDS/GPS 组合数据解算出的 MDB 均值较 BDS 系统分别下降了 6.186 m 和 5.988 m, 标准

差则分别下降了 3.954 m 和 4.544 m。同时, 采用 BDS 单频以及双频数据解算的 MDE 均值分别为 38.647 m 与 35.465 m, 标准差分别为 20.798 m 与 19.030 m; 单频及双频 BDS/GPS 组合数据解算出的 MDE 均值较 BDS 系统分别减小了 20.669 m 和 18.853 m, 标准差则分别下降了 14.811 m 与 13.320 m。可得内部可靠性与外部可靠性受到卫星几何的影响较大, 结合式(14)与式(16), 卫星观测值的内外可靠性主要与误警概率、漏检概率、卫星几何强度与观测误差有关, BDS/GPS 组合较 BDS 卫星几何强度明显提升, 相应观测值的内外可靠性均获得提高且更加稳定。此外, 采用

双频无电离层组合数据进行定位,解算得到的MDB均值与MDE均值均较单频数据都减少了1~4 m,同时标准差也略有下降,因此双频数据较单频数据具备更好的内外可靠性。

3 粗差探测分析

3.1 粗差探测分析数据

采用2021年年积日110日的全天MGEX JFNG测站的BDS/GPS双频观测数据模拟粗差并

进行粗差探测实验。实验数据设计如表5所示。采用JFNG测站原始数据计算对应观测值内外可靠性如图3所示。

表5 粗差探测实验数据设计

场景	数据类型	粗差类型
1	BDS,双频IF组合	单粗差
2	BDS/GPS,双频IF组合	单粗差
3	BDS,双频IF组合	双粗差
4	BDS/GPS,双频IF组合	双粗差

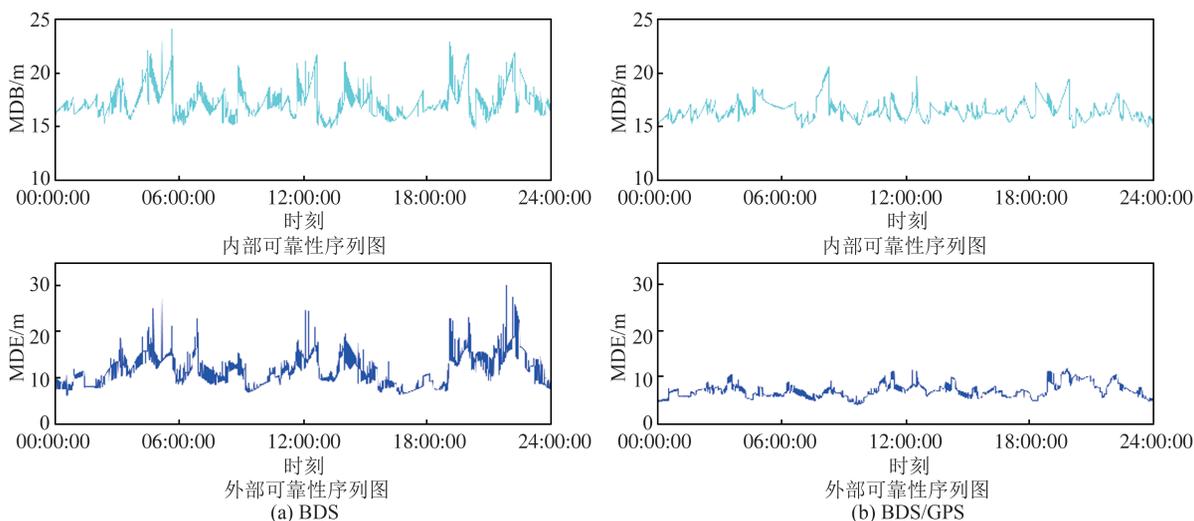


图3 JFNG双频数据可靠性结果

Fig.3 Reliability Results of Dual-Frequency Data at JFNG Station

给定误警概率和漏检概率($\alpha = 0.1\%$, $\beta = 80\%$)情况下分别进行BDS与BDS/GPS组合的可靠性解算,得到对应结果如图3所示。通过图3解算结果可以看出,单BDS系统的MDB大约维持在15~25 m, MDE基本保持在10~30 m;而BDS/GPS组合, MDB基本保持在15~20 m, MDE在10 m左右。

