

凝视红外焦平面 CCD 非均匀性校正

高 云 邬鸣敏 周起勃

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘要: 对 CCD 器件的非均匀性校正的理论方法进行了讨论、分析和比较, 并对 32×64 元硅化铂肖特基势垒红外焦平面器件进行了响应率非均匀性的校正, 针对该器件响应率非线性度大、传输率低、斑点数目多和噪声大等问题, 选取先进的多点定标分段校正算法, 实现了实时校正及显示. 校正后, 不均匀度为 2%, 图像质量明显得到改善.

关键词: 焦平面器件, 响应率非均匀性.

引言

凝视红外焦平面 CCD 是新一代探测器件, 它比光机扫描 CCD 具有光机简单、结构致密、成本低、灵敏度在受到时间噪声限制时用长积分时间加以提高等优点, 所以得到高度重视和应用. 然而, 由于红外图像的低本征反差引起的探测器像元响应之间的非均匀性会导致图像噪声, 使系统的温度分辨率下降, 目标图像质量受到严重影响, 因此, 必须进行非均匀性校正.

产生非均匀性的因素是非常复杂的, 但一般认为影响响应率增益因子的主要因素是量子效率的大小和光敏元的尺寸, 因此在 CCD 制作完成后, 增益因子的大小就基本固定了, 随时间和环境的变化很小.

影响截距因子的主要原因是 CCD 的暗电流, 它是由于衬底内部和表面晶体缺陷所产生的电荷引起的, 因此对环境温度相当敏感. 所以, 校正的实质就是对响应率因子和截距因子的修正.

1 校正算法

焦平面器件的光敏元对辐射有一定的响应, 但由于光敏元之间的响应没有一定的关系, 而且光敏元的响应率又呈非线性, 给非均匀性校正带来很大的难度.

通常采用的校正方法是: 假定每个光敏元的响应是线性的, 则

本文 1991 年 9 月 23 日收到, 修改稿 1992 年 9 月 4 日收到.

$$S_{ij}(\varphi) = R_{ij}\varphi + O_{ij}; \quad (1)$$

式(1)中 φ 为入射到第 (i, j) 个光敏元的辐照度, S_{ij} 为第 (i, j) 个光敏元的输出信号, R_{ij} 为直线的斜率, O_{ij} 为直线的截距.

由于非均匀性的影响, 各光敏元的参数 R_{ij} 和 O_{ij} 不相同. 所以, 校正的关键就是精确地测出 R_{ij} 和 O_{ij} . 最简单的方法是在 φ_1 和 φ_2 两个不同的辐照度下, 测出每个光敏元响应 $S_{ij}(\varphi_1)$, $S_{ij}(\varphi_2)$. 根据式(1)得:

$$S_{ij}(\varphi_1) = R_{ij}\varphi_1 + O_{ij}; \quad (2)$$

$$S_{ij}(\varphi_2) = R_{ij}\varphi_2 + O_{ij}; \quad (3)$$

将式(2)和式(3)联立, 得:

$$R_{ij} = \frac{S_{ij}(\varphi_1) - S_{ij}(\varphi_2)}{\varphi_1 - \varphi_2}; \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)或式(3)即可得到 O_{ij} .

然而, 用这种方法校正是比较困难的, 一是需要精度比较高的测量仪器, 二是辐照度和输出信号难以同时测量, 而且定标辐射源不稳定的影响很大.

为了克服上述方法的不足, 我们分析和讨论了以下校正算法.

1.1 一点定标校正算法

假定探测器光敏元的输出信号与目标的辐照度呈线性关系, 即式(1)所示(见图1(a)). 选取辐照度 φ_1 作为定标点, 对面阵所有光敏元的输出信号 $S_{ij}(\varphi_1)$ 求平均得:

$$\tilde{S}_{ij}(\varphi_1) = \sum S_{ij}(\varphi_1)/N; \quad (5)$$

式(5)中, N 为面阵中光敏元的总数. 任一光敏元输出与平均值差为:

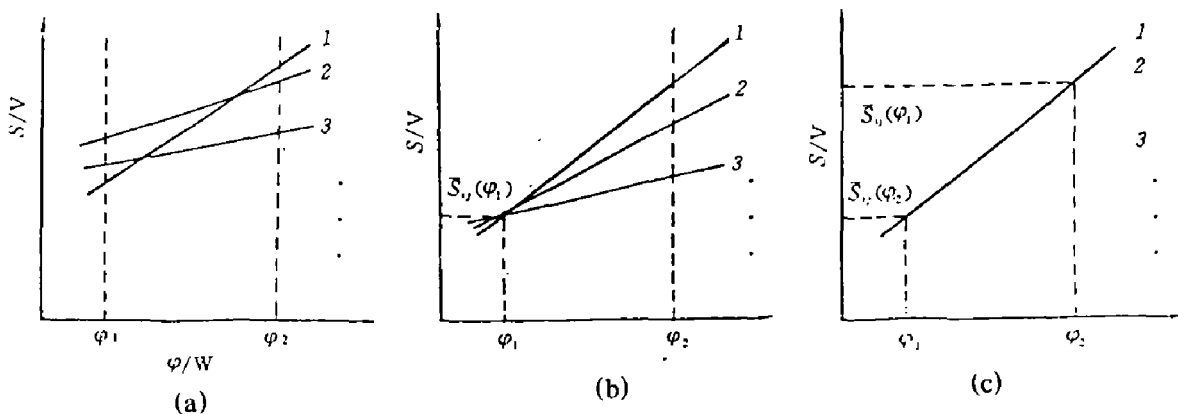


图1 校正过程原理图

(a) 器件的响应曲线; (b) 一点校正示意图; (c) 二点校正示意图

Fig. 1 Steps for linear correction

(a) Linear responses of detectors on a FPA; (b) Graphic description of one-point correction; (c) Graphic description of two-point correction

$$D_{ij}(\varphi_1) = S_{ij}(\varphi_1) - \tilde{S}_{ij}(\varphi_1); \quad (6)$$

校正后任一光敏元输出值为:

$$S'_{ij}(\varphi_1) = S_{ij}(\varphi_1) - D_{ij}(\varphi_1). \quad (7)$$

图 1(b) 是这种算法的示意图, 从算法和图中不难看出这种算法实质上只对器件的暗电流作了补偿, 没有对增益作校正, 因而当目标的辐照度偏离定标点时, 空间噪声很大, 校正范围很小.

1.2 二点定标线性校正算法

为了克服一点定标校正算法的不足, 采用二点定标线性校正算法. 即不仅对器件的暗电流作补偿, 还对增益作了校正, 例如, 选取两定标点 φ_1 、 φ_2 , (见图 1(c)), 由一点定标校正算法推导得:

$$\tilde{S}_{ij}(\varphi_1) = \sum S_{ij}(\varphi_1)/N; \quad (8)$$

$$\tilde{S}_{ij}(\varphi_2) = \sum S_{ij}(\varphi_2)/N. \quad (9)$$

同理, 可推导出校正后的信号输出值为:

$$S'_{ij}(\varphi) = [S_{ij}(\varphi) - S_{ij}(\varphi_1)] \frac{\tilde{S}_{ij}(\varphi_2) - \tilde{S}_{ij}(\varphi_1)}{S_{ij}(\varphi_2) - S_{ij}(\varphi_1)}; \quad (10)$$

式 (10) 中, $S_{ij}(\varphi)$ 为待校正的输出信号.

为了使直线拟合得更合理, 提高计算精度, 选用二点定标线性校正算法时, 通常采用最小二乘法线性回归求参数方法.

对式 (1) 求平均, 即:

$$\tilde{S}_{ij}(\varphi) = \tilde{R}_{ij}\varphi + \tilde{O}_{ij}; \quad (11)$$

将式 (11) 代入式 (1) 得:

$$S_{ij}(\varphi) = R_{ij}[\tilde{S}_{ij}(\varphi) - \tilde{O}_{ij}]/\tilde{R}_{ij} + O_{ij} = R'_{ij}S'(\varphi) + O_{ij}; \quad (12)$$

