

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2018.02.004

基于 Licel 记录仪的激光雷达数据修正技术研究

高 飞, 周 毅, 黄 波, 王 萌, 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: 作为重要的大气遥感探测仪器,激光雷达在气候和环境监测中扮演越来越重要的角色。Licel 数据记录仪是专门针对激光雷达所开发的数据采集仪器,可同时提供模拟探测和光子计数探测模式的数据采集。针对激光雷达模拟数据和光子计数数据的特点,开展了光子计数数据的死区时间校正、模拟数据和光子计数数据的拼接拟合以及二者数据廓线错位的修正技术研究。结果表明,修正后的激光雷达回波具有更高的信噪比和位置精度,能更清晰地归一化表达大气状态信息的变化。

关键词: 激光雷达; Licel 数据记录仪; 模拟数据; 光子计数数据; 数据修正

中图分类号: TN958.98

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2018)02-0147-06

Study of the calibration techniques for lidar data using Licel transient recorders

GAO Fei, ZHOU Yi, HUANG Bo, WANG Meng, HUA Dengxin

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: As an atmospheric remote sensing tool, lidar plays an increasingly important role in the monitor of meteorology and environment. The Licel transient recorder is a data acquisition system combining the analog mode and the photon-counting (PC) mode, which is designed for application of lidar. For the characteristics of analog data, and PC data, the data calibration techniques are studied to improve the quality of lidar data trace and the uniform expression of atmospheric information, including the dead time correction of PC data, the merging technique between analog data and PC data, and the calibration method for the mismatch between analog data and PC data. The results show that the lidar return after calibration has a higher signal to noise ratio and more precision for detecting range, presenting the variation of atmospheric information uniformly and clearly.

Key words: lidar; Licel transient recorder; analog data; photon-counting data; data calibration

环境和气候的变化研究需要精确的、实时的大气参量作为数据输入,而激光雷达系统是最有发展前景的遥感测量仪器^[1-2]。研究表明,激光雷达不仅可以提供气溶胶消光、后向散射系数和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^[3-5]。

激光雷达以光波作为激励源,以大气分子和气溶胶颗粒物为媒介进行大气遥感探测。其系统主要包括四个部分:发射子系统采用窄脉冲激光器,并向大气空间发射高功率的窄脉冲激光束;接收子系统选择光学望远镜,收集激光与大气中物质(气溶胶、

大气分子)的相互作用所产生的大气散射回波信号;光学分光系统分析大气散射回波信号中由粒子引起的米散射、分子引起的瑞利散射、分子转动和振动产生的拉曼散射、荧光等光谱和能量信息;光电检测和数据采集子系统进行光电转换和信号的数据采集,进而实现大气参量的数据反演。激光雷达系统结构示意图如图 1 所示。

激光雷达系统的探测性能与各子系统的参数密切相关,而当前激光雷达的系统结构、光学分光、光电检测等都是专家学者研究的热点^[6-7]。光电倍增管作为光电转换的核心器件,可分别实现模拟探测和光子计数探测两种模式^[8]。其中模拟探测具有高

收稿日期: 2017-09-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41775035,41627807,41305023);中国博士后基金资助项目(2014M560799);陕西省科技计划资助项目(2014KJXX-64)

作者简介: 高飞,男,副教授,博士,研究方向为激光雷达大气遥感探测技术。E-mail:gaofei@xaut.edu.cn

通讯作者: 华灯鑫,男,教授,博导,博士,研究方向为激光雷达大气遥感探测技术。E-mail:dengxinhua@xaut.edu.cn

线性度的特点,适合低层大气参量的遥感探测;而光子计数探测模式具有高灵敏度的特点,适合远距离大气参量的遥感探测。Licel 数据记录仪作为世界上第一款同时具有模拟探测模式和光子计数探测模式的数据采集系统,已经成功应用在多家激光雷达系统的设计及升级改造中,提升了激光雷达系统的探测性能^[9-11]。

