

城区红外遥感云层检测技术

李志军 王卫华 牛照东 刘松林 陈曾平

(国防科学技术大学自动目标识别重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要 针对复杂地物背景下的城区红外遥感图像的云层干扰问题, 提出了一种基于图像特征提取、区域投票表决和阈值分割的云层检测方法。对图像进行去噪和归一化拉伸处理, 再进行多特征提取, 并通过提取的特征向量对图像进行分区域云层投票表决, 最后根据表决结果和分形特征度量矩阵进行阈值计算和阈值分割, 并通过形态学处理得到精确的云层区域。统计检测结果显示算法对不同时刻的数据检测准确率在 91% 以上, 证明了算法的适用性和有效性, 为红外遥感图像的信息处理提供了有效的技术支持。

关键词 图像处理; 红外遥感; 云层检测; 特征提取; 阈值分割; 复杂背景

中图分类号 TP391 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.1108006

Cloud Recognition from Infrared Remote Sensing Images under City Background

Li Zhijun Wang Weihua Niu Zhaodong Liu Songlin Chen Zengping

(Automatic Target Recognition Laboratory of National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Aiming at the problem of infrared remote sensing cloud detection under complex surface features background, a novel cloud detection algorithm based on image feature extraction, regional voting and threshold segmentation is proposed. Denoising and normalized stretching are performed on image. The multi-features are extracted and cloud discrimination is executed in sub-region using the extracted feature vectors. The precise cloud regions are obtained through threshold segmentation based on discrimination results and fractal characteristics. Test results show that the accuracy of image recognition is above 91%. The applicability and effectiveness of the algorithm is verified by large quantities of measured data and it provides effective technical support for the information processing of infrared remote sensing image.

Key words image processing; infrared remote sensing; cloud detection; feature extraction; threshold segmentation; complex background

OCIS codes 040.2480; 100.2000; 100.3008; 100.4999

1 引 言

近年来红外遥感图像在地球资源调查、自然灾害预测、环境污染监测、地质探测以及军事未制导领域中得到广泛应用, 是很多国家军事装备技术发展的重点。红外传感器成像受大气密度、云层变化等影响较大, 图像容易存在云遮挡的“盲区”。如何有效、快速、智能地检测图像中的云层干扰是红外图像处理的关键技术之一, 具有重要的经济和军事应用价值。

红外云层图像具有背景复杂、云层区域与背景

灰度分布对比度特性未知、云层区域形状千变万化等特点, 难以直接对图像进行云层检测和识别。目前, 按照工作平台的不同, 云层检测主要分为卫星遥感和航空遥感两种方式。卫星图像是大尺度观测, 通常能够得到大面积的云层分布情况, 云图识别技术研究较多, 相对成熟。比如灰度共生矩阵法及其扩展法、图像频率的 Gabor 滤波器以及根据云图特点定义的多光谱相态特征等。航空遥感观测则是局部范围, 能够得到细致的云图信息。谢华美等^[1]根

收稿日期: 2012-05-29; 收到修改稿日期: 2012-07-07

基金项目: “十二五”部委预研项目(9140C800201070C80)资助课题。

作者简介: 李志军(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事红外图像处理方面的研究。E-mail: lzj19821202@sina.com

导师简介: 陈曾平(1967—), 男, 博士, 教授, 主要从事精确制导自动目标识别方面的研究。E-mail: atrchen@163.com

据薄云的特点,在可见光图像中基于空域进行云层识别的出发点是云区的均值较大(高亮度)而方差较小(低对比度)。曹琼等^[2]针对卫星遥感图像中的云探测问题,提出纹理特征分析方法。该方法使用反映图像灰度性质和空间关系的分形及灰度共生矩阵(GLCM)两类纹理,分别来描述云区域和无云的下垫面区域,并从这两个纹理的五个特征参数构成的多维空间中简化出最小的二维分类空间。陈奋等^[3]提出云区厚度掩模概念,对图像经无抽样小波变换后采用双阈值方法来标识图像中云区厚度的渐变过程。上述方法都是基于可见光遥感图像的云层检测识别,其特点是单张图像数据量大,图像中云层区域为高亮度,不具有实时性。

