

# 遥感图像融合技术

## Remote Sensing Image Fusion

Luciano Alparone Bruno Aiazzi 著

Stefano Baronti Andrea Garzelli

江碧涛 马雷 蔡琳 译



CRC Press  
Taylor & Francis Group



科学出版社

# 遥感图像融合技术

Remote Sensing Image Fusion

Luciano Alparone Bruno Aiazzi

Stefano Baronti Andrea Garzelli 著

江碧涛 马 雷 蔡 琳 译

科学出版社

北 京

图字:01-2016-3854 号

## 内 容 简 介

本书围绕天基多源遥感图像融合技术,基本涵盖天基多源传感器成像原理、典型遥感数据产品、融合图像质量评价方法和图像配准与插值方法,着重对基于多分辨率分析、小波分析、压缩传感与光谱变换的多光谱图像锐化方法进行详细阐述,并推广到高光谱图像锐化问题中。最后,对异源图像融合的新趋势进行总结并提出展望。

本书可作为从事卫星遥感、图像融合研究与应用的科研人员和工程技术人员的参考书,还可作为高等学校高年级本科生、研究生学习遥感图像融合技术的教材或参考书。

Remote Sensing Image Fusion/ by Luciano Alparone, Bruno Aiazzi, Stefano Baronti, Andrea Garzelli/ ISBN: 978-1-4665-8749-6

Copyright © 2016 by CRC Press.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved. 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下 CRC 出版公司出版,并经其授权翻译出版。版权所有,侵权必究。

China Science Publishing & Media Ltd. (Science Press) is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. 本书中文简体翻译版授权由科学出版社独家出版,并仅限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

## 图书在版编目(CIP)数据

遥感图像融合技术/(意)卢西亚诺·阿尔帕诺等著;江碧涛,马雷,蔡琳译. —北京:科学出版社,2019. 6

书名原文:Remote Sensing Image Fusion

ISBN 978-7-03-061265-6

I. ①遥… II. ①卢… ②江… ③马… ④蔡… III. ①遥感图象-图象处理-研究 IV. ①TP751

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 094645 号

责任编辑:魏英杰 罗 娟 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:吴兆东 / 封面设计:铭轩堂

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2019 年 6 月第一次印刷 印张:16 1/4

字数:322 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 译者序

多源遥感图像融合就是将多个传感器获得的同一场景的遥感图像或同一传感器在不同时刻获得的同一场景的遥感图像数据进行空间和时间配准,然后采用一定的算法将各图像所含的信息优势互补地有机结合起来,产生新图像数据或场景解释的技术;同时也是数学、计算机科学、人工智能、遥感图像处理、模式识别等多种学科的交叉与应用,已成为遥感领域的一个重要研究方向,受到越来越多的关注。对多源遥感图像融合技术的深入研究将增强遥感信息提取的全面性和可靠性,有效提高数据的准确率,为多源异构遥感图像处理与应用研究提供良好的技术基础。

本书由 Luciano Alparone、Bruno Aiazzi、Stefano Baronti 和 Andrea Garzelli 合著。书中介绍典型的天基传感器的成像原理和特点,引入图像融合评价准则,详细介绍图像配准与插值方法,重点阐述基于多分辨率分析、小波分析、光谱变换与压缩传感的图像融合方法,特别对多光谱锐化与高光谱锐化进行探讨。最后,对多源异构图像融合的新趋势进行总结并提出展望。全书结构严谨、论述全面,涉及的知识面广,并给出术语表和缩写说明,方便读者快速理解和全面掌握相关基础知识。

本书作为多源遥感图像融合的专业书籍,适用于有一定技术背景且想深入了解遥感图像处理的理工科高年级本科生、研究生和科学技术人员。希望能够为国内广大从事相关研究的学者提供一本较为全面、深入的遥感图像融合参考书。

本书译者为长期从事遥感图像处理与应用工作的一线研究人员,具有丰富的多源遥感图像融合实践经验,在翻译本书的过程中力求忠实、准确地传达原著的学术观点。在本书翻译过程中,杨利峰、李非墨和田野等为本书的校对做了大量工作,在此一并致谢。

