

# 红外焦平面器件成像的校正技术

崔洪州\*

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

## 1 红外焦平面器件成像

红外探测器的发展, 经历了单元探测器, 线列探测器等阶段, 逐渐过渡到面阵型探测器。

红外焦平面阵列 (IRFPA) 是近年来发展起来的一项新的探测器。探测器的结构由致冷型发展到非致冷型, 逐渐成为红外探测器的主流。当前它已广泛地应用于各方面, 如电力系统和消防系统, 而它在军事领域的应用则更加广泛。

红外焦平面探测器相对于单元探测器和线列探测器具有体积小、功耗低、探测面宽、可同时监视多个目标等特点。由于红外焦平面阵列由排成矩阵型的许多微小探测单元组成, 在一次成像时间内即可对某一区域成像, 真正实现了即时成像, 因此采用红外焦平面阵列的成像系统又叫凝视成像系统。由于它免除了光学-机械扫描结构, 体积明显缩小。其多个微小探测单元可在一次成像时间内分别探测多个点, 探测面宽, 因此在红外跟踪、预警、制导等方面具有很大的用处。在民用方面, 电力系统和消防系统也广泛采用这种探测器。电力系统应用红外焦平面探测器检查大面积的电力布线时, 可以发现电线的走向 (现代电力布线多数是暗线, 由表面上看不到电线的走向, 而用红外探测器却可以很容易探测到) 以及电线的负载是否过大等 (因电线负载过大, 温度会上升到很高, 因此很容易探测到)。在消防方面, 利用红外辐射在烟雾中透过率高的特点, 可以监视火灾的发生情况、发生位置、大小, 起火的物品以及有无人员被困在火灾现场中等。此外, 应用红外焦平面探测器, 医生可以检查病人的体表

温度分布。这对皮肤病和浅体表病症的发现、定位等都有重要的意义。

红外焦平面探测器相对于其它类型的探测器有许多优点, 但是它本身也有缺点。由于是焦平面探测器阵列, 它需要一些额外的辅助电路, 如读出电路、校正电路等。有一些问题, 如红外探测器本身的固定图形噪声 (FPN), 如果不能有效地去除, 将会降低探测效率, 甚至会将有用信号淹没, 造成无法进行探测。因此必须对可能影响焦平面探测器性能的各种因素进行深入的分析研究, 设法消除或尽量减小它的影响。红外焦平面器件在进行成像时, 会受到各种因素的影响, 这会使成像质量大打折扣, 导致图像畸变, 严重时甚至会使得无法找出有用信息。畸变从狭义上来讲仅指由于光学系统的非线性引起的图像扭曲变形, 广义上的畸变包括由于探测器的影响引起的图像质量下降, 由于运动而引起的图像扭曲变形等, 即由于各种原因引起的最终图像质量下降统称为畸变。产生图像畸变的原因有很多, 从系统的角度出发看问题, 在红外凝视成像系统中红外焦平面探测器是成像系统的核心, 因此探测器性能对成像质量影响最大; 其次, 红外凝视成像系统中的光学系统对成像质量也有很大影响; 除此之外, 成像系统平台也会产生各种影响因素, 特别是在成像系统位于高速移动的平台时。为了便于讨论, 本文把成像的影响因素分为两大类: 红外焦平面探测器性能的影响因素和成像辅助系统的影响因素 (包括光学系统和平台系统), 对它们分别进行分析, 并提出修正方法。

\* 2000 级硕博连读研究生

## 2 影响红外焦平面探测器性能的因素及其校正技术

红外焦平面器件类型很多,不同材料、不同加工工艺的器件性能差别很大,响应波长也不同。红外焦平面器件主要有以下 5 类: 1. 硅化铂(PtSi)肖特基势垒型; 2. 光伏型碲化铟(InSb)CID 面阵型; 3. 光伏型碲镉汞(HgCdTe); 4. 热释电材料; 5. 热敏电阻型。探讨材料、工艺对探测器性能的影响因素是器件加工、研制的任务,因此本文不予以讨论。本文只对可通过外部辅助电路来改善的性能加以讨论。

