

探测器非线性响应对能见度激光雷达的影响

魏天问^{1,2**}, 王冲^{1,2}, 上官明佳^{1,2}, 尚祥^{1,2}, 夏海云^{1,2*}

¹中国科学技术大学地球和空间科学学院, 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 在光子计数模式的激光雷达应用中,回波信号的动态范围大。激光雷达的远场回波信号处于探测器的线性输出区间,无需进行校准;近场信号基本处于探测器的非线性响应区,需要进行校准。为了提高远场信号的信噪比,提出了一种校准方法。依据脉冲激光雷达方程,使用远场信号反演得到修正的近场信号,并与接收的回波信号作比较,得到校准因子。进一步使用校准因子修正前后的数据分别反演了能见度,并与能见度仪的探测结果作比较。结果显示:对于未修正的数据,远场信号反演与能见度仪得到的能见度平均偏差和标准差分别为 0.57 km 和 1.89 km,而近场信号的平均偏差大于 10 km。由修正后的数据得到的能见度与能见度仪的结果符合得很好,平均偏差和标准差分别为 0.43 km 和 0.76 km。

关键词 激光雷达; 校准因子; 非线性修正; 能见度; 单光子探测器

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.110402

Effect of Detector Nonlinear Response on Visibility Lidar

Wei Tianwen^{1,2**}, Wang Chong^{1,2}, Shanguan Mingjia^{1,2}, Shang Xiang^{1,2}, Xia Haiyun^{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 Sciences, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract The echo signals have a large dynamic range in the applications of photon counting mode lidar. The far-field echo signals of lidar are within the linear output range of detectors and thus no calibration is required. However, because the near-field signals are usually within the non-linear response area of detectors, it is necessary to calibrate the near-field signals. In order to improve the signal-to-noise ratio of far-field signals, a novel calibration method is proposed. According to the pulsed lidar equation, the corrected near-field signals are obtained by the retrieval of the far-field signals, and simultaneously are compared with the received echo signals to obtain a calibration factor. The data before and after correction by this calibration factor are further used to retrieve the visibility, respectively, which is compared with the detection results obtained by the visibility sensor. The results show that, for the uncorrected data, the average deviation and standard deviation between the visibility obtained by the far-field signals and that by the visibility sensor are 0.57 km and 1.89 km, respectively, while the average deviation exceeds 10 km for the near-field signals. The visibility obtained from the corrected data is in a good agreement with that by the visibility sensor. The average deviation and standard deviation are 0.43 km and 0.76 km, respectively.

Key words lidar; calibration factor; nonlinear correction; visibility; single-photon detector

OCIS codes 280.3640; 040.5160; 150.1488

1 引言

光电探测器是一种用来探测电磁辐射能量的装置,种类繁多,典型的器件有光电倍增管(PMT)、半导体光电二极管、半导体光导器件、热电偶等^[1]。

其中有一类单光子探测器,可以实现单个光子的探测,在量子通信^[2]、激光遥感^[3]、放射探测、光纤传感^[4]等诸多领域具有不可替代的作用。常用的单光子探测器有 PMT 单光子探测器、单光子雪崩光电二极管(APD)、上转换单光子探测器、超导纳米线

收稿日期: 2018-05-01; 修回日期: 2018-05-10; 录用日期: 2018-05-29

基金项目: 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-DQC025)

* E-mail: hssia@ustc.edu.cn; ** E-mail: twwei@mail.ustc.edu.cn

单光子探测器等^[5-8]。

单光子探测器在使用过程中需要考虑非线性响应问题。该现象指的是,当输入光强过大时,超出了探测器的线性工作范围,输出的计数与输入的光强不再成正比。若不进行校准,将会直接影响输出的准确性^[9-10]。

在激光雷达应用中,雷达回波信号的强度随距离的增大而快速衰减,其动态范围大。通常为了提高远场探测的能力,因近场信号基本处于探测器饱和和工作状态,需要对近场信号进行校准^[5-6,11]。以能见度激光雷达为例,本文提出了一种对单光子探测器非线性响应校准的实验方法,得到了校准因子,使用校准因子对激光雷达的原始回波信号进行了修正。比较了根据修正前后的数据反演的能见度与能见度仪的探测结果,分析了单光子探测器非线性响应对能见度激光雷达的影响。

