

卫星自主完好性的观测量监测及检测量设计

欧阳晓凤, 曾芳玲, 胡以华

(解放军电子工程学院, 安徽 合肥 230037)

摘要: 完好性是卫星导航系统的核心性能指标之一, 卫星自主完好性监测是地面运控工作模式下导航系统完好性监测的重要补充。围绕卫星导航信号观测量的完好性监测问题, 给出伪距及载波观测值、伪码载波一致性以及多路伪码相位一致性指标的完好性监测方法, 以及检测量的设计, 并通过仿真计算得到满足民航信号空间完备性设计要求的检测门限和最小可检测异常值, 为卫星导航自主完好性监测终端的设计提供了理论参考。

关键词: 卫星导航系统; 卫星自主完好性; 观测量完好性监测; 检测门限

中图分类号: TN967.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)S-0131-06

Observation monitoring and detection designing of SAIM

Ouyang Xiaofeng, Zeng Fangling, Hu Yihua

(Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei 230037, China)

Abstract: Integrity is one of the most key factors of satellite navigation system. Moreover, satellite autonomous integrity is an important part of operational controlling and monitoring the global navigation satellite system (GNSS). This monitoring of the satellite autonomous integrity monitoring (SAIM) observations was concentrated on, including the specific monitoring methods and detection tests of pseudo-range, carrier phase, carrier-code coherence and multichannel code phase coherence. According to the civil aviation integrity regulations, the detection threshold and the minimum detectable abnormality were calculated, which provided some theoretical reference for terminal design of SAIM.

Key words: satellite navigation system; SAIM; observation monitoring; detection threshold

收稿日期: 2015-10-04; 修订日期: 2015-11-06

基金项目: 安徽省自然科学基金青年基金(1208085QF117)

作者简介: 欧阳晓凤(1989-), 女, 助教, 硕士, 主要从事卫星导航信号质量监测技术研究。Email: xfouyang@sina.com

0 引言

完好性是指导航系统在不能使用时及时向用户发出告警的能力,是衡量全球卫星导航系统(GNSS)可靠性的重要指标,通常使用告警限值(AL)、告警时间(AT)、危险误导信息(PHMI)概率等对完好性性能进行描述^[1-2]。而完好性异常是指导致卫星导航系统服务不完好的异常原因或故障事件。由于卫星导航系统是一个以从卫星星座传输导航信号及其携带的导航数据信息为基础的复杂系统,这个系统给用户提供的导航信息要经过以下阶段:导航信息生成、导航信息上行注入导航卫星,下行导航信号传输、接收,以及用户终端处理等。当任何一个阶段都出现故障或异常,都会导致完好性问题的发生,而卫星完好性异常属于导航系统级的故障,具有影响大、预测难和牵涉环节复杂的特点。

卫星自主完好性监测(SAIM)技术最初由Stanford大学研究人员^[3-4]在2001年提出。SAIM技术是基于LAAS完好性监测测试平台为基础,进行适当扩充,移植到星载平台,使单机用户的完备性监测功能至少比现在提高三个数量级,也使得未检测到的出错概率很容易地从 10^{-3} 提高到 $10^{-6[5]}$,满足民航信号空间完备性 $10^{-7}/h$ 的要求^[6]。SAIM测试平台通过多台接收机进行完好性监测,单台接收机主要检测导航数据、观测量等其他信号参数可能出现的异常;再对多台接收机的观测量进行一致性校验和完好性信息综合处理等。其中,对观测量的有效获取和实时监测是SAIM技术的关键问题,观测量完好信息的准确性也是系统运行的重要保证。

文中首先给出了卫星自主完好性监测的观测量及其一致性校验方法,包括伪距及载波观测值、伪码载波一致性以及多路伪码相位一致性指标的完好性监测;进而设计了完好性监测终端从信号处理到信息处理再到完好性信息综合处理的检测模型,形成卫星自主完好性告警信息,并给出告警信息虚警概率和漏警概率的计算方法;最后,根据虚警概率 10^{-8} 和漏警概率 10^{-3} 的民航信号空间完备性设计要求,通过仿真计算分别得到了各个观测量的检测门限和最小可检测异常,为卫星导航自主完好性监测终端

