

卫星导航接收设备健康管理技术研究

刘雷¹, 高关根^{1,2}, 寇磊^{1,2}, 王博伟¹

(1. 航空工业西安飞行自动控制研究所, 西安 710065;

2. 航空工业西安飞行自动控制研究所飞行器控制一体化技术重点实验室, 西安 710065)

摘要: 针对卫星导航接收设备的技术特点和维护需求, 基于故障检测与健康管理工作, 提出了一种从射频前端、数字信号处理到算法实现全流程的预测与健康管理工作, 搭建了卫星导航接收设备预测与健康管理工作体系结构; 基于检测信息设置, 完成信号处理与状态监测, 开展卫星导航接收设备实时健康评估与寿命预测研究, 根据评估与预测结果制定维护方案, 实现卫星导航接收设备的健康管理; 通过开展仿真试验与实际工程应用, 验证了所设计的卫星导航接收设备健康管理方案的正确性与有效性, 具有一定的工程推广价值。

关键词: 预测与健康管理工作; 卫星导航接收设备; 健康评估; 寿命预测

Research on Satellite Navigation Receiver Health Management Technology

Liu Lei¹, Gao Guanggen^{1,2}, Kou Lei^{1,2}, Wang Bowei¹

(1. AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China; 2. Key Lab. of Science and Technology on Aircraft Control, AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: Considering the technical characteristics and maintenance requirements of satellite navigation receivers, based on the prognostics and health management (PHM) technology, the health management scheme which means a whole process including radio frequency front end, digital signal processing and algorithm implementation is proposed and the structure of satellite navigation receiver prediction and health management system is built. According to the detection information setting, the signal processing and state monitoring are completed, the real-time health assessment and life prediction research are carried out, and the maintenance scheme is formulated according to the evaluation and prediction results, and the health management of the satellite navigation receiver is realized. Through the simulation test and practical engineering application, the correctness and effectiveness are achieved by the designed health management scheme, and which has certain value of engineering application and spread.

Keywords: prognostics and health management; satellite navigation receiver; health assessment; life prediction

0 引言

现代飞机为完成从起飞、巡航、进场到着陆全过程的全天候、长航时、高安全性的飞行使命, 对导航系统提出了具备全天候自主导航、保持长航时精度、提供全姿态的导航参数输出能力要求。卫星导航系统作为目前所有导航方式中精度最高的方式, 被广泛应用于各类飞行器导航、着陆和精密测量等方面。然而, 卫星导航本质上属于无线电导航, 容易受到有意或无意的射频干扰, 导致设备定位的精度及可靠性受到影响, 因此在实际应用中常常采用惯性/卫星组合导航方式。在面向对导航精度要求高的任务时, 卫星导航系统高可靠连续定位成为任务能否完成的关键因素。从目前应用看接收机问题是占组合问题的主要因素, 而目前, 对卫星导航接收机的故障诊断主要依靠于开机自检和基于算法的性能检测, 可概括为: 以冗余管理和BIT为检测方法、以定期维护为主, 采用多、勤、细来的方法预防卫星导航接收系统故障。实时故障检测能力不足, 不具备向组合导航系统提供导航性能预估的能力, 且事后

维修的解决问题途径已经不能满足新一代飞行器的要求, 因此对卫星导航接收系统全生命周期的故障预测与健康管理工作已变得至关重要。

故障预测与健康管理工作 (Prognostics and Health Management, PHM) 就是预测未来一段时间内系统失效可能性以及采取适当维护措施的能力^[1-5]。目前, PHM技术已在军用和民用领域广泛应用, 比如航空、航天、装甲装备等。通过分析工程应用实例发现, PHM技术能够实现自主式保障, 提高维修保障效率和任务成功率, 有效降低维修费用, 缩短维修时间。

PHM技术是一项新的维修保障技术, 代表了维修理念的转变, 实现了从传统的基于传感器的诊断转向智能系统的预测, 极大促进了“状态维修”取代“事后维修”和“定期维修”的过程。基于健康管理技术, 开展卫星导航接收设备的健康管理具有十分重要意义。

本文针对卫星导航接收设备的技术特点和维护需求, 基于健康管理技术, 搭建卫星导航接收设备预测与健康管理工作体系结构, 实现对卫星导航接收设备全生命周期的分析和维护。通过仿真试验和实际工程应用, 验证了所设计的健康管理方案能够有效提高导航系统的可用性、降低故障影响率和保证任务有效性, 具有一定的工程推广价值。

