

文章编号: 1001-3806(2012)05-0602-05

1.55 μm 相干激光雷达系统的硬目标速度探测

张飞飞¹ 夏海云² 孙东松^{2*}

(1. 中国科学院 安徽光学与精密机械研究所 大气光学中心, 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学 地球与空间科学学院, 合肥 230026)

摘要: 为了实现激光雷达系统对硬目标的探测, 设计了相干探测系统, 引入平衡探测器优化本振的大小, 并对漫反射硬目标速度进行了探测。结果表明, 采用平衡探测器, 优化本振的大小, 可以有效地提高系统的信噪比, 对漫反射硬目标的速率探测平均误差为 0.49m/s, 测量速率的方差为 0.91m/s, 实现了系统对漫反射硬目标速度的相干探测。这一结果对于相干测风激光雷达的研制是有帮助的。

关键词: 激光技术; 激光雷达; 相干探测; 硬目标; 速度探测

中图分类号: TN958.98 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.05.007

Speed detection of hard targets based on 1.55 μm coherent lidar systems

ZHANG Fei-fei¹, XIA Hai-yun², SUN Dong-song²

(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China; 2. School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In order to realize coherent detection of speed of hard targets, a coherent system was designed with a balanced detector introduced to optimize the value of the local oscillator, and the speed of a diffusive hard target was detected. The result demonstrated that the signal to noise ratio of the system was efficiently improved with the balanced detector, the average speed accuracy of the hard target was about 0.49m/s, variance of detection was 0.91m/s, and this system made the coherent detection of the speed of a diffusive hard target. The outcome is useful for research of coherent wind lidar.

Key words: laser technique; lidar; coherent detection; hard target; speed detection

引言

全球的大气风场观测可以预报天气和预测气候变化^[1]。激光雷达已成为了探测全球大气风场的强有力的手段。在区域大气风速的遥感应应用中, 相干测风激光雷达已显示出其优势, 例如, 测量飞行器的速度、湍流探测、风切变、飞机尾流等^[2]。另外, 相干测风激光雷达的风速测量还可以提高风能利用的效率^[3]。

相干激光雷达方面的研究在国外开展得较早。在 20 世纪 70 年代, HUFFAKER^[4] 等人报道了首台相干测风激光雷达系统, 该系统利用的是波长为 10.6 μm 的连续 CO₂ 激光器。伴随着激光技术的发展, 相干测风激光雷达朝着小型化、稳定化、商品化的方向发展。固体激光发射系统取代了庞大的气体激光器, 系统的稳定性也有极大的提高, 可移动性能增强, 有利于系统

的商品化。其中的典型代表是相干技术公司的 WindTracer, 该系统采用了全半导体抽运的波长为 2 μm 激光雷达收发机。1.55 μm 稳频的光纤激光器和成熟的光通信器件也不断地应用于相干激光雷达系统中, 此类系统在外界环境引起的震动和温度变化过程中更加稳定, 系统的寿命更长。目前, Mitsubishi Electric^[5], Leosphere^[3] 等机构已报道了相关的系统并且出售相关的产品。国内方面, 哈尔滨工业大学^[6]、中国电子科技集团第二十七研究所^[7] 等较早开展了相干探测方面的研究。近期, 中国科学院上海光学精密机械研究所报道了全固态的 1.064 μm 的相干测风激光雷达系统^[8]。

1.55 μm 激光雷达系统有以下优点^[9]: 人眼最大允许曝光是 2 μm 波段的 10 倍, 因而对人眼更安全; 光通信器件可以应用其中, 可以降低成本; 波长相对于 2 μm 较短, 增加了后向散射效率, 并且提高了速度分辨率。对于 1.064 μm 系统, 其缺点在于人眼安全方面的局限性。国内对于波长为 1.55 μm 相干测风激光雷达的报道, 只是集中于风场反演和算法处理方面, 因而开展 1.55 μm 测风激光雷达系统研制

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41174130)

