



测绘地理信息科技出版资金资助

CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

小波变换及在 遥感图像处理中的应用

Wavelet Transform and Its Application in
Remote Sensing Image Processing

耿则勋 邢帅 魏小峰 编著



测绘出版社

测绘地理信息科技出版资金资助

小波变换及在遥感图像处理中的应用

Wavelet Transform and Its Application in Remote Sensing Image Processing

耿则勋 邢帅 魏小峰 编著

测绘出版社

·北京·

© 耿则勋 邢 帅 魏小峰 2016

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内 容 简 介

本书是作者在长期研究与讲授小波变换理论与应用的基础上形成的,本着通俗易懂与便于工程实现的理念,依次介绍了由傅里叶变换到小波变换的发展,连续小波变换的定义与特点,多分辨率分析与离散小波变换,离散小波变换与两子带滤波器组,离散小波变换的上升型实现以及小波变换在遥感图像处理中的应用等内容。

本书内容分析详细,说理清楚,应用实例具体并易于工程实现,可作为遥感图像处理以及相关专业大学本科高年级学生和研究生“小波变换理论及应用”课程的教材或教辅图书,也可作为工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

小波变换及在遥感图像处理中的应用/耿则勋,邢帅,魏小峰编著. — 北京:测绘出版社,2016.11

ISBN 978-7-5030-3995-9

I. ①小… II. ①耿… ②邢… ③魏… III. ①小波理论—应用—遥感图象—图象处理 IV. ①TP75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 278930 号

责任编辑	雷秀丽	封面设计	李伟	责任校对	程铁柱	责任印制	陈超
出版发行	测绘出版社			电 话	010-83543956(发行部)		
地 址	北京市西城区三里河路 50 号				010-68531609(门市部)		
邮政编码	100045				010-68531363(编辑部)		
电子邮箱	smp@sinomaps.com			网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司			经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm			彩 插	3		
印 张	16.25			字 数	334 千字		
版 次	2016 年 11 月第 1 版			印 次	2016 年 11 月第 1 次印刷		
印 数	0001-1000			定 价	48.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-3995-9

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

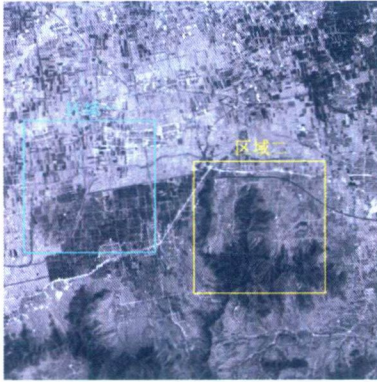
小波变换是傅里叶变换的发展,它能实现信号的时频分解或时频表示,能同时在时间和频率两个维度对信号加以分析,是一种强有力的信号处理工具。自从20世纪80年代中期出现小波变换理论以来,该理论得到了极其广泛深入的研究并得到了大量的研究成果,小波变换也成功应用于图像处理、信号分析、量子力学、理论物理、医学成像与诊断、地震探测数据处理以及分析化学等许多领域,有些已取得优秀的应用成果,如基于小波变换的国际静止及活动图像压缩标准 JPEG、MPEG 等。

本书是在作者多年研究与讲授小波变换理论与应用课程的基础上完成的,旨在介绍小波变换的基本理论以及工程实现,并将作者把小波理论在遥感图像处理中的应用成果介绍给读者。全书内容的撰写与安排力争做到:第一,通俗易懂,便于自学。书中的内容安排按照傅里叶变换理论的局限与发展,小波变换理论的提出与完善,连续小波变换与参数离散变换,多分辨率分析与离散小波变换,离散小波变换与两子带滤波器组以及离散小波变换的上升型实现等顺序,与小波变换理论的形成与完善过程吻合一致,最后结合作者的研究成果介绍了小波变换在遥感图像处理中的应用,叙述方式与结构均是在长期教学过程中积累的经验基础上形成,与学生或其他初学者的学习模式和思路吻合较好,适宜于自学。第二,行文力争做到内容逻辑严谨、连贯正确,内容思路清晰。如对第1章绪论的撰写,作者阅读了丰富翔实的原始参考文献,深入分析了傅里叶变换的不足、短时傅里叶变换的限制,然后结合直观意义明显的大量实例引入小波变换的理论,使得初学者能在自然的过渡中理解小波变换理论。在第3章多分辨率分析内容中,通过作者独特的设计与分析将离散小波变换与两子带滤波器组自然地结合起来。进而通过多相矩阵的因子分解,自然过渡到小波变换的上升型实现,也给整数小波变换、第二代小波变换的出现做了铺垫。第三,书中体现了作者对小波变换理论及应用研究的成果。如针对D小波的离散小波变换过程中的边界数据处理,给出了一般性的处理方法。在小波变换理论的应用方面,给出了作者将小波工具应用于遥感图像融合、遥感图像恢复以及遥感图像压缩等方面的研究成果,提出了遥感图像有损压缩对图像量测精度影响的度量方法,并给出了实验结果。在这些应用中,相关理论分析透彻,应用算法均有详细、可实现的具体步骤,便于学习者软件编程。

