



一种使用抗差估计的保护水平重构方法

赵 昂¹ 杨元喜² 许扬胤³ 景一帆³ 马越原³

¹ 西安测绘总站,陕西 西安,710054

² 地理空间信息工程国家重点实验室,陕西 西安,710054

³ 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450001

摘 要:北斗全球卫星导航系统(简称北斗三号系统,BDS-3)的建设对拓展全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)的应用有重要作用,为多星座融合定位、导航和授时提供了重要支持。多系统融合定位给用户提供了更多的导航信息源,也为导航卫星系统完好性和用户自主完好性指标的实现提供了新的保障。然而多卫星组合的使用显著增加了观测冗余信息,由此提出一种基于抗差估计的保护水平重构方法,利用抗差估计方法及其参数验后信息,重新估计用户保护水平。利用GPS/BDS组合数据进行计算分析,实验结果表明,该方法可在保障特定要求定位精度的前提下,降低告警频率。

关键词:抗差估计;保护水平;接收机自主完好性监测;故障检测与排除

中图分类号:P228

文献标志码:A

北斗全球卫星导航系统(简称北斗三号系统,BDS-3)从2017-11-05开始发射组网卫星^[1],到2018年底建成了由18颗中圆地球轨道(medium earth orbit, MEO)卫星和一颗地球同步轨道(geostationary earth orbit, GEO)卫星组成的基本卫星导航系统,并于2018-12-27提供全球基本定位、导航和授时(positioning, navigation and timing, PNT)服务。多个全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)的迅速发展和完善是多GNSS融合PNT服务的重要基础,并为GNSS可用性、完好性、连续性和可靠性等核心性能指标的实现提供了更好的支持^[2]。多频多星座GNSS也为用户,尤其是航空用户,提供了更多的导航信息,为接收机自主完好性监测(receiver autonomous integrity monitoring, RAIM)提供了重要的保障^[3]。

RAIM作为民用航空完好性监测手段之一,主要包括两部分:(1)保护水平的计算;(2)卫星故障的检测和排除。为保证完好性的实现,GNSS在导航服务不可用时需及时向用户发出告警信息,不可用的标志为保护水平值大于保护限值。在保护水平计算方面,有学者提出单故障诊

断的最大精度因子(dilution of precision, DOP)变化方法^[4]、近似径向误差保护(approximated radial error protected, ARP)法^[5]、用户保护水平法和偏差完好性风险(bias integrity threat, BIT)法^[6];文献^[7]将圆概率误差应用于RAIM的计算中;在多故障条件下,可使用多元假设解分离(multiple hypothesis solution separation, MHSS)法^[8]、扩展RAIM法^[9]和新完好性优化RAIM法(novel integrity-optimized RAIM, NIORAIM)^[10]。在卫星故障检测和排除方面,常用距离比较法^[11]、最小二乘法^[12]和奇偶矢量法^[13]识别单星故障,一般称为快照算法。快照算法因其对斜坡故障检测效果差,有学者提出累计历元的奇偶矢量法^[14]和扩展卡尔曼滤波法^[15];针对多星故障,文献^[16]基于粗差探测和剔除理论以及抗差估计理论提出了多星故障探测和识别的RAIM算法,取得了较好的结果。

目前保护水平的计算和故障检测与排除相对孤立。保护水平计算的作用是发现存在的故障,并及时向用户报警。故障是否排除及精度是否满足要求对保护水平影响很小,这就导致告警频率升高。在多频多星座情况下,可观测卫星数

收稿日期:2019-04-07

项目资助:国家重点研发计划(2016YFB0501700,2016YFB0501701);国家自然科学基金(41874016,41474015,42074006);国家自然科学基金青年基金(41604013)。

