

空间方差构建在激光雷达光子计数数据 堆栈修正中的应用

高 飞 李松辉 李婉婉 汪 丽 辛文辉 华灯鑫*

西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 激光雷达近场回波信号较强, 容易使光子计数系统产生数据堆栈现象, 而死区时间是修正数据堆栈的重要因素。构建了一种激光雷达光子计数数据廓线的空间方差数学计算模型, 用于评价光子计数数据的泊松分布质量。利用计算分析结果估算激光雷达光子计数系统死区时间, 进而修正光子计数数据中遭受数据堆栈的数据。计算结果表明, 激光雷达远场信号基本符合泊松分布, 而近场信号不符合, 但是死区时间修正后的光子计数数据的泊松分布特性可得到明显改善。通过最小化数据方差与均值的偏离程度, 估算系统死区时间以修正数据堆栈现象, 使得光子计数数据最大化地服从泊松分布。研究表明, 长距离扫描激光雷达系统所应用的 Licel 数据记录仪 TR40-160 光子计数系统的死区时间约为 3.402 ns, 修正后的激光雷达数据堆栈现象得到明显改善。

关键词 遥感; 激光雷达; 光子计数器; 死区时间; 数据堆栈; 空间方差

中图分类号 TH741 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0528002

Application of Spatial Variance Construction in Correction of Pile-Up Effects of Lidar Photon-Counting Data

Gao Fei Li Songhui Li Wanwan Wang Li Xin Wenhui Hua Dengxin

*School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an, Shaanxi 710048, China*

Abstract Due to the strong intensity of lidar return signal in the near field, the photon-counting system in lidar applications suffers from the pile-up effect, which can be corrected by the parameter of dead time. A mathematical model is constructed to calculate the spatial variance, which is used to evaluate the quality of Poisson distribution of lidar data. Furthermore, the analysis results of the spatial variance are utilized to estimate the dead time of the lidar photon-counting system and to correct the pile-up effect. The calculation results indicate that the photon-counting data in the far field of lidar conforms to the Poisson distribution, but the data in the near field does not. However, the Poisson distribution characteristic of the photon-counting data can be improved notably by the dead time correction. Therefore, the system dead time can be estimated by minimizing the deviation between the variance and the mean of lidar data. One can correct the pile-up effect of photon-counting data and make the data profile conform to the Poisson distribution at the maximum degree. The results show that the dead time of the photon-counting system in Licel transient recorder TR40-160 is approximately 3.402 ns, which is estimated by using the photon-counting data in the application of long-range scanning lidar. The pile-up effect in the presented photon-counting data is improved obviously.

Key words remote sensing; lidar; photon-counting system; dead time; pile-up effect; spatial variance

OCIS codes 280.3640; 010.0280; 230.0250; 040.5250

收稿日期: 2015-11-18; **收到修改稿日期:** 2015-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(41305023)、中国博士后基金(2014M560799)、陕西省科技计划项目(2014KJXX-64)

作者简介: 高 飞(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光雷达大气遥感探测方面的研究。

E-mail: gaofei@xaut.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn

1 引 言

激光雷达是一种以光波为激励源,以大气分子和气溶胶颗粒物为介质的主动遥感探测技术和工具。它不仅可提供气溶胶消光、后向散射、激光雷达比等光学参量信息以及颗粒物偏振态、粒子谱等物理特性信息,还可提供大气温度、风场、水汽、二氧化碳等要素的廓线分布时空变化信息^[1-5]。

光电倍增管(PMT)是在激光雷达系统中应用最为广泛的光电检测器件^[6]。在激光雷达应用中,激光发射的光脉冲脉宽很窄,一般在 10 ns 量级,而光电转换系统的功能是将大气回波光脉冲忠实地转换为电子信号,产生一个新的电子脉冲信号,其脉宽由大气回波光信号与光电检测电路时间响应特性的卷积决定^[7]。光电倍增管的工作模式主要有:1)模拟工作模式,线性度高,比较适合低层大气参量的激光雷达遥感探测^[8-10];2)光子计数(PC)工作模式,灵敏度高,适合远距离大气参量以及极微弱信号的激光雷达遥感探测^[11-13]。

