全球导航卫星系统多星故障排除新方法

陈灿辉 张晓林

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 在全球导航卫星系统中,多颗卫星同时发生故障的概率会随着观测卫星数的增加而增加,从而,在接收机自主完好性监测中需考虑多星故障的处理.针对故障检测比故障排除简单、且故障检测率比故障排除率高的特征,以故障检测为基础,提出了一种新的多星故障排除方法——随机搜索法.该方法采用二进制对观测卫星进行编码,通过随机初始化方式获得初始无故障星座,再通过逐步搜索未选卫星方式来得到最终的含有最多无故障卫星的星座,实现故障排除功能.仿真结果表明:大部分情形下,新方法能获得99%以上的故障排除率,既能进行单星故障排除,也能进行多星故障排除,能有效满足全球导航卫星系统关于自主完好性的要求.

关 键 词: 卫星导航; 故障排除; 故障检测; 接收机自主完好性监测

中图分类号: TN 967.1

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)12-1479-05

Novel method of multiple-satellite faults exclusion for global navigation satellite system

Chen Canhui Zhang Xiaolin

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In global navigation satellite system (GNSS), with the increase in the number of observational satellites comes an increase in the probability of simultaneous multiple-satellite faults. Therefore, the multiple-satellite faults should be taken into account in receiver autonomous integrity monitoring (RAIM). The approach of fault detection is simpler than that of fault exclusion and the fault detection rate (FDR) is higher than the fault exclusion rate (FER), considering the features of satellite navigation system, a novel multiple-satellite faults exclusion method was proposed based on fault detection, named random search method (RSM). The binary code for observational satellites was employed in the new method. Firstly, the initial fault free constellation was obtained by random initialization in RSM. And the final fault free constellation with the largest number of observational satellites was obtained by the search of unselected satellites gradually based on the initialization result. And so, the function of fault exclusion was realized. Simulation results show that, in most cases, the FER of RSM is more than 99%. And the new method has the capable of fault exclusion either for single satellite fault or for simultaneous multiple-satellite faults, and it can effectively meet the requirement of autonomous integrity of GNSS.

Key words: satellite navigation; fault exclusion; fault detection; receiver autonomous integrity monitoring (RAIM)

收稿日期: 2010-08-02; **网络出版时间**: 2011-12-21 09:56; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20111221.0956.006

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20111221.0956.006.html

基金项目: 国防科工局航天民用专项; 北京市重点学科基金资助项目(XK100070525)

作者简介: 陈灿辉(1973 -),男, 湖南汨罗人,博士生, canhuich@yahoo.com.cn.

在卫星导航系统中,接收机自主完好性监测(RAIM,Receiver Autonomous Integrity Monitoring)是一种基于一致性检验的自包容完好性监测方法[1],它通过对冗余观测信息的检测来判断测量结果中是否含有难以接受的较大卫星距离误差,当系统性能超出指定的容差级时,它能实时有效地给用户提供告警信息[2]. 目前,关于 RAIM 的研究大多集中在单星故障的假设上[3],然而,在一些对完好性要求特别苛刻的领域,如民用航空领域,这种单故障假设并不能满足要求. 特别是在全球导航卫星系统(GNSS,Global Navigation Satellite System)中,多星座联合导航势成必然,多颗卫星同时发生故障的概率会增大,尤其是两颗卫星同时发生错误的概率将不能再被忽略,在进行 RAIM 算法研究中应予以考虑.

RAIM 包含 2 种功能,即故障检测与故障排除. 显然,故障排除功能更难实现[1]. 对于采用卫星导航系统作为辅助或补充导航的用户来说,仅具有故障检测功能是足够的,因为用户可以根据检测结果来决定是否信任该辅助或补充方式的导航结果. 然而,对于采用卫星导航系统作为主用导航甚或是唯一导航方式的用户而言,显然,仅仅检测出故障是不够的,还必须能够快速进行故障排除,以使操作可以在不间断的情况下继续进行[4],这就要求接收机必须具有故障检测与排除(FDE,Fault Detection and Exclusion)功能.