第一作者:赵昂,硕士,主要研究方向为接收机自主完好性。zhaoang3331@126.com

量显著增加,发现故障的概率和排除卫星故障影响的能力也将显著提升。因此在定位与导航精度足够高的情况下,对用户进行告警的必要性也将降低,为减少告警频率,在故障被排除后对保护水平进行重构是很有必要的。本文在验后方差保护水平算法的基础上,提出一种利用抗差估计获得等价权信息,重构保护水平的方法。该方法能够在故障排除或故障影响被严格控制,且导航精度满足相应精密进近要求的情况下,降低告警频率。并利用 GPS/BDS 组合静态和动态数据进行了计算分析,对该方法进行了验证。

1 基于抗差估计的 RAIM 算法

线性化的 GNSS 观测方程可表示为:

$$L = A \cdot \delta X + \epsilon, P \quad (1)$$

式中, L 为经电离层和对流层延迟改正后的伪距观测量; ϵ 为伪距观测误差; δX 为未知参数向量, 包含接收机三维位置的改正量和不同导航系统的钟差参数; A 为观测值的设计矩阵; P 为观测权矩阵, 可表示为:

$$P = \text{diag}(1/\sigma_1^2, 1/\sigma_2^2 \cdots 1/\sigma_n^2) \quad (2)$$

其中^[17]:

$$\sigma_i^2 = \frac{\sigma_0^2}{\sin^2 E_i} + \sigma_{\text{ion},i}^2 + \sigma_{\text{trop},i}^2 \quad (3)$$

式中, σ_0 为伪距观测噪声标准差, 针对不同的系统和卫星, 其选值也不同, GPS 卫星的 σ_0 为 0.3 m, BDS 的 MEO 和倾斜地球同步轨道 (inclined geosynchronous orbit, IGSO) 卫星的 σ_0 都为 0.6 m, BDS 的 GEO 卫星的 σ_0 为 1 m; E_i 为第 i 颗卫星的高度角; $\sigma_{\text{ion},i}$ 为第 i 颗卫星的电离层延迟误差的标准差; $\sigma_{\text{trop},i}$ 为第 i 颗卫星的对流层延迟误差的标准差。

则位置参数的最小二乘解为:

$$\delta \hat{X} = (A^T P A)^{-1} A^T P L = N^{-1} A^T P L \quad (4)$$

伪距残差为:

$$V = \hat{L} - L = A(A^T P A)^{-1} A^T P L - L = (A N^{-1} A^T P - E) \epsilon \quad (5)$$

式中, E 为单位矩阵。

针对上述最小二乘算法, 可得到其抗差估计表达式:

$$\delta \hat{X}_R = (A^T \bar{P} A)^{-1} A^T \bar{P} L \quad (6)$$

式中, $\delta \hat{X}_R$ 为抗差最小二乘解; \bar{P} 为抗差等价权矩阵, 权因子采用 IGG III 权函数确定, 其表达式为^[18]:

$$w_i = \begin{cases} 1, & |\bar{v}_i| \leq k_0 \\ \frac{k_0}{|\bar{v}_i|} \left(\frac{k_1 - |\bar{v}_i|}{k_1 - k_0} \right)^2, & k_0 < |\bar{v}_i| \leq k_1 \\ 0, & |\bar{v}_i| > k_1 \end{cases} \quad (7)$$

式中, w_i 为第 i 个观测值的等价权因子; \bar{v}_i 为第 i 个观测量的标准化残差, $\bar{v}_i = v_i / \sigma_{v_i}$, v_i 为第 i 个观测量的残差, σ_{v_i} 为 v_i 的标准差; k_0 和 k_1 的值分别取 1.5 和 5。

2 基于抗差估计的保护水平重构

2.1 基于验后方差的用户保护水平算法

由式 (4) 可得到位置及钟差的协方差矩阵:

$$Q_{\hat{X}} = (A^T P A)^{-1} = \begin{bmatrix} d_X^2 & d_{XY} & d_{XZ} & d_{XT} \\ d_{XY} & d_Y^2 & d_{YZ} & d_{YT} \\ d_{XZ} & d_{YZ} & d_Z^2 & d_{ZT} \\ d_{XT} & d_{YT} & d_{ZT} & d_T^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式 (8) 可知, 在空间直角坐标系下的位置方差-协方差矩阵为:

$$Q_{XYZ} = \begin{bmatrix} d_X^2 & d_{XY} & d_{XZ} \\ d_{XY} & d_Y^2 & d_{YZ} \\ d_{XZ} & d_{YZ} & d_Z^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

