

文章编号:1004-4213(2011)04-0596-6

# 红外凝视传感器定量仿真及模型验证

张福娣, 张建奇, 徐茵

(西安电子科技大学 技术物理学院, 西安 710071)

**摘 要:**针对新一代红外凝视成像传感器,依据红外辐射能量传递和转换的物理过程,完成了对传感器各组成单元的物理效应建模.不同于以往成像模型的定性仿真,该模型实现了对系统各模块成像特性的定量描述,综合考虑了传感器的信号传递特性、空间传递特性、空间采样特性和时空噪音特性,构建了较为完善的高仿真度红外成像仿真模型.为验证仿真模型的有效性,搭建了有效性实验验证平台,获取了真实热像仪的性能曲线和输出图像.通过计算和比较仿真模型和真实热像仪性能曲线和输出图像相似程度,量化评价了模型的仿真度,验证了仿真模型的有效性.

**关键词:**红外凝视阵列; 定量仿真模型; 仿真度; 验证

**中图分类号:** TN216

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20114004.0596

## 0 引言

随着红外焦平面成像技术的发展及其在航空、航天、气象、环境等领域的广泛应用,新型凝视成像传感器以其独特的优点逐渐取代传统的扫描器件成为光电成像系统的主流.而光电成像系统仿真可以为传感器系统模块参量优化设计提供参考依据,缩短设计周期,还可以为战术策略提供分析模型,解决许多实际测试无法满足的技术问题.因此,近年来对焦平面成像仿真模型的研究成为国内外机构研究的热点之一,相继涌现出许多很具代表性的成像仿真平台.

美国夜视和电子传感器管理局开发的 NVTherm 模型<sup>[1-2]</sup>提出了很多经典特性理论如三维噪音分类、采样混叠理论等,但由于该性能模型主要侧重于系统综合性能评价,对传感器模型做了多处简化,大量使用经验值和估计值来取代对传感器效应的精确仿真描述.美国罗彻斯特理工学院开发的 DIRSIG 模型<sup>[3]</sup>针对遥感成像,注重遥感目标环境辐射特性例如精细的光谱及偏振计算,对传感器模块考虑较粗.波兰 INFRAMET 公司开发的热成像模拟软件 VIRCAM 和 SIMTERM<sup>[4]</sup>具有逼真的动态噪音仿真效果,但是在其他物理过程上偏重于性能的测试和仿真.此外,英、法、德、瑞典、以色列等国的国防及商业研究机构也都支持开发了类似的红外传感器成像模型.

近年来,国内在成像传感器建模方面也取得了长足的进步,北京理工大学<sup>[5]</sup>、中科院遥感所<sup>[6]</sup>、南京理工大学<sup>[7-8]</sup>等单位都研制了针对某个具体应用场景的性能评价模型或成像仿真模型.但是与国外的研究成果相比,仍有明显的差距,主要表现在以下几个方面:1)目前国内针对光电成像仿真模型的研究主要侧重于对目标背景辐射、大气等模块的建模,对传感器部分仅是简单定性仿真,且多是对各模块独立建模,对模块之间的匹配耦合特性考虑很少.2)国内的模型主要从线性系统的角度进行考虑,对成像过程中的非线性因素考虑不足,无法实现高仿真度的输出效果.3)国内很少见到对光电传感器建模的置信度进行验证评价的报道,而它已成为光电成像传感器建模仿真实用化的前提条件.

本文以红外凝视传感器为仿真对象,考虑了输入辐射空间分辨率与传感器之间的匹配耦合关系,建立了传感器的信号传递特性模型、空间传递特性模型、空间采样特性模型和噪音特性模型,定量分析了系统各组成模块物理参量对传感器性能的影响,构建了基于信号级的成像虚拟样机平台.利用真实热像仪及验证实验平台对仿真模型进行了实验验证,量化评价了仿真模型的可信性.

## 1 理论建模体系

按照红外凝视传感器成像的物理过程,仿真模型的物理流程和所考虑的主要物理效应如图 1.

