

多波长发光二极管光源雷达系统与近地面低层大气气溶胶探测

钟文婷 刘君 华灯鑫 侯海彦 晏克俊

Multi-wavelength light-emitting diode light source radar system and near-ground atmospheric aerosol detection

Zhong Wen-Ting Liu Jun Hua Deng-Xin Hou Hai-Yan Yan Ke-Jun

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 184208 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180721

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180721>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphys.ac.cn/CN/Y2018/V67/I18>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[一种测量大气消光系数边界值的新方法](#)

A new method of measuring boundary value of atmospheric extinction coefficient

物理学报.2018, 67(5): 054205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172008>

[绝对测温转动拉曼激光雷达分光系统设计及性能](#)

Design and performance of spectroscopic filter of rotational Raman temperature lidar for absolute measurement

物理学报.2018, 67(1): 014207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.20171834>

[高光谱分辨率激光雷达鉴频器的设计与分析](#)

Design and analysis of high-spectral resolution lidar discriminator

物理学报.2017, 66(18): 184202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.184202>

[远距离探测拉曼光谱特性](#)

Characteristics of Raman spectrum from stand-off detection

物理学报.2016, 65(5): 054206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.054206>

[抑制光束抖动的压电倾斜镜高带宽控制](#)

High-bandwidth control of piezoelectric steering mirror for suppression of laser beam jitter

物理学报.2016, 65(2): 024209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024209>

多波长发光二极管光源雷达系统与近地面低层大气气溶胶探测*

钟文婷 刘君 华灯鑫[†] 侯海彦 晏克俊

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

(2018年4月18日收到; 2018年5月9日收到修改稿)

设计并研制了一台多波长发光二极管(LED)光源雷达系统,用于探测近地面低层大气气溶胶特性.介绍了LED光源雷达系统的组成及工作原理,计算分析了系统几何重叠因子,从而确定了LED光源雷达系统的最低探测高度为60 m.研究了LED光源雷达散射回波信号的数据反演方法,根据LED光源雷达适合近距离探测的特点,采用了Fernald前向积分反演算法,并以地面能见度仪数据为基础,确定了气溶胶消光系数的边界值.利用所设计的475, 530和625 nm三个波长的LED光源雷达系统,分别在轻度污染、中度污染和重度污染天气情况下,对西安夜晚城区上空低层大气气溶胶进行了探测,获得了近300 m高度内三个波长的大气气溶胶消光系数高度分布曲线,并对近地面低层大气气溶胶的垂直分布与变化特征进行了探讨.

关键词: 发光二极管光源雷达, 多波长探测, 近地面, 气溶胶

PACS: 42.68.Wt, 42.79.Qx

DOI: 10.7498/aps.67.20180721

1 引言

大气近地面含有大量的气溶胶颗粒物,而气溶胶颗粒物能够影响地气系统的辐射平衡,并通过消光作用改变能见度,影响大气化学过程从而改变温室气体成分,影响空气质量,与人类的生活和生产息息相关.对近地面大气气溶胶的研究是目前环境领域研究的热点之一^[1-3].为了更好地研究近地面气溶胶的行为,须对其光学特性进行可靠的测量.

传统的地面监测仪器可以对地面上的气溶胶进行精确地连续监测,但是难以获得近地面气溶胶的垂直高度分布信息^[4-6].激光雷达是探测气溶胶时间和空间分布的有效手段,但其发射波长固定,而且存在较长距离的探测盲区^[7,8],使其在特定波长探测和低层大气探测时受到限制.随着遥感探测技术和发光二极管(light emitting diode, LED)光源技术的发展,近年来出现了以大功率LED作

为遥感光源的光学雷达.LED光源雷达不仅具有激光雷达可以对大气进行时间和空间分布探测的特点,而且它盲区很小、发射能量对眼安全,更适合探测与人类活动密切相关且气溶胶分布较多的低层大气^[9].LED光源的最显著特点是可选择的波长丰富,现在可用于遥感雷达的大功率LED的波长有十余种之多,这就对利用雷达进一步研究气溶胶的特性提供了有效手段.对LED光源雷达的研究主要以日本千叶大学的Shiina Tatsuo等学者为代表,用波长392 nm的LED研制了能够探测0—300 m距离内大气并区分粉尘特性的LED迷你雷达^[10,11],用波长349 nm的LED研制了检测氢气泄漏的紧凑型Raman雷达^[12,13],采用波长385 nm的LED雷达测量海浪并分析了海浪的周期和速度^[14].国内除了我们在文献^[15]设计的波长530 nm的LED光源气溶胶探测雷达之外,未见其他关于LED用于光学遥感雷达的报道,多波长LED雷达的研究也未见报道.

* 国家自然科学基金(批准号: 41575035)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: xauthdx@163.com

本文利用LED波长丰富的特点,提出了一种用于探测近地面低层大气气溶胶的多波长LED光源雷达系统. 阐明了雷达的系统构成和工作原理,通过分析雷达的几何重叠因子,确定后向散射光完全进入望远镜接收视场角的最低高度,并研究了LED雷达的数据反演算法. 建立了波长为475, 530和625 nm的多波长LED光源雷达系统,在轻度、中度和重度污染天气情况下,对西安市近地面低层大气气溶胶进行了探测,获得了各波长的消光系数随高度的分布廓线.