将式 (9) 转换到大地坐标系中的方差-协方差矩阵为:

$$Q_{BLH} = H Q_{XYZ} H^T = \begin{bmatrix} d_E^2 & d_{EN} & d_{EU} \\ d_{EN} & d_N^2 & d_{NU} \\ d_{EU} & d_{NU} & d_U^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$H = \begin{bmatrix} -\sin B \cos L & -\sin B \sin L & \cos B \\ -\sin L & \cos L & 0 \\ \cos B \cos L & \cos B \sin L & \sin B \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, B 和 L 分别为相应历元的纬度和经度。则可得水平精度衰减因子为:

$$H_{\text{DOP}} = \sqrt{d_E^2 + d_N^2} \quad (12)$$

垂直精度衰减因子为:

$$V_{\text{DOP}} = d_U \quad (13)$$

基于验后方差的用户保护水平算法中, 水平保护水平 (horizontal protection level, HPL) 计算公式为:

$$\text{HPL} = K_H \cdot m \cdot H_{\text{DOP}} \quad (14)$$

垂直保护水平 (vertical protection level, VPL) 计算公式为:

$$\text{VPL} = K_V \cdot m \cdot V_{\text{DOP}} \quad (15)$$

式中, K_H 和 K_V 为服从高斯分布的乘数因子, 其值分别为 6.18 和 5.33, 相应的完好性风险概率分别为 5×10^{-9} 和 1×10^{-7} ^[19]; m 为最小二乘残差求得

的验后单位权中误差,计算如下:

$$m = \sqrt{\frac{\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}}{n - t}} \quad (16)$$

式中, n 为观测值个数; t 为必要观测个数。

2.2 抗差估计下的保护水平重构

多系统条件下,卫星数量充足,个别卫星故障对导航定位的影响均可通过抗差估计得到控制或消除,定位精度不会受到影响,因此无需报警。报警仅发生在用户定位保护水平值大于保护水平限值的情况下。理论上,多模多频情况下的保护水平值应该减小。

本文基于多系统组合定位模式,利用抗差估计重新计算保护水平,即对多模观测数据进行参数抗差估计后,利用抗差等价权矩阵计算验后均方差因子^[20],得到:

$$\bar{m} = \sqrt{\frac{\bar{\mathbf{V}}^T \bar{\mathbf{P}} \bar{\mathbf{V}}}{n - t}} \quad (17)$$

式中, $\bar{\mathbf{V}}$ 为抗差估计后的伪距残差; \bar{m} 为抗差估计后的验后单位权中误差。

利用抗差均方差因子计算重构后的水平保护水平:

$$\text{HPL}_R = K_H \cdot \bar{m} \cdot H_{\text{DOP},R} \quad (18)$$

垂直保护水平计算如下:

$$\text{VPL}_R = K_V \cdot \bar{m} \cdot V_{\text{DOP},R} \quad (19)$$

式中, $H_{\text{DOP},R}$ 和 $V_{\text{DOP},R}$ 为在等价权意义下相应的DOP值。

3 实验与分析

为验证本文方法的可行性,选取垂直制导性能(localizer performance with vertical guidance 200ft, LPV-200)进近阶段要求的精度和保护限值作为本文的标准,采用GPS/BDS组合动态和静态两组数据进行计算分析,其中GPS采用L1频点伪距观测量,BDS采用B1频点伪距观测量,每组实验均分两个部分:(1)故障检测与排除,分别计算加入异常误差的定位结果以及抗差估计处理后的定位结果,并进行比较分析;(2)保护水平计算,分别使用基于验后方差的保护水平计算方法和基于抗差估计的保护水平重构方法计算垂直保护水平。

3.1 实验数据

静态数据为2017-11-21 CUT0站的数据,采样时长为24 h,采样间隔为30 s,共有2 880个历元。卫星截止高度角为 10° 时,当天可见卫星数见图1。动态数据为无人机实际飞行数据,采集时

