

# 低盲区杂散光对激光雷达系统信号质量的影响

刘洋<sup>1,2</sup>, 张天舒<sup>1</sup>, 项衍<sup>1,2</sup>, 钟刘军<sup>1</sup>, 付毅宾<sup>1</sup>, 郑朝阳<sup>1,2</sup>, 吕丽慧<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

**摘要** 利用 ZEMAX 软件对透射式米散射激光雷达系统的杂散光进行分析,对激光雷达系统中光学镜片表面的反射和镜筒内壁系统的多次反射、散射进行模拟,得到镜面的多次反射光成像在探测器面源的功率可达  $3 \times 10^{-8}$  W, 镜筒散射光成像在探测器面源的功率达到  $2.8 \times 10^{-9}$  W。在测量条件相同的情况下,通过对透射式和反射式激光雷达的连续观测结果进行分析,得出透射式米散射激光雷达的近场杂散光经过光电转换后的回波信号强度可以达到 1000 mV, 比反射式激光雷达系统的高约 17 倍;用衰减片分别对两种雷达信号进行衰减处理,结果显示:当信号衰减 80% 时,透射式激光雷达系统的近场信号出现下翘现象。从对信号非线性化处理的结果也可以看出,反射式激光雷达系统优于透射式激光雷达系统。

**关键词** 几何光学; 激光雷达; 透射式; 反射式; 杂散光; 非线性度

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0505001

## Influence of Stray Light in Low Blind Zone on Signal Quality of Lidar System

Liu Yang<sup>1,2</sup>, Zhang Tianshu<sup>1</sup>, Xiang Yan<sup>1,2</sup>, Zhong Liujun<sup>1</sup>,  
Fu Yibin<sup>1</sup>, Zheng Zhaoyang<sup>1,2</sup>, Lü Lihui<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** Stray light of transmission type Mie scattering lidar system is analyzed by ZEMAX software, and the reflection of optical lens surface in the lidar system and multiple reflection and scattering of the tube wall system are simulated. The power of multiple reflection light imaging on the detector surface source reaches  $3 \times 10^{-8}$  W, and the power of lens barrel light scattering imaging on the detector surface source reaches  $2.8 \times 10^{-9}$  W. Under the same measurement conditions, we analyze the continuous observation results of two kinds of laser lidars, and conclude that the echo signal strength converted from near-field stray light in the transmission type Mie scattering lidar can reach 1000 mV, which is nearly 17 times that of the reflection type lidar system. Attenuation piece is used to attenuate the two lidar signals respectively. The results show that when the signal attenuation is 80%, the near field signal of the transmission type lidar system is turned up. It can be seen from the results of nonlinear signal processing that the reflection type lidar system is better than the transmission type lidar system.

**Key words** geometric optics; lidar; transmission type; reflection type; stray light; degree of nonlinearity

**OCIS codes** 080.3630; 120.5800

## 1 引 言

近年来,我国的环境治理工作日益紧迫。成熟的激光雷达技术<sup>[1-2]</sup>能够实时在线监测污染物的动

向,准确分析污染物的来源,为环境治理工作提供极大的帮助。

米散射激光雷达将激光光束射向大气中,利用大气中分子的吸收和散射等特性对污染物进行探

收稿日期: 2017-10-10; 收到修改稿日期: 2017-11-30

基金项目: 国家重点研究计划(2017YFC0209603)、国家自然科学基金青年基金(41605020)

作者简介: 刘洋(1985—),男,博士研究生,主要从事激光雷达环境探测方面的研究。E-mail: yangliu@aiofm.ac.cn

导师简介: 张天舒(1976—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光雷达环境监测方面的研究。

E-mail: tszhang@aiofm.ac.cn

测<sup>[3]</sup>。目前,人类越来越关注近地面的污染,并要求米散射激光雷达的探测盲区应尽可能小,以便更加准确地分析污染物的来源和走向。为了减小激光雷达的探测盲区,一般采用同轴透射式<sup>[4-5]</sup>和反射式激光雷达系统。透射式激光雷达系统存在近场杂散光,严重影响激光雷达系统近场信号的测量精度。由于透射式激光雷达系统较复杂,多数文献只是提出了处理噪声的方法<sup>[6-9]</sup>,并没有精确分析杂散光的来源,因此有必要对雷达系统杂散光的来源进行定量分析,为雷达系统的后续设计提供可靠的理论依据。

