

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2018.01.002

用于气溶胶探测光学雷达的 LED 光源的研制

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: LED 作为遥感探测光源具有波长丰富、体积小、价格低等优势。本文针对气溶胶探测光学雷达的应用, 研制了一款新的 LED 光源。设计了 LED 的脉冲驱动电路, 使其发出重复频率为 100 kHz、脉宽为 200 ns、单脉冲能量为 30 nJ 的脉冲光束。利用 ZEMAX 软件建立了全内反射式准直器的仿真模型, 并结合开普勒望远镜结构设计了两级准直光路, 将光源发散角压缩到 5.7 mrad~22.9 mrad 范围内。分析了发散角对雷达几何重叠因子的影响规律, 雷达系统的盲区不足 3 m, 仿真结果和初步实验表明, 雷达系统的探测距离可达 210 m。验证了 LED 光源用于气溶胶探测光学雷达的可行性, 适用于城市内的近程气溶胶探测。

关键词: 大气遥感; LED 光源; 光学雷达; 气溶胶探测; 发散角

中图分类号: P41

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2018)01-0006-08

Development of LED light source for aerosol detection optical radar

ZHONG Wenting, HUA Dengxin, LIU Jun, ZHANG Chen, YAN Kejun

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

Abstract: As a remote sensing light source, LED has the advantages of rich wavelengths, small size, low cost and so on; for aerosol detection optical radar applications, a new LED light source is developed. The LED pulse driving circuit is designed, making LED emitting the pulse light beam at the repetition rate of 100 kHz, pulse width of 200 ns, and pulse energy of 30 nJ. Using the ZEMAX software, a simulation model for total internal reflection collimator is established; combining with Kepler telescope structure, a two-stage collimating light path is designed compressing beam divergence angle to the range of 5.7 mrad~22.9 mrad. The influence of beam divergence angle on the radar's geometric overlap factor is analyzed, and it is shown that the blind area of radar system is very small. Simulation results and preliminary experimental results show that the detection range of radar system is up to 210 m. The feasibility of the LED light source for aerosol detection optical radar is verified, with this radar suitable for near range aerosol detection in the city.

Key words: atmospheric remote sensing; LED light source; optical radar; aerosol detection; divergence angle

气溶胶作为地球大气的重要组成部分, 是大气环境中成分复杂、对气候影响较大的颗粒物之一, 来源不同的气溶胶, 其组成成分、形状尺度不同, 环境效应也不同, 对大气气溶胶的光学和微物理特性的研究日益成为近期科学研究的热点和前沿^[1]。气溶胶探测光学雷达是对大气气溶胶进行高精度遥感探

测的有效手段^[2], 目前一般采用激光器作为光源, 气溶胶粒子的回波散射信号特征依赖于发射激光波长, 利用多波长激光雷达可以获得不同波长的气溶胶消光系数, 从而得到表征粒子特征的 Ångström 指数等信息, 为进一步分析气溶胶微物理特征提供数据^[3,4]。但是, 激光雷达的波长资源有限, 只局限

收稿日期: 2017-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41575035)

作者简介: 钟文婷, 女, 博士生, 研究方向为激光雷达大气遥感技术。E-mail: zhongwenting_1221@163.com

通讯作者: 华灯鑫, 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为激光雷达大气遥感技术。E-mail: xauthdx@163.com

在特定波长上对气溶胶的探测。而且激光雷达盲区较大、能量又高,在人类活动频繁且高楼林立的城市中,激光雷达水平探测近程气溶胶显得较为困难且不安全。

LED 光谱资源丰富,以其作为遥感光源搭建光学雷达系统进行气溶胶探测,可以实现在更多波长上对气溶胶的观测,弥补激光雷达在波长可选择性方面的不足。但是,LED 是连续光源,能量弱且发散角大,不能直接用于气溶胶探测。本文研制了一款应用于气溶胶探测光学雷达的 LED 光源,并通过仿真和初步实验说明该光源可以用于气溶胶探测。

