

西电学术文库图书

*Electro-Optical Imaging System:
Modeling, Simulation, Testing and Evaluation*

光电成像系统

—— 建模、仿真、测试与评估

王晓蕊 著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

光电成像系统

——建模、仿真、测试与评估

王晓蕊 著



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书系统介绍了光电成像系统全寿命周期研制主要环节:建模、仿真、测试与评估的基础理论和技术,涉及光电成像系统基本类型和新原理、全链路光电成像物理效应模型、三维光学场景高真实感仿真、全链路光电成像仿真及应用、系统性能评估理论与遥感图像质量评价方法、复杂背景图像杂波量化理论与方法、系统静态性能指标体系及测试方法、半实物仿真测试等核心内容。

本书可作为光学工程、电子科学与技术、遥感科学、电子信息工程、精密仪器等相关专业高年级本科生和研究生的教材,也可作为从事光电系统工程、光电装备、光学遥感、侦察测绘、光电信息处理、仿真试验鉴定与评估工作的科技工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光电成像系统:建模、仿真、测试与评估/王晓蕊著. —西安:西安电子科技大学出版社, 2017.9

ISBN 978-7-5606-4571-1

I. ① 光… II. ① 王… III. ① 光电效应—成像系统—系统性能
IV. ① O435.2 ② O482.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 201101 号

策 划 高 樱

责任编辑 曹 锦 雷鸿俊

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 虎彩印艺股份有限公司

版 次 2017年9月第1版 2017年9月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 35

字 数 840千字

定 价 72.00元

ISBN 978-7-5606-4571-1/O

XDUP 4863001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

近二十年来,作为信息感知科学与技术的重要分支,光电成像技术获得快速发展,并在空间光学遥感、军事侦察、监视预警、成像制导、交通监控、医学影像、天文观测、水下勘探、机器人视觉、工业诊断与检测等军事和民用领域获得广泛应用。光电成像技术促成了人类视觉探测领域的时、空、谱多维度的延伸和扩展,已成为光电子技术发展水平的重要标志。

光电成像是光、机、电、算、控、热、力、磁等多种学科技术集成的产物。光电成像系统多学科技术协同优化设计、复杂环境中工作性能的测试与评估,始终是光电成像系统发展历程中所要面临的关键技术问题。而要解决该关键技术问题,需要对全链路光电成像系统各组成模块环节进行深入分析,建立多物理场耦合作用成像信号退化理论模型,构建全链路多维度信息传递链路成像仿真平台或性能模型,形成光电成像系统高置信度一体化成像仿真平台,实现复杂环境、光电成像系统各专业模块设计参量与系统综合性能指标的有机统一。

依据国际光电成像系统的最新发展趋势,以及光电成像系统全寿命周期的数字化设计革新理念,光电成像系统建模、仿真、测试与评估理论及应用正向着广度和深度方向发展。本书是作者在整理、精选和融合课题组近 15 年来承担多项国家自然科学基金和多项国防科研项目研究成果,以及所承担研究生课程“光电成像系统:建模、仿真、测试与评估”教学讲义的基础上,吸收和引入国际光电成像领域前沿的建模理论、仿真方法、测试新思路、评估应用(如 GPU 物理效应渲染、背景杂波量化、NVThermIP 性能评估模型、TOD 性能评估模型、国家图像质量解译尺度 NIIRS、全链路总体优化设计理念、动态性能评估等)而写成的。

本书综合集成了军用光电成像系统全寿命周期研制的主要环节:总体论证、系统方案设计、系统研制、试验鉴定与评估所涉及的基础理论、关键技术及实例应用等内容。具体来讲,针对国际主流光电成像系统装备和新体制光电成像系统,立足于全链路光电成像建模、仿真和总体优化设计思想,将目标—背景—环境干扰—辐射传输—成像传感器—图像处理—载体平台—通信传输—地面处理作为完整成像链路进行系统理论阐述,主要包括光电成像系统全链路成像质量退化机理、物理效应基本建模理论、工程经验模型构建、全链路光电成像仿真方法及应用、光电图像质量度量、静态/动态性能指标体系及测试方法、性能评估理论等核心内容。本书相关理论与技术可服务于目标及其环

境光学特性理论与实测数据的集成应用、光电成像武器装备的模型驱动协同设计、图像算法效能检测、复杂环境光电成像武器装备作战能力考核评估等任务目标,可提升我国光电成像装备全寿命周期研制的数字化水平。

全书共九章:第一章介绍了光电成像系统建模、仿真、测试与评估的背景需求、基本概念、图像质量与性能影响因素、发展趋势等;第二章介绍了传统和新体制光电成像系统成像转换机理及其组成,给出了光电成像系统各模块的基本参数;第三章阐述了光电成像转换过程的多维信息链路物理效应建模与仿真方法及准确度验证;第四章阐述了新体制光电成像系统建模理论与仿真方法;第五章主要阐述了全链路光电成像系统数字建模与仿真思路、一体化成像仿真软件开发以及课题组所研发的全链路光电成像仿真软件的应用实例;第六章系统地阐述了光电成像系统性能模型的发展历程,重点讲述基于周期靶标的光电成像系统性能评估模型和图像质量解译尺度;第七章系统地介绍了光电成像系统 TOD 性能评估方法;第八章介绍了光电图像复杂背景杂波量化度量方法,以及在光电成像系统性能评估中的应用;第九章介绍了光电成像系统性能测试原理和测试装置,论述了实验室静态性能测试方法与外场动态性能评估方法。

