文章编号: 1672-8785(2015)08-0018-04

红外传感器采样与光学模糊 效应的仿真研究

史浩然¹ 娄树理² 李召龙¹
(1. 海军航空工程学院研究生管理大队,山东烟台 264001;
2. 海军航空工程学院控制工程系,山东烟台 264001)

摘 要: 准确逼真地生成红外目标的仿真图像需要准确模拟红外传感器效应。采样和光 学模糊效应是红外传感器典型的主要效应。首先讨论了采样和模糊效应的数学模型。然 后,同时考虑这两种效应,采用光线追迹的方法将两种效应的算法融合成一种,提出一 种新的数学模型。根据建立的模型,得到采样与光学模糊效应共同作用的仿真图像。 实验结果表明,所建立的仿真模型能够体现出采样和模糊效应对图像的退化作用,有 利于提高计算的准确性和有效性,提高了红外图像模拟的置信度。

关键词:采样效应;光学模糊效应;红外仿真

中图分类号: TN216 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.08.005

Study of Simulation of Sampling and Blur Effects of Infrared Sensor

SHI Hao-ran¹, LOU Shu-li², LI Zhao-long¹

Postgraduate Training Brigade, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;
 Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: To generate the simulated image of an infrared target accurately and realistically, the effects of an infrared sensor need to be simulated accurately. Sampling and blur effects are the typical main effects of infrared sensors. First, the mathematical models of sampling and blur effects are discussed. Then, both effects are taken into account at the same time. Their algorithms are combined into one algorithm by a ray tracing method and a new mathematical model is proposed. According to the established model, the simulation image under the co-action of sampling and blur effects is obtained. The experimental results show that the established model can reflect the degradation of images due to sampling and blur effects. This is helpful to the improvement of calculation accuracy and efficiency and the increase of the fidelity of infrared image simulation.

Key words: sampling effect; optical blur effect; infrared simulation

基金项目:"十二五"总装预研项目(51303020403-3)

作者简介: 史浩然 (1992-), 男, 安徽阜阳人, 硕士生, 主要研究方向为红外成像系统的建模与仿真。 E-mail: naroahux@163.com

收稿日期: 2015-07-06

0 引言

随着焦平面器件的迅速发展, 红外焦平面 成像系统已经成为主流的成像系统。采用焦平 面器件的系统具有轻便、灵敏度高的特点,人们 称这类成像器为第二代成像系统 [1]。但对于红 外焦平面阵列而言, 红外探测器制造工艺等问 题使得探测元与探测元之间存在间隙。另外,自 然景物图像为非带宽受限图像,空间频率可以 认为是无限大,这免不了会对空间景物产生欠采 样^[2,3]。衍射现象是由光的波动性造成的。光在 传播过程中,只要波面受到限制就一定会产生 衍射。像差是实际光学系统成像与理想光学系 统成像两者之间存在偏差造成的, 衍射和像差 都会造成图像模糊^[4]。考虑到探测器的采样也 会造成图像模糊,基于场景辐射信号在传感器 光学系统和探测器中的传输方式,采用光线追 迹的建模方法提出了 $S_{pi}(\lambda)$ 因子的概念。将探测 器的采样模型和光学系统的模糊模型统一到一 个数学表达式中,将两种算法融合成一种,有利 于提高计算的精确性和有效性,同时能增加红外 仿真图像的置信度。

1 采样效应

由于采样效应的非线性,很难写出采样效 应的调制传递函数,文献 [5] 给出了一种采样调 制函数的近似方法。文献 [6] 给出了另一种基于 图像像素处理的建模方法。下面对基于图像像 素的方法进行详细介绍。

对红外焦平面阵列而言,采样是在一定尺 寸大小的有限个探测元组成的探测阵列上进行 的。图1解释了探测器的采样过程, *f*(*x*,*y*) 表示 经过光学系统作用的成像图像, *d*(*x*,*y*) 表示方 形探测器的孔径函数。



图 1 探测器阵列采样过程框图

假设探测器光敏元是矩形形状的,这样可 以得到探测器光敏元函数:

$$l(x,y) = \frac{1}{ab}rect(\frac{x}{a}, \frac{y}{b}) \tag{1}$$

式中, a和 b是探测器光敏元在水平方向和垂直 方向的大小。探测器单元积分响应函数可表示 为

$$r(x,y) = rect(\frac{x}{X}, \frac{y}{Y})$$
(2)

式中, *X* 和 *Y* 表示探测器阵列的大小,采样点 阵 *samp*(*x*, *y*) 可以表示为

$$samp(x,y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - m\Delta x, y - n\Delta y)$$
(3)

