

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.03.11

相干多普勒测风激光雷达校准方法研究

陈朝勇, 魏媛媛*, 邢帅, 佟梓慷, 武腾飞

(中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 针对相干多普勒测风激光雷达需要校准的参数多、涉及计量专业多、校准方法不全的问题, 充分考虑激光测风非接触、高时空分辨、大探测量程的特性, 采用“特征分析-多手段融合”的方法体系, 突破了风速、风向、最大测量距离、探测盲区等争议性参数的量化评价难点。分析定标转盘、射频信号模拟多普勒频移、标准风速仪3种不同风速校准方法的优缺点和适用条件, 并对定标转盘风速校准法进行改进, 提升风速参数校准的数据可靠性。针对风向校准难题, 辩证性地给出了不同扫描模式下的校准方法, 提升校准普适性。基于具体测量案例给出了风速、风向的校准结果, 并对风速、风向参数进行不确定度分析, 有效地说明了校准方法的可行性。研究成果为气象观测、航空安全、新能源等领域的风场精准探测提供了标准化技术支撑, 对于推动大气遥感计量技术发展具有积极意义。

关键词: 相干多普勒探测; 测风激光雷达; 特征分析; 多手段融合; 校准方法; 不确定度分析

中图分类号: TB9; TN95; P414.7 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795 (2025) 03-0123-10

Research on the calibration methods for coherent Doppler wind lidar

CHEN Chaoyong, WEI Yuanyuan*, XING Shuai, TONG Zikang, WU Tengfei

(AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: In light of the challenges posed by the requirement of numerous parameters calibration, the involvement of multiple metrology specialties, and the inadequacies in existing calibration methods for coherent Doppler wind lidar. Considering the characteristics of laser wind measurement, such as non-contact, high spatiotemporal resolution and large detection range, the method of "feature analysis and multi-method integration" is adopted to break through the difficulties of quantitative evaluation of controversial parameters such as wind speed, wind direction, maximum measurement distance and detection blind zone. The advantages, disadvantages and applicable conditions of three different wind speed calibration methods, namely the wind speed calibrations using a calibration turntable, the radio frequency signal simulation of Doppler frequency shift and using a standard anemometer, are analyzed. Moreover, the calibration turntable wind speed calibration method was improved to enhance the data reliability of the wind speed parameter calibration. Aiming at the difficult problem of wind direction calibration, the calibration method under different scanning modes is presented dialectically to improve its universality. Based on specific measurement cases, the calibration results of wind speed and wind direction are given, and the uncertainty analysis of wind speed and wind direction parameters are performed, effectively illustrating the feasibility of the calibration method. The research results provide standardized technical support for the precise detection of wind fields in such fields as meteorological observation, aviation safety, and new energy, and

收稿日期: 2025-04-07; 修回日期: 2025-05-13

基金项目: 航空科学基金项目(20230046044001)

引用格式: 陈朝勇, 魏媛媛, 邢帅, 等. 相干多普勒测风激光雷达校准方法研究[J]. 计测技术, 2025, 45(3): 123-132.

Citation: CHEN C Y, WEI Y Y, XING S, et al. Research on the calibration methods for coherent Doppler wind lidar[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(3): 123-132.



have positive significance for promoting the development of atmospheric remote sensing metrology technology.

Key words: coherent Doppler detection; wind lidar; feature analysis; multi-method fusion; calibration method; uncertainty analysis

0 引言

测风激光雷达在风力发电、气象观测、飞行器大气数据探测、飞机尾流观测等领域具有重要的应用前景^[1-4]，中国海洋大学、南京信息工程大学、中国科学技术大学、西南技术物理研究所、北京理工大学、中科院上海光机所等科研机构均开展了测风激光雷达相关研究，目前相关产品和技術呈现快速发展态势^[5-7]。传统的空气流速测量仪器(例如电接风向风速仪、超声波风向风速测量仪、自动气象站杯式风速传感器等)一般通过标准风洞进行校准。而测风激光雷达测量风场范围在公里量级、距离分辨力在数十米量级，难以建造相应庞大尺寸的标准风洞对其进行校准；此外，测风激光雷达需要校准的参数多^[8-9]、涉及计量专业多。如何实现测风激光雷达的精确校准是研究人员重点关注的问题。

目前，国内外公开使用的与测风雷达相关的标准规范主要包括文献[10-14]。文献[10]规定了外差脉冲多普勒激光雷达的技术要求和性能测试程序，其适用于测量距离范围为3~10 km的外差相干测风激光雷达。文献[11]规定了单站外差连续波多普勒激光雷达技术的要求和性能测试程序，并介绍了其优点和局限性。文献[12]为我国军用

测风雷达的通用规范，涉及的雷达波段为P、L、S、C、X，这些波段的雷达波长均大于2.5 cm。文献[12]虽然涉及微波测风雷达标准，但不涉及近红外激光波段的相干多普勒测风激光雷达校准。文献[13-14]规定了采用相干探测体制的地基相干多普勒测风激光雷达在设计、生产、检验、试验测试、包装运输等方面的基本要求，但未给出相干多普勒测风激光雷达的具体校准要求。

为规范相干多普勒测风激光雷达的校准方法及流程，国家国防科技工业局起草了文献[15]。为了更深入分析校准过程中的测试方法和注意事项，本文较为全面地研究相干多普勒测风激光雷达参数的校准方法，讨论不同方法的优缺点，对风速、风向等关键参数的不确定度进行分析，更好地规范和指导相干多普勒测风激光雷达的校准，有效地保障测风激光雷达风场测量的科学性、准确性和可靠性。