由于理论计算的每个历元可探测最小粗差MDB基本保持在15~20 m内,少数MDB值接近25 m,因此,在JFNG测站的原始观测数据基础上,每个历元随机对一颗卫星的双频IF组合观测值添加20~30 m的观测误差,同时相应设计如下指标评估粗差探测结果:

1)粗差探测率:在所有历元中,通过假设检验判断该历元存在粗差的历元比率。

2)粗差正确识别率:在探测到粗差的基础上,能够正确识别出粗差所位于的卫星观测值,并且能够进行相应剔除的历元比率。

3)剔除粗差后定位精度:在实现观测值数据粗差探测和剔除后,解算得到的定位结果在东、

北、天方向的RMSE(root mean square error)。

3.2 粗差探测结果与分析

表6给出了原始数据加入单一粗差后,分别在BDS以及BDS/GPS组合下进行粗差探测的结果。单BDS成功解算了2 829个历元,其中有2 828个历元的粗差被成功探测,粗差探测的成功率为99.96%;在探测到粗差的历元中,有2 562个历元的粗差被正确识别并成功剔除,其正确识别率为90.56%,剔除粗差后定位精度在东、北、天方向的RMSE分别为0.540 m、0.689 m、1.901 m。在BDS/GPS解算成功的2 828个历元中,有2 827个历元的粗差被成功探测,粗差探测的成功率为99.96%;而在探测到粗差的历元中,有2 801个历元的粗差被正确识别并成功剔除,其正确识别率为99.05%,剔除粗差后定位精度在东、北、天方向的RMSE分别为0.444 m、0.557 m、1.569 m。

对比单BDS系统与BDS/GPS组合系统的粗差探测结果,单系统与双系统均只有一组历元未能成功探测到误差。而在粗差成功探测后,单

BDS 只有 2 562 组历元实现粗差的成功识别与剔除,在另外的 266 组历元中,有 265 组历元未能实现粗差的定位,另一组历元则粗差定位错误;相比较之下,BDS/GPS 组合解算则有 2 801 组历元实现了粗差的正确识别与剔除,另外还有 21 组历元未能实现粗差的定位,5 组历元误差定位错误。通过分析发现,虽然单 BDS 与 BDS/GPS 组合解算的粗差探测成功率几乎一样,但对于粗差正确识别率,双系统组合情况要明显优于单系统。

表 6 单粗差探测识别结果

Tab.6 Single Gross Error Detection and Recognition Results

历元类型	BDS		BDS/GPS	
	历元数/个	历元比例/%	历元数/个	历元比例/%
数据总历元	2 880	100.00	2 880	100.00
原始数据成功解算历元	2 829	98.23	2 828	98.19
包含粗差成功解算历元	2 829	98.23	2 828	98.19
粗差探测正确历元	2 828	99.96	2 827	99.96
粗差正确识别历元	2 562	90.56	2 801	99.05

表 7 给出了原始数据加入双粗差后分别在 BDS 以及 BDS/GPS 组合下进行粗差探测的结果。单 BDS 成功解算了 2 826 个历元,所有历元的粗差被成功探测,粗差探测的成功率为 100%;而在探测到粗差的历元中,有 1 856 个历元的粗差被正确识别并成功剔除,其正确识别率为 65.67%,剔除粗差后定位精度在东、北、天方向的 RMSE 分别为 0.624 m、0.799 m、2.045 m。BDS/GPS 成功解算了 2 832 个历元,所有历元的粗差被成功探测,粗差探测的成功率为 100%;而在探测到粗差的历元中,有 2 071 个历元的粗差被正确识别并成功剔除,其正确识别率为 73.13%,剔除粗差后定位精度在东、北、天方向的 RMSE 分别为 0.637 m、0.743 m、1.864 m,相比较单 BDS,其正确识别率略有提高。无论是单 BDS 还是 BDS/GPS 组合,其双粗差探测成功率均为 100%,但双粗差的粗差成功识别剔除率较单粗差有了明显的下降,单 BDS 以及 BDS/GPS 组合的双粗差成功识别率分别只有 65.67% 与 71.91%。