基金项目:国家自然科学基金(No. 60777042、No. 61007014)资助

第一作者:张福娣(1981-),女,博士研究生,主要研究方向为红外成像传感器. Email: fdzhang@mail.xidian.edu.cn

导师(通讯作者):张建奇(1960-),男,教授,博导,主要研究方向为红外成像系统性能评估. Email: jqzhang@mail.xidian.edu.cn

收稿日期:2010-11-04;修回日期:2010-12-20

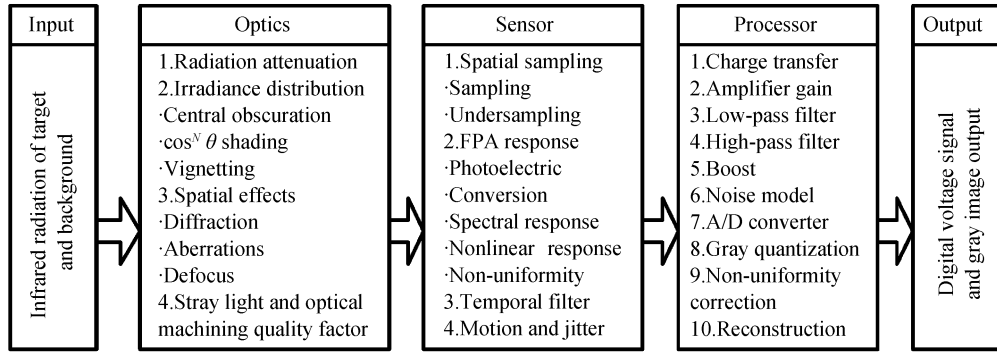


图 1 红外凝视成像传感器建模框架  
Fig. 1 Simulation framework of IR staring imaging sensors

1.1 信号传递转换特性

红外成像传感器的信号传递过程其实是从场景辐射到传感器电压和灰度输出的一个能量传递和转换的过程. 依据红外传感器的成像物理过程, 场景的辐射信号在传感器的各组成模块(光学系统、探测器和电路处理单元)逐级进行传递和转换, 其基本过程如图 2.

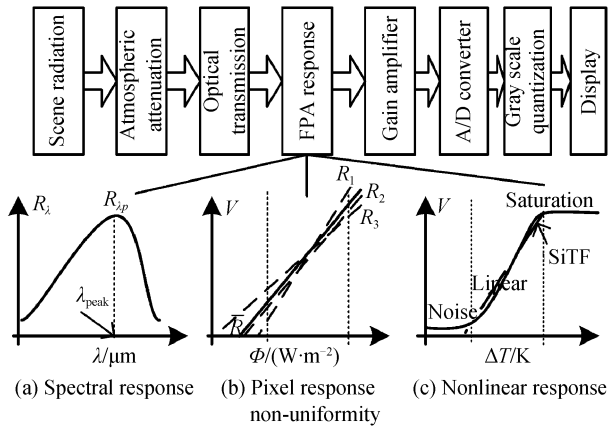


图 2 凝视成像传感器信号传递和转换过程  
Fig. 2 Signal transfer and conversion flow for IR staring imaging sensors

探测器瞬时视场范围内绝对温度为  $T$  的小单元发出的辐射能量在焦平面阵列上  $[i, j]$  坐标处的探测元的电压响应  $V_{ij}$  可表示为

$$V_{ij} = G_{ij} H(\theta_{ij}) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{ij}(\lambda) (1-K) \Phi(\lambda, \theta_{ij}) d\lambda + D_{ij} \quad (1)$$

式中

$$\Phi(\lambda, \theta_{ij}) = \frac{\tau_{\text{optics}}(\lambda) M(\lambda, T) \cos^N(\theta_{ij}) A_d}{1 + 4F^2} \quad (2)$$

