

热层氦激光雷达系统参数设计和性能分析

蔡云云^{1,2}, 孙东松^{1,2}, 薛向辉^{1,2}, 郑俊^{1,2}, 兰家欣^{1,2}, 李梓霖^{1,2}, 张楠楠^{1,2}, 窦贤康^{1,2}

¹中国科学技术大学地球与空间科学学院, 安徽 合肥 230026;

²中国科学院近地空间环境重点实验室, 安徽 合肥 230026

摘要 为满足氦(He)激光雷达系统的探测指标,实现 200~1000 km 大气中 He 原子密度的测量,对 He 密度探测激光雷达系统的参数和性能进行设计(主要包括激光发射部分、光学接收部分、数据采集和控制部分),对比在不同亚稳态 He 密度、不同积分时间、不同距离分辨条件下系统接收光子数与距离的关系,其中亚稳态 He 的密度对信号强度的影响最大。用较低高度的瑞利散射信号标定共振荧光信号,获得相对数密度曲线和信噪比(SNR)曲线。仿真结果显示,在积分时间为 30 min,距离分辨为 50 km,亚稳态 He 原子[He(2^3S)]密度最低的情况下,在 250~530 km 高度范围内,相对误差小于 2%,SNR 大于 40。结果证明系统设计的参数可以满足高层大气 He 原子密度的探测要求,对将来系统的实现有一定参考价值。

关键词 遥感; 氦测密度激光雷达; 热层; 亚稳态氦; 共振荧光

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0910001

Parameter Design and Performance Analysis of Lidar System for Thermospheric Helium

Cai Yunyun^{1,2}, Sun Dongsong^{1,2}, Xue Xianghui^{1,2}, Zheng Jun^{1,2}, Lan Jiaxin^{1,2},
Li Zimu^{1,2}, Zhang Nannan^{1,2}, Dou Xiankang^{1,2}

¹School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

²Key Laboratory of Geospace Environment, Chinese Academy of Science, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract To achieve the detection targets of the helium (He) lidar system and to measure the density of He atoms of the atmosphere at altitude of 200-1000 km, the parameters and performance of the He-density detection lidar system are designed, which mainly includes laser emitting part, optical receiving part, data acquisition and control part. According to the parameters of the He lidar, the relationship between the expected number of photons received and the distance under the conditions of different metastable He [He(2^3S)] densities, integration time and range bin is compared, in which it is found that the density of metastable He(2^3S) has the greatest influence on the signal intensity. The resonance fluorescence signals by Rayleigh scattering signals is calibrated at a common lower altitude to obtain a relative number density curve and signal-to-noise ratio (SNR) curve. The simulation results show that in the height range of 250~530 km, the relative error is less than 2% and SNR is more than 40 when the integration time is 30 min, the range bin is 50 km, and the density of He(2^3S) reaches the minimum. These results prove that the designed parameters of the system meet the detection requirement of He atom density in upper atmosphere and have certain reference value for the system implementation in the future.

Key words remote sensing; helium density lidar; thermosphere; metastable helium; resonance fluorescence

OCIS codes 280.3640; 010.0280; 010.3640; 280.3640

收稿日期: 2017-03-10; **收到修改稿日期:** 2017-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(41227804,41374156)

作者简介: 蔡云云(1994—),女,硕士研究生,主要从事测风激光雷达及光电探测方面的研究。

E-mail: caiyy789@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 孙东松(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光电探测、激光雷达遥感等方面的研究。

