

红外焦平面阵列二元非线性的非均匀性理论模型

屈惠明, 陈 钱

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏南京 210094)

摘 要: 非均匀性校正是红外焦平面阵列成像质量提高的关键, 在现有一元线性理论模型局限下, 红外焦平面阵列成像非均匀性校正难以获得校正精度的提高. 本文通过红外焦平面阵列探测器成像机理及其成像过程理论分析, 推导了影响探测器响应及其非均匀性的主要因素, 首次建立了红外焦平面阵列二元非线性的非均匀性理论模型, 通过实验测试及其统计分析验证了理论模型. 该模型能在较宽红外辐射和环境温度范围内准确预测红外焦平面阵列响应曲线及其非均匀性, 比原一元线性理论模型更全面准确地描述了红外成像非均匀性影响因素及探测器响应关系.

关键词: 红外成像; 红外焦平面阵列; 非均匀性模型; 二元非线性

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 11-2150-04

A Theoretical Model on Infrared Focal Panel Arrays Binary Nonlinear Nonuniformity

QU Hui-ming, CHEN Qian

(School of Electronic Engineering and Optoelectronics Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract: Nonuniformity correction is the key issue for the image quality improvement of infrared focal panel arrays imaging. But the nonuniformity correction precision is difficult to improve based on existing monadic linear theoretical model. Infrared focal panel array photoelectric response mechanism and its imaging process were analyzed. The main influence factors for infrared sensor response and its nonuniformity were deduced. A binary nonlinear nonuniformity theoretical model for infrared imaging was presented for the first time. Experimental test results were given. Test and statistic analysis results show that the model give reasonable prediction of the responsive curve for infrared focal panel arrays sensor in wider infrared scene radiation and surrounding temperature range. Furthermore, this model reveals comprehensive influence factors of IRFPA response and nonuniformity differ from the existing monadic linear theoretical model.

Key words: infrared imaging; infrared focal panel arrays (IRFPA); nonuniformity model; binary nonlinear

1 引言

由于受材料、工艺水平和许多无法控制的因素的限制, 红外焦平面阵列的每个探测元的响应率不可能完全一致, 这种不一致性称红外焦平面阵列的非均匀性. 在成像时这种非均匀性表现为空间噪声或固定图像噪声, 通常空域噪声远远大于时域噪声. 低信噪比检测技术是实现红外自动目标识别的基本前提, 其性能指标将直接决定系统的探测灵敏度和作用距离, 是反映红外可观测目标识别能力至关重要的一项核心技术^[1]. 因此, 为充分利用探测器的性能, 改善成像质量, 提高红外应用系统性能, 必须进行非均匀性校正. 目前红外焦平面阵列的非均匀性校正方法可以分为两大类: 第一类为基于标

定 (calibration based) 的校正算法, 该类方法假定探测元的响应特性是非时变的, 通过事先利用定标辐射源对红外焦平面阵列各探测元的响应进行标定, 来实现非均匀性校正. 第二类为基于场景 (scene based) 的校正算法, 该类方法利用序列图像来估计红外焦平面阵列的校正系数或者直接估计校正结果. 尽管该类校正方法目前得到了广泛的研究和发展, 但在实际的红外成像系统中, 特别是需要硬件电路实时实现时, 基于标定的算法仍然是红外焦平面阵列非均匀性校正的主要方法. 基于标定的校正方法有一点定标、二点定标和多点定标的校正. 这些方法都是以公式 (1) 表示的红外焦平面阵列探测器光电响应的线性或分段线性模型为基础的^[2].

$$f_{ij}(\phi_{ij}) = G_{ij}\phi_{ij} + O_{ij} \quad (1)$$

收稿日期: 2007-05-29; 修回日期: 2008-07-16

基金项目: 近程高速目标探测技术国防重点学科实验室资助; 国防预研项目 (No. 40405030103); 江苏省自然科学基金重点项目 (No. BK2008049)

