

机械斩波在大气探测激光雷达中的应用

林鑫^{1,3} 杨勇^{1,3} 程学武^{1*} 关塞^{2,3} 王继红² 李发泉¹ 刘林美¹ 宋沙磊¹
陈振威¹ 李亚娟^{1,3}

¹中国科学院武汉物理与数学研究所 波谱与原子分子物理国家重点实验室, 湖北 武汉 430071
²中国科学院空间科学与应用研究中心空间天气学国家重点实验室, 北京 100190
³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 激光雷达为了探测更大大气层段的回波信息, 通常采用大功率激光器发射和大口径望远镜接收来增加回波信号强度, 然而会带来低空强散射回波信号光饱和的问题。机械斩波方式从光学上巧妙地完全阻断了低空杂散光, 而让高空回波光全部通过, 有效提高了激光雷达高空探测能力。对斩波器原理进行理论分析, 并组建了一套斩波单元。经测试, 测试结果与理论计算符合得很好。将此斩波单元直接运用于高空探测激光雷达之中, 实现了对低空强散射光的有效隔离, 解决了光电探测器在低空大气层段探测的饱和甚至致盲问题, 有利于提高激光雷达的探测高度和精度。

关键词 机器视觉; 机械斩波; 激光雷达; 光电探测; 饱和

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0814002

Application of Mechanical Chopper in Atmospheric Lidar

Lin Xin^{1,3} Yang Yong^{1,3} Cheng Xuewu¹ Guan Sai^{2,3} Wang Jihong² Li Faquan¹
Liu Linmei¹ Song Shalei¹ Chen Zhenwei¹ Li Yajuan^{1,3}

¹ State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China
² State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Centre, Chinese Academy Sciences, Beijing 100190, China
³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract High power pulse laser and large aperture telescope are usually used for getting signals from higher altitude in lidar observation, which brings the detector saturation caused by strong backscattering from low altitude. The mechanical chopper improves the lidar performance by cutting off the low altitude noise in optical method and passing the backscattering signals from higher. The working principle of the mechanical chopper is analyzed, and the chopper unit is built up. The testing data are agreed well with the theoretical results. The application of the chopper in lidar detection system can solve the problems of detector saturation and blinding caused by low altitude backscattering, so as to increase the detection range and the measuring accuracy.

Key words machine vision; mechanical chopping; lidar; photodetection; saturation

OCIS codes 010.3640; 280.3640; 250.4110

1 引言

激光雷达以其高探测灵敏度和高时空分辨率的优势, 成为大气探测不可或缺的探测手段。从近地

面到一百多公里高空大气层段, 可以获得大气密度、温度、风场等有效参数, 为研究地球大气动力学、光化学以及气候变化等提供有效手段^[1-2]。在这近百

收稿日期: 2013-02-23; 收到修改稿日期: 2013-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(41127901, 10978003, 41104101, 41101334)

作者简介: 林鑫(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事瑞利散射激光雷达大气探测方面的研究。E-mail: lx872000@sina.com

导师简介: 李发泉(1970-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事原子滤光及其应用方面的研究。

E-mail: lifaquan@wipm.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: lidar@wipm.ac.cn

公里大气层段中,大气密度变化范围大于6个数量级^[3],接收到的回波光信号强度范围远超出光电倍增管(PMT,3~4个数量级)的动态范围^[4]。因此,要想实现对高空大气的精确探测,首先必须解决低空强背景光的干扰问题。

