

光学学报

Mie 散射垂直扫描激光雷达近场信号校正及反演技术

李仕春^{1,2*}, 任腾¹, 张鹏辉¹, 高迎春¹, 华灯鑫^{1,2**}, 王玉峰^{1,2}, 宋跃辉^{1,2}, 高飞^{1,2}

¹西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048;

²陕西省现代装备绿色制造协同创新中心, 陕西 西安 710048

摘要 激光雷达近场信号的重叠因子校正和盲区问题一直制约着激光雷达的实用化进程,在假设水平大气均匀的情况下,提出了 Mie 散射激光雷达的近场信号垂直扫描校正方法和多角度反演算法,实现了大气状态自适应控制遥感。从散射型激光雷达方程出发,构建了激光雷达近场的重叠因子和盲区的模型,结合研制的二维扫描激光雷达参数,仿真分析了重叠因子和盲区的特征。利用 Fernald 气溶胶反演算法,提出了基于信噪比的多仰角扫描控制与校正方案,以实现不同大气状态的自适应扫描控制。融合多角度扫描遥感数据,并以水平探测的 Collis 法反演的结果作为地面消光系数,获得了大气气溶胶消光系数无盲区廓线,验证了方案的有效性。数据分析结果表明,在静稳天气时水平能见度优于 18 km 的情况下,以信噪比 20 为阈值,通过 7 个仰角约 15 min 观测,可实现激光雷达重叠因子的自适应校正,获得的重叠因子校正曲线与水平校正法的平均相对偏差约 20%,两组扫描校正的重叠因子的平均相对误差为 4.2%,可实现大气气溶胶的无盲区反演。

关键词 传感器; 激光雷达; 近场信号校正; 大气消光系数; 垂直扫描

中图分类号 TN958.98; TP217 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS222005

1 引言

Mie 散射激光雷达是一种高时空分辨率的遥感仪器,可有效应用于大气气溶胶探测、云雾特征分析、污染排放监测等领域,得到了广泛关注和研究^[1-4]。但是,由于该类地基激光雷达大多属于发射与接收同地的单基地结构,无论发射和接收同轴的系统(受限于反射式望远镜结构)还是发射和接收不同轴(也称离轴)的系统,几乎都存在近场盲区和重叠因子的问题^[5-7],除只进行中高层大气探测外,尤其是在探测对流层或者边界层时,通常都会导致激光雷达近场信号的缺失或者精度降低,故在大多激光雷达应用中,通常需要近场的点式测量仪器(例如,水平能见度仪、PM2.5 仪、粒子谱仪等)的数据进行数据校正、补偿或验证^[8-10]。但是,近地面的近场大气特征通常是气象、环境等领域必不可少的数据,这极大限制了激光雷达的工程化和应用进程^[11],因此,近场信号的校正技术,尤其是重叠因子校正,仍是目前散射型激光雷达需要解决的重要问题之一。

国内外许多学者开展了激光雷达近场信号校正的

相关研究,大多集中于重叠因子校正技术,主要分为理论分析法和实验测试法。理论分析法通过构建激光雷达系统的数学模型,利用激光雷达系统结构参数使用模型公式计算其重叠因子,如刘巧君等^[12]利用建立的重叠因子的解析计算式,完成了对激光雷达重叠因子的计算及相关参数的影响分析,但是,该方法受限于激光雷达收发光轴的平行度误差和激光能量的复杂分布,不能得到高精度的重叠因子曲线,而且不能对系统盲区内的数据进行有效校正。实验测试法则是通过实际观测实验获得重叠因子的方法,它又可分为大气水平均匀校正、辅助通道反演校正和专用仪器探测校正 3 种方法。最早提出也是最简单的就是大气水平均匀校正^[13],通常在大气水平均匀的假设下,选择静稳晴天时,将激光雷达水平放置获取观测回波信号,然后利用 Collis 斜率法计算得到重叠因子,如 Sasano 等^[14]通过多次实验来计算系统重叠因子,但当雷达系统收发光轴有调整后,则需要重新对系统进行校正,而且该方法也不能解决系统盲区的问题。辅助通道反演校正通常采用激光雷达的 Mie 散射和拉曼散射双通道信号计算大气后向散射信号^[15-17],然后再依据 Mie 散射通道信

收稿日期: 2022-11-16; 修回日期: 2022-12-20; 录用日期: 2022-12-30; 网络首发日期: 2023-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(62175199, 61875162)、陕西省自然科学基金(2020JM-445)、陕西省教育厅自然科学基金(2020Y048)、陕西省大学生创新创业训练计划项目(S202210700104)

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

号计算得到重叠因子校正曲线;如 Wandinger 等^[15]通过振动拉曼来测量重叠因子,这种方法虽然能够忽略非均匀大气带来的误差,但在计算时假设气溶胶的波长指数又引入了新的误差。专用仪器探测校正则是设计专门的校正观测设备进行测试,如王威等^[18-19]设计了专门的 CCD 通道,通过直接测量激光束能量分布,进而在进行重叠因子计算时考虑激光束特定分布情况下带来的偏差,得到准确的重叠因子曲线,但该方法需要基于大气均匀假设进行水平测量,从而带来了一些限定条件,同时该方法也不能对盲区信号进行有效处理;陶宗明等^[20]设计了准后向散射的侧向散射 CCD,实时探测并反演重叠因子校正曲线,该方法能够实现对近场范围内信号的测量,但受 CCD 成像质量制约且系统布局复杂,并不利于开展连续性观测;王界等^[21]设计了专用设备,置于激光雷达附近同步观测,通过对主副视场信号的动态拼接,实现对近场信号的有效探测,即使专用设备法已经能够解决部分盲区问题,但是盲区问题依然是激光雷达实用化的制约因素之一。

本文利用自研的扫描激光雷达系统的垂直扫描功能^[22],提出多角度扫描式激光雷达近场信号自适应校正方法。首先,基于离轴激光雷达系统的重叠因子模型,分析激光束发散角、望远镜视场角、光轴距离和光轴夹角等参数对重叠因子的影响。其次,利用 Fernald 气溶胶反演算法,发挥扫描激光雷达垂直扫描优势,提出信噪比阈值的多俯仰角度校正方案,以实现不同大气状态的自适应扫描控制。结合 Collis 法反演的地面

消光系数,融合多角度扫描遥感数据,反演气溶胶消光系数无盲区廓线,并比较了不同天气状况下,校正方案的有效性。

2 激光雷达重叠因子模型

Mie 散射激光雷达探测距离 r 处大气的回波信号 $P(r)$ 可表示为

$$P(r) = C \cdot P_0 \cdot \frac{c\tau}{2} \cdot \frac{A_R}{r^2} \cdot O(r) \cdot \beta(r) \cdot \exp\left[-2 \int_0^r \alpha(r') dr'\right], \quad (1)$$

式中: C 是与探测器的效率以及系统的光路透射率等有关的系统常数; P_0 是激光脉冲发射功率; τ 是探测积分时间; c 是光传播速度; A_R 为望远镜的接收面积; $O(r)$ 为重叠因子,其表示发射的激光场与接收望远镜视场的重合程度,在不完全重合时,其值小于 1,当达到完全重合时,其值为 1; $\beta(r)$ 是大气的后向散射系数; $\alpha(r)$ 为大气总消光系数,通常由大气分子和气溶胶消光系数两部分组成。

激光雷达的重叠因子主要取决于其发射和接收系统的结构,从结构上可分为同轴和离轴型激光雷达,由于离轴型结构相对简单,目前该类型激光雷达采用较多,在此以离轴激光雷达为例,其收发系统如图 1 所示,短虚线表示激光发射视场的上、下边界,长虚线表示接收器视场的上、下边界。

