

doi:10.3788/gzxb20174610.1001001

波长可调谐激光雷达系统设计

宋跃辉, 石高栋, 李仕春, 高飞, 王玉峰, 李博, 华灯鑫

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

摘 要:以 OPO 激光器为光源,设计了一台激发波长在 192~2 750 nm 范围内连续可调谐的激光雷达系统.分光系统由可旋转光栅和小孔光阑构成,通过调节光栅的衍射角,实现不同波长回波信号的有效接收.光电倍增管用于紫外和可见光波段回波信号的光电转换,InGaAs 探测器用于红外波段回波信号的光电转换.后续数据采集及处理由专用采集系统和 PC 机完成.利用美国标准大气模型对系统在不同波段的探测能力进行数值仿真,验证了系统的可行性.该系统实现了激光雷达激发波长的大范围扩展,对精细反演近地表气溶胶微物理特性具有重要的研究意义.

关键词:气溶胶;激光雷达;波长可调谐;OPO 激光器;可旋转光栅

中图分类号: TN958.98; TP702 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2017)10-1001001-9

Design of Wavelength Tunable Lidar System

SONG Yue-hui, SHI Gao-dong, LI Shi-chun, GAO Fei, WANG Yu-feng,
LI Bo, HUA Deng-xin

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

Abstract: A wavelength tunable lidar is designed based on OPO laser. The output wavelength of the lidar can be tunable continuously in the range of 192~2750 nm. The optical splitting system of the lidar is composed of rotatable gratings and circular apertures. By adjusting the diffraction angle of the rotatable gratings, the lidar can receive the return signal at the specific wavelength. The photomultiplier tube and InGaAs detectors are used to transform the optical signal into electric signal in the corresponding wavebands. Subsequent data acquisition and processing are performed by data acquisition system and PC. Numerical simulations are performed with the standard atmospheric model. The detection ability of the lidar in the different wavebands is verified by the simulation results. The lidar is of important significance for fine detection of microphysical properties of near-surface aerosols.

Key words: Aerosols; Lidar; Wavelength tunable; OPO Laser; Rotatable grating

OCIS Codes: 010.1110; 010.3640; 220.4830; 350.2770

0 引言

大气气溶胶是指由大气介质和悬浮于其中的固体或液体微粒所组成的多相体系.气溶胶来源广泛,其中自然来源主要包括地面扬尘、海水溅沫等,人为源气溶胶主要包括煤、油的燃烧物质以及机动车排放的烟粒.气溶胶成分复杂,对生态环境和地球气候等有着非常重要的影响,其中近地表气溶胶更是直接影响人类健康和生产生活,已成为大气科学领域的研究热点^[1-2].

激光雷达是传统微波雷达向光波波段的延伸,具有探测范围广、空间分辨高、实时性好等优点,在气溶胶

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61405158,41627807)资助

第一作者:宋跃辉(1980-),男,讲师,博士,主要研究方向为偏振激光雷达.Email:songyuehui@xaut.edu.cn

通讯作者:华灯鑫(1964-),男,教授,博士,主要研究方向为激光雷达遥感探测技术及光电检测技术等.Email:dengxinhua@xaut.edu.cn

收稿日期:2017-05-12; **录用日期:**2017-07-20

<http://www.photon.ac.cn>

探测研究中发挥着不可或缺的作用^[3].激光束与气溶胶组粒子相互作用产生后向散射回波信号是激光雷达的探测基础.气溶胶粒子对入射光的散射和消光作用与入射光波长密切相关,因此扩展激光雷达的输出波长有利于研究气溶胶微物理特性^[4].

多波长激光雷达和 LED 光源雷达一定程度上扩展了激光雷达输出波长,可用于探测粒谱、波长指数等气溶胶微物理特性.多波长激光雷达一般采用多激光器或激光倍频技术实现多波长激光输出,其输出波长数目有限且波长位置固定^[5-9].LED 光源雷达以大功率 LED 为光源,具有输出波长范围广的突出优点,然而 LED 光源输出功率小、发散角大、有效探测距离仅为数百米^[10].显然,目前激光雷达尚未实现输出波长的大范围连续扩展,限制了气溶胶微物理特性的深入研究.

随着激光技术的飞速发展,光学参量振荡(Optical Parametric Oscillator, OPO)激光器克服了发散角大,输出不稳定等缺点,可实现 192~2 750 nm 波长范围的高质量激光输出,且输出波长连续可调,这为波长可调谐激光雷达设计奠定了基础.基于 OPO 激光器设计波长可调谐激光雷达可实现大范围内任意波长输出,其波长连续可调的突出优势可为精细探测气溶胶微物理特性提供有效手段,具有重要的研究价值.

现有波长可调谐激光雷达的输出波长调节范围很小,仅用于探测吸收性气体浓度^[11-13].鉴于此,为精细探测近地表气溶胶微物理特性,以 OPO 激光器为光源,设计了波长可调谐激光雷达系统,并利用美国标准大气模型进行了数值仿真,验证了系统的可行性,为系统实际搭建提供参考.