E-mail: sds@ustc.edu.cn

1 引 言

氦(He)在热层是非常重要的大气元素,热层中亚稳态 He 原子[He(2^3S)]主要由基态 He 原子和高能光电子直接碰撞产生,之后通过猝灭、光电离和辐射衰退等方式损耗,寿命约为 8000 s,密度受季节和太阳光照影响^[1]。利用遥感仪器观测亚稳态 He[He(2^3S)]的 1083.0 nm 辐射线已有很长时间,该辐射线最初是从太阳辐射线中探测到的,之后从遥远天体辐射线中也探测到它的存在,天文学家利用谱线的多普勒频移和谱线展宽效应探测大气的速度、温度和成分等。后来,人们在晨昏时利用气辉观察到被热层 He($2S$)共振散射的 1083.0,388.9,318.8 nm 的太阳辐射线^[2-5]。其中 1083.0 nm 共振线有足够的强度,而其他辐射线则相对微弱,因此对 1083.0 nm 辐射线的研究得到了越来越多的重视。为使太阳光谱引起的背景噪声最小化,增大信号强度比重,观测 1083.0 nm 辐射线的时间通常选择在晨昏,一般在日落 40 min 后和日出 40 min 前。从太阳天顶角(SZA)角度出发,SZA 为 90° 对应着日出/日落,晨昏时间段是从 SZA 约 95° 开始,直到热层没有光照结束,该范围和季节有关^[2]。用 1083.0 nm 辐射线估计热层 He 的浓度,从而研究热层大气的特性,这种方法开始于用法布里-珀罗(F-P)干涉仪孤立羟基自由基(OH)米氏散射线,且取得初步结果^[6]。

随着激光和探测技术的快速发展^[7],人们设想利用共振激光雷达来实现热层 He 的浓度的探测,现在还处于理论研究阶段。1997 年,Gerrard 等^[8]首次提出自然存在的 He(2^3S)可作为热层的有效散射体,可通过调谐至该原子共振频率的激光探测亚稳态 He,获得大气参数。2005 年,位于波多黎各的 Arecibo 观测站在不同季节和太阳光照条件下建立了 He(2^3S)密度模型,为信号模拟提供理论依据^[2]。为使 He 激光雷达系统实现热层 He 原子密度的探测,本文提出了系统必要的技术参数(主要包括激光发射部分、光学接收部分、数据采集和控制部分)。再结合共振激光雷达方程、Arecibo 观测站建立的 He(2^3S)密度模型、He(2^3S) 1083.0 nm 辐射线的有效后向散射截面和晨昏时太阳光背景强度^[9],采用理论分析和计算机模拟的方法,对比分析在不同亚稳态 He 密度、不同积分时间、不同距离分辨条件下系统接收光子数与距离的关系,用较低高度的瑞利散射信号标定共振荧光信号,反演获得相对数密度曲线和信噪比曲线,对系统性能进行分析。验证了该参数下 He 激光雷达系统可以实现探测目标,这对系统实现具有一定的参考价值。

2 基本原理

2.1 亚稳态 He 辐射线

He 原子核外有两个电子,基态时处于 $1s1s$ 电子组态。受激时,通常一个电子被激发到较高能态,另一个电子仍处于 $1s$ 态。He 原子中两个电子角动量遵从罗素-桑德斯(LS)耦合,两个电子合成的总自旋 $S=0$ 和 1,高能态电子与 $1s$ 态电子自旋相反时, $s=0$ 为单态(仲氦);高能态电子与 $1s$ 态电子自旋平行时, $s=1$ 为三重态(正氦)。

He 1083.0 nm 共振线是三线结构,由 1083.034,1083.025,1082.908 nm 三条非常接近的辐射线组成,这些辐射线产生于 He $2^3P \sim 2^3S$ 的电子跃迁。低能级 He 原子的能级如图 1 所示。

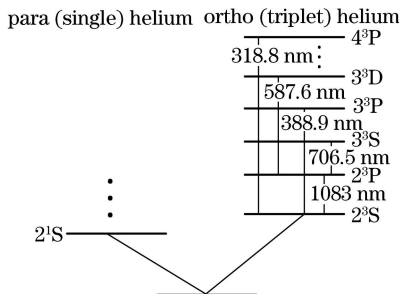


图 1 低能级 He 原子的能级图

Fig. 1 Energy diagram for the lower levels of He atom

He 原子有两套能级,能级之间无跃迁,且三重态的能级总是低于相应的单态的能级。其中, 2^3S 态是三重态 He 中的最低能级,是亚稳态。完成 $2^3P \sim 2^3S$ 跃迁后,电子停留在 2^3S 能级上的时间相对较长,自然衰减速率为 $1.10 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。注意到也有其他辐射线跃迁到 2^3S 态,如 388.9 nm 和 318.8 nm,这些辐射线的