影响红外焦平面探测器性能的因素有很多。除探测器元器件材料的差别外,还有复位噪声、固定图形噪声、单元探测器响应率非均匀性等。下面主要介绍针对这几种影响因素的校正方法。

### 2.1 复位噪声与相关双采样技术

CCD 的信号输出结构有电流输出和电压输出两种形式,电压输出方式主要包括浮置扩散放大器输出和浮置栅放大器输出。浮置扩散放大器制造工艺简单,温度稳定性好,是目前普遍采用的电荷输出方式。浮置扩散放大器的栅级有一个浮置扩散区,在读出时,信号电荷由 CCD 进入浮置扩散区并转换成电压信号后放大输出。由于它在电压信号读出后有一个复位过程,以清除浮置扩散区内的残余电荷,由此引入的噪声称为复位噪声。消除复位噪声采用的方法是相关双采样技术,其原理是对输出进行两次采样。首次采样得到复位噪声电压,第二次采样得到信号加复位噪声电压,两次采样值相减,就可以抵消复位噪声,包括 KTC 和  $1/f$  噪声。这种相关双采样技术对于 MOS 开关型读出电路特别重要。实现相关双采样技术,可采用模拟的或数字的方法,一般都应将相应电路集成在焦平面器件芯片中。

### 2.2 固定图形噪声与帧相减技术

由于像元的暗电流噪声,光学系统成像和背景在焦平面上照射的不一致性,会在“零”背景下出现固定图形噪声,有时会很大,以至

掩盖某些室温的目标。探测器单元的响应电压可用下式表示:

$$V_i(\phi) = R_i\phi + B_i \quad (1)$$

式中  $V_i(\phi)$  为  $i$  像元的信号电压,  $\phi$  为照度,  $R_i$  为响应率,  $B_i$  为固定图形噪声。

消除固定图形噪声的方法是采用帧相减技术。即先在均匀背景下,采集一帧数据存入背景存储器中,然后当系统正式工作时,按顺序将每个像元接收的信号减去存储器中相应像元的背景数据,从而得到一帧清晰的图像,为了减少偶然因素的影响,常用多次测量求平均值的方法,代替单帧背景图像,以提高精度。

### 2.3 响应率非均匀性校正

由于探测器单元的个体差异,每个单元的响应率不可能完全相同。这种不一致将引起输出信号的变化。对应于相同的温度,不同的响应率会给出不同的响应电压,从而引起误差。为了提高系统的温度分辨率,必须进行非均匀性校正。

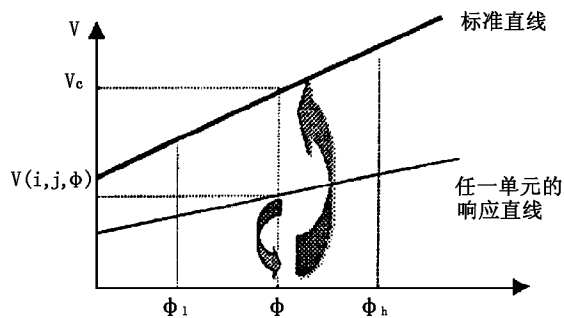


图 1 两点法非均匀性校正示意图

非均匀性校正的方法很多,也是近年来国内探讨的热点。按响应率分,可分为线性校正和非线性校正。按校正点选取法不同,可分为单点式校正、两点式校正、多点式校正以及自适应式校正。假设响应率为线性的,可采用单点式校正和两点式校正。假设响应率为非线性的,则要对响应率曲线进行分段直线近似,采用多点进行校正。由于红外图像数据速率高,为完成实时校正,一般采用两点式校正。具体

的做法是：在所测量的温度范围内，对两个不同温度的均匀面源黑体分别进行成像，可以求出各个单元探测器的校正系数。实际校正时，

$$V_c = \frac{\bar{V}(\phi_h) - \bar{V}(\phi_l)}{V(i, j, \phi_h) - V(i, j, \phi_l)} V(i, j, \phi) + \frac{\bar{V}(\phi_l)V(i, j, \phi_h) - \bar{V}(\phi_h)V(i, j, \phi_l)}{V(i, j, \phi_h) - V(i, j, \phi_l)} \quad (2)$$

