

红外凝视成像系统中的 CDS 噪声抑制技术

白俊奇 陈 钱 钱惟贤

(南京理工大学 近程高速目标探测技术国防重点学科实验室, 南京 210094)

摘 要 固定图案噪声是红外焦平面阵列的一种固有噪声,该噪声在低温场景尤其突出,影响了探测器的成像质量。基于探测器读出电路结构,理论分析了相关双取样电路(CDS)对焦平面阵列非均匀性的影响,并通过数据仿真给出了 CDS 噪声的空间和时间分布特征。针对 CDS 噪声特征,提出将迭代原理和黑体定标校正相结合的噪声滤波算法。实验结果表明,算法有效抑制了 CDS 电路噪声,提高了非均匀性校正的精度,具有较强的实用价值。

关键词 红外焦平面阵列 固定图案噪声 读出电路 迭代理论

中图法分类号: TN911.73 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)07-1062-05

Techniques of CDS Noise Filtering in Staring Infrared Imaging System

BAI Junqi, CHEN Qian, QIAN Weixian

(Ministerial Key Laboratory of JGMT, NJUST, Nanjing 210094)

Abstract Fixed pattern noise, an inherent noise of infrared focal plane array (IRFPA), is serious in the low-temperature scene and affects detector imaging quality. The influence of Correlated Double Sampling (CDS) to the nonuniformity in IRFPA is theoretically analyzed based on the structure of internal readout circuit, moreover, the space and time distribution features of CDS noise are described according to simulation data. Aiming at these features, a noise filtering algorithm using the combination of iterative theory and blackbody calibration is proposed. Experimental results show the proposed algorithm can effectively eliminate CDS circuit noise, increase nonuniformity correction precision and have strong utility value.

Keywords IRFPA, fixed pattern noise, RIOC, iterative theory

0 引 言

随着 CMOS 图像传感器的发展,凝视型红外热成像技术逐渐成为人们研究的热点。然而受红外焦平面阵列探测器制造材料、工艺,以及读出电路(RIOC)的影响,即使在相同辐射照射下焦平面阵列探测单元响应差异也很大,这种响应的不一致性被称作 IRFPA 的非均匀性(non-uniformity),在图像中表现为固定图案噪声(FPN)。FPN 严重制约了红外焦平面探测器的应用,因此,研究一种简单有效的 FPN 滤波算法则显得尤为重要。

目前,IRFPA 非均匀性校正可分为两大类:黑体辐射定标校正法和场景信息迭代校正法。基于黑体

辐射定标的校正方法^[1-2]易于实现,运算量小,得到广泛的工程应用,然而随着探测器工作时间增加(红外焦平面温度漂移),固定图案噪声逐渐恶化,校正效果变差。基于场景的校正算法^[3-6],其校正参数源于对场景信息的估计,具有自适应的校正能力(如神经网络校正法),校正效果优于第 1 类方法,然而该类方法运算量较大,收敛速度往往成为算法工程应用的瓶颈。

本文从探测器读出电路结构阐述了 CDS 电路对红外焦平面固定图案噪声的影响,利用连续红外图像数据,分析了 CDS 电路噪声的空间和时间分布特征,提出了将黑体定标校正和迭代原理相结合的噪声滤波方法,一定程度上抑制了 CDS 电路噪声,提高了非均匀性校正的精度。

基金项目:国防基础科研项目(A2620060242);江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CX08B_045Z)

收稿日期:2009-01-22;改回日期:2009-03-30

第一作者简介:白俊奇(1982—),男。现为南京理工大学电子工程与光电技术学院电子科学与技术专业博士研究生。主要研究方向为红外图像实时处理、光电噪声理论建模。E-mail: baijunqi168@yahoo.cn

1 FPN 空间分布和时变特性

FPN 产生来源于两方面: 1) 红外焦平面阵列; 2) 探测器内部读出电路。

红外焦平面阵列引入的 FPN 主要是像素放大器的偏差和光电二极管的暗电流。而从探测器内部读出电路引入的 FPN 则主要来源于 FPN 抑制电路, 如常用的 CDS^[7-8] 电路, 利用将像素信号与复位信号连接于列信号线的 CDS 电路进行减算, 抑制放大晶体管阈值偏差的基本方法。然而, 由于各列 CDS 电路本身会有偏差, 因此将产生新的噪声。凝视型焦平面读出电路如图 1 所示。