激光雷达的数据反映了大气状态信息的变化。激光雷达方程表明,激光雷达回波信号的强度与距离的平方成反比^[14-15]。为了得到远距离的大气状态信息,光子计数器成为数据采集系统的必然选择。光子计数数据由于计数器自身固有的死区时间而产生数据堆栈现象^[16-17],因此需要对采集到的光子计数数据进行修正以便更精确地反映大气状态信息的变化^[18-20]。研究发现,太阳背景光及激光雷达大气回波的光子计数数据都服从泊松分布,而光电倍增管及采集系统的电子噪声成分都不服从泊松分布^[21]。研究人员构建数学模型以修正激光雷达数据中的非泊松分布部分,进而提高激光雷达的数据精度^[22-24]。

本文针对激光雷达光子计数数据中数据堆栈的修正需求,构建了一种激光雷达光子计数数据廓线的空间方差数学计算模型,评价光子计数数据的泊松分布质量,并利用计算分析结果估算激光雷达光子计数系统死区时间,进而修正光子计数数据中遭受数据堆栈现象的数据,以提高激光雷达的数据精度。

2 光子计数系统

光子计数系统主要由鉴频器和计数器构成,典型的光子计数系统结构如图 1 所示。光电倍增管的输出脉冲首先输送到鉴频器中,鉴频器通过设置阈值电压来确定所鉴别的输入脉冲的高度,当输入脉冲电压高于鉴频器阈值电压时,将产生一系列形状和高度一定的电子脉冲并输送到计数器中,从而实现对光脉冲信号的数据采集。因此原理上光子计数模式非常适用于极微弱光信号的检测,即使当信噪比接近于 1,光子计数模式也可获得比其他任何检测方法都优异的数据特性^[17]。

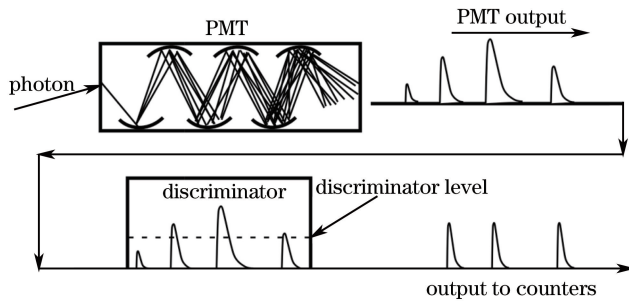


图 1 光子计数系统工作原理示意图

Fig. 1 Schematic of working principle of the photon-counting system

但是当光信号的强度增加时,光子计数系统的响应将不再具有线性特性,即光子计数器的输出计数率和输入光强度不再呈正比关系。在不考虑 PMT 信号诱导噪声等限制因素的情况下,光子计数器的非线性响应主要由脉冲的重叠和电子设备的有限响应时间引起。在低计数率下,当一个单脉冲的幅值大于鉴频器的阈值电压时,计数器计数一次。当两个或者多个高于阈值电压的脉冲到达鉴频器的时间间隔非常短,实际上只记录了一个脉冲,降低了观测计数率,这种现象叫做计数率损失;当两个或者多个低于阈值电压的脉冲到达鉴频器的时间间隔非常短,它们可以结合在一起从而超过阈值电压而被计数一次,提高了观测计数率,这种现象被称为计数率增加。不管是计数损失还是计数增加,都是由电子脉冲的数据堆栈引起的^[17]。

光子计数系统可以分为麻痹系统和非麻痹系统。在麻痹系统中,当脉冲与前面大多数脉冲记录时刻的时间间隔小于给定的时间间隔时,此脉冲不会被记录;而在非麻痹系统中,当脉冲与前面最后一个记录脉冲

的时间间隔小于给定的时间间隔时,此脉冲不会被记录^[16-17]。在这个给定的时间间隔内,计数系统如同死掉一样,不会进行数据记录,因此该时间间隔被称为死区时间 τ_d 。

