



## 北斗卫星导航系统数据分析与应用专题·论文

## 在轨导航卫星故障快速诊断与恢复

刘晓萍\*, 刘利, 曹纪东, 唐桂芬, 董恩强, 朱陵凤, 栾靖

北京卫星导航中心, 北京 100094

\*联系人, E-mail: sohuyouxiangtt@sohu.com

收稿日期: 2015-03-30; 接受日期: 2015-04-29; 网络出版日期: 2015-05-29

**摘要** 快速诊断卫星故障并进行卫星故障快速恢复与组网, 是最大限度保证卫星导航系统可用度的有效手段。本文就在轨卫星故障进行快速故障诊断以及故障恢复后的快速钟差测定进行研究, 并建立卫星快速恢复机制与流程, 使其尽快具备组网能力, 保证组网卫星数量, 恢复对用户的服务。试验表明, 可使卫星故障定位时间由原来的 30 min 缩短到 5 min 之内, 并快速进行钟差计算, 生成注入电文, 上述方法有效缩短卫星不可用时间, 减少故障对卫星可用资源与寿命的浪费。

**关键词** 卫星故障, 异常告警, 故障诊断, 贝叶斯策略, 快速定位, 钟差

**PACS:** 91.10.FC, 89.20.Ff, 07.87.+V, 07.05.Mh

**doi:** 10.1360/SSPMA2015-00122

## 1 前言

导航卫星是实现导航服务目标, 决定服务精度和完好性的直接设备。导航卫星由高精度原子钟及时频设备、地面上行信号接收处理、星载信息处理、导航信号发射等几个主要功能部件组成, 其运行状态会直接影响卫星导航业务的实现。文献[1]中提到导航卫星在轨运行期间, 受太阳磁暴等空间环境, 或软件自身运行异常等因素影响时, 时间频率、上行信号接收、数据处理、导航信号发射等部件有可能出现异常或故障。

导航卫星长期在轨运行过程中很难避免卫星故障问题, 而卫星在轨运行期间的故障诊断能力的水平直接影响卫星的工作性能和工作寿命。造成卫星导航业务信息中断, 影响系统的稳定运行。将

可能造成该星导航信号全部或者个别中断, 用户将无法利用该星导航信号进行导航定位服务。若错误导航电文被用户误认为正确, 用于导航定位的计算中, 可能会产生错误的定位结果, 影响用户的使用。若在轨出现两颗卫星导航业务信息中断不可用时, 对整个系统而言, 组网卫星数量会更少, 对系统服务的影响将进一步恶化。卫星较长时间处于不可用状态也是对卫星可用资源与寿命的浪费。

导航卫星结构的复杂性、运行环境的独特性和诱发故障的多源性, 使得卫星故障的诊断与预测较一般设备困难。近年来部分科研人员对卫星在轨运行期间的故障分析进行研究, 总结了宝贵的经验和经典策略。文献[2]基于鲁棒最优方法的导航卫星故障诊断方法, 通过输出反馈融合鲁棒控制思想, 运用线

**引用格式:** 刘晓萍, 刘利, 曹纪东, 等. 在轨导航卫星故障快速诊断与恢复. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 079506  
Liu X P, Liu L, Cao J D, et al. Rapid fault detection and recovery of in-orbit navigation satellite (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2015, 45: 079506, doi: 10.1360/SSPMA2015-00122

性矩阵不等式方法求解集成故障诊断问题, 利用陀螺故障信息设计一种新型鲁棒最优故障观测器, 克服了传统故障诊断方法对敏感器的依赖, 提高了对卫星姿态控制系统的故障诊断精度。文献[3]通过对SRAM型FPGA功能模块布局布线的约束和规划、动态回读与分帧校验和局部动态重配置, 给出了解决SRAM型FPGA单粒子翻转的一种高效无中断检测与修复方法。

由于卫星故障原因多种多样, 以上两种方法均是针对卫星具体的故障进行的自检测与恢复方法, 但其存在局限性, 地面系统接收到的是卫星下传的数据, 无法直接进行卫星故障的诊断。卫星出现导航业务信息中断不具有可预见性, 因此地面系统只能采用事后恢复的方式解决。如果整个过程采用人工方式进行, 导航卫星故障原因的分析定位所需时间与排查人员的能力与经验, 数据与设备状态是否正常等均有很大关系。

