

基于光学读出非制冷红外成像系统的 无基底 FPA 等效电学模型

张勇¹, 程腾^{1*}, 张青川¹, 陈大鹏², 高杰¹, 毛亮¹, 吴健雄¹, 高越¹

(1. 中国科学技术大学 中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽 合肥 230027;

2. 中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要:与传统的有基底 FPA(焦平面阵列)相比,基于全镂空支撑框架结构的新型无基底 FPA 在热学特性上存在显著差异,传统的基于恒温基底假设的热学分析模型不再适用,因此,通过电学比拟方法,将无基底 FPA 的热响应特性等效为电学模型.通过该模型,进一步分析了无基底 FPA 在非真空环境下的热学性能,分析表明:该无基底 FPA 具有在大气压下优良的红外成像性能,其 NETD(噪声等效温度差)值仅比真空环境下增加了数倍.

关键词:非制冷红外成像;等效电学模型;电学比拟;光学读出;焦平面阵列

中图分类号:TN216 文献标识码:A

Equivalent circuit model of the substrate-free focal plane array based on the optical readout uncooled infrared imaging system

ZHANG Yong¹, CHENG Teng^{1*}, ZHANG Qing-Chuan¹, CHEN Da-Peng²,
GAO Jie¹, MAO Liang¹, WU Jian-Xiong¹, GAO Yue¹

(1. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China)

Abstract: Thermal characteristics of new substrate-free FPA (focal plane array) with full hollow supporting frame structure are very different from that of traditional substrate FPA. The thermal analysis model which based on temperature-constant substrate assumption is not efficient any more. Therefore, an equivalent circuit model was presented to analyze the thermal response characteristics of substrate-free FPA with electric and holistic approach. According to this model, the thermal characteristics of substrate-free FPA under non-vacuum environment were analyzed. The result shows that, the substrate-free FPA has excellent infrared imaging performances under atmospheric pressure, while its NETD (noise equivalent temperature difference) is just increased several times than in the vacuum environment.

Key words: uncooled infrared imaging; equivalent circuit model; electric and holistic approach; optical readout; focal plane array

PACS: 42. 79. Pw

引言

非制冷红外成像技术在军民两大领域均受到了

广泛的关注和应用.传统的电学读出非制冷红外成像技术通过在硅基底上制作微阵列读出电路,检测由探测单元的热致温升导致的电路电学参量(如电

收稿日期:2012-02-12,修回日期:2012-11-06

Received date: 2012-02-12, revised date: 2012-11-06

基金项目:国家自然科学基金(11072233、11102201、11127201);中央高校基本科研业务费专项资金(WK2090050017);中国博士后科学基金(20100480684);江苏省自然科学基金(BK2011373)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(11072233、11102201、11127201); Fundamental Research Funds for Central Universities(WK2090050017); China Postdoctoral Science Foundation(20100480684); Jiangsu Provincial Natural Science Foundations of China(BK2011373)

作者简介(Biography):张勇(1985-),男,江苏扬州人,中国科学技术大学在读博士,主要研究领域为光学读出非制冷红外成像、生化微梁传感器阵列. E-mail: password@mail.ustc.edu.cn.

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: chteng@ustc.edu.cn.

阻、电容)的变化,从而实现目标物体的红外成像. 由于需要集成高增益、高精度的微读出电路,使得 FPA 的结构趋于复杂,大阵列 FPA 的制作和开发的难度增大,并且,探测单元与读出电路之间使用金属导线连接,不利于热的隔离,从而影响红外探测的灵敏度. 随着 MEMS 工艺的发展,研究人员于上世纪 90 年代后期提出了基于双材料微悬臂梁受热变形原理的光学读出非制冷红外成像技术^[1-3],由于其使用了非接触式的光学读出方法,具有结构简单,热隔离效果好和制作工艺简单等优点. 2001 年,课题组开始与中科院微电子研究所合作,共同研究光学读出非制冷红外成像技术,提出了在 FPA 的谱平面进行空间刀口滤波的光学读出方法^[4],设计了一种基于自支撑双材料微悬臂梁结构的新概念无基底 FPA^[5],并于 2005 年首次在国内实现了室温物体的非制冷红外成像^[6]. 截至目前,课题组已先后制作了多批次不同结构的无基底 FPA(像素单元尺寸为 200×200 、 120×120 、 $60 \times 60 \mu\text{m}^2$),其真空环境下的系统级 NETD 最高已达到 100 mK ^[7].

本文针对无基底 FPA 的结构特点,通过电学比拟方法,提出了一个简单快捷的分析无基底 FPA 热学性能的等效电学模型. 该模型综合考虑了像素单元和支撑框架的空气热导对系统红外成像性能的影响,通过该理论模型发现:无基底 FPA 在大气压下具有优良的红外成像性能. 设计制作的像元尺寸为 $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ 的无基底 FPA 上的实验表明:标准大气压环境下,系统 NETD 为 1.08 K . 实验结果与理论模型分析一致.

