

基于北斗的地基增强系统多基准一致性检验算法

胡 杰^{1,2}, 严勇杰^{1,2}, 石潇竹^{1,2}

(1. 中国电子科技集团公司第二十八研究所, 南京, 210007; 2. 空中交通管理系统与技术国家重点实验室, 南京, 210007)

摘要 针对地基增强系统 GBAS)中传统基于极大似然估计准则的多基准一致性检验(MRCC)算法无法有效区分基准站接收机故障来源问题,开展了 GBAS 地面系统 MRCC 算法研究。对 GBAS B 值理论进行分析,给出了一种能够有效确定接收机故障来源的 MRCC 算法处理流程,并提出了一种基于高斯膨胀法的 B 值门限值计算方法。利用 GBAS 原型系统进行了验证实验,结果表明:当地面系统接收机无故障时,计算得到的所有基准站 B 值在门限值以内,通过一致性检验,一旦某个基准站接收机发生故障,则能够有效识别该故障,且当移除故障接收机后,剩余基准站的 B 值能够恢复到正常范围以内,验证了所提出方法的有效性。

关键词 地基增强系统; B 值; 多基准一致性检验; 高斯膨胀法

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2020.01.006

中图分类号 TN967.1 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2020)01-0032-06

A Multiple Reference Consistency Check Algorithm for Ground Based Augmentation System Based on BDS

HU Jie^{1,2}, YAN Yongjie^{1,2}, SHI Xiaozhu^{1,2}

(1. The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China;
2. State Key Laboratory of Air Traffic Management System and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract Aimed at the problem that the traditional multiple reference consistency check (MRCC) algorithm based on maximum likelihood estimation criterion is failure to effectively distinguish the fault sources of reference station receivers in ground based augmentation system (GBAS), the MRCC algorithm of GBAS ground facility is studied. The theory of GBAS B -Value is analyzed, and by a processing flow of MRCC algorithm effectively detected the failed receiver is given, and then a calculation method of B -Value threshold based on Gaussian over-bounding is proposed. The validation experiments are carried out by using the GBAS prototype. The results show that when there are no faults in the ground facility receivers, the calculated B -value of each reference station is within the detection threshold and the consistency check is passed. Once a receiver fails, the trouble can be effectively identified, and when the failed receiver is removed, the B -value of the remaining reference stations can be restored to the normal range, and the effectiveness of the proposed algorithm is verified.

Key words ground based augmentation system; B -value; multiple reference consistency check; Gaussian over-bounding method

收稿日期: 2019-06-16

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0503401); 江苏省自然科学基金(BK20170157)

作者简介: 胡 杰(1987—),男,江苏盐城人,博士,工程师,主要从事卫星导航系统研究。E-mail: hj_student@163.com

引用格式: 胡杰, 严勇杰, 石潇竹. 基于北斗的地基增强系统多基准一致性检验算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(1): 32-37. HU Jie, YAN Yongjie, SHI Xiaozhu. A Multiple Reference Consistency Check Algorithm for Ground Based Augmentation System Based on BDS[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(1): 32-37.

全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)现已逐步完善,它凭借全球、全天候、高精度等优点受到越来越多的应用^[1]。国际民航组织计划利用卫星导航系统替代传统地面导航设备,降低航空导航成本,增加航路设计^[2-3]。地基增强系统(Ground Based Augmentation System, GBAS)在采用差分技术提高卫星信号测距精度的基础上,增加一系列完好性监测算法,提高了导航系统的完好性和可用性^[4-5]。随着我国北斗卫星导航系统(Beidou Navigation System, BDS)在民航领域中的应用范围越来越广泛^[6],国内科研院所正在积极开展基于 BDS 的 GBAS 差分定位与完好性监测等研究工作,如中电 54 所、28 所等围绕卫星信号完好性监测^[7]、机载差分定位^[8]等开展研究,北京航空航天大学王志鹏^[9]、薛瑞^[10]等人一直致力于基于双频多星座的 III 类精密进近与着陆卫星导航关键技术研究,对我国 BDS 在民用航空导航中的应用具有积极的引导作用。