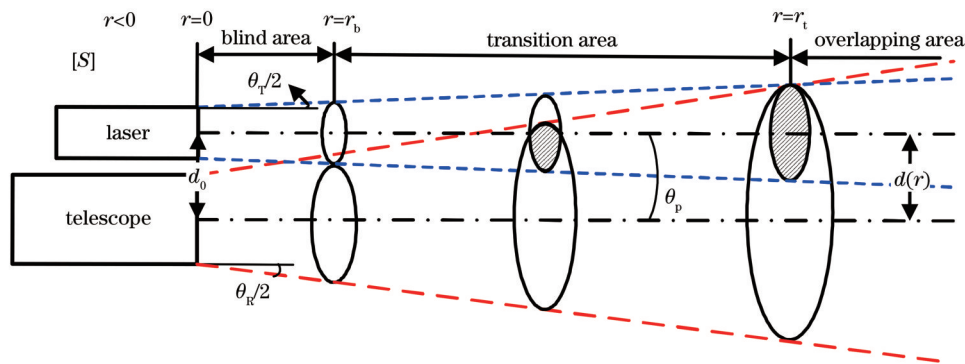


图 1 离轴激光雷达收发系统结构图

Fig. 1 Layout of transmitting and receiving system for off-axis lidar

该收发系统中激光束初始半径为 R_T , 接收器视场初始半径为 R_R , 激光束发散角(即发射视场角)为 θ_T , 接收器接收角(即接收视场角)为 θ_R , 为提高激光雷达的探测效率和距离,通常取 $\theta_R > \theta_T$, 以使发射光束可完全调整至接收视场中,从而使远场重叠因子为 1; 发射视场光轴和接收视场光轴之间的初始距离为 d_0 , 假设接收光轴与发射起点所确定的平面为 $[S]$, 即图 1 的平面,通常发射光轴和接收光轴在垂直于 $[S]$ 平面的夹角 θ_p 影响较小而可忽略,可假设它们在 $[S]$ 平面内的夹角为 θ_p , 并取发射与接收光轴在 $[S]$ 平面内的交

点低于基准面($r=0$)为正,高于基准面为负,通常需要将 θ_p 尽量调整为 0, 以获得最佳的激光雷达探测性能。从图 1 可看出,随探测距离 r 增加,发射视场和接收视场截面的重叠区域由分离经部分重合达到完全重合(图 2)。

1) 当探测处于盲区内 $r \leq r_b$, 即 $d(r) \leq R_T + R_R$ 时,发射视场截面和接收视场截面无重叠,图 2(a) 给出了盲区转变为过渡区的情况。

2) 当探测处于过渡区内 $r_b < r < r_t$, 即 $R_R - R_T < d(r) < R_R + R_T$ 时,发射视场截面和接收视场截面部

分重合但未完全重合,重合区面积随着距离的增加而逐渐增大,如图 2(b)所示。

3) 当探测处于重叠区内 $r \geq r_i$, 即

$d(r) \geq R_R - R_T$ 时,发射视场截面完全落在接收视场截面内,此时重叠因子为 1,图 2(c)为过渡区转变为重叠区的情况。

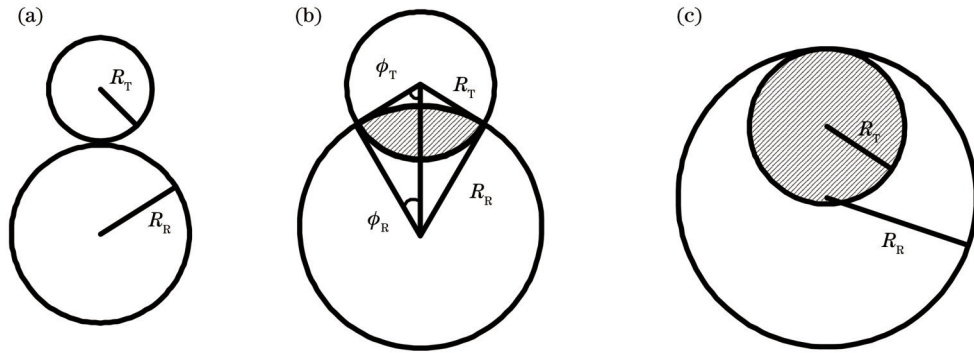


图 2 离轴激光雷达收发视场。(a) $r=r_b$; (b) $r_b < r < r_i$; (c) $r=r_i$
 Fig. 2 Transmitting and receiving field of view of off-axis lidar. (a) $r=r_b$; (b) $r_b < r < r_i$; (c) $r=r_i$

3 激光雷达的校正及反演技术

为使激光雷达能够获得空间任意方向的大气参数特征,甚至能获得某空间区域的大气状态,通常开发二维扫描型散射激光雷达系统(图 3)^[23],以获得更大的

空间探测灵活性。图 3 中的扫描型激光雷达主要包括激光发射模块、光学接收模块、光谱分光模块和数据采集处理模块,其中 MMF 表示多模光纤,DAQ 表示数据采集单元。

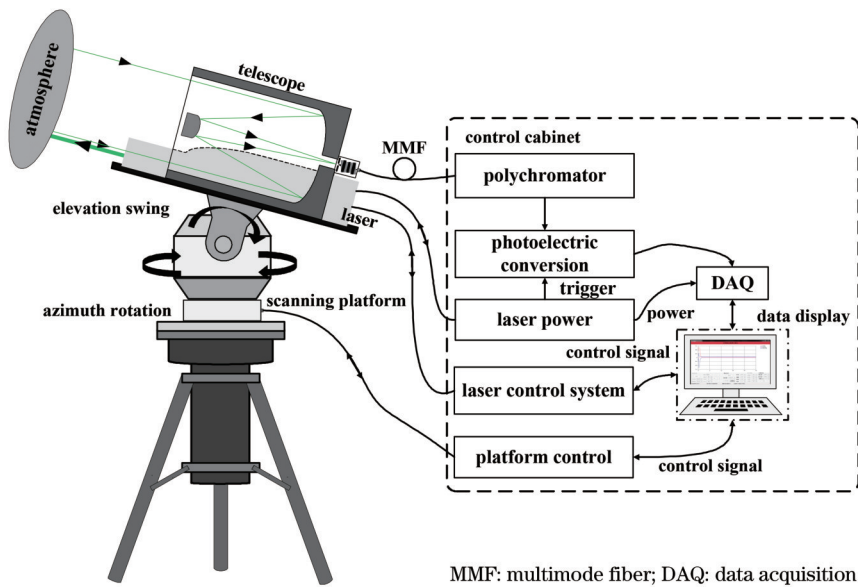


图 3 扫描型激光雷达
 Fig. 3 Scanning type lidar

激光发射模块将激光脉冲发射至大气中,光学接收模块接收大气中气溶胶粒子和分子等的后向散射信号,再经光谱分光模块以实现回波信号的光谱分离,获得双波长的弹性散射信号和振转拉曼散射信号,最后由数据采集处理模块进行光电转换、信号采集以及数据处理。利用该类型激光雷达的垂直扫描功能,可获得任意俯仰角的大气状态廓线信息,如果假设大气水平均匀,就可对激光雷达的近场信号进行随时随地的校正,与重叠因子校正相关的主要参数如表 1 所示,而与激光雷达探测相关的参数参见文献[23]。

