

文章编号: 1001-1595(2011)S-0073-07

## 基于星间链路支持的导航卫星自主完好性监测设计仿真

牛飞<sup>1</sup>, 韩春好<sup>1</sup>, 张义生<sup>2</sup>, 范媚君<sup>1</sup>

1. 北京环球信息应用开发中心, 北京 100094; 2. 北京应用气象研究所, 北京 100094

### Design and Simulation for Satellite Autonomous Integrity Monitoring Based On Inter-satellite links

NIU Fei<sup>1</sup>, HAN Chunhao<sup>1</sup>, ZHANG Yisheng<sup>2</sup>, FAN Meijun<sup>1</sup>

1. Beijing Global Information Center of Application and Exploitation, Beijing 100094, China; 2. Beijing Institute of Application Weather, Beijing 100094, China

**Abstract :** Since it is very difficult for ground mission and control segment to monitor the satellite's state all time and in the invisible region, a substitute integrity monitoring method depending on inter-satellite-links is proposed. It mainly focuses on designing and simulation for satellite autonomous integrity monitoring based on inter-satellite-links. By separating clock error and ephemeris error based on ISL observation, the algorithm how to detect the anomaly of satellite clock and ephemeris is studied. The method based on balanced time sequence is studied for detecting the clock anomaly, and the method based on non-centric and square distribution is studied to detect the orbit anomaly. Through the simulation and analysis it is shown that the algorithm based on ISL can detect the anomaly of clock and orbit, and the integrity risk of the satellites navigation system is reduced, and the time of alert is shorten, so the integrity performance of GNSS is enhanced.

**Key words :** GNSS; ISL; integrity; SAIM

**摘要:** 针对导航卫星在区域完好性监测网可视弧段之外难以实现基于地面监测站的系统级完好性监测问题, 提出一种基于星间链路辅助支持的导航卫星自主完好性监测方法。该方法通过利用星间组合观测值, 分离星钟误差和星历误差, 采用基于平稳时间序列的非稳态异常检测算法对导航卫星星载原子钟相位抖动及频率的异常漂移进行监测; 采用基于轨道先验信息的非中心化开方分布异常检测算法对轨道异常机动进行监测, 并利用星间链路组合观测量对卫星自主完好性监测及其对全球用户完好性性能的提升作用开展仿真分析与研究。仿真计算结果表明: 该方法可以在地面监测网不可视弧度内有效减小空间段卫星部分的故障漏检概率以及系统完好性风险, 缩短完好性告警时间, 提高全球卫星导航系统的完好性服务水平。

**关键词:** 卫星导航; 星间链路; 完好性; 卫星自主完好性监测

中图分类号: P228

文献标识码: A

基金项目: 国家 863 计划(2007AA120601)

## 1 引言

目前, GPS 增强系统完好性监测的实现方法基本上都是采用基于地面站监测的处理体制, 但是基于地面监测网增强系统服务都是区域或是局域范围的, 无法实现导航卫星的全弧段完好性监测。Galileo 系统在方案设计阶段, 为提升系统完好性监测水平, 计划在全球范围内布设 40 个监测站和 9 个上行注入站, 并且提出境外完好性监测的概念, 依托境外密集布设的地面完好性监测站和注入站实现导航卫星完好性信息的实时上行注入<sup>[1-7]</sup>, 但所有这些设计工作都是建立在对地面系统高水平密集布站需求基础上的, 倘若地面系统

无法满足这种高水平需求, 卫星导航系统全球范围内的完好性性能将难以保障。针对这个问题, 考虑采用星间观测辅助支持的方法对导航卫星进行完好性监测, 以满足全球用户的完好性需求。

随着 GPS 现代化的不断推进以及 Galileo 建设的全面开展, 国外开始探讨利用星间链路所获取的双向测距数据来实现对于卫星星历的自主完好性监测。文献[8]提出了使用 Kalman 滤波的方法对于星间测距数据实时估计星历参数并以此监测星历参数完好性的方法; 文献[9-10]提出利用星间双向测距数据对卫星状态进行判断的设想; 国内学者在导航星座星间链路的建立与优化<sup>[11-12]</sup>, 以及系统完好性监测方面开展研究工

作<sup>[13-14]</sup>,并取得初步成果。在吸取上述文献思想基础上,利用区域地面站观测数据与星间链路组合观测数据,开展基于星间链路辅助支持的导航卫星自主完好性监测方案研究,并进行设计仿真工作。

针对基于星间链路辅助支持的导航卫星自主完好性监测对象是:导航卫星的轨道异常机动与卫星钟相位和频率的异常抖动或漂移。当卫星钟实际情况发生跳项或是异常加速、卫星轨道发生异常机动时,及时将该卫星标识为“不可用”,并及时启动相应程序,进行轨道和钟差恢复,提高全球系统空间段的完好性。

