



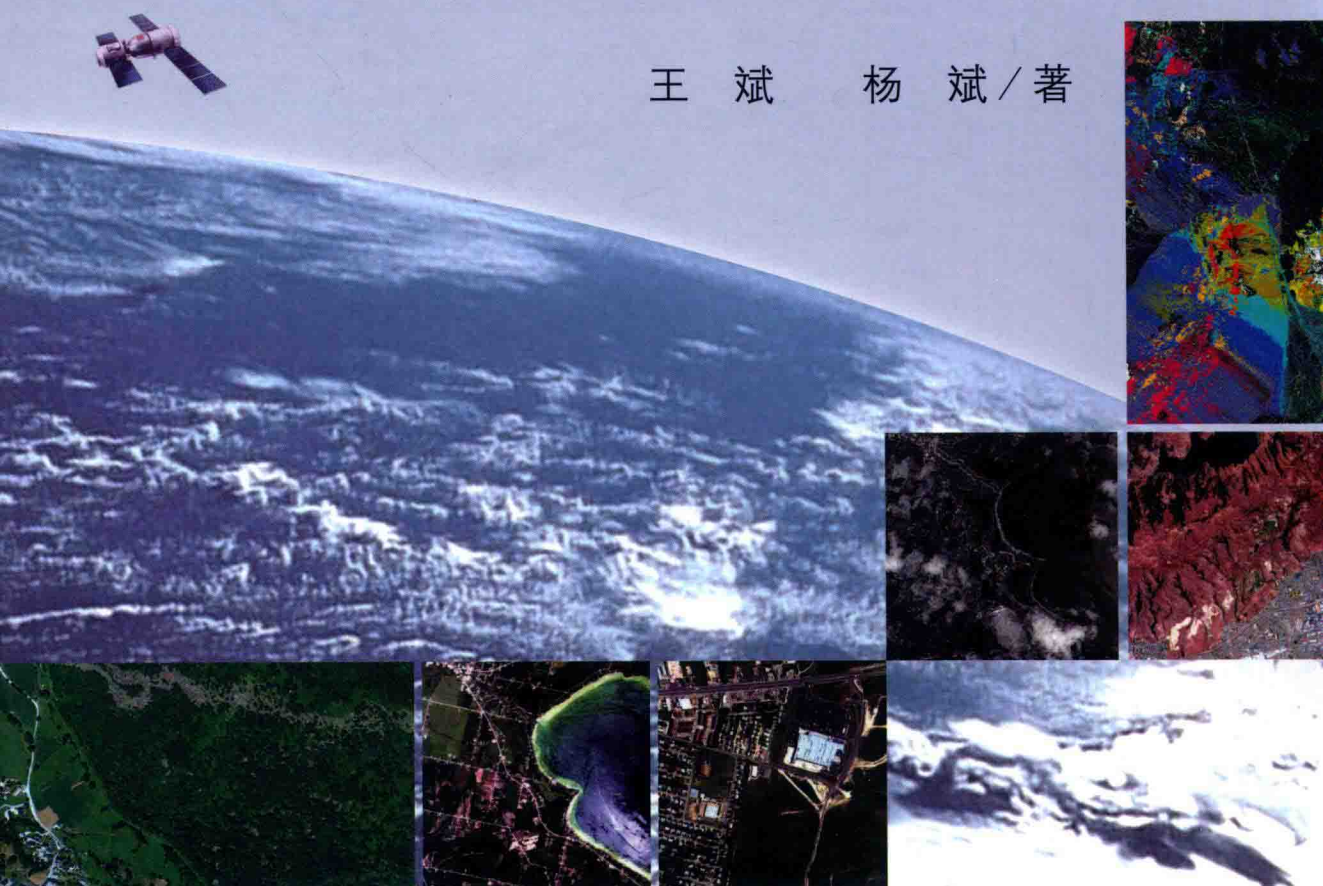
空间微波遥感研究与应用丛书

丛书主编 姜景山 吴一戎 金亚秋

高光谱遥感图像解混 理论与方法

——从线性到非线性

王 斌 杨 斌 / 著



 科学出版社

国家科学技术著作出版基金资助出版

空间微波遥感研究与应用丛书

高光谱遥感图像解混 理论与方法

——从线性到非线性

王斌 杨斌 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

高光谱遥感图像解混技术作为从高光谱遥感数据中有效提取有用信息的重要途径,近年来格外受到重视,其相应的研究也一直是高光谱遥感领域的研究前沿和热点。本书简要介绍了高光谱遥感图像的特点,在总结国内外相关研究基础上,结合著者所在团队多年来取得的研究成果,从线性到非线性,系统地整理和介绍了高光谱遥感图像解混这一研究方向的理论与方法,反映了当前该研究方向的研究现状和最新进展。

本书可以作为高等院校遥感专业及相关专业本科、研究生的专业参考书,也可供从事高光谱遥感与应用研究、信号与信息处理等相关学科的科研与专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高光谱遥感图像解混理论与方法:从线性到非线性/王斌,杨斌著. —北京:科学出版社,2019.10

(空间微波遥感研究与应用丛书)

ISBN 978-7-03-062162-7

I. ①高… II. ①王…②杨… III. ①遥感图像-图像处理-谱分析(数学)-研究 IV. ①TP75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 181924 号

责任编辑:彭胜潮/责任校对:何艳萍

责任印制:肖 兴/封面设计:黄华斌

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>

三河市春园印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 10 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2019 年 10 月第一次印刷 印张:17

字数:400 000

