



遥感数据质量改善之 信息重建

沈焕锋 程青 李星华 曾超 张良培 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

遥感数据质量改善之信息重建

沈焕锋 程 青 李星华 曾 超 张良培 著

科 学 出 版 社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229,010-64034315,13501151303

内 容 简 介

本书针对遥感数据中死像元、厚云等带来的时空断续问题,阐明遥感影像缺失信息重建技术的理论基础、技术路线和方法体系。针对遥感数据的特点,将遥感缺失信息重建分为空域重建、时域重建、谱域重建和联合重建等几大类方法,并分别进行详细论述;此外,针对积雪产品、地表温度产品、全球臭氧产品等遥感产品的信息缺失问题,针对性地阐述顾及物理过程与地学规律的参量产品重建方法。

本书适合具有地球科学、信息科学背景的本科生、硕士生和博士生作为参考教材,也可作为遥感科学和信息科学工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

遥感数据质量改善之信息重建/沈焕锋等著. —北京:科学出版社,2018.1
ISBN 978-7-03-056264-7

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 006332 号

责任编辑:高 嵘 姜德君 / 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

*

开本:787×1092 1/16

2018年1月第一版 印张:16 1/4

2018年1月第一次印刷 字数:379 000

定价:128.00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遥感应用的广度与深度。由于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,取得了诸多可喜的研究成果。然而,由于遥感降质因素多样,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。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。作者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、厚云导致的地表缺失信息的重建问题。

本书是该套“三部曲”书籍的第三部,力图解决遥感数据中死像元、

厚云带来的时空断续问题,生成时空无缝的遥感数据与参量产品。在方法体系上,本书将遥感缺失信息重建分为空域重建、时域重建、谱域重建和联合重建等几大类。空域重建指的是仅依靠数据自身已知区域实现对未知区域的信息恢复,本书分别介绍小区域缺失信息重建、大区域缺失信息重建的理论与方法;谱域重建是利用其他谱段数据为辅助实现对缺失信息重建的一类方法,本书重点阐述针对 Aqua MODIS 数据像元缺失问题的处理方法;时域重建是利用多时相数据的互补信息进行相互填充的一类方法,本书依次研究低频次遥感数据与高频次遥感序列的无缝重建方法;在此基础上,对时-空-谱互补信息的联合重建方法进行充分的分析与探讨。除此以外,本书还根据积雪覆盖、臭氧浓度、地表温度等遥感参量产品的特点,针对性地研究顾及物理过程与地学规律的重建方法。

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(Send Image)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。全书由沈焕锋主笔与统稿,与程青、李星华、曾超、张良培合作完成。袁强强、李慧芳、李杰、岳林蔚等参与讨论并提出了宝贵建议,多名研究生在前期研究和本书撰写过程中做出了辛勤的工作,包括杨刚、彭晓琳、付文轩、李志伟、张成岳、陈佳佳等,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、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,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,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,由衷表示诚挚的谢意。

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委优秀青年科学基金项目“遥感信息与应用”(41422108)、面上项目“遥感影像大范围地表信息缺失区域的修复理论与方法研究”(41271376)、青年科学基金项目“低分影像辅助下的高分遥感影像厚云去除方法(41601357)”、国家 863 项目“星机地综合观测定量遥感融合处理与共性产品生产系统”(2013AA12A301)、“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 1 月

本书涉及的缩略词

- AE:autoencoder 自动编码器
- AG:asymmetric Gaussian 对称高斯函数法
- ARE:average relative error 平均相对误差
- AVHRR:advanced very high resolution radiometer 先进甚高分辨辐射仪
- BISE:best index slope extraction 最佳指数斜率提取方法
- BOS:Bregmanized operator splitting 布雷格曼算子分裂
- BSA:black-sky albedo 黑空反照率
- BP:basis pursuit 基追踪
- BRDF:bidirectional reflectance distribution function 双向反射分布函数
- CC:correlation coefficients 相关系数
- CCD:charge-coupled device 电子耦合元件
- CCM:community climate model 社会气候模型
- CNN:convolutional neural network 卷积神经网络
- CWF:changing-weight filter 变权滤波法
- DCT:discrete cosine transform 离散余弦变换
- DL:double logistic 双曲线函数
- DSR:downward shortwave radiation 下行短波辐射
- ECF:ecosystem curve fitting 生态系统曲线拟合法
- EOS:Earth Observation System 对地观测系统
- EROS:Earth Resources Observation and Science 地球资源观测系统数据中心
- ESA:European Space Agency 欧洲太空局
- ETM+:enhanced thematic mapper 增强型专题制图仪
- FOCUSS:focal underdetermined system solver 欠定系统局灶解法

