

doi: 10.3788/gzxb20154402.0201002

基于 CCD 成像的侧向散射激光雷达几何标定方法

麻晓敏, 史博, 单会会, 赵素贵, 陶宗明

(解放军陆军军官学院 基础部物理教研室, 合肥 230031)

摘要:通过分析 CCD 成像特点, 设计了侧向散射激光雷达几何标定实验, 得到 CCD 各像元的角宽度, 并确定了 CCD 像元与散射光位置之间的对应关系. 对两次实验中采集的回波信号进行标定, 并分别与 POM02 进行相函数比对、与后向散射激光雷达进行探测信号比对, 结果表明: 相函数廓线和 POM02 测量结果相吻合; 侧向散射激光雷达信号与后向散射雷达的距离修正信号在 650 m 以上的变化趋势一致. 侧向散射激光雷达弥补了后向散射激光雷达在近地面段不能探测气溶胶的不足, 该标定方法可靠, 为进一步利用侧向散射激光雷达研究近地面气溶胶的时空分布奠定了坚实的基础.

关键词: 大气散射; 激光雷达; 气溶胶; 像元; 电荷耦合器件

中图分类号: TN958.98, P407.5

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)02-0201002-5

Geometric Calibration Method of Side-Scatter Lidar Based on Charge-Coupled Device

MA Xiao-min, SHI Bo, SHAN Hui-hui, ZHAO Su-gui, TAO Zong-ming

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

Abstract: The imaging characteristics of CCD were analyzed, a geometric calibration experiment on side-scatter lidar was designed, the each CCD pixel angle was achieved, and the relation between CCD pixels and the position of scattered light was established. Two experimental signals were calibrated using this method. The calibrated results are compared with POM02 in aerosol phase function, and with the backscattering lidar in signal, respectively. The comparison results indicate that the profiles of aerosol phase function from this method and from POM02 are same, and the signal from side-scatter lidar has the same tendency with the range-corrected signal from backscatter lidar above 650 m. Moreover, side-scatter lidar overcomes the shortcoming that the backscatter lidar can not detect the full signals in near range. This calibration method is reliable and useful for further studying the spatial-temporal aerosol profile in near surface by side-scatter lidar.

Key words: Atmospheric scattering; Lidar; Aerosols; Pixels; Charge Coupled Device(CCD)

OCIS Codes: 010.1310; 010.3640; 010.1110; 040.1520

0 引言

气溶胶是指液体或固体微粒散布在大气中形成的相对稳定的悬浮体系, 在低层大气中存在着丰富的气溶胶漂浮粒子. 近年来随着经济的发展, 我国大多数城市气溶胶造成的环境污染日益严重, 而且气溶胶通过吸收和散射太阳辐射来改变地面温度, 同时影响云的

形成, 改变局部水循环, 造成局部地区出现恶劣天气^[1]. 所以在大气环境监测领域, 准确了解气溶胶随时空的分布规律具有十分重要的意义.

观测气溶胶是研究气溶胶的基础, 但是现有的仪器很难实现对近地面段气溶胶高度廓线的高准确度探测. 如搭载在 Terra 和 Aqua 卫星上的中分辨率成像光谱仪 MODIS 可对全球气溶胶进行被动观测, 但其空间

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 41175021) 资助

第一作者: 麻晓敏 (1980-), 女, 讲师, 硕士, 主要研究方向为激光雷达大气探测. Email: maxiaomin308515@163.com

通讯作者: 陶宗明 (1962-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为激光雷达研制、激光雷达大气探测. Email: zmtao@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2014-06-16; **录用日期:** 2014-08-27

<http://www.photon.ac.cn>

分辨率不够高^[2];搭载在 CALIPSO 卫星上的激光雷达探测系统 CALIOP 可对全球气溶胶进行主动观测,但其信噪比不够好等^[3];地基后向散射激光雷达是探测气溶胶强有力的工具^[4-6].但在后向散射激光雷达中,由于发射光路和望远镜视场在近区内不完全重合,从地面到 800 m 高度左右范围内,存在一个过渡区和盲区^[7-10],气溶胶后向散射信号不能完全被探测.而这一高度范围正是气溶胶的富集区,是气象和环境部分所重点关注的区域.这一缺陷限制了后向散射激光雷达在近地面段的应用.