$G_{ij}$  为探测元的系统增益,  $\theta_{ij}$  为探测单元相对于光轴的偏角,  $H(\theta_{ij})$  为探测元的面晕系数,  $[\lambda_1, \lambda_2]$  为探测元的光谱响应波长范围,  $R_{ij}(\lambda)$  为探测元的光谱响应率,  $K$  为光学系统遮拦面积比,  $D_{ij}$  为探测元暗电流产生的暗电压,  $\Phi(\lambda, \theta_{ij})$  为该探测元在光学系统输入口径面处所接收到的辐射通量, 当  $\theta_{ij} = 0$  时表示该探测元位于系统光轴上,  $\cos^N(\theta_{ij})$  为像面照度分布函数,  $N$  为阶降指数, 取值在  $2 \sim 4$  之间,  $F$

为光学系统的  $F$  数,  $\tau_{\text{optics}}(\lambda)$  为光学系统的总的光谱透过率,  $A_d$  为探测敏感元的面积,  $M(\lambda, T)$  代表绝对温度为  $T$  的黑体在波长  $\lambda$  处的光谱辐出度, 可由 Planck 辐射定律计算. 上述每个成像单元产生的电压  $V$  依据系统 A/D 转换器的位数及电压灰度量关系进行 A/D 转换和灰度量化, 最终得到一定动态范围的输出灰度图像.

1.2 空间调制传递特性

红外凝视传感器系统各模块除实现对目标背景辐射信号的传输、转换和响应之外, 还起着对辐射信号的空间调制作用. 成像系统的空间调制传递特性在图像效果上主要表现为模糊, 主要空间调制效应包括光学系统的衍射、像差、离焦, 探测器的时间滤波、像移、抖动, 信号处理电路的 CCD 转移、扩散、电子滤波、高频提举等. 这些物理效应均符合线性系统调制特征, 可看作是线性效应, 利用各组成模块的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 来进行模拟. 用 MTF 法仿真红外传感器各模块物理效应的基本流程和效果如图 3, 各模块 MTF 的详细描述可参考文献 [9]. 在实际的成像仿真过程中, 应根据各种模糊引入的顺序, 即真实的成像物理过程分别加入对各物理效应的 MTF 模拟.

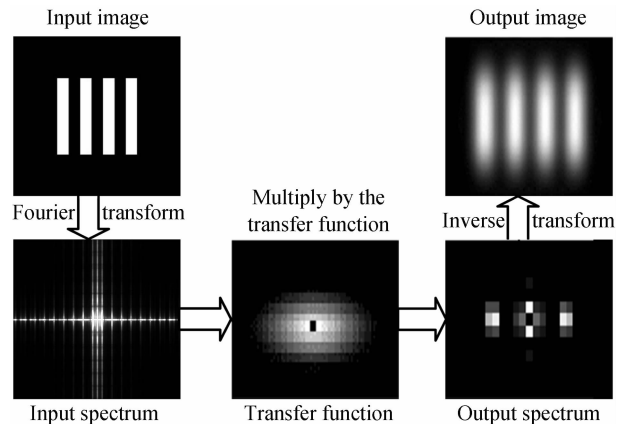


图 3 MTF 法仿真流程和效果  
Fig. 3 Illustration of MTF simulation flow and effects

### 1.3 空间采样特性

探测器的空间采样特性包括采样效应和由于探测单元占空比引起的欠采样效应. 对于新型的焦平面器件, 普遍存在的空间欠采样导致高于 Nyquist 频率的信息叠加入低频基带信号, 产生了明显的频谱混淆, 即虚响应 (Spurious Response, SR), 产生物理如图 4(a)), 增加了空域中成像系统的模糊效果. 虚响应概念被应用于采样成像系统的欠采样频谱混叠的量化, 根据傅立叶变换的相似定理, 空域中增大等效于频域中收缩. 因此, 欠采样混叠效应等效于频域中的 MTF 收缩<sup>[9]</sup>, 收缩的 MTF 效果如图 4(b).

