

多进制小波变换的图像分辨率定量降低方法

张亚南¹, 朱长青^{1*}, 杜福光²

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210046; 2. 唐山师范学院资源管理系, 唐山 063000)

摘要: 传统的图像分辨率降低主要是通过图像重采样实现的。多进制小波是近年来发展的小波分析理论的一个新的分支, 它在正交性、紧支性、光滑性方面都优于二进制小波。本文首先介绍图像分辨率定量降低的需求与传统的图像分辨率降低方法; 然后, 以多进制小波的时频多分辨率特性, 把多进制小波变换应用于定量降低图像分辨率, 并用三进制小波变换进行了图像分辨率降低实验, 提取三进制小波的低频分量作为降低分辨率后的图像; 最后, 通过与常用的图像重采样方法, 如最临近法、双线性插值法及其衍生的邻域平均法的结果进行定性与定量评价, 结果表明多进制小波在图像分辨率定量降低方面具有明显的优势。

关键词: 图像; 多进制小波; 分辨率降低; 定量评价

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2012.00352

1 引言

20 世纪 90 年代出现了一系列具有高空间分辨率特征的传感器, 如 IKONOS、QUICKBIRD 等等。高分辨率影像一方面使人们获得更多的地表细节信息, 为广大用户提供更便捷的服务, 另一方面增加了数据量和数据的复杂性, 导致数据处理与分析工作困难, 特别是对于一些本来只需较低的分辨率影像就可满足需求的应用。同时政府大楼、军事设施等一些敏感地点在高分辨率的影像上清晰可见, 若将这些影像公布于众势必危及国家安全。因此, 为了保护国家安全同时满足民用的需求, 图像分辨率的定量降低具有重要的意义。

如何结合具体的应用领域选择最佳分辨率是地学研究中的一项重要课题^[1-2]。如今直接获得的影像很多都是高分辨率影像, 这就涉及影像的尺度变换问题。遥感信息的尺度转换包括向上尺度转换和向下尺度转换。向上尺度转换是将高分辨率的遥感信息转换为低分辨率的过程; 向下尺度转换则反之^[3]。本文重点研究定量降低图像的分辨率, 以达到最佳分辨率的要求。为了有效进行图像分辨率的降低, 小波分析的图像分辨率改变引起了人

们的注意。

小波分析是 20 世纪 80 年代中期发展起来的应用数学理论, 由于其良好的时频局部化特征、尺度变换特征、方向变化特征, 在众多学科领域得到了应用。并且在图像分辨率的改变方面取得了一些成果, 文献[4]就是以二进制小波进行图像的分辨率降低, 但只能得到缩小 2、4、8、 \dots 、 2^n 倍(n 是正整数)的图像, 不能得到任意整数倍的降低分辨率的图像, 即便是得到 4、8 倍等的图像也不能一次完成。文献[5]利用多进制小波变换的低频部分, 得到了缩小任意整数倍的图像, 但是与本文提的分辨率定量降低角度不同。故此, 作者依据多进制小波的特点, 将多进制小波应用于研究较少的图像分辨率定量降低, 并分析他的可行性, 经过多进制小波变换后的图像的低频信息集中在更小的图像上, 相比于传统的重采样方法图像分辨率降低的方法, 他保持了更完整的图像结构信息。

2 图像分辨率降低的传统方法

影像分辨率通常是指组成影像的最小单元——像元(pixel), 其大小称为影像的空间分辨率^[6]。降低分辨率最直接的方法是使地面相同范

收稿日期: 2011-11-14; 修回日期: 2012-05-04.

