

基于粒子谱的多波长激光雷达近场大气光学参数校正方法

赵虎 华灯鑫 毛建东 周春艳

Correction to near-range multiwavelength lidar optical parameter based on the measurements of particle size distribution

Zhao Hu Hua Deng-Xin Mao Jian-Dong Zhou Chun-Yan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 124208 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.124208

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124208>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

变形镜高斯函数指数对迭代法自适应光学系统的影响

[Influence of Gaussian function index of deformable mirror on iterative algorithm adaptive optical system](#)

物理学报.2015, 64(9): 094207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094207>

多波长激光雷达探测多种天气气溶胶光学特性与分析

[Detections and analyses of aerosol optical properties under different weather conditions using multi-wavelength Mie lidar](#)

物理学报.2014, 63(24): 244206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244206>

Mach-Zehnder干涉仪条纹成像多普勒激光雷达风速反演及视场展宽技术

[Wind velocity retrieval and field widening techniques of fringe-imaging Mach-Zehnder interferometer for Doppler lidar](#)

物理学报.2014, 63(22): 224205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224205>

激光波长对拉曼散射水温遥感系统测温精度及探测深度的影响

[Effects of laser wavelength on both water temperature measurement precision and detection depth of Raman scattering lidar system](#)

物理学报.2014, 63(16): 164209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.164209>

功率谱反演大气湍流随机相位屏采样方法的研究

[Sampling methods of power spectral density method simulating atmospheric turbulence phase screen](#)

物理学报.2014, 63(10): 104217 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104217>

基于粒子谱的多波长激光雷达近场大气光学参数校正方法*

赵虎^{1)2)†} 华灯鑫¹⁾ 毛建东²⁾ 周春艳¹⁾²⁾

1)(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

2)(北方民族大学电气信息工程学院, 银川 750021)

(2014年11月18日收到; 2014年12月16日收到修改稿)

非同轴激光雷达由于存在发射激光与接收望远镜之间的不完全重叠区, 造成近场回波信号与真实大气信号不一致. 对于多波长激光雷达, 这种不一致更为突出和复杂. 然而, 近场大气是人类活动最集中的区域, 因此对多波长激光雷达近场信号进行校正, 对于了解和探究边界层大气具有十分重要的意义. 提出了一种利用粒子谱仪测量近地层气溶胶尺度谱分布并运用 Mie 散射理论和低层大气指数衰减规律, 进而直接校正多波长激光雷达消光系数廓线近场信号的新方法. 通过对晴天、多云天气和雾天多波长气溶胶消光系数廓线近场信号的校正, 证明了该方法的可行性和实用性. 该方法着重考虑了多波长激光雷达比的波长依赖性和气溶胶粒子谱分布的天气相关性, 将该方法用于近地层大气消光系数廓线校正, 减少了由于不考虑这两个因素带来的消光系数廓线反演和校正的不确定性. 该方法对于研究不同天气情况下边界层内的大气气溶胶物理、光学特性具有一定的实用价值和借鉴意义.

关键词: 多波长激光雷达, 雷达比, 气溶胶, Mie 散射

PACS: 42.68.Wt, 42.68.Jg, 92.60.Mt

DOI: 10.7498/aps.64.124208

1 引言

激光雷达具有高时空分辨率、能够全天时和全天候工作的特点, 在大气遥感探测方面得到了广泛应用. 激光雷达常由非同轴系统构成, 发射激光束与接收望远镜视场之间存在不完全几何重叠区, 使得激光雷达的近场信号与真实大气的回波信号不一致, 从而导致激光雷达的近场回波信号不能用. 然而 0—1 km 的大气区域与人类活动密切相关, 因此对激光雷达近场信号的校正, 是激光雷达低层大气应用的一项重要工作. 为了能够探测大气气溶胶的微物理特性, 激光雷达已经从过去的单波长向多波长发展. 多波长激光雷达发射包含多个波长的光束, 不但会出现近场信号的不完全重叠现象, 而且

由于激光雷达比的波长依赖性, 使得激光雷达信号反演大气光学特性存在许多不确定性. 如何精确地反演多波长激光雷达近场大气光学参数, 对于反演低层大气微物理参数具有重要意义.