2 多波长LED光源雷达系统

2.1 系统构成及工作原理

设计的多波长LED光源雷达系统采用同轴发射接收的模式,如图1所示,主要由LED光源发射部分、望远镜接收部分、分光与检测部分和计算机信号采集与处理部分组成. LED光源可选择的波长较多,本系统选用475, 530和625 nm,研究气溶胶在这三个波长上的光学特性. 采用单颗大功率LED灯珠作为光源,由脉冲驱动电源驱动LED光源发出脉冲光,脉冲波形近似矩形波,脉宽为200 ns,垂直分辨率为30 m. LED灯珠发光面积为1 mm × 1 mm,发散角大,利用专门设计的准直扩束光路将光束发散角压缩至11 mrad^[16]. 光束采用与望远镜同轴的方式射入大气. 产生的后向散射

光被卡塞格林望远镜的两面反射镜反射后,通过光阑进入分光与检测部分. 经窄带干涉滤光片分光后由光电倍增管(PMT)接收,最后由计算机进行数据采集与处理. 考虑到光源能量弱,为了有效降低回波信号的白噪声,设置了高脉冲重复频率(100 kHz),脉冲累积时间为15 min. 系统在工作时,LED光源采用每间隔15 min更换一种波长光源的方法,在更换LED灯珠的同时,更换相应波长的窄带干涉滤光片,实现多波长探测. 此时,由于3个波长是在间隔较短时间内探测,所以选择在气溶胶状态变化较小的无风天气下进行实验. 系统主要参数如表1所列.

表1 多波长LED光源雷达系统参数

Table 1. Parameters of multi-wavelength LED radar system.

Emitter system	
LED wavelength λ	475 nm, 530 nm, 625 nm
Pulse energy of LED E	18 nJ, 3 nJ, 13 nJ
Pulse duration τ	200 ns
Repetition frequency	100 kHz
Beam diameter D_t	46 mm
Beam divergence θ_t	11 mrad
Receiver system	
Diameter of telescope D_r	254 mm
Field of view θ_r	16 mrad
Focal length f	2500 mm
Filter $\Delta\lambda$	25 nm @475 nm 22 nm @531 nm 25 nm @625 nm
Quantum efficiency of PMT	17%, 15%, 8%

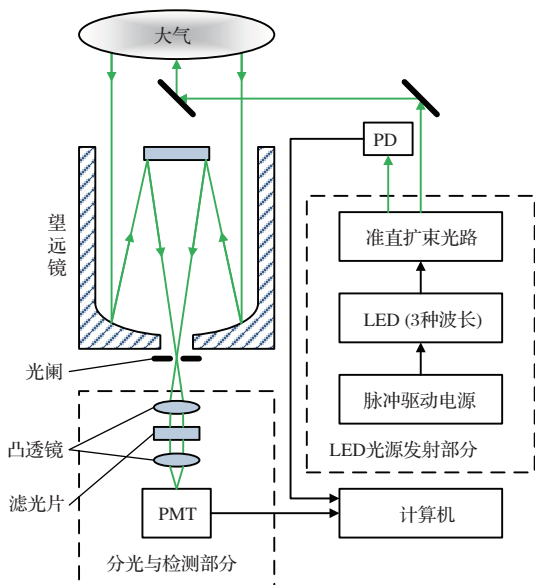


图1 LED光源雷达系统

Fig. 1. LED light source radar system.

2.2 LED光源雷达几何重叠因子分析

研制的LED光源雷达系统采用同轴发射与接收的工作方式,接收视场角大于光束发散角时,远处的后向散射光可以完全进入接收望远镜,但近处存在一段距离的盲区和过渡区,使得近处的后向散射光不能全部被系统接收^[17,18]. 因此,在探测近地面大气气溶胶时,为了明确后向散射光能够完全被系统接收的最低高度,需要对系统的几何重叠因子 $Y(R)$ 进行分析.

LED光源雷达的几何重叠因子由发射部分和接收部分的结构确定,图2为同轴LED雷达系统发

射与接收示意图, 图中 D_r 为望远镜口径, D_t 为出射光斑直径, D_o 为望远镜前方遮挡直径, D_a 为光阑直径, θ_r 为接收视场角, θ_t 为光束发散角. 当接收视场角大于光束发散角时, 若不考虑反射镜遮挡, 发射光束始终在望远镜接收视场范围内. 根据文献 [18], 后向散射光线被雷达系统接收的条件为: 散射光线与光轴的夹角 φ 满足 $\varphi < \theta_r/2$. 因此, 视场内某一点发出的散射光线能否被系统接收, 可分为以下三种情况:

1) 受望远镜前方反射镜遮挡, 在图中阴影部

分, 粒子产生的散射光无法进入光阑;

2) 如图 2 中点 A, 经点 A 入射到望远镜中的后向散射光线并非全都满足 $\varphi < \theta_r/2$ 的条件, 意味着点 A 产生后向散射光只有部分能通过光阑被系统接收;

3) 如图 2 中点 B, 经点 B 入射到望远镜中的后向散射光线全都满足 $\varphi < \theta_r/2$ 的条件, 若不考虑反射镜遮挡, 点 B 产生后向散射光全部都可以通过光阑被系统接收.

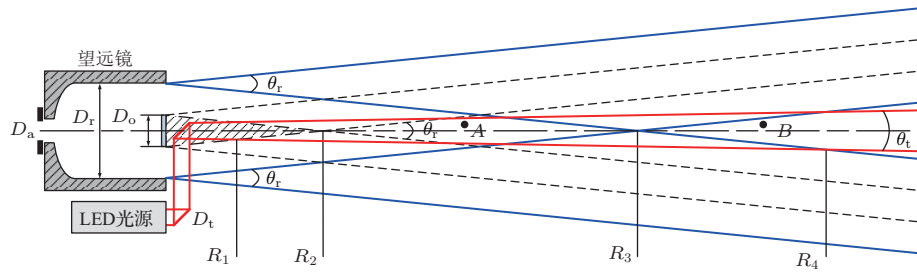


图 2 LED 雷达发射与接收示意图

Fig. 2. Schematic of LED radar's transmitter and receiver.

