

新型 LED 光源气溶胶探测雷达系统 优化设计与初步实验

钟文婷 华灯鑫 刘 君 张 宸 晏克俊

西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 为了实现近地面、多波长气溶胶时空探测,克服激光波长可选择性不足的问题,利用 LED 丰富的光谱特性,设计了一种新型发光二极管(LED)光源雷达。LED 能量小且发散角大,其出光能量、发散角、接收视场角和几何重叠因子都会对 LED 光源雷达探测距离产生影响。针对共轴 LED 光源雷达系统的特点,分析了几何重叠因子的特征和计算方法,详细讨论了光源发散角和接收视场角对几何重叠因子的影响。结合 LED 光源的特点,利用美国标准大气模型对雷达系统的探测能力进行了仿真,优化了光源发散角和接收视场角,在 LED 能量一定的情况下获得了最大的探测距离。搭建了 LED 光源雷达系统并完成了初步实验观测,结果表明该雷达夜晚能够接收到 240 m 远处的大气回波,验证了雷达探测低层大气气溶胶的能力。

关键词 遥感; 发光二极管光源雷达; 系统设计; 几何重叠因子; 发散角; 视场角

中图分类号 P41 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1028001

Optimal Design and Preliminary Experiments on New Type of LED Light Source Radar System for Aerosol Detection

Zhong Wenting Hua Dengxin Liu Jun Zhang Chen Yan Kejun

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

Abstract In order to achieve near-ground and multi-wavelength space-time detection of aerosol and overcome the problem of lack of selectable laser wavelength, a new type of light-emitting diode (LED) light source radar is designed using the abundant spectral characteristics of LED. The energy of LED is low, and the divergence angle is large. The output energy, divergence angle, receiver's field angle and geometric overlap factor will affect the detection range of LED light source radar. In this paper, aiming at the characteristics of the coaxial LED light source radar system, the features and calculation methods of the geometric overlap factor are analyzed, and the influences of light source divergence angle and receiver's field angle on the geometric overlap factor are discussed in detail. Combined with the characteristics of the LED light source, the detection capability of the radar system is simulated by US standard atmospheric model, and the light source divergence angle and receiver's field angle are optimized. The maximum detection range is got at the certain LED energy. The LED light source radar system is built and preliminary experimental observation is completed. The experimental results show that the designed radar can receive the atmospheric echo signal at the distance of 240 m at night. It verifies the radar's ability to detect low-level atmospheric aerosol.

Key words remote sensing; light-emitting diode light source radar; system design; geometric overlap factor; divergence angle; field angle

OCIS codes 280.3640; 280.1100; 010.0280

收稿日期: 2016-04-18; 收到修改稿日期: 2016-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(41575035)

作者简介: 钟文婷(1987—),女,博士研究生,主要从事激光雷达大气遥感测量技术方面的研究。

E-mail: zhongwenting_1221@163.com

导师简介: 华灯鑫(1964—),男,博士,教授,主要从事激光雷达大气遥感测量技术和光电检测技术方面的研究。

E-mail: xauthdx@163.com(通信联系人)

1 引言

颗粒物在大气环境中的行为取决于其粒径大小及其谱分布特征,认识大气颗粒物的谱分布特征是研究气溶胶污染的基础^[1-2]。目前,测量大气气溶胶粒谱分布的方法很多,但不论是基于粒子采样方式的直接测量(如粒谱分析仪、空气动力学粒径仪等)还是多波段的地基遥感测量(如太阳光度计、辐射计等),都难以获得气溶胶粒谱的高度信息^[3-6]。激光雷达遥感探测技术作为大气气溶胶探测的重要方法之一,能够提供气溶胶的时间和空间分布信息及粒谱。多波长的激光雷达主要以双波长为主,近年来出现的三波长激光雷达其波长主要利用 YAG 固体激光器的基频光 1064 nm 及其二倍频光 532 nm 和三倍频光 355 nm^[7-10],但是激光器输出的波长有限,使激光雷达在探测特定波长的气溶胶特性时受到限制。

发光二极管(LED)波长丰富,利用 LED 作为雷达的探测光源,可以克服激光雷达光源波长可选择性不足的问题,可实现气溶胶高分辨率的粒谱分布探测。但 LED 的能量小且发散角大,在设计雷达系统时必须全面考虑 LED 光源出光能量、发散角、接收视场角和几何重叠因子对探测能力的影响,对系统进行优化设计。目前,关于 LED 光源雷达的报道较少,只有日本千叶大学的 Koyama M 等^[11-13]对其进行了研究,夜晚最远探测距离达到 300 m,但并未对雷达系统的设计进行详细分析。