1 LED 光源的总体方案

气溶胶探测光学雷达工作时,由遥感光源向大气发射一束脉冲光,大气中的气溶胶粒子与脉冲光相互作用产生的后向散射光,通过光学接收单元接收,由信号采集单元采集大气回波信号,再送入计算机进行分析处理,最后通过反演计算得到大气气溶胶的光学特性。根据气溶胶探测光学雷达的需要,LED 光源应满足以下要求:

1) 纳秒级的光脉冲宽度:光脉冲宽度决定了雷达探测的最小距离分辨率,光脉冲宽度越小,距离分辨率越高;

2) 单个光脉冲的能量:单个光脉冲的能量与雷达的最远探测距离有关,能量越大,可以探测到的距离越远;

3) 脉冲的重复频率:重复频率与降低噪声有关,重复频率越高,信噪比越大;

4) 出射光束发散角:发散角应小于雷达的接收视场,以保证光束在传输过程中全部或绝大部分保持在望远镜接收视场内,提高光能利用率。

LED 光源系统构成如图 1 所示,主要由 LED 脉冲驱动电源、大功率 LED、全内反射式(Total Internal Reflection, TIR)准直器、准直扩束光路构成。

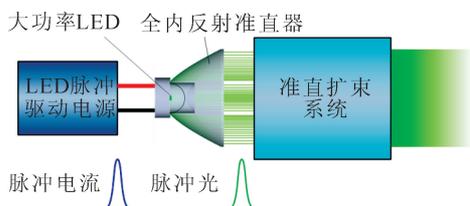


图 1 LED 光源系统构成

Fig. 1 Structure of LED light source system

LED 光源工作时,LED 脉冲驱动电源产生脉宽为纳秒级的脉冲电流,驱动大功率 LED 发出脉冲光束,该光束经全内反射式准直器初步准直后,再经过

准直扩束光路再次准直,以毫弧度级的发散角发射出去。

2 LED 脉冲驱动电源的设计

根据 LED 的工作原理,只允许电流单方向通过,电流通过时 LED 会发光,因此可通过控制电流通断产生脉冲光,设计采用功率场效应管开关电路实现。考虑到雷达探测的距离分辨率,要求光脉冲的脉宽很小,采用高速功率场效应管 IRF610 作为开关器件,其上升时间为 17 ns,下降时间为 9 ns。图 2 为 LED 脉冲驱动电路的原理图。

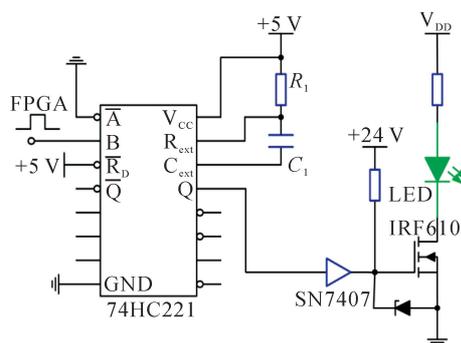


图 2 LED 脉冲驱动电路

Fig. 2 LED pulse driving circuit

74HC221 为单稳态多谐振荡器,用于产生窄脉冲,其真值表如表 1 所示。当管脚 \bar{R}_D 接高电平、管脚 \bar{A} 接低电平、管脚 B 发生从低电平到高电平的跳变时,管脚 Q 输出一个脉宽可调的窄脉冲,脉冲的宽度 t_w 与电阻 R_1 和电容 C_1 有如下关系:

$$t_w = R_1 \cdot C_1 \cdot \ln 2 \quad (1)$$

可通过调节电阻值和电容值得到目标脉宽。

表 1 74HC221 的真值表

Tab. 1 Truth table of 74HC221

输入		输出		
\bar{R}_D	A	B	Q	\bar{Q}
L	X	X	L	H
X	H	X	L	H
X	X	L	L	H
H	L	↑	H pulse	L pulse
H	↓	H	H pulse	L pulse
↑	L	H	H pulse	L pulse

