

卫星着陆系统差分基准站 B 值分析与处理算法

徐 轲¹, 赵修斌¹, 庞春雷¹, 余永林¹, 王祝欣²

(1. 空军工程大学信息与导航学院,西安,710077;2. 93115 部队,沈阳,110015)

摘要 多基准一致性检测中的 B 值处理是卫星着陆系统完好性监测的核心,针对传统基于极大似然估计准则的 B 值处理算法存在相关性,易造成系统故障检测率低以及难以区分故障来源的问题,研究了基于 Kalman 滤波的 B 值处理新算法:通过建立以监测接收机修正伪距值为观测量,基站距离估计值为状态量的滤波模型,计算得到监测接收机修正后的伪距误差,然后利用其构造新的 B 值;理论分析与试验结果表明,相比于传统算法,新的 B 值处理算法可以消除相关性的影响,故障检测率提高近 20%,增强了系统的可用性水平。

关键词 卫星着陆系统;完好性监测;B 值;卡尔曼滤波

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.04.012

中图分类号 TN967.1 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)04-0050-04

B-values Analysis and Processing Algorithms for DGNSS Landing System

XU Ke¹, ZHAO Xiubin¹, PANG Chunlei¹, YU Yonglin¹, WANG Zhuxin²

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;
2. Unit of 93115, Shenyang 110015, China)

Abstract: B-values processing algorithms is the core of GNSS landing system. In multiple reference consistency check, the rule of maximum likelihood estimation is used in traditional processing method of B-values, so some correlativity exists in the traditional B-values process, which is easy to cause the problems such as the difficulties in distinguishing between fault sources, the low fault detection rate. To solve these problems, this paper studies the B-values processing method based on Kalman filter. And the use of the new processing method can improve the performance of the system through the establishment of filter model. Experiments are done and the results show that the new processing method based on Kalman filter is very effective in fault detection, and the use of the method enhances system availability level. In the end, the fault detection rate is increased by nearly 20%.

Key words: GNSS landing system; Integrity testing; B-values; Kalman filter

以差分定位为基础的卫星着陆系统是未来精密进近着陆^[1]的重要发展方向。卫星着陆系统地面部分由若干基准站、中心站以及差分数据广播站组成。

差分数据的完好性是卫星着陆系统完好性的重要组成部分,飞机在着陆过程中通过接收广播数据进行差分定位,若差分数据出现较大偏差,可能会造成定

收稿日期:2015-03-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61273049)

作者简介:徐 轲(1990—),男,陕西大荔人,硕士生,主要从事卫星导航精密进近着陆研究.E-mail:kelepingxuke@163.com

引用格式:徐轲,赵修斌,庞春雷,等. 卫星着陆系统差分基准站 B 值分析与处理算法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(4):50-53.
XU Ke, ZHAO Xiubin, PANG Chunlei, et al. B-values Analysis and Processing Algorithms for DGNSS Landing System[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(4): 50-53.

位结果的较大误差,进而影响飞机的安全着陆。因此在差分数据播发前,需要对其进行完好性监测。对差分数据完好性进行监测,可以利用多个基准接收机的伪距修正量构造一个参考值,即B值。通过对B值的比较,检测可能存在的故障,并排除其中的错误数据,保证播发的差分数据的可靠性。传统的B值处理采用极大似然估计准则^[2],其中B值的大小反应了可能存在的基准接收机故障造成的伪距校正量偏差。但这种处理方法忽略了B值相关性对检测性能的影响^[3],这种有无故障之间的相关性会对故障来源的检测造成影响,降低故障检测率。针对此问题,本文提出了利用Kalman滤波对B值进行构造和处理的算法,通过分析多个基准站的差分修正量对中心站监测接收机定位的影响,并以此构造新的B值,利用新B值进行完好性监测,以进一步提高系统的故障检测率。