非均匀性校正的过程如下：第一步测得  $V(i, j, \phi)$ ，第二步由  $V(i, j, \phi) = R_{i, j} \phi + O_{i, j}$  求出  $\phi$  值，第三步由  $\phi$  值映射出标准直线上的  $V$  值，我们称之为校正电压  $V_c$ 。即  $V(i, j, \phi) \rightarrow \phi \rightarrow V_c$ 。

### 3 成像辅助系统的影响因素及其校正技术

成像辅助系统包括光学系统和平台系统。实际应用中，红外焦平面探测器往往安装在快速移动的平台，如遥感卫星平台、航空平台和车载平台等。在成像过程中，由于这些平台的移动，图像不可避免地要产生畸变。探测器前方的光学系统，由于加工工艺误差，也会引入各种畸变。对于透射成像系统，由于透射率的变化，会在成像时产生桶形畸变或枕形畸变。畸变的后果是图像失真，轻者影响视觉判读，重者根本无法判读，必须进行校正。因此必须研究畸变的成因及消除方法。

#### 3.1 由于遥感平台运动而引起的畸变

遥感成像时，飞行器姿态（侧滚、俯仰、偏航）、高度、速度、地球自转等因素会造成图像相对于地面发生畸变。在成像时，像元会发生挤压、扭曲、伸展、偏移等现象，从而造成图像

对每个像元利用校正系数校正到统一的响应率上去，如图 1 所示。

两点校正公式为：

模糊。这类畸变是随机产生的，没有固定的规律，因此针对这类畸变，主要的校正方法是选用地面控制点 (GCP) 的方式来进行校正。校正前，预先选取地面上坐标已知的控制点，再读出图中相应的像点的坐标，建立畸变关系式，则这一个区域中其它点的坐标也可由此关系式求出。地面控制点坐标的计算可采用在图像上画上方格来计算，如图 2 所示。

这种方法有它的不足之处：1. 用这种方法来校正畸变会受到地面控制点的限制。首先，这些控制点分布应合理布局，基本上要均匀分布；其次，控制点的数量应适当，太多则计算量大，太少则几何校正精度不够。2. 这种校正基于这样的假设：即，地面控制点包围的区域内各点有相同的畸变规律。有些畸变并不如此，如下面讲到的光学畸变。此时，就应采用其它类型的校正方法。

