

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.007

# 基于GNSS的农田平整定位精度优化与试验

夏友祥 刘刚 康熙 景云鹏

(中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室,北京100083)

**摘要:** 基于全球卫星导航系统(Global navigation satellite system, GNSS)农田平整作业中,GNSS定位数据不仅是地形测量和基准面设计的基础,而且在平地作业中实时影响农田平整的精度。针对当前GNSS定位数据误差分析较少,提出一种基于联合滤波算法的GNSS定位数据分析处理方法。分析平地作业过程中GNSS定位数据的误差源,结合多路径效应和随机噪声,提出因地形起伏引起的振动误差校正方法,利用卡尔曼、小波变换联合滤波算法,校正数据误差提高定位精度,农田定位对比试验分析表明,高程定位精度明显提高,平地工作中,GNSS定位实际高度波动范围缩小20%,能够更好的指导农田平整工作。

**关键词:** 农田平整;全球卫星导航系统;误差分析;卡尔曼滤波;小波变换

**中图分类号:** S281 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)S0-0040-05

## Optimization and Analysis of Location Accuracy Based on GNSS-controlled Precise Land Leveling System

XIA Youxiang LIU Gang KANG Xi JING Yunpeng

(Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** During the work of GNSS (Global navigation satellite system) controlled land leveling system, the GNSS location data is not only the basis of topographic survey and land leveling datum design, but also affects the accuracy of land leveling in real time. In the land leveling work, if the GNSS location data is not accurate enough, the results of the terrain measurement can not truly reflect the actual terrain data and affect the entire farmland land leveling process. In order to analyze the GNSS location data error and improve the location accuracy, we proposed a method to analyze the error source of GNSS location data in the process of land leveling work. Combining the multi-path effect and random noise in the process of GNSS location data, we proposed an error correction method of vibration error caused by terrain fluctuation in land leveling work. We use the Kalman filter algorithm and Wavelet transform to process the location date and correct the data error, we can improve the positioning accuracy. We do farmland comparison experiments, and the analysis results showed that, in this method, the height location accuracy increased, during the land leveling work the GNSS positioning actual height fluctuation error range reduced by 20%, so we can use the method to guide land leveling work better, and can give the follow-up research scientific and rational positioning data, provide reliable data support.

**Key words:** land leveling; global navigation satellite system; error analysis; Kalman filter; wavelet transform

### 引言

农田精细土地平整技术,能够提高农田灌溉效率与灌水均匀度,改良土壤水盐分布,达到节水增产

的目的<sup>[1-4]</sup>。

全球卫星导航系统(Global navigation satellite system, GNSS)控制平地技术作为当前最先进的农田平整技术,作业速度快,定位精度较高,智能化、自

收稿日期:2017-07-17 修回日期:2017-11-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0701100-2017YFD0701105)

作者简介:夏友祥(1992—),男,硕士生,主要从事农田精细平整技术研究,E-mail:cau\_yyx@163.com

通信作者:刘刚(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事精细农业及其支持技术研究,E-mail:pac@cau.edu.cn

动化程度高,不受强光、大风等外界因素影响,适用于大面积农田土地平整作业,综合效益高<sup>[5-7]</sup>。

目前,前期研究的 GNSS 农田平整集成系统具有相对完善的功能,适用于大部分农田平整的要求,具有较好的土地平整效果。但是,GNSS 农田平整集成系统仍存在一定的不足之处:在平整工作中,GNSS 定位精度受多路径效应和随机误差的影响,导致农田平整基准面设计不准确;拖拉机行驶在地形起伏的农田中,由于拖拉机、铲车的振动,系统所测得高程数据会叠加振动信号,导致地形测量结果不能真实反映实际地形数据。

本文针对以上问题,分析 GNSS 农田平整集成系统平整作业中,GNSS 定位数据的误差源,结合多路径效应和随机噪声,建立拖拉机和铲车组合的振动分析,提出一种因地形起伏引起的振动误差校正方法,结合卡尔曼滤波与小波变换混合算法,校正数据提高定位精度,并通过对比试验验证方法的可行性。

## 1 材料和方法

### 1.1 系统平台

根据 GNSS 农田平整集成系统的工作原理<sup>[8-9]</sup>,智能控制终端安装在驾驶室内,平板式拉力传感器安装在拖拉机与平地铲之间,RTK-GNSS 基站安装在农田边界,移动站安装在铲车上。系统的实际硬件平台如图 1 所示。