(注释:H 代表高电平,L 代表低电平,X 代表该输入值无关系,↑ 代表上升沿,↓ 代表下降沿,H pulse 代表一个高电平脉冲,L pulse 代表一个低电平脉冲)

选用现场可编程门阵列 FPGA 设计了触发脉冲发生器,输出重复频率为 100 kHz 的脉冲,给 74HC221 的管脚 B 提供上升沿。雷达探测时,单次

大气回波信号是由颗粒物与一个光脉冲相互作用产生的,信号的噪声以白噪声为主,为了降低噪声,将大量回波信号进行累加平均处理,重复频率越高,单位时间内累加的脉冲次数越多,对噪声的抑制作用越大,但重复频率越高,意味着脉冲周期越小,会影响探测距离,本文将重复频率设置为 100 kHz。

脉冲时序如图 3 所示。FPGA 输出信号的上升沿产生时,74HC221 的管脚 Q 输出一个脉宽为 t_w 的脉冲给正向驱动器 7407,由 7407 驱动 IRF610。给漏极回路电源端 V_{DD} 提供高压,当 IRF610 导通时,电流通过 LED 使其发光,通过控制导通时间来控制光脉冲的宽度。

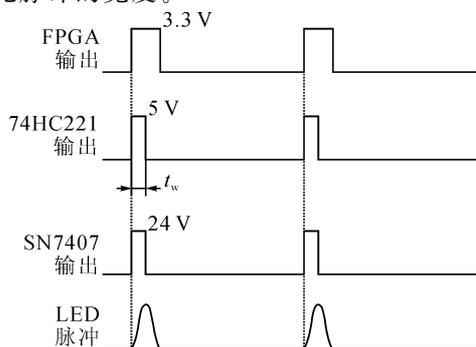


图 3 脉冲时序示意图

Fig. 3 Schematic diagram of pulse timing

用光电二极管探测 LED 光束,如图 4 所示。LED 发出的脉冲光束的脉宽为 193.246 ns,对应雷达探测的距离分辨率为 30 m,使用激光功率能量计测得其单个脉冲能量为 30 nJ。

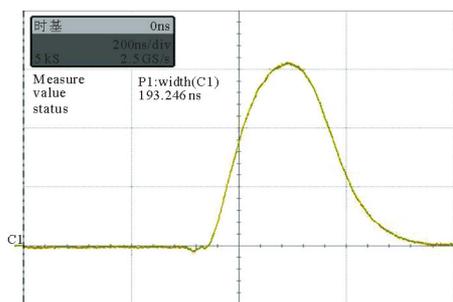


图 4 LED 脉冲光探测

Fig. 4 Detection of LED light pulse

3 LED 光源准直光路的设计

LED 光源是一个朗伯光源^[5],发散角接近 180° ,必须经过准直才能应用于光学雷达。本文先利用全内反射式(TIR)准直器对 LED 光束进行一级准直,再采用逆向开普勒望远镜结构进行二级准直扩束,达到高精度准直的目的。

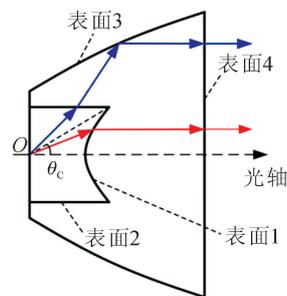
3.1 一级准直原理与模型建立

全内反射式准直器是一种旋转对称的自由曲面

透镜,集折射、反射于一体,结构紧凑,适用于 LED 准直^[6-8],其外形如图 5(a)所示。它的工作原理如图 5(b)所示,将 LED 放置于准直器的中心 O,表面 1 和表面 3 均为旋转对称结构的非球面,与光轴夹角小于临界角 θ_c 的光线,经表面 1 折射后平行于光轴出射,与光轴夹角大于 θ_c 的光线,先经表面 2 折射,再经过表面 3 全反射后平行于光轴出射。



