

遥感数据质量改善之 信息复原

沈焕锋 袁强强 李杰 岳林蔚 张良培 著



科学出版社

遥感数据质量改善之信息复原

沈焕锋 袁强强 李杰 岳林蔚 张良培 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

噪声与模糊是遥感成像中最为常见的两种辐射退化现象,本书主要针对这两种降质问题,研究遥感影像及定量产品的复原理论与方法。在噪声去除方面,较为全面地考虑遥感数据中的各种噪声类型,分别从高斯噪声、脉冲噪声、条带噪声、相干斑噪声、光谱噪声、时序噪声等方面进行系统论述。在影像去模糊方面,以变分正则化框架为重点展开讨论,构建范数自适应的正则化复原方法;结合遥感领域常用的刃边法与图像处理领域经典的迭代优化方法,发展一种稳健的遥感影像盲复原方法。

本书不仅适合遥感、测绘、信号处理等相关专业的高年级本科生、硕士生和博士生参考阅读,而且对从事遥感信息处理与应用方向的科技工作者也具有较大的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

遥感数据质量改善之信息复原 / 沈焕锋等著. —北京: 科学出版社, 2018.9

ISBN 978-7-03-056907-3

I. ①遥… II. ①沈… III. ①遥感数据-数据处理 IV. ①TP751.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 049210 号

责任编辑: 高 嵘 李亚佩/责任校对: 董艳辉

责任印制: 彭 超/封面设计: 苏 波

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>

武汉精一佳印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 9 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 9 月第一次印刷 印张: 18 1/4

字数: 433 000

定价: 180.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

航空航天遥感技术是探测地球表层信息的重要手段,在诸多领域具有广泛的应用。其中,遥感影像及其特征参量产品是空间信息与地学知识的载体,其数据质量直接影响着遥感应用的广度与深度。遥感成像过程极其复杂,传感器、光照、大气、地表等多种因素都可能对数据的辐射质量产生影响,导致遥感信息出现偏差甚至缺失,从而难以实现对地球陆表状况的准确表达与精细刻画。因此,通过遥感数据的质量改善处理,消除降质因素的影响、弥补观测能力的不足、提升数据的应用潜力,是遥感应用中一个重要的基础性问题。

近年来,遥感数据的质量改善研究越来越受到广泛关注,国际摄影测量与遥感学会(ISPRS)第三委员会专门成立了遥感数据质量工作组,电气和电子工程师协会(IEEE)地球科学与遥感协会期刊*IEEE-JSTARS*组织了遥感数据质量改善的特刊。国内外学者开展了卓有成效的研究,产出了诸多可喜的研究成果。然而,遥感降质因素多样,大多数研究往往主要针对其中的一种或几种辐射降质问题,这导致目前针对该问题进行全面、系统分析的书籍还未见出版。有鉴于此,作者希望基于多年的研究积累,整理出版一套全面介绍遥感数据辐射质量改善的书籍。我们从遥感降质特点出发,将遥感数据辐射质量改善划分为三个层次,形成《遥感数据质量改善之信息复原》《遥感数据质量改善之信息校正》和《遥感数据质量改善之信息重建》三部曲。其中,第一部主要介绍遥感影像中常见的噪声和模糊的复原问题;第二部主要阐述各种原因引起的辐射差异的校正问题;第三部主要研究传感器故障、厚云导致地表缺失信息的重建问题。

本书是“三部曲”的第一部,研究内容主要分为遥感影像去噪与去模糊两部分。在遥感影像去噪方面,本书不仅针对常规的高斯噪声、

脉冲噪声等进行深入探讨,更基于遥感成像降质的自身特点,对遥感数据中特有的条带噪声、相干斑噪声、光谱噪声、时序噪声等去除方法,进行全面的阐述。在遥感影像去模糊方面,在对研究现状进行充分分析的基础上,重点针对当前主流的正则化模型进行深入讨论,介绍自适应范数的正则化复原理论与方法,并结合遥感领域与图像处理领域的研究框架,研究联合刃边提取与交替迭代的盲复原方法。