本文利用 530 nm 的单一波长 LED 作为光源,详细分析了 LED 光源雷达的系统优化设计方法,对气溶胶的探测能力进行了仿真分析,并开展了初步实验,以期为进一步实现多波长探测奠定基础。

2 LED 光源雷达系统结构

2.1 系统组成及工作原理

LED 光源雷达系统如图 1 所示,主要由 LED 光源部分、望远镜接收部分、分光和光电探测部分、高性能示波器和计算机等组成。LED 光源雷达系统工作时,波长 530 nm 的 LED 光源经脉冲驱动电源驱动后,发出脉冲光束,再经特殊设计的光路准直扩束后,经反射镜以极小的发散角垂直射向大气,大气中的气溶胶粒子与光脉冲相互作用产生后向散射光,被望远镜接收后到达分光部分,经滤光片滤光后由光电倍增管(PMT)接收,由示波器采集到大气回波信号,再送入计算机分析处理,反演得到大气气溶胶的光学特性。

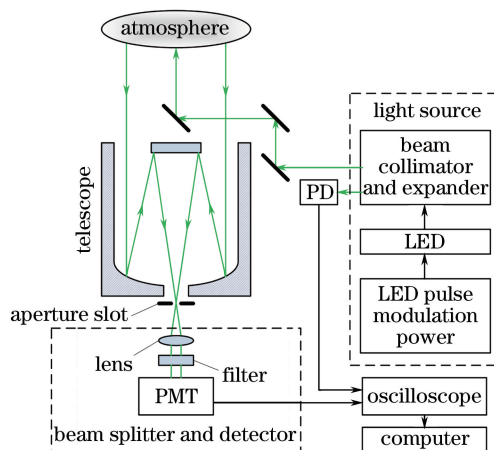


图 1 LED 光源雷达系统

Fig. 1 LED light source radar system

2.2 LED 雷达探测光源分析

根据雷达的工作原理可知,雷达光源应当发出发散角很小的脉冲光束,但 LED 是连续光源,能量有限且发散角很大,并不能直接应用,需要进行脉冲驱动和光束准直。LED 雷达光源部分的组成结构如图 2 所示,采用功率场效应管设计开关电路实现 LED 的脉冲驱动,最终得到光脉冲脉宽为 200 ns。准直光路的设计首先借助全内反射式(TIR)准直器将单颗 LED 的发散角压缩到 $\pm 2.5^\circ$,再采用逆向开普勒望远镜结构设计准直光路对 LED 光束进行准直扩束。根据开普勒望远镜原理可知

$$\theta_t = a/f_2, \quad (1)$$

式中, θ_t 为发散角, a 为光阑直径, f_2 为透镜 2 的焦距。通过调节光阑直径大小可改变发散角大小, 但光阑越小, 出光光束能量越低, 准直光路的光能利用率越低, 根据理论计算和 Zemax 软件仿真得出光阑直径、发散角、光路的光能利用率之间的关系, 如表 1 所示。

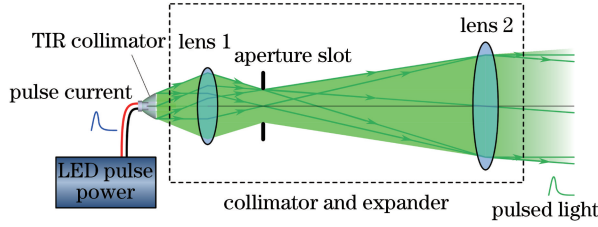


图 2 LED 光源工作原理

Fig. 2 Working principle of the LED light source

表 1 LED 光源准直光路参数

Table 1 Parameters of the collimating light path of the LED light source

Aperture diameter a / mm	1	2	3	4
Beam divergence θ_t / mrad	5.7	11.4	17.1	22.9
Energy efficiency / %	2.41	9.92	21.3	33.3

3 LED 光源雷达系统优化

3.1 LED 光源雷达的几何重叠因子

LED 光源雷达系统通过反演雷达方程获得气溶胶的光学特性, 米散射雷达方程如下

$$P(R) = C \cdot P_0 \cdot \frac{A_r}{R^2} \cdot Y(R) \cdot \Delta R \cdot \beta(R) \cdot \exp \left[-2 \int_0^R \alpha(R) dR \right], \quad (2)$$