现行地面运行系统设备可以实现卫星导航业务信息中断的恢复, 但恢复时间长。现有手段恢复卫星导航业务信息中断时间过长, 对系统可用度会产生较大的影响。本文对在轨卫星进行快速故障诊断研究, 建立卫星快速恢复机制与流程, 大幅缩短卫星故障后恢复的时间, 使其尽快具备组网能力, 恢复对用户的服务, 最大限度保证组网卫星数量和系统可用度。

## 2 多技术融合的智能卫星故障快速诊断

卫星故障快速诊断与恢复需建立卫星系统、地面系统的联合响应机制。卫星导航业务处理系统通过实时获取并分析地面控制段对卫星的观测数据, 发现卫星导航业务信息中断现象; 根据卫星导航业务信息中断现象定位卫星故障单机, 并切出故障卫星; 对故障卫星单机复位或开关机; 监测到卫星故障单机恢复后, 对卫星关键参数及状态进行设置并上行注入电文; 卫星具备可组网状态后, 切入系统运行。

卫星故障发现与定位技术是整个卫星故障快速处理系统的基础, 只有准确快速地发现并定位卫星故障类型, 才能驱动后续的故障恢复等流程。由于卫星故障模式多种多样、复杂, 单一诊断方法已远远不能满足故障诊断的需要。为适应卫星故障多样性要求, 必须探索、应用新的诊断技术以适应系统要求。

星地异常现象与参数的分析与判断是发现与定

位卫星导航业务信息中断及故障单机的主要途径。故障恢复后的快速钟差测定是缩短卫星不可用时间的有力保障。

综合考虑系统功能、效果和客观条件等各方面因素, 试验采用了以基于CBR案例推理、贝叶斯网络的故障数据挖掘、故障模型扩展等方法相融合的技术进行故障特征综合判断与快速定位。利用钟差快速解算缩短卫星故障恢复后的电文信息生成时间。

### 2.1 卫星遥测数据判断方法

卫星参数按一定帧频快速下传到地面, 每颗卫星有几百到上千个遥测参数, 地面卫星测控主要靠计算机程序来实现故障报警, 见文献[4]。

遥测参数判断法是将诊断对象看成由一系列单个零件通过相互连接而构成, 进而对这些零件的输入输出进行行为描述。建立好结构与行为模型后即可预测系统的 behavior。将模型预测值与实测值相比较以获取异常征兆。该报警算法简单、只要超限报警门限设置合理, 就能够及时发现卫星出现的异常。

但该方法的缺陷反映在3个方面。(1)当上下限值相差较大时, 不容易发现遥测参数变化, 会错过故障处理时间, 不利于卫星缓变故障的发现。(2)当卫星参数值本身变化较大时, 判断门限不好掌握。(3)当同时多个遥测参数超限, 会无法正确判断故障源。或者地面发遥控指令时, 相应的参数会发生变化, 导致误判, 需要与其他方法相结合进行判断。

### 2.2 基于贝叶斯网络的故障数据挖掘方法

卫星导航系统是复杂的软硬件集成系统, 系统呈现以下特点:(1)系统规模庞大、业务处理模式多、系统层次多;(2)系统结构非常复杂;(3)分系统之间存在关联性。在系统运行过程中, 系统可能出现的故障模式多样化, 故障之间具有动态随机性和相关性。部分故障由于缺乏数据关联性, 无法快速分离问题;这些特点给卫星故障分析带来较多困难。

将贝叶斯网络结构故障树分析引入到卫星导航系统, 为分析和解决复杂而繁琐的任务提供一个全新的视角和思路。把系统看成一个大的、开放的贝叶斯网络结构, 将卫星、各个关键系统和设备当成问题域中的节点, 根据系统和故障的层次性特点, 确定层次诊断策略、合适的诊断粒度、浅知识和深知识有机结合等确定诊断力度<sup>[5]</sup>。

根据贝叶斯公式, 定义故障和故障原因之间的贝叶斯概率:  $\omega$ 是故障原因的概率为  $P(\omega)$ ,  $\omega \in R^d$ ( $d$  维欧几里德空间);  $x_i$ 发生故障的概率为  $P(x_i)$ ;  $\omega$ 为故障是由于  $x_i$ 导致的概率为  $P(\omega|x_i)$ ;  $x_i$ 发生故障的原因是  $\omega$ 的概率为  $P(x_i|\omega)$ , 得到

$$\varphi(\omega) = P(x_i | \omega) = \frac{P(\omega | x_i)P(x_i)}{\sum_{i=1}^n P(\omega | x_i)P(x_i)}, \quad (1)$$

$$P(\omega) = \sum_{i=1}^n P(\omega | x_i)P(x_i). \quad (2)$$

这里的贝叶斯概率主要是当故障发生时, 该故障原因是由该故障导致的条件概率.

