

100

100



## 摘 要

随着航天遥感技术的发展, 遥感影像的获取手段和获取能力都有了显著的提高。各类不同的遥感影像既有其各自主要的应用特点和对象, 同时也有相应的局限性。而多源遥感影像融合技术则是一项综合同一场景的多源影像信息技术, 可以使我们在不利的条件下或者当一个传感器不足以提供用于目标识别或场景描述的足够信息时, 通过影像融合获得较满意的影像效果。因此本文的主要工作是研究多源遥感影像融合技术的像素级融合以及其在遥感影像质量改善方面的应用问题。

首先, 介绍了多源遥感影像融合和小波变换的技术理论、技术特点和应用方向; 概述了多源遥感影像融合的目的和融合的特征, 以及融合的层次。其次, 从空间域和变换域两个方向介绍了不同的影像融合方法和融合规则, 提出了基于局部区域平均梯度的加权融合准则和基于窗口的活性测度匹配的融合准则。最后在实际应用邻域, 主要研究了以下几个方面:

1. 研究了不同遥感影像之间的局部影像替换, 解决了遥感影像的云覆盖问题, 并利用色彩平衡算法消除了局部替换后影像上存在的拼接缝。
2. 研究了基于小波变换的薄云消除法, 解决了单张影像上的薄云覆盖问题。
3. 探讨了基于影像重叠的序列数字影像的色彩校准方法, 解决序列数字影像拼接的无缝拼接问题。

**关键词:** 影像融合 小波变换 无缝拼接 去除尘雾 影像质量改善



## Abstract

With the development of the Spaceflight Remote Sensing technology, the approach and capability to acquire Remote Sensing images have improved significantly. Different kinds of Remote Sensing image have their own character, and are applied to different objects. Multiple Remote Sensing Image Fusion is a Technology to combine information from multiple images of the same scene. When in the adverse condition or one image sensor can not provide enough information we need, the technology can help to get an improved image. So, the problem of the pixel level fusion of different remote sensing images and its applications on improving of the Remote Sensing images quality are discussed in this thesis.

Firstly, Multiple Remote Sensing Image fusion and Wavelet Transform are introduced, including theory, character and application; the aims, characteristic and gradation of the remote sensing image fusion are also outlined. Secondly, the methods and rules of image fusion are introduced from two aspects: spatial domain and transform domain. Then two novel fusion rules respectively based on local actively measure match and local weighted average gradient. Finally, in application areas, research contents of this thesis are summarized as follows:

1、The local images substitution among different resource RS images are implemented to remove cloud covering effect on RS images. With color balance methods, the color gap after local images substitution is cleared up with good experimental results.

2、The thin cloud clearing up methods based on Wavelet Transform are implemented to remove cloud covering effect on single RS images.

3、Color Adjustment method of the Sequence Digital Images based on image overlapping are implemented to solve the color gap when the Sequence Digital image mosaics.

**Keywords:** Image Fusion Wavelet Transform Seamless Image Mosaic  
Clear Up Cloudy Image Quality Improvement



## 目 录

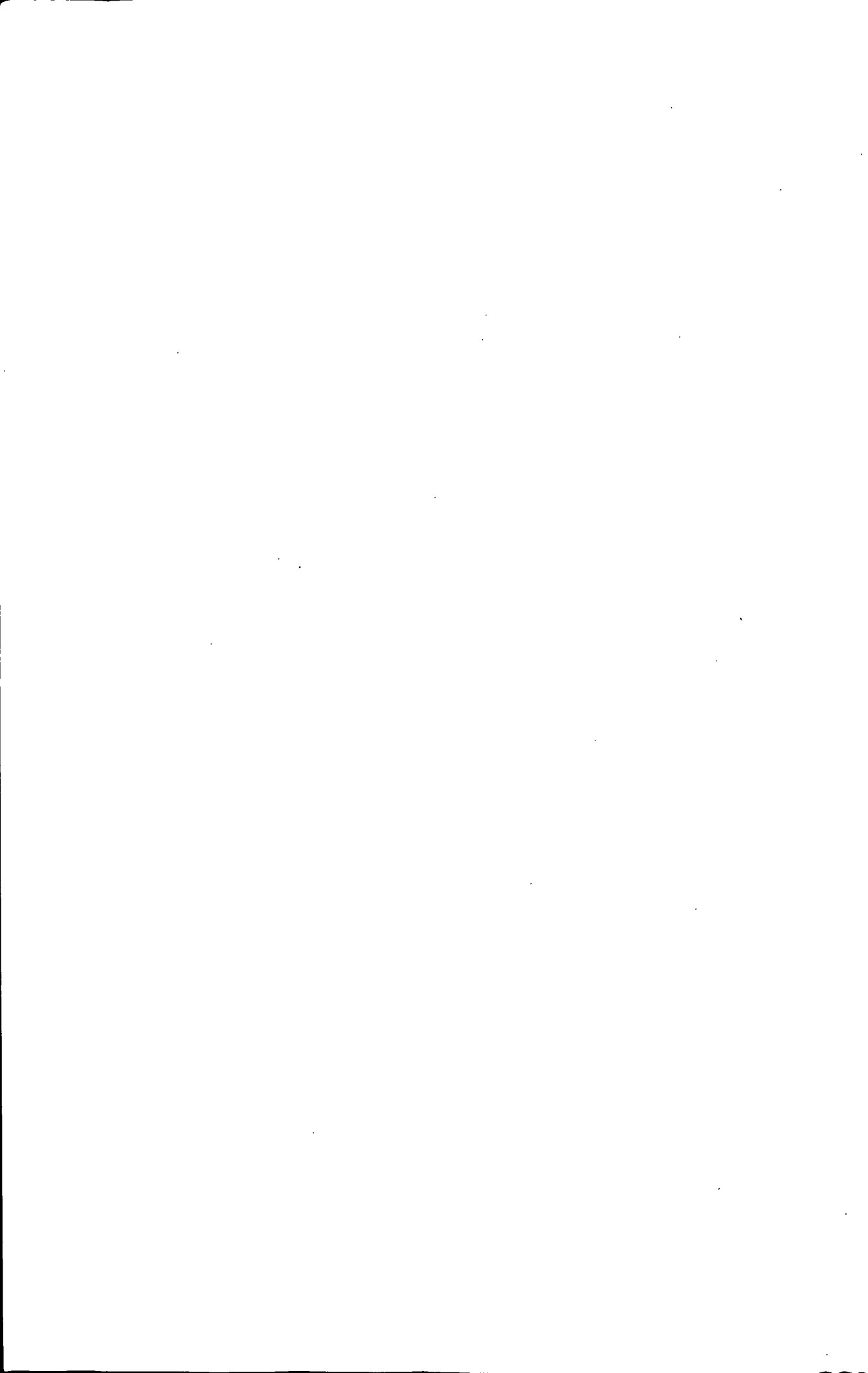
第一章 绪论.....	1
1.1 论文研究的背景和意义.....	1
1.2 多源遥感影像融合技术在测绘上的应用.....	2
1.2.1 通过影像融合生成高分辨率的多光谱影像.....	3
1.2.2 通过多源遥感影像融合来消除云雾的影响.....	3
1.2.3 通过影像拼接技术来消除影像拼接缝.....	4
1.3 国内外研究现状.....	4
1.4 论文的组织.....	5
第二章 多源遥感影像的融合技术.....	7
2.1 多源遥感影像的融合技术的基本原理.....	7
2.1.1 多源遥感影像的融合技术的概念和优点.....	7
2.1.2 多源遥感影像融合的体系结构.....	8
2.2 像素级多源影像融合算法.....	11
2.2.1 空间域融合法.....	11
2.2.1.1 影像加权融合法.....	11
2.2.1.2 基于 HIS 变换的影像融合法.....	12
2.2.1.3 基于 PCA 变换的影像融合法.....	16
2.2.2 变换域融合法.....	18
2.2.2.1 小波变换理论.....	19
2.2.2.2 基于小波变换的影像融合.....	24
2.2.2.3 基于 HIS 变换和小波变换相结合的影像融合算法.....	26
2.2.2.4 基于 PCA 变换和小波变换相结合的影像融合算法.....	28
2.3 影像多尺度分解的融合规则和融合算子.....	29
2.3.1 系数替代准则.....	30
2.3.2 系数替代准则的改进方法.....	30
2.3.3 系数最大准则.....	31
2.3.4 局部区域方差准则.....	32

2.3.5	局部区域平均梯度准则.....	33
2.3.6	局部区域平均梯度的加权融合准则.....	33
2.3.7	基于局部区域活性测度匹配的融合准则.....	34
2.3.8	一致性验证.....	35
2.4	影像融合结果的质量评价.....	36
2.4.1	融合影像质量的主观评价方法.....	36
2.4.2	融合影像质量的客观评价方法.....	37
2.5	实验与分析.....	39
2.5.1	实验数据分析.....	40
2.5.2	实验及分析.....	40
2.6	本章小结.....	45
<b>第三章</b>	<b>遥感影像的云雾影像修复技术.....</b>	<b>47</b>
3.1	云的形成、种类和去除方法.....	47
3.2	基于多源遥感影像融合的去云技术.....	48
3.2.1	影像纠正.....	49
3.2.2	影像直方图匹配.....	49
3.2.3	有云影像裁切.....	51
3.2.4	影像融合规则.....	51
3.2.5	融合后影像的拼接缝处理.....	52
3.2.6	实验与分析.....	53
3.3	基于小波变换的薄云修补法.....	54
3.3.1	薄云的成像模型.....	55
3.3.2	基于小波分解的薄云修补法.....	56
3.3.3	实验及分析.....	57
3.4	本章小结.....	58
<b>第四章</b>	<b>遥感影像拼接的拼接缝消除技术.....</b>	<b>59</b>
4.1	基于加权影像融合的拼接缝消除法.....	60
4.1.1	影像的预处理.....	61
4.1.2	影像的直方图匹配.....	62
4.1.3	影像同名点的自动匹配.....	62

---

4.1.4 基于加权影像融合的拼接缝消除法.....	63
4.1.5 彩色影像.....	63
4.2 实验与分析 .....	63
4.3 本章小结.....	64
<b>第五章 结论与展望.....</b>	<b>65</b>
5.1 论文总结.....	65
5.2 展望.....	66
致谢.....	67
参考文献.....	69
研究成果.....	73





## 第一章 绪论

### 1.1 论文研究的背景和意义

随着传感器、遥感平台、数据通信等相关技术领域的快速发展,现代空间遥感已经进入了一个能够动态、快速、准确、多手段提供各种对地观测数据的新阶段。并且随着各种新型传感器的出现,人们获取影像数据的性质也在发生质的变化,一是已有最初的可见光黑白影像发展到现在的可见光、红外、雷达、微波及其它电磁波等多源数据;二是形成多级分辨率影像序列的金字塔,能够提供由粗到精的对地观测数据。光学影像的空间分辨率已由最初的百米量级,提高的商业卫星 0.61 米 (BirdQuick), 军用卫星甚至达到 0.1 米 (美军的 KH 光学卫星) 的等级;三是可以反复获得同一地区的多时相影像数据,卫星重访周期已由 15—18 天缩短到现在的 2—3 天;四是传感器的光谱波段不断增加,其光谱分辨率已达到 2-3m 的量级,高光谱和超光谱已能细分至数百个甚至上千个波段;五是装载影像的介质平台由传统的胶片成像转变为直接获取数字影像。

在遥感影像处理和应用方面,由于影像获取的传感器种类和接受方式的多样化和快速化,相应获取同一地区的遥感影像数据量也在与日俱增,在空间、光谱、方向和时间等方面构成多源数据。然而随着遥感影像数据量的不断增加,如何有效利用如此巨大的遥感影像信息更好的为经济建设和军事目标服务也在不断地困扰着使用人员。从历史经验来看遥感影像数据的处理往往都是滞后于遥感影像数据获取的薄弱环节,人们对遥感信息的分析和利用程度远远落后于数据源增加的速度,为此它直接影响到大量遥感影像数据的使用效率和经济效益。分析原因<sup>[1]</sup>,这主要是在于缺乏完善和动态的遥感影像分析处理的方法和模型,难以从遥感影像中直接获取大量高精度的空间信息。因此充分挖掘卫星遥感信息的应用潜力,提高遥感影像分析识别精度,是目前遥感应用的迫切要求。

经过大量的研究分析,人们发现与单源遥感影像数据相比,多源遥感影像数据所提供的信息具有冗余性、互补性和合作性。这些性质可以把多源海量数据尽可能作为一个整体来综合利用,以便从中提取出更精练的信息结果,为人为决策

或人工智能决策系统提供决策依据。多源遥感影像数据的冗余性表示它们对环境或目标的表示、描述或解译结果相同，它<sup>[2]</sup>是一组由系统中相同或不同类型的传感器所提供的对环境中同一目标的感知数据，尽管这些数据的表达形式可能存在着差异，但总可以通过变换将它们映射到一个共同的数据空间，这些变换的结果反映了目标某一个方面的特征，如能合理地利用这些冗余信息，将可以降低误差和减少整体决策的不确定性，提高识别率和精确度；互补性是指遥感信息来自不同的自由度且相互独立，它们也是一组由多个传感器提供的对同一个目标的感知数据。一般来讲，这些数据无论是表现的形式还是所表达的含义都存在较大的差异，它们反映了目标的不同特性，如对这些具有不同特性的互补信息加以利用，将可以有效地提高系统的准确性和提高最终结果的可信度；而合作信息的应用，可充分提高影像的协调性能，增强相互之间的调用。因此把多源遥感影像数据中各自的优势提取出来并加以综合利用，将可以获得所研究目标及周围环境的正确的解译。而多源遥感影像融合技术则是富集这些多种传感器信息的最有效途径之一，它为多源遥感影像数据的处理、分析与应用提供了全新的途径。将数据融合技术与遥感影像处理紧密地结合在了一起，被认为是现代多源影像处理和分析中非常重要的一步。

## 1.2 多源遥感影像融合技术在测绘上的应用

在现代测绘中，数字地形图和正射影像图的制作主要依赖于遥感测绘卫星所获取的遥感数字影像，它是测绘产品的基础数据，影像质量的完整和优劣将直接影响着多样化测绘产品的精度和准确度。然而在数字影像获取的过程中，由于传感器和相机本身的物理特性及光学特性，使我们所获取的数字影像仅具有单一传感器的影像特性，缺乏多源传感器的优势互补性，因此造成影像质量的信息缺乏，降低了地物的解译的精度和可靠性；同时再加上外界环境和大气的影响，使所获取的数字影像也存在着或多或少的质量干扰问题（如云雾干扰、镜头边缘减光引起色彩不均等）。如果在影像的后期处理中这些问题得不到有效的改善和解决，将影响遥感影像的成图质量，不利于数字地形图和数字正射影像图的制作。因此利用数字图像处理技术改善和提升遥感影像的质量将有助于保证数字化测绘产品的精确度，目前常用的改善影像质量的方法有：

### 1.2.1 通过影像融合生成高分辨率的多光谱影像

遥感影像融合的目的就在于集成或整合多源遥感影像中的冗余信息和互补信息,利用优势互补的数据来提高影像的信息可用程度,同时增加对研究对象解译(辨识)的可靠性和准确性。因此对于多源遥感影像数据,首先通过分析了解各遥感影像的空间特性,然后根据同一地区不同类型的影像在空间特性上的差别,将各种影像的单类信息特点综合起来,形成聚合类信息影像,不仅对扩展卫星遥感的应用邻域有益,而且有利于地物空间结构和纹理结构更明确地表示,为遥感影像的使用提供更好的基础。如多光谱影像光谱信息量丰富,地物特征明显,对判读有利,但分辨率较低,地物细节分辨不清;而全色影像分辨率高,地物细节显示能力强,但光谱信息量少,不易区分地物属性。因此可以进行遥感影像的数据融合,实现多光谱影像与全色影像对同一场景的复合,形成更适合于人类感知或者进一步影像分析与理解的单一影像,使融合后的多光谱影像既具有较高的空间细节表示能力,同时又保留了多光谱影像的光谱特性,有利于目标影像的识别与判读。同样雷达影像和可见光影像,红外影像和可见光影像也可以利用各自的特点通过融合来达到优势互补的作用。因此,研究多源遥感影像融合技术具有重要的现实意义。

### 1.2.2 通过多源遥感影像融合来消除云雾的影响

目前在利用遥感影像进行测绘制图的工作中,广泛采用的遥感数据大部分是TM、SPOT、IKONOS、QuickBird等可见光影像,这些可见光影像具有信息量大、分辨率高和几何性质稳定等特点,但同时由于它们的镜头传透能力较弱,极易受到气候因素的影响,使遥感影像质量受到干扰,而云雾遮挡就是其中常见影响之一。在云雾影响中有薄云和厚云之分,其中薄云一般范围较大,表现出慢变化的空域趋势,在频域上即具有低频的特征,成像后造成影像模糊,清晰度下降;厚云则完全阻挡地面景物的反射,在影像上无法获得云层覆盖地区的信息,这些地区将成为制图的“盲区”,有时大面积的云层遮挡将严重影响生成影像地图的质量,甚至造成无法进行制图。在航空摄影时,对出现的大云块影像可以通过补飞来解决。而利用卫星影像成像时,卫星传感器通过相同轨道及对同一地区拍摄影像是

控制中心预先设定的,不能随意更改,因此不论是我国自己发射的卫星还是购买国外影像数据,都不易在短期内获得相同传感器获取的同一地区的影像数据,无法满足应急状态下的影像需求。因此我们应该充分利用手头现有多传感器的遥感影像数据,通过多源影像的融合来修补云层,消除云雾的影响。

### 1.2.3 通过影像拼接技术来消除影像拼接缝

影像拼接技术是影像融合技术的一种,广泛应用于虚拟现实中的全景图显示和正射影像制作等遥感影像的处理领域。一般情况下,进行影像拼接时,在拼接的边界上,不可避免地会产生灰度突变。这主要是由于传感器上光学镜头的边缘效应和照射环境的大气影响,造成影像上的灰度的细微差别,如将这些有灰度差异的序列幅影像拼接成一幅全景影像将会产生明显的拼接缝,势必会影响全景影像的整体色彩效果。而在实际的成像过程中,这种细微差别又很难避免。因此影像拼接技术的难点就在于准确寻找影像灰度之间的平衡关系,把两幅以上的影像自然平滑地衔接在一起,获取一幅全局的影像。

本论文将针对以上提出的各种问题,通过对数字影像处理理论和融合技术的综合分析,着重研究多源遥感影像融合技术在影像质量改善和修补方面的应用和发展。

## 1.3 国内外研究现状

多源遥感影像融合技术是以军事领域的研究为开端的。20世纪80年代,美军首先将数据融合技术应用于战略和战术监视系统,包括利用非协调传感器进行目标跟踪、目标识别,以及开发相关、分类、态势和威胁估计的应用算法。因此到80年代末期美军已研制出少量第一代数据融合系统,应用于大型战略系统和海洋监视系统中,并在此基础上建立的C<sup>3</sup>I系统已经实用化应用于海湾战争和伊拉克战争。进入90年代,多源遥感影像融合技术的研究和应用也进入了一个崭新阶段,一些非军事领域的协会和会议相继成立和举办,如美国航天局的国际信息融合协会。1994年IEEE首次举办了智能系统多传感器融合与集成国际会议等<sup>[3]</sup>,同时多源遥感影像融合技术在遥感、医学影像处理,智机器人等民用领域也得到了广泛应

用。在遥感领域中，多源遥感影像融合技术已应用于土地资源调查、洪水监测、地形测绘以及地物分类等方面。正是由于其巨大的市场商业价值，在一些软件公司和研究团体推出的商用遥感影像处理软件中，影像融合，除云技术和影像拼接已经成为必要的功能模块，这些软件中比较常见的有新加坡ENVI公司的ENVI，美国Earth Resource Mapper公司的ER Mapper，美国ERDAS公司的ERDAS IMAGINE软件，PCI软件等。

我国学者对数字遥感影像信息更新技术的研究起步较晚，基本是在1991年海湾战争之后才引起军界领导的高度关注。然而国内对这项技术的研究却非常重视，1990年，陈述彭院士就将“信息复合”列为遥感技术研究的一项重要内容，认为它是遥感地学分析中一项关键技术，并列举了部分的试验成果。随着影像融合领域的进一步延伸，越来越多单位加入了研究的行列，并取得了丰硕的研究成果。国内已有多家院校、科研单位在进行影像信息更新的研究，发表各种相关文章数百篇。与此同时，为跟踪国际前沿，中国政府也不失时机地把信息更新技术列为“863”计划和“九五”规划中的重点研究项目，以之作为发展计算机技术、空间技术等高新产业领域的关键技术之一。