## 2 初步设计思路

倘若卫星导航地面系统无法满足用于完好性监测的全球布站需求,只能满足区域布站的约束条件,尝试考虑采用星地链路+星间链路的完好性监测方法,采用两种方案实现对导航卫星的完好性监测。一是当导航卫星处于区域监测网不可视弧度内时,采用基于星间链路的全球段卫星完好性监测方案;二是当导航卫星进入区域监测网可视弧度内,采用基于地面监测网+星间链路的星间/星地链路区域完好性监测方案,如图1所示。

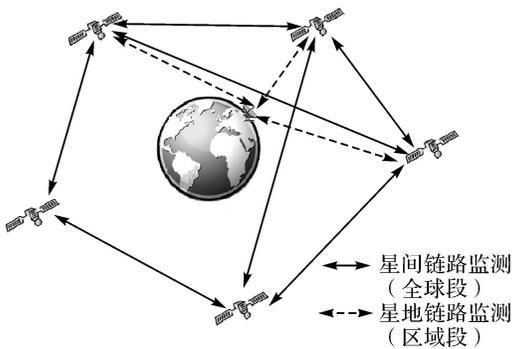


图1 全球系统全球段与区域段完好性监测示意图  
Fig.1 Sketch map of global integrity monitoring

卫星自主完好性监测的观测数据包括卫星遥测数据和星间链路组合观测测量。卫星载荷的遥测数据包括:①卫星环境观测值(温度、电流、电压);④惯性单元观测值(陀螺、加速度计、推进感应器);④卫星钟监测控制单元相位噪声值。基于星间链路的组合观测测量主要包括无轨道影响的组合观测值和无钟差影响的组合观测值。其卫星完好性监测处理过程可由图2表述。

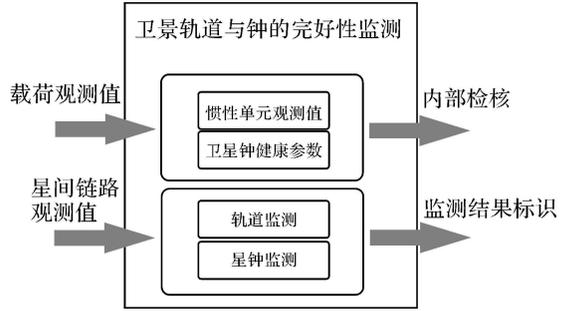


图2 卫星自主完好性监测处理流程图  
Fig.2 Principle map of satellite autonomous integrity monitor

基于星间链路的伪距观测值可以由下式表述

$$\rho_{rx}^x \left( t_{\rho} + \Delta t_{\rho,rx} + \Delta t_{max} \right) = d_{rx}^x \left( t_{\rho} + \Delta t_{\rho,rx} + \Delta t_{max} \right) + C_{rx}^x \left( t_{\rho} \right) - C_{rc} \left( t_{\rho} \right) + H_{TX}^x \left( t_{\rho} \right) - H_{rx}^{RX} \left( t_{\rho} \right) + D_{trop}^x \left( t_{\rho} \right) + I_{rx}^x \left( t_{\rho} \right) + \epsilon_x^x \left( t_{\rho} \right) \quad (1)$$

式中,  $\rho_{rx}^x \left( t_{\rho} + \Delta t_{\rho,rx} + \Delta t_{max} \right)$  为  $t_{\rho} + \Delta t_{\rho,rx} + \Delta t_{max}$  时刻的伪距观测值;  $t_{\rho}$  为信号发射时刻;  $\Delta t_{\rho,rx}$  为信号在空间传播时间;  $\Delta t_{max}$  为伪码在硬件通道中的时延;  $d_{rx}^x$  为发射卫星到接收卫星的空间几何距离;  $C_{rx}^x$  为发射卫星的钟面时;  $C_{rc}$  为接收卫星的钟面时;  $H_{TX}^x$  为发射卫星的硬件时延;  $H_{rx}^{RX}$  为接收卫星的硬件时延;  $I_{rx}^x$  和  $D_{trop}^x$  分别为信号穿过大气电离层和对流层的传输时延,对于星间链路可以不考虑;  $\epsilon_x^x$  为观测噪声。

以下观测值不列为有效的监测数据:星间链路伪距观测值小于 60 ms 的不考虑;星间链路伪距观测线路穿过电离层的不考虑(地面以上 60 km~1 000 km 的空间);星地链路观测线路小于起止高度角(10°)的不考虑。

基于星间链路的伪距的估计值可由下式表述

$$\hat{\rho}_{rx}^x \left( t_{\rho} + \Delta t_{\rho,rx} + \Delta t_{max} \right) = d_{rx}^x \left( t_{\rho} + \Delta t_{\rho,rx} + \Delta t_{max} \right) + C_{rx}^x \left( t_{\rho} \right) - C_{rc} \left( t_{\rho} \right) + H_{TX}^x \left( t_{\rho} \right) - H_{rx}^{RX} \left( t_{\rho} \right) \quad (2)$$