通常,高低空大气探测往往分不同通道接收,在高空探测中,为了获得更高大气层段的信息和更准确的结果,高空激光雷达通常采用大功率脉冲激光器发射和大口径望远镜接收^[5],并采用高灵敏度的光电倍增管来提高探测高度和精度。大的雷达功率面积乘积($P \times A$),加上高灵敏度的光电倍增管,低空强回波信号往往严重饱和甚至致盲光电倍增管并产生强光感生噪声(SIN)^[6-8],影响高空探测结果。解决方法之一是采用收发远离合式(离轴式),这种方式采用很小的接收视场角,阻碍了低空米散射回波信号进入望远镜视场^[9],但离轴同样也会带来高低空不能同时兼顾和收发精确调整的问题;又或者采用电子门控方式^[10],即通过打开和关断光电倍增管光阴极和打拿极之间的高压,可有效抑制照射到光阴极的电子进入打拿级并倍增大,实现对低空强光的抑制,但探测器光阴极仍受到低空强回波光信号的照射易产生疲劳,并且高压的瞬时开关会带来很大的电磁干扰,使原本就极其微弱的回波信号更加难以提取。机械斩波是一种有效的解决办法,利用高速旋转的带孔斩波轮片,实现对接收光信号的通断控制,使选定有效空间范围的回波光信号能够正常通过斩波片槽口,并入射到光电倍增管上;而低空及其他空间范围的回波则被斩波片不透光部分遮挡,无法入射到光电探测器上,从而有效抑制杂散光。在光学上切断低空强背景光,而保留高空回波光,有效地实现了对高空大气的精密探测。

本文报道了机械斩波的原理,并将其成功运用

于高空探测激光雷达,实现了对低空强背景光噪声的有效隔离,避免了光电探测器饱和,同时提高了测量精度。

2 斩波器原理、应用设计及测试分析

斩波器由于其在机械上有周期性结构的特点,而广泛应用于信号调制^[11]。针对激光雷达信号接收的特点,对斩波器的参数,如斩波脉冲的上升沿和门宽等,在不同设置条件下的变化规律做出理论计算,为实际应用提供设置参考。

2.1 斩波器原理与计算

斩波器主要由不同孔规格的斩波片、伺服电机及控制器组成。控制器的作用是通过闭环控制给伺服电机提供稳定的电压,以保证斩波片转速恒定,减小抖动误差。而斩波片转速、槽口数量及大小、斩波光斑大小和光斑到转轴距离决定了斩波的通光时间、上升沿等相关参数。

设定斩波器输出频率为 f ,槽口数量为 N ,开口为等占空比均匀开口,可知单个开口角度大小为 π/N ,则斩波开门时间为 $1/(2f)$;设斩波开门时刻对应空间距离为 H_1 ,斩波关门时刻对应空间距离为 H_2 ,则开门时间对应的空间距离范围为

$$H_2 - H_1 = \frac{c}{4f}, \quad (1)$$

式中 c 为真空光速。

由于需要斩波的光斑经透镜聚焦后直径通常为毫米量级,不能被当作无限小的点,因此斩波片斩过光斑有一定过渡时间,在空间上也对应一段空间范围。

斩波片斩过光斑的过程如图1所示, R 为光斑中心 O' 与转轴中心 O 的距离, r 为光斑半径,斩波片槽口边沿从开始接触光斑到完全过渡所转过的角度为 2β 。

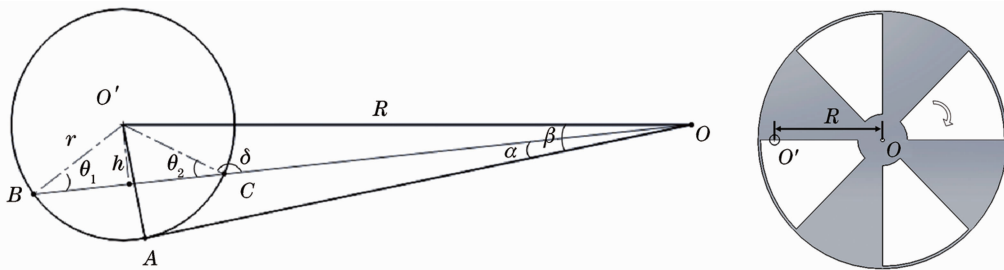


图1 斩波片斩过光斑时示意图

Fig. 1 Graph of the chopper passing light spots

过渡时间为

$$T_1 = \beta / (\pi f / N), \quad (2)$$

式中 $\beta = \arcsin(r/R)$,相应过渡时间对应的空间高

度范围为

$$h_2 - h_1 = \frac{cT_1}{2} = \frac{c \cdot \arcsin(r/R)}{2\pi f / N}, \quad (3)$$