的设计提供了理论参考。

1 卫星自主完好性监测的观测量/导航观测量完好性

1.1 伪码及载波观测量

1.1.1 伪距测量值

伪距测量的基本原理是通过信号传播时延的测量和解算得到,因此对伪距测量值完好性的监测需要时延解算模块对采集的数字信号进行正交变换、捕获、跟踪与解调,为得到精确的伪距时延,需要将相关处理得到的相关峰峰值时刻与1 pps时标做差,从而得到1 ms内精准的伪距时延,这一测量方法的基本原理如图1所示。

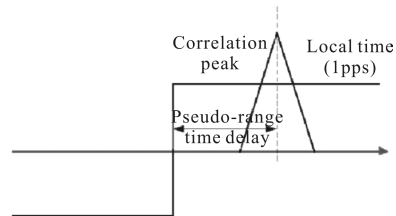


图1 基于理想接收机处理的精准伪距时延测量原理

Fig.1 Precise measurement of pseudo-range based on ideal receiver

由于与1 pps做差后得到的伪距时延不超过1 ms,因此时延解算模块内部只需要将1 ms内的码相位传递。假设码NCO计数值的数据类型为U32(unsigned long integer),在测距脉冲产生时刻,根据下式计算伪距测量值 ρ :

$$\rho = \left[\frac{N_0}{2^{32}} + N_1 \right] \times T_c \quad (1)$$

式中: N_0 为码NCO的计数值; N_1 为1 ms时间内的扩频码片计数值,数据类型为U16(unsigned short integer); T_c 为扩频码码片宽度。

1.1.2 载波相位测量值

载波相位测量值根据信号载波相位和本地载波相位得到,反映了卫星与用户之间距离的相对变化。信号载波相位由载波NCO提供,但是载波相位测量值的初始值存在整周模糊度,在正常跟踪情况下该模糊度保持不变,但在异常导致信号失锁后整周模糊度将被重置,但小数部分仍然保持不变。因此,在对载波相位测量值完好性的监测过程中,包括对整周计数和周内计数的计算和更新,具体操作

如下。

(1) 本地载波相位初始化:将整周计数和周内计数初始为 0; 根据信号载波相位得到载波相位测量值的周内部分 φ , 并将载波相位测量值的整周计数 Z 清零。

(2) 本地载波相位更新:当导航信号发生异常, 失锁重捕后的载波相位测量值的大数部分已经发生跳变, 但需要对本地载波的小数部分实时的更新。

(3) 载波相位测量值完好性监测:假设监测间隔为 50 pps, 则在每 50 pps 时刻, 对信号载波相位相对上一时刻的变化量进行计算, 将该变化量与本地载波相位变换量进行比较, 得到载波相位变化量和最终的载波相位测量值, 需要注意的是叠加过程中整数和小数部分之间的拼接。

1.2 伪码与载波一致性监测

伪码和载波相位一致性监测方法, 可通过检测前后历元间伪码相位与载波相位差的变化, 或检测载波平滑后伪距与伪距观测值之差等多种方法来实现。图 2 是通过检测前后历元间伪码相位与载波相位差的变化, 来进行伪码与载波一致性监测的流程图。

具体算法如下:

(1) 计算前后历元的伪距观测增量和载波相位观测增量

输入信息为当前历元的伪距观测量 $\rho(t_i)$ 和当前历元载波相位观测量 $\varphi(t_i)$, 将这些量保存起来, 计算并保存如下两个增量:

$\Delta\rho = \rho(t_{i+1}) - \rho(t_i)$ 为两历元伪距观测量的增量;

$\Delta\varphi = \varphi(t_{i+1}) - \varphi(t_i)$ 为两历元载波相位观测量的增量。

(2) 监测增量是否正常

计算前后历元间伪码相位差与载波相位差的差异, 即 $\Delta_i = |\Delta\rho - \Delta\varphi|$, 将这个值保存起来, 并与设定的检测门限值 T_3 比较。