基金项目: 国家高新技术研究发展计划“863”计划资助项目(2012AA12A305)。

作者简介: 张亚南(1986-)女, 山东邹城人, 博士研究生, 主要研究方向为 GIS 数据安全。E-mail: yanandixin@126.com

* 通讯作者: 朱长青(1962-)男, 江苏阜宁人, 博士生导师, 主要研究方向为 GIS 理论与方法、空间数据安全、空间数据不确定性、遥感影像处理等。E-mail: zcq88@263.net

围成像的大小变小。

图像的重采样可以定量降低图像的分辨率。传统的重采样方法主要有:最邻近法、双线性内插法、立方卷积、邻域平均法等。

最邻近法将目的图像的某个坐标通过计算得到一个浮点坐标,对其进行简单的取整处理,就可得到一个对应原图像的整数坐标,目的图像坐标的值就取上述整数坐标的值。

双线性内插法是通过线性插值的方式来获得目的图像的像元值,从最近邻内插法可知,对于一个像元,其坐标可以通过反向变换得到一个浮点坐标 (x',y') ,我们可令其为 $(i+u,j+v)$,其中 i 和 j 均为负整数, u 和 v 为 $[0,1]$ 区间的浮点数,则这个目的像元值 $f(i+u,j+v)$ 可由原图像中坐标为 (i,j) , $(i+1,j)$, $(i,j+1)$, $(i+1,j+1)$ 所对应值的线性插值而定。

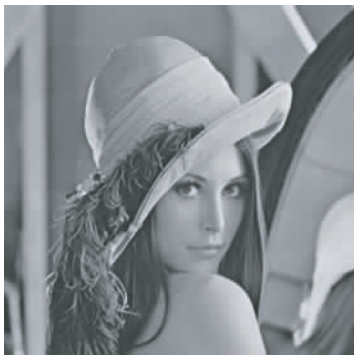
立方卷积法考虑到各邻点间灰度值变化率的影响,立方卷积法利用了待采样点周围更大邻域内像元的灰度值作三次插值($4 \times 4 = 16$ 个像元点)。立方卷积法的计算量太大,实际应用较少。

邻域平均法根据选用的窗口模板 $3 \times 3, 5 \times 5$ 等对模板内的区域取平均值,然后模板内的像元均被赋予这个平均值。我们认为每一个像元与其

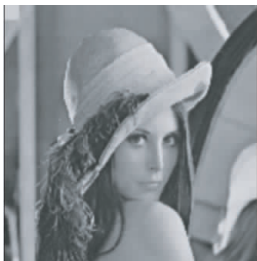
临近像元的灰度值变化是图像细节信息丰富程序和空间分辨率的主要体现^[4],把模板内的像元值赋予同一个灰度值,降低了影像的分辨率。

下图给出了利用最近邻法、双线性内插法和邻域平均法的试验结果,这里选用 lena 图像作为试验数据,图 1(a)为原始 lena 图像,作为参考比较的标准,图 1(b)是采用最邻近法将原始 lena 图降低 3 倍分辨率的结果,图 1(c)是采用双线性法降低 3 倍分辨率的结果,图 1(d)是采用 3×3 窗口邻域平均法降低分辨率的结果。

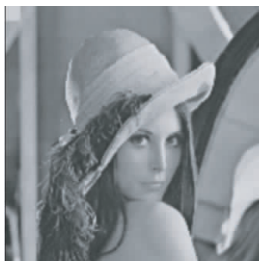
最邻近法针对二维图像取待采样点周围 4 个相邻像元中距离最近的 1 个邻点的灰度值作为该点的灰度值,此算法计算简单,但是由于仅考虑对该点影响最大的像元,因此,图像边缘有明显的不连续性的像元分布(参见图 1(b)中手臂的皮肤)。双线性内插法由于考虑了待采样点周围 4 个直接邻点对待采样点的影响,因此,基本克服了前者灰度不连续的缺点,但其计算量增大。此算法具有低通滤波器的性质,图像的轮廓变得较模糊。但当整数倍的降低分辨率时,双线性内插法的效果等同于最邻近法的效果,这从两算法的结果图(图 1(b)、图 1(c))可以看出,这两幅图没有明显的差别。邻域平均法会带来图像的模糊,边缘细节减少,且随着



