

基于气溶胶光学参数的拉曼激光雷达重叠因子校正方法

王欣红, 狄慧鸽^{*}, 王娅娅, 尹珍珍, 袁云, 杨涛, 闫庆, 李仕春, 辛文辉, 华灯鑫^{**}

西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 提出了一种稳定的拉曼激光雷达重叠因子计算和校正算法,适用于含有拉曼散射通道的激光雷达系统的重叠因子校正。此算法基于大气气溶胶光学参数的拉曼反演算法,通过分析消光系数和后向散射系数的反演特点,发现后向散射系数在过渡区中不受重叠因子的影响。用后向散射系数和激光雷达比的乘积对消光系数缺失信号进行初步校正,进而正演出初步校正后的拉曼散射回波信号,将实际拉曼散射回波信号与正演的拉曼散射回波信号相除即可得到重叠因子廓线。对回波信号和气溶胶光学参数进行了过渡区信号校正和盲区信号补充。分别用单组和连续的激光雷达实验观测数据进行了重叠因子的计算和校正,并与能见度仪观测的近地面数据进行了对比,呈现良好的一致性。结果表明,此算法对重叠因子计算较为稳定。

关键词 大气光学; 激光雷达; 拉曼散射; 重叠因子; 校正

中图分类号 O439 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS221295

1 引言

激光雷达技术是主动遥感技术中的一种,凭借高时空分辨率和高探测灵敏度等优点,已被广泛应用于大气探测领域^[1-3]。激光雷达利用望远镜接收激光与大气散射产生的回波信号实现大气参量的反演,激光发射系统和望远镜接收系统之间的视场匹配程度是影响底层探测性能的关键因素^[4]。重叠因子是由激光发射光束和接收视场不完全重叠产生的,其大小影响到探测盲区的大小,失配情况下还可能会导致望远镜无法接收到回波信号。拉曼激光雷达被认为是一种精度较高的大气气溶胶探测手段,可获得独立反演的气溶胶消光系数、后向散射系数和激光雷达比廓线^[5]。然而,由于系统重叠因子的影响,近地面的回波信号失真,因此需要计算出重叠因子并对近地面信号进行校正。

国内外有很多学者提出了确定重叠因子的方法。一些学者从重叠因子的产生原因出发,通过分析系统的几何结构来计算重叠因子,称为理论计算法。Sassen等^[6]提出了一种简单的算法,用于计算能量分布为高斯函数的激光脉冲的重叠因子。Kuze等^[7]研究了激光雷达回波信号与望远镜孔径大小的关系,并给出了牛顿望远镜与卡塞格林望远镜的模拟和观测结

果。狄慧鸽等^[8]用几何方法分析了激光束能量分布为均匀分布和高斯分布时的重叠因子,对过渡区和盲区的信号分别用定义法和斜率一致法进行了校正,并且校正了Klett公式。王威等^[9]基于激光束的强度分布计算了激光雷达重叠因子,并进行了参数敏感性分析。以上重叠因子的理论计算方法最大的限制条件是需要提前获知激光雷达系统的参数,如激光强度分布、激光束发散角、激光束指向、光学系统的性能和光轴适配度等^[10],但某些参数(如激光束的发散角、发射系统与接收系统之间的夹角)在实际系统中很难精确获取^[11-12],这就影响到了重叠因子的计算和校正结果。

利用激光雷达实测数据也可以获取重叠因子廓线,这种方法不需要提前获取激光雷达系统的参数,更为实用。Sasano等^[13]通过假设边界层内气溶胶在统计上是分布均匀的,提出了一种重叠因子的实验探测方法。Dho等^[14]对近场大气探测信号进行了多项式外推,计算出了非均匀大气条件下的重叠因子,这种方法最大的误差来源是激光雷达比的假设。Wandering等^[15]提出了重叠因子的迭代算法,利用拉曼信号和米散射信号分别计算了气溶胶后向散射系数,通过不断迭代减小二者的偏差来得到重叠因子廓线,这种算法复杂,且需要假设波长指数,这会引入一定的误差。Li等^[16]在迭代法的基础上添加了几何约束条件,将重叠

收稿日期: 2022-06-10; 修回日期: 2022-06-30; 录用日期: 2022-08-01; 网络首发日期: 2022-08-11

基金项目: 国家自然科学基金(61875163, 42130612, 41627807)

通信作者: *dihui@xaut.edu.cn; **dengxinhua@xaut.edu.cn

区域的重叠因子为 1 作为迭代的终止条件,这种方法不需要预先给定激光雷达比。Wang 等^[12]提出了物理约束条件,将 Fernald 法与 Raman 法反演的气溶胶后向散射系数之差最小作为迭代终止条件,以获得重叠因子廓线和最佳的激光雷达比。在以上重叠因子的实验探测方法中,误差的主要来源是后向散射系数算法的不稳定性、对大气条件的假定和对气溶胶类型的不准确估计。迭代算法对回波信号的质量和反演精度要求非常高,特别对米散射信号反演算法(Klett 法、Fernald 法)中边界点或激光雷达比的选取非常敏感。理想情况是在完全重叠区域中,用拉曼信号和米散射信号反演的后向散射系数完全重合,但这在实际数据处理中是很难实现的^[17]。

激光雷达的盲区区和过渡区主要是由系统硬件结构和光束条件等因素造成的,其中重叠区高度一般可达几百米甚至上千米,而此范围是人类生产和活动的主要范围,故对近地面的气溶胶光学参数进行观测对于大气环境、空气质量和大气能见度的监测具有重要意义^[18]。因此,有必要寻求一种更为稳定的重叠因子计算方法,从而实现近地面信号的校正和补充。本文提出了一种稳健的拉曼激光雷达重叠因子获取和校正方法。根据拉曼激光雷达气溶胶消光系数和后向散射系数反演算法的特点,将后向散射系数作为参考信号对消光系数进行校正并正演拉曼散射回波信号,通过将正演拉曼信号与实测拉曼信号比对来得到重叠因子廓线。使用拉曼激光雷达大气观测实验数据对全程探测信号进行了重叠因子计算和校正,并与能见度仪观测的地面气溶胶消光系数进行了对比分析。

2 重叠因子校正原理与方法

2.1 重叠因子定义

大气探测激光雷达由激光发射系统、望远镜接收系统、光学分光系统、光电转换系统和信号处理系统组成^[19]。重叠因子的产生原因是系统的发射光束与接收视场不完全重合,导致近地面部分处望远镜接收的回波信号小于实际大气回波信号。

图 1 所示为重叠因子示意图。重叠因子的定义

为:在一定距离处,望远镜接收视场所能覆盖的后向散射光束能量与该距离处发射激光光束的总能量之比。重叠因子的理想值为 1,表示后向散射激光光斑能完全进入接收视场。然而,实际情况为:在近地面探测盲区中,重叠因子为 0,探测器完全接收不到回波信号;在过渡区中,重叠因子小于 1,且其随着高度的增加逐渐增大;在完全重叠区中,激光束完全进入望远镜视场,重叠因子为 1。因此,在近地面的盲区和过渡区中,探测器所能接收到的后向散射信号失真。然而,此范围是人类生产和活动的主要范围,是大气研究必须关注的区域,故需要通过一定的技术获取重叠因子廓线并校正激光雷达回波信号。