1 像素单元的热致变形原理

本文采用间隔镀金双回折结构设计制作无基底 FPA,其像素单元的结构如图 1 所示,由反光板,热隔离梁和热变形梁组成. 其中,热隔离梁为单材料 SiN_x 膜,用于隔离像素单元与框架之间的热传导,并将像素单元侧向支撑在框架上;反光板和热变形梁为双材料 SiN_x -Au 膜,反光板的镀 Au 面用于反射可见探测光, SiN_x 面吸收红外辐射,使热变形梁产生温升,由于两种材料热膨胀系数的巨大差异,热变形梁发生弯曲变形,反光板随之发生热致偏转. 间隔镀金双回折结构加大了反光板的热致偏转角度,显著提高了单元的热变形效率^[8].

2 理论模型分析

2.1 系统的性能表征

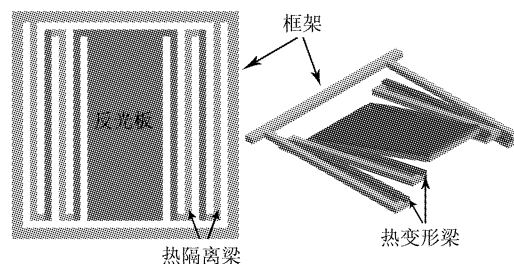


图 1 无基底 FPA 的像素单元结构示意图
Fig. 1 Schematic illustration of the single element of the substrate-free FPA

针对课题组提出的光学读出非制冷红外成像系统,采用 NETD 评估其成像性能,表述为

$$\text{NETD} = N_{\text{noise}} / \text{TRS} \quad (1)$$

其中, N_{noise} 为系统噪声;TRS 为热响应灵敏度(Thermal Response Sensitivity),可表述为

$$\text{TRS} = \frac{\Delta T_c}{\Delta T_s} \times \frac{\Delta \theta}{\Delta T_c} \times \frac{\Delta N}{\Delta \theta} = H \times S_T \times \Theta \quad (2)$$

式中, H 为像素单元的热转换效率^[9],表示目标物体的温升(ΔT_s)引起的像素单元的温升(ΔT_c); S_T 为像素单元的热机械效率,表示微梁的温升(ΔT_c)导致的反光板的偏转角度($\Delta \theta$)^[9,11]; Θ 为系统光学检测灵敏度,表示单位热致转角($\Delta \theta$)导致的 CCD 图像的灰度变化(ΔN),可用量化深度为 N_{ccd} 的 CCD 所量化的微梁单元反光板衍射谱的半宽表示^[5,10].

2.2 无基底 FPA 的热学模型

真空封装后的无基底 FPA 阵列结构如图 2 所示,FPA 外框固定在真空腔壁上,镀金面一侧使用石英玻璃封装,供可见探测光通过,另一侧使用锗玻璃,透射目标物体的红外热辐射. 根据热学原理可知,无基底 FPA 热流的传导方式主要包含三种:1) 通过微悬臂梁和框架以热传导的方式将热流传向外框;2) 像素单元和框架以辐射热交换的方式将热流传向真空腔;3) 空气的热传导(忽略空气热对流对空气热导的影响^[12]). 其中,空气的热传导包含两个部分:a) 像素单元有效表面(反光板与微悬臂梁上下表面之和)与真空腔内端面之间的空气热传导^[12]; b) 框架与真空腔内端面之间的空气热传导.

FPA 像素单元受红外热辐射时,设反光板、微悬臂梁和框架吸收的热量分别为 Q_{absorb} 、 Q_{leg} 和 Q_{frame} ; 微悬臂梁和框架的传导热阻为 r_{leg} 和 r_{frame} ; 反光板、微悬臂梁、框架的辐射热阻和空气传导热阻则分别为 $r_{\text{absorb,rad}}$ 、 $r_{\text{leg,rad}}$ 、 $r_{\text{frame,rad}}$ 与 $r_{\text{absorb,air}}$ 、 $r_{\text{leg,air}}$ 、 $r_{\text{frame,air}}$. 非

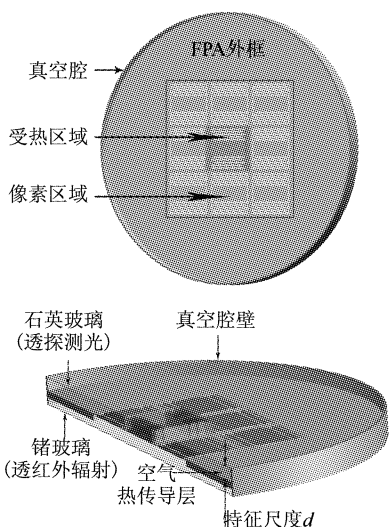


图2 封装后的无基底 FPA 示意图
Fig. 2 Schematic illustration of the packaged substrate-free FPA

