

基于小波双三次插值的遥感测绘 图像空间分辨率检测方法

万计[†]

(湖南省测绘产品质量检验中心,湖南 长沙 410007)

摘 要:为了解决传统图像插值方法在处理效率上的问题,提出了基于小波双三次插值的遥感测绘图像空间分辨率检测方法。利用小波双三次插值将遥感测绘图像分割为空间单位。基于 K-L 变换原理构建图像滤波系数矩阵。采用异构并行体系,在 CUDA 架构下进行高密度值计算,实现了遥感测绘图像空间分辨率的快速检测。实验结果表明,本文方法能够在转换图像时保留更多的细节和纹理信息;在不同测绘比例下,能够在 2.5 s 内完成分辨率检测,且相对水平和垂直分辨率结果较高,适合人眼观察,具有实际应用效果。

关键词:小波双三次插值;遥感测绘图像;检测方法;空间分辨率

中图分类号:TP391

文献标识码:A

Spatial Resolution Detection of Remote Sensing Mapping Image Based on Wavelet Bicubic Interpolation

WAN Ji[†]

(Hunan Quality Inspection Center for Surveying and Mapping Product, Changsha, Hunan 410007, China)

Abstract: In order to solve the problem of processing efficiency of traditional image interpolation methods, a spatial resolution detection method of remote sensing mapping image based on wavelet bicubic interpolation was proposed. Wavelet bicubic interpolation is used to segment remote sensing mapping image into spatial units. The image filtering coefficient matrix is constructed based on the principle of Kosambi-Karhunen-Loève theorem. Adopting a heterogeneous parallel system, high-density value calculation is carried out under the CUDA architecture, achieving rapid detection of spatial resolution in remote sensing surveying and mapping images. The experimental results show that the proposed method can preserve more details and texture information when converting images. Under different mapping ratios, resolution detection can be completed within 2.5 s, with relatively high horizontal and vertical resolution results, suitable for human eye observation and practical application effects.

Key words: wavelet bicubic interpolation; remote sensing mapping image; detection method; spatial resolution

图像插值技术应用非常广泛,如在处理军事雷达图像和卫星遥感图像中,可以对模糊图像进行重新插值,以获得更高分辨率的图像;在地质勘探数据图像中,能够快速还原地貌特征和类型;在生物

医学切片和显微图像处理中,能准确给出细节信息。图像插值的过程就是在图像中将数据再生的一个过程,它能将较低分辨率的图像,变成较高分辨率的图像。

收稿日期:2023-03-27

作者简介:万计(1986—),男,湖北应城人,本科,高级工程师,研究方向:测绘地理信息和成果质量检验技术。

[†]通信联系人,E-mail: tangxun599174@163.com

当遥感图像的分辨率较低时,往往难以满足相关的应用需求。此时,可以通过插值技术来提高遥感图像的分辨率,从而使图像更加清晰,更方便进行后续信息提取和分析处理。因此需要对图像插值方法进行分析和研究,使其在数字图像处理中,更具有广泛的应用和发展价值。本文基于小波双三次插值技术对遥感图像进行分割,针对不同的空间单位进行处理。同时,通过应用 K-L 变换原理,构建遥感图像滤波系数矩阵,以此来实现图像的滤波处理。为了提高计算效率,采用了异构并行体系结构,在 CUDA 架构下进行高密度值的计算。实现检测遥感图像的空间分辨率。

1 小波双三次插值分割遥感测绘图像空间单位

遥感测绘图像是具有一定分辨率的图像,在离散采样值之间需要建立绝对质量的插值数字分析,以小波双三次插值为执行步骤,对遥感测绘图形进行空间单位分割^[1]。其中以最近邻的插值作为基本函数,在一个方波脉冲下分割图像空间单位,其表达式为:

$$Y^0(U) = \begin{cases} 0, U < -\frac{1}{2} \\ 1, -\frac{1}{2} \leq U \leq \frac{1}{2} \\ 0, U > \frac{1}{2} \end{cases} \quad (1)$$

