

文章编号: 1001-5078 (2006) 08-0683-04

## 暗室消光性对激光侦察告警辐射仿真测试的影响

李 华<sup>1,2</sup>, 赵宏鹏<sup>2</sup>, 冯 亮<sup>2</sup>, 朱 震<sup>2</sup>, 张文攀<sup>2</sup>, 陈前荣<sup>2</sup>

(1. 国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 710003; 2. 中国人民解放军 63892 部队, 河南 洛阳 471003)

**摘 要:**研究了利用激光暗室进行的激光侦察告警辐射式仿真测试模式, 提出利用激光指示信号模拟装置的仿真测试方案。分析了仿真测试中暗室漫反射干扰引起的虚警的干扰模式原因和表现, 根据激光目标指示器和激光测距机战场使用与大气传输的理论分析, 给出了告警激光信号能量功率的仿真计算模型, 探讨了激光暗室各个漫反射表面的漫反射特性、漫反射系数(反射率)等因素对激光侦察告警辐射式仿真测试的影响, 为进行激光被动侦察告警辐射式仿真测试提供理论依据和参考。

**关键词:**激光; 暗室消光性能; 侦察告警; 辐射式仿真测试

中图分类号: TN206

文献标识码: A

## The Influence of Laser Extinguishing Chamber Extinguishing Performance on Laser Reconnaissance and Warning Radiation Simulation Test

LI Hua<sup>1,2</sup>, ZHAO Hong-peng<sup>2</sup>, FENG Liang<sup>2</sup>, ZHU Zhen<sup>2</sup>, ZHANG Wen-pan<sup>2</sup>, CHEN Qian-rong<sup>2</sup>

(1. College of Optoelectronics Science and Engineering, NUDT, Changsha 710003, China;

2. 63892 Army Unit, PLA, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** Laser reconnaissance and warning radiation lab simulation test mode in laser extinguishing chamber is analyzed. A simulation test project using laser designating simulator is proposed. The jamming mode reasons and expressions of false alarm caused by laser diffuse reflection in extinguishing chamber are analyzed. According to the theoretical analysis of laser designator and rangefinder used in battlefield and atmospheric propagation, simulation calculating model of warning laser signal's energy and power is given. The influences on laser reconnaissance and warning radiation simulation test, which include diffuse reflection characteristics and diffuse reflection ratio of some different surface and other factors are discussed. Some theory basis and reference about laser passive reconnaissance and warning radiation simulation test are also offered.

**Key words:** laser; extinguishing chamber extinguishing performance; reconnaissance and warning; radiation simulation test

### 1 前 言

构造合适的激光暗室环境是进行激光被动侦察告警和角度欺骗辐射式仿真测试的基本前提<sup>[1]</sup>。尤其是在激光告警仿真测试时, 为了避免不必要的虚警, 需要提供一个近似无反射能量的激光信号传播空间。激光暗室是在土建基础上, 对大厅内各个内表面(内壁、地面以及室内设施表面)进行消光处理, 将其建设成为一个激光暗室, 来构造和形成多方向、多目标激光信号的侦察告警性能测试环境。通

过消光材料<sup>[2]</sup>的作用, 避免激光在被试设备、墙壁及其它物体间反射, 减少激光侦察告警设备的虚警, 保证仿真测试正常进行。

### 2 侦察告警辐射式仿真测试模式分析

侦察告警辐射式仿真测试期间, 被试设备和激光信号模拟分系统、背景信号模拟分系统的信号源

作者简介: 李 华 (1969 - ), 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事光电检测、图像处理工作。E-mail: lihua@sohu.com

收稿日期: 2006-01-14

部分及其架设平台均需要布置在激光暗室内工作,仿真控制、记录分系统、测试评估分系统布置于另外的工作间内。

在野外远距离测试中,通常的激光目标指示器和激光测距机的激光光斑直径达几米,目标的反射率采用激光光斑照射下的目标表面平均反射率。在激光侦察告警辐射式仿真测试中,无论采取直接照射和间接漫反射照射方案,其激光光斑都应该覆盖激光告警头,直接照射和间接漫反射照射两种仿真测试模式分别如图 1、图 2 所示。