目前, 激光雷达近场信号的校正主要基于实验或理论计算几何重叠因子, 如 Sasano 等^[1]通过现场实验得出几何重叠因子, 对近场信号进行校正; Tomine 等^[2]用实验的方法得到了薄雾天气下的重叠函数; 贺应红等^[3]首先对近场距离校正函数进行二次拟合, 进而获得修正后的近场回波信号距离校正曲线, 对近场信号进行校正; 文献^[4, 5]基于激光高斯分布特性, 得到激光雷达重叠因子的变化曲线; 狄慧鸽等^[6]分析了光轴夹角对重叠因子的影响, 进行了重叠因子的修正, 实现了近场信号的校正; 王威等^[7]基于激光强度的分布计算了重叠

* 国家自然科学基金 (批准号: 61168004) 和宁夏自然科学基金 (批准号: NZ14099) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhaoh_1@yeah.net

因子.

以上方法都是基于激光雷达系统本身的激光器和光学系统参数来计算几何重叠因子校正函数,没有考虑激光雷达比的波长依赖性和天气对几何重叠校正的影响. 本文提出了一种不依赖于系统自身参数,借助第三方粒子谱仪对大气气溶胶粒子谱进行测量,通过Mie理论计算气溶胶消光和后向散射系数以及雷达比,进而直接对Klett法^[8]反演的气溶胶光学参数进行近场校正的新方法. Mie理论诞生了很久,但目前仍然是解决粒子散射问题的最重要的方法. Fan等^[9]运用Mie理论分析了污染的沙尘粒子在1.6 μm波长下的散射特性. Du等^[10]提高了Mie多普勒风激光雷达的测量精度. 本文提出的基于粒子谱测量和Mie理论计算校正近场大气光学参数的方法,可用于多波长激光雷达的近场校正,不针对特别的激光雷达系统,应用起来方便可行,可用来验证雷达观测数据,提高雷达测量精度,具有较好的普遍性和实用性.

2 粒子谱测量的校正方法

2.1 近地点消光、后向散射系数和激光雷达比的计算

由Mie理论可知,气溶胶的消光系数和后向散射系数与气溶胶粒子谱的关系可用第一类Fredholm积分方程表示为

$$\alpha_\lambda = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \pi r^2 Q_{\text{ext}}(r, \lambda; m) n(r) dr, \quad (1)$$

$$\beta_\lambda = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \pi r^2 Q_{\text{bac}}(r, \lambda; m) n(r) dr, \quad (2)$$

其中, $n(r)$ 表示气溶胶粒子尺度谱分布, r 是粒子半径, λ 是散射光波长, m 是气溶胶复折射指数, r_{\min} 和 r_{\max} 分别是粒子半径的上下限, $\pi r^2 Q_{\text{ext}}$ 和 $\pi r^2 Q_{\text{bac}}$ 分别是单个粒子的消光截面和后向散射截面. 当已知气溶胶粒子谱分布(由粒子谱仪测得)以及消光截面和后向散射截面(由Mie理论计算),可以得到激光雷达近地点的消光系数 α_λ 和后向散射系数 β_λ . 由激光雷达比的定义 $S_\lambda = \alpha_\lambda / \beta_\lambda$, 可以得到近地点不同波长的激光雷达比 S_λ .

气溶胶粒子谱测量实验在宁夏银川(38.5°N, 106.2°E)进行,选择城市污染型大气复折射指数: $m = 1.48 - 0.008i$, 粒子半径为0.2—10 μm时, 355,

532和1064 nm三个波长的消光截面和后向散射截面如图1所示.