公式中邻近插值的基函数为 Y , 空间元素为 U 。以一个方波进行分割,虽然能够在速度上呈现一定的效果,但会造成脉冲边缘的不对称,需要进行小波的多次插值^[2]。建立小波样条基函数,通过族基 α^p 构成:

$$\alpha^p(U) = \sum_{I=0}^{P+1} \frac{(-1)^I (P+1)}{(P+1-I)I} \left(\frac{P+1}{2} + U - I \right)_+^p \quad (2)$$

其中小波样条系数为 I ^[3]。 $(U)_+^p$ 为单边幂函数,定义为:

$$(U)_+^p = \begin{cases} 0, P=0 \wedge U < 0 \\ \frac{1}{2}, P=0 \wedge U = 0 \\ 1, P=0 \wedge U > 0 \\ U_+^p, P > 0 \end{cases} \quad (3)$$

根据公式可知,通过小波样条的基函数支撑,能够推导出遥感图像的支撑导数。设定在插值中

的离散序列为 $\{A_I\}$, 则图像的分割估计导数表达式为:

$$\frac{1}{U} S(U) = \sum_{I \in P} A_I \frac{1}{U} \alpha^p(U-I) = \sum_{I \in P} (A_I - A_{I-1}) A_I \cdot \alpha^{p-1} \left(U - I + \frac{1}{2} \right) \quad (4)$$

公式中导数信号为。在 P 次插值过程中,保证图像的分割效果,其中当 $P \geq 3$ 时为光滑的, $P \geq 2$ 时为连续的, $P \geq 1$ 时为有界线的,而当 $P = 0$ 又变为最近邻插值基函数。

若 α^0 是关于图像的原点对称,则 Y^0 表示分割不对称,使 α^0 同时满足单位分割条件,通过双三次小波样本进行插值,表示为:

$$\alpha^3(U) = \begin{cases} \frac{2}{3} - \frac{1}{2} |U|^2 (2 - |U|), 0 \leq |U| \leq 1 \\ \frac{1}{6} (2 - |U|)^3, 1 \leq |U| \leq 2 \\ 0, 2 \leq |U| \end{cases} \quad (5)$$

上式中通过对 $\alpha^3(U)$ 的变换,在三次样条的转换中,能够对遥感测绘图像进行严格插值,实现对图像的单位空间分割,在此基础上建立图像的滤波矩阵。

2 基于 K-L 变换原理构建图像滤波系数矩阵

K-L 变换原理是将,某一个含有 Q 组遥感测绘的多光谱图像进行线性转换,通过主成分变换获取分量序列,在产生的新光谱图像中,实现原始遥感图像的矢量计算^[4]。具体表达式如下:

$$\mathbf{W} = \mathbf{E} \mathbf{R} \quad (6)$$

式中, $\mathbf{E}$ 为线性变换矩阵,是指一个 $Q \times Q$ 的线性变换矩阵。 $\mathbf{R}$ 为遥感测量图像,也可用作在变换前,图像的多光谱空间像元矢量。 $\mathbf{W}$ 为生成的新光谱图像,表示转换后图像主分量的像元矢量^[5-6]。而通过 K-L 转换的数学原理,此矩阵 $\mathbf{E}$ 为 $\sum_R$ 的特征矢量矩阵,即转置矩阵 $\mathbf{\delta}^T$, 表示为:

$$\mathbf{E} = \mathbf{\delta}^T = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \cdots & \delta_{1Q} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \cdots & \delta_{2Q} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \delta_{Q1} & \delta_{Q2} & \cdots & \delta_{QQ} \end{bmatrix} \quad (7)$$