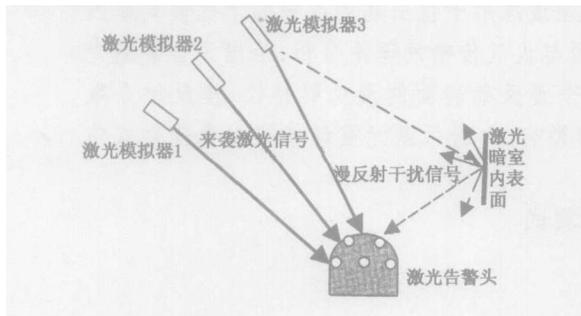


图 1 直接照射测试布局和暗室漫反射干扰示意图

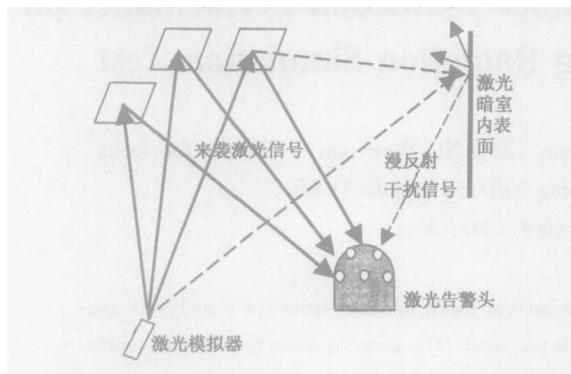


图 2 漫反射测试布局和漫反射干扰示意图

利用室内激光模拟器模拟来自激光目标指示器或者激光测距机等激光信号。直接照射方案是直接利用多个不同位置的激光模拟器模拟不同的激光信号,间接漫反射照射方案利用同一激光模拟器配合不同位置的高反射率的漫反射板模拟不同的激光信号(其中虚线为干扰引起的虚警信号传播路径)。

采用间接漫反射照射方案具有方便灵活等优势,其前提是较高的激光模拟器功率和消光暗室激光消光系数和漫反射要求。

### 3 激光暗室漫反射干扰分析

本文重点分析间接漫反射照射方案的情况。暗室仿真测试中漫反射干扰引起的虚警模式主要有:激光告警头一次镜面反射一次漫反射、激光告警头和暗室两次漫反射、暗室两次漫反射、激光告警头和暗室的多次漫反射等情形,如图 3、图 4、图 5、图 6 所示。

