

成像激光雷达测量大气能见度实验研究

孙国栋^{1,2}, 秦来安¹, 程 知^{1,2}, 何 枫¹, 侯再红¹

(1. 中国科学院合肥物质科学研究院 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, 安徽 合肥 230026)

摘 要: 针对传统的后向散射激光雷达系统结构复杂和需要几何因子矫正的情况, 研制了一套可以全天候测量的成像激光雷达用以克服这些缺陷。采用基于求解消光系数分布的方法反演能见度, 提出一种 Klett 后向积分法与遗传算法相结合的改进的迭代算法, 同时用传统的斜率法和权重拟合法求得能见度。选取比较有代表性的四种天气, 多云、阴天、晴天和雨天的数据进行处理, 得到这四种天气情况下的能见度。将这四组能见度数据与能见度仪器 Belfort 6230A 在这四天同时测得的能见度数据进行对比, 结果表明, 在不同的天气情况下, 两种仪器测得的数据趋势相同, 相关系数均在 0.67 以上, 具有较强的相关性。可以得出结论: 研制的成像激光雷达系统可用于探测大气的能见度。

关键词: 成像激光雷达; 消光系数; 大气能见度; 遗传算法

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1030003

Experimental research of atmospheric visibility measured by imaging lidar

Sun Guodong^{1,2}, Qin Laian¹, Cheng Zhi^{1,2}, He Feng¹, Hou Zaihong¹

(1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Hefei Institutes of Physical Sciences, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Traditional backscattering lidar has complex system and requirement to correct the geometrical factor. Using imaging lidar can overcome these drawbacks and this lidar can work all the day. It adopted the weighted fitting method, slope method and modified iteration algorithm that combined Klett backward integration method and Genetic Algorithm (GA) method based on the distribution of extinction to deal with the image data. Taking the data from four different weathers, the atmospheric visibility of these days was obtained. Then, it was made a confrontation with the America Belfort model 6230A visibility meter. It can achieve from this process that the differences of visibility between two facilities were on the small side and had the high correlation coefficients over 0.67. Finally, it can reach a conclusion that this imaging lidar system can be a new instrument to measure the atmospheric visibility.

Key words: imaging lidar; extinction coefficient; atmospheric visibility; genetic algorithm

收稿日期: 2017-02-05; 修订日期: 2017-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(41405014)

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

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

0 引言

大气能见度是反映大气透明度的一个指标。一般定义为在当时的天气条件下,视力正常(对比感阈为 0.05)的人,白天能从天空背景中看到和辨认的目标物(黑色、大小适度)的最大水平距离或晚上中等强度的发光体被看到和识别的最大水平距离^[1]。根据能见度的定义,当其他因素已定时通过大气透过率或衰减系数的测量就可以给出能见度,这就是激光探测能见度的物理基础^[2]。目前针对不同条件下的能见度探测有多种不同类型的产品,主要有透射式、散射式能见度仪,其主要特点是能够准确地探测水平方向的能见度^[3]。陈安军^[4]提出利用前向散射实现的双光路能见度激光测量系统。谢晨波^[5]等提出使用车载式激光雷达探测能见度,唐磊^[3]等提出使用半导体作为光源的激光雷达探测能见度。饶瑞中^[6]从辐射传输方程出发研究了斜程大气能见度问题,给出了典型大气条件下斜程大气能见度的基本特征,特别比较了向上和向下观察时能见度的区别。在以上论述的使用激光雷达作为测量大气能见度的探测系统所使用的激光发射单元是脉冲式激光器,接收的信号来自后向散射,使用光电倍增管或雪崩二极管探测信号。光子计数是一个统计的过程,即需要一定的采样时间,通过选择采样时间来控制距离分辨率,具体数值可以依照系统探测要求确定。但是,选择不同的采样时间,最后反演出的数据精度可能不同。这种形式的激光雷达由于系统结构原因,激光光束与望远镜接收视场在近距离处不能完全重合,存在一定的盲区和重叠区,系统通过合理的设计可以减少盲区。但是由重叠区引入的几何因子需要进行矫正。基于此,研制了一套易于携带的可以全天候测量的成像激光雷达系统,采用的是连续光激光器,通过 CCD 连续拍摄图像的方式来获得数据,对于机场飞机起升和降落以及军事运用具有参考意义。由于采用的是成像的方式,也就消除了几何因子的影响。并且这种激光雷达系统造价低、结构简单,有利于大范围的推广使用。通过这种激光雷达系统测得的能见度数据与 Belfort 能见度仪测得的能见度数据进行对比分析,并做出相关性分析,以此来验证研制的成像激光雷达具有测量大气能见度的能力。

