

遥感图像处理技术

遥感图像基础

遥感图像的校正与增强技术

遥感图像的配准与镶嵌技术

遥感图像融合技术

遥感图像目视判读与自动分类技术

5.1 遥感图像基础

地物目标反射或发射的电磁波经过大气到达遥感传感器,这些包含有地物目标信息的电磁能量被遥感传感器接收和记录下来,形成遥感数据。在大部分遥感系统中,遥感数据以图像的形式记录下来。遥感图像的有效利用是遥感系统效能的决定性因素之一,是遥感技术中的重点研究领域。遥感传感器获得的原始图像通常需要进一步处理,其目的是对遥感图像进行加工和改造,使之有利于遥感图像的分析与判读。用于该目的的技术称为**遥感图像处理**。遥感图像处理包括各种针对不同目的和任务的处理操作,如图像数字化与量化、图像校正、图像增强、图像分类和图像融合等。

需要注意的是遥感图像处理技术与通用图像处理技术之间的关系。遥感图像处理是以通用图像处理技术为基础的,通用图像处理的很多方法和手段都可以直接用于遥感图像处理任务中。但是遥感图像处理也有其特殊性,属于特定应用领域的专门处理技术,需要结合遥感任务的应用目的和具体特性来研究。与通用图像处理技术相比较,遥感图像处理在很大程度上依赖于对遥感地物特性和信息的先验知识。

5.1.1 遥感图像的数据表示

遥感图像可以表示为定义在二维空间坐标上的函数: $y=f(x,y)$,函数值表示在空间坐标位置上传感器所接收到的电磁能量,或者说是图像强度。对于多光谱图像则可用下标 l 来区分其光谱特性,写成 $f_l(x,y)$;对同一地区在不同时间获取的图像,则可用下标来区分其时间特性 $f_t(x,y)$ 。

从空间坐标和函数值的连续性出发,可以把遥感图像分成光学图像(连续图像)和数

字图像两种类型。

1. 光学图像

采用传统胶卷相机拍摄的遥感图像是光学图像,如常规胶片或透明正片、负片等。光学图像空间坐标是连续变化的,而函数值可以看成是连续的光能量函数记录,随坐标 (x,y) 变化而变化。

2. 数字图像

光学图像因为其自变量和函数值的连续,不适合计算机处理,所以在现代遥感技术中,一般将光学图像转化为数字图像进行处理。数字图像是一个定义在二维离散坐标上的离散函数,相对于光学图像,它在空间坐标 (x,y) 和函数值上都已离散化:

$$\begin{aligned}x &= x_0 + m\Delta x \\y &= y_0 + n\Delta y\end{aligned}\quad (5.1)$$

其中 $\Delta x, \Delta y$ 为离散化的坐标间隔,同时 $f(x,y)$ 也为离散值。

数字图像可用一个矩阵表示:

$$f(x,y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & f(0,2) & \cdots & f(0,n-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & f(1,2) & \cdots & f(1,n-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(m-1,0) & f(m-1,1) & f(m-1,2) & \cdots & f(m-1,n-1) \end{bmatrix}\quad (5.2)$$

矩阵中每个元素称为像素。

3. 光学图像与数字图像的相互转换

1) 光学图像转换为数字图像

光学图像转换成数字图像实际上图像数字化的过程,不仅在空间坐标上要离散化,并且在函数幅值上也要离散化。

图像数字化分为两个步骤,一是空间坐标上的离散化,称为采样,二是函数幅值上的离散化,称为量化。采样从本质上来说,是利用二维周期采样序列从连续信号中抽取一系列的离散值得到离散坐标上的信号值。一般情况下,二维周期采样是通过二维正交的采样结构来实现的。

设 x,y 方向的取样间隔分别为 $\Delta x, \Delta y$,则取样位置分别为

$$x = m\Delta x, \quad y = n\Delta y \quad (m, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)\quad (5.3)$$

则取样周期函数为

$$\delta(x,y) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(x - m\Delta x, y - n\Delta y)\quad (5.4)$$