该模型认为红外焦平面阵列探测器各像元 ij 响应输出电信号 $f_{ij}(\phi_{ij})$ 是输入红外辐射 ϕ_{ij} 的一元线性时不变函数. 其中, G_{ij} 是红外焦平面阵列各像元 ij 的增益系数, O_{ij} 是红外焦平面阵列各像元 ij 的偏移系数. 基于该模型的非均匀性校正技术适用于红外辐射温度范围变化较小的应用领域. 随着红外成像应用范围的扩大, 非均匀性校正精度受到这一理论模型的限制无法进一步提高. 另外, 红外焦平面阵列技术的进步和阵列规模的扩大, 对红外成像图像质量要求的提高, 红外焦平面阵列探测器非均匀性越来越成为红外成像水平提高的瓶颈. 因此, 突破现有理论模型的局限, 建立更加精确的红外焦平面阵列探测器非均匀性理论模型的要求变得越来越迫切.

2 红外焦平面阵列成像非均匀性理论模型建立

2.1 红外焦平面探测器响应非线性模型推导

红外探测器的种类很多, 分类方法也很多. 就其工作原理而言, 一般可分为光子探测器和热探测器两大类. 从电特性来看红外探测器可分为: 光导型 (PC), 光电二极管型 (PD), 光伏型 (PV) 和金属-绝缘体-半导体 (MIS) 型. 光导型红外探测器由偏置光敏电阻构成, 其电导率受红外光调制. 光电二极管型红外探测器是由窄禁带半导体制造的反偏 p-n 结或反偏肖特基势垒二极管构成. 光伏型红外探测器其光电二极管工作在开路模式. MIS 型红外探测器是固体读出结构的一个集成部分, 产生的光生载流子收集在窄禁带半导体中. 不管是哪种类型的红外探测器, 不管是什么工作机理, 红外探测器的响应电信号与入射红外辐射功率都是单调递增的连续函数关系, 可以概括成如下关系式^[3-5].

$$V(L) = RL \tag{2}$$

根据普朗克量子假说推导的普朗克定律, 将红外辐射功率表示为黑体温度和波长的函数.

$$L(\lambda, T) = \frac{2 \hbar^{-2} c^{-5}}{\exp\left(\frac{\hbar c}{k T \lambda}\right) - 1} \tag{3}$$

用辐射通量表示为:

$$\phi(\lambda, T) = \frac{L(\lambda, T)}{\hbar c / \lambda} = \frac{2 c^{-4}}{\exp\left(\frac{\hbar c}{k T \lambda}\right) - 1} \tag{4}$$

红外探测器用于光电转换的光信号是被探测器吸收的红外辐射能量, 它与探测器单元受光面积 A_D 、敏感光谱范围、量子效率、立体角 d 和探测器积分时间

$$E = A_D \times d \times \eta \times \int \phi(\lambda, T) d \lambda \tag{5}$$

一般在较窄的动态范围内红外探测器响应与接受

的红外辐射能量之间是线性的响应关系^[6]. 然而, 在大动态范围内, 基于光子效应的红外焦平面阵列探测单元的响应输出电信号与入射辐照度之间为非线性关系^[7-9]. 而且, 根据式(4)和(5), 探测器吸收的红外辐射能量是黑体温度的单调递增的连续非线性函数. 因此, 红外探测器输出电信号也是黑体温度的单调递增连续非线性函数. 黑体温度、红外辐射能和探测器响应电信号之间的转换关系可以用图 1 所示曲线来表示.