- GAM:generalized additive model 广义加法模型
- HANTS:harmonic analysis of time series 谐波分析法
- HASM:high accuracy surface modeling 高精度曲面建模方法
- HMLLSF:histogram matching and local least squares fitting 直方图匹配的局部最小二乘拟合法
- 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
- ISCCP:International Satellite Cloud Climatology Project 国际卫星云气候计划
- KD:k-dimensional k 维
- KSVD:k singular value decomposition k 奇异值分解法
- LLHM:local linear histogram matching 局部直方图匹配方法
- LST:land surface temperature 地表温度
- MA:moving average method 移动均值滤波法
- MAE:mean absolute error 平均绝对误差
- MCTK:MODIS conversion toolkit MODIS 转化工具箱
- MOD:method of optimal directions 最优方向法
- MODTRAN:moderate resolution atmospheric transmission 中分辨率的大气传输模型
- MODIS:moderate resolution imaging spectroradiometer 中分辨率成像光谱仪
- MRE:mean relative error 平均相对误差
- MRF:Markov random field 马尔可夫随机场
- MSA:mean spectral angle 平均光谱角
- MSE:mean squared error 均方误差
- MVC:maximum value composite 最大值合成法
- MVI:mean-value iteration filter 均值迭代滤波法
- NASA:National Aeronautics and Space Administration 美国国家航空航天局
- NDSI:normlized difference snow index 归一化差分雪被指数
- NDVI:normlized difference vegetation index 归一化差分植被指数
- NSPI:neighborhood similar pixel interpolator 最邻近像元插值方法
- NR:ratio of noise reduction 噪声消除率
- NSIDC:National Snow and Ice Data Center 美国国家冰雪数据中心
- OMI:ozone monitor instrument 臭氧监测仪器
- OMP:orthogonal matching pursuit 正交匹配追踪
- PDE:partial differential equation 偏微分方程
- PSNR:peak signal to noise ratio 峰值信噪比
- QIR:quantitative image restoration 定量复原法

- RBF: radial basis functions 径向基函数
- RMEMR: robust M-estimator multiregression 稳健 M 估计多元回归法
- RMSE: root-mean-square error 均方根误差
- SG: savitzky-golay SG 滤波
- SK: simple Kriging 简单克里金法
- SLC: scan line corrector 扫描线校正器
- SNOWL: regional snowline mapping approach 区域雪线制图方法
- SP: sum of product 离均差乘积和
- SSD: sum of squared difference 差值的平方和
- SSIM: structural similarity index 结构相似性指标
- STMRF: spatio-temporal Markov random fields 时空马尔可夫重建方法
- SURFRAD: surface radiation budget observing network 地面辐射观测网
- TFFSRC: temporal fitting followed by spatial residual correction 基于残差校正的
时空联合重建法
- TSF: temporal spatial filter 时空滤波法
- TV: total variation 总变分
- UIQI: universal image quality index 通用质量评价指标
- USGS: United States Geological Survey 美国地质勘探局
- VI: vegetation index 植被指数
- VP: vantage-point VP 树
- WCLF: within-class local fitting 类内局部拟合法
- WLR: weighted linear regression 加权线性回归
- WSA: white-sky albedo 白空反照率

