

文章编号: 0253-2239(2010)11-3117-07

变阈值检测对无扫描距离选通激光雷达 探测概率的影响

吴 龙 赵 远 靳辰飞 张 宇 孙秀冬

(哈尔滨工业大学物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 根据无扫描成像激光雷达光电阴极输出光电子计数分布满足泊松统计的特点,由极大似然估计方法,给出判定是否接收到回波的似然比判据阈值的计算方法。并针对典型无扫描距离选通成像激光雷达情况,给出了系统探测概率、虚警概率和漏警概率的近似计算方法,并采用蒙特-卡罗模拟方法进行验证。分析了系统阈值对探测概率的影响,并提出变阈值的方法提高探测系统探测概率。而受系统硬件的限制,在满足探测要求的情况下,尽量缩短探测距离和减少探测器像素数,增加接收目标的有用信号光子数,并同时根据极大似然估计法来确定阈值,达到提高探测概率的目的。

关键词 成像系统;距离选通激光雷达;探测概率;虚警概率;变阈值检测;蒙特卡罗法验证

中图分类号 TN958.98; TN959.6; TN247; TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103011.3117

Effects of Changing Threshold on Detection Probability of Scannerless Range-Gated Lidar

Wu Long Zhao Yuan Jin Chenfei Zhang Yu Sun Xiudong

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

Abstract The converted number of photoelectrons after the photocathode of scannerless imaging lidar meet the Poisson statistical distribution. The calculation for judging threshold of lidar system is proposed according to maximum likelihood estimation. Taking a typical scannerless range-gated imaging lidar as the case, an approach to approximately calculate detection probability, false-alarm probability and dropouts probability is presented which is proved by Monte-Carlo simulation. The effect of system threshold on detection probability is analyzed. A proposal that increases the detection probabilities when threshold changes with signal and noise is raised. Under the hardware limitation of lidar system, as the detection requests are satisfied, reducing the detection range and number of detector pixels mostly, increasing arrived signal photons from the target, determining the threshold by maximum likelihood estimation, the detection probability of the system is improved.

Key words imaging systems; range-gated lidar; detection probability; false alarm probability; changing threshold detection; Monte-Carlo validation

1 引 言

激光雷达系统的探测概率、虚警概率是衡量系统性能的重要指标和参数,它与系统的灵敏度方程、信噪比紧密相关而经常作为成像激光雷达设计的依

据或性能优劣的衡量标准。但是极少有人通过统计的方法来研究激光雷达系统的探测概率、虚警概率这样的衡量系统性能的重要指标和参数。美国 MIT 林肯实验室提出了结合强度像的背景抑制方

收稿日期: 2010-01-13; **收到修改稿日期**: 2010-05-27

基金项目: 武器装备预研基金(9140A01040307HT0125)资助课题。

作者简介: 吴 龙(1978—),男,博士研究生,主要从事光电成像和激光雷达等方面的研究。

E-mail: jialongwu@gmail.com

导师简介: 赵 远(1961—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光电信号检测和激光雷达等方面的研究。

E-mail: zhaoyuan@hit.edu.cn(通信联系人)

法^[1],随后出现了改进算法,通过改变阈值来抑制背景^[2]。近年来国内研究阈值选取的方式来抑制背景噪声也取得很大成果^[3~5]。2007年刘厚通等^[6]通过研究激光脉冲对眼睛安全最大阈值能量进行统计分析,却没有研究系统探测概率。而其他关于阈值的研究也多基于去除噪声方面^[7,8]。

本文讨论距离选通成像激光雷达系统的光电子统计特性,重点分析距离选通非扫描成像激光雷达系统的探测概率和虚警概率的计算。从系统探测概率的角度提出鉴幅器变阈值方法,可以有效地提高成像激光雷达系统的探测概率,有效地抑制虚警概率和漏警概率。提出在排除受系统硬件限制的能够影响系统阈值的因素后,通过改变探测距离和探测器像素数阈值,来达到提高系统探测概率的目的。