表 8 给出了粗差识别前后的定位精度统计表,可以看出,无论加入单粗差还是双粗差,无论在 BDS 下解算还是在 BDS/GPS 下解算,粗差剔除后均能实现较好的定位结果。粗差剔除后定位结果在东、北、天方向上的 RMSE 值与原始数

表 7 双粗差探测识别结果

Tab.7 Double Gross Error Detection and Recognition Results

历元类型	BDS		BDS/GPS	
	历元数/个	历元比例/%	历元数/个	历元比例/%
数据总历元	2 880	100.00	2 880	100.00
原始数据成功解算历元	2 826	98.13	2 832	98.33
包含粗差成功解算历元	2 826	98.13	2 832	98.33
粗差探测正确历元	2 826	100.00	2 832	100.00
粗差正确识别历元	1 856	65.67	2 071	73.13

差别不大,均保持在东、北方向 0.5 m 左右,天方向 2 m 左右。

表 8 粗差识别成功前后定位外符合精度(双频)/m

Tab.8 External Accord Accuracy Before and After Gross Error Recognition (Dual-Frequency)/m

模式	定位精度	东方向	北方向	天方向
		RMSE	RMSE	RMSE
单粗差 BDS	原始定位精度	0.534	0.696	1.865
	加入粗差定位精度	2.906	3.232	7.448
	粗差剔除定位精度	0.540	0.689	1.901
单粗差 BDS/GPS	原始定位精度	0.426	0.545	1.546
	加入粗差定位精度	2.080	2.155	5.006
	粗差剔除定位精度	0.444	0.557	1.569
双粗差 BDS	原始定位精度	0.534	0.696	1.865
	加入粗差定位精度	3.256	4.528	9.928
	粗差剔除定位精度	0.624	0.799	2.045
双粗差 BDS/GPS	原始定位精度	0.426	0.545	1.546
	加入粗差定位精度	2.737	3.009	6.671
	粗差剔除定位精度	0.637	0.743	1.864

4 结 语

本文分析研究了可靠性理论与假设检验粗差探测方法在 GNSS 定位领域的应用并进行相应实验。以 WUH2 测站为例,给定误警概率 $\alpha = 0.1\%$ 与漏检概率 $1 - \beta = 20\%$,计算出 BDS/GPS 使用无电离层组合得到的 MDB 与 MDE 均值分别为 18.673 m 与 16.612 m,较单 BDS 无电离层组合解算的 MDB 和 MDE 均值分别下降了 5.988 m、18.853 m,这说明多系统可以改善卫星几何强度,提升可靠性。同时,BDS/GPS 双频 IF 无电离层组合计算得到的 MDB 和 MDE 均值较单频数据分别下降了 3.483 m、1.366 m,这表明双频数据较单频数据可靠性更好。

依照可靠性分析结果,本文基于假设检验理论与可靠性理论结果进行了粗差探测实验。采

用JFNG测站数据的实验结果表明BDS在单粗差与双粗差条件下的粗差识别率分别为90.56%与65.67%;而BDS/GPS组合在单粗差与双粗差条件下的粗差识别成功率较单系统分别提高了8.49%、6.24%,双系统组合识别粗差的能力较单系统提升较为明显。

