

激光探测灵敏度与散射截获半径相关性研究

焦凯强, 赵渊明, 王忆夏, 黄尚兵, 李忠旺

中国电子科技集团公司第二十七研究所, 光电系统部, 河南 郑州

收稿日期: 2025年3月7日; 录用日期: 2025年4月9日; 发布日期: 2025年4月17日

摘要

为研究激光探测灵敏度对散射截获能力的影响, 模拟了5种不同探测灵敏度的激光探测模块, 利用吸收型衰减片测试模块的探测灵敏度; 在典型大气条件及激光源照射场景下, 通过外场试验的方式, 测试了不同模块的散射截获能力, 记录对应的散射截获半径。通过数据分析, 得出激光探测灵敏度与散射截获半径间的相关性, 试验结果表明: 散射截获半径与激光探测灵敏度正相关, 即探测灵敏度越高, 散射截获半径越大。

关键词

激光, 探测灵敏度, 散射截获半径

The Correlational Study on Laser Detection Sensitivity and Scattering Interceptive Range

Kaiqiang Jiao, Yuanming Zhao, Yixia Wang, Shangbing Huang, Zhongwang Li

Optoelectronic Systems Division, The 27th Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Zhengzhou Henan

Received: Mar. 7th, 2025; accepted: Apr. 9th, 2025; published: Apr. 17th, 2025

Abstract

In order to research the influence of laser detection sensitivity on the scattering interception capability, five laser detection modules with different detection sensitivities were simulated and interfaced with signal processing modules. These modules' detection sensitivity was tested with absorption type attenuation sheet. The scattering interception radius of these modules were tested and

recorded through field experiments under typical atmospheric conditions and laser source irradiation scenarios. The correlation between the detection sensitivity and the scattering interception radius was obtained after data analysis. The results show that scattering interception radius was positively correlated with the detection sensitivity, the higher detection sensitivity, the longer scattering interception radius.

Keywords

Laser, Detection Sensitivity, Scattering Interception Radius

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

按工作方式的不同，激光探测设备可分为直接拦截式、散射探测型和二者的复合型[1]，依据各平台对激光探测区域的需求，激光探测设备应具备对直射激光、散射激光探测的能力。其中直接入射光束能量集中、密度大，但由于发散角小，光斑半径通常只有米级，如果只探测直射激光束，激光探测设备的警戒范围很小，但在激光警戒等应用场合，需要利用大气对激光的散射来探测激光[2][3]。大气散射光辐照度较弱，但如果其辐照度大于激光探测系统的灵敏度阈值，将会被设备探测，从而扩大设备的警戒范围[4]。因此，远距离大截获半径激光探测技术是亟需发展的重点，对防护平台而言，一方面可实现远距离探测，另一方面可实现广域激光截获，提高防护区域。

激光探测设备的散射截获半径与诸多因素有关，如设备的探测灵敏度、大气气象条件及测试光源参数等，前期研究结果表明：在某一固定参数激光照射下，辐照度随离轴距离增大近似线性下降，而散射截获半径与脉冲能量近似呈正比线性关系，与脉冲宽度呈反比关系[4]；大气相对湿度变化对激光散射截获半径无明显影响。随着大气能见度的提高，大气对散射激光信号的衰减减小，因而散射截获半径逐渐增大，在能见度约为 18 km 时散射截获半径达到最大值，散射截获半径达到最大值后，由于气溶胶粒子密度的降低，散射激光信号强度减弱，因而随大气能见度的增加散射截获半径而逐渐减小[5]。相关研究人员已完成激光散射截获模型研究，威胁源参数、大气气象条件等因素对散射截获半径相关性研究，未见探测灵敏度与散射截获半径相关性研究。

本文模拟了 5 种探测灵敏度的激光探测模块，利用吸收型衰减片测试模块的探测灵敏度；在典型大气条件及激光源照射场景下，通过试验测试了不同探测灵敏度模块的散射截获能力，记录模块对应的散射截获半径，并对试验数据进行整理、分析，最终得出激光探测灵敏度与散射截获半径相关性研究结果。

2. 激光探测灵敏度

激光探测灵敏度是评价激光探测设备的重要参数，是满足一定探测概率和虚警率要求下的最小可接受辐射照度，即为激光探测设备可探测识别的最弱光功率密度，激光探测灵敏度在一定程度上可以反映设备探测距离远近。

