

DOI:10.16136/j.joel.2023.10.0467

不同通量条件下光子计数激光雷达信号畸变的规律研究

李杰楷, 李志健, 赵艳, 来建成*, 李振华

(南京理工大学 理学院 信息物理与工程系, 江苏 南京 210094)

摘要:光子计数激光雷达在高通量条件下的输出信号会出现严重的畸变现象, 从而影响目标信息的提取, 因此, 研究信号畸变的变化规律是一个重要的理论与实践问题。为此本文建立了多触发条件下光子计数激光雷达信号计算的稳态正向递推模型, 该模型具有精度高、速度快, 且可准确反映物理过程等显著优势。结合正确性验证, 通过改变模型的信号幅度 N 、脉冲宽度 P_w 、背景噪声 N_b 和死区时间 T_d 等参数对激光雷达信号畸变的影响规律进行探究, 结果表明: 当死脉比 $R_{dp} \leq 2$ 时, 信号的畸变与 N 、 P_w 、 T_d 有关, 当 $R_{dp} > 2$ 时, 信号畸变仅与 N 有关; 同时在仿真实验结果中发现, 当探测损失率 $\alpha \leq 5\%$ 时, 可忽略信号畸变的影响, 该发现可作为区分高通量信号畸变 ($\alpha > 5\%$) 与低通量信号保真 ($\alpha \leq 5\%$) 的判别界限, 根据计算, 在某些特定条件下, 改变死区时间的大小会将高通量转化为低通量。上述结论相比于传统的基于光子计数率的“5%”准则更加精确地划分了高低通量与信号畸变的界限。

关键词:光子计数激光雷达; 光子计数; 信号畸变; 死区时间; 通量

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)10-1009-10

Research on signal distortion of photon counting lidar under various flux conditions

LI Jiekai, LI Zhijian, ZHAO Yan, LAI Jiancheng*, LI Zhenhua

(Department of Information Physics and Engineering, School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract: The output signal of photon counting lidar has serious distortion phenomenon under the high-flux condition, which affects the extraction of target information. Therefore, to investigate the change rule of signal distortion, this paper establishes the steady-state forward recursion model for signal calculation of photon counting lidar under the condition of multi-trigger. The model has many advantages, such as high precision, fast speed and accurate reflection of physical process. The influence of the echo signal distortion is explored by changing the signal amplitude N , the pulse width P_w , the background noise N_b and dead time T_d of the model. Results show that when the dead-pulse-ratio $R_{dp} \leq 2$, the signal distortion is related to N , P_w and T_d , when $R_{dp} > 2$, the signal distortion is only related to N . At the same time, our simulations show that when the detection loss rate $\alpha \leq 5\%$, the influence of signal distortion can be ignored, which can be used to distinguish high-flux signal distortion ($\alpha > 5\%$) and the fidelity of the low-flux signal ($\alpha \leq 5\%$). According to the calculation, changing the length of the dead time converts the high-flux to the low-flux under some specific conditions. Compared with the traditional "5%" criterion based on photon count rate, the above conclusion provides a more accurate boundary between the high- and low-flux and signal distortion.

Key words: photon counting lidar; photon counting; signal distortion; dead time; flux

* E-mail: laijiancheng@njust.edu.cn

收稿日期: 2022-06-24 修订日期: 2022-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(61971225, 62221004)资助项目

0 引言

光子计数激光雷达具有极高的探测灵敏度而被广泛应用于远距离目标测距^[1]、三维成像^[2-4]、非视域成像^[5-7]、对地遥感^[8]等领域。时间相关单光子计数(time-correlated single-photon counting, TCSPC)波形^[9]是通过多周期探测、计时起点的相关对齐、光子计数值累加得到的光子计数飞行时间分布的数据波形,该波形与激光脉冲回波有内在联系^[10,11]。脉冲激光回波由目标调制得到^[12],所以 TCSPC 波形与目标的特性有关。光子计数激光雷达通常工作在低通量条件下,入射通量服从 O'CONNOR^[13] 提出的低光子计数准则——“5%”规则,在此规则下的高通量,虽然对目标的探测效率高,但是 TCSPC 波形出现失真,波形中包含的目标信息并不准确,所以研究在不同通量条件下对信号畸变的规律尤为重要。

2002年,DEGNAN^[14]指出因为死区时间的存在,降低了目标的探测概率。GATT^[15,16]分析了单触发模式下不同死时探测效率与平均光子计数率之间的关系。ZHAO^[17]提出了一种求解多触发探测概率模型的组合方法,基于泊松分布信号,推出信号总探测概率和平均计数通用公式,分析了平均计数随死区时间等参数的变化规律。LI^[18]提出了适用于单触发和多触发的探测概率计算公式,分析了死区时间对盖革模式雪崩光电二极管激光雷达探测效率和测距性能的影响。WU^[19]研究了强背景光对检测概率的影响,提出适当的光学衰减可以提高探测性能。HUA^[20]提出了一种考虑后向散射和折射率的探测模型,揭示在水下用更高能量的脉冲或更近的距离并不一定能提高目标的探测概率。ZHANG^[21]建立一种新的死区时间可变的经验模型,得出在远距离探测时必须考虑脉冲堆积效应的影响。HOU^[22,23]改进了一种通用的迭代探测概率计算方法,分析了多个参数对典型死区时间波形失真的影响,并且对扩展目标的光子回波概率分布特性,讨论了光子测距误差与扩展目标类型和倾斜角间的变化规律。ZHANG^[24]考虑了目标表面特征,包括目标位姿和反射率,对探测概率的影响。以上大部分均只讨论死区时间对逐点检测的探测概率和测距精度的影响,而 HOU^[22]并没有对低通量下的信号畸变情况进行研究,此外,上述研究均采用了与发射脉冲时序同步的距离门,用以控制的单光子探测器在距离门的开启时段内上电工作。此设置条件下,背景噪声的死区时间对回波信号的屏蔽效应与回波信号在距离门中的前后位置是严格相关的。从控制变量的角度,此设置方式不利于准确表达波形失真的变化

规律。

为了更好地讨论信号畸变的规律,本文建立了多触发条件下光子计数激光雷达信号计算的稳态正向递推模型,具有精度高、速度快,且可准确反映物理过程的突出优势。在正确性验证的基础上,定义波形的探测损失率及相关系数等参数来详细地描述信号畸变的情况。与此同时,本文将利用探测损失率来重新定义通量判别界限。本文的研究对于波形失真程度判定、系统参数选取、以及后续的失真波形反演与信息提取具有重要价值。