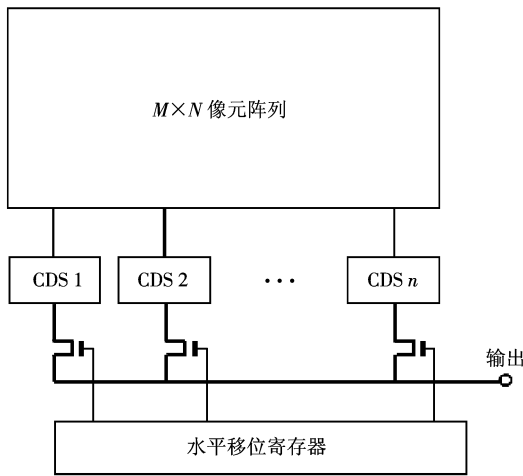


图 1 凝视型焦平面读出电路结构

Fig.1 Read circuit of staring focal plane

实验利用 320 × 240 像素非制凝视型红外焦平面探测器, 采集 HFY-300A 黑体辐射源图像数据。选取中心区域 90 × 260 像素点对 CDS 电路噪声进行分析。由于凝视型红外焦平面阵列每列共用一路 CDS 信号输出通道, 因此, 采用期望 E_i 衡量各路 CDS 通道输出数据差异, 在黑体温度 T_B 下, 期望定义为

$$E_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M f_{i,j} \quad (1)$$

式中, M 是焦平面每列的像元个数。

为描述 CDS 电路噪声随帧序 t 的曲线变化规律, 图 2 分别给出了在温度 280 K 时, 均匀黑体辐射第 1 ~ 8 帧图像; 图 3 是图 2(a) 各路 CDS 通道输出的数据曲线; 图 4 分别反映第 30 路和第 60 路 CDS 通道输出数据随帧序 t 的变化曲线, 其中横坐标 t 表示图 2 所示的 8 帧连续红外图像。

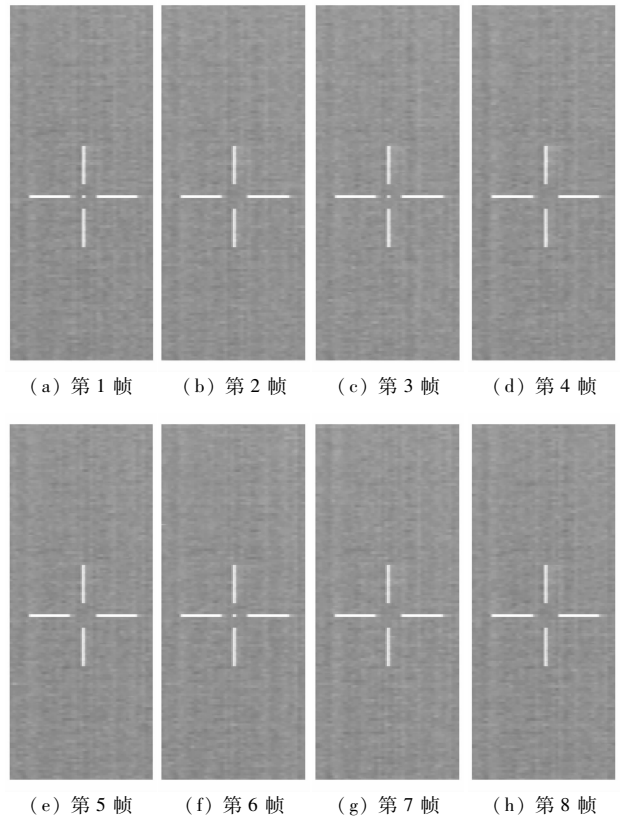


图 2 黑体辐射红外图像 ($T_B = 280 \text{ K}$)

Fig.2 Blackbody infrared image ($T_B = 280 \text{ K}$)

