



集成GNSS和加速度计的实时变形监测系统研制

王培源, 涂锐, 韩军强, 左航, 陶琳琳, 方婧

Development of a real-time deformation monitoring system with integrated GNSS and accelerometer

WANG Peiyuan, TU Rui, HAN Junqiang, ZUO Hang, TAO Linlin, and FANG Jing

引用本文:

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. DOI: [10.12265/j.gnss.2023012](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2023012)

WANG Peiyuan, TU Rui, HAN Junqiang, et al. Development of a real-time deformation monitoring system with integrated GNSS and accelerometer[J]. *Gnss World of China*, 2023, 48(3): 120–126. DOI: [10.12265/j.gnss.2023012](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2023012)

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.gnss.2023012>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

星载加速度计校准对GRACE轨道动力学平滑的影响分析

Analysis on the effect of calibration of satellite accelerometers on smooth GRACE orbit dynamics

全球定位系统. 2020, 45(6): 27–36

BDS精密单点定位在桥梁变形监测中的应用

Application analysis of BDS precise point positioning in bridge deformation monitoring

全球定位系统. 2019, 44(2): 98–102

陆基增强系统与仪表着陆系统的空间对准

Space alignment of ground-based augmentation system and instrument landing system

全球定位系统. 2021, 46(3): 85–93

融合对流层模型及其在精密单点定位中的应用

Fusion tropospheric model and its application in precise point positioning

全球定位系统. 2020, 45(6): 46–54

多系统融合精密单点定位在机载雷达电力线巡检中的应用

Airborne radar power line inspection based on multi-GNSS fusion precise single point positioning

全球定位系统. 2021, 46(5): 104–110

附加基线矢量约束的双站协同精密定位方法

Two-station cooperative precision positioning algorithm with additional baseline constraints

全球定位系统. 2020, 45(2): 21–29



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

集成 GNSS 和加速度计的实时变形监测系统研制

王培源^{1,2}, 涂锐^{1,2,3}, 韩军强^{1,3}, 左航^{1,2}, 陶琳琳^{1,2}, 方婧^{1,2}

(1. 中国科学院国家授时中心, 西安 710600; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院精密导航定位与定时技术重点实验室, 西安 710600)

摘要: 本文设计了一种基于 STM32 单片机的全球卫星导航系统 (GNSS) 和加速度计的数据采集设备, 其可以实现实时变形监测应用. 以 STM32F103ZET6 为主控芯片, 利用 GNSS 板卡和加速度计采集数据, 通过 4G 模块将数据传输到服务器, 从服务器读取数据并用 Kalman 滤波算法对 GNSS 数据和加速度数据进行融合处理, 从而达到实时变形监测的目的, 并通过静态实验进行了验证. 实验结果表明: 加速度计的基线漂移可以被自动校正, 融合后 X、Y、Z 三个方向位移标准差 (STD) 均优于 1.114 cm, 速度 STD 均优于 0.072 cm/s, 校正基线漂移后加速度 STD 均优于 0.485 cm/s².

关键词: 精密单点定位 (PPP); 加速度计; 基线漂移; Kalman 滤波; 数据融合

中图分类号: P228.4

文献标志码: A

文章编号: 1008-9268(2023)03-0120-07

0 引言

全球卫星导航系统 (GNSS) 和加速度计 (也称为强震仪) 是获取高精度地表形变 (位移、速度、加速度) 的两种有效手段, 对于自然灾害的监测和预警具有重要意义^[1-3]. 加速度计是进行变形监测的常用方法之一, 其体积小、采样率高、反应灵敏, 通过对加速度积分可以得到速度和位移信息. 但是, 加速度计会受到基线漂移误差的影响, 这些误差是仪器的倾斜旋转或环境变化引起^[4-5]. 带有基线漂移的加速度值经过积分后得到的速度和位移会明显偏离真实的速度和位移^[6]. 不少学者研究了加速度计基线漂移校正方法^[7-9], 这些方法通常需要外部信息作为参考或延长观测时间估计基线漂移, 且恢复的位移结果仍然存在一定的偏移, 很难应用于实时高精度变形监测.

对于 GNSS 技术, 实时精密单点定位 (PPP) 技术因定位精度高、单站作业、灵活方便, 在收敛后可以达到厘米级甚至毫米级的精度等特点, 非常适合进行变形监测. 但是, 相对于加速度计, GNSS 技术由于采样率的限制导致噪声水平比较高^[4], 只能获得高精度的低频位移信息, 不能得到高频的速度和加速度信息, 因此很难探测到微弱的地表形变. GNSS 和加速度计各有优势和局限性, 它们的结合可以优势互补,

对此已经有不少学者对二者的融合开展了研究.