1 相干多普勒测风激光雷达及校准项目

1.1 相干多普勒测风激光雷达

相干多普勒测风激光雷达是采用外差相干探测原理实现大气风速、风向等参数测量的设备，其探测原理如图1所示。相干多普勒测风激光雷达发射单频激光光束至大气中，大气中运动的分子、

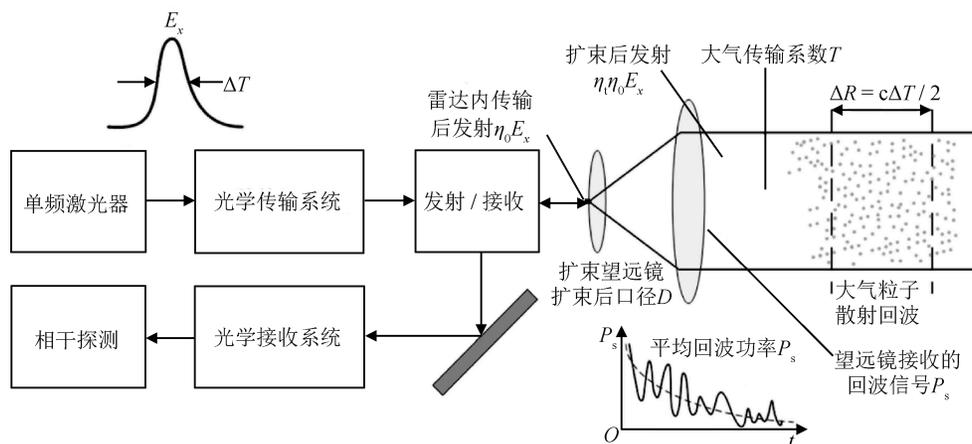


图1 相干多普勒测风激光雷达探测原理

Fig.1 Detection principle of coherent Doppler wind lidar

气溶胶粒子等使激光产生多普勒频移，由相干多普勒测风激光雷达的接收系统接收包含多普勒频移的激光回波信号，并结合相干多普勒测风激光雷达的本振光进行相干外差探测，从而得到大气风场信息。

1.2 校准项目及分类

相干多普勒测风激光雷达的测量参数包括风速、风向、量程、空间分辨、时间分辨、扫描参数等，涉及力学、几何量、时间频率等计量专业。相干多普勒测风激光雷达校准项目及分类如表1所示。

表1 相干多普勒测风激光雷达校准项目及分类
Tab.1 Calibration items and classification of coherent Doppler wind Lidar

类别	校准项目
风速	径向风速测量示值误差
	径向风速测量范围
	水平风速测量示值误差
	水平风速测量范围
	垂直风速测量示值误差
风向	垂直风速测量范围
	风向测量示值误差
	水平风向测量误差
量程(距离测量范围)	风向分辨力
	最大测量距离
空间分辨	测量盲区
	径向距离分辨力
时间分辨	角度分辨力
	径向测量时间分辨力
扫描参数	俯仰角范围
	俯仰角示值误差
	方位角范围
	方位角示值误差
	扫描速度

2 相干多普勒测风激光雷达校准方法研究

2.1 风速参数校准方法分析

相干多普勒测风激光雷达风速参数校准方法主要包括：定标转盘、射频信号模拟多普勒频移、

标准风速仪3种不同风速校准法。下面对这3种方法的操作过程、注意事项及优缺点展开具体论述。

1) 定标转盘风速校准法

定标转盘风速校准法的原理为：利用定标转盘的边缘线速度作为速度标准，与相干多普勒测风激光雷达测量的速度值进行比对实现校准。定标转盘风速校准示意图如图2所示。

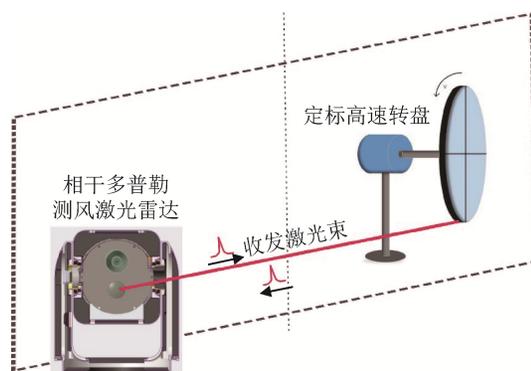


图2 定标转盘风速校准示意图

Fig.2 Diagram of calibrating wind speed with a standard turntable

转盘边缘线速度 v_0 可表示为

$$v_0 = \pi d n \tag{1}$$

式中： d 为转盘直径， n 为转速。

应用定标转盘风速校准法的难点在于：①相干多普勒测风激光雷达存在近场盲区，转盘距离雷达很近时，雷达无法给出速度值；②雷达光束应严格按转盘边缘的切线方向发射；③雷达发射的光束通常经望远镜进行了放大，光束口径通常为数厘米、数十厘米，且发射的激光一般为人眼不可见光，这给光路的调节带来较大困难。

针对难点①的解决方案为：转盘与雷达的间距应大于测量盲区，依据文献[16]，该距离应不低于60 m。针对难点②和难点③的一种解决方案为：步骤一，在雷达光源接入望远镜之前进行小光束准直或者在雷达望远镜系统外增加额外的光学系统，将雷达发射光束直径缩小并形成近似准直光束，光束直径应接近转盘边缘厚度，方便聚焦在转盘边缘；步骤二，将小光束沿转盘切线方向对准转盘边缘，读取雷达测量的速度值时，选取多普勒频谱图上的次峰峰值对应的多普勒频率，如图3所示，其中主峰为雷达近场盲区信号产生的多普勒频移，次峰为转盘产生的多普勒频移。当