式中,  $X$  代表参数的估计值。

星间链路伪距残差可由下式表述

$$\xi_{sv}^x \left( t_{\rho} + \Delta t_{\rho,rx} + \Delta t_{max} \right) = \hat{\rho}_{rx}^x \left( t_{\rho} + \Delta t_{\rho,rx} + \Delta t_{max} \right) - \rho_{rx}^x \left( t_{\rho} + \Delta t_{\rho,rx} + \Delta t_{max} \right) \quad (3)$$

残差中包括以下误差:卫星硬件时延误差、卫星实际位置与电文中卫星星历间误差、卫星星载原子钟实际与电文中的钟面时间误差、观测噪声。不包含卫星星钟误差的轨道残差体现在下式中

$$\xi \left( t_{\rho} \right) = \frac{1}{2} \left[ \xi_{sv}^x \left( t_{\rho} + \Delta t_{\rho,rx} + \Delta t_{max} \right) + \xi_{sv}^x \left( t_{\rho} + \Delta t_{\rho,rx} + \Delta t_{max} \right) \right] \quad (4)$$

式中, 将卫星钟误差部分影响消除掉, 卫星通道硬件时延误差和观测噪声除以 2, 被缩小。

同理, 不包含卫星轨道误差的卫星钟误差体现在下式

$$C_i(t_p) = \frac{1}{2} [\xi_{sv}^{\alpha} (t_p + \Delta t_{p,rx} + \Delta t_{max}) - \xi_{sv}^{\alpha} (t_p + \Delta t_{p,rx} + \Delta t_{max})] \quad (5)$$

式中, 将卫星轨道误差部分影响消除掉, 卫星通道硬件时延误差和观测噪声除以 2, 被缩小。基于星间链路的轨道与钟差的完好性监测将基于以上组合观测值进行<sup>[9]</sup>。

### 3 基于星间链路支持的导航卫星完好性监测方案探讨

#### 3.1 基于星间链路的星载原子钟异常监测

星载原子钟的时间特性与频率特性比较复杂, 通常由频率准确度、稳定度、频率漂移率反映星钟特性。其中, 短稳体现的是白噪声, 长稳体现的是有色噪声。针对监测星载原子钟运行的平稳性, 提出和采用基于平稳时间序列的卫星钟异常检测法, 用于检测卫星钟运行中异常情况。

星载原子钟的时间偏差  $x(t)$  通常可由二次相拟合的方法描述, 因而基于星间链路伪距观测无轨道影响的组合观测值也可以由二次项方法描述, 见式(6), 这个组合观测值可以由确定性变化分量和随机变化分量组成, 即

$$x(t) = x_0 + y_0 t + \frac{1}{2} D t^2 + \varepsilon(t) \quad (6)$$

式中, 右边前三项为确定性时间分量,  $x_0$  为相位(时间)偏差,  $y_0$  为初始频率偏差,  $D$  为线性频漂,  $\varepsilon(t)$  为时间偏差的随机变化分量。但是目前研究表明, 在剔除卫星钟的常数项、一次项和二次项之后还不完全是随机噪声, 在时域上还有一个不能确定表述的函数关系, 可以由这一时段的相关性来描述。基于平稳时间序列的卫星钟异常检测法, 就是通过将基于星间链路的无轨道影响的组合观测值在时域上作双差处理, 去除常数项和一次项, 由于组合观测值的二阶差分序列是相关序列, 不能简单地视为样本, 需要借助随机过程的自协方差函数进行转化, 再进行相应的假设检验。

令零均值各态历经高斯平稳过程  $\{x_i\}$  的时序实现为

$$\tilde{x}_i = x_i + e_i, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

式中,  $e_i$  为独立观测噪声, 且是 0 均值各态历经高斯白噪声, 与  $x_i$  相独立;  $n$  为样本数。关于  $e_i$  和

$x_i$  的随机模型有以下特性

$$E(e_i) = E(x_i) = 0, \quad COV(x_i, x_{i-r}) = E(x_i, x_{i-r}) = \gamma(r) \quad (8)$$

$$COV(e_i, e_{i-r}) = E(e_i, e_{i-r}) = \gamma_e(r) \quad (9)$$

$$COV(e, x) = E(ex) = 0$$

$$COV(\tilde{x}_i, \tilde{x}_{i-r}) = \gamma_e(r) + \gamma(r) \quad (10)$$

式中,  $\gamma$  和  $\gamma_e$  分别为  $\{x_i\}$  和  $\{e_i\}$  的自协方差函数, 且如下性质

$$\left. \begin{aligned} \gamma_e(r) &= 0, r > 0 \\ \gamma_e(r) &= D_e, r = 0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