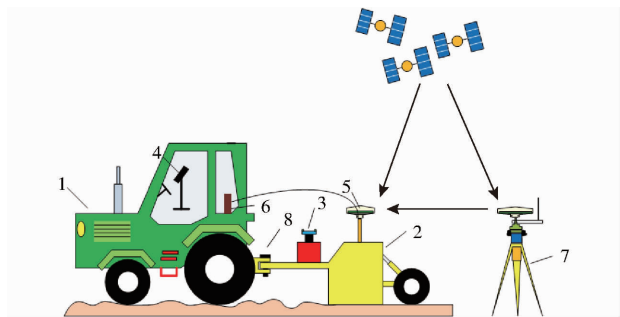


图 1 系统平台组成

Fig. 1 System hardware components

1. 拖拉机 2. 平地铲 3. 液压系统 4. 智能控制终端 5. 移动站  
6. 移动站电台 7. 基站 8. 销轴拉力传感器

### 1.2 定位精度误差分析与算法描述

#### 1.2.1 多路径效应分析与算法处理

GNSS 多路径效应主要是由卫星信号的多路径引起的,如图 2 所示,卫星发射的信号一部分被接收机直接接收,但是在发射过程中由于接收机周围环境影响,另一部分发射的信号直射到起伏不平的农田,经反射将信号传递给接收机,所以接收机接收到的信号,不仅有卫星直接发射的,还混有反射信号。

设直接信号为

$$S_d = A \cos(w_0 t) \quad (1)$$

某一反射信号为

$$S_{r_i} = \alpha_i A \cos(w_0 t + \varphi_i) \quad (2)$$

式中  $A$ ——直接信号的振幅

$w_0$ ——卫星信号的角速度

$t$ ——时间

$\varphi_i$ ——第  $i$  个反射信号的相位延迟

$\alpha_i$ ——第  $i$  个反射信号的折射系数

接收机接收到的信号可表示为

$$S(t) = S_d + \sum S_{r_i} \quad (3)$$

直接信号与反射信号相互作用,导致 GNSS 接收机接收到的信号与实际信号产生偏差,从而形成多路径效应<sup>[10-16]</sup>。在农田平整过程中,由于多路径效应,降低了 GNSS 定位精度,影响平整工作的进行。

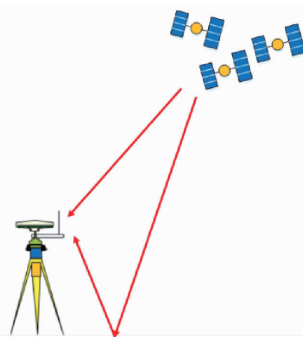


图 2 多路径效应原理图

Fig. 2 Multi-path effect schematic

针对多路径效应的影响,分析误差性质,可采用卡尔曼滤波对多路径误差进行处理。卡尔曼滤波是一种时域内的递推算法,在计算过程中不需要存储大量的观测数据,不断地对结果进行预测、修正,一旦得到新数据,可以实时得到新的滤波值,便于实时处理,易于计算机实现。

GNSS 定位数据处理中,卡尔曼滤波用离散形式来表示,其系统状态方程和量测方程分别为

$$\mathbf{X}_k = \boldsymbol{\phi}_{k,k-1} \mathbf{X}_{k-1,k-1} + \mathbf{W}_{k-1} \quad (4)$$

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \quad (5)$$

式中  $\mathbf{X}_k$ ——系统的状态向量

$\boldsymbol{\phi}_{k,k-1}$ ——状态转移矩阵

$\mathbf{W}_{k-1}$ ——系统噪声矩阵

$\mathbf{Z}_k$ ——量测向量

$\mathbf{H}_k$ ——系统观测方程的设计矩阵

$\mathbf{V}_k$ ——量测噪声矩阵

一般情况下假设动态噪声和观测噪声均为白噪声,即  $\mathbf{W}_{k-1}$  和  $\mathbf{V}_k$  的均值为 0,且相互独立。可按以下滤波方程求解。

状态向量预测

$$\mathbf{X}_{k,k-1} = \boldsymbol{\phi}_{k,k-1} \mathbf{X}_{k-1,k-1} \quad (6)$$