针对透射式激光雷达系统的干扰因素进行分析,结合 ZEMAX 软件对光学镜片表面反射和镜筒内壁多次反射、散射进行模拟分析,经分析得到镜片表面反射光成像在探测器的面源功率达到  $3 \times 10^{-8}$  W,镜筒多次反射和散射光成像在探测器的面源功率达到  $2.8 \times 10^{-9}$  W。在相同的观测条件下,将透射式与反射式激光雷达系统的连续观测数据进行对比,得到雷达系统光噪声线性度值和光噪声对雷达近场测量信号的线性度和精度的影响。

## 2 干扰因素分析

米散射激光雷达回波信号中的干扰因素主要包括雷达本身的噪声、外界白噪声和杂散光。其中雷达本身的噪声主要由光子的散粒噪声、热噪声和暗电流噪声组成。光子的散粒噪声是指光电转换过程中光电子计数随机起伏引起的噪声;热噪声是指由电阻内部自由电子或电荷载流子的不规则热运动所引起的噪声;暗电流噪声是指在没有光照射的情况下,光电倍增管(PMT)通电后光电阴极和打拿极发射电子所形成的噪声,在夜间监测过程中,主要的噪声来源是暗电流噪声。外界白噪声是指太阳光、月光和星光等各种散射光进入光学系统中所产生的噪声,在白天监测过程中,自然光背景噪声是米散射激光雷达系统的主要噪声来源<sup>[10-11]</sup>。

因探测器面源接收光功率较高,而近场杂散光的形成只与系统光机结构有关,所以这里只对系统的近场杂散光进行分析。系统近场杂散光是由激光雷达系统中光信号经过镜面多次反射、镜筒内壁反射以及镜筒中的散射等引起的,其在探测器面源上所形成的光斑能量强于探测器的饱和值,进而降低了近场测量精度并缩短了探测器本身的使用寿命。系统杂散光的存在不会随着昼夜条件的变化而改变,所以有必要分析米散射激光雷达系统的杂散光。

与反射式激光雷达系统相比,透射式激光雷达系统的镜面反射、镜筒内壁反射以及光束在镜筒中的散射等现象对信号的影响更加显著。首先假定透射式光机结构中的镜面表面特性和镜筒特征,它们的表面特征决定了杂散光在系统中的传输特性。虽然目前的镀膜技术可以将镜面的透过率提高到 99%,但还是会有少量光被反射回来,所以可以用哈维模型来描述光学镜面的杂散光特性,即

$$\text{BSDF}(\theta, \theta_0) = b_0 \left[ 1 + \left( \frac{\sin \theta - \sin \theta_0}{L} \right)^2 \right]^{s/2}, \quad (1)$$

式中  $\theta$  和  $\theta_0$  分别表示散射角和镜面反射角; $b_0$  为常量, $b_0 = 1.741$ ;  $s$  为斜率,一般取  $-1.5$ ;  $L$  为下跌角度,一般取  $0.001$ ;  $\text{BSDF}(\cdot)$  为镜面散射分布函数。

## 3 实验系统组成

为了有效验证透射式激光雷达系统杂散光对信号质量的影响,在相同参数的基础上自行研发了透射式和反射式米散射激光雷达系统,其结构和原理如图 1 所示。整个雷达系统主要由激光发射单元、信号接收单元和数据采集控制单元组成。

激光雷达发射单元主要由 Nd:YAG 激光器和扩束镜等组成。Nd:YAG 激光器输出波长为 532 nm 的光束,经过 10 倍扩束后的发散角为 0.8 mrad,发射光束通过扩束镜进入大气中,与大气分子和气溶胶相互作用后产生米散射信号。接收单元的望远镜口径为 150 mm,小孔光阑大小为 1.5 mm,所以接收单元的视场角为 2 mrad。通过大气的信号经准直镜和滤光片后进入光电倍增管,并被转变成电信号。为了降低热噪声和暗电流对回波信号的影响,整个系统都配备有制冷装置。为了降低白噪声,在光电倍增管前面放置带宽为 1 nm、带外抑制为 6 的窄带滤光片。激光雷达系统采用的 Nd:YAG 激光器的脉冲功率为 0.4 W,脉冲宽度为 5 ns,束腰直径为 8 mm,激光脉冲重复频率为 7.5 kHz, PMT 的直径为 8 mm。