可以看出, 在近距离处, 即使光束截面完全处于接收视场内, 产生的散射光线也不一定能全部被雷达系统接收. 光束截面中, 设进入望远镜视场的截面面积与光束截面总面积之比为 $\eta(R)$, 入射到望远镜的散射光线可以全部通过光阑的区域面积与光束截面总面积之比为 $\eta'(R)$, 几何重叠因子 $Y(R)$ 应介于 $\eta(R)$ 和 $\eta'(R)$ 之间.

在近处, 当 $R \leq R_1$, 由于望远镜前方反射镜遮挡, 光束没有进入望远镜接收视场, 此时 $\eta(R) = 0$; 当 $R_1 < R \leq R_2$, 部分光束进入接收视场, 此时 $0 \leq \eta(R) < 1$; 当 $R > R_2$, 光束全部进入接收视场, $\eta(R) = 1$.

当 $R \leq R_3$, 光束截面中的任何粒子产生的后向散射光线都不可能全部通过光阑, $\eta'(R) = 0$; 当 $R_3 < R \leq R_4$, 光束截面中部分区域的粒子产生的后向散射光线可以全部通过光阑, 此时 $0 < \eta'(R) < 1$; 当 $R > R_4$, 若不考虑遮挡物的影响, 光束截面中的任何粒子产生的后向散射光线都能全部通过光阑被系统接收, 此时 $\eta'(R) = 1$.

根据图 2 中的几何关系可以得出, $R_1 = (D_o - D_t)/(\theta_r + \theta_t)$, $R_2 = D_o/\theta_r$, $R_3 = D_r/\theta_r$, $R_4 = (D_r + D_t)/(\theta_r - \theta_t)$, 当 $R_1 < R \leq R_2$ 时, $\eta(R)$ 的表达式为

$$\eta(R) = \frac{(D_t + \theta_t \cdot R)^2 - (D_o - \theta_r \cdot R)^2}{(D_t + \theta_t \cdot R)^2}; \quad (1)$$

当 $R_3 < R \leq R_4$ 时, $\eta'(R)$ 的表达式为

$$\eta'(R) = \frac{(\theta_r \cdot R - D_r)^2}{(D_t + \theta_t \cdot R)^2}. \quad (2)$$

图 3 给出了根据 (1) 和 (2) 式以及表 1 所列系统参数绘制的 $\eta(R)$ 和 $\eta'(R)$ 随距离 R 的变化曲线.

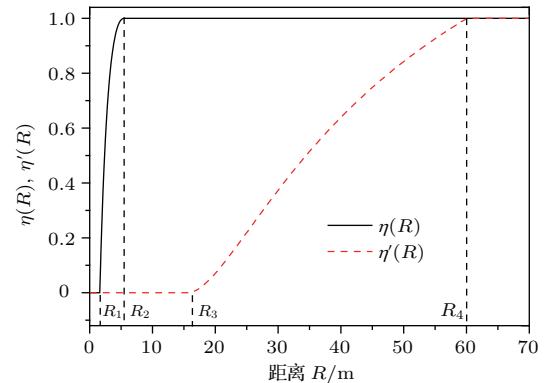


图 3 $\eta'(R)$ 和 $\eta(R)$ 随距离 R 的变化

Fig. 3. Curves of $\eta'(R)$ and $\eta(R)$ with distance R .

从图 3 可知, 由于几何重叠因子 $Y(R)$ 介于 $\eta(R)$ 和 $\eta'(R)$ 之间, 60 m 之前, $\eta'(R) < Y(R) < \eta(R) \leq 1$, 60 m 之后, $\eta'(R) = Y(R) = \eta(R) = 1$, 说明 60 m 高度以上后向散射光能够完全被系统接收. 因此, 不考虑修正几何重叠因子时, 该 LED 雷

达系统的探测范围下限可到60 m, 因而可以实现近距离的大气气溶胶探测.

3 回波信号数据反演方法

LED光源雷达系统接收到大气后向散射回波信号, 通过反演雷达方程获得气溶胶的消光系数和后向散射系数. 雷达方程如下:

$$P(\lambda, R) = \frac{C \cdot Y(R)}{R^2} \cdot [\beta_a(\lambda, R) + \beta_m(\lambda, R)] \times \exp \left\{ -2 \int_0^R [\alpha_a(\lambda, R') + \alpha_m(\lambda, R')] dR' \right\}, \quad (3)$$

$$\alpha_a(\lambda, R) = -\frac{S_a}{S_m} \cdot \alpha_m(\lambda, R)$$

$$+ \frac{P(\lambda, R) \cdot R^2 \cdot \exp \left[-2 \left(\frac{S_a}{S_m} - 1 \right) \cdot \int_{R_c}^R \alpha_m(\lambda, R) dR \right]}{\frac{P(\lambda, R_c) \cdot R_c^2}{\alpha_a(\lambda, R_c) + \frac{S_a}{S_m} \cdot \alpha_m(\lambda, R_c)} - 2 \int_{R_c}^R \left\{ P(\lambda, R) \cdot R^2 \cdot \exp \left[-2 \left(\frac{S_a}{S_m} - 1 \right) \cdot \int_{R_c}^R \alpha_m(\lambda, R') dR' \right] \right\} dR}, \quad (4)$$

式中 $S_m = 8\pi/3$ 为大气分子的消光后向散射比, S_a 为气溶胶的消光后向散射比, R_c 为边界点高度值.

