

北斗用户机自主完好性监测研究

卢虎^{1,2}, 廉杰²

(1. 空军工程大学 理学院, 陕西 西安 710051; 2. 西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072)

摘要:导航系统完好性是指当导航系统处于不健康状态,不能准确导航时向用户提供及时报警的能力,对于卫星导航系统而言,系统所能提供的完好性指标和导航定位精度是同样重要的。接收机自主完好性监视(RAIM)技术是设在用户接收机中的一种算法。它利用导航卫星的冗余信息对多个导航解进行一致性检验,从而达到完好性监测的目的,而且该方法的优越性日益凸显。RAIM技术的关键是故障检测和故障识别,针对北斗用户机RAIM算法与性能进行分析,并提出一种基于奇偶相关分组方法的新型故障卫星分离方法,图形和数据化的仿真结果充分证明了新算法的可行性和有效性。

关键词:北斗用户机;自主完好性;最小二乘残差和法

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2010.03.012

中图分类号: TN967.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2010)03-0053-05

我国的北斗导航定位系统现已完成第1阶段的星座组网,正在进一步完善之中。

对卫星导航系统的要求,不仅仅包括对导航定位精度的要求,而且也包括对系统的完好性的要求。一般而言,如果在给定的精度指标下的置信度很差,那么这样的系统尽管能给出保证精度的服务,实际上是没有多大用途的。用户要求在获得一定精度的同时,系统的可靠性也得到保证。完好性与系统的置信度有关,该置信度依赖于导航系统提供的信息的正确性,包括当系统或导航数据不能用于导航业务时,系统向用户及时提供警告信息的能力^[1]。

目前导航卫星完好性监测方法通常有3种,即广域增强系统(Wide Area Augmentation System, WAAS)、地面增强完好性监测(Ground Augmentation Integrity Monitoring, GAIM)和接收机自主完好性监测(Receiver Autonomous Integrity Monitoring, RAIM)。接收机自主完好性监视是利用接收机自身的冗余观测值进行卫星故障的检测识别。它无需外部设备的辅助,花费较低,容易实现,是目前应用较为广泛的一种完好性监视算法,该方法较其它2种监测方法日益凸显出其优越性^[2-3]。

1 卫星故障监测方法

导航系统的故障监测算法一般有3种:最小二乘残差和法(SSE)^[4]、奇偶空间法(Parity)^[5]和伪距残差法^[6]。可以证明,这3种算法在相同的虚警率下是等价的,本文选取最小二乘残差和法SSE作为北斗卫星故障的监测算法。

设北斗用户机量测方程为:

$$y = A_u S - \rho = Hx + \varepsilon \quad (1)$$

式中: y 是 $(m \times 1)$ 维量测矢量; A_u 是表示用户与各卫星之间几何关系的矩阵; S 表示卫星状态矢量; ρ 为测

收稿日期:2009-11-09

基金项目:航空科学基金资助项目(20085553016;20090196004);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(SJ08F12);陕西省电子信息系统集成重点实验室基金资助项目(200908A)

作者简介:卢虎(1975-),男,陕西西安人,讲师,博士(后),主要从事卫星导航与定位研究。

E-mail: sdkmsdn@sina.com.

量伪距; H 是几何观测阵; ϵ 为量测误差向量; x 是用户状态向量(一般为4维),可得用户状态的最小二乘解为:

$$\hat{x}_{ls} = (H^T H)^{-1} H^T y \quad (2)$$

量测向量 y 的估计值又可表示为:

$$\hat{y} = H \hat{x}_{ls} \quad (3)$$

于是可得伪距残差向量为:

$$R = y - \hat{y} = [I - H(H^T H)^{-1} H^T] \epsilon \quad (4)$$

由于伪距残差向量不是一个标量值,故不能作为统计检测量,所以为了完全地保留误差信息,将 R 的各个分量的平方和(Sum of the Squares of Range Residual Errors, SSE)作为统计检测量。设 $u = K\epsilon$, K 为正交矩阵,则伪距残差向量 R 各分量的平方和可写成:

$$R^T R = u^T \text{diag}(1, \dots, 1, 0, \dots, 0) u = u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_{m-4}^2 \quad (5)$$

在应用中,通常采用 $T_x = \sqrt{\text{SSE}/N}$ 作为统计检测量,其中 N 为 χ^2 分布的自由度,即用户机系统的信息冗余度。在用户机可以同时观测到GPS时, $N = n - 5$,否则 $N = n - 4$ 。在每次定位时将 T_x 与门限值 T_D 比较,若 $T_x \geq T_D$,有故障导航卫星;若 $T_x < T_D$,无故障导航卫星。