目前对 GNSS 和加速度计数据融合主要有两种方法. 一种是松组合, Emore 等^[10]提出了一种从 GPS 和加速度数据中获得最佳位移的方法, 解决了加速度记录中的阶跃函数偏移. Smyth 等^[11]提出一种多速率 Kalman 滤波算法, 从加速度和 GPS 位移测量中估计速度和位移. Bock 等^[12]将其应用于 2 010 MW 7.2 El Mayor-Cucapah 地震的宽带位移估计, 但是基线漂移不能被滤波器的动态噪声完全吸收, 因此恢复的结果可能会有较大的偏移. Tu 等^[13]使用实时动态 (RTK) 技术获取 GNSS 位移与加速度数据并进行融合, 估计校正了加速度计的基线漂移, 同时也降低了 GNSS 噪声, 从而获得高精度的形变信息. Shu 等^[14]提出基于历元间差分测速得到 GPS 位移, 并通过 Kalman 滤波算法对 GPS 位移和加速度数据进行融合.

另一种是紧组合, Geng 等^[15-16]将 GPS 原始观测值与加速度计数据融合, 在两个历元之间用加速度数据对位移进行约束. Tu 等^[17-19]提出了 GNSS 和加速度计紧组合的方法, 将加速度计的基线漂移作为未知参数引入, 并通过随机游走过程进行估计, 结果表明, 加速度计基线漂移可以被自动校正, 在实时获取形变位移的同时还提高了 PPP 的收敛性和精度.

以上研究中, GNSS 数据和加速度数据都是利用

收稿日期: 2023-02-07

资助项目: 国家自然科学基金 (42274019)

通信作者: 涂锐 E-mail: turui-2004@126.com

两台仪器分别记录,这样就会存在时标及变形量不一致性的问题.针对这个问题,美国天宝公司设计了 SG160-09^[20],武汉大学和中国地震局合作研制了一体化 GNSS 强震仪 SMAG2000^[21],都将 GNSS 接收机和强震仪集成在一台设备上,Xin 等^[22]对两台仪器的性能进行了比较.本文设计了一种将 GNSS 接收机和加速度计集成一体的变形监测数据采集设备.基于集成设备采集的数据,采用 Kalman 滤波算法对 GNSS 数据和加速度计数据进行融合处理并通过实验验证了该系统可以实时得到高精度宽频带的位移、速度和加速度信息,实现了变形的实时监测应用.

1 数据采集设备设计方案

1.1 数据采集设备硬件设计

数据采集设备由单片机、GNSS 板卡、加速度计、4G 模块、电源模块构成.系统组成如图 1 所示.

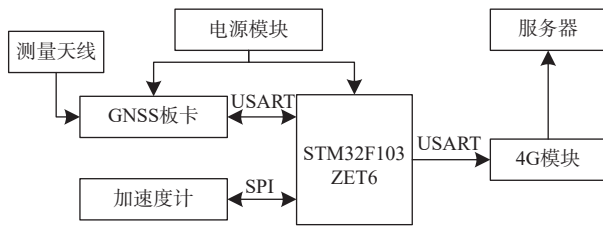


图 1 数据采集设备结构框图

单片机使用意法半导体公司的 STM32F103ZET6 作为主控芯片,STM32 单片机拥有多个 USART、SPI、IIC 接口,可以实现对外部传感器的数据采集.该芯片还拥有 8 个定时器,其中高级定时器和通用定时器可以产生多路脉宽调制(PWM)输出,用于控制加速度计数据的采样率.GNSS 板卡使用和芯星通科技有限公司的全系统 GNSS 高精度板卡 UB4B0,可以输出 NMEA、Unicore、RTCM 等多种数据格式的消息,本文设置输出 RTCM3 格式数据.加速度计使用 MuRata 的三轴加速度计 SCA3300,有±1.5~±6 g 的量程可供选择,SPI 数字接口.4G 模块使用塔石物联网提供的 TAS-E18H,支持标准的 AT 指令;支持自定义心跳包、注册包等功能;支持 MQTT/TCP/UDP/HTTP 等多种协议;并且内置软件看门狗,支持断线重连技术.

1.2 数据采集设备程序设计

数据采集设备主要功能是将采集到的数据通过 4G 模块发送至服务器.程序设计主要包括 GNSS 数据和加速度数据的接收,GNSS 数据的解码,加速度数据编码,数据发送等几个模块.开机上电之后,先对串口、GNSS 板卡、加速度计进行初始化,如果接收

到 GNSS 数据,解码出 GNSS 的 MSM 电文中的时间;然后向加速度计发出命令得到加速度计数据,再将加速度数据编码为 RTCM3 格式,编码时把 GNSS 对应的时间加一秒编进加速度数据中;最后通过 4G 模块将编码后的加速度计数据和 GNSS 数据发送至服务器.程序设计流程如图 2 所示.