在利用 Fernald 前向积分法进行回波数据反演时, 需要确定适合高度处的边界值, 边界点的选取失误会对反演结果产生较大影响^[20]. 根据2.2节系统几何重叠因子的分析, 在60 m高度以上, 几何重叠因子 $Y(R) = 1$; 60 m以下, 几何重叠因子 $Y(R) < 1$. 根据文献^[8], 短距离内距离平方校正信号 (range squared corrected signal, RSCS) 可以认为是线性分布, 利用斜率一致的原则对60 m以下的RSCS进行修正. 考虑将边界点高度 R_c 取值在5 m, 然后利用 Fernald 前向积分法反演5 m以上高度的气溶胶消光系数.

气溶胶消光系数的边界值 $\alpha_a(\lambda, R_c)$ 可以根据同一高度(5 m)能见度仪数据换算得到, 能见度 V (单位: km) 与气溶胶消光系数 (单位: km^{-1}) 的经验关系式^[21]为

$$\alpha_a(\lambda, R) = \frac{3.912}{V} \cdot \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-q} - \alpha_m(\lambda, R), \quad (5)$$

其中大气分子的消光系数 $\alpha_m(\lambda, R)$ 可采用美国标准大气模型的数据, q 取值为

$$q = \begin{cases} 0.585V^{\frac{1}{3}}, & V < 6 \text{ km}, \\ 1.3, & 6 \text{ km} \leq V < 50 \text{ km}. \end{cases} \quad (6)$$

式中 λ 为探测波长, R 为探测距离, $P(\lambda, R)$ 为雷达接收到的回波信号功率, C 为雷达的系统常数, $Y(R)$ 为重叠因子, $\beta_a(\lambda, R)$ 为气溶胶的后向散射系数, $\beta_m(\lambda, R)$ 为大气分子的后向散射系数, $\alpha_a(\lambda, R)$ 为气溶胶的消光系数, $\alpha_m(\lambda, R)$ 为大气分子的消光系数. 本系统采用三个不同探测波长, 可得到相应的三个雷达方程.

由于LED光源雷达能量小, 探测距离比较近, 适合采用 Fernald 前向积分法^[19]反演气溶胶消光系数, 其数学表达式为

利用能见度仪的数据, 通过(5)式的计算, 可以获得一个比较准确的气溶胶消光系数的边界值, 减小消光系数的反演误差.

4 近地面低层大气气溶胶观测与分析

2018年初, 分别选取了轻度、中度和重度污染天气, 利用建立的多波长LED光源雷达系统在西安理工大学雷达中心对夜晚的西安市低层大气气溶胶进行了垂直探测, 获得了高度约300 m内三个波长下大气气溶胶消光特性分布, 并对其变化特征进行了分析. LED光源雷达观测的同时, 雷达中心的CJY-1G型前向散射能见度仪测量实时能见度, 为反演消光系数提供边界值, 该仪器测量范围为10—50000 m, 精度为 $\pm 10\%$ (能见度 ≤ 1500 m时) 或者 $\pm 20\%$ (能见度 > 1500 m时).

4.1 轻度污染天观测结果与分析

2018年2月4日晚(晴天), 空气质量指数AQI在120到135之间, 属于轻度污染天气. 在当晚21:00 (雷达中心能见度仪的能见度数据为8 km) 进行了一次观测, 探测结果示于图4. 图4(a)为探测回波的RSCS, 从探测曲线来看, 530 nm波段在150 m高度内数据可靠, 150 m高度以上, 信噪比

较低, 曲线波动变大, 475 和 625 nm 波段在 210 m 高度内数据可靠. 图 4(b) 为气溶胶消光系数的高度分布曲线, 三个波长的消光系数随高度增加逐渐减小, 在 5—210 m 高度内, 475 nm 波段消光系数

从 0.66 km^{-1} 减小到 0.09 km^{-1} , 625 nm 波段消光系数从 0.47 km^{-1} 减小到 0.06 km^{-1} , 530 nm 波段消光系数在 5—150 m 高度内从 0.57 km^{-1} 减小到 0.13 km^{-1} .

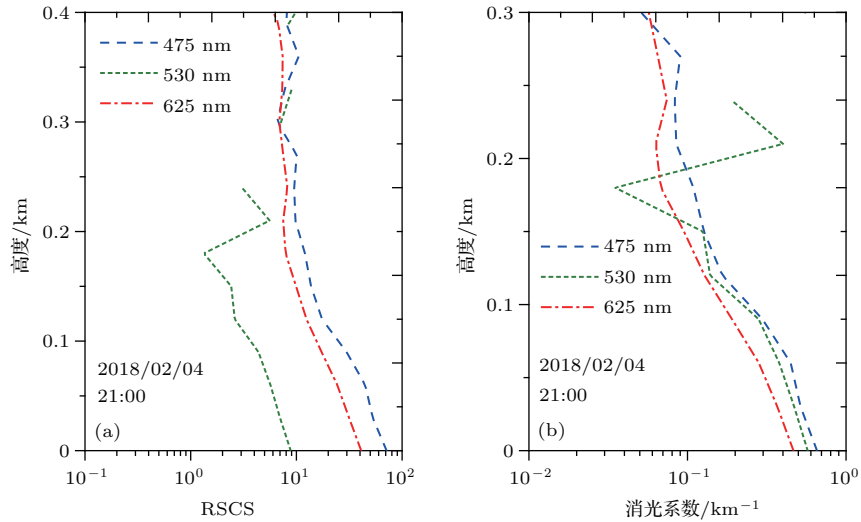


图 4 2018 年 2 月 4 日 21:00 垂直观测结果 (a) RSCS; (b) 消光系数高度分布曲线
Fig. 4. Vertical observations at 21:00 on February 4, 2018: (a) RSCS; (b) aerosol extinction coefficient.