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 遥感信息重建的方法体系	3
1.3 研究内容	5
参考文献	7
第 2 章 小区域缺失信息的空域重建方法	10
2.1 空域重建的插值方法	10
2.1.1 确定性插值方法	10
2.1.2 地统计学方法	15
2.1.3 高精度曲面建模	19
2.2 空域重建方法的新进展	19
2.2.1 传播扩散法	20
2.2.2 变分法	21
2.2.3 样例填充法	23
2.2.4 机器学习方法	24
2.2.5 方法简要对比	24
2.3 基于多通道非局部总变分模型的重建方法	26
2.3.1 非局部处理模型基础	26
2.3.2 多通道非局部总变分重建方法	28
2.4 实验结果与分析	31

2.4.1 模拟数据实验	31
2.4.2 真实数据实验	36
2.5 本章小结	40
参考文献	40
第3章 大区域缺失信息的空域重建方法	44
3.1 引言	44
3.2 样例填充的基本思想与步骤	45
3.2.1 样例填充的基本思想	46
3.2.2 样例填充的关键步骤	46
3.3 基于块位移统计的高分辨率影像重建方法	50
3.3.1 全局优化填充方法	51
3.3.2 多标签图割优化求解算法	54
3.4 实验结果与分析	56
3.4.1 模拟数据实验	56
3.4.2 真实数据实验	58
3.5 本章小结	61
参考文献	61
第4章 遥感数据缺失信息的谱域重建方法	64
4.1 引言	64
4.1.1 Aqua MODIS 部分波段信息缺失	64
4.1.2 谱域重建的基本原理与思路	66
4.2 一元回归分析方法	68
4.2.1 全局多项式拟合法	68
4.2.2 局部最小二乘拟合法	68
4.2.3 类内局部拟合法	69
4.3 多元回归分析方法	76
4.3.1 预处理方法	76
4.3.2 重建方法	78
4.4 不同谱域重建方法的对比分析	79
4.5 本章小结	83
参考文献	83

第 5 章 低频次遥感数据的时域重建方法	85
5.1 时域重建的基本原理和方法	85
5.1.1 时域重建的基本原理	85
5.1.2 时域重建的研究现状	88
5.2 基于加权线性回归的时域重建方法	89
5.2.1 不同时相场景差异分析	89
5.2.2 加权线性回归重建模型	91
5.2.3 实验结果与分析	93
5.3 时相辅助下的全局优化填充重建法	100
5.3.1 基本思想	100
5.3.2 时空马尔可夫重建模型	101
5.3.3 实验结果与分析	103
5.4 本章小结	112
参考文献	112
第 6 章 高频次遥感数据的时域重建方法	115
6.1 引言	115
6.1.1 多时相合成方法	116
6.1.2 时域重建方法	117
6.1.3 主要限制与不足	119
6.2 时域分析与空域校正结合的重建方法	119
6.2.1 初始填充	120
6.2.2 时域重建	122
6.2.3 空域校正	123
6.3 地表反射率重建实验与分析	125
6.3.1 实验数据	125
6.3.2 结果与分析	126
6.4 本章小结	138
参考文献	139
第 7 章 时-空-谱联合的遥感信息重建方法	142
7.1 引言	142
7.2 稀疏表达理论与方法	143

7.2.1	稀疏表达	143
7.2.2	合成型稀疏表达	144
7.2.3	分析型稀疏表达	148
7.3	基于稀疏表达的时-空-谱联合重建方法	149
7.3.1	数据组织与预处理	149
7.3.2	合成型稀疏表达重建方法	152
7.3.3	分析型稀疏表达重建方法	153
7.4	实验分析	154
7.4.1	空-谱联合重建实验	155
7.4.2	时-空联合重建实验	158
7.4.3	时-空-谱联合重建实验	161
7.4.4	稀疏表达和其他方法对比实验	164
7.5	本章小结	166
	参考文献	166
第 8 章	积雪产品云覆盖区的信息重建方法	170
8.1	积雪产品简介	170
8.2	MODIS 积雪产品重建方法分类	171
8.2.1	光学-微波融合方法	171
8.2.2	空间互补方法	172
8.2.3	时相互补方法	172
8.2.4	时空互补方法	173
8.3	时空自适应加权重建方法	174
8.4	实验分析	176
8.4.1	新疆伊犁河流域实验	177
8.4.2	横断山区实验	182
8.5	本章小结	185
	参考文献	185
第 9 章	顾及物理约束的地表温度数据重建方法	188
9.1	地表温度数据缺失与重建方法现状	188
9.1.1	地表温度数据缺失问题	188
9.1.2	地表温度重建的研究现状	189

