

星地同步观测数据的地基激光雷达几何因子反演方法

齐白玉, 陈思颖*, 张寅超, 陈 和, 郭 磐

北京理工大学光电学院, 北京 100081

摘要 为了有效确定地基激光雷达系统的几何因子,修正地基激光雷达信号接收过渡区内的回波信号,提出了一种反演几何因子的新方法。利用星载激光雷达(CALIPSO)可以覆盖地基激光雷达探测过渡区的特点,结合星载与地基激光雷达同步获取的回波信号,分别反演了离轴和同轴模式下的几何因子,并同成熟的拉曼-米氏几何因子反演方法,以及 Su Jia 的联合测量法作对比。在几何因子过渡区内,校正后的气溶胶后向散射系数与 Su Jia 的方法相比,离轴和同轴模式下的平均相对误差分别提高了 25.4% 和 10.4%。该方法克服了弹性散射激光雷达水平测量法中因大气均匀假设导致的几何因子测量结果的不确定性,更适用于应用广泛的弹性散射激光雷达,且可以利用 CALIPSO 每月过境时间稳定的特点,对系统几何因子进行常规标定。

关键词 遥感; 激光雷达; 几何因子; 弹性散射激光雷达; 星载激光雷达

中图分类号 O436.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0910003

Geometric Form Factor Retrieval Method for Ground-Based Lidar Based on Ground-Based and Space-Borne Synchronous Observation Data

Qi Baiyu, Chen Siying, Zhang Yinchao, Chen He, Guo Pan

School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract To effectively retrieve the geometric form factor of the ground-based lidar and to modify the echoed signal in transition region, a new geometric form factor retrieval method is proposed. The method takes advantage of the characteristic of space-borne lidar (Cloud Aerosol Lidar Infrared Pathfinder Satellite Observation, CALIPSO) that it can cover the detection transition area of the ground-based lidar. The geometric form factors in off-axial and coaxial modes are determined by the use of simultaneous lidar measurement data from the space-borne lidar and the ground-based lidar. The results are compared to the results of comprehensive Raman-Mie method and Su Jia's method. In the transition region of the geometric form factor, the average relative errors of the aerosol backscatter coefficient can be improved by 25.4% and 10.4% compared to those of Su Jia's method in off-axial and coaxial modes, respectively. This method overcomes the uncertainties caused by assumptive uniformity of the atmosphere in the horizontal measurement method of the elastic scattering lidar. It is more suitable for the widely-used elastic scattering lidar. The geometric form factor of the ground-based lidar can be routinely calibrated by use of the regular transit time of CALIPSO with stable features.

Key words remote sensing; lidar; geometric form factor; elastic scattering lidar; cloud aerosol lidar infrared pathfinder satellite observation

OCIS codes 280.3640; 280.1100; 280.1310

收稿日期: 2017-03-23; 收到修改稿日期: 2017-05-15

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61505009)

作者简介: 齐白玉(1993—),女,硕士研究生,主要从事激光雷达大气探测方面的研究。E-mail: qibaiyu_by@163.com

导师简介: 张寅超(1961—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光雷达大气探测方面的研究。

E-mail: ychang@bit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: csy@bit.edu.cn

1 引 言

激光雷达技术以其高时空分辨率的优势,日益成为研究气溶胶垂直结构和时空演变特征的重要工具。由于发射光束与接收视场不完全重合,激光雷达在探测盲区存在信号丢失、在过渡区存在信号不完全接收的问题,导致对过渡区的气溶胶光学参数反演结果不合理,但近地表气溶胶与人类活动最密切,因此激光雷达必须具备近地表气溶胶的有效探测能力。通过理论计算或实验测量得到激光雷达的几何因子,是获取该区域内气溶胶参数的有效手段之一。

在理论计算研究方面, Stelmaszczyk 等^[1]通过分析牛顿望远镜中像的简单模型,推导激光雷达的几何因子;狄慧鸽等^[2]基于数学推导和仿真,给出激光雷达重叠因子表达式,并分析了光束在均匀分布和高斯分布时激光雷达几何因子的变化;汪少林等^[3]引入可完全聚焦填充系数,从几何光学角度推导同轴与离轴激光雷达的几何因子;宋跃辉等^[4]通过分析激光束光轴与望远镜光轴夹角对同轴激光雷达几何因子的影响,提出同轴米氏散射激光雷达准直判据;王威等^[5]提出了基于激光强度分布的激光雷达几何因子计算方法。理论算法虽然可以计算激光雷达几何因子,并指导激光雷达光学系统的优化配置,但它依赖于在实际中很难获得的系统参数,包括激光能量分布、传输特性和光学系统性能等。

