

GBAS 中基于导航星监测的 B 值修正算法

刘 军,牟绍君,张立立,王群仰

(东北大学 计算机科学与工程学院,辽宁 沈阳 110819)

摘 要: GBAS 推动了空中交通管理系统由路基导航向星基导航过渡,其中多参考一致性检测(MRCC)的 B 值是 GBAS 地面完好性检测的核心算法.本文提出基于导航星监测的 B 值修正算法,通过定义卫星伪距修正量误差估计值 S 值对导航星监测,利用高斯膨胀-Shewhat 法推导 S 警示阈值,结合 S 值检测并标记故障卫星,形成新的可用卫星集合,避免由于 B 值无法有效反映具有较大偏差的卫星伪距修正量的误差估计而造成 MRCC 执行逻辑对接收机的整体剔除,对 B 值形成修正作用.实验证明,新算法可有效监测卫星故障,修正 B 值,提高 MRCC 监测能力并提高系统可用性.

关键词: GBAS;可用卫星集合;多参考一致性检测;完好性

中图分类号:TN 967.4 文献标志码:A 文章编号:1005-3026(2016)08-1075-04

B Correction Algorithm in GBAS Based on Navigation Satellites Monitoring Information

LIU Jun, MOU Shao-jun, ZHANG Li-li, WANG Qun-yang

(School of Computer Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LIU Jun, E-mail: liujun@cse.neu.edu.cn)

Abstract: Ground based augmentation system (GBAS) promotes the transition of air traffic management system from roadbed navigation to satellite-based navigation, in which B for multi-reference consistency check (MRCC) is the core algorithm in GBAS. The B correction algorithm is proposed based on the navigation satellites monitoring. The satellite pseudorange correction error S estimated is defined to monitor navigation satellites. With the methods of Gauss expansion-Shewhat, S warning threshold is derived. According to S value detected and fault satellites, a new collection of available satellites is formed, thus it is avoided that the whole receiver may be eliminated by the execution logic of MRCC because the B value cannot effectively reflect a large deviation of satellite pseudorange correction error estimated, which means the B values can be corrected. Experimental results show that the satellite fault can be monitored effectively in the new algorithm, and B value can be corrected, so as to improve the monitoring capacity of MRCC and increase system availability.

Key words: GBAS; collection of available satellites; MRCC; integrity

为将我国北斗卫星导航系统^[1]的导航信号应用于民航飞机精密进场着陆过程,GBAS^[2]为机载设备提供包含伪距修正量、完好性信息和其他精密进近信息,以满足国际民航组织(ICAO)定义的性能指标要求. GBAS 的完好性检测^[3-5]是系统实现的技术难点,地面监测系统通常采用多台基准接收机的冗余信息进行数据的完好性检

测,首先进行单台接收机的观测值检验,然后,对多台接收机提供的差分修正值进行交叉冗余检验,以识别接收机观测量是否存在较大误差.为交叉冗余校验构造的 B 值^[6]校验量是对一组基准接收机中每个独立的基准接收机伪距修正量进行比较,表示接收机对误差贡献的大小^[7].但由于 B 值基于测量域构建,难以区分接收机故障和卫星

故障,故易导致可选用的卫星数量减少.由此,提出了 GBAS 中基于导航星检测的 B 值修正算法.

1 传统多参考一致性(MRCC)检测

1.1 GBAS 中 B 值计算

为排除引起较大伪距修正量误差的接收机通道,通过 B 值进行多参考接收机一致性检测,用以监测卫星与对应接收机的一致性. B 值通过计算不同基准接收机伪距修正量获得,为了保证系统完好性,在地面向航空器发射报文前,需验证所发射伪距修正量的正确性,因此必须剔除超过示警阈值的伪距修正量.

假设有 M 个基准接收机, N 个卫星,包含基

$$P_{fa_n} = \frac{1}{M} P_{fa} = P(v_0) \int_{-T_m}^{T_m} \int_{T_m-x_1}^{T_m} \dots \int_{T_m-\sum_{i=1}^{M-1} x_i}^{T_m} \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^M |C_B|}} \times \exp\left(-\frac{1}{2} \mathbf{x}^T C_B^{-1} \mathbf{x}\right) dx_{i-1} \dots dx_2 dx_1. \quad (2)$$

式中 $\mathbf{x} = [B_1^n \ B_2^n \ \dots \ B_M^n]$;

$$C_B = \frac{\sigma_{pr_gnd}^2}{M(M-1)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{N} & \dots & \frac{1}{N} \\ -\frac{1}{N} & 1 & & \\ & & \ddots & \\ -\frac{1}{N} & & & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

σ_{pr_gnd} 为伪距修正量.