#### 1.4 论文的组织

本文研究共分五章内容：

第一章为绪论，介绍了多源遥感影像融合技术的现状和在测绘邻域的应用。

第二章为多源遥感影像融合技术，首先叙述了影像融合和小波变化的概念、原理及流程，然后着重介绍了几种影像融合的算法和融合规则，最后介绍融合后影像质量的评价标准。

第三章为数字遥感影像去除云雾影响技术，介绍了云雾组成的机理和形成的原因，介绍了利用小波变换去除薄云的基本思想，利用多源遥感影像融合技术去除厚云的方法流程

第四章为数字遥感影像的拼接技术，着重介绍了利用直方图规定化和多源遥感影像融合技术消除拼接缝的原理和步骤。

第五章为结束语，总结本文的工作，提出了进一步的研究方向。



## 第二章 多源遥感影像的融合技术

### 2.1 多源遥感影像的融合技术的基本原理

#### 2.1.1 多源遥感影像的融合技术的概念和优点

航天遥感技术经过 50 多年的发展与应用, 一个多层次、多角度、全方位和全天候的地球信息获取技术系统已经形成<sup>[4]</sup>, 并因此产生了大量的地球观测数据。面对如此数量巨大、覆盖范围广阔的遥感数据, 现有的处理技术和计算机的软、硬件水平无法同时处理多传感器、多分辨率、多时相的遥感数据, 来获取所需要的有用信息。而多源遥感影像融合技术的出现, 则为解决这些问题提供了一条崭新的思路。

多源遥感影像融合通过多级影像处理技术来复合多源遥感信息, 其将多源信息所采集的关于同一目标的影像经过一定的处理, 提取各自信道的优势信息, 最后综合成统一影像或综合影像特征以供观察和进一步处理, 以改善解译的精度、可靠性以及使用率, 形成对目标的完整一致的信息描述<sup>[5]</sup>。也就是说在获取的大量遥感数据中, 我们可以根据多源遥感数据所具有的不尽相同的空间分辨率、波谱分辨率和时相分辨率, 将它们各自的优势综合起来, 便可以弥补单一影像上信息的不足, 这样不仅扩大了各自信息的应用范围, 而且大大提高了遥感影像分析的精度。总的来说, 多源遥感影像数据融合的优点可以归纳如下:

- 1、使传感器系统具有全天候工作能力。在航天遥感中, 当某个传感器因为干扰而不能被利用, 或某个时间段某个传感器无法胜任工作时, 可以获得另一种传感器提供的影像信息。

- 2、扩展了空间的覆盖。通过多个交叠覆盖的传感器作用区域, 扩展了空间的覆盖范围, 总有一种传感器可以探测到其它传感器探测不到的地方<sup>[1]</sup>。

- 3、提高目标探测、分辨和识别率。如用高分辨率的全色影像和低分辨率的多光谱影像进行融合。在保持光谱信息的同时, 影像的空间分辨率得到提高, 同时还可以利用不同时相影像改善影像分辨率。



4、信息互补。不同影像传感器由于其观察功能的片面性，不能全面地反映地物的整体信息，将不同类型或不同时相的影像数据进行针对性融合就可以进行信息互补。

5、利用多时相数据进行动态检测。遥感影像是某一时刻地面景物的集中体现，当时域发生变化时，无法快速确定地面景物的动态变化情况，将不同时域的影像数据进行融合就可以得到某一区域的动态信息。

6、在数字地图绘制等方面，可以提高平面测图和几何纠正精度，为立体摄影测量提供立体观测能力。

### 2.1.2 多源遥感影像融合的体系结构

一般的多源遥感影像融合技术的处理流程为：影像预处理、影像配准、影像融合、特征提取以及识别与决策。根据当前数据融合结果的性质，IEEE国际遥感数据融合技术委员会将遥感数据融合分为三级，即像素级融合、特征级融合和决策级融合。

#### 1、像素级融合

像素级影像融合亦称为基于像素的影像融合。其过程是在严格的配准条件下，直接在采集到的原始影像数据层上进行的，即在可见光、红外及SAR影像等原始数据基础上进行数据的综合分析。像素级融合是整个影像融合技术的基础，是最底层的影像融合，融合精度比较高，可以使得人们对潜在目标的影像识别更为容易，更适合于计算机的检测处理，其主要目的是影像增强、影像分割和影像分类，为人工判读影像或更进一步的特征级融合提供良好的基础数据。它的优点在于信息丢失少，能够保持尽可能多的现场数据，并提供其它融合层次所不能提供的细微信息。缺点计算数据量大，计算时间长，配准精度要求高，最好来自同一平台。

目前通常的像素级影像融合的方法主要包括：加权融合法、HIS变换、主成分分析法（PCA）、高通滤波法、基于影像金字塔形分解的融合方法、基于小波变换的影像融合法等。融合过程如图2.1。

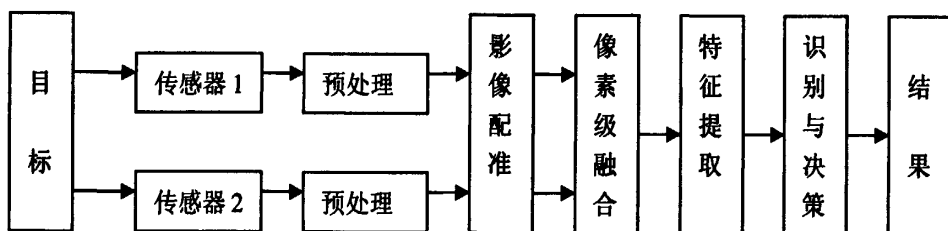


图2.1 像素级影像融合过程

## 2、特征级融合

特征级融合是处在像素级融合和决策级融合之间的中间层次的融合，是仅次于决策级融合的更高层次的融合。特征级融合首先对来自不同传感器的原始影像数据进行特征提取，然后按各影像上相同类型的特征信息如边缘、形状、轮廓和区域等信息进行综合与处理，得到新的影像特征或新的融合影像，从而为目标的特征分类、检测和判决、估计提供依据。经过特征级融合处理后的特征空间其数据量相比于原来的影像数据大为减少，可以有效地提高数据处理和传输效率。因此它的最大优点在于实现了客观的数据压缩，计算量较小，便于实时处理。由于特征级融合所提取的特征直接与决策分析有关，因而融合结果能最大限度地给出决策分析所需要的特征信息。特征层融合的传感器对配准要求不如像素层要求那么严格，因此影像传感器可分布于不同平台上。缺点是与像素级融合相比信息丢失较多。

目前，特征级融合的主要方法有Bayes 准则法、Dempster-Shafer 证据理论法、聚类分析法、表决法及神经网络法等。融合过程如图2.2。

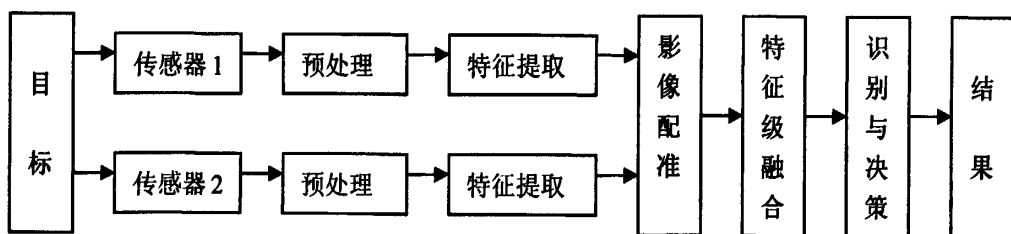


图2.2 特征级影像融合过程

## 3、决策级融合

决策级融合是根据一定的准则以及每个决策的可信度做出最优决策，属于最高层次影像融合，它首先对待处理的影像，如原始影像、像素层或特征层融合影像等，分别提取信息，然后将信息通过一定的决策规则进行融合来解决不同数据产生的结果的不一致性，从而提高对研究对象的辨识程度。它具有容错性高、通

信及传输要求低、分析能力强、配准要求低、实时性最好的优点，但信息损失最多。如果传感器影像表示形式差异很大或者涉及影像的不同区域时，那么决策级融合也许是融合多源影像信息的唯一方法。典型方法有MAP 法、Dempster-Shafer 证据理论法，基于专家知识的方法、基于神经网络的方法以及基于模糊逻辑的方法等。融合过程如图2.3。

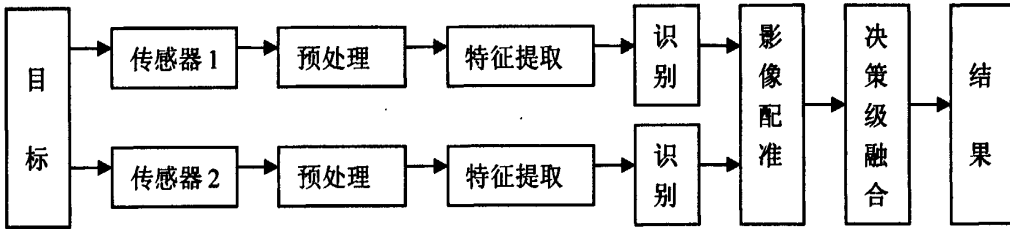


图2.3 决策级影像融合过程

对于一般的影像融合过程，针对不同层次的影像融合总结一下具有以下特点：

1、随着融合层次的提高，要求数据的抽象程度越高，对各传感器的通知性要求越低，对数据表示的统一性越高，数据转换量越大，同时系统的容错性增强；而随着融合层次的下降，融合所保存的细节信息越多，数据的处理量增大，数据间的配准精度更高，并且融合方法对数据源及其特点的依赖性增大，因此不易给出影像融合的一般方法。

2、在遥感影像融合体系结构中由于融合层次的高低不同，标准不同，决定着融合的基本策略也为一种由低至高逐步整合，逐层抽象的信息处理过程。即先对同一层次上的影像信息进行融合，从而得到更高层次上的融合信息，然后再汇入相应的高层次影像融合中，逐步完成融合。

在实际应用中可根据具体的应用场合采用不同层次的融合，很多数据融合领域的专家认为在融合中应该更多地采用像素融合，因为像素级含有的信息最为丰富。当传感器容易失效时或传感器类型不同时，可采用特征级或决策级融合，它们在传感器失效时仍具有很好的鲁棒性，而在此种情况下由像素级融合得出来得结论往往是不可靠的<sup>[6]</sup>，本文主要讨论像素层遥感影像的融合算法及应用。

## 2.2 像素级多源影像融合算法

针对遥感影像的像素级融合方法的研究一直是国际性的热点问题,已经提出了许多种不同的融合算法,如BT(Brovey Transform)、SVR(Synthetic Variable Ratio)、HIS(Intensity-Hue-Saturation)、PCA(Primary Components Analysis)、FFS(Frequency Filtering Substitution)以及DWT(Discrete Wavelet-based Transform)<sup>[7]-[10]</sup>等。像素级多源影像融合算法大致分为两大类:基于空间域的影像融合算法和基于变换域的影像融合算法。基于空间域的影像融合算法一般是直接在影像的像素灰度空间上进行融合;而基于变换域的影像融合算法先对待融合的多源影像经过影像变换(如金字塔变换,小波变换),然后根据融合规则对变换后的系数进行组合生成融合影像。虽然二者作用域不同,但是它们之间关系并不是完全独立的,在许多算法中有相互结合。

### 2.2.1 空间域融合法

空间域融合法指采用某种算法在不经任何影像变换和分解的前提下,直接对空间配准的两幅或多幅源影像在空间域进行对应像素的处理,从而融合成一幅新的影像。常用的算法有加权融合法、HIS变换法、主成分分析法以及基于统计的影像融合<sup>[11]-[13]</sup>等。

#### 2.2.1.1 影像加权融合法

加权融合法是直接将两幅影像在空域内进行算术加权处理,一般采用下式进行融合:

$$\begin{cases} R_F = a_1 R_M + a_2 I_p \\ G_F = b_1 G_M + b_2 I_p \\ B_F = c_1 B_M + c_2 I_p \end{cases} \quad (2-1)$$

1)

式中:  $I_p$ : 高分辨率全色影像

$R_M, G_M, B_M$ : 多光谱影像三个通道原始数据

$R_F, G_F, B_F$ : 融合后影像三个通道数据

$a_i, b_i, i=1, 2, 3$ , 权系数, 一般根据经验而定

加权融合方法具有算法简单、融合速度快、实时性强的优点, 可以依据不同影像的质量, 给出一组最佳的加权系数, 然后对它们进行加权平均处理, 当用于多幅图像融合处理时, 还可以提高了融合影像的信噪比。但是, 这种加权融合实际上是对像素的一种平滑处理, 这种平滑处理在减少图像中噪声的同时, 往往在一定程度上降低了影像的对比度, 使图像中的边缘、轮廓变得模糊了。而且, 当融合图像的灰度差异很大时, 就会出现明显的拼接痕迹, 不利于人眼识别和后续的目标判读过程, 因此在多数应用场合该方法是难以取得满意的融合效果。

### 2.2.1.2 基于 HIS 变换的影像融合法

影像处理中经常应用的彩色空间有两种: 一种由红(R), 绿(G), 蓝(B)三原色组成的彩色空间 RGB 空间, 在人眼所能观察的色彩中, 任何颜色都是由这三种独立的基本色彩按不同比例相混合而成, 因此该颜色系统方法简单, 便于显示和彩色扫描, 常面向于硬件设备。另一种是 HIS 彩色空间, 既强度(I), 色度(H), 饱和度(S)。其中, 色度取决与光线的波长, 是光谱在质方面的区别; 饱和度取决于光的波长纯度; 亮度取决于物体发出的或反射的光线的强度<sup>[14]</sup>。因此三属性互不相关, 更适合于彩色处理。

在 RGB 空间中, 模型是基于笛卡尔坐标系统, 三个轴分别为 R,G,B, 而光谱信息与三个坐标 R、G、B 耦合性较强, 任一分量的改变都会改变光谱信息, 单独处理起来比较困难。而 HIS 空间中 I、H、S 相互独立, 影像空间分辨率主要由亮度(I)的空间分辨率决定, 光谱分辨率由色度(H)和饱和度(S)来决定, 亮度的改变对光谱信息影像较小, 而这一特点使得 HIS 模型非常适合借助人的视觉系统来感知彩色特性的影像处理算法。更重要的是 I、H、S 三种特征分量的分离使我们能够对饱和度直接进行扩展, 扩大饱和度的动态范围, 从而降低各个波段亮度值之间的相关性, 从根本上改善影像质量。因此通过调节 I,H,S 可以获得较好的显示效果, 符合影像融合中提高空间分辨率而保持光谱分辨率的特性。通常, 把影像的 R、G、B 变换成 H、I、S 称为 HIS 正变换, 而由 H、I、S 变换为

R、G、B 称为 HIS 反变换。HIS 变换是一种影像显示、增强和信息综合的方法，具有灵活实用的特点。

### 1、HIS 变换的数学模型

目前常用的 HIS 变换模型主要有球体变换、圆柱体变换、三角形变换和单六棱锥变换四种。对影像融合而言，四种模型差异不明显。下面给出圆柱体和三角形模型的正反变换公式：

#### (1)、圆柱体变换模型：

正变换：

$$I = \frac{1}{\sqrt{3}}(R + G + B)$$

$$H = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{2R - G - B}{\sqrt{3}(G - B)} \right) + C$$

$$S = \frac{\sqrt{6}}{3} \sqrt{R^2 + G^2 + B^2 - RG - RB - GB}$$

其中：

$$\text{当 } G \geq B, \quad C = 0$$

$$\text{当 } G < B, \quad C = \pi$$

反变换：

$$\text{当 } 0 \leq H < 120^\circ \text{ 时: } \quad R = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( 1 + \frac{S \cdot \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right)$$

$$B = \frac{1}{\sqrt{3}}(1 - S)$$

$$G = \sqrt{3} I - R - B$$

$$\text{当 } 120^\circ \leq H < 240^\circ \text{ 时: } \quad G = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( 1 + \frac{S \cdot \cos(H - 120^\circ)}{\cos(180^\circ - H)} \right)$$

$$R = \frac{1}{\sqrt{3}}(1 - S)$$

$$B = \sqrt{3} I - R - G$$

$$\text{当 } 240^\circ \leq H < 360^\circ \text{ 时: } B = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( 1 + \frac{S \cdot \cos(H - 240^\circ)}{\cos(300^\circ - H)} \right)$$

$$G = \frac{1}{\sqrt{3}} (1 - S)$$

$$R = \sqrt{3} I - R - G$$

(2) 三角形变换模型:

正变换:

$$I = \frac{1}{3} (R + G + B)$$

$$\text{Min} = \text{Min}[R, G, B]$$

$$\text{当 } B = \text{Min} \text{ 时, } H = \frac{(G - B)}{3(I - B)}, \quad S = 1 - \frac{B}{I}$$

$$\text{当 } R = \text{Min} \text{ 时, } H = \frac{(B - R)}{3(I - R)}, \quad S = 1 - \frac{R}{I}$$

$$\text{当 } G = \text{Min} \text{ 时, } H = \frac{(R - G)}{3(I - G)}, \quad S = 1 - \frac{G}{I}$$

反变换:

$$I' = R + G + B$$

$$\text{当 } 2 \leq H < 3 \text{ 为最小时, } R = I' (1 - 7S - 3SH) / 3$$

$$G = I' (1 - S) / 3$$

$$B = I' (1 + 8S - 2SH) / 3$$

$$\text{当 } 1 \leq H < 2 \text{ 为最小时, } R = I' (1 - S) / 3$$

$$G = I' (1 + 5S - 3SH) / 3$$

$$B = I' (1 - 4S + 3SH) / 3$$

$$\text{当 } 0 \leq H < 1 \text{ 为最小时, } R = I' (1 + 2S - 3SH) / 3$$

$$G = I' (1 - S + 3SH) / 3$$

$$B=I'(1-S)/3$$

两种变换的明度  $I$  与  $R$ 、 $G$ 、 $B$  的值域为  $[0, 1]$ ，影像的  $R$ 、 $G$ 、 $B$  值在使用前需要作归一化处理。

## 2、基于 HIS 变换的影像融合

当彩色影像从 RGB 转换到 HIS 空间中，光谱信息主要体现在色调和饱和度上，从视觉特点上分析，亮度的改变对光谱信息影响较小，便于处理。对于高空分辨率影像和多光谱影像的融合问题，我们希望在保留光谱信息的前提下，添加高空分辨率影像的细节信息，因此影像融合更适于在 HIS 空间进行。

基于 HIS 变换的影像融合的一般步骤为：

(1)、将高分辨率影像和多光谱影像进行影像预处理（配准，采样，去噪），使多光谱影像与高分辨率影像具有相同的像元分辨率和空间几何位置。

(2)、将多光谱影像的  $R$ 、 $G$ 、 $B$  三个波段进行 HIS 变换，得到  $H$ 、 $I$ 、 $S$  三个分量，然后将空间分辨率高的影像进行直方图拉伸，使之与多光谱影像的亮度分量  $I$  有相同的均值和方差。

(3)、用拉伸后的高分辨率影像代替多光谱影像经 HIS 变换后得到的亮度分量  $I$ ，得到新的亮度分量  $I'$ 。

(4)、用替换后的亮度分量  $I'$  与色度  $S$ ，饱和度  $H$  进行 HIS 逆变换得到融合后影像

## 3、基于 HIS 变换的影像融合的特点和缺点

由以上规则可以看出，HIS 变换法将高分辨影像的空间信息完整地保留下来，而且较大程度上保留了多光谱影像的光谱特征，因此具有分辨率高，波谱信息丰富的综合特点。然而多光谱影像在 HIS 空间的亮度  $I$  和高分辨影像的灰度值是两种具有不同光谱强度特性的频道数据，相关性较低，这种完全性的替代使 HIS 反变换后得到的融合影像容易产生了光谱退化现象，光谱信息损失严重。同时该方法对多光谱的波段也有要求，一般只能而且必须是三个波段，并且两两波段之间应具有最低的相关系数，这样才能保证所选择的信息不至于有过多的重复。针对此问题，文献[15]提出了一种改进的 HIS 变换融合算法，通过最小二乘法原理来求解颜色分量的最优解，该方法可以减小融合后的颜色偏差。



