

引用格式: LAN Jiaxin, ZHAO Ruocan, PAN Tingyu, et al. Comparative Analysis of Metastable Helium Resonance Fluorescence Lidar Systems[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(4):0401001

兰家欣,赵若灿,潘婷玉,等.亚稳态氦共振荧光激光雷达系统方案比较分析[J].光子学报,2021,50(4):0401001

## 亚稳态氦共振荧光激光雷达系统方案比较分析

兰家欣<sup>1,2</sup>,赵若灿<sup>1,2</sup>,潘婷玉<sup>1,2</sup>,薛向辉<sup>1,2</sup>,陈廷娣<sup>1,2</sup>,孙东松<sup>1,2</sup>,李梓霖<sup>1,2</sup>

(1 中国科学技术大学 地球和空间科学学院,合肥 230026)

(2 中国科学院近地空间环境重点实验室,合肥 230026)

**摘 要:**对脉冲光和连续光两种激光雷达系统进行了改进,在原有激光雷达系统的基础上进一步细化设计参数,并结合系统本身限制选择更合适的设备。对两种激光雷达系统回波信号进行模拟计算,并就信噪比和实现难度等方面进行了对比,结果表明,脉冲光激光雷达更合适探测热层和外逸层亚稳态氦密度。

**关键词:**大气光学;氦测密度激光雷达;共振荧光;亚稳态氦;遥感

中图分类号:TN958.98

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215004.0401001

## Comparative Analysis of Metastable Helium Resonance Fluorescence Lidar Systems

LAN Jiaxin<sup>1,2</sup>, ZHAO Ruocan<sup>1,2</sup>, PAN Tingyu<sup>1,2</sup>, XUE Xianghui<sup>1,2</sup>, CHEN Tingdi<sup>1,2</sup>, SUN Dongsong<sup>1,2</sup>, LI Zimu<sup>1,2</sup>

(1 School of Earth and Space Sciences, University of Science of Technology of China, Hefei 230026, China)

(2 Chinese Academy of Sciences Key Laboratory of Geospace Environment, Hefei 230026, China)

**Abstract:** The pulsed lidar system and continuous lidar system are improved by redesigning the parameters considering more details of the systems and choosing the more appropriate equipment according to limitations of the systems. After the simulation of the return signals, these two kinds of lidar systems are compared in SNR and difficulty of implementation. The results show that the pulsed lidar is more suitable for measuring the metastable Helium density of thermosphere and exosphere.

**Key words:** Atmospheric optics; Helium density lidar; Resonance fluorescence; Merastable helium; Remote sensing

**OCIS Codes:** 010.0280; 010.3640; 280.3640

## 0 引言

对高空中性大气特性的研究是探索高空空间环境的重要课题。这一区域的大气特性测量对于研究与空间天气有关的上/下大气层耦合和卫星近地轨道环境都极其重要。然而这一高度的中性大气粒子密度很低,对地面激光雷达测量上层大气温度、密度和风场的工作造成极大困难。

目前对热层和外大气层的大气测量多通过卫星、探空火箭等航天器实现,然而这些测量方法都有一定局限性,探空火箭成本较高且无法进行长时间连续探测,星载探测空间分辨率低。随着激光雷达探测技术的发展,共振荧光激光雷达为高层大气探测提供了更多的可能性。GERRARD A J等<sup>[1]</sup>于1997年首次提出

基金项目:空间环境地基综合监测网项目

第一作者:兰家欣(1995—),女,博士研究生,主要研究方向为激光雷达遥感及光电探测。Email:lanjx@mail.ustc.edu.cn

导师(通讯作者):孙东松(1962—),男,教授,博士,主要研究方向为光电探测、激光雷达遥感等。Email:sds@ustc.edu.cn

收稿日期:2020-10-13;录用日期:2020-12-21

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

利用亚稳态氦作为共振荧光激光雷达的示踪物来探测热层氦密度,基于当时的设备条件和技术水平设计了激光雷达参数,并通过模拟回波光光子数验证了利用激光雷达探测亚稳态氦密度的可行性。CARLSON C G等<sup>[2]</sup>于2009年使用连续激光器,利用收发分置使得不同高度信号成像到探测器的不同像素上,从而从空间上区分不同高度信号。MANGOGNIA A D等<sup>[3]</sup>于2015年将CARLSON C G提出的收发分置激光雷达系统方案进行了优化改进。蔡云云等<sup>[4]</sup>基于阵列式望远镜设计了脉冲光亚稳态氦激光雷达系统。潘婷玉等<sup>[5]</sup>受限于没有高功率的1083 nm脉冲激光器,设计了使用连续光的收发分置激光雷达系统。

本文在蔡云云和潘婷玉工作的基础上进一步对两个系统方案进行了改进。相比原有的脉冲光激光雷达系统,在原来的基础上进一步细化了激光器和滤波器的设计参数,并在考虑了探测器暗电流对仿真结果影响的情况下选取了更合适的探测器;相比原有的连续光激光雷达系统,法布里珀罗(Fabry-Perot,FP)滤波器的接收视场角有限,提出采用法拉第反常色散光学滤波器,在满足高度分辨率的情况下使用像素合并法来提高信噪比。对比两个系统仿真结果及实际实现难度等方面,选择出目前更为可行的系统研制方案。

## 1 原理

选择亚稳态氦作为共振荧光激光雷达的示踪物主要与其能级寿命和后向散射截面两个特性参数有关。亚稳态氦的能级寿命长达7 870 s,1 083 nm辐射线的后向散射截面为 $2.6 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ ,可与低海拔共振荧光激光雷达探测通常使用的碱金属相媲美。