当多参考一致性检测发现 B 值存在异常,即 $B_i^n > B_s$ (B_s 为示警阈值)时,由式(2)、式(3)可知,由于 B 值定义的缺陷,当某一卫星伪距修正量具有较大误差时,所有 B 值均受影响,因而无法准确判别该 B 值异常是由故障卫星还是故障基准接收机造成的,进而影响 MRCC 的误检、漏检的概率.传统基于极大似然估计准则的 B 值检测算法简单地假设卫星不存在故障,由此检测执行逻辑模块认为所有故障均来自于接收机,造成可用接收机数量减少,致使可用卫星数量大大减少,降低了系统性能.因此有必要构造新的 S 值检测卫星故障修正值 B .

2 基于导航星监测的 B 值修正算法

2.1 S 值的确定

由式(1)看出, B 值由伪距修正量计算获得.假设基准接收机为 M 个,卫星为 N 个,构造伪距修正量矩阵:

准接收机 m 站的伪距修正误差平均值与不包含此站的伪距修正误差平均值做差,便可得 B 值,求出与故障影响对应的偏差量.针对参考站 m ,相对于同一颗卫星 j ,不同时刻 B 值计算如下:

$$B_m^j(t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \rho_m^j(t) - \frac{1}{M-1} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^M \rho_m^j(t). \quad (1)$$

式中 ρ 是除去钟差后的码相位伪距修正值.

1.2 传统 MRCC 不足

由文献[8]知,基于传统的极大似然估计准则的 B 值运算,由于同一颗卫星对应不同基准接收机或者同一基准接收机对应不同卫星,使 B 值具有确定的相关性.

假设各基准接收机之间的误警率 P_{fa} 均匀分布,对于第 n 颗卫星,故障检测门限公式如下:

$$\rho = \begin{bmatrix} \rho_1^1 & \rho_1^2 & \dots & \rho_1^j & \dots & \rho_1^N \\ \rho_2^1 & \rho_2^2 & \dots & \rho_2^j & \dots & \rho_2^N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_M^1 & \rho_M^2 & \dots & \rho_M^j & \dots & \rho_M^N \end{bmatrix}. \quad (4)$$

由式(1)、式(4)得,当基准接收机 m 发生故障时,则第 m 行均将受到影响;当卫星 n 发生故障时,则第 n 列均将受到影响.由此,定义 S 值为某接收机 m 中包含卫星 n 的伪距误差平均值与不包含此卫星的伪距误差平均值的差值,可得与卫星故障影响对应的偏差量.

由 S 值定义知, S 取值受限于某一接收机的伪距修正量,由此实现对单一卫星故障的监测,此时卫星星历误差、时钟误差和相对论效应便成为卫星故障监测的重要依据,则 S 值计算如下:

$$S_m^j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\rho_i^j + \delta_{ij}) - \frac{1}{N-1} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N (\rho_i^j + \delta_{ij}). \quad (5)$$

式中 $\delta_{ij} = a_0 + a_1(t^j - t_{oe}) + a_2(t^j - t_{oe})^2 - t_{gd}$; δ_{ij} 为卫星 j 在 t^j 时刻的卫星钟差; a_0, a_1, a_2 为卫星钟差修正参数; t_{oe} 为卫星星历中 t^j 所在时间段的参考时刻.

2.2 S 值示警阈值计算与检测

为了检测 S 值,本实验采用高斯膨胀-Shewhat 算法[9]生成并检测示警阈值,具体步骤如下:

1) 基准接收机针对每个接收通道采集数据.由于不同接收机的 S 值会有不同分布,需为每个接收机单独生成示警阈值.

2) 样本归一化处理. 按跟踪卫星仰角, 每 10° 划分一个区间, 取各区间样本平均值 μ 和方差值 σ , 然后分区进行样本归一化, 求得 μ_{norm} :

$$\mu_{\text{norm}} = \frac{\mu - \mu_{\text{mean}}}{\sigma^2} \quad (6)$$

式中 μ_{mean} 为所有原始样本的均值.

将归一化后偏离度数据进行区间分布统计, 统计每个分区中样本数量和所有样本总数.

3) 高斯膨胀. 依据归一化结果得出样本在区间的概率密度分布, 按标准正态分布方差轨迹对概率密度分布图进行膨胀, 直至曲线“覆盖”两侧样本数据, 得到膨胀系数 f .

4) 利用 Shewhart 控制图设置示警阈值, 并检测 S 值的完好性.

为缩短完好性的系统示警时间, 满足民航适航安全要求, 利用 Shewhart 控制图算法将当前样本信息与示警阈值绘制于同一控制图, 实现大误差快速监测、示警. 定义其示警阈值为

$$S_0 = \mu \pm Kf\sigma \quad (7)$$

根据 3σ 原则, 取 $K = 3$, 采样点出现在 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ 中的概率为 99.73%. 在监测过程中, 当数据分布于 $\pm 3\sigma$ 以外时, 根据统计学原理认为小概率事件不会发生, 即产生示警信号.