定价:158.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《空间微波遥感研究与应用丛书》

编委会

主 编 姜景山 吴一戎 金亚秋

副主编 徐 丰 董晓龙 王 宇

编 委 (以姓氏汉语拼音为序)

陈洪滨 杜 兰 杜 阳 法文哲

洪 文 谷松岩 李 新 廖桂生

林 琿 林明森 龙 腾 卢乃锰

仇晓兰 孙 洪 王 斌 杨 健

杨劲松 张 群

丛 书 序

空间遥感从光学影像开始，经过对水汽特别敏感的多光谱红外辐射遥感，发展到了全天时、全天候的微波被动与主动遥感。被动遥感获取电磁辐射值，主动遥感获取电磁回波。遥感数据与图像不仅是获得这些测量值，而是通过这些测量值，反演重构数据图像中内含的天地海目标多类、多尺度、多维度的特征信息，进而形成科学知识与应用，这就是“遥感——遥远感知”的实质含义。因此，空间遥感从各类星载遥感器的研制与运行到天地海目标精细定量信息的智能获取，是一项综合交叉的高科技领域。

在 20 世纪七八十年代，中国的微波遥感从最早的微波辐射计研制、雷达技术观测应用等开始，开展了大气与地表的微波遥感研究。1992 年作为“九五”规划之一，我国第一个具有微波遥感能力的风云气象卫星三号 A 星开始前期预研，多通道微波被动遥感信息获取的基础研究也已经开始。当时，我们与美国早已运行的星载微波遥感差距大概是 30 年。

自 20 世纪“863”高技术计划开始，合成孔径雷达的微波主动遥感技术调研和研制开始启动。

自 2000 年之后，中国空间遥感技术得到了十分迅速的发展。中国的风云气象卫星、海洋遥感卫星、环境遥感卫星等微波遥感技术相继发展，覆盖了可见光、红外、微波多个频段通道，包括星载高光谱成像仪、微波辐射计、散射计、高度计、高分辨率合成孔径成像雷达等被动与主动遥感星载有效载荷。空间微波遥感信息获取与处理的基础研究和业务应用得到了迅速发展，在国际上已占据了十分显著的地位。

现在，我国已有了相当大规模的航天遥感计划，包括气象、海洋、资源、环境与减灾、军事侦察、测绘导航、行星探测等空间遥感应用。

我国气象与海洋卫星近期将包括星载新型降水测量与风场测量雷达、新型多通道微波辐射计等多种主被动新一代微波遥感载荷，具有更为精细通道与精细时空分辨率，多计划综合连续地获取大气、海洋及自然灾害监测、大气水圈动力过程等遥感数据信息，以及全球变化的多维遥感信息。

