

有限距离大气透过率实验研究

孙国栋^{1,2}, 秦来安^{1*}, 侯再红¹

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学研究生院, 安徽 合肥 230026

摘要 将成像激光雷达这一新型主动大气探测手段运用于水平大气透过率测量研究。采用矩阵图像错位相加法提高信噪比。获取随距离变化的信号之后,通过 Klett 积分结合斜率法的反演方式获得 1 km 以内水平传输路径上的消光系数分布,对消光系数进行路径积分,计算出水平大气透过率。将反演结果与对比实验中直接测量的大气透过率进行对比分析,发现不同天气情况下两者的相关性系数在 0.7 以上,相对误差在 20% 以内。该成像激光雷达设备可进行有限距离的水平大气透过率探测研究。

关键词 大气光学; 成像激光雷达; 大气透过率; 消光系数; 有限距离

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1204005

Experimental Study of Atmospheric Transmittance in Finite Distance

Sun Guodong^{1,2}, Qin Laian¹, Hou Zaihong¹

¹Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract A new active atmospheric detection means of the imaging lidar is used in the horizontal atmospheric transmittance detection. A matrix image dislocation addition method is proposed to improve the signal to noise ratio. When the signal which is changing with the distance is obtained, an inversion method combined with the slope method and Klett integration is adopted to retrieve the extinction coefficient distribution in 1 km horizontal transmission path. The horizontal atmospheric transmittance can be achieved based on the path integral of extinction coefficient. By comparing the inversion results of comparing experiments with the atmospheric transmittance obtained in direct measurements, we find that the correlation coefficient is over 0.7 and the relative error is within 20%. The imaging lidar can be an instrument for the study on detecting the horizontal atmospheric transmittance in the finite range.

Key words atmospheric optics; imaging lidar; atmospheric transmittance; extinction coefficient; finite distance

OCIS codes 010.1290; 010.1100; 010.3640

1 引言

有限距离大气透过率是指在特定路径及特定范围内的大气透过率,反映近地面大气的消光特性,它是地基光学工程设计及大气辐射传输等科学技术工作中的一个基本物理量,实时测量有限距离内的大气透过率对以上研究领域具有一定的实际意义。

直接测量法是获得实时大气透过率最有效的方法。Horman^[1]利用脉冲激光光束的后向散射光获得了大气透过率;Diner 等^[2]基于机载的多仰角进行成像,这种方法减弱了大气路径上的辐射以及设备噪声的影

收稿日期: 2017-04-11; 收到修改稿日期: 2017-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(41405014)

作者简介: 孙国栋(1991—),男,博士研究生,主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: gds0525@163.com

导师简介: 侯再红(1968—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事激光大气传输方面的研究。E-mail: zhou@aiofm.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: laqin@aiofm.ac.cn

响;范伟等^[3]利用太阳光谱辐射计计算了可见光到近红外波段整层大气连续光谱透过率;郭瑞鹏等^[4]利用太阳辐射测量整层大气光谱透过率,该方法需要利用 Langley 拟合法进行定标。这些直接测量方法测量的都是整层大气透过率,而有限距离内大气透过率的测量鲜见报道。

综上所述,已有的直接测量大气透过率的方法不能满足有限距离内大气透过率的实时测量要求。随着激光器和成像系统的快速发展,一种基于成像激光雷达的水平有限距离大气透过率的测量方法被提出。成像激光雷达是一种新型的主动式遥感技术,其基本原理与传统的后向散射激光雷达相似。成像激光雷达的发射系统发射激光,发射激光与大气中的介质相互作用后产生回波信号,接收系统收集这些回波信号并进行后期处理,以获得所需要的信息。不同的是,传统的后向散射激光雷达采用的是脉冲激光,使用光电倍增管或雪崩二极管探测回波信号。光子计数是一个统计过程,需要一定的采样时间,通过选择采样时间可控制距离分辨率,具体参数可根据探测要求确定。传统的后向散射激光雷达在近地面存在盲区,需要进行几何因子校正^[5]。而成像激光雷达的探测方式不需要进行几何因子校正^[6],可采用连续激光,通过软件设置对激光光柱进行连续拍摄,以获取全天的光柱图像,然后利用图像处理的方式获取所需要的光信号,进而通过反演算法来计算大气透过率。同时,设计了一个不通过反演算法来计算大气透过率的激光水平传输实验作为对比实验,以进行可信度分析。有限距离内大气透过率实验结果的精度满足相对误差(ERR)在 15% 以内的要求,同时验证了成像激光雷达系统的合理性。