限于译者水平,不妥之处恳请广大读者批评指正。

译者

2018年5月

## 前 言

本书是关于遥感图像融合技术的综合性专著。对于大多数新兴领域,一本专著的诞生能够在很大程度上促进该学科快速发展。现阶段大部分研究领域的发展和进步都是依靠相对独立的研究论文,但这些论文较为分散,每一篇只能展现该研究领域局部的一个技术点。而专著可将该领域的专题和知识点有机统一起来,更便于读者查阅和学习相关内容。本书的四位作者在遥感图像处理领域有着超过20年的研究经历。

本书不仅可以视为对遥感图像融合领域主要研究成果的一个历史性回顾,而且可以为理解该领域提供一种全新的视角。遥感成像设备及传感器技术不断进步,采集的光谱范围不断扩大,从根本上促进了图像融合领域中各种新技术和新方法的提出与发展,处理的数据从可见光波段到微波波段,地面采样分辨率也达到亚米级。

本书的观点是,基于图像特性的算法相对简单,可能仅优于基于数学理论和模型而忽视物理性质的复杂算法。在这种情况下,处理结果的性能评价标准就成为评判融合方法优劣的关键。对于第一代图像融合技术,质量评估往往处于初级阶段,没有考虑综合利用高质量的光谱信息,这就成为当前第二代图像融合技术的主要需求和相关研究的主流。

在第二代图像融合技术渐趋成熟后,第三代融合技术也在悄然兴起。这些技术或多或少地尝试去发掘信息科学和信号处理方面的一些新概念及模型。由于大规模计算性能需求的限制,这些技术暂时无法直接运用于整景遥感图像,但其性能可达到第二代融合技术的最优水平。在过去五年里,第三代融合技术的出现导致图像融合研究出现两极分化的现象,但距技术成熟仍然有很大的差距,该领域学术成果仍需不断完善。

一方面,本书旨在为图像融合这个逐步清晰和完善的多学科研究领域提供一种新的理解方式,形成一系列人工或自动的、针对遥感图像信息提取的信号和图像处理方法;另一方面,本书对初步接触本领域的人员大有裨益,包括拟在环境科学方面进一步进行深度研究的学者,以及希望进一步提升专业技能的技术人员。

## 引 言

当前,星载传感器每天大约获取 4TB 的遥感数据,机载传感器获取的数据更是不计其数。艾克诺斯(IKONOS)、快鸟(Quickbird)、地球之眼(GeoEye)、世界观测(WorldView)、昴星团(Pléiades)等在轨对地观测卫星上都搭载了超高分辨率、高性能的全色相机和多光谱相机,且即将发射升空的棱镜(PRISMA)和环境测绘与分析计划(EnMap)高光谱成像卫星可以提供几十到几百个波段的数据,这将为多源遥感数据带来更广阔的应用前景。同时,合成孔径雷达卫星星座系统的卫星 TerraSAR-X/Tandem-X、COSMO-SkyMed、RadarSat-2 与即将发射的 RadarSat-3 和 Sentinel-2,都能获取高分辨率微波对地观测图像,并在重访率上有很大的提升。

可见光、近红外、短波红外、热红外、X 波段雷达、C 波段雷达等成像手段,不仅体现出遥感数据的多样性,也体现出各类数据的独特性与数据之间的互补性。这些都为多源遥感融合技术的发展提供了先决条件。融合的目的是综合两个或多个数据源的信息,获取单个传感器难以得到的更有价值、更精确、更全面的信息。虽然在解决洪灾、火灾等自然灾害区域检测等特定任务中,融合结果还需要人工参与分析,但多源融合带来的优势在半自动和全自动处理系统中已经崭露头角。

遥感图像处理中最典型的多源图像融合方法为全色图像锐化。该方法一般适用于全色与多光谱图像融合,多光谱图像的波段范围包含可见光与可见近红外,全色图像地面分辨率是多光谱图像的 2~6 倍。SPOT 卫星发射时,卫星上同时搭载全色成像仪与多光谱成像仪,采用的图像融合方法即为全色锐化技术。近期,越来越多领域的专家开始研究高光谱全色锐化方法,以实现在一个数据上同时具有空间与光谱的检测能力。

不同波长、不同成像机理的多源数据融合技术是遥感图像应用需要关注的一项长期任务。一个典型的例子就是热红外图像与同时相的可见近红外图像的融合,此类融合技术的应用范围涵盖军事和民事,甚至超出遥感应用领域。

可见光与合成孔径雷达(SAR)图像的融合是一类更为特殊的融合问题。SAR 系统具有全天时、全天候成像能力,可获取目标更显著的相对特征信息,通过 SAR 图像增强可见光图像的融合方法已经得到广泛应用。然而,由于可见光成像受天气因素影响较大,特别是云的遮挡,因此利用可见光图像增强 SAR 图像的光谱和空间信息的意义不大。