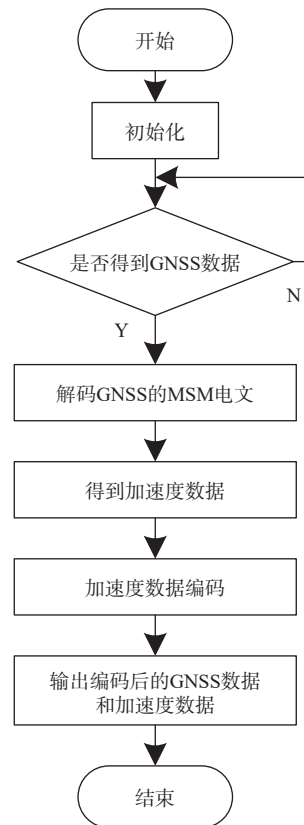


图 2 数据采集设备程序设计流程图

1.3 RTCM3 数据的解码与编码

完整的 RTCM3 格式数据由帧头、保留字、消息长度、可变长度消息内容和 24 位 CRC 校验码组成,帧结构如表 1 所示.

表 1 RTCM3 格式数据帧结构

名称	长度	内容
帧头	8 bit	11 010 011
保留字	6 bit	默认为 000 000
消息长度	10 bit	以 byte 为单位的消息长度
可变长度消息内容	0~1 023 byte	具体消息内容
CRC 校验码	24 bit	由前面数据生成的唯一校验码

解码的流程如图 3 所示,接收到 RTCM3 数据之后先判断帧头是否为“1 101 0011”,如果是提取消息长度 n ,判断消息缓冲区的字节数是否大于等于

“ $n+3$ ”,如果是说明字节数足够,可以进行 CRC 校验,否则说明消息不完整应舍去.将计算得到的 CRC 校验值与从电文中读到的 CRC 校验值进行比较,若相同进入解码阶段,若不同则说明消息有误应舍去.编码是解码的逆过程.

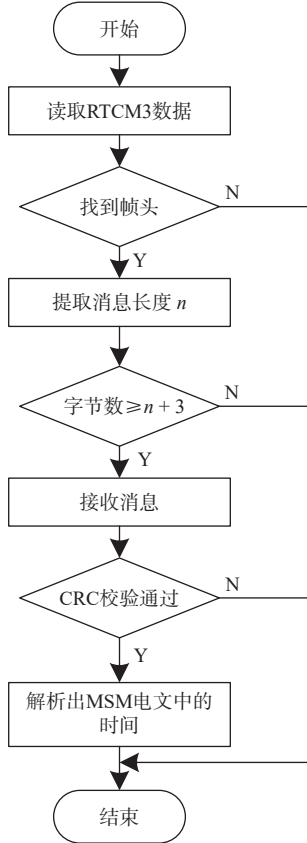


图 3 RTCM3 格式数据解码流程图

1.4 单片机与服务器的数据传输

4G 模块通过 AT 指令的配置可以直接将单片机串口发送的数据透传给服务器.4G 模块通过 TCP 透连接服务器需要的 AT 指令及其功能如表 2 所示.

表 2 4G 模块连接服务器需要的 AT 指令及其功能

AT指令	说明
+++	离开透传模式进入AT指令配置
AT+WORKMODE=0	设置仅数据透传模式
AT+DTUMODE=1,1	设置为TCP透传
AT+DSCADDR=1,“TCP”,“IP”, 端口号	连接服务器
AT+UARTCFG=115 200,1,0,0	设置串口参数
AT&W	保存当前配置
AT+CFUN=1,1	模块重启

注:指令“AT+DSCADDR=1,“TCP”,“IP”,端口号”中的IP和端口号为实际所连服务器的IP和端口号.

