

# 基于探测概率曲线的探测灵敏度测试方法

马娜<sup>1</sup>, 郭豪<sup>2</sup>, 雷萍<sup>1</sup>, 朱峰<sup>1</sup>

(1. 63891 部队, 河南 洛阳 471003; 2. 63892 部队, 河南 洛阳 471003)

**摘要:**相对于传统直接测试探测灵敏度的方法,提出了基于探测概率曲线的探测灵敏度测试方法,详细阐述了测试方法和步骤以及数据处理方法。按照上述方法,对某高性能激光探测接收机的探测灵敏度进行了测试,测试过程及结果表明,该方法在操作的简便性和测试结果的准确性上均优于传统测试方法。

**关键词:**激光技术;激光探测;探测概率;灵敏度

**中图分类号:**TN971 **文献标识码:**A

## New test method of detection sensitivity based on probability curve

MA Na<sup>1</sup>, GUO Hao<sup>2</sup>, LEI Ping<sup>1</sup>, ZHU Feng<sup>1</sup>

(1. 63891 Unit, PLA, Luoyang 471003, China; 2. 63892 Unit, PLA, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** Compared to traditional test mode, a novel detection sensitivity test method based on probability curve is brought forward, the test method and procedure and the data-processing algorithm is represented. According to this test method, detection sensitivity is tested for one laser detector with high performance, the operating procedure and results prove that the novel method is better than the traditional in convenience and accuracy.

**Key words:** laser technology; laser probing; detectivity; detection sensitivity

### 1 引言

探测灵敏度(detection sensitivity)是反映激光探测接收机性能的一个重要指标,它直接影响到激光探测接收机的动态范围、作用距离等诸多重要指标,如何准确地测量出高性能激光探测接收机的探测灵敏度,是全面客观地评判激光探测接收机性能时必须解决的重要问题之一。

与传统的探测灵敏度测试方法相比,本文用激光漫反射板取代大倍率激光衰减片、用测试探测概率曲线取代直接测试探测灵敏度的方法,能够克服测试条件的限制,减小测试工作量,能够更为准确可靠地测试出高性能激光探测接收机的探测灵敏度。

### 2 传统的探测灵敏度测试方法

在国军标<sup>[1]</sup>中,探测灵敏度的定义为:满足探

测概率和虚警率要求的最小可接收辐射照度。所以必须要重复测量,以求取相应的探测概率,传统的探测灵敏度测试方法如图1所示。

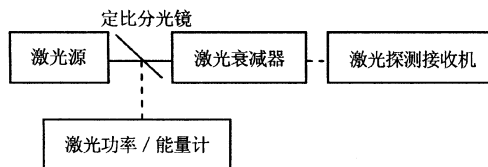


图1 传统的探测灵敏度测试框图

激光经定比分光镜分光后,一部分激光进入激光衰减器,经衰减器衰减后进入激光探测接收机,一部分激光用激光功率/能量计接收,实时监测激光的功率或能量。将激光衰减器的衰减量调节到合适

作者简介:马娜(1981-),女,硕士,主要从事光电对抗方面的研究。E-mail:manaoc@yahoo.com.cn

收稿日期:2009-06-08

值,发射激光信号,记录激光探测接收机的探测情况,重复测量,求取探测概率;然后改变衰减器的衰减量,重复上述步骤,直到探测概率达到规定值为止,记录此时衰减器的衰减量,从而求得激光探测接收机的探测灵敏度。

从测试理论上讲,传统的探测灵敏度测试方法是客观正确的,但在实际测试中,可以发现传统的探测灵敏度测试方法有几个明显的不足:

(1)由于衰减器一般都是由多片分片定标的衰减片组合而成的,是非连续可调的,并且总的衰减片数量有限,所以衰减量很难调节到正好满足规定探测概率的程度。

(2)即使衰减器能够满足要求,为了将探测概率恰好调节到规定值,需要进行很多组测试,测试工作量很大。

(3)根据测试经验,衰减片衰减倍率越大,其标称衰减倍率与实际衰减倍率之间的误差可能就越大,这将严重影响测试结果的准确性。

### 3 基于探测概率曲线的探测灵敏度测试方法

为了克服传统探测灵敏度测试方法的不足,本文提出了基于探测概率曲线的探测灵敏度测试方法,测试框图如图2所示。

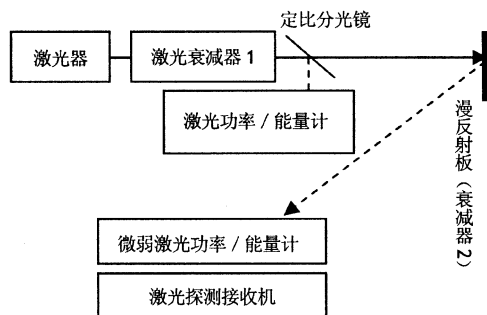


图2 基于探测概率曲线的探测灵敏度测试框图

在经消光处理后的实验室里(抑制杂散光),激光器瞄准激光漫反射板中心,衰减器置于激光器发射窗口前,定比分光镜置于衰减器之后,一部分激光经定比分光镜进入激光能量计,用来监测激光能量,另一部分照射到激光漫反射板上,经漫反射板反射后,微量的激光入射到激光探测接收机。

与传统的探测灵敏度测试方法不同的是,这里的激光衰减器分开为两部分,一部分位于定比分光镜之前,是一个小倍率准确并且可精细调节的衰减器1,另一部分位于定比分光镜之后,由激光漫反射板充当的一个大的固定倍率激光衰减器2,激光探测接收机与激光漫反射板之间的距离根据衰减倍率

的需要进行设定。这样做的优点是可以直接测量经衰减器衰减后的能量,既实现了对激光能量的大倍率衰减和精细调节,又消除了衰减器的准确度对测试结果的影响,解决了传统探测灵敏度测试方法中能量测量误差可能较大的不足。

#### 3.1 测试方法与步骤

整个测试主要可分为三个步骤。

##### (1) 标定漫反射衰减系数

为了得到此时激光探测接收机处的能量密度(或峰值功率密度),可以采用标定漫反射衰减系数的方法,具体做法如下:激光衰减器1的衰减倍率取一合适值,激光器发射重频激光信号,利用激光能量计测量出分光镜侧面出射的激光能量 $E_0$ ,同时利用微弱激光能量计测量出经漫反射板反射后照射在激光探测接收机处的激光能量密度 $E_{w0}$ ,增大激光衰减器1的衰减倍率,当能量计测得的能量被衰减至较小值 $E_i$ 时,利用微弱能量计也无法测量出激光探测接收机处的能量密度 $E_{wi}$ ,这时就可以利用公式

$$E_{wi} = E_{w0} \times E_i / E_0 \quad (1)$$

来计算出 $E_{wi}$ ,即标定漫反射衰减系数 $E_{w0}/E_0$ 的目的,是为了通过监测分光镜侧面的能量,结合漫反射衰减系数 $E_{w0}/E_0$ ,就可以计算得到激光探测接收机处的能量密度 $E_{wi}$ ,可以认为漫反射衰减系数在整个测试中是不变的。

##### (2) 测试探测概率曲线

在标定漫反射系数之后,就可以进行探测概率曲线的测试,具体如下:激光器发射激光,记录发射脉冲个数,激光能量计同时测量分光镜侧面的能量,并测试出激光源的脉冲宽度 $\tau$ 。激光探测接收机接收漫反射激光,通过信息处理机处理后,输出并记录探测脉冲个数。逐渐增大激光衰减倍数,使探测概率从100%逐渐降至0,期间监测记录分光镜侧面出口激光能量。根据 $n$ 个测试点的 $(E_{wi}, P_{di})$ 值,拟合探测概率曲线 $P_d(E_w)$ ,并可转换为探测概率曲线 $P_d(P_w)$ ,其中 $P_w$ 为激光脉冲峰值功率密度( $P_w = E_w/\tau$ )。