转盘转速较小(通常对应的边缘线速度不高于2 m/s)时,雷达多普勒频谱图上主次峰会重叠,因此采用上述方案时,需要在零风速处进行硬目标真值零速验证。

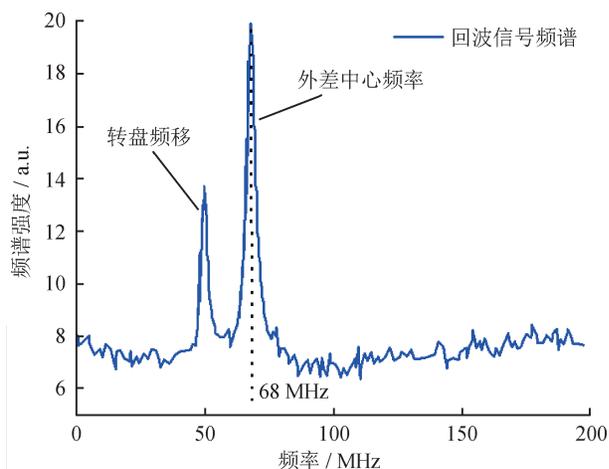


图3 回波信号频谱
Fig.3 Echo signal spectrum

2) 射频信号模拟多普勒频移风速校准法

射频信号模拟多普勒频移风速校准法的原理为:将射频信号源产生的射频信号直接输入雷达的回波数据采集端,通过观察雷达测量的速度值实现校准。射频信号源模拟的风速值 v_s 可表示为

$$v_s = (f - f_{AOM}) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

式中: f 为射频信号源输出频率; f_{AOM} 为相干多普勒测风激光雷达内置声光调制器的频移值,由雷达说明书得到; λ 为相干多普勒测风激光雷达内置激光的波长值,由雷达说明书得到。

射频信号模拟多普勒频移风速校准法的优点为:精度高、操作方便(尤其是在校准大风速值和风速测量范围时);缺点为:该方法只验证了雷达的信号采集处理和风速反演的性能,并未验证雷达光学系统的性能。

3) 标准风速仪风速校准法

标准风速仪风速校准法的原理为:将标准风速仪测量的风速值与相干多普勒测风激光雷达测量的风速值进行比对,从而实现校准。相干多普勒测风激光雷达测量的是一个距离门内大气气流作用下的风速值,而标准风速仪通常测量单点风速值,因此两者比对存在一定的局限性。为提升

标准风速仪风速校准的准确性,应选择空旷的外场场地,且风速、风向应较为稳定。

相干多普勒测风激光雷达风速测量精度与其自身的信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)有关^[17],随着探测距离的增加,相干多普勒测风激光雷达的信噪比逐渐减低,因此相干多普勒测风激光雷达测量远场和近场风速的精度不同。在数据处理中,采集系统的奈奎斯特频率 F_s 、距离门的长度 M (单个距离门内的采样点数)、脉冲积累次数 N 等都会影响风速反演精度。数据处理算法对风速精度的估计存在克拉美-罗下界(Cramer-Rao Lower Bound, CRLB)。对于高斯型脉冲,其CRLB的近似公式为^[18]

$$\sigma_{v, \text{CRLB}}^2 \approx \left(\frac{\lambda F_s}{2} \right)^2 \frac{4\sqrt{\pi} \Delta f^3}{N M S_{\text{SNR}}^2} \left(1 + 0.16 \frac{S_{\text{SNR}}}{\Delta f} \right)^2 \quad (3)$$

式中: $\sigma_{v, \text{CRLB}}$ 为风速误差的下界, λ 为发射激光波长, Δf 为 F_s 归一化后的高斯谱宽, S_{SNR} 为回波信号的信噪比。

风速测量误差CRLB与相干多普勒测风激光雷达信噪比的关系如图4所示,可以看出:当信噪比较高时, $\sigma_{v, \text{CRLB}}$ 更低,且 $\sigma_{v, \text{CRLB}}$ 的变化幅度较小;当信噪比较低时, $\sigma_{v, \text{CRLB}}$ 较高,且 $\sigma_{v, \text{CRLB}}$ 的变化幅度较大。定标转盘风速校准法、射频信号模拟多普勒频移风速校准法、标准风速仪风速校准法均在雷达近场进行校准,此时雷达信噪比很高,甚至可能超过相干多普勒测风激光雷达正常进行大气风场观测时近场信号的信噪比,这会导致校准

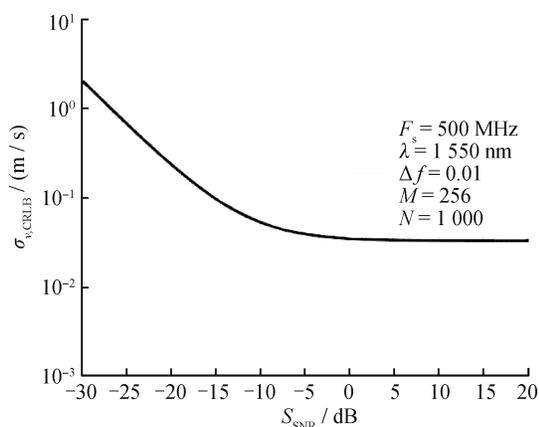


图4 风速测量误差CRLB与相干多普勒测风激光雷达信噪比的关系图

Fig.4 Relationship between CRLB of wind speed measurement error and SNR of coherent Doppler wind lidar

