

## 基于 CCD 的侧向激光雷达系统研制及探测个例

陶宗明<sup>1,2</sup>, 刘东<sup>2</sup>, 麻晓敏<sup>1</sup>, 陈向春<sup>1</sup>, 王珍珠<sup>2</sup>, 谢晨波<sup>2</sup>, 王英俭<sup>2</sup>

(1. 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)

**摘要:** 后向散射激光雷达技术已广泛应用于大气气溶胶的探测, 但由于有盲区 and 过渡区, 限制了它在近距离段的探测范围和精度。侧向散射激光雷达技术没有后向散射激光雷达技术中的上述缺陷, 可实现近距离段气溶胶信号的连续探测, 且探测精度较高。开发研制了基于 CCD 的侧向散射激光雷达系统, 它由激光发射、光学接收、几何定标及数据采集等子系统组成。与后向散射激光雷达的对比探测个例表明, 该激光雷达系统数据可靠, 近距离的有效探测范围为 0.02~4 km。这一系统的建立为进一步深入研究近地面层的气溶胶时、空分布奠定了坚实的基础。

**关键词:** 大气光学; 侧向散射激光雷达; CCD

**中图分类号:** TN958.98; P407.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)10-3282-05

## Development and case study of side-scatter lidar system based on charge-coupled device

Tao Zongming<sup>1,2</sup>, Liu Dong<sup>2</sup>, Ma Xiaomin<sup>1</sup>, Chen Xiangchun<sup>1</sup>, Wang Zhenzhu<sup>2</sup>,  
Xie Chenbo<sup>2</sup>, Wang Yingjian<sup>2</sup>

(1. Section of Physics T&R, Department of Basic Sciences, Army Officer Academy, Hefei 230031, China;

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

**Abstract:** The backscatter lidar technique is widely applied to atmospheric aerosol detection, but the blind and transition regions restrict its detecting range and precision in near distance. Side-scatter lidar technique without above shortage can detect aerosol continuously in near distance, and has good precision. A side-scatter lidar system was developed, which is composed of transmitter, receiver, geometric calibration, and data acquisition subsystems. Comparison experiment with backscatter lidar indicates that the data acquired from this lidar are reliable and the near detection effective range is from 0.02–4 km. This system can be used for study the spatio-temporal distribution of atmospheric aerosol in near surface further.

**Key words:** atmospheric optics; side-scatter lidar; CCD

收稿日期: 2014-02-10; 修订日期: 2014-03-15

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

作者简介: 陶宗明(1962-), 男, 教授, 博士, 主要从事激光雷达研制和激光雷达大气探测方面的研究。Email: zmtao@aiofm.ac.cn

## 0 引言

气溶胶是指悬浮在大气中固体和液体微粒共同组成的多相体系,微粒的直径跨度较大,一般为  $0.001\sim 100\ \mu\text{m}$ ,不同类型的气溶胶存在时间不等,短则几秒,长则几年,化学成份更是复杂。气溶胶主要分布在对流层内,在人类活动的近地面内含量最大。气溶胶对全球气候及人类生存环境都有一定的影响<sup>[1]</sup>,主要表现在两个方面:第一,它发射来自太阳的短波辐射、吸收来自地面的长波辐射,直接影响地球-大气系统的辐射收支平衡,同时作为凝结核参与云的形成,间接影响辐射收支平衡;第二,它是大气中污染物和灰霾的主要成分,是城市中光化学烟雾的重要组成。故气溶胶是当前大气科学领域中的热点问题之一,是全球气候变化最敏感的强迫因子,同时也是政府制定减排政策的重要科学依据。

随着科学技术的进步,激光雷达技术已广泛、深入地应用到大气气溶胶时间和空间分布探测中<sup>[2-4]</sup>。目前常用的激光雷达为后向散射激光雷达,这种激光雷达在近距离段存在一个盲区 and 过渡区<sup>[5]</sup>。盲区和过渡区的距离与发射光轴和望远镜光轴的间距、激光光束发散角、望远镜的视场角等因素有关,可从几百米到超过一 kilometers 的范围。过渡区内的激光雷达信号受几何因子的影响,限制了后向散射激光雷达在近距离场合下的探测精度。在环境监测中,人们最关心的就是近地面层内的气溶胶空间分布情况,这是后向散射激光雷达技术的不足之处。

