

文章编号:1002-2082(2013)04-0663-04

## 低噪声红外辐射计设计

胡铁力<sup>1</sup>, 申 越<sup>2</sup>, 郭 羽<sup>1</sup>, 范纪红<sup>1</sup>, 马世帮<sup>1</sup>, 张 玫<sup>1</sup>, 刘瑞星<sup>1</sup>, 谢 毅<sup>1</sup>, 辛 舟<sup>1</sup>

(1. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 中国兵器科学研究院, 北京 100089)

**摘 要:**为解决热像仪测试设备校准问题, 设计了内部参考黑体温度与环境温度相等的红外辐射计。为评估精密红外辐射计的性能指标, 指导精密红外辐射计的设计, 建立了红外辐射计 NETD (噪声等效温差, Noise equivalent temperature difference) 数学模型。估算了在不同电子带宽、光谱波段下红外辐射计的 NETD。结果表明, 当噪声带宽小于 1 Hz 时, 红外辐射计自身的 NETD 在 MWIR (mid-wavelength infrared)、LWIR (long wavelength infrared) 波段均小于 0.01℃, 能够满足热像仪测试设备校准需要。

**关键词:**红外热像仪; 红外辐射计; 黑体; 辐射温度; 噪声等效温差

中图分类号: TN219

文献标志码: A

doi: 10.5768/JAO201334.0404004

### Low noise infrared radiometer

HU Tie-li<sup>1</sup>, SHEN Yue<sup>2</sup>, GUO Yu<sup>1</sup>, FAN Ji-hong<sup>1</sup>, MA Shi-bang<sup>1</sup>,  
ZHANG Mei<sup>1</sup>, LIU Rui-xing<sup>1</sup>, XIE Yi<sup>1</sup>, XIN Zhou<sup>1</sup>

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China; 2. Academy of China Ordnance Science, Beijing 100089, China)

**Abstract:** In order to solve the calibration of the infrared imager test equipment, a kind of infrared radiometer in which the temperature of interior reference blackbody was equal to the environmental temperature was designed. In order to evaluate this kind of radiometer and give guidance to the infrared radiometer design, a mathematic model for infrared radiometer noise equivalent temperature difference (NETD) was given. The NETD of infrared radiometer was estimated under different electronic bandwidths and spectral wavebands. The results show that when noise equivalent bandwidth is within 1 Hz, NETD of infrared radiometer in mid-wavelength infrared (MWIR) and long wavelength infrared (LWIR) spectral bands is smaller than 0.01℃, which can meet the requirements of the calibration of infrared imager test equipment.

**Key words:** infrared imager; infrared radiometer; blackbody; radiant temperature; NETD

### 引言

热像仪参数测试设备的红外温差准直辐射系统能够模拟远距离红外目标和背景。红外温差辐射源由黑体和靶标组成, 对于单黑体型温差辐射源, 以靶标等效为背景, 黑体辐射穿过靶标镂空部分出射<sup>[1-2]</sup>。通过改变靶标开口大小, 改变红外目标辐射张角, 模拟目标远近。通过改变黑体与靶标间温差, 模拟目标对比度的变化。

热像仪大部分参数只需要±1℃之内的温差目标, 温差准确度约为0.025℃。为实现红外温差准直辐射系统辐射温差的校准, 需研制精密红外辐射计, 其 NETD 要小于 0.01℃。

NETD (噪声等效温差) 是精密红外辐射计一个重要性能指标, 反映了精密红外辐射计的探测能力或者灵敏度, 因此, 为研制精密红外辐射计, 估算其 NETD 尤为重要。

收稿日期: 2013-04-10; 修回日期: 2013-04-25

作者简介: 胡铁力 (1965—), 男, 黑龙江铁力人, 高级工程师, 硕士, 主要从事红外计量与测试技术研究工作。

E-mail: hu\_tieli@sohu.com

## 1 精密红外辐射计系统组成

专用精密红外辐射计用于实验室、生产现场用热像仪测试设备中红外差分准直辐射系统辐射温差的校准,工作环境温度一般为 20℃左右,其光学系统<sup>[3]</sup>如图 1 所示。

