

测风激光雷达光学参量对相干效率的影响

彭涛, 王茜, 石磊, 姜勇, 陈涌, 周鼎富

Influence of optical parameters of wind LiDAR on coherent efficiency

引用本文:

彭涛, 王茜, 石磊, 姜勇, 陈涌, 周鼎富. 测风激光雷达光学参量对相干效率的影响[J]. *激光技术*, 2023, 47(6): 751–756.

PENG Tao, WANG Qian, SHI Lei, et al. Influence of optical parameters of wind LiDAR on coherent efficiency[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 47(6): 751–756.

您可能感兴趣的其他文章

1. 相干测风激光雷达探测效能评估研究

引用本文: 吴俊杰, 徐足音, 王耀辉, 等. 相干测风激光雷达探测效能评估研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(5): 716–722.

2. 大气湍流下超振荡望远成像的理论研究

引用本文: 周健文, 姚纳, 赵汗青, 等. 大气湍流下超振荡望远成像的理论研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(1): 115–120.

3. 光纤激光非相干合成效果分析

引用本文: 贺也洹, 张恩华, 王志海, 等. 光纤激光非相干合成效果分析[J]. *激光技术*, 2019, 43(6): 829–833.

4. 光束参量积对半导体激光器光束质量的评估

引用本文: 杨孝敬, 焦清局, 王乙婷. 光束参量积对半导体激光器光束质量的评估[J]. *激光技术*, 2018, 42(6): 859–861.

5. 激光雷达坐标测量系统的测角误差分析

引用本文: 亢甲杰, 张福民, 曲兴华. 激光雷达坐标测量系统的测角误差分析[J]. *激光技术*, 2016, 40(6): 834–839.

文章编号: 1001-3806(2023)06-0751-06

测风激光雷达光学参量对相干效率的影响

彭涛,王茜,石磊,姜勇,陈涌,周鼎富
(西南技术物理研究所,成都 610041)

摘要: 为了研究光学参量如何影响测风激光雷达相干效率的问题,结合理论推导与实验验证进行了研究。基于光场叠加理论,讨论了本振光束腰、光纤耦合器芯径、光学系统像差对系统相干效率的影响;开展大气湍流影响实验,测量了不同光学参量的系统在典型天气条件下的信噪比。结果表明,光瞳口径为 100 mm、 F 数为 2 时,最优束腰半径为 3.3 μm ,最佳匹配接收光纤芯径为 9 μm ,光学系统波像差均方根值应不大于 0.06 λ ;在强湍流作用下,当能见度小于 5 km 时,雷达探测距离降低 60%。此研究对光学参量的优化具有重要参考意义。

关键词: 激光技术;相干效率;光学参量;仿真实验

中图分类号: TN958.98

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.06.004

Influence of optical parameters of wind LiDAR on coherent efficiency

PENG Tao, WANG Qian, SHI Lei, JIANG Yong, CHEN Yong, ZHOU Dingfu

(Southwest Institute of Technology and Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: By combining theoretical derivation and experimental verification, research was conducted on how optical parameters affected the coherence efficiency of wind light detection and ranging (LiDAR). According to the superposition principle of optical fields, the influence of local oscillator waist and fiber coupler diameter and optical aberrations on coherent efficiency was discussed. Experiment of atmospheric turbulence effect was conducted, and the system signal-to-noise ratio with different optical parameters was measured under typical weather conditions. The consequence indicate that if the pupil aperture and F number are 100 mm and 2, the optimal beam waist and receive fiber diameter are 3.3 μm and 9 μm , and root mean square of the optical wavefront aberration is less than 0.06 λ . Under strong turbulence, when the visibility is less than 5 km, the radar detection distance decreases by 60%. It has special significance for optimizing optical parameters to promote the study.