2 非扫描成像激光雷达系统概率统计理论模型

2.1 非扫描成像激光雷达信号的光电子统计特性

激光雷达接收机所接收的回波信号经探测器阴极光电转换后输出的光电子数都满足泊松统计分布^[9]

$$p(k | H^{(j)}) = \frac{(\bar{k}_s^{(j)} + \bar{k}_b)^k}{k!} \exp[-(\bar{k}_s^{(j)} + \bar{k}_b)], \quad (1)$$

式中 \bar{k}_s 和 \bar{k}_b 分别是信号光和非信号热光产生的平均光电子数。 k 是阴极产生的光电子数, $H^{(j)}$ 表示泊松过程, $j=0$ 或 1 , $j=0$ 表示无激光回波信号, $j=1$ 表示有激光回波信号。

2.2 概率统计模型及系统判据

由上节得到探测器阴极光电转换后输出的光电子数都满足泊松统计分布。按照极大似然估计方法,可以得到似然比判据为

$$k_T = \frac{\bar{k}_s}{\ln(1 + \bar{k}_s / \bar{k}_b)}, \quad (2)$$

式中 k_T 的物理意义是系统判别探测器探测到信号时阴极发生光电子数的阈值。 $k > k_T$,探测到回波信号; $k < k_T$,没有探测到回波信号。

3 典型距离选通成像激光雷达系统概率统计

3.1 距离选通成像激光雷达的构成及工作原理

距离选通技术利用目标反射激光器发射脉冲返回时间和探测器的选通探测功能,以时间的先后探

测不同距离目标的回波信号。当被观察目标反射的回波脉冲刚好落在增强型电荷耦合器件(I-CCD)探测器选通工作时间内时,回波到达探测器并成像。而当激光脉冲回波处于传输途中,探测器选通门(或光闸)关闭,I-CCD探测器测不到激光回波像,如图1所示。

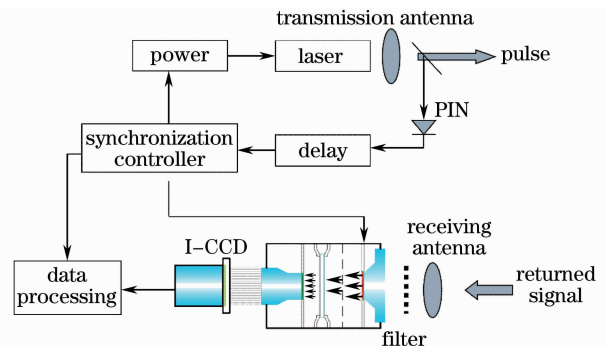


图1 距离选通激光成像雷达系统的组成及原理

Fig.1 Structure and theory of scannerless range-gated lidar

3.2 典型距离选通成像激光雷达系统的阈值计算

针对上面的概率分析,选用典型的距离选通型非扫描三维(3D)脉冲激光成像雷达来进行模拟分析,其相关参数^[10]由表1给出,并忽略大气湍流、大气散射和系统内部噪声。

令探测目标距离 $R=1$ km,则探测器阴极每个像元输出光电子数为

$$\bar{k}_s = \eta \frac{p_r \tau}{h\nu} = \eta \frac{p_r \tau \lambda}{hc} = \eta \frac{P_r T_1 T_2 T^2 \rho A_r \tau \lambda}{mn \pi R^2 hc} = 10.7991. \quad (3)$$

像元接收背景光并输出的噪声光电子数为

$$\bar{k}_b = \left(\frac{\eta \bar{\lambda}_b}{hc} \right) P_b \Delta \lambda T_2 A_r \tau_g = 0.7689, \quad (4)$$

式中 $\bar{\lambda}_b$ 是与激光波长相当的背景光平均波长, ν 为背景光平均频率, h 为普朗克常数, c 为光速。根据(2)式可以得到

$$k_T = \bar{k}_s / \ln\left(1 + \frac{\bar{k}_s}{\bar{k}_b}\right) \approx 3.9833. \quad (5)$$

