

文章编号: 1672-8785(2015)09-0001-05

红外焦平面阵列的非均匀性仿真方法研究

李召龙¹ 沈同圣² 娄树理³ 史浩然¹

(1. 海军航空工程学院研究生管理大队, 山东 烟台 264001 ;

2. 国防科技信息中心, 北京 100037 ;

3. 海军航空工程学院控制工程系, 山东 烟台 264001)

摘 要: 在研究红外焦平面阵列 (Infrared Focal Plane Array, IRFPA) 非均匀性校正算法的过程中, 需要通过仿真获取大量带有非均匀性信息的目标图像。根据 IRFPA 非均匀性的产生机理, 分别建立了探测元非均匀性、读出电路非均匀性和漂移噪声的数学模型, 并利用这些模型在理想图像上分别叠加了这三部分的非均匀性, 最终获取了目标图像。在仿真过程中, 假设非均匀性噪声符合高斯分布, 通过设置模型系数使其具有不同的均值和方差, 可以实现不同程度的非均匀性仿真。由于考虑了漂移噪声, 本文方法的仿真结果更为符合实际情况。

关键词: IRFPA ; 非均匀性; 探测元; 读出电路; 漂移噪声

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.09.001

Research on Nonuniformity Simulation of Infrared Focal Plane Array

LI Zhao-long¹, SHEN Tong-sheng², LOU Shu-li³, SHI Hao-ran¹

(1. Postgraduate Training Brigade, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. National Defense Science and Technology Information Center, Beijing 100037, China; 3. Department of Controlling Engineering, Naval University of Aeronautics and Astronautics, Yantai 264001, China)

Abstract: During the study of nonuniformity correction algorithms for Infrared Focal Plane Arrays (IRFPA), a large number of target images containing nonuniformity information need to be obtained by simulation. According to the generation mechanism of nonuniformity of IRFPAs, a detection element nonuniformity model, a readout circuit nonuniformity model and a drift noise model are established respectively. By superposing the nonuniformity of the three models on the ideal image respectively, the target image is obtained eventually. In the process of simulation, it is assumed that the nonuniformity noise obeys the Gaussian distribution. By setting the model coefficients with different mean and variant, different degrees of nonuniformity simulation can be achieved. Because the drift noise is considered, the simulation results of the proposed method are more consistent to actual situation.

Key words: nonuniformity; detector element; readout circuit; drift noise

收稿日期: 2015-08-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61303192)

作者简介: 李召龙 (1987-), 男, 山东诸城人, 博士研究生, 主要从事光电制导、图像处理以及红外图像生成等方面的研究。 E-mail: zgzb1987@sina.com

0 引言

红外成像系统具有灵敏度高、帧频较高以及可获取目标的更多信息等特点,已经在军民领域发挥着重要的作用。尽管红外成像技术现已发展到较高水平,但由于受目标辐射特性、光学回路、IRFPA 材料及制造工艺、读出电路的影响,实际获得的红外图像依然存在非均匀性问题。这会极大地增加空间噪声,降低图像质量,严重的甚至还会使红外成像系统失去探测能力。因此,红外成像系统必须结合相应的非均匀性校正技术才能应用到工程实践之中^[1]。人们当前研究的基于场景的非均匀性校正算法主要包括场景统计算法^[2]、时域高通算法^[3]、神经网络算法^[4]和卡尔曼滤波算法^[5]等。在研究上述非均匀性校正方法的过程中,基于仿真获取非均匀性图像占有重要地位。

根据产生机理的不同,本文将红外图像非均匀性分为探测器非均匀性、读出电路非均匀性和漂移噪声三部分,针对这三部分分别建立噪声模型并对图像序列进行仿真,为后续的非均匀性校正方法研究提供图像源。