式中, $P(R)$ 为雷达接收到的来自 R 到 $R + \Delta R$ 高度大气段的回波信号功率, R 为探测距离, ΔR 为距离分辨率, C 为雷达的系统常数, P_0 为发射光束的功率, A_r 为接收望远镜的收光面积, $Y(R)$ 为重叠因子, $\beta(R)$ 为被探测组分的后向散射系数, $\alpha(R)$ 为大气总消光系数。

在(2)式中, 重叠因子 $Y(R)$ 定义为在一定距离处进入望远镜视场中的光束能量与该距离上光束总能量的比值, 若光束能量分布均匀, 则系统重叠因子演变为几何重叠因子 $Y_G(R)$ ^[14], 它表征了雷达系统对光束能量的利用情况, 对雷达的探测能力有很大影响。

图 3 和图 4 分别为当 $\theta_t < \theta_r$ 和 $\theta_t > \theta_r$ 时共轴 LED 光源雷达的几何重叠因子示意图, θ_t 为光束发散角, θ_r 为接收视场角, 当 $\theta_t < \theta_r$ 时, 重叠因子分为 3 个区域: 1) 探测盲区 $Y_G(R) = 0$; 2) 过渡区 $0 < Y_G(R) < 1$, 光束逐渐充满视场; 3) 充满区 $Y_G(R) = 1$, 光束能量全部被接收。但是若 $\theta_t > \theta_r$, 重叠因子分为 4 个区域: 1) 探测盲区 $Y_G(R) = 0$; 2) 过渡区 $0 < Y_G(R) < 1$; 3) 充满区 $Y_G(R) = 1$, 当 θ_t 太大或 θ_r 太小时可能会消失; 4) 衰减区 $0 < Y_G(R) < 1$, 部分光束射出接收视场。

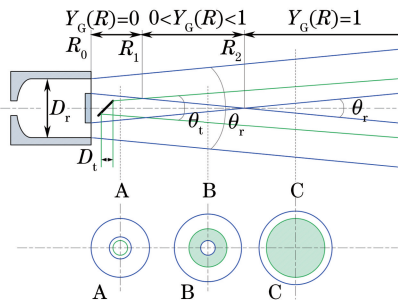


图 3 $\theta_t < \theta_r$ 时, 共轴 LED 光源雷达的几何重叠因子

Fig. 3 Geometric overlap factor of the coaxial LED light source radar when $\theta_t < \theta_r$

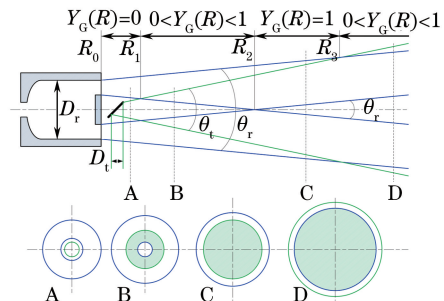


图 4 $\theta_t > \theta_r$ 时, 共轴 LED 光源雷达的几何重叠因子

Fig. 4 Geometric overlap factor of the coaxial LED light source radar when $\theta_t > \theta_r$

根据图中几何关系可以得出几何重叠因子的表达式为

$$\theta_t < \theta_r, Y_G(R) = \begin{cases} 0, & R \leq R_1 \\ \frac{(D_t + \theta_t \cdot R)^2 - (D_a - \theta_r \cdot R)^2}{(D_t + \theta_t \cdot R)^2}, & R_1 < R \leq R_2, \\ 1, & R > R_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\theta_t > \theta_r, Y_G(R) = \begin{cases} 0, & R \leq R_1 \\ \frac{(D_t + \theta_t \cdot R)^2 - (D_a - \theta_r \cdot R)^2}{(D_t + \theta_t \cdot R)^2}, & R_1 < R \leq R_2, \\ 1, & R_2 < R \leq R_3 \\ \frac{(D_r + \theta_r \cdot R)^2}{(D_t + \theta_t \cdot R)^2}, & R > R_3 \end{cases} \quad (4)$$

