



装备科技译著出版基金

光电成像系统性能 (第4版)

Electro-Optical Imaging
System Performance
(Fourth Edition)

[美] Gerald C. Holst 著
阎吉祥 俞信 解天宝 姚和军 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

光电成像系统性能

(第4版)

**Electro - Optical Imaging System
Performance (Fourth Edition)**

[美] Gerald C. Holst 著

阎吉祥 俞信 解天宝 姚和军 译



国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2008-063号

图书在版编目(CIP)数据

光电成像系统性能:第4版/(美)霍尔斯特(Holst,G.C.)著;
阎吉祥等译. —北京:国防工业出版社,2015.4

书名原文:Electro-optical imaging system performance,4th edition
ISBN 978-7-118-09945-4

I. ①光... II. ①霍... ②阎... III. ①光电效应—成像系统—
系统性能 IV. ①O435.2②O482.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第053289号

ELECTRO-OPTICAL IMAGING SYSTEM PERFORMANCE

Fourth edition

Gerald C. Holst

ISBN:0-9707749-2-3

Copyright © 2006 Gerald C. Holst

All rights reserved. No part of this book may be reproduced in any form by any means
without written permission from the copyright owner.

本书简体中文版由 Gerald C. Holst 授权国防工业出版社独家出版发行。

版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 20 字数 448 千字

2015年4月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 88.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

第 4 版序

获取目标的模型在过去的这些年里经历了很多发展变化。20 世纪 80 年代晚期引入的凝视阵列 (Staring array) 引发了 (模型的) 重大变化 (如下表)。夜视热敏模型 (NVTherm) 是从 1975 和 FLIR92 模型演变来的 (1975 模型也因它的主要发明人 Ratches 而称为 Ratches 模型)。然而, 实际的使用范围和预期的仍有差别。人眼主要是靠对比度来分辨目标的。一个系统会局限于人眼的能力 (人眼不能分辨出系统所提供的精细的灰度) 或系统本身的性能 (系统不能提供足够的对比度)。夜视热敏及图像处理模型 (NVThemIP) 作为一种对比度的模型在目标的获取上引入了新的目标任务性能 (TTP) 度量方法。对比度的方法应用普遍, 它适用于所有的成像系统。分析可见光和红外光系统唯一的区别在于对目标特性的描述。红外目标的特征是用其 (各部分) 温度的不同来描述的, 这些区别被转化为热对比度。而在可见光的范围内, 目标的特性是用传统的 (光学) 对比度来描述的。增益和亮度的偏置也许会使显示的像的反差和实际景物的有明显的不同。这就是 NVThemIP 的图像处理部分所采用的。早期的模型不能精确地预测实验室最小的可分辨温度 (MRT)。可是 NVThemIP 却能办到。

美国几个模型的特性汇总

模型及其年份	所改进的功能	目视模型	预测适用距离
1975 NVL 1975	第一代一维扫描热像仪	匹配滤波器	Johnson 判据
FLIR92 1992	二维凝视阵列包 括三维噪音模型	同步积分器	Johnson 判据
NVThemIP 2002.9	眩光和增益设定。 可通过压缩调制传递函数 对采样进行调节	对比度灵敏度	与 Modtran 结合 的 Johnson 判据
NVThemIP 2005.3	可预测实验室最小可分辨温度。 可在目标任务性能中对 采样进行调节	对比度灵敏度	目标任务性能

译者前言

本书译自美国学者 Gerald C. Holst 博士所著的《ELECTRO - OPTICAL IMAGING SYSTEM PERFORMANCE》(第4版)。

本译著获“装备科技译者出版基金”项目资助。立项过程中幸蒙中国工程院周立伟院士和周寿桓院士推荐;并得到基金管理部门有关领导及评审专家的大力支持。国防工业出版社的责任编辑程邦仁同志做了大量工作;解天宝教授在与原书作者 Gerald C. Holst 博士的联系与沟通中发挥了重要作用,译者对此一并表示诚挚的感谢。

