

区域农用 GNSS 基准站云端管理方法与系统研究

吴才聪 胡冰冰 韩碧云 赵明 杨卫中

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对区域农用卫星导航定位基准站规模化应用中存在无效冗余、频率干扰和基准不统一问题,提出基于云端管理构架实现区域基准站管理与信息共享的初步解决方案。选择石河子市作为研究区,获得3个企业总计84个固定基准站的备案数据,计算任意2个基准站的站间距 ΔD 和频率差 ΔF 形成数据集 E 。在此基础上,利用GIS空间分析和数值统计方法,分析基准站无效冗余和同频干扰,开展基准站坐标平差与精度验证,开发基准站管理服务系统原型。研究表明,由于缺乏技术和管理协调,区域农用GNSS基准站无效冗余、频率干扰和频率浪费难以避免,所统计的84个基准站占用了26.7 MHz频带,使用了47个频点,其中30个基准站使用单独频点,站间距40 km以内时多达18对基准站频率相同,29对基准站频率相近($\Delta F \leq 25$ kHz)。石河子东北18个基准站,平均冗余率达263.2%,中心区冗余率更高。固定基准站通过坐标平差可以提高站址精度,有利于发挥基准站冗余的有效性和提高差分信号接入的可靠性,3个验证点的经度坐标差最大为0.011 m,纬度坐标差最大为0.023 m,精度分别达到毫米级和厘米级。管理服务系统原型和手机端APP原型的初步测试表明,系统可以实现基准站备案、建站辅助、基准站查询和频率推荐等功能,可以提高基准站管理效率和减少干扰现象。

关键词: 全球卫星导航系统; 基准站; 自动驾驶系统; 频率干扰; 云端管理; 坐标平差

中图分类号: G633.67; P228.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)01-0143-08

Cloud Based Management Method and System for Regional Agricultural GNSS Reference Stations

WU Caicong HU Bingbing HAN Biyun ZHAO Ming YANG Weizhong

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

Abstract: Fixed and mobile global navigation satellite system (GNSS) reference stations are the main differential positioning resources for automated steering system in China at current stage. However, with the rapid increase in GNSS reference stations usage, there is an increasing trend of serious radio frequency interference, which mainly due to deficiency of technical and management coordination. To solve this problem, a cloud based architecture that achieved regional GNSS reference stations management and information sharing for agricultural applications was proposed. Shihezi, a district of Xinjiang, was selected as the study area. The accurate information (i.e., name, position, and frequency) of 84 fixed reference stations from three enterprises was collected, based on which the difference of distance (ΔD) and the difference of frequency (ΔF) between each two reference stations were calculated. By using ΔD and ΔF , redundancy and frequency interference were analyzed, coordinate adjustment of two stations were conducted, and the prototype system and an APP were developed for reference station management and agricultural applications. The results showed that the 84 reference stations occupied 26.7 MHz frequency band with 47 frequencies, and 30 of which were independent frequency. In addition, there were 18 couples of stations using the same frequencies and 29 pairs of stations using near frequencies ($\Delta F \leq 25$ kHz) within 40 km in northeast of Shihezi. The average redundancy was 263.2%, and the redundancy of central area was even worse. To benefit from the redundancy information, it was utilized to adjust the coordinate of the GNSS reference station in order to improve the reliability of differential signal access. Three stations were tested and the precision to millimeter level and centimeter level for longitude

收稿日期: 2017-09-25 修回日期: 2017-11-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0501805)

作者简介: 吴才聪(1975—),男,副教授,主要从事导航与位置服务技术研究,E-mail: wucc@cau.edu.cn

通信作者: 杨卫中(1963—),男,副教授,主要从事导航与位置服务技术研究,E-mail: ywz@cau.edu.cn

and latitude respectively, which meant the coordinate adjustment can improve the accuracy of GNSS reference stations. The prototype system and APP achieved the functions such as stations recording, interference detection, station construction assistance, and frequency recommendation, and it can improve the management efficiency of GNSS reference stations and reduce radio frequency interference.