式中, D_r 为望远镜接收口径, D_t 为出光光束直径, D_a 为望远镜前方被遮挡的直径。可以看出, 重叠区域的大小以及随距离的变化情况受到光束发散角 θ_t 和接收视场角 θ_r 的影响。

3.1.1 光束发散角的影响

由(3)式和(4)式可以得到几何重叠因子与光束发散角的关系, 如图 5 所示。当接收视场角($\theta_r = 10$ mrad)不变时, 发散角越小, 进入接收视场的距离 R 越远, 盲区越大, 如图 5(a)所示。若 $\theta_t < \theta_r$, $Y_G(R)$ 不存在衰减区, 若 $\theta_t > \theta_r$, $Y_G(R)$ 存在衰减区; 随着距离的增加, 发散角越小, $Y_G(R)$ 进入衰减区的距离越远, 远处的 $Y_G(R)$ 越大, 如图 5(b)所示。

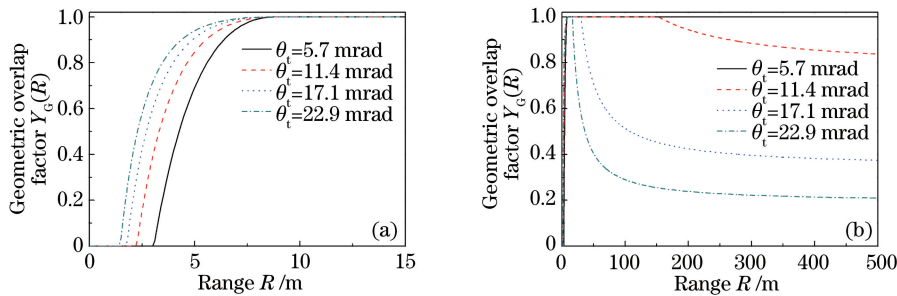


图 5 几何重叠因子与光束发散角的关系。(a)0~15 m 距离内;(b)0~500 m 距离内

Fig. 5 Relationship between geometric overlap factor and beam divergence angle. (a) Range from 0 to 15 m;

(b) range from 0 to 500 m

3.1.2 望远镜视场角的影响

图 6 为几何重叠因子与接收视场角的关系。当光束发散角($\theta_t = 11.4$ mrad)不变时, 视场角越大, 进入接收视场的距离 R 越近, 盲区越小, 重叠因子到达 1 的距离也越近, 如图 6(a)所示, 这是因为从图 3 和图 4 中可以看出, R_2 的大小是由接收视场角 θ_r 决定的。若 $\theta_r > \theta_t$, $Y_G(R)$ 不存在衰减区; 若 $\theta_r < \theta_t$, $Y_G(R)$ 存在衰减区; 随着距离的增加, 视场角越大, $Y_G(R)$ 进入衰减区的距离越远, 远处的 $Y_G(R)$ 越大, 如图 6(b)所示。

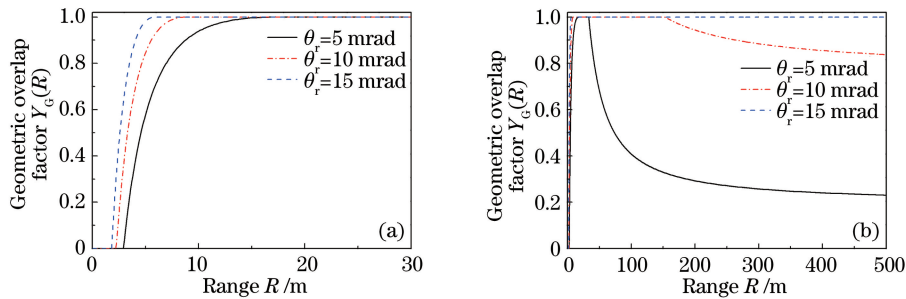


图 6 几何重叠因子与接收视场角的关系。(a)0~30 m 距离内;(b)0~500 m 距离内

Fig. 6 Relationship between geometric overlap factor and receiver's field angle.

