

文章编号: 1001-3806(2016)06-0830-04

## 基于不同阳光背景的激光告警概率曲线研究

梁巍巍<sup>1</sup>, 谈蕊<sup>2</sup>, 郭豪<sup>1</sup>, 殷瑞光<sup>1</sup>, 赵宏鹏<sup>1</sup>, 李波<sup>1</sup>

(1. 中国洛阳电子装备试验中心, 洛阳 471003; 2 中国航空工业集团公司 洛阳光电设备研究所, 洛阳 471000)

**摘要:** 为了对复杂背景光条件下激光告警设备进行效能评估, 基于不同阳光背景开展了激光告警概率曲线的相关研究。首先, 对激光告警设备面临的复杂背景光进行了分析; 其次, 通过理论研究和实验验证, 初步获得了激光告警设备在不同强度阳光背景下告警概率曲线变化规律; 最后, 提出了一种由典型阳光背景下告警概率曲线测试结果推算到不同阳光背景下告警概率曲线的方法。结果表明, 阳光背景辐射严重影响着激光告警设备的性能, 告警阈值随着阳光辐照强度的增加而增加, 告警灵敏度下降。此研究结果有助于进一步提高激光告警设备评估能力。

**关键词:** 激光技术; 激光告警; 概率曲线; 阳光背景

**中图分类号:** TN977

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.06.012

### Study on laser warning probability curve in different background sunlight

LIANG Weiwei<sup>1</sup>, TAN Rui<sup>2</sup>, GUO Hao<sup>1</sup>, YIN Ruiguang<sup>1</sup>, ZHAO Hongpeng<sup>1</sup>, LI Bo<sup>1</sup>

(1. Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471003, China; 2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, Aviation Industry Corporation of China, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** In order to evaluate the laser warning device in different background light, the study of laser warning probability curve based on different background sunlight was presented. Firstly, the complex light environment for laser warning device was analyzed. Then, preliminary study results of laser warning probability curve variation were obtained by theoretical research and experimental verification. Finally, a calculating method of laser warning probability curve from typical to different intensity irradiance background sunlight was introduced. The results indicate that the background sunlight has a big influence on the performance of the laser warning device, and the warning threshold increases with the increasing of the intensity of sunlight irradiance. The results will be helpful for effect evaluation of laser warning.

**Key words:** laser technique; laser warning; probability curve; background sunlight

## 引言

激光威胁日趋严重, 各国均在大力发展激光对抗技术, 激光告警设备是一种用于截获、测量、识别敌方激光威胁的存在, 确定威胁源方位、种类及工作特性并实时告警的光电对抗侦察设备, 可用于对激光制导系统、激光测距机、激光雷达、大功率激光压制设备及战术激光系统等激光信号进行实时探测、识别和告警<sup>[1-5]</sup>。典型的激光告警装备有美国 Perkin-Elmer 公司研制的 AN/AVR-2 型激光告警接收机、英国和挪威联合研制的 RL-1 和 RL-2 型激光告警器、德国 Alcatel SEL 公司研制的 HLWE 型激光告警设备等, 目前广泛装备于各种飞机、坦克和水面舰艇上<sup>[6-12]</sup>。

但激光告警设备面临着十分复杂的背景光环境, 特别是普遍存在、不可避免的阳光背景, 影响着设备的激光告警概率曲线和灵敏度, 因此, 如何定量研究不同强度阳光背景对激光告警设备的影响及其规律成为本文的主题。本文中通过理论研究, 仿真计算了不同阳光背景强度下激光告警设备的告警概率曲线, 分析了告警概率曲线变化规律, 通过实验验证, 提出了一种由典型阳光背景下告警概率曲线测试结果推算到不同阳光背景下告警概率曲线的方法, 基于不同阳光背景的激光告警概率曲线研究, 可以为激光告警设备的设计和考核提供理论依据。

### 1 激光告警设备面临的复杂背景光分析

激光告警设备接收到的不仅有激光信号, 还有十分复杂的背景光信号, 如经过目标反射或大气散射的太阳光、导弹尾焰、炮火闪光、闪电等, 由于背景光谱包含激光告警波长, 尤其是当背景光较强或作用距离较近时, 有可能使告警设备告警波长范围内的光能量