图 1 中给出了几个代表性高度的光束匹配情况,从下至上分别为盲区、盲区与过渡区的分界点、过渡区、过渡区与重叠区的分界点和重叠区。为了方便起见,下文中称盲区与过渡区的分界点为盲区高度,过渡区与重叠区的分界点为重叠区高度。

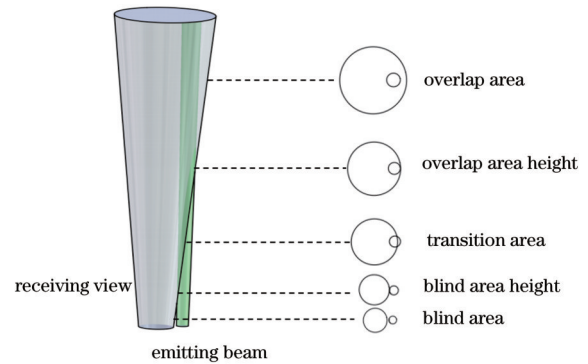


图 1 重叠因子示意图

Fig. 1 Schematic diagram of overlap factor

2.2 拉曼激光雷达气溶胶光学参数反演算法

拉曼-米散射激光雷达的探测原理是基于氮气分子的拉曼散射效应,利用望远镜接收发射激光与大气中的粒子相互作用后的振动拉曼散射信号,实现气溶胶垂直分布信息的高时空分辨率探测。利用拉曼-米散射激光雷达的两路回波信号进行大气气溶胶光学参数的反演,米散射通道和拉曼散射通道的激光雷达方程^[20]可以分别表示为

$$P_1(r) = \frac{C_1 O_1(r)}{r^2} [\beta_a(r, \lambda_0) + \beta_m(r, \lambda_0)] \times \exp \left\{ -2 \int_0^r [\alpha_a(r', \lambda_0) + \alpha_m(r', \lambda_0)] dr' \right\}, \quad (1)$$

$$P_2(r) = \frac{C_2 O_2(r)}{r^2} N_R(r) \frac{d\sigma_R(\pi)}{d\Omega} \times \exp \left\{ - \int_0^r [\alpha_a(r', \lambda_0) + \alpha_m(r', \lambda_0) + \alpha_a(r', \lambda_R) + \alpha_m(r', \lambda_R)] dr' \right\}, \quad (2)$$

式中: $P_1(r)$ 和 $P_2(r)$ 分别表示探测距离 r 处的米散射通道回波信号和拉曼散射通道回波信号; $O_1(r)$ 和 $O_2(r)$ 分别表示两个通道的重叠因子; C_1 和 C_2 表示两个通道各自的系统常数,包含激光发射功率、望远镜接收面积、滤光片的光学透过率和分色片的光学透过率等参

数; $\beta_a(r, \lambda_0)$ 和 $\beta_m(r, \lambda_0)$ 分别表示对应于发射波长 λ_0 的气溶胶后向散射系数和大气分子后向散射系数; $N_R(r)$ 表示氮气分子数浓度; $d\sigma_R(\pi)/d\Omega$ 表示氮气分子差分拉曼散射截面,其中 Ω 为立体角; $\alpha_a(r, \lambda_0)$ 和 $\alpha_m(r, \lambda_0)$ 分别表示对应于发射波长 λ_0 的气溶胶消光系数和大气

分子消光系数; $\alpha_a(r, \lambda_R)$ 和 $\alpha_m(r, \lambda_R)$ 分别表示对应于拉曼散射波长 λ_R 的气溶胶消光系数和大气分子消光系数。

利用气溶胶光学参数的拉曼反演方法反演消光系数和后向散射系数, 其中消光系数只用到了氮气拉曼散射回波信号 $P_2(r)$ 。气溶胶消光系数^[21]可以表示为

$$\alpha_a(r, \lambda_0) = \frac{\frac{d}{dr} \left[\ln \frac{N_R(r)}{r^2 P_2(r)} \right] - \alpha_m(r, \lambda_0) - \alpha_m(r, \lambda_R)}{1 + \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_R} \right)^k}, \quad (3)$$

式中: $r^2 P_2(r)$ 表示拉曼散射距离平方校正信号 (RSCS), 记为 $R_2(r)$; k 表示 Ångström 指数, 一般的取值范围为 0~2。

气溶胶的后向散射系数反演需要用到米散射信号和拉曼散射信号, 通常根据 Whiteman^[21-22]提出的方法, 用晴天高空的数据进行系统标定, 再用于后向散射系数的反演, 下面给出标定方法。气溶胶的后向散射比 $R_a(r, \lambda_0)$ 用于量化总的米散射与分子散射的比值, 其定义为分子加气溶胶散射与纯分子散射的体积后向散射系数之比, 可表示为

$$R_a(r, \lambda_0) = 1 + \frac{\beta_a(r, \lambda_0)}{\beta_m(r, \lambda_0)}, \quad (4)$$

Whiteman 提出的求解后向散射比的公式为

$$R_a(r, \lambda_0) = C \frac{P_1(r)}{P_2(r)}, \quad (5)$$

式中: C 为系统常数, 包括滤光片和分色片的光学透过率等参数。Whiteman 认为在晴朗无云的天气条件下, 高空 7~10 km 之间的气溶胶非常少, 355 nm 通道的气溶胶后向散射比近似为 1, 532 nm 的后向散射比近似为 1.01, 以此来标定系统常数 C ^[21-22]。大气气溶胶后向散射系数的公式为

$$\beta_a(r, \lambda_0) = \beta_m(r, \lambda_0) \left[C \frac{P_1(r)/O_1(r)}{P_2(r)/O_2(r)} - 1 \right]. \quad (6)$$

米散射回波信号和拉曼散射回波信号经重叠因子校正后分别可以表示为 $P_1(r)/O_1(r)$ 和 $P_2(r)/O_2(r)$ 。通常这两个通道的重叠因子相等^[12], 即 $O_1(r) = O_2(r) = O(r)$, 这是因为大多数激光雷达系统都经过精密装调, 重叠因子仅与两个通道共用的激光束和望远镜有关^[15]。因此, 式(6)可以写成

$$\beta_a(r, \lambda_0) = \beta_m(r, \lambda_0) \left[C \frac{P_1(r)}{P_2(r)} - 1 \right]. \quad (7)$$

由式(7)可以看出, 由于使用了具有相同重叠因子

的两个回波信号的比值, 故拉曼后向散射系数在近场内提供了可靠的结果^[15], 这一特征是重叠因子迭代算法和所提校正算法的理论基础。由于盲区接收不到有效信号, 即使有信号也是假信号, 因此盲区内的信号需要单独处理^[8]。然而, 气溶胶的消光系数不具有这一特征。所提重叠因子计算方法基于以上气溶胶光学参数的拉曼反演方法, 利用反演算法的特点, 实现对过渡区信号的校正和盲区内信号的补充。

