

光纤基线标定激光测距仪方法研究

史洁琴¹ 何珂¹ 徐永²

(1. 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京, 100191; 2. 北京长城计量测试技术研究所, 北京, 100095)

摘要:提出利用光纤基线代替野外基线标定激光测距仪的方法,将室外基线引入到室内。研究激光到光纤耦合方法并选取适当的耦合元件参数,搭建稳定的激光器到光纤高效耦合平台。对3段不同长度光纤基线进行了光程长度测量实验,分析了光波长、温度、聚焦透镜、色散等因素对测量结果的影响。实验获得了稳定的测量数据,测量结果偏差在2 mm以内,验证了方法的可行性。

关键词:激光测距仪;室内基线;标定;光纤耦合

中图分类号:TN247

文献标识码:A

文章编号:1005-2615(2012)06-0830-05

Research on Calibration of Laser Rangefinder Using Optical Fiber Baseline

Shi Jieqin¹, He Ke¹, Xu Yong²

(1. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing, 100191, China;

2. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing, 100095, China)

Abstract: A novel scheme of calibrating the laser rangefinder using optical fiber baseline is proposed. Coupling between laser beam and optical fiber is studied for the optical components design. By establishing the coupling system between laser diode and optical fiber, the outdoor baseline is successfully replaced by the indoor optical fiber. Optical path length measurement experiments are conducted on three kinds of fibers. Effects of wavelength, temperature and material dispersion on the experiment results are discussed. Stable data are derived in the experiments, the deviation is proved to be within 2 mm, indicating that the proposed calibration method is feasible.

Key words: laser rangefinder; indoor baseline; calibration; fiber coupling

标定激光测距仪的常用方法是野外基线场的六段比较法,但是野外基线场需要占用大量的土地资源,也受到天气、环境等因素的影响^[1]。因此国内外学者都致力于室内检定方法的研究。但室内基线长度往往较短,检测结果精度不高,难以作为检定基准。为了增加室内基线长度,国外的研究者用平面反射镜来折叠光线^[2],达到延长光路的目的,采用该方法能延长室内基线的长度最大可达180~200 m,但重复性误差在毫米级且不稳定,有的甚至达到分米级^[3],同时用于延长和控制光路的反光镜需要严格精密加工和精确定位,难度较大。光纤

具有直径小、透光谱段宽、传输损耗低、传输光路灵活、占用空间小等优点,因此采用室内光纤基线替代野外基线成为一种发展趋势^[1,4],相关研究专家对利用光纤建立室内基线进行了研究,在实验室实现了室内用光纤基线对激光测距仪的标定,但光纤基线长度只有30 m左右,且稳定重复性误差也在毫米级^[4]。本文根据激光测距仪光信号与光纤特点,通过对耦合方式及透镜与光纤参数的选择,建立了激光器与光纤耦合模型,搭建稳定的实验平台,对200 m以内的光纤基线进行了标定实验,获取了稳定的测量结果,并对测量结果造成影响的因

素进行分析。与现有室内光纤基线相比,用本文所述的光纤基线标定测距仪方案可在空间较小的室内环境下,满足更长距离、更高精度激光测距仪的校准需求。

1 光纤基线标定测距仪方法

光纤标定激光测距仪的系统原理图如图1所示。激光测距仪射出的光信号由聚焦透镜聚焦后进入到光纤中,经光纤传输后光信号再通过接收透镜回到激光测距仪的接收端进行读数。由于激光经光纤传输后可能引入杂散光的干扰,因此加入窄带滤光片限制接收光谱的范围,有利于提高光程测量精度,而且该滤光片也用来滤除背景杂散光。