目前,散射型激光雷达已成为大气气溶胶分布探测的重要手段之一,通常通过 Collis、Klett 和 Fernald 三种方法反演大气消光系数廓线。Fernald 法将导致大气总消光效应的因素分成气溶胶颗粒物和大气分子两类物质,应用更广泛,同时,利用理论分析和实际观测的统计分析,获得了气溶胶颗粒物和大气分子的后向散射系数与消光系数的比值,即

$$S_1 = \frac{\alpha_a(r)}{\beta_a(r)}, \quad (2)$$

表 1 激光雷达的主要参数
Table 1 Main parameters of lidar

Item	Parameter
Axis distance of transceiver d_0 /m	0.2
Divergence angle of transmitter θ_T /mrad	0.5
Field of view (FOV) angle of receiver θ_R /mrad	0.7
Diameter of receiving telescope $2R_R$ /mm	254
Diameter of laser beam $2R_T$ /mm	6.0
Diameter of fiber core /mm	0.8
Azimuth rotation angle θ /($^\circ$)	0-360
Vertical swing angle φ /($^\circ$)	-80+90

$$S_2 = \frac{\alpha_m(r)}{\beta_m(r)} = \frac{8\pi}{3}, \quad (3)$$

式中： $\beta_m(r)$ 表示传输距离 r 处大气分子后向散射系数； $\beta_a(r)$ 表示气溶胶粒子的后向散射系数； $\alpha_m(r)$ 表示

传输距离为 r 处大气分子的消光系数； $\alpha_a(r)$ 表示气溶胶粒子的消光系数。

利用标准大气模型中的大气分子浓度廓线，Fernald法可得到气溶胶的消光系数^[24]为

$$\alpha_a(r) = -\frac{S_1}{S_2} \alpha_m(r) + \frac{X(r) \cdot \exp\left[-2\left(\frac{S_1}{S_2} - 1\right) \int_r^{r_s} \alpha_m(r) dr\right]}{\frac{X(r_c)}{\alpha_a(r_c) + \frac{S_1}{S_2} \alpha_m(r_c)} + 2 \int_r^{r_c} \left\{ X(r) \cdot \exp\left[-2\left(\frac{S_1}{S_2} - 1\right) \int_r^{r_c} \alpha_m(r') dr'\right] \right\} dr}, \quad (4)$$

式中， r_c 是边界高度，依据该高度的气溶胶消光系数，代入式(4)可反演得到气溶胶的消光系数廓线。通常边界高度可选择对流层顶，并假设此处无气溶胶粒子，此时称为后向积分解，或者将地面观测数据作为边界高度，此时称为前向积分解。由于后向积分解迭代算法的稳定性优于前向积分解，实际中多采用后向积分解。

3.1 重叠因子的水平校正

为校正激光雷达的重叠因子，在观测环境合适的情况下，通常选择静稳天气情况时，可假设大气水平分布均匀，利用水平观测信号，进行系统重叠因子校正，简称为水平校正法。由式(1)可知，经过距离平方校正后的信号 $X(r)$ 可以表示为

$$X(r) = P(r) \cdot r^2 = C_s \cdot O(r) \cdot \beta(r) \cdot \exp\left[-2 \int_0^r \alpha(r') dr'\right], \quad (5)$$

式中， C_s 是与 C 、 A_R 等参数有关的常数。由于大气水平均匀，则其大气总消光系数 $\alpha(r)$ 和后向散射系数 $\beta(r)$ 就成为不随距离 r 变化的常数，因此，式(5)可简化为

$$X(r) = C_s \cdot O(r) \cdot \beta \cdot \exp(-2ar), \quad (6)$$

在激光雷达的重叠区内 $O(r) = 1$ ，式(6)可表示为

$$\ln[X(r)] = \ln[C_s \cdot \beta] - 2ar. \quad (7)$$

因此，可通过对观测数据的多点数据线性拟合，获得式

(6)的线性方程，其斜率就是大气总消光系数的2倍。而将上述线性方程由重叠区向过渡区延拓，就可得到系统重叠因子，即

$$O(r) = \frac{X(r)}{C_s \cdot \beta \cdot \exp(-2ar)}. \quad (8)$$

虽然线性方程也可以延拓至盲区，但是由于盲区内无回波信号，故不能用于校正盲区，甚至在过渡区的前半区，由于回波信号较微弱，也很难得到有效校正。

3.2 重叠因子的数值校正

依据激光雷达结构参数(表1)，可通过构建重叠因子的数学模型，通过数值计算直接获得系统重叠因子。当激光脉冲传输至距离 r 时，发射视场和接收视场的光轴之间的距离可表示为

$$d(r) = d_0 + r \tan(\theta_p) \approx d_0 + r\theta_p, \quad (9)$$

同理，发射视场的半径和接收视场的半径可分别表示为

$$\begin{cases} R_T(r) = r\theta_T/2 + R_T \\ R_R(r) = r\theta_R/2 + R_R \end{cases}. \quad (10)$$

在系统过渡区范围内[图2(b)]，其重叠区(阴影部分)的面积 A_o ^[18]表示为

$$A_o(r) = \frac{1}{2} \left\{ R_R^2 [2\phi_R(r) - \sin 2\phi_R(r)] + R_T^2 [2\phi_T(r) - \sin 2\phi_T(r)] \right\}, \quad (11)$$

式中， ϕ_R 、 ϕ_T 分别为

$$\phi_R(r) = \arccos \left[\frac{R_R^2(r) + d^2(r) - R_T^2(r)}{2R_R(r)d(r)} \right], \quad (12)$$

$$\phi_T(r) = \arccos \left[\frac{R_T^2(r) + d^2(r) - R_R^2(r)}{2R_T(r)d(r)} \right]. \quad (13)$$

因此,重叠因子 $O(r)$ ^[18]可表示为

$$O(r) = A_o(r) / \pi R_i^2(r). \quad (14)$$

利用上述的重叠因子模型,仿真分析自研的扫描型激光雷达系统(表 1),在发射光轴与接收光轴理想平行,即 $\theta_p=0$ 时,系统盲区为 0~116.7 m,过渡区为 116.7~760.0 m。针对自研的扫描型激光雷达系统,仿真分析了接收视场角、激光束发散角、光轴间距离和光轴夹角对激光雷达重叠因子的影响,如图 4 所示。

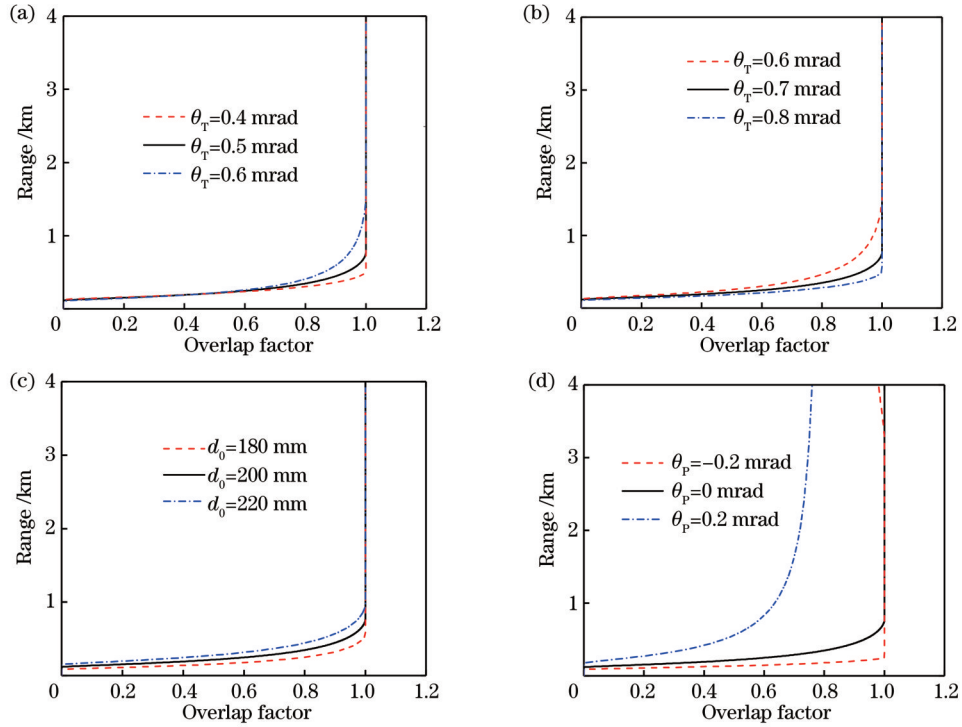


图 4 激光雷达参数对重叠因子的影响。(a)激光束发散角;(b)接收视场角;(c)光轴间距离;(d)光轴间夹角

Fig. 4 Influence of lidar parameters on overlap factors. (a) Divergence angle of laser beam; (b) field of view of receiver; (c) distance between optical axes; (d) angle between optical axes

