

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1902766

野外基线溯源技术研究*

谷友艺¹ 蒋理兴¹ 孙振雄² 王力¹ 王安成¹

(1. 中国人民解放军战略支援部队信息工程大学 郑州 450001; 2. 78102 部队 成都 610036)

摘要: 野外基线是测绘科学技术领域中特殊的长度实物标准, 可用于检定全站仪等光电测距仪的加、乘常数, 为确保检定结果的真实、准确、可靠, 定期进行野外基线的溯源是必不可少的。目前我国主要采用 24 m 因瓦尺或高精度光电测距仪 2 种方法实现野外基线的溯源, 已有大量实验事实表明, 我国野外基线的量值传递与国外仍存在着不一致的问题。随着我国制造业的快速发展和“中国制造 2025”的提出, 传统的野外基线溯源技术很难满足越来越高的精度要求, 迫切地需要实现野外基线精密测距。结合国内外研究现状, 对光干涉法、24 m 因瓦尺法和高精度光电测距法进行总结, 深入分析了 3 种野外基线溯源方式的优缺点。最后, 对我国未来的基线场建设提出了一些思考与建议。

关键词: 野外基线; 溯源; 量值传递; 高精度

中图分类号: TB921 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Research on traceability technology of outdoor baseline

Gu Youyi¹ Jiang Lixing¹ Sun Zhenxiong² Wang Li¹ Wang Ancheng¹

(1. PLA Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China;

2. 78102 Troops, Chengdu 610036, China)

Abstract: Outdoor baseline is the special length standard in the field of surveying and mapping, it can be used to verify the addition and multiplication constants of the total station and other photoelectric rangefinders. In order to ensure the authenticity, accuracy and reliability of verification results, conducting outdoor baseline traceability periodically is essential. At present, direct measurement by 24 m invar tape or high precision electro-optical measurement is mainly used to achieve the traceability of outdoor baseline in China, a large number of experimental facts have shown that there are still system errors between the quantity transfer of baselines in China and abroad. With the rapid development of China's manufacturing industry and the proposal of "made in China 2025", the traditional traceability technology of outdoor baseline is difficult to meet the increasingly high precision requirements, and it is urgent to achieve the outdoor baseline precision ranging. Combined with the current research situation at home and abroad, optical interferometry by Vaisala interference comparator, direct measurement by 24 m invar tape and high precision electro-optical measurement are summarized, the advantages and disadvantages of the three methods are deeply analyzed. Last but not least, some thoughts and suggestions are put forward for the future outdoor baseline field construction in China.

Keywords: outdoor baseline; traceability; quantity transfer; high precision

0 引言

基线(Baseline)是指具有精确距离和稳固标志的两点构成的空间直线段。野外基线(Outdoor Baseline)是在室外相互关联的多个观测墩柱构成的一组长度基线的统称, 作为特殊的长度实物标准, 为光电测距仪等测长仪器提供长度标准, 是实现大尺寸距离传递的重要技术手段^[1]。

依据 JJG 703—2003《光电测距仪检定规程》, 光电测距

仪的加、乘常数一般基于野外基线来检定^[2], 加常数检定与基线长度无关, 乘常数检定的可靠性与基线长度成正相关。虽然越来越多的研究人员开始关注背靠背法、动态基线法、光纤法等室内检定法, 但目前还没有溯源到国家的长度基准, 没有修订相关室内检定规程^[3]。基线检定法可以理解成是仪器在室外性能优良程度的综合反应^[4]。当检定结果偏差较大时, 则说明仪器不稳定, 这也说明了基线检定法存在的必要性。野外基线场一般全长 1 km 左右, 地壳运动、