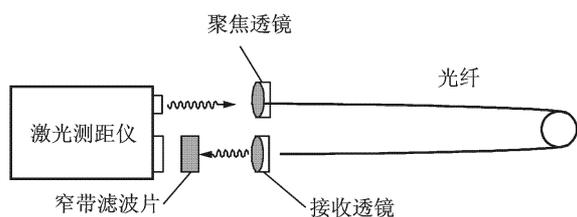


图1 系统原理图

测量时,激光测距仪的读数为测距仪发出的光波在光纤中传播所经历的光程长加上测距仪到光纤前端面的附加光程长的一半。

光纤基线的绝对长度可通过比激光测距仪精度更高的基于全光纤干涉法的高精度、大量程光纤绝对长度测量方法测得^[5],将激光测距仪的测量结果与被测光纤的绝对长度进行对比,便可实现激光测距仪的高精度标定。

激光与光纤的耦合效率是实现长距离、高精度激光测距仪的校准的关键,激光到光纤的耦合实际上是二者模场之间的匹配。要实现激光束到光纤的高效耦合,必须满足以下两个条件:入射到光纤端面的光斑小于光纤芯径大小,且进入光纤的光束发散角满足光纤的数值孔径(Numerical aperture, NA)要求。即

$$\begin{cases} \phi \leq 2a \\ \theta_{\max} \leq \arcsin NA = \arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ϕ 为聚焦光斑大小; $2a$ 为光纤芯径; θ_{\max} 为最大入射角。

激光测距仪发出的激光是高斯光束,具有一定的光斑大小和发散角。使用光电扫描法对光斑尺寸进行测量^[6],经过测量,激光测距仪的出射光斑大

小直径3 mm,发散角约为0.6 mrad,近似平行光。结合式(1)的要求,设定聚焦透镜参数。

透镜的主要参数为镜片直径、厚度及焦距。透镜的焦距 f 是一个很重要的参数,它能决定汇聚光斑的大小及入射到光纤内的入射角大小。设 ω 是准直激光光束的直径,则理想的激光光束通过聚焦透镜的束腰半径为

$$\varphi/2 = \frac{\lambda}{\pi} \frac{f}{\omega} \quad (2)$$

式中: f 为透镜的焦距; λ 为入射光波长。通常影响聚焦光斑的是激光衍射和空间像差^[7],激光衍射影响聚焦光斑的直径 φ_1 的表达式为

$$\varphi_1 = \left[\frac{8}{\pi} \left(\frac{f\lambda}{D} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \approx 1.6 \left(\frac{f\lambda}{D} \right) \approx 0.5 \left(\frac{f\lambda}{\omega} \right) \quad (3)$$

空间像差对聚焦光斑大小的影响为

$$\varphi_2 = [4(n-1)]^{-1} \left(n^2 - 2n + \frac{2}{n} \right) \times \frac{\omega^3}{f^2} \quad (4)$$

式中, n 为传播媒介折射率。由式(3,4)可以看出,要减小激光衍射对聚焦的影响,应使用短焦距透镜;而长焦透镜可以减小空间像差对聚焦的影响。同时考虑激光衍射和空间像差时,所选聚焦透镜最佳焦距为

$$f_o = 1.05 \left(\frac{\omega^4}{\lambda} \right)^{1/3} \quad (5)$$

此时得到的聚焦光斑大小为

$$\varphi_o = 0.5(\omega\lambda^2)^{1/3} \quad (6)$$

对本文实验中使用的激光测距仪,出射光斑大小直径为3 mm,发散角约为0.6 mrad,则根据式(1)及式(5)的要求,选取焦距为50 mm的聚焦透镜,理论上能获得的聚焦光斑大小为10.7 μm ,小于光纤芯径。同时50 mm的焦距 f 也可以保证入射光角度满足光纤数值孔径NA的要求。