### 2.2.1.3 基于 PCA 变换的影像融合法<sup>[16]-[18]</sup>

PCA 变换也叫主成份分析、K-L 变换, 是统计特征基础上的多维正交线性变换, 是通过一种降维技术, 把多个分量约化为少数几个综合分量的方法。在多光谱遥感影像中, 各个波段(分量)影像之间存在相关性, 并包含了冗余信息, 于是着眼于分量之间的相互关系, 通过采用主成分分析法, 将一组线性相关的分量变为一组相互独立、相互正交的分量, 然后将输入变量进行加权线性组合, 以产生新的亮度灰度值<sup>[19]</sup>, 这样就能消除各个波段影像之间的信息冗余。其实质就是把现有的影像中所含的大部分信息用假想的少数波段表示出来, 以减少光谱的维数, 其中第一主成分影像为平滑分量, 占据了影像能量信息的 80% 以上, 而光谱信息保存在其它分量中。

#### 1、PCA 变换的理论基础 (K-L 变换)<sup>[20]</sup>

假设  $X = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$  是一个  $N \times 1$  维的随机变量, 其均值为:

$$m_x = E\{X\} \approx \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L X_i \quad (2-2)$$

L 为样本个数, 而它的协方差阵可以有 (2-3) 来近似估计:

$$C_x = E\{(X - m_x)(X - m_x)^T\} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L X_i X_i^T - m_x m_x^T \quad (2-3)$$

3)

协方差矩阵是  $N \times N$  的实对称阵, 对角线元素是各个随机变量的方差, 非对角线是它们的协方差, 如果上述矢量不相关, 那么它们的协方差为零。

因为  $C_x$  是一个实对称矩阵, 所以总可以找到它的一组  $N$  个正交特征值。用矩阵  $A$  来定义一个线性变换, 得到一个新的向量  $Y$ :

$$Y = A\{X - m_x\} \quad (2-4)$$

其中,  $A$  的行向量就是  $C_x$  的特征向量, 并且  $A$  的第一行对应为  $C_x$  最大特征值和特征向量,  $A$  的最后一行对应为  $C_x$  最小特征值和特征向量。

变换后的向量  $Y$  是具有零均值的随机向量, 它的协方差矩阵与  $X$  的协方差矩

阵的关系为:

$$C_Y = AC_X A^T \quad (2-5)$$

5)

由于 A 的行是  $C_X$  的特征向量, 所以  $C_Y$  是对角线且其对角元素为  $C_X$  的特征值, 即:

$$C_Y = \begin{pmatrix} \lambda_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_N \end{pmatrix} \quad (2-6)$$

6)

从式 (2-6) 可以看出, 因为  $C_Y$  的非对角元素都是零, 所以 Y 的各个元素之间都是互不相关的, 于是线性变换 A 去掉变量间的相关性。

PCA 变换后的各主分量包含信息量不同, 呈逐渐减少趋势。其中, 第一主分量集中了最大的信息量, 常常占 80% 以上, 第二、第三主分量的信息量依次快速递减, 到第 n 分量信息几乎为 0。由于第一分量包含了 X 的绝大部分能量, 我们只需要对第一主分量进行分析。

## 2、基于 PCA 变换的融合法

PCA 变换融合是将 N 个波段的低分辨率多光谱影像进行 K-L 变换, 得到各主分量影像, 然后将单波段的高分辨率影像进行直方图拉伸, 使之与第一主分量有相同的均值和方差, 最后用拉伸后的高分辨率影像代替第一主分量, 再把它同其它主分量经主分量逆变换得到融合后的影像。

## 3、基于 PCA 变换影像融合法的优点与局限性

基于 PCA 变换影像融合法的优点为: 融合合成速度快, 并且经过融合后的影像在保留高分辨率影像的清晰度的基础上, 光谱信息更加丰富, 这主要是由于第一主分量表示最大变化的影像<sup>[21]</sup>, 而 HIS 变化中的 I 分量表示多光谱彩色影像的平均影像, 因此第一主分量比 I 分量含有更多的空间细节, 因此与高分辨率全色影像具有更相似的相关性, 在保留光谱特性方面优于 HIS 变换, 也就是光谱扭曲小。同时克服了 HIS 变换融合只能同时对三个波段的影像进行融合的限制性, 可以对两个或两个以上的多光谱波段进行融合。

基于 PCA 变换影像融合法的局限性:

(1)、影像在做主成分分析时,第一分量的信息表达的是原各波段中信息的共同变换部分,其与高分辨影像中细节变化的含义略有不同,高分辨率影像经过拉伸后虽然与第一分量具有高相似性,但融合后的影像在空间分辨率和光谱分辨率上会有所变化,不能用于地物识别和反演工作<sup>[2]</sup>。

(2)、由于PCA变换对影像中的所有像素不管是重要目标,还是不感兴趣的背景都一并处理。因此它往往会隐藏在影像中能量比重小的目标。

### 2.2.2 变换域融合法

传统的融合方法多是在空间域对影像进行算术运算,并没有对待处理影像在相应频率域变化时的状况进行考虑。不同的融合方法会在频率域有不同的表现,而这种频率域表现是否合适、有效,在一定程度上说明了融合方法是否有效,因此对于影像融合而言,在频率域进行比在空间域进行更为有效。在频域中,常用的变换方法有傅立叶变换和小波变换。

在上世纪四十年代, Gabor提出了著名短时傅立叶变换(简称STFT)。其基本思想是给信号加一个小窗,信号的傅立叶变换主要集中在对小窗内的信号进行变换,因此可以反映信号的局部特征,然而在信号的传输过程中高频信号一般持续时间很短,而低频信号持续时间较长。因此,我们期望在信号处理过程中对高频信号采用小的时间窗,对于低频信号则采用大的时间窗来进行分析。于是这种处理思路就与短时傅立叶变换的时间—频率窗的不可变性相矛盾,在对于突变信号和非平稳信号时,傅立叶变换的处理效果并不显著。

20世纪80年代中期发展起来的小波变换技术是由短时傅立叶变换发展起来的一个新的数学方法,它通过伸缩和平移等运算功能对函数和信号进行多尺度的细化分析,不但解决了傅立叶变换不能解决的局部信号放大的多重困难,而且具有许多傅立叶变换所不具有的优良特性,如方向选择性、正交性、可变的时频域分辨率、可调整的局部支持,以及分析数据量小等。这些优良特性使得小波变换成为影像处理的一种强有力的工具和手段。人们开始用小波多尺度变换理论代替傅立叶变换用于影像融合。而且,小波变换的多尺度变换特性更加符合人类的视觉机制,与计算机视觉中由粗到细的认识过程更加相似,更加适于影像融合。

### 2.2.2.1 小波变换理论

小波变换<sup>[22]-[24]</sup>基于一种称为小波的小型波<sup>[25]</sup>，是具有变化的频率和有限的持续时间的方法。小波变化是一种信号的时间—频率分析方法，它具有多分辨率的特点，而且在空域和频域都具有表征信号局部特征的能力，是一种窗口大小固定不变，但其形状可改变而且时间窗和频率窗都可以改变的时频局部化分析方法。根据高频和低频使时间—频率变窄和变宽，即在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率，在高频部分具有较高的时间分辨率和较低频率分辨率，从而在不同的分辨率下，反映出不同的影像结构特征，使其在处理影像纹理信息方面具有特殊的能力，被誉为分析信号的显微镜。通过小波分析，可以将各种交织在一起的由不同频率组成的混合信号分解成不同频率的块信号，能够有效的解决诸如影像融合、数据压缩、影像增强、非线性化问题线性化、非平稳过程平稳化等问题。

#### 1、连续小波变换

连续小波变换也称为积分小波变换。通过对基本小波的二进伸缩和二进平移来构成基函数，从而产生二进小波。

定义2.1: 设  $\hat{\Psi}(0) = 0$   $\Psi(x) \in L^2(R) \cap L^1(R)$  且  $\hat{\Psi}(0) = 0$ ，则由函数  $\Psi(x)$  伸缩和平移得到一组小波基函数：

$$\Psi_{a,b}(x) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (2-7)$$

函数  $f(x)$  以小波  $\Psi(x)$  为基的连续小波变换为：

$$w_f(a,b) = (f, \Psi_{a,b}) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_R f(x) \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (2-8)$$

其中，基本小波（或者母小波） $\Psi(x)$  是一个实值函数它的频谱要满足式（2-9）

$$C_\Psi = \int_R \frac{[\hat{\Psi}(\omega)]^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (2-9)$$

当  $\Psi(x)$  为基小波时，下面的逆变换成立：

$$f(x) = \frac{1}{C_{\Psi}} \iint_{R^2} \{W_{\Psi} f(a, b)\} \left\{ |a|^{\frac{1}{2}} \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \right\} \frac{da db}{a^2} \quad (2-10)$$

由基小波的定义立即可得出  $\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(x)| dx < \infty$ 。并且基小波  $\Psi(x)$  在无穷远处趋于零，且衰减速度足够快。特别地，如果  $\Psi(x)$  具有紧支集（所谓紧支集，就是函数很快衰减到0），效果将更理想。因为用这样的基小波对信号进行了分解，可同时在时频域上做到局部使用。

基于代数式  $\Psi_{a,b}(x)$  的连续小波变换衡量了信号  $f(x)$  在时刻  $b$  处频率为  $\frac{1}{a}$  的信号强度，其中变量  $a$  反映一个特定函数的尺度（宽度），变量  $b$  指出其沿  $x$  轴的平移量。 $\Psi_{a,b}(x)$  实际上是基小波  $\Psi(x)$  经过尺度  $a$  的伸缩和平移  $b$  之后得到的，由此可见，连续小波变换将原来的时域信号变换成频域信号。

## 2、离散小波变换

计算机中的影像信息是以离散信号形式存放的，所以需要将连续小波变换离散化。而最基本的离散化方法就是二进制离散。一般将这种经过离散化的小波及其变换叫做二进小波和二进变换。需要强调和指出的是，这一离散化都是针对连续尺度参数  $a$  和连续平移参数  $b$  的，而不是针对变量  $x$  的。

为了使离散化后的函数组能覆盖整个  $a, b$  所表示的平面，我们取  $a_0 > 1, b_0 > 1$ ，使得：

$$a = a_0^{-j}, b = nb_0 a_0^{-k} \quad j, k \in Z \quad (2-11)$$

且将  $\Psi_{a,b}(x)$  改记为  $\Psi_{j,k}(x)$ ，即：

$$\Psi_{j,k}(x) = a_0^{j/2} \Psi\left(\frac{x - kb_0 a_0^{-j}}{a_0^{-j}}\right) = a_0^{j/2} \Psi(a_0^j x - kb_0) \quad (2-$$

12)

相应的离散小波变化为：

$$C_f(j, k) = \int_R f(x) \Psi_{j,k}(x) dx = (f(x), \Psi_{j,k}(x)), j, k \in Z \quad (2-13)$$

$$\text{取 } a_0 = 2, b_0 = 1, \text{ 则 } \Psi_{j,k}(x) = 2^{j/2} \Psi(2^j x - k)$$

因此，离散小波变换式（2-13）也是一种时频分析，它是集中在某个区间上

的基本小波开始,以规定步长向左或向右移动基本波形,并用标度因子 $a^0$ 来扩张或压缩以构造其函数系,一系列小波由此而生。

### 3、Mallat 小波变换

Mallat<sup>[26]-[27]</sup>在构造正交小波基时提出了多分辨(Multi-Resolution Analysis)的概念,从空间的概念上形象地说明了小波的多分辨率特性,并将在此之前的所有正交小波基的构造法统一起来,给出了正交小波的构造方法以及正交小波的快速算法Mallat算法。Mallat算法在小波分析中的地位相当于快速傅立叶变换在经典傅立叶分析中的地位。

设 $V_j^2(j \in Z)$ 是空间 $L^2(R^2)$ 的一个可分离多分辨率分析,对于 $j \in Z$ 来说,尺度函数 $\phi(x, y)$ 构成 $V_j^2$ 的规范正交基,小波函数 $\Psi(x, y)$ 构成 $L^2(R \times R)$ 的规范正交基。则对于二维数字影像 $f(x, y) \in L^2(R \times R)$ 用其在空间 $V_j^2$ 的投影 $A_j f(x, y)$ 来表示,则Mallat分解算法的迭代表达式为:

$$f(x, y) = A_j f(x, y) = A_{j+1} f + D_{j+1}^h f + D_{j+1}^v f + D_{j+1}^d f \quad (2-14)$$

$$\text{其中} \begin{cases} A_{j+1} f = \sum_{n, m \in Z} C_{j+1, n, m} \Phi_{j+1, n, m} \\ D_{j+1}^\varepsilon f = \sum_{n, m \in Z} C_{j+1, n, m} \Psi_{j+1, n, m} \end{cases} \quad \varepsilon = h, v, d \quad (2-15)$$

$\Phi_{j+1, n, m}$ 为尺度函数,  $\Psi_{j+1, n, m}$ 为小波函数。若 $H_r, G_r$ 和 $H_c, G_c$ 分别表示镜像共轭滤波器 $H, G$ 分别作用在影像行和列上的函数,  $H$ 为低通滤波器,  $G$ 为高通滤波器,且 $H = (-1)^n G$ ,这样上式可简洁表示为:

$$\begin{aligned} C_{j+1} &= H_r H_c C_j \\ D_{j+1}^h &= H_r G_c C_j \\ D_{j+1}^v &= G_r H_c C_j \\ D_{j+1}^d &= G_r G_c C_j \end{aligned} \quad (2-16)$$

即二维Mallat重构算法为:

$$C_j = H_r' H_c' C_{j+1} + H_r' G_c' C_{j+1} + G_r' H_c' C_{j+1} + G_r' G_c' C_{j+1} \quad (2-17)$$

其中,  $H', G'$ 分别为 $H, G$ 的共轭转置矩阵。按照Mallat算法,影像的小波分解示意图如图2.4所示,对影像依次按行、列与一维低通和高通滤波器进行卷积,卷积之后进行相应的降2采样。重构示意图如图2.5。

对二维影像来说,算子  $H_r, H_c$  相当与二维低通滤波器,  $C_{j+1} (A_{j+1}f)$  显示  $C_j$  的低频信息;  $H_r, G_c$  对列作平滑, 检查行的差异, 因此  $D_{j+1}^h$  显示  $C_j$  垂直方向的高频分量, 即影像的水平边缘; 而  $G_r, H_c$  对行作平滑, 检查列的差异, 因此  $D_{j+1}^v$  显示  $C_j$  水平方向的高频分量, 即影像的垂直边缘;  $G_r, G_c$  是两个方向的高频滤波,  $D_{j+1}^d$  是两个方向的高频分量, 即影像的对角线边缘。

由此看来, 影像的小波变换就是将原始影像数据按照不同频带和分辨率分解成子带影像, 每一层小波系数分解成大小相同4个子带: 即低频部分 (LL), 显示为近似影像; 垂直高频影像 (LH)、水平高频影像 (HL)、对角线高频影像 (HH) 为细节影像, 下一层分解只对低频部分 (LL) 进行分解, 分解示意图如图2.6, 影像分解实验如图2.7。总之, 影像的小波变换即将影像分解在不同频率下的不同特征域上。

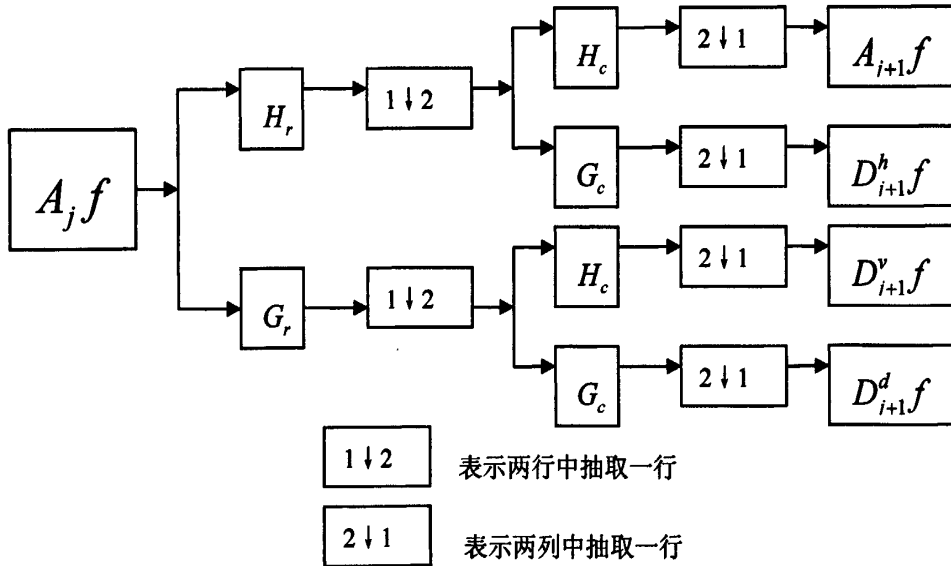


图2.4 二维图像的小波分解示意图

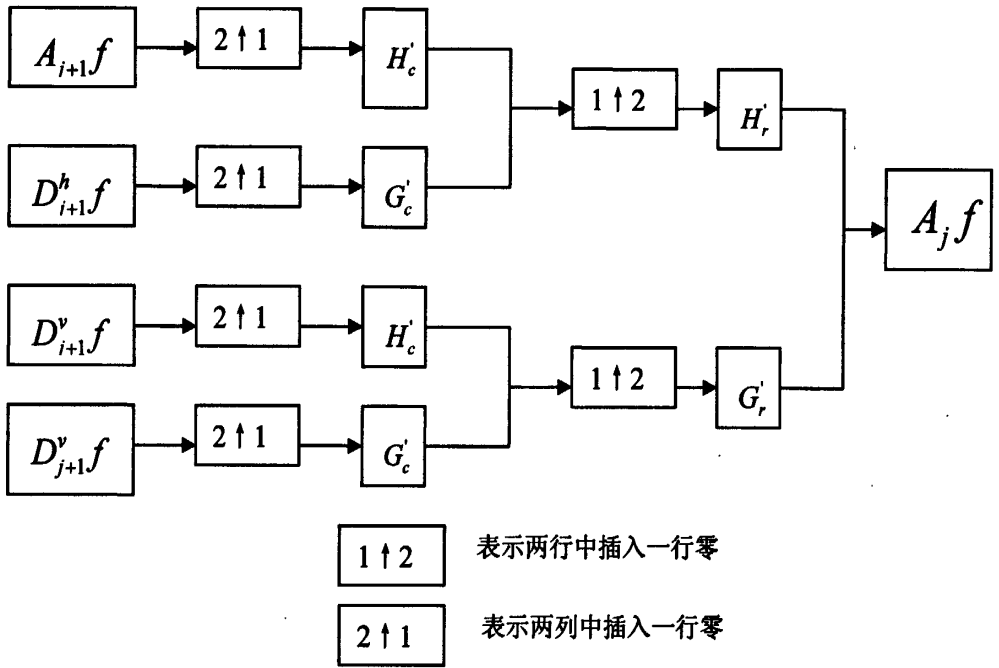


图2.5 二维图像的小波重构示意图

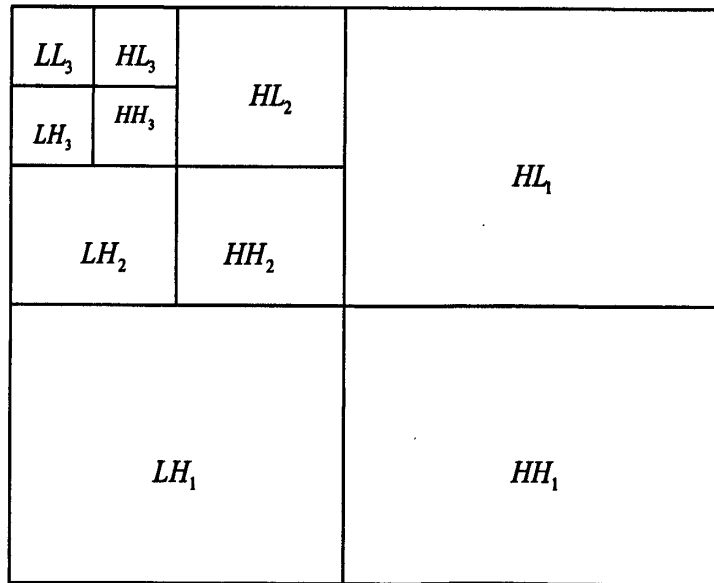


图2.6 影像的三层分解示意图



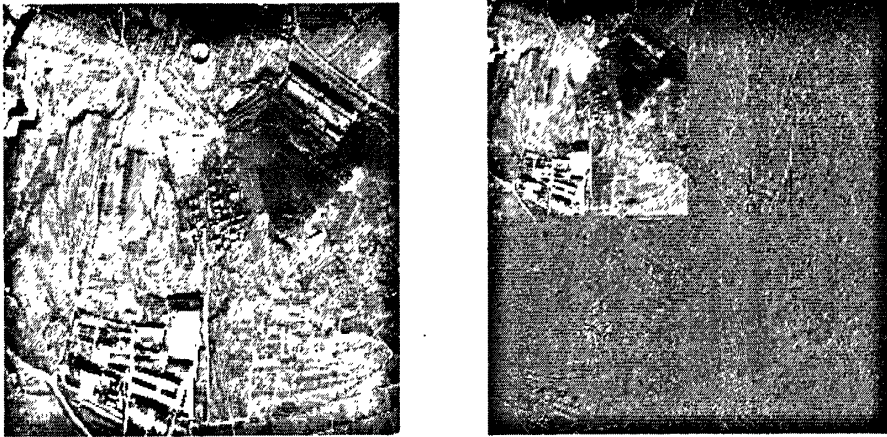


图2.7 小波分解实验

影像经过小波变换后<sup>[28]</sup>，能够获得良好的空间—频率多分辨率表示，小波变换具有以下主要特征：

(1)、不仅保持原影像的空间特征，而且很好的提取了影像的高频信息。在低频处有很好的频率特性，在高频有很好的空间选择性。

(2)、小波分量有方向选择性，分为水平、垂直、斜向，这些特性都和人类的视觉特性相吻合。

(3)、能量主要集中在低频子带影像。

(4)、低通模糊子图具有很强的相关性，水平子带影像在水平方向相关系数大，而垂直方向小。垂直子带影像在垂直方向相关系数大，而水平方向小，斜子带影像在垂直方向和水平方向相关系数都小。