真空环境下无基底 FPA 像素单元受热辐射照射时的热阻分布示意图可简单等效为图3所示。

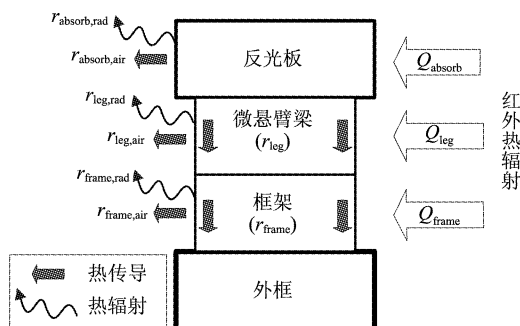


图3 非真空环境下无基底 FPA 单个像素受热辐射照射时的热阻分布示意图
Fig. 3 Thermal resistance distribution of the substrate-free FPA when its single element was radiated under the non-vacuum environment

2.3 无基底 FPA 的电学模型

由于无基底 FPA 外框的热导远大于单个像素单元的热导,所以将其和真空腔内端面一起视为恒温基底.采用电学比拟的方法,将热流等效为电学中的恒流源,热阻等效为电阻,恒温基底等效为接地,非真空环境下无基底 FPA 单个像素受热辐射照射时的等效电学模型如图4所示。

有限元分析表明,无基底 FPA 的整体热响应是单个像素受热辐射时热响应的点扩散函数的线性叠加^[13],所以当像素阵列为 $N \times N$ 的无基底 FPA 中心 $M \times M$ 像素单元受热辐射时,其整体热阻为对应区

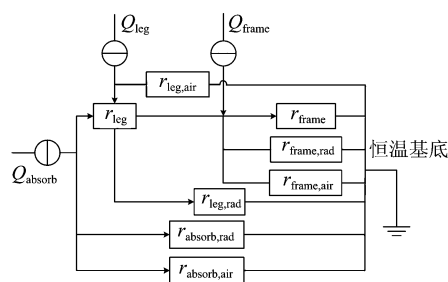


图4 非真空环境下单个像素受热辐射时无基底 FPA 的电学等效模型
Fig. 4 Equivalent circuit model of the substrate-free FPA when its single element is radiated under the non-vacuum environment

域的一个像素热阻并联.当无基底 FPA 受热辐射照射时,微悬臂梁的温升与反光板温升几乎相同^[14],故我们引入近似,认为两者在模型中电势相等,微悬臂梁和反光板吸收的热流合并为等效热流,用 Q_{Meff} 表示.图4中的等效电学模型简化为如图5所示。

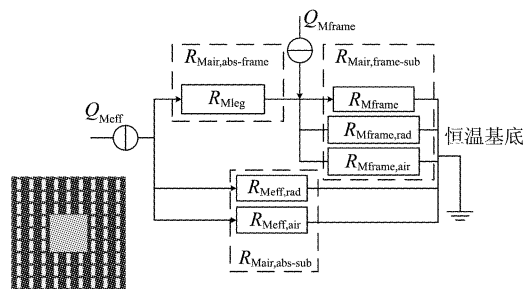


图5 像素阵列为 $N \times N$ 的无基底 FPA 中心 $M \times M$ 个像素单元受热辐射时(左下角所示)的简化等效电学模型
Fig. 5 Equivalent circuit model of the substrate-free FPA when the central $M \times M$ area are radiated under the non-vacuum environment(Shown in the lower left corner)

2.3.1 热传导和热辐射

设系统入射红外辐射强度为 Δq ,将 M^2 个受热辐射像素单元做为整体考虑,其等效热流 Q_{Meff} 和框架部分吸收热流 Q_{Mframe} 可表示为:

$$Q_{Meff} = M^2 \cdot \Delta q (A_{absorb} + A_{leg}) \quad (4)$$

$$Q_{Mframe} = M^2 \cdot \Delta q \cdot A_{frame} \quad (5)$$

式中, A_{absorb} 和 A_{frame} 分别为 FPA 单个像素的反光板的面积和框架的面积, A_{leg} 为 FPA 单个像素包含所有微悬臂梁表面积之和。

$R_{Meff,rad}$ (等效辐射热阻) 为 M^2 个像素单元的 $r_{absorb,rad}$ 与 $r_{leg,rad}$ 并联后的等效辐射热阻, R_{Mleg} 、 R_{Mframe} 和 $R_{Mframe,rad}$ 则分别是 M^2 个像素单元的 r_{leg} 、 r_{frame} 和 $r_{frame,rad}$ 并联后的热阻,计算公式如下^[15]:

$$R_{\text{Meff,rad}} = \frac{1}{4M^2 \sigma \Sigma T_0^3}, \quad (6)$$

$$R_{\text{Mleg}} = \frac{1}{2M^2} \left[\frac{nL_{\text{leg}}}{k_{\text{SiNx}} A_{\text{SiNx}} + k_{\text{Au}} A_{\text{Au}}} + \frac{nL_{\text{leg}}}{K_{\text{SiNx}} A_{\text{SiNx}}} \right], \quad (7)$$

$$R_{\text{Mframe,nad}} = \frac{1}{8M^2 \sigma A_{\text{frame}} \varepsilon_{\text{SiNx}} T_0^3}, \quad (8)$$

$$R_{\text{Mframe}} = \frac{L_{\text{pixel}} \ln(N/M)}{8k_{\text{SiNx}} A_{\text{SiNx,frame}}}, \quad (9)$$

