

林立宇 张友焱 孙 涛 秦前清 编著

Contourlet变换 ——影像处理应用

 科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

本书以 Contourlet 变化在图像处理中的应用为研究对象,介绍了 Contourlet 变换在影像压缩、超分辨率重建、影像融合等方面的应用。第 1 章概述了相关影像处理的主题,重点介绍了图像压缩和遥感影像超分辨率重建技术的研究现状。第 2 章阐述了从图像的多分辨率分析(以小波变换为代表)到图像的多尺寸几何分析(以 Contourlet 变换为代表)的演变过程,以及相关的理论基础。第 3 章介绍了 Contourlet 变换在图像去噪以及像素级融合中的应用。第 4 章是 Contourlet 变换在图像压缩中的应用研究,并介绍了几种压缩图像的补偿算法。第 5 章主要介绍了图像超分辨率的一些算法以及 Contourlet 变换在其中的应用。

本书可供计算机专业的本科生、研究生参考阅读,旨在帮助读者透彻理解和掌握 Contourlet 变换与方向滤波器组的基本原理和框架。初步了解 Contourlet 变换在图像处理领域中的应用,为进一步深入研究问题打下基础。

图书在版编目(CIP)数据

Contourlet 变换:影像处理应用/林立宇等编著. —北京:科学出版社, 2008

ISBN 978-7-03-021200-9

I. C… II. 林… III. 图像处理 IV. TN919.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 035237 号

责任编辑:孙 芳 王志欣 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:刘士平 / 封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 4 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2008 年 4 月第一次印刷 印张: 14 1/2

印数: 1—3 000 字数: 282 000

定价: 40.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

我们生活在一个信息大爆炸的时代。信息的几何倍数增长,对数据传输、存储以及专题信息的提取提出了新的挑战。在过去的十几年里,信息存储和处理技术的进步一日千里。在这些技术的支持下,更高分辨率、更大量的数据被源源不断地获取,这反过来又进一步推动了数据的存储、处理技术的发展。正如马克思在其著作中指出的那样,人类总是在矛盾中生活,并在解决矛盾的同时进步。

数字图像是人们获取的数字信息中的一个重要种类。对于数字图像处理的研究一直是一个热点。为了有效显现数字图像中的某些信息特征,常常需要将原定义在图像空间的图像以某种形式转化到另外一些空间,这样的做法被称为对图像进行基本变换。典型和常用的基本图像变换有傅里叶(Fourier)变换、沃尔什-阿达马变换、小波(Wavelet)变换、Contourlet 变换。

以小波变换为代表的子波变换自提出以来就得到了数学界的密切关注,十年来其理论和应用均得到了空前的发展,并在信号处理等众多学科领域得到了广泛应用。小波变换克服了经典傅里叶变换不能同时表现局部信号时频域特征的缺点,多分辨率、时频域局部化的特征使得其在数学界享有“数学显微镜”的美称。但小波变换用于图像处理时,其二维变换基的支撑区域为矩形,这种多分辨率的表达方式无法高效地逼近影像固有的奇异曲线。从这个意义上说,小波并不是一种最优的图像多分辨率表达方法。为克服小波变换的这一局限性,近年来出现了以 Curvelet 变换和 Contourlet 变换为代表的多尺度和多方向性的图像表达方式,并在图像压缩、影像融合、超分辨率等方面显示出一定的优势。但总体而言,多尺度几何分析的变换方法的应用研究尚处于初级阶段,其主要原因是影像的多几何分析领域的研究尚未形成完善的理论框架,很多问题还有待解决。

本书以 Contourlet 变换及其在图像处理中的应用为研究对象,结合作者自己的研究成果,在参考了大量国内外书籍和文献的基础上,介绍了 Contourlet 变换的基本理论,以及在影像压缩、超分辨率重建、影像融合等方面的应用。旨在帮助读者透彻理解和掌握 Contourlet 变换和方向滤波器组的基本原理和框架。初步了解 Contourlet 变换在图像处理领域中的应用,为进一步深入研究的问题打下基础。

本书的出版受到了国家 863 计划(项目编号:2006AA12Z132)、国家自然科学基金(项目编号:40604055)和国家 973 计划(项目编号:2006CB701303)的资助。在此,对上述资助单位表示诚挚谢意!