Licel 记录仪是专门针对激光雷达应用所开发的数据采集系统^[7]。Licel 记录仪所包含的光子计数器的最大计数率为 250 MHz,时间分辨率为 25 ns,是典型的非麻痹系统^[18-20,25],其观测计数率 R 和实际计数率 R' 的关系为

$$R' = \frac{R}{1 - R\tau_d} \quad (1)$$

Licel 记录仪所表示的激光雷达回波信号为接收到的光子数,因此可使用观测光子数 N 和实际光子数 N' 来代替计数率,即

$$N' = \frac{N}{1 - N \frac{\tau_d}{\tau_s}}, \quad (2)$$

式中 τ_s 为系统的时间分辨率。通常激光雷达的数据是多脉冲激光回波的累加结果,当激光脉冲为 m 时,观测光子累加数 n 和实际光子累加数 n' 为

$$n' = m \frac{n/m}{1 - (n/m) (\tau_d/\tau_s)} = \frac{n}{1 - (n/m) (\tau_d/\tau_s)} \quad (3)$$

(3)式表明,当系统确定时,激光雷达光子计数数据堆栈现象的修正只与死区时间有关。光子计数数据的死区时间修正(DTC)效果如图 2 所示。图 2(a)所示为单激光脉冲回波数据的死区时间校正,光子计数系统可记录的最大光子数为 6,且当观测光子数为 5 时,其实际光子数为 25。图 2(b)所示为典型的激光脉冲累加的光子技术原始数据^[20,22]和假定死区时间分别为 2 ns 和 5 ns 的光子计数堆栈数据修正结果。从图中可以看出,前 2000 个数据点(探测距离 0~7.5 km)修正后的数据和原始数据有较大的差异,且不同死区时间产生不同的数据修正效果。

综上,死区时间 τ_d 在光子计数数据堆栈现象的修正中扮演了非常重要的角色。因此需要正确估算系统死区时间 τ_d ,以修正光子计数数据的数据堆栈现象,进而提高激光雷达数据的精度。以应用 Licel 数据记录仪 TR40-140(Licel GmbH,德国)的长距离扫描激光雷达的数据为例^[20,22],详细阐述如何通过构建激光雷达数据空间方差数学计算模型正确估算系统死区时间,进而修正激光雷达光子计数数据中的数据堆栈现象。

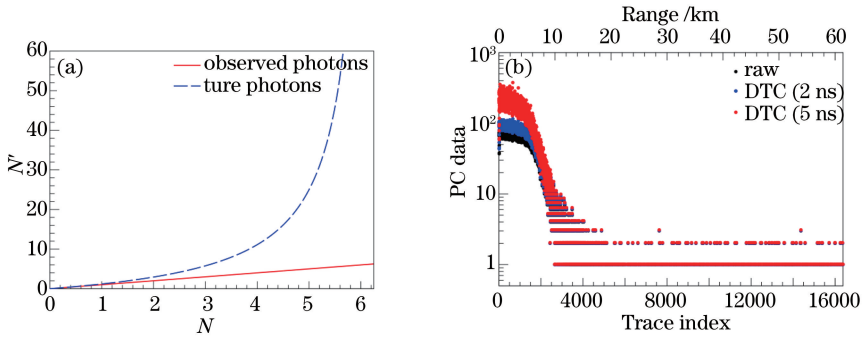


图 2 光子计数数据的死区时间修正效果。(a)单激光脉冲回波计数死区时间校正效果的理论计算;

(b)典型的 20 个激光脉冲累加的光子计数原始数据以及假定死区时间分别为 2 ns 和 5 ns 时的堆栈校正数据

Fig. 2 DTC effect on PC data. (a) Theoretical calculation of DTC effect for a single laser pulse return wave counting; (b) stack calibration data with dead time setting of 2 ns and 5 ns and raw PC data of typical summation of 20 laser pulses

3 激光雷达数据空间方差数学计算模型

原理上,激光雷达大气回波的光子计数数据服从泊松分布^[21]。方差是衡量数据集离散程度的度量,可用于判断数据集的泊松分布状态。当数据服从泊松分布时,其方差与均值相等。根据激光雷达数据随距离的变化关系,构建激光雷达数据廓线的空间方差计算模型如图 3 所示。