收稿日期: 2019-03

* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFF0206000)资助。

地下水位变化等会对长距离、高精度检定场产生不可忽视的影响。因此,野外基线的标准长度需定期进行校准^[5]。

1 野外基线溯源关键技术

1.1 光干涉法

目前,光干涉法是国际上公认精度最高的基线校准方法,其校准基线原理如图 1 所示。根据光的干涉原理,两束光的光程差等于波长的整数倍,干涉相长;光程差为半波长的整数倍,干涉相消。在半反射镜 B 顶端按 1:1 分开的两束光会合时的光程差为 0,会产生明亮的干涉条纹。距离 D_{AB} 由 1 m 石英杆尺精确测量,根据光学倍乘原理, D_{BC} 是 D_{AB} 的整数倍^[6]。由于距离 D_{BC} 越大,产生的干涉条纹亮度越弱,况且环境的变化也会导致干涉条纹的抖动,故光干涉法校准基线长度有限,一般能够校准 400 m 左右。

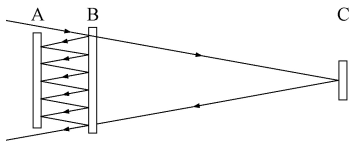


图 1 光干涉法原理

1.2 24 m 因瓦尺法

国测一大队是国家授权的全国唯一野外大长度量值传递机构,承担全国所有比长基线场的周期性检定工作^[7]。按照 JJG 306—2004《24 m 因瓦基线尺检定规程》的要求,用于基线校准的因瓦尺应每年送国家级计量检定部门进行长度检定,每 5 年检定一次膨胀系数,并出具检定合格证书^[8]。

因瓦尺检定合格后,依据 GB 16789—1997《比长基线测量规范》^[9],使用 6 根 24 m 因瓦尺(也可使用 4 根尺)将基线场分成等距离的 3 节。每节使用 4 根尺测量,两根往测,两根返测,每次使用的 2 根尺最好具有不同的膨胀系数,测量时尺的配置如表 1 所示。

表 1 用于各节测量的因瓦尺配置

	往测	返测
第一节	1,2	3,4
第二节	5,6(3,4)	1,2(5,6)
第三节	3,4(5,6)	5,6(1,2)

将各节尺测量结果进行温度改正、尺长改正和倾斜改正后,各段长度之和为基线全长,并依据 JJF 1214—2008

《长度基线场校准规范》,对校准结果进行不确定度评定^[10]。

1.3 高精度光电测距法

瑞士徕卡公司作为生产测绘仪器的代表厂家,在高精度测距仪方面关键技术的研究一直处于世界领先地位。其生产的 ME5 000 测距仪,在上个世纪末是精度最高的光电测距仪,测距标准差达到 $0.2 \text{ mm} + 0.2 \times 10^{-6} D$,是国际公认的野外基线校准工具,但目前已经停产。

2012 年推出的新一代高精度测距仪 μ -base,方便携带、操作简单、性能优良,事先通过激光干涉仪或维塞拉基线进行检定合格后^[11],可以用来进行野外基线的校准^[12]。该仪器的外形如图 2 所示。

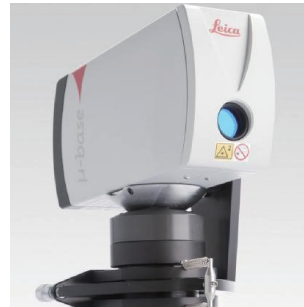


图 2 μ -base 测距仪图

不同于徕卡全站仪等常规测量仪器的操作方式, μ -base 测距仪主机上没有显示屏与键盘,是基于安装在 Windows xp 或 Windows 7 系统下的 Pilot 应用软件实现精密测距的,整套测距系统如图 3 所示。 μ -base 所测距离的精度主要取决于环境温度、气压与湿度的测定精度,通过在 Pilot 软件中输入气象参数,可实时显示测量结果,并保存为 csv 格式数据文件,便于后期数据处理。主要技术参数如表 2 所示^[13]。

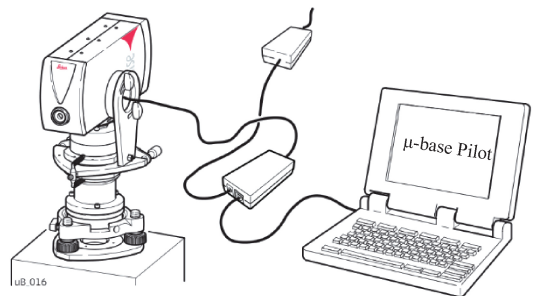


图 3 μ -base 测距系统

表 2 μ -base 主要技术参数

外形尺寸		环境要求		绝对测距			
重量	大小	工作环境	存储环境	波长	有效测距范围	测量误差	推荐使用棱镜
2.4 kg	250 mm×110 mm ×64 mm	0~+40 °C	-10~+60 °C	780 nm	1.5~160 m	±10 μm	RRR 球棱镜、GPH1P 圆棱镜 或 GMP101 型小棱镜