从气辉中观测到热层亚稳态氦荧光共振散射的1 083 nm、388.9 nm和318.8 nm谱线,分别产生于 $2^3\text{P}$ 、 $3^3\text{P}$ 和 $4^3\text{P}$ 向 $2^3\text{S}$ 的跃迁。其中1 083 nm辐射线具有较大的爱因斯坦系数和可与碱金属媲美的有效后向散射截面,更容易被探测,因此选择1 083 nm作为共振荧光激光雷达的波长。氦的1083 nm共振辐射线为三线结构,由1 083.034 nm、1 083.025 nm、1 082.908 nm三条十分接近的辐射线组成<sup>[6]</sup>。它们的后向散射截面如图1所示,其中1 082.908 nm谱线离三条谱线中心较远且后向散射截面较小,因此主要利用1 083.025 nm和1 083.034 nm两条谱线的后向散射截面进行探测。图2为实测的亚稳态氦饱和吸收谱,两侧两条谱线分别对应1 083.025 nm和1 083.034 nm,中间为两条谱线的交叉共振信号。饱和吸收谱测量中使用的亚稳态氦池压强为60 Pa,温度为室温(约300 K)。

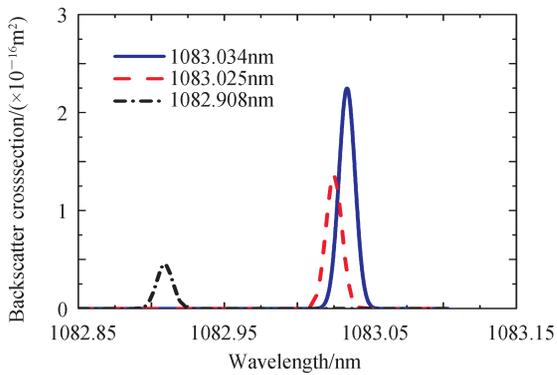


图1 1083 nm谱线的有效后向散射截面

Fig.1 Effective backscatter cross section for the 1083 nm lines

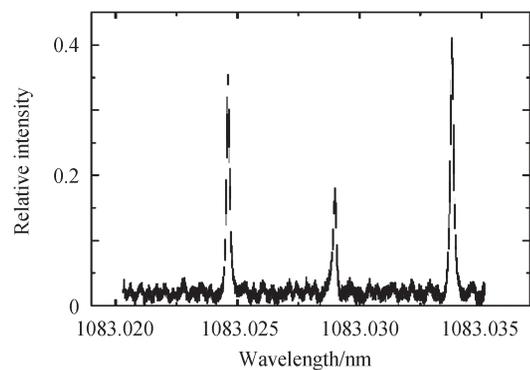
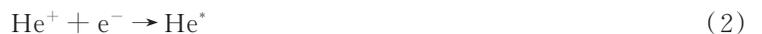


图2 亚稳态氦饱和吸收谱

Fig.2 Saturation absorption spectrum of metastable Helium

热层中的亚稳态氦主要由基态氦原子和光电子碰撞、氦离子重组两种方式产生,即



并在高海拔发生的光致电离及低海拔发生的潘宁效应的作用下损耗,即



在一系列产生、损耗及运输机制影响下,亚稳态氦主要集中在海拔400~700 km的区域<sup>[7]</sup>。

本文使用的亚稳态氦密度数据来源于WALDROP L S等利用在阿雷西博天文台(Arecibo Observatory)

非相干散射雷达测量的数据建立的亚稳态氦密度模型<sup>[8]</sup>,见图3。冬夏季半球的温度差造成的气压差会导致氦等粒子由夏季半球向冬季半球运输,导致冬季半球热层的基态氦原子密度较大。同时冬季时共轭半球有更为充足的光照,可以提供更多的共轭光电子。热层中的亚稳态氦主要由基态氦原子和光电子碰撞产生,因此冬季时热层中亚稳态氦的密度较其他季节高,夏季较其他季节低。

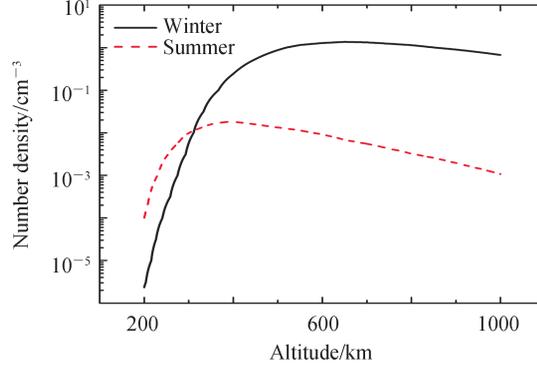


图3 亚稳态氦密度分布模型  
Fig.3 Density distribution model of metastable Helium

## 2 激光雷达系统设计

基于目前国内外亚稳态氦激光雷达的研究,对现有的脉冲光探测和连续光探测两种不同的氦激光雷达进行改进,并从实现难度、探测信噪比等方面进行对比。为了便于对比,统一使用参数:探测高度目标范围为200~1 000 km,距离分辨率为50 km,积分时间为1 h。

### 2.1 脉冲光激光雷达系统设计

#### 2.1.1 共振荧光激光雷达方程

本方案采用脉冲激光器,其脉冲特性可以将不同高度的信号从时间上区分开来,探测距离可以通过信号从发射源到物体再反射回来所需的时间得到。接收系统接收到的光子数与发射光子数、光子被亚稳态氦原子散射的概率、散射光子被接收的概率以及系统效率成正比。激光雷达方程为<sup>[9]</sup>

$$N_s(z) = \frac{P_L \tau}{hc/\lambda_0} \cdot [\sigma_{\text{eff}} \rho(z) R_B \Delta z] \cdot \frac{A_R}{4\pi z^2} \cdot [\eta T^2 E^2(z)] + N_B \quad (5)$$