利用 ZEMAX 软件分别对透射式和反射式激光雷达系统的信号接收单元进行仿真,结果如图 2 所示。透射式激光雷达系统的信号接收单元由三片式 K9 玻璃组成,反射式激光雷达系统的信号接收单元的主次镜采用抛物面镜结构形式。从图中可以看出,两种系统的信号接收单元的弥散斑都很小,且都具有很好的成像质量,完全能够满足激光雷达系统的要求。

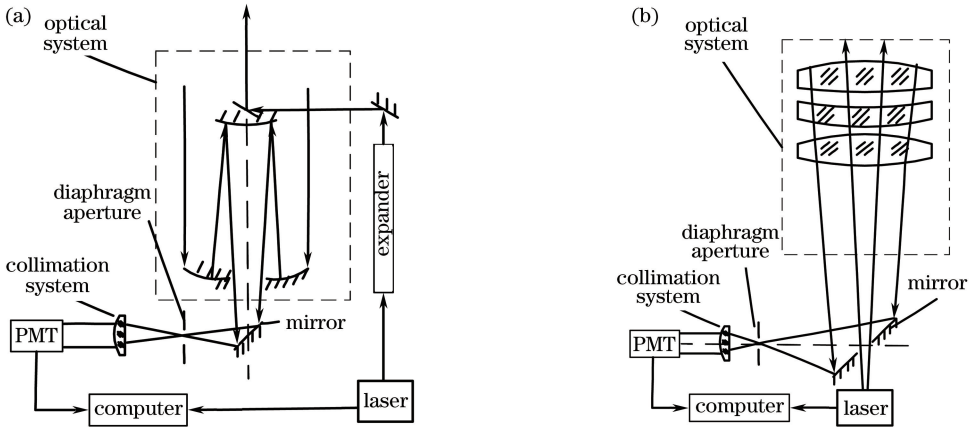


图 1 (a)透射式和(b)反射式米散射激光雷达系统示意图

Fig. 1 Diagrams of (a) transmission type and (b) reflection type Mie scattering lidar systems

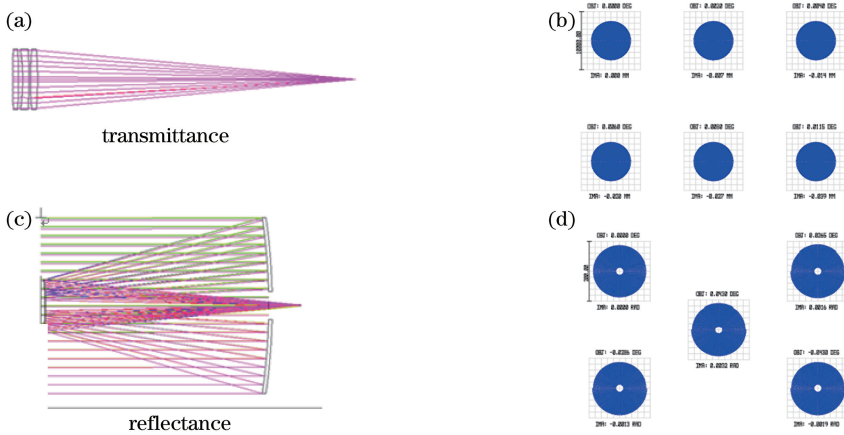


图 2 激光雷达系统的信号接收单元的(a)(c)光学结构图和(b)(d)点列图

Fig. 2 (a)(c) Optical structural diagrams and (b)(d) spot diagrams of signal receiving unit of lidar system

