

系统与设计

目标到测试系统距离对红外测温精度的影响

陆子凤^{1,2,3}, 潘玉龙⁴, 王学进⁴, 孙强^{*1}, 谷立山¹, 卢振武¹, 刘益春³

(1. 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130022; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 东北师范大学物理学院, 吉林 长春 130024; 4. 第二炮兵工程设计研究所, 北京 100011)

摘要: 为了提高红外测温精度、减小测温误差, 研究了目标到红外系统的距离对红外测温的影响, 采用非制冷红外焦平面阵列热像仪和标准黑体进行定标研究, 实验结果表明黑体红外热图像的灰度均值随温度呈线性变化, 随距离呈非线性变化的关系, 利用红外热像仪探测面上照度与像方孔径角的关系, 对测试距离的影响做出了合理的解释; 比较了不同距离处测量温度与真实温度的差别, 得出在近距离测温时, 距离变化对测温影响较大, 最大误差可达 $\pm 5^\circ\text{C}$; 在远距离测温时, 测试距离在大范围内变化, 对测温结果影响很小, 误差在 $\pm 0.02^\circ\text{C}$ 范围之内。实际测量距离与热像仪标定距离不同, 也会引入测温误差, 因此保持实际测温距离与校准距离相同以减小误差, 或根据不同距离处表观温度与实际温度的差别, 对表观温度修正, 以提高测温精度。

关键词: 红外测温; 温度标定; 距离; 测温精度

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2008)05-0271-04

Influence of Object-system Distance on Accuracy of Temperature Measurement with IR System

LU Zi-feng^{1,2,3}, WANG Xuejin⁴, PAN Yulong⁴, SUN Qiang¹, GU Lishan¹, LU Zhen-wu¹, LIU Yichun³

(1. State Key Lab. of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun Jilin 130033, China; 2. Graduate School-of-the Chinese Academy of Sciences, Beijing China;

3. Physical department, Northeast Normal University, Changchun Jilin 130024, China;

4. Engineering Design Institute for Second Artillery, Beijing 100011, China)

Abstract: The influence of object-system distance as well as the difference between the values of the object-system distance under calibration and real work conditions on accuracy of non-contact temperature measurement with Un-cooled IR thermal imaging system was investigated. When the object-system distance changed from 3 to 10 meter, the temperature measured had great change. For the distance changed from 10 meter to infinity, the temperature measured had no change. The method of eliminating the influence of the distance on the measurement results was proposed.

Key words: infrared temperature measurement ;temperature calibration ;object-system distance ;temperature accuracy

引言

红外热像仪测温是通过接收入射到红外焦平面阵列探测器上的物体辐射来确定其温度的。被红外探测器接收的红外辐射, 由于受到测试距离、大气透过率、环境温度等因素的影响而与物体表面的辐射不同, 因而导致热像仪显示温度(表观温度)与物体的

实际温度不同。目前, 国内外的很多专家和学者已对影响红外测温精度的各种因素进行了广泛地分析和讨论^[1-7]。然而人们很少关注实际测温距离与校准距离不同而引起的测温误差。本文详细研究了校准过程中, 热像仪灰度均值与物体温度和校准距离间的关系, 并对实际测量过程中, 测量距离与校准距离不同而引入的误差进行了讨论。

收稿日期: 2008-03-20

作者简介: 陆子凤(1974-), 女, 黑龙江人, 博士, 研究方向: 红外测温。*联系作者: 孙强, sunq@ciomp.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60507003); 中国科学院国防科技创新基金支持; 中国科学院知识创新工程领域前沿项目资助;

吉林省科技发展计划杰出青年项目支持; 国防 863 计划资助; 东北师范大学校内青年基金 20080203

1 红外热像仪测温的基本原理

红外热像仪测温是靠接收被测物体表面发射的辐射来确定其温度的。实际测温时,红外探测器接收到的能量 W 包括被测目标自身辐射能量 W_t 、目标反射周围环境物体辐射能量 W_r , 以及大气辐射能量 W_a , 即:

$$W(\lambda, T) = W_t(\lambda, T) + W_r(\lambda, T) + W_a(\lambda, T)$$

被测表面的辐射亮度为:

$$L_\lambda = \varepsilon_\lambda L_{b\lambda}(T_o) + \rho_\lambda L_{b\lambda}(T_U) = \varepsilon_\lambda L_{b\lambda}(T_o) + (1 - \alpha_\lambda) L_{b\lambda}(T_U) \quad (1)$$