跃迁特性如表 1 所示,其中, g_2 为激发态的统计权重, g_1 为低能态的统计权重, A_{21} 为爱因斯坦系数 ($A_{21} = 1/t_{21}$), t_{21} 为激发态的寿命, g 为跃迁因子。

表 1 亚稳态 He 共振辐射线跃迁特性

Table 1 Transition characteristics of metastable He resonance emission lines

Emission lines	1083.034 nm	1083.025 nm	1082.908 nm	388.9 nm	311.8 nm
g_2	5	3	1	9	9
g_1	3	3	3	3	3
$A_{21}/(10^7 \text{ s}^{-1})$	1.022	1.022	1.022	0.948	0.564
$t_{21}/(10^{-8} \text{ s})$	9.785	9.785	9.785	10.55	17.73
g	16.8	16.8	16.8	0.1	Small

388.9 nm 和 318.8 nm 辐射线分别产生于 $3^3\text{P} \sim 2^3\text{S}$ 和 $4^3\text{P} \sim 2^3\text{S}$ 的跃迁,但它们的爱因斯坦系数较小,辐射线的强度比 1083 nm 低,其有效后向散射截面相对较小,依现有的技术水平,并不适用于亚稳态 He 激光雷达系统。

2.2 热层亚稳态 He 的密度分布

He 原子在 100~1500 km 的热层和外逸层非常重要。He(2^3S) 在一定周期内辐射衰变,由基态 He 原子和高能光电子直接碰撞产生,之后通过猝灭、光电离和辐射衰退等方式损耗。He(2^3S) 的产量和太阳天顶角紧密相关,低海拔处产生的 He(2^3S) 向上扩散,由于一系列受季节和高度影响的光化学和电离损耗机制造成的损失,导致整个热层 He(2^3S) 的浓度很低。400 km 以下的 Penning 电离和 700 km 以上紫外线和更高能量光子的光电离,也会产生损耗机制。这些机制有效限制了激光雷达探测 He(2^3S) 的最优高度为 400~700 km^[10]。

利用 Arecibo 观测站的数据,在不同季节和太阳光照条件下建立 He(2^3S) 密度随高度分布的模型,分别给出大气中 He(2^3S) 密度最高和最低时随高度的分布,如图 2 所示。

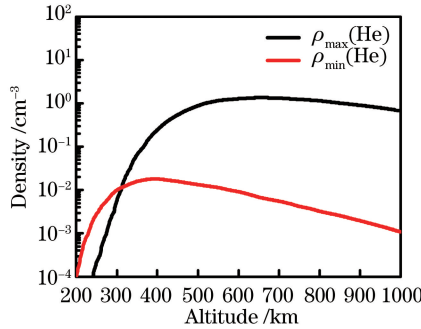


图 2 最好/最差季节和太阳光照条件下,亚稳态 He 密度随高度分布模型

Fig. 2 Density distribution model of metastable He with height in the best/worst seasons and solar conditions

He(2^3S) 在冬季的密度较高,在夏季的密度较低。在最好季节和太阳光照条件下,密度仍小于 1 cm^{-3} ,在 400 km 附近密度达到极大值,之后密度缓慢下降。

2.3 共振荧光激光雷达方程

He 测密度激光雷达主要利用的是热层 He 原子的回波信号进行 He 密度的探测^[11]。共振荧光激光雷达方程为

$$N_s(z) = \left(\frac{P_L \tau}{hc/\lambda} \right) \cdot [\sigma_{\text{eff}} \rho(z) R_B \Delta z] \cdot \left(\frac{A_R}{4\pi z^2} \right) \cdot [\eta T_a^2 E^2(z) G(z)] + N_B \tau, \quad (1)$$