1 IRFPA 非均匀性模型

1.1 探测元的非均匀性

设 IRFPA 共有 P 个探测元,入射到探测元 i, j 上的红外辐射通量为 $x(i, j)$,则探测单元输出可用以下 N 阶多项式表示^[6]:

$$y(i, j) = a_1(i, j) + a_2(i, j)x(i, j) + \cdots + a_N(i, j)$$

$$\times x^{N-1}(i, j) + a_{N+1}(i, j)x^N(i, j) = \mathbf{a}(i, j)^T \mathbf{X}(i, j) \quad (1)$$

式中, $\mathbf{a}(j) = [a_1(j), a_2(j), \cdots, a_{N+1}(j)]^T$ 为探测元 i, j 的响应系数, $\mathbf{x}(j) = [1, x(j), \cdots, x^{N-1}(j), x^N(j)]$ 。

当 $N = 1$ 时,此模型变为 IRFPA 探测元的线性响应模型。当 $N \geq 2$ 时,此模型可用来表示 IRFPA 探测元的非线性响应模型。

采用线性响应模型,并设原始图像中像素 i, j 的灰度值为 $R_{i,j}$,则叠加非均匀性的仿真图像的灰度值为

$$S_{i,j} = G_{i,j}R_{i,j} + O_{i,j} \quad (2)$$

由于各探测元的增益系数 $G_{i,j}$ 与偏置系数 $O_{i,j}$ 不一致,各探测元的响应也会不一致,从而会形成整个 IRFPA 的非均匀性。采用高斯分布 $N(V_0, V_1)$ 对该非均匀性进行模拟,其中 V_0 为高斯分布均值, V_1 为高斯分布方差。仿真时,将增益系数 $G_{i,j}$ 设置成服从 $N(1, \sigma_g^2)$ 的高斯分布,并将其均值设置为 1,使仿真图像的灰度值在原始图像附近作较小的波动。设置偏置系数 $O_{i,j}$,使其服从 $N(0, \sigma_o^2)$ 的高斯分布。

1.2 读出电路通道的非均匀性

红外探测器的读出电路一般具有多个读出通道。探测器的光响应可以在不同通道内实现分组和多路传输^[7]。图 1 所示为典型的读出电

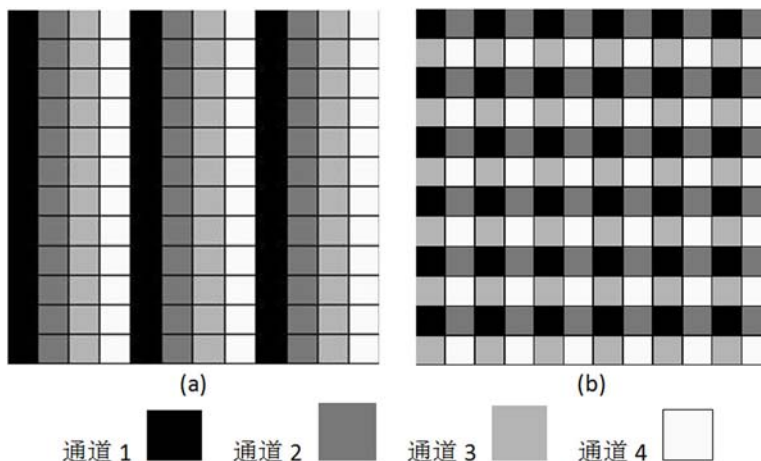


图 1 读出电路的结构图

路结构, 该读出电路共有 4 个读出通道。红外图像中, 由同一通道读出的像素被划分为一组。同一组的像素具有非常接近的非均匀性噪声值, 而不同组像素之间由于读出通道的参数特性各异, 在传输中会叠加不同的乘性噪声和加性噪声。