2 原理

2.1 单光子探测器的非线性响应

造成单光子探测器非线性响应的因素有很多,具体分析如下:

对于工作在光子计数模式下的 PMT,当有光子打到阴极后,从阴极发射出光电子,在经倍增极放大的过程中,由于不同的电子具有不同的初速度和飞跃路径,它们到达阳极的时间有所差别,因此阳极输出的将是展宽的脉冲电流,脉冲宽度一般为 10~20 ns。当入射光子计数率较大时,PMT 阳极输出的就有可能由两个或多个单光子脉冲电流叠加所形成的幅度较高、宽度更宽的脉冲,这种现象通常被称为脉冲堆积^[12-13]。脉冲堆积导致探测器的实际输出比真实值小,产生了非线性效应。

对于 APD,当有光子到达探测器时,APD 发生雪崩并产生一个电流脉冲信号。为了探测下一个光子,APD 必须迅速停止雪崩,恢复到接收光子之前的状态。这段恢复时间称为死时间,死时间内 APD 不会对进入的光子产生响应^[14]。因而死时间内进入探测器的光子将会被漏计,漏计同样使得探测器的实际输出比真实值小,产生了非线性效应。

为了提高探测器的线性工作范围,可以使用校准因子对输出进行校准。真实光子计数率 C_i 和探测器输出计数率 C_o 。满足以下关系^[15]

$$C_i = \frac{C_o \cdot f - C_d}{\eta}, \quad (1)$$

式中: f 为探测器的校准因子; η 为探测器工作波长

的量子效率; C_d 为暗计数率。校准因子 f 是输出计数率 C_o 的函数,一般输出计数率越大,校准因子越大。在探测器的线性工作范围内, f 等于 1。

2.2 脉冲激光雷达方程

脉冲激光雷达向指定方向发射一系列激光脉冲,并接收路径上气溶胶和分子的后向散射回波信号,通过对回波信号的处理来反演路径上的大气参数信息。根据脉冲激光雷达方程^[16],一个激光脉冲发射后,距离 R 处返回的光子计数率为

$$N(R) = \frac{E_o}{h\nu} \frac{c}{2} A \frac{O(R)}{R^2} \beta(R) \exp \left[-2 \int_0^R \alpha(r) dr \right], \quad (2)$$

式中: E_o 为脉冲能量; h 为普朗克常数; ν 为激光频率; c 为光速; A 为接收望远镜的有效接收面积; $O(R)$ 为几何重叠因子。对于弹性散射激光雷达, β 为气溶胶后向散射系数, α 为大气总消光系数。对于均匀介质, β 和 α 都是常数。

若大气介质水平分布均匀,则(2)式可简化为

$$N(R) = C \cdot R^{-2} \exp(-2\alpha R), \quad (3)$$

式中: C 为常数。(3)式两边同乘 R^2 并取对数后得到

$$\ln(N \cdot R^2) = \ln C - 2\alpha R, \quad (4)$$

可以看出, $\ln(N \cdot R^2)$ 是 R 的一次函数,利用这一关系对原始回波信号作标定,可以得到真实回波信号。

3 实验系统

图 1 是系统原理图及实物图。触发器(trigger)发出电信号控制驱动器(driver)和采集卡(MCS),532 nm 激光器在驱动器的驱动下发射脉冲激光,脉冲激光经准直器(collimator)水平出射到大气中。回波信号由接收望远镜(telescope)接收后,经过干涉滤波片(IF)滤除杂光,被待校准探测器(detector)探测,并被采集卡记录,最后由计算机(computer)处理数据。其中探测器采用的是滨松公司的 H7421-40 型光子计数探头。系统关键参数见表 1。

