

# 红外探测器 成像与信息处理

HONGWAI TANCEQI CHENGXIANG YU XINXI CHULI

主 编 牟新刚 周 晓



重庆大学出版社  
<http://www.cqup.com.cn>

## 内 容 提 要

本书研究了红外传感器成像与信息处理技术中的若干关键问题,包括传感器非均匀矫正、红外弱小目标检测、图像增强及识别信息处理三大部分。本书内容除了在理论角度进行分析阐述之外,更侧重于面向实际应用时的优化设计。本书提供的处理方法为多年研究成果总结,大多经过实际工程项目验证,可以供相关专业研究生学习、工程技术人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

红外探测器成像与信息处理/牟新刚,周晓主编. —重庆:

重庆大学出版社, 2016. 9

ISBN 978-7-5689-0137-6

I. ①红… II. ①牟…②周… III. ①红外探测器—图像处理

IV. ①TN215

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 217892 号

## 红外探测器成像与信息处理

主 编 牟新刚 周 晓

责任编辑:文 鹏 版式设计:文 鹏

责任校对:秦巴达 责任印制:邱 瑶

\*

重庆大学出版社出版发行

出版人:易树平

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023) 88617190 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (营销中心)

全国新华书店经销

POD:重庆书源排校有限公司

\*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:14 字数:340 千

2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5689-0137-6 定价:40.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

# 前言

---

1800 年英国天文学家威廉姆·赫胥尔发现了红外线,从此开启了人类探测及利用红外线的历史。尤其 20 世纪 70 年代以来,红外探测技术有了长足的进步。从红外传感器的国内外发展过程来看,经历了从单个或少量数目的敏感元,到线列、焦平面,甚至高分辨率焦平面;从热敏型发展到光敏型;从制冷型到非制冷型;从早期依赖进口,到如今实现完全国产。随着红外传感器制造技术逐步完善,红外成像信息的应用也经历了一个扩展过程,从早期纯军事用途,包括远距离天空弱小目标预警、红外导弹跟踪系统、夜视侦察系统,到工业红外探伤、高压线故障检测、人体测温,再到今天的高端家用汽车夜视、安全监控等领域。但是相比可见光成像及信息处理技术而言,红外技术远未成熟,还有广阔的发展前景。

全书内容主要针对红外成像及信息处理若干关键问题展开,为作者近几年来相关工作的总结概括。全书一共有 13 章,分三大部分,分别对应红外成像、图像处理、高级信息处理三个环节。其中第二部分由周晓完成,其余部分由牟新刚完成并统稿。

红外传感器在制造成熟度上远没有达到可见光 CCD 或者 CMOS 水平。红外传感器选用敏感材料及制造工艺尚存在瓶颈,导致有一定比例的坏元,而非坏元也存在响应一致性较差的情况,称作非均匀性问题。即对相同输入不同像元的响应输出存在差异,甚至同一像元的响应输出会随使用时间与环境条件变化而变化。因此,需要首先对传感器的原始输出进行去非均匀处理,才能得到可用的图像数据。非均匀校正的方法有很多种,本书第一部分中作者概括了多种研究成果,包括单帧非均匀校正技术、基于场景自适应校正技术、盲元识别及补偿技术等,随后给出了自适应校正系统的系统方案设计。

红外线相比可见光更容易穿透大气,受霾、雾等影响要远小于可见光,所以可以实现比可见光更远的探测距离。因此,远距离红外小目标探测技术成为红外成像信息处理中的典型应用之一。当目标处于接近极限远的距离时,目标辐射到探测器的能量非常少,与背景信号难以分解开来。因此,如何从复杂的背景目标中快速检测出弱小目标是红外信息处理的一个难题。本书第二部分给出了作者近年来的相关研究结果总结,首先建立了红外弱小目标检测模型,然后讨论了红外弱小目标检测算法,着重论述了基于形态学的目标增强方法,最后给出了较实用的快速实现算法。

第三部分内容针对若干更高层次的增强及识别任务展开,包括图像运动复原以及三维变化的目标识别等。

本书在撰写过程中得到了武汉理工大学机电工程学院以及测控系领导的鼓励和支持,并为本书提供了宝贵意见,特在此向他们表示衷心感谢。本书的出版得到了重庆大学出版社的支持,谨在此一并表示感谢。