本文针对城区红外遥感图像中云层区域的亮度不具有确定性,要求检测算法具有较高的实时性;针对复杂地物背景下航拍的城区红外遥感图像云层检测问题,提出了一种基于图像特征提取、投票表决和阈值分割的红外图像云层检测方法。对图像进行去噪和灰度归一化拉伸,再对图像进行区域划分和特征提取,根据提取到的特征向量对划分的各个区域进行投票表决,初步得到云层区域。然后,根据投票表决结果和分形特征进行阈值计算和阈值分割,得到精确云层检测结果。

2 图像预处理

2.1 图像去噪

红外图像在传输、转换过程中会因为干扰、电子信息处理等因素造成图像质量下降,即产生噪声。常用的去噪主要包括频域和空域滤波。空域滤波是在空间域中对像素灰度值直接进行运算处理,包括邻域平均法、多图平均法、自适应滤波、高斯滤波和

中值滤波等。而频域滤波则考虑噪声频谱,通常在高频段采用低通滤波方法来减少噪声^[4]。

由于红外遥感图像中的高斯噪声并不很强,并且图像中通常存在一定的坏点,实验中采用一种伪中值排序滤波器对实时图像进行去噪处理。计算公式为

$$f_1(i, j) = \begin{cases} \max_{\substack{(k, h) \in D \\ k \neq i, h \neq j}} [f_0(k, h)], & f_0(i, j) = \max_{(k, h) \in D} [f_0(k, h)] \\ \min_{\substack{(k, h) \in D \\ k \neq i, h \neq j}} [f_0(k, h)], & f_0(i, j) = \min_{(k, h) \in D} [f_0(k, h)] \\ f_0(i, j), & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

式中 f_0 为原始实时图, f_1 为去噪后的图像, D 为像素坐标 (i, j) 的 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 邻域。该方法既能有效去除坏点噪声影响,又能有效保持图像的边缘轮廓信息,为后面的特征提取提供基础。

2.2 图像灰度归一化拉伸

为了标准化图像的灰度对比度,使不同条件下拍摄的图像具有相同的灰度均值和动态范围,并且又能较好地保持原始图像的灰度分布细节信息,因此,需要对实时图进行灰度归一化拉伸,拉伸图像 f_2 的计算公式为

$$f_2(i, j) = [f_1(i, j) - f] / \sigma_g + 128, \quad (2)$$

式中 f_1 为去噪后的实时图, f 为 f_1 的灰度均值, $\sigma_g = \max(64, 5\sigma_f)$, σ_f 为 f_1 的灰度均方差, $\max(\cdot)$ 为求最大值函数。

经过灰度归一化拉伸后,不同时刻、不同天气条件下拍摄的图像在灰度整体分布上具有相同的均值,以及类似的直方图和对对比度,便于后续的特征提取和云层判别。灰度拉伸结果如图 1 所示。

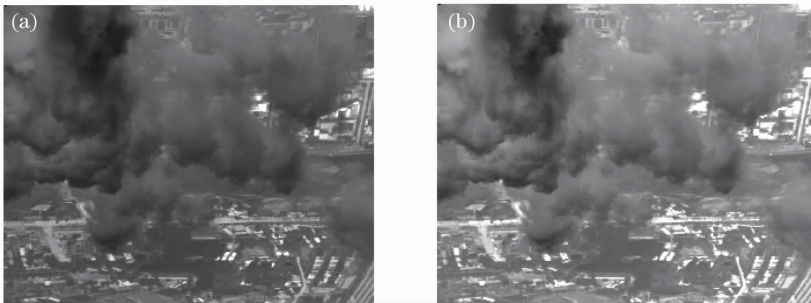


图 1 (a)实时图;(b)灰度拉伸图

Fig. 1 (a) Origin image; (b) normalized stretching image

3 区域云层判别

对实时图进行分区,然后对划分的区域进行特

征提取和特征量化,最后根据提取到的特征向量对划分的每个区域进行特征表决,得到区域云层表决

结果。具体流程如图 2 所示。区域划分把实时图划分成 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ 大小的区域,把大小为 $320 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 的实时图划分成 20 个区域,如

