

高超声速飞行器红外窗口热辐射特性试验

王亚辉^{1,2,3}, 王强¹, 张伯川^{2,3}, 周斌^{2,3}, 肖利平^{2,3}, 徐力^{2,3}

- (1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;
2. 中国航天科技集团 宇航智能控制技术国家级重点实验室, 北京 100854;
3. 北京航天自动控制研究所, 北京 100854)

摘要: 对于大气层内的高速飞行器, 强烈的气动加热使红外探测系统的红外窗口温度迅速上升, 成为气动热辐射效应的主要因素, 导致红外探测系统的探测距离、识别概率、跟踪精度等性能下降, 甚至失效。通过简化红外窗口热辐射传输模型, 设计了一种红外窗口热辐射特性试验平台, 并对某蓝宝石红外窗口在中波红外 3.7~4.8 μm 波段的热辐射特性进行试验研究。研究表明, 在 100~350 $^{\circ}\text{C}$ 高温范围内, 该红外窗口热辐射特性与温度近似呈现 3 次方关系, 随温度升高, 透过率下降约 16%, 而自身辐射持续增强, 幅度最高在 100 倍以上, 对红外探测系统造成的影响比透过率要大得多。

关键词: 高超声速; 红外窗口; 气动热辐射效应; 自身辐射; 蓝宝石

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)06-1716-05

Experiment of the thermo-radiation characteristic of infrared window of hypersonic vehicles

Wang Yahui^{1,2,3}, Wang Qiang¹, Zhang Bochuan^{2,3}, Zhou Bin^{2,3}, Xiao Liping^{2,3}, Xu Li^{2,3}

- (1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. National Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Intelligent Control, China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100854, China; 3. Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China)

Abstract: When hypersonic vehicles have flights in atmosphere, the temperature of the window of infrared (IR) detection systems rise rapidly, due to the aerodynamic heating by hypersonic airflow around. High-temperature IR windows dominate the aero-thermo-radiation effect, which reduce the performance of IR detection systems, including detection range, identification probability, tracking precision, and so on, or even make these systems fail. By simplifying radiation transfer model for IR windows, an experiment platform was designed to measure thermal-radiation characteristics of IR windows. On the platform, the experiment on thermal-radiation characteristics of a sapphire window were studied, in 3.7–4.8 μm . The research result indicates that, in 100–350 $^{\circ}\text{C}$, the higher the temperature of the sapphire IR window is, the smaller the transmittance is, and the stronger the self-radiation is. Both the transmittance and the self-radiation are related to the third power of the window temperature. From 100 $^{\circ}\text{C}$ to 350 $^{\circ}\text{C}$, the transmittance of the window drops about 16%, otherwise the self-radiation enhances above 100 times, of

收稿日期: 2014-10-20; 修订日期: 2014-11-07

基金项目: “十二五”预研项目(51301030101)

作者简介: 王亚辉(1980-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事气动光学效应方面的研究。Email: wangyahuis@yeah.net

which the influence on the MWIR detection system is bigger than that of transmittance.

Key words: hypersonic; infrared window; aero-thermo-radiation effect; self-radiation; sapphire

0 引言

飞行器在大气层内超音速飞行时,高速来流在红外探测系统的光学窗口(以下简称“红外窗口”)附近形成高温高压气体流场,并产生强烈的气动加热使红外窗口的温度迅速上升,高温气体和红外窗口引起强烈的气动热辐射效应,导致红外特测系统的探测信噪比、识别概率、跟踪精度等性能下降,甚至因探测器饱和而失效^[1-2]。高温高压混合气体热辐射的理论分析和试验研究比较充分,已经形成了完善的辐射传输计算方法和混合气体辐射参数计算方法,并具有完善的气体光谱辐射数据库支撑^[3],同时全球大气廓线较为稳定,高温气体热辐射特性计算结果的准确性和可靠性高,满足工程应用需求。一些研究显示,高温红外窗口迅速超越高温高压气体,并主导气动热辐射效应的发展^[4],红外窗口温度越高,自身辐射越强,对目标辐射的衰减也随之增强^[5-6]。然而,红外窗口由人工晶体材料制成,其热辐射特性不仅与温度有关^[7],还与制备工艺及工艺参数等因素密切相关^[8]。国内有关人工晶体的热辐射特性数据多集中于室温状态,高温状态的数据较少,缺少稳定可靠的热辐射特性数据库^[9]。随着人工晶体生长技术和工艺水平的发展,采用新技术、更高性能的红外窗口将陆续应用于高超音速飞行器的红外探测系统,快速、准确地获取红外探测系统红外窗口的热辐射特性数据,对探测系统论证、设计、验证等各个环节都至关重要。

