

## 红外辐射式干扰弹能量测量装置研究

常 帅<sup>1</sup>, 高秀伟<sup>2</sup>, 佟首峰<sup>1</sup>, 宋延嵩<sup>1</sup>, 董 岩<sup>1</sup>

( 1. 长春理工大学 空地激光通信国防重点实验室, 吉林 长春 130022;

2. 东北电子技术研究所, 辽宁 锦州 121000)

**摘 要:** 为了实现对干扰弹能量及特性的非接触式测量, 开展了基于红外辐射式干扰弹能量测量装置研究。首先, 针对干扰弹的能量和辐射的波段等特点进行了总结和提炼; 接着, 确定了用红外辐射能量的量级来表征干扰弹的能量及其特性; 然后, 在以上的理论基础上, 对红外辐射的能量测量进行仿真和研制, 包括探测器的选取与应用设计, 模拟信号处理和数字信号的处理, 采用相关测量方法对能量进行检测以及计算。最后, 介绍了红外测量装置的具体实现方法以及优势。实验结果表明: 红外辐射能量测量装置的响应时间小于 2.5ms; 探测灵敏度优于  $2.5 \times 10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。基于红外辐射式的能量测量系统成功实现了对 1~21  $\mu\text{m}$  的长波红外能量的准确测量, 且具有较高的灵敏度和较低的相应时间。

**关键词:** 红外辐射; 干扰弹; 高灵敏度; 快速响应; 相关测量法

**中图分类号:** TP212.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0117002

## Power measurement device of jamming bomb based on infrared radiation

Chang Shuai<sup>1</sup>, Gao Xiuwei<sup>2</sup>, Tong Shoufeng<sup>1</sup>, Song Yansong<sup>1</sup>, Dong Yan<sup>1</sup>

(1. National Defense Key Laboratory of Air to Ground Laser Communication, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. Northeast Institute of Electronic Technology, JinZhou 121000, China)

**Abstract:** In order to realize the non-contact measurement of the energy and the characteristics of jamming bomb, the research on energy measurement device based on infrared radiation type jamming bomb was carried out. Firstly, jamming energy and radiation characteristics of the band were summarized; then, the energy and characterization were characterized with infrared radiation energy level; and then, based on the above theory, energy measurement of infrared radiation was simulated and developed, including choosing and apply design of detectors, analogue signal processing and digital signal processing, detecting and calculating energy with relative detecting methods. At last, the specific realization methods and advantages of the infrared measuring device were introduced. The experiment result shows that the response time of the infrared radiation energy measurement device is less than 2.5 ms, and detection sensitivity is better than  $2.5 \times 10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ . Energy measurement system based on infrared radiation type successfully implements the accurate measurement of long wave infrared energy to the 1–21  $\mu\text{m}$  with higher sensitivity and lower response time.

**Key words:** infrared radiation; jamming bomb; high sensitivity; quick response; correlation measurement method

收稿日期: 2015-05-13; 修订日期: 2015-06-15

作者简介: 常帅(1989-), 男, 博士生, 主要从事伺服跟踪及信号处理方面的研究。Email: cs0617@126.com

导师简介: 佟首峰(1972-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光通信方面的研究。Email: tsf1998@sina.com.cn

## 0 引言

红外干扰弹是红外对抗中非常有效的作用手段,能够作为诱饵使得导弹脱离目标,保证了军事平台的安全。在最近的战争中红外干扰弹发挥了巨大的作用,现在已由过去的单一诱饵发展成为红外与射频综合作用诱饵,目前能够成功对抗红外成像导引头的干扰弹已经研制成功。国内外的干扰弹的生产已经发展得很成熟,以色列生产的红外辐射测量装置内部具有温度参考单元,视场角 40°,已经成为行业的标杆<sup>[1-3]</sup>。但目前国内干扰弹的辐射能量检测装置一直处于国际的劣势,文中研究针对干扰弹的辐射特性定制检测装置,检测精度及范围已接近国际先进水平,已经成功应用至干扰弹的生产厂家进行长波红外干扰弹的出场检测,试验表明该装置输出红外干扰弹辐射曲线精度优于以色列某设备。