Key words: laser technique; coherent efficiency; optical parameters; simulation and experiment

引 言

激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)作为一种常用光学遥感设备在风场测量应用中扮演着愈发重要的作用^[1-9]。相干测风技术通过本振光与大气后向散射信号光的拍频获取大气气溶胶的多普勒频移信息,从而实现风速测量。相较直接探测方式,其具有高增益、小体积、激光器指标易实现等优点,是远程测风的通用手段。相干效率表征了接收的信号光光场与本振光光场之间的匹配程度,是相干探测模式下的关键指标。系统中激光器、探测器、光学天线等关键光学单元的性能参数,以及大气扰动程度直接影响相干效率

的大小。目前,相干测风激光雷达正朝着远程、小型化、低成本的趋势发展^[10-12],对关键器件的优化设计提出了更高的要求,因此,研究测风激光雷达光学参量对相干效率的影响具有重要意义。

相干测风激光雷达的相关技术在国内外得到了广泛研究。AUGERE 等人将全光纤相干多普勒测风雷达搭载于机载平台进行了挂飞测量,水平探测距离为 3 km,垂直距离分辨率 100 m^[13]。WITSCHAS 等人基于重力波研究开展了机载激光测风雷达的飞行试验,测量数据经比对,风速均方根误差小于 0.2 m/s^[14]。WANG 等人提出了相干多普勒测风雷达联合时频算法,与传统快速傅里叶变化法相比,提升了系统时空分辨率、信噪比和最大测程^[15]。MARTIN 等人针对脉冲相干激光雷达系统,研制了小型化集成电路,配合信息处理算法实现了小能量远距离的硬目标探测^[16]。CLEMENT 等人利用频移环自相关处理法实现了 1550 nm

作者简介:彭涛(1987-),男,高级工程师,主要从事激光雷达光学设计方面的工作。

E-mail: pengtao__2007@126.com

收稿日期:2022-10-28;收到修改稿日期:2022-11-29

激光相干探测系统发射光束的脉冲压缩^[17]。HAYLOCK 等人研制了微型亚微秒电光开关,并应用于近程激光相干测速系统^[18]。以上研究主要集中于对相干测风激光雷达相关试验结果进行分析,或是对风场反演和信息处理算法进行优化,但是对于光学系统的设计仿真鲜有报道,无法从理论上分析不同湍流条件下重要光学参量对系统性能指标的影响。

本文中针对相干测风激光雷达,首先概述了光学系统的组成和工作原理,然后基于光场叠加法讨论分析了关键光学参量对系统相干效率的影响,最后针对不同参量开展了整机性能验证实验,可为激光器、光学天线、接收器件的设计优化提供理论支撑。

1 相干测风光学系统

相干测风光学系统如图 1 所示。1550 nm 半导体激光种子器发射几百赫兹线宽的激光,经 1×2 光纤分束器分束后,一路作为本振光(local oscillator, LO),频率为 f_0 , 输入光纤耦合器;另一路经声光调制器(acousto-optic modulator, AOM)调制成脉冲激光,频率为 f_0+f_1 ,再经脉冲掺铒光纤放大器(erbium-doped fiber amplifier, EDFA)放大输出,然后经光学环形器和天线射向目标空域。激光与大气气溶胶作用后产生多普勒频移,后向散射信号光频率为 $f_0+f_1+f_2$,依次经天线和环形器进入光纤耦合器,与本振光相干拍频。最后,拍频信号由光电平衡探测器(balance detector, BD)转换为光电流,实现后续的信号处理和风场反演。定义信号光与本振光在拍频过程中振幅和相位的匹配程度为相干效率。该指标直接影响相干测风激光雷达系统的信噪比,是重要性能指标。由于光学系统涉及的参量较多,包括本振光束腰、光纤耦合器芯径、光学系统像差等,所以对相干效率的影响需要逐一分析。

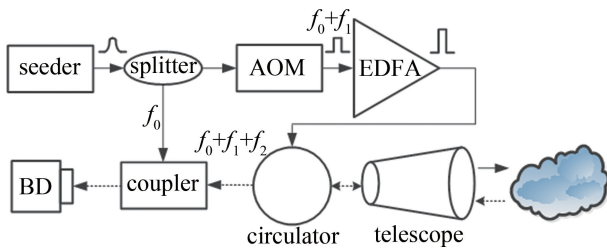


图 1 光学系统图

Fig. 1 Diagram of optical system

2 光学参量分析

2.1 本振光束腰

本振光通过窄线宽半导体种子激光器分束获得,

光场 E_{LO} 满足高斯分布:

$$E_{LO} = A_{LO} \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2}\right) \exp(i\varphi_{LO}) \quad (1)$$