探测灵敏度与光学镜头增益、光电探测器响应度、放大电路参数等息息相关。需综合考虑设备探测概率、虚警率、探测距离间的制约关系，确保设备满足高探测概率、低虚警率的前提下，具备高探测灵敏度。

2.1. 激光探测灵敏度理论计算

对于信号处理算法及光学增益设计固化的激光探测设备而言，探测灵敏度主要与探测系统的电路性能有关，探测系统的光电探测器响应度、放大电路参数、电路噪声等对探测灵敏度产生不同程度的影响，其中噪声源主要有热噪声和散粒噪声，具体分析如下：

(1) 热噪声电流

激光探测设备往往采取 PIN 光电二极管作为探测感知激光的传感器，在工作原理上，光电探测器可简化成一个等效电阻为 R 的电流源。当光电探测器处于工作状态时，其内部等效电阻自由电子发生随机热运动现象，由电子散射而产生电流为热噪声电流，等效电阻两端随机起伏的电压为热噪声电压。经公式推导，处于工作状态下的光电探测器热噪声电流 I_{nt} 计算公式如下：

$$I_{nt} = \sqrt{\frac{4K_B T \Delta f}{R}} \quad (1)$$

式中， K_B 为玻尔兹曼常数； T 为最高工作温度； Δf 为噪声带宽； R 为光电探测器负载等效电阻。

(2) 光子噪声电流

无光照时，光电探测器在热激发作用下随机产生的电子造成的起伏为散粒噪声；有光照时，探测器由光激发产生随机载流子，引起噪声起伏，由光子起伏产生的噪声为光子噪声。光子噪声与背景辐射产生的光电流 I_b 与噪声带宽 Δf 等有关，其中背景辐射产生的光电流 I_b 的计算公式如下：

$$I_b = EA\tau_2 R_i \Delta \lambda \quad (2)$$

式中， E 为太阳平均光谱辐照度； A 为探测器有效光敏面积； τ_2 为背景光透过率； R_i 为探测器光谱电流响应度。

光电探测器的光子噪声 I_{nd} 计算公式如下：

$$I_{nd} = \sqrt{2eI_b \Delta \lambda} \quad (3)$$

式中， e 为电子电荷。

(3) 总噪声电流

探测器的总噪声电流 I_n 计算公式如下：

$$I_n = \sqrt{I_{nt}^2 + I_{nd}^2} \quad (4)$$

(4) 激光探测灵敏度

为兼顾探测概率和虚警率要求，若已知电路噪声系数 SF ，探测电路输出信噪比 $SNR_{需}$ ，总噪声电流 I_n ，光学系统透过率 τ_1 ，探测器光谱电流响应度 R_i ，可计算出可探测的最小光功率密度，即探测灵敏度 E_0 ，计算公式如下：

$$E_0 = \frac{10^{\frac{SNR_{需} + SF}{SF}} I_n}{D_2 \tau_1 R_i} \quad (5)$$

2.2. 激光探测灵敏度测试方法

激光探测灵敏度的测试方法主要有以下几种：

(1) 用激光能量计直接测量

测试方法如下：使用功率可调的激光源对准激光探测模块，调整激光源发射功率，发射激光照射探测窗口，直至模块不能正常输出信号为止，使用激光能量计直接测量此时激光源发射功率。

该方法对激光能量计量程及测试精度要求较高，目前，激光探测灵敏度往往在微瓦量级，甚至百纳瓦量级，该测试方法普适性不高。

(2) 利用激光大气传输模型测试

该测试方法是利用激光在大气中传输辐射功率随距离的变化规律来确定激光探测灵敏度，一般采取外场测试方法。

测试方法如下：在典型大气条件下，使用参数已知的激光源架设在距离激光探测模块 L 处，使激光源出光口瞄准探测模块发射激光，观察并记录模块输出情况；不断改变距离值，得出模块可正常输出的极限距离值，进而计算出模块的探测灵敏度。

结合激光大气传输模型，激光探测灵敏度 E_0 的计算公式如下：

$$E_0 = \frac{4P_t\tau_0}{\pi(L\theta)^2} \quad (6)$$

式中： E_0 为激光探测灵敏度； P_t 为激光源发射功率； τ_0 为大气透过率； L 为激光源与激光探测模块间距离； θ 为激光源发散角。

该测试方法需保证激光源和模块间无视场遮挡，且需激光源出光口远距离瞄准激光探测模块，同时不断改变激光源与模块间距离，测试场地间通视条件要求高，操作难度较大，同时，激光光束质量受大气条件影响较大，难以准确评估到靶光功率密度，该测试方法普适性不高。