4.2 中度污染天观测结果与分析

2018 年 3 月 20 日晚至 21 日凌晨 (多云间晴), 空气质量指数 AQI 在 169 到 178 之间, 属于中度污染天气. 在夜晚 21:00、凌晨 0:00 和 3:00 分别用三个波长对气溶胶进行了探测, 图 5 为系统探测到的回波 RSCS, 从曲线的波动可以看出, 475 和 625 nm 波段在 300 m 高度内数据可靠, 530 nm 波段在 150 m 高度内数据可靠.

图 6 为气溶胶消光系数的高度分布曲线. 图 6(a) 为 20 日 21:00 (能见度为 2.7 km) 的消光系数随高度变化曲线. 在 5—270 m 高度内, 475 nm 波段消光系数从 1.61 km^{-1} 减小到 0.05 km^{-1} , 625 nm 波段消光系数从 1.30 km^{-1} 减小到 0.02 km^{-1} , 530 nm 波段消光系数在 5—150 m 高度内从 1.48 km^{-1} 减小到 0.11 km^{-1} . 可以看出, 21:00 时, 气溶胶在低处浓度较高, 气溶胶消光系数随高度的增加而减小.

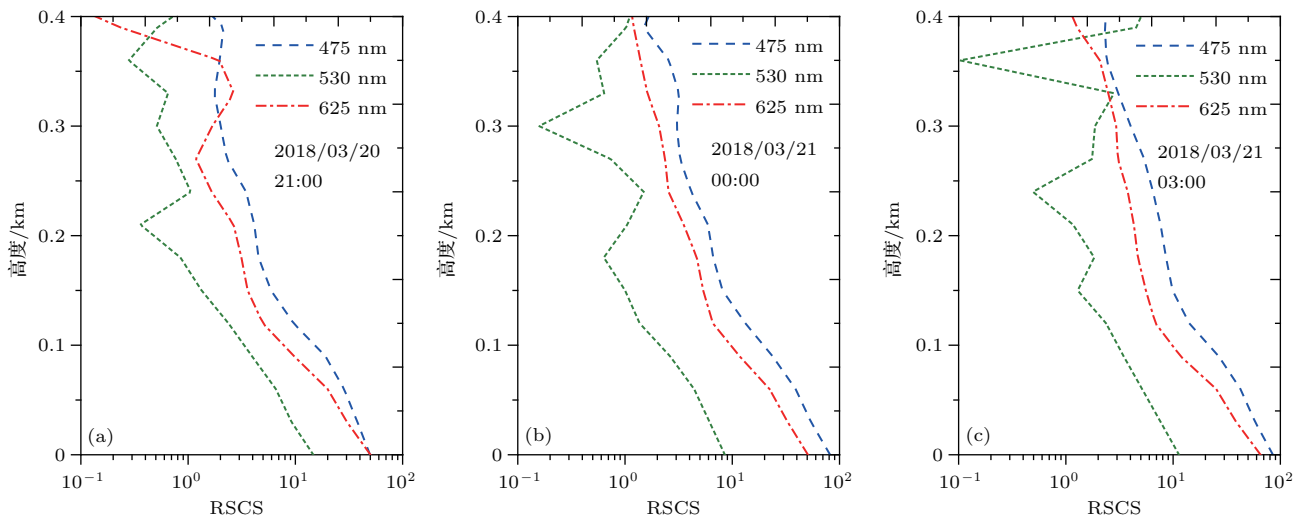


图 5 2018 年 3 月 20 日至 21 日回波信号的 RSCS (a) 20 日 21:00; (b) 21 日 00:00; (c) 21 日 3:00

Fig. 5. RSCS on March 20-21, 2018: (a) 21:00 at 20; (b) 00:00 at 21; (c) 3:00 at 21.

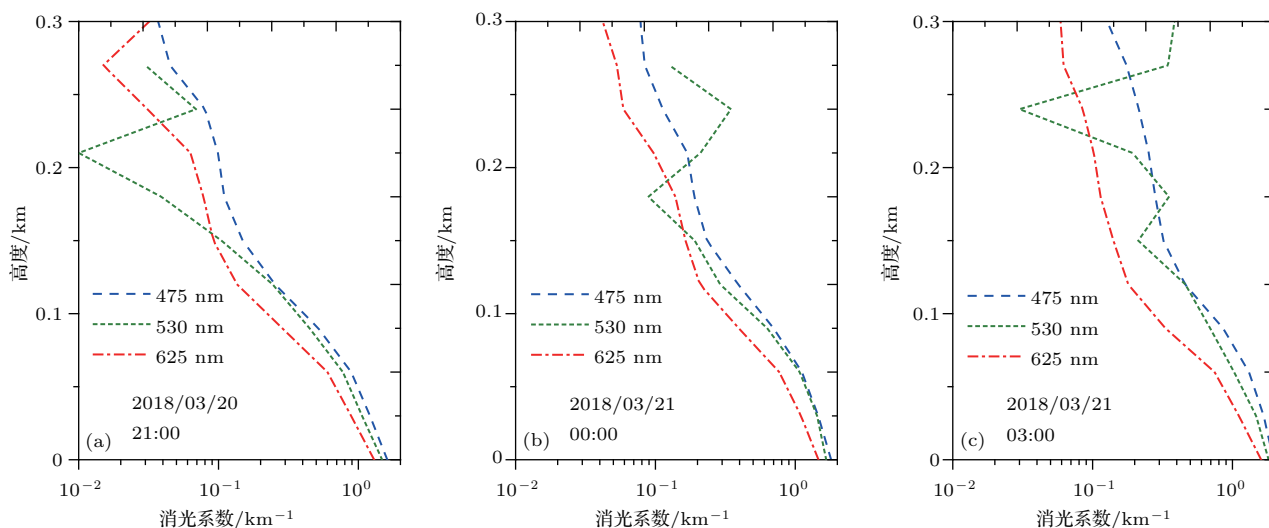


图6 2018年3月20日至21日气溶胶消光系数 (a) 20日21:00; (b) 21日00:00; (c) 21日3:00

Fig. 6. Aerosol extinction coefficient on March 20–21, 2018: (a) 21:00 at 20; (b) 00:00 at 21; (c) 3:00 at 21.

