

GPS+BD 双模接收机自主完好性监测算法研究

孙 隽¹, 韦萍萍²

(1. 重庆交通大学 教育技术中心, 重庆 400074;
2. 贵州师范学院 数学与计算机科学学院, 贵州 贵阳 550018)

摘 要:在高动态导航中,卫星接收机自主完好性监测(RAIM)越来越受到重视。假如在单一模式下监测,RAIM 系统至少需要接收到 5 颗卫星的信息才能监测出异常卫星,而如果需要辨识出故障卫星,则至少需要接收到 6 颗卫星的信息,这就使得单一的接收模式很难保证在全球范围内进行全天候的完整性检测。而随着北斗(BD)系统的迅速发展,使得采用 GPS+BD 导航模式进行监测成为可能。文中讨论了 GPS 和 BD 组合接收机中,在某时刻假设只有一颗卫星出现故障的情况下,怎样使用加权方法进行自主完好性监测。并通过仿真 GPS、BD 单模式和 GPS+BD 模式下的故障识别率和 RAIM 完好性可用率,证明了 GPS+BD 模式 RAIM 算法要优于任何一种单系统模式的 RAIM 算法。

关键词:GPS+BD 模式 RAIM;自主完好性监测;最小二乘;ARP
中图分类号:TP39 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-629X(2013)07-0238-04
doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.07.061

Research on RAIM Algorithm of GPS+BD Double Model Receiver

SUN Jun¹, WEI Ping-ping²

(1. Educational Technology Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. School of Mathematics and Computer Science, Guizhou Normal University, Guizhou 550018, China)

Abstract:In high dynamic navigation, satellite Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM) is gaining more attention. Five satellites would be needed at least to monitor abnormal satellite in single RAIM model system, more than six satellites must be provided to identify the faulty satellites. This makes it hard to ensure the all-weather autonomous integrity monitoring in global space using single GPS or BD model. With the rapid development of BD system, it makes possible to use GPS+BD double model. Discuss how to use method of weighting in RAIM monitor supposed only one trouble satellite in GPS+BD model receiver. And it separates simulation in single GPS or BD model and GPS+BD double model. Contrasting failure recognition rate and completeness or adequateness of RAIM, it demonstrated double module RAIM is superior than the any kind of RAIM algorithm.
Key words:GPS+BD mode RAIM; autonomous integrity monitoring; least squares; ARP

1 GPS+BD 模式 RAIM 算法模型

在某时刻条件下, GPS+BD 模式组合接收机接收系统总共收到有 n 颗可见卫星, 根据接收通道中得到所有可见卫星的伪距和导航电文, 联立方程组如下式:

$$\begin{cases} \rho_1 = \sqrt{(x_1 - x_u)^2 + (y_1 - y_u)^2 + (z_1 - z_u)^2} + b_u + l_1 \delta_b \\ \rho_2 = \sqrt{(x_2 - x_u)^2 + (y_2 - y_u)^2 + (z_2 - z_u)^2} + b_u + l_2 \delta_b \\ \dots \\ \rho_n = \sqrt{(x_n - x_u)^2 + (y_n - y_u)^2 + (z_n - z_u)^2} + b_u + l_n \delta_b \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ_i —第 i 颗卫星伪距;
 (x_i, y_i, z_i) —第 i 颗卫星位置;
 (x_u, y_u, z_u) —所求的用户坐标;
 b_u —是用户使用的接收机系统时钟与 GPS 系统时钟差量引起的距离偏差, $b_u = ct_u$;
 δ_b —由 BD 与 GPS 系统的钟差量^[1]而产生的距离偏差;
 l_i —当第 i 颗卫星是 GPS 系统的卫星时, 则 $l_i = 0$;
当第 i 颗卫星是 BD 系统中的卫星时, 则 $l_i = 1$ 。
得到解算方程:

