

基于 CORS 与 UHF 的农用 GNSS 差分信号中继方法

吴才聪^{1,2} 赵欣^{1,2} 田娟^{1,2} 程颖^{1,2} 胡冰冰^{1,2}

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 农业部农业灾害遥感重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为利用现有丰富的连续运行参考站(CORS)资源,给精准农业提供高精度、高可靠、高并发的差分信号,本文结合农业应用特点,利用 GNSS 误差的空间相关性,提出基于 CORS 和 UHF 电台的 GNSS 差分信号中继方案,解决测绘用 CORS 传输方式单一、并发性不足、使用成本较高以及单站 RTK 重复建设、频率干扰和基准不统一等问题。在北京市海淀区、顺义区和平谷区建立了 3 个基准站,组建了试验用 CORS 网,构建了基于 PC、i80 和智能手机(Phone)的 3 套中继试验系统,分别开展了定位性能综合验证、机组控制精度验证和应用推广原型验证。试验表明:在 10 km 范围内,中继定位的平面内、外符合精度分别优于 0.022 m 和 0.033 m,基本满足农机作业定位要求;作业机组控制精度达到 0.066~0.076 m,略高于 0.050 m 的理论控制要求,由于机组为挂载农具空驶,该指标属可接受范围;智能手机中继传输的可靠性高、扩展性好。因此,利用智能手机和 UHF 电台,可快速获取与转发 CORS 差分改正数,使 10 km 之内的流动站实现 RTK 级定位。该模式简单易用、成本低廉,有一定的应用推广价值。

关键词: 全球导航卫星系统;连续运行参考站;特高频;差分信号;中继;自动驾驶系统

中图分类号: G633.67; P228.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)S0-0023-06

CORS and UHF Based GNSS Differential Signal Relay Method for Agricultural Application

WU Caicong^{1,2} ZHAO Xin^{1,2} TIAN Juan^{1,2} CHENG Ying^{1,2} HU Bingbing^{1,2}

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Remote Sensing for Agri-Hazards, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China)

Abstract: How to use the existing and rich continuous operation reference stations (CORS) resources to provide high precision, high reliability, and high concurrency differential augmentation signals for precision agriculture is still an unsolved problem. Based on the characteristics of agricultural application, a CORS and UHF radio GNSS based differential signal relay scheme was proposed, which can solve the problems such as single transmission mode, lack of concurrency, high cost of using in CORS application, repeated construction, frequency interference and frequency interference existing in single RTK station application. An experimental CORS system with three stations was established. The stations were established in Haidian District, Shunyi District and Pinggu District of Beijing. Three sets of relay test systems based on PC, i80, and Phone were constructed. The positioning performance verification, operation unit control accuracy verification and application prototype verification were carried out respectively. The test result showed that within 10 km, the plane inside and outside accuracy values of relay positioning were better than 0.022 m and 0.033 m, which met the requirements of agricultural machinery operation (usually 0.03 m). The control accuracy of the operation unit reached 0.066 ~ 0.076 m, slightly higher than 0.050 m. The reliability of the phone based relay system was high, and the system had good expansion. Therefore, by using smart phone and UHF radio, the differential signal of CORS can be easily obtained and transmitted, which can realize RTK positioning by the rover within 10 km. The mode was easy, low cost, and had certain feasibility and application value.

Key words: global navigation satellite system; continuously operating reference stations; ultra high frequency; differential signal; relay; auto-steering system

0 引言

农机自动驾驶导航可以有效减少用工成本、延长作业时间、提高作业质量和土地利用率^[1-4],是近年发展较为迅速的精准农业技术^[5-10]。该技术需要高精度、高可靠和高并发的全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)差分信号源,以实现行对行 $\pm 2.5\text{ cm}$ 的作业精度^[9,11-13]。

当前,单站RTK(Real time kinematic)^[14]和网络RTK^[15-17]具有较好的精度,能够满足上述作业精度要求。星基差分增强^[18]和星基精密单点定位(Precise point positioning, PPP)略低于该精度,且PPP的初始化时间较长^[19-20],目前可满足部分农机作业任务要求。