在实验测量研究方面,有学者提出了水平测量法、成像法^[6]、振动拉曼-米氏法^[7-10]、纯转动拉曼-米氏法^[11-12],以及星载与地基激光雷达联合测量(即 Su Jia 的方法)^[13]等。水平测量法需要激光雷达结构具备水平测量能力,并且需要假设水平方向上气溶胶均匀分布,因此在实际应用中具有一定的局限性;成像法对光学系统精确度要求较高且较为复杂;振动拉曼-米氏方法需要假设米氏散射信号接收通道和拉曼信号接收通道的几何因子一致,并且由于拉曼波长与米氏散射波长之间波长差距较大,需要假定气溶胶消光波长指数;纯转动拉曼-米氏方法虽然可以弥补波长指数差异的问题,但同样存在拉曼和米氏通道几何因子一致问题的假设,并且应用范围仅限在纯转动拉曼-米氏激光雷达上。Su Jia 的方法,需要利用星载数据反演近地表的消光系数,受制于星载信号在近地面信噪比较低、激光雷达比未知等因素的影响,星载激光雷达(CALIPSO)反演气溶胶消光系数存在一定的误差,致使几何因子反演结果也存在一定误差^[14]。

目前应用最广泛的单一功能米氏散射激光雷达,只能通过水平法确定其几何因子,限制了其针对边界层大气的探测能力。为了解决上述矛盾,本文根据 CALIPSO 可以完全接收近地表回波信号的特点,联合全接收的 CALIPSO 探测信号,以及同步观测的、受接收过渡区影响的地基激光雷达信号,提出反演几何因子的新方法。

2 基本原理

根据激光雷达方程,地基激光雷达与 CALIPSO 的距离校正后的回波信号 $X_g(r)$ 和 $X_s(r)$ 可以分别表示为

$$X_g(r) = c_1 g(r) \beta(r) \exp(-2\tau_{0r}), \quad (1)$$

$$X_s(r) = c_2 \beta(r) \exp[-2\eta(r)\tau_{rr_c}], \quad (2)$$

式中: r 为以地面为原点的垂直高度; c_1, c_2 分别为地基激光雷达和 CALIPSO 的系统常数; $g(r)$ 为地基激光雷达的几何因子,由于 CALIPSO 位于太阳同步极地轨道上,因此在低层大气中几何因子为常数,并包含在系统常数中; $\beta(r)$ 为高度 r 处的总后向散射系数,包括大气分子后向散射系数与气溶胶后向散射系数; $\eta(r)$ 为多次散射因子。为了减弱粒子多次散射对测量结果的影响,选择大气相对清洁、透过率高的状况测量,此时认为 $\eta(r) = 1$; τ_{0r} 为从地面至测量高度 r 处的光学厚度; τ_{rr_c} 为从测量高度 r 至 CALIPSO 校准高度 r_c 处的光学厚度,其表达式为

$$\tau_{0r} = \int_0^r \alpha(r) dr, \quad (3)$$

$$\tau_{rr_c} = \int_r^{r_c} \alpha(r) dr, \quad (4)$$

式中 $\alpha(r)$ 为高度 r 处的总消光系数。

若不校准地基激光雷达几何因子,则地基激光雷达几何因子影响区域内的距离修正信号可写为

$$X_g(r) = c_3 \beta'(r) \exp(-2\tau'_{0r}), \quad (5)$$

式中 c_3 为地基激光雷达系统不校准几何因子时的系统常数; $\beta'(r)$ 为不校准几何因子得到的总后向散射系数; τ'_{0r} 为从地面至测量高度 r 处对应的光学厚度。由(1)式和(5)式可以得到校正几何因子前后, 后向散射系数 $\beta'(r)$ 与 $\beta(r)$ 之间的关系为

$$c\beta(r)g(r) = \frac{\beta'(r)\exp(-2\tau'_{0r})}{\exp(-2\tau_{0r})}. \quad (6)$$