1 波长可调谐激光雷达系统设计

图 1 为自主设计的波长可调谐激光雷达系统.激光发射系统采用美国 Continuum 公司的 Horizon II 型激光器,其输出波长范围为 192~2 750 nm,出射波长连续可调、波长最小调节步长为 0.1nm,线宽为 3~10 个波数.其中 192~400 nm 和 400~2 750 nm 波长范围的激光由两个出光口分别出射.经特殊镀膜处理的两台望远镜分别接收 192~400 nm 和 400~2 750 nm 波长范围的回波信号.光栅分光系统主要由可旋转光栅和小孔光阑构成.当激光器出射波长变化时,系统通过调整可旋转光栅的衍射角以保证探测器接收到对应波长的回波信号.192~400 nm 波长范围的回波信号由 Grating1 选择波长,并由 PMT1 进行光电转换.考虑到光电探测器的波长范围,400~2 750 nm 波长范围回波信号首先由分束镜进行分光,其反射光波长范围为

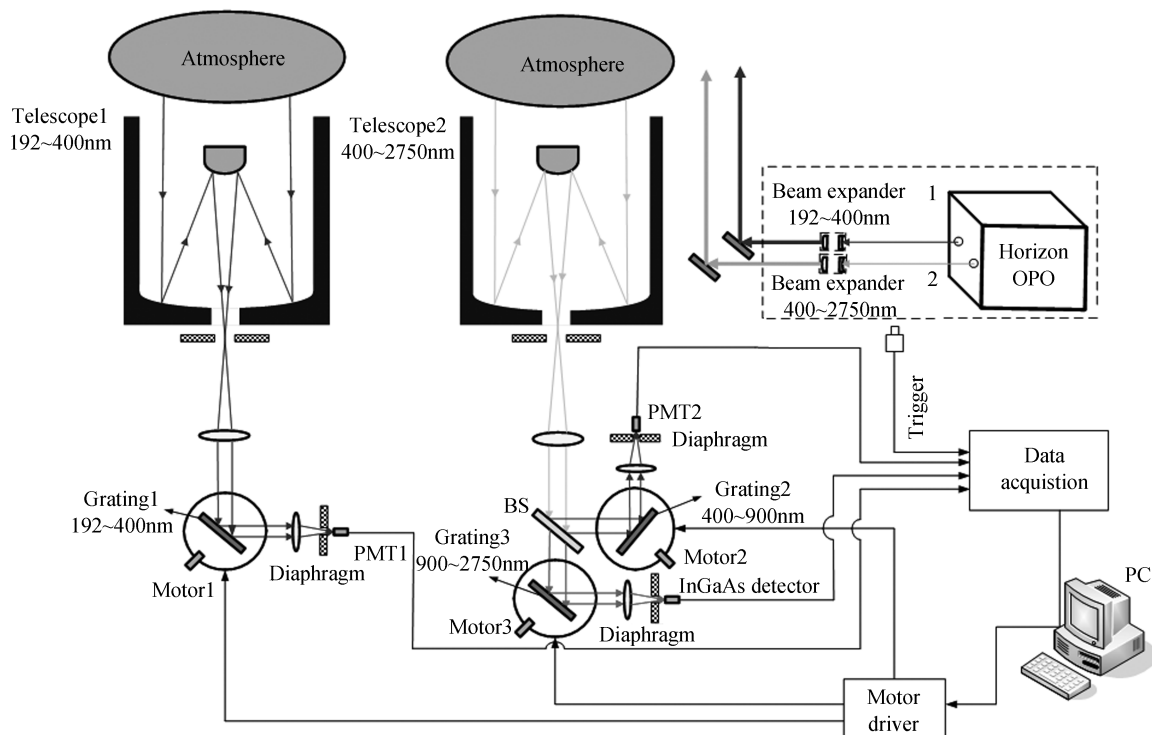


图 1 波长可调谐激光雷达系统结构

Fig.1 The schematic of the wavelength tunable lidar system

400~900 nm,其透射光波长范围为 900~2 750 nm.反射光由 Grating2 进行波长选择,并由 PMT2 进行光电转换;而透射光由 Grating3 进行波长选择,并由 InGaAs 探测器进行光电转换.后续数据采集及处理由专用采集系统和 PC 机完成.系统主要参数如表 1.