故观测系列  $\{\tilde{x}_i\}$  的自协方差函数有如下性质

$$\left. \begin{aligned} COV(\tilde{x}_i, \tilde{x}_{i-r}) &= E[(x_i + e_i)(x_{i-r} + e_{i-r})] = \\ &\gamma(r) + \gamma_e(r) = \gamma(r), r > 0 \\ COV(\tilde{x}_i, \tilde{x}_{i-r}) &= \gamma(0) + D_e, r = 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中,  $D_e$  为观测噪声  $e_i$  的方差。由于  $\{x_i\}$  为零均值各态历经高斯过程, 依据其各态历经的性质, 则高斯平稳系列  $X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_n]$  可以看作  $n$  元正态随机向量, 且  $E(X) = 0$ 。当独立观测噪声  $e_i$  的方差  $D_e$  已知时,  $X$  的协方差  $\Sigma_{XX}$  可由观测系列  $\{\tilde{x}_i\}$  的自协方差函数确定。此时,  $X$  服从于均值为 0, 协方差阵为  $\Sigma_{XX}$  的  $n$  元正态分布, 即  $X \sim N(0, \Sigma_{XX})$ , 其中,  $\Sigma_{XX}$  为非负定矩阵。当  $\det \Sigma_{XX} > 0$  时, 由正态随机向量的性质可知随机向量

$$Z = \Sigma_{XX}^{-1/2} (X - X) \quad (13)$$

是  $n$  元正态随机向量, 且  $E(Z) = 0, \Sigma_{ZZ} = I_n$ 。  $I_n$  为  $n$  阶单位阵。故随机向量  $Z$  是独立同分布的标准正态随机向量。

$\gamma(r)$  可采用估计量  $\tilde{\gamma}(r) = (n-r)^{-1} \sum_{i=1}^{n-r} \tilde{x}_i \tilde{x}_{i+r}, 0 < r < n$ , 则

$$\Sigma_{XX} = \begin{bmatrix} \tilde{\gamma}(0) & \tilde{\gamma}(1) & \dots & \tilde{\gamma}(n-1) \\ \tilde{\gamma}(1) & \tilde{\gamma}(0) & \dots & \tilde{\gamma}(n-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{\gamma}(n-1) & \tilde{\gamma}(n-2) & \dots & \tilde{\gamma}(0) \end{bmatrix} \quad (14)$$

由此可以推出, 各态历经高斯平稳过程  $\{x_i\}$  的离散序列可以转化为标准正态随机向量, 故该平稳过程统计特性的相关问题就转化为独立样本的相关问题。因而, 当  $\{x_i\}$  出现扰动状态导致第  $i$  个观测离群时, 经过转化的独立标准正态

随机向量  $Z$  的相应分量也会出现离群现象。

根据上面原理,可采取下述方案来探测星载原子钟是否发生异常现象:

(1) 对基于星间链路无轨道影响组合观测值的时间序列进行差分处理,得到平稳序列;

(2) 采用定长采样窗口(可采用 10 个采样),在时间域上随着采样的增加,滑动窗口,计算该平稳序列的自协方差估值,并构建自协方差矩阵;

(3) 构建标准正态分布的样本  $\{Z_i\} (i = 1, 2, \dots, n)$ , 利用  $\chi^2$  假设检验探测异常;

(4) 若  $\chi^2(N) = Z_1^2 + Z_2^2 + \dots + Z_n^2 \leq \chi_{\alpha}^2(N)$ , ( $\alpha$  为设定的扰动判别因子, 取为 0.005), 星载原子钟正常, 否则, 认为星载原子钟发生扰动。

### 3.2 基于星间链路的卫星轨道异常监测

针对导航卫星的轨道异常机动,利用星间链路观测数据以及轨道先验信息构造检测量,对轨道异常机动进行完好性监测。

基于星间链路的双向观测建立与卫星钟差影响无关的组合观测值,在正常情况下,该组合观测值应该为服从高斯分布的随机量。若该随机量的均值和均方差分别为  $b_{\xi_{ref,j}}$  和  $\sigma_{\xi_{ref,j}}$ , 则有如下式统计量服从非中心化的开方分布<sup>[9]</sup>

$$\phi = \sum_{j=1}^n \left( \frac{\xi_{ref,j}}{\sigma_{\xi_{ref,j}}} \right)^2 \quad (15)$$

其非中心化参数为  $\lambda$  如下式

$$\lambda = \sum_{j=1}^n \left( \frac{b_{\xi_{ref,j}}}{\sigma_{\xi_{ref,j}}} \right)^2 \quad (16)$$

