基于 CCD 的侧向散射激光雷达信号提取方法

麻晓敏1 陶宗明1,2* 马明俊3 李成军1 王珍珠2 刘 东2 谢晨波2 王英俭2

1 解放军陆军军官学院基础部物理教研室, 安徽 合肥 230031

² 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室,安徽 合肥 230031

③中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院环境光学与技术重点实验室,安徽 合肥 230031

摘要 后向散射激光雷达是探测大气气溶胶空间分布的强有力手段,但由于盲区和过渡区的存在,限制了它在近距离段的探测范围和精度。基于电荷耦合器(CCD)的侧向散射激光雷达可实现近距离段气溶胶信号的连续探测, 且探测精度较高。分析了侧向散射激光雷达中干扰光和背景光的特点,找到了减少它们的方法。分析了激光在大 气中产生侧向散射光的特点,找到了同一距离处侧向散射光的叠加方法。应用 Matlab 编程实现了对信号的自动 提取,并与后向散射激光雷达信号进行了实验比对,结果表明该信号提取方法是可靠的、可行的。

关键词 大气光学;侧向散射激光雷达;电荷耦合器件;高斯分布

中图分类号 TN958.98; P407.5 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0201001

Retrival Method of Side-Scatter Lidar Signal Based on Charge Coupled Device Technique

Ma Xiaomin¹ Tao Zongming^{1,2} Ma Mingjun³ Li Chengjun¹ Wang Zhenzhu² Liu Dong² Xie Chenbo² Wang Yingjian²

 $^{\rm 1}\,Section$ of Physics Teaching and Research , Department of Basic Sciences ,

Army Officer Academy, Hefei, Anhui 230031, China

² Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

³ Key Laboratory of Environment Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract Backscattering lidar is a powerful tool for atmospheric aerosol detection, but the blind and transition regions restrict its detecting range and precision in near distance. Side-scatter lidar based on charge coupled device (CCD) can detect aerosol continuously in near distance with great precision. The characteristics of interference light and background light in side-scatter lidar are analyzed, and the way to decrease them is found. The characteristics of atmospheric scattering light generated by laser are analyzed, and the scattering light superposition from the same distance is computed. Matlab software is applied to retrieve signals, and the comparison between the proposed method and the backscattering lidar signals is made. The result indicates that this retrival method is reliable and feasible.

Key words atmospheric optics; side-scatter lidar; charge coupled device; Gaussian distribution OCIS codes 010.1310; 290.5820; 040.1520

1 引 言 大气气溶胶是目前大气科学领域中的热点问题 之一,它对人体健康环境和全球气候都有一定的影响^[1]。具体来讲,一方面,它是大气污染物的主要组

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41175021,41075016,41005014)

作者简介:麻晓敏(1980一),女,硕士,讲师,主要从事激光雷达技术、激光大气探测等方面的研究。

E-mail: maxiaomin308515@163.com

* 通信联系人。E-mail: zmtao@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2013-07-30; 收到修改稿日期: 2013-10-15

成部分,是城市光化学烟雾的重要来源,影响人体健 康环境;另一方面,它发射太阳短波辐射、吸收地面 长波辐射,直接影响到地球一大气系统的辐射收支平 衡,同时它作为云的凝结核参与云的形成,还间接影 响辐射收支。到目前为止,气溶胶已变成影响全球 气候变化最敏感的强迫因子,也是研究气候变化机 制和制定减排政策必需考虑的切入点和新视角。

激光雷达是探测大气气溶胶空间分布的强有力 手段[2-4],但后向散射激光雷达由于几何因子的存 在^[5],在近距离范围内有一定的误差,还可能有一个 盲区,这就限制了后向散射激光雷达在近距离场合 下的应用。侧向散射激光雷达将发射装置与接收装 置「本系统中接收装置为电荷耦合器(CCD)相机]分 两处放置[6-8],避免了后向散射激光雷达中几何因 子的影响,在近距离段测量精度大大提高,同时由于 使用了侧向技术,其空间分辨率在近距离段也很高。 这两个优点非常适用于测量近地层的大气气溶胶空 间分布。美国 Barnes 等^[6-7]在 2002 年利用 CCD 相机侧向激光雷达系统在夏威夷的莫纳罗亚山上对 大气边界层的气溶胶空间分布进行了探测。在国 内,中国科学院安徽光学精密机械研究所正在进行 侧向激光雷达的初探研究。侧向散射激光雷达的 CCD 图像中除了包含大气分子和气溶胶的散射光 信号外还包含背景光等噪声。本文主要对 CCD 图 像中的信号提取方法进行研究,设计了提取信号的 方法,估算了信号的相对误差,并与后向散射激光雷 达信号进行了实验比对。

