

文章编号:1001-9014(2006)02-0127-04

## 烟幕激光和红外透过率对应关系研究

李明<sup>1,2</sup>, 范东启<sup>2</sup>, 殷纯永<sup>1</sup>

(1. 清华大学精密仪器系, 北京 100084; 2 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

**摘要:**分析了烟幕激光透过率与红外透过率的对应关系,提出了利用相邻波段红外透过率推算同样光学路径激光透过率的多项式拟和方法,开展了实验研究.结果表明:特定波长的激光透过率与相应红外波段透过率利用二项式拟合,其透过率计算误差在3%以内.

**关键词:**烟幕;烟幕透过率;激光透过率;红外透过率

**中图分类号:**TN976 **文献标识码:**A

## STUDY ON CORRESPONDING RELATION OF LASER AND INFRARED TRANSMITTIVITY FOR SMOKE SCREEN

LI Ming<sup>1,2</sup>, FAN Dong-Qi<sup>2</sup>, YIN Chun-Yong<sup>1</sup>

(1. Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Beijing Institute of Tracking & Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The corresponding relation of laser transmittivity and infrared transmittivity was analyzed. A polynomial fit algorithm was introduced for reckoning laser transmittivity by infrared waveband transmittivity in the same optical paths. The tested results show that the fit error is less than 3%, as the laser wavelength is in or near infrared waveband.

**Key words:** smoke screen; smoke transmittivity; laser transmittivity; infrared transmittivity

### 引言

烟幕作为一种常用光电对抗装备,其战术效果是遮蔽被保护目标辐射或反射的光电信息,主要技术指标为在军事常用波段的红外透过率、军事常用波长的激光透过率、有效遮蔽面积、形成时间和有效遮蔽时间.其中有效遮蔽面积、形成时间和有效遮蔽时间均是指在满足烟幕激光和红外透过率前提下的面积和时间.因此烟幕的激光透过率和红外透过率是最为重要的技术指标.

烟幕的面积从几十平方米到几千平方米不等,在外场试验时需要进行多达几十甚至几百点的红外和激光透过率测量,这样才能够通过拟合和外推给出烟幕有效遮蔽面积等主要技术指标的定量评价结果.烟幕的红外透过率多点测量可以使用红外焦平面器件和设置多个红外光源实现;而对激光的透过率,由于激光器和接收机造价较高,不可能同时利用几十甚至几百台激光器进行测量.

为了得到烟幕的多点激光透过率,文献[1]报

道了一种方法,利用测量多路径的红外透过率和其中同光路中一条路径的激光透过率,可以得到烟幕对激光的透过率,其立足点是红外透过率和对应该波段的激光透过率有对应关系.

本文首先对激光和红外透过率的对应关系进行了理论分析,然后设计了一组实验,验证烟幕的激光透过率与红外透过率的对应关系,最后分析了利用对应关系推算结果与实测结果的比较.

### 1 激光透过率和红外透过率的对应关系

烟幕是一种人工产生的气溶胶,由许多微粒构成.这些微粒对入射光的散射和吸收,导致传输光信号的衰减,从而达到遮蔽的目的.对波长为 $\lambda$ 、强度为 $I_0$ 的入射光如果其投射强度为 $I_t$ ,则其透过率 $T(\lambda)$ 定义为

$$T(\lambda) = I_t(\lambda) / I_0(\lambda) \quad (1)$$

激光一般工作在某个波长,烟幕的激光透过率可以用式(1)描述.

烟幕在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段的平均红外透过率 $T_{\lambda_1 \sim \lambda_2}$

可以利用式(1)积分得到

$$T_{\lambda_1-\lambda_2} = \left[ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T(\lambda) d\lambda \right] / (\lambda_2 - \lambda_1) \quad (2)$$

从式(1)和式(2)可以看出,烟幕的激光透过率和红外透过率有一定的对应关系.从目前使用烟幕的消光机理看,还没有特别针对激光的特定波长研制特别的烟幕,主要是利用烟幕对红外宽谱段的消光特性,达到同时遮蔽红外信号和激光信号的目的.因此对于同一种烟幕,如果激光的波长在其在某个红外波段内或在该波段附近,且激光和红外信号的传输路径相同,其红外透过率和激光透过率应该存在一定的对应关系,成单调变化,并且均随着烟幕的厚度增加而减小.

由于烟幕的透过率与烟幕中的材料、颗粒形状与大小、烟幕浓度等均有关,因此很难用一个严格的解析表达式从理论上求解出其对应关系,这里提出一种多项式拟合法.

设激光的透过率为  $y$ , 相应波段的红外透过率为  $x$ , 其关系为

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (3)$$

只要确定  $(a_0, a_1, a_2, \dots, a_n)$  这些系数,即可根据测量得到的红外透过率计算出相应的激光透过率.