## 主要符号列表

|                              |                             |
|------------------------------|-----------------------------|
| $\alpha$                     | 压缩感知锐化的稀疏向量                 |
| $\tilde{A}_k$                | 多光谱第 $k$ 个波段插值混叠模式          |
| $\tilde{A}_p$                | 全色图像插值混叠模式                  |
| $\beta$                      | 受限频谱角度(CSA)方法乘数因子           |
| $B_k$                        | 原图像第 $k$ 个波段                |
| $\tilde{B}_k$                | 插值到全色尺度上的第 $k$ 个图像波段        |
| $\hat{B}_k$                  | 全色锐化的第 $k$ 个图像波段            |
| $\delta$                     | 空间细节图像                      |
| $\delta(\Delta x, \Delta y)$ | 全色-多光谱存在偏差情况下的空间细节图像        |
| $D$                          | 压缩感知锐化的字典矩阵                 |
| $D_\lambda$                  | 光谱失真                        |
| $D_s$                        | 空间失真                        |
| $\Delta x$                   | 全色与插值后多光谱图像之间的水平偏差          |
| $\Delta y$                   | 全色与插值后多光谱图像之间的垂直偏差          |
| $D_x^{(I)}$                  | $I$ 在 $x$ 方向上的偏导数           |
| $D_y^{(I)}$                  | $I$ 在 $y$ 方向上的偏导数           |
| $D_x^{(k)}$                  | $\tilde{M}_k$ 在 $x$ 方向上的偏导数 |
| $D_y^{(k)}$                  | $\tilde{M}_k$ 在 $y$ 方向上的偏导数 |
| $F$                          | 基于重建的全色锐化的稀疏矩阵              |
| $g^*$                        | 广义拉普拉斯金字塔方法的高通滤波器的脉冲响应      |
| $g_k$                        | 第 $k$ 个波段的全局注入增益            |
| $G_k$                        | 第 $k$ 个波段的空间变化的局部注射增益       |
| $h_j^*$                      | ATW 的 $j$ 层的等效低通冲激响应        |
| $H_j^*$                      | ATW 的 $j$ 层的等效低通频率响应        |
| $H_k$                        | 第 $k$ 个波段的基于复原全色锐化的点扩散函数    |
| $I$                          | 亮度图像                        |
| $I(\Delta x, \Delta y)$      | 全色-多光谱存在偏差量的亮度图像            |
| $I_k$                        | 基于相关空间细节波段方法的第 $k$ 个波段的亮度图像 |
| $K$                          | 波段的数目                       |
| $\tilde{M}_k$                | 扩展至全色尺度的原始多光谱第 $k$ 个波段      |

|                                 |                                      |
|---------------------------------|--------------------------------------|
| $\hat{M}_k$                     | 全色锐化的多光谱第 $k$ 个波段                    |
| $\hat{M}_k(\Delta x, \Delta y)$ | 全色和多光谱配准失准情况下全色锐化的多光谱第 $k$ 个波段       |
| $\tilde{M}_K^*$                 | 无混叠插值的多光谱第 $k$ 个波段                   |
| $\hat{M}_k^*$                   | 无混叠插值的锐化图像第 $k$ 个波段                  |
| $p$                             | 广义拉普拉斯金字塔的整数约减系数                     |
| $P$                             | 全色图像                                 |
| $q$                             | 广义拉普拉斯金字塔的整数膨胀系数                     |
| $Q$                             | 通用图像质量指标                             |
| $Q2^n$                          | $Q4$ 在具有 $2^n$ 个波段图像上的泛化             |
| $Q4$                            | 4 波段图像的通用图像质量指标                      |
| $P_l$                           | 低通滤波后的全色图像                           |
| $P_l^*$                         | 全色低通滤波先以 $r$ 下取样,再用 $r$ 插值           |
| $r$                             | 原始多光谱与全色的空间采样比率                      |
| $\theta$                        | 调制合成孔径雷达纹理的软阈值                       |
| $t$                             | 光学与 SAR 融合过程中从合成孔径雷达中提取的纹理图像         |
| $t_\theta$                      | 阈值为 $\theta$ 的纹理图像 $t$               |
| $T_k$                           | 热红外第 $k$ 个波段                         |
| $\tilde{T}_k$                   | 插值到可见光近红外波段尺度第 $k$ 个热红外波段            |
| $\hat{T}_k$                     | 热红外第 $k$ 个波段空间增强                     |
| $V$                             | 增强可见光近红外波段                           |
| $V_l$                           | 增强可见光近红外波段的低通滤波结果                    |
| $V_l^*$                         | 增强可见光近红外波段低通滤波结果先以 $r$ 下取样,再以 $r$ 插值 |
| $\omega_k$                      | 用于亮度计算的第 $k$ 个波段频谱分量的权重向量            |

