

盖革模式雪崩光电二极管激光雷达累积探测性能的研究

徐 璐 张 宇 张 勇 赵 远

(哈尔滨工业大学物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 利用单个盖革模式雪崩光电二极管(Gm-APD)对单脉冲测距的激光雷达探测性能进行了研究。从 Gm-APD 进行单光子探测的模型出发,研究长死时间情况下,单脉冲多次累积探测的探测概率(P_D)和虚警概率(P_{FA})。研究目标区间在选通门中的位置及平均信号光电子数的变化对 P_D 、 P_{FA} 的影响;对不同次数累积探测下的 P_D 、 P_{FA} 做了比较和分析。理论研究和数值计算结果表明,累积探测能够提高探测性能,增加累积次数到 3 次,就可以非常明显地提高探测性能;控制好选通门的开启时间,可以明显提高探测性能;在接收一个激光脉冲时,只需产生 4 个光电子数就可以使探测性能基本达到最佳。

关键词 探测器;盖革模式雪崩光电二极管激光雷达;探测性能;单脉冲累积;长死时间

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0414003

Research on the Detection Performance of Geiger-Mode APD Laser Radar with Accumulated Detection

Xu Lu Zhang Yu Zhang Yong Zhao Yuan

(Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract The detection performance of range detection laser radar which uses a single Geiger-mode avalanche photodiode (Gm-APD) with single-pulse is reported. Based on the model of single photon detection with a Gm-APD, research on the detection and false alarm probabilities (P_D and P_{FA}) with accumulated single-pulse detection at long dead-time is done. Research on the influence on P_D and P_{FA} is done, when the location of target bin in the strobe gate and the mean signal photoelectrons vary. The P_D and P_{FA} under different numbers of accumulated detection are compared and analyzed. Theory and numerical results show that accumulated detection can improve the detection performance, and when the accumulated number increases to three times, the detection performance can be very significantly improved; good control of the opening time of the strobe gate can significantly improve the detection performance; when Gm-APD receives a laser pulse, only four photoelectrons can make the detection performance best.

Key words detectors; Geiger-mode avalanche photodiode laser radar; detection performance; accumulated single-pulse; long dead-time

OCIS codes 040.1345; 250.1345; 100.6890; 110.6880; 110.2970

1 引 言

随着激光雷达探测技术的不断发展,人们对激光雷达探测距离的要求不断提高,从而促使对激光雷达探测器灵敏度的要求逐渐提高。随着新的探测

材料的运用和探测手段的进步,出现了具有单光子灵敏度的探测器。其中,盖革模式下的雪崩光电二极管(Gm-APD)及其阵列在弱信号检测方面的应用在国外近 10 年来发展迅速,以美国麻省理工林肯实

收稿日期: 2011-10-12; **收到修改稿日期**: 2012-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(60808027)和武器预研基金(9140A01010110HT0161)资助课题。

作者简介: 徐 璐(1988—),男,硕士研究生,主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: xlhit@126.com

导师简介: 张 宇(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光电信号检测的理论、激光探测的理论、光折变非线性光学等方面的研究。E-mail: zhangyunn@hit.edu.cn

实验室为代表,他们研制了一系列的 Gm-APD 激光雷达^[1~5]。Gm-APD 阵列从 4×4 元发展到 256×256 元,由于其灵敏度高,可以探测到隐藏在树林或军事掩护网下的目标并且成三维像,距离分辨率可达 $3 \sim 5 \text{ cm}^{[1~5]}$ 。

由于 Gm-APD 具有单光子灵敏度,探测时存在死时间,基于死时间独立发展了 Gm-APD 激光雷达的统计理论^[6~12]。2003 年, S. Johnson 等^[10] 研究了 Gm-APD 作为激光测距雷达探测器时的模型,首次提出了采用分立区间去分析光电子产生的理论,与传统的理论有很大的区别,为未来探测理论的发展奠定了基础。2003 年, D. G. Fouche^[11] 研究了采用单脉冲直接探测 Gm-APD 激光雷达的探测概率 (P_D)、虚警概率 (P_{FA}),首次理论研究了 Gm-APD 激光雷达的探测性能。2010 年, M. S. Oh 等^[12] 对 Gm-APD 激光雷达系统成像进行仿真实验,采用适当阈值处理图像后可以得到较好的成像结果。国内光子激光雷达的发展也已经成为一种趋势^[13~16]。本文通过研究长死时间情况下的单脉冲多次累积探测的 P_D 、 P_{FA} ,确定在探测过程中,可以控制选通门开启时间,累积次数,来提高系统的探测性能。