#### 3.2 光学成像系统的几何畸变

光学成像系统位于红外焦平面探测器的前方，是整个系统的重要组成部分。成像系统有透射成像和反射成像之分。对于红外探测器来说，由于红外波段的透光材料品种较少，在设

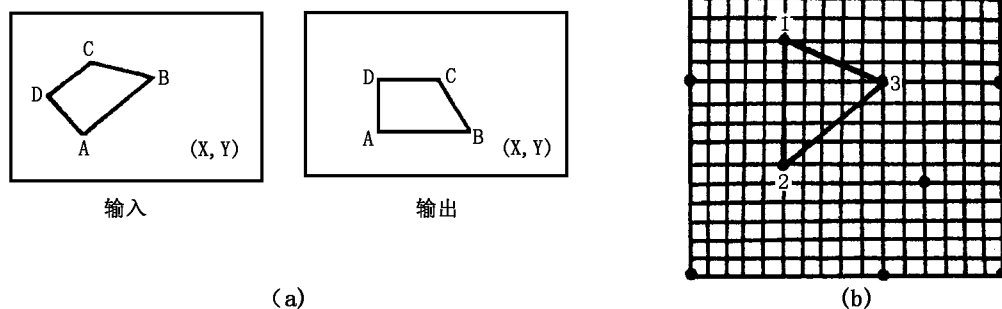


图 2 a) 利用地面控制点进行畸变校正的示意图； b) 地面控制点坐标的计算图

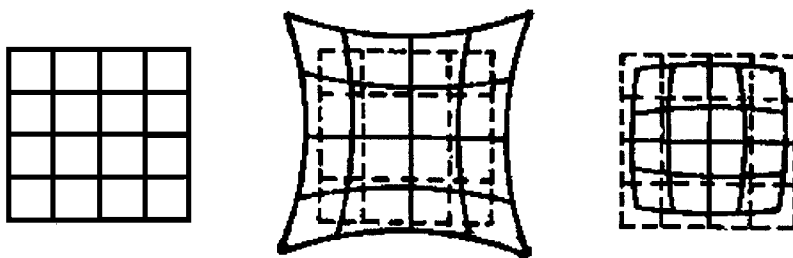


图 3 畸变示意图。左为标准方格，中为枕形畸变，右为桶形畸变

计时较多地采用反射式成像光学系统，但是视场角太小。红外焦平面成像系统需要整幅图像的视场，因此设计时必须更多地采用透射系统。一般透射式光学系统都会存在畸变，对于大视场，畸变会更明显，必须设法消除或降低。设计时可以采用对称式光学系统来校正畸变，但是某些情况下由于尺寸等条件的限制，无法采用光学方法来校正，此时就要用其它方法来设法消除或降低畸变。

目前，针对这类畸变，已经提出来的校正方法有控制点法和模式法两种。控制点法包括多项式地址修正法和有限元法。模式法包括基于相机相对目标姿态和位置模型的外参数地址修正法和基于相机光学特性模型的内参数地址修正法。

多项式地址修正法无法用于实时处理，并且存在振荡现象。基于相机相对目标姿态和位置模型的外参数地址修正法只能完成透视失真校正，不能完成镜头的非线性失真校正。另一种精确的校正方法是基于相机的光学特性模型，建立几何失真模型，进而建立地址修正方程，

完成几何失真的校正，但是计算复杂而且计算量较大。下面结合工程实际，介绍两种常用的光学畸变校正技术，变焦距地址修正法和查表变换地址修正法。

1. 变焦距地址修正法是一种相对简单的方法。对于桶形失真，像素点沿径向向内收缩，且收缩率随着目标距光轴距离的增加而增大。变焦距地址修正法的原理是采用虚拟成像的方法，以失真图像为目标，各像素点通过变焦距虚拟透镜成像，所成的像即为校正后的图像。变焦距虚拟透镜位置与实际透镜重合，其焦距  $f$  随着到像素点到透镜中心的距离  $r'$  而变化。具体做法如下：假设焦距  $f$  与  $r'$  成线性关系。