2 实验及结果分析

2.1 实验装置和设备

本文的实验装置如图2所示。该装置由激光测

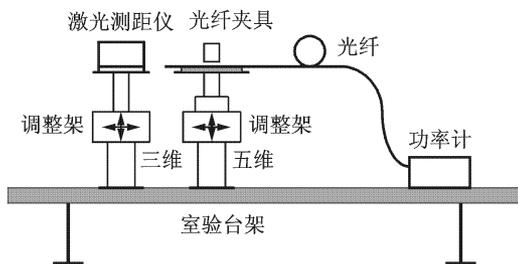


图2 室内光纤基线标定激光测距仪实验示意图

距仪、透镜、光纤及其夹具、调整支架、光功率计等组成。激光测距仪发出的激光束经透镜光纤传输后,回到该仪器的接收窗口。带透镜和套管的光纤头通过五维调整架固定在测试平台上,另一端与光功率计连接,通过不断调整光纤位置及方向,获得最高的耦合效率。然后,光纤的一头与光功率计断开,绕回来,经接收透镜和窄带滤光片耦合入激光测距仪的接收窗口,完成激光测距仪的读数。

2.2 测量实验及结果

使用搭建的光程测量系统对光纤标定激光测距仪的方法进行实验。实验中共使用两台徕卡D5激光测距仪进行对比实验,其波长为635 nm,大气中最大测程200 m。实验用的光纤是3条材质、参数相同的阶跃折射率光纤,长度分别约为30,100和200 m,光纤数值孔径 $NA=0.23$,包层折射率为 $n_1=1.4684$,纤芯折射率 $n_2=1.4863$ 。这3条光纤的长度先由全光纤干涉法精确标定。

利用光功率计调节激光与光纤耦合至最佳状态后,将光纤末端引到激光测距仪的接收端进行读数。为防止激光沿原光路返回测距仪,在其接收端加盖了一个薄挡光片,并留出供光纤末端插入的圆孔。

表1给出了对100 m光纤进行实验测量得到的结果。

表1 100 m 光纤测量结果 m

测量序号	光纤末端距离 测距仪到光纤前		L_1-L_2
	读数 L_1	端距离 L_2	
1	75.341	0.066	75.275
2	75.343	0.066	75.277
3	75.343	0.067	75.276
4	75.343	0.066	75.277
5	75.341	0.066	75.275
6	75.342	0.066	75.276
均值	75.342 2	0.066	75.276 2

由表1所得的测量结果,推算光纤的理论长度为 $L=(L_1-L_2)\times 2/n_2=75.2762\times 2/1.486=101.313$ m。与全光纤系统测量法测出的光纤理论长度值101.324 m相比,绝对误差为 $\Delta L=0.011$ m。使用另外一台相同型号的测距仪D5进行平行实验时(实验环境不变),测量的结果与第一次的实验结果十分接近,证明了该方法重复性比较好。

同理,对200 m的光纤进行实验,耦合效率达到最高值后的测量结果如表2所示。

表2 200 m 光纤测量结果 m

测量序号	光纤末端距离 测距仪到光纤前		L_1-L_2
	读数 L_1	端距离 L_2	
1	149.035	0.065	148.970
2	149.034	0.064	148.970
3	149.037	0.065	148.972
4	149.036	0.065	148.971
5	149.034	0.065	148.969
6	149.035	0.065	148.970
均值	149.034 5	0.065	148.970

根据测距仪测得的结果,同理推算光纤理论长度为 $L=148.970\times 2/1.486=200.497$ m,与全光纤系统测量法测出的光纤理论长度值200.517 m相比,绝对误差为 $\Delta L=0.020$ m。在相同的实验环境下使用第二台D5测距仪进行测量时,得到的测量结果与第一次的实验结果相差1 mm,同样证明了实验具有较好的重复性。在对30 m长光纤进行实验时,也获得了稳定的实验结果。

2.3 误差分析

综合以上实验结果及分析,在测距仪量程以内的光纤基线实验中,测量结果比较稳定,同组实验数据之间偏差在2 mm以内,产生以上偏差的原因分析如下。

相位式激光测距仪通过测量连续调制波在待测距离上往返传播一次所产生的相位移,间接测定调制信号所传播的时间 t ,从而求得被测距离 L 。其基本公式为

$$L = \frac{C}{2} \frac{\varphi}{2\pi f_m} = \frac{C_0}{2n} \frac{\varphi}{2\pi f_m} \quad (7)$$