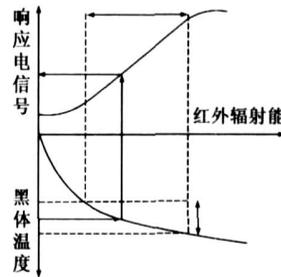


图1 黑体温度与探测器响应电信号转换关系示意图

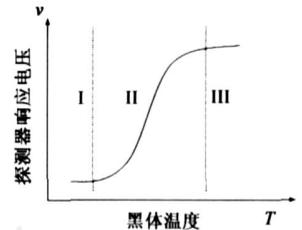


图2 红外探测器“S”型响应曲线示意图

根据理论分析和材料器件性能, 实际探测单元对红外辐射信号响应都有一个由截止到饱和的状态, 响应曲线一般要经历由截止到缓慢上升、线性增长直到趋于饱和和这样的变化过程^[10-12]. 可以形象地将红外焦平面阵列探测器输出电信号与黑体温度的单调递增连续非线性关系称为“S”型曲线. 用以下表达式来表示这一函数

$$V(T_b) = a + \frac{b}{1 + \exp(c - d \times T_b)} \tag{6}$$

其中: 系数 $b > 0, d > 0$. 该关系式用图

示表示如图 2 所示, 可以将这一曲线分为三个区域, 分别是截止区 (I)、工作区 (II) 和饱和区 (III)^[11-13].

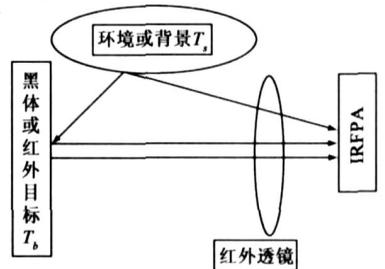


图3 探测器对红外辐射响应过程示意图

由于存在着非均匀性, 红外焦平面阵列探测器上各像元响应曲线具体位置和形状不同, 每个像元对应一条不同的“S”型曲线.

2.2 红外焦平面阵列二元非线性的非均匀性理论模型

由上面推导的结论可知: 在光谱响应范围已知的情情况下, 探测器响应电压是由黑体温度唯一确定的一元单调递增的连续函数. 然而, 实际上不存在发射率为 1 的绝对黑体, 自然界的辐射源通常都是发射率 < 1 的灰体; 而且, 成像时红外辐射源并不是紧贴红外焦平面阵列探测器表面, 它们之间光路的环境红外辐射需要考虑. 对于非透射物体, 发射率与反射率之和应为 1, 辐射源对环境红外辐射的反射也会对探测器响应信号产生

上符合“S”型的非线性响应曲线。然后,保持均匀黑体设定温度不变,改变不同环境温度,每隔 5 度采集测试 100 帧探测器响应值,求 100 帧响应值的均值,再求焦平面阵列所有像元的均值,测试探测器使用环境温度范围探测器响应均值,得到统计拟合响应曲线,分析探测器响应随环境温度变化的趋势及函数关系。图 6 所示是实验测试和统计拟合得到的探测器响应随环境温度变化的曲线。由图 6 可见,红外焦平面阵列探测器在使用范围内响应随环境温度变化呈线性单调递增关系。

实验测试及统计分析表明:红外焦平面阵列探测器响应是黑体目标红外辐射温度和环境红外辐射温度的二元非线性函数;探测器响应随黑体目标红外辐射温度升高而单调递增,其变化在探测器使用范围内呈“S”型曲线响应关系;探测器响应随环境红外辐射温度升高变化而单调递增,基本呈线性变化关系。

4 结束语

本文通过红外焦平面阵列成像的机理及其成像过程理论分析,推导了影响探测器响应及其非均匀性的主要因素,首次建立了红外焦平面阵列成像二元非线性的非均匀性理论模型。这一模型不仅是建立在理论分析推导的基础上,也是经过大量的试验测试得到的结果。大量的实验测试及其统计分析验证了理论模型。它比原理模型更准确预测红外成像非均匀性的影响因素及探测器响应关系。新模型为研究校正精度更高和环境变化适应性好的非均匀性校正技术提供了理论依据,为基于环境补偿的非均匀校正技术的提出打下理论基础。它是对现有红外成像非均匀性校正技术理论基础一元线性模型的突破。