表 1 系统主要参数表
Table 1 The parameters of the system

Transmitter	Horizon II OPO
Wavelength	192~2 750 nm(tunable)
Pulse duration	3~5 ns
Pulse repetition frequency	10Hz
Beam divergence	<2 mrad
Beam expander	5 times
Receiver 1/receiver 2	Schmidt-Cassegrain telescope
Diameter	300 mm
Field of view	0.5 mrad
Grating 1	Thorlabs GR13-1203
Grating constant	(1/1 200) mm
Effective area	12.7 mm×12.7 mm
Grating 2	Thorlabs GR25-0605
Grating constant	(1/600) mm
Effective area	25 mm×25 mm
Grating 3	Thorlabs GR25-0310
Grating constant	(1/300) mm
Effective area	25 mm×25 mm
Diaphragm aperture	1~12 mm
Beam splitter reflection band	400~900 nm($R_{avg}>95\%$)
Beam splitter transmission band	900~2 800 nm ($T_{avg}>90\%$)
PMT 1	Hamamatsu R6351
Spectral response range	160~650 nm
Dark current	0.5 nA
PMT 2	Hamamatsu R630-10
Spectral response range	185~930 nm
Dark current	0.1 nA
InGaAs detector	Hamamatsu G12183-003K
Spectral response range	900~2 600 nm
Dark current	400 nA

2 光栅分光系统

图 2 为光栅分光系统,主要由可旋转光栅和小孔光阑构成,其中可旋转光栅的最小旋转角度为 0.01° ,小孔光阑可有效抑制杂散光.当调节光栅的角度时,其入射角 a 和水平方向衍射光的衍射角 b 也随之改变,而

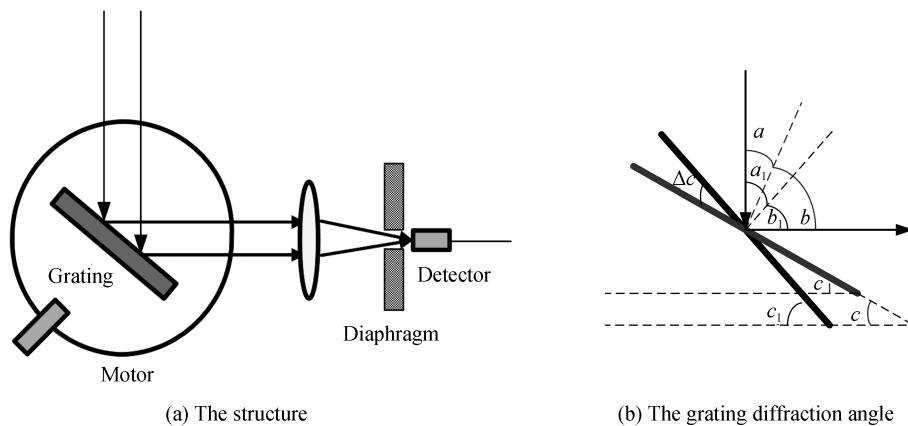


图 2 光栅分光系统
Fig.2 The grating beam spiting system

探测器只接收平行方向的衍射光.因此,探测器接收的回波信号波长也会发生改变.

光栅方程为

$$d(\sin a \pm \sin b) = m\lambda \quad (1)$$

式中 d 为光栅常数, a 为入射角, b 为衍射角, m 为衍射级次.

由图 2(b)可知,入射角和衍射角有如下关系

$$a + b = \pi/2 \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)可得

$$\sqrt{2}d \sin(a \pm \pi/4) = m\lambda \quad (3)$$

系统设定只对光栅负一级的衍射光进行探测.若探测波长 λ 已知,则可利用式(3)计算入射角 a 以及光栅与水平方向的夹角 c .如图 2(b)所示,若光栅角度与水平方向的夹角由 c 变化为 c_1 ,则入射角由 a 变为 a_1 ,衍射角由 b 变为 b_1 .系统在紫外、可见、红外波段分别使用不同型号的光栅分光,详细参数参见表 1.光栅初始位置与水平方向的夹角为 30° ,此时三个探测器接收到的中心波长分别为 305 nm, 610 nm, 1 220 nm.

假设回波信号波长为 λ ,利用式(3)计算光栅与水平方向的目标夹角 c_1 ,则光栅角度相对于初始位置的变化量为 Δc ,有

$$\Delta c = c_1 - 30^\circ \quad (4)$$

式中, Δc 为正,表示相对于初始位置顺时针旋转; Δc 为负,表示相对于初始位置逆时针旋转.

光栅相对于初始位置转过的角度 Δc 与光栅分光系统中心波长的关系如图 3.