## 4 仿真结果

### 4.1 光学镜头表面反射

在透射式米散射激光雷达系统中,各表面都镀有增透膜,以使单个镜头表面的透过率达到 99%,但少量光束经过镜面多次反射后聚焦在像面位置。如图 3 所示,透射式光学系统发射单元的发射光束 L 共经过 3 个镜片(M1、M2、M3)即 6 个镜面后才射向大气中,可以看出每束光到达像面 D 处的会聚情况不同,在探测面源位置处所会聚的功率也不同。对透射式激光雷达系统的光反射噪声进行分析,发射单元的光源功率为 0.4 W,光源发出的光从中间开孔的反射镜出射,分别经过透镜的 6 个镜面,对每个镜面都进行仿真,结果如图 4(a)~(f)所示。从图中可以看出,光束经过第 3 个镜面反射后,在探测器面源处形成的光斑功率最大值达到  $1 \times 10^{-9}$  W;当光束经过第 6 个镜面反射后,在探测器面源处形成的光斑功率最大值可以达到  $3 \times 10^{-8}$  W。

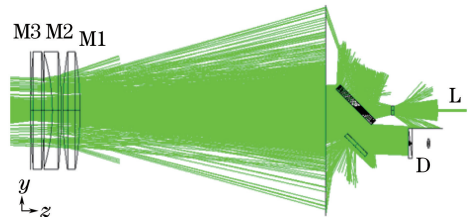


图 3 透射式光学系统中杂散光光线追迹图

Fig. 3 Ray tracing of stray light in a transmission type optical system

图 5(a)为透射式镜面反射光线追迹。将接收成像面源直径扩大到 40 mm 时,分析第 1~6 个镜面反射后到达接收像面处的功率。可以看出,像面上形成了强度不同的同心圆环,如图 5(b)所示。虽然像面面源所接收的功率最大值达到  $2.5 \times 10^{-6}$  W,但是大部分功率都集中在直径为 8 mm 的成像面源范围之外,只有少部分功率进入探测器中,如图 5(c)所示。

### 4.2 镜筒反射和散射

透射式米散射激光雷达系统中的发射光束经 3

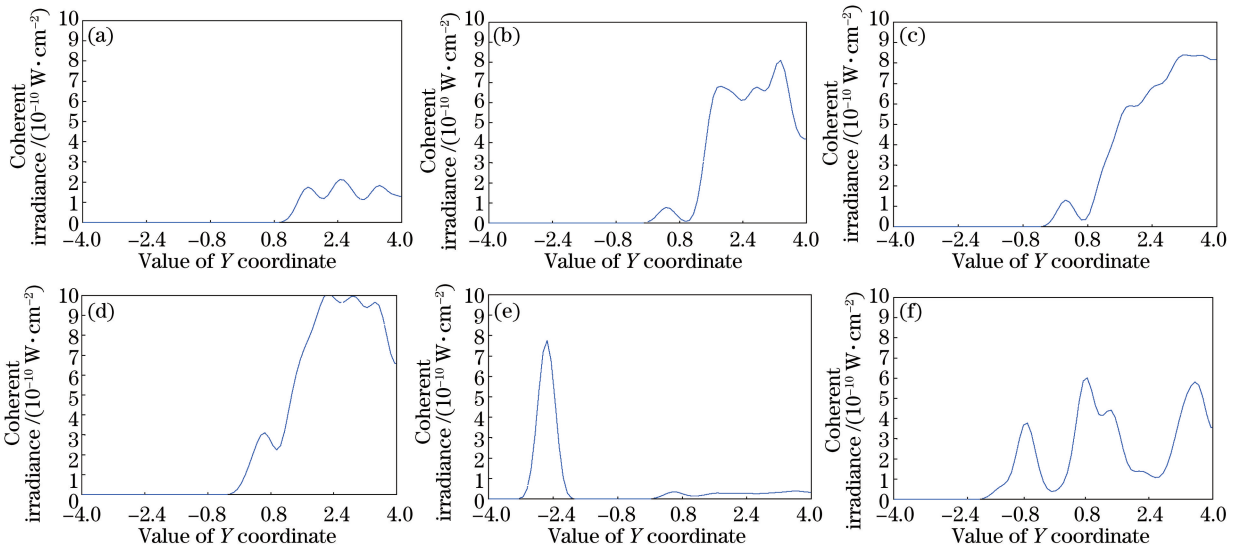


图 4 光束经过(a)第 1 个, (b)第 2 个, (c)第 3 个, (d)第 4 个, (e)第 5 个和 (f)第 6 个镜面反射后在探测器面源上的接收功率  
Fig. 4 Receiving powers on detector surface source after reflection by (a) 1<sup>st</sup>, (b) 2<sup>nd</sup>, (c) 3<sup>rd</sup>, (d) 4<sup>th</sup>, (e) 5<sup>th</sup>, and (f) 6<sup>th</sup> mirror