2 数据融合处理方法

2.1 松组合系统设计

本文采用 Kalman 滤波算法对 GNSS 数据和加速度数据进行融合. Kalman 滤波的状态向量 \mathbf{x}_k 为测站的三维位移 \mathbf{d}_k 、速度 \mathbf{v}_k 及加速度计的基线漂移 \mathbf{u}_k , 即

$$\mathbf{x}_k = \begin{pmatrix} \mathbf{d}^T & \mathbf{v}^T & \mathbf{u}^T \end{pmatrix}_k^T. \quad (1)$$

观测方程为:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \boldsymbol{\alpha}_k, \boldsymbol{\alpha}_k \sim N(0, \mathbf{R}), \quad (2)$$

$$\mathbf{H}_k = \begin{pmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{pmatrix}, \mathbf{R} = r/t_d \mathbf{I}.$$

状态方程为:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A} \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B} \mathbf{a}_k + \boldsymbol{\beta}_k, \boldsymbol{\beta}_k \sim N(0, \mathbf{Q}),$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{I} & t_a \mathbf{I} & -t_a^2/2\mathbf{I} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I} & -t_a \mathbf{I} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I} \end{pmatrix}, \mathbf{B} = \begin{pmatrix} t_a^2/2\mathbf{I} \\ t_a \mathbf{I} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} t_a^3 q_a/3\mathbf{I} & t_a^2 q_a/2\mathbf{I} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ t_a^2 q_a/2\mathbf{I} & t_a q_a \mathbf{I} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & t_a q_u \mathbf{I} \end{pmatrix}.$$

式中:下标 k 为历元; \mathbf{y}_k 和 \mathbf{a}_k 分别为 GNSS 位移和加速度的测量值; \mathbf{H}_k 为设计矩阵; \mathbf{I} 为 3×3 单位阵; \mathbf{A} 为状态转移矩阵; \mathbf{B} 为加速度的输入矩阵; t_d 和 t_a 分别为 GNSS 数据和加速度数据的采样间隔; $\boldsymbol{\alpha}_k$ 和 $\boldsymbol{\beta}_k$ 分别为位移噪声和系统噪声,且均服从正态分布; \mathbf{R} 和 \mathbf{Q} 分别为位移噪声和系统噪声的协方差阵; r 、 q_a 、 q_u 分别为 GNSS 测量噪声方差、加速度方差、加速度计的基线漂移方差.

结合观测方程和状态方程,使用 Kalman 滤波估计未知参数,包含预测(时间更新)和滤波(量测更新)两个部分.

状态一步预测方程:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{B} \mathbf{a}_k. \quad (4)$$

一步预测后的状态协方差阵:

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{A}^T + \mathbf{Q}. \quad (5)$$

Kalman 滤波增益:

$$\mathbf{K} = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}. \quad (6)$$

状态估计:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^+ = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K} (\mathbf{y}_k - \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}_k^-). \quad (7)$$

量测更新后的状态协方差矩阵:

$$\mathbf{P}_k^+ = (\mathbf{I} - \mathbf{K} \mathbf{H}) \mathbf{P}_k^-. \quad (8)$$

式中,上标“-”和“+”分别表示时间更新和量测更新之后的值.

通常情况下, GNSS 数据的采样率远低于加速度计的采样率. 当 GNSS 位移和加速度的采样率不同时, 双速 Kalman 滤波可以使位移和速度达到最优估计^[11]. 因此, 只有加速度数据时只进行时间更新, 有 GNSS 位移数据时进行时间更新和量测更新, 在两次量测更新之间的 Kalman 滤波结果主要依靠加速度数据.

2.2 实现过程

GNSS 与加速度计松组合首先应把 GNSS 观测值、状态空间表示 (SSR) 信息和加速度值进行时间匹配, 若时间一致, 利用 PPP 解算得到测站位移. 再将 GNSS 和加速度计数据进行融合, 得到融合后的位移、速度、基线漂移, 用于实时变形监测. 数据处理过程如图 4 所示.

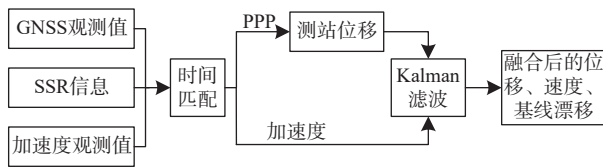


图 4 GNSS 与加速度计松组合数据处理过程

3 实验分析

3.1 实验简介

本次实验在中国科学院国家授时中心临潼园区综合楼楼顶完成, 楼顶视野开阔无遮挡物, 观测条件较好. 其中, 多系统 GNSS 的采样率为 1 Hz, 加速度计的采样率为 50 Hz. 为方便进行数据分析, 本实验采用实时保存的原始数据及 SSR 信息进行仿实时处理. 实验装置如图 5 所示.