式中, A_{LO} 为本振光振幅强度, r 为径向尺寸, w_0 为束腰半径, φ_{LO} 为本振光初始相位。

回波信号光经光学系统耦合进入光纤耦合器,光场 E_s 满足艾里分布:

$$E_s = A_s \frac{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 2J_1\left(\frac{\pi r}{F\lambda_s}\right)}{i\lambda_s f \frac{\pi r}{F\lambda_s}} \times \exp\left\{i\left[k_s\left(f + \frac{r^2}{2f}\right) + \varphi_s\right]\right\} \quad (2)$$

式中, A_s 为信号光振幅强度, $J_1(\cdot)$ 为第 1 类 1 阶贝塞尔函数, d 为光学系统入瞳直径, λ_s 为信号光波长, f 为光学系统焦距, k_s 为信号光波数, φ_s 为信号光初始相位, F 为光学系统 F 数 ($F=f/d$)。

通过计算本振光和信号光在光纤耦合器端面的叠加场,得到相干效率 η :

$$\eta = \frac{\left| \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} E_{LO}(r, \theta) E_s(r, \theta) \cos(\varphi_{LO} - \varphi_s) r dr d\theta \right|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} |E_{LO}(r, \theta)|^2 r dr d\theta \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} |E_s(r, \theta)|^2 r dr d\theta} \quad (3)$$

式中, r_0 为纤芯半径, r, θ 为极坐标参数。

系统工作波长为 1550 nm, 光学系统焦距为 300 mm, 接收光纤芯径为 10 μm , 假设初始状态下信号光与本振光同相位, 不同光瞳口径下相干效率与本振光束腰半径的变化曲线如图 2 所示。对于相同的光瞳口径, 相干效率随光纤端面本振光的增大而先增大再减小, 具有最大值, 最大相干效率为 81.4%。光瞳口径从 80 mm 增大到 100 mm 时, 最优束腰半径从

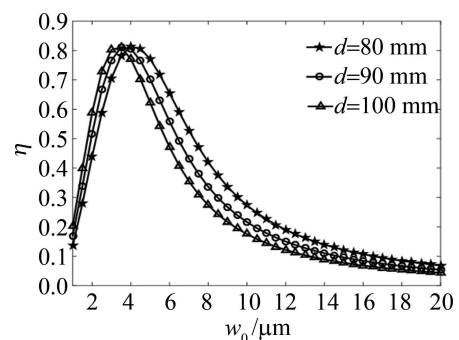


图 2 相干效率与本振光束腰半径的变化曲线

Fig. 2 Curves of coherent efficiency versus LO beam waist

4.25 μm 减小到 3.3 μm ,这是因为在系统焦距一定的情况下,光瞳口径越大,信号光在焦平面处的艾里斑半径越小,所以最佳匹配的本振光束腰半径越小。束腰半径大于最优值时,相干效率急剧下降,当 $w_0 = 20 \mu\text{m}$ 时,相干效率只有 6.8%,原因在于在束散角相同的条件下,束腰越大,光束质量越差,本振光光场振幅分布严重变形,有效相干面积大幅减小。

2.2 光纤耦合器芯径

本振光和信号光叠加后的光场与光纤耦合器的模场匹配时,才能近似空间信号光被全部无损接收,因此光纤耦合器端面有效叠加场的相干效率 η' :

$$\eta' = \frac{\left| \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} E_{\text{LO}}(r, \theta) E_s(r, \theta) M(r, \theta) r dr d\theta \right|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^\infty |E_{\text{LO}}(r, \theta) E_s(r, \theta)|^2 r dr d\theta \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^\infty |M(r, \theta)|^2 r dr d\theta} \quad (4)$$

式中, $M(r, \theta)$ 为光纤模场分布。光纤耦合器通常采用单模光纤,模场分布为:

$$M(r, \theta) = \sqrt{\frac{2}{\pi w_m^2}} \exp\left(-\frac{r^2}{w_m^2}\right) \quad (5)$$