在故障检测和排除算法中,传统上主要采用基于单星故障假设的广义似然比法来进行,比较简单而常用的是基于当前伪距观测量的快照(snapshot)算法[4-5]. 这类算法主要有奇偶矢量法、最小二乘残差法及距离比较法等,这些方法总体上而言是等价的[5],它们多用于单故障检测和识别,不能实现多星故障排除. 而且,目前的故障排除方法几乎无一例外的均是通过某种方式找出故障卫星,然后排除卫星以获得无故障星座. 为了实现卫星导航定位系统实时有效地基于多卫星故障的排故功能,本文提出了一种新的故障排除方法,该方法与传统排故方法不同,它不以找出故障卫星为出发点,而是以一种逆向思维来看待与处理故障排除问题,以找出无故障星座为原则来进行. 仿真结果表明该方法能有效地排除多卫星故障,获得无故障卫星星座,有效提高卫星导航系统的可靠性.

1 广义似然比方法

卫星导航系统伪距观测方程[4]可表示为

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{H}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{\varepsilon} \tag{1}$$

其中,$\boldsymbol{y}$ 表示伪距残差矢量,即观测伪距与预测伪距之差,$\boldsymbol{y} \in \mathbf{R}^n$,$n$ 为观测卫星数;$\boldsymbol{x}$ 表示接收机位置和钟差增量矢量,$\boldsymbol{x} \in \mathbf{R}^m$,$m = 3 + n_s$,$n_s$ 表示卫星系统个数;$\boldsymbol{H}$ 是 $\boldsymbol{x}$ 和 $\boldsymbol{y}$ 之间的线性关联矩阵;$\boldsymbol{\varepsilon}$ 为测量误差矢量,当没有故障时,$\boldsymbol{\varepsilon}$ 的各分量可认为是独立同分布的,并可近似表示为零均值高斯随机变量[4],即可设其第 i 个分量为 $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$,$\sigma^2$ 为伪距测量方差.

定义奇偶方程为

$$\boldsymbol{p} = \boldsymbol{P}\boldsymbol{y} \tag{2}$$

式中,$\boldsymbol{P}$ 为奇偶空间矩阵,$\boldsymbol{P} \in \mathbf{R}^{(n-m)\times m}$,有 $\boldsymbol{P}\boldsymbol{H} = 0$,$\boldsymbol{P}\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{I}$;$\boldsymbol{p}$ 为奇偶矢量.

故障检测判决函数为

$$T_{\mathrm{D}} = \frac{1}{\sigma^2}\boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{p} \tag{3}$$

$T_{\mathrm{D}} \sim \chi^2(n-m)$,根据给定的虚警概率就可得到判决门限 T. 如果 $T_{\mathrm{D}} \geqslant T$,则表明当前卫星有故障,否则表明无故障.

采用广义似然比法进行单星故障排除时,故障卫星识别判决函数为

$$r_i = \frac{|\boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_i|}{\|\boldsymbol{P}_i\|} \tag{4}$$

式中,$\boldsymbol{P}_i$ 为矩阵 $\boldsymbol{P}$ 的第 i 列. 当故障检测函数判决有故障时,若

$$r_j = \max_{1\leqslant i\leqslant n}(r_i) \tag{5}$$

则判决第 j 颗卫星可能出现故障.