则采样输出图像为

$$s(m,n) = f(x,y) \cdot \delta(x,y)\quad (5.5)$$

量化是指用有限个状态来表示连续采样值的过程。如果每个采样值单独量化,则称为标量量化;如果一组采样值同时量化用有限个状态表示,则称为矢量量化。

标量量化器 $Q(\cdot)$ 如下所示:

$$Q(s) = r_i, \quad s \in (d_{i-1}, d_i], \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (5.6)$$

其中, L 表示量化状态数。式(5.6)表示如果连续采样值 s 处于范围 $(d_{i-1}, d_i]$ 内, 量化器输出对应的量化状态值 r_i 。

2) 数字图像转换为光学图像

数字图像转换为光学图像实际上是采样过程的逆过程, 将空间离散信号变成空间连续信号。数字图像转换为光学图像一般有两种方式, 一种是通过显示终端输出, 这些设备包括显示器、电子束或激光束成像记录仪等, 这些设备输出光学图像的基本原理是通过数模转换设备将数字信号以模拟方式表现, 如显示器就是将数字信号以蓝、绿、红三色的不同强度通过电子束打在荧光屏上表现出来, 一个数字图像的像元如(70, 60, 80)以红色电子束强度为相对 70 打在荧光屏上, 同理, 绿色、蓝色的电子束也打在同一个位置, 3 个颜色的综合就显示出该像元应有的颜色。电子束或激光束成像记录仪工作原理与显示器相似。另一种是通过照相或打印的方式输出, 如早期的遥感图像处理设备中包含的屏幕照相设备和目前的彩色喷墨打印机。

5.1.2 遥感图像处理的涵盖范围与分类

1. 遥感图像处理的涵盖范围

遥感图像处理包括多种多样的处理任务, 常见的处理功能包括以下几项。

1) 遥感图像校正

遥感图像校正是指纠正变形的图像数据或低质量的图像数据, 从而更加真实地反映其情景。图像校正主要包括辐射校正与几何校正两种。

2) 遥感图像增强

遥感图像增强是通过增加图像中各某些特征在外观上的反差来提高图像的目视解译性能。主要包括对比度变换、空间滤波、彩色变换、图像运算和多光谱变换等。图像校正以消除伴随观测而产生的误差与畸变, 使遥感观测数据更接近于真实值为主要目的的处理, 而图像增强则把重点放在使分析者能从视觉上便于识别图像内容之上。

3) 遥感图像镶嵌

遥感图像镶嵌是将两幅或多幅数字图像(它们有可能是在不同的摄影条件下获取的)拼接在一起, 构成一幅更大范围的遥感图像。

4) 遥感图像融合

遥感图像融合是将多源遥感数据在统一的地理坐标系中采用一定算法生成一组新的信息或合成图像的过程。遥感图像融合将多种遥感平台、多时相遥感数据之间以及遥感数据与非遥感数据之间的信息进行组合匹配、信息补充, 融合后的数据更有利于综合分析。

5) 遥感图像自动判读

遥感图像自动判读是根据遥感图像数据特征的差异和变化, 通过计算机处理, 自动输出地物目标的识别分类结果。它是计算机模式识别技术在遥感领域的具体应用, 可提

高从遥感数据中提取信息的速度与客观性。自动判读的方法主要包括监督分类法和非监督分类法。

2. 遥感图像处理的分类

1) 遥感图像光学处理方法

遥感图像光学处理方法是针对光学图像,依靠光学仪器或电子光学仪器,用光学方法进行图像处理,实现处理目的。遥感图像光学处理精度高,反映目标地物真实,图像目视效果好,是遥感图像处理的重要方法之一。

2) 遥感图像数字处理方法

随着计算机技术的发展,计算机处理技术已经越来越多地应用于遥感图像处理之中。在光学图像转换为数字图像之后,或者通过遥感传感器直接获得数字遥感图像之后,就可以利用计算机对遥感图像数据进行处理,这种处理技术称为遥感图像数字处理方法。数字处理方法操作简单,能够很容易地构建满足特定处理任务的遥感图像处理系统,同时随着计算机硬件和软件技术的发展,处理效率越来越高,可以准确地提取所需要的遥感信息,同时还可以和其他计算机系统(如地理信息系统和GPS系统)无缝集成,形成3S技术的综合应用。所以目前来说,遥感图像数字处理方法已经逐步取代光学方法,成为遥感图像处理的主流技术手段。

