

遥感图象复原与超分辨 理论及实现

The Theory and Realization of Remote Sensing Image
Restoration and Super-Resolution

李金宗 李宁宁 朱 兵 李冬冬 著



科学出版社

内 容 简 介

遥感图象复原与超分辨 理论及实现

The Theory and Realization of Remote Sensing
Image Restoration and Super-Resolution

李金宗 李宁宁 朱 兵



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统深入地阐述遥感图象复原与超分辨的理论分析、数学模型、公式推导以及实现的技术途径、计算流程、实验验证,还给出各种算法的实际应用效果和量化指标评价。全书共分6章:第1章主要论述遥感图象质量退化的成像模型及其质量复原与超分辨的基本概念和系统方案;第2章主要通过遥感图象频谱分析定义实施复原与超分辨的判断标准、图象噪声与模糊的先验模式以及序列图象配准的系列算法与精度分析等;第3章主要论述解模糊、抑制噪声和消除薄云薄雾干扰等算法模型和实验分析;第4章依次论述单帧频域变换与补偿扩展、频域解混叠和频域融合超分辨算法;第5章依次阐述网格法、MAP、PMAP、POCS和空域融合最优超分辨算法;第6章重点建立具有强大泛化再生能力的三级训练图象超分辨BP网等。

本书富含创新性的学术观点和方法,可以广泛应用于需要图象处理方法提高分辨率的卫星资源、成像判读、环境监护、交通管制、医学诊断、地震灾情等领域的遥感图象处理,对信号与信息处理、电子与通信工程、计算机科学与应用、图象处理与系列图象分析、模式识别与人工智能、自动化与自动控制、遥测遥控和地球物理等相关专业的科学研究人员以及大学教师、研究生、高年级本科生,是必备的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

遥感图象复原与超分辨理论及实现 / 李金宗等著. —北京: 科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-048936-4

I. ①遥… II. ①李… III. ①遥感图象—图象恢复—高分辨率—研究 IV. ①TP751

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 138487 号

责任编辑: 王 哲 邢宝钦 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 迷底书装

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 8 月第 一 版 开本: 720×1 000 1/16

2016 年 8 月第一次印刷 印张: 27 插页: 6

字数: 532 000

定价: 186.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

本书是作者十多年关于遥感图象复原与超分辨研究成果的结晶和理论升华,内容包括绪论、先验信息提取、图象复原和图象超分辨,而图象超分辨又包括频域图象超分辨、空域图象超分辨和神经网络图象超分辨三个部分。

图象分辨率是衡量图象质量的重要指标。高分辨率的遥感图象,作为准确客观蕴涵和表达目标客体及其背景信息的载体,其应用领域越来越广泛,应用价值越来越高,例如,在空间飞行器的制导与导航、重要目标的辨识与判读、交通枢纽的管制与车牌识别、气象环境的监视与预报、地震灾害的探查与评估等诸多领域的应用均取得很大进展。但是,实际应用表明,从遥感成像系统获取的遥感图象,由于光学散焦和相对运动等因素引起的模糊以及光电敏感器的散粒等噪声污染,尤其是 CCD 等成像器件的欠采样和光学衍射的截止频率等导致的频谱混叠,还有成像器件水平不理想等因素,所成图象质量退化,其分辨率达不到实际应用的要求。所以,随着应用需求的日益高涨,越来越迫切要求通过图象处理的方法,即图象复原与超分辨,来提高遥感图象的分辨率。

图象复原与超分辨作为成像过程的反过程,所涉及的数理问题属于“反问题”。“反问题”的一个重要属性是它的“病态”,因此高分辨率图象的求解很困难。在 20 世纪末的三十多年中,关于单帧退化图象的复原问题,人们建立和发展了一系列的经典理论。进入 21 世纪以来,随着计算机科学和工程的持续不断发展,允许更复杂更费时的算法,在解决图象复原问题的基础上,人们把主要精力集中在图象超分辨率处理的非传统处理方法上,首先是基于重建(reconstruction-based)的频、空域方法,然后是基于学习(learning-based)的神经网络方法,由于研究热情越来越高,新方法也层出不穷。