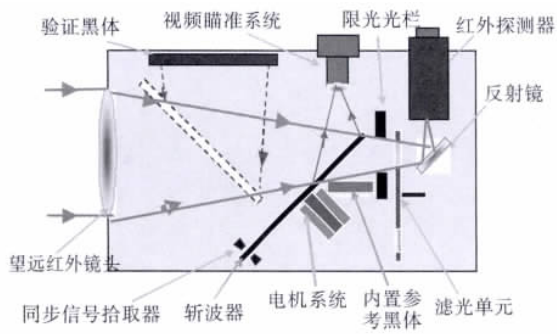


图 1 红外辐射计示意图

Fig.1 Schematic of infrared radiometer

精密红外辐射计由望远红外透镜组件、验证黑体、视频瞄准系统、斩波器、同步信号拾取电路、内置参考黑体、限光光栏、滤光单元、反射镜、红外探测器、前置放大器、信号输入通道、参考频率输入

信号通道、信号相关器等组成<sup>[4-7]</sup>。其电子系统如图 2 所示。

为抑制系统 1/f 噪声,设计斩波器频率大于 1 kHz。斩波频率稳定性优于 ±0.5 Hz,实现噪声带宽小于 1 Hz,有效提高锁相放大信噪比。

斩波器叶片扫过红外光束轨迹弧长大于红外光束直径 10 倍以上,红外探测器输出信号基本为方波。面向红外探测器的斩波器表面喷涂高发射率黑漆,与内置参考黑体互为补充,向红外辐射计提供精准参考红外辐射。

设计内置参考黑体温度与环境温度保持一致,其温度通过精密测温单元实时测量显示,在测量目标红外辐射时参加运算,补偿环境温度变化,有效减小环境对测量的影响<sup>[3]</sup>。

同步频率信号拾取环节提取斩波器频率,经滤波及整形后作为锁相放大电路参考频率信号输入到其参考通道中。相关器完成求解参考信号和被测信号之间相关函数运算的电路,实现信噪比的大幅度改善,从噪声中将微弱红外测量信号检测出来。

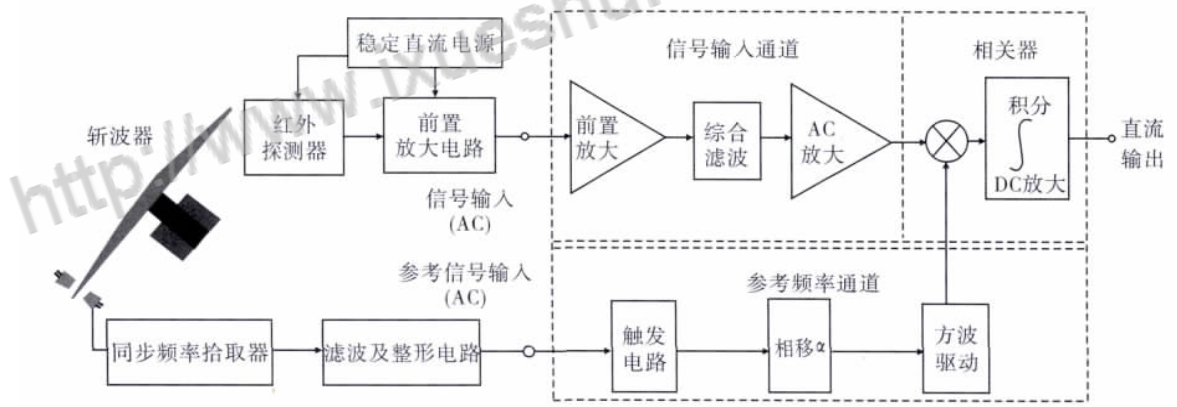


图 2 红外探测电子系统

Fig.2 Electronic system for infrared detecting

## 2 精密红外辐射计信号方程

测量目标红外辐射时,红外辐射计输出信号电压  $V$  为

$$V = G \times R \times [P_{\text{target}} - P_{\text{Re}}] \quad (1)$$

式中: $R$  为红外探测器响应度  $G$  为红外辐射计电路增益; $P_{\text{target}}$  为斩波器叶片不在光路时以目标辐射为主的红外入射功率; $P_{\text{Re}}$  为斩波器叶片完全遮挡光路时红外辐射计内部参考黑体辐射功率。红外辐射计输出信号电压  $V$  如图 3 所示。