由于激光雷达中激光束发散角通常小于接收视场角,以保证激光雷达远场信号的重叠因子为 1,由图 4(a)可看出,随着激光束发散角的增加,过渡区域增加,当激光束发散角由 0.5 mrad 增加至 0.6 mrad 时,过渡区终点由 0.76 km 增加至 1.40 km。从图 4(b)可看出,随着接收视场角的减少,过渡区域增加,当接收视场角由 0.7 mrad 减少至 0.6 mrad 时,过渡区终点由 0.76 km 增加至 1.30 km。由图 4(a)和 4(b)还可看出,激光束发散角和接收视场角对盲区距离也有影响,但是这种影响不大,几乎可以忽略。由图 4(c)可看出,随着初始光轴之间距离的增加,过渡区域增加,而盲区也增加,但增加幅度小于过渡区;当光轴间距离由 200 mm 增加至 220 mm 时,过渡区终点由 0.76 km 增加至 0.88 km,盲区增加不大。从图 4(d)可看出,发射和接收光轴平面内的夹角对重叠因子影响较大,当该角度为正时,重叠因子几乎一致小于 1;虽然该角度为负时,会导致盲区和过渡区减少,但是这也引起了激光雷达信号的远场重叠因子小于 1,例如,当该角度为

-0.2 mrad、探测距离 r 大于 3.5 km 时,会出现重叠因子小于 1 的情况。

3.3 近场信号的扫描校正与反演

针对激光雷达近场信号的校正要求,且系统多参数对重叠因子都有影响,基于激光雷达的垂直扫描功能,提出了近场信号的扫描校正技术(图 5),以实现多角度重叠因子校正的无盲区反演大气气溶胶垂直廓线。

图 5 中当激光雷达在 O 点垂直扫描 $\varphi_0=90^\circ$ 时, $\varphi_1, \dots, \varphi_i, \varphi_{i+1}, \dots (i=1, 2, \dots)$ 所对应的斜线分别表示不同俯仰角探测时的气溶胶消光系数廓线,虚线圆弧范围内表示盲区,实线圆弧和虚线圆弧之间为过渡区,实线圆弧以外表示重叠区,盲区和过渡区就是需要校正的近场信号,即半径为 r_N 的范围,该参数主要受限于激光雷达的结构参数。半径 r_N 的圆弧与垂直探测廓线的交点为 N_0 ,与俯仰角 φ_1 探测廓线的交点为 N_1 ,其余类似。

在激光雷达重叠区内,即探测距离 $r > r_N$ 时,如果

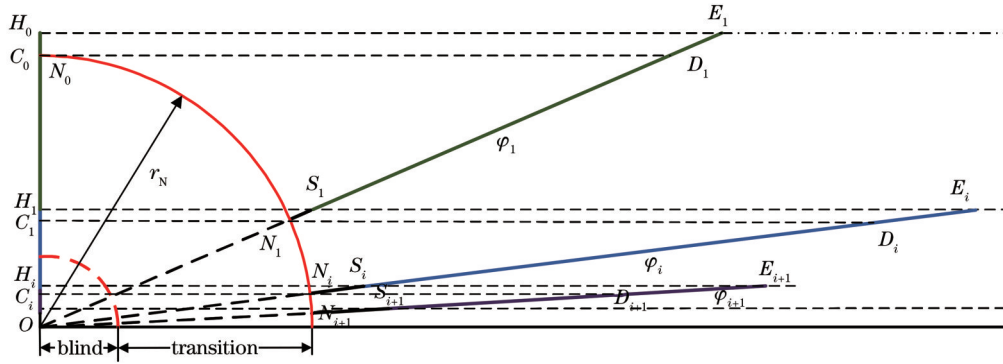


图 5 近场信号的扫描校正示意图

Fig. 5 Schematic diagram of scanning correction for near-field signals

没有如云层、雾霾层等气溶胶粒子浓度极大的聚集区，回波信号的信噪比通常随着距离增加会逐渐降低。因此，设置信噪比(SNR)阈值为 T_{SNR} ，只分析重叠区内高于信噪比阈值的一段连续区域。例如，图 5 中的 $[N_1, E_1]$ 段，将其用于高度 $[H_0, C_1]$ 区间的消光系数校正，而垂直探测 $[C_0, H_0]$ 段（即拼接距离 Z_M ，如 0.5 km）的消光系数廓线与俯仰角 φ_1 消光系数廓线 $[D_1, E_1]$ 段进行数据拼接；同理， $[N_2, E_2]$ 段 ($i=2$) 将用于高度 $[H_1, C_2]$ 区间的消光系数校正，而俯仰角 φ_1 探测 $[S_1, N_1]$ 段（即 Z_M ）的消光系数廓线与俯仰角 φ_2 消光系数廓线 $[D_2, E_2]$ 段进行数据拼接；其余类似。直至垂直廓线校正高度小于高度阈值 H_E （如 10 m），而 C_n 点以下可用水平观测的消光数据点表示；或者，扫描至观测周边环境限制的最小俯仰角 φ_n ，从而极大降低消光系数廓线的有效探测高度。具体扫描校正程序流程图如图 6 所示。

另外，与上述由垂直向低俯仰角的扫描校正相反，也可以采用由低俯仰角向垂直的扫描校正，此时先获得水平观测的近地面信号，或受限于观测环境的最小俯仰角，再依次进行不同俯仰角的探测，并利用 Fernald 反演算法的前向积分解，或者将 Fernald 反演算法的后向积分解迭代至近场的边界值，直至获得垂直探测的消光系数廓线。

上述的近场信号的扫描与反演技术，不仅能够直接反演获得大气气溶胶的垂直消光廓线（无盲区），而且可进一步反演得到激光雷达过渡区的重叠因子 $O(r)$ 。但是，在该扫描校正方案中，需要假定大气状态在扫描过程中是不变的，而且水平分布均匀，这是该方法的主要误差来源，这种误差主要受大气湍流强度和结构，以及风速和风向等影响。因此，如果要求探测近地面的盲区信号，则需要每组大气消光廓线都进行扫描探测与反演，此时，大气消光系数廓线不受限于重叠因子，主要受回波信号比、反演算法和大气稳定性以及水平均匀性的影响。然而，如果对于近地面的盲区信号要求不高，则可通过隔段时间校正一次的方案，进而利用校正后的重叠因子曲线 $O(r)$ ，降低激光雷达探