1 成像激光雷达测量水平能见度原理

1.1 水平能见度测量方法

水平能见度的测量是以水平大气消光均匀,且在阳光或均匀的天空照明下为前提条件的。由 Koschmieder 定律指出:

$$\eta = e^{-\sigma V} \quad (1)$$

$$V = -\frac{\ln(\eta)}{\sigma} = \frac{3.912}{\sigma} \quad (2)$$

式中: V 为能见度; η 为视觉反应阈值,是人眼将目标从背景中区别出来的最小亮度对比,为 2%; σ 为大气消光系数。

Koschmieder 公式仅在激光波长为 $0.55 \mu\text{m}$ 时有效,其他波长的激光需要考虑对波长的依赖关系,公式最早由 Angstrom 提出^[7]:

$$\sigma = \frac{3.912}{V} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^q \quad (3)$$

式中: V 的单位是 km; λ 的单位是 μm 。波长修正因子 q 由以下经验公式决定:

$$q = \begin{cases} 0.585V^{1/3} & V < 6 \text{ km} \\ 1.3 & 6 \text{ km} \leq V \leq 50 \text{ km} \\ 1.6 & V \geq 50 \text{ km} \end{cases} \quad (4)$$

基于上述公式及理论可以得出反演能见度的问题在于求解消光系数的分布,精确地求解消光系数是得出能见度的关键。

1.2 定标计算与改进的迭代算法

成像激光雷达系统采用收发分置结构,它的系统结构图如图 1 所示。

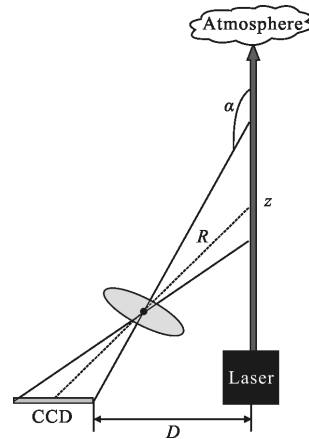


图 1 系统结构图

Fig.1 Systemic geometry

激光雷达的发射装置和接收装置在同一个水平面内,收发间距为 480 mm。作为发射装置的是一个波长为 532 nm,平均能量为 4 W 的连续光 YAG 激光器。

激光器的性能参数在表 1 中列出。

表 1 激光器的性能参数

Tab.1 Parameters of laser

Feature	Specification
Wavelength/nm	532
Polarization	Linear
Output power/W	4
Working mode	CW
Beam quality(M^2 factor)	<1.2
Beam divergence(full angle, mrad)	1.5
Transverse	TEM ₀₀

激光通过 10 倍的扩束镜之后被发射到大气中。光学接收装置由接收望远镜、干涉滤光片和 CCD 等组成。接收望远镜为透射式望远镜,口径为 50 mm, CCD 前为一块中心波长为 532 nm、带宽为 3 nm 的干涉滤光片,以提高探测信号的信噪比。

CCD 的性能参数在表 2 中列出。

表 2 CCD 的性能参数

Tab.2 Parameters of CCD

Feature	Specification
Resolution	1 388(H)×1 038(V)
Sensor	Sony ICX285
Sensor type	CCD progressive
Pixel size/ $\mu\text{m}\times\mu\text{m}$	6.45×6.45
Lens connector	C-Mount
ADC/bit	12

系统中的 CCD 倾斜放置,通过几何结构设计,利用镜头将测量范围全部纳入 CCD 相机视场,一次测量即可获得要求的测量区域内的数据,无需扫描。通过几何关系计算,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为 178.6°,那么随着距离的增大,散射角都会大于 178.6°。所以,只需要计算出 178.6°~180°之间的接收光与后向散射光的比值即可。考虑一种典型情况,那就是在合肥模式下的一种细粒模的对数正

态谱分布^[8],仿真结果如图 2 所示。

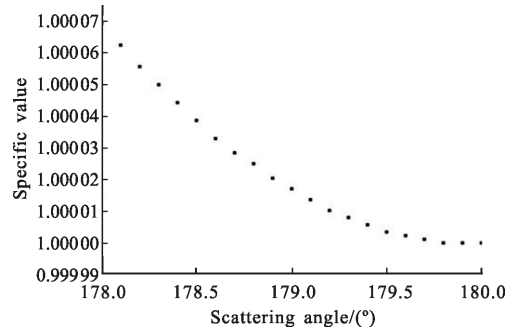


图 2 接收光与后向散射光的比值随散射角的变化

Fig.2 Specific value between collecting light and backscattering light with scattering angle increase

