

制冷型 HgCdTe 红外推扫系统噪声等效温差精测与结果分析

徐世伟 张悦玲 王大鹏 魏东 刘万成 张昇种 唐树威

(光电信息控制和安全技术重点实验室, 河北 三河 065201)

摘要 指出传统噪声等效温差(NETD)测试中的不足之处;从噪声等效温差测试原理出发,推导测试中常用噪声等效温差公式;提出实验室条件下的精确测量方法,并对测试结果进行修正;对制冷型 HgCdTe 红外推扫系统采用不同波段、不同光学镜头组合测试噪声等效温差值,对测试得到 4 组数据进行对比分析。根据探测器本身温度响应特性及中波与长波波段的黑体辐射特性,从理论上解释了不同测试条件下噪声等效温差的测试结果差异;同时,实验结果表明同一波段,不同口径的噪声等效温差相差不大,而不同波段相同口径的噪声等效温差相差很大。实验结果同时证实了光学系统只有 F 数与噪声等效温差有关。

关键词 信号处理;噪声等效温差;红外推扫系统;信号传递函数

中图分类号 TN215 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.111202

Precision Measurement and Results Analysis of Noise Equivalent Temperature Difference of Cooled HgCdTe Infrared Push-Broom System

Xu Shiwei Zhang Yueling Wang Dapeng Wei Dong Liu Wancheng
Zhang Shengchong Tang Shuwei

(*Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Sanhe, Heibei 065201, China*)

Abstract The inadequacies of traditional noise equivalent temperature difference (NETD) test are pointed out; the commonly used NETD test formula is derivated from the principle of NETD test. The accurate measurement methods under laboratory conditions are raised and test results are corrected; NETD of cooled HgCdTe infrared push-broom system with different bands, different optical lens are tested and four sets of data on the test are got and contrast analysis is given to them. According to the detector temperature response characteristics and blackbody radiation characteristics of the medium wave and long wave band, the reasons for NETD test result differences under different test conditions are explained theoretically. At the same time, experimental result shows that NETD with the same band and the different optical calibers change little, while NETD with different bands and the same optical caliber change very much. The experimental results also confirm that only the F number in all the parameters of the optical system, is relative to NETD.

Key words signal processing; noise equivalent temperature difference; infrared push-broom system; signal transfer function

OCIS codes 120.6780; 040.3060; 040.1240

1 引言

目前,由于采用斯特林制冷, HgCdTe 探测器的探测率仍然是接近或达到背景限。噪声等效温差(NETD)是热成像系统灵敏度的重要指标,可用于计算红外目标的作用距离,也可以反推出探测器的比探测率 D^* ,或利用噪声等效温差和探测器测试数据计算红外成像系统扫描效率。国内关于制冷型 HgCdTe 红

收稿日期: 2012-06-20; 收到修改稿日期: 2012-08-01; 网络出版日期: 2012-10-15

作者简介: 徐世伟(1979—),男,硕士,工程师,主要从事数字信号处理与红外图像处理等方面的研究。

E-mail: xsw19@126.com

外推扫噪声等效温差精确测量的工程实用方法并不多,其测量的噪声等效温差作为系统性能的综合度量尚有不足之处:1)由于电路输出端到终端图像之间还有其他子系统(如显示器);2)人眼对图像分辨效果与视在信噪比有关^[1]。本文从实验角度,对制冷型 HgCdTe 红外推扫系统噪声等效温差进行精确测量,分析测量过程中引入的噪声环节,对测试结果进行修正,并分析测量结果的影响因素。