2.3 重叠因子获取和校正算法

消光系数和后向散射系数之比即为激光雷达比, 若能获取过渡区内的激光雷达比就可以用后向散射系数来校正消光系数, 进而得到经过校正的拉曼散射回波信号和重叠因子廓线。拉曼-米激光雷达可以得到重叠区内垂直高度上的激光雷达比廓线。由于过渡区内缺失消光系数和激光雷达比的廓线信息, 因此参照 Fernald 反演算法中认为激光雷达比恒定的假设, 将重叠区高度处的激光雷达比作为过渡区的激光雷达比, 以实现消光系数的补充和重叠因子的获取。

对于盲区, 激光雷达完全无法接收到有效信号, 即使有回波信号, 也是近场干扰假信号, 此时不能用过渡区的方法来进行校正。狄慧鸽等^[8]证明了标准大气模型的光学参数和 RSCS 随探测距离呈线性分布, 并提出将斜率一致法用于盲区信号的补充。在对过渡区进行初步校正后, 较短的探测盲区内可认为回波信号和气溶胶的光学参数呈线性分布, 从而对盲区信号进行估算。

重叠因子校正算法的主要步骤如下。

1) 气溶胶光学参数反演和重叠区高度初值 r_{b0} 的确定

使用米散射回波信号和拉曼散射回波信号按照前述算法分别反演气溶胶消光系数、后向散射系数和激光雷达比廓线。根据消光系数与后向散射系数变化趋势的差异和激光雷达比廓线来初步判断重叠区高度, 记为 r_{b0} 。这一判断方法将在 3.2 节用实测数据进行详细说明。

2) 过渡区消光系数初步校正

用 r_{b0} 以下的后向散射系数与 r_{b0} 处的激光雷达比相乘作为 r_{b0} 以下初步校正之后的消光系数廓线, 即

$$\alpha_a^c(r, \lambda_0) = S_a(r_{b0}) \beta_a(r, \lambda_0), \quad r \leq r_{b0}, \quad (8)$$

式中: $S_a(r_{b0})$ 表示重叠区高度初值 r_{b0} 处的激光雷达比。

3) 过渡区拉曼散射 RSCS 初步校正

在式(3)中, 拉曼散射 RSCS 经过求导和其他运算后可得到气溶胶的消光系数。反之, 对消光系数进行积分可正演出拉曼散射 RSCS 信号, 即

$$R_2(r) = \frac{N_R(r)}{C_0 \exp \left\{ \int_0^r \left[\alpha_a(r', \lambda_0) \left(1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_R} \right)^k + \alpha_m(r', \lambda_0) + \alpha_m(r', \lambda_R) \right] dr' \right\}}, \quad (9)$$

式中: C_0 表示积分常数。将步骤 2) 中经初步校正后的消光系数 $\alpha_a^c(r, \lambda_0)$ 代入式 (9) 中正演出初步校正后的拉曼散射 RSCS $R_2^c(r)$ 。积分常数 C_0 用于调整信号的幅值, 使之与实验探测的回波信号幅值匹配。

4) 重叠因子廓线获取

实际探测的拉曼散射回波信号与经初步校正后拉曼散射回波信号的差异包含重叠因子信息。二者之比即为重叠因子廓线, 可表示为

$$O(r) = \frac{R_2(r)}{R_2^c(r)} \quad (10)$$

5) 盲区高度和重叠区高度确定

重叠因子满足 $O(r) = 0$ 的区域为探测盲区, $0 < O(r) < 1$ 的区域为过渡区。然而, 在实际实验中, 由于盲区内存在近场光, 故使用上述方法计算出的重叠因子始终不为 0。解决方法是设置一个接近于 0 的阈值 δ , 小于该阈值的范围即认为是探测盲区, 则可以由 $O(r)$ 廓线中由小于 δ 变为大于 δ 的高度得到盲区高度 r_a , 由小于 1 变为等于 1 的高度得到重叠区高度 r_b 。

6) 过渡区信号校正

对于 $r_a < r < r_b$ 的过渡区, 分别校正光学参数和回波信号。其中, 后向散射系数不需要进行过渡区校正, 消光系数的校正方法与式 (8) 类似, 区别在于将重叠区高度初值 r_{b0} 改成步骤 5) 的计算结果 r_b , 可表示为

$$\alpha_a^c(r, \lambda_0) = S_a(r_b) \beta_a(r, \lambda_0), r_a < r \leq r_b \quad (11)$$

过渡区内的回波信号使用重叠因子的定义进行校正, 表示为

$$\begin{cases} R_1^c(r) = \frac{R_1(r)}{O(r)}, r_a < r \leq r_b \\ R_2^c(r) = \frac{R_2(r)}{O(r)}, r_a < r \leq r_b \end{cases}, \quad (12)$$

式中: $R_1^c(r)$ 和 $R_2^c(r)$ 分别表示过渡区校正后的米散射 RSCS 和拉曼散射 RSCS; $R_1(r)$ 和 $R_2(r)$ 分别表示实验探测的米散射 RSCS 和拉曼散射 RSCS。

7) 盲区信号补充

对于 $r \leq r_a$ 的探测盲区, 重叠因子为 0, 无法用定义进行校正。文献 [8] 提出了补充盲区信号的斜率一致法, 在较短的探测盲区之内, 对光学参数和回波信号分别用直线进行补充。以消光系数为例, 盲区内的消光系数用直线来估算, 直线的斜率使用气溶胶消光系数模型的斜率 [6], 且廓线经过由步骤 6) 校正后的盲区点 $\alpha_a^c(r_a, \lambda_0)$ 。后向散射系数、355 nm 米散射 RSCS 和 387 nm 拉曼散射 RSCS 也分别按照其模型斜率和盲区高度处的数值进行估算。

重叠因子过渡区校正和盲区估算算法完整的流程图如图 2 所示。

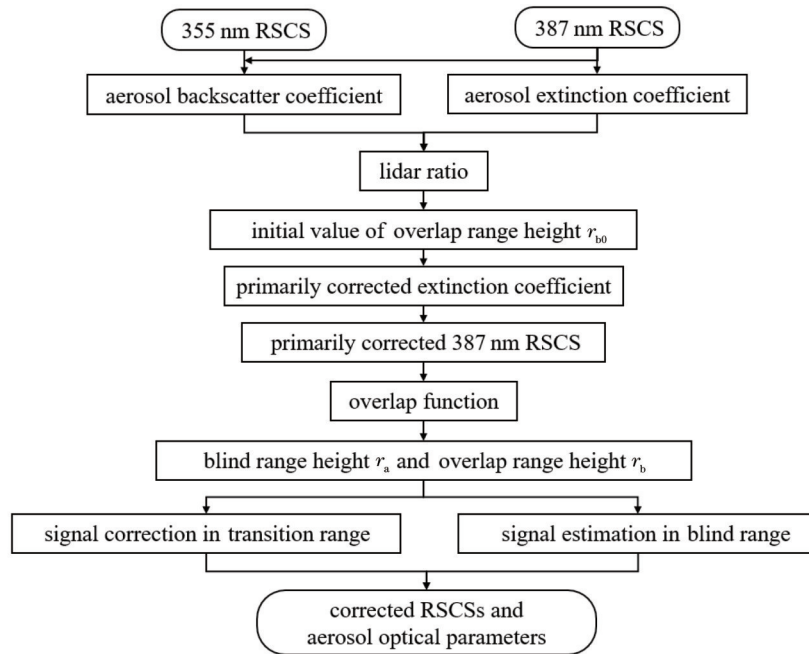


图 2 重叠因子获取和校正算法流程图

Fig. 2 Flow chart of acquisition and correction algorithm for overlap factor

3 重叠因子实验观测

3.1 实验系统介绍

拉曼-米散射激光雷达系统由西安理工大学自主研发, 发射激光波长为 355 nm, 利用米散射回波信号

和氮气分子的拉曼散射回波信号可实现气溶胶垂直分布信息的高时空分辨率探测, 其主要仪器参数如表 1 所示。其中, 回波信号的波长为 355 nm (米通道) 和 387 nm (拉曼通道), 距离分辨率为 3.75 m, 时间分辨率为 2 min。