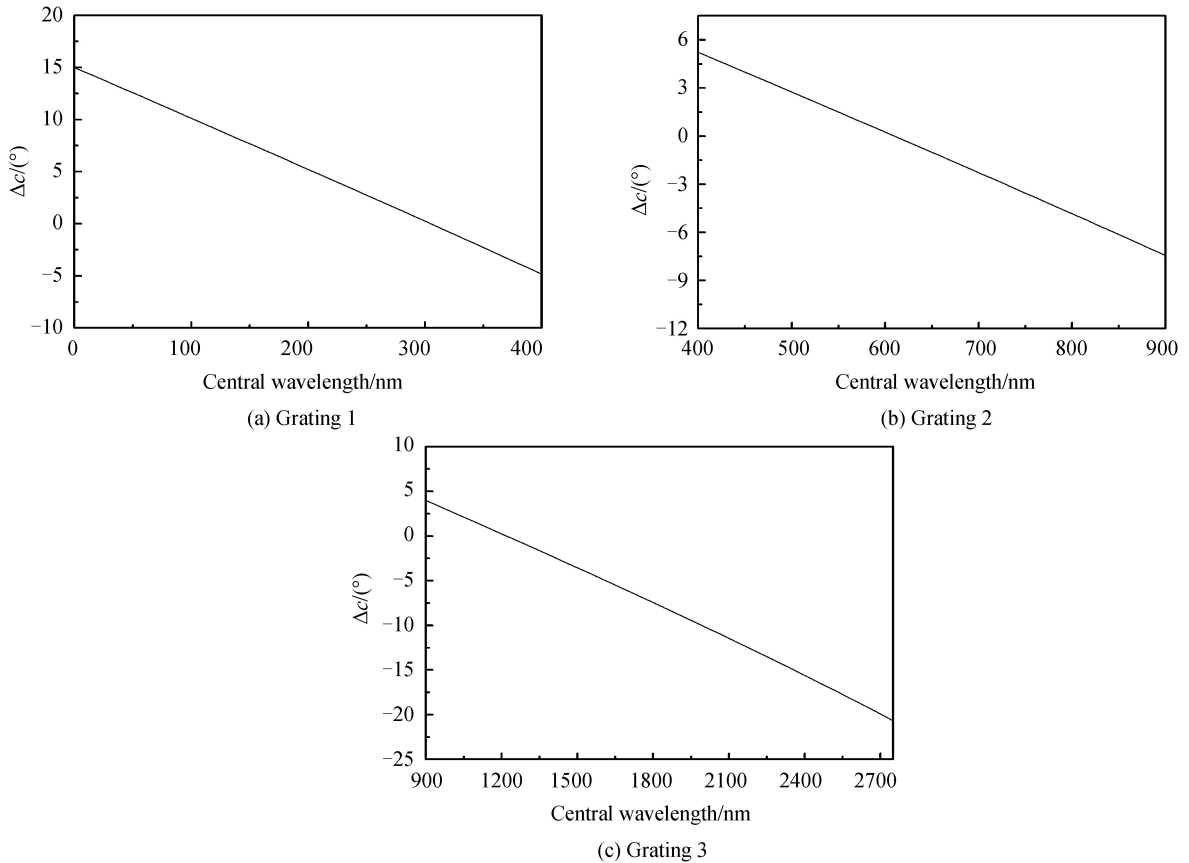


图 3 光栅角度不同时水平方向衍射光的中心波长

Fig.3 The central wavelength of the diffracted light in horizontal direction when Δc is different

光栅分光系统的带宽为

$$\Delta\lambda = r / (dl/d\lambda) = rd \cos \theta / fm \quad (5)$$

式中, r 为小孔光阑孔径, $dl/d\lambda$ 为光栅线色散,是指在聚焦物镜的焦平面上,波长相差 0.1 nm 的两条谱线分开的距离. d 为光栅常数, f 为物镜焦距, m 为光谱级次, θ 为衍射角.

光阑孔径在 1~12 mm 范围内连续可调,当光栅常数为 1/1 200 mm,衍射角 θ 为 0 时,光栅分光系统带宽与光阑孔径的关系如图 4.

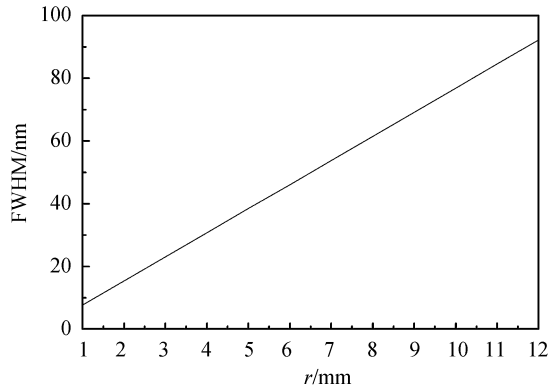


图 4 光栅分光系统带宽与光阑孔径的关系

Fig.4 The FWHM of the grating beam spiting system with different diaphragm aperture

由图 4 可知,当光阑孔径增大时,分光系统带宽增大.为了减小太阳背景光干扰,将光阑孔径统一设为 1 mm.光栅分光系统在不同中心波长位置的带宽如图 5.显然,在光栅分光系统中,系统带宽均随中心波长增加而减小.

