

Surveillance and Reconnaissance Imaging Systems

监视与侦察 成像系统

(模型与性能预测)
(modeling and performance prediction)

【美】 Jon C. Leachtenauer 著
Ronald G. Driggers

陈世平 马文坡 周 峰 等译



中国科学技术出版社

Artech House Publishers

监视与侦察成像系统

Surveillance and Reconnaissance Imaging Systems

(模型与性能预测)

(modeling and performance prediction)

【美】 Jon C. Leachtenauer 著
Ronald G. Driggers

陈世平 马文坡 周 峰 等译

中国科学技术出版社

 Artech House Publishers

图书在版编目(CIP)数据

监视与侦察成像系统:模型与性能预测/(美)利齐坎纳尔(Leachtenauer, J. C.),
(美)德里格斯(Driggers, R. G.)著;陈世平等译. —北京:中国科学技术出版社,
2007. 1

ISBN 978-7-5046-4502-9

I. 监... II. ①利... ②德... ③陈... III. 军用卫星—卫星侦察—卫星图像—
成像系统 IV. E87

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 094938 号

北京市版权局著作权登记图字:01-2006-3888 号

自 2006 年 4 月起本社图书封面均贴有防伪标志,未贴防伪标志的为盗版图书。

责任编辑 崔 玲 封面设计 达 卡
责任校对 韩 玲 责任印制 王 沛

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081

电话:010-62103208 传真:010-62183872

<http://www.kjpbooks.com.cn>

科学普及出版社发行部发行

北京长宁印刷有限公司印刷

*

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16 印张:17.5 字数:500 千字

2007 年 2 月第 1 版 2007 年 2 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5046-4502-9/V·33

定价:42.00 元

前 言

本书旨在对监视与侦察成像系统的建模和性能预测作一全面介绍。监视与侦察成像系统的作用是提供信息,基于图像特征对目标进行探测、分类和识别。对于一组给定的信息需求,系统设计者和使用者必须通过某种方式设计并运行系统以提供所需要的信息。因此,他们需要具备根据设计要素和可以测量的运行参数对监视与侦察成像系统进行建模及性能评估的能力。系统的性能是根据用户提取希望得到信息的能力来规定的。书中对系统的描述、系统建模的历史、系统的特点以及性能模型都做了介绍。尽管在线性移不变系统、目标获取和飞行领域内有许多介绍成像系统的论著,但是,专门介绍监视与侦察成像系统设计和分析技术的论著却几乎没有。本书还对图像解译人员工作性能的有效评估做了重点介绍。

本书面向设计工程师、系统分析人员以及图像科学工作者,对于那些希望更深入了解成像系统建模和对专业术语的学习有兴趣的管理人员或项目工程师可能也会有所帮助。致力于图像解译人员工作性能评估测量的专业人士也能在本书中找到感兴趣的内容。

本书第1章介绍了性能评估模型的概念,并对可能选择的建模方法进行了综述。第2章对可见光、红外以及合成孔径雷达方面的监视与侦察成像系统做了简要介绍。第3章是历史回顾,总结了从第一次世界大战至今监视与侦察成像系统及其性能评估的发展历程,从简单的比例尺和带有经验性的分辨率到今天的信息理论以及多元空间和频域模型。第4章介绍了线性移不变(LSI)成像系统,包括在空间域和频域中的表示。

第5章根据解译人员的工作性能或作为因变量,介绍了用于衡量监视与侦察成像系统信息提取性能的变量。因变量既包括衡量信息提取性能的直接度量,也包括用主观尺度进行的性能评估。诸如目标辨别(发现、识别和确认)的概率、探测时间和探测距离都属于衡量信息提取的直接度量。这一章同时还简要介绍了在发现和虚警之间进行折中的建模过程中信号检测理论所起的作用。性能直接测量

的另一种方法是应用如国家图像解译度分级标准(NIIRS)这样的预测度量,它是由经过培训的解译人员进行性能评估的。经典的信息理论也被应用于这个问题的研究,一般是作为评估信息提取性能的中间步骤。第6章介绍了评估(独立)变量。这些独立的评估变量对应于诸如分辨率、清晰度、比例尺这样一些度量,既是可测量的图像性能,也是可以通过系统的设计和运行参数进行预估的。另外一些独立变量包括对比度、信噪比、差异值和图像质量属性的度量。