编 者

2016 年 8 月

# 目 录

## 第一篇 红外探测器非均匀性校正

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 1 红外探测器成像基础 .....           | 2  |
| 1.1 红外成像机理 .....            | 2  |
| 1.2 红外探测器非均匀性校正技术综述 .....   | 6  |
| 1.3 小结 .....                | 13 |
| 参考文献 .....                  | 14 |
| 2 基于混合高斯模型的非均匀性校正算法 .....   | 18 |
| 2.1 时域高通滤波校正算法 .....        | 18 |
| 2.2 背景建模算法 .....            | 23 |
| 2.3 基于混合高斯模型的非均匀性校正算法 ..... | 24 |
| 2.4 实验结果 .....              | 26 |
| 2.5 小结 .....                | 34 |
| 参考文献 .....                  | 34 |
| 3 基于异性扩散的神经网络校正算法 .....     | 36 |
| 3.1 原始的神经网络校正算法 .....       | 36 |
| 3.2 基于异性扩散的神经网络校正算法 .....   | 41 |
| 3.3 实验结果及分析 .....           | 46 |

|     |                      |    |
|-----|----------------------|----|
| 3.4 | 小结                   | 50 |
|     | 参考文献                 | 50 |
| 4   | 基于最大似然估计的非均匀性校正算法    | 53 |
| 4.1 | 引言                   | 53 |
| 4.2 | 基于最大似然估计的非均匀性校正算法    | 54 |
| 4.3 | 鬼影问题分析               | 62 |
| 4.4 | 实验结果                 | 65 |
| 4.5 | 小结                   | 69 |
|     | 参考文献                 | 70 |
| 5   | 红外焦平面阵列无效像元检测与补偿算法研究 | 72 |
| 5.1 | 无效像元种类               | 72 |
| 5.2 | 无效像元检测算法             | 78 |
| 5.3 | 无效像元补偿算法             | 85 |
| 5.4 | 小结                   | 88 |
|     | 参考文献                 | 88 |
| 6   | 红外探测器自适应非均匀性校正系统设计   | 89 |
| 6.1 | 系统功能和要求              | 89 |
| 6.2 | 系统总体设计               | 90 |
| 6.3 | 系统关键模块详细设计           | 92 |
| 6.4 | 小结                   | 96 |
|     | 参考文献                 | 96 |

## 第二篇 红外小目标检测

|     |            |     |
|-----|------------|-----|
| 7   | 红外弱小目标检测模型 | 98  |
| 7.1 | 红外图像成像特性分析 | 98  |
| 7.2 | 目标的成像特性    | 99  |
| 7.3 | 背景的成像特性    | 102 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 7.4 噪声 .....                 | 103 |
| 7.5 目标与背景和噪声成像特性比较 .....     | 105 |
| 7.6 红外弱小目标检测模型 .....         | 109 |
| 7.7 小结 .....                 | 111 |
| 参考文献 .....                   | 111 |
| 8 远距离小目标检测算法研究 .....         | 113 |
| 8.1 常用的弱小目标检测算法 .....        | 113 |
| 8.2 基于局部目标可检测度的小目标检测算法 ..... | 117 |
| 8.3 基于形态特征滤波的小目标检测算法 .....   | 122 |
| 参考文献 .....                   | 127 |
| 9 多结构元形态学小目标增强方法 .....       | 129 |
| 9.1 灰度数学形态学 Tophat 变换 .....  | 129 |
| 9.2 复合型形态学结构元 .....          | 130 |
| 9.3 滤波结果图像分布规律 .....         | 131 |
| 9.4 红外图像纹理模型 .....           | 132 |
| 9.5 形态学滤波器空域分析 .....         | 133 |
| 9.6 形态学滤波器的频率特性分析 .....      | 138 |
| 参考文献 .....                   | 142 |
| 10 多结构元级联滤波方法 .....          | 144 |
| 10.1 引言 .....                | 144 |
| 10.2 多结构元两级级联滤波原理 .....      | 145 |
| 10.3 基于硬件数字逻辑实现方法 .....      | 145 |
| 10.4 目标检测算法评价准则 .....        | 146 |
| 10.5 对比实验 .....              | 147 |
| 10.6 小结 .....                | 152 |
| 参考文献 .....                   | 153 |
| 11 快速局部信噪比计算方法 .....         | 154 |
| 11.1 引言 .....                | 154 |

|      |                             |     |
|------|-----------------------------|-----|
| 11.2 | 标准信噪比计算方法 .....             | 155 |
| 11.3 | 基于积分图像的局部信噪比计算 .....        | 155 |
| 11.4 | PGM 模型下的快速标准差计算方法 .....     | 160 |
| 11.5 | 基于 PGM 模型的局部信噪比快速计算方法 ..... | 167 |
| 11.6 | 小结 .....                    | 171 |
|      | 参考文献 .....                  | 171 |