式中 h_1 为开始斩波时的空间高度, h_2 为光斑完全通过时的空间高度。

假定光斑为均匀圆形光斑, 在斩波片切过光斑的过程中, 圆形光斑面积变化为非线性。图中从 OA 到 OB 为斩波片槽口边沿开始接触光斑到 t 时间后的面积, 斩波片转过角度为 $\alpha(t)$, 则

$$\frac{r}{\sin[\beta - \alpha(t)]} = \frac{R}{\sin \delta}, \quad (4)$$

$\theta(t) = \theta_1 = \theta_2 = \pi - \delta(t)$, 图中所求面积为扇形 $O'BAC$ 减去三角形 $O'BC$ 的面积, 即

$$S_{BAC}(t) = S_{O'BAC} - S_{O'BC} = [\pi - 2\theta(t)]r^2/2 - r^2 \cos \theta(t) \sin \theta(t). \quad (5)$$

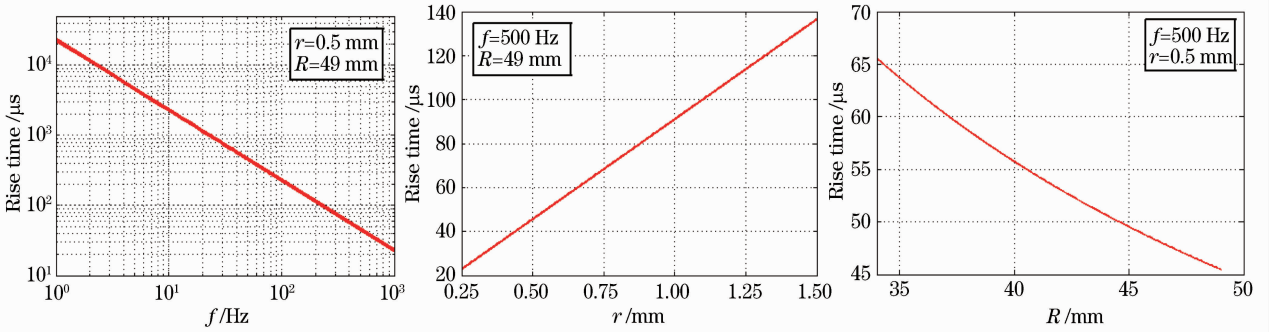


图 2 不同设置条件下斩波上升沿的变化

Fig. 2 Change of rising edge with different experimental setups

表 1 不同斩波频率、光斑大小和光斑到转轴距离对应的斩波过渡时间

Table 1 Transition times with different frequencies, spot sizes and distances from spot to the chopper hub

r / mm	f / Hz	Rise time / μs		
		$R=49 \text{ mm}$	$R=45 \text{ mm}$	$R=36 \text{ mm}$
0.25	700	16.24	17.68	22.11
	560	20.30	22.11	27.63
	350	32.48	35.37	44.21
0.50	700	32.48	35.37	44.21
	560	40.60	44.21	55.26
	350	64.96	70.74	88.42
1.00	700	64.97	70.74	88.43
	560	81.21	88.43	110.54
	350	129.93	141.48	176.86

2.2 斩波单元研制及测试

为了验证上述斩波理论分析计算的准确性, 搭建了一套斩波测试装置, 如图 3 所示。

532 nm 连续光(CW)激光器发出连续光通过光纤输出后, 由透镜聚焦到斩波片上, 之后经过准直聚焦进入探测器, 探测器输出信号送入示波器进行监测。

所用斩波片(Thorlabs MC2F57)直径为 102 mm, 内圈 5 槽孔, 外圈 7 槽孔; 实际斩波中所用部分为斩

综合(1)~(5)式得斩波片开始斩波到 t 时间后所通过光斑的面积, 由此面积的变化可反映斩波过渡规律。

以实际斩波单元中所用斩波器(Thorlabs MC2000)计算, 图 2 分别为斩波频率、光斑大小和光斑距离转轴位置对应上升沿的变化情况。

由图 2 可以看出, 斩波上升沿时间随转速、光斑到转轴距离为非线性变化, 而随光斑大小变化接近线性。对不同的斩波高度要求可以通过选择合适的转速、光斑到转轴距离及控制光斑大小来实现。表 1 给出了不同转速、光斑大小和光斑到转轴距离对应的上升沿时间。