沿激光雷达数据廓线,取任意连续的 M 个激光雷达数据点作为计算空间方差的样本,则整个激光雷达

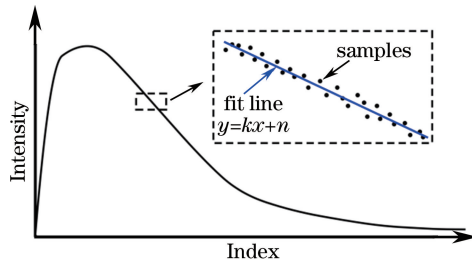


图 3 激光雷达数据廓线的空间方差计算模型

Fig. 3 Schematic of spatial variance calculation on trace of lidar data

数据廓线可构成的方差样本数为 $L-M+1$, 其中 L 为整个激光雷达廓线的数据点数。在均匀大气中, 激光雷达接收到的回波强度与距离的平方成反比。然而在很短的距离间隔内, 可以认为激光回波是线性递减的, 因此样本方差为

$$V(P) = \frac{1}{M-2} \sum_i^M [P - (kx_i + b)]^2, \quad (4)$$

式中 x 为激光雷达数据点的索引坐标, k 为样本函数的线性拟合斜率, b 为样本函数的线性拟合截距。样本中对数据量 M 的大小选择主要考虑激光雷达数据的空间分辨率以及大气的空间尺度。取 $M=25$ 来计算方差, 对应的空间距离间隔为 93.75 m。

如图 4 所示为激光雷达光子计数数据廓线的空间方差计算结果。图 4(a) 为光子计数原始数据的方差计算结果, 激光雷达远场信号的光子计数数据基本服从泊松分布, 而近场信号的光子计数数据由于受到堆栈的影响不服从泊松分布。利用(3)式对激光雷达光子计数数据进行数据堆栈修正, 修正后的数据分布特性有了较大的变化, 如图 4(b) 所示。该变化主要表现在近场信号中遭受堆栈影响的数据中, 当死区时间设置为 2 ns 时, 近场信号的泊松分布特性得到一些改善, 趋向于方差与均值相等的方向运动; 而当死区时间设置为 5 ns 时, 近场信号的方差已经超越了方差与均值相等的直线。因此, 光子计数系统的死区时间在 2~5 ns 之间, 而设备制造商及专家学者所推荐的 Licel 数据记录仪的光子计数系统死区时间为 4 ns^[18-19, 25]。

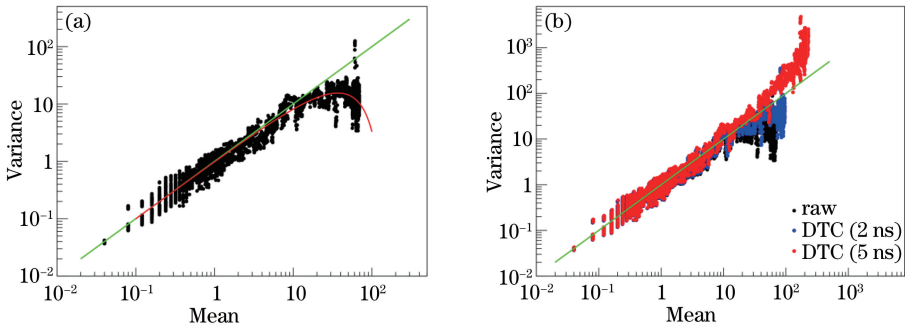


图 4 激光雷达光子计数数据廓线的方差计算结果(绿线标示方差与均值相等的情况)。(a)光子计数原始数据, 红线为空间方差分布数据的拟合曲线;(b)死区时间(2 ns 和 5 ns)校正后的光子计数数据

Fig. 4 Calculation results of spatial variance on trace of lidar PC data (the green line denotes the condition when the mean equals to the variance). (a) Raw PC data, the red line is the fit line of spatial variance distribution; (b) PC data after DTC (2 ns and 5 ns)

4 光子计数器死区时间的估算及数据堆栈的修正

如图 4 所示, 利用死区时间对激光雷达数据进行修正后, 光子计数数据的分布特性发生改变。当设置的死区时间小于实际死区时间时, 数据的方差虽然趋向于泊松分布特性方向, 但未完全实现, 可称之为欠修正; 当设置的死区时间大于实际死区时间时, 数据的方差超过了泊松分布特性的表现, 称之为过度修正。因此, 可通过最小化数据样本方差 V 与均值 E 的差异来探寻最佳死区时间, 从而使得光子计数数据最大化地符合泊松分布, 即