若 $\Delta_i > T_3$, 则判断伪码与载波不一致; 若 $\Delta_i \leq T_3$, 则继续下一步判断。

(3) 监测增量的变化率是否正常

计算前后历元间伪码相位与载波相位差的差异的变化, 即 $\nabla\Delta_i = |\Delta_{i+1} - \Delta_i|$, $\nabla\Delta_{i+1} = |\Delta_{i+1} - \Delta_i|$, 与设定的检测门限 T_4 比较。

若 $\nabla\Delta_i > T_4$, 则判断伪码与载波不一致; 若 $\nabla\Delta_i \leq T_4$, 则判断伪码与载波一致。

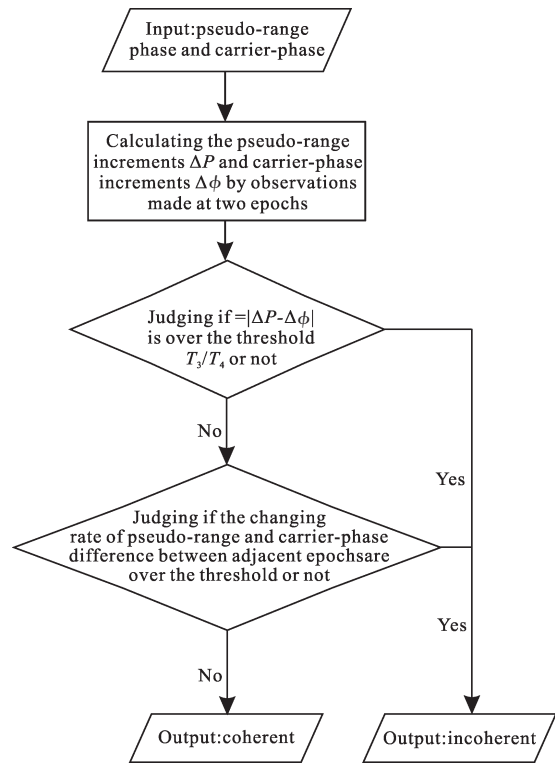


图 2 伪码与载波一致性监测的流程图

Fig.2 Flow chart of carrier-pseudo code coherence monitoring

1.3 多路伪码相位一致性

为保证卫星信号生成的多路伪码相位一致性, 须监测各个频点的军、民码等多路伪码测量值的一致性。图 3 是多路伪码相位一致性监测的流程图。

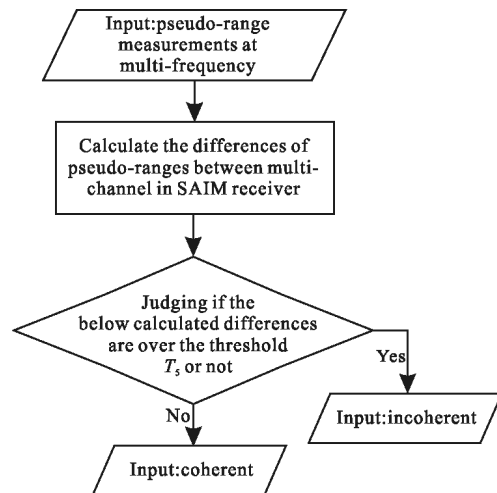


图 3 多路伪码相位一致性监测的流程图

Fig.3 Flow chart of multi-channel code phase coherence monitoring

以 GPS 导航信号为例,在轨卫星信号包括 L1、L2、L5 频点,其中 L1 频点上复用有 C/A 码、P(Y)码和 M 码信号^[7],C/A 码为低速率码,码率为 1.023 MHz, P(Y) 码和 M 为高速率码,码率为 10.23 MHz,则对多路伪码相位一致性的完好性监测算法具体如下:

(1) 计算单频点伪码相位一致性

计算 L1 频点上 P(Y)码伪距测量值 P_i 与 C/A 码伪距测量值 φ_i 之间的差值 $|P_i - \varphi_i|$,将其保存,并与设定的门限 T_3 进行比较。