按照对象系统的层次性特点, 首先将系统设备划分为若干问题域, 然后再根据各系统本身的功能特性及层次性, 划分为若干分系统、子系统和功能单元. 从系统的层次性角度出发, 较低层的元素可以集成高层的更大元素, 而高层的较大元素可以分解为低层的较小元素. 最高层的元素是系统, 最底层的元素是系统功能单元. 系统的各个分系统在功能上都是相对独立的, 因此, 每个分系统都可以作为一个基本诊断对象. 用专业知识、先验信息、观测数据的

相互作用和影响下, 通过最大后验概率与最小描述的协调计算, 得到一个最佳匹配的卫星故障贝叶斯网络结构. 有机结合网络结构的精确性, 综合相关知识和信息解决计算复杂性, 避免主观偏见带来的片面性, 使得故障结构模型与数据实例达到最佳匹配.

针对卫星故障任务开展贝叶斯网络故障树建模与分析, 具体建模过程如下: (1) 根据任务剖面和信息流, 确定任务过程中的参与设备及其逻辑关系; (2) 结合卫星下传数据、卫星设备工况的故障与修复信息, 形成卫星的任务可用性模型并确定其任务可用度; (3) 根据地面站分布、设备、数据、工况及其逻辑关系, 形成地面站任务成功性模型; (4) 利用贝叶斯网络推理算法, 开展卫星可用任务成功性模型和地面站任务成功性模型故障诊断, 确定卫星薄弱环节, 建立卫星故障诊断模型.

例如当地面发现星地时间同步中断时, 并不能直接判断是卫星故障, 需要通过对地面和卫星数据以及工况等进行综合分析, 剥离地面设备故障、软件异常、任务调度等各种导致星地时间同步中断的因素, 最终才能定位卫星故障, 卫星也需要剥离是什么故障, 哪个软件或元器件故障, 最终才能准确定位故障. 图1给出了星地时间同步中断贝叶斯网络故障树.

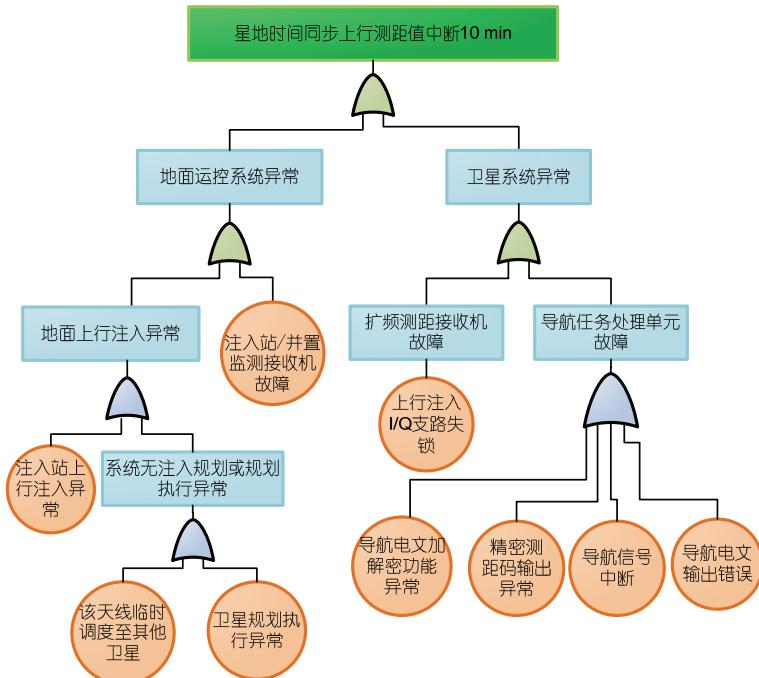


图1 (网络版彩图)星地时间同步中断贝叶斯网络故障树

Figure 1 (Color online) Bayesian network fault tree of satellite-ground time synchronization interrupt.