(a) 实物照片



(b) 工作原理

图 5 TIR 准直器

Fig. 5 TIR collimator

随着大功率 LED 的广泛应用,学者们研究出了许多设计 TIR 准直器的方法,但是,这些研究工作大多是针对照明、投影等应用场合而设计,主要追求目标面照度的均匀性,对光束的发散角没有特殊要求。目前市场上可以购买到的 TIR 准直器的最小出光发散角为 5° ,可用于以 LED 作为主动探测光源的实验室仪器系统,但对于遥感探测的光学雷达来说仍然很大,需要设计二级准直光路。本文选用发散角为 5° 的 TIR 准直器对 LED 光束进行一级准直,为了便于二级准直光路的设计,建立了 TIR 准直器的模型,并在 ZEMAX 中进行仿真。

图 5(b)中,折射面表面 1 和表面 4 中间部分可以看作是非球面凸透镜,根据光路可逆原理,平行光通过凸透镜汇聚在光源点处,可通过 ZEMAX 光学设计软件设计表面 1 的参数。图 6 为折射面的光线追迹图和点列图。从图 6(b)的点列图可以看出,该设计聚焦效果很好,根据图 6(a)可以得到临界角 θ_c 的值。

$$\frac{\tan \omega'}{\tan \omega} = -\frac{f'_0}{f'_e} = \frac{D}{D'} \quad (7)$$

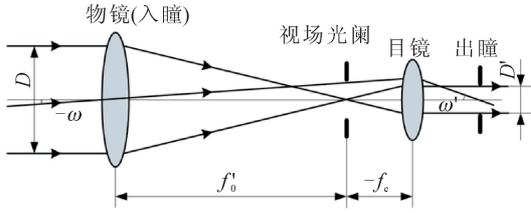


图 10 开普勒望远镜原理
Fig. 10 Principle of Kepler telescope

将固定了 TIR 准直器的 LED 放置于开普勒望远镜的出瞳位置,逆向使用开普勒望远镜,可将光束的发散半角从 ω' 压缩到 ω ,设计原理如图 11 所示。

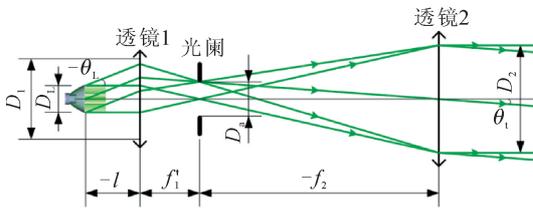


图 11 准直光路设计原理
Fig. 11 Design principle of collimating light path

已知 TIR 透镜的直径 D_L 为 17.5 mm、发散半角 θ_L 为 2.5° ,根据实际常用透镜焦距尺寸,透镜 1 选择焦距为 50.8 mm 的平凸透镜,透镜 2 选择焦距为 175 mm 的平凸透镜,由开普勒望远镜原理得:

$$\frac{\tan \theta_L}{\tan \theta_t} = -\frac{f'_2}{f'_1} \quad (8)$$

则 $\theta_t = 12.7 \text{ mrad}$,另外根据以下三式:

$$-l = f'_1 + \frac{f_1 \cdot f'_1}{f_2} \quad (9)$$

$$D_1 = D_L + 2 \cdot (-l) \cdot \tan \theta_L \quad (10)$$

$$D_2 = \frac{\tan \theta_L}{\tan \theta_t} \cdot D_L \quad (11)$$

可得 $-l = 65.5 \text{ mm}$, $D_1 = 23.2 \text{ mm}$, $D_2 = 60.3 \text{ mm}$ 。

此时已将发散半角压缩至 12.7 mrad ,光阑直径 D_a 与 θ_t 有如下关系:

$$\tan \theta_t = \frac{D_a}{2 \cdot f_2} \quad (12)$$

则 $D_a = 4.4 \text{ mm}$ 。

一般情况下,光阑的作用是限定光束的宽度或成像范围,这里通过减小光阑直径 D_a 来进一步压缩发散角,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。

