

几种测量方法在森林资源调查中的应用与精度分析

徐文兵^{1,2}, 高飞², 杜华强¹

(1. 浙江林学院 环境科技学院, 浙江 临安 311300; 2. 合肥工业大学 土木建筑工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 通过外业调查数据分析和理论推导, 对林业调查中的几种测量方法进行了比较分析。研究表明: ①罗盘仪由于制作粗糙, 在标准样地测设中尚能满足规范要求, 但随着距离和竖直角度的增加, 精度急剧下降, 在大范围的林地面积和科研特殊需要的测量中操作不便捷, 精度差, 效率低; ②全站仪测设样地边长不超过 100 m 时, 半测回的距离测量可达到 1/10 000, 高差测量误差不超过 1 cm, 且受距离和竖直角度的影响较小; ③当面积大于 3.34 hm², 边长超过 100 m 时, 手持全球定位系统 (GPS) 完全可代替罗盘仪, 并可通过坐标差分或修正坐标转换参数来提高测量精度。另外, 网络 RTK 的发展必将连同全站仪成为精准林业测量的主要仪器设备。表 2 参 13

关键词: 森林测计学; 森林资源调查; 精度分析; 罗盘仪; 全站仪; 手持全球定位系统

中图分类号: S758 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5692(2009)01-0132-05

Application and precision analysis of several surveying methods in forest resources survey

XU Wen-bing^{1,2}, GAO Fei², DU Hua-qiang¹

(1. School of Environment and Technology, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300, Zhejiang, China;

2. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract: This paper compares and analyzes several surveying methods in forestry resource investigation via an analysis of experiment datum and theory reasoning. The research findings are as follows: (1) The compass could only satisfy the criteria and standards of surveying sample plot due to its roughness; and its accuracy would decrease significantly while distance and vertical angle increased; the compass was inconvenient, imprecise and inefficient for large scale forestry acreage survey or special scientific research. (2) When the length measured by total station was not over 100 m, semi-observation accuracy of distance measuring could reach 1/10 000 and height measuring error wouldn't be over 1 cm; and the measuring was hardly affected by distance and vertical angle. (3) When acreage and length were over 3.34 hm² and 100 m respectively, handy global positioning system (GPS) could replace compass, and its measuring accuracy could be improved by coordinating difference or modifying parameter of coordinates transform. Besides, development of network real time kinematic (RTK) with total station would be main instruments for the precise forestry surveying. [Ch, 2 tab. 13 ref.]

Key words: forest mensuration; forestry resources survey; precision analysis; compass; total station; handy global positioning system(GPS)

中国森林资源调查分为 3 类: 全国森林资源清查(简称一类调查)、森林经理调查(简称二类调查)和作业设计调查(简称三类调查)^[1]。其中, 森林资源二类调查是为林业规划设计需要而进行的森林资源调查工作。过去几十年, 林业生产是以生产木材为主, 二类调查侧重于森林蓄积量、森林面

收稿日期: 2008-02-27; 修回日期: 2008-06-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30700638); 浙江林学院科学研究发展基金资助项目(2006FK29)

作者简介: 徐文兵, 讲师, 从事工程测绘、GPS 测量等研究。E-mail: xuwb97@163.com

积、成熟度以及收获效益等。森林资源三类调查是为完成各项作业设计而进行的调查工作，包括伐区设计、造林设计和抚育采伐设计等^[2]。传统森林资源调查方法主要是用罗盘仪(compass)和百米尺做闭合导线^[2]或视距法测定标准地和树高等^[3]，后来全站仪(total station)也有所应用，限于当时测绘技术的发展和生产的需求，能满足相应规范要求。现在，天然林区的森林经营从过去的生产经营型转变为生态保护型，以发挥森林的涵养水源、保持水土、维持地区的良好生态效益为目的，森林资源调查对与生态效益相关的因素，如森林结构状态、生态群落类型、植被状况等提出甚高要求。同时，国内外森林资源调查的总体发展趋势也是继续向精度高、速度快、成本低和连续性的方向发展，因此，对调查手段提出更高的要求，传统的测绘技术显现出局限性。随着测绘技术的发展，手持全球定位系统(global positioning system, GPS)等新型测绘技术在林业调查中应用越来越广泛^[2,4-6]。现在，林业调查除了指导林业生产，还为科研服务。笔者主要根据相关文献的实验数据加以理论推导来探讨林业调查中常用的测量技术的精度，为不同的林业调查目的和要求提供参考。