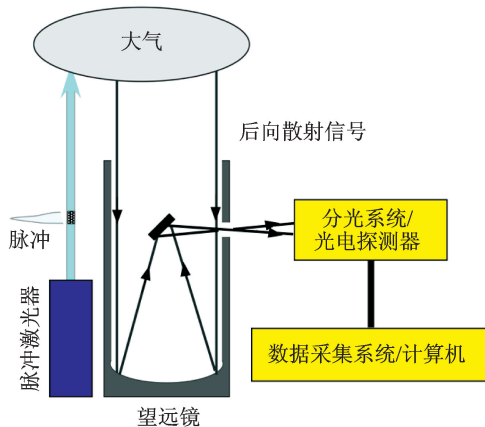


图 1 激光雷达系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of lidar system

本文针对应用到激光雷达系统中的 Licel 数据记录仪,通过分析激光雷达数据的特点,开展激光雷达数据的修正技术研究,进而提高激光雷达系统的探测性能和探测精度。

1 激光雷达 Licel 数据采集系统

Licel 是专门针对激光雷达应用所开发的数据采集系统,其可同时提供模拟探测和光子计数探测模式的数据采集^[12]。激光雷达所接收的光信号经光电倍增管转换后,被分成两路。一路进入模拟探测通道,经放大器、抗混叠滤波器、A/D 转换器后进入存储器,而另外一路进入光子计数通道,经放大、鉴频、计数后进入存储器。图 2 为数据记录仪 Licel TR40-160 的工作原理框图。根据实际激光雷达建设需求,可选择多种型号的 Licel 数据记录仪以满足测量需求。

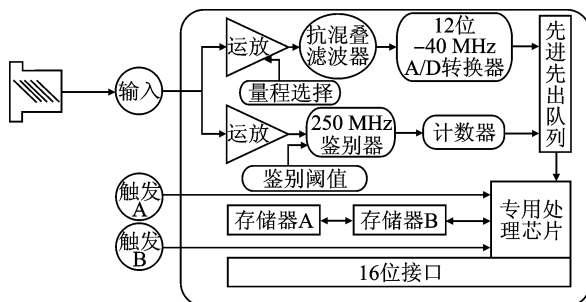


图 2 Licel 数据记录仪工作原理框图^[11]

Fig. 2 Schematic diagram of Licel transient recorder

2 激光雷达数据及其修正

为了更深入地了解数据记录仪 Licel TR40-160 (简称 Licel 数据记录仪)的特性,论文以长距离扫描米散射激光雷达系统^[13-14]为例,详细阐述基于 Licel 数据记录仪的激光雷达数据特点和数据修正技术。

2.1 激光雷达原始数据及特点

长距离扫描激光雷达系统采用数据记录仪 Licel TR40-160 作为数据采集系统,其模拟通道和光子计数通道的距离分辨率均为 3.75 m,记录长度为 16 380,其所对应的最远探测距离为 61.44 km。图 3 为典型的激光雷达原始数据的示例,其为 20 个激光脉冲累加的结果。从图中可以看出,近场信号的模拟数据保持高度的线性度,而光子计数数据却遭受数据堆栈的影响。但是,光子计数数据相比于模拟数据,对远场信号具有较高的灵敏度。因此,模拟探测模式和光子技术探测模式的结合可有效提高激光雷达系统的探测性能。此外,经数据特性分析发现,光子计数数据符合泊松分布,而模拟数据虽具有非泊松分布,但是具有转化成泊松分布的可能^[13]。