2 新的多星故障排除方法

2.1 方法的提出

根据奇偶矩阵的特性及式(1)、式(2)可得

$$\boldsymbol{p} = \boldsymbol{P}\boldsymbol{\varepsilon} \tag{6}$$

即测量误差是通过奇偶矩阵的各列反映到奇偶矢量的,奇偶矢量法正是通过奇偶矢量和奇偶矩阵各列间的关系进行故障识别的. 可以证明,在忽略测量噪声时,在单星故障情形下,奇偶矢量正比于故障卫星对应的奇偶矩阵之列向量,广义似然比法即是据此形成故障识别判决的. 然而,当多颗卫星发生故障时,由式(6)可知,矢量 $\boldsymbol{p}$ 不再与矩阵 $\boldsymbol{P}$ 中某列成比例,采用奇偶矢量法等基于广义似然比的方法已不能实现基于多星故障的识别. 在采用全球导航卫星系统导航时,多颗特别是两颗卫星同时发生故障的概率不能忽略,这就需要构建基于多星故障排除的方法.

文献[6-7]提出了一种针对特定传感器故障进行诊断的最优奇偶矢量法,该方法可以用来

进行多星故障识别,但仿真结果表明该方法故障识别率仅 60% 左右,识别率过低. 文献[8]提出了一种称为"假设验证法"的多星故障识别方法,在故障较小(如 4σ)时,其故障识别率约为 86.2%,对将卫星导航系统作为主用导航的用户而言,识别率也有进一步提高的必要. 在 RAIM 的两大功能中,故障识别要比故障检测困难得多[1],不管是对辅助导航还是主用导航,故障检测概率均可达 99.9% 以上[4],而故障识别概率却很难达到该量级. 那么,是否可利用该特点来实现多星故障排除并提高故障排除率呢? 答案是肯定的. 本文正是利用故障检测率比故障识别率高的特点,避免传统的"识别故障星、排除故障星、获得无故障星座"的故障排除模式,直接采用故障检测方法搜索含有最多无故障卫星星座的方式来实现多星故障排除并获得较高故障排除率的目的. 在该方法中,对观测卫星进行二进制编码,从随机初始化开始,然后利用故障检测函数进行逐步搜索以获得最终的含有最多无故障卫星的星座,所以,称之为"随机搜索法". 图 1 所示是该方法的排故流程图. 下面,对该方法的具体实施方式进行详细讨论.

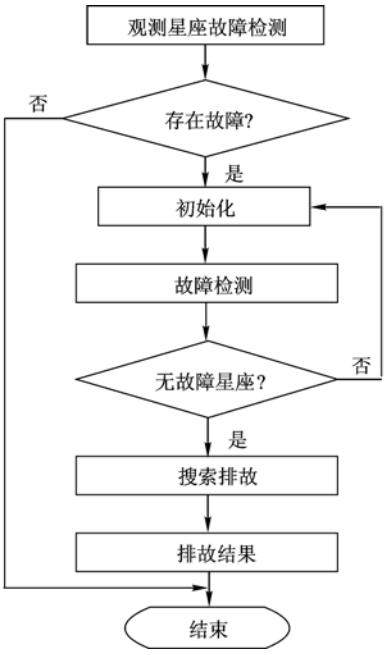

图 1　随机搜索法排故流程

2.2　编　码

在随机搜索法中,首先要进行的工作就是将观测卫星进行编码. 设 $s_j(j=1,2,\cdots,n)$ 为如下变量:

$$s_j = \begin{cases} 1 & \text{卫星 } j \text{ 被选入} \\ 0 & \text{卫星 } j \text{ 未选入} \end{cases} \tag{7}$$

从而,可将观测卫星组合方案以二进制串编码方式来表示. 在该编码方案中,每颗卫星设为一个二进制字码,数字 1 表示该颗卫星被选入,数字 0 则表示该卫星未被选入. 所有观测卫星按顺序进行编排,最低位表示第 1 颗卫星. 例如,一个总观测卫星数为 15 的一种卫星组合方案可以表示为如下形式的字串:

$$S = [s_{15}\ s_{14}\cdots s_1] = [101110010110010] = (5CB2)_{16}$$

这表示卫星 15,13,12,11,8,6,5,2 被选入. 其中,S 表示一种卫星组合方案的二进制编码,下标 16 表示十六进制. 采用十六进制数是为了表述的简洁性.