(3) 利用激光漫反射特性测定

该测试方法是利用漫反射板的反射特性，以激光探测模块对反射激光输出情况为依据，间接测量模块探测灵敏度。

测试方法如下：将漫反射系数为 ρ 的漫反射板固定在某处，激光源和激光探测模块放置于漫反射板前方距离 L 处，调整激光源的发射功率或距离值，直至模块处于能/不能正常输出的极限，进而测试得到探测灵敏度。激光探测模块的探测灵敏度 E_0 计算公式如下：

$$E_0 = \frac{\rho}{\pi} P_t \frac{A_r}{L^2} \quad (7)$$

式中 A_r 为模块探测器接收孔径面积。该方法需精准标定漫反射板的漫反射系数，难度较大，该测试方法普适性不高。

(4) 利用吸收型衰减片测试

该方法是采用等效衰减的方式，在室内进行探测灵敏度测试，操作简单，可行度较高，常用于激光探测灵敏度测试。

测试方法如下：利用激光功率计测量并标定激光源的输出功率 P_{max} ；将激光源出光口对准激光探测模块窗口发射激光，观察并记录模块输出情况；逐渐在激光源出光口前增加吸收型衰减片，直至模块不能正常输出，记录此时所加衰减片的衰减值 N_1 ，探测灵敏度计算公式如下：

$$E_0 = \frac{P_{max}}{\pi(D/2)^2} 10^{-0.1N_1} \quad (8)$$

式中： D 为激光源出光光斑直径。

3. 散射截获半径

散射截获半径是激光探测设备的重要参数，可用来表征离轴激光截获探测能力。在满足特定探测概

率(如 98%或 100%)的前提下，探测设备可正常响应的最大离轴探测距离称为散射截获半径。散射截获半径不仅是激光探测设备主要的技术参数之一，同时是样机研制与系统作战效能评估的重要内容。

将实测条件下的威胁激光源发射能量、脉冲宽度、传输距离、探测器视场等传输参数输入离轴散射探测模型式进行仿真计算，得到某一离轴距离 DS 处的散射激光辐射照度 E_{sca} ，计算公式如下：

$$E_{sca} = P_0 \tau_{ls} \tau_{DS} \times \frac{\int_{r_1}^{r_2} F(\beta, \Phi) n(r) \exp\left(-\frac{h}{H_p}\right) dr \int_{L_1}^{L_2} \cos(\delta) dL}{k^2 DS^2} \quad (9)$$

式中： $n(r)$ 为气溶胶粒子尺度谱分布； r_1, r_2 为气溶胶粒子半径取值范围； L_1 为散射路径的起点； L_2 为散射路径的终点； τ_{ls} 为直射光大气透过率； τ_{DS} 为散射光大气透过率； P_0 为激光源发射功率； δ 为散射光入射方向与探测器视场中心的夹角； $F(\beta, \Phi)$ 为散射函数； H_p 表示气溶胶标高(特征高度)，取值在 1~1.4 km； k 为玻耳兹曼常量； h 为高度[6]。

针对设计固化的激光探测模块，可根据设计结果，将相关参数带入(5)式，计算得到模块探测灵敏度 E_0 ；同时也可通过吸收型衰减片对模块的探测灵敏度进行测试，将测试光源参数及最大衰减值数据带入(8)式，计算得到探测灵敏度 E_0 。当模块的激光探测灵敏度大于等于激光离轴散射辐照度时，即 $E_0 \geq E_{sca}$ 时，模块可截获探测最大离轴 DS 处的散射激光，DS 为设备散射截获半径的边界，将探测灵敏度带入(9)式，可得到散射截获半径与探测灵敏度间关系，如下式：

$$DS = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{P_0 \tau_{ls} \tau_{DS} \int_{r_1}^{r_2} F(\beta, \Phi) n(r) \exp\left(-\frac{h}{H_p}\right) dr \int_{L_1}^{L_2} \cos(\delta) dL}{E_0}} \quad (10)$$

由上式可知，激光探测模块的散射截获半径与测试光源参数(如出光能量、发散角、脉冲宽度等)、大气气象条件(如大气能见度、大气透过率等)、探测灵敏度等因素均有一定的相关性。当测试光源和大气条件一定时，散射截获半径与探测灵敏度正相关，即模块探测灵敏度越高，散射截获半径越大。