从以上的仿真图像中可以看出,接收光与后向散射光在探测范围内的比值基本上等于 1,所以散射相函数的影响可以不用考虑。

由于这种测量方法是成像的方式,那么也就没有几何因子的影响,所以该方法所适用的激光雷达方程为:

$$P(z) = \frac{C}{R^2} \beta(z) T^2(z) \Delta z \quad (5)$$

式中: $P(z)$ 为激光雷达接收到的信号大小; C 为系统常数; $\beta(z)$ 为气溶胶和分子的总的后向散射系数; $T(z)$ 为大气透过率,它的表达式为:

$$T(z) = \exp \left[- \int_0^z \sigma(z') dz' \right] \quad (6)$$

式中: σ 为大气总的消光系数。

距离分辨率公式:

$$\Delta z = R^2 \Delta \theta / D \quad (7)$$

角分辨率公式:

$$\Delta \theta = 2 \arctan [d / (2f)] \quad (8)$$

式中: D 为收发间距; d 为单个像素的尺寸; f 为系统焦距。

由公式(7)、(8),不同于传统的激光雷达系统,成像激光雷达的距离分辨率非线性变化,那么就需要对距离进行几何标定。

根据几何关系,定标方程式可以表示为^[9]:

$$z = \frac{L [p_1 (\sin \Theta - \cos \Theta \tan \Phi) + L_{11}]}{p_1 (\cos \Theta + \sin \Theta \tan \Phi) + L_{11} \tan \Theta} \quad (9)$$

式中: z 为探测距离; L 为透镜到光柱平面的距离; L_{11} 为透镜中心到 CCD 靶面中心的位置; Θ 为 CCD 靶

面相对于透镜平面的夹角; Φ 为透镜的倾斜角, $p_l = (N_p/2 - n_p)\omega_p$; N_p 为整个的像素数目; n_p 为对应的像素数目; ω_p 为像素宽度。

通过定标关系得出像素数与实际距离的对应图形如图 3 所示。

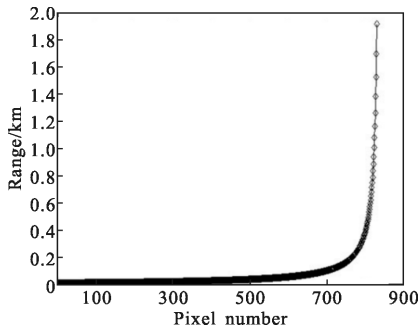


图 3 像素个数与实际距离的关系

Fig.3 Relation between pixel number and actual range

从图 3 可以看出, 成像激光雷达拍摄到的图片有近距离分辨率好, 远距离分辨率差的特点^[10]。

将公式(7)代入公式(5)中, 则公式(5)变为:

$$P(z) = C\beta(z)T^2(z)\Delta\theta/D \quad (10)$$

从公式(10)可以看出, 接收的后向散射光的能量大小与 R^2 已经没有反比的关系, 与传统的激光雷达相比, 成像激光雷达系统降低了对探测器探测范围的要求。

对上述方程式两边取对数:

$$U(z) = \ln[P(z)] = \ln\left(\frac{C\Delta\theta}{D}\right) + \ln[\beta(z)] - 2 \int_0^z \sigma(z')dz' \quad (11)$$

假定 z_0 为某一选定的参考距离, 则:

$$U(z_0) = \ln[P(z_0)] = \ln\left(\frac{C\Delta\theta}{D}\right) + \ln[\beta(z_0)] - 2 \int_0^{z_0} \sigma(z')dz' \quad (12)$$

以上两式相减, 可以得出一个和常数无关的方程:

$$U(z) - U(z_0) = \ln\left(\frac{\beta(z)}{\beta(z_0)}\right) - 2 \int_{z_0}^z \sigma(z')dz' \quad (13)$$

上式两边同时对距离 z 求导, 可得:

$$\frac{dU(z)}{dz} = \frac{1}{\beta(z)} \frac{d\beta(z)}{dz} - 2\sigma \quad (14)$$

当大气均匀时, β 与 σ 均为常数, 不随距离的变化而变化, 即 $\frac{d\beta}{dz} = 0$, 则:

$$\frac{dU}{dz} = -2\sigma_{\text{hom}} \quad (15)$$

由此可以得出假定大气均匀时的消光系数:

$$\sigma_{\text{hom}} = -\frac{1}{2} \frac{dU}{dz} \quad (16)$$

通过对对数信号进行最小二乘法拟合, 求出曲线的斜率即可得出均匀大气中的平均消光系数^[11]。这种方法是传统的斜率法。由于斜率法的基本前提是大气水平均匀, 对于非均匀大气条件下能见度的反演存在较大误差, 不能满足实际要求。