波片的外圈 7 槽孔部分: 开口角度为 25.7° , 内径为 68 mm, 外径为 98 mm。测试过程中, 通过改变斩波片前的透镜焦距及位置来调节聚焦光斑的大小和光斑到斩波片转轴的距离, 斩波器在不同参数设置时, 上升沿所占时间测试与计算结果对比如图 4 所示。

图 4 中数据点为测量所得数据, 曲线为分析计算结果。其测试和计算条件如下: 光斑半径 r 分别为 0.35, 0.35, 0.4, 0.7 mm; 光斑到转轴距离 R 分别为 40, 40, 36, 40 mm; 斩波器输出频率 f 分别为

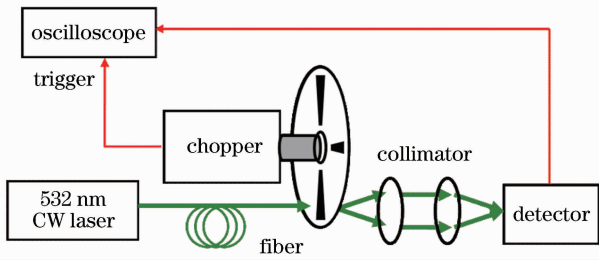


图 3 斩波测试装置示意图

Fig. 3 Structural scheme of the chopping testing system

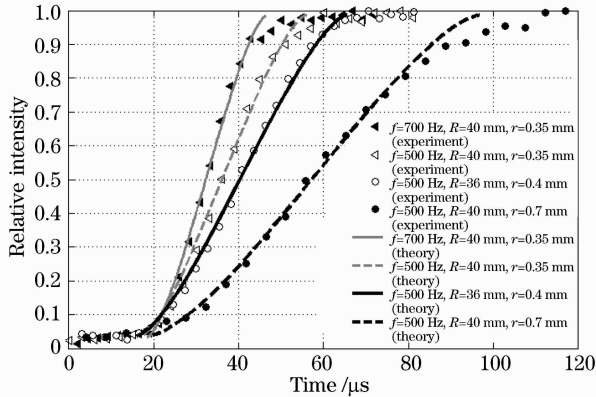


图 4 斩波器上升沿时间测试数据及计算结果比较

Fig. 4 Comparison between calculation and experimental data

700, 500, 500, 500 Hz。比较不同参数设置的结果可得:斩波频率、光斑到斩波片转轴距离与上升沿时间成反比,斩波频率越高、光斑距离转轴越远则上升沿时间越短;光斑半径与上升沿时间成正比,即光斑越大上升沿时间越长,符合前文中图 2 所述规律。由图 4 可知,实验测试与计算结果吻合较好。

对斩波开门时间的测试结果如图 5 所示,斩波器输出频率为 700 Hz 时开门时间约为 700 μ s,对应空间范围约为 105 km;输出频率为 500 Hz 和 350 Hz 时,开门时间分别约为 1 ms 和 1.4 ms,对应空间范围分别约为 150 km 和 210 km。在高空激光雷达中,瑞利探测激光雷达的探测高度通常在 80 km 左右,而钠层荧光激光雷达探测高度为 80~120 km,通常开门时间一般为 0.7~1 ms 或者更长一些。

机械斩波为了很好地与激光雷达接收系统相匹配,斩波器的上升沿和门宽(开门时间)这两个参数至关重要。上升沿越陡峭,则开关门过渡时间越短,开门时刻就越接近探测起始高度,能更大程度上避免低空强信号在开门过程中对倍增管的影响,对回波信号的获取就越有利;门宽越宽,则开门时间越长,未遮挡的有效探测高度范围就越大。然而,这两个参数是相互制约的:上升沿陡峭,表明斩波速率