结合公式(6)和(7),将其实现线性变化,方式如下:

$$\begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_i \\ \vdots \\ W_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \cdots & \delta_{1Q} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \cdots & \delta_{2Q} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \delta_{Q1} & \delta_{Q2} & \cdots & \delta_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_i \\ \vdots \\ R_Q \end{bmatrix} \quad (8)$$

根据公式可知矩阵 E 的作用,即在分割空间中添加权重系数, W 分量取值均为 R 信息分量的线性组合形式,对每一个空间单位分量进行计算,公式为:

$$\begin{cases} W_1 = \delta_{11}R_1 + \delta_{12}R_2 + \cdots + \delta_{1Q}R_Q \\ W_2 = \delta_{21}R_1 + \delta_{22}R_2 + \cdots + \delta_{2Q}R_Q \\ \dots\dots\dots \\ W_Q = \delta_{Q1}R_1 + \delta_{Q2}R_2 + \cdots + \delta_{QQ}R_Q \end{cases} \quad (9)$$

将 W 变换后的协方差矩阵 $\sum_W W_i$ 作为对角矩阵,分量 W_i 方差为对角元素,即 $\sum_R$ 的特征值^[7]:

$$\sum_W W_i = \begin{bmatrix} \beta_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \beta_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \beta_Q \end{bmatrix} \quad (10)$$

公式中将 $\beta_i = (1, 2, 3, \dots, Q)$ 按照从小到大的顺序排列,则在 K-L 变换过程中,能够获取新的坐标轴 $W_1, W_2, \dots, W_Q$ 的各特征矢量的方向,通过转换后的图像分量信息,在相互独立的关系中完成遥感测绘图像空间分辨率检测。

3 异构并行体系下检测遥感测绘图像空间分辨率

在相互独立的空间关系中,建立 CPU 和 CGU 异构体系,对遥感图像中分辨率进行高密度计算。设定图像的背景下,在统一时刻下其产生的反射率不变,则每个像元在 01 时刻内,均含有 $0.25 \mu\text{m}$ 波段,为独立的像元值^[8]。在该时刻内选择 3 次插值作均值运算,引入 CUDA 架构,将每个遥感图像中的空间,均看作一个二维矩阵。

定义遥感测绘图像为 Z ,像元列数为 X ,像元行数为 C 。将原始图形的波段定义为 $Z_{\text{band}}^{\text{initial}}$ 。在经过双三次插值后,图像表示为 $Z_{\text{min } 1}^{\text{initial}}$ 、 $Z_{\text{min } 2}^{\text{initial}}$ 、 $Z_{\text{min } 3}^{\text{initial}}$,均值求解后图像为 $Z_{\text{band}}^{\text{BG}}$ ^[9-10]。则原始遥感测绘图像为:

$$Z_{\text{band}}^{\text{initial}} = \begin{bmatrix} DN_{11}^{\text{initial}} & \cdots & DN_{1X}^{\text{initial}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ DN_{C1}^{\text{initial}} & \cdots & DN_{CX}^{\text{initial}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中场景并构关系为 DN 。将三次插值过程后的图像定义为 $Z_{\text{band}}^{\text{num}}$,即 $Z_{\text{min } 1}^{\text{initial}} + Z_{\text{min } 2}^{\text{initial}} + Z_{\text{min } 3}^{\text{initial}} = Z_{\text{band}}^{\text{num}}$ 。具体为:

$$\begin{bmatrix} DN_{11}^{\text{initial}} & \cdots & DN_{1X}^{\text{initial}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ DN_{C1}^{\text{initial}} & \cdots & DN_{CX}^{\text{initial}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} DN_{11}^{\text{initial}} & \cdots & DN_{1X}^{\text{initial}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ DN_{C1}^{\text{initial}} & \cdots & DN_{CX}^{\text{initial}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} DN_{11}^{\text{initial}} & \cdots & DN_{1X}^{\text{initial}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ DN_{C1}^{\text{initial}} & \cdots & DN_{CX}^{\text{initial}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} DN_{11}^{\text{num}} & \cdots & DN_{1X}^{\text{num}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ DN_{C1}^{\text{num}} & \cdots & DN_{CX}^{\text{num}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

