# Galion激光测风雷达探测性能分析

罗红艳[1]　张庆[1]　朱蓉[2*]　卢超[1]　贺园园[2]

(1 深圳市国家气候观象台，深圳 518040；2 国家气候中心，北京 100081)

**摘要**　Galion激光雷达是应用第二代技术的激光雷达设备，具备对全天空、全角度的扫描能力，目前是市场上唯一的三维扫描设备。本文利用深圳356 m梯度塔与锡林浩特100 m梯度塔的观测数据分析了Galion激光雷达的探测性能，并得出以下结论：PPI模式下，深圳激光雷达与测风塔测得风速相关系数为0.85，风向相关系数为0.9；锡林浩特激光雷达与测风塔测得风速相关系数为0.9，风向相关系数为0.95；此外，雷达在各个角度探测的结果相关性都较好，说明激光雷达在PPI模式下具有很好的探测性能。

**关键词**　Galion激光雷达；梯度塔；PPI；风速；风向

**中图分类号**：P414.7　**DOI**：10.19517/j.1671-6345.20210555　**文献标识码**：A

## 引言

风是研究大气动力学的基础，对天气预警预报、研究气候变化、航空航天等领域都有重要的应用价值[1-2]。目前，气象上对风的观测主要通过机械风杯、超声风速仪、风廓线仪器以及各种测风雷达等设备[3-8]。机械风杯测风准确性较高，但受限于观测高度、环境等因素，无法获取高时空分辨率的观测资料。激光测风雷达具有时间分辨率高、探测精度高、可以进行连续观测等优势，目前已经成为测量大气风场的最有效手段之一，在气象、环保、风电和航空航天等领域有着广泛的应用[9-14]。关于激光测风雷达性能的研究，人们做了大量工作[15-24]。肖小平等[25]用WindView 10型激光测风雷达与深圳356 m气象梯度塔观测对比表明，WindView 10型激光测风雷达具有很好的测量精度。蔡彦枫等[26]采用国产WindPrint S4000型激光雷达很好地观测到台风"妮妲"的风场特征。史文浩等[27]通过激光测风雷达对台风"利奇马"边界层风场精度进行分析，结果表明激光雷达在观测台风时有较好的精度。Smith等[28]将平坦地形上多普勒激光雷达测得的水平风速与4个不同高度的水平风速计进行对比。Pena等[29]发现多普勒激光雷达与风速计测量结果之间有良好的一致性。马秋杰等[30]利用激光测风雷达清晰地观测到海上低空急流的结构特征。然而，传统的激光测风雷达依然存在一定的局限性，如无法进行大范围体扫，对于台风、飑线等强天气过程无法连续定向监测等。Galion激光雷达与传统的激光测风雷达相比，扫描范围不仅仅局限于设备正上方(VAD模式)，还可以实现弧度扫描(PPI模式和RHI模式)与大范围扫描，弥补了传统激光测风雷达的不足。由于探空资料时间和地点的局限性，很难开展连续时间和特定地点的测风激光雷达评估工作。深圳国家气候观象台356 m气象梯度观测塔以及锡林浩特国家气候观象台100 m梯度塔可以实现近地面多要素的垂直立体连续观测，是为数不多的可以提供丰富、详实资料的直接观测设备。本文利用深圳356 m梯度塔与锡林浩特100 m梯度塔的观测数据进行分析，为更加有效地利用Galion激光雷达提供科学依据。

## 1　资料与方法

### 1.1　Galion激光雷达

Galion激光雷达是由英国Sgurr公司生产的一



国家重点研发计划(2018YFB1501101)资助

作者简介：罗红艳，男，1974年出生，高级工程师，主要从事气象探测应用研究工作，Email：lhycc008@163.com

收稿日期：2021年12月23日；定稿日期：2023年1月5日

*通信作者，Email：rongzhu@cma.gov.cn

款先进的可视化激光雷达，采用第二代雷达测风技术，具备全天空/全角度的扫描能力，是目前市场上唯一的三维扫描设备，详细参数见表1。可以实现传统模式VAD扫描(图1)与弧度扫描(图2)。通过PPI模式(方位角改变，仰角不变)可探测某一层的风场信息，通过RHI模式(方位角不变，仰角改变)可探测某个方位角所在平面的多层风场信息，且不会受到观测平台的影响。Galion激光雷达最远探测距离为4 km，单一扫描模式下，最多可以探测100个高度，且高度可以实现自定义，输出要素包括平均水平风速、垂直风速、最大最小值、风向、标准偏差、后向散射强度、风切变、湍流强度等。此外，其采用的激光符合欧盟CE认证安全标准IEC60825-1，确保对人眼无害。

### 1.2 观测试验地点

本观测试验分别选择在深圳国家气候观象台与锡林浩特国家气候观象台开展，两个试验场地梯度塔外景图见图3。深圳国家气候观象台梯度塔高度356 m，位于深圳市宝安区石岩水库水源保护区内的石岩观测基地，锡林浩特国家气候观象台观测场内安装有100 m梯度塔，梯度塔详细参数见表2。