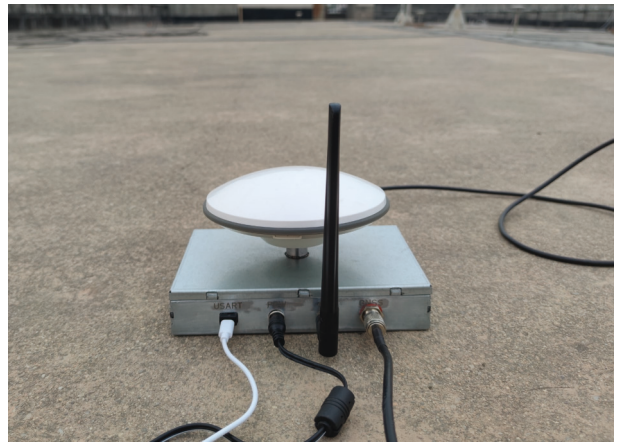
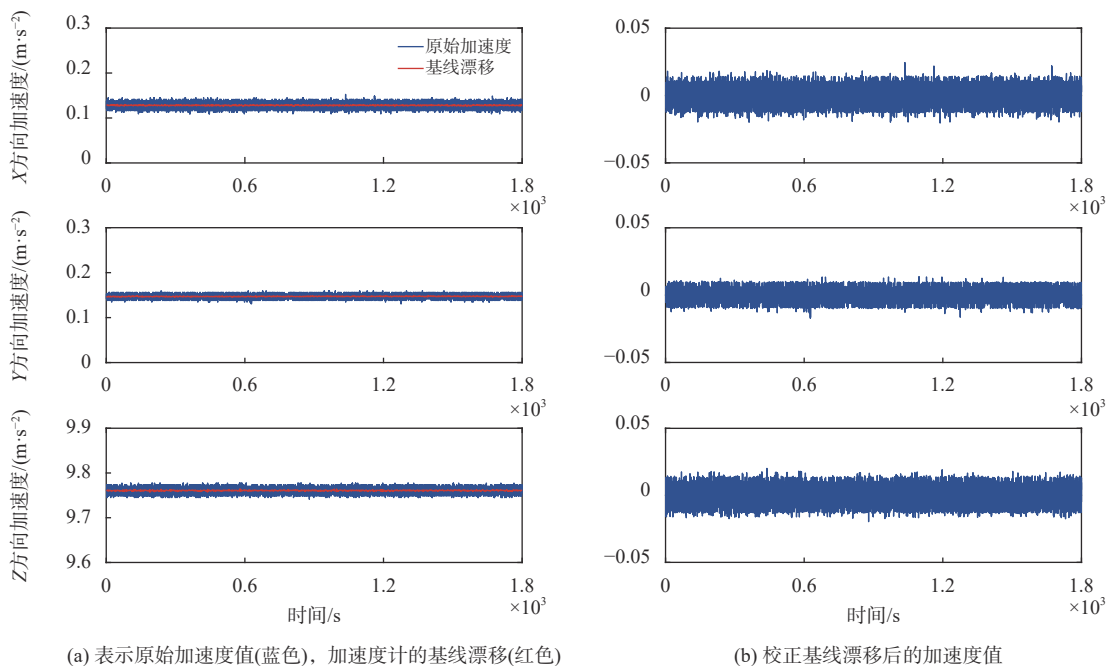


图 5 实验装置

3.2 实验结果与分析

将仪器安装好后, 取 PPP 定位结果收敛之后的 30 min 数据进行分析. 图 6(a) 显示了原始加速度值 (蓝色), 加速度计的基线漂移 (红色). 由于仪器安装、环境变化及重力加速度的原因, 原始加速度具有较大的初始基线偏移, 三个方向的初始基线漂移分别约为 0.1286 m/s^2 、 0.1471 m/s^2 、 9.7602 m/s^2 . 同时, 这些基线漂移随着地面运动和环境变化而改变. 原始加速度与加速度计的基线漂移作差即可得到校正后的加速度. 图 6(b) 表示校正基线漂移后的加速度值. 可以看出, 当没有运动时, 加速度值近似为零值. 静止状态下原始加速度及校正基线漂移之后加速度的平均值和标准差 (STD) 如表 3 所示.



(a) 表示原始加速度值(蓝色), 加速度计的基线漂移(红色) (b) 校正基线漂移后的加速度值

图 6 不同方向原始速度及基线漂移加速度结果

表 3 静止状态下原始加速度及校正基线漂移之后加速度的平均值和 STD

统计量		X方向	Y方向	Z方向
原始加速度/(cm·s ⁻²)	平均值	12.812 0	14.706 4	976.076 5
	STD	0.477 7	0.338 1	0.484 4
去除基线漂移后的加速度/(cm·s ⁻²)	平均值	-0.000 1	-0.000 1	0.000 1
	STD	0.480 7	0.337 6	0.484 3

GNSS 求解的三个方向的位移和速度如图 7 所示. GNSS 与加速度数据融合之后求解的三个方向的位移和速度如图 8 所示. 表 4 表示数据融合前后速度的平均值和 STD. 可见, GNSS 求解速度变化范围非常大, 相比之下, 融合了加速度数据之后的速度拥有更高的信噪比 (SNR). 三个方向融合之后的位移变化范围均在 4.5 cm 以内, STD 分别为 0.482 3 cm、1.113 3 cm、0.308 3 cm.