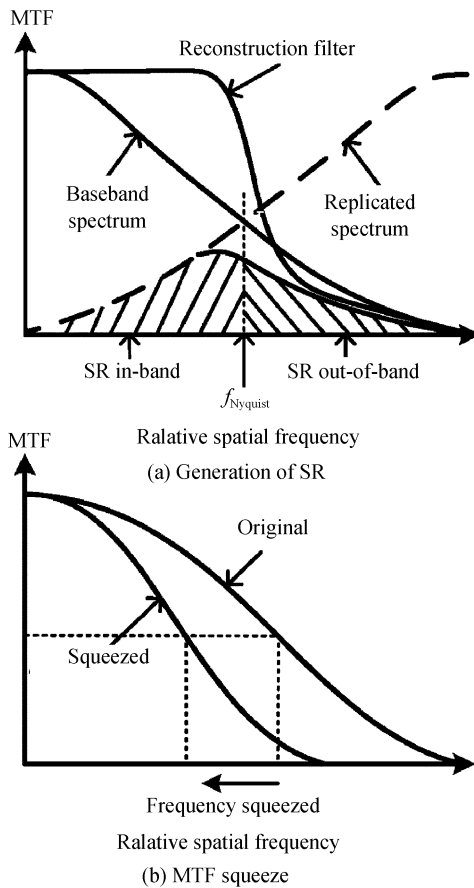


图 4 欠采样成像系统的压缩 MTF 函数

Fig. 4 A squeezed MTF for undersampled imaging sensors

针对探测器阵列的空间采样, 以连续/离散/连续分析模型<sup>[10]</sup>为基础, 考虑输入分辨率与探测器分辨能力之间的匹配关系, 采用 MTF 法及压缩 MTF 法来仿真探测器阵列的采样和欠采样效应, 建立了传感器的空间采样模型, 分析探测器阵列采样对成像效果和分辨率的影响.

### 1.4 时空噪音特性

红外传感器的噪音对系统的成像质量和探测能力有很大影响, 因此精确地描述探测器的噪音对传感器仿真模型有重要意义. 对于传统的单元或扫描式探测器, 大多采用噪音等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 来描述

探测器的噪音等级. 但是, 对于新型的焦平面探测器, NETD 不能够全面地表征其噪音特性. 针对此种情况, 夜视和电子传感器管理局提出了用于噪音分类的三维噪音模型, 该模型按照时空关系将噪音分成了 8 个分量, 各个分量按时空关系构成了一个三维立方体. 与传统的噪音模型相比, 三维噪音分析方法将空间噪音扩展到时间域内, 能够形象地表征焦平面探测器所有的噪音源特征, 易于理解和进行分析. 三维噪音模型的 8 个噪音分量的产生物理各不相同, 对每种噪音分量的具体描述可参见文献<sup>[11]</sup>, 其存在的形式取决于红外系统的成像技术. 也就是说每个红外传感器并不是存在所有的噪音, 可能是其中几种噪音占主导地位, 其他的次要噪音或不存在或对整体性能的影响可以忽略不计. 按照三维噪音理论的分类方法, 对于凝视型探测器, 其主要噪音为时空随机噪音  $\sigma_{TVH}$  和固定图形噪音  $\sigma_{TV}$ . 时空随机噪音可看作独立的、服从方差为  $\sigma_{TVH}$  分布的高斯白噪音

$$\sigma_{TVH} = \frac{4F^2 \Delta f_n^{1/2}}{\tau_{optics} A_d^{1/2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{D^*(\lambda, T) \partial M(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda} \quad (3)$$

其中

$$\frac{\partial M(\lambda, T)}{\partial T} = \frac{c_2}{\lambda T^2} \frac{e^{\frac{c_2}{\lambda T}}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} M(\lambda, T) \quad (4)$$

$D^*(\lambda, T)$  代表探测器的光谱探测灵敏度;  $\Delta f_n$  为等效噪音带宽, 对于凝视型探测器, 通过片上积分电路已对探测器输出进行了低通滤波, 此时的系统带宽主要由积分时间决定;  $c_2$  为第二辐射常量. 固定图形噪音  $\sigma_{TV}$  的主要来源为探测器的残余非均匀性, 可以通过模拟计算残余非均匀性来模拟该分量. 红外传感器的残余非均匀性与非均匀性校正方法有关, 也与工作环境温度 and 背景辐射特性有关.

