

文章编号: 1672-8785(2014)07-0001-04

红外成像传感器建模与仿真 技术研究进展

娄树理 张 健 任建存 李召龙

(海军航空工程学院控制工程系, 山东烟台 264001)

摘 要: 通过对红外成像传感器系统效应建模与仿真进行研究, 不仅可以较真实地对红外成像武器系统进行分析、测试和评估, 而且还可为红外传感器性能分析和设计提供依据, 因此具有重要的军事和经济意义。分析了红外成像传感器效应建模与仿真方法的研究现状, 详细介绍了几种典型的红外传感器模型, 并对红外传感器效应建模与仿真技术提出了几点看法。

关键词: 红外成像系统; 传感器; 仿真模型

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.07.001

Progress of Effect Modeling and Simulation of Infrared Imaging Sensors

LOU Shu-li, ZHANG Jian, REN Jian-cun, LI Zhao-long

(Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: The modeling and simulation of various effects of infrared imaging sensor systems are not only helpful to the actual analysis, test and evaluation of infrared imaging weapon systems, but also can provide the basis for the performance analysis and design of infrared sensors. Therefore, they are of importance to military and economy. The current status of effect modeling and simulation of infrared imaging sensors are analyzed. Several typical infrared sensor models are described in detail. Finally, some ideas are proposed to the effect modeling and simulation of infrared sensors.

Key words: infrared imaging system; sensor; simulation model

0 引言

随着红外成像制导武器的不断发展, 人们越来越重视对红外成像制导系统仿真技术及其应用进行研究。利用仿真技术测试武器系统的性能, 能够降低研制成本和缩短研制周期, 从而提高武器系统的效费比^[1]。因此, 红外成像制导系统仿真技术在导弹性能评估中发挥着越来越重要的作用。

目前红外成像半实物仿真技术可以分为景像投影和信号注入式两种^[2]。在信号注入式仿真模式下, 被测装备的红外传感器系统不直接参与仿真试验, 因此需要考虑红外传感器系统效应的影响。通过对红外成像传感器系统进行建模, 可以避开红外动态景像投影器的瓶颈制

收稿日期: 2014-05-15

基金项目: 总装备部“十二五”预研项目(51303020403-3)

作者简介: 娄树理(1976-), 男, 山东蒙阴人, 讲师, 博士, 主要从事光电制导、图像处理以及红外图像生成方面的研究。E-mail: shulilou@sina.com

约^[3]。利用传感器模型直接模拟红外传感器系统的输出图像,并以信号注入的方式将数据实时送往被测系统的信号处理模块。该方法不仅可以较真实地对武器系统进行分析、设计、测试和评估,而且还可为现有的传感器性能分析和新型红外传感器设计提供依据。

本文分析了红外成像传感器效应建模和仿真方法的研究现状,详细介绍了几种典型的红外传感器模型,并对传感器效应建模与仿真技术提出了几点看法。

1 红外成像传感器系统建模与仿真研究

根据红外成像系统的工作原理,目标和背景发出的红外辐射经过大气传输之后,通过光学系统会聚辐射、探测器光电转换以及信号放大电路变换处理等环节,最终被转换成红外图像以供后续信号处理或目标探测识别。从红外成像的物理过程来看,传感器系统一般会在光学系统、探测器阵列和信号处理电路等3个环节中对成像产生影响,而不同物理结构的传感器系统也只是具有不同的主导因素而已。目前,红外成像传感器系统效应建模与仿真技术的实现方法逐渐趋向多样化,主要包括光线追迹法、传递函数法和图像像素处理法三种^[4]。

1.1 红外光学系统的建模与仿真

在红外光学系统对红外成像的各种影响中,线性效应主要表现为由其本身产生的衍射、像差和光学系统的能量衰减,而非线性效应则主要表现为畸变和渐晕。目前,在对这些线性效应进行分析和建模时,主要根据线性系统理论和针对不同的波长、焦距和孔径形状,采用传递函数方法对其进行建模和仿真^[5]。由于无法采用传递函数方法,人们对非线性效应的研究相对较少。一般采用光线追迹方法对渐晕效应进行建模和仿真,并可推导出两种表征方式:一种是 $\cos^N \theta$ 加权因子^[6],即把图像各像点的灰度值乘以一个 $\cos^N \theta$ 加权因子,其中不同成像传感器的滚降幂数 N 的确定还存在问题;另一种方

法是用渐晕系数表示渐晕现象的严重程度^[7],该表征方式充分考虑了入射光瞳和入射窗对成像光束的拦截作用。另外,一般在空域中通过校正项对畸变效应进行建模,并基于图像像素处理法实现仿真。