侧向散射激光雷达技术是近年来正在研究的新技术<sup>[6-7]</sup>,它将发射装置与接收装置分两处放置,这样就不存在后向散射激光雷达中几何因子的影响,极大地提高了近距离段的探测精度;由于探测的是侧向散射光,由几何关系可知,近距离段空间分辨率也很高,这两个优点使得侧向激光雷达适合探测近地层的大气气溶胶。

文中给出了基于 CCD 的侧向散射激光雷达系统的原理图和主要技术参数,CCD 像元角宽度分布曲线,大气侧向散射回波信号等;介绍了侧向散射激光雷达系统包括硬件和 CCD 像元角宽度探测及检验;并介绍了探测个例及结果分析。

## 1 系统

当激光束入射到大气中,就要和大气中的散射粒子(主要是大气分子、气溶胶)发生相互作用,从而产生向各个方向的散射光。散射光中包含了散射粒子的信息,侧向散射激光雷达借助 CCD 探测激光束上不同距离、不同方向上的散射光光强,通过侧向散射激光雷达方程来反演散射粒子的光学参量。

### 1.1 系统装置

侧向散射激光雷达系统由激光发射、光学接收、几何定标及数据采集等子系统组成。激光发射子系统主要是 Nd:YAG 脉冲激光器,主要指标:波长  $532\ \text{nm}$ ,重复频率  $10\ \text{Hz}$ ,发散角  $0.5\ \text{mrad}$ 。光学接收子系统为一部天文 CCD 相机,其像素大小为  $3\ 352\times 2\ 532$ ,曝光时间可根据需要设定,CCD 前加装了一块中心波长为  $532\ \text{nm}$  的干涉滤光片,以提高探测信号的信噪比。利用几何标定子系统,计算激光光束上各散射点与 CCD 相机中像元之间的对应关系。计算机采集 CCD 成像的回波信号强度。图 1 为侧向散射激光雷达的组成示意图。图中  $z$  为探测距离, $D$  为 CCD 相机到激光光束的垂直距离, $d\theta$  为像元对应的张角。表 1 为该雷达系统的主要技术参数。

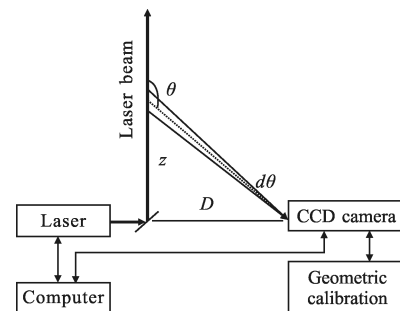


图 1 侧向散射激光雷达原理示意图

Fig.1 Diagram of side-scatter lidar

表 1 侧向散射激光雷达系统主要技术参数

Tab.1 Specifications of side-scatter lidar system

Laser	(Quantel brilliant b)Nd:YAG
Wavelength/nm	532
Pulse energy/mJ	260
Repetition rate/Hz	10
Divergence/mrad	0.5
Detector	(SBIG) ST-8300M

续表 1

Lasers	(Quantel brilliant b)Nd:YAG
Active area/mm	18.00×14.00
Pixels	3 352×2 532
Pixel size/μm <sup>2</sup>	5.4×5.4
Read noise/counts·pixel <sup>-1</sup>	~10
Dark/electrons·s <sup>-1</sup> ·pixel <sup>-1</sup>	<0.5e at 0℃
Full well capacity/electrons	25 500
A/D converter/bits	16
Binning modes	1×1, 2×2, 3×3
Cooling	Single TE, Active fan, ~35℃ Delt
Temperature regulation/℃	Closed loop, ±0.1
Wide-angle lens	Walmexpro f/2.8
Lens focal length/mm	14
CCD sensor	Kodak KAF-8300
Quantum efficiency at 532 nm	~55%
Interference filter	Semrock corporation
Bandwidth/nm	25.6
Peak transmittance	~95%
Computer	Lenovo×200

## 1.2 侧向激光雷达方程

依据侧向散射激光雷达的工作原理,结合图 1,可导出它的方程式为<sup>[6]</sup>:

$$N(z, \theta) = \frac{N_0 K A}{D} [\beta_a(z, \theta) + \beta_m(z, \theta)] \cdot \exp\left\{-\int_0^z [\alpha_a(z') + \alpha_m(z')] \cdot dz' + \int_0^{z/\cos(\pi-\theta)} [\alpha_a(z') + \alpha_m(z')] \cdot dz'\right\} d\theta \quad (1)$$