式中, $N_s(z)$ 为在间距范围( $z-\Delta z/2, z+\Delta z/2$ )内收集到的总光子的期望值; $z$ 为高度(m); $\Delta z$ 为距离分辨率(m); $P_L$ 为激光器功率(W); $\tau$ 为积分时间(s); $h=6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ 为普朗克常量; $c$ 为光速; $\lambda_0$ 为激光波长(m); $\sigma_{\text{eff}}$ 为有效后向散射截面( $\text{m}^2$ ); $\rho(z)$ 为亚稳态氦原子的密度( $\text{cm}^{-3}$ ); $R_B$ 为分支比,即1 083 nm辐射占总辐射的比例; $A_R$ 为接收望远镜的孔径( $\text{m}^2$ ); $\eta$ 为接收系统总效率; $T$ 为大气单程透过率; $E(z)$ 为大气单程消光比,表示亚稳态氦原子层对激光吸收后的单程透过率,可以表示为

$$E(z) = \exp \left[ - \int_{z_{\text{bottom}}}^z \sigma_{\text{eff}} \rho(z) dz \right] \quad (6)$$

式中, $z_{\text{bottom}}$ 表示亚稳态氦原子底层高度; $N_B$ 为积分时间内由于背景噪声和探测器暗计数产生的光子计数,可以表示为

$$N_B = \frac{E_B A_R \frac{\pi}{4} \beta_R^2 \eta \Delta \lambda \lambda_0}{hc\pi} + n_{\text{dark}} \cdot \frac{2\Delta z}{c} \cdot f \cdot \tau \quad (7)$$

式中, $E_B$ 为晨昏期间背景光强度( $1.38 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ ), $\beta_R$ 为望远镜接收视场角, $\Delta \lambda$ 为干涉滤光片带宽(nm), $n_{\text{dark}}$ 为单个像素元单位时间产生的暗电流计数, $f$ 为激光器重频(Hz)。

#### 2.1.2 收发光学设计

图4为脉冲光激光雷达系统光路图。激光雷达系统的发射部分用于产生稳定的高功率1 083 nm脉冲光。高功率1083 nm脉冲光的产生主要利用光学参量振荡(Optical Parametric Oscillation, OPO)和光参量

放大(Optical Parametric Amplification, OPA)技术。OPO和OPA应用的光学参量振荡效应以泵浦光提供增益,非线性晶体作为能量转移的中介,把能量耦合给信号光波并将其放大,可以达到将激光向低频范围扩展,产生可调谐的相干辐射的目的。泵浦光选用532 nm脉冲光,非线性晶体选用具有非线性系数大、激光损伤阈值高等优点的 $\text{KTiOPO}_4$ (KTP)晶体。目前该技术可以实现25 W、重频20 Hz的1 083 nm脉冲光输出<sup>[10-11]</sup>。为保证出射激光频率的稳定性,用波长计将种子激光器的监测光作为反馈,采用比例-积分-微分(Proportion Integral Differential, PID)算法实时调整种子激光器出光频率以实现稳频,可将频率波动控制在15 MHz内。经过扩束系统,可将出射激光的发散角压缩至50  $\mu\text{rad}$ 。

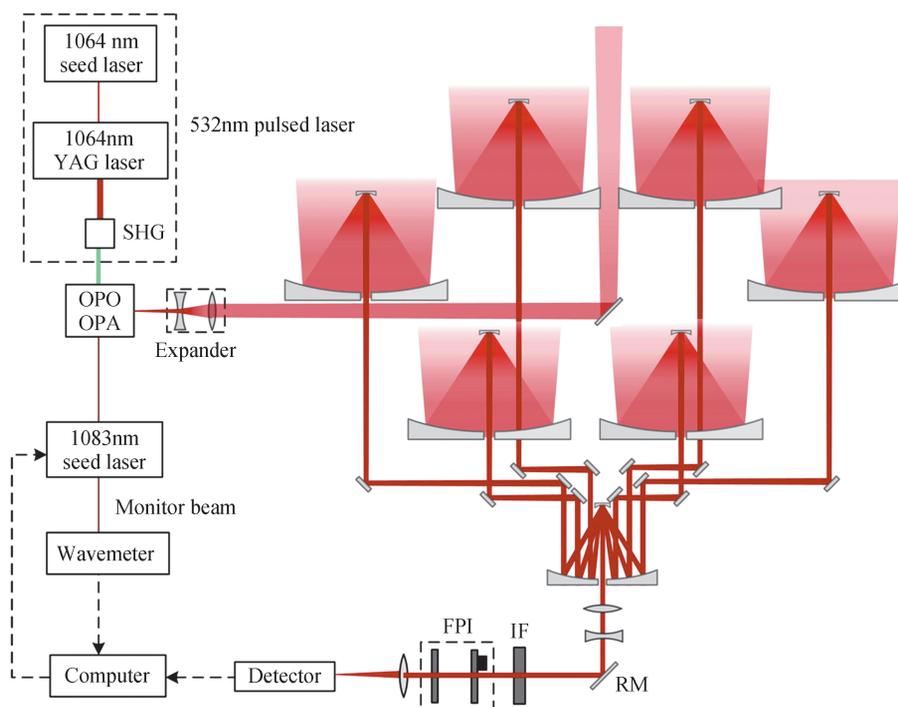


图4 脉冲光激光雷达系统光路图  
Fig.4 Pulsed lidar system schematic

激光雷达系统的接收部分主要由望远镜阵列、后继光路和探测器组成,用于接收大气的回波信号。为了使接收信号最大化,需要增大望远镜面积。但单独一块的大面积镜片造价较高、工艺较难,考虑未来扩展的需要和性价比,采用阵列式光学天线布局,以接收组合成像系统为中心,六套缩束子系统均匀环绕的形式进行光学布局。六套缩束子系统均采用无焦反射式光学结构,光线缩束后经平面反射镜折转后进入接收组合成像系统。接收组合成像系统采用折反式结构,光线经成像系统反射、进入后继光路,如图5所示。单个缩束子系统和接收组合成像系统的有效口径分别为1 000 mm和770 mm。望远镜视场角大小理论上满足大于