一个监视与侦察成像系统的性能虽然很大程度上与设计和运行有关,但同时也受到成像链其他环节的影响。第7章介绍了目标和环境方面的影响,此外,对欺骗和隐藏技术的建模也给出了一些基本的考虑。这些方法包括伪装、虚假目标和利用烟雾产生信号衰减等。第8章和第9章分别介绍图像处理及其模型和显示/判读人员有关问题。

第10章对评估监视与侦察成像系统性能的模型进行了归纳,包括用于SAR、光电/可见光和红外系统以及电视系统的模型。第11章讨论了模型间的转换方法,可用于系统比较。最后,在第12章中介绍了监视与侦察成像系统性能建模当中尚未解决的问题,其中包括多光谱和超光谱系统性能的建模、SAR图像判读性能、瞬态影响的处理及搜寻建模等。

作 者

译者前言

监视与侦察成像系统用于获取图像,在图像中发现、识别和确认目标,从中提取所需要的信息,在军事、经济以及国家安全方面有十分重要的作用。监视与侦察成像系统不仅包括遥感器,还包括装载遥感器的平台、遥感图像数据的传输和处理、图像的显示和观测者对图像的判读。系统成像和信息提取的性能还受到各种环境条件的影响。系统设计者和使用者的共同目标是满足信息任务的需求。在设计中,必须将任务需求正确地转化为对系统的技术指标要求,再将其科学合理地分解为系统各组成部分的设计要素,可以通过模型对系统的性能进行预估、对系统的设计进行修改,最终,需要对系统的实际性能进行可靠和准确的评价。

本书的主题就是讨论信息提取的能力与成像系统的设计和性能之间的关系。书中对系统的描述、系统的特点、系统建模的历史、系统性能的度量以及性能模型与预估,包括模型间的转换方法都做了比较详细的介绍。因为系统的性能不仅与设计有关,而且与运行有关,本书还介绍了目标和环境方面的影响,包括伪装技术的有关模型,同时,对图像处理、图像显示,以及图像解译人员工作性能的有效评估问题也进行了介绍。本书是论述监视与侦察成像系统性能模型和预估技术的一本少见的专著。无论对于系统的设计者还是使用者,了解和学习有关的内容都是有所裨益的。

本书作者 Jon C. Leachtenauer 原是美军的一位图片解译工作者,后来从事图片解译测量和人类因素对图像质量影响的研究长达 40 余年,他曾在美国密执安环境研究所主持了合成孔径雷达图像质量和性能度量的研究工作,他是美国国家开发实验室图像分析部的高级科学家,领导了雷达 NIIRS 标准的制定和多项图像质量与应用的研究,现在他是美国国家图像和测绘局的顾问。本书另外一位作者 Ronald G. Driggers 博士多年来曾在多家公司和美国联合精确打击演示项目办公室从事光电系统的研究,现在他工作于美军夜视和

电子遥感器理事会,是北大西洋公约组织高级热成像特性表征委员会的美方代表。两位作者在监视与侦察成像领域长期从事多方面的研究工作,既有深厚的理论功底,又有丰富的实践经验,书中的许多内容都来自于他们的研究成果,使本书更加具有可读性。

在本书的翻译和出版过程中,始终得到中国空间技术研究院北京空间机电研究所张昊所长、王建新副所长、沈洪兵副所长、傅丹鹰主任的热情支持和帮助,还得到北京遥感信息研究所文江平研究员、孙来稳研究员和周春平博士的大力指导,在此表示衷心感谢。还要感谢王丽霞高工为本书翻译和出版付出的辛勤劳动。

本书由陈世平研究员负责全书的译校工作。马文坡博士参加了第1、2、3、9、11、12章的译校,周峰博士参加了第4、7、8、10章的译校,时红伟博士参加了第5、6章的译校。陈世平研究员审校了全书。参加初译的有沈洪兵高级工程师、马骏研究员、傅丹鹰博士、周胜利研究员、张宇峰硕士、颜孙震硕士、高庆军硕士、宋泽考硕士、陈晓丽硕士、姜伟硕士和满益云硕士。由于译校者的水平所限,译文中难免有不当和错误之处,敬请广大读者批评指正。