遗传算法(GA)是一种借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机搜索算法。它对初值依赖小, 是一种全局搜索算法。该算法的缺点是为了获取全局最优解, 需要选择较大的种群数量和遗传代数, 从而导致收敛速度较慢。文中仅利用遗传算法获取一个初始值, 所以只需要相对较少的迭代次数和种群数量^[12]。

文中提出一种基于 Klett 后向积分法和遗传算法的组合反演算法, 反演的基本方程^[13]为:

$$\sigma(z) = \frac{\exp[(U - U_m)/k]}{\sigma_m^{-1} + \frac{2}{k} \int_z^{z_m} \exp[(U - U_m)/k] dz'} \quad (17)$$

Klett 对该方法的稳定性和适应性进行了分析, 反演结果的主要误差来自假设或估计的边界值。方程中的 k 为常数, 取值范围一般为 0.67~1, 典型值取为 1, 由于它不是主要的误差来源, 所以此算法中也取 k 等于 1^[13]。为最大探测距离, σ_m 为最大探测距离处的消光系数。算法中需要确定 σ_m 的数值大小。改进迭代算法的步骤为:

(1) 除去噪声之后, 确定有效数据起点 z_0 , 由于系统设计的探测距离在 2 km 左右, 所以选取 $z_m = 2$ km 作为最大探测距离。

(2) 假定地面临时标定点的范围^[14]为 $0 \sim 2 \text{ km}^{-1}$, 即 σ_m 的搜索区间的上下限分别为 0 和 2。运用遗传算法获得一个全局空间的可行解 σ_0 , 将获得的可行解代入公式(16)中, 获得各个距离上的消光系数, 然后估算传输路径上的平均消光系数 σ_{avg} 。

(3) 理论上说, 水平传输路径上的平均消光系数 σ_{avg} 与 σ_m 应该相差不大。将 σ_{avg} 与 σ_m 的相对误差作为适应度函数, 为了减少迭代次数, 同时获得相对较高的迭代精度, 文中暂时设定的适应度函数值为 5%。当可行解与平均消光系数的相对误差小于适应度函数值时即获得全局最优解 σ_{best} , 同时也获得了激光传输路径上的平均消光系数。如果可行解与平均

消光系数的误差范围大于适应度函数值时,重新进行迭代。

(4) 运用获得的平均消光系数进一步反演所需要的能见度信息。

2 CCD 拍摄图像的预处理

2.1 暗场处理

暗场是指在全黑的环境下拍得的一帧图像。设有一帧 CCD 原始图像 $R(x,y)$, x,y 分别为像素的坐标。用同样的曝光时间,摄得一幅暗场 $d(x,y)$ 。暗场实际上包括了暗流和本底,本底是指系统在没有任何输入的时候输出的数据,一般无法单独测得,往往和暗流混在一起。

按照公式(18)将两幅图像按对应像素相减,可得到 $S_1(x,y)$:

$$S_1(x,y)=R(x,y)-d(x,y) \quad (18)$$

$S_1(x,y)$ 为去除各像素暗流后的图像,也同时减去了系统本底。经过相减运算后,就完成了暗场处理。

2.2 平场处理

消除各像素灵敏度不同的影响,可采用平场校正的方法。所谓的平场,就是 CCD 在同样条件下(温度、望远镜取向等),对均匀亮度的面光源摄取的一帧图像。这时,所有 CCD 像素在曝光时间内受光完全相同,因而应该有相同的输出,若有差别,就是由于各像素的灵敏度不同所引起的。将摄得的平场 $F(x,y)$ 对 $S_1(x,y)$ 按对应像素运用公式(19)相除,就校正了灵敏度的差别。需要注意的是,在此之前必须先对平场做暗场处理。这时的暗场需采用和平场相同的曝光时间才能有效。

$$S(x,y)=a \frac{R(x,y)-d(x,y)}{F(x,y)-d(x,y)} \quad (19)$$

式中: a 为比例系数。若 CCD 行像素为 m ,列像素为 n , a 由公式(20)进行计算:

$$a = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n [F(x,y)-d(x,y)] / (m \cdot n) \quad (20)$$

