

## 大气探测激光雷达噪声比例因子及信噪比的估算

邓 潘<sup>1,2,3</sup>, 张天舒<sup>1</sup>, 陈 卫<sup>1,2,3</sup>, 刘建国<sup>1</sup>, 刘 洋<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230036;  
3. 解放军电子工程学院 脉冲功率激光技术国家重点实验, 安徽 合肥 230037)

**摘 要:** 信噪比是激光雷达辐射能力的表征, 是度量激光雷达回波信号品质的重要参数, 对信噪比的评估一直是研究者面临的问题。针对大气探测激光雷达, 对激光雷达回波信号噪声比例因子(NSF)和信噪比进行了分析研究; 通过自行研制的 532 nm 瑞利散射激光雷达的昼夜连续观测, 对噪声比例因子进行了估算, 计算得出实验激光雷达系统噪声比例因子在白天和夜间分别为 0.07 和 0.034; 采用白天噪声比例因子值对激光雷达回波信号信噪比进行了估算, 计算结果表明: 基于噪声比例因子的信噪比估算法可较好地估算出系统回波信噪比。该方法为大气激光雷达系统总体设计和大气参数反演提供了数据依据。

**关键词:** 激光雷达; 信噪比; 信号比例因子; 噪声

中图分类号: P413.2 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.S130003

## Estimating noise scale factor and SNR of atmospheric lidar

Deng Pan<sup>1,2,3</sup>, Zhang Tianshu<sup>1</sup>, Chen Wei<sup>1,2,3</sup>, Liu Jianguo<sup>1</sup>, Liu Yang<sup>1,2</sup>

(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230036, China;

3. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

**Abstract:** The signal-to-noise ratio(SNR) of Lidar (light detection and ranging) reflects its radiance and is one of the most important parameters for evaluation of lidar return signal quality. However, it is very difficult to estimate the value of SNR quantitatively in practical engineering. At the first, the algorithm was used to estimate lidar returns noise scale factor (NSF) and SNR. Then, the value of NSF of the Rayleigh lidar were estimated by measuring 0–40 km atmosphere day and night with 532 nm wavelength laser, which is 0.07 in daytime and 0.034 in nighttime. Finally, the SNR of the atmospheric lidar was estimated by the value of NSF in daytime. Result shows that the method which based on the NSF in nighttime of lidar to estimate the value of SNR is feasible. The evaluating of NSF and SNR of the lidar can be used as the basis for its overall design and inversion.

**Key words:** lidar; signal-to-noise ratio; noise scale factor; noise

收稿日期: 2016-02-08; 修订日期: 2016-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(41205119); 国家 863 计划(2014AA06A512)

作者简介: 邓潘(1981-), 女, 博士生, 主要从事激光雷达大气探测方面的研究。Email: pdeng@aiofm.ac.cn

导师简介: 刘建国(1968-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事环境遥感监测方面的研究。Email: jgliu@aiofm.ac.cn

## 0 引言

近年来,激光雷达主动遥感技术发展十分迅速。激光雷达是利用发射的激光束,通过物质对激光的吸收或散射等特性,对物质进行探测<sup>[1]</sup>。其以高时空分辨率、主动性和探测距离远等优点,在目标成像、大气探测和环境监测等方面发挥着重要作用。对于激光雷达系统而言,其有效探测范围和测量误差等是系统的重要性能参数。激光雷达系统的回波信号信噪比是激光雷达系统辐射能力的表征,是度量激光雷达接收到的回波信号品质的重要参数指标,其可定量描述激光雷达探测能力以及测量误差。可见,激光雷达回波信噪比决定了激光雷达系统性能参数的好坏,它是激光雷达系统性能的重要指标。然而,由于激光雷达系统的复杂性以及激光波粒二象性,对激光雷达回波信号信噪比进行定量计算十分困难。理论上,可通过激光雷达系统硬件的各种性能参数计算激光雷达回波信号信噪比,而在实际工程中,定量计算信噪比所需的大部分系统参数难以精确测量得到,其中部分参数还会随着时间和工作环境的改变而变化,因此在实际操作中,精确计算系统回波信噪比存在较大的困难,操作人员通常只能通过近似算法估算系统的回波信噪比参数。目前的研究文献通常直接引用某种信噪比公式,而未说明信噪比的来源和计算方法,因此有必要进一步研究激光雷达系统回波信号信噪比的计算方法,为激光雷达系统研制设计及参数反演提供数据支持。