若 $|P_i - \varphi_i| \leq T_3$,则判断该频点伪码相位一致;若 $|P_i - \varphi_i| > T_3$,则判断该频点伪码相位不一致。

(2) 类推至其他各个频点

以此类推,计算 L2、L5 各频点的伪码相位一致性。

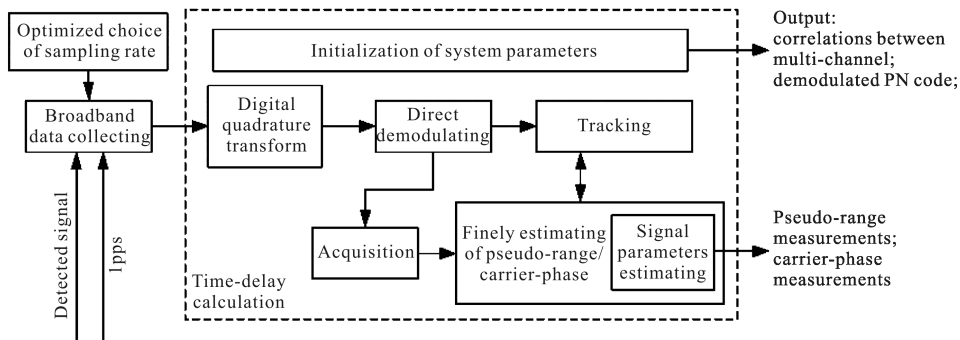


图 4 自主完好性监测信号处理结构图

Fig.4 Signal processing structure of autonomous integrity monitoring

2.2 虚警与漏警概率的计算

虚警的概念是:信号正常未发生畸变时,系统显示的却是信号畸变,因而告警。漏警的概念是:信号发生完好性异常,系统却显示信号正常,不告警。

如前节所述,卫星自主完好性监测的观测量包括伪距及载波观测值、伪码载波一致性以及多路伪码相位一致性指标,为保障完好性监测可实现的检测能力,各观测量的虚警概率、漏警概率和检测门限的计算方法如下:

卫星完好性监测结果表明,正常信号的各个观测指标变化量均服从零均值正态分布,即 $X \sim N(0, \sqrt{\sigma_x^2})$,其中 X 为伪距、载波相位、伪码载波一致性以及多路伪码相位一致性观测量, σ_x 为完好性设计可保证的观测量估计精度;信号出现异常时,各个观测量产生偏差 A ,即服从 $Y \sim N(A, \sqrt{\sigma_y^2})$ 的正态分布。

2 观测量完好性检测设计

2.1 观测量完好性检测方法

经过宽带采集后的 A/D 采样信号首先通过数字下变频模块转换为同相和正交的 I、Q 两路基带信号,直接解调后分别送至捕获模块和跟踪通道^[9];捕获模块对接收信号的伪码相位和载波频率进行搜索,并将捕获结果送至跟踪通道;跟踪通道完成载波去除、伪码解扩、积分清零等处理后得到相关累加值,信号处理的具体流程如图 4 所示;处理后的结果将送至微处理器,进一步完成跟踪环路处理、锁定检测以及数据解调等操作^[9];微处理器配合进行捕获调度、跟踪环路处理、参数设置、通信协议解析^[10],并根据跟踪结果进行伪距、载波相位、功率的估计,然后进行完好性信息处理。

$$\text{则虚警概率为: } P_F = \int_T^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$$

$$\text{漏警概率为: } P_M = \int_{-\infty}^T \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y^2}} \exp\left(-\frac{(y-A)^2}{2}\right) dx$$

从而由虚警概率 $P_F=10^{-3}$ 可确定检测门限值 T ,结合漏警概率 $P_M=10^{-3}$ 的要求,进一步通过迭代收敛得到异常信号的可检测最小偏差值 A 。

3 仿真结果

文中按照虚警概率 10^{-3} 和漏警概率 10^{-3} (假定卫星故障率为 $10^{-4}/h$) 通过仿真计算各观测量的检测门限和最小可检测量,设计保证的各个观测量精度指标及计算结果如下:

(1) 低码率情况伪距估计精度: $\sigma_x=0.3$ ns (码率 ≤ 10 MHz, 示例为 C/A 码,码率为 1.023 MHz)

如图 5 所示,当码率 ≤ 10 MHz,异常信号伪距检测门限 $T=1.6836$ ns,最小偏差量 $A=2.8355$ ns。

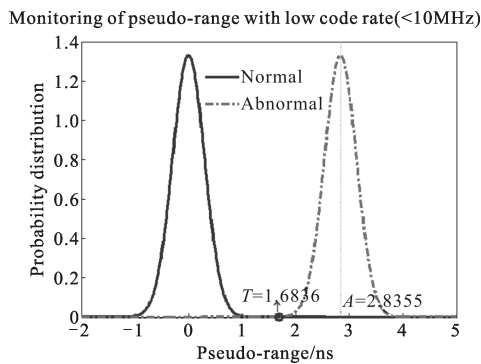


图 5 低码率伪距观测量概率分布及检测量

Fig.5 Probability distribution and detection of pseudo-range with low code rate

(2) 高码率情况伪距估计精度: $\sigma_x=0.2$ ns(码率 ≥ 10 MHz 或 BOC 信号,示例为 M 码,码率为 10.23MHz)

如图 6 所示,码率 ≥ 10 MHz 或信号为 BOC 调制时,异常信号伪距检测门限 $T=1.224$ ns,最小偏差量 $A=2.7663$ ns。

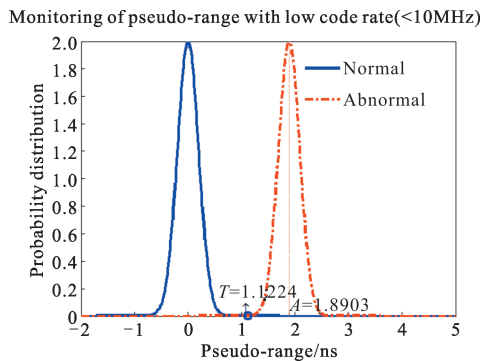


图 6 高码率伪距观测量概率分布及检测量

Fig.6 Probability distribution and detection of pseudo-range with high code rate

(3) 载波相位估计精度: $\sigma_x=0.05$ 周

如图 7 所示,异常信号载波相位检测门限 $T=0.2806$ 周,最小偏差量 $A=2.6801$ 周。

(4) 伪码载波一致性估计精度: $\sigma_x=0.3$ ns

如图 8 所示,异常信号伪码载波一致性检测门限 $T=1.6836$ ns,最小偏差量 $A=2.8355$ ns。

(5) 多路伪码相位一致性估计精度: $\sigma_x=0.2$ ns

如图 9 所示,异常信号多路伪码相位一致性检测门限 $T=1.224$ ns,最小偏差量 $A=2.7663$ ns。

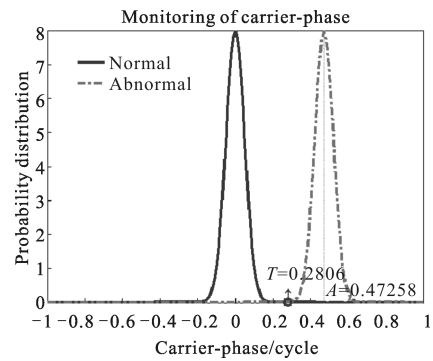


图 7 载波相位观测量概率分布及检测量

Fig.7 Probability distribution and detection of carrier-phase

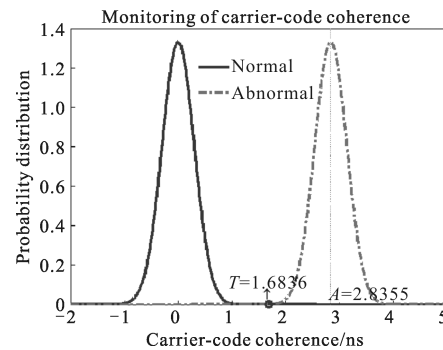


图 8 伪码载波一致性观测量概率分布及检测量

Fig.8 Probability distribution and detection of carrier-code coherence

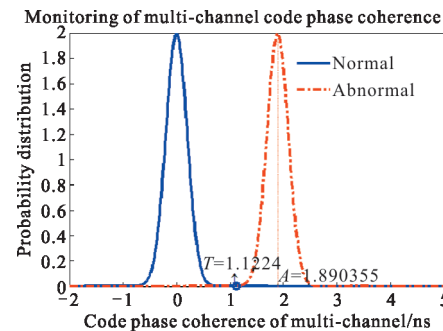


图 9 多路伪码相位一致性观测量概率分布及检测量

Fig.9 Probability distribution and detection of multichannel code phase coherence

综上所述,完好性监测设计可保证的检测性能如表 1 所示。

表 1 完好性监测设计可保证的检测门限及最小可检测异常

Tab.1 Detection threshold and minimum detectable abnormality according to integrity monitoring demands

Detectors	Estimation precision	Detection threshold T	Minimum detectable abnormality A
Pseudo-range/ ns	Low code rate :0.3	1.683 6	2.835 5
	High code rate :0.2	1.224	2.766 3

续表 1
Continued Tab.1

Detectors	Estimation precision	Detection threshold T	Minimum detectable abnormality A
Carrier-phase/cycle	0.05	0.280 6	2.680 1
Carrier-code coherence/ns	0.3	1.683 6	2.835 5
Multi-channel code phase coherence/ns	0.2	1.224	2.766 3

4 结 论

文中围绕导航卫星的自主完好性监测问题,提取伪距及载波观测值、伪码载波一致性以及多路伪码相位一致性指标的观测量监测模型及其一致性校验方法,并对观测量完好性监测的模型结构和检测量进行了设计计算,通过仿真验证给出了在虚警概率 10^{-3} 和漏警概率 10^{-3} 的完好性告警指标要求下,保证各个观测量精度指标的检测门限设计值和最小可检测异常理论值。