表 1 拉曼-米散射激光雷达系统参数^[23]
Table 1 Parameters of Raman-Mie scattering lidar system^[23]

Instrument	Parameter	Value
Nd:YAG pulsed laser	Wavelength /nm	355
	Pulse duration /ns	8.4
	Repetitive frequency /Hz	10
	Laser beam divergence /mrad	<0.5
Custom Cassegrain telescope	Aperture /mm	400
	Field of view /mrad	0.5-1.0
	Focal distance /m	2

3.2 实测数据计算

2021年秋季,使用西安理工大学自主研发的拉曼-米散射激光雷达系统在西安市大气探测中心泾河国家基本气象站(34°26'N,108°57'E)进行了连续大气观测

实验。选取一组实验观测数据反演了气溶胶光学参数,计算并校正了激光雷达重叠因子。图 3 给出了 2021 年 8 月 28 日 17:04—17:06 的一组激光雷达实验观测数据及其光学参数反演结果。

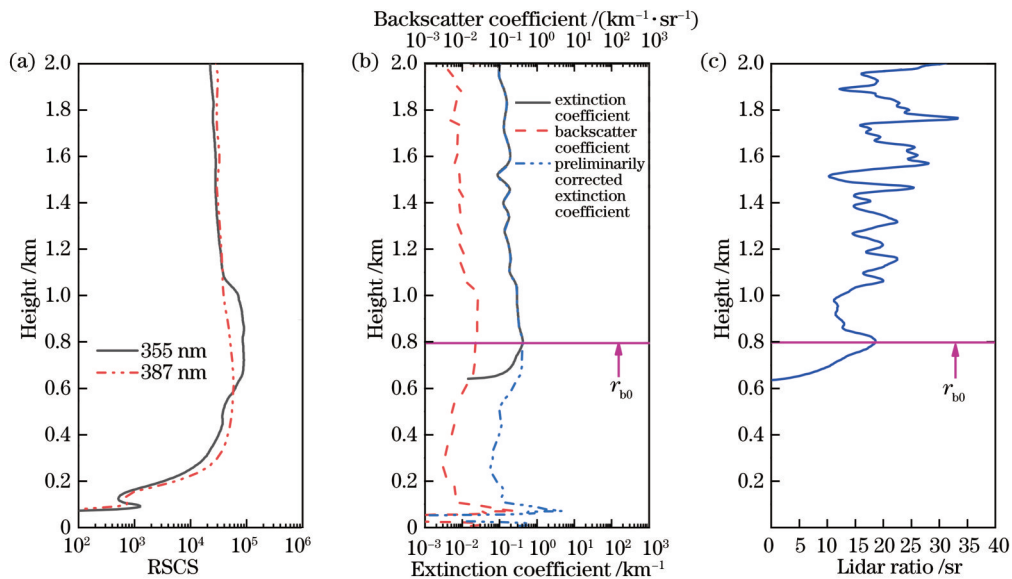


图 3 单组激光雷达实验观测数据(2021年8月28日17:04—17:06)。(a) RSCS;(b)光学参数;(c)激光雷达比
Fig. 3 Single group lidar experimental observation data (17:04—17:06, August 28, 2021). (a) RSCS; (b) optical parameters; (c) lidar ratio

图 3(a)给出了 355 nm 米散射 RSCS 和 387 nm 拉曼散射的 RSCS。可以看出,受重叠因子的影响,0.6 km 以下的回波信号随探测距离的增加而呈现出增大的趋势,0.1 km 以下回波信号缺失,进而得到准确的重叠区高度和盲区高度。图 3(b)、(c)分别给出了气溶胶消光系数、后向散射系数和激光雷达比的反演结果。由前述分析和图 3(b)中虚线可知,后向散射系数在过渡区内不受重叠因子影响,而 0.1 km 以下是由受近场信号干扰的盲区假信号反演的廓线,因此盲区内的后向散射系数不可靠。如图 3(b)中实线所示,0.8 km 以上消光系数和后向散射系数的变化趋势相近,0.8 km 以下受重叠因子的影响,随着距离的减小,消光系数迅速衰减,尤其是 0.65 km 以下消光系数为负,廓线断开。如图 3(c)所示,0.8 km 以下的激光雷达比与消光系数呈现同样的特征。由于 0.6~0.8 km

之间气溶胶消光系数和激光雷达比的变化受重叠因子的影响程度远大于受气溶胶含量的影响程度,激光雷达比的第一个峰值 0.796 km 反映了重叠因子在过渡区和重叠区作用效果的变化,因此将这个高度选取为重叠区高度初值 r_{b0} 。按照 2.3 节给出的重叠因子计算流程,将 r_{b0} 以下的消光系数用后向散射系数和激光雷达比进行初步校正,经过步骤 1)和步骤 2)初步校正后的消光系数如图 3(b)中双点划线所示。

按照步骤 3)和步骤 4),用初步校正后的消光系数正演 387 nm 拉曼散射回波信号,得到如图 4(a)所示的初步校正的信号和实验探测信号,二者之比即为重叠因子廓线,如图 4(b)所示。经步骤 5)~7),将过渡区的回波信号用重叠因子的定义式进行校正,盲区的回波信号和光学参数用斜率法校正,校正结果如图 4(c)、(d)所示。