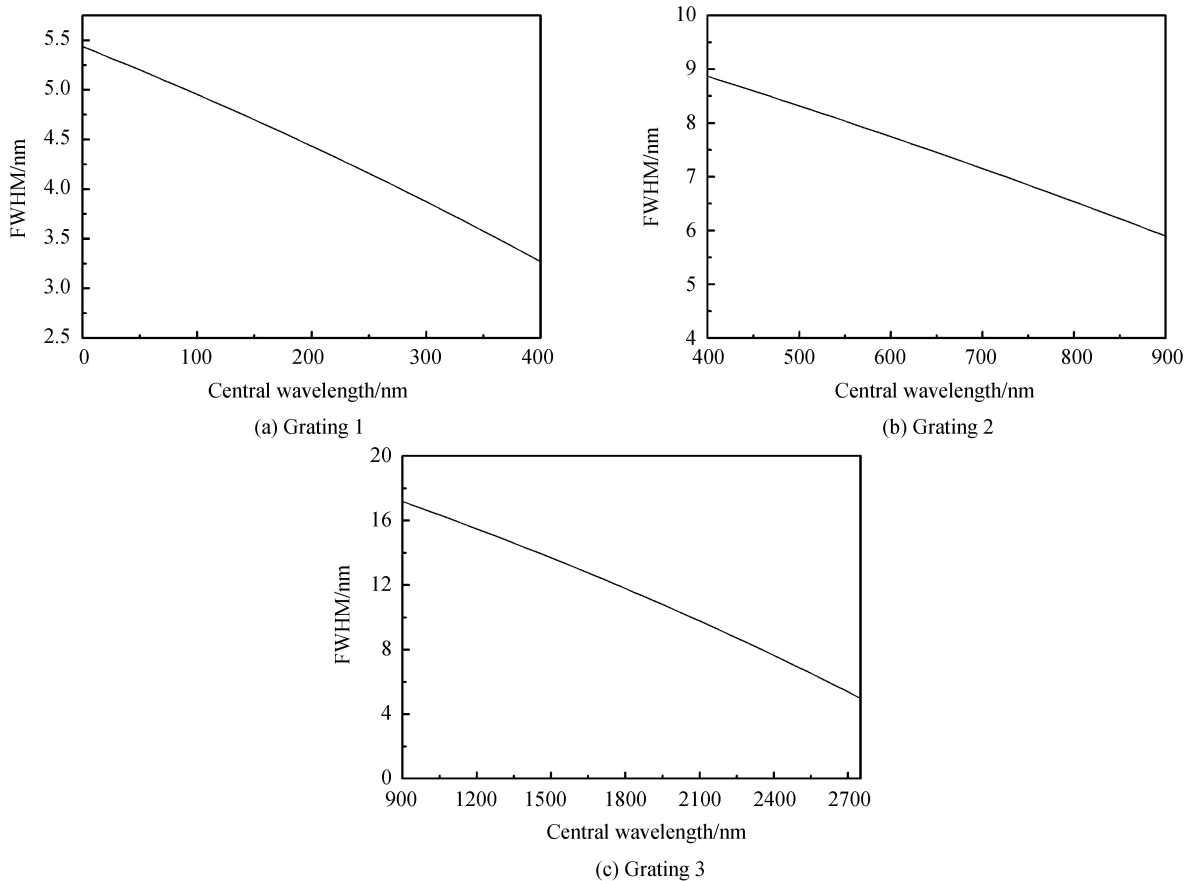


图 5 光栅分光系统在不同中心波长的带宽

Fig.5 The FWHM of the grating beam spiting system at different central wavelength

3 系统仿真

太阳背景光和探测器暗电流会对回波信号产生干扰,从而影响激光雷达的探测距离和信噪比.为验证系统的探测能力,利用美国标准大气模型进行了数值仿真.

3.1 米散射激光雷达方程

波长可调谐激光雷达接收到高度 z 处的米散射回波信号功率为

$$P(\lambda, z) = P_0(\lambda)C(\lambda) \frac{\beta(\lambda, z)}{z^2} \exp \left[-2 \int_0^z \alpha(\lambda, z) dz \right] \quad (6)$$

式中, $P(\lambda, z)$ 为高度 z 处波长为 λ 的回波信号功率, $P_0(\lambda)$ 为激光器发射功率, $C(\lambda)$ 为激光雷达常数, $\beta(\lambda, z)$ 为大气后向散射系数, $\alpha(\lambda, z)$ 为大气总消光系数.

在紫外部分波段, 需要考虑臭氧吸收作用对大气消光系数的影响, 大气消光系数表示为

$$\alpha(\lambda, z) = \alpha_a(\lambda, z) + \alpha_m(\lambda, z) + N_{O_3}(z)\sigma_{O_3}(\lambda, z) \quad (7)$$

式中, $\alpha_a(\lambda, z)$ 为气溶胶消光系数, $\alpha_m(\lambda, z)$ 为大气分子消光系数, $N_{O_3}(z)$ 表示臭氧浓度, $\sigma_{O_3}(\lambda, z)$ 为臭氧分子的吸收截面.

3.2 信噪比

系统采用模拟法进行光电检测, 光电探测器将回波光信号转换为电流信号, 计算公式为

$$I_s = P(\lambda, z)\eta(\lambda)e/h\nu \quad (8)$$

式中, $\eta(\lambda)$ 为探测器量子效率, e 为电子电量, h 为普朗克常数, ν 为入射光频率.

日间探测时, 系统主要受太阳背景光影响, 其所产生的电流为

$$I_b(\lambda) = S_b(\lambda)\Omega_0 A_0 \epsilon(\lambda) \Delta\lambda(\lambda) \frac{\eta(\lambda)e}{h\nu} \quad (9)$$

式中, λ 为激发波长, $S_b(\lambda)$ 为太阳背景光的辐射亮度, $\epsilon(\lambda)$ 为接收系统在波长 λ 处的光学效率, A_0 为有效接收面积, Ω_0 为接收立体角, $\Delta\lambda(\lambda)$ 为分光系统在 λ 处的带宽.