1 光子计数激光雷达信号计算的稳态正向递推模型

本文中使用的激光脉冲波形为高斯型脉冲,设激光脉冲的幅值为 A ,脉宽为 P_w , t_d 为激光脉冲到目标的双程飞行时间,则激光脉冲 $F(t)$ 的表达形式为^[25]:

$$F(t) = A \cdot \exp\left[-\frac{(t-t_d)^2}{2\tau_d^2}\right], \quad (1)$$

式中, τ_d 为标准差,根据 JOHNSON^[26]有 $\tau_d = P_w / \sqrt{8\ln 2}$ 。

针对离散条件下某个时隙内的初级光电子数 $N(k)$ 由该时隙内所包含的信号光电子数 $N_s(k)$ 和噪声光电子数 N_b 两部分组成^[16],即:

$$N(k) = N_s(k) + N_b, \quad (2)$$

通常认为单光子探测器将数量大于 0 的初级光电子放大成为雪崩脉冲的概率为 100%,而雪崩脉冲被计时电路记录的概率也为 100%。因此,光子计数概率建模的关键是求解至少产生一个初级光电子的概率。

根据泊松响应模型理论^[14,15,27],在没有死区时间存在的情况下,第 k 个时隙内至少产生一个光电子的概率为:

$$P_0(k) = 1 - \exp[-N(k)]. \quad (3)$$

考虑死区时间效应,在第 k 个时隙探测到光电子的概率 $P(k)$ 由该时隙不在死区时间的概率 $P_{\text{non}}(k)$ 和在该时隙探测光电子的概率 $P_0(k)$ 共同决定^[18],即:

$$P(k) = P_0(k) \cdot P_{\text{non}}(k). \quad (4)$$

由文献[15]指出,对于多触发模式的探测过程,如果噪声光子速率 N_b 是恒定值,则噪声光子的探测概率最终会实现稳态,文献[19]称之为“连续波稳态(continuous wave steady state, CWSS)”,并给出了实现稳态时时隙内的探测概率 P_{CWSS} :

$$P_{CWSS} = \frac{P_0(k)}{\frac{1}{N_b T_d} + 1} \quad (5)$$

设系统在第 k_{CWSS} 个时隙之前已处于 CWSS, 从第 $k_{CWSS} + 1$ 个时隙起开始进入回波信号的范围。设时隙的长度为 τ , 则探测器的死区时间 T_d 占据 $d = T_d/\tau$ 个时隙。式(4)中的 $P_{non}(k)$ 由前序 $d - 1$ 个时隙的探测概率以及 k 时隙光子到达概率决定, 引入文献[18]的快速递推格式, 可得门控模式下 $P_{non}(k)$ 的表达式为:

$$P_{non}(k) = \begin{cases} P_{non}(k-1) - P(k-1) + P(k+d), & (k_{CWSS} + d \leq k) \\ P_{non}(k-1) - P(k-1) + P_{CWSS}, & (k_{CWSS} + 1 < k < k_{CWSS} + d) \\ 1 - (d-1)P_{CWSS}, & (k = k_{CWSS} + 1) \end{cases} \quad (6)$$

式(4)和式(6)形成递推关系, 给定入射光子流方程, 从而可计算理论探测概率的时间函数。

本文模型与文献[18]的区别在于, 对于门控模式而言, 本文模型假设在回波信号到达前的 d 个时隙处, 探测过程已实现了 CWSS, 因此从回波信号到达前的 d 个时隙开始, 直接引入稳态概率 P_{CWSS} 递推求解, 即可求出回波信号的探测概率时间函数;

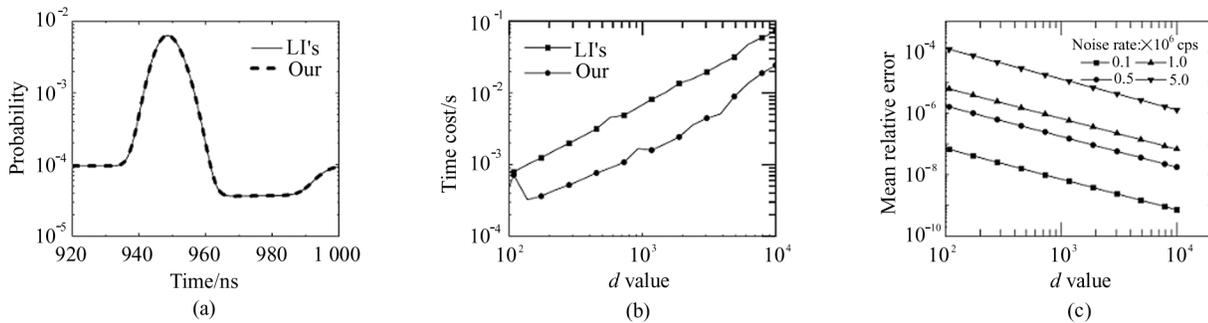


图 1 本文的模型和 LI 的模型^[18]在探测稳态实现之后的结果对比: (a) 回波信号的探测概率对比; (b) 计算耗时对比; (c) 相对误差对比

Fig. 1 Comparison of our model and LI's model^[18] when steady state is realized:

(a) Comparison of detection probability of echo signal; (b) Comparison of time cost; (c) Comparison of relative error

2 光子计数激光雷达信号畸变的评价指标

本文将在噪声稳定的情况下研究信号幅度、噪声、脉冲宽度以及死区时间对回波信号的探测损失率以及相关系数等方面的影响, 在讨论死区时间和脉冲宽度对信号畸变的影响时, 采用死区时间与脉冲宽度之比, 简称死脉比 R_{dp} , 作为自变量进行讨论, 即:

而文献[18]需要从距离门的第 1 个时隙开始, 逐个时隙向后递推计算, 才可求出回波信号的探测概率时间函数。显然, 假设 CWSS 已实现的前提下, 采用本文模型可以显著减少理论计算量。更重要的是, 由式(5)可知稳态实现时, 背景噪声的死区时间对回波信号的屏蔽效应与回波信号在距离门中的相对位置无关。从控制变量的角度看, 此特性有利于波形畸变的理论分析。因此, 本文涉及的波形畸变分析内容均采用 CWSS 假设。

为了验证本文模型的正确性, 采用如下默认计算参数: 信号幅度 $N = 1$, 噪声速率 $N_b = 10^6$ cps, FWHM 脉宽 $P_w = 10$ ns, 时隙宽度 $\tau = 100$ ps, 死区时间 $T_d = 45$ ns, 回波信号飞行时间为 950 ns。图 1 对比了 LI 的模型^[18]和本文模型在 CWSS 实现之后回波信号的探测概率时间函数、不同 d 值时的计算耗时、不同 d 值、不同噪声速率时回波信号的平均相对误差。图 1 中 d 值的变化是通过固定死区时间长度改变时隙宽度实现的。图 1 结果显示, 在上述参数下, 本文模型计算效率比 LI^[18]的模型计算效率提升约 5 倍。对于时隙宽度 $\tau = 100$ ps 的计算条件 ($d = 450$), 本文模型的平均相对误差小于 0.1%, 具有足够的计算精度。

$$R_{dp} = \frac{T_d}{P_w} \quad (7)$$

将回波信号的探测损失率划分为两段, 即上升沿探测损失率、下降沿探测损失率。以理想回波信号作为基准, 将其峰值作为中心, 峰值处对应的时隙为 k_{center} , 左右一倍脉宽处所对应的时隙分别作为波形的起始时隙 k_{start} 和终结时隙 k_{end} , 那么畸变波形左右两部分的探测损失率为:

上升沿探测损失率:

$$\alpha_{up} = \frac{\sum_{k=k_{start}}^{k_{center}} N(k) - N'(k)}{\sum_{k=k_{start}}^{k_{center}} N(k)} \quad (8)$$

下降沿探测损失率:

$$\alpha_{down} = \frac{\sum_{k=k_{center}}^{k_{end}} N(k) - N'(k)}{\sum_{k=k_{center}}^{k_{end}} N(k)} \quad (9)$$

波形整体的探测损失率表征所测波形与理想波形间的探测差别,即:

$$\alpha = \frac{\sum_{k=k_{start}}^{k_{end}} [N(k) - N'(k)]}{\sum_{k=k_{start}}^{k_{end}} N(k)} \quad (10)$$

式中, $N(k)$ 是没有畸变的人射光波形在第 k 个时隙里的光子数, $N'(k)$ 是畸变波形里第 k 个时隙里的光子数目。

利用相关系数 ρ 表征畸变波形与理想波形之间的相似程度,相关系数定义为:

$$\rho = \frac{\sum_{k=k_{start}}^{k_{end}} N(k) \cdot N'(k)}{\sqrt{\sum_{k=k_{start}}^{k_{end}} [N(k)]^2} \sqrt{\sum_{k=k_{start}}^{k_{end}} [N'(k)]^2}} \quad (11)$$

3 典型结果与分析

为了控制变量,使仿真结果不受回波信号在距离门中所处位置的影响,本文设定噪声的探测概率在信号到达前的 T_d 内已经实现稳态概率 P_{cwss} 。本节分析激光脉冲幅度 N 、脉冲宽度 P_w 、噪声 N_b 以

及死区时间 T_d 对波形畸变影响。

3.1 死区时间对波形畸变的影响

如图 2 所示,设置 $P_w = 10 \text{ ns}$, $N_b = 0.3 \times 10^6/\text{s}$,通过改变死区时间 T_d 的大小改变 R_{dp} 值,分别对信号幅度 $N = 0.01$ 、 $N = 1$ 和 $N = 3$ 进行计算,从而得到不同 R_{dp} 值条件下的回波信号。由图 2 (a)中显示,当 $N = 0.01$ 时,波形随死区时间的变化不大;当 $N = 1$ 和 $N = 3$,随着死区时间的增加,信号强度先是逐渐减小,后趋于稳定;波形的质心逐渐向前移动,如图 2(b)和(c)所示; N 越大,回波信号波形的下降沿的拖尾现象越明显,拖尾的原因在于,脉冲前沿探测产生的死区时间屏蔽了对后沿的响应,并且短于脉冲全宽的死区时间,对脉冲进行了“分段采样”,导致在信号较强的子图(c)中, $R_{dp} = 1$ 时产生了近似双峰值的波形。

如图 3 所示,当死区时间 $R_{dp} \leq 2$ 时,各部分探测损失率和探测损失率 α 随死区时间长度增加而逐渐增大,原因在于当死区时间小于回波脉冲的近似全宽度($2P_w$)时,在回波脉冲的持续范围内可发生多次光子探测事件,这些光子探测事件的次数随死区时间的增大而减少;当 $R_{dp} > 2$ 时,回波脉冲的持续范围内最多只可记录一次光子计数事件,造成了图 3 中探测损失率逐渐趋于稳定的结果。

从图 4 中可以看出,相对系数不仅受死区时间的影响,而且在改变信号幅度后,相关系数变化十分迅速,在 $N = 0.01$ 和 $N = 0.3$ 时,相关系数 ρ 几乎为一条等于 1 的水平线,即此时无论死区时间如何增大,畸变波形始终与理想波形保持相似,仅波形大小不同;结合图 3,当 $N = 0.01$ 时,其 α_{up} 、 α_{down} 和 α 的值均很小,故可将其信号畸变情况忽略。信号幅度增大后,相关系数随着死区时间的改变迅速变化,波形也发生突变。

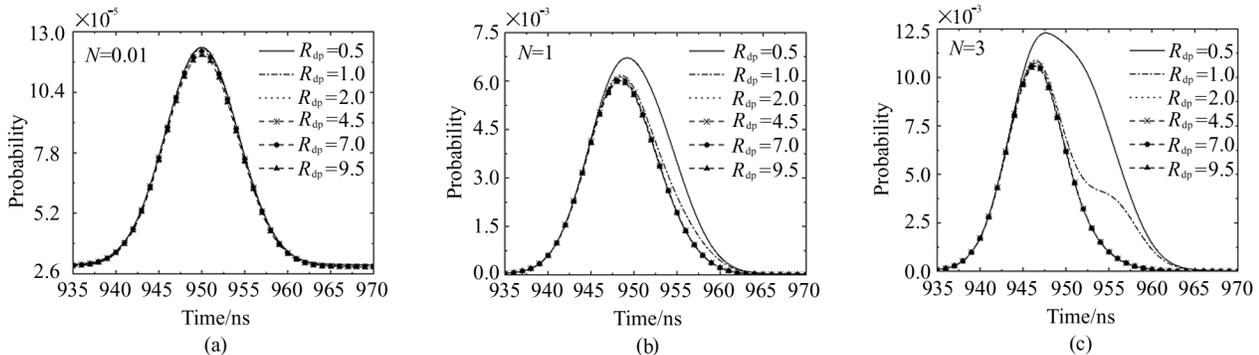


图 2 不同死区时间下的回波信号:(a) $N = 0.01$ 时的回波信号;(b) $N = 1$ 时的回波信号;(c) $N = 3$ 时的回波信号

Fig. 2 Echo signal at different dead time: (a) The echo signal when $N = 0.01$; (b) The echo signal when $N = 1$; (c) The echo signal when $N = 3$