式中,  $n$  为星间链路组合观测值的个数,若有星地链路,则还包括星地链路的组合观测值个数。其中,  $b_{\xi_{ref,j}}$  和  $\sigma_{\xi_{ref,j}}$  是轨道异常完好性监测算法的配置参数,它们的取值为先验信息,需预先统计得出。

若如式(15)所示的检验量  $\phi$  不服从非中心化开方分布,则表明该星间链路中的卫星轨道有异常。在这种情况下,还需判定出现轨道异常的卫星是该星间链路中的哪一颗,这需要其中一颗卫星的另一个方向的星间链路的观测数据。若这条星间链路的轨道监测中检验量  $\phi$  服从非中心化开方分布,则说明该卫星是正常的,出现轨道异常的卫星是第一条星间链路另一端的卫星;否则说明该卫星存在轨道异常。这时需将有轨道异常的故障星的健康状态设为“不可用”,并及时进行轨道状态的恢复。

这种算法的成功与否取决于: 1 有关卫星星

间链路组合观测值  $\xi(t)$  的先验信息  $b_{\xi_{ref,j}}$  和  $\sigma_{\xi_{ref,j}}$  是否准确; ④星间观测个数  $n$  的合理取值。这个取值受到完好性告警时间的限制,否则也不能准确反应统计特性,同时星间观测数还受到卫星的空间可用星间链路个数的限制。

## 4 仿真验证

### 4.1 星钟异常监测仿真验证

仿真数据采用实际的卫星钟差数据加异常数据仿真的方式进行。由于基于星间链路的无轨道影响的组合在观测值中含有的卫星通道时延误差很小,近似认为组合观测之中只含有卫星钟和观测噪声的影响,对组合观测值的仿真利用 IGS 提供的最终精密 GPS 星载原子钟钟差数据进行实时数据模拟,利用上述分析方法,进行相关讨论。采用 2001-07-29 PRN23, PRN20 一天的星钟钟差数据,令组合观测值的精度在 0.5 ns 以内,采样点间隔为 5 min。

当星载原子钟状态异常时,可能有两种情况:一种情况是相位异常,  $\{\delta X(t_j) + \varepsilon\}$  不再是 0 均值各态历经高斯平稳过程;另一种情况是频率异常,这时  $D$  不再是常数而是时间  $t$  的函数  $D(t)$ , 下面分别对这两种情况进行研究。

星载原子钟状态异常是小概率事件,因而较难得到发生异常时刻的钟差数据,采用在正常钟差数据基础上叠加异常数据的方法。噪声异常是通过在卫星 SVN23 第 150 采样点到 170 采样点时间段的正常钟差数据上叠加一个振幅为 0.8 ns 的随机噪声,叠加噪声后的星钟钟差数据和历元间双差数据分别如图 3 和图 4 所示。由于叠加的噪声幅度很小,因而不能从图中直接判断出异常,而通过历元间双差法则更容易判定出异常。由上述可知,在正常状态下  $\sigma_{\dot{y}^2 X(t)} = 0.4 \times 10^{-9}$  s, 令限值  $T = 5\sigma_{\dot{y}^2 X(t)}$ , 当  $\dot{y}^2 X(t) > T$  时则认为星钟噪声存在异常。给出基于平稳时间序列的  $\chi^2$  检验结果。由于采用的是定长开窗法(窗口为 10 个采样点),因而正常星钟状态下,  $\chi^2$  序列服从自由度为 10 的开方分布,由数理统计相关理论可知置信度为 0.005 的  $\chi^2$  分布限值  $T_{\chi^2(10)} = 25.188$ , 从图 5 可以清晰发现在第 150 采样点到 170 采样点时间段星钟数据异常。

若频率异常,这时频漂项系数  $D$  不再是一常数而是一时间  $t$  的函数  $D(t)$ , 令  $D(t) = at + \varepsilon$   $a = 0.8 \times 10^{-15}$  s/s<sup>2</sup>,  $\varepsilon$  为一随机小量。在第 100

采样点到 110 采样点时间段叠加星钟频漂异常的星钟钟差数据和历元间双差数据如图 6 和图 7 所示, 从该图中均无法检测到异常。图 8 给出的是基于平稳时间序列的  $\chi^2$  检验结果, 从该图中可以清晰的检测到在第 100 采样点到 110 采样点时间段内存在异常数据。