采用卫星星座在 $t = 1200$ s时的5颗可视北斗卫星,虚警概率设定为0.005,相关性检测时置信概率设定为0.01。在仿真过程中,特意将卫星数据中的其中一组改动,使之偏离准确数据,从而体现卫星故障。图1和图2分别给出北斗用户机分别在SSE故障的检测算法执行前后定位误差仿真结果,从中可以看出,剔除故障卫星信号后,用户机的定位精度获得极大提升。

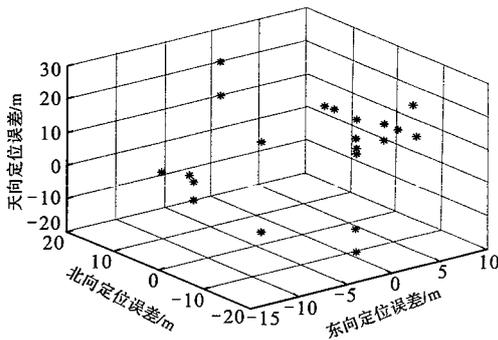


图1 监测算法执行前定位误差仿真结果

Fig. 1 The position error results before detection

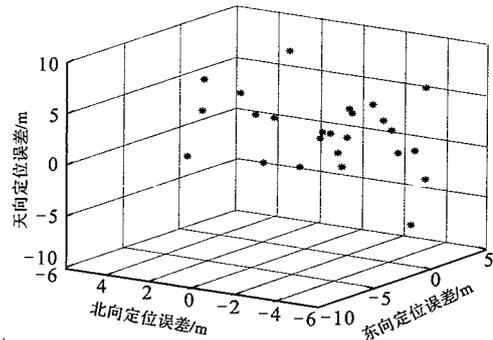


图2 监测算法执行后定位误差仿真结果

Fig. 2 The position error results after detection

2 卫星故障分离方法

故障北斗卫星的分离也就是粗差的分离问题,比较常见的算法有分组法^[7],向前向后法^[8],和奇偶相关系数法(Parity)^[9]。由于奇偶相关系数可以利用故障检测产生的数据,因此下面主要研究奇偶相关系数法及其改进方法。

2.1 奇偶相关系数法

首先我们研究伪距测量误差对Parity向量的影响向量。将式(4)中 ϵ 按各分量拆开可得:

$$R = P\epsilon = \begin{bmatrix} P_{11} \\ P_{21} \\ \vdots \\ P_{m1} \end{bmatrix} \epsilon_1 + \begin{bmatrix} P_{12} \\ P_{22} \\ \vdots \\ P_{m2} \end{bmatrix} \epsilon_2 + \dots + \begin{bmatrix} P_{1n} \\ P_{2n} \\ \dots \\ P_{mn} \end{bmatrix} \epsilon_n = P_1 \epsilon_1 + P_2 \epsilon_2 + \dots + P_n \epsilon_n = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_n]^T \epsilon \quad (6)$$

式中 $m = n - 4$, P_i 为矩阵 P 的第 i 列,它是一个与测量误差无关但是反应了误差 ϵ_i 对Parity向量 R 的内在影响程度的向量,作为 R 的列向量,它由卫星与用户的相对位置决定。

由式(6)可以看出,向量 R 是 $P_i \epsilon_i$ 的叠加, ϵ_i 越大, $|P_i \epsilon_i|$ 越大, P_i 在 R 中占的比重越大,因此,当 ϵ_i 出

现粗差时,表现为 R 与 P_i 具有相当强的相关性。可以通过检测 R 与 P_i 的相关性来判断粗差出现在哪一颗卫星上。

2.2 一种新型故障卫星分离方法及仿真

现有的奇偶相关系数算法具体实现过程主要分为2种:一种是同时探测多个粗差的算法,另一种是逐个探测粗差的算法。两者的区别在于前者一次同时对多个测量量进行探测,对所有大于限值的测量量进行剔除,而后者测依次排除最大的测量量直到统计量 $T_x < T_D$ 为止。

研究发现,由于北斗系统可视卫星较少, P_i 维数较小,各向量间相关性比较大,当出现多个粗差的时候, R 并不与某一个 P_i 完全相关,所以,用第1种方法很难检测出来,而第2种方法检测过程相对第1种又相对繁琐。

本文提出了一种将2种奇偶相关方法和传统的分组法(其基本原理就是一旦检测出完好性有问题,就产生每组包含 $n-1$ 颗卫星的 n 组卫星,分别求出 n 个解,从而检测出不包含故障卫星的一组卫星)结合起来的一种新的方法,具体流程见图3。