中国高分辨率米级与亚米级多极化多模式合成孔径成像雷达 SAR 也在相当迅速地发展，在一些主要的技术指标上日益接近国际先进水平。干涉、多星、宽幅、全极化、高分辨率 SAR 都在立项发展中。

我国正在建成陆地、海洋、大气三大卫星系列，实现多种观测技术优化组合的高效全球观测和数据信息获取能力。空间微波遥感信息获取与处理的基础理论与应用方法也得到了全面的发展，逐步占据了世界先进行列。

如果说，21 世纪前十多年中国的遥感技术正在追赶世界先进水平，那么正在到来的二三十年将是与世界先进水平全面的“平跑与领跑”研究的开始。

为了及时总结我国在空间微波遥感领域的研究成果,促进我国科技工作者在该领域研究与应用水平的不断提高,我们编撰了《空间微波遥感研究与应用丛书》。可喜的是,丛书的大部分作者都是在近十多年里涌现出来的中国青年学者,取得了很好的研究成果,值得总结与提高。

我们希望,这套丛书以高质量、高品位向国内外遥感科技界展示与交流,百尺竿头,更进一步,为伟大的中国梦的实现贡献力量。

主编: **姜景山** (中国工程院院士 中国科学院国家空间科学中心)
吴一戎 (中国科学院院士 中国科学院电子学研究所)
金亚秋 (中国科学院院士 复旦大学)

2017年6月10日

序 一

遥感技术自诞生之日起，便作为一种科学、技术与应用紧密结合的对地观测手段快速发展和壮大起来。高光谱遥感技术起源于多光谱遥感，是 20 世纪 80 年代开始发展的一种新兴遥感技术，其突出的优势在于提供了丰富的地物光谱信息，较高的光谱分辨率可以解决许多在全色和多光谱遥感中无法解决的问题，并成为当前遥感技术的前沿。然而，相对于高光谱遥感图像的获取和其所提供的巨大数据量，高光谱遥感图像的处理与分析仍是制约高光谱遥感应用的重要瓶颈。

高光谱遥感图像的解混研究是高光谱遥感图像处理与分析领域中独特且最为重要和本质的研究方向，它既有非常现实和紧迫的应用需求，与此同时，高光谱遥感图像也在解决此问题上具有其他遥感数据所不具备的优势。高光谱遥感图像解混技术作为从高光谱遥感数据中有效提取有用信息的重要途径，近年来格外受到重视，其相应的研究一直是高光谱遥感数据处理领域的重要前沿。在过去的二三十年里，虽然其相关研究已经和正在取得令人鼓舞的进展，但是总体上看仍有大量的理论和技术问题有待深入研究。

《高光谱遥感图像解混理论与方法》一书正是围绕高光谱遥感图像解混的问题和难点展开讨论的。自 2005 年以来，王斌教授及其团队承担了多项高光谱遥感图像解混这一研究分支的科研项目，取得了一批重要研究成果，为该书的出版打下了坚实的基础并提供了丰富的素材。著者紧密结合国际前沿，对目前的高光谱遥感图像的解混研究进行了认真、全面的提炼、归纳和总结，在该书中系统地整理和介绍了高光谱遥感图像解混这一重要研究方向的理论与方法，反映了当前该研究分支的研究进展和现状。该书在内容上全面、深刻，且图文并茂，与此同时还兼顾了深入浅出。该书的出版，必将较大地推动高光谱遥感图像解混研究的进一步发展。

在此，我特别推荐该书的出版。同时，也期待著者所在的团队继续深化高光谱遥感图像处理与分析领域的研究，并不断取得新成就。

中国科学院院士



2018 年 8 月 14 日

序 二

高光谱遥感技术是 20 世纪 80 年代初出现的新型对地观测技术。所谓高光谱，是指传感器获取的数据光谱分辨率很高（高达 5~10 nm）。高光谱遥感技术的发展始于成像光谱技术的发展。成像光谱仪是新一代“图谱合一”的光学遥感器，它具有获取地物目标详细光谱信息的能力，是当前监测地球环境动态变化、遥感定量反演等遥感应用最有效的空间遥感仪器。高光谱遥感技术是当前遥感技术发展的前沿技术之一。

