

# 瑞利散射激光雷达强光感生噪声修正的新方法及 大气温度探测

关 塞<sup>1,3</sup> 杨国韬<sup>1</sup> 程学武<sup>2</sup> 常岐海<sup>4</sup> 杨 勇<sup>2</sup> 岳 川<sup>1,3</sup> 龚少华<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> 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

<sup>3</sup> 中国科学院大学, 北京 100049; <sup>4</sup> 西藏民族学院信息工程学院, 陕西 西安 712082

<sup>5</sup> 海南师范大学物理与电子工程学院, 海南海口 571158

**摘要** 借助一套全新的地面高精度光电探测器强光感生噪声检测平台,建立了强光感生噪声精细结构扣除模型,同多通道信号接收技术相结合,改进了一台用于中高层大气温度探测的子午工程双波长三通道瑞利散射激光雷达数据的处理方法。处理后数据反演的大气温度廓线与 TIMED 卫星结果相比较,得到了很好的吻合。在 35~85 km 高度范围内二者反映了较一致的温度分布特征,30~55 km 温度误差小于±5 K,55~75km 温度误差小于±10 K。

**关键词** 大气光学; 瑞利激光雷达; 强光感生噪声; 中高层大气温度; 光电探测

中图分类号 P356

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201441.0713001

## New Methods of Signal-Induced Noise Deduction for Rayleigh Scattering Lidar in Temperature Measurement

Guan Sai<sup>1,3</sup> Yang Guotao<sup>1</sup> Cheng Xuewu<sup>2</sup> Chang Qihai<sup>4</sup>

Yang Yong<sup>2</sup> Yue Chuan<sup>1,3</sup> Gong Shaohua<sup>5</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Centre, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

<sup>2</sup> 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

<sup>3</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

<sup>4</sup> College of Information Engineering, Tibet University for Nationalities, Xi'an, Shaanxi 712082, China

<sup>5</sup> School of Physics and Electronics Engineering, Hainan Normal University, Haikou, Hainan 571158, China

**Abstract** A new grounded precious experimental method is proposed for identifying signal-induced noise (SIN) originated in the photoelectric detector, as well as establishing a fine structure SIN model for its deduction from raw Lidar signals. The method of data process of a dual-wavelength Rayleigh scattering lidar with multi-channels enrolled in the meridian project is improved. Temperature profiles obtained by calibrated data show the coincident distribution with the TIMED satellite over the altitudes of 35 km to 85 km, temperature bias between them is less than 5 K from 30 km to 55 km, less than 10 K from 55 km to 75 km.

**Key words** atmospheric optics; Rayleigh scattering lidar; signal-induced noise; upper atmosphere temperature; photoelectric detection

**OCIS codes** 010.1290; 010.3640; 280.6780

收稿日期: 2014-01-22; 收到修改稿日期: 2014-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(41264006, 40905012, 41174129)、国家重点实验室专项

作者简介: 关 塞(1985—),男,博士研究生,主要从事激光雷达中高层大气探测方面的研究。

E-mail: sguan@spaceweather.ac.cn

导师简介: 杨国韬(1975—),男,研究员,博士生导师,主要从事高空探测激光雷达、双波长激光雷达、全固态钠层测温激光雷达及其应用等方面的研究。E-mail: gtyang@spaceweather.ac.cn(通信联系人)

# 1 引 言

在瑞利散射激光雷达中高层大气探测中,回波信号动态变化范围约为 6 个数量级,远远超过光电倍增管(PMT)的线性探测范围<sup>[1]</sup>。近场强烈大气后向散射信号引起的探测器脉冲累积效应<sup>[2-3]</sup>和强光感生噪声(SIN)<sup>[4-7]</sup>是导致激光雷达回波信号非线性失真,干扰原始数据反演大气参数准确性的主要因素。尤其对高空探测激光雷达,往往采用高量子效率、光子计数模式的 PMT 以保证高空瑞利信号(65~85 km)的高信噪比,这就使得脉冲累积效应和强光感生噪声造成的非线性失真更为明显,与反演需要的大动态范围线性信号相矛盾。目前国际上解决脉冲累积效应的现有手段是采用机械斩波器<sup>[8]</sup>与多通道信号接收技术<sup>[9-10]</sup>相组合,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,从光学上切断低空强背景光,而保留高空回波光;同时高、中、低空大气探测分子量效率和敏感程度由高到低的不同通道接收,能够有效避免中层大气信号(30~70 km)的非线性失真。解决 SIN 的方案之一是利用数值模型<sup>[11-12]</sup>从低空探测激光雷达信号中提取 SIN 进行扣除(例如,平流层气溶胶激光雷达或者差分吸收激光雷达),但是由于缺乏同双波长三通道瑞利散射激光雷达实际采集参数相对应的实验基础,上述模型移植到这台激光雷达实际强光感生噪声扣除的复杂性和确定性尚存争议。Guan 等<sup>[7]</sup>基于单通道大功率孔径钠荧光激光雷达的探测技术,提出了一种单通道内修正回波信号非线性失真的新方法,有效解决了单通道钠荧光激光雷达钠层信号的非线性失真问题。