据调查,由于单基准站(RTK)易建设、易维护,我国普遍建设单基准站,通过UHF(特高频)电台播发差分信号。这种差分方式导致重复建设、重复投资和频率干扰等问题,已成为制约农机自动驾驶导航快速发展的瓶颈^[21]。另一方面,中国已建设数以千计高等级的GNSS连续运行参考站(CORS),覆盖面广、可靠性高,但利用率较低,几乎未用于蓬勃发展的精准农业。究其原因,除共享机制尚未完全理顺外,当前测绘用CORS普遍通过移动通信网络播发差分信号,而广大农区往往通信覆盖不佳。此外,CORS的并发性也不能适应要求。以石河子为例,春播时全境2 000~3 000台套的拖拉机并发工作,测绘用CORS难以满足高并发访问要求。

2017年5月,原国家测绘地理信息局宣布“全国卫星导航定位基准服务系统”正式启用,可以向公众提供实时亚米级的导航定位服务,并向专业用户提供厘米级乃至毫米级的定位服务。该系统为精准农业利用国家丰富、高标准的CORS资源提供了渠道。

综上,单站RTK和网络RTK具有较好的精度,但单站RTK在传播距离与时空基准、网络RTK在并发性与传播可靠性等方面存在不足。因此,综合利用单站RTK和网络RTK的技术优势,探索基于

国家CORS资源和UHF电台的农用虚拟差分方法,有望降低CORS并发访问数和使用成本,提高差分数据传输的可靠性,统一区域作业基准。

针对精准农业对GNSS差分信号的应用需求,本文结合农业生产的具体特点,利用GNSS误差强空间相关性的原理,面向区域农机高精度导航作业,提出利用UHF电台获取并转发CORS差分改正数的解决方案,以期利用中国丰富的CORS资源为精准农业服务。

1 试验与方法

1.1 CORS建设

根据试验区分布,在中国农业大学信电楼(图1a)、北京兴农天力农机服务专业合作社(图1b)和北京互联农机服务专业合作社(图1c),分别建设农用CORS。

农用CORS由接收机、接收机天线、无线数据传输设备、中心服务器及解算软件组成。

基准站接收机采用PD318型高精度基准站接收机,可接收北斗B1、B2、B3, GPS L1、L2、L5和GLONASS L1、L2全波段信号。天线采用HX-CGX601A型3D基准站天线。

无线数据传输设备采用华为B315S-936型无线4G路由器,使用中国移动SIM卡通过4G网络将基准站的原始观测数据实时回传至数据中心。数据传输频率设为1 Hz。

中心服务器租用阿里云主机,该主机使用Intel Xeon CPU E5-2630@2.30 GHz,内存8 GB,安装Windows Server 2008 R2 Standard 64位操作系统。

CORS解算软件采用武汉大学研发的PowerNetwork软件(图1d)。

利用PANDA高精度导航定位解算软件进行PPP解算,获得基准站和验证点的坐标,精度达到毫米级。

1.2 中继试验

1.2.1 中继试验系统构建

在近3个月的试验过程中,针对定位性能综合

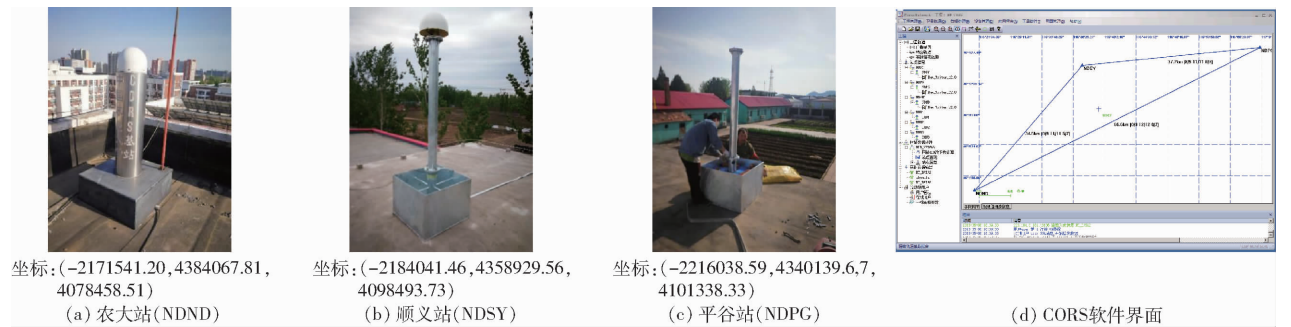
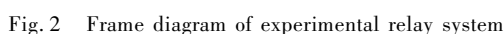


