

文章编号 1004-924X(2015)02-0408-07

微脉冲激光雷达中的光子计数死区时间瞬态效应

杨子健, 陈 锋, 李 抄, 吴太虎*

(军事医学科学院 卫生装备研究所, 天津 300161)

摘要:建立了光子计数器的模型,对光子计数器的死区时间效应进行了理论分析和实际测量,并提出了校正光子计数效应对微脉冲雷达信号影响的方法。利用马尔科夫链对微脉冲雷达的探测过程进行理论分析,并利用 MATLAB 对死区时间对光子计数产生的影响进行了计算和分析,描述了计数死区对探测结果产生的瞬态形态变化。在此基础上,搭建了微脉冲激光雷达光子计数的测量平台,实验验证了死区时间对于光子计数采集的影响。最后,测量了不同光强下死区时间对探测结果的抑制情况,给出了微脉冲激光雷达信号的校正方法。基于提出的方法对真实微脉冲激光雷达信号进行了校正实验。实验结果表明:在峰值功率为 100 mW 的 405 nm 激光照射下,光子计数在采集频率 100 MHz 时的散射光计数效应减少了 50%。文中的方法较好地解释了小尺寸目标的探测信号形态,实现了对光子计数探测结果的校正。

关键词:微脉冲激光雷达;光子计数;死时间;瞬态效应;马尔科夫链

中图分类号:TN958.98 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152302.0408

Transient effect of dead time of photon-counting in micro-pulse lidar

YANG Zi-jian, CHEN Feng, LI Chao, WU Tai-hu*

(Institute of Medical Equipment, Academy of Military Medical Sciences, Tianjin 300161, China)

* Corresponding author, E-mail: wutaihu@vip.sina.com

Abstract: A photon counter model was established to analyze theoretically and measure actually the effect of dead time of the photon counter in a micro-pulse lidar. A correct method for the influence of photon-counting on micro-pulse lidar signals was proposed. The Markov chain was used to theoretically describe the detection process of the photon counter in the micro-pulse lidar theoretically. Then, the influence of dead time on photon counting was calculated based on MATLAB, and the transient morphological changes of the results due to the dead time of photon counting were described. After the theoretical analysis and computer simulation, a photon counting platform based on micro-pulse lidar was performed to illustrate the effect of the dead time on counting photons. Finally, the effect of the dead time was measured under different light intensities, and the correction method of the micro-pulse lidar signal was given. A correction experiment was carried out based on the proposed method. The results show that the effect of photon counting on the scattering light has been reduced by 50%. It concludes that the proposed method has well explained the signal shapes of small targets and achieves the correction of the detection results of photon counts.

Key words: micro-pulse lidar; photon counting; dead time; transient effect; Markov chain

收稿日期:2014-07-29;修订日期:2014-08-27.

基金项目:国家十二五规划重大专项资助项目(No. AWS11Z005-4);国家科技重大专项资助项目(No. 2012ZX10004801)

1 引言

光子计数器作为探测器在微脉冲激光雷达^[1]系统中应用非常广泛,其探测灵敏度比普通的光电倍增管高2个数量级^[2]。但只有在信号光非常微弱的情况下,光子计数器才会工作在线性区域。当信号强度增加时,其输出信号不再正比于入射光强,这种非线性是由于光子计数器的输出脉冲的堆叠效应和探测电路的有限时间响应,即死区时间^[3,4]导致的(光子计数器在输出脉冲后需要一段时间进行重启,期间探测器无法工作)。在低计数率下,稀疏的输出脉冲能充分反映探测信号,但是当信号增强后,有限计数率导致探测器无法反映出信号的实际变化。K. Schätzel^[5]、G Brida^[6]等人对单光子计数的死区时间效应进行了分析和测量;D. P. Donovan等^[7,8]分析了在激光雷达系统中探测器的采集频率和甄别阈值对光子计数结果的影响。James^[9]、Donovan^[10]在气溶胶雷达系统设计中提到死区时间导致计数器非线性的校正。这些文献大多分析了死区时间对一段时间内计数平均值和稳态分布的影响。司马博羽,何伟基^[11,12]等提出引入马尔科夫链^[13]分析不同光强条件下光子计数瞬态分布受到的影响。