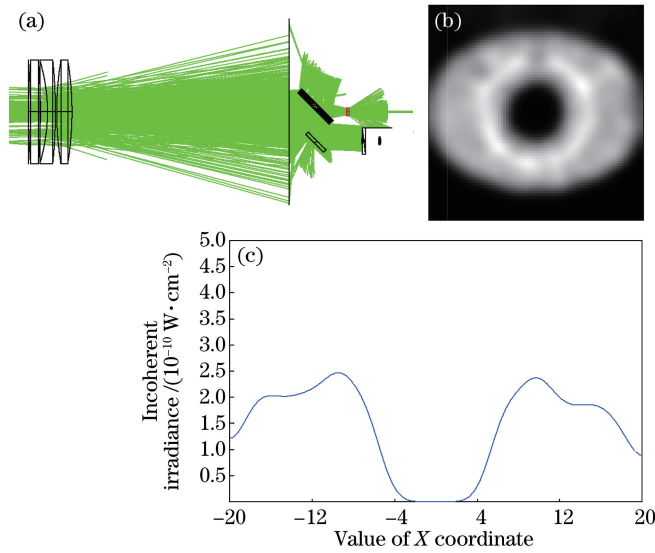


图 5 (a)透射式镜面反射光线追迹; (b)探测器面源处实际成像效果; (c)探测器面源处接收光功率曲线图  
Fig. 5 (a) Light tracing of reflection of transmission type lens surface; (b) actual imaging effect of detector's surface source; (c) light power curve received by detector's surface source

个镜片表面反射后,一部分反射光经过反射镜直接到达探测器面源上,如 4.1 节所述;另一部分反射光经过镜筒的多次反射和镜筒内的散射后,成像在探测器面源上。如图 6(a)所示,在镜筒内部增加 3 个消光环,并将内壁氧化,对镜筒进行消光处理。利用 ZEMAX 软件进行光线追迹,发现在直径为 40 mm 的探测器面源处形成强度不等的同心圆环,如图 6 (b)所示。光经过镜筒多次反射和镜筒内散射后,主要的光功率都已进入探测器面源之内,接收的功率最大值达到  $2.8 \times 10^{-9}$  W,直接冲击探测器并造

成探测器损伤,降低了近场信号的测量精度,如图 6(c)所示。

### 5 数据验证结果

对透射式激光雷达和反射式激光雷达进行连续观测对比实验。通过分析系统杂散光对回波信号质量的影响,可得当输入激光能量为 0.4 W 时,对应的镜筒内壁多次反射和散射的杂散光在探测器面源处的光功率约为  $2.8 \times 10^{-9}$  W。经过 3 个镜片多次反射的杂散光在探测器面源处形成的光功率为

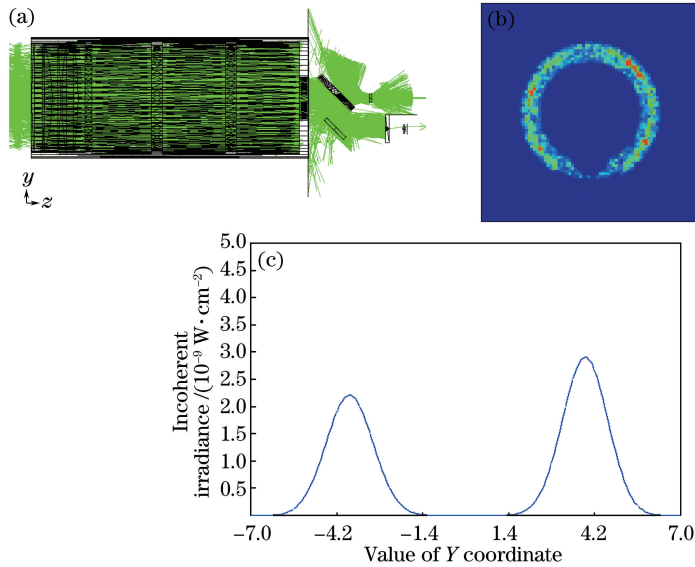


图 6 (a)透射式镜筒反射光和散射光的光线追迹;(b)探测器面源处实际成像效果;(c)探测器面源处接收光功率曲线图  
Fig. 6 (a) Light tracing of reflection light and scattering light of transmission type lens surface; (b) actual imaging effect of detector's surface source; (c) light power curve received by detector's surface source