图1 试验用CORS基准站及其坐标(WGS84)

Fig. 1 Experimental CORS and coordinates of reference station (WGS84)

由于 GNSS 误差具有强时空相关性,故在一定距离内能够通过差分技术削弱或消除流动站的定位误差,但其差分效果有待通过试验验证。



精度验证的主要指标包括内符合精度和外符合精度^[22-23]。每个观测点进行 2 h 的静态观测以及 30 min 的 UHF 中继差分定位。观测频率均为 1 Hz。利用 PPP 技术进行观测数据后处理,获得毫米级精度的观测点坐标,作为内外符合精度验证的参考值。

针对机组控制精度验证,为延长作业时间,采用中绘 i80 接收机作为中继站。如图 5a 所示,i80 通过 4 G 连接 CORS,实时获取虚拟改正数,然后通过 DL5-C1 型电台进行改正数的中继播发,功率为 28 W,频率为 461.05 MHz。流动站为 NX200 型自动驾驶导航系统用接收机,内置华测 UHF 电台。NX200 安装于 JD1204 型拖拉机(图 5b),支持 BDS、GPS、GLONASS 定位。



Fig.3 PC based experimental relay system

中继站及流动站的位置分布见图4。

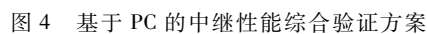


Fig. 4 PC based relay performance verification scheme

2018年6月,在北京顺义区开展了基于 i80 中继的农机自动驾驶导航作业,预先设定 AB 导航线,利用中继信号进行差分定位。NX200 通过 4G 将作业轨迹回传至服务器。针对回传的作业轨迹,采用 ArcGIS 软件过滤系统初始化、行驶速度为零及地头调头的数据,然后利用 SPSS 软件进行线性回归,对作业机组的控制精度进行验证。

1.2.4 基于 Phone 的中继试验

智能手机具有 GNSS 单频定位、4G 传输、蓝牙连接等功能。由于虚拟差分仅需中继站报送概略坐标,因此用智能手机替代双频接收机是可行的。其工作原理可概括为:基于 NTRIP Client APP,利用智能手机请求 CORS 差分改正数,通过手机内置蓝牙模块,将数据传输至 BT578 外置蓝牙模块,再经 BT578 串口将差分改正数传输至 UHF 电台,最终实现差分改正数的远距离无线播发。

2018 年 7 月,在中国农业大学运动场,架设了基于 Phone 的中继试验系统,如图 6 所示。试验员手持 STONEX 接收机绕运动场步行 1 圈,获得行走轨迹,检验基于 Phone 中继的可行性和数传链路的可靠性。



图 6 基于 Phone 的 GNSS 差分增强中继试验系统

Fig.6 Phone based experimental relay system for GNSS differential augmentation

2 结果与讨论

2.1 定位性能验证

表 1 为基于计算机的中继试验内、外符合精度结果(2σ)。可以看出,除Ⅱ-10 和Ⅲ-7 验证点的精度较差外,其余验证点的平面内符合和外符合精度均优于 0.022 m 和 0.033 m,最优值分别达到 0.003 m

表 1 中继距离与定位精度

Tab.1 Relay distance and positioning accuracy

中继点	中继距离/km	内符合精度/m		外符合精度/m	
		平面	高程	平面	高程
I	3	0.005	0.003	0.016	0.019
	7	0.006	0.003	0.024	0.018
	10	0.011	0.007	0.013	0.008
II	3	0.018	0.016	0.024	0.018
	7	0.022	0.012	0.024	0.014
	10	0.040	0.016	0.048	0.022
III	3	0.018	0.016	0.024	0.018
	7	0.111	0.054	0.116	0.057
	10	0.016	0.010	0.031	0.011
IV	3	0.006	0.005	0.028	0.018
	7	0.016	0.006	0.033	0.020
	10	0.014	0.006	0.023	0.009
V	7	0.003	0.002	0.019	0.002
	10	0.010	0.006	0.014	0.008