系统信噪比为

$$\text{SNR} = \frac{\sqrt{n}I_s}{\sqrt{2eFB[I_s + 2(I_b + I_d)]}} \quad (10)$$

式中, n 为脉冲数数目, F 为噪声系数, B 为探测器带宽, I_d 为探测器暗电流. 夜间探测时, 可忽略太阳背景光的影响.

3.3 系统探测能力

192 nm、266 nm、355 nm、450 nm、532 nm、650 nm、800 nm、1 064 nm、1 220 nm、1 550 nm、2 100 nm 波长, 覆盖了紫外、可见光和红外波段范围, 避开了主要气体吸收谱线(266 nm 除外), 同时具有一定的波长间隔. 因此, 利用美国标准大气模型对系统在以上波长的探测能力进行了数值仿真. 仿真中脉冲数目为 1 200, 即积分时间为 2 min, 探测器带宽为 500 MHz.

系统在紫外波段的仿真参数和仿真结果如表 2、图 6 所示. 值得一提的是, 臭氧对 266 nm 波长电磁辐射具有强吸收性, 本文在仿真中设定臭氧浓度为 30 ppb. 由图 6 可知, 在信噪比为 10 的限定条件下, 在紫外波段 192 nm、266 nm、355 nm 波长, 系统日间最大探测高度分别为 1.2 km、2.6 km、6.3 km, 夜间最大探测高度分别为 1.2 km、2.6 km、7.1 km.

在 192 nm 和 266 nm 波长, 系统的夜间探测能力和日间探测能力基本一致, 这主要是因为两个波长恰好位于日盲区, 不受太阳背景光影响. 夜间探测时, 相同探测高度处, 系统在 355 nm 波长的信噪比最高, 在 266 nm 波长的信噪比次之, 在 192 nm 波长的信噪比最低. 日间探测时, 尽管 192 nm 和 266 nm 波长不受太

表 2 紫外波段仿真参数

Table 2 The simulation parameters in ultraviolet waveband

Wavelength/nm	192	266	355
Pulse energy/mJ	0.1	3	8
Background radiation in the day/(W · cm ⁻² · Sr ⁻¹ · μm ⁻¹)	0	0	0.05
System receiving efficiency	0.3	0.51	0.5
Filter bandwidth/nm	4.5	4.2	3.5
Quantum efficiency	0.19	0.2	0.18

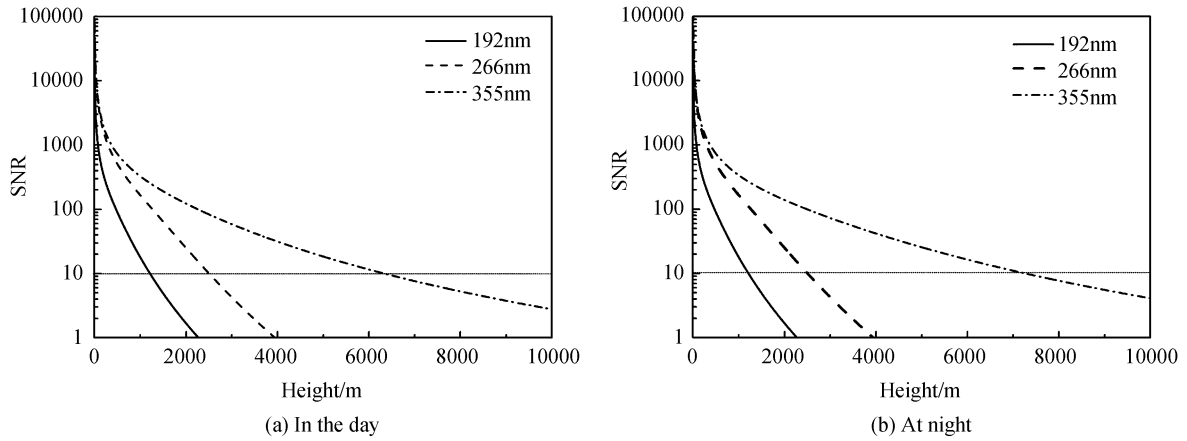


图6 紫外波段信噪比
Fig.6 The SNR in ultraviolet waveband

阳背景光的影响,但由于激光器在不同波长脉冲能量的差异(8 mJ@355 nm,3 mJ@266 nm,0.1 mJ@192 nm),系统在355 nm的信噪比依然高于在266 nm和192 nm波长的信噪比。

系统在可见光波段的仿真参数如表3所示.由图7可知,在信噪比为10的限定条件下,在可见光波段450 nm、532 nm、650 nm、800 nm波长,系统日间的最大探测高度分别为8.5 km、6.5 km、5 km、3.6 km,夜间的最大探测高度分别为20 km、16.2 km、11 km、7 km.在以上可见光波段,受太阳背景光影响,系统日间探测能力远低于夜间探测能力.另外,由于在此波长范围内激光脉冲能量随波长递减,系统最大探测高度随波长增加而逐渐减小。