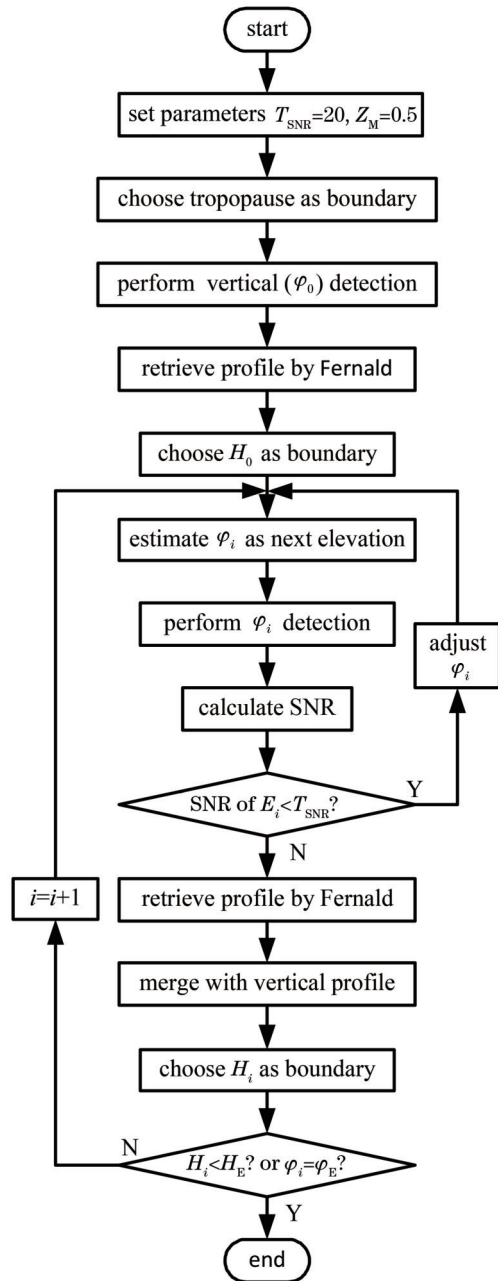


图 6 近场信号扫描校正流程图

Fig. 6 Flow chart of scanning correction for near-field signals

测的最低有效高度,大气消光系数廓线的误差则不仅受重叠因子曲线的校正精度影响,而且受激光雷达过渡区回波信号的信噪比影响。

4 校正及反演实验分析

为验证 3.3 节中的扫描校正方法,采用自研的二维扫描型激光雷达开展实验研究,观测点位于陕西省西安市阎良区(109.25E, 34.66N),观测方位角为 240°(西南,正北方的方位角为 0°),在此选择两组数据

的 355 nm 通道信号进行分析,每组探测数据积分时间为 2 min,7 组数据观测时间约为 15 min,数据距离分辨率为 3.75 m,平滑窗口为 21 bins,依据第 3 节的 Fernald 反演算法和校正模型,开展数据分析。

2022 年 6 月 23 日,天气晴,上午 09:41 至 09:56 (CST,北京时间)期间采集 7 组数据,其俯仰角分别为 90°、40°、10°、5°、2°、1°和 0°,上午的观测数据经历黎明时人类活动的影响,因此,大气底层气溶胶层存在上升过程,分析探测数据如图 7 所示。

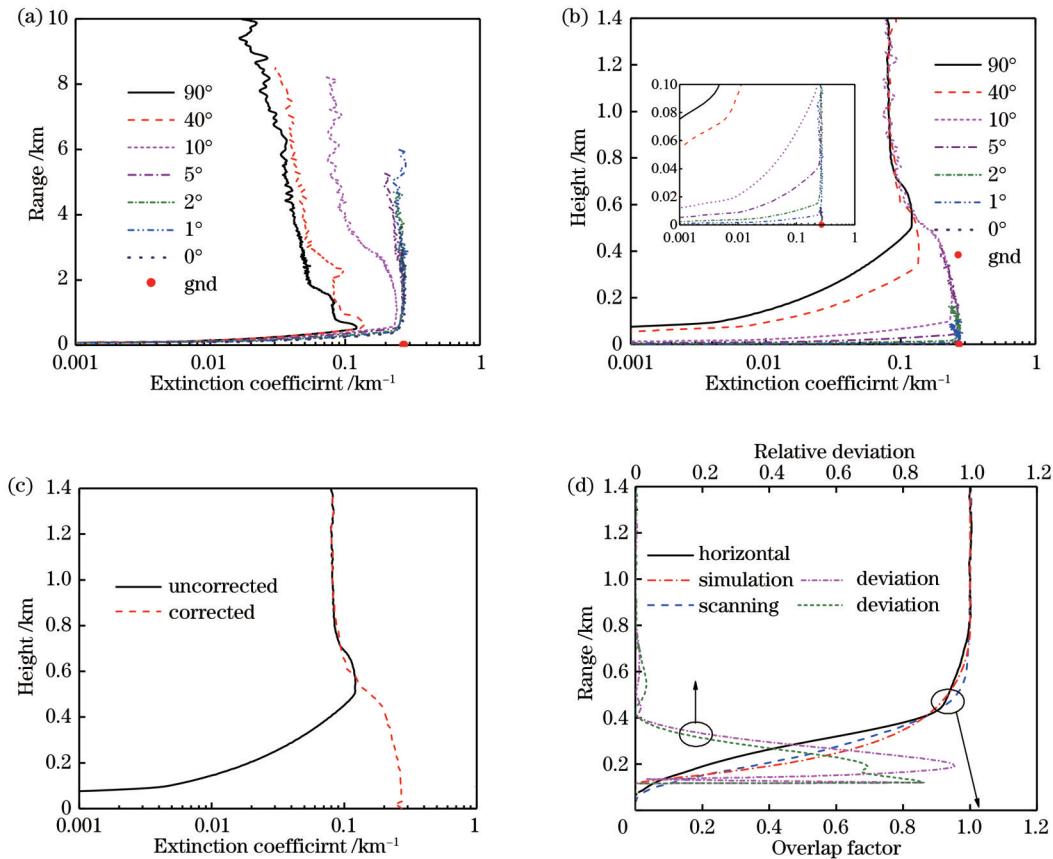


图 7 2022 年 6 月 23 日廓线反演与校正分析。(a)消光系数的距离廓线;(b)消光系数的高度廓线;(c)消光系数的垂直廓线;(d)重叠因子

Fig. 7 Profile retrieval and correction analysis on June 23, 2022. (a) Distance profile of extinction coefficient; (b) height profile of extinction coefficient; (c) vertical profile of extinction coefficient; (d) overlap factors

从图 7(a)可看出,未经校正的不同俯仰角度的消光系数廓线,受限于信噪比阈值,其探测距离略有差异,90°廓线的探测距离较远,而随着俯仰角度减少,探测距离逐渐减少,但是趋于水平时,探测距离又略有上升;而消光系数廓线随着俯仰角度减少,从 90°的大略呈现指数衰减,逐渐过渡至水平探测趋于固定数值。图 7(b)则展示了 7 组消光系数廓线随高度的变化情况,在相邻俯仰角的廓线之间,存在着较为明显的一致性,但是,90°和 40°廓线在 0.6 km 处的边界层顶部,也存在一定的不一致性,这会对校正结果产生一定的影响,另外,图 7(b)中的小图则着重展示了 0.1 km 以下的廓线一致性,尤其是 1°廓线与 0°廓线具有较好的一

致性,图中 0°廓线(Fernald 法)采用了 0.2°的小角度进行展示,以填充剩余 13 m 高度的数据,而地面消光系数(圆点 gnd)的数据来自 Collis 法反演的 0°数据,地面消光系数为 0.272 km⁻¹,水平能见度约为 19.4 km^[23]。图 7(c)给出了校正和未校正的大气消光系数廓线,校正曲线较好地展示了过渡区和盲区的近地面 0.76 km 以下的气溶胶分布,可实现激光雷达无盲区的近场信号校正,且其过渡区高度约为 96~750 m,这与第 3 节的理论值 116.7~760.0 m 具有较好的一致性,表明激光雷达收发轴平行度较高。为验证扫描校正方法的有效性,图 7(d)给出了过渡区内的重叠因子,实线是 0°探测数据通过水平校正(3.1 节)得到的重叠因子,点