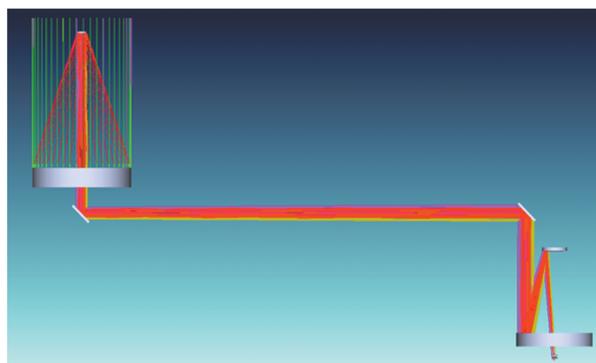


图5 望远镜光路  
Fig.5 Telescope beam path

出射激光发散角即可接收到全部共振荧光回波信号,考虑到系统误差等原因将望远镜视场角选取为 100  $\mu$ rad。

探测器选用 Princeton Instruments 的 Si CCD 相机,该相机可在水冷辅助下达到  $-100^{\circ}\text{C}$  低温,从而将暗计数降低至 0.001 5  $\text{e}^-/\text{pixel}/\text{s}$ 。它在 1 083 nm 处量子效率约为 10%<sup>[12]</sup>。

### 2.1.3 背景噪声抑制技术

为了提高信噪比,需要用干涉滤光片与超窄带滤波器的组合形式对信号进行滤波处理。干涉滤光片选用单带通型滤光片,美国 Alluxa 公司可以生产中心波长为 1 083 nm、带宽为 0.5 nm 同时透过率为 80% 以上的干涉滤光片。超窄带滤波器采用 FP 型滤波器<sup>[13-14]</sup>,FP 标准具的透过率具有陡峭的边缘,利用其透过率曲线进行滤光可以进一步压缩带宽。通过参数设计,使得回波信号和滤光器透过率曲线的中心频率对齐,可以滤除大部分背景噪声。

标准具自由光谱范围(Free Spectral Range, FSR)为 161 GHz,半高宽(Full Width at Half Maxima, FWHM)为 8.05 GHz,峰值透过率为 0.6。与干涉滤光片级联后,总透过率曲线如图 6 所示。

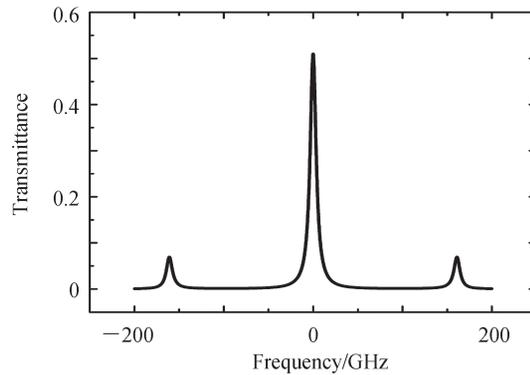


图 6 干涉滤光片与 FPI 滤波器级联的透过率曲线  
Fig.6 Combined transmission curve of FPI filter and interference filter

### 2.1.4 仿真结果

根据式(5)的激光雷达方程和系统参数(见表 1)可以模拟得到脉冲光激光雷达共振荧光回波信号光子数(见图 7)。由此可以进一步得到信噪比(Signal-Noise Ratio, SNR),即

$$\text{SNR}(z) = \frac{N_s(z) - N_B}{\sqrt{N_s(z)}} \quad (8)$$

表 1 脉冲光激光雷达系统仿真参数  
Table 1 Parameters of pulsed lidar simulation

Parameters	Value
Laser power/W	25
Laser repetition/Hz	20
Telescope area/ $\text{m}^2$	4.712
FP FWHM/GHz	8.05
Optical efficiency/%	4
Detector dark counts/ $(\text{e}^- \cdot \text{pixel}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	0.001 5
Integral time/h	1
Range resolution/km	50

脉冲光激光雷达模拟信噪比如图 8 所示。冬季时,脉冲光激光雷达信噪比最高可以达到 300,且在较高海拔的地区信噪比都比较高。夏季时,由于亚稳态氦原子密度较低,信噪比最高只能达到 13 左右,且在探测范围内最低和最高处信噪比都非常低。

若以  $\text{SNR} > 10$  作为有效探测的标准,那么冬季可以探测的范围是 300~1 000 km,夏季可以探测的高

度为 330 km 处,即亚稳态氮密度最高的位置。

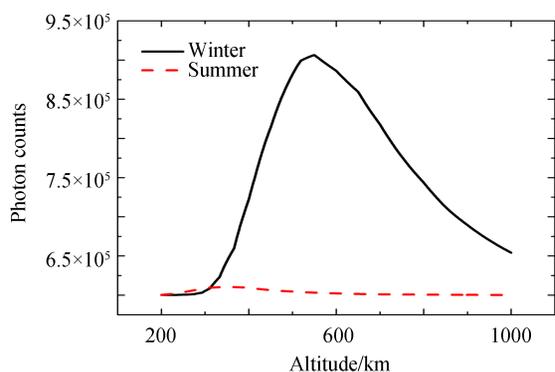


图7 脉冲光激光雷达模拟接收信号  
Fig.7 Simulated receiving signal of pulsed lidar

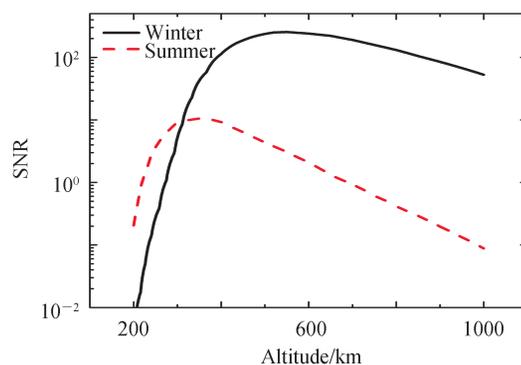


图8 脉冲光激光雷达模拟信噪比  
Fig.8 Simulated SNR of pulsed lidar

## 2.2 连续光激光雷达系统设计

### 2.2.1 激光雷达方程及几何结构

本方案采用连续激光器。由于无法像脉冲激光雷达一样以收到回波信号的时间先后来确定对应信号高度,连续激光雷达利用收发分置结构<sup>[15]</sup>,使激光成像于接收系统中,以不同 CCD 像元对应成像位置来确定信号高度,结构示意图见图 9。