表3 可见光波段仿真参数

Table 3 The simulation parameters in visible waveband

Wavelength/nm	450	532	650	800
Pulse energy/mJ	50	36	26	20
Background radiation in the day/(W · cm ⁻² · Sr ⁻¹ · μm ⁻¹)	0.22	0.2	0.16	0.1
System receiving efficiency	0.49	0.49	0.4	0.29
Filter bandwidth/nm	8.6	8	7.5	6.6
Quantum efficiency	0.2	0.17	0.12	0.08

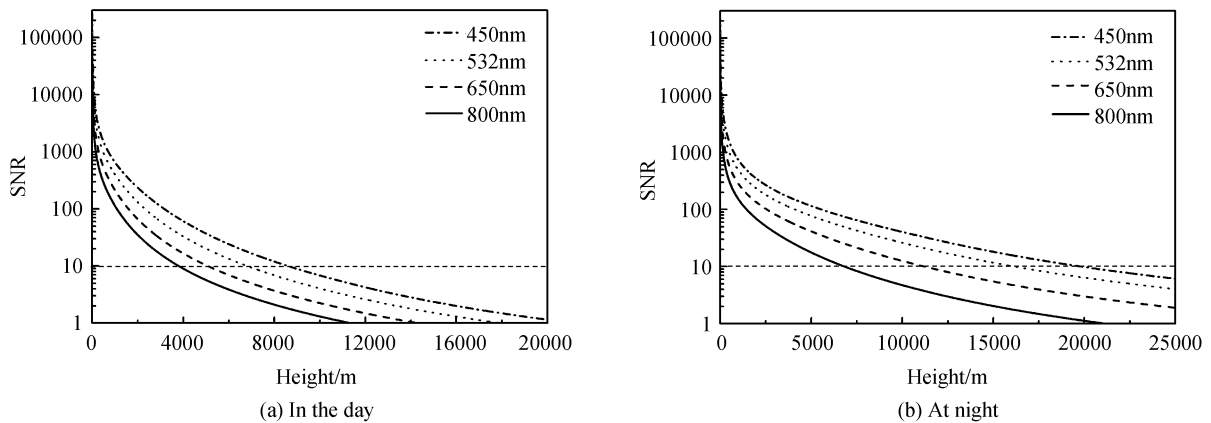


图7 可见光波段的信噪比
Fig.7 The SNR in visible waveband

系统在红外波段的仿真参数如表4所示.由图8可知,在信噪比为10的限定条件下,在1 064 nm、1 220 nm、1 550 nm、2 100 nm波长,系统日间的最大探测高度分别为1.95 km、1.6 km、1.4 km、1 km;夜间的最大探测高度分别为2.05 km、1.8 km、1.5 km、1.05 km.受激光脉冲能量影响,系统在1 064 nm、1 220 nm、1 550 nm、2 100 nm波长的探测能力依次降低.在红外波段,探测器暗电流是最主要的噪声来源,因此系统日间探测能力和夜间探测能力的差别较小。

表 4 红外波段仿真参数

Table 4 The simulation parameters in infrared waveband

Wavelength/nm	1 064	1 220	1 550	2 100
Pulse energy/mJ	12	10	9	5
Background radiation in the day / ($W \cdot cm^{-2} \cdot Sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)	0.06	0.045	0.02	0.005
System receiving efficiency	0.62	0.58	0.43	0.22
Filter bandwidth/nm	16	15.4	13	9
Photosensitivity / ($A \cdot W^{-1}$)	0.28	0.4	0.75	1.28