本文基于子午工程双波长三通道瑞利散射激光

雷达实际观测的经验基础,设计了一套全新的地面高精度光电探测器强光感生噪声检测平台,建立了对应双波长瑞利散射激光雷达采集参数的强光感生噪声精细结构扣除模型,同多通道信号接收技术相结合,改进了一台用于中高层大气温度探测的双波长三通道瑞利散射激光雷达数据的处理方法。

## 2 子午工程双波长三通道瑞利散射激光雷达系统及其温度探测原理

### 2.1 子午工程双波长三通道瑞利散射激光雷达系统

2010 年初建立的子午工程<sup>[13]</sup>北京激光雷达主要参数如表 1 所示,主要由 Nd:YAG 和染料激光器组成激光发射系统,使用 532 nm、589 nm 两种波长探测大气温度,由大口径望远镜(约 100 cm)、小口径望远镜(约 40 cm)、两个光电倍增管(H7421 series, HAMAMATS Ltd., JAP)、Licel 低空采集系统、两片数据采集卡(MCS-PCI)组成三通道信号接收和采集系统,最终将大气瑞利散射信号接收并以数字信号的方式存储在计算机里。整个系统如图 1 所示。大的雷达功率面积乘积,加上高灵敏的光电倍增管,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 SIN,影响大气温度的反演结果。对于这台双波长三通道瑞利散射激光雷达,不同的激光发射能量、不同敏感程度和量子效率的信号采集系统决定了不同接收通道内,脉冲累积效应扰动高度上限的不同。因此选择合适的反演拼接高度,再扣除强光感生噪声指数衰减的累积效应,就可以有效解决瑞利回波信号的非线性失真问题,提高大气温度反演的准确性。

表 1 子午工程双波长三通道瑞利散射激光雷达系统主要参数

Table 1 Main parameters of dual-wavelength rayleigh scattering lidar enrolled in the meridian project

Nd:YAG \ dye laser		Telescope cassegrain			Optical filter		PMT (H7421 series)	
Wave-length / nm	Pulse energy / mJ	Repetition rate / Hz	Beam divergence / mrad	Field of view / mrad	Wave-length / nm	Full width at half maximum / nm	Quantum efficiency	Count linearity / s <sup>-1</sup>
532\589	550\60	30\30	0.5\0.5	1000\400	0.2~2	589\532	1.0	40% 1.5×10 <sup>6</sup>
Data acquisition								
MCS-pci acquisition card				Licel acquisition system				
Maximum count rate /MHz	Channels	Minimum Bin width /ns	Analogue-to-digital sampling rate /MHz	Photon count rate /MHz	Time-spatial resolution	Channels		
150	4~65536	100	20~40	250	1~10 min, 7.5~100 m	5		

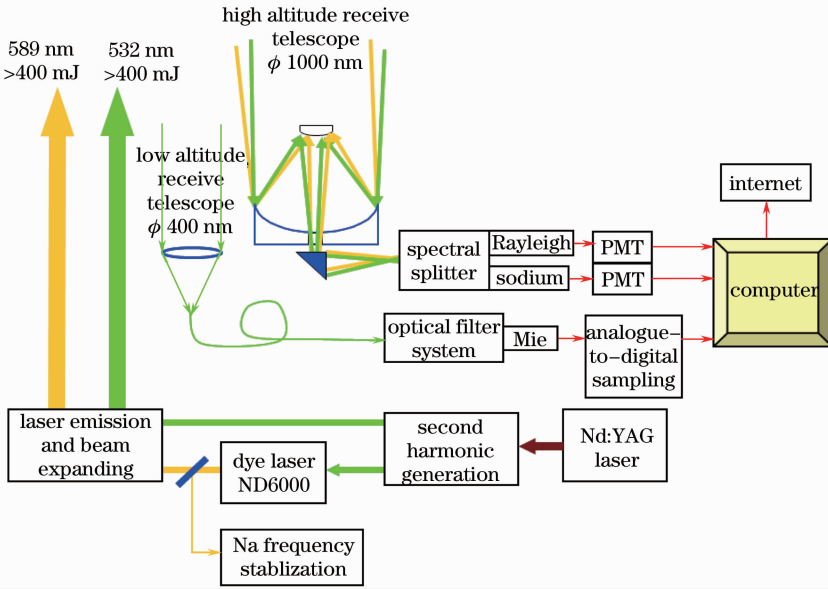


图 1 双波长三通道瑞利散射激光雷达原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of dual-wavelength Rayleigh scattering lidar with multi-channels