式中, $\triangle x$ 和 $\triangle y$ 表示探测器光敏元的中心距, 式 (1)、式 (2) 和式 (3) 联合起来就可得到探测器 的采样模型:

$$i(x,y) = [f(x,y) \times \frac{1}{ab} rect(\frac{x}{a},\frac{y}{b})] \cdot rect(\frac{x}{X},\frac{y}{Y}) \cdot samp(x,y)$$
(4)

结果最终转化为数字信号,在计算机上以 灰度图像表示。根据每个探测器的间隔和光敏 元尺寸所占的场景像素数目进行采样和积分平 均,即可获取探测器阵列采样后的输出信号。

2 光学模糊效应

光学模糊效应主要包括衍射和像差。对于理想的光学系统,一个物点的像就是一个像点。然而,实际情况并非如此,一个物点的像并不是一个几何点,而是一个亮的扩散圆斑,这个扩散的亮圆斑可以用点扩散函数进行描述^[7]。光学模型取决于对光学系统点扩散函数的计算,点扩散函数描述了在像平面上一点周围能量的分布情况。

光学模糊模型需要计算模糊的直径,模型 中只考虑像差和衍射两种因素的影响,基本的 算法如下所述。

2.1 计算像差模糊的直径

 $d_{abrrations} = \sqrt{d_{sph}^2 + d_{coma}^2 + d_{asting}^2 + d_{chro}^2} \quad (5)$

式中, *d_{sph}* 是球像差直径, *d_{coma}* 是彗形象差 直径, *d_{asting}* 是散像差直径, *d_{chro}* 是色像差直 径,这些可以通过特定的光学系统,用光线追迹 的方法得到^[8]。

2.2 计算衍射模糊的直径

$$d_{diffraction}(\lambda) = 2.44 \frac{\lambda}{D} \tag{6}$$

式中, *D* 为光学系统的通光孔径, *\(\lambda\)*为入射波 长的平均值。

假定点扩散函数是二维高斯分布函数,标 准差 σ 相当于扩散圆斑直径的四分之一,因此 可以通过光学扩散圆的直径计算出函数标准差 σ 。由于光学模糊考虑到衍射和像差两种现象, 因此,在光学模糊模型的计算过程中需要对衍射 与像差的点扩散函数进行卷积运算,对标准差 为 σ_1 、 σ_2 的高斯函数进行卷积。运算得到的仍 然是高斯函数,其标准差为 $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ 。故整 个光学系统的模糊模型可以表示为

$$h(x,y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} exp(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2})$$
(7)

式中, $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$, $\sigma_1 = d_{abrrations}/4$, $\sigma_2 = d_{diffraction}/4$ 。

3 采样效应和光学模糊效应的新模型

由于采样效应和光学模糊效应都会影响积 分时间内探测器区域的能量收集,因此,可以将 两种效应在一种信号运算中进行建模,从而得 到更精确和更有效的计算。

对探测器区域像平面 I_{det} 上接收到的平均 辐照度进行积分,得到平均光谱通量 $\phi_{\lambda}(\lambda)$ 的表 达式:

$$\phi_{\lambda}(\lambda) = \int_{pi \in I_{det}} [\bar{E}_{\lambda}(p_i, \lambda \times h_{pi}(p_i, \lambda)] T(p_i) dI_{det}$$
(8)

式中, 在 p_i 点处的扩散函数 $h_{pi}(p_i, \lambda)$ 为总的 点扩散函数。 $T(p_i)$ 表示积分时间的一小部分, $T(p_i)$ 因子实质就是对时间进行采样,对于凝视 系统,其值为1;对于扫描型系统,其值是介于 0和1之间的变量。这里只讨论凝视型系统,对 扫描型系统不做研究^[9]。通过对以上的分析, 式(8) 变为

$$\phi_{\lambda}(\lambda) = \int_{pi \in I_{det}} \left[\int_{p \in D_b} \bar{E_{\lambda}}(p,\lambda) h_{pi}(p_i - p,\lambda) dD_b \right] dI_{det}$$
(9)

INFRARED (MONTHLY)/VOL.36, NO.8, AUG 2015

式中, *D_b* 是以 *p_i* 为中心、总模糊直径为直径 的圆, 辐照度呈现出高斯分布, 对称地分布在圆 上, 如图 2 所示。将像平面上的每一个点 *p_i* 看 成是独立的热能量源, 可以近似表示成 δ 脉冲函 数。这个性质使不同积分区间内的两个被积函数 能进行交换, 因此式 (9) 变为

$$\phi_{\lambda}(\lambda) = \int_{pi \in I_{det}} \bar{E}_{\lambda}(p_i, \lambda) S_{pi}(\lambda) dI_{det}$$
(10)