3. 遥感图像光学处理方法简介

下面简要说明遥感图像光学处理的几个方法。

1) 加色法彩色合成

加色法彩色合成是根据加色法原理制作成各种合成仪器,选用不同波段的正片或负片组合进行彩色合成。根据仪器类别可以将加色法彩色合成分为以下两种。

(1) 合成仪法:是将不同波段的黑白透明片分别放入有红、绿、蓝滤光片的光学投影通道中精确配准和重叠,生成彩色影像的过程。采用的合成仪有两类,一类是单纯光学合成系统,另一类是计算机控制式的屏幕合成系统,但原理相同。

(2) 分层曝光法:指利用彩色胶片具有的三层乳剂,使每一层乳剂依次曝光的方法。采用的仪器为单通道投影仪或放大机。每次放入一个波段的透明片,依次使用红、绿、蓝滤光片,分3次或更多次对胶片或相纸曝光,使感红层、感绿层和感蓝层依次感光。最后冲洗成彩色片。这一技术的关键是保证多次曝光时,多张黑白透明片的影像位置完全重合。3个滤色片要使其在色度图上组成的颜色三角形最大,以便合成后的色调丰富。

2) 减色法彩色合成

减色法彩色合成利用减色法原理,利用白光经过多种乳剂或染料以及滤色片、透明片等材质反射或透射出来的光线合成彩色。根据不同的工艺和技术可以分为染印法和印刷法。染印法是一种使用特别浮雕片、接收纸和冲显染印药制作影色合成影像的方法。浮雕片是一种特制的感光胶片,经曝光和暗室处理后能吸附酸性颜料。接收纸是一种不感光的特殊纸张,能吸收浮雕片上的酸性颜料。染印法合成是把3种浮雕

片上的染料先后转印到不透明的接收纸上,或分别转印在 3 张透明胶片上重叠起来阅读。印刷法是利用普通胶印设备,直接使用不同波段的遥感底片和黄、品红、青 3 种油墨,经分色、加网和制版,套印成影色合成图像。该方法工序简单,可大量生产。重氮法是利用重氮盐的化学反应处理彩色单波段影像透明片的方法,各波段图像可重叠阅读。

3) 相关掩膜处理方法

掩膜处理指对于几何位置完全配准的原片,利用感光条件和摄影处理的差别制成不同密度、不同反差的正片或负片(称为模片),通过它们的各种不同叠加方案改变原有影像的显示效果,达到信息增强目的的方法。这种处理不能增加原片所记录的信息,但可以将原先分辨不清或不够突出的目标突出出来,把不必要的信息变得不太清楚,以达到增强主题的目的。具体方法有改变对比度、显示动态变化、比值影像、边缘突出雕刻、密度分层和专题抽取等。

4) 光学信息处理

利用光学信息处理系统,即一系列光学透镜按一定规律构成的系统,可以实现对输入数据并行的线性变换,适宜作二维影像处理,在遥感光学处理中主要研究相干光学的处理过程,较多地应用于干涉和衍射知识。