划线是 3.2 节分析模型的数值仿真结果,而虚线是 3.3 节扫描校正的结果,三者整体上具有一定的一致性,但也存在较大差异,其主要原因在于,模型仿真法中需要假设激光束的光斑分布均匀,而实际激光束的光斑分布情况复杂(如类高斯分布等),而扫描校正和水平校正都需要假设水平分布均匀,同时扫描校正还受限于扫描期间的大气状态稳定程度等因素;其次,就是收发双轴平行度的调整以及激光束杂散光的影响等。图 7 中的上坐标(即相对偏差)是以水平校正为参考值算得

的,可看出扫描校正与水平校正的一致性优于仿真模型,且随着距离增加,由于水平校正信噪比改善,导致偏差也逐渐减少,过渡区(116~760 m)中扫描校正与水平校正的平均偏差为 19.6%。

2022 年 6 月 24 日,天气晴,上午 06:29 至 09:44 (CST,北京时间)期间采集 7 组数据,其俯仰角分别为 90°、40°、10°、5°、2°、1°和 0°,黎明时的观测数据遭受人类活动的影响较小,因此,大气底层气溶胶层分布较为规律,分析探测数据如图 8 所示。

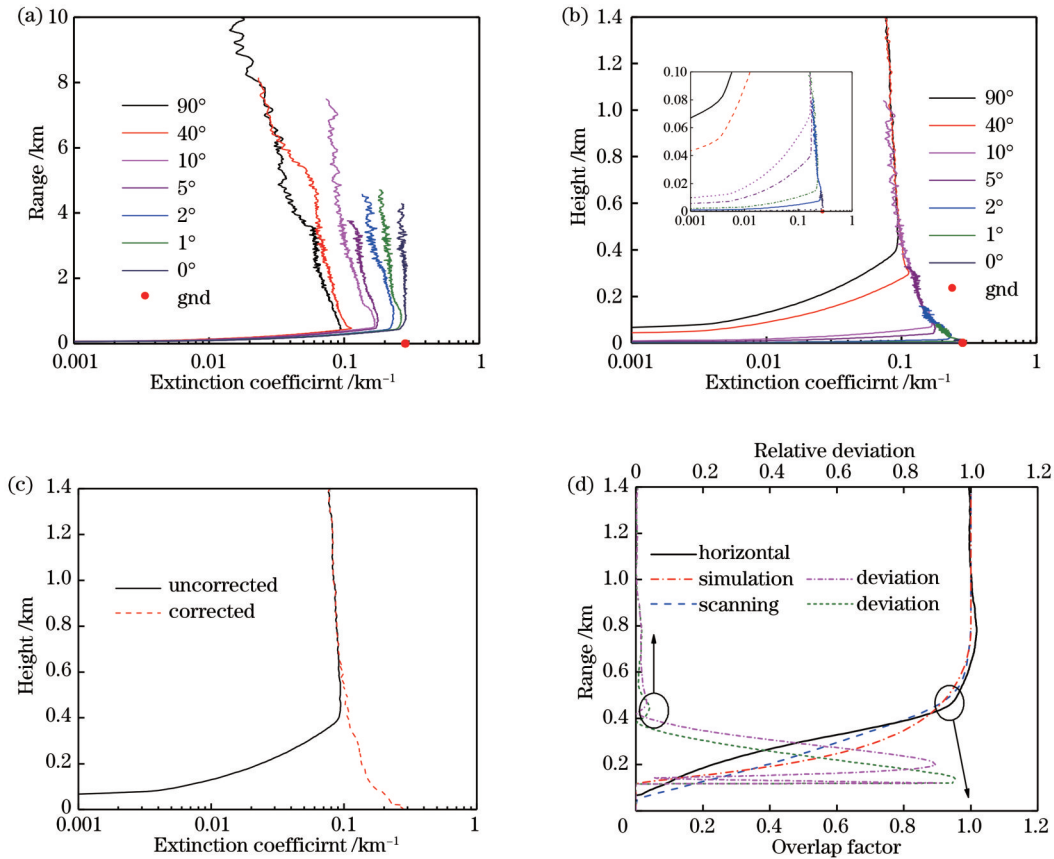


图 8 2022 年 6 月 24 日廓线反演与校正分析。(a)消光系数的距离廓线;(b)消光系数的高度廓线;(c)消光系数的垂直廓线;(d)重叠因子

Fig. 8 Profile retrieval and correction analysis on June 24, 2022. (a) Distance profile of extinction coefficient; (b) height profile of extinction coefficient; (c) vertical profile of extinction coefficient; (d) overlap factors

从图 8(a)可看出,未经校正的不同俯仰角度的消光系数廓线,受限于信噪比阈值,其探测距离略有差异,90°廓线的探测距离较远,而随着俯仰角度减少,探测距离逐渐减少,但是趋于水平时,探测距离又略有上升;而消光系数廓线随着俯仰角度减少,从 90°的大略呈现指数衰减,逐渐过渡至水平探测趋于固定数值。图 8(b)则展示了 7 组消光系数廓线随高度的变化情况,在相邻俯仰角的廓线之间,存在着较好的一致性,另外,图 8(b)中的小图则着重展示了 0.1 km 以下的廓线一致性,尤其是 1°廓线与 0°廓线具有较好的一致性,图中 0°廓线(Fernald 法)采用了 0.2°的小角度进行展示,以填充剩余 13 m 高度的数据,而地面消光系数(圆

点 gnd)的数据来自 Collis 法反演的 0°数据,地面消光系数为 0.284 km⁻¹,水平能见度约为 18.6 km^[23]。图 8(c)给出了校正和未校正的大气消光系数廓线,校正曲线较好地展示了过渡区和盲区的近地面 0.76 km 以下的气溶胶分布,可实现激光雷达无盲区的近场信号校正,而且其过渡区高度约为 94~745 m,这与理论值 116.7~760.0 m 具有较好的一致性,也表明激光雷达收发轴平行度较高。图 8(d)给出了过渡区内的重叠因子,实线是 0°探测数据通过水平校正(3.1 节)得到的重叠因子,点划线是 3.2 节分析模型的数值仿真结果,而虚线是 3.3 节扫描校正的结果,三者整体上具有一定的一致性,但也存在较大差异,其原因分析与

图 7(d) 类似。图 8(d) 中的相对偏差变化规律与图 7(d) 大略一致, 只是相对大小略有起伏, 扫描校正与水平校正的一致性略大于仿真模型, 且随着距离增加, 由于水平校正信噪比改善, 导致偏差也逐渐减少, 过渡区(116~760 m)中扫描校正与水平校正的平均偏差为 20.4%。

图 9 中对比了上述两组扫描校正的重叠因子, 两

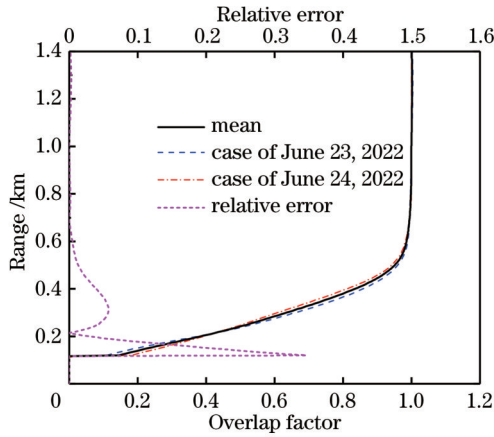


图 9 重叠因子校正曲线

Fig. 9 Correction curves of overlap factors

组信号重叠因子有相同的盲区终点和重叠区起点, 实线为其均值, 校正结果存在一定的差异, 短虚线给出了其统计误差, 可看出, 其差异在 0.2 km 以下, 由于数值较小, 因此相对误差较大, 在 0.2 km 以上的相对误差小于 7%, 在过渡区(116~760 m)内平均相对误差约为 4.2%, 扫描校正的误差主要来自不同观测环境参数(如温度)导致的激光雷达结构的微小变化, 以及 15 min 内大气状态的不一致性, 这表明激光雷达近场信号扫描校正方法具有较好的有效性。