时获得的示值误差(即激光雷达校准过程中风速测量值与校准值之间的偏差)与实际测量误差(即相干多普勒测风激光雷达测量真实大气风场过程中风速测量值与真实值之间的偏差)不一致。因此校准时应通过衰减相干多普勒测风激光雷达输出功率、选择合适的射频信号输入强度等方式,使相干多普勒测风激光雷达信噪比与实际观测时一致。校准相干多普勒测风激光雷达远场风速测量误差时,应充分考虑低信噪比对风速测量误差带来的影响。采用射频信号模拟多普勒频移风速校准相干多普勒测风激光雷达远场风速测量误差时,可采用降低射频信号输入幅度或者叠加白噪声输入的方式,使相干多普勒测风激光雷达获得与远场风信号同等的信噪比,在此基础上再进行风速测量误差校准。

2.1.1 径向风速测量示值误差

径向风速测量示值误差是指沿着雷达激光发射的方向,雷达风速测量值与校准器具标准值之间的风速误差。定标转盘风速校准法、射频信号模拟多普勒频移风速校准法、标准风速仪风速校准法均可对径向风速测量误差进行校准。需要注意的是,采用标准风速仪对雷达径向风速进行测量时,雷达的激光发射方向应与风向平行。

2.1.2 径向风速测量范围

径向风速测量范围是指沿着雷达激光发射的方向,雷达可以探测并给出正确风速的范围。通常,相干多普勒测风激光雷达测量来向和去向的风得到的风速值分别用正风速和负风速来表示,因此径向风速测量范围通常为一个负风速到正风速的区间。定标转盘风速校准法和射频信号模拟多普勒频移风速校准法可用于校准径向风速测量范围。

2.1.3 水平/垂直风速校准方法分析

在实际的大气风场测量中,往往更关注水平和垂直风速。相干多普勒测风激光雷达单次测量只能给出沿激光发射方向的径向风速,因此需要测量2个或者多个角度下的径向风速,然后通过矢量分析得到水平和垂直方向风速。标准风速仪风速校准法能够实现水平和垂直风速校准,定标转盘风速校准法和射频信号模拟多普勒频移风速校准法则不适用。

2.2 风向参数校准方法分析

相干多普勒测风激光雷达测量的是某个区域的风向。采用水平平面位置显示(Plan Position Indicator, PPI)模式扫描时,得到的风向是测量网格内的径向风速矢量合成的结果;采用速度方位显示(Velocity and Azimuth Display, VAD)模式或多普勒光束定向摆动(Doppler Beam Swinging, DBS)模式扫描时,得到的风向为同一高度层径向风速矢量合成的结果。风向参数校准方法示意图如图5所示^[19]。

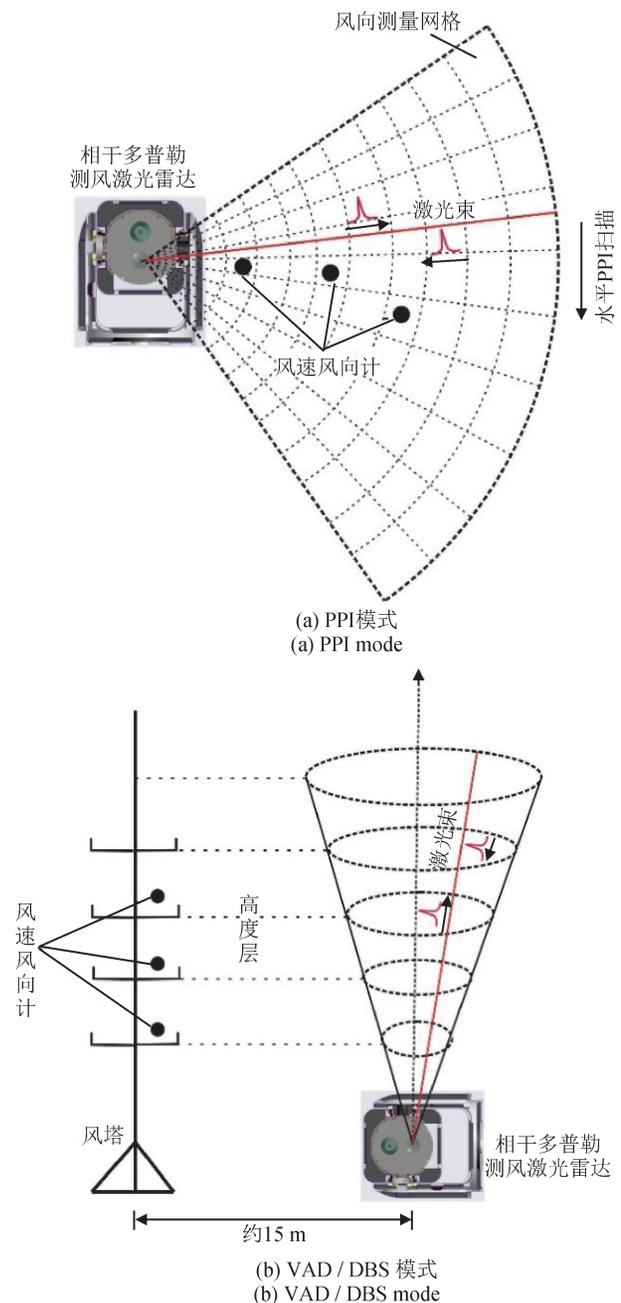


图5 风向参数校准方法示意图
Fig.5 Diagram of wind direction parameter calibration method

为了避免风向不定对校准结果产生影响,应选择空旷且风向较为稳定的外场测试环境,例如,风速应不小于 2 m/s ,风向在 10 min 内的标准差不大于 2° 。在相干多普勒测风激光雷达的测量范围内,至少选取3个合适位置放置标准风向计,且测量位置应分别属于相干多普勒测风激光雷达不同的风向测量网格或高度层。在每个位置至少连续测量5次,每次测量时间为 10 min ,以每个位置多次测量的风向平均值作为该处风向值,比对相干多普勒测风激光雷达与标准风向计测量的风向结果,实现风向参数校准。