式中, w_m 为模场半径。根据 Marcuse 经验公式, $w_m = r_0 / (\ln \nu)^{0.5}$ ($2 < \nu < 2.4$), ν 为归一化频率。

目前市场上传输光纤的芯径一般为 8.4 μm ~ 10.2 μm ,也有特殊的 4 μm 、6 μm 、12 μm 和 25 μm 。不同光学 F 数情况下,相干效率与光纤耦合器芯径的变化曲线如图 3 所示。对于相同的光学系统,相干效率随光纤芯径的增大而迅速增大,然后趋于平稳。这是因为当耦合器芯径小于有效叠加场尺寸时,随着耦合器芯径的增大,接收视场将会增大,有效相干面积呈芯径的平方增大;当耦合器芯径大于有效叠加场尺寸时,即使耦合器芯径继续增大,但有效相干面积已不变,所以相干效率也保持稳定。不同光学系统的最大

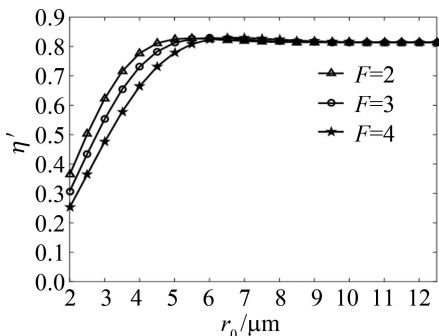


图 3 相干效率与光纤耦合器芯径的变化曲线

Fig. 3 Curves of coherent efficiency versus coupler core radius

相干效率一致,为 81.4%,但达到最大相干效率需要的最小芯径 $r_{0,\text{min}}$ 有差异。当 $F=2$ 时, $r_{0,\text{min}} = 4.5 \mu\text{m}$,该类光纤耦合器属于常规货架产品;当 $F=4$ 时, $r_{0,\text{min}} = 6 \mu\text{m}$,该类光纤耦合器需要定制。因此,光学系统的设计在满足最大相干效率前提下,需要权衡系统尺寸重量和光纤耦合器的选型及价格等因素。

2.3 光学系统像差

相位匹配是实现相干探测系统高效拍频的关键因素,光学系统像差会造成信号光波前畸变,产生相位误差,导致耦合光斑的斯特列尔比下降。利用 Zernike 多项式表征信号光波前畸变,光学系统产生的 5 种初级像差(倾斜、离焦、球差、彗差、像散)分别表示为^[20]:

$$\begin{cases} W_t(r, \theta) = W_{111} r \cos \theta \\ W_d(r, \theta) = W_{020} r^2 \\ W_{\text{SA}}(r, \theta) = W_{040} r^4 \\ W_c(r, \theta) = W_{131} r^3 \cos \theta \\ W_a(r, \theta) = W_{222} r^2 \cos \theta \end{cases} \quad (6)$$

式中, W_{111} 、 W_{020} 、 W_{040} 、 W_{131} 、 W_{222} 分别为 5 种像差系数。

含有光学系统像差影响的相干效率 η' 表示为:

$$\eta' = \frac{\left| \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} E_{\text{LO}}(r, \theta) E_s(r, \theta) \cos[k_s W(r, \theta)] r dr d\theta \right|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^\infty |E_{\text{LO}}(r, \theta)|^2 r dr d\theta \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^\infty |E_s(r, \theta)|^2 r dr d\theta} \quad (7)$$

式中,信号光波数 $k_s = 2\pi/\lambda_s$ 。

光纤耦合器纤芯直径为 10 μm ,天线口径为 100 mm,本振光束腰半径为 3.3 μm ,相干效率与光学系统像差的变化曲线如图 4 所示。倾斜对相干效率的影响最大,当波像差为 0.2 λ (λ 为工作波长)时,相干效率为 71.8%,下降了 9.6%,原因在于波前倾斜造成焦平面处信号光光斑偏移,与本振光同轴度降低,两光场重叠面积快速减小,损耗了有用的光能量。同等波