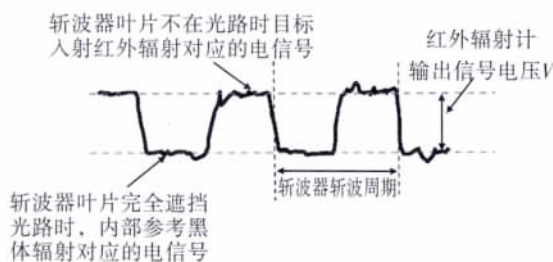


图 3 红外辐射计输出信号示意图

Fig.3 Schematic of output signals of infrared radiometer

目标、内部参考黑体红外辐射通过斩波器周期性地交替进入红外探测器,红外辐射计输出电压是  $P_{\text{target}}$  与  $P_{\text{Re}}$  响应的电信号之差。红外辐射计最终输出的是一个电压值。为减小环境辐射带来的测量误差,设计红外辐射计内参考黑体温度与红外辐射计壳体内温度、斩波器温度、环境温度相等<sup>[8]</sup>,将信号方程简化为

$$V = G \times R \times \left(\frac{1}{2}\right) \times (D_{\text{IO}} \times \text{FOV})^2 \times \tau_{\text{IO}} \times \epsilon_{\text{target}} \times [M(T_{\text{target}}) - M(T_{\text{Re}})] \quad (2)$$

式中: $G$ 为红外辐射计电路增益; $R$ 为红外探测器响应度; $D_{\text{IO}}$ 为红外辐射计光学系统入瞳口径; $\tau_{\text{IO}}$ 为光学系统透过率; $\text{FOV}$ 为红外辐射计视场,以上量均为常数。 $\epsilon_{\text{target}}$ 和  $T_{\text{target}}$ 为被测目标的发射率与温度; $T_{\text{Re}}$ 为红外辐射计内部参考黑体温度; $M(T_{\text{target}})$ 和  $M(T_{\text{Re}})$ 分别为被测目标、内部参考黑体的辐射出射度。

红外辐射计以扫描方式测量红外温差准直辐射源辐射温度与辐射温差,其测量精度取决于红外辐射计自身噪声。因此,需要研究红外辐射计噪声。

### 3 红外辐射计噪声等效温差建模

为了直观表达噪声量值,红外工程技术人员习惯于将红外测量设备的噪声等效为输入目标温差。当红外辐射计对准目标,其输出信号电压与噪声电压均方根(rms)之比(即信噪比)为1时,目标与辐射计内部参考黑体间的温差即为红外辐射计的 NETD。

红外辐射计 NETD 的推导基于以下几个假设<sup>[9]</sup>:

1) 在整个红外探测器光敏度面上,其响应度均匀一致;

2) 目标充满红外辐射计视场;

3) 在目标与红外探测器之间的大气透射损失可以忽略;

4) 与红外探测器相比,电子系统的前置放大电路、锁相放大电路噪声可忽略。

当目标温度  $T_{\text{target}}$  和红外辐射计内部参考黑体温度  $T_{\text{Re}}$  小于  $1^\circ\text{C}$  时,原方程变换为

$$V = G \times R \times \left(\frac{1}{2}\right) \times (D_{\text{IO}} \times \text{FOV})^2 \times [\tau_{\text{IO}} \times \epsilon_{\text{target}} \times \frac{\partial M(T_{\text{target}})}{\partial T} \times \Delta T] \quad (3)$$