式中

$$\Sigma = (A_{\text{absorb}} + A_{\text{leg}}/2) (\varepsilon_{\text{SiNx}} + \varepsilon_{\text{Au}}) + A_{\text{leg}} \varepsilon_{\text{SiNx}}, \quad (10)$$

σ 为 Stefan-Boltzman 常数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$); T_0 为像素单元原始温度; n 为微悬臂梁的回折数; L_{leg} 和 L_{pixel} 分别为微悬臂梁和像素单元的长度; k_{SiNx} 、 k_{Au} 、 A_{SiNx} 、 A_{Au} 、 $\varepsilon_{\text{SiNx}}$ 、 ε_{Au} 分别为 SiN_x 和 Au 这两种材料的热传导系数,横截面积和红外吸收系数; $A_{\text{SiNx,frame}}$ 则为框架的横截面积。

2.3.2 空气热导

无基底 FPA 的空气热导^[13]可表述为 $G_{\text{air}} = k_{\text{air}} \cdot A_{\text{area}}/d$ 。式中, k_{air} 为空气的热传导系数; A_{area} 为对应部分的表面积; d 为气体传热层的特征尺度(本文中为 2 mm)。

将 FPA 中心 $M \times M$ 像素单元做为一个整体,图 5 中框架空气热阻 $R_{\text{Mframe,air}}$ 和等效空气热阻 $R_{\text{Meff,air}}$ 可写出,如下式所示:

$$R_{\text{Mframe,air}} = \frac{d}{2k_{\text{air}} M^2 A_{\text{frame}}}, \quad (11)$$

$$R_{\text{Meff,air}} = \frac{d}{2k_{\text{air}} M^2 (A_{\text{absorb}} + A_{\text{leg}})}. \quad (12)$$

本文所构建的系统中,空气分子的热运动受到真空腔内端面和 FPA 薄膜的限制,故需要对空气的热传导系数 k_{air} 做如下修正^[12]:

$$\frac{1}{k_{\text{air}}} = \frac{1}{\lambda_{\text{hp}}} + \frac{1}{\lambda_{\text{lp}} p d}, \quad (13)$$

式中, λ_{hp} 为经典理论中空气热传导系数,常温 (300 K) 下其值为 0.0263 W/Km ; λ_{lp} 为气压降低后,空气分子平均自由程大于气体传热层尺度时对空气热传导系数进行修正的因子,常温 (300 K) 下其值为 1.793 m/sK ; p 为空气压强。

2.3.3 热转换效率与等效总热导

由欧姆定律,图 5 中的电阻可最终合并如下:

$$R_{\text{Mair,abs-frame}} = R_{\text{Mleg}}, \quad (14)$$

$$R_{\text{Mair,abs-sub}} = \left(\frac{1}{R_{\text{Meff,rad}}} + \frac{1}{R_{\text{Meff,air}}} \right)^{-1}, \quad (15)$$

$$R_{\text{Mair,frame-sub}} = \left(\frac{1}{R_{\text{Mframe}}} + \frac{1}{R_{\text{Mframe,rad}}} + \frac{1}{R_{\text{Mframe,air}}} \right)^{-1}. \quad (16)$$

至此,根据基尔霍夫定律及图 5,可以得到,当 $N \times N$ 像素阵列的无基底 FPA 在中心 $M \times M$ 像素区域受热辐射照射时,整体平均温升可表述为:

$$\Delta T_c = \frac{(1 + \beta) R_{\text{Mair,frame-sub}} + R_{\text{Mair,abs-frame}}}{R_{\text{Mair,abs-frame}} + R_{\text{Mair,frame-sub}} + R_{\text{Mair,abs-sub}}} \cdot \frac{M^2 A_{\text{pixel}} \Delta q}{4F^2 dT_s}, \quad (17)$$

其中, $A_{\text{pixel}} = A_{\text{absorb}} + A_{\text{leg}} + A_{\text{frame}}$, 为像素单元吸热总面积。

则,热转换效率 H 为:

$$H = \frac{\Delta T_c}{\Delta T_s} = \frac{R_{\text{Mair,abs-sub}} [(1 + \beta) R_{\text{Mair,frame-sub}} + R_{\text{Mair,abs-frame}}]}{R_{\text{Mair,abs-frame}} + R_{\text{Mair,frame-sub}} + R_{\text{Mair,abs-sub}}} \cdot \frac{A_{\text{pixel}} \tau \varepsilon \pi}{4F^2} \frac{dL}{dT_s}, \quad (18)$$