我们在长期的研究中建立了由图象分析、图象复原、超分辨处理和效果评价等四个主要部分组成的遥感图象复原与超分辨率处理系统方案。

先验信息开采是系统方案的一个环节。其中,频率混叠深度参数 C_{11} 来源于我们的中国发明专利(李金宗, 2011),既可用于图象超分辨算法优化和选择,又可用于处理效果的客观评价;无论是哪类的模糊,均使高频成分发生损失和丢失,通过模糊图象频谱分析建立的模糊参数 C_2 是模糊复原的先验信息,并且给出高斯、散焦和线性移动等三类模糊的先验模型;图象的散粒等光电噪声,在低光度下满足泊松分布,而在强光照时满足高斯分布,电阻热噪声是零均值高斯白噪声,散斑噪声是非线性的乘性噪声,无论是哪类的噪声,均使高频成分发生变化和损失,信噪比参

数 C_3 是图象去噪复原的先验信息; 空域存在薄云薄雾的卫星遥感图象可以简化为云雾图象与景物图象之积, 而云雾占据相对较低的频率成分, 这是设计抑制云雾算法的重要依据; 成像系统的调制传递函数可用高斯曲线进行模拟, 实际相当于低通滤波器; 序列图象配准是多帧超分辨的前提条件, 可使帧间旋转参数估计精度优于 0.01° 、平移参数估计精度优于 0.02 像素, 为多帧超分辨算法取得良好效果奠定基础。

图象复原操作主要是解模糊、抑制噪声污染和消除薄云薄雾干扰等。利用遥感图象成像模型和有关先验信息的研究成果, 分别进行三项图象复原技术与算法的研究。图象解模糊复原, 首先是利用四种基本频域滤波器的图象频域相乘等操作实现空域反卷积解模糊; 然后重点研究有限支持域上图象盲目反卷积解模糊, 其中包括空间域的和基于 FT 的两种算法, 均进行数学模型的系列推导和算法流程的设计, 通过实验复杂性及其 PSNR 数据比较, 优选基于 FT 的算法处理“资源二号”遥感图象, 兼顾噪声放大问题, 只需两次迭代, 即可得到满意效果。图象去噪复原, 要求同时保留甚至增强边缘纹理信息, 为此专题研究多帧(源)信息融合的频域去噪方法和基于偏微分方程的扩散去噪方法, 后者是帧内处理, 其中我们改进的非线性各向异性扩散算法效果最佳; 接着, 研究设计剔除条带噪声的陷波带阻滤波器以及消除颗粒噪声的改进的中值滤波器算法。根据含薄云薄雾遥感图象的简化模型以及云雾成分的频谱特征, 设计基于同态滤波的和基于小波多分辨分析的两种云雾抑制算法, 后者处理效果较优, 但是算法较复杂, 且需要同一地区的无云雾参考图象, 而前者比较简便。

图象超分辨要解决的核心问题是解开被处理低分辨率图象的频率混叠、扩展和增强高频成分、展宽频谱、改善频谱结构, 使其恢复和逼近原理想物图象的频谱。从实际应用的观点, 开展的图象超分辨研究是从单帧频域算法开始的, 由 FFT 插值法, 经过频域变换与增强、振铃抑制、频域补偿与扩展、引入控制参数, 逐步建立单帧频域变换与补偿扩展超分辨自适应算法, 给出系列算法模型, 设计自适应算法流程模块, 理论与实验研究表明, 该算法具有理论扎实、应用方便和普适性强的特点。频域解混叠是多帧(源)图象超分辨, 解混叠的同时解模糊和抑制噪声, 进行严格的数学推演, 并且将多帧频域解混叠退化, 建立单帧频域解混叠超分辨算法, 进而设计其算法流程模块, 理论与实验研究同样表明, 该算法具有理论扎实、应用方便和普适性强的特点。在上述两个算法的基础上, 引进图象精确配准和高斯再采样函数等, 建立了二至多帧频域融合超分辨算法, 实验证明融合算法的效果最优。