Key words: global navigation satellite system; reference station; automated steering system; frequency interference; cloud management; coordinate adjustment

0 引言

农机自动驾驶导航是近年发展较为迅速的精准农业技术。该技术可以减少用工成本,延长作业时间,提高作业质量和土地利用率^[1-2]。农机自动驾驶导航要求高精度、高可靠和高并发的全球卫星导航系统(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^[3-6]。

厘米级农用 GNSS 差分增强主要有 4 种技术: ①基于单基准站的载波相位差分(Real time kinematic, RTK)技术^[7],通过电台或移动通信链路,向机载导航终端播发差分信号。②基于多基准站的网络 RTK 差分技术,通过移动通信链路提供虚拟差分服务,如测绘用连续运行参考站系统(Continuously operating reference stations, CORS)^[8-10],站间距可达 70 ~ 100 km,可靠性取决于通信链路,并发性取决于软件解算能力。③GNSS 广域差分技术^[11],通过地球同步卫星(Geostationary satellite, GEO)提供差分服务,如 OmniSTAR HP 与 G2,最高可达约 10 cm 定位精度。④精密单点定位(Precise point positioning, PPP)技术^[12-13],通过卫星或移动通信链路,提供差分增强服务,如 CenterPoint RTX 系统,可以达到 3.8 cm 的定位精度^[14-15],标准收敛时间 30 min,在部分区域可缩短至 1 ~ 5 min。普渡大学 2015 年度的精准农业服务调查表明^[16],美国 11.7% 的用户自建 RTK 基准站,购买 OminSTAR XP 或 HP、StarFire 2 信号服务的比例为 27.2%,购买网络 RTK 差分服务的比例为 25.7%。据作者调查,我国农机自动驾驶导航应用,基本采用固定式和移动式单基准站 RTK 差分方式。

差分增强信号的传播易受到地形、地物等环境的影响,会导致连接中断。单一差分增强信号,无法完全满足农业对高可靠性的要求。为此,国际上发展了主差分 and 副差分的备份模式。例如,当 RTK 或虚拟差分信号失锁时,Trimble xFill 断点续测技术可以在 20 min 内维持 RTK 固定解^[17]。xFill 将单基准站或 CORS 作为主差分信号源,将星基信号作为副差分信号源。主副差分信号瞬时切换,没有延时。

目前,由于缺乏中国境内的基准站数据,

OmniSTAR、StarFire、CenterPoint RTX 等商业系统无法在中国提供厘米级定位服务。大部分省市测绘用 CORS^[10-18],其可靠性和并发能力不足,不能满足规模化农机导航业务需求。作者参与规划了石河子农用 CORS^[5],包含 6 个基准站,虚拟差分精度为 $\pm 2.0\text{ cm}$,但由于农区移动通信质量较差,该系统还不能满足近 1600 台终端的并发访问。截至 2017 年 5 月,石河子已建成固定基准站近百个,移动基准站 10 余个,形成了 CORS、固定基准站和移动基准站共存的局面。上述基准站由多家企业建设,由于缺乏站址、频率和协议协调,导致基准站冗余率高、电台频率干扰严重等问题^[19-21]。在美国,其联邦通讯委员会(FCC)下属机构负责非政府用户无线电频率指配,可以较好地避免频率干扰^[20-22]。

由以上分析可知,我国缺乏必要的农用 GNSS 差分增强设施及规划,在区域农用基准站建设方面,缺乏必要的站址、频率和数据协议管理与协调。本文拟针对上述问题,从技术和管理 2 方面,提出云端管理构架,以石河子为研究区,分析基准站冗余和频率干扰,开展坐标平差,研发管理服务系统原型,以提高基准站管理效率和减少频率干扰。

1 材料与 方法

1.1 数据获取及预处理

石河子地处天山北麓中段,准噶尔盆地和古尔班通古特大沙漠南缘,东西长约 116 km,南北长约 213 km。国土面积 7 762 km²,耕地面积 1 973 km²。

参照《卫星导航定位基准站建设备案办法(试行)》(国测法发[2016]4 号),对石河子所建设的固定基准站进行备案。备案的主要内容包括:建设单位、运营单位、站点坐标、电台频率、主要用途、覆盖范围、数据传输方式、软硬件设备性能指标等内容。

图 1 为石河子部分农用 GNSS 基准站分布图,此次总计精确统计 84 个固定基准站,由 H、S、L 3 个企业建设,约占石河子固定基准站总数的 90%,具有较好的代表性。未及时备案的基准站由多家企业零星建设,主要在上述 3 家企业覆盖区域之外。