其中, τ 为光学系统红外透过率 ($\tau = 0.9$), ε 为像素单元的红外吸收系数 ($\varepsilon_{\text{SiNx}} = 0.8$), F 为红外透镜的数值孔径 ($F = 0.8$), dL/dT_s 为黑体的单位温度辐射率 (300 K 时在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段其值为 $0.63 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$)。

等效总热导为:

$$G_{\text{total}} = \frac{R_{\text{Mair,abs-frame}} + R_{\text{Mair,frame-sub}} + R_{\text{Mair,abs-sub}}}{R_{\text{Mair,abs-sub}} [(1 + \beta) R_{\text{Mair,frame-sub}} + R_{\text{Mair,abs-frame}}]}, \quad (19)$$

式中, $\beta = Q_{\text{Mframe}}/Q_{\text{Meff}} = A_{\text{frame}}/(A_{\text{absorb}} + A_{\text{leg}})$, 为像素单元框架面积与等效表面积之比值。

3 性能分析

课题组使用 SiN_x 和 Au (材料参数如表 1) 设计制作了阵列大小为 240×240 , 像素单元尺寸为 $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ 的无基底 FPA, 其光学显微照片如图 6 所示, 图片右上角为单个像素单元细观结构。

表 1 SiN_x 和 Au 的热物理性能

	辐射系数 ε	密度 $\rho/103 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	杨氏模量 E/GPa	热导系数 $k/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	热膨胀系数 $\alpha/10^{-6} \text{K}^{-1}$	热容 $c/\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
SiN_x	0.8	2.40	180	5.5	0.8	691
Au	0.01	19.3	73	296	14.2	129

由式(18)、(19)可计算得,当 FPA 中心 5×5 像素区域受热辐射时,系统的等效总热导 G_{total} 与热转换效率 H 随真空腔空气压强变化情况如图 7 所示。

由图 8 所示可知,当真空腔空气压强从 10^2 Pa 上升至 10^0 Pa 时,系统等效总热导 G_{total} 从 $0.59 \times 10^{-6} \text{ W/K}$ 上升至 $0.62 \times 10^{-6} \text{ W/K}$, 系统热转换效率

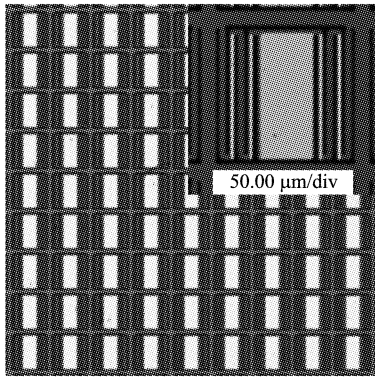


图 6 像元尺寸为 $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ 的无基底 FPA 光学显微照片
Fig. 6 Optical microscope image of the substrate-free FPA with pixel size of $50 \times 50 \mu\text{m}^2$

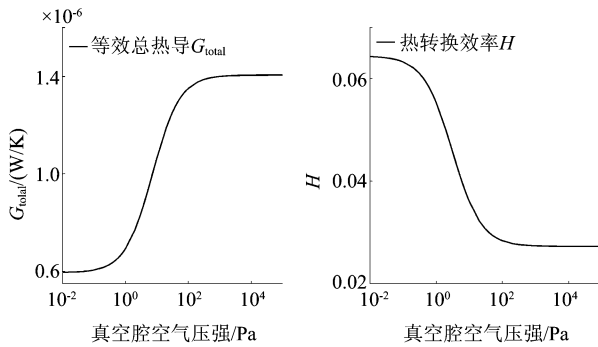


图 7 不同压强条件下的系统总热导 G_{total} 和热转换效率 H ($N=240, M=5$)
Fig. 7 Total thermal conductivity G_{total} and thermal conversion efficiency H under different air pressures ($N=240, M=5$)

H 从 6.45% 下降至 6.22%, 变化幅度较小; 而当真空腔的空气压强从 10^0 Pa 上升至 10^2 Pa 时, G_{total} 上涨了 92% 至 $1.19 \times 10^{-6} \text{ W/K}$, H 下降 48% 至 3.22%, 变化较剧烈; 最后, 在真空腔缓慢充气至一个标准大气压 (10^5 Pa) 过程中, G_{total} 与 H 的变化再次趋于平缓, 最终值分别为 $1.41 \times 10^{-6} \text{ W/K}$ 与 2.73%.

由上述可知, 标准大气压环境下的无基底 FPA 的等效总热导仅比其真空环境下增长了 1.39 倍, 这使得无基底 FPA 拥有了在大气压下对常温物体进行红外成像的优良性能.

4 实验验证

4.1 大气压下成像

室温条件 (300 K) 下, 实验测量了不同空气压强条件下像素单元尺寸为 $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ 的无基底

FPA 对人手的红外成像结果, 如图 8 所示. 随着真空腔中空气压强逐步增大, 空气分子热运动增加, 空气热阻减小, 系统总热导增加, 热转换效率降低, 微梁单元温升下降, 反光板的热致转角变小, CCD 靶面采集的图像灰度值降低, 导致系统的红外成像性能逐步下降, CCD 采集图像的平均灰度值降低, NETD 随着空气压强的增大逐步增加.