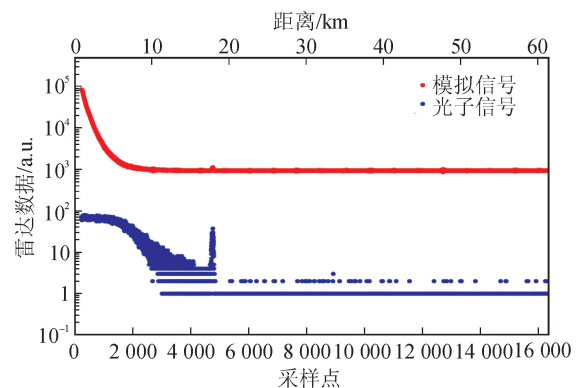


图 3 Licel 数据记录仪采集的激光雷达原始数据

Fig. 3 Example of the lidar raw data using Licel TR40-160

图 4 为激光雷达 20 个激光脉冲累加的光子计数数据和模拟数据相对应的数据分布图,蓝线标示出二者数据具有线性关系的区间(低计数率 1 MHz 和高计数率 20 MHz)。其中模拟数据值为 12 位数据采集卡的数据值,光子计数数据为光子数。从激光雷达方程^[15]可知,激光雷达回波信号的强度与距离的平方成反比,因此远距离的激光回波要远远小于近场的激光回波信号值。由于模拟模式和光子计数模式的原理差异,从图中可以明显地看出模拟数据叠加有一个偏置电压值,其主要是由采集卡的电子噪音造成的;光子计数数据受此影响却很小,因此光子计数探测模式更适于远场微弱信号的探测。而

对于近场信号(2 000 数据点内,7.5 km 探测距离内),光子计数数据呈现饱和趋势,这部分数据主要是由于光信号较强,堆栈现象发生而造成的,因此光子计数数据在近场强信号的数据采集中具有劣势。同样,云存在的地方,激光雷达回波信号中的米散射信号强度较大,在光子计数系统中也会遭受数据堆栈的影响。

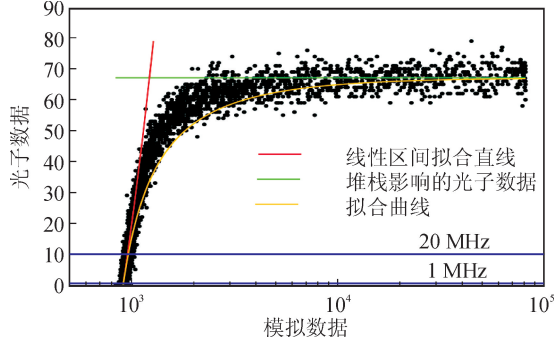


图4 光子计数数据和模拟数据相对应的数据分布图
Fig.4 Photon-counting (PC) data versus analog data distribution

2.2 光子计数数据的死区时间校正

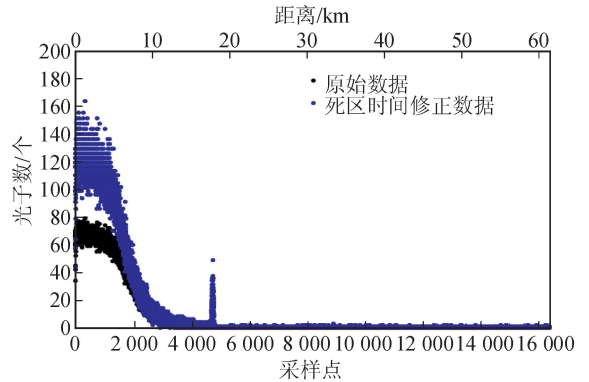
光电倍增管的光子计数模式适用于光信号比较微弱的情况,相比于其它探测模式来说也具有更高的信噪比。此外,光子计数模式还要求光电倍增管的响应和脉冲计数系统是线性的。然而,随着光信号的增强,光子计数器的响应将变成非线性的,也就是说光子计数器的计数率和入射光强度不再呈比例关系^[16]。光子计数器的非线性响应主要是由于脉冲叠加以及电子仪器的有限响应时间引起的,其造成了数据的堆栈现象^[17]。

光子计数器根据其其对光脉冲的表现可分为麻痹系统(Paralyzable system)和非麻痹系统(Non-paralyzable system)两种,而 Licel 数据记录仪中的光子计数系统是典型的非麻痹系统^[8,11],其测量的计数率 R 和实际的计数率 R' 的关系为:

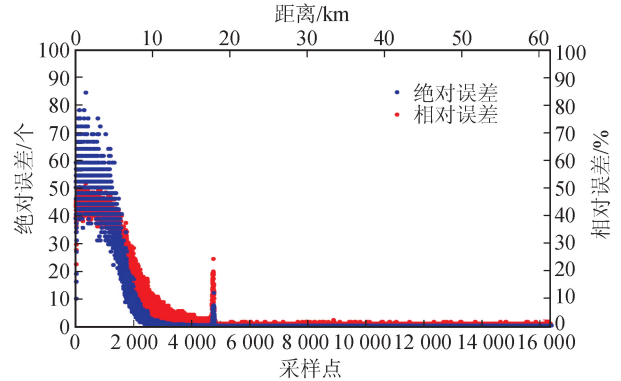
$$R' = \frac{R}{1 - R\tau_d} \quad (1)$$