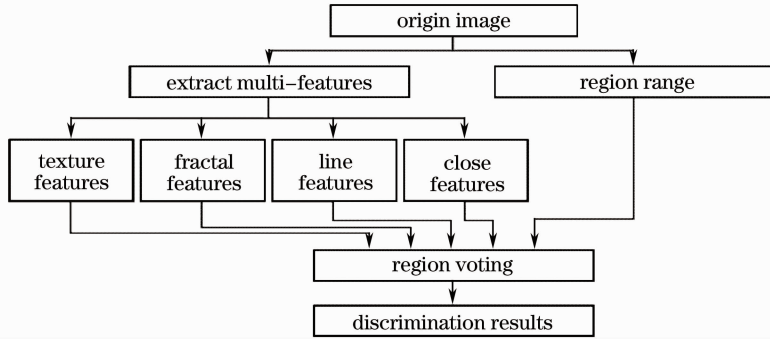


图 2 区域云层判断流程图

Fig. 2 Flow chart of cloud discrimination

3.1 纹理特征

纹理是对图像各像素灰度空间分布的一种描述,是图像灰度分布函数的统计^[5]。目前公认最有效的图像纹理分析方法是灰度共生矩阵,它是建立在二阶组合条件概率密度函数基础上对图像的纹理特征进行分析、提取和量化。实验中通过灰度共生矩阵对每个区域提取纹理特征^[6]。

由于云层纹理具有方向的不确定性,采用 0° 、 45° 、 90° 和 135° 四种方向的平均灰度共生矩阵 $H_c(i, j)$ 作为最终的灰度共生矩阵。通过对灰度共生矩阵的多种特征值进行分析和统计,提取特征值作为纹理特征提取结果。特征值为

$$A_k(1) = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L H_c(i, j)^2 \times (|i - j| - d)^2, \quad (3)$$

式中 $L=64$ 为灰度共生矩阵图像灰度压缩级数, d 为纹理参数,通常取 2。

3.2 分形特征

分形是一种独立于分辨率、视角,在一定范围内稳定存在的表示量^[4]。分形有不同的测度,相应也有不同的概念,实现的算法也有多种。实验中提出一种计算简单,能够区分复杂地貌和云层区域的分形特征提取算法。分形测度矩阵 f_{Dim} 的计算公式为

$$f_{\text{Dim}}(i, j) = \max_{\substack{i-n \leq k \leq i+n \\ j-n \leq h \leq j+n}} [f_2(k, h)] -$$

图 3(b)所示。通过对不同的特征进行特征提取和统计,并分析其表决性能,实验中选择纹理、分形、直线和闭合 4 个特征值组合成特征向量进行区域表决。

$$\min_{\substack{i-n \leq k \leq i+n \\ j-n \leq h \leq j+n}} [f_2(k, h)], \quad (4)$$

式中 $f_{\text{Dim}}(i, j)$ 为像素点 (i, j) 的分形测度值, f_2 为经过去噪和灰度拉伸后的实时图, $n=3$ 为分形测度参数。(4)式表示像素点 (i, j) 在 $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$ 邻域内的最大和最小值之差。

3.3 直线特征

实时图像中云层区域轮廓具有随机性,不具有人工地貌产生的直线等几何特征。对于复杂背景下的红外遥感图像,背景中常常具有大量人工物体。比如城市建筑物、道路、广场及水池等。这些地貌具有一定的直线特征,因此,可以通过检测这些地貌具有的直线特征,进而对图像进行判断。

直线检测采用相位编组方法,算法步骤为^[7,8]:

- 1) 对图像进行 Canny 算子边缘检测,并对边缘方向重叠量化;
- 2) 将图像中边缘方向相同、相互连通的像素点连接成各自的集合,形成线段支持集;
- 3) 对各个线段支持集进行线基元连接;
- 4) 计算每条直线的像素个数和直线拟合角度;
- 5) 祛除不符合条件的线基元。