本书是武汉大学地学感知数据质量改善与融合应用研究室(SendImage)多年研究工作的系统归纳、修订与完善,部分工作已在国内外刊物发表。本书由沈焕锋主笔并统稿,袁强强、李杰、岳林蔚、张良培合作完成。李慧芳、程青、李星华、曾超等参与讨论并提出了宝贵建议,多名已毕业或在读的研究生在前期研究和本书撰写过程中付出了辛勤的劳动,包括马晓双、刘欣鑫、杨刚、赵文楠、贺威、孙京、杨震、兰霞、彭鑫、杜丽军、姜湾、江波、景映红、蒋梦辉、郭贤等,在此表示衷心感谢。

在本书研究与撰写过程中,得到了多位老师的指导与帮助,包括武汉大学李德仁院士、龚健雅院士、李平湘教授、刘耀林教授、杜清运教授、龚威教授、张洪艳教授、吕锡亮教授、钟燕飞教授、江万寿教授、王密教授,中国科学院西北生态环境资源研究院李新研究员、黄春林研究员,中国科学院遥感与数字地球研究所张兵研究员、张立福研究员、李国庆研究员、柳钦火研究员、仲波副研究员,北京大学李培军教授,清华大学洪阳教授、龙笛研究员,美国密西西比州立大学杜谦教授,意大利帕维亚大学 Paolo Gamba 教授,同济大学童小华教授,中山大学黎夏教授、刘小平教授,中南大学吴立新教授,湖南大学李树涛教授,北京师范大学陈晋教授、陈云浩教授,南京大学杜培军教授,香港中文大学黄波教授,香港浸会大学吴国宝教授,中国地质大学(武汉)王毅教授、王力哲教授,北京市遥感信息研究所周春平研究员等,在此表示诚挚的谢意。

本书的研究与出版得到了多个项目资助,包括国家自然科学基金优秀青年科学基金项目“遥感时空定量信息重建、融合及其在长时序精细化城市热岛监测中的应用”(41422108)、面上项目“基于图块协同与学习的全极化遥感影像信息增强方法”(61671334)、青年科学基金项目“高光谱遥感影像多类型噪声一体化变分处理方法研究”(41401383)、武汉市青年科技晨光计划项目“航空航天遥感数据高性能质量改善技术”(2013072304010820)、“万人计划”青年拔尖人才计划等。

由于作者水平有限,书中不足和疏漏之处在所难免,敬请各位专家、同行不吝指正。关于本书的任何批评与建议,请发送至作者邮箱:shenhf@whu.edu.cn。

沈焕锋

2018年4月

本书涉及的缩略词

| 英文简称 | 英文全称 | 中文全称 |
|--------|--|------------------------|
| AD | anisotropic diffusion | 各向异性扩散 |
| ADMM | alternating direction method of multipliers | 交替方向乘法 |
| AE | auto encoder | 自动编码器 |
| AIRPAD | adaptive iteratively refined PolSAR AD | 自适应迭代优化的极化合成孔径雷达各向异性扩散 |
| AG | asymmetric Gaussians | 非对称高斯函数法 |
| ALS | alternating least square | 交替最小二乘法 |
| AMF | adaptive median filter | 自适应中值滤波 |
| ANA | adaptive norm algorithm | 自适应范数算法 |
| ANTV | adaptive norm total variation | 自适应范数全变差 |
| AVIRIS | airborne visible infrared imaging spectrometer | 机载可见光/红外成像光谱仪 |
| BISE | the best index slope extraction | 最佳指数斜率提取法 |
| BM3D | block-matching 3-D filtering | 三维块匹配与协同滤波 |
| BOS | Bregmanized operator splitting | 布雷格曼算子分裂 |
| BRP | bilateral random projection | 双边随机投影 |
| BTV | bilateral total variation | 双边全变差 |
| CCD | charge coupled device | 电荷耦合器件 |
| CG | conjugate gradient | 共轭梯度 |
| CS | compressive sensing | 压缩感知 |
| CNN | convolutional neural network | 卷积神经网络 |
| COV | coefficient of variation | 变异系数 |
| CWMF | central weighted median filter | 中央加权中值滤波 |
| CWF | changing-weight filter | 变权滤波法 |
| DBA | decision based algorithm | 基于决策的算法 |