2 噪声等效温差的定义及表达式

用红外成像系统观察标准实验图案,当红外成像系统输出端产生的峰值信号与均方根噪声电压之比为 1 时的目标与背景之间的温差,称为噪声等效温差。噪声等效温差是表征热成像系统受客观信噪比限制的分辨率的一种量度,其表达式为

$$f_{\text{NETD}} = \frac{\Delta T}{\Delta v_s / \Delta v_n}, \quad (1)$$

式中 Δv_n 为电路输出的噪声的均方根值, Δv_s 为目标与背景之间温差为 ΔT 时电路输出端目标信号与背景信号之差。

噪声等效温差的理论值计算已有很多介绍,文中不再叙述。这里直接采用了以能量形式推导出的背景限噪声等效温差的理论值^[2],其表达式为

$$f_{\text{NETD}} = \frac{4F^2 \sqrt{\Delta f}}{\sqrt{A_d} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_0(\lambda) D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(T_B)}{\partial T} d\lambda}, \quad (2)$$

式中 F 为光学系统 F 数, Δf 为系统的等效噪声带宽, A_d 为探测器有效面积, $\tau_0(\lambda)$ 为光学系统的光谱透射率, $D^*(\lambda)$ 为探测器的归一化探测度(比探测率), $M_\lambda(T)$ 为目标的光谱辐射出射度; $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为系统工作波段, T_B 为背景辐射度。

$$D^*(\lambda) = \frac{R(\lambda) \sqrt{\Delta f A_d}}{\sigma}, \quad (3)$$

$$F_{\text{STF}} = \frac{\sqrt{A_d}}{4F^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau(\lambda) D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(T_B)}{\partial T} d\lambda. \quad (4)$$

式中 σ 为均方根噪声, f_{STF} 为信号传递函数, $R(\lambda)$ 为探测器电压响应率。

将(3)、(4)式代入(1)式可以得出,测试中常用噪声等效温差的表达式为

$$f_{\text{NETD}} = \frac{\sigma}{f_{\text{STF}}} \text{ or } f_{\text{NETD}} = \frac{\Delta T}{S/\sigma}. \quad (5)$$

(5)式与噪声等效温差测试定义相一致,即让目标、背景的温差与噪声等效温差相差数倍。对于 480×6 扫描型探测系统,其噪声等效温差并没有一个统一的表达式,参考单元扫描及凝视方式成像系统,假定扫描效率为 100%,则其噪声等效温差表达式为

$$f_{\text{NETD}} = \frac{\pi^{3/2} f_0 \sqrt{W_H W_V \bar{F}}}{2\alpha\beta A_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_0(\lambda) D^*(\lambda_p) \frac{\partial M_\lambda(T_B)}{\partial T} d\lambda}, \quad (6)$$

式中 f_0 为焦距, A_0 为入瞳面积, $W_H \times W_V$ 为光学系统观察视场角, \bar{F} 为帧时 T_f 的倒数, α, β 为瞬时视场角。 $D^*(\lambda_p)$ 是为便于近似计算,用器件响应峰值波长归一化后的替代值。

3 噪声等效温差的测试方法

在国标中规定的测噪声等效温差的标准目标是条状孔板,并要求孔和板的宽度都不小于 4 pixel,如图 1(a)所示。事实上是要求目标信号和背景信号都有足够的宽度,让目标信号和背景信号都出现平顶或平谷,实际采用了方孔目标,其中方孔的边长约为 60 pixel,如图 1(b)所示。