#### 2.2.2.2 基于小波变换的影像融合

基于小波变换的影像融合方法通常采用多分辨分析和Mallat快速算法，其基本思想是将原始影像利用小波变换进行N层小波分解，产生 $(3N+1)$ 个不同频带的近似影像和细节影像，其中包括 $3N$ 个高频子带（细节影像）和一个低频子带（近似影像），然后将多光谱图像的低频分量和高空间分辨率图像的高频分量结合，进行小波反变换，得到一幅具有高空间分辨率的多光谱图像。

影像通过小波分解生成的各级频带自上而下形成影像金字塔结构，因此小波分解也是一种具有方向性的多分辨率、多尺度的分解。然而对于小波分解层数的选择，不是层数越多融合效果会越好。反而发现融合后的影像会随着小波分解层

数的增加,在影像空间分辨率不断提高的同时,融合影像也会出现明显的有规律的方块效应(振铃效应),光谱分辨率降低,当小波分解达到最大时,方块效应消失,而光谱信息的损失也达到最大,并且数据计算量也会很大,运算速度较慢。这主要是因为:小波分解的层数过低时,高分辨率全色影像的低频成分中仍然包含大量细节信息,这些细节信息却在融合过程中被忽略,从而空间细节的表现的能力较差;而低分辨率的多光谱影像分解后,在其高频部分包含光谱信息不多,从而融合后影像光谱特性保持比较完好,当小波分解的层数过高时,则相反。因此小波分解的通常分解层数为 2—3 层。这样即兼顾了空间分辨率的提高,也保证了光谱信息不会损失过多,同时也提高了效率。

这里以两幅影像融合为例,对于多幅影像的融合方法可由此类推。设A、B为两幅原始影像,F为融合后的影像,融合处理的流程如图2.8,基本步骤为:

- 1、分别对多光谱影像 A 和高分辨率影像 B 进行预处理,使两者有相同的像元分辨率、几何关系和一致的直方图分布;
- 2、对多光谱影像 A 和高分辨率影像 B 分别进行小波分解,得到近似影像和三个方向上的细节影像,对近似影像可继续进行分解,建立多光谱 A 和高分辨率影像 B 的小波金字塔;
- 3、对各分解层进行融合处理,各分解层的细节影像及近似影像分别由不同的算法模型进行处理,生成用于重构过程的近似影像和细节影像,最终得到融合后的小波金字塔;
- 4、对融合后所得到的的小波金字塔进行小波逆变换(即进行影像重构),所得到的重构影像即为融合影像 F。

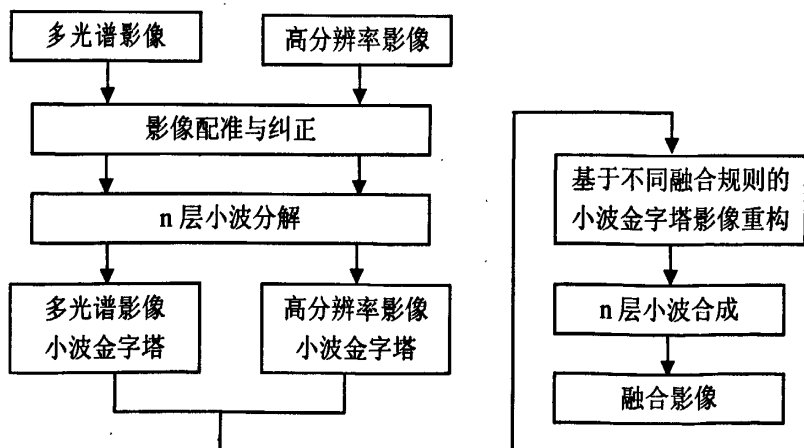


图 2.8 基于小波变换的影像融合流程图

小波变换用于影像融合的物理意义在于：首先，影像的小波分解是多尺度、多分辨分解。通常影像中的物体，其特征和边缘是出现在不同大小的尺度上的，也就是说，影像中的某些边缘和细节是在一定尺度范围内存在的；其次影像的多尺度分解过程，可以看作是把影像中不同大小、不同特征的地物信息分解到不同的尺度频带上的提取过程。同时小波的多尺度分解还具有方向性，可以在不同尺度上针对不同大小、方向的边缘和细节进行融合处理。最后，在进行小波分解后，为了获得更好的融合效果并突出重要的特征细节信息，在进行融合处理时，不同分解层，不同方向均可以采用不同的融合规则和融合算子进行融合处理。另外，同一分解层上的不同局部区域上采用的融合算子也可以不同。这样就可以充分挖掘被融合影像的互补、冗余信息，有针对性的突出、强化感兴趣的特征和细节信息。由此可见，基于小波变换融合法的目的是将原始影像分解到频域通道中，利用其分解后的塔形结构，对不同分阶层、不同频带数据分别进行融合处理，可有效地将来自不同影像的细节融合在一起。

在基于小波变换的融合中，在个分解层上的小波系数是影像融合的基础，而构成小波函数的小波基的选取却在一定程度上影响小波系数的分布。不同的小波基会产生不同的融合效果，同一小波基不同的滤波器长度也会产生不同的融合效果。因此如何选择一个合适的小波基就显得很重要。一般小波基的选取主要依据

(1) 正交性 (2) 对称性 (3) 紧支撑性 (4) 正则性 (5) 消失矩五个特征，只有同时具备这几个特征，影像分解后各子空间的影像才能互不相关，具有较好的局部性和光滑度，从而能够完整的重构出原始影像的信息，保证了信号在分解重构过程中没有信息损失和信息冗余产生。然而能够同时具备这几点的的小波函数几乎不存在，为了处理不同影像的技术要求，对这几个特征进行了不同程度的取舍，便产生了具有不同特点的小波算法，如 harr 小波，Daubechies 小波等。本文选择的是 Daubechies 小波，该小波除具有正交小波(低通分析滤波器和高通分析滤波器正交,低通合成滤波器和高通合成滤波器正交)特性外,还具有紧支撑性。

### 2.2.2.3 基于 HIS 变换和小波变换相结合的影像融合算法

传统 HIS 变换方法已成为影像融合的一个标准方法，可用于光谱特性高度相

关的影像数据的特征增强, 以及改善影像空间分辨率等融合处理; 同时也可提高地物纹理特征, 增强多光谱影像的空间细节表现能量。虽然 HIS 变换对提高空间分辨率贡献很大, 但也存在这光谱失真较大的缺陷, 这主要是因为多光谱影像变换后的 I 分量的光谱特性和高分辨率全色影像的光谱特性并不是完全一致, 直接利用其替代 I 分量, 导致丢失了大部分多光谱影像的光谱信息, 造成光谱特性失真较大。而基于小波变换的融合方法是直接舍弃了全色影像的低频分量, 保留了多光谱影像的低频分量, 因此能较好的保持了影像的光谱特性。同时小波分解层数的大小也对融合结果产生很大影响, 如果小波分解层数太小, 则增强后多光谱影像的空间细节表现能力较差, 容易出地物纹理模糊, 但光谱特性保留程度好; 若小波分解层数太大, 则增强后多光谱影像的空间细节表示能力较好但光谱特性保留程度较差<sup>[29]</sup>。

从上面分析可以看出, 在遥感影像融合中, HIS 变换法与小波变换法具有互补性, 因此就把两者结合起来, 提出一种基于 HIS 和小波变换的融合方法, 利用 HIS 变换来提高增强后多光谱影像的空间分辨率和利用小波变换(分解层数低)来保持光谱特性。基于 HIS 变换与小波变换的遥感影像融合方法的步骤如下:

- 1、对高分辨率影像或多光谱影像进行空间配准, 使两幅影像具有相同的几何位置关系和像元分辨率。
- 2、将多光谱影像进行 HIS 正变换, 得到 H, I, S 三个分量数据。
- 3、将高分辨率影像与 I 分量进行直方图匹配, 使灰度变换具有相同的均值和方差。
- 4、将匹配后的高分辨率影像和 I 分量进行小波变换(分解层数为 2 层), 并根据融合规则, 融合算子来生成融合影像, 并用融合后的影像替换 I 分量, 得到  $I'$  分量。
- 5、用替换后的  $I'$  分量和 H, S 分量影像进行 HIS 反变换, 得到最终的融合影像。

其流程示意图如图 2.9:

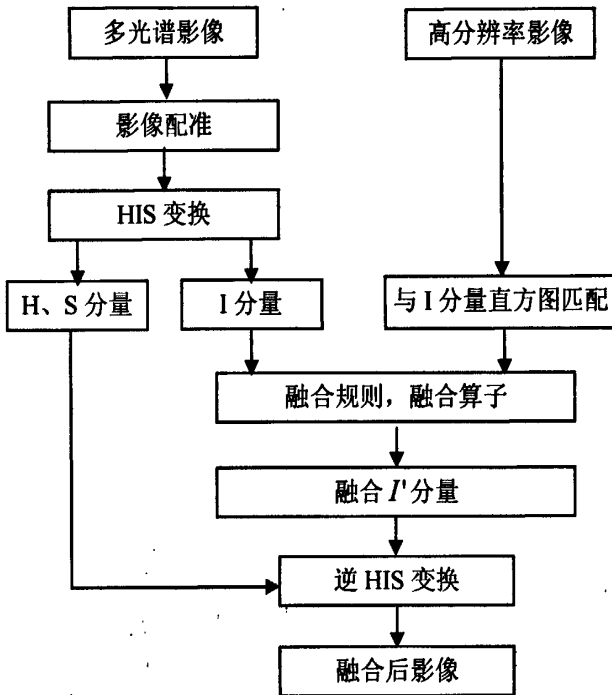


图 2.9 基于 HIS 变换和小波变换相结合的影像融合流程图

#### 2.2.2.4 基于 PCA 变换和小波变换相结合的影像融合算法

基于 PCA 变换的影像融合就是将经过 PCA 变换后的第一主成分能量和高分辨率影像进行交换, 然后在经过 PCA 逆变换生产融合后的影像。该方法不仅提高了融合后影像的空间细节表示能力, 而且光谱特性保留方面优于 HIS 变换。但由于多光谱影像 PCA 变换矩阵的第一主分量的光谱特性和高分辨率影像的光谱特性并不是完全一致, 直接利用高分辨率影像替代第一主分量, 导致丢失了部分多光谱影像的光谱信息, 也会造成光谱失真。而基于小波变换的融合方法是直接舍弃了全色影像的低频分量, 容易出现分块效益。小波分解层数的大小也对融合结果产生很大影响, 如果小波分解层数太小, 则增强后多光谱影像的空间细节表现能力较差, 容易出地物纹理模糊, 但光谱特性保留程度好; 若小波分解层数太大, 则增强后多光谱影像的空间细节表示能力较好但光谱特性保留程度较差<sup>[29]</sup>。

从上面分析可以看出, 在遥感影像融合中, PCA 变换法与小波变换法具有互补性, 因此就把两者结合起来, 提出一种基于 PCA 和小波变换的融合方法, 利用 PCA 变换来提高增强后多光谱影像的空间分辨率和利用小波变换(分解层数低)

来保持光谱特性。基于 PCA 变换与小波变换的遥感影像融合方法的步骤如下：

1、对高分辨率影像或多光谱影像进行空间配准，使两幅影像具有相同的几何位置关系和像元分辨率。

2、将多光谱影像进行PCA正变换，得到各主成分分量。

3、将高分辨率影像与第一主成分分量进行直方图匹配，使两者灰度变换具有相同的均值和方差。

4、将匹配后的高分辨率影像和第一主成分分量进行小波变换（分解层数为2—3层），并根据融合规则，融合算子来生成融合影像，并用融合后的影像替换第一主成分分量。

5、替换后的第一主成分分量和其它主成分分量影像进行PCA反变换，得到最终的融合影像。

其流程示意图如图2.10：

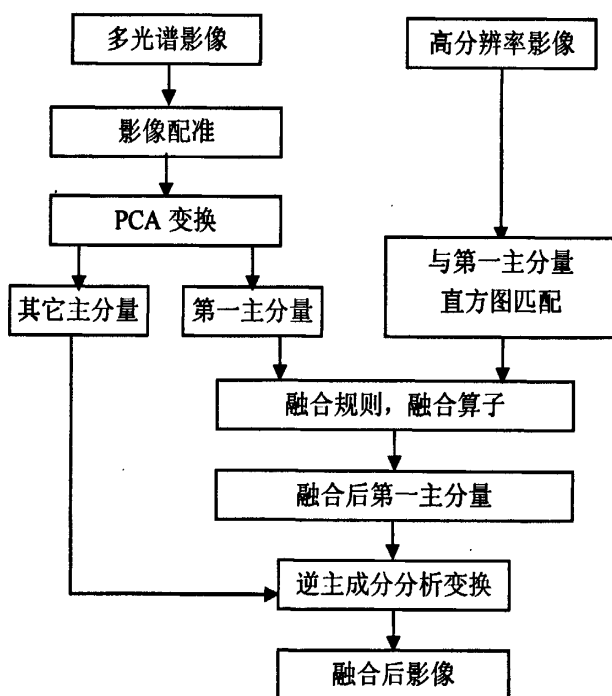


图 2.10 基于 PCA 变换和小波变换相结合的影像融合流程图

### 2.3 影像多尺度分解的融合规则和融合算子

基于多尺度分解的像素级遥感影像融合方法，其主要技术要点在于制定合适的

融合规则<sup>[30]</sup>:在制定融合规则时,应充分考虑所采用的具体多尺度分解方法,这样才能获得较为满意的融合结果。对于相对简单一些的影像融合规则虽然可应用于大多数的基于多尺度分解的融合算法中,但不一定能得到一个满意的融合结果。而对于某一种多尺度分解方法,采用简单的融合规则与采用相对复杂的融合规则得到的融合结果可能会相差很大。因此,融合规则的选择是影像融合技术的核心,融合规则的好坏将直接影响影像融合的速度和质量。

### 2.3.1 系数替代准则

系数替代法是传统的小波变换融合法,就是在小波变换域中,用高分辨率全色影像的高频部分替换低分辨率多光谱影像的高频部分,然后和低分辨率多光谱影像的低频部分进行小波逆变换,得到增强后的多光谱影像。其本质就是在含有大部分光谱信息的多光谱低频成分上加入高分辨全色影像的高频成分(细节纹理信息)。

系数替代法运算简单,计算速度快。但也存在着小波分解层数少,空间分辨率低和分解层数多,光谱出现分块效应的局限。由于该方法舍弃了多光谱的高频部分和全色影像的低频部分,而这两部分也含有影像少量有用信息,所以系数替代法将容易造成影像信息的缺少,从而影响融合影像的信息含量。因此该方法弊端明显。

### 2.3.2 系数替代准则的改进方法<sup>[31]</sup>

针对传统小波变换融合方法的这些缺点,为了在保持多光谱影像的光谱特征的前提下,尽可能的提高影像的空间分辨率,在原有基础上做了一些改进。首先对多光谱影像和高分辨率的全色影像进行一层小波分解,然后将高分辨率的全色影像的低频分量和多光谱影像的低频分量采用算子进行融合,可以达到增强光谱影像低频分量空间特性的目的,此种方法克服因小波分解层数低而造成的空间分辨率增强效果不明显的缺点;同时,通过融合也提高了多光谱影像低频分量与高分辨率全色影像低频分量的相关性,避免了融合结果出现的分块效应。方法描述为:

设高分辨率全色影像  $P$  和多光谱影像  $M$  经小波分解以后的低频分量分别为  $P_L$  和  $M_L$ 。将  $P_L$  进行低通滤波, 获得结果  $HP_L$ , 低通滤波器  $H$  设计为:

$$H = \frac{1}{256} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 6 & 24 & 36 & 24 & 6 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-18)$$

18)

$$\text{令: } N = P_L - HP_L \quad (2-19)$$

19)

$N$  为高分辨率全色影像低频分量  $P_L$  的细节成分, 以  $M_L + N$  取代传统小波变换融合合法中重构影像金字塔的低频分量, 这样便使多光谱影像低频分量  $M_L$  融合了高分辨率全色影像低频分量  $P_L$  的细节成分, 从而增强了多光谱影像低频分量  $M_L$  的空间特性, 同时也提高了多光谱影像低频分量与高分辨率全色影像低频分量的相关性, 克服了融合影像出现的分块效应。

### 2.3.3 系数最大准则

小波变换后的低频系数表征影像的近似部分, 而高频系数表征影像的细节信息, 其值一般在零值左右波动。在相同分解层的系数中系数绝对值越大的系数表示该处亮度变化越剧烈, 即可能包含影像的重要特征信息, 如边缘、线条以及区域边界等。因此为了保证原始影像中所有重要特征信息的有效保留, 可以采用基于系数最大法的融合规则, 保留两幅影像高频子图像中系数绝对值大的像素点, 以此形成融合影像。

假设对影像大小为  $M_1 \times M_2$  的原始影像  $A$  和  $B$  进行融合, 融合后的影像为  $F$ 。其原理为: 在对影像进行小波变换后形成不同分解层各自的高频和低频系数, 在低频为了保持影像的光谱特性, 因此选用多光谱影像的低频系数, 而在高频子图像上通过比较各原始影像中对应像素位置  $(i, j)$  处的系数的绝对值大小, 将其中系数绝对值大的像素作为融合后影像  $F$  在位置  $(i, j)$  处的高频系数值, 然后与低频系数相结合进行小波逆变换形成融合后的影像  $F$ , 用式子表示:



$$D_F^{l,k}(i,j) = \begin{cases} D_A^{l,k}(i,j) & \text{if } |D_A(i,j)| > |D_B(i,j)| \\ D_B^{l,k}(i,j) & \text{else} \end{cases} \quad (2-20)$$

该方法是选择参加融合的各源影像中系数绝对值大的像素作为融合后的像素，因此融合后影像中基本保留源影像的特征，影像对比度与源影像基本相同，适合于高频成分较丰富，亮度、对比度较高的源影像。否则在融合影像中只保留一幅源影像的特征，其他的特征被覆盖。由于孤立噪声点的绝对值也比较大，因此该方法易受孤立噪声的影响导致选择错误的分解系数。

### 2.3.4 局部区域方差准则

传统的融合规则直接对小波分解后各分量的像素值进行计算，但是由于影像的局域特征往往不是由一个像素所能表征的，它是由某一局域的多个像素来表征和体现的；同时，通常影像中某一局部区域内的各像素间往往有较强的相关性，因此，直接对像素处理的融合规则有其片面性和局限性，容易造成影像区域特征的损失。基于以上考虑，为了获得视觉特性更佳、信息更丰富、细节更突出的融合效果，采用基于局部区域的融合规则，一般区域选择为  $3 \times 3$ ， $5 \times 5$  等。