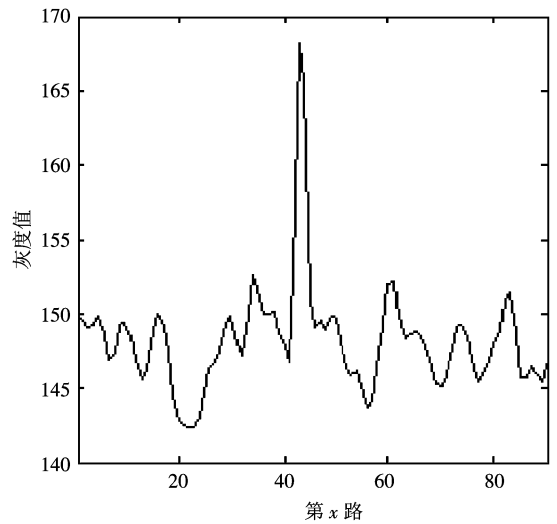


图 3 图 2(a) CDS 数据输出 ($T_B = 280 \text{ K}$)

Fig.3 CDS curve of Fig.2 ($T_B = 280 \text{ K}$)

结合图 3 和图 4 的曲线特征, 混杂固定图案噪声的 CDS 通道信号输出 $g_1(x, y, t)$ 可认为由原始红外辐射信号 $g(x, y)$ 和固定图案噪声 $n(x, y, t)$ 叠加而成, 如下式所示:

$$g_1(x, y, t) = g(x, y) + n(x, y, t) \quad (2)$$

式中,自变量 x 表示第 x 路 CDS 通道, y 表示焦平面阵列的第 y 行。

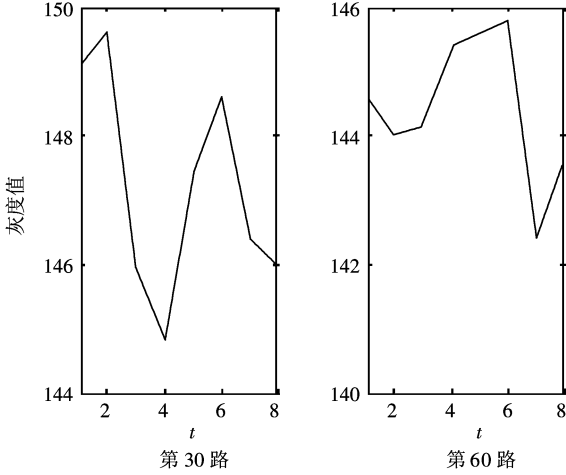


图 4 CDS 输出与 t 的曲线 ($T_B = 280$ K)

Fig. 4 The curve of CDS output and t ($T_B = 280$ K)

在黑体温度一定的前提下,图 3 曲线反映对均匀黑体辐射,红外焦平面读出电路 CDS 通道数据输出在同一时刻差异很大,由式(2)可知,在红外辐射信号 $g(x, y)$ 不变的前提下, CDS 通道输出直接受噪声 $n(x, y, t)$ 的影响,因此,图 3 曲线同样反映出各路 CDS 通道电路噪声差异很大;图 4 曲线分别表示第 30 路 CDS 通道以及第 60 路 CDS 通道数据输出随帧序 t 在较大范围波动,由式(2)可知,图 4 曲线同样反映相同 CDS 通道电路噪声随帧序 t 而波动。

2 FPN 理论模型

2.1 IRFPA 线性时不变理论模型

基于黑体定标的非均匀性校正,建立在一元线性时不变理论的基础上,表达式如下:

$$V_{ij}(\varphi_{ij}) = a_{ij} \times \varphi_{ij} + b_{ij} \quad (3)$$

式中, a_{ij} 是各像元的增益系数, b_{ij} 是各像元的偏移系数。该模型假设焦平面像元响应电信号 V_{ij} 是场景红外辐射 φ_{ij} 的一元线性函数,且不随时间变化。