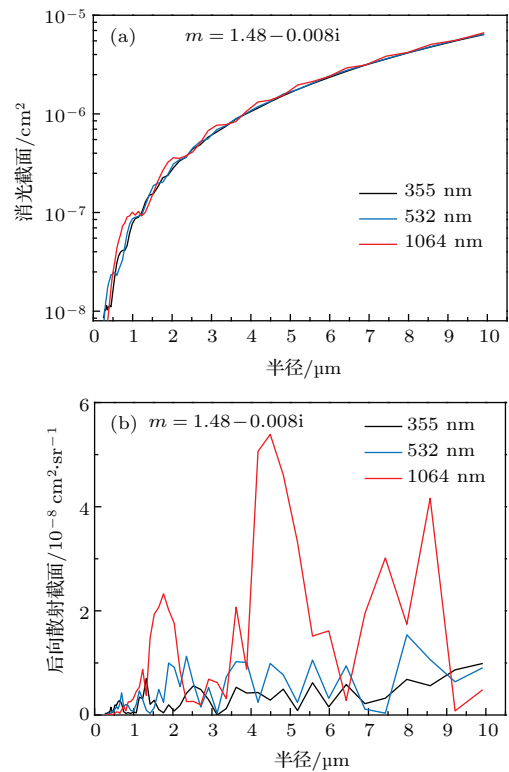


图1 (网刊彩色) 单个粒子消光截面和后向散射截面 (a) 消光截面; (b) 后向散射截面
Fig. 1. (color online) Extinction and backscattering cross-section of single particle: (a) extinction cross-section; (b) backscattering cross-section.

图2所示为当地时间2014/9/2 22:08, 粒径谱仪测量得到的晴天气溶胶粒子尺度谱分布. 粒径谱仪将半径为0.2—10 μm的粒子按照对数等间隔分成52个间隔, 半径小于0.26 μm的粒子为一个独立间隔, 条形图的高度表示了单位半径间隔内单位体积气溶胶粒子的个数.

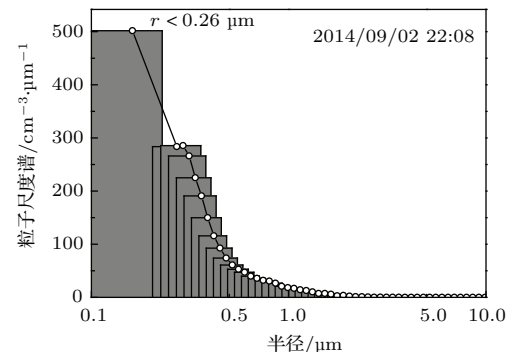


图2 粒径谱仪实测的晴天近地面气溶胶粒子尺度谱分布
Fig. 2. Aerosol size distribution in near surface of fine day measured by aerosol spectrometer.

由(1)和(2)式对单个粒子消光截面和后向散射截面与气溶胶尺度谱分布的积,在半径0.2—10 μm间隔内积分,得到三个波长355, 532和1064 nm近地面的消光系数、后向散射系数和激光雷达比,如图3所示.从图3可以看到,激光雷达比是具有波长依赖性的,在同一气溶胶粒子谱分布的情况下,不同波长的激光雷达比 S_λ 是不一样的.因此在多波长激光雷达光学参数的反演中,使用与波长和天气状况无关的,统一的经验雷达比会带来很大误差.

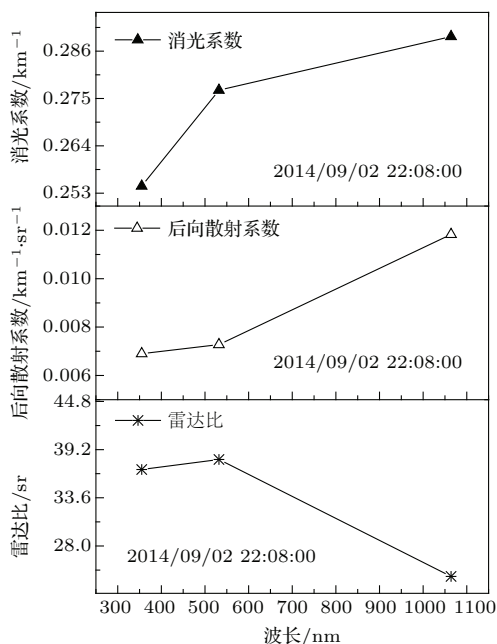


图3 Mie理论计算的三波长近地面气溶胶消光、后向散射系数和雷达比

Fig. 3. Extinction coefficient, backscattering coefficient, and lidar ratio in near surface aerosol of three-wavelength calculated by Mie theory.