### 第三篇 飞行器目标信息处理

|      |                          |     |
|------|--------------------------|-----|
| 12   | 飞行器成像复原算法研究 .....        | 174 |
| 12.1 | 图像复原算法研究现状 .....         | 174 |
| 12.2 | 电子稳像 .....               | 175 |
| 12.3 | 运动模糊模型及其复原 .....         | 185 |
| 12.4 | 基于最大峰谷比的运动模糊参数估计算法 ..... | 196 |
| 12.5 | 实验结果 .....               | 198 |
| 12.6 | 小结 .....                 | 200 |
|      | 参考文献 .....               | 200 |
| 13   | 基于三维目标特征空间的目标识别算法 .....  | 202 |
| 13.1 | 目标识别算法研究现状 .....         | 202 |
| 13.2 | 常用目标识别算法 .....           | 203 |
| 13.3 | 基于三维目标特征空间的目标识别算法 .....  | 210 |
| 13.4 | 实验结果 .....               | 212 |
| 13.5 | 小结 .....                 | 213 |
|      | 参考文献 .....               | 214 |

# 第一篇

## 红外探测器非均匀性校正

---

红外探测器是获取目标场景信息的重要工具,在成像制导领域获得了广泛的应用。由于自身材料和制造工艺水平的限制,红外探测器各探测元间响应的非均匀性较大,严重影响了成像质量,从而限制了系统的探测性能。更为复杂的是,探测元响应参数会随时间缓慢漂移,使得无法通过单次定标的方法彻底解决非均匀性问题。因此,非均匀性校正是红外成像的关键技术,是自动目标识别研究领域的热点课题之一。由于国内红外探测器在一个较长时期内还要依赖进口,而且高性能探测器还处于限制进口的状态,因此,深入研究红外探测器非均匀性校正技术,最大限度挖掘红外探测器性能,有着特殊的意义。

# 1

## 红外探测器成像基础

本章首先介绍了红外辐射和红外成像的原理,然后分析了红外成像非均匀性产生的原因,最后介绍了非均匀性校正技术的国内外研究现状。

### 1.1 红外成像机理

1672 年,牛顿使用分光棱镜把太阳光(白光)分解为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等各色单色光,证实了太阳光(白光)是由各种颜色的光复合而成的。1800 年,英国天文学家赫谢耳在测量太阳光不同谱段热效应时,发现红色光谱外存在着一种人眼看不见的热线,光线是由不同颜色的光谱组成的。此发现揭开了人类认识红外现象的序幕<sup>[1-4]</sup>。这种看不见的热线位于红色光外侧,称为红外线,又称为红外辐射。1859 年,基尔霍夫根据热平衡原理推导出物体的辐射与吸收所遵循的基尔霍夫定律,该定律引出了黑体的概念。1900 年,普朗克在量子假设的前提下得出了黑体辐射的普朗克公式,标志着红外辐射基本理论的建立。

#### 1.1.1 黑体辐射定律

黑体是指在任何情况下对一切波长的入射辐射吸收率都等于 1 的物体,它的吸收率和发射率均为 1。因为自然界中实际存在的任何物体对不同波长的入射辐射都有一定的反射(吸收率不等于 1),所以,黑体只是人们抽象出来的一种理想化的物体模型。但黑体热辐射的基本规律是红外研究及应用的基础,它揭示了黑体发射的红外热辐射随温度及波长变化的定量关系。下面重点介绍其中的 3 个基本定律。

##### (1) 普朗克辐射定律

一个温度为  $T$  的黑体,在单位立体角内向空间发射的辐射功率与波长和温度的关系为:

$$W(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (1.1)$$

式中,  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  为普朗克常量,  $c = 2.997\,925 \times 10^5 \text{ km/s}$  为真空中电磁波的传播速度。

图 1.1 给出了 5 组温度 (分别是 5 500 K, 5 000 K, 4 500 K, 4 000 K, 2 500 K) 下的黑体辐射功率曲线。温度越高, 黑体的空间辐射能量越强。同时可以看出每种温度下的黑体辐射功率均存在着一个峰值, 该峰值对应的电磁波波长被称为本征辐射波长。温度越高, 本征辐射波长越短, 即维恩位移定律。

对普朗克公式中的波长求导, 并令其导数为 0 (求最大值), 可以得到维恩位移定律。

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2.897\,6 \times 10^{-3} (\text{m} \cdot \text{K}) \quad (1.2)$$

根据维恩位移定律可以成功地解释物体发光的颜色。当钢材被加热到 1 000 K 左右时, 其颜色为暗红色。当温度逐渐增加, 就会依次变成红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等颜色。这些颜色跟用维恩位移定律的数学表达式计算所求的峰值波长所对应的颜色相吻合。

通过维恩位移定律可以计算出常见物体的峰值辐射波长。如星云温度通常为几千摄氏度, 对应的波长小于  $2\,\mu\text{m}$ 。喷气飞机尾翼 (650 K) 辐射的峰值波长大概为  $4.5\,\mu\text{m}$ 。正常体温人体 (310 K) 辐射的峰值波长为  $9.3\,\mu\text{m}$ 。自然场景下绝大多数物体 (233 ~ 373 K) 辐射的峰值波长为  $7.78 \sim 12.4\,\mu\text{m}$ 。上述波长均位于电磁波谱的红外波段, 故热辐射又称为红外辐射。