在实际测试过程中,以数字信号灰度级代替电压值。因为设置峰值信号等于均方根噪声值时的误差很

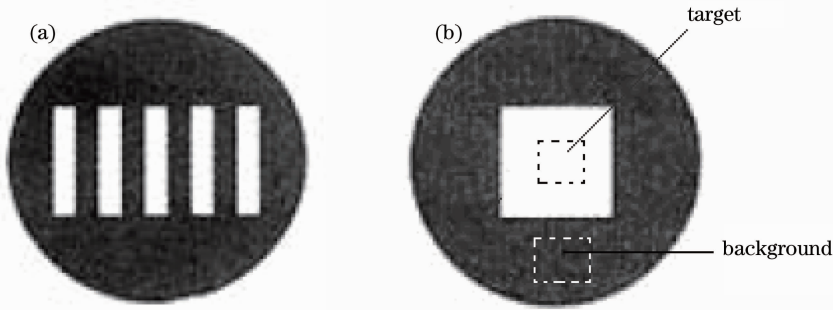


图 1 目标图像。(a)条状孔板图像；(b)方孔目标图像

Fig. 1 Target image. (a) Strip-hole image; (b) square-hole target image

大。假设目标与背景都是朗伯辐射体,先求出在均匀黑体辐照下的系统均方根噪声,记录目标与背景温差 ΔT ,在一段时间内统计目标与背景灰度的平均值 (Δf_{gray}),记录红外成像系统分辨单元接收到的辐射功率的灰度信号差值 S ,由噪声等效温差的表达式(5)式得到。

3.1 噪声模型的选择

目前,用来表述热成像系统噪声等效温差的主要方法有噪声等效温差、时间噪声等效温差和空间噪声等效温差^[3~7],主要取决于测试时所选取的噪声类型。在实际中,选用不同噪声测量方式,噪声等效温差测量结果相差并不大。为便于计算,文中采用时间噪声的测试方法,假设测试区为正方形,边长含 n 个像素,其表达式为

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{xy}^i - \overline{P_{xy}})^2}{n(n-1)}}, \quad (7)$$

式中 P_{xy}^i 为采集视频图像相应帧对应像数的灰度级; $\overline{P_{xy}}$ 为视频图像的平均值,即 $\overline{P_{xy}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{xy}^i}{n(n-1)}$ 。

3.2 减少测试过程引入其他分系统带来的噪声

红外推扫系统噪声不仅是由光子的随机运动引起,而且要引入其他的分系统。根据线性滤波理论,假设各系统的传递函数表示式分别为:光学系统 f_{MTFo} ,探测器 f_{MTFd} ,电子线路 f_{MTFe} ,显示器 f_{MTFm} ,大气扰动 f_{MTFom} ,人眼调制传递函数 f_{MTFeye} ^[8]。则系统的传递函数 MTF 表达式为

$$f_{\text{MTF}} = f_{\text{MTFo}} \cdot f_{\text{MTFd}} \cdot f_{\text{MTFe}} \cdot f_{\text{MTFm}} \cdot f_{\text{MTFom}} \cdot f_{\text{MTFeye}}. \quad (8)$$

上述噪声等效温差测试方法, f_{MTFm} 是将探测器输出的模拟图像转换为数字信号,必然会使噪声增加。同时对于 f_{MTFeye} ,人眼对图像分辨效果与视在信噪比有关。为了避免引入这两方面影响,实验中采用 Ethernet、USB 或 Camera link 等数字传输方式直接读取探测器的数字信号。

4 实验结果与噪声等效温差修正

4.1 实验结果

选用 480×6 制冷型 HgCdTe 材料探测器,中波 ($3 \sim 5 \mu\text{m}$)、长波 ($8 \sim 12 \mu\text{m}$),像素尺寸 $a \times b$,测试环境温度 $18.65 \text{ }^\circ\text{C}$,探测器所成图像大小为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 、帧频率 50 Hz 。得到中波与长波线扫制冷探测器在不同焦距 f 、相同积分时间条件下像级差值 Δf_{gray} 与系统噪声均方根值 (RMSN) f_{RMSN} 。同时根据测试结果对噪声等效温差进行修正,如下式:

$$f_{\text{NETD}} = f_{\text{RMSN}} \frac{\Delta T}{\Delta f_{\text{gray}}} \times 1000 \times 0.92 \times 0.97. \quad (9)$$

表 1~4 为不同焦距下中波与长波修正后的 NETD 结果。

表 1 $f=100$ mm, $f_{\text{RMSN}}=4.104$ 时长波探测器 NETD 结果Table 1 NETD results of long-wave detector when $f=100$ mm and $f_{\text{RMSN}}=4.104$