## 主要术语对照表

|         |                                                                       |               |
|---------|-----------------------------------------------------------------------|---------------|
| ADC     | analog-to-digital converter                                           | 模拟-数字转换器      |
| ALI     | advanced land imager                                                  | 高级陆地成像仪       |
| ASC-CSA | Agence Spatiale Canadienne-Canadian Space Agency                      | 加拿大航天局        |
| ASI     | Agenzia Spaziale Italiana                                             | 意大利航天局        |
| ASTER   | advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer        | 先进星载热发射和反射辐射仪 |
| ATW     | à-trous wavelet                                                       | à-trous 小波变换  |
| AVHRR   | advanced very high resolution radiometer                              | 先进高分辨率辐射仪     |
| AWLP    | additive wavelet luminance proportional                               | 加性小波亮度比例      |
| BDSD    | band dependent spatial detail                                         | 波段独立空间细节      |
| BT      | Brovey transform                                                      | Brovey 变换     |
| CBD     | context-based decision                                                | 基于上下文的        |
| CC      | correlation coefficient                                               | 相关系数          |
| CCD     | charge-coupled device                                                 | 电荷耦合装置        |
| CLS     | constrained least square                                              | 约束最小二乘法       |
| CNES    | Centre Nationale d'Etudes Spatiales                                   | 国家空间研究中心      |
| CoS     | compressed sensing                                                    | 压缩感知          |
| COSMO   | constellation of small satellites for mediterranean basin observation | 地中海盆地小卫星观测星座  |
| CS      | component substitution                                                | 成分替换          |
| CSA     | constrained spectral angle                                            | 受限频谱角         |
| CST     | compressed sensing theory                                             | 压缩感知理论        |
| CT      | curvelet transform                                                    | 曲波变换          |
| DEM     | digital elevation model                                               | 数字高程模型        |
| DFB     | directional filter bank                                               | 定向滤波器组        |
| DLR     | Deutsches zentrum für Luft- und Raumfahrt                             | 德国宇航中心        |
| DST     | discrete sine transform                                               | 离散正弦变换        |
| DTC     | dual-tree complex                                                     | 对偶树复数         |
| DTW     | dynamic time warping                                                  | 动态时间归整        |
| DWT     | discrete wavelet transform                                            | 离散小波变换        |
| EHR     | extremely high resolution                                             | 极高分辨率         |
| ELP     | enhanced laplacian pyramid                                            | 增强拉普拉斯金字塔     |