若直线提取像素个数阈值为 15,最终二值化直线提取图像为 f_L ,则有直线特征度量矩阵 f_{LT} 为

$$f_{\text{LT}}(i, j) = \begin{cases} N(i, j) \times 3, & f_L(i, j), \quad A(i, j) \in [80^\circ, 90^\circ] \cup (-90^\circ, -80^\circ] \\ N(i, j) \times 2, & f_L(i, j), \quad A(i, j) \in [-10^\circ, 10^\circ] \\ N(i, j), & f_L(i, j), \quad A(i, j) \in \text{else} \\ 0, & f_L(i, j), \quad f_L(i, j) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $N(i, j)$ 和 $A(i, j)$ 为图像 f_L 中点 (i, j) 所在直线的长度和角度。

3.4 闭合特征

云层区域灰度分布相关性较强,一般只存在弱边缘,并且,云层区域边缘检测结果不会出现由人工地貌产生的边缘闭合区域。故可以对实时图像进行闭合区域检测,进而对图像进行云层判断。

闭合区域的提取步骤如下^[5,9,10] :

- 1) 对实时图像进行 Canny 算子边缘检测;
- 2) 对检测到的边缘进行形态学孔洞填充处理;
- 3) 对孔洞填充后的图像进行二值形态学开运算处理,去除非闭合区域边缘。形态学结构元素大小为 2×2 。

若得到的二值化闭合区域图像为 f_c ,则有闭合区域特征度量矩阵 f_{CT}

$$f_{CT}(i,j) = \begin{cases} M(i,j), & f_c(i,j) \neq 0 \\ 0, & f_c(i,j) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中 $M(i,j)$ 表示闭合图像 f_c 中非零点 (i,j) 所属闭合区域的像素个数。

3.5 投票表决

对实时图划分的 20 个区域分别提取其特征向量,并进行投票表决,判断是否是云层。若第 k 个划分区域 D_k 的特征向量为 $A_k, k=1, \dots, 20$,则有

$$A_k(1) = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L H_{ck}(i,j)^2 \times (|i-j| - d)^2, \quad (7)$$

$$A_k(2) = \frac{1}{64 \times 64} \sum_{(i,j) \in D_k} f_{Dim}(i,j), \quad (8)$$

$$A_k(3) = \frac{1}{64 \times 64} \sum_{(i,j) \in D_k} f_{LT}(i,j), \quad (9)$$

$$A_k(4) = \frac{1}{64 \times 64} \sum_{(i,j) \in D_k} f_{CT}(i,j), \quad (10)$$

式中 $H_{ck}(i,j)$ 和 D_k 为第 k 个划分区域的灰度共生矩阵和像素点集合。

对 A_k 中 4 个特征值分别进行投票表决,得到第 k 个划分区域的云层判别 $J(k), k=1, 2, \dots, 20$,有 $J(k) =$

$$\begin{cases} 0, & \alpha[A_k(n)] > \alpha[T(n)], (n = 1, 2, 3, 4) \\ 1, & \text{else} \end{cases} \quad (11)$$

(11)式表示当某块划分区域的特征向量中存在任意一个特征值大于阈值,即定义表示为 $\alpha[A_k(n)] > \alpha[T(n)], (n = 1, 2, 3, 4)$,则判断该区域为非云层。 $\alpha[T(n)]$ 为投票否决阈值,通过对一定量的样本实测数据进行特征提取和统计获得。图 3 为云层区域判别结果,其中图 3(a)为实时图,图 3(b)为云层判别时的区域划分,图 3(c)为对实时图进行分形特征提取的度量矩阵数,图 3(d)为提取的大于 15 pixel 长度的直线,图 3(e)为通过 Canny 算子提取的边缘闭合区域,图 3(f)为通过区域表决得到的云层判别结果。