2 成像激光雷达实验平台

2.1 成像激光雷达原理

成像激光雷达系统的结构示意图如图 1 所示。收发间距 $D=480\text{ mm}$,发射装置是波长为 532 nm 、平均功率为 4 W 的 YAG 激光器,激光器输出功率的稳定性为 5% 。激光通过 10 倍的扩束镜后进入大气,与大气中的粒子相互作用后的散射光由接收装置收集。接收装置由透射式望远镜、CCD 相机和滤光片等组成,这些器件的具体参数如表 1 所示。CCD 相机本身的噪声通过 CCD 相机平场来进行校正^[7]。该系统未进行自动增益控制。接收镜头针对轴上和近轴区域进行了优化,保证了测量光柱能完整地在 CCD 焦平面上成像。依据系统设计原理^[8],CCD 按照一定的倾角($\gamma=22.62^\circ$)安放,从而获得了较大的景深,有效地克服了离焦的影响。

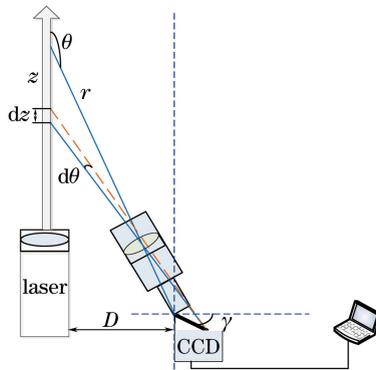


图 1 成像激光雷达系统结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of imaging lidar system

利用几何关系进行计算,本系统中所能探测到的最小距离为 17.79 m ,综合收发间距可知,最小探测距离处的散射角 $\theta=178.6^\circ$ 。随着收发间距的增大, θ 均大于 178.6° 。因此,只需要计算出 θ 为 $178.6^\circ\sim 180^\circ$ 时的接收光与后向散射光的比值即可。根据合肥地区气溶胶的两种细粒模态的对数正态谱分布拟合参数^[9],仿直接收光与后向散射光的关系,仿真结果如图 2 所示。仿真得到气溶胶的两种细粒模态下 θ 为 $178.6^\circ\sim 180^\circ$ 时接收光与后向散射光的比值均在 1 附近,说明在该角度范围内接收到的散射光可以作为后向散射光来处理,该结论可用于简化成像激光雷达方程。

表 1 仪器参数
Table 1 Parameters of instruments

Instrument	Feature	Specification
Laser	Wavelength /nm	532
	Polarization	Linear
	Output power /W	4
	Working mode	Continuous wave
	Beam quality (M^2 factor)	<1.2
	Beam divergence angle /mrad	1.5
	Transverse	TEM ₀₀
Telescope	Diameter /mm	50
	Focal length /mm	200
	Field of view /($^{\circ}$)	2.56
	Receive efficiency /%	58
Interference filter	Central wavelength /nm	532
	Bandwidth /nm	3
Camera	Resolution /pixel \times pixel	1388 \times 1038
	Frame rate /(frame \cdot s $^{-1}$)	12
	Sensor	Sony ICX285
	Sensor type	CCD progressive
	Pixel size / $\mu\text{m}\times\mu\text{m}$	6.45 \times 6.45
	Analog-to-digital converter bit	12

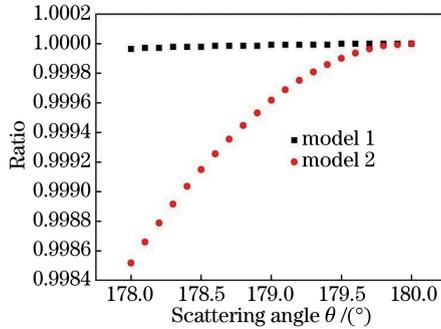


图 2 散射相函数曲线

Fig. 2 Curves of scattering phase function

成像激光雷达方程^[6]为

$$p(z) = C\beta(z) \frac{dz}{z^2} \exp \left[-2 \int_0^z \sigma(z') dz' \right], \quad (1)$$