作者简介: 张飞飞(1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事相干多普勒测风激光雷达的研究。

* 通讯联系人。E-mail: sds@ustc.edu.cn

收稿日期: 2012-01-12; 收到修改稿日期: 2012-02-16

工作具有重要意义。本文中将从相干探测的基本原理出发,设计了对漫反射硬目标的速度探测实验,给出了实验结果。

1 相干测风激光雷达基本原理

相干测风激光雷达系统向大气发射窄线宽的激光,激光受大气中的气溶胶粒子散射,部分散射光进入激光雷达接收机,运动的气溶胶粒子的散射光将会产生多普勒频率移动。接收光信号和本振激光进行光学混频,差频信号的频率是由运动粒子引起的多普勒频移。通过信号处理,推算出多普勒频移并推算出径向风速。

外差探测原理如图 1 所示,图中的箭头表示光束

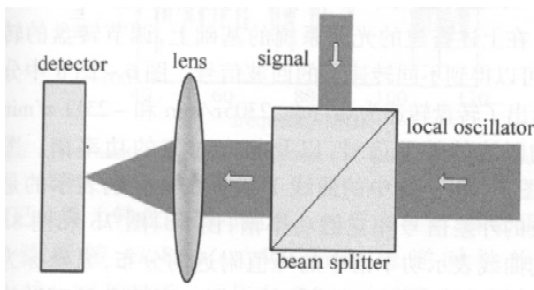


Fig. 1 Principle of optical heterodyne detection

传播的方向。目标物的散射光信号和本振光信号混频,然后聚焦到光电探测器上生成光电流。假设探测器均匀响应,探测器响应面的光电流为^[10]:

$$i(t) = \frac{e\eta}{h\nu} \iint_A \frac{1}{2z_m} |U_{LO}(x, y, t) + U_s(x, y, t)|^2 dx dy \quad (1)$$

式中 A 为对探测器响应面的面积, x 和 y 表示探测器表面的位置坐标, t 表时间, $U_{LO}(x, y, t)$ 和 $U_s(x, y, t)$ 分别是探测器响应面本振光和信号光的光电场, η 为均匀响应探测器的量子效率, e 为电子电量, h 为普朗克常量, $h\nu$ 为光子能量, z_m 是传播介质阻抗。将(1)式展开,并忽略直流项,则外差电流为:

$$i_h(t) = \frac{e\eta}{h\nu} \iint_A \frac{1}{2z_m} A_{LO}(x, y, t) A_s(x, y, t) \times \cos(2\pi\Delta\nu t + \Delta\varphi) dx dy \quad (2)$$

式中 $A_{LO}(x, y, t)$ 和 $A_s(x, y, t)$ 分别表示本振光和信号光的电场振幅, $\Delta\nu$ 和 $\Delta\varphi$ 分别表示信号光与本振光的频率差和相位差。根据探测器响应的外差信号光电流,可以估算出信号光的频率信息,即估算出目标物移动引起的频率移动。对于收发同置系统,则径向风速可表示为^[11]:

$$v_r = \lambda \cdot \frac{\Delta\nu}{2} \quad (3)$$

式中 λ 为出射激光的波长。径向风速经过矢量合成,可以得到大气的水平风场。

2 系统实验

2.1 实验光路搭建

依据相干测风激光雷达基本原理,搭建如图 2 所示的实验光路。连续波(continuous wave, CW)种子激光经分束器(beam splitter, BS) 1 分成两束,其中 1 束光经衰减器衰减后作为相干检测的本振(local oscillator, LO),另一束经声光调制器(acoustic-optic modulator, AOM)产生脉冲光,其中,信号发生器(arbitrary waveform generator, AWG)为 AOM 提供输入信号,然后经过掺铒光纤放大器(erbium doped fiber amplifier, EDFA)后形成输出脉冲光。脉冲激光的脉宽为 200nm,脉冲重复频率为 10kHz,最大单脉冲能量约为 0.15mJ,谱宽小于 50kHz,脉冲频移 80MHz。脉冲光经过 200m 的光纤出射经聚焦透镜到转动圆盘。圆盘用较理想的漫反射材料聚四氟乙烯制成^[12],其直径为 200mm,转盘的设计转速范围为 $\pm 1000\text{r/min} \sim \pm 6000\text{r/min}$,“-”表示逆时针旋转,“+”表示顺时针旋转。散射光由接收透镜耦合到接收光纤中,与 LO 进入 BS₂ 中混频,其中 BS₂ 的分束比为 50:50,分出两束光进入平衡探测器,探测器响应输出的射频(radio frequency, RF)信号进入示波器。