### 1.3 观测试验方案

2019年3月23日至4月28日在深圳开展对比观测试验，采用PPI扫描，扫描高度分别为10 m、40 m、80 m、100 m、160 m、200 m、250 m以及320 m，试验期间Galion激光雷达布设于距离梯度塔400 m的位置，如图4a所示。

**表1 Galion雷达主要技术参数**

| 主要指标 | 参数 |
|---|---|
| 扫描范围/m | 80～4000 |
| 空间分辨率/m | 24～48 |
| 数据采集频率/Hz | 10 |
| 测量精度/(m·s$^{-1}$) | ＜0.1 |
| 测量范围/(m·s$^{-1}$) | 0～70 |
| 扫描方位角范围/(°) | 0～360 |
| 扫描仰角范围/(°) | －17～＋197 |
| 环境温度要求/℃ | －30～40 |
| 环境湿度要求/% | 0～100 |
| 功耗/W | 130 |
| 设备尺寸/cm | 82×53×67 |
| 重量/kg | 85 |

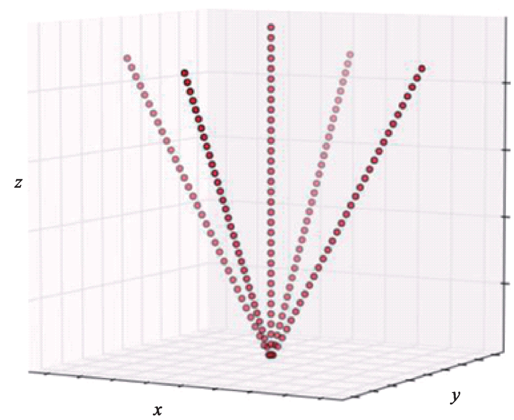


图1 VAD扫描模式示意

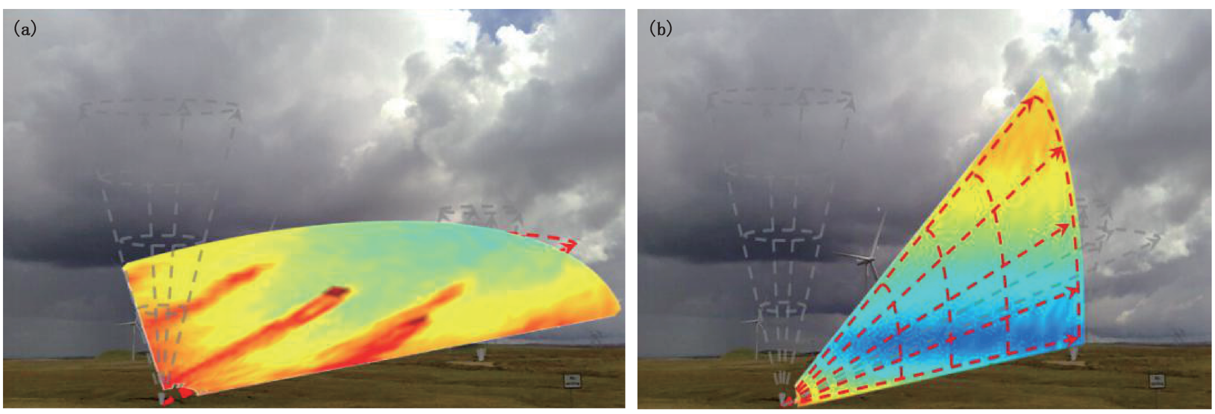


图2 PPI扫描模式(a)、RHI扫描模式(b)示意

2019年5月8日至8月31日在锡林浩特同样采用PPI扫描方式开展对比试验，扫描高度分别为30 m、50 m、70 m、100 m，试验期间Galion激光雷达布设于距离梯度塔100 m的位置，如图4b所示。

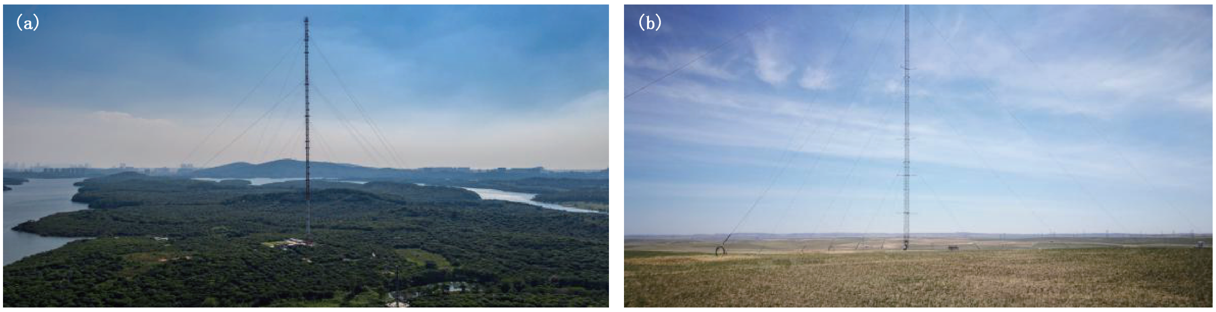

图 3　深圳气象梯度塔(a)与锡林浩特梯度塔(b)外景图片

**表 2　2 个国家气候观象台梯度塔主要技术参数**

| | 深圳 | 锡林浩特 |
|---|---|---|
| 塔体高度/m | 356 | 100 |
| 测风高度/m | 10、20、40、50、80、100、150、160、200、250、300、320、350 | 30、50、70、100 |
| 测风设备型号 | 维萨拉 WMT703 | MetOne 010C |
| 测风精度/(m·s$^{-1}$) | 0.1 | 0.6 |
| 测风范围/(m·s$^{-1}$) | 0～70 | 0～60 |
| 采样间隔/s | 10 | 60 |