3.3 距离选通成像激光雷达系统的探测概率计算

假设激光器能够均匀照明,而且噪声信号也是均匀的,那么每个探测单元所面对的状况都是一致的。另外假设各探测单元是相互独立的,任一个探测单元探测时不受其他探测单元影响。因此只需要分析单个探测单元即可代表其他的探测单元。以下都以单个探测元进行分析。

距离选通成像激光雷达系统的探测过程可以看

表 1 距离选通型非扫描 3D 脉冲激光成像雷达的结构参数
Table 1 Parameters of range-gated scannerless 3D pulsed laser imaging radar

Transmitting system	Laser wavelength	Laser pulse energy	Laser pulse width	Transmitting efficiency
	$\lambda=532 \text{ nm}$	$P_t=10 \text{ mJ}$	$\tau=10 \text{ ns}$	$T_1=0.75$
Receiving system	Detector	Pixel numbers $m \times n$	Receiving aperture	Receiving efficiency
	I-CCD	256×256	$D=10 \text{ cm}$	$T_2=0.80$
	Gate width	Optical filter width	Quantum transmission efficiency	
	$\tau_g=50 \text{ ns}$	$\Delta\lambda=1 \text{ nm}$	$\eta=50\%$	
Other parameters	Target reflectivity	Ranging resolution	Background spectral irradiance at sun illumination	Atm. extinction coeff.
	$\rho=0.2$	$\Delta R_0=7.5 \text{ m}$	$P_b=1.83 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{nm)}$	$T=0.42$

作是多帧相同的图像采样过程的集合,而其概率的计算可以表示为多帧图像探测的联合概率,因此这个过程可以分为两个阶段考虑,即 2D 单帧图像采样过程与多帧图像联合探测过程。

第一阶段:单帧图像采样

探测过程可以分为 4 种情况:

1) 无目标,且系统判别无信号。此时无激光回波信号, $k_s=0$; 光电子是由噪声产生,光电子数没有达到阈值, $k=k_b < k_T$ 。这种情况的概率为

$$Q_1 = \sum_{k=0}^{k < k_T} P[k | H^{(0)}] + \frac{1}{2} P[k_T | H^{(0)}]. \quad (6)$$

2) 无目标,但系统判别有信号。此时仍然无激光回波信号, $k_s=0$; 光电子是由噪声产生,光电子数达到了阈值, $k=k_b > k_T$, 系统判别有信号,属于虚警,虚警概率为

$$Q_2 = \sum_{k > k_T} P[k | H^{(0)}] + \frac{1}{2} P[k_T | H^{(0)}]. \quad (7)$$

虚警概率还可以用 $Q_2=1-Q_1$ 来表示。

3) 有目标,但系统判别无信号。此时有激光回波信号, $k_s \neq 0$ 。但信号和噪声激发的光电子数没有达到探测阈值, $k=k_s+k_b < k_T$, 属于漏警,漏警概率为

$$Q_3 = \sum_{k=0}^{k < k_T} P[k | H^{(1)}] + \frac{1}{2} P[k_T | H^{(1)}]. \quad (8)$$

4) 有目标,且系统判别有信号。此时有激光回波信号, $k_s \neq 0$ 。信号和噪声激发的光电子数超过了阈值, $k=k_s+k_b > k_T$, 是正确的探测概率

$$Q_4 = \sum_{k > k_T} P[k | H^{(1)}] + \frac{1}{2} P[k_T | H^{(1)}]. \quad (9)$$

对于情况 3) 和 4), 也存在关系式 $Q_3+Q_4=1$ 。

第二阶段:多帧图像综合

多帧图像综合是将分步距离选通的单帧 2D 图

像综合成为一幅完整的 3D 图像,在整个距离选通时间内,设定有 M 个单帧图像采样区间,一般情况下,每帧图像的一个像素只能对应一个目标距离,但在某些特殊情况下,由于探测器横向分辨率的原因,或目标移动的原因,探测器探测过程中,有可能一个像素在不同的采用时间就对应于不同的距离目标,为避免遗漏,因此讨论中假定整个选通距离内有 M 个采样区间,包含有 N 个目标。