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11504420)

作者简介: 梁巍巍(1983-), 男, 硕士, 工程师, 现主要从事激光测试技术方面的研究。

E-mail: liangblue1044@163.com

收稿日期: 2015-11-03; 收到修改稿日期: 2015-11-23

密度超过告警探测器灵敏度,导致激光告警设备虚警。因此,背景光的存在,使激光告警设备减小了输出信噪比,降低了探测灵敏度,增加了激光告警设备的虚警率,限制了系统探测能力的进一步提升。为了抑制背景光的影响,降低激光告警设备虚警率,有很多文献报道采用加装窄带滤光片、相关检测、提高比较器阈值等方法<sup>[13-16]</sup>,减小背景光对激光告警设备的影响,但均有一定的限制性。

窄带滤光片的透过光谱带宽较窄,但其带外透过光谱并非理想化等于零,对背景光的抑制有限,背景光仍能够通过光学系统前端到达光电探测器;由于激光告警设备多采用多元探测器,同时进入两个探测器视场内的背景光之间具有相关性,采用相关检测方法处理,可能会造成背景光相关增强,甚至会导致激光告警设备产生虚警,增加系统虚警率;提高比较器阈值虽然可以降低激光告警设备的虚警率,但是同样也会使激光告警设备的作用距离大大减小,严重影响告警距离这一核心指标。激光告警设备面临着十分复杂的背景光环境,特别是阳光背景,严重影响着激光告警设备的作战效能,现有处理方法均不能有效地消除阳光背景的影响,因此,有必要分析不同阳光背景对激光告警设备的影响。

## 2 基于不同阳光背景的激光告警概率曲线

激光告警概率是反应激光信号存在情况下激光告警设备探测到信号并实施告警的概率,是激光告警设备的重要指标。下式为告警设备的告警概率:

$$P_d \approx \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{I_s - I_t}{\sqrt{2} I_n} \right) \right] \quad (1)$$

式中,  $P_d$  为正确发现信号的概率,简称告警概率;  $I_n$  为噪声电流;  $I_t$  为阈值电流;  $I_s$  为信号电流。  $\operatorname{erf}(x)$  是高斯误差函数,其表达式为:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (2)$$

由告警概率表达式可知:当  $I_s = I_t$  时,  $P_d \approx 50\%$ ; 当  $I_s \gg I_t$  时,  $P_d \approx 100\%$ 。

显然,在探测器动态工作范围之内时,  $I_s$  与探测器接收到的激光辐射峰值功率密度  $P_{\max}$  成正比,即有  $I_s = R_d P_{\max} S \cos \theta$ , 其中  $R_d$  是探测器的功率-电流响应度,当工作电压一定时,  $R_d$  是一个固定值;  $S$  为探测器面积;  $\theta$  为激光辐射方向与探测器表面法线方向的夹角。

则(1)式可改写为:

$$P_d \approx \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{P_{\max} R_d S \cos \theta - I_t}{\sqrt{2} I_n} \right) \right] \quad (3)$$

即:

$$P_d \approx 0.5 + 0.5 \operatorname{erf}(a P_{\max} - b) \quad (4)$$

$$\text{式中, } a = \frac{R_d S \cos \theta}{\sqrt{2} I_n} > 0, \quad b = \frac{I_t}{\sqrt{2} I_n} > 0.$$

因此,激光告警概率  $P_d$  可以简化为仅与  $a$  和  $b$  有关的函数,  $a$  和  $b$  均与噪声电流  $I_n$  有关,需要分析告警设备的噪声电流。要估算背景噪声的大小,需要研究背景辐射功率。对于告警探测器,任何进入视场内的发热发光的物体都可能成为背景因素,常见的背景辐射源包括:环境温度辐射;太阳光的直射;地球目标、大气、星体等对太阳的反射等。