## (2) 斯蒂芬-波尔兹曼定律

斯蒂芬-波尔兹曼定律描述的是黑体单位表面积向整个半球空间发射的所有波长的总辐射功率  $M_b(T)$  (简称为全辐射度) 随其温度的变化规律。因此, 该定律为普朗克辐射定律对波长积分得到:

$$M_b(T) = \int_0^{\infty} W(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (1.3)$$

式中,  $\sigma = 5.669\,7 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ , 称为斯蒂芬-波尔兹曼常数。斯蒂芬-波尔兹曼定律表明, 凡是温度高于绝对零度的物体都会自发地向外发射红外热辐射, 而且黑体单位表面积发射的总辐射功率与开氏温度的 4 次方成正比。因此, 只要当温度有较小变化时, 就将会引起物体发射的辐射功率很大变化。可以通过探测黑体单位表面积发射的总辐射功率来确定黑体的温度。因此, 斯蒂芬-波尔兹曼定律是所有红外测温的基础。

## (3) 朗伯余弦定律

朗伯余弦定律是指黑体在任意方向上的辐射强度与观测方向相对于辐射表面法线夹角的余弦成正比。

$$I(\theta) = I_0 \cos(\theta) \quad (1.4)$$

式中,  $I_0$  为辐射表面法线方向上的辐射强度。此定律表明, 黑体在辐射表面法线方向的辐射最强。因此, 实际做红外检测时, 应尽可能选择在被测表面法线方向进行。如果在与法线成  $\theta$  角

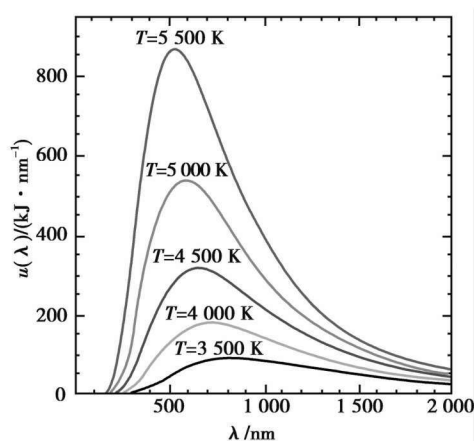


图 1.1 黑体辐射功率曲线

方向检测,则接收到的红外辐射信号将减弱成法线方向最大值的  $\cos(\theta)$  倍。

### 1.1.2 真实物体的红外辐射

黑体是理想的物理模型,实际中通常用不透明材料制成带小孔的空腔来近似黑体。真实物体的辐射出射度小于同温下黑体的辐射出射度。真实物体的红外辐射满足基尔霍夫定律,即任何物体辐射出射度  $M_s(T, \lambda)$  和吸收比  $A_s(T, \lambda)$  之比,与物体性质无关。

$$f(T, \lambda) = \frac{M_s(T, \lambda)}{A_s(T, \lambda)} \quad (1.5)$$

$f(T, \lambda)$  是与物体性质无关的普适函数,表明吸收本领大的物体,其发射本领也大,强吸收体必然是强发射体。如果该物体不能发射某一波长的辐射能,也就不能吸收此波长的辐射能。

实际物体的辐射度除了依赖温度和波长外,还与构成该物体的材料性质及表面状态等因素有关。引入一个随材料性质及表面状态变化的辐射系数,即比辐射率,又称为发射率,是指物体在温度  $T$ 、波长  $\lambda$  处的辐射出射度  $M_s(T, \lambda)$  与同温度、同波长下的黑体辐射出射度  $M_B(T, \lambda)$  的比值,即

$$\varepsilon(T, \lambda) = \frac{M_s(T, \lambda)}{M_B(T, \lambda)} \quad (1.6)$$

比辐射率是一个无量纲的量,其取值范围为  $0 \sim 1$ 。比辐射率是波长  $\lambda$  的函数,由材料性质决定。斯蒂芬-波尔兹曼应用于真实物体可表示为:

$$M_s(T) = \varepsilon(T) \sigma T^4 \quad (1.7)$$

不同性质的材料因对辐射的吸收或反射性能各异,因此它们的发射性能也不同。表 1.1 给出了常见物体的发射率。利用红外进行测温时,必须要根据测量的材料进行补偿。

表 1.1 常见物体的发射率

| 物 体 | 发射率         | 物 体   | 发射率         | 物 体  | 发射率         |
|-----|-------------|-------|-------------|------|-------------|
| 沥青  | 0.9 ~ 0.98  | 大理石   | 0.94        | 铬氧化物 | 0.81        |
| 混凝土 | 0.94        | 石膏    | 0.8 ~ 0.9   | 铜氧化物 | 0.78        |
| 水泥  | 0.96        | 砖     | 0.93 ~ 0.96 | 铁氧化物 | 0.78 ~ 0.82 |
| 沙子  | 0.9         | 布(黑色) | 0.98        | 镍氧化物 | 0.85 ~ 0.9  |
| 泥土  | 0.92 ~ 0.96 | 人体皮肤  | 0.98        | 锡氧化物 | 0.3 ~ 0.55  |
| 水   | 0.92 ~ 0.96 | 肥皂泡   | 0.75 ~ 0.8  | 钛氧化物 | 0.5         |
| 冰   | 0.96 ~ 0.98 | 漆器    | 0.8 ~ 0.95  | 镁氧化物 | 0.15 ~ 0.45 |
| 雪   | 0.83        | 橡胶    | 0.94        | 不锈钢  | 0.2 ~ 0.3   |
| 玻璃  | 0.9 ~ 0.95  | 木材    | 0.9         | 铝材   | 0.2 ~ 0.3   |
| 陶瓷  | 0.9 ~ 0.94  | 纸     | 0.7 ~ 0.94  | 塑料   | 0.7 ~ 0.9   |

另外,物体的表面粗糙度的不同也会对反射率造成影响。这种影响的大小同时取决于材料的种类。例如,对于非金属电介质材料,发射率受表面粗糙度影响较小或无关。但是对于金属材料而言,表面粗糙度将对发射率产生较大影响。例如熟铁,当表面状况为毛面,温度为 300 K 时,发射率为 0.94;当表面状况为抛光、温度为 310 K 时,发射率仅为 0.28。

### 1.1.3 红外辐射的大气衰减

红外辐射自目标发出后,要在大气中传输很远的距离才能到达探测仪器,因此要受到大气中各种因素的影响。大气对物体的辐射有吸收、散射、折射等物理过程,对物体的辐射强度会有衰减作用。大气中的水蒸气、二氧化碳和臭氧等对红外辐射的吸收作用较强。大气中的气体分子和气溶胶则对红外辐射的散射较强。

大气对红外电磁波的衰减与波长相关,有明显的选择性。红外波在大气中有三个波段区间能基本完成透过,称为大气窗口,分为近红外( $0.76 \sim 1.1 \mu\text{m}$ )、中红外( $3 \sim 5 \mu\text{m}$ )、远红外( $8 \sim 14 \mu\text{m}$ )。图 1.2 给出了红外辐射的大气窗口,其中 3 个向下箭头分别指向了 3 个对应的大气窗口。

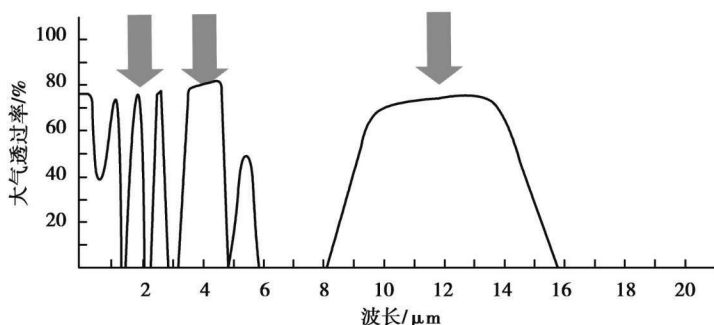


图 1.2 红外辐射的大气窗口

根据普朗克辐射定律计算待探测目标的主要辐射范围和峰值辐射波长,选择对应波段的红外探测器。如星云温度通常为几千摄氏度,对应的波长小于  $2 \mu\text{m}$ ,应选择短波红外探测器。喷气飞机尾翼( $650 \text{ K}$ )辐射的峰值波长大概为  $4.5 \mu\text{m}$ ,应选择中波红外探测器。正常体温人体( $310 \text{ K}$ )辐射的峰值波长为  $9.3 \mu\text{m}$ ,应选择长波红外探测器。

当进行远距离红外测温时,必须考虑大气衰减的影响,要对测量结果进行修正和补偿。

### 1.1.4 红外成像原理

自然界中的一切物体,只要它的温度高于绝对温度( $273 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ),就存在分子和原子无规则的运动,其表面就不断地辐射红外线。红外线是一种电磁波,它的波长范围为  $0.78 \sim 1\,000 \mu\text{m}$ ,不为人眼所见。红外成像设备就是探测这种物体表面辐射的不为人眼所见的红外线的设备。它反映物体表面的红外辐射场,即温度场。

红外成像系统实现光电转换功能,将目标热辐射转换成电信号。图 1.3 给出了红外的成像过程,目标发出的红外辐射经大气传输到达红外成像系统。光学镜头将红外辐射聚焦到红外探测器上,经过光电转换生成与辐射相对应的电信号。前置放大器的功能是对生成的弱信号进行调理,包括增益和偏置调整、模数转换等。信号处理模块主要实现非均匀性校正、无效像元补偿、视频合成等功能。