根据插值转换结果,对图像均值进行计算,将其与遥感图像的像元进行对应:

$$Z_{\text{band}}^{\text{BG}} = \frac{Z_{\text{band}}^{\text{num}}}{3} = \begin{bmatrix} \frac{DN_{11}^{\text{num}}}{3} & \cdots & \frac{DN_{1X}^{\text{num}}}{3} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{DN_{C1}^{\text{num}}}{3} & \cdots & \frac{DN_{CX}^{\text{num}}}{3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} DN_{11}^{\text{BG}} & \cdots & DN_{1X}^{\text{BG}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ DN_{C1}^{\text{BG}} & \cdots & DN_{CX}^{\text{BG}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

在 CUDA 架构下,对划分的空间单位进行线程分组,设定一定数量的线程完成并行,而遥感测绘图像作为二维数组,通过小波双三次插值实现特征计算,可以对应线程数量与像元之间的关系,实现分辨率检测。至此,完成了基于小波双三次差值的检测方法设计。

4 实验测试分析

为验证上文中设计的方法,可以检测遥感测绘图像空间分辨率,采用对比实验的方式进行以下论证。分别选择直线双性插值检测、分形插值检测和变换插值检测方法作为对照,分别与本文方法进行比较。

4.1 遥感测绘图像主观呈现效果

为了让此次测试的结果具有真实性,以某省科研机构中的遥感测绘图像数据库作为测试对象,从中随机挑选一张样本,设置其编号为 TM142562。具体内容如图 1 所示。

根据图中内容,选择的数据样本中具有纹理信

息,将该图像作为原始图像,上传至 Matlab 测试平台,依次连接选择的四组检测方法,按照其技术进行插值转换,具体结果见图 2。

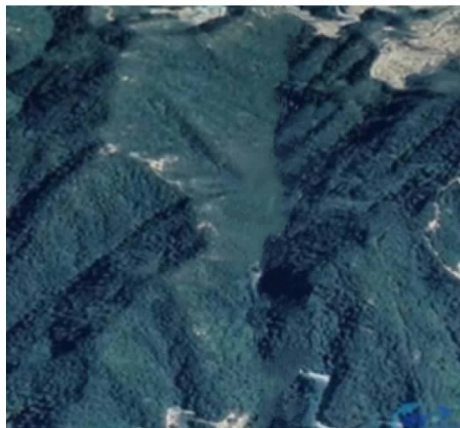


图 1 原始图像

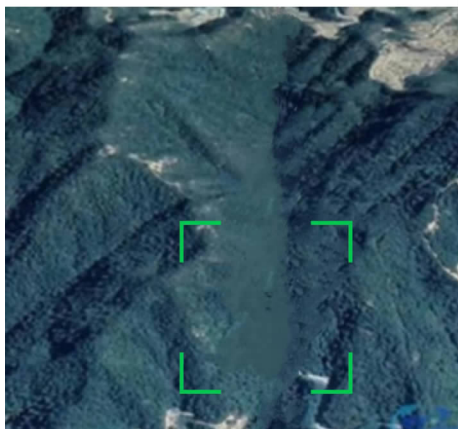
图 2 转换结果表明,在多次插值变化后,分形插值检测方法和变换插值检测方法图像仍具有平滑效果,过度增加纹理信息或不能保持图像的原始纹理信息。直线双性插值检测方法,插值的次数较少,虽然减少了平滑效果,但图像中的纹理信息出现扭曲,且降质较多。而本文方法在小波变换的技术中,可以将原始图像分解为多方向的细节图像,以此再进行分形处理,可以得到较好的效果,且主观效果更适合人眼观察。