若采用图 1(a) 所示的读出方式, 则 IRFPA 中的每列探测元均通过同一个读出电路输出响应值。若采用图 1(b) 所示的读出方式, IRFPA 中的探测元则通过行列间隔的方式输出响应值。设读出电路共有 C 个通道, 经通道 m 读出的探测元个数为 P_m ($m = 1, 2, \dots, C$), 则每一帧图像的总像素数目为 $P = \sum_{m=1}^C P_m$ 。若探测元 i, j 的响应值为 $y(i, j)$, 经读出电路通道 m 读出的输出值 $z(i, j)$ 则可用一个线性模型来描述:

$$z(i, j) = b_m y(i, j) + c_m \quad (3)$$

式中, b_m 和 c_m 分别为通道 m 叠加在探测元输出 $y(i, j)$ 上的非均匀性乘性系数和加性系数。探测器的 C 个通道的 b_m 和 c_m 服从不同的高斯分布, 从而引起通道之间的非均匀性。仿真时, 通过设置不同的 b_m 和 c_m 分布形式, 可以在仿真图像上叠加读出电路的非均匀性。

1.3 漂移噪声的非均匀性

探测元响应的增益系数 $G_{i,j}$ 和偏置系数 $O_{i,j}$ 会随时间发生缓慢的漂移。该漂移在非致冷型 IRFPA 中表现得更加明显。如果研究过程中需要获得图像序列, 那么在仿真时就要考虑漂移噪声。设 $G_{i,j}^n$ 和 $O_{i,j}^n$ 分别为图像序列中第 n 帧图像的增益系数和偏置系数, $g_{i,j}$ 和 $o_{i,j}$ 分别为增益系数和偏置系数的漂移量, 图像序列中第 $n+1$ 帧图像的增益系数 $G_{i,j}^{n+1}$ 与偏置系数 $O_{i,j}^{n+1}$ 可分别表示为

$$G_{i,j}^{n+1} = G_{i,j}^n + g_{i,j} \quad (4)$$

$$O_{i,j}^{n+1} = O_{i,j}^n + o_{i,j} \quad (5)$$

第 $n+1$ 帧原始图像中像素 i, j 的灰度值为 $R_{i,j}^{n+1}$, 叠加漂移噪声的仿真图像的灰度值为

$$S_{i,j}^{n+1} = (G_{i,j}^n + g_{i,j}) R_{i,j}^{n+1} + O_{i,j}^n + o_{i,j} \quad (6)$$

增益系数的漂移量 $g_{i,j}$ 服从 $N(V_g, \sigma_g'^2)$ 的高斯分布, 偏置系数的漂移量 $o_{i,j}$ 服从 $N(0, \sigma_o'^2)$ 的高斯分布。仿真时, 可以通过设置不同的 $g_{i,j}$ 均值/方差和 $o_{i,j}$ 方差来模拟不同程度的漂移。

2 仿真实现

在非均匀性仿真中, 首先由原始图像根据一定的裁剪规则生成图像序列, 然后在生成的图像序列上叠加探测元响应的非均匀性, 并添加漂移噪声, 最后在整幅图像中叠加读出电路通道的非均匀性。仿真中需要注意的是, 如果仿真对象是单幅图像, 则不用生成图像序列, 而只需考虑探测元响应和读出电路通道的非均匀性, 且不用叠加漂移噪声。

2.1 生成图像序列

在当前研究的各种基于场景的非均匀性校正方法中, 绝大多数方法都要对帧数足够多的图像序列进行处理才能完成校正。因此, 我们需要将一幅较大的图像切割成若干幅尺寸较小的图像。本文利用一幅 500×500 大小的可见光灰度图像来模拟理想的红外图像, 并从大图的左上角开始, 沿对角线方向逐次切割出一帧 256×256 大小的图像。向右移动 $\text{floor}\left(\frac{500-256}{50}\right) = 4$ 个像素, 同时向下移动 $\text{floor}\left(\frac{500-256}{50}\right) = 4$ 个像素, 直至切割完整幅大图为止 ($\text{floor}()$ 表示向下取整)。此时我们便可获得 50 帧 256×256 大小的图像。图 2 为理想原图以及第 1 帧、第 20 帧、第 50 帧图像。