本书的第一、二、三、四、六、九章由王晓蕊独立撰写,第五章由王晓蕊、黄曦合作撰写,第七章由王晓蕊、刘鑫合作撰写,第八章由王晓蕊、杨翠、刘鑫合作撰写。全书由王晓蕊统合定稿。

在本书撰写过程中,得到西安电子科技大学出版社和西安电子科技大学物理与光电工程学院教师、同学的支持及帮助,在此一并表示感谢。另外,对于本书作者家人的理解与支持也表示衷心的感谢。

由于编著者水平有限,且书中部分内容涉及光电成像系统建模、仿真、测试与评估的新领域和新方向,难免有不足之处,热诚希望读者和同行专家批评指正。

王晓蕊

2017年3月

目 录

第一章 绪论	1	3.3.1 面源目标成像输出电压模型	62
1.1 背景需求及目的意义	1	3.3.2 点源目标信号响应特性模型	74
1.2 光电成像系统建模、仿真、测试与 评估基本概念	5	3.4 全链路光电成像空间传递特性 建模与仿真	78
1.3 光电成像系统图像质量与性能 影响物理因素	7	3.4.1 光学系统	79
1.4 光电成像系统建模、仿真、测试与 评估主要思路及发展趋势	12	3.4.2 探测器	80
1.4.1 光电成像系统建模	12	3.4.3 平台运动拖影图像退化模型	81
1.4.2 光电成像全链路动态仿真	13	3.4.4 信号处理电路	82
1.4.3 光电成像系统静态/动态性能 测试	13	3.4.5 显示器	83
1.4.4 光电成像系统静态/动态性能 评估	13	3.5 全链路光电成像空时域噪声效应 建模与仿真	84
1.5 本书内容结构	14	3.6 空间成像几何转换模型	85
本章参考文献	15	3.6.1 摆扫式航空遥感器空间成像 几何建模	86
第二章 光电成像原理、系统类型及基本表征 参数	16	3.6.2 卫星光学成像传感器空间成像 几何转换模型	88
2.1 光电成像基本成像原理	16	3.7 光电成像空间采样效应建模与仿真	91
2.2 光电成像系统类型及工作模式	17	3.8 数字图像重构算法增强模拟	97
2.2.1 微光/紫外成像系统	17	3.9 光电成像系统典型成像物理仿真 结果及分析	99
2.2.2 可见光/红外成像系统	23	3.10 光电成像系统模型准确度验证方法	103
2.2.3 多光谱/高光谱成像系统	29	3.10.1 仿真模型验证方案及验证实验	103
2.2.4 偏振成像系统	35	3.10.2 逼真度评价准则及验证 结果分析	109
2.2.5 激光雷达成像系统	39	3.10.3 MRTD 仿真验证	114
2.2.6 新体制光电计算成像系统	40	本章小结	115
2.3 光电成像系统基本表征参数	51	本章参考文献	116
本章小结	58	第四章 新体制光电成像系统建模理论与 仿真方法	117
本章参考文献	58	4.1 微扫描光电成像特性建模与仿真	117
第三章 光电成像物理效应建模理论与 仿真方法	60	4.1.1 微扫描技术的研究现状	117
3.1 光电成像系统成像特性分析	60	4.1.2 微扫描模式	118
3.2 主要成像链路模型及建模耦合准则	60	4.1.3 微扫描成像特性分析模型	118
3.3 全链路光电成像信号响应转换特性 建模与仿真	62	4.1.4 微扫描成像特性度量因子	122

4.1.5 微扫描成像分辨率的定量计算与分析	125
4.1.6 微扫描成像过程仿真	128
4.1.7 微扫描成像系统的现场性能分析	131
4.2 压缩感知与编码成像系统建模与仿真	136
4.2.1 压缩感知与编码成像理论框架	136
4.2.2 编码成像理论模型	137
4.2.3 时变焦平面编码成像模型	139
4.3 多孔径超分辨率红外成像系统建模与仿真	148
4.3.1 多孔径红外成像原理	148
4.3.2 数字仿真及结果讨论	150
4.4 偏振成像效应建模与仿真	155
4.5 激光雷达成像效应模型	159
本章小结	163
本章参考文献	163
第五章 全链路光电成像一体化数字仿真及应用	165
5.1 引言	165
5.2 全链路光电成像系统数字仿真原理	166
5.3 全链路光电成像一体化数字仿真发展动态	168
5.3.1 国外发展动态	169
5.3.2 国内发展动态	179
5.4 光电成像数字仿真开发平台设计	183
5.4.1 光电成像系统全链路数字仿真框架设计	183
5.4.2 光电成像一体化数字应用设计	185
5.5 三维光学场景动态仿真	186
5.5.1 三维光学场景仿真概述	186
5.5.2 三维光学场景几何要素建模与预处理	187
5.5.3 光学材质建模与辐射、散射物理特征预测	209
5.5.4 场景纹理生成方法与预处理	225
5.5.5 场景要素物理特性综合渲染集成	232