预测误差方差矩阵

$$\mathbf{P}_{k,k-1} = \boldsymbol{\phi}_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1,k-1} \boldsymbol{\phi}_{k,k-1}^T + \mathbf{Q}_{k-1} \quad (7)$$

状态向量估计

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{X}_{k-1,k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \mathbf{X}_{k-1,k-1}) \quad (8)$$

增益矩阵

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}_{k,k-1}^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (9)$$

估计误差方差矩阵

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_{k,k-1}) \mathbf{P}_{k,k-1} \quad (10)$$

式中  $\mathbf{Q}_k$ ——系统的动态噪声方差矩阵

$\mathbf{R}_k$ ——系统的观测噪声方差矩阵

$\mathbf{I}$ ——单位矩阵

$\mathbf{P}_{k,k-1}$ ——预测误差方差矩阵

### 1.2.2 振动误差分析与算法处理

GNSS 农田平整集成系统中,移动站卫星天线安装在铲车顶端。由于拖拉机和平地铲在起伏不平的农田中进行作业,会导致整个系统因为地势起伏而产生垂直方向的振动。当系统接收地势三维信息时,读取的高程数据不仅包括 GNSS 接收机接收的卫星定位数据,还包括因振动而产生的振动误差,降低整个系统的定位精度。

为了提高整个系统平地效果,需要对 GNSS 数据进行分析处理,滤除振动误差,使定位数据更加准确,平地效果更佳。

针对振动误差的影响,采用小波变换,对高程数据进行分析处理。小波变换可以在不同的分辨率下对信号的时频特性进行分析,通过对信号的分解可以得到不同的小波系数,这些系数代表了原始信号的不同信息,而这些不同的信息,可以对原始信号和振动误差的传播特性和特征描述进行很好的区分,这样就能够利用这些信息区分原始信号与振动误差<sup>[18-22]</sup>。依据信号的特点及形成原因,需要对常规小波阈值去噪方法进行改进,针对传统小波的硬、软阈值去噪方法的一些缺陷,选择合适阈值,使之更加适用于农田平整环境。

利用双尺度方程,采用递归算法,分别获取每一个分解层次上输入信号的平滑逼近信号和细节信号。假定原始信号为  $x(n)$ ,当通过一系列半带宽的低通滤波器  $h(n)$  和高通滤波器  $g(n)$  时,滤波器中设置的不同截止频率将原始信号分解成不同分辨率的信号。该过程可表示为

$$x^j(k) = \sum_n x^{j-1}(n) h(n-2k) \quad (j=1,2,\dots,L) \quad (11)$$

$$d^j(k) = \sum_n x^{j-1}(n) g(n-2k)$$

$$(j=1,2,\dots,L) \quad (12)$$

式中  $j$ ——当前小波变换的层次

$L$ ——小波分解的总层次

$k$ ——第  $j$  层的第  $k$  个小波系数

$x^j(k)$ ——分辨率  $a=2^j$  下的离散平滑逼近信号

$d^j(k)$ ——分辨率  $a=2^j$  下的离散细节信号,也就是该分辨率下的小波变换系数

假设不含振动的有效 GNSS 定位信号为  $f(z,x)$  ( $z=1,2,\dots,M;x=1,2,\dots,N$ )。其中  $M$  为数据的采样点数, $N$  为数据的总道数,而实际接收到的含有高频振动噪声的定位信号可表示为

$$g(z,x) = f(z,x) + t(z,x) \quad (z=1,2,\dots,M;x=1,2,\dots,N) \quad (13)$$

尽可能精确估计  $f(z,x)$ ,从而达到提高定位精度的目的。将  $g(z,x)$  进行小波变换。由于小波变换具有线性变换特性,因此在小波变换域,各小波系数可表示为

$$W_g(j,k_z,k_x) = W_f(j,k_z,k_x) + W_t(j,k_z,k_x) \quad (14)$$

式中  $k_z, k_x$ ——第  $j$  层的深度和空间方向上波形系数索引值

$W_f(j,k_z,k_x)$ ——真实的小波系数

$W_t(j,k_z,k_x)$ ——与振动有关的小波系数

以平整试验过程中采集的农田地势高程数据作为输入,联合卡尔曼滤波算法和小波变换,选取合适阈值,对高程数据进行处理,得到滤除误差的高程分量,为后续研究提供数据支持。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 农田地形数据采集