1.2 红外成像探测器的建模与仿真

红外焦平面阵列探测器对成像的影响与其材料、物理结构等多方面因素有关,它们主要源于探测器的空间和时间滤波效应、采样效应、探测器响应的非均匀性以及噪声等方面。一般采用传递函数方法对空间和时间线性滤波效应进行建模和仿真。针对不同的红外探测器类型可以建立起相应的传递函数模型。目前,探测器阵列采样效应建模与仿真方法主要有两种:一种是采用调制传递函数进行建模,该方法认为采样效应等效于频率域中调制传递函数的压缩或挤压^[8];另一种则是在空域上根据探测器响应与采样过程进行分析和建模^[9],并采用图像像素处理方法实现仿真。红外探测器的非均匀性是重要的研究内容之一。由于其产生原因是多方面的,人们到目前为止还没有建立适应性较强的红外焦平面阵列非均匀性模型。现有的非均匀性模型研究都是面向特定的工作条件和模式建立起来的^[10]。目前,探测器阵列非均匀性效应建模与仿真方法主要有两种:一种是将非均匀性看作是固定图案噪声^[11],然后通过噪声模拟实现仿真;另一种则是基于定标校正原理,通过用图像像素处理方法将增益和偏置施加于图像来实现仿真^[12]。作为红外成像系统的主要噪声,红外探测器的噪声会影响该系统的成像质量。各种系统具有不同的噪声来源。目前,噪声分析仿真一般采用3D噪声模型来实现建模和仿真^[13]。

1.3 信号放大电路的建模与仿真

在红外传感器系统中,信号放大电路大多采用低通/高通滤波器的组合。采用不同的处理电路可以得到不同的滤波效果。人们一般采用传递函数法对信号放大电路的滤波效应进行分析和建模,并针对不同信号电路建立相应的传递函数模型。

2 典型红外成像传感器仿真模型

目前, 国外红外成像传感器系统仿真研究开展得较为深入, 美国等国在红外成像传感器仿真模型及其研究方法上投入了大量人力、物力, 并取得了一些研究成果, 如 SYTHER、IGOSS、NVTherm、IBSM 和 IRISIM 等传感器模型; 国内红外成像传感器系统研究则开展得较少, 而且主要也只是涉及探测器噪声。

2.1 SYTHER 红外成像传感器仿真模型

法国 Dassault 航空公司子公司研制的 SYTHER 红外成像传感器仿真模型可以实现任何环境、任何红外波段探测器的景像仿真^[14]。该模型包括红外景像模型、环境模型和红外传感器模型, 其中 SYTHER 红外传感器模型是一种非常完善的传感器模型, 能够满足用户的精度要求。

SYTHER 红外成像传感器仿真模型负责从扫描器、探测器、光学系统和电子线路等 4 个部分对传感器效应进行模拟仿真。该模型不仅可以仿真光学系统的几何失真、辐射度效应、像差模糊、衍射模糊、聚焦模糊和视线抖动等效应以及探测器的时空采样、非均匀性、非线性、噪声和暗电流等效应, 而且还可仿真电子线路的放大、量化以及自动增益控制等效应。SYTHER 仿真模型主要采用光线追迹法和后处理技术对各种效应进行建模和仿真, 建模准确, 适用于并行运算; 然而光线追迹分析会涉及到积分计算, 不利于算法的简便性, 因此会对运算速度产生一定影响, 而且也无法对人眼的观察效应进行分析和模拟。

2.2 IGOSS 红外成像传感器仿真模型

瑞典国防研究中心研制的 IGOSS 红外成像传感器仿真模型^[15]主要包括场景模块、运动模块、动态模块、光学模块、探测器模块、处理器模块、显示模块以及观察者模块等几部分。该模型不仅可以仿真光学系统、探测器、处理器和显示器等对成像的各种效应, 而且还可仿真由平台运动和视线抖动等造成的模糊效应。

IGOSS 仿真模型主要使用调制传递函数方法对图像退化进行仿真, 即通过对系统各组件的调制传递函数进行计算获得整个系统的调制传递函数。该模型可以根据实际情况任意取舍单元, 方便灵活, 但无法采用调制传递函数对渐晕效应、探测器采样以及噪声等一些非线性效应进行仿真。

2.3 NVTherm 红外成像传感器仿真模型

NVTherm 红外成像传感器仿真模型是由美国夜视和光电传感器理事会研制的一种传感器性能评价模型, 其最初版本是美国陆军夜视实验室在 1975 年研制的用于热成像系统的静态性能模型, 随后该实验室研制出了 FLIR90 和 FLIR92 模型。这两种模型能够对第一代和第二代热成像系统的性能进行准确预测, 但对于新型凝视成像系统则存在明显缺陷。2002 年, NVTherm 仿真模型取代 FLIR92 成为了光电传感器的标准性能模型^[17]。

NVTherm 仿真模型主要采用调制传递函数方法对红外传感器系统进行分析 and 仿真^[18]。其仿真过程包括光学系统能量衰减、调制传递函数卷积滤波处理和传感器噪声仿真模拟三部分。其中, 调制传递函数用于对光学系统、探测器、电子线路以及视线抖动等效应进行分析建模; 对于噪声, 则采用三维噪声模型。