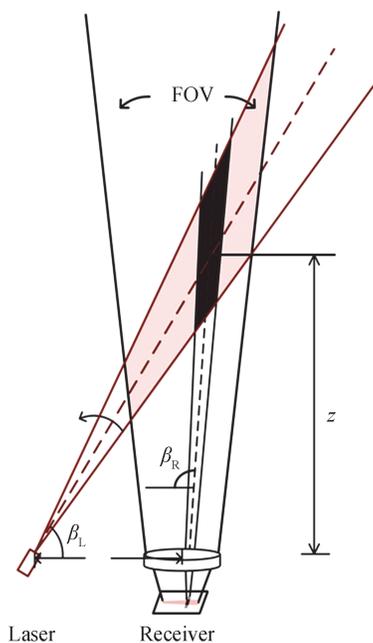


图9 连续光激光雷达收发分置结构示意图  
Fig.9 Bistatic schematic of continuous lidar

第  $n$  列像素元的共振荧光激光雷达方程为

$$N_s(n) = \frac{P_L \tau}{hc/\lambda_0} \cdot \frac{V(n) \cdot A_R}{\pi \left( \tan \frac{\theta_L}{2} \right)^2 \left[ \frac{z(n)}{\sin \beta_L} \right]^2 \left[ \frac{z(n)}{\sin \beta_R} \right]^2} \cdot \left[ \rho(z) \frac{\sigma_{\text{eff}}}{4\pi} R_B \right] \cdot \eta T^2 E(z)^2 + N_B' \quad (9)$$

式中,  $N_s(n)$  为第  $n$  列像素元接收到的总光子的期望值;  $V(n)$  为第  $n$  列像素元视场范围与激光束的交叉体积;  $z(n)$  为第  $n$  列像素元对应的中心高度;  $\theta_L$  为激光器仰角;  $\beta_L$  为激光器发散角;  $N_B'$  为积分时间内由于背景噪声和暗电流计数产生的光子计数,可表示为

$$N_B = \frac{E_B A_R \frac{\pi}{4} \beta_R^2 \eta \Delta \lambda \lambda_0}{hc\pi} + n_{\text{dark}} \cdot \tau \quad (10)$$

### 2.2.2 收发光学设计

图 10 为连续光激光雷达系统光路。激光器基于主振荡光纤功率放大(Master Oscillator Fiber Power Amplifier, MOFPA)设计,将窄线宽种子激光器输出的 1 083 nm 连续光通过多级掺镱放大器进行放大,激光器功率可达到 20 W。仿真计算中为便于与脉冲光激光雷达对比,激光器功率取值为 25 W。

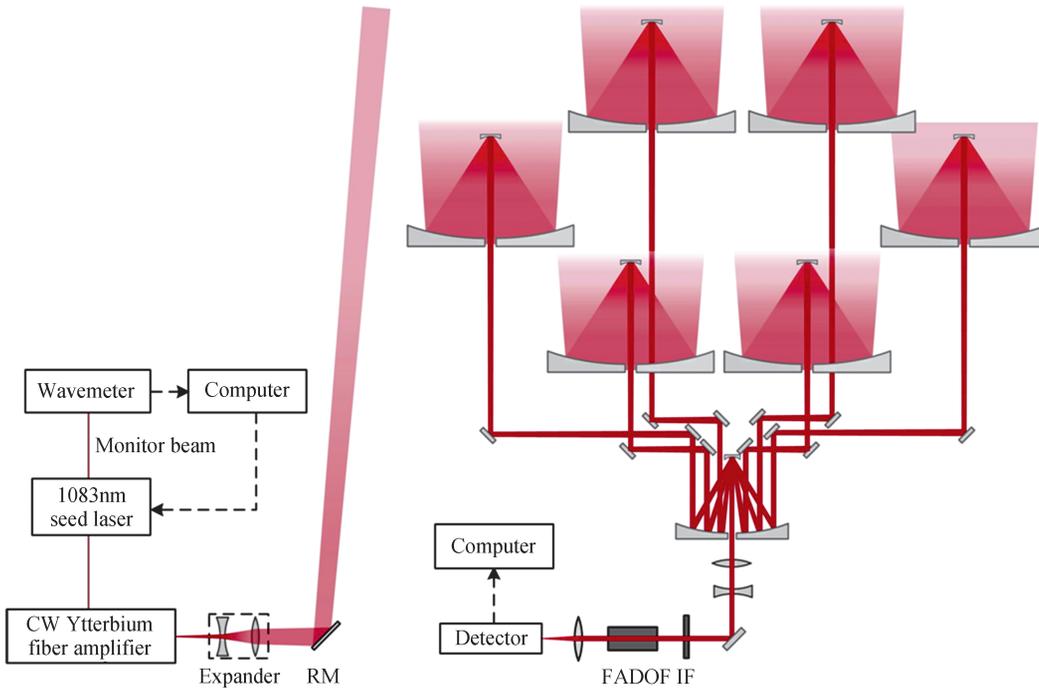


图 10 连续光激光雷达系统光路  
Fig.10 Continuous lidar system schematic

连续光激光雷达同样采用阵列式望远镜以在保留扩展性、降低成本的情况下尽量增加望远镜接收面积。在收发分置距离选取为 1.6 km 的情况下,根据几何关系计算得到所需望远镜视场角为 6.401 mrad。连续光激光雷达采用收发分置系统结构,需采用可以用像素分辨不同高度信号的 CCD 相机作为探测器。CCD 阵列大小为 1 340×100,像素元大小为 20 μm×20 μm,暗计数为 0.001 5 e<sup>-</sup>/pixel/s。它在 1 083 nm 处量子效率约为 10%。