式中 z 为水平距离, $p(z)$ 为激光雷达接收到的信号, C 为系统常数, $\beta(z)$ 为气溶胶和分子的总后向散射系数, $\sigma(z)$ 为大气总消光系数。设 $T(z)$ 为大气透过率, 其表达式为

$$T(z) = \exp \left[- \int_0^z \sigma(z') dz' \right]. \quad (2)$$

角分辨率公式和距离分辨率公式分别为

$$d\theta = 2\arctan[l/(2f)], \quad (3)$$

$$dz = z^2 d\theta/D, \quad (4)$$

式中 l 为单个像素的尺寸, f 为系统焦距, $d\theta$ 是一个常量。与传统的后向散射激光雷达不同, 成像激光雷达信号的变化受几何关系的影响。从(3)、(4)式中可以得出, 随着 z 的增大, dz 会迅速增大, 即距离分辨率会迅速变低。实际计算得到的对应距离随像素数的变化与(3)、(4)式的结果一致, 如图 3 所示。成像激光雷达系统在距离较近处的距离分辨率较高, 因此该系统可尽可能多地获取近地面数据。随着 z 的增大, 距离分

分辨率会快速降低,表明每一个像素代表的高度迅速增加,远处每一个像素代表的高度甚至达到百米量级,信噪比(SNR)也随之降低,这对于测量精度有一定影响。处理以上问题的方法是:对远处的信号先进行归一化处理,再进行插值,以获得固定高度分辨率的信号,从而可在一定程度上提高测量精度。

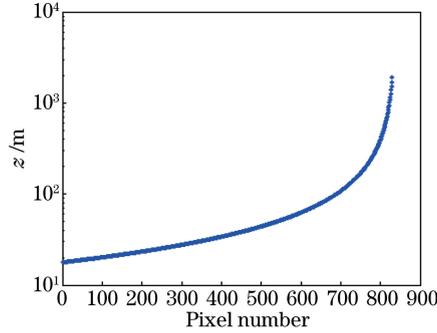


图 3 成像激光雷达距离分辨率

Fig. 3 Range resolution of imaging lidar

2.2 大气透过率反演方法

对于通过拍摄得到的激光光柱图像,依据激光光束高斯分布的特点提取光柱范围内随高度变化的光子数,运用反演算法对雷达数据进行反演^[10-12]。Klett 积分和 Fernald 积分是激光雷达信号反演过程中广泛采用的两种算法,它们的主要差别是:Klett 积分可计算大气分子和气溶胶总的消光系数,而 Fernald 积分可分别计算大气分子和气溶胶对消光系数的贡献。为验证水平大气透过率,需要获取总的消光系数,然后通过路径积分进行计算。如果选取 Fernald 积分算法,则需要先设定激光雷达比,然后选取大气分子消光模式,这样会不可避免地引入误差。这里采用 Klett 积分算法^[13],结合斜率法确定初值^[14-15],反演出 1 km 以内水平消光系数的分布,然后根据大气透过率的定义,依据(2)式计算出 1 km 以内的单程水平大气透过率。

Klett 后向积分公式为^[13]

$$\sigma(z) = \frac{\exp[(U - U_m)/k]}{\sigma_m^{-1} + \frac{2}{k} \int_z^{z_m} \exp[(U - U_m)/k] dz'}, \quad (5)$$

式中 k 为常数,取值范围一般为 0.67~1,这里取 $k=1$ ^[13]; σ_m 为消光系数边界值; z_m 为最大探测距离; U 为距离校正信号; U_m 为最大探测距离处的距离校正信号。通过编程自动选取距离平方校正信号最平滑的一段斜率来计算消光系数,并大致表示出消光系数边界值^[14,16]。

通过实验发现噪声对信号的提取具有较大影响。成像激光雷达系统中不可避免地存在噪声和干扰源,包括光电探测系统中的电噪声和热噪声等。针对噪声影响信号提取的情况,一般通过硬件和软件这两种方式来提高信噪比。硬件方式主要通过加大激光器功率和采用窄带滤光片来提高信噪比^[17],这在成像激光雷达装置中都已实现,如第 2.1 节所述,激光器采用的功率为 4 W,窄带滤光片的带宽为 3 nm。为更进一步通过软件方式提高信噪比,研究人员进行了大量的研究,如采用小波滤波及卡尔曼滤波等,达到了比较好的降噪效果。图像中的随机噪声可认为是高斯白噪声,对图像进行长曝光可去除相当一部分的随机噪声。但是,在白天探测噪声可能会造成长曝光图像的信噪比不能满足反演精度的要求,故提出使用错位相加法的方式来进一步提高图像信噪比。错位相加法的示意图如图 4 所示,图 4(a)、(b)都来自同一幅原始图像,通过编程的方式将图 4(a)、(b)进行错位相加,结果如图 4(c)所示。可以看出,图 4(c)中间光柱的区域变宽,有用信号也成倍地增强,但是噪声的增强速度没有信号的增强速度快,所以信噪比会提高。这里用峰值信噪比 P_{SNR} 来评价图像质量的好坏,峰值信噪比越大,代表信号失真程度越小。