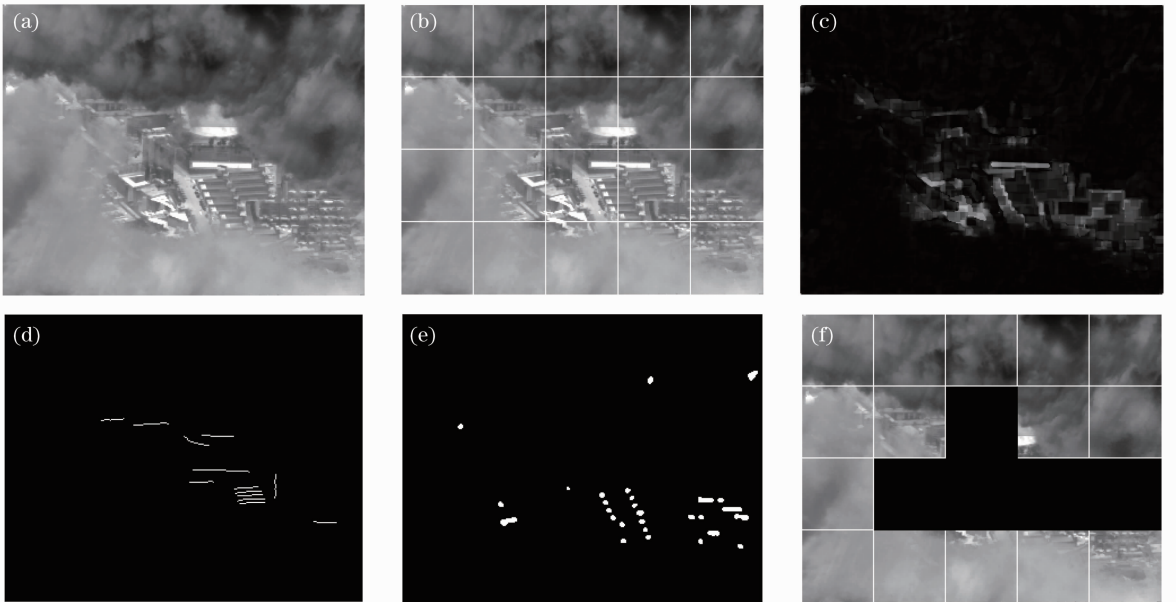


图 3 区域云层判断示意图。(a)实时图;(b)区域划分;(c)分形特征度量矩阵;(d)直线检测结果;
(e)闭合区域提取结果;(f)区域投票表决结果

Fig. 3 Results of cloud discrimination. (a) Origin image; (b) page range; (c) fractal characteristics;
(d) line detect image; (e) close characteristics; (f) discrimination results

4 阈值分割

对区域云层判别结果进行阈值分割,并进行一系列形态学操作得到精确云层区域。具体操作流程如图 4 所示。

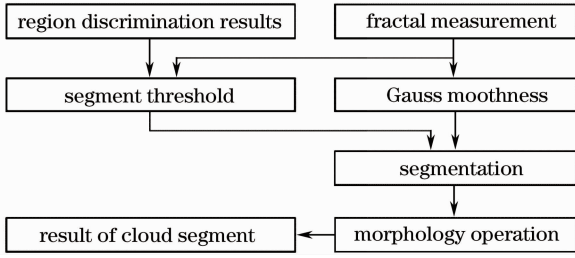


图 4 云层分割流程图

Fig. 4 Flow chart of cloud segmentation

4.1 阈值计算

如图 4 所示,在区域云层识别结果和分形测度量矩阵数的基础上计算分割阈值。若得到的区域云层判别结果为 $J(k)$ ($k=1,2,\dots,20$),当 $J(k)=1$ 时表示判别第 k 个区域为云层,当 $J(k)=0$ 时表示判别第 k 个区域为非云层。则分割阈值的计算公式为

$$H_{res} = \sum_{k=1}^{20} [J(k) \times A_k(2) \times 1.5] / \sum_{h=1}^{h=20} J(h), \quad (12)$$

(12)式计算的阈值结果表示为通过投票表决判别为云层区域的分形测度均值。

4.2 阈值分割

对分形测度矩阵 f_{Dim} 进行高斯滤波,得到 f'_{Dim} 。阈值分割得到的云层分割结果为 f_{Cloud} ,有

$$f_{Cloud}(i,j) = \begin{cases} 0, & f'_{Dim}(i,j) > H_{res} \\ 1, & f'_{Dim}(i,j) \leq H_{res} \end{cases} \quad (13)$$

对云层分割结果 $f_{Cloud}(i,j)$ 进行形态学孔洞填充和滤除小区域操作^[4],可得到精确的云层分割结果。图 5 为对图 3(a)进行阈值分割的结果,图 5(a)为区域判别结果标识,图 5(b)为进行阈值分割和形态学处理后的精确分割结果。从图 3(a)可以看出,实时图云层区域分为两大块,并且两部分灰度分布对比度不同,出现明显的亮暗,直接进行灰度分割不可能得到正确的云层区域;从图 5(b)可以看出,云层区域分割精确,效果良好。