### 2.2.3 背景噪声抑制技术

连续光方案中,望远镜视场角为 6.401 mrad,与脉冲激光方案中望远镜视场角相比大了一个量级以上,进入滤波装置的光发散角较大,而 FP 型标准具滤波器的透过率随着发散角的增大而急剧减小。因此考虑采用法拉第反常色散光学滤波器(Faraday Anomalous Dispersion Optical Filter, FADOF)<sup>[16-17]</sup>。FADOF 基于塞曼效应以及法拉第反常色散效应两种机制实现滤波,通常将原子蒸汽池放在两个线性偏振片中间,然后沿光轴方向加上外部磁场。光经过第一个偏振片 P<sub>x</sub>后成为线偏光,线偏光可等效为两束振幅相同的左旋和右旋圆偏光的叠加。在磁场作用下两束光不同的传播速度造成它们的相位差,当两束光从蒸汽池中出来后它们叠加组成的线偏光偏振方向将发生偏转,如图 11。若偏振方向刚好为 90°的整数倍,那么将两个偏振片正交方向放置就可以刚好使特定波长的光通过并阻隔其他波长的光。

FADOF 是高性能的光学滤波器,具有超窄带宽、高透过率、透射波长无漂移、视场角大等特点。该技术在钠激光雷达中已得到广泛使用,但亚稳态氦 FADOF 目前仍在研制中。通过对亚稳态氦 FADOF 的理论计算可以得到,在合适的温度、磁场及气池长度参数选取下,FADOF 半高宽约为 2.3 GHz,峰值透过率约为 0.9,如图 12。

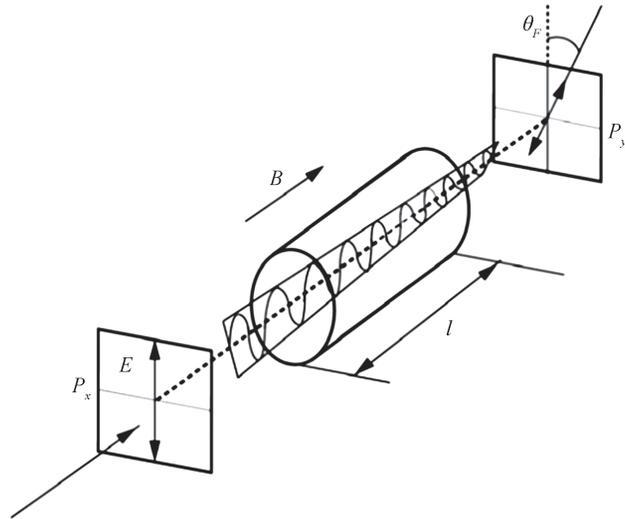


图 11 法拉第滤波器示意图  
Fig.11 FADOF schematic

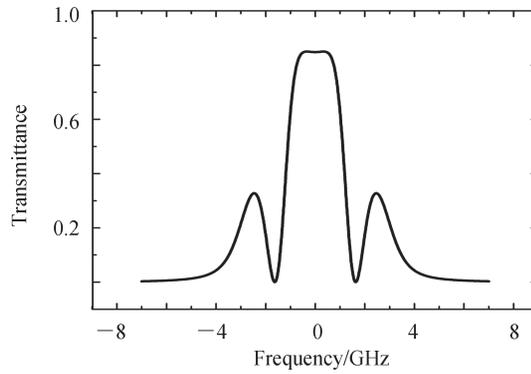


图 12 干涉滤光片与法拉第滤波器级联的透过率曲线  
Fig.12 Combined transmission curve of FADOF and interference filter

2.2.4 仿真结果

根据式(9)的激光雷达方程、式(8)的信噪比公式和表 2 所示的系统参数可以分别得到连续光激光雷达共振荧光回波信号光子数和信噪比,如图 13 和图 14.

表 2 连续光激光雷达系统仿真参数  
Table 2 Parameters of continuous lidar simulation

Parameters	Value
Laser power/W	25
Laser divergence angle/mrad	0.05
Laser tilt angle/mrad	4.8
Telescope area/m <sup>2</sup>	4.712
Field of view/mrad	6.401
FADOF FWHM/GHz	8.05
Optical efficiency/%	6
Detector dark counts/(e <sup>-</sup> ·pixel <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0.001 5
Detector pixel array	1 340×100
Integral time/h	1

图 14 为连续光激光雷达系统单列像素元的信噪比。冬季信号信噪比最高不到 10,夏季信号信噪比最高不到 0.1。连续激光雷达系统中,每一列像素对应的高度和距离分辨率不同,距离越高的像素对应的距离分辨率越低。为了提高信噪比,同时方便与脉冲激光雷达系统进行对比,将相邻的部分像素接收信号进行叠加,使得每一个新的数据点对应的距离分辨率与脉冲激光雷达系统相同,约为 50 km。对接收信号进行组合及合并后,得到距离分辨率为 50 km 左右的信号信噪比,如图 15。可见信噪比相对单列像素信号的信噪比略有提升,冬季信号信噪比最高约为 40,夏季信号信噪比最高将近 1。