即为平场经暗场处理后的各像素数据的平均值。这样得到的 $S(x,y)$ 在数值上和 $S_1(x,y)$ 相近,便于各帧的进一步比较。

2.3 图像预处理结果

文中选取一帧在 2016 年 9 月 4 日进行实验的图像进行预处理前后结果对比如图 4 所示。

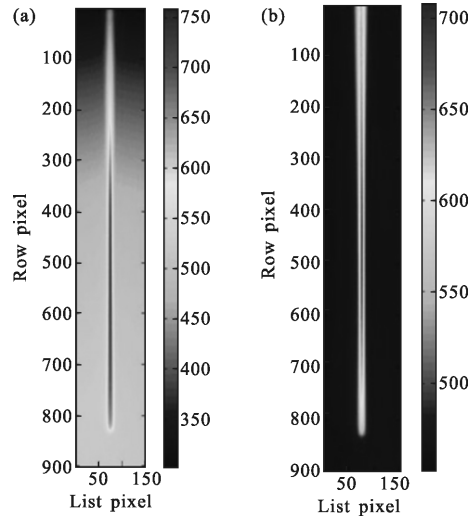


图 4 预处理前(a)后(b)图像对比

Fig.4 Images before (a) and after (b) preprocess

3 信号的提取

图 4(b)中的 CCD 图像虽然减小了背景光和干扰光的影响,但它是含大气分子和气溶胶散射信号的一束较宽光束,光束的宽度横跨多个像元,需要将这多个像元信号进行叠加,转化为光束方向上该像元对应角宽度内的散射光光子数。取图 4(b)中的某一行像素的光子数进行作图,如图 5 所示。

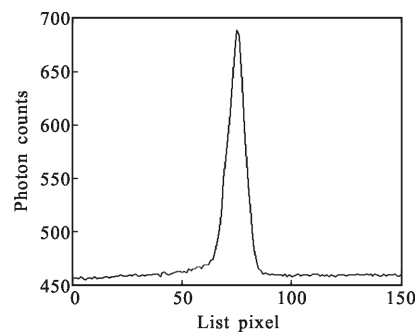


图 5 一行像素的光子数

Fig.5 Photon number on one line

由图中可知,大气分子和气溶胶的散射光在空间上满足高斯分布,可以通过高斯光束的特性找到光柱在每个像素高度上的边界。在图像的矩阵中找到光子数最大的那个像素点,假定它所在的像素列数为光柱中心列数。在光柱图像中心列数的最上方取一个 40×40 像素大小的矩阵作为背景区域。对其中的像素上的光子数求平均,作为光柱周围的背景。

由于背景有起伏,并且噪声是高斯白噪声,所以最后总的背景是光柱周围的背景与三倍起伏背景均方差的和。用平场之后的图像减去总的背景可以获得减背景后的光柱图像。在光束传播方向上由于湍流等因素的作用,每行像素上的光子数的最大值一般不与上述的中心列数在同一列上,所以取每一行像素中心列数和其左右两个像素上的光子数的平均值的 $1/e^2$ 作为判定条件,然后在每行像素上从中心列数向两侧搜索,当光子数小于判定条件的时候即作为每行像素上光柱的边界。以此类推,可以得到整个光柱的边界。将光柱边界内的每一行所有像素上的光子数进行叠加可以得到在每个像元对应的角宽度内的所有光子数。通过前面的 d_z 来对信号进行归一化并且进行插值可以获得在每个真实高度上的光子数。这样就完成了信号的提取工作。图 6 所示是获得的信号随距离变化的曲线图。

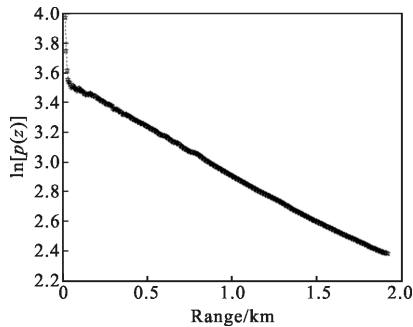


图 6 信号随距离的变化

Fig.6 Difference of signal as range increase

4 测量结果比对分析与统计分析

4.1 能见度比对结果与分析

Belfort 能见度仪器放置在一楼的空地上,观测结果为每秒钟记录一次。为了减小起伏,对此能见度仪器测得的能见度数据进行一分钟平滑处理。成像激光雷达放置在不远处的二楼实验室内,拍摄图像的帧频为每秒钟六幅图像,每一分钟拍摄 360 幅图像。为了与能见度仪数据进行对比,采集数据之后对图像进行一分钟的长曝光处理,从而获得了一分钟长曝光图像。通过权重拟合法^[15]、斜率法^[13]以及改进的迭代算法三种方法获取的水平能见度数据和 Belfort 能见度仪的结果进行比对。多云、晴天、阴天和雨天四种不同天气的能见度数据比对结果如图 7 所示。