式中:第一部分为表面光谱辐射亮度,第二部分为反射的环境光谱辐射亮度。 T_o 为被测物体表面温度; T_U 为环境温度; ε_λ 为表面发射率; ρ_λ 为表面反射率; α_λ 为表面吸收率。

作用于热像仪的辐射照度为:

$$E = A_0 d^2 [\tau_{a\lambda} \varepsilon_\lambda L_{b\lambda}(T_o) + \tau_{a\lambda} (1 - \alpha_\lambda) L_{b\lambda}(T_U) + \varepsilon_{a\lambda} L_{b\lambda}(T_a)] \quad (2)$$

式中: A_0 为热像仪最小空间张角所对应的目标的可视面积; d 为该目标到测量仪器之间的距离,通常一定条件下, $A_0 d^2$ 为一常值; $\tau_{a\lambda}$ 为大气的光谱透射率; $\varepsilon_{a\lambda}$ 为大气发射率。

热像仪通常工作在 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 或 $8 \sim 13 \mu\text{m}$ 两个波段。探测器在工作波段上积分入射的辐射能,并把它转化为一个与能量成正比的电信号。

入射在探测器上的某波长的辐射功率为:

$$P_\lambda = E_\lambda \times A_R \quad (3)$$

式中: A_R 为热像仪透镜的面积。

与辐射功率相应的信号电压为:

$$V_S = A_R \int_{\Delta\lambda} E_\lambda \Re d\lambda \quad (4)$$

式中: \Re 为探测器的光谱响应度,它表示了红外探测器把红外辐射能转变为电信号的能力。

由于热像仪是工作在某一个很窄的波段, $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 或 $8 \sim 13 \mu\text{m}$ 两个波段, ε_λ , α_λ , $\tau_{a\lambda}$ 通常可认为与 λ 无关,则(4)式可写成:

$$V_S = A_R A_0 d^{-2} \{ \tau_a [\varepsilon \int_{\Delta\lambda} L_{b\lambda}(T_o) \Re d\lambda + (1 - \alpha) \int_{\Delta\lambda} L_{b\lambda}(T_U) \Re d\lambda] + \varepsilon_a \int_{\Delta\lambda} L_{b\lambda}(T_a) \Re d\lambda \} \quad (5)$$

令 $K = A_R A_0 d^{-2}$, 则上式变为:

$$V_S = k \{ \tau_a [\varepsilon \int_{\Delta\lambda} L_{b\lambda}(T_o) \Re d\lambda + (1 - \alpha) \int_{\Delta\lambda} L_{b\lambda}(T_U) \Re d\lambda + \varepsilon_a \int_{\Delta\lambda} L_{b\lambda}(T_a) \Re d\lambda \} \quad (6)$$

2 非制冷长波红外热像仪的温度标定

图 1(a)所示为本课题组研制的非制冷长波热像仪,采用法国 sofradir 公司生产的非制冷长波红外焦

平面阵列探测器,探测器的位置可调,能保证始终位于像平面上。热像仪的工作波段是 $8 \sim 12 \mu\text{m}$, 工作距离是 2 m 至无穷远;光学系统焦距为 90 mm, F 数为 1, 全视场为 12.6° 。实验所用 IR-160/301 型黑体由美国红外系统发展公司生产,温度变化范围是从环境温度到 350, 分辨率是 0.1, 校准精度为 ± 0.2 , 面板大小是 305 mm \times 305 mm。每次实验时保持热像仪的工作状态相同。首先,在实验室条件下(环境温度为 27.0, 湿度为 52%RH), 对热像仪进行非均匀性校正以后进行温度标定,为了方便测量黑体到热像仪的距离,选择温度标定距离是 5.35 m。图 1(b)显示了黑体的清晰热图像,黑体温度是 38.5。热像仪标定时,黑体所发出的热辐射,经红外热像仪光学系统成像,被探测器接收并经过采集处理后,所成像的灰度均值与黑体温度变化成线性关系,如图 2 所示。图中空心圆点连线是在实验室条件下获得的原始数据所得,直线是由原始数据理论拟合获得的,理论公式为:

$$G = -133.07 + 7.56T \quad (7)$$

式中: G 表示灰度均值; T 表示温度,单位为 $^\circ\text{C}$ 。在实际测量过程中,可以根据热像仪图像的灰度均值,由上述关系算出物体的温度。

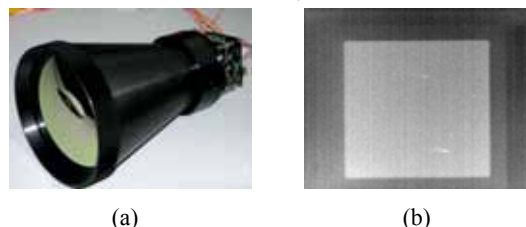


图 1 非制冷长波红外焦平面阵列热像仪(a)和 IR-160/301 黑体在距离为 5.35m、温度 38.5 的热图像(b)

Fig.1 IR uncooled FPA in long wavelength(a), Thermal imaging of IR-160/301 blackbody of 38.5 at 5.35 m distance between the system and the object(b)

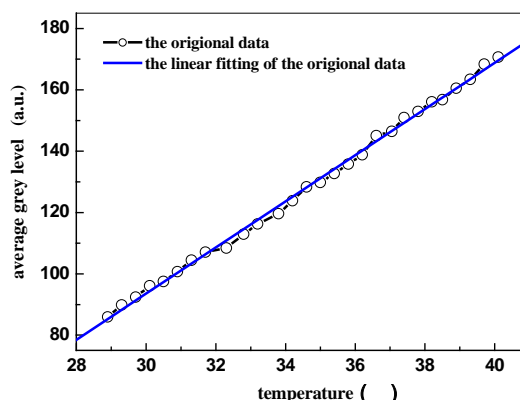


图 2 黑体清晰热图像的灰度均值与黑体温度的变化关系

Fig.2 Average gray level of the thermal image of the blackbody dependence of the blackbody's temperature

3 测试距离对测温精度的影响

实际测温时,测量距离的量级可以从米到千米变化,为了考虑测试距离对红外光学系统接收物体辐射的影响,在实验室条件下,环境温度为 27 时,以黑体作为待测物体,进行了下列实验。如图 3 所示,当测试距离分别为 5.35 m、16.00 m、26.70 m 时,测试了灰度均值随物体温度的变化关系,为获得清晰的热图像,每一距离处,热像仪都经过重新聚焦。图中虚线、破折线、直线分别是对上述实验结果的理论拟合。由图 3 可见:当距离固定时,黑体热图像的灰度均值随着黑体温度的升高而升高,并满足线性关系;当黑体温度恒定时,灰度均值又随着测试距离的增大而增大。

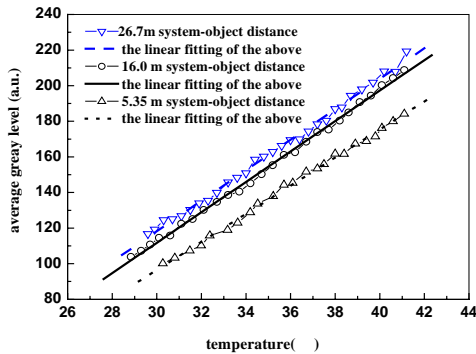


图3 黑体距热像仪分别为 5.35 m、16.00 m、26.70 m 时,灰度均值随黑体温度的变化关系

Fig.3 Average gray level of the blackbody's thermal image dependence of its temperature when the system-object distance is respectively fixed at 5.35 m、16.00 m、26.70 m

测量过程中热像仪能接收到的有效辐射包括:目标自身辐射、目标反射环境辐射、环境物体辐射、大气辐射和太阳辐射。由于以黑体作为待测物体,其发射率接近于 1,所以几乎不反射周围环境物体辐射;在实验室条件下,可以忽略太阳辐射,并可保证周围没有高温热辐射源;测试距离很小,大气辐射和衰减的影响是微小的,可忽略不计。那么,对于可忽略目标反射环境辐射,光学系统很好校正球差,探测器始终位于像面上的热像仪,在探测器焦平面上的辐射照度可以用下列公式表达^[8]:

$$E'(\lambda) = \pi \tau_0(\lambda) \varepsilon L_e(T_{ob}, \lambda) \sin^2 u'_m \quad (8)$$