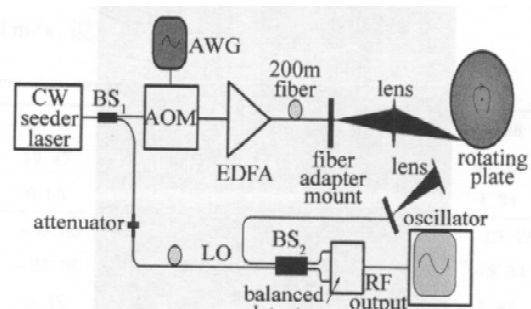


Fig. 2 Experiment setup

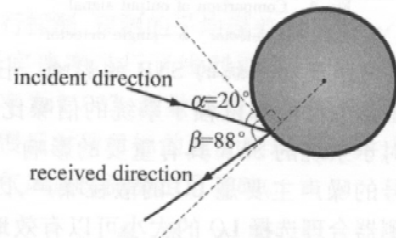


Fig. 3 Angle between beams and plate

选取适当的发射角和接收角条件下,测量不同转速下的回波信号的频率移动。图 3 是入射光和接收光信号与转盘的角度关系的测量结果,入射光与切线方向的夹角为 α ,接收光与切线方向的夹角为 β 。转盘的切向速度的测量值为:

$$v_t = \lambda \cdot \frac{\Delta\nu}{\cos\alpha + \cos\beta} \quad (4)$$

2.2 系统信噪比实验

信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)是衡量系统性能的重要因素,因而提升系统的测量 SNR 具有重要意义。在现有的条件下,从平衡探测器的引入和 LO 的强度方面对系统的 SNR 进行了实验分析。

2.2.1 平衡探测器与单一探测器的探测对比 本实验中的探测单元采用的是平衡探测器。相比于普通的单一探测器,平衡探测器可以抑制外差信号的直流成分、LO 本身的噪声等,可以有效地提高信号的 SNR。图 4 显示了在相同条件下平衡探测器与单一探测器对同一外差信号的探测对比。图中显示的两个探测器的坐标轴刻度值是一致的,突出的包络是散射信号的外差信号。图 4a 中采用的是平衡探测器的双探测器的 RF 输出外差信号,图 4b 是该平衡探测器的单一输入端的 RF 输出外差信号。将图 4a 与图 4b 中的信号分别作傅里叶变换,计算其 SNR,其值分别为 5.3 和 3.1。可见,平衡探测可以有效地提高系统的 SNR。