如果在同一光路中同时得到  $(n+1)$  组同光路、同步测量的红外和激光透过率  $((x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n))$ , 每组数据对应不同烟幕浓度状态,利用式(3),可以确定相应的系数  $(a_0, a_1, a_2, \dots, a_n)$ , 这样也就得到了激光透过率.

在实际拟合处理的过程中可以看到,由于实际烟幕的激光和红外透过率对应关系非常明显,系数  $(a_0, a_1, a_2, \dots, a_n)$  收敛很快,使用到 2 次拟合即可以达到精度要求.

## 2 实验验证

为验证激光透过率和红外透过率的对应关系,利用烟幕箱对五种配方的烟幕剂进行了试验.

### 2.1 试验仪器

实验所用仪器主要有:1.06 $\mu\text{m}$  和 10.6 $\mu\text{m}$  激光透过率测量仪各一套;33 $\text{m}^3$  烟箱及其配套设施一套;1~3 $\mu\text{m}$ 、3~5 $\mu\text{m}$  和 8~12 $\mu\text{m}$  红外透过率测量仪一套.图 1 为实验示意图.

在施放烟幕之前,先进行仪器的标定,即先完全遮挡光源,此时探测器输出信号定义为 0% 透过率时的信号,再无遮挡地直接接收光源能量,此时探测器输出信号定义为 100% 透过率时的信号;然后在

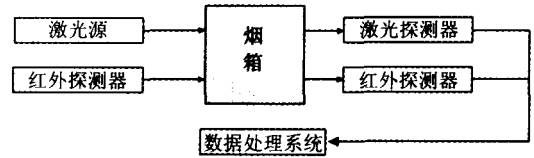


图 1 实验示意图

Fig. 1 Sketch map for test

烟箱内施放烟幕,探测器输出信号大小应介于 0% 和 100% 透过率时的信号,与标定信号比较可处理出烟幕的透过率,使用抽风机多次改变烟幕浓度,待每次稳定后读取一组激光、红外透过率,每次实验可以改变 3~5 次浓度,获取 3~5 组实验数据.

### 2.2 实验结果与分析

本文分别对 4 种烟幕配方进行多次烟箱实验,下面给出其中一些实验结果.

对于红磷烟幕(L型),以实验 1 取得 1.06 $\mu\text{m}$  激光和 1~3 $\mu\text{m}$  红外透过率数据,通过拟合,得到其对应关系;在实验 2 时同时测量得到激光与红外烟幕透过率,利用实验 1 得到的对应关系和取得实验 2 取得的红外透过率数据,计算其激光透过率并和测量结果比较,其拟合曲线和误差分析如图 2 所示,图中“o”表示拟合曲线的实验 1 测量数据,“x”表示待检验的实验 2 测得的数据, $a_E$  是推算的实验 2 激光透过率与实测值误差绝对值的平均值, $s_E$  是误差均方根值.由于红磷烟幕主要用于对可见光与中短波段红外辐射特性的遮蔽,在长波红外波段遮蔽效果很差,在长波红外波段与 10.6 $\mu\text{m}$  激光透过率关系不明显.

与红磷烟幕类似,我们对多功能烟幕(DG型)配方实验中,我们改变了不同成分的配比,用实验 2 数据拟合对应关系检验实验 1 和实验 3 数据的推算精度,其 1.06 $\mu\text{m}$  激光和 1~3 $\mu\text{m}$  红外透过率拟合与实测结果的分析如图 3 所示,10.6 $\mu\text{m}$  激光和 8~12 $\mu\text{m}$  红外透过率拟合与实测结果的差如图 4 所示.图 5 和图 6 是 M 型配方的分析图,图 7 和图 8 是 N 配方实验的分析图.

我们选择 N 配方的 8 次共 39 组 10.6 $\mu\text{m}$  激光透过率和 8~12 $\mu\text{m}$  红外透过率数据近似看作一次外场烟幕试验的 8 个光路采样点数据,用最小二乘法对实验数据进行 2 次多项式拟合,得到激光、红外透过率的数学对应关系

$$y = -0.9599 + 0.5736x + 0.0027x^2 \quad (4)$$

依此关系可以得到与各红外透过率对应的激光透过率推算值,统计 N 型配方其余实验激光透过率

实测值与推算值的误差,检验这种推算方法的可行性.实验数据点及拟合对应关系曲线如图 8 所示.33 组推算值与实测值的平均误差及均方根误差分别为

$$|\Delta y| = \frac{\sum_{33} |T_L' - T_L|}{33} = 1.536,$$

$$\sigma_{\Delta y} = \sqrt{\frac{\sum_{33} (T_L' - T_L)^2}{33}} = 1.946 \quad (5)$$

式(5)中  $T_L'$  表示激光透过率的实测值,  $T_L$  表示激光透过率的推算值,透过率平均误差和均方根误差均小于 2%.这其中包含有烟幕重复试验的不一致性误差、烟幕不均匀性误差、光源稳定性误差、接收机的测量误差和数学方法误差,这些误差是彼此不相关的量.受试验条件所限,该误差无法分离.