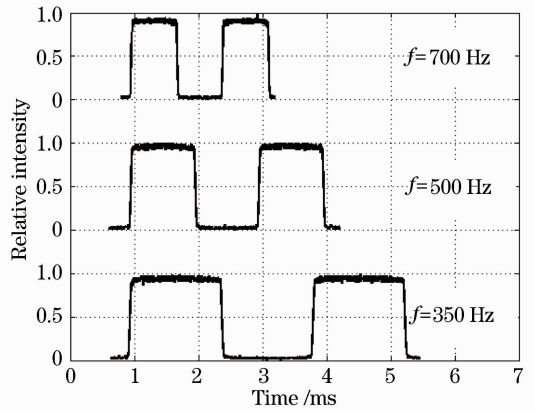


图 5 斩波器开门时间测试

Fig. 5 Gating time area of the chopper

高,带来的问题是门宽窄;反之,上升沿平缓,则门宽宽,探测高度范围大。

3 斩波器在激光雷达中的应用

中国科学院武汉物理与数学研究所已经建成的双波长全天时大气探测激光雷达中^[12-14],采用 400 mJ 功率脉冲激光器及 1 m 口径接收望远镜来获得高空回波信号。为避免低空强散射光导致探测器饱和,采用了收发分离技术抑制低空背景光噪声,即发射激光和接收望远镜分开 5~8 m,这样保证激光进入望远镜视场的起始高度在 10 km 以后,使得进入光电探测器的信号大大减弱,而更低空的回波信号则需要用小望远镜接收。本文目的是在此基础上增加机械斩波后,计划采用同轴发射方式,仅用单个大口径望远镜即可实现从低空近地面到高空百公里范围的探测。下面将重点描述斩波器在激光雷达系统中的应用原理与设计,以及增加斩波器前后的回波探测信号比较。

要想将上述斩波器应用到激光雷达实际工作中,还需解决一个触发同步问题。和电子门控不同的是,由于斩波片的转速有限,不可能做到类似电子快门的纳秒量级开关门控制,而从接收望远镜输出的回波光斑经过光纤后,直径通常在毫米量级,因此斩波器的开关门过渡时间在数十微秒量级。如果利用激光触发脉冲同步斩波器,会带来极大的抖动误差(数十微秒)。因此必须反向控制,即利用斩波器的外同步触发控制激光器,通过调整斩波器输出参考信号的延时,来屏蔽低空强回波信号,保证高空有效信号的接收。图 6 为斩波器在激光雷达中的应用原理图。

图 6 中斩波器的同步输出信号通过信号发生器

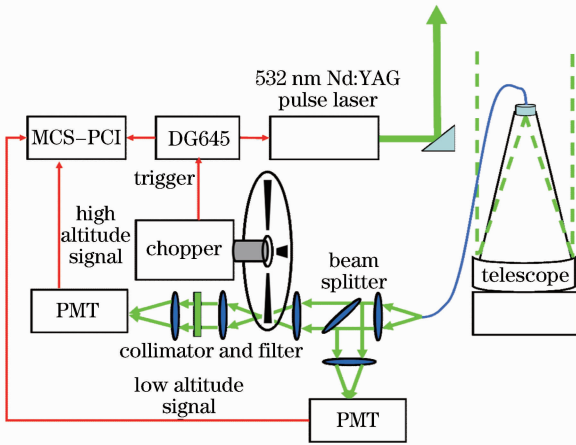


图 6 带斩波器的激光雷达原理图

Fig. 6 Structural scheme of lidar system with a chopper
 DG645 经适当的延时后,产生的触发信号送入 Nd:YAG 脉冲激光器的外触发输入口,用来触发 Nd:YAG 激光器发射脉冲激光。接收望远镜将大气回波光信号耦合送入光纤,在光纤输出整形后分束,小部分回波光信号直接进入光电倍增管(Hamamatsu H7421-40)作为低空信号接收,回波大部分能量聚焦至斩波片上进行斩波,经斩波后的光束再由准直镜准直和滤光片滤光后,聚焦进入光电倍增管光阴极,将光信号转换成电信号由采集卡采集;斩波器输出信号、激光器外触发信号及光电倍增管电信号均输入到采集卡 MCS-PCI 监测。