5.6 光电成像系统物理效应动态数字仿真	245
5.6.1 光电成像系统虚拟样机概述	245
5.6.2 成像系统效应建模与预处理	246
5.6.3 成像物理效应动态渲染	247
5.7 全链路光电成像数字仿真软件(FC-EOISS)及应用情况	250
本章小结	266
本章参考文献	266

第六章 光电成像系统性能模型与图像质量解译尺度

6.1 典型性能模型概述	268
6.2 最小可分辨温差定义及模型推导	270
6.2.1 一代红外成像系统 MRTD 理论模型的推导	271
6.2.2 二代红外成像系统 MRTD 理论模型	273
6.2.3 二代红外成像系统性能模型的推导	273
6.2.4 NVTherm 模型	277
6.3 MRTD 模型在现场性能预测中的应用	279
6.3.1 红外场景的表征描述	280
6.3.2 现场性能预测准则的确定	281
6.3.3 现场性能预测实现原理	283
6.3.4 现场性能仿真及分析	285
6.3.5 运动效应和背景杂波对现场性能影响的仿真	286
6.4 NVThermIP 模型	292
6.4.1 NVThermIP 模型的基本思想	292
6.4.2 NVThermIP 模型的现场性能预测方法	295
6.4.3 光电成像系统的对比度阈值函数	297
6.5 系统固有效应对 NVThermIP 模型的修正	305
6.5.1 采样对 NVThermIP 模型预测性能的影响	305
6.5.2 两种等效模型的比较	307

6.6 基于野外测试图像和性能度量曲线的热成像系统探测与识别性能量化评估	313
6.6.1 性能预测基本思想	313
6.6.2 基于周期准则的野外性能预测新方法	314
6.6.3 性能度量曲线的量化评估模型	314
6.6.4 仿真结果及分析	315
6.7 NIIRS 与目标获取模型之间的关系	318
6.7.1 美国国家成像解译尺度	318
6.7.2 通用图像质量方程 GIQE	321
6.7.3 特定参数下 NIIRS 等级的确定及结果分析	323
6.7.4 NIIRS 与鉴别概率的关系	326
本章小结	332
本章参考文献	332
第七章 光电成像系统 TOD 性能评估方法	335
7.1 TOD 度量方法概述	335
7.1.1 TOD 测试靶标	336
7.1.2 TOD 曲线测量方法	336
7.1.3 视觉心理测量函数	338
7.2 TOD 曲线精确度量	339
7.2.1 TOD 测试平台	339
7.2.2 TOD 测试及数据处理	341
7.3 TOD 度量结果不确定度分析	345
7.3.1 ΔT_{EFF} 不确定度	345
7.3.2 ΔU_{sys} 不确定度	347
7.3.3 观察者响应的不确定度	347
7.4 客观 TOD 性能度量方法	349
7.4.1 客观 TOD 测量的必要性与要求	349
7.4.2 已有客观 TOD 测量模型分析	350
7.4.3 客观判别模型	351
7.4.4 客观判别模型的验证	356
7.4.5 数据拟合与 TOD 曲线分析	361
7.5 TOD 性能预测理论模型	365
7.5.1 基于靶标仿真成像的 TOD 曲线预测	366
7.5.2 基于方程的 TOD 性能理论模型	370
7.5.3 TOD 性能理论模型仿真结果及试验验证	383
7.5.4 基于 TOD 理论模型的成像系统匹配设计探讨	387
7.6 基于 TOD 曲线的目标获取模型	389
7.6.1 基本概念及目标获取模型	389
7.6.2 TOD 准则的试验确定	392
7.6.3 基于 TOD 曲线的现场性能预测	397
7.7 基于三角形靶标的目标传递概率函数	400
7.7.1 目标传递概率函数	400
7.7.2 视觉锐度	400
7.7.3 无缝三角形网格划分算法	401
7.7.4 目标传递概率函数拟合	402
7.8 多光谱红外成像系统 TOD 性能表征方法	404
7.8.1 多光谱红外成像系统 TOD 测试靶标特征描述	405
7.8.2 多光谱红外成像系统 TOD 性能理论模型	406
7.8.3 TOD 性能模型计算与结果分析	414
7.8.4 多光谱红外成像系统温差鉴别性能表征	420
7.9 基于 TOD 性能模型的多光谱红外成像系统作用距离预测	422
7.9.1 多光谱红外成像系统 TOD 性能模型修正	422
7.9.2 多光谱成像系统作用距离预测	423
7.9.3 计算实例与实验验证	424
本章小结	431
本章参考文献	432
第八章 复杂背景杂波量化及对成像系统性能的影响	434
8.1 背景杂波基本理论	434
8.1.1 背景杂波图像感知分析	434
8.1.2 杂波基本特性	438
8.1.3 杂波量化的难题和基本原则	440