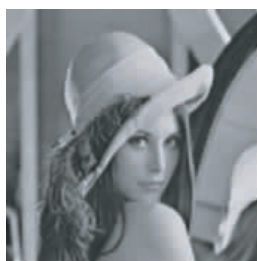
(a) 原始lena图



(b) 最邻近法结果图



(c) 双线性法结果图



(d) 3*3邻域平均法结果图

图 1 实验图

Fig. 1 Experimental figures

模板的增大,图像模糊更加明显,图 1(d)可以看出图像比较模糊。

3 多进制小波变换的图像分辨率降低方法

利用重采样方法得到的降低分辨率后的图像,虽然简单,但因忽略了图像信息本身的结构特征,得到的图像效果不理想。多进制小波的图像分辨率降低方法,在降低分辨率的过程中,考虑了图像的结构信息,效果理想。

3.1 多进制小波原理

多进制小波的基本构造理论是多尺度分析^[7-8]。设 $M \geq 2$ 是一个整数,平方可积函数空间 $L^2(R)$ 上的一个多尺度分析是满足一定条件的闭子空间列 $\{V_j\}_{j \in Z}$ 。与二进制小波一样,利用多尺度分析,能够得到空间 $L^2(R)$ 的正交小波分解,但伸缩性变为 $\mu(x) \in V_j \Rightarrow \mu(Mx) \in V_{j-1}$ 。

令 W_j 为 V_j 在 V_{j+1} 上的正交补空间,即 $V_j \oplus W_j = V_{j+1}, j \in Z$ 则对 $f \in L^2(R)$,有 $g_j \in W_j$ 和 $f_k \in V_k$,使

$$f = \sum_{j \in Z} g_j = f_k + \sum_{j \geq k} g_j$$

事实上,可以证明,闭子空间列 V_j 能够由 $\{M^{j/2} \varphi(M^j x - k) | k \in Z\}$ 生成,而 W_j 能够由 $\{M^{j/2} \psi_s(M^j x - k) | 1 \leq s \leq M-1, k \in Z\}$ 生成。这里函数 $\varphi(x)$ 称之为尺度函数,而 $\{\psi_s(x) | 1 \leq s \leq M-1\}$ 称为小波函数。值得注意的是,多进制小波中,一个尺度函数对应于多个小波函数。

3.2 多进制小波的分解和重构

利用张量积,可以得到二维函数的正交小波分解,因此,对于二维图像 $\{c_0, m, n\} (m, n \in Z)$, M 进制小波的正交分解公式为^[9-10]:

$$c_{k,l}^{j+1} = \sum_m \sum_n h_{m-Mk} h_{n-Ml} c_{m,n}^j$$
$$d_{k,l}^{j+1,s_1,s_2} = \begin{cases} \sum_m \sum_n h_{m-Mk} g_{n-Ml}^{s_2} c_{m,n}^j, s_1 = 0, \\ \qquad \qquad \qquad 1 \leq s_2 \leq M-1 \\ \sum_m \sum_n g_{m-Mk}^{s_1} h_{n-Ml} c_{m,n}^j, \\ \qquad \qquad \qquad 1 \leq s_1 \leq M-1, s_2 = 0 \\ \sum_m \sum_n g_{m-Mk}^{s_1} g_{n-Ml}^{s_2} c_{m,n}^j, 1 \leq s_1, s_2 \leq M-1 \end{cases}$$

图像的重构公式为:

$$c_{k,l}^j = \sum_m \sum_n h_{k-Mm} h_{l-Mn} c_{k,l}^{j+1} + \sum_{s_1,s_2=0,s_1+s_2 \neq 0}^{M-1} \sum_m \sum_n g_{k-Mm}^{s_1} g_{l-Mn}^{s_2} d_{j,k,l}^{j+1,s_1,s_2}$$
$$= \sum_m \sum_n (h_k - M m h_k - M n c_{k,l}^{j+1} + \sum_{s_1,s_2=0,s_1+s_2 \neq 0}^{M-1} g_{k-Mm}^{s_1} g_{l-Mn}^{s_2} d_{j,k,l}^{j+1,s_1,s_2})$$

