

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.022

森林资源连续清查固定样地标记装置设计与试验

胡杨¹ 孙忠秋² 吴发云² 王伟² 彭道黎¹

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 国家林业局调查规划设计院, 北京 100714)

摘要: 以遥控报警原理、GNSS定位原理为基础, 设计了实现森林资源连续清查固定样地标记装置, 该装置由主程序模块、定位解算模块、遥控报警模块、数据传输模块、样地信息存储更新模块等组成。通过在 Cortex-M3 上移植 FreeRTOS 操作系统, 并利用 C 语言进行汇编实现样地标记信息的读取与写入、遥控报警、标记定位等功能。针对定位信息数据传输, 在微信平台通过调用百度地图的 API 开发实现普通手机用户到样地桩的路线规划。通过试验验证, 利用此固定样地标记装置, 可将固定样地的复核效率较传统样桩提高 324% 左右, 并且通过此装置可以直接读取固定样地历史信息及写入实时监测数据, 解决了传统固定样地标记桩无法进行样地信息记录及无法快速找到、遥控监测等问题。

关键词: 森林资源连续清查; 固定样地; 标记桩; 遥控报警; 定位导航技术

中图分类号: S757.2; TP23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)06-0191-07

Development and Experiment of Permanent Plot Marking Device for Continuous Forest Inventory

HU Yang¹ SUN Zhongqiu² WU Fayun² WANG Wei² PENG Daoli¹

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Academy of Forestry Inventory and Planning, State Forestry Administration, Beijing 100714, China)

Abstract: In order to solve the problem of finding the fixed plot difficulty for continuous forest inventory, improve the efficiency and reduce the cost, a permanent sample plot marking device was designed based on the principle of remote control alarm and GNSS positioning. The marking device was composed of main program module, positioning decoding module, remote control alarm module, the data transmission module, the sample update information storage module, etc. FreeRTOS operating system was transplanted on Cortex-M3, and C++ was used to carry out most of the functions such as remote control, low frequency positioning etc. For the location of information data transmission, a sample API was developed on the WeChat platform by calling a Baidu map to realize the route planning for general mobile phone users. When the investigators load the APP for searching the plot in a certain area of the marker, the remote alarm would automatically start ringing. Then the location would be sent to the handset, which would help them to find the marker more quickly. Verified by experiments, the efficiency of the marking device was about 324% higher than that of the traditional sample plot. Meanwhile, the device can directly read and write the historical information and real-time monitoring data. It was showed that the equipment can solve problems such as marking device finding difficulties and no history inventory information. Therefore, it can be used and promoted in the permanent plot for continuous forest inventory in the future.

Key words: continuous forest inventory; permanent sample plot; marking device; telecontrol alarm; positioning and navigation technology

收稿日期: 2017-12-21 修回日期: 2018-01-25

基金项目: 国家林业局 948 项目(2015-4-32)、植被与环境变化国家重点实验室开放项目(LVEC-2017kf02)和国家自然科学基金青年基金项目(31400426)

作者简介: 胡杨(1989-),男,博士生,主要从事林业遥感与信息技术研究,E-mail: huyang@bjfu.edu.cn

通信作者: 彭道黎(1963-),男,教授,主要从事森林资源监测与评价和森林经营管理研究,E-mail: dlpeng@bjfu.edu.cn

0 引言

国家森林资源连续清查是以掌握宏观森林资源现状与动态为目的,以全省为单位,利用固定样地为主进行定期复查的森林资源调查方法,每5年进行一次^[1-2]。固定样地的复查是国家森林资源连续清查的前提条件,也是我国乃至全球森林调查、蓄积量和生物量估测的基础^[3-8]。

随着我国生态文明建设进程不断推进,森林资源监测对数据成果的要求发生了巨大的变化,实现年度出数的需求越来越高^[9-12]。另外,森林资源调查数据不再被看作为一个单纯的资源性量值,而被列为政府业绩考核和生态文明建设评价的重要指标^[13]。由于国家对森林资源监测数据要求的质量越来越高,精准监测复查成为森林资源监测的必然,因此,固定样地标记桩的设计变得越来越重要,并成为林业上一个重要的研究课题。