从备案数据中,抽取基准站名称 S_i 、站点经度 L_i 、站点纬度 I_i 和电台频率 F_i ,形成数据集 D 。

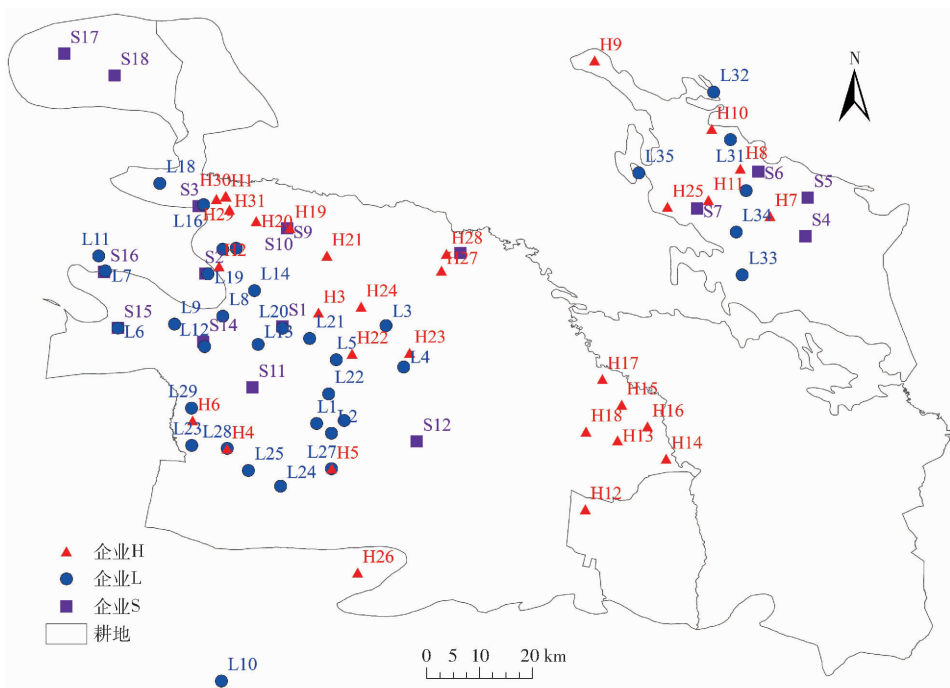


图 1 石河子农用 GNSS 基准站分布图

Fig. 1 Distribution map of agricultural GNSS reference stations in Shihezi

$$D = \begin{bmatrix} S_1 & L_1 & I_1 & F_1 \\ S_2 & L_2 & I_2 & F_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_m & L_m & I_m & F_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 m ——站点数量

计算任意 2 个基准站的站间距 ΔD (m) 和频率差 ΔF (MHz), 形成数据集 E 。

$$E = \begin{bmatrix} 1 & \Delta D_{1,2} & \Delta F_{1,2} \\ 2 & \Delta D_{1,3} & \Delta F_{1,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ n & \Delta D_{n-1,n} & \Delta F_{n-1,n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 n ——任意 2 个基站组成的对数
维度 m 与维度 n 之间的关系为

$$n = \frac{m(m-1)}{2} \quad (3)$$

基准站 $S_i(\alpha_i, \beta_i)$ 和基准站 $S_j(\alpha_j, \beta_j)$ 的站间距和频率差的计算式为

$$\Delta D_{i,j} = R \arccos(\cos \beta_i \cos \beta_j \cos(\alpha_i - \alpha_j) + \sin \beta_i \sin \beta_j) \quad (4)$$

$$\Delta F_{i,j} = |F_i - F_j| \quad (5)$$

式中 R ——地球半径 F_i ——第 i 个基准站频率
 α ——基准站经度
 F_j ——第 j 个基准站频率
 β ——基准站纬度

$\Delta D_{i,j}$ ——第 i 个和第 j 个基准站间的距离
1.2 基准站冗余分析
由于农田边界不规则、基准站分布不均匀、无线

电台传播距离存在不确定性等, 使得准确计算基准站冗余率存在较大难度。为此, 本文采取如下方法估算基准站冗余率。

首先, 选择某区域的 k 个基准站, 假定电台传播半径均为 r (km), 在 ArcGIS 软件中, 提取以上基准站信号覆盖的包络面积 A_r (km²)。其次, 计算 k 个基准站按照理想蜂窝状 (正六边形) 布设所覆盖的面积 A_c (km²)。进而, 计算 A_c 和 A_r 的比值 λ (%), 作为基准站平均冗余率, 计算公式为

$$\lambda = \frac{A_c}{A_r} \times 100\% \quad (6)$$

其中 $A_c = \frac{3\sqrt{3}}{2} k r^2 \quad (7)$

1.3 同近频干扰统计

频率干扰与站间距直接相关。为此, 基于数据集 E , 利用 SPSS“对个案内的值计数”功能, 进行同近频统计。同频统计时 $\Delta F = 0$, 近频统计时 $\Delta F > 0$ 且小于设定的频率差阈值。 ΔD 设为搜索半径, 按不同站间距统计频率相同或相近的基准站对数。