其中, $j=0,1,2,\dots$, 这里 $\{c_{k,l}^{j+1}\}$ 为分解的 $j+1$ 层的低频部分, $\{d_{k,l}^{j+1,s_1,s_2}\}$ 为分解的 $j+1$ 层的高频部分。图 2 为一层三进制小波分解示意图。

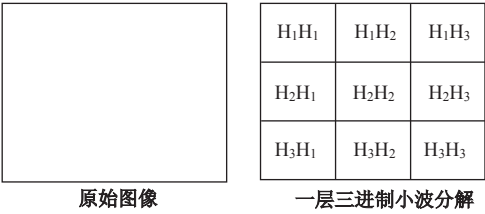


图 2 多进制小波分解示意图
Fig. 2 Schematic diagram of multi-band wavelet decomposition

$H_1 H_1$ 部分为分解后的低频部分,该部分保持了原始图像的内容信息及较多的影像结构,图像的能量集中于此部分。其他部分分别为水平、垂直、对角线方向的高频信息。经过三进制小波分解后, $H_1 H_1$ 的像元大小为原来的 $1/3$,即为原始图像分辨率降低 3 倍后的子图。

3.3 图像分辨率的定量降低

利用多进制小波进行图像分辨率定量降低的基本方法:

(1)利用多进制小波的原理,可以构造 M 进制小波的尺度函数和小波函数,然后由其对应的尺度函数系数和小波函数系数构造需要的多进制小波。根据选定的进制数 M 可以整数倍地降低图像的分辨率。例如,在进行三进制小波时可以选择如下 6 系数的小波函数的系数, $c_0 = 0.586101, c_1 = 0.919435, c_2 = 1.25276, c_3 = 0.413898, c_4 = 0.080564, c_5 = -0.252768, d_0^1 = -0.707106, d_1^1 = 1.414213, d_2^1 = 0.707106, d_3^1 = 0, d_4^1 = 0, d_5^1 = 0, d_0^2 = -0.173494, d_1^2 = -0.272165, d_2^2 = -0.370836, d_3^2 = 1.398239, d_4^2 = 0.272165, d_5^2 = -0.853908$ 。图 3 是根据提供的系数构建的三进制小波图像。

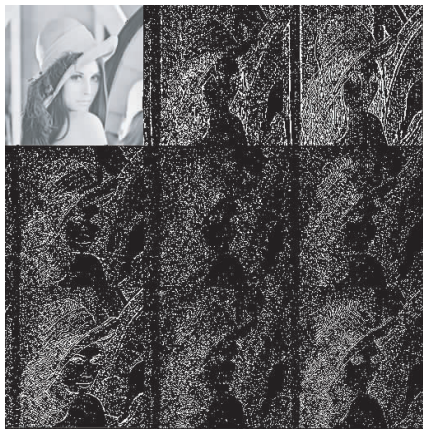


图 3 三进制小波变换图像

Fig. 3 The 3-band wavelet transform images

(2)经 M 进制小波正交分解后,图像被分解成 $M \times M$ 个相同大小的子图像,其长和宽为原图像的 $1/M$ 倍,取出变换后低频部分即图像的左上角部分,这一部分保留了原图像的基本信息及较大的影像结构,是其低分辨率子图,将其另存,以备做最后的定量评价。

4 图像分辨率降低实验与评价

4.1 实验结果

本论文实验的运行平台是 vc 6.0,结合 GDAL

进行图像读取。(GDAL 是一个操作各种栅格地理数据格式的库,包括读取、写入、转换、处理各种栅格数据格式。)实验数据是某一地区 10m 分辨率的 SPOT 影像(图 4),本文以三进制小波进行图像分辨率降低实验,为保持结果的可比较性,其他算法实验均采用 3×3 窗口。实验结果如图 5。