传统寻找固定样地主要依托手持GPS(Global positioning system),通过前期记录的固定样地坐标利用手持GPS进行导航到大致位置,之后利用前期记录的定位物如房屋墙角、大径阶树木等明显标志对固定样地标记桩进行寻找^[12-13]。实践证明,森林资源连续清查布设的固定样地因处于森林中而导致大部分固定样地手持GPS定位弱,定位偏差大^[14],即使是有经验的林业调查人员也很难快速准确地找到固定样地标记桩的位置,导致样地复查效率低下,有些位于深山老林的固定样地在找到时,当天已经无法再进行样地调查,只能做好标记隔日再来调查,浪费了大量的人力财力。此外,传统的固定样地标记桩只是一个水泥桩,没有记录样地调查信息的功能,且水泥桩特别笨重,用于深山老林里做样地标记时还需要雇佣工人进行搬运,无法满足我国对智慧林业的建设需求^[15]。

为了提高森林资源连续清查固定样地复查的准确性与高效性,本文设计一种便于森林调查人员发现的固定样地标记装置,适用于森林资源清查固定样地标记,通过3种不同的设计方案,可以满足:野外作业人员利用手持终端(平板电脑或手机等智能设备)快速准确找到固定样地标记装置的地理位置;到达固定样地标记装置的地理位置附近的野外作业人员可以通过发射无线电波找到埋在草丛中或埋入地下的固定样地标记装置;固定样地标记装置能够保存与采样相关的信息,从而实现固定样地标记装置的历史数据记录。

1 装置构成

1.1 硬件结构

传统的固定样地标记桩如图1a所示,本文设计的固定样地标记装置如图1b所示,主要由固定在土体中的桩体、放置在桩体中的设备箱、安装在设备箱的样地标记信号发射器等部分组成。其中设备箱上设有门和门锁,便于对样地标记信号发射器的维修或维护。标记信号发生器是固定样地标记装置的核心部分,其将CPU(Central processing unit)、语音报警芯片、GNSS(Global navigation satellite system)芯片、GPRS(General packet radio service)芯片、WiFi(Wireless fidelity)芯片、电源等高度集成在一个硬件板上并设计铝合金外壳,如图2所示。

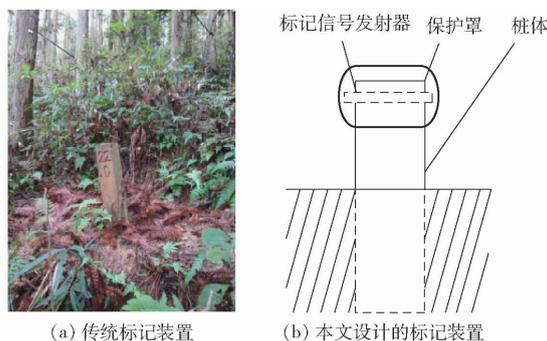


图1 固定样地标记桩

Fig. 1 Permanent plot marking device

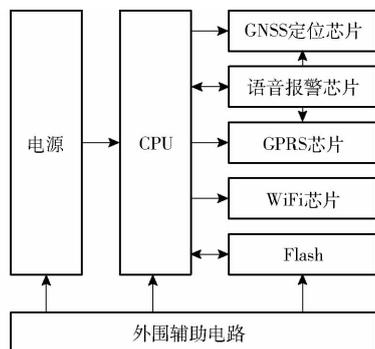


图2 标记信号发生器的硬件架构

Fig. 2 Framework of hardware

标记信号发生器的CPU选用高可靠性低成本的意法半导体STM32 ARM Cortex-M3处理器,16位处理器内核,寻址空间8GB,通过外围相应电路设计实现整个系统的功能控制与低功耗控制;GNSS芯片选用武汉梦芯科技自主研发的MXT2702芯片组,实现GPS/BEIDOU/GALILEO/GLONASS的多模导航系统联合定位解算功能;无线传输芯片使用中移物联的C216芯片组,实现GPRS通信数据的传输;报警芯片选用WT588D语音芯片,是集单片机和语音电路于一体的可编辑语音芯片,功能多、音质好、应用范围广、性能稳定;采用SPI Flash接口,便于数据共享与交换,其硬件电路原理图如图3所示。