### 2.3 卫星故障模型扩展性方法

针对系统的灵活性和扩展性要求,以目前已知的数据处理和监控分系统导航业务信息中断时的各种异常现象及卫星故障为基础,设计并实现了具有一定扩展性的卫星故障模型<sup>[6]</sup>. 卫星故障模型扩展性技术实现流程图2所示。

卫星故障模型的扩展性表现在如下几方面.

#### (1) 异常现象参数可修改.

在故障模型库中可以配置每一种异常现象的多类阈值,包括参数报警阈值、时间阈值、概率和差值阈值等. 可以根据情况调整和优化异常现象参数.

#### (2) 故障定位策略可扩展.

在故障模型库中,针对每一种卫星故障,建立了可扩展的故障定位模型. 通过配置,每一类卫星故障的定位策略可以修改或新增,实现了卫星故障判断策略的可扩展,异常现象与故障的判定逻辑之间的关系可配置. 在卫星故障定位过程中,故障定位策略是从故障模型库中读取的,在故障模型库变化后,相关软件通过读取数据库,自动适应新的需求.

对于新增异常现象,故障发现与定位软件的软件架构具有较好的可扩充性,可以加入新的异常现象判定模块,在整体架构不变的前提下,通过较少的代码修改,实现对新增异常现象的支持.

### 2.4 基于 CBR 的多方法融合智能故障诊断技术

CBR(Case Based Reasoning)它规避知识和规则难以获取这一瓶颈,运用以前积累的经验直接求解问题,是人工智能和故障诊断方法的一次新发展. 在 CBR 中,知识单元是案例(case),合理的案例表达方式是 CBR 推理的基础和关键. 其基本思路是:首先将已解决的故障做成案例并按照一定的格式存储于案例库;当有新的诊断任务时,程序依某一匹配算法检索案例库,若能匹配相关案例,则输出结果;如果不能匹配,则对该故障采取其他诊断方法进行处理,如专家会诊等,得到的诊断结果经规范化处理后作为新的案例添加到案例库中去,见文献[7].

综合考虑系统功能、效果和客观条件等各方面因素,本系统采用了以基于 CBR 案例推理专家系统与贝叶斯网络分析、故障模型扩展等技术进行故障特征

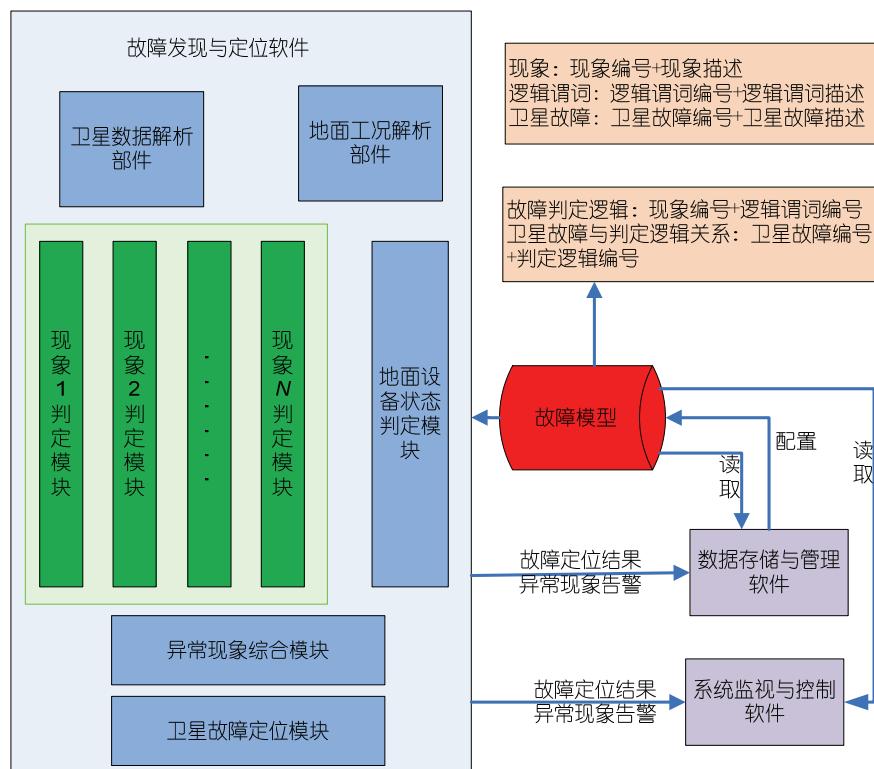


图 2 (网络版彩图)卫星故障模型扩展性技术流程

Figure 2 (Color online) Flowchart of satellite fault model expanding technology.