$3.0 \times 10^{-8}$  W,将两者相加可以得到近场杂散光总功率约为  $3.28 \times 10^{-8}$  W。计算得到的模拟数据曲线与模拟采集的实际测量数据曲线如图 7 所示,对比

可知,近场探测器达到饱和状态,导致 100 m 之内的回波信号强度远比模拟数据高。

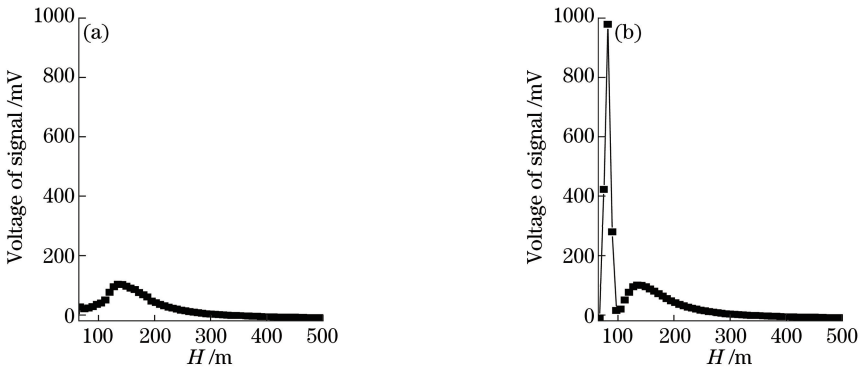


图 7 (a)模拟与(b)实测数据曲线  
Fig. 7 (a) Simulated and (b) measured data curves

分别取两个系统中的两条原始信号进行对比分析。图 8 为 2017 年 9 月 28 日 10:00 的原始信号,由图 8(a)可以看出由于杂散光的存在,进入透射式激光雷达系统的杂散光信号强度峰值可以达到 1000 mV。图 8(b)所示的反射式激光雷达系统的近场杂散光回波信号峰值相比透射式激光雷达系统要小很多。

分别对两种雷达进行衰减光处理,衰减片的吸收率分别为 10%、50%和 80%。从图 9 可以明显看出,透射式激光雷达系统加衰减片后的回波信号强度与反射式回波信号强度相比,线性度较差。对于近场信号,反射式激光雷达系统的曲线线性度更加

平缓,测量精度更高。

对高度(H)延伸到 5 km 时的回波信号进行分析,发现当信号衰减 80%时,透射式激光雷达系统的回波信号明显出现下翘现象,出现该现象的原因是:系统的杂散光直接冲击探测器,导致探测器在一段时间内产生非线性效应,如图 10 所示。为了更加明确杂散光对雷达回波信号线性度的影响,将衰减过的回波信号分别与原始信号进行对比,得到图 11 所示曲线,取 350~1500 m 中间段的回波信号进行对比,可以看出反射式激光雷达系统比透射式激光雷达系统的线性度更高。

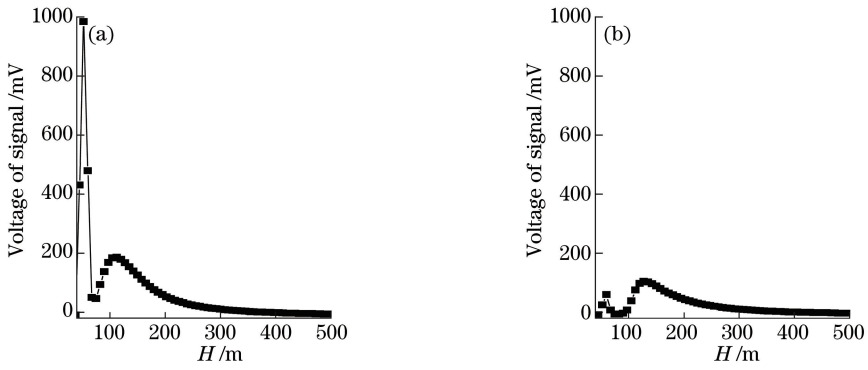


图 8 (a)透射式和(b)反射式激光雷达回波信号强度

Fig. 8 Echo signal intensity of (a) transmission type and (b) reflection type laser lidars

