

doi:10.3799/dqkx.2010.028

相干算法提取嫦娥数据月表地质特征

金丹,朱培民,刘江平

中国地质大学地球物理与空间信息学院,湖北武汉 430074

摘要:经典的边缘提取算法可从月球影像数据中提取出月表的构造特征,但难以提取出与月貌有关的特征信息。本文提出的相干法月球影像地质特征提取技术,其基本思想是基于相干运算来考察图像上像素或像素组之间的相似性,以获取月表的构造特征和月貌特征。该方法已经应用在嫦娥一号月球探测器获取的部分影像数据上,相比于几种常规的边缘提取方法,本方法优势明显,不仅能有效地提取环形构造和线性构造等地质特征,还可以很好地提取月貌特征,对具有一定规模的小直径撞击坑的识别也有不错的效果。该方法可以用于计算机自动识别或辅助手工解译月表构造,划分月貌单元等研究。

关键词:月球表面;边缘提取;构造;月貌;相干算法;地球物理。

中图分类号: TP301.6

文章编号: 1000-2383(2010)02-0277-06

收稿日期: 2009-07-16

Extraction of Lunar Surface Geological Features with Chang'e-1 Data Using Coherent Algorithm

JIN Dan, ZHU Pei-min, LIU Jiang-ping

Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The classical edge extracting algorithms in the image processing can extract lunar surface geological features, but can not extract texture features of lunar terrain from Chang'e-1 image data. This paper suggests a method of coherent algorithm to extract the lunar surface geological features with Chang'e-1 data, which is based on coherent calculation of signals in digital signal processing transplanted into image processing for lunar data. We processed some Chang'e-1 image data by using coherent calculation which involves calculating the similarity between pixels or pixel groups. By comparing several classical algorithms with our algorithm, the effectiveness of this method is demonstrated. The coherent algorithm can extract linear and circular geological structure features as well as the texture features of lunar terrain from Chang'e-1 lunar image at the same time. And it is also able to identify the small-diameter craters. So the method can be applied to computer-driven automatic recognition of lunar structures and landforms for evolution analysis of the moon.

Key words: lunar surface; edge extraction; geological structure; lunar landform; coherent algorithm; geophysics.

嫦娥一号月球探测器在太空正常工作一年多后(2007年10月24日发射)获得了大量探测数据,成功完成探测使命后坠落在月球表面。探测数据中最引人注目的是月球表面的影像数据,给我们印象深刻的主要有两点:一是那些遍布月面的大小不一的环形坑和环形山,以及弯弯曲曲、延绵数百千米的裂谷状线性构造;二是那些形态、高程各异的地形地貌。通过研究这些环形构造和线性构造的形态、大小、分布及所属区域的地形地貌,可进一步推断月球

演化过程。嫦娥一期工程的科学目标之一就是要获取月球表面三维影像及对月球进行构造分析(欧阳自远,2005)。为此,本文的研究工作主要集中于嫦娥数据的图像处理,并试图从中获取月球表面的构造和月貌特征,以实现计算机自动识别月表构造和月貌单元,并为手工解译月球影像提供参考数据。

月球遥感影像主要包括构造和月貌单元两部分的地质信息。从月表数据中提取地质特征,即主要提取构造和月貌这两种特征,用于研究月表构造分布、

月貌单元划分及推断月球演化过程. 构造特征主要指环形构造和线性构造的几何形态及分布等, 反映在遥感影像上就是灰度变化率较大的地方. 月貌特征即图像的纹理特征, 指月球表面单元地貌的分布, 反映在遥感影像上就是灰度变化率较小, 纹理模式不同的区域. 这些特征信息对分析月球的演化很重要, 因此如何同时从图像中提取出构造特征和月貌特征尤其重要.