式中, τ_d 为死区时间,是描述光子计数系统在强光照下非线性响应的一个重要参数。在不考虑光电倍增管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,进而产生电子脉冲的数据堆栈现象。通过构建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,计算得到长距离扫描激光雷达系统所应用的 Licel 数据记录仪的光子计数系统的死区时间约为

3.402 ns^[18]。图5表示激光雷达数据的死区时间修正效果。从光子计数原始数据和死区时间修正后的数据比对可以看出,近场激光回波信号(小于10 km)发生数据堆栈现象的数据线性度得到了极大的改善,从而使得表征大气状态信息的有效激光雷达数据的利用率得到大幅提高。同时,误差分析表明,死区时间的存在导致近场激光雷达光信号近50%的光子数未记录上,而远场信号的误差值相对较小。此外,云的存在使得激光回波信号增强,导致光子计数器的计数率增加而使得光子数的记录误差较大。数据特性分析显示,经死区时间校正后的激光雷达光子计数数据具有更优的泊松分布特性。



(a) 光子计数数据修正前后结果比对



(b) 光子计数数据死区时间修正的误差计算

图5 光子计数数据的死区时间校正效果
Fig.5 Dead time correction (DTC) effect on the photon-counting data

2.3 模拟数据和光子计数数据的拼接拟合

Licel 数据记录仪提供了模拟模式和光子计数探测模式的平行数据采集,为提高激光雷达系统的探测能力,尤其是整个数据长度内激光雷达回波的信噪比,有必要对激光雷达回波的模拟数据和光子计数数据进行拼接拟合,以归一化表达大气状态信息。

模拟数据 A_i 和光子计数数据 P_i 被认为在低计数率 1 MHz 和高计数率 20 MHz 之间的有效区间内具有一定的线性关系^[9-10],因此模拟数据可通过线性变换转化为类光子数据,从而实现二者的拼接

拟合。通过探寻线性有效区间内(1 MHz~20 MHz)模拟数据 A_i 和光子计数数据 P_i 的最小值 χ^2 , 可以得到线性转换系数 a 和 b , 即

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i - (b + aA_i)^2}{\sigma_i} \right) \quad (2)$$

其中, σ_i 表示光子计数数据的泊松误差; i 表示采样点, n 表示有效区间内的采样点数。

图4标明了该激光雷达数据示例中模拟数据和光子计数数据的线性关系部分(1 MHz~20 MHz), 并进行线性拟合分别得到了转换系数 a ($a=0.215$) 和 b ($b=-912.993$)。由此可利用转换系数 a 和 b 将模拟数据转换成为类光子数据, 其转换结果如图6所示。从图中可以看出, 模拟数据转换后的类光子数据和死区时间校正后的光子计数数据在某段探测距离内具有较大的数据重叠性。在此范围内选取二者具有最小数据差的点作为拼接拟合点, 就可得到整条(覆盖近场和远场)反映大气状态信息的激光雷达数据廓线, 如图7所示, 这极大地提高了激光雷达的探测范围。数据特性分析表明, 拼接拟合后的激光雷达数据基本符合泊松分布。

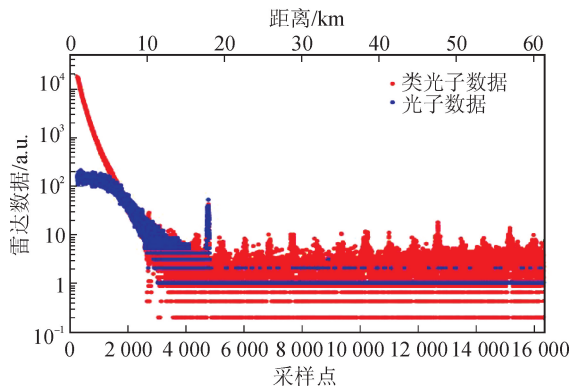


图6 模拟数据转换成类光子数据后和光子计数数据(死区时间校正后)的匹配情况

Fig. 6 Match condition for the transferred analog data and the photon-counting data after dead time correction (DTC)