文中针对大气探测激光雷达,介绍激光雷达系统信噪比表达方式及噪声类型,对系统噪声比例因子(NSF)和回波信号信噪比的计算方法进行了研究分析,通过瑞利散射激光雷达系统外场昼夜连续观测,实验系统采用光电倍增管(PMT)探测器,A/D 模数转换方式采集卡,对不同回波信号的系统噪声比例因子及回波信噪比进行计算检验,分析了该方法的可行性。

## 1 计算方法

在大气探测激光雷达系统的回波信号中,除了大气分子和气溶胶等后向散射信号之外,还有天空的自然光背景噪声和光电探测器的噪声等背景噪

声。信噪比(SNR)是探测器接收到的信号与产生的总的噪声之比,是衡量信号与噪声强弱关系的度量。按照计算参数的类型,它可以以能量形式表示,也可以以光子形式表示<sup>[2]</sup>。

若用  $P_S(Z)$  表示在一定时间内收集到信号光电子数,  $P_N(Z)$  表示同一时间内收集到的所有噪声光电子数,则信噪比可以表示为:

$$\text{SNR} = \frac{P_S(Z)}{P_N(Z)} \quad (1)$$

### 1.1 信号计算

激光雷达接收到的目标散射回波信号  $P_S(Z)$  为激光雷达测量得到的原始回波信号减去背景噪声信号:

$$P_S(Z) = P_{\text{raw}}(Z) - BG \quad (2)$$

式中:  $P_{\text{raw}}(Z)$  为激光雷达的原始回波信号,其由探测器直接测量得到,包括目标散射回波信号和背景噪声信号;  $BG$  为背景噪声信号,随着探测高度的增加,激光雷达的回波信号变得越来越微弱,通常在一定距离以后,激光雷达回波信号不再随高度变化,认为此时激光雷达采集的信号只是背景信号,因此,可取该距离以后的信号平均值作为背景信号。

### 1.2 噪声计算

激光雷达回波信号中噪声包含了自然光背景噪声、暗电流噪声、散粒噪声和热噪声四类<sup>[3]</sup>。

自然光背景噪声主要由太阳光、月光、星光等自然光辐射及各种散射光进入探测器产生,在白天实验观测时,自然光背景噪声是激光雷达系统的主要噪声来源。暗电流噪声指在没有光照射的情况下,光电倍增管加电后,光电阴极和打拿极发射电子,形成的暗电流噪声。夜晚实验时,探测器的暗电流噪声是影响激光雷达探测能力的主要噪声来源。散粒噪声也称为量子噪声,探测器在单位时间内接收到大气回波信号,其为大量光子所组成,由于光子的不均匀从而导致噪声产生。热噪声来源于电阻内部自由电子或电荷载流子的不规则热运动可见后三类噪声与光电探测器的硬件特性相关。

由于探测器的统计特性,测量到的信号计数将有一定的不确定度,噪声的大小一般用其均值、方差或标准差等数学术语来表征<sup>[4-5]</sup>,则

$$P_N(Z) = \Delta P_{\text{raw}}(Z) \quad (3)$$

式中:  $\Delta P_{\text{raw}}$  为激光雷达接收的原始回波信号的标准偏差,其为激光雷达信号的不确定度。则激光雷达回

波信号的信噪比为:

$$SNR = \frac{P_s(Z)}{P_M(Z)} = \frac{P_{raw}(Z) - BG}{\Delta P_{raw}(Z)} \quad (4)$$

式中:  $\Delta P_{raw}(Z)$  与回波信号的强度、系统的硬件参数、系统工作方式等密切相关。

光子的量子特性和光电探测的模型等理论表明: 单位时间内, 激光雷达接收的光子数服从泊松分布。对光电倍增管(PMT)而言, 阴极激发得到的光电子数也满足泊松分布, 若不考虑其他噪声影响, 则  $\Delta P_{raw}(Z) = \sqrt{P_{raw}(Z)}$ 。但由于光电子在 PMT 打拿极上是逐级放大过程, 并经前置放大器转换成电压值及被 A/D 卡采集, 在该过程中会引入其他一些附加噪声, 最终使得测量得到的回波信号不满足泊松分布, 从而在 A/D 采集卡输出的回波信号均值与回波信号标准偏差之间存在以下关系<sup>[6-7]</sup>:

$$\Delta P_{raw}(Z) = \sqrt{2eBF_m G_m G_A} \sqrt{P_{raw}(Z)} \quad (5)$$

式中:  $e$  为电子电量;  $B$  为激光雷达接收系统带宽,  $B = 1/2t$ ;  $t$  为积分时间;  $F_m$  为探测器的噪声因子;  $G_m$  为探测器的增益;  $G_A$  为探测器阳极输出电流到 A/D 采集卡计数的转换因子。因此定义一个变量 NSF (Noise scale factor, NSF) 噪声比例因子<sup>[8]</sup>:

$$NSF = \sqrt{2eBF_m G_m G_A} \quad (6)$$

由此可见, NSF 是一个表征激光雷达硬件参数和工作方式的量, 若激光雷达系统参数没有变化, 则在该激光雷达系统的 NSF 为一个定值。由于公式(6)中这些系统硬件参数难以准确测量出来, 所以无法通过公式(6)计算出 NSF 值。由公式(5)和(6)可以得出:

$$NSF = \frac{\Delta P_{raw}(Z)}{\sqrt{P_{raw}(Z)}} \quad (7)$$

可见, NSF 是一个描述散射回波标准偏差与均方根之间关系的一个量, 它与回波信号的光电转换、放大、采集过程有关。这说明自然光背景信号和目标散射回波进入激光雷达系统后, 会经历相同的光电转换、放大、采集过程, 所以自然光背景信号的标准偏差与均方根的关系, 与目标回波信号的标准偏差与均方根关系是一样的, 即为同一值。如果在背景噪声中, 自然背景噪声远大于本底噪声(暗电流噪声、热噪声等), 则认为背景噪声即为自然光背景噪声, NSF 值可直接由自然背景光信号计算, 即

$$NSF = \frac{\Delta P_b}{\sqrt{P_b}} \quad (8)$$

式中:  $\Delta P_b(Z)$  为背景信号标准偏差;  $\overline{P_b}$  为背景信号均值。在激光雷达实际测量中, 往往将  $N$  发激光脉冲的回波信号进行累计平均来提高信噪比。 $N$  发激光脉冲累计平均的背景回波信号是一发激光脉冲背景回波的  $N^{1/2}$  倍。故

$$\Delta P_b = \overline{\Delta P_b} \sqrt{N} \quad (9)$$

式中:  $\overline{\Delta P_b}$  为背景平均值标准偏差;  $N$  为采集脉冲个数。

对于光电倍增管 PMT 而言, 因为 PMT 自身暗电流很小, 白天工作时, 由于白天自然光背景很强烈, 在可见光及其附近波段, 背景噪声远大于本底噪声, 故 NSF 值则可以利用白天测量的背景信号的均方根和标准偏差直接计算得到, 即 NSF 值可通过公式(7)得到。对雪崩管 APM 而言, 由于其暗电流比较大, 则不能忽略暗电流噪声, 所以在计算 NSF 时, 需要将暗电流从背景信号中扣除掉, 即

$$NSF = \frac{\sqrt{(\Delta P_b)^2 - (\Delta P_d)^2}}{\sqrt{P_b - P_d}} \quad (10)$$