利用 ZEMAX 对上述准直光路进行光学模拟,光线追迹如图 12 所示,图 13 为距离光源 40 m 远处光束截面的光能分布。



图 12 准直光路光线追迹图
Fig. 12 Ray tracing of collimating light path

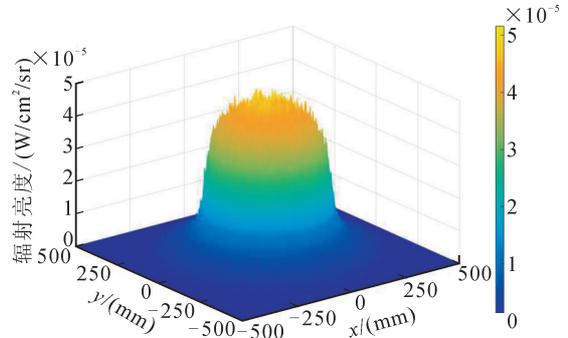


图 13 光束截面能量分布
Fig. 13 Energy distribution of beam cross section

图 12 中,LED 发出的光线,经过整个准直光路后,平行于光轴射出,在垂直于光轴的截面形成圆形光斑。从图 13 可以看出,在距离光源 40 m 远处形成的光斑的绝大部分能量比较均匀地分布在圆内,只有很小部分的能量分布在圆外,这种光束强度均匀分布的光源对于气溶胶探测雷达是比较理想的遥感光源。

表 2 列出了光阑直径不同时,发散角与光路的光能利用率之间的关系。LED 发出的脉冲光束的能量是一定的,即 30 nJ,从表 2 可以看出,光阑越小,发散角越小,能量利用率越低,但是发散角过大,也会影响雷达的探测距离,雷达光源期望有小的发散角同时兼有较高的能量。

表 2 LED 光源准直光路特征参数
Tab. 2 Parameters of collimating light path for LED source

光阑直径/mm	发散角/mrad	光能利用率/%
1	5.7	2.41
2	11.4	9.92
3	17.1	21.3
4	22.9	33.3

4 LED 光源的应用分析与实验验证

4.1 LED 光源的性能参数

根据上述设计制作 LED 光源。采用美国 CREE 公司的 XLamp XR-E Q5 型 5W 绿光 LED,光谱如图 14 所示,耐温 $-45^\circ\text{C} \sim 135^\circ\text{C}$,可于四季在户外使用,适用于气溶胶探测雷达。全内反射式准直器采用与 XLamp XR-E Q5 型 LED 适配的 CREE XRE-5°透镜,该透镜采用聚甲基丙烯酸甲酯

(PMMA)材质,出射光直径为 17.5 mm,透光率为 95%,可将 LED 光束发散角准直到 5° 以内。选择大恒光电的 GCL-0101 系列平凸透镜和可变光阑搭建二级准直光路,透镜参数如表 3 所示。

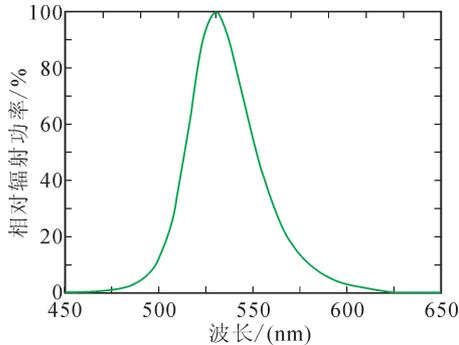


图 14 LED 的相对光谱功率分布图

Fig. 14 Relative spectrum power distribution of LED

表 3 平凸透镜参数

Tab. 3 Parameters of plano-convex lenses

序号	焦距/mm	直径/mm	材料	透镜类型
透镜 1	50.8	25.4	K9 玻璃	平凸透镜
透镜 2	175	76.2	K9 玻璃	平凸透镜

最终研制的 LED 光源的主要性能参数如下:①峰值波长:530 nm;②LED 单脉冲能量:30 nJ;③光脉冲宽度:200 ns;④脉冲重复频率:100 kHz;⑤出射光束发散角:在 5.7~22.9 mrad 范围内可调(发散角越小,出射光束能量越小,出光效率详见表 2)。

