



北京市高等教育精品教材立项项目



高级遥感数字图像处理 数学物理教程

晏磊 赵红颖 刘绥华 王明志 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



北京市高等教育精品教材立项项目



高级遥感数字图像处理 数学物理教程

晏

磊

赵红颖

刘安华

王明志

编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

高级遥感数字图像处理数学物理教程/晏磊等编著.—北京: 北京大学出版社, 2016.12

ISBN 978-7-301-26650-2

I. ①高… II. ①晏… III. ①遥感图象—数字图象处理—数学物理方法—教材
IV. ①TP751.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 309586 号

- | | |
|-------|--|
| 书 名 | 高级遥感数字图像处理数学物理教程
GAOJI YAOGAN SHUZI TUXIANG CHULI SHUXUE WULI JIAOCHENG |
| 著作责任者 | 晏磊 赵红颖 刘绥华 王明志 编著 |
| 责任编辑 | 王剑飞 |
| 标准书号 | ISBN 978-7-301-26650-2 |
| 出版发行 | 北京大学出版社 |
| 地 址 | 北京市海淀区成府路 205 号 100871 |
| 网 址 | http://www.pup.cn 新浪微博: @北京大学出版社 |
| 电子信箱 | zpup@pup.cn |
| 电 话 | 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62765014 |
| 印刷者 | 北京大学印刷厂 |
| 经 销 者 | 新华书店 |
| | 730 毫米×980 毫米 16 开本 26 印张 480 千字 |
| | 2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷 |
| 定 价 | 88.00 元 |

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

图书如有印装质量问题, 请与出版部联系, 电话: 010-62756370

内 容 简 介

本书是北京大学研究生必修课“高级遥感数字图像处理”教学和研究生专题研讨相结合历经十八年的结晶,力图为遥感数字图像处理领域提供一部尽可能详细的数学物理手册。

全书包括三部分。第一部分系统与整体处理基础,是遥感数字图像处理的出发点,由第一至四章构成,包括遥感数字图像处理的系统概述、系统支撑条件,以及遥感数字图像整体处理分析的数学基础和物理学基础。第二部分像元处理理论与方法,是遥感数字图像处理的核心和细节所在,由第五至十章构成,包括遥感数字图像像元处理理论 I——时空域卷积线性系统、理论 II——时频域卷-乘傅里叶变换、理论 III——频域滤波、理论 IV——时域采样,以及遥感数字图像变换基础 I——时空等效正交基、变换基础 II——时频组合正交基。第三部分技术与应用,是遥感数字图像处理的目的和落脚点,由第十一至十六章构成,包括遥感数字图像处理技术 I——复原降噪声、技术 II——压缩减容量、技术 III——模式识别(图像分割)、技术 III——模式识别(特征提取及分类)、技术 IV——彩色变换与三维重建以及应用举例。

本书可用于空间信息、遥感等地球观测领域研究人员学习、教学,是理解其他遥感图像处理书籍中数学物理本质和相互关系的重要参考书。

序

遥感是一门以电磁波为媒介、以非接触方式对人们所感兴趣的对象进行观测,进而定量分析其存在和变化、把握其特性的科学技术。遥感也是一个复杂的信息转化过程,先将通过遥感器或传感器获得的信号转换成数据,再从数据到信息,从信息到知识,从而丰富了人们对事物的认知。在大多数情况下,遥感主要是通过地物的图像或影像来展现丰富多彩的世界,经信息处理——主要是图像处理技术来提取、表达和展现地物的形态和状态,挖掘和分析其特征,研究其变化规律,因此遥感图像处理就成为人们通过遥感获取知识的必由之路,并成为人们认识世界的一个重要途径,也是遥感科技工作者的必修课程。自遥感问世以来,图像处理技术就一直伴随其发展而发展。目前,遥感图像处理的各项技术及软件已充斥于市,其中包括各种商用软件系统以及因不同需要而自行开发的技术系统,各项技术十分成熟,在遥感市场上也占了一定的份额。各类遥感图像处理的书籍也随处可见,且技术人员已经开发出种类繁多的遥感图像处理功能软件,但是这些书籍或软件多偏重于让人们学习技术方法和掌握程序本身,大多处于“知其然,不知其所以然”的状态,而针对遥感图像处理数学和物理本质方面的解析和探讨却较少,系统化理论与方法论方面的论著就更是凤毛麟角了。这就导致目前遥感数字图像处理过于技术化、程序化,难以揭示遥感信息的本质及其成像物理特征和数学表达的因果逻辑关系,其结果是基于应用的遥感数字图像处理技术缺乏系统的理论支撑,进而影响了此项技术的深化和提高。