需要指出的是,由于实验测量的是实际大气的长程消光系数,(2)式的求解需要假设大气水平介质分布均匀,而现实中并不存在绝对均匀的大气,大气中气溶胶浓度随距离的差异及随时间的变化会对结果带来一定的误差,但是可以选择下垫面均匀、远离污染源的地区进行实验,尽可能减少大气水平分布不均匀造成的影响。

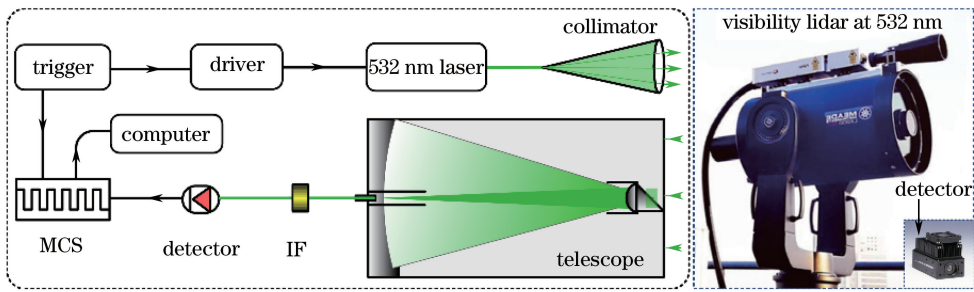


图 1 实验数据采集系统

Fig. 1 Acquisition system of experimental data

表 1 系统关键参数表

Table 1 Key parameters of system

Parameter	Value
Wavelength /nm	532
Pulse energy /mJ	15
Pulse duration /ns	7
Pulse repetition rate /Hz	50
Collimator aperture /mm	80
Telescope aperture /mm	300
Detector dark count /Hz	100
Detector count linearity /MHz	1.5

4 数据处理

4.1 原始数据

图 2(a)是由实验系统测出的一组原始回波信号,即探测器输出计数率 n_0 与距离 R 的数据。从图中可以看到,7 km 之后的计数率基本保持不变,此时的计数主要来自大气背景辐射和探测器本身的暗计数。选取 7 km 之后的数据取平均后作为噪声计数率 n_b 。此外,由于实验地点在城区,环境较复杂,原始数据中出现了几处凸起的峰,经实地考察发现与当地的公路及建筑施工有关,后续处理过程去除了这些数据。

需要指出的是,实验采用的是双轴系统,采集到的回波信号将受到几何重叠因子和探测器非线性响应的共同影响。实验中,通过调节发射光束和望远镜的视场,尽量压缩几何因子的影响范围。为了确定几何因子的影响范围,通过降低发射脉冲能量来保证较近距离处的回波信号处于探测器线性工作范围内。忽略降低脉冲能量对光束质量造成的影响,根据采集的回波信号,分析发现 1.5 km 之后的数据已经不受几何因子的影响,因此后续的处理过程都选择 1.5 km 之后的数据。

4.2 校准因子的导出

由于探测器的非线性输出,回波信号的部分数

据出现失真,需要对其进行修正。考虑(1)式,一方面探测器输入计数率 C_i 包括两部分:脉冲回波信号计数率 N 和大气背景辐射计数率。另一方面噪声计数率 n_b 中也包含两部分,即探测器暗计数和大气背景辐射计数。因此可以得到

$$N = \frac{n_0 f - n_b}{\eta} \quad (5)$$

当计数率 n_0 较小时,探测器工作在线性范围,此时校准因子 f 等于 1。记 $n = n_0 - n_b$,则(5)式简化成

$$N = \frac{n}{\eta} \quad (6)$$

作出 $\ln(n \cdot R^2)$ 的图像,如图 2(b)所示。从图中可以看出,远距离处,信噪比低,波动较大;中间区域线性关系较好,说明探测器处于线性工作范围内;近距离处明显偏离线性关系,这是因为计数率高,超出了探测器的线性工作范围。选取信噪比较高同时计数率又较低(对应计数率小于 0.5 MHz)的一段数据,对这段范围的数据作线性拟合,得到拟合直线,结合(4)式和(6)式,可以得到