## 2.2 大气温度探测原理

瑞利激光雷达主要用于探测 30 km 以上高度的大气温度,主要原理基于<sup>[14-15]</sup>:1) 30 km 以上可以忽略气溶胶粒子的散射;2) 已知 30 km 及以上高度密度,可以得到大气相对密度廓线;3) 再由理想气体状态方程和大气静力学方程得到大气温度廓线。30 km 以上大气密度廓线由瑞利激光雷达回波得到

$$\rho(z_i) = \rho(z^*) \frac{(z_i - z_1)^2 N(z_i)}{(z^* - z_1)^2 N(z^*)} \cdot \exp\left[-2 \int_{z_i}^{z^*} \sigma(x) dx\right] \cdot K, \quad (1)$$

式中  $\rho(z_i)$  和  $\rho(z^*)$  分别为高度  $z_i$  和参考高度  $z^*$  上的大气密度,  $N(z_i)$  和  $N(z^*)$  分别为高度  $z_i$  和参考高度  $z^*$  上的大气回波光子数,  $\exp\left[-2 \int_{z_i}^{z^*} \sigma(x) dx\right]$  为  $z_i$  至  $z^*$  高度的大气双层透射率,  $K$  为归一化常数。由于 30 km 以上光学厚度小于 0.01, 可将 30 km 及以上高度作为归一化高度, 其大气透射系数定为 1, 由此引发的大气密度计算误差不超过 1%<sup>[16]</sup>。由理想气体状态方程和大气静力学方程得到 30 km 以上大气温度廓线表示为

$$T(z_i) = \frac{\rho(z^*)}{\rho(z_i)} \cdot T(z^*) + \frac{1}{R} \cdot \int_{z_i}^{z^*} \frac{\rho(z')}{\rho(z_i)} g(z') dz', \quad (2)$$

式中  $T(z_i)$  与  $T(z^*)$  分别为高度  $z_i$  和参考高度  $z^*$  上的大气温度,  $R$  为普适气体常数,  $g$  为重力加速

度。参考高度处的大气密度和温度可由卫星数据或大气模式给出。由(1)、(2)式可知, 温度的精度与回波信号、大气双程透射率、大气的相对密度和参考温度值的不确定性等有关, 而与大气的绝对密度无关。因此, 多通道接收技术以及信号的反演拼接能够有效解决低空强回波光的非线性失真, 而 532 nm/589 nm 通道强光感生噪声的扣除则需要借助一套全新的地面高精度光电探测器强光感生噪声检测平台, 建立了强光感生噪声精细结构扣除模型。

## 3 地面高精度光电探测器强光感生噪声检测平台

实验平台示意图如图 2 所示。左边的 50Ω 信号发生器调制 T-1 3/4 590 nm/532 nm 发光二极管(LED)发出应这台双波长瑞利散射激光雷达采集参数的脉冲方波信号(脉宽 1.28 μs、脉冲重复频率 30 Hz), 同步信号显示到数字示波器中; LED 放置在准直透镜的焦点处, 入射光从左往右, 经过同轴嵌套在第一透镜螺纹套管中的第一环驱动可变光阑、第一准直透镜变为平行光, 光强通过变换信号发生器输出电压和安装在转轮承载装置上的中性滤光片按固定步长改变  $[\Delta(O_D) = 10^{0.1}]$ ; 再经过第二环驱动可变光阑, 通过光纤导入第二螺纹套管, 经过第二准直透镜变为平行光, 通过窄带滤光片均匀入射待测光电倍增管光阴极, 阳极输出信号通过采集卡存入计算机, 并同步显示到数字示波器。右边的 50Ω 信号发生器分别触发左边的 50Ω 信号发生器和 MCS-PCI

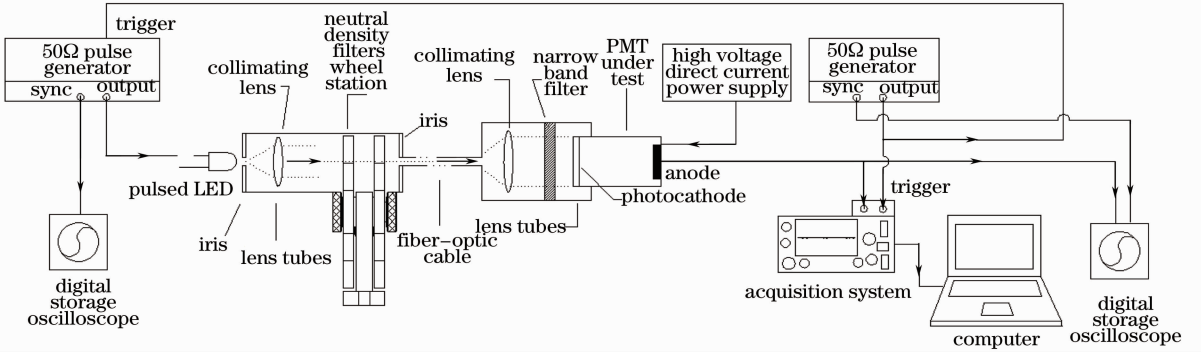


图 2 光电探测器强光感生噪声检测实验平台

Fig. 2 Schematic diagram of the signal processing unit for investigation of signal-induced noise effects with a pulsed LED installed for the PMT tests