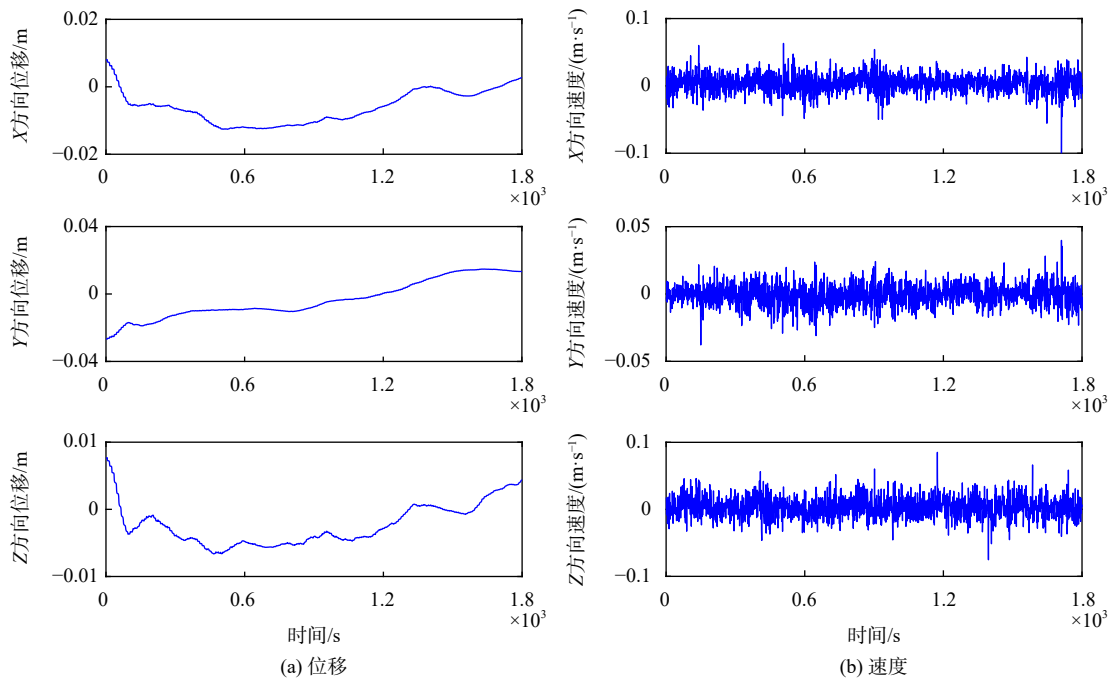


图 7 GNSS 求解的三个方向的位移和速度

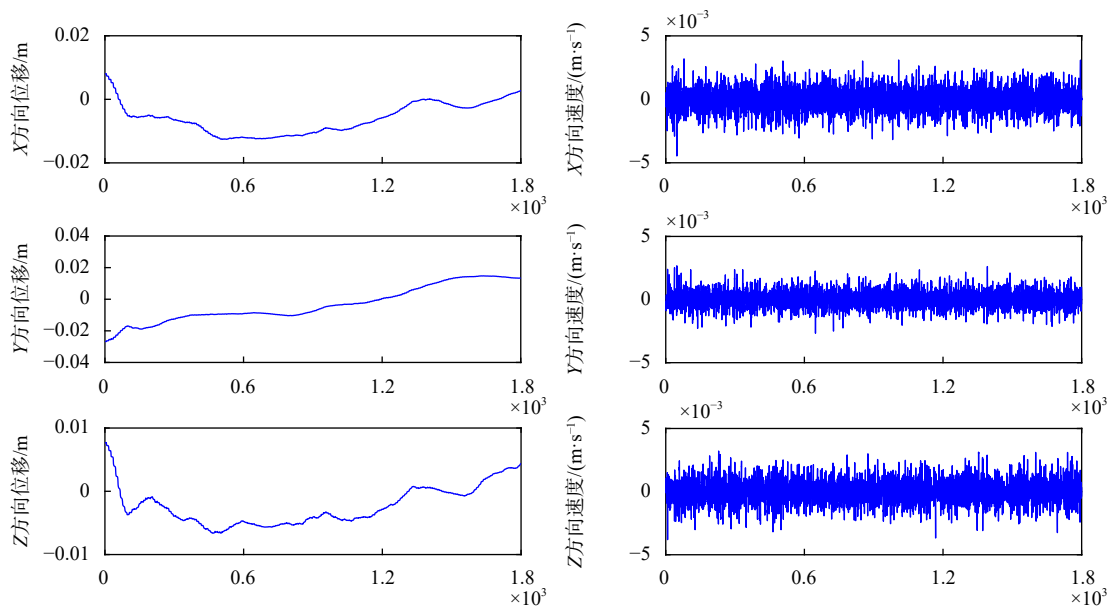


图 8 GNSS 与加速度数据融合后求解的三个方向的位移和速度

表 4 数据融合前后速度的平均值和 STD

统计量	X方向	Y方向	Z方向	
融合前的速度/(cm·s ⁻¹)	平均值	0.378 6	-0.071 9	0.334 4
	STD	1.368 3	0.793 3	1.553 4
融合后的速度/(cm·s ⁻¹)	平均值	0.000 3	0.002 2	0.000 1
	STD	0.070 4	0.051 5	0.071 1

4 结束语

本研究设计了一种基于 STM32 单片机的 GNSS 数据和加速度计数据采集设备,并研发了 GNSS 数据和加速度数据融合处理系统.在该监测系统中,使用 PPP 技术得到高精度 GNSS 位移,采用加速度计获取原始加速度,用 Kalman 滤波算法对 GNSS 位移和加速度数据进行融合,得到融合后的位移、速度和加速度的基线漂移.

搭载了实验环境进行了实验验证,其结果表明,加速度计的基线漂移可以被自动校正,融合后 X、Y、Z 三个方向的位移 STD 均优于 1.114 cm,速度 STD 均优于 0.072 cm/s,校正基线漂移后加速度 STD 均优于 0.485 cm/s².本文的研究为实时高精度宽频带变形监测应用提供了技术支撑.

参考文献

- [1] WEBER E, CONVERTITO V, IANNACCONE G, et al. An advanced seismic network in the southern apennines (Italy) for seismicity investigations and experimentation with earthquake early warning[J]. *Seismological research letters*, 2007, 78(6): 622-634. DOI: 10.1785/gssrl.78.6.622
- [2] ZOLLO A, LANNACCONE G, LANCIERI M, et al. Earthquake early warning system in southern Italy: methodologies and performance evaluation[J]. *Geophysical research letters*, 2009, 36(5): L00B07. DOI: 10.1029/2008gl036689
- [3] CROWELL B W, BOCK Y, SQUIBB M B. Demonstration of earthquake early warning using total displacement waveforms from real-time GPS networks[J]. *Seismological research letters*, 2009, 80(5): 772-782. DOI: 10.1785/gssrl.80.5.772
- [4] GENRICH J F, BOCK Y. Instantaneous geodetic positioning with 10-50 Hz GPS measurements: noise characteristics and implications for monitoring networks[J]. *Journal of geophysical research*, 2006, 111(B3): B03403. DOI: 10.1029/2005jb003617
- [5] LARSON K M, BILICH A, AXELRAD P. Improving the precision of high-rate GPS[J]. *Journal of geophysical research*, 2007, 112(B5): B05422. DOI: 10.1029/2006jb004367
- [6] IWAN W D, MOSER M A, PENG C Y. Some observations on strong-motion earthquake measurement using a digital accelerograph[J]. *Bulletin of the seismological society of America*, 1985, 75(5): 1225-1246. DOI: 10.1007/bf01449758