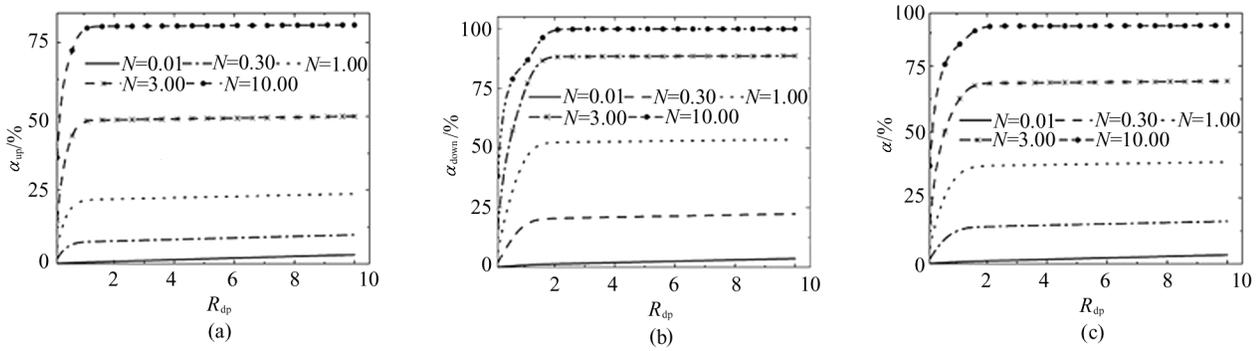


图 3 探测损失率与死区时间的关系:(a) 上升沿探测损失率; (b) 下降沿探测损失率; (c) 总探测损失率
 Fig. 3 The relationship between detection loss rate and dead time:(a) The detection loss rate of rising edge;
 (b) The detection loss rate of falling edge; (c) Total detection loss rate

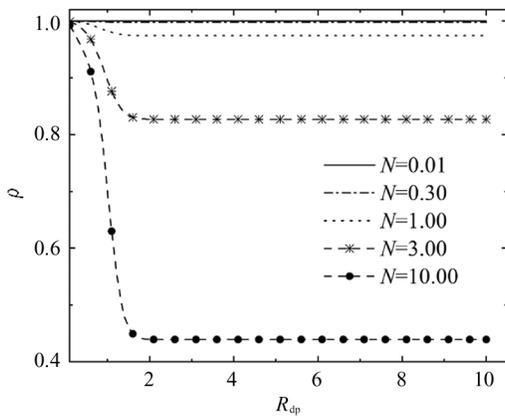


图 4 相关系数随死区时间的变化

Fig. 4 Variation of correlation coefficient with dead time

3.2 脉冲幅度对波形畸变的影响

本节选择死脉比作为多变量来具体研究信号幅度对波形畸变的影响。设置背景噪声 $N_b = 0.3 \times 10^6 / s$, $R_{dp} = 4.5$ ($T_d = 45 \text{ ns}$, $P_w = 10 \text{ ns}$), 得到图 5 中的回波信号。当信号增大时, 波形向前移动, 也就意味着波形下降沿探测损失率越来越大, 测距

精度降低。

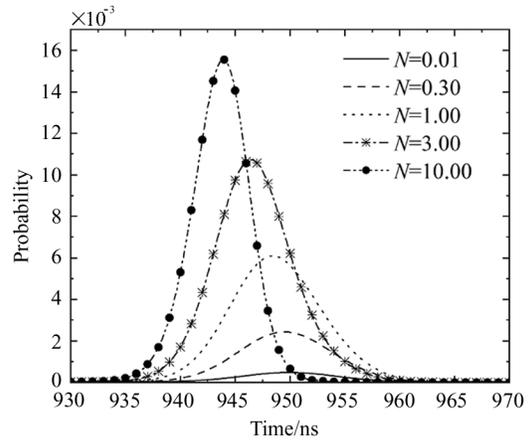


图 5 不同信号幅度下的波形

Fig. 5 Waveform of different signal amplitudes

如图 6(a)和(b)所示, α_{up} 、 α_{down} 不断增大, 尤其当 $R_{dp} \geq 2$ 时, α_{down} 最终值接近 100%, 表明当信号幅度达到一定值后, 下降沿探测率几乎为 0; 图 6(c)中, 总探测损失率 α 变化趋势如 α_{down} 一样, 最终 α 的值达到 90% 左右, 信号真实探测率远低于理论探测率。

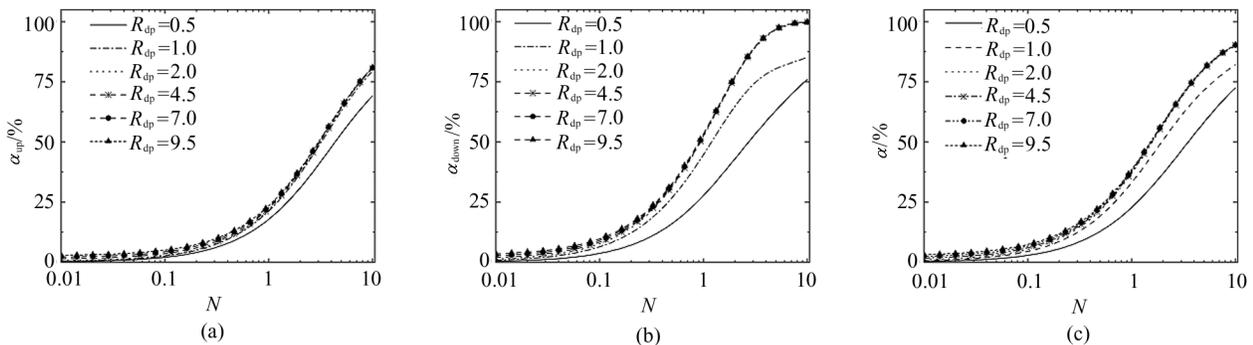


图 6 探测损失率与信号幅度的关系:(a) 上升沿探测损失率; (b) 下降沿探测损失率; (c) 总探测损失率
 Fig. 6 Relationship between detection loss rate and signal amplitude:(a) The detection loss rate of rising edge;
 (b) The detection loss rate of falling edge; (c) Total detection loss rate

如图7所示,当 $N < 0.37$,相关系数 ρ 几乎不受 T_d 的影响, ρ 大约保持在等于1的水平,畸变波形与理想波形相似;当 $N \geq 0.37$ 时, $R_{dp} \geq 2$ 对应的下降速度比 $R_{dp} < 2$ 对应的 ρ 下降更快。结合图6(c),当 $\alpha < 5\%$,此时,波形的畸变可忽略。根据计算,当 $N = 0.05$, $N_b = 0.3 \times 10^6/s$, $P_w = 10\text{ ns}$,且 $T_d = 95\text{ ns}$ 时,此时 $\alpha > 5\%$,波形畸变不可忽略;但是当 $T_d = 5\text{ ns}$ 时,其余条件保持不变,此时 $\alpha < 5\%$,波形的畸变情况可忽略。