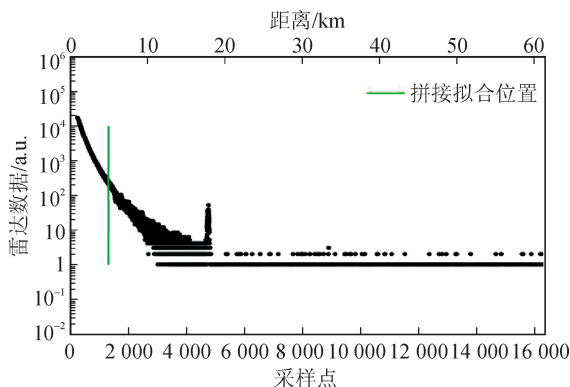


图7 模拟数据和光子计数数据拼接拟合后的激光雷达回波信号

Fig. 7 Merged trace of lidar return signal

2.4 模拟数据和光子计数数据廓线错位的修正

Licel 数据记录仪中的 AD 数据采集卡(模拟模式)和光子计数器(光子计数模式)是独立运行的单元, 二者数据在记录长度上具有一定的错位现象, 如图8所示。也就是说, 模拟数据和光子计数数据在大气状态信息的表达上具有一定的距离差异性, 因此需要对模拟数据或光子计数数据进行移位修正, 以更精确地表达大气状态信息。从图8可以看出, 此 Licel 数据记录仪的模拟数据相比于光子计数数据存在一定的滞后性, 可通过将光子计数数据右移或者将模拟数据左移进行数据修正以匹配模拟数据或光子计数数据。

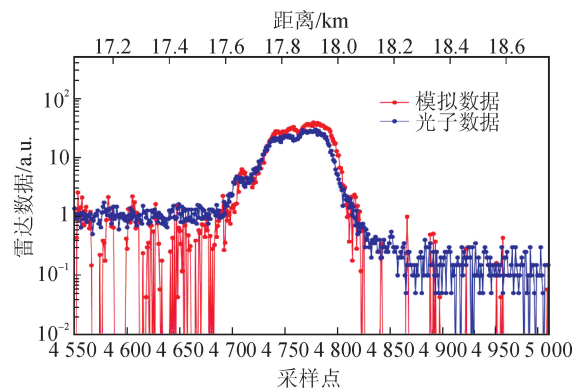


图8 模拟数据和光子计数数据的错位现象
Fig. 8 Mismatch between the analog and photon-counting data

模拟探测模式和光子计数探测模式是平行的数据记录模式, 因此二者反映相同的大气状态信息。当把模拟数据转换成类光子计数数据后, 若二者相互匹配, 则应具有最小的 χ^2 (见式(2)), 也就是说, 当二者数据具有最小的 χ^2 时, 模拟数据和光子计数数据具有最佳的距离位置对应关系。这为探寻模拟数据和光子计数数据的位置差提供了解决方案, 即:

$$\chi^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

考虑到激光雷达的原始坐标点由硬反射物的模拟数据坐标距离确定, 因此选择模拟数据作为参考数据。

图9为光子计数数据右移 N 点后利用式(2)所计算得到的 χ^2 结果。从结果中可以发现, 在光子计数数据右移4点后, 模拟数据和光子计数数据具有最小的 χ^2 。图10为光子计数数据右移4点后的模拟数据和光子计数数据在云信号表达上的匹配情况。由图10可知, 类光子数据和光子数据得到了较好的位置匹配。

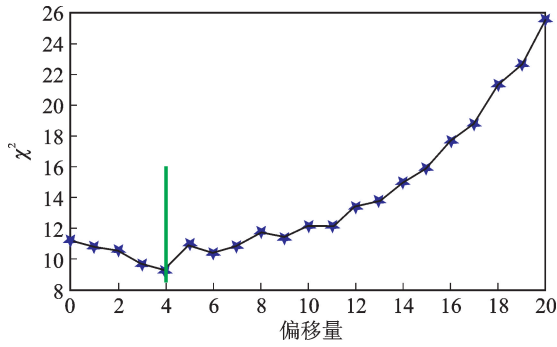


图9 光子计数数据右移 N 点后式(2)所得 χ^2 结果

Fig. 9 Calculation results of χ^2 by shifting N bins of photon-counting data using formula(2)

