



光电成像系统建模 及性能评估理论

张建奇 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 及性能评估理论

张建奇 王晓蕊 著

西安电子科技大学出版社

序

近几十年来,在应用光学、大气光学、红外物理学、光电子技术、微电子学、信息处理技术、自动化技术及通信技术等学科的带动下,受对景物观测、识别、监控等方面的应用需求不断增长的驱动,光电成像技术有了长足发展。现在在民用方面已有 2110 万有效像素的相机面市,军用光电成像设备亦有相应进展。在光电成像系统的研制工作中,传统的总体设计理念是根据光电成像设备的使用要求,首先拟定总体设计指标;进而进行设计任务分析(包括目标、背景及噪声特性分析)及系统应有的灵敏度和精度等总体指标分析计算,确定系统应有的具体设计指标;再进行系统的结构设计及系统的信号处理系统设计;最后进行系统综合结构及性能总体指标的分析计算,然后进入具体研制进程。这种设计理念的特点是根据具体任务要求而确立的设计流程,目标现实、明确。设计样机总体成果需要通过一定的实体试验(仿真实验及外场实验等)。对各种复杂多变因素不一定能通盘顾及。本书介绍的通过在光电成像建模、评估理论上建立的光电成像系统优化设计方法,是一种新的总体设计理念。该方法是通过分析系统各组成部分的物理特性建立相应的数学物理模型,借助计算机仿真技术实现光电成像过程,从而预测评估系统的作用性能。此方法可避免繁琐、艰辛的野外试验,并能节约研究经费。这种设计理念的可贵之处更在于可为不断发展的新型光电成像系统提供优质可靠的总体设计依据。

本书全面、系统地论述了光电成像系统建模的基础理论、评估方法和性能测试技术,它是在汇集、整理国内外相应研究论文的基础上,结合本课题组多年来的研究成果编写而成的专著。本书在光电系统设计研究方面具有重要的理论意义及实用价值。

本人自 20 世纪 50 年代中后期以来即从事光电系统研究和教学工作,对本书的出版感到非常欣慰,该书为光电成像系统的研制和教学人员提供了一本可贵的学习参考资料。

楊宜禾

2010 年 11 月

前 言

从现代信息理论的观点来看,光电成像技术是对景物辐射信息源在多维空间上经光/电转换产生适合人眼观察图像的技术。光电成像技术促成了人类视觉探测领域的光谱延伸、阈值扩展和时间暂留,近几十年来发展十分迅速,在航天遥感、交通监控、医学影像、天文观测、水下勘探、机器人视觉、军事侦察、成像制导等民用和军事领域都表现出卓越的功能和巨大的潜力,已成为光电子技术发展的重要标志。

光电成像是光、机、电、算、控多种技术集成的产物,如何将光电成像系统所涉及的各种技术进行匹配设计以获取最优的系统性能,始终是光电成像系统发展历程中所要解决的关键技术之一。要解决这一关键技术,就必须对成像系统各组成模块进行深入分析,建立相应的理论模型,构建成像系统的性能模型,从而将光电成像系统基本设计参量与系统综合性能指标进行有效的结合,使性能模型预测结果与系统性能实验测量结果准确吻合,方可作为光电成像系统的优化设计模型。根据光电成像系统的发展可知,光电成像系统的优化设计理论模型与系统性能评价是紧密联系的,并且光电成像系统集成设计的优化理论研究也是以光电成像系统的性能评估为前提开展的。

本书是在整理、精选课题组多年来科研成果的基础上,同时吸收国内外在光电成像建模评估理论方面的最新进展,汇总而成的。鉴于国内外关于光电成像系统建模和性能评估理论大都是以红外成像系统为典型系统而开展的,本书以红外成像系统为主线,全面、系统地论述了光电成像系统建模的基础理论、评估方法和性能测试技术,并从应用角度出发,将目标背景—大气辐射传输—成像传感器作为广义系统,重点论述了基于周期和非周期靶标的性能评估方法、大气环境和背景杂波对模型的影响。这些理论模型和性能评估方法仅需作适当修正即可适用于其它波段的光电成像系统。