式中: C_0 为真空光速; n 为传播媒介折射率; f_m 为调制波频率; φ 为相位差。由式(7)可以看出, $C_0, n, f_m, \Delta\varphi$ 对测量结果都会产生一定的偏差。根据误差理论,假设测距结果 L 中的误差为 M_L 。 $C_0, n, f_m, \Delta\varphi$ 中的误差分量分别为 $M_{C_0}, M_n, M_{f_m}, M_{\Delta\varphi}$,那么光程长 L 的误差和其他各项误差的关系可以由式(8)表达

$$M_L^2 = \left(\frac{\partial L}{\partial C_0}\right)^2 M_{C_0}^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial n}\right)^2 M_n^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial f_m}\right)^2 M_{f_m}^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial \Delta\varphi}\right)^2 M_{\Delta\varphi}^2 \quad (8)$$

由于光速的相对误差非常小,因此对测距结果带来的误差可以忽略不计;其次,光纤的折射率 n 受温度变化影响较大,将直接影响光程测量结果,因此温度、湿度等可能影响光纤折射率的因素都

尽量保持恒定;此外,为了减小调制波频率波动 f_m 及相位差变化 $\Delta\varphi$ 对测量结果的影响,可以通过提高光源的相位稳定性和频率稳定性,避免光路偏移误差,并减少杂散光带来的干扰,减小测量误差。

2.4 波长对测量结果的影响

当检定不同的激光测距仪时,由于其发光光源不同,发光波长不一样,将在多模光纤中引起模群数目改变,从而引起光波在多模光纤中所经历的总体光程的变化。假设两光源波长相差 $\Delta\lambda$,则通过相同长度 L 的光纤时间差 $\Delta\tau$ 可以由式(9)给出^[8]

$$\Delta\tau = K_\lambda L \Delta\lambda \quad (9)$$

式中, K_λ 由光源参数决定,当波长为635 nm时, $K_\lambda \approx 100 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。根据理论推算和实验结果可知,对于200 m以内的光纤,当波长在0.6~1 μm 之间变化时,激光测距仪测距值的最大变化量约为2 mm。

2.5 温度对测量结果的影响

温度对光纤的影响主要是因温度变化时引起的光纤几何长度和折射率的变化,从而引起光程的变化,并且这种影响与光纤长度有关。光程长变化受温度影响的变化系数为 $K_T = 1.2 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ^[9],根据理论计算和实验验证,对于100 m长光纤,温度变化2.5 $^\circ\text{C}$ 时,光程长变化了3 mm。因此,室内标定过程应采取恒温控制,减少温度变化给测量带来的影响。

2.6 色散对测量结果的影响

多模光纤中主要存在的色散是模间色散,不同角度的光线从光纤的入射端到出射端之间有不同的光程,因此到达接收端存在时间差。耦合的过程中,聚焦斑中心偏离光纤中心时将导致射入光纤的光线入射角变化,从而造成光线的光程差^[10]

$$\Delta L = L - n_1 L_0 \quad (10)$$

式中: L 为激光信号入射点偏离光纤中心时走过的光程; $n_1 L_0$ 为激光沿光纤轴线走过的光程; n_1 为纤芯折射率; L_0 为光纤几何长度。于是实际入射光线相对于基模光线的相位延迟为

$$\phi = 2\pi L / \lambda \quad (11)$$

设光波在光纤中经历的总体光程为 $2D$,则激光测距仪读数为 D

$$D = (n_1 L_0 + \Delta L) / 2 = (n_1 L_0 + \lambda \phi / 2\pi) / 2 \quad (12)$$