2 装置与原理

2.1 系统装置

本文研制的侧向散射激光雷达系统主要由以下 四个部分组成:发射器、接收器、几何标定装置和计 算机。发射器使用的光源为Nd:YAG激光器,发射 波长为532 nm的激光,脉冲重复频率为20 Hz。接 收装置为一部 CCD 相机,其像素为3352 pixel× 2532 pixel,在 CCD 前加装了干涉滤光片,以提高信 噪比。利用几何标定装置,确定 CCD 相机中的像元 与光束上各散射中心的一一对应关系。计算机采集 CCD 成像的回波信号。该系统工作的原理可简述 为:激光器向大气中发射一束激光,由于激光与大气 相互作用,侧向散射光中就包含了大气分子和气溶胶 的信息;CCD 相机中的像元记录了光束上各散射点的 散射光光子数(也称信号强度)。图1为侧向散射激 光雷达的原理示意图,图中 z 为探测距离,D 为 CCD



图 1 侧向散射激光雷达原理示意图

Fig. 1 Diagram of side-scatter lidar 相机到光束的垂直距离,dθ为像元对应的张角。

2.2 测量原理

由上述装置,可得侧向散射激光雷达方程为^[6]

$$N(z, heta) = rac{N_0 KA}{D} [eta_{\mathrm{a}}(z, heta) + eta_{\mathrm{m}}(z, heta)] imes \ \exp\left\{-\int\limits_{0}^{z} [lpha_{\mathrm{a}}(z') + lpha_{\mathrm{m}}(z')] \mathrm{d}z' - \int\limits_{0}^{z/\cos(\pi- heta)} [lpha_{\mathrm{a}}(z') + lpha_{\mathrm{m}}(z')] \mathrm{d}z'
ight\} \mathrm{d} heta, (1)$$

式中 $N(z,\theta)$ 为侧向散射激光雷达接收距离 z 处、散 射角为 θ 、角宽度为 $d\theta$ 的大气侧向散射回波信号光 子数, N_0 为激光雷达发射光的光子数,K 为激光雷 达系统常数,A 为有效光学接收面积,D 为 CCD 相 机到光束的垂直距离, $\beta_a(z,\theta),\beta_m(z,\theta)$ 分别为距离 z 处气溶胶和大气分子在散射角为 θ 方向上的侧向 散射系数, $\alpha_a(z),\alpha_m(z)$ 分别为距离 z 处气溶胶和大 气分子的消光系数。

由相函数 $P(z,\theta)$ 的定义,侧向散射系数可表示为 $\beta(z,\theta) = P(z,\theta)\beta_s(z),$ (2)

式中 β_s(z)为总散射系数。由此又可得

$$\beta(z,\theta) = \beta(z,\pi) \, \frac{P(z,\theta)}{P(z,\pi)} = \beta(z,\pi) f(z,\theta) \,, (3)$$

式中 $f(z,\theta)$ 又称为比相函数。为了简化,合理认为, 在大气边界层内,大气分子和气溶胶的相函数与高 度无关,令 $f(z,\theta)$ 记为 $f(\theta)$,且令 $\beta(z,\pi)$ 记为 $\beta(z)$,则(3)式又可简化为

$$\beta(z,\theta) = \beta(z) f(\theta). \tag{4}$$

把(4)式代入(1)式可得

$$N(z,\theta) = \frac{N_0 KA}{D} [\beta_a(z) f_a(\theta) + \beta_m(z) f_m(\theta)] \times \exp\left\{-\int_0^z [\alpha_a(z') + \alpha_m(z')] dz' - \int_0^{z/\cos(\pi-\theta)} [\alpha_a(z') + \alpha_m(z')] dz'\right\} d\theta.$$
(5)

