

文章编号: 1001- 2486(2010) 04- 0013- 06

全球卫星导航系统自主导航完好性隔离算法*

林益明¹, 初海彬², 秦子增¹

(1. 国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 中国空间技术研究院, 北京 100094)

摘要: 全球卫星导航系统在自主导航工作模式下, 为了保持星座系统的稳定, 保证系统的完好性, 需要对故障卫星进行及时可靠的隔离。因此提出一种基于星间链路的全球卫星导航系统(GNSS)自主完好性隔离算法, 分析全球卫星导航系统故障判别方式, 设计了基于星间链路的故障隔离流程, 提出了基于星间测距误差和判别的故障检测及隔离算法。仿真结果表明, 基于星间链路的 GNSS 自主完好性隔离算法, 可以有效隔离故障卫星, 保持星座自主导航精度, 并且算法实现复杂度较小, 易于工程实现。

关键词: GNSS; 星间链路; 自主导航; 完好性

中图分类号: TN927. 23 文献标识码: A

GNSS Autonomous Navigation Integrity Separation Technique

LIN Yi-ming¹, CHU Hai-bin², QIN Zi-zeng¹

(1. College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Under GNSS autonomous navigation mode, in order to keep constellation stabilization and integrity, failure satellites must be separated in time. A GNSS autonomous navigation integrity separation technique was developed, and satellite failure judgment method was analyzed. Satellite failure separation procedures were designed, and then a failure check and separation technique was presented. Simulation of this technique suggests that it ensures services precision by effectively separating failure satellites among autonomous navigation constellation. Furthermore, this technique is not very complex and easy for engineering.

Key words: GNSS; crosslink; autonomous navigation; integrity

全球卫星导航系统是由空间、地面和终端组成的复杂庞大的系统^[1]。战争状态下, 由于地面测控部分地理位置固定, 最容易遭到袭击和干扰, 主控站、注入站或监测站一旦无法使用, 都将造成系统部分或全部的瘫痪。导航卫星系统自主导航技术的提出正是基于上述事实, 要求在失去地面测控部分支持的情况下, 仅靠卫星的自主导航技术对存储的导航数据进行修正更新, 在较长的时间内保持较高的定位精度^[2]。美国 GPS 系统在 20 世纪 80 年代到 90 年代已进行自主导航技术研究^[3-5], 已经初步具备自主导航能力, 同时俄罗斯 GLONASS 系统和欧洲 Galileo 系统也正在开展自主导航技术研究。

在全球卫星导航定位系统中, 为了保证系统的完好性, 保证系统能够提供可靠的导航定位服务, 最为行之有效的措施是及时发现故障, 并且将故障及时通知用户, 将故障从卫星导航定位系统中隔离出去, 从而保证用户能够安全可靠地使用卫星导航定位服务^[6]。作为系统的完好性报警功能, 通常卫星导航定位系统由地面站实施, 当发现卫星故障后, 及时上注卫星健康指示信息, 通过下行电文播发给用户使用, 隔离故障。美国 GPS 系统现有的广域增强系统(WAAS)就是如此。然而, 在全球卫星导航定位系统自主导航期间, 没有地面站支持, 传统的广域增强系统、局域增强系统(LAAS)和接收机自主完好性监测(RAIM)均已无法适用, 因为如果卫星出现故障而不及进行相关的完好性处理, 那么卫星故障将会引起星间链路测距异常, 从而会严重导致星座卫星自主时间同步和精密定轨结果发散, 系统无法提供正常的导航定位服务, 并且这种后果是不可逆的结果, 在自主导航期间无法自主恢复。本文提出基于星间链路 GNSS 自主完好性隔离算法, 设计了基于星间链路完好性隔离流程, 提出了自主导航期间故障检测

* 收稿日期: 2010- 04- 19

作者简介: 林益明(1971-), 男, 博士生。

与隔离处理算法。

1 基于星间链路导航卫星故障判别

在自主导航运行期间,如果卫星发生异常或产生故障,并且没有及时发现星座中卫星故障,很可能将导致整个星座自主定轨算法无法收敛,导致整个星座提供的星历存在逐步扩展的星历误差,最终将使整个卫星导航定位系统提供服务无法满足用户的使用要求,系统将面临瘫痪,并且在自主导航期间这种瘫痪是不可逆的,无法自主恢复正常,因此需要及时判别系统中存在的故障,并及时将故障卫星剔除在自主导航星座之外。