方差是一个反差（对比度）的测度，它反映影像细节的信息量，若方差大，则影像灰度级分布分散，影像的反差大，可以看出更多的信息。方差小，影像反差小，对比度不大，色调单一均匀，看不出太多的信息，因此以它作为融合的依据，将小波分解后的高频子影像分成一系列小区域，通过滑动邻域操作分别计算各小块的方差，然后进行比较，把方差大的系数值付给融合后的影像系数值，最后把取舍后的低频和高频系数值进行小波逆变换得到融合后的影像。其算法为：

- 1、计算局部区域 ( $3 \times 3$ ) 中每一个点的方差值

$$\sigma^2 = \frac{1}{m \times n} \sum_{m,n}^3 (D(i,j) - \tilde{\mu})^2 \quad (2-$$

21)

$\tilde{\mu}$  为影像灰度均值。

- 2、以方差大小判读小波系数的值：

$$D_F^{l,k}(i,j) = \begin{cases} D_A^{l,k}(i,j) & \text{if } |\sigma_A(i,j)| > |\sigma_B(i,j)| \\ D_B^{l,k}(i,j) & \text{else} \end{cases} \quad (2-$$

22)

### 2.3.5 局部区域平均梯度准则

在数字图像处理中梯度是一个矢量，指向边缘法线方向上取得局部的最大值方向，和影像的边缘方向总是正交（垂直）的，梯度值大的像素点可以突出相邻点间灰度级的变化的明显特征，因此分别计算影像A和影像B的小波分解后的高频子影像上每个像素的局部平均梯度值，以该像素的局部平均梯度值大小为准，确定融合后的高频子影像上的该点像素值，这样可以很好的提取影像的边缘信息，突出相邻点间灰度级的变化，达到增强融合后影像边缘的目的。更重要的是人体视觉对影像的梯度十分敏感，这样可以获得与人体视觉特性更为接近的融合效果。用式子表示为：

- 1、计算局部区域（3×3）中每一个点的梯度值：

$$T(i, j) = (|D(i, j)| - |D(i+1, j)|)^2 + (|D(i, j)| - |D(i, j+1)|)^2 \quad (2-23)$$

- 2、出该区域的梯度平均值作为中心点的值：

$$\tilde{T}(i, j) = \frac{\sum_{m,n}^3 T(i+m, j+n)}{9} \quad (2-24)$$

24)

- 3、以平均梯度大小判读小波系数的值：

$$D_F^{l,k}(i, j) = \begin{cases} D_A^{l,k}(i, j) & \text{if } |\tilde{T}_A(i, j)| > |\tilde{T}_B(i, j)| \\ D_B^{l,k}(i, j) & \text{else} \end{cases} \quad (2-25)$$

25)

用根据局部区域平均梯度准则得到的高频子图像系数和多光谱低频子图像系数相结合进行小波逆变换形成融合后的影像F。

### 2.3.6 局部区域平均梯度的加权融合准则

上述基于局部平均梯度的融合规则是取具有较大局部梯度的像素值作为融合系数，当两幅影像的梯度值相差很大时（大于某一阈值 $\alpha$ ），融合系数可以选择一副影像的系数而覆盖另一幅影像的系数。但是当两幅影像对应像素的梯度值

相差不大时（小于某一阈值 $\alpha$ ），也就是两幅影像的局部边缘特征相似时，使用此方法会丢失一部分有用信息，使融合后的影像产生失真。为此，本人提出了改进的局部平均梯度的融合算法，其规则为：

- 1、求出对应像素点的局部平均梯度 $\tilde{T}_A(i, j)$ 和 $\tilde{T}_B(i, j)$ 。
- 2、归一化处理：

$$\lambda_A = \frac{\tilde{T}_A(i, j)}{\tilde{T}_A(i, j) + \tilde{T}_B(i, j)}$$

$$\lambda_B = \frac{\tilde{T}_B(i, j)}{\tilde{T}_A(i, j) + \tilde{T}_B(i, j)} \quad (2-26)$$

- 3、定义一个阈值 $\alpha$ （ $0 < \alpha < 1$ ），一般取 $0.5 < \alpha < 1$ 。
- 4、如果 $|\tilde{T}_A(i, j) - \tilde{T}_B(i, j)| > \alpha$ ，则融合影像F的小波系数：

$$I_F^{l,k}(i, j) = \begin{cases} I_A^{l,k}(i, j) & \tilde{T}_A(i, j) \geq \tilde{T}_B(i, j) \\ I_B^{l,k}(i, j) & \tilde{T}_A(i, j) < \tilde{T}_B(i, j) \end{cases} \quad (2-27)$$

如果 $|\tilde{T}_A(i, j) - \tilde{T}_B(i, j)| \leq \alpha$ ，则：

$$I_F^{l,k}(i, j) = \lambda_A I_A^{l,k}(i, j) + \lambda_B I_B^{l,k}(i, j) \quad (2-28)$$

### 2.3.7 基于局部区域活性测度匹配的融合准则

活性测度<sup>[32]</sup>是在一定的局部区域内用卷积来测定各个源图象的在该窗口的质量的量，它反映了该系数以及该系数扩展得到的相应空间的局部区域能量，越大意味着该像素包含的信息越丰富，应保留。而匹配度则表示两幅影像的相似程度，当匹配度小于阈值 $\alpha$ 时，一般可认为两幅影像对应像素点的相关程度不高应根据局部能量选择其一；当匹配度大于阈值 $\alpha$ 时则认为两幅影像对应像素点的相关程度高可以通过加权的方法来尽可能的保留两者，其主要步骤为：

设A, B为全色影像和多光谱影像，F为融合后的影像：

- 1、两影像的活性测度为 $E_{iA}$ ,  $E_{iB}$ 。

$$E_i(x, y) = \sum_{i \in L, j \in K} \omega(i, j) D_i(x+i, y+j)^2 \quad (2-29)$$

$$\omega(i, j) = \begin{pmatrix} 1/16 & 1/16 & 1/16 \\ 1/16 & 1/2 & 1/16 \\ 1/16 & 1/16 & 1/16 \end{pmatrix} \quad (2-30)$$

$E_l(x, y)$  是第  $L$  层上以  $(x, y)$  为中心位置像素点的活性测度值,  $D_l$  是小波分解的第  $L$  层影像系数,  $\omega(i, j)$  是加权系数矩阵,  $L \times K$  是局部区域大小。

2、影像  $A, B$  对应邻域匹配度  $M_{l,AB}$  为

$$E_{l,AB}(x, y) = \sum_{i \in L, j \in K} \omega(i, j) D_{l,A}(x+i, y+j) D_{l,B}(x+i, y+j) \quad (2-31)$$

$$M_{l,AB}(x, y) = \frac{E_{l,AB}(x, y)^2}{E_{l,A}(x, y) E_{l,B}(x, y)} \quad (2-32)$$

3、设置匹配度的阈值  $\alpha$  (取  $0.5 < \alpha < 1$ )

4、加权融合规则为:

$$D_{l,F}(x, y) = \lambda_a D_{l,A}(x, y) + \lambda_b D_{l,B}(x, y) \quad (2-33)$$

若:  $M_{l,AB}(x, y) < \alpha$ , 则  $\lambda_a = 0, \lambda_b = 1$ , 当  $E_{l,A} < E_{l,B}$

$\lambda_a = 1, \lambda_b = 0$ , 当  $E_{l,A} > E_{l,B}$

$$\text{否则: } \lambda_a = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \times \frac{1 - M_{l,AB}(x, y)}{1 - \alpha} \quad \lambda_b = 1 - \lambda_a \quad \text{当 } E_{l,A} < E_{l,B}$$

$$\lambda_a = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \times \frac{1 - M_{l,AB}(x, y)}{1 - \alpha} \quad \lambda_b = 1 - \lambda_a \quad \text{当 } E_{l,A} > E_{l,B}$$

### 2.3.8 一致性验证

考虑到各个高频子图像在空间局部区域和同一尺度内的不同频带之间具有一定的相关性和一致性, 另外同一尺度下的多个频带系数反映了同一物理结构在不同方向上的特征, 而空间位置相近的像素之间往往反映了相同的物理特征, 因此为避免在多分辨率重构过程中存在的特征细节丢失和保持相邻像素的相似性, 要对融合后影像数据进行一致性验证, 即在低频和高频子带融合后, 采用概率方法对其进行一致性检测和调整。

具体来说, 一致性验证按照“多数”原则进行, 即在各子带融合结果中, 若某一分解系数来自于影像  $A$  的子带, 而它的邻域中大多数系数却来自于影像  $B$  的子带, 那么该点的系数改成影像  $B$  分解子带对应的系数。否则, 改为影像  $A$  分解

子带对应的系数

## 2.4 影像融合结果的质量评价

目前在多源遥感影像融合技术中,有很多种不同的融合方法,每一种方法都有其优劣性和针对性,因此在实际应用中,影像融合效果评价是影像融合处理不可缺少的环节之一,通过融合效果评价能够对融合算法的效果和性能进行分析、测试和评估,并在此基础上改进算法,优化整个融合处理过程。目前对影像质量的评价大多数分为主观评价和客观评价,并结合起来使用。主观评价是建立在人的视觉器官和经验知识基础上,通过目视观察来分析融合效果;客观评价是通过影像的特征进行分析,建立相应的特征评估模型,然后通过这些模型参数值来比较、评估影像融合算法。严格上讲,融合影像的主客观评价应该是一致的,即融合影像效果,应遵循以下原则<sup>[33]</sup>:

- 1、融合影像应包含各源影像中所有的有用信息,不破坏影像的色彩信息,也不能丢失影像的纹理信息,以便获得一个既有光谱信息又有空间信息的影像。
- 2、融合影像中不应引入人为的虚假信息,否则会妨碍人眼识别以及后续的目标识别过程。
- 3、算法应使融合影像的噪声降到最低程度。
- 4、在影像配准等前期预处理效果不理想时,算法还应保持其可靠性和稳定性,即无论在什么气候条件下算法的性能都不会有太大的变化。
- 5、在某些应用场合中应考虑到算法的实时性并可进行在线处理。

对同一对象,不同的融合方法可以得到不同的融合效果,即可以得到不同的融合影像。如何评价融合效果,即如何评价融合影像的质量,是影像融合的一个重要步骤。

### 2.4.1 融合影像质量的主观评价方法

主观评价<sup>[34]</sup>是以人作为观察者,对影像的质量作出主观性评价。即在对融合后的影像进行评价时,仅考虑融合后影像的表面综合信息测度,如果信息测度大,表明该影像具有较多的信息含量,说明融合效果好,反之亦然。该方法优点是直

接,简单,对明显的影像信息可以进行快捷、方便的评价,并可根据影像融合后的对比作出定性评价。其评分步骤为:先用某些原始标准影像建立质量评价标准,然后由观察者观看被评价影像,并与标准影像等级做出比较,得出被评价影像的等级。

在实际应用中,用主观评价方法对融合后的影像进行目视评价时,应侧重以下六个方面的评价内容<sup>[36]</sup>:

- 1、判读融合影像是否配准;
- 2、判断融合后的影像是否出现重影;
- 3、通过直接比较融合影像和标准影像的差异来判断光谱是否扭曲;
- 4、判断融合影像纹理及色彩信息是否一致,融合影像整体色彩是否与天然色彩保持一致;
- 5、判断融合影像整体亮度、色彩反差是否合适,是否有蒙雾或马赛克等现象;
- 6、判断融合影像的清晰度是否降低、影像边缘是否清楚。

有了以上的主观评价标准,我们就可以运用主观评价方法直接对影像上的田地边界、道路、居民地轮廓、机场跑道边缘进行比较,可直观地得到影像在空间分辨率、清晰度等方面的差异。然而当利用主观评价方法对影像融合效果进行评价时又容易受不同的观察者、影像的类型、应用场合和环境条件的影响,因此其只能在统计上有意义。这主要是因为一方面,多数情况下,您无法知道标准的融合影像应该是怎样的,也就是说,此时评价人员没有评价参照物。另一方面,由于影像融合的应用场合、应用目的的可能各不相同,因此在进行评价时的评价尺度就应考虑到应用场合和应用目的,而这又是千差万别的。所以,人在对融合影像质量进行主观评价时,评价的标准(尺度)很难掌握。

#### 2.4.2 融合影像质量的客观评价方法

采用影像的主观评价法会不同程度的受到人为主观因素的影响,而客观评价依据的是客观数学模型参数值,因此客观评价能够克服主观因素的影响,对融合影像的各种性能做出定量的评价,以便开展更深入的研究。

一般地,对于影像融合的客观评价,应综合考虑空间细节信息的增强与光谱信息的保持,可用三类统计参数进行分析与评价:第一类反映亮度信息,如均值、

平均梯度、方差等；第二类反映空间细节信息，如标准差、信息熵、交叉熵等；第三类反映光谱信息，如光谱扭曲程度、偏差指数，相关系数等。为了客观定量评价融合效果，本文对融合影像用均值、平均梯度、信息熵、标准差和光谱扭曲程度来定量衡量融合质量。

### 1、影像均值：

影像均值是像素灰度平均值，对人眼反应为平均亮度。其数学定义为：

$$\bar{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2-34)$$

式中  $n$  为样本总数， $x_i$  为第  $i$  个样本值

在评价多光谱影像融合前后的光谱变化情况时，可用影像均值来加以衡量。因此对于强调光谱保持的融合方法来说，融合前后的影像均值最好保持不变。

### 2、信息熵：

信息量的增加是影像融合最基本的要求，因此用信息熵评价影像的质量即可以从信息量方面来评定影像融合的质量，信息熵  $H(x)$  越大，影像所含的信息越丰富，影像质量越好。而影像中当所有灰度级出现的概率相等时，影像所包含的信息量是趋于最大的。一幅以影像  $X$  的熵数学定义为：

$$H(x) = - \sum_{i=0}^{255} P_i \log_2 P_i \quad (2-35)$$

$P_i$  为影像  $X$  像素灰度值为  $i$  的概率。

### 3、标准差：

标准差反映了影像灰度相对于灰度平均值的离散情况，在某种程度上，标准差也可用来评价影像反差的大小。若标准差大，则影像灰度级分布分散，影像的反差大，可以看出更多的信息。标准差小，影像反差小，对比度不大，色调单一均匀，看不出太多的信息。其数学定义为：

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{\mu})^2 \quad (2-36)$$

式中  $n$  为样本总数， $x_i$  为第  $i$  个样本值， $\bar{\mu}$  为影像均值。

### 4、平均梯度（清晰度）：

平均梯度可用来评价影像的模糊程度。一幅影像模糊是指影像中边界和线条

附近影像变模糊了,即灰度变化率小了,而变化率的大小可以用梯度来表示的。因此,我们可以用平均梯度值来衡量影像的清晰度,其数学公式为:

$$g = \frac{1}{(M-1) \cdot (N-1)} \sum_{x=1}^{M-1} \sum_{y=1}^{N-1} \sqrt{\{ [F_{i,j} - F_{i,j+1}]^2 + [F_{i,j} - F_{i+1,j}]^2 \}} / 2 \quad (2-37)$$

37)

式中  $F_{i,j}$  为像素点  $(i, j)$  的灰度值,  $F_{i,j+1}$  为为像素点  $(i, j+1)$  的灰度值,  $F_{i+1,j}$  为像素点  $(i+1, j)$  的灰度值,  $M, N$  为区域大小。一般来说,  $g$  值越大,细微反差程度越强烈,对比度越高,影像越清晰。

### 5、光谱扭曲程度

光谱扭曲程度可用来评价融合前后的光谱变化情况,一般是指融合影像  $F$  像素灰度平均值与源影像  $A$  像素灰度平均值之差,也可以说是融合影像与源影像的差值影像的灰度平均值。它的数学表达式为:

$$D = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |F(x_i - y_j) - A(x_i - y_j)| \quad (2-38)$$

38)

式中  $M, N$  为影像的宽度和高度。

有的时候 光谱扭曲程度也被称为偏差指数。它反映融合影像和源影像在光谱信息上的差异大小和光谱特性变化的平均程度,值越小表明差异越小,理想的情况下,  $D=0$ 。对于多光谱影像融合而言,好的融合方法不应造成原始多光谱影像的光谱退化,这对后续的信息提取和解译很重要,尤其是多光谱影像各波段之间有意义的指数运算,如植被指数等。因此,在遥感应用中,还可以用它来反映每一个地物覆盖类型融合后的光谱变异程度

从以上的参数定义来看,在影像质量的客观评价中,均值、标准差、信息熵、平均梯度和光谱扭曲程度等参数可以从不同角度来定量的考虑影像的融合质量,以确定何种融合方法和融合规则更有效。

## 2.5 实验与分析

在前面几节中,本文对空域法和变换域法的几种代表性融合方法做了介绍,



并对变换域的融合规则和融合算子做了了解,但没有对他们进行对比。因为在实际应用中,一种融合方法的好坏是根据源影像的物理特性来决定的,不同的影像融合适合不同的融合方法和融合规则。因此本文实验采用了现在最常用的Quickbird影像,在相同的影像预处理条件下用不同的融合方法和融合规则做了大量实验,并通过主观和客观评价方法来分析实验结果,找出适合Quickbird影像的多光谱影像融合方法。

### 2.5.1 实验数据分析

本文所采用的遥感影像为国内某地区Quickbird全色影像(空间分辨率为0.61米),Quickbird多光谱影像(空间分辨率为2米)。在采样间隔为5米的DEM基础上对输入原影像进行空间几何纠正,并采用三次卷积内插法对Quickbird 2m多光谱影像进行插值重采样,使其与全色影像尺寸大小和像元分辨率相同。

快鸟<sup>[36]</sup>(QuickBird)是目前分辨率最高的商业卫星(2001年10发射),推扫式成像,其基本物理属性为:全色波段像元尺寸为0.61米,波长范围为450~900nm,多光谱波段像元尺寸为2.44米,波长范围:蓝波段(band 1)450~520nm,绿波段(band 2)520~600nm,红波段(band 3)630~690nm,近红外波段(band 4)760~900nm;卫星的轨道高度450km,最大天顶角25°。轨道倾角98°(太阳同步),沿轨/横轨迹方向立体成像,辐射宽度以星下点轨迹为中心左右各272km;分幅模式条带16.5×165km,单景16.5km×16.5km,影像幅宽16.5km;重访周期1~6天。

### 2.5.2 实验及分析

#### 1、基于HIS变换、PCA变换和小波变换融合法的分析比较

对以上QuickBird影像数据进行处理,分别采用基于HIS变换、PCA变换、小波变换和小波+HIS变换进行融合试验,小波变换采用的滤波器长度为4的Daubechies正交小波,小波分解层数为2层。原始影像和融合影像如图2.11,影像的性能统计参数如表2.1。

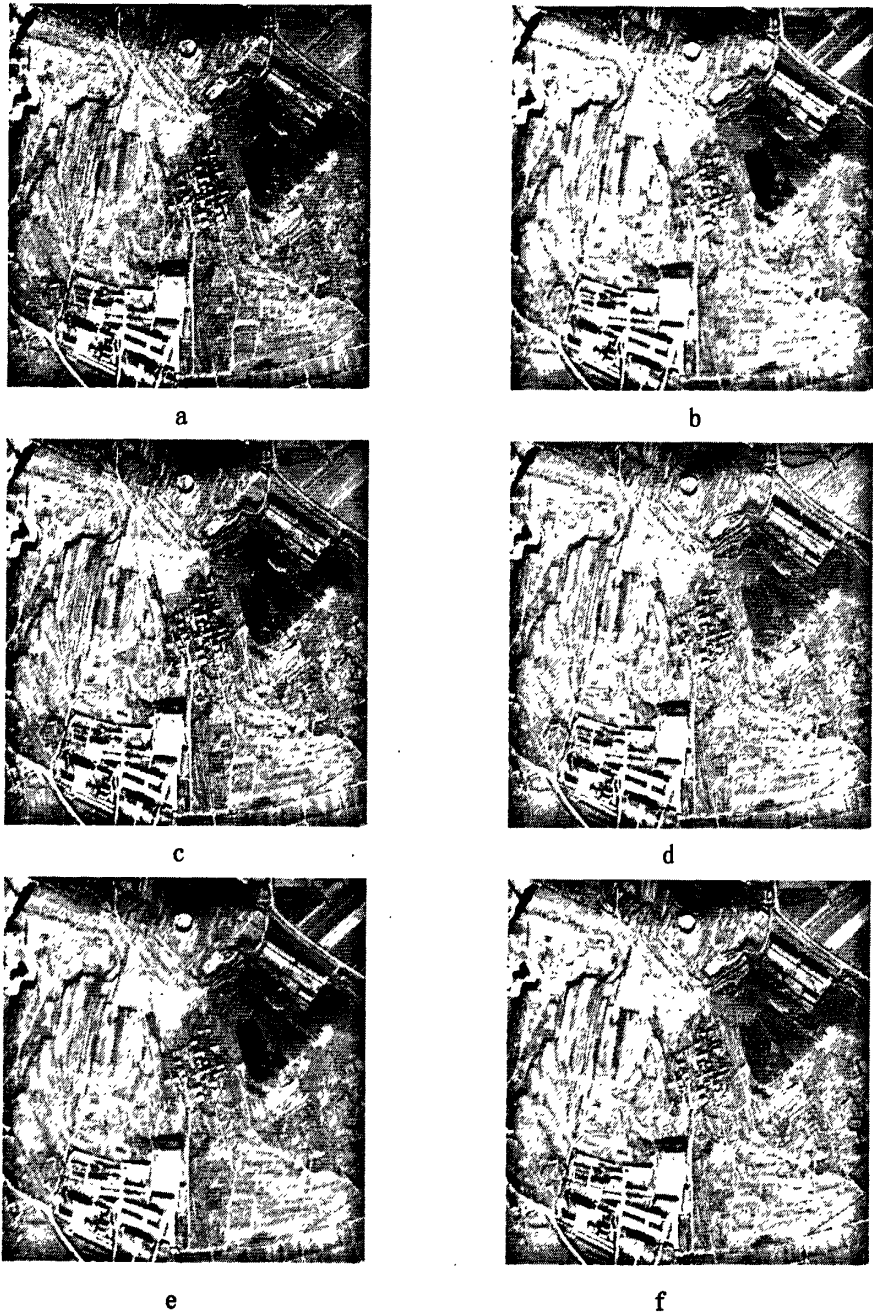


图 2.11 输入原影像和融合后影像: (a) Quickbird 0.61m 全色影像; (b) Quickbird 2m 多光谱影像; (c) HIS 变换融合影像; (d) PCA 变换融合影像; (e) 小波变换融合影像; (f) 小波+HIS 变换融合影像