收稿日期: 2018-05-06; 修回日期: 2018-08-07。

作者简介: 刘雷(1987-), 男, 河南洛阳人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事卫星导航方向的研究。

1 健康管理系统的体系结构

健康管理系统的核心是数据的获得和模型的建立，其核心技术是诊断推理技术。一般实现健康管理的方法有基于小波变换的奇异点检测算法、极大似然检验法、神经网络方法以及大数定律等^[6-8]。对于卫星导航接收设备目前主要停留在故障检测层面，Calgary 大学的一个小组，对卫星导航异常检测和抑制技术进行了总结，常用的方法包括自主完好性检测、信号强度检测以及冗余信息检测^[9]。

PHM 系统一般应具备以下几点要素^[10-12]：

- 1) 设备数据采集、处理、特征值提取的功能；
- 2) 根据特征数据，借助冗余信息，对系统状态进行检测的功能；
- 3) 根据系统模型和故障检测技术，对故障进行检测、隔离的功能；
- 4) 对即将发生的故障进行预测，估计系统剩余寿命的功能；
- 5) 根据检测结果，制定维护方案的功能。

2 卫星导航接收设备的 PHM

卫星导航接收设备健康管理的出发点是从整体上提高卫星导航完成导航任务的可靠性和安全性。这种技术主要是借助于各种数据处理技术来诊断系统自身的健康状态，并在系统故障发生前对其进行预测，使卫星导航接收设备自身具有故障检测、隔离和性能检测，健康管理，故障预测功能，即通过消除和减弱有故障部件的影响，对故障进行预测，并对维修进行决策，从而最大程度地提高卫星导航完成导航任务的可靠性和安全性。

卫星导航接收设备健康管理的目的是预测卫星导航接收设备的性能，给出卫星导航接收设备的实时导航性能，关键是监测信息的选取和性能模型的建立。

在进行卫星导航接收设备健康管理时，可充分利用卫星导航系统自身的先验信息、其他传感器的辅助信息和自身的冗余信息，构建健康管理数据库，形成 PHM 模型和知识库，提供系统维护方案，其系统体系结构如图 1 所示。

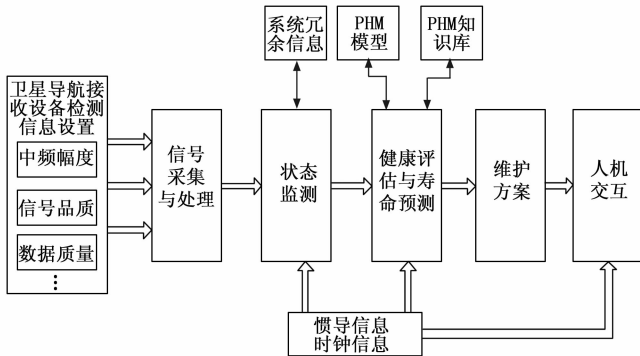


图 1 卫星导航接收设备 PHM 系统体系结构

2.1 检测信息设置

系统上电完成上电自检、直接合理性检测、检测状

态信息设置，具体检测信息如下：

- 1) 针对射频信号设置信号幅度检测；
- 2) 针对中频采样设计 FFT 变换，检测是否存在干扰；
- 3) 针对测量信息，判断载波及多普勒处理结果；
- 4) 基于卫星及时钟先验信息的时间位置信息判断，定位几何精度因子值判断，定位计数值判断等。

建立从射频前端、数据采样、测量信息处理到定位解算全流程全方位的检测信息点设置。

2.2 信号采集与处理

将数据处理成与要求的形式相一致；

- 1) 采集 2.1 中设置的各类检测信息；
- 2) 将采集到的检测信息处理为符合要求的格式。

2.3 状态检测

根据检测信息（时延、多普勒、伪距）可能产生的影响（时间、速度、位置），梳理不同应用条件下的可用信息（高精度原子钟、惯导、双天线冗余信息），采用直接合理性和滤波器检测方法，实现输出信息可用性判断和故障检测，并形成系统的物理状态或性能，设计卫星导航接收设备的状态检测逻辑如图 2 所示。