在自主导航期间,卫星需要通过星间链路完成测距和星间数据通信,导航卫星自主轨道确定和时间同步需要通过星间测距和通信完成,同样星间完好性监测主要通过星间链路完成,为了隔离产生故障的卫星,首先可以考虑的是利用星间链路的测距数据来进行判断。由于在自主导航期间,虽然由于地球自转及其他空间动力学模型误差,导致自主导航无法保持较高的绝对精度,但是星座卫星轨道位置和时间保持很高的相对精度,也就是说,可以考虑利用星间链路测距值与根据精密星历估计的星间距离值来判断卫星是否存在异常。当星间测距与星历估计产生差异时,可以判断收发两颗卫星中存在故障或异常,然后由于自主导航使用星间双向测距,每颗卫星既要发送也要接收,因此这两颗卫星产生故障的原因也很多,主要包括:星间天线异常、接收或发射通道故障、时钟故障和自主导航算法处理异常。

在自主导航过程中,需要每颗卫星维持和更新星座中其他卫星的精密星历,这样一方面是用来在星间链路建立时,使星间链路收发设备能够快速捕获信号及跟踪,另一方面可以用来判断星间测距值与卫星星历的吻合程度,从而判断是否有故障存在,故障判别示意如图1所示。

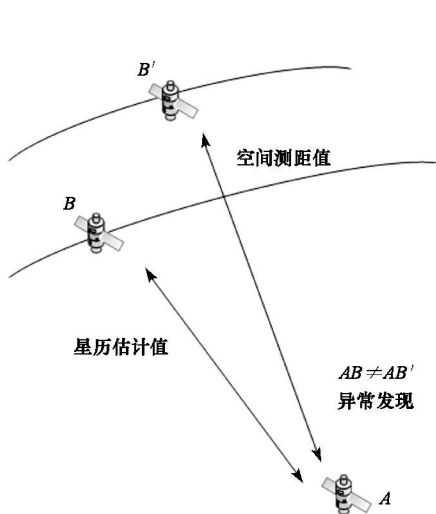


图1 基于星间链路测距故障判别示意图

Fig.1 Fault location discrimination based on cross link

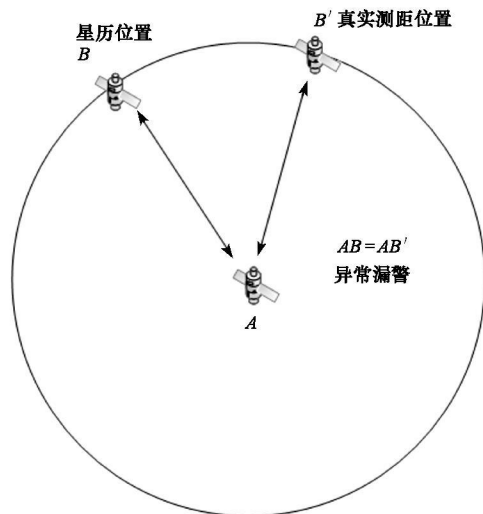


图2 基于星间链路故障漏警示意图

Fig.2 False dismissal based on cross link

然而通过星间测距值与星历估计值判别卫星存在故障,还会存在问题,如果在测距时刻,故障卫星星历标称位置和测距时刻真实位置相对发起测距卫星在相同半径球上,那么就无法发现故障的存在,因为只要在这个球上,测距值和星历估计值完全相等,这样就会出现漏警,漏警情况示意如图2所示。

为了降低出现故障或异常发生然而没有被检测出来的漏警概率,需要多颗卫星同时观测,就可以避免出现漏警事件。由空间定位关系可以知道,空间3个球面就可以基本确定空间位置,也就是说当星座中任意一时刻卫星由大于3颗卫星进行测距,那么基本上可以避免出现漏警事件,在自主导航中,为了精确确定轨道位置和时间同步,往往采用大于4颗卫星进行星间测距以满足自主定轨和时间同步的需求。通过上述分析,可以看出如果星间测距值与星历估计值之间存在差异,可以判定星座中测距的两颗卫星存在故障或异常。

当星座中一条星间链路中测距值与星历估计值存在不一致后,还不能断定是哪个卫星出现问题,两

颗中的任何一颗卫星出现异常均有可能导致星间链路测距值与估计值不一致,因此需要考虑利用其他卫星冗余观测,基本原理如下:

(1) 对于故障卫星一方,如果故障卫星星历计算处理出现异常、卫星钟出现异常或其他异常出现,那么故障卫星应该与多颗卫星存在测距值与星历估计值不一致现象出现,而不单是只发现一颗卫星出现测距异常;