3 CCD 像元信号提取

在侧向散射激光雷达 CCD 的图像中,除了包含 (5)式中的大气分子和气溶胶散射光信号外,还有背 景光、干扰光、暗电子数等噪声。一方面要减少背景 光和干扰光的噪声,以获得有用的大气散射光信号; 另一方面光束有一定的宽度,常对应多个像元,需要 将这多个像元信号叠加,转换为光束方向上该处散 射光的光子数(或光强度),从而得到光子数与位置 (或光束方向上像元)的一一对应关系。

3.1 背景光、干扰光的减少

实际的 CCD 成像像元中既有信号又有噪声。由于实验场地和实验时间等因素的制约,背景光和干扰 光可能有月光、星光、路灯、建筑物的反射光、邻近激 光雷达干扰光束等。图 2 是 2013-05-13T20:21 在合 肥西郊拍摄到的 CCD 相片,如图 2(a)所示(从左到右 依次为建筑物反射光、邻近激光雷达散射干扰光束、 激光散射光束及工业烟囱、背景有星光)。背景光和 干扰光的光强随时间变化特点可分为两类:1)背景 光和干扰光强度是随时间缓慢变化的,如月光、星光 等;2)背景光和干扰光光强可以认为是恒定的,如路 灯、建筑物的反射光、邻近激光雷达散射干扰光束 等。这两类光在短时间(如 200 s 的探测时间)内, 其光强都可认为是不变的。这样,就找到了减少它 们的方法:实验时,连续拍摄曝光时间相同(如每次 曝光 100 s)的两张 CCD 相片,一张是包含所有光的 CCD 相片,另一张是缺少激光散射光束的 CCD 相 片,如图 2(b)所示,通过图像处理软件将两次拍摄 的 CCD 对应像元信号相减,获得的信号就减少了背 景光和干扰光的影响,结果如图 2(c)所示。由背景 光产生原因可知,背景可以被减少,但要完全消除是 很困难的。



图 2 (a)包含所有光的 CCD 相片; (b)缺少激光散射光束的 CCD 相片; (c)减少了背景光的 CCD 相片 Fig. 2 Photographs of CCD of (a) total signals, (b) no laser beam scattering signals and (c) decreased

3.2 信号的提取

图 2(c)的 CCD 相片中虽然减少了背景光和干 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,转换为光束方向上该像 元对应角宽度内的散射光光子数。

大气分子和气溶胶的散射光发光情况在时间上 是随机的,但满足泊松分布规律^[9]。对于泊松分布, 它的标准误差 σ_N 与信号平均值 \overline{N} 之间的关系为

$$\sigma_{\rm N} = \overline{N}^{1/2}.$$
 (6)

大气分子和气溶胶的散射光在空间上满足高斯 分布。在任一高度上,大气分子和气溶胶的散射光 在光束宽度方向上占多个像元,它们的总光子数 N_{total}(包括激光散射光信号、背景光以及暗电子数等 噪声)与光束宽度方向上像元位置坐标 *x* 的关系可 表示为^[7]

 $N_{\text{total}}(x) = A_0 \exp[-(x - A_1)^2/(2A_2^2)] + A_3$,

background signals

式中 x 的范围为 $0 \sim 3352$, A_0 表示高斯曲线的峰值 高度, A_1 为光束的中心位置坐标, A_2 为高斯宽度, A_3 为噪声(背景光以及暗电子数总和)。沿光束方向 每个像元对应的激光散射光子数 N_s (或信号光子 数)可用该像元对应的高斯曲线的净面积^[7], 即

$$N_{\rm s} = \sqrt{2\pi} A_0 A_2. \tag{8}$$

噪声光子数为

$$N_{\rm n} = \sqrt{2\pi} A_2 A_3. \tag{9}$$

利用 Matlab 编程,读入减少了背景光和干扰光的 CCD 信号;然后获取沿光束方向的中间像元(约为 1276 pixel)所在行信号最强的位置,即该像元处 对应的 A₁;接着进行高斯拟合,获得 A₀,A₂ 和 A₃。 最后由(8)式得到该像元对应的信号光子数,由(9) 式得到该像元对应的噪声光子数。沿光束方向的其 他像元对应的信号光子数及噪声光子数依此可得, 这样就完成了 CCD 信号提取工作。