全书共八章。第一章介绍了光电成像系统建模及性能评估的研究背景,系统地分析了国内外在这一领域的研究现状和发展趋势;第二章介绍了不同类型系统的光电成像转换机理及其组成,并给出了光电成像系统各模块的基本参数;第三章针对典型的凝视和推扫型红外成像系统,系统论述了红外成像系统主要物理效应模型和仿真方法;第四章从辐射信号的传递与转换的角度出发,阐述了三维场景、大气辐射传输、成像系统的建模、模块耦合以及高逼真度设计和渲染方法;第五章依据光电成像系统性能评估模型的发展历程,系统地介绍了基于周期靶标的光电成像系统性能评估模型;第六章系统地介绍了基于三角方向鉴别阈值的光电成像系统性能评估模型;第七章介绍了光电图像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;第八章介绍了红外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与外场动态性能评估方法。

本书的第一、二章由张建奇撰写,第三、五章由王晓蕊撰写,第四章由黄曦、刘德连撰写,第六章由王晓蕊、何国经撰写,第七章由何国经、常洪花、杨翠撰写,第八章由王晓蕊、刘鑫撰写,全书最后由张建奇、王晓蕊统稿定稿。

本书由西安电子科技大学石顺祥教授、安毓英教授主审,两位教授对本书的结构、内容乃至公式、符号均提出了许多宝贵的建议。本书撰写过程中,得到西安电子科技大学出版社、西安电子科技大学技术物理学院红外技术系教师和同学的支持与帮助,在此一并表示感谢。

由于著者水平有限,且本书部分内容涉及光电成像系统建模及性能评估的新领域和新方向,难免有不足之处,热诚希望读者批评指正。

张建奇 王晓蕊

2010年6月

目 录

第一章 绪 论

1.1 光电成像系统评估的目的及意义	3
1.2 光电成像系统建模的概念及影响图像质量的因素	4
1.3 光电成像系统性能评估的研究现状	7
1.3.1 基于信息理论的成像系统评价方法	8
1.3.2 基于建模仿真的成像系统评价方法	8
1.3.3 基于性能模型的成像系统评价方法	9
1.3.4 基于背景杂波量化的成像系统评价方法	12
1.4 本书内容结构	13
本章参考文献	14

第二章 光电成像原理及系统组成

2.1 光电成像系统的构成	21
2.2 红外热成像系统原理	21
2.3 红外热成像系统的类型和组成	23
2.3.1 光机扫描型红外成像系统	23
2.3.2 凝视型红外成像系统	24
2.4 多光谱成像仪概述	25
2.4.1 成像分光技术	25
2.4.2 成像光谱仪	27
2.5 光电成像系统基本参数	30
2.5.1 瞬时视场	30
2.5.2 总视场	31
2.5.3 空间角频率	31
2.5.4 帧周期和帧频	32
2.5.5 扫描效率	32
2.5.6 过扫比	32
2.5.7 驻留时间	33
2.5.8 时间频率和空间频率的关系	33
2.5.9 光谱分辨力	33
2.5.10 辐射分辨力	34
2.5.11 参数的标定	34
本章参考文献	34

第三章 光电成像系统建模仿真理论

3.1 焦平面成像系统典型物理效应	39
3.2 系统分析模型的选择	40

3.2.1	连续输入/连续输出模型(C/C模型)	40
3.2.2	离散输入/离散输出模型(D/D模型)	40
3.2.3	连续输入/离散处理/连续输出模型(C/D/C模型)	40
3.3	响应特性理论分析	41
3.4	成像系统物理效应建模仿真	43
3.4.1	系统空间传递特性建模仿真	43
3.4.2	系统非线性效应建模仿真	48
3.5	成像系统建模合理性的验证	63
3.6	基于微扫描的焦平面成像特性分析	65
3.6.1	微扫描技术的研究现状	65
3.6.2	微扫描模式	66
3.6.3	微扫描成像特性分析模型	67
3.6.4	微扫描成像特性度量因子	70
3.6.5	微扫描成像分辨率的定量计算与分析	74
3.6.6	微扫描成像过程仿真	77
3.6.7	微扫描成像系统的现场性能分析	80
3.7	仿真模型置信度验证方案	85
	本章参考文献	92