图 2.11 a 和 b 分别为 Quickbird 0.61m 原始全色影像和 Quickbird 2m 原始多光谱影像, 图 2-7c 为采用 HIS 变换后的融合影像从融合后影像, 图 2.11 d 为采用 PCA 变换后的融合影像, 图 2.11 e 为采用基于小波变换融合方法所得的融合影像, 图 2.11 f 为采用基于小波+HIS 变换融合方法所得的融合影像。从影像

融合结果主观上可以看出几种算法融合影像都将高分辨率影像的空间信息和多光谱影像的光谱信息有机结合。融合影像在可分辨性、清晰性上有很大提高,线状地物更加突出,如融合影像上独立地物,线状地物清晰可见,而在多光谱影像上就模糊难以分辨;因此从主观评价角度上来看,各融合方法所得融合影像的空间信息均得到较大的提高。从视觉上看,融合后的影像在色彩上同多光谱影像大致相似,同类地物有接近相同的颜色,但在局部与多光谱影像有明显差异,特别是 HIS 变换和 PCA 变换融合法,这表明融合影像的光谱特征同多光谱影像的光谱特征有差异,但融合影像比多光谱影像更利于目视判读。

表2.1 性能统计参数表

	信息熵	均值	平均梯度	标准差	光谱扭曲
全色影像	7.03	133	8.02	36.30	
多光谱影像	5.51	136	2.46	29.45	
HIS变换法	6.95	132	7.58	35.54	44.56
PCA变换法	6.02	131	4.71	23.67	42.82
小波变换法	6.81	136	4.49	29.16	13.23
小波+HIS	6.98	133	6.79	34.52	36.11

在客观分析上从表 2.1 可以看出,四种融合方法的熵值都比原始多光谱影像的熵值大,这表明融合后的影像所含信息都比原始多光谱影像信息丰富,因此地物表现特征强,易于识别;在影像清晰度上,传统的 HIS 变换方法梯度值最大,因此所获得的空间细节方面表示能力强,基本上达到了全色影像的分辨率;在光谱信息保留方面的 HIS 变换方法光谱信息的损失最大,而基于小波变换融合方法光谱信息的损失却比其它方法要小的多,光谱信息保持较好,但在空间细节表示方面提高程度有限。从各参数综合属性上可以看出,小波变换和 HIS 变换相结合的方法比单纯的小波变换或 HIS 变换的方法要优越,它即较好的保留了原多光谱影像的丰富的光谱信息,也较大的提高了其空间分辨率。

## 2、基于小波变换和HIS变换相结合的各个融合规则的比较

由 QuickBird 的物理属性可以看出:其多光谱四个波段成像频带较窄,而全色波段成像频带较宽,并且多光谱频带位于全色波段频带内,既多光谱影像与全

色波段影像的低频成分有很强的相关性, 这样, 可以利用小波变换将全色波段影像的低频成分与多光谱影像的低频成分进行适当处理, 便可能得到具有较高空间分辨率的多光谱影像。同时, 由于多光谱各波段频带范围互异, 两两波段之间具有较低的相关系数, 符合 HIS 变换的波段属性。因此从理论上讲, QuickBird 比较适合小波+HIS 相结合的融合方法, 通过上面的实验数据, 也验证了此结论。

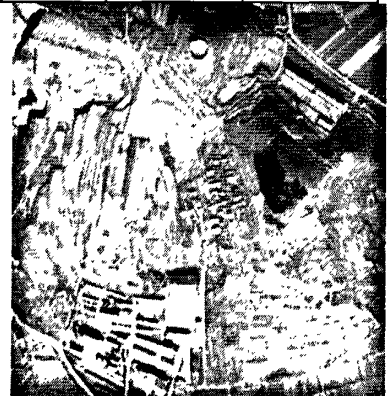
在使用小波+HIS 相结合的融合方法时, 不同的融合规则和融合算子会产生不同的融合影像。因此依然用 QuickBird 原始影像数据, 在基于小波变换和 HIS 变换相结合的融合方法前提下, 分别采取了系数最大法, 局部区域方差法, 局部平均梯度加权法 (阈值为 0.7) 和基于局部区域活性测度匹配的 (阈值为 0.9) 四种融合规则做了比较性实验。小波分解层数为两层, 实验结果如图 2.12, 影像性能统计参数如表 2.2。

2.2 小波+HIS融合法不同融合规则性能统计参数表

	信息熵	均值	平均梯度	标准差	光谱扭曲
全色影像	7.03	133	8.02	36.30	
多光谱影像	5.51	136	2.46	29.45	
系数最大法	6.98	133	6.79	34.52	36.11
局部区域方差法	6.78	133	4.77	29.44	19.29
局部平均梯度加权法	6.82	134	6.03	30.25	22.27
文献【3】	7.00	134	6.78	34.91	25.36
活性测度匹配法	7.01	134	6.81	34.67	25.16



a



b

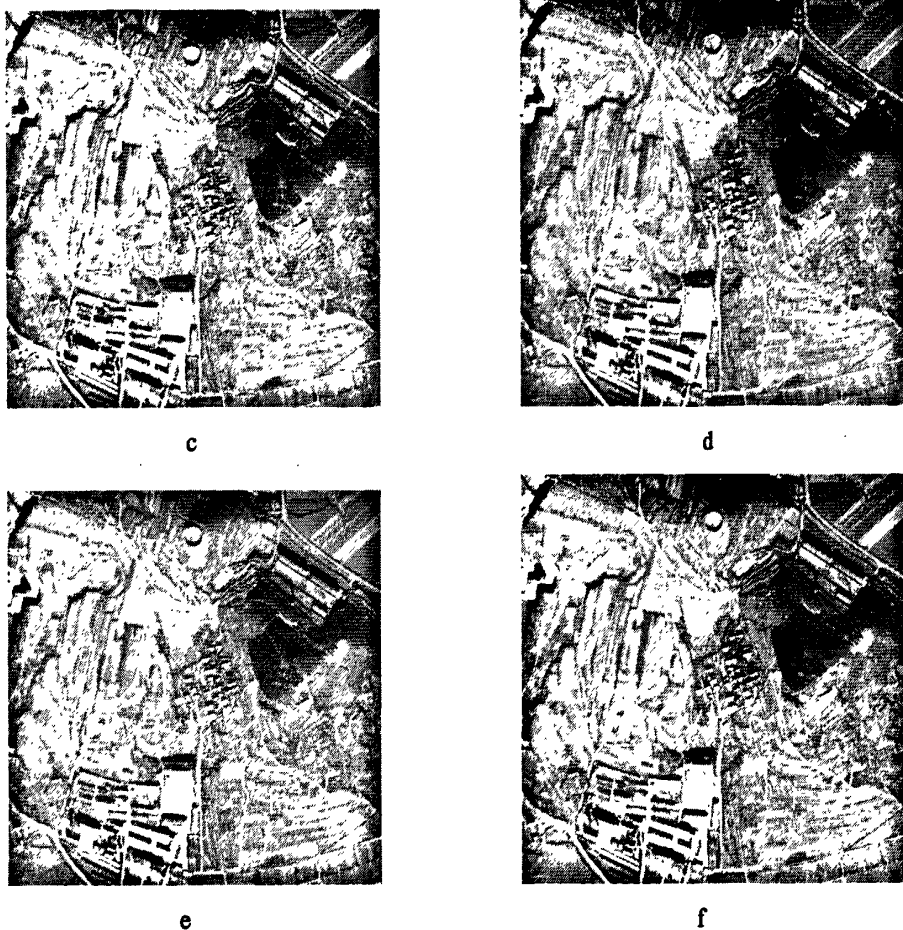


图 2.12 输入原影像和融合后影像: (a) Quickbird 0.61m 全色影像; (b) Quickbird 2m 多光谱影像; (c) 系数最大法融合规则; (d) 局部区域方差法融合规则 (e) 局部平均梯度加权法融合规则; (f) 基于局部区域活性测度匹配的融合规则

从影像融合结果主观上可以看出几种算法融合影像都将高分辨率影像的空间信息和多光谱影像的光谱信息有机结合。融合影像在可分辨性、清晰性上有很大提高, 线状地物更加突出, 如融合影像上独立地物, 线状地物清晰可见, 而在多光谱影像上就模糊难以分辨; 因此从主观评价角度上来看, 各融合方法所得融合影像的空间信息均得到较大的提高。从视觉上看, 融合后的影像在色彩上同多光谱影像大致相似, 同类地物有接近相同的颜色, 但在局部与多光谱影像有明显差异, 这表明融合影像的光谱特征同多光谱影像的光谱特征有差异, 但融合影像比多光谱影像更利于目视判读。

在客观分析上从表 2.2 可以看出, 四种融合方法的熵值都比原始多光谱影像的熵值大, 这表明融合后的影像所含信息都比原始多光谱影像信息丰富, 因此地

物表现特征强,易于识别;在光谱信息保持能力上,局部区域方差法能较好保持原多光谱影像的光谱特性,但其平均梯度值较小,提高影像清晰度能力有限;而基于局部区域的活性测度匹配的融合规则,平均梯度值较大,能大幅度的提高影像空间信息的分辨能力,易于目标的识别与判读,虽然在光谱信息的保持方面不如局部区域方差法,但差值较小,对目标的目视识别影响微小。因此,从指标的综合考量来看,基于局部区域的活性测度匹配的融合规则的各项评价指标较优,比较适合 Quickbird 影像的多光谱影像融合。

## 2.6 本章小结

本章简要阐述了影像融合技术的概念、特点、基本流程及层次划分,分别对空域法的加权融合法、HIS变换法、PCA变换法以及变换域法的小波变换、小波+HIS变换、小波+PCA变换等方法做了介绍,并在原有的融合规则基础上提出基于平均梯度的加权融合规则和基于局部区域的活性测度匹配的融合规则。在以Quickbird影像为基础的多光谱融合实验中,从融合影像的质量评价来看本文提出的算法都取得了好的融合效果。为QuickBird影像在今后测绘上更好的使用和有效扩展,提供了技术上的可靠保证。



### 第三章 遥感影像的云雾影像修复技术

在遥感影像处理过程中,噪声是影响影像质量的一个重要因素,因此噪声的消除是影像增强处理中的一个重要组成部分,在所有噪声中云覆盖噪声是最常见的噪声之一。云覆盖噪声不仅影响遥感影像的解释,降低解释精度,同时在有限的光谱分辨率的情况下,云覆盖噪声对于分辨率低的遥感平台来说,也是造成遥感数据影像不全的一个重要因素。而在当前的遥感领域,只有合成孔径雷达传感器能穿透云层获取地表信息,而常用的遥感高分辨率影像多采用的是可见光传感器,此类传感器穿透能力弱,受大气变化影响比较大,因此常常会出现的目标影像不同程度的受到云覆盖噪声的影响。从测绘的角度来看,大面积的云层遮挡势必将严重影响生成影像地物表示的完整度,将会对影像的识别,制图等工作带来的很大的困难,使的难以保证地图的精度,有时甚至无法进行工作。而用卫星补飞的方法获取无云影像,又受到时间、经济和技术等各方面的制约,很不现实。因此如何利用数字影像处理技术有效地减少或去除云雾的影响,不仅是遥感影像进行准确解释基础,也是增加遥感数据有效性的一个重要途径。

#### 3.1 云的形成、种类和去除方法

云的形成从物理范畴来说,是空气中的水汽经由各种原因达到饱和或过饱和状态而发生凝结的过程;是由水滴,冰晶聚集形成的在空中悬浮的物体;是地球大气中有一定稳定性,沉积速度小,尺度范围在 $10^{-3}\sim 10\mu\text{m}$ 之间的液态离子和固态离子所组成的混合物集合体。云块一般较为分散,其薄厚或形状也有很大差异,常呈灰白色或灰色,结构较松散。在遥感影像处理中,我们常常将云雾分为薄云和厚云。薄云范围一般较大,所覆盖区域的影像不仅包含云的信息,也包含地面影像信息,表现出由中心向四周缓慢变化的空域趋势,在频域上具有低频的特性,成像后造成影像模糊,清晰度下降;与薄云相比,厚云遮挡处的影像几乎不包含地面影像的任何信息,因此无法进行滤波处理。但在现在的遥感领域中,卫星影像的获取途径多种多样,同一地区的遥感影像资料也种类繁多。对于多源遥感卫星,由于各类遥感卫星具有固定的重复周期,因此每隔一段时间可以



获取同一地区的影像, 在两个时间上的获取影像, 图上云雾不可能正好完全重合, 这就为多源遥感影像的厚云处理提供了可靠的数据源。因此对于厚云的处理方法, 我们一般采用替换法, 即用经过纠正的同一地区时相不同的传感器或同一传感器获取的无云影像的局部部分对同地区的云遮挡影像进行局部镶嵌, 以到达消除云雾对地面地物的遮挡。

在遥感影像局部替换去云处理中, 有两个方面问题必须加以解决: 一是由于有云影像与无云影像的几何位置, 像元分辨率一般不一致, 需要进行影像严格几何纠正和影像同名点配准处理; 二是由于有云影像与无云影像的灰度一般不一致, 替换后的影像不可避免的产生灰度不协调现象, 使得被替换后的影像真实感不强, 即使在影像替换前进行了灰度调整, 局部替换后的影像仍然会存在着拼接缝问题, 必须进行替换后灰度处理<sup>[37]</sup>。

### 3.2 基于多源遥感影像融合的去云技术

目前在遥感影像数据处理中, 针对厚云的替换常用的方法有: 2-维直方图阈值调整法、数字高程模型校正去云法等。

2-维直方图阈值调整法<sup>[38]</sup>用两个同一地区不同时段, 不同云分布的影像形成2-维直方图的两个轴, 第一个轴由去除云的影像组成, 第二轴由待去云的影像构成, 通过调节阈值, 找出有云影像的像素值, 然后用同一地区的无云影像的像素值去取代有云地区的像素值, 达到去除云的效果。该方法操作简便, 但是去云效果不是很理想。

数字高程校正去云法<sup>[39]</sup>, 是针对海拔较高地区由于地形的抬升作用, 在山体上空形成的云体而提出的一种去除云的方法, 该方法是应用具有相同地理参考的地形图去校正有云的遥感影像, 以达到去除云的目的。

以上几种方法在计算过程中操作比较繁琐, 每次都要把云遮挡区域进行圈定, 如果一幅影像上云遮挡区域多而且分散, 则要进行大量的操作步骤, 并且去云效果也不太理想。于是我们从前面介绍的多源遥感影像小波融合理论中可以得知, 在影像进行小波分解后清晰影像的高频系数要远大于模糊影像的高频系数, 而清晰影像的低频系数相当于模糊影像的低频系数, 在遥感影像中无云影像在影像的

显示来说比有云影像清晰,因此为了获得前后景物均清晰的影像,根据多源遥感影像的多聚焦融合原理,使用了基于小波变换融合的厚云替代法。在小波系数选择中采取了基于系数值判断的高频系数取大,低频系数取平均的融合策略,来达到有云影像的局部替换以消除云层遮挡的影响。其具体步骤为:

### 3.2.1 影像纠正

在利用融合法进行厚云处理时,采用同一地区的同一传感器或不同传感器获得影像进行融合,首先要将所获得影像进行影像纠正。影像纠正就是对影像间存在着的几何差异进行校正,把参与融合的取自不同时间、不同传感器或不同视角的同一景物的两幅影像或多幅影像变换到同一坐标系下并具有相同的几何关系和像元分辨率,使得相同景物的局部影像对应起来,以便于影像融合。影像纠正一般可以采用以下两种方法:一是利用地面控制点和数字高程模型(DEM)对传感器影像进行严格的几何纠正,使它们统一到大地坐标系中;二是采用影像匹配的方法利用多项式纠正来实现影像的自动纠正。相比较而言,第一种方法更严格,更紧密,影像纠正质量较高,但需要较全的传感器参数。

### 3.2.2 影像直方图匹配

用于融合的两幅影像虽然在空间上对应起来,但是它们的灰度一般都存在差异(辐射差异),直接融合后由于有云区域将会被另一幅影像无云同名区域所代替,因此两者的灰度差异将造成人为拼接缝,从而影响影像质量。对于光学影像来说,辐射差异主要来自两个方面,一方面是受到成像条件的影响,比如光照条件、大气条件、视角、工作波段等因素;另一方面则可能受到地面覆盖变化的影响,如季节的变迁等,对于由不同因素导致的辐射差异可以采取相应的策略,即采用对相应波段影像进行灰度匹配处理的方法来加以平衡,来达到消除影像的辐射差异。

直方图匹配<sup>[40]</sup>(直方图规定化),就是按照参考影像的灰度修改配准影像的直方图,使某些部分的灰度得到增强来改善影像色调之间的反差或者使需要变换的直方图成为参考影像特定的形状,通过这样使参与匹配的两幅影像具有相似的直方图形状,灰度分布大致相同,同名影像辐射度趋于一致,用数学公式表达式

为。

设匹配影像, 参考影像的概率密度函数与对应的累积分布函数分别为  $P_L(g_L), P_R(g_R), H_L(g_L), H_R(g_R)$ ,  $g_L$  和  $g_R$  为匹配影像, 参考影像灰度值:

对影像进行灰度变换:

$$u = H_L(g_L) = \sum_{l=0}^k p_l(g_l) \quad k=0, 1, 2, \dots, M-1 \quad (3-1)$$

1)

$$s = H_R(g_R) = \sum_{n=0}^t p_n(g_n) \quad t=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3-2)$$

2)

根据直方图规定化原理, 我们希望  $P_L(g_L), P_R(g_R)$  具有同样的均匀密度

$$u = s \quad (3-3)$$

$$g_L = H_L^{-1}(u) = H_L^{-1}(s) = H_L^{-1}[H_R(g_R)] \quad (3-4)$$

$$g_R = H_R^{-1}[H_L(g_L)] \quad (3-5)$$

最后根据  $g_L$  和  $g_R$  的映射关系, 逐像元地修改待匹配影像的灰度值。

在直方图规定化中采用什么样的对应映射规则在离散空间很重要, 一般有两种方法可以完成匹配影像直方图的灰度级与参考影像直方图的灰度级之间的映射, 即单映射规则 SML 和组映射规则 GML。单映射规则 SML 的数学公式为: 根据灰度级从小到大的顺序依次找到能使 (3-6) 式最小的  $k$  和  $t$

$$\left| \sum_{l=0}^k p_l(g_l) - \sum_{n=0}^t p_n(g_n) \right|$$

(3-6)