1.4 基准站平差与验证

2017 年 4 月 7 日 20:00 至 4 月 8 日 10:00, 记录 H13 和 H14 原始观测数据 (基准站接收机为华测 N71), 进而利用华测 CGO 平差软件, 与石河子农用 CORS 进行平差处理。

在 H13 覆盖区域内, 选择 3 个验证点, 利用中绘 i70 智能 RTK 测量系统, 基于 H13 和石河子 CORS 进行对比测量, 每个点测量 3 次取其均值, 对

坐标进行求差,对 H13 的平差质量进行初步检验。

由于 3 个验证点均在 H14 覆盖范围之外,故未对 H14 的精度进行检验。

1.5 系统设计与开发

农用 GNSS 管理服务系统的主要角色包括建设者、使用者和管理者。固定基准站往往由导航企业建设,建设地点一般为楼顶,作业期持续工作,为多台农机提供差分服务,电台功率较大,服务半径较大。临时基准站大都由农机手架设,由机组随机携带,放置在田间地头,往往为单个机组或少数临近农机提供差分服务,其位置和频率变动频繁,作业时临时架设,作业后随即收存,电台功率较小,服务半径较小。临时基准站的建设者同时是临时基准站的使用者,这类用户的行为具有较大的随机性,是主要干扰源。管理员负责审核、管理基准站和用户信息。

图 2a 为管理服务系统的基本构架,主要包括云管理服务系统、移动端及 APP、基准站 3 个组成部分。基准站又包括固定基准站和移动基准站两类。图 2b 为农用基准站建设、管理和应用的基本流程,是基准站管理服务系统原型设计的基本依据。当基准站建设者或使用者开始工作时,首先基于云平台或 APP 进行站址或作业田块周边已有基准站的查询,如果有可用基准站覆盖作业区,则直接利用,如无可用基准站,或有基准站但不可靠,则可自建基准站,从 APP 获得规划或推荐的频率,并通过 APP 进行基准站备案。

云管理服务系统为 B/S 构架,主框架采用 Spring MVC、持久层采用 MyBatis、数据库采用 MySQL。APP 利用 Spring mvc 接口,基于 Android 系统和百度地图进行二次开发。

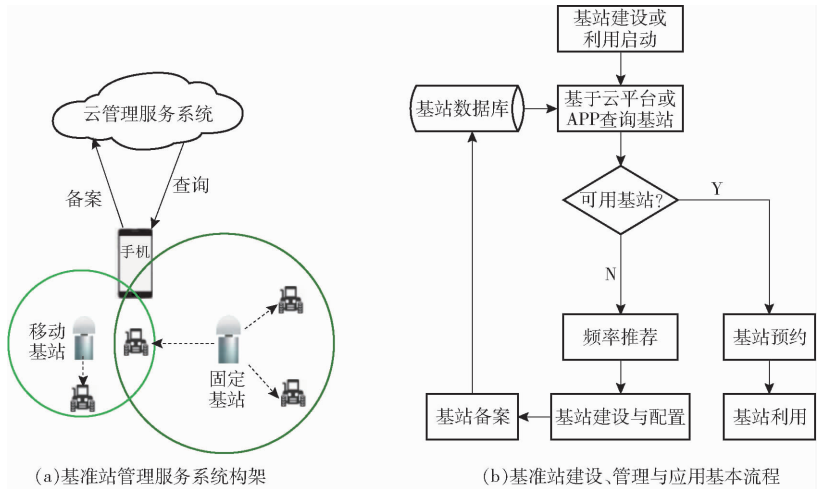


图 2 基于云端协同的农用基准站管理服务系统原型

Fig. 2 Cloud based architecture for management and service prototype system of agricultural reference station

2 结果与讨论

2.1 总体情况

如图 3 所示,总计统计了石河子 84 个基准站,所用电台频率极小值、极大值和均值分别为 440.340 0、467.075、458.624 9 MHz,占用了 26.7 MHz 频带,利用率最高的频带是 455~465 MHz。总计使用了 47 个频率,30 个基准站使用单独的频率,54 个基准站复用频率。在复用的频点中,461.050 0 MHz 为 H5 等 6 个基准站所共用,为复用次数最多的频点。