基于 CCD 的侧向散射激光雷达系统将发射装置与接收装置分两处放置,它没有过渡区和盲区,而且由于使用了侧向技术,可实现对近距离段气溶胶的高准确度、高分辨率的探测^[11-13].从侧向散射激光雷达的 CCD 成像中获得的是像元与光强之间的对应关系,但实际需要的是散射光位置与光强之间的对应关系,所以找出像元与散射光位置之间的对应关系是正确获取侧向散射激光雷达探测信号的关键,对侧向散射激光雷达进行几何标定,就可解决这一难题.本文对 CCD 相机的标定过程进行分析研究,设计了 CCD 相机标定方法,通过个例对标定结果进行检验.

1 实验系统

1.1 系统装置

侧向散射激光雷达系统通过 Nd:YAG 激光器向大气中发射波长为 532 nm 的激光,由于激光束与大气中的大气分子、气溶胶等发生相互作用,散射光中包含散射粒子的信息,利用一部 CCD 相机作为接收装置,将激光束上不同高度、不同方向上的散射光成像在对应的 CCD 像元上,利用几何标定装置确定 CCD 相机中像元与散射光位置的对应关系,计算机采集 CCD 成像的回波信号.图 1 是侧向散射激光雷达系统的原理,图中 z 为探测距离, D 为 CCD 相机到光束的垂直距离, θ 为散射角, $d\theta$ 为单个像元对应的角宽度.

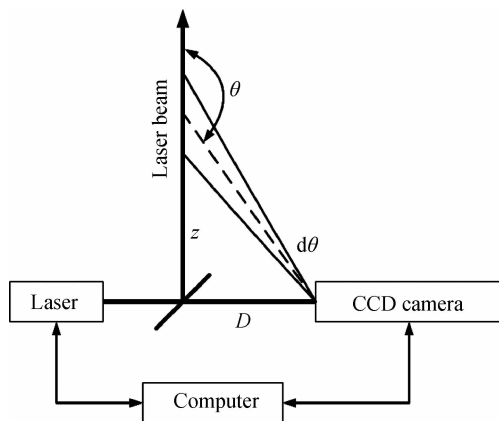


图 1 侧向散射激光雷达原理
Fig. 1 The diagram of side-scatter lidar

1.2 侧向散射激光雷达方程

侧向散射激光雷达方程为^[14]

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

式中, $N(z, \theta)$ 为侧向散射激光雷达单个像元接收距离 z 处、散射角为 θ 、角宽度为 $d\theta$ 的大气侧向散射回波信号强度, N_0 为激光雷达发射光的强度, K 为激光雷达系统常数, A 为有效光学接收面积, $\alpha_a(z)$, $\alpha_m(z)$ 分别为距离 z 处气溶胶和大气分子的消光系数, $\beta_a(z, \theta)$, $\beta_m(z, \theta)$ 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.

引入比相函数 $f(z, \theta)$ ^[15],在大气边界层内,假设大气分子和气溶胶的相函数与高度无关,令 $f(z, \theta)$ 记为 $f(\theta)$,令 $\beta(z, \pi)$ 记为 $\beta(z)$,侧向散射雷达方程表示为

$$N(z, \theta) = \frac{N_0 KA}{D} [\beta_a(z) f_a(\theta) + \beta_m(z) f_m(\theta)] \times \exp - \left\{ \int_0^z [\alpha_a(z') + \alpha_m(z')] dz' + \int_0^z [\alpha_a(z') + \alpha_m(z')] \frac{dz'}{\cos(\pi - \theta)} d\theta \right. \quad (2)$$

2 标定方法

实验发现系统 CCD 相机中像元的角宽度并不是一个常数,这对通过像元来确定对应散射光的位置造成一定困难.对于侧向散射激光雷达系统,激光束的散射光在 CCD 上成的像在一条直线上.实验时,调整 CCD 方位直至激光散射光束在 CCD 上成像通过中心像元且成水平直线或垂直直线,这样只需测量通过 CCD 中心像元水平和垂直两个方向上不同位置处像元的角宽度即可.