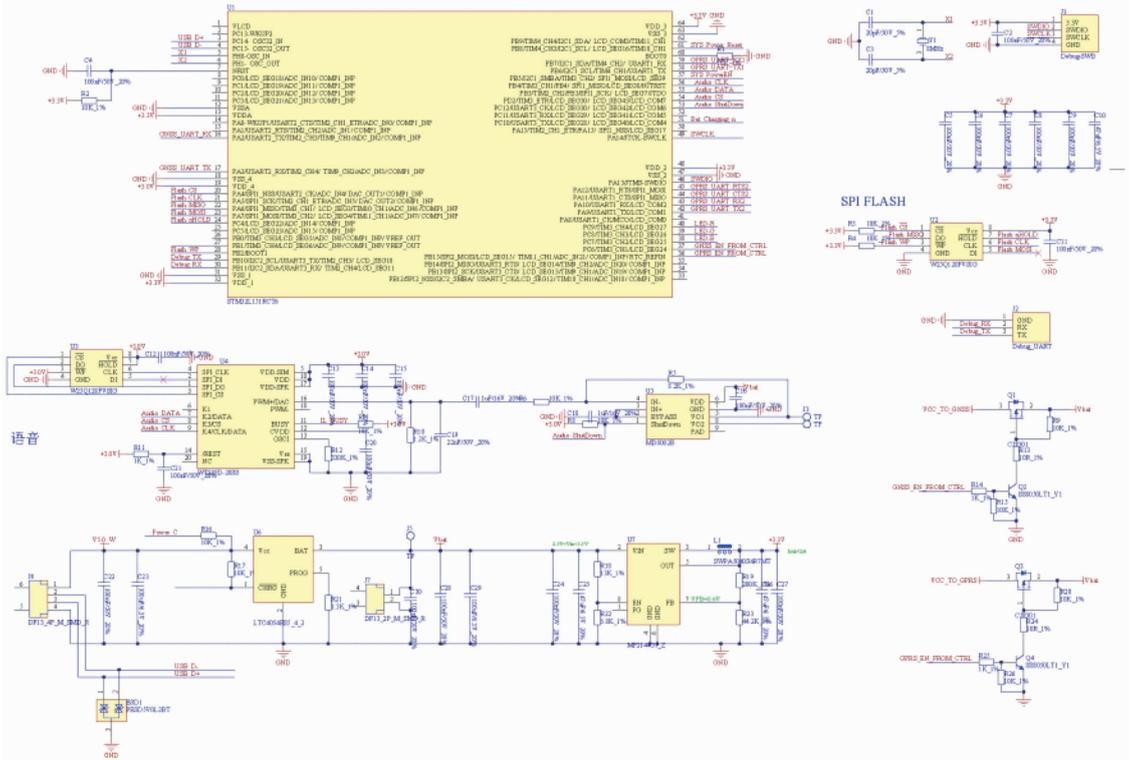


图 3 硬件电路原理图

Fig. 3 Principle schematic of hardware circuit

1.2 软件设计

标记信号发生器的软件部分采用 FreeRTOS (Free SYS/BIOS real-time kernel) 操作系统,它是一个小型的实时操作系统内核。作为一个轻量级的操作系统,功能包括:任务管理、时间管理、信号量、消息队列、内存管理、记录功能、软件定时器等,可满足本系统的需要。在 FreeRTOS 平台上,使用 C 语言编程,保证处理任务的实时高效。软件功能采用模块化编程的方式,主要包括主程序模块、定位解算模块、遥控报警模块、数据传输模块、样地信息存储更新模块等,其中主程序模块负责各个功能模块间的信号调度与电源低功耗的处理逻辑,定位解算模块负责定位的实时结算,遥控报警模块在扫描到信号后触发语音系统发出鸣响,样地信息存储模块记录历次的样地调查数据及采集人员等信息。具体的软件功能流程如图 4 所示。

1.3 功能参数

标记信号发生器功能包括定位解算功能、遥控报警功能、数据传输功能、样地信息存储功能。定位解算功能,支持最大 64 通道同时工作,支持 GPS、GLONASS、GALILEO、北斗、QZSS、SBAS 多系统,支持 GPS 与北斗双系统联合定位,冷启动情况下,定位仅需 38 s,定位精度低于 1 m;遥控报警功能最多可加载 500 段用于编辑的语音,用于提示信息,该功能下,静态休眠电流小于 10 μ A;数据传输最高速率

