

文章编号: 1672-8785(2012)03-0013-04

红外成像传感器建模仿真方法综述

王学伟 赵国荣

(海军航空工程学院控制工程系, 山东烟台 264001)

摘 要: 对调制传递函数法、点扩散函数法、基于图像像素的处理方法和光线追迹法等四种常用的红外成像传感器建模仿真方法的适用范围和优缺点进行了分析和比较, 并根据红外成像传感器的特点, 得出了将调制传递函数法、光线追迹法和基于图像像素的处理方法相结合的仿真思路。

关键词: 信号注入仿真; 红外成像系统; 调制传递函数; 点扩散函数; 光线追迹法

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.03.003

Overview of Modeling Methods of IR Imaging Sensor

WANG Xue-wei, ZHAO Guo-rong

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

Abstract: The advantages and disadvantages of four kinds of methods such as modulation transfer function method, point spread function method, pixel processing method and ray tracing method are analyzed and compared. According to the features of infrared imaging sensors, a simulation idea of combining the modulation transfer function method with the ray tracing method and the processing method based on image pixels is given.

Key words: signal injection simulation; infrared imaging system; modulation transfer function; point spread function; ray tracing method

0 引言

红外成像传感器模拟是信号注入式红外成像仿真过程中的独有环节, 它可在没有设备硬件参与的情况下实现全数字仿真。通过将仿真产生的红外目标与背景图像作为信号源直接注入到红外成像系统信号处理电路中, 可以实现对信号处理算法、控制回路乃至系统整体性能的测试和评价, 从而评估出红外系统的目标识别与跟踪能力并对其进行改进和优化^[1]。

为了对红外成像传感器进行仿真, 我们必须建立一种能够反映红外成像过程的数学模型。在建模时, 红外成像传感器通常被描述成一个特

定的调制传递函数与噪声模型。目前, 大多数仿真过程都是对红外成像传感器系统分开进行分析和仿真的, 其使用的方法及模型也趋于多样化, 而每一种模型均重点研究其中的某一单元或某一物理现象。

1 常用建模方法的分析与比较

目前, 国内外常用的红外传感器建模仿真方法包括调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 法、点扩散函数 (Point Spread Function, PSF) 法、基于图像像素的处理方法和光线追迹法等四种。其中, MTF 法和 PSF 法实质上是一致的, 但其处理方式不同, 前者在频率域中进行

收稿日期: 2012-01-10

作者简介: 王学伟 (1973-), 男, 山东青州人, 副教授, 主要研究方向为精确制导及仿真。E-mail: xuweiwang@sohu.com

处理,而后者则在空域中进行处理。

1.1 MTF 法

MTF 是输出图像与输入图像频谱的复变函数(包括调制特性和相位特性的复变函数)的比值,它可以体现出线性时空不变成像系统对各种空间频率成分的调制度和相位的传递能力。

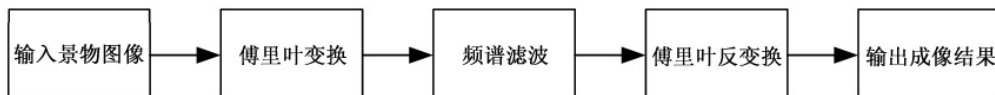


图 1 利用调制传递函数法的仿真过程

首先要求输入一幅标准图像,并读取图像信息。然后对图像进行频域变换,即进行傅里叶变换,得到有关图像的频谱。此时,时域的卷积变成了频域的乘积。接着进行频谱滤波,并用传递函数乘以图像频谱,得到处理后的频谱图。最后进行傅里叶反变换,得到图像的时域信息,并把图像显示出来。

成像过程往往包括许多环节,其中每一个环节都会影响像质。成像过程的一连串环节和因素则构成了成像系统。每增加一个环节都会使成像像质进一步降低,因为除零频率外,MTF 均小于 1。如果用 MTF 对成像过程进行建模,那么只要知道成像系统中的各个环节的 MTF,然后把它们相乘起来,便可得到总的 MTF。但是相乘的前提是各个环节使用或转化为统一的空间频率,即最后一个像面的空间频率。

在频域里,利用 MTF 表征红外成像传感器系统的各个组成单元的空间线性调制传递特性。先将各个组成单元的输入信号变换成频谱函数,再用频谱函数与相应单元的 MTF 的乘积作为下一单元的输入数据。系统的总传递函数是各个组成单元的 MTF 的乘积。最后作傅里叶反变换,得到生成的红外仿真图像。总 MTF 的数学表达式为

$$MTF(f_x, f_y) = MTF_0(f_x, f_y) \times MTF_d(f_x, f_y) MTF_e(f_x, f_y) \quad (1)$$

式中, $MTF_0(f_x, f_y)$ 、 $MTF_d(f_x, f_y)$ 和 $MTF_e(f_x, f_y)$ 分别为光学系统、探测器和信号放大电路的 MTF。