$$\chi^2 = \sum_i [V(P_i) - E(P_i)]^2. \quad (5)$$

图 5 所示为在不同死区时间下(0~8 ns)激光雷达光子计数数据方差计算结果中的均值与方差值的偏离程度。死区时间在 6.2 ns 以内时,方差值与均值的偏离程度随着死区时间的变化呈规律性的递增或者递减,并且在死区时间为 3.488 ns 时,方差值与均值取得最小的偏离差异,表明该系统的死区时间应为 3.488 ns。而当死区时间大于 6.2 ns 时,偏离程度的变化开始离散、无规律。图 6 所示为利用上述估算的系统死区时间(3.488 ns)对激光雷达光子计数数据进行修正后的结果。结果表明,数据堆栈修正后的整条光子计数数据廓线基本上服从泊松分布。

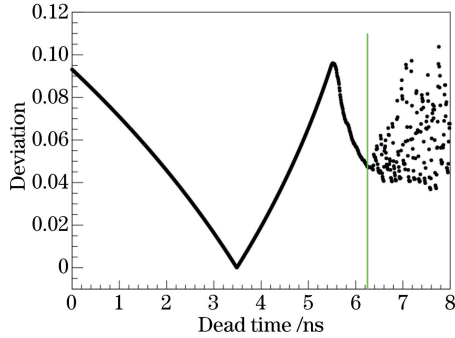


图 5 在不同死区时间下(0~8 ns)激光雷达光子计数数据方差计算结果中的均值与方差值的偏离程度。
绿线表示在此死区时间后,偏离程度的变化开始离散、无规律

Fig. 5 Deviation between the values of spatial variance and its mean in the calculation of spatial variance of lidar PC data with different dead time(0~8 ns). The green line denotes the region where the deviation variation begins to become discrete and irregular

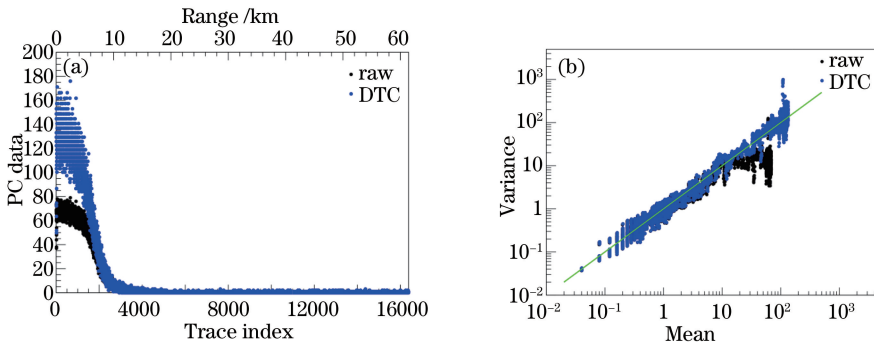


图 6 利用估算的系统死区时间(3.488 ns)对激光雷达光子计数数据修正后的结果。

(a) 激光雷达光子计数数据廓线;(b) 数据方差计算结果

Fig. 6 Calibration results of the pile-up effect of lidar PC data using the estimated dead time (3.488 ns).

(a) Profile of lidar data; (b) calculation results of data variance

为检验该估算方法在激光雷达光子计数系统中的实际应用,对多组激光雷达数据进行实际测算。图 7 所示为利用 420 组不同激光雷达数据估算的死区时间。结果表明,该方法估算的死区时间基本上在 3.20~3.60 ns 之间波动,而最终系统的死区时间估算结果为 3.402 ns。

5 分析与讨论

修正光子计数数据堆栈现象所利用的非麻痹性光子计数系统死区时间的估算方法,主要是利用激光雷达光子计数数据的泊松分布特性和样本方差与均值的相等关系进行评价。构建的空间方差计算模型(图 3)利用了激光雷达数据廓线的变化与距离的关系。进一步审视激光雷达的数据廓线时发现,如果大气中存在气溶胶层或者云层[图 8(a)],激光雷达回波信号在相应位置处有信号的突变。在方差计算中,气溶胶层或者云层的数据不再符合泊松分布[图 8(b)],即使利用死区时间对数据进行修正也无法使得这部分数据服从