式中: $\tau_0(\lambda)$ 是波长 λ 处的光学系统透过率; $L_e(T_{ob}, \lambda)$ 是波长 λ 处、温度 T_{ob} 时物体的亮度; ε 为物体的发射率,这里取值为 1; $\sin u'_m$ 为光学系统的像方数值孔径,定义为 $n' \sin u'_m$, 其中 n' 等于 1, 是像方折射率, u'_m 为像方孔径角,如图 4 所示。探测器的输出信号可以表示为:

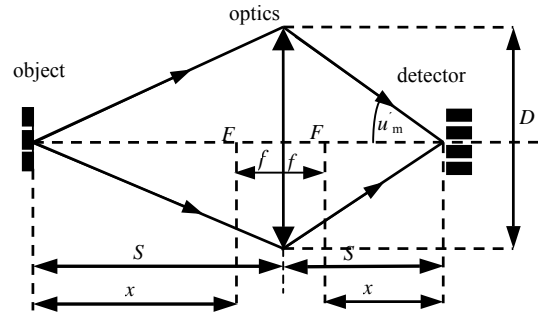


图4 目标经光学系统成像示意图

Fig.4 The diagram of creating the image of the tested object by optical system

$$s(T_{ob}) = \pi R_{\max} A_d c_1 \varepsilon \sin^2 u'_m \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_0(\lambda) s(\lambda)}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T_{ob}}} - 1)} d\lambda \quad (9)$$

式中: A_d 为单个探测元面积; R_{\max} 为探测器的最大灵敏度; $s(\lambda)$ 为探测器的相对灵敏度; λ_1 、 λ_2 为探测器带宽; c_1 、 c_2 为普朗克常数。根据公式(3),探测元面积、相对灵敏度、最大灵敏度,探测器带宽都是由红外系统确定的,与距离无关,那么当黑体温度恒定不变,测试距离变化时,探测器的输出信号主要与像方数值孔径 $\sin u'_m$ 相关。如图 4 所示,光学系统的焦距为 f' , 直径为 D , 物距为 s , 根据牛顿公式和几何关系可得:

$$\sin u'_m = \frac{\frac{D}{2}}{\sqrt{\left(\frac{f'^2}{s-f'} + f'\right)^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2}} \quad (10)$$

从式(10)可见,测试距离 s 增大会使像方数值孔径 $\sin u'_m$ 增大,从而导致探测器平面上的辐射照度增大。这是导致黑体保持恒温时,测试距离增大,灰度值增大的原因。

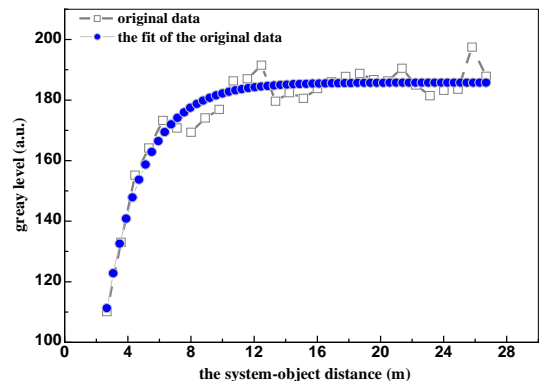


图5 黑体温度固定为 38 ,灰度均值随黑体距热像仪距离变化的关系图

Fig.5 Average gray level of the blackbody's thermal image dependence of the system-object distance when the blackbody's temperature is fixed at 38