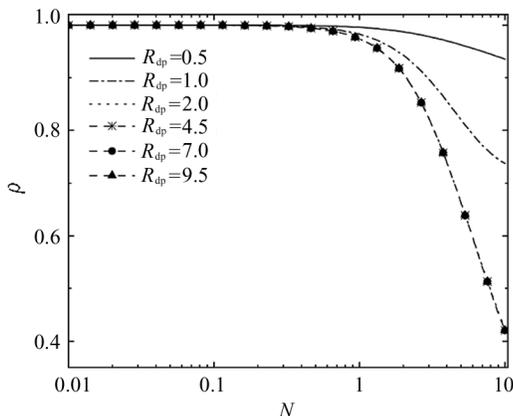


图7 相关系数随信号幅度的变化情况

Fig. 7 Correlation coefficient varies with signal amplitude

3.3 脉冲宽度对波形畸变的影响

本节通过调整激光脉冲宽度大小改变 R_{dp} 值,从而讨论对波形畸变的影响。激光脉宽取1—30 ns的范围,该范围包含了 $R_{dp} \geq 2$ 、 $R_{dp} < 2$ 两种情况。其余参数设置为: $N = 0.01$ 和 $N = 1$ 两种情况,背景噪声 $N_b = 0.3 \times 10^6/s$ 。

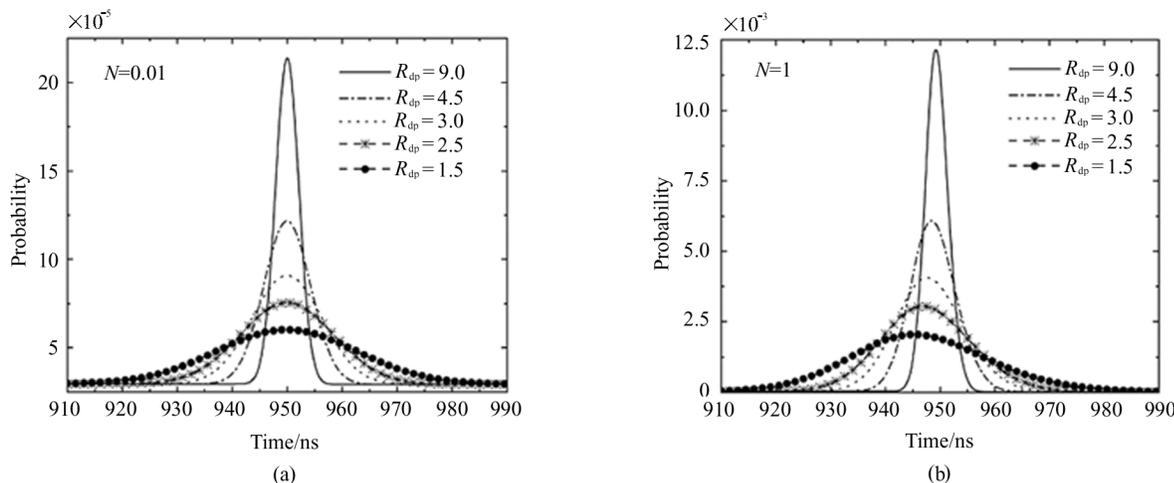


图8 不同激光脉冲脉宽对应的回波信号:(a) $N=0.01$ 时的回波信号;(b) $N=1$ 时的回波信号

Fig. 8 Echo signal corresponding to different laser pulse widths:

(a) The echo signal when $N=0.01$; (b) The echo signal when $N=1$

$T_d = 45\text{ ns}$ 、 $N_b = 0.3 \times 10^6/s$ 条件下的仿真结果如图8所示。脉冲宽度 P_w 增大,波形所含能量一定,故而信号幅值会降低。图(a)和(b)除信号幅值不同外,区别在于当 $N = 1$ 时,波形向前移动的位移比 $N = 0.01$ 时更加明显。

由图9可知,整体而言,波形探测损失率与 P_w 呈负相关。具体而言,如果此时的 $R_{dp} < 2$,则损失率将随着 P_w 的增大而进一步减小;而在 $R_{dp} \geq 2$ 时,探测损失率 α 几乎不受脉宽改变的影响。此外,子图(a)中波形前沿的损失率随着脉宽的增加而波动。上述现象的原因是:不同的死区时间长度对回波脉冲的分段采样的次数不尽相同,当 $R_{dp} < 2$ 时,回波脉冲可以被多次采样,从而减小了各部位的损失。此外,由于分段采样的非整数特性,导致光子数较大时子图(a)损失率曲线的波动。因此,选择较短的死区时间,特别是选用 $R_{dp} \leq 2$ 的条件,有利于信号的完整采样。

图10显示,当 $R_{dp} < 2$ 时,相关系数随 P_w 的增大而增大,即畸变信号与理想信号的相似度提高,因此,在实际测量中可选用较宽脉宽测得的信号获较高的相关系数。

3.4 背景噪声对波形畸变的影响

本小节讨论背景噪声 N_b 对波形畸变的影响,激光脉冲的相关参数为: $N = 0.01$ 和 $N = 1$, $R_{dp} = 4.5$ ($P_w = 10\text{ ns}$, $T_d = 45\text{ ns}$)。波形在不同背景噪声下的变化情况如图11所示,随着噪声 N_b 的增大,噪声探测对信号的屏蔽效应加强,并且噪声本身的探测概率提升,导致信号幅值减小、波形的直流量抬升,信号的对比度下降。

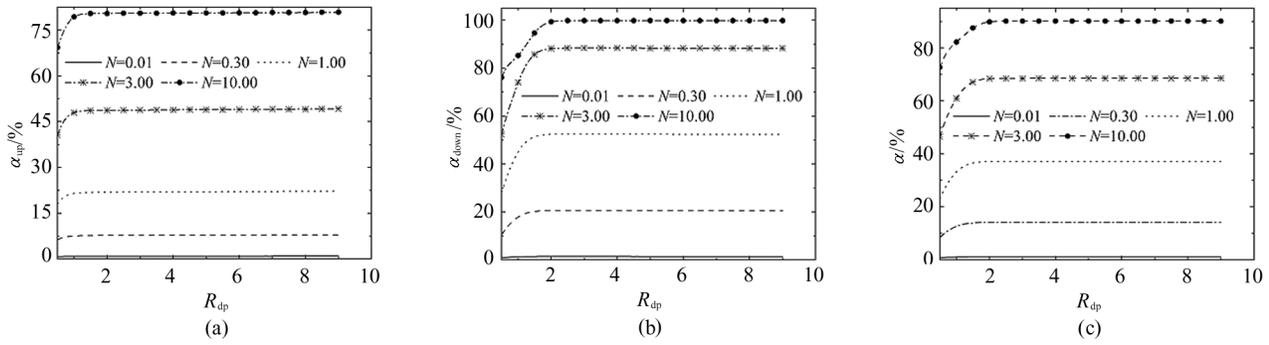


图 9 探测损失率随脉宽变化的变化情况:(a) 上升沿探测损失率;(b) 下降沿探测损失率;(c) 总探测损失率

Fig. 9 Detection loss rate as a function of pulse width:(a) The detection loss rate of rising edge;(b) The detection loss rate of falling edge;(c) Total detection loss rate