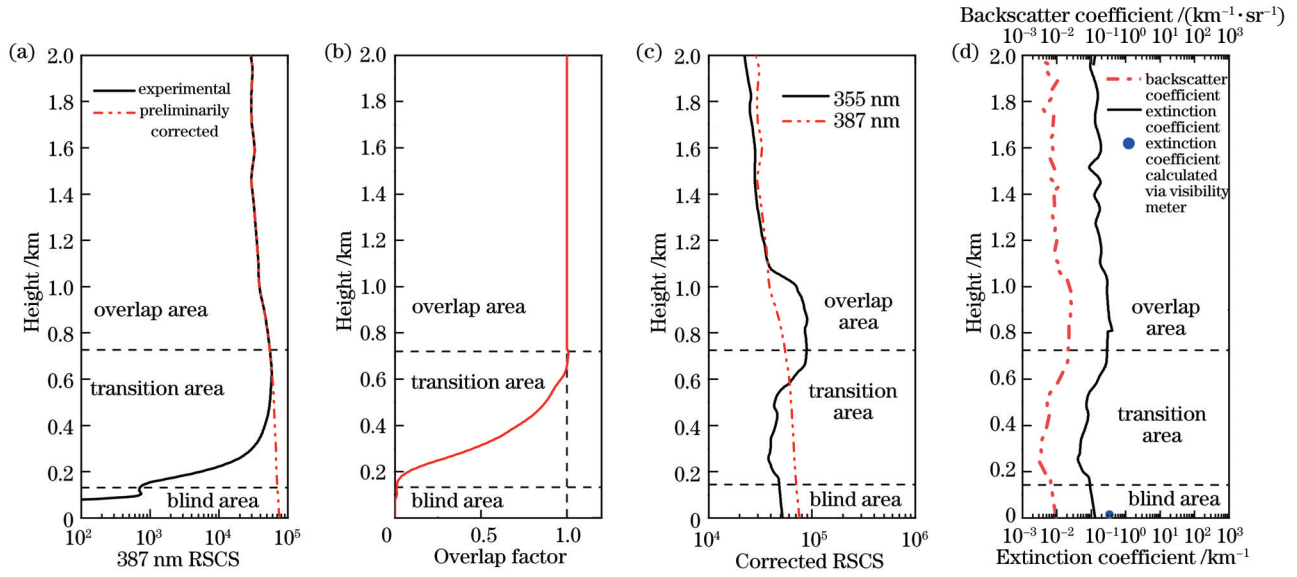


图 4 重叠因子计算和校正结果。(a) 387 nm RSCS;(b)重叠因子;(c)重叠因子校正后的 RSCS;(d)重叠因子校正后的气溶胶光学参数

Fig. 4 Calculation and correction results of overlap factors. (a) RSCS at wavelength of 387 nm; (b) overlap factor; (c) RSCS corrected by overlap factor; (d) aerosol optical parameters corrected by overlap factor

由图 4(a)中的双点划线可以看出,使用经过初步校正的消光系数正演的 387 nm RSCS 在近场中明显增大,且与 r_{b0} 以上 RSCS 信号的整体变化趋势一致。实验探测 387 nm RSCS 与正演的 387 nm RSCS 之间的差异反映了重叠因子的影响效果,二者之比即为重叠因子廓线。在图 4(b)中,由于近场光的影响,盲区内存在假信号,故重叠因子一直大于 0。设置盲区重叠因子阈值 δ 为 0.01,则盲区高度 r_a 为 0.131 km,重叠区高度 r_b 为 0.727 km。此处计算出的重叠区高度 r_b 与初步判断的重叠区高度初值 r_{b0} 不一致,这是因为 r_{b0} 的初步选取会存在一定的误差。如图 4(c)、(d)所示,在 0.131~0.727 km 的过渡区中,分别根据步骤 6)对回波信号和气溶胶消光系数进行了校正。盲区范围为 0.131 km,在此短范围内,根据步骤 7)使用大气模型的斜率对回波信号和气溶胶的消光系数与后向散射系数进行了补充估算。根据图 4(d)所示的经重叠因子校正后的结果,于 2021 年 8 月 28 日傍晚,用激光雷达测得西安市大气探测中心泾河国家基本气象站近地面的消光系数估算值为 0.194 km^{-1} 。大气能见度 V 和消光系数 α 的转化公式^[24]为

$$\alpha(\lambda) = \frac{3.912}{V} \left(\frac{550}{\lambda} \right)^k, \quad (13)$$

式中: $\alpha(\lambda)$ 表示波长 λ 的消光系数, λ 的单位为 nm; V 表示能见度,单位为 km。大气的 Ångström 指数 k 与能见度的关系可以表示为

$$k = \begin{cases} 0.585V^{\frac{1}{3}}, & V \leq 6 \text{ km} \\ 1.3, & V > 6 \text{ km} \end{cases} \quad (14)$$

根据西安市气象局发布的数据,2021 年 8 月 28 日

傍晚西安市的空气质量等级为优,能见度为 30 km,对应 355 nm 的气溶胶消光系数为 0.231 km^{-1} ,在图 4(d)中已用圆点标出。将二者进行对比可知,经重叠因子校正后估算的近地面气溶胶消光系数与气象局发布的能见度数据保持良好的一致性,这也验证了重叠因子计算和校正算法的合理性。

在所提算法中,重叠因子廓线是通过实验探测拉曼散射回波信号和正演拉曼散射回波信号的比值得到的,正演的拉曼散射回波信号取决于重叠区高度的激光雷达比和重叠区的后向散射系数。重叠区高度的激光雷达比由气溶胶消光系数和后向散射系数决定,因此重叠因子的反演精度和过渡区校正后的气溶胶消光系数均与气溶胶光学参数的反演精度有关。消光系数的反演过程用到了微弱的拉曼散射回波信号的导数,对于噪声很敏感,而后向散射系数的反演效果主要取决于系统常数 C 的标定,已有大量研究计算了拉曼激光雷达光学参数的反演误差^[25-26]。此外,由于无法反演出过渡区的气溶胶消光系数和激光雷达比,故认为过渡区的激光雷达比等于重叠区高度处的激光雷达比这一假设也会给重叠因子廓线和过渡区消光系数引入误差。然而,盲区的气溶胶光学参数是用斜率一致法进行补充的,因此其误差来源于盲区高度、盲区高度处的气溶胶光学参数和盲区内大气模型与实际大气的差异。盲区高度的选取与阈值 δ 有关,盲区内用直线来代替实际大气的梯度变化会造成垂直信息的缺失,故只能估算出近地面气溶胶光学参数的参考值。

4 连续探测实验重叠因子的获取与校正

2021 年 8 月 28 日 20:00—24:00,在西安市大气探

测中心泾河国家基本气象站进行了连续 4 h 的激光雷达大气观测实验。探测时间分辨率为 2 min, 共采集了 120 组回波信号, 每组信号进行了 2000 次激光脉冲回波信号的累积, 数据反演结果如图 5 所示。据西安市

气象资料显示, 探测期间西安市空气质量等级为优。分别给出了 0~1.6 km 之间大气气溶胶消光系数的直接反演结果, 以及经过重叠因子过渡区校正和盲区估算的消光系数时空变化 (THI) 图。