(2) 对于正常卫星一方,没有出现故障卫星,所以正常卫星应该与星座中其他卫星测距值与估计值吻合。

基于上述两条原则,可以看出,实际上可以通过统计星座测距值与估计值温差和数据就可以判断出是否发生故障事件,以及导致故障时间的卫星是哪一颗,从而可以将其从自主导航星座中隔离出去。

2 基于星间链路完好性隔离流程设计

自主导航星间链路完好性隔离基本流程如下:

(1) 星间链路的建立,完成信号的捕获跟踪;

(2) 星间测距及测距值修正;

(3) 星间测距值与星历估计值进行比较,检测是否超出测距与估计偏差门限;

(4) 如果没有超出测距与估计偏差门限,那么转入(8);如果超出测距与估计偏差门限,那么转入下一步完好性隔离处理程序;

(5) 如果发现测距与星历估计超差,那么本星健康事件统计计数器加1,对应星座卫星健康事件统计计数器(包括星座每颗卫星健康事件统计)加1;

(6) 查询本星健康事件统计计数器值是否存在超出健康异常统计门限情况(设为3);如果本星健康事件超出门限,则标记本星健康指示为“不健康”,通过星间链路广播给星座其他卫星,同时本星转入自主健康诊断处理程序;

(7) 查询星座卫星健康事件统计计数器是否存在超出健康异常统计门限情况,如果发现某颗卫星健康事件超出门限,则通过星间链路健康指示信息通知星座卫星,此颗卫星为不健康;

(8) 判断是否完成了全部星间链路拓扑内星间链路建立,如果未完成则回到(1),如果已完成则结束。

基于星间链路完好性隔离处理基本流程如图3所示。

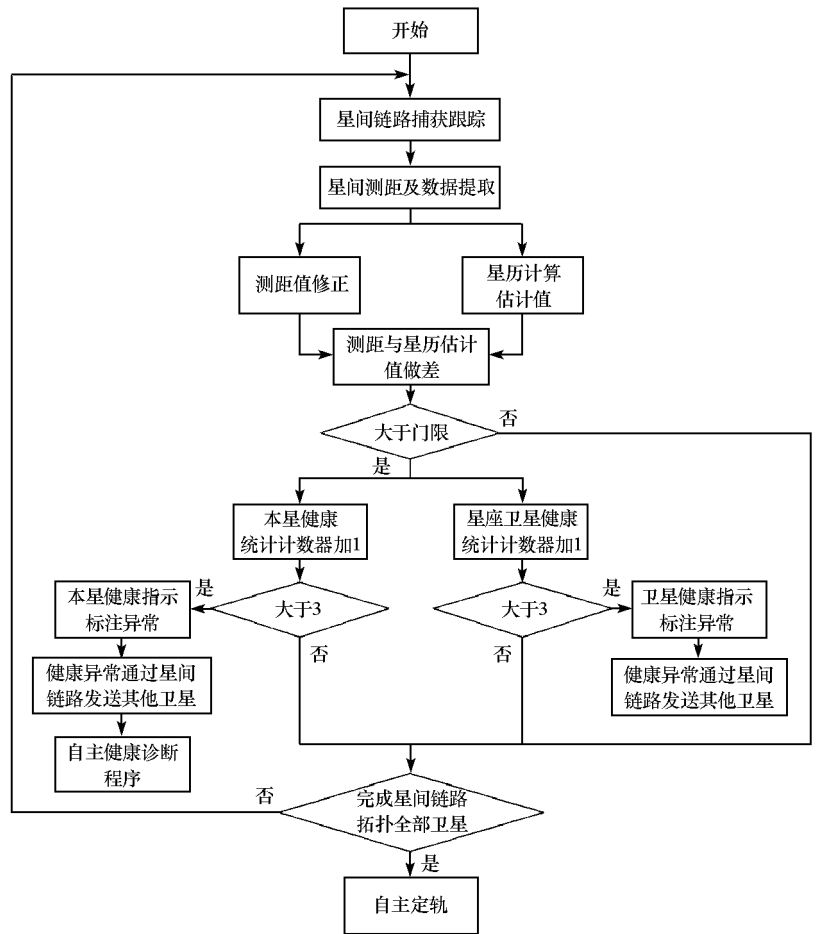


图3 完好性隔离处理基本流程

Fig. 3 Integrity isolation dispose flow

3 星间链路测距异常检测与隔离算法

对于星间链路测距异常检测方法采用奇偶判别法^[7], 在奇偶法中, 首先对测量矢量 y 进行如下的线性变换

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_{is} \\ \vdots \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (G^T G)^{-1} G^T \\ \vdots \\ P \end{bmatrix} [y] \quad (1)$$