2.5 数据修正对长距离扫描激光雷达探测能力的提高

Licel 数据记录仪可同时提供模拟探测模式和光子计数探测模式的数据采集,以提高激光雷达的探测性能。通过对长距离扫描激光雷达数据采集所用 Licel 数据记录仪的光子计数系统的死区时间进行修正、对模拟数据和光子计数数据进行数据拼接

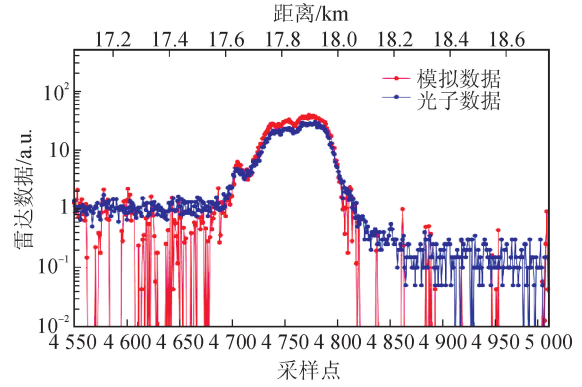


图10 光子计数数据右移4点后的模拟数据和光子计数数据的匹配情况

Fig. 10 Good match between analog data and photon-counting data after 4-bin left-shift of analog data

以及错位修正,使得长距离激光雷达的扫描探测距离实现大幅提升,为采用多角度方法反演气溶胶光学特性提供更佳的数据支持。图 11 为长距离扫描激光雷达数据修正前后对比图。比较图 11(a)和(b)可知,水平探测距离从图 11(a)的不足 15 km 提高到图 11(b)的 25 km,极大地提高了 RHI(Range-Height Indicator)扫描图的质量。

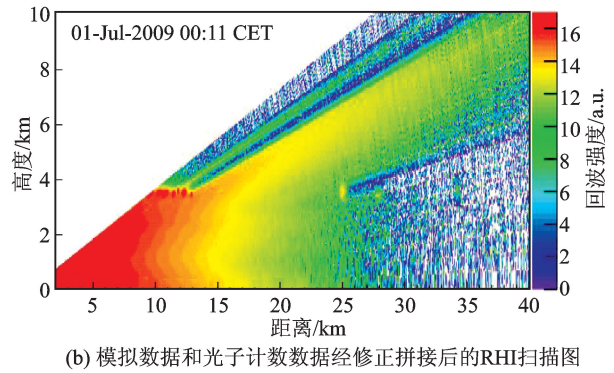
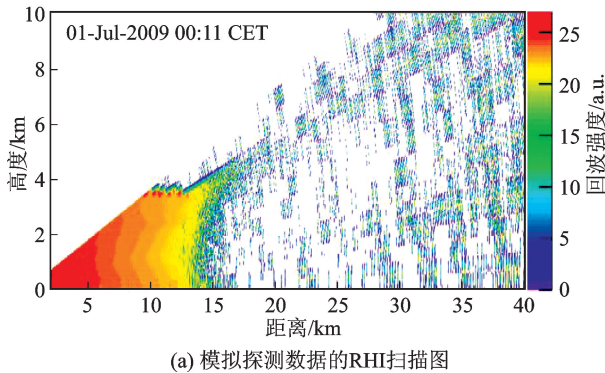


图 11 长距离扫描激光雷达数据修正前后对比图

Fig. 11 Comparison of the RHI scans displaying logarithm RSCS based on before and after correction

3 结 语

Licel 数据记录仪应用于激光雷达系统的数据采集时,可同时提供模拟探测和光子计数探测两种模式。模拟数据和光子计数数据具有较大的数据差异性。模拟数据受电子噪声的影响较大,存在一个较大的偏置电压值,具有线性度高的特性,可有效反映近场激光回波信号;光子计数数据在强信号下受到死区时间的影响而易产生数据堆栈现象,具有高灵敏度的特点,在远场微弱激光回波信号检测中具有优势。