(a)

1	1	1	1	1
1	1	0	1	1
1	0	0	0	0
1	1	1	1	1

(b)

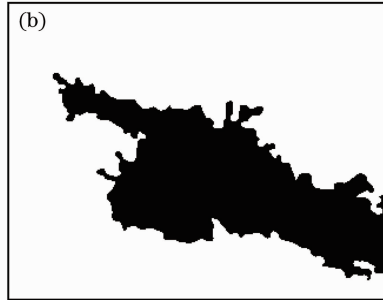


图 5 (a)区域判别标识;(b)云层分割结果

Fig. 5 (a) Discrimination results; (b) cloud segment image

5 试验结果

为了验证本算法的有效性,在 CPU2.5 GHz,内存 2.0 Gb 的计算机上,采用 VC6.0 语言编程对实拍数据进行了测试。图 6 为航拍的遥感红外云层图像数据试验结果。其中图 6(a)为原始实时图,图 6(b)为图像去噪结果,图 6(c)为灰度拉伸结果,图 6(d)为对实时图进行直线检测结果,图 6(e)为对实时图进行分形特征提取得到的度量矩阵数,图 6(f)通过 Canny 算子检测到的边缘闭合区域,图 6(g)为利用论文介绍的多特征投票机制进行区域云层表决的结果,图 6(h)为最终云层分割结果。

从图 6 可以看出,与复杂地面背景相比,红外云层区域灰度整体上相关性较强,不具有明显的亮暗

特性;而复杂地面背景由于具有较多的人工地貌,灰度变化剧烈,出现较多的边缘和闭合特征。通过处理结果可以看出,与传统的遥感云层检测技术相比,实验中采取算法能够适应复杂地貌背景的工作环境,具有正确检测并精确分割出图像中灰度亮特性未知的云层干扰区域的能力,为后续的图像解译、特征提取及目标识别等提供了有效的技术保障。

6 结 论

针对复杂地物背景下的城区红外遥感云层检测问题,提出了一种基于图像特征提取、投票表决和阈值分割的云层检测方法。该方法提出利用伪中值滤波和归一化拉伸对图像进行预处理的方法,能有效滤除坏点噪声,并把不同特性的图像在灰度分

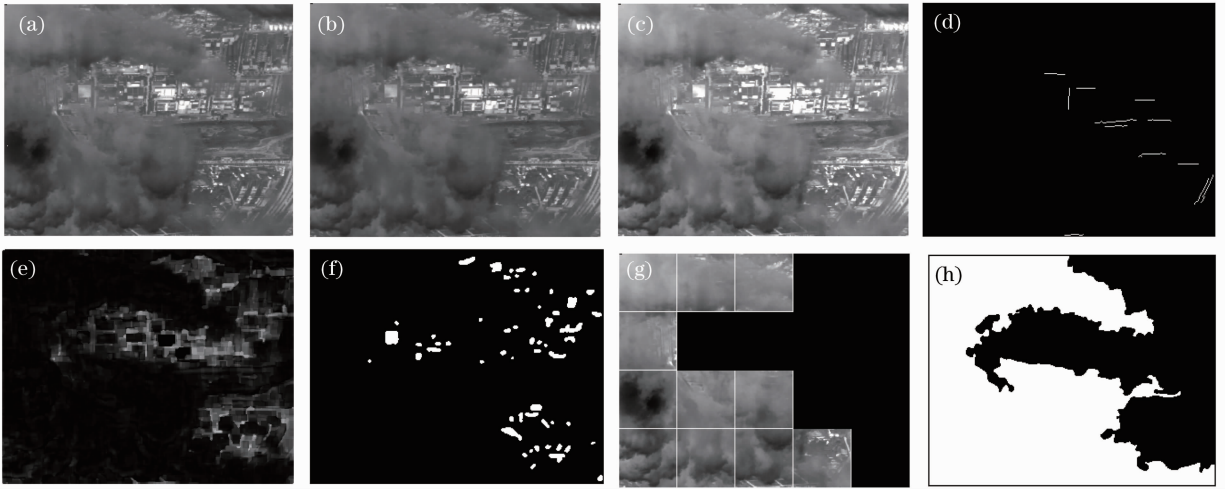


图 6 云层检测结果。(a)实时图;(b)去噪图;(c)灰度拉伸图;(d)直线检测结果;(e)分形特征提取结果;
(f)闭合区域检测结果;(g)区域云层判别结果;(h)云层分割结果