收稿日期:2012-06-05 修回日期:2012-10-25 网络出版时间:2013-04-08
基金项目:贵州省科技计划项目:黔科合 J 字[2012]2290 号;重庆交通大学实验教学改革与研究项目[SYJ201221]
作者简介:孙 隽(1975-),女,山东临沂人,工程师,主要从事计算机实验室教学研究。
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20130408.1631.046.html>

$$\Delta \rho = \begin{pmatrix} \Delta \rho_1 \\ \Delta \rho_2 \\ \Delta \rho_3 \\ \dots \\ \Delta \rho_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{x1} & \alpha_{y1} & \alpha_{z1} & l_1 \\ \alpha_{x2} & \alpha_{y2} & \alpha_{z2} & l_2 \\ \alpha_{x3} & \alpha_{y3} & \alpha_{z3} & l_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{xn} & \alpha_{yn} & \alpha_{zn} & l_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x_u \\ \Delta y_u \\ \Delta z_u \\ \Delta \delta_b \end{pmatrix} \quad (2)$$

写成矩阵形式: $\Delta \rho = H \Delta U$

$$\text{此时 } \Delta \rho = \begin{pmatrix} \Delta \rho_1 \\ \Delta \rho_2 \\ \Delta \rho_3 \\ \dots \\ \Delta \rho_n \end{pmatrix} \quad \Delta U = \begin{pmatrix} \Delta x_u \\ \Delta y_u \\ \Delta z_u \\ \Delta \delta_b \end{pmatrix}$$

$$H = \begin{pmatrix} \alpha_{x1} & \alpha_{y1} & \alpha_{z1} & l_1 \\ \alpha_{x2} & \alpha_{y2} & \alpha_{z2} & l_2 \\ \alpha_{x3} & \alpha_{y3} & \alpha_{z3} & l_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{xn} & \alpha_{yn} & \alpha_{zn} & l_n \end{pmatrix}$$

H 中:

$$\begin{cases} \alpha_{xi} = -\frac{x_i - x_{u0}}{r_i} \\ \alpha_{yi} = -\frac{y_i - y_{u0}}{r_i} \\ \alpha_{zi} = -\frac{z_i - z_{u0}}{r_i} \end{cases} \quad (3)$$

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_{u0})^2 + (y_i - y_{u0})^2 + (z_i - z_{u0})^2}$$

加权最小二乘估计结果为:

$$\Delta U = (H^T P H)^{-1} H^T P \Delta \rho \quad (4)$$

GPS+BD 模式下如有 n 颗卫星可见,则伪距方程如下:

$$\Delta \rho = H \Delta U + b + \varepsilon \quad (5)$$

式中, $\Delta \rho = \rho - \rho_0$, 表示所测量伪距和伪距估计值的差, $\Delta \rho \in R^n$; H 的定义如式(2), $H \in R^{n \times 5}$, 且在可见卫星中,只要有任意的五颗卫星不在同一平面上, H 的秩就为 5; 定义 ΔU 见式(2), 表示用户位置偏差与钟差偏差的信息向量^[2,3], $\Delta U \in R^{5 \times 1}$; ε 是高斯测量噪声, $\varepsilon \in R^n$ 且 $E(\varepsilon) = 0$, $\text{Cov}(\varepsilon) = \text{diag}(\sigma_1^2, \dots, \sigma_n^2)$; 由于诸如卫星故障或者已飞出视线等原因,引起伪距偏差用 b 来表示, $b \in R^n$, 在第 i 颗卫星发生故障时, $b =$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \dots \\ b_i \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix}, \text{当没有故障卫星时 } b \text{ 取零。}$$

故障检测采用加权最小二乘残差法

$$\Delta \hat{U} = (H^T Q^{-1} H)^{-1} H^T Q^{-1} \Delta \rho = A \Delta \rho \quad (6)$$