很明显, 变换式的上半部分给出了一般的最小二乘解 \hat{x}_{is} , 而下半部分则给出了 p 的值, 它是 y 与特定 $(n-4) \times n$ 矩阵 P 运算的结果, 该矩阵的行向量是相互正交的, 且为单位向量, 而且与 G 矩阵(视距向量矩阵)的列向量也是相互正交的。对 y 进行变换:

$$p = Py \quad (2)$$

式中, 奇偶变换矩阵 p 可通过 H 矩阵的 QR 分解而获得。 p 的各行是: 相互正交, 大小归一, 并与 H 的各列相互正交。由于有这些规定的特性, 所以产生的 p 就具有特殊的性质, 特别是相对噪声来说如此。如果 ε 具有独立的随机元素, 且它们全是 $N(0, \sigma^2)$ 的。

以 6 颗可见卫星的情况为例, 下面的分析展示奇偶变换怎样影响一个距离测量中的肯定误差。假定在第 3 颗卫星中有距离偏差误差 b , 得

$$p = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & \dots & P_{16} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & \dots & P_{26} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

或

$$p = b \times (P \text{ 的第 3 列}) \quad (4)$$

p 的第 3 列在奇偶空间中规定出一条线, 这条线叫做与第 3 颗卫星相关联的特征偏差线。每颗卫星都有它自己的特征偏差线。由距离偏差 b 导致的奇偶偏差矢量的幅值由下式给出:

$$|\text{奇偶偏差矢量}| = b \left(P_{13} P_{23} \right)^T \text{ (第 3 颗卫星的偏差, 假定 } b > 0) \quad (5)$$

式中, $\left| \left(P_{13} P_{23} \right)^T \right| = \sqrt{P_{13}^2 + P_{23}^2}$ 。一般来说, 第 i 颗卫星的距离偏差 $b = \text{奇偶偏差矢量的范数} / P \text{ 的第 } i \text{ 列的范数}$ 。位置误差矢量 e 的定义是

$$e = \hat{x}_{L,s} - x \quad (6)$$

$$\begin{aligned} e &= \left(H^T H \right)^{-1} H^T y - x \\ &= \left(H^T H \right)^{-1} H^T \left(Hx + \varepsilon \right) - x \quad (\text{位置误差}) = \left(H^T H \right)^{-1} H^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \left(H^T H \right)^{-1} H^T \varepsilon \end{aligned} \quad (7)$$

这些方程式提供了从在奇偶空间中的偏差到距离空间中相应偏差的前进和后退, 以最后达到相应的位置误差的方法。位置误差矢量的前两个分量的范数给出了水平径向位置误差。所以, 在奇偶法中, 关于检测的测试统计量即简化为一个简单的标量。

$$p^T p = \omega^T \omega = \text{SSE} \quad (8)$$

4 算法仿真

4.1 仿真条件

星座仿真采用 GPS 星座进行,主要参数包括: 24 颗卫星、轨道高度 26 561. 750km、轨道平面倾角 55° 、轨道偏心率 0° 、星间链路测距精度为 0. 3m(1ns)、自主导航观测时间间隔 1h。

4.2 正常与异常情况仿真

在正常情况下仿真给出 SSE 值,从图 4 和表 1 可以看出,在无异常发生情况下, SSE 统计值十分稳定。假定异常情况发生在 PRN3(轨道面 C),仿真时间为 200h,卫星异常发生在 50~ 200h。图 5 和表 2 为卫星 SSE 值的仿真结果。