采集卡,并将同步信号显示到数字示波器。

2 台 F-G 发生器的组合便于控制发光-采集先后次序,任意调制点光源脉冲参数,能够精确观测脉冲信号的上下沿时间和 SIN 拖尾;所有光学元件密封于定制的螺纹套管中,光强通过变换信号发生器输出电压和安装在转轮承载装置上的中性滤光片变换,光路以光纤导入,平台模块化程度高。

## 4 强光感生噪声检测

### 4.1 原理与方法

通过分析 SIN 的特征与对应子午工程激光雷达采集参数的精细累积效果,借助有限元分析方法,调制 LED 发出  $1.28 \mu\text{s}$  脉宽的脉冲方波信号,模拟  $10 \text{ ns}$  脉宽的大气连续回波信号,建立不同诱导光强下光强-强光感生噪声-时间三维数组。实验光强范围通过变换信号发生器输出电压和中性滤光片组合,从极弱光(约  $0.2 \text{ MHz}$ )扫到极强光(约  $30 \text{ MHz}$ )。值得说明的是,为了防止强光对 PMT 造成损害,在保证完全覆盖回波动态范围的前提下,事先估计实际激光雷达采集中出现的最强信号(约  $20 \text{ MHz}$ )。然后运用线性插值方法,将相对有限的

实验光强数据同实际激光雷达回波光强一一对应,建立总的感生噪声累积效果与时间的关系表达式。

### 4.2 强光感生噪声特性分析

强光感生噪声特性符合两个经验指数衰减函数之和<sup>[4,7]</sup>

$$S_{\text{IN}} = I_1 \times \exp[-T_1(t-t_0)] + I_2 \times \exp[-T_2(t-t_0)], \quad (3)$$

式中每个指数衰减函数包含两个参数:时间常数  $T$  和截距  $I, t_0$  是 LED 发出的诱导脉冲信号脉宽。对于给定的诱导脉冲信号光强和脉宽,  $I_1, T_1, I_2, T_2$  可以由最小二乘法拟合得到,  $T_1$  和  $T_2$  随着入射光强增大而减小,而  $I_1$  和  $I_2$  与入射光强成正比。

### 4.3 强光感生噪声精细结构扣除模型

图 3 是 SIN 的累积效应同时间关系的精细结构示意图:激光器发射  $10 \text{ ns}$  脉宽的脉冲信号,得到  $10 \text{ ns}$  脉宽的连续回波信号,由于  $532 \text{ nm}/589 \text{ nm}$  通道的 MCS-PCI 采集卡采用 bin 宽( $\nu_{\text{bin}}$ )  $1.28 \mu\text{s}$  求和采集模式,每个回波光诱发的强光感生噪声(红线)依次同下一时刻大气信号(黑线)被合记为一个点,对应某一数据点  $n$  的 SIN 累积效应  $N_{\text{SIN}}$  同时间  $T$  的关系可以表示为

$$\begin{cases} N_{\text{SIN}}^1 = \sum_{T=0}^{\nu_{\text{bin}}} S_{\text{IN}1} \\ N_{\text{SIN}}^2 = \sum_{T=\nu_{\text{bin}}}^{2\nu_{\text{bin}}} S_{\text{IN}1} + \sum_{T=0}^{\nu_{\text{bin}}} S_{\text{IN}2} \\ N_{\text{SIN}}^3 = \sum_{T=2\nu_{\text{bin}}}^{3\nu_{\text{bin}}} S_{\text{IN}1} + \sum_{T=\nu_{\text{bin}}}^{2\nu_{\text{bin}}} S_{\text{IN}2} + \sum_{T=0}^{\nu_{\text{bin}}} S_{\text{IN}3} \\ \vdots \\ N_{\text{SIN}}^n = \sum_{T=(n-1)\nu_{\text{bin}}}^{n\nu_{\text{bin}}} S_{\text{IN}1} + \sum_{T=(n-2)\nu_{\text{bin}}}^{(n-1)\nu_{\text{bin}}} S_{\text{IN}2} + \sum_{T=(n-3)\nu_{\text{bin}}}^{(n-2)\nu_{\text{bin}}} S_{\text{IN}3} + \dots + \sum_{T=\nu_{\text{bin}}}^{2\nu_{\text{bin}}} S_{\text{IN}n-1} + \sum_{T=0}^{\nu_{\text{bin}}} S_{\text{IN}n} \end{cases} \quad (4)$$