2 探测原理

Gm-APD 激光雷达利用激光脉冲的飞行时间测距:激光器发射激光脉冲,与此同时,探测器的计时电路开始计时,激光脉冲遇到目标反射回来,Gm-APD 接收信号产生雪崩,计时电路截止计时,时间间隔为激光脉冲的飞行时间,从而获得目标距离。

当 APD 的外加偏压大于反向击穿电压,即 $V > V_{br}$ 时,称 APD 工作在盖革模式下。如果 Gm-APD 接收到一个光子并触发,就会发生雪崩现象,使电流达到饱和值,这个过程能在瞬间完成。但是,APD 中产生的雪崩若不加以抑制,会一直持续进行,将给 APD 造成击穿性损伤。为了保证探测器连续、正常工作,控制电路必须在能捕捉到雪崩脉冲的上升沿并产生一个与雪崩脉冲上升沿同步的可鉴别输出的同时,能以足够快的速度将 APD 两端的偏压降到低于雪崩电压,从而抑制雪崩;在间隔一定时间之后,将 APD 两端的偏压恢复到正常工作状态,称这段时间为死时间^[1]。在实际应用中,一般采用主动抑制电路^[1],为了降低噪声,附加一个时间选通门,只有在这个选通门内,Gm-APD 才有可能被触发,从而进行有效的探测。

当探测器的计数率较小时,探测过程服从泊松分布,在时间 $t_1 \sim t_2$ 之间,产生 m 次事件的概率为

$$P_m(t_1, t_2) = \frac{1}{m!} [M(t_1, t_2)]^m \exp[-M(t_1, t_2)], \quad (1)$$

式中 $M(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt$ 表示在探测器的探测时间 $t_1 \sim t_2$ 之间,探测器产生的平均初始光电子数; $f(t)$ 表示这段时间探测器产生初始光电子数的平均速率。

由于探测器的死时间和选通门宽度的相对关系,在探测时会出现两种情况:如果探测器的死时间与选通门的宽度相当,在某次探测时,探测器最多只能产生一个雪崩脉冲,这种情况为长死时间情况;如果探测器的死时间与选通门的宽度相比较短,在某次探测时,探测器能产生两个及两个以上的雪崩脉冲,这种情况为短死时间情况^[10]。在研究过程中,将选通门平均分成 b 个区间^[10],激光脉冲的宽度小于每个区间的宽度,保证脉冲信号只能落在某个区间内。本文研究的是长死时间情况,因此探测器最多只能产生一个雪崩脉冲,在研究某个区间产生雪崩脉冲的概率时,必须保证在这个区间之前都没有发生雪崩。假设产生的每个初始光电子都能触发雪崩,这时,分析某个区间产生雪崩脉冲的概率就转移到分析产生初始光电子的概率。

探测器接收到从目标返回的激光脉冲并产生 S 个信号初始光电子数,在整个探测过程中,虽然噪声光电子数的产生速率有一定的起伏,与脉冲信号相比,起伏可以忽略,设噪声光电子数的产生速率为一个定值^[7],每个区间产生的平均总噪声光电子数(背景光产生的光电子数、暗电流产生的电子数)为 n 。图 1 所示为噪声光电子和信号光电子数随时间的变化。

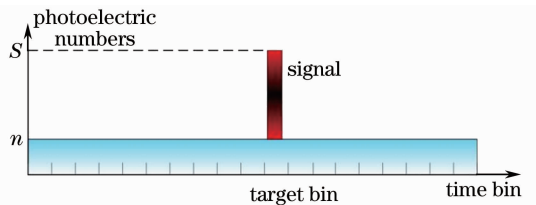


图 1 噪声光电子和信号光电子数随时间的变化

Fig. 1 Photoelectrons of noise and signal versus time-bin

在时间 $t_1 \sim t_2$ 内,没有雪崩脉冲产生的概率为

$$P_0(t_1, t_2) = \exp[-M(t_1, t_2)]. \quad (2)$$

有雪崩脉冲产生的概率为

$$P(t_1, t_2) = \exp[-M(0, t_1)] \times \{1 - \exp[-M(t_1, t_2)]\}, \quad (3)$$

式中 $\exp[-M(0, t_1)]$ 表示在 t_1 之前没有雪崩脉冲产生的概率, $1 - \exp[-M(t_1, t_2)]$ 表示在 $t_1 \sim t_2$ 内, 有雪崩脉冲产生的概率。