4 验证与比对

4.1 高斯拟合验证

利用上述侧向散射激光雷达系统和 Matlab 编写的程序,对 CCD 信号提取过程进行分析。作为个例,分析了 2013-05-01T21:19 在合肥西郊拍摄到的 CCD 相片,验证光束在宽度方向上的空间分布情况,结果如图 3 所示。圆点代表不同像元实际测得 的光子数,实线代表拟合的高斯线,两者符合得很好。这说明散射光在光束宽度方向上是满足高斯分 布的,利用高斯分布来计算信号光子数和噪声光子数的(8)式和(9)式是可行的,这一结果与文献[7]得 到的结论一致。



图 3 高斯拟合 Fig. 3 Gaussian fitting

4.2 实验比对

由散射理论知,后向散射激光雷达方程为[2]

$$P(z) = C \frac{\beta_{a}(z) + \beta_{m}(z)}{z^{2}} \times \exp\left\{-2 \int_{z}^{z} \left[\alpha_{a}(z') + \alpha_{m}(z')\right] dz'\right\}, (10)$$

式中 P(z)为后向散射激光雷达接收距离 z 处的大 气后向散射回波信号,C 为激光雷达系统常数(包括 能量)。

对于后向散射激光雷达,常用距离修正信号可 表示为

$$X(z) = P(z)z^{2} = C[\beta_{a}(z) + \beta_{m}(z)] \times \exp\left\{-2\int_{0}^{z} [\alpha_{a}(z') + \alpha_{m}(z')]dz'\right\}. (11)$$

对于侧向散射激光雷达方程,当散射角 $\theta \in (178^\circ, 180^\circ)$ 时,可近似得到 $\cos(\pi - \theta) = 1, f_a(\theta) = 1, f_m(\theta) = 1$ 。此时侧向散射激光雷达方程(5)式可写为

$$N(z) = C' [\beta_{a}(z) + \beta_{m}(z)] \times \exp\left\{-2\int_{0}^{z} [\alpha_{a}(z') + \alpha_{m}(z')]dz'\right\}, (12)$$

式中 C'为新的常数。比较(11)式和(12)式可知,在 散射角 $\theta \in (178^{\circ}, 180^{\circ})$ 范围内,后向散射激光雷达 的距离修正信号与侧向散射激光雷达信号只差一个 常数项不同,那么两种激光雷达的散射信号随高度 的变化关系应是一致的。2013-05-01T21:19,在合 肥西郊 CCD 侧向散射激光雷达与后向散射激光雷 达同时进行了比对探测。在本次实验中,选用中国 科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成 分与光学重点实验室的一台已定标过的后向散射激 光雷达系统,其主要参数如表 1 所示。侧向散射激 光雷达的 D=21.2 m,那么侧向散射激光雷达的探 测高度与散射角的对应关系如图 4 所示。从图 4 中

表1 后向散射激光雷达系统主要参数

Table 1 Specifications of backscatter lidar

Laser	Nd: YAG laser (Quantel Brilliant b)
Wavelength /nm	532
Pulse energy /mJ	50
Repetition rate $/Hz$	20
Divergence /mrad	0.5



图 4 CCD 探测距离与散射角关系









可以知道,探测高度在 600 m 以上时,对应的散射 角大于 178°。后向散射激光雷达的距离修正信号 与侧向散射激光雷达信号比对结果如图 5 所示。从 图 5 中可以看出:探测高度大于 600 m 时,侧向散射 激光雷达的信号与后向散射雷达的距离修正信号一 致性很好,验证了前面分析的正确性。从图中还可 以看出,由于几何因子的影响,后向散射激光雷达在 600 m 以下,探测信号偏差较大,而侧向散射激光雷 达可以实现近距离段的信号探测。

4.3 误差估算

如前所述,在连续拍摄两幅曝光时间相同的 CCD相片时,由于背景光和干扰光在短时间内(如 200 s)有缓慢改变,两次拍摄的 CCD 对应像元信号 相减时,仍然不能完全消除背景光、干扰光及暗电子数等的影响,从而产生一定的噪声。由(6)、(8)和(9)式可估算信号标准误差,则信号的相对误差可表示为

$$\sigma_{\rm N}/N_{\rm s} = (\sqrt{2\pi}A_2A_3 + \sqrt{2\pi}A_0A_2)^{1/2}/(\sqrt{2\pi}A_0A_2).$$
(13)