式中:  $\Delta P_b$  为本底噪声的标准偏差;  $\overline{P_d}$  为本底噪声的均值。

## 2 实验系统组成

通过自行研制的瑞利散射激光雷达对算法进行验证。该瑞利散射激光雷达系统主要由激光发射部分、信号接收部分和数据采集及控制三部分组成。系统原理结构如图 1 所示。

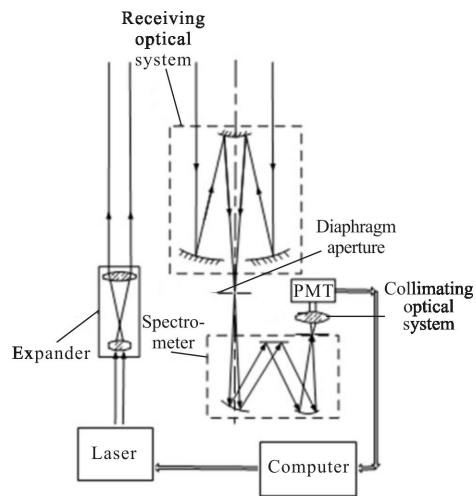


图 1 激光雷达系统结构图

Fig.1 Schematic setup of the rayleigh lidar

激光发射部分主要由 Nd:YAG 激光器、导光及光束调整装置组成。Nd:YAG 激光器水平输出 532 nm 波长的激光束,扩束后的发散角约 0.3 mrad,单个脉冲能量约 400 mJ,重复频率为 10 Hz,经 45°反射镜后垂直入射到大气中,激光与大气中的分子和气溶胶相互作用而发生瑞利散射和米散射。接收望远镜为直径 400 mm 的卡塞格林(Cassegrain)型望远镜,用于收集大气后向散射的光信号。小孔光阑用于限制接收望远镜系统的接收视场,接收视场角约为 1.5 mrad。后向散射光经目镜准直后由光电倍增管(PMT)转化为电信号。为减小小照射到阴极的光强,光电倍增管前放置了衰减片。选用线性好、增益高的型 PMT,采用光子计数方式记录中层大气的弱回波信号。PMT 配备了相应的制冷器,用以降低热噪声和暗电流。为抑制天空背景噪声,PMT 前放置了窄带干涉滤光片,带宽为 1 nm。Nd:YAG 激光器调 Q 输出信号输入时序控制器,触发采集软件同步开始采集。光子计数采集软件可以设置采样的分层厚度、激光脉冲数和甄别电平,并实时显示回波信号随高度的分布曲线。表 1 给出了该瑞利激光雷达系统的技术参数。

表 1 瑞利激光雷达系统主要技术参数

Tab.1 Technical parameters of the Rayleigh lidar

Lidar system	Specification
Transmitter	
Laser	Nd:YAG
Wavelength/nm	532
Pulse energy/mJ	400
PRF/Hz	10
Divergence/mrad	0.3
Receiver	
Telescope type	Cassegrain
Telescope diameter/mm	400
Field of View/mrad	1.5

### 3 结果及分析

采用瑞利散射激光雷达对合肥地区中高层大气进行试验观测,对 2015 年 5 月 23 日和 6 月 10 日凌晨

0:12 至夜间 23:44 时间段连续观测的回波信号进行计算分析。利用公式(8)计算得出了 5 月 23 日和 6 月 10 日 NSF 值随时间变化分布图,见图 2。

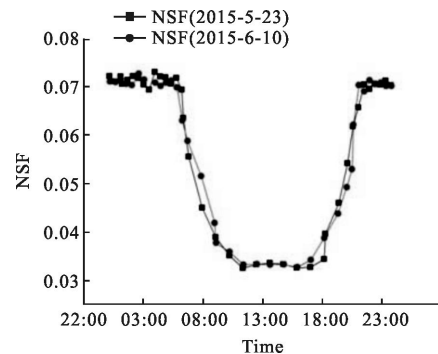


图 2 激光回波信号 NSF 值随时间变化图

Fig.2 Profile of NSF of lidar vs time

从图 2 可见,5 月 23 日和 6 月 10 日两日的 NSF 计算值变化基本一致,白天(9:00~18:00)与夜间(20:30~6:30)NSF 值约为一恒定值,其他时间段(6:30~9:00, 15:00~20:30)NSF 值变化较大。白天,NSF 均值约为 0.034,夜间,NSF 均值约为 0.07,二者存在差异。这是因为夜间自然光背景较弱,背景噪声主要为暗电流、热噪声,此时背景信号中的暗电流和热噪声不能被忽略,所得的 NSF 为一个恒定值;白天的自然光背景远大于暗电流和热噪声,满足公式(8),其值必为另一恒定值。其他时间段 NSF 值变化较大,这是由于 6:30~9:00 时间段,天色逐渐变亮,自然光背景逐渐增强,NSF 值逐渐减小;15:00~20:30 时间段,天色逐渐变暗,自然光逐渐减弱,NSF 值逐渐增大。由于 6:30~9:00 和 15:00~20:30 两时间段不能满足计算 NSF 值时必须使得自然光远大于暗电流和热噪声的条件,故 NSF 值有较大的变化。

在白天的实验观测中,所得激光雷达回波信号中,自然背景噪声远大于本底噪声,则认为背景噪声即为自然光背景噪声,故由白天回波信号计算出来的 NSF 值应为该通道真正的 NSF 值。通过对 2015 年 5 月 23 日和 6 月 10 日两日白天 NSF 值比较,NSF 值均在 0.034 左右波动,即对于该套激光雷达系统,其系统所决定的 NSF 值应约为 0.034。

图 3 为 2015 年 5 月 23 日 22:50 时刻和 6 月 10 日 0:14 时刻两条原始回波信号。选取计算所得白天 NSF 值为 0.034,由公式(1)、(4)、(8)、(9)求取两日回波信噪比,结果如图 4 所示。由图 3、图 4 可见,计算