对于 CALIPSO, 其探测方向与地基激光雷达相反, 距离修正信号 $X_s(r)$ 可由 CALIPSO 数据产品 Level-1B 中获得, 它是经过校准和距离修正后的衰减后向散射回波信号。将(1)式和(2)式相乘, 星载与地基距离修正信号乘积可表示为

$$X_s(r)X_g(r) = c_1c_2g(r)\beta^2(r)\exp[-2(\tau_{0r} + \tau_{rr_c})], \quad (7)$$

式中 $\tau_{0r} + \tau_{rr_c}$ 表示地面至 CALIPSO 校准高度的光学厚度, 为常数。设常数 $c_4 = \exp[-2(\tau_{0r} + \tau_{rr_c})]$, (7)式化简为

$$X_s(r)X_g(r) = c_1c_2c_4g(r)\beta^2(r). \quad (8)$$

由(8)式可以看出, 地基激光雷达几何因子 $g(r)$ 可由星载与地基距离修正回波信号表示, 但实际上无法得到几何因子校准后的后向散射系数 $\beta(r)$ 。将(8)式中地基距离修正信号 $X_g(r)$ 由不校准几何因子计算的后向散射系数 $\beta'(r)$ 表示, 同时两边乘以 $g(r)$, 可以得到

$$g(r)X_s(r)X_g(r) = g(r)c_3\beta'(r)\exp(-2\tau'_{0r})c_2\beta(r)\exp(-2\tau_{rr_c}). \quad (9)$$

根据(6)式中 $\beta(r)$ 与 $\beta'(r)$ 、 τ_{0r} 与 τ'_{0r} 之间的关系将(9)式中几何因子转化为由未校正几何因子的后向散射系数 $\beta'(r)$ 表示的形式, 即

$$g(r) = \frac{c_2c_3c_4\beta'^2(r)}{cX_s(r)X_g(r)} \cdot \frac{\exp(-4\tau'_{0r})}{\exp(-4\tau_{0r})}, \quad (10)$$

式中 $g(r)$ 为联合星载与地基激光雷达反演的最终几何因子。但其中 $\exp(-4\tau_{0r})$ 为未知数, 因此首先假设(10)式中后半部的比值为常数, 即

$$\exp(-4\tau'_{0r}) = c_5 \cdot \exp(-4\tau_{0r}), \quad (11)$$

则几何因子可以近似表示为

$$g'(r) = \frac{k\beta'^2(r)}{X_s(r)X_g(r)}, \quad (12)$$

式中 $g'(r)$ 为近似几何因子, 可以在几何因子为 1 处选择干净大气, 由大气分子后向散射系数得到; k 为常数; $\beta'(r)$ 由地基弹性散射回波信号通过 Fernald 法确定。根据(12)式确定近似几何因子 $g'(r)$ 后, 先校正地基激光雷达距离修正信号得到经 $g'(r)$ 校正后的后向散射系数 $\beta(r)$, 计算从地面至探测高度处的透过率 $\exp(-2\tau_{0r})$, 再代入(10)式确定最终几何因子 $g(r)$ 。

3 实验结果与分析

3.1 星载与地基激光雷达系统

CALIPSO 有效载荷共包含 3 部分, 周期为 16 d, 其中正交极化云-气溶胶激光雷达 (CALIOP) 包含 1064 nm 和具有偏振探测能力的 532 nm 通道, 能提供气溶胶、云后向散射及退偏比的垂直剖面信息等。地基激光雷达 (BIT-Lidar, 北京理工大学激光雷达) 位于北京市海淀区北京理工大学 (39.9° N, 116.3° E), 是一台纯转动拉曼-米氏散射激光雷达, 包含 532 nm 弹性米氏散射通道和两个高低阶纯转动拉曼通道 (正斯托克斯 533.7 nm、535.1 nm, 反斯托克斯 530.3 nm、529.0 nm), 并可根据探测要求, 在同轴与离轴两种接收模式之间进行切换, CALIOP 与 BIT-Lidar 系统均采用 Nd:YAG 激光器, 其他相关参数如表 1 所示。

3.2 结果验证与数据分析

CALIPSO 每月经过 BIT-Lidar 所在地附近 4 次。为了验证本方法反演几何因子的可行性与准确性, 分别在 BIT-Lidar 离轴与同轴两种情况下, 利用 BIT-Lidar 实际弹性散射回波信号与 CALIPSO 的 532 nm 距离修正信号, 反演地基激光雷达几何因子。同时, 与 Su Jia 的方法反演出的几何因子作对比。另外, 纯转动