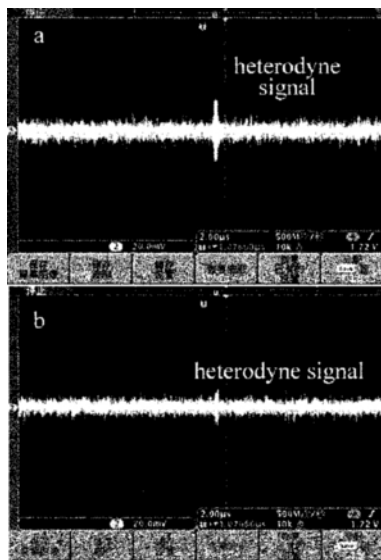


Fig. 4 Comparison of output signal
a—balanced detector b—single detector

2.2.2 LO 的强度对系统的 SNR 的影响 任何外差探测激光雷达的性能都依赖于系统的信噪比,而探测器的响应对于系统的 SNR 具有重要的影响^[13]。相干探测中信号的噪声主要是 LO 的散粒噪声,因而针对系统的探测器合理选择 LO 的大小可以有效地提高探测的 SNR。图 2 中 CW 激光经 BS₁ 出射的光功率为 7.8mW,利用现有的 1dB、3dB、5dB 的光纤衰减器,分别对 CW 光进行 5dB、6dB、8dB、9dB 的衰减。图 5 是相同端面反射信号与不同衰减后的 LO 的外差信号,其中 横坐标表示时间(μ s),纵坐标表示电压(mV)。由图可知,经过 9dB 衰减后产生的 LO 可以使得外差信号具有较高的 SNR,因而本实验中采用 9dB 的光纤衰减器,即 LO 的值约为 0.98mW。

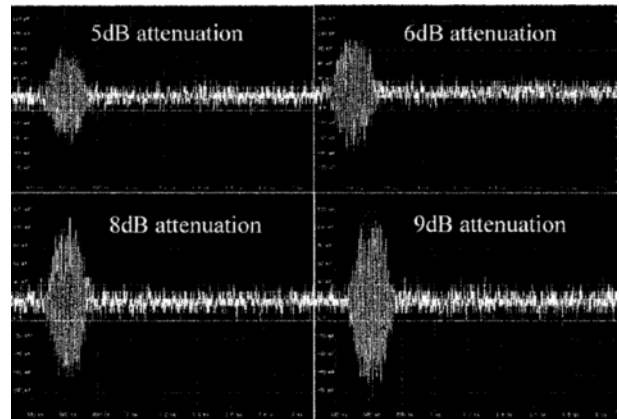


Fig. 5 Heterodyne signals of different LOs

2.3 系统实验结果

在上述搭建的光路系统的基础上,调节转盘的转速,可以得到不同转速下的回波信号。图 6~图 8 中分别给出了转盘转速为 0r/min、2305r/min 和 -2311 r/min 时的回波的外差信号,以及与之对应的功率谱。图 6a、图 7a 和图 8a 中的曲线 1 和曲线 2 分别表示的是回波的外差信号和它的功率谱;图 6b、图 7b 和图 8b 中的曲线表示功率谱中的峰值附近的分布,纵坐标为相对强度,图中给出了峰值的坐标。当转盘顺时针旋转时,外差包络相对于零频移的包络较密,信号光的频移为正;当转盘逆时针旋转时,外差包络相对于零频移的包络较疏,信号光的频移为负。在功率谱上,给出了峰值处的坐标,产生的频移分别为 0MHz、15.75MHz 和 -15.5MHz,分别计算得到的转盘转速为 0r/min、2354r/min 和 -2392r/min。