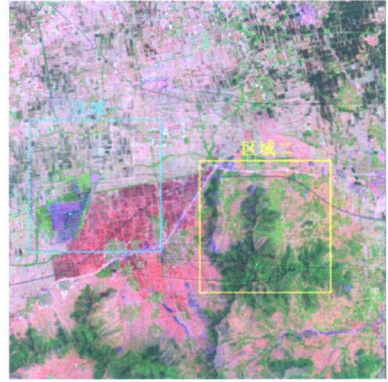
全书共分9章,其中第1~4、5、9章由耿则勋编写,第6、7章由魏小峰编写,第8章由邢帅编写。全书由耿则勋统稿。

本书的完成凝结了多人的指导和帮助。感谢解放军信息工程大学地理空间信息学院张晓森主任以及训练部参谋对本书出版的关心与支持。感谢解放军信息工程大学地理空间信息学院航空航天摄影测量教研室龚志辉主任对本书出版的支持与帮助。本书在撰写过程中参考借鉴了大量国内外同行的研究成果及文献,谨在此表示诚挚的敬意与真诚的感谢。

由于作者学术视野、专业水平和研究深度所限,书中难免出现错误或不严谨之处,敬请专家同行以及广大读者批评指正。

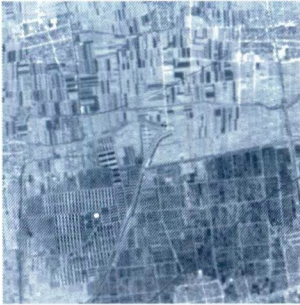


(a) TM第8波段图像



(b) TM2、4、7波段合成图像

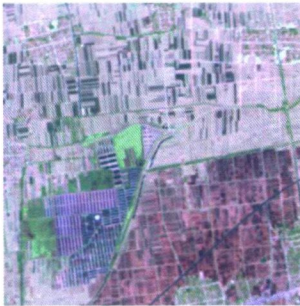
图 8.6 原始图像



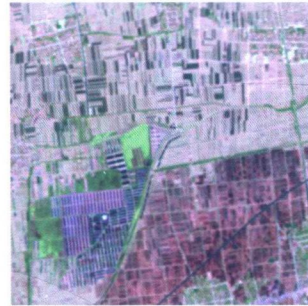
(a) TM第8波段图像



(b) TM2、4、7波段合成图像



(c) 直接加权平均融合图像



(d) 高通滤波融合图像

图 8.7 区域一的系列融合结果显示



(e) Broye变换融合图像



(f) IHS变换融合图像



(g) 主成分分析变换融合图像



(h) YIQ变换融合图像



(i) Lab变换融合图像



(j) 小波变换融合图像

图 8.7 (续) 区域一的系列融合结果显示



(a) TM第8波段图像



(b) TM2、4、7波段合成图像

图 8.8 区域二的系列融合结果显示



(c) 直接加权平均融合图像



(d) 高通滤波融合图像



(e) Brovey变换融合图像



(f) IHS变换融合图像



(g) 主成分分析变换融合图像



(h) YIQ变换融合图像



(i) Lab变换融合图像



(j) 小波变换融合图像

图 8.8 (续) 区域二的系列融合结果显示

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 傅里叶变换及其局限性	1
1.2 短时傅里叶变换的定义及性质	9
1.3 小波变换概述	17
1.4 数学基础知识	24
1.5 卷积与滤波	30
第 2 章 连续小波变换的定义与特点	32
2.1 连续小波变换的定义	32
2.2 连续小波变换的逆变换及对基本小波的要求	35
2.3 连续小波变换的时频特点	37
2.4 连续小波变换的计算	41
2.5 几种常用的基本小波	47
第 3 章 多分辨率分析与离散小波变换	51
3.1 多分辨率分析的定义	52
3.2 尺度函数与小波函数	56
3.3 一维离散信号的小波变换	63
3.4 二维多分辨率分析与离散小波变换	66
3.5 离散信号小波变换的两子带滤波器组表示	71
3.6 紧支撑小波的构造	76
3.7 Daubechies 正交小波变换的边界数据处理	80
第 4 章 离散小波变换与两子带滤波器组	87
4.1 离散序列的 Z 变换	87
4.2 两子带滤波器组的基本理论	92
4.3 离散正交小波变换的两子带滤波器组	96
4.4 小波变换的多孔算法	99
4.5 双正交小波与双正交滤波器组	101

第 5 章 小波变换的上升型实现	111
5.1 小波变换的多相矩阵表示	112
5.2 小波变换的上升型实现	116
5.3 双正交小波变换的上升型实现	123
5.4 小波变换多项矩阵的因子分解	128
5.5 整数小波变换	134
第 6 章 小波变换在遥感图像数字水印中的应用	143
6.1 数字水印基本理论	143
6.2 小波域扩频水印算法	147
6.3 小波域量化水印算法	150
6.4 小波域抗几何攻击水印算法	153
6.5 基于双数复数小波变换的水印算法	157
第 7 章 基于小波变换的图像复原	164
7.1 图像复原基本理论	164
7.2 图像的小波域统计模型	168
7.3 小波域图像复原理论与方法	171
第 8 章 小波变换在遥感图像融合中的应用	186
8.1 遥感图像融合概述	186
8.2 基于多尺度边缘增强的图像融合算法	199