2.2 FPN 模型

结合 IRFPA 线性时不变模型,将式(2)中的固定图案噪声 $n(x, y, t)$ 看作是由红外焦平面阵列引起的固定图案噪声 $n_1(x, y)$ 和由探测器内部读出电路引起的 CDS 电路噪声 $n_2(x, t)$ 的总和。即

$$n(x, y, t) = n_1(x, y) + n_2(x, t) \quad (4)$$

由式(3)时不变特性可知, $n_1(x, y)$ 与时间无关;因此,从式(4)推导,由读出电路引起的 $n_2(x, t)$ 与时间相关。

2.3 FPN 抑制模型

分析式(2)和式(4),原始红外辐射信号 $g(x, y)$ 可由下式解得:

$$g(x, y) = g_1(x, y, t) - n_1(x, y) - n_2(x, t) \quad (5)$$

式中, $n_1(x, y)$ 通过黑体定标的方法进行校正, $n_2(x, t)$ 随时间灰度值大小改变。设 $f(x, y, t)$ 表示 CDS 通道信号经黑体校正后的图像,则式(5)可表示为

$$g(x, y) = f(x, y, t) - n_2(x, t) \quad (6)$$

设 $C'(x, t)$ 表示由 CDS 通道电路偏差引起的 CDS 电路噪声, $g(x, y)$ 表示校正输出,则 CDS 噪声抑制模型可表示为

$$g(x, y) = f(x, y, t) - C'(x, t) \quad (7)$$

显然,通过消除 $C'(x, t)$ 的方式便能使读出通道引起的 CDS 电路噪声消除。

CDS 通道电路偏差估计值 $C'(x, t)$ 通过下面定理理解得。

定理 假设探测器 $\{A_0, A_1, \dots, A_{N-1}\}$ 的 CDS 电路偏差为 $\{C_0, C_1, \dots, C_{N-1}\}$, 对任意 $n \in \mathbf{N}$, 第 n 路 C'_n 可由下式表示:

$$\begin{cases} C_n = A_n - A_{n-1} \\ C'_n = C_n - C'_{n-1} \end{cases} \quad (8)$$

根据式(8)可推出 C'_n 如下:

$$\begin{cases} C_1 = A_1 - A_0 \\ C'_n = A_n - 2 \sum_{m=0}^{n-2} (-1)^{2n-m} \cdot A_{n-m-1} + (-1)^n \cdot A_0 \end{cases} \quad n \geq 2 \quad (9)$$

证明 用数学归纳法

1) $n = 2$ 时,

$$C_2 - C_1 = A_2 - 2A_1 + A_0$$

式(9)成立。

2) 假设 $n = k$ 时,式(9)成立,那么 $n = k + 1$ 时,有

$$C_{k+1} - C_k = C_{k+1} = A_{k+1} - 2A_k + (-1)^k A_0 -$$

$$2 \sum_{m=0}^{k-2} (-1)^{2k-m} A_{k-m-1} =$$

$$A_{k+1} + (-1)^{k+1} A_0 -$$

$$2 \sum_{m=-1}^{k-2} (-1)^{2k-m+1} A_{k-m-1} =$$

$$A_{(k+1)} + (-1)^{(k+1)} A_0 -$$

$$2 \sum_{l=0}^{(k+1)-2} (-1)^{2(k+1)-l} A_{(k+1)-l-1}$$

即对 $n = k + 1$, 式(9)成立。由此可知, 上式对所有自然数均成立。

3 算法仿真及数据分析

3.1 算法仿真

图 5 是对图 2(a) 的 CDS 电路噪声的滤波效果, 以及经校正后 CDS 通道输出的 2 维显示图, 由图 5 可知, 对固定黑体温度点, 经本文校正算法处理后的期望最大与最小值之差不超过 2 个灰度级。相比图 3(最大与最小值差约 10 个灰度级) 而言, CDS 电路偏差引起的电路噪声得到明显改善。图 6 反映了图 2 各帧的第 30 路及第 60 路 CDS 通道输出与 t 的关系, 其中横坐标 t 表示图 2 中的 8 帧图像, 相比