## 1 干扰弹辐射能量及其技术指标分析

红外干扰弹通常是固体烟火弹,用于对抗攻击或诱饵,其辐射机理是利用物质燃烧时的化学反应产生大量的烟云,并对外发射红外辐射,因此计算的基础是描述绝对黑体热辐射的普朗克定律<sup>[4-10]</sup>。

$$M_{\lambda}(T) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (1)$$

式中:  $M_{\lambda}(T)$  为绝对黑体的光谱辐射强度;  $T$  为黑体的温度(K);  $\lambda$  为光波波长;  $c_1, c_2$  为第一、第二热辐射常数,  $c_1 = 3.7415 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \mu\text{m}^4, c_2 = 3.7415 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。但在实际应用中,由于干扰弹燃烧时其辐射面积难以确定,所以,经常用经验公式按点源来计算干扰弹燃烧时的辐射强度:

$$I = mE_{\lambda} \quad (2)$$

式中:  $m$  为燃烧的效率,  $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $E_{\lambda}$  为燃烧的比辐射度,  $\text{J} \cdot \text{g}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ , 表达式如下:

$$E_{\lambda} = 1/(4\pi) H_c F_{\Delta\lambda, T} de dW ds \quad (3)$$

式中:  $H_c$  为燃料燃烧热值,  $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $de$  为辐射源静态辐射因子;  $dW$  为气流衰减因子;  $ds$  为干扰弹燃烧时羽流的形状因子;  $F_{\Delta\lambda, T}$  表示辐射源总的辐射出射度值与其在有效波段内的光谱辐射度之比,一般表示为<sup>[11]</sup>:

$$F_{\Delta\lambda, T} = \frac{1}{\varepsilon \sigma T^4} \int_{\Delta\lambda} \frac{\varepsilon_{\lambda} c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T}} d\lambda \quad (4)$$

式中:  $\varepsilon$  为平均发射率;  $\varepsilon_{\lambda}$  为光谱发射率;  $\sigma = 5.6679 \times 10^{-8}$  为斯蒂芬-玻耳兹曼常数,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

## 2 干扰弹红外辐射测量系统原理及研制

文中系统基于热释电的红外辐射计由红外镜头、探测器信号模拟处理单元、探测器信号数字处理单元,直流量输出,枪瞄、人机操控界面等几部分组成。其中,探测器信号模拟处理单元和探测器信号数字处理单元均在辐射计主箱体中;主箱体前端为放置衰减片卡具的卡槽;人机操控界面右上端配有航插接口。各部分如图 1 所示。辐射计主要性能指标见表 1。

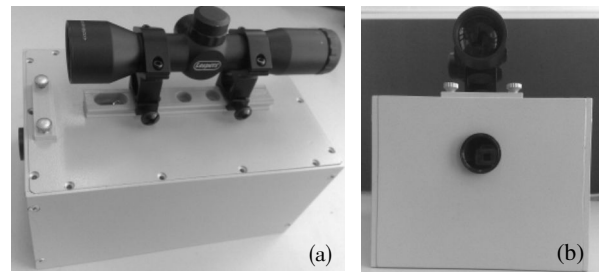


图 1 红外辐射计外观图

Fig.1 Infrared radiometer appearance

表 1 辐射计主要性能指标

Tab.1 Key performance of radiometer

Key parameters	Index	Key parameters	Index
Wavelength range/ $\mu\text{m}$	8-14	Dynamic range/dB	40
Lens angle/ $^{\circ}$	~8	Working temperature/ $^{\circ}\text{C}$	-20-50
Response time/ms	5	Power	DC 24 V,
Sensitivity/ $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$	1		<0.5 A

由于该系统的采集干扰弹能量的视场需求,辐射源只有部分填充入射口径,故采用近距离拓展源法模拟真实环境进行实验室标定,实验原理示意图如图 2 所示,其中 A 为黑体辐射源, B 为红外镜头, C 为探测器。

在实验中笔者使用黑体辐射源作为定标源。黑体辐射源作为标准辐射源,已广泛地被用作红外设备绝对标准。通过黑体辐射源参数可计算出较精确红外能量参数,使用黑体辐射源对探头组件进行标定后,可使用探头测量被测辐射源准确的红外辐射参数。图 3 为某型号黑体实物图。

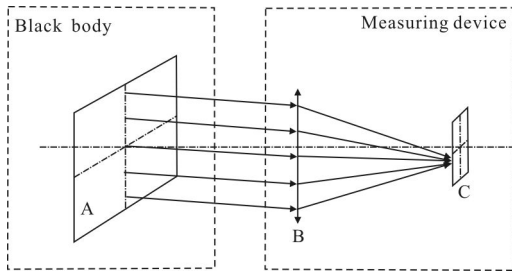


图 2 红外辐射计标定原理示意图

Fig.2 Infrared radiometer calculation principle view



图 3 黑体实物图

Fig.3 Black body real object

计算定标黑体在本波段的辐射出射度为:

$$M(T) = \varepsilon \int_0^{\infty} \frac{C_1 d\lambda}{\lambda^5 \{ \exp[C_2 / (\lambda T)] - 1 \}} \quad (5)$$