|         |                                                             |                    |
|---------|-------------------------------------------------------------|--------------------|
| ELR     | extremely low resolution                                    | 极低分辨率              |
| EMR     | electro magnetic radiation                                  | 电磁辐射               |
| EnMAP   | environmental monitoring and analysis program               | 环境监测与分析程序          |
| ENVI    | environment for visualizing images                          | 可视化图像环境            |
| EnviSat | environmental satellite                                     | 欧洲环境卫星             |
| ER GAS  | erreur relative globale adimensionnelle de synthese         | 相对整体维数综合误差         |
| ERS     | European Remote-Sensing satellite                           | 欧洲遥感卫星             |
| ESA     | European Space Agency                                       | 欧洲航天局              |
| ETM+    | enhanced thematic mapper                                    | 增强型专题制图仪           |
| FOV     | field of view                                               | 视场角                |
| GGP     | generalized Gaussian pyramid                                | 广义高斯金字塔            |
| GIHS    | generalized intensity-hue-saturation                        | 广义亮度-色调-饱和度        |
| GIHSA   | generalized IHS with adaptive weights                       | 自适应权重的广义亮度-色调-饱和度  |
| GIHSF   | generalized IHS with unequal fixed weights                  | 不等固定权重的广义亮度-色调-饱和度 |
| GLP     | generalized Laplacian pyramid                               | 广义拉普拉斯金字塔          |
| GLP-CBD | generalized Laplacian pyramid with a context-based decision | 基于上下文决策的广义拉普拉斯金字塔  |
| GP      | Gaussian pyramid                                            | 高斯金字塔              |
| GPS     | global positioning system                                   | 全球定位系统             |
| GS      | Gram-Schmidt                                                | 格拉姆-施密特            |
| GSA     | Gram-Schmidt with adaptive weights                          | 自适应权重的格拉姆-施密特法     |
| GSF     | Gram-Schmidt with fixed weights                             | 固定权重的格拉姆-施密特法      |
| HPF     | high pass filtering                                         | 高通滤波               |
| HPM     | high pass modulation                                        | 高通调制               |
| HR      | high resolution                                             | 高分辨率               |
| HS      | hyper spectral                                              | 高光谱                |
| HSL     | hue, saturation, luminance                                  | 色调-饱和度-亮度          |
| HSV     | hue, saturation, value                                      | 色调-饱和度-亮度          |
| IFOV    | instantaneous field of view                                 | 瞬时视场               |
| IHS     | intensity-hue-saturation                                    | 亮(强)度-色调-饱和度       |
| IMU     | inertial measurement unit                                   | 惯性测量单元             |
| IR      | infrared radiation                                          | 红外辐射               |
| JERS    | Japanese Earth Resources Satellite                          | 日本地球资源卫星           |
| JPL     | Jet Propulsion Laboratory                                   | 喷气推进实验室            |
| KoMPSat | Korean Multi Purpose Satellite                              | 韩国多用途卫星(阿里郎卫星)     |

|        |                                                         |              |
|--------|---------------------------------------------------------|--------------|
| K-SVD  | K-singular value decomposition                          | K-奇异值分解      |
| LASER  | light amplification by stimulated emission of radiation | 激光           |
| LiDAR  | light detection and ranging                             | 激光雷达(光探测和测距) |
| LP     | Laplacian pyramid                                       | 拉普拉斯金字塔      |
| LWIR   | long wave infrared                                      | 长波红外         |
| MeR    | medium resolution                                       | 中等分辨率        |
| MIS    | misregistered                                           | 配准不良         |
| MMSE   | minimum mean square error                               | 最小均方误差       |
| MoR    | moderate resolution                                     | 中分辨率         |
| MRA    | multi resolution analysis                               | 多分辨率分析       |
| MS     | multi spectral                                          | 多光谱          |
| MSE    | mean square error                                       | 均方误差         |
| MTF    | modulation transfer function                            | 调制传递函数       |
| MVUE   | minimum variance unbiased estimator                     | 最小方差无偏估计     |
| MWIR   | medium wave infrared                                    | 中波红外辐射       |
| NASA   | National Aeronautics and Space Administration           | 美国国家航空航天局    |
| NDVI   | normalized differential vegetation index                | 归一化差分植被指数    |
| NIR    | near infrared                                           | 近红外          |
| NN     | nearest neighbor                                        | 最近邻          |
| NRMSE  | normalized root mean square error                       | 归一化均方根误差     |
| NSCT   | nonsampled contourlet transform                         | 非下采样轮廓波变换    |
| NSDFB  | nonsampled directional filter bank                      | 非下采样方向滤波器组   |
| NSP    | nonsampled pyramid                                      | 非下采样金字塔      |
| OLI    | operational land imager                                 | 操作陆地成像仪      |
| OTF    | optical transfer function                               | 光学传递函数       |
| PAN    | panchromatic                                            | 全色的          |
| PCA    | principal component analysis                            | 主成分分析        |
| PCs    | principal components                                    | 主成分          |
| PR     | perfect reconstruction                                  | 完美重构         |
| PRF    | pulse repetition frequency                              | 脉冲重复频率       |
| PRISMA | precursore iperspettrale della missione applicativa     | 先进超光谱应用任务    |
| PSF    | point spread function                                   | 点扩散函数        |
| QFB    | quincunx filter bank                                    | 梅花形滤波器组      |
| QMF    | quadrature mirror filter                                | 正交镜像滤波器      |
| QNR    | quality with no reference                               | 无参考质量        |

