

摘要

随着科学技术的不断发展，人们认识事物的能力逐步得到提高。遥感技术的兴起是 20 世纪最具标志性的科学技术成就之一。特别是 80 年代初期，随着光谱成像仪以及成像技术的不断发展，光学遥感进入了一个崭新的阶段-高光谱遥感阶段。由于高光谱遥感图像具有较高的光谱分辨率，目前在民用和军事领域都得到了广泛的应用。高光谱图像具有“图谱合一”、波段多、数据量大的特点，能够提供丰富的空间信息。但是高光谱图像中普遍存在着条带噪声，这些噪声与普通的随机噪声存在着很大的不同，主要表现为呈带状分布，并且具有一定宽度。

近年来，国内外学者根据高光谱图像的特点和条带噪声统计规律，提出了基于空间域的直方图匹配、矩匹配等方法以及变换域的基于傅里叶变换和小波变换的条带噪声滤除方法。至今，已有部分学者针对现有的滤除方法进行了改进。但是，这些方法大多拘泥于成像光谱仪的特性、条带宽度以及条带噪声分布的周期性的限制，不具有普遍的适用性和较适中的算法复杂度。所以，我们有必要对高光谱图像做进一步深入的研究，探索一种适合于宽窄条带噪声同时存在的高光谱图像条带噪声滤除方法，该方法能够降低对地物特征的要求，在滤除条带噪声的同时能够保持较好的细节信息。本文在对条带噪声的产生机理和滤除算法进行深入研究的基础上，主要做了以下两方面工作：

1、对现有的基于矩匹配思想提出的邻域插值算法进行了改进。新算法通过对判别函数进行分析，构造出一个新的判别公式，该方法在一定程度上弥补了原始的“信息平均化”的不足。根据邻域不同信息元素对当前信息元素的影响因子不同，确定不同的相关系数，通过仿真验证改进后的邻域插值算法在评价指标上优于原邻域插值方法。

2、高光谱图像由于成像机理不同，可能有宽窄条带噪声同时存在的情况。本文针对这种情况提出了一种矩匹配和插值相结合的条带噪声滤除方法。该方法可以自动对 AVIRIS 图像中条带噪声进行分类滤除，克服了原有条带噪声滤除算法拘泥于条带宽度和周期性限制的缺点。通过对 AVIRIS 图像进行仿真，本文证明了该方法不仅能有效去除图像中的条带噪声，并且能够较好地保证图像的质量。

关键词：AVIRIS 图像；条带噪声；矩匹配；小波变换；邻域插值法

ABSTRACT

With the continuous development of science and technology, cognitive competence of people has been improved. One of the most iconic achievements of science and technology in the 20th century is the rise of remote sensing technology. Especially in the early of 18th century, with the continuous development of spectral imaging technology, optical remote sensing has entered a new phase – the phase of Hyperspectral Remote Sensing. Due to high spectral resolution, the high spectral remote sensing images have been widely used in the field of civil and military. Hyperspectral image can provide a wealth of spatial information with the characteristic of “combine spectrum into picture”, multi-band and large amount of data. However, stripe noise the prevalently exists in Hyperspectral image. There is a considerable difference between stripe noise and random noise. The stripe noise is zonal distribution, and has a certain width.

According to the characteristics of hyperspectral image and noise statistics law, domestic and foreign scholars proposed many stripe noise filtering methods, including histogram matching method, moment matching method, and some other methods on transform domain about Fourier Transform and Wavelet Transform. Until now, parts of the existing denoising methods have been improved by scholars. However, Most of these methods are stick to the characteristics of imaging spectrometer, the width and distribution of strip noise. They do not have general applicability and moderate complexity of the algorithm. Therefore, we need to do further study on hyperspectral image to explore a suitable band noise filtering method on hyperspectral image. This method can reduce the request of surface features, and furthest maintain the texture details with filtering out the stripe noise. In this paper, the mechanism of band noise and filtering algorithms on Hyperspectral image was in-depth study. The contents were as follows:

1. An improved neighbor interpolation algorithm which is based on moment matching method was proposed. By analysing on discriminant function, a new discriminant formula has been constructed. To some extent, new method makes up for the disadvantage of "information on average" of the original method. According to neighborhood different information elements having different impact on current information element, we define different correlation coefficients for neighborhood different information elements. Simulation results show the improved interpolation algorithm in the neighborhood is better than the original method of in evaluating indicator.

2. Because of different imaging mechanism, different widths stripe noise may exist in hyperspectral image simultaneously. This paper presents a method combining moment method with interpolation method, which is fit for the presence of any width of band noise. The method can automatically filter strip noise with any width on AVIRIS image, overcoming the disadvantage of original method. Simulations on AVIRIS image show that the proposed method can not only effectively filter the band noise of the image, but also be able to ensure image quality.

Keywords: AVIRIS image; stripe noise; moment matching method; wavelet transformation; neighborhood interpolation algorithm

第1章 绪论

1.1 课题研究的背景及意义

遥感 (Remote Sensing) 是 20 世纪 60 年代发展起来的一门技术。该技术不需要直接接触研究目标或区域，而是通过某种装置对获取的数据进行分析，从而得到所需信息。经过几十年的研究，遥感技术得到了飞速的发展，并且在军事和民事领域都得到了广泛应用。通常情况下，可以根据光谱分辨率的不同对遥感进行分类，光谱分辨率在 $10^{-1} \lambda$ 数量级范围内的遥感称为多光谱遥感；光谱分辨率在 $10^{-2} \lambda$ 数量级范围内的遥感称为高光谱遥感；光谱分辨率在 $10^{-3} \lambda$ 数量级范围内的遥感称为超光谱遥感^[1]。

高光谱遥感技术是 20 世纪 80 年代伴随成像光谱仪的发展出现的新型对地观测综合技术。该技术最早由美国加州理工学院喷气推进实验室 (Jet Propulsion Lab, JPL) 的一些学者提出，并在美国宇航局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 的支持下，相继推出了系列成像光谱仪产品^[1]。成像光谱仪是新一代“图谱合一”的光学遥感器，它具有获取地球目标详细光谱数据的能力，是当前监测地球环境动态变化、遥感定量反演等遥感应用中最有效的空间遥感仪器。高光谱遥感技术已经成为当前遥感技术发展的前言技术之一。

与传统的多光谱遥感器相比，高光谱遥感器具有窄波段成像的特点，在可见光—近红外区域光谱分辨率能够达到纳米级。利用高光谱的这一特点，针对不同的应用目的选择适当的波段，可以获得研究对象详细而精确的光谱信息^[2]。所以，高光谱遥感具有广泛的应用价值，主要表现为以下几个方面：

1、高光谱遥感在地质调查领域的应用

从上个世纪 80 年代至今，地质调查已经成为地球观测数据的产业化应用之一。矿物光谱研究表明，岩石矿物在 $0.4\text{--}2.5 \mu\text{m}$ 之间具有一系列可诊断性光谱特征信息，这些特征的带宽多在 $10\text{--}20 \text{ nm}$ 之间。由于成像光谱图像具有三维谱像信息的特点，使得我们能在光谱维上进行矿物成分信息展开^[2]。通过近些年的研究表明，高光谱遥感在矿物识别与填图、地表裸露环境下的岩层填图等方面有着广泛的应用价值。传统地质调查方法的成本为每平方公里 150~500 美元，而高光谱遥感调查每平方公里的成本仅为 10~30 美元^[3]。因此，高光谱遥感技术的研究对地质调查领域的发展具有重大贡献作用。

2、高光谱遥感在生态环境监测方面的应用

我们赖以生存的自然环境正面临着臭氧层破坏、全球变暖、森林破坏与生物多样性

减少、大气及酸雨污染、淡水资源危机、土地荒漠化、国际水域与海洋污染、有毒化学品污染和有害废物越境转移等^[3]。遥感作为一种基础的物理、数学和地学分析方法，具有强大的数据获取能力。我们可以通过遥感技术获得大范围、多时相、多波段的地物信息，从而为不同时序上的全球各种现象的综合性分析创造有利条件。高光谱遥感技术具有的光谱划分精细、数据信息丰富等性能，使得它在物质识别、信息提取等生态环境监测应用方面比其他技术具有更广阔的应用前景。

3、高光谱遥感在精准农业方面的应用

精准农业是指综合利用现代高新科学技术，以获取农田高产、优质、高效的现代化农业生产模式和技术体系^[4]，具体的说就是利用遥感卫星定位系统实时获取农田作物的大量时空变化信息，及时对农业进行管理，并对作物疫情、灾害的发生趋势，进行分析、模拟，为资源有效利用提供必要的空间信息。近些年来，遥感技术对于农作物质量和产量预测、土地信息调查以及疫情灾害预报等方面做出了很大贡献，它的应用价值受到越来越多的农业学家的广泛关注。

4、高光谱遥感在林业方面的应用

随着生态环境的不断恶化，现在的林业发展正逐渐由传统的单纯生产和经营木材方式转变为重视森林的生态效益和社会效益。高光谱遥感在林业方面能够得到广泛应用，主要与高光谱遥感图像的光谱特性有关。通过遥感监测到植被叶片的光谱特性曲线，从而对森林状况进行精确的遥感监测。良好的遥感监测技术直接关系到我国的木材生产和进出口政策。所以，作为一个木材进出口大国，我国对林业生产基地的遥感资源监测技术的发展非常重视。

5、高光谱遥感在水质监测方面的应用

利用遥感监测水质又称为水色遥感，主要用于水色因子包括浮游植物色素、无生命悬浮物和黄色物质及相关水质参数的定量探测^[4]。遥感监测在水质监测方面的应用范围广、成本低，有利于对水体进行长期的动态监测。与常规监测方法相比，遥感监测具有能够揭示水体污染源和污染物的迁移特性的优势。通过对水质光谱特征不断深入的研究以及遥感技术本身不断的创新，遥感在水质检测方面的技术已经从定性发展到定量，预计今后几年会得到更进一步的发展。

基于以上这些领域的应用价值，高光谱遥感技术具有广阔的应用前景。但是高光谱图像在采集、存储和传输过程中都会受到不同程度的噪声的干扰。主要可以分为条带噪声和随机噪声两种，其中条带噪声是图像在采集过程中，由于光电传感器各探测单元正反扫描响应差异、传感器机械运动、空气介质不同以及温度等影响造成的。这类噪声具

有一定宽度，并且沿扫描方向呈带状分布。条带噪声的存在掩盖了图像中真正的数据信息，对图像质量产生了严重的影响，为图像的后续处理带来诸多不利因素。因此，在图像解译和判读之前，应该首先进行消噪处理。现有的条带噪声消除方法的复杂性和通用性不是很好，所以我们有必要探索一种通用性好，复杂度低的条带噪声滤除方法。

1.2 高光谱遥感的基础以及发展过程

1.2.1 高光谱遥感的基本特点

高光谱遥感具有以下突出特点^[5]：

1、高光谱分辨率

常规的多光谱遥感器只有几个波段，其光谱分辨率一般大于 100nm。高光谱遥感器有几十甚至几百个波段，光谱分辨率一般为 10-20nm，能获得整个可见光、近红外、短波红外等波段多而窄的连续光谱。

2、图谱合一

高光谱遥感图像包含了丰富的空间、辐射和光谱信息，这些信息能够表现出地物空间信息以及光谱特征，影像、辐射与光谱这三个遥感中的重要特征就形成了高光谱图像。

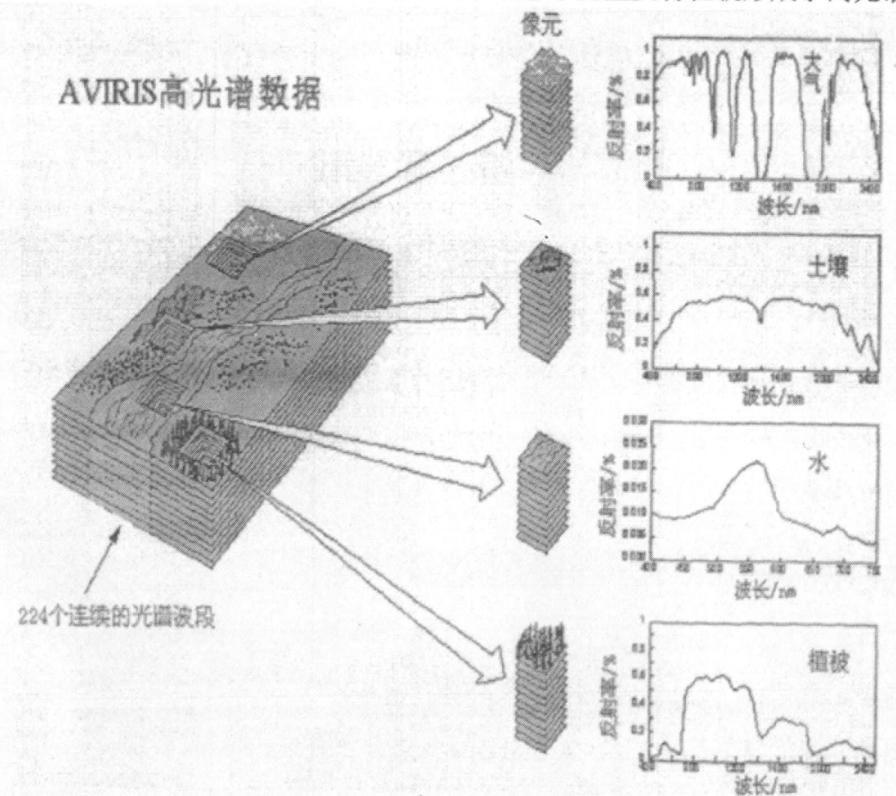


图 1.1 高光谱数据示意图

3、波段多，数据量大

光谱成像仪的波段数一般是几十到几百个，有的甚至能达到上千个波段，并且这些光谱波段在一定范围内连续成像。因此，高光谱遥感图像的数据量大大增加，相邻波段之间相关性也增强了许多，同时为相邻波段间的数据带来较大的冗余性。

1.2.2 高光谱遥感的发展过程

高光谱遥感技术发展的重要趋势是提高空间分辨率和光谱分辨率。20世纪70年代初美国发射的陆地卫星仅有4个波段，它们的平均光谱分辨率为150nm；80年代的TM增加到了7个波段，在可见光到红外光谱范围的平均光谱分辨率为137nm；法国SPOT卫星的多光谱波段的光谱分辨率为87nm。20世纪80年代，高光谱成像遥感技术成为遥感技术的最大成就之一^[1]。

美国是光谱成像技术发展最早的国家，从上个世纪80年代至今已经成功研制出三代高光谱成像光谱仪。第一代是航空成像光谱仪（AIS），已于1984~1986年在NASA的C-130飞机上使用。它有128个通道，光谱覆盖范围是990~2400nm；第二代产品是航空可见光/红外光成像光谱仪（AVIRIS），有224个通道，光谱范围是400~2500nm，本文实验所用到的图像就是由这类光谱仪成像产生的；第三代是克里斯特里尔傅里叶变换高光谱成像仪（FTHSI），光谱范围在400~1050nm之间，有2~10nm的光谱分辨率，适合在轻型飞机上使用。

我国成像光谱仪从“七五”期间开始研制至今已取得了很大的进展。研制成功的第一台224波段PHI（扫帚式高光谱成像仪）与128波段OMIS（实用模块化机载成像光谱仪）已进行了多次遥感实验。2002年，由中国科学院上海物理研究所研制的中分辨率成像光谱仪随“神舟三号”飞船发射升空，该设备光谱通道为34个，精度可达500m。这一成果标志着我国成为世界上第二个拥有航天载成像光谱仪的国家。

经过近四十年的发展，随着高光谱遥感图像—光谱变换、光谱信息提取以及光谱匹配和识别等技术的不断成熟，高光谱遥感已经得到了广泛的应用。

1.3 高光谱图像条带噪声滤除方法的发展及现状

高光谱遥感技术的发展得益于卫星技术、传感器技术以及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，极大地满足了人们对高光谱数据的需求^[4]。但是，就目前的遥感信息处理能力来讲，其远远落后于遥感信息的获取能力。尤其是在多传感器和单传感器光谱仪成像中普遍存在着条带噪声，甚

至有些高光谱图像 50%以上的波段都受到不同程度条带噪声的干扰。当高光谱图像被噪声污染后，进行处理的图像就不再是原始图像，而是受到噪声污染的降质图像，这必将影响图像的后续处理，如编码、分割、分类、目标检测和特征提取等。高光谱图像中的噪声可以分为随机噪声和条带噪声两种，其中随机噪声的滤除方法和普通图像基本相同，而条带噪声产生机理与随机噪声不同，并且具有特殊的噪声特性^[5]。因此，为了提高图像质量以及更好的对图像进行后续处理，我们有必要对高光谱图像中的条带噪声进行滤除。

至今，国内外已有许多学者对遥感图像条带噪声的滤除方法进行了探索和研究。Horn 和 Kautsky 等人^{[6][7]}首先提出直方图匹配法；Gadallah 等人^[8]认识到了直方图匹配法的缺陷，提出了比直方图匹配法消噪效果较好的矩匹配法。由于实际情况很难满足矩匹配法适用的地物分布条件，所以刘正军、韩玲^{[9][10]}等人对矩匹配方法进行了改进，提出了均值补偿，傅里叶变换以及相关系数三种方法。随后蒋耿明^[11]等人分别采用傅立叶变换、小波变换和邻域插值三种方法对 MODIS 图像条带噪声滤除技术进行了研究，证明了邻域插值法在处理效果和算法复杂度上都优于傅立叶变换、小波变换两种频域处理方法。后来黄晓园^[12]等人对该方法进行了改进，但是邻域插值法适用于周期分布比较规律的窄带噪声。常威威在 2007 年的硕士论文中提出了四种改进的条带噪声滤除方法，其中包括基于矩匹配的一种自适应滑动滤波方法，结合边缘检测、奇异点检测的两种小波变换方法，以及一种矩匹配与小波变换相结合的自适应消噪方法。2010 年王文英、周伟^[22]等人在 CBER-02 影响上应用上述算法对条带噪声的滤除进行了研究。同年，支晶晶^[13]等人对 HIS 图像的条带噪声滤除技术进行了研究。