为此,简化了红外窗口内的介质辐射传输模型,分析红外窗口的透过率和自身辐射等热辐射特性,设计具有保温装置的红外窗口热辐射特性试验平台,用于测量高温状态下红外窗口的热辐射特性,并对某蓝宝石红外窗口在 100~350 °C 高温范围内的中波红外 3.7~4.8 μm 波段的热辐射特性进行试验研究。

1 红外窗口的热辐射传输特性

红外窗口属于参与性介质,其热辐射的产生与传递可用辐射传输方程描述,这是一个传输方向上的辐射能量守恒方程^[10]。积分形式辐射传输方程表示为:

$$L_{\lambda}(s)=L_{\lambda}(0)\exp(-k_{e\lambda}s)+\int_0^s S_{\lambda}(s^*,\omega_{\lambda})\exp[-(s-s^*)]ds^*(1)$$

式中: s 为传播距离; $k_{e\lambda}$ 为衰减系数; ω_{λ} 为反照率; S_{λ} 为源函数。 $L_{\lambda}(s)$ 为 s 处的辐射亮度,由两项组成:第一项是 $s=0$ 处的辐射亮度 $L_{\lambda}(0)$ 经过传播介质的衰减到达 s 处的辐射能量, $\exp(-k_{e\lambda}s)$ 代表介质的透过率;第二项是整个传播路径上每一点介质在射线方向上的发射及散射经过后面介质衰减后抵达 s 处的辐射能量。 S_{λ} 包含散射和辐射因素,忽略散射因素后, S_{λ} 体现为传输路径上介质的热辐射,那么右边第二项表示介质的自身辐射。

假设目标红外辐射 L_{obj} 为红外窗口外表面 $s=0$ 处的红外辐射,透过红外窗口的红外辐射 L_{tot} 是窗口内表面 S 处的红外辐射,由两部分组成,即经过红外窗口衰减后的目标红外辐射和红外窗口的自身辐射 L_{win} 。考虑红外窗口的透过率 τ_{win} ,公式(1)可简化为:

$$L_{\text{tot}}=L_{\text{obj}}\cdot\tau_{\text{win}}+L_{\text{win}}(2)$$

显然,高温红外窗口对探测系统的影响是线性的,红外窗口的透过率 τ_{win} 和自身辐射 L_{win} 是该线性关系的参数,也是评价红外窗口热辐射特性的关键基础参数。

2 红外窗口热辐射特性试验平台

图1是红外窗口热辐射特性试验平台结构方案,主要由红外探测器、保温装置、面源黑体、数据记录仪、安装平台和平台状态控制器等组成,其中安装平台提供其他试验设备组件的安装。配套设备还有

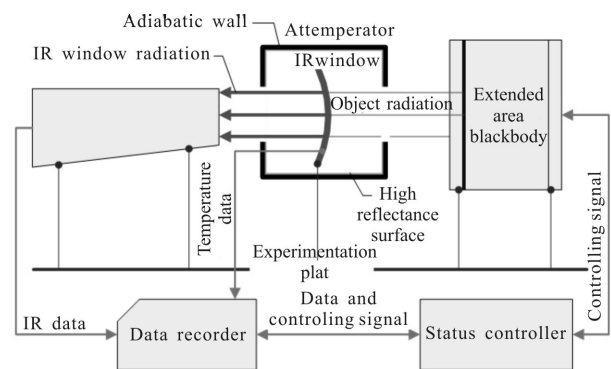


图1 红外窗口热辐射特性试验平台

Fig.1 Scheme of experiment platform of thermo-radiation characteristics of IR window