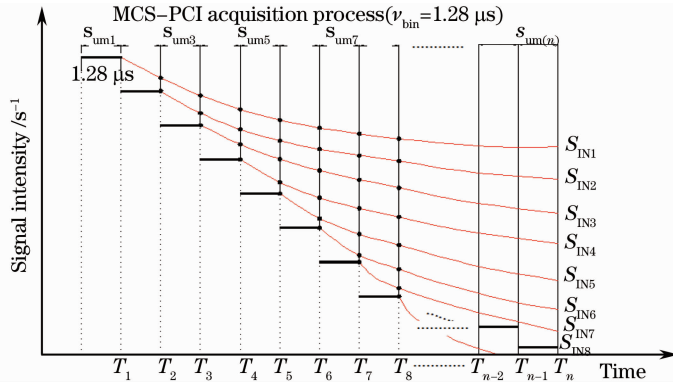
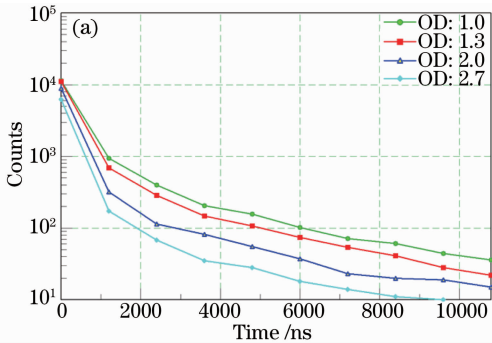


图 3 强光感生噪声 SIN 的累积效应同时间关系的精细结构示意图  
Fig. 3 Fine structure of SIN accumulative effects on lidar return signal

由于中性滤光片组合方式及最小变化步长的限制,实验中诱导光强无法连续变化,并且一一对应实际激光雷达回波信号(例如,有限的实验数据点相对于 1024 个激光雷达采集点,覆盖近地面至 110 km 的回波信号动态范围),因此借助线性插值方法,将实际激光雷达回波光强数据  $x$  在相邻实验光强数据范围  $(x_{n-1}, x_{n-2})$  内,做到(4)式中强光感生噪声扣除的一一对应

$$S_{IN} = \frac{x - x_{n-1}}{x_{n-1} - x_{n-2}} (S_{IN_{n-1}} - S_{IN_{n-2}}) + S_{IN_{n-1}}. \quad (5)$$

图 4 分别给出了 SIN 地面监测平台获得的典型实测例子以及由 SIN 精细结构扣除模型(4)、(5)式计



算得到的 SIN 累积效应随高度(时间)的变化关系。调制 LED 发出  $1.28 \mu\text{s}$  脉宽的诱导脉冲方波信号,脉冲重复频率为 30 Hz,采集 bin 宽采用 100 ns 加密采集。随着光强的逐渐减弱,即中性衰减片光学密度 OD 的逐渐增强,SIN 拖尾效应逐渐减弱,后向累加范围不超过  $20 \mu\text{s}$  (3 km)。对应图 3 的后向累积效应示意图,图 4(b)给出了 SIN 累积效果对应一组 589 nm 通道实际瑞利激光雷达信号影响的绝对值。该例中,SIN 累加效果绝对值在 15 km 达到最大(300 counts),后向累加范围不超过 35 km,40 km 以上可以认为瑞利回波信号不再受到 SIN 干扰。

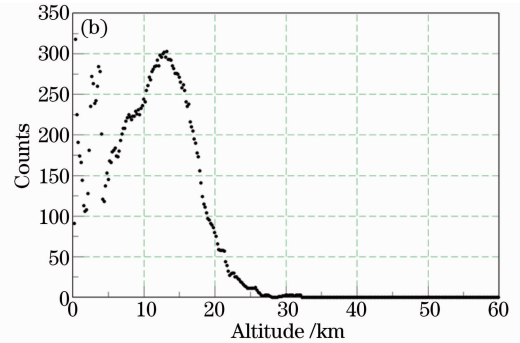


图 4 (a) SIN 地面监测平台实测例子;(b) SIN 累积效果随高度变化的绝对值

Fig. 4 (a) Measured examples of SIN through the grounded signal processing unit; (b) absolute value of SIN accumulative effects on lidar return signal

最后得到追溯大气真实回波的扣除强光感生噪声的表达式为

$$N_{\text{true}} = N_{\text{channel-measured}} - N_{\text{SIN}} - N_{\text{B}}, \quad (6)$$

式中  $N_{\text{true}}$  是未被采集系统扭曲的大气真实回波信号, $N_{\text{channel-measured}}$  是选定拼接高度之后,不同通道采集系统的输出信号, $N_{\text{SIN}}$  是(4)式给出的 SIN 累积效果, $N_{\text{B}}$  是信号的背景噪声。

#### 4.4 强光感生效应和脉冲累积效应对原始回波信号的扰动量:决定多通道信号反演、拼接高度

图 5 给出了这台双波长激光雷达在三个接收通道(Licel、589 nm、532 nm)的典型回波信号。Licel 系统采用的是模数(AD)采样模式,能够有效避免近场强烈回波信号的非线性扰动,但信噪比和探测上限明显低于采用光子计数模式的 PMT。对这台双