## 2 模型仿真结果

图 5~图 8 展示了仿真模型对一个多光谱输入

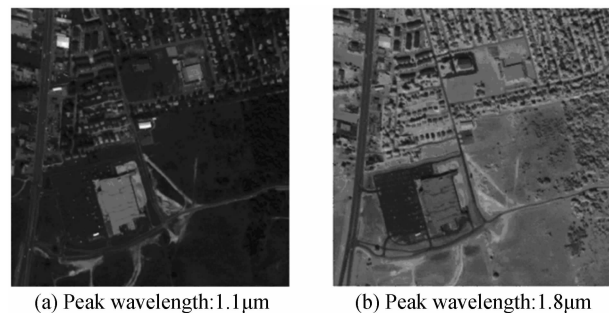


图 5 不同光谱响应曲线下的仿真模型的输出结果

Fig. 5 Results of the simulator with different spectral response



(a) Dynamic range: 4mV:0.5mV (b) Dynamic range: 1.8mV:0.5mV

图 6 探测器动态范围改变时仿真模型的输出结果

Fig. 6 Results of the simulator with different dynamic range

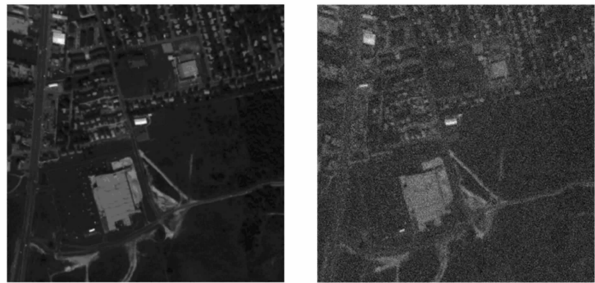


(a) Integration time=3ms

(b) Integration time=1ms

图 7 探测器的积分时间改变时仿真模型的输出结果

Fig. 7 Results of the simulator with different integration times



(a) Higher specific detectivity( $D^*$ ) (b) Lower specific detectivity( $D^*$ )

图 8 探测灵敏度改变时仿真模型的输出结果

Fig. 8 Results of the simulator with different detectivity 数据设置不同探测器性能参量的输出结果,结果表明在几个关键性能参量(光谱响应参量、动态范围、积分时间和探测灵敏度)变化时,仿真模型的输出表现和真实红外探测器理论输出结果一致。

图 5 为仿真模型对输入数据进行光谱选择的结果,从图中可以明显看出该模型能够区分出不同波长的辐射信号,响应峰值波长为  $1.1 \mu\text{m}$  的探测器输出结果较峰值响应波长在  $1.8 \mu\text{m}$  处的探测器具有更好的目标背景对比度,能更容易地从背景中分辨出目标。图 6 为改变探测器动态范围时的输出结果,由图 6 可看出探测器动态范围变大时,目标背景的对比度明显增强。图 7 为改变探测器积分时间时的仿真模型输出结果,图中当积分时间改变时模型输出图像的信噪比发生了明显变化。图 8 为改变探测器探测灵敏度时仿真模型的输出结果,由图 8 可以看出,当探测灵敏度降低大约一个量级时,传感器

仿真模型输出信噪比发生了显著的变化。

### 3 模型实验验证

为确认红外凝视传感器仿真模型的有效性,对模型进行了实验验证,有效性验证平台、被测热像仪及其相对光谱响应曲线如图 9。图 10 为图 9 中所示的被测热像仪实测和仿真模型获取的 MTF 结果对比图,由图 10 可看出仿真模型的 MTF 曲线与实际热像仪的 MTF 曲线具有良好的一致性。这里我们采用曲线相似度(Curve Similarity, CSIM)来描述 MTF 曲线的契合程度,经计算图 10 中所示的 MTF 曲线相似度为 0.994 2。