为此整个探测过程可分为两个区段:有目标存在的目标段和没有目标存在的非目标段。非目标段的探测有可能不产生虚警也可能产生虚警。未产生虚警的概率是 $P_1=Q_1^{M-N}$, 产生虚警的概率是 $P_2=1-Q_1^{M-N}$ 。目标段的探测可能未产生漏警而将所有目标全部被探测到,也可能由于产生漏警而没有被全部探测到。因此目标段内未产生漏警的概率是 $P_3=Q_4^N$, 而产生漏警的概率是 $P_4=1-Q_4^N$ 。

于是整个探测过程有以下 4 种状况:

1) 正确探测到目标(无虚警,无漏警)的概率为 $P=P_1P_3$;

2) 探测到目标,但无虚警,有漏警的错误概率为 $P_{e1}=P_1P_4$;

3) 探测到目标,但有虚警,无漏警的错误概率为 $P_{e2}=P_2P_3$;

4) 探测到目标,但既有虚警,又有漏警的错误概率为 $P_{e3}=P_2P_4$ 。

总错误概率为 $P_e=P_{e1}+P_{e2}+P_{e3}$ 。

图 2~6 表现了不同背景光强度下,系统探测概率、虚警概率以及漏警概率随噪声电子数 k_b 和光电子数 k_s 发生改变,不同曲线对应不同的噪声电子数值 k_b , 曲线出现的折线对应不同阈值 k_T 的大小。其具体分析将在后面阐述。