式 (12) 中 $R'_{ij} = R_{ij}/\tilde{R}_{ij}$, $S'(\varphi) = \tilde{S}_{ij}(\varphi) - \tilde{O}_{ij}$, 所以, $S_{ij}(\varphi)$ 与 $S'_{ij}(\varphi)$ 仍呈线性关系. 改变 M 次定标源的辐照度, 得到 M 组输出信号的数据, 用最小二乘法进行回归运算, 可拟合出最佳直线参数的计算公式:

$$R'_{ij} = \frac{M \sum_{k=1}^M S'_{ijk} S_{ijk} - \sum_{k=1}^M S'_{ijk} \sum_{k=1}^M S_{ijk}}{M \sum_{k=1}^M (S'_{ijk})^2 - (\sum_{k=1}^M S'_{ijk})^2}, \quad (13)$$

$$O_{ij} = \left(\sum_{k=1}^M S_{ijk} - R'_{ij} \sum_{k=1}^M S'_{ijk} \right) / M. \quad (14)$$

二点定标线性校正算法也有不足之处，因为光敏元的响应通常呈非线性，尤其在辐照度变化范围较大时，其线性度更差。图 2 示意出采用二点定标线性校正算法校正光敏元响应呈非线性而引起的偏差，图中的 φ_L 和 φ_H 为定标辐照度，当使用线性算法时，辐照度 φ_s 被转换成 φ'_s ，继而响应 $S_{ij}(\varphi_s)$ 被转换成 $S'_{ij}(\varphi'_s)$ ，而不是实际的 $S'_{ij}(\varphi_s)$ 。

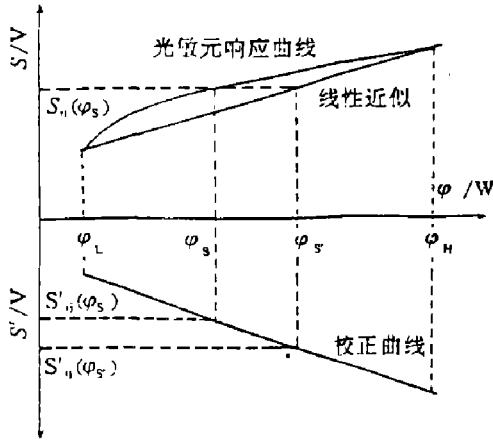


图 2 用线性校正算法校正非线性响应引起的偏差示意图
Fig. 2 Graphic description of errors which can arise from nonlinearities

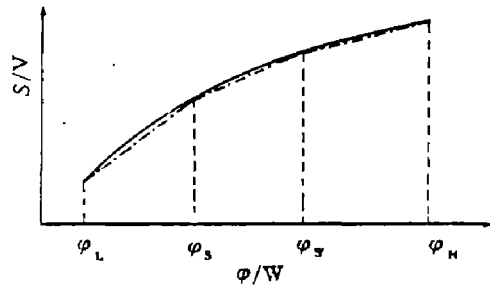


图 3 多点定标分段线性校正示意图
Fig. 3 Graphic description of multi-point correction

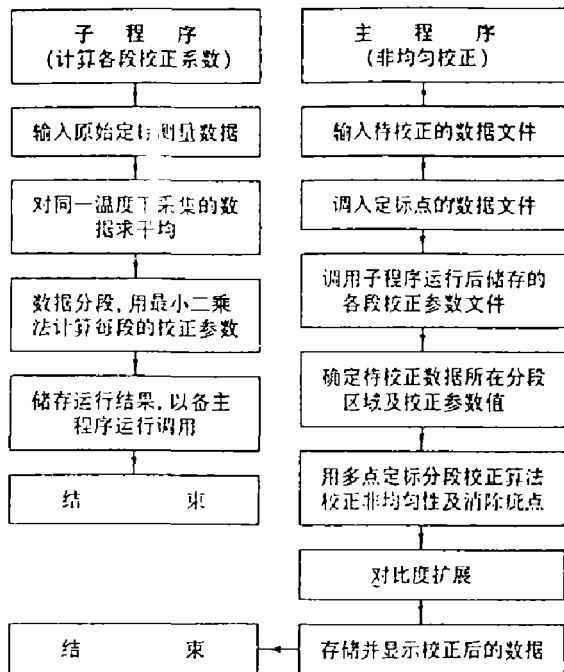


图 4 软件校正框图
Fig. 4 Block diagram of software for nonuniformity correction

1.3 多点定标分段校正算法

为了进一步改善图像质量，必须采用多点定标分段校正算法。多点定标分段校正算法其实就是将光敏元的响应曲线合理地分成若干段，每段用二点定标线性校正算法校正。图 3 是其校正示意图。显然，此算法更趋近于实际情况。