高温加热炉。

面源黑体,模拟来自目标的红外辐射,通过改变黑体温度实现不同强度的红外辐射。文中选用以色列 CI 公司的 SR-800 型高精度扩展面源黑体,辐射面尺寸 7"×7",发射率为 0.97±0.02,温度调节范围是 0~175℃,辐射面温度均匀性优于±0.015℃。

保温装置,为红外窗口试验件提供完善的保温功能,确保试验数据采集期间红外窗口温度浮动小,保证红外窗口的温度分布在多次反复测量中的一致性。保温装置从导热、对流、辐射三个传热途径减少红外窗口试验件的热量损失^[11],减缓温度下降速度,提高热辐射特性测量精度。采取如下措施:

(1) 箱体采用绝热材料,削弱导热损失;

(2) 内表面采用高反射率金属薄膜,降低红外窗口试验件和箱体内壁的辐射热交换。沿视线方向,在装置的两个面上开小孔,同时加大保温装置在视线方向上的尺度,降低高温红外窗口和外界环境的辐射热交换,减少辐射热损失。

(3) 隔离高温红外窗口与外界环境的直接联系,降低窗口壁面和环境的自然对流换热强度,减少对流热损失;

平台状态控制器实现红外探测器、面源黑体、数据记录仪、红外窗口等多个设备的一体化管理,并显示温度、状态等信息,减少了试验人员与各个设备的交互,提高试验可靠性和效率。

3 试验方法

设定面源黑体温度 T_b ,待黑体状态稳定后,用红外探测器获取黑体的红外响应数据,并分析对应的红外辐射 L_{obj} 。将红外窗口放置于高温加热炉内加热至指定温度 T_{win} ,待窗口温度达到等温分布状态后,取出红外窗口并放置于保温装置内,然后将保温装置放于红外探测器和面源黑体之间。用红外探测器获取透过窗口的黑体红外响应数据,并分析对应的红外辐射 L_{tot} 。

改变面源黑体温度 T_b ,重复上述过程。获取多组多组黑体温度 T_b 状态下的红外辐射 L_{obj} 和 L_{tot} ,基于公式(2),采用最小二乘算法分析红外窗口透过率 τ_{win}^T 和自身辐射 L_{win}^T 。

4 蓝宝石红外窗口热辐射特性试验研究

基于红外窗口热辐射特性试验平台,以某高超

声速飞行器的中波红外探测系统为对象,试验研究其蓝宝石红外窗口 100~350℃范围内的透过率和自身辐射等热辐射特性。

4.1 红外探测器非线性响应标定

红外窗口热辐射特性试验平台的红外探测器来自该中波红外探测系统。该红外探测器采用法国 Sofradir 公司的 K508 型中波制冷红外焦平面器件(FPA),响应光谱为 3.7~4.8 μm,320×256 像元,NETD<20 mK。为了实现红外探测器的测量功能,需要标定红外探测器对红外辐射的响应关系^[12]。

红外探测器输出红外图像的不同像素对应 FPA 不同的红外探测器单元。红外探测器单元均存在非线性响应特性,目前有多种非线性响应模型。在此选用二次函数模型描述非线性响应特性^[13],是一种基于系统统计特征的非线性响应模型。

$$Dn(L)=aL+b+eL^2 \quad (3)$$

式中: $Dn(L)$ 为红外探测器单元的响应,是红外辐射 L 的函数; a 和 b 代表探测器响应的线性部分; e 代表探测器响应的非线性部分。

面源黑体可提供不同能量强度的红外辐射。面源黑体红外辐射遵循普朗克 Planck 辐射定律,视面源黑体辐射为朗博体。黑体温度为 T_b 时,红外辐射亮度为:

$$L=\frac{1}{\pi} \int_{\Delta\lambda} \varepsilon_{\lambda} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp[c_2/\lambda T_b]-1} d\lambda \quad (4)$$