从图像中提取构造特征通常采用边缘提取方法. 到目前为止, 尚未发现较好的可提取地质图像纹理特征的算法. 常规的图像边缘提取方法其基本思想是考察影像的以某个像素为中心的邻域内灰度的急剧变化, 利用空间一阶或二阶方向导数来检测这种变化. 因求导方式不同而细化为不同的边缘提取方法, 常用的求导算子有 Prewitt 算子、Robert 算子、Sobel 算子、Kirsch 算子和 Isotropic Sobel 算子等 (Zhang *et al.*, 2005). 我们采用这几种算子对部分嫦娥数据进行了处理, 其边缘提取效果各异, 大都能提取出构造特征, 但不能正确反映出原始遥感影像的月貌特征.

本文提出的相干法可以同时提取出月表的构造特征和月貌特征. 其基本思想为计算图像中一组像素与另一组像素的相似性, 相似值的大小反映了灰度变化的不连续性程度. 不连续的灰度变化相似值小, 连续的灰度变化相似值大. 算法的实现过程为计算出图像上所有像素点与邻域的相似值, 然后绘制出一副灰度相干图. 作者使用本文提出的算法处理了部分嫦娥数据, 其结果不仅能精确勾勒出环形构造和线性构造, 还能醒目地显示月球表面地貌单元特征, 取得了较好的效果.

1 原理

相干算法常用在离散随机信号的处理中, 用来研究两个信号的相似性, 或一个信号经过一段延迟后自身的相似性, 以实现信号特征的检测、识别和提取等.

设 $x(n)$, $y(n)$ 是两个离散随机信号, 并假设它们是因果关系, 定义:

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n)}{[\sum_{n=0}^{N-1} x^2(n) \sum_{n=0}^{N-1} y^2(n)]^{1/2}}$$

为信号 $x(n)$ 和 $y(n)$ 的相干系数, 其中 N 为 X 、 Y 序

列的长度. 由 Schwartz 不等式 (Dragomir, 2000), 有 $|\rho_{xy}| \leq 1$.

由于像素的值都不小于 0, 所以 ρ_{xy} 的取值只在 0~1 之间.

分析可知, 当 $x(n) = y(n)$ 时, $\rho_{xy} = 1$, 两个信号完全相关; 当 $x(n)$ 和 $y(n)$ 完全无关时, $\rho_{xy} = 0$; 当 $x(n)$ 和 $y(n)$ 有某种程度的相似时, ρ_{xy} 在 0 和 1 中间取值. 因此 ρ_{xy} 可用来描述 $x(n)$ 和 $y(n)$ 之间的相似程度 (胡广书, 2005).

将这种相干算法移植到图像处理上, 可用来研究图像上像素或像素组之间的相似性. 由于图像的边缘与其邻域内像素的灰度有阶跃性变化, 即处于构造边缘的像素与其邻域内像素的相似程度小, 在像素 (组) 间进行相干计算后就可以提取出构造特征.

从月球遥感影像上可以看到很多地貌单元, 有光滑平坦地区、陡峭的斜坡、分布有很多石头和撞击坑的地区等. 若某一地貌单元覆盖介质的反射率有规律地变化, 反映在图像上它们的像素点的相似程度高, 在像素 (组) 间进行相干计算后就可以提取出该地貌单元的纹理特征, 然后依据纹理特征可以确定月貌的类型及分布.

2 算法设计

相干算法的核心是对序列进行相干运算. 在图像上如何选取序列, 才能最大化地提取出月表地质特征呢? 一般来说, 对长度为 N 的序列, 可以选图像同一行上 N 个点, 也可选同一列上 N 个点, 或者 M 行 M 列上 N 个点的矩阵, 其中 $N = M \times M$. 由于月球影像图片上的信息是空间变化的, 单行或单列的运算不利于月表地质特征信息的提取, 所以实际运算中我们通常选择 $M \times M$ 的矩阵.