信息融合, 寻找一个类似的、成功的过去案例, 并对其进行修改直至满足当前问题的需要.

在卫星导航系统实际故障诊断过程中, 首先根据故障产生的大致部位及故障现象情况, 应用案例推理的方法进行诊断. 如果从案例库中检索到相同或相似故障的维护案例, 则按此案例的故障原因进行故障定位, 若故障定位成功, 则说明诊断成功, 即可按照此案例的维护方案展开维护工作. 否则系统启动基于规则的诊断流程, 使用由故障树获得的维修知识进行精确诊断, 诊断成功后将此次信息增加到故障案例库. 从而实现故障快速诊断和精确诊断, 见文献[8]. 故障诊断流程如图3所示.

每个案例都是在导航设备使用或诊断实践当中的故障现象、原因以及排除过程与方法的积累和总结. 由不断丰富的案例形成系统诊断案例库, 以方便系统诊断的查询和推理. 本系统的CBR建造主要有以下几步.

(1) 案例表示. 一个案例是一个具体问题求解的完整表达, 应包括如下几类信息: 1) 问题描述, 包括故障类型、故障现象、故障特征的描述; 2) 问题环境的描述, 故障发生时系统所表现的征兆; 3) 解决方案, 是关于故障原因、故障解决方案、解释、参考经验的描述; 4) 反馈: 是对解决方案的反馈建议.

(2) 案例索引. 它和案例的组织结构以及检索相关, 反映了系统不同案例间的区别. 本项目针对案例分为两类进行了索引. 1) 基本信息类, 按照卫星的基本信息和故障信息建立索引; 2) 结构信息类, 故障通常发生于卫星的某个功能单元.

(3) 案例检索与匹配. 利用索引机制, 根据相似性度量方法, 从案例库中检索出一组与当前案例在特征属性上相似、对当前故障的诊断有启发和指导意义的案例, 并从中选择最佳的案例作为本次诊断的

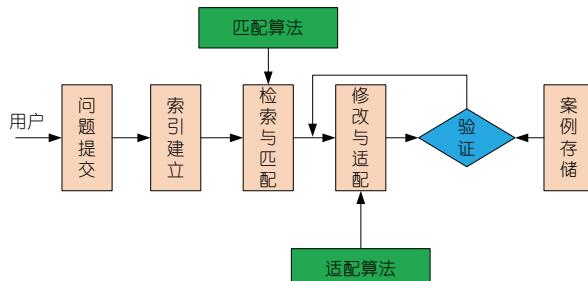


图3 (网络版彩图)故障诊断流程

Figure 3 (Color online) Fault detection flowchart.

建议. 相似度匹配算法公式如下:

$$\text{相似度} = \frac{\sum \{\text{相似度}[i] \times \text{权重}[i]\}}{\sum \text{权重}[i]}, \quad (3)$$

$$\text{相似度}[i] = \begin{cases} 1 \times \text{权重}[i], & \text{当属性值相等时}, \\ 0, & \text{当属性值不等时}. \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $i$  表示第  $i$  个匹配的关键特征; 相似度  $[i]$  表示案例间第  $i$  个关键特征的相似度; 权重  $[i]$  表示第  $i$  个关键特征的权重因子.

(4) 案例复用与修改. 把检索到的旧案例复用到新案例中. 当复用结果不好时通过运用专家经验知识和人为干预对检索得出的案例进行调整、修改, 形成适合于当前故障的案例, 得出诊断结论.

(5) 案例添加. 将新案例的诊断过程、评价结果添加到卫星故障案例库中成为新的案例, 保存过程就是一个学习的过程.