式中: $\Delta\lambda=3.7\sim 4.8 \mu\text{m}$; $\varepsilon_{\lambda}=0.97$; c_1 和 c_2 是辐射常数。

设定黑体温度为 T_b ,待黑体状态稳定后,用中波红外探测器采集约 300 帧图像,提取红外探测器响应均值 Dn 。重复上述过程,使 T_b 覆盖 0~170℃,间隔 10℃一个测量点。计算面源黑体对应的红外辐射 L 。根据式(3)对红外辐射 L 和红外探测器响应 Dn 进行二次多项式曲线拟合,如图 2 所示。表 1 列出了红外探测器非线性响应模型的参数。

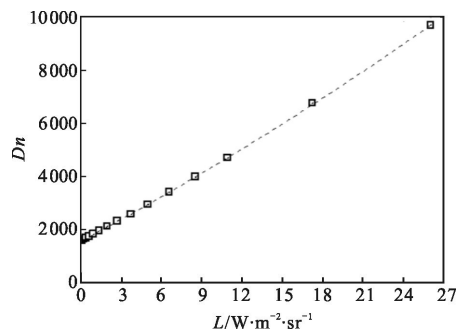


图 2 红外探测器响应

Fig.2 Response model of the infrared detector

表 1 探测器响应模型参数

Tab.1 Parameters of the detector response model

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>e</i>
268.277	1 578.75	1.671 27

4.2 蓝宝石红外窗口热辐射特性测量

将蓝宝石红外窗口放置于高温加热炉加热到 $T_{win}=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。然后调整黑体温度 T_b 。等待黑体温度状态稳定且窗口温度分布均匀后,取出红外窗口并将其安装到红外窗口热辐射特性试验平台。用红外探测器获取安装红外窗口前后的响应均值 Dn 。根据公式(3)和表1的探测器响应模型参数计算面源黑体提供的红外辐射 L_{obi} 及其透过红外窗口的红外辐射 L_{tot} 。然后测量其它黑体温度 T_b 状态下的 L_{obi} 和 L_{tot} , 使 T_b 覆盖 $0\sim 175\text{ }^{\circ}\text{C}$, 间隔 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为一个测量点。基于公式(2)对 L_{obi} 和 L_{tot} 进行线性拟合, 可得红外窗口透过率 $\tau_{win}^{T=100\text{ }^{\circ}\text{C}}=0.9986$, 自身辐射 $L_{win}^{T=100\text{ }^{\circ}\text{C}}=0.3297\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$, 如图3所示。

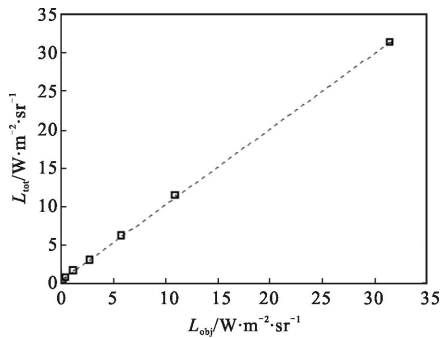


图3 红外窗口热辐射特性($T_{win}=100\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig.3 Thermo-radiation characteristics ($T_{win}=100\text{ }^{\circ}\text{C}$)

采用同样方法测量其它窗口温度 T_{win} 状态的红外窗口透过率 τ_{win}^T 和自身辐射 L_{win}^T 。图4给出了蓝宝石红外窗口的透过率 τ_{win}^T 和自身辐射 L_{win}^T 随温度 T_{win} 的变化曲线。