由图 3 可见,石河子基准站占用了较宽的民用频段,频点复用率较低,存在较大的无线电频率资源浪费。调查表明,实际使用过程中,由于占用频段过宽,不仅农用基准站之间存在相互干扰,农用基准站与水利勘测等不同行业之间,也存在干扰现象。

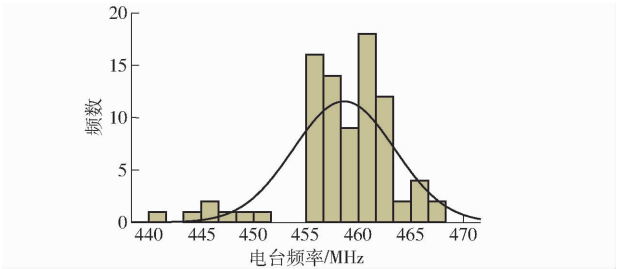


图 3 电台频率分布

Fig. 3 Distribution of radio frequency

2.2 基准站冗余

选取图 1 右上 16 个基准站和 2 个企业 N 的基准站开展冗余分析。这些基准站服务于石河子第 148、149 和 150 团场,来自 4 家企业,企业 H、S、L 和 N 的基准站数量分别为 5、5、6、2 个。企业 N 未进行备案,故数据集并不包含该企业的数据。 r 取 10 km,可获得图 4 所示的基准站信号覆盖包络图。

一般而言,35 W 电台有效传播距离约为 10 km。

图 4 中,差分信号包络面积 $A_r(10) = 1\,744\text{ km}^2$ 。进一步,计算 18 个基准站按照理想蜂窝状布设的覆盖面积分别为 $A_c(10) = 4\,590\text{ km}^2$ 。由此获得基准站冗余率 $\lambda(10) = 263.2\%$ 。 $\lambda(10)$ 的数值表明区域平均冗余较为显著。

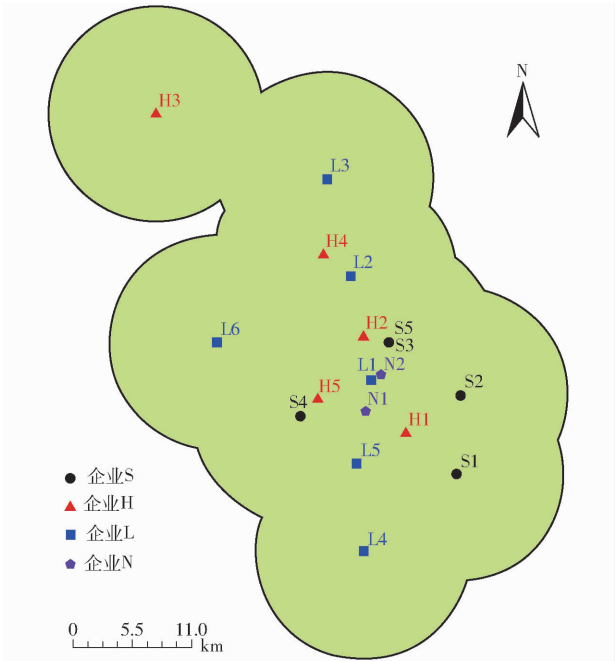


图 4 区域基准站信号覆盖包络图

Fig. 4 Envelope diagram of regional reference stations

考虑到图 4 中基准站分布不均匀,该区域的冗余程度是不一致的,即边缘区域冗余度低或无冗余,中心区域冗余度高。显然,多家企业缺乏协调和地方政府缺乏规划,导致了上述问题。

如图 5a 所示,蜂窝状架设基准站可以最大限度地提高基准站覆盖面积,减少基准站冗余。但在实际应用中,由于地形及地物的影响及各自独立建站,导致基准站覆盖重叠,由此产生的冗余,需要一分为二地分析。一方面,必要的冗余可以提高基准站服务的可靠性,即流动站可以有更多的信号源可供选择。另一方面,同一个区域有超过 2 个基准站覆盖,则可视为无效冗余,如图 5b 中的 IV 区块,为 3 个基准站共同覆盖区域。