$$\ln(\eta N R^2) = a \cdot R + b, \quad (7)$$

式中: a 、 b 分别为线性拟合直线的斜率和截距。显然(7)式适用于整个距离范围的数据。

进一步,得到回波信号光子计数率 N ,即

$$\eta N = R^{-2} \exp(a \cdot R + b), \quad (8)$$

最后,由(5)式得到探测器的校准因子

$$f = \frac{\eta N + n_b}{n_0} \quad (9)$$

图 2(c)为探测器输出计数率 n_0 与真实计数率 $\eta N + n_b$ 的关系,校准因子与 n_0 的关系如图 2(d)所示。可以看到,计数率很小时,校准因子波动很大,这是远距离处回波信号信噪比低的原因。对数据点拟合后得到图中的校准因子曲线,之后便可以使用该曲线对探测器的输出进行校准。

4.3 能见度反演

在 Klett 等^[17-18]的工作中详细介绍了消光系数

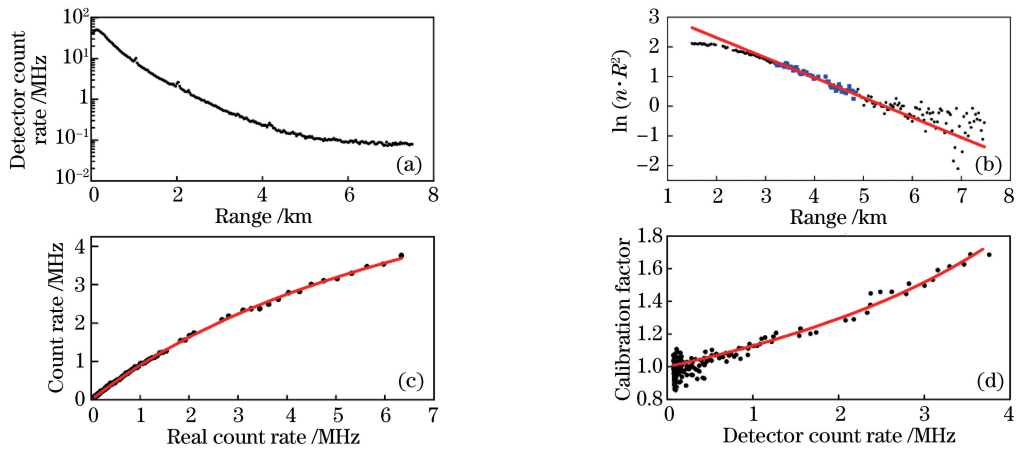


图2 回波信号校准原理图。(a)原始回波信号;(b)标定原理;(c)响应曲线;(d)校准因子

Fig. 2 Schematic of echo signal calibration.

(a) Raw echo signal; (b) calibration principle; (c) response curve; (d) calibration factor

的反演方法, Xia^[19]和 Shang等^[20]的工作中分析了不同波长激光雷达能见度与消光系数的关系, 这里根据 Shang介绍的方法, 使用原始数据和4.2节导

出的校准因子修正后的数据反演了能见度, 并与 Vaisala 能见度仪的探测结果作了对比, 如图3所示。

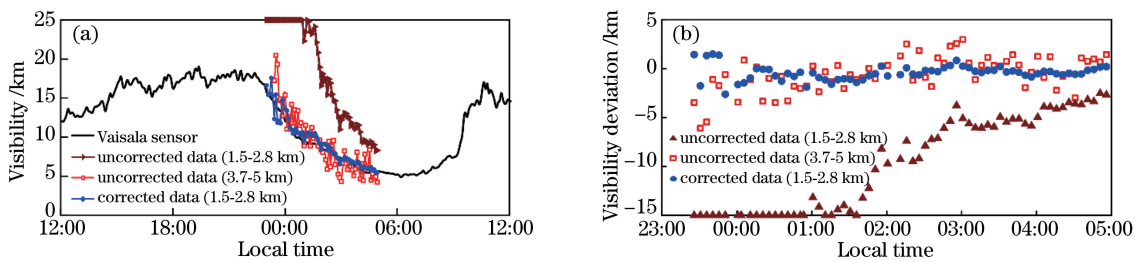


图3 能见度反演结果。(a)不同方式得到的能见度;(b)与能见度仪的偏差

Fig. 3 Retrieval results of visibility. (a) Visibility obtained by different ways; (b) deviation from that from visibility sensor