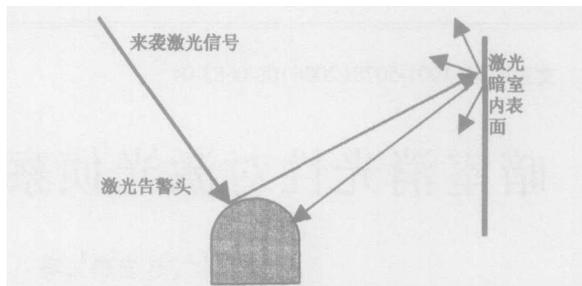


图 3 激光告警头一次镜面反射一次漫反射引起虚警示意图

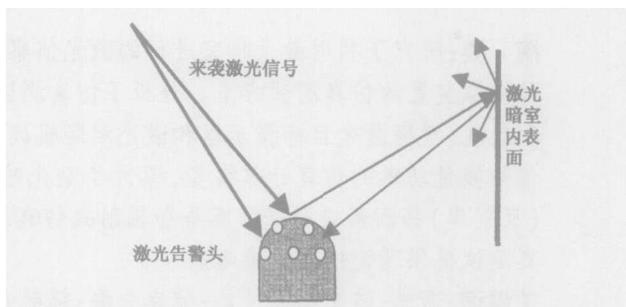


图 4 激光告警头和暗室两次漫反射引起虚警示意图

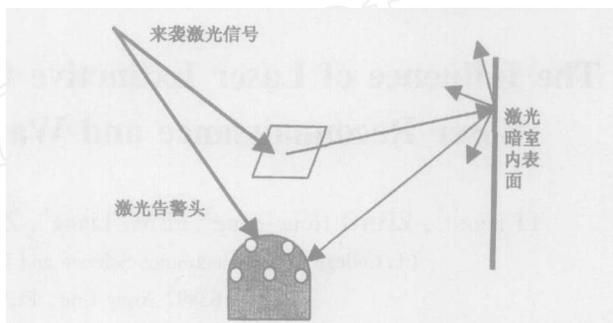


图 5 暗室两次漫反射引起虚警示意图

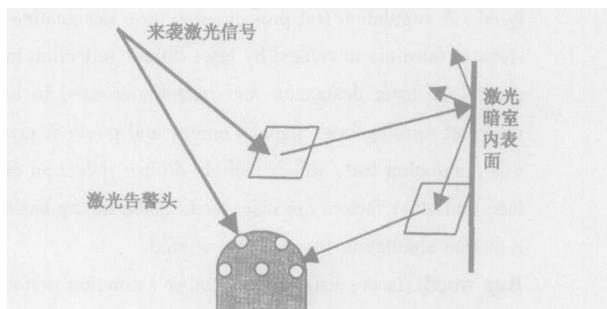


图 6 激光告警头和暗室多次漫反射引起虚警示意图

### 4 激光能量/功率密度仿真计算

假设激光入射方向和告警头告警单元镜头(或外壳的切平面)垂直,考察此时入射方向上定向照射的定向-半球反射率。

对于各向同性的激光漫反射目标,在均匀激光束的照射下,激光探测系统接收到的目标激光散射功率为  $P_r$ :

$$P_r = \frac{P_t}{L^2} A_r \frac{A_c}{L^2} T^2 \quad (\text{当 } A_c < L^2) \quad (1)$$

$$P_r = \frac{P_t}{L^2} A_r T^2 \quad (\text{当 } A_c \geq L^2 \theta_r) \quad (2)$$

其中,  $P_r$  为接收机接收到的激光后向散射功率;  $P_t$  为激光发射功率;  $L$  为距离;  $\theta_r$  为目标半球反射率;  $A_r$  为目标在垂直于照明方向的投影面积;  $A_c$  为探测系统接收孔径;  $\theta_t$  为发射激光发散立体角;  $\theta_r$  为目标散射光散射立体角;  $T$  为单向传输的路径透过率;  $P_t/R^2$  表示激光发射功率在目标上产生的辐照度;  $A_r$  为目标有效反射面积;  $A_c/R^2$  为探测系统功率截获因子;  $T^2$  表示传输介质的影响。

若入射光束内入射辐射各向同性且均匀,定向照射的定向一半球反射率为:

$$(\theta_r, \phi_r, 2) = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) \sin \theta_r d\theta_r d\phi_r \quad (3)$$

告警器对激光的反射被近似看作镜面反射,将墙壁视为朗伯漫反射面,根据 Beer-Lambert 定理,

$$E_r = E_i \rho_1 \cos \theta / (L^2) \quad (4)$$

其中,  $E_i$ 、 $E_r$  分别为入射、反射激光的能量密度;  $\rho_1$  为激光告警器表面的镜面反射率;  $\rho_2$  为暗室内壁的漫反射反射率;  $\theta$  为入射方向和反射表面的夹角;  $L$  为漫反射点至告警头距离。

野外告警头探测器灵敏度阈值能量密度估算采用 1.06μm Nd YAG 激光器的激光目标指示器指示,模型如下:

$$T_s = P_t T_d T_r (R_{TD}) \rho_1 \rho_2 \cos \theta / L^2 \quad (5)$$

其中,  $P_t$  为发射激光的能量;  $T_d$  为目标指示器光学衰减系数;  $T_r$  为告警头光学系统衰减系数;  $(R_{TD})$  为目标指示器到告警头光学系统的路径大气衰减;  $\rho_1$  为大气透过率随机变化因子。

采用 Nd YAG 激光目标指示器的典型技术参数,代入  $P_t$ 、光学表面衰减系数、大气衰减系数、光学表面反射系数等数据,得到探测器灵敏度阈值  $E_{min}$  告警器探测灵敏度。

仿真实验中当以最大激光能量密度照射告警器时,只考虑与相应的传输路径(传播距离、高角等)相关,不考虑其随机变化,  $\rho_1 = 0$ 。激光束被告警器反射到墙壁,再经墙壁反射回告警器处时,暗室的消光处理应使二次散射激光信号不会引起虚警,即二次散射能量密度应小于被试告警器的探测灵敏度,则激光暗室的消光系数应满足如下条件:

$$E_{min} > \frac{E_{max} S \rho_2 \cos(\theta)}{L^2} \quad (6)$$

式中,  $E_{min}$  为告警器探测灵敏度激光能量密度;  $S$  为照射到告警头处的激光光斑面积;  $E_{max}$  为告警测试时照射到告警头处的最大激光信号能量密度。