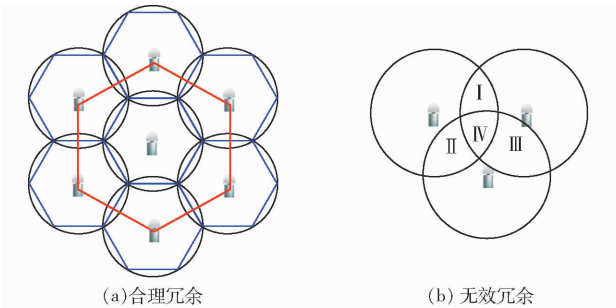


图 5 基准站分布与冗余

Fig. 5 Distribution and redundancy of reference stations

2.3 频率干扰

小区中如有多路中心频率相同或相近的无线电覆盖,则会产生频率干扰问题^[20]。由于特高频(Ultra high frequency, UHF)无线电波的传播具有一定的不确定性,故设定多个搜索半径 ΔD ,基于数据集 E ,进行同近频统计分析。

针对同频分析,设定 $\Delta F = 0$, ΔD 分别取 10、20、30、40 km 及不限距离,同频的基准站对数如图 6 所示。从图 6 中可以看出,随着站间距的增加,同频的基准站数量快速增加。站间距 40 km 以内,有 18 对基准站频率完全相同。例如, H15 和 H16 隶属同一家企业,站间距为 5.41 km,均使用 461.05 MHz 频率。同样, H21 和 H27 的站间距为 15.64 km,均使用 457.05 MHz 频率。而 S12 和 L24 分属于两家企业,站间距为 30.39 km,均使用 459.012 5 MHz 频率。显然,站间距越小,同频干扰的影响越显著。

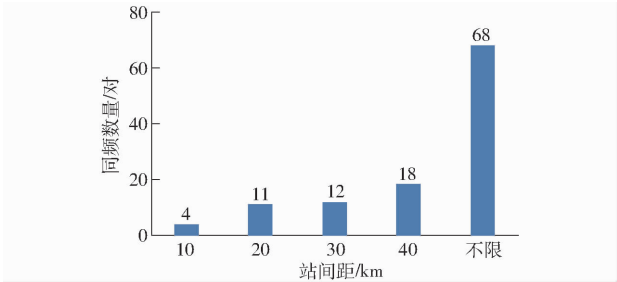


图 6 站间距与同频关系

Fig. 6 Relationship between distance and same frequency

在短距离内,如 30 km 范围内,大部分干扰来自同一企业。究其原因,在于石河子采用统一采购制度,往往集中采购同一企业的自动驾驶系统。经与企业 H、L、S 等核实,这种企业内部干扰现象确实存在。站间距 30 km 以上时,则来自不同企业的频率干扰现象逐渐增加。而应引起高度重视的是 2 个企业覆盖区域的结合部,这是同近频干扰的高发地段。

针对近频分析,设定 ΔF 取 25 kHz, ΔD 分别取 10、20、30、40 km 及不限距离,近频的基准站对数如图 7 所示。可以看出, L27 和 H5 分属 2 个企业,对

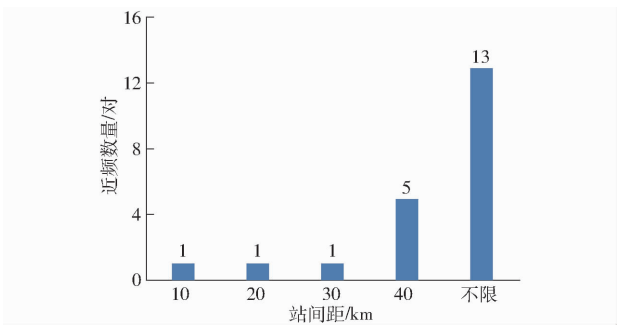


图 7 站间距与近频数量关系

Fig. 7 Relationship between distance and near frequency

应频率分别为 461.075 MHz 和 461.050 MHz,频率差为 25 kHz,站间距为 9.25 km。频率相近,电台功率稍大的情况下,易产生干扰^[20]。

进一步设定 ΔF 取 50 kHz,经检索发现,区域中有 87 对基准站符合条件,站间距 40 km 内有 29 对基准站符合条件。由此可见,近频现象是普遍存在的,这埋下了频率干扰的隐患。

区域内农用基准站频率干扰产生的原因主要有 2 种。一是固定基准站因缺乏协调引起的频率干扰,这种干扰,通过区域统筹规划(频分多址和空分多址)、基准站备案和信息分享,可以得到有效解决。二是临时建站引起的频率干扰,即移动基准站干扰。例如,移动或外来作业机组,未经扫频与协调,临时架设基准站,导致其电台与小区内电台发生频率干扰。这种情况具有很大的随机性,难以排除。针对这种情况,有关管理部门应统筹规划农用无线电频段,区分固定基准站和移动基准站的频谱范围,通过频分多址等实现频率的优化配置,避免移动基准站对固定基准站的无序干扰,然后通过信息分享避免移动基准站之间的频率干扰。