波长激光雷达来说,由于低空气溶胶的影响暂时无法扣除,30 km 以下的 Licel 通道回波信号并未用于大气温度的反演<sup>[17-18]</sup>。589 nm 通道激光脉冲能量是 532 nm 通道的约 1/10,瑞利信号探测上限及信噪比明显低于 532 nm 通道,但是在 35~55 km 大气信号的非线性失真比 532 nm 通道要小。

表 2 中给出了对应各个细分高度段,大气瑞利散射回波信号受到的干扰。脉冲累积效应可以由不同 PMT 的线性响应上限(此例子中为 1.5 MHz)判断<sup>[1]</sup>,对于近场瑞利散射信号非线性失真起主要贡献,扰动高度在 589 nm 和 532 nm 通道分别达到

表 2 SIN 和脉冲累积效应各自对瑞利散射回波信号的扰动量  
Table 2 Relative role of SIN and pulse pile-up to the distortion of lidar signal

Period number	Altitude range		Relative roles in 589 nm/532 nm channels	
	589 nm	532 nm	Major factor	Counts of SIN deduced from Eq. (3)
I	Near-field~35 km	Near-field~52 km	Pile-up	$1 \times 10^4 \sim 10$ $3 \times 10^4 \sim 25$
II	35~55 km	52~75 km	SIN	$10 \sim 1$ $25 \sim 1$
III	55~80 km	75~90 km	Linearity	1      1

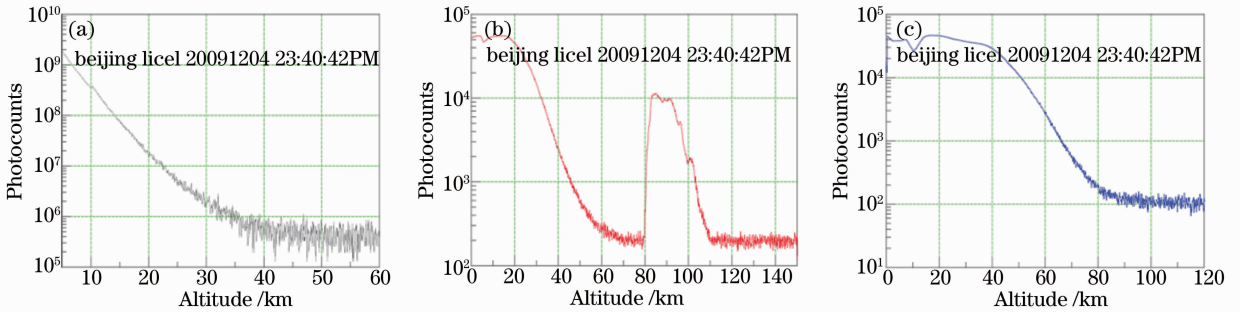


图 5 双波长激光雷达米-瑞利散射回波信号。(a) Licel 通道;(b) 589 nm 通道;(c) 532 nm 通道  
Fig. 5 Mie-Rayleigh backscattering signal of dual-wavelength lidar. (a) Licel channel;  
(b) 589 nm channel; (c) 532 nm channel

图 6 给出了一个典型的三通道大气相对密度拼接廓线即(1)式。高、中、低空根据 PMT 的线性响应上限和脉冲累积效应的截止高度,分别选择 30 km、55 km 作为拼接高度,且图 6 中时间分辨率

35 km和 52 km;85~105 km 是 589 nm 通道钠层信号的共振散射荧光,由于其峰值强度相当于 30 km 瑞利信号的强度,脉冲累积效应对信号非线性失真起主要贡献<sup>[7]</sup>。SIN 指数衰减引起的累积效应分别截止在 55 km 和 75 km 左右,因此多通道信号反演大气密度的拼接高度可以选择在 55 km,即:35~55 km采用 589 nm 通道的瑞利回波信号扣除 SIN 之后反演大气密度,55~85 km 采用 532 nm 通道的瑞利回波信号扣除 SIN 之后反演大气密度,再用拼接后的大气相对密度反演大气温度如(2)式所示。

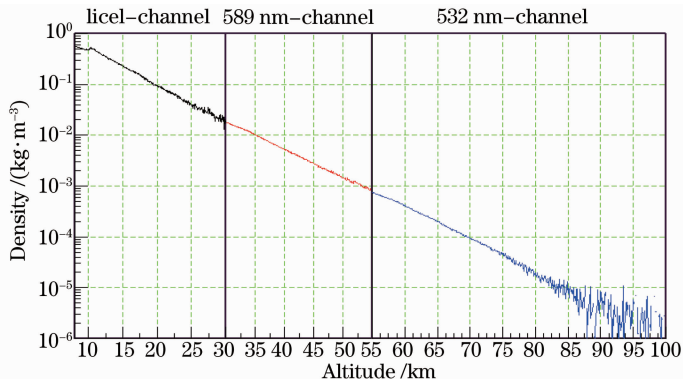


图 6 双波长激光雷达米-瑞利散射回波信号大气密度反演拼接  
Fig. 6 Density profile measured by dual-wavelength lidar with multi-channels