- [7] BOORE D M. Effect of baseline corrections on displacements and response spectra for several recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake[J]. *Bulletin of the seismological society of America*, 2001, 91(5): 1199-1211. DOI: 10.1785/0120000703
- [8] WU Y M, WU C F. Approximate recovery of coseismic deformation from Taiwan strong-motion records[J]. *Journal of seismology*, 2007, 11(2): 159-170. DOI: 10.1007/s10950-006-9043-x
- [9] WANG R, SCHURR B, MILKEREIT C, et al. An improved automatic scheme for empirical baseline correction of digital strong-motion records[J]. *Bulletin of the seismological society of America*, 2011, 101(5): 2029-2044. DOI: 10.1785/0120110039
- [10] EMORE G L, HAASE J S, CHOI K, et al. Recovering seismic displacements through combined use of 1-Hz GPS and strong-motion accelerometers[J]. *Bulletin of the seismological society of America*, 2007, 97(2): 357-378. DOI: 10.1785/0120060153
- [11] SMYTH A, WU M. Multi-rate Kalman filtering for the data fusion of displacement and acceleration response measurements in dynamic system monitoring[J]. *Mechanical systems and signal processing*, 2007, 21(2): 706-723. DOI: 10.1016/j.ymssp.2006.03.005
- [12] BOCK Y, MELGAR D, CROWELL B W. Real-time strong-motion broadband displacements from collocated GPS and accelerometers[J]. *Bulletin of the seismological society of America*, 2011, 101(6): 2904-2925. DOI: 10.1785/0120110007
- [13] TU R, LIU J H, LU C X, et al. Cooperating the BDS, GPS, GLONASS and strong-motion observations for real-time deformation monitoring[J]. *Geophysical journal international*, 2017, 209(3): 1408-1417. DOI: 10.1093/gji/ggx099
- [14] SHU Y M, FANG R X, GENG J H, et al. Broadband velocities and displacements from integrated GPS and accelerometer data for high-rate seismogeodesy[J]. *Geophysical research letters*, 2018, 45(17): 8939-8948. DOI: 10.1029/2018gl079425
- [15] GENG J H, BOCK Y, MELGAR D, et al. A new seismogeodetic approach applied to GPS and accelerometer