条带噪声消除方法的研究已经受到国内外广泛关注，但是现有的滤除方法大多拘泥于成像光谱仪的特性和条带噪声的特点。时域去噪方法对原始高光谱图像的地物特征要求较高，对条带噪声的限制过大，而实际获得的图像很难达到适用标准，所以该类方法不具有良好的适用性；频域去噪方法滤除噪声的同时对于细节信息的保留效果不好，并且大多计算量较大，算法复杂度较高。因此，我们有必要对高光谱图像做进一步深入的研究，探索一种适合于宽窄条带噪声同时存在的高光谱图像条带噪声滤除方法，该方法能够降低对地物特征的要求，在滤除条带噪声的同时能够保持较好的细节信息。

1.4 本文的主要研究内容以及章节的安排

近年来，国内外已有许多学者对高光谱遥感图像条带噪声的消除方法进行了深入的研究和探讨。Gadallah^[8]等人提出的矩匹配法虽然比 Horn^[6]和 Kautsky^[7]等人提出的直方

图匹配法有一定的优势，但是这种方法的缺点是要求地物分布单一。刘正军^[9]等对矩匹配法进行了改进。蒋耿明^[10]等人证明了邻域插值法在处理效果和算法复杂度上都优于傅立叶变换、小波变换两种频域处理方法。但是邻域插值法适用于周期分布比较规律的窄条带噪声。所以，现有的条带噪声消除方法受图像或条带形式的限制过大，无法对遥感图像中任意宽度的条带噪声进行有效地滤除。本文主要在两方面提出了创新，一是对原邻域插值方法的判别公式进行了改进；二是提出了一种基于矩匹配和插值相结合的条带噪声分类滤除方法，此方法适合于任意宽度条带噪声的滤除。并且在 AVIRIS 图像上对本文提出的方法进行仿真，通过图像质量评价指标验证本文方法的有效性。基于上述内容，本文结构安排如下：

第一章对本文研究的背景、意义，高光谱遥感以及条带噪声的发展现状进行了概括性的介绍，然后给出了本论文各章节的具体安排。

第二章介绍了高光谱图像的基本理论，包括高光谱遥感图像的表达形式以及成像光谱仪成像机理，然后说明了条带噪声的产生机理及条带特征。

第三章详细介绍了高光谱图像条带噪声消除的基本方法。时域主要包括：直方图匹配，矩匹配法；频域主要包括傅里叶变换和小波变换方法。

第四章在原始的邻域插值方法基础上，对该方法的判别公式进行了改进。改进后的判别公式克服了原始“信息平均化”的缺点。通过在高光谱图像上对改进方法进行实验仿真，证明了该方法的有效性。

第五章提出了一种针对不同宽度条带噪声适用的条带噪声滤除方法。在 AVIRIS 图像中将此方法与传统的矩匹配、小波变换、邻域插值等方法的仿真结果进行比较，分析总结实验结果，得出实验结论，证明了新方法的有效性。

第2章 高光谱遥感图像基本理论

2.1 高光谱图像数据表达

与其他图像相比，高光谱遥感图像的优势是不仅拥有二维的平面图像，而且还包含了光谱维信息。那么如何正确的表达这些信息，成为高光谱应用中一个大家比较关心的问题。我们尽量把信息统计量转化为图像，这样可以更直观、更形象的了解高光谱图像，同时也可以发挥人眼对图像细节的分辨能力，更好的进行图像处理。

2.1.1 图像立方体—成像光谱信息集

高光谱图像在普通图像二维信息的基础上增加了光谱维，形成三维的坐标空间。由于每个波段数据可以看成是一个层面，那么如果将成像光谱数据整体表达到一个坐标空间内，就会形成一个按波段顺序堆叠的具有多个层面的图像立方体^[2]。假设图像灰度值 DN，我们简单定义图像立方体的三维分别是空间维 X、Y，以及光谱维 Z，构成了如图 2.1 所示的坐标系。实际获得的高光谱遥感图像数据就类似于这样一个立方体，它的各

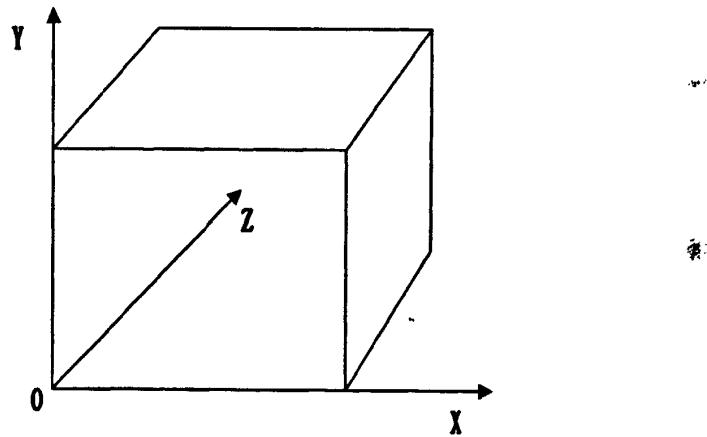


图 2.1 图像立方体的构成

个层面是“不透明”的，只能看到立方体的表面。图像立方体的六个面可以分为两类：一是空间直线 X 与空间直线 Y 组成的平面空间 OXY 平面；二是空间维与光谱维构成的 OXZ、OYZ 平面。其中 OXY 平面图像与传统灰度图像相同，可以反映某一波段信息；也可以是彩色合成图像，同时表达三个波段信息。OXZ、OYZ 平面的图像则与传统图像不同，它反映某一条直线上的地物光谱信息。对于高光谱图像中某一点的光谱特征最直观的表达方式就是二维光谱曲线。光谱曲线图大致如图 2.2 所示，由于不同的地物具有不同特征的光谱曲线，我们可以通过光谱曲线对地物进行识别。

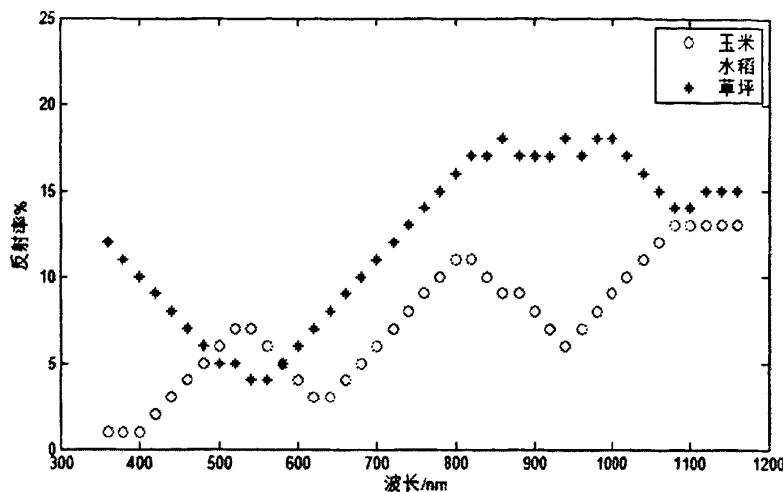


图 2.2 光谱曲线

2.1.2 高光谱图像概貌分析的基本统计量

高光谱图像具有总体的特征信息，其亮度值大小受很多因素的影响。而这些因素的变化具有很大的随机性，所以高光谱遥感图像的灰度值也是一种随机变量。本节主要介绍一下高光谱遥感图像概貌分析的统计量，为后续图像去噪方法的研究奠定基础。

1、均值

均值用来表示图像中所有像元亮度值的算术平均值，可以反映地物的平均反射强度，表现地物的平均反射率。

如果用 \bar{X} 表示均值，那么它的计算公式为：

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (2-1)$$

其中： X_i 表示图像中各个像元的灰度值； n 表示图像的像元个数。

2、方差和标准差

方差和标准差可以用来描述该幅图像的像元值相对于图像平均值的离散程度，复杂影像的灰度值离散程度大。对于地物分布比较丰富的高光谱图像，可以通过去噪前后标准差的改变大小来判定该图像的地物信息改变情况。由此可以看出，方差和标准差是衡量图像信息量大小的重要指标之一。

标准差 σ 和方差 σ^2 的计算公式为：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (2-2)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n} \quad (2-3)$$

4、反差

图像的反差可以用以下三个公式表示：

$$X_{c1} = \frac{X_{\max}}{X_{\min}} \quad (2-4)$$

$$X_{c2} = X_{\max} - X_{\min} \quad (2-5)$$

$$X_{c3} = \sigma \quad (2-6)$$

其中： X_{c1} ， X_{c2} ， X_{c3} 均表示图像的反差。反差可以用来描述图像的显示效果，会直接影响到图像的可分辨性。如果反差偏小，则影像的判读效果较差。在这三个表达式中标准差会比较精确，其它两个受个别极端变化的像元的影响较大。

2.1.3 高光谱图像的直方图

1、直方图的基本概念

图像的直方图能够表示图像中每个波段灰度值与像元数关系分布曲线，如图 2.3 所示^[13]，该图像的横坐标表示该图像的灰度级变化，纵坐标表示图像中某个灰度级像元数目占整幅图像像元数目的百分比。直方图能够反映图像信息量和分布特征，它是图像分布的一种直观描述。因此，在高光谱遥感图像条带噪声的滤除方法中，有一种就是通过修正图像的直方图来达到滤除图像中条带噪声的目的。

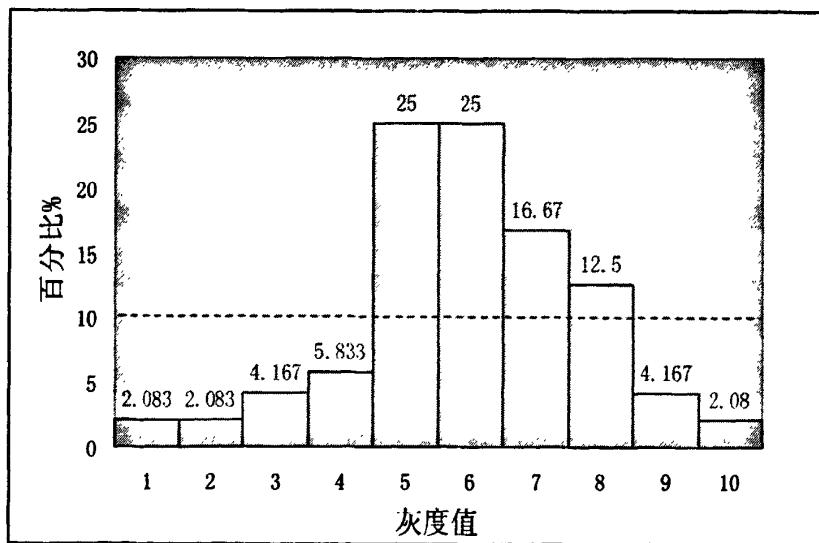


图 2.3 高光谱遥感图像直方图

2、图像直方图的基本类型

在高光谱遥感图像处理中，根据直方图纵坐标值物理意义的不同，可以把图像直方

图分为两种类型。一种是频数直方图，它的纵坐标表示某个灰度级的像元在图像中分布的百分比，这种直方图曲线相当于概率密度曲线；另一种是累积直方图，它的纵坐标表示小于或等于特定灰度级的像元在图像中的百分数，这种直方图曲线相当于累积概率密度曲线^[14]。

3、图像数据的理想分布

假设像元亮度是随机分布的，在图像包含大量像元的前提下，图像的直方图分布函数服从或接近于正态分布（如图 2.4a 所示）。基于这种思想，我们可以通过一幅图像的直方图形态大致判断出图像的质量。通常情况下，图像直方图的分布曲线越接近正态分布，说明该图像的对比度越好。如果直方图分布曲线的峰值偏向灰度值小的一侧（如图 2.4b 所示），说明图像偏暗；反之，若峰值偏向灰度值较大的一侧（如图 2.4c 所示），说

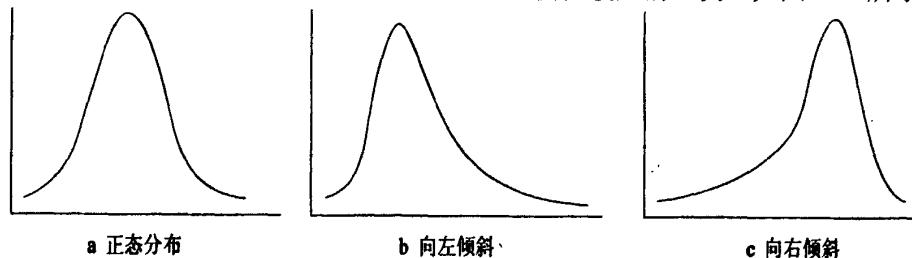


图 2.4 高光谱遥感图像直方图分布曲线

明图像偏亮^[12]。由此可见，通过有目的的改变直方图形态从而改善图像质量是图像处理的一种可行方法。

2.2 高光谱图像中的条带噪声

噪声可以理解为“妨碍人们的感觉器官对所接受的信源信息理解的因素”。噪声按产生的原因可以分为内部噪声和外部噪声。内部噪声一般可以分为由光和电的基本性质引起的噪声、器材材料本身所引起的噪声、电器的机械运动所引起的噪声和系统内部电路所引起的噪声。外部噪声是指系统外部受到干扰，并且以电磁波或经电源进入到系统内部所引起的噪声，如天体放电现象、电器设备等引起的噪声^[15]。高光谱图像的噪声一般分为两大类：一类是普通的随机噪声，我们经常见到的噪声类型主要有高斯噪声和脉冲噪声等类型；另一类是由成像光谱仪 CCD 扫描器件响应不一致产生的噪声，即条带噪声。

2.2.1 成像光谱仪工作原理

成像光谱仪是 20 世纪 80 年代初研制成功的新一代传感器。随着这些年的发展，现在成像光谱仪的种类比较多，工作原理也不太相同。常见的成像光谱仪见表 2-1^[4]。

表2-1 主要成像光谱仪概览

传感器	波段数	光谱范围 (nm)	波段宽 /nm	国家
AIS 航空成像光谱仪 AIS-1	128	990~2100	9.3	美国
		1200~2400		
AIS-2	128	800~1600	10.6	
		1200~2400		
AMSS 航空多光谱扫描仪	32	490~1090	170~240	澳大利亚
	8	2020~2370	430~440	
	6	8500~12000	550~590	
AVIRIS 航空可见光/红外成像光谱仪	224	380~250	9.7~12.0	美国
CASI 小型机载成像光谱仪	≥288	430~870	1.8	加拿大
CIS 成像光谱仪	64	400~1040	10	中国
	24	2000~2480	20	
	1	3530~3940	410	
	2	10500~12500	1000	
PHI 推扫式成像光谱仪	244	400~850	7.6~14.9	中国
ISM 红外成像光谱仪	64	800~1600	12.5	法国
	64	1600~3200	25	
MAS MODIS 航空成像光谱仪	50	547~14521	31~517	美国
ROSIS 反射光学系统成像光谱仪	84	430~830 (≤2400)	4~12	德国
Hyperion 高光谱成像仪	220	400~2500	约 10	美国

在了解成像光谱仪的扫描方式之前，我们首先要知道像元网格是数字图像通过横向扫描结合平台沿飞行方向向前移动产生的，同时传感器通过扫描仪对地物进行扫描记录产生了像元的亮度值。目前已有的成像光谱仪的扫描方式大致分为掸扫式和推扫式两种。扫描仪利用探测元件获取平行扫描线组的成像方式属于掸扫式成像，如陆地卫星传感器 TM；扫描仪以平行方式推扫整景宽而获取图像的成像方式属于推扫式成像，如

SPOT HRV 有一个由上千个探测元件构成的线阵列^[16]。

1、掸扫式成像原理

掸扫式线阵列成像光谱仪是一种光机扫描装置，可以产生具有多个波段的图像数据。该光谱仪是在扫描平台向前运动的同时电机左右掸扫产生的图像，其每个瞬时视场像元的光谱维获取是由线阵列探测器完成的，如图 2.5 所示。这个仪器的核心部件是线

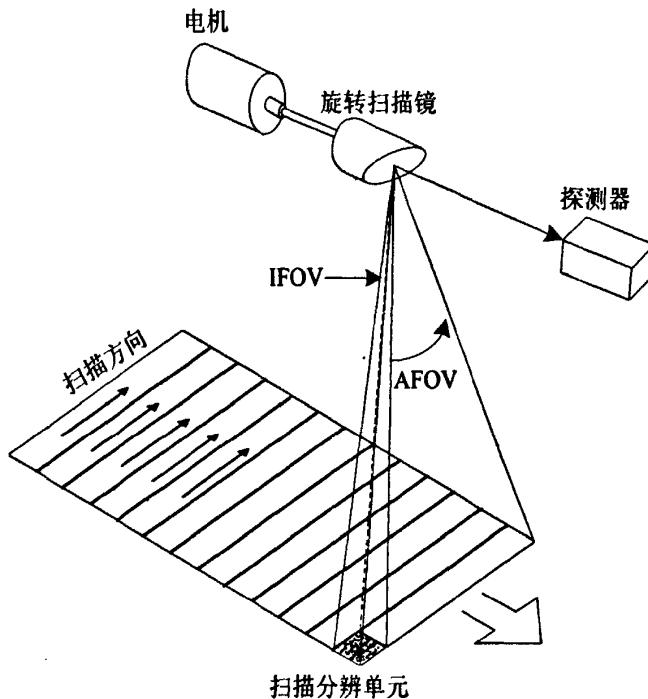


图 2.5 掸扫型成像光谱仪成像方式

状光电探测器，它使 CCD 线阵列的各个元件都能接收到不同波长的辐射能的照射。掸扫式成像光谱仪的优点在于光谱范围宽，像元配准好，总视场比较大（可以达到 900），数据稳定性也比较高；缺点在于不同波段在同一时刻都凝视同一像元，使得每个像元凝视的时间相对较短，所以该类光谱仪在提高光谱和空间分辨率上有很大困难。美国 GER 公司的 Deadalus 系统和我国上海技术物理所研制的实用型机载成像光谱仪都属于这类成像机理，本文实验用到的 AVIRIS 图像就是由这种扫描方式成像产生的典型例子^[3]。