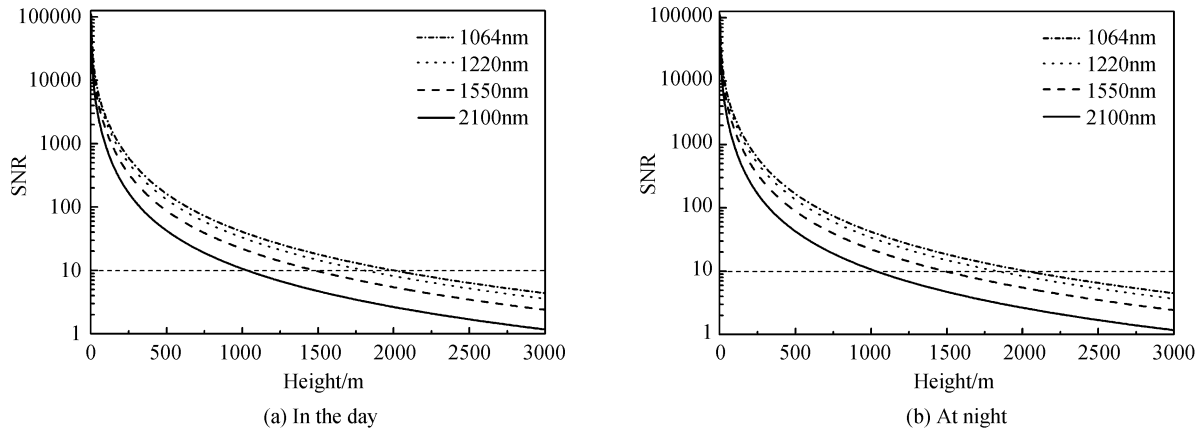


图 8 红外波段的信噪比

Fig.8 The SNR at infrared waveband

4 结论

以 OPO 激光器为光源,设计了波长可调谐激光雷达系统,激发波长在 192~2 750 nm 范围内连续可调谐,扩展了激光雷达的激发波长,有利于反演气溶胶微物理特性.仿真结果表明,在信噪比为 10 的限定条件下,在紫外波段 192 nm、266 nm、355 nm 波长,系统日间最大探测高度分别为 1.2 km、2.6 km、6.3 km,夜间最大探测高度分别为 1.2 km、2.6 km、7.1 km;在可见光波段 450 nm、532 nm、650 nm、800 nm 波长,系统日间最大探测高度分别为 8.5 km、6.5 km、5 km、3.6 km,夜间最大探测高度分别为 20 km、16.2 km、11 km、7 km;在红外波段 1 064 nm、1 220 nm、1 550 nm、2 100 nm 波长,系统日间最大探测高度分别为 1.95 km、1.6 km、1.4 km、1 km,夜间最大探测高度分别为 2.05 km、1.8 km、1.5 km、1.05 km.仿真结果表明该系统在不同波长的有效探测距离均大于 1 km,验证了系统设计的可行性,可为精细探测近地表气溶胶微物理特性提供有效的研究手段.

参考文献

- [1] MAO Jie-tai, ZHANG Jun-hua, WANG Mei-hua. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, **60**(1): 625-634.
毛节泰, 张军华, 王美华. 中国大气气溶胶研究综述[J]. *气象学报*, 2002, **60**(1): 625-634.
- [2] ZHANG Xiao-ye. Aerosol over China and their climate effect[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, **22**(1): 12-16.
张小曳. 中国大气气溶胶及其气候效应的研究[J]. *地球科学进展*, 2007, **22**(1): 12-16.
- [3] SCHOTLAND R M, SASSEN K, STONE R. Observation by lidar of linear depolarization ratios for hydrometeors[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2010, **10**(5): 1011-1017.
- [4] HAO Zeng-zhou, GONG Fang, PAN De-lu, et al. Scattering and polarization characteristics of dust aerosol particles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 6-14.
郝增周, 龚芳, 潘德炉, 等. 沙尘气溶胶粒子群的散射和偏振特性[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 6-14.
- [5] ALTHAUSEN D, MULLER D, ANSMANN A, et al. Scanning 6-wavelength 11-channel aerosol lidar[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000, **17**(11): 1469-1482.
- [6] SU J, LIU Z, WU Y, et al. Retrieval of multi-wavelength aerosol lidar ratio profiles using Raman scattering and Mie backscattering signals[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **79**(7): 36-40.
- [7] ZEGHBIB S, BOUZID S, CHAABI A. Quantitative characterization of atmospheric desert particles Via multispectral LiDAR method (UV to IR), using genetic algorithms and compared with Chomette's mode[J]. *Turkish Journal of*

- Physics, 2013, **37**(1): 151-158.
- [8] CHEMYAKIN E, MULLER 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.
- [9] VESELOVSKII I, WHITEMAN D N, KORENSKIV M, *et al.* Characterization of forest fire smoke event near Washington, DC in summer 2013 with multi-wavelength lidar[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2015, **15**(4): 1647-1660.
- [10] ZHONG Wen-ting, HUA Deng-xin, Liu Jun, *et al.* Optimal design and preliminary experiments on new type of LED light source radar system for aerosol detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(10): 488-494.
钟文婷, 华灯鑫, 刘君, 等. 新型 LED 光源气溶胶探测雷达系统优化设计与初步实验[J]. *光学学报*, 2016, **36**(10): 488-494.
- [11] VEERABUTHIRAN S, RAZDAN A K, JINDAL M K, *et al.* Development of 3.0~3.45 μm OPO laser based range resolved and hard-target differential absorption lidar for sensing of atmospheric methane [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, **73**(1): 1-5.
- [12] LIU Zhi-qing, LI Peng-cheng, CHEN Xiao-wei, *et al.* Classification of airborne LiDAR point cloud data based on information vector machine[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(1): 210-219.
刘志青, 李鹏程, 陈小卫, 等. 基于信息向量机的机载激光雷达点云数据分类[J]. *光学精密工程*, 2016, **24**(1): 210-219.
- [13] HAN Ke, GONG Wei, MA Xin, *et al.* A ground-based differential absorption lidar for atmospheric vertical CO₂ profiling[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(24): 226-234.
韩舸, 龚威, 马昕, 等. 地基 CO₂ 廓线探测差分吸收激光雷达[J]. *物理学报*, 2015, **64**(24): 226-234.