假设目标信号光电子所在的区间为目标区间 T , 在目标区间发生雪崩事件的概率为

$$P_T = \exp[-(T-1)n][1 - \exp(-S-n)]. \quad (4)$$

(4)式为单次探测下, 在选通门的每个区间上发生雪崩事件的概率。在此基础上, 可以定义多次累积下的探测性能, 并获得其理论结果。

3 累积探测的探测性能

单脉冲单次探测时, 探测器输出一组数据, 系统直接利用这组数据成像; 单脉冲多次累积探测时, 会产生多组数据, 系统先判断, 从多组数据中选择一组比较好的, 再利用这组数据成像。本文中的判断方法, 就是找出重复次数最多的那组数据。

3.1 理论研究

在研究系统的探测概率和虚警概率时, 采用文献[11]中的定义。

定义单次探测的探测概率 P_{D1} : 探测器在目标区间发生雪崩事件的概率^[11], 即

$$P_{D1} = P_T = \exp[-(T-1)n] \times [1 - \exp(-S-n)]. \quad (5)$$

定义单次探测的虚警概率 P_{FA1} : 探测器在非目标区间发生雪崩事件的概率^[11], 即

$$P_{FA1} = 1 - P_{D1} - \exp(-S-bn) = 1 - \exp[-(T-1)n][1 - \exp(-S-n)] - \exp(-S-bn). \quad (6)$$

为了使累积探测的探测性能表达更简便, 令 y 表示单个脉冲在目标区间发生雪崩事件的概率, 即

$$y = \exp[-(T-1)n][1 - \exp(-S-n)]. \quad (7)$$

令 z 表示单个脉冲在整个探测区间都没有发生雪崩事件的概率, 即

$$z = \exp(-S-bn). \quad (8)$$

令 x_j 表示单个脉冲在第 j 个区间(非目标区间, $j \neq T$) 发生雪崩事件的概率, 则

$$\begin{cases} x_j = \exp[-(j-1)n][1 - \exp(-n)], \\ \quad (1 \leq j \leq T-1) \\ x_j = \exp[-(j-1)n - S][1 - \exp(-n)], \\ \quad (T+1 \leq j \leq b) \end{cases} \quad (9)$$

定义多次累积探测的探测概率 P_D : 如图 2 所示, 目标区间有最多的雪崩脉冲数目, 且所有的非目标区间的雪崩脉冲数目都要比目标区间的雪崩脉冲数目少的概率^[11]。

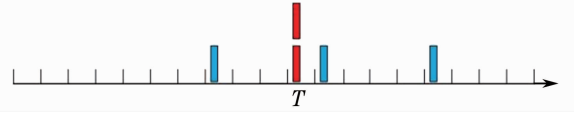


图 2 长死时间情况下, 单脉冲多次累积探测的 P_D 定义
Fig. 2 Definition of P_D of accumulated single-pulse at long dead-time

定义多次累积探测的虚警概率 P_{FA} : 如图 3 所示, 有且只有一个非目标区间有最多的雪崩脉冲数目, 且目标区间的雪崩脉冲数目比它少的概率^[11]。

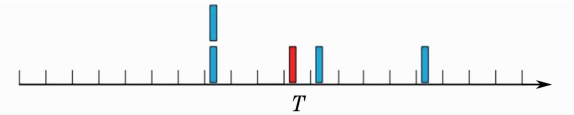


图 3 长死时间情况下, 单脉冲多次累积探测的 P_{FA} 定义
Fig. 3 Definition of P_{FA} of accumulated single-pulse at long dead-time

根据多次累积探测的 P_D 、 P_{FA} 定义, 可以获得如下理论结果:

2 次累积探测的探测概率 P_{D2} :

$$P_{D2} = y^2 + 2yz. \quad (10)$$

2 次累积探测的虚警概率 P_{FA2} :

$$P_{FA2} = \sum_{j=1}^b x_j^2 + 2z \sum_{j=1}^b x_j. \quad (11)$$

3 次累积探测的探测概率 P_{D3} :

$$P_{D3} = y^3 + 3y^2(1-y) + 3yz^2. \quad (12)$$

3 次累积探测的虚警概率 P_{FA3} :

$$P_{FA3} = \sum_{j=1}^b x_j^3 + 3 \sum_{j=1}^b x_j^2(1-z^2) + 3z^2 \sum_{j=1}^b x_j. \quad (13)$$

4 次累积探测的探测概率 P_{D4} :

$$P_{D4} = y^4 + 4y^3(1-y) + 6y^2 \left(\sum_j x_j \sum_{i \neq j} x_i + 2 \sum_j x_j z + z^2 \right) + 4yz^3. \quad (14)$$

4 次累积探测的虚警概率 P_{FA4} :

$$P_{FA4} = \sum_{j=1}^b x_j^4 + 4 \sum_{j=1}^b x_j^3(1-x_j) + 6 \sum_{j=1}^b x_j^2 \left[1 - \sum_{j=1}^b x_j^2 - 2x_j(1-x_j) + 4 \sum_{j=1}^b x_j z^3 \right]. \quad (15)$$

5 次累积探测的探测概率 P_{D5} :

$$P_{D5} = y^5 + 5y^4(1-y) + 10y^3(1-y)^2 + 10y^2 \left(\sum_{j=1}^b x_j \sum_{i \neq j}^b x_i \sum_{k \neq i,j}^b x_k + 3 \sum_{j=1}^b x_j \sum_{i \neq j}^b x_i z + 3 \sum_{j=1}^b x_j z^2 + z^3 \right) + 5yz^4. \quad (16)$$

5次累积探测的虚警概率 P_{FA5} :

$$P_{FA5} = \sum_{j=1}^b x_j^5 + 5 \sum_{j=1}^b x_j^4(1-x_j) + 10 \sum_{j=1}^b (1-x_j)^2 + 10 \sum_{j=1}^b x_j^2 \left(\sum_{i \neq j}^b x_i \sum_{k \neq i,j}^b x_k \sum_{l \neq i,j,k}^b x_l + 3 \sum_{i \neq j}^b x_i \sum_{k \neq i,j}^b x_k z + 3 \sum_{i \neq j}^b x_i z^2 + z^3 \right) + 5 \sum_{j=1}^b x_j z^4. \quad (17)$$

从(5)、(6)、(10)~(17)式中可以看出,由于死时间的存在,导致多次累积探测的探测性能都是一个多项式函数,这使得对函数本身的解析分析造成了很大的困难,因此本文采用数值计算方法研究。(5)、(6)、(10)~(17)式表明,探测性能与目标区间在探测区间中的位置 T 、平均信号光电子数 S 、选通门的宽度 b 、平均每个区间产生的平均总噪声光电子数 n 有关。但是,哪些因素影响大,在探测过程中如何有效地控制这些参数,使得探测性能得以提高是本文的研究重点。

3.2 数值计算分析和比较

从(5)、(6)、(10)~(17)式出发,利用数值计算,

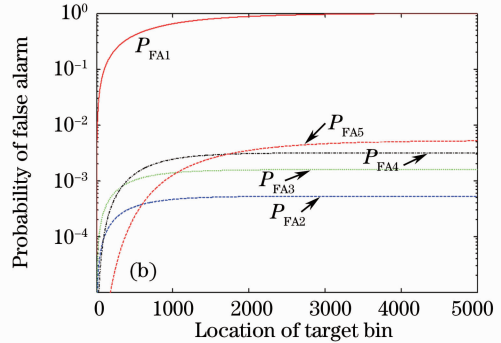
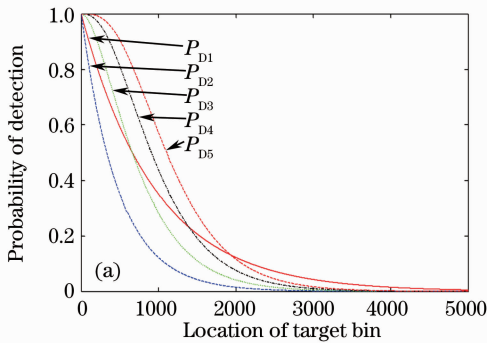