在撰写本书的过程中,作者参阅了国内外相关领域的研究成果和论著,在此,谨对所有著者表示由衷的谢意。

由于作者水平有限,不妥之处在所难免,敬请读者不吝指正。

作 者

2007 年 12 月于武汉大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 基本图像变换	2
1.3 图像压缩概述	5
1.3.1 基本背景	5
1.3.2 国内外研究现状	7
1.3.3 发展趋势	10
1.4 图像超分辨率重建概述	11
1.4.1 基本背景	11
1.4.2 国内外研究现状	13
第 2 章 从小波变换到 Contourlet 变换	15
2.1 小波变换	15
2.1.1 连续小波变换与离散小波变换	15
2.1.2 多分辨率分析	18
2.1.3 小波变换的 Mallat 算法	19
2.1.4 信号的小波分解与重构	22
2.1.5 二维小波变换	25
2.2 Contourlet 变换	28
2.2.1 多尺度几何分析	28
2.2.2 拉普拉斯金字塔变换	29
2.2.3 五株采样与矩阵坐标变换	32
2.2.4 五株滤波器组和方向滤波器组	35
2.2.5 离散 Contourlet 变换	41
2.3 Contourlet 变换的拓展	43
2.3.1 基于小波变换的 Contourlet 变换	44
2.3.2 冗余 Contourlet 变换	44
2.3.3 对比度金字塔变换	55
2.3.4 基于对比度 $\hat{a}$ trous 小波的 Contourlet 变换	57
2.4 本章小结	58

第 3 章 Contourlet 变换的已知应用	59
3.1 Contourlet 变换与图像去噪	59
3.1.1 阈值去噪	59
3.1.2 尺度相关去噪	60
3.2 Contourlet 变换在像素级融合中的运用	65
3.3 基于拓展 Contourlet 变换的融合方法	67
3.4 Contourlet 变换与图像增强	69
3.5 本章小结	72
第 4 章 遥感影像压缩与 Contourlet 变换	74
4.1 遥感影像压缩的特点	74
4.2 图像压缩算法综述	75
4.2.1 差分脉冲编码(DPCM)	75
4.2.2 JPEG 离散余弦变换编码	76
4.2.3 小波变换图像编码	77
4.3 Contourlet 变换的图像压缩运用	82
4.3.1 基于高频 Contourlet 变换的图像压缩方案	82
4.3.2 基于 WBCT 的图像压缩方案	86
4.4 压缩图像的两种补偿算法	88
4.4.1 统计纹理信息高斯补偿算法	88
4.4.2 形态学重构数学基础	91
4.4.3 形态学重构补偿算法	95
4.5 基于分段线性系数变换函数的编码预处理	99
4.6 本章小结	103
第 5 章 遥感影像超分辨率重建与 Contourlet 变换	104
5.1 图像的分辨率基础知识	104
5.1.1 图像与分辨率	104
5.1.2 CCD	105
5.1.3 光学系统与分辨率	107
5.2 图像超分辨率重建基础知识	109
5.2.1 图像的卷积降质模型	109
5.2.2 CGLS 算法的前提解卷积模型	110
5.2.3 变换域收缩(transform-domain shrinkage)	111
5.3 PCGLS 算法	112
5.3.1 CGLS 算法描述	112
5.3.2 PCGLS 算法描述	113

5.3.3 PCGLS 算法实验结果	114
5.4 使用 Contourlet 变换改进的 PCGLS 算法	116
5.5 ForWaRD 算法	117
5.5.1 傅里叶变换与小波变换高效性分析	118
5.5.2 FoRD 算法	119
5.5.3 WVD 算法	121
5.5.4 ForWaRD 算法	122
5.5.5 ForWaRD 算法中的收缩平衡	124
5.5.6 ForWaRD 算法的实验结果	126
5.6 使用 Contourlet 变换的 ForCoRD 算法	127
5.6.1 Contourlet 变换的高效性分析	128
5.6.2 CVD 算法	130
5.6.3 ForCoRD 算法	132
5.6.4 ForCoRD 算法的实验结果	133
5.7 克服块边缘问题的海量图像分块算法	134
5.8 本章小结	137
参考文献	139
附录	146

第 1 章 绪 论

人类社会已迈进了 21 世纪,20 世纪带给我们的科学与技术的传奇仍然在科学家和学者们的不懈努力下继续上演着,社会仍然被科学这一伟大的力量继续飞速地推进。在人们的意识中,地球已经缩小,世界正在经历由 A(atom-原子)到 B(bit-比特)的转变。整个世界的节奏随着科技进步的步伐而加快。