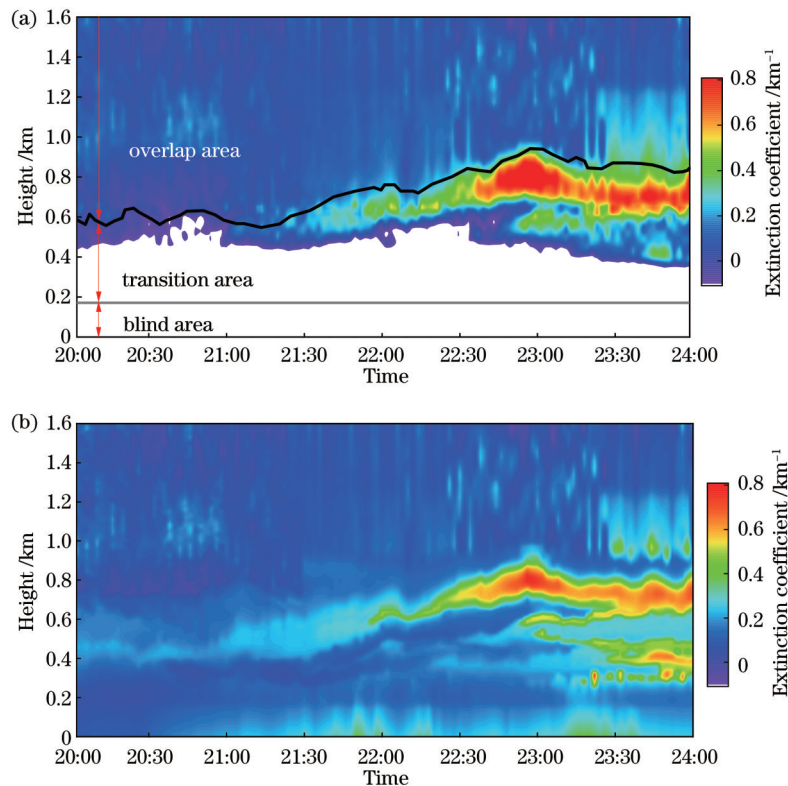


图 5 大气气溶胶消光系数 THI 图 (2021 年 8 月 28 日 20:00—24:00)。(a) 经重叠因子校正前的气溶胶消光系数; (b) 经重叠因子校正后的气溶胶消光系数

Fig. 5 THI diagram of atmospheric aerosol extinction coefficient (20:00—24:00, August 28, 2021). (a) Aerosol extinction coefficient before corrected by overlap factor; (b) aerosol extinction coefficient after corrected by overlap factor

气溶胶消光系数算法需要对回波信号进行求导, 信号中轻微的噪声会对反演结果产生很大的影响, 且不同高度的信号中噪声也不同。因此, 为了提高数据稳定性, 对图 5(a)、(b) 中的消光系数廓线进行了分段移动平均滤波。为了消除分段点引入的局部噪声, 又对整体数据进行了垂直高度上的移动平均滤波。由图 5(a) 所示的直接由拉曼散射回波信号反演得到的大气气溶胶消光系数时空变化图可以发现, 2021 年 8 月 28 日 22:00 之后, 在 0.6 km 附近存在气溶胶层, 其高度先上升后下降, 而 0.6 km 以下由于重叠因子的影响, 无法反演出消光系数, 故损失了近地面气溶胶的时空变化信息 (空白部分)。图 5(b) 所示为利用所提的重叠因子反演和校正算法得到的消光系数时空变化图, 可以看出气溶胶消光系数的损失信息得到了补充。过渡区校正后的消光系数可以明显反映气溶胶的分层结构及其时空变化情况, 而盲区内由于是用斜率一致法估算的结果, 故在空间维度上的意义不大, 只有时间维度的信息可供参考。

激光雷达系统结构中影响重叠因子的参数包括望

远镜口径、望远镜的接收视场角、出射激光束的指向、激光束的光斑大小, 以及出射光束和望远镜光轴的相对位置。其中, 出射激光束的指向是非常容易变动的参数, 存在 $25 \mu\text{rad}$ 的角度漂移^[27], 而其他参数相对稳定。根据文献[8]所述的激光雷达几何重叠因子的理论计算方法, 计算了激光束指向变动 $25 \mu\text{rad}$ 的几何重叠因子变化情况, 如图 6(a) 所示。0 与 $25 \mu\text{rad}$ 曲线之间的范围为几何重叠因子的变化区间, 二者与平均值的相对偏差如图 6(b) 所示。绘制以上 120 组实验观测数据的重叠因子廓线的平均值、最大值和最小值如图 6(c) 所示。最大值与最小值曲线之间的区域为重叠因子的变化区间, 最值与平均值的相对偏差如图 6(d) 所示。

由图 6 可知: 激光束指向存在 $25 \mu\text{rad}$ 角度漂移时几何重叠因子的相对偏差为 $-4\% \sim 6\%$, 这是系统重叠因子本身存在的误差; 根据所提算法反演的实测重叠因子的相对偏差为 $-5\% \sim 8\%$, 即算法引入的误差非常小; 盲区高度集中在 0.18 km 附近, 重叠区高度在 0.6~1.1 km 之间波动。根据西安市大气探测中

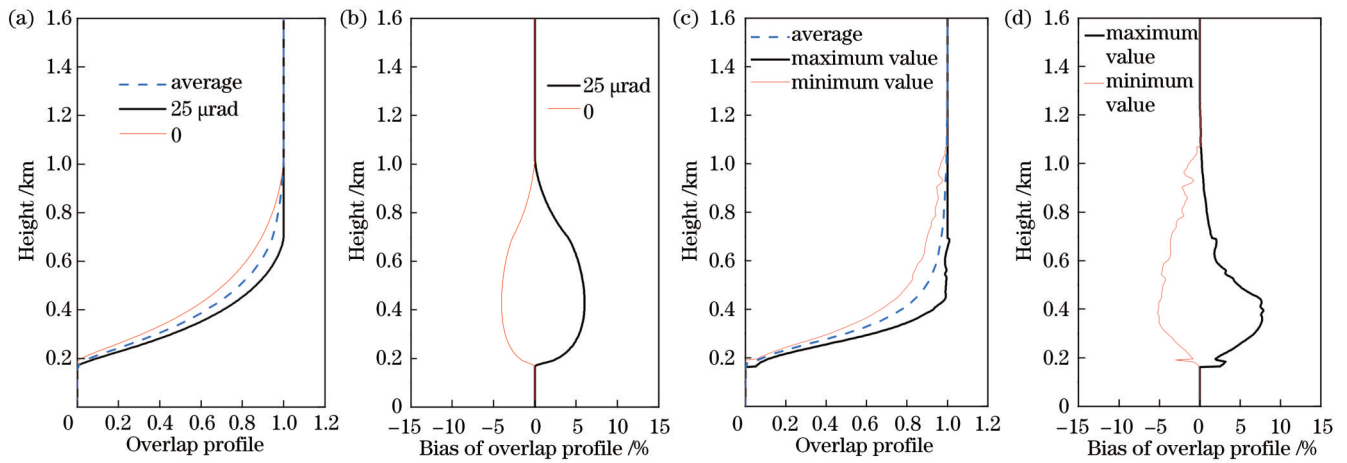


图 6 几何重叠因子和实验观测重叠因子。(a)激光束指向改变 $25 \mu\text{rad}$ 的几何重叠因子;(b)几何重叠因子的相对偏差;(c)实验观测重叠因子的最大值、最小值和平均值;(d)实验观测重叠因子的相对偏差

Fig. 6 Geometric and experimentally observed overlap factors. (a) Geometric overlap factor with laser beam pointing change of $25 \mu\text{rad}$; (b) relative bias of geometric overlap factor; (c) maximum value, minimum value and average of experimentally observed overlap factor; (d) relative bias of experimentally observed overlap factor

心泾河国家基本气象站发布的数据,在实验探测时段内,探测地能见度变化范围为 $8\sim 30 \text{ km}$,根据能见度同步计算了地面气溶胶消光系数,与经过重叠因子校