当激光告警设备视场里有太阳时,太阳光散粒噪声会产生一个平均的噪声电流;自由电子的无规则热运动会产生热噪声;探测器噪声中包含散粒噪声、产生-复合噪声、热噪声和低频噪声,当光伏探测器取反偏工作时,可有效抑制散粒噪声,同时它是高频工作,低频噪声影响也很小;在直接探测系统中,当光功率信号较小时,光电探测器的电信号输出也相应较小,为了信号处理的需要,往往要跟随前置放大器,但放大器不仅放大有用信号,对输入的噪声也同样放大,而且放大器本身还要引入新的噪声,放大器的噪声包括有源器件如晶体管等的噪声和无源器件如电阻电容等的噪声。因此,告警设备探测器噪声主要有3个来源:太阳散粒噪声、热噪声和探测器内部噪声。

根据参量计算,探测器内部噪声远小于前两个噪声(大约小两个数量级),因此,这里主要考虑太阳散粒噪声和热噪声。

在光学暗室内,对激光告警设备进行了告警概率曲线测试,以无阳光背景辐射告警概率曲线为基础,根据告警探测器的具体参量,计算了不同条件下告警概率曲线变化规律,计算不同条件下  $a$  和  $b$  值,推算步骤具体如下:(1)由实际测得的无背景辐射情况下(阳光辐照强度为0)告警概率与告警头处的能量密度值,经过拟合可以得到激光告警设备的告警概率曲线,进而可以得到  $a$  值和  $b$  值;(2)噪声电流由三部分组成,即背景太阳噪声电流、热噪声、探测器内部噪声,由典型激光告警设备探测器参量可以推导出噪声电流总和  $I_n$ ,则由  $b$  值可以得到阈值电流  $I_t$ ,阈值电流在测试中不会发生改变,为一固定值;(3)当工作电压一定时,  $R_d$  是一个固定值;夹角  $\theta$  在测试中不变,激光告警设备为同一设备,因此  $R_d S \cos \theta / \sqrt{2}$  为固定值,不随其它测试条件变化而变化,则由  $a$  和噪声电流  $I_n$  可以得到  $R_d S \cos \theta / \sqrt{2}$ ;(4)由不同环境温度或不同阳光辐照强度可以计算出不同条件下新的噪声电流  $I_n$ ,  $R_d S \cos \theta / \sqrt{2}$

和阈值电流  $I_t$  已知,即可以推导出新的  $a$  值和  $b$  值,就得到了不同环境温度或不同阳光辐照强度下激光告警设备的告警概率曲线。

结合激光告警设备探测器具体参量,计算了不同环境温度下热噪声对告警概率曲线的影响。不同环境温度下激光告警概率曲线如图 1 所示。

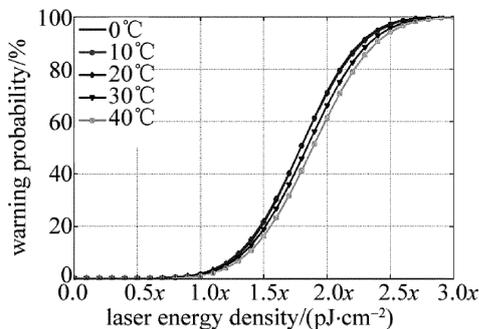


Fig. 1 Relationship of warning probability and laser energy density under different environment temperatures

如图 1 所示,为不同温度下告警概率曲线示意图,环境温度以此设定为 0°C, 10°C, 20°C, 30°C, 40°C。激光告警设备一般会设定某个告警概率对应的激光能量密度为告警阈值,这里假设告警概率为 98% 时对应的能量密度为激光告警设备的告警阈值,可以看出,当环境温度为 0°C, 10°C, 20°C 时,告警概率曲线随环境温度变化很小,告警阈值变化也很小;当环境温度为 30°C, 40°C 时,告警概率曲线随环境温度有明显的变化,告警阈值变化明显;但总体来说,告警概率曲线随环境温度变化不大,说明环境温度对告警概率曲线影响比较小,不是影响激光告警设备性能的主要因素。

其次,当激光告警设备探测器在阳光背景环境中,由于太阳光散粒噪声,探测器会产生一个平均的噪声电流。除了太阳光直接照射探测器外,太阳散粒噪声还可能来源于目标对太阳光的反射和太阳光的大气散射,特别是白天时目标对太阳光的反射以及信号行程上大气对太阳光的散射作用。太阳在地球上的辐照度与太阳的高度角、观测者的海平面高度以及天空中云霾与尘埃的含量有关,其计算较为复杂,可采用 LOWTRAN 软件,根据不同的大气模式进行计算。在 1.06 μm 附近,海平面上(大气质量为 AM1)的太阳光谱辐照度约为 600 W · m<sup>-2</sup> · μm<sup>-1</sup>,为了便于计算,可以设定几个太阳光辐照度值进行计算。