4.2 不同分辨率条件下的检测时间

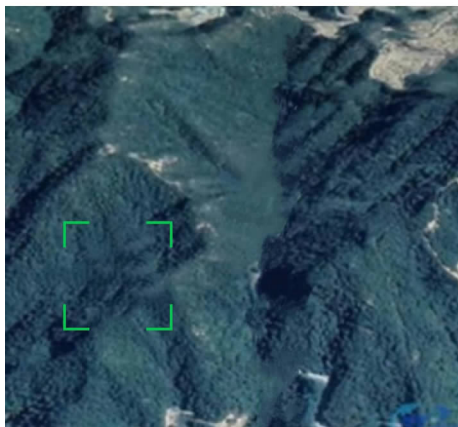
第一阶段验证了本文方法的呈现效果,为进一步分析新方法的有效性,按照设定标准检验不同方法的运算时间。只有在较快的运算中,才能够检测出更多的遥感测绘图像,由于地形测绘的数据较多,若在遥感图像识别中,应用的方法检测时间过长,会影响后续的工作进度。



(a) 直线双性插值检测方法



(b) 分形插值检测方法



(c) 变换插值检测方法

图 2 遥感测绘图像插值转换情况

选择上文中的数据库,以航拍比例尺获取地形分辨率。小基数遥感图像的分辨率为 $0.4-0.8$ m,中基数遥感图像分辨率为 $1.0-2.2$ m,大基数遥感图像的分辨率为 $2.4-3.2$ m。比较不同检测方法的运算时间,结果如图 3 所示。

根据图中内容,随着分辨率数值的增加,不同检测方法的运算时间发生变化,产生不同的结果。由于分形插值检测方法和变换插值检测方法需要经过多次转换差值,因此在计算大基数遥感图像的分辨率时需要耗费较长的时间。直线双性插值检测方法的转换次数较少,在小基数遥感图像分辨率计算中具有一定的运算优势,但在大基数遥感图像中运算优势有所下降。本文方法在较少的插值转换中,就可以得到多个图像细节,无论是在哪一种基数类型中均可以保持运算优势。

综合上图的结果,以最长运算时间为对比项,本文方法在三组基数图像中,其分辨率运算时间分别为 1.2 s、 1.5 s、 2.0 s,可以控制在 3.0 s 以内。较分形插值检测方法分别减少了 0.5 s、 2.0 s、 3.5 s;较变换插值检测方法分别减少了 0.3 s、 1.5 s、 3.0 s;较直