图3(a)中记录了从2017年4月21日12:00到4月22日12:00, 共24h的Vaisala能见度仪探测结果, 时间分辨率为5min。可以看出从午后开始, 到22:00左右, 能见度先是缓慢增加, 然后一直保持在17km左右的较高水平。此后能见度开始快速下降, 并在第二天07:00左右达到最小值约5km, 之后迅速回升到前一日中午的水平。

由于激光雷达采用后向散射信号, 在能见度高的时候, 回波信号弱, 同时上半夜城市的背景灯光干扰强, 信噪比很差, 所以这里只选取了532nm激光雷达从21日23:00到22日05:00的数据, 时间分辨率为5min。对于未修正的原始数据, 分别选择近场(1.5~2.8km)和远场(3.7~5.0km)的数据来反演能见度, 其中远场的数据基本处于探测器的线性工作区间, 得到的能见度与Vaisala能见度仪的探测结果符合得比较好, 但是由于信噪比低, 波动很大, 近场的数据虽然信噪比高, 但是已经处于探测器的非线性输出区间, 其数值已经失真, 因此反演出的

能见度与Vaisala能见度仪相比偏差很大。当使用校准因子对原始数据进行修正之后, 便可以在保证准确性的同时, 使用信噪比高的近场数据反演能见度, 其结果明显优于未经修正的数据, 如图3(b)所示。这也验证了对探测器非线性响应的校准是有效的。

4.4 误差与讨论

4.2节导出校准因子的过程主要有两方面的误差, 分别是数据的测量误差和数据处理方法的系统误差。数据测量的误差包括水平大气的不均匀、激光雷达系统输出能量的不稳定等。即使是水平大气, 在几千米的范围内也会不可避免地出现温度、密度、气溶胶浓度等的差异, 这些因素会导致后向散射系数和消光系数不再是常数, 从而造成反演得到的校准因子的误差。此外, 由于大气参数随时间是变化的, 故对回波信号进行较长时间的累加也会引入误差。系统误差来源于在数据处理过程中利用探测器工作在线性区的输出作线性拟合后对回波信号进

行修正。但是理想的线性区并不存在,根据文献[12]及导出的校准因子来看,即使在所选取的低计数率范围,数据也存在较小的相对误差,为了减少这种误差,应当尽量选择较低的输出数据,但同时应考虑信噪比的问题。

Vaisala 能见度仪的探测结果根据国际通用的标准在文中用于定标能见度^[20]。由图 3(b)的计算结果显示,对于未修正的数据,远场信号反演得到的能见度与能见度仪所测数据相比,平均偏差和标准差分别为 0.57 km 和 1.89 km;而近场数据平均偏差大于 10 km,说明探测器的非线性响应对能见度的反演造成严重误差。由修正后的数据反演得到的能见度与能见度仪所测的结果符合得很好,平均偏差和标准差分别为 0.43 km 和 0.76 km。

5 结 论

针对能见度激光雷达中单光子探测器非线性响应的问题,提出了一种校准方法。利用激光雷达的脉冲回波信号与距离的关系和低计数率时探测器线性输出的特点,通过对水平回波信号的处理,实现了探测器非线性输出的测量和校准。利用校准前后的数据分别反演得到能见度,并与 Vaisala 能见度仪的探测结果进行了对比,结果表明,该方法可以有效地修正探测器在计数率较大时的非线性误差,极大地提高了其线性工作的范围。最后对该方法的误差来源作简单分析。本研究仅以能见度激光雷达为例,介绍了反演单光子探测器校准因子的方法,显然该方法并不局限于此,也可用于其他类型激光雷达中单光子探测器的校准。