$$f = k \times (r' - r'_{max}) + u/2 \quad (3)$$

由牛顿成像定理，像高  $r''$  为：

$$r'' = r' \times \frac{f}{u - f} \quad (4)$$

上式中  $u$  为物距， $r'_{max}$  为  $r'$  最大值， $k$  为系数， $k$  的值由实验效果确定。

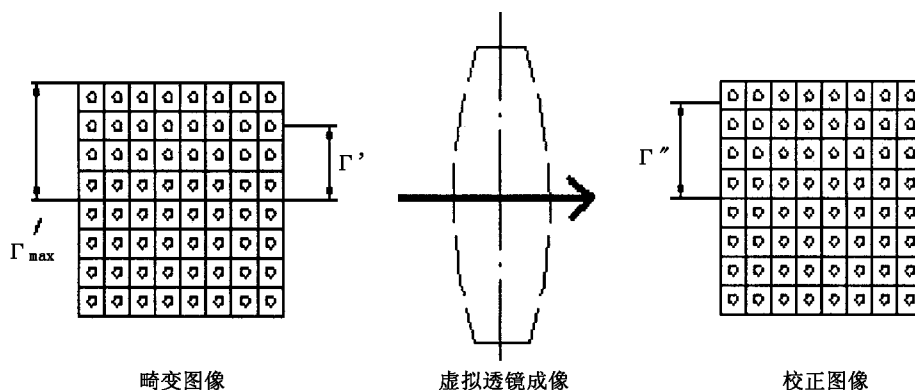


图 4 变焦距地址修正法示意图

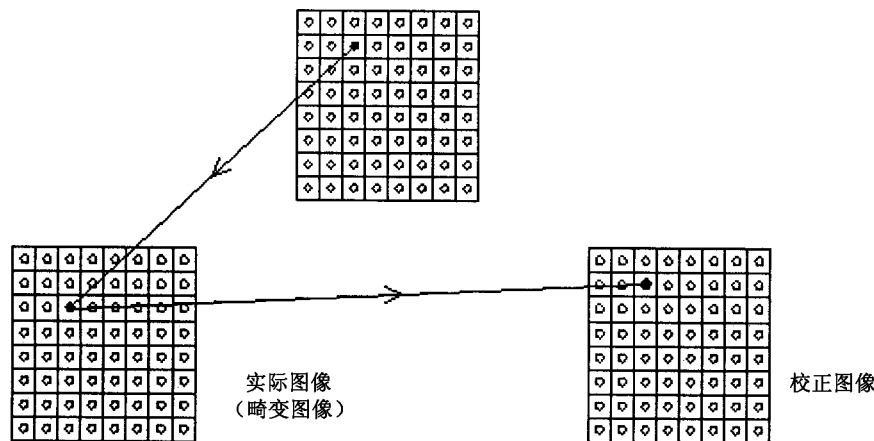


图 5 LUT 地址修正法示意图

由于原始图像与校正图像的非线性对应关系，校正后图像中会存在孔洞效应（某些像素点无对应原始值），对此的处理方法是采用  $3 \times 3$  窗口的中值滤波来消除孔洞效应。

利用这种方法需知道成像时的物距，另外系数  $k$  也是由经验给出的，缺乏精确的定量选择方法，因此不能进行精确的校正。

2. 另一种已知畸变率进行校正的方法如下：姑且称之为查表变换 (Look Up Table) 地址修正法，是作者正在进行研究的课题。它的前提是已知成像光学系统的畸变规律。畸变数据可以根据光学系统的设计方案进行计算，也可以对已经装配好的镜头进行畸变测量来获得。该方法基于一个地址查表变换算法，将畸变后的像素值送到正确的位置上去。

畸变率的定义如下：

$$Distortion = \frac{\eta - H}{H} \times 100\% \quad (5)$$

式中， $\eta$  为实际成像位置， $H$  为理想成像位置。按此定义，当发生枕形畸变时，畸变率为正，当发生桶形畸变时，畸变率为负。由此推出的理想成像位置  $H$  为：

$$H = \frac{\eta}{1 + Distortion} = k_D \times \eta \quad (6)$$

式中， $k_D$  为畸变校正系数。若已知畸变率，则可以按此公式进行校正。

已知光学系统的畸变率，可以计算出各像素点的校正位置（ $X, Y$  坐标分别进行计算），

由此可得到一张实际图像坐标  $(X, Y)$  到校正图像坐标  $(x, y)$  的映射关系表。校正时只需将实际图像中的像素值按对应关系填入校正图像中即可。采用直接转换的好处是处理速度快，适应实时处理要求。

由于实际图像空间与校正图像空间之间的对应是非线性的，而且两个图像空间的像元是离散化分布的，因此存在这样的情况：由于实际图像空间中的像素是均匀分布的，从校正图像空间中计算原始图像中的对应点，并不一定刚好位于各坐标点上，无法取值。解决的方法是采用重采样法。重采样法有三种：1. 取最近邻点的值作为该点的数值；2. 双向线性插值法；3. 三次褶积法。在一般应用中，可采用双向线性插值法计算该点的数值。该算法的示意图如图 6 所示。

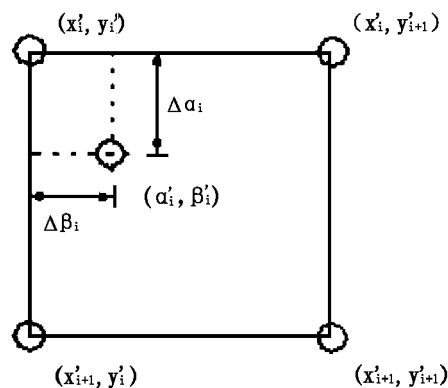


图 6 双向线性插值示意图

图中  $(\alpha'_i, \beta'_i)$  为校正图像中点在原始图像中的对应位置,  $(x'_i, y'_i)$ 、 $(x'_i, y'_{i+1})$ 、 $(x'_{i+1}, y'_i)$ 、