通过空间方差数学计算模型来评价光子计数数据的泊松分布质量,可得到光子计数系统的死区时

间。长距离扫描激光雷达的数据记录仪 Licel TR40-160 的光子计数系统的死区时间约为 3.402 ns,近场信号经数据堆栈修正后得到了极大的改善,数据利用率得到了大幅提高。通过探寻模拟数据和光子计数数据在线性关系区间(1 MHz~20 MHz)的转换系数,将模拟数据转换成类光子计数数据,并选择具有最小数据差的点作为拼接拟合点,进而实现大气状态信息的激光雷达数据归一化表达。此外,通过比较云信号处的模拟数据和光子计数数据,发现二者存在距离差异性。通过将光子计数数据右移并探寻具有最小 χ^2 的位置,确定二者数据的最优位置差为 4 点,进而对数据进行修正,实现大气状态信息位置的精确表达。

为验证数据修正效果,将长距离扫描激光雷达的模拟数据 RHI 扫描图以及模拟数据和光子计数数据经修正、拼接后的 RHI 扫描图进行比较,发现数据拼接极大地提高了 RHI 扫描图在远场信号中的表达。

参考文献:

- [1] 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(增刊): 21-27.
HUA Dengxin, SONG Xiaoquan. Advances in lidar remote sensing techniques [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S): 21-27.
- [2] 华灯鑫. 大气探测激光雷达技术进展及应用瓶颈 [C] // 中国气象学会. 第 33 届中国气象学会年会 S18 雷达探测新技术与应用. 北京: 气象出版社, 2016: 16.
- [3] 刘金涛, 陈卫标, 刘智深. 高光谱分辨率激光雷达同时测量大气风和气溶胶光学性质的模拟研究 [J]. 大气科学, 2003, 27(1): 115-122.
LIU Jintao, CHEN Weibiao, LIU Zhishen. A simulation of simultaneously measuring wind and aerosol optical properties using high spectral resolution lidar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(1): 115-122.
- [4] BEHREND A, NAKAMURA T, ONISHI M, et al. Combined Raman lidar for the measurement of atmospheric temperature, water vapor, particle extinction coefficient, and particle backscatter coefficient [J]. Applied Optics, 2002, 41(36): 7657-7666.
- [5] ZHAO P T, ZHANG Y C, WANG L, et al. Measurement of tropospheric CO₂ and aerosol extinction profiles with Raman lidar [J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6(3): 157-160.
- [6] 高飞, 华灯鑫, 吴敏, 等. 光束品质因子 M^2 对非同轴激光雷达探测性能的影响 [J]. 光学学报, 2008, 28(9): 1649-1654.
GAO Fei, HUA Dengxin, WU Min, et al. Effect of M^2 factor of laser beam for a non-coaxial lidar system [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(9): 1649-1654.
- [7] MAO F Y, GONG W, LI J. Geometrical form factor calculation using Monte Carlo integration for lidar [J]. Optics and Laser Technology, 2012, 44(4): 907-912.
- [8] NAU V J, NIEMAN T A. Photometric instrument with automatic switching between photon counting and analog modes [J]. Analytical Chemistry, 1981, 53(2): 350-354.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] GAO F, VEBERİĆ D, STANIĆ 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.
- [12] ZHANG Y P, YI F, KONG W, et al. Slope characterization in combining analog and photon count data from atmospheric lidar measurements [J]. Applied Optics, 2014, 53(31): 7312-7320.
- [13] GAO F, BERGANT K, FILIPCIC 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.
- [14] GAO F, STANIĆ S, BERGANT K, et al. Application of the ultraviolet scanning elastic backscatter lidar for the investigation of aerosol variability [J]. Remote Sensing, 2015, 7(5): 6320-6335.
- [15] KLETT J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns [J]. Applied Optics, 1981, 20(2): 211-220.
- [16] NEWSOM R K, DAVID D T, BERND M, et al. Simultaneous analog and photon counting detection for Raman lidar [J]. Applied Optics, 2009, 48(20): 3903-3914.
- [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] 高飞, 李松辉, 李婉婉, 等. 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 [J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0528002.
GAO Fei, LI Songhui, LI Wanwan, et al. Application of spatial variance construction in correction of pile-up effects of lidar photon-counting data [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0528002.

(责任编辑 周 蓓)