2、推扫式成像原理

推扫式面阵列成像光谱仪的二维空间扫描是在飞行平台向前运动中，通过一个垂直于运动方向的面阵探测器完成的，同时在平行于平台运动方向通过光栅和棱镜分光完成光谱维扫描，工作原理如图 2.6 所示。推扫式成像光谱仪的优点是像元的凝视时间得到了较大的提高，相对于掸扫式成像光谱仪的增加量可以达到 10^3 数量级。由于凝视时间直接影响到系统的灵敏度和信噪比，所以在系统空间分辨率和光谱分辨率方面，推扫式

成像光谱仪比掸扫式成像光谱仪有一定的优势。但是这类光谱仪也存在一些缺点，比如：由于面阵 CCD 器件探测元件有上万个，庞大的数量为标定带来了很多困难；由于探测

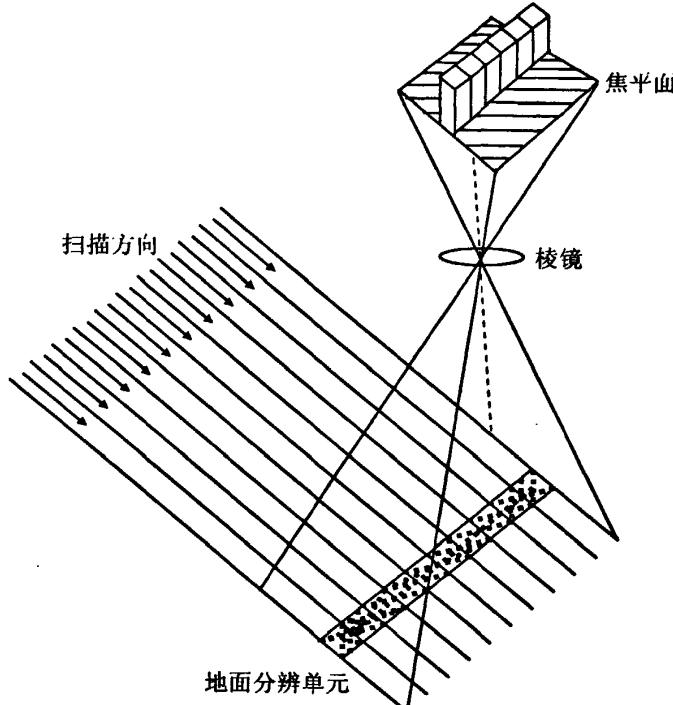


图 2.6 推扫型成像光谱仪成像方式

器件尺寸小，光学设计也比较困难，使得总视场角最大只能做到 30° 左右。目前这类成像光谱仪有中科院上海物理研究所的 PHI（推扫式成像光谱仪）、加拿大的 CASI，它们的波长范围均为可见光到近红外；而美国研制的 HIRIS (High Resolution Imaging Spectrometer) 以及 HYDICE 同样采用推扫方式，波长范围从可见光延伸到了短波红外 ($0.4\text{--}2.5\ \mu\text{m}$)^[3]。

2.2.2 条带噪声的产生机理

条带噪声普遍存在于一些星载、机载单传感器和多传感器成像光谱仪中。这些噪声主要是由于传感器件在反复扫描成像过程中，探测单元受正反两方面差异或传感器机械运动等多种因素干扰产生的。因为探测器是高光谱成像光谱仪的核心部件之一，要分析高光谱图像条带噪声的产生机理，首先要了解 CCD 线阵列探测器或面阵探测器。无论哪种探测器，对于不同的成像光谱仪，它每一行的探测单元数都不相同。条带噪声的产生是由于这些探测元之间响应不一致，空间复杂的电磁环境以及器件本身的误差造成的^[17]。所以，影响条带噪声产生的因素主要可以分为以下两个方面：

1、由于元器件内部系统误差、传感器工艺差异、光谱仪元件老化等因素使各个探

测单元的传递函数不同，从而造成传感器的电子装置性能降低，对电磁辐射响应产生差异从而产生与探测器扫描方向相同的“周期性条带噪声”。

2、在扫描过程中，各 CCD 探测单元间响应的非一致性是造成条带噪声产生的主要原因之一，响应函数差异曲线如图 2.7 所示。由于空间电磁干扰、传感器的运动、探测

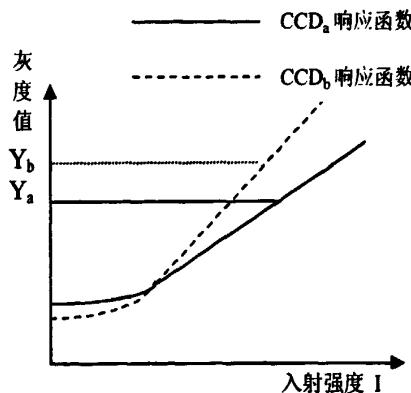


图 2.7 CCD 响应函数差异比较

单元正反扫描响应的差异等因素都会影响到 CCD 探测器的驱动信号以及成像系统的光能量等，进而影响到成像光谱仪的工作状态，导致探测单元间响应不一致而产生条带噪声^{[18][19]}。这类条带噪声与探测器扫描方向仍然保持相同，但是不具有周期性。

2.2.3 条带噪声的特性分析

高光谱图像中条带噪声的主要特点有^[5]：

- 1、沿成像光谱仪扫描方向分布。条带噪声主要是由于 CCD 探测单元之间响应不一致造成的，所以条带噪声的分布沿着扫描方向按行或列分布，与扫描方向基本相同。
- 2、在图像中表现为条带形式。一般的随机噪声是以点状或者脉冲形式分布在图像上，而高光谱图像中的条带噪声沿行或列方向分布，并且贯穿于整幅图像中。
- 3、条带噪声具有一定的宽度。在高光谱图像中条带噪声的宽度可以表现为 1 个或多个像素宽，也可能同时存在多种宽度的条带噪声，表现为宽窄不一的明暗条纹。
- 4、条带噪声具有一定的明暗度。如果当前噪声像素的灰度值高于相邻信息的灰度值，则表现明条纹，如果当前像素灰度值低于相邻信息，则表现为暗条纹。

2.3 本章小结

本章首先介绍了高光谱图像数据的表达形式，包括图像的概貌分析及直方图的表示形式，然后从成像光谱仪的工作原理入手，描述了高光谱图像条带噪声的产生机理以及

条带特征。这些基本理论的概述，主要是为文章后续章节的条带去噪的基本理论及创新方法奠定了一定的理论基础。

第3章 高光谱图像条带噪声滤除的基本方法

高光谱图像由于具有优良的光谱特性，在国内外已得到广泛的应用。但是高光谱图像中普遍存在着条带噪声，严重影响了地物信息的识别。条带噪声在高光谱图像上表现为沿扫描方向分布，并且不具有周期性。在地表反射率信号比较弱的情况下，条带噪声表现的更加明显。目前，国内外已有不少学者针对不同类型光谱仪的成像机理，对光谱图像中的条带噪声进行了深入研究。根据噪声处理的信号域的不同，可以分为图像空间域去噪方法和图像变换域去噪方法两大类。其中空间域去噪技术是指直接在空间域上对原始图像的像素点进行处理，如直方图匹配、矩匹配等方法；变换域去噪技术是先对图像进行某种数学变换，使其从空间域转换到变换域，然后再对变换域中的变换系数进行修正处理，最后进行反变换得到处理后的图像，如基于傅里叶变换、小波变换的方法等。

3.1 直方图匹配消噪方法

直方图可以显示出一幅图像中不同灰度级出现的相对概率。利用直方图匹配消除高光谱图像中的条带噪声是 Horn 和 Kautsky 等人在 20 世纪 70 年代首先提出的。直方图匹配法是基于直方图均衡的思想提出的，通过采用控制图像灰度分布直方图的方法达到消除条带噪声的目的。当图像对比度比较低，看起来模糊不清时，灰度范围一般集中在中间或较低部分，此时采用直方图均衡化的方法可以使图像的灰度分布调整到整个灰度范围内，从而增强图像的对比度，使图像变得清晰。直方图匹配法是在此基础上将成像光谱仪中每个传感器所形成的子图像的直方图经过变换调整到一个参考直方图上，使它与预先指定的直方图相匹配^[20]。这一方法的前提是假设每个传感器探测到的地物具有均衡的辐射分布。具体实现步骤是，首先将每一个探测元的直方图累积概率密度分布函数(CDF)匹配到参考探测元的直方图 CDF 上^[21]。假设 $P_i(x)$ 代表第 i 个探测元的直方图概率密度，那么第 i 个探测元的累积概率密度分布函数 $P_i(x)$ 可以表示为^[22]：

$$P_i(x) = \sum_{t=0}^x P_i(t) \quad (3-1)$$

$P_i(x)$ 最大值为 1，是 x 的单调递增函数；设 x' 是第 i 个探测元的输出值 x 的校正值，那么 x' 满足^[22]：

$$P_r(x') = P_i(x) \quad (3-2)$$

其中 r 表示参考探测元；所以，矫正后 DN 值 x' 可以表示为^[23]：

$$x' = P_r^{-1}(P_i(x)) \quad (3-3)$$

由于高光谱图像相邻波段之间具有较好的相关性，那么我们可以用相邻的未受条带

噪声污染的波段的图像去匹配受到条带噪声污染的图像。但是，在不同的波段图像中，不同地物具有不同的辐射特性，经过这种思想匹配后的图像会对原始图像的信息改变较大，所以直方图匹配法还有待进一步探索和研究。

3.2 矩匹配去噪方法

3.2.1 传统矩匹配法

由光谱仪成像产生的高光谱图像中普遍存在着条带噪声，主要是由各 CCD 探测单元在光谱响应区内的响应函数不一致产生的，同时这些噪声与传感器增益或补偿值变化有关。20世纪末，Gadallah 等人认识到了直方图匹配法的缺陷，提出了比直方图匹配法滤除噪声效果较好的矩匹配法。该方法的思想是假设入射辐射强度的均值和方差近似相等，那么各 CCD 探测单元的响应函数具有移不变性质^[24]。如果我们用 C_i 表示第 i 个 CCD 探测单元，那么 C_i 的光谱响应函数可以表示为^[25]：

$$Y_i = k_i X + b_i + \varepsilon_i(X) \quad (3-4)$$

其中， Y_i 表示图像像素灰度值，也就是 C_i 输出值， b_i 和 ε_i 表示偏移量和随机噪声， k_i 表示函数增益， X 表示 CCD 记录的辐射量。在高信噪比情况下，我们可以忽略随机噪声的影响，式(3-4)可简化为：

$$Y_i = k_i X + b_i \quad (3-5)$$

由公式(3-5)，我们可以分析出条带噪声的产生原因。对于相同的辐射量 X ，如果增益 k_i 和偏移 b_i 取不同值，那么就会得到不同的灰度值 Y_i 。因此，我们可以通过将输出灰度值 Y_i 归一化到相同值的方法达到消除条带噪声的目的。

矩匹配法的思想是在地物分布比较均衡的情况下，假设 CCD 按行扫描，那么选取某一 CCD 行作为参考行，将其它 CCD 校正到该参考 CCD 的辐射率上，具体的匹配公式如(3-6)所示^[25]：

$$Y_i = \frac{\sigma_r}{\sigma_i} X_i + \mu_r - \mu_i \frac{\sigma_r}{\sigma_i} \quad (3-6)$$

X_i ， Y_i 分别表示该幅图像第 i 行像素校正前后的灰度值； μ_i ， μ_r 分别表示第 i 行和参考 CCD 行的均值； σ_i ， σ_r 分别表示第 i 行和参考 CCD 行的标准差。矩匹配法具有比直方图匹配法较好的条带噪声滤除效果，但是我们实际获得的图像一般都是地物分布较复杂的情况，很难满足地物均衡分布的要求。所以，使用矩匹配法滤除噪声后的图像通常会产生“带状效应”，即图像沿垂直于扫描方向会产生一种明暗相间的条纹。产生这种现象的根源是，经过矩匹配的图像具有相等的行均值，即行均值分布曲线为一条直

线^[26]。由于我们获得的高光谱遥感图像中大多包含多种地物分布特征，所以实际灰度分布难以满足矩匹配法适用的前提条件，从而容易导致图像上地物光谱信息的分布发生畸变，即产生“带状效应”。

由此可以看出，矩匹配法虽然在算法上比直方图匹配法有了一定的改进，但是由于实际高光谱图像中地物丰富，并且分布无规律，很难满足其适用条件，所以矩匹配法很难具有广阔的应用前景。

3.2.2 改进的矩匹配法

从 21 世纪开始，不断有学者针对矩匹配方法的缺点，对原始的矩匹配方法提出改进措施。其中主要以刘正军等人提出的基于矩匹配的均值补偿和相关系数两种方法取得了较好的条带噪声滤除效果。

1、基于矩匹配改进的均值补偿算法

由于实际高光谱图像中地物分布很难满足均衡的情况，所以矩匹配算法滤除条带噪声后通常会产生“带状效应”。为了减轻条带噪声滤除过程中对真实地物信息的影响，刘正军等人提出了均值补偿算法。假设 CCD 探测单元个数为 N 个，用 C_i 表示第 i 个 CCD 探测元，在相同的成像条件下，第 i 行成像的像素行均值用 μ_i 表示，那么对于第 l 行(其中 $l=k*N+i$ ， k 为自然数)也是由 C_i 成像产生的，其行均值用 μ_l 表示，对于这两行的任意像素点 j 可以表示为^[8]：

$$Y_j = k_i X_j + b_i \quad (3-7)$$

$$Y_j = k_l X_j + b_l \quad (3-8)$$

上式整理得：

$$X_j - X_j = \frac{1}{k_i} (Y_j - Y_j) \quad (3-9)$$

对上式两边同时求和得：

$$\sum X_j - \sum X_j = \frac{1}{k_i} (\sum Y_j - \sum Y_j) \quad (3-10)$$

将(3-10)等式两端同时除以像素列数(即每行包含的像元数)即可得到入射辐射强度的均值差，用 Δ_l 表示：

$$\Delta_l = \frac{1}{k_i} (\mu_l - \mu_i) \quad (3-11)$$

经过移相得：

$$\mu_l - \mu_i = \frac{1}{k_i} * \Delta_l \quad (3-12)$$

根据公式(3-12)，我们可以看出，地表真实出射辐射强度均值的差值可以由同一 CCD 探

测单元扫描形成的不同行之间的均值差表示。如果选用图像的前 N 行数据作为参考均值，利用上述方法对 N 行之后的每一 CCD 成像行进行计算，得出的差值序列构成的曲线就是列方向地表均值差值变化曲线。补偿后的图像可以由差值序列叠加到矩匹配法的计算结果上得到，即将公式(3-12)叠加到(3-6)中，对于补偿后图像中任一 C_i ($i \leq N$) 的第 l 成像行中的任一像素 j 有^[11]：

$$Y_{ij} = \frac{\sigma_r}{\sigma_i} X_{ij} + \mu_r + \mu_l - \mu_i \left(1 + \frac{\sigma_r}{\sigma_i}\right) \quad (3-13)$$

其中， X_{ij} ， Y_{ij} 分别为该像素校正前后的图像灰度值。

考虑到各 CCD 的漂移值对计算真实均值差值变化的影响，我们可以在图像上一定范围内选择多个地物分布比较均匀的矩形区域进行多次计算，将这些次计算结果的期望值作为漂移值的近似值。采用这种方法可以克服 CCD 的漂移值对真实均值差值变化的影响。该方法适用于较小的非均匀图像，在一定程度上改善了“带状效应”，但是均值补偿法的缺点在于条带滤除效果受前 N 行数据的影响。

2、基于矩匹配改进的相关系数算法

高光谱图像的最大特点之一就是波段多，并且相邻波段之间具有较好相关性^[26]。也就是说，相邻波段图像的直方图具有相似的灰度分布，所以相邻波段之间行均值的分布也近似相等。基于这种条件，我们可以利用成像质量较好的波段图像去修正条带噪声比较明显的波段的图像。首先求出待去噪波段与相邻多个波段之间的相关系数，从结果中提取出图像本身质量较好且与待去噪波段相关系数较高的邻近波段的图像，然后再计算出提取波段的各行的均值与整个图像均值的差值，再将差值分别乘以一定的常数，然后叠加到矩匹配后图像的均值序列上，这样就得到了真实均值序列的模拟近似值^[27]。经过多次实验总结，该常数一般为小于 0.05 倍原图像均值的数，具体大小依据相关系数模拟效果设定，还需要指出的是，为避免叠加后像素灰度均值增大的现象出现，在叠加之前应该将经过矩匹配后的图像像素减去一定的数值^[28]。