然后将  $P_L(g_L)$  对应到  $P_R(g_R)$  中去, 该方法简单直观, 但因为存在取整误差的影响, 因此会有较大的取整误差。

另一种组映射规则的实现思想为, 设有 1 个整数函数  $I(l), l=0, 1, 2, \dots, N-1$ , 满足  $0 \leq I(0) \leq I(1) \leq \dots \leq I(N-1) \leq M-1$ 。现在依据 (3-7) 式确定达到最小的  $I(l)$ :

$$\left| \sum_{i=0}^{I(l)} p_l(g_l) - \sum_{n=0}^t p_n(g_n) \right| \quad t=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3-7)$$

如果  $l=0$ , 则将  $i$  从 0 到  $I(0)$  的  $P_l(g_l)$  对应到  $P_r(g_r)$  去; 如果  $l \geq 1$ , 则将其  $i$  从  $I(l-1)+1$  到  $I(l)$  的  $P_l(g_l)$  都对应到  $P_r(g_r)$  去。

通过实验误差表明, SML 映射规则是一种有偏的映射规则, 因此一些对应灰度级被有偏地映射到接近计算开始的灰度级; 而 GML 映射规则是统计无偏的。因此 GML 映射规则总会比 SML 映射规则更能体现规定直方图的意图, 而且通常产生的误差只有 SML 映射规则的十几分之一。可见, 通过组映射规则的直方图规定化变换方法结合设计良好的规定直方图, 可以得到较好的影像处理效果。但是当两幅影像的局部区域的地貌或植被等特征不同时, 会造成整体色彩一致而局部区域色彩偏色的情况, 因此为了兼顾影像整体和局部色彩的平衡问题, 潘俊<sup>[41]</sup>提出了一种基于 Wallis 滤波器的色彩平衡, 这种方法可以减少色彩平衡处理时的处理误差, 同时可以消除处理误差的空间传递和积累问题, 保持输入影像的辐射分辨率。

### 3.2.3 有云影像裁切

因为云的分布没有规律而且厚薄不均, 一般来讲, 一团厚云的边缘相对来说薄一些, 因此云区和云影区的边缘存在着渐变, 从而无法精确确定其形状。同时, 融合后的影像应该包含着两幅影像无云的部分, 有云部分都被抛弃掉, 因此我们可以把影像上的有云部分(包括边上的薄云)用photoshop圈定矩形范围并裁切掉, 形成一片空白, 但要保证两幅影像裁切掉的部分没有重叠。

### 3.2.4 影像融合规则

在影像进行了直方图匹配后, 两幅影像有相似的直方图分布, 在相同的位置灰度值相差很小, 而因为有云被裁切掉的部分却为白色, 与另一幅影像相同无云部分灰度值差别很大, 正是利用这一点制定本融合规则。假设对影像大小为

$M_1 \times M_2$  的原始影像 A 和 B 进行融合, 融合后的影像为 F。其原理为: 在对影像

进行小波变换后形成各自的同分解层上的高频系数  $D_A^{l,k}(i,j)$ ,  $D_B^{l,k}(i,j)$  和低频系数  $C_A^{l,k}(i,j)$ ,  $C_B^{l,k}(i,j)$  (其中,  $K$  表示分解层数), 并对各频率系数进行归一化处理:

$$CK = \frac{C_A^{l,k}(i,j) - C_B^{l,k}(i,j)}{C_A^{l,k}(i,j) + C_B^{l,k}(i,j)} \quad (3-8)$$

$$DK = \frac{D_A^{l,k}(i,j) - D_B^{l,k}(i,j)}{D_A^{l,k}(i,j) + D_B^{l,k}(i,j)} \quad (3-$$

9)

如果  $CK$ 、 $DK$  小于给定的阈值  $\alpha$ , 则两幅影像在该处的系数相差不大, 说明影像  $A$  和影像  $B$  在该处都不是云层信息, 于是其中系数绝对值大的像素作为融合后影像  $F$  在位置  $(i, j)$  处的系数, 如果大于  $\alpha$ , 则两幅影像在该处的系数相差很大, 说明影像  $A$  和影像  $B$  在该处有一幅是云层信息, 于是取系数绝对值小的像素作为融合后影像  $F$  在位置  $(i, j)$  处的系数, 然后以比较后形成的系数进行小波逆变换形成融合后的影像  $F$ , 用式子表示:

如果  $|DK$  (或  $CK$ )  $< \alpha$       $\alpha$  取为 0.5-1.0

$$D_F^{l,k}(i,j) = \begin{cases} D_A^{l,k}(i,j) & \text{if } |D_A^{l,k}(i,j)| > |D_B^{l,k}(i,j)| \\ D_B^{l,k}(i,j) & \text{else} \end{cases} \quad (3-10)$$

否则:

$$D_F^{l,k}(i,j) = \begin{cases} D_A^{l,k}(i,j) & \text{if } |D_A^{l,k}(i,j)| < |D_B^{l,k}(i,j)| \\ D_B^{l,k}(i,j) & \text{else} \end{cases} \quad (3-$$

11)

### 3.2.5 融合后影像的拼接缝处理

虽然在融合前对两幅影像进行了直方图匹配, 使两幅影像的灰度值基本一致, 但由于地面环境的微小变换和成像角度的差异等因素, 对于局部影像来说仍然存在一些细小差异, 特别是当两幅影像融合在一起以后, 就会在影像拼接处出现一条明显的拼接缝, 影响影像的整体效果。因此就需要一种技术能够修正融合影像在拼接缝附近的灰度 (或颜色), 使之在拼接缝的灰度 (或颜色) 有一个光滑

过渡, 不产生突变效应。

为了解决以上问题, 朱述龙<sup>[42]</sup>提出一种拼接缝强制改正的方法。该方法的基本方法是: 对于融合后影像上的每一段拼接线, 首先统计裁剪线上任一点左, 右两侧一定范围  $L$  内的灰度差  $\Delta g$  (如裁剪线是垂直的, 则统计左右两侧的灰度差; 如裁剪线是水平的, 则统计上下两侧的灰度差), 并求出平均灰度差值  $\tilde{\Delta g}$ , 然后将灰度差  $\tilde{\Delta g}$  在裁剪线相应的两侧的一定范围  $W$  内改正掉 ( $W$  为改正宽度)。由于上述处理是沿裁剪线逐象素进行的, 为了避免改正后的影像出现条纹效应, 灰度差  $\tilde{\Delta g}$  应在该象素位置前后的多个位置上共同统计得到。改正宽度  $W$  的大小与灰度差成正比,  $\tilde{\Delta g}$  越大改正宽度也越大。灰度改正时, 离拼接缝越近的像点, 灰度值改正的越多; 拼接缝越远的像点, 灰度值改正的越小。到拼接缝距离为  $d$  的像点灰度值改正量  $\Delta g'$  为:

$$\Delta g' = (W-d)/W * \tilde{\Delta g} \quad (3-12)$$

因为在影像的预处理阶段, 对有云区域的裁剪用的是矩形, 因此融合后的影像其拼接缝只存在于水平方向和垂直方向的边线上, 而不用考虑斜线方向的情况, 这样就简化了该像素点各方向像素点的判断。该拼接缝消除法不受影像重叠度的大小, 影像数目的多少, 几何镶嵌精度的影响, 能有效解决融合影像局部区域的拼接缝问题。

对于彩色影像的拼接缝消除, 可采用以下两种方法:

- 1、把彩色数字影像分解为红 (R), 绿 (G), 蓝 (B) 3个分量影像, 分别用上述某种方法消除红, 绿, 蓝3个分量影像上的各自拼接缝现象, 然后再把处理后的红, 绿, 蓝3个分量影像进行彩色合成, 就可以得到消除了拼接缝现象的彩色影像。

- 2、将彩色影像从 (RGB) 彩色空间变换为光强, 色度和饱和度 (HIS) 的色彩空间, 然后用在光强通道 (I) 来消除拼接缝, 再进行 HIS 到 RGB 的彩色反变换即可。

### 3.2.6 实验与分析

本章实验使用的数据为QuickBird全色影像, 空间分辨率为0.61米。小波变换

采用的滤波器长度为4的Daubechies正交小波,小波分解层数为2层.厚云所处位置为两幅影像的白色区域(已做裁切处理),箭头所标位置分别为两幅影像焦距不清楚的位置.原始影像有云部分被裁切后的影像为图3.1,图3.2,去云后的影像为图3.3.



图3.1 原始影像



图3.2 原始影像



图3.3 去云后影像

从(图3-3)实验结果可以看出,两幅影像的厚云区域被无云区域有效的融合进去,影像中没有任何云层信息,焦距不清晰处也被清晰影像所替代,影像整体灰度基本一致,这说明本方法是有效的。

### 3.3 基于小波变换的薄云修补法

薄云在遥感影像中比较常见,从成像机理上分析,薄云区域具有局部能量大,区域灰度平均值高、方差小的特点,同时薄云区域色调过渡均匀,薄云呈缓慢变换的空域状态,区域的纹理结构较其它自然地物纹理结构简单,因此在频率域上

薄云区域多集中在影像的低频部分；从目视上看薄云面积一般较大，云层厚度比较薄，地面上的景物若隐若现，依稀可辨，影像信息中即包含有云的信息，还含有地面景物信息等多重信息。考虑到在现实中，取得同区域同来源的无云参考影像并不容易，容易受到时间和资料的限制，在有的时候必须要对单幅影像进行处理来消除薄云的影响。因此根据薄云信息频率低的特性，在不利用无云影像镶嵌的基础下，通过单幅影像的正交变换在频率域根据影像不同频率特性来消除薄云的影响，还原地面真实景象。这样作，即减少了影像配准所带来的误差，又加快了影像质量的修补速度，特别适合遥感影像的快速更新需要。

### 3.3.1 薄云的成像模型<sup>[43]</sup>

在薄云条件下，传感器所接受的影像信息包含了太阳光经云层反射（照射分量）及太阳光经地面景物反射后再穿透云层（反射分量）这两部分。即入射光（照射）分量  $f_i(x, y)$  和  $f_r(x, y)$  反射分量，用数学函数式表达如下：

$$f(x, y) = aLp(x, y)T(x, y) + L_i \quad (3-13)$$

$$L_i = L(1 - t(x, y)) \quad (3-14)$$

其中  $f(x, y)$  为传感器接收到的综合信息， $p(x, y)$  为地物或地面反射率，代表信号， $T(x, y)$  为云层的透射率，代表噪声， $L$  为太阳辐射强度， $a$  为太阳辐射在大气传输过程中的衰减系数， $L_i$  为程辐射率，式中  $p(x, y)$  和  $T(x, y)$  的取值在 0 和 1 之间。

传感器上接受到的影像可以看成是由两个因素决定的，一是诸如云、雾、大气等的影响；另一个是地面反射特性的不同。若忽略其它因素，则前者是由云引起的。如果地面的反射是完全相同的，为了简化模型利于计算，可将地面看成反射相同且全反射的均质体，公式又可写成：

$$f(x, y) = f_i(x, y) f_r(x, y) \quad (3-15)$$

式中  $f_i(x, y)$  为照射分量，是光照条件和阴影的函数， $f_r(x, y)$  为反射分量，是地物的函数，因此在空间域中影像的亮度值就可以表示为照射分量和反射分量的乘积。通常，景物相对主要处于高频，反映影像的细节内容；照射分量（薄云）在整幅遥感影像上除个别阴影区域外一般差异很小，表现出慢变化的特



征, 与频率域低频相联系, 因此去除薄云就是要适当降低光源照射量函数 $f_i(x, y)$ 的影响, 也就是在频率域上削弱光源入射量函数 $f_i(x, y)$ 的成分, 同时增强地面反射率函数 $f_r(x, y)$ 的成分, 这样就可以在影像上弱化薄云的显示, 从而突出地面地物的细节特征。

### 3.3.2 基于小波分解的薄云修补法

在去除薄云时常用的方法为同态滤波法, 该方法是影像增强的方法, 使用的是巴特沃斯高通滤波器, 在有效的去除薄云的同时也损失了影像背景的低频成分, 使深色的背景变淡, 甚至反转。同时也去除了部分有用的高频信息, 使影像的无云区域发生变换。

而由小波原理可知, 基于变换域的小波变换具有空域和频域“变焦距”特性, 与空间域相比, 更有利于深入了解影像的空间域和频率域特性, 它可以将影像分解为一系列具有不同分辨率、频率和方向特性的子带信号, 可以提供数据在任何时域和频域的局部化特性。使我们不仅可以确定信号中所包含的频率, 而且可以确定这些频率的信号出现在什么时候, 很容易地找到变换小波系数和原始影像内容在空间和频率域两方面的对应关系。这样便可以在不同层次上来对低频或高频分量等感兴趣的信息进行分析和处理, 从而将二维影像域难以处理的问题转换到不同层次的小波域进行处理。根据小波的这种时频特性, 朱锡芳<sup>[44]</sup>提出了一种基于小波分解的薄云处理方法, 他的基本思想是将含云影像在经过小波分解后, 会形成一个最高层的近似系数和每一层的细节系数, 其中近似系数频率比较低, 包含着薄云大部分信息; 细节系数频率较高, 包含着影像的地物信息和部分薄云信息。又因为层数大的细节系数频率比层数小的细节系数频率低, 所以高频所包含的薄云信息主要集中在层数较高的细节系数上。知道了这一点, 我们就可以在影像经过 $n$ 层小波分解后, 适当增加低层的细节信息(地物信息), 同时减少影像近似系数和高层的细节系数(薄云信息), 通过在减弱影像薄云信息的同时增强影像的地物信息, 以此来达到去除薄云的目的。具体流程为:

- 1、将薄云影像进行 $n$ 层小波变换。
- 2、确定层数 $L(1 < L < n)$ , 使层数大于 $L$ 的细节系数和近似系数与权重系数 $\alpha$ 相

乘 ( $0 < \alpha < 1$ ), 减少细节信息和近似信息 (减弱影像的薄云信息); 层数小于L的细节系数与权重系数 $\beta$ 相乘 ( $\beta > 1$ ), 突出地物的边缘信息。

3、把经过变换后的小波分解系数进行小波逆变换, 形成去云后的影像。

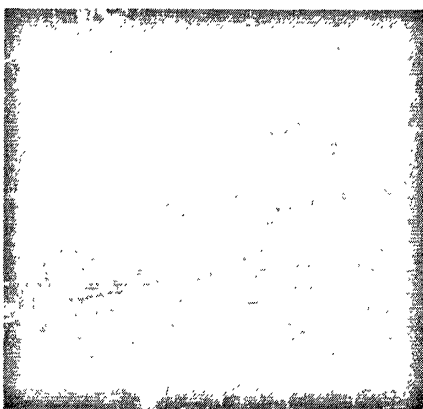
在具体操作时, 应注意以下几点:

1、当薄云均匀覆盖整幅影像时, 近似系数中包含薄云信息较少, 可保持不动; 而当薄云非均匀覆盖的整幅影像时, 近似系数包含大量薄云信息, 可按上面操作。

2、小波分解的层数根据影像而定, 一般取2层已经能够获得明显的效果, 但是针对不同实际情况, 也可采用更高的分解层数。因此就需要把L设为可输入参数, 通过不断调整分界层数L的值, 以取得最佳的处理效果。

### 3.3.3 实验及分析

实验数据为QuickBird多光谱影像, 空间分辨率为2米。影像表面云雾覆盖整幅图, 地面景物细节分辨不清, 对比度较低。实验采用小波分解法, 滤波器长度为4的Daubechies正交小波, 分解层数为3层, 衰减第一层近似系数,  $\alpha$  值取0.7, 增加2, 3层细节系数,  $\beta$  值取2.5, 实验结果如图3.4, 图3.5:



3.4 原始影像



3.5 小波分解法去薄云后影像

实验结果从目视情况分析, 薄云信息被有效消弱, 地面景物的细节得到了突出, 影像对比度提高, 清晰度得到增强, 但光谱特性有所退化, 可再用直方图匹配来平衡颜色。因此在去除薄云的效果上利用小波变换的薄云修补法可以取得了良好的去云实验效果。

### 3.4、本章小结

遥感影像的去云技术是遥感影像质量修补的一个重要手段,在对敌作战、抢险救灾、经济建设都有广泛的应用。本章主要介绍了云形成的机理和去云模型,了解了利用影像融合技术去除厚云和利用小波变换去除薄云的方法和过程,叙述了利用色彩平衡技术消除镶嵌后影像的拼接缝的消除方法。并通过实验,验证了上述方法在QuickBird影像上取得了良好的实验效果。

## 第四章 遥感影像拼接的拼接缝消除技术

遥感卫星所拍摄的影像是一块区域自然和人文景观全貌的综合反映，并按一定的标准格式进行分幅，编号，存储和检索。也就是说，每幅（景）遥感影像的覆盖面积是有限的，而其包含的内容和信息量则是多方面，综合的。在当今的遥感影像应用中常常会遇到一些情况，即待研究分析的区域很大，所感兴趣的目标对象延伸分布很广，涉及到多幅（景）影像；或者虽然有时作业地区研究对象的范围并不大，但恰好处于几幅影像的交界处。因此为了获得更大范围的地面影像，形成一个灰度较协调，均衡的整体，便于今后更好的处理，分析与制图。这就要用到遥感影像的拼接技术。

影像拼接技术始于 20 世纪 70 年代中期，到了 80 年代，A. L. 佐希里斯特等提出了陆地数字镶嵌的基本概念，并进行了实验，获得了较好的效果。但同时也存在摄影测量方面一些特有的问题。如经过纠正的正射影像由于点位分布，像点量测，控制资料，DEM 误差等方面的原因，在拼接的重叠区域可能存在几何位置的偏差；同时由于遥感影像受不同时相，天气状况，摄影质量，边缘减光等因素的影响，在相邻影像间的灰度（颜色）必然存在着一定的差异，如将这些有灰度差异的单幅影像拼接成一幅全景影像，势必会影响全景影像的整体色彩效果。因此，为了保证影像拼接时的几何精度和全景影像在色彩分布上更适合人眼的视觉特征，影像拼接在技术方面主要应解决以下两个问题：

- 1、先对每幅影像在 DEM 支持下进行严格几何纠正，将它们规划到统一的坐标系中，然后对它们进行裁剪，去掉影像重叠部分，将多幅影像几何拼接在一起，形成一幅大幅面的全景影像。

- 2、利用数字影像处理技术消除几何拼接以后的影像上因灰度（颜色）差异而出现的拼接缝，也就是使在接缝处的灰度曲线由中断变成一条光滑的连续曲线，不产生突变效应，如图 4.1。

在航天摄影测量遥感中，为了建立地面影像的立体测量，我们所获取的遥感影像都具有一定范围的影像重叠度，在重叠区的影像地物特征一致，照射角度相同，只是灰度存在着差异。如果对于重叠区域的影像，只是简单的取第一幅影像和第二幅影像的数据进行叠加，会造成影像的模糊和拼接的痕迹，这是不能容许

的。而影像融合的理念就是通过融合来消除影像的灰度的不连续性，因此根据前面介绍的遥感影像融合技术，在重叠区内通过影像融合使重叠区的影像的灰度完全一致，并和非重叠区平滑过渡，这样当影像拼接时就可以保证影像的自然过渡，消除灰度突变，无拼接缝存在。因此本章只讨论基于影像重叠的拼接缝的消除问题，所涉及的影像是经过 DEM 严格纠正后的正射影像。

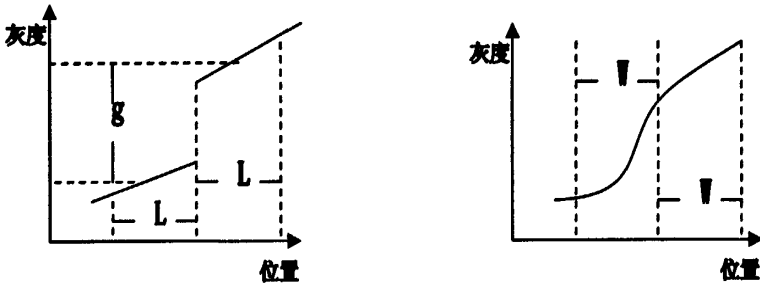


图 4.1 影像拼接处的灰度变化

#### 4.1 基于加权影像融合的拼接缝消除法

该方法的工作思想为：主要通过对纠正后影像重叠区域同名点的自动配准，来确定两幅影像的几何刚性关系，从而确定出影像重叠宽度，然后在重叠区内让影像灰度从左到右（或从上到下）用影像融合的方法使影像灰度逐渐渐变，以达到和非重叠区的灰度相接，以此来消除拼接缝。其具体步骤如下：

