

基于相干多普勒激光雷达的风雨同时探测

魏天问¹, 夏海云^{1,2*}

- (1. 中国科学技术大学 中国科学院近地空间环境重点实验室, 安徽 合肥 230026;
2. 中国科学技术大学 合肥微尺度物质科学国家研究中心, 安徽 合肥 230026)

摘要: 多普勒测风激光雷达是一种有效的具有高时空分辨率的遥感测风仪器。然而, 由于雨滴反射的干扰信号, 在雨天条件下进行精确的风廓线测量是一个挑战, 但是这也为探测降雨提供了一种可能。在这项工作中, 一台垂直指向的 1.5 μm 全光纤相干多普勒激光雷达被应用于风和雨的同时探测。由于相干多普勒激光雷达能够进行精确的频谱测量, 因此在下雨天, 它可以同时检测到气溶胶和雨滴的回波信号。具有速度差异的气溶胶和雨滴的回波信号会导致多普勒频谱出现两个峰值, 从而可以根据频谱宽度来识别降雨事件。通过双高斯模型拟合多普勒频谱, 可以获得两个速度, 分别为风速和雨速。与微雨雷达结果的对比验证了多普勒激光雷达探测降雨的能力, 同时也降低了多普勒激光雷达在雨天条件下风速的错误探测概率。

关键词: 相干激光雷达; 遥感; 测风; 测雨; 双峰谱

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200406

Simultaneous wind and rainfall detection using coherent Doppler lidar

Wei Tianwen¹, Xia Haiyun^{1,2*}

- (1. CAS Key Laboratory of Geospace Environment, USTC, Hefei 230026, China;
2. Hefei National Laboratory for Physical Sciences at the Microscale, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Doppler wind lidar is an effective remote wind measurement instrument with high temporal and spatial resolution. However, due to the interference signal reflected by raindrops, it is a challenge to perform precise wind profile measurements under rainy conditions, but it also provides a possibility for detecting rainfall. In this work, a compact all-fiber coherent Doppler lidar (CDL) operating at wavelength of 1.5 μm was applied for simultaneous wind and rainfall precipitation detection. Due to the ability of precise spectrum measurement, both aerosol and rainfall signals can be detected by the CDL under rainy conditions. The echo signals from aerosols and raindrops with different speeds will cause two peaks in the Doppler spectrum, so that the spectrum width can be used to identified rainfall events. A two-component Gaussian model was applied to fit the spectrum and two velocities were obtained. The comparison with the results of the micro rain radar verifies the CDL's ability of rain measurement, meanwhile, the false detection probability of wind speed in the rainy conditions is also reduced.

Key words: coherent lidar; remote sensing; wind detection; rainfall detection; two-peak spectrum

收稿日期: 2020-10-22; 修订日期: 2020-11-04

作者简介: 魏天问(1994-), 男, 博士生, 主要从事相干多普勒激光雷达方面的研究。Email: twwei@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 夏海云(1980-), 男, 教授, 博士, 主要从事激光雷达遥感方面的研究。Email: hsia@ustc.edu.cn

0 引言

降雨在很多领域都扮演着重要的作用,例如飞行安全、极端天气预警、农业气象等。另一方面,风场探测(尤其在雨天)在上述领域中也具有重要意义。例如,在航空飞行中,雷暴天气期间发生的微下击暴流和风切变可能会严重破坏飞机的平衡。而高空的冻雨会导致飞机机翼结冰,大大降低飞机的升阻比以及空气动力性能,在严重时甚至还会导致航空事故。因此对风场和降雨进行准确的探测将有助于提高飞行安全^[1]。

现有几种仪器可以用于风和(或)雨的探测,例如维萨拉气象站,微波雷达和激光雷达。其中维萨拉受限于地面测量,微波雷达的缺点是波束宽度较宽,发散角大。多普勒测风激光雷达是一种探测风场的有效工具,具有高时空分辨率的优点。但是,由于雨滴的反射会产生干扰信号,在雨天条件下进行精确的风场探测是一个挑战。此外在强降雨时,由于雨滴对激光的强烈吸收衰减以及气溶胶浓度的减少,雷达接收到的回波信号强度会大大减弱,限制了激光雷达在雨天的探测距离。

