

GPS 接收机基于奇偶矢量的 RAIM 算法研究

李 颖, 李 猛

(解放军 61769 部队, 黑龙江 哈尔滨 150039)

摘要: RAIM 是指用户接收机利用多余观测量为定位解自主地提供完善性监测, 其基本功能包括故障检测 (FD) 及故障排除 (FE) 两个部分。文中对基于奇偶矢量法的 GPS 接收机自主完善性监测 (RAIM) 算法进行分析与研究, 并以具体数据为例, 对该算法进行验证分析。

关键词: 奇偶矢量; RAIM 算法; 径向误差保护值; 漏警率

中图分类号: P228.4 **文献标识码:** B **文章编号:** 1672 - 5867(2012)01 - 0158 - 03

Study on RAIM Algorithm of GPS Receiver Based on Parity Vector

LI Ying, LI Meng

(PLA 61769 Troops, Harbin 150039, China)

Abstract: RAIM can provide integrated autonomous monitoring with redundant observation of users' receivers for positioning solution, and its basic functions include fault detection and fault exclusion. The paper discusses the influence of satellite's geometrical distribution, presents the parity vector model, introduces the principle of fault detection and exclusion using parity vector by the practical data and validates the RAIM algorithm of parity vector in the end.

Key words: parity vector; RAIM algorithm; radial error; leaking alarm probability

0 引 言

由于 GPS 系统在军事领域和现代战争中发挥着巨大的作用, 所以对它的完善性要求就更加严格。GPS 自主式完整性检测 (RAIM, Receiver Autonomous Integrity Monitoring) 就是指当 GPS 接收机在执行任务过程中, 可能会由于存在故障星或长时间假锁等各种原因而导致系统可靠性出现问题, 如系统不能用于导航服务或导航精度超出给定范围。此时, 导航系统应当具备及时发现故障并通知用户的能力, 以使用户消除故障源的影响, 保证用户导航的正常进行。目前利用 GPS 信号进行检测的 RAIM 算法分为三种: 范围比较法、奇偶空间法和残差最小二乘法。由于范围比较法不精确, 产生的误差比较大, 因而没有后两种方法应用广泛。本文仅介绍奇偶空间矢量的 RAIM 算法。

1 卫星几何分布对 RAIM 算法的影响

RAIM 需要解决两个问题: 卫星是否存在故障和故障存在于哪颗卫星。RAIM 通过多余的 GPS 观测量来解决这两个问题, 当观测到 5 颗卫星时, 就可以利用故障检测

(FD) 功能来解决前一个问题; 当观测到 6 颗卫星时, 就可以利用故障排除 (FE) 功能来解决后一个问题。有时几何分布不好时, 某颗故障较多的卫星尽管会产生较大的定位误差, 但产生的观测量 $\omega^T \omega$ 却很小, 这就就会产生漏检情况。为保证 RAIM 的漏检概率尽可能小, 必须在卫星的几何分布满足一定条件时, 才能应用 RAIM 算法, 否则就不能用 RAIM 来检测故障星。在 GPS 系统的定位解算过程中, 最难检测的卫星就是其偏差能产生最大斜率的卫星。因此, 可以用近似径向误差保护值 ARP (Approximated Radial - Error Protected) 来作为几何分布可用性的衡量指标。ARP 值只与卫星的几何分布和检测门限有关, 具体的计算方法如下:

首先定义矩阵 A, B :

$$A = (G^T G)^{-1} G^T, B = G (G^T G)^{-1} G^T \quad (1)$$

其中, G 是 $n \cdot 4$ 维的系数矩阵, 是由各卫星至用户接收机的方向余弦向量构成的线性化矩阵。计算每颗卫星的斜率 $Slope$ 值, 则:

$$Slope(i) = [(A_{1i}^2 + A_{2i}^2)(n-4)/(1-B_{1i})]^{1/2} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

则 $Slope(i)$ 中最大值:

收稿日期: 2010 - 12 - 22

作者简介: 李 颖 (1981 -), 女, 内蒙古海拉尔人, 助理工程师, 硕士, 2007 年毕业于哈尔滨工业大学工程热物理专业, 主要从事卫星导航等工作。

$$Slope_{max} = [Slope(\hat{y})]_{max} \quad (3)$$

计算 ART 值:

$$ART = Slope_{max} \cdot T_D \quad (4)$$

式中, T_D 为门限值,即在每次要检测之前,首先根据定位卫星计算 ART 值,并将其与 ARP_m 值进行比较,以便判断 RAIM 算法是否可用。若 $ARP \geq ARP_m(n)$,RAIM 算法不可用;若 $ARP < ARP_m(n)$,则 RAIM 算法可用。表 1 给出的是在我国范围内,飞机非精密进场时 $ARP_m(n)$ 的值,它是由试验获得的。

表 1 $ARP_m(n)$ 值
Tab.1 Value of $ARP_m(n)$

卫星数 n	6	7	8
$ARP_m(n)$	337	343	347

2 基于奇偶矢量的故障检测和识别

假设无观测误差,则 GPS 伪距观测模型表达式为: $y = Gx$,其中, $G = QR$; Q 为 $n \cdot n$ 阶正交矩阵; R 为 $n \cdot 4$ 阶上三角矩阵。

两边左乘 Q^T ,得:

$$Q^T y = Rx \quad (5)$$

又 Q^T 和 R 可分别表示为:

$$Q^T = \begin{bmatrix} Q_x \\ Q_p \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} R_x \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, Q_x 为 Q^T 的前 4 行; Q_p 为剩下的 $n - 4$ 行; R_x 为 R 的前 4 行。

则有如下表达式:

$$0 = Q_p y \quad (7)$$

考虑观测误差的影响,即 $y = Gx + \varepsilon$,则:

$$p = Q_p \varepsilon \quad (8)$$

其中, Q_p 为奇偶空间矩阵,矢量 p 为观测误差被奇偶空间矩阵 Q_p 投影得到,一般称为奇偶空间矢量,它能直接反映故障卫星的偏差信息,所以基于奇偶矢量可构造检验统计量 $p^T p$,进行故障检测和识别。每颗卫星都有自己的特征偏差线,其斜率由向量 Q_p 各列的元素决定,即第 i 颗卫星特征偏差线斜率为:

$$q_{2i}/q_{1i} (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (9)$$

其中, q_{2i} 和 q_{1i} 为 Q_p 的第 i 列元素,由此可得故障识别法则: 含有粗差的卫星就是那颗特征偏差线与观测的奇

偶向量 p 重合的卫星。

为最大化偏差的可视性,将奇偶矢量投影到 Q_p 的每一列,并进行标准化,可得到观测量:

$$r_i = \frac{|p^T Q_{p,i}|}{|Q_{p,i}|} \quad (10)$$

以 r_i 为检验统计量,当无观测偏差时, r_i 为零均值正态分布,方差与观测误差方差相同。给定告警概率 P_{FA} ,检测限值为:

$$T_r = \sigma_0 \text{erf}^{-1}(P_{FA}/2n) \quad (11)$$

其中, $\text{erf}(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\lambda^2} d\lambda$,已知 P_{FA} ,可事先计算得到限值 T_r ,对每个统计量 r_i 与 T_r 比较,若 $r_i > T_r$,则检测到该卫星有故障。

3 基于奇偶矢量的完善性保证

当第 i 个观测量存在偏差 b_i ,则 r_i 的均值为:

$$\mu_i = |Q_{p,i}| b_i \quad (12)$$

给定漏警概率 P_{MD} ,应有下面的概率等式成立:

$$Pr(r_i < T_r) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \int_0^{T_r} e^{-\frac{(x-\mu_i)^2}{2\sigma_0^2}} dx = P_{MD} \quad (13)$$