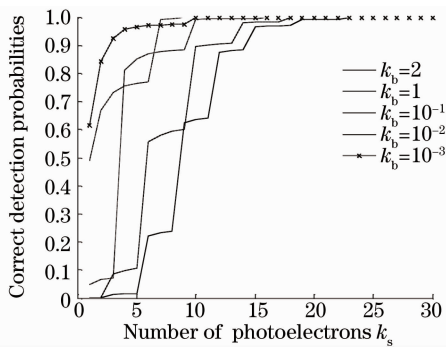


图 2 探测概率

Fig. 2 Detection probability

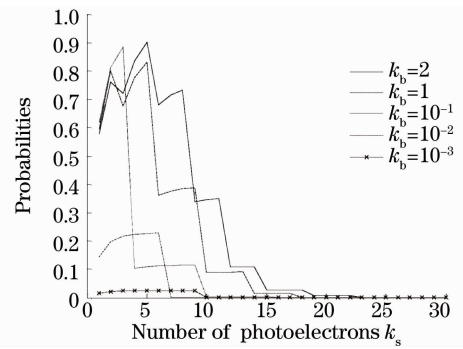


图 4 有漏警无虚警的概率

Fig. 4 Probability with dropouts

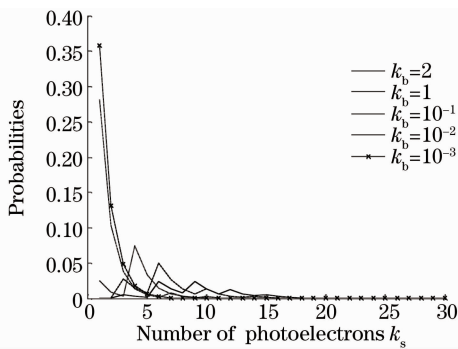


图 3 无漏警有虚警的概率

Fig. 3 Probability with false alarm and without dropout

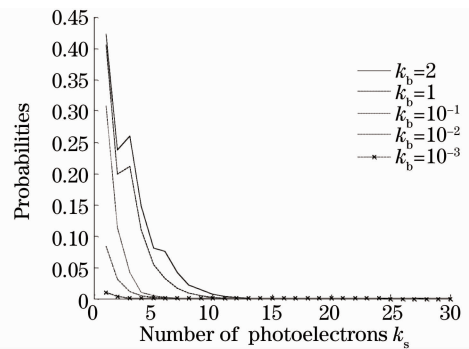


图 5 既有漏警又有虚警的概率

Fig. 5 Probability with false alarm and dropouts

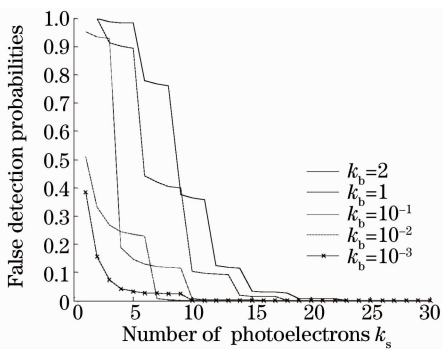
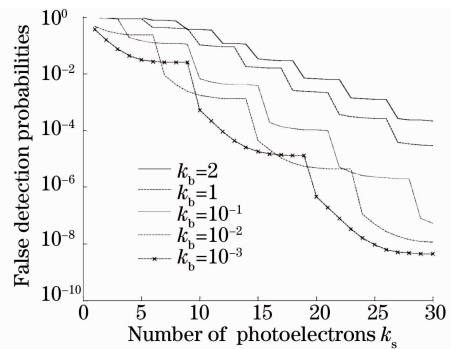
图 6 总错误概率 P_e 与信号光电子数 k_s 的关系

Fig. 6 Probability of error with the number of signal photo-electrons



3.4 蒙特-卡罗法验证

蒙特-卡罗数值计算方法^[11]是以概率和统计理论为基础的实验方法。蒙特-卡罗方法利用一连串的随机数来求解问题,对于复杂的物理过程的模拟计算十分有效。

蒙特-卡罗计算机模拟可以确定随机变量超过某一给定值的概率。在本文讨论的脉冲激光探测体制中,有效激光信号和背景噪声信号被接收器接收,光电阴极产生的光电子数符合泊松分布,对符合泊松分布且超过门限阈值的随机信号进行概率计算,就可以得到系统探测概率和虚警概率,从而验证所建模型的准确性。

蒙特-卡罗计算机模拟的步骤如下:

- 1) 根据已有的实验数据初步确定噪声方差和信号的均值以及分布规律,用 Matlab 指令生成符合泊松分布的噪声信号和有效信号。产生 M 个独立的随机噪声变量 x 和 N 个有效激光信号变量 y ;
- 2) 设定目标区在整个采样区间内的前 N 个区间,因此先将混合信号值设为噪声变量的值,然后将前 N 个噪声变量与 N 个信号变量相加,得到仿真混合信号 S 的前 N 个值;
- 3) 重复以上步骤 T 次,产生 T 个混合信号序列;
- 4) 针对每一个混合信号序列,为 4 种情况计数,所得数值除以总数 T ,即得到每种情况的概率值。