红外探测器是红外成像系统的核心部件,其发展伴随着材料科学和电子科学的兴起和进步<sup>[5-6]</sup>。第一代红外成像系统出现在 20 世纪 70 年代以前,其采用线列探测器,通过复杂的光机扫描实现二维成像。到 70 年代中期,出现了红外焦平面阵列(Infrared Focal Plane Array,

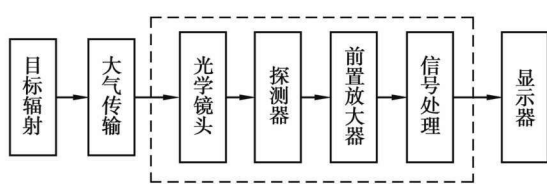


图 1.3 红外成像过程(虚线框内为红外成像系统)

IRFPA)探测器,其采用电子扫描成像,标志着第二代红外成像系统的出现。与线列探测器相比,焦平面阵列探测器具有空间分辨率高、结构简单、帧频高等优点。进入 21 世纪,红外探测器朝着第三代的方向发展,具有大面阵(百万像素以上)、高帧频(高于 100 Hz)、多谱段探测、强大的信号处理能力(自适应的非均匀性校正、运动检测、边缘检测、多帧平均)等特点<sup>[7-9]</sup>。根据探测机理的不同,红外探测器分为光子探测器和热探测器两大类。光子探测器具有量子效率高、响应时间快、信噪比高等优点,但因为需要制冷,导致其体积大、质量大、价格贵。因此,光子探测器常应用于军事领域,如星载、机载、弹载的红外搜索跟踪系统。其常用材料包括 HgCdTe、InSb、PtSi。热探测器工作于常温,不需要昂贵的制冷机,但是其敏感度低、响应速度慢。热探测器在轻型武器、夜视导航、工业、医学、消防、海关等领域得到了广泛的应用。近年来,非制冷焦平面阵列探测器取得了飞速发展,其在可靠性、价格、体积、功耗、可操作性等方面都具有绝对优势,代表了红外成像系统未来的发展方向<sup>[10-13]</sup>。非制冷探测器的常用材料包括多晶硅和氧化钒。

红外辐射具有全天候成像的能力,红外辐射透过烟雾的能力较强,因此红外探测器在天文、气象、医学、军事、文物鉴定、数据传输、智能交通、火灾探测、警用安防、电力、故障诊断等领域得到了广泛的应用。

## 1.2 红外探测器非均匀性校正技术综述

由于自身材料和制造工艺水平的限制,红外探测器各像元间响应的非均匀性较大,严重影响了成像质量,降低了系统的温度分辨率、空间分辨率、探测和识别距离。更加复杂的是探测元响应会随着外部条件的改变而发生缓慢的漂移,使得无法通过单次的定标彻底解决非均匀性问题。因此,非均匀性校正是红外成像系统的一个关键环节,是探测器应用的必要步骤。自适应的校正算法,即基于场景的校正算法,能够随场景内容的变化自适应地调整校正系数,解决或降低探测器响应漂移问题,是目前校正算法研究的热点。

目前,国内红外探测器研制水平与国外相比仍存在很大差距,工程实用的探测器严重依赖进口,无法从源头上保证探测器的质量。因此,从后端利用现代信号处理技术对非均匀性进行自适应的校正具有重要的现实意义。

### 1.2.1 非均匀性的定义

非均匀性是指在外界同一均匀辐射场输入时,探测器各探测元输出响应不一致,在图像上表现为空间噪声或固定模式噪声<sup>[14-16]</sup>。这种空间噪声不能通过多帧处理的方法得到抑制,严

重影响了红外系统的探测和识别性能<sup>[17]</sup>。图 1.4 和图 1.5 是分别采集的两幅红外图像,分辨率为  $320 \times 240$ ,图像位数为 14 位,显示时进行了平台直方图均衡变换。图 1.4(a) 是均匀的黑体图像,其非均匀性为 5%,如果不进行非均匀性校正,探测器将根本无法工作。图 1.5(a) 是真实的天空场景图像,探测器开机时进行了单点校正,但由于探测器工作条件的变化,探测元的响应发生了漂移,从图中仍然可以看到明显的非均匀性噪声,严重影响了目标检测和跟踪。图 1.5(a) 黑色框中心是一个远距离的飞机目标,但由于非均匀性噪声的干扰,目标几乎淹没在噪声中。