线双性插值检测方法分别减少了 0.2 s、1.0 s、2.5 s，说明可以在一定程度上提高工作效率。

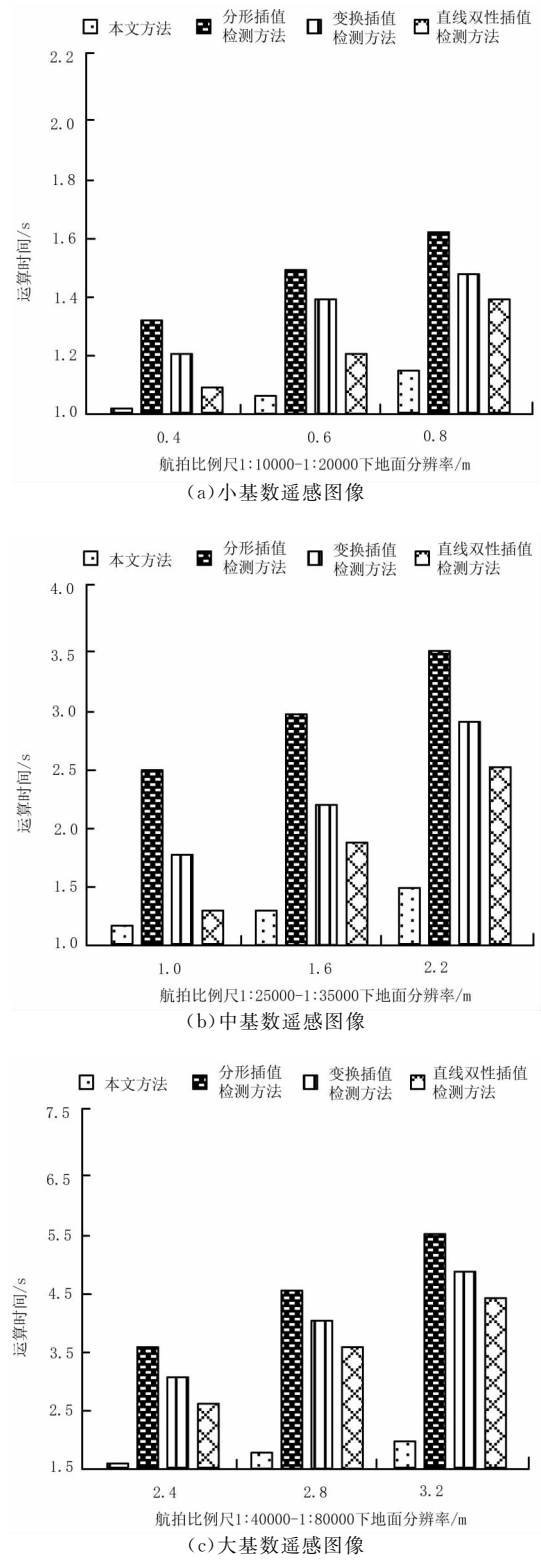


图 3 检测方法的运算时间

4.3 相对水平和相对垂直分辨率检测结果

遥感测量图像的分辨率分为相对水平分辨率和相对垂直分辨率，即图像在各行或各列中灰度数值改变的平均次数，此次以相对水平和相对垂直分

辨率为主要测量对象。

基本上，图像转换后的纹理越丰富，其图像灰度值的变化就会更多，因此图形的相对水平和垂直水平分辨率也在一定程度上反映了图像的纹理信息。以第一阶段的原始图像为例，分别在 1.5 s、2.5 s、3.5 s 的运算时间下，不同方法检测结果见图 4。