ΔT /K	0.5	1	1.25	1.5	2
Δf_{gray}	62.50	117.72	145.15	172.43	228.41
NETD /mK	29.30	31.12	31.55	31.86	32.07

表 2 $f=200$ mm, $f_{\text{RMSN}}=4.06$ 长波探测器 NETD 结果Table 2 NETD results of long-wave detector when $f=200$ mm and $f_{\text{RMSN}}=4.06$

ΔT /K	0.5	1	1.25	1.5	2
Δf_{gray}	64.21	122.03	150.62	177.61	235.20
NETD /mK	28.22	29.70	30.07	30.60	30.81

表 3 $f=100$ mm, $f_{\text{RMSN}}=3.88$ 时中波探测器 NETD 结果Table 3 NETD results of medium-wave detector when $f=100$ mm and $f_{\text{RMSN}}=3.88$

ΔT /K	0.5	1	1.5	2	2.5
Δf_{gray}	26.70	49.56	72.94	96.94	121.11
NETD /mK	64.84	69.86	71.20	71.43	71.48

表 4 $f=200$ mm, $f_{\text{RMSN}}=3.92$ 时中波探测器 NETD 结果Table 4 NETD results of medium-wave detector when $f=200$ mm and $f_{\text{RMSN}}=3.92$

ΔT /K	0.5	1	1.5	2	2.5
Δf_{gray}	23.80	44.64	64.93	86.08	107.06
NETD /mK	73.49	78.36	80.81	81.27	81.68

4.2 测试修正

测试与计算过程中需要考虑以下两点:

1) 平行光管内温度在设置 0° 时,方口靶标中心区域的灰度值与周围的背景的温度还存在一定的差值。需要 CTCB 温度控制软件设置偏置做修正,使它们的灰度级相同。同时,通过计算机绘制出背景与信号的统计区域,自动给出像差灰度数,从而消除人眼对测试结果的影响。

2) 测试中还要考虑黑体的发射率以及红外波段的光在平行光管内折射传输损失,对 NETD 进行修正。实际测试中黑体发射率为 0.97 ± 0.01 ,光传输损失为 0.08。

5 实验数据分析

通过表 1~4 数据对比分析得到,同一测试条件下噪声等效温差变化具有规律性,NETD 测量结果与测试条件有关,具体如下:

5.1 同一波段、相同口径的探测器,随 ΔT 增加,噪声等效温差噪声等效温差值增大

如表 1~4 中,随 ΔT 增加,噪声等效温差噪声等效温差值逐渐增大。当温差从 0.5 K 升到 2 K 时,噪声 σ 保持不变,背景黑体温度不变,灰度值相同。(9)式得到 f_{NETD} 与 $\Delta T/\Delta f_{\text{gray}}$ 成正比,即反映了温度响应曲线的斜率变化情况。制冷 HgCdTe 探测器的温度响应曲线为“S”形曲线(图 2),其线性区的温度范围 $T_1 \sim T_3$,但线性区内并不是一个严格意义上的直线,而是从斜率 K_2 逐渐增加到最大值 K_1 ,再逐渐减小的过程。实验中,温度在 $T_2 \sim T_3$ 范围内,使温度响应的斜率随温度升高由大变小,测试得到的噪声等效温差初始值最小,但其变化量并不是很大。所以噪声等效温差取值范围不能太大,太大会使得灰度响应进入更深的非线性区,温度 T_2 下的噪声等效温差值为最大值。图 3 为 ΔT 在 $0 \sim 2$ K 范围内实测值与理论值的关系图。灰度值范围为 $0 \sim 16383$ 。

5.2 不同波段、相同口径的噪声等效温差结果相差很大^[9~12]