式中 N_s 是在间距范围 ($z - \Delta z/2$, $z + \Delta z/2$) 内收集到的总光子的期望值, z 是高度, Δz 是距离分辨; P_L 是激光器功率, τ 是积分时间, h 是普朗克常量, c 是光速, λ 是激光波长, σ_{eff} 是有效后向散射截面, $\rho(z)$ 是亚稳态 He 原子的密度; $R_B(\lambda)$ 是分支比,指当受激原子回到基态或者跃迁到其他激发态时,发射光子并产生不同的波长,产生共振吸收波长 λ 的荧光光子占受激原子发射的总荧光光子的比值; A_R 是接收望远镜的孔径, η 是接收总效率, T_a 是大气单程透过率, $E(z)$ 是消光系数, $G(z)$ 是与距离相关的几何因子(假设为 1);

N_B 是由于背景噪声和暗计数产生的单位时间的光子计数。分支比 $R_B(\lambda)$ 的计算公式为

$$R_B(\lambda) = \frac{I_{ul}}{\sum I_{ul}}, \quad (2)$$

式中 I_{ul} 是高能级 u 和低能级 l 之间跃迁的光强, 当分母包含所有低能级的衰减时, $R_B(\lambda) = A_{ul} \cdot \tau_u$, 其中 A_{ul} 是跃迁几率, τ_u 是辐射寿命。消光系数 $E(z)$ 的计算公式为

$$E(z) = \exp \left[- \int_{z_{\text{bottom}}}^z \sigma_{\text{eff}}(\lambda) \rho(z) dz \right], \quad (3)$$

式中 z_{bottom} 是 He 原子层底层的高度。单位时间背景光子数 N_B 的计算公式为

$$N_B = \frac{E \cdot A_R \cdot \Omega \cdot \eta \cdot \Delta\lambda \cdot 2 \cdot \Delta z}{h \cdot \nu \cdot c \cdot \pi}, \quad (4)$$

式中 Ω 为接受立体角, $\Omega = (\pi/4) \times V_{\text{fov}}$, V_{fov} 是激光雷达接收视场角 (0.2 mrad), $\Delta\lambda$ 是滤光片带宽, E 为背景光强度 [晨昏时为 $1.38 \times 10^{-4} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$], ν 为激光频率。

2.4 有效后向散射截面的计算

有效后向散射截面是激光雷达方程中非常重要的参数, 是考虑设备参数后 (如激光线型) 的后向散射截面。在短激光脉冲和无自发辐射的条件下, 该值定义为^[8]

$$\sigma_{\text{eff}}(\nu_L) = \frac{\sigma_D \sigma_0}{\sqrt{\sigma_D^2 + \sigma_L^2}} \exp \left[- \frac{(\nu_0 - \nu_L)^2}{2\sigma_D^2 + 2\sigma_L^2} \right], \quad (5)$$

式中 $\sigma_{\text{eff}}(\nu_L)$ 是激光频率 ν_L 的有效后向散射截面, σ_0 是峰值后向散射截面, σ_D 是多普勒宽度均方根, σ_L 为激光线宽均方根, ν_0 是辐射频率。

假设激光带宽为 1 GHz, 分别计算构成 1083.0 nm 三条共振线的后向散射系数, 相加获得 1083.0 nm 总谱线的有效后向散射截面, 如图 3 所示。

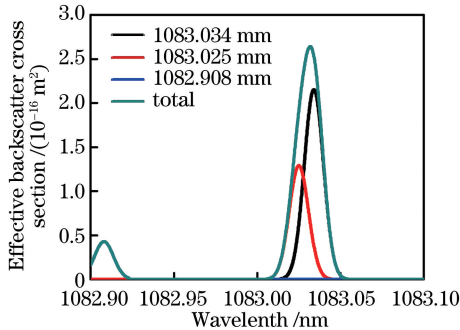


图 3 1083 nm 各谱线的有效后向散射截面

Fig. 3 Effective backscatter cross section for the 1083 nm lines

上图谱线从左到右分别为 1082.908, 1083.025, 1083.034 nm 的辐射线, 三条曲线的最大值为 $2.6 \times 10^{-16} \text{ m}^2$, 中心波长为 1083.032 nm。图中 1082.908 nm 谱线落在了激光线宽的外面, 因此对有效后向散射截面的贡献很小。也可以计算 388.9 nm 和 318.8 nm 谱线的有效后向散射截面, 相比之下, 388.9 nm 和 318.8 nm 的有效后向散射截面分别约为 1083.0 nm 谱线有效后向散射截面的 10% 和 1%。