式中, $A = (H^T Q^{-1} H)^{-1} H^T Q^{-1}$, $A \in R^{6 \times n}$, Q 为协因素阵, 与权阵互为逆矩阵, $Q^{-1} = \text{diag}(\frac{\sigma_0^2}{\sigma_1^2}, \dots, \frac{\sigma_0^2}{\sigma_n^2})$, 设:

$Q^{-1} = q^T q$, 式中 $q = \text{diag}(\frac{\sigma_0}{\sigma_1}, \dots, \frac{\sigma_0}{\sigma_n})$ 。则定位误差 d 得到如下式:

$$\begin{aligned} d &= \Delta \hat{U} - \Delta U \\ &= (H^T Q^{-1} H)^{-1} H^T Q^{-1} \cdot (H \Delta U + b + \varepsilon) - \Delta U \\ &= A(b + \varepsilon) \end{aligned} \quad (7)$$

伪距加权最小二乘残差 V 为:

$$\begin{aligned} V &= \Delta \rho - H \Delta \hat{U} \\ &= (I - H (H^T Q^{-1} H)^{-1} H^T Q^{-1}) (b + \varepsilon) \\ &= B(b + \varepsilon) \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $B = (I - H (H^T Q^{-1} H)^{-1} H^T Q^{-1})$, $B \in R^{n \times n}$

$$\begin{aligned} V^T Q^{-1} V &= (b + \varepsilon)^T B^T Q^{-1} B (b + \varepsilon) \\ &= (qb + q\varepsilon)^T q^T B (qb + q\varepsilon) \\ &= (\omega + e)^T B (\omega + e) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $e = q\varepsilon$, $e \in R^n$, 且 $E(e) = 0$, $\text{Cov}(e) = \sigma_0^2 I$; $\omega = qb$, $\omega \in R^n$, $E(\omega + e) = \omega$, $\text{Cov}(\omega + e) = \sigma_0^2 I$ 。

显然在无故障卫星情况下,

$$b = 0: V^T Q^{-1} V = e^T B e \quad (10)$$

这里定义 $DWSE = V^T Q^{-1} V$, 在没有故障卫星条件下, 归一化统计量 $DWSE / \sigma_0^2$, 需要服从自由度为 $(n - 5)$ 的卡方分布^[4,5]; 当存在故障卫星的条件下, $DWSE / \sigma_0^2$ 则应服从自由度为 $(n - 5)$ 的非中心化的卡方分布^[6]。

$$\text{统计假设: } \begin{cases} H_0 & b = 0 \\ H_1 & b \neq 0 \end{cases}$$

则虚警概率如下:

$$P_{FA} = P(DWSE > T_D | H_0) = Q(T_D / \sigma_0^2 | n - 5) \quad (11)$$

式中, $Q(\chi^2 | r) = 1 - P(\chi^2 | r)$, 且 $P(\chi^2 | r)$ 是卡方分布的概率分布函数^[6,7]:

$$P(\chi^2 | r) = [2^{r/2} \Gamma(r/2)]^{-1} \int_0^{\chi^2} y^{r/2-1} e^{-y/2} dy \quad (12)$$

在给定虚警概率下, 门限值取:

$$T_D = \sigma_0^2 Q^{-1}(P_{FA} | n - 6) \quad (13)$$

2 GPS+BD 模式下加权的 ARP 对自主完备性监测的可用性判定

自主完备性监测对卫星故障的识别会受到可见星数目和卫星几何分布的影响^[8]。GPS+BD 模式下, 在某些地区很有可能将无法同时满足所有所需要的完好性性能指标^[9]的要求, 此时的完好性监测结果会不真。因而, 需要根据性能指标的要求, 对当前可见星的几何

分布进行有效判断,决定所接收到的卫星是不是适合做完好性监测^[10]。

假设在当卫星出故障的情况下, $b = \begin{pmatrix} 0 \\ \dots \\ b_i \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix}$, 则:

$$\omega = qb = \begin{pmatrix} 0 \\ \dots \\ \frac{\sigma_0 b_i}{\sigma_i} \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \dots \\ \omega_i \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix}, \text{式中 } \omega_i = \frac{\sigma_0 b_i}{\sigma_i}。$$