Stanford 大学给出了 GBAS 地面系统完好性监视平台仿真模型,包括信号质量监测、数据质量监测以及观测质量监测等,并计算通过一系列完好性监视后的卫星信号伪距差分校正值得^[11]。为了确保多个基准站计算得到的差分校正具有一致性,需要在广播差分校正前进行多基准一致性检验(Multiple Reference Consistency Check, MRCC),以隔离可能存在故障的接收机。RTCA DO245^[12]标准中给出了一种基于极大似然估计准则的 MRCC 算法,该算法通过比较各个基准站的差分校正并计算其 B 值以判别基准站接收机是否存在故障。Dautermann^[13]将该方法应用于德国 DLR 机构研制的 GBAS 地面系统中心处理单元中,并指出可以根据 B 值的标准差评估 GBAS 地面系统精度,但是对于 B 值门限值的设定方法并未提及。李亮^[14]、徐轲^[15]指出由于各个基准站之间存在相关性,基于极大似然估计准则的 MRCC 算法无法有效区分故障来源,因此提出了一种基于 Kalman 滤波的 B 值计算新方法,该方法是建立在假设某一基准站接收机发生故障的概率为零的基础之上,在实际中该假设一般难以成立。胡杰^[16]、刘军^[17]等人针对传统 MRCC 算法无法检测故障卫星的问题,提出了一种 GBAS 中基于导航监测的 B 值修正算法,由分析可知,地面系统经过一系列完好性监测后,已经将卫星故障予以排除,但该算法存在冗余,并没有有效解决

B 值相关性问题。

针对上述问题,本文提出了一种基于高斯膨胀法的 B 值门限值计算方法,并利用实验室研制的 GBAS 原型系统进行了验证实验。

1 基于极大似然估计准则的 MRCC 算法

假设 GBAS 地面系统有 M 个基准站,经过一系列完好性监测后可用卫星个数为 N 。基准站精确位置信息已知,利用已知点位置与卫星空间坐标可以计算得到第 j 颗卫星与第 i 个基准站之间距离为 $R(i, j)$,进一步与经载波相位平滑后的伪距进行差分可以得到平滑伪距的差分校正值为:

$$PR_{SC}(i, j) = PR_S(i, j) - R(i, j) + \tau(i, j) \quad (1)$$

式中: i 为第 i 个基准站; j 为第 j 颗卫星; PR_S 为经载波相位平滑后的伪距观测值; R 为星站之间真实距离; τ 为卫星钟差校正值得。

由式(1)计算得到的差分校正值得中包含接收机钟差,因此需要进一步消除该项误差。对于第 i 个基准站而言,其所有可观测卫星的接收机钟差大小相同,因此可以利用差分校正值得估计该接收机钟差,进一步可得:

$$PR_{SCA}(i, j) = PR_{SC}(i, j) - \frac{1}{N} \sum_{j \in S_c} PR_{SC}(i, j) \quad (2)$$

$$PR_{CORR}(j) = \frac{1}{M} \sum_{i \in S_i} PR_{SCA}(i, j) = c(j) + \frac{1}{M} \sum_{i \in S_i} \epsilon(i, j) \quad (3)$$

式中: PR_{SCA} 为补偿接收机钟差后差分校正值得; PR_{CORR} 为地面系统最终播发的差分校正值得; $c(j)$ 为基准站接收机与机载接收机之间关于第 j 颗卫星的公共伪距误差; S_c 为可用卫星集合; S_i 为可用基准站集合。