高光谱遥感技术为遥感信息的定量应用开辟了新的前景。高光谱遥感技术是一门新型的交叉学科，其发展得益于卫星技术、传感器技术和计算机技术的高速发展。随着国内外一系列空间计划的实施，以及系列高光谱传感器的研制成功和星载高光谱传感器的发射升空，将极大地满足人们对高光谱数据的需求，这必将进一步推动遥感信息实用化的进程。然而，目前高光谱遥感的信息处理能力仍远远落后于高光谱遥感的数据获取能力。如何从海量的高光谱遥感数据中有效地提取有用信息，仍是目前高光谱遥感应用中迫切需要得到很好解决的突出问题。

高光谱遥感图像的处理与分析仍是制约高光谱遥感应用的重要瓶颈，而高光谱遥感图像解混的研究则是伴随高光谱成像技术发展的新型数据处理问题，是高光谱数据处理的重要任务之一，也是区别于其他成像数据处理的独特任务。特别是对于高光谱遥感，解混是图像亚像元分析、地物精细分类、微弱目标检测等的基础。目前国内外尽管有少量有关高光谱信息处理方面的学术著作，但是还没有一本专门和完整地讨论高光谱遥感图像解混（特别是非线性解混）的学术著作。因此，王斌教授等撰写的这本专著是非常及时和必要的。

该书有几个比较突出的特点：

(1) 系统地构建和整理了高光谱遥感图像解混这一重要研究方向的基本理论体系。由于高光谱图像解混是伴随高光谱成像技术发展的新型数据处理问题，涉及多个学科，因此，如何构建和整理高光谱图像解混的基本理论体系，是困难但又极为必要的工作。本专著从线性和非线性信号处理出发，系统地梳理和介绍了高光谱图像解混的基本理论和方法，对于高光谱数据处理技术的发展具有重要意义。

(2) 在注重高光谱遥感图像解混基础理论和技术的同时，强调了对当前该领域前沿研究成果的归纳、总结和介绍，使之不仅为读者提供了扎实的理论知识体系，覆盖了解混的主要技术和方法，也提供了最新的研究思路和发展方向。该专著对于刚刚踏入这一领域的

大学生和研究生是非常好的教材，对于有经验的专业研究人员也是很好的参考书。

(3) 该书的著者长期从事信号、图像处理的研究，理论基础扎实，有很高的学术造诣。著者本身是国内最早从事高光谱成像信息处理研究的学者之一，在高光谱图像解混、降维、分类、目标探测、图像恢复等方面做了大量创新性的工作，有较大的国际影响力。该专著内容也包含了著者自身的研究成果，以及对于高光谱图像解混问题的深入思考。

(4) 该书在内容上深入浅出，论述清楚，图表规范；在结构上，安排合理，脉络清晰。

作为一名高光谱遥感领域的研究者，在阅读该书初稿中深切感受到著者为该书所花费的心血，真诚感谢他们为读者奉献了一本好书，在此，我特别推荐该专著尽早出版。相信该书的出版将在高光谱数据处理与分析领域中发挥引领和推动作用，为我国高光谱遥感应用的深入发展添砖加瓦，做出重要贡献。同时，也期待著者所在的团队继续深化高光谱遥感图像处理与分析领域的研究，并不断取得新成就。



测绘遥感信息工程国家重点实验室
武汉大学

2018年8月22日

前 言

常见的星载多光谱遥感图像，由少数几个宽的波段组成，包含有空间、辐射、光谱三维信息，已在军事和民用等领域得到广泛应用。自 20 世纪 80 年代以来，高光谱遥感技术取得了重要发展。高光谱遥感图像将传统的遥感成像技术与物理中的光谱分析技术有机结合起来，是具有“图谱合一”优势的空间对地观测数据源，在对地表目标获取空间信息的同时，获得高分辨率的光谱信息(高达 5~10 nm)。波段数的急增蕴含了巨大的质变，它使本来在宽波段遥感中不可探测的物质，在高光谱遥感中能被探测，具有对地物目标进行识别和精细分类的能力。随着机载高光谱成像设备的实用化和产业化以及星载仪器的发射，高光谱遥感数据已进入应用领域，并成为当前遥感技术的前沿。然而，随着波段数的增多，也必然导致信息的冗余和数据处理复杂性的增加。面对如此多的波段(数百甚至上千)、如此多的光谱图像信息，如何处理、如何从中有效地提取有用信息，仍是目前急需解决的一个突出问题。

