

Imaging Spectropolarimetric
Remote Sensing and Application

成像偏振光谱 遥感及应用

赵永强 潘泉 程咏梅 © 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

TP722
Z345



郑州大学 *04010790546-*

成像偏振光谱 遥感及应用

Imaging Spectropolarimetric
Remote Sensing and Application

赵永强 潘 泉 程咏梅 著



国防工业出版社

· 北京 ·

TP722
Z345

图书在版编目 (CIP) 数据

成像偏振光谱遥感及应用 / 赵永强, 潘泉, 程咏梅著.

—北京: 国防工业出版社, 2011. 10

ISBN 978 - 7 - 118 - 07397 - 3

I. ①成... II. ①赵... ②潘... ③程... III. ①偏
振光 - 成像系统 - 多光谱遥感 IV. ①TP722

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 115048 号

※

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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 8 $\frac{3}{4}$ 字数 216 千字

2011 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 46.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评

审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 镭 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 鄢江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生

吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起

崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波

前 言

成像遥感作为一种重要的信息获取手段,在军、民领域都得到广泛应用。现有的成像遥感器件主要采集来自目标辐射的光谱和强度信息,进而获取目标的理化特性。而对于地球表面和大气中的任何目标,在反射、散射和透射太阳辐射的过程中,会产生由其自身性质决定的偏振光谱特征。通过获取目标的偏振光谱特征可以为被观测目标提供传统方法无法获取的新信息,对所获得的信息进行综合利用,可以有效提高目标检测和识别性能,特别是对探测经过隐蔽、伪装或具有隐身能力的非合作目标。近几年来,成像偏振光谱技术得到了快速的发展,在军事、医学、机器人等领域受到广泛重视,很多国家投入了大量资金和人力抢先开展多方面的研究和产品开发,获得了惊人的进展,成像偏振光谱技术已成为国内外的研究热点之一。

自 2001 年以来,我们课题组一直进行成像偏振光谱探测理论及应用方面的研究工作,开展了成像偏振光谱遥感系统、目标偏振光谱特性分析和成像偏振光谱技术在伪装目标辨别中的应用等基础研究,重点研究了伪装涂层对目标偏振光谱二向反射特性的影像以及偏振光谱图像在目标检测中的应用,用于解决伪装、隐身目标探测中的图像信息处理、目标检测和识别等问题。

本书共分为 7 章:第 1 章为绪论,介绍了成像光谱技术、成像偏振光谱技术的基本概念、研究现状以及相应的应用领域;第 2 章和第 3 章为成像偏振光谱基础部分,分别介绍了电磁辐射偏振特征的物理基础、成像机理以及相关的成像系统等,同时对于我们提

出的如何改善偏振测量图像的误差、课题组设计的成像偏振光谱仪以及相关的标定技术均作了详细的介绍;第4章~第6章为本书的重点,分别介绍了在伪装、隐身目标的表面偏振光谱特性分析、目标检测和分类方面的研究成果,包括伪装材料的偏振光谱二向反射特性的测量方法、目标和背景的偏振光谱二向反射模型分析、基于信息融合的高维图像目标检测、基于分组与融合的目标检测、偏振光谱图像的无监督分类、偏振光谱二向反射图像的有监督分类、大气变化对偏振光谱图像分类的影响等;第7章介绍了偏振光谱信息处理软件的分析、实现及应用。

本书主要由西北工业大学赵永强副教授、潘泉教授、程咏梅教授编写,西北工业大学陈超硕士、宋霖博士也参加了编写。参加有关课题研究的成员有赵永强、潘泉、都安平、王道荣、赵程章、贺霖、邸韦、杨铁恒、陈超等。

本书内容的研究受到了国家自然科学基金“仿生多波段偏振视觉感知模型研究”(61071172)、“基于多尺度分析的成像光谱偏振探测信息综合及应用”(60602056)、国家自然科学基金重点项目“具有复杂系统特征的运动目标多模多尺度自适应估计与辨识”(60634030)、航空科学基金(03D53032)、武器装备预研基金(51401040204HK0359)等的资助,在此表示衷心感谢。

国防工业出版社对本书的编写和出版给予了热情的支持,对此深致谢忱。书中有不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