间为2018-08-07T12:52:13—15:15:54,采样间隔为1 s,选取的卫星截止高度角为 10° ,其当天可见卫星数见图2。

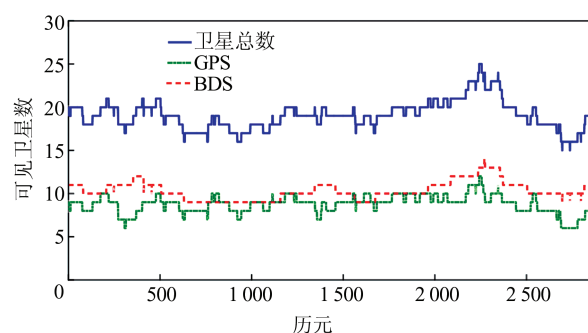


图1 静态数据可见卫星数量序列

Fig.1 Sequence Diagram of Visible Satellites' Quantity of Static Data

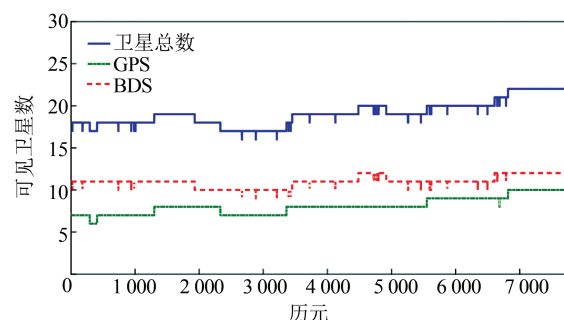


图2 动态数据可见卫星数量序列

Fig.2 Sequence Diagram of Visible Satellites' Quantity of Dynamic Data

3.2 静态数据结果与分析

本文在第545~645历元和第1 708~1 808历元随机挑选两颗卫星,并给这两颗卫星加入随机大小的异常误差。分别采用最小二乘估计和抗差最小二乘估计进行定位解算,获得的位置信息与CUT0站当天发布的精确位置进行对比,得到相应的误差序列。加入异常误差后,其东(east,E)、北(north,N)、天顶(up,U)3个方向的误差序列分布见图3;利用抗差估计处理后,其三方向误差序列分布见图4。数值统计结果见表1,从表1中可以看出,经过抗差估计后,粗差被剔除,其精度(95%)和均方根(root mean square, RMS)都有了显著的改善。

由图3、4和表1可知:(1)加入相应观测异常后,基于最小二乘估计的结果对垂直分量的精度影响最大,U方向的定位精度为10.110 m,不满足LPV-200进近阶段的精度要求。(2)经抗差估计处理后,异常误差的影响得到有效控制,垂直分量均方差精度为3.051 m,满足LPV-200进近阶段的要求,抗差估计效果明显。

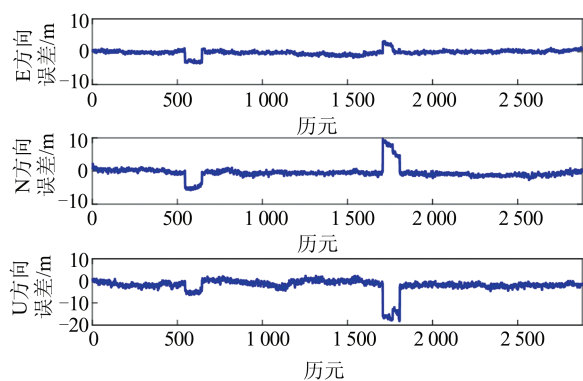


图3 含异常误差的静态数据定位误差序列

Fig. 3 Sequence Diagram of Positioning Errors Using Static Data with Abnormal Error