峰值信噪比的计算公式为^[16]

$$P_{SNR} = 10 \lg \left[\frac{Q_{mm}^2}{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \| I(i, j) - K(i, j) \|^2} \right], \quad (6)$$

式中 Q_{mm} 表示转化为灰度图像之后灰度的最大值, m 、 n 分别为图像的行、列数目, $I(i, j)$ 和 $K(i, j)$ 分别为

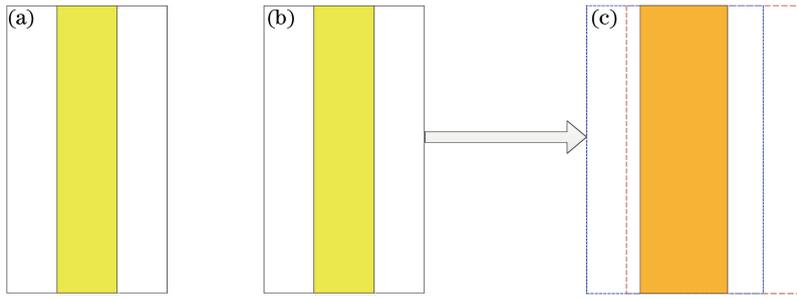


图 4 错位相加法示意图。(a)含有噪声的图像;(b)图平移后的图像;(c)叠加图像

Fig. 4 Schematic of dislocation addition method. (a) Noisy image; (b) image after translation; (c) superposition image

原始图像矩阵和经处理后的图像矩阵的元素。图 5(a)为没有噪声污染的原始信号图像;图 5(b)为噪声图像,光子数方差为 1600;图 5(c)为经过一次错位相加后的图像;图 5(d)为经过 4 次错位相加后的图像。由图 5 可以直观地看出,图像的质量逐渐变好。表 2 列出了经过不同次数错位相加之后峰值信噪比的大小,从数据中可以看出,错位相加一定次数之后,图像的峰值信噪比和每个高度上的 SNR 都有一定程度的提高,与直观看到的情况一致。实际成像激光雷达信号的信号提升效果如图 6 所示,说明错位相加法具有提高信噪比的效果。

表 2 错位相加前后图像的 P_{SNR} 和某一高度上的 SNR

Table 2 P_{SNR} of images and SNR at certain altitude before and after dislocation addition

Image type	P_{SNR}/dB	SNR /dB
Noisy image	13.7416	20.4383
Addition for 1 times	15.6982	20.6741
Addition for 2 times	16.3394	21.2772
Addition for 3 times	17.1137	21.5869
Addition for 4 times	18.1106	21.9136

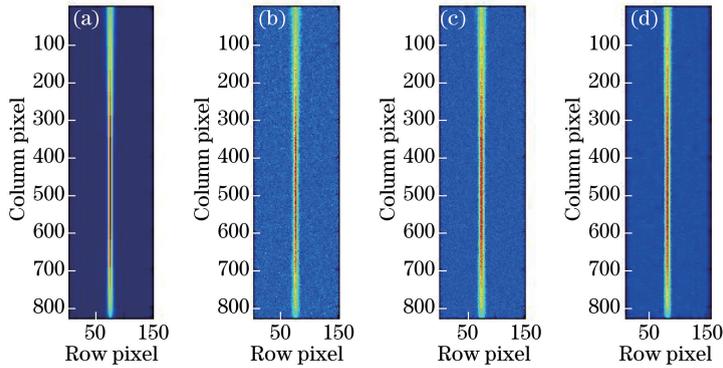


图 5 不同次数错位相加前后的图像对比。(a)原始图像;(b)含有噪声的图像;(c)一次错位相加;(d)四次错位相加

Fig. 5 Contrast of images after dislocation superposition for different times. (a) Original image; (b) noisy image;

