

一种改进的便于实现的红外焦平面 阵列不均匀性校正算法

王瑞忠 陈培毅 钱佩信

(清华大学微电子学研究所 北京 100084)

摘要 本文提出了一种适合对光敏元的响应特性为非线性的红外焦平面阵列进行不均匀性校正的改进算法. 与现有的算法相比, 该法具有便于用软件和硬件实现的优点. 同时, 通过对改进前后的算法进行理论分析和软件模拟结果比较, 证明二者的校正精度无本质差别, 校正效果基本相同.

EEACC: 7220, 7230C

1 引言

红外焦平面阵列广泛应用于红外成像以及红外探索, 红外跟踪等军事系统中. 由于工艺和偏置情况等的不均匀, 使得红外焦平面阵列的各个光敏元的响应度各不相同, 这导致红外系统产生的红外热像总是带有固定图形噪声(Fixed Pattern Noise), 使系统的温度分辨率下降, 因此响应均匀性是红外焦平面阵列的一个重要指标, 它直接影响到焦平面阵列的最小可分辨温度. 为了改善红外系统的成像质量, 提高系统的最小可分辨温度, 目前在大多数红外成像系统中都要通过软件或硬件对红外焦平面阵列所产生的图像信号进行不均匀性校正. 尽管校正的方法很多, 但校正的基本原理是一致的, 即首先测定各个光敏元在探测温度范围内若干个点的响应信号, 然后分别将每个光敏元的响应信号与所有光敏元的平均响应信号的关系用一个校正函数表示出来, 并将每个光敏元的校正函数的参数保存在存储器中, 这样成像时就可以利用这些校正函数将每个光敏元的响应信号校正到阵列中所有光敏元的平均响应水平, 从而抑制了固定图形噪声.

如果光敏元的响应与目标温度的关系是线性的, 可以通过两点或多点定标线性校正算法^[1]来进行不均匀性校正. 由于校正函数是线性函数, 所以对每个光敏元只存储两个校正参数, 其算法用软件或硬件都不难实现. 然而, 光敏元的响应与目标温度的关系通常是非线性的, 尤其在探测温度范围较大时, 其线性度更差. 这时如果仍采用线性校正算法会引起较大误差, 较理想的措施是采用分段线性校正算法, 即将红外焦平面阵列的探测温度范围分成若

王瑞忠 男, 1970 年生, 博士研究生, 从事锗硅合金红外探测器及焦平面阵列的研制
陈培毅 男, 1945 年生, 副教授, 从事半导体光电器件及其集成技术的研究
1996 年 10 月 25 日收到初稿, 1997 年 1 月 23 日收到修改稿

干区间,在每个区间内应用线性校正算法.所划分的区间数越多,则校正的效果越好.但该方法有两个缺点,一是需存储的校正参数较多(如划分为 n 个区间,则每个光敏元的校正参数为 $2n$ 个),二是需要对每个光敏元的响应信号进行比较判断,确定其所在的温度区间,以便选用正确的校正参数.1994年,Schulz 与 Caldwell 提出了一种基于多项式拟合的不均匀性校正算法^[2],它适合于对光敏元的响应特性为非线性的红外焦平面阵列进行不均匀性校正,并且避免了分段线性校正算法的上述两个缺点.

本文对^[2]中的算法进行了改进,目的是使其更易于用软件或硬件实现.通过对改进前后的算法进行理论分析和软件模拟结果比较,证明二者的校正精度无本质差别,校正效果基本相同.

2 算法的改进和分析

为了对光敏元的响应特性为非线性的红外焦平面阵列进行不均匀性校正,1994年,Schulz 与 Caldwell 在^[2]中提出了一种基于多项式拟合的不均匀性校正算法,其基本思想在于:

将每个光敏元的响应信号 Y_j 与整个焦平面阵列上所有 N 个光敏元对同样的目标的平均响应信号 $\langle Y \rangle$ 的差 ΔY_j 用 $\langle Y \rangle$ 的 n 次多项式来拟合,即:

$$\Delta Y_j = Y_j - \langle Y \rangle \approx \sum_{i=0}^n a_{ij} \langle Y \rangle^i \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

拟合系数 a_{ij} 可由对焦平面阵列探测温度范围内多个点的实测数据得到.式(1)可看作是关于 $\langle Y \rangle$ 的一系列方程,由此可解得:

$$\langle Y \rangle \approx F_j(Y_j) \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

在工作时 Y_j 可直接得到,其校正值应为 $\langle Y \rangle$,所以 Y_j 的校正公式为:

$$Y_j^c = F_j(Y_j) \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

其中 Y_j^c 为 Y_j 的校正值.