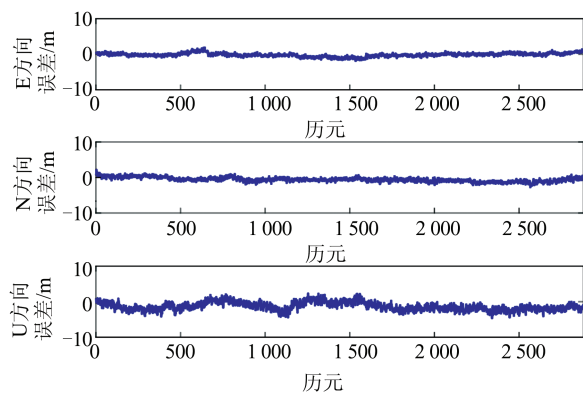


图4 静态数据抗差估计定位误差序列

Fig. 4 Sequence Diagram of Positioning Errors Using Static Data with Robust Estimation

表 1 含异常误差静态数据抗差估计前后定位结果
精度统计表/m

Tab. 1 Positioning Accuracy Statistics Using Static Data with Abnormal Error Before and After Robust Estimation/m

方向	精度(95%)		RMS	
	抗差估计前	抗差估计后	抗差估计前	抗差估计后
E方向	2.570	0.956	1.151	0.471
N方向	7.763	1.495	2.779	0.800
U方向	10.110	3.051	4.851	1.767

分别使用验后方差保护水平方法和基于抗差估计的保护水平重构方法计算加入异常误差数据的VPL,结果见图5。由图5可知:(1)在未加入异常误差时,基于验后方差方法计算的VPL和基于抗差估计保护水平重构方法计算的VPL结果一致;(2)抗差估计能控制异常观测误差的影响,利用抗差估计验后精度因子对保护水平进行重构,合理重估了保护水平;(3)基于抗差估计的保护水平重构方法计算的VPL值一直处于垂

直告警限值(vertical alarm level, VAL)之下,降低了报警频率;在实际航路中,由于卫星数量充足,少数几颗卫星的故障在抗差估计的控制下,对整体定位结果影响很小,无需进行频繁的报警。

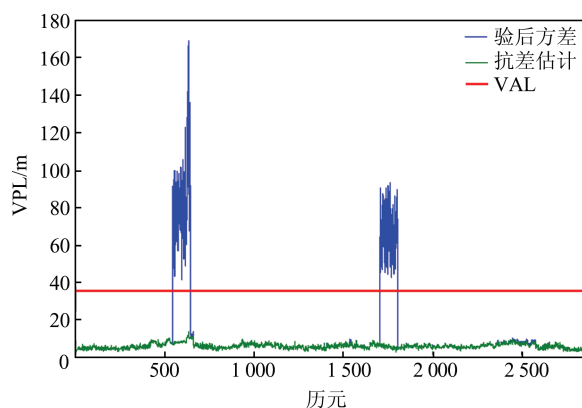


图5 含异常误差静态数据VPL值序列图

Fig. 5 Sequence Diagram of VPL Using Static Data with Abnormal Error

为了验证异常误差对VPL的影响,本文在第545历元选取G02卫星,在该卫星的伪距观测值中依次加入5~100m的异常误差(误差依次增加5m),分别用两种垂直保护水平方法计算相应的VPL值,其分布见图6。

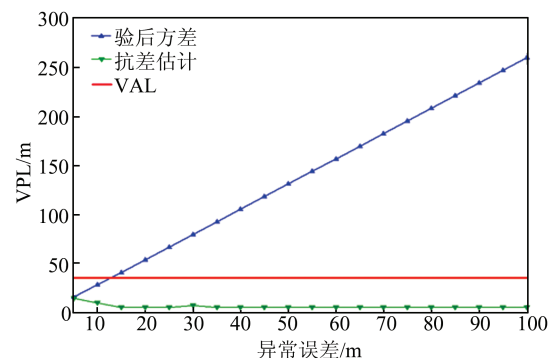


图6 不同异常误差下VPL分布

Fig. 6 VPL Distribution Under Different Abnormal Errors

由图6可知,随着异常误差的增大,使用基于验后方差算法计算的VPL值也在变大,在异常误差值大于15m后,其VPL大于限值;而使用抗差估计重构的VPL均维持在限值以下,说明异常误差得到了有效的控制。在异常误差小于15m时,两种方法算得的VPL值均小于保护限值,垂直方向上的定位误差分别为2.745m和2.955m,满足LPV-200进近阶段的精度要求。