仿真条件同图1,分别对单个粗差的分离和多个粗差的分离进行2次仿真。单个粗差的分离是给随机的某可视卫星伪距测量量加上500m的粗差,多个粗差的分离则给随机2颗可视卫星分别加上500m的粗差。对用户位置进行求解并进行完整性检测,发现粗差后分别用4种方法分离故障卫星,4种方法分别为:同时探测多个粗差的算法、将同时探测及逐一探测相结合的算法、将同时和逐一探测以及分组法相结合的新算法、分组法,各重复计算10000次。同时对上述4种方法的正确识别次数和计算所耗时间进行统计,由于处理的过程不一样,4种方法的表现也有差别,结果见表1。

表1 各种方法的故障识别率统计

Tab. 1 Malfunction identify ratio statistics of different algorithm

	同时	同时/逐一	同时/逐一/分组	分组法
单粗差	0.916 8	0.993 4	0.993 4	0.993 6
多粗差	0.0	0.681 2	0.949 2	0.998 2

从表1可以看出不管是单个粗差还是多个粗差,同时探测法的正确分离概率最低,出现多个粗差时同时探测法完全失效,在单个粗差时分组法和同时/逐一结合法以及同时/逐一/分组结合法正确分离概率相当,存在多个粗差时,同时/逐一探测法的正确分离率就变低了,只有0.6812,仿真中还得出其错误分离率有0.0495,分离失败的几率高达0.2693。相对而言,同时/逐一/分组结合探测法正确分离率较高,大部分情况都可以正确分离故障卫星,而且所耗时间较少,分组法的正确分离率是最高的,但是分组法计算相当繁琐,仿真时平均所耗时间是同时/逐一/分组结合法的2.42倍。

综上,本文提出的将同时探测多个粗差和逐一探测粗差以及分组法相结合的新算法具有实用性和简捷性相结合的效果。

3 北斗用户机 RAIM 性能仿真

根据以上对北斗用户机自主完好性监测的描述,RAIM性能主要从故障监测率、故障识别率和可用率3个指标进行衡量^[10]。

3.1 RAIM 故障监测率和故障识别率仿真

1) 仿真条件

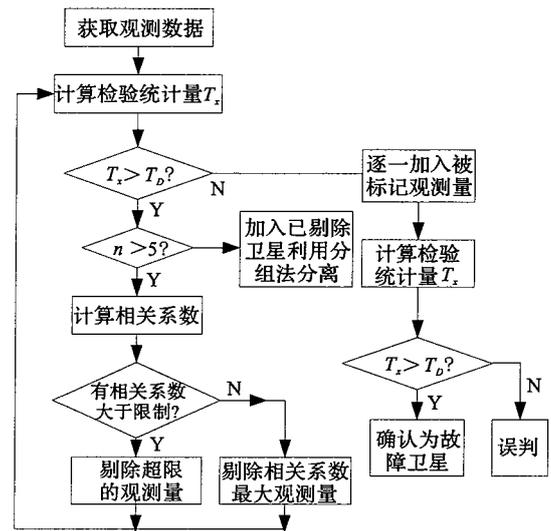


图3 Parity + 分组分离算法流程图

Fig. 3 The flow chart of Parity + packet algorithm

用户机置于海拔 0 m 高度的固定位置,采样间隔为 30 s,监测 12 h,选取 3 号星为故障星,故障偏差以 20 m 为步长从 0 增长到 500 m,所有在用户位置上观测到的可见星都用于监测,仿真结果如图 4 和图 5 所示。

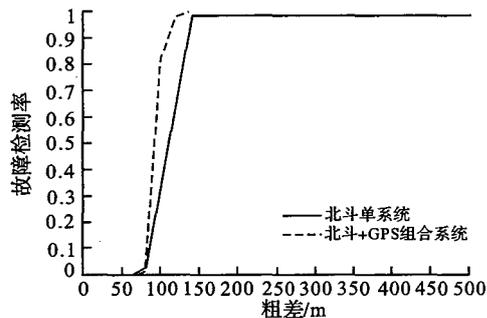


图4 系统故障检测率

Fig. 4 The failure - detecting ratio of receiver

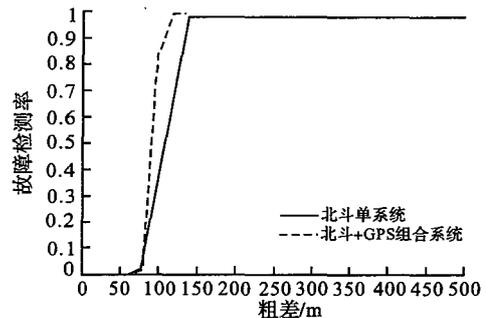


图5 系统故障识别率

Fig. 5 The failure - excluding ratio of receiver

2) 仿真结果

通过对比单北斗系统导航与“北斗+GPS”组合导航的故障检测率可以发现,组合导航的故障检测能力要优于单系统导航故障检测能力。这体现在当粗差达到 140 m 时,组合导航系统能 100% 检测到故障;北斗单系统由于存在不可用时刻,故障检测率无法达到 100%。组合系统通过增加可见卫星数目,增加 RAIM 的冗余信息,提高 RAIM 的可用性,减少 RAIM 空洞,在一定程度上能够提高 RAIM 算法性能。