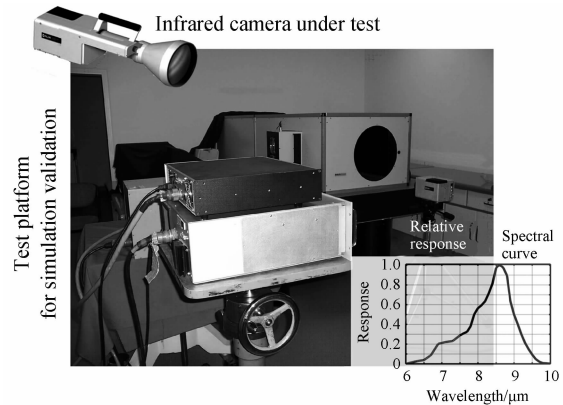


图 9 模型有效性验证平台

Fig. 9 Test platform for simulation validation

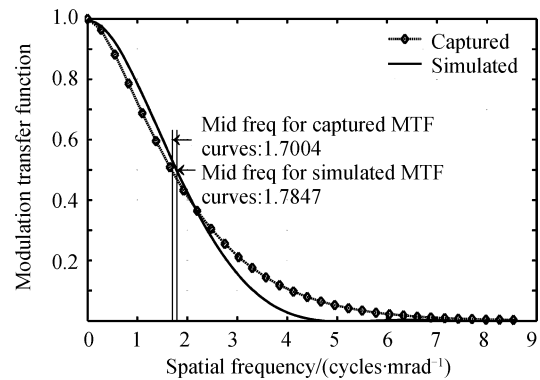


图 10 真实热像仪和仿真模型获取的 MTF 曲线对比

Fig. 10 MTF comparison for the real and simulated cameras

以标准实验室四条带靶标为测试目标,利用验证平台获取的真实热像仪的输出图像及其直方图如图 11。以标准靶仿真软件所产生的虚拟四条带靶标辐射为输入(虚拟靶标的各项参量设置与真实靶标完全一致),传感器仿真模型(模型各项参量设置与被测热像仪实际参量相同)输出结果及直方图如图 12。对上述两种途径得到的图像进行图像质量、携带信息及整体相似度比较,结果在表 1 中列出。由于对此种情况下的相似度评价国际上尚无公认的评价指标,本文尝试使用了在误差分析、信息论、图像压缩、图像融合等多领域常见的评价方法,以期得到综合

的评价效果. 本文所使用的指标有整体均值 (Mean)、均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE)、信息熵 (Entropy, ENT)<sup>[11-12]</sup>、峰值信噪比 (Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)<sup>[13]</sup>、结构相似度 (Structural Similarity, SSIM)<sup>[14-15]</sup>, 分别从灰度分布、信息量、结构等不同角度评价图像相似度. 由表 1 的数据可看出, 仿真模型获取的输出图像在均值、均方差和边缘熵三个评价参量值上均比较接近真实热像仪的输出图像, 而仿真模型的所有相似度

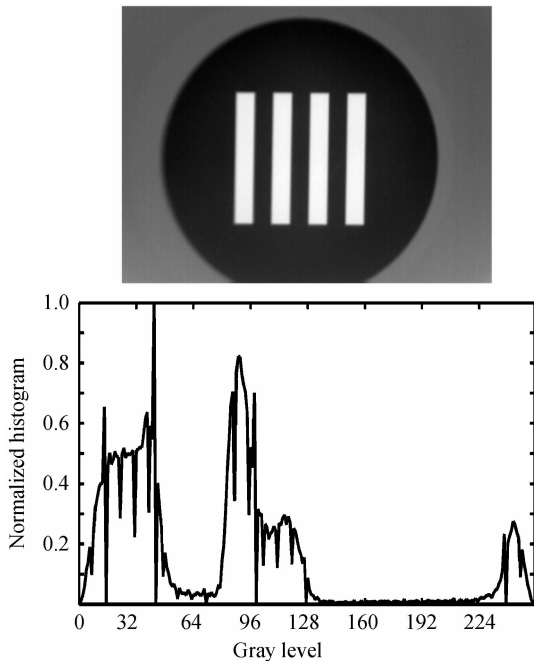


图 11 真实热像仪获取的测试图像及其直方图  
Fig. 11 Illustration of an image obtained from a real camera