多普勒测风激光雷达有两种基本探测方法:直接探测和相干探测。在直接探测多普勒激光雷达(DDL)中,通常使用光学鉴频器或频谱分析仪将多普勒频移信息转换为功率或光学图案变化^[2-3]。在相干多普勒激光雷达(CDL)中,使用本振光与回波信号拍频,获得精确的多普勒频谱信息^[4-5]。在晴天时,CDL和DDL均可用于高精度地探测大气风场信息^[6-8]。然而,在降雨情况下,会出现由气溶胶和雨滴的回波信号叠加而形成的双峰多普勒谱^[9-10]。在DDL中,风速的反演假设了已知的信号频谱模型^[11-13]。因此,发现未知的降雨信号是困难的。先前的高光谱分辨率激光雷达工作中,使用光纤 Fabry-Perot 扫描干涉仪来获取信号频谱信息^[14],但是其时间分辨率较低。具有高时空分辨率和精确的频谱测量能力使CDL适用于风和雨的探测。

最早 Fukao 使用风廓线雷达观测到降雨环境下出现双峰多普勒谱的现象,双峰信号分别来自大气湍流散射和雨滴散射^[15]。Lottman 发现 2 μm 相干多普勒激光雷达的功率谱在雨天也表现出双峰的结构,

双峰分别来自气溶胶散射和雨滴反射^[9]。现有商用雷达算法一般不考虑双峰谱的情况,而是直接通过计算功率谱最大值位置得到一个速度,因此有研究者通过设定速度阈值的方式来区分风速和雨速^[16]。

在文中,笔者所在课题组将一台 1.5 μm 全光纤相干多普勒激光雷达用于探测风和降雨。先前的工作中,课题组通过 VAD 扫描方式同时得到了水平风场和雨速^[10],文中专注研究风雨谱的分离,以及和微雨雷达的对比验证,因此采用垂直观测。笔者提出使用信号的谱宽来识别降水事件,通过双高斯模型拟合多普勒频谱,获得两个径向速度。和微雨雷达结果的对比验证了激光雷达探测降雨的能力,同时气溶胶信号的准确识别也减少了在雨天条件下风速的错误探测概率。

1 原理

在降雨情况下,激光雷达接收到的回波信号会包含两个成分:气溶胶信号和雨滴信号。如果风速和降雨速度不同,则从多普勒谱中可以观察到两个峰值。双高斯模型通常被用于拟合双峰频谱:

$$S(f) = I_a \exp(-(f-f_a)^2/2\sigma_a^2) + I_r \exp(-(f-f_r)^2/2\sigma_r^2) \quad (1)$$

式中: f_a 和 f_r 分别是来自气溶胶和雨滴的平均多普勒频移; I_a 和 I_r 是对应的峰值强度; σ_a 和 σ_r 是各自的频谱宽度,使用最小二乘法曲线拟合来确定上述参数。通常,降雨信号的强度和降雨率成正比。因此,在不同的降雨强度下,雨信号和气溶胶信号之间会有不同的相对强度。例如,在小雨时,雨滴的回波信号较弱,并且由于其速度小,随风飘曳,造成其信号谱峰靠近气溶胶谱峰,从而难以区分两者。当降雨强度变大时,两个信号的强度可能相似并且可以很好地被识别。但是强降雨或者高空降雨的情况,降雨信号可能强于气溶胶信号。

风和雨速度的差异主要体现在垂直方向上,垂直风速在零附近,而雨滴受到重力作用相对空气向下运动,Atlas 给出了地面经验雨速公式^[17]:

$$v(D) = 9.65 - 10.3 \exp(-0.6D) \quad (2)$$

式中: D 为等效球形雨滴直径,单位 mm。雨滴在下落过程中并非球形,雨滴越大其形状越扁平,其轴比在直径 5 mm 时可以达到 0.7^[18]。此外雨滴的震荡会增加其阻力,进而影响垂直速度^[19]。而在水平方向上

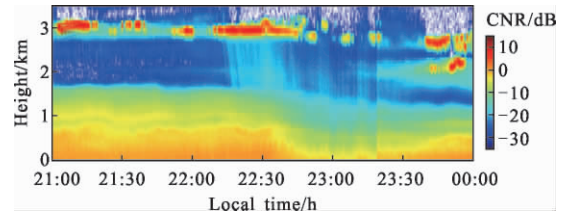
雨滴被风拖曳运动,速度的大小和方向与风基本一致。

信号的频谱宽度主要由发射脉冲的固有线宽决定,有些因素会导致频谱增宽的现象,例如气溶胶粒子的布朗运动、分子热运动、湍流、风切变、云的多次散射以及降水等。对于气溶胶粒子,布朗运动的速度标准偏差约为 1 mm/s,与湍流等引起的光谱增宽相比可以忽略不计。而对于雨滴反射信号,由于不同大小雨滴的终端速度不同,多普勒频谱宽度会进一步加宽。来自不同大小雨滴的各个回波信号具有相同的频谱宽度(即发射脉冲固有线宽),但却有不同的多普勒频移,因此,这些信号的叠加将导致更宽的多普勒频谱。气溶胶信号和雨滴信号谱宽的差异是区分风和雨信号的基础之一。