译 者
2006年3月

作者简介

Jon C. Leachtenauer 从锡拉库扎(Syracuse)大学获得地质学学士学位和硕士学位。自从在美国陆军当照片判读员后,40年来他一直致力于图像质量和照片判读性能测量中人的因素的研究。他曾在航空服务公司、光学研究公司和美国波音公司工作。1978年至1999年间,在密歇根环境研究所(ERIM)从事合成孔径雷达(SAR)图像质量和性能度量开发研究,并领导传感器研究部多年。在密歇根环境研究所(ERIM)期间,他是国家开发实验室图像分析部门的高级科学家,领导了雷达国家图像解译度等级标准(NIIRS)的开发,建立和领导了显示器质量研究计划,并进行了多数图像质量和应用研究。1999年,他成立了一个咨询公司(J/M Leachtenauer Associates),现任国家图像和绘图机构的顾问。他写了150多篇技术报告,并且多次发表论文,内容涉及图像开发过程的所有方面。

Dr. Ronald G. Driggers 从事光电研究已经有12年的时间,他曾在洛克希德马丁公司、SAIC、EOIR测量、Amtec公司、联合精确打击演示计划办公室(Joint Precision Strike Demonstration Project Office)和红石技术测试中心工作或担任顾问。他目前在美国陆军夜视和电子遥感设备局工作,是北大西洋公约组织(NATO)关于先进热像特性专门小组的美国代表。Dr. Driggers是有关红外和光电系统方面书的作者,并出版了30余篇杂志论文。他是 Marcel Dekker 的光学工程百科全书的合作编辑,光学工程期刊的副编辑。

致谢：

在我从事的长期而有益的工作中，非常有幸地从世纪研究公司的 Kenneth Cook 博士、Robert Sleight 博士和 Henry Abbott 先生那里了解到有关人的因素方面的专业知识。我非常感激他们的耐心指导。随后，我又师从罗马天空发展中心的 Sheldon McCloud 博士继续学习。在波音公司，我有幸与许多颇有才干的专家组进行交流，包括 Jim Briggs 博士、Charles Elworth 博士、Conrad Kraft 博士、John Booth 先生、Richard Schindler 先生和 Richard Farrell 先生。在现在的 Veridian ERIM 公司，Ralph Mitchel 博士、Jack Walker 博士、Basil Wentworth 先生、Rod Dallarrie 先生和 Linda Klimach 女士对我的学习给予了很多支持。在国家信息实验室工作期间，我从 Michael Grote 先生、Michael Brill 先生、Ron Enstrom 先生、Dennis Bechis 先生、Albert Pica 先生和 Jeff Lubin 博士那里学习到许多。在国家开发实验室及国家图片和测绘局，我有幸地与 Michael Parcell 先生长期合作。感谢那些在过去的 30 年中让我学到如此多的知识的所有的我提到的和未提到的人们。撰写本书最初是由我的合著者 Ron Driggers 博士作为一些早期合作的成果而建议的。我非常感谢他在写书过程中对我的悉心指导。最后，我必须提到 Ellen Schwartz 女士和 Keith Krapels 先生在本书编辑出版工作中给予的宝贵帮助。

译者简介

陈世平 中国空间技术研究院研究员、博士生导师、科学技术委员会副主任。多年来在卫星地面测控、天线、微波遥感、光学遥感、数据传输等空间技术领域完成了多项研究工作,编写著作多部,著写和发表论文 70 余篇,获国家奖励多项。

马文坡 北京空间机电研究所研究员,博士生导师,主要从事星载光学遥感器总体设计、标定、检测与评价研究。

周 峰 北京空间机电研究所工程师,博士,中国遥感应用协会会员,中国遥感应用协会红外专业委员会秘书,《航天返回与遥感》杂志编委。主要从事空间光学遥感器总体设计研究。