为上行/下行 85.6 KB/s,内嵌 TCP/IP 协议;样地信息存储功能支持最大 8 GB 的数据存储,采用 USB 接口进行数据传输。操作系统为 FreeRTOS,CPU 为嵌入式 Cortex - M3 架构,内存 2 GB RAM。工作环境温度为 -30 ~ 60 $^{\circ}$ C,报警范围大于 300 m。在 2 节 1 号电池供电的情况下,工作时长大于 1 a。

2 原理与功能

2.1 基本原理

标记信号发生器的工作原理图如图 5 所示,包括供电单元、低功耗增强单元、接收及处理单元以及定位标记单元 4 部分。为减小整个装置的体积及考虑野外工作的需求,供电单元在实际使用中需要采用轻巧型电池,并在外部增加保护装置;接收与处理单元长期供电,并按照一定频率扫描覆盖范围,当接收到搜索信号时,立即启动远程报警功能,通过鸣响声指引调查人员找到样地桩。同时,调用定位及标记单元将固定样地的位置主动上报;定位标记单元通过 GNSS 定位记录样地桩位置,并上传信息至手持终端。

标记信号发生器采用的是主动搜索、主动定位、主动上报的工作模式,在满负荷工作状态下,耗能较高,为降低系统的整体功耗,延长设备的使用寿命,本设计中增加低功耗增强单元,提升系统性能。优化原理主要包括:

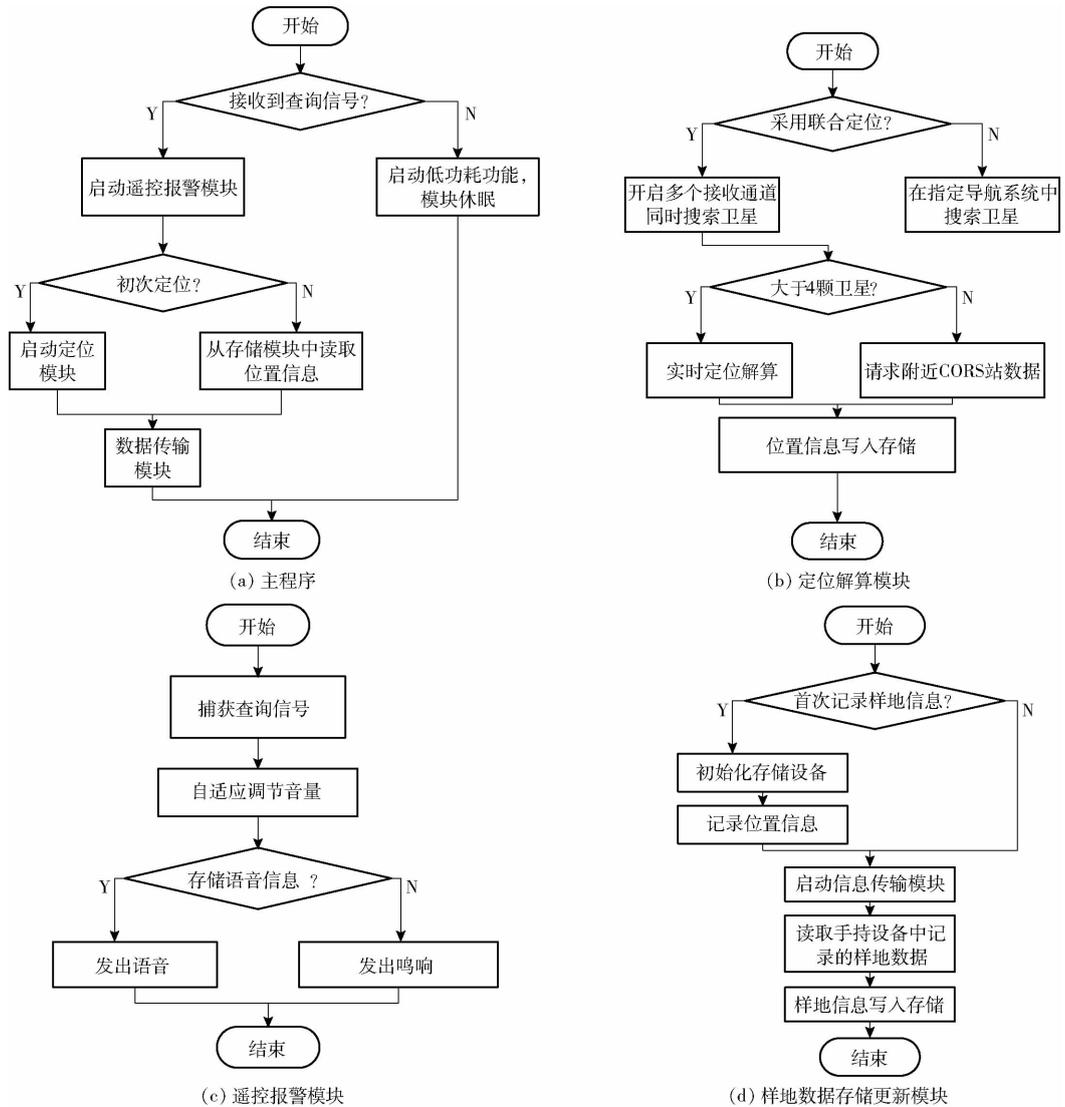


图4 主程序和3个功能模块流程图

Fig.4 Flow charts of main program and three function modules

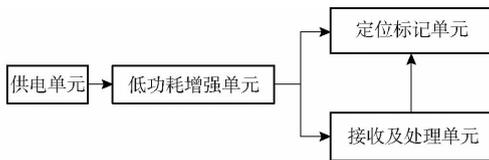


图5 标记信号发生器原理图

Fig.5 Schematic diagram of marking signal generator

(1) 由于固定样地在短时间内被连续监测的频率较低,将接收与处理单元的搜索频率降低,如降至每1 h 搜索10 min,其他时间处于休眠状态。

(2) 定位与标记单元仅在捕获到信号时才启动,通过中央处理器控制信号的传输和低功耗电源的分配,使其优化至短时工作或长期休眠的状态,实现低频的定位监测。

(3) 桩体不移动时,定位信息记录在存储单元中,在收到搜索信号后直接通过无线信号发射模块传输,而不必启动GNSS定位设备,进一步节省了耗电量。

2.2 主要功能

2.2.1 远程报警指引

由于固定样地标记装置安装在野外,并且间隔一年或数年才使用一次,导致固定样地标记装置被杂草埋没,而不易被发现。本文利用安装在设备箱中的样地标记信号发射器发射的近距离无线信号,使整体埋入或部分埋入到土体的固定样地标记装置都可以轻易地被发现。

无线信号在自由空间中传输,其中传输的损耗为^[16]

$$L_{oss} = 32.44 + 20\lg d + 20\lg f \quad (1)$$

式中 L_{oss} ——传输损耗, dB

d ——传输距离, km

f ——频率, MHz

由式(1)可见,自由空间中电波传播损耗(亦称衰减)只与工作频率 f 和传播距离 d 有关,当 f 或 d 增大一倍时, L_{oss} 增加6 dB。因此,当固定样地标记

装置的标记信号发生器发出信号后,其传输数据的最大距离受环境影响非常大。一般的遥控报警装置的作用范围不超过 100 m,为增加固定样地标记装置的找寻范围,本文采用传统遥控报警结合 GSM 声控报警的方式实现超过百米范围的远程报警指引,其工作原理是:首先通过无线通信的方式查找固定样地桩,一旦找到立即开启远程报警;其次根据历史信息,寻找至样地附近时,开启手持终端的编码器,其可以与固定样地标记装置的解码器配对,匹配成功即发出鸣响,由于声波的传输距离远,因此可以快速找到样地桩。

2.2.2 低频定位监测

低频定位监测主要包括 3 部分:GNSS 定位解算、NMEA 帧解码、位置信息发送与导航,工作原理如图 6 所示。

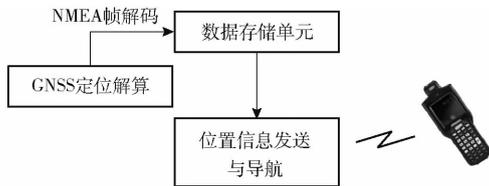


图 6 低频定位监测原理图

Fig. 6 Principle diagram of low frequency positioning monitoring

2.2.2.1 GNSS 定位解算原理

卫星导航定位原理是四点定位原理,即设时刻 t_i 时同时测得 P 点至 4 颗 GNSS 卫星 S_1, S_2, S_3, S_4 的距离 $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$,解出 4 颗卫星的三维坐标 (X_j, Y_j, Z_j) , $(j = 1, 2, 3, 4)$,用距离交会的方法求解 P 点的三维坐标 (X, Y, Z) 的观测方程为

