

基于 GNSS 与加速度计融合的地涵变形监测系统设计与应用

蒋礼瑜, 柳 豹, 吴玉洁

(江苏省淮沭新河管理处, 江苏 淮安 223001)

摘要: 为克服传统的变形监测手段与使用单一卫星定位技术在监测精度方向的不足, 融合 GNSS 与加速计变形监测技术, 设计出具备高精度、智能化的地涵变形监测系统; 通过克服 GNSS 与加速度计空间基准的统一以及 GNSS 与加速度计时间同步问题, 提出多星座融合的 GNSS 模糊度解算处理算法、面向 GNSS 与加速度计融合的数据解算算法, 提高了地涵变形监测的精准度。灌河地涵变形监测实际应用表明: 该地涵变形监测系统在授时稳定性、时间同步性、定位精度等均满足设计要求, 能够准确监测地涵的变形信息, 具有应用潜力。

关键词: 地涵变形; 变形监测; GNSS; 加速度计; 系统设计

中图分类号: TV698.1

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2024)06-0019-0005

Design and application of ground culvert deformation monitoring system based on GNSS and accelerometer fusion

JIANG Liyu, LIU Bao, WU Yujie

(Huaishu New River Management Division of Jiangsu Province, Huai'an 223001, China)

Abstract: To overcome the shortcomings of traditional deformation monitoring methods and the use of single satellite positioning technology in the direction of monitoring accuracy, a high-precision and intelligent ground culvert deformation monitoring system is designed by integrating GNSS and accelerometer deformation monitoring technology. By overcoming the unification of GNSS and accelerometer spatial benchmarks and the problem of time synchronization between GNSS and accelerometers, a multi constellation fusion GNSS ambiguity resolution algorithm and a data resolution algorithm for GNSS and accelerometer fusion are proposed to improve the accuracy of ground cover deformation monitoring. In the practical application of deformation monitoring of Guanhe culvert, it has been shown that the designed ground culvert deformation monitoring system, which meets the design requirements in terms of timing stability, time synchronization, and positioning accuracy. It can accurately monitor the deformation information of the culvert and has application potential.

Key words: ground culvert deformation; deformation monitoring; GNSS; accelerometers; system design

收稿日期: 2023-12-04

作者简介: 蒋礼瑜(1995—), 男, 工程师, 本科, 主要从事水利工程管理工作。E-mail: g15yxm@163.com

1 概 述

全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)接收机^[1]能够精确测量水工结构长期的变形,且每个测量值互不相关,精度保持一致,但由于技术的限制,实时采样频率往往不超过 50 Hz,不能获取水工结构的高动态响应信息。加速度计传感器^[2]的特性和GNSS刚好相反,其采样频率往往能够达到 200 Hz,能够获得水工结构的高动态响应信息,但存在零点漂移现象,且漂移会随温度等环境因素的变化而变化,测量精度不统一,且难以获取低频信号^[3]。

针对GNSS接收机能够精确测量水工结构长期的变形但是动态性不足以及加速度计动态性好但是无法反映水工结构长期形变的问题,本文所设计的地涵变形监测系统将2种传感器在结构以及数据处理上进行融合,实现同时获取地涵的低频和高频响应信息,为有效监测地涵的瞬时形变及长期形变提供监测手段。

2 系统关键性技术

2.1 GNSS接收机与加速度计空间基准统一方法

为了实现对地涵上同一点位的卫星信号与加速度信号的同步采集,将3个单轴加速度计按照一定的空间几何规则进行组合,使其轴线相交于一点,将GNSS天线通过固定装置与3个单轴加速度计相连,且GNSS天线相位中心位于加速度计某一轴

线上,通过量取GNSS天线相位中心到点 O 的距离,将测量点位归算到点 O 上,实现了地涵上监测点位卫星信号与加速度信号的同步采集。

2.2 GNSS接收机与加速度计时间同步方法

为了克服当加速度计采样率达到 200 Hz时服务器时间精度难以满足加速度计计时需求的问题,通过改造硬件,将GNSS接收机的秒脉冲以及时间信息通过引脚发送给加速度计,加速度计在接收到GNSS接收机发送的秒脉冲和时间信息后,将时间信息打印在加速度计数据上,从而实现了GNSS与加速度计的时间同步。

2.3 多星座融合的GNSS模糊度解算处理算法

在多GNSS时空基准统一、大气误差估计等研究基础上,重点优化提升北斗/GPS/GLONASS/GALILEO多模数据处理模型,设计面向北斗/GPS/GLONASS/GALILEO多系统原始观测量的设计统一滤波方法,提高多星座单频GNSS数据的基准站模糊度解算效率与成功率,开发一套地涵健康监测软件。多星座融合的GNSS模糊度解算处理算法解算的定位结果与坐标真值之间的偏差见图1,由图1可知:水平可以优于 7 mm,高程优于 10 mm。