$(x'_{i+1}, y'_{i+1})$  是其相邻的四个点,  $\Delta\alpha_i$ 、 $\Delta\beta_i$  为坐标差, 如图 6 所示, 则  $(\alpha'_i, \beta'_i)$  处的数值为:

$$f(\alpha'_i, \beta'_i) = (1-\Delta\alpha_i)(1-\Delta\beta_i)f(x'_i, y'_i) + \Delta\alpha_i(1-\Delta\beta_i)f(x'_{i+1}, y'_i) + (1-\Delta\alpha_i)\Delta\beta_i f(x'_i, y'_{i+1}) + \Delta\alpha_i\Delta\beta_i f(x'_{i+1}, y'_{i+1}) \quad (7)$$

式中,  $\Delta\alpha_i = \alpha'_i - x'_i$ ,  $\Delta\beta_i = \beta'_i - y'_i$

应用双线性内插公式可以比较精确地计算校正点的数值, 但缺点是需要知道相邻点的值, 计算量大, 对于实时处理系统来说, 这就需要至少缓冲两行才能进行内插计算, 而且内插计算量相当大。因此在实时处理系统中, 特别是高速数据处理中不是采用双向线性内插, 而是采

用最近邻点法, 这样校正时就无需运算, 直接查表变换地址即可。硬件实现也相当容易。仅一块 EPROM 加一片 PLD 时序控制加一块 RAM 进行缓冲即可。计算机模拟图像处理结果也表明, 采用最近邻点法校正效果已经很好。见图 7。

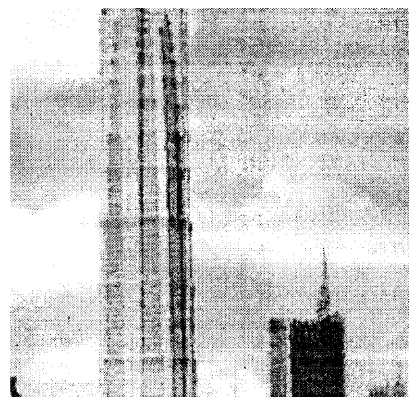
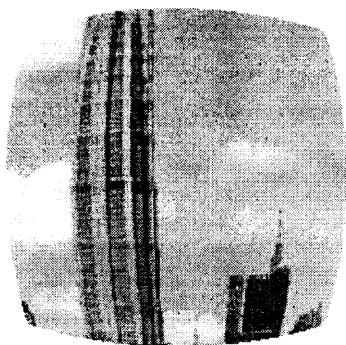


图 7 应用 LUT 地址修正法的模拟结果 (左为畸变图像, 右为校正后的图像)

## 4 结束语

本文主要叙述了影响红外焦平面探测器性能的因素及相应的消除方法。文章分成两大部分, 第一部分对影响探测器性能的因素如复位噪声电压、固定图形噪声、响应率非均匀性进行了讨论, 并对工程上用来消除这些因素的方法

加以说明; 第二部分主要讨论了红外焦平面探测器成像畸变的原因、类型及校正方法。

## 参考文献

- [1] 汪国有等, 一种新的大视场景像的几何失真校正方法, 数据采集与处理, 1996 年 6 月。
- [2] 张凤林, 孙学珠, 工程光学, 天津大学出版社, 1988 年 9 月。

## 简 讯

### 大气红外探测器

由美国红外成像系统公司制造的大气红外探测器 (AIRS) 于 2002 年 5 月 4 日由美国航空与航天管理局的 Aqua 宇宙飞船成功带上天。大气红外探测器是红外成像系统公司与喷气推进实验室 10 多年合作研究的结果, 该仪器获得的数据有望明显提高天气预报的准确

度。美国气象局、美国海洋与大气管理局以及其他国家的科学家都将利用由大气红外探测器采集的数据来更好地了解地球的气候, 并提高他们的天气模型和气候模型的精度。大气红外探测器将非常精确地测量全球范围内的空气温度和湿度。它是美国航空与航天管理局的地球观测系统 (EOS) 的一个关键部分, 用以研究地球的健康以及人类活动对地球健康的影响。地球观测系统由一系列卫星构成, 它们监视着全球的环境变化。

□ 顾聚兴