2.2 气溶胶尺度谱随高度分布函数

大气气溶胶主要集中在5 km以下的对流层低层,在此高度范围内,其数密度随高度大致按指数规律递减^[11],可表示为

$$N_a(z) = N_{a0} \exp(-z/h_0), \quad (3)$$

式中, $N_a(z)$ 为高度 z 处的气溶胶数密度; N_{a0} 为地面处的气溶胶数密度; h_0 为一待定系数,与当时天气情况和气溶胶尺度分布有关.已知气溶胶在近地面的尺度谱分布 $n_0(r)$, 则气溶胶尺度谱分布随高度变化可表示为

$$n(r, z) = n_0(r) \exp(-z/h_0). \quad (4)$$

将(4)式代入(1)式,可得气溶胶消光系数随高度变化的关系,

$$\alpha_\lambda(z) = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \pi r^2 Q_{\text{ext}}(r, \lambda; m) n_0(r) \exp(-z/h_0) dr. \quad (5)$$

由(5)式可得

$$\alpha_\lambda(z) = \alpha_\lambda(0) \exp(-z/h_0). \quad (6)$$

近地点气溶胶消光系数 $\alpha_\lambda(0)$ 由(1)式和实测气溶胶尺度谱分布计算得到,只要确定了不同波长下的待定系数 h_0 , 就可以得到不同波长信号在不同高度 z 的气溶胶消光系数廓线.

2.3 指数衰减待定系数的确定

在气溶胶粒子谱测量实验的同时,在同一地点进行了三波长激光雷达的大气探测,根据(1)和(2)式以及实测气溶胶粒子谱得到的不同波长 λ 下的激光雷达比 $S_\lambda(0)$, 用Klett法反演得到三个波长的消光系数廓线,如图4中实线所示.设 $(z_{m_\lambda}, \alpha_{m_\lambda})$ 是校正前波长为 λ 的消光系数廓线的最大值点, z_{m_λ} 为最大值点的高度, α_{m_λ} 为最大值点的消光系数.可以认为:当 $z > z_{m_\lambda}$ 时,波长 λ 的激光束与望远镜视场完全重叠,几何重叠因子为1,无须校正;当 $z < z_{m_\lambda}$ 时,气溶胶消光系数随高度增加而增加,与大气性质不符,必须校正.需要校正的区域为 $z < z_{m_\lambda}$ 的低层大气,该区域大气对流充分,粒子混合较好,粒子数密度基本满足指数递减的规律.

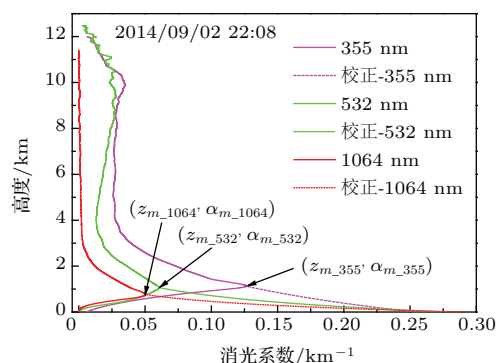


图4 (网刊彩色)晴天大气消光系数随高度变化的校正曲线

Fig. 4. (color online) Extinction coefficient correction curve of fine day.

表1 近地面消光系数随高度衰减标高系数计算

Table 1. Elevation coefficient calculation of extinction coefficient attenuation in near surface.

| 波长/nm | 近地点消光系数 $\alpha_\lambda(0)/\text{km}^{-1}$ | 消光系数最大值 $\alpha_{m_\lambda}/\text{km}^{-1}$ | 消光最大值高度 z_{m_λ}/km | 标高系数 h_{0_λ}/km |
|-------|---|--|--------------------------------------|-----------------------------------|
| 355 | 0.25463 | 0.1262 | 1.127 | 1.606 |
| 532 | 0.27691 | 0.06081 | 1.062 | 0.7 |
| 1064 | 0.28939 | 0.05 | 0.7635 | 0.435 |