8.3 基于复数小波变换的遥感图像融合	204
第 9 章 遥感图像的小波变换有损压缩与几何畸变度量	212
9.1 遥感图像压缩概述	213
9.2 静止图像压缩方法分类和几种压缩技术分析	214
9.3 基于小波变换的图像压缩现状及分析	218
9.4 遥感图像小波变换系数的统计特性	221
9.5 遥感图像嵌入零树小波编码	232
9.6 遥感图像有损压缩的几何质量评价	239
参考文献	244

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Fourier Transform and Its Limitation	1
1.2 Definition and Properties of Short Time Fourier Transform	9
1.3 Brief Introduction of Wavelet Transform	17
1.4 Mathematics Bases	24
1.5 Convolution and Filtering	30
Chapter 2 Definition and Properties of Continuous Wavelet Transforms	32
2.1 Definition of Continuous Wavelet Transforms	32
2.2 Inverse Wavelet Transform and Requirements for Mother Wavelet	35
2.3 Time-frequency Features of Continuous Wavelet Transforms	37
2.4 Computing of Continuous Wavelet Transformation	41
2.5 Some Well-known Mother Wavelets	47
Chapter 3 Multi-resolution Analysis and Discrete Wavelet Transform	51
3.1 Definition of Multi-resolution Analysis	52
3.2 Scale Function and Wavelet Function	56
3.3 Discrete Wavelet Transform of One Dimension Discrete Signals ...	63
3.4 Two Dimension Multi-resolution Analysis and Discrete Wavelet Transform of Two Dimension Discrete Signals	66
3.5 Two Subband Filter Banks Representation of Discrete Signal Wavelet Transform	71
3.6 Construction of Compactly Supported Wavelets	76
3.7 Border Data Processing in Daubechies Orthogonal Wavelet Transform	80
Chapter 4 Discrete Wavelet Transform and Two Subbands Filter Banks	87
4.1 Z Transform of Discrete Sequence	87
4.2 Basic Theories of Two Subbands Filter Banks	92
4.3 Two Subbands Filter Banks of Discrete Orthogonal Wavelet Transform	96
4.4 Á Trousé Algorithm of Wavelet Transform	99
4.5 Biorthogonal Wavelet and Biorthogonal Filter Banks	101
Chapter 5 Lifting Scheme of Wavelet Transformation	111
5.1 Multi-phase Matrix Representation of Orthogonal Wavelet Transforms	112