3.3 动态数据结果与分析

分别在第2 250~2 500历元和第5 000~5 250历元随机挑选两颗卫星,并加入随机大小的异常误差。分别采用最小二乘估计和抗差最小二乘估计进行定位解算,获得的位置信息与用精密单点定位(precise point positioning, PPP)算法获得的位置信息进行对比,得到相应的误差序列。加入异常误差后,E、N、U三方向误差序列分布如图7所示,利用抗差估计方法的处理结果见图8,统计具有异常误差的动态数据抗差估计前后定位结果精度,结果见表2。

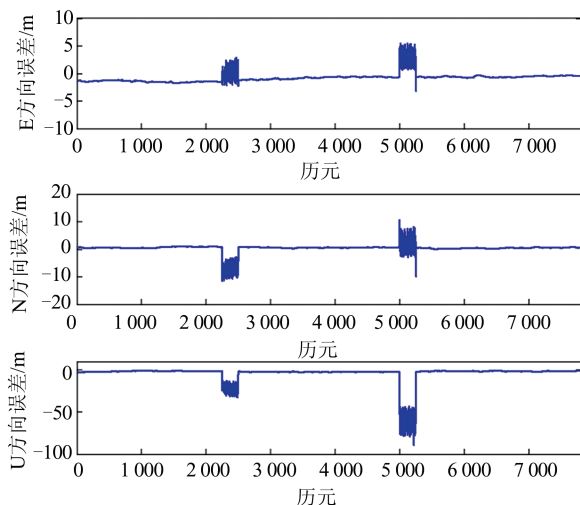


图7 具有异常误差的动态定位误差序列

Fig. 7 Sequence Diagram of Positioning Errors Using Dynamic Data with Abnormal Error

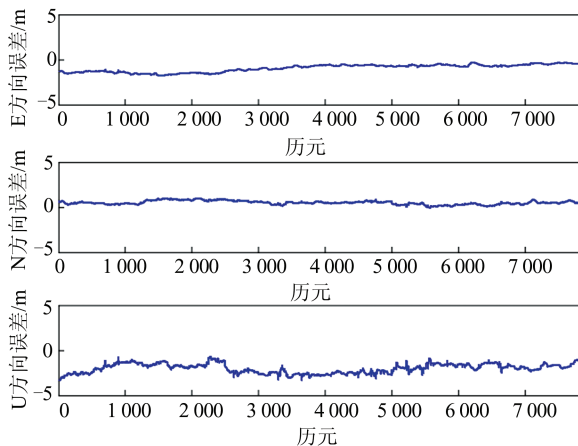


图8 动态数据抗差处理后定位误差序列图

Fig. 8 Sequence Diagram of Positioning Errors Using Dynamic Data with Robust Estimation

由图7、8和表2可知:(1)加入异常误差后,对U方向的影响最大,U方向的定位精度降到了20.712 m,远不满足LPV-200阶段的要求,严重影响了航路飞行的可靠性和完好性;(2)经抗

差估计后,异常误差的影响得到有效控制,尽管含有部分异常观测,也可满足LPV-200进近阶段的要求。

表2 具有异常误差的动态数据抗差估计前后定位结果精度统计表/m

Tab.2 Positioning Accuracy Statistics Using Dynamic Data with Abnormal Error Before and After Robust Estimation/m

方向	精度(95%)		RMS	
	抗差估计前	抗差估计后	抗差估计前	抗差估计后
E方向	1.709	1.625	8.554	1.389
N方向	2.157	0.875	6.449	0.991
U方向	20.712	2.792	4.890	1.998