本书由四位译者共同翻译。前言及第1、7、8章由美国 Linfield 学院物理系主任解天宝教授翻译,田新荣硕士助其完成图中文字处理;第2、17、19章由中国计量科学研究院姚和军研究员负责,李建威博士和徐楠博士协助完成;第3~6章由北京理工大学俞信教授翻译;目录、第9~16、18、20、21章及附录和中英文对照由阎吉祥翻译,译文的录入工作由其博士生温焱、王碧茹、王钢、杨强及硕士生田新荣完成。

原著中一些明显的笔误、印刷错误已在翻译时改正,并予注明。囿于译者水平,译著中错误及欠妥之处在所难免,恳请读者指正。

译者

2014年10月

前 言

目标的识别和认定没有绝对的值。更确切地说,任何一个目标都存在着被识别(认定)的可能性,这要取决于“混淆物体”的数目。这里所说的“混淆物体”是指类似所寻目标的杂乱物体及其他相似的物体。在图像处理中,显示的图像会被噪声、取样走样及系统的调制传递函数(MTF)所破坏。在低信噪比的情形下,观察者对目标的识别可能没有100%的把握。如果在视场中有五个相似的物体,即使观测者把眼睛闭上,猜对目标的概率也有20%。NVThermIP模型考虑到这种可能性,而之前的模型则没有。

就本书来说,这一版虽增加了35页,然而有些章节缩短了并去掉了多数冗长的部分。正文部分增加了大约50页的新内容。多数章节中的内容和第3版的是一样的,这对系统的MTF的方程讨论也是一样。书中还加入了最新的参考材料(2003年—2005年)。为了更容易解读,所有的图已经重新画过。

第1章~第10章的内容基本是一样的。系统的设计和所用的公式都没有变化。虽然我们的模型都注明是二维的,但事实上它们是两个方向的:垂直和水平方向。第11章的标题中“垂直调制传递函数”改为“二维调制传递函数”。它阐述了(由光学显示出的)极对称和(由探测器显示出的)矩形相应之间的不同(由探测器所表现出的)。

欠采样的图像是典型“块状”的,其分辨力与相应的模拟系统相比降低了。采样—数据系统分辨力能够通过超分辨力图像重建而得到明显的改进(第12章)。14章扩展为两部分:数字信号处理和空间采样。数字信号处理的部分把原来在第3版中分散于各章的有关数字信号处理的内容都集中起来。在第19章系统性能模型中介绍了NVThermIP模型,TTP模型在第20章中有论述。目标的区别和适用距离的预测在第21章中做了解释。对于选择MWIR(中波长红外)还是选择LWIR(长波长红外)成像系统的争论从来都没有停止过。本书中有9个独立的章节对此进行了讨论。

本书讨论的模型都是线性模型。虽然NVThermIP含有“图像处理”功能,此功能不过只是测量目标的对比度而已。而它不含有很多书中都给予解释的非线性图像处理的算法。没有包括在这本书中目前流行的论题:色彩显示,图像融合,目标暗示,目标自动识别装置以及应用大规模图像处理的系统。而我们目前所用的系统可看成是配备有传感器的计算机。而这些系统的性能却不能用目前的模型来预测。

Pinnacle信息服务公司的Doug Marks为本书提供了所有的图表。我很感激Doug为我每次及时修改图表。

Gerald C. Holst

2005年11月

目 录

第1章 引言	1
1.1 成像系统相关术语	2
1.2 系统模型构建	3
1.3 灵敏度和分辨率的极限	5
1.4 红外成像系统	6
1.5 红外成像系统的模型构建	8
1.6 模型的输入信号	8
参考文献	9
第2章 红外热成像系统的运行	11
2.1 光学部件	12
2.2 扫描仪	13
2.3 探测器和冷却器	15
2.3.1 探测器分类	16
2.3.2 特定(专用)探测器	17
2.3.3 探测器的工作	17
2.4 特殊系统	19
2.4.1 线阵扫描仪	19
2.4.2 公共模块系统	19
2.4.3 电光倍增系统	22
2.4.4 电子多路传输系统	22
2.4.5 第二代扫描系统	23
2.4.6 凝视阵列系统	24
2.5 系统放大率	25
参考文献	25
第3章 辐射度学	26
3.1 辐射传输	26
3.1.1 普朗克黑体公式	27
3.1.2 扩展源	28
3.1.3 点源	31
3.2 温度差 ΔT 概念	35
3.3 光度学	36
3.4 归一化	36