##### (3) 计算探测灵敏度

根据拟合得到的公式 $P_d(P_w) = f(P_w)$ ,令 $P_d(P_w) = f(P_w)$ 等于规定的探测概率(如95%),解得 $P_{ws}$ 即为探测灵敏度。也可在探测概率曲线 $P_d(P_w)$ 上直接查找探测概率为规定值时对应的激光峰值功率密度 $P_{ws}$ 即为探测灵敏度。

3.2 测试数据处理及结果分析

按照上述方法,对某高性能激光探测接收机的

探测灵敏度进行了测试,一共进行了13组不同功率密度的测试,经数据处理后结果如表1所示。

表1 测试结果处理表

序号	激光探测接收机处峰值功率密度(单位略)	探测概率
1	2.436038491	0
2	2.59353547	0
3	4.040602044	0.659567463
4	4.107175875	0.810643008
5	4.143469351	0.824487814
6	4.462808987	0.938671747
7	4.651739077	0.930693069
8	5.161135585	0.902805941
9	5.633577046	0.955436013
10	5.662029456	0.977422233
11	20.19229685	0.990147783
12	37.19915742	0.990243902
13	306.0553402	1

根据拟合函数类型选择的不同,分别采用两种方法进行曲线拟合。

(1)最小二乘法分段拟合

分别采用5次多项式和双曲线作为拟合函数,按最小二乘原则进行分段拟合,整条探测概率曲线表达式  $P_d(x)$  取下式进行计算( $x$  为峰值功率密度,下同,单位略):

$$P_d(x) = \begin{cases} 0.0 \leq x \leq 2.5 \\ -0.00006793x^5 + 0.0045592x^4 - 0.090285x^3 + \\ 0.57213x^2 - 0.9348x - 0.0038328, 2.5 < x < 5.21 \\ 1 - \frac{0.073555}{x}, 5.21 \leq x < 40 \\ 1, x \geq 40 \end{cases} \quad (2)$$

采用分段拟合的方法,使得拟合函数  $P_d(x)$  的精度比上述两种方法中的任意一种的单独拟合效果都好得多,并且拟合曲线的平滑性也得到较好的保持。将多项式与双曲线交点处图形局部放大,可观察拟合曲线的平滑性,如图3所示。分段拟合的探测概率曲线如图4所示。

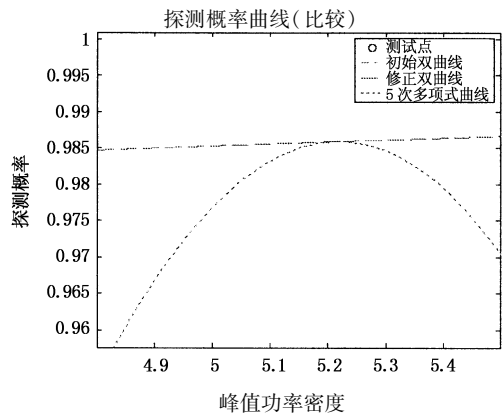


图3 多项式与双曲线交点处拟合曲线的平滑性示意图

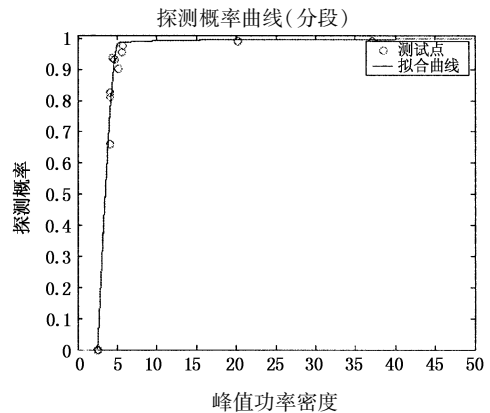


图4 探测概率曲线(分段拟合)