分别使用验后方差保护水平方法和基于抗差估计的保护水平重构方法计算加入异常误差数据的VPL,结果见图9。

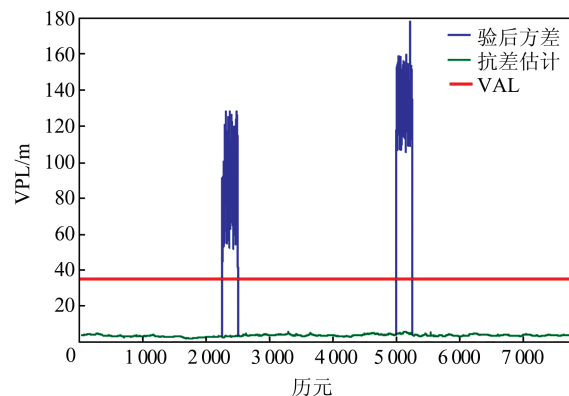


图9 含异常误差动态数据VPL值序列图

Fig. 9 Sequence Diagram of VPL Using Dynamic Data with Abnormal Error

由图9可知:(1)在未加入异常误差时,验后方差保护水平方法计算的VPL和基于抗差估计保护水平重构方法得到的VPL结果一致,保持在保护限值之下;加入异常误差后,验后方差保护水平算法计算的VPL明显大于保护限值。(2)利用抗差估计及其相应的验后均方差因子对保护水平进行重构,由于抑制了异常误差对定位结果的影响,经重构后计算的VPL值满足LPV-200进近阶段的要求,在卫星数量充足和保证定位精度的情况下,显著降低了报警的频率。

4 结 语

本文提出一种基于抗差估计的保护水平重构方法,并分别利用静态和动态两组数据进行验

证,得到以下结论:(1)加入异常误差对导航定位精度的影响很大,尽管在多GNSS融合定位条件下,也不能排除对飞行安全的影响,因此需要及时报警,并排除异常观测;(2)利用抗差最小二乘估计可以有效处理多星故障,经抗差估计处理后的异常观测对导航定位精度的影响较小;(3)基于验后方差的保护水平算法充分利用了残差信息,在无故障时保护水平值远小于保护限值,故障发生时,可迅速发现故障,提高完好性检测的有效性;(4)使用抗差估计处理后,异常误差的影响可以得到有效控制,出现少数故障不会对导航定位精度产生明显的影响,因此也不会影响导航安全性,无需进行报警。因此,在验后方差保护水平方法基础上,利用抗差估计获得的等价权信息对保护水平重新进行计算,一方面降低了异常观测(或者个别卫星故障)的影响,另一方面也可计算出更合理的保护水平,降低了报警的频率,在多频多星座条件下,将更好地保证导航可用性和完好性的实现。