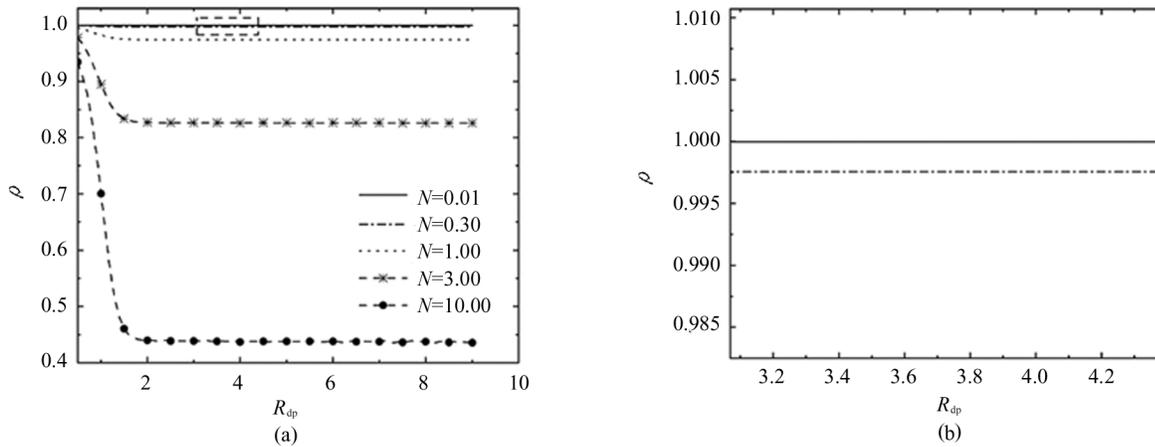


图 10 相关系数与激光脉冲脉宽之间的关系:(a) 相关系数整体变化图;(b) 虚线框部分的放大图

Fig. 10 Relationship between correlation coefficient and laser pulse width:(a) Overall change of correlation coefficient;(b) Enlarge of the dashed box section

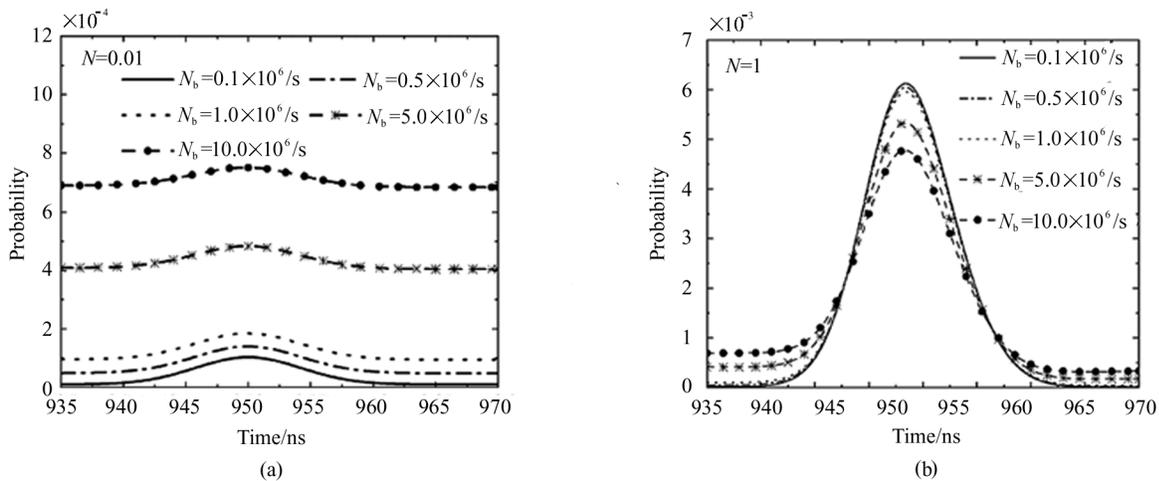


图 11 不同背景噪声下的回波波形:(a) $N=0.01$ 时的回波信号;(b) $N=1$ 时的回波信号

Fig. 11 Echo waveform under different background noises:(a) The echo signal when $N=0.01$;(b) The echo signal when $N=1$

如图 12 所示,随着背景噪声 N_b 的增大, α_{up} 、 α_{down} 以及 α 均在增大。对比 $N=0.01$ 和 $N=1$ 发现,不同信号幅度对应噪声影响探测率的初始值差

别较大: N 较小时,其初始值较为接近; N 较大时, $R_{dp} < 2$ 对应的 α_{up} 、 α_{down} 和 α 与 $R_{dp} \geq 2$ 相差较大。对于相关系数 ρ ,如图 13(a)所示,在 $N=0.01$