### 1.4　数据处理方法

对雷达与梯度塔观测的数据进行预处理。首先，对风速大于 20 m·s$^{-1}$的数据进行剔除，同时剔除掉相对湿度为 100%或者降水量大于 0 mm 的数据。然后进行野点去除，剔除大于标准差 1.5 倍的数据。最后，采用矢量法计算得到小时平均数据。

对两者观测的数据进行相关系数、系统误差及标准偏差的计算。设 $A_i$ 为雷达数据，$B_i$ 为梯度塔数据，$X$ 为系统误差，$S$ 为标准偏差，$n$ 为样本数，则

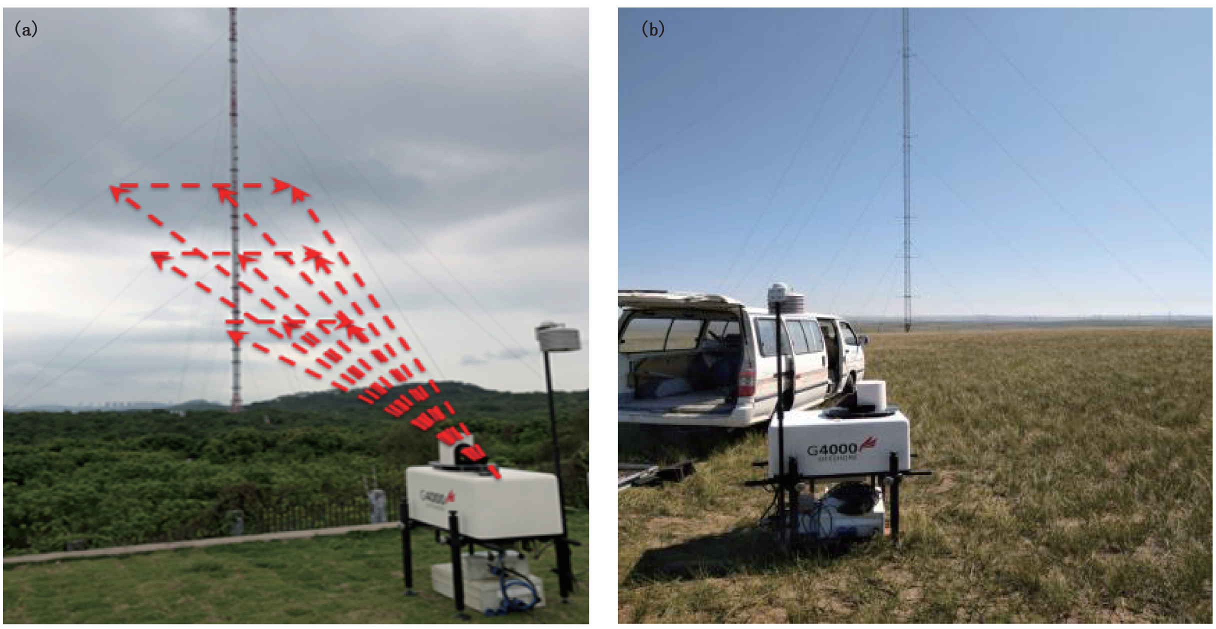



图 4　深圳观测场地(a)、锡林浩特观测场地(b)

$$X = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{A_i - B_i}{n}\right) \tag{1}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(A_i - B_i - X)^2}{n-1}} \tag{2}$$

## 2　结果分析

### 2.1　Galion 激光雷达与梯度塔测风性能对比

2 次观测试验期间的平均风速风向廓线如图 5 所示。可以看出，深圳观测试验中，Galion 激光雷

达与梯度塔测得风速相比整体偏大，但廓线整体趋势一致，并且，高度超过 100 m 后，两种设备测量结果逐渐接近。风向的测量结果与风速类似，整体廓线趋势一致，差距较小，低层偏差略大于高层。Galion 激光雷达风速风向测量值都比较稳定，且在测量高层风速风向时结果更准确，但风速观测值比真实值偏大 1～2 $m \cdot s^{-1}$，风向测量值更接近真实值。锡林浩特观测试验中，Galion 激光雷达测量风速结果偏大于梯度塔的测量结果，但两者整体趋势一致，表 2 也看出，两种设备的测量误差不到 1 $m \cdot s^{-1}$。在风速测量方面两者结果较为接近，且雷达测量稳定性相对更高。