| 英文简称 | 英文全称 | 中文全称 |
|---------|--|------------------|
| DCT | discrete cosine transform | 离散余弦变换 |
| DSL | despeckling structure loss | 去相干斑结构损失 |
| DNN | deep neural network | 深度神经网络 |
| DPIMF | detail-preserving iterative median filter | 顾及影像细节信息的迭代中值滤波 |
| ECF | ecosystem curve fitting | 生态系统曲线拟合法 |
| ENL | equivalent number of looks | 等效视数 |
| ESF | edge spread function | 边缘扩散函数 |
| FFT | fast Fourier transformation | 快速傅里叶变换 |
| FOM | figure of merit | 质量因数 |
| ForWaRD | Fourier-wavelet regularized deconvolution | 傅里叶-小波正则化反卷积 |
| FT | Fourier transform | 傅里叶变换 |
| GLRT | great ratio likelihood test | 广义似然比检验 |
| GMRF | Gaussian Markov random field | 高斯马尔可夫随机场 |
| HANTS | harmonic analysis of time series | 时间序列的谐波分析法 |
| HM | histogram modification | 括直方图匹配 |
| HMRF | Huber Markov random field | 胡伯尔马尔可夫随机场 |
| HSSNR | hybrid spatial-spectral noise reduction | 混合空谱噪声抑制 |
| ICV | inverse coefficient of variation | 方差逆系数 |
| IDR | iterative interpolation for data reconstruction | 迭代插值数据重建算法 |
| IF | improvement factor | 改善因子 |
| IRLS | iterative reweighed least squares | 迭代加权最小二乘法 |
| IRN | iteratively reweighted norm | 迭代重加权范数法 |
| ISNR | improved signal-to-noise ratio | 改善信噪比 |
| JSSDSR | joint spectral-spatial distributed sparse representation | 基于分布式稀疏表达的空谱联合算法 |
| LABTV | locally adaptive bilateral total variation | 局部自适应双边全变差 |
| LDFPI | lagged diffusivity fixed point iteration | 滞后定点迭代法 |
| LMMSE | linear minimum mean-squared error | 线性最小均方误差 |
| LPC-SI | local phase coherence-based sharpness index | 局部相位相干性清晰度指标 |
| LRMR | low-rank matrix recovery | 基于低秩分解的高光谱去噪方法 |
| LSF | linear spread function | 线扩散函数 |
| MA | moving average method | 移动均值滤波法 |
| MAP | maximum <i>a posteriori</i> | 最大后验概率 |
| MLP | multi layer perceptrons | 多层感知器 |
| MM | majorization-minimization | 最大-最小算法 |