2.4 GNSS与加速度计融合的数据解算技术

利用GNSS接收机能够精确测量结构的变形值,且每次测量结果互不相关,精度保持一致,以及加速度计传感器对高频振动测量精度高,针对这些特点,提出面向GNSS与加速度计融合的数据解算算法,用于解决GNSS高频噪声大,加速度计无法监

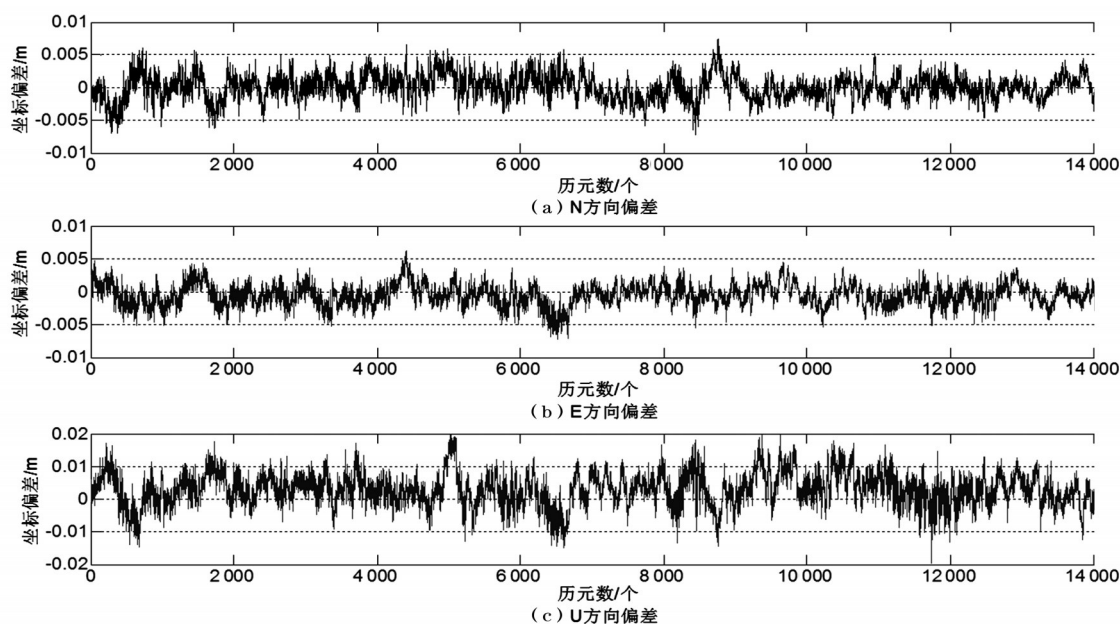


图1 多星座融合的GNSS模糊度解算处理算法解算误差波动

测长周期变形等问题。

2.4.1 加速度计频域积分

首先将加速度计信号 $a(t) = Ae^{j\omega t}$ 经过傅里叶变换^[4], 转换为频域信号 $A(n) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k e^{-j2\pi nk/N}$, 然后进行二次积分得到位移信号如下:

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} -\frac{1}{(2\pi k \Delta f)^2} H(k) a_k e^{-j2\pi kn/N} \quad (1)$$

式中: $H(k) = \begin{cases} 1 & (f_d \leq k \Delta f \leq f_u) \\ 0 & \text{else} \end{cases}$, f_d 为下限截止频率, f_u

为下限截止频率。最后再将位移信号经过傅里叶逆变换转换到时域中去, 得到位移信号如下:

$$x(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X(n) e^{j(2\pi/N)kn} \quad (2)$$