例如,当校正阶次 n 为 0 时(即偏置校正),校正公式为:

$$Y_j^c = Y_j - a_{0j} \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

当校正阶次为 1 时(即线性校正),校正公式为:

$$Y_j^c = \frac{Y_j - a_{0j}}{1 + a_{1j}} \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

当校正阶次为 2 时(即平方校正),校正公式*为:

$$Y_j^c = -\frac{1 + a_{1j}}{2a_{2j}} \pm \sqrt{\frac{(1 + a_{1j})^2}{4a_{2j}^2} + \frac{Y_j - a_{0j}}{a_{2j}}} \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (6)$$

上述算法存在一个明显的缺点,即实现起来比较困难,尤其是当用硬件实现时,这表现在:

(1) 它涉及较多的除法和开方运算,特别是在校正阶次较高的时候;

(2) 当校正阶次高于三阶时,关于 $\langle Y \rangle$ 的方程(1)已没有求根公式可用,已得不到解析形式的校正公式;

* 在文献^[2]中,该公式的“ \pm ”号为“+”号,实际上两种情况均有可能.

(3) 当校正阶次高于一次时, 由于关于 $\langle Y \rangle$ 的方程(1)有多个根, 所以校正时具体用哪个根需要进行判断.

我们对该法的改进之处在于将 ΔY_j 用 Y_j 的多项式来拟合, 即:

$$\Delta Y_j = Y_j - \langle Y \rangle \approx \sum_{i=0}^n a_{ij} Y_j^i \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

这样,

$$\langle Y \rangle \approx Y_j - \sum_{i=0}^n a_{ij} Y_j^i \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (8)$$

所以, 校正公式为:

$$Y_j^c = Y_j - \sum_{i=0}^n a_{ij} Y_j^i \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (9)$$

显然, 由于(9)式为关于 Y_j 的多项式函数, 所以改进后的算法已从本质上避免了原来算法的上述三个问题, 无论校正阶次高低, 都很容易用软件或硬件实现.

下面从理论上简要分析一下改进前后的算法在校正精度上是否具有本质差别. 由于焦平面阵列工作时其每个光敏元的响应信号除了受其本身响应特性的影响外, 还受随机噪声的影响, 所以我们分别就有无随机噪声两种情况进行分析.

(1) 不考虑随机噪声的影响

在这种情况下, $Y_j (j=1, 2, \dots, N)$ 与 $\langle Y \rangle$ 均是目标温度 T 的单调函数, 所以 ΔY_j 是 T 的函数, 而且也是 Y_j 或 $\langle Y \rangle$ 的函数. 改进前后的算法本质差别在于前者是用 $\langle Y \rangle$ 的多项式来拟合 ΔY_j , 而后者是用 Y_j 的多项式来拟合 ΔY_j . 由于 $Y_j(T)$ 与 $\langle Y(T) \rangle$ 为性质相近的同一类函数, 所以用它们的多项式来拟合 $\Delta Y_j(T)$ 从数学角度上来看二者的拟合精度将没有本质差别, 因而两种算法的校正精度也不会有本质差别.

(2) 考虑随机噪声的影响

有随机噪声存在时, 测得的响应信号 $Y_j (j=1, 2, \dots, N)$ 将在其期望值附近随机变动, 它对校正精度的影响程度可用 Y_j^c 对 Y_j 的导数 dY_j^c/dY_j 来衡量. 在校正阶次 n 足够高的情况下, 式(1), (2), (7), (8)中的“ \approx ”可用“ $=$ ”代替, 此时 $Y_j^c = \langle Y \rangle$, 这样对两种算法来说其 dY_j^c/dY_j 均为 $\partial \langle Y \rangle / \partial Y_j = 1/N$. 因此, 从受随机噪声影响的角度来看, 改进前后的算法无本质差别.