漏警概率为:

$$P_{MD} = \text{erf}\left(\frac{u_i - T_r}{\sigma_0}\right) \quad (14)$$

则 P_{MD} 对应的均值为:

$$u = T_r + \sigma_0 \text{erf}^{-1}(P_{MD}) \quad (15)$$

P_{MD} 条件下的最小检测偏差为:

$$b_i = \frac{u}{|Q_{p,i}|} \quad (16)$$

可得偏差 b_i 产生的水平定位误差为:

$$E(\hat{x}) = \begin{bmatrix} \delta x_i \\ \delta y_i \end{bmatrix} = R_x^{-1} Q_x b_i \quad (17)$$

取最大定位误差,则水平定位误差保护级为:

$$HPL = (\sqrt{\delta x_i^2 + \delta y_i^2})_{max} \quad (18)$$

此 HPL 值表示满足 P_{MD} 条件时可能达到的最大水平定位误差,若其小于水平定位误差告警限值 HAL ,则故障检测具有完善性保证。

4 计算实例

现在用实际数据对以上介绍的算法进行验证。以 BJFS 2009 年 1 月 1 日站 UTC2/00/00 的 C1 数据为例(见表 2)。

表 2 BJFS 站 2009/1/1,2/00/00 时刻 C1 数据
Tab.2 Data of BJFS station at 2009/1/1,2/00/00

PRN	31	25	13	1	2
C1	23 253 465.323	22 312 566.236	22 285 452.604	20 994 612.623	21 094 344.963
PRN	3	16			
C1	20 326 412.706	20 954 356.269			

由(1)~(4)式列出的计算式算得 $ARP = 276$,由表 1 知观测到 7 颗卫星时的 $ARP_m = 343$, $ARP < ARP_m(n)$,故

RAIM 算法可用。由(10)~(11)公式算出奇偶矢量 P 和奇偶空间矩阵 Q_p ,得到 $T_r = 4.5364$ m。在没有引入误差

状态下,根据(6)式算得: $r_1 = 0.386\ 9$; $r_2 = 0.304\ 2$; $r_3 = 0.063\ 2$; $r_4 = 0.523\ 1$; $r_5 = 0.432\ 65$; $r_6 = 0.032\ 1$; $r_7 = 0.023\ 6$ 。

由于 $r_i < T_r$,可知该组卫星没有故障卫星存在。在第 6 颗即 3 号卫星引入 50 m 误差,数据见表 3。

表 3 BJFS 站 2009/1/1,2/00/00 时刻 C1 数据(增加误差)
Tab. 3 Data of BJFS station at 2009/1/1,2/00/00(Add error)

PRN	31	25	13	1	2
C1	23 253 465.323	22 312 566.236	22 285 452.604	20 994 612.623	21 094 344.963
PRN	3	16			
C1	20 326 462.706	20 954 356.269			

在引入 50 m 误差状态下,算得: $r_1 = 1.330\ 2$; $r_2 = 3.256\ 0$; $r_3 = 2.095\ 1$; $r_4 = 3.265\ 4$; $r_5 = 1.362\ 7$; $r_6 = 5.965\ 4$; $r_7 = 0.362\ 6$ 。

比较得知 $r_6 > T_r$,故可知该组卫星存在故障卫星是第 6 颗即 3 号卫星。将 3 号卫星剔除后,再进行计算得: $r_1 = 0.430\ 1$; $r_2 = 0.356\ 4$; $r_3 = 0.295\ 2$; $r_4 = 0.255\ 4$; $r_5 = 0.365\ 4$; $r_6 = 0.065\ 4$ 。