8.2 背景杂波量化尺度	441	9.4 光电成像系统静态性能测试装置及 测试方法	510
8.2.1 基于数学定义的杂波尺度	442	9.4.1 光电成像系统静态性能测试装置	510
8.2.2 基于前期视觉的杂波尺度	445	9.4.2 光电成像系统信号传递函数测试	516
8.2.3 基于后期视觉的杂波尺度	448	9.4.3 非周期传递函数测试	520
8.2.4 基于特征提取的杂波量化尺度	453	9.4.4 系统噪声特性测量	523
8.3 杂波对人眼视觉成像系统性能 模型的影响	472	9.4.5 光电成像系统 MTF 测量	529
8.3.1 目标获取性能基本框架	472	9.4.6 最小可分辨温差(MRTD)曲线 测试	532
8.3.2 杂波对人眼视觉目标获取 性能模型的修正	473	9.4.7 最小可探测温差测试	536
8.3.3 修正模型的实验验证与分析 ..	475	9.4.8 红外图像的非均匀性测试	537
8.4 复杂背景修正的目标获取性能模型	477	9.5 基于半实物仿真系统的光电成像 系统性能测试	538
8.4.1 局部目标探测概率模型	477	9.5.1 典型半实物仿真系统	538
8.4.2 类目标探测概率模型	478	9.5.2 半实物仿真系统的性能测试 设置基本要求	544
8.4.3 复杂背景下的目标探测概率模型	479	9.5.3 基于半实物仿真系统的成像系统 探测与识别性能预测	544
8.4.4 实验结果	479	9.5.4 搜索跟踪系统的性能评估	545
8.5 杂波对机器视觉成像系统性能 模型的影响	483	9.5.5 信杂比评估	546
8.5.1 与 ATR 算法有关的背景杂波 量化尺度	485	9.5.6 跟踪精度评估	546
8.5.2 基于频域分析的背景杂波尺度	491	9.5.7 跟踪稳定度评估	547
8.5.3 杂波对机器视觉目标获取性能 模型的修正	492	9.5.8 抗干扰能力评估	547
本章小结	495	9.5.9 探测概率与虚警概率评价	548
本章参考文献	495	9.5.10 处理时间评估	549
9.5.11 综合评估	549	9.6 光电成像系统室外测试评估	549
第九章 光电成像系统性能测试与评价	500	9.7 测试注意事项	550
9.1 性能测量概述	500	9.8 光电成像系统测试与评价展望	550
9.2 光电成像系统性能简易测试方法	501	本章小结	552
9.3 光电探测器及焦平面阵列特性 测试装置	504	本章参考文献	552

第一章 绪 论

光电成像是光、机、电、算、控、磁、热、力等多学科技术集成的产物。在最近的二十年内,光电成像技术领域不断涌现出新思想、新器件和新技术,光电成像系统的集成与应用水平达到了前所未有的高度。依据国际光电成像系统的最新发展趋势和高水平应用能力,以及光电成像系统研制全寿命周期的数字化革新需求,如何从系统工程论的角度对光电成像系统建模、仿真、测试与评估始终是光电成像系统发展历程中必然面临的核心任务。本章主要就光电成像系统建模、仿真、测试与评估的背景需求、任务目标、基本概念、国内外发展现状与趋势及全书内容安排做系统论述。

1.1 背景需求及目的意义

随着光学系统设计加工水平的提高、大规模光电探测器阵列制作工艺成熟及高性能光电信息处理软硬件能力大幅度提升,高性能光电成像系统已成为人类获取信息、认知世界的主要利器。高空间分辨率、高光谱分辨率、高时间分辨率、高辐射分辨率、大覆盖范围的多维光电成像系统已成为光电成像技术发展追求的目标。目前,光电成像系统已在航空/航天光学遥感测绘、侦察监视、告警预警、光电瞄准、成像制导、机器视觉、天文观测、医学影像等军事和民用领域获得广泛应用,如图 1.1 所示。

建模、仿真、测试与评估是光电成像系统总体技术的重要组成部分,涵盖光电成像系统研制全寿命周期的多个重要环节,四者相互支撑、相互补充、相互关联。具体来讲,光电成像系统建模、仿真、测试与评估可以对以下应用领域形成有效支撑:

- (1) 光电成像系统总体方案论证、全链路关联与协同优化设计;
- (2) 光电成像质量提升与图像质量评价;
- (3) 光电成像探测、识别、定位与跟踪算法设计和评估;
- (4) 光电成像系统空间攻防对抗模拟训练;
- (5) 光电成像系统实验室固有性能测试与评价;
- (6) 复杂战场环境光电成像装备综合作战任务能力评测。