1901 年,意大利发明家马可尼成功地实验了跨越大西洋的无线电报,从此人类可以以光速传递信息;1946 年,第一台电子计算机在宾夕法尼亚大学摩尔学院问世,架起了从 A(analog-模拟)到 D(digital-数字)的伟大桥梁,此后的五十年,地球在飞快地数字化;1957 年,第一颗人造卫星上天,其后不久对地观测卫星就为人们发回了大量有关地球的信息,人类开始以崭新的视角来重新认识自己赖以生存的世界。通过神奇的电波,人们接受着信息,借此探索着浩瀚宇宙的秘密;通过神奇的电波,人们发出着信息,期待着与其他存在生命的星球一起开发宇宙;通过神奇的电波,人们传递着信息,在彼此之间的距离瞬间缩短。如今,人们甚至可以做到足不出户,只需敲击键盘、点击鼠标就可以满足几乎所有的生活信息需求。伴随着航天、遥感、通信和计算机技术的全面发展,人类社会在信息时代中获得了越来越广阔的空间。

1.1 引 言

众所周知,人类社会已经进入信息时代,而美国当仁不让地成为信息时代前进步伐的引导者。1993 年,美国提出信息高速公路的概念,倡导建立“国家信息基础设施”(National Information Infrastructure, NII)。1994 年,美国签署了行政命令,决定建立“国家空间数据基础设施”(National Spatial Data Infrastructure, NSDI)。1998 年,美国又推出了“数字地球”(digital earth)的概念和构想,“数字地球”是美国继“星球大战”和“信息高速公路”之后的又一次全球性的战略计划。戈尔在其报告中称:“数字地球将给我们一个空前的机会,可以将关于我们社会和我们星球的原始数据流转换成可以理解的信息,这种数据不仅包括地球的高分辨率的卫星影像、数字地图,也包括经济、社会和人口的信息。如果成功的话,它将在教育、可持续发展的决策、土地利用规划、农业以及危机处理等领域产生很大的社

会和商业效益。”“数字地球”计划将提供 1m, 甚至是 1ft^① 分辨率的卫星遥感影像, 而且数据获取的频率很高, 甚至有可能每天一次。这些高分辨率的卫星影像将使地上的房子、汽车、船舶、树木、街上的行人、商店的招牌都清晰可见, 这样一来, 全球的资源、环境、社会、经济的分布和变化悉在其掌握之中。

信息社会的较量归根结底是信息获取、管理和利用能力的竞争, 而首先就是信息获取能力的竞争。信息社会的发展有赖于遥感、网络、计算、存储、传输等多项技术的共同进步, 如果缺乏技术支持, “数字地球”只会是一座空中楼阁, 绝无可能付诸实施。近年来, 各国纷纷大力发展综合对地观测数据获取系统, 以期在新一轮的信息竞赛中取得优势地位。我国政府对此也极为重视, 接连在国家 863 计划和 973 计划中设立“信息获取”和“信息处理”专题, 可谓意义重大, 影响深远。

1.2 基本图像变换

数字图像是人们获取的数字信息的一个重要种类。对于数字图像处理的研究一直是一个热点。为了有效和快速地对数字图像进行处理, 常常需要将原定义在图像空间的图像以某种形式或方法转化到另外一些空间, 并利用在这些空间的特有性质方便地进行一定的加工, 最后再转换回图像空间以得到所需的效果, 这些转换方法就是图像变换。典型和常用的基本图像变换有傅里叶(Fourier)变换、小波变换、Contourlet 变换、沃尔什变换和阿达马变换等。图像变换应该是双向的。在图像处理中, 一般将从图像空间向其他空间的变换称为正变换, 而将从其他空间向图像空间的变换称为逆变换。

可分离变换是一类重要的空间之间的变换, 由于其具有特殊的性质, 可以简化计算, 所以在实际中得到了广泛的应用。

一维的可分离变换通常表示为

$$T(u) = \sum_{x=0}^{N-1} f(x)h(x, u), \quad u = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1.2.1)$$

式中, $T(u)$ 为 $f(x)$ 的变换; $h(x, u)$ 为正向变换核。

同理, 反变换可以表示为

$$f(x) = \sum_{u=0}^{N-1} T(u)k(x, u), \quad x = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1.2.2)$$

式中, $k(x, u)$ 为反向变换核。

对于二维的情况, 正变换和反变换可以分别表示为

① 1ft(英尺)=12in=0.3048m。

$$T(u, v) = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) h(x, y, u, v), \quad u, v = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1.2.3)$$

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} T(u, v) k(x, y, u, v), \quad x, y = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1.2.4)$$