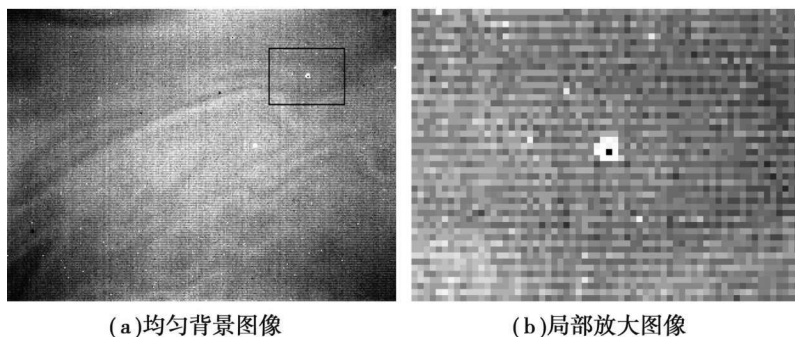


图 1.4 均匀背景红外图像

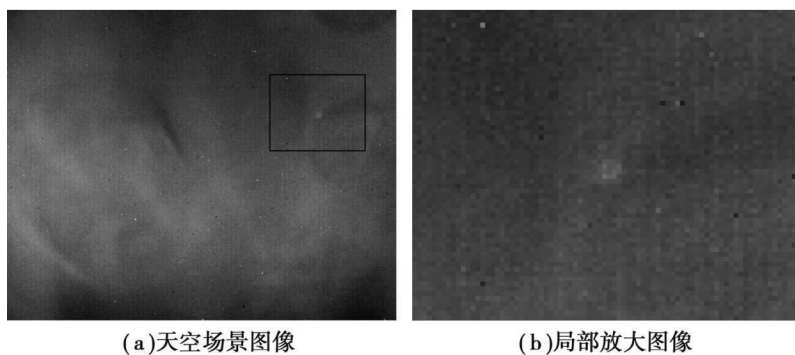


图 1.5 天空场景红外图像

非均匀性的极端情况表现为尖峰状干扰,这种干扰不能通过校正的方法消除。这类像元称为无效像元,其对弱小目标的检测和跟踪危害极大,必须对其进行补偿。本书将无效像元的检测和补偿纳入非均匀性校正的范围。无效像元在图像中表现为局部的亮点或暗点。图 1.4(b) 是图 1.4(a) 矩形框内图像的局部放大,图像中心区域为一个连续分布的团状无效像元,其面积为 15 个像素。无效像元的存在改变了图像的统计特性,进而影响了分割门限的计算、相关值的计算等,导致目标检测和跟踪失败。图 1.5(b) 是图 1.5(a) 矩形框内图像的局部放大,真实目标周围存在着无效像元(亮点和暗点),导致目标跟踪不稳定。

研究红外探测器的成像模型,进而找出非均匀性产生的根源,用于指导相应的校正方法,具有重要的意义。从红外成像过程可以看出,非均匀性的产生包含了光学系统的影响、探测器本身的响应模型、前置放大器的影响。目前常用的红外焦平面阵列探测器响应模型为 Mooney 模型<sup>[18]</sup>,该模型包含了光学系统和探测器自身响应两方面。对绝对温度为  $T$  的黑体辐射,在单个积分时间内,IRFPA 中第  $i$  个单元响应的电荷数  $N_i(T)$  为:

$$N_i(T) = \left[ \tau_{eff} \tau_{int} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta_i(\lambda) L(\lambda, T) d\lambda \right] A_i \Omega_i + D_i \quad (1.8)$$

式中,  $\Omega_i = \frac{\pi(\cos \theta_i)^4}{4(F/\#)^2 + 1}$ 。

表 1.2 给出了公式(1.8)中所涉及变量的含义。

表 1.2 Mooney 响应模型中各变量的含义

| 变 量                      | 定 义                               |
|--------------------------|-----------------------------------|
| $\tau_{eff}$             | 光学系统的透射率                          |
| $\tau_{int}$             | IRFPA 积分时间                        |
| $[\lambda_1, \lambda_2]$ | 光学系统的光谱响应的波长范围                    |
| $\eta_i(\lambda)$        | 像元 $i$ 在波长 $\lambda$ 处的量子效率       |
| $L(\lambda, T)$          | 绝对温度为 $T$ 时黑体在波长 $\lambda$ 处的辐射强度 |
| $\theta_i$               | 像元 $i$ 相对于光学系统中心轴的偏移角             |
| $\Omega_i$               | 像元 $i$ 相对于光学系统出瞳的立体角              |
| $F/\#$                   | 光学系统的 $F$ 数                       |
| $A_i$                    | 像元 $i$ 的光敏面积                      |
| $D_i$                    | 像元 $i$ 的暗电流在积分时间内累积的电荷数           |

带有下标  $i$  的变量均与空间坐标有关,其最终导致了探测元响应的非均匀性。式(1.8)给出了非均匀性主要的来源:立体角  $\Omega_i$ 、光敏面积  $A_i$ 、暗电流累积电荷  $D_i$  和量子效率  $\eta_i(\lambda)$ 。图 1.4 中图像四个角落偏暗,主要是由光学系统造成的。当光学系统的视场较小时,可以忽略不同探测元立体角的差异。探测元光敏面积的非均匀性主要由光刻技术水平决定。决定暗电流累积电荷和量子效率的因素主要包括制造工艺和工作条件(偏置电压和工作温度)。上述 Mooney 模型没有考虑读出电路和前置放大器的影响。