(c) dislocation addition for 1 times; (d) dislocation addition for 4 times

3 直接大气透过率测量

图 7 是直接测量大气透过率的装置图,图中标注的①为功率为 1 W、波长为 532 nm 的连续激光器,②为平行光管,③和⑤为聚焦镜,④和⑥为功率探测器。平行光管对出射的激光进行准直。③位于平行光管的出口处,④用于探测从聚焦镜反射回来的光,即探测出射光的功率,并将此功率记录下来。在 1 km 以外的实验地点,同样通过⑤将光反射到⑥上,此时⑥获得的激光功率是经过 1 km 大气衰减之后的激光功率,将此功率记录下来。在该实验中,通过调整光路及仪器的焦距可以保证 1 km 处的激光光斑全部被接收。为保证数据的可靠性,在每天的测试前后均将两端的测量仪器放在一起进行系统的比对定标。由朗伯-比尔定律可知,衰减后的激光功率与激光出射功率的比值即为 1 km 以内的水平大气透过率。该方法可直接测量得到

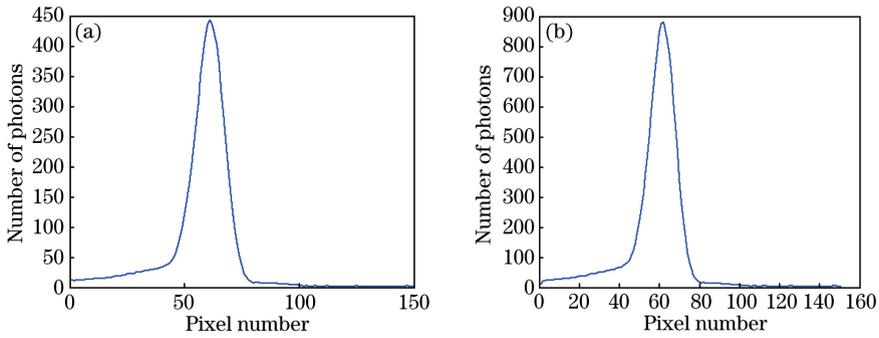


图 6 真实探测信号一次错位相加后某一行信噪比的提升效果。(a) SNR 为 37.5181 dB;(b) SNR 为 37.5836 dB

Fig. 6 Enhancement effects of SNR at certain row of true detection signals. (a) SNR is 37.5181 dB; (b) SNR is 37.5836 dB

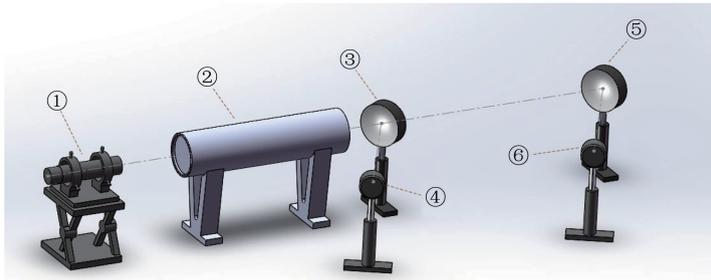


图 7 直接测量装置

Fig. 7 Direct measurement setup

大气透过率,具有较高的测量精度。通过对比直接测量得到的水平大气透过率与成像激光雷达反演获得的大气透过率,可对成像激光雷达反演大气透过率的精度进行更加真实的评估。

4 对比实验结果

图 8 是选取成像激光雷达在 2017 年 3 月 17 日和 2017 年 4 月 6 日不同时间段测得的水平消光系数分布。可以看出,水平消光系数在空间和时间上的变化比较显著,这种现象对于成像激光雷达系统而言是正常的,因为激光在 1 km 的水平传输路径上会经过公路、水库等地带,公路上汽车排放的尾气和水库上方含量较多的水汽都会对消光系数造成比较大的影响。通过(2)式可计算出 532 nm 波长的激光在不同时间段内水平传输 1 km 的大气水平消光系数廓线,并通过路径积分获得水平大气透过率。对比实验均在同一实验室进行,实验平台都在同一水平位置上,对比实验结果更为真实。通过第 3 节介绍的直接测量大气透过率的方法可得到 532 nm 波长的激光在不同时间段内水平传输 1 km 的大气透过率。

图 9(a)~(c)分别为 2017 年 3 月 17 日、2017 年 3 月 18 日和 2017 年 4 月 6 日的数据,天气情况分别为阴天、晴天和雾天。图中的红线是直接测量得到的 1 km 的水平大气透过率,蓝线为经过成像激光雷达反演