### 3 故障快速恢复方法

卫星故障恢复后的导航电文快速生成的关键是卫星复位后星地钟差计算及定轨数据的快速处理.

高精度卫星钟差是卫星故障发现及定位、故障卫星恢复正常判断的依据, 是故障卫星恢复正常后钟差快速预报的重要资料来源, 其解算的实时性直接影响卫星故障定位和卫星导航业务信息快速恢复总时间.

实时解算技术的难点在于, 卫星钟差解算采用的原始观测数据为无线电双向上下行观测数据, 由于数据传输因素, 数据处理分系统的星地时间同步软件在卫星测量得到的上行观测数据和地面天线测量得到的下行观测数据的获取时间上存在时间差, 影响卫星钟差实时解算过程中的上下行数据配对, 见文献[9].

对于任意一台原子钟读数  $T$  与系统时间之间的关系可以用一个二阶多项式表示, 即

$$T - t = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2, \quad (5)$$

其中,  $a_0$ ,  $a_1$  和  $a_2$  分别是  $t_0$  时刻原子钟相对于系统时间  $t$  的钟差、钟速(频差)和半加速度(频率漂移的一半). 如果时钟读数的秒长均匀, 那么  $a_2$  应为 0.

设  $z$  表示原子钟在  $t$  时刻相对于系统时间的钟差观测量, 即

$$z(t) = T - t. \quad (6)$$

如果观测时间为  $t_j$ , 观测误差为  $v_j$ , 则可以建立误差方程:

$$z(t_j) + v_j = a_0 + a_1(t_j - t_0) + a_2(t_j - t_0)^2. \quad (7)$$

设  $\hat{a}_0$ ,  $\hat{a}_1$ ,  $\hat{a}_2$  为钟参数  $a_0$ ,  $a_1$  和  $a_2$  的估计值, 则有

$$\hat{z}(t_j) = \hat{a}_0 + \hat{a}_1(t_j - t_0) + \hat{a}_2(t_j - t_0)^2. \quad (8)$$

根据最小二乘估计原则, 钟参数  $a_0$ ,  $a_1$  和  $a_2$  的估值可由多次钟差观测数据求出, 即

$$\begin{bmatrix} \hat{a}_0 \\ \hat{a}_1 \\ \hat{a}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum_{j=1}^n \Delta t_j & \sum_{j=1}^n \Delta t_j^2 \\ \sum_{j=1}^n \Delta t_j & \sum_{j=1}^n \Delta t_j^2 & \sum_{j=1}^n \Delta t_j^3 \\ \sum_{j=1}^n \Delta t_j^2 & \sum_{j=1}^n \Delta t_j^3 & \sum_{j=1}^n \Delta t_j^4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n z_j \\ \sum_{j=1}^n z_j \Delta t_j \\ \sum_{j=1}^n z_j \Delta t_j^2 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中,  $n$  为同步观测次数,  $\Delta t_j \equiv t_j - t_0$ .

为了实现连续、稳定、高实时性、高精度的卫星钟差解算, 设计了同步缓冲模式下的数据融合方法. 其主要思想是根据数据时标开辟同步缓冲区, 相同时标的的数据存储在同一缓冲区内, 不同类型的数据存在缓冲区不同的位置上, 当两类数据都收齐后, 可以进行双向时间比对计算.

同步缓冲模式下的数据融合方法在设计过程要考虑以下 3 点. (1) 同步缓冲区的开辟与销毁. 根据接收数据的时标判断, 如果比最新缓冲区的时标晚, 则开辟新的缓冲区, 并根据数据类型存储, 同时设置缓冲区接收数据标志; 对缓冲区的组数进行判断, 如果达到最大组数, 销毁最旧的一组缓冲区. 实际上以数据时标建立的同步缓冲区是一种先进先出(FIFO)缓冲区. (2) 数据的匹配. 如果接收数据的时标不比最新缓冲区的时标晚, 则按时标查找缓冲区, 将数据按类型存储在相同时标的缓冲区内, 并设置缓冲区接收数据标志; 如果缓冲区接收数据标志显示两类数据已收齐, 可以进行下一步计算. 如果查找整个缓冲区, 未找到相同时标的缓冲区, 则数据匹配失败. 如果缓冲区组数设置合理, 出现数据匹配失败的原因必然是某一类型的数据缺失. (3) 同步缓冲区组数的设置. 依据两类数据传输时间差, 时差越大, 所需的缓冲区组数也越多. 此外, 在满足数据延迟要求的情况下, 缓冲区组数越小, 当数据中断时, 数据匹配

失败消耗的查找次数越少.