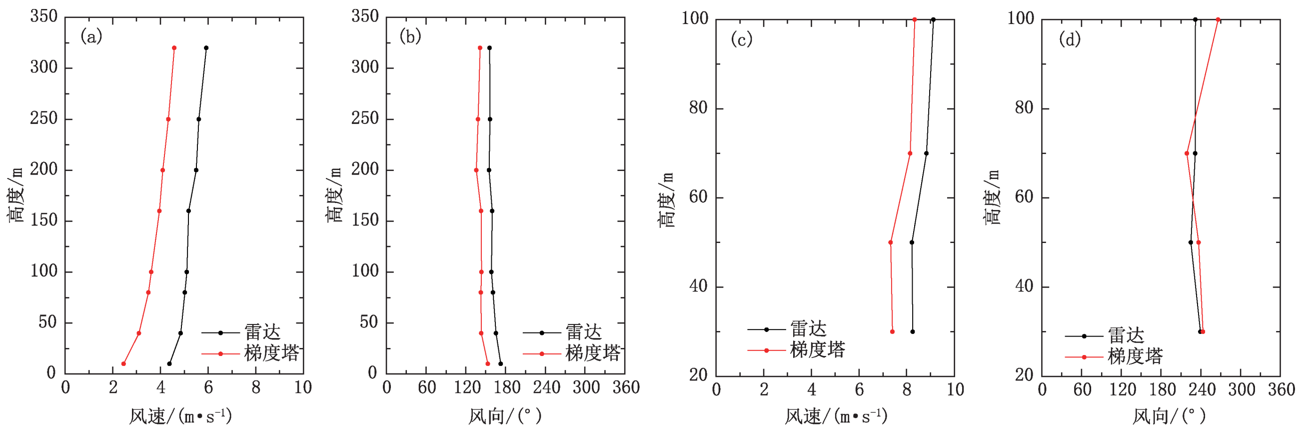


图 5　激光雷达与梯度塔试验期间深圳风速(a)和风向(b)、锡林浩特风速(c)和风向(d)平均廓线

为进一步分析 Galion 激光雷达观测结果的准确性，分别选取深圳试验中最低层(10 m)与最高层(320 m)平均风速做相关性分析，如图 6 所示。可以看出，雷达与梯度塔在高层风速观测值的相关性明显优于低层，雷达对风向的观测结果较好，无论高层还是低层测量结果都有较好的相关性。表 3 和表 4 分别计算了深圳和锡林浩特试验中各层风速风向相关系数与均方根误差，可以看出，在深圳的对比试验中 Galion 激光雷达与梯度塔观测风速风向的相关性随高度增加逐渐增大，同时系统误差和标准偏差都随高度减小。而在锡林浩特的对比试验中，在 30 m 高度时 Galion 激光雷达和梯度塔观测结果相关性最高，之后随高度变化趋于稳定。

### 2.2　Galion 激光雷达在不同风向夹角下对观测结果的影响分析

在 PPI 模式下，根据测量原理可知，风向与雷达激光束发射方向平行时，测量效果最好，垂直时效果最差。为进一步了解 Galion 激光雷达的探测性能，分别对风向与激光束夹角在 15°、30°、45°、60°范围观测情况进行对比，选取深圳观测试验 320 m 高度进行分析(图 7)。可以看出，随着风向与激光束方向夹角增大，风速点有发散的趋势，表明两种设备的探测一致性逐渐变差；在不同角度下，风向一致性没有明显变化，说明风向探测效果对角度的敏感性不大。

此外，对深圳观测试验不同高度、不同夹角探测结果进行分析，如图 8 所示。可以看出，角度相同的情况下，Galion 激光雷达测量风速准确性随观测高度增加而下降。高度相同时，风向与两种设备连线的夹角越小，观测结果越准确。图 8b 可以看出，雷达测量风向的准确性只与高度有关，高度越低测量结果越好，对风向夹角敏感性不大。

采用相同方法，对锡林浩特观测试验进行分析，如图 9 所示。可以看出，与深圳结果类似，夹角越小，Galion 激光雷达测量风速结果越好，风向测量结果变化不大。

### 2.3　Galion 激光雷达应用分析

为进一步研究 Galion 激光雷达在实际观测中的应用效果，本文分别将在深圳和锡林浩特观测试验期间的观测数据进行小时平均，取 00:00 和 12:00 的观测实况代表 Galion 激光雷达在白天和夜间的观测性能。图 10 和 11 分别为深圳和锡林浩特观测试验期间 00:00 和 12:00 的风速廓线图，可以看出，Galion 激光雷达在白天的观测结果与拟合结果十分接近，在夜间有所偏差。主要原因为白天边界层发展旺盛，垂直混合均匀，风速变化不大。到了夜间，边界层顶部形成逆温，混合作用减弱，低层风速也减弱。可见，Galion 激光雷达可以很好地观测边界层连续的风速变化。