2.1 CCD 相机像元角宽度标定

CCD 相机成像遵守几何光学规律,系统中 CCD 相机焦距为 14 mm,实验中光束到 CCD 相机的距离大于 5 m,可认为像距等于焦距.物和像具有对应关系,但一般情况下,由像的位置直接反推物的距离很困难,例如不能根据一张像片来判断像片上人与相机之间的距离,但如果物仅是一条激光束,并且知道相机中各像元的角宽度以及相机与激光束之间的几何方位关系,则可以根据像的位置来计算物的距离.

CCD 相机中各像元的角宽度厂商仅给出一个平均值,实际上不同位置处像元的角宽度是不一样的.为了标定 CCD 相机各像元的角宽度,设计了一幅宽度为 a 黑白相间的长方形格子板,如图 2. CCD 相机到图板

的垂直距离为 D ,为了精确地测量 D ,在图板上找两点 A, B ,按照格子间隔可知 A, B 间的距离 d 、用激光测距仪分别测出 CCD 相机到 A 和 B 的距离 r_1, r_2 ,通过几何关系,就可以获得 O 点的准确位置,以及 CCD 相机到图板的垂直距离 D .

$$h = \frac{(r_2^2 - r_1^2 - d^2)}{2d} \quad (3)$$

$$D = \sqrt{r_1^2 - h^2} \quad (4)$$

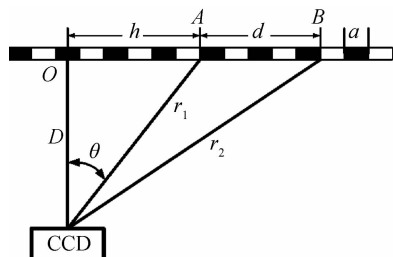


图 2 CCD 相机到光束垂直测量示意图

Fig. 2 The distance measurement diagram from CCD to laser beam

实验发现 CCD 相机中不但像元的角宽度不是一个常数,而且不同方向上也是不对称的.为此,以 CCD 相机中心像元为中心,把要标定的像元(通过中心水平线和竖直线)分为 4 条线,在图 3 中用 1、2、3、4 标出.

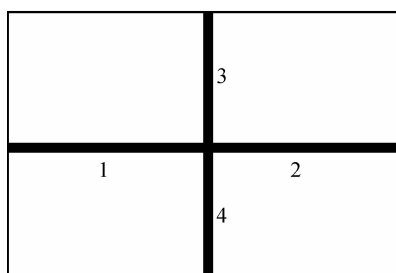


图 3 CCD 像元分区

Fig. 3 The section diagram of CCD pixels

按式(3)、(4)找好垂足点 O ,调整 CCD 相机方位,让垂足点 O 成像在 CCD 相机的中心像元上,且黑白相间的长方形格子水平成像在 CCD 相机的右侧,即图 3 中的 2 位置,然后进行拍摄.设长方形格子板上任意格子到 O 点的距离为 x ,CCD 相机到该格子的连线与垂线的夹角为 θ ,如图 4.该格子在 CCD 相机上所成的像

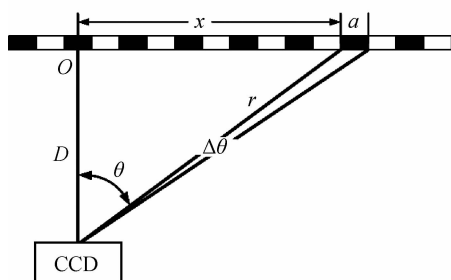


图 4 CCD 像元角宽度测量示意图

Fig 4 The diagram of measuring the pixel angle of CCD

元 $M(\theta)$,对 CCD 的张角为 $\Delta\theta$,则有

$$\Delta\theta = \frac{a \cos \theta}{D / \cos \theta} = a \cos^2 \theta / D$$

那么,该格子处单位像元对 CCD 的角宽度 $d\theta$ 为

$$d\theta = \Delta\theta / M(\theta) = a \cos^2 \theta / (DM(\theta)) \quad (5)$$

所以,该像元相对于中心像元的角位置 θ 为

$$\theta = \int d\theta \quad (6)$$

用同样的方法可以测量图 3 中 1、3 和 4 位置上各像元的角宽度,结果见图 5.从图 5 可以看出:CCD 像元角宽度各方位是不完全对称,但存在部分对称,左边和上边对称;右边和下边对称.从图 5 中还可算出 CCD 相机在横向和纵向的视场角分别为 105° 和 80° .