由图4可知,随着红外窗口温度的上升,透过率持续下降,且下降幅度持续变大,但是自身辐射迅速增强,增强幅度迅速扩大。当红外窗口温度由 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升至 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, 透过率下降约 16% , 但是自身辐射的增强却在 100 倍以上。

对图4中数据进行拟合分析, 在 $100\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高

温范围内,蓝宝石红外窗口在中波红外波段的透过率和自身辐射与温度之间均近似呈现3次方关系,即

$$L_{win}^T = \sum_{i=1}^3 [p_{L_{win}}^i \cdot (T_{win})^i] \tag{5}$$

$$\tau_{win}^T = \sum_{i=1}^3 [p_{\tau_{win}}^i \cdot (T_{win})^i] \tag{6}$$

式中: $p_{\tau_{win}}^i$ 、 $p_{L_{win}}^i$ 是关系系数, 如表2所示。

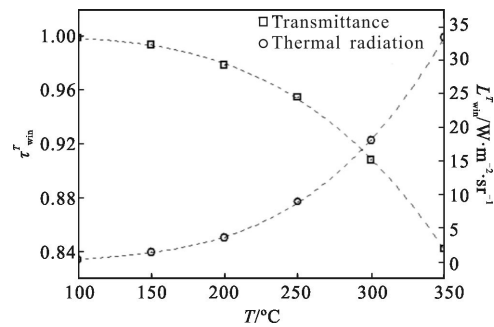


图4 红外窗口的热辐射特性

Fig.4 Thermo-radiation characteristics of IR window

表 2 红外窗口热辐射特性的数据拟合

Tab.2 Fit of thermo-radiation characteristics of IR window

	<i>i</i> =0	<i>i</i> =1	<i>i</i> =2	<i>i</i> =3
$p_{\tau_{win}}^i$	1.00	-1.30E-4	1.34E-6	-6.57E-9
$p_{L_{win}}^i$	-3.99	8.83E-2	-6.52E-4	2.01E-6

4.3 蓝宝石红外窗口对探测系统的影响

窗口温度为 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温状态时, 蓝宝石红外窗口自身辐射高达 $33.39\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$, 而窗口透过率降至 0.84 , 考虑到背景噪声增强因素, 红外窗口使探测信噪比下降约 16% 。由于 FPA 探测单元响应的非均匀性, 探测器平均响应达到 $13\ 000$ 时, 探测器已经开始出现局部饱和现象。由探测器响应模型可知, 到达探测器单元的红外辐射为 $34.96\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$, 其中 95% 以上是窗口自身辐射, 而此时目标辐射为 $1.86\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$, 表观温度约为 $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。用于目标探测的有效探测器响应区间较小, 云层、屋顶、燃烧源等强散射或者强辐射目标极易导致探测器局部饱和现象, 使其不能分辨来自目标的信号。所以, 对比透过率引起的信噪比下降, 红外窗口自身辐射对探测系统造成的影响要大得多。

红外窗口温度越高, 对目标信号衰减越大, 信噪

比下降越大,同时到达探测器的总体辐射越强,探测器饱和的风险越大,必须调整红外探测器的积分时间等关键系统参数,降低探测器响应模型的线性系数 a ,扩大对目标/背景红外辐射的有效响应范围。但是,较小的线性系数 a 将导致探测器对目标/背景红外辐射分辨能力变差。所以,需要准确分析场景中目标/背景红外辐射的分布范围,测量不同积分时间的响应模型,在确保探测器饱和风险可控的情况下,给出优化的积分时间等设计参数。

5 结论

(1) 基于红外窗口热辐射传输特性分析,设计一种红外窗口热辐射特性试验平台,用于测量红外窗口在高温状态下的透过率和自身辐射等热辐射特性。

(2) 某蓝宝石红外窗口在中波红外 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 波段的热辐射特性试验结果显示,在 $100\sim 350\ ^\circ\text{C}$ 高温范围内,透过率和自身辐射等热辐射特性与温度之间均近似呈现3次方关系,随温度上升,透过率下降约16%,自身辐射却迅速增强100倍以上。