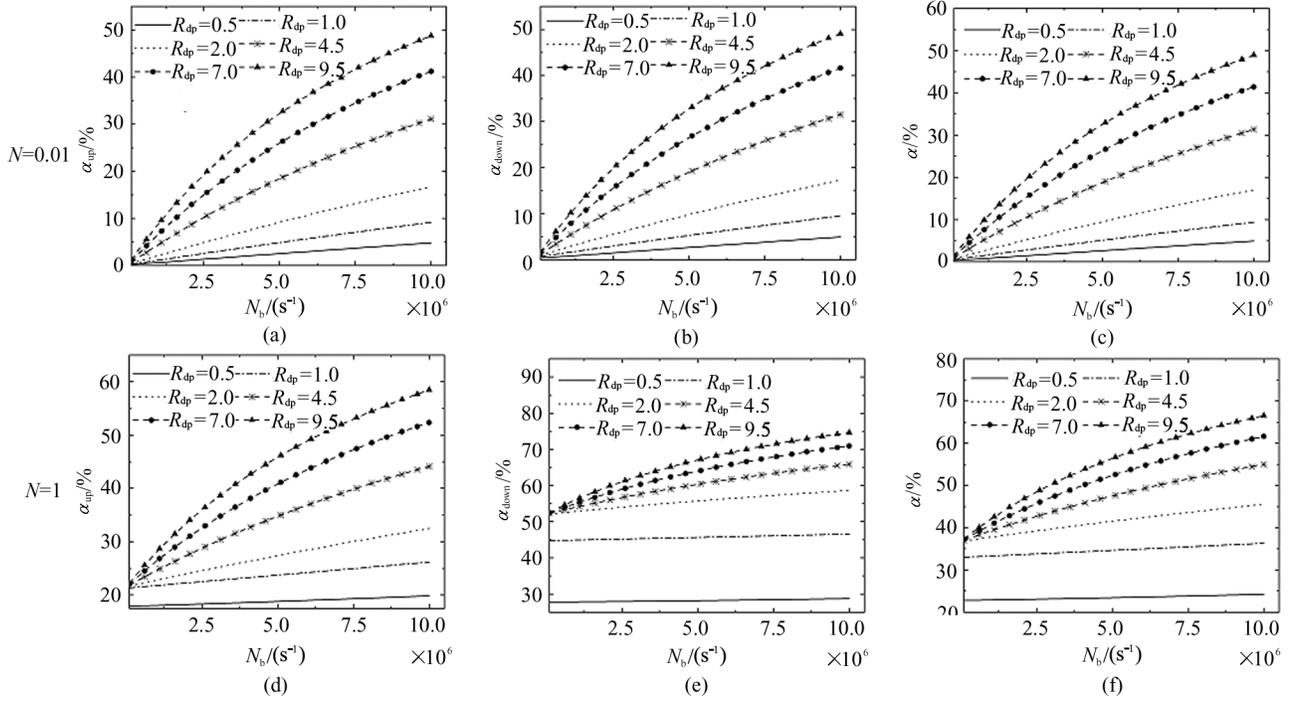


图 12 探测损失率与背景噪声的关系:(a)、(d)上升沿探测损失率;(b)、(e)下降沿探测损失率;(c)、(f)总探测损失率

Fig. 12 Relationship between detection loss rate and background noise:(a), (d) The detection loss rate of rising edge; (b), (e) The detection loss rate of falling edge; (c), (f) Total detection loss rate

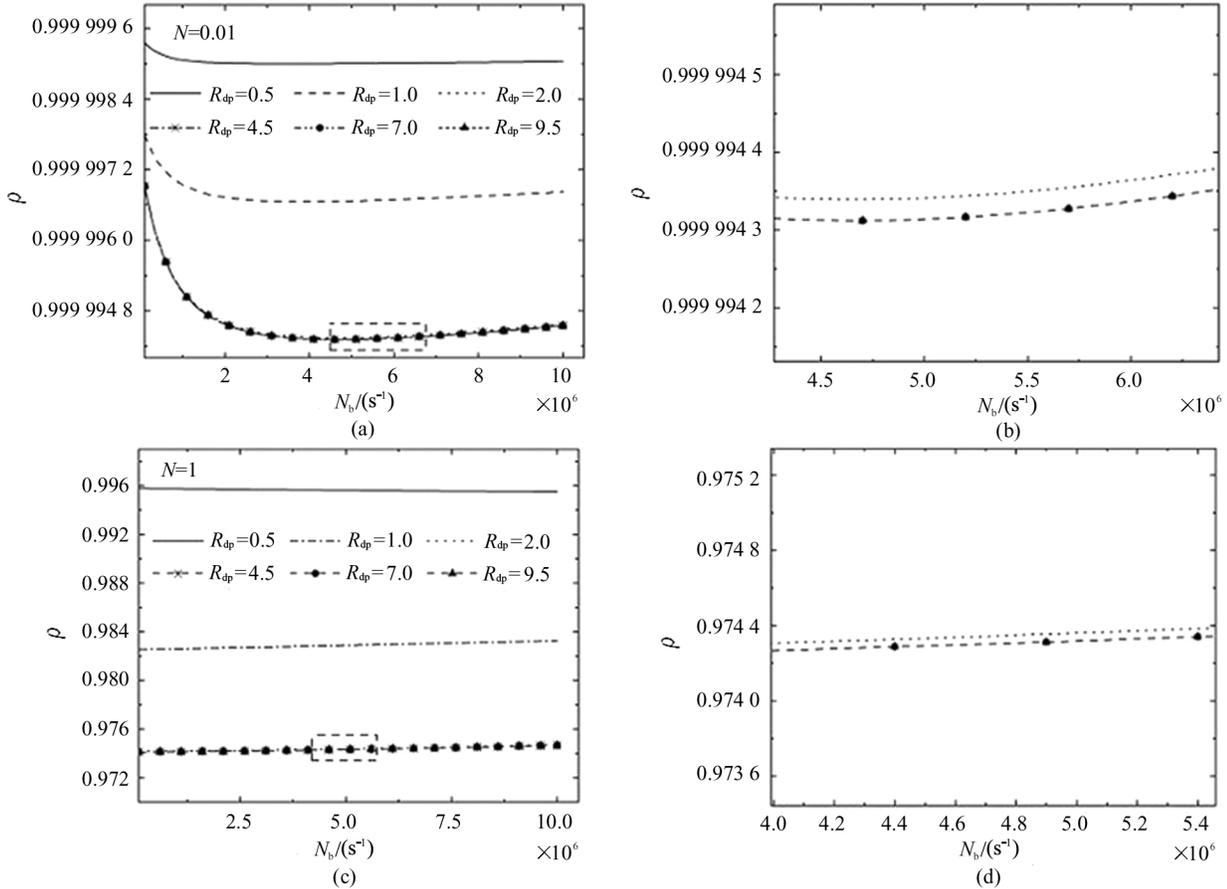


图 13 相关系数与背景噪声的关系:(a)、(c)相关系数整体变化图;(b)、(d)虚线框部分放大图

Fig. 13 Relationship between correlation coefficient and background noise:(a), (c) Overall change of correlation coefficient; (b), (d) Part of the dotted box enlarged view

时, ρ 随 N_b 的变化几乎可以忽略不计, 再结合前面的探测损失率, 当 $\alpha < 5\%$ 时, 可认为波形无畸变; 但在 $N = 1$ 时, 如图 13(c) 所示, 随着 N_b 的增大, ρ 在缓慢增长, 但每次增大的值可以忽略不计; 在同一噪声 N_b 下, 有 $\rho_{R_{dp} < 2} > \rho_{R_{dp} = 2} > \rho_{R_{dp} > 2}$ 。