参 考 文 献

- [1] 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]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(5):614-624
- [2] Yang Yuanxi. Concepts of Comprehensive PNT and Related Key Technologies[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(5): 505-510 (杨元喜. 综合PNT体系及其关键技术[J]. 测绘学报, 2016, 45(5):505-510)
- [3] Jie Bai. Robust Navigation Algorithms for Aircraft Precision Approach, Landing and Surface Movement Using Global Navigation Satellite Systems [D]. London:London University, 2008
- [4] Sturza M A, Brown A K. Comparison of Fixed and Variable Threshold RAIM Algorithms[C]. Colorado, Colorado Spring, USA, 1990
- [5] Brown R G, Chin G Y, Kraemer J H. Update on GPS Integrity Requirements of the RTCA MOPS [C]. ION-91, Albuquerque, New Mexico, USA, 1991
- [6] Ober P B. Ways to Improve RAIM/AAIM Availability Using Position Domain Performance Computations [C]. ION ITM, Santa Monica, Los Angeles, USA, 1997
- [7] Li Guozhong, Li Jianwen, Li Junzheng, et al. Research on RAIM Availability Algorithm Based on Circular Error Probable [J]. *Geomatic and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(4):461-466 (李国重, 李建文, 李军正, 等. 基于圆概率误差的RAIM可用性算法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(4):461-466)
- [8] Pervan B, Pullen S, Christie J. A Multiple Hypothesis Approach to Satellite Navigation Integrity [J]. *Journal of the Institute of Navigation*, 1998, 45(1):61-71
- [9] Angus J E. RAIM with Multiple Faults[J]. *Navigation*, 2006, 53(4):249-257
- [10] Hwang P, Brown R G. RAIM-FDE Revisited: A New Breakthrough in Availability Performance with NIOAIM[J]. *Navigation*, 2006, 53(1):41-51
- [11] 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 D C, USA, 1986
- [12] Parkinson B W, Axelrad P. Autonomous GPS Integrity Monitoring Using the Pseudorange Residual [J]. *Navigation*, 1988, 35(2):255-274
- [13] Sturza M A. Navigation System Integrity Monitoring Using Redundant Measurements [J]. *Navigation*, 1988, 35(4): 483-501
- [14] Bakhache B. A Sequential RAIM Based on the Civil Aviation Requirements [C]. ION-99, Nashville, Tennessee, USA, 1999
- [15] Brown G, Hwang P. GPS Failure Detection by Autonomous Means Within the Cockpit [J]. *Navigation*, 1986, 33(4): 335-353
- [16] 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)
- [17] Pothacher M, Springer T A, Schaer S, et al. Processing Strategies for Regional GPS Networks[C]. Advance in Positioning and Reference Frames: IAG Scientific Assembly, London, US, 1998
- [18] Yang Yuanxi. Robust Estimation of Geodetic Datum Transformation [J]. *Journal of Geodesy*, 1999, 73(5): 68-74
- [19] Blanch J, Walker T, Enge P, et al. Baseline Advanced RAIM User Algorithm and Possible Improvement [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, 51(1):713-732

[20] Yang Yuanxi. Estimators of Covariance Matrix at Robust Estimation Based on Influence Functions

[J]. *Zeitschrift Fuer Vermessungswesen*, 1997, 122 (4):166-174

A Method of Protection Level Reconstruction Based on Robust Estimation

ZHAO Ang¹ YANG Yuanxi² XU Yangyin³ JING Yifan³ MA Yueyuan³

¹ Division of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China

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

³ Institute of Geographical Spatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

Abstract: The basic construction of BeiDou global satellite navigation system (BDS) has played a key role in promoting the development of global navigation satellite system, which provides an important guarantee for multi-constellation fusion positioning, navigation and timing. Multi-system fusion positioning provides users with more navigation information, and also provides a better guarantee for the realization of navigation performance indicators. At present, in order to ensure integrity, it is necessary to warn users when navigation service is unavailable. Due to satellite failure, the protection level exceeds its alert limit. However, under the condition of multi-frequency and multi-constellation, the number of satellites is sufficient. After a few satellite faults are eliminated quickly, the influence on the overall navigation accuracy is very small and no alarm is needed. A protection level reconstruction method based on robust estimation is proposed. The protection level is reconstructed by using robust information and posterior variance. In order to verify the feasibility of the algorithm, the accuracy and protection limits required by localizer performance with vertical guidance 200ft (LPV-200) approach phase are selected as the standard of this paper, and the global positioning system (GPS)/BDS combination of dynamic and static data are used for calculation and analysis. The GPS adopts L1 pseudo range observation, and the BDS adopts B1 pseudo range observation. Each group of experiments is divided into two parts, fault detection and elimination and the method of adding abnormal error is calculated respectively, the vertical protection level is calculated by the protection level calculation method based on a posteriori variance and the protection level reconstruction method based on robust estimation. The results show that our proposed method can reduce the alarm frequency on the premise of ensuring the positioning accuracy.

Key words: robust estimation; protection level; receiver autonomous integrity monitoring; fault detection and exclusion

First author: ZHAO Ang, master, majors in GNSS receiver autonomous integrity monitoring. E-mail: zhaoang3331@126.com

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China (2016YFB0501700, 2016YFB0501701); the National Natural Science Foundation of China (41874016, 41474015, 42074006); the National Natural Science Foundation Youth Fund of China (41604013).

引文格式: 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. DOI:10.13203/j.whugis20190043 (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. DOI:10.13203/j.whugis20190043)