对于步骤 3) 中 T 的取值, 为了仿真的准确性, 使仿真尽可能逼近真实状态, T 取值不能太小, 应该达到一定的值才能准确模拟; 但 T 也不应过大, 因

为纯粹的蒙特-卡罗法并不能充分利用每次信息, 故文中取 $T=5000$ 。其他变量如上节所给 $M=27$, $N=1$, 所得概率如图 7 所示。

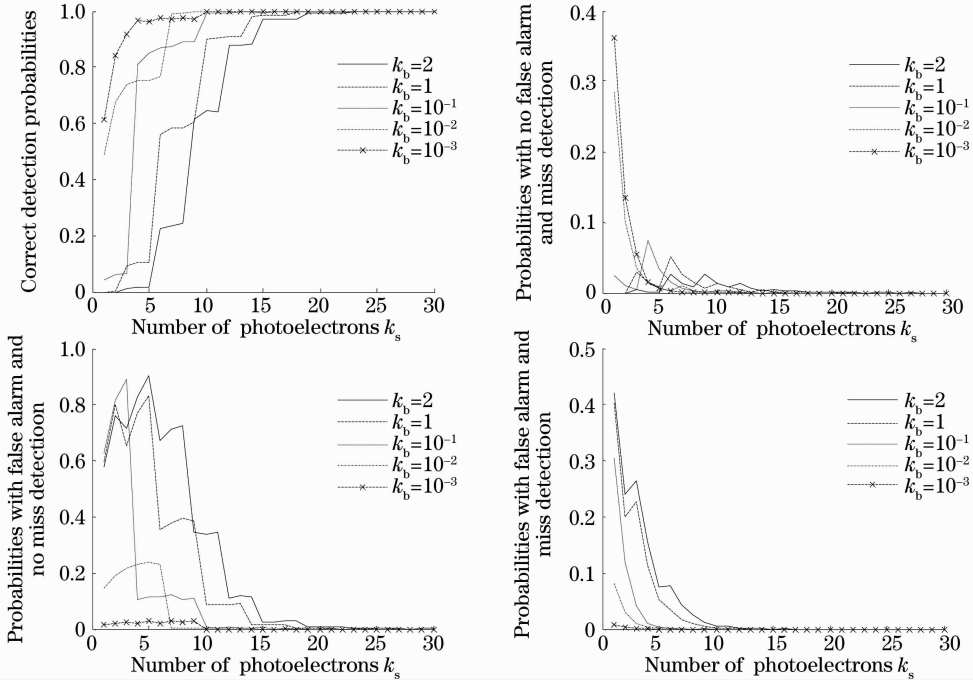


图 7 蒙特-卡罗方法统计所得的四种情况的概率

Fig. 7 Probabilities of the four conditions by Mont-Carlo method

比较图 7 和图 2~5, 蒙特卡罗方法所得的概率与本文提出的概率计算方法一致, 因此可以验证本文提出的概率计算方法是正确的。

4 阈值对探测概率的影响

4.1 恒定阈值对系统探测概率的影响

就实际系统而言, 一旦激光雷达的应用环境确定, 阈值 k_T 即为恒定值, 因此单帧的无虚警概率保持为恒定值, 但并不为 1, 因此正确探测到目标的概率极限值变为恒定值, 但不为 1。当系统阈值固定为 $k_T=3.9833$ 时, 各概率曲线如图 8~11 所示。