| 英文简称 | 英文全称 | 中文全称 |
|---------|---|-----------------|
| MM | moment matching | 矩匹配 |
| MNF | minimum noise fraction | 最小噪声分离 |
| MNLTV | multichannel nonlocal total variation | 多通道的非局部全变差 |
| MRD | mean relative deviation | 平均相对偏差 |
| MRF | Markov random field | 马尔可夫随机场 |
| MOS | modular optoelectronic scanner | 模块化光电子扫描仪 |
| MTF | modulation transfer function | 调制传递函数 |
| MVC | maximum value composite | 最大值合成法 |
| MVI | mean-value iteration filter | 均值迭代滤波法 |
| MWF | multidimensional Wiener filtering | 多维维纳滤波 |
| MWHA | moving weighted harmonic analysis | 移动加权谐波分析法 |
| NDVI | normalized difference vegetation index | 归一化差异植被指数 |
| NLM | nonlocal means | 非局部均值 |
| NLTV | nonlocal total variation | 非局部全变差 |
| OTF | optical transfer function | 光学传递函数 |
| PCA | principal component analysis | 主成分分析 |
| PCG | preconditioned conjugate gradient | 预条件共轭梯度 |
| PDE | paltial differential equation | 偏微分方程 |
| PDF | probability distribution function | 概率密度函数 |
| PFBS | proximal forward backward splitting | 前向后向算子分裂方法 |
| PNLM | pretest nonlocal means | 预检测非局部均值 |
| PPB | probabilistic patch-based | 基于概率块 |
| PSF | point-spread function | 点扩散函数 |
| PolSAR | polarimetric synthetic aperture radar | 极化合成孔径雷达 |
| PSNR | peak signal-to-noise ratio | 峰值信噪比 |
| RIP | restricted isometry property | 有限等距性质 |
| SA | simulated annealing algorithm | 模拟退火算法 |
| SAMF | simple adaptive median filter | 简单的自适应中值滤波 |
| SAMNLTV | spectral adaptive multichannel nonlocal total variation | 光谱自适应的多通道非局部全变差 |
| SAR | synthetic aperture radar | 合成孔径雷达 |
| SARAS | SAR raw signal simulator | 合成孔径雷达原始信号模拟器 |
| SNR | signal-noise ratio | 信噪比 |
| SSAHTV | spectral-spatial adaptive hyperspectral total variation model | 空谱自适应全变差模型 |
| SR | sparse representation | 稀疏表达 |

续表

| 英文简称 | 英文全称 | 中文全称 |
|-------|---|------------------|
| SRAD | speckle reducing anisotropic diffusion | 相干斑抑制的各向异性扩散 |
| SSCM | striping sparsity considered model | 考虑条带稀疏特性模型 |
| SSC | simultaneous sparse coding | 同步稀疏编码 |
| SSIM | structural similarity index measurement | 结构相似指数测量 |
| RSATV | regional spatially adaptive total variation | 区域空间自适应全变差 |
| TCR | target to clutter ratio | 目标-聚类比 |
| TV | total variation | 全变差 |
| TSF | temporal spatial filter | 时空滤波法 |
| UTMF | unsymmetric trimmed median filter | 基于决策的改进非对称剪枝中值滤波 |
| UTVM | unidirectional total variational model | 单向全变差模型 |
| WAFT | wavelet-Fourier transform | 小波-傅里叶变换 |
| WMF | weighted median filter | 加权中值滤波 |
| WOSF | weighted order statistic filters | 加权顺序统计滤波 |
| WT | wavelet transform | 小波变换 |

目 录

| | |
|----------------------|----|
| 第 1 章 概述 | 1 |
| 1.1 研究背景与意义 | 1 |
| 1.2 研究内容 | 4 |
| 第 2 章 遥感影像复原方法及其最新进展 | 7 |
| 2.1 噪声与模糊退化模型 | 7 |
| 2.1.1 遥感影像的噪声模型 | 8 |
| 2.1.2 遥感影像的模糊模型 | 10 |
| 2.2 影像复原研究现状 | 11 |
| 2.2.1 空间域移动窗口法 | 11 |
| 2.2.2 变换域影像复原法 | 13 |
| 2.2.3 基于偏微分方程的复原方法 | 18 |
| 2.2.4 基于变分的复原方法 | 22 |
| 2.2.5 基于机器学习的复原方法 | 26 |
| 2.3 影像盲复原方法 | 30 |
| 2.3.1 基于 MAP 的盲复原方法 | 31 |
| 2.3.2 基于边缘预测的盲复原法 | 32 |
| 2.3.3 变分贝叶斯复原方法 | 33 |
| 2.4 变分正则化模型的数值求解方法 | 35 |
| 2.4.1 线性问题的数值解法 | 35 |
| 2.4.2 非线性问题的数值解法 | 38 |
| 2.5 本章总结 | 42 |
| 第 3 章 遥感影像脉冲噪声去除方法 | 49 |
| 3.1 脉冲噪声及其分布特征 | 49 |