图6(b)所示为21日0:00(能见度为2.4 km)的消光系数随高度变化曲线. 在5—300 m高度内, 475 nm波段消光系数从 1.81 km^{-1} 减小到 0.08 km^{-1} , 625 nm波段消光系数从 1.47 km^{-1} 减小到 0.04 km^{-1} , 530 nm波段消光系数在5—150 m高度内从 1.66 km^{-1} 减小到 0.19 km^{-1} . 此时, 各高度处消光系数都比21:00时有所增大.

图6(c)所示为21日3:00(能见度为2.2 km)的消光系数随高度变化曲线. 在5—300 m高度内, 475 nm波段消光系数从 1.97 km^{-1} 减小到 0.13 km^{-1} , 625 nm波段消光系数从 1.61 km^{-1} 减小到 0.06 km^{-1} , 530 nm波段消光系数在5—150 m

高度内从 1.82 km^{-1} 减小到 0.21 km^{-1} . 数据表明, 各高度处消光系数都比0:00时有所增大.

4.3 重度污染天观测结果与分析

2018年1月18日晚至19日凌晨(雾霾), 能见度为2—3.5 km, 空气质量指数AQI在205到232之间, 属于重度污染天气. 在夜晚20:00, 23:00和凌晨2:00分别用三个波长对气溶胶进行了探测. 图7为系统探测到的回波RSCS, 可以看出, 475和625 nm波段在300 m高度内数据可靠, 530 nm波段在150 m高度内数据可靠.

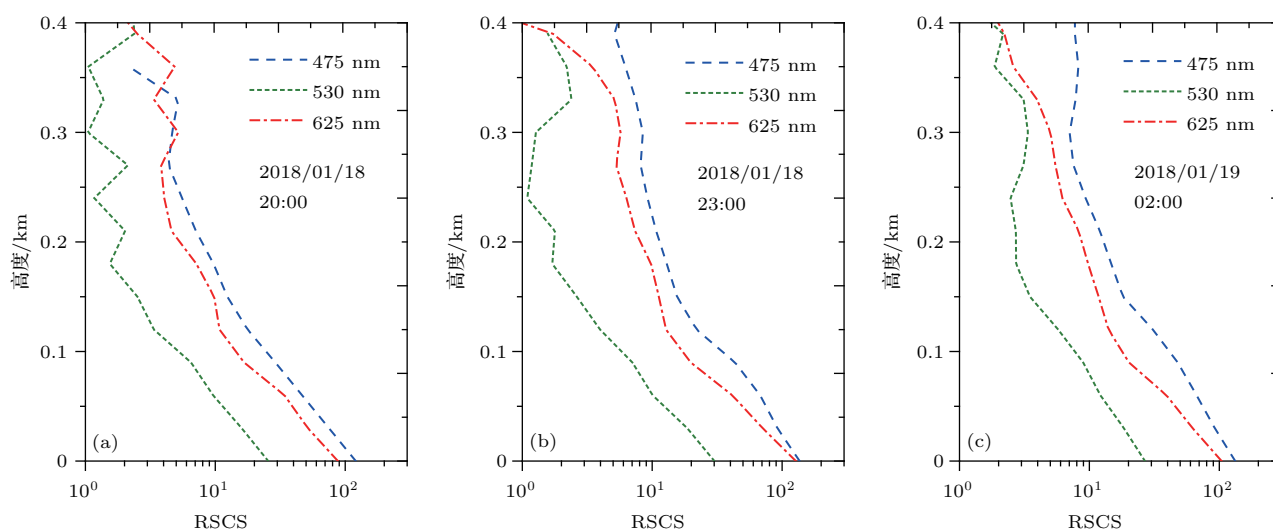


图7 2018年1月18日至19日回波信号的RSCS (a) 18日20:00; (b) 18日23:00; (c) 19日2:00

Fig. 7. RSCS on January 18–19, 2018: (a) 20:00 at 18; (b) 23:00 at 18; (c) 2:00 at 19.