2 实现校正的方法

软件和硬件都可实现校正，在工作速度要求不高，或静态显示中，可通过计算机软件进行校正。然而，在工作速度高，尤其是在动态实时显示系统中，就必须用硬件校正。因此，在采用校正算法时，除了考虑校正精度外，还应考虑电路的简单性和实用性。

理论上选取定标点越多，校正偏差越小，但是定标点越多，电路越复杂，并影响计算速度，因此，在实际中，尤其是在实时处理中，

应合理选择定标点和数目。

首先利用计算机编程实现软件校正，验证算法的可行性，图 4 是软件校正的框图。然后根据软件的设计思想制作硬件电路板，进行实时校正，图 5 是硬件校正框图。

硬件校正过程是：焦平面 CCD 输出的模拟信号经信号预处理器和 A/D 转换后，变为 8 bit 的数字信号，再经减法器 I 消除固定背景噪声，通过比较电路和逻辑控制电路得到控制信号来调用 EPROM1 和 EPROM2 所存储的分段校正系数以及消除疵点，最后，经减法器 II 和乘法器进行非均匀性校正。图 5 中的 EPROM1 和 EPROM2 分别存储校正系数，RAM 作为校正系数的中继暂存器。图中的存储器和读写电路对背景信号进行存储和采集控制。

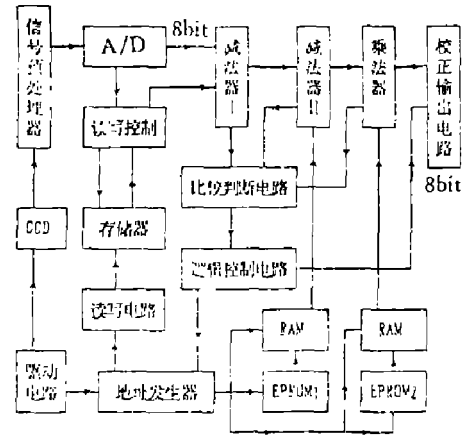


图 5 硬件校正框图
Fig. 5 Block diagram of circuits for nonuniformity correction in hardware

3 校正结果和讨论

本工作是凝视红外成像系统的一部分，整个系统的原理如图 6 所示。

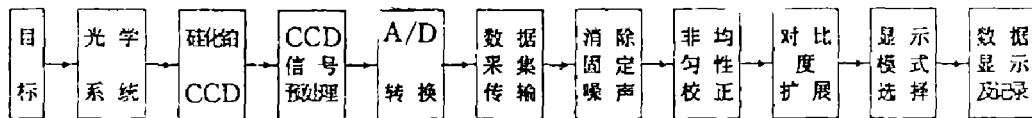


图 6 PtSi 凝视红外 CCD 成像原理图
Fig. 6 Block diagram of PtSi staring IRCCD imaging system

图 7 是进行定标测量的原理框图。由温度控制系统控制扩展源的温度，图像信号经数据采集电路成为长度 2048、位数 8 bit 的二进制数据文件，被存储到计算机内存中，供以后处理、校正和显示。

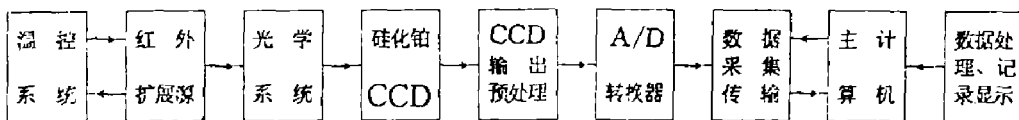


图 7 定标测量原理图
Fig. 7 Set-up for measurement of correction

采用扩展源进行定标测量，可使焦平面上每个光敏元得到同一时刻的信号，避免了定标源辐射随时间变化的影响。

对一幅图像两种校正方法的结果分析讨论如下：

3.1 目标图像减去固定背景噪声后进行非均匀性校正

该方法是先关闭镜头, 得到一幅固定背景噪声的图像, 并存储到存储器中, 打开镜头后采集到的图像数据经减法器 I 减去存储器中的固定背景噪声后再存储、校正和显示.