2 探测结果与讨论

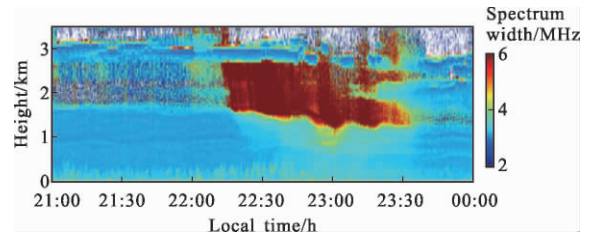
如图 1 给出了 2020 年 6 月 9 日连续 3 h 的气溶胶和降雨探测结果,实验在中国科学技术大学东区校园进行。相干多普勒激光雷达设置为垂直探测,距离分辨率 30 m,时间分辨率 1 s。相距 20 m 的微雨雷达^[20](MRR2, 24 GHz)提供了降雨的垂直廓线信息,其距离和时间分辨率分别是 100 m 和 1 min,最大探测高度为 3 km。维萨拉气象站提供了地面能见度和降雨率信息。

图 1(a)为相干多普勒激光雷达输出的载噪比,它表示回波信号的强度。在 3 km 高度附近,较大的载噪比数值对应云层。图 1(b)为激光雷达输出的信号谱宽,可以看到在云层下方出现了谱宽增大的现象,因此判断出现了高空降雨。图 1(c)为微雨雷达输出的雷达反射率,其回波信号来自于雨滴的米散射。降雨的时空分布和激光雷达的结果基本一致。值得注意的是,图 1(b)中增大的谱宽并没有从 1 km 的高度延伸到地面,这是因为高度越低气溶胶浓度越大,而雨滴数密度随高度的变化不明显,因此近地面气溶胶信号占主导,计算出的谱宽接近气溶胶信号谱宽。200 m 高度以下持续存在的较大谱宽是近地面湍流导致的。在 1.5~3 km 的范围,谱宽增大的同时载噪比也增加,这是由于额外的雨滴反射信号导致激光雷达接收到的总回波信号强度增加,此时降雨信号占主导。从 22:30 开始,仪器记录到地面降雨,而此时高空降雨已经持续了近 20 min。



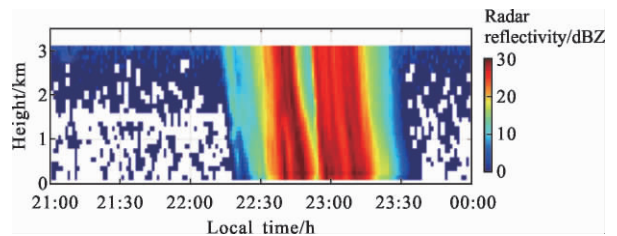
(a) 载噪比

(a) Carrier-to-noise ratio



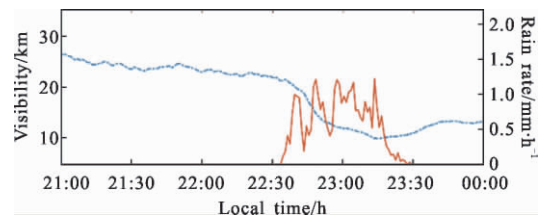
(b) 信号谱宽

(b) Signal spectrum width



(c) 微雨雷达雷达反射率

(c) Radar reflectivity



(d) 能见度和降雨率

(d) Visibility and rain rate

图 1 降雨事件前后观测数据

Fig.1 Observation results during a rain event

为了进一步分析,在图 2(a)和图 2(b)中给出了晴天和雨天条件下的典型功率谱,雨天的功率谱表现出明显的差异。图 2(c)~(e)给出了图 2(b)在三个不同距离处的频谱示例,可以看到双峰功率谱结构。径向风速的探测精度由相干激光雷达的载噪比决定,但在降雨条件下反演风速时,单峰分析和双峰分析得出的结果存在差异。若不考虑降雨信号的影响使用单峰拟合的方式将会导致反演的风速存在误差。