MTF 可以对线性空间系统的各个单元进行级联并确定整个系统的综合空间频率响应。当整个系统的幅值响应具有线性或相移不变性时,系统的总体响应可以表示成一个总的 MTF,即各个分系统的 MTF 的乘积^[2]。图 1 所示为利用 MTF 对红外成像系统进行数字仿真的过程。

MTF 法可以仿真红外成像系统的各个组成单元,并能任意取舍系统的各个单元,即可分别研究红外成像传感器系统的各个单元。该方法所建的模型能够准确解释物理现象,而且其运算量不大。

然而,MTF 法的不足之处在于,它不能对非线性物理效应(如光学系统的渐晕、探测器的响应非均匀性等)进行仿真。

1.2 PSF 法

PSF 法是一种微观分析方法,其基本思想与 MTF 法完全一致。因为 MTF 法是在频域内分析信号,而 PSF 法则是在空域内分析信号,所以它们之间存在着傅里叶变换关系,即 $MTF(f_x, f_y) = F[PSF(x, y)]$ 。在空域内,仿真图像是原始图像与系统的 PSF 的卷积。而在频域内,它则是原始图像频谱函数与系统的 MTF 相乘,再经过傅里叶反变换得到的空域内的仿真图像。我们通常把 MTF 法和 PSF 法看作是两种类似的方法。

1.3 基于图像像素的处理方法

红外成像传感器系统的一些非线性效应(如光学系统的几何扭曲、探测器的噪声特性等)无法用 MTF 法进行建模。把图像中的各个像素点看成像点并直接对像素进行处理,是一种“空间域”方法。将图像看作是一个由平面中各个像素组成的集合,然后直接对这个二维函数进行处理^[3]。例如,几何扭曲效应是由光学系统引起的,主要表现在图像中像点发生位移,导致图像中的物体发生扭曲变形。通过分析几何扭曲机理和

建立原图像中各像素位置与发生畸变失真后其在像空间中的位置之间的几何变换关系式, 可以实现对该效应的仿真。

1.4 光线追迹法

光线追迹法是从待观察场景各点的辐射出发, 研究红外辐射经过光学系统、探测器和信号放大电路后转换成电信号的过程, 并建立场景各点与红外成像传感器输出图像上各点之间的几何位置及辐射量关系的。该方法完全用数学方法描述光线的传播过程, 可以计算由光学系统的变化造成的像点移动和像差等。例如, 对于红外导引头光学系统, 人们常用像面上弥散斑的大小来评价光学系统的成像质量, 而这弥散斑的大小可用光学追迹法求出。只要大量计算入瞳上均匀分布的空间光线并求出它们在像面上的分布图即点列图就可以了。同样, 为了仿真光学系统的像差, 通过确定入射光的初始坐标, 然后逐面依次应用计算公式求出出射光线的坐标, 再根据有关公式对结果进行处理, 就可以得到像差的仿真效果。若要确定由光学系统引起的成像扭曲畸变, 则只要在给出视场角的情况下, 通过追迹主光线并将主光线与像面的交点和预定的高斯点进行比较, 便可以确定畸变。

利用光线追迹法既可以把红外成像系统的各个部分结合起来建模, 使模型具有普遍适用性, 又可以把红外成像系统的各个部分合理分开, 使其相互独立并具有开放、灵活的优点。另外, 利用该方法还可以深入分析红外成像的物理过程, 包括大部分红外成像系统的物理现象^[4]。

光线追迹法的不足之处主要是其对一些物理现象(如探测器效应等)的分析和建模比较复杂, 而且其所建模型涉及积分计算, 整体运算量大, 不利于算法的简化。

2 建模方法的选用及思路分析

综合考虑上述四种方法的优缺点及现有条件, 对于红外成像传感器的建模仿真, 单一方法不能实现高置信度的建模, 而应采用 MTF 法、光线追迹法和基于图像像素的处理方法相结合的方法, 即综合空间信息传递和辐射能传输^[5]。

对于不同的红外成像系统, 器件本身所具有的特殊性质决定了其传递函数的不同。因此, 若要构建一个比较完备并可描述红外成像传感器系统图像传递特性的仿真系统, 则必须合理地构建各个成像环节的传递函数, 使其在各种应用条件下, 通过合理地选用模型和参数, 便可完成对红外成像传感器系统的建模仿真。根据红外成像传感器系统的工作原理, 在分别讨论光学系统、探测器以及信号放大电路等各个环节和传感器系统整体的传递函数时, 由于景物之间没有固定的相位关系, 建模是基于非相干光照射成像的, 我们可以只考虑 MTF。

除了实现对辐射信号的转换和响应之外, 首先必须考虑成像系统的空间传递特性。空间传递特性在图像效果上表现为模糊和像质退化。这些效应包括光学系统的光能衰减、衍射和像差, 探测器的空间和时间滤波效应以及信号放大电路的线性滤波效应等。这些物理效应可以看作是线性传递效应。我们可以利用各个组成模块的 MTF 对其进行模拟。