在中国农业大学上庄试验基地选取两块地势不同的农田 A、B,使用 GNSS 农田平整集成系统进行地形数据采集。

试验步骤如下:

(1) 在拖拉机上安装 GNSS 农田平整集成系统,并在农田地头架设 GNSS 基站。

(2) 调试设备,保证 GNSS 农田平整集成系统工作在差分状态。

(3) 使用集成控制终端,原点标定后进行边界测量。

(4) 边界测量结束后,使用蛇形行走方式,测量农田内部地势。

测量结果如图 3、4 所示。

### 2.2 数据算法处理

农田平整过程中,地势信息的高程分量是指导

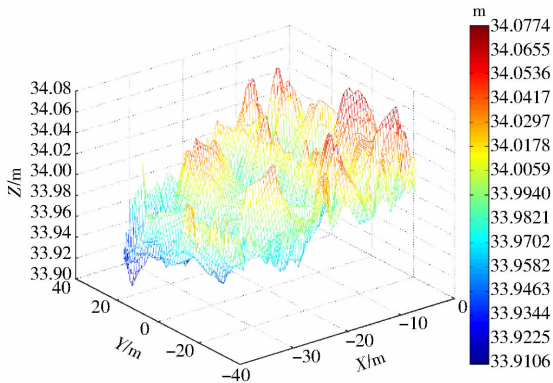


图3 农田 A 三维地势信息图

Fig. 3 Three-dimensional terrain information of farmland A

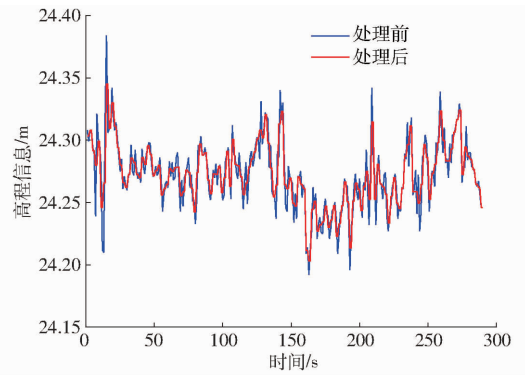


图6 农田 B 的高程信息

Fig. 6 Height information of farm B

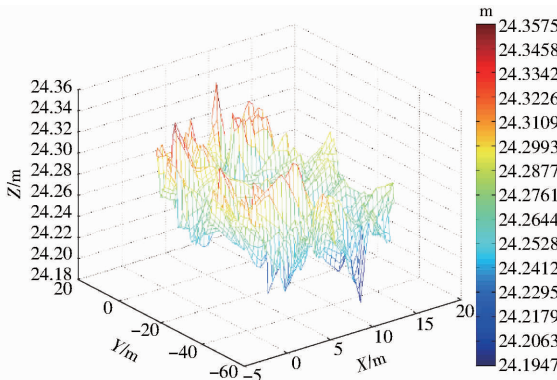


图4 农田 B 三维地势信息图

Fig. 4 Three-dimensional terrain information of farmland B

农田平整的基础,也是农田平整作业评价的指标。将处理前的高程定位信息作为原始信号,利用卡尔曼、小波变换联合算法进行数据处理,处理结果如图 5、6 以及表 1 所示。

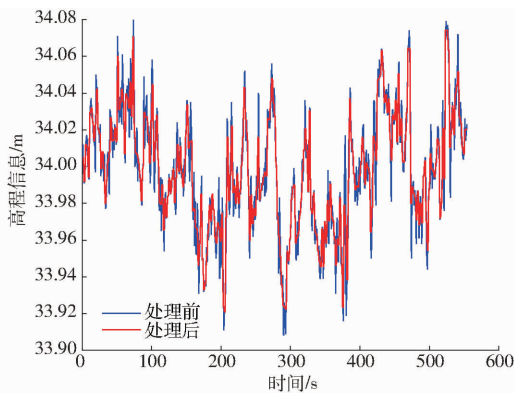


图5 农田 A 的高程信息

Fig. 5 Height information of farm A

试验分析可知,经卡尔曼、小波变换联合滤波算

表 1 处理前后地势数据

Tab. 1 Terrain data before and after processing

农田编号	状态	最大值/m	最小值/m	高程差/cm	均方差/cm
A	处理前	34.077	33.911	16.6	3.24
	处理后	34.065	33.943	12.2	3.07
B	处理前	24.357	24.195	16.2	2.77
	处理后	24.339	24.208	13.1	2.37