本文讨论了在短程生物气溶胶激光雷达系统中,非稳态条件下光子计数器死区时间对真实信号探测的影响。生物气溶胶激光雷达主要用于早期生物气溶胶预警,通过探测生物气溶胶的散射光和生物荧光信号实现气溶胶的甄别和浓度估算。实验发现,对于高浓度生物气溶胶,过强的信号光导致计数器的结果无法反映出正确的浓度。因此本文引入非齐次马氏过程^[14]对微脉冲雷达中光子计数探测的死区时间瞬态效应进行理论推导分析,并进行了实验验证。该方法有助于生物气溶胶信号的校正,特别是对于光学厚度较薄的目标区域,探测信号尚未达到稳态情况下信号的校正。

2 时间相关光子计数数学模型

2.1 理论推导

对于光子计数模块,不考虑死区时间条件下,

$$[P(0) \quad P(1)]_n = [1 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} e^{-\lambda_1 \Delta t} & 1 - e^{-\lambda_1 \Delta t} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e^{-\lambda_1 \Delta t} & 1 - e^{-\lambda_1 \Delta t} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} e^{-\lambda_1 \Delta t} & 1 - e^{-\lambda_1 \Delta t} \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

探测器在一段时间 T 内采集 K 个光子的概率服从泊松分布,即:

$$P(K, T) = \frac{e^{-\lambda T} (\lambda T)^K}{K!}, \quad (1)$$

式中: λ 为单位时间内入射的平均光子数。

假设光子计数的脉冲对分辨率为 t_R , 输出信号脉宽为 t_P , 则死区时间 t_d 即为:

$$t_d = t_R - t_P. \quad (2)$$

根据目前探测器的制作工艺,光子计数模块死区时间宽度与信号脉宽相若,可以使用马尔科夫更新过程对其进行建模分析。设定探测器在开放状态(置为0,表示之前未接收到光子)和封闭状态(置为1,表示已接收光子)之间进行切换;开放状态下探测器可以接收一个光子输出脉冲信号并转移到封闭状态,其转移概率为:

$$P(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (3)$$

经历死时间后探测器将恢复成开放状态,转移概率为:

$$P(t) = \begin{cases} 0 & t < t_d \\ 1 & t \geq t_d \end{cases}. \quad (4)$$

为便于分析,假设采集频率与信号脉冲频率相同,即 $\Delta t = t_P$ 。

当 $t_d \leq t_P$ 时,探测器状态只取决于前一时刻状态,其转移过程为一阶马尔科夫链,概率转移矩阵为^[9]:

$$\mathbf{Q}_{ij} = \begin{bmatrix} e^{-\lambda \Delta t} & 1 - e^{-\lambda \Delta t} \\ 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

当 $t_P < t_d \leq 2t_P$ 时,探测器状态取决于前两时刻状态,其转移过程为二阶马尔科夫链,设定切换状态(前一时刻,现在时刻)为(0,0),(0,1),(1,0)。其概率转移矩阵为:

$$\mathbf{Q}_{ij} = \begin{bmatrix} e^{-\lambda \Delta t} & 1 - e^{-\lambda \Delta t} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其他情况以此类推。

对于微脉冲雷达中使用的时间相关光子计数,记 $\lambda_n = \lambda(n\Delta t)$, 设定初始状态为开放状态,则 n 时刻概率状态为:

其中

$$\lambda_n \propto IF\left(\frac{n\Delta tc}{2}\right), \quad (8)$$

其中: I 为激光脉冲能量, $F\left(\frac{n\Delta tc}{2}\right)$ 为距离为 $\frac{n\Delta tc}{2}$ 处的大气散射截面分布。由于 λ_n 不恒定, 整个随机过程为非齐次马氏过程。

考虑到测量过程中每次循环测量初始状态等同前一周周期结束状态, 其状态并不恒定, 但是考虑到实际使用, 微脉冲雷达近距离信号 λ_n 不会出现突变, 其过程作为齐次马氏过程处理。而对于状态有限的马尔可夫链, 经历一段时间后必定进入平稳分布, 即:

$$[P_x \quad 1-P_x] \cdot \begin{pmatrix} e^{-\lambda_1 \Delta t} & 1-e^{-\lambda_1 \Delta t} \\ 1 & 0 \end{pmatrix} = [P_x \quad 1-P_x], \quad (9)$$