5.1.3 遥感图像数字处理的基础知识

1. 颜色的描述与颜色立体

遥感图像像素颜色一般采用明度、色调和饱和度 3 个指标来描述。色调是颜色的

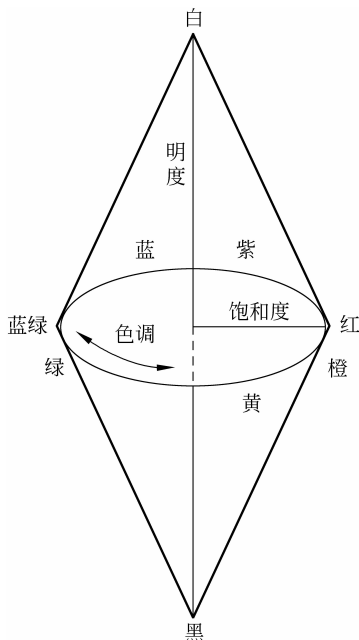


图 5.1 颜色立体

基本特征或表现,是色彩彼此相互区分的特性,如红色和绿色。色调由混合光中起主导作用的波长所决定。各种彩色依据它在心理上的相似程度排列,可构成一个环形,称色环。在色环上,凡相邻两种不同波长的色光相混合,都会产生位于两者中间的另外一种颜色。例如红与黄相混合会出现橙色。饱和度描述了色彩纯洁的程度,在一个颜色中,起主导作用的波长越强,表现出的色调越纯,也就是该颜色的饱和度越大。明度指构成该颜色的全部光波的总强度,反映了人眼对光源或物体明亮程度的感觉。物体反射率越高,明度就越高。白色明度最大,当其明度减弱时,表现出一系列灰色,当最终达到全部黑暗时,视觉消失。

颜色的描述也可以采用颜色立体来描述,如图 5.1 所示。在颜色立体中,中间的垂直轴代表明度,中间的水平面的圆周代表色调,圆周上的半径大小代表饱和度。

2. 颜色对比与亮度对比

在图像中,相邻区域上不同颜色之间的相互影响叫颜色对比。两种颜色相互影响的结果,使每种颜色会向其影响色的补色变化。在两种颜色的边界,对比现象更为明显。

与颜色对比相关的是亮度对比,亮度对比描述了图像中所关注对象相对于背景的明亮程度。可以用式(5.7)描述:

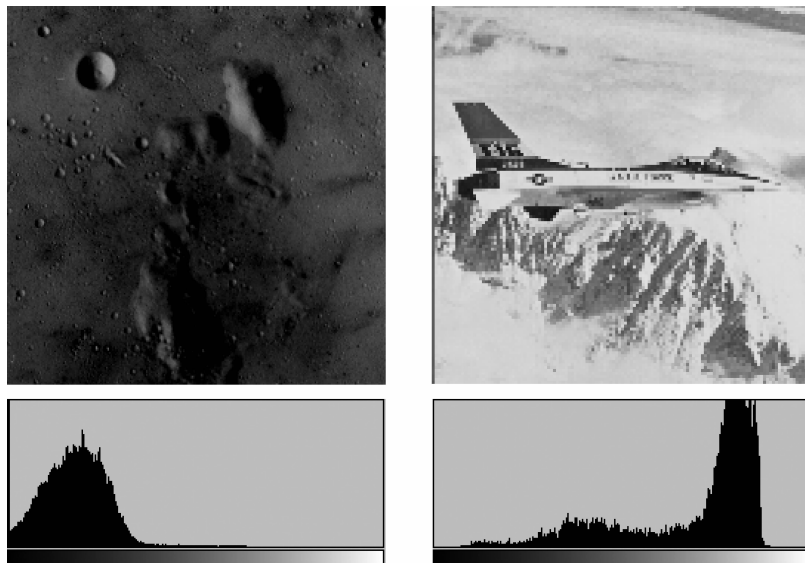
$$C = \frac{|L_{\text{对象}} - L_{\text{背景}}|}{L_{\text{背景}}} \quad (5.7)$$

改变对比度,可以提高图像的视觉效果。

3. 数字图像的直方图

数字图像直方图是以每个像素为单位,表示图像中各亮度值(或亮度值区间)上像素出现频率的分布图。在直方图中,横轴是像素亮度值等级,纵轴是对应像素亮度值等级上的像素个数或者频率。