9.2 顾及物理约束的地表温度重建方法	190
9.2.1 理论依据	190
9.2.2 重建框架与方法	192
9.2.3 验证方法	195
9.3 实验与分析	196
9.3.1 实验数据介绍	196
9.3.2 模拟数据验证	202
9.3.3 SURFRAD 站点验证	207
9.4 本章小结	213
参考文献	213
第 10 章 全球臭氧总量产品的时空重建方法	217
10.1 概述	217
10.2 基于残差校正的时空联合重建方法	220
10.2.1 基于地理加权的时空重建	220
10.2.2 顾及臭氧异质性分布特征的残差校正	223
10.3 实验与分析	226
10.3.1 实验数据	226
10.3.2 评价与比较	227
10.3.3 讨论	241
10.4 本章小结	242
参考文献	242

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景与意义

遥感技术作为一种先进的对地观测手段,为人们提供十分重要的地球表层空间数据。然而,在遥感对地观测过程中,各种原因经常导致观测数据中出现信息缺失,严重影响了数据的时空连续性,为后续的判读、解译、监测带来了极大的应用困扰。根据不同的成因,遥感数据的信息缺失主要包括如下三个方面。

一是传感器故障导致的信息缺失问题。一个或多个探测器损坏,无法正常采集地物的辐射能量,导致影像上对应像元信息缺失,即死像元(Shen et al.,2009;Ratliff et al.,2007)。例如,搭载于 Aqua 卫星上的中分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectroradiometer,MODIS)在发射后不久就出现部分探测器损坏,使得 Aqua MODIS 每景影像上约 75%的信息缺失,如图 1.1(a)所示;搭载于 Landsat-7 卫星上的增强型专题制图仪(enhanced thematic mapper,ETM+)传感器,其扫描行校正器于 2003 年发生故障,此后 ETM+所获得的每景影像上都出现大概 22%的数据缺失,如图 1.1(b)所示;美国国家航空航天局 Aura 卫星上搭载的 OMI 传感器,是世界上首套采用高光谱推扫式的臭氧监测仪器,但由于传感器故障其反演的臭氧产品也出现了信息缺失(Peng et al.,2016),如图 1.1(c)所示。由此可见,传感器故障导致遥感数据信息缺失是一种较为常见的现象,通常会严重影响数据的后续应用。