3 参数设计和性能评估

He 激光雷达系统主要包括激光发射部分、光学接收部分、数据采集和控制部分, 系统光路如图 4 所示, 其中 IF 是干涉滤光片, DET 是探测器。为满足 He 激光雷达系统的探测指标, 实现 200~1000 km 大气中 He 原子密度参数的测量, 这里对各系统和组成部分参数和性能提出要求, 并给出满足系统要求的市场调研产品。

激光器系统由 1083 nm 的连续激光器和脉冲激光器组成。连续激光器作为种子产生 1083 nm 的高稳连续种子激光, 注入到一台固体掺镱钇铝石榴石晶体 (Yb:YAG) 脉冲激光器中进行放大, 输出 1083 nm 的

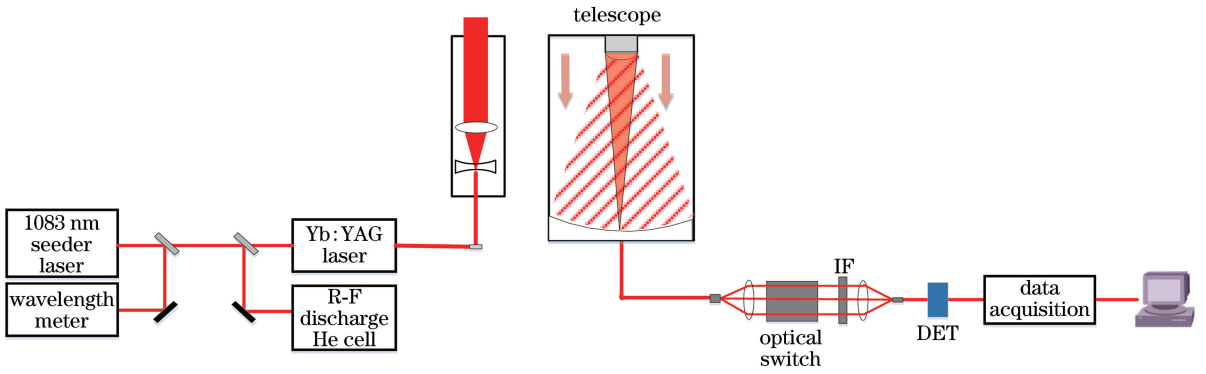


图 4 He 激光雷达系统结构图

Fig. 4 Schematic setup of the He lidar system

脉冲光,由发射镜发射到大气中。为保证发射激光的频率,将输出的连续光分出一部分分别进入波长计和射频放电 He 池,监测和控制激光系统的发射光频率,并反馈给种子激光器,进行激光频率锁定。种子激光器采用窄线宽可调谐光纤激光器,其中心波长为 1083.032 nm,输出波长稳定。可选用法国 KEOPSYS 公司的 CYFL-KILO 系列掺镱光纤激光器,其最大输出功率为 1~20 W,线宽小于 70 kHz,波长的调谐范围为 260 pm(约 67 GHz)。目前未找到产品化的 1083 nm 脉冲激光器,所以,作为脉冲放大的主激光器需要进行定制或研制,激光器要求:工作波长为 1083.032 nm,工作物质为 Yb:YAG;激光平均功率为 20 W,或单脉冲能量 1 J、重复频率 20 Hz。波长计可采用德国 HighFinesse 公司生产的 WS-6-200 型号的波长计,波长计在 1083 nm 波段的绝对测量精度为 200 MHz,满足对种子激光器出射光频率的监测,并且可以利用其测量数据,对种子激光器的出射光频率进行粗调,使其位于 He 吸收线中心附近。射频放电 He 池,用于激光波长的精确锁定,其主要利用射频放电的方法产生亚稳态 He。射频放电 He 池通过定制生产,原子吸收室原理如图 5 所示。