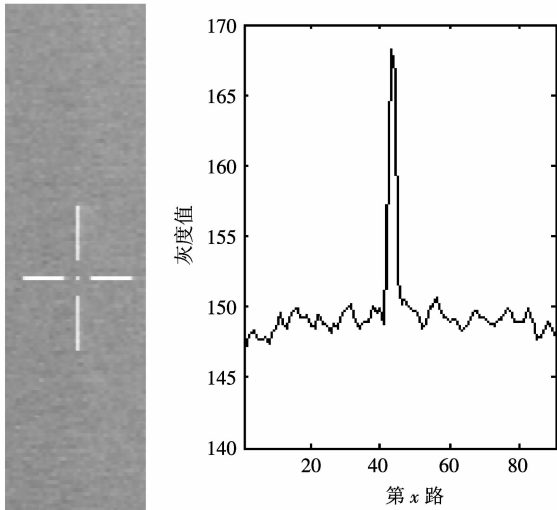


图 5 图 2(a) 的校正及 CDS 通道输出

Fig. 5 The correction of Fig. 2 and CDS output

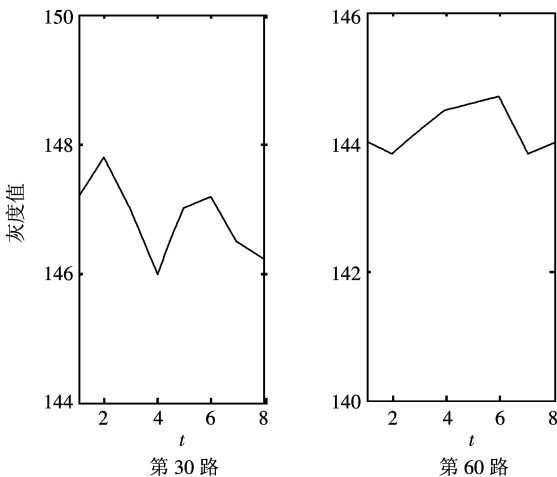


图 6 经噪声滤波的 CDS 输出与 t 的曲线

Fig. 6 The curve of CDS and t by noise filtering

图 4, 其波动范围明显减小, 说明一定程度提高了非均匀性校正的精度。图 7 是经黑体定标校正后的 320×240 像素场景图像, CDS 电路噪声严重, 影响视觉观察。而图 8 显示本文非均匀性校正算法的处理效果, 较好地抑制了 CDS 电路噪声。

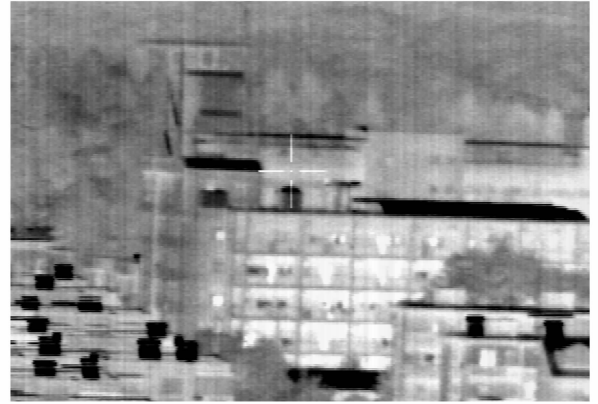


图 7 320×240 像素黑体定标校正图

Fig. 7 320×240 pixels image after blackbody correction



图 8 本文算法处理的红外图像

Fig. 8 The infrared image after our algorithm

3.2 数据分析

基于图 7 和图 8 的原始数据, 使用非均匀性参数、辐射分辨率、等效视数和视觉效果衡量不同方法抑制 CDS 电路噪声的效果。《红外焦平面阵列特性参数测试技术规范》中关于 IRFPA 的非均匀性 (NU) 的定义^[9]为在均匀入射辐射下, 焦平面像元输出值的均方误差与输出平均值的百分比, 即

$$NU = \frac{1}{\bar{V}} \sqrt{\frac{1}{N \times M - (d + h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (V_{i,j} - \bar{V})^2} \quad (10)$$

$$\bar{V} = \frac{1}{N \times M - (d + h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N V_{i,j} \quad (11)$$