目 录

第1章 绪 言	(1)
1.1 模型应用	(1)
1.2 监视与侦察系统概念模型	(2)
1.3 性能预估方法	(5)
1.3.1 物理图像质量模型	(5)
1.3.2 物理模型和仿真	(6)
1.3.3 基于信息论的模型	(7)
1.3.4 差异模型和度量	(7)
1.4 小结	(7)
参考文献	(8)
第2章 监视与侦察成像系统	(9)
2.1 引言	(9)
2.2 红外和光电遥感器成像	(10)
2.2.1 红外遥感器	(11)
2.2.2 光电遥感器	(13)
2.3 图像形成	(13)
2.3.1 行扫描器	(14)
2.3.2 凝视阵列遥感器	(15)
2.3.3 电视遥感器	(16)
2.3.4 模拟信号与数字信号	(16)
2.4 成像系统参数	(17)
2.4.1 灵敏度和分辨率	(17)
2.4.2 视场	(18)
2.4.3 观测场(Field of Regard)	(19)
2.4.4 衍射	(19)
2.4.5 探测器角弦和瞬时视场	(20)
2.4.6 地面采样距离	(20)
2.4.7 点扩散函数	(21)
2.5 合成孔径雷达	(22)
2.6 成像遥感器的选择	(25)
2.7 监视与侦察遥感器实例	(26)
2.7.1 捕食者(Predator)	(26)
2.7.2 全球鹰(Global Hawk)	(27)

2.7.3	陆地卫星 7 号(Landsat7)	(29)
2.7.4	雷达星(RADARSAT)	(31)
2.7.5	艾科诺斯(IKONOS)	(32)
2.7.6	俄罗斯卫星图像	(33)
2.7.7	其他卫星系统	(34)
	参考文献	(35)
第 3 章	历史回顾	(37)
3.1	1950 年以前	(37)
3.2	1950~1970 年	(39)
3.3	1970 年至今	(45)
3.4	小结	(48)
	参考文献	(48)
第 4 章	线性移不变成像系统	(53)
4.1	线性和移不变	(53)
4.2	冲激函数	(54)
4.3	傅立叶级数和傅立叶变换	(55)
4.3.1	傅立叶级数	(55)
4.3.2	傅立叶变换	(56)
4.3.3	傅立叶变换的性质	(56)
4.3.4	傅立叶变换对	(57)
4.4	线性移不变成像系统	(58)
4.5	空间域和频率域成像	(59)
4.6	成像环节	(60)
4.6.1	光学系统	(61)
4.6.2	探测器	(62)
4.6.3	电子学系统	(64)
4.6.4	显示器	(66)
4.6.5	人的视觉	(67)
4.7	把线性移不变成像简化成一维来分析	(68)
4.8	采样成像系统	(70)
4.9	合成孔径雷达(SAR)的冲激响应和传递函数	(72)
4.10	小结	(72)
	参考文献	(73)
第 5 章	信息提取的度量	(75)
5.1	直接性能度量	(75)
5.1.1	任务性能概率	(76)
5.1.2	任务完备度和准确度	(77)
5.1.3	直接度量的统计特性	(78)

5.2	信号探测理论(TSD).....	(80)
5.3	距离/时间度量	(83)
5.4	性能估计度量.....	(85)
5.4.1	国家图像解译度分级标准(NIIRS)	(85)
5.4.2	任务满意置信度等级	(95)
5.4.3	相对质量等级	(97)
5.5	信息和差值度量	(101)
5.6	小结	(102)
	参考文献.....	(103)
第 6 章	信息提取性能的预测	(105)
6.1	比例尺、分辨率和锐度.....	(105)
6.1.1	比例尺	(106)
6.1.2	摄影分辨率	(107)
6.1.3	视频分辨率(模拟量)	(110)
6.1.4	光电系统	(113)
6.1.5	SAR 分辨率	(114)
6.2	对比度和噪声	(116)
6.2.1	摄影系统度量	(117)
6.2.2	光电系统度量	(119)
6.2.3	SAR 度量	(119)
6.3	伪像	(121)
6.4	综合性度量	(123)
6.4.1	回归模型	(123)
6.4.2	调制传递函数(MTF)	(123)
6.4.3	MTF 度量	(125)
6.4.4	信噪比(SNR)度量	(127)
6.4.5	物理差异度量	(128)
6.5	小结	(129)
	参考文献.....	(129)
第 7 章	目标和环境	(133)
7.1	目标的影响	(133)
7.2	欺骗和隐藏	(142)
7.3	大气影响	(144)
7.4	小结	(146)
	参考文献.....	(146)
第 8 章	图像处理	(148)
8.1	带宽压缩	(148)
8.1.1	单幅黑白图像压缩	(150)