信息工程大学包欢等对 μ -base 校准基线方法进行了深入研究^[14]。

如图4(a),对于长度在150~300 m的基线A-B,在A、B观测墩上放置球棱镜,在C观测墩上安置 μ -base 测距仪,调整高度、位置,确保 μ -base 测距仪的测距中心在A、B点棱镜中心连线上且A、B、C 3点在同一铅垂面内。忽略仪器常数(5 μ m 以内),基线A-B的斜距测量值为两者之和加上2倍的仪器常数K:

$$S_{A-B} = d_1 + d_2 + 2K \quad (1)$$

如图4(b),对于长度小于200 m的基线A-B,基线A-B的斜距测量值为:

$$S_{A-B} = d_1 - d_2 \quad (2)$$

为得到基线墩间的平距且减少精读损失,可利用精密水准测量或高精度全站仪三角高程测量,得到基线墩间的高差,利用勾股定理进行高差改正,即可得到基线点间的平距。

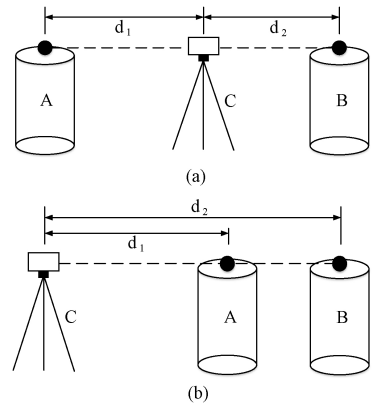


图4 μ -base 测距仪测量方法

2 发展现状及存在问题

根据国内外研究资料,光干涉法、高精度光电测距法和24 m 因瓦尺法3种方式的量值传递如图5。

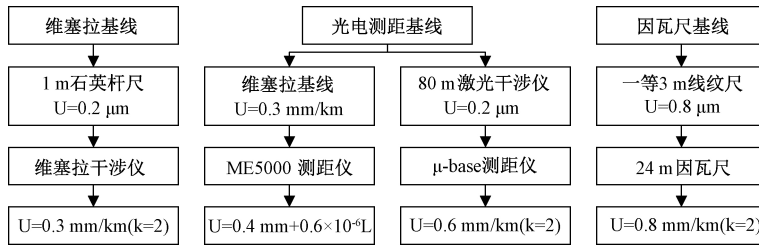


图5 野外基线校准三种方式的量值传递

2.1 光干涉法发展现状

目前,基于光干涉法的维塞拉基线是测量野外基线精度最高的方法,已有大约十余个国家建设了此类基线。其中,芬兰奴米拉标准基线(nummela standard baseline, NSB)是世界各国公认的野外长度基准,精度最高且最稳定^[15-16]。奴米拉基线坐落于芬兰的森林里,如图6,各基线墩由铁栅栏小房保护,仅在测线沿线开窗保证视通,受自然影响较小,能够校准864 m,全长的扩展不确定度为 $U = 0.3 \text{ mm/km} (k=2)$ 。



图6 芬兰 Nummela 基线场

在芬兰大地测量研究所(finnish geodetic institute, FGI)的帮助下,我国曾在北京长阳和成都分别建设过432 m和378 m的维塞拉基线^[17-19],由于城市建设等因素,均已废弃,目前我国没有一条维塞拉基线。

2.2 24 m 因瓦尺法发展现状

用于基线校准的因瓦尺已经停产,因瓦尺法也已逐步被美国、加拿大等发达国家所淘汰,但我国仍然在大量使用。因瓦尺法属于机械测量长度的方法,几十年来,因瓦尺在我国计量史上发挥了巨大的作用,但随着基线校准精度要求的不断提高,因瓦尺法的弊端逐渐显露^[20-21]:

1)24 m 因瓦尺仅在两端10 cm 内有mm 刻划,为方便野外基线校准,基线墩间的距离常常是24 m 的整数倍。不过目前有的基线场构建方式有了较大改变,基线墩间距离组合不一定均是24 m 整数倍,因瓦尺法校准难度很大。

2)测量过程中各段尺测长的叠加会造成误差累积,且不能消除。

3)野外测量只能采用肉眼观测,与室内检定使用显微镜相比,大大增加了人为的不确定性。

4)作业时间较长,且对作业人员技术要求很高。

2.3 高精度光电测距法发展现状

美国国家大地测量局(NGS)^[22-23]、加拿大国家大地测量局(GSD)^[24]、澳大利亚国家计量协会(MSA)^[25]、西班牙

瓦伦西亚理工大学 (UPV)^[26]、立陶宛维尔纽斯科技大学 (VGTU)^[27-28]、克罗地亚萨格勒布大学^[29]等均采用在芬兰 Nummela 基线上校准的高精度光电测距仪进行基线校准,为实现我国野外基线的精密测距提供了参考。

解放军 61 365 部队和信息工程大学也在高精度光电测距法上进行了大量的尝试,取得了较大的进展^[30-31]。付子傲等于 2009 年 1 月 11 日至 2010 年 6 月 29 日期间,使用 3 台性能稳定的光电测距仪,包括 1 台 ME5000 和 2 台 DI2002,基于郑州黄河大堤基线场、北京昌平基线场、芬兰奴米拉基线场和成都三宜基线场进行了 6 期的测量,按照基线比较法计算每台仪器的加乘常数,比较在因瓦尺基线与维塞拉基线上所获得的结果,发现我国野外基线的量值传递与国外存在着不一致的问题,因瓦尺基线与维塞拉基线间系统误差为 -3.7 mm/km ^[32]。

近年来,国内大多采用高精度光电测距仪 μ -base 进行基线校准,虽然精度达到 μm 级,但测量气象元素普遍采用两点法,即认为测线上测站和镜站气象元素的平均值为该测线的气象值,无法有效地消除大气折射的影响,从而带来气象代表性误差^[33]。可参考德国联邦物理技术研究院 (physikalisch-technische bundesanstalt, PTB)^[34]和中国计量科学研究院^[35],为提高测量精度,在基线沿线密集地布设高精度气象传感器,精确测量气象参数,进行大气折射改正,与传统两点法测量气象元素相比,显著提高了测量精度。德国 PTB 基线场全长 600 m,测量温度、气压和湿度分别引入的不确定度为 1.4×10^{-7} 、 5.4×10^{-8} 和 2.0×10^{-8} 。中国计量科学研究院在 1 176 m 的基线场上,布设了 60 个 Pt-100 铂电阻温度传感器、3 个 PTB330 气压传感器和 13 个 HMP155 湿度传感器,但还没有明确资料表明已完成基于环境参数自动采集系统的基线全长不确定度评定实验。

3 结 论

随着我国制造业的快速发展和“中国制造 2025”的提出,为使我国从制造大国向制造强国迈进,传统的野外基线溯源技术很难满足越来越高的精度要求,解决量值传递间的系统误差迫在眉睫,对我国基线场建设有以下思考:

1) 保守估计我国计量等部门已建成的野外长度基线场接近 100 条,受限于城市建设等因素,其长度均在 1 000 m 左右甚至更短,例如北京市测绘院的标准长度基线场的长度为 1 032 m,信息工程大学基线长度为 1 140 m。随着测量仪器更新换代的速度不断加快,如 Leica 全站仪 TS60 在圆棱镜测量模式下的测程达到了 3 500 m,目前野外基线场的长度不能满足长距离室外检定需要,建立一些长度更长的野外基线场是有必要的。