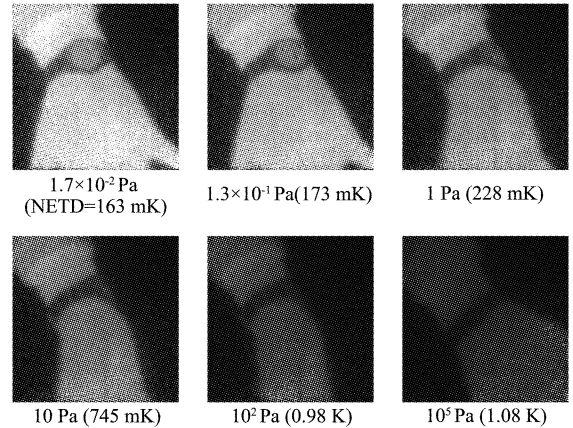


图 8 像素单元尺寸为 $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ 无基底 FPA 在不同大气压强条件下对人手的成像 (实验环境温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 人手温度为 $35.2 \text{ }^\circ\text{C}$)
Fig. 8 Hand images through the substrate-free FPA with pixel size of $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ under different air pressures (Environment temperature is $25 \text{ }^\circ\text{C}$, hand temperature is $35.2 \text{ }^\circ\text{C}$)

4.2 系统 NETD 分析

结合式 (1)、(2)、(18) 和 (19), 可得 NETD 与系统等效总热导 G_{total} 的关系如下:

$$\text{NETD} \propto N_{\text{noise}} G_{\text{total}} \quad (20)$$

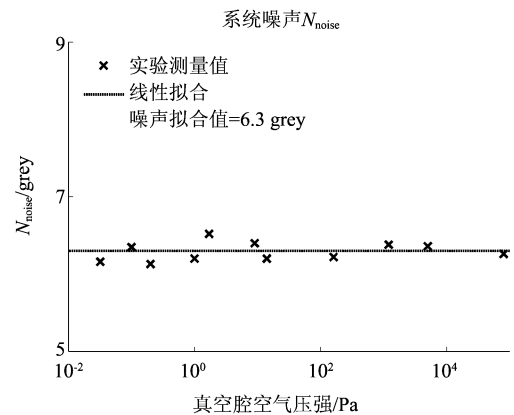


图 9 系统噪声随气压变化情况
Fig. 9 System noises under different air pressures

实验测得, 不同真空腔空气压强条件下系统噪声如图 10 中“x”所示, 对其线性拟合后得图中所

示拟合直线.由图 10 可知,在真空腔空气压强发生变化时,系统噪声 N_{noise} 在一固定值上下小范围变动;又分析发现,环境中的不良因素(比如震动)对实验测量值本身有影响,故本文认为,不同空气压强条件下系统噪声保持不变.

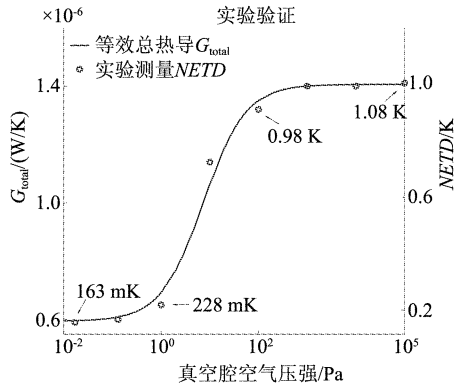


图 10 实验测量 NETD 值与系统等效总热导的对比
Fig. 10 Contrast between the experimental NETD and the total thermal conductivity

不同空气压强条件下系统 NETD 实验测量值如图 10 中“o”所示(对应图 10 右纵坐标),图中曲线表示了系统的等效总热导 G_{total} 随气体压强变化关系(对应图 10 左纵坐标).实验结果表明:真空环境下(10^{-2} Pa 量级),实验测量系统 NETD 值为 163 mK;当压强介于 1 Pa 到 100 Pa 之间时,NETD 值变化剧烈,其余情况下变化则比较平缓;标准大气压下(10^5 Pa 量级),NETD 值为 1.08 K.由图可知,实验测量系统 NETD 变化与等效总热导变化趋势一致,与上文分析相符.

5 结论

针对基于全镂空支撑框架结构的新型无基底 FPA,传统的基于恒温基底假设的热学分析模型不再适用,由它得到的理论分析结果与实验数据不符.因此,根据这种新型无基底 FPA 的热学特征(即无基底 FPA 的四周边框为恒温结构,但支撑框架为变温结构),采用电学比拟的方法,将无基底 FPA 吸收的热流等效为恒流源,无基底 FPA 的热阻等效为电阻,无基底 FPA 的恒温边框等效为接地,提出了在非真空环境下,可有效分析无基底 FPA 热学性能的等效电学模型,并在设计制作的像元尺寸为 $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ 的无基底 FPA 上进行了验证.实验结果表明:真空腔空气压强为 10^{-2} Pa 时,系统 NETD 为 163 mK;大气压环境下,NETD 增加 5.75 倍至 1.08 K.