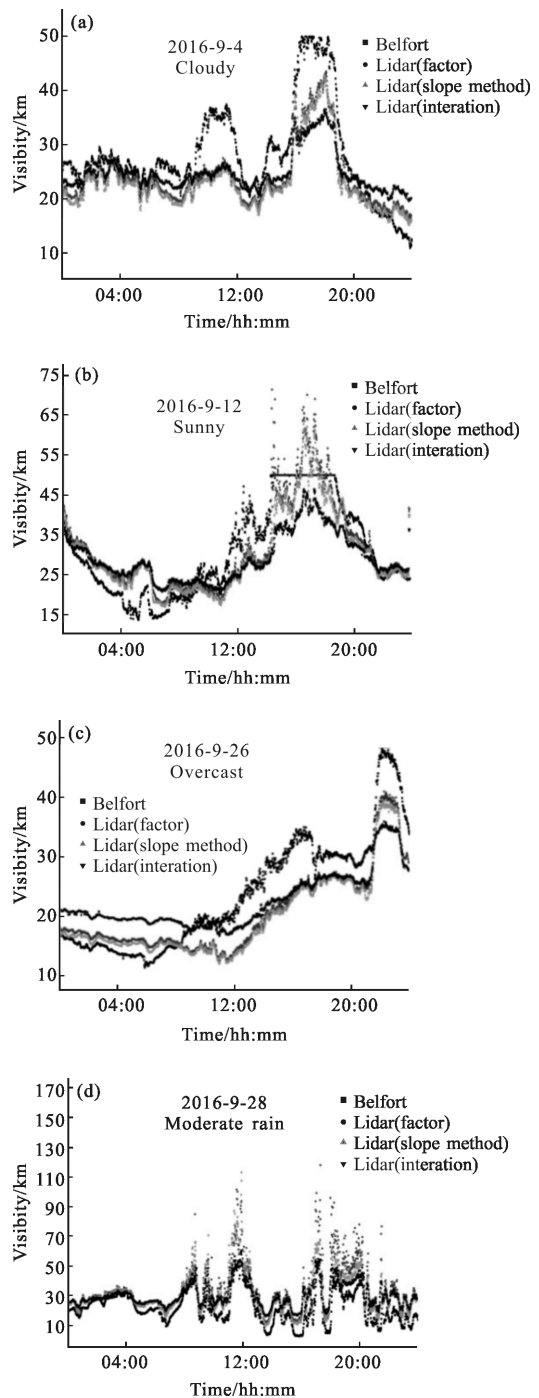


图 7 四种天气情况下的能见度与 Belfort 能见度仪的对比结果

Fig.7 Four weather conditions of visibility compared with that of Belfort

需要说明的是,在晴天这幅数据图像中,Belfort 测得的能见度数据有一段明显等于 50 km 的直线,这是因为所用 Belfort 的型号的最大测量阈值为 50 km,如果能见度超过 50 km 则将值自动设定为 50 km。那么也就造成了这一部分的能见度数据和成

像激光雷达的能见度数据不能进行有效的对比。

对以上四种不同天气下的结果进行对比分析：

(1) 从以上四种天气情况下能见度的对比情况可以知道，Belfort 能见度仪与成像激光雷达测量结果趋势近似，不同的是在这四天的有效数据的对比时间段内，Belfort 测得的能见度数据起伏较大。主要原因是，Belfort 能见度仪基于的原理是前向散射，通过对测量一小空气体积对 42° 红外光的前向散射强度来评估气象光学范围能见度。那么如果出现小范围内的气溶胶浓度增大或者减小，就会造成测得的能见度数据出现较大的波动。

(2) 部分时间段内成像激光雷达与 Belfort 能见度仪获得的数据的误差比较大。其原因可能是实验地点处于由公路、水库、树林等组成的复杂环境中所致。水平大气不均匀的情况下，如果探测范围内某一距离段的消光系数有较大起伏，通过反演得出的能见度波动可能也会增大。

(3) 成像激光雷达所处的位置为二楼的实验室，激光发射之后传输的路径上会遇到远处的障碍物，如楼房、烟囱等，那么，就需要将激光雷达抬升至合适的仰角来保证 CCD 中不会有障碍物的成像干扰。在这种情况下，获得实验数据就不是严格意义上的水平能见度数据，而是斜程能见度数据。斜程路径上的消光系数分布肯定是不均匀的，那么通过消光系数反演获得的能见度数据会出现一定的误差。