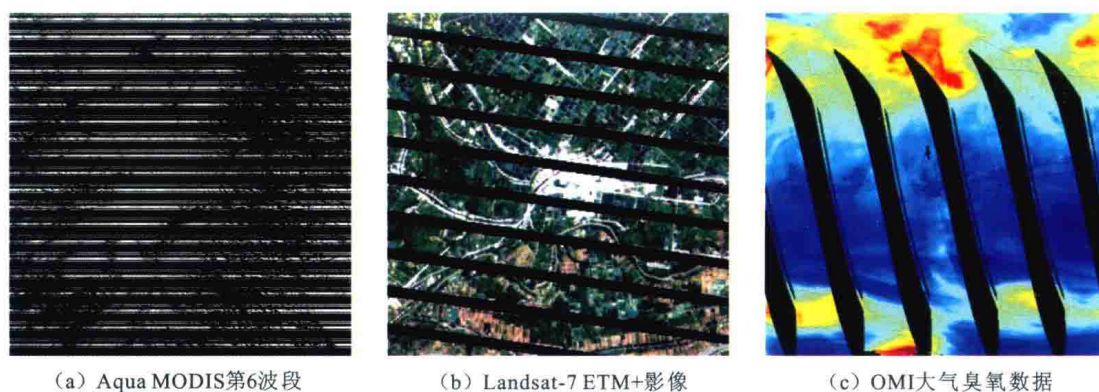


图 1.1 传感器损坏导致的影像数据缺失

二是遥感数据中的厚云覆盖问题。众所周知,光学、红外等遥感成像容易受到大气条件的影响,特别是当大气层中存在较厚的云层时,地物反射或发射的电磁波信号无法穿透云层,此时获取影像上的相应区域就会被厚云覆盖,导致地物目标的信息完全丢失,如图 1.2(a)所示。虽然云在大气遥感、气象学研究中是重要的观测信息,但在陆地遥感中则经常被视为一个非常大的降质问题。根据国际卫星云气候计划(International Satellite Cloud Climatology Project, ISCCP)提供的全球云量数据显示,云覆盖了地球表面 50% 以上的范围(侯舒维 等,2014),可见云覆盖对遥感应用的影响十分可观。由于原始观测数据受云影响,其反演的定量产品中也就不可避免地出现数据空缺,如图 1.2(b)和图 1.2(c)所示的植被指数、地表温度数据(Yang et al.,2015;Zeng et al.,2015;Yan et al.,2012),这往往使得相关要素的时空连续监测变得十分困难。

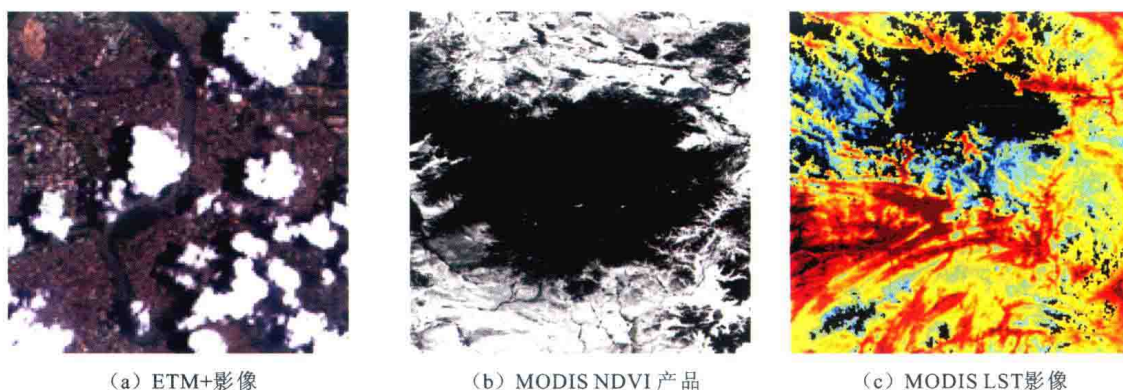


图 1.2 厚云导致的影像数据缺失

三是非成像因素导致、满足特定需求条件下的信息缺失。例如,在一些应用场景,需要将影像上的特殊目标进行移除,移除后的区域也可以看成一种信息缺失,需要进行填补。例如,大量公开的高分辨率卫星影像经常会暴露重要的军事目标,如图 1.3(a)所示,可能对国家安全利益产生影响(汪凌 等,2006),往往需要对公开的影像数据做预处理,将影像上重要的军事目标进行移除和掩盖,这样既不暴露军事目标,又不影响影像其他区域

信息的正常使用;另外,在很多高分辨率影像中,一些重要的地物(如图 1.3(b)中的斑马线)往往会被其他地物所掩盖,因此需要对这些干扰目标进行移除,恢复被覆盖的地物信息;此外,图 1.3(c)为栅格化的影像地图,如果需要得到原始的“干净”影像,就需要将影像地图上的地物注记去除。



图 1.3 遥感影像上某些特殊目标

遥感缺失信息重建就是针对遥感数据中存在的各种信息缺失问题,通过设计合适的处理模型与算法,实现缺失区域的数据恢复与信息重建,从而得到空间、时间或时空连续的无缝数据。需要说明的是,在图像处理与遥感领域也有其他类似的表述术语,如“死像元处理”“填充”“修补”“补绘”“修复”“补全”“去云”等(程青,2015;Cheng et al.,2014a,2014b;Zhu et al.,2012;Komodakis,2006),本书将它们统一表述为“缺失信息重建”,或简称为“信息重建”。