2.2 非均匀性仿真

2.2.1 叠加探测元的非均匀性

根据式 (2), 将增益系数 $G_{i,j}$ 设置成服从 $N(1, 0.02)$ 的高斯分布, 使仿真图像的灰度值在原始图像附近作较小的波动, 以符合实际情况。将偏置系数 $O_{i,j}$ 的均值设置为 0, 其方差与原始图像的方差有关 (本文设置为原始图像方差的 $1/4$)。图 3 所示为仿真结果。

2.2.2 叠加漂移噪声

如果对单幅图像进行非均匀性仿真, 则不必考虑漂移噪声。若对图像序列进行仿真, 根据

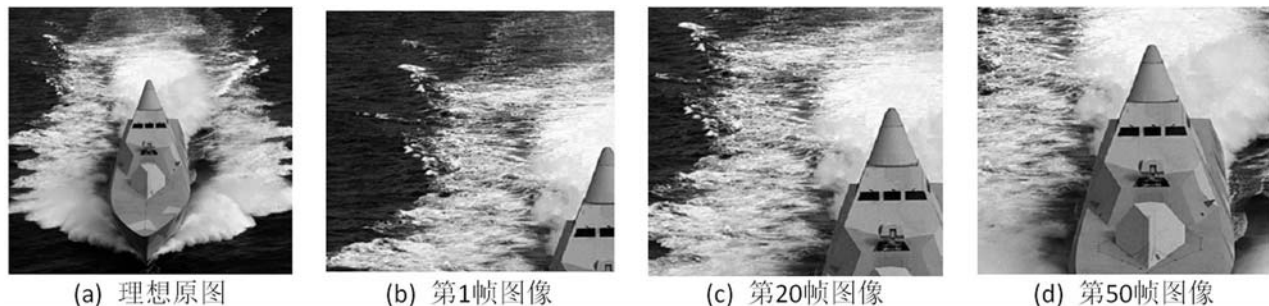


图 2 经裁剪生成的图像序列

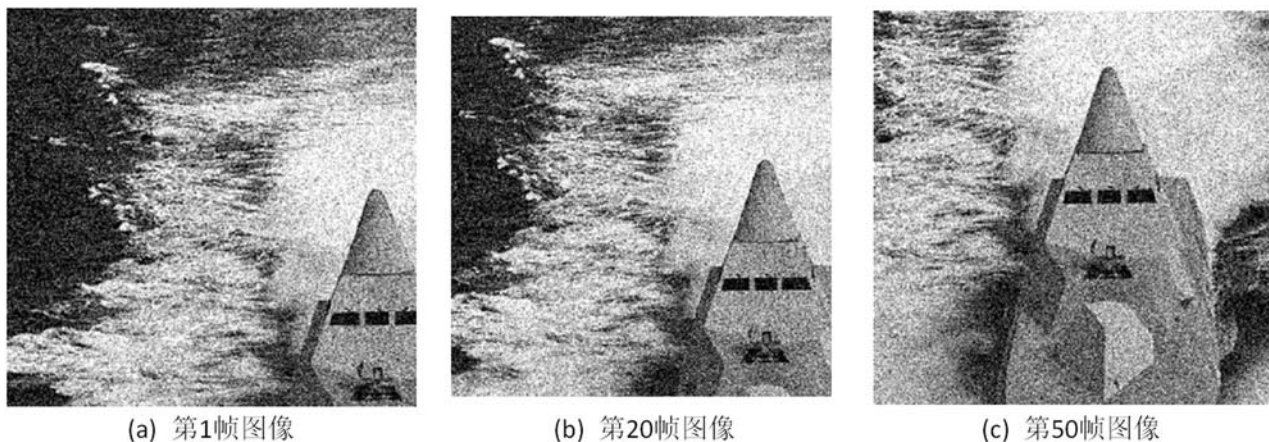


图 3 叠加探测器非均匀性的图像

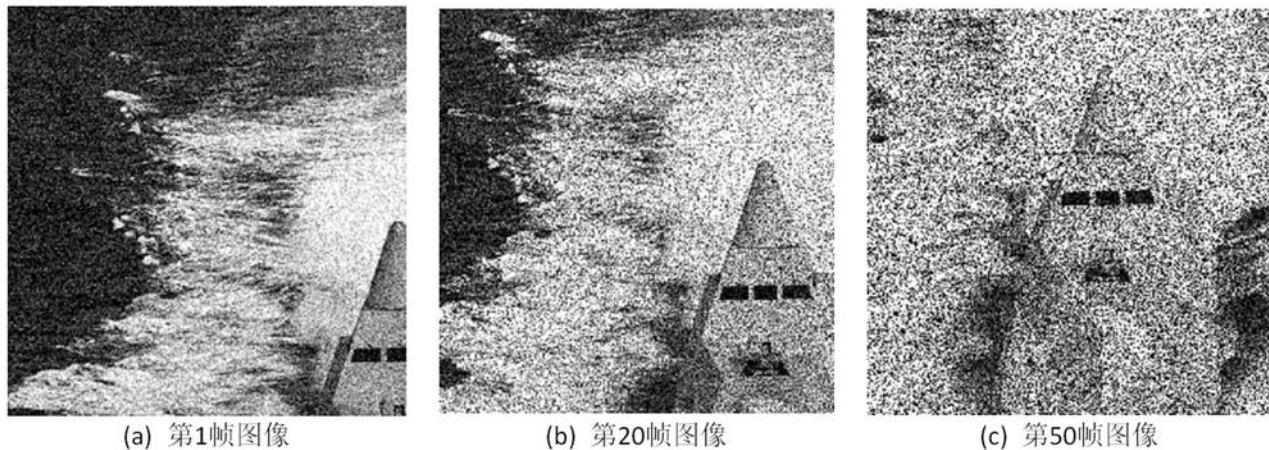


图 4 叠加漂移噪声的图像

式(4), 叠加漂移噪声的探测元增益和偏置系数公式则将变成一个递推形式。由于漂移噪声与时间有关, 开始时将图像漂移噪声设置为 0; 当图像达到 50 帧时, 图像漂移噪声的均值幅度达到某个级别。本文将其设置为 2.5, 即 $50x = 2.5$, $x = 0.05$, 将 $g_{i,j}$ 设置成服从 $N(0.05, 0.002)$ 的高斯分布, 将 $o_{i,j}$ 设置成服从 $N(0, 2)$ 的高斯分布。仿真时, 通过控制 $g_{i,j}$ 均值/方差和 $o_{i,j}$ 方差来模拟不同程

度的漂移。图 4 所示为仿真结果。

2.2.3 叠加通道的非均匀性

采用图 1(a) 所示的通道模式对读出电路通道的非均匀性进行仿真。读出电路 4 个通道的参数特性各异, 因而会引起通道间的非均匀性。仿真时, 主要通过将 4 个通道的 b_m 和 c_m 系数设置成服从不同的高斯分布来实现。表 1 列出了仿真通道非均匀性时 4 个通道的 b_m 和 c_m 系数