2.4.2 GNSS 多径抑制

构建单差滤波方差计算单差残差, 通过分析残差的频谱特性, 利用快速傅里叶变换和小波变换提取多路径延迟, 多径抑制算法流程见图2。

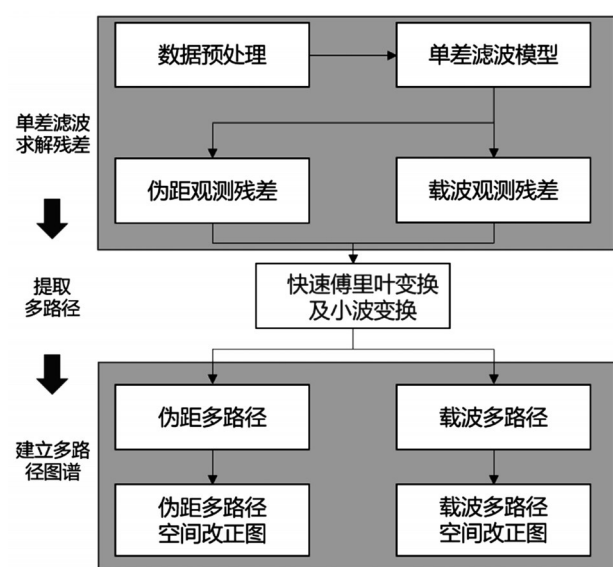


图2 多径抑制算法流程

由于多路径延迟与频率具有相关性, 因此可以通过分析同一频点伪距和载波残差的频谱特性提取多路径延迟, 然后根据提取得到的多路径延迟即可得到相应的多路径空间图谱, 利用多路径空间图谱改正后, N1 浮点解和残差都会得到明显改善。

2.4.3 GNSS 低频位移提取

变分模态分解(VMD)可以适用于含有间断信号的分解, 避免混叠模态问题的出现, 可以自定义分量的数目, 其分解的各个基本分量(各解析信号)的瞬时频率具有实际的物理意义, 因此将其用于提

取GNSS低频位移。基本流程如图3所示。

利用模拟实验对比经典模态分解(EMD)和变分模态分解(VMD)在分解间断信号时的优劣势, 模拟信号如公式3所示:

$$\begin{aligned} f_1 &= 5\text{Hz}, f_2 = 50\text{Hz}, f_3 = 150\text{Hz} \\ s_1 &= \cos(2\pi \cdot f_1 \cdot t); s_2 = 0.3 \cdot \sin(2\pi \cdot f_2 \cdot t) \\ s_3 &= \begin{cases} 0 & t < 20 \\ 0.1 \cdot \sin(2\pi \cdot f_3 \cdot t) & t \geq 20 \end{cases} \\ s &= s_1 + s_2 + s_3 + 0.05 \cdot \text{rand} \end{aligned} \quad (3)$$

2.4.4 加速度计时间同步

GNSS数据采用标准的GNSS时, 而加速度计采用的是系统时, 两者不具备相关性。利用硬件集成策略, 实现GNSS对加速度计的精准授时。同时, 在软件部分, 利用GNSS与加速度计信号的时间和空间相关性, 保障时间同步的准确性。

2.4.5 坐标框架统一

GNSS定位采用的为WGS84坐标系, 加速度计则以本身为原点建立坐标系, 在数据融合处理过程中, 需要严格将GNSS坐标系与加速度计坐标系进行统一。采用精确测量配合坐标误差补偿等方式, 实现GNSS与加速度计的坐标框架统一。

2.4.6 GNSS与加速度计位移融合

根据式(1)~(5)中所述算法, 最终将GNSS低频位移与加速度计位移进行融合, 以实现对地涵高频振动及低频长周期位移的高精度监测。

3 系统设计

3.1 硬件架构设计

为北斗/加速度计融合的地涵变形监测系统硬件方案设计, 见图4。

3.2 设备集成

北斗/加速度计融合的地涵变形监测系统数据采集装置主要由1个GNSS天线、3个加速度计、GNSS天线与加速度计刚连装置组成。通过设计GNSS与加速度计一体化数据采集装置, 实现GNSS接收机与加速度计空间基准统一, 如图5所示。

通过上述设计, 实现了GNSS接收机与加速度计传感器的刚性连接设计。GNSS与加速度计主机箱中包含了GNSS定位模块、加速度计数据采集卡, 将GNSS定位模块的秒脉冲以及时间信息通过引脚发送给加速度计采集卡, 加速度计采集卡在接收到GNSS接收机发送的秒脉冲和时间信息后, 将时间信息打印在加速度计数据上, 从而实现了GNSS与加速度计的时间同步。