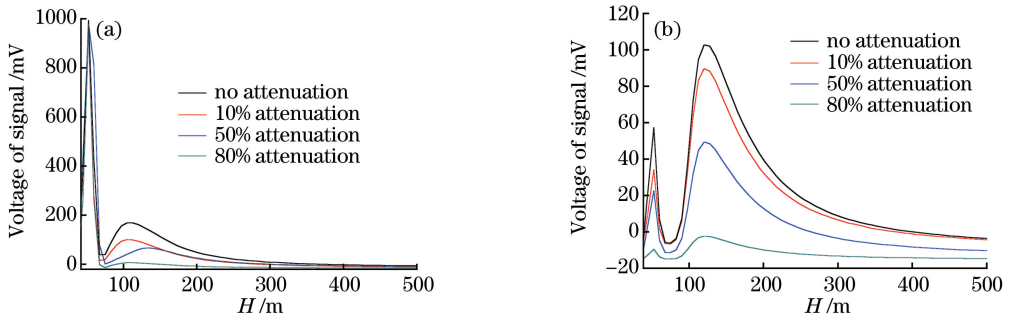


图 9 (a)透射式和(b)反射式激光雷达加衰减片后的回波信号强度

Fig. 9 Echo signal intensity of (a) transmission type and (b) reflection type laser lidars with attenuation piece

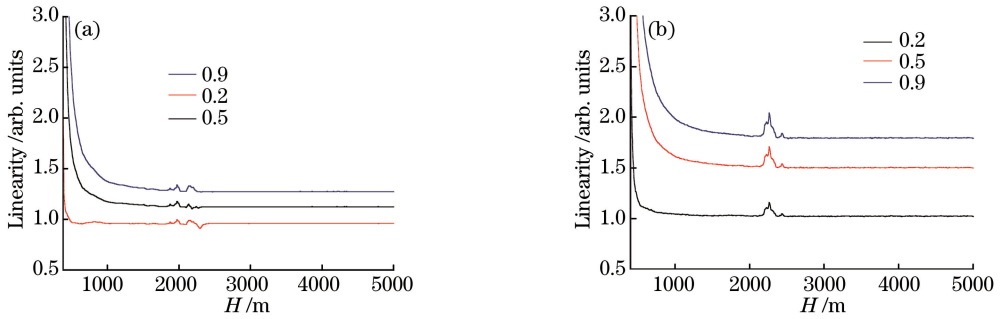


图 10 (a)透射式和(b)反射式激光雷达衰减后远场回波信号的线性度

Fig. 10 Signal linearity of far-field echo after the attenuation of (a) transmission type and (b) reflection type lidars

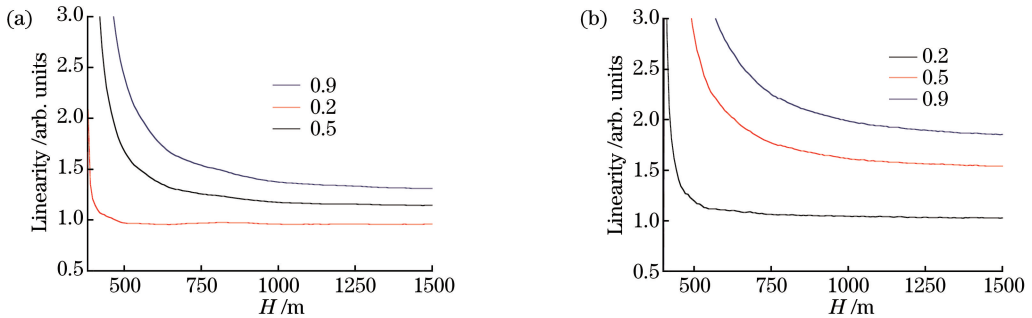


图 11 (a)透射式和(b)反射式激光雷达衰减后近场回波信号线性度

Fig. 11 Signal linearity of near-field echo after the attenuation of (a) transmission type and (b) reflection type lidars