| | | |
|------------|---------------------|------------|
| 3.1.1 | 固定值脉冲噪声 | 50 |
| 3.1.2 | 随机值脉冲噪声 | 50 |
| 3.2 | 经典的脉冲噪声去除方法 | 50 |
| 3.2.1 | 传统中值滤波 | 50 |
| 3.2.2 | 加权中值滤波 | 51 |
| 3.2.3 | 开关中值滤波 | 52 |
| 3.2.4 | 噪声探测方法 | 52 |
| 3.3 | 保持细节信息的迭代中值滤波 | 54 |
| 3.4 | 实验结果与分析 | 56 |
| 3.5 | 本章总结 | 60 |
| 第4章 | 遥感影像条带噪声去除方法 | 62 |
| 4.1 | 条带噪声成因与特性分析 | 62 |
| 4.1.1 | 条带噪声产生的原因 | 62 |
| 4.1.2 | 条带噪声的特性分析 | 63 |
| 4.2 | 经典的条带噪声去除方法 | 66 |
| 4.2.1 | 条带噪声的处理方法分类 | 66 |
| 4.2.2 | 空间域统计计算的条带噪声去除方法 | 68 |
| 4.2.3 | 变换域频率滤波的条带噪声去除方法 | 71 |
| 4.3 | 变分框架下的条带噪声去除方法 | 75 |
| 4.3.1 | 基于最大后验概率的条带噪声去除方法 | 75 |
| 4.3.2 | 基于校正系数估计的条带噪声去除方法 | 77 |
| 4.3.3 | 基于单向变差的条带去除方法 | 79 |
| 4.3.4 | 基于稀疏分布假设的条带去除方法 | 80 |
| 4.3.5 | 基于方向差分的斜向条带去除方法 | 83 |
| 4.4 | 实验结果与分析 | 86 |
| 4.4.1 | 模拟实验对比分析 | 86 |
| 4.4.2 | 真实实验对比分析 | 89 |
| 4.4.3 | 斜向条带噪声去除实验 | 95 |
| 4.5 | 本章总结 | 97 |
| 第5章 | 遥感影像光谱噪声去除方法 | 100 |
| 5.1 | 高光谱遥感影像噪声分析 | 100 |
| 5.2 | 变换域光谱噪声去除方法 | 104 |
| 5.2.1 | 主成分变换框架下的光谱去噪 | 104 |
| 5.2.2 | 基于小波域的空谱噪声分离 | 105 |
| 5.2.3 | 多维维纳滤波法 | 107 |
| 5.3 | 空谱联合的变分去噪方法 | 110 |

| | | |
|--------------|---------------------------|------------|
| 5.3.1 | 空间-光谱联合全变差模型 | 111 |
| 5.3.2 | 多通道非局部全变差模型 | 115 |
| 5.3.3 | 空谱分布式稀疏先验模型 | 118 |
| 5.3.4 | 基于低秩分解的高光谱去噪方法 | 124 |
| 5.4 | 实验结果与分析 | 126 |
| 5.4.1 | 模拟实验 | 127 |
| 5.4.2 | 真实实验 | 134 |
| 5.5 | 本章总结 | 139 |
| 第 6 章 | 遥感影像时序噪声去除方法 | 142 |
| 6.1 | 研究背景与意义 | 142 |
| 6.2 | 时序滤波方法综述 | 143 |
| 6.2.1 | 插值替换方法 | 144 |
| 6.2.2 | 卷积滤波法 | 146 |
| 6.2.3 | 频率域滤波法 | 147 |
| 6.2.4 | 曲线拟合法 | 149 |
| 6.2.5 | 顾及时空关系的重建方法 | 154 |
| 6.2.6 | 其他方法 | 155 |
| 6.3 | 移动加权谐波分析时序噪声去除方法 | 155 |
| 6.3.1 | 方法的基本原理 | 156 |
| 6.3.2 | MWHA 方法四步流程 | 157 |
| 6.3.3 | 实验与分析 | 160 |
| 6.4 | 顾及时序噪声特性的变分滤波方法 | 167 |
| 6.4.1 | 方法的基本原理 | 167 |
| 6.4.2 | 噪声去除实验 | 169 |
| 6.5 | 本章总结 | 172 |
| 第 7 章 | 单极化 SAR 影像相干斑噪声的抑制 | 175 |
| 7.1 | 相干斑形成机理及统计特性 | 175 |
| 7.1.1 | 相干斑形成机理 | 175 |
| 7.1.2 | 单极化 SAR 统计特性 | 176 |
| 7.2 | 单极化 SAR 影像去噪方法综述 | 179 |
| 7.2.1 | 局部窗口滤波算法 | 179 |
| 7.2.2 | 变换域滤波算法 | 182 |
| 7.2.3 | 基于偏微分方程的算法 | 183 |
| 7.2.4 | 变分去噪算法 | 184 |
| 7.2.5 | 基于图块计算的算法 | 185 |
| 7.2.6 | 基于机器学习与智能优化的算法 | 187 |