第四章 光电成像系统数字仿真

4.1	光电成像系统数字仿真原理与方法	97
4.1.1	光电成像系统数字仿真概述	97
4.1.2	光电成像系统数字仿真发展动态	100
4.1.3	光电成像数字仿真开发平台设计	104
4.2	三维红外场景仿真	110
4.2.1	三维红外场景仿真概述	110
4.2.2	三维红外场景建模与预处理	111
4.2.3	三维红外场景驱动与生成	130
4.3	红外成像系统虚拟样机	140
4.3.1	红外成像系统虚拟样机概述	140
4.3.2	成像系统建模与预处理	141
4.3.3	成像系统效应动态渲染	142
	本章参考文献	145

第五章 基于周期靶标的光电成像系统性能评估

5.1	典型性能模型概述	151
5.2	最小可分辨温差定义及模型推导	151
5.2.1	一代红外成像系统的 MRTD 理论模型推导	153
5.2.2	二代红外成像系统 MRTD 理论模型	154
5.2.3	二代红外成像系统性能模型推导	155
5.2.4	NVTherm 模型	159
5.3	MRTD 模型在现场性能预测中的应用	161
5.3.1	红外场景的表征描述	161

5.3.2	现场性能预测准则的确定	163
5.3.3	现场性能预测实现原理	165
5.3.4	现场性能仿真及分析	167
5.3.5	运动效应和背景杂波对现场性能影响的仿真	168
5.4	NVThermIP 模型	174
5.4.1	NVThermIP 模型的基本思想	174
5.4.2	NVThermIP 模型的现场性能预测方法	178
5.4.3	光电成像系统的对比度阈值函数	180
5.5	系统固有效应对 NVThermIP 模型的修正	188
5.5.1	采样对 NVThermIP 模型预测性能的影响	189
5.5.2	两种等效模型的比较	191
5.6	基于野外测试图像的探测识别性能评估	197
5.6.1	性能预测基本思想	198
5.6.2	基于周期准则的野外性能预测新方法	198
5.6.3	性能度量曲线的量化评估模型	199
5.6.4	仿真结果及分析	200
5.6.5	结论	203
5.7	NIIRS 与目标获取模型之间的关系研究	203
5.7.1	美国国家成像解译尺度	203
5.7.2	通用图像质量方程 GIQE	206
5.7.3	特定参数下 NIIRS 等级的确定及结果分析	209
5.7.4	NIIRS 与鉴别概率的关系研究	211
	本章参考文献	219

第六章 光电成像系统 TOD 性能评估方法

6.1	TOD 度量方法概述	225
6.1.1	TOD 测试靶标	226
6.1.2	TOD 曲线测量方法	226
6.1.3	视觉心理测量函数	228
6.2	TOD 曲线精确度量	229
6.2.1	TOD 测试平台	229
6.2.2	TOD 测试及数据处理	231
6.3	TOD 度量结果不确定度分析	235
6.3.1	ΔT_{eff} 不确定度	236
6.3.2	ΔV_{sys} 不确定度	237
6.3.3	观察者响应的不确定度	238
6.4	客观 TOD 性能度量方法	241
6.4.1	客观 TOD 测量的必要性与要求	241
6.4.2	已有客观 TOD 测量模型分析	241
6.4.3	客观判别模型	242
6.4.4	客观判别模型的验证	247
6.4.5	数据拟合与 TOD 曲线分析	253
6.5	TOD 性能预测理论模型	258

6.5.1	基于靶标仿真成像的 TOD 曲线预测	258
6.5.2	基于方程的 TOD 性能理论模型	263
6.5.3	TOD 性能理论模型仿真结果及试验验证	277
6.5.4	基于 TOD 理论模型的成像系统匹配设计探讨	281
6.6	基于 TOD 曲线的目标获取模型	284
6.6.1	基本概念及目标获取模型	284
6.6.2	TOD 准则的试验确定	287
6.6.3	基于 TOD 曲线的现场性能预测	292
6.7	基于三角形靶标的目标传递概率函数	296
6.7.1	目标传递概率函数	296
6.7.2	视觉锐度	296
6.7.3	无缝三角形网格划分算法	297
6.7.4	目标传递概率函数拟合	298
	本章参考文献	300