已知,红外探测器光谱响应度与  $D$  之间其存在下列关系:

$$R(\lambda) = \frac{V_N}{\sqrt{A_{\text{detector}} \cdot \Delta f_N}} \times D^*(\lambda) \quad (4)$$

式中: $V_N$ 为红外探测器噪声; $A_{\text{detector}}$ 为红外探测器光敏面面积; $\Delta f_N$ 为噪声带宽; $D^*(\lambda)$ 为红外探测器的比探测率。将上式的红外辐射对 MWIR、LWIR 及中波热像仪常见谱段(3.7~4.8) $\mu\text{m}$  分别积分,得到红外探测器信噪比 SNR 为

$$\frac{V}{V_n} = \Delta T \times \frac{(D_{\text{IO}} \times \text{FOV})^2}{2^2 \sqrt{A_{\text{detector}} \cdot \Delta f_N}} \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \tau_{\text{IO}}(\lambda) \epsilon_{\text{target}} \frac{\partial M(\lambda, T_{\text{Re}})}{\partial T} d\lambda \quad (5)$$

前置放大器将信号  $V$  和噪声  $V_n$  放大同样的倍数,前置放大器设计精密,插入噪声可以忽略,信噪比保持恒定。噪声等效温差(NETD)是以信噪比  $\text{SNR}=1$  为前提条件的,即  $V/V_n=1$ ,由此得到的  $\Delta T$  称为红外辐射计 NETD<sup>[10]</sup>:

$$\text{NETD} = \frac{2^2 \sqrt{A_{\text{detector}} \Delta f_N}}{(D_{\text{IO}} \times \text{FOV})^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \tau_{\text{IO}}(\lambda) \epsilon_{\text{target}} \frac{\partial M(\lambda, T_{\text{Re}})}{\partial T} d\lambda} \quad (6)$$

该模型给出了红外辐射计噪声与其光学系统、红外探测电子系统的哪些因素有关,指导精密红外辐射计光、机、电环节设计,实现对整机噪声的有效抑制。

### 4 设计实例

红外辐射计入瞳直径  $D_{\text{IO}}$  取值为 100 mm;红外辐射计视场  $\text{FOV}$  取值为  $0.05^\circ$ ;系统噪声带宽  $\Delta f_N$

分别取值 100 Hz、10 Hz、1 Hz;参照 Judson 公司资料,红外探测器光敏面面积  $A_{\text{detector}}$  取  $0.0252 \text{ cm}^2$ ;  $D^*(\lambda_p) = 5 \times 10^{10} \text{ cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ ,利用积分中值定理,MWIR 的  $D^*(\lambda) = 55\% D^*(\lambda_p)$ , (3.7~4.8) $\mu\text{m}$  的  $D^*(\lambda) = 55\% D^*(\lambda_p)$ , LWIR 的  $D^*(\lambda) = 72\% D^*(\lambda_p)$ ;  $\tau_{\text{IO}}(\lambda)$  为红外辐射计入瞳的光谱透过率,取 80%;  $\epsilon_{\text{target}}$  取 0.99。表 1 列出环境温度为  $20^\circ\text{C}$  情况下精密红外辐射计的 NETD。

表1 精密红外辐射计的 NETD

Table 1 NETD of precision infrared radiometer

噪声带宽/ Hz	中波红外		长波红外 (8~14) $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$
	(3~5) $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$	(3.7~4.8) $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$	
100	0.038 2	0.056 2	0.002 3
10	0.012 0	0.017 7	0.000 7
1	0.003 8	0.005 6	0.000 2

### 5 结论

从表1中可以得到以下结论:对于相同的红外谱段,红外谱段光谱范围越窄,红外辐射计自身的NETD越大,因此(3.7~4.8) $\mu\text{m}$ 谱段的NETD最大。此外,测量20 $^\circ\text{C}$ 左右的红外目标,由于LWIR的 $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M(\lambda, T_{Re})}{\partial T} d\lambda$ 最大,因此红外辐射计在LWIR的NETD最小;系统噪声带宽越窄,红外辐射计NETD越小。