分别取在 $\Delta T=0.5$ K 时噪声等效温差值:焦距 100 mm,长波噪声等效温差为 29.30;焦距 100 mm 中波

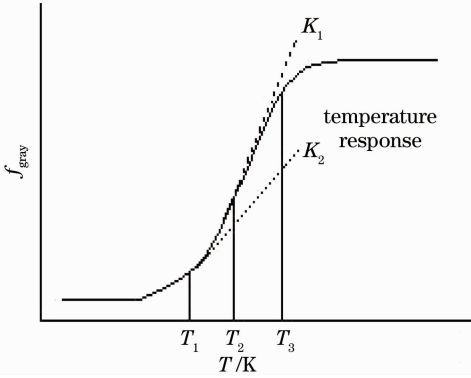


图2 探测器的温度响应曲线

Fig. 2 Curve of detector's temperature response

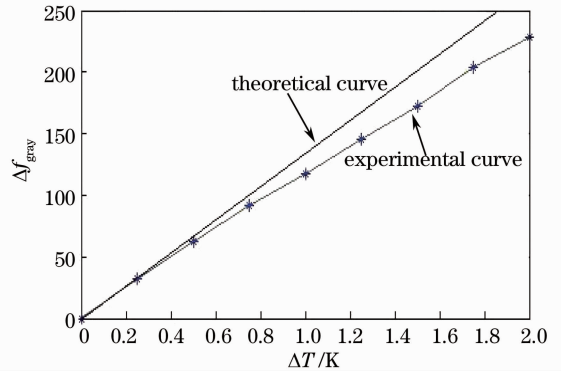


图3 ΔT 与 Δf_gray 关系图

Fig. 3 Relation of ΔT to Δf_gray

噪声等效温差为 64.84; 焦距 200 mm, 长波噪声等效温差为 28.22; 焦距 200 mm, 中波噪声等效温差为 73.49。在两种相同焦距情况下噪声等效温差值相差 2~3 倍。

绝对温度 $T(K)$ 的理想辐射源的出射度, 可以通过普朗克黑体的辐射定律来表示:

$$M_e(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \left[\frac{1}{\exp(c_2/\lambda T) - 1} \right]. \quad (10)$$

式中, 第一辐射常量 $C_1 = 3.7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$, 第二辐射常数 $C_2 = 1.4388 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$; λ 为波长, 单位为 μm 。图 4 表示在对数坐标系下的普朗克光谱出射度。因为光子探测器对有效的能量显示是线性的, 应用线性坐标系更加容易理解(图 5)。每一条曲线在峰值波长处 λ_{peak} 有一个最大值。

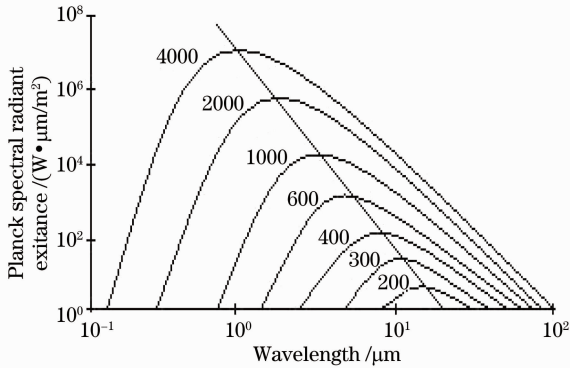


图4 普朗克光谱辐射出射度曲线

Fig. 4 Curve of Planck spectral radiant exitance

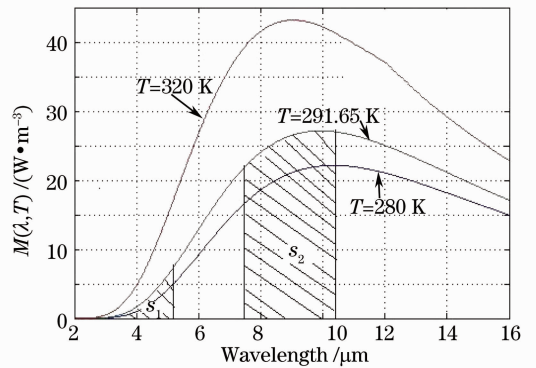


图5 线性坐标系下普朗克黑体定律曲线

Fig. 5 Curve of Planck blackbody law in the linear coordinate

维恩从热力学理论导出黑体辐射光谱的极大值对应的波长:

$$\lambda_{\text{peak}} = b/T, \quad (11)$$

式中 $b = 2897.8 \mu\text{m} \cdot \text{K}$, T 为绝对温度, 单位 K。

根据维恩位移定律, 在实验室 18.65 °C 条件下, $T = 291.65 \text{ K}$, 黑体峰值波长 $\lambda_{\text{peak}} = 9.94 \mu\text{m}$, 图(5)的中间线为其辐射曲线。因此长波 7.7~10.3 μm 与中波 3.7~4.8 μm 的辐射出射度为图 5 阴影面积 S_2 与 S_1 , 计算得到 S_2/S_1 为 23.38 倍。

$$S_1 = \int_{3.7}^{4.8} M_e(\lambda, 291.65) d\lambda = 2.8882 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$$

$$S_2 = \int_{7.7}^{10.3} M_e(\lambda, 291.65) d\lambda = 67.5415 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}.$$

为将灰度输出值调整到 14 位数据的中间值附近(8000 左右), 实验前, 设置长波探测系统增益系数为 1, 中波探测系统增益系数为 8。长波 D_L^* 与中波 D_M^* 的比值为 1.8 倍。灰度变化值与温度、波长、增益、 D^* 值

关系公式可写成:

$$\Delta f_{\text{gray}} = K_{\text{sys}} D^* G \left\{ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\lambda}{\lambda_{\text{O_peak}}} \frac{c_1}{\lambda^5} \left[\frac{1}{\exp(c_2/\lambda T_{\text{O}}) - 1} \right] d\lambda - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\lambda}{\lambda_{\text{B_peak}}} \frac{c_1}{\lambda^5} \left[\frac{1}{\exp(c_2/\lambda T_{\text{B}}) - 1} \right] d\lambda \right\}. \quad (12)$$

式中 K_{sys} 可以认为是除探测器其他影响的归一化系数, G 为探测器的增益系数, $\lambda_{\text{O_peak}}$ 在目标温度的峰值波长, $\lambda_{\text{B_peak}}$ 背景温度的峰值波长, T_{O} 为目标温度, T_{B} 为背景温度。对于中波与长波系统 K_{sys} 相同。因此, 在相同条件下, 实验室测量得到的中波的噪声等效温差值为长波值的 2 倍。

5.3 同一波段、不同口径的噪声等效温差相差很小

同样取在 $\Delta T=0.5$ K 时噪声等效温差的值: 长波焦距 100 mm, 噪声等效温差为 29.30, 长波焦距为 200 mm 时, 噪声等效温差为 28.22; 中波焦距为 100 mm, 噪声等效温差为 64.84, 中波焦距 200 mm, 噪声等效温差为 73.49。

这个问题的实质就是要分析噪声等效温差与光学镜头参数的关系。(1)式与(5)式均未提及光学口径与噪声等效温差有关系,(5)式中, 如果将总视场 $W_{\text{H}}、W_{\text{V}}$ 用瞬时视场 $\alpha=a/f、\beta=b/f$ ($a、b$ 为单个像素尺寸) 与像素个数 $m \times n$ 乘积来代替, 可以推回到(1)式。

同时, 实验结果表明 噪声等效温差与光学口径没有关系, 与瞬时视场 $\alpha、\beta$ 乘积无关, 与焦距无关, 只与光学系统 F 数成正比。噪声等效温差测试需要成像超过一定像素个数, 不是极限状态下的一个像素点目标。口径大的焦距大而它们的 F 数比值不变; 制冷型器件由于内有冷屏, 要求光学设计与冷屏 F 数匹配, 非制冷型有实际极限值 ($F \geq 1$) 限制^[13]。