第七章 背景杂波尺度与成像系统性能预测

7.1	概述	305
7.1.1	杂波在目标获取性能模型中的引入	305
7.1.2	国内外研究动态	310
7.2	杂波对人眼视觉成像系统性能模型的影响	313
7.2.1	背景杂波量化尺度	313
7.2.2	杂波对人眼视觉目标获取性能模型的修正	325
7.3	杂波对机器视觉成像系统性能模型的影响	330
7.3.1	背景杂波量化尺度	332
7.3.2	杂波对机器视觉目标获取性能模型的修正	340
	本章参考文献	343

第八章 光电成像系统性能测试与评价

8.1	性能测量概述	351
8.2	典型红外性能测试装置	352
8.3	信号传递函数测试	354
8.3.1	信号传递函数的定义	354
8.3.2	测试方法	355
8.3.3	数据处理及结果分析	355
8.4	系统噪声特性测量	357
8.4.1	D_i 算子	358
8.4.2	噪声的组成	359
8.4.3	噪声等效温差度量噪声	360
8.5	光电成像系统 MTF 测量	361
8.5.1	测试原理	362
8.5.2	测试结果	363
8.5.3	结论分析	364
8.6	最小可分辨温差曲线测试	364

8.6.1 MRTD 主观测量	364
8.6.2 MRTD 客观度量方法	366
8.7 最小可探测温差测试	368
8.8 红外图像的非均匀性测试	369
8.9 基于半实物仿真系统的性能测试	370
8.9.1 半实物仿真系统的性能测试设置基本要求	372
8.9.2 基于半实物仿真系统的成像系统探测识别性能预测	373
8.9.3 搜索跟踪系统的性能评估	374
8.10 红外成像系统室外测试评估	377
8.11 测试中应注意的事项	378
本章参考文献	379

第一章

绪 论

从光电成像技术开始研究到今天的成熟发展,如何将光电成像系统所涉及的各种技术匹配设计以获取最优的系统性能,始终是光电成像系统发展历程中所要解决的关键技术问题。而要解决此关键技术问题,就必须对成像系统各组成模块进行建模仿真,建立成像系统的性能模型,将光电成像系统基本结构设计参量与系统综合性能指标有效结合,使性能模型预测结果与系统性能实验测量结果准确吻合,方可作为光电成像系统的优化设计模型。根据光电成像系统的发展历程可知,光电成像系统的优化设计理论模型与系统性能评价是紧密联系的,而且光电成像系统集成设计的优化理论研究也是以光电成像系统的性能评估为基础而开展的。本章主要就光电成像质量的影响因素、系统建模理论和方法及全书内容安排作了系统论述。

1.1 光电成像系统评估的目的及意义

在过去的几十年中,世界各国开发了各种类型的光电成像系统,并已在航空航天侦察、遥感、夜视、成像制导跟踪、医疗成像、工业故障诊断、机器人等军事和民用领域获得广泛应用。

光电成像系统的性能评估是光电成像总体技术的重要组成部分。通常,光电成像系统性能评估包括光电成像系统的固有性能评估和复杂环境中的现场性能预测两方面的内容。

一般来说,评价光电成像系统的性能有三种方法:

- 试验测试法;
- 半实物仿真法;
- 性能理论模型法。

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,野外试验测量法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。

半实物仿真法是在实验室内,利用场景生成软件逼真地、可重复地再现目标在不同背景条件和不同工作状态下的红外场景,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,试验测试法和半实物仿真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评价。

性能理论模型法是针对标准测试样条,以光电成像系统的综合性能参量为基础,通过分析系统各组成部分的物理特性,建立相应的数学物理模型,借助计算机仿真技术重现光电成像系统的成像过程,预测评估系统的作用性能。此方法可避免繁琐、艰辛的野外试验,节约研究经费,还可以为红外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。性能理论模型法适用于光电成像系统的设计计算、方案论证及战术指标的确定。

光电成像技术与系统的发展趋势仍然是引入新工艺、新结构和新技术,采用最新的成像系统集成设计理念,提高光电成像系统的分辨率和灵敏度,改善光电成像系统的综合性能。这必然要求研究新型成像系统的建模理论及系统性能评估新方法,以适应不断发展的新型光电成像系统的需要。光电成像系统的理论建模及性能表征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,为光电成像系统的优化设计提供理论依据,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 光电成像系统建模的概念及影响图像质量的因素