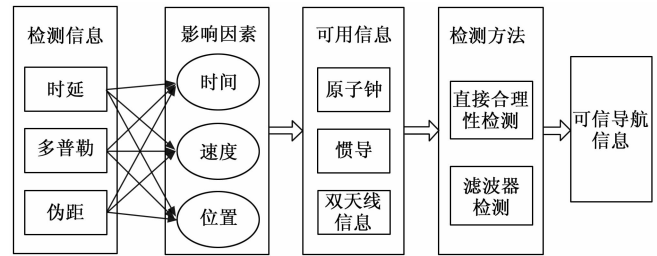


图 2 故障状态检测

2.3.1 时钟检测

利用原子钟的高精度守时特性，当接收机解算后输出的整秒时刻和原子钟输出的整秒时刻超出检测门限后，认为导航信息不可信。

2.3.2 速度检测

利用惯导系统与接收机系统速度之差进行判断，考虑惯导系统的漂移误差，当两者差值超出检测门限后，认为卫星信息不可信。

为了减小接收机噪声的影响，对接收机速度和惯导速度的差值进行平滑滤波处理，根据平滑后的数据进行判断。

2.3.3 位置检测

利用惯导系统与接收机系统位置之差进行判断，考虑惯导系统的漂移误差，当两者差值超出检测门限后，认为卫星信息不可信。

为了减小接收机噪声的影响，对接收机位置和惯导位置的差值进行平滑滤波处理，根据平滑后的数据进行判断。

2.3.4 伪距检测

利用惯导位置与卫星位置，得到计算伪距，和接收机对同一颗星的测量伪距进行比较，考虑惯导漂移，如果误差超过了允许的范围，则导航信息不可信。

2.3.5 多普勒检测

利用惯导速度与卫星速度, 得到计算多普勒, 和接收机对同一颗星的测量多普勒进行比较, 考虑惯导漂移, 如果误差超过了允许的范围, 则导航信息不可信。

2.3.6 双天线空间矢量冗余信息检测

基于具有几何约束关系的天线先验信息, 在同一时刻将双天线对同一颗卫星的测量值做差, 得到同一颗星测量值的单差结果。由于单差可以消除卫星钟差、对流层延迟和电离层延迟的影响, 单差测量值是和天线空间基线相关的一个量值, 如果单差值超过范围, 则认为导航信息不可信。

选择参考星, 将同一时刻其他卫星同参考星的单差做差, 得到卫星相对于参考星的双差结果。双差测量值是和天线空间基线相关的数值, 如果双差后结果趋向于 0, 则认为导航信息不可信。

2.4 健康评估与寿命预测

诊断和汇报卫星导航接收设备的健康状态, 给出导航性能预估, 并给出其剩余寿命。

2.4.1 健康评估

采用接收机自主完好性检测方法, 对卫星导航接收设备进行故障检测, 预测卫星导航接收设备性能, 并给出位置信息精度指示。一般的接收机自主完好性检测方法主要有卡尔曼滤波、最大间隔法、伪距比较法、最小二乘残差法、奇偶空间法等^[13-14]。本文采用最小平方残余法^[9]。过程如下:

- 1) 构建检验统计量 SSE 。

$$SSE = [\Delta\rho]^T \Delta\rho$$

其中: $\Delta\rho$ 为伪距残差向量。当系统无故障时归一化统计量 SSE/σ^2 服从自由度为 $M-4$ 的 χ^2 分布 $\chi^2(n-4)$; 当存在故障时 SSE/σ^2 服从自由度为 $M-4$ 的非中心化的分布 $\chi^2(n-4, \lambda)$, M 为卫星颗数。

- 2) 根据虚警率 P_{FA} 计算检测门限 T 。

$$P(SSE/\sigma^2 < T^2) = \int_0^{T^2} f_{n-4}^{\lambda}(x) dx = 1 - P_{FA}$$

- 3) 根据漏警率 P_{MD} 计算最小非中心分布参数 λ_{min} 。

$$P(SSE/\sigma^2 < T^2) = \int_0^{T^2} f_{n-4, \lambda}^{\lambda}(x) dx = P_{MD}$$

- 4) 计算水平保护门限 HPL 。

$$HPL = \sqrt{\lambda_{min}} \sigma \cdot \max \{ \sqrt{(A_{1i}^2 + A_{2i}^2)/S_{ii}} \}$$