通常，遥感图像像元记录的是探测单元瞬时视场角所对应的地面范围内目标辐射能量的总和。如果探测单元的瞬时视场角所对应的地面范围仅包含了同一类性质的目标，则该像元记录的是同一性质地面目标辐射能量的总和，这样的像元称为纯像元(又称端元)；如果单元的瞬时视场角所对应的地面范围包含了不同性质的目标，则该像元记录的是多类不同性质的地面目标辐射能量的总和，这样的像元称为混合像元。由于空间分辨率的限制，中低空间分辨率遥感数据的像元很少是由单一均匀地表覆盖类组成的，一般都是几种地物的混合像元。另外，不依赖于遥感图像空间分辨率的提高，由不同性质的物质组成的均匀的混合物，也构成混合像元。混合像元的产生给遥感解译造成了困扰，同时也是影响地物目标检测和分类精度的最主要因素之一。

在遥感成像系统的设计中，空间分辨率和光谱分辨率的提高是相互制约的。因为高光谱成像系统的光谱带宽很窄，必须用较大的瞬时视场才能收集足够多的光子，以维持可接受的信噪比；同样，高空间分辨率系统(瞬时视场很小)则必须加宽光谱通道。因此，在高光谱遥感图像中，由于空间分辨率的限制，存在着大量混合像元，而混合像元分解技术是从高光谱数据中有效提取有用信息的一个重要途径，可实现亚像元信息的解译、软分类等应用。事实上，高光谱遥感的出现有利于对混合像元的光谱分解，其原因是，像元光谱能较完整地描述给定地物光谱特征。在实际应用中，混合像元分解技术是比以像元为单位的分类更为精确的一种数据处理方法，它能够将在亚像元级上进行分类，可以满足更高的应用需求。

光谱混合模型本质上可分为线性混合和非线性混合两类模型。线性混合模型适用于地物分布，本质上就属于或者基本属于线性混合，以及在大尺度上可以认为是线性混合的类型。该模型由于其简单、易于处理，而且其对应的理论研究开展得较早，其发展较

为成熟,因此,已得到广泛应用,目前是高光谱数据的主要处理方法。然而,在真实条件下,地物之间的光谱响应复杂,很少为纯线性组合,更多的是复杂的非线性关系,尤其是在对一些微观尺度上地物进行精细光谱分析时,就需要非线性光谱混合模型来解释。从物理角度来讲,当传感器瞬时视场内存在多种地物时,入射的光子之间将会产生多重散射,从而导致非线性混合现象。相对于线性光谱解混来说,非线性光谱解混在原理及实现上需要考虑更多更复杂的影响因素,其相关研究总体上都还处于探索阶段。例如,在非线性光谱解混中,即便是目前较为广泛采用的双线性或多线性混合模型,用端元光谱间的哈达玛积来表示二次散射或多次散射的作用这一基础表达,仍受到一些专家的质疑。

在当前的高光谱遥感发展中,相对于其所提供的巨大数据量,高光谱遥感图像的处理与分析仍是制约高光谱遥感应用的重要瓶颈,其核心在于如何结合各种地物特征以及不同的探测要求,从海量且高度相关的高光谱数据中精确地进行地物属性信息的提取。更进一步,从高光谱遥感图像处理与分析研究领域来看,其包括了图像恢复(降噪和修复)、降维(波段选择和特征提取)、像元分类、光谱解混、目标探测(光谱匹配和光谱异常目标探测)、图像融合、超分辨、亚像元制图等多个研究方向。其中,高光谱遥感图像的光谱解混研究是高光谱遥感图像处理与分析领域中独特且最为重要和本质的研究方向,它既有非常现实和紧迫的应用需求,与此同时高光谱遥感图像也在解决此问题上具有其他遥感数据所不具备的优势。在过去的二三十年里,高光谱遥感图像的解混研究一直是遥感领域的重要前沿,虽然已经和正在取得令人鼓舞的进展,但是总体上看仍有大量的理论和技术问题有待深入研究。本书正是围绕这些问题,在总结国内外相关研究基础上,结合著者所在团队多年来取得的研究成果,从线性到非线性,系统地整理和介绍了高光谱遥感图像解混这一重要研究方向的理论与方法,反映了当前该研究方向的研究进展和现状。特别是,国内外至今仍没有一部涉及系统介绍非线性光谱解混内容的专著。希望本书能够抛砖引玉,推动高光谱遥感图像解混研究的进一步发展。