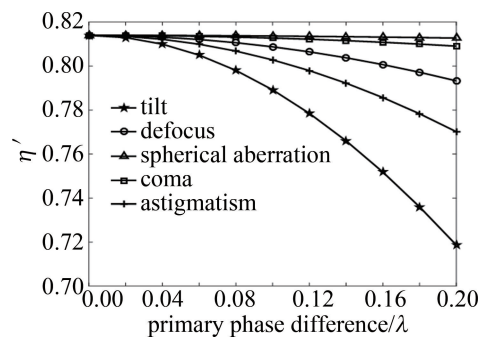


图 4 相干效率与光学系统像差的变化曲线

Fig. 4 Curves of coherent efficiency versus aberrations

像差,像散和离焦导致相干效率下降 4.4%和 2.1%,而彗差和球差造成的影响近似相等且最小,约 0.3%。实际应用中,环境温度变化和机械振动必然存在,所以应采用主动或被动消热差设计,使整个光学系统波像差均方根值(root mean square,RMS)不大于 0.06λ ,同时对光学系统进行减震设计。

3 大气湍流的影响

相干测风激光雷达以大气为传输通道,由于大气湍流的存在,回波信号光会引入波前相位差^[19]。根据冯卡曼模型,平均相位延迟 $\langle\varphi^2\rangle$ 表示为^[20]:

$$\langle\varphi^2\rangle = 0.782Lk_s^2 C_n^2 L_0^{5/3} \quad (8)$$

式中, L 为探测距离, C_n^2 为大气折射率结构常数, $L_0^{5/3}$ 为湍流外尺度。

考虑大气湍流影响后,相干效率 η' 表示为:

$$\eta' = \frac{\left| \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} E_{LO}(r,\theta) E_s(r,\theta) \cos\varphi r dr d\theta \right|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^\infty |E_{LO}(r,\theta)|^2 r dr d\theta \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^\infty |E_s(r,\theta)|^2 r dr d\theta} \quad (9)$$

通常认为 $C_n^2 < 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ 为弱湍流, $10^{-17} \text{ m}^{-2/3} \leq C_n^2 \leq 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 为中湍流, $C_n^2 > 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 为强湍流。不同湍流强度情况下,相干效率与探测距离的变化曲线如图 5 所示。在相同天气条件下,相干效率随探测距离的增大而减小。对于强湍流情形,当 $L=8 \text{ km}$ 时, η' 降至 28.2%,再往远距离探测较困难;对于弱湍流情形,当 $L=30 \text{ km}$ 时, η' 仍有 41.6%,与目前报道的可实现探测最远距离相吻合。在同一探测距离处,随着湍流强度增大,相干效率减小,但减小量在不同距离区间有差异。当 $L < 3 \text{ km}$ 时, $|\Delta\eta'| < 12.2\%$; 当 $3 \text{ km} \leq L \leq 30 \text{ km}$ 时, η' 急剧下降,特别地,在 $L=17 \text{ km}$ 处,减小量为最大值, $|\Delta\eta'|_{\max} = 48.1\%$ 。这是因为近距离探

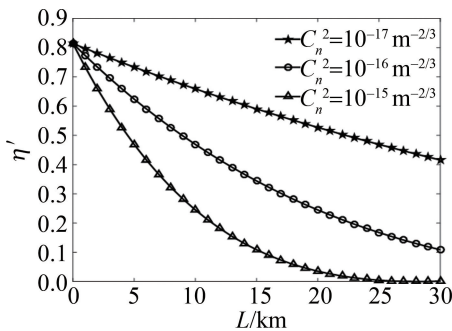


图 5 相干效率与探测距离的变化曲线

Fig. 5 Curves of coherent efficiency versus range

测时,大气散射回波信号强度较强,湍流影响较小;中远距离探测时,激光受大气扰动及退偏影响严重,散斑效应显著。

4 实验与讨论

分束器本振光支路分别采用不同芯径的单模光纤跳线模拟本振光束腰 w_0 ,利用不同光瞳口径 d 的光学天线在同一测试地点,对相同环境的径向风速进行测量,如图 6 所示。由于测风激光雷达相干效率表征信号光场与本振光场的匹配度,所以最终由系统获得的信号频谱强度 I 或信噪比 α 量化表示。