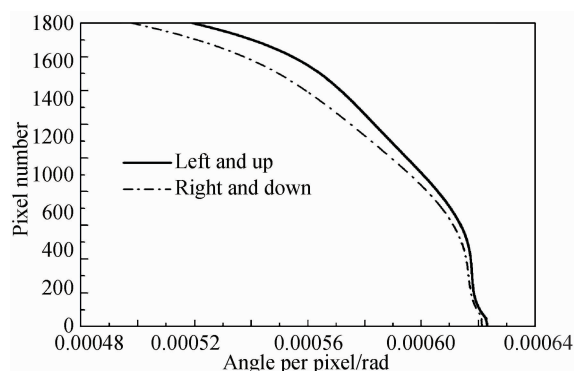


图 5 CCD 像元角宽度廓线

Fig. 5 The profile of CCD pixel angle

2.2 CCD 相机像元与对应散射光束位置关系标定

在实际实验中,激光束有时水平发射,例如探测气溶胶相函数时;有时竖直发射,如探测气溶胶垂直廓线时.为确定 CCD 相机中各像元与散射光束上各散射点之间的对应关系,需要标定 CCD 相机与散射光束之间的几何关系.为使问题简单化,激光水平发射时,光束要成像在通过 CCD 相机中心像元的水平方向上;激光竖直发射时,光束要成像在通过 CCD 相机中心像元的竖直方向上.这种情况下,CCD 相机与光束的几何关系可用两个量来描述:CCD 相机到光束的垂直距离和 CCD 相机光轴与垂线之间的夹角.

2.2.1 水平发射激光束

当发射水平方向的激光束时,在光束上适当的两点 A, B 处各放置一块玻璃光屏,与图 2 类似.利用激光测距仪分别测出 A, B 两点间距离 d 、及 CCD 到 A 和 B 点的距离 r_1 和 r_2 ,利用式(3)、(4)求得 CCD 相机到光束的垂直距离 D .保留 A 光屏(撤去 B 光屏),如图 6,调整 CCD 相机的方位,直至光屏上 A 处光斑成像在 CCD 相机中心像元且光束成像水平为止,则 CCD 相机光轴与垂线的夹角 θ_0 为

$$\theta_0 = \arccos \frac{D}{r_1}$$

结合式(5)、(6),可知任意像元与垂线的夹角为(分两

种情况:A点右侧和左侧)

$$\alpha = \theta_0 \pm \theta$$

则,该像元对应的散射光位置为

$$z = D \tan \alpha \tag{7}$$

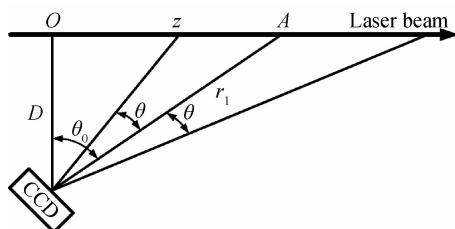


图6 水平测量方位角

Fig 6 The diagram of angle at horizontal measurement

2.3.2 垂直发射激光束

当激光束垂直向上发射时,由于受高度制约,不能如图2那样在光束上放置两块光屏来确定垂距D,所以采用另一种方法:在光束上适当位置放置一玻璃光屏,利用激光测距仪测出光屏至 CCD 相机的距离 r, CCD 相机和激光测距机都是固定在经纬仪上的,从经纬仪上读出此时的激光测距机仰角 φ,则可算出 CCD 相机到激光束的距离 D 为

$$D = r \cos \varphi$$

再调整经纬仪,使 CCD 相机中心轴仰角至适当角度,并读出仰角 θ₀,如图7,结合式(5)、(6)可知任一像元对应的散射光位置 z 为(分两种情况)