由故障卫星引起的定位误差的数学期望为:

$$E(d) = E(A(b + \varepsilon)) = Ab$$

其中水平定位误差为: $d_k = (d_x^2 + d_y^2)^{1/2} = (A_{1i}^2 + A_{2i}^2)^{1/2} |b_i|$ 。

而此时的统计量的数学期望为: $E(DWSE) = E((\omega + e)^T B(\omega + e)) = \omega^T B \omega = B_{ii} \omega_i^2$ 。

定义水平误差和距离残差之比为该卫星的斜率:

$$SLOPE_i = d_k / \sqrt{E(DWSE) / (n - 5)} =$$

$$\frac{\sigma_i}{\sigma_0} \sqrt{(A_{1i}^2 + A_{2i}^2)(n - 5) / B_{ii}}$$

对 n 颗可见卫星可以求得 n 个 SLOPE 值。现以六颗可见卫星为例,其分布图如图 1 所示,从图中可以看出,在假设有相同水平定位误差^[11]时,斜率最大的卫星所对应的检测量值最小,所以该卫星如果出现故障时,最难被检测到,这颗卫星最容易发生漏检的情况,如果根据该卫星所对应的 ARP 值为: $ARP = SLOPE_{\max} T_D$,预先设定 T_{ARP} ,去判定 $ARP \leq T_{ARP}$,则自主完备性算法可用,否则该算法将不可用。

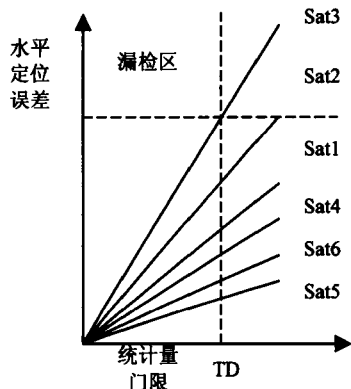


图 1 SLOPE 的分布

3 GPS+BD 模式自主完备性监测算法仿真

3.1 仿真条件

本实验设定用户位置为 25°N, 121.5°E, 高度为

0m, 纬度变化范围在 24°N 到 26°N 之间, 经度变化范围在 120.5°E 到 122.5°E 之间。采样间隔设置为 60s, 监测时间设置为 24h 即 86400s。假设选取所有可见星中的一颗为故障星, 进行故障识别率仿真分析。设定故障偏差以 20m 为步长, 从 0m 增长到 500m, 并且将在用户位置上所能够观测到的所有可见星都用于监测。

3.2 仿真结果

在图 2 ~ 图 4 中, 通过对比可以看到单系统导航与 GPS+BD 组合导航的故障识别率与粗差的关系, 还可以发现当粗差达到 128m 时, GPS+BD 组合导航系统能够 100% 检测到故障; 但是如果使用 GPS 单系统导航则至少需要 170m 的粗差, 才能使得故障检测率达到 100%; 而对于北斗单系统更是由于存在不可用时刻, 故障检测率根本无法达到 100%。GPS+BD 组合系统就是通过增加所有可见卫星的数目和增加 RAIM 冗余信息来提高 RAIM 的可用性, 同时也减少了 RAIM