其中:

$$A = (G^T G)^{-1} G^T$$

$$S = I - G(G^T G)^{-1} G^T$$

$$G = H Q^{-1}$$

$$Q = \begin{bmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\sin\varphi\cos\lambda & -\sin\varphi\sin\lambda & \cos\varphi \\ \cos\varphi\cos\lambda & \cos\varphi\sin\lambda & \sin\varphi \end{bmatrix}$$

H 为地心地固坐标系下最小二乘解算得到的雅可比矩阵, Q 为坐标变换矩阵, λ 为经度, φ 为纬度。

- 5) 完好性检测可用性判断:

如果 $HPL < HAL$, 完好性检测方法可用, 继续执行故障检测、故障隔离和性能预测。

如果 $HPL \geq HAL$, 完好性检测方法不可用, 不再进行故障检测和故障隔离。

- 6) 故障检测:

在检测方法可用时进行故障检测, 如果 $SSE/\sigma^2 > T^2$ 则存在故障星, 执行故障隔离, 否则没有故障星。

- 7) 故障隔离:

在有故障时, 计算每颗卫星的残差 $(S\Delta\rho)^2/S_{ii}$, 残差最大的星即为故障星。

完好性检测算法的前提是可见星必须大于 5 颗, 这是制约完好性检测的主要因素, 如果由于卫星信号遮挡等因素造成可见星少于 5 颗, 称存在完好性检测漏洞, 完好性检测失效。为提高完好性检测效率可采用惯性辅助的卫星完好性检测方法。

- 8) 性能预测:

性能预测有如下两种方法: 利用标准偏差与当前卫星精度因子投影到 3 个方向, 利用实际的伪距残差与当前卫星精度因子投影到 3 个方向。本文采用第二种方法。

$$\hat{\sigma}_{north} = \sqrt{P_{11}} \hat{\sigma}$$

$$\hat{\sigma}_{east} = \sqrt{P_{22}} \hat{\sigma}$$

$$\hat{\sigma}_{up} = \sqrt{P_{33}} \hat{\sigma}$$

其中:

$$P = (G^T G)^{-1}$$

$\hat{\sigma}$ 表示实际的伪距残差, $\hat{\sigma}_{north}$ 表示预测的北向误差, $\hat{\sigma}_{east}$ 表示预测的东向误差, $\hat{\sigma}_{up}$ 表示预测的天向误差。

2.4.2 寿命预测

寿命预测需要对系统的健康水平进行建模, 并建立相应的专家系统来预测系统和部件的剩余寿命。为此建立卫星导航接收系统的健康水平同系统的工作时间 (还有温度、电磁环境、加速度、飞行高度等) 的关系, 如图 3 所示。

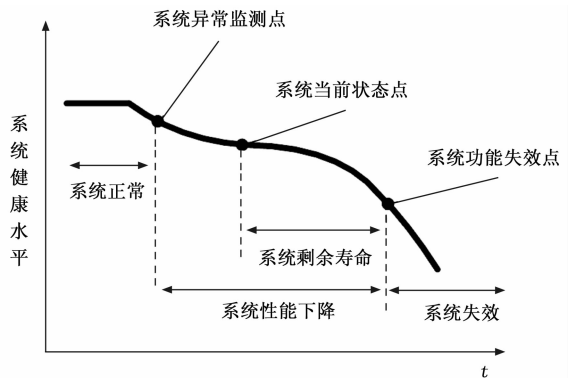


图 3 卫星导航系统健康退化过程

寿命预测的内容包括:

- 1) 评价当前卫星导航接收系统处于何种健康状态, 正常状态、性能下降状态或者功能失效状态;

2) 当前卫星导航接收系统处于性能下降状态时, 判断是何种原因引起的健康水平下降, 并评价当前健康状态, 偏离其正常程度的大小;

3) 预测卫星导航接收系统的未来健康水平, 包括两个任务:

- a) 研究未来的一段时间卫星导航接收系统是否正常地完成其功能要求;
- b) 分析卫星导航接收系统的剩余寿命的大小。

对于卫星导航接收系统的寿命预测模型, 通过收集影响系统的因素数据, 可以采用随机时间序列预测法、平滑预测法、回归预测法、模糊预测法、神经网络预测法和灰色理论预测法等方法实现。