|        |                                                             |                 |
|--------|-------------------------------------------------------------|-----------------|
| RASE   | relative average spectral error                             | 相对平均光谱误差        |
| RCM    | radarsat constellation mission                              | 雷达卫星星座任务        |
| RMSE   | root mean square error                                      | 均方根误差           |
| RS     | remote sensing                                              | 遥感              |
| RT     | ridgelet transform                                          | 脊波变换            |
| SAM    | spectral angle mapper                                       | 波谱角度映射表         |
| SAR    | synthetic aperture radar                                    | 合成孔径雷达          |
| SDM    | spectral distortion minimization                            | 光谱畸变最小化         |
| SFIM   | smoothing filter-based intensity modulation                 | 基于平滑滤波的亮度调节     |
| SHALOM | spaceborne hyperspectral applicative land and ocean mission | 应用性星载高光谱陆地和海洋任务 |
| SIR    | shuttle imaging radar                                       | 航天飞机成像雷达        |
| SLAR   | side-looking airborne radar                                 | 侧视机载雷达          |
| SNR    | signal-to-noise ratio                                       | 信噪比             |
| SPOT   | Satellite Pour l' Observation de la Terre                   | 法国“斯波特”对地观测卫星   |
| SRTM   | shuttle radar topography mission                            | 航天飞机雷达地形测绘任务    |
| SS     | super spectral                                              | 超光谱             |
| SSI    | spatial sampling interval                                   | 空间采样间隔          |
| SWIR   | short wave infrared                                         | 短波红外            |
| SWT    | stationary wavelet transform                                | 平稳小波变换          |
| TDI    | time delay integration                                      | 时间延迟积分          |
| TIR    | thermal infrared                                            | 热红外             |
| UDWT   | undecimated discrete wavelet transform                      | 非抽样离散小波变换       |
| UIQI   | universal image quality index                               | 通用图像质量指标        |
| UNB    | ultra narrow band                                           | 超窄带             |
| UNBPS  | University of New Brunswick PanSharp                        | 新布伦瑞克大学图像融合     |
| US     | ultra spectral                                              | 极高光谱            |
| VHR    | very high resolution                                        | 超高分辨率           |
| VIR    | visible infrared                                            | 可见红外            |
| VIRS   | visible and infrared scanner                                | 可见光和红外扫描仪       |
| VLR    | very low resolution                                         | 超低分辨率           |
| V-NIR  | visible near-infrared                                       | 可见近红外           |
| WPD    | wavelet packet decomposition                                | 小波包分解           |

# 目 录

译者序

前言

引言

主要符号列表

主要术语对照表

|                   |    |
|-------------------|----|
| 第 1 章 绪论          | 1  |
| 1.1 概述            | 1  |
| 1.2 目的和范围         | 1  |
| 1.3 内容组织          | 2  |
| 1.3.1 传感器与图像数据产品  | 2  |
| 1.3.2 融合质量评价      | 2  |
| 1.3.3 图像配准与插值     | 2  |
| 1.3.4 图像融合多尺度分析   | 3  |
| 1.3.5 多波段图像融合的谱变换 | 3  |
| 1.3.6 多光谱图像融合     | 3  |
| 1.3.7 高光谱图像融合     | 4  |
| 1.3.8 失真和错位对锐化的影响 | 4  |
| 1.3.9 异构传感器图像融合   | 5  |
| 1.3.10 遥感图像融合新趋势  | 5  |
| 1.3.11 总结和展望      | 5  |
| 1.4 小结            | 6  |
| 第 2 章 传感器与图像数据产品  | 7  |
| 2.1 概述            | 7  |
| 2.2 基本概念          | 7  |
| 2.2.1 名词定义        | 8  |
| 2.2.2 空间分辨率       | 9  |
| 2.2.3 辐射分辨率       | 14 |
| 2.2.4 光谱分辨率       | 15 |
| 2.2.5 时间分辨率       | 15 |
| 2.3 成像策略          | 16 |