本书的第一作者晏磊是一位富于钻研精神又十分较真的教授,凡事总愿究其因果。自1998年他在北京大学开设“高级遥感数字图像处理”研究生课程以来,始终本着对教学工作的责任心,结合遥感应用的实际,系统地、持续地研究遥感数字图像处理的技术方法,并不断提高和完善所讲授的课程。正是在授课的实践中,他深感目前遥感数字图像处理领域存在的数学物理基础性、理论性和系统性偏弱的问题,从而精益求精、锲而不舍地积极探索遥感数字图像处理的数理基本理论方法,把授课的重点放在将逐个图像处理技术理论化和系统化问题上,且在授课方法上力求与研究生共同探究与归纳,对一些重要问题开展专题研究。这种互动式的教学方法对于提炼重要的理论和技术问题,使得师生达到高度共识,更使得学生明白其中道理,以提升教学质量,大有补益。因此可以说,《高级遥感

《数字图像处理数学物理教程》一书实际上是在不断总结教学经验和与历届研究生展开专题研究的基础上,经 18 年刻苦努力所形成的北京市研究生精品教材。该书包含了作者和一批又一批研究生的辛勤工作和心血,是教授潜心教学、师生共同探索的成果,由长期经验积累、知识积淀和心血凝聚而成。因此,本书获得北京市高等教育精品教材立项项目的资助也就顺理成章了。

本书系统化地提炼了遥感数字图像处理的基本技术方法,并通过数学的语言来诠释遥感数字图像处理的物理本质,是遥感图像处理技术的理论提升。与此同时,本书又以丰富的应用实例对遥感数字图像处理理论方法进行验证,具有应用实践的支持。本书涉猎面广,内容深入全面,力求通俗易懂,是对遥感数字图像处理方法技术从数学基础和物理本质来进行深入分析的一个创新尝试。本书主要阐述在遥感中占主导地位的光学图像处理,而对微波遥感(包括主动的合成孔径雷达、激光三维成像和被动的微波辐射影像处理)涉及较少。这虽是本书有待完善的地方,但能如此全面、深入地论述光学遥感图像处理的数理基础问题也实属难能可贵。

该书可以作为从事遥感数字图像处理的科研、教学人员全面了解和提升该技术和相关方法的参考书,也可以作为遥感空间信息技术和应用领域教师、学生、科研人员、工程技术人员、生产企业工程师和遥感应用专家在遥感数字图像处理领域的一本案头手册。

我很高兴看到本书的出版,更希望它能对我国遥感数字图像处理及遥感应用水平的提高、人才的培养和成长起到良好的促进作用。

是为序。



中国科学院院士

北京大学遥感与地理信息系统研究所所长

2015 年 9 月于燕园

前 言

本书聚焦于空间信息领域的遥感数字图像处理,并力图为遥感数字图像处理领域提供一部尽可能详细的数学物理教程.全书包括三部分:第一部分系统与整体处理基础是遥感数字图像处理的基础,由第一至四章构成;第二部分像元处理理论与方法是遥感数字图像处理的核心和细节所在,由第五至十章构成;第三部分技术与应用是遥感数字图像处理的手段和目的,由第十一至十六章构成.

第一部分 系统与整体处理基础 这部分主要介绍对遥感图像的整幅处理,在提高遥感图像整体水平的同时,不改变遥感图像内部的相互关系,是第二部分逐点处理的基础,具体内容如下:第一章是遥感数字图像处理的系统概述,主要包括遥感数字图像处理的整体构架、细节内涵及应用外延,以建立遥感数字图像处理系统的全局概念.第二章是遥感数字图像处理分析的系统支撑条件,阐述遥感数字图像处理整体分析的第一步,即系统支撑条件对图像性能的影响,包括图像的输入获取、输出显示和处理软件设计等.第三章是遥感数字图像整体处理分析的数学基础,利用基于直方图和卷积理论的图像整体性能分析和改善方法(即图像预处理),以尽可能消除图像整体不合理表象特征(即“治标”),而无论它们根源如何.第四章是遥感数字图像整体处理分析的物理学基础.影响遥感影像整体质量的主要因素来自成像过程,它们无法在预处理中人为改变,必须通过物理成像过程的“治本”分析而改变.这样就实现了遥感图像整体处理的“标本兼治”,为本书第二部分的图像像元处理奠定系统和整体处理的基础.