同样, $h(x, y, u, v)$ 和 $k(x, y, u, v)$ 分别称为正向变换核和反向变换核。这两个变换核只依赖于 x, y, u, v , 而与 $f(x, y)$ 或 $T(u, v)$ 的值无关, 可以看作通过式(1.2.3)和式(1.2.4)进行级数展开的基本函数。

下面的讨论对于正向变换核和反向变换核都适用, 但仅以正向变换核为例。首先, 如果下式成立:

$$h(x, y, u, v) = h_1(x, u) h_2(y, v) \quad (1.2.5)$$

则称正向变换核是可分离的。进一步地, 如果 $h_1(x, u)$ 和 $h_2(y, v)$ 的函数形式是一样的, 则称正向变换核是对称的。此时, 式(1.2.5)可以写为

$$h(x, y, u, v) = h_1(x, u) h_1(y, v) \quad (1.2.6)$$

可见, 具有可分离变换核的二维变换可分成两个步骤计算, 每个步骤用一个一维变换。当 $h(x, y, u, v)$ 是可分离的和对称的函数时, 式(1.2.3)也可以写成矩阵形式, 如下:

$$T = AFA \quad (1.2.7)$$

式中, F 为 $N \times N$ 图像矩阵; A 为 $N \times N$ 对称变换矩阵, 其元素为 $a_{i,j} = h_1(i, j)$; T 为输出的 $N \times N$ 变换结果。

如果令 $B = A^{-1}$, 式(1.2.7)经过简单变换易有

$$F = BTB \quad (1.2.8)$$

这表明图像 F 完全可以由其反变换来恢复。如果 B 不等于 A^{-1} , 则可以得到图像 F 的一个近似, 如下:

$$\hat{F} = BAFAB \quad (1.2.9)$$

式(1.2.9)其实就是有损压缩的原理。

利用矩阵形式的一个优点是, 所得到的变换矩阵可分解为若干个具有较少非零元素的矩阵的乘积, 这样可以减少冗余并减少操作次数。

在 $B = A^{-1}$ 的基础上, 如果有

$$A^{-1} = A^* \quad (* \text{ 代表共轭}) \quad (1.2.10)$$

则称 A 为酉矩阵(相应的变换称为酉变换, 是线性变换的一种特殊类型)。进一步, 如果 A 为实矩阵, 且

$$A^{-1} = A^T \quad (1.2.11)$$

则称 A 为正交矩阵, 相应的变换称为正交变换。此时, 正反变换式(1.2.1)和式(1.2.2)或式(1.2.3)和式(1.2.4)都构成正交变换。

傅里叶变换的基本思想首先由法国学者傅里叶系统提出,所以以其名字来命名以示纪念。从现代数学的眼光来看,傅里叶变换是一种特殊的积分变换,它能够将满足一定条件的某个函数表示成正弦基函数的线性组合或者积分。在不同的研究领域,傅里叶变换具有多种不同的变体形式,如连续傅里叶变换和离散傅里叶变换。

现代数学发现傅里叶变换具有非常好的性质,具体有以下几方面。

(1) 傅里叶变换是线性算子,若赋予适当的范数,它还是酉算子。

(2) 傅里叶变换的逆变换容易求出,而且形式与正变换非常类似。

(3) 正弦基函数是微分运算的本征函数,从而使得线性微分方程的求解可以转化为常系数的代数方程的求解。在线性时不变的物理系统内,频率是个不变的性质,从而系统对于复杂激励的响应可以通过组合其对不同频率正弦信号的响应来获取。

(4) 著名的卷积定理指出,傅里叶变换可以化复杂的卷积运算为简单的乘积运算,从而提供了计算卷积的一种简单手段。

(5) 离散形式的傅里叶变换可以利用数字计算机快速的算出[其算法称为快速傅里叶变换算法(FFT)]。

正是由于上述的良好性质,傅里叶变换在物理学、数论、组合数学、信号处理、概率、统计、密码学、声学、光学等领域都有着广泛的应用。傅里叶变换是可分离和正交变换中的一个特例,对图像进行傅里叶变换,将图像从图像空间变换到频率空间,从而可以利用傅里叶频谱特性进行图像处理。

小波变换是近年来最为著名的变换,因其具有多尺度和多分辨率的特点而被广泛应用于图像、语音等信号处理领域。小波变换也是可分离的变换,根据基的选取,可以实现正交变换和非正交变换。这将在第2章中进行详细的介绍。