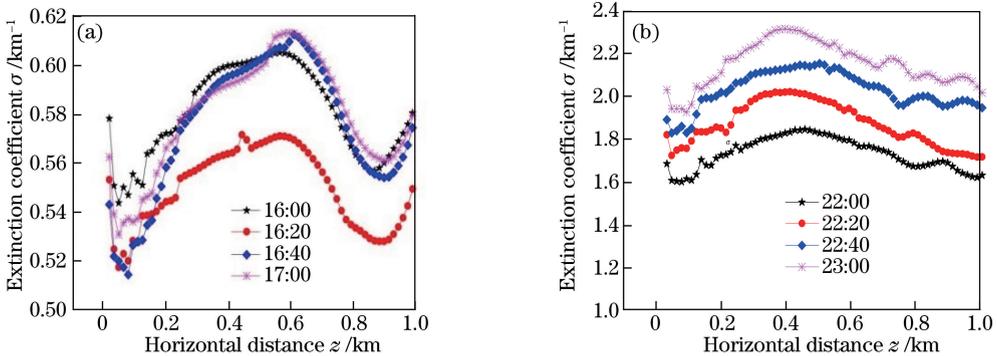


图 8 水平消光系数廓线。(a) 2017 年 3 月 17 日;(b) 2017 年 4 月 6 日

Fig. 8 Horizontal extinction coefficient profiles. (a) March 17, 2017; (b) April 6, 2017

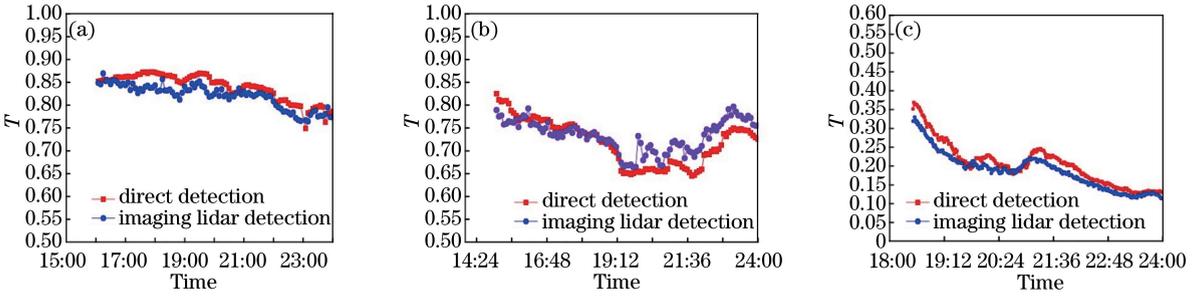


图 9 不同天气条件下的水平大气透过率。(a) 2017 年 3 月 17 日, 阴天; (b) 2017 年 3 月 18 日, 晴天; (c) 2017 年 4 月 6 日, 雾天
 Fig. 9 Horizontal atmospheric transmittance under different weather conditions. (a) March 17, 2017, overcast;
 (b) March 18, 2017, fine day; (c) April 6, 2017, fog

得到的 1 km 水平大气透过率。可以看出, 两种方法测量得到的水平大气透过率在变化范围内均有较好的一致性。尽管三幅图中覆盖的时间范围不是全天, 但是包括了白天和夜晚, 说明成像激光雷达可在白天背景光较强的情况下正常工作。从图 10 可以看出, 不同天气情况下两种测量方法所测数据的相关性系数 R^2 均在 0.7 以上, 大部分的相对误差 (ERR) 在 10% 以内, 极少部分的在 10% 到 20% 之间。因为精度满足 ERR 在 15% 以内, 所以成像激光雷达所测数据是可靠的。从对比情况来看, 两种方法测量的水平大气透过率的一致