因此, 点 $(z_{m_\lambda}, \alpha_{m_\lambda})$ 是气溶胶消光系数随高度变化曲线 $\alpha_\lambda(z) = \alpha_\lambda(0) \exp(-z/h_0)$ 上的点, 且满足 $\alpha_{m_\lambda} = \alpha_\lambda(0) \exp(-z_{m_\lambda}/h_{0_\lambda})$. 根据不同波长的消光系数廓线最大值点, 可得不同波长消光系数随高度指数衰减的标高系数 h_{0_λ} , 如表1所列. 根据不同波长 λ 下的标高系数 h_{0_λ} , 由(6)式得到各波长要校正高度 $z < z_{m_\lambda}$ 的消光系数 $\alpha_\lambda(z)$. 图4中虚线所示为不同波长近场消光系数校正廓线. 大气能见度 R_v 与人眼最为敏感的 550 nm 波长大气消光系数 σ 的关系为 $R_v = 3.912/\sigma$, 由接近 550 nm 波长的 532 nm 近地点消光系数, 可得近地面的能见度为 14.1 km; 当时气象部门发布的天气状况为: 温度 21 °C, 湿度 35%, 能见度 13 km, 这与校正后近地点激光雷达的数据基本一致.

由图4和表1可看出, 不同波长的激光束在同一光学系统中, 几何重叠因子达到1时的高度并不相同, 也就是说激光束与望远镜视场完全重叠的高度是具有波长依赖性的, 并且与当时的天气情况相关.

因此, 这种利用粒子谱仪测量近地面气溶胶尺度谱并结合 Mie 理论计算直接校正激光雷达近场

大气光学参数的方法, 充分考虑了几何重叠因子和激光雷达比的波长依赖性和天气的相关性, 减少了不考虑波长依赖性而带来的反演和校正误差. 对于几何重叠区较大, 尤其是大于混合层高度时, 该方法的适用性受到一定限制, 但可以通过调节发射激光和接收望远镜的同轴度, 尽量减小重叠区的办法解决, 该方法对激光雷达近场信号校正仍具有较高的参考价值.

3 不同天气多波长消光系数廓线低层校正实例

运用前述方法, 对多云天气和雾天情况下的实测多波长激光雷达近场消光系数进行了校正. 图5所示为多云天气近地面气溶胶粒子谱和低层大气消光系数校正曲线, 由 532 nm 近地点消光系数可得近地面大气能见度为 10.3 km, 这与气象部门给出能见度 11 km 符合得较好. 图5(a)与图2对比可以看出, 多云天气的近地面粒子总数和大粒子数要比晴天多出许多, 这使得近地面的消光系数增大, 也是大气能见度下降的主要原因.

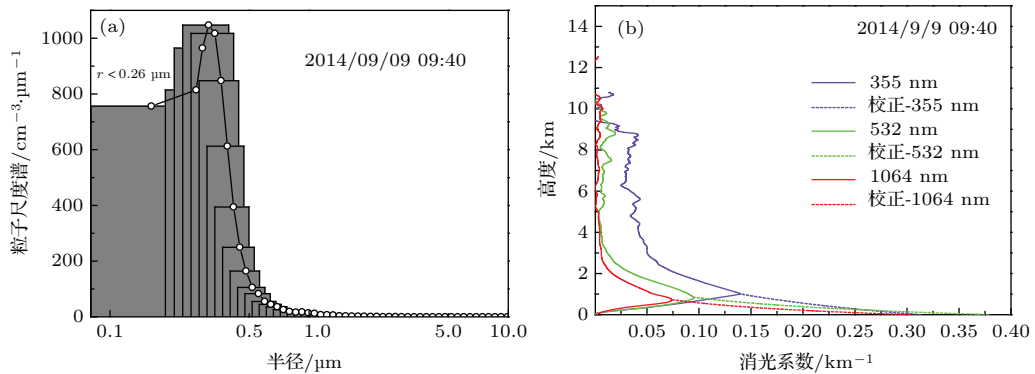


图5 (网刊彩色) 多云天气溶胶粒子谱和消光系数校正曲线 (a) 气溶胶粒子谱; (b) 消光系数校正曲线

Fig. 5. (color online) Aerosol size distribution and extinction coefficient correction curve of cloudy day: (a) aerosol size distribution; (b) extinction coefficient correction curve.