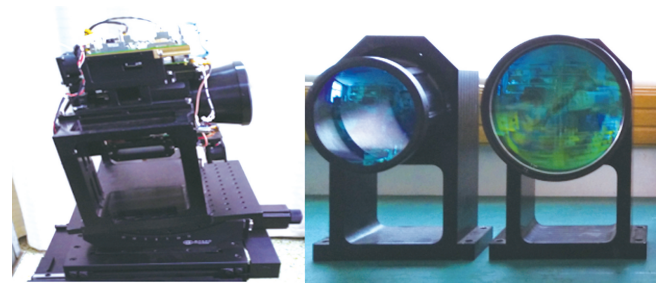


图 6 实验系统示意图

Fig. 6 Diagram of experiment system

实验中,激光器工作波长为 1550 nm ,输出单脉冲能量为 $300 \mu\text{J}$,AOM 中频为 80 MHz ,距离门长度设置为 80 m 。测量并记录不同天线口径下,不同本振光束腰拍频计算得到的第 40 个距离门的频谱强度,如表 1 所示。当天线口径为 80 mm 时,随着本振光的增大,频谱强度先增大后减小,因此本振光束腰半径存在最优解;随着天线口径增大,最优解会减小,与仿真结果相符。

表 1 不同天线口径、不同本振光束腰下的频谱强度

Table 1 Frequency spectrum intensity of different antenna aperture and LO beam waist

d/mm	80			100		
$w_0/\mu\text{m}$	4	4.2	5	4	4.2	5
$I/\text{a. u.}$	1.7×10^{11}	2×10^{11}	1.8×10^{11}	1.5×10^{11}	1.3×10^{11}	1.2×10^{11}

为了验证接收光纤芯径对相干效率的影响,订制了纤芯直径 D 为 $12 \mu\text{m}$ 和 $25 \mu\text{m}$ 的光纤耦合器,与常用的 $9 \mu\text{m}$ 芯径光纤耦合器进行比对实验。光学系统焦距为 300 mm ,口径 80 mm 和 100 mm 天线对应的 F 数分别为 3.75 和 3,测量结果如表 2 所示。当光学 F 数不变时,频谱强度随光纤芯径的增大而增大,然后趋于平稳。在平稳状态前,对于相同的光纤芯径, F 数越小,频谱强度越大。例如,对于 $9 \mu\text{m}$ 光纤芯径, F 数从 3 增加到 3.75 时,频谱强度下降 25%。这是因为 F 数

表2 不同光学 F 数、不同接收光纤芯径下的频谱强度Table 2 Frequency spectrum intensity of different F number and receive core diameter

F	3			3.75		
	9	12	25	9	12	25
$D/\mu\text{m}$	9	12	25	9	12	25
$I/\text{a. u.}$	1.2×10^{11}	1.4×10^{11}	1.4×10^{11}	0.9×10^{11}	1.4×10^{11}	1.4×10^{11}

与光学口径成反比,大口径光学天线接收的回波信号更多。

为了验证光学系统像差对相干效率的影响,加工了两套相同的光学系统,一套经过严格装调测试,满足波像差 RMS 为 0.036λ ,如图 7 所示。另一套未做装调,并处于离焦状态,RMS 远大于 0.06λ 。将两套光学系统装入测风激光雷达系统进行比对测量,记录在第 40 个距离门的频谱强度,前者为 3×10^{11} a. u.,信号细腻清晰,后者为 2.5×10^7 a. u.,尖峰噪声激增,信号完全淹没在噪声中。实验结果表明,满足光学像差要求的系统在第 40 个距离门处的中频信号频谱可有效提取,相干效率高;反之,信噪比极低,相干效率很低,与仿真结果一致。