(2)用误差函数拟合

之所以选用误差函数拟合探测概率曲线,是基于根据问题的实际背景来判定拟合函数的类型这一原则。对于白噪声中的激光脉冲探测来讲,噪声电流的分布是高斯型规律<sup>[2-3]</sup>,探测概率的表达式可写成以下形式:

$$P_d(x) \approx 0.5 + 0.5 \operatorname{erf}(ax - b) \quad (3)$$

其中,  $a = \frac{R_d S \cos \theta}{\sqrt{2} I_n} > 0$ ;  $b = \frac{I_t}{\sqrt{2} I_n} > 0$ ; 误差函数

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

式中,  $P_d$  为探测概率;  $I_n$  为噪声电流的有效值;  $I_t$  为阈值电流;  $I_s$  为信号分量的峰值振幅;  $i_n$  为噪声电流分量。显然,在探测器动态工作范围之内时,  $I_s$  随探测器接收到的辐照度  $P_{\max}$  成正比, 即有  $I_s = R_d \times P_{\max} \times S \times \cos \theta$ , 这里  $R_d$  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。而  $I_n$  和  $I_t$  与入射激光的辐照度无关, 均是常数。

如果上述参数全部已知, 可以直接给出探测概率的表达式, 但由于  $I_n$  较难测得, 所以需要通过选择合适的  $a, b$  来拟合出探测概率表达式。当  $a = 1.6, b = 6$  时, 拟合得到的探测概率曲线如图 5 所示。此时的探测概率表达式  $P_d(x)$  为:

$$P_d(x) \approx 0.5 + 0.5 \operatorname{erf}(1.6x - 6) \quad (4)$$

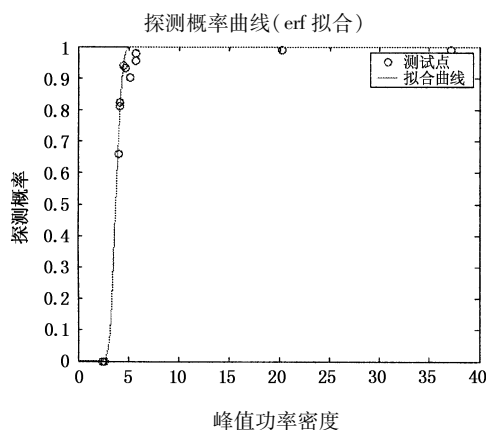


图 5 探测概率曲线(误差函数拟合)

通过上述两种拟合方法的对比可以发现,在拟合效果上,用误差函数拟合的效果明显比分段拟合的效果要好,因为它结合了激光探测问题的实际背景,更好地体现出了测试数据中蕴藏的规律;在拟合函数表达式形式上,前者采用的是分段表达的形式,多达四段的表达式较为复杂且不易使用,后者是统一的表达式,简洁易用。因此,根据问题的实际背景来判定拟合函数的方法比采用观察法选定拟合函数更为科学准确。

根据拟合得到的探测概率表达式,令表达式左端取规定的探测概率,求出右端的峰值功率密度即为探测灵敏度。这里探测概率取 98%, 则按照分段拟合的方法计算得到激光探测接收机的灵敏度为 5.043 (单位略), 按照误差函数拟合的方法计算得到激光探测接收机灵敏度为 4.658 (单位略)。此结果与该激光探测接收机的灵敏度指标很接近。

4 结 论

按照基于探测概率曲线的探测灵敏度测试方法,一方面可以不必把衰减量正好调节到满足规定探测概率的程度,只需要按探测概率从高到低或从低到高测试几个典型点即可按拟合出探测曲线,进而求得探测灵敏度,这样对衰减器的要求就大大降低了,另一方面也不需要很多组测试,减少了测试工作量,而且测试结果的准确度也比较高,具有较好的工程实践意义。

参考文献:

[1] 成斌,薛建国,赵威,等. GJB5099-2004 地面激光侦察告警设备定型试验规程[S]. 北京:总装备部军标出版发行部,2004,(6):1-7.  
 [2] 魏光辉,等. 激光技术在兵器工业中的应用[M]. 北京:兵器工业出版社,1995:202-210.  
 [3] David H Pollock. The infrared & electro-optical systems handbook countermeasure systems[M]. Washington:SPIE Optical Engineering Press,1993,7:73-79.