8.1.2	多通道图像压缩	(155)
8.1.3	动态图像压缩	(155)
8.2	图像增强处理	(158)
8.2.1	空间滤波	(159)
8.2.2	像素灰度变换	(161)
8.2.3	图像融合	(164)
8.3	小结	(164)
	参考文献	(165)
第9章	显示与观测者	(167)
9.1	显示	(167)
9.1.1	布里格斯靶标	(168)
9.1.2	阴极射线管(CRT)显示器	(170)
9.1.3	平板显示器	(177)
9.1.4	显示环境	(178)
9.2	观测者的特性	(181)
9.2.1	观测者的选择	(181)
9.2.2	观测者的差异性	(183)
9.3	观测者模型	(185)
9.4	小结	(190)
	参考文献	(190)
第10章	性能预估模型	(194)
10.1	基于参数的模型	(194)
10.1.1	通用图像质量方程	(195)
10.1.2	目标捕获传感器性能建模	(203)
10.1.3	Physique	(211)
10.1.4	雷达阈值品质因子(RTQF)模型	(213)
10.1.5	其他的 SAR 模型	(214)
10.2	基于图像模型	(215)
10.2.1	IQM 模型	(215)
10.2.2	萨诺夫 JND 模型	(217)
10.2.3	其他基于图像模型	(220)
10.3	小结	(223)
	参考文献	(223)
第11章	遥感器性能转换	(227)
11.1	约翰逊(Johnson)准则和 NIIRS	(228)
11.2	模型间的转换	(229)
11.3	遥感器性能转换的比较	(230)
11.4	同目标尺寸有关的性能转换	(233)

11.5 小结.....	(234)
参考文献.....	(234)
第 12 章 结论和展望	(236)
12.1 频谱域.....	(236)
12.2 时态的影响.....	(238)
12.3 搜寻.....	(239)
12.4 SAR	(240)
12.5 小结.....	(242)
参考文献.....	(244)
缩略词表	(245)
索引	(249)

第1章 绪 言

监视与侦察(S&R)系统在这里定义为用于获取军事、经济和政治情报信息的遥感成像系统。从传统上讲,将侦察定义为初步调查。从军事意义上讲,侦察指确定地形和敌军的部署。从经济上讲,侦察可以指对油层的勘探。能够获取相对较大地面区域的图像的任何成像系统均可用作侦察。

监视被定义为对某一群体或地点保持密切观察,对敌军进行频繁照相是监视的经典应用。观察农作物长势或民间骚乱也可被认为是监视。监视在这里的含义是要求频繁甚至连续的观察覆盖。

事实上,通过分辨率和覆盖范围的折中,多数监视与侦察系统既可以执行监视任务也可以执行侦察任务。以“捕食者”无人侦察机(UAV)为例,其携带的摄像系统配备了一个长焦距镜头和一个短焦距镜头,长焦距镜头用于高分辨率监视,短焦距镜头用于低分辨率侦察。LANDSAT 多光谱卫星既用于侦察又用于监视任务,两者唯一的区别在于对同一地域获取的图像数目不同。

无论是监视还是侦察任务,目的都是对地面上的区域或目标成像,并从图像中提取信息。将提取信息的能力与成像系统的设计和性能联系起来是本书的主题。

监视与侦察成像系统涵盖了从合成孔径雷达(SAR)到红外系统和可见光系统。在红外和可见光光谱区,包含摄像系统以及传统的线扫描和推扫遥感器。本书研究的重点是光电成像系统,而非摄影测量系统,尽管有些方法对二者都适用。尽管多光谱和超光谱系统目前也在飞行,但这种系统在光谱方面的贡献尚未得到很好的解释与描述,现行的绝大多数模型和性能预测都是针对全色图像的。

尽管对机器或自动图像判读已经进行了近 30 年的研究,然而尚没有一个全能的自动判读系统可供使用。因此,在本书中讨论性能预估时假设人作为观测者进行图像信息的提取。

性能预估基于某种建模过程。最简单的建模过程可能是将图像质量的某些度量与信息提取性能度量联系在一起的简单回归模型。对于复杂的建模过程,模型可能包括成像过程的计算机仿真或人类视觉系统的理论模型。