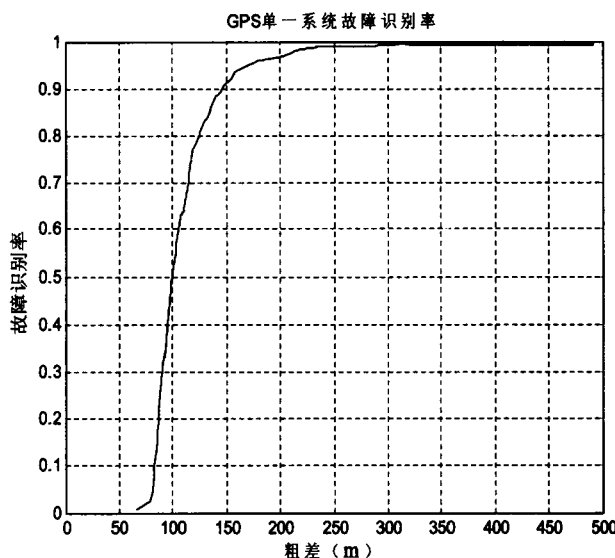


图 2 GPS 单一系统故障识别率

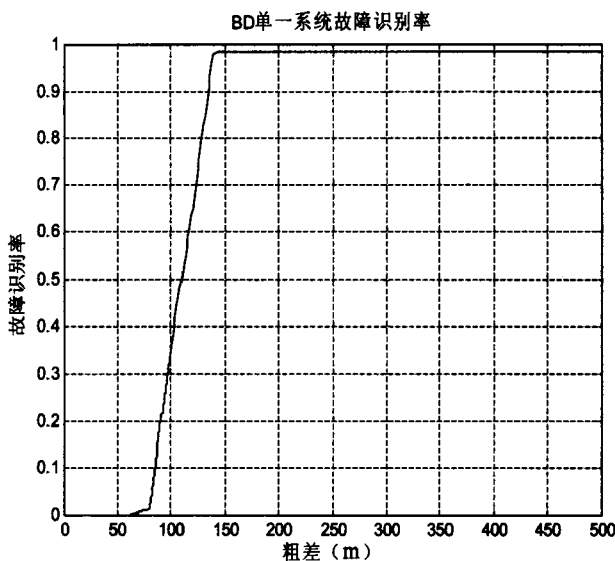


图 3 北斗单一系统故障检测率

的空洞^[13],在一定程度上提高了 RAIM 算法的性能。所以 GPS+BD 式组合导航的故障识别能力要优于单系统导航故障识别能力。同时卫星的屏蔽角的限值设定为 8°和 15°。设置误差告警的限值为 556m。误警率 P_{FA} 设定 0.002/h,漏警率 P_{miss} 设定为 0.001。由表 1 可以看出 GPS+BD 式导航 RAIM 算法可以提高 RAIM 的可用率,达到单系统无法实现的 RAIM 可用率。GPS+BD 式下 RAIM 的可用率完好性可达到 100%。

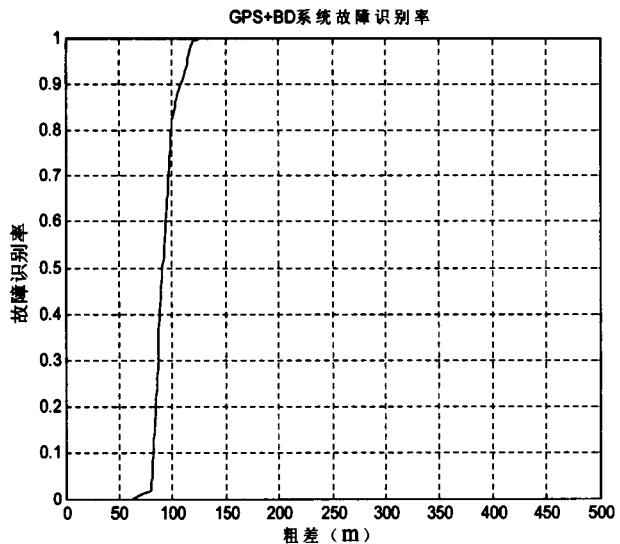


图 4 GPS+北斗组合故障识别率

表 1 完好性可用率表(%)

| 遮蔽角 | GPS 单系统 | 北斗单系统 | GPS/北斗组合 |
|-----|---------|-------|----------|
| 8° | 100 | 54.64 | 100 |
| 15° | 86.37 | 44.39 | 100 |