空域图象超分辨方法灵活多变, 近年来发展比较快, 其中, 既有基于概率统计理论的 MAP 估计、PMAP 估计, 又有基于集合理论的 POCS 估计, 以及 PMAP/POCS 融合算法。但是, 首先是我们基于 Shannon 采样定理和图象局部二维内插拟合函数而建立的网格超分辨估计算法, 进行系列公式的推导, 建立由非标准位移的低分辨

率序列图象求解其高分辨率图象的重复递归迭代网格超分辨算法模块。MAP 估计算法是基于 Bayes 决策理论最大化后验概率 $P(z, s | y)$, 同时得到所求的高分辨率图象 z 和低分辨率序列图象帧间运动参数 s 的 MAP 估计, 给出系列公式推导, 建立循环递归迭代算法及其算法模块。PMAP 估计算法是将图象及其噪声置于泊松概率模型中, 根据 Bayes 公式, 通过最大化后验概率 $P(u | y)$, 推导得到高分辨率图象 u 的 PMAP 估计基本算法迭代公式, 并且扩展得到 GPMAP 估计扩展算法及 RGPMP 估计鲁棒扩展算法的迭代公式, 还引入正则化项。POCS 估计算法是在基于集恢复理论的图象数据一致性限制凸集的基础上, 逐步建立其基本算法模型和 RPOCS 估计鲁棒算法模型, 还通过修改定义在边缘像素坐标的广义归一化点扩散函数抑制边缘振铃的出现, 建立三次循环迭代的 RPOCS 估计鲁棒算法计算流程。PMAP/POCS 融合算法是在概率统计推断和集理论恢复的融合理论基础上, 以处理效果为主, 兼顾处理效率, 建立 RGPMP-2-RPOCS 图象融合最优算法, 不但在空域具有最强的超分辨图象重建能力, 而且与频域图象融合超分辨算法比较, 达到几乎一致但是稍微优良的超分辨效果。

最后, 研究基于学习的神经网络图象超分辨技术, 重点研究和建立三级训练图象超分辨 BP 网, 并且在泛化再生应用实验中证明具有很强的图象超分辨能力。由于图象超分辨本质上是由低分辨率(序列)图象到高分辨率图象的非线性的模式映射, 具有处理机理内含反问题的病态, 处理数据内含不完全和/或不精确等不确定性, 这些特点恰好是神经网络技术比较擅长处理的问题, 其实现的基本思想是仿效生物神经元及其生物网络建立人工神经元及其人工神经网络, 使其具有庞大的分布式连接权值系统, 成为快速并行储存和并行处理的物质基础, 并且赋予适当的激励变换函数和学习算法, 使其成为脑式信息处理系统, 具有良好的泛化应用和再生能力。由于所建立的网络连续进行三个周期的训练和学习, 并且通过训练输入/输出样本图象的优选以及训练输出目标样本图象的复原操作等提高训练样本图象的质量和代表性, 而训练输入/输出样本图象模式映射的分辨率等级连续提高三次, 使网络连接权值逐级优化, 不但使网络在充分训练中学习具备扩展图象模式映射等级的能力, 而且使网络学习增强去模糊、去噪声和扩展高频成分即丰富图象纹理细节的能力, 导致网络泛化再生和图象超分辨的能力逐级提高。包括图象精确配准、融合和单帧频域变换与补偿扩展超分辨等算法在内的以三级训练图象超分辨 BP 网为主处理双帧输入“资源二号”遥感图象的应用实验结果, 与空域的 RGPMP-2-RPOCS 融合最优算法和频域的融合超分辨算法同样的应用实验结果比较, 取得基本相同但稍微优良的图象超分辨效果, 但是仍然有较大的发展空间。