一维小波可最优逼近含奇异点的分段光滑函数,但二维情况下奇异点的形式要复杂得多,奇异点往往不是孤立点,而是聚合成有某些几何特征的轮廓。二维可分离小波是一维小波的简单张成,基函数的各向同性性质导致方向选择性差,不能有效地捕捉轮廓信息,在图像压缩、去噪等应用中,不可避免地在图像边缘和细节纹理处引入一定程度的模糊。因此,有必要寻求比小波变换更有效的方法。

Contourlet 变换正是在此背景下应运而生的一种新的分析工具,2002年由Do和Veterli提出。该变换也称作塔型方向滤波器组(pyramid directional filter bank,PDFB),是一种多分辨率、局域的、方向的影像表示方法。Contourlet 变换满足各向异性尺度关系,有很好的方向性,它能准确地将图像中的边缘轮廓信息捕捉到不同尺度、不同方向的子带中,因此在图像处理领域有着非常广阔的应用前景。例如,Contourlet 变换具有多尺度多方向的特性,善于捕捉图像的边缘轮廓信息,而且自然图像的 Contourlet 变换系数尺度间强相关,因此在压缩、去噪等应

用领域内能很好地保留纹理细节信息。第2章中将对 Contourlet 变换进行较为详细的介绍。

沃尔什变换和阿达马变换都是可分离和正交变换,两者很相似,经常混用。所以,沃尔什-阿达马变换常用来指两者中的任一个,其理论和应用都有专门的著作进行讨论。简单地说,和傅里叶变换相比,沃尔什-阿达马变换只需要做加减法,运算复杂度低,所以曾经得到过很广泛的应用。但是,较傅里叶变换缺乏明确的物理意义和比较直观的解释。

可以应用于数字图像处理领域的图像变换远不止上述几种,还有 Gabor 变换、Haar 变换、Radon 变换等,关于它们的理论和应用都有各自相关的著作,这里不再赘述。

1.3 图像压缩概述

1.3.1 基本背景

一般来说,自然界的数据或多或少都含有“水分”,即存在冗余,数据压缩的目的就是把这些水分挤掉,用最少的比特表示最多的信息。典型的数据压缩包含去相关(冗余)和熵编码两个步骤。实际上,日常生活中拍发电报的过程就是一个数据压缩的经典范例。为了减少电报的字数,我们把文字尽量精简,浓缩为一种类似文言文的精练文字,表达的意思保持不变,然后将精简后的文字转换为莫尔斯电报码发送出去。这两个步骤分别相当于数据压缩的去相关和熵编码。

尽管数据压缩的实践很早以来就广泛存在于人们的生活当中,但科学上对数据压缩的研究却始于1948年。针对通信的信源编码问题,Shannon 发表了 *A mathematical theory of communication*。在这篇文章里,作者从概率统计的角度详细讨论了输出信元为 $N(N=0,1,2,3)$ 阶平稳有限马尔可夫链时的无损压缩问题,并从理论上证明,信号的无损压缩倍率不可能高于信号的熵。在此基础上,1952年,Huffman 提出了以他的名字命名的编码算法,解决了一阶马尔可夫序列的无损压缩问题。1963年,Elias 提出了比 Huffman 码更优的算术编码,但是第一个实际可用的算法直到1976年才由 Rissanen 和 Pasco 给出。1977年,Ziv 等基于字串复杂度分析,设计通用信源的 Lempel-Ziv 编码得到了与 Shannon 的熵编码相同的结果。此后,熵编码成为各种数据压缩技术的基础。从信息论的角度来看,数据压缩的问题转化为如何将高阶马尔可夫序列转化为一阶序列的问题。

图像冗余包含空间冗余和光谱冗余两方面。空间冗余体现在相邻像素的灰度值比较接近,光谱冗余体现在不同波段图像的灰度值的相关性。光谱冗余一般采用 K-L 之类的方法去除,没有太多的选择余地,比较而言,空间去相关的方法要