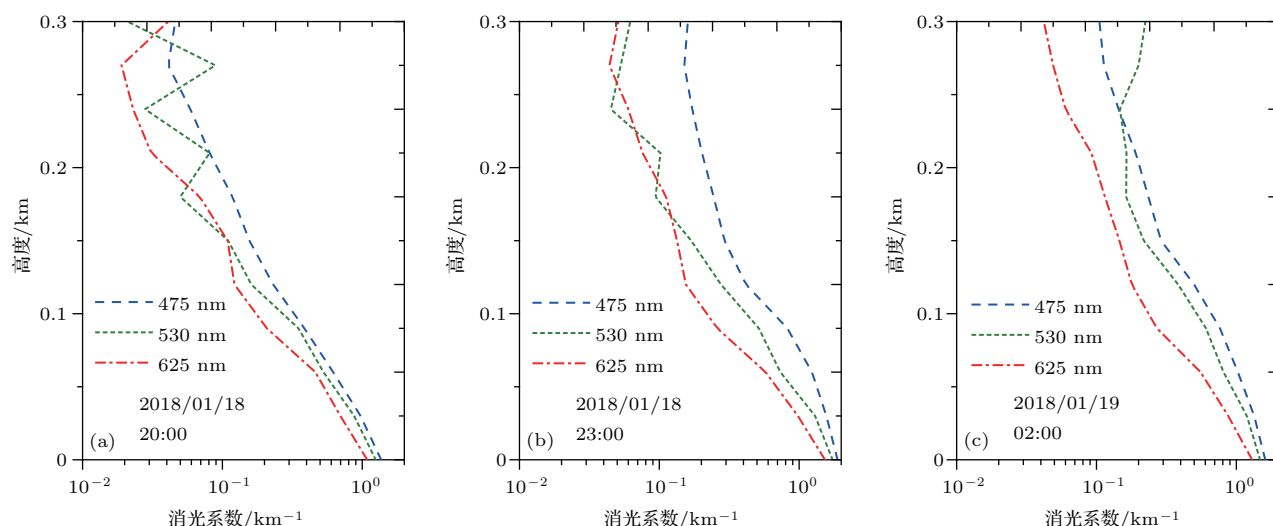


图8 2018年1月18日至19日气溶胶消光系数 (a) 18日20:00; (b) 18日23:00; (c) 19日2:00

Fig. 8. Aerosol extinction coefficient on January 18–19, 2018: (a) 20:00 at 18; (b) 23:00 at 18; (c) 2:00 at 19.

图8所示为经反演后获得的气溶胶消光系数的高度分布曲线. 图8(a)为18日20:00(能见度为3.2 km)的消光系数随高度变化曲线. 从图8(a)中可以看出,在5—150 m高度内,各波长气溶胶消光系数随高度的增加快速减小.在5—270 m高度内,475 nm波段消光系数从 1.37 km^{-1} 减小到 0.04 km^{-1} ,625 nm波段消光系数从 1.09 km^{-1} 减小到 0.02 km^{-1} ,530 nm波段消光系数在5—150 m高度内从 1.25 km^{-1} 减小到 0.11 km^{-1} .

图8(b)所示为18日23:00(能见度为2.3 km)的消光系数随高度变化曲线.在5—300 m高度内,475 nm波段消光系数从 1.88 km^{-1} 减小到 0.16 km^{-1} ,625 nm波段消光系数从 1.53 km^{-1} 减小到 0.05 km^{-1} ,530 nm波段消光系数在5—150 m高度内从 1.74 km^{-1} 减小到 0.17 km^{-1} .可以看出,23:00探测到的各波长的消光系数要比20:00探测到的消光系数大.

图8(c)所示为19日2:00(能见度为2.7 km)的消光系数随高度变化曲线.在5—300 m高度内,475 nm波段消光系数从 1.61 km^{-1} 减小到 0.11 km^{-1} ,625 nm波段消光系数从 1.30 km^{-1} 减小到 0.04 km^{-1} ,530 nm波段消光系数在5—150 m高度内从 1.48 km^{-1} 减小到 0.22 km^{-1} .

从上述三天的数据可以看出,夜晚近地面气溶胶消光系数随着高度的增加而减小,尤其在150 m高度范围内,消光系数减小速度很快.轻度污染天近地面各高度的气溶胶消光系数均比中度和重度

污染天要小,中度污染天的气溶胶消光系数与重度污染天相近.

5 结 论

本文设计并研制了一台多波长LED光源雷达系统,介绍了系统的组成及工作原理,该系统可以实现三个波段(475, 530和625 nm)对大气气溶胶的探测.通过对系统几何重叠因子的计算与分析,得出该LED雷达对大气近地面的探测范围下限可到60 m,可以实现近距离的大气探测.对60 m以下的RSCS进行了修正,利用能见度数据确定边界值,采用Fernald前向积分反演气溶胶消光系数的垂直分布.分别在轻度污染、中度污染和重度污染天气情况下,对西安理工大学上空近地面低层大气气溶胶进行了垂直观测,得到了300 m高度内三个波长的气溶胶消光系数随高度的变化曲线.探测结果表明,多波长LED光源雷达是探测近地面大气气溶胶垂直分布的一种有效方法,能够弥补激光雷达在近场探测方面的不足.

参考文献

- [1] Han Y, Wang T J, Rao R Z, Wang Y J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7396 (in Chinese) [韩永, 王体健, 饶瑞中, 王英俭 2008 物理学报 **57** 7396]
- [2] Li S W, Si F Q, Zhao X 2009 *J. Electr. Measur. Instr.* **23** 69 (in Chinese) [李素文, 司福祺, 赵鑫 2009 电子测量与仪器学报 **23** 69]