拉曼-米氏方法由于不受振动拉曼-米氏方法中波长指数假设的制约,反演激光雷达几何因子较为成熟,可靠性较高。因此,由 BIT-Lidar 中的米氏信号与纯转动拉曼信号,根据纯转动拉曼-米氏方法^[12] 确定系统几何因子,并与本方法反演结果进行比对。

表 1 CALIOP 和 BIT-Lidar 的主要系统参数

Table 1 Main instrument parameters of CALIOP and BIT-Lidar

Characteristic	CALIOP value	BIT-Lidar value
Wavelength /nm	532, 1064	532
Pulse energy /mJ	110	150
Repetition frequency /Hz	20.25	20
Telescope diameter /m	1	0.4
Vertical resolution /m	30-60	2.5 (Mie channel) 30 (Raman channel)
Horizontal resolution /m	333	

图 1 为 2016 年 8 月 25 日晚 CALIPSO(黑线)与 BIT-Lidar(点线)的相对距离修正信号,当晚 BIT-Lidar 为离轴模式。为了提高星载数据信噪比,在数据处理过程中将 200 条回波廓线累加平均,同时对星载与地基回波信号进行插值使垂直分辨率统一为 15 m,对地基信号进行背景去噪处理。为了验证当晚地基与 CALIPSO 探测的气溶胶空间分布较为均一,将 BIT-Lidar 回波信号构造成与 CALIPSO 探测方向相同的距离修正信号廓线,并与 CALIPSO 的距离修正信号廓线进行直接对比。图 1 中的虚线为用 BIT-Lidar 回波信号构造的与 CALIPSO 探测方向相同的距离修正信号^[15],可以看出转化后的地基信号与星载信号整体结构趋于一致,且总回波信号与构造的大气分子回波信号(红线)比较接近。这表明当天对流层中的高层无云层和明显的气溶胶层,气溶胶浓度相对较低。但在 1.5 km 以下,星载信号反映出近地面存在气溶胶边界层结构,而地基回波信号由于受到几何因子的限制,随着高度的降低,强度急剧衰减,二者在近地面偏差较大。

在反演几何因子时,根据(12)式,利用地基弹性散射回波信号,由 Fernald 法反演后向散射系数,但由于气溶胶雷达比垂直廓线是未知的,需要假设当天的激光雷达比 S_a ,这将使几何因子的反演结果产生一定的不确定性。图 2 是利用 8 月 25 日星载与地基回波信号,通过假设不同的激光雷达比,得到的几何因子反演结果。可见,激光雷达比对几何因子的影响在过渡区比较明显,且不正确的激光雷达比会使几何因子在充满区出现单调递减或递增等不合理情况。为了解决这个问题,根据 Tao 等^[16]的方法,结合星载与地基弹性散射回波信号,确定当天最佳的激光雷达比。但近地面信号因未经几何因子校正,且考虑到地基激光雷达在对流层高层的信噪比会下降,在计算不同雷达比下的气溶胶后向散射系数与参考气溶胶后向散射系数廓线差值的平方和时,最低高度应选择在几何因子充满区以上,本文选择计算高度为 3~9 km,最终确定当天最佳雷达比为 61 sr。

图 3 中点线为计算的近似几何因子 $g'(r)$,实线为计算的最终几何因子 $g(r)$ 。二者在 1.8 km 以上基本

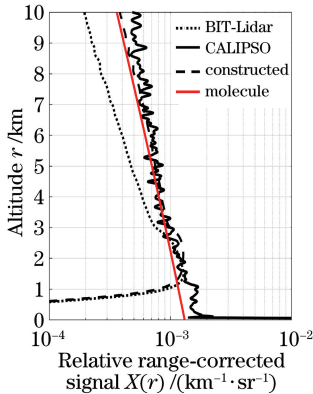


图 1 2016 年 8 月 25 日晚相对距离修正信号
Fig. 1 Relative range-corrected signals
on the evening of August 25, 2016

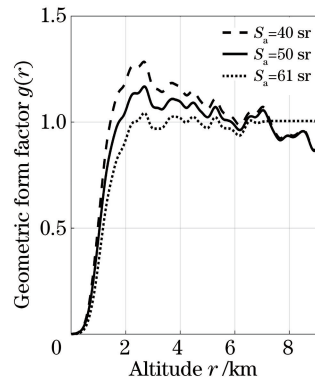


图 2 不同激光雷达比反演的几何因子廓线
Fig. 2 Geometric form factor profiles retrieved
by different lidar ratios