2.4 坐标平差

固定基准站往往通过自动获取的方式确定其坐标,误差达数米;或通过 CORS 确定其坐标,精度为

厘米级;对其进行坐标平差,精度为毫米级。区域内基准站坐标不统一,将导致无法实现区域多基准站联合作业,不能发挥基准站冗余的效益。在实践中,基准站坐标不统一常导致作业混乱。例如,在一条长导航线(如 $A-B$ 线)作业过程中,流动站可能会接入不同的基准站(频率相同),导致拖拉机改变导航线。

基准站 H13 和 H14 平差结果见表 1。从表中可见,平差前 H13 和 H14 分别存在 0.80 m 和 1.37 m 的中误差。这 2 个中误差均超过了石河子棉花行距(0.7 m),而且 2 个基准站误差的大小与方向不一致。假设自动驾驶导航系统的差分信号源在这 2 个基准站之间切换,显然会导致作业陷入混乱。

基准站坐标平差后导航精度及一致性检验结果见表 2。在经度方向,3 个点的坐标差值最大为 0.011 m,在纬度方向,3 个点的坐标差值最大为 0.023 m,分别达到毫米级和厘米级,达到了农机自动驾驶导航对基准站的应用要求。

尽管同频干扰会影响作业的连续性,但在同频干扰难以完全排除的情况下,流动站会自动接入信号较强的基准站。因此,对基准站进行坐标平差,统一区域基准站时空基准,作为一种对同频干扰进行弥补的有效方法。

表 1 基准站坐标平差结果

Tab.1 Results of coordination adjustment of reference stations

站名	平差前坐标			平差后坐标		
	经度/(°)	纬度/(°)	高程/m	经度/(°)	纬度/(°)	高程/m
H13	85.987 645	44.512 223	318.980	85.987 648	44.512 227	318.981
H14	86.070 239	44.480 670	322.345	86.070 239	44.480 670	322.345

表 2 坐标平差精度和一致性检验结果

Tab.2 Verification result of accuracy and consistency of reference stations after coordination adjustment

m

基准站	点 1			点 2			点 3		
	经度	纬度	高程	经度	纬度	高程	经度	纬度	高程
H13	5 416 076.863	-1 957 451.611	314.350	5 415 871.250	-1 957 766.398	314.804	5 416 135.145	-1 958 103.969	313.841
CORS	5 416 076.874	-1 957 451.588	314.383	5 415 871.252	-1 957 766.390	314.851	5 416 135.142	-1 958 103.950	313.875
坐标差	-0.011	-0.023	-0.033	-0.002	-0.008	-0.047	0.003	-0.019	-0.034

2.5 系统原型

通过以上基准站冗余和频率干扰分析,可见基准站备案、信息分享和建站辅助的重要性和必要性。基于此设计的农用 GNSS 基准站管理服务系统原型主要包括 B/S 系统和移动端 APP(图 8)。B/S 系统包括后台和前台,后台服务于平台管理者和基准站建设单位。前台除提供 1.5 节所述功能,还可根据临时基准站设定的生命周期,自动删除临时基准站。对于未设定生命周期的临时基准站,则通过阈值进

行管理,如由系统于每日的零点进行自动删除。

APP 的核心功能是通过获取周边基准站占用的频点,向用户推荐可用的频点列表,由用户自行选择。

基准站的管理与使用具有社会性,基于移动通信在线分享基准站的位置和参数,有助于提高基准站管理的效率和准确性。论文仅开发了系统原型和进行了有限的功能测试,其实用性还有待进一步完善。



图 8 农用导航基准站管理服务系统原型

Fig. 8 Prototype of management and service system for agricultural GNSS reference stations

3 结论

- (1) 由于缺乏技术和管理协调,区域农用 GNSS 基准站无效冗余、频率干扰和频率浪费难以避免。以石河子为例,所统计的 84 个基准站使用了 47 个频点,站间距 40 km 以内,有多达 18 对基准站频率相同,有 29 对基准站频率相近(频率差小于 25 kHz)。石河子东北 18 个基准站,平均冗余率达 263.2%,中心区冗余率更高。
- (2) 固定基准站通过坐标平差可以提高站址精