多得多,采用什么方法去相关取决于数据之间的相关程度。在信号处理中,一般将强相关信号当成确定性信号,采用实变函数、复变函数的理论和方法分析处理;对于弱相关信号,则认为是随机信号,采用统计学的理论和方法进行处理。实际上,随机信号和确定性信号之间并无明确界线,确定性信号的高频成分与随机信号相去无几。早期的压缩算法把图像看成马尔可夫随机场,通过相邻像素预测的方法去相关,这种算法虽然简单,压缩效率却不高。事实上,图像的相邻像素之间常常具有很高的相关性,采用马尔可夫随机场模型来描述图像数据固然不错,可是其去相关的效率却远远不如把图像当作确定性信号来处理,因为图像是介于纯粹的确定和随机之间的某种信号。如图 1.3.1 所示,图像的上部地势平坦,采样间隔与地物的尺度相比,前者远小于后者,根据奈奎斯特(Nyquist)采样定理,当采样频率高于被采样信号的最高频率两倍时,被采样信号可以完全恢复,这时候采样数据可以看成是确定性数字信号,点与点之间具有很强的相关性;在图 1.3.1 的下半部分,尽管采样点加密了一倍,但是地物的尺寸与采样间隔相比仍小了不少一个数量级,采样频率远低于奈奎斯特采样频率,这时候采样数据之间相关性较小,更多地表现出随机信号的特性。此外,数据采集的时候还有电磁、大气扰动等多种干扰,在信号中加入了白噪声。因此,图像可以表示成确定性信号、随机信号和噪声的混合。



图 1.3.1 遥感影像的采样间隔与地物的尺度

设图像信号为 $F(x, y)$, 通常情况下有

$$F(x, y) = F_d(x, y) + F_s(x, y) + N(\sigma, \mu) \quad (1.3.1)$$

式中, $F_d(x, y)$ 为确定性信号; $F_s(x, y)$ 为马尔可夫随机信号; $N(\sigma, \mu)$ 为高斯噪声。

针对上述图像的混合模型,图像压缩算法应该包含以下基本步骤:①信号逼近;②信号去噪;③熵编码。信号逼近的目的在于去除 $F_d(x, y)$ 的高度相关。这

时,图像信号被当作一个二维函数形成的曲面(以灰度为 z 方向坐标), $F_s(x,y)$ 和 $N(\sigma,\mu)$ 被近似看成是信号的高频成分。这种情况下,去相关的本质是二维曲面的分解与逼近,常用的方法有傅里叶分析或小波分析。通过某种正交变换可以极大地去除图像信号的相关;信号去噪是为了降低数据的熵值。噪声信号一般具有很高的熵值,混合在有效信号中对压缩编码的整体效率有很大影响,必须在熵编码之前剔除出去。经过上述处理以后,图像信号转化为一组随机信号,可进一步采用熵编码进行压缩。

综上所述,图像压缩的基本原理如图 1.3.2 所示,包含以下几个部分:①去相关;②量化;③熵编码。首先将图像当作确定性信号处理,采用 DFT、DCT(其实质仍为傅里叶分析)、DWT 变换等函数逼近的方法降低信号的相关性;然后对变换的系数进行量化处理,以去除信号的噪声,降低系数熵值;最后,采用信息论提供的方法进一步去除数据的冗余。

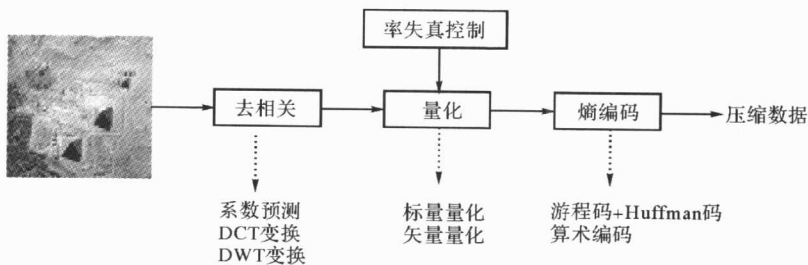


图 1.3.2 图像压缩原理框图

1.3.2 国内外研究现状

尽管数据压缩技术很早就被用于深空探测数据的传输,但这项技术在卫星遥感中的大规模应用中却遇到了不小的阻力。反对的人们认为,既然现有的系统能够工作,为什么还要数据压缩?随着遥感传感技术的发展,星载数据传输和存储成为严重问题,人们才不得不开始考虑采用数据压缩技术。1992年,美国国家航空航天管理局(NASA)戈达德航天中心(GSFC)的研究人员向空间数据系统咨询委员会(CCSDS)第一委员会提交了一个报告,建议采用性能优良、复杂度低的 Rice 算法实现星上无损数据压缩。这个报告没有引起与会者广泛的关注,因为那时候带宽和星上存储还不是困扰国际航天遥感界的主要问题。但当时对地观测计划中的 MODIS 项目恰好由 NASA 戈达德航天中心负责,MODIS 数据有 36 个波段,当时的通信设备还没有达到相应的传输水平,必须采用数据压缩技术才能解决这个问题。于是 1994 年秋,戈达德航天中心重新向 CCSDS 第一委员会提交了一个报告,这一次所有的与会者都同意了这项建议。1997 年,CCSDS 正式公布