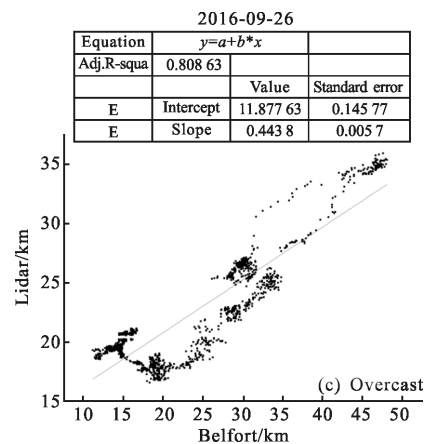
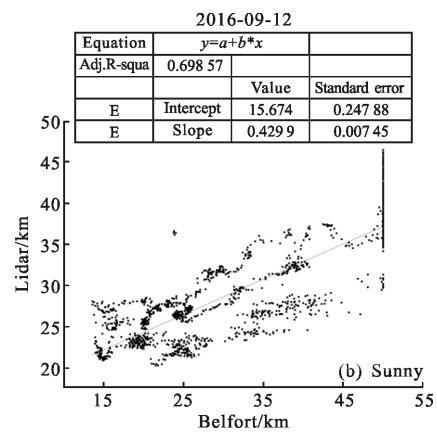
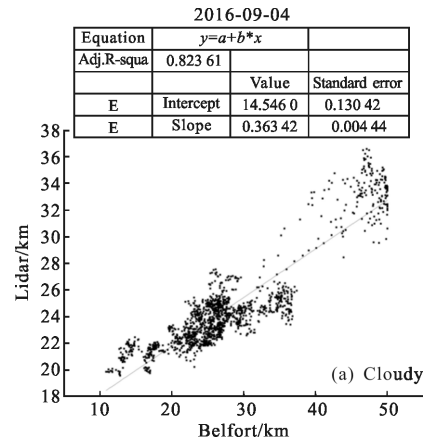
(4) 采取的三种数据处理方法中，权重拟合法和斜率法获得的数据较为接近，是因为这两种方法都是以斜率法为基础，但是部分时间段内起伏较大。通过改进的迭代算法计算激光传输路径上的平均消光系数反演得到的大气水平能见度，其结果波动较小，可靠性较高。

(5) 计算能见度的算法中，仅考虑了单次散射。但是激光在云、雾、霾等光学厚度较大的介质中传输时，由于能见度较差，近距离的多次散射信号会与远距离信号重叠成像在同一像素上，而且随着传输距离的增加，光子与粒子发生多次散射形成的散射信号落到探测视场内的几率增大，多次散射信号叠加导致形成的后向散射信号增强，进而影响能见度测量结果，会使测量结果偏高，这也是对比结果中影响误差的一个原因。致力于解决多次散射影响的方法有多种，其中，熊兴隆^[16]在 2014 年提出来的利用半

解析 Monte Carlo 法计算多次散射对单次散射比值的方法可以作为下一步工作的一个重点，加入反演算法中。

4.2 迭代算法反演结果与能见度仪数据的相关性分析

将两种仪器在四种天气情况下获得的数据进行相关性拟合，得到结果如图 8 所示。



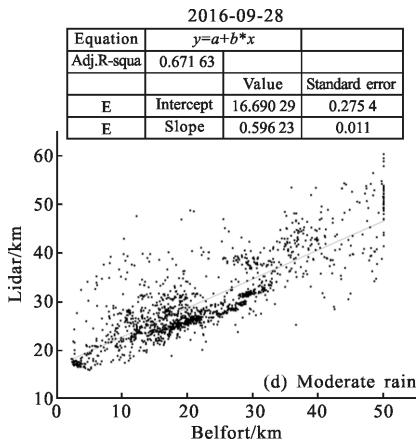


图 8 四种天气情况下的相关性分析

Fig.8 Correlation analysis under four weather conditions

从以上四种天气情况下的相关性拟合可以知道，四种天气情况下的相关性系数分别为0.823 61, 0.698 57, 0.808 63, 0.671 63。据统计学分析可以知道，两种仪器在四种不同天气情况下得到的数据具有较强的相关性。

4.3 不确定度分析

Belfort 能见度仪测得的数据并非绝对准确，事实上，此型号的 Belfort 能见度仪本身的不确定度 δ_b 在±10%左右，综合激光雷达与能见度仪所测数据之间的不确定度 δ_d ，可以计算出总的确定度 δ_r 。计算公式为：

$$\delta_r = \sqrt{\delta_b^2 + \delta_d^2} \quad (21)$$

以 2016 年 9 月 4 日和 9 月 26 日的数据为例进行统计，可以得出总的确定度不超过 12.78% 和 13.43%。

5 结 论

由于成像激光雷达系统的发射端和接收端间距较小，而且激光器的体积也较小，所以激光雷达系统的所有部分可以集成为一个小型系统，方便携带，有利于进行环境比较恶劣的外场实验。通过对激光雷达和能见度仪数据的分析，所测数据之间的相关系数达到了 0.67 以上，具有较强的相关性。对成像激光雷达本身做不确定度分析之后，发现总的确定度在 15% 以下。初步认为该成像激光雷达系统具有全天候测量大气水平能见度的能力。那么在水平应用的基础上，下一步的工作是要对边界层内的气溶