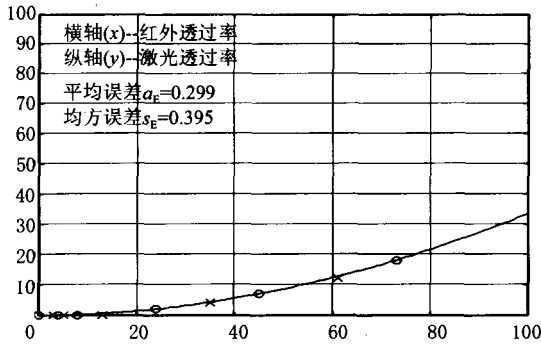


图 2 L 型烟幕利用实验 1 拟合曲线推算试验 2 激光透过率与实测结果的比较与误差分析(1.06 $\mu\text{m}$ 与 1~3 $\mu\text{m}$ 波段)

Fig.2 Smoke screen L: comparison the laser transmittance between the result measured in experiment 2 and the estimate value based on fitting curve from experiment 1 (1.06 $\mu\text{m}$  and 1~3 $\mu\text{m}$ )

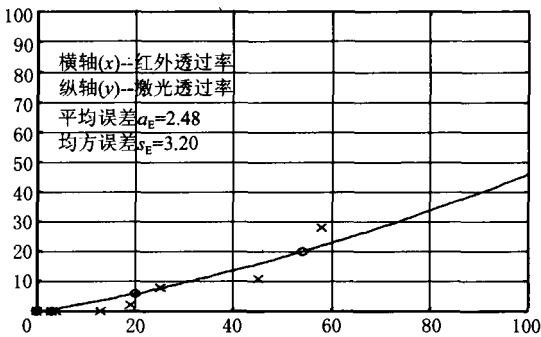


图 3 DG 型烟幕利用实验 1 拟合曲线推算试验 2 激光透过率与实测结果的比较与误差分析(1.06 $\mu\text{m}$ 与 1~3 $\mu\text{m}$ 波段)

Fig.3 Smoke screen DG: comparison the laser transmittance between the result measured in experiment 2 and the estimate value based on fitting curve from experiment 1 (1.06 $\mu\text{m}$  and 1~3 $\mu\text{m}$ )

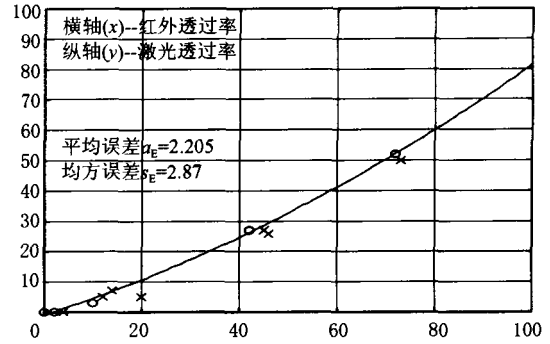


图 4 DG 型烟幕利用实验 2 拟合曲线推算实验 1 和实验 3 激光透过率与实测结果的比较与误差分析(1.06 $\mu\text{m}$ 与 8~12 $\mu\text{m}$ 波段)

Fig.4 Smoke screen DG: comparison the laser transmittance between the result measured in experiment 2 and the estimate value based on fitting curve from experiment 1 (1.06 $\mu\text{m}$  and 8~12 $\mu\text{m}$ )

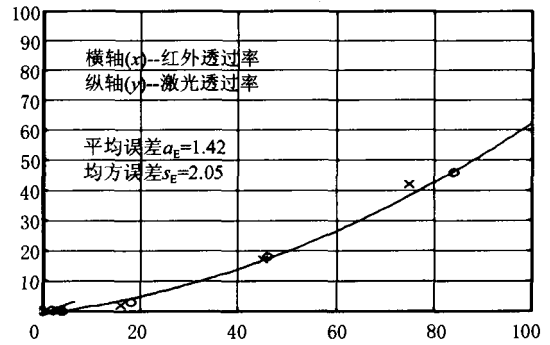


图 5 M 型烟幕利用实验 2 拟合曲线推算试验 1 激光透过率与实测结果的比较与误差分析(1.06 $\mu\text{m}$ 与 1~3 $\mu\text{m}$ 波段)

Fig.5 Smoke screen M: comparison the laser transmittance between the result measured in experiment 2 and the estimate value based on fitting curve from experiment 1 (1.06 $\mu\text{m}$  and 1~3 $\mu\text{m}$ )