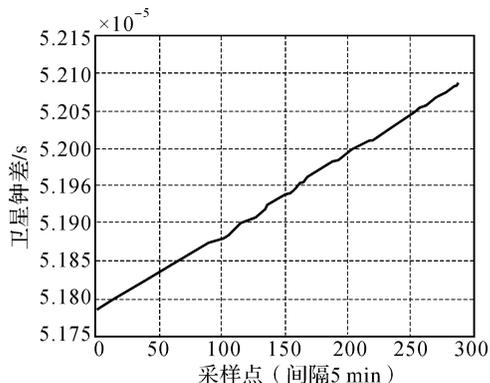


图 6 频率异常钟差数据

Fig. 6 Satellite clock bias of frequency anomaly

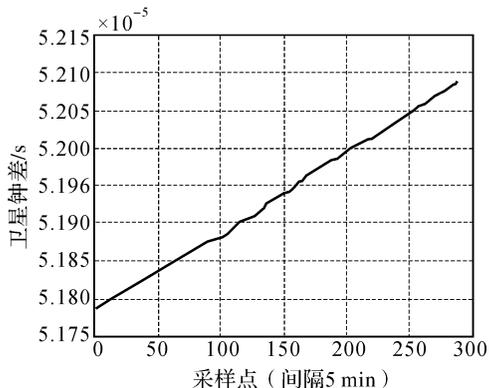


图 3 相位异常的钟差数据

Fig. 3 Satellite clock bias of phase anomaly

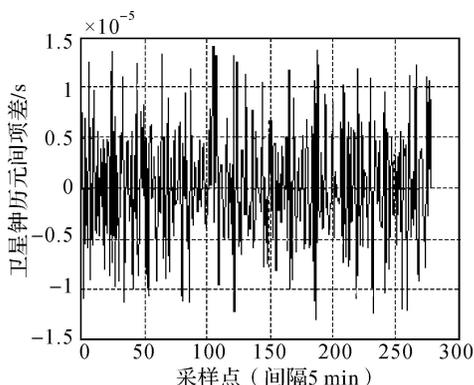


图 7 频率异常的双差数据

Fig. 7 Double difference of satellite clock of frequency anomaly

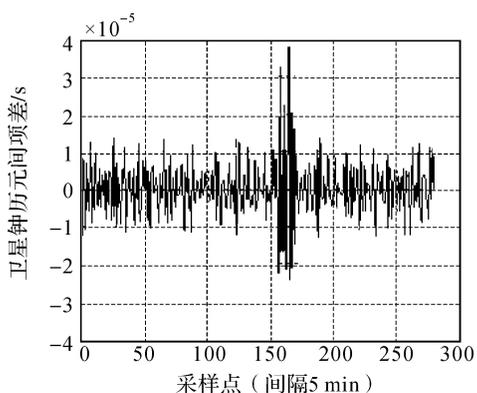


图 4 相位异常的双差数据

Fig. 4 Double difference of satellite clock of phase anomaly

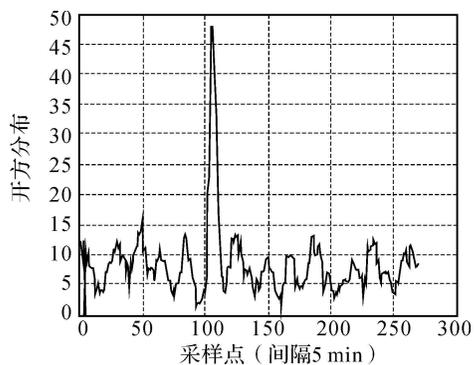


图 8 频率异常  $\chi^2$  检验法

Fig. 8  $\chi^2$  detection for frequency anomaly

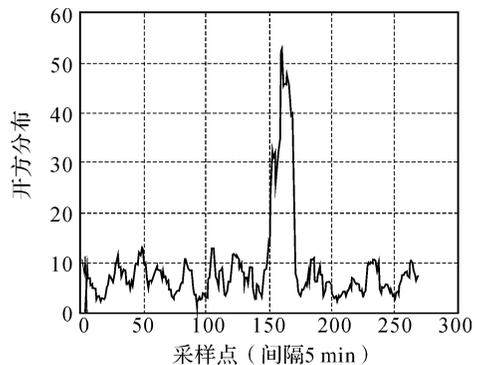


图 5 相位异常  $\chi^2$  检验法

Fig. 5  $\chi^2$  detection for phase anomaly

通过对星间链路组合观测数据作双差处理构建平稳时间序列, 利用基于平稳时间序列的  $\chi^2$  检验法监测星钟异常扰动, 通过算例分析可以得出:

- (1) 历元间双差法对于高频的噪声异常比较敏感, 而对低频的频率异常效果不佳。而基于平稳时间序列的  $\chi^2$  检验法对高频的噪声异常和低频的频率异常均比较有效。