胶的垂直分布或者斜程大气透过率进行探测，来进一步验证该系统的可行性。

参考文献：

- [1] Lv Lihui, Liu Wenqing, Zhang Tianshu, et al. A new micro-pulse lidar for atmospheric horizontal visibility measurement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41 (9): 0908005. (in Chinese)
吕立慧, 刘文清, 张天舒, 等. 新型微脉冲激光雷达测量大气水平能见度[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0908005.
- [2] Song Zhengfang. Application of Atmospheric Optical Basis [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1978. (in Chinese)
宋正方. 应用大气光学基础[M]. 北京: 气象出版社, 1978.
- [3] Tang Lei, Shu Zhifeng, Dong Jihui, et al. Measurements of slant visibility and its iteration method with diode-laser lidar [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22 (5): 963-967. (in Chinese)
唐磊, 舒志峰, 董吉辉, 等. 半导体激光雷达斜程能见度观测和反演方法[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(5): 963-967.
- [4] Chen Anjun. Dual-light-path laser detection system for visibility by forward scattering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 30(4): 304-308. (in Chinese)
陈安军. 利用前向散射实现的双光路能见度激光测量系统[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(4): 304-308.
- [5] Xie Chenbo, Han Yong, Li Chao, et al. Mobile lidar for visibility measurement [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(7): 971-975. (in Chinese)
谢晨波, 韩永, 李超, 等. 车载式激光雷达测量大气水平能见度[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(7): 971-975.
- [6] Rao Ruizhong. Vision through atmosphere and atmospheric visibility [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30 (9): 2486-2492. (in Chinese)
饶瑞中. 大气中的视觉和大气能见度[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2486-2492.
- [7] Yang Zhao. Sun Dongsong, Li Qiang. Retrieval of atmosphere extinction coefficient for imaging laser radar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(3): 239-242. (in Chinese)
杨昭, 孙东松, 李强. 成像激光雷达大气消光系数的反演方法[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(3): 239-242.
- [8] Wang Yingjian, Hu Shunxing, Zhou Jun, et al. Atmospheric Parameters Measured by Lidar [M]. Beijing: Science Press, 2014: 264-265. (in Chinese)
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.
- [9] Liang Mei, Mikkel Brydegaard. Continuous-wave differential absorption lidar [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015:9(6): 629–636.
- [10] John E Barnes, Sebastian Bronner, Robert Beck, et al. Boundary layer scattering measurements with a charge-coupled device camera lidar [J]. *Applied Optics*, 2003, 42 (15): 2647–2652.
- [11] Yang Zhao. Performance of atmospheric extinction with a 1.06 μm lidar [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2004. (in Chinese)
杨昭. 基于 1.06 μm 激光雷达的大气消光系数特性的研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2004.
- [12] Cheng Zhi, He Feng, Jing Xu, et al. Improved retrieval method of turbulence profile from differential column image motion light detection and ranging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0401004. (in Chinese)
程知, 何枫, 靖旭, 等. 改进的差分光柱像运动激光雷达的湍流廓线反演方法[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0401004.
- [13] James D Klett. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns [J]. *Applied Optics*, 1981, 20 (2): 211–220.
- [14] Liu Houtong, Ge Zhangqi, Wang Zhenzhu, et al. Extinction coefficient inversion of airborne lidar detecting in low-altitude by Fernald iterative backward integration method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(10): 1838–1843. (in Chinese)
刘厚通, 葛占旗, 王珍珠, 等. Fernald 迭代后向积分法反演低空探测机载激光雷达消光系数 [J]. 光学学报, 2008, 28(10): 1838–1843.
- [15] Chen Li, Hu Huanling, Yan Fengqi. The horizontal visibility measured by micro pulse lidar at Hefei Airport [C]//SPIE, 2005, 5832: 732–737.
- [16] Xiong Xinglong, Liu Wenqing, Jiang Lihui, et al. Slant range visibility retrieve considering multiple-scattering effects [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2014, 25 (9): 1742 – 1748. (in Chinese)
熊兴隆, 刘雯箐, 蒋立辉, 等. 考虑多次散射影响的斜程能见度反演方法研究 [J]. 光电子·激光, 2014, 25(9): 1742–1748.