| | | |
|--------------|---------------------------|------------|
| 7.2.7 | 其他算法 | 188 |
| 7.2.8 | SAR 去噪效果的评价 | 188 |
| 7.3 | 单极化 SAR 非局部变分去噪方法 | 191 |
| 7.3.1 | 经典的 SAR 局部变分去噪算法 | 191 |
| 7.3.2 | 非局部正则化 SAR 变分去噪算法 | 192 |
| 7.4 | 实验与分析 | 195 |
| 7.4.1 | 模拟实验 | 195 |
| 7.4.2 | 真实实验 | 199 |
| 7.5 | 本章总结 | 202 |
| 第 8 章 | 全极化 SAR 影像相干斑噪声的抑制 | 206 |
| 8.1 | PolSAR 统计特性及去噪原则 | 206 |
| 8.1.1 | PolSAR 相干斑统计特性 | 206 |
| 8.1.2 | PolSAR 去噪原则 | 208 |
| 8.2 | PolSAR 影像滤波方法综述 | 209 |
| 8.2.1 | 局部窗口滤波算法 | 209 |
| 8.2.2 | 基于非局部均值的算法 | 210 |
| 8.2.3 | 偏微分去噪算法 | 211 |
| 8.2.4 | 变分去噪算法 | 212 |
| 8.2.5 | 基于机器学习与智能优化的去噪算法 | 213 |
| 8.2.6 | PolSAR 去噪效果的评价 | 213 |
| 8.3 | 自适应迭代优化的 PolSAR AD 滤波 | 215 |
| 8.3.1 | PolSAR AD 的基础模型 | 215 |
| 8.3.2 | 自适应迭代优化的 PolSAR AD 模型 | 216 |
| 8.4 | 实验与分析 | 224 |
| 8.4.1 | 模拟实验 | 224 |
| 8.4.2 | 真实实验 | 225 |
| 8.5 | 本章总结 | 231 |
| 第 9 章 | 范数自适应的正则化影像复原方法 | 234 |
| 9.1 | 正则化复原框架与模型 | 234 |
| 9.2 | 范数自适应的影像复原方法 | 236 |
| 9.2.1 | 范数自适应的数据一致性约束项 | 236 |
| 9.2.2 | 范数自适应的正则化先验 | 240 |
| 9.2.3 | 模型的优化求解 | 241 |
| 9.3 | 实验结果与分析 | 242 |
| 9.3.1 | 范数自适应数据一致性约束的验证 | 242 |
| 9.3.2 | 范数自适应先验模型的验证 | 243 |

| | |
|---------------------------------------|------------|
| 9.3.3 联合框架的验证 | 246 |
| 9.4 本章总结 | 248 |
| 第 10 章 联合刃边提取与交替迭代的盲复原方法 | 250 |
| 10.1 引言 | 250 |
| 10.2 常用的模糊函数估计与盲复原方法 | 252 |
| 10.2.1 模糊函数估计方法 | 252 |
| 10.2.2 基于交替迭代最优化框架的影像盲复原 | 253 |
| 10.3 联合刃边提取与交替迭代的遥感影像盲复原 | 255 |
| 10.3.1 整体复原框架与求解 | 256 |
| 10.3.2 基于刃边提取的 PSF 初始估计 | 258 |
| 10.3.3 基于影像非参考评价指标的自动终止条件 | 261 |
| 10.4 实验结果与分析 | 262 |
| 10.4.1 参数选取、初始化与终止 | 263 |
| 10.4.2 模拟实验与分析 | 263 |
| 10.4.3 真实遥感影像实验与分析 | 272 |
| 10.5 本章总结 | 275 |