参考文献	38
第 4 章 调制传递函数(MTF)理论	40
4.1 MTF 定义	41
4.2 线性滤波理论	42
4.2.1 线性系统的光电系统	42
4.2.2 级联 MTFs	43
4.3 叠加在光学系统中的应用	44
4.4 相移	45
参考文献	46
第 5 章 采样理论	47
5.1 采样理论	48
5.2 混淆	49
5.3 采样器	50
5.3.1 探测器作为采样器	50
5.3.2 空间采样	51
5.3.3 A/D 转换器	53
5.4 微扫描	54
5.5 抗混淆滤波器	55
参考文献	56
第 6 章 通用模块系统	57
6.1 光学传递函数 OTF	58
6.1.1 衍射受限 OTF	58
6.1.2 中央遮挡	60
6.1.3 像差	61
6.1.4 散焦光学	62
6.1.5 高斯近似	63
6.2 探测器	63
6.3 运动	64
6.3.1 线性运动	65
6.3.2 正弦运动	66
6.3.3 随机运动(抖动)	67
6.3.4 非线性扫描镜的运动	69
6.3.5 低频运动	69
6.4 电子系统的 MTF	69
6.4.1 电子频率向空间频率转换	69
6.4.2 探测器时间常数	73
6.4.3 放大器	73
6.4.4 电子滤波器	73
6.5 发光二极管	75

6.6	视觉光学	75
6.7	眼响应	75
6.7.1	人眼空间频率向空间频率的转换	76
6.7.2	人眼 MTF	76
6.7.3	人眼对比度阈值函数 (CTF)	79
6.8	系统设计实例:随机运动.....	80
6.9	中心极限定理	81
	参考文献.....	81
第7章	光电多路传输系统	84
7.1	摄像机	84
7.1.1	转换:从摄像机(扫描)线到空间频率	84
7.1.2	摄像机的调制传递函数	85
7.2	视频放大器和滤波器	85
7.2.1	转换:摄像机频率到空间频率	86
7.2.2	辅助放大器线路	86
7.2.3	视频放大器	87
7.3	显示器	87
7.4	系统设计实例	88
	参考文献.....	89
第8章	电子多路传输系统	90
8.1	移动	91
8.2	探测器	92
8.2.1	时间延迟和积分(TDI)	92
8.2.2	SPRITE 探测器.....	93
8.2.3	非冷却探测器	94
8.3	转换:从取样频率到空间频率.....	95
8.4	转换:视频取样频率到空间频率	95
8.5	图像重建	96
8.5.1	取样保持	96
8.5.2	后重建滤波器	96
	参考文献.....	98
第9章	凝视阵列系统	100
9.1	运动.....	101
9.2	探测器阵列.....	101
9.3	微扫描.....	102
	参考文献	104
第10章	线性扫描仪	105
10.1	矩形孔	107
10.1.1	衍射极限 OTF	107

10.1.2	离焦 OTF	108
10.1.3	地面覆盖率	110
10.2	扫描仪	110
10.3	运动	111
10.4	电子装置的 MTF	111
10.5	AN/ADD -5 CRT MTF	111
10.6	AN/ADD -5 的胶片	112
10.6.1	转换:胶片影响到空间频率	112
10.6.2	胶片 MTF	112
	参考文献	112
第 11 章	二维 MTF	114
11.1	子系统二维 OTF	114
11.2	垂直采样速率	117
11.3	系统竖向 MTF	119
11.4	插入和数字滤波器	120
	参考文献	120
第 12 章	分辨率	121
12.1	模拟度量标准	122
12.2	数据采样系统	124
12.3	超分辨率	126
12.4	基于分辨率的系统设计	127
12.5	Shade 的等价分辨率	129
12.5.1	模拟系统	129
12.5.2	数据采样系统	132
12.6	分辨率对可观察细节	133
	参考文献	134
第 13 章	像质	136
13.1	MTF	136
13.2	等价通带宽度	137
13.3	感观分辨率	138
13.4	主观质量因子(SQF)	139
13.5	MTFA	140
13.6	平方根积分	140
13.7	瞄准作业性能	141
	参考文献	141
第 14 章	SA 数据采样系统	143
14.1	Z - 变换	143
14.2	数字滤波器	144
14.3	内插法	147