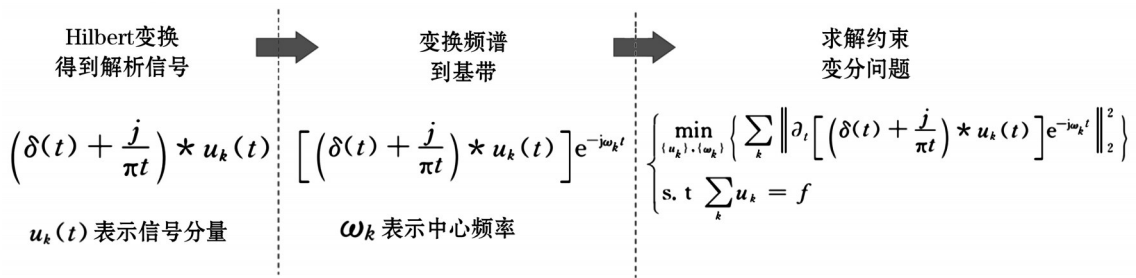


图3 VMD算法流程

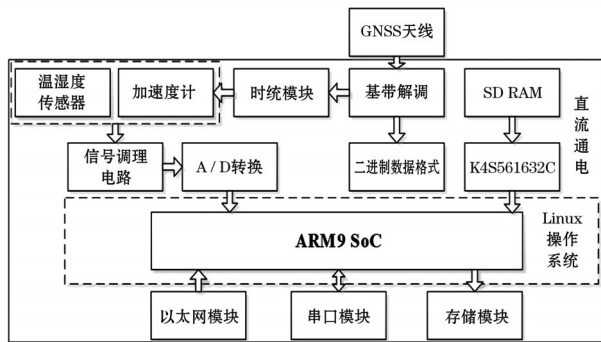


图4 北斗/加速度计融合的地涵变形监测系统硬件方案设计

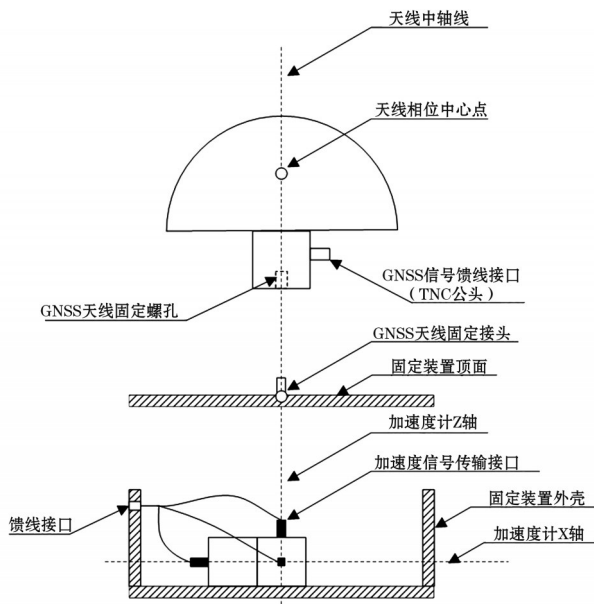


图5 GNSS与加速度计一体化数据采集装置结构

4 系统软件功能

地涵变形实时监测软件通过多星座融合的GNSS模糊度解算算法,提升模糊度解算精度及成功率;利用单差模型构建多径空间图谱,进行多径信号削弱;利用VMD提取GNSS低频位移;采用频域积分算法计算加速度计振动信号;最后通过融合算法得到能同时反映地涵高频振动及低频长周期

位移的地涵形变结果,以便监测地涵的健康状态。

软件主要功能如下:

(1)数据通讯功能

通过TCP/IP网络协议及相应厂商提供的二次开发接口实现GNSS、加速度计设备到数据处理中心的观测数据实时传输,并且支持对北斗/加速度计融合的地涵变形监测系统设备的远程管理和操控。

(2)数据监测功能

对GNSS、加速度计设备进行实时监控。对设备至数据处理中心的通讯链路进行状态监控;对观测数据质量进行实时分析,包括GNSS观测数据的卫星可视性、信噪比、多路径延迟,以及加速度计数据的完整性、实时性等。

(3)数据融合处理功能

支持GNSS数据及加速度计数据的融合处理及单GNSS数据处理功能。将GNSS观测数据和加速度计观测数据进行时间匹配,充分利用GNSS、加速度计设备各自的优势,实时高频输出地涵的振动信息。

5 系统应用

灌河地涵为通榆河北延送水工程穿越灌河建筑物,地涵上洞首位于响水县城西郊黄响河入灌河的河口处,下洞首位于灌河北岸的灌南县长茂村。地涵的设计流量为50 m³/s,4孔,总长约550 m,主涵管长450 m,采用直径为3.5 m钢筋混凝土预制顶管,顶管中心线间距为9 m,管中心高程为-15.55 m。由于灌河地涵及配套建筑物长期受较大水流冲击以及其他地质因素的影响,会使其产生过大的变形,从而导致结构破坏、水流受阻等危害。本文所设计的系统已应用于灌河地涵的变形监测,通过在实际中的应用检验GNSS与加速度计集成硬件的性能,设计实验对北斗/加速度计融合的地涵变形监测系统硬件的各项指标进行测试,从而客观评价接收机性能。