2.3　初 始 化

确立了编码方案后,在随机搜索法中,首先要进行的是随机初始化,即以随机的方式产生一个长度等于总观测卫星数 n 的二进制整数. 为了满足故障检测的需要,所产生的二进制数中 1 的个数应不小于 $m+1$;当然,为了满足排故的需要,该二进制数中 1 的个数也不应大于 $n-1$(考虑到多星故障排除的需要,在观测卫星数足够多的情况下,主张该二进制数中 1 的个数以不大于 $n-3$ 为宜,即假定可能同时存在 3 颗故障星,当然,也可随组合星座个数而定). 从而,根据编码方案,一个二进制整数就对应了一种卫星组合方案. 同时,采用故障检测函数对所产生的卫星组合方案进行检测. 如果检测结果表明无故障,则结束初始化工作;否则,继续进行初始化,直至所产生的卫星组合方案无故障. 这里,需要考虑的一个问题就是,一般情况下经多少次初始化就能得到无故障星座呢? 从定性的角度看,因为各卫星同时发生故障的概率是很低的,也就是说同时发生故障的卫星数很少,从而,以随机初始化方式得到无故障卫星组合方案的几率不会太小,即应当只需少数几次初始化便能获得无故障卫星组合方案. 同时,根据概率统计知识进行了定量分析,得到了在不同观测卫星数、不同故障星数情形下以随机抽样方式获得无故障星座的概率分布,如图 2 所示.

由图 2 可见,随着故障卫星数的增加,获得无故障星座的概率会逐渐降低,从而,为了获得无故障星座,就需要更多次数的初始化. 例如,单星故障时,其概率约为 0.5,从而,从概率上看,约 2 次初始化就可获得无故障星座;而对 3 星故障,因获得无故障星座的概率约为 0.125,从而,为了得到无故障星座,约需 8 次初始化. 总体而言,初始化次数并不多. 另一方面,还可以规定在进行初始化时,所选取的卫星数为固定的少数几颗卫星,如

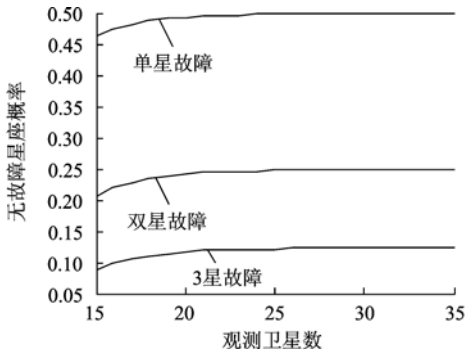

图2 无故障星座概率分布

6,7颗,此时得到无故障星座的概率会得到较大增加. 图3所示是选6颗星条件下,在不同观测卫星数、不同故障星数时,以随机抽样方式得到无故障星座的概率,显然,此时能以更少的初始化次数得到无故障星座.

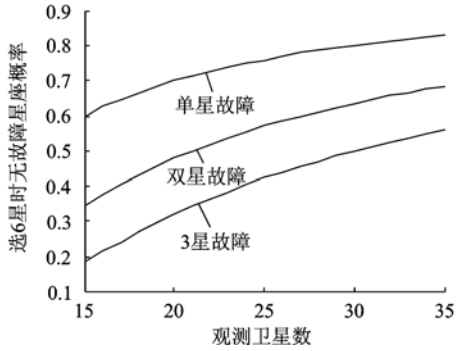

图3 选6星时无故障星座概率分布

2.4 搜索排故

搜索排故,就是以初始化得到的无故障星座为基础,采用故障检测方式,在已有的无故障星座中逐步增加未选卫星的方式来获得含有最多无故障卫星的星座. 搜索排故的具体操作方式为:按先后顺序依次对初始化获得的表征星座组合方案的二进制整数中的每个字码进行检测;如果所检测的字码为1,则继续检测下一字码;否则,就将该字码变为1,得到一种新的组合方案,利用故障检测函数对该方案进行检测,如果检测结果表明该方案有故障,则将该字码恢复为0,检测下一字码. 当检测完所有字码,就可将最终得到的二进制整数所对应的星座组合方案视为含有最多无故障卫星的星座,完成故障排除.