为进一步验证扫描校正方法的性能, 图 10 给出了 2022 年 2 月 25 日至 26 日的 24 h 连续观测数据, 天气由多云转为晴, 实验地点位于西安理工大学金花校区学科二号楼南侧(108.99E, 34.26N), 探测方向朝西, 下午 18:00 至翌日 18:00(CST, 北京时间)期间每组数据采集 6 组廓线, 选择 355 nm 通道信号进行分析, 每条廓线数据积分时间为 2 min, 每组数据观测时间 12 min, 观测间隔 20 min, 数据距离分辨率为 3.75 m, 平滑窗口为 21 bins, 最大俯仰角为 28°(受限于观测条件), 依据第 3 节的 Fernald 反演算法进行消光系数反演, 因此, 图中的时间高度显示(THI)的左坐标是高度, 而右坐标是距离, 校正范围为 470 m 以下。

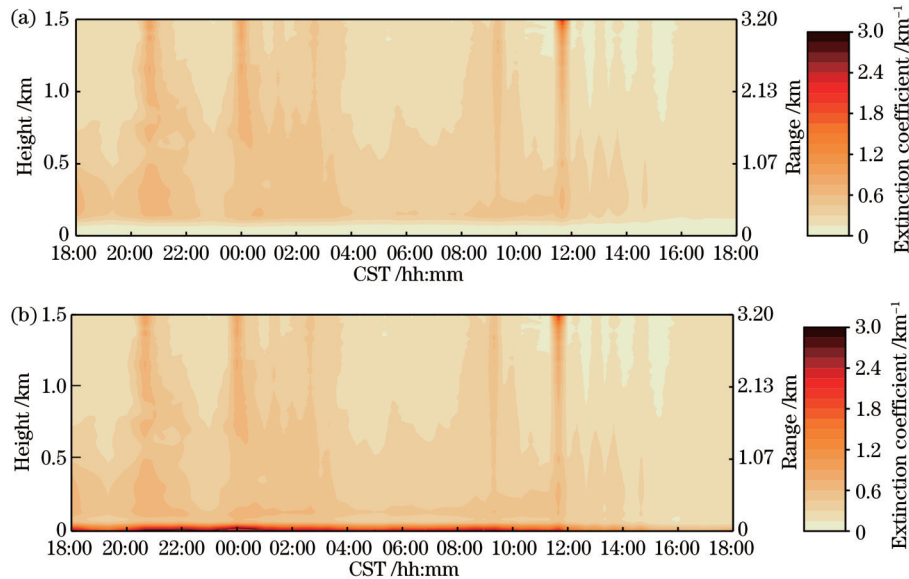


图 10 2022 年 2 月 25 日至 26 日观测数据校正比较。(a) 未校正; (b) 校正后

Fig. 10 Comparison of observation data on February 25-26, 2022 without and with correction. (a) Without correction; (b) with correction

对比图 10(a) 和 10(b) 可看出, 最为明显的 200 m 以下数据校正尤为明显, 获得了随时间变化的底层气溶胶分布数据。从观测时间上分析, 在 20:40、00:00 具有气溶胶的高浓度, 这与人类活动密切相关, 从地面气溶胶浓度分析, 在 00:00 时浓度最高。在 00:00 以后, 则存在明显的气溶胶沉降过程, 直至早晨 06:00, 而在上午时间则气溶胶浓度逐渐升高直至中午 12:00, 下午则由于天气转晴同时伴随微风, 导致气溶

胶逐渐下降, 城市空气质量逐步提升。

5 结 论

为校正 Mie 散射激光雷达的近场气溶胶消光廓线, 针对垂直扫描激光雷达, 提出了一种多角度的近场信号扫描校正方法, 以实现近场盲区和重叠因子的实时校正。从发射视场和接收视场的重叠面积出发, 分析了发射发散角、接收视场角、收发光轴间距、收发光

轴夹角等参数对激光雷达系统重叠因子的影响特性。基于大气水平均匀的分层假设,利用 Fernald 气溶胶反演算法,设计了基于信噪比的多俯仰角度扫描控制与校正步骤,以实现不同大气状态的自适应扫描控制。融合多角度扫描遥感数据,并以水平探测的 Collis 法反演的结果作为地面消光系数,获得了大气气溶胶消光系数无盲区廓线。在静稳天气时水平能见度优于 18 km 的情况下,以信噪比 20 为阈值,通过约 7 个俯仰角度,实现了激光雷达重叠因子的自适应校正,获得的重叠因子校正曲线与水平探测法校正曲线的平均相对偏差约为 20%,两组扫描校正的重叠因子曲线的平均相对误差为 4.2%,并通过长时间观测验证了扫描校正的有效性,可实现大气气溶胶的无盲区反演。但是,该近场信号校正方法的误差会受限于大气状态的稳定程度和水平分布均匀性。