2.3 S 值行列判断辅助法

由文献 [10-11] 知, 取 130 s 相关时间, 北斗卫星故障概率小于 GPS 的 4.95×10^{-7} 故障概率. 假设基准接收机故障先验概率为 10^{-5} , 由此推断基准接收机与卫星同时发生故障的概率小于 10^{-10} . 本文只需考虑最多两处故障的情况便可满足 CAT-II 类盲降标准完好性概率为 10^{-9} 的要求.

当 B 值超过示警阈值时, 利用基于导航星检测算法修正 B 值, 鉴别卫星故障; 如果卫星发生故障, 则由执行逻辑剔除相应卫星, 形成新的可用卫星集合, 由此避免基准接收机的整体剔除, 对 B 值形成反馈修正, 增加系统可用性, 提高 MRCC 算法完好性检测水平. S 值行列判断辅助法流程如下.

首先分别计算基于接收机 i 、卫星 j 伪距修正量之和, 并按其数值由大到小的顺序重新排列公式 (4) 中伪距修正量; 计算此时 B_i^j 值, 如果 $B_i^j < B_e$, 则播发伪距修正量, 对应无故障状态; 否则去掉第 m_1 行, 重新计算 B_i^j . 如果 $B_i^j < B_e$, 则播发伪距修正量, 对应一个接收机故障状态; 否则重新加入第 m_1 行, 计算 S_1 . 如果 $S_1 < S_0$, 则去掉第 m_2 行, 重新计算 B_i^j , 播发伪距修正量, 对应两台接

收机同时故障状态; 否则去掉第 n_1 列, 计算 B_i^j . 如果 $B_i^j < B_e$, 则播发伪距修正量, 对应一处卫星故障状态; 否则计算 S_2 . 如果 $S_2 < S_0$, 则去掉第 m_1 行, 重新计算 B_i^j , 播发伪距修正量, 对应卫星、接收机各一处故障状态; 否则去掉第 n_2 列, 重新计算 B_i^j , 播发伪距修正量, 对应两颗卫星故障状态.

由此, 完成最多发生两处故障的 6 种可能故障状态监测, 实现 B 值异常时有效检测故障来源, 剔除故障卫星数据, 从而达到对卫星故障与接收机故障的识别, 对 B 值进行修正提高完好性检测水平.

3 仿真验证

采用 4 台 GPS/BEIDOU 基准接收机搭建实验平台, 分别放置于实验室顶楼, 接收北斗导航系统信号, 并利用计算机进行数据记录、算法处理. 实验中数据经历载波平滑、差分修正等处理最终实现地面站功能. 实验对 B 值和 S 值进行 24 h 观测, 见图 1. 通过加入人为干扰观测算法性能, 其中体现完好性检测性能指标包括误检率和漏检率.

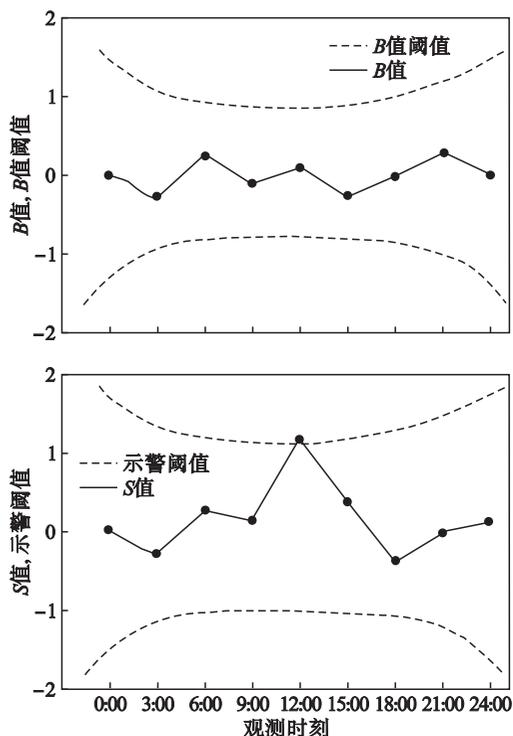


图 1 北斗卫星 24 h 观测的 B 值和 S 值
Fig. 1 B and S values observed for 24 h by Beidou satellite

实验于 12:00 人为对北斗 8 号卫星引入错误伪距修正量误差. 由图 1a 可以看出, 当引入错误

伪距修正量误差时,由于 B 值定义的缺陷使其无较大变化,而图 1b 中 S 值出现较大波动,对故障卫星实现示警,表明导航卫星故障监测的 S 值算法可以有效监测卫星故障,增强完好性检测功能。