式中:  $\varepsilon=0.995$ , 为发射率;  $C_1=2\pi hc^2=3.7415 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , 为第一辐射常数;  $C_2=hC/k=1.43897 \times 10^4 \text{ m}^2 \cdot \text{K}$ ;  $T$  为黑体绝对温度;

定标黑体的辐射强度为:

$$I(T) = \frac{A_b}{\pi} M(T) \tau(l) \quad (6)$$

式中:  $A_b$  为黑体辐射面积;  $\tau(l)$  为测量距离为  $l$  时的大气衰减系数,  $l$  为测量距离。

将定标黑体辐射中心与测量系统光学系统轴线对准, 定标源辐射在测量系统接收面上的辐照度为:

$$E(T) = \frac{A_b}{\pi l^2} M(T) \tau(l) \quad (7)$$

辐射功率为:

$$P(T) = A_t E(T) = \frac{A_t A_b}{\pi l^2} M(T) \tau(l) \quad (8)$$

式中:  $A_t$  为测量系统入瞳面积。

探测组件接收功率为:

$$P_t(T) = P(T)t = \frac{A_t A_b}{\pi l^2} M(T) \tau(l)t \quad (9)$$

式中:  $t$  为光学系统总透过率。

可以得出探测组件总响应度为:

$$R = \frac{V}{FP_t(T)} \quad (10)$$

式中:  $V$  为系统响应电压;  $F$  为系统对探测器响应信号的放大倍率。

根据上述推导, 笔者可以根据得出的总响应度进行指标的分析。

### 3 红外辐射计指标分析

#### 3.1 400~6 000 W 目标源指标

目标辐射源辐射功率为 400~6 000 W, 测量距离为 27~30 m。将目标源看作点源向  $4\pi$  立体角空间球面均匀辐射, 在 27 m 和 30 m 处计算每平方米的辐射量即为表 2 计算的辐照度。计算中使用的镜头通光口径为 20 mm, 总透过率为 0.7。

表 2 400~6 000 W 目标源响应指标

Tab.2 400-6 000 W target source response

Item	Irradiance /W · m <sup>2</sup>	Received power/W	Memo
400 W/27 m	0.043 7	5.76E-06	
400 W/30 m	0.035 4	4.67E-06	Without source power and atmospheric attenuation
600 W/27 m	0.665	8.64E-05	
600 W/30 m	0.530 5	7.00E-05	

#### 3.2 1750 °C 目标源指标

计算中, 将目标辐射源的尺寸计为半径为 1 m 的球面。由于给定测量距离为 27~30 m, 故将目标源计为点源。辐照度计算为目标源发射功率在  $4\pi$  立体角空间球面每平方米的辐射功率。所得数值均未计入目标源发射率和大气衰减, 故所得数据均大于实际值。如表 3 所示。

表 3 1750 °C 目标源响应指标

Tab.3 Response index of 1750 °C target source

Item	Radiated power/W	Radiation exitance/W · m <sup>-2</sup>	Received power/W
8-14 μm/27m	2.377E+5	1.89E+04	0.0034
8-12 μm/27m	2.02E+05	1.61E+04	0.0029

### 3.3 实验灵敏度分析

标定仪器为黑体辐射源/ISOTECH-R976 30~550 °C;实验条件是室内。

#### (1) 极限探测功率

在 200Hz 调制频率下,黑体(辐射口径  $R=0.0325\text{ m}$ )温度为 30 °C,探测器(接收口径为  $r=0.00175\text{ m}$ ,透镜透过率为 0.6;加在 8~14  $\mu\text{m}$  波段透过率为 0.8 的红外滤光片)极限探测距离为 1.25 m,响应峰峰值电压为 500 mV( $\times 30$  倍)。

#### (2) 饱和探测功率

在 200Hz 调制频率下,黑体(辐射口径  $R=0.0325\text{ m}$ )温度为 350 °C,探测器(接收口径为  $r=0.00175\text{ m}$ ,透镜透过率为 0.6;加在 8~14  $\mu\text{m}$  波段透过率为 0.8 的红外滤光片)探测距离为 1 m 时,响应峰峰值电压为 10.2 V( $\times 30$  倍)<sup>[12-13]</sup>。表 4 为干扰弹辐射能量测量系统的响应灵敏度。