令 $\epsilon_{gnd, j} = \frac{1}{M} \sum_{i \in S_i} \epsilon(i, j)$, 表示地面系统计算得差分校正值得的误差,服从均值为零的高斯分布,可表示为:

$$\epsilon_{gnd, j} \sim N(0, \sigma_{pr, gnd, j}^2) \quad (4)$$

式中: $\sigma_{pr, gnd, j}^2$ 表示地面系统计算得第 j 号卫星差分校正值得误差标准差。

GBAS 中心处理单元广播差分校正前必须确保所有基准站计算的校正值得具有一致性,因此需要对多个基准站的一致性进行检验。文献^[12]中给出

了GBAS B 值计算方法,同时规定只要任意一基准站的 B 值超过设定门限值则需排除该通道, B 值计算公式为:

$$B_{PR}(i,j) = PR_{CORR}(j) - \frac{1}{M-1} \cdot \sum_{\substack{k \in S_i \\ k \neq j}} PR_{SCA}(k,j) \quad (5)$$

式中: $B_{PR}(i,j)$ 表示第 i 个基准站所观测到的第 j 颗卫星的 B 值。

进一步可以利用 B 值的标准差 σ_B 对 GBAS 地面系统精度进行评估,其关系可表示为:

$$\sigma_{pr, \text{gnd}}^2 = \sigma_B^2 \frac{(M-1)(N-1)}{N} \quad (6)$$

式中: σ_B 为地面系统计算得 B 值的标准差, $\sigma_{pr, \text{gnd}}$ 、 PR_{CORR} 以及 B 值最终通过 VDB 电台广播给机载用户,以实时计算飞机位置和保护级。

2 GBAS B 值理论分析

GBAS 地面系统中 MRCC 算法主要用于检测地面基准站生成的伪距差分校正值是否具有一致性,通过计算各个基准站对应可见卫星的 B 值,以隔离其中不具备一致性的差分量。

令 $Y_{ij} = PR_{sc}(i,j)$, 其中, $i=1,2,\dots,M, j=1,2,\dots,N$, 假设 $M=4, N=4$, 则总观测量个数为 16, 如表 1 所示, $Y_{\cdot j}/M, Y_{i \cdot}/N, Y_{\cdot\cdot}/MN$ 分别表示列均值、行均值以及总均值。

表 1 平滑伪距的差分校正值列表形式

Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{14}	$Y_{1 \cdot}/N$
Y_{21}	Y_{22}	Y_{23}	Y_{24}	$Y_{2 \cdot}/N$
Y_{31}	Y_{32}	Y_{33}	Y_{34}	$Y_{3 \cdot}/N$
Y_{41}	Y_{42}	Y_{43}	Y_{44}	$Y_{4 \cdot}/N$
$Y_{\cdot 1}/M$	$Y_{\cdot 2}/M$	$Y_{\cdot 3}/M$	$Y_{\cdot 4}/M$	$Y_{\cdot\cdot}/MN$

$$Z_{ij} = PR_{SCA}(i,j) = Y_{ij} - Y_{i \cdot}/N \quad (7)$$

由式(7)以及表 1 定义可得:

$$Z_{\cdot j} = Y_{\cdot j} - Y_{\cdot\cdot}/N \quad (8)$$

将式(2)、式(7)和式(8)带入式(5)可得:

$$B_{PR}(i,j) = \frac{1}{M-1} \left(Y_{ij} - \frac{1}{M} Y_{\cdot j} - \frac{1}{N} \cdot Y_{i \cdot} + \frac{1}{MN} Y_{\cdot\cdot} \right) \quad (9)$$

假设 Y_{ij} 的均值为 μ ; α_i 表示第 i 个基准站接收机误差; β_j 表示第 j 颗卫星误差, 则 Y_{ij} 可表示为:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j \quad (10)$$

当 $M=4, N=4$ 时, 式(10)可写成如下方程形式:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} \\ Y_{12} \\ Y_{13} \\ Y_{14} \\ Y_{21} \\ Y_{22} \\ Y_{23} \\ Y_{24} \\ Y_{31} \\ Y_{32} \\ Y_{33} \\ Y_{34} \\ Y_{41} \\ Y_{42} \\ Y_{43} \\ Y_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \end{bmatrix} \quad (11)$$