为 20 min。由于低空气溶胶的影响暂时无法扣除,30 km 以下的 Licel 通道大气密度并未用于大气温度的反演。589 nm 和 532 nm 通道的强光感生噪声由(4)~(6)进行了扣除。

## 5 大气温度探测结果与讨论

子午工程双波长三通道瑞利激光雷达在北京进行了观测。图 7(a)给出了 2012 年 3 月、6 月、9 月、12 月的采用多通道拼接技术与 SIN 扣除之后反演的高层大气温度廓线(高度分辨率 392 m)和 TIMED 卫星上搭载的 Saber 探测器结果比较。589 nm 和 532 nm 通道的拼接高度分别选在 52、55、57、50 km, 强光感生噪声的累积效应通过(4)~(6)式进行了扣除;图 7(b)给出了激光雷达结果与卫星结果的差别,在 35~85 km 高度范围内两者反映了较一致的温度分布特征。随着高度的增加,平流层温度明显递增,589 nm 通道由于激光脉冲能量是

532 nm 通道的约 1/10,探测上限及拼接高度处的信噪比明显低于 532 nm 通道,反映在温度廓线的误差棒上。可以看出,对于 589 nm 通道而言,在 35~50 km 范围内它和卫星结果的相对偏差不超过  $\pm 5$  K;对于 532 nm 通道而言,在平流层顶到中层大气范围内(55~75 km)它们之间的偏差不超过  $\pm 10$  K。总的来说,在不同季节的探测情况下,激光雷达和卫星结果差别较小,这表明多通道信号接收技术和强光感生噪声的扣除能够有效解决这台双波长三通道瑞利激光雷达脉冲累积效应和强光感生噪声的累积效应,提供了可靠的大气温度探测结果。

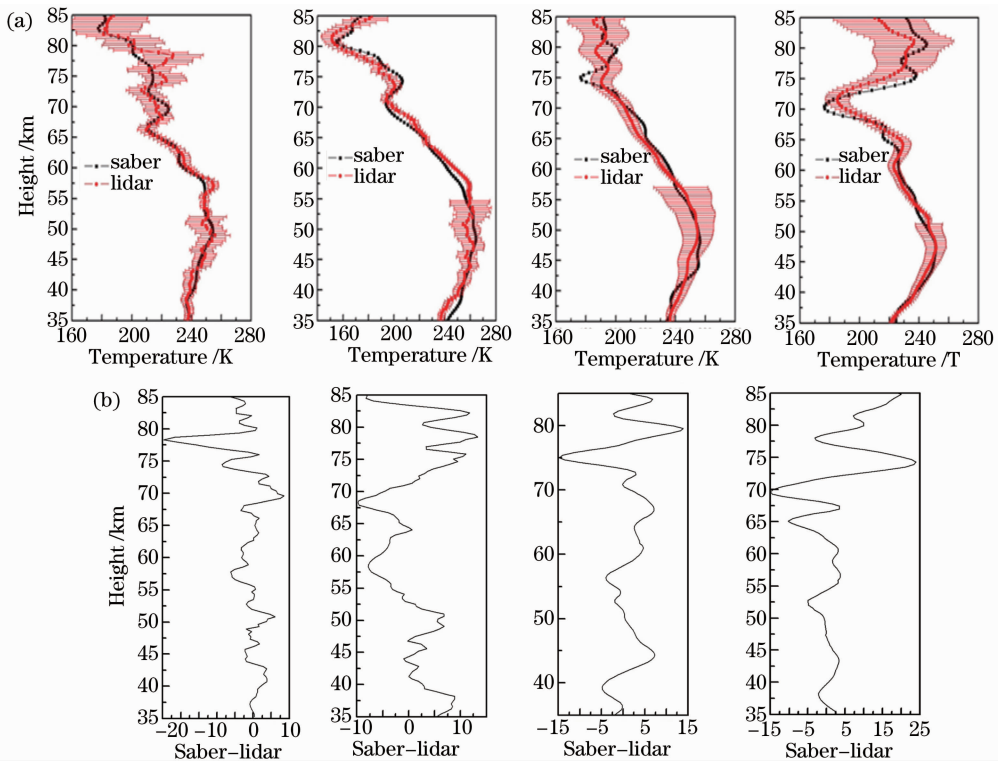


图 7 双波长瑞利散射激光雷达获得的温度分布。(a) 大气温度廓线及误差棒;(b) 与卫星结果对比的温度差别  
Fig. 7 Temperature profiles obtained by dual-wavelength lidar. (a) Temperature profiles and its associated error bar;  
(b) temperature bias between lidar and TIMED