(a) Range from 0 to 30 m; (b) range from 0 to 500 m

比较图 5 和图 6 可知,光束发散角 θ_i 越小,望远镜视场角 θ_r 越大,越有利于信号的接收,当 $\theta_i < \theta_r$ 时,几何重叠因子最理想,对于低空气溶胶的探测,尤其需要压缩光束发散角和增大望远镜接收视场角。但是由表 1 可知,该 LED 光源的发散角越小,光能利用率越低,而且望远镜的接收视场角越大,接收的背景噪声也就越大,所以不能只根据几何重叠因子确定系统参数,还应考虑能量的因素。

3.2 LED 光源雷达的探测能力仿真与系统优化

雷达系统参数如表 2 所示,LED 的光谱带宽为 15 nm,考虑到 LED 能量较弱,为了更好地接收回波,选用了带宽较宽的滤光片。结合雷达系统参数(如表 2 所示)和 LED 光源的能量参数(如表 1 所示),利用美国标准大气模型对 LED 光源雷达的探测能力进行仿真计算,累积时间 5 min。仿真结果如图 7 所示。

表 2 LED 光源雷达系统参数

Table 2 Parameters of the LED light source radar system

Emitter and receiver system	Value
LED wavelength /nm	530
Pulse energy of LED /nJ	0.2
Pulse duration /ns	200
Repetition frequency /Hz	2500
Beam diameter D_i /mm	47
Beam divergence θ_i /mrad	5.7/11.4/17.1/22.9
Telescope	Cassegrain telescope
Diameter of telescope D_r /mm	254
Field of view θ_r /mrad	5/7.5/10/12.5/15
Filter /nm	531±11
Quantum efficiency of PMT /%	12

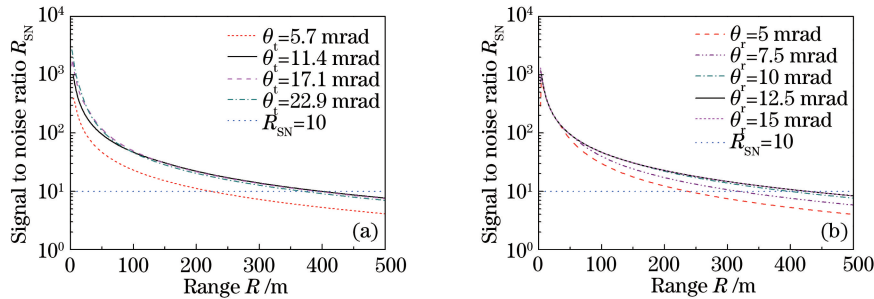


图 7 LED 光源雷达夜晚探测信噪比仿真结果。(a)接收视场角为 10 mrad 时不同发散角的信噪比;
(b)光束发散角为 11.4 mrad 时不同接收视场角的信噪比

Fig. 7 Simulated results of detection SNR for LED light source radar system at night. (a) SNR of different divergence angles when $\theta_r = 10$ mrad; (b) SNR of different receiver's field angles when $\theta_i = 11.4$ mrad

图 7(a)为接收视场角 $\theta_r = 10$ mrad 时,不同光束发散角下,LED 光源雷达夜晚探测信噪比(SNR)仿真曲线。虽然图 5 中显示 $\theta_i = 5.7$ mrad 时,几何重叠因子最好,但是从图 7(a)中可以看出,由于光束出射时能量低,此时 LED 光源雷达的最大探测距离不及 $\theta_i = 11.4$ mrad 时的情况; $\theta_i = 17.1$ mrad 和 $\theta_i = 22.9$ mrad 时,虽然能量较多,但因几何重叠因子衰减较快,最大探测距离也不及 $\theta_i = 11.4$ mrad 时的情况。

图 7(b)为光束发散角 $\theta_i = 11.4$ mrad 时,不同接收视场角下,LED 光源雷达夜晚探测信噪比仿真曲线。当 $\theta_r < \theta_i$ 时,最大探测距离随着视场角的增大而增大;当 $\theta_r > \theta_i$ 时,最大探测距离不再随视场角变化。从理论上说,发散角 $\theta_i = 11.4$ mrad 时,视场角 θ_r 选取为略大于 θ_i 的 12.5 mrad 最理想,因为 $\theta_r = 10$ mrad 时,几何重叠因子会出现衰减区,而更大的视场角,不仅不能增加最大探测距离,还会引入更多背景噪声。但实际中望远镜的视场角受到自身结构限制不能随意增大,只能取 10 mrad。

根据上述分析结果最终确定 LED 光源雷达系统发散角为 11.4 mrad、望远镜接收视场角为 10 mrad,该参数下满足夜晚探测信噪比仿真的探测信号误差小于 10%的最远探测距离为 400 m。