式中, $S_{pi}(\lambda)$ 表示探测器区域内 p_i 点周围接收 到的一部分辐照度,其值在 0 和 1 之间,它的 物理意义如图 2 所示。 $S_{pi}(\lambda)$ 是辐照度扩散函数 $h_{pi}(p_i - p, \lambda)$ 的积分,积分区域是探测器上像平 面 I_{det} 与模糊圆 D_b 的交集部分,在模糊圆 D_b 外 的部分等于 0。 $S_{pi}(\lambda)$ 可以用以下表达式得到:

$$S_{pi}(\lambda) = \int_{pi \in I_{det}} h_{pi}(p,\lambda) dI_{det}$$
(11)

因为所有的能量假设都包含在 D_b 内, $h_{pi}(p_i, \lambda)$ 归一化成为

$$\int_{p\in D_b} h_{pi}(p,\lambda)dD_b = 1 \tag{12}$$

S_{pi}(λ)结合了模糊效应和通过探测器区域像 平面的空间采样效应。

最终辐照通量通过式 (10) 计算出来, 这个 积分公式是对探测器上的像平面进行采样得到 的。



探测器区域上接收到的像平面Ida

图 2 $S_{pi}(\lambda)$ 因子的物理意义

http://journal.sitp.ac.cn/hw

4 采样模糊效应的仿真图

仿真条件为探测器波段 8~12 μm, 取入射 波长平均值, 即 λ 为 10 μm; 探测器的尺寸为 25 μm× 25 μm, 光学系统的焦距为 150 mm, 通光 孔径 D = 120 mm。原图采用 256× 256 像素的 舰船目标, 以 4×4 的光敏尺寸对场景中的舰船 图像进行采样,得到的仿真图像如图 3~ 图 5 所 示。



图 3 原始场景图



图 4 采样图像



图 5 采样模糊图像

图 4 只考虑了探测器的采样效应。可以看出,由于采样的原因,输出的图像有明显的锯齿 http://journal.sitp.ac.cn/hw 条纹,同时在舰船的边缘和水面,这种波纹现象 更加严重,这是由于采样造成的混淆在图像的 高频部分尤为严重。图5根据建立的新模型,结 合采样效应和模糊效应,在一种算法中实现了对 这两种效应的建模仿真,仿真图像比图4中的舰 船目标更模糊,图像的细节部分已经不能被明 显分辨出来,这是由于光学模糊的作用。

5 结语

对红外传感器采样效应和模糊效应进行了 建模仿真,提出将两种效应融合成一种算法处 理的新模型,给出了相应的数学表达式,得出了 仿真图像。仿真结果表明,采样图像的边缘部分 会出现锯齿现象,同时采样和光学模糊效应使得 图像的细节部分不能被很好地分辨出来,会降 低图像的成像质量。根据本文提出的数学模型 得到的仿真结果与客观图像相吻合。因此,红外 成像系统的建模仿真必须考虑到这两种效应的 作用效果,这对光电系统的成像以及后续的系 统评估等具有重要意义。

参考文献

- [1] 彭新红, 吴常泳, 陈雨良. 采样成像系统性能评估 [J]. **红外与毫米波学报**, 2001, **20**(6): 477-480.
- [2] Lei H, Chen Q, Hing C S, et al. Source Enumeration for Large Array Using Shrinkage-based Detectors with Small Samples [J]. Aerospace and Electronic System, 2015, 51(1): 344–357.
- [3] 王长伟, 江月松, 刘丽, 等. 光学综合孔径成像系统探测器采样研究 [J].光电子·激光, 2010, 21(3):424-429.
- [4] 丁帅, 匡海鹏, 王德江, 等. 探测器采样频率与光学系统衍射截止频率比值对航空图像质量的影响 [J].
 光子学报, 2013, 42(7): 828-831.
- [5] 王晓蕊,张建奇,冯卓祥,等.采样红外成像系统 仿真及最小可分辨温差预测方法研究 [J]. 红外与 毫米波学报, 2004, 23(6): 436–440.
- [6] 陈治宣. 红外传感器典型效应模拟及系统仿真研究 [D]. 烟台: 海军航空工程学院, 2007.
- [7] Christelle G, Rene C, Jihed F, et al. General Framework for Infrared Sensor Modeling [C]. SPIE, 1998, 3377: 59–70.
- [8] 冯克成, 刘景生. **红外光学系统** [M]. 北京兵器工 业出版社, 1994.
- [9] Christelle G, Rene C, Jihed F, et al. Physical-based Infrared Sensor Effects Modeling [C]. SPIE, 1999, 3701: 81–94.

INFRARED (MONTHLY)/VOL.36, NO.8, AUG 2015