式中: $N(z, \theta)$ 为距离 $z$ 且散射角 $\theta$ 处、角宽度为 $d\theta$ 的大气侧向散射回波信号光子数; $N_0$ 为激光雷达发射激光束初始光子数; $K$ 为激光雷达系统常数; $A$ 为 CCD 有效光学接收面积; $D$ 为 CCD 相机到激光光束的垂直距离; $\beta_a(z, \theta)$ 、 $\beta_m(z, \theta)$ 分别为距离 $z$ 处、散射角为 $\theta$ 方向上气溶胶和大气分子的侧向散射系数; $\alpha_a(z)$ 、 $\alpha_m(z)$ 分别为距离 $z$ 处气溶胶和大气分子的消光系数。

根据相函数 $P(z, \theta)$ 的定义,侧向散射系数可表示为:

$$\beta(z, \theta) = P(z, \theta) \beta_s(z) \quad (2)$$

式中: $\beta_s(z)$ 为总散射系数。由此又可得:

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

式中: $f(z, \theta)$ 为比相函数。在大气边界层内,由于湍流

的作用,大气分子和气溶胶的相函数可合理地认为不随高度变化,令 $f(z, \theta)$ 记为 $f(\theta)$ ,且令 $\beta(z, \pi)$ 记为 $\beta(z)$ ,则上式又可简化为:

$$\beta(z, \theta) = \beta(z) f(\theta) \quad (4)$$

将公式(4)代入公式(1)可得:

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

## 2 CCD 像元角宽度

实验中发现,该系统中 CCD 相机所有像元的角宽度不是一个常数,这给由像元位置来确定光束上对应散射光的位置带来一定的困难。为此设计定标实验,测量像元的角宽度。对于侧向散射激光雷达,激光束的散射光在 CCD 平面上也是一个光束,实验中,将散射光束调到通过 CCD 中心。这种情况下,只要测量出 CCD 通过中心一维方向上不同像元的角宽度就可以了。

### 2.1 CCD 像元角宽度测量

图 2 为测量 CCD 一维角宽度的示意图。制作一幅宽度为 $b$ 、黑白相间的长条形格子板,CCD 相机与长条形格子板的垂直距离为 $D$ ,让 CCD 相机的中心像元对准图中的 $O$ 点,拍一长条形格子板的相片。任一黑白格子到 $O$ 点的距离用 $x$ (或角度 $\theta$ )来表示,那么,从 CCD 相片中可以读出每一个黑白格子所占的像元个数。在图 2 中,设角度在 $\theta$ 方向上,宽度为 $b$ 的格子对 CCD 的张角为:

$$\delta\theta = (b \cos\theta) / (D / \cos\theta) = b \cos^2\theta / D \quad (6)$$

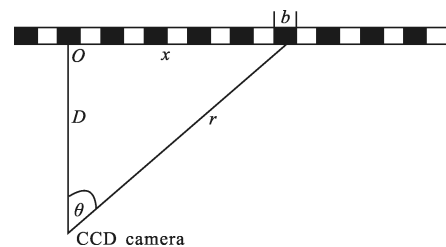


图 2 CCD 相机像元角宽度测量示意图

Fig.2 Diagram of measuring the angle of pixel of CCD

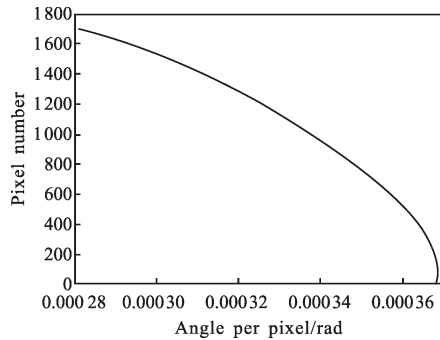
这一格子在 CCD 中所占的像元个数为 $N(\theta)$ ,那么单位像素对应的角宽度为:

$$d\theta = \delta\theta / N(\theta) = b \cos^2\theta / (DN(\theta)) \quad (7)$$

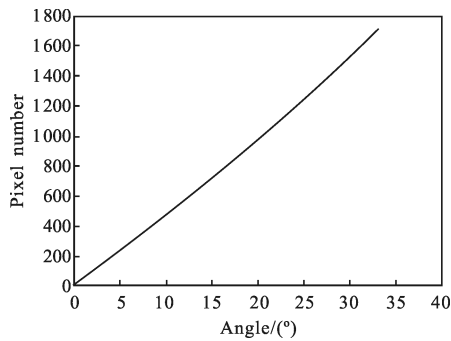
图 2 中的像元位置角度为:

$$\theta = \int d\theta \quad (8)$$

根据测量数据,利用公式(7)和(8)就可算出从 CCD 中心开始各像元的角宽度和像元位置角度,结果如图 3 所示。



(a) 像元角宽度廓线  
(a) Profile of pixel angle



(b) CCD 像元位置角度廓线  
(b) Profile of pixel position angle

图 3 CCD 角度关系

Fig.3 Relationship of CCD angle

### 2.2 CCD 像元角宽度检验

为了检验在实验条件下测出 CCD 像元角度关系的可靠性,选择了一处很平直的栅栏墙作为拍摄对象进行验证实验。实验中,在栅栏墙上选一条水平线,且在该水平线上作上 7 处黑色标记。调节 CCD 相机的水平高度与栅栏墙上被选水平线的高度相同。激光测距机测出 CCD 到栅栏墙的垂直距离  $D=11.5\text{ m}$ , 7 处标记点到标记点 1 的距离测出后分别存入表 2 中第 2 列。调节 CCD 相机方位,使屏幕上水平中心像元对准标记点 1(此时 CCD 到标记点 1 连线与 CCD 到栅栏墙垂线的夹角测量值为  $58.65^\circ$ ),然后进行拍摄。从拍摄到的 CCD 相片中读出各标记点的水平像元序号,并存入表 2 中第 3 列。利用上面测量出的像元位置角度,由几何关系反演出各标记

点的距离,存入表 2 中第 4 列,其反演误差在第 5 列中。从表 2 中的相对误差结果可知,反演距离的相对误差都在 0.4% 以内,表明像元角宽度的测量结果是可靠、正确的。

表 2 CCD 像元角度检验

Tab.2 CCD pixel angle check

Marked number	Real distance/m	Pixel number	Retrieved distance/m	Relative error
1	0	1 676	0	0.0%
2	5.18	1 268	5.20	0.4%
3	18.0	805	18.04	0.2%
4	28.27	634	28.17	0.3%
5	48.69	456	48.58	0.2%
6	73.56	351	73.34	0.3%
7	92.22	305	91.57	0.4%

### 3 探测个例

侧向散射激光雷达是正在研究中的技术,它的方程与后向散射激光雷达方程主要区别有两处:一是透过率项不同,后向散射激光雷达的两个透过率项相同,侧向散射激光雷达的两个透过率项不同;二是散射系数项不同,后向散射的散射方向各处都是后向的,侧向散射的散射角各处是不同的。这就导致后向散射激光雷达成熟的反演方法已不适用于侧向激光雷达了。

为了检验侧向激光雷达信号的正确性,要对探测到的侧向激光雷达信号进行比对,比对参照物是后向散射激光雷达。后向散射激光雷达的方程可改写为:

$$X(z) = C[\beta_a(z) + \beta_m(z)] \cdot \exp\{-2 \int_0^z [\alpha_a(z') + \alpha_m(z')] \cdot dz'\} \quad (9)$$

式中: $X(z)$ 为接收距离  $z$  处的大气后向散射距离修正信号; $C$ 为后向散射激光雷达系统常数; $\beta_a(z)$ 、 $\beta_m(z)$ 分别为气溶胶和大气分子在距离  $z$  处的后向散射系数; $\alpha_a(z')$ 、 $\alpha_m(z')$ 分别为气溶胶和大气分子在距离  $z$  处的消光系数。

表面上看,侧向激光雷达方程式(5)与后向散射激光雷达方程式(9)一致性较差,但当散射角接近  $180^\circ$  时,情况就不同了。如散射角在  $178^\circ \sim 180^\circ$  的范围内时,公式(5)中的  $f(\theta) \approx 1$ ,  $f_m(\theta) \approx 1$ ,  $z/\cos(\pi - \theta) \approx z$ 。在这种条件下,公式(5)和公式(9)仅差一个常数。在该系统中,散射角在  $178^\circ \sim 180^\circ$  的范围内,对应的 CCD