解得:

$$P_x = \frac{1}{2-e^{-\lambda_1 \Delta t}}. \quad (10)$$

因此每次循环初始状态不会影响后续过程。

当不考虑死区时间的效应时, 各时刻状态为:

$$[P(0) \quad P(1)]_n = [e^{-\lambda_n \Delta t} \quad 1-e^{-\lambda_n \Delta t}]. \quad (11)$$

2.2 计算仿真

假设探测器的量子效率为 0.4, 可以推算其 $\lambda_n \Delta t$ 最大为 0.8。为表示方便, 使用 λ_n 替代 $\lambda_n \Delta t$, 以表示单次采集光子照射到探测器的概率。

2.2.1 厚生物气溶胶

厚生物气溶胶指气溶胶的光学厚度足以使得光子计数探测达到稳定。将假设 λ_n 分布带入式(7), 结果如图 1 所示。

可以看到:

(a) 死区时间会降低采集光子的数目, 并且死区时间越长其降低的程度越大。

(b) 当信号变化剧烈时死区时间会导致理想信号形成过冲, 并形成“弛豫”, 死区时间越长, 其“弛豫”时间越长。

当 λ_n 持续稳定时, 光子计数的期望值会逐渐稳定, 但是当 λ_n 变化剧烈或持续时间较短时, 死区时间带来的数据抖动使得数据校正变得更为困难。

当微脉冲雷达多次光子计数进行循环叠加, 设循环次数为 n , 则单个位置采集数据的方差服

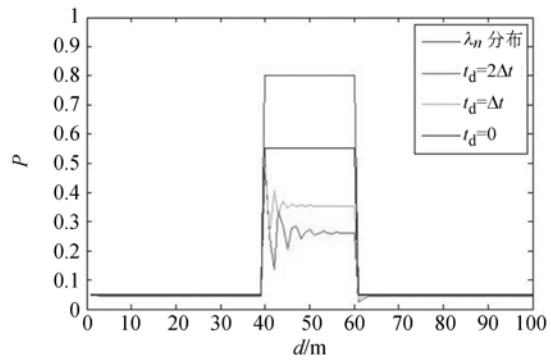


图 1 厚生物气溶胶光子计数对计数期望的影响

Fig. 1 Effect of thick biological aerosols on photon counting expectation

从二项分布 $\xi \sim B(N, P_n(1))$, 其方差为:

$$S_n^2 = NP_n(1)P_n(0). \quad (12)$$

其分布如图 2 所示, 在目标区域方差和期望的同向抖动表明在微脉冲雷达的测试区域极易形成上下震荡的特征信号。

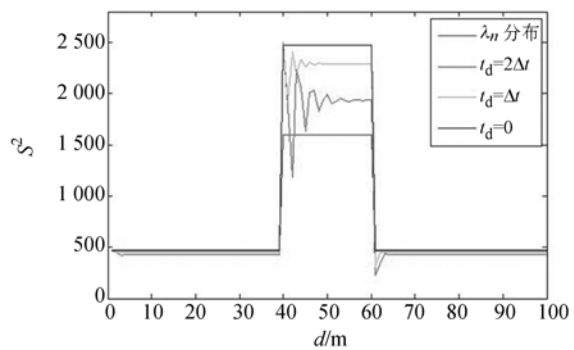


图 2 厚生物气溶胶光子计数对计数方差的影响

Fig. 2 Effect of thick biological aerosols on photon counting variance

对于厚生物气溶胶云团, 光子计数探测的死时间效应最终会达到平衡。但是在实际的测试过程中有 2 个因素会严重干扰探测的结果。(1) 入射光的光强。针对于薄生物气溶胶, 由于其在空间上分布范围较小, 可以认为其激发光光强不变; 而对于厚生物气溶胶, 激发光因大气或云团吸收导致的损耗不可忽略。(2) 散射信号光的衰减。根据经典雷达公式, 散射光光强随距离成 $1/R^2$ 衰减, 而云团间的二次吸收散射会进一步衰减信号光。这两种因素使探测结果随距离的衰减与仿真和实际的空间概率分布发生较大的偏离。

2.2.2 薄生物气溶胶

薄生物气溶胶指气溶胶的光学厚度不足以使得光子计数探测达到稳定。由于云团空间分布范围较小,可认为探测激发光强不变。对于微脉冲雷达短距离测量,受限于目标的小尺寸和雷达空间分辨率,目标信号的分布存在较大的随机性,图 3 所示为对各种薄的气溶胶分布类型的计算结果。