5.2	Lifting Scheme of Orthogonal Wavelet Transforms	116
5.3	Lifting Scheme of Biorthogonal Wavelet Transforms	123
5.4	Factorization of Wavelet Transform Multi-phase Matrixes	128
5.5	Wavelet Transform from Integers to Integers	134
Chapter 6	Wavelet Transform Applications in Remote Sensing Image Digital Watermarking	143
6.1	Basic Theory of Digital Watermarking	143
6.2	Spread Spectrum Watermarking Algorithm in Wavelet Domain ...	147
6.3	Quantization Watermarking Algorithm in Wavelet Domain	150
6.4	Anti-geometric Attack Watermarking Algorithm in Wavelet Domain	153
6.5	The Dual Watermarking Algorithm Based on Complex Wavelet Transform	157
Chapter 7	Digital Image Restoration Based on Wavelet Transform	164
7.1	Basic Theory of Image Restoration	164
7.2	Statistical Model of Image in Wavelet Domain	168
7.3	The Theory and Method of Image Restoration in the Wavelet Domain	171
Chapter 8	Remote Sensing Image Fusion Applied Wavelet Transform	186
8.1	Introduction of Remote Sensing Image Fusion	186
8.2	Remote Sensing Image Fusion Algorithm Based on Multi-scale Edge Enhancement	199
8.3	Remote Sensing Image Fusion Based on Complex Wavelet Transform	204
Chapter 9	Remote Sensing Image Lossy Compression Applied Wavelet Transform and Measurement of Geometrical Distortion	212
9.1	Introduction of Remote Sensing Image Compression	213
9.2	Classification of Still Image Compression and Analysis of Some Compression Algorithms	214
9.3	Current Situation and Analysis of Image Compression Based on Wavelet Transform	218
9.4	Statistical Features of Wavelet Coefficients of Remote Sensing Images	221
9.5	Zero-tree Embedded Compression Coding of Remote Sensing Images	232
9.6	Geometrical Assessment of Remote Sensing Image Lossy Compression	239
References	244

第1章 绪论

大多数信号,都是时间的函数。如果将这种时间域信号绘制出来,就可以得到该信号的时间-幅值表示。对大多数与信号处理相关的应用来说,这种时间-幅值表示不是该信号的最佳表示,它反映不出信号的某些重要特性,如信号中某种内在现象(或因素)变化的频率及这些变化发生的时间区间或瞬间等。而在许多场合,较重要的信息常常隐藏在信号的频率域或其他变换域。如果要想在频率域或其他变换域对信号进行分析,就必须对信号施行变换。人们经常对信号施加各种数学变换,其目的就是发现或获取那些从原始信号本身不能够直接看出的信息。原始信号一般指时间域的离散数字信号,任何经过某种数学变换输出的信号称为处理信号。实际中有很多可用的变换,其中傅里叶变换(Fourier transform)可能是最常用的变换。

1.1 傅里叶变换及其局限性

傅里叶变换是信号处理中一种重要的变换方法,在电气工程、电子工程、信息与通信工程、控制工程、生物医学工程以及天文学等理工类学科中都是十分重要的内容。傅里叶变换在小波变换理论本身以及小波函数构造中也起着非常关键的作用,所以本节先简要介绍傅里叶变换。之所以说是简要介绍,就是只列出有关傅里叶变换的主要结论,而对一些严格的理论问题请读者参阅相关专业文献。

1.1.1 傅里叶变换的定义

1. 连续信号傅里叶级数

任何一个周期为 T_1 的函数或信号 $g(t)$, 若满足狄利克雷(Dirichlet)条件, 可以表示成傅里叶级数

$$g(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos 2n\pi f_1 t + b_n \sin 2n\pi f_1 t) \quad (1.1)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= 1/T_1 \\ a_n &= \frac{2}{T_1} \int_{-\frac{T_1}{2}}^{\frac{T_1}{2}} g(t) \cos 2n\pi f_1 t dt \\ b_n &= \frac{2}{T_1} \int_{-\frac{T_1}{2}}^{\frac{T_1}{2}} g(t) \sin 2n\pi f_1 t dt \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