可见故障卫星确实为 3 号卫星。为验证故障检测与排除的正确性,进行奇偶矢量完好性校验,漏警率 $P_{MD} = 0.001$,根据(12)~(15)式算得 $u = 6.008\ 2$,可得:

$$\sqrt{\delta x_i^2 + \delta y_i^2} = 42.1234; 40.236\ 5; 35.123\ 6; 46.120\ 3; 39.236\ 9; 38.471\ 9; 37.498\ 7$$

$$\text{故 } HPL = (\sqrt{\delta x_i^2 + \delta y_i^2})_{\max} = 46.120\ 3。$$

通过资料查阅,HAL 限值取为 600 m, HPL 远小于 HAL,故障检测具备完好性。

5 结束语

通过奇偶矢量 RAIM 算法的实例计算分析,可知奇偶矢量算法简单直观,矩阵运算量小,节省计算时间,能提高接收机 RAIM 功能的处理效率,更容易满足 GPS 完善性对告警时间的限制。但是 RAIM 可用性与伪距误差也有关,必须考虑有 SA 和无 SA 时的不同影响,且仅 24 颗

GPS 卫星星座,RAIM 的可用性并不能满足任何领域的导航需求,必须利用其他系统辅助,以增强几何结构,以进一步提高 RAIM 算法的可用性。

参考文献:

- [1] 陈金平. 完善性增强研究[D]. 郑州: 信息工程大学测绘学院博士学位论文,2001.
- [2] 黄晓瑞,田巍,李波. GPS 接收机的自主完善性监测算法研究[J]. 遥测遥控,2003(1): 1-3.
- [3] 陈家斌,袁信. GPS 完善性监测研究[J]. 航空电子技术,1996(1): 28-23.
- [4] 廖向前,黄顺吉. 奇偶矢量法用于 GPS 的故障检测和隔离[J]. 电子科技大学学报,1997,26(3): 262-266.
- [5] 王淑芳,孙妍. 卫星自主完好性监测技术[J]. 信息工程大学测绘学院学报,2005,22(4): 266-268.
- [6] Sturza M A. Navigation System Integrity Monitoring Using Redundant Measurements[J]. Journal of The Institute of Navigation. 1988-89,35(4): 483-501.
- [7] Brown R Grover. A baseline GPS RAIM scheme and a note on the equivalence of three RAIM method[J]. Journal of The Institute of Navigation,1992,38(3): 301-314.

[编辑: 宋丽茹]

(上接第 157 页)

经过前面的数据处理后,处理成功的地籍数据完全满足了地籍数据管理业务的需要。并且经过前面的数据处理,地籍数据库已经在 SQL 中建立起来,通过 SQL 可以查询所建的数据库。

3 结束语

本文以大同市浑源县为例,利用 SuperMap 地籍建库软件建立了浑源县的地籍数据库,得出了如下的结论:

1) 针对浑源县没有自己的地籍数据库,提出了利用 SuperMap 建立城镇地籍数据库的具体方法,并且取得了良好的效果。对于其他地方建立地籍数据库有一定的实用价值。

2) 在将 Cass 数据转入 SuperMap 的过程中存在着中间过程多、数据丢失的现象,这应在后续的研究中加以改进。

参考文献:

- [1] 侯海滨,侯海江. 基于 MapGIS 的县级土地利用数据库的建设[J]. 测绘与空间地理信息,2010,33(1): 136-139.
- [2] 国家测绘局测绘标准化研究所. GB/T 20257.1-2007 国家基本比例尺地图图式第 1 部分: 1:500 1:1 000 1:2 000 地形图图式[S]. 北京: 中国标准出版社,2007.
- [3] 林增杰,严星. 地籍管理[M]. 北京: 中国人民大学出版社,2001.
- [4] 国土资源部地籍管理司. 地籍管理手册[M]. 北京: 中国大地出版社,2002.
- [5] 周晓光,陈军. 地籍信息系统综述[J]. 地理信息世界,2006,4(3): 35-40,48.
- [6] 国土资源部信息中心,中国土地勘测规划院. TD/T 1015-2007 土地地籍数据库标准[S]. 北京: 中国标准出版社,2007.

[编辑: 胡雪]