3 模拟结果比较

我们通过软件模拟对改进前后的算法的校正效果做了比较. 软件模拟的步骤包括:

(1) 在一定的温度范围内, 建立一个焦平面阵列关于目标温度 T 的非线性的平均响应特性模型, 即建立 $\langle Y \rangle$ 的模型;

(2) 在一定的温度范围内, 根据 $\langle Y \rangle$ 的模型, 在一定的不均匀度下随机地建立每个光敏元的响应特性模型, 即建立 Y_j 的模型;

(3) 在一定的温度范围内, 依据改进前后的校正算法分别确定每个光敏元的校正参数;

(4) 建立一幅用作软件模拟实验的温度图像;

(5) 根据上述温度图像和每个光敏元的响应特性模型及校正参数, 计算出每个光敏元校正前后的响应信号, 并以灰度的形式显示出整个焦平面阵列校正前后所成的热像;

(6) 在一定的温度范围内, 计算整个焦平面阵列在校正前后对某一目标温度的响应的不均匀度 δ . 不均匀度 δ 的定义为^[1]:

$$\delta = \sum_{j=1}^N |Y_j - \langle Y \rangle| / NY_j \quad (10)$$

由于在光敏元的随机噪声远小于固定图形噪声时影响热像质量的主要是固定图形噪声; 而当光敏元的随机噪声与固定图形噪声可比拟时, 焦平面阵列的可校正度 (correctability, 文献[2]中有定义) 较差, 所以为了更好地对校正前后的结果进行比较, 在光敏元的响应模型中未考虑随机噪声的作用. 图 1 是本文所用的 $\langle Y \rangle$ 的模型及由它随机建立的两个 Y_j 的模型, 它并不失一般性.

图 2(见图版 I) 是校正的效果, 为了便于说明在整个目标温度范围内校正的效果, 我们选用的实验温度图像为在 20~100℃ 间等差排列的八个温度条, 如图 2(a) 所示, 灰度越高表示温度越高. 模拟采用的焦平面阵列的规模为 64×40, 图 2(b) 是校正前的热像, 图 2(c) 与 (d) 分别是校正阶次为 1 时用改进前后的算法得到的校正后的热像, 图 2(e) 和 (f) 分别是校正阶次为 2 时用改进前后的算法得到的校正后的热像. 通过比较这些图像, 我们可以看出:

- (1) 校正后图像质量有明显改善, 这说明了不均匀性校正工作的重要作用;
- (2) 对改进前后的两种算法, 2 阶校正的效果均比 1 阶校正要好, 这说明由于响应特性的非线性, 常用的线性校正算法已不能满足一定的精度要求;
- (3) 无论是 2 阶校正还是 1 阶校正, 采用改进前后的两种算法得到的校正效果无明显差别.

图 3 是在 20~100℃ 范围内, 根据图 2 所用的光敏元的响应特性模型和校正参数计算得到的该焦平面阵列在校正前后的不均匀度, 其中曲线 1 是校正前的结果; 曲线 2 是用改进后算法做 1 阶 5 点校正后的结果; 曲线 3 是用改进前算法做 1 阶 5 点校正后的结果; 曲线 4 是用改进后算法做 2 阶 5 点校正后的结果; 曲线 5 是用改进前算法做 2 阶 5 点校正后的结果, 它进一步定量地说明了上述结论.

4 结论

通过对现有的适合对光敏元的响应特性为非线性的红外焦平面阵列进行不均匀性校正的算法进行改进, 使该法更易于用软件或硬件实

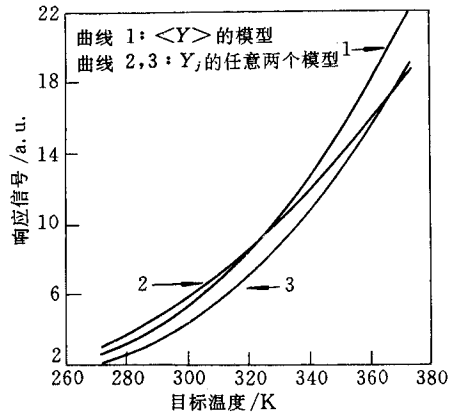


图 1 模拟所用的 $\langle Y \rangle$ 的模型及两个 Y_j 的模型

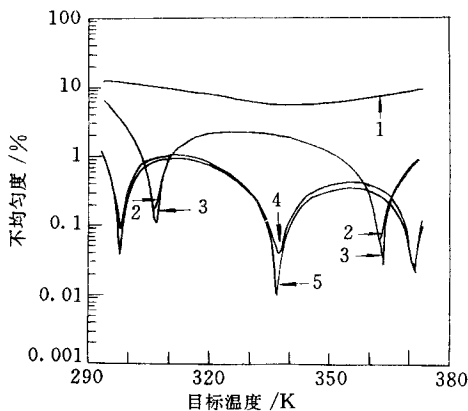


图 3 校正前后的不均匀度比较

现. 同时, 理论分析与软件模拟结果均表明, 改进前后的算法在校正精度上无本质差别, 校正效果基本相同.