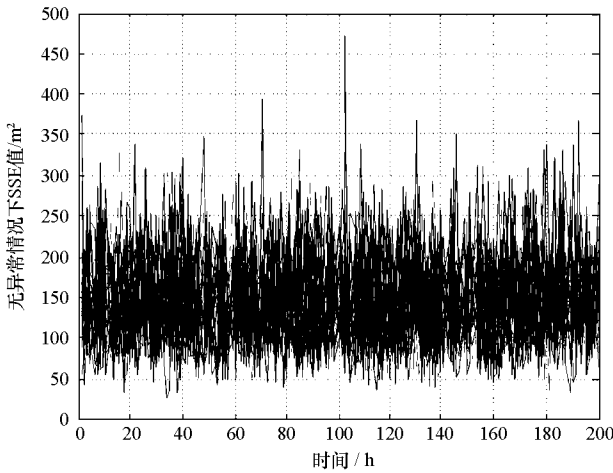


图 4 无异常情况下卫星 SSE 值

Fig. 4 SSE with no exceptional circumstances

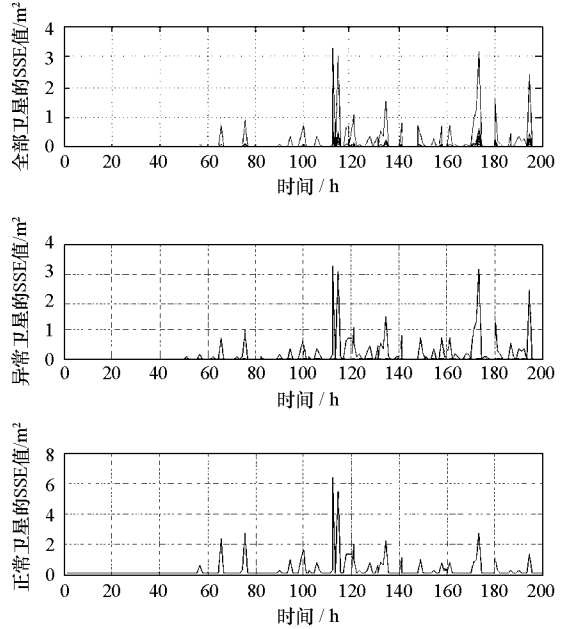


图 5 异常情况下卫星 SSE 值

Fig. 5 SSE with exceptional circumstances

表 1 无异常情况下卫星 SSE 均值(m^2)

Tab. 1 SSE mean value with no exceptional circumstances(m^2)

PRN	SSE 均值	PRN	SSE 均值	PRN	SSE 均值	PRN	SSE 均值	PRN	SSE 均值	PRN	SSE 均值
9	145. 7639	22	147. 9591	6	141. 5352	24	145. 6587	14	148. 5586	1	139. 3929
25	145. 7223	20	145. 1309	3	145. 2367	15	143. 0236	21	143. 7533	26	145. 0344
27	145. 2188	2	146. 4761	31	147. 1767	17	140. 9455	16	139. 7582	18	146. 9532
19	141. 8812	5	147. 1833	7	141. 8094	4	142. 9236	23	141. 2140	29	143. 2331

表 2 异常情况下卫星 SSE 均值(m^2)

Tab. 2 SSE Mean Value with Exceptional Circumstances(m^2)

PRN	SSE 均值	PRN	SSE 均值	PRN	SSE 均值	PRN	SSE 均值	PRN	SSE 均值	PRN	SSE 均值
9	1439. 5	22	173 670	6	88 876	24	6437. 7	14	131 430	1	23 180
25	677. 0113	20	29 098	3	38 176	15	3982. 4	21	414. 1342	26	1406. 684
27	30177	2	2524. 3	31	198 840	17	114 430	16	21 512	18	2140. 5
19	5563	5	62 451	7	1 018 000	4	131 530	23	50 928	29	27 969

从表 1 和表 2 可以看出,星座中出现 1 颗故障卫星,将会导致星座中每颗卫星的 SSE 统计值发生变化,并且每颗卫星的变化程度不同,变化范围从正常 414. 1342 左右到 1 018 000 不等,大多数卫星发生了较大幅度变化。因此,通过仿真可以看出,通过 SSE 值的计算可以诊断出卫星星座中出现异常卫星,达

到报警作用可以转入下一步继续处理。

图6给出了星座中存在故障卫星时,健康卫星的卫星测距值与星历估计值之间的差值,从图6可以看出,正常卫星与其他正常卫星测距值与星历估计值之差很小,然而与故障卫星 PRN3 的差值很大,所以可以判断出存在异常,如果健康事件超出门限,那么就可以把故障卫星隔离出去。