了卫星数据无损压缩建议的蓝皮书,其中,对星载数据压缩系统提出了三点要求。

(1) 压缩算法能够适应数据统计特性的变化,从而保证最大的压缩效率。

(2) 压缩算法用硬件实现以后能够实时运行,并且需要的缓存和电力资源尽可能少。

(3) 压缩算法能够独立处理多种类型数据包,不同包数据的压缩、解压相互独立。

根据以上指标进行对比,CCSDS 最终建议在星上无损数据压缩中采用 Rice 算法。

应当指出的是,CCSDS 的建议针对的是所有类型的数据,在航天遥感领域,海量数据基本上可以认为就是高分辨率遥感影像,这时候采用 Rice 算法,压缩效率并不是最好的,因为图像数据之间存在高阶相关,采用专门的图像压缩技术可以得到更高的压缩倍率。现有的遥感影像压缩技术分为无损压缩和有损压缩两类。无损压缩可以完整地恢复原始影像,重建图像与原始图像之间分毫不差,非常有利于影像信息的保存,但是无损压缩的倍率通常较低(1~2 之间,SPOT4 为 1.3)。这是由于遥感影像在采集过程中不可避免会受到大气扰动、电磁辐射等作用的影响,使得图像信号含有较多的高斯噪声,不利于无损压缩;有损压缩允许重建信号略微失真,对信号进行滤波可以较好地克服噪声对压缩倍率的影响,因此,压缩倍率通常比无损压缩要高得多。通过调整滤波的阈值和量化的步长可以控制压缩倍率。众所周知,信号的高频成分和噪声常常混叠于同一频带,有损压缩在剔除噪声的同时也损害了信号的高频分量。选取怎样的压缩倍率和信号失真门限最为恰当取决于遥感影像的具体应用。

遥感影像压缩的应用包含软件和硬件两方面。软件主要用于地面遥感影像数据库的数据存取和大型网络上的影像传输;硬件则应用于星载高分辨率遥感影像的缓存和实时传输。

软件方面的应用目前主要有 MrSID 和 ECW 两种商业产品。MrSID 采用美国 Los Alamos 国家实验室开发的图像压缩技术,在大型无缝影像数据压缩等方面具有很好的适应性;ECW 由 ERMap 公司开发,采用小波压缩算法,压缩质量较好,并且短小精悍。

硬件方面的应用更加广泛,目前的高分辨率光学遥感卫星几乎都采用了数据压缩技术。以法国的 SPOT 卫星为例。SPOT5 于 2002 年 5 月上天,最高分辨率为 2.5m(全色波段),星上压缩采用离散余弦变换编码,压缩倍率设为 2.6,接近于无损压缩。其他一些商用卫星,如法国的 SPOT1,2,3,4、美国的 IKONOS2 和 Quick Bird 也都在星上采用了图像压缩技术。既然民用卫星都需要采用数据压缩技术,那么更高分辨率的军事侦察卫星岂不是更要采用这项技术?以美国的高分辨率军事侦察卫星 KH-11 为例,KH-11 军事侦察卫星照片的幅宽为 16km×

16km,地面分辨率为 0.1m,每分钟照 8~12 幅,则数据获取的最高速率大约为 18Gb/s,而传输信道的容量仅为 300~650Mb/s,新型的 8X 成像侦察卫星覆盖面积更达到 50km×50km,图像数据下传速率为 KH-11 的 8 倍,数据若不先进行压缩,根本无法下传。对于有损压缩在空间遥感中的应用,NASA 和欧洲航天局(ESA)都做了大量的工作。继伽利略号宇宙飞船上的图像压缩系统之后,喷气推进实验室(JPL)研制了 ICER 用于火星探测器的图像传输。ICER 采用了改进的小波零树编码,而且已经用 ASIC 方式硬件实现;在 ICER 的基础上,采用线性预测或 K-L 变换去除光谱相关,还可用于多光谱或高光谱数据的压缩。欧洲航天局的星载图像压缩系统由德国宇航中心承担(DLR),投资额为 270 万欧元,目前已研制成功基于小波变换的 ASIC,系统名为 CWIC,主要特点如下:支持无损和有损压缩,压缩倍率可调或图像质量可调,16 比特位深度,有损压缩 10MSps(采样点每秒),无损压缩 7.5MSps。中巴地球资源卫星 CBERS 装有多光谱 CCD 相机,数据率为 113.23Mb/s,无须采用数据压缩,但有部分已经上天或即将上天的卫星已经用到数据压缩。