4.2 仿真分析

根据上述性能参数,对该 LED 光源应用于气溶胶探测光学雷达时,雷达的探测盲区和探测能力进行仿真,验证该光源的可应用性。

LED 光源雷达结构如图 15 所示,采用共轴模式,右边 ABCD 分别代表了光束与望远镜接收视场的重叠状态,绿色为光束截面,蓝色为望远镜视场截面,阴影为两者重叠部分。在一定距离处,发射光束与望远镜视场的重叠面积与发射光束光斑面积的比值,称为雷达的几何重叠因子 $Y_G(R)$,而两者未发生重叠的距离范围,即 $Y_G(R)=0$ 的区域,称为雷达的探测盲区。本文所设计的 LED 光源发散角可调,发散角越大,光束进入望远镜视场的距离越近,探测盲区越小,但当光源发散角大于望远镜接收视场角时(图 15 中由绿色虚线说明),望远镜视场将不能覆盖光束,如图 15 中 D 状态所示。分别取发散角为 5.7 mrad、11.4 mrad、17.1 mrad、22.9 mrad 来分析,望远镜视场角取 12 mrad,LED 光源雷达的几何重叠因子随距离变化曲线如图 16 所示。

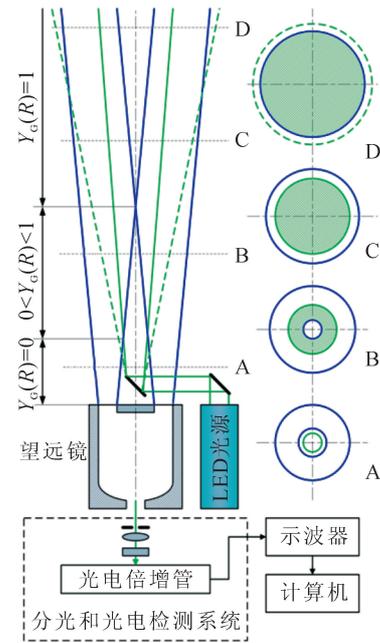


图 15 共轴 LED 光源雷达结构示意图

Fig. 15 Structure of coaxial LED light source radar

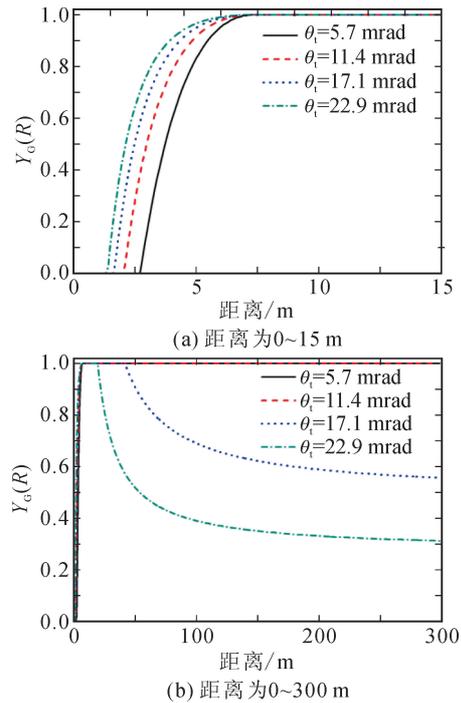


图 16 几何重叠因子

Fig. 16 Geometric overlap factor

从图 16(a)可以看出,探测盲区最大不到 3 m,9 m 后发射光束完全进入接收视场。图 16(b)中,当发散角小于视场角时,即发散角为 5.7 mrad 和 11.4 mrad 的情况,距离超过 9 m 时, $Y_G(R)$ 始终为 1;而发散角大于视场角时,即发散角为 17.1 mrad 和 22.9 mrad 的情况,几何重叠因子在某距离之后发生衰减,这是因为发散角大于视场角时,随着距离