光电成像技术发展系统与系统集成应用始终伴随着光电成像系统的建模、仿真、测试与评估问题。



图 1.1 光电成像系统典型应用领域

在本书中,光电成像系统工作的光谱范围涵盖电磁波谱的三个区域:紫外、可见光、红外,如图 1.2 所示。根据大气光谱透过率特性,光电成像系统设计通常被分成七个通用的光谱区域(参见图 1.3),其中四个光谱区域与红外成像系统相关^[1-2]。紫外(UV)光谱区域范围为 $0.2\sim 0.4\ \mu\text{m}$;可见光(VIS)光谱区域范围为 $0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$,通常电视、电子静态相机、数码相机工作于该区域;近红外(NIR)光谱区域涵盖了 $0.7\sim 1.1\ \mu\text{m}$ 范围,微光电视、像增强管、星光探测仪和夜视瞄准镜通常工作于该光谱区域。因为历史原因,紫外、可见光、近红外技术都发展出各自的专业术语。第一个短波红外(SWIR)成像光谱区域范围近似为 $1.1\sim 2.5\ \mu\text{m}$ (国内通常为 $1\sim 3\ \mu\text{m}$);第二个红外波段为中波红外波段(MWIR),覆盖范围为 $2.5\sim 7.0\ \mu\text{m}$ (国内通常为 $3\sim 5\ \mu\text{m}$);第三个红外波段为长波红外波段(LWIR),覆盖范围为 $7\sim 15\ \mu\text{m}$ (国内通常为 $8\sim 12\ \mu\text{m}$);第四个红外波段范围为远红外光谱区域(FIR)或极远红外区域(VLWIR)。

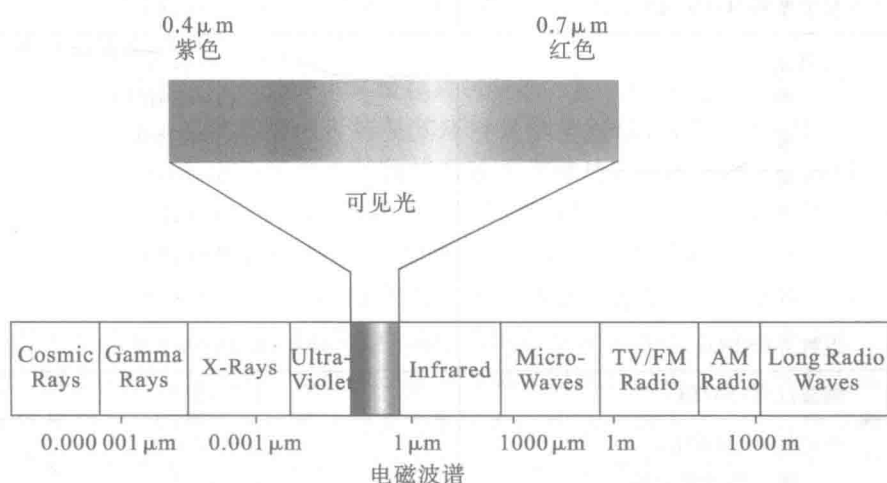


图 1.2 光电成像电磁频谱波段

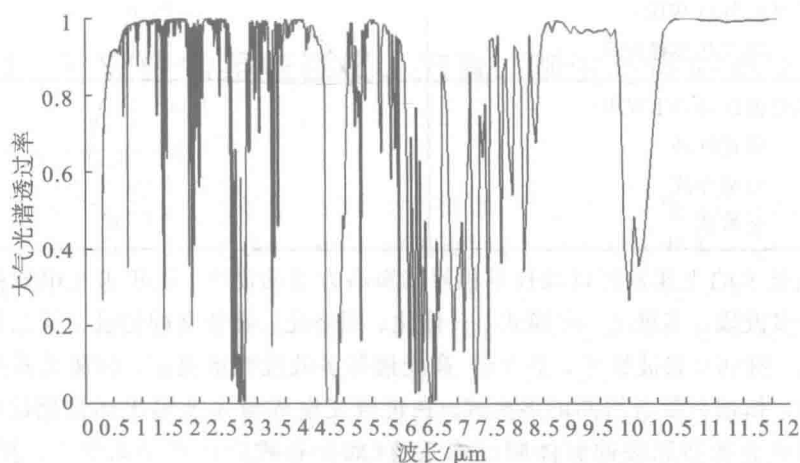


图 1.3 典型大气光谱透过率

表 1.1 列举了与具体系统有关的波长。任何光电系统的精细光谱响应与具体的系统设计有关,我们常提到的长波红外成像系统仅意味着其响应是在 LWIR 区域某个位置或部分区域,比如,一款长波红外系统可能具有 $7.7\sim 11\ \mu\text{m}$ 或 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 的光谱响应范围。由于大气中二氧化碳吸收带在 $4.2\ \mu\text{m}$ 处可完全衰减所有目标信息,因此中波红外系统可能具有 $3\sim 4.2\ \mu\text{m}$ 或 $4.3\sim 5.5\ \mu\text{m}$ 的光谱响应。