无基底 FPA 具有在大气压下优良的红外成像性能,其 NETD 值仅比真空环境下增加了数倍.实验结果与等效电学模型的理论分析结果一致,该模型是有效的、可信的.

REFERENCES

- [1] ZHAO Yang, MAO Min-yao, MAJUMDAR A, *et al.* Optomechanical uncooled infrared imaging system: design, microfabrication, and performance [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2002, **11**(2): 136 - 146.
- [2] ISHIZUYA T, SUZUKI J, AKAGAWA K, *et al.* 160×120 pixels optically readable biomaterial infrared detector: The fifteenth IEEE international conference on micro electro mechanical systems, 2002 [C]. *Las Vegas, NV, USA, IEEE*, 2002: 578 - 581.
- [3] SENESAC L R, CORBEIL J L, RAJIC S, *et al.* IR imaging using uncooled microcantilever detectors [J]. *Ultramicroscopy*, 2003, **97**: 451 - 458.
- [4] DUAN Zhi-hui, ZHANG Qing-chuan, WU Xiao-ping, *et al.* Uncooled optically readable bimaterial micro-cantilever infrared imaging device [J]. *Chinese Physics Letters*, 2003, **20**(12): 2130 - 2132.
- [5] PAN Liang, ZHANG Qing-chuan, WU Xiao-ping, *et al.* MEMS based optomechanical infrared imaging [J]. *Journal of Experimental Mechanics* (潘亮,张青川,伍小平,等.基于 MEMS 的光力学红外成像. *实验力学*), 2004, **19**(4): 403 - 407.
- [6] MIAO Zheng-yu, ZHANG Qing-chuan, CHEN Da-peng, *et al.* Uncooled IR imaging using optomechanical detectors [J]. *Ultramicroscopy*, 2007, **107**: 610 - 616.
- [7] DONG Feng-liang, JIAO Bin-bin, ZHANG Qing-chuan, *et al.* Advance in optically readable uncooled infrared imaging [J]. *Journal of Experimental Mechanics* (董凤良,焦斌斌,张青川,等.光学读出非制冷红外成像的最新进展. *实验力学*), 2007, **22**(3): 401 - 406.
- [8] MIAO Zheng-yu, ZHANG Qing-chuan, CHEN Da-peng, *et al.* Bi-material microcantilever array room-temperature IR imaging [J]. *Acta Physica Sinica* (繆正宇,张青川,陈大鹏,等.双材料微梁阵列室温物体红外成像. *物理学报*), 2007, **55**(7): 3208 - 3214.
- [9] KRUSE P W. Principle of uncooled infrared focal plane arrays [J]. *Semiconductors Semimetals*, 1997, **47**: 17 - 44.
- [10] ZHANG Qing-chuan, PAN Liang, WU Xiao-ping, *et al.* Optomechanical microcantilever array hot type image infrared sensor: PRC Patent (张青川,潘亮,伍小平,等.光-机械式微梁阵列热型图像红外传感器: 中华人民共和国), ZL200310112820.1 [P]. 2006 - 05 - 03.
- [11] XIONG Zhi-ming, ZHANG Qing-chuan, CHEN Da-peng, *et al.* Optical-readout microcantilever array IR imaging system and performance analysis [J]. *Acta Physica Sinica* (熊志铭,张青川,陈大鹏,等.光学读出微梁阵列红外成像及性能分析. *物理学报*), 2007, **56**(5): 2529 - 2536.
- [12] ZHAO Yang. Optomechanical uncooled infrared imaging system [D]. Berkley, California, USA: UC Berkley, 2002.
- [13] CHENG Teng, ZHANG Qing-chuan, WU Xiao-ping, *et al.* Uncooled infrared imaging using a substrate-free focal plane array [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2008, **29**(11): 1218 - 1211.

(下转第 443 页)

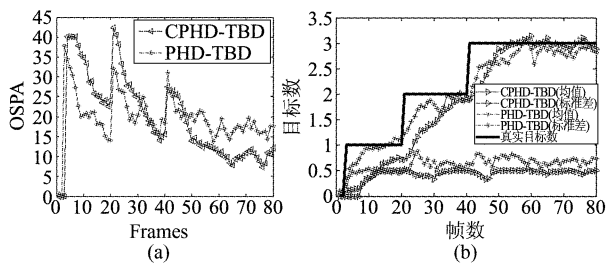


图8 CPHD-TBD 和 PHD-TBD 算法性能对比图 ($I = 12$, $SNR = 5.7$)

Fig. 8 Performance comparisons of different CPHD-TBD and PHD-TBD with intensity of target as 12 and SNR 5.7 (a) OSPA (b) number of estimate targets

敛.