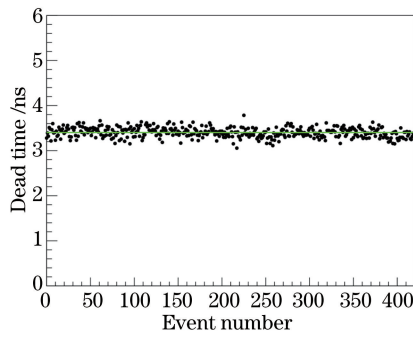


图 7 不同激光雷达回波信号估算的死区时间

Fig. 7 Estimation of dead time at different lidar return events

泊松分布。因此利用带有气溶胶和云层所造成的强烈米氏散射信号的激光雷达数据进行光子计数系统的死区时间估算时,会造成一定的估算误差。应用该方法进行死区时间估算时应尽量避免使用强米氏散射信号,而应尽可能多地使用晴朗天气条件下的大气分子瑞利散射信号或者拉曼散射信号。

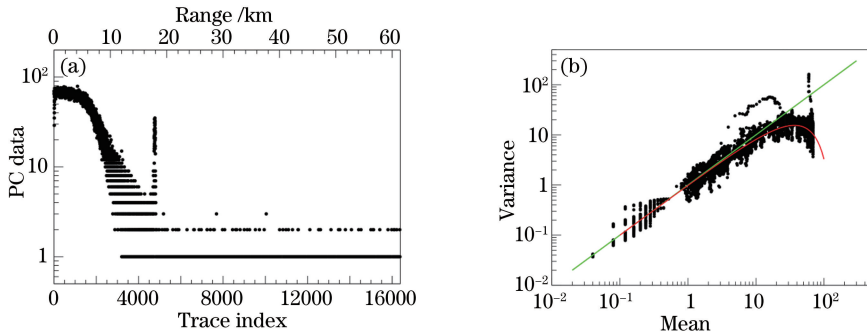


图 8 有云条件下的激光雷达光子计数数据及空间方差计算结果。(a)原始激光雷达数据;(b)空间方差计算结果

Fig. 8 Lidar PC data and calculation results of spatial variance under cloudy conditions.

(a) Raw lidar data; (b) calculation results of spatial variance

6 结 论

光子计数系统受到死区时间的影响,在激光雷达的近场强回波信号中造成光子计数数据的数据堆栈现象。正确地估算死区时间,修正堆栈数据,进而提高激光雷达的数据精度以准确表达大气状态信息的变化具有非常重要的意义。

利用激光雷达回波与距离的关系,构建了激光雷达数据廓线的空间方差计算模型,用于评价光子计数数据的泊松分布质量。方差计算结果表明,远场激光雷达回波光子计数数据基本服从泊松分布,而近场信号受到数据堆栈的影响,不服从泊松分布特性。利用死区时间对激光雷达光子计数数据进行修正时,同样会改变激光雷达光子计数数据的泊松分布特性,尤其是近场信号中受到数据堆栈影响的数据分布特性。利用此原理,最小化数据方差与均值的偏离程度,以正确估算系统的死区时间进而对数据堆栈进行修正,使得光子计数数据最大化地服从泊松分布,为后续的模拟数据和光子计数数据的拼接乃至气溶胶数据的反演提供高精度的光子计数数据^[20,22]。以 Licel 数据记录仪的长距离扫描激光雷达的数据为例,分析得到了 Licel 数据记录仪 TR40-160 的非麻痹光子计数系统的死区时间为 3.402 ns,并进行了数据堆栈的修正。

分析结果表明,该光子计数系统死区时间估算方法具有较强的稳定性和可靠性。该方法的局限性主要表现在数据的选取上,应尽量选择晴朗天气条件下的大气分子瑞利散射信号或者拉曼散射信号,而避免带有气溶胶和云信息的强米氏散射信号,以减小估算误差。

参 考 文 献

- 1 Liu Hao, Shu Rong, Hong Guanglie, *et al.*. Continuous-wave modulation differentia absorption lidar system for CO₂