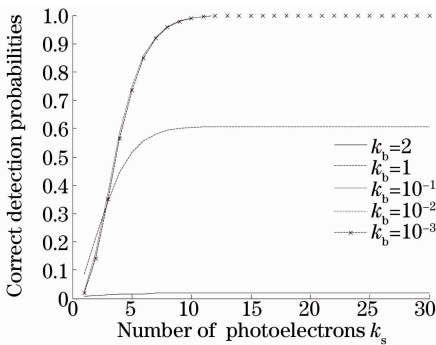


图 8 探测概率

Fig. 8 Detection probability

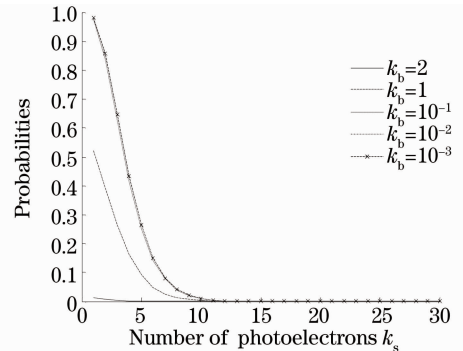


图 9 无漏警有虚警的概率

Fig. 9 Probability with false alarm and without dropout

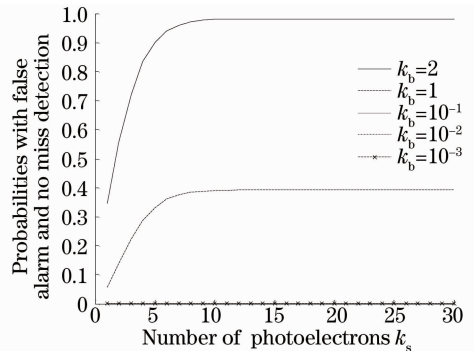


图 10 有漏警无虚警的概率

Fig. 10 Probability with dropouts and without false alarm

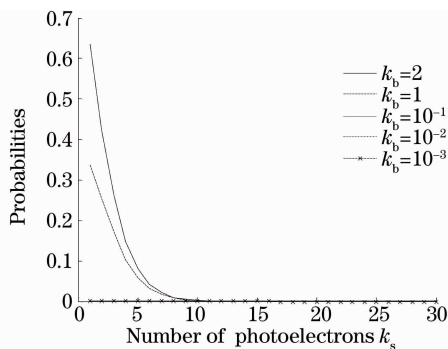


图 11 既有漏警又有虚警的概率

Fig. 11 Probability with false alarm and dropouts

此时正确探测到目标的概率的极限值保持不变。而当 k_b 增加时,这个概率极限值将减少。所以对于任一个系统,根据背景光的强弱和探测概率要求,设定阈值 k_T 是非常必要的。对于实际系统的应用中,一定工作条件下,激光发射功率一定,背景噪声电子数 k_b 也相对稳定,因此,系统探测阈值 k_T 也是确定的。根据图 8~11,可以得到结论:提高激光器发射功率可以提高雷达的探测概率,但是当发射功率提高到一定程度后,探测概率的提高程度是有限的。因此降低噪声也可以大幅度提高探测概率。

4.2 变阈值对系统探测概率的影响

典型距离选通成像激光雷达系统是在白天工作情况下,根据相对稳定的背景噪声环境,按照系统探测概率要求,依据经验调节激光器发射能量。但对于实际情况,经常需要调整系统参数,以适应不同背景光强度和激光器发射能量的情况下探测概率和虚警概率的变化要求。

从图 2 可以看出当 k_s 增加时,正确探测到目标的概率也随之增加,并趋近于 1。在图 3 中,由于未产生虚警的概率的增幅没有产生漏警概率的降幅大,所以整条曲线呈下降趋势。图 4 可以分为两个部分。首先是随着 k_s 的增加在目标区探测到目标的概率不断增加,但是由于 k_s 值的增加量还不足以改变阈值 k_T ,因此这个曲线部分是属于上升的。而随着 k_s 值的持续增加,阈值 k_T 也增加,因此造成虚警概率的下降,其降幅超过在目标区探测到目标概率的增幅,因此曲线的后半段是呈现下降趋势的。在图 5 中由于未产生虚警的概率与没有产生漏警概率的都呈下降趋势,所以整条曲线呈下降趋势。

从图 2~5 可以看出当回波信号 k_s 增加或噪声信号 k_b 减小时,正确探测到目标的概率也随之增加,并趋近于 1。图 2~5 的探测概率出现折线,这是由于阈值是由回波信号和噪声信号光电子数的平

均值确定的,见(2)式,因此当 k_s 增加或 k_b 减小时,阈值 k_T 也随之增加,探测概率随之增加,直至趋近于 1,从而造成了在图中出现折线的问题。

4.3 影响阈值的因素

根据上两节的结论,随着回波信号 k_s 增加或噪声信号 k_b 的减小,阈值随之增加,可以有效地提高探测概率,抑制错误概率。因此能够影响回波信号强度和噪声信号强度的变量都可以使阈值发生改变,从而提高探测概率。

根据(2)~(4)式,可以看出为了提高激光雷达的探测概率,显然应从激光雷达本身诸因素考虑。提高回波信号强度的方法主要包括提高激光器发射功率,缩短探测距离,增加有效探测面积,提高激光波长,降低探测器像素数等。降低噪声信号的方法有提高探测器灵敏度,缩短门选通时间来降低探测器接收到的背景光噪声,减小有效探测面积,减小滤光片带宽等。其中增大激光发射机的峰值功率,增大接收口径,选择合适门选通时间,滤光片带宽等都是可行的技术方案。但这些因素在现有的系统中受激光发射器和接收机硬件条件限制较多。压缩激光束发散角可提高测距能力,但发散角必须与系统精度匹配。光电探测器的灵敏度与器件的工艺水平有关,提高灵敏度的难度很大。因而有效地改变探测距离和探测器像素数,就可以影响检测阈值,从而达到提高探测概率的效果。