重合,该区域几何因子修正前后透过率的比值近似为常数。1.8 km 以下透过率修正前后的几何因子之间只存在微小的改变,表明透过率的修正对几何因子的结果影响较小。由激光雷达方程可以看出,几何因子主要作用在后向散射系数上,透过率是对后向散射系数取负指数值,所以削弱了透射率对几何因子的影响。本文方法反演的离轴几何因子到达充满区后,在 1 附近有微小波动,这可能是由星载与地基信号的信噪比不一致造成的^[17-18]。

图 4 中实线为联合 CALIPSO 与 BIT-Lidar 反演的离轴模式几何因子廓线,其中将达到充满区以后的几何因子设为常数 1,点线为利用纯转动拉曼-米氏法确定的几何因子,两者基本吻合,Su Jia 方法反演的几何因子(虚线)达到充满区距离较低。可以看出,BIT-Lidar 离轴系统在 0.6 km 以下的几何因子几乎为 0,对应几何因子的盲区,在 0.6~2.3 km 之间的几何因子急剧增大,在 2.3 km 附近达到 1,以上则为充满区。

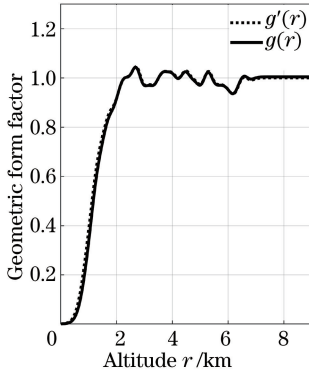


图 3 近似几何因子 $g'(r)$ 与最终几何因子 $g(r)$

Fig. 3 Approximate geometric form factor profile $g'(r)$ and final geometric form factor profile $g(r)$

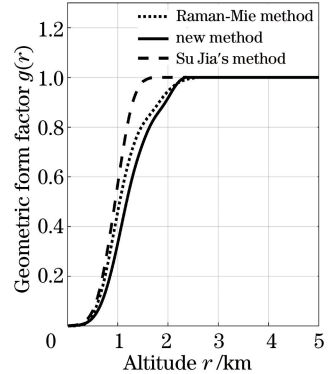


图 4 三种方法反演的离轴几何因子

Fig. 4 Off-axis geometric form factor profiles retrieved by three different methods

图 5 为 2017 年 2 月 17 日晚 CALIPSO(黑线)、BIT-Lidar(点线)的相对距离修正信号与转化后的地基距离修正信号(虚线),当晚 BIT-Lidar 为同轴模式。图 6 中实线表示的是根据本文方法反演的 BIT-Lidar 同轴几何因子廓线,当天选择的激光雷达比是 55 sr,可以看出同轴几何因子在 1.0 km 附近变为常数。相比于离轴系统,同轴系统盲区范围小,过渡区小,有利于近地面回波信号的接收。充满区最低高度与拉曼-米氏方法反演的几何因子相比约低 0.17 km,Su Jia 的方法比拉曼-米氏方法约低 0.46 km。

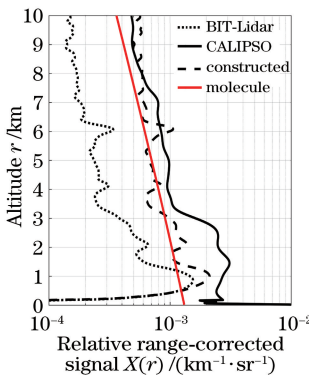


图 5 2017 年 2 月 17 日晚相对距离修正信号

Fig. 5 Relative range-corrected signals on the evening of February 17, 2017

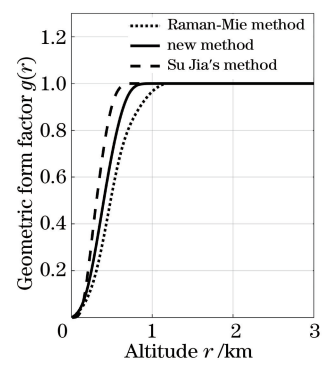


图 6 三种方法反演的同轴几何因子

Fig. 6 Coaxial geometric form factor profiles retrieved by three different methods