研制内部参考黑体与环境温度一致的红外辐射计,在保证与被校准红外温差准直辐射源的出瞳口径、靶标张角匹配的前提下,增大光学系统入瞳口径与FOV,可有效降低红外辐射计NETD;提高光学系统透过率 $\tau_{10}(\lambda)$ 、选用高 $D^*(\lambda)$ 红外探测器均可有效降低红外辐射计NETD。通过选用直流无刷高速电动机,减小电机轴向、径向窜动量,采用锁相环路提高电动机瞬时转速稳定性等措施,可有效提高斩波器频率稳定性,将红外探测电子系统噪声带宽压缩到1 Hz以内,实现在MWIR、LWIR等波段红外辐射计自身的NETD均小于0.01 $^\circ\text{C}$ ,解决热像仪测试设备辐射温差准确校准问题,实现热像仪测量量值溯源,满足我国军用热像仪科研生产中的计量需求。

### 参考文献:

[1] 胡铁力,李旭东,付建明,等. 红外热像仪参数的双黑体测量装置[J]. 应用光学,2006,27(3):246-249.  
HU Tie-li, LI Xu-dong, FU Jian-ming, et al. Double-blackbody unit for measuring parameters of infrared cameras [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(3):246-249. (in Chinese with an English abstract)

[2] BRYANT P, GRIGOR J, MCHUGH S, et al. Performance comparison of reflective and emissive target projector systems for high-performance IR sensors [J]. SPIE, 2003, 5076:242-249.

[3] 胡铁力,韩军,郑克哲,等. 红外热像仪测试系统校准[J]. 应用光学,2006,27(增刊):28-32.  
HU Tie-li, HAN Jun, ZHENG Ke-zhe, et al. Calibration facility of infrared imaging systems [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(Sup):28-32. (in Chinese with an English abstract)

[4] MACKINNON J B, SMITH B R, SCHWEIZER F. Calibration of a transfer radiometer in support of the navy forward looking infrared systems (FLIR) program [J]. SPIE, 1981, 308:13-21.

[5] ANDERSON R C. Considerations in selection and use of calibration equipment for simulators used with thermal imaging systems [J]. SPIE, 1991, 308:92-98.

[6] DARIO C, AMIR G, BUCKWALD R A. High performance spectroradiometer for very accurate radiometric calibrations and testing of blackbody sources and EO test equipment [J]. SPIE, 2006, 6207:230-240.

[7] 曾庆勇. 微弱信号检测[M]. 杭州:浙江大学出版社,1994.  
ZENG Qing-yong. Detection of weak signals [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1994. (in Chinese)

[8] ZVI K, YORAIN N, DARIO C, et al. State-of-the-art transfer radiometer for testing and calibration of FLIR test equipment [J]. SPIE, 1991, 1540:565-577.

[9] 劳埃德 J M. 热成像系统[M]. 北京:国防工业出版社,1981.  
LLOYD J M. Thermal imaging systems [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1981. (in Chinese)

[10] 曲卫东,张才根,薛建国,等. 双波段扫描辐射计的研制[J]. 光学技术,2004,30(1):89-94.  
QU Wei-dong, ZHANG Cai-gen, XUE Jian-guo, et al. Development of double-channels scanning radiometer [J]. Optical Technique, 2004, 30(1):89-94. (in Chinese with an English abstract)

论文降重，论文修改，论文代写加微信:18086619247或QQ:516639237

论文免费查重，论文格式一键规范，参考文献规范扫二维码：



[相关推荐：](#)

[小型化大增益低噪声中视频接收机的研制](#)

[低噪声红外辐射计设计](#)

[双波段辐射计中红外望远镜的结构设计](#)

[长距离红外遥控](#)

[红外和微波辐射计反演海表面温度的比较](#)

[红外和微波辐射计反演海表面温度的比较](#)

[用于遥感测温的双通道红外辐射计](#)

[低噪声运放前置放大器的实用设计](#)

[红外和微波辐射计反演海表面温度的比较\(英文\)](#)

[LLWS探测用红外辐射计初步设计](#)