法处理后的农田地势信息,高程数据得到较好的平滑处理,多路径效应、随机噪声以及振动造成的误差处理效果较好。最大值与最小值均得到改善。农田 A 高程差由 16.6 cm 下降到 12.2 cm,均方差由 3.24 cm 下降到 3.07 cm,数据波动范围减小了 26.5%,农田 B 高程差由 16.2 cm 下降到 13.1 cm,均方差从 2.77 cm 下降到 2.37 cm,数据波动范围减小了 19.1%。表明农田定位精度得到较好的改善。

### 3 结论

(1) 提出了一种基于 GNSS 农田平整的定位数据处理方法,通过卡尔曼滤波与小波变换,对 GNSS 定位数据进行处理,减少多路径效应、随机误差以及振动对定位精度的影响,提高 GNSS 高程数据的准确性,使得测量结果可以更加准确地反映农田地势信息。

(2) 进行了 GNSS 定位数据对比仿真试验,高程数据波动范围降低约 20%,均方差降低约 0.2 cm,结果表明,数据经过滤波处理后,明显消除了多路径效应、随机噪声以及振动误差产生的高频分量,使得波形更加平滑,更能准确反映农田地势信息。

### 参考文献

- WALKER W R. Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems [R]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper No. 45, 1992.
- 李益农, 许迪, 杨继富, 等. 农田土地激光平整技术应用及初步评价[J]. 农业工程学报, 1999, 15(2): 79-84.  
LI Yinong, XU Di, YANG Jifu, et al. Application and evaluation of laser-controlled land leveling technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1999, 15(2): 79-84. (in Chinese)
- 许迪, 李益农, 李福祥, 等. 常规土地平整方法与激光平地技术组合应用分析[J]. 水利学报, 1999, 30(10): 52-56.  
XU Di, LI Yinong, LI Fuxiang, et al. Study on combination of conventional and laser-controlled land grading procedures[J].

- Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 30(10): 52 - 56. (in Chinese)
- 4 刘刚, 司永胜, 林建涵, 等. 激光平地控制器的开发与农田试验分析[C] // 2005年中国农业工程学会学术年会, 广州, 2005.  
LIU Gang, SI Yongsheng, LIN Jianhan, et al. Development of laser ground controllers and field trials analysis [C] // Annual Meeting of CSAE, 2005. (in Chinese)
  - 5 AZIZ S A, STEWARD B L, TANG Lie, et al. Multiple GPS measurements for digital elevation model[C] // Proceedings of the 4th World Congress of Computers in Agriculture and Natural Resources, St. Joseph, USA: ASABE, 2006: 329 - 334.
  - 6 李益农, 许迪, 李福祥, 等. GPS在农田土地平整地形测量中应用的初步研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 66 - 70.  
LI Yinong, XU Di, LI Fuxiang, et al. Preliminary research on GPS leveling of farmland topographic survey application [J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(1): 66 - 70. (in Chinese)
  - 7 李笑, 李宏鹏, 牛东岭, 等. 基于全球导航卫星系统的智能化精细平地系统优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 48 - 55.  
LI Xiao, LI Hongpeng, NIU Dongling, et al. Optimization and test-based global navigation satellite system intelligent finish grading system [J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(3): 48 - 55. (in Chinese)
  - 8 王珑, 刘刚, 刘寅, 等. 基于GPS的农田坡面平整技术与试验[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(5): 456 - 460.  
WANG Long, LIU Gang, LIU Yin, et al. GPS is based on a flat slope farmland technology and testing [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(5): 456 - 460. (in Chinese)
  - 9 刘寅, 李宏鹏, 刘刚, 等. 基于GPS控制技术的土地平整系统[J]. 农机化研究, 2014, 36(9): 142 - 146.  
LIU Yin, LI Hongpeng, LIU Gang, et al. Land leveling system based on GPS techniques [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(9): 142 - 146. (in Chinese)
  - 10 杨天石. 多路径效应对GPS精密定位的影响及消除方法分析[J]. 勘察科学技术, 2006(3): 53 - 56.  
YANG Tianshi. Analysis of the effects on GPS accurate positioning which caused by multi-path effect and the avoiding method [J]. Site Investigation Science and Technology, 2006(3): 53 - 56. (in Chinese)
  - 11 黄声享, 李沛鸿, 杨保岑, 等. GPS动态监测中多路径效应的规律性研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2005, 30(10): 877 - 880.  
HUANG Shengxiang, LI Peihong, YANG Baocen, et al. Study on the characteristics of multipath effects in GPS dynamic deformation monitoring [J]. Journal of Wuhan University, 2005, 30(10): 877 - 880. (in Chinese)
  - 12 田宗彪, 章磊, 张训虎, 等. GNSS点位质量评定中多路径效应分析研究[J]. 工程勘察, 2017, 45(2): 45 - 48.  
TIAN Zongbiao, ZHANG Lei, ZHANG Xunhu, et al. Study of multi-path effects in GNSS points quality assessment [J]. Engineering Investigation, 2017, 45(2): 45 - 48. (in Chinese)
  - 13 尹子明, 陈明剑, 闫建巧, 等. GNSS多路径和信噪比相关性分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2017(2): 109 - 112.  
YIN Ziming, CHEN Mingjian, YAN Jianqiao, et al. Correlation analysis for GNSS multipath and SNR [J]. Mapping and Spatial Geography Information, 2017(2): 109 - 112. (in Chinese)
  - 14 夏峰, 张锐, 冯胜涛, 等. GNSS不同类型实验观测墩对不同类型噪声幅值影响分析[J]. 华北地震科学, 2014, 32(2): 39 - 44.  
XIA Feng, ZHANG Rui, FENG Shengtao, et al. Analysis on impact of different types test GNSS monument to different types noise amplitude [J]. North China Earthquake Science, 2014, 32(2): 39 - 44. (in Chinese)
  - 15 贾文涛, 刘峻明, 于丽娜. 基于农田高程信息快速采集系统的平整精度评价方法[J]. 中国土地科学, 2009(5): 65 - 70.  
JIA Wentao, LIU Junming, YU Lina. Study on evaluation methods of farmland-leveling precision based on information fast collecting system of farmland Altitude [J]. China Land Science, 2009(5): 65 - 70. (in Chinese)
  - 16 王增刚. GIS在高标准基本农田建设中的应用研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2013.  
WANG Zenggang. GIS application of high standards in the construction of basic farmland [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2013. (in Chinese)
  - 17 王岩, 李宏鹏, 牛东岭, 等. GNSS平地作业路径实时规划与导航方法研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 271 - 275.  
WANG Yan, LI Hongpeng, NIU Dongling, et al. GNSS real-time grading path planning and navigation method [J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 271 - 275. (in Chinese)
  - 18 杨建潮. 测量误差及粗大误差的判别与消除[J]. 计量与测试技术, 2006, 33(11): 4 - 5.  
YANG Jianchao. Identification and elimination of measurement errors and gross errors [J]. Metrology and Measurement Technique, 2006, 33(11): 4 - 5. (in Chinese)
  - 19 夏开旺, 廖振修, 高旭光, 等. 基于小波分析的GPS接收机随机噪声研究[J]. 山西建筑, 2012, 38(1): 233 - 235.  
XIA Kaiwang, LIAO Zhenxiu, GAO Xuguang, et al. Research on random noise of GPS receiver based on wavelet analysis [J]. Shanxi Architecture, 2012, 38(1): 233 - 235. (in Chinese)
  - 20 彭志科, 卢文秀, 褚福磊. 新的基于小波变换的振动信号消噪方法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(4): 18 - 22.  
PENG Zhike, LU Wenxiu, CHU Fulei. Novel wavelet based for vibration signal noise cancellation [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(4): 18 - 22. (in Chinese)
  - 21 钟萍, 丁晓利, 郑大伟, 等. GPS结构振动监测数据滤波方法及其性能实验研究[J]. 测绘学报, 2007, 36(1): 31 - 36.  
ZHONG Ping, DING Xiaoli, ZHENG Dawei, et al. Filter-based GPS structural vibration monitoring methods and comparison of their performances [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2007, 36(1): 31 - 36. (in Chinese)
  - 22 李旋, 孙磊, 骆辉, 等. 基于小波消噪的EMD模型在GPS振动信号处理中的应用[J]. 工程勘察, 2011, 39(3): 72 - 76.  
LI Xuan, SUN Lei, LUO Hui, et al. Empirical mode decomposition based on wavelet de-noise in GPS vibration signal deformation analysis [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2011, 39(3): 72 - 76. (in Chinese)