本书旨在梳理高光谱遥感图像解混研究的脉络,并介绍各个阶段和方面的理论、模型和算法。全书共分8章。第1章概括地介绍高光谱遥感技术,重点阐述高光谱遥感图像的特点、高光谱遥感图像处理的研究现状和高光谱遥感图像处理中的解混问题;第2章详细讨论线性光谱解混的理论与方法;第3章详细讨论无监督线性光谱解混的理论与方法;第4章详细讨论线性光谱解混的其他方法;第5章详细描述非线性光谱混合理论与模型;第6章详细讨论非线性光谱解混方法;第7章详细讨论无监督的非线性光谱解混方法;第8章详细讨论非线性光谱解混的其他方法。限于本书篇幅,我们只选取了主要的典型、有代表性的算法进行介绍。当然,这种选取具有较强的主观性,其选取也只能算是一家之言。

本书是在著者承担国家自然科学基金项目(60672116、41371337、61572133)、国家高技术研究计划(863计划)项目(2009AA12Z115)、上海市自然科学基金项目(04ZR14018)以及北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室项目所取得成果的基础上撰写而成。在本书的撰写过程中,一批优秀的青年科技工作者提供了巨大的支持,他们是普晗晔(复旦大学优秀博士学位论文获得者)、夏威(复旦大学优秀博士学位论文获得者)、智

通祥、刘雪松(上海市优秀硕士学位论文获得者)、金晶、刘力帆(上海市优秀硕士学位论文获得者)、陶雪涛、周昊等,感谢他们的辛勤付出。在本书撰写过程中,参阅了有关书籍和文献,同时向这些作者致以诚挚的感谢。

本书的研究工作是在复旦大学电磁波信息科学教育部重点实验室完成的。在本书完成之际,谨向中国科学院院士金亚秋教授致以由衷的谢意,感谢他对著者及其团队开展相关研究一直给予的热情关怀和指导。同时,著者在高光谱遥感图像处理领域中的研究工作也一直得到武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室张良培教授的大力支持和帮助,特致以衷心的感谢。最后,感谢科学出版社对本书出版给予的配合与支持。

由于著者水平有限,书中难免存在差错和遗漏,加之高光谱遥感图像解混研究的理论和技术还在发展之中,在理论和技术方面还有很多不足,衷心希望广大读者批评指正和不吝赐教,著者将在后续工作中进一步完善。

著 者

2018年8月于复旦大学邯郸校区

目 录

丛书序

序一

序二

前言

第 1 章 概述	1
1.1 高光谱遥感	1
1.1.1 成像光谱遥感技术简介	1
1.1.2 高光谱遥感图像的表达与特征	6
1.2 高光谱遥感图像处理方法	9
1.2.1 高光谱遥感图像降噪与恢复	11
1.2.2 高光谱遥感图像降维	13
1.2.3 高光谱遥感图像融合	15
1.2.4 高光谱遥感图像分类	16
1.2.5 高光谱遥感图像目标探测	17
1.3 混合像元和光谱解混技术	19
1.3.1 混合像元问题	19
1.3.2 光谱解混的一般流程与重要问题	25
1.3.3 解混算法评估常用的高光谱遥感图像	28
参考文献	34
第 2 章 线性光谱解混方法	38
2.1 线性混合模型	38
2.1.1 数学表达形式	38
2.1.2 LMM 的模型意义	39
2.1.3 解混的一般优化问题	41
2.2 端元数目估计方法	42
2.2.1 高光谱数据的虚拟维度	42
2.2.2 最小误差信号子空间识别	44
2.2.3 噪声白化的特征值间隔方法	46
2.2.4 基于低秩表示的信号子空间数目估计	47
2.2.5 基于最近邻距离比的本征维度估计	48
2.3 端元提取方法	50
2.3.1 基于单形体几何特性的方法	50