表 4 干扰弹辐射能量测量系统的响应灵敏度

Tab.4 Response sensitivity of power measurement device of jamming bomb system

Item	Limit	Saturation
Temperature/°C	30	350
Distance/m	1.25	1
Response value/V	0.5	10.2
Exitance/W·m <sup>2</sup>	180.968	2.14E+03
Radiated power/W	0.6005	7.091
Intensity/W·sr <sup>-1</sup>	0.1911	2.2571
Power/W	8.83E-07	1.04E-05

## 4 实验数据分析

实验条件如下:室温为 25 °C;黑体口径  $R=0.0325\text{ m}$ ;探测距离为 1 m;探测器接收面口径  $r=0.00175\text{ m}$ ;放大倍数约 30 倍;调制(11 V/0.06 A)约为 200 Hz;实验数据统计及计算结果如图 4~图 6 所示。

根据实验数据表格和拟合曲线,从图 4、图 5 可看出黑体温度与探测器响应的电压峰峰值及探测器接收功率均有很好的线性;图 6 示出探测器对接收功率的电压响应也有很好的线性。

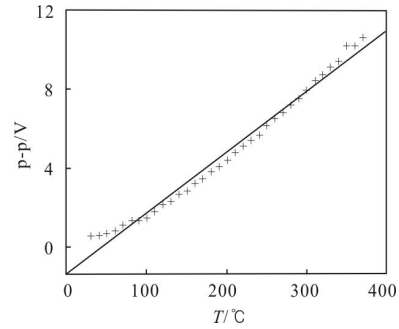


图 4 温度与电压峰峰值曲线与线性最小二乘拟合

Fig.4 Temperature-peak voltage and linear least-squares curve fit

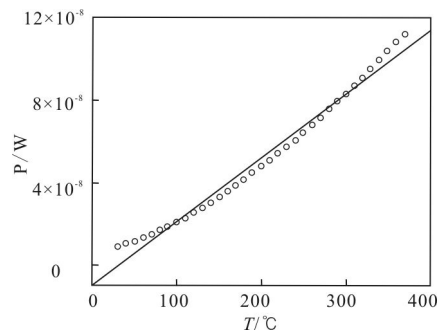


图 5 温度与接收功率曲线

Fig.5 Temperature and reception power curve

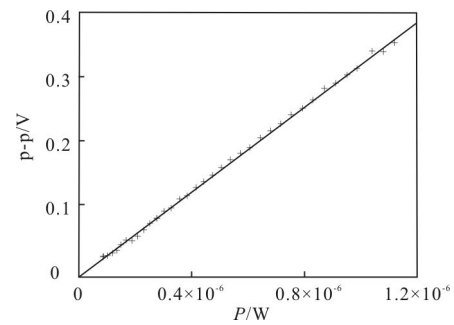


图 6 接收功率响应度曲线(线性最小二乘拟合

响应度  $R=24976$ )

Fig.6 Received power response curve (linear least squares

fit responsivity  $R=24976$ )

## 5 外场实验数据分析

外场实验条件:厂温为 10 °C;距离为 30 m;探测器接收面口径  $r=0.00175\text{ m}$ ;放大倍数约 30 倍;调制(11V/0.06A)约 200 Hz。

外场实验充分成功后,进行了外场实验,实验条件如上所示,图 7 为干扰弹外场实验现场图及干扰弹辐射曲线图,反映了干扰弹的 8~14  $\mu\text{m}$  波段辐

射特性,响应时间小于 2.5 ms;探测灵敏度优于  $2.5 \times 10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