1 几种测量方法及其精度分析

1.1 罗盘仪测距及其精度分析

多年来，罗盘仪在林业调查中起着主要作用^[3]，但罗盘仪制作比较粗糙，尤其是测角度盘最小刻度为 0.5° ，直接限制了视距测量、磁方位角测量的精度，但仪器轻巧，价格低廉，操作简便，在精度要求不高的林业调查中仍将发挥着重要作用。

罗盘仪测距采用视距法，森林罗盘仪的望远镜放大倍率一般为 $8 \sim 16$ 倍，度盘鉴别率一般为 $11' \sim 15'$ 。通过实验^[3]分析：建立一条基线，高差 4 m 多，由全站仪测定基线长为 $S = 75.981 \text{ m}$ 作为真值，用罗盘仪重复视距测量 39 次，由观测数据可得测距中误差和相对误差，如式(1)。

$$\begin{aligned} \text{测距中误差:} \quad m_{ss} &= \pm \sqrt{\frac{|\Delta\Delta|}{n}} = \pm 0.286 \text{ m;} \\ \text{相对误差:} \quad \frac{1}{M} &= \frac{|m_{ss}|}{S} \approx \frac{1}{260}。 \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中： Δ 为测距真误差； n 为测量次数。

根据视距测量的公式 $S = kl\cos^2\alpha$ (k 为常数， $k = 100$) 可知， S 的精度由距离(l)、坡度角(α)测量精度决定，公式在 l^0 和 α^0 处泰勒级数展开(保留一阶)，如式(2)：

$$S = kl^0\cos^2\alpha + k\cos^2\alpha^0(l - l^0) - kl^0\sin^2\alpha^0(\alpha - \alpha^0)。 \quad (2)$$

带入 39 组观测数据，组成方程组，解算得到 l ， α 的中误差分别为： $m_l \approx \pm 3 \text{ mm}$ ， $m_{\alpha} \approx \pm 1.4'$ ，因为 l ， α 相互独立，由误差传播定律可得式(3)：

$$\begin{aligned} m_{ss}^2 &= k^2\cos^4\alpha m_l^2 + k^2l^2\sin^2\alpha \frac{m_{\alpha}^2}{\rho^2} \\ &= 0.09\cos^4\alpha + 16.59l^2\sin^2\alpha (\text{m}^2)。 \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中： ρ 为常数， $\rho = 206\,265$ 。

从式(3)中可以看出，测距中误差与 l ， α 成正比，随着距离和坡度角的增加， m_{ss}^2 也将增大。利用上述实验中 $S = 75.891 \text{ m}$ ，由 $l = S/k\cos^2\alpha$ 近似反算出不同竖直角度的 l 值，如果取 $S = 50 \text{ m}$ ，虽然此时 m_l 偏小，但仍可近似计算出不同的竖直角下的测距中误差和相对误差(表 1)。

由表 1 可知，随着竖直角度的增加，中误差和相对误差急剧增大。由于二类调查中标准样地的大小为 $25.82 \text{ m} \times 25.82 \text{ m}$ ，罗盘仪测边相对误差将有所提高。若利用皮尺测距，精度与罗盘仪相当，在一定坡度角下能满足粗放林业调查的需要，但在研究

表 1 罗盘仪在不同竖直角下的测距中误差和相对误差

Table 1 Compass' mean square error and relative error of range observation on the condition of different vertical angles

竖直角/ $^\circ$	中误差/m	相对误差
0	± 0.548	1/253
5	± 0.785	1/123
10	± 1.062	1/67
15	± 1.296	1/45
20	± 1.505	1/33
30	± 1.891	1/21
40	± 2.278	1/14
50	± 2.714	1/10

森林水土保持功能、森林结构状态等精准林业调查中,由于罗盘仪测边精度不高,导致测树高精度较低,大范围林地面积测量精度更低,且不能直接测定林木坐标,满足不了某些科研生产的需要。

1.2 全站仪测量及精度分析

全站仪(total station)是集测距仪、电子经纬仪、微处理机于一体的电子测绘仪器,使用方便,效率高,精度高,可直接通过坐标测量测定林木位置^[7]、悬高测量测定树高等,并且通过 Excel 等常规软件即能很好地处理数据^[8],已成为测量中常用仪器。全站仪的测距精度一般都优于 $\pm(5+5\times 10^{-6}D)$ mm,因此在短距离的林业样地测设中测距误差可以忽略不计。