为了进一步验证上述结论,当黑体温度固定为38.0℃时,研究了热图像的灰度均值随测试距离的变化关系,每一距离处热像仪都经过重新聚焦,以获得清晰的热图像。如图5所示,正方形连线是实验获得的结果,圆点连线是理论拟合的结果。可见在10 m以内,近距离测温时,黑体图像的灰度值随测试距离增大而非线性变化;测温距离在10~15 m的区间内,灰度值随距离增大缓慢增大;达到15 m以后,距离的变化对测温基本没有什么影响。即近距离测温,距离变化对测温影响较大;远距离时,距离变化对测温影响很小,甚至可忽略不计。灰度值随距离变化获得的理论拟合公式是:

$$G = 185.74 - 225.25e^{-0.194x} \quad (11)$$

式中: G 表示灰度值; x 表示测试距离。由公式(8)与(10),理论上获得探测器平面上的辐射照度随测试距离的变化关系为:

$$E'(\lambda) = \frac{\tau_0(\lambda) D^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1 d\lambda}{\lambda^5 [\exp(\frac{c_2}{\lambda T}) - 1]}}{4[\frac{f'^2}{s-f'} + f']^2 + D^2} \quad (12)$$

取 $\tau_0(\lambda) = 0.8$ 、 $D = 90 \text{ mm}$ 、 $f' = 90 \text{ mm}$ 、 $T = 311 \text{ K}$ 可得辐射照度随距离的变化关系,如图6所示。由于热图像的灰度均值与辐射照度之间满足下列关系:

$$G = K_1 E + K_2 \quad (13)$$

式中: K_1 为热像仪的增益; K_2 为偏置^[9]。同图5比较,实验获得的灰度均值随黑体距热像仪距离变化规律与理论上获得的辐射照度随距离的变化规律是一致的。可见在测量误差允许的范围内,我们的解释是合理的。

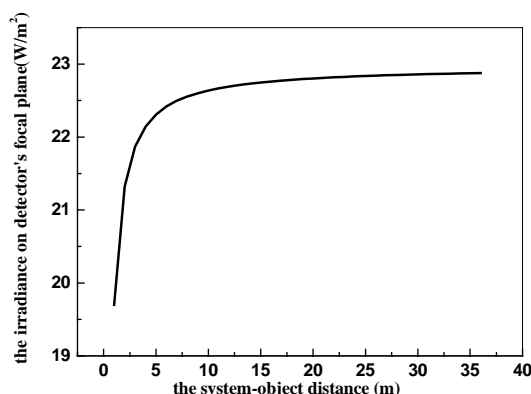


图6 理论获得的探测器平面上的辐射照度随测试距离的变化关系

Fig.6 The irradiance on detector's focal plane versus the system-object distance in theory

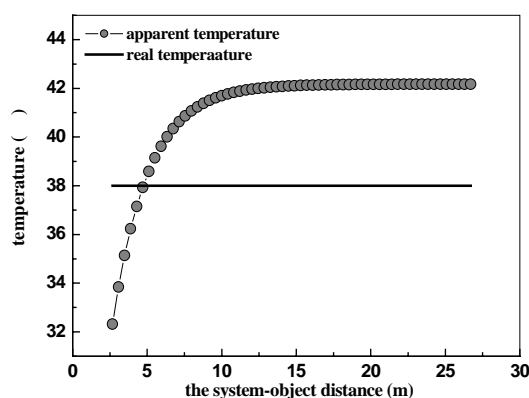


图7 不同距离处测量的物体表观温度与实际温度的差别

Fig.7 The difference of the real temperature and the apparent temperature at different distance between the system and the object

若将图5的灰度均值代入公式(1),可计算出物体温度值,如图7所示。不难看出在不同距离处测量的物体表观温度与物体实际温度的差别。可见实际测试距离与标定距离偏差越大,表观温度越偏离物体实际温度,当实际测试距离达到15 m或更远时,表观温度接近42℃,并且表观温度不再随测试距离的增大而变化。因此,为了避免实际测量距离与标定距离不同而引起测温误差,提出以下的解决方法。对于传统的校准方法,应该制作出反映黑体灰度值与温度和测试距离关系的图表或关系;将实际测温距离与红外热像仪标定时的距离保持一致,可减小误差;远距离测温,距离变化对测温影响很小,因此可以找出远距离测温与标定距离不同时,温度的误差量,对表观温度进行修正,以提高测温的精度。

4 结束语

对于成像是望远镜型的红外热像仪,在近距离测温时,距离变化对测温影响较大;在远距离测温时,测试距离在大范围内变化,对测温结果影响很小。同时实际测量距离与热像仪标定距离不同,会引入很大的测温误差,因此可采取实际测温距离与校准距离相同的方法或者找出远距离测得的温度与红外热像仪校准时温度的误差,对表观温度修正,可以提高测温的精度。

(下转 278 页)

参考文献：

- [1] 童诗白. 模拟电子技术基础[M]. 北京：高等教育出版社, 1998.
- [2] 倪晋平, 王铁岭. 光电靶工作原理及应用[J]. 西安工业学院学报, 1997, 17(1): 31.
- [3] 宋玉贵, 王铁岭. 天幕靶抗蚊虫干扰数字滤波电路设计[J]. 西安工业学院学报, 1998, 18(2): 130.
- [4] 诸邦田. 电子线路抗干扰技术手册[M]. 北京：北京科学技术出版社,

1988.