2.3 量程参数校准方法分析

相干多普勒测风激光雷达的测量对象为大气颗粒物,是“软目标”,因此,其量程参数的验证较为困难。目前,相干多普勒测风激光雷达的量程验证主要通过查看雷达的原始数据实现,例如,评估相干多普勒测风激光雷达最大测量距离时,通过观察远程测量数据是否出现突变,以未出现突变的可测量的最远位置作为最大测量距离;评估相干多普勒测风激光雷达最小测量距离时,以相干多普勒测风激光雷达给出的最近处第1个有效风速值所对应的位置作为最小测量距离。该方法不严谨,需要探索新的手段进行联合验证和校准。

2.3.1 最大测量距离

选择空旷的外场测试环境,设置相干多普勒测风激光雷达仰角在 $0^\circ \sim 5^\circ$ 范围内,将相干多普勒测风激光雷达对准距离已知的硬目标,观察相干多普勒测风激光雷达实测数据,硬目标引起的回波信号信噪比不低于 3 dB ,硬目标对应距离处的风速测量值在 0 m/s 附近,例如,可设定为 $(0 \pm 0.5)\text{ m/s}$ 。不断增加相干多普勒测风激光雷达与硬目标之间的距离,观察相干多普勒测风激光雷达数据,直到硬目标对应的相干多普勒测风激光雷达距离门的前一个距离门显示的风速值缺失或者出现明显的失真,此时硬目标与相干多普勒测风激光雷达的距离即为相干多普勒测风激光雷达的最大测量距离。

2.3.2 测量盲区

通常情况下,相干多普勒测风激光雷达的测量盲区在数百米范围内。因此,可以在数百米范围内比对雷达与风速计测量的风速值进行比较,

观察雷达近场风速失真时对应的距离。

选择空旷的外场测试环境,在大于2倍预期的相干多普勒测风激光雷达测量盲区的距离范围内无遮挡。在相干多普勒测风激光雷达激光出射方向上放置风速风向计,以相干多普勒测风激光雷达的最小距离分辨力为单位,由近及远测量风速值(每个距离下测量不低于5次,记录风速平均值),并与相干多普勒测风激光雷达的风速测量结果进行比对,直到观察到两者风速测量结果一致(例如两者差值不高于 0.5 m/s),记录此时风速风向计与相干多普勒测风激光雷达之间的距离。查阅当前距离对应的相干多普勒测风激光雷达的距离门,以此距离门的中心距离读数作为该相干多普勒测风激光雷达的测量盲区。

2.4 空间分辨校准方法分析

相干多普勒测风激光雷达通常采用三维扫描的方式进行三维大气风场的测量,其空间分辨力包含径向距离分辨和扫描角度分辨。空间分辨力取决于雷达划分的每个距离门对应的距离,扫描角度分辨力取决于雷达扫描单元对应的扫描精度。

2.4.1 径向距离分辨力

采用对准硬目标测距的方式来获得激光雷达的径向距离分辨力。在相干多普勒测风激光雷达距离测量范围内依次放置3个硬目标,相邻硬目标之间的距离 D 等于相干多普勒测风激光雷达厂家给出的距离分辨力的值,将激光分别对准这3个硬目标,如图6所示,观察相干多普勒测风激光雷达测量得到的这3个硬目标的位置是否依次属于3个相邻的距离门,若属于,则相干多普勒测风激光雷达的距离分辨力为 D ;若不属于,则更改 D 值并重复上述测量过程,直到属于为止,最终的 D 值即为相干多普勒测风激光雷达的距离分辨力。

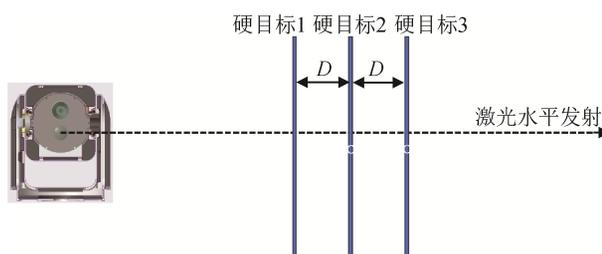


图6 距离分辨力校准方法示意图

Fig.6 Diagram of calibration method for range resolution

2.4.2 扫描角度分辨力

通常情况下，相干多普勒测风激光雷达的扫描角度分辨力取决于扫描速度和径向风速数据更新时间的乘积。可以通过降低扫描速度和提高径向风速刷新率来提升雷达的扫描角度分辨力。在不考虑光束发散角的情况下，相干多普勒测风激光雷达扫描角度分辨力等于扫描电机的角度分辨力。

2.5 径向测量时间分辨力

相干多普勒测风激光雷达的径向测量时间分辨力主要取决于雷达出射激光的重复频率、脉冲累积数、软件反演速度等。目前多数相干多普勒测风激光雷达的径向测量时间分辨力在0.1~10 s，可以通过观察单位时间内获得的有效径向风速数据的数量确定径向测量时间分辨力。