运用本文方法确定的激光雷达几何因子,分别校正当天的地基激光雷达回波信号,反演气溶胶后向散射系数。图 7 给出了 2016 年 8 月 25 日晚大气分子后向散射系数(红线),几何因子校准前气溶胶后向散射系数(蓝线),本文方法(黑线)、拉曼-米氏方法(点线)与 Su Jia 的方法(虚线)反演的离轴几何因子校准后的气溶胶后向散射系数。结果表明,本文方法校准后的气溶胶后向散射系数在近地面相比于校准前有所提高,可以反演出更低区域的气溶胶后向散射系数。离轴模式时,0.6 km 以下为探测盲区。0.6~1.0 km 区域内,3

种方法反演的几何因子对气溶胶后向散射系数的校正均不完全。1 km 以上至充满区高度范围内,本文方法与拉曼-米氏方法校正的气溶胶后向散射系数之间平均相对误差为 20.8%,与 Su Jia 方法相比,在几何因子过渡区范围内,平均相对误差提高了 25.4%。

图 8 为 2017 年 2 月 17 日晚几何因子校正激光雷达回波信号前、后反演的气溶胶后向散射系数。可以看出,本文方法与 Su Jia 的方法校正的气溶胶后向散射系数较拉曼-米氏方法的结果均整体偏小,探测盲区高度降低至 0.18 km,本文方法与拉曼-米氏方法校正不完全范围为 0.18~0.25 km。0.25 km 至充满区范围内,本文方法与拉曼-米氏方法的平均相对误差为 18.6%,与 Su Jia 方法相比,提高了 10.4%。

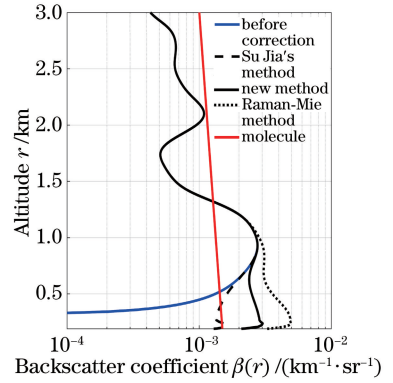
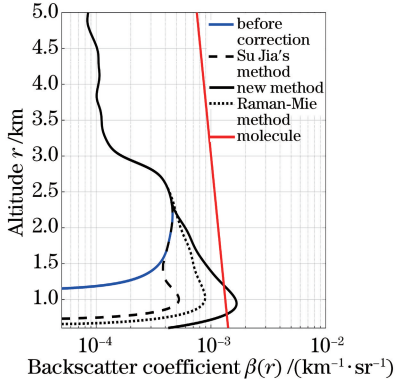


图 7 2016 年 8 月 25 日晚几何因子校准前、后气溶胶后向散射系数

图 8 2017 年 2 月 17 日晚几何因子校准前、后气溶胶后向散射系数

Fig. 7 Aerosol backscatter coefficient of geometric form factor before and after correction on the evening of August 25, 2016

Fig. 8 Aerosol backscatter coefficient of geometric form factor before and after correction on the evening of February 17, 2017

4 结 论

通过联合 CALIPSO 532 nm 与地基 532 nm 弹性散射回波信号,可以反演地基激光雷达几何因子。实验结果表明,本方法反演的同轴和离轴几何因子与纯转动拉曼-米氏法的结果吻合,证明了本文所提方法的可行性,且与 Su Jia 的方法相比,精度有所提高。在离轴模式下,平均相对误差提高了 25.4%;在同轴模式下,平均相对误差提高了 10.4%。

该方法具备如下优点:与米氏散射激光雷达水平方法获取几何因子相比,避免了几何因子水平测量法涉及的大气水平均匀假设的不利因素;与 Su Jia 提出的基于星地同步观测方法相比,减小了利用星载数据反演几何因子过渡区内透过率时引入的误差,提高了反演几何因子的精度;与振动拉曼-米氏方法相比,不需要假设气溶胶消光波长指数;与转动拉曼-米氏方法相比,避免了拉曼和米氏通道几何因子一致问题的假设,且适用于应用范围最广泛的米氏散射激光雷达。

相比于其他方法,这种新的方法可以应用于只含有 532 nm 弹性散射通道的激光雷达反演几何因子,并利用卫星过境时间规律的特点,对系统进行常规标定,为激光雷达近距离数据的精确反演提供了一种可供参考的方法。

参 考 文 献

[1] Stelmaszczyk K, Dell'Aglio M, Chudzynski S, *et al.* Analytical function for lidar geometrical compression form-factor calculations[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(7): 1323-1331.