2011年3月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 成像光谱探测	2
1.1.1 基本原理	3
1.1.2 光谱成像设备的发展和现状	4
1.1.3 成像光谱图像分析应用分类	7
1.1.4 成像光谱探测技术应用	10
1.2 成像偏振光谱探测	14
1.2.1 成像偏振光谱探测的发展	14
1.2.2 成像偏振光谱探测的应用	16
参考文献	19
第 2 章 成像偏振探测	22
2.1 电磁学与偏振分析	22
2.2.1 麦克斯韦方程	22
2.2.2 偏振椭圆	24
2.2.3 Fresnel 方程	26
2.2 成像偏振探测原理	28
2.3 成像偏振探测在自动目标识别中的应用	32
2.3.1 目标检测与跟踪	32
2.3.2 边缘检测	33
2.3.3 物质分类和目标识别	35
2.3.4 目标三维重建	37

2.4	影响成像偏振探测性能的因素	38
2.4.1	偏振器件传输特性	38
2.4.2	光照条件	40
2.5	减小测量偏振参数图像误差的主要方法	42
2.5.1	多角度测量	42
2.5.2	图像滤波	46
2.5.3	图像融合	46
2.6	新型偏振探测器件	50
2.7	仿生多波段偏振探测	53
	参考文献	59
第3章	偏振光谱成像系统	62
3.1	典型成像偏振光谱探测系统	62
3.1.1	光谱波段调谐方法	62
3.1.2	偏振态调节	65
3.2	基于可调谐滤光片的偏振光谱探测系统	66
3.2.1	LCTF 工作原理	67
3.2.2	AOTF 工作原理	68
3.2.3	LCVR 工作原理	68
3.2.4	几种典型的偏振光谱成像探测系统	69
3.3	基于 LCTF 的偏振光谱成像探测系统构成	71
3.3.1	成像系统构建	71
3.3.2	主要器件性能	73
3.3.3	偏振光谱图像采集实验装置	75
3.3.4	偏振光谱图像采集	77
3.4	偏振光谱成像探测系统定标	80
3.4.1	光谱谱段定标	80
3.4.2	光谱辐射定标	81

3.4.3	滤光片旋转性能	82
3.4.4	偏振态定标	82
3.5	偏振光谱反演	84
3.5.1	常用的光谱反演方法	85
3.5.2	基于经验线性法的偏振反演	87
3.6	实验分析	88
	参考文献	95
第4章	目标和背景偏振光谱二向反射建模	96
4.1	二向反射分布	97
4.1.1	二向反射的测量	98
4.1.2	二向反射的模型	104
4.2	偏振二向反射	107
4.2.1	偏振二向分布函数	107
4.2.2	偏振辐射传输方程	108
4.3	偏振光谱 BRDF 的测量	112
4.3.1	测量原理	113
4.3.2	偏振光谱 BRDF 户外实验系统	115
4.3.3	图像数据的反演	116
4.3.4	实验测量流程	117
4.3.5	仿真实验结果及分析	119
4.4	涂层目标的偏振光谱 BRDF 模型	124
4.4.1	强度分量模型	124
4.4.2	偏振度分量模型	128
4.4.3	涂层目标偏振光谱 BRDF 与探测角、波长 关系分析	130
4.5	背景的偏振光谱 BRDF 模型	136
4.5.1	强度分量模型	137

4.5.2	偏振度分量模型	143
	参考文献	148
第5章 基于偏振光谱图像的目标检测		151
5.1	偏振光谱图像分析	152
5.2	目标检测的基础理论	154
5.2.1	偏振光谱信号混合模型	154
5.2.2	多元正态分布族	155
5.2.3	极大似然估计	156
5.2.4	似然比检验	157
5.2.5	子空间分析	162
5.2.6	随机信号与熵	164
5.2.7	非参核密度估计	165
5.3	常用异常检测算法	168
5.3.1	异常检测统计假设模型	169
5.3.2	低概率目标检测	170
5.3.3	经典RX检测算法	171
5.3.4	由RX算法导出的改进算法	171
5.4	波段子集模糊积分融合检测	172
5.4.1	数据模型及波段子集划分	172
5.4.2	模糊测度及模糊积分	174
5.4.3	非参模糊隶属度函数的构造	176
5.4.4	模糊密度的估计	177
5.4.5	实验分析	181
5.5	多检测器最大熵融合异常检测	182
5.5.1	单似然异常检测模型	182
5.5.2	核密度估计	183
5.5.3	基于最大熵的检测器融合	185