2.6 扫描参数校准方法

相干多普勒测风激光雷达扫描参数可依据JJF 1210-2008《低速转台校准规范》^[20]或文献[21]中的方法进行校准。

3 校准结果分析

分别采用定标转盘(伺服电机型号为HG-KR13J，最大转速稳定误差不超过±1%，转盘半径为150 mm)、射频信号源(频率误差不超过±1 ×

10⁻⁸)、风向传感器(型号为EL15，分辨力 $\sigma_{\text{风向}}$ 为3°，最大示值误差 $\Delta_{\text{风向}}$ 为±3°)对自主研发的相干多普勒测风激光雷达的风速、风向等关键指标进行校准测试。校准时，转盘转速为 n ，转盘边缘线速度为 v_0 ，雷达测量风速值为 v_i ，射频信号源输出频率为 f ，射频信号源模拟的风速值为 v_s ，多次测量的平均风速值为 \bar{v} ，风速示值误差为 Δv ，风向计测量的风向为 θ_0 ，雷达测量的风向为 θ_{lidar} ，风向示值误差为 $\Delta\theta$ 。定标转盘风速校准结果如表2所示，射频信号模拟多普勒频移风速校准结果如表3所示。

根据表2和表3可知：采用定标转盘进行校准时，测量的风速误差和标准差较大，采用射频信号模拟多普勒频移进行校准可以获得更准确的结果，但其只验证了雷达的信号采集处理和风速反演性能，并未验证雷达光学系统的性能。因此在进行风速校准时，建议依次采用这2种方法来综合评估相干多普勒测风激光雷达的风速测量能力。

通常情况下，在气象观测中更关注风场在垂直方向上的变化。分别在高度 h 为80、140、180 m处放置标准风向计，采用风廓线测量模式对相干多普勒测风激光雷达的风向参数进行校准，结果如表4所示。

表2 定标转盘风速校准结果

Tab.2 Calibration result of wind speed by using the calibration turntable

$n/(r/min)$	$v_0/(m/s)$	$v_1/(m/s)$	$v_2/(m/s)$	$v_3/(m/s)$	$v_4/(m/s)$	$v_5/(m/s)$
200	3.14	2.91	2.94	2.94	2.94	2.94
400	6.28	6.12	6.16	6.13	5.62	5.97
600	9.42	9.59	9.39	9.17	9.03	9.20
800	12.56	12.17	12.14	12.29	12.11	12.18
1 000	15.70	15.24	14.99	14.91	15.09	15.00
1 200	18.84	18.18	17.69	17.14	17.77	17.53
1 400	21.98	21.27	20.67	21.09	21.17	20.98
1 600	25.12	24.22	23.52	24.04	24.67	24.08
1 800	28.26	27.24	27.06	27.05	26.74	26.95
2 000	31.40	30.29	29.51	30.23	30.21	29.98
2 200	34.54	33.28	32.90	32.45	32.79	32.71
2 400	37.68	36.29	35.63	36.26	35.94	35.94
2 600	40.82	39.28	39.11	39.05	39.09	39.08
2 800	43.96	42.34	42.16	42.53	42.36	42.35

表3 射频信号模拟多普勒频移风速校准结果
Tab.3 Calibration result of wind speed with the radio frequency signal analog Doppler shift

f/MHz	$v_s/(\text{m/s})$	$\bar{v}/(\text{m/s})$	$\Delta v/(\text{m/s})$
-50	-41.13	-41.20	0.07
-30	-24.68	-24.76	0.08
-10	-8.23	-8.30	0.07
10	8.23	8.23	0.00
30	24.68	24.75	0.07
50	41.13	41.20	0.07

表4 风廓线扫描模式下的风向校准结果
Tab.4 Wind direction calibration results in wind profile scanning mode 单位: ($^{\circ}$)

$h = 80 \text{ m}$ 位置		$h = 140 \text{ m}$ 位置		$h = 180 \text{ m}$ 位置	
θ_0	θ_{lidar}	θ_0	θ_{lidar}	θ_0	θ_{lidar}
78.4	83.1	75.9	79.8	77.6	80.4
78.1	83.9	75.5	80.4	77.5	80.5
78.6	83.6	76.3	80.5	76.8	81.1
78.8	83.9	76.5	80.9	77.3	80.6
79.6	83.5	75.4	80.7	77.9	81.3
$\Delta\theta = 4.9$		$\Delta\theta = 5.5$		$\Delta\theta = 3.4$	

4 不确定度分析

4.1 风速测量不确定度分析

风速测量不确定度主要包含风速测量值引入的测量不确定度分量 u_1 和标准装置引入的标准不确定度分量 u_2 。 u_1 由测量重复性引入的不确定度分量 u_{11} 和由示值误差引入的标准不确定度分量 u_{12} 组成, 公式为

$$u_1 = \sqrt{u_{11}^2 + u_{12}^2} = \sqrt{\left(\frac{s_1}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta}{2\sqrt{3}}\right)^2} \quad (4)$$