参 考 文 献

- [1] Yang Yuanxi. Progress, Contribution and Challenges of Compass/BeiDou Satellite Navigation System [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(1): 1-6. (杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 1-6.)
- [2] Yang Yuanxi, Xu Yangyin, Li Jinlong, et al. Progress and Performance Evaluation of BeiDou Global Navigation Satellite System: Data Analysis Based on BDS-3 Demonstration System [J]. *Scientia Sinica (Terra)*, 2018, 48(5): 584-594. (杨元喜, 许扬胤, 李金龙, 等. 北斗三号系统进展及性能预测: 试验验证数据分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(5): 584-594.)
- [3] China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard (Version 3.0) [EB/OL]. [2018-12-27]. <http://www.beidou.gov.cn>. (中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统公开服务性能规范(3.0版) [EB/OL]. [2018-12-27]. <http://www.beidou.gov.cn>.)
- [4] Cui Haomeng, Wang Jiexian, Wang Minghua, et al. Service Performance Assessment of BDS-3 Using Satellite Distribution Probability [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(6): 938-946. (崔浩猛, 王解先, 王明华, 等. 利用卫星分布概率对BDS-3性能的评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(6): 938-946.)
- [5] Liu Mingliang, An Jiachun, Wang Zemin, et al. Performance Analysis of BDS-3 Multi-frequency Pseudorange Positioning [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, DOI:10.13203/j.whugis20200714. (刘明亮, 安家春, 王泽民, 等. BDS-3多频伪距定位性能分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, DOI:10.13203/j.whugis20200714.)
- [6] Zeng Qi. Research on Method and Quality Control for BDS/GPS Combined Kinematic Relative Positioning [D]. Wuhan, China: Wuhan University, 2017. (曾琪. BDS/GPS组合动态相对定位及其质量控制方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.)
- [7] Hernández-Pajares M, Lyu H X, Aragón-Ángel À, et al. Polar Electron Content from GPS Data-Based Global Ionospheric Maps: Assessment, Case Studies, and Climatology [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, 125(6), DOI: 10.1029/2019JA027677.
- [8] Liu J B, Chen R Z, Wang Z M, et al. Spherical Cap Harmonic Model for Mapping and Predicting Regional TEC [J]. *GPS Solutions*, 2011, 15(2): 109-119.
- [9] Baarda W. A Testing Procedure for Use in Geodetic Networks [J]. *Geodesy*, 1968, 2(5), DOI:10.1.1.367.8131.
- [10] Teunissen P J G. Minimal Detectable Biases of GPS Data [J]. *Journal of Geodesy*, 1998, 72(4): 236-244.
- [11] Teunissen P J G. Quality Control in Geodetic Networks [M]// Optimization and Design of Geodetic Networks. Berlin, Heidelberg: Springer, 1985.
- [12] Li Deren, Yuan Xiuxiao. Error Processing and Reliability Theory [M]. Wuhan, China: Wuhan University Press, 2012. (李德仁, 袁修孝. 误差处理与可靠性理论 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2012.)
- [13] Yang Yuanxi, Xu Junyi. GNSS Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM) Algorithm Based on Robust Estimation [J]. *Scientia Sinica Terra*, 2016, 7(2): 117-123. (杨元喜, 徐君毅. 基于抗差估计的GNSS接收机自主完好性监测研究 [J]. 中国科学: 地球科学, 2016, 7(2): 117-123.)
- [14] Sun Y. RAIM-NET: A Deep Neural Network for Receiver Autonomous Integrity Monitoring [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(9): 1503.
- [15] Han Qingqing. Optimization and Performance Analysis of Autonomous Integrity Monitoring Algorithm for GNSS Receiver [D]. Xi'an, China: Chang'an University, 2020. (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.)
- [16] Lee Y C. Analysis of Range and Position Comparison Methods as a Means to Provide GPS Integrity in the User Receiver [C]//The User Receiver US Institute of Navigation Annual Meeting, Washington, USA, 1986.
- [17] Parkinson B W, Axelrad P. Autonomous GPS Integrity Monitoring Using the Pseudorange Residual [J]. *Navigation*, 1988, 35(2): 255-274.
- [18] Sturza M A. Navigation System Integrity Monitoring Using Redundant Measurements [J]. *Navigation*, 1988, 35(4): 483-501.