浏览国际上关于图象超分辨处理技术的大量文献, 可以看出其发展趋势有下列特点:

(1) 完善现有的图象超分辨处理算法, 不断地探索新的超分辨处理算法;

- (2) 增强图象超分辨算法的鲁棒性, 以尽可能适应有所变化的应用条件;
- (3) 改善图象超分辨算法收敛性, 以适应可能出现的各种图象退化因素的影响;
- (4) 在图象超分辨算法中引入正则化因子, 以免病态运行使操作更有效。

哈尔滨工业大学的李冬冬高级工程师、朱兵副教授等和中国航天科技集团公司第五研究院总体部的李宁宁研究员分别提供了本书的部分初稿。在哈尔滨工业大学图象信息技术与工程研究所学习过, 作者指导的众多博士研究生和硕士研究生以不同分课题的形式参加了该项研究(名单见后记), 在研究中共同切磋、互相启发, 对研究进展甚有助益, 其中李宁宁对单帧频域超分辨方法的提出、杨学峰对空域最优融合超分辨算法的形成、朱福珍对神经网络图象超分辨算法的训练实验、黄婧对序列图象配准算法的实验研究等, 均有突出贡献, 并且作者始终得到家人的鼎力支持。在此, 一并表示感谢!

由于作者水平有限, 书中不足之处在所难免, 敬请广大读者批评指正。

李金宗

2016年3月

缩 写 词

Additive Algebraic Reconstruction Technique, AART	加性代数重建技术
Analog to Digital, A/D	模/数
Artificial Neural Network, ANN	人工神经网络
Back-Propagation, BP	后向传输
Back-Propagation Neural Network, BPNN	后向传输神经网络
Charge Couple Device, CCD	电荷耦合器件
Conjugate Gradient, CG	共轭梯度
Data Consistence Constraints, DCC	数据一致性限制
Discrete Cosine Transform, DCT	离散余弦变换
Discrete Fourier Transform, DFT	离散傅里叶变换
Frequency Aliasing Depth, FAD	频率混叠深度
Fast Fourier Transform, FFT	快速傅里叶变换
Finite Impulse Response, FIR	有限字长冲激响应
Gradient Descent Algorithms, GDA	梯度下降算法
Iteration Back-Projection, IBP	迭代后向投影
Inverse Fast Fourier Transform, IFFT	逆快速傅里叶变换
Infinite Impulse Response, IIR	无限字长冲激响应
Linear Associative Memory, LAM	线性联想记忆
Linear Shift-Invariant, LSI	线性移不变
Linear Shift-Variant, LSV	线性移变
Mean Absolute Gradient, MAG	平均绝对梯度
Maximum A-posteriori Probability, MAP	最大后验概率
Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique, MART	乘性代数重建技术
Maximum Likelihood, ML	最大似然
Multi-Layer Perceptron-Probabilistic Neural Network, MLP-PNN	多层感知器概率神经网络
Mean Squared Error, MSE	均方误差
Markov Random Field, MRF	马尔可夫随机场
Modulation Transfer Function, MTF	调制传递函数
Nonlinear Associative Memory, NLAM	非线性联想记忆
Neural Network, NN	神经网络

Principle Component Analysis, PCA	主成分分析
Partial Derivative Equation, PDE	偏微分方程
Probability Density Function, PDF	概率密度函数
Pixel-Mapping, PM	像素映射
Projections onto Convex Sets, POCS	凸集投影
Pixels Per Inch, PPI	每英寸像素数
Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR	峰值信噪比
Point Spread Function, PSF	点扩散函数
Root-Mean-Square Error, RMSE	均方根误差
Scale Conjugate Gradient, SCG	比例共轭梯度
Scatterometer Image Reconstruction, SIR	散射图像重建
Super Resolution Reconstruction, SRR	超分辨重建
Signal-to-Noise Ratio, SNR	信噪比
Traveling Saleman Problem, TSP	旅行商问题
Undersampled and Subpixel-Shifted, USS	欠采样和亚像素位移
Vector-Mapping, VM	向量映射