5 结 论

根据光子统计模型,由极大似然法则,根据典型距离选通 3D 成像激光雷达的构成和参数,计算了探测器探测到信号时阴极发生光电子数的阈值,形成系统判据。并通过改变阈值的改变,提高了探测概率,并抑制了错误概率,同时对系统判断接收到信号的探测概率进行了计算。结合距离选通成像激光雷达的特点,分析了在单一选通时间内的 4 种探测情况的概率,然后综合分析多个选通时间段的联合概率,即系统的探测概率,虚警概率和漏警概率。采用蒙特-卡罗模拟方法进行的分析讨论,验证了距离选通成像激光雷达联合概率的计算公式。根据本文讨论该系统探测概率和错误概率随信号光电子变化的依赖关系以及仿真结果,说明提高激光器发射功率,或降低背景噪声信号,或缩短探测距离都可以有限度地提高系统的探测概率。而系统判据所决定的阈值则应该随着背景噪声和激光信号功率的改变而改变,否则系统的探测概率随激光信号功率的提高将

无限趋近一个小于 1 的值,对提高系统性能没有显著帮助。而当阈值随背景噪声和激光信号功率改变时,探测概率将在一定程度上得到提高。而受系统硬件的限制,在满足探测要求的情况下,尽量缩短探测距离和减少探测器像素数,增加接收目标的有用信号光子数,并同时根据极大似然估计法来确定阈值,从而达到提高探测概率的目的。

参 考 文 献

- 1 Jacques G. Verly, Richard L. Delanoy. Model-based auto-matic target recognition (ATR) system for forwardlooking groundbased and airborne imaging laser radars (LADAR)[J]. *Proc. IEEE*, 1996, **84**(2): 126~163
- 2 Ziqin Li, Qi Li, Zhaoshuo Tian *et al.*. Processing for laser radar range images[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(4): 210~212
- 3 Li Ziqin, Li Jinxin, Wang Qi. Suppressed algorithm of lidar's range image background[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1469~1472
李自勤, 李金新, 王 骐. 激光雷达距离像背景抑制算法研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11): 1469~1472
- 4 Chen Zhe, Li Qi, Wang Qi. Comparison and analysis of background suppression methods of range image for coherent Ladar[J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(12): 1120~1123
陈 哲, 李 琦, 王 骐. 相干激光雷达距离像背景抑制方法比较和分析[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(12): 1120~1123
- 5 Chen Xiaoqing, Ma Junguo, Fu Qiang *et al.*. Range anomalies suppression method of coherent laser radar range image[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 181~185
陈晓清, 马君国, 付 强等. 相干激光雷达距离像背景抑制方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 181~185
- 6 Liu Houtong, Zhong Zhiqing, Li Chao *et al.*. Statistical study of energy-optimized distribution for sand-dust detection using airborne Lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 1913~1919
刘厚通, 钟志庆, 李 超等. 机载激光雷达沙尘探测能量优化配置的统计研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 1913~1919
- 7 Li Qi, Wang Yongzhen, Wang Qi *et al.*. Noise suppression algorithm of coherent Ladar range image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 581~584
李 琦, 王永珍, 王 骐等. 相干激光雷达距离像的噪声抑制算法研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 581~584
- 8 Joseph W. Goodman. *Statistical Optics*[M]. New York: John Wiley & Sons, 2000. 85~98
- 9 Sun Jian, Zhang Xiaohui, Ge Weilong *et al.*. Relation between imaging quality and gate-control signal of underwater range-gated imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2187~2190
孙 健, 张晓晖, 葛卫龙等. 距离选通激光水下成像系统的门控信号对图像质量的影响[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2187~2190
- 10 Lü Hua, Su Jianzhong. Scannerless 4D imaging technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(suppl.): 202~205
吕 华, 苏建忠. 无扫描四维激光成像技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(suppl.): 202~205
- 11 Li Yu, Deng Jiahao, Zhao Guifen *et al.*. Analysis on reliability of the laser detecting system based on Monte-Carlo method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, **36**(s): 187~189
李 钰, 邓甲昊, 赵桂芬等. 基于蒙特卡罗方法的激光探测系统可靠性分析[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(s): 187~189