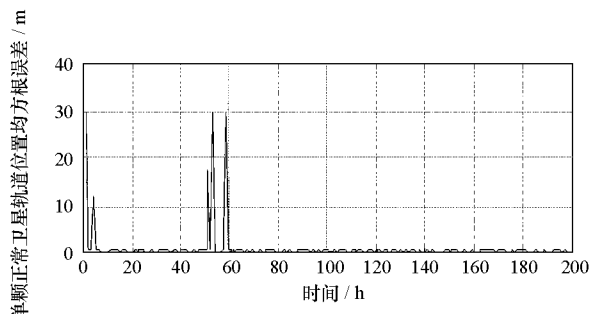
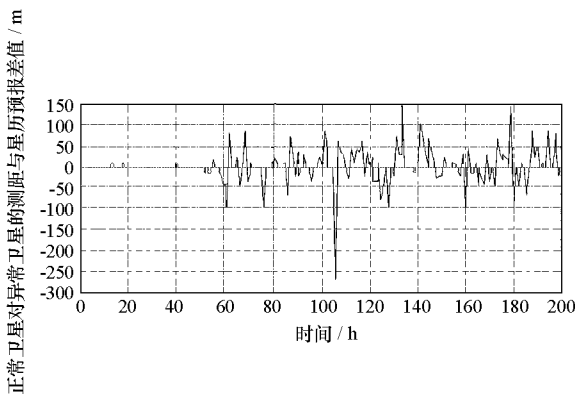
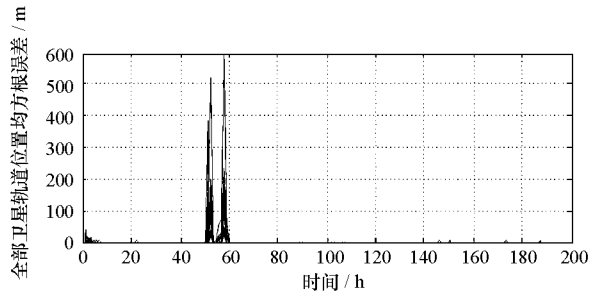
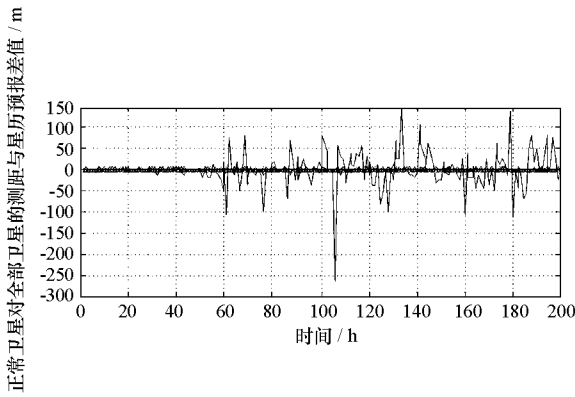


图6 正常卫星测距值与星历预报差值

Fig. 6 Normal satellite ephemeris prediction value

图7 卫星轨道位置均方根误差

Fig. 7 Satellite orbital position and the distance difference root mean square error

图7给出异常卫星 PRN3 被隔离前后的星座和单颗卫星 (PRN10) 轨道位置仿真情况,从图7可以看出,当异常卫星出现时星座中卫星轨道位置出现误差(第50~60h),当异常卫星被隔离后(第60h后),星座卫星恢复正常轨道保持精度水平,可见故障卫星的隔离是正确有效的。

5 结论

本文提出了基于星间链路 GNSS 自主完好性隔离算法,提出了故障检测与判别方法,设计了完好性隔离处理流程,提出了基于星间链路自主完好性隔离算法。仿真表明,设计的故障检测算法可以有效地发现故障卫星,在故障自主隔离后,星座恢复到正常的导航服务精度水平,有效地防止了星座由于故障引起的发散,保持了自主导航系统的稳定运行。

参考文献:

- [1] Bradford W P, James J S. Global Positioning System: Theory and Applications Volume I[M]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. 2002: 100- 389.
- [2] Rajan J A. Highlights of GPS II-R Autonomous Navigation[C]//ION 58th Annual Meeting, Albuquerque, NM, 2002: 354- 363.
- [3] Ollie L, Boyd L, Gower A, et al. GPS III System Operations Concepts[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2005, 20(1): 10- 18.
- [4] Fisher S C, Chassemi K. GPS IIF—The Next Generation[J]. Proceedings of the IEEE 1999, 87(1): 24- 47.
- [5] Paul K M, Langer J. Crosslink for the Next-Generation GPS[J]. IEEE, 2003(4): 1589- 1596.
- [6] Ober P. Toward High Integrity Positioning[C]//ION GPS, 1999: 2113- 2120.
- [7] Surza M A. Navigation System Integrity Monitoring Using Redundant Measurements[J]. Journal of the Institute of Navigation, 1988, 35(4).