4 结 论

本文建立了多触发条件下光子计数激光雷达信号计算的稳态正向递推模型, 讨论了不同通量条件对信号畸变的影响。从损失率方面来看, 当 $R_{dp} > 2$ 时, 光子计数激光雷达信号的探测损失率处于稳定不变的状态, 此时波形畸变仅与 N 有关; 当 $R_{dp} \leq 2$ 时, 探测损失率随着脉宽 P_w 的增大不断减小, 相关系数在 $R_{dp} \leq 2$ 时呈现减小的趋势; 而当信号幅度的 $R_{dp} > 2$ 时, 探测率基本为 0。从相关系数方面来看, 脉宽对相关系数的影响在 $\alpha \leq 5\%$ 时呈现减小的趋势。除此之外, 背景噪声也会对波形畸变产生影响, 但背景噪声 N_b 的改变仅会引起信号幅度的改变; 由于整个波形存在被噪声抬高的现象, 促使信号对比度下降, 从而影响探测损失率。综合上述影响, 当探测损失率 $\alpha \leq 5\%$ 时, 此时波形相似度极高, 可以忽略波形畸变的影响, 并将探测损失率作为区分高通量 ($\alpha > 5\%$) 与低通量 ($\alpha \leq 5\%$) 的判别界限, 该判别方式较传统基于计数率的“5%”准则更加精确详细。根据计算, 当 $N = 0.05$, $N_b = 0.3 \times 10^6/s$, $P_w = 10 \text{ ns}$, 且 $T_d = 95 \text{ ns}$ 时, 此时 $\alpha > 5\%$, 即满足高通量条件; 但是当 $T_d = 5 \text{ ns}$ 时, 其余条件保持不变, 此时 $\alpha < 5\%$, 即为低通量。本文的研究对于波形失真程度判定、系统参数选取、以及后续的失真波形反演与信息提取具有重要价值。

参考文献:

- [1] WARBURTON R E, MCCARTHY A, WALLACE A M, et al. Subcentimeter depth resolution using a single-photon counting time-of-flight laser ranging system at 1550 nm wavelength[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(15): 2266-2268.
- [2] PAWLIKOWSKA A M, HALIMI A, LAMB R A, et al. Single-photon three-dimensional imaging at up to 10 kilometers range[J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 11919-11931.
- [3] LI Z P, HUANG X, JIANG P Y, et al. Super-resolution single-photon imaging at 8.2 kilometers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(3): 4076-4087.
- [4] QIAO J D, MEI F H, YE Y. Single-photon emitters in van der Waals materials[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(2): 020011.
- [5] OTOOLE M, LINDELL D B, WETZSTEIN G. Confocal non-line-of-sight imaging based on the light-cone transform[J]. *Nature*, 2018, 555(7696): 338-341.
- [6] LIU X C, GUILLEN I, LA MANNA M, et al. Non-line-of-sight imaging using phasor-field virtual wave optics[J]. *Nature*, 2019, 572(7771): 620-623.
- [7] FACCIO D, VELTEN A, WETZSTEIN G. Non-line-of-sight imaging[J]. *Nature Reviews Physics*, 2020, 2(6): 318-327.
- [8] ZHANG P H, HU M, XU M M, et al. Non-doppler lidar wind measurement system based on convolutional neural network[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2021, 32(10): 1039-1045.
张平慧, 胡森, 许蒙蒙, 等. 基于卷积神经网络的非多普勒激光雷达测风系统[J]. *光电子 • 激光*, 2021, 32(10): 1039-1045.
- [9] WANG X P, CHEN Y B, BU Z C, et al. Aerosol lidar inter-comparison observation calibration at lidar stations based on REAL lidar[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2022, 33(2): 133-140.
王箫鹏, 陈玉宝, 步志超等. 基于 REAL 气溶胶激光雷达在站比对标定技术研究[J]. *光电子 • 激光*, 2022, 33(2): 133-140.
- [10] ZHANG F, ZHANG S, WANG L. Performance simulation of space-based coherent wind LIDAR system under various meteorological conditions[J]. *Optoelectronics Letters*, 2021, 17(6): 342-348.
- [11] DU B C, LI Z H, SHEN G Y, et al. A photon-counting full-waveform lidar[J]. *Chinese Physics Letters*, 2019, 36(9): 094201.
- [12] STEINVALD O, TULLDAHL M. Laser range profiling for small target recognition[J]. *Optical Engineering*, 2016, 56(3): 031206.
- [13] O'CONNOR D. Time-correlated single photon counting[M]. New York: Academic Press, 2012.
- [14] DEGNAN J J. Photon-counting multikilohertz microlaser altimeters for airborne and spaceborne topographic measurements[J]. *Journal of Geodynamics*, 2002, 34(3-4): 503-549.
- [15] GATT P, JOHNSON S, NICHOLS T. Dead-time effects on Geiger-mode APD performance[C]//Laser Radar Technology and Applications XII. SPIE, May 4, 2007, Orlando, Florida, United States. Bellingham, WA, USA: SPIE Press. 2007, 6550: 144-155.
- [16] GATT P, JOHNSON S, NICHOLS T. Geiger-mode avalanche photodiode LADAR receiver performance characteristics and detection statistics[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(17): 3261-3276.

- [17] ZHAO P, ZHANG Y, QIAN W P, et al. Investigation of Geiger-mode detector in multi-hit model for laser ranging [J]. *Science China Technological Sciences*, 2015, 58(5): 943-950.
- [18] LI Z J, LAI J C, WANG C H, et al. Influence of dead-time on detection efficiency and range performance of photon-counting laser radar that uses a Geiger-mode avalanche photodiode [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(23): 6680-6687.
- [19] WU C, XING W G, XIA L H, et al. Receiver performance characteristics of single-photon lidar in a strong background environment [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(1): 102-108.
- [20] HUA K J, LIU B, FANG L, et al. Detection efficiency for underwater coaxial photon-counting lidar [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(9): 2797-2809.
- [21] ZHANG Z Y, MAY, LI S, et al. Ranging performance model considering the pulse pileup effect for PMT-based photon-counting lidars [J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 13586-13600.
- [22] HOU A H, HU Y H, ZHAO N X, et al. Full-waveform distortion characteristics of photon counting Lidar at different dead-time [J]. *Optik*, 2020, 223: 165448.
- [23] HOU A H, HU Y H, ZHAO N X, et al. Echo characteristics and error of extended target for photon ranging [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(4): 0401016.
- 侯阿慧, 胡以华, 赵楠翔, 等. 扩展目标光子测距回波特性及误差研究 [J]. *中国激光*, 2021, 48(4): 0401016.
- [24] ZHANG X, SUN J F, LI S N, et al. Research on the detection probability curve characteristics of long-range target based on SPAD array lidar [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022, 126: 104325.
- [25] JOHNSON S E, NICHOLS T L, GATT P, et al. Range precision of direct-detection laser radar systems [C] // *Laser Radar Technology and Applications IX*. SPIE, September 13, 2004, Orlando, Florida, United States. Bellingham, WA, USA: SPIE Press, 2004, 5412: 72-86.
- [26] JOHNSON S E. Cramer-Rao lower bound on range error for LADARs with Geiger-mode avalanche photodiodes [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(24): 4581-4590.
- [27] JOHNSON S, GATT P, NICHOLS T. Analysis of Geiger-mode APD laser radars [C] // *Laser Radar Technology and Applications VIII*. SPIE, August 21, 2003, Orlando, Florida, United States. Bellingham, WA, USA: SPIE Press, 2003, 5086: 359-368.

作者简介:

来建成 (1978—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光探测与成像方面的研究。