2) 应考虑在我国寻找合适地域,或借助芬兰 FGI 研究人员的帮助,建设一条维塞拉基线,用于检定高精度仪器和下一个精度级的野外基线等,作为野外量值传递的基

准,解决我国不同量值传递方法间系统误差的问题,与国际高精度实验数据接轨。

3) 考虑到目前我国境内没有一条采用光干涉法测量的基线,建设一条基于环境参数自动采集系统的光电测距基线是很有必要的。由于成本很高且维护会进一步耗费人力、物力、财力,在基线沿线建立环境参数自动采集系统广泛普及较为困难。可以仿照昌平基线场建设经验,考虑在国内再建设几条高精度基线场。环境参数自动采集系统由数量众多的温度、湿度、气压等传感器组成,这些气象传感器检定周期一般为 1 年,但长时间暴露在室外,在检定周期内仍存在突变故障和缓变故障的可能,保证气象传感器的精度和稳定是实现高精度基线校准的基础,对众多设备的故障检测仍需进一步深入研究,确保基线校准结果真实、准确、可靠。

4) 采用 24 m 因瓦尺时,可在现有研究基础上,对已识别的各项误差源进行室外环境下的综合组合实验,优化误差影响模型,可采用基于摄像技术的自动化辅助测量及处理方法,减少人工操作引入的误差,优化溯源方法及补偿模型,提高因瓦基线尺的量值溯源准确度。

5) 随着我国 BDS、美国 GPS 等全球卫星导航定位系统迅速发展,高精度(测地型)GNSS 接收机在短基线解算精度方面有了显著提高,其中使用 GAMIT 软件解算短基线的精度优于 1 mm,但仍未达到校准基线的精度要求,况且基线沿线可能存在树木等障碍物的遮挡,不过这仍可成为不断完善长度量值传递体系进行的有益探索。

6) 近年来飞秒频率梳测距技术^[36]与量子精密测距技术^[37]已成为国内外的研究热点。飞秒频率梳测距技术在实验室内的精度已达到纳米级甚至亚纳米级。量子精密测距技术测量精度高,抗噪能力强,可以做到室外测距。这两种方法的测距系统均比较庞大,不够便携,在野外环境下测距会受到温湿度、湍流等大气影响,致使测量精度下降。但可以预见的是,在精密测量领域,这将是未来测距的研究方向。

解决我国野外基线的量值与国外基线量值不一致的问题,实现野外基线精密测距,将对精密测量仪器的检定起到至关重要的作用,有利于我国长度计量体系的精化、基础领域的发展,可为我国的国防建设、重大基础设施建设、航空航天、国民经济等领域发挥重要的作用。

参考文献

- [1] 杨俊志, 薛英. 野外基线长度量值的溯源问题[C]. 全国测绘仪器综合学术年会, 2009: 115-119.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 703-2003 光电测距仪检定规程[S]. 北京: 中国计量出版社, 2003.
- [3] 刘浩. 光电测距仪检定方法的研究进展[J]. 中国测试, 2017(S1): 8-14.
- [4] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 703-2003 光电测距仪检定规程[S]. 北京: 中国计量出版社, 2003.