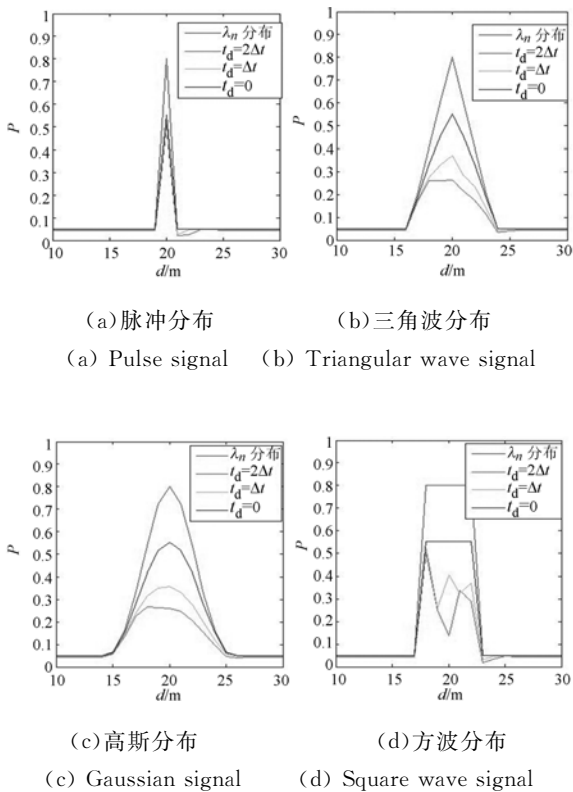


图 3 不同类型空间分布的薄生物气溶胶光子光子计数对计数期望影响

Fig. 3 Effect of different kind of thin biological aerosols on photon counting expectation

由图 3 可以看出,对于变化较缓慢的气溶胶云团,光子计数除抑制信号的幅度外将使信号最高值位置前移,改变信号的形状。而对于变化剧烈的分布,信号尚未稳定,其期望的震荡幅度剧烈。

2.2.3 随机噪声的影响

以上计算只考虑到光子计数对 λ_n 本身信号测量的影响。探测过程中不可避免会产生背景噪声和暗噪声,其期望和方差都会对结果产生影响。

a、噪声期望的影响

由于随机噪声的影响,允许在测量目标的前

一时刻光子计数器的状态矩阵发生微小变化 Δp , 则:

$$\begin{aligned}
 [P(0) \quad P(1)]_n &= [P(0) \quad P(1)]_{n-1} \cdot \begin{bmatrix} e^{-\lambda_n \Delta t} & 1 - e^{-\lambda_n \Delta t} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \\
 [P(0) + \Delta P \quad P(1) - \Delta P]_n &= [P(0) + \Delta P_0 \quad P(1) - \Delta P_0]_{n-1} \cdot \begin{bmatrix} -\lambda_n \Delta t & 1 - e^{-\lambda_n \Delta t} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \\
 \Delta P &= \Delta P_0 (e^{-\lambda_n \Delta t} - 1). \quad (13)
 \end{aligned}$$

即目标区域信号的偏移与前一时刻噪声干扰成正比。

b、信噪比的影响

光子计数死区时间对于探测的抑制不仅与噪声和信号的平均值有关,还与它们的信噪比有关,如图 4 所示。

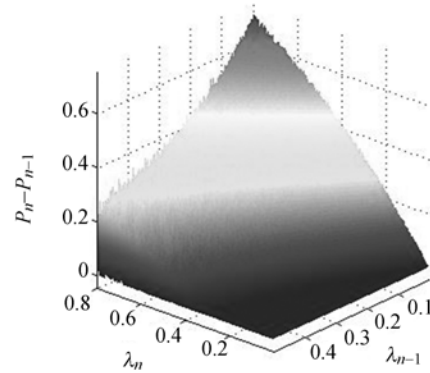


图 4 光子计数探测信号幅度与真实信号和噪声的关系

Fig. 4 Relationship between photon counting detection signal amplitude and true signal, noise