$$z = D \tan (\theta_0 \pm \theta) \tag{8}$$

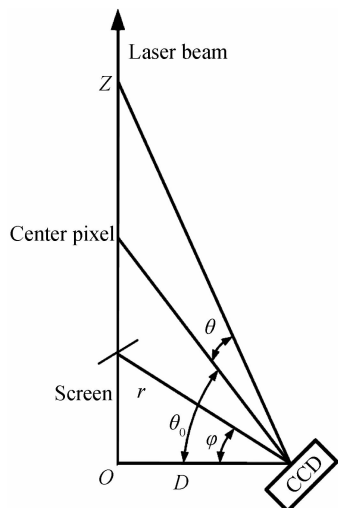


图7 垂直测量方位角

Fig 7 The diagram of angle at vertical measurement

3 检验

在实际探测检验中,分别分析了2013年11月29日20:32在合肥西郊发射的水平激光束拍摄的 CCD 相片和2014年4月14日21:14在合肥西郊发射的垂直激光束拍摄的 CCD 相片,并分别与同日同地工作的

太阳辐射计进行相函数比对、与同地同时实验的后向散射激光雷达进行信号比对.

3.1 水平方向几何标定的检验

2013年11月29日的实验中,利用图2的方法算得 CCD 相机到水平激光束的垂直距离为 10.34 m,由于 CCD 相机在水平方向的视场角为 105°,将 CCD 相机的光轴与激光束成 52.5°,曝光时间为 150 s,从而得到 10°~105°散射角的回波信号.图8中虚线是利用相关反演方法得到的相函数的廓线^[16],实线是 POM02 (同一地点)测量结果,从图中可以看出两条廓线吻合得很好,这就间接证明了水平方向几何标定的正确性.

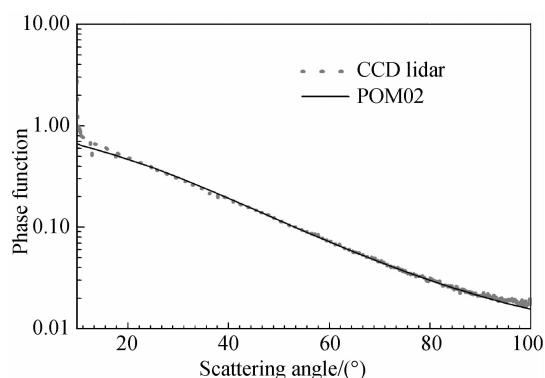


图8 气溶胶的相函数廓线

Fig. 8 the profile of aerosol phase function

3.2 竖直方向 CCD 像元标定的检验

2014年4月14日21:14的实验中,使 CCD 中心光轴与水平方向成 51.15°放置, CCD 在竖直方向的视场角为 80°,利用图7的方法得到 CCD 相机到垂直激光束的垂距为 33.97 m,曝光时间设置 240 s,同时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同时同地点进行比较实验,测得侧向散射激光雷达探测高度与散射角的关系如图9.从图9中可以看出,探测高度在 650 m 以上时,对应的散射角大于 177°,这时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变化趋势应该一致,比对结果如图

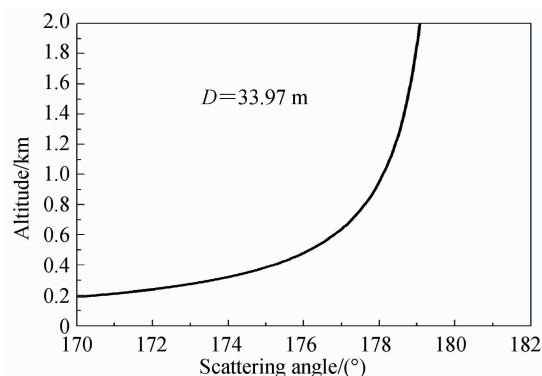


图9 CCD 探测距离与散射角关系

Fig. 9 Relationship between detection altitude of CCD and scattering angle

10. 从图 10 中可以看出:探测高度大于 650 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变化趋势一致性很好,间接验证了本文提出的垂直方向 CCD 像元标定方法的正确性,从图中还可以进一步看出,侧向散射激光雷达弥补了后向散射激光雷达在近地面段不能探测气溶胶的不足。