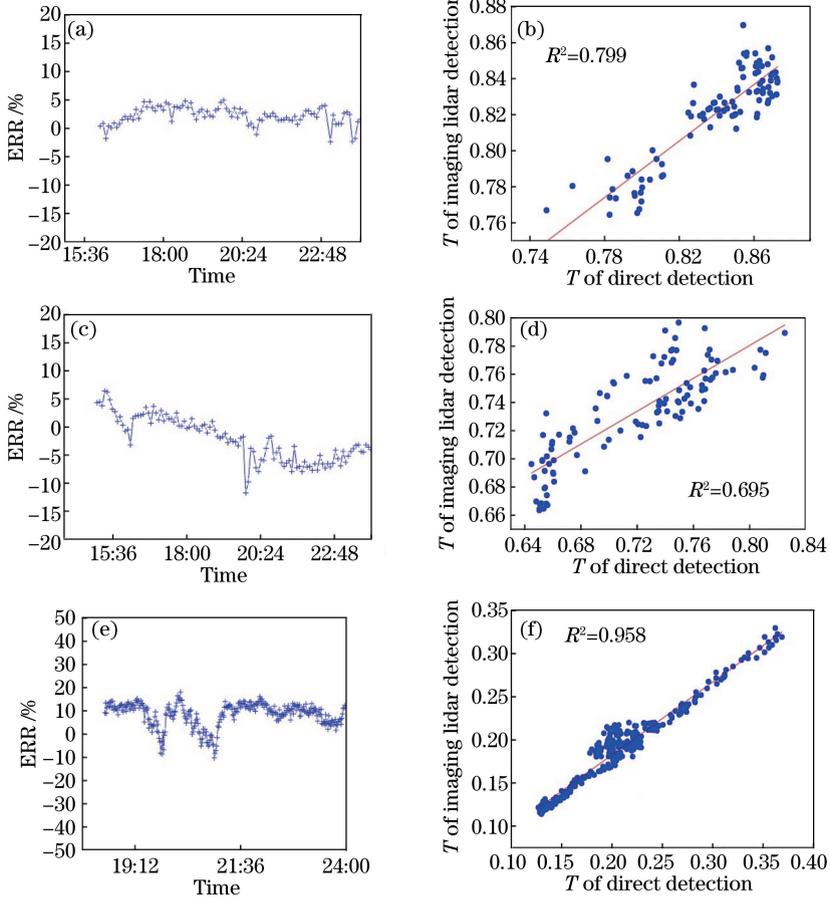


图 10 不同天气情况下的相对误差和相关性系数。(a) 2017 年 3 月 17 日 阴天下 的相对误差; (b) 2017 年 3 月 17 日 阴天下 的相关性系数; (c) 2017 年 3 月 18 日 晴天下 的相对误差; (d) 2017 年 3 月 18 日 晴天下 的相关性系数;
 (e) 2017 年 4 月 6 日 雾天下 的相对误差; (f) 2017 年 4 月 6 日 雾天下 的相关性系数

Fig. 10 Relative error and correlation coefficient under different weather conditions. (a) Relative error on March 17, 2017, overcast; (b) correlation coefficient on March 17, 2017, overcast; (c) relative error on March 18, 2017, fine day; (d) correlation coefficient on March 18, 2017, fine day; (e) relative error on April 6, 2017, fog; (f) correlation coefficient on April 6, 2017, fog

性较好,验证了成像激光雷达能够测量水平大气透过率的可行性。

虽然两种方法所测数据在整体上具有较好的一致性,但是在局部的时间点,成像激光雷达反演得到的水平大气透过率与直接测量得到的水平大气透过率相比还具有一定的偏差。出现这种情况的原因大致为:1)直接测量装置的误差;2)成像激光雷达本身的误差。直接测量装置的误差可能是因为功率探测器本身的不确定度所引起的,实验中功率探测器的不确定度范围为 $\pm 3\%$,所以可能会导致误差的产生。成像激光雷达本身的误差大致来源于以下两个方面:1)对比实验均在合肥董铺水库附近进行,这里的实验条件复杂,附近有湖水、树林、公路、建筑物等,为了保证人员安全,成像激光雷达发射出的激光光束并不是严格意义上的水平,而是与水平方向具有一个小角度的夹角,该路径上消光系数的分布也与水平方向的分布不尽相同,所以会引入一定的误差;2)成像激光雷达探测的是散射光,实验仅仅考虑单次散射,而忽略了多次散射的影响,这也会造成一定的误差。由以上的误差源可得,两种方法在这些误差的影响下依然可以得到不同天气情况下的相对误差大部分在 10% 以内的测量结果是具有一定意义的。

5 结 论

对成像激光雷达的原理进行了简要介绍。基于雷达系统的几何关系,以距离的平方的方式逐渐增加单位像素的采样距离,消除了雷达方程中的距离平方因子,大大减小了雷达系统的动态范围,而且近地面的分辨率较高,对于探测边界层的气溶胶或其他大气成分具有重要意义。成像激光雷达可探测得到 1 km 以内的水平大气消光系数廓线,通过对其进行路径积分获得的水平大气透过率要比直接用斜率法获得平均消光系数进而求得的水平大气透过率更为准确。在实验环境较为复杂的情况下,水平大气是不均匀的,而斜率法只适用于水平路径均匀的情况。同时,设计了一个对比实验用于直接探测同样距离内的水平大气透过率。从分析结果来看,不同天气情况下,直接测量法和成像激光雷达获得的 1 km 以内的水平大气透过率的相关性系数在 0.7 以上,大部分的相对误差在 10% 以内,极少部分的相对误差在 10% 到 20% 之间。 1 km 水平路径上的大气透过率实验还不足以说明所设计的成像激光雷达具有绝对的可靠性,更深入的研究可从斜程或者垂直大气透过率实验着手。