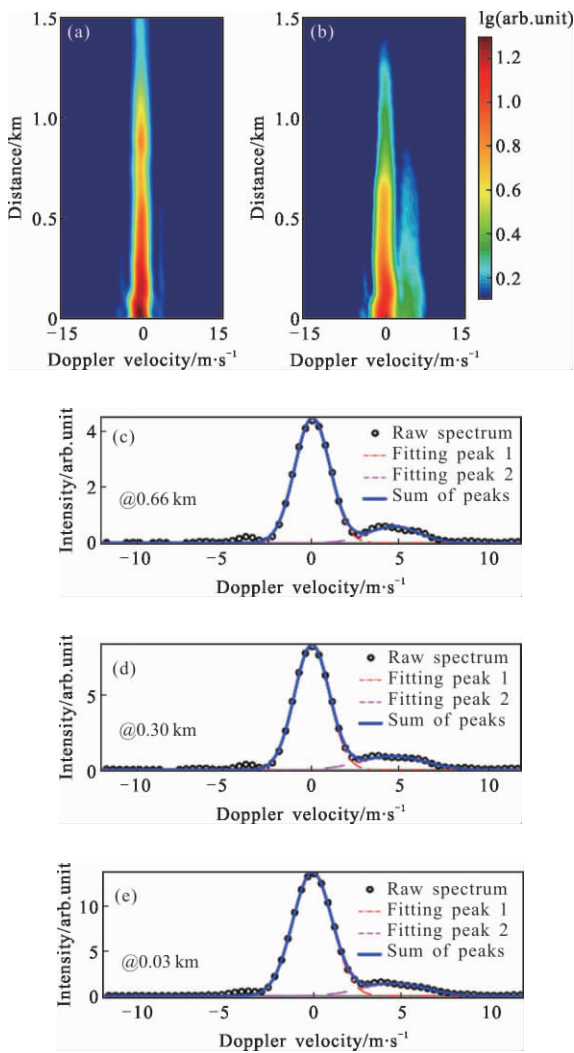


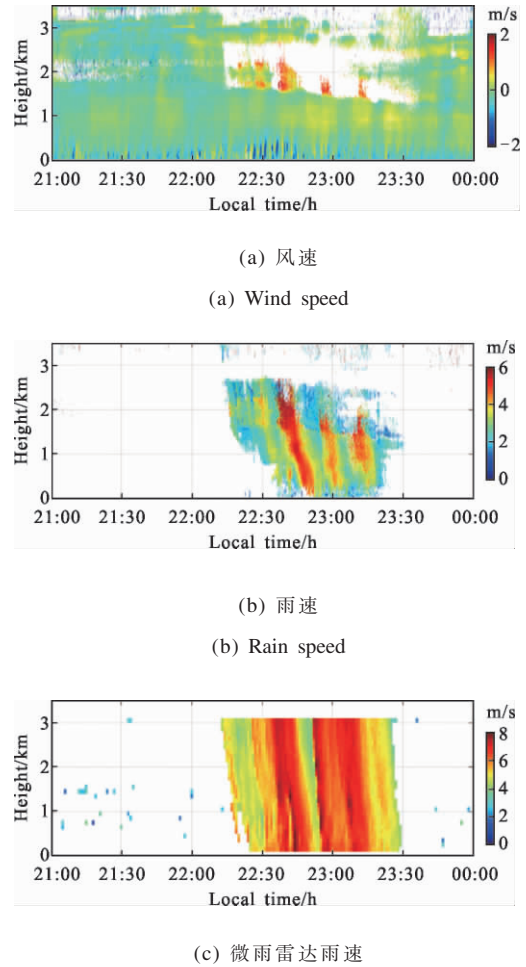
图 2 无雨时(a)和降雨时(b)功率谱对比以及降雨时三个不同距离的双峰功率谱(c)~(e)

Fig.2 Comparison of the spectrum between sunny (a) and rainy (b) conditions. Specific double-peak spectra at three different distances (c)~(e)

由于在垂直方向上,风速在零附近,而雨滴的下落速度远大于风速。因此垂直探测时,可以根据速度的大小来区分气溶胶和降雨信号。采用公式(1)的双高斯模型拟合降雨时的双峰频谱,可以提取出雨滴速度,同时给出更准确的风速。

图 3 给出了双高斯模型拟合的频谱分析结果。图 3(a)为垂直风速,近地面风速的快速变化与图 1(b)谱宽的增加对应,都反映了湍流活动。图 3(b)为提取出的垂直雨速廓线,可以看到不同速度的雨滴从高空下落时,在时间-高度图中形成的斜条纹,接近地面时,雨速数据的缺失是由于降雨信号淹没在强的

气溶胶信号中造成的。图 3(c)给出了微雨雷达探测的垂直雨速廓线,由于两种雷达工作波长的差异,微雨雷达对大雨滴更敏感,而激光雷达对小雨滴更敏感,因此微雨雷达测到的平均垂直雨速比激光雷达测到的雨速偏大,但它们的整体趋势是一致的。