图 4 多次累积探测的 P_D 、 P_{FA} 随 T 的变化

Fig. 4 P_D and P_{FA} of accumulated single-pulse versus T

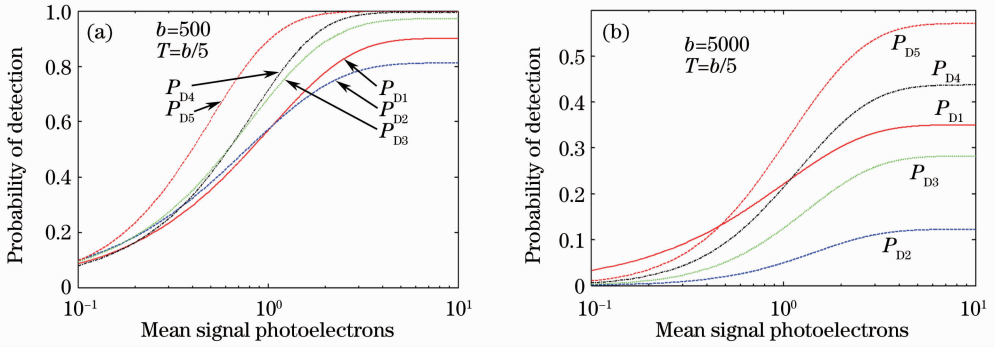
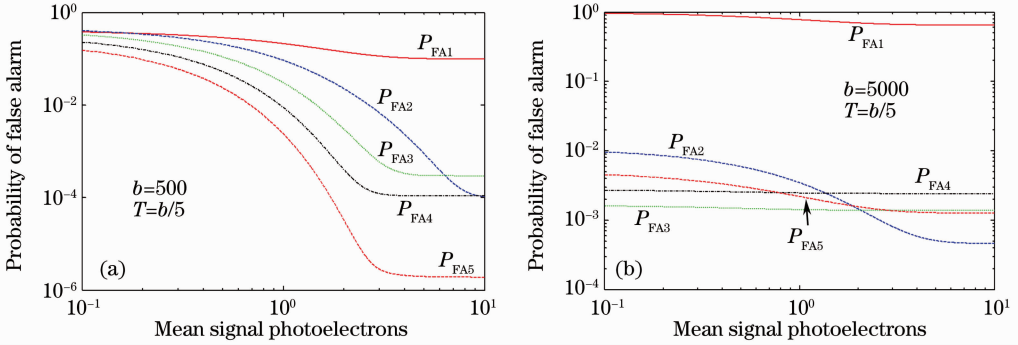
图 5 为不同宽度的距离选通门,不同累积次数的 P_D 随着平均光电子数 S 的变化曲线。计算过程中,取 $n=0.00105$ 保持不变。图 5(a)表明:当 $b=500$, $T=100$ 时,随着 S 的增加,多次累积探测的 P_D 增加得较快,而且当 $S \geq 4$ 时基本达到稳定, $P_{D1} = 0.81$, $P_{D2} = 0.89$, $P_{D3} = 0.97$, $P_{D4} = 0.99$, $P_{D5} = 0.99$ 。图 5(b)表明:当 $b=5000$, $T=1000$ 时,随着