信号处理中的序列 $x(n)$ 和 $y(n)$ 都是一维的, 而图像处理中的 $M \times M$ 矩阵是二维的, 因而运算前, 需要先将二维矩阵编码成一维序列. 编码可按先列后行、从左往右的顺序进行, 起始编号 0, 最大编号 $N-1$, 第 1 列 1 行编号 0、第 2 列 1 行编号 1, …, 第 M 列 M 行编号 $N-1$, 所有编号与 X 、 Y 的序列号相对应 (参见图 1 中的 X 像素矩阵). 对于图像边界上的那些点, 无法以其为中心构成 $M \times M$ 矩阵, 可在新图像中初始化一个默认值, 在本文中, 我们取默认值为 255.

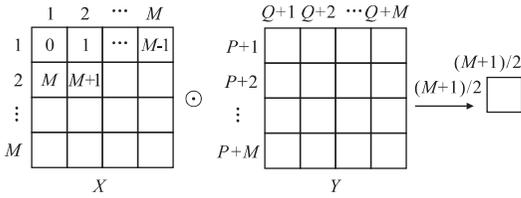


图 1 X 和 Y 像素矩阵的相干运算示意图(符号⊕表示相干计算)
Fig. 1 Illustration of coherent calculation between X and Y pixel matrices

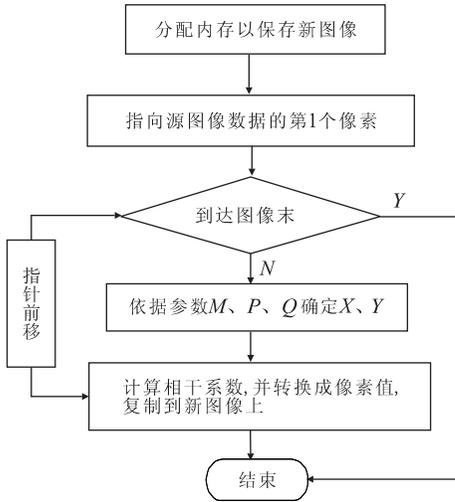


图 2 相干算法流程图

Fig. 2 Flowchart of coherent algorithm

当 X、Y 序列选定后,它们的位置关系也是影响相干结果的重要参数.一是 Y 相对 X 的上下移动行数 P,可取 $-M \sim +M$;二是 Y 相对 X 的左右偏移像素 Q,可取 $-M \sim +M$.当 $P=M$ 或 $Q=M$ 时,Y 与 X 相邻;当 $P=0$ 或 $Q=0$ 时, $Y=X$,自相关计算出的像素值全部等于 255,无意义.当 $|P| > M$ 或 $|Q| > M$ 时,无物理意义.

图 1 描述的是两个 $M \times M$ 矩阵进行相干运算的过程. X 为图像上 M 行 M 列个像素点,Y 为与 X 相隔 P 行 Q 列的 M 行 M 列个像素点,符号⊕表示相干计算.计算出 X 与 Y 的相干系数后,将其结果转换成像素值,并作为 X 的中心点,即新图像上 $(M+1)/2$ 行 $(M+1)/2$ 列的点的像素值.

相干算法流程如图 2 所示.

3 算法实验与分析

X 和 Y 的选取方式影响着月表地质特征提取的效果,为此我们对参数 M、P、Q 的取值进行了实

验,并对结果进行了分析.另外,我们根据实验得到的 M、P、Q 的最佳取值,对部分嫦娥数据进行了相干计算.为了说明相干算法的效果,我们与 Gauss-Laplace、Robert 两种边缘提取算法处理的结果进行了对比.

3.1 参数实验

用于相干试验的参数选取见表 1.通过几种参数试验的对比(表 2),最佳参数为 $M=3, P=1, Q=1$.除了表 1 中所列的参数外,我们还进行了其他的参数实验,但并没有列入表 1 中,表 1 中列出的参数比较具有代表性.