由于激光测距机/目标指示器的作用距离在

$S$  km 以上,它在  $S$  km 处的激光照射信号能量密度约为  $QmJ/cm^2$ ,告警距离一般大于作用距离的 1.2 倍,告警测试时照射到告警头处的最大激光信号能量密度近似为激光测距机/目标指示器在告警距离  $S$  处照射信号,将各参数代入上述公式,则激光暗室消光系数表示为:

$$\rho_2 = 1 - \rho_1 \quad (7)$$

分析一次镜面反射和一次漫反射情况下的仿真计算模型,此时有:

$$T_s = P_t T_d T_r (R_{TD}) (R_{TS}) \rho_1 \rho_2 \cos \theta / L^2 \quad (8)$$

其中,  $(R_{TD})$  为目标指示器到告警头光学系统的路径大气衰减系数;  $(R_{TS})$  为告警头到暗室表面再回到告警头系统的路径大气衰减系数。

同理,可给出直接漫反射、二次漫反射、多次漫反射等情况下的仿真计算模型。

代入典型数据进行模拟仿真运算结果如图 7 所示。

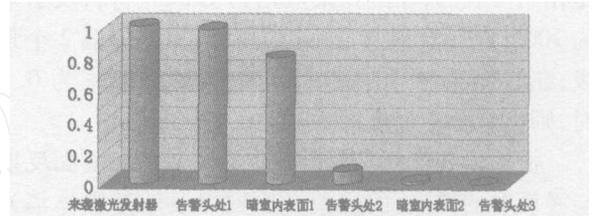


图 7 直接漫反射、二次漫反射、多次漫反射情况下的仿真计算

### 5 漫反射模型和计算分析

各个漫反射表面的漫反射特性、漫反射系数(反射率)是影响激光消光性能的重要因素。

#### 5.1 漫反射特性的影响

材料的漫反射特性评价一般以理想朗伯体为参照来定义各方向上的反射。反射比因子定义为:指定方向上的反射通量与该方向上理想朗伯体反射通量之比。反射比因子测量一般采用主动光源方式,在反射比因子测量装置上,测量不同角度下的样品亮度值,依据测量的几何条件转换后,拟合得到反射比因子的相对分布,而后由反射比因子与方向一半球反射比之间的关系,计算得到各角度下的反射比因子。

根据定义<sup>[3-4]</sup>,反射比因子与半球反射率有如下关系:

$$\rho = \frac{2 \int_0^\pi R(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta}{\int_0^\pi \sin \theta d\theta} \quad (9)$$

当材料为理想朗伯体时,反射比因子与角度无关,  $\rho = R$ 。

对于非理想朗伯体,依据不同角度下测量探测器电压得到相对反射比因子  $R_{rel}(\theta)$ ,以多项式拟合:

$$R_{rel}(\theta) = \sum_{i=0}^n a_i \theta^i \quad (10)$$

反射比因子  $R(\theta)$  与相对反射比因子  $R_{rel}(\theta)$  之

间相差一系数  $A$ :

$$R(\theta) = A \cdot R_{rel}(\theta) \quad (11)$$

$$\text{式中: } A = \frac{d}{2 R_{rel}(\theta) \sin \theta \cos \theta}$$

漫反射特性的影响考虑镜面反射和漫反射特性的不同,假定入射激光辐亮度为  $L_{\text{入射激光}}$ ,激光束散角为  $\theta$ ,则最小镜面反射激光辐亮度为:

$$L_{\text{镜反射}} = 0.04 L_{\text{入射激光}} \quad (12)$$

材料反射率为 100% 时,理想漫反射激光辐亮度为:

$$L_{\text{漫反射}} = L_{\text{入射激光}} \quad (13)$$

当激光束散角为  $1 \text{ mrad}$  时,两者相比:

$$\frac{L_{\text{镜反射}}}{L_{\text{漫反射}}} = \frac{0.04}{1} = 0.04 \quad (14)$$

计算可见,漫反射削弱激光强度(亮度)的效果是相当可观的,在激光束散角为  $1 \text{ mrad}$ ,材料反射率为 100% 时漫反射与最小镜面反射相比降低 2 个量级,在激光束散角为  $0.1 \text{ mrad}$ ,材料反射率为 0.1 时,则将降低 4 个量级。