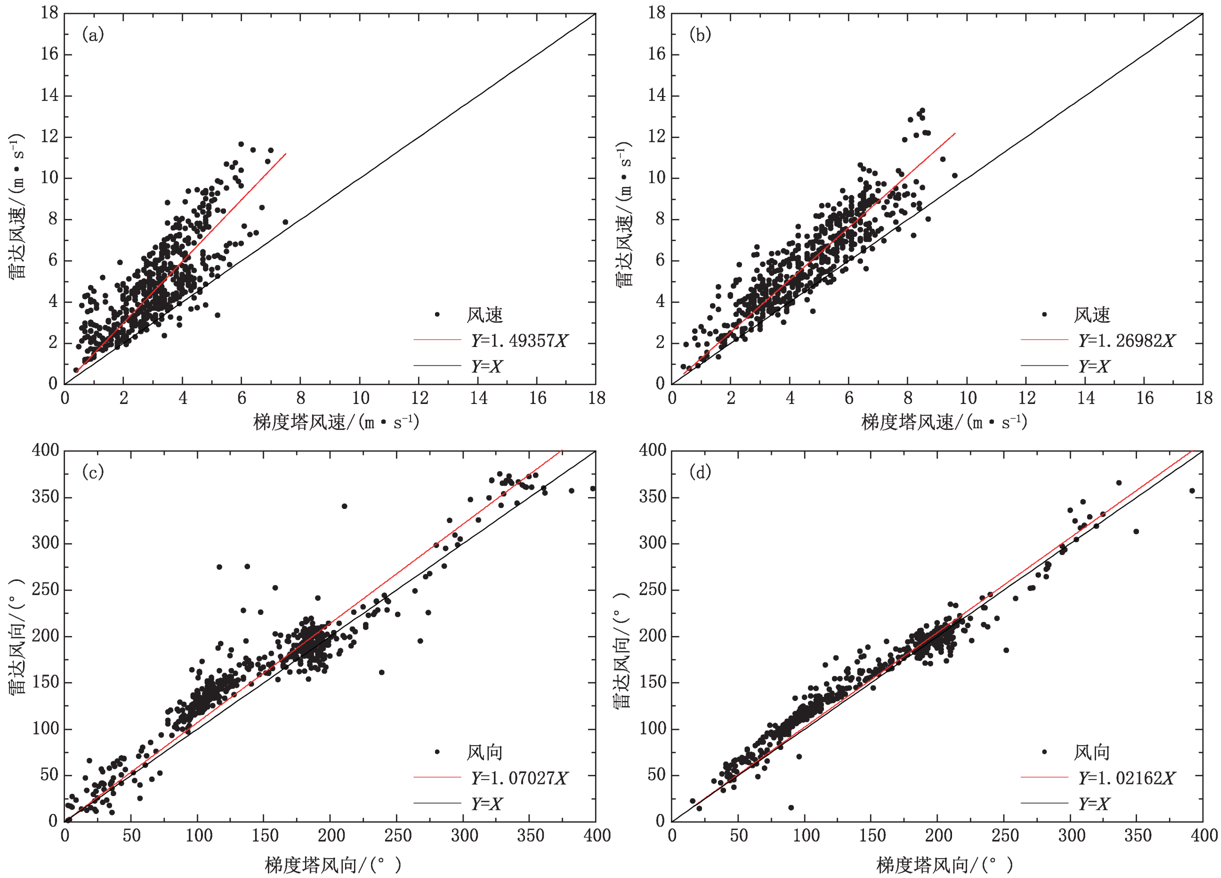


图 6　试验期间深圳激光雷达与梯度塔风速风向散点:(a)10 m 风速,(b)320 m 风速,(c)10 m 风向,(d)320 m 风向

**表 3　深圳试验中激光雷达与梯度塔各层风速风向统计**

| | | 10 m | 40 m | 80 m | 100 m | 160 m | 200 m | 250 m | 320 m |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 风速 | 相关系数 | 0.80436 | 0.75654 | 0.78991 | 0.81319 | 0.82845 | 0.80724 | 0.87696 | 0.89847 |
| | 系统误差/(m·s⁻¹) | 1.93122 | 1.75241 | 1.53219 | 1.49599 | 1.223 | 1.40506 | 1.276 | 1.34023 |
| | 标准偏差/(m·s⁻¹) | 1.27658 | 1.35747 | 1.24273 | 1.14029 | 1.07464 | 1.25264 | 1.01451 | 1.00763 |
| 风向 | 相关系数 | 0.91079 | 0.86341 | 0.93921 | 0.95391 | 0.91016 | 0.85507 | 0.95046 | 0.96269 |
| | 系统误差/(°) | 10.4595 | 12.0604 | 10.858 | 8.01647 | 8.00462 | 12.078 | 9.79081 | 7.21985 |
| | 标准偏差/(°) | 32.0104 | 38.2219 | 24.7502 | 20.526 | 27.2925 | 34.6616 | 19.9673 | 17.5813 |

**表 4　锡林浩特试验中激光雷达与梯度塔各层风速风向统计**

| | | 30 m | 50 m | 70 m | 100 m |
|---|---|---|---|---|---|
| 风速 | 相关系数 | 0.96293 | 0.9277 | 0.93514 | 0.92265 |
| | 系统误差/(m·s⁻¹) | 0.8563 | 0.89487 | 0.68675 | 0.7827 |
| | 标准偏差/(m·s⁻¹) | 0.90133 | 1.26737 | 1.23836 | 1.39476 |
| 风向 | 相关系数 | 0.98804 | 0.96809 | 0.97877 | 0.97615 |
| | 系统误差/(°) | −3.6306 | −8.26688 | 10.4046 | −34.1766 |
| | 标准偏差/(°) | 13.6354 | 22.2591 | 17.5348 | 20.2108 |