3 仿真分析

3.1 仿真条件

随机搜索法的提出,主要是针对观测卫星数较多、且需考虑多颗卫星同时出现故障的GNSS系统进行的,因此,为了评估其在不同故障数和故障大小情形下的排故性能,本文以中国的北斗卫星导航系统(COMPASS, BeiDou/COMPASS Navigation Satellite System)和美国的GPS(Global Position System)系统组成的双星座联合卫星导航系统为参考,以检测与排除1颗、2颗和3颗故障卫星为例进行仿真.

为了保证仿真的合理有效性,采用含有GPS系统和COMPASS系统的GNSS模拟器作为信号源来产生卫星信号,并以随机选取故障卫星的方式施加相应的故障大小,采用Monte Carlo方法进行计算机仿真.

仿真过程中,观测卫星数分别设置为15,17,19,21,23五种情形,故障检测函数中,参考国际民间航空组织(ICAO, the International Civil Aviation Organisation)对导航性能的要求[5],设定虚警率为10^{-5}/h,并设$\sigma=6$ m. 关于故障大小的选取,考虑到当故障偏差小于临界偏差p_{bias}时,漏检率会超出所设定的容许值,而且,当卫星数和虚警率确定时,p_{bias}是确定的[4],因此,仿真中所施加的故障大小以p_{bias}为参考.

3.2 仿真结果分析

对本文所提出的随机搜索法,以随机选取故障卫星的方式,对不同的1颗、2颗、3颗卫星组合分别加入不同幅值的故障偏差,每种情形均进行了1万次Monte Carlo仿真,仿真结果如表1所示. 为了进行比较,对于单星故障检测与排除问题,本文采用奇偶空间法进行了仿真,每种情形同样均进行了1万次的Monte Carlo仿真,仿真结果如表2所示.

表1 随机搜索法故障排除率 %

故障大小	故障个数	观测卫星数				
		15	17	19	21	23
$0.8p_{\text{bias}}$	1	95.72	98.39	99.35	99.80	99.99
	2	60.03	74.56	84.56	93.17	97.53
	3	54.97	71.69	83.02	91.11	96.19
p_{bias}	1	99.82	99.95	99.96	99.99	99.98
	2	73.33	88.54	94.66	98.58	99.57
	3	77.85	89.36	94.84	98.37	99.47
$1.5p_{\text{bias}}$	1	99.99	99.99	99.99	99.99	99.97
	2	88.20	96.15	99.58	99.90	99.93
	3	89.87	97.26	99.72	99.96	99.97
$2p_{\text{bias}}$	1	99.99	99.99	99.99	99.99	99.98
	2	94.55	99.10	99.85	99.93	99.92
	3	94.27	99.36	99.98	99.97	99.97

由表1与表2可见,对单星故障而言,大部分情形下,本文所提出的随机搜索法与奇偶空间法的排故率都在99%以上,相对而言,随机搜索法较好. 从多星故障检测与排除情况来看,由表1可知,总体而言其排故率也很高,当故障偏差不小于

临界偏差时,除了可见卫星数较少的少数情形外,其余情形下其排故率都在 90% 以上,特别是当可见卫星数在 20 颗以上时,其排故率超过 99%,接近于单星故障排除率;而即使是故障偏差为小于临界偏差的较小值时,在可见卫星数较多(不小于 17)的情形下,其排故率也达到了 83% 以上,且随着可见卫星数的增加而增大. 而目前采用的一些多星故障检测与排除方法,如最优奇偶矢量法,在 3 颗故障星情形下,其排故率不到 60%[8],相对而言,本文所提出的随机搜索法的排故率要高得多. 在进行故障检测与排除仿真时还发现,不管故障施加的方向和卫星怎样,总能保证获得基本相同的故障排除率,这也就是说,本文所提出的方法具有良好的鲁棒性.