通过对比单系统导航与组合导航的故障识别率同样可以发现,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。其原因与组合导航的故障检测能力要优于单系统导航故障检测能力的原因相同。

3.2 RAIM 可用率仿真

1) 仿真条件

纬度变化范围 $24.1^{\circ}\text{N} - 26.1^{\circ}\text{N}$,经度变化范围 $120.6^{\circ}\text{E} - 122.6^{\circ}\text{E}$ 。在覆盖范围内按 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 间隔取 500 个格点。采样间隔为 60 s,监测 32 400 s (12 h)。卫星屏蔽角限值选择 5° 和 15° 。RAIM 可用性门限的误差告警限值设置为 500 m,误警率设置为 0.001/h,漏警率设为 0.001 5。

2) 仿真结果

由表 2 可以看出,GPS 系统自身的观测几何分布要优于北斗系统的观测几何分布,这体现在前者 RAIM 可用率始终高于后者。采用组合模式可以达到增强观测几何以提高 RAIM 的可用率,达到单系统无法实现的 RAIM 可用率。由于 15° 是导航接收机遮蔽角上限,因此可以得到结论,组合导航 RAIM 可用率的完好性可达到 100%。

表 2 地面网格法计算完好性可用率表

Tab.2 RAIM of ground grid algorithm

遮蔽角	GPS 单系统 (%)	北斗单系统 (%)	GPS/北斗组合 (%)
5°	100	52.78	100
15°	87.45	42.37	100

4 结论

RAIM 一方面保证了定位精度,另一方面实现了对卫星工作状态的监控,增强了定位结果的可信性,是目前卫星定位获得完好性监视时唯一自主有效的方法。

北斗用户机自主完好性监视的应用将大大提高北斗卫星导航的应用范围,为高动态环境导航提供了可靠性保障,在未来的北斗导航用户机中必将得到极其广泛的应用。

参考文献:

- [1] 李飞,段哲民. GPS 接收机自主完好性监视算法研究及仿真[J]. 测绘科学, 2009,34(1):136-138.

- LI Fei, DUAN Zheming. Research and Simulation on RAIM Algorithm of GPS[J]. Science of Surveying and Mapping, 2009, 34(1): 136 - 138. (in Chinese)
- [2] Lee Y C. Analysis of Range and Position Comparison Methods as A Methods as A Means to Provide GPS Integrity in the User Receiver[C]//Proceedings of the 42nd Annual Meeting. Washington DC: Institute of Navigation, 1986: 1 - 4.
- [3] Brown R G, Mcburney P W. Self - contained GPS Integrity Check Using Maximum Solution Separation[J]. Navigation, 1988, 35(1): 41 - 45.
- [4] Parkinson B W, Axelrad P. Autonomous GPS Integrity Monitoring Using the Pseudorange Residual[J]. Navigation, 1988, 35(2): 255 - 274.
- [5] Brown R G. A Baseline GPS RAIM Scheme and A Note on the Equivalence of Three RAIM Methods [J]. Navigation, 1992, 39(3): 301 - 316.
- [6] Belabbas B, Gass F. RAIM Algorithms Analysis for A Combined GPS/Galileo Constellation [C]//ION GNSS 2005. Long Beach; Long Beach Convention Center, 2005: 1781 - 1788.
- [7] Sturza M A. Navigation System Integrity Monitoring Using Redundant Measurements [J]. Navigation, 1988, 35(4): 483 - 501.
- [8] Pratap Misra, Per Enge. Global Positioning System Signals, Measurements, and Performance [M]. Lincoln: Ganga - Jamuna Press, 2001.
- [9] Kaplan Elliott D, Hegarty Christopher J. Understanding GPS Principles and Applications [M] . Boston, MA: Artech House, 2006.
- [10] Elder M E. The Physical Attributes of Autonomous GPS Mobile Navigation [C]// ION NTM 2006. Long Beach; Long Beach Convention Center, 2005: 781 - 787.

(编辑:徐楠楠)

Research on RAIM Algorithm of Beidou Receiver

LU Hu^{1,2}, LIAN Jie¹

(1. Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Electronic Information School, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: With the widespread use of satellite navigation technique, the requirement of the precision and effectiveness in particular of navigation is more and more strict. To guarantee the requirement, the method of RAIM is addressed. The superiority of the method has become more and more apparent. The common methods of RAIM include the comparison of pseudo - range, the LSE and the Parity method. In this article, the novel method is studied and simulated. The graphic and numeral simulation results adequately demonstrate that the method is feasible.

Key words: Beidou receiver; receiver autonomous integrity; sum of the squares of range residual errors