参考文献:

- [1] Mozo A, Hernandez C, Romay M M. Galileo navigation and integrity algorithms [C]//Proceedings of ION GNSS, 2005: 1315-1326.
- [2] Oehler V, Francesco L, Trautenberg H L, et al. The Galileo integrity concept and performance [OL]//http: jmwkrueger. googlepage s.com/GNSS_05_Paper_Integrity_Concept/, 2005.
- [3] Mitelman A M. Signal quality monitoring for GPS augmentation system[D]. US: Stanford University, 2004.
- [4] Logi V, Sam P, Gaylord G, et al. Satellite autonomous integrity monitoring and its role in enhancing GPS user performance[C]//Proceeding of ION GPS, 2001.
- [5] Guo S X, Dong Z Y, Gao Y. Construction method of anti-jamming performance test system for navigation satellite receiver [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2150-2155. (in Chinese)
郭淑霞, 董中要, 高颖. 卫星导航接收端抗干扰性能测试平台构建方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2150-2155.
- [6] Chen J P. Study of GPS integrity augmentation [D]. Zhengzhou: Information Engineering University of PLA, 2001. (in Chinese)
陈金平. GPS 完善性增强研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2001.
- [7] Barker B C, Huser S J. Protect yourself navigation payload anomalies and the importance of adhering to ICD-GPS-200 [C]//Proceedings of ION GPS, 1998: 1843-1854.
- [8] Kaplan E D, Hegarty C J. Understanding GPS Principles and Applications[M]. 2nd ed. US: Artech House, 2006.
- [9] Yuan L Y, Wang J Y, Lin Y, et al. Optcial design and test of an infrared hyperspectral imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1075-1078. (in Chinese)
袁立银, 王建宇, 林颖, 等. 红外高光谱成像系统光学设计及检测[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1075-1078.
- [10] Liu Y C, Zhang X L, Wang Y J, et al. Research on D8PSK modulation formats and analysis of its transmission performance[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1271-1276. (in Chinese)
柳雨晨, 张晓磊, 王拥军, 等. D8PSK 调制格式研究及其传输性能分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5):1271-1276.