第二部分 像元处理理论与方法 数字图像的最大特点是可以对其各个离散像元进行处理分析.在第一部分介绍图像预处理的基础上,第二部分将给出对每个像元进行分析、处理和加工的方法,是遥感数字图像处理分析的核心,体现了遥感数字图像像元处理的本质内容,具体内容如下.第五章是遥感数字图像像元处理理论 I——时空域卷积线性系统,阐明遥感数字图像的线性系统惯性延迟导致的卷积效应是客观存在的,并建立卷积理论.第六章是遥感数字图像像元处理理论 II——时频域卷·乘傅里叶变换,介绍时间域与其倒数频率域的互为对偶、互为卷积·简单乘积变换关系,实现时频转换的傅里叶变换理论.第七章是遥感数字图像像元处理理论 III——频域滤波,建立频域滤波理论,以实现所需要不同频率尺度信息的提取保留方法.第八章是遥感数字图像像元处理理论 IV——

时域采样,将自然世界中连续的空间信息通过采样转化为计算机处理所需的离散信息,建立香农采样定理及相关理论.第九章是遥感数字图像像元变换基础 I——时空等效正交基,建立基函数、基向量、基图像的线性表征理论,说明傅里叶变换等所有遥感数字图像处理的传输、存储和压缩变换的数学本质.第十章是遥感数字图像像元变换基础 II——时频组合正交基,通过同一图像局部窗口压缩和展开来提取图像的时频特性,即小波变换,本质是实现了时频域信息的统一.

第三部分 技术与应用 这部分按照遥感数字图像处理的技术流程,介绍了主要步骤的原理、方法及实现过程之数学物理本质,具体内容如下.第十一章是遥感数字图像处理技术 I——复原降噪声,其数学物理本质是去除数字图像处理或输入的卷积效应、等效噪声.第十二章是遥感数字图像处理技术 II——压缩减容量,即在保证图像复原的前提下,去除冗余数据并突出有用信息.一般需要对图像进行压缩处理,有两类图像压缩:一是基于信息熵去冗余极限理论的无损压缩;二是基于率失真函数理论的有损压缩,即在工程误差允许的前提下用最小量存储数据保留尽可能多的有用信息.第十三章是遥感数字图像处理技术 III——模式识别(图像分割),图像信息识别是遥感数字图像处理的最重要目的.为了提取图像中的有用信息,需要对图像进行模式识别处理,模式识别一般分为三大步骤:特征“寻找”“提取”和“归类”,即图像分割(遥感应用的手段,本章阐述)、特征提取与判断分类(遥感应用的目的,第十四章阐述).第十四章是遥感数字图像处理技术 III——模式识别(特征提取及分类),由此实现遥感应用的根本目标,即目标对象的识别.第十五章是遥感数字图像处理技术 IV——彩色变换与三维重建.在对遥感图像进行恰当的处理并提取出有用信息之后,如何对信息进行合适的表达以使图像更适合于人眼的观看,或使图像更接近于真实世界呢?这就需要对图像处理结果进行恰当的色彩变换与三维重建.第十六章是遥感数字图像处理的应用举例,介绍遥感数字图像处理的四个典型应用,以加强和深化对遥感数字图像处理本质方法的理解,并以此证明本书给出的图像总体处理方法、图像像元处理理论和重要技术手段的有效性.

目 录

第一部分 系统与整体处理基础

第一章 遥感数字图像处理系统概述	(3)
1.1 遥感系统	(3)
1.2 遥感数字图像	(8)
1.3 遥感数字图像处理	(17)
1.4 本书框架	(20)
参考文献	(21)
第二章 遥感数字图像处理分析的系统支撑条件	(23)
2.1 数字图像传感器	(24)
2.2 图像数字化输入	(30)
2.3 数字图像显示	(33)
2.4 遥感图像的处理软件及设计	(37)
2.5 小结	(40)
参考文献	(41)
第三章 遥感数字图像整体处理分析的数学基础	(42)
3.1 灰度直方图与概率本质	(43)
3.2 点运算与函数变换本质	(46)
3.3 代数运算与卷积本质	(50)
3.4 几何运算与矩阵本质	(53)
3.5 小结	(65)
参考文献	(67)
第四章 遥感数字图像整体处理分析的物理学基础	(69)
4.1 成像系统的模型与光波的传输	(70)
4.2 光学系统的传递函数	(75)
4.3 光学成像系统的评价指标	(80)
4.4 遥感影像的绝对辐射定标	(87)
4.5 小结	(91)