(2) 基于平稳时间序列的  $\chi^2$  检验法的实质是在一个平稳的时间序列中发现、探测出不平稳的状态, 而不需要外部检核量。

(3) 采样点间隔取值不同, 所能检测到星钟异常特性不同。采用短间隔可检测出短稳异常, 采用长间隔可检测出长稳异常。

#### 4.2 轨道异常机动监测仿真验证

利用星间链路观测数据对卫星轨道异常进行完好性监测的第一步是要准确知道构造检验量  $\phi$  的先验信息  $b\xi_{ref,j}$  和  $\sigma_{\xi_{ref,j}}$ 。仿真设计参照 Galileo 星座设计, 包括 3 个轨道面的 30 个 MEO, 地面布设 40 个区域完好性监测站且无故障运行, 星座处于正常状态, 假设每颗卫星构建 4 条星间链路, 同轨面 2 条, 异轨面 2 条。

在仿真中, 令星间与星地链路观测噪声  $0.5 \text{ ns}$ , 所有基于星间链路的组合观测值  $\xi_j(t_p)$  服从高斯分布, 在此基础上对组合观测值  $\xi_j(t_p)$  进行统计; 在实际运行中, 需对正常运行状态下的星间链路作轨道相关组合观测值  $\xi_j(t_p)$  的统计, 统计  $\xi_j(t_p)$  的均值和均方差。与之相对应, 检验量  $\phi$  也应该服从非中心化开方分布。

为了检验这种方法的有效性, 进行卫星轨道异常机动的仿真, 过程采用三个预想定, 分别是卫星轨道沿迹向、法向和径向进行异常机动。在监测算法中, 分别利用星间链路(分为单频、双频两种模式)、星间/星地组合链路(星间采用单频, 星地采用双频)的观测数据进行处理, 分析其对轨道异常监测效果的差异, 并给出在异常探测时刻最受影响用户位置处(WUL)的定位误差, 以及探测到异常所需时间。

想定 1: 卫星轨道沿迹向异常机动加速度  $5 \times 10^{-7} \text{ m/s}^2$ , 仿真结果见表 1。仿真结果表明对于轨道的迹向异常机动, 采用星间单频观测数据的探测效果较好, 星间双频效果较差, 主要原因是: 星间链路较星地链路对于垂直于径向方向的轨道异常机动更为敏感, 并且星间链路观测数据不经过电离层, 而单频观测噪声较星间双频小很多, 更容易检测。

表 1 轨道机动的探测时间和用户定位误差

Tab. 1 The detecting time and error

模式	探测时间/min	用户定位误差/m
星间/星地组合	31	1.12
星间双频	36	1.48
星间单频	26	0.86

想定 2: 卫星轨道沿法向异常机动加速度  $5 \times 10^{-7} \text{ m/s}^2$ , 仿真结果见表 2。仿真结果表明: 对于轨道的法向异常机动, 采用星间单频观测数据的探测效果较好, 原因同上。

表 2 轨道机动的探测时间和用户定位误差

Tab. 2 The detecting time and error

模式	探测时间/min	用户定位误差/m
星间/星地组合	41	1.24
星间双频	36.5	1.16
星间单频	29.5	0.72

想定三: 卫星轨道沿径向异常机动加速度  $10 \times 10^{-7} \text{ m/s}^2$ , 仿真结果见表 3。仿真结果表明: 对于轨道的径向异常机动, 采用星地链路观测数据的探测效果较好。主要原因是: 星地链路观测数据对卫星轨道的径向约束最强, 对径向的异常机动也最敏感。

表 3 轨道机动的探测时间和用户定位误差

Tab. 3 The detecting time and error

模式	探测时间/min	用户定位误差/m
星间/星地组合	46	1.66
星间单频	53	1.98
星地双频	44	1.44

通过上述分析可以得出: 同时采用星间单频和星地双频两组检测手段可以较好地探测卫星轨道的异常机动。以上算法对卫星轨道的持续性微小的轨道异常机动具有较好监测效果, 缺点是检测出异常所需时间较长; 对于短时间较大轨道异常机动可采用基于星间链路观测的 Kalman 滤波方法进行, 其检测出异常的时间更短, 更有利于缩小完好性告警时间。

## 5 结论

通过上述分析可以看出, 增加星间链路观测数据对于全球卫星导航系统的完好性具有较大提升作用, 具体体现在:

(1) 降低卫星导航系统空间段的完好性风险。根据 GPS 运行 30 年的故障概率经验积累, 空间段的故障概率为  $10^{-4}/\text{h}$  量级。采用区域布站+星间链路的工作模式, 若没有星间链路支持, 在导航卫星处于本土监测网监视弧度之外时, 其完好性是无法保证的, 若导航卫星出现故障就会产生完好性风险。因此, 在没有星间链路支持条

件下,导航系统的空间段完好性风险概率在 $10^{-4}/h$ 量级。若增加星间链路观测数据的支持,采用上述针对卫星轨道和星载原子钟的异常监测方法,则导航系统的空间段完好性风险概率在 $10^{-7}/h$ 量级,完好性风险概率降低3个数量级。