图 8 是对一只盛热水的茶杯热像图校正前后的图像, 图 8(a) 是既没有减去固定噪声也没有进行非均匀性校正的图像, 显然目标被噪声所淹没, 无法辨认. 图 8(b) 是减去固定噪声而没有进行非均匀性校正的图像, 图中目标基本上被显示出来, 但目标轮廓线不分明, 温度分布层次不明显. 图 8(c) 是减去固定噪声并进行非均匀性校正的图像, 目标轮廓线清晰, 温度分布层次分明.

3.2 对含有固定背景噪声的目标图像进行非均匀性校正

该方法是打开镜头后测量的目标图像不经过减法器 I 而直接存储、校正和显示.

图 8(d) 是校正前的图像, 显然目标被噪声所淹没, 无法辨认. 图 8(e) 是校正后的图像, 图中目标被清晰地显示出来.

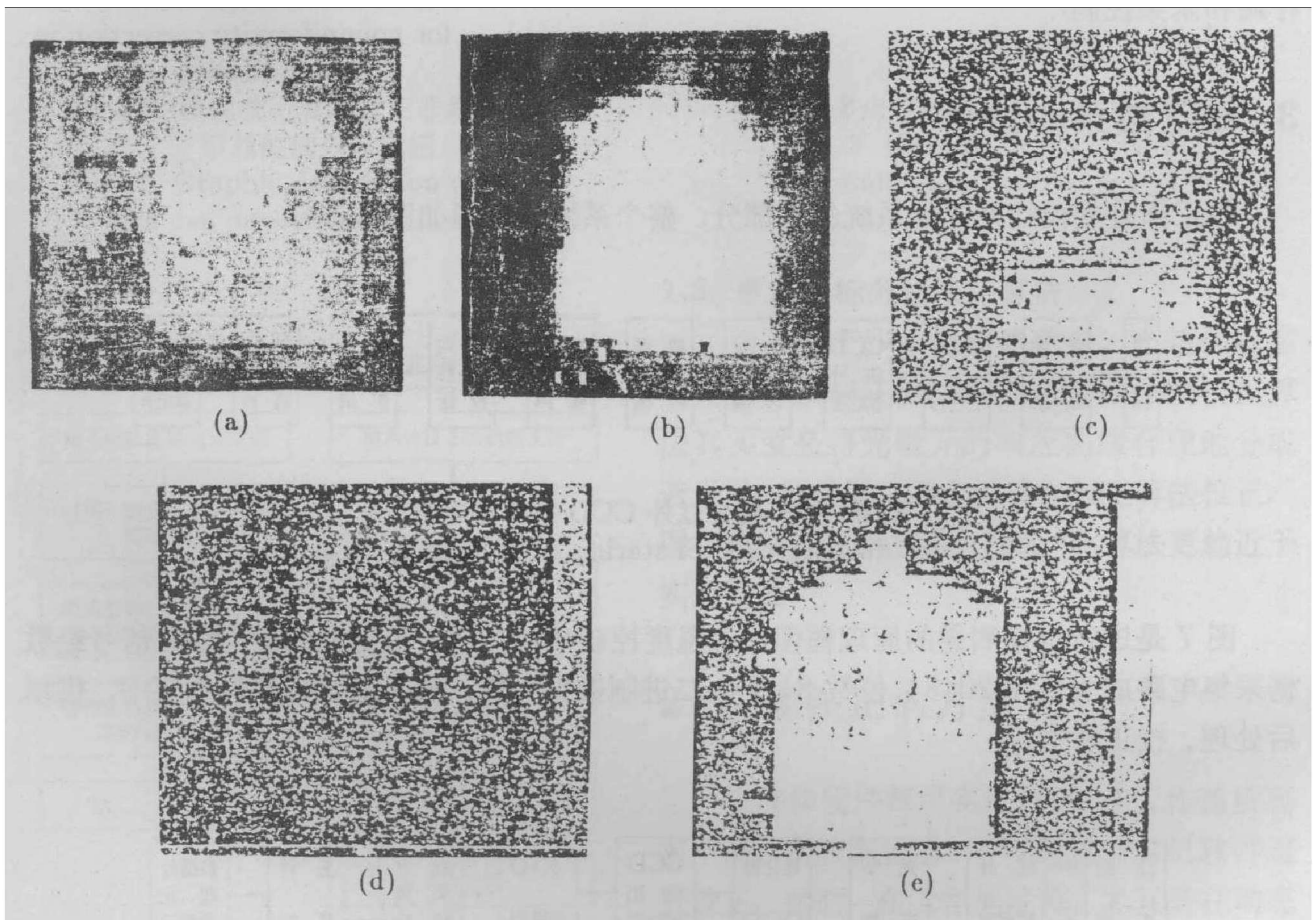


图 8 热水杯的热像图
Fig. 8 Thermal images of the cup with warm water

由图 8 很显然地说明, 经过非均匀性校正后的图像质量明显改善.

为了进一步说明问题, 表 1 分别列出定标源处于几个不同温度时, 校正前后的不均匀度和均方根偏差. 其中, 不均匀度的定义为

$$\delta = \sum |S_{ij} - \tilde{S}_{ij}| / NS_{ij}; \quad (15)$$

均方根偏差的定义为

$$\delta = \sqrt{\sum (|S_{ij} - \tilde{S}_{ij}|)^2 / N}; \quad (16)$$

式中, N 为光敏元总数.

由表 1 可知, 校正后系统的不均匀度降低了一个数量级.

引起校正误差的原因是多方面的, 主要有定标源的不均匀性、电路噪声、计算校正系数误差和 CCD 非线性误差等, 我们对误差进行了分析, 得到总校正误差为 1.7%, 与表 1 的校正结果一致.

表 1 校正前后的不均匀度和均方根偏差
Table 1 nonuniformity degree and root-mean square deviation

$t(^{\circ}\text{C})$		40	50	60	70	80
不均匀度 (%)	校正前	19.5	19.8	19.7	19.6	19.5
	校正后	1.65	1.54	1.52	1.41	1.72
均方根偏差	校正前	22.0	23.7	25.7	26.7	28.8
	校正后	2.46	2.37	3.38	3.38	4.64

4 结语

非均匀性校正技术是多元探测器尤其是红外焦平面器件发展的产物之一, 它已成为集图像处理、焦平面器件、计算机和定标测量等专业为一体的一门新技术. 本研究工作为焦平面响应率非均匀性校正提出了正确有效的方法, 成功地研制出一种实用的实时校正器, 明显地改善了红外凝视成像系统的性能.