增加,光束光斑将大于望远镜视场,光束能量不能全部被接收。

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,设置望远镜口径为 254 mm、接收视场角为 12 mrad,滤光片中心波长 531 nm、带宽 22 nm,光电倍增管(PMT)的量子效率为 15%,仿真结果如图 17 所示。

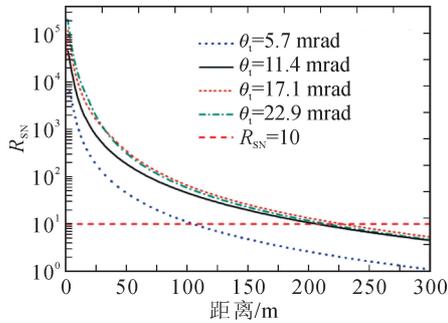


图 17 LED 光源雷达夜晚探测信噪比仿真

Fig. 17 Signal to noise ratio simulation of LED light source radar at night

图 17 为接收视场角 $\theta_r = 12$ mrad 时,不同光束发散角下,LED 光源雷达夜晚探测信噪比 R_{SN} 仿真曲线。当 $\theta_t = 5.7$ mrad 时,发散角小于接收视场角,由于光束出射能量低,探测距离仅 105 m;当 $\theta_t = 11.4$ mrad 时,发散角仍小于接收视场角,由于光束出射能量提高,探测距离增加到 210 m;当 $\theta_t = 17.1$ mrad 和 22.9 mrad 时,能量较大,本应探测得更远,但由于发散角大于接收视场角太多,几何重叠因子小于 1,部分光束超出接收视场,光能利用率低,探测距离没有显著提升。

4.3 实验验证

设置 LED 光源的发散角为 11.4 mrad 和 22.9 mrad,搭建雷达系统进行探测尝试,系统参数如表 4 所示。图 18 为同一夜晚发散角为 11.4 mrad 和 22.9 mrad 时的回波信号对比。由表 2 知,发散角为 22.9 mrad 时,光源出光能量是发散角为 11.4 mrad 时的三倍多,但从图 18 中可以看出,近处发散角为 22.9 mrad 时的回波信号比发散角为 11.4 mrad 时大,可是两者在 200 m 后信号都很弱,发散角为 22.9 mrad 时并不比发散角为 11.4 mrad 时探测得更远,此结果与上述仿真结果一致。考虑到几何重叠因子小于 1 会增加后续数据反演的复杂度,故光源的发散角取 11.4 mrad。

最终设置发散角为 11.4 mrad 进行实验。图 19 为 2016 年 6 月 20 日和 21 日晚 LED 光源雷达水平观测结果。可以看出,雷达系统可以接收到近距离 210 m 处的大气回波,说明该 LED 光源可以用于

气溶胶探测雷达。

表 4 LED 光源雷达参数

Tab. 4 Parameters of LED light source radar

参数	取值
中心波长/nm	530
发射单元	
单脉冲能量/nJ	30
脉冲宽度/ns	200
重复频率/Hz	100000
光束发散角/mrad	11.4 或 22.9
接收单元	
接收望远镜口径/mm	254
接收望远镜视场角/mrad	12
滤光片带宽/nm	531±11
PMT 的量子效率/%	15
累计时间/min	5