2.3.2	融合空间信息的端元提取方法	59
2.3.3	基于统计学的端元提取方法	64
2.4	丰度估计方法	67
2.4.1	最小二乘法	68
2.4.2	基于单形体几何性质的快速丰度估计	70
2.4.3	利用稀疏性与空间关系的线性光谱解混	74
	参考文献	82
第3章	无监督的线性光谱解混方法	85
3.1	无监督线性解混的统计学方法	85
3.1.1	同时估计端元和丰度的贝叶斯方法	85
3.1.2	基于依赖成分分析的无监督线性解混	87
3.2	基于独立成分分析的解混方法	90
3.2.1	独立成分分析原理	90
3.2.2	基于ICA的光谱解混方法	92
3.3	基于约束非负矩阵分解的解混方法	97
3.3.1	NMF原理与一般算法	97
3.3.2	端元约束的NMF	100
3.3.3	丰度稀疏约束的NMF	103
3.3.4	空间信息混合约束的NMF	105
3.3.5	基于非负张量分解的解混方法	111
3.4	基于凸几何理论的解混方法	117
3.4.1	基于分裂增广拉格朗日的单形体识别算法	118
3.4.2	最小体积单形体分析	120
3.4.3	最小体积闭合单形体分析	122
	参考文献	124
第4章	线性光谱解混的其他方法	127
4.1	考虑端元光谱变异性的解混方法	127
4.1.1	光谱变异性	127
4.1.2	端元束方法	129
4.1.3	基于Fisher判别零空间的线性变换方法	131
4.1.4	扰动与扩展的线性混合模型	132
4.2	基于启发式优化方法的光谱解混	137
4.2.1	基于神经网络的混合像元分解	137
4.2.2	自适应差分进化端元提取算法	139
4.2.3	基于粒子群优化的约束非负矩阵分解	141
4.3	时变的光谱解混方法	147
4.3.1	基于解混的高光谱图像变化检测	148
4.3.2	多时相高光谱图像的动态解混	148

4.4	高性能并行计算的解混方法	151
4.4.1	VCA 和 SUnSAL 算法的 GPU 并行加速	151
4.4.2	基于 OpenCL 的完整线性解混链的并行实现	153
	参考文献	154
第 5 章	非线性光谱混合理论与模型	156
5.1	观测场景中的非线性混合现象	156
5.1.1	砂石矿物地表	156
5.1.2	植被覆盖与城市区域	157
5.2	非线性光谱混合模型	160
5.2.1	传统非线性物理模型	161
5.2.2	Hapke 模型	162
5.2.3	双线性混合模型	166
5.2.4	高阶线性混合模型	170
5.2.5	基于核函数的模型	173
5.3	植被覆盖区域的模型解混分析比较	174
	参考文献	177
第 6 章	非线性光谱解混方法	180
6.1	非线性端元提取算法	180
6.1.1	基于数据测地线流形的的方法	180
6.1.2	非线性混合物中端元物质的检测	182
6.2	基于非线性混合模型的解混算法	185
6.2.1	最小二乘规则下的泰勒展开与梯度下降方法	185
6.2.2	贝叶斯统计学方法	187
6.2.3	基于半非负矩阵分解的丰度估计	189
6.2.4	利用稀疏性与空间信息的改进方法	190
6.2.5	克服共线性效应的方法	197
6.3	数据驱动的非线性解混算法	204
6.3.1	流形学习方法	204
6.3.2	基于核函数的非线性光谱解混算法	207
	参考文献	214
第 7 章	无监督的非线性光谱解混方法	216
7.1	基于数据流形距离的方法	216
7.2	基于高斯过程与蒙特卡洛的方法	218
7.2.1	高斯过程方法	218
7.2.2	基于 PPNM 与蒙特卡洛的方法	220
7.3	基于非负矩阵分解的方法	223
7.3.1	非线性混合模型与 NMF 的结合	223
7.3.2	核函数与 NMF 的结合	225