1 基于Kalman滤波的B值处理新算法

1.1 系统模型

根据卫星着陆系统的性能要求,为满足系统的完好性要求,基准站个数至少为3个。以设置3个基准站为例,对应中心站监测接收机的卡尔曼滤波观测模型可以表示为:

$$\mathbf{y}_i(k) = \mathbf{H}_i \mathbf{x}_i(k) + \boldsymbol{\gamma}_i(k) \quad (1)$$

式中:测量矩阵 $\mathbf{y}_i(k)$ 为监测接收机在第 k 历元进行差分定位得到的伪距值,差分数据由各个基准站提供; $\mathbf{H}_i = [1 \ 1 \ 1]^\top$ 为观测矩阵;状态矩阵 $\mathbf{x}_i(k)$ 为监测接收机计算的星站距离真值; $\boldsymbol{\gamma}_i(k)$ 为观测噪声; i 值为0时表示无接收机故障, $i=1, 2, 3$ 时表示相应基准接收机发生故障。多基准站故障会造成系统不可用,因此模型的建立是在单基准站发生故障的假设前提下进行的。

在无故障的情况下,式(1)的观测模型可以等效如下:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_0^1(k) \\ \mathbf{y}_0^2(k) \\ \mathbf{y}_0^3(k) \end{bmatrix} = \mathbf{H}_i \mathbf{x}_i(k) + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\gamma}_1(k) \\ \boldsymbol{\gamma}_2(k) \\ \boldsymbol{\gamma}_3(k) \end{bmatrix} \quad (2)$$

单站发生故障时,对应的 $\mathbf{y}_i(k)$ 和 \mathbf{H}_i 可以表示为:

$$\mathbf{y}_i(k) = (\mathbf{I} - \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^\top) \mathbf{y}_0(k) \quad (3)$$

$$\mathbf{H}_i = (\mathbf{I} - \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^\top) \mathbf{H}_0 \quad (4)$$

$$\mathbf{e}_i = [0 \ \cdots \ \cdots \ 0] \text{ 第 } i \text{ 位} \quad (5)$$

滤波模型中的状态方程采用位置-速度模型,将

伪距值作为位置值,伪距变化量作为速度值,具体可表示为:

$$\mathbf{x}_i(k) = \mathbf{x}_i(k-1) + T_s \Delta \mathbf{x}_i(k-1) + \mathbf{w}_i(k) \quad (6)$$

式中: $\Delta \mathbf{x}_i(k)$ 为伪距变化率; T_s 为时间常数; $\mathbf{w}_i(k)$ 为过程噪声。

1.2 B值构造

根据上述系统模型,可得估计误差值。

无故障情况下:

$$\tilde{\mathbf{x}}_0(k) = \mathbf{x}_0(k) - \hat{\mathbf{x}}_0(k) \quad (7)$$

第 i 个基准接收机发生故障情况下:

$$\tilde{\mathbf{x}}_i(k) = \mathbf{x}_i(k) - \hat{\mathbf{x}}_i(k) \quad (8)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}}$ 为监测站伪距估计值; $\tilde{\mathbf{x}}$ 为伪距估计误差。

基于Kalman滤波的B值可构造为:

$$\mathbf{B}_i(k) = \tilde{\mathbf{x}}_0(k) - \tilde{\mathbf{x}}_i(k) \quad (9)$$

由式(9)可知当 $i=0$ 时, $\mathbf{B}_i(k)=0$; $\mathbf{B}_i(k)$ 表示排除第 i 个基准接收机之后引起的监测接收机差分定位伪距误差。

1.3 B值分析与故障检测

计算B值的协方差,可表示为:

$$\mathbf{C}_{i,j}(k) = E(\mathbf{B}_i(k) \mathbf{B}_j(k)^\top) \quad (10)$$

由式(10)可以得到,当 $i=0$ 或 $j=0$ 时,有 $\mathbf{B}_i(k)=0$,对应 $\mathbf{C}_{ij}(k)=0$,说明这种B值构造方法消除了无故障假设检验和有故障假设检验之间的相关性。