利用(8)和(13)式对 2013-05-01T21:19 在合肥西 郊拍摄到的 CCD 侧向散射激光雷达数据进行估算, 结果如图 6 所示。图 6(a)是信号光子数与像元的对 应关系廓线;图 6(b)是相应的信号相对误差廓线。 从图 6(b)中可以看出,相对误差大部分都在 0.5%左 右,最大值也在 1.5%以内,说明信号是可靠的。



图 6 CCD 信号。(a)光子数廓线;(b)相对误差廓线 Fig. 6 CCD signals. (a) Profile of photons;(b) profile of relative errors

5 结 论

基于 CCD 的侧向散射激光雷达是探测近距离 气溶胶光学参数的有效手段,但该技术目前还处在 研究中。在 CCD 探测到的侧向散射激光雷达信号 中,除了大气分子和气溶胶的散射信号外,还有背景 光、干扰光和 CCD 暗电子数等噪声。根据噪声的特 点,设计了连续曝光两次的方法来减少噪声;用高斯 拟合的方法来计算大气(分子和气溶胶)的散射光信 号及噪声。通过与后向散射激光雷达同时探测信号 的比对,结果表明这一方法是可靠的、有效的。正确 获取侧向散射激光雷达信号后,利用侧向散射激光 雷达方程,就可以反演气溶胶的相函数和消光系数 等参数,这将是下一步的工作计划。

参考文献

- 1 Shi Guangyu, Wang Biao, Zhang Hua, *et al.*. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols [J]. Chinese J Atmospheric Sciences, 2008, 32(4): 826-840.
 - 石广玉,王 标,张 华,等.大气气溶胶的辐射与气候效应 [J].大气科学,2008,32(4):826-840.

- 2 Bo Guangyu, Liu Bo, Zhong Zhiqing, *et al.*. Rayleigh-Raman-Mie lidar for atmospheric temperature and aerosol profiles measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 19-25. 伯广宇,刘 博,钟志庆,等. 探测大气温度和气溶胶的瑞利-拉 曼-米氏散射激光雷达[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 19-25.
- 3 Dong Yunsheng, Liu Wenqing, Liu Jianguo, *et al.*. Lidar study of the aerosol characteristic in Beijing during traffic controlled [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(2): 14-18. 董云升,刘文清,刘建国,等. 北京城区限车期间气溶胶特征激
- 光雷达观测研究[J]. 光学学报, 2009, 29(2): 14-18. 4 Zhang Gaixia, Zhang Yinchao, Hu Shunxing, et al.. Slant
- measurements of atmospheric boundary layer aerosol with mobile lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(8): 1015-1019. 张改霞,张寅超,胡顺星,等. 车载测污激光雷达对大气边界层 气溶胶的斜程探测[J]. 光学学报, 2004, 24(8): 1015-1019.
- 5 Wang Shaolin, Cao Kaifa, Hu Shunxing, *et al.*. Analysis and determination of lidar geometrical factor [J]. Lsare Technology, 2008, 32(2): 147-150.

王少林,曹开法,胡顺星,等.对激光雷达几何因子的分析与测量[J].激光技术,2008,32(2):147-150.

- 6 J E Bernes, S Bronner, R Beck, et al.. Boundary layer scattering measurements with a charge-coupled device camera lidar [J]. Appl Opt, 2003, 42(15): 2647-2652.
- 7 J E Bernes, N C Parikh Sharma, T B Kaplan. Atmospheric aerosol profiling with a bistatic imaging lidar system [J]. Appl Opt, 2007,46(15): 2922-2929.
- 8 Meng Xiangqian, Hu Shunxing, Wang Yingjian, et al.. Aerosol

scattering phase function and visibility based on charge coupled device [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0901001.

孟祥谦, 胡顺星, 王英俭, 等. 基于电荷耦合器件探测气溶胶散 射相函数与大气能见度的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0901001.

9 Tao Zongming, Zhang Qingze, Fang Xin, et al.. Estimation of

random errors for backscatter lidar observations [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(12): 237-240. 陶宗明,张清泽,方 欣,等. 激光雷达信号随机误差的估算 [J]. 光子学报, 2009, 38(12): 237-240.

栏目编辑: 王晓琰