综合考虑各种因素的影响,红外探测元的响应是非线性的,其形状类似于 S 形曲线<sup>[19]</sup>,如图 1.6 所示。其中,A 表示响应的截止区、B 表示线性响应区(正常工作区)、C 表示响应饱和区。当探测器工作范围较小时可近似用线性模型代替。图 1.7 是从实际采集的红外序列中选取的两个正常像元的响应特性曲线。实验数据来源于探测器对可调节温度的黑体成像。黑体温度范围为  $-10 \sim 40$  °C,每次递增 5 °C。上下两条曲线为两个像元的时间平均响应值。相等的辐射输入,但像元的响应曲线并不相同,这就是非均匀性。校正的目的就是将两条不同的响应曲线校正到同一期望输出曲线。实验中,期望输出曲线为两个像元响应的平均值。从响应特性曲线也可看出,探测元的响应可近似用线性模型表示。

正确度量 IRFPA 的非均匀性,对于评价红外成像系统的性能和非均匀性校正算法的性能都具有重要意义。常用的评价指标分为基于定标的评价和基于场景的评价。

国家标准<sup>[20]</sup>用响应非均匀性  $U_R$  评价采集于参考辐射源的数据:

$$U_R = \frac{1}{V_s} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [V_s(i) - \overline{V_s}]^2} \quad (1.9)$$

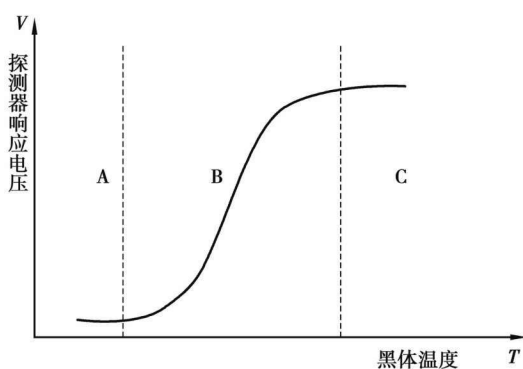


图 1.6 探测元 S 形响应曲线

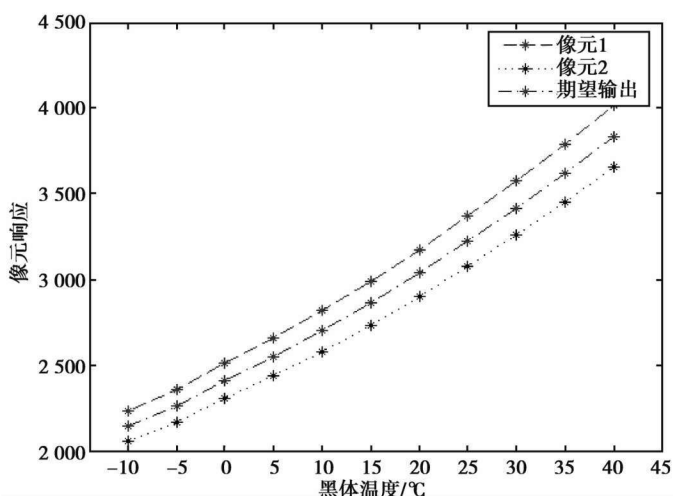


图 1.7 红外焦平面阵列像元响应曲线

式中,  $V_s(i)$  为探测元  $i$  的响应输出电压,  $V_s$  为有效像元的平均响应输出电压,  $N$  为 IRFPA 有效像元数量。响应非均匀性指标剔除了无效像元的影响。

基于场景的评价方法分为已知真实场景图像和未知真实场景图像两种。如果已知真实的场景图像, 可以采用均方根误差  $RMSE$  来评价:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{T}_i - T_i)^2} \quad (1.10)$$

式中,  $\hat{T}_i$  和  $T_i$  分别为第  $i$  个探测元对应场景的估计值和真实值。由于  $RMSE$  需要知道真实的场景图像, 其常用于对仿真的非均匀性校正结果进行评价。

峰值信噪比  $PSNR$  也是一种常用的已知真实场景图像的非均匀性评价方法:

$$PSNR = 20 \log_{10} \left( \frac{2^b - 1}{RMSE} \right) \quad (1.11)$$

式中,  $b$  是每个像元的有效位数, 对于本书所用红外图像其值为 14。

如果无法得到真实的场景图像, 可用粗糙度  $\rho$  评价非均匀性<sup>[21]</sup>, 其定义为:

$$\rho = \frac{\|h_1 * f\|_1 + \|h_2 * f\|_1}{\|f\|_1} \quad (1.12)$$