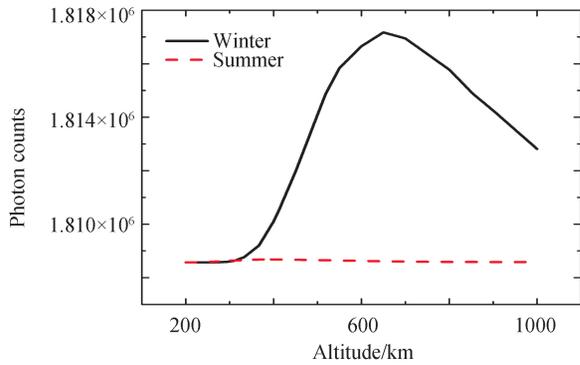


图 13 连续光激光雷达模拟接收信号  
Fig.13 Simulated receiving signal of continuous lidar

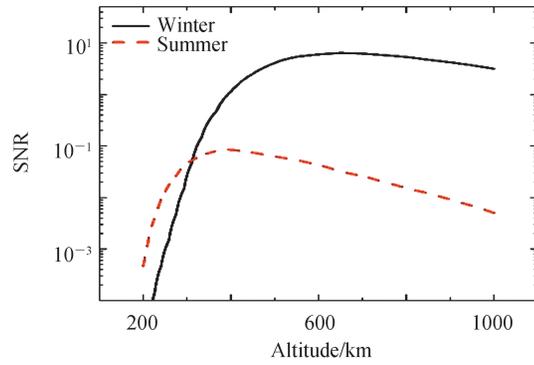


图 14 连续光激光雷达模拟信噪比  
Fig.14 Simulated SNR of continuous lidar

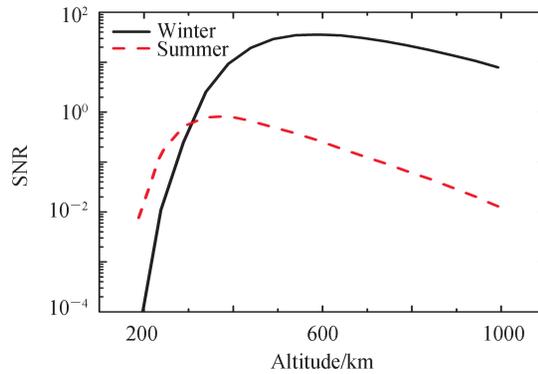


图 15 连续光激光雷达模拟信噪比(距离分辨率为 50 km)  
Fig.15 Simulated SNR of continuous lidar (range resolution is 50 km)

若以  $SNR > 10$  作为有效探测的标准,那么冬季可以探测的高度范围约为 400~950 km,而夏季信噪比均不足 10。

### 3 脉冲光和连续光激光雷达系统对比

#### 3.1 系统参数对比

表 3 为脉冲光和连续光激光雷达系统的主要参数对比。脉冲光和连续光激光雷达的关键技术的不同主要在于激光器和滤波器。连续光激光雷达采用的多级掺镱放大器技术成熟,而脉冲光激光雷达采用的 OPO 和 OPA 结构相对复杂,维护较困难,成本较高。

表 3 脉冲光和连续光激光雷达系统参数对比

Table 3 Comparison of parameters between pulsed lidar and continuous lidar

Parameters	Pulsed lidar system	Continuous lidar system
Laser power/W	25	20
Field of view/mrad	0.1	6.401
Filter FWHM/GHz	8.05	2.3
Filter peak transmittance	0.6	0.9

脉冲光激光雷达中的FP滤波器技术成熟,光学结构简单,但需要控温控压装置以保证滤波中心波长的稳定。连续光激光雷达中望远镜接收视场角大,光束经过后续光路缩束处理后发散角将更大。受到FP滤波器对光束入射发散角的限制,连续光激光雷达无法使用FP滤波器,只能使用FADOF。亚稳态氦FADOF需要高压电极装置将气池中的基态氦激发到亚稳态氦,且需要定期更换气池以维持气池压强,增加了搭建和后续维护的复杂性,但其具有滤波中心波长稳定、对入射光发散角容忍度高的优点。

### 3.2 信噪比对比

图16为脉冲光和连续光激光雷达在冬季和夏季时的信号信噪比对比,可以看出在激光功率相同的情况下,冬季和夏季脉冲光激光雷达的信噪比都比连续光激光雷达高约一个量级。在激光功率和系统效率相同的情况下,脉冲光和连续光激光雷达共振荧光信号总强度相同。那么影响信噪比的主要因素就是天空背景噪声和探测器暗计数噪声。

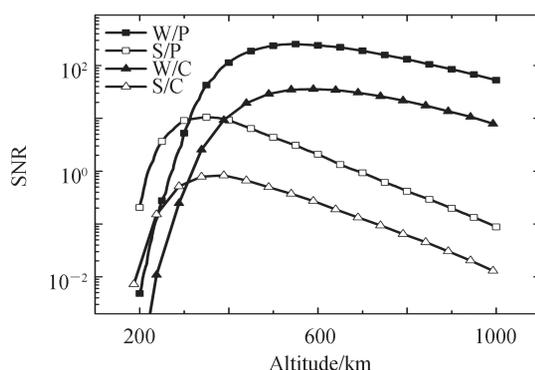


图16 脉冲光激光雷达与连续光激光雷达的信噪比对比(W和S分别表示冬季和夏季,P和C分别表示脉冲光和连续光激光雷达)

Fig.16 Comparison of SNR between pulsed lidar and continuous lidar(W and S stand for winter and summer respectively, P and C stand for pulsed lidar and continuous lidar respectively)

在连续光方案中,不同探测高度的光以不同角度进入接收系统,因此需要接收系统视场角足够大才能一次性接收200~1000 km的所有回波信号,在本方案中视场角选取为6.401 mrad。而脉冲光方案中,发射系统和接收系统同轴,理论上只要接收视场角大于激光发散角即可接收到所有共振荧光回波信号,在本方案中视场角选取为0.1 mrad。由式(7)和(10)可得,视场角越大,天空背景噪声越强,因此大视场角的连续光激光雷达接收天空背景噪声远高于脉冲光激光雷达。除了视场角对天空背景噪声的影响外,脉冲光激光雷达可利用光开关控制接收系统只在有回波信号的时间接收信号,因而大大减少了天空背景噪声的接收时间。

除了天空背景噪声以外,探测器的暗电流对信噪比的影响也是不可忽视的。连续光激光雷达中信号成像到CCD上,多个像素同时进行暗计数累积,在本系统设计中暗计数累积的像素数为1340。而脉冲光激光雷达中经过后续光路,光束直径可控制在60  $\mu\text{m}$ ,对应9个CCD像素元大小,大大减小了探测器光敏面大小,因此也大大减小了暗计数带来的噪声影响。