如表 1 所示,基于导航星监测的 B 值修正算法完好性检测水平平均高于 B 值检测法,使误检、漏检概率大大降低。与接收机故障监测相比,卫星故障状态监测是难点, S 值检测算法使卫星故障监测水平得到较大提高。在 B 值未发现异常,但存在卫星故障漏检的情况下,修正算法对多参考一致性具有最好的增强效果。

表 1 B 值和基于卫星故障检测 MRCC 完好性水平
Table 1 Integrity level of B values and MRCC based on satellite fault detection

故障类型	B	基于导航星监测的 B 值
无	7.2×10^{-10}	3.0×10^{-10}
1 个接收机故障	9.9×10^{-5}	5.5×10^{-7}
2 个接收机故障	6.2×10^{-5}	3.8×10^{-6}
1 个接收机、1 个卫星故障	1.4×10^{-4}	7.1×10^{-6}
1 个卫星故障	1.4×10^{-4}	7.1×10^{-6}
2 个卫星故障	1.8×10^{-4}	1.9×10^{-5}

如图 2 所示,当卫星出现故障时, B 值检测无法有效监测其故障,导致垂直保护极限 VPL 增大,可用性水平降低,而检测 S 值可有效监测卫星故障,使 $VPL < 10$ m,满足 CAT I 精密进近要求。

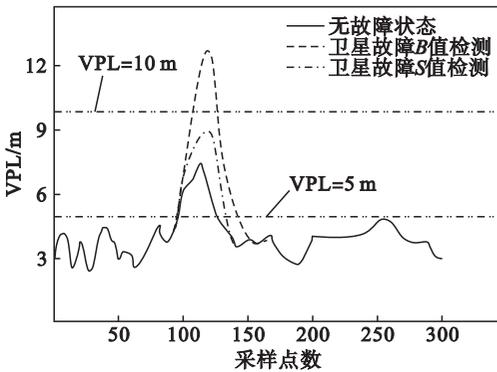


图 2 卫星可用性对比

Fig. 2 Comparison of satellite availabilities

4 结 语

完好性检测是 GBAS 地基增强系统核心算法之一,MRCC 利用似然比原理,生成 B 值,由于利用 B 值对基准接收机伪距修正量进行一致性检测时,未能反映卫星伪距修正量偏差的一致性,使其难以区别故障来源于卫星还是基准接收机,

本文提出的基于导航星监测的 B 值修正算法可以区分卫星故障。实验证明,新算法对于卫星故障具有更好的监测能力,在 B 值超过阈值时有效增加可用卫星集合的冗余,完善 MRCC 算法,提高 GBAS 的可用性,提高定位精度。

参考文献:

- [1] 李剑锋,胡伍生.“北斗二代”地面监控站建设方案设想[J].现代测绘,2012,35(1):3-6.
(Li Jian-feng, Hu Wu-sheng. Design of ground monitoring stations of compass navigation satellite system[J]. *Modern Surveying and Mapping* 2012, 35(1): 3-6.)
- [2] Yun Y, Cho J, Heo M B, et al. GBAS reference receiver clock adjustment effects on continuity and integrity performance [J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems* 2013, 49(4): 2296-2309.
- [3] 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): 693-707.
- [4] Gopalakrishnan G L, Schmidt-Bruecken F, Kalden O. Simulation of integrity and availability of multi-constellation and multi-frequency GNSS augmentation systems[C]// 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies. New York: IEEE, 2013: 1157-1162.
- [5] Schuster W, Ochieng W. Novel integrity concept for CAT III precision approaches and taxiing: extended GBAS (E-GBAS) [J]. *Journal of Navigation*, 2011, 64(4): 695-710.
- [6] Li L, Qudus M, Joon S, et al. Multiple reference consistency check for LAAS: a novel position domain based approach [J]. *GPS Solutions* 2012, 16(2): 209-220.
- [7] 杨文辉,周保军. LAAS 地面系统多基准一致性检测算法的分析[J].电子学报,2006,34(3):469-471.
(Yang Wen-hui, Zhou Bao-jun. Analysis of multiple reference consistency check on LAAS ground facility [J]. *Acta Electronica Sinica* 2006, 34(3): 469-471.)
- [8] 甘兴利. GPS 局域增强系统的完善性检测技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
(Gan Xing-li. Research on the integrity monitoring of GPS local area augmentation system [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008.)
- [9] Yun Y, Yun H, Kim D, et al. A Gaussian sum filter approach for DGNS integrity monitoring [J]. *Journal of Navigation*, 2008, 61(4): 687-703.
- [10] Van Dyke K L. The world after SA: benefits to GPS integrity position location and navigation symposium [C]// Position Location and Navigation Symposium, IEEE 2000. San Diego, 2000: 387-394.
- [11] Moradi R, Schuster W, Feng S, et al. The carrier-multipath observable: a new carrier-phase multipath mitigation technique [J]. *GPS Solutions* 2015, 19(1): 73-82.