4 结束语

卫星接收机自主完好性监测技术的关键是故障检测和故障识别。文中通过假设某时刻若有一颗卫星出现故障的情况下,利用 GPS 和 BD 组合接收机使用加权方法进行自主完好性监测。并通过仿真 GPS、BD 单

模式和 GPS+BD 模式下的故障识别率和 RAIM 完好性可用率,进一步证明了 GPS+BD 双模式 RAIM 算法是优于任何一种单系统模式的 RAIM 算法。

参考文献:

[1] 陈小平,滕云龙,徐红兵.接收机时钟辅助 RAIM 算法研究[J].宇航学报,2009,30(1):271-275.

[2] Parkinson B W,Spilker J J. Global position system:theory and applications, volume II [M]. American: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. ,1996.

[3] 孙淑光. GPS 接收机自主完整性监视(RAIM)的最小二乘法研究[J].测控技术,2004,23(z1):242-243.

[4] Chey J, Lee J G. Fault Detection and Isolation Using Satellite Geometry in RAIM[C]//Proc of the ION GPS/GNSS. Portland:[s. n.],2003.

[5] Zhang Qiang, Zhang Xiaolin, Chang Xiaoming. Research on RAIM Algorithm under the Assumption of Simultaneous Multiple Satellites Failure[C]//Proc of Eighth ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing. [s. l.]:[s. n.],2007.

[6] 盛 骤,谢式千,潘承毅. 概率论和数理统计[M]. 北京:高等教育出版社,2010.

[7] 韩曜旭,赵铁成,梁 振,等. GPS 接收机 RAIM 方法比较[J]. 科技创新导报,2011(8):134-134.

[8] 李 飞,段哲民,龚 诚,等. GNSS 接收机自主完好性监测算法研究[J]. 测绘通报,2007(8):14-15.

[9] 解 楠. 高动态卫星定位接收机技术研究[J]. 中国工程物理研究院科技年报,2010(1):115-117.

[10] 徐伯健,符京杨,敬必刚,等. 双模导航接收机时间系统一致性研究[J]. 无线电工程,2010,40(6):51-53.

[11] 高瑞乾. 卫星导航接收机自主完好性监测可用性判断方法研究[J]. 科教前哨,2012(5):38-40.

[12] 任 锴,杨 力. GPS 和 GLONASS 系统下 RAIM 空洞预报[J]. 全球定位系统,2009(4):25-29.

(上接第 237 页)

对图像进行分层压缩[J]. 国防科技大学学报,2007,29(5):54-59.

[10] 侯 彪,徐 谦,刘 凤,等. 基于第二代 Bandelet 域隐马尔可夫树模型的图像分割[J]. 自动化学报,2009,35(5):498-504.

[11] 金 光. 基于第二代 bandelet 变换的纹理图像分割[D]. 成都:西南交通大学,2008.

[12] 杨岳湘,罗 永,叶昭晖,等. 基于 bandelet 与自适应矩阵范数的全频率无损水印方法[J]. 计算机研究与发展,2007,44(12):1996-2003.

[13] 李铁钢,马驷良,张忠波,等. 基于 bandelet 变换的手背静脉识别算法[J]. 吉林大学学报(理学版),2007,45(6):975-978.

[14] Qu Xiaobo, Yan Jingwen, Xie Guofu, et al. A novel image fusion algorithm based on bandelet transform[J]. Chinese Optics Letters,2007,5(10):569-572.

GPS+BD双模接收机自主完好性监测算法研究

作者：孙隼, 韦萍萍, SUN Jun, WEI Ping-ping
作者单位：孙隼, SUN Jun(重庆交通大学教育技术中心, 重庆, 400074), 韦萍萍, WEI Ping-ping(贵州师范学院数学与计算机科学学院, 贵州贵阳, 550018)
刊名：计算机技术与发展 
英文刊名：Computer Technology and Development
年, 卷(期)：2013, 23(7)

本文链接：http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201307061.aspx