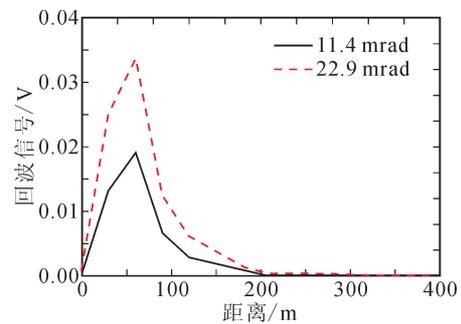


图 18 发散角不同时回波信号对比

Fig. 18 Comparison of echo signals at different divergences

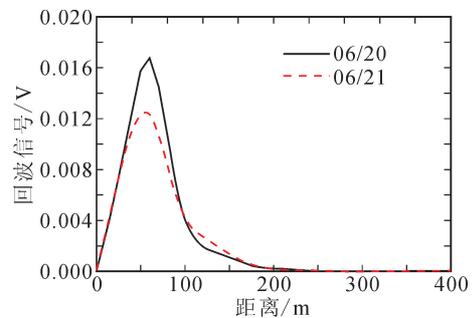


图 19 夜晚水平探测回波信号

Fig. 19 Echo signal for horizontal detection at night

5 结 语

本文研制了一款应用于低空气溶胶探测雷达的 LED 光源,利用快速功率场效应管实现了 LED 光源的纳秒级脉冲驱动,在 ZEMAX 中建立了 TIR 准直器的模型,并结合开普勒望远镜结构设计了准直扩束光路,实现了 LED 光束的毫弧度级准直。通过光源的应用分析说明,LED 光源雷达探测盲区小。利用美国标准大气模型进行探测信号信噪比仿真,结果表明,雷达的探测距离可达 210 m。通过水平观测实验进一步说明,该光源可以用于气溶胶探测

雷达。该光源能量对眼安全,盲区很小,这使LED光源雷达更适用于城市内的近程气溶胶探测。

参考文献:

- [1] 韩永,王体健,饶瑞中,等. 大气气溶胶物理光学特性研究进展 [J]. 物理学报, 2008, 57(11): 7396-7407.
HAN Yong, WANG Tijian, RAO Ruizhong, et al. Progress in the study of physic optics characteristics of atmospheric aerosols [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(11): 7396-7407.
- [2] 刘思含,周春艳,毛学军,等. 大气气溶胶主被动遥感探测应用技术进展 [J]. 环境与可持续发展, 2016, 41(4): 131-135.
LIU Sihan, ZHOU Chunyan, MAO Xuejun, et al. Advances in the application of active and passive remote sensing monitoring of atmospheric aerosol [J]. Environment and Sustainable Development, 2016, 41(4): 131-135.
- [3] 华灯鑫,宋小全. 先进激光雷达探测技术研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(增刊3): 21-27.
HUA Dengxin, SONG Xiaoquan. Advances in lidar remote sensing techniques [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S3): 21-27.
- [4] 狄慧鸽,侯晓龙,赵虎,等. 多波长激光雷达探测多种天气气溶胶光学特性与分析 [J]. 物理学报, 2014, 63(24): 244206.
DI Huige, HOU Xiaolong, ZHAO Hu, et al. Detections and analyses of aerosol optical properties under different weather conditions using multi-wavelength Mie lidar [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(24): 244206.
- [5] 万运佳,林浩博,刘杰,等. 超高光效小聚光角度的均匀配光LED透镜设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 122202.
WAN Yunjia, LIN Haobo, LIU Jie, et al. Design of LED lens with ultra-high light efficiency and small light-gathering angle for realizing uniform light distribution [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 122202.
- [6] 张航,梁雪,严金华,等. LED准直器设计中复合抛物面同步多曲面方法 [J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0922004.
ZHANG Hang, LIANG Xue, YAN Jinhua, et al. Compound parabolic concentrator-simultaneous multiple surfaces design methods for collimators [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0922004.
- [7] CHEN J J, LIN C T. Freeform surface design for a light-emitting diode-based collimating lens [J]. Optical Engineering, 2010, 49(9): 093001.
- [8] 苏宙平,阙立志,朱焯炜,等. 用于LED光源准直的紧凑型光学系统设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(2): 022203.
SU Zhouping, QUE Lizhi, ZHU Zhuowei, et al. Optical system design of the compact collimator for LED source [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(2): 022203.

(责任编辑 周 蓓)