4. 试验情况

为探究散射截获半径与探测灵敏度间相关性，同时验证(10)式的准确性，拟通过外场试验的方式对不同探测灵敏度模块的散射截获半径进行测试。即在标准大气条件及典型测试场景下，使用同一激光源照射不同探测灵敏度模块，通过观察模块输出情况，记录模块可正常探测的极限离轴距离，从而得到各模块的散射截获半径。

4.1. 探测灵敏度测试

采用吸收型衰减片对 5 种激光探测模块的灵敏度进行测试，测试场景示意图见图 1。

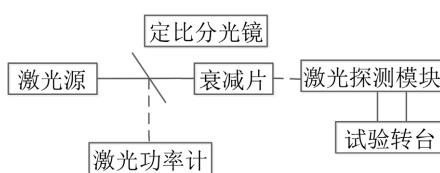


Figure 1. Detection sensitivity testing method
图 1. 探测灵敏度测试方法

测试光源为激光测距机，参数如下：波长 1.064 μm，发射功率 P_{max} ：0.4 MW；出光光斑直径 D ：5

mm。

测试方法如下：将激光测距机对准激光探测模块光学窗口，在测距机出光口前逐渐增加吸收型衰减片，直至模块处于能正常输出的极限，记录此时所加的最大衰减值 N_1 ，将测距机相关参数及最大衰减值带入公式(8)，可计算出模块的探测灵敏度。各模块测试数据及探测灵敏度汇总见表 1。

Table 1. Detection sensitivity test results

表 1. 探测灵敏度测试结果

序号	最大衰减值(dB)	探测灵敏度($\mu\text{W/mm}^2$)
1	90	18.37
2	97	4.12
3	105	0.62
4	120	0.02

4.2. 散射截获半径测试

(1) 测试场景

在典型大气条件下，采用远场照射激光的方式，分别对 5 种探测灵敏度模块的散射截获半径进行测试。测试场景见图 2。

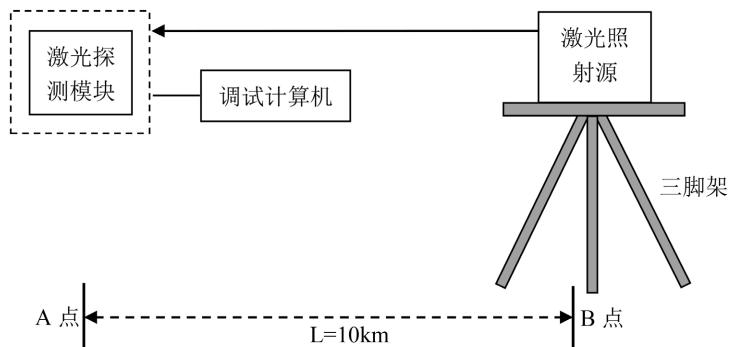


Figure 2. Scene diagram of detection sensitivity testing

图 2. 散射截获半径测试场景图

测试场景图中：A 点分别放置 5 种探测灵敏度的探测模块，通过调试计算机观察记录模块输出情况；B 点处的激光照射源放置于三脚架上，出光口瞄准 A 点的激光探测模块，A、B 两点间距离为 10 km。

(2) 参试设备

5 种激光探测模块。

(3) 配试设备

激光照射源(波长 1.064 μm ，脉冲能量 106.2 mJ，脉冲宽度 10 ns，出光功率 10.6 MW，重频 20 Hz)和调试计算机。

(4) 测试步骤

- 1) 按图 2 安装布置测试场景；
- 2) 激光探测模块和激光照射源加电，通过调试计算机观察并记录探测模块工作状态；
- 3) 使激光照射源出光口对准 A 点处的探测模块，发射激光，通过调试计算机观察并记录模块输出情况；

- 4) 激光照射源沿水平方向一侧转动, 记录探测模块在满足探测概率要求前提下, 激光照射源最大偏转角度 θ_1 ;
- 5) 沿水平方向向另一侧转动激光照射源, 记录探测模块在满足探测概率要求前提下, 激光照射源最大偏转角度 θ_2 ;
- 6) 重复步骤 2)~5), 完成其它激光探测模块散射截获半径测试。

(5) 数据处理方法

激光探测模块散射截获半径计算公式如下:

$$R = \frac{(\tan \theta_1 + \tan \theta_2) \times L}{2} \quad (11)$$

式中: R 为激光探测模块的散射截获半径; θ_1 为水平方向一侧最大偏转角度; θ_2 为水平方向另一侧最大偏转角度; L 为激光照射源与探测模块间的测试距离。