和 0.013 m。由此可见,在 10 km 范围内,流动站基于中继站播发的差分改正数,可实现高精度定位,满足农机自动驾驶导航对 0.03 m 的精度要求。

Ⅱ-10 和Ⅲ-7 点的内、外符合精度较差。在验证期间,因靠近北京首都机场,上空航班川流不息,有可能是导致定位结果短暂时变差的原因。其特征是精度下降至米级,但保持固定解,持续时间不超过 1 min。将这些异常点过滤后,Ⅱ-10 点的平面内、外符合精度(2σ)可达 0.040 m 和 0.048 m,Ⅲ-7 点的平面内、外符合精度(2σ)可达 0.111 m 和 0.116 m。

表 2 为 CORS 与中继定位的连续性统计结果。从表中可见,CORS 和中继站均无法达到 100% 的差分信号连续获取。经现场试验观察,影响 CORS 连续定位的主要因素是移动通信信号中断,而影响中继连续定位的主要因素是延迟。CORS 定位是中继定位的前提,当 CORS 断开时,因无法获得实时改正数,中继定位将显示延迟,并中断定位。因此,中继定位的连续性总是低于 CORS 定位。

表 2 CORS 与中继定位的连续性

Tab.2 Positioning continuity of CORS and relay system

定位方式	定位连续性/%			
	I-7	I-10	II-3	IV-3
CORS	99.7	99.9	99.8	99.8
中继站	99.5	99.7	92.1	92.5

鉴于中继定位与 CORS 定位的依存关系,将中继站放置在移动通信覆盖良好地点是必要的,是发挥中继定位优越性的前提。至于中继站 UHF 传输的可靠性和连续性,本文没有进行实测。UHF 电台传播的距离与电台功率、天线高度、区域地形起伏等有关,即使开展试验,也难以得到满意的结果。

2.2 作业机组控制精度

基于 i80 中继系统,播种机组空驶的行驶轨迹见图 7,经线性回归,其标准差为 0.066 m,略高于 0.050 m(理论控制精度要求)。另一组试验的标准差为 0.076 m。考虑到机组是挂载农具空驶,尚属可接受范围^[24-26]。

GNSS 农机自动驾驶导航系统的控制精度与田间作业机组的调校直接相关。一般来说,拖拉机挂载农机具(如播种机)后,需要量测机组的有关参数,将农机具调节至工作状态,通过田间测试优化导航与控制参数。试验开展时,播种机处于运输状态,故其控制特性与作业时存在差异,这可能是导致机组控制精度略差的主要原因。

在试验过程中,4 台安装 NX200 的拖拉机同时接入中继站进行 RTK 定位。事实上,当机群联合作

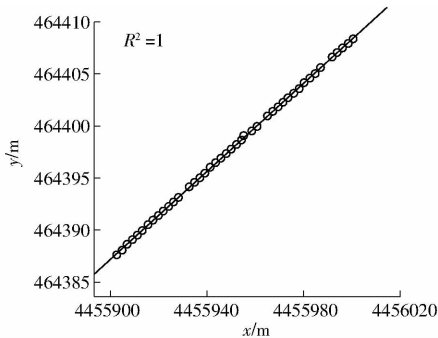


图 7 作业机组 GNSS 轨迹

Fig. 7 GNSS trajectory of farm machinery

业时,所有田间作业机组均可通过同一个中继站进行 RTK 定位,而无需全部接入 CORS。由此可见,在中继站能够覆盖的范围内,只需中继站接入 CORS,其他机组可直接通过中继站获得高精度的差分改正数。由此,中继方法在统一区域空间基准的同时,可以有效降低 CORS 的并发访问请求。以石河子市为例,目前已安装自动驾驶系统约 2 200 台(套),如果均接入 CORS,则普通测绘用 CORS 难以满足要求。而如果通过中继方式,则仅需 54 个中继站,并发量仅为前者的 2.5%。

2.3 基于 Phone 的中继试验结果

基于 Phone 的中继结果见图 8。经统计,试验期间中继系统工作稳定,未出现 CORS 连接中断和播发与接收中断现象,这说明基于 Phone 中继的定位连续性较好,具有较好的实用性。