致谢: 本工作得到我所 520 组全体同志以及研究生部老师的热情帮助, 在此表示衷心的感谢!

参考文献

- 1 Scribner D A, Sarkady K A *et al.* *Proc. SPIE*, 1989;255:1108
- 2 Scribner D A, Kruer M R *et al.* *Proc. SPIE*, 1988;56:930
- 3 Scribner D A, Kruer M R *et al.* *Proc. SPIE*, 1989;255:1108
- 4 Kruer M R, Scribner D A *et al.* *Opt. Eng.*, 1987;26:182
- 5 Milton A F, Barone F R *et al.* *Opt. Eng.*, 1985;24:855

NONUNIFORMITY CORRECTION IN STARING IRCCD FOCAL PLANE ARRAYS

GAO YUN, WU MINMING, ZHOU QIBO

*(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences,
Shanghai 200083, China)*

Abstract: The paper describes systematically several methods of nonuniformity correction for 32×64 pixels PtSi FPA IRCCD designed by the Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, and makes a comparison and analysis between them. An advanced method of multi-point correction was developed in software and hardware. The results show that the method reduces the influences of the bad pixels and low transfer efficiency, and the image can be corrected and displayed in real-time, and the degree of nonuniformity drops to below 2%. It is quite obvious that the quality of the image is improved, and the desired results are achieved.

Key words: focal plane array, nonuniformity of responsivity.