目 录

前言	1
缩写词	2
插图目录	3
插表目录	4
第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 成像模型	6
1.2.1 遥感图象的成像过程及其影响因素	6
1.2.2 成像模型及其分析	9
1.3 遥感图象质量恢复的技术途径及其理论依据	11
1.3.1 图象质量恢复途径及问题	11
1.3.2 图象质量恢复的理论依据	13
1.4 图象复原引论	15
1.5 图象超分辨率论	18
1.5.1 图象内插技术	21
1.5.2 基于局部谱变换特征的凸显技术	25
1.5.3 基于多核基集合的高分辨率图象重建技术	27
1.6 系统方案	31
1.6.1 系统方案的设计和原理框图	31
1.6.2 工作原理	33
1.7 小结和评述	34
第2章 遥感图象的先验信息提取	36
2.1 图象概率先验模型及其变换分析	36
2.1.1 图象概率先验模型	36
2.1.2 图象变换分析	39
2.1.3 频谱分析及频率混叠深度参数的定义与提取	44
2.2 图象模糊及其模糊函数的先验模型	51
2.2.1 图象模糊及其模糊参数分析	51

2.2.2	模糊函数的先验模型	55
2.3	图象噪声及其分析	59
2.3.1	噪声来源及其先验分析	59
2.3.2	噪声分析	61
2.4	图象云雾分析及其图象模型	65
2.5	成像调制传递函数及其影响因素分析	66
2.5.1	调制传递函数的基本概念和物理意义	66
2.5.2	调制传递函数的数学模型及其实验数据	68
2.6	图象配准技术及其帧间变换参数的提取	74
2.6.1	图象配准技术研究总体方案	74
2.6.2	基于 FT 的图象频域配准及其优化算法	75
2.6.3	基于光(学)流的鲁棒性高精度图象配准算法方案	85
2.6.4	基于不变特征的高精度图象配准算法方案	86
2.7	小结与评述	87
第 3 章	遥感图象复原处理技术研究	89
3.1	引言	89
3.2	图象模糊复原技术及其解模糊算法	90
3.2.1	图象解模糊实施方案	90
3.2.2	图象基本频域解模糊算法	91
3.2.3	有限支持域上图象盲目反卷积解模糊算法	104
3.3	图象噪声抑制技术及其去噪算法	128
3.3.1	引言	128
3.3.2	基于多帧融合的频域法图象去噪技术	129
3.3.3	基于 PDE 的扩散图象去噪技术	131
3.3.4	剔除遥感图象条带噪声的陷波带阻滤波器	146
3.3.5	改进的中值滤波器消除颗粒噪声算法	151
3.4	图象薄云薄雾的抑制技术	151
3.4.1	基于同态滤波的薄云薄雾抑制技术	152
3.4.2	基于小波多分辨分析的薄云薄雾抑制技术	156
3.4.3	两种抑制薄云薄雾方法的比较	160
3.5	小结与评述	161
第 4 章	频域图象超分辨处理技术研究	163
4.1	引言	163
4.2	单帧频域变换与补偿扩展超分辨处理技术研究	164