图6所示为雾天气溶胶粒子谱和低层大气消光系数校正曲线。由于雾天大气相对湿度达到了99%，因此，计算近地面大气消光系数时，采用水滴的复折射指数： $m = 1.33 - 1.47 \times 10^{-8}i$ ，从图6可以看到，近地面的消光系数达到了 1.2 km^{-1} 左右，由532 nm近地点消光系数得大气能见度为3.25 km，与气象部门给出的能见度3 km相符，与当时能见度小于5 km的大雾天气状况也是一致的。从图6(a)可看出，雾天的气溶胶粒子总数和大粒

子数明显大于晴天和多云天气，由于雾天相对湿度较大，气溶胶小粒子成为凝结核，外围凝结了水汽成为半径较大的颗粒物，使得大气能见度急剧下降。

多云天和雾天近地点消光系数、雷达比和标高系数计算结果列于表2。可以看出，不同天气情况下，同一波长的雷达比是不同的，标高系数也是不同的，说明雷达比和低层大气消光衰减与天气状况密切相关。

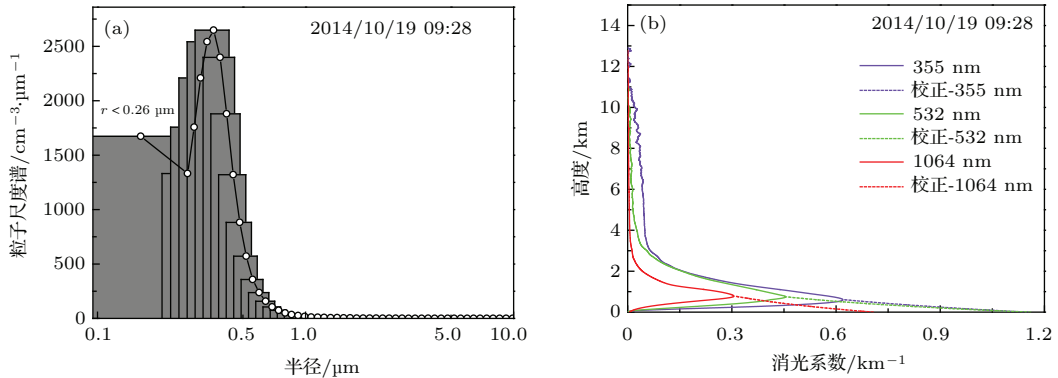


图6 (网刊彩色) 雾天气溶胶粒子谱和消光系数校正曲线 (a) 气溶胶粒子谱; (b) 消光系数校正曲线

Fig. 6. (color online) Aerosol size distribution and extinction coefficient correction curve of foggy day: (a) aerosol size distribution; (b) extinction coefficient correction curve.

表2 多云天气和雾天近地点消光系数、雷达比和标高系数对比

Table 2. Comparison of extinction coefficient, lidar ratio, and elevation coefficient in near surface between cloudy day and foggy day.

| 波长/nm | 多云天气 | | | 雾天 | | |
|-------|---|------------------------------|------------------------------------|---|------------------------------|------------------------------------|
| | 近地点消光系数 $\alpha_\lambda(0)/\text{km}^{-1}$ | 雷达比 S_λ/sr | 标高系数 $h_{0_}\lambda/\text{km}$ | 近地点消光系数 $\alpha_\lambda(0)/\text{km}^{-1}$ | 雷达比 S_λ/sr | 标高系数 $h_{0_}\lambda/\text{km}$ |
| 355 | 0.31298 | 27 | 1.25 | 1.152 | 55.4 | 0.989 |
| 532 | 0.37860 | 43 | 0.612 | 1.16 | 61.7 | 0.801 |
| 1064 | 0.30205 | 37 | 0.517 | 0.7072 | 33.6 | 0.941 |

4 结 论

本文通过对晴天、多云天气和雾天近地面大气气溶胶尺度谱分布的测量，运用Mie散射理论和低层大气指数衰减规律的方法，对多波长激光雷达355, 532和1064 nm波长的消光系数廓线近场信号进行了校正。通过校正后的近地点消光系数计算得到的能见度值与当天气象部门发布的结果符合得较好。校正结果较好地反映了不同波长近场气溶胶消光系数的变化趋势，该方法在近地层大气对流充分、气溶胶粒子混合均匀的情况下，对多波长激光