表 1.1 光电成像对应光谱术语分类

谱 段	波长范围/ μm
真空紫外	0.05~0.20
短波紫外(UV-C)	0.20~0.28
中波紫外(UV-B)	0.28~0.32
长波紫外(UV-A)	0.32~0.40
可见光	0.40~0.70
紫	0.40~0.46
蓝	0.46~0.49
绿	0.49~0.55
黄	0.55~0.58
橙	0.58~0.60
红	0.60~0.70
近红外(NIR)	0.75~1.1
短波红外(SWIR)	1.1~2.5
中波红外(MWIR)	2.5~7.0
第一热成像波段	3.0~5.5
蓝峰	4.1~4.3
红峰	4.3~4.6
长波红外(LWIR)	7.0~15.0
第二热成像波段	8.0~14.0
超长波红外(VLWIR)	>15.0
极远红外	15~100
近毫米波	100~1000
毫米波	1000~10 000

随着高新技术的飞速发展以及技术积累和军事方面的需求,近年来光电成像技术迅速发展,呈现为多波段、多维度、多模式、一体化、网络化、高精度的特征。其工作波段涵盖紫外、可见光、短/中/长波红外、多光谱/高光谱等多波段频谱范围;探测模式呈现能量与光谱探测结合、扫描与凝视协同的多模式。在传统光电成像系统追求高性能的同时,出现了多种基于新概念和新原理的新体制成像系统(如分布式空间感知系统^[3]、复眼成像^[4]、Gigapixel 相机^[5]、自适应孔径编码与焦平面编码成像^[6]、偏振成像、量子成像等),从功能上讲,实现了警戒-跟踪、侦察-跟踪、跟踪-制导、监视-预警、跟踪-火控等多功能一体化;

从网络协同机制上讲,将实现单平台多传感器、单平台多系统、多平台多传感器以及多平台多系统的无缝链接的网络化分层感知,信息的采集、处理和共享,形成协同作战体系;从信息融合的角度讲,将实现光电感知图像、地球高程数据、全球地理信息三者的统一框架融合,使光电成像装备由传统战术应用走向战略作战应用,实现空天地一体化广域搜索、探测、精确定位/定向、持续监视跟踪^[7]等。

新一代武器系统作战平台与体系对光电成像总体技术和总体集成技术提出了严峻的挑战,要求现代光电成像系统具有多功能综合化、多任务一体化、多平台协同化的能力。光电成像系统研制融入了光学、光电子学、精密机械、自动控制、计算机、工程力学、传热学、电磁学、空气动力学、流体力学、材料科学等众多学科和专业人员共同参与及协同设计的过程,需要多学科技术的耦合与关联。如何高效地将多学科技术进行高、精、准综合、关联与集成,已成为光电成像总体设计与研制各环节面临的关键技术问题。因此,系统化、协同与关联化的研发体系是光电成像系统研制数字化的核心部分,这将成为该系统建模、仿真、测试与评估所要面临的新问题。

同时,光电成像系统面临的光电环境越来越复杂,其工作效能除受制于光电成像系统自身集成技术外,还与系统所处的目标及其环境光学散射/辐射特性密切相关。现代战场光电环境日益复杂,各类光电成像系统使用面临多重威胁,如战场烟尘、战场火光、烟幕弹、干扰弹、激光与欺骗式干扰等,造成光电成像系统作战能力大幅度下降,如何解决该类问题已成为光电成像系统建模、仿真、测试与评估面临的新任务。

光电成像技术与系统的发展趋势仍然是引入新体制、新方法、新原理和新技术,采用最新的成像系统集成设计理念,提高光电成像系统在多种工作状态和成像条件下的图像质量与综合性能,拓展其在空天信息获取、态势感知等领域的应用。这必然要求研究新型成像系统的建模理论、仿真技术、测试设备及系统性能评估的新方法,以适应不断发展的新型光电成像系统总体集成研制和拓展应用的需要。光电成像系统建模、仿真、测试与评估作为光电成像系统总体技术的重要组成部分,其不仅可实现成像系统的结构参数与端到端综合性能的有机结合,为光电成像系统全链路协同优化设计、全寿命周期研制过程耦合关联提供理论依据,还可以预测成像系统的固有性能和复杂环境中的现场性能。

1.2 光电成像系统建模、仿真、测试与评估基本概念

1. 光电成像系统建模

光电成像系统建模是一种数学物理模型的构建,其表征了系统或模块的设计参数与各专业分系统性能指标或系统总体性能之间的函数关系。由于光电成像系统图像质量和综合性能与目标及其环境光学特性、大气辐射特性、成像系统、光电信息处理、伺服稳定、载体平台、通信传输、观察者解译等链路环节有关,因此建模需要将上述环节作为广义的完整链路进行考虑。通常,光电成像系统建模可分为三个层级:模块层级建模、系统层级建模与外场性能预测模型。模块层级建模主要是指链路环节各专业分系统或组件的建模,比如光学系统的建模、目标及其环境光学特性建模、探测器组件建模等;系统层级建模是将各模块输出特性参数作为输入,确立各模块特性与系统总体技术指标的定量关系,比如系统总体调制传递函数、噪声等效温差、信号传递函数等模型;外场性能预测模型主要是确立