将式(11)写成矩阵形式, 即:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{G}\mathbf{X} \quad (12)$$

利用最小二乘法可以得到变量 \mathbf{X} 的估计值为:

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{y} \quad (13)$$

进一步根据 GBAS 线性模型最小二乘估计方法可得^[18]:

$$\begin{cases} \hat{\mu} = \frac{Y_{\cdot\cdot}}{MN} \\ \hat{\alpha}_i = \frac{1}{M} Y_{i \cdot} - \frac{Y_{\cdot\cdot}}{MN} \\ \hat{\beta}_j = \frac{1}{N} Y_{\cdot j} - \frac{Y_{\cdot\cdot}}{MN} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\hat{\mu}$ 为总偏差估计值; $\hat{\alpha}_i$ 为第 i 个基准站接收机故障引起的误差; $\hat{\beta}_j$ 为第 j 颗卫星故障引起的误差。

将式(14)带入式(9), B 值可表示为:

$$B_{PR}(i,j) = \frac{1}{M-1} (Y_{ij} - \hat{\mu} - \hat{\alpha}_i - \hat{\beta}_j) \quad (15)$$

由式(15)可以看出, B 值的大小体现了基准站接收机故障以及卫星故障引起的伪距差分校正值的偏差多少。当基准站接收机和卫星无故障时, B 值是伪距差分校正值与其均值的偏差, 其数值在较小的范围内变化, 一旦出现任何故障, B 值将会大幅跳变, 因此通过设定的门限值能够将故障予以检测。

传统基于 B 值的处理算法无法区分故障来源, 针对该问题本文给出了一种能够区分故障来源的 MRCC 算法处理流程, 如图 1 所示。假设地面基准站个数为 4, 由图 1 可以看出, 地面系统经过一系列完好性监测后形成可用卫星集合, 当可用卫星个数小于 4 颗时, 地面系统告警, 表示此时 GBAS 不可用。当可用卫星个数大于 4 颗时, 则分别计算每颗卫星对应 4 个基准站的 B 值, 并与设定的门限值进行比较, 如果 B 值在门限值范围以内, 说明通过一致性检验, 否则需要将其中最大 B 值对应的基准站予以移除, 然后计

算剩余基准站对应可见卫星的 B 值,并进行判别,如果 B 值不超过门限值,则说明剩余 3 个基准站通过一致性检验,否则说明地面系统可用基准站个数小于 3,不满足系统完好性需求并告警。

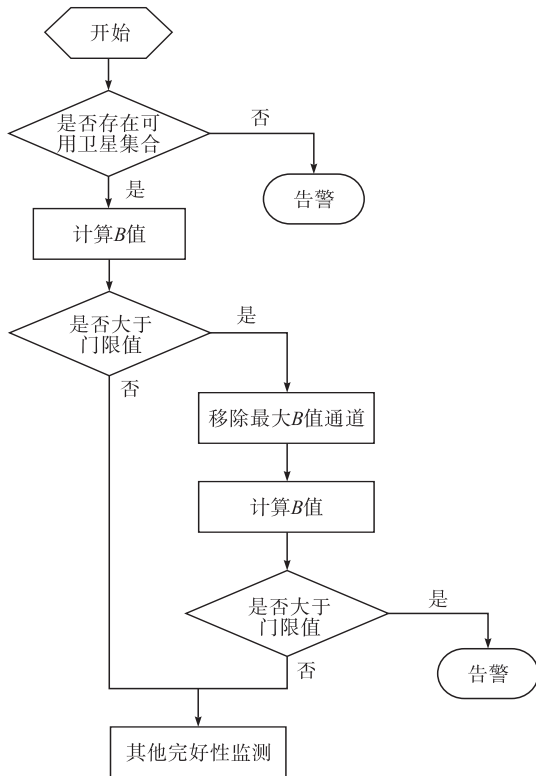


图 1 MRCC 算法流程

3 基于高斯膨胀法的门限值计算方法

为了判别 B 值是否异常,需要确定适合的门限值,本文提出一种基于高斯膨胀法的检测门限值计算方法,具体实现过程如下:

步骤 1 根据 GBAS 地面系统 4 个基准站处理得到的伪距差分校正值得 B 值,并进行预处理,确保所得样本数据具有较好的一致性。

步骤 2 以 10° 为区间划分步骤 1 中所计算得 B 值,并分别计算其均值 $\mu(\theta)$ 和标准差 $\sigma(\theta)$, θ 表示相应卫星仰角大小。

步骤 3 利用多项式拟合卫星仰角区间 $0^\circ \sim 90^\circ$ 内其他角度均值及标准差。

步骤 4 利用步骤 3 中拟合得到的 B 值均值和标准差对样本数据进行归一化,具体计算如下:

$$\bar{x} = \frac{x - \mu(\theta)}{\sigma(\theta)} \quad (16)$$

式中: x 为 4 个基准站计算得 B 值; $\mu(\theta)$ 和 $\sigma(\theta)$ 为步骤 3 中拟合得样本数据均值和标准差; \bar{x} 为归一化后 B 值。

步骤 5 绘制归一化后 B 值的分布直方图,并

计算各个样本区间概率密度值。

步骤 6 根据步骤 5 中计算得概率密度值绘制概率密度分布曲线,并在图中加载均值为 0,标准差为 1 的标准正态分布曲线,然后对标准正态分布曲线进行膨胀,直至膨胀曲线包络样本数据概率密度曲线两侧,由此可得膨胀系数。

确定好膨胀系数后,根据卫星仰角可以得到对应角度下 B 值的均值和标准差,由式 (17) 可以得到 B 值门限值为:

$$Threshold(\theta) = \mu(\theta) \pm K_{fd} \cdot f \cdot \sigma(\theta) \quad (17)$$

式中: $\mu(\theta)$ 、 $\sigma(\theta)$ 分别表示卫星仰角为 θ 时地面系统 B 值的均值和标准差; K_{fd} 为乘数因子; 为满足 I 类精密进近导航完好性需求,取值为 6; f 为计算得膨胀系数^[19]。

对样本数据进行高斯膨胀后其分布特性满足 $\chi \sim N(\mu, f^2 \sigma^2)$, 当采用式 (17) 作为 B 值异常检测门限值时,可以计算得 B 值异常检测误警概率小于 $P(|x - \mu| \geq 6f\sigma) = 2Q(6) = 1.973 \times 10^{-9}$, 满足飞机 I 类精密进近与着陆导航完好性风险需求。

利用实验室 GBAS 平台采集一组 BDS 卫星数据,实验时间为 2019 年 5 月 17 日 8:00 至 2019 年 5 月 18 日 8:00,总时长为 24 h,按步骤 1~6 计算得到膨胀系数,图 2 为归一化后的 B 值概率密度分布曲线,其中蓝色点线为实际过程数据的概率分布,紫色实线为标准高斯正态分布概率密度曲线,红色点画线为经过高斯膨胀后的概率密度曲线,由图 2 可得对应的膨胀系数 $f = 1.251$ 。

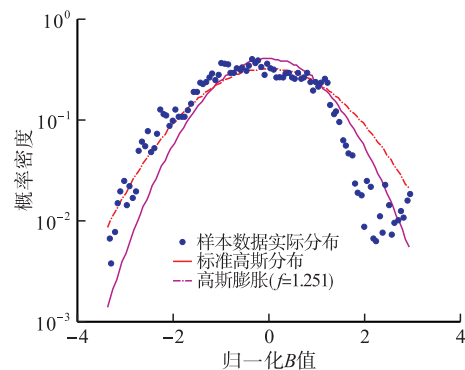


图 2 归一化 B 值概率密度曲线

4 验证实验

4.1 实验环境

文中实验室于 2017 年初研制了 GBAS 原型样机,可实时监测 BDS/GPS 卫星状态。GBAS 地面系统包括:4 个基准站及相应卫星接收天线、中心处理单元以及 VDB 发射电台等,软件部分主要包括以下 4 个进程,如图 3 所示。