雷达近场信号校正是十分有效的，并且该方法方便可行。该方法与以往计算激光雷达几何重叠因子函数不同，充分考虑了多波长激光雷达比的波长依赖性和气溶胶粒子尺度分布的天气相关性，减少了由于采用激光雷达比经验值带来的反演消光系数不确定性。必须指出，在近地层大气对过程强烈、几何重叠区较大的情况下，该方法存在一定的局限性，本方法对于混合层高度以下、对流稳定、大气混合均匀的情况下适用性较好。该方法将大气物理光学参数的波长依赖性和天气相关性作为考虑问题的一个方面，对于今后研究激光雷达反演大气物理、光学参数具有很好的借鉴和参考价值。

参考文献

- [1] Sasano Y, Shimizu H, Takeuchi N, Okuda M 1979 *Appl. Opt.* **18** 3908
- [2] Tomine K, Hirayama C, Michimoto K, Takeuchi N 1989 *Appl. Opt.* **28** 2194
- [3] He Y H, Andrew Y S C, Cheng J, Zuo H Y, Yang J G 2005 *Acta Opt. Sin.* **25** 289 (in Chinese) [贺应红, 郑玉臣, 程娟, 左浩毅, 杨经国 2005 光学学报 **25** 289]
- [4] Wang Z H, He Y H, Zuo H Y, Andrew Y S C, Yang J G 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3188 (in Chinese) [王治华, 贺应红, 左浩毅, 郑玉臣, 杨经国 2006 物理学报 **55** 3188]
- [5] Liu Q J, Yang L, Wang J Y, Zuo H Y, Luo S R, Andrew Y S C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7376 (in Chinese) [刘巧君, 杨林, 王劫予, 左浩毅, 罗时荣, 郑玉臣 2009 物理学报 **58** 7376]
- [6] Di H G, Hua D X, Wang Y F, Yan Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 094215 (in Chinese) [狄慧鸽, 华灯鑫, 王玉峰, 闫庆 2013 物理学报 **62** 094215]
- [7] Wang W, Mao F Y, Gong W, Li J 2014 *Acta Opt. Sin.* **34** 0228005 (in Chinese) [王威, 毛飞跃, 龚威, 李俊 2014 光学学报 **34** 0228005]
- [8] Klett J D 1981 *Appl. Opt.* **20** 211
- [9] Fan M, Chen L F, Li S S, Tao J H, Su L, Zou M M 2014 *Chin. Phys. B* **23** 104203
- [10] Du J, Ren D M, Zhao W J, Qu Y C, Chen Z L, Geng L J 2013 *Chin. Phys. B* **22** 024211
- [11] Valley S L 1965 *Handbook of Geophysics and Space Environments* (New York: McGraw-Hill Book Company) p27

Correction to near-range multiwavelength lidar optical parameter based on the measurements of particle size distribution*

Zhao Hu^{1)2)†} Hua Deng-Xin¹⁾ Mao Jian-Dong²⁾ Zhou Chun-Yan¹⁾²⁾

1) (School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

2) (College of Electrical and Information Engineering, Beifang University of Nationalities, Yinchuan 750021, China)

(Received 18 November 2014; revised manuscript received 16 December 2014)

Abstract

The lidar observations of aerosols under near range condition are distorted because of insufficient overlapping between the transmitting laser beam and the field of view of receiving telescope in non-coaxial lidar especially in multiwavelength lidar. However, the near-range atmosphere is closely related with human's activity. So it is important to correct the near-range signal of multiwavelength lidar. This paper presents a novel method of correcting the near-range optical parameter of multiwavelength lidar based on aerosol particle size distribution measurements and Mie scattering theory. The near-range aerosol extinction profiles on fine day, cloudy day and foggy day are corrected. The results show that the method is convenient and feasible compared with the traditional methods. This method reduces the uncertainty of inversion and correction because the wavelength dependences of lidar ratio and the weather correlation of aerosol size distribution are taken into account. This method realizes the direct correction to near-range optical parameter of multiwavelength lidar. It is favorable and convenient to study physical and optical properties of boundary layer atmosphere by using this method. It will have a broad application and prospect.

Keywords: multi-wavelength lidar, lidar ratio, aerosol, Mie scattering

PACS: 42.68.Wt, 42.68.Jg, 92.60.Mt

DOI: 10.7498/aps.64.124208

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61168004) and the Natural Science Foundation of Ningxia, China (Grant No. NZ14099).

† Corresponding author. E-mail: zhaoh_1@yeah.net