本机械斩波单元已成功应用到中国科学院武汉物理与数学研究所和子午工程北京延庆站的激光雷达探测中。系统采用 Thorlabs MC2000 斩波器,斩波片为 7 槽口斩波片(Thorlabs MC2F57),斩波频率为 700 Hz,对应门宽约为 105 km。在武汉物理与数学研究所激光雷达(测试条件:激光器功率为 300 mJ,望远镜口径为 400 mm)测试的结果如图 7 所示,图中 140 km 以下为斩波器开门时的有效探测范围,而空缺部分为斩波器关断的空间探测范围,三条曲线分别代表不同延时条件下探测到的不同空间范围。延时 0 μs 状态为在激光发射时斩波器已经全打开,类似于低空无斩波状态,回波信号低空部分进入视场时的几何重叠因子过渡区明显可见;延时 33 μs 状态为斩波器在约 5 km 时开门,此时 15 km 高度左右信号仍使倍增管饱和;延时 106 μs 状态为斩波器在约 16 km 时开门,回波信号强度在倍增管线性探测范围内,光电倍增管能够正常工作。

图 8 为增加斩波器前后的子午工程北京延庆站激光雷达瑞利回波信号比较。其中灰色曲线为无斩波器时的工作状态,由于使用更大功率的激光器(功

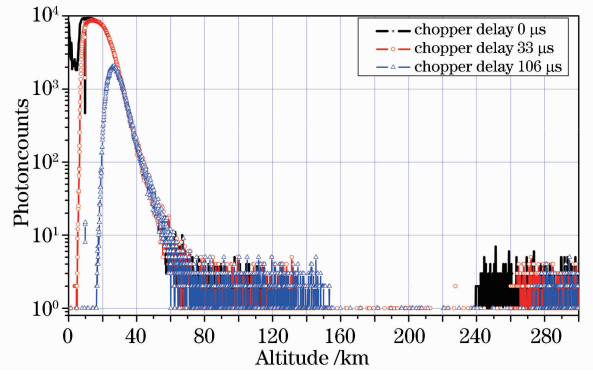


图 7 斩波器在不同延时下的激光雷达回波信号

Fig. 7 Signals comparison between the lidar with different chopper delays

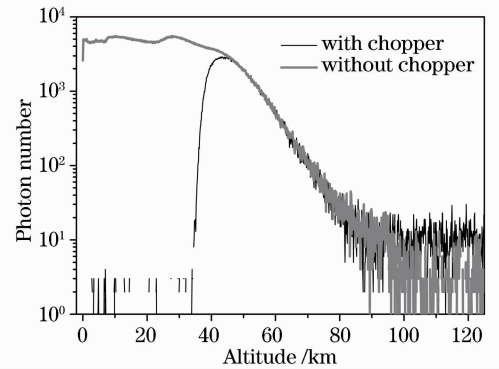


图 8 激光雷达瑞利回波信号有/无机机械斩波系统对比结果

Fig. 8 Signals comparison between the lidar with and without chopper

率为 600 mJ)和大口径的望远镜(口径为 1000 mm),饱和问题更加严重,可以明显看出在 40 km 以下低空信号都已经饱和,这种饱和会影响到光电探测器的性能,甚至损坏探测器;并且在探测高空信号时由于低空信号产生的强光感生噪声影响,对于大气参数的反演结果有较大误差^[15-16];黑色曲线为斩波后的回波信号。与图 7 中结果相比,斩波器的开门时刻需要更晚,本系统延时 220 μs 后开门,探测信号从约 33 km 开始进入光电倍增管,到约 43 km 时斩波器完全打开,有效关断低空强散射回波信号,确保光电倍增管工作在正常(非饱和)状态。以上比较说明,对于高空探测激光雷达,使用斩波方式来抑制低空干扰是一种直接有效的方式。

如果想要更短的过渡时间(对应门控的上升沿时间),可以从以下三方面进一步提高机械斩波的性能:扩大斩波片直径、增加斩波片转速、采用非等分槽口斩波片。这些改进将是提高斩波器在激光雷达中应用效果的发展趋势,使斩波器的应用更加满足激光雷达探测需求。

4 结 论

在激光雷达的应用背景下分析了斩波器的斩波规律,以实际应用为例,分析计算了斩波器在激光雷达中对应的斩波空间范围及斩波上升沿的规律。并对斩波器进行了测试实验,计算结果与测试实验结果一致。对比分析了激光雷达中是否有斩波的探测结果,说明在斩波器参数设置合适的情况下,可以有效地去除激光雷达高空探测通道中的较强低空回波,使高空弱信号不受低空强散射影响,得到较好信噪比的探测结果。