光电成像系统建模驱动了未来的系统设计、系统测量和质量控制指标。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、制造厂家和消费者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与仿真是一个连续的过程(见图 1.1)。该模型可用于优化系统设计、预测系统的作用距离,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,就可用于下一代成像系统的设计开发。

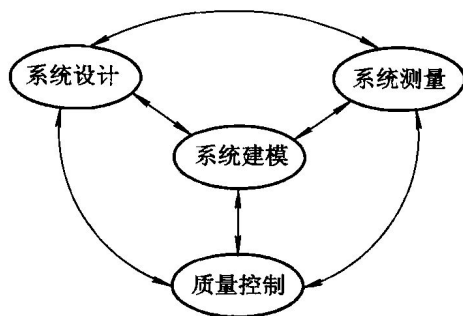


图 1.1 光电成像系统建模过程

光电成像系统建模是一种数学模型的构建,该模型需要综合考虑光电成像系统特性、观测者经验、场景特性、大气环境、监视器设置及多种其他因素。这些因素(见图 1.2)影响着感知图像的质量。

由图 1.2 可知,影响光电图像质量的因素是非常复杂的,很难找到一个单独的模型能将上述因素全面覆盖。正因为如此,许多模型是专门针对特定环境和系统类型构建的,且需要做很多简化的假设和特征条件下的试验验证。

下面简要分析影响图像质量的各个因素。

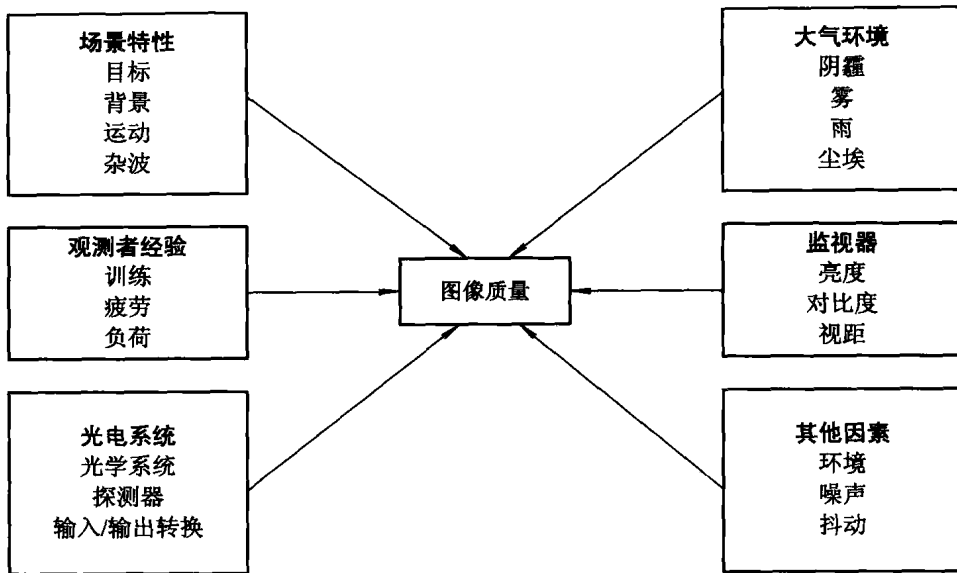


图 1.2 影响图像质量的因素

1. 场景特性

处于环境中的目标(如建筑物、桥梁、汽车、舰船、飞机、人等)和背景(如地表、天空、树木、岩石等)组成了光电成像系统的辐射源。目标和背景是以空间参数(几何尺寸等)和能量参数(辐射率、温度等)表征的。对于目标,这些参数可用确定函数来描述;而对于背景,则用随机函数描述。

2. 大气环境

大气是辐射源和成像系统间的中介介质。由于大气的吸收和散射,使目标和背景的辐射发生了改变;而由于大气的扰动使得图像变得模糊不清;同时,大气也成为辐射接收器接收的一部分辐射源。这些因素使得无论是空间参数还是能量辐射参数,都可能发生变化,这些变化在时间上都是随机的。