4.2.1	FFT 插值法的改进和频域变换增强技术的形成	165
4.2.2	单帧频域变换与增强技术方案及其精度分析	167
4.2.3	使用条件与理论极限	174
4.2.4	振铃的抑制和帧内频域补偿与扩展滤波器的设计	175
4.2.5	单帧频域变换与补偿扩展超分辨自适应算法	185
4.2.6	实验结果及其分析	186
4.3	图象频域解混叠超分辨处理技术研究	202
4.3.1	研究实施方案	202
4.3.2	多帧(源)频域解混叠的理论分析	203
4.3.3	单帧频域解混叠算法	210
4.3.4	实验结果及其分析	212
4.4	二至多帧频域融合超分辨算法研究	225
4.4.1	引言	225
4.4.2	频域融合超分辨算法的建立	225
4.4.3	实验结果及其分析	229
4.5	小结与评述	240
第 5 章	空域图象超分辨处理技术研究	242
5.1	引言	242
5.2	网格超分辨估计算法及其模块研究	244
5.2.1	低分辨率序列图象与高分辨率图象之间的空间关系	245
5.2.2	标准位移低分辨率图象的求解	247
5.2.3	空域递归迭代网格算法模型的建立	249
5.2.4	空域递归迭代网格算法模块	250
5.2.5	实验结果及其分析	252
5.3	MAP 估计算法及其算法模块研究	253
5.3.1	研究实施方案	253
5.3.2	图象的概率模型与估计	254
5.3.3	代价函数及其最小化估计	256
5.3.4	梯度下降的优化	257
5.3.5	循环递归迭代算法模块	259
5.3.6	实验结果及其分析	259
5.4	PMAP 估计算法模型及其改进算法研究	261
5.4.1	引言	261
5.4.2	PMAP/PML 估计基本算法模型	262

5.4.3	改进的 PMAP 估计算法	269
5.4.4	实验结果及其分析	274
5.5	POCS 估计算法模型及其计算流程研究	283
5.5.1	引言	283
5.5.2	POCS 估计算法的基础理论	284
5.5.3	POCS 估计基本算法和 RPOCS 估计鲁棒算法	287
5.5.4	实验结果及其分析	294
5.6	PMAP/POCS 融合最优算法的建立及其实验研究	298
5.6.1	引言	298
5.6.2	PMAP/POCS 融合的理论基础	299
5.6.3	PMAP/POCS 融合最优算法的建立	302
5.6.4	实验结果及其分析	310
5.7	小结与评述	321
第 6 章	神经网络图象超分辨技术研究	324
6.1	引言	324
6.2	神经网络技术基础	327
6.2.1	神经元及其激励函数	327
6.2.2	人工神经网络模型及其学习方法	331
6.3	BP 网模型及其学习算法	334
6.3.1	BP 网学习过程分析及其数学模型	334
6.3.2	BP 网基本学习算法及其局限性	337
6.3.3	比例共轭梯度学习算法	342
6.3.4	BP 网学习算法实现的保障及优化	352
6.4	网络训练样本图象的采集及其映射向量的获取	357
6.4.1	网络训练样本图象的采集	357
6.4.2	网络训练映射向量的构造方法	359
6.4.3	网络训练映射向量的数量和质量	362
6.5	BP 网结构的确定方法	363
6.6	单级训练图象超分辨 BP 网的建立和实验研究	366
6.6.1	结构的确定	366
6.6.2	网络参数的选择	368
6.6.3	图象超分辨 BP 网单级训练实验结果	370
6.6.4	单级训练图象超分辨 BP 网泛化应用实验结果与分析	372
6.7	三级训练图象超分辨 BP 网的建立和实验研究	375