如果分别用 X ， Y 表示两个波段各行的均值序列， $\sqrt{D(X)}$ ， $\sqrt{D(Y)}$ 分别表示 X ， Y 波段均值序列的方差， $Cov(X, Y)$ 表示 X ， Y 波段均值序列的协方差。那么相关系数的计算公式为^[5]：

$$\rho_{X,Y} = \frac{Cov(X, Y)}{\sqrt{D(X)} \sqrt{D(Y)}} \quad (3-14)$$

相关系数法能够取得比矩匹配法更好的滤除效果，但是在用一个波段数据对另一个波段进行校正时，容易对本身波段的某些细节信息造成损害。所以，该方法对参考波段

的图像质量要求较高。

3、自适应滑动匹配方法

2007年常威威在硕士论文中提出一种窗口自适应滑动的条带噪声滤除方法。首先计算图像每行的均值和标准差,选定窗口的初始宽度大于最大条带宽度;然后以图像行均值为基准,将窗口沿垂直于条带方向滑动,选取窗口内行均值的中值为阈值,若窗口中心的行均值大于阈值(此为明条纹情况,暗条纹情况正好与此相反),判定其为条带噪声所在行,同时整行像素灰度值进行匹配调整,完成一次滑动匹配之后,选取新的较小的窗口,迭代的进行滑动匹配调整,直到窗口大小为^{3^[5]}。此方法的关键在于如何更好的估计最宽条带宽度,进而确定最大窗口。若窗口选择过小,不能彻底滤除条带噪声;若窗口选择过大,会使图像过分平滑,同时过大的条带宽度范围内,地物分布情况也会变得复杂,进而影响匹配结果的精确性。2010年郑逢斌、支晶晶等人提出了一种新的矩匹配和平滑滤波相结合的条带噪声滤除方法,该方法的主要思想是将传统矩匹配算法中“参考图像”的平均值和标准差分别用平滑滤波处理后的列均值和方差来代替^[29]。通过实验结果验证了该算法比传统矩匹配方法具有一定的优势,但是噪声滤除后的图像仍存在斑点噪声。

3.3 基于傅里叶变换的条带去噪方法

利用傅里叶变换公式将信号变换到频率域进行噪声的滤除,是变换域去噪的基本方法之一。将此方法应用在高光谱图像条带噪声的滤除上,首先是把一幅含有条带噪声的高光谱图像变换到傅里叶频域空间,其每个频谱区域都对应代表空间域中的某一特定成分^[29]。根据对不同光谱仪产生的条带噪声这种特定成分的分析,可以通过在傅里叶频域空间构造一个滤波器来达到滤除条带噪声频率成分的目的,最后再反变换到时空域得到滤除条带噪声之后的图像。

3.3.1 傅里叶变换的基本理论

时域内任何一种信号都可以看作是一种复杂的波动,这些复杂的波动现象是由不同频率、不同幅度的正弦波叠加而成的^[16]。傅里叶变换的基本思想就是把时域信号变换到频率域,通过分析信号的频谱特性来解决时域内难以处理的问题,然后再将信号反变换回时域。

如果信号为 $f(t)$,那么经过一维傅立叶变换后 $F(s)$ 为^[17]:

$$F(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j2\pi s t} dt \quad (3-15)$$

$F(s)$ 的一维傅里叶反变换公式为:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(s) e^{j2\pi s t} ds \quad (3-16)$$

如果信号为 $f(t)$, 那么经过二维傅立叶变换后的信号为 $F(u, v)$:

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \quad (3-17)$$

$F(u, v)$ 的二维傅里叶反变换公式为:

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(u, v) e^{j2\pi(ux+vy)} du dv \quad (3-18)$$

由于实际的图像处理中常常用到的是离散信号, 而上述公式是针对连续信号的, 那么下面介绍一下离散信号的傅里叶变换公式。

假设 $f(x)$ 是长度为 N 的离散信号, 那么其经过一维傅里叶变换后为 $F(u)$ ^[30]:

$$F(u) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) e^{-j2\pi \frac{u}{N} x} \quad (3-19)$$

那么 $F(u)$ 的一维离散傅里叶反变换公式为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{u=0}^{N-1} F(u) e^{-j2\pi \frac{x}{N} u} \quad (3-20)$$

假设 $f(x, y)$ 是二维离散信号, 进过傅里叶变换后为 $F(u, v)$:

$$F(u, v) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi \left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)} \quad (3-21)$$

那么 $F(u, v)$ 的二维离散傅里叶反变换公式为:

$$f(x, y) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) e^{-j2\pi \left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)} \quad (3-22)$$

其中, x, y 代表空域采样值; u, v 代表频域采样值。

3.3.2 基于傅里叶变换的条带去噪

如果一幅图像的大小是 $M \times N$, 根据公式 (3-19), 它经过二维傅里叶变换后为:

$$F(u, v) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi \left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)} \quad (3-23)$$

那么频域空间滤波可以表示为:

$$G(u, v) = F(u, v) H(u, v) \quad (3-24)$$

其中, $G(u, v)$ 表示图像进行频域滤波后的傅里叶能量谱, $H(u, v)$ 表示选取的频域滤波器。

滤除噪声后的图像 $\hat{f}(x, y)$ 可以由公式 (3-25) 得到:

$$\hat{f}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} G(u, v) e^{-j2\pi \left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)} \quad (3-25)$$

基于以上理论, 傅里叶变换在条带噪声的滤除上的应用步骤可以参照 3.1 所示的流程图^[30]。

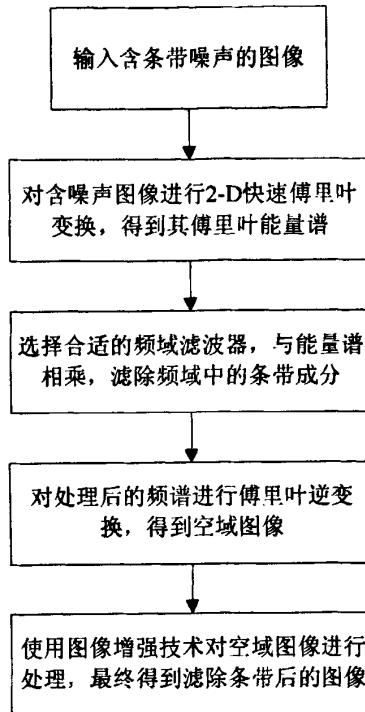


图 3.1 傅里叶变换在图像去噪中的基本流程

该算法的关键在于如何准确地构造出一个能分离出条带噪声频率成分的频域滤波器。这就需要对条带噪声的频谱特性进行深入的分析, 如何确定条带噪声的频率成分以及如何选择滤波器以及对滤波器的参数进行设计, 成为这种算法应用中的一个难点。尤其对于一些周期性不强的条带噪声, 很难通过分析其频谱特点, 选择合适的频域滤波装置^[31]。所以, 大多数经过傅里叶变换去噪后的高光谱图像中还存在条带噪声滤除不彻底或者图像纹理细节信息丢失的缺点^[32]。

3.4 基于小波变换的条带去噪方法

小波变换以其独特的时频分析和多分辨率分析特性, 弥补了傅里叶变换在信号分析方面的不足。近年来, 小波变换在图像处理的各个领域得到了广泛的应用。尤其是小波变换作为继傅里叶变换之后的一种新的图像去噪方法, 受到国内外许多学者的广泛关注。图像信号与噪声信号经过小波变换后, 在不同的分辨率下能够呈现出不同规律。利用这一特点, 只需要在不同的分辨率(不同的层次)下, 设定不同的阈值门限, 调整小波系数, 就可以达到小波去噪的目的^[26]。同时, 小波变换的去相关性和选基灵活性等特点, 也使它在去噪方面有了更广阔的应用前景。目前, 图像消噪已经成为小波变换技术

的重要应用领域之一。

3.4.1 小波变换的基础理论

1、连续小波变换

设 $\psi(t) \in L^2(R)$, 若其傅里叶变换满足:

$$C_\psi = \int_R \frac{|\hat{\psi}(t)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (3-26)$$

则 $\psi(t)$ 被称为一个基本小波或母小波, 式(3-26)称为允许条件; 将 $\psi(t)$ 伸缩和平移后得到一个小波序列为^[33]:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in R; a \neq 0 \quad (3-27)$$

其中 a 称为伸缩因子, b 称为平移因子;

设任意函数 $f(t) \in L^2(R)$, 则其的连续小波变换 (CWT) 为:

$$W_f(a, b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3-28)$$

逆变换 (ICWT) 为:

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2} W_f(a, b) \psi_{a,b}(t) da db \quad (3-29)$$

由于小波基具有伸缩和平移两个因子, 所以将小波基展开就意味着将时间函数投影到了二维的尺度—时间平面上, 有利于特征的提取。

2、离散小波变换

在实际应用中, 为了能在计算机上很好的实现, 必须把连续小波进行离散化。因此有必要对连续小波 $\psi_{a,b}(t)$ 和连续小波变换 $W_f(a, b)$ 进行讨论。离散化是针对连续的尺度参数 a 和连续的平移参数 b 而进行的, 并不是针对时间变量^[34]。

在离散化过程中, 把尺度参数 a 和平移参数 b 取为: $a = a_0^j$, $b = k b_0 a_0^j$, 其中 $k, j \in \mathbb{Z}$, $a_0 > 1$, $b_0 > 0$, 且 a_0 , b_0 都是固定值, 则离散小波函数可以表示为:

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \psi\left(\frac{t - k b_0 a_0^j}{a_0^j}\right) = a_0^{-j/2} \psi(a_0^{-j} t - k b_0) \quad (3-30)$$

设任意函数为 $f(t)$, 则其离散小波变换 (DWT) 为:

$$W_f(j, k) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{j,k}^*(t) dt \quad (3-31)$$

为了在离散化时, 能够很好的重构原有信号, 引入小波框架的概念。离散小波变换要完全重建, 则离散小波序列 $\{\psi_{j,k}\}_{j,k \in \mathbb{Z}}$ 必须构成希尔伯特空间中的一个框架, 同时满

足稳定性的约束条件, 即对 Hilbert 空间中的所有 $f \in H$, 都存在 $0 < A, B < \infty$ 的两个数, 使其满足以下条件:

$$A\|f\|^2 \leq \sum_j |\langle f, \psi_{j,k} \rangle|^2 \leq B\|f\|^2 \quad (3-32)$$

A 和 B 被称为框架界, 如果 A 和 B 相等, 则此时的框架称为紧框架。当在紧框架的情况下, 重构公式为:

$$f(t) = \frac{1}{A} \sum_{j,k} W_f(j,k) \cdot \psi_{j,k}(t) \quad (3-33)$$

3、多分辨率小波分析

多分辨率分析理论是 Mallat 在 1989 年提出的, 是一个建立在函数空间概念上的理论。Mallat 首先将多分辨分析方法引入到了小波变换, 为小波基的构造提供了一种快速简便的方法, 同时也为小波变换的分解及重构提供了一种快速算法。多分辨分析是从函数空间的角度来构建不同尺度空间的关系, 在 $L^2(R)$ 空间中, 函数被分解成一系列近似函数的极限, 其中每个近似函数都为原函数的逼近, 且程度越来越高^[35]。

设 $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$ 为空间 $L^2(R)$ 的一系列序列, 如果满足以下条件:

①单调性: $\{V_j\}$ 是一个嵌套序列, 即 $\cdots V_{j-1} \subset V_j \subset V_{j+1} \subset \cdots$

②逼近性: 所有 V_j 的并在 $L^2(R)$ 上都是稠密的, 所有 V_j 的交是零函数, 即 $\bigcup_{j \in \mathbb{Z}} V_j = L^2(R)$, $\bigcap_{j \in \mathbb{Z}} V_j = \{0\}$

③伸缩性: 即 $f(t) \in V_j \Leftrightarrow f(2t) \in V_{j+1} \quad j \in \mathbb{Z}$

④平移不变性: 即 $f(t) \in V_j \Leftrightarrow f(t-k) \in V_j \quad k \in \mathbb{Z}$

⑤Riesz 基的存在性: 存在函数 $\phi \in V_0$, 使 $\{\phi(t-k)\}_{k \in \mathbb{Z}}$ 是 V_0 的一个 Riesz 基, 即对任意 $f(t) \in V_0$, 总存在序列 $\{C_k\}_k \in L^2(R)$, 在常数 A 和 B 满足 $0 < A \leq B < \infty$ 的条件下, 使

$$f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} C_k \phi(t-k) \quad (3-34)$$

$$\text{且 } A\|f\|_2^2 \leq \sum_{-\infty}^{\infty} |C_k|^2 \leq B\|f\|_2^2$$

则 ϕ 被称为尺度函数, 且称函数 ϕ 生成一个分辨率分析 $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$, $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$ 在 $\{0\}$ 和 $L^2(R)$ 之间是相互嵌套的, 即:

$$\{0\} \leftarrow \cdots V_{j-1} \subset V_j \subset V_{j+1} \subset \cdots \rightarrow L^2(R) \quad (3-35)$$

当 j 越大时, 则相应层的时间分辨率越细, 相反, 当 j 越小时, 相应层的时间分辨率越粗。图 3.2 形象地表示了多分辨率分析的空间关系。

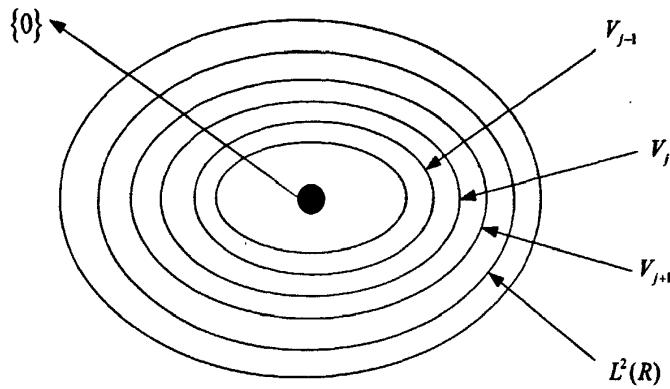


图 3.2 多分辨率的空间关系图

4、小波变换的快速算法

多分辨分析理论给人们讨论信号的局部特征提供了一个直观的框架，这对于非平稳信号来说是非常重要的，因为非平稳信号的频率随着时间的变化而变化，这种变化可以被分成快变和慢变，快变部分对应于信号的高频部分，代表信号的细节；而慢变部分对应于信号的低频部分，代表信号的轮廓^[36]。为了将信号的高频和低频部分分开处理，Mallat 提出了一种离散小波分解和重构的快速算法，其分解表达式为：

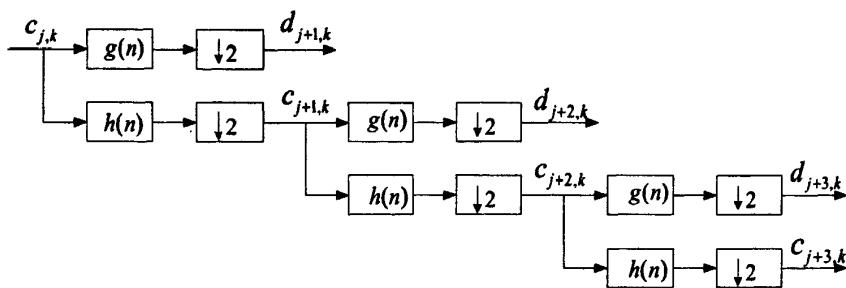
$$c_{j,k} = \sum_m h(m-2k)c_{j-1,m} \quad (3-36)$$

$$d_{j,k} = \sum_m g(m-2k)c_{j-1,m} \quad (3-37)$$

重构表达式为：

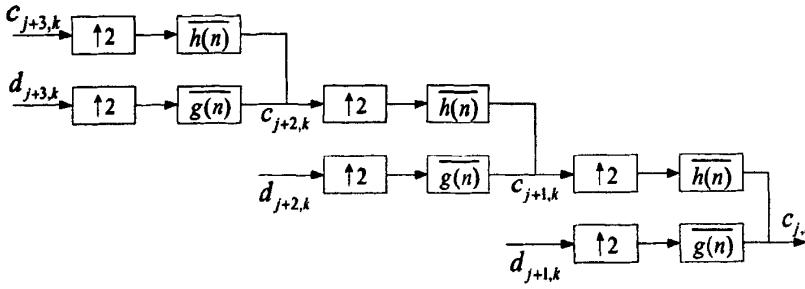
$$c_{j-1,m} = \sum_k c_{j,k}h(m-2k) + \sum_k d_{j,k}g(m-2k) \quad (3-38)$$

其中， $c_{j-1,m}$ 为尺度 $j-1$ 上的尺度系数， $c_{j,k}$ 为尺度 j 上的尺度系数， $d_{j,k}$ 为尺度 j 上的小波系数。离散小波变换的分解和重构快速算法可分别用图 3.3 (a) 和图 3.3 (b) 来表示^[37]。



(a) 离散小波变换分解

图 3.3 一维离散小波变换快速运算



(b) 离散小波变换重构
图 3.3 一维离散小波变换快速运算

其中, h 和 g 分别为低通滤波器和高通滤波器, \bar{h} 和 \bar{g} 分别为 h 和 g 的逆滤波器。

3.4.2 小波变换图像去噪

假如图像用函数 $f(x, y)$ 表示, 那么其二维小波变换可以表示为:

$$W_j^\lambda f(x, y) = \iint_{R^2} f(u, v) \psi_j^\lambda(x-u)(y-v) du dv \quad (3-39)$$

其中 λ 表示不同的高频分量, j 表示分解的尺度。

设原图像 $f(x, y)$ 为 C_0 , 小波函数 $\psi(x)$ 和尺度函数 $\varphi(x)$ 对应的滤波器系数矩阵分别为 G 和 H , 则二维小波的分解算法为:

$$\begin{cases} C_{j+1} = HC_j H^* \\ D_{j+1}^h = GC_j H^* \\ D_{j+1}^v = HC_j G^* \\ D_{j+1}^d = GC_j G^* \end{cases} \quad j = 0, 1, \dots, J-1 \quad (3-40)$$

其中 H^* 和 G^* 分别表示 H 和 G 的共轭矩阵, J 表示分解层数, h, v, d 分别表示水平、垂直和对角三个方向上的分量。

对应的重构算法为:

$$C_{j-1} = H^* C_j H + G^* D_j^h H + H^* D_j^v G + G^* D_j^d G \quad j = 0, 1, \dots, J-1 \quad (3-41)$$

在实际应用中, 通常将图像进行三层分解, 分别得到低频成份、水平高频成份、垂直高频成份和对角成份。如图 3.4 所示, 为图像的三层小波分解示意图。其中 C_3 表示低频部分, 集中了主要能量。 $D_n^h (n=1, 2, 3)$ 表示水平成份, $D_n^v (n=1, 2, 3)$ 表示垂直成份, $D_n^d (n=1, 2, 3)$ 表示对角成份。