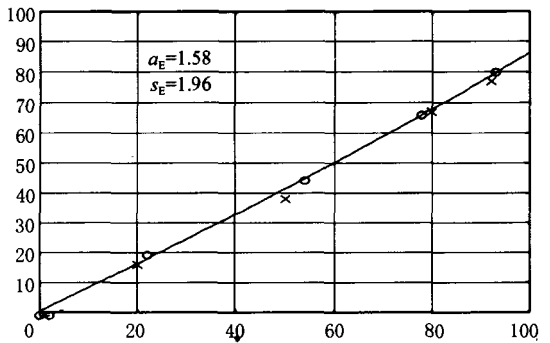


图 6 M 型烟幕利用实验 2 拟合曲线推算试验 1 激光透过率与实测结果的比较与误差分析(1.06 $\mu\text{m}$ 与 8~12 $\mu\text{m}$ 波段)

Fig.6 Smoke screen M: comparison the laser transmittance between the result measured in experiment 2 and the estimate value based on fitting curve from experiment 1 (1.06 $\mu\text{m}$  and 8~12 $\mu\text{m}$ )

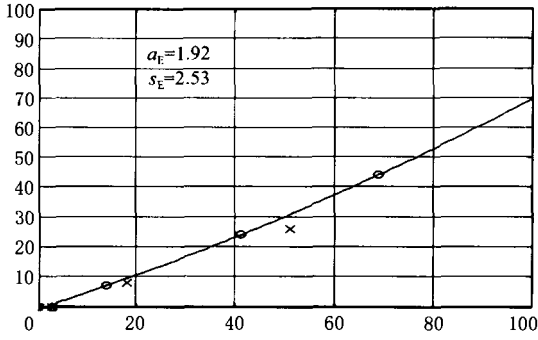


图7 N型烟幕利用实验2拟合曲线推算试验1激光透过率与实测结果的比较与误差分析(1.06 $\mu\text{m}$ 与1~3 $\mu\text{m}$ 波段)

Fig.7 Smoke screen N; comparison the laser transmittance between the result measured in experiment 2 and the estimate value based on fitting curve from experiment 1 (1.06  $\mu\text{m}$  and 1~3  $\mu\text{m}$ )

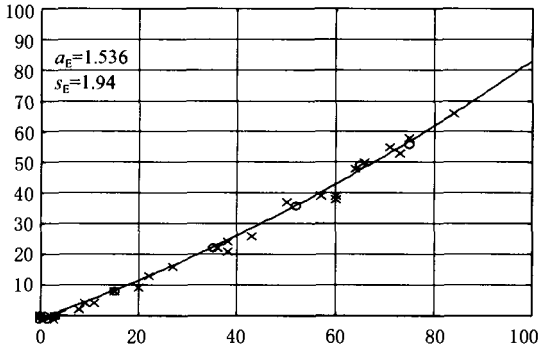


图8 N型烟幕利用实验2拟合曲线推算试验1激光透过率与实测结果的比较与误差分析(1.06 $\mu\text{m}$ 与8~12 $\mu\text{m}$ 波段)

Fig.8 Smoke screen N; comparison the laser transmittance between the result measured in experiment 2 and the estimate value based on fitting curve from experiment 1 (1.06  $\mu\text{m}$  and 8~12  $\mu\text{m}$ )

### 3 结语

通过理论分析与实验研究,同一种烟幕在不同的物理状态下激光、红外透过率变化遵从单调递增的对应规律,对激光信号与相应的红外波段遮蔽效果有明确的对应关系.从利用多组实验数据的拟合结果看,只要激光波长在相应的红外波段内,利用多项式拟合时收敛速度很快,一般用2次多项式拟合即可满足透过率测量误差为3%的精度要求.

### REFERENCES

- [1] LI Ming, FAN Dong-Qi, KANG Wen-Yun, *et al.* Measurement & evaluation system of smoke defiladed effect for field test [J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology* (李明,范东启,康文运,等.外场用烟幕遮蔽效果测量系统.飞行器测控学报),2005,24(4):51—55.
- [2] AD-B031193 Methodology Investigation for Testing Effectiveness of Smoke/Aerosol [R]. 1980.
- [3] ZHU Chen-Guang, PAN Gong-Pei, GUAN Hua, *et al.* Research of measuring method about sheltering coefficient of anti-infrared smoke-screen [J]. *Infrared Technology* (朱晨光,潘功配,关华,等.红外烟幕遮蔽率测试方法研究.红外技术),2004,26(4):81—84.
- [4] WANG Yong-Zhong, WANG Xiao, XU Dai. How to test Lasers smoke-screen in the field [J]. *Applied Laser* (王永仲,王晓,徐岱.烟幕对信息激光的衰减及其相关性能试验.应用激光),2003,23(5):287—289