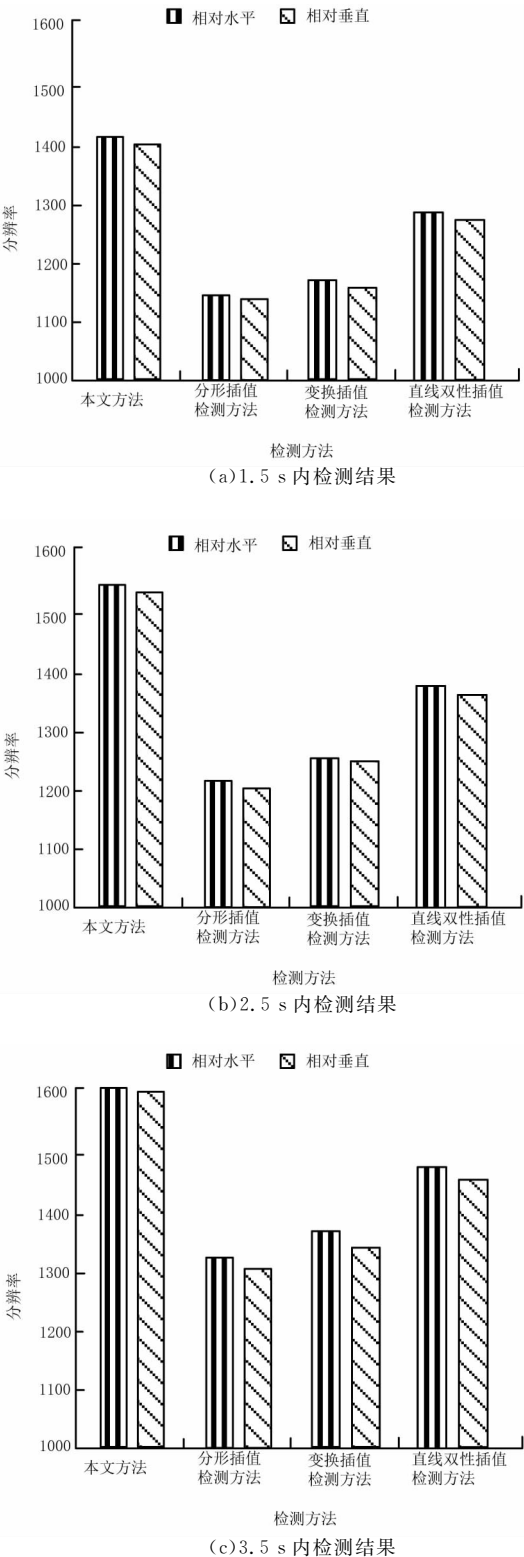


图 4 分辨率检测结果

根据图中内容可知,在不同检测方法下,获取的相对水平和垂直的分辨率结果各不相同,其中本文方法取得的结果最大,其次为直线双性插值检测方法,分形插值检测方法得到的分辨率结果最小。综合说明本文方法应用下,获取的图像细节更加丰富,分辨率较高,观察效果更好。

5 结 论

遥感数字图像的分辨率越高,其所含的信息量越大。在实际应用过程中,受大气、地表和云覆盖等环境因素影响,其图像质量仍有可能下降。在特定情况下,获得高分辨率图像还要考虑设备型号、技术条件、经济成本等因素,因此,如何采用多种技术手段提升遥感数字图像的分辨率,同时考虑图像质量问题,仍然是一个需要解决的难题。本文通过小波双三次插值方式,对遥感测绘图像分割空间信息,以独立的单位空间,应用 K-L 变换建立遥滤波系数矩阵,结合背景场构建原理,实现检测方法设计。并通过实验测试,验证了其具有高精度和快速性的效果。但由于时间条件限制,没有对图像的边缘化程度进行分析,存在一些不足之处,后续会通过更多的测试方式进行补足,为图像处理提供技术支持。

参考文献

[1] 马圣杰,王勇,郝士琦,等. 基于小波分形插值算法的大气湍

流波前畸变重构[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2022,23(3):47-52.

[2] 谭仁虎,胡小平,彭向前,等. 一种基于轮廓边缘的直线拟合算法[J]. 传感技术学报,2022,35(3):376-382.

[3] 秦彦平,张军,多化琼,等. 木材节子图像增强的小波变换与双三次插值融合方法[J]. 西北林学院学报,2021,36(5):183-189.

[4] 孟可欣,刘梦,郭书君,等. Hermite-Shannon-Cosine 区间小波及其在图形自适应分划插值中的应用[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2021,33(10):1573-1581.

[5] 王海群,王水满,张怡. 基于小波分形插值的波前畸变校正[J]. 激光与光电子学进展,2020,57(2):206-212.

[6] 彭龙康,刘励聪,陈学泓,等. 遥感影像云检测网络泛化性能研究:以 DeepLabv3+ 为例[J]. 遥感学报,2021,25(5):1169-1186.

[7] 汪志宁,刘春,戴雷,等. 小波变换组合双线性插值法在北斗周跳中的应用[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(11):50-57.

[8] 史永胜,孙烨. 基于小波双立方配比插值的 Bessel 拟合图像复原算法[J]. 科学技术与工程,2020,20(23):9472-9477.

[9] 张建鹏,任亚婧,杨嘉鹏. 基于小波变换与梯形窗 FFT 的多谱线插值谐波检测算法[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2020,37(3):399-406+414.

[10] 张春森,吴蓉蓉,李国君,等. 面向对象的高空间分辨率遥感影像箱线图变化检测方法[J]. 国土资源遥感,2020,32(2):19-25.