- [5] 薛英,付子傲.测距基线点位位移及应对办法[C].全国测绘仪器综合学术年会,2009:56-60.
- [6] 霍立业,秦显平.标准基线的测量原理及其精度分析[J].测绘技术装备,2006,8(1):5-7
- [7] 陈真,郭赞峰.比长基线几种丈量方案的比较[J].测绘技术装备,2012,14(4):33-34.
- [8] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 306—2004 24m 因瓦基线尺检定规程[S].北京:中国计量出版社,2004.
- [9] 国家质量监督检验检疫总局. GB 16789—1997.比长基线测量规范[S].北京:中国计量出版社,1998.
- [10] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1214—2008.长度基线场校准规范[S].北京:中国计量出版社,2008.
- [11] 李建双.室内 80 m 大长度激光比长国家标准装置的研制[D].天津:天津大学,2017.
- [12] 李广云,范百兴.精密工程测量技术及其发展[J].测绘学报,2017,46(10):1742-1751.
- [13] base User Manual v1.0.0 [Z]. Leica Geosystems AG, 2010.
- [14] 包欢,赵东明,王若璞,等.高准确度基线检定仪器 μ -base 基线场测量试验[J].计量学报,2014,35(6A):109-112.
- [15] JOKELA J, HKLI P. Interference measurements of the nummela standard baseline in 2005 and 2007[R]. Helsinki: Publications of the Finnish Geodetic Institute, 2010.
- [16] JOKELA J. Current Research and development at the nummela standard baseline [C]. FIG Congress. Munich, Germany, 2006.
- [17] 卢乾坤,杜宗玉,卡列宁,等.北京长阳标准基线场的建立[J].测绘通报,1986(5):20-33.
- [18] 李荃,康蒂宁,约克拉.北京长阳标准基线复测报告[J].测绘通报,1992(1):12-24.
- [19] JOKELA J. Interference measurements of the chang yang standard baseline in 1994 [M]. Helsinki: Publications of the Finnish Geodetic Institute, 1995.
- [20] 张则宇,刘智超,张九龙,等.长度基线校准装置的设计与实现[J].海洋测绘,2017(5):76-79.
- [21] 李建双,梁平,赵岩等.野外大长度标准器—24 m 因瓦基线尺量值的可靠性[J].计量学报,2008,29(4A):74-76.
- [22] JOKELA J, HKLI P, AHOLA J, et al. On traceability of long distances [R]. 2011-10-25.
- [23] JOSEPH F D, CHARLES J F, RAYMOND W T. Establishment of calibration base lines [C]. NOAA Technical Memorandum NOS NGS 8, Revised March 2014.
- [24] BRESEE B, VAMOSI S. Comparison of the Canadian national baseline with the vaisala-standard in Munich[C]. Commission 5 FIG XIX Congress, Helsinki; [s. n.], 1990:431-436.
- [25] VOLKER J, TONY W. Current status of EDM calibration procedures in NSW[C]. Proceedings of the 19th Association of Public Authority Surveyors Conference (APAS2014), Pokolbin, New South Wales, Australia, 31 March-2 April 2014.
- [26] LUIS G A, SERGIO B, PASCUAL G. Deformation monitoring of the submillimetric UPV calibration baseline [J]. J. Appl. Geodesy 2017, 11(2): 107-114.
- [27] ARUNAS B, ROSITA B, RICARDAS K, et al. Analysis of the calibration quality of the Kyvikes calibration baseline [J]. Acta Geod Geophys, 2016.
- [28] ARUNAS B, JORMA J, RAIMUNDAS P. Traceability, stability and use of the Kyvikes calibration baseline—The first 10 years [C]. The 7th International Conference, May 22-23, 2008.
- [29] NIKOLA S, MILJENKO L, GORANA N. Testing the precision of the electro-optical distance meter mekometer ME 5000 on the calibration baseline Zagreb [J]. Survey Review, 2002, 286: 612-626.
- [30] 刘智超,张则宇,朱建军. ME5000 测距仪校准测距基线的可行性分析[J].计测技术,2013(5):63-65.
- [31] 王俊勤,刘智超,张则宇,等. CHB 5.10—2010 军用测距基线校准规程—ME5000 光电测距仪施测要求[S].北京:解放军 1205 厂,2010.
- [32] 付子傲,朱江,孙方飞.长度基线溯源问题探讨[J].测绘科学技术学报,2011(3):157-160.
- [33] 张海波,张健,韩正阳.野外基线温度测量方法探讨[J].计量测试与检定,2017,27(1):36-37.
- [34] POLLINGER F, MEVER T, BEYER J. The upgraded PTB 600 m baseline: a high-accuracy reference for the calibration and the development of long distance measurement devices [J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(9): 094018-1-094018-11.
- [35] 陈杨,李建双,缪东晶,等.基于传感器阵列的野外基线环境参数自动测量系统研制[J].计量学报,2018(4):455-460.
- [36] 周维虎,石俊凯,纪荣祎,等.飞秒激光频率梳精密测距技术综述[J].仪器仪表学报,2017,38(8):1859-1868.
- [37] 韩笑纯.量子精密测距理论和数据处理技术研究[D].上海:上海交通大学,2015.

作者简介

谷友艺,硕士,主要研究方向为测控仪器与计量检定。

E-mail:1943624866@qq.com

蒋理兴(通信作者),教授。

E-mail:lixing_jiang@126.com