数据压缩不仅应用于近地轨道卫星,在深空探测中也有很多的应用。“九五”期间,我国开始立项研究星载图像压缩技术,目前也取得了一些进展,部分已经上天或即将上天的卫星已经用到数据压缩技术。

在地面遥感影像数据压缩中,目前遥感影像压缩主要基于通用的图像压缩算法。图像压缩算法大致上可分为三代。第一代 of 预测编码,以 DPCM 为代表;第二代为变换编码,以 JPEG 为代表;第三代为小波编码,以 EZW 为代表,包括最新出现的整数小波编码,并渐渐发展成为新一代图像压缩国际标准 JPEG2000。为解决网络环境下的图像传输问题,出现了可分级编码技术,主要包括信噪比可分级(SNR scalability)、空间分辨率可分级(spatial resolution scalability)。为实现高效率的海量影像数据库,出现了嵌入式多分辨率无损编码技术。由于遥感影像的获取成本较高,数据压缩必须保证有用信息不受损害,同时也不能加入虚假信息,有研究表明,当影像压缩超过 10 倍时,对影像匹配的精度会造成一定的影响。遥感影像不同于普通图像,每一个像素都可能携带重要的信息,因此需要针对遥感影像的应用特点,研究在高保真压缩的前提下,提高压缩倍率和运算速度,或在相同的压缩倍率的条件下尽可能留住细节信息。

比较而言,硬件系统的实现相对复杂一些,不过随着电路设计技术的发展成熟,采用 ASIC 实现较为复杂的图像压缩算法已经不存在很大问题。软件和硬件的表现形式虽然大不相同,其实质却没有有什么区别,系统的压缩性能完全取决于所采用的压缩算法。研究遥感影像压缩的首要任务便是找到简单、高效的压缩算法。

总的来说,数据压缩在航天遥感中的应用尚处于初级阶段,主要局限于高分

分辨率光学遥感影像,所采用的技术也还有进一步发展的余地。随着遥感信息获取技术的不断发展,数据的种类不断增多,数据规模不断增大,不同种类数据之间的关系更错综复杂,数据压缩的内涵和方法将不断向前发展,数据压缩必将成为遥感数据处理的不可或缺的关键技术。遥感技术的进步迫切需要数据压缩同步发展。

1.3.3 发展趋势

在出现和发展了三十年之后,数据压缩还有没有突破的可能?答案是肯定的。因为科学技术不断进步,新的问题不断提出,数据压缩也在不断地更新发展。

首先,遥感成像方式的发展为数据压缩提出了新的问题。众所周知,数据压缩必须找到数据的内在规律,然后才能设计出信息的更简练的表达,没有规律的数据不能被压缩。不同种类的遥感数据,其特性或者说相关性亦大不相同,须有新的方法才能胜任新型遥感数据的压缩。目前,高光谱影像、雷达影像和遥感立体像对已经在遥感应用中广泛应用,针对高光谱影像的压缩已经有了一些研究成果,但是还没有一种算法能够满足实用的要求;而雷达数据压缩、立体像对压缩则研究得更少,很难找到相关的参考文献。

其次,信号去相关的技术还在继续发展,整数小波变换的出现更为设计遥感影像实时压缩系统提供了有力的武器。图像压缩算法与同时代的数学方法直接相关。小波理论出现后,大大提高了压缩算法的性能。从早期的预测、DCT 变换、浮点小波变换直到现在的整数小波变换,信号的去相关技术经历着螺旋式不断向上的发展。整数小波变换不涉及浮点运算,其计算公式和系数预测公式十分相近,然而压缩的效果却和浮点小波相去无几,而且在整数小波的基础上,可以将无损和有损压缩统一起来。Contourlet 变换等最新变换的出现也进一步推动了信号去相关技术的发展。

第三,数据压缩对影像质量的影响尚缺乏深入研究。一直以来,图像压缩都倾向于从概率统计的角度描述信号失真,并据此优化预测、阈值和量化的策略。然而,事实表明这些评判与人眼主观判断不完全一致,而且遥感影像的质量评价不能由目视判读单独决定,必须对辐射失真和几何失真进行定量的分析,才能确切地知道压缩对数据质量的影响。

随着空间遥感技术的发展,今后数年,高性能遥感数据压缩技术将面临重大挑战,国际上迫切需要高性能的数据压缩算法,在保证信号质量的情况下以极高的吞吐量大倍率压缩数据。围绕着高保真和高速度,一些新的理论和方法将被引进、发展和完善,数据压缩技术必将出现大的发展。