主要研究目标区间在探测区间中的位置 T 、平均信号光电子数 S 、探测区间的宽度 b 的变化对 P_D 、 P_{FA} 的影响。

图 4 为不同累积次数的 P_D 、 P_{FA} 随 T 的变化曲线。计算过程中,取 $b=5000$, $n=0.00105$ [11]。图 4 表明,控制选通门开启的时间,选择合适的目标区间位置 T ,采用单脉冲多次累积探测时,对于 P_D 提高的影响是很明显的。如:当 $T=500$ 时, $P_{D1} = 0.59$, $P_{D2} = 0.35$, $P_{D3} = 0.63$, $P_{D4} = 0.81$, $P_{D5} = 0.91$ 。而此时的 P_{FA} 降低到几乎可以忽略噪声的影响,都在 10^{-2} 之下。在探测过程中,为了得到较好的探测性能,应尽量使选通门恰好在目标之前开启。在实际中,首先利用普通的激光测距机测得目标粗略的距离,自动设定选通门在此前 $2 \mu s$ 开启,利用 Gm-APD 采用单脉冲多次累积探测测得目标较精确的距离,自动设定选通门在此之前 100 ns 开启,继续测量从而使激光雷达的探测性能进一步提高。或者采用距离选通激光雷达的选通门控制方法,以选通门的宽度为步长,每次探测后都延迟选通门的开启时刻,直到探测到目标为止,然后,自动设定选通门在此前 $2 \mu s$ 开启,利用 Gm-APD 采用单脉冲多次累积探测测得目标较精确的距离,自动设定选通门在此之前 100 ns 开启,继续测量从而使激光雷达的探测性能进一步提高,这种方法就可以避免激光测距机给系统带来的复杂性。

S 的增加,多次累积探测的 P_D 增加得较慢,当 $S \geq 4$ 时基本达到稳定, $P_{D1} = 0.34$, $P_{D2} = 0.12$, $P_{D3} = 0.27$, $P_{D4} = 0.43$, $P_{D5} = 0.56$, 并且最终的稳定值比图 5(a) 小。

图 6 所示为不同宽度的选通门,不同累积次数的 P_{FA} 随着 S 的变化曲线。计算过程中, $n=0.00105$ 保持不变。图 6(a)表明:当 $b=500$, $T=$

图5 多次累积探测的 P_D 随 S 的变化Fig. 5 P_D of accumulated single-pulse versus S 图6 多次累积探测的 P_{FA} 随 S 的变化Fig. 6 P_{FA} of accumulated single-pulse versus S

100 时,随着 S 的增加,多次累积探测的 P_{FA} 减少,而且当 $S \geq 4$ 时基本达到稳定。图 6(b) 表明:当 $b=5000, T=1000$ 时,随着 S 的增加,多次探测的 P_{FA} 减少,而且当 $S \geq 4$ 时基本达到稳定,并且最终的稳定值比图 5(a) 大;最终达到稳定时,单脉冲多次累积探测的 P_{FA} 都在 10^{-2} 之下,比单脉冲单次探测的 P_{FA} 明显小得多,对于噪声的影响,基本上可以忽略。

图 5 和图 6 表明,在探测过程中,只需保证 $S \geq 4$,就能得到最好的探测性能,并且随着 S 的继续增加, P_D, P_{FA} 都将保持不变。根据参考文献[11],从目标反射回的激光脉冲信号在 Gm-APD 上产生的信号初始光电子数可以从激光雷达测距方程得到:

$$S = E \frac{\lambda}{hc} T_{\text{xmit}} T_{\text{atm}}^2 \varepsilon \rho_L \frac{A}{R^2} T_{\text{rec}} \eta_q, \quad (18)$$

式中 E 为激光脉冲的能量, R 为目标的距离,激光脉冲的波长 λ 为 532 nm,普朗克常数 h 和光速 c 的乘积为 $2 \times 10^{-25} \text{ J} \cdot \text{m}$,发射光学系统的透射率 T_{xmit} 为 0.6,接收光学系统的透射率 T_{rec} 为 0.3,目标与探测器间的大气透射率 T_{atm} 为 1,目标处的目标截面占发射光束面积的百分比 ε 为 0.3,目标表面的反射率 ρ_L 为 $(0.5/\pi) \text{ sr}^{-1}$,接收光学系统的面积 A 为

$(10^{-2} \pi/4) \text{ m}^2$ (直径 10 cm),探测器的量子效率 η_q 为 0.5。当激光脉冲的能量为 100 nJ,波长 532 nm,目标距离 1 km 时,探测器产生的信号光电子数为 9;若采用的激光脉冲能量为 100 μJ ,探测器产生的信号光电子数只需 5 时,探测距离可以达到 42.4 km,充分体现了 Gm-APD 激光雷达在作用距离上的优势。若此时仍使选通门在目标前 100 ns 开启,根据 (10)~(17) 式, $P_{D1} = 0.81, P_{D2} = 0.89, P_{D3} = 0.97, P_{D4} = 0.99, P_{D5} = 0.99$,虚警概率在 10^{-2} 之下,可以忽略。