参 考 文 献

- 1 M Alpers, R Eixmann, C Fricke-Begemann, *et al.*. Temperature lidar measurements from 1 to 105 km altitude using resonance, Rayleigh, and rotational Raman scattering [J]. *Atmos Chem Phys*, 2004, 4(1): 793–800.
- 2 M Gerding, J Höffner, J Lautenbach, *et al.*. Seasonal variation of nocturnal temperatures between 1 and 105 km altitude at 54°N observed by lidar[J]. *Atmos Chem Phys*, 2008, 8(24): 7465–7482.
- 3 NOAA, NASA, DAF. U. S. Standard Atmosphere, 1976[M]. Ren Xianmiao, Qian Zhimin Transl. Beijing: Science Press, 1982. 65–79.
美国国家海洋和大气局,国家宇航局和美国空军部. 标准大气(美国,1976)[M]. 任现森,钱志民译. 北京: 科学出版社,1982. 65–79.
- 4 Hamamatsu Photonics K K Editorial Committee. Photomultiplier Tubes-Basic and Applications[M]. Third Edition, Hamamatsu: Hamamatsu Photonics, 2006. 45–47.
- 5 G Baumgarten. Doppler Rayleigh/Mie/Raman lidar for wind and temperature measurements in the middle atmosphere up to 80 km[J]. *Atmos Meas Technol*, 2010, 3(6): 1509–1518.
- 6 Y Zhao. Signal-induced fluorescence in photomultipliers in differential absorption lidar systems [J]. *Appl Opt*, 1999, 38(21): 4639–4648.
- 7 D P Donovan, J A Whiteway. Correction for nonlinear photo-counting effects in lidar system [J]. *Appl Phys*, 1993, 32(33): 6742–6753.
- 8 S Guan, G Yang, Q Chang, *et al.*. New methods of data calibration for high power-aperture Lidar [J]. *Opt Express*, 2013, 21(6): 7768–7785.
- 9 Yan Jixiang, Gong Shunsheng, Liu Zhishen. Lidars for Environment Detection[M]. Beijing: Science Press, 2001. 165–167.
阎吉祥,龚顺生,刘智深. 环境监测激光雷达[M]. 北京: 科学出版社,2001. 165–167.
- 10 M P. Bristow. Suppression of afterpulsing in photomultipliers by gating the photocathode [J]. *Appl Opt*, 2002, 41 (24): 4975–4987.
- 11 D Vincent. Amplitude modulation with a mechanical chopper[J]. *Appl Opt*, 1986, 25(7): 1035–1036.
- 12 Cheng Xuewu, Song Juan, Li Faquan, *et al.*. Dual-wavelength high altitude detecting lidar technology[J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(5): 601–606.
程学武,宋娟,李发泉,等. 双波长高空探测激光雷达技术[J]. *中国激光*, 2006, 33(5): 601–606.
- 13 Cheng Xuewu, Yang Guotao, Yang Yong, *et al.*. Na layer and K layer simultaneous observation by lidar[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(2): 0214001.
程学武,杨国韬,杨勇,等. 高空钠层、钾层同时探测的激光雷达[J]. *中国激光*, 2011, 38(2): 0214001.
- 14 Cheng Xuewu, Gong Shunsheng, Li Faquan, *et al.*. Daytime observation technology of lidar by using atomic optical filter[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(3): 406–410.
程学武,龚顺生,李发泉,等. 采用原子滤光的激光雷达白天探测技术[J]. *中国激光*, 2007, 34(3): 406–410.
- 15 Wang Guocheng, Sun Dongsong, Du Hongliang, *et al.*. Analysis of Doppler wind lidar detecting data based on Fabry-Perot etalon [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(3): 0314002.
王国成,孙东松,杜洪亮,等. 基于法布里珀罗标准具的测风激光雷达探测数据分析[J]. *中国激光*, 2011, 38(3): 0314002.
- 16 Cao Nianwen, Shi Jianzhong, Zhang Yingying, *et al.*. Aerosol measurements by Raman-Rayleigh-Mie lidar in north suburb area of Nanjing city[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6): 060101.
曹念文,施建中,张莹莹,等. 南京北郊气溶胶观测[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(6): 060101.

栏目编辑: 何卓铭