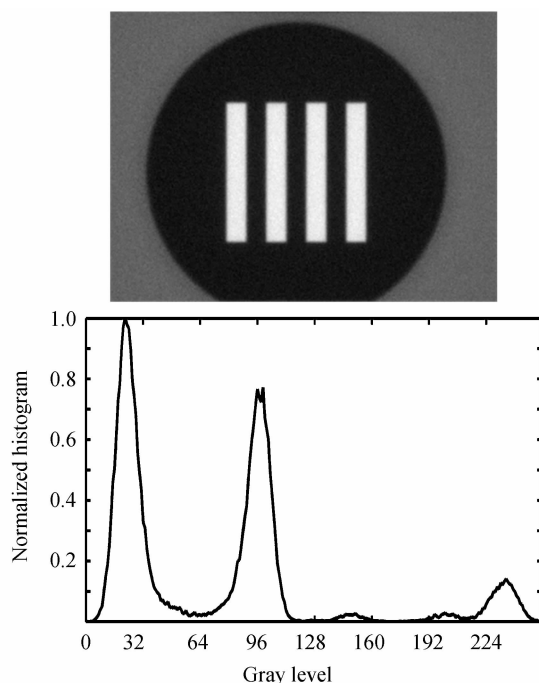


图 12 仿真模型获取的测试图像及其直方图  
Fig. 12 Illustration of an image obtained from the simulator

表 1 实测和仿真输出结果的相似度比较数据  
Table 1 Fidelity data calculated from the outputs of the real and simulated cameras

Metric	Original value		Normalization
CSIM	MTF data list as Fig. 10		0.994 2
Mean	Mean	103 96	0.932 0
RMSE	RMSE	77.143 75.198	0.974 7
ENT	Marginal Entropy	6.871 2 6.468 2	0.889 6
	Joint Entropy	11.867 1	
PSNR	PSNR	21.072	0.716 0
SSIM	Luminance	0.997 7	0.933 0
	Contrast	0.999 8	
	Structure	0.935 4	

评价参量的归一化值均大于 70%, 由此表明, 本文建立的仿真模型具有较高的置信度.

当然, 由于某些热像仪参量获取困难和测试条件限制, 目前无法针对更多典型型号的凝视热像仪进行仿真验证实验, 上述仿真模型验证结果有一定的局限性, 在以后的工作中还有待于进一步完善.

## 4 结论

目前的红外传感器仿真模型多是基于性能评价的定性描述, 也没有全面地考虑焦平面阵列所引入的一系列非线性效应. 本文依据红外焦平面成像的物理过程, 定量化分析系统各组成模块物理参量对传感器性能的影响, 建立了准确描述焦平面成像系统的信号传递特性模型、空间传递特性模型、空间采样特性模型和时空噪声特性模型, 从而实现了红外凝视传感器在输入特定参量条件下的输出图像模拟. 文章还针对实验室中的特定热成像系统, 搭建验证实验平台, 获取真实热像仪的输出图像和性能曲线, 与仿真模型得到的数据进行综合相似度对比分析, 从而验证模型的有效性. 文章综合考虑多方面影响因素对仿真模型置信度进行了计算评估, 实验及计算结果表明, 本文建立的成像仿真模型具有较高的置信度.

本文的研究成果可以应用于成像传感器研制的各个阶段 (可行性论证、方案论证、分析、设计、运行、维护、训练和管理等), 根据不同的系统设置、作用对象以及使用环境条件, 进行有针对性的系统的优化设计, 缩短研制周期, 降低研制成本.

### 参考文献

- [1] TOMKINSON D, WILHELM T, FLUG E, *et al.* NV-THERM based sensor effects for imaging simulations [C]. *SPIE*, 2005, **5784**: 157-169.
- [2] RICHARDSON P, MILLER B. Third-generation FLIR simulation at NVESD [C]. *SPIE*, 2007, **6543**: 65430K.