- [5] 吴永忠, 韩江洪, 谢华, 等. 低噪声放大器设计中接地和屏蔽技术的研究[J]. 电测与表, 2001, 38(7): 8.
- [6] 郑宗亚. 减小放大器噪声的方法[J]. 上海海运学院学报, 1995, 16(3): 42.
- [7] 李西安, 付小宁. 集成运放在应用中的性能提高与改善[J]. 现代电子技术, 2002, 13(3): 61.

(上接第 270 页)

4 结束语

本文简要介绍了数据关联快速算法和自适应 α - β 滤波, 并进行了仿真, 验证了其有效性。关联部分是信息融合系统的核心之一, 也是进行信息融合的基础, 对于此方面有待于更广泛和更深入的研究。

参考文献：

- [1] 扬万海. 多传感器数据融合及应用[M]. 西安：西安电子科技大学出版社, 2004.
- [2] 耿 峰, 祝小平. 一种改进的多传感器多目标跟踪联合概率数据关联

算法研究[J]. 2007, 19(20): 4671 ~ 4675.

- [3] 刘城霞, 王宝树. 适于复杂信息融合系统的近似联合概率数据关联算法[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(10): 1355 ~ 1360.
- [4] 张保山, 徐国亮, 吴一全. 基于坐标转换的卡尔曼交互式多模型滤波算法[J]. 指挥控制与仿真, 2007, 29(5): 32 ~ 35.
- [5] 辛云宏, 杨万海. 基于红外辐射信息的IRST系统机动目标跟踪算法[J]. 红外技术, 2004, 26(3): 37 ~ 40.
- [6] XR.ong Li, Vesselin P, Jilkov. Survey of Maneuvering Target Tracking. Part V : Multiple-Model Methods[J]. IEEE AES, 2005, 41(4): 1255 ~ 1321.
- [7] 张国英. 地面跟踪目标红外特性测量系统[J]. 红外技术, 2002, 24(1): 12 ~ 13.

(上接第 274 页)

参考文献：

- [1] K. Chrzanowski. Influence of object-system distance on accuracy of remote temperature measurement with IR systems[J]. Infrared Phys. Technol, 1995, 36(3): 703 ~ 713.
- [2] Krzysztof Chrzanowski, Joachim Fischer, Robert Matyszekiel. Testing and evaluation of thermal cameras for absolute temperature measurement[J]. Optical Engineering, 2000, 39(9): 2535 ~ 2544.
- [3] Krzysztof Chrzanowski. Experimental verification of a theory of the influence of measurement conditions on temperature measurement accuracy with IR systems[J]. Applied optics, 1996, 35(19): 3540 ~ 3547
- [4] You-Wen Zhang, Cai-Gen Zhang, and Victor Klemas. Quantitative measurements of ambient radiation, emissivity, and truth temperature of a

grey body: methods and experimental results[J]. Applied optics, 1986, 25(20): 3683 ~ 3689.

- [5] 张才根, 张幼文. 环境辐射对目标热辐射特性测试的影响[J]. 物理学报, 1981, 30(7): 953 ~ 961.
- [6] 范春利, 杨 立, 华顺芳. 热探测器温度对非制冷红外热像仪测温的影响[J]. 红外技术, 2002, 24(5): 22 ~ 25.
- [7] 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
- [8] R. Jóźwicki. Instrumental Optics[M], Chap. 2. PWN, Warsaw (1970).
- [9] Wu Yaping, Zhang Tianxu. Study of un-cooled infrared focal plane detector for temperature measurement[A]. Proceedings of SPIE[C]. 2000, 4077: 260 ~ 263.