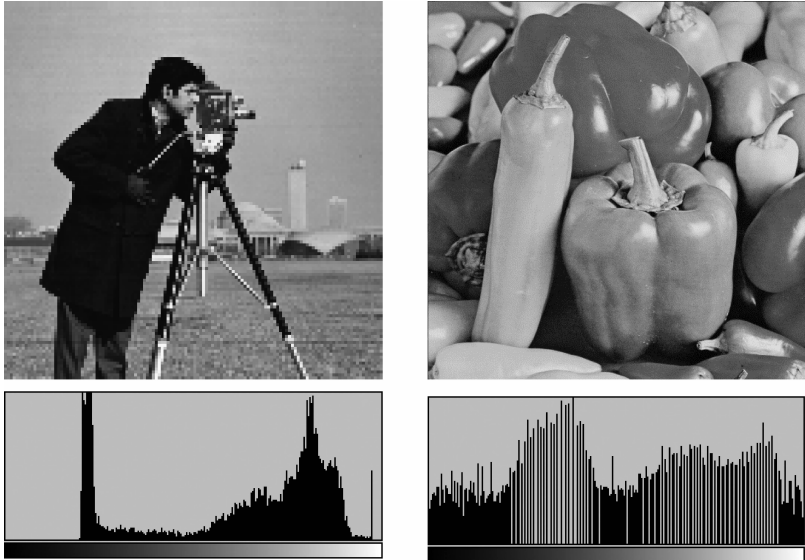
通过直方图可以直观地了解图像的亮度值分布范围、峰值的位置以及亮度值分布的离散程度。直方图的曲线可以反映图像的质量差异。一般说来,直方图表现为正态分布时,图像反差适中,亮度分布均匀,层次丰富,图像质量高。而图像直方图为偏态分布时,图像偏亮或偏暗,层次少,质量较差。如图 5.2 所示,不同视觉质量图像的直方图也表现不同。



(a) 主体在灰度低端, 图像较暗, 对比度小, 细节不明显

(b) 主体在灰度级高端, 图像较亮, 对比度小, 细节不明显

图 5.2 不同视觉质量图像的直方图



(c) 主体集中在灰度级两端，
图像对比鲜明，但细节不明显

(d) 灰度分布均匀，图像清晰，细节丰富

图 5.2 (续)

4. 数字图像的变换分析

在数字图像处理中，常常将图像从空间域转换到另一种表示域，利用这种域的特性来处理或分析图像。将空间域的处理转换为变换域的处理，不仅可减少计算量，而且在很多时候这种表示域的转换会使得图像的某些特征或者信息更加突出，更加有利于处理，能够获得更有效的处理结果。这种图像在表示域之间的转换过程称为图像变换分析。遥感影像处理中的图像变换不仅是数值层面上的空间转换，每一种转换都有其物理层面上的特定的意义。遥感图像处理中的常见图像变换方法有傅里叶变换、离散余弦变换、K-L 变换、KT 变换和小波变换等。

1) 傅里叶变换

傅里叶变换是图像处理中最常用的变换之一，是进行图像处理和有力工具。傅里叶变换是一种纯频域分析，它可将一般函数 $f(x)$ 表示为一簇标准基函数的加权求和，具体定义如下。

一维傅里叶变换：

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j2\pi\omega t} dt \quad (5.8)$$

一维傅里叶逆变换：

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{j2\pi\omega t} d\omega \quad (5.9)$$

图像的频率是表征图像中灰度变化剧烈程度的指标，是灰度在平面空间上的梯度。例如，大面积的沙漠在图像中是一片灰度变化缓慢的区域，对应的频率值很低；而地表属

性变换剧烈的边缘区域在图像中是一片灰度变化剧烈的区域,对应的频率值较高。从纯粹的数学意义上看,傅里叶变换是将一个函数转换为一系列周期函数来处理的。从物理效果看,傅里叶变换是将图像从空间域转换到频率域,其逆变换是将图像从频率域转换到空间域。

傅里叶变换涉及复数运算,在实际应用中受到限制。在很多应用中,采用 DCT 变换来代替傅里叶变换,具体的变换公式如下。

DCT 变换公式:

$$F(u) = \sqrt{\frac{2}{N}} \cdot C(u) \sum_{i=0}^{N-1} f(i) \cos \frac{(2i+1)u\pi}{2N} \quad (5.10)$$

DCT 逆变换公式:

$$f(i) = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{u=0}^{N-1} C(u) F(u) \cos \frac{(2i+1)u\pi}{2N} \quad (5.11)$$

其中

$$C(n) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & n = 0 \\ 1, & n > 0 \end{cases}$$