4 初步实验与结果分析

在西安理工大学教六楼天台搭建 LED 光源雷达系统进行初步探测实验。该雷达光源波长为 530 nm, 能量为 0.2 nJ, 脉冲频率为 2500 Hz, 脉宽为 200 ns, 光源发散角为 11.4 mrad, 接收视场角为 10 mrad。

图 8 为 2015 年 10 月 12 日晚水平探测回波信号, 图 9 为水平探测回波信号的距离平方校正信号, 近处为气溶胶回波, 在 500 m 处为建筑物反射回波。

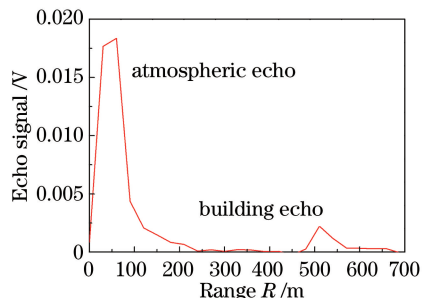


图 8 水平探测回波

Fig. 8 Echo signal from the detection observation

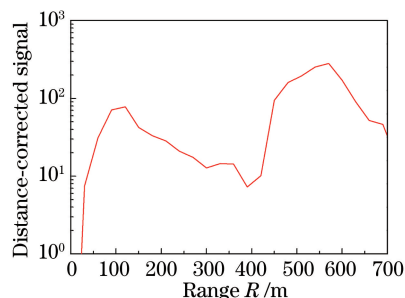


图 9 水平探测回波的距离校正信号

Fig. 9 Distance-corrected signal from the horizontal detection echo

图 10 为 2015 年 4 月 29 日凌晨 0 点到 5 点每隔一个小时得到的垂直探测回波信号的距离平方校正信号, 能见度在 0 点时为 12.5 km, 1 点时减小到 10 km, 2 点时增大到 15.5 km, 3 点时减小到 9 km, 5 点时减小到 5.8 km, 信号大小变化与能见度变化相反, 因为消光系数越小能见度越大, 符合实际情况, 300 m 之后信号起伏变大。图 11 为垂直探测回波信噪比曲线, 由于实际系统的距离分辨率为 30 m, 不能很细致地表现波形随距离的变化, 所以近处(0~50 m)波形与理论结果(图 7)略有不同, 但可以看出整体变化趋势是一致的, 探测距离能够达到 240 m, 初步验证了设计的 LED 光源雷达系统探测低空大气气溶胶方案的可行性。

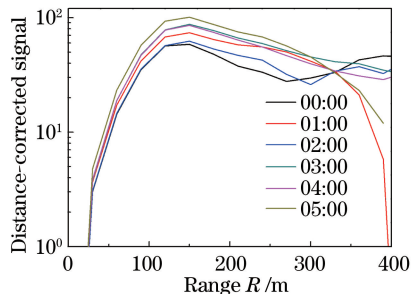


图 10 垂直探测回波的距离校正信号

Fig. 10 Distance-corrected signal from the vertical detection echo

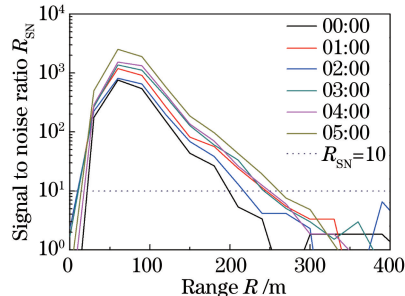


图 11 垂直探测回波的信噪比

Fig. 11 SNR from the vertical detection echo

5 结 论

提出了一种新型 LED 光源雷达系统, 分析了其几何重叠因子的特点和计算方法, 讨论了光源发散角和望远镜接收视场角对几何重叠因子的影响, 并结合光源出光能量进行了探测能力仿真, 优化了系统参数。当光束发散角 θ_i 小于接收视场角 θ_r 时, 几何重叠因子最为理想, 但该 LED 光源的发散角越小, 光能利用率越低, 而且望远镜的接收视场角越大, 接收的背景噪声也就越大。考虑发散角与接收视场角的关系并结合光源能量进行探测能力仿真, 结果显示当 $\theta_i = 11.4$ mrad, $\theta_r = 12.5$ mrad 时雷达系统状态最理想。但实际中, 望远镜的视场角受到自身结构限制不能随意增大, 最终确定 LED 光源雷达系统发散角为 11.4 mrad、望远镜接收视场角为 10 mrad。搭建了雷达系统, 并开展了初步实验, 结果表明所设计的 LED 光源雷达系统夜晚探测的最远距离为 240 m, 验证了所设计的 LED 光源雷达系统探测低空大气气溶胶的可行性。