图 3 中的 b、c、f 都是 Y 在 X 右方移动 1 个像素的相干结果,但 M 取值各不同.图 3b 和 3c 提取出来的构造边缘都很清晰,图 3f 的较模糊,图 3f 更利于凸现大型构造的轮廓特征.相比图 3b 而言,图 3c 的边缘线条略粗.图 3d 为 Y 在 X 下方移动 1 个像素的相干结果,与图 3c 相比它的横向分辨率降低,纵向分辨率提高.图 3e 为 Y 在 X 右方移动 3 个像素的相干结果,此时 Y 与 X 相邻,与图 3c 相比它的清晰度有所下降.图 3a 为嫦娥探测器拍摄到的,经度 $71.1123^{\circ} \sim 77.8218^{\circ} E$ 和纬度 $74.1269^{\circ} \sim 74.1263^{\circ} S$ 、分辨率 120 m 的月球影像图.图 3b~3f 为采用不同参数的相干算法处理结果.

表 1 用于相干试验的参数

Table 1 Parameters for coherent algorithm test

图幅编号	参数			矩阵
	M	P	Q	
b	2	0	1	2×2
c	3	0	1	3×3
d	3	1	1	3×3
e	3	0	3	3×3
f	10	0	1	10×10

表 2 相干算法的参数影响

Table 2 Effect of coherent algorithm under various parameters

参数	M	P	Q
取值范围	1~width	$-M \sim +M$	$-M \sim +M$
变换趋势	大	小	绝对值从大到小
对图像的影响	结构突出	边缘清晰	纵向分辨率逐渐提高
对地质特征的影响	可提取大构造特征	可提取小构造特征	纹理特征逐渐清晰

注:width 为原始图像宽度.