2.5 PHM 模型和知识库

根据影响卫星导航接收设备工作的因素建立卫星导航系统健康管理模型;

根据模型预测与实测数据形成知识库, 并完成对模型的校准和数据分析。

2.6 维护方案与人机交互

维护方案, 根据评估和预测结果决定采用标定维护、更换关键模块或者更换系统的方案。

人机交互, 卫星导航接收设备与操作人员的人机接口。

3 试验验证

某次综合试验, 载体运动状态包括大机动、振动、以及静止状态下的多径影响, 通过本文所述的综合健康管理方法, 准确检测出多径信号影响, 剔除单颗卫星多径信号, 给出了正确的导航定位结果, 预测出天线性能恶化, 并在载体上予以更换。

3.1 多径信号试验

设置多径信号, 在 300~900 秒 1 号星加 300 米误差, 在 400~500 秒之间 3 号星加 300 米误差, 在 500~700 秒之间 6 号星加 500 米误差, 如图 4 所示。

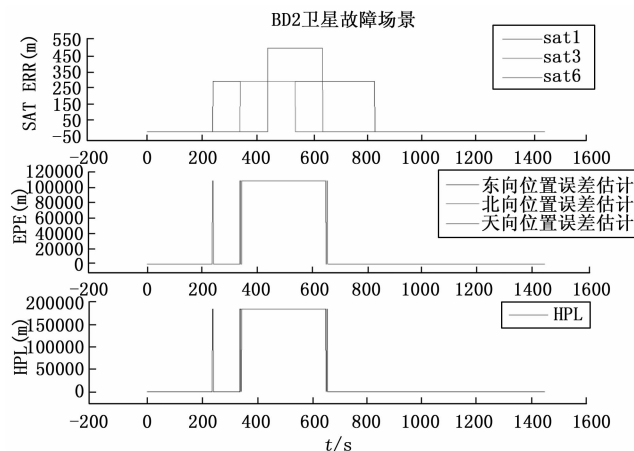


图 4 多径信号及其故障检测

通过第 2.4.1 节给出的故障检测方案, 检测出单颗星伪距 300 m 的跳变误差, 并剔除该颗故障星, HPL 及误差预测符合设计要求。在 2 颗星或 3 颗星的伪距由于多径跳变的

情况下, 完好性检测无法检测和剔除故障星, 但通过 2.3 节给出的状态检测, 判定接收机定位无效, 并且输出的 HPL 和误差预测均为最大值, 如图 4 所示。

3.2 天线性能检测

检测原理: 通过判断中频幅度大小实现对天线、电缆和射频通道的性能检测, 在中频幅度采样小于正常值的 2/3 时报故障。

根据设计中频噪声值 90 000 对应信号强度 -6 dBm, 报故障门限 2/3 对应中频噪声幅度值 60 000, 对应的信号强度为 -9 dBm。热噪声功率谱密度为 -174 dBm/Hz, 则 20 MHz 带宽内的总能量为 -101 dBm。接收机与天线的总增益需要满足 (101-9=92) dB 要求, 不会报故。

接收机设计的增益为 68 dB, 因此天线到接收机射频前端的增益要求最低为 24 dB。在试验中, 发现中频幅度值低于检测门限 60 000, 并且报天线开路状态, 如图 5 所示。



图 5 中频幅度天线开路检测

事后分析, 天线增益在高低温环境下小于 24 dB, 高低温下天线增益低于设计指标。准确定位天线故障, 在更换天线器件后, 接收机工作正常。

通过上述实验分析验证了本文设计的卫星导航接收设备健康管理方案的正确性。

4 结束语

以上介绍了针对卫星导航接收系统的健康管理方案, 该方法充分利用卫星导航接收系统的工作特性, 从卫星导航接收系统健康管理的体系结构、方法和手段以及卫星导航接收系统的寿命预估模型等方面研究了卫星导航接收系统的健康管理, 并通过试验验证了方案的正确性。其中相关方法已应用在实际工程中, 系统总体方案具有很强的工程应用价值。

参考文献:

[1] 张宝珍. 预测与健康管理工作的发展与应用 [J]. 测控技术, 2008, 27 (2): 5-7.
 [2] 洪 晟, 陶文辉, 路君里, 等. 基于综合 PHM 方法的导弹维修保障综述 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (4): 862-864.