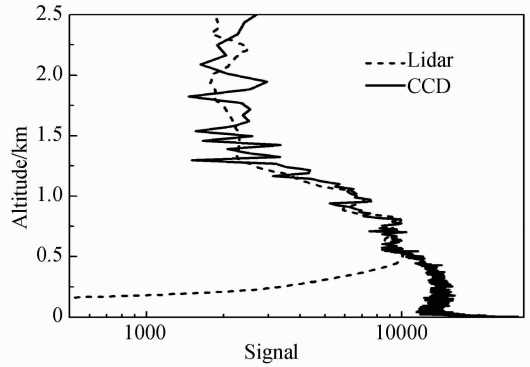


图 10 侧向散射激光雷达信号与后向散雷达距离修正信号对比

Fig. 10 Comparison of side-scatter lidar signals with backscattering lidar altitude-corrected signals

4 结论

基于 CCD 的侧向散射激光雷达探测近地面的气溶胶时空分布规律是近年来发展的一项新技术,其中, CCD 成像信息反映的是像元与光强之间的对应关系,本文设计了 CCD 相机的标定实验,将像元与光强之间的对应关系转化为实际需要的散射光位置与光强之间的对应关系.通过与同日同地工作的 POM02 和同地同时实验的后向散射激光雷达进行比对,结果表明:CCD 像元角宽度测量结果以及水平方向和垂直方向的定标方法都是有效的、可靠的.这一标定方法的建立为进一步利用 CCD 侧向散射激光雷达研究近地面气溶胶的时空分布规律奠定了基础。

参考文献

[1] YANG Hong-bin, ZOU Xu-dong, WANG Hong-yu, *et al.* Study progress on PM_{2.5} in atmospheric environment[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2012, **28**(3):77-82.
杨洪斌, 邹旭东, 汪宏宇, 等. 大气环境中 PM_{2.5} 的研究进展与展望[J]. *气象与环境学报*, 2012, **28**(3):77-82.

[2] HE Xiu, DENG Zhao-ze, LI Cheng-cai, *et al.* Application of MODIS AOD in surface PM₁₀ evaluation[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010, **46**(2):26-32.
何秀, 邓兆泽, 李成才, 等. MODIS 气溶胶光学厚度产品在地面 PM₁₀ 检测方面的应用研究[J]. *北京大学学报*, 2010, **46**(2):26-32.

[3] MA Ying-ying, GONG Wei, ZHU Zhong-min, Aerosol optical characteristics in South east China determined using spaceborne lidar[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, **13**(4):159-166.

马盈盈, 龚威, 朱忠敏, 中国东南部地区气溶胶光学特性激光雷达探测[J]. *遥感学报*, 2009, **13**(4):159-166.

[4] HUANG Z, HUANG J, BI J, *et al.* Dust aerosol vertical structure measurements using three MPL lidars during 2008 China-US joint dust field experiment [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, **115**(D7), D00K15.

[5] LIU J, ZHENG Y, LI Z, *et al.* Seasonal variations of aerosol optical properties, vertical distribution and associated radiative effects in the Yangtze Delta region of China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, **117**(D16), D00K38.

[6] BO Guang-yu, LIU Bo, ZHONG Zhi-qing, *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.

[7] DHO S W, PARK Y J, KONG H J, Experimental determination of a geometric form factor in a lidar equation for an inhomogeneous atmosphere[J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(24):6009-6010.

[8] HU S, WANG X, WU Y, *et al.* Geometrical form factor determination with Raman backscattering signals[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(14):1879-1881.

[9] 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.

[10] WANG Shao-lin, CAO Kai-fa, HU Shun-xing, *et al.* Analysis and determination of lidar geometrical factor [J]. *Laser 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.

[11] 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.

[12] BARNES J E, PARIKH SHARMA N C, KAPLAN T B, Atmospheric aerosol profiling with a bistatic imaging lidar system[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(15):2922-2929.

[13] MENG Xiang-qian, HU Shun-xing, WANG Ying-jian, *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, 王英俊, 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.

[14] TAO Z, LIU D, WANG Z, *et al.* Measurements of aerosol phase function and vertical backscattering coefficient using a charge-coupled device side-scatter lidar[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(1):1127-1134.

[15] MA Xiao-min, TAO Zong-ming, MA Ming-jun, *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 的侧向散射激光雷达信号提取方法[J]. *光学学报*, 2014, **34**(2), 0201001-1.

[16] TAO Z, LIU D, XIE C, *et al.* International conference on remote sensing, environment and transportation engineering [C]. Atlantis Press, 2013:350-352.