尽管本书研究了大量的性能预估方法,但重点只有两个。一个是为高空的光电系统开发的通用图像质量方程^[1],另一个是为地面和低空光电系统开发的区分概率模型^[2]。本书对大量其他方法进行详细介绍的目的是让读者评价它们在具体性能预测问题中的适用性。

1.1 模型应用

对监视与侦察系统的性能进行预估的原因有两个。第一个原因是将其作为系统设计过程中的工具。给定一组情报要求,人们愿意设计一个系统恰好满足那些要求。在竞争过程中,设计过头与设计不足的代价同样高。在遥感器设计过程中,从目标或景物一直到人提取

信息的整个链路都需要得到很好的理解(并且在不同程度上建模),以便优化遥感系统设计。遥感器并不是独立地工作,它是整个系统的一部分。

对性能进行预估的第二个原因在于对监视与侦察系统的运行。大多数系统的部署和运行都有一定的灵活性。比如,飞机可以飞行在不同高度,这样可以将覆盖范围和分辨率进行折中。在敌对的环境中,当获取的图像的质量足以满足情报要求时,飞行员一般都愿意飞得尽可能高一些。图像比例尺,即图像尺寸与对应地面距离的比,是用于预测系统性能的基本图像质量度量之一。给定相机焦距,可以计算所需的成像高度^{*}。目标距离(目标到遥感器的距离)是战术成像系统的一个常用度量。

随着性能预估的进步,它变得越来越复杂。可对大气的影响进行建模,并用于预估作战系统的性能。目标/遥感器几何的影响也进入了预估方程。对图像传输和显示过程中的性能损失可进行估计,并作为系统任务分析过程中的一部分。

尽管有些内容超出了本书的范围,但性能预估对于成像系统的理解和优化是一个很有用的工具。相对简单的物理和计算机模型用来表示系统运行条件变化带来的影响(如太阳角对阴影的影响,SAR中的目标叠掩等)。这些模型有助于更好地理解成像过程,进而改进信息提取。对于特定的应用,它们也可用于优化系统任务分析。

1.2 监视与侦察系统概念模型

监视与侦察系统概念模型基于成像的结果预估某些类型的信息提取性能,如图 1.1 所示。性能用一个或多个信息提取度量来定义。这些度量在第 5 章中进行了详细的讨论。信息提取性能可以通过将观测者置于图像前并记录他们的信息提取能力(如发现的目标数量)来直接测量。我们将这种测量方法称之为“直接性能测量”和“直接性能度量”。直接性能度量包括诸如发现和确认概率等。它们被冠以“直接”是因为它们通过对实际性能进行打分来测量。一个目标是否被探测到,一个目标是被正确确认还是错误确认,观测者也可以根据各种分级标准来对信息提取性能进行估计。我们将使用“性能估计测量和度量”这一术语来表示这类测量方法和数据。术语“客观”和“主观”经常分别用来指直接度量和估计度量。直接度量之所以被认为是客观的是因为答案非对即错,这样可以直接给出结果;性能估计之所以被认为是主观的是由于它们代表的是观测者的意见(如,“我相信这个任务可以完成”)。虽然直接测量方法看起来更加严格,但实际上这些度量可能不如性能估计准确(根据实际性能的预测)。虽然可对直接测量结果进行客观评价,但是潜在的结果可能相当主观。信号检测理论说明了直接性能是如何根据观测者的判决准则独自变化。

性能评估度量涵盖从性能预估到相对性能的评述。性能预估包括性能估计概率(在规定质量等级的图像中发现概率的估计)、任务满意置信度等级和国家图像解译度分级标准(NIIRS)等级。任务满意置信度等级表明了观测者在所观察图像上(或在相近质量的图像上)执行给定任务的信心。NIIRS^[3]是一个 10 级的标准,每级根据一组难度逐级增加的信

^{*} 图像比例通常定义为一个比值(如 1/18000),分母被称为比例因子。对于相机而言,比例因子定义为高度除以焦距(两者的单位相同),因此,比例因子乘以焦距就是需要的高度。