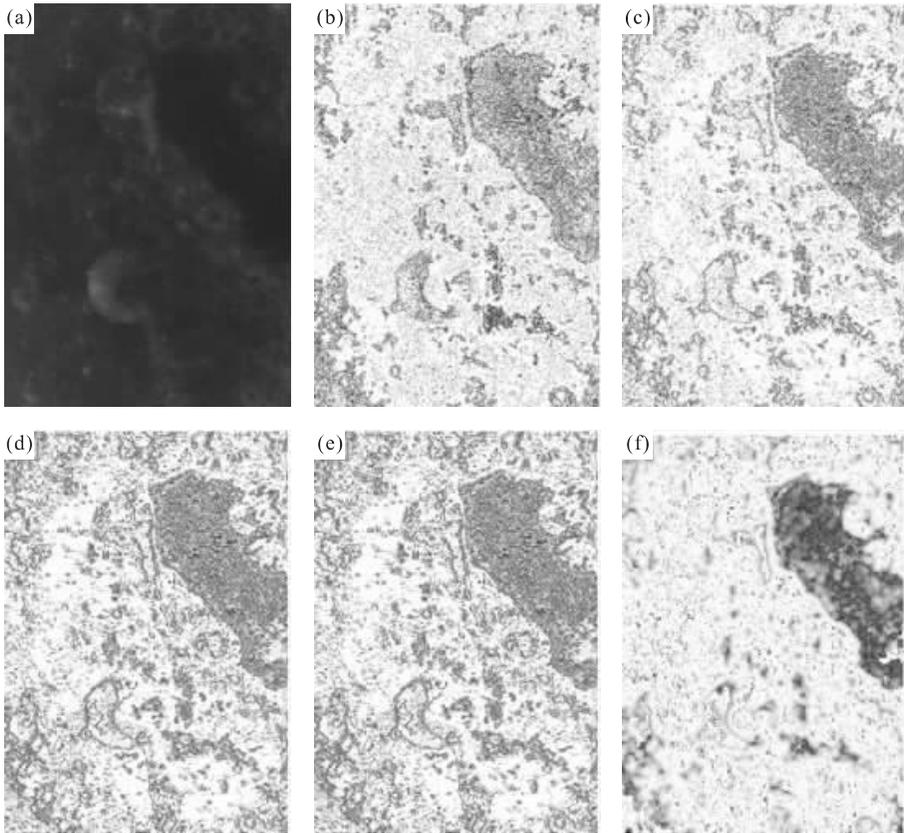


图 3 月球影像不同相干参数处理结果示例

Fig. 3 Illustration of different coherent parameters with the lunar image data

a. 原始灰度图(嫦娥拍摄的影像数据, 经度 $71.1123^{\circ} \sim 77.8218^{\circ}E$, 纬度 $74.1269^{\circ} \sim 74.1263^{\circ}S$, 分辨率 120 m); b. $M=2, P=0, Q=1$ 处理结果; c. $M=3, P=0, Q=1$ 处理结果; d. $M=3, P=1, Q=1$ 处理结果; e. $M=3, P=0, Q=3$ 处理结果; f. $M=10, P=0, Q=1$ 处理结果

3.2 算法对比与构造分析

为了验证相干算法提取月表地质特征的有效性, 我们对比了 Gauss-Laplace 法和 Robert 法, 结果表明相干算法在构造特征和月貌特征提取方面都优于上述两种算法。

我们从嫦娥一号月球探测器获取的数据中, 选出了一幅经度 $71.1123^{\circ} \sim 77.8218^{\circ}E$ 、纬度 $74.1344^{\circ} \sim 74.1338^{\circ}S$ 、恰好含有线性和环形两种构造的月球影像图(图 4a), 其图形分辨率为 120 m。环形构造和线性构造参见图中所标 A 和 B。图 4b~4d 是分别经过 Gauss-Laplace 法、Robert 法和相干算法处理的结果。图 4b~4d 的图件都没有经过任何美化处理, 包括亮度调整, 是算法计算的原始结果。

3.2.1 构造特征对比 在图 4a 原始图中, 可看到环形结构和线性结构两种构造存在。环形构造共由 4 个醒目的大型环形撞击坑组成, 线性构造位于图 4a 右下角, 隐约可看到它们呈树枝状散开, 弯弯曲曲地朝东南方向延伸, 我们推断这些线性构造为月溪(吴伟仁, 2008)。

图 4b~4d 分别是 Gauss-Laplace 法、Robert 法和相干算法处理的结果。对比来看, 图 4b 的噪声最大, 图 4c 次之, 图 4d 最小。从提取结果上看, 图 4b 和 4c 中能看到被勾勒出边缘的 4 个环形坑, 但无法分辨出线性构造。而图 4d 用相干算法的提取结果很好地展现出环形坑和月溪的构造特征, 图 4d 中的右下方清晰地显示了线性构造的边缘、形状及走向(参见图中 C 所标箭头指向的位置), 而 Gauss-Laplace 法和 Robert 法的处理结果在这一块噪声很大, 明显没能提取出这一重要信息(图 4b 和 4c 中 B 处)。图 5a 是在图 4d 的基础上手绘出的构造纲要图。

由此可见, 在构造特征的提取上, 以 Gauss-Laplace 法和 Robert 法为代表的常规边缘提取算法和相干算法对环形构造坑的处理效果都较好, 但常规方法难以提取出线性构造特征, 而相干算法的提取效果就非常好。可能的原因有: (1) 常规方法对图像求梯度或二阶差分来确定边缘像素点(王洪, 2007), 计算时用的像素数每个方向有 2 个或 3 个, 容易形成单点噪声, 而相干算法比较像素组之间的