5.1 测试与检验

5.1.1 测试内容

授时稳定性测试:卫星定位模块通过引脚给加速度计进行授时,为了确保授时稳定性,用STRSVR软件连续收取卫星定位模块发送的秒脉冲信号。

时间同步精度测试:卫星定位模块完成对加速度计数据的授时后,需要检验授时的精确性,从而确保卫星数据与加速度计数据融合的稳定。

定位精度测试:GNSS与加速度计融合定位,可以有效地减小GNSS噪声误差,从而提高GNSS的瞬时定位效果,通过实验验证,证明GNSS与加速度计融合定位可以提高瞬时定位精度。

5.1.2 测试方法

授时稳定性测试:授时稳定性测试是用STRSVR软件通过TCP/IP协议接通系统GNSS模块输出的PPS时间标签,如果时间准确无误且连续,则认为授时稳定性符合要求。

时间同步精度测试:同步采集速度传感器数据与GNSS观测数据,人为地抖动GNSS与加速度计一体化数据采集装置,并进行数据存储。分析GNSS反映的抖动情况与加速度计反映的抖动情况是否一致。若一致,则认为时间同步精度满足要求。

定位精度测试:同步采集速度传感器数据与GNSS观测数据,并进行数据存储。解算GNSS、GNSS与加速度计融合的数据,对比定位精度。

5.1.3 测试结果

授时稳定性测试:用STRSVR软件通过TCP/IP协议接通系统GNSS模块输出的PPS时间标签,并显示在屏幕上,与其他GNSS高精度接收机的秒脉冲作对比,时间准确无误且连续性好,授时稳定性满足设计要求。

时间同步精度测试:GNSS高频位移与加速度计频域积分位移的时间同步精度测试结果表明GNSS与加速度计的时间同步性良好,满足使用要求。

定位精度测试:GNSS与加速度计融合位移及频谱特性测试结果,见图6。从图6中可以看出,融合后的位移解算精度,较GNSS位移解算精度有明显提升,可达到水平2 mm,高程优于5 mm的定位精度。

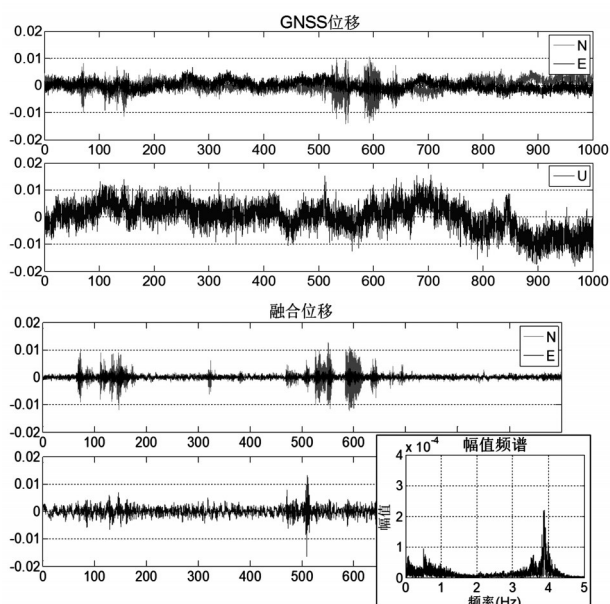


图6 GNSS与加速度计融合位移及频谱特性

6 结论

本文所设计的地涵变形监测系统将GNSS定位技术与加速度计定位技术在结构以及数据处理上进行融合,可大幅度提高监测精度,克服了使用单一变形监测手段的缺陷,并在实际应用中展现出优势。随着水利信息化水平的发展,以地涵变形监测系统为代表的自动化监测技术,将在水利工程变形监测及安全预警方面发挥更大作用,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 王培源,涂锐,韩军强,等.集成GNSS和加速度计的实时变形监测系统研制[J].全球定位系统,2023,48(3):120-126.
- [2] 吴绍诚,王怀宝,王坚.GNSS与加速度计融合超高建筑动态监测数据分析[J].测绘科学,2023,48(2):45-53.
- [3] 沈楠.基于GNSS与加速度计融合的建筑变形监测关键技术研究[J].测绘学报,2023,52(8):1414.
- [4] 汪义东,郑宏.基于IWR1642的雷达水位计设计[J].江苏水利,2021(7):14-18.
- [5] 付波,聂兴宇,赵熙临,等.基于VMD-SE-PSO-BIGRU模型的水电机组振动趋势预测[J].水电能源科学,2023(12):178-181,177.