$$\begin{cases} \rho_1^2 = (X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2 + (Z - Z_1)^2 + c\delta_i \\ \rho_2^2 = (X - X_2)^2 + (Y - Y_2)^2 + (Z - Z_2)^2 + c\delta_i \\ \rho_3^2 = (X - X_3)^2 + (Y - Y_3)^2 + (Z - Z_3)^2 + c\delta_i \\ \rho_4^2 = (X - X_4)^2 + (Y - Y_4)^2 + (Z - Z_4)^2 + c\delta_i \end{cases} \quad (2)$$

式中 c ——光速 δ_i ——接收机钟差

当捕获的卫星数超过 4 颗时,能够确定装置所在位置,捕获的卫星数越多,定位精度越高。目前,全球正在运行的卫星导航定位系统包括美国 GPS、俄罗斯 GLONASS、欧洲 Galileo^[17] 和我国的北斗卫星导航定位系统^[18] 等,在轨运行的卫星数量超过 70 颗^[19]。因此本文设计的固定样地标记装置具有最多同时 64 颗卫星共同定位的能力,保证了数据的准确性。

2.2.2.2 NMEA 帧解码原理

解算后的定位位置信息以 NMEA - 0183 协议输出。NMEA - 0183 协议是美国国家海洋电子协会

(National Marine Electronics Association) 为海用电子设备制定的标准格式^[20-21]。目前业已成为定位导航输出的标准协议。该协议包含的字段如表 1 所示。

表 1 NMEA - 0183 协议
Tab.1 Protocol of NMEA - 0183

序号	命令	说明	最大帧长
1	\$ GPGGA	全球定位数据	72
2	\$ GPGSA	卫星 PRN 数据	65
3	\$ GPGSV	卫星状态信息	210
4	\$ GPRMC	定位数据	70
5	\$ GPVTG	地面速度信息	34
6	\$ GPGLL	大地坐标信息	
7	\$ GPZDA	UTC 时间和日期	

发送顺序依次为 \$ GPZDA、\$ GPGGA、\$ GPGLL、\$ GPVTG、\$ GPGSA、\$ GPGSV、\$ GPRMC。其中定位数据信息需要发送给手持终端设备。为了便于调试,本文利用卫星导航定位监控软件,改写部分代码,实现在便携式计算机中实时确定解算后的位置信息。

2.2.2.3 位置信息发送与导航原理

在首次获得样桩的位置信息后,将这些信息存储在 Flash 中,一旦接收到寻找样桩的信号,立即将位置信息发送,并在手持终端中调用百度地图的 API 实现位置导航。为了方便手机用户快速找到样桩,该功能在微信平台实现,采用 JavaScript 编程实现。步骤为:打开手机的定位功能,获取找寻人的位置信息;接收样桩的位置信息,利用百度地图的 API 设计找寻路线。

2.2.3 样地信息记录

样地信息记录在装置存储器中,样地调查人员通过 USB 接口复制出历史数据,同时更新最新的调查数据,也可以通过无线传输的方式将信息发送至装置中。样地信息的记录包括以下字段:样地位置(省、市、县、乡、村,大样地编号)、建模信息(树种、区域、树高级、郁闭度级、龄组、样地半径)、样地信息(地貌、坡向、坡位、坡度、地类、起源、郁闭度)等,如图 7 所示。

3 试验与分析

对固定样地标记寻找效率进行试验设计:以北京市延庆区有林地作为试验区,抽样方案设计选取目前在延庆区试点的三阶段抽样方案,使用 ArcGIS 10.2.2 软件生成正六边形抽样框架,并生成 52 个固定样地中心点,随机选取 15 个固定样地中心点进行固定样地标记桩寻找效率验证试验(表 2)。