式(1.2)的直观解释就是,物理中将复杂的周期振动表示成简谐振动的叠加,其中的 $2\pi f_1$ 称为基频。利用欧拉公式可以方便地将式(1.1)、式(1.2)写成式(1.3)

$$\left. \begin{aligned} g(t) &= \sum_{-\infty}^{+\infty} c_n e^{i2n\pi f_1 t} \\ c_n &= \frac{1}{T_1} \int_{-\frac{T_1}{2}}^{\frac{T_1}{2}} g(t) e^{-i2n\pi f_1 t} dt \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

式中, $i = \sqrt{-1}$ (全书同), c_n 为复数,称为信号 $g(t)$ 在不同频率上的复振幅,也称为傅里叶系数。若画出 c_n 的模 $|c_n|$ 关于频率 $n f_1$ 的散点图(见图 1.1),可以看出, $|c_n|$ 实际上反映了原始信号 $g(t)$ 在不同频率成分 $n f_1$ 上的能量,通常称为离散频谱(有时称 $|c_n|$ 为离散的振幅谱)。从这种离散频谱可以对信号在不同频率成分的能量(或不同频率成分在信号中的作用)有一个直观的认识。

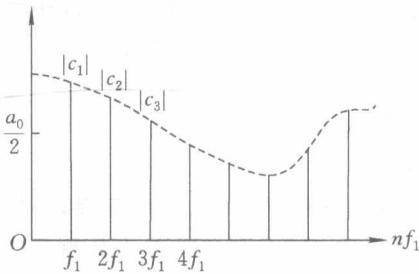


图 1.1 信号的离散频谱

2. 一维连续信号的傅里叶变换

对于非周期信号,可采用下述方法,即当 $T_1 \rightarrow \infty$ ($f_1 \rightarrow 0$) 时,周期信号 $g(t)$ 变成非周期信号(或函数),即一般任意信号,而离散频谱的谱线便无限靠近变成一条连续曲线,从而可以用连续的频率变量 f 代替离散频率 $n f_1$,相应的复振幅 c_n 就变为 $G(f)$

$$G(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) e^{-i2\pi f t} dt$$

即傅里叶系数 c_n 变为连续的傅里叶变换,而周期振动的叠加,式(1.3)中的第一式则成为傅里叶逆变换

$$g(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(f) e^{i2\pi f t} df$$

一般地,严格意义上的傅里叶变换定义如下。

定义 1.1.1 设 $f(t)$ 为绝对可积(即 $\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)| dx < +\infty$) 的光滑函数,则其傅里叶变换表示成 $\hat{f}(\omega)$, 定义为

$$\hat{f}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i2\pi\omega t} dt \quad (1.4)$$

$f(t)$ 的逆傅里叶变换定义为

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}(\omega) e^{i2\pi\omega t} d\omega \quad (1.5)$$

通常称 $f(t)$ 与 $\hat{f}(\omega)$ 为傅里叶变换对,记为 $f(t) \Leftrightarrow \hat{f}(\omega)$,也可表示为 $\hat{f}(\omega) = F\{f(t)\}$, $f(t) = F^{-1}\{\hat{f}(\omega)\}$,其中 F 、 F^{-1} 分别表示傅里叶变换和逆变换算子。

直观上,一维信号 $f(t)$ 的傅里叶变换 $\hat{f}(\omega)$ 可以理解为:频率成分 ω 在信号 $f(t)$ 中所贡献的复能量,而傅里叶逆变换则可形象地理解为非周期振动表示成简谐振动的叠加。