参 考 文 献

- [1] 高云, 邬鸣敏, 周起勃, 红外与毫米波学报, 1993, 12(3): 169~175.
[2] M. Schulz, L. Caldwell, Infrared Physics & Technology, 1995, 36: 763~777.

Improved and Easy Achieved Nonuniformity Correction Algorithm for Infrared Focal Plane Arrays

Wang Ruizhong, Chen Peiyi and Qian Peixin

(*Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084*)

Received 25 October 1996, revised manuscript received 23 January 1997

Abstract An improved nonuniformity correction algorithm is presented which is suitable for the infrared focal plane arrays with a nonlinearity of the photoresponse characteristic. Comparing with old algorithm, it is easier to achieve by software or hardware. At the same time, it is shown that the correction precision and the correction effect of the new algorithm are substantially the same as that of the old one through theoretical analysis and comparisons of the simulation results.

EEACC: 7220, 7230C

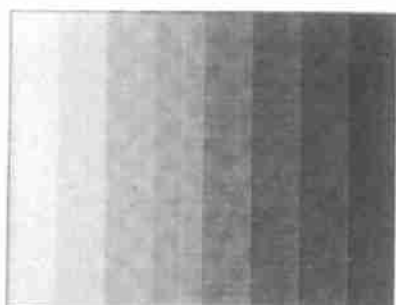


图 2(a) 实验所用的温度图像

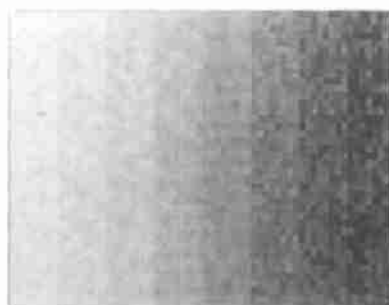


图 2(b) 校正前的红外热像

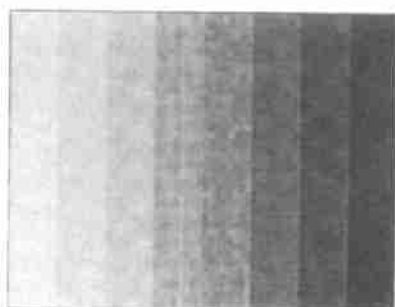


图 2(c) 用改进后算法做 1 阶 5 点校正的红外热像

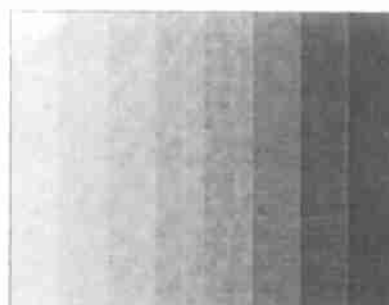


图 2(d) 用改进前算法做 1 阶 5 点校正后的后的红外热像

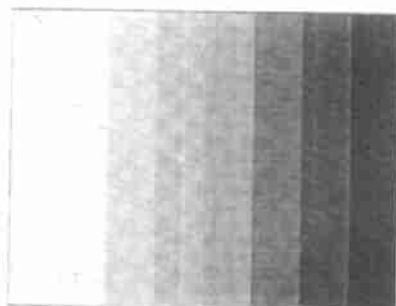


图 2(e) 用改进后算法做 2 阶 5 点校正后的红外热像

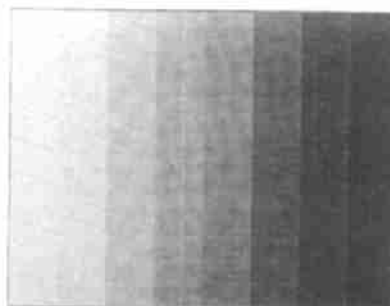


图 2(f) 用改进前算法做 2 阶 5 点校正后的红外热像