参 考 文 献

- [1] Träger F. Springer handbook of lasers and optics [M]. New York: Springer-Verlag, 2007: 503-560.
- [2] Zhang J, Itzler M A, Zbinden H, *et al.* Advances in InGaAs/InP single-photon detector systems for quantum communication [J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(5): e286.
- [3] Shanguan M J. Laser remote sensing with 1.5 μm single photon detector [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017: 16-23.
上官明佳. 1.5 μm 单光子探测器在激光遥感中的应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017: 16-23.
- [4] Shanguan M J, Wang C, Xia H Y, *et al.* Brillouin optical time domain reflectometry for fast detection of dynamic strain incorporating double-edge technique [J]. *Optics Communications*, 2017, 398: 95-100.
- [5] Xia H Y, Shanguan M J, Wang C, *et al.* Micro-pulse upconversion Doppler lidar for wind and visibility detection in the atmospheric boundary layer [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(22): 5218-5221.
- [6] Shanguan M J, Xia H Y, Wang C, *et al.* Dual-frequency Doppler lidar for wind detection with a superconducting nanowire single-photon detector [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(18): 3541-3544.
- [7] Eisaman M D, Fan J, Migdall A, *et al.* Invited review article: single-photon sources and detectors [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(7): 071101.
- [8] Yu C, Shanguan M J, Xia H Y, *et al.* Fully integrated free-running InGaAs/InP single-photon detector for accurate lidar applications [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14611-14620.
- [9] Tang D Y, Li H L, Chen X B, *et al.* Effects of detector's nonlinearity on frequency response of visible light communication system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(4): 0405002.
唐丹颖, 李洪磊, 陈雄斌, 等. 探测器非线性对可见光通信系统幅频响应的影响 [J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0405002.
- [10] Zhao W Q, Liu H, Liu J. Study on nonlinearity coefficient measurement for optical detector using infrared LED [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0912002.
赵伟强, 刘慧, 刘建. 基于红外 LED 的光学探测器非线性系数测量研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0912002.
- [11] Xia H Y, Dou X K, Sun D S, *et al.* Mid-altitude wind measurements with mobile Rayleigh Doppler lidar incorporating system-level optical frequency control method [J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15286-15300.
- [12] 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.
- [13] Ingle J D, Crouch S R. Pulse overlap effects on linearity and signal-to-noise ratio in photon counting systems [J]. *Analytical Chemistry*, 1972, 44(4): 777-784.
- [14] Xu L, Zhang Y, Zhang Y, *et al.* Research on the detection performance of Geiger-mode APD laser radar with accumulated detection [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(4): 0414003.

- 徐璐, 张宇, 张勇, 等. 盖革模式雪崩光电二极管激光雷达累积探测性能的研究[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0414003.
- [15] Xia H Y. Direct detection Doppler wind lidar based on aerosol backscattered signal with twin-channel Fabry-Perot etalon [D]. Suzhou: Soochow University, 2006: 60-62.
夏海云. 基于气溶胶后向散射的双边缘直接探测多普勒测风激光雷达研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2006: 60-62.
- [16] Spinhirne J D. Micro pulse lidar [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31(1): 48-55.
- [17] Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. Applied Optics, 1981, 20(2): 211-220.
- [18] Sun X H, Zhang T S, Lu Y H, *et al.* Optimization solution of atmospheric profile extinction coefficient by scanning lidar [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(3): 0314001.
孙新会, 张天舒, 陆亦怀, 等. 扫描激光雷达大气剖面消光系数优化求解[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0314001.
- [19] Xia H Y, Shentu G L, Shangguan M J, *et al.* Long-range micro-pulse aerosol lidar at 1.5 μm with an upconversion single-photon detector [J]. Optics Letters, 2015, 40(7): 1579-1582.
- [20] Shang X, Xia H Y, Dou X K, *et al.* Adaptive inversion algorithm for 1.5 μm visibility lidar incorporating *in situ* Angstrom wavelength exponent [J]. Optics Communications, 2018, 418: 129-134.