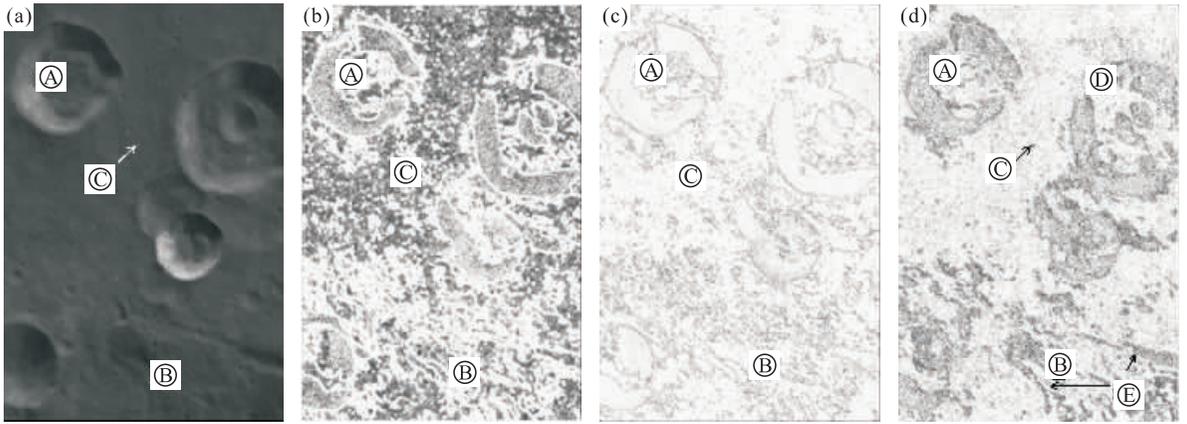


图 4 月球影像不同边缘提取算法处理结果

Fig. 4 Illustration of different edge-extracted algorithms with the lunar image data

a. 原始灰度图(嫦娥拍摄的影像数据,经度 71. 112 3°~77. 821 8°E,纬度 74. 134 4°~74. 133 8°S,分辨率 120 m); b. 用 Gauss-Laplace 法处理的结果; c. 用 Robert 法处理的结果; d. 用相干算法处理的结果

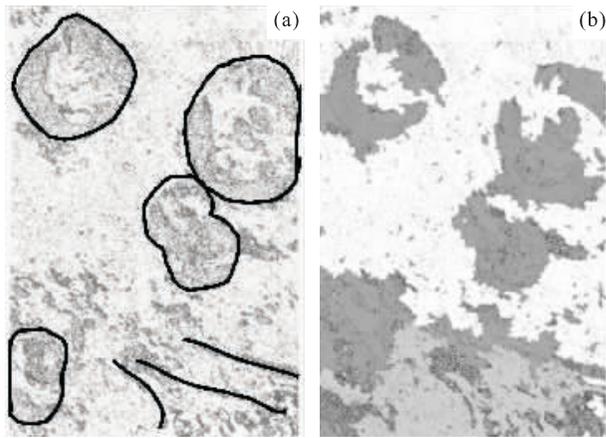


图 5 (a)由图 4d 手绘的构造纲要图;(b)由图 4d 根据纹理由计算机划分的月貌分区图

Fig. 5 (a) Structure outline from Fig. 4d; (b) landform zones categorized by texture from Fig. 4d

相似程度,无形中降低了单个像素点梯度变化引起的噪声,提高了线性构造分辨率;(2)线性构造本身结构细长,微弱的噪声就会影响其提取效果。

3.2.2 月貌特征对比 从原始图 4a 中可以看出,几个大型撞击坑的背景区域是一片较平滑的地区,其间零散分布了一些小直径撞击坑。提取该区域的月貌特征就需要在图像上用纹理区分出月表的平原、坑壑等。

对这一区域的图像处理,采用相干算法提取的结果具有绝对的优势。图 4d 中浅白色的纹理块©对应了原始图中光滑平坦的区域©,黑色的星点对应其中的小型撞击坑,其结果符合原始图中的月貌单元特征。图 4b 和 4c 在该区域产生了很大的噪声,基

本不能反映出区域平坦的地质特征。

常规的边缘提取算法难以提取出图像的纹理特征,即月貌特征,这是由它的算法决定的,具体原因还有待进一步的研究。

特别是相干法能在大型平坦区域中较好地提取出具有一定规模的小直径的撞击坑(图 4a 和 4d 中©箭头指向处为一小型撞击坑),而常规方法提取的效果不太好,所以在后续的研究工作中,我们还可以考虑将该方法扩展应用到小撞击坑的自动识别中。当然,撞击坑的规模与图像分辨率有关。