1.2.1 全站仪水平角测量及精度分析 全站仪在测设样地 90° 转折角时,为了提高工作效率,一般采用半测回观测。根据实验^[9]结果分析:全站仪观测水平角,边长和高度角对水平角观测精度无显著影响。现利用一台低端全站仪如NTS355(测角精度为 $\pm 5''$)来测角。假设每条边测角偏差为 $+5\sqrt{2}''$,则标准样地的闭合差为: $\rho = 25.82 \text{ m} \times 4 \times \tan 5\sqrt{2}'' = 3.54 \text{ mm}$,相对误差为: $\frac{1}{M} = \frac{\rho}{\sum D_i} =$

$\frac{3.54}{25.82 \times 4 \times 1000} \approx \frac{1}{3000}$,远高于规范要求的 $\frac{1}{200}$ 。因此全站仪测设样本地转折角只需半测回。

1.2.2 全站仪三角高程测量及精度分析 三角高程测量是利用全站仪由测站点向目标点观测高度角和斜距,通过三角公式计算两点间的高差和平距。在精密三角高程测量中,若距离较短,距离测量不需考虑高程归化和高斯投影改正^[10],但高差需顾及球差和气差改正,则其计算公式^[11]如(4)所示:

$$\begin{cases} D = S \cos \alpha \\ h_{AB} = D \tan \alpha + i + v + f \\ f = p + r = (1 - k)D^2/2R \\ p = D^2/2R \\ r = -kD^2/2R \end{cases} \quad (4)$$

式(3)中: S , h_{AB} , D , α 分别为两点间斜距、高差、平距和高度角; i 为仪器高, v 为目标高, f 为球气差, p 为球差, r 为气差; k 为大气折光系数,在我国通常取 $0.14 \sim 0.16$; R 为地球半径,通常取 6370 km 。在林业测量中,由于距离短,无需顾及大气折光和地球曲率的影响,故通常采用公式(5)。

$$\begin{cases} D = S \cos \alpha \\ h_{AB} = D \tan \alpha + i + v \end{cases} \quad (5)$$

由误差传播定律可得式(6):

$$\begin{cases} m_D^2 = \cos^2 \alpha m_s^2 + S^2 \sin^2 \alpha m_\alpha^2 / \rho^2 \\ m_h^2 = \tan^2 \alpha m_D^2 + \frac{D^2}{\cos^4 \alpha} \frac{m_\alpha^2}{\rho^2} + m_i^2 + m_v^2 \end{cases} \quad (6)$$

若利用 NTS355 来测设,距离不超过 1000 m , i , v 用普通钢卷尺丈量,可取 $m_s = \pm 5 \text{ mm}$, $m_\alpha = \pm 5''$, $m_i = \pm 5 \text{ mm}$, $m_v = \pm 5 \text{ mm}$,但 S , α 取不同值时计算如表2。

由表2可知, m_h 随 S 的增加而增大较快,随 α 的增加而增大较慢,因此要提高高差测量精度需控制边长; m_D 因测距仪的精度高受距离和高度角的影响都较小,固定 S 、变动 α ,显示随 α 增大有减小的趋势,主要因为 S 较短, $S^2 \sin^2 \alpha m_\alpha^2 / \rho^2$ 可以忽略不计,而 $\cos^2 \alpha m_s^2$ 中 m_s^2 假设为固定值,故结果随角度增加而减小。虽然未顾及测站偏心差和目标偏心差,但一般林业样地边长都不大于 100 m ,所以全站仪测距、测高差和测坐标的精度完全满足精准林业测量。

1.3 GPS 测量及精度分析

在我国林业产业上,GPS 主要应用于飞播及防病虫害导航、典型样地定位、荒漠化监测及林火监测等方面^[4]。我国主要利用美国国防部研制组建的全球定位系统^[12],大地型 GPS 接收机主要作业方式有静态绝对定位和动态相对定位,精度分别可达到毫米级和厘米级,但 GPS 测量在林业上的应用主要受到森林覆盖率和高度角的局限,因此目前在林业上多是利用低精度的手持 GPS。

表 2 不同条件下计算的误差

Table 2 Error calculated on the different conditions

$\alpha/(\circ)$	S/m	m_h/mm	m_p/mm	$\frac{m_p}{D}$	$\alpha/(\circ)$	S/m	m_h/mm	m_p/mm	$\frac{m_p}{D}$
30	25.82	7.5	4.3	1/6 000	5	100.00	7.5	5.1	1/20 000
30	50.00	7.6	4.4	1/11 000	10	100.00	7.5	5.1	1/20 000
30	100.00	8.0	4.5	1/22 000	15	100.00	7.6	5.0	1/20 000
30	200.00	9.4	4.8	1/4.1 000	20	100.00	7.7	4.8	1/21 000
30	400.00	13.7	6.0	1/66 000	30	100.00	8.0	4.4	1/22 000
30	800.00	24.1	9.4	1/84 000	40	100.00	8.4	3.9	1/25 000
30	1 000.00	29.6	11.4	1/88 000	50	100.00	8.9	3.3	1/30 000