单站 RTK 需使用双频接收机和 UHF 电台。如建设中继站,则可用智能手机替代双频接收机。利用智能手机不仅可以降低建站成本,而且智能手机还具有 GNSS 接收机所不具备的功能。例如,可以利用智能手机的数传功能,将中继站坐标、差分数据协议、电台参数等,传输至中国农用 GNSS 基准站管理系统^[21],从而实现基准站信息共享,利于减少重复建设和频率干扰等问题。

此外,由于中继站利用 CORS 的时空基准,因此中继站可以在田间地头随机放置,依然能够满足农

机高精度重复作业要求。相较而言,移动基准站则难以维持固定基准。

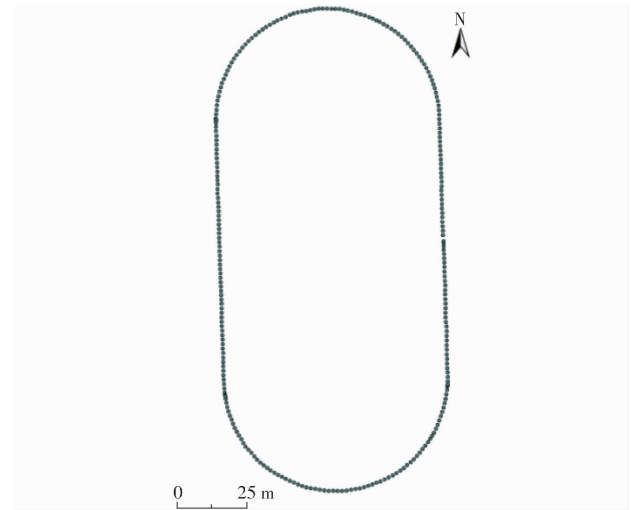


图 8 基于 Phone 的中继试验轨迹

Fig. 8 Phone based relay experiment trajectory

3 结论

(1)在北京建设了 3 个基准站,组建了试验用 CORS 网。基于计算机和 UHF 电台的中继试验表明,在 10 km 范围内,流动站的平面内、外符合精度分别优于 0.022 m 和 0.033 m,基本满足农机自动驾驶对定位精度的应用需求。

(2)机组田间作业表明,基于 i80 和 UHF 电台播发的中继信号,机组控制精度达到 0.066 ~ 0.076 m,基本达到机组控制精度要求。针对机群或区域应用,中继方法可以极大降低并发访问数,节省移动通信流量费用支出。

(3)基于智能手机的试验表明,蓝牙传输和 UHF 传输稳定可靠,能够满足连续作业要求。利用智能手机和 UHF 电台,可以直接利用 CORS 资源,快捷地组建移动中继站。该模式具有简单易用、成本低廉、基准统一等特点,有一定的应用推广价值,有助于利用中国丰富的 CORS 资源为精准农业服务。

参 考 文 献

1 MA Junfei, WANG Daichao, TANG Yongwei, et al. Automatic control system of agricultural machinery based on Beidou navigation [C]. 2017 IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference(ITOEC), Chongqing, China, 2017; 318 - 323.

2 ZHANG Chi, NOBORU Noguchi, YANG Liangliang. Leader-follower system using two robot tractors to improve work efficiency [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 121: 269 - 281.

3 胡静涛, 高雷, 白晓平, 等. 农业机械自动导航技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 1 - 10.

HU Jingtao, GAO Lei, BAI Xiaoping, et al. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 1 - 10. (in Chinese)

4 姬长英, 周俊. 农业机械导航技术发展分析[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 44 - 54. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140908&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.008.