插图目录

图 1.2.1	遥感图象成像过程示意图	7
图 1.2.2	遥感图象成像模型	9
图 1.5.1	几种常见的插值核函数示意图	23
图 1.5.2	FIR 插值法频谱示意图 ($P=3$)	24
图 1.5.3	图象频谱的二维振幅谱示意图	25
图 1.5.4	高频补偿滤波器的幅频响应示意图	26
图 1.5.5	获取插值核函数族的训练过程框图	28
图 1.5.6	基于多核基集合的高分辨图象重构过程原理框图	28
图 1.5.7	邻域抽取示意图	29
图 1.5.8	五角大楼的基集合插值效果图	31
图 1.6.1	遥感图象复原与超分辨率处理技术系统方案简图	32
图 1.6.2	遥感图象复原与超分辨率处理技术系统方案原理框图	32
图 2.1.1	图象频谱移位示意图	41
图 2.1.2	下采样图象的一维频谱高频部分及其频率混叠分析图	46
图 2.1.3	“资源二号”遥感图象的一维频谱高频部分分析图	48
图 2.1.4	1m 分辨率遥感图象的一维频谱高频部分分析图	49
图 2.2.1	图象模糊退化实验及其频谱分析	54
图 2.3.1	图象噪声污染实验及其频谱变化	63
图 2.4.1	薄云薄雾成像模型示意图	65
图 2.5.1	MFT(f)的一般形式示意图	68
图 2.5.2	线阵 CCD 光敏器件示意图	70
图 2.6.1	基于 FT 的多帧序列图象配准技术总体方案框图	75
图 2.6.2	用于图象配准仿真实验的原始图象	76
图 2.6.3	帧间不存在旋转时基于 FT 的图象频域配准算法仿真技术方案框图	77
图 2.6.4	帧间存在旋转时基于 FT 的图象频域配准算法仿真技术方案框图	78
图 2.6.5	基于全局运动模型的图象配准算法仿真方案简图	81
图 2.6.6	采用高斯低通滤波器优化的图象频域配准算法仿真方案框图	82
图 2.6.7	采用 R 低通滤波器优化的图象频域配准算法仿真方案框图	83
图 2.6.8	基于光流的鲁棒性高精度图象配准算法仿真方案	85
图 2.6.9	基于不变特征的高精度图象配准算法方案框图	86
图 3.2.1	遥感图象模糊分析及解模糊复原技术实施方案框图	91
图 3.2.2	图象基本频域解模糊复原仿真实验方案框图	94

图 3.2.3	高斯模糊 ($\sigma^2 = 0.8, 5 \times 5$, 不附加噪声) 图象基本频域反卷积解模糊算法仿真实验结果 (55%显示)	95
图 3.2.4	线性运动 ($\theta = 12^\circ$, 5 像素) 模糊噪声图象基本频域反卷积解模糊仿真实验结果 (55%显示)	97
图 3.2.5	线性运动模糊 ($\theta = 30^\circ$, 5 像素) 噪声图象基本频域反卷积解模糊算法仿真实验结果 (67%显示)	98
图 3.2.6	有噪高斯模糊 ($\sigma^2 = 0.8, 5 \times 5$) 图象基本频域反卷积解模糊算法仿真实验结果 (一) (55%显示)	100
图 3.2.7	有噪高斯模糊 ($\sigma^2 = 0.8, 5 \times 5$) 图象基本频域反卷积解模糊算法仿真实验结果 (二) (67%显示)	101
图 3.2.8	有噪 ($N(0, 10)$) 散焦模糊 (5×5 矩形) 图象基本频域反卷积解模糊算法仿真实验结果 (一) (55%显示)	102
图 3.2.9	有噪 ($N(0, 10)$) 散焦模糊 (5×5 矩形) 图象基本频域反卷积解模糊算法仿真实验结果 (二) (133%显示)	103
图 3.2.10	空域迭代盲目反卷积模糊图象复原算法框图	111
图 3.2.11	基于 FT 的迭代盲目反卷积模糊图象复原算法框图	114
图 3.2.12	有限支持域迭代盲目反卷积模糊图象复原仿真实验方案	115
图 3.2.13	空域迭代盲目反卷积算法对无噪散焦模糊图象复原仿真实验结果 (N 为迭代次数)	116
图 3.2.14	基于 FT 的迭代盲目反卷积算法对无噪散焦模糊图象复原实验结果 (N 为迭代次数)	117
图 3.2.15	两种盲目反卷积算法解散焦模糊 (不附加噪声) 复原图象的 PSNR 与迭代次数 N 的关系	118
图 3.2.16	空域迭代盲目反卷积算法对有噪散焦模糊图象复原仿真实验结果 (N 为迭代次数) (48%显示)	119
图 3.2.17	基于 FT 的迭代盲目反卷积算法对有噪散焦模糊图象复原仿真实验结果 (N 为迭代次数) (48%显示)	120
图 3.2.18	两种盲目反卷积算法解散焦模糊 (有噪) 复原图象的 PSNR 增量与迭代次数 N 的关系	121
图 3.2.19	有限支持域迭代 ($N=2$) 盲目反卷积算法解散焦模糊 (有噪) 复原图象仿真实验结果 (70%显示)	124
图 3.2.20	基于 FT 的迭代 ($N=2$) 盲目反卷积算法对真实遥感图象解模糊复原实验结果 (70%显示)	127
图 3.3.1	基于多帧融合的频域循环递归迭代去噪算法仿真实验结果 (66%显示)	130
图 3.3.2	基于 PDE 的九种扩散去噪算法仿真实验方案	138