参 考 文 献

- [1] Horman M H. Measurement of atmospheric transmissivity using backscattered light from a pulsed light beam[J]. Journal of the Optical Society of America, 1961, 51(6): 681-691.
- [2] Diner D J, Martonchik J V. Atmospheric transmittance from spacecraft using multiple view angle imagery[J]. Applied Optics, 1985, 24(21): 3503-3511.
- [3] Fan Wei, Wang Yi, Rao Ruizhong. Measurement of the atmospheric transmittance from visible to near infrared bands[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(3): 402-407.
范伟, 王毅, 饶瑞中. 可见到近红外波段整层大气光谱透过率的测量研究[J]. 光子学报, 2006, 35(3): 402-407.
- [4] Guo Ruipeng, Zhan Jie, Rao Ruizhong. Measurement of total atmospheric spectral transmittance by solar irradiance[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2009, 23(5): 736-740.
郭瑞鹏, 詹杰, 饶瑞中. 利用太阳测量整层大气光谱透过率[J]. 量子电子学报, 2009, 23(5): 736-740.
- [5] Su J, McCormick M P, Liu Z, *et al.* Obtaining a ground-based lidar geometric form factor using coincident spaceborne lidar measurements[J]. Applied Optics, 2010, 49(1): 108-113.
- [6] Barnes J E, Bronner S, Beck R, *et al.* Boundary layer scattering measurements with a charge-coupled device camera lidar[J]. Applied Optics, 2003, 42(15): 2647-2652.
- [7] Yang Chengpeng. A study of the star recognition algorithm and its application based on CCD[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011: 6-9.
杨成鹏. 基于 CCD 的星体识别算法及应用研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2011: 6-9.
- [8] Jing X, Hou Z H, Wu Y, *et al.* Development of a differential column image motion light detection and ranging for measuring turbulence profiles[J]. Optics Letters, 2013, 38(17): 3445-3447.
- [9] Wang Yingjian, Hu Shunxing, Zhou Jun, *et al.* Atmospheric parameters measured by lidar[M]. Beijing: Science Press, 2014: 264-265.
王英俭, 胡顺星, 周军, 等. 激光雷达大气参数测量[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 264-265.

- [10] Ma Xiaomin, Tao Zongming, Ma Mingjun, *et al.* Retrieval method of side-scatter lidar signal based on charge coupled device technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0201001.
麻晓敏, 陶宗明, 马明俊, 等. 基于 CCD 侧向散射激光雷达信号提取方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0201001.
- [11] Shi Bo, Tao Zongming, Ma Xiaomin, *et al.* Measurements of near-ground aerosol backscattering coefficient profile with side-scatter technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0501006.
史博, 陶宗明, 麻晓敏, 等. 基于侧向散射技术的近地面气溶胶后向散射系数廓线探测[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0501006.
- [12] Song Yuehui, Shi Lili, Wang Yufeng, *et al.* Retrieve of lidar ration of aerosols by iteration[J]. *Chinese J 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.
- [13] Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. *Applied Optics*, 1981, 20(2): 211-220.
- [14] He Yinghong, Zheng Yuchen, Cheng Juan, *et al.* Estimation of extinction efficient boundary value with least-square fitting for lidar return signal[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2004, 21(6): 879-883.
贺应红, 郑玉臣, 程娟, 等. 最小二乘法拟合大气激光雷达回波信号估算消光系数边界值[J]. *量子电子学报*, 2004, 21(6): 879-883.
- [15] Kovalev V A, Eichinger W E. Elastic lidar: Theory, practice, and analysis methods[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004: 147-152.
- [16] Cai Dunhu. The research on the performance of manifold wavelet basis in image denoising[D]. Wuhan: Wuhan University, 2003: 12-13.
蔡敦虎. 多种小波基的图像去噪性能研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2003: 12-13.
- [17] Zhou Zhirong, Hua Dengxin, Yang Rong, *et al.* De-noising method for Mie scattering lidar echo signal based on wavelet theory[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(7): 0701002.
周智荣, 华灯鑫, 杨蓉, 等. Mie 散射激光雷达回波信号小波去噪方法[J]. *光子学报*, 2016, 45(7): 0701002.