综合图6到图8所示,在信噪比为9.3时,当经过多帧累积检测后,CPHD-TBD算法和PHD-TBD算法都能很好的发现目标,并准确估计目标个数和状态,CPHD-TBD的OSPA值和目标个数估计标准相对更小,表明其对目标数的估计更准确和稳定,性能相对更优.在信噪比为7.1时,CPHD-TBD算法和PHD-TBD算法都能较好发现目标,并估计目标状态,但PHD-TBD对目标数估计的标准差较大,有起伏现象,其OSPA也明显增大,但CPHD-TBD算法的目标个数估计的标准和OSPA都没有明显增加,通过多帧累积,依旧能很好检测并跟踪目标.当信噪比为5.7时,由于随着信噪比的降低,CPHD-TBD和PHD-TBD算法的性能都有明显下降,PHD-TBD算法对目标数估计明显偏差,已经难以准确稳定的实现目标发现和跟踪,CPHD-TBD需要累积20帧左右才能实现对目标发现,其对目标数估计的标准差也相应变大,OSPA值也增大,但仍然具有一定的目标检测与跟踪能力,相对于PHD-TBD算法其性能明显更优.在目标数估计正确的条件下,CPHD-TBD和PHD-TBD算法都能精确的估计目标状态,

6 结论

文章对红外序列图像CPHD-TBD的问题进行了深入分析和研究,把标准CPHD滤波的思想应用

到弱小目标的检测前跟踪中,推导出了CPHD-TBD的粒子权重更新表达式,得到了CPHD-TBD的目标势分布表达式,并给出CPHD-TBD的详细步骤与说明.在不同信噪比下,文章首次提出的CPHD-TBD的算法相比现有的PHD-TBD算法,利用目标势分布完成目标数估计,目标数估计标准差更小,能更稳定地估计目标个数,能很好地实现对弱小目标的检测并跟踪,但同时CPHD-TBD算法也增加对图像检测帧数的需求.作者的后续工作主要针对更低目标的信噪比条件下,研究基于融合的PHD-TBD算法和CPHD-TBD算法,更好地实现对弱小目标个数和目标状态的准确估计.

REFERENCES

- [1] Buzzi S, Lops Ma, Venturino L. Track-before-detect procedures in a multi-target environment [J]. *IEEE Transactions on Aero space and Electronic Systems*, 2008, **44**(3): 1135 - 1150.
- [2] Boer s Y, Driessen J N. Multitarget . particle filter track-before -detect application [J] . *IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation*, 2004, **151**(6): 351 - 357.
- [3] Mahler R. PHD Filters of Higher Order in Target Number [J]. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*. 2007, **43**(4): 1523 - 1543.
- [4] Vo B N, Singh S, Doucet A. Sequential Monte Carlo methods for multi-target filtering with random finite sets [J] . *IEEE Trans-actions on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, **41**(4): 1224 - 1245.
- [5] Davide Macagnano, Giuseppe Thadeu. Gating for Multitarget Tracking with the Gaussian Mixture PHD and CPHD Filters [J]. *IEEE*, 2011.
- [6] Ouyang Cheng, Ji Hong-bing, Zhang Jun-gen. Improved CPHD Filter for Multitarget Tracking. [J] *Journal of Electronics & Information Technology* (欧阳成, 姬红兵, 杨金龙. 一种改进的CPHD多目标跟踪算法. *电子与信息学报*). 2010, vol **32**(9): 2112 - 2117.
- [7] Punithakumar K, Kirubarajan T. A sequential Monte Carlo probability hypothesis density algorithm for multitarget track-before-detect [A]. *Signal Data Processing Small Targets [C]*. San Diego. CA: SPIE, 2005. 5913: 1 - 8.
- [8] Lin Zaiping, Zhou Yiyu, An wei. improved multitarget Track-Before-Detect using probability hypothesis density filte [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (林再平, 周一宇, 安玮. 基于改进的概率假设密度滤波的检测前跟踪算法. *红外与毫米波学报*) 2012, **31**(5): 103 - 108.

(上接 399 页)

- [14] CHENG Teng, ZHANG Qing-chuan, CHEN Da-peng, *et al.* Performance analysis of the substrate-free focal plane array in infrared imaging [J]. *Acta Physica Sinica* (程腾, 张青川, 陈大鹏, 等. 无基底焦平面阵列的红外成像性能分析, *物理学报*), 2009, **58**(2): 852 - 859.

- [15] JIANG Xing-kai, ZHANG Qing-chuan, SHI Hai-tao, *et al.* Analysis of theoretical model of thermal infrared imager based on the substrate-free focal plane array [J]. *Acta Physica Sinica* (蒋兴凯, 张青川, 史海涛, 等. 基于无基底焦平面阵列红外热像仪的理论模型分析, *物理学报*), 2011, **60**(5): 054401.