光电成像系统在多种复杂环境条件下的工作性能,通常以系统总体技术指标模型为基础,结合目标环境光学特性,借助于特定任务准则实现外场性能预测,可预测光电成像系统在不同环境的威力。

完整的系统端到端分析(场景-观察者解译或机器视觉自动解译)可以支持系统优化设计。光电成像系统优化设计是一种迭代决策过程,在具有冲突的设计过程中的每一步需要折中分析。许多性能参数的增加往往是以其他性能指标的降低为代价的,如减少分辨率可以增加灵敏度。

系统优化设计通常以概念设计为出发点,接着实现不同子系统的设计。由于硬件限制(如体积、功率消耗限制及组件限制特性),每个子系统的功能和性能将多多少少不同于原始设计,系统分析人员紧接着必须修正模型参数以反映当前设计。当系统装配时,实际组件由于制造公差的原因将表现出不同的功能。基于实际组件,系统分析人员最终确定其模型参数。至此,系统分析人员才能确保预测性能与测量值匹配。

根据 Shumaker 和 Wood 的观点,光电成像系统模型应解决四个基本问题^[8]:

(1) What characteristics(specifications)must an electro-optical imaging system have to do a given task? (针对给定任务,光电成像系统应具备什么样的技术指标?)

(2) What design parameters will enable a system to satisfy given specification? (什么样的设计参数将确保系统满足给定指标?)

(3) What laboratory performance values will verify that a design provides desired characteristics? (什么样的实验室性能指标为验证该设计提供了理想特性?)

(4) Given an electro-optical imaging system design, how can it best be deployed and what are the expected results? (给定一款设计的光电成像系统,如何更好地使用以达到所期望的结果?)

存在很多影响设计的因素难以包含在任何性能模型中,这些因素包括环境因素、覆盖因素、对抗因素、体积、重量、功率消耗、花费、技术成熟度、客户需求、可维修性、可靠性和技术支持问题等。

光电成像系统建模驱动了未来的系统设计、系统要求和质量控制指标。它将系统特性与易于理解的物理参数相联系,使得设计人员、制造厂家和消费用户可以更好地确认系统设计目标的完成程度。

光电成像系统的建模是一个连续的过程(参见图 1.4)。所建模型可用于优化系统设计、预测系统的工作效能,且能帮助选择质量控制指标。

一旦模型针对特定设计进行了验证,可用于下一代成像系统的设计与开发。

2. 光电成像系统仿真

光电成像系统仿真是指依据目标及其环境光学特性与光电成像系统作用机理,以光电成像系统模型为基础,借助于计算机仿真和图形学技术完成光电成像物理效应高逼真度模拟,实现光电成像系统输出成像数据的高置信度仿真。成像仿真主要完成场景辐射或散射

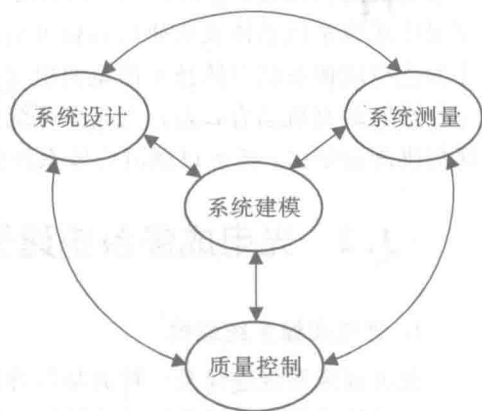


图 1.4 光电成像系统建模过程

光场分布信息到数字图像灰度分布信息的转换,可模拟真实光电成像系统输出的图像数据来源,为光电成像系统各环节参数合理性评估、系统图像质量评价、复杂环境成像性能评估、图像处理算法评测等提供有效的数据源。

3. 光电成像系统测试

光电成像系统测试是指通过全数字成像仿真测试平台、半实物仿真测试平台、实际物理实验测试平台,设计合理的性能参数测试方法,完成光电成像系统固有性能和外场性能指标的试验测试与度量^[9],获得测试指标数据。根据所采用平台的不同,它可分为纯物理试验测试法、半实物仿真测试法和全数字成像仿真测试法。

(1) 纯物理试验测试法是指在实验室或现场工作环境中,对光电成像系统进行试验,确定系统的性能指标。该方法的特点是测量结果直观、准确、可靠。然而,野外试验测试不可能在复杂多变的环境下进行,系统性能评估范围受到很大的限制。

(2) 半实物仿真测试法是在实验室内利用场景生成软件逼真、可重复地再现目标在不同背景条件和不同工作状态下的光学场景,考核光电成像系统,定量评估其性能,使试验结论更加科学、全面、准确地反映被测试品的真实性能。但这需要建立昂贵的红外场景投影系统,且系统的响应范围也受到现有技术工艺水平的限制。另外,纯物理试验测试法和半实物仿真测试法都只能针对已研制定型的成像系统进行评估,对于所设想或设计中的成像系统无法开展其性能的预测与评价。