图 4 SPOT 10m 影像

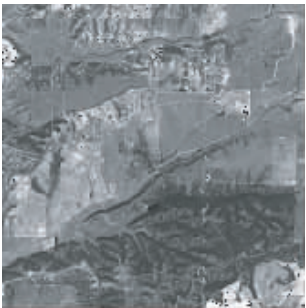
Fig. 4 SPOT 10m-resolution image

4.2 定性分析

将图 3 和图 1(b)、图 1(c)、图 1(d)相比较不难看出,利用多进制小波变换方法得到的降低分辨率



(a)30m影像图



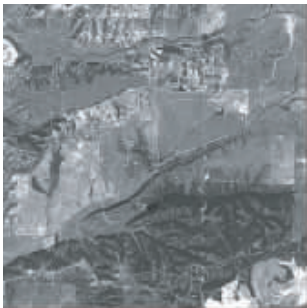
(b)多进制小波左上角子图



(c)最邻近法得到的图像



(d)双线性法得到的图像



(e)领域平均法得到的图像

图 5 原始 30m 图像及各种算法得到的图像

Fig. 5 30m-resolution image and the results from different algorithms

后的图像连续性较好,图像清晰。

从图 5(b)-(e)对图 4 采用重采样的算法得到的图像可以看出,基于三进制小波的结果减轻了图像的不连续性,以及模糊的程度,因而视觉效果比其他方法好的多。从效果上看,小波方法最好,邻域平均法次之,最邻近和双线性法效果相当。

小波方法较好的根本原因是小波基于频域对图像进行处理,频域具有能量比较集中的特性,经过多进制小波变换后的图像把低频信息集中在更小的区域,能够保持图像的基本特征。

4.3 定量分析

如何从图像本身来定量评价图像空间分辨率,一直是图像处理领域的一个难题,至今没有统一的解决方法^[11]。本文是通过同一地区 10m 分辨率的 SPOT 影像和 30m 分辨率的多光谱影像进行定量评价,将 10m 分辨率图像进行三进制小波变换后取出三进制小波的低频部分与 30m 的影像通过相关系数和偏差系数进行匹配。相关系数描述影像的相似程度^[9],计算公式如公式(1)。相关系数越大,说明变换后的图像与 30m 分辨率图像越接近。

$$r = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (f_A(i,j) - \overline{f_A})(f_B(i,j) - \overline{f_B})}{[\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (f_A(i,j) - \overline{f_A})^2 \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (f_B(i,j) - \overline{f_B})^2]^{1/2}} \quad (1)$$

偏差系数是变换后的图像与原始 30m 影像差值的绝对值与原始 30m 分辨率的图像灰度值的比值,反映了两幅图像间的偏离程度,如公式(2)。偏差系数越小,说明变换后的图像与 30m 分辨率的图像越接近。表 1 为计算的各种算法的相关系数和偏差系数。

$$d = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \frac{|f_A(i,j) - f_B(i,j)|}{f_B(i,j)} \quad (2)$$

表 1 各种算法图像分辨率定量降低评价结果 1
Tab. 1 Quantitative evaluation results 1 of various algorithms

实验算法	相关系数	偏差指数
最近邻插值	0.6905	0.2058
双线性插值	0.6905	0.2058
邻域平均法	0.8017	0.1367
多进制小波法	0.8620	0.0944

从表中可以看出,对原图像进行多进制小波后的结果是最接近原始 30m 数据的,即多进制小波在

降低至指定分辨率的应用上效果理想,表中还可以看出最近邻插值和双线性插值,在整数倍降低影像分辨率上的效果是一样的,这与两种算法的原理相符合。

为进一步验证此算法的有效性和优越性,另选其他地区 10m 和 30m 的数据进行验证,原始实验数据如图 6 所示。对原始数据分别进行最临近法、双线性法、邻域平均法和三进制小波法处理,计算相关系数和偏差指数,结果如表 2 所示。