正的激光雷达观测数据对比如图 7(a)所示。相关性分析如图 7(b)所示,给出了二者相关性分析的拟合直线。

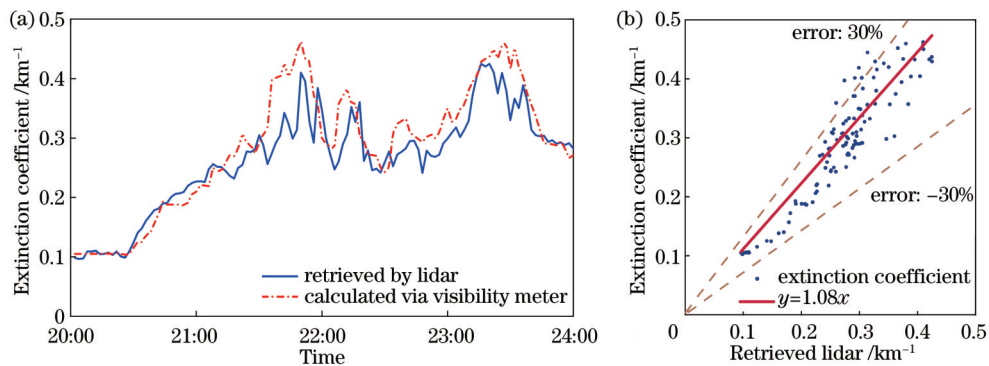


图 7 重叠因子校正后的消光系数与能见度仪探测的消光系数对比。(a)重叠因子随时间的变化;(b)相关性分析

Fig. 7 Comparison between extinction coefficient corrected by overlap factor and extinction coefficient detected via visibility meter.

(a) Extinction coefficient varying with time; (b) correlation analysis

由图 7(a)、(b)可知,经盲区信号补充估算的近地面消光系数与能见度仪观测的消光系数保持良好的一致性,拟合度可达 0.993,验证了重叠因子校正算法的合理性与稳定性。

5 结 论

提出了一种基于实验观测数据的拉曼激光雷达重叠因子计算和校正算法。算法基于大气气溶胶光学参数的拉曼反演方法,通过分析气溶胶消光系数和后向散射系数的反演特点,将后向散射系数作为参考信号对消光系数进行校正,进而正演拉曼散射回波信号来得到重叠因子廓线。使用拉曼散射激光雷达系统进行了大气气溶胶观测实验,计算并校正了重叠因子,将其与能见度仪探测的地面消光系数作了对比,验证了算

法的合理性和可靠性,并针对此算法进行了误差分析。最后,使用连续的激光雷达实验探测数据计算并校正了重叠因子,得到了全程回波信号和光学参数,验证了算法的稳定性。实测数据表明,此算法对于拉曼激光雷达系统重叠因子校正具有普适性和稳定性,对激光雷达盲区信号校正与补充具有重要意义。

与拉曼激光雷达重叠因子的权威算法——迭代法相比,此算法对气溶胶光学参数的反演精度要求较低。气溶胶后向散射系数的拉曼解在过渡区中不受重叠因子影响,而 Fernald 解在过渡区和盲区中均受重叠因子影响,二者在过渡区的差异包含重叠因子信息。若想用迭代法得到完全符合理论情况的重叠因子廓线,要求用拉曼法和 Fernald 法反演的气溶胶后向散射系数在重叠区中完全重合。然而, Fernald 法中激光雷达比

的假设和边界点的选取是重要的误差来源,并且米散射信号和拉曼散射信号通道的探测精度也不一样,因此这一条件很难满足。所提算法无需假设激光雷达比和选取边界点高度,对气溶胶光学参数的反演精度要求较低。此外,正演 387 nm 拉曼散射回波信号用到了消光系数的积分,实验探测拉曼散射回波信号与积分拉曼散射回波信号的差异包含重叠因子信息,这一积分过程减小了大气的垂直变化对重叠因子计算的影响,这也是算法较为稳定的重要原因。此外,本研究采用的方式是对每组回波信号都计算实时的重叠因子廓线,并应用于数据校正。在实际中,对于单次的长时间大气观测实验,可以计算实时重叠因子廓线并进行长时间累积平均,将平均后的重叠因子应用于盲区校正中,这样可以有效减小因激光束指向漂移引入的重叠因子计算和校正误差。

需要强调的是,由于在激光雷达探测盲区内,无法接收到有效信号,因此无法对盲区进行准确校正。使用斜率一致法补充的盲区信号在空间上由于利用了线性分布,无法得到有效的垂直信息,故只能估算出近地面光学参数和回波信号的参考值。

参 考 文 献

- [1] Chemyakin E, Müller D, Burton S, et al. Arrange and average algorithm for the retrieval of aerosol parameters from multiwavelength high-spectral-resolution lidar/Raman lidar data [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(31): 7252-7266.
- [2] Kim S W, Yoon S C, Kim J, et al. Seasonal and monthly variations of columnar aerosol optical properties over east Asia determined from multi-year MODIS, LIDAR, and AERONET Sun/sky radiometer measurements[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(8): 1634-1651.
- [3] 李宝莹, 崔生成, 乔智, 等. 一种估测气溶胶吸收系数垂直分布的理论方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(19): 1901001.
Li B Y, Cui S C, Qiao Z, et al. Theoretical method to estimate vertical distribution of aerosol absorption coefficient[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(19): 1901001.
- [4] 毛建东, 华灯鑫, 何廷尧. 小型米散射激光雷达的研制及其探测[J]. *光子学报*, 2010, 39(2): 284-288.
Mao J D, Hua D X, He T Y. A compact Mie scattering lidar and its observation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(2): 284-288.
- [5] 朱首正, 卜令兵, 刘继桥, 等. 机载高光谱分辨率激光雷达探测大气气溶胶光学特性及污染研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(17): 1710003.
Zhu S Z, Bu L B, Liu J Q, et al. Study on airborne high spectral resolution lidar detecting optical properties and pollution of atmospheric aerosol[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(17): 1710003.
- [6] Sassen K, Dodd G C. Lidar crossover function and misalignment effects[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(17): 3162-3165.
- [7] Kuze H, Kinjo H, Sakurada Y, et al. Field-of-view dependence of lidar signals by use of Newtonian and Cassegrainian telescopes [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(15): 3128-3132.
- [8] 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.
Di H G, Hua D X, Wang Y F, 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.
- [9] 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.
Wang W, Mao F Y, Gong W, et al. Overlap factor calculation method based on laser intensity distribution and its sensitivity analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0228005.
- [10] 刘巧君, 杨林, 王劭予, 等. 基于激光器输出模式的离轴激光雷达重叠因子计算及近场信号校正[J]. *物理学报*, 2009, 58(10): 7376-7381.
Liu Q J, Yang L, Wang J Y, et al. Calculation of the overlap factor and correction of near-field signal of the off-axis lidar based on the Gaussian mode of laser beam[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(10): 7376-7381.
- [11] Gong W, Mao F Y, Li J. OFLID: simple method of overlap factor calculation with laser intensity distribution for biaxial lidar [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(12): 2966-2971.
- [12] Wang W, Gong W, Mao F Y, et al. Physical constraint method to determine optimal overlap factor of Raman lidar[J]. *Journal of Optics*, 2018, 47(1): 83-90.
- [13] Sasano Y, Shimizu H, Takeuchi N, et al. Geometrical form factor in the laser radar equation: an experimental determination [J]. *Applied Optics*, 1979, 18(23): 3908-3910.
- [14] 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.
- [15] Wandinger U, Ansmann A. Experimental determination of the lidar overlap profile with Raman lidar[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(3): 511-514.
- [16] Li J, Li C C, Zhao Y M, et al. Geometrical constraint experimental determination of Raman lidar overlap profile[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(18): 4924-4928.
- [17] 丁红星, 孙东松, 戴丽莉, 等. 离轴 Mie 散射激光雷达系统及其信号校准[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(6): 842-845.
Ding H X, Sun D S, Dai L L, et al. Abaxial Mie scattering lidar system and its signal calibration[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 842-845.
- [18] 付松琳, 谢晨波, 李路, 等. 基于激光雷达探测技术的 PM_{2.5} 浓度辨识研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(9): 224-231.
Fu S L, Xie C B, Li L, et al. PM_{2.5} concentration identification based on lidar detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 224-231.
- [19] 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.
Song Y H, Lu L L, Hua D X, et al. Design of auto collimation system for coaxial Mie lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0710001.
- [20] Ansmann A, Wandinger U, Riebesell M, et al. Independent measurement of extinction and backscatter profiles in cirrus clouds by using a combined Raman elastic-backscatter lidar[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(33): 7113-7131.
- [21] Whiteman D N. Examination of the traditional Raman lidar technique. I. Evaluating the temperature-dependent lidar equations[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(15): 2571-2592.
- [22] Whiteman D N. Examination of the traditional Raman lidar technique. II. Evaluating the ratios for water vapor and aerosols [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(15): 2593-2608.
- [23] Li S W, Di H G, Li Y, et al. Detection of aerosol mass concentration profiles using single-wavelength Raman Lidar within the planetary boundary layer[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2021, 272: 107833.
- [24] 侯晓龙. 多波长激光雷达探测大气气溶胶光谱特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2015.
Hou X L. Study on particle size distribution characteristics of atmospheric aerosol detected by multi-wavelength lidar[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2015.