所得信噪比变化趋势与原始回波信号一致，计算所得信噪比是有效的。此外，图 4 显示两日回波信噪比变化基本一致，数值变化差异不大，两实验观测时刻天气情况基本一致，激光雷达系统较为稳定。

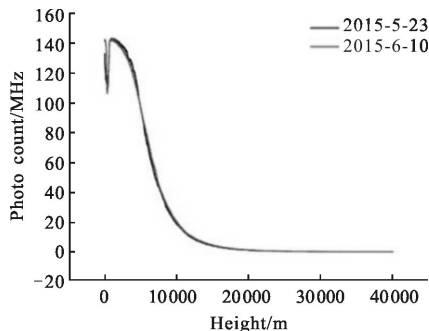


图 3 激光雷达回波信号  
Fig.3 Echo signal of lidar

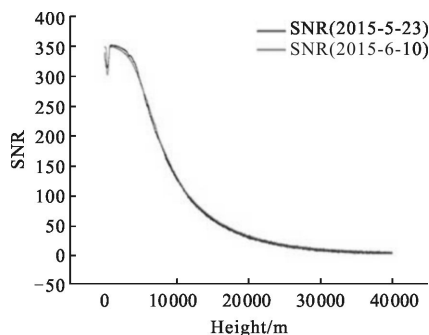


图 4 激光雷达信噪比廓线  
Fig.4 Profile of SNR of lidar

为有效探测中高层大气环境变化情况，特别对 20~40 km 高度范围的激光回波信噪比进行计算分析，图 5 为 5 月 23 日和 6 月 10 日两日 20~40 km 高度范围的激光回波信噪比。从图 5 中可见该套瑞利散射激光雷达系统在 20 km 高度信噪比约为 35，40 km 高度信噪比约为 2.5。

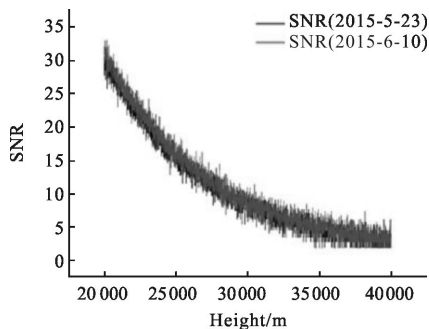


图 5 20~40 km 高度范围激光回波信噪比廓线  
Fig.5 Profile of SNR of lidar for height of 20~40 km

由公式(9)可知发射激光累积脉冲数  $N$  增加后，系统信噪比则会提高  $\sqrt{N}$  倍。图 2 为 4000 个脉冲回波信号计算所得 NSF 值变化图。将 5 月 23 日的激光脉冲进行 20 000 个脉冲累积，比较中高层空间的激光回波信噪比的变化。由公式(9)理论计算可知若激光脉冲信号增加至 20 000 个，与 4 000 个脉冲累积相比，信噪比则会增加  $\sqrt{5}$  倍左右。由于脉冲进行累积，系统噪声特性发生了改变，故此时则应在新的脉冲数目条件下对系统 NSF 值进行计算。20 000 个脉冲累积后，通过计算得到 5 月 23 日的 NSF 值随时间变化，如图 6 所示。从图 6 可见，NSF 变化趋势与图 2 一致，但参数值整体下降。夜间 NSF 值约为 0.032，白天 NSF 值约为 0.015，选取白天 NSF 值代入信噪比公式计算，如图 7 所示。此外，从图可见测量时间间隔增大，这主要是采用脉冲累积后减小了时间分辨率。