## 3　结论与讨论

本文主要介绍了 Galion 激光雷达的测量原理和技术特点,通过在深圳国家气候观象台和锡林浩特国家气候观象台开展的观测试验分析了 Galion 激光雷达 PPI 模式风探测性能,得出以下结论。

(1)深圳,两种设备探测的风速相关系数约为 0.85,风向的相关系数大于 0.9;锡林浩特,风速相关系数在 0.9 以上,风向的相关系数更高大于 0.95。

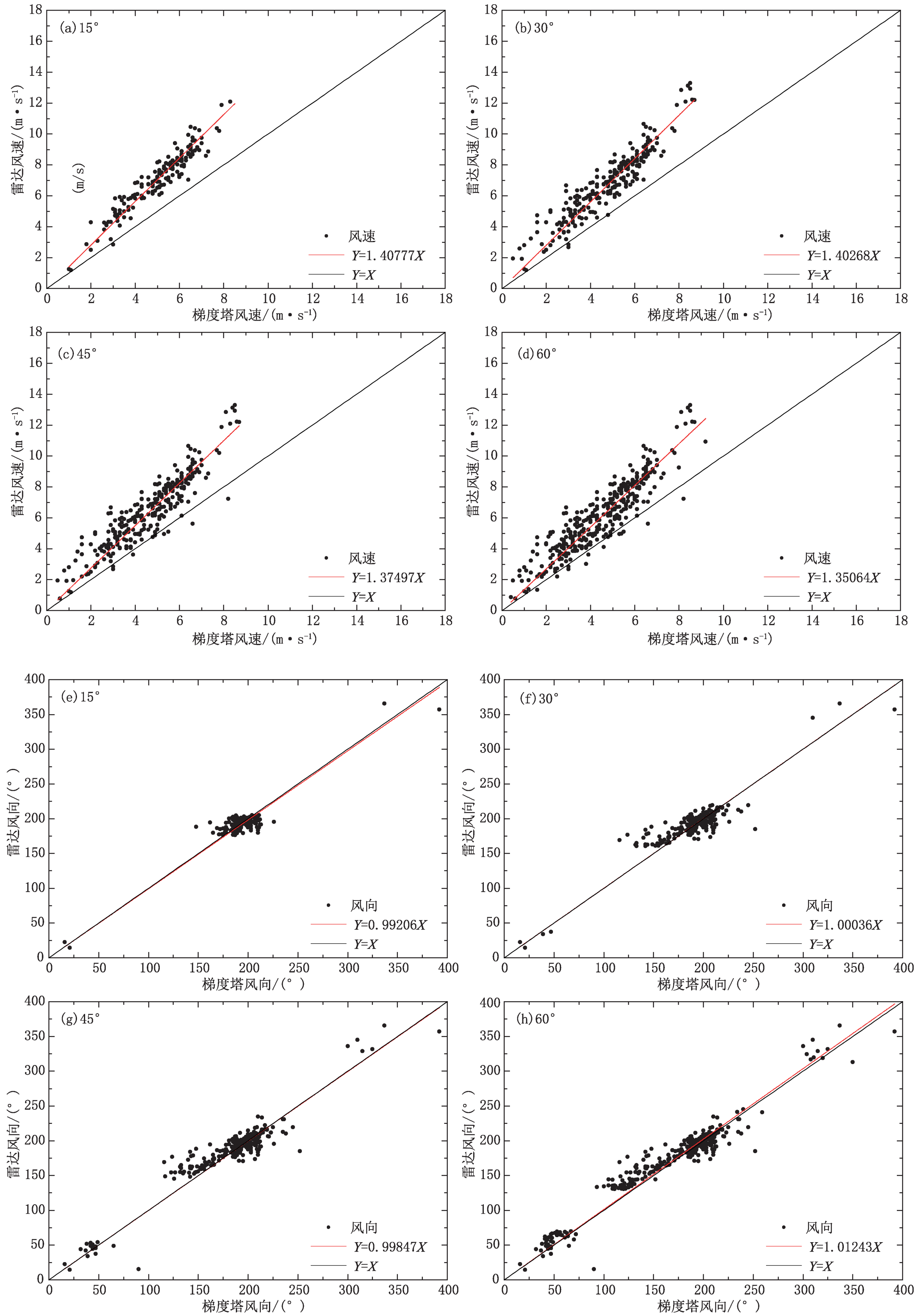


图 7 深圳激光雷达与梯度塔 320 m 不同夹角的风速(a～d)及风向(e～h)散点

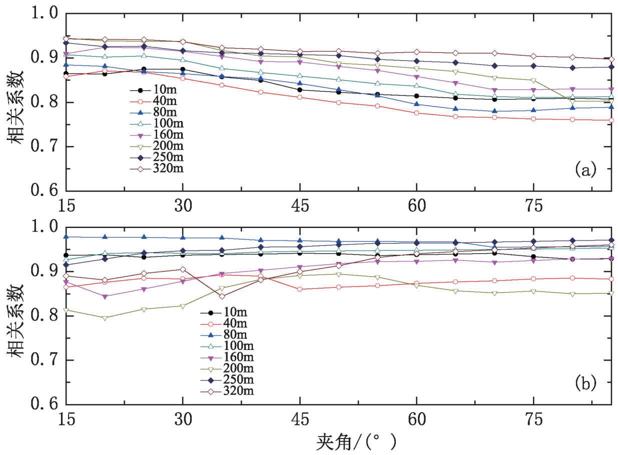


图 8　深圳激光雷达与梯度不同高度不同夹角风速(a)、风向(b)相关系数

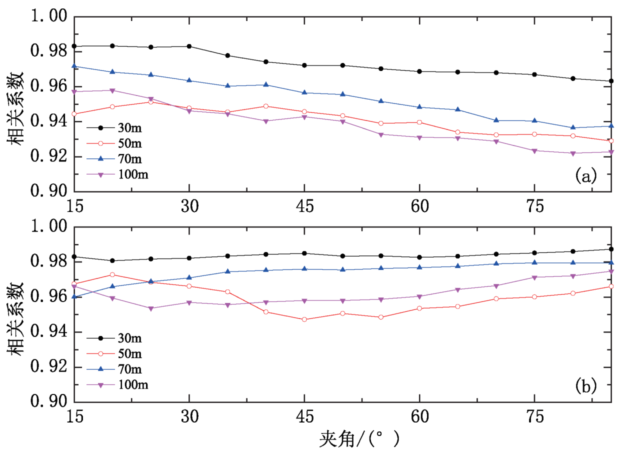


图 9　锡林浩特激光雷达与梯度塔不同高度不同夹角风速(a)、风向(b)相关系数

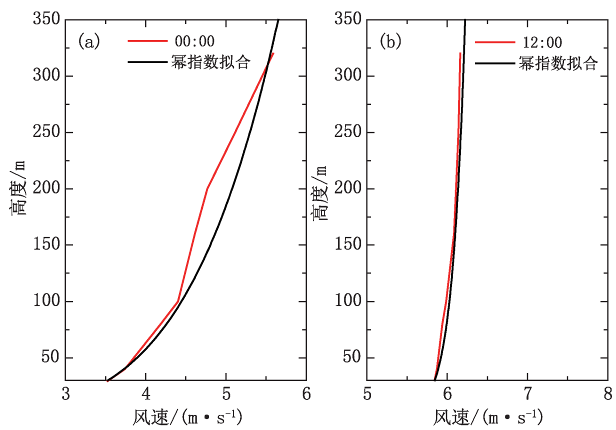


图 10　试验期间深圳激光雷达 00:00(a)、12:00(b)风速廓线

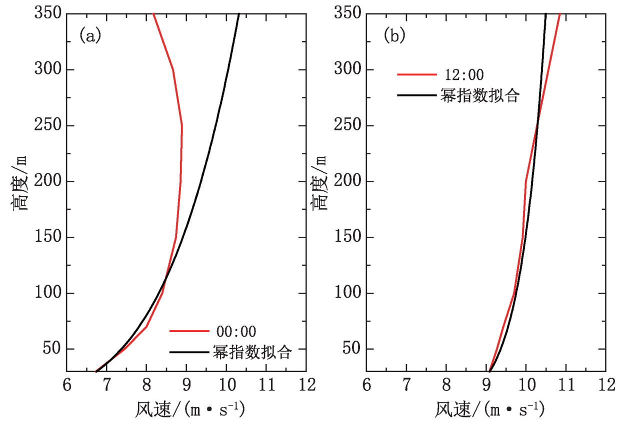


图 11　试验期间锡林浩特激光雷达 00:00(a)、12:00(b)风速廓线