- Ji Changying, ZHOU Jun. Current situation of navigation technologies for agricultural machinery[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 44–54. (in Chinese)
- 5 PRASANNA KUMAR G V. Development of a computer program for the path generation of tractor hitch points[J]. Biosystems Engineering, 2012, 113(3): 272–283.
- 6 李安宁, 郭京华, 刘小伟, 等. 赴美国精准农业考察情况报告——中美科技合作交流计划精准农业考察团[J]. 农业工程技术, 2018, 38(9): 112–117.
- 7 罗锡文, 廖娟, 邹湘军, 等. 信息技术提升农业机械化水平[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 1–14.
- LUO Xiwen, LIAO Juan, ZOU Xiangjun, et al. Enhancing agricultural mechanization level through information technology[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20): 1–14. (in Chinese)
- 8 王海涛, 张丹. 北斗高精度位置服务在精准农业中的应用[J]. 测绘通报, 2017(增刊2): 24–27.
- 9 吴才聪, 苑严伟, 韩云霞. 北斗在农业生产过程中的应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- 10 向俊霖, 郭承军. 北斗卫星导航系统在精准农业中应用的研究[C]//第八届中国卫星导航学术年会, 上海, 2017.
- 11 FRANCISCO R M, ISHANI C, VERÓNICA S R. The role of GNSS in the navigation strategies of cost-effective agricultural robots[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 112: 172–183.
- 12 伟利国. 农机导航多模变结构智能控制方法研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2015.
- 13 张京, 陈度, 王书茂, 等. 农机 INS/GNSS 组合导航系统航向信息融合方法[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊): 1–7. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2015S001&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.001.
- ZHANG Jing, CHEN Du, WANG Shumao, et al. Research of INS/GNSS heading information fusion method for agricultural machinery automatic navigation system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 1–7. (in Chinese)
- 14 王世进, 秘金钟, 李得海, 等. GPS/BDS 的 RTK 定位算法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(5): 621–625.
- WANG Shijin, MI Jinzhong, LI Dehai, et al. Research on RTK positioning algorithm of GPS/BDS[J]. Journal of Wuhan University(Information Science Edition), 2014, 39(5): 621–625. (in Chinese)
- 15 WANG Linlin, NI Yude, CHANG Yingxin, et al. Research on integrity of ground-based augmentation system under GPS/BDS constellations environment[J]. Computer Engineering, 2015, 41(12): 30–35.
- 16 吴寒, 许超铃, 刘邢巍. 基于 CORS 的现代测绘基准体系应用[J]. 全球定位系统, 2016, 41(3): 89–92, 96.
- WU Han, XU Chaoyu, LIU Xingwei. Application of modern surveying and mapping reference system based on CORS[J]. Global Positioning System, 2016, 41(3): 89–92, 96. (in Chinese)
- 17 袁鹏. 省级 CORS 组网技术研究与服务模式探讨[J]. 测绘通报, 2014(2): 16–19.
- 18 宋伟伟. 导航卫星实时精密钟差确定及实时精密单点定位理论方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2011.
- 19 BOCHTIS D, GRIEPENTROG H W, VOUGIOUKAS S, et al. Route planning for orchard operations[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 113: 51–60.
- 20 JACOB C, MANUEL P R, LUIS E, et al. Comparison of positional accuracy between RTK and RTX GNSS based on the autonomous agricultural vehicles under field conditions[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2014, 30(3): 361–366.
- 21 吴才聪, 胡冰冰, 韩碧云, 等. 区域农用 GNSS 基准站云端管理方法与系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 143–150. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180118&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.018.
- WU Caicong, HU Bingbing, HAN Biyun, et al. Research on cloud management method and system of regional agricultural GNSS reference station[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 143–150. (in Chinese)
- 22 陈振. BDS/GPS 网络伪距差分定位方法研究[D]. 北京: 中国测绘科学研究院, 2016.
- 23 刘文建. 北斗/GNSS 区域地基增强服务系统建立方法与实践[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- 24 刘兆朋, 张智刚, 罗锡文, 等. 雷沃 ZP9500 高地隙喷雾机的 GNSS 自动导航作业系统设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 15–21.
- LIU Zhaopeng, ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, et al. Design of automatic navigation operationsystem for Lovol ZP9500 high clearance boom sprayer based on GNSS[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1): 15–21. (in Chinese)
- 25 魏爽, 李世超, 张漫, 等. 基于 GNSS 的农机自动导航路径搜索及转向控制[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊1): 70–77.
- WEI Shuang, LI Shichao, ZHANG Man, et al. Automatic navigation path search and turning control of agricultural machinery based on GNSS[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp.1): 70–77. (in Chinese)
- 26 赵一蒙. 基于北斗导航的农机自动驾驶系统研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.