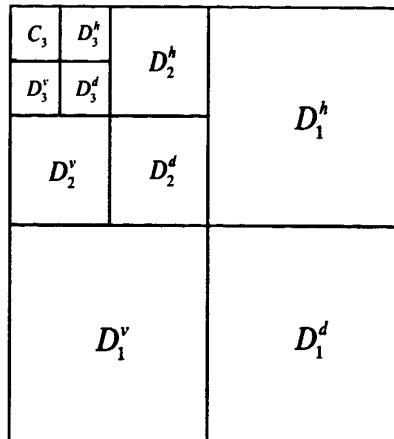


图 3.4 图像三层小波分解示意图

小波变换在图像去噪中的应用主要是利用相应的规则，在小波域中对含有噪声的图像的小波系数进行处理。含噪图像经过小波变换后，得到有用信息的小波系数和噪声的小波系数。由于这两种系数具有不同特性，因此可以在小波域内对这两种系数分别进行处理，最大限度的保留有用信息以及最大限度的消除噪声。最后对处理后的小波系数进行逆变换^[38]，具体过程可以参照图 3.5 所示的流程图：

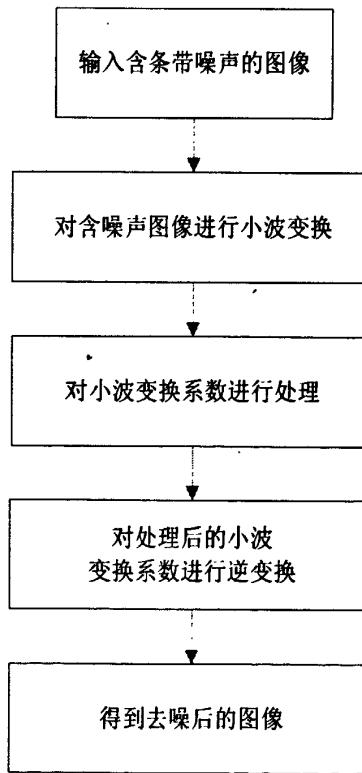


图 3.5 小波变换去噪流程图

目前，小波变换应用在图像去噪上的方法大致可以分为三种：

1、小波模极大值法

主要根据噪声和图像信号的小波系数随着尺度的增大而传播特性不同来进行去噪

^[39]。该方法的优点在于对噪声的依赖性小, 比较适合于低信噪比的图像, 缺点是算法的实现极为复杂, 不易于实用化。

2、小波相关性去噪法

主要根据小波系数各尺度之间的相关性理论来进行去噪^[40]。该方法的优点是在高信噪比的图像上比较适用, 具有稳定的消噪效果, 能够保持较好的图像边缘, 缺点是计算量比较大。

3、小波阈值去噪法

根据图像中的信号和噪声经小波变换后得到的小波系数幅值及个数的不同进行去噪^[41]。小波阈值去噪法是比较常用的一种去噪方法, 其中包括硬阈值和软阈值两种。通常情况下, 软阈值去噪可以使图像具有较好的平滑性, 但是会丢失部分细节信息; 硬阈值去噪信息保留较好, 但是不具有平滑性。所以在实际应用中只能根据不同需要选择一种阈值方法。

3.4.3 基于小波变换的条带图像去噪

以上关于小波变换在图像去噪方面的研究都是针对随机噪声提出的, 这些方法同样可以应用在条带噪声的滤除方面。只是由于条带噪声与随机噪声有很多不同, 所以直接应用这些方法不能达到较好的滤除噪声的效果。近而, 有些学者针对小波变换在滤除条带噪声方面的应用进行了深入的探索和研究。

1、蒋耿明、牛铮等人在 2003 年对 MODIS 图像中的条带噪声消除技术进行了研究, 提出采用不同的消噪阈值和系数加权因子滤除条带噪声的方法。通过研究表明, 在小波分解的高频图像中, 条带噪声表现为与分布方向垂直的高频子图像中亮度的突变^[9]。因此, 在滤波阈值选定为 λ 之后, 滤波因子 h 可以利用(3-41)公式计算得到:

$$\begin{cases} h = 1 - \frac{\lambda \cdot \text{sgn}(W)}{W} & \text{if } (|W| \geq \lambda) \\ h = 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3-41)$$

其中, W 表示处理前小波系数, $\text{sgn}()$ 表示符号取定函数。然后在小波域对小波系数进行不同的处理, 若用 W_v 表示小波变换垂直突变系数, 处理后的小波系数 \hat{W} 为^[42]:

$$\hat{W} = \begin{cases} h^2 \cdot W & \text{if } (W = W_v) \\ W \cdot h & \text{else} \end{cases} \quad (3-42)$$

该方法采用对垂直方向突变的小波系数进行力度较大的惩罚, 而对其它方向的小波变换系数进行力度较小的惩罚的方法实现最佳滤波^[9]。通过对 MODIS 图像进行仿真可以看出, 虽然该方法在边缘和细节信息的保留上具有一定的优势, 但是阈值和小波基的

选取对条带噪声滤除的效果影响较大。

2、修吉宏等对基于小波变换的条带噪声的滤除技术进行了研究，研究表明条带噪声存在于小波低频图像以及与条带方向对应的小波高频子图像中^[33]，只需要对低频和高频子图像进行处理，即采用三层小波分解的方法，确定不同尺度下对应方向高频子图像中小波系数幅值的突变位置，从而统计出条带噪声分布规律，然后用相邻两行小波系数的均值代替低频小波系数，对确定位置的高频小波系数置零。最后通过小波重构，得到滤除条带噪声后的图像。由于该方法是在地物分布比较单一且条带分布比较规律的CCD图像上提出的，所以对于地物分布复杂的较大尺寸的高光谱图像，该方法不具有普遍的适用性。

3、2007年常威威提出了三种基于小波变换的检测方法，并在高光谱图像上进行了实验仿真：

（1）结合边缘检测的小波变换方法

由于传统的小波阈值方法会造成细节信息丢失或者边缘模糊的情况，该方法考虑将边缘检测理论结合到小波阈值消噪处理中，通过重新选择阈值的方法对高光谱图像进行消噪处理。虽然极大限度的保留了图像纹理信息，但是若条带噪声为宽条带，那么会普遍存在于小波分解后的低频图像中，这些条带的存在会对后续边缘检测结果造成一定的影响。至少现在我们还无法定性的说明任何一种检测方法在检测图像边缘信息时不会检测出条带噪声，这是该方法的一个缺陷。

（2）结合奇异点检测的小波变换方法

该方法的思想是利用小波变换结合奇异点检测的优越性对条带噪声进行滤除。首先对经过小波变换后不同尺度下图像的行均值曲线进行奇异点检测，判断出条带噪声所在的位置，然后用匹配思想对条带噪声所在位置的小波系数进行调整，最后经过小波反变换得到条带消除后的图像^[43]。此种方法只适合与条带分布间隔较宽的条带噪声，对于条带分布间隔较窄并且分布无规律的条带噪声不具有适用性。

（3）基于矩匹配的自适应消噪方法

由于条带噪声在行均值曲线中表现为曲线的极大（明条纹）或极小（暗条纹）值点，而小波变换具有空间局部化的性质，那么提出应用小波变换方法对条带行均值曲线进行消噪处理，得到消除噪声后的行均值曲线，然后将其作为矩匹配的参考行均值，最后对各行均值进行匹配，得到消除噪声后的图像^[44]。由于实现过程中涉及到小波变换对行均值曲线的处理，这就涉及到一个阈值选取的问题，所以该方法看起来比传统的小波变换方法具有一定的改进，但是还是保留了小波变换方法的缺陷，使得后续的匹配过程的参

考值可能在某种程度上具有一定的不可靠性。

3.5 本章小结

本章选取高光谱图像条带噪声滤除中比较成熟的四类算法进行了比较详细的介绍。时域主要介绍了直方图匹配法和矩匹配法，以及基于矩匹配法提出的改进的条带噪声滤除算法；频域主要介绍了基于傅里叶变换和小波变换的频域滤波方法。同时，对各类算法的应用条件、适用范围进行了说明，并分析了各类算法的优缺点。

第4章 邻域插值算法的改进方法

由于基于傅里叶变换和小波变换的条带噪声滤除算法复杂度较高，并且会对非噪声信息产生影响。21世纪初，蒋耿明、牛铮等人针对 MODIS 图像中条带噪声提出了简单而有效的邻域插值方法。该方法的基本思路是通过定位条带噪声所在行，然后用上下两行数据插值结果代替条带噪声。后来黄晓园等人在此基础上对邻域插值算法进行了改进，将原来的上下两行插值算法改为六邻域平均插值。本文在对这两种方法深入研究的基础之上，提出了六邻域权重系数不同的邻域插值算法的改进方法。

4.1 原始邻域平均插值算法描述

4.1.1 上下邻域平均插值算法的描述

MODIS（中分辨率成像光谱仪）是由美国圣巴巴拉遥感中心研制成功的一种“图谱合一”的光学遥感仪器，目前作为美国极地轨道环境遥感卫星 Terra 和 Aqua 卫星平台上搭载的主要探测仪器使用^[45]。MODIS 传感器与其它大部分成像光谱仪的传感器具有相同的性质，都采用多元并扫技术，那么就存在多个探测单元之间就很难达到完全一致的问题。所以，由于扫描探测元正反扫描响应差异、传感器机械运动以及外界温度变化等影响，MODIS 影像中普遍存在着条带噪声。学者经过研究发现 MODIS 影像中的条带噪声以第 5 波段和第 26 波段最为明显^[45]，并且这些条带噪声都存在以下特点：

- 1、条带呈水平方向分布，除第 26 波段影像以外，其它波段条带宽度基本为一个像素；
- 2、相邻两个条带噪声的中心线之间的距离等于扫描条带宽度。

基于上述特点，蒋耿明等人提出通过统计每行可能的噪声数来定位条带噪声所在行。如果当前像素点为 (i, j) ，那么当前像素值为 $X_{i,j}$ 。将当前像素值与上下垂直的两个像素的平均值做比较，并且设定一个阈值 T ，通过判别公式（4-1）判断当前像素是否为“噪声像素”：

$$\begin{cases} \bar{X} = \frac{X_{i-1,j} + X_{i+1,j}}{2} \\ \frac{|X - \bar{X}|}{\bar{X}} > T \end{cases} \quad (4-1)$$

其中， $X_{i-1,j}$ ， $X_{i+1,j}$ 分别为该像素 $X_{i,j}$ 上下行对应的像素值， \bar{X} 为上下行像素的平均值， T 为阈值。若当前像素值相对于上下两个像素的平均值增加的百分比超过阈值 T ，我们

判定该像素为“噪声像素”。然后统计出每行的“噪声像素”的数量，以行号为横坐标、每行的“噪声像素”数为纵坐标制作统计曲线图，异常突起的峰值对应行就是条带噪声所在行。定位条带噪声所在行之后，我们只需要针对该行进行噪声的滤除，即采用上下像素元平均值 \bar{X} 代替当前噪声像素的方法。蒋耿明等人通过仿真证明了该算法的有效性。

4.1.2 六邻域平均插值算法的描述

2008年，黄晓园等人经过进一步研究发现，蒋耿明等人提出的用上下两行数据插值结果代替条带噪声的邻域插值法虽然滤除了条带噪声，对非条带区域也没有产生任何负面影响，但是该方法噪声替代值只是噪声上下像素元的平均值，没有考虑到相邻对角的四个像元值对当前像素值的影响。所以，黄晓园等人提出了利用当前噪声像元邻域的六个非噪声像元的灰度值平均值替代该噪声像元灰度值的方法。假设 $X_{i,j}$ 为当前像素值，其余六个邻域像素如图4.1所示。

$X_{i-1,j-1}$	$X_{i-1,j}$	$X_{i-1,j+1}$
	$X_{i,j}$	
$X_{i+1,j-1}$	$X_{i+1,j}$	$X_{i+1,j+1}$

图4.1 六邻域像素

此时“噪声像素”的判别公式为^[33]：

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{X} = \frac{1}{6} \sum_{k=j-1}^{j+1} (X_{i-1,k} + X_{i+1,k}) \\ \left| \frac{\bar{X} - X_{i,j}}{\bar{X}} \right| > T \end{array} \right. \quad (4-2)$$

其中 \bar{X} 表示六个相邻非噪声像元平均值， T 为阈值。若 T 取值过小，那么像元被误判为噪声像元的可能性较大；若 T 取值过大，则可能检测不出噪声。所以，采用六邻域阈值比较法检测出每行存在的噪声总数后，统计出每个周期内条带噪声数最多的那一行的行号。然后将统计出的这些条带行号对 l 取模 (l 为图像光谱分辨率，即条带产生周期)，获得小于 l 的行号，累计该行号的次数，得到次数最多的行号就是第一条带噪声所在行，用 Lf 表示，则所有噪声条带号 N 可以用 Lf 加上周期 l 行的倍数表示^[33]：

$$N = Lf + l * n \quad (4-3)$$

最后用六邻域平均值 \bar{X} 替代条带行噪声所在行的噪声像素值。通过在MODIS图像中进

行仿真, 证明了该方法不但可以在不影响非噪声信息的前提下滤除MODIS图像中的条带噪声, 而且比上下邻域平均插值算法的信噪比有所提高。

4.2 改进算法

上一节介绍的六邻域插值法主要是对分布周期比较规律的单行窄条带噪声的滤除十分有效。本节在此方法基础上提出了改进措施。由于原方法无论在对“噪声像素”进行判别, 还是对条带进行滤除时, 都用到了当前像元邻域的六个非噪声像元(左上、上、右上、左下、下、右下)的平均值。需要指出的是, 从信息之间的相关性考虑, 这六个邻域的非噪声像元对当前像元的影响系数应该有所区别。由于MODIS影像相邻灰度是渐变的, 通过距离加权方法算出的六个邻域不同位置的权重系数如图4.2所示。若上下像元的权重系数用 d 表示, 那么对角四个像元的权重系数为 $d/\sqrt{2}$ 。根据周边六邻域影响系数和为1的原则, 通过精确计算上下行的权重系数约为0.3, 对角四个像元的权重系数约为0.1。然后改用公式(4-4)对“噪声像素”进行判别:

$$\begin{cases} \bar{X} = 0.1*(X_{i-1,j-1} + X_{i-1,j+1} + X_{i+1,j-1} + X_{i+1,j+1}) + 0.3*(X_{i-1,j} + X_{i+1,j}) \\ \left| \frac{\bar{X} - X_{i,j}}{\bar{X}} \right| > T \end{cases} \quad (4-4)$$

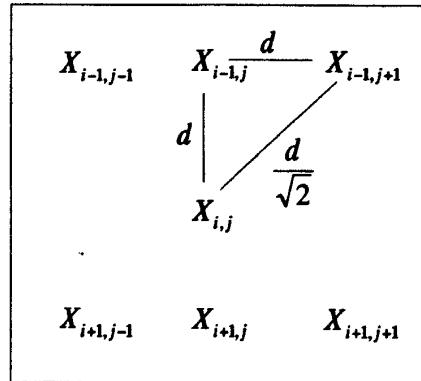


图4.2 不同位置像素权重系数图

统计出每行条带噪声总数, 然后用所有检测到的条带行号对 l 取模的方法, 确定第一条带噪声所在行。所有条带噪声行号的计算与上一节介绍的方法相同。最后用邻域像元不同权重系数的插值结果替代每个条带行的当前噪声像素值, 如公式(4-5)所示:

$$X_{i,j} = 0.1*(X_{i-1,j-1} + X_{i-1,j+1} + X_{i+1,j-1} + X_{i+1,j+1}) + 0.3*(X_{i-1,j} + X_{i+1,j}) \quad (4-5)$$