图7 光学系统波前质量示意图

Fig. 7 Diagram of wavefront quality of optical system

开展大气湍流影响实验时,将雷达安置于同一测试地点,针对典型天气条件(条件一:大雨或雾霾,能见度 $V \leq 5$ km;条件二:晴朗,大气气溶胶含量高,能见度 $V \geq 20$ km)进行测量,并利用系统在不同探测距离处的信噪比 α 表征相干效率,测量结果如图 8 所示。光学天线口径为 100 mm,束散角为 $40 \mu\text{rad}$,波像差为 0.036λ ,本振光束腰为 $3.3 \mu\text{m}$,光纤耦合器芯径为 $12 \mu\text{m}$ 。晴空条件下,系统最远测程可达 15 km,大雨或雾霾天气条件下,系统最远测程 6 km,原因在于雨水和大气微粒对信号光的吸收和散射导致光强起伏和相位波动,造成相干效率下降。对于近程,即 $L < 3$ km 时,湍流对系统信噪比影响较小;当 $L > 3$ km 时,在强湍流情况下,系统信噪比随探测距离的增加急剧下降;当 $L = 6$ km 时,系统信噪比小于 5,提取中频信号频谱变得困难。实验结果与仿真结果基本吻合,实测的最远测程比理论值小,且信噪比曲线存在局部波动,这是

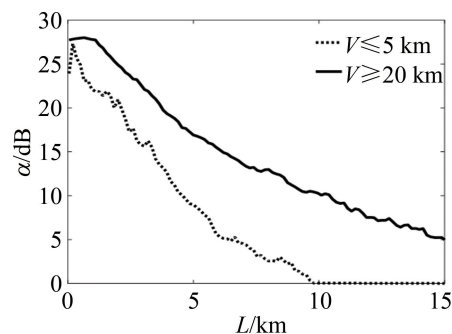


图8 信噪比与探测距离的变化曲线

Fig. 8 Diagram of signal-to-noise ratio versus range

因为建模仿真使用的冯卡曼模型将相位噪声理想化为平均相位延迟,忽略了实际情况中大气湍流的随机性。

5 结论

针对相干测风激光雷达,阐述了光学系统组成和工作原理,定义了系统相干效率;基于本振光和信号光的光场叠加理论,讨论分析了本振光束腰、光纤耦合器芯径、光学系统像差对相干效率的影响;引入大气湍流平均相位延迟参量,建模分析了大气扰动对相干效率的影响,并开展了验证实验,测量了不同光学参量的系统在典型天气条件下的信噪比。结果表明,光瞳口径从 80 mm 增大到 100 mm 时,最优束腰半径从 $4.25 \mu\text{m}$ 减小到 $3.3 \mu\text{m}$ 。当光学 F 数不变时,相干效率随接收光纤芯径的增大而增大,最后趋于平稳。对于 $9 \mu\text{m}$ 光纤芯径, F 数从 3 增大到 3.75 时,频谱强度下降 25%。为保证系统相干效率,光学系统波像差 RMS 不大于 0.06λ 。在相同天气条件下,相干效率随探测距离的增大而减小,晴朗天气条件下,能见度不小于 20 km 时,系统最远测程可达 15 km。对于近程,湍流对相干效率的影响较小,当 $L > 3$ km 时,在强湍流情况下,系统信噪比随探测距离的增加急剧下降;当 $L = 6$ km 时,系统信噪比小于 5。因为大气干扰和退偏效应客观存在,所以在优化光学参量的同时,应考虑信号光与本振光的偏振匹配。

本文中对相干测风激光雷达激光器和光学天线的设计,以及接收器件的选型和参数优化具有参考意义。

参考文献

- [1] FAN Q, ZHU X L, ZHOU D F, et al. Analysis of the wind field characteristics using the wind LiDAR in a typical plateau airport[J]. Laser Technology, 2020, 44(5): 525-531(in Chinese). 范琪,朱晓林,周鼎富,等. 激光测风雷达分析典型高原机场风场特征[J]. 激光技术, 2020, 44(5): 525-531.
- [2] BONIN T A, CHOULKAR A, BREWER W A, et al. Evaluation of turbulence measurement techniques from a single Doppler lidar