参 考 文 献

- [1] 黄忠伟,王雍恺,闭建荣,等.气溶胶激光雷达的国内外研究进展与展望[J].遥感学报,2022,26(5):834-851.
Huang Z W, Wang Y K, Bi J R, et al. An overview of aerosol lidar: progress and prospect[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(5): 834-851.
- [2] 董德保,张广元,陆大春,等.寿县一次沙尘过程气溶胶谱分布和光学特性的阶段性特征[J].激光与光电子学进展,2022,59(19):1901002.
Dong D B, Zhang G Y, Lu D C, et al. Stageful characteristics of aerosol spectral distribution and optical properties during a dust episode in Shouxian[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(19): 1901002.
- [3] 赵忆睿,曹念文,贾鹏程,等.紫外多波长激光雷达的臭氧和气溶胶同步观测研究[J].激光与光电子学进展,2022,59(16):1601001.
Zhao Y R, Cao N W, Jia P C, et al. Simultaneous observation of ozone and aerosol by ultraviolet multi-wavelength lidar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(16): 1601001.
- [4] 倪登峰,刘素,曹力媛,等.太原市采暖季PM_{2.5}组分特征及重污染事件分析[J].中国环境科学,2020,40(7):2821-2828.
Ni D F, Liu S, Cao L Y, et al. Composition characteristics of PM_{2.5} and heavy pollution events in Taiyuan City during heating season[J]. China Environmental Science, 2020, 40(7): 2821-2828.
- [5] Jenness J R, Jr, Lysak D B, Jr, Philbrick C R. Design of a lidar receiver with fiber-optic output[J]. Applied Optics, 1997, 36(18): 4278-4284.
- [6] Halldórsson T, Langerholc J. Geometrical form factors for the lidar function[J]. Applied Optics, 1978, 17(2): 240-244.
- [7] 康圣,夏明卓,王江安,等.非共轴激光雷达系统参数对几何因子的影响[J].光学与光电技术,2012,10(2):47-51.
Kang S, Xia M Z, Wang J A, et al. Influence of anti-coaxial lidar system parameters on geometrical factor[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2012, 10(2): 47-51.
- [8] 熊兴隆,李永东,冯帅,等.PM_{2.5}质量浓度廓线的激光雷达反演研究[J].光子学报,2020,49(4):0401001.
Xiong X L, Li Y D, Feng S, et al. Lidar inversion of PM_{2.5} mass concentration vertical distribution[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(4): 0401001.
- [9] 赵虎,华灯鑫,毛建东,等.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[J].物理学报,2015,64(12):124208.
Zhao H, Hua D X, Mao J D, et al. Correction to near-range multiwavelength lidar optical parameter based on the measurements of particle size distribution[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(12): 124208.
- [10] 巫阳,罗涛,刘常瑜,等.基于无人机探测大柴旦地区近地层气溶胶特征[J].光学学报,2022,42(6):0601003.
Wu Y, Luo T, Liu C Y, et al. UAV-based characteristic detection of near-surface layer aerosol over da Qaidam area[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(6): 0601003.
- [11] 闫庆,华灯鑫,李仕春,等.微脉冲 Mie 散射激光雷达系统的产品化研发及实验观测研究[J].量子电子学报,2013,30(1):123-128.
Yan Q, Hua D X, Li S C, et al. Observation and productization of the micro-pulsed Mie scattering lidar system[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2013, 30(1): 123-128.
- [12] 刘巧君,吴承璇,郑玉臣,等.离轴激光雷达重叠因子解析研究[J].光散射学报,2017,29(4):367-371.
Liu Q J, Wu C X, Zheng Y C, et al. The analytical formula research of the overlap factor of off-axis lidar[J]. The Journal of Light Scattering, 2017, 29(4): 367-371.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Wandinger U, Ansmann A. Experimental determination of the lidar overlap profile with Raman lidar[J]. Applied Optics, 2002, 41(3): 511-514.
- [16] 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.
Cao K F, Du X Y, Wang S L, et al. Determination of lidar geometric form factor with pure rotational Raman scattering signal[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(8): 1349-1354.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 陶宗明,施奇兵,谢晨波,等.利用 CCD 和后向散射激光雷达精确探测近地面气溶胶消光系数廓线[J].红外与激光工程,2019,48(S1):S106007.
Tao Z M, Shi Q B, Xie C B, et al. Precise detection of near ground aerosol extinction coefficient profile based on CCD and backscattering lidar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(S1): S106007.
- [21] 王界,刘文清,张天舒,等.基于双视场激光雷达的气溶胶水平分布观测[J].光谱学与光谱分析,2019,39(9):2664-2669.
Wang J, Liu W Q, Zhang T S, et al. Mapping for horizontal aerosol density field by a portable dual-FOV lidar[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(9): 2664-2669.
- [22] 薛国刚,孙东松,闫长春,等.小型气溶胶激光雷达及其信号校准[J].激光与红外,2005,35(3):151-153.
Xue G G, Sun D S, Yan C C, et al. A compact aerosol lidar and its signal calibration[J]. Laser & Infrared, 2005, 35(3): 151-153.
- [23] 李仕春,任腾,王旭,等.斜程能见度探测的米-拉曼散射扫描型激光雷达研制[J].光学学报,2022,42(12):1228001.
Li S C, Ren T, Wang X, et al. Development of Mie-Raman scattering scanning lidar for probing slant visibility[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(12): 1228001.
- [24] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments[J]. Applied Optics, 1984, 23(5): 652-653.

Near-Field Signal Correction and Retrieval Technique for Mie Scattering Vertical Scanning Lidar

Li Shichun^{1,2*}, Ren Teng¹, Zhang Penghui¹, Gao Yingchun¹, Hua Dengxin^{1,2**},
Wang Yufeng^{1,2}, Song Yuehui^{1,2}, Gao Fei^{1,2}

¹*School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China;*

²*Shaanxi Collaborative Innovation Center for Modern Equipment Green Manufacturing, Xi'an 710048, Shaanxi, China*

Abstract

Objective Mie scattering lidar is a remote sensing instrument with a high spatial and temporal resolution, and it has received extensive attention in research since it has successfully been applied in the fields such as atmospheric aerosol observation, cloud and fog characteristic analysis, and pollution emission monitoring. However, most of these ground-based lidars belong to the monostatic structure with the same transmitting and receiving sites. While they are being utilized to detect tropospheric or boundary layer, the transmitting and receiving coaxial systems (limited by the reflective telescope structure) or the transmitting and receiving systems with different axes (also known as off-axis) are almost affected by the near-field blind area and overlap factor, which results in the loss of near-field signals of the lidar or the reduction of accuracy. Therefore, the data of near-field point-type probing instruments (such as horizontal visibility meter, PM2.5 meter, and particle spectrometer) are usually required for data correction, compensation, or verification in these applications of lidar. However, the near-field atmospheric characteristics are usually essential data in meteorological, environmental, and other fields, which greatly limits the engineering and application process of the lidar. Therefore, overlap factor correction of lidar near-field signals and blind area have always restricted the practical process of lidar.

Methods Based on the assumption of horizontal atmosphere uniformity, a multi-angle scanning near-field signal adaptive correction method for lidar is proposed using the vertical scanning function of the developed two-dimensional scanning lidar system. Firstly, according to the overlap factor model of an off-axis lidar system, the influence of laser beam divergence angle, telescope field angle, optical axis distance, and optical axis angle on the overlap factor is analyzed. Secondly, using the Fernald aerosol retrieval algorithm and taking the advantage of lidar vertical scanning, a multi-elevation angle correction scheme dependent on signal-to-noise (SNR) threshold is proposed to achieve adaptive scanning control of different atmospheric states. Combined with the ground extinction coefficient retrieved by the Collis method and the multi-angle scanning remote sensing data, the aerosol extinction coefficient without a blind area profile is retrieved, and the effectiveness of the correction scheme under different weather conditions is compared.

Results and Discussions Based on the stratification assumption of a uniform atmosphere, the multi-elevation angle scanning control and correction steps (Figs. 5 and 6) are designed to realize the adaptive scanning control for different atmospheric states. Using multi-angle scanning remote sensing data and taking the result of Collis retrieval by horizontal detection as the ground extinction coefficient, the blind area profile of the atmospheric aerosol extinction coefficient is obtained [Fig. 7 (c) and Fig. 8 (c)]. When the horizontal visibility is better than 18 km and the SNR threshold is 20, the average relative deviation of the overlap factor correction curve and the correction curve of the horizontal detection method is about 20% [Fig. 7 (d) and Fig. 8 (d)], and the average relative error of the overlap factor curve is 4.2% (Fig. 9). Finally, a group of data with 24-h observation is shown to verify the scanning correction method (Fig. 10), and the retrieval without blind area of atmospheric aerosol can be realized.

Conclusions In order to correct the near-field aerosol extinction profile of ground-based Mie scattering lidar, a vertical scanning correction method and multi-angle retrieval algorithm are proposed for near-field signals of Mie scattering lidar, and then the adaptive control of the atmospheric state is probed based on the assumption of horizontal atmosphere uniformity. Owing to the scattering lidar equation, a model of the overlap factor and blind area in the near field of the lidar is constructed, and the characteristics of the overlap factor and the blind area are analyzed and simulated based on the developed two-dimensional scanning lidar. In combination with the Fernald retrieval algorithm, a multi-elevation scanning control and correction scheme dependent on SNR is presented to realize adaptive scanning control for different atmospheric conditions. The profile of atmospheric aerosol extinction coefficient without blind area under different weather conditions is

obtained by merging multi-angle scanning remote sensing data and the ground extinction coefficient obtained by the Collis method of horizontal detection, and the effectiveness of this scheme is verified. The data analysis results show that the adaptive correction of the lidar overlap factor can be achieved through seven elevations of about 15-min observation with the SNR ratio of 20 as the threshold when the horizontal visibility is better than 18 km. The mean relative deviation of the obtained calibration curve from horizontal correction is about 20%, and the mean relative error of the correction results of the overlap factor curves is 4.2%, which can realize the retrieval of atmospheric aerosol without blind area.

Key words sensors; lidar; near-field signal correction; atmospheric extinction coefficient; vertical scanning