- [3] JAKUBOWSKI M K, POGORZALA D, HATTENBERGER T J, *et al.* Synthetic data generation of high-resolution hyperspectral data using DIRSIG [C]. *SPIE*, 2007, **6610**: 66100G.
- [4] CHRZANOWSKI K, KRUPSKI M. Computer simulator for training operators of thermal cameras [C]. *SPIE*, 2004, **5424**: 187-194.
- [5] JIN Wei-qi, WANG Ji-hui, WANG Xia, *et al.* Development on performance evaluation of thermal imaging systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(1): 7-13.  
金伟其, 王吉晖, 王霞, 等. 红外成像系统性能评价技术的新发展[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(1): 7-13.
- [6] YANG Gui-jun, LIU Qin-huo, LIU Qiang, *et al.* Mid-infrared atmosphere radiation transfer analytic model and remote sensing images simulation [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29**(3): 629-634.  
杨贵军, 柳钦火, 刘强, 等. 中红外大气辐射传输解析模型及遥感成像分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, **29**(3): 629-634.
- [7] QU Hui-ming. Research on infrared imaging electronics theory and its key techniques [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.  
屈惠明. 红外成像电子学理论及其关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [8] SUI Xiu-bao. Research on the imaging theory and the Key techniques of uncooled staring thermal imager [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.  
隋修宝. 非制冷凝视热像仪成像理论以及关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [9] HOLST G C. Electro-optical imaging system performance [M]. 5th ed. Bellingham WA: SPIE Press, 2008.
- [10] WANG Xiao-rui. Research on modeling of IR FPA imaging system & TOD performance characterization method [D]. Xi'an: Xidian University, 2005.  
王晓蕊. 红外焦平面成像系统建模及 TOD 性能表征方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- [11] O'SHEA P, SOUSK S. Practical issues with 3D-noise measurements and application to modern infrared sensors [C]. *SPIE*, 2005, **5784**: 262-271.
- [12] PLUIM J P W, MAINTZ J B A, VIERGEVER M A. Mutual information based registration of medical images: a survey [J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2003, **22**(8): 986-1004.
- [13] CHI Xue-fen, HAN Chang-yuan, YI Zhi-dong. Matching design methods based on information theory in sampled imaging systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 278-283.  
迟学芬, 韩昌元, 易志栋. 基于信息理论的采样成像系统匹配设计[J]. *光学学报*, 2003, **23**(3): 278-283.
- [14] SUN Wen-fang, ZHAO Yi-gong, ZHU Hong. Low bitrate image compression scheme based on noise-shaping contourlet transform [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 3004-3008.  
孙文方, 赵亦工, 朱红. 一种基于噪音修整 Contourlet 变换的低码率图像压缩算法[J]. *光子学报*, 2009, **38**(11): 3004-3008.
- [15] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, *et al.* Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Trans Image Processing*, 2004, **13**(4): 600-612.
- [16] YANG Cui, ZHANG Jian-qi, WANG Xiao-rui, *et al.* A novel similarity based quality metric for image fusion [J]. *Inform Fusion*, 2008, **9**(2): 156-160.

## Quantization Simulation and Fidelity Validation of Infrared Staring Imaging Sensors

ZHANG Fu-di, ZHANG Jian-qi, XU Yin

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Aiming at the new generation of infrared staring imaging sensors, primary physical effects modeling of imaging system elements was accomplished based on thermal infrared radiative transfer and energy conversion in imaging physical processes. The simulation model, which is different from those qualitative models available now, quantitatively represents the modulation characteristics of input information by design parameters of imaging system elements. Through building the signal response model, spatial transfer model, spatial sampling model, and noise characterization model for infrared imaging sensors, a perfect simulator could be established and high-fidelity simulation could be realized for the imaging process. For credibility validation of the simulation model, an experiment platform was constructed to capture the system performance curve and output image of a real infrared camera. Subsequently the similarities of performance curves and output images between the simulator and the real device were calculated and compared, and a quantitative evaluation of the simulation fidelity was made. Finally, the credibility of the simulation model was validated by the fidelity data.

**Key words:** Infrared staring array; Quantization simulation model; Fidelity; Validation