该 LED 光源雷达的盲区小, 适用于近地面气溶胶探测, 可作为激光雷达探测的补充。通过进一步提高

LED 光源能量,优化光源结构,还具有提高探测距离的潜力。新型 LED 光源雷达系统为实现多波长气溶胶探测,进而实现高分辨率的粒谱分布探测奠定基础。

参 考 文 献

- 1 Hu Min, Liu Shang, Wu Zhijun, *et al.* Effects of high temperature, high relative humidity and rain process on particle size distributions in the summer of Beijing[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(11): 2293-2298.
胡 敏, 刘 尚, 吴志军, 等. 北京夏季高温高湿和降水过程对大气颗粒物谱分布的影响[J]. *环境科学*, 2006, 27(11): 2293-2298.
- 2 Heintzenberg J, Covert D C, van Dingenen R. Size distribution and chemical composition of marine aerosols: a compilation and review[J]. *Tellus Series B-chemical & Physical Meteorology*, 2000, 52(4): 1104-1112.
- 3 Huang Shuhua, Liu Jianguo, Liu Wenqing, *et al.* Influence of high humidity in summer on the characteristic of aerosol's size distribution in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(1): 17-21.
黄书华, 刘建国, 刘文清, 等. 夏季高湿度条件下北京市气溶胶颗粒物粒谱特征研究[J]. *环境科学*, 2010, 31(1): 17-21.
- 4 Xu Wanzhi, Zhao Fengzheng. Observational study on the size distribution characteristics of atmospheric aerosol mass concentration in autumn of Beijing city[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(8): 2105-2114.
许万智, 赵凤生. 北京市秋季大气气溶胶质量浓度谱分布特征的观测研究[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(8): 2105-2114.
- 5 Lian Yue, Liu Wenqing, Zhang Tianshu, *et al.* Measurement analysis of atmospheric aerosol aerodynamics size with APD detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(12): 1837-1840.
连 悦, 刘文清, 张天舒, 等. 利用 APD 对大气气溶胶空气动力学直径测量分析[J]. *光子学报*, 2005, 34(12): 1837-1840.
- 6 Wang Hongbin, Zhang Zhiwei, Zhang Lei, *et al.* Identify the size of aerosol particles and analyze its characteristic at three AERONET sites in China[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(4): 995-1003.
王宏斌, 张志薇, 张 镭, 等. 中国 3 个 AERONET 站点气溶胶大小的识别及特征分析[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(4): 995-1003.
- 7 Bo Guangyu, Liu Dong, Wu Decheng, *et al.* Two-wavelength lidar for observation of aerosol optical and hygroscopic properties in fog and haze days[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0113001.
伯广宇, 刘 东, 吴德成, 等. 双波长激光雷达探测典型雾霾气溶胶的光学和吸湿性质[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0113001.
- 8 Liu Dong, Tao Zongming, Wu Decheng, *et al.* Development of three-wavelength-Raman-polarization lidar system and case study[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0228001.
刘 东, 陶宗明, 吴德成, 等. 三波长拉曼偏振激光雷达系统研制及探测个例[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0228001.
- 9 Zhao Hu, Hua Dengxin, Di Huige, *et al.* Development of all time multi-wavelength lidar system and analysis of its signal to noise ratio[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0113001.
赵 虎, 华灯鑫, 狄慧鸽, 等. 全天时多波长激光雷达系统研制与信噪比分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0113001.
- 10 Ji Chengli, Tao Zongming, Hu Shunxing, *et al.* Cirrus measurement using three-wavelength lidar in Hefei[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0401001.
季承荔, 陶宗明, 胡顺星, 等. 三波长激光雷达探测合肥地区卷云特性[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0401001.
- 11 Koyama M, Shiina T. Development of LED mini-Lidar[C]. *IEEE CLEO/IQEC/PACIFIC RIM*, 2011, 544-545.
- 12 Shiina T. Optical design and development of near range compact lidar[C]. *SPIE*, 2011, 8311: 831111.
- 13 Shiina T. LED mini-lidar for air and dust monitoring[C]. *SPIE*, 2013, 8905: 890533.
- 14 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.