4.3 实验结果及分析

由于高光谱图像具有多波段的特性, 那么在仿真中我们需要提取不同的波段验证算法的有效性。本文用到的AVIRIS图像取自1992年6月拍摄的美国印第安纳州西北部印第

安遥感试验区的一部分。该图像具有220个波段，下面分别在第5波段，第26波段和第76波段上对本章提到的三种邻域插值方法进行了仿真。仿真结果如下：

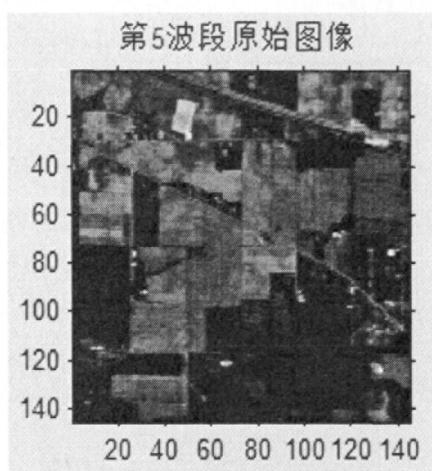


图4.3(a) 第5波段原始图像

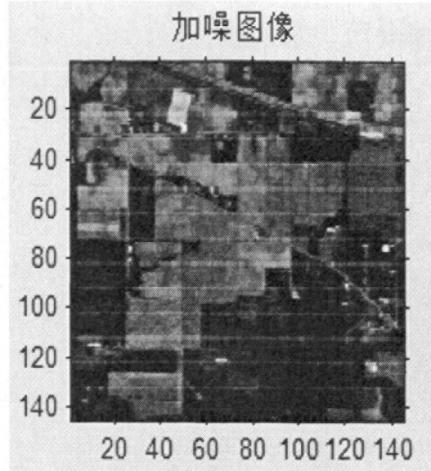


图4.3(b) 第5波段加噪图像

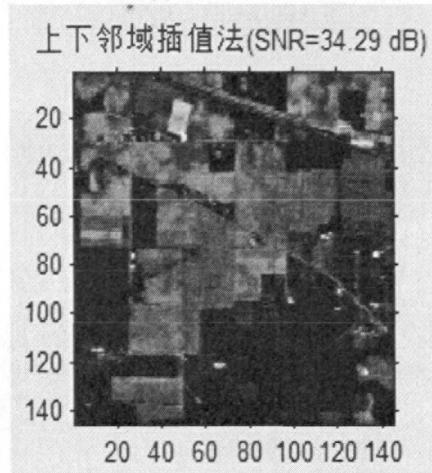


图4.3(c) 上下邻域插值去噪后图像

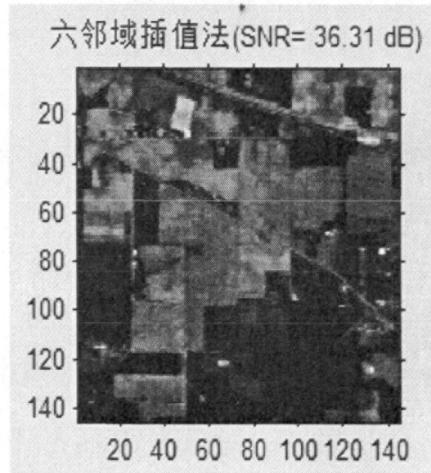


图4.3(d) 六邻域平均插值去噪后图像

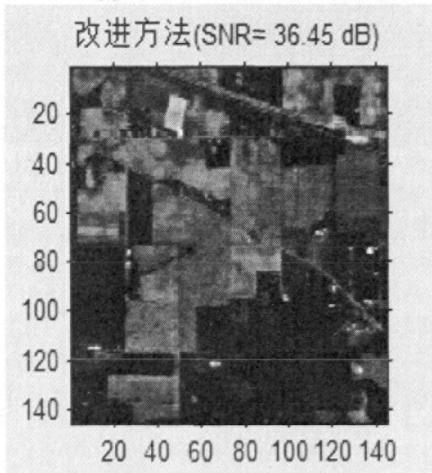


图4.3(e) 改进方法去噪后图像

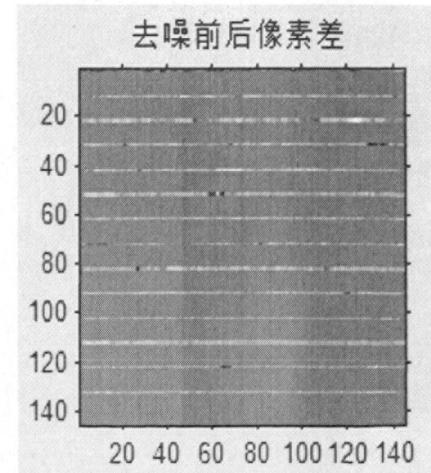


图4.3(f) 改进方法去噪前后像素差

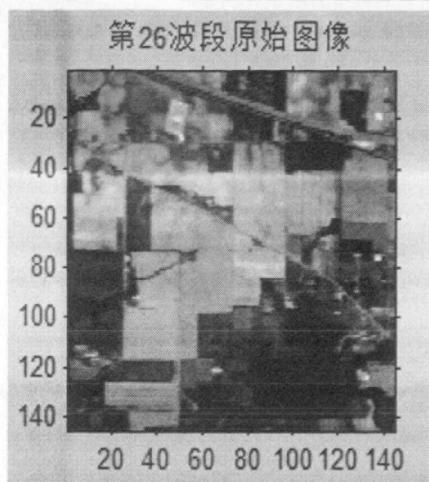


图4.4(a) 第26波段原始图像

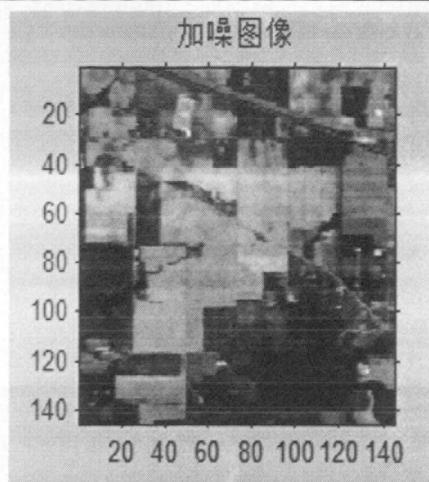


图4.4(b) 第26波段加噪图像

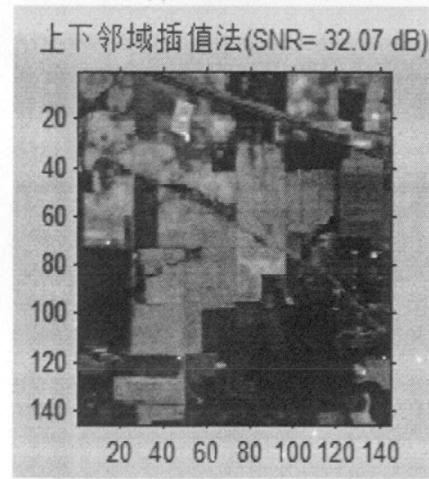


图4.4(c) 上下邻域插值去噪后图像

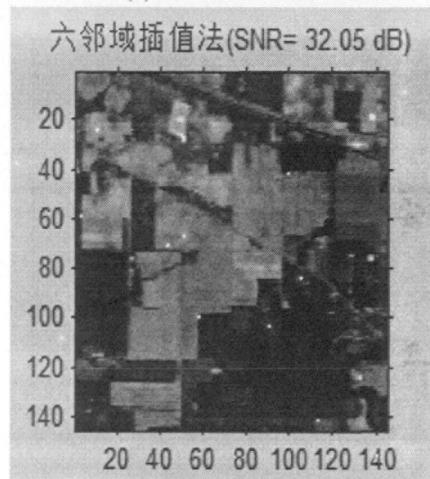


图4.4(d) 六邻域平均插值去噪后图像

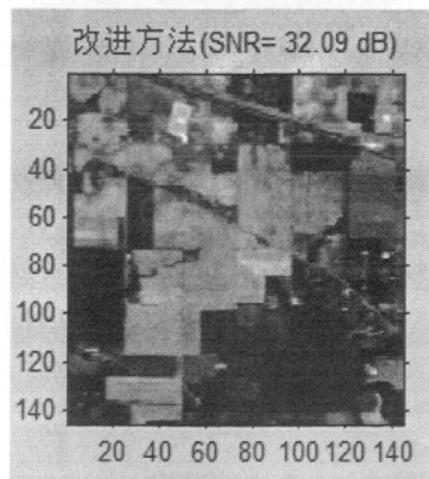


图4.4(e) 改进方法去噪后图像

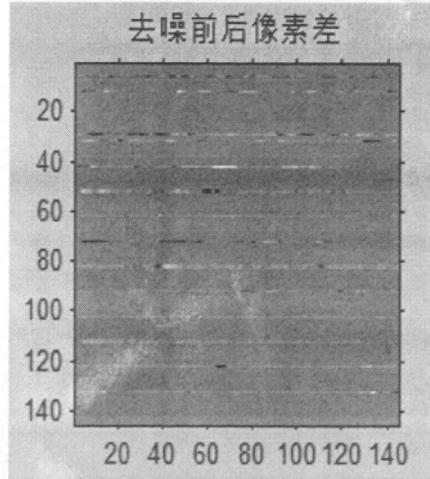


图4.4(f) 改进方法去噪前后像素差

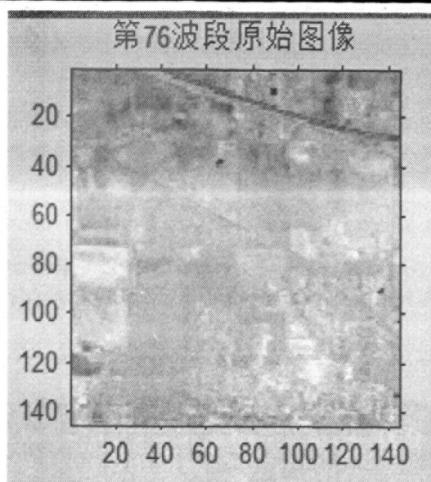


图 4.5(a) 第 76 波段原始图像

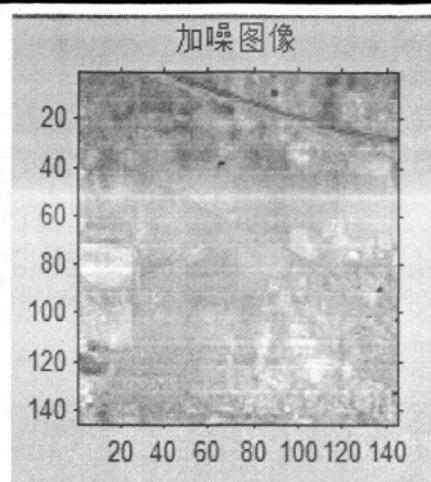


图 4.5(b) 第 76 波段加噪图像

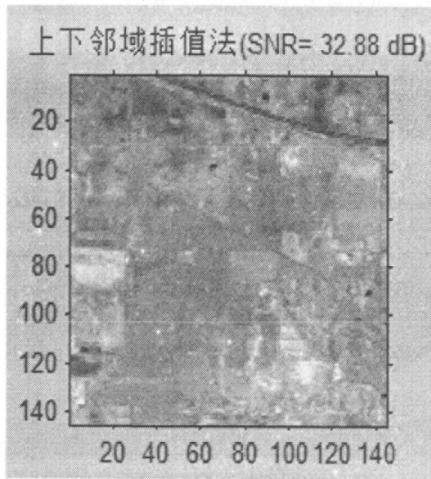


图4.5(c) 上下邻域插值去噪后图

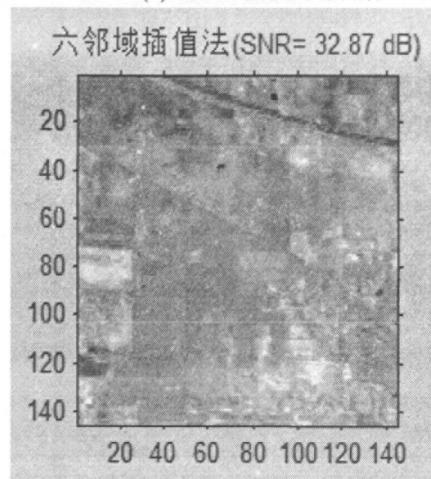


图4.5(d) 六邻域平均插值去噪后图像

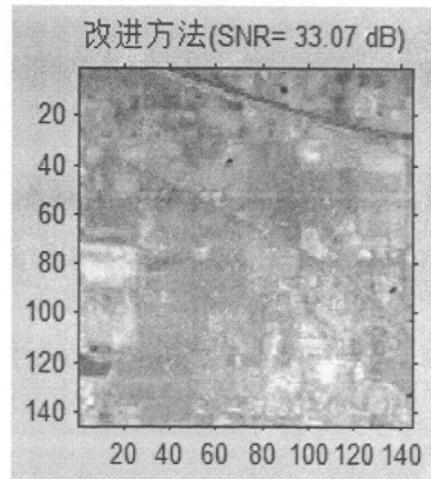


图4.5(e) 改进方法去噪后图像

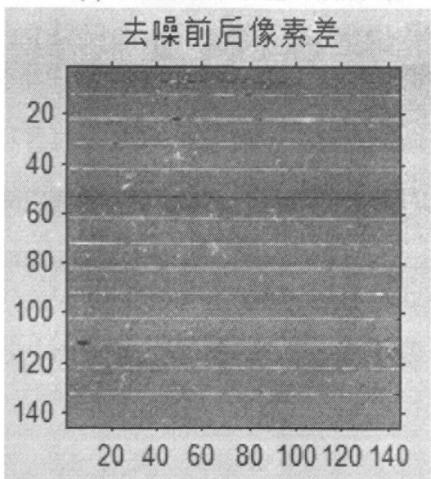


图4.5(f) 改进方法去噪前后像素差

通过实验表明, 本节提出的改进方法在不同波段上都具有较好的去噪效果。尤其在第76波段上, 图像去噪前后信噪比提高了近1dB; 在第5波段图像上, 改进方法比原方法

提高了0.1~0.2dB；在第26波段上，提高了0.02dB。在AVIRIS图像的220个波段随机提取若干个波段进行仿真，实验结果如表4-1所示。虽然不同波段信噪比提高的幅度有所不同，但是仿真结果可以说明，在不同波段上，本文提出的改进方法都比原始方法的信噪比有所提高。由于高光谱图像相当于一个立方体数据，在不同波段信噪比都有所提高的情况下，整个高光谱图像的质量将得到较大的改善。

表4-1 AVIRIS图像不同波段邻域插值不同方法去噪后的SNR值

波段号	SNR(dB)		
	上下邻域插值法	六邻域插值法	改进方法
5	34.29	36.31	36.45
14	35.15	35.10	35.21
26	32.07	32.05	32.09
33	32.25	31.92	32.28
55	34.20	34.22	34.37
64	35.27	35.18	35.31
76	32.88	32.87	33.07
96	33.18	33.08	33.19
101	29.67	29.64	39.66
125	29.71	29.68	29.72
145	27.62	27.87	27.91
185	27.22	27.45	27.54
196	27.83	27.48	27.86
200	27.67	27.72	27.85

通过上表分析可知，在不同波段的仿真结果中，本章提出的改进方法都比原始的邻域插值方法信噪比有所提高，提高范围大概在0.1~1dB之间。虽然提高幅度不同，但是高光谱图像具有上百个波段，这些波段叠加起来，图像质量将得到较大的改善。可是，邻域插值方法由于适用范围有限，仅适用于分布周期比较规律的窄带噪声。所以，本章提出的改进的邻域插值算法如果能和其它方法相结合，将有更好的应用价值。

4.4 本章小结

本章首先介绍了适用于周期分布比较规律的单行条带噪声的上下邻域插值去噪方

法,然后介绍了六邻域平均插值法。在这两种算法的基础上,对条带噪声像素的判别公式进行了改进。在提取的 AVIRIS 不同波段的图像上,应用改进的方法进行条带噪声滤除仿真实验,并与之前的插值方法进行对比。通过仿真结果证明,改进的邻域插值方法具有较好的条带噪声滤除效果。

第5章 基于AVIRIS图像的条带噪声滤除方法

从上一章条带噪声消除效果图中可以看出,邻域插值法在算法复杂度和去噪效果上都优于以前提出的时频分析方法。应用邻域插值算法能有效滤除条带噪声,并且保证非条带噪声区域不受任何影响。但是该方法只针对周期分布规律的单行条带噪声适用。而我们实际获得的高光谱图像种类很多,也许宽窄条带噪声同时存在,并且不具有周期性。例如MODIS影像的第26波段图像,条带噪声的分布不具有统计规律。主要为条带噪声不再是单独一行,而是存在不同宽度的条带噪声。本章基于AVIRIS图像提出了一种对不同宽度的非周期性条带噪声适用的高光谱图像条带噪声滤除方法。

5.1 判别公式的提出

本文采用的AVIRIS图像取自1992年6月拍摄的美国印第安纳州西北部印第安遥感试验区的一部分^[42]。该图像是由掸扫式线阵列成像光谱仪产生的,具有220个波段。光谱分辨率为10nm,空间分辨率为20m。由于AVIRIS图像光谱分辨率为10nm,那么条带噪声的宽度小于5行。如果条带大于等于5行,条带噪声行数已经超过实际CCD探测元的一半以上,此时图像受条带污染严重,实际有用信息量过少,不再具有处理价值。由于获得高光谱图像是具有多个波段的图谱合一的数据立方体,那么我们首先要对高光谱图像进行波段提取,得到220个波段的图像,其中每个波段都是一幅含有 145×145 个像素点的图像。提取任意一个波段的图像,对该图像每行像素值求平均,这些平均值可以绘制出一幅如图5.1所示的行均值曲线图。



图5.1 AVIRIS原始图像像素行均值曲线图

当某一行或某几行存在条带噪声时,由于噪声按行存在,那么此时行均值曲线中这一行或这几行的行均值会产生突变。其中加入明条纹噪声的当前行噪声像素均值会产生凸起,如图5.2所示。

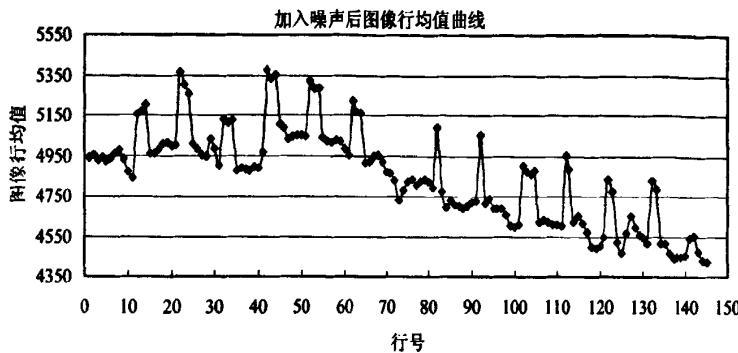


图 5.2 AVIRIS 加入明条纹图像像素行均值曲线图

加入暗条纹噪声的当前行噪声像素均值会产生凹陷，如图 5.3 所示。

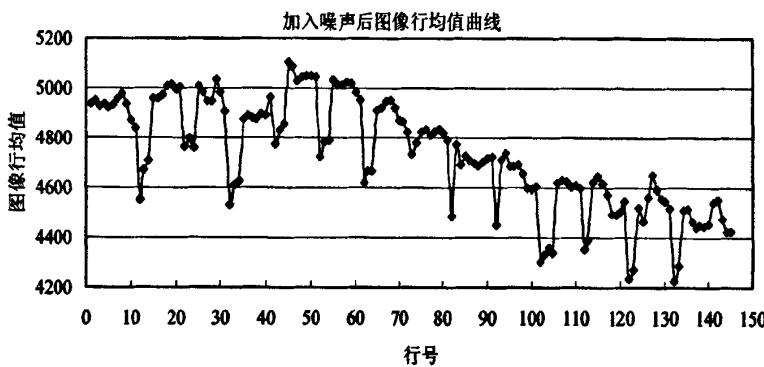


图 5.3 AVIRIS 加入暗条纹图像像素行均值曲线图

利用噪声行和非噪声行像素均值特征差异提出条带噪声归类判别公式，如 (5-1) 所示：

$$\frac{|aver(i) - aver(i-1)|}{aver(i)} > T \quad (5-1)$$

其中 $aver(i)$ 为当前行像素灰度均值， $aver(i-1)$ 为上一行灰度均值， T 为阈值。由于获得的 AVIRIS 图像像素灰度行均值在 4400-5200 之间，原始图像相邻行之间灰度均值之差小于 100，所以阈值 T 设定为 0.02。根据公式(5-1)对第 i 行进行判定，小于阈值 T 的记为同一组，大于 T 的存入下一组。