- observations of the 2012 brawley seismic swarm: implications for earthquake early warning[J]. *Geochemistry, geophysics, geosystems*, 2013, 14(7): 2124-2142. DOI: [10.1002/ggge.20139](https://doi.org/10.1002/ggge.20139)
- [16] GENG J H, MELGAR D, BOCK Y, et al. Recovering coseismic point ground tilts from collocated high-rate GPS and accelerometers[J]. *Geophysical research letters*, 2013, 40(19): 5095-5100. DOI: [10.1002/grl.51001](https://doi.org/10.1002/grl.51001)
- [17] TU R, GE M R, WANG R J, et al. A new algorithm for tight integration of real-time GPS and strong-motion records, demonstrated on simulated, experimental, and real seismic data[J]. *Journal of seismology*, 2014, 18(1): 151-161. DOI: [10.1007/s10950-013-9408-x](https://doi.org/10.1007/s10950-013-9408-x)
- [18] TU R, CHEN K J. Tightly integrated processing of high-rate GPS and accelerometer observations by real-time estimation of transient baseline shifts[J]. *The journal of navigation*, 2014, 67(5): 869-880. DOI: [10.1017/S0373463314000150](https://doi.org/10.1017/S0373463314000150)
- [19] TU R, LIU J, ZHANG R, et al. Real-time kinematic positioning algorithm with GNSS and high-frequency accelerometer observations for broadband signals[J]. *Measurement science and technology*, 2019, 31(3): 035007. DOI: [10.1088/1361-6501/ab5d87](https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab5d87)
- [20] PASSMORE P R, JACKSON M, ZIMAKOV L G, et al. Integrated seismogeodetic system with high-resolution, real-time GNSS and accelerometer observation for earthquake early warning application[C]// American Geophysical Union, Fall Meeting, 2014.
- [21] 曾燃, 耿江辉, 辛绍铭, 等. SMAG2000: 一体化GNSS强震仪及其地震监测性能分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*: 2023, 48(3): 443-452.
- [22] XIN S M, GENG J H, ZENG R, et al. In-situ real-time seismogeodesy by integrating multi-GNSS and accelerometers[J]. *Measurement*, 2021, 179(5). DOI: [10.1016/j.measurement.2021.109453](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109453)

作者简介

王培源 (1997—), 女, 硕士, 研究方向为 GNSS/加速度计融合定位。

涂锐 (1985—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为 GNSS 精密定位, 测速, 时间传递, 灾害监测等。

韩军强 (1989—), 男, 博士, 研究方向为 GNSS 电离层建模理论研究及高精度定位应用。

Development of a real-time deformation monitoring system with integrated GNSS and accelerometer

WANG Peiyuan^{1,2}, TU Rui^{1,2,3}, HAN Junqiang^{1,3}, ZUO Hang^{1,2}, TAO Linlin^{1,2}, FANG Jing^{1,2}

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Precision Navigation and Timing Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

Abstract: This paper designs an STM32 microcontroller based Global Navigation Satellite System (GNSS) and accelerometer data acquisition device that enables real-time deformation monitoring applications. The STM32F103ZET6 is used as the main control chip, and also the GNSS board and accelerometer are used to acquire data, and the data are transmitted to the server through the 4G module. The data are read from the server and the Kalman filter algorithm is used to fuse GNSS data with accelerometer data so that real-time deformation monitoring can be achieved and verified by static experiments. The results show that the baseline drift of the accelerometer can be automatically corrected and the standard deviation of displacement (STD) is better than 1.114 cm in all three directions after fusion; the STD of velocity is better than 0.072 cm/s; and the STD of acceleration is better than 0.485 cm/s² after correction of baseline drift.

Keywords: precise point positioning (PPP); accelerometer; baseline drift; Kalman filter; data fusion