傅里叶变换除了上述定义的形式外,还有另外两种常用的等价形式,可根据实际应用或研究问题的方便,采用不同的定义形式。这两种定义分别为

$$\hat{f}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{+i\omega t} dt$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

$$\hat{f}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt$$

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

下面给出一个傅里叶变换的直观的例子。

例 1.1.1 设 $f(t)$ 为频率为 50 Hz 的交流电信号

$$f(t) = \sin 50 \cdot 2\pi t$$

其时间域波形如图 1.2 所示。利用式(1.4)中的第一式做傅里叶变换,就得到该信号的频谱 $\hat{f}(\omega)$ 。绘出 $\hat{f}(\omega)$ 依赖于频率变化的图形(见图 1.3),即得到该信号的频率-幅值表示,其中的横坐标轴表示频率,而另一个坐标轴代表幅值。该图形在 50 Hz 处有一个峰值,其余频率位置什么都没有,因为该电流信号只包含 50 Hz 一个频率。

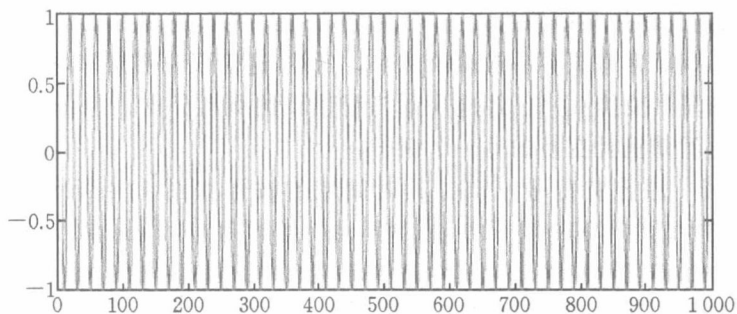


图 1.2 频率为 50 Hz 的正弦波信号 $f(t)$

图 1.3 中下半部分绘出了上半部分的 1/2 频率长度(从 0 Hz 到 500 Hz),因为实值信号的频谱都是对称的,其第二部分(即从 500 Hz 到 1 000 Hz 频率区间部分)仅是第一部分(即从 0 Hz 到 500 Hz 频率区间部分)的镜像,不含任何其他附加信息,所以第二部分一般都不画出来。本书中,有关信号的傅里叶变换对称频谱都只绘出前半部分。

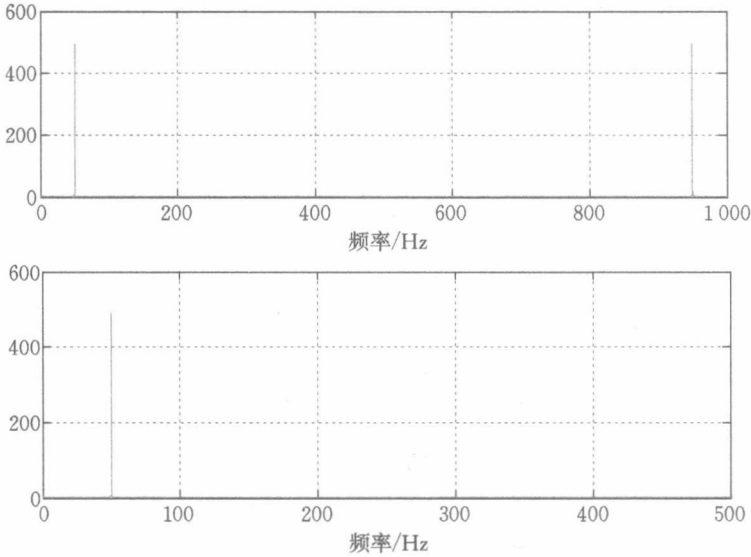


图 1.3 50 Hz 正弦波信号傅里叶变换的频率-幅值图形

为什么人们需要频率信息？因为大多数情况下，无法从时间域直接看出来的信息可以在频率域找到。以一个生物信号心电图 (electrocardiogram, ECG) 信号为例。心脏科医生非常熟悉健康心电图信号的典型形状，与典型形状的任何明显偏离都应该是某种病状 (症状) 的表现。然而，这种病状表现在原始的时间域信号中常常不明显。心脏科专家通常用时间域心电图信号 (这种信号是一个条状图，被记录在一张条状的纸上) 分析心电变化。最近，一种新型计算机处理的心电图记录仪及分析仪则是利用频率信息去分析、判断心脏是否有病理变化。当分析信号的频率信息时，病状常常更容易被诊断出来。当然，这仅仅说明频率内容可能是有用的。现在，傅里叶变换几乎已经应用到工程领域的所有分支。为了体会傅里叶变换的特性，再看傅里叶变换的另一个例子。