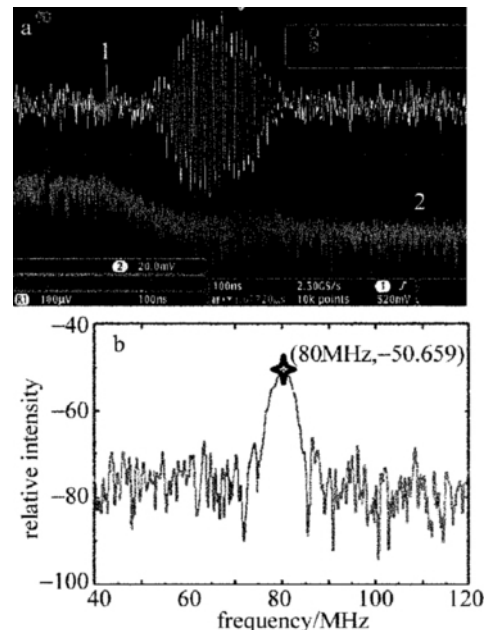


Fig. 6 a—heterodyne signals of 0r/min b—relative power spectrum of 0r/min

表 1 中给出了 1 组多个转速下的测量结果。真实值的原始数据为圆盘的转速,通过(4)式,表中的真实

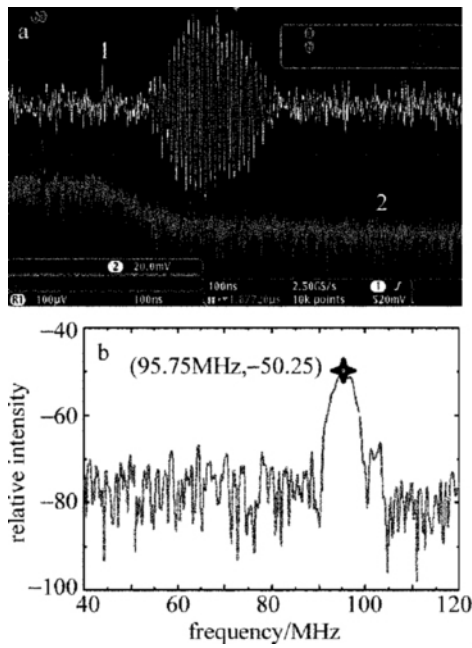


Fig. 7 a—heterodyne signals of 2305r/min b—relative power spectrum of 2305r/min

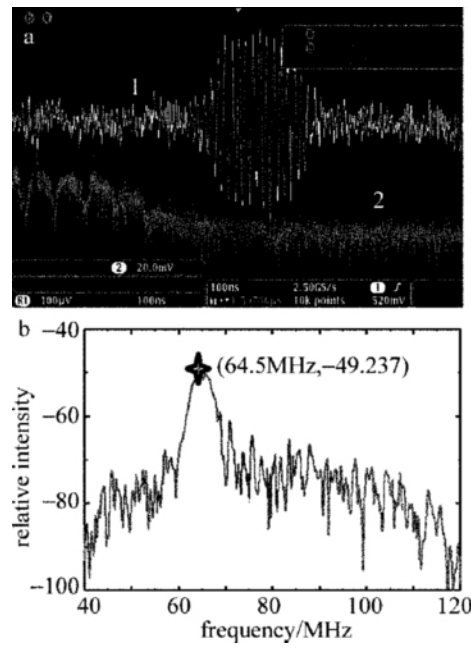


Fig. 8 a—heterodyne signals of 2311r/min b—relative power spectrum of 2311r/min

值已换算为转盘的切向速率。由表 1 可知,除去正顺时针旋转 41.88m/s (4001r/min),逆时针旋转 10.49m/s(1002r/min)与 41.94m/s(4007r/min)时,速率的误差超过 1m/s,其它转速的误差小于 1m/s。考虑到转盘在较高转速时,转盘有明显震动,对测量结果有较大的影响,因而可以忽略这两组测量结果,计算

得到系统的测量平均误差为 0.49m/s。以上表明,本系统在对转盘线速度探测方面具有很高的准确度。将转盘的真实转速与实验测量的转速作线性拟合,结果如图 9 所示,线性拟合的可决系数的值为 0.999,斜率为 1.003,拟合得较好。速度测量的标准方差约为 0.91m/s,说明系统具有较高的测量精度。

Table 1 Velocity of plate vs. velocity of measurement

clockwise rotation	actual value/($m \cdot s^{-1}$)	10.68	14.70	19.41	24.13	29.22	33.45	37.06	41.88
	measurement value/($m \cdot s^{-1}$)	11.13	14.31	19.47	24.64	29.01	32.58	37.75	43.72
	error/($m \cdot s^{-1}$)	0.45	-0.39	0.06	0.51	-0.21	-0.87	0.69	1.84
anti-clockwise rotation	actual value/($m \cdot s^{-1}$)	-41.94	-36.56	-33.60	-28.63	-24.19	-19.38	-15.03	-10.49
	measurement value/($m \cdot s^{-1}$)	-40.94	-36.96	-32.98	-29.41	-25.04	-18.68	-15.10	-8.34
	error/($m \cdot s^{-1}$)	1.00	-0.40	0.38	-0.78	-0.85	0.70	-0.07	1.85