6 结 论

通过理论推导及实验的方法分析影响噪声等效温差测量的影响因素, 对制冷型 HgCdTe 红外推扫系统噪声等效温差进行精确测量, 通过考虑黑体的发射率以及红外波段的光在平行光管内折射传输损失对噪声等效温差测量结果进行修正, 同时直接读取探测器数字信号消除了传统读取模拟信号带来的误差。得到了不同波段、不同口径和不同测试条件是实验室测试的噪声等效温差值, 并对测量结果进行了分析, 得到的实验结果与理论上基本保持一致。

参 考 文 献

- 1 Wang Yifeng, Mao Jingxiang. Computation of scan efficiency of infrared imaging system [J]. *Laser & Infrared*, 2008, **38**(11): 1097~1099
王忆锋, 毛京湘. 利用 NETD 和探测器测试数据计算红外成像系统扫描效率[J]. *激光与红外*, 2008, **38**(11): 1097~1099
- 2 Song Fenghua. *Modern Space Optoelectronics System and Application* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. 243~250
宋丰华. *现代空间光电系统与应用* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004. 243~250
- 3 G. C. HOLST. *Electro-Optical Imaging System Performance*[M]. Winter Park: JCD Publishing, 1995. 362~382
- 4 G. C. Holst. *Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems*[M]. Winter Park: JCD Publishing; Beijingham: SPIE Optical Engineering Press, 1998
- 5 Feng Kecheng, Liu Jingsheng. *Infrared Optics System* [M]. Beijing: Enginery Industry Press, 1994. 124~129
冯克成, 刘景生. *红外光学系统*[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1994. 124~129
- 6 An Chengbin, Wan Ying. Analysis of NETD test for thermal imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(3): 414~417
安成斌, 万 英. 热成像系统的 NETD 测试分析[J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(3): 414~417
- 7 Hu Mingpeng, Ma Dongmei, Li Hongzhuang *et al.*. The noise model of the staring image system [J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(9): 863~866
胡明鹏, 马冬梅, 李宏壮. 凝视型热成像系统噪声模型研究[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(9): 863~866
- 8 Hu Tieli, Feng Zhuoxiang, Li Xudong *et al.*. Modeling and measurement of thermal imager temporal noise[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(2): 519~522

- 胡铁力, 冯卓祥, 李旭东 等. 红外热像仪时间噪声测量技术研究 [J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(2): 519~522
- 9 Jiang Guibin, Lan Tian, Ni Guoqiang. Important parameters and testing methods of performance evaluation of thermal infrared imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(2): 470~473
- 姜贵彬, 蓝天, 倪国强. 红外热成像系统评价的重要参数及测试方法[J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(2): 470~473
- 10 Zhang Cheng, Li Chunming. Research on NETD test of infrared imaging systems [J]. *J. Dali University*, 2009, **8**(4): 37~39
- 张成, 李春明. 红外热成像系统噪声等效温差测试研究[J]. 大理学院学报, 2009, **8**(4): 37~39
- 11 Hu Mingpeng. Influence and analysis of parameters set on NETD test [J]. *Infrared Technology*, 2009, **31**(1): 27~31
- 胡明鹏. 参数设置对噪声等效温差(NETD)测试影响分析[J]. 红外技术, 2009, **31**(1): 27~31
- 12 Hu Mingpeng. NETD test for the staring thermal imaging system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(8): 15~19
- 胡明鹏, 李宏壮, 马冬梅. 凝视型红外光电系统噪声等效温差测量[J]. 光电工程, 2007, **34**(8): 15~19
- 13 Wan Ying, Qi Meng. Method of thermal image system auto NETD-measuring [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(10): 1379~1382
- 万英, 祁蒙. 热成像系统 NETD 自动测量方法研究[J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(10): 1379~1382