在进行故障检测时,需要对B值的统计特性进行准确分析,当 $i=j$ 时,计算对应B值的方差,展开式(14):

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_i(k) &= E(\mathbf{B}_i(k) \mathbf{B}_i(k)^\top) = \\ & E[(\tilde{\mathbf{x}}_0(k) - \tilde{\mathbf{x}}_i(k)) (\tilde{\mathbf{x}}_0(k) - \tilde{\mathbf{x}}_i(k))^\top] \end{aligned} \quad (11)$$

在Kalman滤波中,估计误差的均方误差阵为:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_{x_0}(k) = E(\tilde{\mathbf{x}}_0(k) \tilde{\mathbf{x}}_0(k)^\top) \\ \mathbf{P}_{x_i}(k) = E(\tilde{\mathbf{x}}_i(k) \tilde{\mathbf{x}}_i(k)^\top) \\ \mathbf{P}_{x_0,i}(k) = E(\tilde{\mathbf{x}}_0(k) \tilde{\mathbf{x}}_i(k)^\top) \\ \mathbf{P}_{x_i,0}(k) = E(\tilde{\mathbf{x}}_i(k) \tilde{\mathbf{x}}_0(k)^\top) \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)带入 $\mathbf{C}_{ij}(k)$,得:

$$\mathbf{C}_i(k) = \mathbf{P}_{x_0}(k) - \mathbf{P}_{x_0,i}(k) - \mathbf{P}_{x_i,0}(k) + \mathbf{P}_{x_i}(k) \quad (13)$$

可以证明 $\mathbf{P}_{x_0,i}(k) = \mathbf{P}_{x_i,0}(k) = \mathbf{P}_{x_0}(k)$ ^[5],代入式(13),得:

$$\mathbf{C}_i(k) = \mathbf{P}_{x_i}(k) - \mathbf{P}_{x_0}(k)^\top \quad (14)$$

因此B值的协方差可以通过Kalman滤波的 $\mathbf{P}_{x_0}(k)$ 和 $\mathbf{P}_{x_i}(k)$ 获得。

观测噪声 $\boldsymbol{\gamma}_i(k)$ 和过程噪声 $\boldsymbol{w}_i(k)$ 服从高斯分布。采用文献[6]的处理方法对 $\boldsymbol{B}_i(k)$ 进行修正,对应概率密度函数为:

$$f_z(\boldsymbol{B}_i(k)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\boldsymbol{C}_i(k)}} e^{-\frac{1}{2}\boldsymbol{z}^T\boldsymbol{C}_i(k)^{-1}\boldsymbol{z}} \quad (15)$$

采用逐个残差比较法^[5],根据系统误警概率 P_{fa} ,可求得故障检测门限为:

$$P_{fa} = \sum_{i=1}^M P(v_0) [P(|\boldsymbol{B}_i(k)| > \boldsymbol{T}_i(k))] \quad (16)$$

结合式(15)和(16)得:

$$P_{fa} = \sum_{i=1}^M P(v_0) \left[\int_{\boldsymbol{T}_k}^{\infty} f_z(\boldsymbol{B}_i(k)) d\boldsymbol{z} + \int_{-\infty}^{-\boldsymbol{T}_k} f_z(\boldsymbol{B}_i(k)) d\boldsymbol{z} \right] \quad (17)$$

根据式(17)可以求得故障检测门限值 $\boldsymbol{T}_i(k)$ 。当接收机出现故障, $|\boldsymbol{B}_i(k)|$ 会出现较大幅度的波动,并且会出现 $|\boldsymbol{B}_i(k)| > \boldsymbol{T}_i(k)$ 的情况,此时对应的故障编号 i 值即为出现故障的基准站编号。