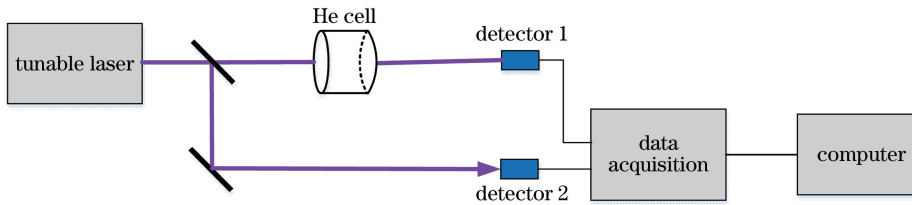


图 5 He 池电路原理图

Fig. 5 Circuit principle schematic of He cell

接收部分主要由望远镜、后继光路和探测器组成,主要用于接收大气的回波信号。望远镜直径设为 1.2 m,接收的回波信号通过光纤进入后继光路,经过光开关和窄带滤光片进入探测器。光电探测器可以采用 Licel 公司的 NIR Si-APD 模块,型号为 S11518。该探测器在 1083 nm 的量子效率可达 30%。可以在光纤和探测器间加上聚焦透镜,实现光纤耦合。暗电流典型值:靶面直径 1 mm 时为 5 nA,3 mm 时为 15 nA,带宽为 10 MHz;支持单光子计数工作模式。配合使用该公司的 TR20-16bit 瞬态计数仪,可以在模拟和光子计数两个模式下工作。干涉滤光片的带宽为 1 nm,由 Semrock 公司定制,峰值透过率可达 80%。超窄带滤光片可以采用 F-P 型滤光器。光开关可以采用电光型开关或者机械式的斩波器实现底层信号的阻断,保证探测器不会由于底层较强信号造成饱和。

数据采集和控制部分主要由数据采集系统和计算机组成。探测器探测的信号进入数据采集系统,并将采集的信号输入到计算机进行处理。同时,计算机还是整个系统和各个设备的控制终端。数据采集部分可采用德国 Licel 公司的瞬态记录仪,采样频率为 20 MHz,最大光子计数率为 250 MHz,存储深度为 128 kbins(相当于 983 km),输出耦合为 50 Ω。

综上所述,He 激光雷达系统的参数设计结果如表 2 所示,其中 PMT 为光电倍增管。根据表 2 给出的系统参数设计结果,对该系统的性能进行评估。在亚稳态 He 密度最高的条件下,积分时间为 30 min,距离

分辨为 50 km, 给出激光雷达系统接收到的光子数与距离的关系如图 6 所示。作为对比同时给出 He 密度最低、积分时间为 10 min 和 60 min、距离分辨为 25 km 的分布。

表 2 He 激光雷达参数设计

Table 2 Parameters design of He lidar system

Parameter	Value
Laser power /W	40
Integration time /min	30
Resolution range /km	50
Telescope diameter /m	1.2
One-way atmosphere transmission	85%
Chopper efficiency	95%
Filter bandwidth /nm	1
Bandwidth of ultra narrow band filter /GHz	1
Transmission of ultra narrow band filter	80%
PMT quantum efficiency	30%
Optical fiber efficiency	85%