总而言之,遥感平台瞰万象,需祈探仪无恙障;光学成像更逼真,要盼天公不生云。在对地遥感观测系统中,探测仪器故障导致影像出现死像元的现象普遍存在,厚云覆盖已成为光学遥感成像中最为常见和严重的降质因素之一。各种因素导致的信息缺失问题,大大限制了遥感数据在各领域的应用潜力。因此,研究缺失信息的重建问题,获取时空无缝的遥感数据与参量产品,对遥感应应用具有十分重要的基础性意义。

1.2 遥感信息重建的方法体系

对遥感数据缺失区域进行重建时,一般需要利用已知信息作为信息源,建立信息源和缺失信息之间的转换关系,从而实现缺失数据的重建。通常按照信息来源的不同,将遥感数据重建方法分为如下几种类型(Shen et al.,2015)。

1. 空域重建方法

该类方法不需要其他辅助数据,仅仅依靠数据自身已知区域的信息作为补充源,利用空间相关性实现缺失区域的信息重建(Lorenzi et al.,2011;Peng et al.,2005)。该类方法中较为常规的是插值方法(Olivier et al.,2012;Yu et al.,2011;Ballester, et al.,2011;

Rossi et al., 1994), 逐渐又发展了扩散法(Maalouf et al., 2009; Bertalmio et al., 2000)、变分法(Shen et al., 2009; Chan et al., 2001)、样例填充法(Lorenzi et al., 2011; Crimimisi et al., 2004)等。空域方法一般适合重建小区域或细条带状的缺失数据; 对大区域的缺失数据往往难以奏效, 即使可取得较好的视觉效果, 也不能保证重建信息的准确度。

2. 谱域重建方法

当遥感影像上某些谱段存在数据缺失, 而其他谱段完好无损时, 可以利用谱域重建方法。该类方法利用其他谱段的数据作为互补信息源, 通过建立谱段之间的关系模型实现对特定谱段的重建处理。此类方法非常适合处理多/高光谱数据中的死像元问题(刘洋等, 2008; Zhang et al., 2002), 目前应用较多的是针对 Aqua MODIS 第 6 波段缺失数据的重建(Li et al., 2014a; Shen et al., 2014; Gladkova et al., 2012; Shen et al., 2011; Wang et al., 2006)。由于厚云对光学成像的各波段都会产生影响, 谱域重建方法通常不适合对厚云的处理。

3. 时域重建方法

极轨卫星的周期性重复观测、静止卫星的连续观测, 使我们可以获取同一地区不同时相的多次观测数据。基于时域互补信息的数据重建主要利用多时相数据作为互补信息源, 通过建立多时相数据之间的关系模型进行相互填补, 实现特定区域的信息重建。该类方法是当前研究和应用最为广泛的一类方法, 在遥感数据厚云去除(Li et al., 2016; Li et al., 2014b; Lin et al., 2013; Chen et al., 2011; 李炳燮等, 2010; Melgani, 2006)、死像元修复(如 Landsat-7 ETM+ SLC-off 数据)(Zeng et al., 2013; Storey et al., 2005)等方面都有较好的适用性。需要说明的是, 当地物覆盖类型发生变化时, 该类方法重建结果的可信度会受到较大影响。

4. 时-空-谱联合重建方法

如果谱段互补信息和时相互补信息同时存在, 再加上数据自身的空间互补信息, 可以将不同的时间、空间和光谱信息联合利用, 共同实现对缺失信息的重建处理(Li et al., 2015), 即时-空-谱互补的信息重建。该类方法联合利用多个维度的互补信息, 一般能达到较为稳定的信息重建; 但由于对辅助数据的要求较高, 该类方法还有较大的研究空间。

总之, 空间维、时间维、光谱维互补信息是遥感缺失数据得以重建的基础(图 1.4), 互补信息可以来源于同一个传感器, 也可以来源于不同的传感器(图 1.5), 甚至还可以考虑利用站点数据和模式模拟数据作为互补信息来源。值得说明的是, 针对遥感参量产品的处理, 除了考虑基本的时、空、谱关系, 还需进一步考虑参量特殊的物理特性及地学分布规律, 以期获得更为准确的重建结果。