设光斑中心相对于纤芯中心的距离为 r ,假设光斑直径等于纤芯直径的一半,则在100 m光纤的

测量中 ΔD 随 r 变化的理论计算曲线与实验曲线如图3所示。

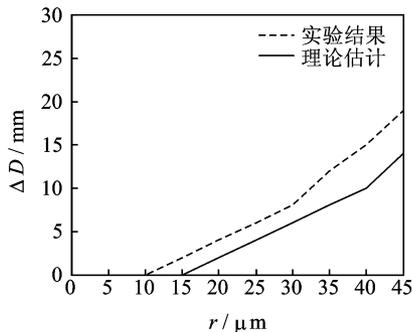


图3 ΔD 随 r 变化的曲线图

根据分析,当会聚光斑中心偏移光纤纤芯中心位置 $\pm 0.01 \text{ mm}$ 时,将造成光程长度变化约1 mm;当偏移量大于0.01 mm时,光程长度变换明显加大。因此,室内标定用光纤应使用数值孔径小的光纤来限制入射到光纤中光束的入射角,并避免耦合未对准的误差,提高测量的稳定性和可重复性。

3 结束语

本文提出利用光纤基线代替野外基线标定激光测距仪的方法,根据激光与光纤的耦合效率,研究激光到光纤耦合方法并选取适当的耦合元件参数,搭建了标定激光测距仪的室内光纤基线系统。实验获取了稳定的测量结果,分析了光波长、温度、聚焦透镜、色散等因素对测量结果的影响。与现有的室内标定方法相比,本文中利用光纤基线标定的方法测量结果重复性误差更小、精度更高,并且由于光纤可缠绕,通过延长光纤的长度可使室内标定基线长度加大,从而满足更高精度、更大量程的测距仪检定需求。

参考文献:

- [1] 张学庄. 光电测距仪室内检定的必要性[J]. 测绘通报, 1987(4): 25-30.
Zhang Xue Zhuang. The necessity of laboratorial calibration of EODM[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 1987(4): 25-30.
- [2] Forde L C, Howick E F. An extension of traceable calibration for electronic distance measuring instruments beyond the length of the laboratory[J]. SPIE, 2003, 5190: 289-299.
- [3] 杨维芳. 光电测距仪室内长基线建立方法研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2009.

- Yang Weifang. Establishment method of longer laboratory baselines for verificating EDMs[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2009.
- [4] 杨潘,李新婉,李中方,等. 基于标准光纤的全站仪测距室内检定[J]. 电子技术, 2011, 38(2): 4-5.
Yang Pan, Li Xinwan, Li Zhongfang, et al. Indoor calibration of ranging by total station based on standard optical fiber[J]. *Electronic Technology*, 2011, 38(2): 4-5.
- [5] 贾波,钱松荣,华中一,等. 全光纤干涉系统用于光纤长度测量实验[J]. 中国激光, 2002, 29(1): 1-3.
Jia Bo, Qian Songrong, Hua Zhongyi, et al. Optic fiber length measurement using all-fiber interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, A(29): 1-3.
- [6] 李文成,谷晋骐,王涌萍. 激光光斑及束腰光斑尺寸的测量研究[J]. 应用光学, 2002, 23(3): 30-33.
Li Wencheng, Gu Jinqi, Wang Yongping. Research on laser spot and beam waist spot size measurement[J]. *Applied Optics*, 2002, 23(3): 30-33.
- [7] 姜兴山. 透镜的焦距对激光聚焦焦斑影响的研究[J]. 佳木斯大学学报, 2002, 20(3): 288-290.
Jiang Xingshan. A study on the influence of optical focal length of lens on laser focal spot[J]. *Journal of Jiamusi University*, 2002, 20(3): 288-290.
- [8] Zumberge M A. Precise optical path length measurement through an optical fiber; application to seafloor strain monitoring[J]. *Ocean Eng*, 1997, 24(6): 531-542.
- [9] Hocker G B. Fiber-optic sensing of pressure and temperature [J]. *Applied Optics*, 1979 (18): 1445-1448.
- [10] 杨中东,雷玉堂. 利用光纤检定激光测距仪的研究[J]. 光电工程, 2007, 34(1): 139-144.
Yang Zhongdong, Lei Yütang. Calibrating laser rangefinder using fiber [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(1): 139-144.