在实验室内,将设备放在带有消光屏蔽的遮光罩内,模拟没有阳光背景辐射的情况,对激光告警设备进行了告警概率曲线测试,以无阳光背景辐射告警概率曲线为基础,根据告警探测器的具体参量计算了不同强度阳光背景下告警概率曲线变化规律。图 2 所示为不同阳光辐照强度下激光告警设备告警概率曲线。

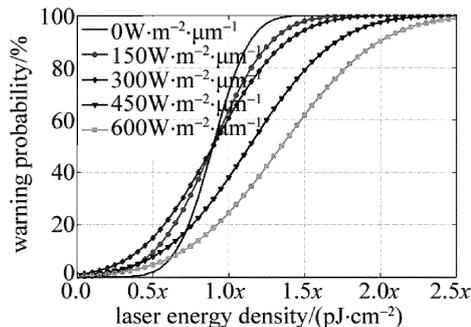


Fig. 2 Relationship of warning probability and laser energy density under different sunlight irradiance intensities

图 2 中阳光背景强度依次为 0 W · m<sup>-2</sup> · μm<sup>-1</sup>, 150 W · m<sup>-2</sup> · μm<sup>-1</sup>, 300 W · m<sup>-2</sup> · μm<sup>-1</sup>, 450 W · m<sup>-2</sup> · μm<sup>-1</sup> 和 600 W · m<sup>-2</sup> · μm<sup>-1</sup>。可以看出,随着阳光背景辐射强度的增加,曲线斜率变小,即告警概率曲线在强阳光背景下变化缓慢;告警概率曲线随着阳光背景强度变化会有明显的变化,特别是告警阈值随着阳光背景强度变大有明显的增加,即告警灵敏度随着阳光背景强度的增加而下降,即造成告警设备探测能力下降。图 3 所示为不同阳光辐照强度下告警阈值示意图。当阳光背景强度增加时,会造成探测器的噪声电流变强,导致告警阈值增加,告警灵敏度下降,降低告警设备探测能力。

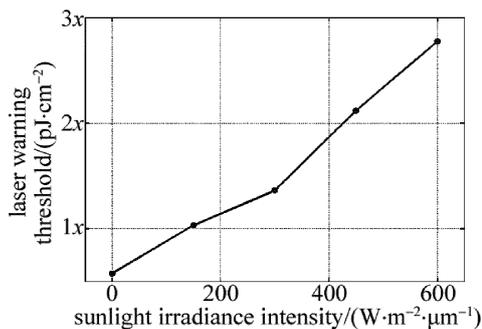


Fig. 3 Relationship of laser warning threshold and sunlight irradiance intensity

为了研究不同强度阳光背景下告警概率曲线的  $a$  值和  $b$  值的变化规律,分别对  $a$  值和  $b$  值相对阳光辐照强度  $e$  进行了拟合,拟合曲线如图 4 所示。其中图 4a 为  $a$  值相对阳光辐照强度  $e$  的拟合曲线;图 4b 为  $b$  值相对阳光辐照强度  $e$  的拟合曲线,黑点为数据点,拟合曲线 1 均为 4 阶函数。可以看出,拟合曲线与数据点重合度较好。因此,通过  $a$  值和  $b$  值相对阳光辐照强度  $e$  拟合曲线,可以很方便地得出任意阳光辐照强度下的  $a$  值和  $b$  值,进而可以得到任意阳光辐照强度下的激光告警设备告警概率曲线。