- [3] Fan X H, Chen H B, Xia X A 2013 *Chin. J. Atmos. Sci.* **37** 477 (in Chinese) [范学花, 陈洪滨, 夏祥鳌 2013 大气科学 **37** 477]
- [4] Tao J H, Zhang M G, Chen L F, Wang Z F, Su L, Ge C, Han X, Zou M M 2013 *Sci. Sin.: Terrae* **43** 143 (in Chinese) [陶金花, 张美根, 陈良富, 王子峰, 苏林, 葛萃, 韩霄, 邹铭敏 2013 中国科学: 地球科学 **43** 143]
- [5] Xu M C, Xu Q S, Bian J, Wang Y R, Li X B 2014 *Acta Opt. Sin.* **34** 1201002 (in Chinese) [徐梦春, 徐青山, 边键, 王艺然, 李学彬 2014 光学学报 **34** 1201002]
- [6] Wang Y, Li A, Xie P H, Chen H, Xu J, Wu F C, Liu J G, Liu W Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 180705 (in Chinese) [王杨, 李昂, 谢品华, 陈浩, 徐晋, 吴丰成, 刘建国, 刘文清 2013 物理学报 **62** 180705]
- [7] Shi B, Tao Z M, Ma X M, Shan H H, Zhao S G, Liu D, Xie C B 2015 *Acta Opt. Sin.* **35** 0501006 (in Chinese) [史博, 陶宗明, 麻晓敏, 单会会, 赵素贵, 刘东, 谢晨波 2015 光学学报 **35** 0501006]
- [8] 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]
- [9] Koyama M, Shiina T 2011 *2011 International Quantum Electronics Conference Sydney, Australia, August 28-September 1, 2011* p544
- [10] Shiina T 2013 *Proc. SPIE* **8905** 890533
- [11] Shiina T 2014 *Proc. SPIE* **9246** 92460F
- [12] Shiina T 2011 *Proc. SPIE* **8311** 83111I
- [13] Shiina T, Noguchi K, Tsuji K 2015 *23rd International Conference on Nuclear Engineering Chiba, Japan, May 17-21, 2015* p1640
- [14] Mori Y, Shimada S, Shiina T, Baji H, Takemoto S 2016 *Proc. SPIE* **10006** 100060G
- [15] Zhong W T, Hua D X, Liu J, Zhang C, Yan K J 2016 *Acta Opt. Sin.* **36** 1028001 (in Chinese) [钟文婷, 华灯鑫, 刘君, 张宸, 晏克俊 2016 光学学报 **36** 1028001]
- [16] Zhong W T, Hua D X, Liu J, Zhang C, Yan K J 2018 *J. Xi'an Univ. Technol.* **34** 6 (in Chinese) [钟文婷, 华灯鑫, 刘君, 张宸, 晏克俊 2018 西安理工大学学报 **34** 6]
- [17] Zhang G X, Zhang Y C, Tao Z M, Liu X Q, Shao S S, Tan K, Lü Y H, Zhou J, Hu H L 2005 *Chin. J. Quantum Electron.* **22** 299 (in Chinese) [张改霞, 张寅超, 陶宗明, 刘小勤, 邵石生, 谭锟, 吕勇辉, 周军, 胡欢陵 2005 量子电子学报 **22** 299]
- [18] Wang S L, Cao K F, Hu S X, Wei H L 2008 *Laser Technol.* **32** 147 (in Chinese) [汪少林, 曹开法, 胡顺星, 魏合理 2008 激光技术 **32** 147]
- [19] Fernald F G 1984 *Appl. Opt.* **23** 652
- [20] Di H G, Hou X L, Zhao H, Yan L J, Wei X, Zhao H, Hua D X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 244206 (in Chinese) [狄慧鸽, 侯晓龙, 赵虎, 阎蕾洁, 卫鑫, 赵欢, 华灯鑫 2014 物理学报 **63** 244206]
- [21] Roberto N 2005 *Appl. Opt.* **44** 3795

Multi-wavelength light-emitting diode light source radar system and near-ground atmospheric aerosol detection*

Zhong Wen-Ting Liu Jun Hua Deng-Xin[†] Hou Hai-Yan Yan Ke-Jun

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

(Received 18 April 2018; revised manuscript received 9 May 2018)

Abstract

Near-ground atmospheric aerosol has a direct effect on the living and production of human, and the research on its detection attracts substantial attention from engineers and scholars in the community of environment. Traditional monitoring instruments can accurately and continuously detect the aerosols above the ground, but it is difficult for them to obtain the information about vertical distribution of near-ground aerosols. As is well known, lidar can act as an efficient method to detect the aerosol's temporal and spatial distribution. However, this technique is restricted in the potential applications of the detection of aerosol at a certain wavelengths or near range. That is because it usually presents fixed wavelengths and a large blind area. In this work, a new multi-wavelength light-emitting diode (LED) light source radar system is designed and established for detecting the characteristics of atmospheric aerosol near ground. The paper is outlined as follows. Firstly, the composition and working principle of the LED light source radar system are introduced. Based on the structure of radar's transmitter and receiver, the geometric overlap factor is analyzed and calculated. The minimum detection height of the LED light source radar system is then determined to be 60 m. Secondly, the inversion method for the echo signal of LED light source radar is studied. In consideration of the suitability of near-range detection of LED light source radar, the Fernald forward integration method is used for inverting the aerosol extinction coefficient. The calibration value of aerosol extinction coefficient is further determined with the ground visibility data. Finally, by using the designed multi-wavelength LED light source radar system (475 nm, 530 nm, and 625 nm), near-ground aerosol observation at night in Xi'an city is carried out and three atmospheric conditions including light, moderate and severe pollution days are considered. The height distribution curves of atmospheric aerosol extinction coefficient of three wavelengths within a height of nearly 300 m are obtained. The characteristics of the distribution and change of near ground aerosols are accordingly discussed. The experimental results show that the multi-wavelength LED light source radar provides an efficient implementation for detecting the vertical distribution of atmospheric aerosol near the ground, and can make up for the inadequacy of lidar in near range detection.

Keywords: light-emitting diode light source radar, multi-wavelength detection, near-ground, aerosol

PACS: 42.68.Wt, 42.79.Qx

DOI: 10.7498/aps.67.20180721

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41575035).

[†] Corresponding author. E-mail: xauthdx@163.com