参考文献	(92)
------------	------

第二部分 像元处理理论与方法

第五章 遥感数字图像像元处理理论 I ——时空域卷积线性系统	(97)
5.1 线性系统的定义	(98)
5.2 卷积的定义与性质	(100)
5.3 卷积的计算与表达	(105)
5.4 与卷积相关的五种基本类型函数及关系	(115)
5.5 卷积滤波	(118)
5.6 小结	(121)
参考文献	(122)
第六章 遥感数字图像像元处理基本理论 II ——时频域	
卷-乘傅里叶变换	(124)
6.1 时间域与频率域转换对应的数学基础	(125)
6.2 傅里叶变换的特殊处理方法	(133)
6.3 图像像元处理中的傅里叶变换	(137)
6.4 傅里叶变换在图像像元处理中的应用举例	(141)
6.5 小结	(146)
参考文献	(149)
第七章 遥感数字图像像元处理理论 III ——频域滤波	(151)
7.1 滤波器及分类	(152)
7.2 线性滤波器	(155)
7.3 最优线性滤波器	(160)
7.4 非线性滤波器	(166)
7.5 小结	(170)
参考文献	(172)
第八章 遥感数字图像像元处理理论 IV ——时域采样	(174)
8.1 采样和插值	(175)
8.2 采样定理的二维图像推广	(182)
8.3 频谱截取与分析	(187)
8.4 混叠误差和线性滤波	(193)
8.5 数字处理	(198)
8.6 小结	(201)
参考文献	(203)

第九章 遥感数字图像像元变换基础 I——时空等效正交基	(205)
9.1 线性变换	(206)
9.2 基函数、基向量与基图像	(208)
9.3 基于基函数、基向量与基图像的任意图像线性表征及变换	(210)
9.4 基于基函数、基向量与基图像的哈达玛变换及实例	(218)
9.5 小结	(223)
参考文献	(225)
第十章 遥感数字图像像元变换基础 II——时频组合正交基	(226)
10.1 时频分析与小波变换	(227)
10.2 连续小波变换与级数展开	(228)
10.3 离散小波变换	(233)
10.4 小波变换应用	(241)
10.5 小结	(245)
参考文献	(246)

第三部分 技术与应用

第十一章 遥感数字图像处理技术 I——复原降噪声	(249)
11.1 图像退化原理与退化误差二要素	(250)
11.2 经典复原滤波器的数学本质及去卷积运算	(255)
11.3 线性代数复原和限制较少的复原	(259)
11.4 多视复原和滤波复原(以 SAR 为例)	(262)
11.5 遥感图像的超分辨率复原	(268)
11.6 图像复原软件环节模型实现方法	(270)
11.7 小结	(276)
参考文献	(278)
第十二章 遥感数字图像处理技术 II——压缩减容量	(280)
12.1 压缩的意义及常用压缩方法	(281)
12.2 熵编码与无损压缩算法	(284)
12.3 率失真函数与有损压缩算法	(288)
12.4 图像随机场的空间对象有损压缩理论	(295)
12.5 小结	(301)
参考文献	(304)
第十三章 遥感数字图像处理技术 III——模式识别(图像分割)	(305)
13.1 图像分割概述	(306)

13.2	用阈值进行图像分割	(307)
13.3	基于模板的图像边界分割	(313)
13.4	区域生长与分裂合并	(321)
13.5	数学形态学图像处理	(323)
13.6	分割图像的结构化	(325)
13.7	小结	(327)
	参考文献	(328)
第十四章 遥感数字图像处理技术Ⅲ——模式		
	识别(特征提取及分类)	(330)
14.1	特征提取及分类概述	(331)
14.2	遥感图像的特征测量	(332)
14.3	曲线与表面拟合	(338)
14.4	遥感图像目标的分类识别	(343)
14.5	错误率估计	(347)
14.6	小结	(347)
	参考文献	(349)
第十五章 遥感数字图像处理技术Ⅳ——彩色变换与三维重建		
15.1	彩色变换与矢量空间表达	(351)
15.2	三维图像重建的数据基础——二维图像(序列)	(359)
15.3	三维图像重建的成像基础——断层扫描技术	(361)
15.4	三维图像重建的参数基础——立体测量技术	(365)
15.5	小结	(375)
	参考文献	(376)
第十六章 遥感数字图像处理的应用举例		
16.1	例一:遥感数据的向量基表达	(379)
16.2	例二:遥感影像的几何校正	(382)
16.3	例三:遥感影像的阈值分割技术	(390)
16.4	例四:遥感影像的最小噪声分离变换	(394)
16.5	小结	(399)
	参考文献	(400)
后记		
致谢		

第一部分 系统与整体处理基础

这部分是遥感数字图像处理的出发点,由第一至四章构成,具体如下:

第一章主要包括遥感数字图像处理的整体构架、细节内涵及应用外延,以建立遥感数字图像处理系统的全局概念.