7.4 其他基于非线性混合模型的盲解混方法	226
7.4.1 基于几何投影和约束 NMF 的非线性解混	226
7.4.2 基于 MLM 的无监督非线性解混	229
参考文献	230
第 8 章 非线性光谱解混的其他方法	232
8.1 与波段选择结合的非线性光谱解混	232
8.2 基于启发式优化方法的非线性光谱解混	235
8.2.1 基于集成极限学习回归的方法	235
8.2.2 基于 Hopfield 神经网络的方法	236
8.3 波长依赖的非线性光谱解混	238
8.3.1 矢量核模型方法	239
8.3.2 扩展的多线性混合模型方法	241
8.4 考虑光谱变异性的非线性光谱解混	244
8.5 非线性混合检测方法	246
8.5.1 基于 PPNM 的非线性探测	246
8.5.2 非线性混合像元的非参数检验与端元提取	247
8.5.3 线性混合物检测的预解混框架	249
参考文献	251

第1章 概述

1.1 高光谱遥感

1.1.1 成像光谱遥感技术简介

人类社会的发展实际上是一个伴随着对未知事物不断探索和认知的过程，也就很直接地需要了解地球表面自然资源和环境各方面性质与变化，以及人类活动在其中带来的影响。而遥感(remote sensing, RS)技术则提供了使这些需求得以较好满足的重要手段。遥感发展始于20世纪60年代，是指不直接接触研究目标、区域或现象，而利用仪器设备和媒介，在一定的远距离上实施探测并采集所需的信息(梅安新等, 2001; 赵英时, 2003)的技术。对地遥感乃至行星太空遥感的开展，极大地丰富和改善了人们对地球和宇宙的认知，并已经在科学研究、商业民用和军事等诸多领域中被广泛应用。

对地遥感以地球表面的物质为观测目标，一般从空中对地表进行观测，传感器可以搭载于不同高度的工作平台之上，如气球、飞机、人造地球卫星、航天飞机等(赵春晖等, 2016)。遥感仪器通过采集并记录与地物发生作用后的物理媒介信息(如电磁波、力、声波等)来达到观测目的。其中，电磁辐射(electromagnetic radiation)是一种非常重要的被动遥感采集数据的形式，而太阳是被动遥感最主要的辐射源。在太阳光的传播过程中，经过地球的大气层时，首先会部分被大气吸收、反射和散射，然后那些透过大气层的辐射光，将会传播到地面继续与地表物质发生进一步相互作用(吸收、反射和透射)，最后有部分光会被地物重新反射回天空。另一方面，地物的种类和理化性质取决于构成它们的最基本的分子和原子，也就造成了不同地物间的本质差异性。这些差异性会在光子入射物质内部时，于辐射能量对电子跃迁、分子及原子振动的作用中被反映出来。同种物质对于不同波长的电磁辐射会有明显不同的吸收和反射特征，而不同物质间由于其组成、内部结构和表面形态等不同，它们的电磁波谱特性间往往更会具有相当大的差异(赵英时, 2003; Borengasser et al., 2007)。因此，遥感仪器通过接收太阳辐射和来自地表物体的反射辐射，就能很好地揭示这些物质本质所蕴含的生理、物理、地学等详细信息。

电磁波谱按波长从短到长的划分包括 γ 射线、X射线、紫外线、可见光、红外线，并最终延伸至无线电波的多个谱段。然而，绝大多数的太阳辐射能量却集中在紫外—中红外(0.31~5.6 μm)的波长范围内，其中可见光(0.38~0.72 μm)与近红外(0.72~1.5 μm)两者则占了最主要的部分(张兵和高连如, 2011)。在光学被动遥感中，太阳的可见光—反射红外谱段常作为稳定的辐射源被航天和航空遥感平台广泛采用。遥感传感器接收到各类地物的反射辐射后，会将其以遥感图像的数据载体形式记录下来。历经几十年的发展，遥感已度过了全色(黑白)、彩色摄影、多光谱扫描成像等不同阶段。如常见的 Landsat