可以看出对于不同信号和信噪比,探测信号幅度变化有微弱震荡,其幅度变化与信号基本呈线性关系,与噪声呈反指数关系。

3 测量实验与结果

为验证光子计数器死区时间带来的信号畸变效应,基于日本滨松公司的 H10682-210 光子计数模块设计实验。H10682-210 光子计数模块线性计数区间 5×10^6 /s,暗计数 50/s,输出脉宽 10 ns,脉冲对分辨率 20 ns,即

$$t_R = 20 \text{ ns}, t_d = 10 \text{ ns}.$$

3.1 死区时间的验证

使用功率 100 mw 405 nm 激光束通过一片 OD2 的衰减片照射光子计数模块使其饱和,在采

集频率为 100 MHz 下,测量其时间相关光子计数数据,如图 5 所示。

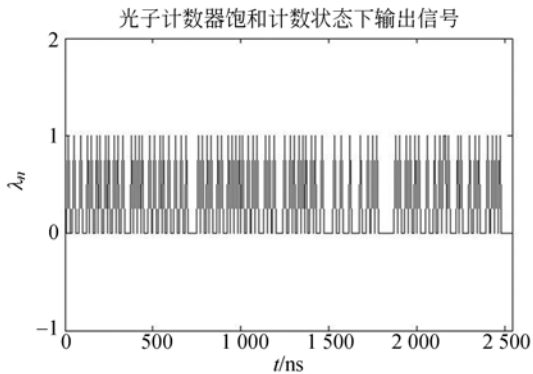


图 5 饱和状态下光子计数原始输出信号

Fig. 5 Original photon counting signal under saturated light conditions

图 5 表明光子计数模块存在死区时间且 $t_d = t_p$,但是存在极小概率出现例外情况,即两个脉冲信号相连。这可能是由于 t_d 略小于 10 ns 时采集带来的例外情况。

3.2 信号畸变的测量

3.2.1 实验平台介绍

平台基于一套微脉冲雷达系统,包括 1 台 405 nm 激光器,脉冲脉宽可调,峰值功率为 100 mW;1 台卡塞格林望远镜作为接收光路,口径为 200 mm。使用中心波长为 405 nm,带宽为 10 nm 的滤光片作为探测通道。

3.2.2 实验畸变测量

为对比信号的畸变,基于 FPGA 芯片编写了 2 套系统控制采集程序,控制采集为频率 100 MHz,程序结构分别如图 6、图 7 所示:

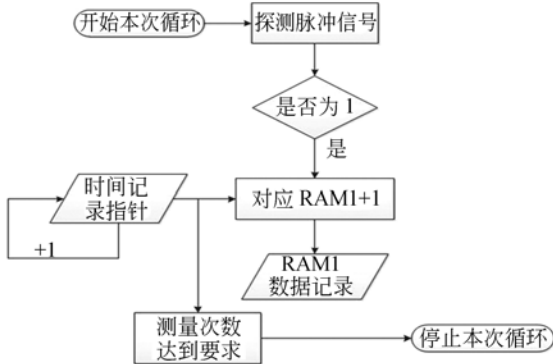


图 6 正常微脉冲雷达光子计数程序框图

Fig. 6 Block diagram of normal photon counting in micro-pulse lidar

程序 1(图 6)有简单时间相关计数功能,而在程序 2(图 7)中,通过 RAM2 记录测量前一刻的信号值为 0 的次数,当达到规定次数后结束测量,可以保证不同探测时刻之间最多探测光子数目相同,即可以去除死区时间的影响。

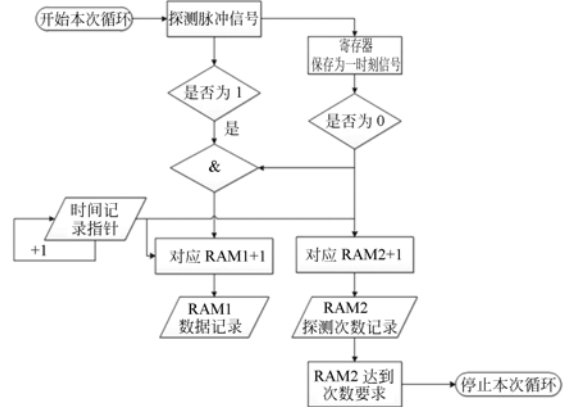


图 7 排除死区时间下微脉冲雷达光子计数程序框图

Fig. 7 Block diagram of normal photon counting in micro-pulse lidar without dead time