Fig. 6 Results of cloud detection, (a) Origin image; (b) denoising image; (c) normalized stretching image; (d) line detect image; (e) fractal characteristics; (f) close characteristics image; (g) discrimination results; (h) cloud segment image

布上统一起来;利用多特征提取和区域投票表决,能够初步得到云层判别区域;对判别后的图像根据判别区域和分形特征进行阈值计算和阈值分割得到精确的云层区域。实验中默认云层区域大于 80% 面积的图像为全云图,小于 20% 的为无云图。通过对 10 多组、2000 多帧不同时刻的含云图像进行测试,正确检测率在 91% 以上;对 30 多组无云图像序列进行表决测试,正确率在 98% 以上;对 $320 \times 256 \times 8$ 的红外实时图像,单帧检测时间小于 0.26 s。大量实测数据测试结果表明,该方法能有效判别并精确分割出红外图像中的云层干扰部分,为红外图像信息处理提供技术支持。

参 考 文 献

- 1 Xie Huamei, Li Rongyan, Tian Yanqin *et al.*. The removing clouds method based on large remote sensing image[J]. *Journal of Beijing Normal University*, 2006, **42**(1): 42~46
谢华美,李荣艳,田艳琴等.基于大数据量遥感图像的薄云去除[J].北京师范大学学报,2006,**42**(1): 42~46
- 2 Cao Qiong, Zheng Hong, Li Xingshan. A method for detection cloud in satellinte remote sensing image based on texture[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2007, **28**(3): 661~666
曹琼,郑红,李行善.一种基于纹理特征的卫星遥感图像云层探测方法[J].航空学报,2007,**28**(3): 661~666
- 3 Chen Fen, Yan Dongmei, Zhao Zhongming. Haze detection and removal in remote sensing images based on undecimated wavelet transform[J]. *Journal of Wuhuan University*, 2007, **32**(1): 71~74
陈奋,闫冬梅,赵忠明.基于无抽样小波的遥感影像薄云检测

- 与去除[J]. 武汉大学学报, 2007, **32**(1): 71~74
- 4 Bai Junqi, Chen Qian. Algorithm for infrared image noise filtering based on anisotropic diffusion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 866~869
白俊奇,陈钱.基于各向异性扩散的红外图像噪声滤波算法[J].光学学报,2008,**28**(5): 866~869
- 5 R. C. Gonzales, R. E. Woods. Digital Image Processing (2nd Edition)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005
- 6 M. Sonka, V. Hlavac, R. Boyle. Image Processing, Analy, and Machine Vision [M]. 2nd Edition. Pacific Grove, California: Brooks/Cole, a division of Thomson Corporation, 1999. 163~173
- 7 An Chengjin. Research on Key Technology of Feature Based on Scene Matching for Terminal Guidance Circular Scanning SAR [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010
安成锦.基于特征的环扫SAR末制导景象匹配关键技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2010
- 8 Li Xiaofeng, Xu Jun, Zhang Shengxiu *et al.*. Edge detection algorithm of laser active imaging[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1599~1601
李晓峰,徐军,张胜修等.激光主动成像图像边缘检测技术[J].中国激光,2010,**37**(6): 1599~1601
- 9 Song Chao, Xu Zhiyong, Wang Jingyuan. Cloud scattering model and channel transmission characteristics analysis[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0213001
宋超,徐智勇,汪井源.云散射模型与信道传输特性分析[J].中国激光,2012,**39**(2): 0213001
- 10 Zheng Dezhong, Cui Fayi. Contour extraction of image using adaptive bilinear generalized fuzzy enhancement[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 495~504
郑德忠,崔法毅.自适应双线性广义模糊增强的图像轮廓提取[J].中国激光,2010,**37**(2): 495~504