|       |                          |    |
|-------|--------------------------|----|
| 2.3.1 | 摆扫式成像 .....              | 16 |
| 2.3.2 | 推扫式成像 .....              | 17 |
| 2.4   | 光学传感器 .....              | 18 |
| 2.4.1 | 反射辐射传感器 .....            | 21 |
| 2.4.2 | 高分辨率和超高分辨率传感器 .....      | 22 |
| 2.4.3 | 热成像传感器 .....             | 29 |
| 2.5   | 主动式传感器 .....             | 29 |
| 2.5.1 | 雷达与合成孔径雷达 .....          | 30 |
| 2.5.2 | 合成孔径雷达传感器 .....          | 34 |
| 2.5.3 | 激光雷达 .....               | 36 |
| 2.6   | 小结 .....                 | 36 |
| 第3章   | 融合质量评价 .....             | 38 |
| 3.1   | 概述 .....                 | 38 |
| 3.2   | 全色锐化融合质量 .....           | 38 |
| 3.2.1 | 质量评价统计指标 .....           | 40 |
| 3.2.2 | 全色锐化融合评价准则 .....         | 43 |
| 3.2.3 | 高光谱全色锐化质量评价 .....        | 46 |
| 3.2.4 | 热红外与可见近红外融合质量评价 .....    | 46 |
| 3.3   | 光学图像与 SAR 图像融合质量评价 ..... | 47 |
| 3.4   | 小结 .....                 | 48 |
| 第4章   | 图像配准与插值 .....            | 49 |
| 4.1   | 概述 .....                 | 49 |
| 4.2   | 图像配准 .....               | 50 |
| 4.2.1 | 定义 .....                 | 50 |
| 4.2.2 | 几何校正 .....               | 51 |
| 4.2.3 | 点映射方法:图像变换 .....         | 54 |
| 4.2.4 | 重采样 .....                | 56 |
| 4.2.5 | 其他配准技术 .....             | 57 |
| 4.3   | 图像插值 .....               | 57 |
| 4.3.1 | 问题描述 .....               | 58 |
| 4.3.2 | 数字插值的理论基础 .....          | 58 |
| 4.3.3 | 理想情况和实际情况 .....          | 60 |
| 4.3.4 | 分段局部多项式核函数 .....         | 61 |
| 4.3.5 | 分段局部多项式核函数的推导 .....      | 62 |
| 4.3.6 | 基于全色锐化的多光谱数据插值 .....     | 68 |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 4.3.7 全色锐化中插值过程的效果评价 .....     | 70         |
| 4.4 小结 .....                   | 77         |
| <b>第5章 基于多分辨率分析的图像融合 .....</b> | <b>79</b>  |
| 5.1 概述 .....                   | 79         |
| 5.2 多分辨率分析 .....               | 79         |
| 5.2.1 正交小波 .....               | 81         |
| 5.2.2 双正交小波 .....              | 82         |
| 5.3 多级不平衡树结构 .....             | 82         |
| 5.3.1 严格抽样方法 .....             | 82         |
| 5.3.2 平移不变法 .....              | 82         |
| 5.4 二维多分辨率分析 .....             | 84         |
| 5.4.1 二维非抽样可分离分析 .....         | 85         |
| 5.4.2 à-trous 分析 .....         | 87         |
| 5.5 高斯和拉普拉斯金字塔 .....           | 88         |
| 5.6 不可分离多分辨率分析 .....           | 92         |
| 5.6.1 曲波 .....                 | 92         |
| 5.6.2 轮廓波 .....                | 93         |
| 5.7 小结 .....                   | 94         |
| <b>第6章 基于谱变换的多波段图像融合 .....</b> | <b>96</b>  |
| 6.1 概述 .....                   | 96         |
| 6.2 RGB 到 IHS 的变换及其实现 .....    | 96         |
| 6.2.1 线性 IHS 变换 .....          | 97         |
| 6.2.2 非线性 IHS 变换 .....         | 101        |
| 6.2.3 多光谱图像融合中 IHS 变换的推广 ..... | 104        |
| 6.3 PCA 变换 .....               | 108        |
| 6.3.1 PCA 的去相关性 .....          | 108        |
| 6.3.2 基于 PCA 变换的图像融合 .....     | 109        |
| 6.4 Gram-Schmidt 变换 .....      | 110        |
| 6.4.1 Gram-Schmidt 正交化过程 ..... | 110        |
| 6.4.2 Gram-Schmidt 光谱锐化 .....  | 111        |
| 6.5 小结 .....                   | 113        |
| <b>第7章 多光谱图像融合 .....</b>       | <b>114</b> |
| 7.1 概述 .....                   | 114        |
| 7.2 全色锐化方法的分类 .....            | 115        |
| 7.3 全色锐化方法综述 .....             | 117        |