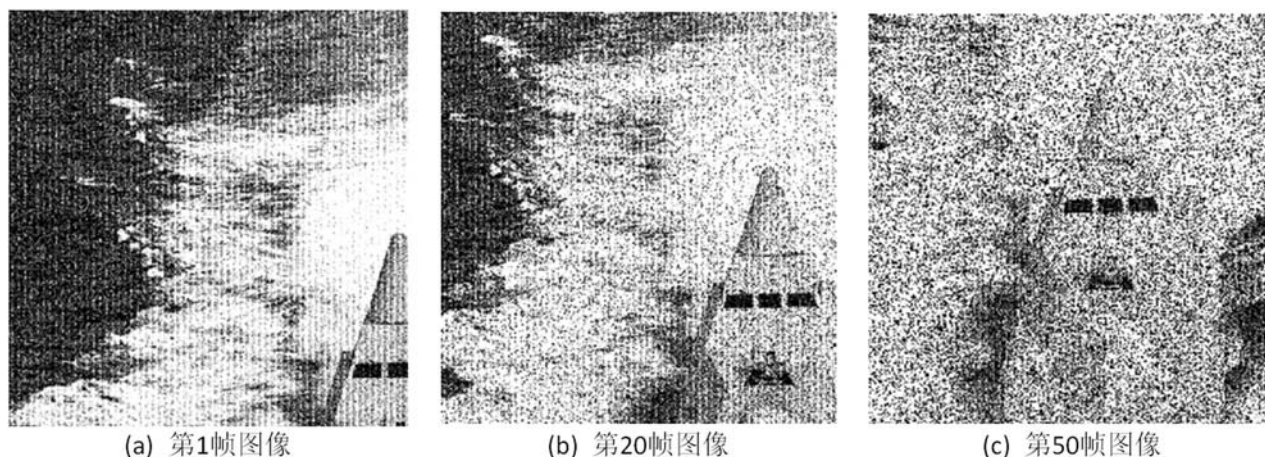


图5 叠加通道非均匀性的图像

表1 4个读出通道的系数设置情况

通道编号	b_m		c_m	
	平均值	标准差	平均值	标准差
通道 1	1.28	0.15	0	$0.15STD_{raw}$
通道 2	1.30	0.25	0	$0.20STD_{raw}$
通道 3	1.29	0.35	0	$0.25STD_{raw}$
通道 4	1.27	0.45	0	$0.30STD_{raw}$

的设置情况。其中, STD_{raw} 为原始图像的标准差。图5所示为仿真结果。

3 结束语

本文根据红外图像非均匀性的产生机理, 分三个部分对其进行了建模和仿真, 为后续的非均匀性校正算法研究提供了目标图像。在仿真及建模的过程中, 考虑了 IRFPA 的参数漂移特性, 因此仿真结果比较贴近现实。实际仿真中, 通过调整模型的相关参数可以实现不同程度的非均匀性仿真。当然, 要想更加准确地对红外图像的非均匀性进行仿真, 还需建立 IRFPA 光电响应及后端处理电路的精确数学模型。

参考文献

- [1] 简耀波, 阮双琛, 周慧鑫, 等. 改进的基于卡尔曼滤波的非均匀性校正算法 [J]. 光电工程, 2008, 35(1): 131-135.
- [2] Harris J G, Ching Y M. Nonuniformity Correction of Image Sequences Using the Constant Statistics Constraint [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(8): 1148-1151.
- [3] Scribner D A, Sarkay K A, Caulfield J T, et al. Nonuniformity Correction for Staring Focal Plane Arrays Using Scene-Based Technology [C]. SPIE, 1990, 1308: 224-233.
- [4] Scribner D A, Sarkay K A, Kruer M R, et al. Adaptive Nonuniformity Correction for IR Focal Plane Arrays Using Neural Networks [C]. SPIE, 1991, 1541: 100-109.
- [5] Torres S N, Hayat M, Armstrong E E, et al. A Kalman-Filtering Approach for Non-Uniformity Correction in Focal Plan Arrays Sensors [C]. SPIE, 2000, 4030: 196-205.
- [6] Narayanan B, Hardie R C, Muse R A. Scene-Based Nonuniformity Correction Technique that Exploits Knowledge of the Focal-Plane Array Readout Architecture [J]. Applied Optics, 2005, 44(17): 3482-3491.
- [7] 全勇, 朱红, 何泰诚. 基于读出电路结构的红外焦平面图像非均匀性校正算法 [J]. 光电工程, 2008, 35(2): 66-70.