为验证死区时间对突变信号的影响,将一块黑色障碍物置于探测系统前方 40 m 处,为排除遥测系统几何因子的影响,保持障碍物的位置不变,将激光脉宽延长至 100 ns,光子计数模块前放置一片 OD3 衰减片,采集结果如图 8 所示。

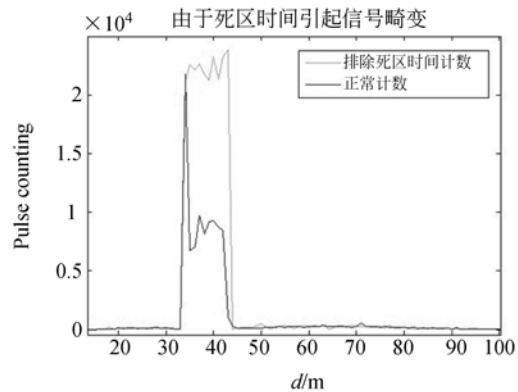


图 8 两个程序测试信号的对比

Fig. 8 Comparison of test signals of two procedures

3.3 信号光强对畸变的影响

微弱光信号由于探测光子稀疏,其不同信号之间不会相互抑制,因此死区时间的影响随光强增大逐渐显著。使用不同 OD 值衰减片对信号光

进行调节,测量结果如图9所示。

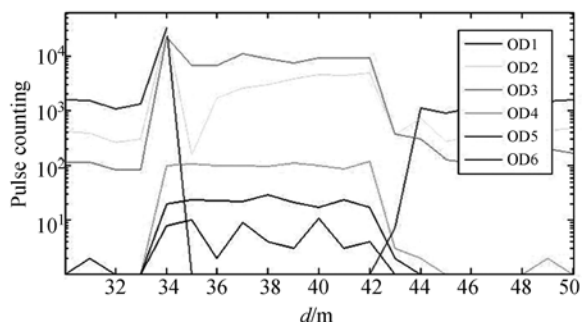


图9 光子计数器对不同强度信号光的原始计数

Fig. 9 Original signals of photon counter to different light intensities

可以看到对于使用 OD1 和 OD2 衰减片的数据,探测器完全饱和,持续输出高电平,后续计数为 0;对于 OD3,可以看到明显的死区时间效应,后续的数据效应逐渐减弱;对于 OD6,暗噪声已经占据重要作用。

3.4 微脉冲雷达信号的校正

基于以上理论推导和实验测量,对真实的生物气溶胶遥测信号进行校正和还原。

3.4.1 实验设计

基于微脉冲雷达遥测系统平台,激光脉宽 10 ns,使用光子计数器作为探测头,探测头前放置中心波长 405 nm、带宽 10 nm 的窄带滤光片。考虑生物样品的安全性,配置使用浓度约为 3×10^9 / ml 的枯草芽孢溶液,通过大功率气溶胶发生器,在探测器前方约 40 m 处喷洒到空气中,在黑暗条件下对其进行散射光信号测量,探测叠加次数为 36 880 次。

3.4.2 校正方法

根据式(5)和(7),可推出信号校正公式:

$$\lambda_n = -\ln\left(\frac{1 - P_{n-1} - P_n}{1 - P_{n-1}}\right), \quad (14)$$

式中: P_n 为计时 $n\Delta t$ 处探测计数与循环次数的比值。

3.4.3 实验结果

图 10 所示为探测数据的校正曲线。可以看

到光子计数死区时间效应对散射光信号的抑制最大可达到 50%。

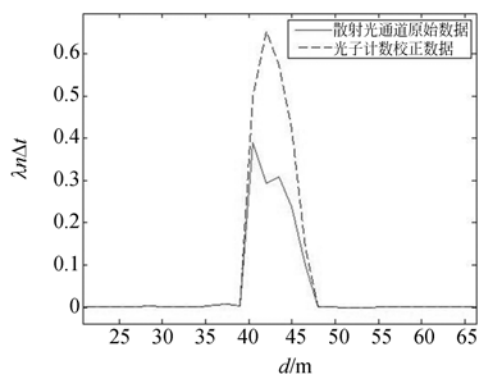


图10 枯草芽孢杆菌气溶胶散射光信号校正前后比较

Fig. 10 Comparison between corrected and uncorrected backscatter signals from a cloud of *B. subtilis*