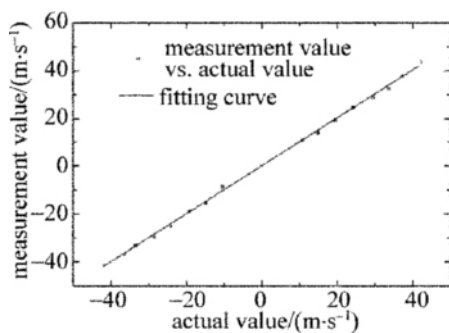


Fig. 9 Comparison between actual speed and measured speed

3 结论

简述了相干测风激光雷达在国内外的进展,说明了 1.55μm 相干激光雷达研究的意义,根据相干检测的原理,搭建了漫反射硬目标探测的实验系统。给出了平衡探测器的引入和 LO 的大小对系统 SNR 的影

响,初步设定了 LO 的值为 0.98mW。对漫反射硬目标的速度进行探测,探测的平均误差为 0.49m/s,对测量速率和真实速率进行了线性拟合,可决系数的值为 0.999,斜率为 1.003,测量的精度为 0.91m/s,较好地实现了对漫反射硬目标的速度实现了探测,因而为系统实现大气风速探测奠定了基础。

参 考 文 献

[1] FLESIA C, KORB C L, HIRT C. Double-edge molecular measurement of lidar wind profiles at 355nm [J]. Optics Letters, 2000, 25 (19): 1466-1468.

[2] Wächter M, Rettenmeier A, Kühn M, et al. Wind velocity measurements using a pulsed LIDAR system: first result [C]//14th International Symposium for the Advancement of Boundary Layer Remote Sensing. London, UK: Institute of Physics, 2008: 012066/1-012066/7.

[3] FUJII T, FUKUCHI T. Laser remote sensing [M]. New York, USA: Taylor & Francis Group, 2005: 457-458.

- [4] HUFFAKER R M , JELALIAN A V , THOMPSON J A L. Laser-Doppler system for detection of aircraft trailing vortices [J]. *Proceedings of the IEEE* ,1970 ,58: 322-326.
- [5] KAMEYAMA S , ANDO T , ASAKA K , *et al.* Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing [J]. *Applied Optics* 2007 ,46(11) : 1953-1962.
- [6] JIANG L H , WANG C H , WANG Q , *et al.* A speckle imaging model for impulse coherent laser radar and suppressing its speckle noise [J]. *Acta Optica Sinica* 2000 ,20(12) : 1623-1628(in Chinese) .
- [7] ZHANG F P , XUE H Z , HU Y Z , *et al.* Coherent Doppler wind lidar [J]. *Journal of Applied Optics* ,2009 ,30(6) : 1045-1050(in Chinese) .
- [8] ZHU X P , LIU J Q , BI D C , *et al.* Development of all-solid coherent Doppler wind lidar [J]. *Chinese Optics Letters* 2012 ,10(1) : 1-3.
- [9] ASAKA K , YANAGISAWA T , HIRANO Y. 1.5 μm eye-safe coherent lidar system for wind velocity measurement [J]. *Proceedings of SPIE* 2001 ,4153: 321-328.
- [10] JIN G F , LI J Zh. *Laser metrology* [M]. Beijing: Science Press , 1998: 255-257(in Chinese) .
- [11] XIA H Y , SUN D S , ZHONG Z Q , *et al.* Design of verifying attachment for calibration of lidar [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2006 ,33(10) : 1412-1416(in Chinese) .
- [12] SHEN F H. *Doppler wind lidar based on double-edge technique* [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences 2009: 104-109(in Chinese) .
- [13] HOLMES J F , RASK B J. Optimum optical local-oscillator power levels for coherent detection with photodiodes [J]. *Applied Optics* , 1995 ,34(6) : 927-933.