3. 光电系统

1) 光学系统

光学系统是由防护玻璃、透镜、反射镜、棱镜、光阑、滤光片等组合而成的。光学系统具有下述功能:

- (1) 能以给定的比例在分析平面内形成目标和背景的辐射场图像。
- (2) 能以最小的损失,尽最大可能将目标辐射通量传递到辐射接收器上。
- (3) 为增大目标辐射与背景辐射的比值,实施光学信号的时间和空间滤波。
- (4) 能保证给定视场内物空间必需的扫描。
- (5) 能实现目标的追迹和确定目标的坐标。
- (6) 能增强入射到辐射接收器上的辐射通量密度。

2) 光电成像探测器

光电成像探测器是成像系统的主要核心部件，它起着将辐射光线转换成电信号的作用。光电成像探测器可按以下特征分类：

- (1) 辐射能转换类型；
- (2) 灵敏度随辐射波长变化的特性；
- (3) 最敏感和应用广泛的光谱区等。

表 1.1 列出了光电成像探测器的主要工作波段。

表 1.1 光电成像探测器主要工作波段

谱 段	波长范围/ μm
真空紫外	0.05~0.20
短波紫外(UV-C)	0.20~0.29
中波紫外(UC-B)	0.29~0.32
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)	1.1~1.7
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	1000~10000

4. 监视器

监视器(也称显示器或指示器)的作用是将瞬时的视频电信号转换成与观察平面内热场

分布相对应的屏幕亮度的空间分布。电子射线管、发光二极管和液晶矩阵、电子彩色指示器等都是重要的转换元件。视频成像和图像扫描装置的工作必须同步。

5. 观测者经验

观测者是热成像系统信息的需求者。观测者用眼睛感知视频显示屏幕上的亮度分布,进行目标的探测和识别等。观测者的经验也是影响感知图像质量的因素之一。

6. 其他因素

影响感知图像质量的还有其他因素,如环境、噪声、抖动等。对这些因素的处理包括将信号处理器输出的电信号进行数据采集、传输、分析和记录等进一步的加工处理工作,为系统的性能评估提供有效的数据。

从理论上讲,要完整、准确地评价光电成像系统的端到端综合性能,就应该把影响系统性能的四个重要模块(场景特性、大气环境、光电成像系统本身因素、显示与观察接收系统)结合起来,建立成像系统的仿真模型和性能理论模型,分析每个模块对系统成像特性的影响,四者缺一不可。

从实现方法上讲,有关光电成像系统性能评估理论的研究主要存在四种思路:一是基于信息理论的成像系统评价方法^[1-7];二是基于建模仿真的成像系统评价方法;三是基于性能模型的成像系统评价方法;四是基于背景杂波的成像系统评价方法。本章 1.3 节将介绍这四种思路。

可以说,到目前为止,光电成像系统性能评价的研究成果已有很多,但在光电成像系统性能评估方法、综合性能参量的选择方面仍然存在较大的分歧^[21-22]。

我们知道,评价一个光电成像系统的性能优劣通常是以它的现场性能(作用距离,探测、识别和鉴别概率等)或任务要求为基准的。因此,用于光电成像系统性能评估的性能参量本身首先应能体现系统的外场性能;其次,选择的评价参量能够数学建模,描述光电成像系统灵敏度、分辨率的常用物理量有噪声等效温差(NETD)、最小可分辨温差(MRTD)、最小可探测温差(MDTD)、调制传递函数(MTF)、互信息量及信号干扰比(SIR)等;再者,评价参量能够得到实验室测量结果的验证,目的是检验、修改及优化上述理论模型;最后还必须找到外场性能指标与实验室测量参量之间的定量转换关系,预测成像系统的外场性能指标。

1.3 光电成像系统性能评估的研究现状

五十多年以来,随着光电成像系统技术水平的不断提高,与其相应发展的光电成像特性分析理论与性能评估模型也在不断的改进。从对光电成像系统最初的探索,到今天各种成像特性分析模型及性能表征方法,前人在这方面做出了卓越的贡献。下面将依据四种主要研究思路就他们的研究成果和发展状况分别加以阐述,从中可以看出光电成像系统及性能评估方法的发展历程,这对光电成像系统建模与性能评估研究有着重要的参考价值。