图7 样地调查信息存储界面

Fig.7 Interface of sample plot information storage

试验分组:每组2人,共3组,每组随机选取1人进行传统固定样地标记装置寻找,待传统固定样地标记装置找到后,重新换上本文设计的固定样地标记装置,此时另一人在同一位置进行本文设计的固定样地标记装置寻找,记录寻找时间。3组试验全部测试结束后,分析传统固定样地标记装置与本文设计的固定样地标记装置的寻找效率。

经3组试验,求各样地的3次寻找时间平均值,传统标记装置的平均寻找时间为51.92 min,本文设计装置的平均寻找时间为12.24 min,与传统标记装置相比,本文设计装置寻找效率提高了324%。结果表明,本文设计的固定样地标记装置与传统的固定样地标记装置相比,极大地缩短了寻找时间,提高了寻找到固定样地标记桩的效率,对比试验结果如

表2 样地标记桩寻找效率验证试验结果

Tab.2 Search efficiency verification test result of plot center point

类别	样地号															min
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
传统装置用时	44.98	57.76	49.67	46.51	31.47	54.05	57.40	47.44	37.48	77.43	52.14	72.88	46.34	59.70	43.57	
本文装置用时	8.55	6.20	13.58	14.27	9.61	12.48	14.77	12.83	11.83	19.63	15.73	17.09	12.69	6.18	8.20	

图8所示。

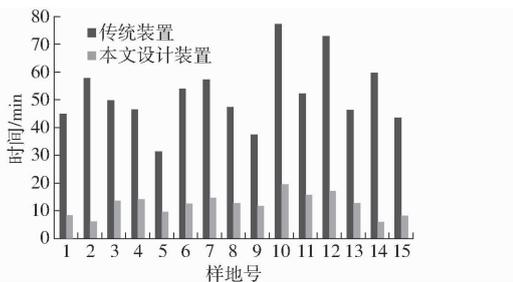


图8 对比试验结果

Fig.8 Results of comparative test

4 讨论

(1)由于标记信号发生器利用无线信号传输原理,因此装置接收信号的天线部分高于地表以保证较大的信号搜索范围,当全部埋于地下时,由于土壤的覆盖,接收信号能量将急剧降低,进而导致报警范围的缩小。

(2)该装置能较好的应用于森林资源年度监测样地标记中,在森林资源连续清查的应用场景下,固定样地的复查周期是5 a,在后续工作中需要对装置的耗电特性及连续工作时长进一步优化和评估,以满足实际应用,更好地服务森林资源连续清查工作。

5 结束语

本文装置基于遥控报警原理、GNSS定位原理,实现了森林资源连续清查固定样地标记桩的导航定位、遥控报警、样地信息读取与写入等功能,从而使调查人员能清晰地了解该固定样地的建设时间、调查次数、调查日期、调查人员等一系列相关信息,极大地提高了固定样地信息的透明度。与传统固定样地标记桩相比,本文装置解决了固定样地信息无法读取与写入、无法导航定位、无法遥控报警指引寻找等问题,为实现快速复位固定样地提供了一种高效可行的解决方案。

参 考 文 献

- 1 国家林业局. 国家森林资源连续清查技术规范[S]. 2004.
- 2 北京市园林绿化局. 北京市第八次森林资源清查操作细则[S]. 2011.
- 3 SIMS A, GADOW K V. Estimating tree survival: a study based on the estonian forest research plots network [J]. *Annales Botanici Fennici*, 2012, 46(4):336-352.
- 4 SIMS A, MÄNDMA R, LAARMANN D, et al. Assessment of tree mortality on the estonian network of forest research plots [J]. *Forestry Studies*, 2014, 60(1):57-68.
- 5 王海宾,彭道黎,范应龙,等. 基于辅助信息的森林蓄积量空间模拟[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(6):283-289. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160637&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.