2 实验分析

2.1 方案设计

实验过程中使用4台GPS/BD2接收机板卡进行数据接收和采集,编号分别为1号、2号、3号和4号。4个接收机观测数据的采集时间为1000s,采集频率为1Hz。假设单个基准接收机发生故障的概率为 10^{-5} ,并且各个基准接收机之间相互独立。根据卫星着陆系统的性能要求,设置误警概率为 10^{-9} ,然后分别采用2种算法进行B值处理与对比分析:

方案1 极大似然估计准则的B值处理算法,该方法是将4台接收机均视为基准接收机进行数据处理;

方案2 采用本文新算法进行B值处理,将其中4号接收机作为监测接收机,其他1号、2号、3号3个接收机作为基准接收机。

由于数据采集过程中4台接收机均未发生故障,为了检测算法性能,将1号基准接收机在400s至600s之间人为加入误差值,以此来模拟接收机故障。2组实验均采用同一观测数据,由于同一接收机各个卫星之间的B值都可以反应该接收机的故障情况,为方便对比分析,实验中统一使用第22号可视卫星的数据进行分析。

2.2 结果分析

图1为采用方案1进行实验时,4个基准接收机的B值与对应阈值的变化情况,可以看出,在400

s之前,4个基准接收机都处于正常状态,对应B值也在检测门限之内。但在400s至600s时,1号接收机出现故障,对应的B值有较大幅度的跳动,并且在该时刻其他几个接收机也出现了明显的变化,对应的B值均超出检测门限,此时无法判断故障的来源,影响了正常的故障检测。

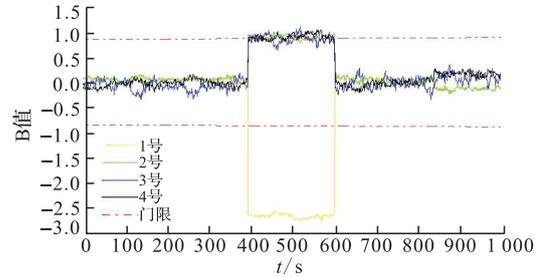


图1 22号卫星对应的B值变化

Fig.1 B-values of number 22 satellite

图2同样为方案1情况下,剔除1号基准接收机伪距修正量之后,重新进行故障检测,对应各个基准接收机的B值与检测门限值,可以看出剔除1号基准接收机之后,其他3个B值均在检测门限之内,可以说明2号、3号、4号基准接收机均无故障,而图1中对应B值跳动是由于1号基准接收机的故障相关性引起的。

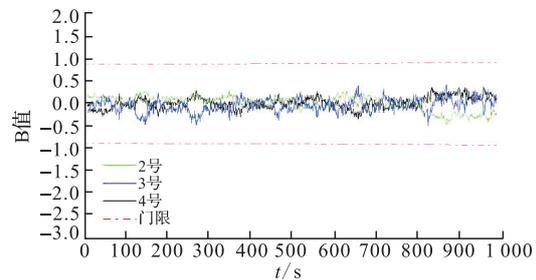


图2 剔除1号基准接收机之后的B值的变化

Fig.2 B-values without no. 1 receiver of number 22 satellite

针对同一观测数据,使用方案2进行实验,对差分修正量进行检测,实验结果见图3,可以看出,1号基准接收机发生故障时,B1的值出现大幅度的波动,超出了检测门限范围,而其他基准接收机的B值没有超出检测门限值,此时判定1号基准接收机出现故障,其他基准接收机正常,当前系统依然可以使用。