2) K-L 变换

K-L 变换又称作主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)。遥感多光谱影像波段多,一些波段的遥感数据之间有不同程度的相关性(光谱反射的相关性,以及地形、遥感器波段间的重叠),造成了数据冗余。K-L 变换的作用就是保留主要信息,降低数据量,从而达到增强或提取某些有用的信息的目的。

K-L 变换的定义公式为

$$g = A(X - m_f) \quad (5.12)$$

其中, $m_f = E\{X\}$, $C_f = E\{(X - m_f)(X - m_f)^T\}$ 。

e_i 和 λ_i 分别是 C_f 的特征向量和特征值,其中 $i=1, 2, \dots, N^2$, 假设 $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_{N^2}$, 则

$$A = \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_2^T \\ \vdots \\ e_{N^2}^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \cdots & e_{1N^2} \\ e_{21} & e_{22} & \cdots & e_{2N^2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{N^2 1} & e_{N^2 2} & \cdots & e_{N^2 N^2} \end{bmatrix}$$

从几何意义来看,变换后的主分量空间坐标系与变换前的多光谱空间坐标系相比,旋转了一个角度,而且新的坐标系的坐标轴一定指向数据信息量较大的方向。如图 5.3 所示,以二维空间为例,假定某图像像元的分布为椭圆状,那么经过旋转后新坐标系的坐标轴一定分别沿椭圆的长半轴和短半轴方向,椭圆的长半轴即为主分量,因为长半轴这一方向信息量最大。

基于上述特点,在遥感数据处理时常常用 K-L 变换作数据分析前的预处理,可以实现数据压缩和图像增强的效果。在遥感图像分类中,常常利用主成分分析算法来消除特征向量中各特征之间的相关性,并进行特征选择。

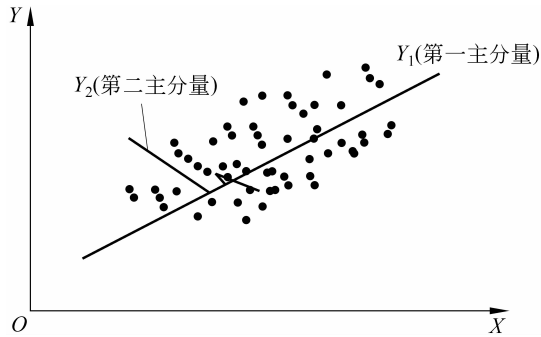
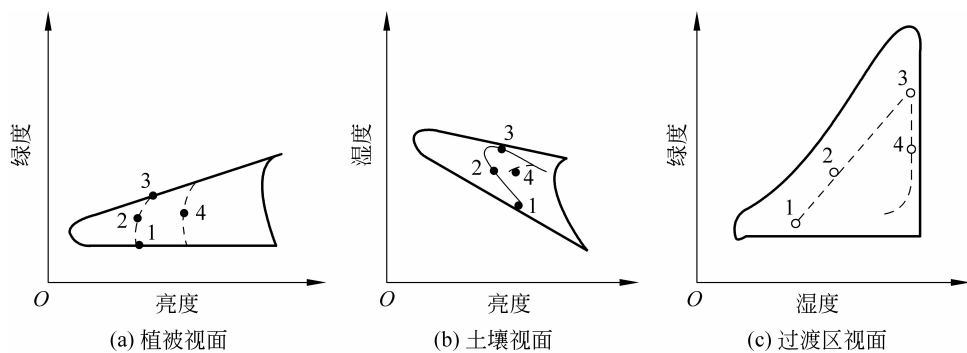


图 5.3 K-L 变换示意图

3) K-T 变换

K-T 变换又称缨帽变换。1976 年, Kauth 和 Thomas 发现了一种线性变换, 它使坐标空间发生旋转, 但旋转后的坐标轴不是指向主分量的方向, 而是指向另外的方向, 这些方向与地面景物有密切的关系, 特别是与植物生长过程和土壤有关。这种变换既可以实现信息压缩, 又可以帮助解译分析农业特征, 因此有很大的实际应用意义。缨帽变换也是一种线性变换, 它也遵循一般线性变换的形式。目前对这个变换的研究主要集中在 MSS 与 TM 两种遥感数据的应用分析方面。TM 数据经 K-T 变换后的景观意义可通过图 5.4 形象地说明, 图中 1、2、3、4 分别代表作物从发芽到枯黄生长的不同阶段。绿度与亮度组成的二维空间称为植被视面, 它反映了植被从破土发芽到生长旺盛阶段随叶面积增加而绿度值增加, 之后开始成熟枯黄, 绿度也逐渐降到最低点。湿度与亮度组成的平面为土壤视面, 绿度与湿度组成的平面称过渡区视面, 都不同程度地反映了作物生长过程中植被与土壤的变化信息。