(3) 在 $350\ ^\circ\text{C}$ 高温状态时,蓝宝石红外窗口自身辐射极易导致红外探测器局部饱和,对红外探测系统造成的影响远比透过率引起的信噪比下降要大得多,需要调整探测系统的积分时间等参数,扩大对目标/背景红外辐射的有效响应范围。

文中研究成果可广泛用于红外探测系统论证、设计、仿真与优化,为评估高温红外窗口对探测性能的影响提供基础数据支持。

参考文献:

- [1] Yin Xingliang. Principle of Aero-optics [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2003. (in Chinese)
殷兴良. 气动光学原理[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003.
- [2] Peng Zhiyong, Wang Xiangjun, Lu Jin. Infrared target detection under hot dome infrared radiation based on visual saliency method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1772-1776. (in Chinese)
彭志勇, 王向军, 卢进. 窗口热辐射下基于视觉显著性的红外目标检测方法 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1772-1776.
- [3] Tan Heping, Xia Xinlin, Liu Linhua. Numerical Calculation on Infrared Radiative Properties and Transfer Calculating Thermal Radiation [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006. (in Chinese)
谈和平, 夏新林, 刘林华. 红外辐射特性与传输的数值计算—计算热辐射学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.
- [4] Wang Yahui, Wang Qiang, Gao Lei, et al. Aero-thermo-radiation of a hypersonic vehicle [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1399-1403. (in Chinese)
王亚辉, 王强, 高磊, 等. 高超声速飞行器气动热辐射特性 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1399-1403.
- [5] Chen Lianzhong, Zhang Jiayang, Fei Jindong. Experiment research on the aerodynamic heating effect on the infrared imaging [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(1): 36-38. (in Chinese)
陈连忠, 张嘉祥, 费锦东. 气动加热对红外成像的影响试验研究 [J]. 激光与红外, 2009, 39(1): 36-38.
- [6] Ma Yifei, Zhao Wenping. Effects of window radiation on infrared imaging detection [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, 27(32): 427-430. (in Chinese).
马毅飞, 赵文平. 窗口辐射对红外成像探测影响的研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(32): 427-430.
- [7] Yu Huaizhi. Infrared Optical Material [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007. (in Chinese)
余怀之. 红外光学材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [8] Wei Chuncheng, Tian Guishan, Meng Fantao, et al. Influence of isostatic pressing on transparent of aluminum oxynitride ceramics [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2008, 37(3): 694-698. (in Chinese)
魏春城, 田贵山, 孟凡涛, 等. 等静压成型对氮氧化铝陶瓷透明性的影响 [J]. 人工晶体学报, 2008, 37(3): 694-698.
- [9] Xie Qiming, Li Yiwei, Pan Shunchen. The development and application of the materials for infrared windows and domes [J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(10): 559-567. (in Chinese)
谢启明, 李奕威, 潘顺臣. 红外窗口和整流罩材料的发展和应 [J]. 红外技术, 2012, 34(10): 559-567.
- [10] Yu Qizheng. Principle of Radiation Heat Transfer [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1999. (in Chinese)
余其铮. 辐射换热[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999.
- [11] Tao Wenquan. Numerical Heat Transfer [M]. 2nd Ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001. (in Chinese)
陶文铨. 数值传热学 [M]. 第二版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [12] Luo Maojie, Zhou Jinmei, Fu Jingneng, et al. Integration time as variable for radiometric calibration of infrared system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 41(2): 36-40. (in Chinese)
罗茂捷, 周金梅, 傅景能, 等. 考虑积分时间变量的红外系统辐射响应定标 [J]. 红外与激光工程, 2013, 41(2): 36-40.
- [13] Gurevich E, Fein A. Maintaining uniformity of IR focal plane arrays by updating offset correction coefficients [C]// SPIE, 2003, 4820: 809-820.