- [19] Yang S, Li L L, Liu J B, et al. Effective Cycle Slip Detection and Repair for PPP/INS Integrated Systems[J]. *Sensors*, 2019, 19(3): 502.
- [20] Wu Hao, Lu Nan, Zou Jingui, et al. An Improved 3σ Gross Error Detection Method for GNSS Deformation Monitoring Time Series[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(9): 1282-1288. (吴浩, 卢楠, 邹进贵, 等. GNSS 变形监测时间序列的改进型 3σ 粗差探测方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(9): 1282-1288.)
- [21] Li Bin, Wu Yun, Li Zhenghang. Validation of the GNSS Advanced ARAIM Algorithm[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(6): 800-804. (李彬, 吴云, 李征航. GNSS 接收机自主完备性监测高级算法的有效性验证[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(6): 800-804.)
- [22] Yang Yuanxi. Robust Estimation Theory and Its Application [M]. Beijing, China: Bayi Press, 1993. (杨元喜. 抗差估计理论及其应用[M]. 北京: 八一出版社, 1993.)
- [23] Huang Weibin. Modern Adjustment Theory and Its Application [M]. Beijing, China: People's Liberation Army Press, 1992. (黄维彬. 近代平差理论及其应用[M]. 北京: 解放军出版社, 1992.)
- [24] Wu Yun. Algorithm Research on GNSS Receiver Autonomous Integrity Monitoring [D]. Wuhan, China: Wuhan University, 2009. (吴云. GNSS 接收机自主完备性监测算法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009.)
- [25] Zhao Ang, Yang Yuanxi, Xu Yangyin, et al. Integrity Analysis of GNSS Single System and Multi-system Combination [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(1): 72-80. (赵昂, 杨元喜, 许扬胤, 等. GNSS 单系统及多系统组合完好性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(1): 72-80.)
- [26] Blanco-Delgado N, Nunes F D. Satellite Selection Based on WDOP Concept and Convex Geometry [C]//The 5th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC), Noordwijk, Netherlands, 2010.
- [27] Blanch J, Walker T, Enge P, et al. Baseline Advanced RAIM User Algorithm and Possible Improvements [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, 51(1): 713-732.
- [28] Li Guangcai. Research on the Key Technologies of Multi-GNSS Integrated Navigation and Location [D]. Zhengzhou, China: Information Engineering University, 2017. (栗广才. Multi-GNSS 组合导航定位关键技术研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2017.)
- [29] Zhao Jue. Key Technology Research of GPS/BDS/GLONASS/Galileo Combined Pseudorange Point Positioning [D]. Nanjing, China: Southeast University, 2018. (赵珏. 全系统 GNSS 组合伪距单点定位关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.)
- [30] Wu Yun, Liu Wanke. Foundation of Optimal Estimation [M]. Wuhan, China: Wuhan University Press, 2021. (吴云, 刘万科. 最优估计基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2021.)
- [31] Zhao Chunmei, Ou Jikun, Yuan Yunbin. Simulation Analysis of Positioning Accuracy and Reliability of Galileo and GPS-Galileo Combined System Based on Single-Point Positioning Model [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(8): 811-819. (赵春梅, 欧吉坤, 袁运斌. 基于单点定位模型的 Galileo 及 GPS-Galileo 组合系统的定位精度和可靠性的仿真分析[J]. 科学通报, 2005, 50(8): 811-819.)
- [32] Teunissen P J G, Bakker P F. Single-Receiver Single-Channel Multi-frequency GNSS Integrity: Outliers, Slips, and Ionospheric Disturbances[J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(2): 161-177.
- [33] Jong K, Teunissen P J G. Minimal Detectable Biases of GPS Observations for a Weighted Ionosphere[J]. *Earth, Planets and Space*, 2000, 52(10): 857-862.
- [34] Bei Jinzhong. GNSS Integrity Monitoring Method, Technology and Application [D]. Wuhan, China: Wuhan University, 2010. (秘金钟. GNSS 完备性监测方法、技术与应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.)
- [35] Zhou Chengsong, Liu Wenxiang, Xiao Wei, et al. GNSS Pseudo-range Outlier's Detection and Reparation Based on Moving Window [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016(12): 20-24. (周承松, 刘文祥, 肖伟, 等. GNSS 伪距粗差的开窗探测及修复[J]. 测绘通报, 2016(12): 20-24.)
- [36] Sun Maojun, Zhang Hongwen, Xia Jingchao. Integrity Monitoring of Satellite Systems Based on Multi-mode GNSS Receiver [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2013, 36(8): 152-154. (孙茂军, 张洪文, 夏敬潮. 基于多模 GNSS 接收机的卫星系统完好性监测[J]. 测绘与空间地理信息, 2013, 36(8): 152-154.)