图 5b 是在相干算法处理结果上,依据纹理由计算机自动划分的月貌分区图,图中已将平原、坡地和坑洼地区划分出来。我们也对相干处理结果按灰度进行过月貌划分,两种划分的结果基本相同。由于我们的研究工作是初步的,在这里划分的标准较简单,划分的结果较粗糙。更细致的划分有待进一步的研究。

3.2.3 计算效率对比 当图像宽度为 W ,算子宽度为 M 时,相干算法的时间复杂度为 $O(W^2 * M^2)$, Robert 算法的为 $O(W^2)$, Gauss-Laplace 算法的为 $O(W^2 * M^2)$ 。由此可看出,相干算法时间复杂度与 Gauss-Laplace 相当。

本文也用其他一些边缘提取算法做过处理试验,如 Prewitt、Sobel、Kirsch、Isotropic Sobel 法等,这些算法都无法正确提取出月貌特征,在线性构造的边缘提取上效果也不佳。从整体效果而言,本文设计的相干算法比较好。

采用相干算法提取月球表面的地质特征时,由

于太阳光照射角度的原因,会引起图像上的明暗变换,比如环形坑壁的阴影区,这使得相干处理后的环形坑边缘不连续(见图 4d 中①处).当然其他算法也存在类似的问题.

4 结语

(1)本文提出的相干算法月球影像地质特征提取技术,应用在嫦娥一号月球探测器获取的部分数据上,较之于 Gauss-Laplace 和 Robert 等常规边缘提取方法,本方法有明显的优势,不仅能有效提取出环形构造和线性构造,还能很好地提取出月貌特征,对一定规模的小直径撞击坑的识别也有不错的效果,可以用于计算机自动识别或辅助手工解译月表构造,划分月貌单元等研究,并期望能在探月数据的后续处理和地质解译工作中发挥作用.

(2)相干算法进行边缘提取时,如果提取大尺度构造,应该选取大像素集;提取小尺度构造,应该选取小像素集,具体参数可通过试验确定.

(3)相干算法的时间复杂度与 Gauss-Laplace 算法相当,但比其他算法略低,处理大数据量遥感影像没有问题.

(4)在图像分辨率确定的情况下,本算法提取构造信息的准确度只与图像提取中相干算子的纵横向位移参数有关,其中最小误差为 0 个像素,最大误差为最大位移的一半.

References

- Dragomir, S. S., 2000. On the Cauchy-Buniakowsky-Schwartz's inequality for sequences in inner product spaces. *Mathematical Inequalities and Applications*, 3(3):385-398.
- Hu, G. S., 2005. Introduction of digital signal processing. Tsinghua University Press, Beijing, 26-31 (in Chinese).
- Ouyang, Z. Y., 2005. The introduction of lunar science. China Astronautic Press, Beijing, 1-200 (in Chinese).
- Wang, H., 2007. The analysis of lunar surface features based on remote sensing image (Dissertation). Jilin University, Changchun, 1-45 (in Chinese).
- Wu, W. R., 2008. To the moon. China Astronautic Press, Beijing, 85-122 (in Chinese).
- Zhang, H. Y., Wu, B., Peng, Q. C., 2005. An improved algorithm for image edge detection based on lifting scheme. *Journal of Electronic Science and Technology of China*, 3(2):113-116.

附中文参考文献

- 胡广书, 2005. 数字信号处理导论. 北京: 清华大学出版社, 26-31.
- 欧阳自远, 2005. 月球科学概论. 北京: 中国宇航出版社, 1-200.
- 王洪, 2007. 基于遥感图像的月球表面特征分析(学位论文). 长春: 吉林大学, 1-45.
- 吴伟仁, 2008. 奔向月球. 北京: 中国宇航出版社, 85-122.