- issn. 1000-1298. 2016. 06. 037.
- WANG Haibin, PENG Daoli, FAN Yinglong, et al. Spatial modeling of forest stock volume based on auxiliary information[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6):283-289. (in Chinese)
- 6 张茂震,王广兴,刘安兴. 基于森林资源连续清查资料估算的浙江省森林生物量及生产力[J]. 林业科学,2009,45(9):13-17.
- ZHANG Maozhen, WANG Guangxing, LIU Anxing. Estimation of forest biomass and net primary production for Zhejiang province based on continuous forest resources inventory[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(9): 13-17. (in Chinese)
- 7 范文义,李明泽,杨金明. 长白山林区森林生物量遥感估测模型[J]. 林业科学,2011,47(10):16-20.
- FAN Wenyi, LI Mingze, YANG Jinming. Forest biomass estimation models of remote sensing in Changbai mountain forests [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(10): 16-20. (in Chinese)
- 8 季碧勇,陶吉兴,王文武. 基于连续清查固定样地生物量的立地质量评价[J]. 西南林业大学学报,2012,32(4):45-50.
- JI Biyong, TAO Jixing, WANG Wenwu. Forest site quality evaluation based on biomass data from continuous forest inventories [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2012, 32(4): 45-50. (in Chinese)
- 9 余超,宋立奕,李明阳,等. 河南西峡县森林地上生物量时空动态分析[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2017,41(6):93-101.
- YU Chao, SONG Liyi, LI Mingyang, et al. Spatio-temporal dynamics of forest aboveground biomass in Xixia County, Henan Province, China[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2017, 41(6): 93-101. (in Chinese)
- 10 王雪军. 基于多源数据源的森林资源年度动态监测研究[D]. 北京:北京林业大学,2013.
- WANG Xuejun. Annual forest resources dynamic monitoring research based on multi-data source in the case of Anshan City[D]. Beijing:Beijing Forestry University, 2013. (in Chinese)
- 11 王雪军,张煜星,黄国胜,等. 全国森林面积和森林蓄积年度出数方法探讨[J]. 江西农业大学学报,2016,38(1):9-18.
- WANG Xuejun, ZHANG Yuxing, HUANG Guosheng, et al. Discussion on methods for annual national producing estimates of forest area and forest stock in China[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2016, 38(1): 9-18. (in Chinese)
- 12 陶吉兴,王文武,徐达,等. 基于固定样地连续监测数据的林木蓄积生长率月际分布[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2017,41(2):111-116.
- TAO Jixing, WANG Wenwu, XU Da, et al. Monthly distribution of tree volume growth rate based on continuous monitoring data of fixed sample plots[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2017, 41(2): 111-116. (in Chinese)
- 13 李志刚,万猛,梁丰. RFID技术在国家森林资源连续清查中的应用[J]. 安徽农业科学,2014,42(7):2174-2175.
- LI Zhigang, WAN Meng, LIANG Feng. Application of RFID in continuous forest inventory[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2014, 42(7): 2174-2175. (in Chinese)
- 14 张慧春,郑加强,周宏平. GPS林业定位误差分析与野点剔除方法[J]. 农业机械学报,2010,41(5):143-147.
- ZHANG Huichun, ZHENG Jiaqiang, ZHOU Hongping. GPS positioning error analysis and outlier elimination method in forestry [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5):143-147. (in Chinese)
- 15 张扬南. 智慧林业:现代林业发展的新方向[J]. 南京林业大学学报:人文社会科学版,2013,37(4):77-81.
- ZHANG Yangnan. Intelligent forestry: a new direction for the development of modern forestry [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Humanities and Social Sciences Edition, 2013, 37(4): 77-81. (in Chinese)
- 16 OLENEWA J L. 无线通信原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2016.
- 17 HOFMANN-WELLENHOF B, LICHTENEGGER H, WASLE E. GNSS—global navigation satellite systems[M]//GNSS—global Navigation Satellite Systems: Springer, 2008:647-651.
- 18 杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. 测绘学报,2010,39(1):1-6.
- YANG Yuanxi. Progress contribution and challenges of compass/Beidou satellite navigation system [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(1):1-6. (in Chinese)
- 19 周祖渊. 全球卫星导航系统的构成及其比较[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2008,27(增刊1):999-1004.
- ZHOU Zuyuan. On composition of global satellite navigation system and its comparison [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2008, 27(Supp. 1):999-1004. (in Chinese)
- 20 曹婷婷,高玉. GPS中NMEA-0183协议的应用[J]. 电子工程师,2006,32(10):8-11.
- CAO T T, GAO Y. Application of NMEA-0183 protocol for GPS[J]. Electronic Engineer, 2006, 32(10):8-11. (in Chinese)
- 21 WHITE E S, WETHERBEE L. Post-processing of NMEA data: US6490524[P]. 2002.