参考文献:

- [1] 余农,吴常泳,汤心溢,等. 红外目标检测的自适应背景感知算法[J]. 电子学报,2005,33(2):200-204.
YU Nong, WU Chang-Yong, TANG Xin-yi, et al. Adaptive background perception algorithm for infrared target detection [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(2):200-204. (in Chinese)
- [2] 石岩,张天序,李辉,等. 一种考虑红外焦平面器件非线性响应的非均匀性校正方法[J]. 红外与毫米波学报,2004,23(4):251-256.
SHI Yan, ZHANG Tian-xu, LI Hui, et al. New approach to nonuniformity correction of IRFPA with nonlinear response[J]. J. Infrared Millim. Waves, 2004, 23(4):251-256. (in Chinese)
- [3] 刘继琨. 固体摄像器件的物理基础[M]. 成都:电子科技大学出版社,1989:206-207.
- [4] 白廷柱,金伟其,编. 光电成像原理与技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2006:406-442.

- [5] 常本康,蔡毅,编著. 红外成像阵列与系统[M]. 北京:科学出版社,2006:58-63.
- [6] Greg Matis, Jack Grigor, Jay James, et al. Radiance calibration of target projectors for infrared testing [J]. Proceedings of SPIE, 2006, (6207):62070N1-11.
- [7] Hui-xin Zhou, Rui Lai, Shang-qian Liu, et al. New improved nonuniformity correction for infrared focal plane arrays [J]. Optics Communications, 2005, (245):49-53.
- [8] Jeremy M. Lemer, Thomas Hierl, Max Schulz. Correctability and long-term stability of infrared focal plane arrays [J]. Opt. Eng., 1999, 38(5):862-869.
- [9] Wilhelm Isoz, Thomas Svensson, Ingmar Renhorn. Nonuniformity correction of infrared focal plane arrays [J]. Proceedings of SPIE, 2005, (5783):949-960.
- [10] Yan Shi, Tian-xu Zhang, Zhi-guo Cao, et al. A feasible approach for nonuniformity correction in IRFPA with nonlinear response [J]. Infrared Physics & Technology, 2005, (46):329-337.
- [11] Jan Baars, Max Schulz. Performance characteristics, measurement procedures, and figures of merit for infrared focal plane arrays [J]. Proceedings of SPIE, 1995, (2470):141-155.
- [12] W A Cabanski, M J Schulz. Electronic and optical properties of silicide/silicon IR detectors [J]. Proceedings of SPIE, 1991, (1484):81-97.
- [13] QU Hui-ming, CHEN Qian, ZHANG Can-lin. Accurate non-effective pixel detection and replacement based on multi-temperature matching [J]. Proceedings of SPIE, 2007, (6279):62796X-1~8.
- [14] 屈惠明,陈钱,顾国华,等. 红外焦平面阵列性能参数测试系统[J]. 激光与红外,2006,36(10):950-952.
QU Hui-ming, CHEN Qian, GU Guo-hua, et al. Test system for measuring characteristic parameters of IRFPA [J]. LASER & INFRARED, 2006, 36(10):950-952. (in Chinese)
- [15] GB/T 17444-1998, 红外焦平面阵列特性参数测试技术规范[S].
GB/T 1744-1998, The technical norms for measurement and test of characteristic parameters of infrared focal plane arrays [S]. (in Chinese)

作者简介:



屈惠明 男,1967年10月出生于湖南永州,分别于1990年、2004年和2007年7月在电子科技大学、东南大学和南京理工大学获得学士、硕士和博士学位,现为南京理工大学在站博士后。研究方向为光电探测与新型成像理论。
E-mail: huimingqu@163.com

陈钱 男,1964年11月出生于江苏无锡,教授,博士生导师,长江学者,现为美国亚利桑那大学高级访问学者。研究方向为光电探测与数字视频。