5.2 算法描述

首先对高光谱图像进行波段提取，求出某一波段图像每行的像素均值。利用公式 (5-1)，对得到的行均值根据进行分组，保证均值相近的行号存入同一组。例如对第 i 行进行判定：若当前行像素均值相对于当前行与第 $i-1$ 行均值之差的百分比小于阈值 T ，那么将第 i 行与第 $i-1$ 行记为同一组；若大于阈值 T ，则将 i 存入下一组。然后统计出每组中元素个数 N ，分为以下三种情况进行处理：

- 1、 $N \geq 5$ 时，判定该组数据为真实地物信息，不含有噪声，保留原始值不做处理；
- 2、 N 为偶数时，上下行分别用临近条带的上下行数据做参考行，应用矩匹配方法滤除噪声；
- 3、 N 为奇数时，边缘行条带分别用临近的上下行数据做为参考行，应用矩匹配方法滤除噪声，中间行每点像素值则由得到的第相邻上下行数据用改进的邻域插值补偿方法得到。

5.3 图像质量评价标准

我们需要对经过图像处理之后的图像进行评价，以便能全面的判断经过处理之后图像质量的好坏。现在我们常用的评价方法主要可以分为主观质量评价方法和客观质量评价方法两种。主观方法就是根据人眼对图像的视觉效果进行识别和判断。这是一种定性的方法，可能会受到观察者主观因素的影响。因此，主观质量评价方法的结果往往具有不确定性。客观质量评价方法通过某种公式计算出处理后的图像与原始图像之间在某些方面的误差，以此来衡量经过处理之后的图像的质量。该方法可以定量的反映出处理后图像与原始图像之间的差别。本节将重点介绍几种高光谱图像中用来衡量图像质量的客观评价指标。

通常情况下，对于一幅 $M \times N$ 大小的图像，其均值 μ 和标准差 σ 分别为：

$$\mu = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N X_{i,j} \quad (5-2)$$

$$\therefore \sigma = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (X_{i,j} - \mu)^2} \quad (5-3)$$

均方误差（MSE）公式定义为：

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (f_{i,j} - \hat{f}_{i,j})^2 \quad (5-4)$$

信噪比（SNR）公式定义为^[44]：

$$SNR = 10 \lg \left[\frac{\sigma_{\hat{f}_{i,j}}^2}{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (f_{i,j} - \hat{f}_{i,j})^2} \right] \quad (5-5)$$

峰值信噪比（PSNR）公式定义为^[44]：

$$PSNR = 10 \lg \left[\frac{255^2}{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (f_{i,j} - \hat{f}_{i,j})^2} \right] \quad (5-6)$$

其中 $f_{i,j}$ 表示原图像, $\hat{f}_{i,j}$ 表示处理后的图像。

以上这些指标是普通图像处理中常用的客观质量评价指标。然而高光谱图像除了具有普通图像共有的特点之外, 还具有波段多、数据量大的特点, 并且相邻波段之间的信息有很大的相关性。所以, 高光谱图像噪声消除的基本目标不但要最大限度地消除条带噪声, 使原图像的非噪声信息不被破坏, 而且要尽量保持较好的相邻波段之间的相关性。因此, 仅仅根据信噪比, 并不能全面的判定一种方法是否有效。本文除了采用均值 μ , 标准差 σ , 信噪比 SNR 以外, 还加入了高光谱图像特有的图像质量评价指标, 包括图像质量评价因子 IQ 和相邻波段相关系数 H, 总共五种评价指标对仿真结果进行验证。

$$IQ = 10 \log_{10} \left[\frac{\sum_{i=1}^M d_R^2[i]}{\sum_{i=1}^M d_E^2[i]} \right] \quad (5-7)$$

$$d_R[i] = m_{IR}[i] - m_I[i] \quad (5-8)$$

$$d_E[i] = m_{IE}[i] - m_I[i] \quad (5-9)$$

其中 $m_I[i]$, $m_{IR}[i]$, $m_{IE}[i]$ 分别为真实地表图像, 原始条带以及去噪后图像中各行的均值^[5]。IQ 值可以反映出条带分布方向上的图像信息在条带噪声消除前后的变化。如果 IQ 值较小, 说明条带噪声滤除的效果较差; 反之, IQ 值越大, 表明条带噪声滤除效果越好。

相邻波段相关系数的计算公式如下^[14]:

$$H = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (X_{i,j} - \mu_X)(Y_{i,j} - \mu_Y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (X_{i,j} - \mu_X)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (Y_{i,j} - \mu_Y)^2}} \quad (5-10)$$

其中 $X_{i,j}$, $Y_{i,j}$ 为相邻两个波段对应位置像素值, μ_X , μ_Y 为相邻波段两幅图像灰度均值。相关系数 H 的范围在 0~1 之间, 其值愈接近 1, 说明相邻波段间相关性越好; 反之, 说明相邻波段间相关性较差。

5.4 实验结果及分析

为了验证本章提出的算法在滤除条带噪声上的正确性和有效性, 分别选取AVIRIS 图像的第6波段, 第26波段, 第138波段作为实验对象, 加入不同宽度的条带噪声。分别采用矩匹配法, 小波变换去噪法、六邻域平均插值法和本章提出的方法进行比较, 实验结果如下所示:

1、第6波段仿真结果图：

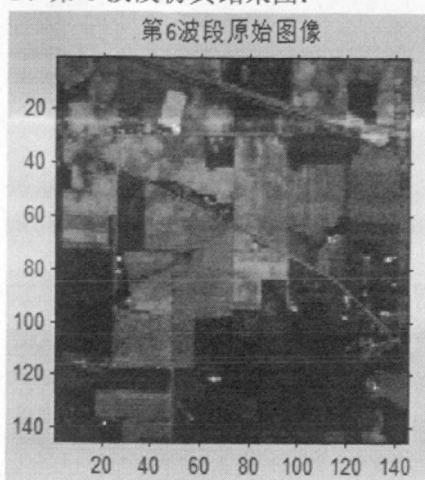


图5.4(a) 第6波段原始图像

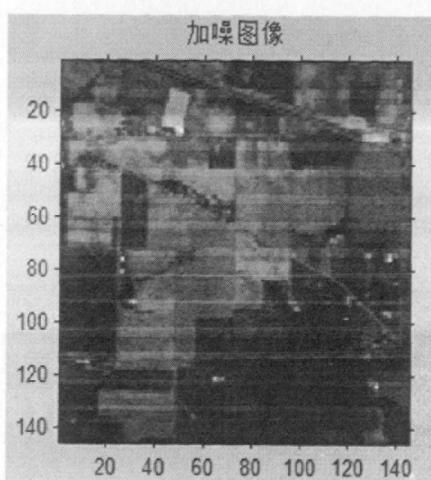


图5.4(b) 第6波段加噪图像

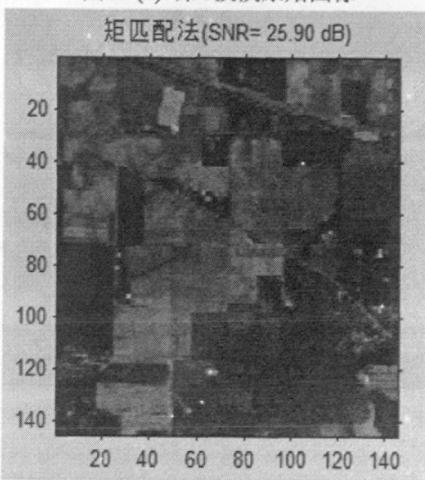


图5.4(c) 矩匹配法消噪图像

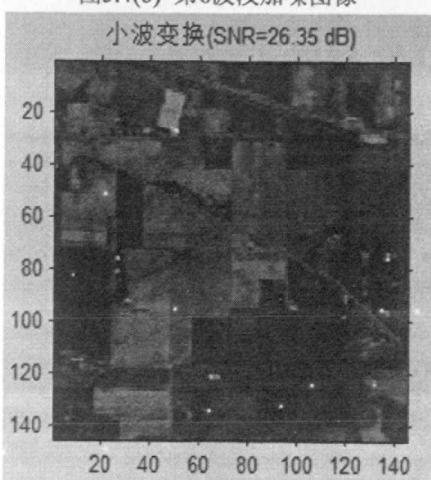


图5.4(d) 小波变换消噪图像

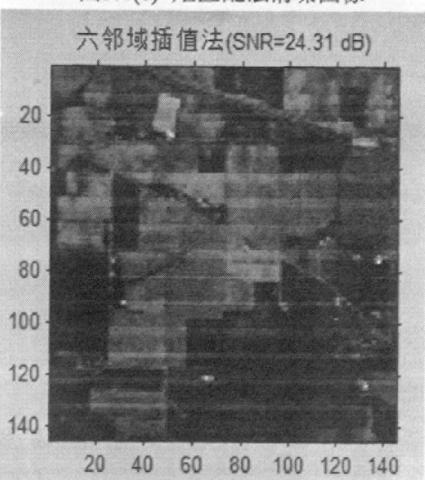


图5.4(e) 六邻域插值消噪图像

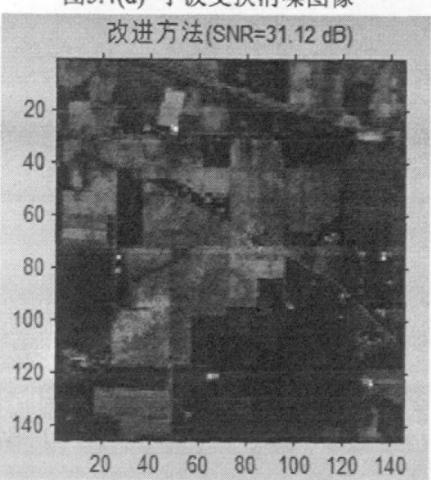


图5.4(f) 本章算法消噪图像

2. 第 26 波段仿真结果图:

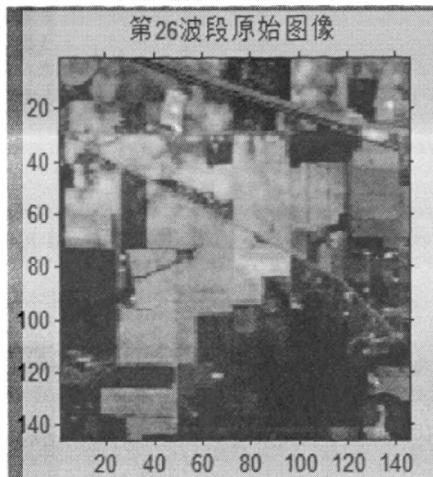


图5.5(a) 第26波段原始图像

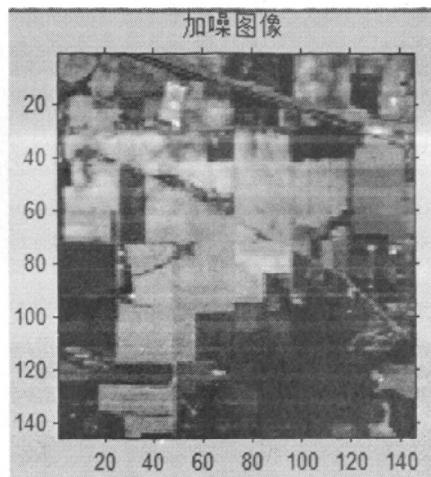


图5.5(b) 第26波段加噪图像

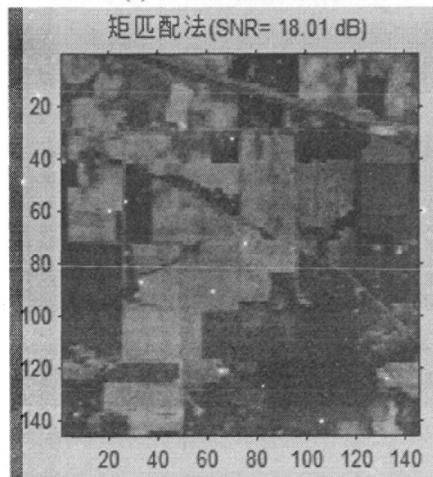


图5.5(c) 矩匹配法消噪图像

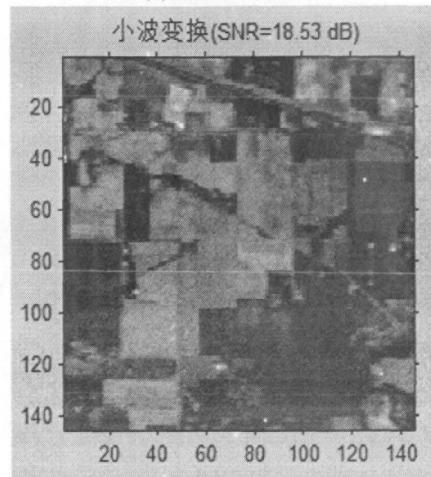


图5.5(d) 小波变换消噪图像

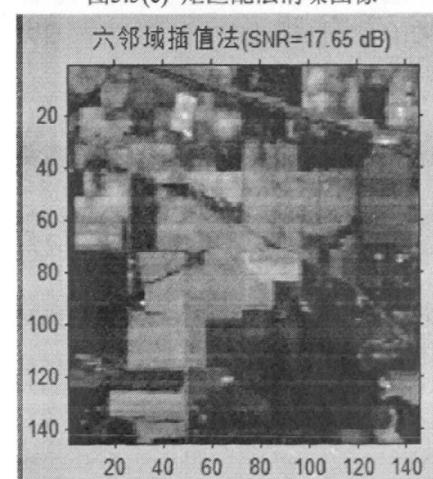


图5.5(e) 六邻域插值消噪图像

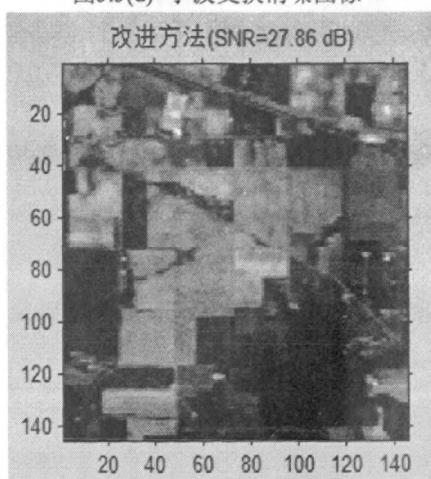


图5.5(f) 本章算法消噪图像

3、第138波段仿真结果图：

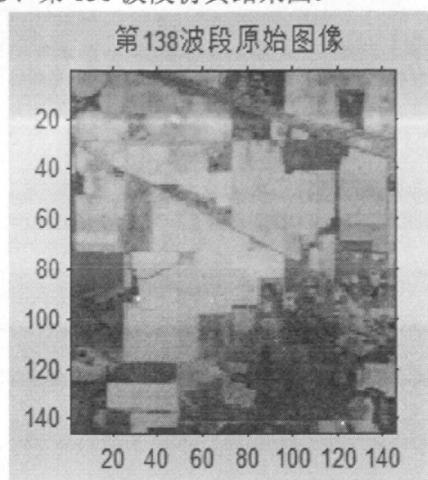


图5.6(a) 第138波段原始图像

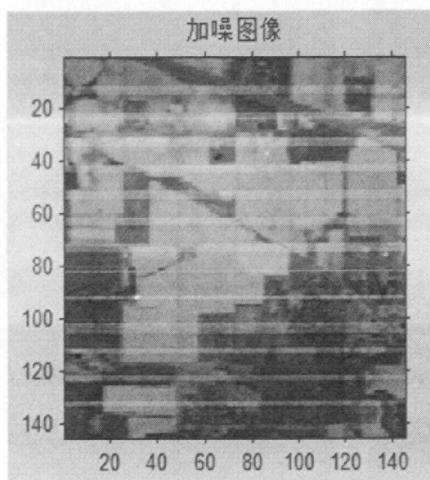


图5.6(b) 第138波段加噪图像

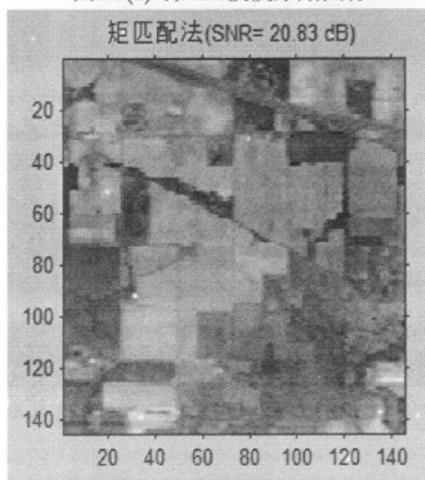


图5.6(c) 矩匹配法消噪图像

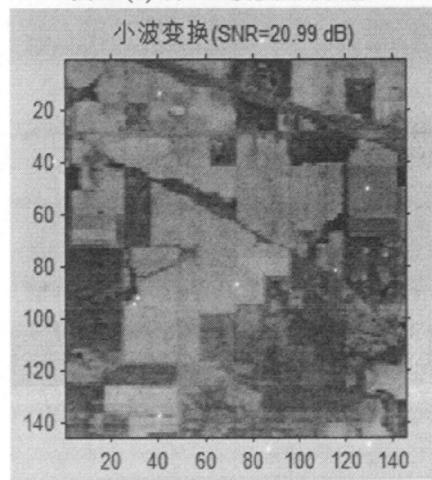


图5.6(d) 小波变换消噪图像

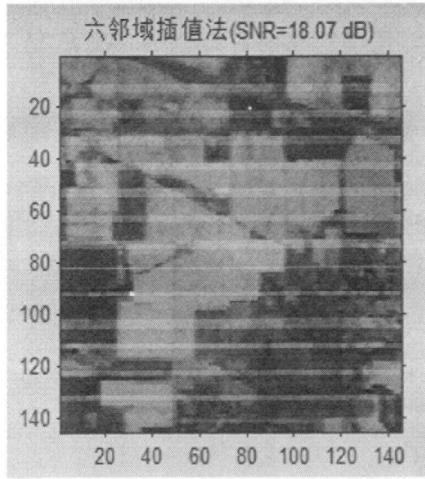


图5.6(e) 六邻域插值消噪图像

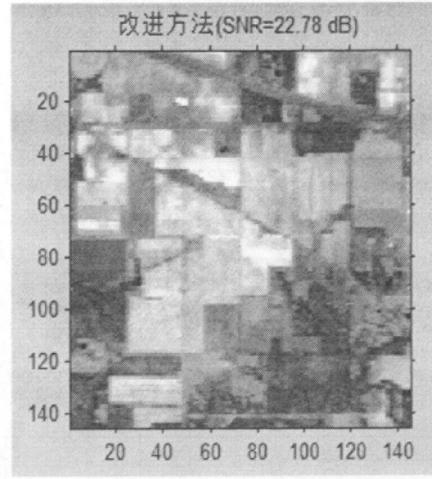


图5.6(f) 本章算法消噪图像

通过仿真结果图我们可以直观的看出,传统的六邻域平均插值算法对于宽窄条带同时存在的噪声图像不具有适用性。图像应用小波变换方法去噪后具有比矩匹配法略高的信噪比,而本章提出的方法比小波去噪方法具有一定的优越性。仅通过一项评价指标不能全面客观的评价一种去噪方法的优劣,所以我们五种图像质量评价指标对去噪后的图像进行质量分析。不同波段的实验数据分别记录在表5-1、5-2、5-3中。