第 1 章 概 述

1.1 研究背景与意义

遥感数据是空间信息与地学知识的载体，其数据质量直接影响着遥感应用的广度与深度。然而，遥感观测过程中，受传感器、光照、大气、地表等多种因素的影响，所获取的遥感影像中经常存在辐射质量退化，产生噪声、模糊、死像元、亮度不均、阴影、云雾遮盖等系列问题(图 1.1)，极大制约了遥感数据在各领域的深入应用(Ghamisi et al., 2017; Bioucas-Dias et al., 2013)。影像复原是利用影像退化的先验信息建立处理模型，通过反向推演恢复影像原始信息的一种影像处理技术。从广义上来讲，针对以上各种降质因素的处理技术均可归于影像复原的范畴。但是，狭义上的影像复原往往特指影像去噪及去模糊，这也是本书所关注的重点。关于其他辐射退化的处理问题，可参考本书的姊妹篇《遥感数据质量改善之信息校正》《遥感数据质量改善之信息重建》。

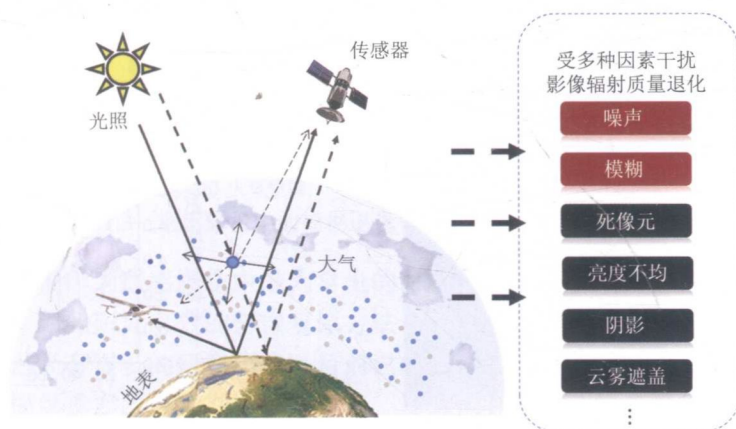


图 1.1 遥感影像复杂成因与降质类型

遥感成像手段多样,观测过程复杂,除了普通近景影像中常见的高斯噪声[图 1.2(a)]、脉冲噪声[图 1.2(b)](Gonzalez et al., 2001)外,还可能存在如下一些较为特殊类型的噪声。

(1) 条带噪声。线阵遥感探测器是遥感成像系统中最为常见的一种传感器,其在扫描成像的过程中,由于探元间的响应不一致,会有条带状、明暗相间分布的条带噪声(Liu et al., 2016, 2018; Shen et al., 2009; 刘正军 等, 2002)。该类噪声不同于遥感影像中的其他噪声,具有非常显著的结构化分布特性,如图 1.2(c)所示。

(2) 光谱噪声。高光谱影像精细的谱间探测能力是其重要优势,光谱曲线是用于地物解译的重要依据。但是,与传统的宽波段遥感相比,高光谱成像质量更容易受到噪声的影响,噪声的来源与特点也更加复杂(李杰, 2016; 陈绍林, 2012; 袁强强, 2012; 孙蕾 等, 2009)。从光谱维的视角,其表现为异常波动的光谱曲线,如图 1.2(d)所示。

(3) 时序噪声。受非理想大气条件、观测角度、反演算法等因素的影响,具有高时间分辨率的定量遥感产品往往在某些时相上会出现较大的误差,在时序曲线上出现明显的异常波动,如图 1.2(e)所示,限制了后续对定量产品进行时间序列分析的精度(Zhou et al., 2015; 李儒 等, 2009; 顾娟 等, 2006; Cihlar, 1996)。