14.3.1	像元内插法	147
14.3.2	线—线插入法	148
14.3.3	变焦	149
14.4	噪声衰减算法	150
14.4.1	递归滤波器	150
14.4.2	中值滤波器	152
14.4.3	帧累加	152
14.5	图像恢复	152
14.6	采样—场景调相	154
14.7	单位闭锁采样数	155
14.8	靶上像素	156
14.9	非对称采样	158
14.10	伪响应	159
14.11	MTF 压缩(NVTherm)	161
14.12	分辨周期压缩(NVThermIP)	163
14.13	数据采样系统中的噪声	163
	参考文献	164
第 15 章	大气透过率	167
15.1	大气成分	168
15.1.1	水蒸气	169
15.1.2	气溶胶	170
15.2	能见度	172
15.2.1	气象学距离	172
15.2.2	对比度透过率	173
15.3	LOWTRAN, MODTRAN 和 HITRAN	173
15.4	谱平均大气透过率	175
15.5	天气条件	176
15.5.1	平均条件	177
15.5.2	发生概率	177
15.5.3	海军模型	178
15.5.4	地基系统及水平路径	180
15.5.5	陆基系统及斜程	181
15.6	MWIR 与 LWIR	182
15.7	信噪比的最佳化	185
15.8	太阳闪烁	187
15.9	太阳光的散射	189
15.10	战场遮蔽	189
	参考文献	189

第 16 章 大气 MTF	192
16.1 C_n^2	193
16.2 湍流的 MTF	194
16.3 气溶胶 MTF	197
参考文献	198
第 17 章 目标特征图	200
17.1 什么是 ΔT	201
17.2 面积加权 ΔT	202
17.3 热力学结构度量	203
17.4 昼夜变化	204
17.4.1 太阳光加热	204
17.4.2 ΔT 累积概率	205
17.4.3 环境修正	206
17.5 运动目标	206
17.5.1 燃料燃烧	206
17.5.2 摩擦生热	206
17.6 目标特征建模	206
17.7 天空背景	207
17.8 可见光区域的目标特征	207
17.9 目标对比度	208
17.10 路径辐射	209
17.10.1 红外路径辐射	209
17.10.2 可见光路径辐射	209
参考文献	211
第 18 章 灵敏度和噪声	213
18.1 扫描阵列(模拟系统)	214
18.1.1 噪声等价带宽	214
18.1.2 光子噪声	215
18.1.3 JOHNSON 噪声	215
18.1.4 放大器噪声	216
18.2 凝视阵列	216
18.2.1 光子噪声	216
18.2.2 暗电流	216
18.2.3 固定型噪声	217
18.2.4 多路调制器噪声	218
18.3 探测器响应度	218
18.3.1 经典半导体器件	218
18.3.2 新型半导体器件	219

18.3.3	热探测器	219
18.4	比探测率	219
18.4.1	BLIP	220
18.4.2	JOHNSON 噪声受限	220
18.4.3	D_{BB}^* 向 D_F^* 的转换	221
18.4.4	D_{300}^*	221
18.5	真实系统	222
18.6	系统 SNR	224
18.6.1	扫描系统	224
18.6.2	凝视系统	224
18.7	NEDT	225
18.7.1	扫描系统	226
18.7.2	凝视系统	226
18.7.3	背景温度	227
18.7.4	升压	228
18.7.5	大气透过率	228
18.8	MWIR 与 LWIR	229
18.9	NEI	230
	参考文献	231
第 19 章	系统性能模型	234
19.1	三维噪声模型	236
19.2	FLIR92	238
19.2.1	FLIR92 模型	239
19.2.2	SNR_{th} 与 t_e	241
19.2.3	头部运动	242
19.2.4	“嵌入式”1975 NVL 模型	243
19.2.5	扫描系统(默认值)	243
19.2.6	凝视系统(默认值)	244
19.2.7	不均匀性与 σ_{VH}/σ_{TVH} 对比	244
19.2.8	二维 MRT	245
19.3	NVTherm	246
19.4	NVThermIP	249
19.5	TRM3	250
19.6	三角方向辨别: TOD	250
19.7	模型比较	251
19.8	STADIUM FLIR	251
19.9	最小可分辨对比度	252