(a) Wind speed

(b) Rain speed

(c) Rain speed from MRR

图 3 多普勒激光雷达结果

Fig.3 Results of CDL

3 结束语

在降雨事件期间,使用全光纤相干多普勒激光雷达以垂直探测方式运行,同时反演得到了风和雨的速度,并与微雨雷达的结果做了对比。降雨时,多普勒频谱包含气溶胶和雨滴两者的贡献,表现为双峰结构,谱宽的增加可以用于判断降雨事件的发生,双高斯模型适用于分离气溶胶信号和降雨信号。雨速和风速的分离不仅提高了相干多普勒激光雷达在降雨条件下测风的准确性,也将为微物理降雨研究

提供更多信息。

参考文献：

- [1] O'Conner C J, Ruithausser D K. Enhanced airport capacity through safe dynamic reductions in aircraft separation: NASA's Aircraft Vortex Spacing System AVOSS. TM-2001-211052[R]. US: NASA, 2001.
- [2] Xia H, Sun D, Yang Y, et al. Fabry-Perot interferometer based Mie Doppler lidar for low tropospheric wind observation [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(29): 7120-7131.
- [3] Xia H, Dou X, Sun D, et al. Mid-altitude wind measurements with mobile Rayleigh Doppler lidar incorporating system-level optical frequency control method [J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15286-15300.
- [4] Wang C, Xia H, Shangguan M, et al. 1.5 μm polarization coherent lidar incorporating time-division multiplexing [J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20663-20674.
- [5] Zhu X, Liu J, Bi D, et al. Development of all-solid coherent Doppler wind lidar [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(1): 012801.
- [6] Liu Z-S, Liu B-Y, Wu S-H, et al. High spatial and temporal resolution mobile incoherent Doppler lidar for sea surface wind measurements [J]. *Optics letters*, 2008, 33(13): 1485-1487.
- [7] Xia H, Shangguan M, 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): 5218-5221.
- [8] Wei T, Xia H, Wu Y, et al. Inversion probability enhancement of all-fiber CDWL by noise modeling and robust fitting [J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 29662-29675.
- [9] Lottman B T, Frehlich R G, Hannon S M, et al. Evaluation of vertical winds near and inside a cloud deck using coherent doppler lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2001, 18(8): 1377-1386.
- [10] Wei T, Xia H, Hu J, et al. Simultaneous wind and rainfall detection by power spectrum analysis using a VAD scanning coherent Doppler lidar [J]. *Optics Express*, 2019, 27(22): 31235-31245.
- [11] Sun D, Zhong Z, Zhou J, et al. Accuracy analysis of the Fabry-Perot Etalon based Doppler wind lidar [J]. *Optical Review*, 2005, 12(5): 409-414.
- [12] Shangguan M, Xia H, Dou X, et al. Comprehensive wind correction for a Rayleigh Doppler lidar from atmospheric temperature and pressure influences and Mie contamination [J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(9): 094212.
- [13] Xia H, Dou X, Shangguan M, et al. Stratospheric temperature measurement with scanning Fabry-Perot interferometer for wind retrieval from mobile Rayleigh Doppler lidar [J]. *Optics Express*, 2014, 22(18): 21775-21789.
- [14] Shangguan M, Xia H, Wang C, et al. All-fiber upconversion high spectral resolution wind lidar using a Fabry-Perot interferometer [J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 19322-19336.
- [15] Fukao S, Wakasugi K, Sato T, et al. Direct measurement of air and precipitation particle motion by very high frequency Doppler radar [J]. *Nature*, 1985, 316(6030): 712-714.
- [16] Manninen A J, Marke T, Tuononen M, et al. Atmospheric boundary layer classification with Doppler lidar [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(15): 8172-8189.
- [17] Atlas D, Srivastava R, Sekhon R. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence [J]. *Reviews of Geophysics*, 1973, 11(1): 1-35.
- [18] Randeu W L, Kozu T, Shimomai T, et al. Raindrop axis ratios, fall velocities and size distribution over Sumatra from 2D-Video Disdrometer measurement [J]. *Atmospheric Research*, 2013, 119: 23-37.
- [19] Thurai M, Bringi V, Petersen W, et al. Drop shapes and fall speeds in rain: Two contrasting examples [J]. *Journal of Applied Meteorology Climatology*, 2013, 52(11): 2567-2581.
- [20] Peters G, Fischer B, Andersson T. Rain observations with a vertically looking Micro Rain Radar (MRR) [J]. *Boreal Environment Research*, 2002, 7(4): 353-362.