(4) 相干斑噪声。在雷达影像中,由于合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)系统的雷达回波信号中相邻像素灰度会受到雷达相干性的影响,产生一定随机变化,普遍表现为雷达影像的相片中会出现颗粒状或斑点状的噪声,称为相干斑噪声(Deledalle et al., 2017; Ma et al., 2017; 马晓双, 2016; Argenti et al., 2013),如图 1.2(f)所示。特殊的是,单极化影像相干斑噪声一般为乘性相干斑噪声,而全极化影像中的噪声则更加复杂。



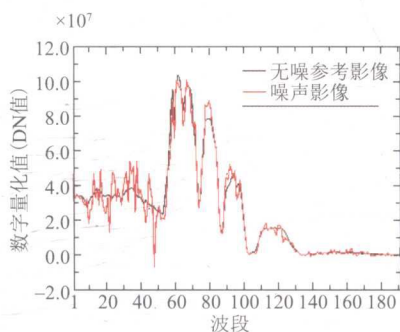
(a) 高斯噪声



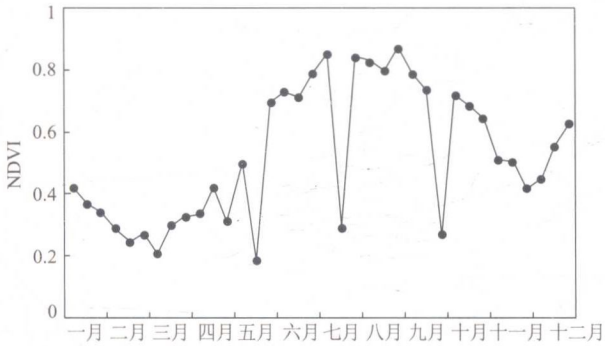
(b) 脉冲噪声



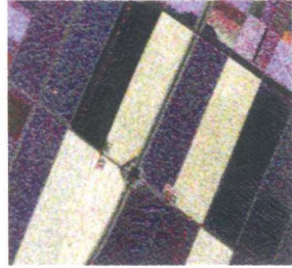
(c) 条带噪声



(d) 光谱噪声



(e) 时序噪声



(f) 相干斑噪声

图 1.2 遥感影像中常见的噪声退化类型

除噪声以外, 由于受到传感器散焦、大气湍流、平台震颤等因素的影响, 遥感影像中经常存在一定的模糊退化。根据产生机理的不同, 遥感影像模糊主要可以分为散焦模糊、大气模糊、运动模糊三类, 并且通常是共同作用的(Li et al., 2013; Shen et al., 2012; Leger et al., 2003; Markham, 1985)。

(1) 散焦模糊。从传感器自身的设计角度来讲, 光学系统的衍射、像差、成像设备的散焦会引起一定的散焦模糊[图 1.3(a)](Gao et al., 2018), 该类模糊退化广泛存在于卫星、航空及低空(无人机等)方式获取的遥感数据中。

(2) 大气模糊。大气湍流的扰动效应、大气中气溶胶的散射作用会引起一定的大气模糊(王振国, 2010)。在卫星遥感成像过程中, 成像平台较高, 大气湍流与散射的影响更为严重, 其模糊退化往往占主导地位[图 1.3(b)]。

(3) 运动模糊。传感器的震颤及地物与成像设备之间的相对运动也会产生一定的运动模糊[图 1.3(c)], 特别是在视频遥感及无人机遥感数据中较为常见。



(a) 散焦模糊



(b) 大气模糊



(c) 运动模糊

图 1.3 遥感影像中的模糊退化类型

综上所述, 噪声与模糊作为遥感影像中最为常见的两种辐射质量退化问题, 经常限制遥感数据的应用能力, 因此研究有效的影像复原方法十分必要。在(近景)图像处理领域, 去噪与去模糊技术已经有很长的研究历史, 目前已经具备较为完善的理论与方法体系, 可为遥感影像处理提供重要的参考与借鉴。然而, 遥感也有其特殊的成像特点, 如何有效顾及遥感影像的数据特征, 发展稳健的噪声抑制和模糊效应补偿技术, 对于提升