(2) 缩短完好性告警时间。GPS卫星是每2h更新广播星历和钟差参数,同时对轨道和钟差给出一个预报精度URA, Galileo卫星是每100min更新广播星历和钟差参数,并对轨道和钟差给出一个预报精度SISA,在没有星间链路支持下,全球段导航卫星在广播星历参数更新期内长达1~2h内没有完好性告警信息的产生和发播,在发生故障时不能及时向用户发出告警,极大地限制了用户对高完好性的需求和使用。若增加星间链路观测数据的支持,可以利用星间链路的观测数据对卫星的轨道和星载原子钟进行异常监测,并通过星间链路的通信通道向卫星注入,极大地缩短全球段导航卫星故障告警时间。

(3) 提高导航卫星异常时刻的用户定位精度。若导航卫星在轨出现异常,卫星的实际轨位和钟时刻与电文中参数不一致或是存在较大误差,若不及时将其排除将会影响到用户段的定位精度和准确性,根据用户位置不同,故障星对处于不同位置的用户定位精度的影响也不一样,这里主要关注故障星影响最大(WUL)用户的定位精度。当卫星发生异常时,导航卫星的实际URE会迅速衰退,能否及时将其检测出来,并进行快速恢复,对稳定系统定位精度等服务性能具有关键作用。

## 参考文献:

- [1] OEHLER V, TRAUTENBERG H L, KRUEGER J. Galileo System Design and Performance [C] // Proceedings of ION GNSS 2006. Fort Worth: ION, 2006: 492-503.
- [2] BOURGA C, LANNELONGUE S, BAUER F. Galileo Mission Segment Processing Chain: Algorithm Design, Performance and Verification [C] // Proceedings of ION GNSS 2006. Fort Worth: ION, 2006: 520-530.
- [3] JOURNO S, POU MAILLOUX J, PIÓPLU J M, et al. Producing the Galileo Services From the Ground Mission Segment [C] // Proceedings of ION GNSS 2006. Fort Worth: ION, 2006: 504-519.
- [4] OEHLER V, LUONGO F. The Galileo Integrity Concept [C] // Proceedings of ION GNSS 2004. Long Beach: ION, 2004: 604-612.
- [5] GARÍA A M, MEDEL H C, MERINO R M M. Galileo Navigation and Integrity Algorithms [C] // Proceedings of ION GNSS 2005. Long Beach: ION, 2005: 1315-1324.
- [6] SARDÓN E, MORA E, HERNÁNDEZ C, et al. Galileo Integrity Processing Facility: Preliminary Design [C] // Proceedings of ION GNSS 2006. Fort Worth: ION, 2006: 531-539.
- [7] MACH J, DEUSTER I, WOLF R. Real Time Station Clock Synchronization for GNSS Integrity Monitoring [C] // Proceedings of ION GNSS 2005. Long Beach: ION, 2005: 1339-1348.
- [8] WOLF R. Onboard Autonomous Integrity Monitoring Using Intersatellite Links [C] // Proceedings of ION GPS 2000. Salt Lake: ION, 2000: 1572-1581.
- [9] RODRIGUEZ I, GARCA C. Satellite Autonomous Integrity Monitoring for GNSS Systems [C] // Proceedings of ION GNSS 2009. Savannah: ION, 2009: 1330-1342.
- [10] PEIRÓ B M A, RAMÍREZ E M. Carmen Igual Bets, Promising Results on Detection Capability of Galileo OSPP and IPF Integrity Barriers [C] // Proceedings of ION GNSS 2009. Savannah: ION, 2009: 2764-2774.
- [11] ZOU D C, LU X C. Research on Global Navigation Satellite System Autonomous Navigation Technology Based on Inter Satellite Links [C] // Proceedings of ION GNSS 2009. Savannah: ION, 2009: 1289-1297.
- [12] HANTAO, LU Xiaochun, DOU Jihong. Design and Simulation on the Intersatellite-links with Annular Antenna [J], Scientia Sinica Physica: Mechanica and Astronomica, 2010, 40(5): 628-637. (韩涛, 卢晓春, 窦齐虹. 基于环带波束天线的星间链路设计仿真[J]. 中国科学: 物理学天文学, 2010, 40(5): 628-637.)
- [13] NIU Fei. Theory and Technique on GNSS Integrity Augment [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2008. (牛飞. GNSS完好性增强理论与方法研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2008.)
- [14] CHEN Jinping. Research on GPS Integrity Augmentation [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2001. (陈金平. GPS完善性增强研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2001.)

(责任编辑:宋启凡)

收稿日期: 2011-02-20

修回日期: 2011-03-15

第一作者简介: 牛飞(1979—),男,博士,主要从事GNSS差分与完好性技术研究。

First author: NIU Fei(1979—), male, PhD, majors in GNSS augmentation technology.

E-mail: niufei009@sina.com