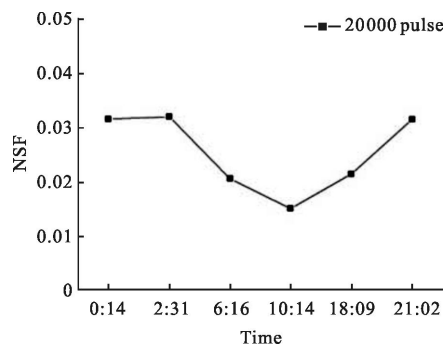


图 6 脉冲累积的 NSF 变化图  
Fig.6 NSF of lidar based on pulse accumulation method

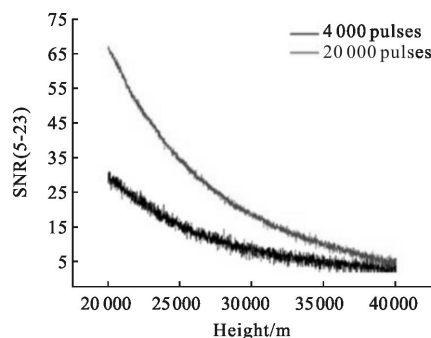


图 7 脉冲累积的 SNR 对比图  
Fig.7 Comparison of SNR based on pulse accumulation method

图 7 为 5 月 23 日 20~40 km 高度范围 4 000 个激光脉冲信号的信噪比和 20 000 个激光脉冲信号信噪比比对图。可见，20~40 km 高度范围，20 000 个激光脉冲信号信噪比约为 4 000 个脉冲信号的 2.3 倍，符合公

式(9)理论计算结果。此外 20 000 个脉冲所得信噪比波动小,稳定性更好,信号质量更好。可见,对于激光光源的脉冲重复频率固定的激光雷达探测系统,总积分时间越长,系统信噪比越好。但是积分时间过长又会影响系统的时间分辨率,所以在计算以及设计时要兼顾两者。

## 4 结 论

针对大气探测激光雷达,对激光雷达回波信号噪声比例因子和信噪比计算方法进行了分析研究;通过自行研制的 532 nm 瑞利散射激光雷达昼夜连续观测,对噪声比例因子进行了估算,计算得出实验激光雷达系统白天时间段与夜间时间段 NSF 随时间变化的关系,其中在白天时间段 NSF 均值约为 0.07,夜间时间段 NSF 均值约为 0.034;由于白天自然光背景噪声远大于系统本底噪声,采用白天 NSF 值对激光雷达回波信号信噪比进行估算,通过对 0~40 km 高度范围的激光回波信噪比进行计算,结果表明:基于噪声比例因子的信噪比估算法可较好地估算出系统回波信噪比。此外,计算了 20 000 个脉冲累积信号的 NSF 值,并以此计算 SNR 与 4 000 个脉冲累积信号所得 SNR 进行比对,结果显示系统信噪比提高了约 2.3 倍。通过对该方法计算所得信噪比数据可为大气激光雷达系统总计设计和大气参数反演工作提供依据。

## 参考文献:

- [1] Dai Yongjiang. Laser and Infrared Sounds Principle [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 271–272. (in Chinese)  
戴永江. 激光与红外探测原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 271–272.
- [2] Sun Chengming, Yuan Yan, Zhao Fei. Analysis of SNR for space-based imaging detection of space object [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1654–1659. (in Chinese)  
孙成明, 袁艳, 赵飞. 空间目标天基成像探测信噪比分析 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1654–1659.
- [3] Cui Chaolong, Huang Honghua, Tao Zongming, et al. Analysis of noise in residual turbulent scintillation lidar [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2013, 30 (5): 628–634. (in Chinese)  
崔朝龙, 黄宏华, 陶宗明, 等. 光强闪烁激光雷达的背景噪声分析[J]. 量子电子学报, 2013, 30(5): 628–634.
- [4] Ellsworth J welton, James R Campbell. Notes and corresponden. Micropulse lidar signals: uncertainty analysis [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19: 2089–2094.
- [5] Liu Zhaoyan, William Hunt, Mark Vaughan, et al. Estimating random errors due to shot noise in backscatter lidar observations[J]. *Appl Optic*, 2006, 45(18): 4437–4447.
- [6] Lin Jinming, Cao Kaifa, Hu Shunxing, et al. Experiment study of SO<sub>2</sub> measurement by differential absorption lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 872–878. (in Chinese)  
林金明, 曹开法, 胡顺星, 等. 差分吸收激光雷达探测二氧化硫实验研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 872–878.
- [7] Zhao Hu, Hua Dengxin, Di Huige, et al. Development of all time multi-wavelength lidar system and analysis of its signal to noise ratio [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(1): 00113001–1–00113001–8. (in Chinese)  
赵虎, 华灯鑫, 狄慧鸽, 等. 全天时多波长激光雷达系统研制与信噪比分析[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 00113001–1–00113001–8.
- [8] Mohd Nadzri Md Reba, Francesc Rocadenbosch, Michaël Sicard. A straightforward signal-to-noise ratio estimator for elastic/Raman lidar signals [C]//SPIE, 2006, 6362: 636223–1–636223–12.