例 1.1.2 假定有信号 $f(t)$ ，其时间域的波形如图 1.4 所示 (Gao et al., 2011)。该例中的信号是一个非平稳信号，由持续时间为 12 ms 的 4 组互不重叠脉冲信号链组成，每组脉冲都包含了中心频率在 1 500 Hz 和 650 Hz 的两种瞬时频率成分，在每组脉冲内，两种瞬时频率成分在时间上相互重叠。图 1.5 表示了该信号的傅里叶变换 (Gao et al., 2011)，其中显示了两个中心在 650 Hz 和 1 500 Hz 的两个频率峰值，但它只说明了原始信号中存在的两个频率峰值或频率成分，但并没有告诉人们，信号中的这些频率成分随时间的变化，也就是说，图 1.5 并没有说明：这两种频率成分是连续存在于整个信号的观测期间，还是仅存在于某一段时间内。由于傅里叶变换不能揭示原时间域信号的时间结构，所以其作用就受到了限制。也就是说，傅里叶变换不适宜分析非平稳信号，这将在下一小节详细分析。

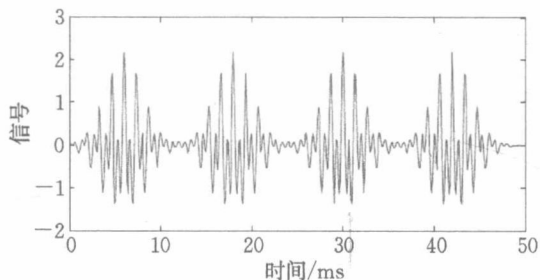


图 1.4 包含有两种频率成分的非平稳信号

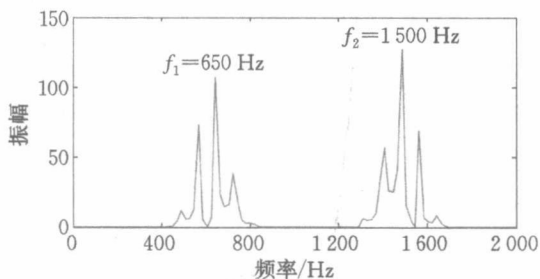


图 1.5 例 1.1.2 中信号的傅里叶变换

用内积的定义,还可将式(1.4)、式(1.5)定义的傅里叶变换表示成内积的形式, $\hat{f}(\omega) = \langle f(t), e^{-i2\pi\omega t} \rangle$, 它更形象地说明了, $\hat{f}(\omega)$ 本质上度量了信号 $f(t)$ 与模板函数(有时称分析函数或窗口函数) $e^{-i2\pi\omega t}$ 之间的相似性。同理,逆变换可以表示为 $f(t) = \langle \hat{f}(\omega), e^{i2\pi\omega t} \rangle$ 。傅里叶变换的这种解释可以用图 1.6(Gao et al., 2011)中的图形来形象化说明。

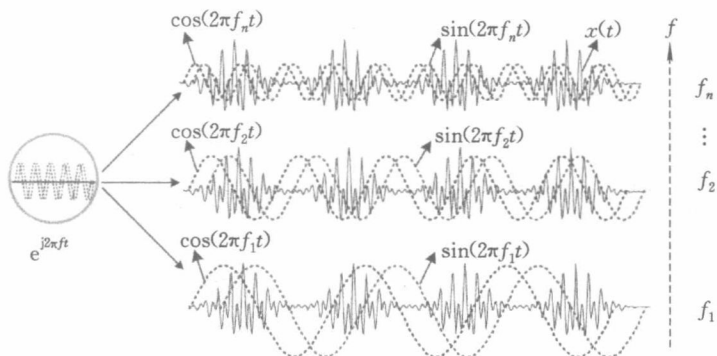


图 1.6 傅里叶变换的图形说明

一般来说,试验中通过传感器得到的信号,不再是连续的时间信号,而是在一定的观测时间 T 内具有离散时间间隔 ΔT 的样本值,记为 x_k ,它通过式(1.6)中定义的离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)变换到频率域。