图 6 另一实验区原始 10m 分辨率图像
Fig. 6 Original 10m-resolution data

表 2 各种算法的图像分辨率定量降低评价结果 2
Tab. 2 Quantitative evaluation results 2 of various algorithms

实验算法	相关系数	偏差指数
最近邻插值	0.6955	0.2038
双线性插值	0.6955	0.2038
邻域平均法	0.8117	0.1296
多进制小波法	0.8732	0.0867

表 2 的评价结果与表 1 一致,可知以上算法的可行性和优越性。

5 结论

本文将多进制小波应用于研究较少的图像分辨率定量降低方面,并在三进制小波情形,对图像进行了降低分辨率实验,为了证明本方法的有效性,还与常用的重采样方法进行了比较。结果表明,多进制小波在此应用上的优越性。本文方法根据多进制小波的进制数整数倍定量降低分辨率,应用灵活,为图像定量降低分辨率提供了一个新的途径。

参考文献:

- [1] 明东萍,王群,杨建宁. 遥感影像空间尺度特征与最佳空间分辨率选择[J]. 遥感学报,2008,12(4):529-537.
- [2] Chen J, Deng M, Xiao P F. Optimal spatial scale choosing for high resolution imagery based on texture frequency analysis[J]. Journal of Remote Sensing,2011,15(3):492-501.
- [3] 柏延臣,王劲峰. 遥感信息的不确定性研究分类与尺度效应模型[M]. 北京:地质出版社,2003.
- [4] 李永忠. 基于小波变换的多分辨率图像转换[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版),2005,19(6):50-53.
- [5] 杨晓梅,朱长青. 多进制小波变换及其在影像分析中的应用[J]. 中国图象图形学报,1999,4(2):157-160.
- [6] 马蔼乃. 遥感概论[M]. 北京:科学出版社,1984,153-156.
- [7] 季统凯,赵忠明. 海嘯地区遥感图像空间分辨率定量评价研究[J]. 遥感学报:2005,9(4):486-493.
- [8] 朱长青. 小波分析理论与影像分析[M]. 北京:测绘出版社,1998.
- [9] 朱长青,史文中. 空间分析建模与原理[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [10] 毕宁. 多进制小波在图像处理中的应用[D]. 中山大学论文,2004.
- [11] 李小春,陈鲸. 多进制小波变换的快速构造及在遥感图像融合中的实现[J]. 计算机工程与应用,2004(7):32-34,114.
- [12] 闫利,岳昔娟,崔晨风. 一种定量确定遥感融合图像空间分辨率的方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2007,32(8):667-670.

A Method to Quantitively Reduce Image Resolution Based on Multi-band Wavelet Transform

ZHANG Yanan¹, ZHU Changqing¹ and DU Fuguang²

(1. Key Laboratory of Virtual Geographical Environment, Ministry of Education,

Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China;

2. Department of Resource Management, Tangshan Teachers College; Tangshan 063000, China)

Abstract: The achievement of traditional image resolution reduction is primarily through image resampling. Multi-band wavelet is a newly developed branch of wavelet analysis, and its orthogonality, compact support and smoothness are better than the binary wavelet. In this paper we firstly described the demand of quantitative reduction of image resolution and the traditional methods on image resolution reduction. Then we used multi-band wavelet to reduce image resolution quantitatively based on multi-resolution time frequency characteristics. We did the image resolution reduction experiment through the 3-band wavelet transformation and extracted the low-frequency information of the 3-band wavelet as the resulting image that achieved the image resolution reduction. Lastly, compared with the results of common image re-sampling methods, such as the nearest method, bilinear interpolation method and derivative neighborhood averaging method qualitatively and quantitatively, we found that multi-band wavelet has obvious advantages in image resolution reduction.

Key words: image; multi-band wavelet; resolution reduction; quantitative evaluation