- [25] Whiteman D N. Application of statistical methods to the determination of slope in lidar data[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(15): 3360-3369.
- [26] 丁红波, 王珍珠, 刘东. 激光雷达信号去噪方法的对比研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(24): 2401001.
Ding H B, Wang Z Z, Liu D. Comparison of de-noising methods of LiDAR signal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(24): 2401001.
- [27] 徐鑫鑫. 激光雷达几何重叠因子自校正技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
Xu X X. Research on automatic correction technique of geometric overlap factor of lidar system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.

Correction Method of Raman Lidar Overlap Factor Based on Aerosol Optical Parameters

Wang Xinhong, Di Huige*, Wang Yaya, Yin Zhenzhen, Yuan Yun, Yang Tao, Yan Qing, Li Shichun, Xin Wenhui, Hua Dengxin**

School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China

Abstract

Objective Lidar has been widely used in the field of atmospheric detection with the advantages of high spatial-temporal resolution and high detection sensitivity. The overlap factor of a lidar system arises from the incomplete overlap between the laser beam and the field of view of the receiver, which results in the distortion of the received backscattered signal in the near-field range. The accurate observation of aerosol optical parameters near the ground is important for the monitoring of the atmospheric environment, air quality, and atmospheric visibility. The overlap factor at a certain distance is defined as the ratio of the beam energy entering the receiving field of view to the actual backscattering energy. In general, the overlap factor is estimated by either theoretical methods or experimental methods. The theoretical methods are to calculate the overlap factor according to the structural parameters of the lidar system. However, some parameters are often rather difficult to accurately obtain in practice or theory, such as the performance of the optical elements, the beam divergence angle, and the beam direction. The experimental methods are to calculate the overlap factor with the experimental observation data. Some use the deviation between the Raman solution and the Fernald solution of a backscattering coefficient to calculate the overlap factor. The main limitation is that the Fernald method of aerosol backscattering coefficient requires the assumption of lidar ratio or boundary conditions, which will introduce great errors. Besides, the experimental methods strongly depend on the accurate estimation of atmospheric conditions. Thus, it is necessary to propose a stable algorithm for overlap factors to correct signals and aerosol optical parameters in the near-field range.

Methods An experimental method for the overlap factor of Raman-Mie scattering lidar is proposed in this paper, which is applicable to lidar systems equipped with a Raman scattering channel. The method is based on the Raman inversion method for aerosol optical parameters. By analyzing the inversion characteristics of aerosol optical parameters, it is found that in a transition area, the aerosol backscattering coefficient is not influenced by the overlap factor, while the aerosol extinction coefficient is influenced greatly. In the Raman inversion method, the aerosol extinction coefficient and backscattering coefficient are independently inverted without the assumption of lidar ratios. Thus, the lidar ratio profile can be obtained in a complete overlap area. According to the inversed optical parameters, the overlap area height is determined preliminarily, and then the lidar ratio in the transition area is assumed to be equal to that at the overlap area height. The product of the aerosol backscattering coefficient and the lidar ratio is used to preliminarily correct the missing signal of the aerosol extinction coefficient in the transition area. The Raman scattering signal is derived from the inverse equation of the aerosol extinction coefficient, and then the preliminarily corrected Raman scattering signal is forward modeled. The overlap factor is obtained by dividing the experimental observed Raman signal by the forward modeled Raman signal. The blind area, transition area, and overlap area are distinguished according to the overlap factor profile. The Raman scattering and Mie scattering echo signals and the aerosol optical parameters in the near-field range are corrected, respectively. For the transition area, the definition of the overlap factor is used for signal correction. For the blind area, the slope consistency method is used to supplement the signal, that is, the slope of the standard atmospheric model is used to linearly estimate the signal.

Results and Discussions The atmospheric observation experiment is carried out with an independently developed Raman-

Mie scattering lidar system. For a single set of experimental observation data, the aerosol extinction coefficient and backscattering coefficient are retrieved, respectively. The overlap factor profile is obtained, and then the echo signals and aerosol optical parameters are corrected, respectively. The estimated extinction coefficient on the ground by lidar is compared with that observed via a visibility meter to verify the correctness of the algorithm. For the observation data from an experiment lasting for 4 hours, the time-height-intensity (THI) diagrams of the aerosol extinction coefficient before and after the correction by an overlap factor are given (Fig. 5). The corrected aerosol extinction coefficient below about 0.6 km can be obtained, which can obviously reflect the stratification structure and spatial-temporal variations of atmospheric aerosols near the ground. The estimated aerosol extinction coefficients of long-term observations on the ground are compared with those simultaneously observed via a visibility meter, and they show good consistency with a regression coefficient R up to 0.993 (Fig. 7). The measured overlap factors are compared with those calculated with the theoretical method, and the relative biases are analyzed separately. The error of overlap factors can be controlled within $\pm 8\%$.

Conclusions The error of the proposed method is calculated and analyzed. The results show that the proposed method can accurately calculate the overlap factor profile of the Raman lidar system. After correction by an overlap factor, the signal profile in the transition area and the estimated linear signal in the blind area can be obtained. The improved method is of great significance for the correction and supplement of near-field signals with lidar.

Key words atmospheric optics; lidar; Raman scattering; overlap factor; correction