根据瑞利准则,表面粗糙度以  $\lambda/8$  为镜面反射与漫反射的界限,面层消光涂料以及软基黑体消光材料的粗糙度在  $1.06 \mu\text{m}$ 、 $1.54 \mu\text{m}$ 、 $10.6 \mu\text{m}$  等波长都必须大于该标准。

针对金属和水泥基底的样品反射比因子测试的结果如图 8、9 所示。

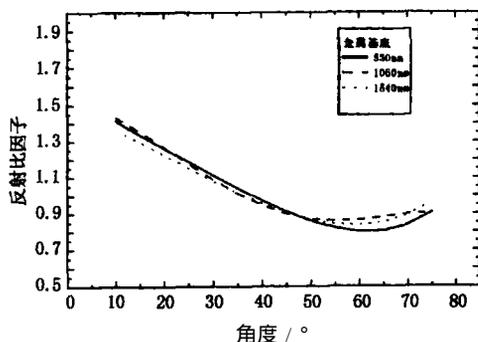


图 8 金属基底样品反射比因子测试数据

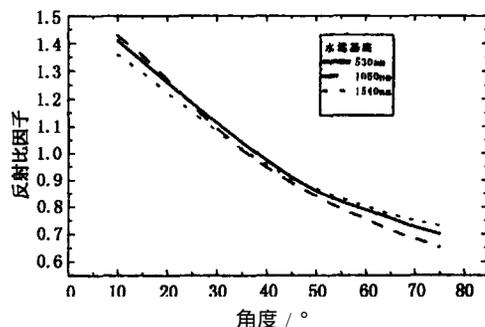


图 9 水泥基底样品反射比因子测试数据

## 5.2 漫反射系数的影响

漫反射系数的影响分析,主要考虑反射的积分效应。材料多次反射时,尤其在高反射率和环境密闭的状态下,会产生积分效应,入射(至消光面)激光功率与积分反射辐亮度有如下关系:

$$L_{\text{反射}} = \frac{W_{\text{入射激光功率}}}{A} \frac{1}{1 - \rho} \quad (15)$$

式中, $A$  为密闭环境表面积;  $\rho$  为材料的反射率;  $1/(1 - \rho)$  为积分因子。

虽然大的环境表面积将大大削弱激光的强度(亮度),但是,在材料高反射率情况下,反射的积分因子效应还是不可忽略的。当反射比小于 0.1 时,积分因子接近于 1,积分效果减弱,多可忽略不记。

## 5.3 其它影响因素

不同基底材料(水泥表面、消光布、管道、门、被试设备材料等)有着不同漫反射率,基底和消光材料的施工方法造成的相同基底材料的不同漫反射率,其形成原因主要包括:不同部位、不同方位、仰角的温度梯度等影响,湿度梯度影响,暗室内表面受到的外应力影响,表面灰尘影响等;

各镜面反射的反射率以及路径和环境大气影响;

告警头光学系统对激光能量的衰减(若采取光路分光技术须考虑分光镜的分光比准确度)等。其中,各个漫反射表面不同位置漫反射差异,在极限的情况时影响激光能量衰减不均匀形成假目标的,将会对测试结果造成影响;

测试中热源和激光屏蔽不良的影响、激光器自身不稳定漂移和抖动、漫反射叠加、积分衰减效应等;此外,针对  $10.6 \mu\text{m}$  激光的长波测试中环境和背景发射影响也不容忽视。

## 6 结束语

本文对激光漫反射干扰引起虚警的干扰模式原因和表现进行了分析,根据激光目标指示器和激光测距机战场使用情况与大气传输的理论分析,给出了告警激光信号能量功率的仿真计算模型,还探讨了激光暗室各个漫反射表面的漫反射特性、漫反射系数(反射率)等因素对激光侦察告警辐射式仿真的影响。测试中必须充分考虑这些影响因素,以避免引起多目标、虚警等现象。

## 参考文献:

- [1] 谢雪康,等.激光制导信号告警的仿真[J].应用光学,2002,(5):26-31.
- [2] 曾宪林,李翔.机载激光目标指示器发展综述[J].激光与红外,2000,30:3-5.
- [3] 徐根兴.目标和环境的光学特性[M].北京:宇航出版社,1995,278.
- [4] 丛明煜,等.激光制导炸弹弹目视线半实物仿真方法的研究[J].计算机仿真,2000,(3):23-27.