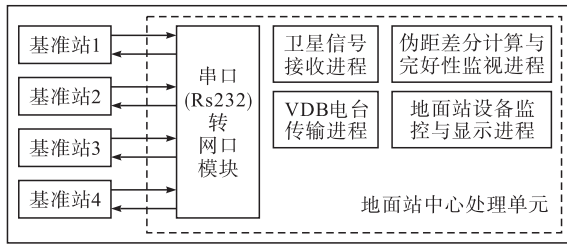


图3 中心处理单元模块

4.2 实验结果分析

GBAS地面系统4个基准站接收卫星信号,并分别计算每个基准站对应可观测卫星的 PR_{SCA} 和 B 值,图4和图5分别为2019年6月1日4个基准站对应6号卫星的 PR_{SCA} 和 B 值及其门限值曲线,图6为利用 B 值计算得地面系统校正值误差标准差随卫星仰角变化曲线,图中红色实线为根据RTCA DO245计算得GBAS地面系统精度等级,说明实验室研制的GBAS原型样机具备A级精度。

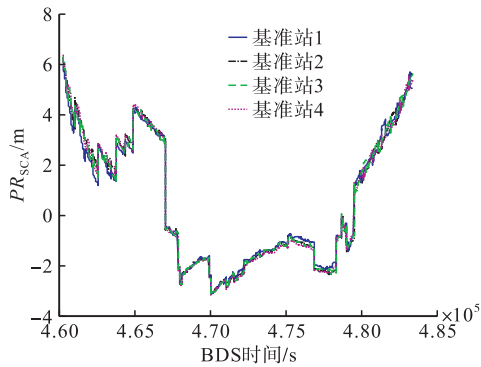


图4 6号卫星对应4个基准站伪距差分校正值

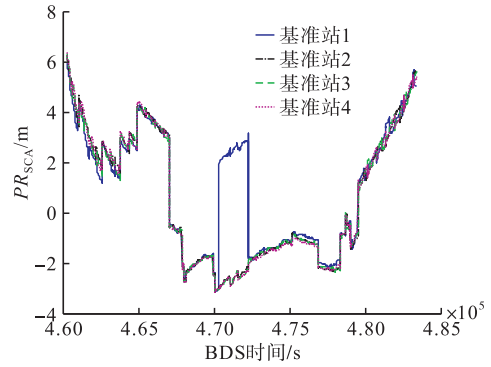


图7 基准站1接收机对应6号卫星注入5m误差后 PR_{SCA} 曲线

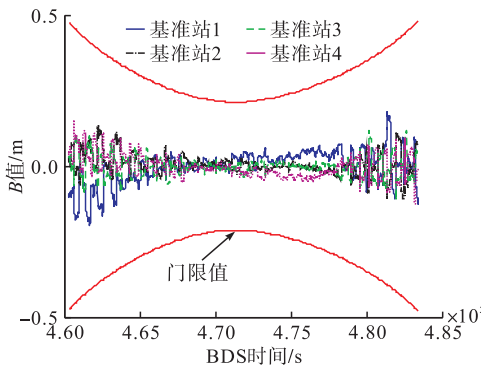


图5 6号卫星对应4个基准站的 B 值及其门限值

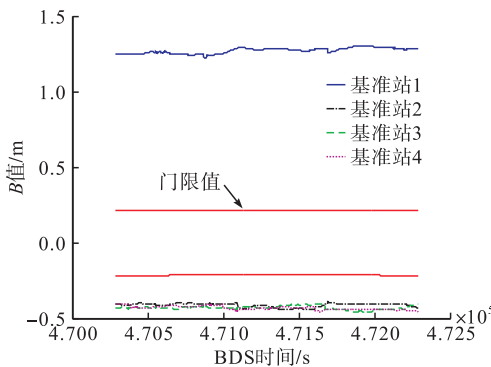


图8 基准站1接收机故障时6号卫星的 B 值及其门限值

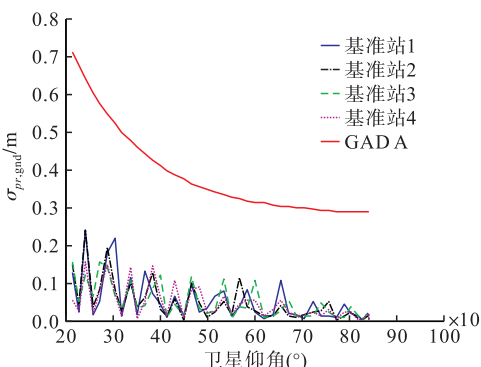


图6 6号卫星伪距差分校正值误差的标准差

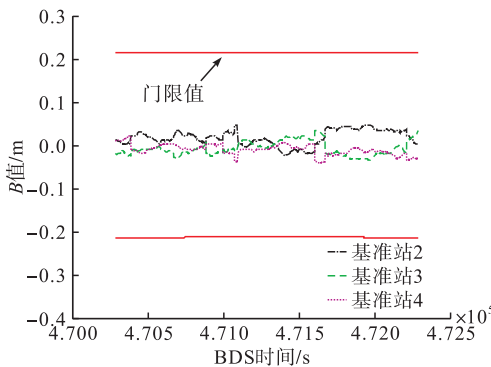


图9 移除基准站1接收机后6号卫星的 B 值及其门限值

由图4~5可以看出,6号卫星在该时间段内的 PR_{SCA} 具有较好的一致性,因此其 B 值没有超出设定的门限值,通过一致性检验,进一步对4个基准站伪距差分校正值进行平均可以得到该时间段内6号卫星所播发的 PR_{CORR} 。由图6可以看出,随着卫星仰角变大,伪距所受多路径以及电离层干扰影响逐渐变小,因此对应的差分校正值误差的标准差也逐渐变小,数据结果与理论分析一致。