(2)在 PPI 模式下,风向与激光束发射方向的夹角对风速观测影响较大,夹角越小时,两者相关性越好,随着夹角增大,相关性逐渐降低;相比于风速,风向探测效果与夹角关系不大。总体而言,雷达在各个角度探测的风速风向结果都较好,说明在 PPI 模式下,Galion 激光雷达的探测结果是可信的。

本文通过分析在深圳和锡林浩特开展的激光雷达与梯度塔测风比对试验得出的初步结论,存在试验样本较少的问题,未来需在深圳或其他地方进一步开展不同观测模式、不同天气过程下的观测试验,进一步研究激光雷达的测风能力。

## 参考文献


[1] 甘晓英,杨万基,甘晓星,等.台山市风场特征与工业布局合理性浅析[J].广东气象,2013,35 (1):54-58.

[2] 沈平,苏祥芳,张永华,等.广东省高空风观测资料融合技术的应用[J].广东气象,2017,39(5):73-77.

[3] 梁碧玲,张丽,钟雪平.边界层风场对深圳秋冬季灰霾天气的影响[J].广东气象,2017,39(6):15-18.

[4] 李海洋,祁秀香,赵小伟,等.南沙区海陆风环流的特征及其对气温和能见度的影响[J].广东气象,2015,37(3):24-27.

[5] 文彬,梁文全,邝家豪. 夏季风廓线雷达在雷州半岛强对流天气过程的应用[J].广东气象,2016,38(5):42-44+48.

[6] 罗雄光,梁国锋,杨超.L 波段雷达系统不同测风方法计算结果分析[J]. 气象科技, 2015,43(6):1025-1029.