## 6 结 论

介绍了一套全新的地面高精度光电探测器强光感生噪声检测平台,建立了强光感生噪声精细结构扣除模型,同多通道信号反演拼接技术相结合,改进了一台用于中高层大气温度探测的子午工程双波长三通道瑞利散射激光雷达数据的处理方法,能够有效避免中层大气信号(30~85 km)的非线性失真。处理后数据反演的大气温度廓线与 TIMED 卫星结果相比较,得到了很好的吻合:在 35~85 km 高度

范围内二者反映了较一致的温度分布特征,589 nm 通道在 35~50 km 范围内和卫星结果的相对偏差不超过  $\pm 5$  K,532 nm 在 55~75 km 范围内偏差不超过  $\pm 10$  K。

### 参 考 文 献

- 1 Hamatsu Photonics K K. Photomultiplier Tubes Basics and Applications[M]. Third Edition, Hamamatsu Photonics K K Electron Tube Division, 2006. 45-47.
- 2 M P Bristow, D H Bundy, A G Wright. Signal linearity, gain stability, and gating in photo-multipliers: application to differential adsorption lidar[J]. Appl Opt, 1995, 34(21):

- 4437—4452.
- 3 D P Donovan, J A Whiteway, A I Carswell. Correction for non-linear photon-counting effects in lidar systems[J]. *Appl Opt*, 1993, 32(33): 6742—6753.
  - 4 Yanzeng Zhao. Signal-induced fluorescence in photomultipliers in differential absorption lidar systems[J]. *Appl Opt*, 1999, 38(21): 4639—4648.
  - 5 J A Sunesson, A Apituley, D P J Swart. Differential absorption lidar system for routine monitoring of tropospheric ozone[J]. *Appl Opt*, 1994, 33(30): 7045—7058.
  - 6 H S Lee, G K Schwemmer, C L Korb, *et al.*. Gated photomultiplier response characterization for DIAL measurements[J]. *Appl Opt*, 1990, 29(22): 3303—3315.
  - 7 Sai Guan, Guotao Yang, Qihai Chang, *et al.*. New methods of data calibration for high power-aperture lidar[J]. *Opt Express*, 2013, 21(6): 7768—7785.
  - 8 Lin Xin, Yang Yong, Cheng Xuewu, *et al.*. Application of mechanical chopper in atmospheric lidar[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(8): 0814002.  
林 鑫, 杨 勇, 程学武, 等. 机械斩波在大气探测激光雷达中的应用[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0814002.
  - 9 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.
  - 10 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.
  - 11 Y Likura, N Sugimoto, Y Sassano, *et al.*. Improvement on lidar data processing for stratospheric aerosol measurements[J]. *Appl Opt*, 1987, 26(24): 5299—5306.
  - 12 I S McDermid, S M Godin, R A Barnes, *et al.*. Comparison of ozone profiles from ground-based lidar, electrochemical concentration cell balloon sonde, ROCOZ-A rocket sonde, and stratospheric aerosol and gas experiment satellite measurements[J]. *J Geophysical Research: Atmospheres*, 1990, 95(D7): 10037—10042.
  - 13 C Wang. New chains of space weather monitoring stations in china[J]. *Space Weather*, 2010, 8(8): S08001.
  - 14 Shibata T, Kobuchi M, Maeda M. Measurements of density and temperature profiles in the middle atmosphere with a XeF lidar[J]. *Appl Opt*, 1986, 25(5): 685—688.
  - 15 Leblanc I T, McDermid I S, Hauchecorne A, *et al.*. Evaluation of optimization of lidar temperature analysis algorithms using simulated data[J]. *J Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, 103(D6): 6177—6187.
  - 16 Wu Yonghua, Hu Huanling, Hu Shunxing, *et al.*. Temperature measurement with Rayleigh scattering lidar in the mid and upper stratosphere[J]. *Chinese J Lasers*, 2001, 28(2): 137—140.  
吴永华, 胡欢陵, 胡顺星, 等. 用瑞利散射激光雷达探测平流层中上部温度[J]. *中国激光*, 2001, 28(2): 137—140.
  - 17 Guo Jingqiu, Bu Lingbing, Wang Min, *et al.*. Measurement of temperature profiles above nanjing using raman lidar[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(s1): s114009.  
郭劲秋, 卜令兵, 王 敏, 等. 基于拉曼激光雷达的南京上空大气温度廓线观测[J]. *中国激光*, 2012, 39(s1): s114009.
  - 18 Bo Guangyu, Liu Dong, Wu Decheng, *et al.*. Two-wavelength lidar for observation of aerosol optical and hygroscopic properties in fog and haze days[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0113001.  
伯广宇, 刘 东, 吴德成, 等. 双波长激光雷达探测典型雾霾气溶胶的光学和吸湿性质[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0113001.

栏目编辑:何卓铭