由于探测物目标较近,并且测量前对其进行聚焦调整,因此没有对几何因子进行事先校正。对于荧光探测通道,由于信号较弱,光子计数的非线性特征不明显。而对于散射光通道,如图 10 所示,其结果受到比较明显的抑制。基于以上的模型对散射光数据进行校正,看出气溶胶在空中呈现近似高斯分布的特征,与实际相符,说明该方法具有较好的校正效果。

4 结 论

本文提出了分析和校正遥测系统光子计数器死区时间效应的方法。考虑小尺寸和薄光学厚度的云团变化剧烈,相关数据少,传统方法无法根据稳态统计数据进行准确的校正,本文提出了利用非齐次马氏链对其进行瞬态分析和有效校正的方法,并进行了实验验证。通过实验可以看到,对于散射光探测,这种抑制程度可达到 50%。

通过测量不同信号强度下死区时间对信号的抑制程度,结合本文算法,可以实现微脉冲雷达对目标区域信号较好的校正。

参考文献:

[1] SPINHIME J D. Micro pulse lidar[J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 1993, 31(1): 48-55.

[2] 卜绍芳, 尼启良, 何玲平, 等. 极紫外波段微通道板光子计数探测器[J]. *中国光学*, 2012, 5(3): 302-309.

BU SH F, NI Q L, HE L P, et al.. Microchannel

- plate photon counting detector in UV range[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 302-309. (in Chinese)
- [3] MÜLLER J W. Dead-time problems[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1973, 112(1): 47-57.
- [4] 黄宇, 张晓芳, 俞信. 光子成像静止点目标的管道滤波探测方法[J]. *中国光学*, 2013, 6(1): 73-79. HUANG Y, ZHANG X F, YU X. Pipeline filtering detection of stationary point targets in photon images [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1): 73-79. (in Chinese)
- [5] SCHÄTZEL K. Dead time correction of photon correlation functions[J]. *Applied Physics B*, 1986, 41(2): 95-102.
- [6] BRIDA G, CASTELLETTO S, DEGIOVANNI I P, *et al.*. Quantum efficiency and dead time of single-photon counting photodiodes: a comparison between two measurement techniques [J]. *Metrologia*, 2000, 37(5): 625.
- [7] 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.
- [8] 何伟基, 司马博羽, 苗壮, 等. 光子计数三维成像激光雷达反转误差的校正[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(10): 2488-2494. HE W J, SIMA B Y, MIAO ZH, *et al.*. Correction of reversal errors in photon counting 3D imaging lidar [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(10): 2488-2494. (in Chinese)
- [9] CAMPBELL J R, HLAVKA D L, WELTON E J, *et al.*. Full-time, eye-safe cloud and aerosol lidar observation at atmospheric radiation measurement program sites: Instruments and data processing [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19(4): 431-442.
- [10] 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.
- [11] 司马博羽, 陈钱, 何伟基. 单光子雪崩二极管的死时间效应分析[J]. *光学技术*, 2012, 38(5): 515-519. SIMA B Y, CHEN Q, HE W J. Analysis on the dead time effect of an SPAD [J]. *Optical Technique*, 2012, 38(5): 515-519. (in Chinese)
- [12] 何伟基, 司马博羽, 程耀进, 等. 基于盖格-雪崩光电二极管的光子计数成像[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(8): 1831-1837. HE W J, SIMA B Y, CHENG Y J, *et al.*. Photon counting imaging based on GM-APD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1831-1837. (in Chinese)
- [13] GARDINER C W. *Handbook of Stochastic Methods* [M]. Berlin: Springer, 1985.
- [14] 陆大经. *随机过程及其应用* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006. LU D Q. *Stochastic Processes and their Applications* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)

作者简介:



杨子健(1988—),男,辽宁本溪人,博士研究生,2010年于上海交通大学获学士学位,主要从事野战生物快速检验仪器与装备方面的研究。E-mail: alyan-gzj99@163.com



吴太虎(1962—),男,山西长治人,研究员、博士生导师,主要从事野战急救技术与装备系统集成方面的研究工作。E-mail: wutaihu@vip.sina.com

(本栏目编辑:曹金)

(版权所有 未经许可 不得转载)