(6) 测试数据

不同探测灵敏度模块的散射截获半径测试数据记录见表 2。

Table 2. Record table of test data of different laser reconnaissance and warning equipment
表 2. 不同探测灵敏度模块测试数据记录表

序号	最大偏转角度 θ_1 (mrad)	最大偏转角度 θ_2 (mrad)	探测灵敏度($\mu\text{W}/\text{mm}^2$)	散射截获半径(m)
1	6.8	7.2	18.37	70
2	10.9	11.1	4.12	110
3	15.3	14.7	0.62	150
4	19.6	20.4	0.02	200

(7) 实验结果

由试验数据可知, 当激光照射源参数、外界大气条件和测试场景一定时, 测试过程中, 随着激光探测灵敏度提高, 激光照射源在水平方向上的最大偏转角度 θ_1 、 θ_2 逐渐增大, 探测模块的散射截获半径逐渐增大。

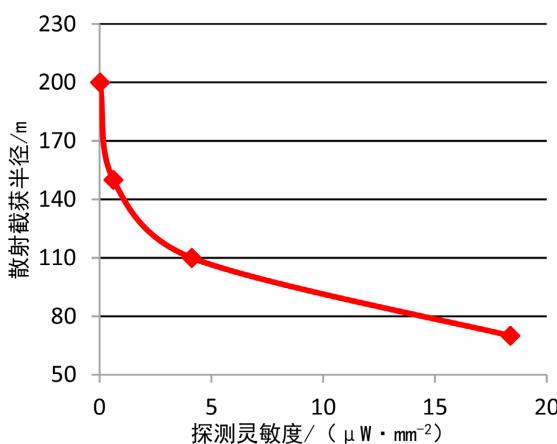


Figure 3. Relationship curve between scattering interception radius and detection sensitivity
图 3. 散射截获半径与探测灵敏度关系曲线

结合(10)式分析可知：对激光探测设备而言，其散射截获能力与探测灵敏度具有一定的相关性，散射截获半径 DS 与探测灵敏度 E_0 两者为幂函数关系，当大气气象条件及测试光源一定时，即直射光大气透过率、散射光大气透过率及激光源发射功率等参数相同时，DS 随着 E_0 数值的减小(探测灵敏度提高)而急剧增大。对表(2)数据进行整理，绘制探测模块散射截获半径与探测灵敏度关系曲线见图 3，从图中可以看出，散射截获半径与激光探测灵敏度正相关，即随着探测灵敏度提高，散射截获半径逐渐增大；当探测灵敏度逐渐提高时，散射截获半径急剧增大，该试验结果与理论分析结果一致。

5. 结论

本文通过外场试验，在典型大气条件和测试场景下，使用同一激光照射源照射激光探测模块，得到了多组不同探测灵敏度模块的散射截获半径数据。试验过程中，激光照射源参数、大气条件和测试场景完全相同，排除了其它因素对散射截获半径的影响，完成了激光探测灵敏度与散射截获半径相关性研究，试验数据充分，结果可靠。

通过试验数据分析，得出以下结论：

- (1) 在激光照射源参数、大气条件、测试场景一定时，散射截获半径与激光探测灵敏度正相关，即探测灵敏度越高，散射截获半径越大；
- (2) 散射截获半径与激光探测灵敏度的关系呈现为非线性，随着探测灵敏度提高，散射截获半径急剧增大，验证了(10)式的准确性。

由此可见，可通过提高探测灵敏度，增大散射截获半径。

参考文献

- [1] 魏光辉, 杨培根. 激光技术在兵器工业中的应用[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995: 200-204.
- [2] 杨在富, 钱焕文, 高光煌. 激光告警技术发展现状[J]. 激光技术, 2004, 28(1): 98-102.
- [3] 陈军, 尤政, 周兆英. 激光散射理论及其在计量测试中的应用[J]. 激光技术, 1996(6): 40-46.
- [4] 巨养锋, 梁东明, 薛建国, 王东. 威胁源参数对激光散射截获半径的影响[J]. 激光与红外, 2011, 41(4): 426-429.
- [5] 巨养锋, 梁东明, 薛建国, 张乐. 气象条件对激光散射截获半径的影响[J]. 应用激光, 2011, 31(4): 338-341.
- [6] 姚梅, 张乐, 陈洁, 郭豪. 激光告警散射截获半径评估建模与仿真[J]. 激光与红外, 2017, 47(2): 216-220.