为进一步对本文提出的多基准一致性检验算法进行验证,将基准站1对应的接收机伪距观测值在历元10 000至12 000之间(对应的BDS周内时间为470 288~472 288 s)注入5 m测量误差,以此模拟基准站1接收机故障,为方便对比分析,同样选用6号卫星的数据进行分析,图7和图8为历元10 000至12 000之间6号卫星的 PR_{SCA} 和 B 值及其门限值曲线,图9为移除基准站1后6号卫星对应3个基准站 B 值变化曲线。

由图 7、图 8 可以看出,在 470 288 s 至 472 288 s 之间,当基准站 1 接收机发生故障时,对应的 B 值会发生较大幅度的跳变,同时在该时间段内,其他 3 个基准站对应的 B 值也出现较为明显的变化,超出了检测门限值范围,因此无法区分故障接收机。进一步根据本文图 1 给出的 MRCC 算法流程,通过比较 4 个基准站 B 值的大小,可以将基准站 1 予以移除,然后计算得到剩余 3 个基准站的 B 值,由图 9 可以看出,基准站 2~4 的 B 值在门限值范围以内,说明此时有 3 个基准站接收机可用,从而实现了故障接收机的检测与隔离。

5 结语

GBAS 地面系统中 MRCC 算法主要用于检测地面基准站接收机计算得到的差分校正值是否具有 consistency,针对传统基于极大似然估计准则的 MRCC 算法无法区分 GBAS 地面系统基准站接收机故障来源问题,本文在对 GBAS B 值计算理论分析的基础上,给出了一种能够有效确定接收机故障的 MRCC 算法处理流程,并提出了一种基于高斯膨胀法的 B 值门限值计算方法。通过实验室研制的 GBAS 原型系统验证了所提出方法的有效性,地面系统接收机无故障时, B 值在门限值以内,一旦某个基准站接收机发生故障,则能够有效识别该故障并进行隔离,后续需要进一步对该方法的完好性进行评估。

参考文献

[1] LEE J, PULLEN S, DATTER-BARUA S, et al. Real-Time Ionospheric Threat Adaptation Using a Space Weather Prediction for GNSS-Based Aircraft Landing Systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(7): 1752-1761.