NVTherm 仿真模型目前的版本为 NVThermIP, 即将发布的最新版本为 NV-IPM^[19], 该版本通过一个接口可包含以前的所有模型。

2.4 IBSM 红外成像传感器仿真模型

IBSM 红外成像传感器仿真模型是由美国密歇根环境研究所的光电科学实验室在 1994 年至 1995 年期间研发的。该模型可以产生传感器的仿真图像, 并可对不同传感器的特性进行评估和比较^[14,15]。IBSM 仿真模型采用光学传递函数方法进行分析仿真, 并可对大气效应、传感器效应和信号处理效应分别进行建模分析。该模型主要考虑了衍射效应、离焦模糊、光线抖动、时延积分效应、噪声、采样效应以及非均匀性等因素。

IBSM 模型设计完全实现了模块化, 因此可以根据不同需要组织模块来实现对不同传感器的模拟和评估, 而且还很容易对其进行升级和扩展。其信号处理采用并行处理算法, 运行速度较快, 但在很多情况中只能对一维信号进行处理。IBSM 模型中的许多模块都是基于线性时不变空间的假设设计并作简化的, 因此会对系统分析仿真的精度产生一些影响。

3 分析与展望

红外成像传感器效应分析与仿真是一个重点研究课题。目前建立的红外传感器模型形式多样, 其研究工作主要集中在对各种传感器的退化仿真上。虽然它们对于一般应用已经足够了, 但是其大多不完善且存在一些缺陷和不足, 因此需要提高建模与仿真的全面性、精度以及并行处理能力:

(1) 需要对红外成像传感器系统的各种效应进行全面建模和仿真。目前红外成像传感器模型中没有一个完全包含红外成像系统的整体组成单元, 所以需要建立一个完备的传感器系统建模仿真模型, 包括从大气效应一直到最终观察效果的整个过程中的各种效应的建模与仿真, 从而更加真实地体现传感器系统的成像机理。

(2) 红外成像传感器效应建模与仿真必须与基本物理原理及定律相一致, 且须提高建模与仿真的精度。目前, 有些模型在对很多效应的分析模拟中作了一些简化, 比如采用调制传递函数方法对人眼及大脑进行分析仿真时就是将其限制在线性系统的情况下加以简化的。这些简化势必会对仿真的准确性及精度产生影响。为提高建模与仿真的准确性和精度, 必须分析仿真方法的优化过程。目前采用的光线追迹、调制传递函数以及图像像素处理等方法既有优点也存在缺陷, 今后需借鉴各种方法的优点来优化分析仿真方法, 以提高仿真的准确度和精度。

(3) 红外成像传感器模型需要实现高度模块化, 并具有扩展性。红外传感器仿真模型应是一个开放、可调整的框架模型, 这个模型可以支持成像环节中光学系统、扫描系统、探测系统和电子线路等各个部件的建模算法的发展, 从而与

红外成像系统技术和精度要求相适应。该模型可以分为很多模块, 其中每一模块对应于红外传感器系统的一个单元。在给定的实际系统和精度要求下, 不仅可以对各模块进行任意组合, 而且还可以对每一模块进行改进和完善, 从而满足系统发展及仿真的需求。

(4) 红外成像传感器模型的并行处理能力需要加强。该模型的用途是计算并实时生成红外探测器所观察到的场景。目前的红外成像传感器模型大多是基于后处理技术, 通过一系列的探测器效应模块将一帧帧的二维图像转换为最终的退化图像的。该模型属于串行机制, 今后需要加强并行处理能力, 以满足实时性要求。整体研究工作倾向于能依次输出图像中像素最终值的模型, 可采用像素级计算进行处理。

(5) 需要加强对红外成像传感器建模与仿真的准确性的验证评估研究。建模与仿真的真实性和逼真度决定着建模与仿真的有效性, 目前人们对此研究得较少。像素级比较方法和统计比较方法都存在一定的缺陷及不足^[21], 至今也没有一种统一有效的验证评估方法和评估指标。因此需要研究验证评估方法, 建立评估指标体系, 以对建模与仿真结果进行验证。

未来的红外传感器模型将会表现得更加全面、完善、准确, 并能更真实地对武器系统进行分析、设计、测试和评估, 从而为新型红外传感器的设计提供依据。

参考文献

- [1] 娄树理, 周晓东, 董言治. 动态红外生成方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2004, **34**(4): 36-40.
- [2] James A B J, David E K, Mark H B. Low Cost Real-time Infrared Scene Generation for Image Projection and Signal Injection [C]. *SPIE*, 1998, **3368**: 290-299.
- [3] Robert J M, Brian E O. Real-time Synchronized Multiple Sensor IR/EO Scene Generation Utilizing the SGI Onyx2 [C]. *SPIE*, 1999, **3368**: 300-309.
- [4] 左月萍, 张建奇. 红外成像系统仿真技术的现状与未来[J]. *红外与激光工程*, 2001, **30**(4): 203-207.
- [5] Jeffrey P G. Application of Scene Projection Technologies at the AMRDEC SSDD HWIL Facilities [C]. *SPIE*, 2012, **8356**: 1-11.

(下转第 15 页)