图 3.3.3	基于 PDE 的扩散去噪算法处理高斯噪声图象的一组仿真实验结果 (51%显示)	139
图 3.3.4	基于 PDE 的扩散去噪算法处理泊松噪声图象的一组仿真实验结果 (51%显示)	140
图 3.3.5	改进的各向异性扩散去噪算法仿真实验结果	143
图 3.3.6	改进的各向异性扩散去噪算法对真实遥感图象的实验结果 (72%显示)	146
图 3.3.7	含条带噪声的 CBERS-2 三波段图象及其频谱分析图 (39%显示)	147
图 3.3.8	三种常见的陷波带阻滤波器示意图	148
图 3.3.9	陷波带阻滤波器 (图象中心部位为低频部分) 示意图	148
图 3.3.10	陷波带阻滤波器设计示意图	149
图 3.3.11	陷波带阻滤波器及其处理前后的图象 (39%显示)	150
图 3.4.1	基于同态滤波的图象薄云薄雾抑制技术实施方案框图	154
图 3.4.2	基于同态滤波的图象薄云薄雾抑制技术典型实验结果 (44%显示)	154
图 3.4.3	基于同态滤波的图象薄云薄雾抑制技术实验结果 (66%显示)	155
图 3.4.4	基于小波多分辨分析的图象薄云薄雾抑制技术实施方案	158
图 3.4.5	基于小波多分辨分析的图象薄云薄雾抑制应用实验结果 (64%显示)	159
图 3.4.6	基于小波多分辨分析的图象薄云薄雾抑制仿真实验结果 (72%显示)	160
图 4.2.1	FFT 插值 ($P=2$) 算法示意图	165
图 4.2.2	单帧图象频域变换与增强算法处理靶标图象提高分辨率效果比较 (51%显示)	167
图 4.2.3	单帧图象频域变换与增强算法对 1m 分辨率遥感图象的处理结果 (70%显示)	167
图 4.2.4	单帧频域变换与增强算法仿真技术方案	168
图 4.2.5	单帧频域变换与增强算法单向提高图象分辨率的实验结果	170
图 4.2.6	单帧频域变换与增强算法双向提高图象分辨率的实验结果	172
图 4.2.7	单帧频域变换与增强技术应用方案	172
图 4.2.8	单帧频域变换与增强算法处理前后的图象 (72%显示)	174
图 4.2.9	遥感图象的二维频谱和一维频谱分析	175
图 4.2.10	图象超分辨中抑制振铃技术实施方案框图	176
图 4.2.11	一维信号 FFT 插值法频域变换示意图	176
图 4.2.12	复杂程度不同的图象及其频谱分析图	177
图 4.2.13	单帧频域补偿与扩展滤波器一维基础函数响应和 p 指数变化的关系	179
图 4.2.14	一维频率补偿与扩展滤波器操作原理 (混叠的校正和补偿) 示意图 ($A=2$)	180
图 4.2.15	一维频域补偿与扩展滤波器和其他几种插值方法的性能实验效果比较	181
图 4.2.16	图象振幅谱方差 D_F 与指数 p 的关系	184