该方法能快速准确地完成星地时间同步上下行数据配对及无线电双向法卫星钟差解算, 实时给出了连续、稳定、高精度的卫星钟差结果.

#### 4 试验验证

基于上述方法研究, 研制了一套验证软件. 仿真验证软件实时处理多监测站、多星的观测数据、工况信息, 对其进行数据综合判读和比对. 观测数据的判读设计门限、正常超差等多个判据, 减少误警率. 一旦发现在轨卫星出现观测数据中断、超差、不连续等现象时, 即可发出报警信息, 提示出现卫星异常问题

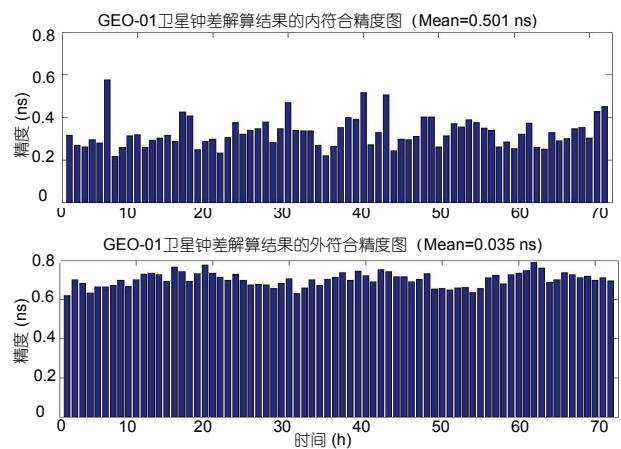


图 4 (网络版彩图) 钟差解算内符合、外符合精度

Figure 4 (Color online) Inner and outer coincidental precision of clock results.

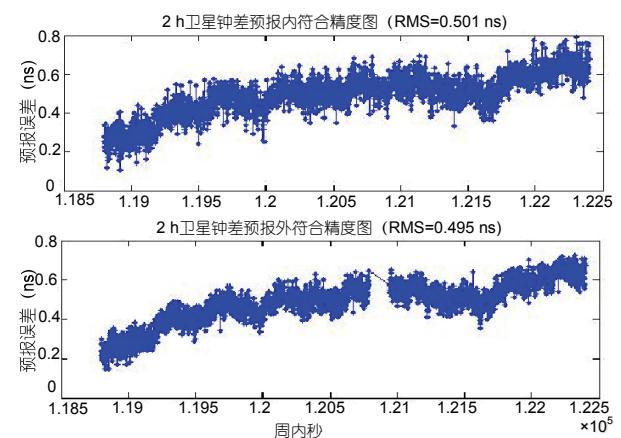


图 5 (网络版彩图) 钟差预报参数性能测试

Figure 5 (Color online) Performance test results of clock predicting parameters.

**表 1 故障快速诊断与恢复所需时间统计**

业务中断类型	故障发现 确认(m)	总计时间 (h)	原处理时间 (h)
上行注入载荷 I, Q 支路假锁	<5	<1.5	26
上行注入载荷 I, Q 支路均失锁	<5	<1.5	26
上行注入载荷向导航任务处理单元数据传输错误	<5	<1.5	26
导航信号全部或个别支路异常	<5	<4.5	249
导航电文加解密功能异常	<5	<3.5	81
卫星上下行信号同时出现中断	<5	<3.5	52

或是地面系统的问题. 通过对数据的综合比对判读, 剥离地面故障因素, 实现卫星故障快速定位, 并进行快速恢复.

数据分析结果表明: 实时解算的钟差精度优于 2 ns. GEO 卫星内符合精度均优于 0.15 ns(见图 4). 外

符合精度均优于 0.04 ns. 钟差 2 h 预报精度优于 3 ns. 钟差 2 h 预报的内符合和外符合精度均优于 0.8 ns(见图 5). 钟差快速计算时间小于 25 min. 故障快速诊断与恢复所需时间统计见表 1.