系统的非线性物理效应主要包括光学系统的几何扭曲和渐晕效应, 探测器的采样效应、非均匀性和噪声特性以及信号放大电路的非线性响应特性和噪声特性等。在对红外成像系统的非线性效应进行建模的问题上, 除了个别特例之外, 现在还没有通用的技术可以进行求解。人们一般是采用图解和近似方法进行建模的, 即利用光线追迹法和基于图像像素的处理方法相结合的方法从空间域上对其进行建模仿真。

在系统建模上, 忽略非线性物理效应。红外成像传感器系统的信息传递是一个稳定或者确定的过程, 即可近似地把系统当作线性、空间(时间)不变和稳定的系统。红外成像的退化过程可以表达为一种卷积过程。像函数是物函数与系统冲激响应(点扩散函数)的空间卷积结果, 其频谱表现为物函数频谱与系统传递函数乘积的结果。对于红外成像传感器系统的各个组成单元, 先建立 MTF 模型, 再叠加其非线性物理效应模型, 可使仿真系统变得更加合理和完善。

对红外成像传感器效应的仿真是通过其对红外成像的作用效果表现出来的。在评价仿真

结果的置信度时,需要对仿真的红外图像进行分析、数据统计和评价。根据红外成像传感器的各种效应特点和红外图像的性质,通过采用一/二维直方图和图像傅里叶频谱分析相结合的分析方法,可以较为合理、有效地对仿真结果进行分析和评价,而且还能弥补单一分析方法仅能分析部分效应下的成像效果的缺点。

3 结论

本文综述了常用的红外成像系统仿真建模方法并对其各自的优缺点进行了比较,提出了建模思路和评价方法,为后续红外传感器的各种典型效应模型的建立和系统仿真奠定了基础。

参考文献

- [1] 王学伟,沈同圣,周晓东. 红外热像仿真中传感器的模拟方法研究 [J]. 半导体光电, 2004, 24(25): 317-319.
- [2] 光电系统设计、分析和测试. 红外与光电系统手册(第四卷) [M]. 天津: 航天工业总公司三院 8358 所, 2001.
- [3] 阮秋琦,阮宇智译. 数字图像处理(第二版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [4] 白延柱,刘明奇,邹正峰,等. 像管动态成像过程的计算机模拟仿真 [J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(4): 481-491.
- [5] 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.

新闻动态 News

用红外成像技术检测复合材料的 热特性

据 www.iom3.org 网站报道, 西班牙马德里卡洛斯三世大学 (UC3M) 的研究人员发明了一种可以提高人们对复合材料热特性和耐火性能的认识的新颖红外成像方法。据说, 此方法可能会使许多工业包括航空航天业、铁路业和建筑业受益。

据该大学有关专家说, 现有的接触式方法如热电偶在有些领域不能满足要求。它们需要与取样材料直接接触, 这样会损坏探测器, 使得测量变得非常昂贵和不易进行。当温度超过 1000℃ 时, 取样物体的确切温度会被淹没。

由高温火焰发射出的热能会使处于较热区的探测器发生饱和。如果你不在这个区内进行测量, 那你就会失去这些较热点的信息。另外, 在较冷区, 烟雾会起一堵墙的作用, 把一切隐藏起来。

为了克服这些缺点, 研究人员发明了一种非接触技术, 该技术基于一台红外摄像机和一个适应于样品特性的激励系统。它是利用一台被调节到适当的波长的红外摄像机进行测量的。测量以后, 通过用算法对所获得的图像进行处理, 便可获得相关参数。

该方法提供的是二维图像, 而不是点测量数据, 据说它能在毫秒时间内完成测量而且成本比较低。虽然一个热电偶的价格比该系统的便宜, 但是它只能测量一个点。如果必须测量几个点, 那么每次就需要使用几个热电偶。实验做完后, 由于在实验中受到火的损害, 这些热电偶都不得不被替换。玻璃纤维传感器同样有这种情况。而西班牙卡洛斯三世大学发明的这种系统是非接触式的, 在试验中不会受到任何损害, 而且可以使用很长时间, 这样便可以降低成本。

目前, 该大学的研究人员已做好这项技术的投产准备, 不过对于如何使该方法适应特定的材料类型, 他们还需要作进一步研究。他们期待该方法能测量各种新材料的热参数, 如热扩散系数、比热、热传导率、发射率、对流因数以及努塞尔特数。他们还在研制一种用以检查位于表面下面的污点的系统。在检查结构缺陷时, 人们最常用的技术是超声波。超声波需要使用接触液体作为测量界面, 它也是非侵入式的, 但该技术复杂而且速度慢, 这会影响制造过程的效率。

非侵入式的热成像技术速度快, 是识别材料结构缺陷如表面下缺陷、断裂区、湿度以及过分受力区的一种真正的替代技术。

□ 高国龙