1. 裸土(种子破土前); 2. 生长; 3. 植被最大覆盖; 4. 衰老

图 5.4 K-T 变换的景观意义

4) 小波变换

小波变换是当前应用数学和工程学科中一个迅速发展的新领域。与傅里叶变换相比, 小波变换是时间(空间)频率的局部化分析, 它通过伸缩平移运算对信号(函数)逐步进行多尺度细化, 最终达到高频处时间细分, 低频处频率细分, 能自动适应时频信号分析

的要求,从而可聚焦到信号的任意细节,解决了傅里叶变换的困难问题,成为继傅里叶变换以来在科学方法上的重大突破,又被称为“数学显微镜”^[1]。

5.1.4 遥感图像数字处理系统组成

一个完整的遥感图像数字处理系统应包括硬件和软件两大部分。硬件是指进行遥感图像数字处理所必须具备的硬件设备,这些设备利用各种电子部件、光学部件和机械部件,按照遥感图像处理系统的要求组成。软件是指为完成遥感图像处理任务所编制的程序系统,这套处理程序在硬件的支持下运行于特定的操作系统之上,构成完整的遥感图像处理软件系统。

1. 遥感图像数字处理硬件系统

遥感数字图像处理硬件系统主要由输入设备、输出设备、计算设备、存储设备以及系统操作台等几部分组成。随着计算机硬件技术的快速发展,一些原来独立的设备也集成起来,成为电子计算机的一个组成部分,所以硬件系统的范围划分也变得模糊起来。但是从功能上来说,一个完整的遥感图像数字处理系统的硬件系统应该包括以下几个部分。

1) 输入设备

输入设备完成遥感数据输入计算机的功能。常见的输入设备有磁带机、磁盘机(包括光盘)、胶片扫描仪、析像器和数字化仪等。根据遥感数据类型的不同,输入设备也不相同。磁带机和磁盘机直接将存储在磁带、磁盘或光盘上的遥感数字图像输入计算机。胶片扫描仪和析像器主要将光学遥感图像转换成数字遥感图像,然后输入计算机进行处理。数字化仪将纸质地图变换成数字形式输入计算机进行处理。胶片扫描仪、析像器及数字化仪统称为数字化器,实际上是将模拟的遥感数据转换为数字形式。

2) 输出设备

遥感图像处理系统处理后的结果数据要显示或者保存到输出设备中。常见输出设备有磁带机、磁盘机(包括光盘)、彩色显示器、绘图仪和打印机等。磁带机和磁盘机将处理结果以数字形式存储在磁带、磁盘或光盘上。彩色显示器、绘图仪和打印机完成数字图像向光学图像的转换,处理结果以光学图像形式直观地表现出来,同时显示器还作为人机交互的接口设备实现人对计算机遥感图像处理的控制。

3) 计算设备

计算设备是遥感图像处理系统的核心,完成遥感数据的处理任务。计算性能的高低决定了处理的速度及效果。

在遥感图像处理任务中,计算设备的应用也随着电子计算机的发展而发展。在20世纪70年代以前,遥感图像处理一般是在已有的大型计算机上配备必要的输入输出设备,利用图像处理软件来完成图像处理与分析功能。到了20世纪80年代初期,除了主机之外,还配备了专用的图像处理机,将许多图像处理算法固化以加速遥感图像处理。在20世纪90年代初,遥感图像处理系统主机绝大多数采用32位的超小型机,处理速度进一步提高。而到了现在,遥感图像处理系统按照处理规模的大小采用不同类型的计算机。一方面计算机朝着巨型化发展,如各种超级计算机,这些计算机也被气象、地质等部