[2] Di Huige, Hua Dengxin, Wang Yufeng, *et al.* Investigation on the correction of the Mie scattering lidar's overlapping factor and echo signals over the total detection range[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(9): 094215.
狄慧鸽, 华灯鑫, 王玉峰, 等. 米散射激光雷达重叠因子及全程回波信号标定技术研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(9): 094215.

[3] Wang Shaolin, Cao Kaifa, Hu Shunxing, *et al.* Analysis and determination of lidar geometrical factor[J]. *Laser*

- Technology, 2008, 32(2): 147-150.
- 汪少林, 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.
- [4] Song Yuehui, Lu Leilei, Hua Dengxin, *et al.* Design of auto collimation system for coaxial Mie lidar[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(7): 0710001.
宋跃辉, 鲁雷雷, 华灯鑫, 等. 同轴米散射激光雷达自准直系统设计[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0710001.
- [5] Wang Wei, Mao Feiyue, Gong Wei, *et al.* Overlap factor calculation method based on laser intensity distribution and its sensitivity analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0228005.
王 威, 毛飞跃, 龚 威, 等. 基于激光强度分布的激光雷达重叠因子计算及其敏感性分析[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0228005.
- [6] Hey J V, Coupland J, Foo M H, *et al.* Determination of overlap in lidar systems[J]. Applied Optics, 2011, 50(30): 5791-5797.
- [7] Wandinger U, Ansmann A. Experimental determination of the lidar overlap profile with Raman lidar[J]. Applied Optics, 2001, 41(3): 511-514.
- [8] Hu S X, Wang X B, Wu Y H, *et al.* Geometrical form factor determination with Raman backscattering signals[J]. Optics Letters, 2005, 30(14): 1879-1881.
- [9] Zhao Peitao, Li Wei, Zhang Yinchao, *et al.* Determination of lidar geometric form factor with vibration Raman scattering signals[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 1938-1944.
赵培涛, 李 伟, 张寅超, 等. 振动拉曼散射信号反演激光雷达几何因子分析[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 1938-1944.
- [10] Yan Shunsheng, Li Haihua. Determination of geometrical form factor of a lidar by means of Raman-Mie method[J]. Laser Technology, 2013, 37(4): 511-514.
闫顺生, 李海花. 利用喇曼-米方法确定激光雷达几何因子[J]. 激光技术, 2013, 37(4): 511-514.
- [11] Cao Kaifa, Du Xiaoyong, Wang Shaolin, *et al.* Determination of lidar geometric form factor with pure rotational Raman scattering signal[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(8): 1349-1354.
曹开法, 杜小勇, 汪少林, 等. 纯转动拉曼法确定激光雷达几何因子[J]. 光学学报, 2007, 27(8): 1349-1354.
- [12] Chen H, Chen S Y, Zhang Y C, *et al.* Experimental determination of Raman lidar geometric form factor combining Raman and elastic return[J]. Optics Communications, 2014, 332: 296-300.
- [13] Su J, McCormick M P, Liu Z Y, *et al.* Obtaining a ground-based lidar geometric form factor using coincident spaceborne lidar measurements[J]. Applied Optics, 2010, 49(1): 108-113.
- [14] Mao F Y, Gong W, Ma Y Y. Retrieving the aerosol lidar ratio profile by combining ground- and space-based elastic lidars[J]. Optics Letters, 2012, 37(4): 617-619.
- [15] Wu D, Wang Z, Wang B, *et al.* CALIPSO validation using ground-based lidar in Hefei (31.9°N, 117.2°E), China[J]. Applied Physics B, 2011, 102: 185-195.
- [16] Tao Z M, Liu Z Y, Wu D, *et al.* Determination of aerosol extinction-to-backscatter ratios from simultaneous ground-based and spaceborne lidar measurements[J]. Optics Letters, 2008, 33(24): 2986-2988.
- [17] Wang X, Frontoso M G, Pisani G, *et al.* Retrieval of atmospheric particles optical properties by combining ground-based and spaceborne lidar elastic scattering profiles[J]. Optics Express, 2007, 15(11): 6734-6743.
- [18] Cuesta J, Flamant P H. Lidar beams in opposite directions for quality assessment of cloud-aerosol lidar with orthogonal polarization spaceborne measurements[J]. Applied Optics, 2010, 49(12): 2232-2243.