[7] 韩彦霞,王成刚,严家德,等.新型边界层气象探空系统的开发与应用[J]. 气象科技,2017,45(5):804-810. DOI:10.19517/j.1671-6345.20160615.

[8] 吴蕾,陈洪滨,康雪.风廓线雷达与 L 波段雷达探空测风对比分析[J].气象科技,2014,42(2):225-230.

[9] 傅军,李洁,吴强.激光测风雷达在风场观测领域的应用及展望[J].空气动力学学报,2021,39(4):172-179.

[10] 代冰冰,何敏,杨靖新,等.利用激光雷达判别机场晴空风切变事件成因[J].气象科技,2021,49(4):589-596.
[11] 郭运,汤胜茗,王旭,等.不同台风降水强度下风廓线雷达适用性研究[J].热带气象学报,2021,37(2):268-276.
[12] 李林蔚,陈亚军,弓宇恒.激光测风雷达反演风场产品在冬运会的适用性分析[J].现代电子技术,2022,45(13):93-98.
[13] 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.
[14] 魏晓琳,王德立,贺佳佳,等.深圳沿海地区阵风系数的特征[J].广东气象,2016,38(5):33-36+41.
[15] Huffaker R. Laser Doppler detection systems for gas velocity measurement [J]. Applied Optics, 1970, 9(5):1026-1039.
[16] Werner C, Flamant P H, Reitebuch O, et al. Wind infrared Doppler lidar instrument [J]. Optical Engineering, 2001, 40(1): 115-125.
[17] 赵文凯,赵世军,单雨龙,等.激光测风雷达风场探测性能评估[J].中国测试,2022,48(1):147-153.
[18] 鲁峻麟,黄惺惺,顾桃峰,等.测风雷达在超大城市综合观测中的探测效能评估[J].气象研究与应用,2021,42(4):101-105.
[19] 徐宁,鲁奕岑,刘熔熔,等.三个激光测风雷达与探空测风对比分析[J].电子技术与软件工程,2022(13):108-112.
[20] 董秋婷,贺明慧,刁军,等.夏季不同天气条件下风廓线雷达探测精度分析[J]. 气象科技, 2018,46(1):16-28.
[21] 陈中钰,杜冰,刘康.风廓线雷达水平风数据质量控制[J]. 气象科技, 2020, 48(6): 801-807. DOI: 10.19517/j.1671-6345.20200026.
[22] 沈建,沈利洪,韩笑,等.激光雷达与微波辐射计联合观测大气边界层高度变化[J]. 气象科技, 2017,45(3):425-429.
[23] 陈泉,史文浩,汤杰,等.降雨强度对雷达测风精度的影响研究[J]. 气象科技, 2022,50(3):324-333.
[24] 王乔乔,张秀芝,王尚昆.Windcube激光雷达与测风塔测风结果对比[J]. 气象科技, 2013,41(1):20-26.
[25] 肖小平,卢超,杨红龙,等.深圳气象梯度塔与测风激光雷达观测对比分析[J].广东气象,2019,41(1):77-80.
[26] 蔡彦枫, 黄增浩, 吴新桥, 等. 基于测风激光雷达的沿海架空输电线路台风观测方[J].南方电网技术,2020,14(4): 17-23+84.
[27] 史文浩, 汤杰, 陈勇航, 等. 多普勒激光雷达探测台风“利奇马”边界层风场精度分析[J].热带气象学报, 2020,36(5): 577-589.
[28] Smith D A, Michael H, Coffey A S, et al. Wind lidar evaluation at the Danish wind test site in Hovsore [J]. Wind Energy, 2006,9(1-2): 87-93.
[29] Pena A, Hasager C B, Gryning S E, et al. Offshore wind profiling using light detection and ranging measurements [J]. Wind Energy, 2009,12(2): 105-124.
[30] 马秋杰,李珍妮,宋小全,等. 基于多普勒测风激光雷达的低空急流观测研究[J].海洋气象学报,2019,39(4):61-67.

# Analysis of Detection Performance of Galion Laser Wind Radar

LUO Hongyan[1] ZHANG Qing[1] ZHU Rong[2] LU Chao[1] HE Yuanyuan[2]
(1 Shenzhen National Climate Observatory, Shenzhen 518040; 2 National Climate Center, Beijing 100081)

**Abstract:** The Galion lidar is a lidar equipment using the second generation technology. It has the ability to scan all sky and all angles. At present, it is the only three-dimensional scanning equipment on the market. Based on the observation data of Shenzhen 356 m gradient tower and Xilinhot 100 m gradient tower, this paper analyzes the detection performance of Galion Lidar and draws the following conclusions: in PPI mode, the correlation coefficient of wind speed measured by the Galion lidar and gradient tower in Shenzhen is 0.85; the correlation coefficient of wind direction is 0.9; the correlation coefficient of wind speed and wind direction measured by the Galion lidar and gradient tower in Xilinhot is 0.9 and 0.95, respectively; in addition, the correlation of lidar detection results at all angles is good, indicating that the lidar has good detection performance in PPI mode.

**Keywords:** Galion lidar; PPI; wind speed; gradient tower; wind direction