|       |                        |     |
|-------|------------------------|-----|
| 7.3.1 | 成分替换 .....             | 117 |
| 7.3.2 | 基于 CS 融合方法的优化 .....    | 121 |
| 7.3.3 | 多分辨率分析 .....           | 123 |
| 7.3.4 | 基于 MTF 的 MRA 最优化 ..... | 125 |
| 7.3.5 | 混合方法 .....             | 130 |
| 7.4   | 模拟结果和讨论 .....          | 131 |
| 7.4.1 | IKONOS 数据的融合 .....     | 131 |
| 7.4.2 | QuickBird 数据的融合 .....  | 137 |
| 7.4.3 | 讨论 .....               | 139 |
| 7.5   | 小结 .....               | 140 |
| 第 8 章 | 高光谱图像融合 .....          | 141 |
| 8.1   | 概述 .....               | 141 |
| 8.2   | 多光谱到高光谱的全色锐化 .....     | 142 |
| 8.3   | 文献回顾 .....             | 144 |
| 8.3.1 | BDSD-MMSE 融合 .....     | 144 |
| 8.3.2 | 基于光谱角约束的融合 .....       | 146 |
| 8.4   | 仿真结果 .....             | 147 |
| 8.4.1 | BDSD-MMSE 算法 .....     | 147 |
| 8.4.2 | CSA 算法 .....           | 150 |
| 8.4.3 | 讨论 .....               | 150 |
| 8.5   | 小结 .....               | 153 |
| 第 9 章 | 混叠与错位对全色锐化的影响 .....    | 155 |
| 9.1   | 概述 .....               | 155 |
| 9.2   | 数学公式 .....             | 156 |
| 9.2.1 | 基于成分替换的方法 .....        | 156 |
| 9.2.2 | 基于多分辨率分析的方法 .....      | 156 |
| 9.3   | 混叠敏感 .....             | 157 |
| 9.3.1 | 基于成分替换的方法 .....        | 157 |
| 9.3.2 | 基于多分辨率分析的方法 .....      | 158 |
| 9.3.3 | 结果和讨论 .....            | 159 |
| 9.4   | 空间失准偏移的敏感性 .....       | 165 |
| 9.4.1 | 基于 MRA 的方法 .....       | 165 |
| 9.4.2 | 基于 CS 的方法 .....        | 165 |
| 9.4.3 | 结果和讨论 .....            | 166 |
| 9.5   | 时间未对准的敏感性 .....        | 174 |

|                                             |            |
|---------------------------------------------|------------|
| 9.6 小结 .....                                | 179        |
| <b>第 10 章 异构传感器图像融合 .....</b>               | <b>180</b> |
| 10.1 概述 .....                               | 180        |
| 10.2 红外和可见光图像融合 .....                       | 180        |
| 10.2.1 背景和综述 .....                          | 181        |
| 10.2.2 ASTER 数据的融合 .....                    | 182        |
| 10.3 光学和 SAR 数据的融合 .....                    | 188        |
| 10.3.1 问题陈述 .....                           | 188        |
| 10.3.2 文献综述 .....                           | 189        |
| 10.3.3 质量问题 .....                           | 190        |
| 10.3.4 Landsat 7 ETM+ 和 ERS SAR 数据的融合 ..... | 191        |
| 10.4 小结 .....                               | 197        |
| <b>第 11 章 遥感图像融合的新趋势 .....</b>              | <b>199</b> |
| 11.1 概述 .....                               | 199        |
| 11.2 基于重建的方法 .....                          | 199        |
| 11.3 稀疏表示 .....                             | 201        |
| 11.3.1 空间光谱融合的稀疏图像融合 .....                  | 201        |
| 11.3.2 稀疏时空图像融合 .....                       | 204        |
| 11.4 贝叶斯方法 .....                            | 207        |
| 11.5 变分方法 .....                             | 208        |
| 11.6 基于新的谱变换的方法 .....                       | 210        |
| 11.7 小结 .....                               | 211        |
| <b>第 12 章 总结与展望 .....</b>                   | <b>212</b> |
| 12.1 概述 .....                               | 212        |
| 12.2 全色锐化方法的现状 .....                        | 212        |
| 12.2.1 插值 .....                             | 213        |
| 12.2.2 基于成分替换的全色锐化 .....                    | 213        |
| 12.2.3 基于多分辨率分析的全色锐化 .....                  | 213        |
| 12.2.4 混合方法 .....                           | 214        |
| 12.3 多光谱到超光谱的全色锐化 .....                     | 214        |
| 12.4 异构数据集融合 .....                          | 215        |
| 12.5 融合算法新趋势 .....                          | 215        |
| 12.6 小结 .....                               | 216        |
| <b>参考文献 .....</b>                           | <b>218</b> |