## 6 结 论

通过对透射式光学系统的镜面发射和镜筒反射、散射进行杂散光分析,得到镜片表面反射光成像在探测器的面源功率达到  $3 \times 10^{-8}$  W,镜筒多次反射和散射光成像在探测器的面源功率达到  $2.8 \times 10^{-9}$  W。对透射式和反射式激光雷达系统的观测数据进行分析,结果显示透射式光学系统的近场杂散光回波信号强度明显高于反射式光学系统。当回波信号衰减 80% 时透射式激光雷达系统近场信号出现下翘现象,通过对信号进行非线性化处理也可以看出反射式激光雷达系统的性能优于透射式雷达系统。

实验数据分析验证了上述 ZEMAX 分析结果的正确性,说明对透射式激光雷达系统近场杂散光进行分析是必要的,并且对以后激光雷达系统的设计、近场杂散光抑制分析有重要的参考价值。

## 参 考 文 献

- [1] Ji C L, Tao Z M, Hu S X, *et al.* Cirrus measurement using three-wavelength lidar in Hefei [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0401001.  
季承荔, 陶宗明, 胡顺星, 等. 三波长激光雷达探测合肥地区卷云特性 [J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0401001.
- [2] Liu Z S, Li Z G, Liu B Y, *et al.* Analysis of saturation signal correction of the troposphere lidar [J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(11): 111051.
- [3] Jiang R H, He X D, Wu T, *et al.* Rayleigh-Mie lidar system design and simulation [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2013, 8(4): 306-313.  
江榕宏, 何兴道, 吴涛, 等. 瑞利-米散射激光雷达的系统设计及仿真计算 [J]. *大气与环境光学学报*, 2013, 8(4): 306-313.
- [4] Du Q C, Xu C D, Ji Y F. Development of transmission coaxial micro-pulse lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(5): 357-360.  
杜其成, 徐赤东, 纪玉峰. 透射式同轴微脉冲激光雷达研制 [J]. *大气与环境光学学报*, 2007, 2(5): 357-360.
- [5] Liu B, Zhao Y M, Li J W, *et al.* Research on telescope design method of atmospheric lidar [J]. *Journal of Telemetry/ Tracking and Command*, 2014, 35(2): 37-42.  
刘波, 赵一鸣, 李菁文, 等. 大气探测激光雷达望远镜设计方法研究 [J]. *遥测遥控*, 2014, 35(2): 37-42.
- [6] Li X P, Sha S C, Hu T L. Suppression of stray light for long focal length off-axis three-mirror optical system [J]. *Optical and Precision Engineering*, 2011, 19(11): 2603-2608.  
李晓平, 沙晟春, 胡亭亮. 长焦距离轴三反光学系统杂散光的抑制 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(11): 2603-2608.
- [7] Zhang H X, Lu Z W, Xia L D, *et al.* Stray light suppressing of optical system in white light coronagraph [J]. *Optical and Precision Engineering*, 2009, 17(10): 2371-2376.  
张红鑫, 卢振武, 夏利东, 等. 白光日冕仪光学系统的杂散光抑制 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(10): 2371-2376.
- [8] Gao F, Li W W, Nan H S, *et al.* Fine detection of aerosol in the lower troposphere using twin scanning lidars [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(9): 0901002.  
高飞, 李婉婉, 南恒帅, 等. 双扫描激光雷达精细探测低层大气气溶胶方法 [J]. *光子学报*, 2017, 46(9): 0901002.
- [9] Song Y H, Shi L L, Wang Y F, *et al.* Retrieve of lidar ratio of aerosols by iteration [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(1): 0113001.  
宋跃辉, 时丽丽, 王玉峰, 等. 气溶胶激光雷达比的迭代反演 [J]. *中国激光*, 2016, 43(1): 0113001.
- [10] Zhang H X, Lu Z W, Sun Q, *et al.* Stray light analysis of diffractive/refractive LWIR staring imaging system [J]. *Chinese Journal of Optical and Applied Optics*, 2009, 2(5): 402-407.  
张红鑫, 卢振武, 孙强, 等. 折/衍混合长波红外凝视成像系统的杂散光分析 [J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(5): 402-407.
- [11] Zou G Y, Fan X W. Baffle design and stray light analysis of the off-axis three-mirror telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(3): 605-609.  
邹刚毅, 樊学武. 离轴三反望远镜遮光罩设计与杂光分析 [J]. *光子学报*, 2009, 38(3): 605-609.