如图 4.2 所示 设  $I_A$  和  $I_B$  是相邻重叠的影像， $I_F$  表示融合后的的影像，平滑后的像素点的值为  $I_F(x, y)$

- 1、对  $I_A$  和  $I_B$  进行平滑，滤波，锐化等增强处理，以消除噪声。
- 2、将增强后  $I_A$  和  $I_B$  进行直方图匹配，使两幅影像颜色基本一致。
- 3、用影像配准的方法在相邻影像  $I_A$  和  $I_B$  上确定同名像素点，以确定影像重叠宽度  $W$ 。
- 4、设  $I_A$  和  $I_B$  在重叠部分对应的像素点的值为  $I_A(x, y)$  和  $I_B(x, y)$ ，取：

$$I_F(x, y) = \lambda_A I_A(x, y) + \lambda_B I_B(x, y) \quad (4-1)$$

$$\lambda_A = 1 - \lambda_B = 1 - i/W \quad (4-2)$$

其中 $0 < i < W$ ,  $W$ 为重叠区域的宽度。

5、用重叠区域的 $I_F(x, y)$ 直接替换 $I_A(x, y)$ 和 $I_B(x, y)$ 相应位置像素,这样就保证了当相邻两幅影像拼接时是无缝拼接。

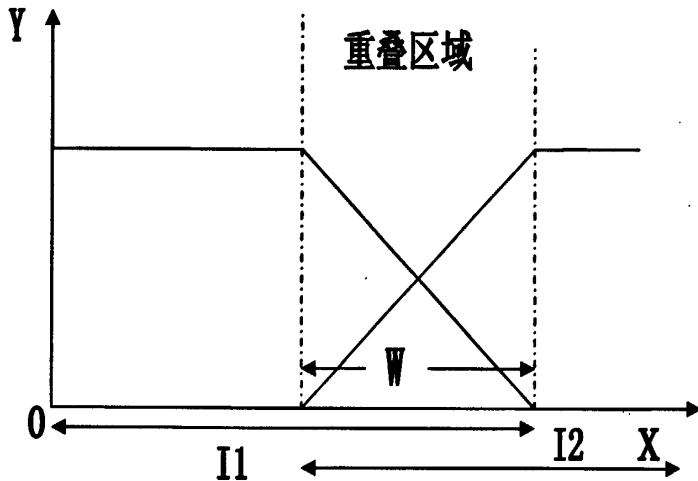


图 4.2 影像重叠区域示意图

#### 4.1.1 影像的预处理

对经过严格几何纠正后的输入影像,为提高影像重叠区域同名像点的匹配精度和减少数据计算量,在消除色差前应对影像作以下预处理:

1、在影像几何镶嵌前,应分别对获取的影像进行的校正、增强、平滑、滤波等预处理,以突出影像的边缘和线状目标或某些亮度变化率大的部分,并且还要用直方图规定化将两幅影像灰度(颜色)调整的大体一致,这样在拼接时的拼接缝的消除工作就简单一些,并且灰度平缓过渡时视觉变化效果不明显。

2、在同名点匹配的共同区域选择上不能太大也不能太小。因为我们在同名点匹配过程中要在相邻影像上选择一个共同区域,利用该区域同名点的灰度值建立同名点匹配方程,如果区域太小,将影响影像匹配的稳定性和普遍性,所以要在尽可能大的区域内建立匹配方程,这样才能准确找到相邻图幅的匹配点,找出重叠区域。但是匹配区域太大又会增加数据处理的计算量和计算时间,影响作业效率。因此在本文实验数据中,均采用 $7 \times 7$ 的区域进行匹配。

3、要选择有代表性的区域用于匹配,最好是地物特征比较突出,明显区别于其它区域,周围影像特征基本一致,同时要避开云和各种噪声的干扰,来建立准

确的同名点匹配方程。

#### 4.1.2 影像的直方图匹配

影像的直方图匹配在前面第三章已经详细介绍过了, 这里就不再重复。在遥感影像中, 一幅影像的均值反映了其色调与亮度, 标准差则反映了其灰度动态变化范围, 并在一定程度上反映了其反差。因此为了考虑相邻影像地物的相关性, 理想情况下获取的序列影像在色彩空间上应该是连续的, 具有近似的色调、亮度与反差和近似的灰度动态变化范围, 因而也应具有近似的均值与标准差。由此看来两幅影像在经过直方图匹配后, 由于具有相似的灰度均值和标准差, 两幅影像的色调也应基本一致。

#### 4.1.3 影像同名点的自动匹配

在经过严格几何纠正的两幅正射影像中, 影像内部地物点具有相同的刚性几何结构, 而影像配准就是找出相邻影像重叠区域同名像素点, 依次来完成影像之间的刚性对齐。

同名点配准总是相对于多幅影像来讲的, 在实际作业中, 通常取一副影像作为配准的基准, 称它为参考图; 另一幅影像, 称为搜索图。影像配准的一般做法是, 首先在参考图上选取以某一目标点为中心的影像模板, 然后让模板在搜索图上有序的移动, 每移到一个位置, 把模板与搜索图中的对应位置进行相关比较, 直到找到配准位置为止。如果用更精确的数学语言描述出来, 配准可以描述为如下问题:

给定同一景物从不同的视角或不同的时间获取的两幅影像 $I_1$ ,  $I_2$ 和两个影像匹配区域的相似性测度 $R(i, j)$ 如式4-3, 若相似度量 $R(i, j)$ 取的最大值, 则匹配区域的中心点即为同名像素点, 从而可以确定相邻正射影像的重叠度, 影像配准成功。

$$R(i, j) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [S^{i,j}(m, n) \times T(m, n)]}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [S^{i,j}(m, n)]^2} \quad (4-3)$$

其中T为模板，S为搜索图， $S^{i,j}(m,n)$ 表示模板覆盖下的那块搜索图， $i,j$ 表示位置

#### 4.1.4 基于加权影像融合的拼接缝消除法

虽然通过直方图规定化的两幅影像有相似的直方图，但是当两幅影像拼接在一起时，还是有细微的接缝。如何处理影像整合过程中出现的拼接缝隙问题，实现真正意义上的无缝拼接，正是影像融合过程中需要解决的问题。它的主要思想是让影像在重叠区域的灰度平滑过度以消除灰度的突变。

为了要使重叠区平滑，提高影像质量，现采用加权平滑算法，使颜色逐渐过渡，以避免影像的模糊和明显的边界。该方法的主要思想为：在重叠部分由前一幅影像慢慢过渡到第二幅影像，即将影像重叠区域的像素值按一定的权值相加合成新的影像。具体算法按式(4-1)，式(4-2)。

#### 4.1.5 彩色影像

把彩色数字影像分解为红(R)，绿(G)，蓝(B)3个分量影像，在配准完成后，分别用基于影像融合的拼接缝消除法消除红，绿，蓝3个分量影像上的各自拼接缝现象，然后再把处理后的红，绿，蓝3个分量影像进行彩色合成，就可以得到消除了拼接缝现象的彩色影像。

### 4.2 实验与分析

本实验采用的数据是QuickBird全色正射影像，空间分辨率为0.61米。图4.3，图4.4为原始相邻影像，图4.5为经过直方图匹配后的拼接影像，虽然两者灰度基本一致，但拼接起来仍有人眼可辨细微拼接缝（考虑的显示效果，本图夸大处理），图4.6为经过融合后相邻影像拼接图，可以看出拼接影像无拼接缝存在，灰度连续过渡。实验效果比较好。





图 4.3 原图 (左)



图 4.4 原图 (右)



图 4.5 直方图匹配后拼接图

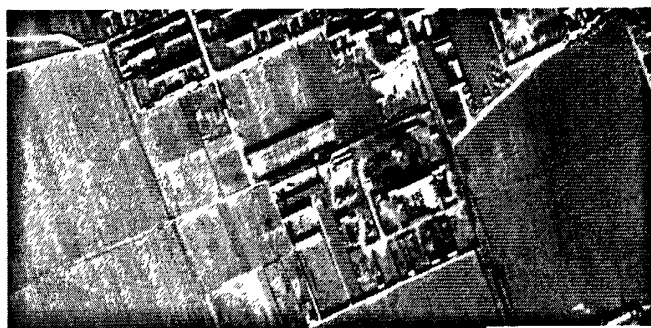


图 4.6 影像融合后拼接图

### 4.3 本章小结

本章介绍了基于加权影像融合的拼接缝消除法，该方法可以为全景图的制作提供了可靠的技术保证。其中的影像纠正精度和配准精度是保证影像合成质量的关键，因此本方法对影像的精度参数要求较高（误差不超过一个像素）。从实验效果看，用该方法拼接后影像灰度的平滑结果能够达到很好的视觉效果，在保持影像地物特性的同时，拼接缝消失，灰度自然缝合。

## 第五章 结论与展望

### 5.1 论文总结

虽然在航天遥感卫星高速发展的今天, 适合不同环境, 气候和地物特性的多光谱、多分辨率、多时相的遥感影像层出不穷, 然而由于传感器自身的物理特性和光学特性, 使单一传感器永远无法摆脱其信息含量匮乏的局限性。而多源影像融合技术能够充分利用多个传感器影像中包含的冗余信息和互补信息, 合成来自同一场景的多源影像信息, 形成更适合于人类感知或者进一步影像分析与理解的单一影像。它可明显改善单一传感器的不足, 提高系统的可靠性、鲁棒性以及影像信息的利用效率, 获取同一场景/目标的更为准确、更为全面、更为可靠的影像描述, 有利于对该影像的进一步的分析和理解。因此多源影像融合技术对于改善遥感卫星影像质量有着重要的理论与应用价值。

本文围绕着多源影像融合技术的理论和方法, 结合我在测绘中的实际工作, 对多源影像融合技术在改善遥感影像质量方面上的应用进行了深入、系统的研究, 主要进行了以下几方面的工作:

- 1、阐述了多源遥感影像融合的概念、特点、基本流程及层次划分; 实现了空间域的加权融合、HIS变换融合和PCA变换融合三种影像融合算法。并论述这三种算法的适用性和局限性。

- 2、阐述了小波变换的理论、步骤和特点; 详细介绍了其在多源遥感影像融合中的应用, 并与传统的HIS变换相结合, 实现了基于小波变换和HIS变换相结合的四种融合规则的融合算法; 在此基础上针对QuickBird影像研究了基于局部梯度加权融合和基于局部区域的活性测度匹配的两种融合规则的可行性, 取得了好的融合效果。

- 3、在分析总结现有影像质量评价方法的基础上, 指出将主观定性和客观定量评价相结合是评价融合影像质量和融合影像方法的有效途径。

- 4、通告研究在自然环境中云雾形成的物理特性和频率特性, 阐述了基于影像融合的厚云替代法的流程及步骤, 对影像局部镶嵌后产生的拼接缝问题, 实现了一种替换前直方图匹配加替换后强制改正的方法, 消除了影像上的厚云影响, 避

免了拼接缝的产生；对于薄云，阐述了利用小波变换的分解，划分出影像的高频和低频部分，根据薄云频率低的特点，通过增强高频、抑制低频的技术来消除薄云的影响。

5、针对序列遥感影像在影像拼接时由于灰度差异而出现的拼接缝问题，阐述了基于影像重叠的加权影像融合法的理论和步骤，并对影像的预处理和影像的精度提出了要求。

## 5.2 展望

由于多源遥感影像融合技术涉及到众多的科学研究和应用实践领域，涵盖范围广，内容繁多。论文只是在技术的表面进行了一些研究，深度不够，因此在许多地方还存在着不足和没有解决的问题，这是以后需要进一步研究的地方，主要有：

1、对于小波变换的研究，由于它是一种很好的时频分析工具，类型比较多（如双正交小波，小波包，多小波等），而本文只使用了正交小波，因此还有许多值得研究的地方，如何结合其它小波算法，选择出更好的基于变换域的融合算法。

2、在颜色匹配研究中，只考虑了影像整体色彩匹配以及替换后整体结果的色彩平衡，而没有考虑不同地貌的不同色彩特征以及同一类地物在不同时相、不同光谱、不同分辨率的遥感影像上的色彩差异。因此会出现整体色彩一致而局部相同地貌不同色彩的情况，这需要以后进一步研究。

3、在基于小波变换的薄云去除研究中，为了找出影像中薄云的低频成分，小波需要分解5—8层（效果会更好些），然而随着小波分解层数的增加，影像恢复后容易出现影像的分块效应。如何解决这一矛盾是以后工作的重点。

4、本文的融合研究仅限于像素级的融合，没有对特征级和决策级融合进行研究，而这两方面代表这融合研究的最高邻域，因此仍然需要在以后的工作和学习中进一步研究新的融合方法和融合规则，探讨如何实现智能融合、自适应融合，以满足遥感影像的时时融合和动态融合的需要。

## 致谢

两年半的研究生阶段即将结束，这是我军旅生涯中一段难忘的学习和生活经历。在这期间，由于本人年龄和家庭的原因，因此在生活和工作中曾遇到过许多问题和困难，直到现在我能够顺利完成学业以及论文的工作，离不开诸多良师益友的指导和帮助，在此我衷心地表示最真挚的感谢。

值此本文最终完成之际，由衷地感谢我的导师王保保教授，感谢他在这两年半来对我孜孜不倦的培养、悉心指导。王老师的身体力行，言传身教以及对科学事业的不懈追求和开拓进取的精神给我留下了难忘的印象。他，严谨求实，勤勉治学，学术思想活跃，学术观点新颖，对本学科发展方向有着很强的把握能力，在许多关键时刻都给我指明了正确的方向。所有这些都是我今后人生旅途的宝贵财富。

在攻读硕士学位的学习期间，还要感谢1410实验室的所有同学对我的帮助和照顾，是他们使我不仅在理论研究方面有了很大的提高，同时也使我感觉到年轻人特有的朝气和锐意进取的创新精神，这是一个令人难忘的集体。

最后，特别感谢我的爱人和孩子，感谢她们在几年学习阶段中，给予我的支持和默默的理解，使我无任何顾虑地面对各种困难和挑战。愿她们健康、快乐。



## 参考文献

- [1] 李朝锋, 曾生根. 遥感影像智能处理. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [2] 李玲玲. 像素级影像融合方法研究与应用. 华中科技大学博士学位论文, 2005.
- [3] 徐青, 张艳, 邢帅等. 遥感影像融合与分辨率增强技术. 北京: 科学出版社, 2007.
- [4] 郭华东. 感知天地—信息获取与处理技术. 北京: 科学出版社, 2000.
- [5] 张永生, 刘晨光, 张云彬等. 天基多源遥感信息融合. 北京: 科学出版社, 2005.
- [6] Thomopoulos C A. Sensor integration and data fusion. Proceedings of SPIE, 1989, 1198: 178-191
- [7] Pohl C, van Genderen J L, Multisensor Image Fusion in Remote Sensing, Concept. Methods and Applications[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(5):823-854.
- [8] Tsai V J D, Requency-Based Fusion of Multiresolution Images[A]. Proc of IGARSS' 03[A]. 2003. 3665-3667.
- [9] Aiazzi B, Alparone L, Baronti S, et al. Context-Driven Fusion of High Spatial and Spectral Resolution Images Based on Oversampled Multi-Resolution Analysis[J]. IEEE Trans on Geoscience Remote Sensing, 2002, 40(10):2300-2312.
- [10] Otazu X, Gonzalez-Audicana M, Fors O, et al. Introduction of Sensor Spectral Response into Image Fusion Methods. Application to Wavelet-Based Methods[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(10):2376-2385.
- [11] Sharma R, Pavel M Adaptive and statistical image fusion. 1996 Society for Information Display (SID) Symposium Digest of Technical Papers. San Jose, USA: SID Press 1996 969-972.
- [12] Lafert J. M, Heitz F, Perez P, et al. Hierarchical statistical models for the fusion of multiresolution image data. Proceedings of the international conference on computer vision 1995:908-913.
- [13] Xia Y, Leung H, Bose E. Neural data fusion algorithms based on a linearly constrained least square method. IEEE Trans. On Neural

Networks ,2002, 13:320-329

- [14] 陈传波, 金先级. 数字图像处理. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [15] 杨进, 刘建波. 一种改进的 HIS 图像融合新算法. 华中科技大学学报, 2007. 8: 21-24
- [16] Jia Y.H. Fusion TM and SAR images based on principal component analysis. Remote Sensing Technology and Application , 1998, 13(1):46-49.
- [17] Chavez P.S. Sides S.C, Anderson J.A. Comparison of three difference methods to merge multiresolution and multispectral data:Landsat TM and SPOT panchromatic Photogrammetric Engineering and Remote Sension , 1991, 57(3):295-303.
- [18] Chavez P.S, Kwarteng A.Y, Extracting spectral contrast in Landsat thematic mapper image data using selective principal component analysis .Photogram Engineering and Remote Sensing 1989, 55(3):339-348
- [19] 刘同明, 夏祖勋. 数据融合技术及其应用. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [20] 杨枝灵 王开. 数字影像获取 处理及实践应用. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
- [21] 李晖晖. 多传感器图像融合算法研究. 西北工业大学博士论文. 2006.
- [22] Stephane G Mallat "A Theory for Multiresolution Signal Decomposition :The Wavelet Representation" IEEE Trans On Pattern Analysis and Machine Intelligence ,Vol.11 ,NO,7 July 1989. 674-693.
- [23] Stephane Mallat"Wavelets for a vision ",Proceedings of The IEEE ,Vol .84.No.4, April 1996 604-641.
- [24] Jorge Nunez ,Xavier Otazu"Multiresolution-Based Image Fusion with additive Wavelet Decomposition" IEEE Trans On Geoscience and Remote Sensing , Vol. 37, NO. 3. May 1999, 1204-1211.
- [25] (美) Ingrid Daubechies (李建平, 杨万年译). 小波十讲. 北京: 国防工业出版社.
- [26] Mallat S .A theory for m ultiresolution signal decomposition:The waveletrepresentation[J]. IEEE Trans, PAMI, 1989, 11(7):674-693.
- [27] H. Li, B.S. Manjunath, S.K. Mitra. Multisensor image fusion using the wavelet transform. *Graphical Models and Image Processing*, 1995, 57(3):
- [28] 董卫军. 基于小波变换的图像处理技术研究. 西北大学博士论文. 2006.
- [29] 张跃进, 谢昕. 基于 HIS 和小波变换的遥感影像融合方法研究. 华东交通大学学报,

2008. 2: 49-52.
- [30] 杨旭红. 多源遥感图像像素级融合上海交通大学博士论文. 2006.
- [31] 余二永, 王润生. 小波变换实现多光谱影像融合增强. 计算机工程与科学, 2001  
1. 23(1):47-50.
- [32] Zhong Zhang, Rick S Blum. A Categorization of Multiscale-Decomposition  
-Base Image Fusion Schemes with a Performance Study for a Digital  
Camera Application [J], proceedings of the  
IEEE, 1999, 87(8):1315-1326.
- [33] 毛士艺, 赵巍. 多传感器影像融合技术综述. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(5):512-  
518.
- [34] 覃征, 鲍复民. 多传感器影像融合及其应用综述. 微电子学与计算机, 2004, 21(4): 1-5.
- [35] 王海晖. 不同遥感影像的融合与应用. 华中科技大学博士论文, 2003.
- [36] 张国坤. QuickBird数字遥感图像光谱辐射定标. 光谱学与光谱分析, 2008. 3.
- [37] 方勇, 常本义. 联合应用多传感器影像消除云层遮挡影响的研究. 中国图象图形学报,  
2001. 2: 138-141.
- [38] 王惠. 多源遥感影像在目标图集制作中的应用. 中国人民解放军信息工程大学测绘学院  
硕士论文, 2001.
- [39] 李志林, 朱庆. 数字高程模型. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 2000.
- [40] 章毓晋. 图像处理和分析. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [41] 潘俊. 立体正射影像无缝镶嵌技术的研究. 武汉大学硕士论文, 2005. 5.
- [42] 朱述龙, 钱曾波. 遥感影像镶嵌时拼接缝的消除方法. 遥感学报, 2002. 5.
- [43] 曹爽. 高分辨率遥感影像去云方法研究. 河海大学博士论文, 2006.
- [44] 朱锡芳, 吴峰. 基于Mallat算法遥感影像去云雾处理的改进方法. 遥感学报, 2007. 3.





## 研究成果

在硕士研究生期间取得的研究成果如下：

### 一、参与科研情况

参与了总参测绘局项目“xxxxxx 中数字影像基准图质量评估与控制”的研制

### 二、发表论文情况

1 卢汉明,何绳青 超分辨率重建技术的原理及应用 测绘信息技术 2007(3)

2 卢汉明 赵红 基于同态滤波的薄云处理方法 测绘信息技术 2008 (1)