像元个数仍有 100 多个,那么这两种雷达的数据是可以进行检验比对的。

2013 年 5 月 13 日 21 时 19 分,在合肥西郊科学岛进行了 CCD 侧向散射激光雷达与后向散射激光雷达同时探测。侧向散射激光雷达中 CCD 相机至激光束的垂直距离  $D=23.7\text{ m}$ ,图 4 给出了侧向散射激光雷达的探测高度与散射角的关系。由图 4 中可以看出,散射角大于  $178^\circ$  时,对应的探测高度大于  $700\text{ m}$ 。图 5 给出了侧向散射激光雷达信号和后向散射激光雷达的距离修正信号。由图 5 可知:探测高度大于  $700\text{ m}$  时(对应于散射角在  $178^\circ\sim 180^\circ$  的范围内),侧向散射激光雷达的信号与后向散射激光雷达的距离修正信号符合很好,证明了前面分析是合理、正确的。由图 5 中还可知:后向散射激光雷达在  $700\text{ m}$  以下与侧向散射激光信号不一致,这是由于后向散射激光雷达系统的几何因子所造成的,而侧向散射激光雷达的信号不受几何因子的影响,可以实现近距离段信号精确探测,这正是侧向激光雷达的优点所在。

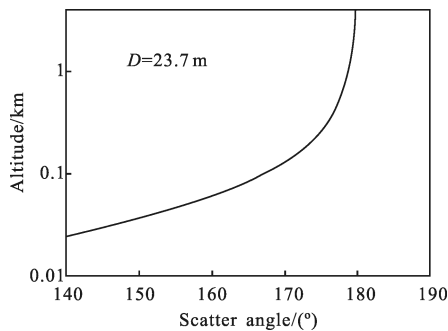


图 4 CCD 探测距离与散射角的关系

Fig.4 Relationship between detection range and scatter angle

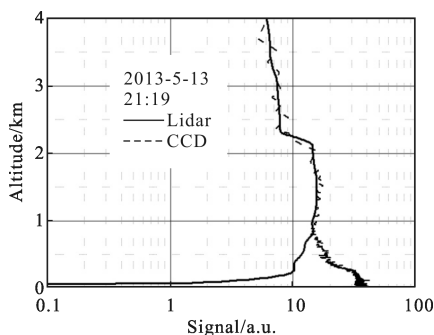


图 5 侧向散射激光雷达信号与后向散射激光雷达距离修正信号比对

Fig.5 Comparison of side-scatter lidar signals with backscatter lidar range corrected signals

## 4 结束语

侧向激光雷达技术目前还处在研究阶段,但侧向散射激光雷达无疑是探测近距离气溶胶光学参数空间分布的有效手段。成功研制出了基于 CCD 的侧向散射激光雷达系统,包括 CCD 像元的角宽度测量。在个例探测中,有效探测高度范围为  $0.02\sim 4\text{ km}$ 。通过和后向散射激光雷达的实验比对,证明了侧向散射激光雷达信号的可靠性。这一系统的建立为进一步深入研究近地面层的气溶胶时间和空间分布奠定了坚实的基础。

## 参考文献:

- [1] Shi Guangyu, Wang Biao, Zhang Hua, et al. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 826-840. (in Chinese)  
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] Ding Hongxing, Dai Lili, Sun Dongsong. Spatial distribution of aerosol in troposphere measured by lidar at slant range[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39 (3): 442-446. (in Chinese)  
丁红星,戴丽莉,孙东松. 激光雷达斜程探测的对流层气溶胶空间分布[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(3): 442-446.
- [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. (in Chinese)  
董云升,刘文清,刘建国,等. 北京城区限行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] Chen Min, Sun Dongsong, Gu Jiang, et al. Two-dimensional distribution of aerosol measured by lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 369-372. (in Chinese)  
陈敏,孙东松,顾江,等. 激光雷达探测的大气气溶胶空间二维分布[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 369-372.
- [5] Mao F, Gong W, Li J. Geometrical form factor calculation using Monte Carlo integration for lidar [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(40): 907-912.
- [6] Bernes J E, Bronner S, Beck R, et al. Boundary layer scattering measurements with a charge-coupled device camera lidar[J]. *Appl Opt*, 2003, 42(15): 2647-2652.
- [7] Bernes J E, Parikh Sharma N C, Kaplan T B. Atmospheric aerosol profiling with a bistatic imaging lidar system [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(15): 2922-2929.