## 5 小结

本文就在轨卫星故障进行快速故障诊断以及故障恢复后的快速钟差测定进行研究, 并建立卫星快速恢复机制与流程, 使其尽快具备组网能力, 保证组网卫星数量, 恢复对用户的服务. 通过试验表明, 它是一种有效的方法, 可以大幅缩短卫星故障定位与钟差快速生成时间, 有效缩短卫星不可用时间, 减少故障对卫星可用资源与寿命的浪费, 缩短卫星故障对用户的影响.

建议进一步进行基于贝叶斯网络的卫星故障数据挖掘研究, 使卫星故障诊断和危险趋势预测更加准确、有效、快速. 从卫星正常运行模式与卫星故障模式间无缝切换的角度进行深入研究, 确保卫星和系统发挥的最大效能.

## 参考文献

- 宫颖. 卫星故障模式与故障案例库及其应用. 质量与可靠性, 2011, 2: 53–56
- 王庆华, 伍向军, 王金刚, 等. 基于鲁棒最优方法的导航卫星故障诊断. 第二届中国卫星导航学术年会论文集. 上海, 2011. 1286–1289
- 邢克飞, 何伟, 周永彬, 等. SRAM 型 FPGA 单粒子翻转的高效无中断检测与修复技术. 第二届中国卫星导航学术年会论文集. 上海, 2011. 25–29
- 王宏兵, 楚恒林, 原亮, 等. 导航卫星导航业务中断问题初步分析. 第二届中国卫星导航学术年会电子集. 上海, 2011
- 杨卓鹏, 郑恒, 薛峰, 等. 基于蒙特卡洛–贝叶斯网络方法的卫星地面站可用性分析. 第二届中国卫星导航学术年会电子文集, 上海, 2011.
- Yin W, Zhang W G, Li B, et al. Fault tree diagnosis method in flight control system combined with Bayesian (in Chinese). Comput Appl, 2007, 7: 1802–1805 [尹伟, 章卫国, 李斌, 等. 结合贝叶斯理论的飞控系统故障树诊断方法. 计算机应用, 2007, 7: 1802–1805]
- Song D, Liu F, Wu X Y. Research and application on case self-revision approach of fault diagnosis system based on CBR (in Chinese). Observ Control Technol, 2008, 5: 81–83 [宋东, 刘飞, 吴信永. CBR 故障诊断系统中的案例自修改方法研究及应用. 测控技术, 2008, 5: 81–83]
- Yang T S, Yang K Z, Li H Z. Research on knowledge-based method for satellite fault diagnosis and prediction (in Chinese). Eng Sci, 2003, 5: 63–67 [杨天社, 杨开忠, 李怀祖. 基于知识的卫星故障诊断与预测方法. 中国工程科学, 2003, 5: 63–67]
- Liu X G, Li J W, Li Y, et al. The study of time prediction based on the methods of least square and Kalman filter (in Chinese). Hydrograph Surv Chart, 2008, 3: 24–26 [刘晓刚, 李建伟, 李岩, 等. 基于最小二乘和卡尔曼滤波方法进行原子时预报的研究, 海洋测绘, 2008, 3: 24–26]

## Rapid fault detection and recovery of in-orbit navigation satellite

LIU XiaoPing<sup>\*</sup>, LIU Li, CAO JiDong, TANG GuiFen, DONG EnQiang,  
ZHU LingFeng & LI Jing

*Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China*

It's an effective means to ensure maximum availability of satellite navigation systems by rapid fault detecting, recovering and satellite rejoining. In this paper, methods of in-orbit satellite failures rapid detection, fast clock error determination and orbit determination after fault recovery were studied. Then, rapid satellite fault recovery mechanism and processes were established, so as to ensure the constellation reforming capability with enough satellites in a short time, while service capability of navigation users was recovered. The test results indicate that satellite fault detecting time decreases to a level of 5 min compared with a level of 30 min before. Moreover, satellites clock parameters were quickly calculated and injection messages were generated as soon as possible. All methods above effectively decreased the satellite unavailable time, and reduced the waste of satellites resources and life caused by satellite failures.

**satellite failure, abnormal alarm, fault-diagnosis, Bayes strategy, rapid positioning, clock errors**

**PACS:** 91.10.FC, 89.20.Ff, 07.87.+V, 07.05.Mh

**doi:** 10.1360/SSPMA2015-00122