度,有助于发挥基准站冗余的有效性和提高差分信号接入的可靠性。H13 基准站平差精度验证表明,经度方向,3 个验证点的坐标差最大为 0.011 m,在纬度方向,3 个验证点的坐标差最大为 0.023 m,分别达到毫米级和厘米级,可以满足自动驾驶导航的要求。

(3) 开发了农用 GNSS 基准站管理服务系统,包括 B/S 系统和手机端 APP。初步测试表明,系统可以实现基准站备案、建站辅助和基准站查询,能够自动删除临时基准站和向移动用户推荐可用频点。系统有助于实现基准站的精准管理与共享。

参 考 文 献

1 胡静涛,高雷,白晓平,等. 农业机械自动驾驶技术研究进展[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)

2 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)

3 ROVIRA-MÁS F, CHATTERJEE I, SÁIZ-RUBIO V. The role of GNSS in the navigation strategies of cost-effective agricultural robots[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 112: 172-183.

4 ZHANG C, NOGUCHI N, YANG L. Leader-follower system using two robot tractors to improve work efficiency[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 121: 269-281.

5 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.

6 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)

7 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. Real-time kinematic positioning algorithm of GPS/BDS[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(5): 621-625. (in Chinese)

8 WANG L, NI Y, CHANG Y, et al. Research on integrity of ground-based augmentation system under GPS/BDS constellations environment[J]. Computer Engineering, 2015, 41(12): 30-35.

9 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 Chaoqian, LIU Xingwei. Applications of fiducial system for modern surveying and mapping based on CORS[J].

- GNSS World of China, 2016, 41(3): 89 – 92, 96. (in Chinese)
- 10 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.
YUAN Peng. Research and service model of provincial CORS interconnection technology[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(2): 16 – 19. (in Chinese)
- 11 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.
- 12 张宝成, DENNIS O. 一种能实现单频 PPP – RTK 的 GNSS 局域参考网数据处理算法[J]. 地球物理学报, 2015, 58(7): 2306 – 2319.
ZHANG Baocheng, DENNIS O. A method for processing GNSS data from regional reference networks to enable single-frequency PPP – RTK[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(7): 2306 – 2319. (in Chinese)
- 13 张小红, 郭斐, 李盼, 等. GNSS 精密单点定位中的实时质量控制[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2012, 37(8): 940 – 944, 1013.
ZHANG Xiaohong, GUO Fei, LI Pan, et al. Real-time quality control procedure for GNSS precise point positioning[J]. Geomatics and Information Sciency of Wuhan University, 2012, 37(8): 940 – 944, 1013. (in Chinese)
- 14 CARBALLIDO J, PEREZ-RUIZ M, EMMI L, 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.
- 15 徐以厅, 宋济宇. Trimble RTX 技术综述[J]. 测绘通报, 2014(2): 137 – 138.
- 16 ERICKSON B, WIDMAR D A. 2015 Precision agricultural services dealership survey results[R]. West Lafayette, IN: Purdue University, 2015.
- 17 SIEJKA Z. Verification of the usefulness of the trimble Rtx extended satellite technology with the Xfill function in the local network implementing Rtk measurements[J]. Artificial Satellites, 2014, 49(4): 191 – 209.
- 18 过静珺, 王丽, 张鹏. 国内外连续运行基准站网新进展和应用展望[J]. 全球定位系统, 2008, 33(1): 1 – 10.
GUO Jingjun, WANG Li, ZHANG Peng. The application and expectation of CORS in international and China[J]. GNSS World of China, 2008, 33(1): 1 – 10. (in Chinese)
- 19 ABEDI M R, MOKARI N, JAVAN M R, et al. Secure communication in OFDMA-based cognitive radio networks: an incentivized secondary network coexistence approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(2): 1171 – 1185.
- 20 BEAK M S, JU S L, LI M H, et al. Channel allocation and interference analysis for DAB system in frequency band III environment with legacy T-DMB[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2016, 62(4): 962 – 970.
- 21 IJAZ A, HASSAN S A, ZAIDI S A R, et al. Coverage and rate analysis for downlink HetNets using modified reverse frequency allocation scheme[J]. IEEE Access, 2017, 5: 2489 – 2502.
- 22 许云林, 张洪顺, 孙梦婕. 美国无线电管理法规范体系建设研究[J]. 中国无线电, 2014(3): 10 – 14.