式中, $V_{i,j}$ 为焦平面上第 i 行第 j 列像元的输出值,

\bar{V} 为焦平面所有有效像元的平均值, M 和 N 分别为行数和列数, d 为死像元数, h 为过热像元数。

辐射分辨率反映图像边缘细节信息, 定义为^[10]

$$\gamma = 10 \cdot \log_{10} [1 + \sqrt{\text{Var}(I)}/E(I)] \quad (12)$$

式中, I 表示图像灰度值, $E(I)$ 表示图像期望, $\text{Var}(I)$ 表示图像方差。

等效视数反映图像局部平滑程度, 定义为^[10]

$$ENL = E(I)^2 / \text{Var}(I) \quad (13)$$

式中, I 表示图像灰度值, $E(I)$ 表示图像期望, $\text{Var}(I)$ 表示图像方差。

由表 1 可看出, NU 数值减小且 ENL 值增大, 说明本文算法有效抑制了 CDS 电路噪声; γ 值改变程度小, 说明目标边缘保持较好。分析 NU 、 γ 、 ENL 参数可知, 本文算法在提高非均匀性校正精度的同时较好保持了原图信息。

表 1 图像评价参数

Tab. 1 Evaluation parameters of image

图像类型	NU	ENL	γ
图 2(a)	0.079	192.75	0.326
图 5	0.062	196.66	0.322
图 7	0.363	7.593	1.340
图 8	0.354	7.941	1.321

4 结 论

从 IRFPA 和探测器内部读出电路角度阐述了固定图案噪声产生的机理。结合 IRFPA 线性时不变理论模型, 提出了单帧迭代原理和黑体定标校正法相结合的 CDS 电路噪声抑制算法。实验效果及数据表明, 算法能进一步抑制 CDS 电路噪声, 一定程度提高了非均匀性校正精度。算法运算量小, 已在 DSP 硬件平台上实时运行, 有效改善了凝视型红外探测器的成像质量。

参考文献 (References)

- [1] Wang Yueming, Chen Jianxin, Liu Yinnian, et al. Study on two-point multi-section IRFPA nonuniformity correction algorithm [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2003, 22(6): 415-418. [王跃明, 陈建新, 刘银年, 等. 红外焦平面器件二点多段非均匀性校正算法研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(6): 415-418.]
- [2] Song Le, Lin Yuchi, Zhou Xin, et al. Optimizing method for

- infrared image processing system based on DM642 [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(10): 1091-1094. [宋乐, 林玉池, 周欣, 等. 基于 DM 642 的红外图像处理系统的优化策略 [J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(10): 1091-1094.]
- [3] Scribner D A, Sarkay K A, Kruer M K, et al. Adaptive nonuniformity correction for IR focal plane arrays using neural networks [J]. SPIE, 1991, 1541: 100-109.
- [4] Scribner D A, Sarkay K A, Calfield J T, et al. Nonuniformity correction for staring focal plane arrays using scene-based technique [J]. SPIE, 1990, 1308: 224-233.
- [5] Russell C Hardie, Frank Baxley, Brandon Brys, et al. Scene-based nonuniformity correction with reduced ghosting using a gated LMS algorithm [J]. Optics Express, 2009, 17(17): 14918-14933.
- [6] Bradly M Ratliff, Majeed M Hayat. An algebraic algorithm for nonuniformity correction in focal-plane arrays [J]. Journal of Optical Society of America A, 2002, 19(9): 1737-1747.
- [7] Chen Rongting, Peng Meigui. CCD/CMOS Image Sensors Basis and Application [M]. Beijing: Science Press, 2003: 156-158. [陈榕庭, 彭美桂. CCD/CMOS 图像传感器基础与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 156-158.]
- [8] Zhang Shihua, Wu Qianrong. Noise suppression in ROIC for uncooled Infrared Focal Plane Arrays. Microelectronics, 2007, 37(2): 294-297. [张实华, 伍乾永. 非制冷红外焦平面阵列读出电路的噪声抑制. 微电子学, 2007, 37(2): 294-297.]
- [9] GB/T 17444 1998. The technical norms for measurement and test of characteristic parameters of infrared focal plane arrays [S]. [GB/T 17444 1998, 红外焦平面阵列特性参数测试技术规范 [S].]
- [10] Huang Qian, Wang Yanfei, Zhang Bingchen, et al. A new anisotropic diffusion method for SAR speckle reduction [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(9): 1553-1557. [黄倩, 王岩飞, 张冰尘, 等. 一种新的各向异性扩散 SAR 相干斑抑制算法 [J]. 电子学报, 2006, 34(9): 1553-1557.]