参考文献	253
第 20 章 目标识别	256
20.1 一维目标搜索	257
20.1.1 JOHNSON 判据	257
20.1.2 扩展识别法	258
20.1.3 目标传递概率函数	260
20.1.4 杂物干扰	262
20.1.5 中等纵横比目标	263
20.2 二维识别	264
20.2.1 像元与周期	264
20.2.2 目标上的像元数	265
20.2.3 识别要求	266
20.2.4 二维 TTPF	268
20.3 热点物探测	269
20.4 瞄准工作特性	269
参考文献	272
第 21 章 距离预测	275
21.1 距离预测方法	276
21.1.1 大气透过率	276
21.1.2 大气湍流	277
21.1.3 ACQUIRE	277
21.1.4 距离性能概率	277
21.1.5 采样效应	279
21.2 两个视场	279
21.3 分辨力与灵敏度	280
21.4 视线稳定	281
21.5 目标大小	281
21.6 电子变焦	282
21.7 STADIUM FLIR	282
21.8 MWIR 对 LWIR 系统	282
21.9 实际目标	284
21.10 NVThermIP	284
21.11 搜索	285
21.12 NIIRS	286
参考文献	290
附录	292
中英文索引	294

第 1 章 引 言

光电成像系统分析是个数学构建的过程,它通过适当的权衡分析提供最佳的设计。一个完整的光电成像系统包括目标,背景,(目标和成像系统间)大气的性质,光学系统,检测器,电子学,显示器以及人对所显示信息的解释图 1-1 所示为适用于所有光电成像系统的典型的传感器工作原理。扫描机理取决于整机设计及探测器的数量。凝视阵列不含扫描器。上述各元器件均可分开来对其进行更为详细的研究,然而光电成像系统本身则不能。只有从端到端(从目标景物到观测者的诠释)的完全分析才可对系统进行优化。

找到最佳设计是个反复论证的过程。如果在设计过程中的任何一步出现相互冲突的设计指标时,需要引入权衡分析。许多性能参数的增强只能以牺牲其他性能参数为代价。如增加了分辨率就会降低灵敏度。