- [J]. *Atmosphere Measurement Technology*, 2017, 10(8): 3021-3039.
- [3] CHOUKULKAR A, BREWER W A, SANDBERG S P, *et al.* Evaluation of single and multiple Doppler lidar techniques to measure complex flow during the XPIA field campaign [J]. *Atmosphere Measurement Technology*, 2017, 10(1): 247-264.
- [4] AITKEN M L, BANTA R M, PICHUGINA Y L, *et al.* Quantifying wind turbine wake characteristics from scanning remote sensor data [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31(4): 765-787.
- [5] PARVIZI R, HARUN S W, ALI N M, *et al.* Investigation on threshold power of stimulated Brillouin scattering in photonic crystal fiber [J]. *Optiks*, 2012, 123(13): 1149-1152.
- [6] SATHE A, MANN J, GOTTSCHALL J, *et al.* Can wind lidars measure turbulence? [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2011, 28(7): 853-868.
- [7] MANN J, PEÑA A, BINGÖF F, *et al.* Lidar scanning of momentum flux in and above the atmospheric surface layer [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, 27(6): 959-976.
- [8] DRECHSEL S, MAYR G J, CHONG M, *et al.* Three-dimensional wind retrieval: Application of MUSCAT to dual-Doppler lidar [J]. *Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, 2009, 26(3): 635-646.
- [9] TUCKER S C, SENFF C J, WEICKMANN A M, *et al.* Doppler lidar estimation of mixing height using turbulence, shear, and aerosol profiles [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(4): 673-688.
- [10] LUO J, HOU Z H, JING X, *et al.* Advances in coherent laser wind measurement technology [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2020, 37(2): 129-137 (in Chinese).
罗杰, 侯再红, 靖旭, 等. 相干激光测风技术研究进展 [J]. *量子电子学报*, 2020, 37(2): 129-137.
- [11] MA F M, CHEN Y, YANG Z H, *et al.* Latest development of laser Doppler wind measurement technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(18): 180003 (in Chinese).
马福民, 陈涌, 杨泽后, 等. 激光多普勒测风技术最新进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(18): 180003.
- [12] ZHOU Y Z, WANG Ch, LIU Y P, *et al.* Research progress and application of coherent wind lidar [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(2): 020001 (in Chinese).
周艳宗, 王冲, 刘燕平, 等. 相干测风激光雷达研究进展和应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(2): 020001.
- [13] AUGERE B, VALLA M, DURÉCU A, *et al.* Three-dimensional wind measurements with the fibered airborne coherent Doppler wind lidar LIVE [J]. *Atmosphere*, 2019, 10(9): 549.
- [14] WITSCHAS B, RAHM S, DÖRNBRACK A, *et al.* Airborne wind lidar measurements of vertical and horizontal winds for the investigation of orographically induced gravity waves [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2017, 34(6): 1371-1386.
- [15] WANG Ch, XIA H Y, LIU Y P, *et al.* Spatial resolution enhancement of coherent Doppler wind lidar using joint time-frequency analysis [J]. *Optics Communications*, 2018, 424: 48-53.
- [16] MARTIN A, DODANE D, LEVIANDIER L, *et al.* Photonic integrated circuit-based FMCW coherent LiDAR [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(19): 4640-4645.
- [17] CLEMENT J, SCHNÉBELIN C, de CHATELLUS H G, *et al.* Laser ranging using coherent pulse compression with frequency shifting loops [J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 12000-12010.
- [18] HAYLOCK B, BAKER M A, STACE T M, *et al.* Fast electro-optic switching for coherent laser ranging and velocimetry [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(18): 181103.
- [19] PENG T, CHEN Y, ZHAO P E, *et al.* Character analysis of fiber coherent LiDAR antenna [J]. *Laser Technology*, 2020, 44(5): 525-531 (in Chinese).
彭涛, 陈涌, 赵培娥, 等. 光纤脉冲相干激光测风雷达光学天线特性分析 [J]. *激光技术*, 2022, 46(4): 511-515.
- [20] GONG X Y, ZHANG P, WU X J, *et al.* Research on influence of aberration and turbulence on performance of 90° space optical hybrid [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(4): 0401003 (in Chinese).
宫喜宇, 张鹏, 吴潇杰, 等. 像差及湍流对 90° 空间光混频器性能的影响研究 [J]. *光子学报*, 2021, 50(4): 0401003.