(3) 全数字成像仿真测试法与半实物仿真测试法的相同之处,光学试验场景都是通过光学场景生成软件生成的虚拟场景;不同之处,全数字成像仿真的待测成像系统、光电信息处理机、伺服控制、载体平台等环节都是虚拟的。全数字成像仿真测试法的优点是可灵活控制各环节的仿真参数,可对所设想或设计中的新体制成像系统开展其性能的测试与评价,避免繁琐、艰辛的野外试验,节约研究经费;同时,还可以为光电成像系统的优化设计和分析提供参考依据,缩短设计周期,提高工作效率。此方法适用于光电成像系统的各环节参数灵活调整、方案论证及战技指标的评定。不足之处是,该仿真测试法将对全链路环节逼真建模与协同仿真提出较高要求。

4. 光电成像系统评估

光电成像系统评估是指以图像质量、综合性能指标和作战能力指标为任务目标,通过性能模型或试验测试数据统计分析手段,结合判别准则,完成对光电成像系统在复杂环境条件下的性能预测和等级划分,如作用距离、探测概率、识别概率、国家图像质量解译尺度、定位和定向精度、跟踪精度、脱靶量、命中率、跟踪角速度、抗干扰能力等指标。

1.3 光电成像系统图像质量与性能影响物理因素

根据应用领域不同,光电成像系统可分为军用光电成像系统和民用光电成像系统。应用方向的不同使得系统设计要求存在较大区别,参见表 1.2。例如,在振动稳定性方面,军用光电成像系统通常工作在车载、机载、弹载和星载等机动平台上,需要采用减振部件和加装稳定装置以隔离平台振动对成像系统的传递;而民用光电成像系统通常放置于三脚架

或其他静止、稳定的平台上,不需要考虑振动稳定性。在图像处理方面,军用光电成像系统图像算法设计往往针对具体应用,设计目标探测和自动目标识别算法;而民用光电成像系统通常采用菜单驱动的多种选择算法。在分辨率方面,军用光电成像系统通常要求实现高分辨率的图像质量,以便远距离分辨敌方目标;而民用光电成像系统因可以接近测量目标而无需高分辨率。在图像处理时效性方面,军用光电成像系统通常要求图像处理实时性;而民用系统通常没有该要求。在灵敏度要求方面,军用光电成像系统通常要求具有低噪声和高灵敏度,以便对远距离微弱目标特性进行感知;而民用光电成像系统通常感知的目标具有高对比度,不需要高灵敏度。

表 1.2 军用/民用光电成像系统典型设计要求差别

系统设计要求	军用光电成像系统	民用光电成像系统
振动稳定性	对窄视场成像有要求	无要求
图像处理算法	取决于具体应用 (目标探测、自动目标识别)	菜单驱动的多重选择
分辨率	高分辨率 (远距离分辨目标)	不是问题 (因成像器可通过靠近目标放大物体)
图像处理时间	实时处理	实时处理不要求
目标特性 (灵敏度要求)	刚好感知目标 (如低噪声/低 NETD)	高对比度目标 (噪声往往不是主要设计关注因素)

针对不同类型和不同用途的光电成像系统,用户不仅关注光电图像的质量,更关注基于成像数据发挥的性能或效能(如作用距离,探测、识别、跟踪性能,战技指标等)。依据光电成像机理可知,光电成像系统成像质量和性能与成像过程中每个环节的因素密切相关,如目标及其背景光学特性、大气环境、成像系统、光电信息处理、伺服控制、稳定平台及通信传输等环境因素,这些因素(如图 1.5 和图 1.6 所示的成像链路)^[10]共同影响着感知图像的质量及综合性能。

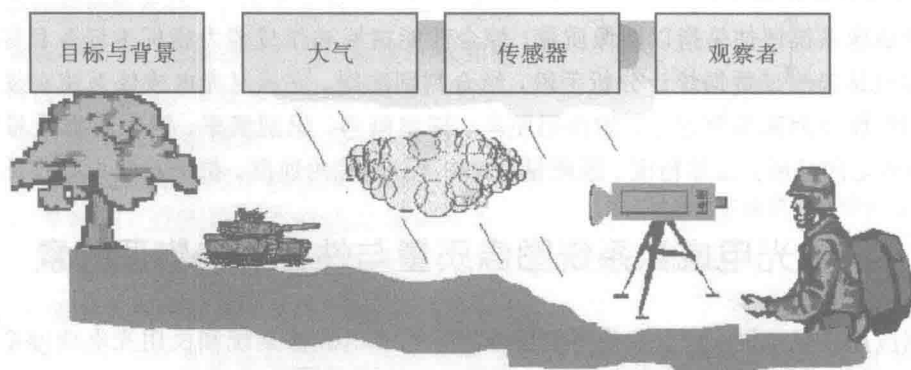


图 1.5 观瞄式光电成像链路