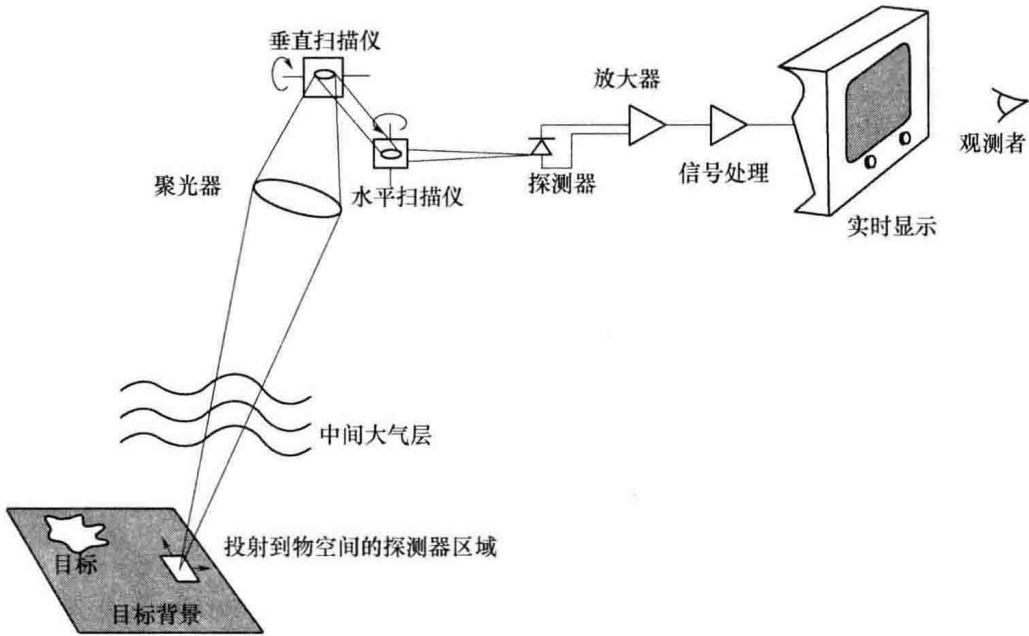


图 1-1 传感器工作原理

有效地建立模型的过程需要把不同的技术和语言有机地结合在一起。这些技术和语言是和辐射物理、光学、固态传感器、电子线路、人对显示图像的解释(人的因素)、计算机模型及系统采用的软件相关联的。上述每个领域都是复杂和独立的学科。系统的分析者应对这些领域都有所熟悉。

Hudson^[1]说过,系统工程是这样—个学科,它提供了一个循序渐进的方法来设计一个系统,特别是对那些复杂到一个人不能对其所有相关细节都能精通的系统来说。随着系统更加复杂和技术的不断进步,扼要地给出对各子系统性能的基本要求以确保

整体系统的要求得到满足就变得越来越必要了。这是对系统设计人员不断增加的挑战。

系统的优化始于概念设计,随之而来的是设计各个子系统。每个子系统的实际性能会和原设想的有所不同,这源于硬件的差异(零部件选择的制约、空间的局限、电源消耗的限制等)。分析者必须修改模型参数以便反映当前的设计。在组装系统的过程中,实际元件的性能由于在生产过程中产生的误差会有所不同。根据实际使用的元件设计人员能够最终对模型参数进行修改。只有在这时,设计人员才可相信测量结果和预期的相吻合。

按 Shumaker 和 Wood^[2] 的说法,一个系统应该能回答下面的四个基本问题:

- (1) 对于给定的任务来说,一个光电成像系统应该具备什么样的性能指标;
- (2) 什么样的设计参数能使系统满足给定的性能指标;
- (3) 什么样的实验数据可用来检验所做的设计能满足所需要的性能;
- (4) 对于一个光电成像系统的设计而言,如何将它以最佳的方式组装起来、所预期的结果是什么。

很多影响设计的因素在实际使用的模型中不容易考虑到。这些因素包括环境问题、不可预料的问题、对不同问题采取的措施、机器的尺寸、重量、能源的消耗、造价、技术的成熟度、顾客的需求、各种性能(维修难易,可靠性等)、以及售后服务等。

1.1 成像系统相关术语

基于大气的频谱传输系数,电子成像系统的设计被分为 7 个不同的频谱段。图 1-2 为 1km 的大气传输系数的分布。传输系数与温度、相对湿度以及空气中所含颗粒有关。紫外(UV)波长的范围为 $0.2\mu\text{m} \sim 0.4\mu\text{m}$ 。可见光的波长范围为 $0.4\mu\text{m} \sim 0.7\mu\text{m}$ 。电视、电子照相机及多数 CCD 照相机都工作在这一波段。近红外成像波段包含了 $0.7\mu\text{m} \sim 1.1\mu\text{m}$ 的范围。弱光电视(LLLTV),图像增强器、星光镜、夜视镜等均工作在这一波段。由于历史的原因,紫外、可见光及近红外成像技术发展了它们自己的术语。第一个红外成像的波段是短波长的红外成像波段(SWIR)它覆盖了 $1.1\mu\text{m} \sim 2.5\mu\text{m}$ 的范围。第二个红外波段是中波长的红外波段(MWIR),它覆盖的范围为