脉冲光激光雷达中天空背景噪声和探测器暗电流噪声均低于连续光激光雷达,因此脉冲光激光雷达具有更高的信噪比,也比连续光激光雷达具有更大的有效观测范围。

## 4 结论

亚稳态氦共振荧光激光雷达实现的难点在于极高的探测高度和严格的观测时间。大气中的氦层主要在200 km以上的高度,对激光器功率和接收望远镜面积提出了极高的要求。而亚稳态氦的激发需要太阳辐射提供能量,因此观测时间集中在有较强太阳背景的晨昏时间,要求系统的滤波装置具有非常强的背景抑制能力。因此可以稳定输出的高功率激光器、量子效率较高同时暗电流计数较小的近红外探测器以及高透过率同时低带宽的滤波装置是亚稳态氦共振荧光激光雷达实现的重点。

在激光器方面由于强激光的光学损伤等因素,连续光激光雷达所使用的连续激光器以其低成本、易维

护性优于脉冲光激光雷达所使用的OPO脉冲激光器。在滤波系统上,脉冲激光雷达中的FP滤波技术较为成熟,已经在激光雷达中广泛应用,而连续光激光雷达中使用的亚稳态氦FADOF仍在研制中,且结构复杂、维护困难。在探测器选择上,脉冲光激光雷达对探测器光敏面需求较小,连续光激光雷达则需要具有较多像素的光敏面以实现一定的距离分辨能力,但在高度上距离分辨能力极差,同时连续光激光雷达的成像方式对于距离、角度的准确度有很高的要求,实现起来难度高。

综合考虑脉冲光激光雷达和连续光激光雷达的优劣,在测量热层和外逸层的亚稳态氦密度时,脉冲光激光雷达是更好的选择。

#### 参考文献

- [1] GERRARD A J, KANE T J, MEISEL D D, et al. Investigation of a resonance lidar for measurement of thermospheric metastable helium[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1997, 59(16): 2023-2035.
- [2] CARLSON C G, DRAGIC P D, PRICE R K, et al. A narrow-linewidth, Yb fiber-amplifier-based upper atmospheric Doppler temperature lidar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 451-461.
- [3] MANGOGNIA A D. Helium resonance fluorescence LiDAR[D]. Urbana-Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2015.
- [4] CAI Yunyun, SUN Dongsong, XUE Xianghui, et al. Parameter design and performance analysis of lidar system for thermospheric helium[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 0910001.  
蔡云云, 孙东松, 薛向辉, 等. 热层氦激光雷达系统参数设计和性能分析[J]. *中国激光*, 2017, 44(9): 0910001.
- [5] PAN Tingyu, SUN Dongsong, ZHAO Ruocan, et al. Parameter design and performance analysis of bistatic helium lidar system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(10): 1001001  
潘婷玉, 孙东松, 赵若灿, 等. 收发分置氦激光雷达系统参数设计与性能分析[J]. *光子学报*, 2019, 48(10): 1001001.
- [6] ZHENG Xin, SUN Yu, CHEN Jiaojiao, et al. Precision spectroscopy on the  $2^3S-2^3P$  transition of atomic helium[J]. *Acta Physics Sinica*, 2018, 67(16): 164203.  
郑昕, 孙羽, 陈娇娇, 等. 氦原子  $2^3S-2^3P$  精密光谱研究[J]. *物理学报*, 2018, 67(16): 164203.
- [7] BISHOP J, LINK R. He ( $2^3S$ ) densities in the upper thermosphere: Updates in modeling capabilities and comparisons with midlatitude observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1999, 104(A8): 17157-17172.
- [8] WALDROP L S, KERR R B, GONZALEZ S A, et al. Generation of metastable helium and the 1083 nm emission in the upper thermosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, 110(A8): A08304.
- [9] FUJII T. Laser remote sensing[M]. Boca Raton, FL: CRC press, 2004.
- [10] KULATILAKA W D, ANDERSON T N, BOUGHER T L, et al. Development of injection-seeded, pulsed optical parametric generator/oscillator systems for high-resolution spectroscopy[J]. *Applied Physics B*, 2005, 80: 669 - 680.
- [11] BHUIYAN A H, RICHARDSON D R, NAIK S V, et al. Development of an optical parametric generator with pulsed dye amplification for high-resolution laser spectroscopy[J]. *Applied Physics B*, 2009, 94: 559 - 567.
- [12] Teledyne princeton instruments. BLAZE [EB/OL]. (2020-07-29) [2020-11-12]. <https://www.princetoninstruments.com/products/blaze-family/blaze>.
- [13] LI Zimu, CHEN Tingdi, LIU Hengjia et al. Design of ultra-narrow filter for Rayleigh doppler lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 78-84.  
李梓霖, 陈廷娣, 刘恒嘉, 等. 瑞利多普勒激光雷达超窄带滤光器的设计[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(10): 78-84.
- [14] HAN Fei, LIU Hengjia, SUN Dongsong, et al. Design and analysis of ultra-narrow filter of Rayleigh lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(2): 0205003.  
韩飞, 刘恒嘉, 孙东松, 等. 瑞利激光雷达超窄带滤光器参数设计及性能分析[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(2): 0205003.
- [15] PARAMESWARAN K, ROSE K O, MURTHY B K. Aerosol characteristics from bistatic lidar observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1984, 89(D2): 2541-2552.
- [16] DU Lifang, WANG Jihong, YANG Yong, et al. Continuous detection of diurnal sodium fluorescent lidar over Beijing in China[J]. *Atmosphere*, 2020, 11(1): 118.
- [17] KIEFER W, LÖW R, WRACHTRUP J, et al. Na-Faraday rotation filtering: the optimal point[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 6552.