通过分析可以看出,环境温度不是影响激光告警设备告警概率曲线的主要因素,阳光背景强度才是影响激光告警设备告警概率曲线的主要因素,得到了激

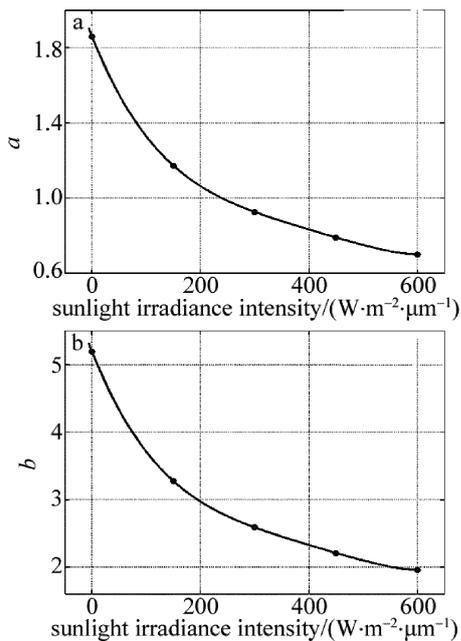


Fig. 4 Fitting curve of  $a$  and  $b$  vs. sunlight irradiance intensity  $e$

光告警设备告警概率曲线随不同强度阳光背景的变化规律,通过典型阳光背景下告警概率曲线测试结果推算到不同阳光背景下告警概率曲线的方法,可以实现不同阳光背景环境下激光告警作用距离和散射截获半径的评估。

### 3 结论

通过理论研究和实验验证,初步获得了激光告警设备在不同强度阳光背景下告警概率曲线变化规律,并提出了一种由典型阳光背景下告警概率曲线测试结果推算到不同阳光背景下告警概率曲线的方法,实现了不同阳光背景环境下激光告警作用距离和散射截获半径的评估。

#### 参 考 文 献

[1] PAN H, AI Y, JIANG H L. Application and analysis of sensors technologies based on laser threat warning [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(2): 132-135 (in Chinese).  
 [2] HOU Zh N. The research on signal detection in laser warning [J]. *Journal of Applied Optics*, 2002, 23(5): 14-18 (in Chinese).

[3] WANG J J, ZHANG P L, LI Y, *et al.* Design of indoor simulation test system for laser warning [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(9): 1936-1942 (in Chinese).  
 [4] WANG X Y, ZHANG J. Foreign army laser warning device development and prospect [J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2002(2): 38-41 (in Chinese).  
 [5] YANG Z F, QIAN H W, GAO G H. Development of laser warning technology [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(1): 98-102 (in Chinese).  
 [6] CHEN W, CAO Y P, GONG Ch K, *et al.* Improvement of the directional detection algorithm of fiber-array laser warning receivers [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(3): 252-254 (in Chinese).  
 [7] WANG L, WANG Y Zh, SHEN X J, *et al.* Analysis of detective sensitivity for super wide-angle laser warning system based on grating diffraction [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(3): 293-297 (in Chinese).  
 [8] WANG L, WANG Y Zh, SHEN X J, *et al.* Algorithm for laser spot center locating in super wide-angle laser warning system based on grating diffraction [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(3): 0311002 (in Chinese).  
 [9] SU P, NIU Y X, LI D Q, *et al.* Design and implementation of grating diffraction laser warning system based on DSP [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 643-647 (in Chinese).  
 [10] SU P, NIU Y X, LI D Q, *et al.* Image acquisition and processing of a laser warning system based on planar array CCD [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(5): 394-399 (in Chinese).  
 [11] SUN Ch Sh, ZHANG X H, ZHANG Sh. Research on the layout and evaluation of laser warning receiver [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(4): 419-423 (in Chinese).  
 [12] ZHANG W A, WANG L, REN J G. Research on laser threat source localization of omni-directional laser warning system based on scattering laser detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0115004 (in Chinese).  
 [13] LI Sh W, ZHANG J L, HAO J, *et al.* Elimination of the interference of bias light for laser warning systems [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(5): 642-644 (in Chinese).  
 [14] WEI W D, SUN X Q, SUN X J. Improvement method in laser pulse correlation detection [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2011, 26(3): 4-9 (in Chinese).  
 [15] WEI W D, SUN X Q, SUN X J. A method for background light interference suppression in laser pulse correlation detection [J]. *Electronics Optics & Control*, 2012, 19(4): 31-34 (in Chinese).  
 [16] WEI W D, SUN X Q, LI H B, *et al.* Correlation detection of dual-wavelength laser pulse suppressing background light interference [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1777-1783 (in Chinese).