式中: s_1 为风速测量值的标准偏差, Δ 为风速测量示值误差。

以定标转盘作为标准装置引入的标准不确定度分量 $u_{2\text{转盘}}$ 可表示为

$$u_{2\text{转盘}} = \frac{v_0 \delta_{\text{转盘}}}{2\sqrt{3}} \quad (5)$$

式中: $\delta_{\text{转盘}}$ 为定标转盘转速误差。

以射频信号源作为标准装置时, 引入的标准不确定度分量 $u_{2\text{信号源}}$ 可表示为

$$u_{2\text{信号源}} = \frac{v_s \delta_{\text{信号源}}}{2\sqrt{3}} \quad (6)$$

式中: $\delta_{\text{信号源}}$ 为射频信号源频率误差。

风速合成标准不确定度 $u_{c\text{风速}}$ 为

$$u_{c\text{风速}} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \quad (7)$$

扩展不确定度 $U_{\text{风速}}$ 为

$$U_{\text{风速}} = 2u_{c\text{风速}}, \quad k = 2 \quad (8)$$

以表2中的数据为例, 采用定标转盘风速校准方法, 取转速为 2 800 r/min, 风速测量示值误差的扩展不确定度 $U_{\text{风速(转盘)}}$ 可表示为

$$U_{\text{风速(转盘)}} = 2 \sqrt{\left(\frac{s_1}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{v_0 \delta_{\text{转盘}}}{2\sqrt{3}}\right)^2}, \quad k = 2 \quad (9)$$

计算得到 $U_{\text{风速(转盘)}} = 0.98 \text{ m/s}$ ($k = 2$)。采用定标转盘风速校准方法得到的风速测量不确定度较大, 相干多普勒测风激光雷达风速测量值的标准偏差远小于风速测量示值误差, 可以通过风速修正和提升定标转盘自身的校准精度来降低风速测量的不确定度。

以表3中的数据为例, 采用射频信号模拟多普勒频移风速方法进行校准, 取模拟频移量为 50 MHz, 10次测量值的标准偏差 $s_1 = 0.031 \text{ m/s}$, 风速测量示值误差的扩展不确定度可表示为

$$U_{\text{风速(信号源)}} = 2 \sqrt{\left(\frac{s_1}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{v_s \delta_{\text{信号源}}}{2\sqrt{3}}\right)^2}, \quad k = 2 \quad (10)$$

计算得到 $U_{\text{风速(信号源)}} = 0.05 \text{ m/s}$ ($k = 2$)。采用射频信号模拟多普勒频移风速的方法获得的风速校准结果更加精确。

4.2 风向测量不确定度分析

风向的测量不确定度由风向测量值引入的测量不确定度分量 $u_{1\text{风向}}$ 和标准装置引入的标准不确定度分量 $u_{2\text{风向}}$ 组成。 $u_{1\text{风向}}$ 的计算公式为

$$u_{1\text{风向}} = \sqrt{u_{11\text{风向}}^2 + u_{12\text{风向}}^2} = \sqrt{\left(\frac{s_{1\text{风向}}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\theta_{\text{风向}}}{2\sqrt{3}}\right)^2} \quad (11)$$

式中: $u_{11\text{风向}}$ 为风向测量重复性引入的不确定度分量, $u_{12\text{风向}}$ 为风向示值误差引入的标准不确定度分量, $s_{1\text{风向}}$ 为风向测量值标准偏差, $\Delta\theta_{\text{风向}}$ 为风向测

量示值误差。

$u_{2\text{风向}}$ 的计算公式为

$$u_{2\text{风向}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\text{风向}}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\text{风向}}}{2\sqrt{3}}\right)^2} \quad (12)$$

式中： $\sigma_{\text{风向}}$ 为风向传感器的分辨力， $\Delta_{\text{风向}}$ 为风向传感器的示值误差。

风向测量示值误差的扩展不确定度 $U_{\text{风向}}$ 的计算公式为

$$U_{\text{风向}} = 2 \sqrt{\left(\frac{s_{1\text{风向}}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\theta}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\text{风向}}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\text{风向}}}{2\sqrt{3}}\right)^2}, k=2 \quad (13)$$

以表4中 $h = 80 \text{ m}$ 条件下的数据为例计算 $U_{\text{风向}}$ ，其中， $s_{1\text{风向}} = 0.33^\circ$ ， $\sigma_{\text{风向}} = 3^\circ$ ， $\Delta_{\text{风向}} = \pm 3^\circ$ ，最终计算得到 $U_{\text{风向}} = 4.8^\circ (k=2)$ 。

5 结论

采用“特征分析-多手段融合”的方法，系统研究了相干多普勒测风激光雷达核心参数的校准技术，突破了风速、风向、最大测量距离、探测盲区等争议性参数的量化评价难点。详细分析了3种不同风速校准方法的适用条件和优缺点，改进了定标转盘风速校准方法，并通过交叉验证和互补分析，有效提升了风速参数校准数据的可靠性。针对相干多普勒测风激光雷达风向参数测量特点，辩证性地给出了不同扫描模式下的校准方法，提升了校准方法的普适性。给出了外场环境条件约束，降低了环境干扰引起的风向、量程校准误差。结合具体的测量数据案例，对风速、风向的测量不确定度进行了详细分析。研究成果对于构建相干多普勒测风激光雷达多参数一体化校准技术体系具有重要意义，为实现高准确度风场参数检测提供了有力支撑。

参考文献

[1] 杜海浪. 多普勒测风激光雷达在航空气象中的应用进展[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(24). DOI: 10.3788/LOP240947.
DU H L. Application progress of doppler wind lidar in aviation meteorology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(24). DOI: 10.3788/LOP240947. (in

Chinese)