1.3.1 手持 GPS 测量及精度分析 手持 GPS 在林业生产中主要用于测量面积、测设样地和已有样地点导航以及距离测量等^[2,4-6]。近年来,手持 GPS 精度也有较大提高,如 GARMIN 公司的 Vista 接收机标称精度为平面 5 m,高程 2.5 m,观测条件良好时,各点测量精度均匀,减少了人为因素的干扰,并且通过后处理可进一步提高精度^[4,6]。根据实验数据^[4-5]分析:手持 GPS 测量面积时,面积越大,相对精度越高,反之亦反。当面积大于 2.00 hm² 时,误差为 4.6%;当面积大于 6.67 hm² 时,误差为 2.2%;经试验,当面积大于 3.34 hm² 时手持 GPS 测量精度超过罗盘仪,并且误差低于 4.0%,超过规范 10% 的要求;若面积小于 3.34 hm² 需通过多次测量求数学平均值来提高精度。手持 GPS 的距离测量是通过导航功能实现的。实验表明^[4]:距离在 50 m 以下时,误差较大,均在 5% 以上;大于 50 m 时误差可小于 4%,达到规范要求的 5%;当距离大于 100 m 时误差可为 3% 以下。在森林资源调查中,需要寻找固定样地和布设新样地,在森林覆盖率允许的情况下,利用手持 GPS 导航功能来找点和放样样地的西南角点,比利用罗盘仪通过明显地形点来引点以导线传递要精度高、操作便捷、效率高。实验表明^[4]:一般情况下,手持 GPS 定位最大误差为 16 m,其中 0~3 m 占 60%,3~5 m 占 25%,5 m 以上占 15%,并且精度相对均匀,有效避免了读图时的错判和误判。

1.3.2 GPS 其他作业方式及精度分析 在林业调查中,高精度的静态 GPS 可以用来测定大面积航测的像控点,但由于前期林业生产的粗放性,应用实例不多。GPS-RTK(GPS-real time kinematic)技术是 GPS 技术发展的新方向,作者通过利用 GPS-RTK 测定莫干山边界的工程实例^[13]表明:在森林覆盖率较高的乔木和毛竹林中,山脊和山腰上 RTK 定位精度可达到厘米级,在山谷中选择合适的时段也可达到分米至米级。20 世纪末,GPS 连续运行参考站技术的研发,网络 RTK 发展蓬勃,全国多省市包括杭州、宁波已建立 GPS 连续运行参考站网,浙江省网正在建设中,网络 RTK 代替了传统的单基站 RTK 模式,不需要再建立基站,延长了作业距离,提高了差分精度,虽然定位精度同样是厘米级,但仪器成本降低,作业更简便,必将在林业生产中得到广泛应用。

2 结论与讨论

罗盘仪虽然作为目前林业测量中的基本工具,还将广泛使用,但由于测距精度低,在“生态保护型”林业调查中使用不便捷甚至满足不了工作需要,将在林业测量中退居辅助地位。

全站仪和 GPS 技术作为现代测量技术,将在林业测量中发挥重要作用。全站仪测设样地边长不超过 100 m 时,半测回的距离测量可达到 1/10 000 和高差测量误差不超过 1 cm,且受距离和竖直角的影响较小,但要保证光学通视;GPS 测量精度均匀,在高度角和覆盖率满足要求的情况下,定位精度可达到厘米级且无需引点,效率高。

手持 GPS 在林业测量中已应用较多,当面积大于 3.34 hm² 时,误差小于 4%;距离大于 50 m 时,误差可小于 4%;一般情况下定位最大误差为 16 m,其中 0~3 m 占 60%,3~5 m 占 25%,5 m 以上占 15%。由于此文中手持 GPS 测量精度分析是以罗盘仪测定数据作为参考数据,精度有限,若采用

更高精度的如全站仪测量的数据作为参考数据, 分析结果会更合理。当需要较高测量精度时, 可以通过其他手段来弥补手持 GPS 测量的粗泛性, 例如, 利用 2 台手持 GPS 同时观测, 一台固定在测区周边或测区内连续观测, 利用观测数据对另一台游移的手持 GPS 观测值进行事后差分; 也可以先测算出较准确的区域坐标转换参数, 对手持 GPS 观测值的坐标重新转换^[6]。