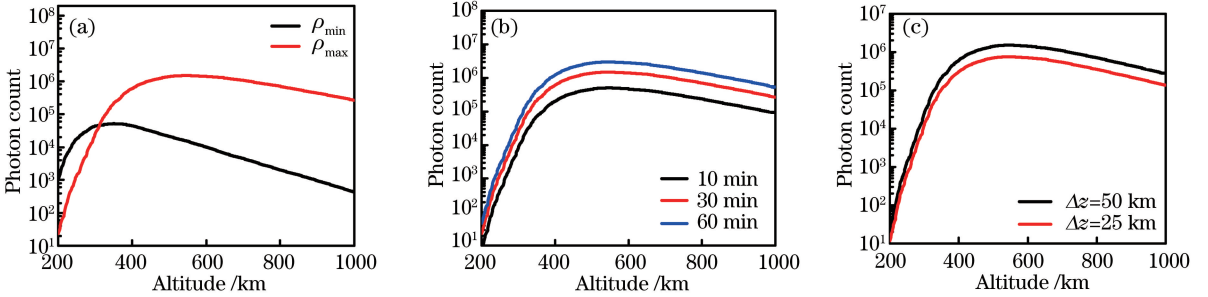


图 6 不同系统参数时的模拟接收信号。(a) He(2³S)密度;(b)积分时间;(c)距离分辨

Fig. 6 Simulated receiving signal with different system parameters. (a) He(2³S) density; (b) integration time; (c) range bin

如果大气透过率和激光雷达系统的参数已知,可以直接通过共振荧光激光雷达方程得到光子数,进而反演出 He 的数密度。在密度反演中,最常用的方法是用较低高度上瑞利散射信号标定共振荧光信号,获得相对数密度曲线。从其他仪器的观测或者大气模型中获得参考高度的大气数密度,由此确定探测区域的数密度。瑞利散射激光雷达方程为

$$N_R(z_R) = \left(\frac{P_L \tau}{hc/\lambda} \right) \cdot [\sigma_R \rho_R(z_R) \Delta z] \cdot \left(\frac{A_R}{z_R^2} \right) \cdot [\eta T_a^2(z_R) G(z_R)] + N_B \tau, \quad (6)$$

瑞利散射激光雷达方程表示在标准高度 z_R 上,单程大气透过率为 $T_a(z_R)$ 时的瑞利散射信号。利用瑞利散射激光雷达方程[(6)式]标准化共振激光雷达方程[(1)式],得到相对数密度。参考高度 z_R 一般选在没有气溶胶的区域,避免受米散射的影响。且 z_R 处瑞利散射信号应该和高层顶区共振荧光信号有相同的量级,避免受信号动态范围的影响。进一步假设 $T_a^2(z) = T_a^2(z_R)$, $G(z) = G(z_R) = 1$,则 He 层数密度可以反演为^[12]

$$\rho(z) = \rho_R(z_R) \frac{N_S(z) - N_B \tau}{N_R(z_R) - N_B \tau} \cdot \frac{z^2}{z_R^2} \cdot \frac{4\pi\sigma_R}{\sigma_{eff} R_B} \cdot \frac{1}{E^2(z)}, \quad (7)$$

式中,He 共振荧光和瑞利散射光子数、距离、总的有效散射截面和消光系数可以通过激光雷达观测,瑞利后向散射截面可以由量子力学计算得出。 z_R 处大气分子数密度 $\rho_R(z_R)$ 通常由大气模型得到。由相对误差传递公式,He 的数密度的相对误差为

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta \rho_z(z_R)}{\rho_z(z_R)} + \frac{\Delta N_S(z)}{N_S(z) - N_B \cdot \tau} + \frac{\Delta N_R(z)}{N_R(z) - N_B \cdot \tau}, \quad (8)$$