表5-1 AVIRIS图像第6波段不同消噪方法实验仿真数据

	$\mu (10^3)$	σ	IQ	SNR(dB)	H
原始图像	4.7906	20.3565			0.9739
加噪图像	4.8537	20.9063			0.9554
矩匹配法	4.8386	18.1394	-3.9636	25.90	0.9356
小波变换	4.8281	20.8681	-3.7457	26.35	0.9531
六邻域平均插值	4.8589	20.9041	-0.0970	24.31	0.9492
改进方法	4.7922	20.3976	10.1664	31.12	0.9547

表5-2 AVIRIS图像第26波段不同消噪方法实验仿真数据

	$\mu (10^3)$	σ	IQ	SNR(dB)	H
原始图像	3.6210	30.5312			0.9994
加噪图像	3.6885	30.8042			0.9724
矩匹配法	3.6535	28.3767	-10.7782	18.01	0.9755
小波变换	3.6410	30.6142	-9.7341	18.53	0.9842
六邻域平均插值	3.6852	30.7441	-0.0202	17.65	0.9838
改进方法	3.6314	30.5330	7.6842	27.86	0.9850

表5-3 AVIRIS图像第138波段不同消噪方法实验仿真数据

	$\mu (10^3)$	σ	IQ	SNR(dB)	H
原始图像	1.7715	15.4444			0.9994
加噪图像	1.8334	16.4162			0.9724
矩匹配法	1.8165	14.2542	-0.0647	20.83	0.9840
小波变换	1.8084	14.6062	0.4210	20.99	0.9874
六邻域平均插值	1.8337	16.3799	-0.0107	18.07	0.9766
改进方法	1.7725	15.4206	23.0424	22.78	0.9890

从以上三个波段的实验数据，我们可以总结出以下几点：

1、从图像中，我们可以直观的看出，仅仅通过邻域插值法无法有效滤除图像中的不同宽度的条带噪声。

2、从信噪比来看，小波变换高于矩匹配方法，本章方法又高于小波变换法。这说明经过改进方法处理后的图像信噪比最高。

3、从图像均值来看，三个波段图像的仿真结果中，本章方法的均值和与原始图像最接近，说明该方法保留的图像信息与原始图像最为相似。

4、图像质量因子可以反映出一幅图像去噪前后图像信息在条带分布方向上的变化，从上表可以看出，本章提出的方法是所有对比方法中数值最高的。

5、相关系数 H 反映相邻波段之间的相关性，而本章算法去噪后的相关性在这四种算法中最接近原始图像。

6、标准差 σ 主要反映了该幅图像受到噪声的污染程度，对于地物比较丰富的高光谱图像，标准差同时还能反映图像纹理信息的丰富程度。所以，我们可以通过去噪前后标准差的改变大小来判断该图像的地物信息改变情况。与原始图像标准差相比较，矩匹配法去噪后图像的地物信息变化比较明显。在三个波段的仿真数据中，本章提出的方法具有与原始图像最接近的标准差数值，可以证明该方法在有效滤除条带噪声的同时能够保持较好的地物信息特征。

基于以上几点可以说明，对于宽窄条带噪声同时存在的高光谱遥感图像，本章提出的方法比原始的高光谱图像条带噪声滤除算法具有较好的去噪效果。

5.5 本章小结

本章提出了一种新的基于AVIRIS图像中不同宽度的条带噪声的滤除方法，详细介绍了该算法提出的背景，并对该算法的具体实现进行了描述。同时，在原有的图像质量评价指标的基础上，添加了针对高光谱图像的质量评价因子和相邻波段相关系数两种图像质量评价指标。然后分别在提取的不同波段的AVIRIS图像中对该算法进行了仿真实验。通过实验证明，本章方法不仅能有效的去除条带噪声，而且可以很好的保留图像的细节信息，保持较好的邻域之间的相关性。

结 论

由于成像光谱仪多个 CCD 探测单元间响应的不一致，导致多传感器和单传感器光谱仪成像中普遍存在着条带噪声，甚至有些高光谱图像 50%以上的波段都受到不同程度条带噪声的干扰。这些条带噪声主要成带状分布，并且具有一定宽度，所以它的特性与普通点状噪声有很大不同。高光谱图像中条带噪声的普遍存在严重影响了地物光谱特征识别的精度，从而降低了高光谱图像分析技术的有效性。因此，我们有必要对高光谱图像条带噪声的滤除技术进行研究。

本文对高光谱图像的基本理论及条带噪声的成像机理进行了简单介绍，对现有的高光谱图像条带噪声滤除方法进行了深入的分析和研究。在条带噪声呈单行周期性分布的背景下，对邻域插值法在图像去噪中的应用进行了深入的研究，在此方法基础上对原来的条带噪声判别公式以及条带噪声行像素的替代公式进行了改进，通过仿真实验证明了该算法的有效性。随后，针对宽窄条带噪声同时存在的情况，本文提出了一种基于 AVIRIS 图像的条带噪声滤除方法。主要工作归结如下：

1、首先简单介绍了高光谱图像以及条带噪声的发展现状，然后对高光谱图像的表示形式及条带噪声的基本理论进行了详细的阐述，特别是对条带噪声的成像机理以及条带噪声的特点进行了深入的研究。

2、然后详细介绍了高光谱图像条带噪声基本的滤除方法，包括时域的直方图匹配和矩匹配法以及频域基于傅里叶变换和小波变换的去噪方法。尤其详细的介绍了改进的矩匹配方法和基于小波变换提出的改进方法，以及这些方法的优缺点。为后续方法的提出以及改进方法的实验对比方法奠定了一定的基础。

3、邻域插值方法是基于矩匹配提出的一种时域条带噪声滤除方法，该方法主要对单行周期性分布的条带噪声比较适用。本文对现有的邻域插值方法的噪声判别公式和条带噪声行像素的替代公式提出了改进措施，通过在 AVIRIS 图像中模拟单行周期性条带噪声进行仿真实验，证明了改进方法的有效性。

4、在实际的高光谱图像中宽窄条带噪声可能同时存在，针对这种情况，本文提出了一种对图像中条带噪声和非条带噪声行进行分组，然后根据不同情况，采用不同方式滤除条带噪声的消噪方法。该方法充分利用了条带噪声的特点，首先利用判别公式对噪声信息和非噪声信息进行分组，然后根据不同情况对噪声信息进行分类滤除。通过对 AVIRIS 不同波段图像进行仿真，结果表明该算法在有效滤除条带噪声的同时，能够保

留较好的细节信息。

由于时间和条件的限制，本文只在 AVIRIS 图像中对条带噪声的滤除方法进行了仿真实验，而本文提出的算法在其它类型的高光谱图像条带噪声的滤除中有着广阔的应用前景。主要待研究的工作如下：

1、由于成像光谱仪的种类比较多，不同光谱仪扫描产生的图像中条带噪声的特点有可能不同，所以，现有的条带噪声统计特性比较笼统，需要针对不同成像光谱仪的条带噪声的统计特性做进一步的深入研究。

2、由于高光谱图像价值比较昂贵，现有的图像资源有限，所以只对本文提出的方法在 AVIRIS 图像中进行了仿真实验，希望后续能将该方法应用在其它类型的高光谱遥感影像中。

3、目前已有的图像质量评价指标还不够完善，希望在图像质量评价指标方面能有新的探索。

参考文献

- [1] 张良培,张立福.高光谱遥感[M].武汉大学出版社,2005.
- [2] 童庆喜,张兵,郑兰芬.高光谱遥感原理、技术与应用[M].高等教育出版社,2006.
- [3] 童庆喜,张兵,郑兰芬.高光谱遥感的多学科应用[M].电子工业出版社,2006.
- [4] 孙钊.高光谱遥感的应用.贵州教育学院学报[J].2004,15(4):58-61.
- [5] 常威威.高光谱图像条带噪声消除方法研究[D].西北工业大学硕士学位论文.2007,03.
- [6] Horm B K P, Woodham R J. Destriping Landsat MSS Imagery by Histogram Modification[J]. Comput Graph & Image Proeess, 1979, 10: 69-83.
- [7] Kautsky J, Nichols N K, JuPP D L B. Smoothed Histogram Histogram Modifieation for Image Proeessing[J]. Comput Vis & Image Proeess, 1984, 26: 271-291.
- [8] Gadallah F L, Csillag F, Smith E J M. Destriping Multisensor Imagery with Moment Matching[J]. Ini. J. Remote Sensing, 2000, 21(12): 2505-2511.
- [9] 刘正军,王长耀,王成. 成像光谱仪图像条带噪声去除的改进矩匹配方法[J].遥感学报, 2002, 6(4): 280-284.
- [10] 韩玲,董连凤,张敏,吴静. 基于改进的矩匹配方法高光谱影像条带噪声滤波技术[J]. 光学学报,2009,29(12) :3333-3338.
- [11] 蒋耿明,牛铮,阮伟利,刘正军. MODIS 影像条带噪声去除方法研究[J].遥感技术与应用,2003, 18(6):393-398.
- [12] 黄晓园,周汝良,罗辉. MODIS 影像条带噪声去除邻域插值法研究[J].地理空间信息,2008,6(1):101-102.
- [13] 支晶晶,梅枫,郑逢斌,高海亮,潘伟. 基于 IDL 的 HSI 图像条带噪声去除方案研究[J]. 河南大学学报,2010,40(1):73-76.
- [14] Wegener M. DestriPing MultiPle Sensor Imagery by ImProved Histogram Matehing[J]. Int.J.RemoteSensing,1999,11(5):859-875.
- [15] Alexandre A, Marie F, Kai S. Nonlinear Wavelet Thresholding: A Reeursive Methodto Determine the Optimal Denoising Threshold[J]. Applied and Computational Harlllonic Analysis,2005,18:177-185.
- [16] 杨忠东,张文,李俊,W. Paul Menzel, Richard A. Frey. 应用小波收缩方法剔除 MODIS 热红外波段数据条带噪声[J].遥感学报,2004,8(1):23-30.

- [17] 张辉. Hyperion 高光谱数据条带噪声消除方法研究 [J]. 厦门理工学院学报, 2010, 18(3):43-47.
- [18] Chaichoke V. Consideration of Smoothing Techniques for Hyperspectral Remote Sensing [J]. Photogrammetry & Remote Sensing, 2005, 11(2):1-9.
- [19] 崔廷伟, 马毅, 张杰. 航空高光谱遥感的发展与应用 [J]. 遥感技术与应用, 2003, 18(2):118-122.
- [20] 宋燕, 刘团结, 丁赤飚, 赵永超. 一种直方图匹配和线性空间滤波相结合的条带噪声去除方法 [J]. 测绘科学, 2009, 34(5):94-96.
- [21] 陈劲松, 朱博勤, 邵芸. 基于小波变换的多波段遥感图像条带噪声的去除 [J]. 遥感信息, 2003, 2:6-9.
- [22] 王文英, 周伟, 袁春, 刘顺喜等. CBERS_02 影像条带噪声处理方法探讨 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(8):4350-4352.
- [23] 杨金红, 顾松山, 程明虎. 插值法在去除 MODIS 遥感影像条带噪声中的应用 [J]. 气象科学, 2007, 27(6):604-609.
- [24] 崔廷伟, 马毅, 张杰. 航空高光谱遥感的发展与应用 [J]. 遥感技术与应用, 2003, 18(2):118-122.
- [25] Weinreb M P, Xie R., Lienekeh J H, and Crosby D S. Destriping GOES Images by Matching Empirical Distribution Functions [J]. Remote Sens. Environ., 1989, 29:185-195.
- [26] Stephane Mallat. A Wavelet Tour of Signal Processing, Second Edition [M]. 机械工业出版社, 2003, 9.
- [27] 张延奎. 小波分析及其应用 [M]. 机械工业出版社, 2005.
- [28] 郑逢斌, 支晶晶, 高海, 赖积保, 潘伟. 一种高光谱图像条带噪声去除改进算法 [J]. 计算机科学, 2010, 37(5):265-267.
- [29] 孙颖, 张志佳. 基于频域滤波的自适应条带噪声去除算法 [J]. 仪表技术与传感器, 2006, 2:57-60.
- [30] 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用 [M]. 高等教育出版社, 2000.
- [31] 张兆礼, 赵春晖, 梅晓丹等. 现代图像处理技术及 Matlab 实现 [M]. 人民邮电出版社, 2001.
- [32] Preesap Rakwatin, Wataru Takeuchi. Stripe Noise Reduction in MODIS Data by Combining Histogram Matching With Facet Filter [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(6):1844-1856.

- [33] 修吉宏,翟林培,刘红. CCD 图像条带噪声消除方法[J].电子器件, 2005, 28(4):719-725.
- [34] 董广香,张继贤,刘正军.CHRIS/PROBA 数据条带噪声去除方法比较[J].遥感信息,2006,6:36-39.
- [35] 罗婷,周新志.GA_BP 网络在去除 MODIS 遥感影像条带噪声中的应用[J]. 测控技术,2010 29(6):21-24.
- [36] Ruizhi Ren, Shuxu Guo, Lingjia Gu, Xiangxin Shao. Stripe Noise Removal Method for MODIS Remote Sensing Imagery[J].International Conference on Computer Engineering and Technology. 2010,1:565-569.
- [37] 吴传庆,赵永超,童庆禧,郑兰芬. 基于光谱信息的遥感图像空间域自适应滤波[J].遥感学报,2004,8(1):51-55.
- [38] 姚敏等编著.数字图像处理[M].机械工业出版社, 2006.
- [39] 宋燕, 刘团结, 丁赤飚. 一种 CBERS-02 星 CCD 原始条带噪声处理方法[J]. 遥感技术与应用,2008,23(4):457-461.
- [40] Gao B C,Heidebrecht K H,Goetza A F H. Derivation of scaled surface reflectance from AVIRIS data[J]. Remote Sensing of Environment,1993,44(2-3):165-178.
- [41] 陈秋林,薛永祺. OMIS 成像光谱数据信噪比估算[J].遥感学报,2000,4(4): 284-289.
- [42] Kenneth R.Castleman 著,朱志刚等译.数字图像处理[M].电子工业出版社, 2002.
- [43] 石光明,王晓甜,张犁,刘哲.基于方向滤波器消除遥感图像孤立条带噪声的方法[J].红外与毫米波学报,2008,27(3):214:218.
- [44] 袁金国.遥感图像数字处理[M].中国环境科学出版社, 2006.
- [45] 崔廷伟,马毅,张杰.航空高光谱遥感的发展与应用[J].遥感技术与应用 2003, 18(2):118-122.

攻读学位期间发表的学术论文

- [1] Wanchen Li, Yanli Cao, Yuxian Chen. Methods Reserch for Removing the Stripe Noise based on AVIRIS Image[J]. 2010 International Conference on Future Information Technology and Management Engineering,2010,2(1):107-110.

致 谢

两年半的研究生学习生活即将结束，回顾这段难忘的岁月，我要向帮助过我的老师、同学和亲人表示深深的感谢。

首先衷心感谢导师李万臣教授在学习生活中给予我的悉心关怀和指导。在整个研究生期间，从论文的选题、开题直到论文的结束，李老师都作了详细而具体的指导。李老师总是在百忙之中抽出时间来听取我们的报告，每次都会非常认真而耐心的指出我们工作的不足。李老师严谨的作风、渊博的学识、开阔的思维以及平易近人的态度，深深地影响着我，并将激励我在以后的学习、工作和生活中继续努力进取。在李老师身上，我不仅学到了专业知识、分析问题和解决问题的能力，更重要的是学到了做人做学问的道理。

同时感谢师兄赵开伟、师姐葛秘蕾以及郭逢丽、于学明、李丹雪、葛磊等同学，我们在一起相互帮助、相互学习，为本课题的顺利完成创造了一个良好的学习和研究环境。与你们在一起共度的这段学习时光充实而又快乐，必将成为我一生中难忘的回忆。

最后感谢我的父母及家人，在整个学习过程中，他们给予了我无私的关怀和帮助，他们的支持是我顺利完成学业的强大动力。