网络 RTK 是近几年兴起的新技术, 除了个别省份, 大多还是以覆盖城区为主, 在林业上应用的可靠性还有待于更多的检验, 同时由于仪器设备的相对昂贵和该技术的普及程度有限, 导致了该技术在林业上的应用还很鲜见, 但鉴于传统 RTK 应用的可靠性和优越性, 随着 GPS 连续运行参考站网覆盖范围的扩大, 必将连同全站仪将成为林业测量的主要仪器设备。

参考文献:

- [1] 亢新刚. 森林资源经营管理[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [2] 杨东. GPS 在三类调查中的应用[J]. 黑龙江生态工程职业学院学报, 2006, 19 (6): 36.
YANG Dong. Application of GPS in the third investigation[J]. *J Heilongjiang Vocat Inst Ecol Eng*, 2006, 19 (6): 36.
- [3] 梁长秀, 韩光瞬, 冯仲科, 等. 罗盘导线定位及其精度分析[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27 (2): 182 - 186.
LIANG Changxiu, HAN Guangshun, FENG Zhongke, et al. The positioning and precision analysis of compass traverse [J]. *J Beijing For Univ*, 2005, 27 (2): 182 - 186.
- [4] 张彦芳, 李文立, 陈智卿, 等. GPS 与罗盘在林业调查设计中的应用比较[J]. 河北林果研究, 2007, 22 (2): 159 - 160, 164.
ZHANG Yanfang, LI Wenli, CHEN Zhiqing, et al. Comparison of GPS and compass in the application of forestry [J]. *Hebei J For Orch Res*, 2007, 22 (2): 159 - 160, 164.
- [5] 夏友福. 手持 GPS 测量面积的精度分析[J]. 西南林学院学报, 2006, 26 (3): 59 - 61.
XIA Youfu. Precision analysis on area measurement by handy GPS[J]. *J Southwest For Coll*, 2006, 26 (3): 59 - 61.
- [6] 武红敢, 蒋丽雅. 提升 GPS 林业应用精度与水平的方法[J]. 林业资源管理, 2006 (2): 46 - 50.
WU Honggan, JIANG Liya. Some measures to improve the precision and application level of GPS in forestry [J]. *For Res Manage*, 2006 (2): 46 - 50.
- [7] 章雪莲, 汤孟平, 方国景, 等. 一种基于 ArcView 的实现林分可视化的方法[J]. 浙江林学院学报, 2008, 25 (1): 78 - 82.
ZHANG Xuelian, TANG Mengping, FANG Guojing, et al. A method of realizing stand visualization based on ArcView[J]. *J Zhejiang For Coll*, 2008, 25 (1): 78 - 82.
- [8] 陈永刚, 施拥军, 汤孟平, 等. Excel 内嵌 VBA 和 COM 代码在测量计算中的应用[J]. 浙江林学院学报, 2008, 25 (1): 83 - 87.
CHEN Yonggang, SHI Yongjun, TANG Mengping, et al. Measurements and calculations with embedded VBA and COM codes in Excel[J]. *J Zhejiang For Coll*, 2008, 25 (1): 83 - 87.
- [9] 李裕. 全站仪水平角实测精度研究[J]. 今日科苑, 2006 (9): 116.
LI Yu. Precision research of total station surveying horizontal angle[J]. *Today Panorama Mod Sci*, 2006 (9): 116.
- [10] 施一民. 电磁波测距边归算至投影面的公式论证及应用讨论[J]. 测绘通报, 2000 (12): 6 - 7.
SHI Yimin. The application and demonstration for reduction formula of special side to projection surface [J]. *Bull Surv Mapp*, 2000 (12): 6 - 7.
- [11] 张正禄, 邓勇, 罗长林, 等. 精密三角高程代替一等水准测量的研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2006, 31(1): 5 - 8.
ZHANG Zhenglu, DENG Yong, LUO Changlin, et al. Research on precise triangulated height surveying in place of first order leveling[J]. *Geom Inf Sci Wuhan Univ*, 2006, 31 (1): 5 - 8.
- [12] 李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005.
- [13] 徐文兵, 施拥军, 吴承涛, 等. GPS-RTK 技术在林区边界测量中的应用[C]//中国林学会森林经理分会. 森林可持续经营探索与实践. 北京: 中国林业出版社, 2006: 321 - 325.