如果 z_R 取 40 km, 距离分辨为 50 km, He 相对密度误差随高度变化曲线如图 7 所示。

信噪比(SNR)的计算公式为

$$R_{SN}(z) = \frac{N_S(z) - N_B \cdot \tau}{\sqrt{N_S(z)}}, \quad (9)$$

在积分时间为 10 min、距离分辨为 50 km 时, 信噪比随高度变化的曲线如图 8 所示。

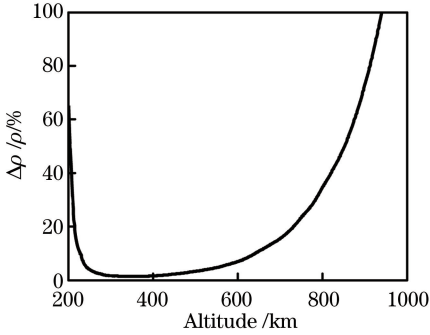


图 7 He 密度探测相对误差分布

Fig. 7 Distribution of relative error for He density detection

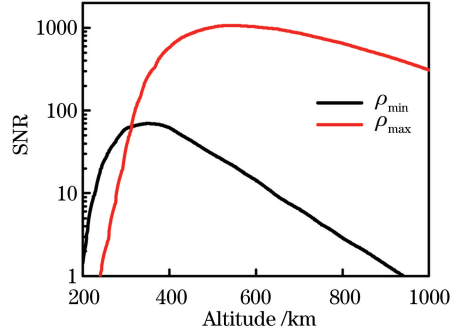


图 8 He 激光雷达系统接收信噪比分布

Fig. 8 Distribution of receiving SNR of He lidar system

4 结 论

为使 He 密度探测激光雷达系统达到 200~1000 km 大气中 He 原子密度测量的探测指标, 本研究对 He 激光雷达系统各个组成部分的参数进行设计, 并对现有的技术水平下, 市场上满足要求的产品进行调研, 保证参数设计的合理性。对系统的性能进行评估, 利用 He(2^3S) 1083.0 nm 辐射线的有效后向散射截面、晨昏时太阳光背景强度和 Arecibo 观测站最新建立的 He(2^3S) 密度模型, 建立激光雷达方程, 对比在不同亚稳态 He 密度、不同积分时间、不同距离分辨条件下, 系统接收光子数与距离关系。最后, 用较低高度的瑞利散射信号标定共振荧光信号, 获得相对数密度曲线和信噪比曲线。仿真结果显示, 在积分时间为 30 min、距离分辨力为 50 km、He(2^3S) 密度最低的情况下, 在 250~530 km 高度范围内, 相对误差小于 2%, 信噪比大于 40。因此, 本研究对 He 激光雷达系统参数的设计满足 He 密度测量指标, 再次证明 He 激光雷达系统的可行性, 这为将来系统平台的搭建提供了一定的理论依据。

参 考 文 献

- [1] Hodgman S S, Dall R G, Byron L J. Metastablehelium: a new determination of the longest atomic excited-state lifetime [J]. Physical Review Letters, 2009, 103(5): 053002.
 - [2] 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): 216-226.
 - [3] Christensen A B, Patterson T N L, Tinsley B A. Observation and computations of twilight and helium 10830 angstrom emission[J]. Journal of Geophysical Research, 1971, 76: 1764-1777.
 - [4] Rundel R, Stebbings R. Metastablehelium in the earth's upper atmosphere[J]. Journal of Geophysical Research, 1974, 79(4): 681-685.
 - [5] Tinsley B A, Christensen A B. Twilighthelium 10830 Å calculations and observations [J]. Journal of Geophysical Research, 1976, 81(7): 1253-1263.
 - [6] Kerr R, Noto J, Lancaster R S, *et al.* Fabry-Perot observations of helium 10830 Å emission at millstone hill [J]. Geophysics Research Letters, 1996, 23(22): 3239-3242.
 - [7] Du Jianbo, Li Daojing, Ma Meng. Reserch onwideband signal generation for ladar[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(11): 1114003.
- 杜剑波, 李道京, 马 萌. 激光雷达宽带信号产生方法研究[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1114003.
- [8] 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.
 - [9] Kato S, Norman G L. Twilight irradiance reflected by the earth estimated from clouds and the earth's radiant energy

- system (CERES) measurement[J]. *Journal of Climate*, 2002, 16(15): 2646-2649.
- [10] Carlson C G, Dragic P D, Price R K, et al. A narrow linewidth Yb fiber-amplified-based upper atmospheric doppler temperature lidar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 451-461.
- [11] Xia Yuan, Wang Zelong, Cheng Xuewu, *et al.* All-solid-state narrowband sodium lidar system and preliminary result [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(s1): s113003.
夏 媛, 王泽龙, 程学武, 等. 全固态窄带钠层荧光激光雷达系统及初步观测结果[J]. *中国激光*, 2015, 42(s1): s113003.
- [12] Chu X, Papen G. Resonance fluorescence lidar for measurements of the middle and upper atmosphere[M]. Boca Raton: CRC Press, 2005: 179-432.