第二章着重阐述了遥感数字图像处理整体分析的第一步,即系统支撑条件对图像性能的影响,包括图像输入的获取、输出显示和处理软件设计等.

第三章利用合理的数学方法可以对图像进行分析,并使其整体性能得到改善,即图像预处理.图像预处理可以尽可能地消除图像整体的不合理表象特征,即“治标”,而不论它们根源如何.

第四章介绍影响遥感影像整体质量的主要因素来自成像过程,它们无法在图像预处理中被人为改变,必须通过物理成像过程的“治本”分析而改变,从而实现遥感图像整体处理的“标本兼治”,为本书第二部分图像像元处理奠定系统和整体处理的基础.

第一章 遥感数字图像处理系统概述

章前导引 本章是对遥感数字图像处理(remote sensing digital image processing)系统的总体描述,包括遥感数字图像处理的整体构架、细节内涵及应用外延。本章不仅为读者建立了遥感数字图像处理系统的全局概念,并为本书其他章节的论述和展开奠定了基础。

对地遥感作为采集地球数据及其变化信息的重要手段,在世界范围内得到了广泛的应用,但是遥感学科的酝酿和积累却经历了几百年的历史。作为技术学科,它是在现代物理学、空间科学、计算机技术、数学方法和地球理论科学的基础上逐步发展起来的一门新兴的综合性、交叉性学科。^[1]

目前,遥感平台、传感器、遥感信息的处理、遥感应用都得到长足的发展,特别是遥感信息处理的全数字化、可视化、智能化和网络化方面都有了很大的提升和创新。但是,这仍不能满足广大用户需求,日益丰富的遥感信息还没有被充分地挖掘处理。遥感信息的处理,特别是遥感数字图像的处理,已成为遥感技术研究的核心问题之一。

本章内容具体如下:遥感系统(第 1.1 节),主要包括遥感信息采集系统(remote sensing data acquisition system)和遥感数字图像处理系统,说明了遥感数字图像在遥感系统中形成的根源和不可或缺的作用;遥感数字图像(第 1.2 节),主要包括遥感数字图像的概念、特点、分辨率和格式等内容;遥感数字图像处理(第 1.3 节),主要介绍遥感数字图像处理方法和遥感图像的反演;本书框架(第 1.4 节),主要介绍整本教程的结构和内容及框架。

1.1 遥感系统

遥感系统是遥感数字图像产生的前提和基础,本节主要包括两大部分:遥感信息采集系统和遥感数字图像处理系统。本节系统性地介绍了遥感数据从获取到处理的整个过程,说明了遥感数字图像在遥感系统中形成的根源和重要地位,介绍了遥感的原理、类型、遥感信息的特点及数字化处理过程。

1.1.1 遥感信息采集系统

遥感信息采集系统是通过各种遥感技术进行数据采集的系统。

1. 遥感原理及遥感的电磁谱段类型

(1) 遥感原理.

遥感是根据不同物体对波谱产生不同响应的原理,利用传感器从空中来探测地表物体(简称地物)对电磁波的反射,从而提取这些物体的信息,完成远距离识别物体.

(2) 地物的波谱特征.

遥感影像被划分为最小的单位称做图像元素,简称为像素或像元(pixel).遥感影像中每个像元的亮度值代表该像元中地物的平均辐射值,它随着地物的成分、纹理、状态、表面特征及所使用的电磁波段的不同而变化,这种随着上述因素变化而变化的特征称为地物的波谱特征.^[2]应当指出的是,图像的亮度是经过量化的辐射值,是一种相对的量度,不同地物在同一波段间的亮度差异及同一地物在不同波段间的亮度差异则构成了地物的波谱信息,因而不同的电磁波段也可以反映地物间的差异和不同特征.^[3]

(3) 遥感的电磁谱段类型.

目前,应用在遥感中的电磁波段主要有以下几种.^[4,5]

① 可见光遥感.

这是应用比较广泛的一种遥感方式.对波长为 $0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$ 的可见光的遥感一般采用感光胶片(图像遥感)或光电探测器作为感测元件.可见光摄影遥感具有较高的地面分辨率,但只能在晴朗的白昼使用.