- measurement[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(10): 104214.
- 刘 豪, 舒 嵘, 洪光烈, 等. 连续波差分吸收激光雷达测量大气 CO₂ [J]. *物理学报*, 2014, 63(10): 104214.
- 2 Hua Dengxin, Song Xiaoquan. Advances in lidar remote sensing techniques[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37 (S3): 21-27.
- 华灯鑫, 宋小全. 先进激光雷达探测技术研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(S3): 21-27.
- 3 Huang Z, Huang J, Bi J, *et al.*. Dust aerosol vertical structure measurements using three MPL lidars during 2008 China-U.S. joint dust field experiment[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(D7): D00K15.
- 4 Wang X, Huang J P, Zhang R D, *et al.*. Surface measurement of aerosol properties over northwest China during ARM China 2008 deployment[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(D7): D00K27.
- 5 Li Jun, Gong Wei, Mao Feiyue, *et al.*. Dual field of view lidar for observing atmospheric aerosols over Wuhan [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1201001.
- 李 俊, 龚 威, 毛飞跃, 等. 探测武汉上空大气气溶胶的双视场激光雷达[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1201001.
- 6 Hamamatsu Photonics K. Photon counting: Using photomultiplier tubes [OL]. [2016-03-01]. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_handbook_v3aE-Chapter6.pdf.
- 7 Licel GmbH. TR20-160 lidar transient recorder[OL]. [2016-03-01]. <http://www.licel.com/manuals/TRInstallation.pdf>.
- 8 Gao F, Song X Q, Wang Y F, *et al.*. Ultraviolet Raman lidar for high-accuracy profiling of aerosol extinction coefficient [J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(2): 95-97.
- 9 Imaki M, Takegoshi Y, Kobayashi T. Ultraviolet high-spectral-resolution lidar with Fabry-Perot filter for accurate measurement of extinction and lidar ratio[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(5A): 3063-3067.
- 10 Fu Yibin, Wang Yu, Zhang Tianshu, *et al.*. Signal acquisition system with simultaneous analog and photon counting measurement for lidar[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(8): 0814001.
- 付毅宾, 王 煜, 张天舒, 等. 模拟与光子计数融合的激光雷达信号采集系统设计[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0814001.
- 11 Wu Y H, Hu H L, Hu S X, *et al.*. Raman lidar measurements of tropospheric water vapor over Hefei[J]. *Chinese Optics Letters*, 2003, 1(7): 373-376.
- 12 Zhang Wei, Wu Songhua, Song Xiaoquan, *et al.*. Atmospheric boundary layer detected by Fraunhofer lidar over Qingdao suburb [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0628002.
- 张 薇, 吴松华, 宋小全, 等. 夫琅禾费暗线激光雷达探测青岛市郊大气边界层[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0628002.
- 13 Lü H F, Yi F. Gravity wave characteristics observed by lidar and radiosonde in Wuhan [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(6): 1436-1441.
- 14 Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. *Applied Optics*, 1981, 20(2): 211-220.
- 15 Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(5): 652-653.
- 16 Müller J W. Dead time problems[J]. *Nuclear Instrument Methods*, 1973, 112(S1-2): 45-57.
- 17 Donovan D P, Whiteway J A, Carswell A I. Correction for nonlinear photon-counting effects in lidar systems[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(33): 6742-6753.
- 18 Newsom R K, Turner D D, Mielke B, *et al.*. Simultaneous analog and photon counting detection for Raman lidar[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(20): 3903-3914.
- 19 Liu Z S, Li Z G, Liu B Y, *et al.*. Analysis of saturation signal correction of the troposphere lidar[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(11): 1051-1054.
- 20 Gao F, Bergant K, Filipčić A, *et al.*. Observations of the atmospheric boundary layer across the land-sea transition zone using a scanning Mie lidar[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2011, 112(2): 182-188.
- 21 Liu Z Y, Hunt W, Vaughan M, *et al.*. Estimating random errors due to shot noise in back scatter lidar observations[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(18): 4437-4447.
- 22 Gao F, Veberič D, Stanic S, *et al.*. Performance improvement of long-range scanning Mie lidar for the retrieval of atmospheric extinction[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2013, 122(122): 72-78.
- 23 Gerrard A J, Kane T J, Thayer J P, *et al.*. Consideration of non-Poisson distributions for lidar applications[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(9): 1488-1492.
- 24 Volkov S N, Kaul B V, Shefontuk D I. Optimal method of linear regression in laser remote sensing[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(24): 5078-5083.
- 25 Mielke B. Analog + photon counting[OL]. [2016-03-03]. <https://www.researchgate.net/publication/265226203>.