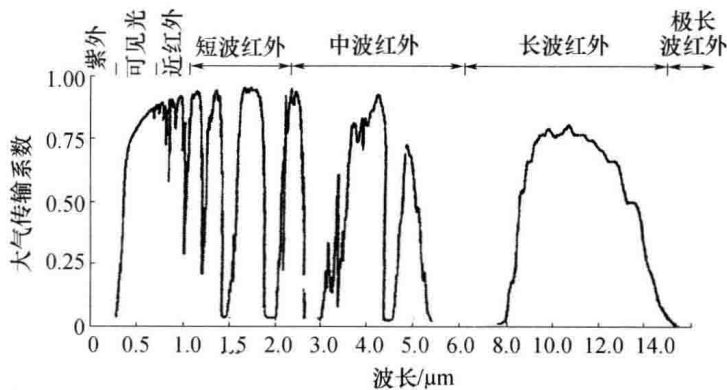


图 1-2 1km 的大气传输系数的分布

2.5 μm ~ 7.0 μm (在早期的一些文献中, MWIR 被标成 SWIR)。第三个红外波段是长波红外波段(LWIR),它覆盖的范围为7 μm ~ 15 μm 。第四个红外波段是远红外波段(FIR)或极长波红外波段(VLWIR),此波段适用于所有频率响应超过15 μm 的系统。有时, MWIR 和 LWIR 也被称为第一个和第二个热成像波段。

对于不同的技术来讲,红外这个词有着不同的定义。例如,胶片是为产生可见影像发明的。如果胶片对较长波长敏感,则称为红外胶片。红外胶片对波长至0.85 μm 的(光波)都敏感。成像系统也是为影像的重建而产生的。如果(成像)系统(对光波)的光谱响应超过0.7 μm 则称为红外装置。大多数此类系统使用的光敏探测器的光谱响应可达1 μm 。不同的标识会用来标明它们,其中包含热成像系统和夜视仪。

表1-1 所列为各系统相应的波长范围。精确的光谱响应取决于各系统的设计。我们说一个系统是 LWIR 系统,只是说其光谱响应在 LWIR 的范围附近。例如,一个 LWIR 系统的光谱响应可能会在7.7 μm ~ 11 μm 或是在8 μm ~ 12 μm 的范围。大气中二氧化碳的吸收谱会在几十米外把所有目标中4.2 μm 的信息完全削去。其结果就是一个 MWIR 系统的光谱响应变为3 μm ~ 4.2 μm 和4.3 μm ~ 5.5 μm 。

表 1-1 各系统相应的波长范围

光谱带		波长范围/(μm)	光谱带		波长范围/(μm)
紫外/ μm (0.05 ~ 0.4)	真空紫外	0.05 ~ 0.20	红外 (0.7 ~ 1000)	近红外(NIR)	0.7 ~ 1.1
	短紫外(UV - C)	0.20 ~ 0.29		短波红外(SWIR)	1.1 ~ 2.5
	中波紫外(UV - B)	0.29 ~ 0.32		中波红外(MWIR) (过去标为 SWIR)	2.5 ~ 7.0
	长波紫外(UV - A)	0.32 ~ 0.40		第一热像谱	3.0 ~ 5.5
可见光/ μm (0.40 ~ 0.70)	紫外	0.40 ~ 0.46		蓝刺羽光	4.1 ~ 4.6
	蓝光	0.46 ~ 0.49		红刺羽光	4.3 ~ 4.6
	绿光	0.49 ~ 0.55		长波红外(LWIR)	7.0 ~ 15.0
	黄光	0.55 ~ 0.58		第二热像谱	8 ~ 14
	橙光	0.58 ~ 0.60		极长波红外(VLWIR)	> 15.0
	红光	0.60 ~ 0.70		超红外	15 ~ 100
				近毫米红外	100 ~ 1000
				毫米红外	1000 ~ 10000

1.2 系统模型构建

建立系统模型能促进优化设计、系统要求以及高质量达标。将各项指标和熟悉的物理参数联系起来,使设计者、生产者及用户对实现设计目标更加有信心。

预测建模是一个连续的过程(图1-3)。其模型是用来优化系统的设计的。当系统用硬件组装起来后,新的测量值可用来改进预测范围。同时建模有助于选择质量控制的指标。一旦模型验证了某个设计,它便用来研发下个设计。