4 结 论

对长死时间情况下 Gm-APD 激光雷达单脉冲多次累积探测的探测性能进行了研究和分析,结果表明,累积探测能够提高探测性能,通过增加累计次数到 3 次,就可以非常明显地提高探测性能;控制好选通门的开启时间,可以明显提高探测性能;在接收一个激光脉冲时,只需产生 4 个光电子数就可以使探测性能基本达到最佳,可见 Gm-APD 激光雷达在远距离弱信号探测中的巨大优势。

Gm-APD 还可能处于短死时间的情况,在今后的工作中,将继续研究在短死时间情况下 Gm-APD

激光雷达的探测性能。

参 考 文 献

- 1 B. F. Aull, A. H. Loomis, D. J. Young *et al.*. Geiger-mode avalanche photodiodes for three-dimensional imaging[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2002, **13**(2): 335~350
- 2 M. A. Albota, B. F. Aull, D. G. Fouche *et al.*. Three-dimensional imaging laser radars with Geiger-mode avalanche photodiode arrays[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2002, **13**(2): 351~370
- 3 R. M. Marino, T. Stephens, R. E. Hatch *et al.*. A compact 3D imaging laser radar system using Geiger-mode APD arrays system and measurements[C]. *SPIE*, 2003, **5086**: 1~15
- 4 R. M. Marino, W. R. Daviis, G. C. Rich *et al.*. High-resolution 3D imaging laser radar flight test experiments[C]. *SPIE*, 2005, **5791**: 138~151
- 5 G. M. Smith, K. A. McIntosh, J. P. Donnelly *et al.*. Reliable InP-based Geiger-mode avalanche photodiode arrays[C]. *SPIE*, 2009, **7320**: 1~10
- 6 P. Gatt, S. W. Henderson. Laser radar detection statistics; a comparison of coherent and direct detection receivers[C]. *SPIE*, 2001, **4377**: 251~262
- 7 P. Gatt, S. Johnson, T. Nichols. Geiger-mode avalanche photodiode ladar receiver performance characteristics and detection statistics[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(47): 3261~3276
- 8 M. S. Oh, H. J. Kong, T. H. Kim *et al.*. Reduction of range walk error in direct detection laser radar using a Geiger mode avalanche photodiode [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(2): 304~308
- 9 M. S. Oh, H. J. Kong, T. H. Kim *et al.*. Time-of-flight analysis of three-dimensional imaging laser radar using a Geiger-mode avalanche photodiode[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2010, **49**(2): 026601
- 10 S. Johnson, P. Gatt, T. Nichols. Analysis of Geiger-mode APD laser radars[C]. *SPIE*, 2003, **5086**: 359~368
- 11 D. G. Fouche. Detection and false-alarm probabilities for laser radars that use Geiger-mode detectors[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(27): 5388~5398
- 12 M. S. Oh, H. J. Kong, T. H. Kim *et al.*. Development and analysis of a photon-counting three-dimensional imaging laser detection and ranging (LADAR) system[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2011, **28**(5): 759~765
- 13 Wang Fei, Zhao Yuan, Zhang Yu *et al.*. Theoretical analysis of influence of laser signal strength on range precision in single photon ranging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2771~2775
王 飞, 赵 远, 张 宇 等. 激光脉冲强度对于盖革模式单光子探测测距精度影响的理论研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2771~2775
- 14 Yin Liju, Chen Qian, Zhang Canlin. Spectral response characterization of avalanche photodiode [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(11): 111101
尹丽菊, 陈 钱, 张灿林. 雪崩光电二极管的光谱响应特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(11): 111101
- 15 Yang Fu, He Yan, Chen Weibiao. Study of fiber laser ranging system using pseudorandom modulation and single photon counting techniques [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0314003
杨 馥, 贺 岩, 陈卫标. 基于伪随机码调制和单光子计数的光纤激光测距研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0314003
- 16 Wei Jingsong, Wang Qi, Sun Jianfeng *et al.*. Experiment of four-dimensional imaging with single-slit streak tube lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1231~1235
魏靖松, 王 骐, 孙剑峰 等. 单狭缝条纹管激光雷达四维成像实验[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1231~1235

栏目编辑: 宋梅梅