② 红外遥感.

此又分为三种:一是近红外或摄影红外遥感,波长为 $0.7\sim 1.5\ \mu\text{m}$,用感光胶片直接感测;二是中红外遥感,波长为 $1.5\sim 5.5\ \mu\text{m}$;三是远红外遥感,波长为 $5.5\sim 1000\ \mu\text{m}$.中、远红外遥感通常用于遥感物体的辐射,具有昼夜工作的能力.常用的红外传感器是光学机械扫描仪.

③ 多-高谱段遥感.

利用几个或多个不同的谱段同时对同一地物(或地区)进行遥感,从而获得与各谱段相对应的各种信息.将不同谱段的遥感信息加以组合,可以获取更多的有关物体的信息,有利于判读和识别.常用的多-高谱段传感器有多-高谱段相机和多-高光谱扫描仪.多光谱主要指谱段宽度在几十~几百纳米,高光谱主要是指谱段宽度在几~十几纳米,超高(或叫高高)光谱主要是指谱段宽度在 1nm 或更高精细尺度.

④ 紫外遥感.

对波长 $0.3\sim 0.4\ \mu\text{m}$ 的紫外光的主要遥感方法是紫外摄影.

⑤ 微波遥感.

这是指对波长 $1\sim 1000\ \mu\text{m}$ 的微波的遥感.微波遥感具有昼夜工作能力,但空

间分辨率低. 雷达是典型的主动微波系统, 常采用合成孔径雷达作为微波遥感器.

现代遥感技术的发展趋势是: 由紫外谱段逐渐向 X 射线和 γ 射线扩展, 从单一的电磁波扩展到声波、引力波、地震波等多种波的综合. 可见光及近红外影像、热红外影像和雷达影像在成像原理及影像特征方面的特点与差异总结如表 1.1 所示.

表 1.1 可见光及近红外影像、热红外影像、雷达影像的特点总结

成像方式	可见光及近红外线影像	热红外线影像	雷达影像
波段	0.4~0.5 μm	8~10 μm	1~1000 mm
获取条件	白天	白天、夜晚	白天、夜晚
获取方式	被动式	被动式	主动式
穿透云雾能力	无	有	有
传感器类型	摄影类型、扫描类型	扫描类型	雷达、非图像类型
投影方式	中心投影	中心投影	斜距投影
物理意义	地物反射的太阳辐射	地物发射辐射	地物后向回波强度
图像的空间分辨率	瞬时视场宽度 $S = \frac{H}{f}D$	瞬时视场宽度 $S = \frac{H}{f}D$	距离向: $R_r = \frac{rC}{2} \sec\beta$ 方位向: $R_a = \frac{d}{2}$
图像的辐射分辨率	信号大于 2~6 倍 $P_{\text{EN}} = \frac{P}{S/N} = \frac{N}{R}$	地面温度大于 2~6 倍 $\Delta T_{\text{EN}} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{EN}}}{\epsilon\sigma}}$	信号大于 2~6 倍 $P_{\text{EN}} = \frac{P}{S/N} = \frac{N}{R}$
图像的光谱分辨率	成像光谱仪的波段数达 386 个, 每个波段的间隔小到 5 nm		单波段, 无光谱分辨率
图像的时间分辨率	时间分辨率是指对同一地区重复获取图像所需的时间间隔		

2. 遥感信息特点

遥感信息不仅具有地物和不同电磁波段的波谱信息, 而且还具有成像瞬时地物的空间信息和形态特征, 即时空信息. 因此不同时相遥感图像具有光谱信息与空间信息的差异.

空间信息的差异主要体现在空间频率信息、边缘和线性信息、结构或纹理以及几何信息等信息上. 空间信息是通过图像亮度值在空间上的变化反映出来的. 图像中有实际意义的点、线、面或区域的空间位置、长度、面积、距离等量度都属于空间信息. 纹理是遥感图像中重要的空间信息之一, 用它可以辅助图像的识别与地物属性的提取. 此外空间结构信息也是遥感中非常有用的信息. 遥感数字图像处理中, 增强和提取空间结构信息是图像信息增强处理的重要内容. [3]

但遥感图像信息的记录是成像瞬时的地物现状的记录, 许多地物是具有时相变化的, 一是自然变化过程的发生、发展和演化过程; 二是节律, 即事物的发展在时间序列上表现出某种周期性重复的规律, 亦即地物的波谱信息和空间信息