5.5.4	实验分析	188
5.6	基于偏振与光谱特征的融合检测	189
5.6.1	融合检测算法结构	190
5.6.2	实验分析	192
5.7	基于偏振度调制的融合检测	195
5.7.1	偏振度调制融合	195
5.7.2	光谱和偏振图像伪彩色编码融合	198
	参考文献	201
第 6 章	基于偏振光谱图像的目标分类	203
6.1	偏振光谱特性分析	204
6.1.1	地物偏振光谱特征分析	204
6.1.2	目标偏振 BRDF 特征分析	206
6.2	无监督分类	209
6.2.1	模糊 C 均值算法	211
6.2.2	迭代自组织数据分析算法	213
6.2.3	Mean-Shift 聚类	214
6.3	支持向量机	216
6.3.1	最优分类超平面	217
6.3.2	线性可分的最优分类面	218
6.3.3	线性不可分的最优分类面	219
6.3.4	非线性支持向量机	221
6.4	证据推理	221
6.5	基于聚类融合的偏振光谱图像分类	224
6.5.1	融合聚类算法	224
6.5.2	用分层分类提高分类效果	225
6.5.3	分类结果	225
6.5.4	分类精度评价	229

6.6	基于偏振光谱 BRDF 融合分类	232
6.6.1	分类结果 1	233
6.6.2	分类结果 2	237
6.7	基于偏振 BRDF 模型的目标分类	241
6.7.1	算法流程	242
6.7.2	分类结果分析	244
	参考文献	245
第 7 章	偏振光谱信息处理软件	247
7.1	系统分析	247
7.2	系统实现	249
7.3	系统应用	250

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Imaging Spectrometry	2
1.1.1 Fundamental Information	3
1.1.2 Development and Status of Imaging Spectrometer	4
1.1.3 Spectral Imagery Analysis and Application	7
1.1.4 Application of Imaging Spectrometry	10
1.2 Imaging Spectropolarimetry	14
1.2.1 Development of Imaging Spectropolarimetry	14
1.2.2 Application of Imaging Spectropolarimetry	16
References	19
Chapter 2 Imaging Polarimetry	22
2.1 Electromagnetism and Polarimetric Analysis	22
2.2.1 Maxwell Equation	22
2.2.2 Polarization Ellipse	24
2.2.3 Fresnel Equation	26
2.2 Principle of Imaging Polarization	28
2.3 Application of Imaging Polarization in Automatic Object Recognition	32

2.3.1	Object Detection and Tracking	32
2.3.2	Edge Detection	33
2.3.3	Object Classification and Recognition	35
2.3.4	3D Reconstruction	37
2.4	Factors Affecting Polarimetric Imaging	38
2.4.1	Transsmission of Polarizer	38
2.4.2	Lighting	40
2.5	Method to Reduce Measurement Errors	42
2.5.1	Multi – angle Measurement	42
2.5.2	Image Filtering	46
2.5.3	Image Fusion	46
2.6	New Polarimetric Detectors	50
2.7	Bionics Multiband Polarimetric Imaging	53
	References	59
Chapter 3	Imaging Spectropolarimeter	62
3.1	Typical Imaging Spectropolarimeter	62
3.1.1	Adjustion of Spectrum	62
3.1.2	Adjustion of Polarization	65
3.2	Imaging Spectropolarimeter Based on Tunable Filter	66
3.2.1	Principle of LCTF	67
3.2.2	Principle of AOTF	68
3.2.3	Principle of LCVR	68
3.2.4	Typical Imaging Spectropolarimeter	69
3.3	Imaging Spectropolarimeter Based on LCTF	71
3.3.1	Structure of Imaging System	71

3.3.2	Performance of Elements	73
3.3.3	Imaging Spectropolarimeter	75
3.3.4	Example Measurement Results	77
3.4	Calibration of Spectropolarimetric Imaging	
System		80
3.4.1	Spectral Calibration	80
3.4.2	Spectral Radiometric Calibration	81
3.4.3	Performance of Filter	82
3.4.4	Polarimetric Calibration	82
3.5	Retrieve of Spectropolarimetricum	84
3.5.1	Classical Retrieve Method	85
3.5.2	Spectropolarimetric Retrieve Based on	
Emprical Linear Method		87
3.6	Example Measurement Analysis	88
References		95
Chapter 4	Spectropolarimetric BRDF Modeling of	
	Object and Background	96
4.1	Bidirectional Reflectance Distribution Function	
(BRDF)		97
4.1.1	Measurement of BRDF	98
4.1.2	Model of BRDF	104
4.2	Polarimetric BRDF	107
4.2.1	Polarimetric BRDF	107
4.2.2	Polarimetric Radiation Transmission	
Equation		108
4.3	Measurement of Spectropolarimetric BRDF	112
4.3.1	Principle of Measurement	113