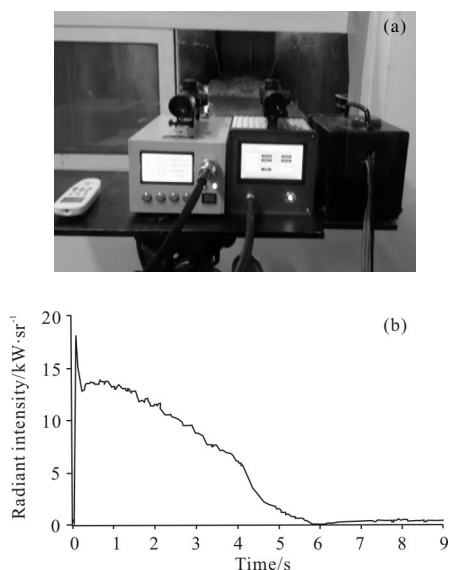


图 7 室内干扰弹测试现场及测试曲线

Fig.7 Indoor jamming bomb test and test curve

## 6 结束语

依据理论进行了辐射能量系统的设计。根据前期的理想计算结果,笔者通过大量的实验对理论进行了验证,最终得到了非常理想的结果。实验结果表明:红外辐射能量测量装置的响应时间小于 2.5 ms;探测灵敏度优于  $2.5 \times 10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。笔者成功地实现了 8~14  $\mu\text{m}$  红外波段的能量精准测量并且具有较高的灵敏度和较低的相应时间。

## 参考文献:

[1] Li Yunhong, Sun Xiaogang, Yuan Guibin. Accurate measuring temperature with infrared thermal imager [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(9): 1336-1341. (in Chinese)  
李云红, 孙晓刚, 原桂彬. 红外热像仪精确测温技术[J]. 光学精密工程, 2007, 15(9): 1336-1341.

[2] Zhang Jian, Yang Li, Liu Huikai. Effect of environmental objecton infrared Temperature measurement [J]. *Infrared Technology*, 2005, 27(5): 419-422. (in Chinese)  
张健, 杨立, 刘慧开. 环境高温物体对红外热像仪测温误差的影响[J]. 红外技术, 2005, 27(5): 419-422.

[3] Webster John G, Eren Halit. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook: Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement[M]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2014.

[4] Yang Ciyin, Zhang Jianping, Cao Lihua. Infrared radiation

measurement based on real-time correction [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2011, 30(3): 284-288. (in Chinese)  
杨词银, 张建萍, 曹立华. 基于实时标校的目标红外辐射测量新方法[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(3): 284-288.

[5] Han Yuge, Xuan Yimin. Effect of atmospheric transmission on IR radiation feature of target and background[J]. *Journal of Applied Optics*, 2002, 23(6): 8-11. (in Chinese)  
韩玉阁, 宣益民. 大气传输特性对目标与背景红外辐射特性的影响[J]. 应用光学, 2002, 23(6): 8-11.

[6] Fu Wei, Hou Zhenyu. Operation principle of IR decoy [J]. *Laser & Infrared*, 2000, 30(3): 171-174. (in Chinese)  
付伟, 侯振宇. 红外干扰弹的干扰机理与战术应用 [J]. 激光与红外, 2000, 30(3): 171-174.

[7] Wang Chaoqun. Some characteristics of infrared jam and its simulation technique on infrared guided missile [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 30(4): 163-167. (in Chinese)  
汪朝群. 红外诱饵对红外制导导弹的干扰特性及仿真[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(4): 163-167.

[8] Li Ge, Yuan Ningyi, Li Jinhua. Voltage responsivity simulation of pyroelectric sensor [J]. *Electronic Device*, 2002, 25(4): 461-465. (in Chinese)  
李格, 袁宁一, 李金华. 热释电单元探测器的电压响应模拟[J]. 电子器件, 2002, 25(4): 461-465.

[9] Song X, Wang L, Wang P, et al. IR target tracking based on improved mean shift method[J]. *Journal of Infrared and Millimeters Waves*, 2007, 26(6): 429. (in Chinese)

[10] Li Bin, Wu Haiying, Wang Wentao, et al. Design of a simple infrared calibration system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 458-463. (in Chinese)  
李斌, 吴海英, 王文涛, 等. 一种简易红外标定系统的设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 458-463.

[11] Wang Yanbin, Wang Min, Zou Qianjin, et al. Setup of blackbody's temperature and area for simulating real target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (3): 779-784. (in Chinese)  
王彦斌, 王敏, 邹前进, 等. 黑体模拟真实目标温度和面积的设定[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 779-784.

[12] Li Ning, Yang Ciyin, Cao Lihua, et al. Radiance calibration for 3-5 $\mu\text{m}$  infrared focalplane array [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(10): 2319-2325. (in Chinese)  
李宁, 杨词银, 曹立华, 等. 3~5  $\mu\text{m}$  红外焦平面阵列的辐射定标[J]. 光学精密工程, 2011, 19(10): 2319-2325.

[13] Li Ning, Zhang Yunfen, Liu Chunxiang, et al. Calibration of 1m aperture infrared theodolit [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2054-2060. (in Chinese)  
李宁, 张云峰, 刘春香, 等. 1m 口径红外测量系统的辐射定标[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2054-2060.