表 2　奇偶空间法单星故障排除率　%

故障大小	观测卫星数				
	15	17	19	21	23
$0.8p_{\text{bias}}$	71.44	79.22	84.66	88.24	90.66
p_{bias}	97.06	98.30	99.12	99.66	99.93
$1.5p_{\text{bias}}$	99.99	99.99	99.99	99.99	99.99
$2p_{\text{bias}}$	99.99	99.99	99.99	99.99	99.99

4　结 束 语

本文以逆向思维探讨了卫星导航系统中故障排除问题,针对故障检测比故障排除简单、且故障检测率比故障排除率高的特征,形成了一种新的以故障检测为基础的多星故障排除方法——随机搜索法. 与传统的故障排除方法不同,随机搜索法不采用故障识别方式来进行排故,而以获得含有最多无故障卫星星座为出发点来进行. 它以故障检测为基础,通过对观测卫星的编码、随机初始化来获得初始的无故障星座,然后通过逐步搜索未选卫星方式来得到最终的含有最多无故障卫星星座,实现故障排除功能.

以双星座组合导航系统为例,以 GNSS 模拟器所产生的卫星信号为基础,采用 Monte Carlo 仿真方式,对多种故障方式进行了计算机仿真,仿真结果表明,该方法能有效用于卫星导航定位系统中的单星、多星故障故障排除,其结构简单,故障排除率高,鲁棒性好.

需要说明的是,因为所提出的随机搜索法是以故障检测为基础来进行的,从而,其故障排除率会受故障检测方法的影响,故可采用故障检测率高的方法,如最优奇偶矢量法等,来获得更高的故障排除率.

参考文献(References)

[1] Lee Young C. Receiver autonomous integrity monitoring (RAIM) capability for sole-means GPS navigation in the oceanic phase of flight[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1992,7(5):29 - 36

[2] Hewitson Steve, Wang Jinling. GNSS receiver autonomous integrity monitoring (RAIM) performance analysis[J]. GPS Solutions, 2006,10(3):155 - 170

[3] Liu J, Lu M, Cui X, et al. Theoretical analysis of RAIM in the occurrence of simultaneous two-satellite faults [J]. IET Radar Sonar Navig, 2007,1(2):92 - 97

[4] Elliott D Kaplan, Christopher J Hegarty. GPS 原理与应用[M]. 2 版. 寇艳红,译. 北京:电子工业出版社,2007:224 - 280
Elliott D Kaplan, Christopher J Hegarty. Understanding GPS: principles and applications[M]. 2nd ed. Translated by Kou Yanhong. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007: 224 - 280(in Chinese)

[5] Feng Shaojun, Ochieng Washington Y, Walsh David, et al. A measurement domain receiver autonomous integrity monitoring algorithm[J]. GPS Solutions, 2006,10(2):85 - 96

[6] Jin Hong, Zhang Hongyue. Optimal parity vector sensitive to designated sensor fault [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999,35(4):1122 - 1128

[7] 杨静,张洪钺. 卫星故障诊断的最优奇偶向量法[J]. 航空学报,2002,23(2):183 - 186
Yang Jing, Zhang Hongyue. Satellite fault diagnosis based on optimal parity vector method[J]. ACTA Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002,23(2):183 - 186(in Chinese)

[8] 张强,张晓林,常啸鸣. 用于卫星导航多星故障识别的新方法[J]. 航空学报,2008,29(5):1239 - 1244
Zhang Qiang, Zhang Xiaolin, Chang Xiaoming. New method for satellite navigation identifying simultaneous multi-faulty satellites [J]. ACTA Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008,29(5): 1239 - 1244(in Chinese)

(编　辑:娄　嘉)