- [2] 冯力天, 周杰, 范琪, 等. 应用于民航机场风切变探测与预警的三维激光测风雷达[J]. 光子学报, 2019, 48(5): 186-196.
FENG L T, ZHOU J, FAN Q, et al. Application research of three-dimensional wind lidar in civil aviation airport [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(5): 186-196. (in Chinese)
- [3] 顾桃峰, 岳海燕, 王四化, 等. 一种基于多普勒原理的相干测风激光雷达及其外场应用[J]. 大气与环境光学学报, 2024, 19(1): 22-37.
GU T F, YUE H Y, WANG S H, et al. A coherent wind lidar based on Doppler principle and its field application [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2024, 19(1): 22-37. (in Chinese)
- [4] 樊振兴, 张云飞, 程更建, 等. 测风激光雷达在智慧风电场的应用进展[J]. 物联网技术, 2024, 14(5): 151-155.
FAN Z X, ZHANG Y F, CHEN G J, et al. Application progress of wind measurement lidar in smart wind farms [J]. Intelligent Processing and Application, 2024, 14(5): 151-155. (in Chinese)
- [5] XIA H Y, SHANGGUAN M J, WANG C, et al. Micro-pulse upconversion Doppler lidar for wind and visibility detection in the atmospheric boundary layer [J]. Optics letters, 2016, 41(22). DOI: 10.1364/OL.41.005218.
- [6] SHANGGUAN M J, XIA H Y, WANG C, et al. Dual-frequency Doppler lidar for wind detection with a superconducting nanowire single-photon detector [J]. Optics Letters, 2017, 42(18). DOI: 10.1364/OL.42.003541.
- [7] WANG K X, GAO C Q, LIN Z F, et al. 1645 nm coherent Doppler wind lidar with a single-frequency Er: YAG laser [J]. Optics Express, 2020, 28(10): 14694-14704.
- [8] 李志刚, 孙泽中, 赵增亮, 等. 机载光纤多普勒测风激光雷达风场反演及实验验证[J]. 应用光学, 2016, 37(5): 765-771.
LI Z G, SUN Z Z, ZHAO Z L, et al. Wind retrieval of airborne fiber Doppler wind lidar and experimental verification [J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(5): 765-771. (in Chinese)
- [9] 夏俊荣, 王普才, 闵敏. 新型多普勒测风激光雷达 Windcube 的风参数观测与验证[J]. 气候与环境研究, 2011, 16(6): 733-741.
XIA J R, WANG P C, MIN M. Observation and valida-

- tion of wind parameters measured by doppler wind lidar Windcube[J]. Climatic and Environmental Research, 16 (6): 733-741. (in Chinese)
- [10] International Organization for Standardization. Air quality — environmental meteorology: part 2: ground-based remote sensing of wind by heterodyne pulsed Doppler lidar: ISO 28902-2: 2017[S]. 2017.
- [11] International Organization for Standardization. Air quality — environmental meteorology: part 3: ground-based remote sensing of wind by continuous-wave Doppler lidar: ISO 28902-3: 2018[S]. 2018.
- [12] 中国人民解放军总装备部. 军用测风雷达通用规范: GJB/5289-2004[S]. 2004.
General Armament Department of the Chinese People's Liberation Army. General specification for military wind radar: GJB/5289-2004[S]. 2004. (in Chinese)
- [13] 中国气象局. 地基相干多普勒测风激光雷达: QX/T 605-2021[S]. 2021.
China Meteorological Administration. Ground-based coherent Doppler wind lidar: QX/T 605-2021[S]. 2021. (in Chinese)
- [14] 中国气象局. 激光测风雷达观测规范: QX/T 687-2023[S]. 2023.
China Meteorological Administration. Specification for wind lidar observation: QX/T 687-2023[S]. 2023. (in Chinese)
- [15] 国家国防科技工业局. 相干多普勒测风激光雷达校准规范: JJF(军工) 363-2023[S]. 2023.
State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense. Calibration specification for the coherent Doppler wind lidar: JJF (military project) 363-2023[S]. 2023. (in Chinese)
- [16] 中国气象局综合观测司. 相干多普勒测风激光雷达功能规格需求书: 气测函 2023[Z]. 2023.
Comprehensive Observation Department of the China Meteorological Administration. Functional specification requirements for coherent Doppler wind measurement LIDAR: gas measurement letter 2023[Z]. 2023. (in Chinese)
- [17] 王冲. 1.5 μm 波长全光纤多功能相干多普勒测风激光雷达[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
WANG C. 1.5 μm All-fiber multifunction coherent Doppler wind Lidar [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)
- [18] RYE B J, HARDESTY R M. Discrete spectral peak estimation in incoherent backscatter heterodyne lidar. I. Spectral accumulation and the Cramer-Rao lower bound [J]. IEEE T Geosci Remote, 1993, 31(1): 16-27.
- [19] 孟昭林, 王坪, 陆雅萍, 等. CINRAD/SA 新一代天气雷达 RHI/PPI 扫描模式设计[J]. 气象科技, 2004, 32 (4): 251-254.
MENG Z L, WANG P, LU Y P, et al. Design of RHI/PPI scan mode of CINRAD/SA radar[J]. Meteorological Science and Technology, 2004, 32 (4): 251-254. (in Chinese)
- [20] 国家质量监督检验检疫总局. 低速转台校准规范: JJF 1210-2008[S]. 北京: 中国质检出版社, 2008.
State Administration for Market Regulation. Calibration specification for low speed turntable: JJF 1210-2008[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2008. (in Chinese)
- [21] 林晓钢, 杨锦杰, 高潮. 基于 MSP430 单片机的高精度转台角速率校准系统设计[J]. 计测技术, 2022, 42 (1): 45-50.
LIN X G, YANG J J, GAO C. Design of high-precision angular rate calibration system of turntable based on MSP430 [J]. Metrology & Measurement Technology, 2022, 42 (1): 45-50. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 陈朝勇(1991—), 男, 工程师, 博士, 主要研究方向为三维流场精细测量技术。



通信作者: 魏瑗瑗(1992—), 女, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为三维流场精细测量技术。