[2] XIE G. Optimal on-Airport Monitoring of the Integrity of GPS-Based Landing System[D]. San Francisco, USA:Stanford University, 2004.

[3] FELUX M, DAUTERMANN T, BECKER H. GBAS Landing System-Precision Approach Guidance After ILS[J]. Aircraft Engineering & Aerospace Technology, 2013, 85(5): 382-388.

[4] WANG Z P, MACABIAU C, ZHANG J, et al. Prediction and Analysis of GBAS Integrity Monitoring Availability at Linzhi Airport[J]. GPS Solutions, 2014(18): 27-40.

[5] DAUTERMANN T, MAYER C, ANTREICH F, et al. Non-Gaussian Error Modeling for GBAS Integrity Assessment[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(1): 693-706.

[6] 于耕, 张斌浩, 赵龙. BDS/GPS 双系统组合 GBAS 性

能评估[J]. 测绘通报, 2018(4): 88-91.

[7] XING Z D, ZHAO J B, WANG Z H, et al. Analysis and Improvement to Ionosphere Grads Integrity Monitoring Algorithm in Ground Based Augmentation System[C]//Proceedings of Chinese Satellite Navigation Conference (CSNC). Xi'an, China:[s. n.], 2015: 237-247.

[8] HU J, SUN Q W, SHI X Z. Differential Positioning Algorithm for GBAS Based on Extended Kalman Filtering [C]//Proceedings on the 13th World Congress on Intelligent Control and Automation. Changsha,China: IEEE, 2018: 296-303.

[9] WANG Z P, WANG S J, ZHU Y B, et al. Assessment of Ionospheric Gradient Impacts on Ground-Based Augmentation System (GBAS) Data in Guangdong Province, China[J]. Sensors, 2017(17): 1-23.

[10] XUE R, ZHANG J, ZHU Y B. Cascade Dual Frequency Smoothing for Local Area Augmentation System[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009(22): 49-55.

[11] PULLEN S, LUO M, GLEASON S, et al. GBAS Validation Methodology and Test Results from the Stanford LAAS Integrity Monitor Testbed[C]//Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Salt Lake, USA: ION/IEEE,2000: 1191-1201.

[12] RTCA. Minimum Aviation System Performance Standards for the Local Area Augmentation System (LAAS): RTCA SC-159, DO-245[R]. Washington DC: RT-CA, 2008.

[13] DAUTERMANN T, FELUX M. Approach Service Type D Evaluation of the DLR GBAS Testbed[J]. GPS Solutions, 2012(16): 375-387.

[14] LI L, QUDDUS M, ISON S, et al. Multiple Reference Consistency Check for LAAS: A Novel Position Domain Based Approach[J]. GPS Solutions, 2012(16): 209-220.

[15] 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.

[16] HU J, SUN Q W, SHI X Z. Multiple Reference Consistency Check Algorithm in GBAS Based on S-values Auxiliary[C]//Proceedings of the 37th Chinese Control Conference. Wuhan, China:[s. n.], 2015: 4906-4912.

[17] 刘军, 牟绍君, 张立立, 等. GBAS 中基于导航星监测的 B 值修正算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(8): 1075-1078.

[18] KELLY R. Comparison of LAAS B -Values with Linear Model Optimum B -Values[J]. Journal of the Institute of Navigation, 2000, 47(2): 143-156.

[19] 胡杰, 严勇杰, 单尧. 基于 CUSUM 控制图的电离层慢变故障检测方法[J]. 指挥信息系统与技术, 2019, 10(1): 49-54.