利用识别故障时长与添加故障时长作为商,分别计算2种算法故障检测率,方案1为50.32%,方案2为71.83%。

通过对比可以看出,采用Kalman滤波算法进行B值处理,可以显著提高系统的故障检测性能,相应的故障检测率从50.32%提高到了71.83%,有近20%的提升。

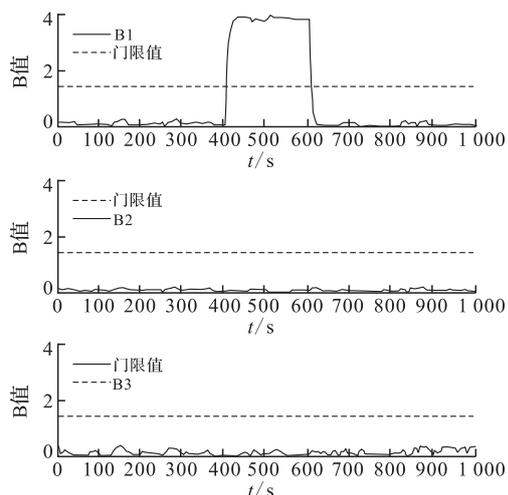


图3 22号卫星对应的B值变化情况

Fig.3 B-values of number 22 satellite

3 结语

传统的基于极大似然估计准则的B值处理没有考虑各个基准接收机之间的B值相关性,造成难以区分故障来源的问题,降低了故障检测率。而采用Kalman滤波的B值处理算法能有效消除有无故障之间的相关性,较好地反映故障来源,相比于传统算法,故障检测率有一定的提升,增强了整个系统的可用性。

参考文献(References):

- [1] 魏光兴.GLS进近的实施方法与优越性比较[J].中国民航飞行学院学报,2006,17(6):27-31.
WEI Guangxing. The Superiority Comparison of The GLS Approach Comparison Method [J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2006, 17(6):27-31. (in Chinese)
- [2] 杨文辉,周保军.LAAS地面系统中多基准一致性检测算法的分析[J].电子学报,2006(3):469-471.
YANG Wenhui, ZHOU Baojun. Analysis of Multiple Reference Consistency Check on LASS Ground Facility [J]. Acta Electronica Sinica, 2006(3):469-471. (in Chinese)
- [3] Kelly R. Comparison of LAAS B-values with Linear Model Optimum B-Values [J]. Navigation, 2000, 47(2):143-156.
- [4] 李斌,王党卫,杨明.一种地基增强系统(GBAS)B值的分析与处理技术[J].现代导航,2013(1):19-23.
LI Bin, WANG Dangwei, YANG Ming. Analysis and Processing of B-Values for GNSS GBAS [J]. Modern Navigation, 2013(1):19-23. (in Chinese)
- [5] Liang Li, Mohammed Quddus, Stephen Ison, et al. Multiple Reference Consistency Check for LAAS: A

Novel Position Domain Based Approach [J]. GPS Solutions, 2012, 16(2):209-220.

- [6] Khanafseh S, Langel S, Pervan B. H1-integrity of Carrier Phase Navigation Algorithms Using Multiple Reference Receivers [C]//Proceedings of the 2009 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, CA, 2009:236-247.
- [7] 甘兴利.GPS局域增强系统的完善性监测技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008.
GAN Xingli. Research of GPS Local Area Augmentation System Integrity Monitoring [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008. (in Chinese)
- [8] 王志鹏,张军,刘强.LAAS地面站伪距纠正量误差完好性监测算法研究[J].电子与信息学报,2009,31(1):196-200.
WANG Zhipeng, ZHANG Jun, LIU Qiang. The Study of Integrity Monitor Algorithm of the Pseudorange Correction Error on LAAS Ground Facility [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(1):196-200. (in Chinese)
- [9] 王玉明,杨光,杨大伟,等.LAAS处理算法及其完善性实验研究[J].指挥控制与实验,2009,31(4):87-96.
WANG Yuming, YANG Guang, YANG Dawei, et al. Research on the Arithmetic and Integrity of LAAS by Simulation [J]. Command Control & Simulation, 2009, 31(4):87-96. (in Chinese)
- [10] 陈金平.GPS完善性增强研究[D].郑州:解放军信息工程大学,2001.
CHEN Jinping. Research of GPS Integrity Augmentation [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2001. (in Chinese)

(编辑:姚树峰)