



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102750701 A

(43) 申请公布日 2012. 10. 24

(21) 申请号 201210199055. 0

(22) 申请日 2012. 06. 15

(71) 申请人 西安电子科技大学

地址 710071 陕西省西安市太白南路 2 号

(72) 发明人 王桂婷 孙一博 焦李成 公茂果

钟桦 王爽 张小华 侯彪

田小林

(74) 专利代理机构 陕西电子工业专利中心

61205

代理人 王品华 朱红星

(51) Int. Cl.

G06T 7/00(2006. 01)

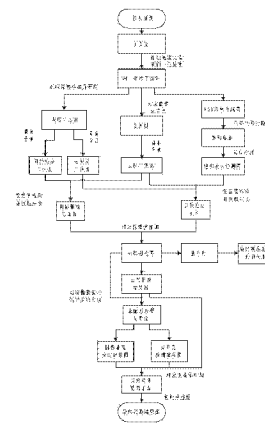
权利要求书 4 页 说明书 13 页 附图 3 页

(54) 发明名称

针对 Landsat TM 和 ETM 图像的厚云及其阴影检测方法

(57) 摘要

本发明公开了一种针对 Landsat TM 和 ETM 图像的厚云及其阴影检测方法,其实现步骤为:(1) 将输入图像分成 16 个子图集,并对其进行维纳滤波去噪和归一化;(2) 对各子图集的厚云和阴影进行粗检测,并从粗检测结果中选取基准对;(3) 根据各基准对求最终基准对质心连线倾角和间距;(4) 根据最终基准对质心连线倾角和间距对各子集集中厚云和阴影配对,并对未配对阴影和厚云进行补充检测;(5) 对云影配对结果和补充检测结果进行相加,得到各子图集的最终检测结果子图;(6) 顺序拼接各子图集的最终检测结果子图,获得最终检测结果图。本发明不需要辅助信息和人工参与,检测精确度高,可用于遥感图像变化检测、分类以及图像分割的预处理。



1. 一种针对 Landsat TM 或 ETM 图像的厚云及其阴影检测方法,包括步骤如下:

(1) 输入一幅包含除第六波段外的第一至第七波段专题制图仪 TM 图像或增强专题制图仪 ETM 图像,以输入图像长的 1/4 和宽的 1/4 分别作为要获得子图像的长和宽,将输入图像分为互不重叠的 16 组子图像,用每一组子图像包含的 6 个波段图像 Y_{ij}^b 构成一个子图集 I_{ij} ,其中 i 、 j 分别为行和列方向分成子图的序号, $i = \{1, 2, 3, 4\}$, $j = \{1, 2, 3, 4\}$, b 为波段序号, $b = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$;

(2) 将各子图集中的各波段子图像 Y_{ij}^b 分别进行维纳滤波去噪,并归一化处理,得到归一化后子图像 \hat{Y}_{ij}^b 和归一化后子图集 \hat{I}_{ij} ;

(3) 将归一化后子图集 \hat{I}_{ij} 所有波段图像 \hat{Y}_{ij}^b 的相同空间位置处的像素灰度值相加并求平均值,得到一幅灰度平均图像 E_{ij} ,用云阈值 T_1 对 E_{ij} 做二值化分割,即把 E_{ij} 中灰度值大于 T_1 的像素灰度值置为 1,其余像素灰度值置为 0,得到 \hat{I}_{ij} 的云初检二值图 $CL1_{ij}$;再对 E_{ij} 用阴影阈值 T_2 进行分割,把 E_{ij} 中灰度值小于 T_2 的像素灰度值置为 0.5,其余像素灰度值置为 0,得到 \hat{I}_{ij} 的阴影初检二值图 SH_{ij} ,其中 $T_1=0.8$, $T_2=0.1$;

(4) 对归一化后子图集 \hat{I}_{ij} 所有波段图像 \hat{Y}_{ij}^b 的相同空间位置处的像素灰度值求方差,得到一幅方差图像 V_{ij} ,用云影阈值 T_3 对 V_{ij} 进行二值化分割,把 V_{ij} 中灰度值小于 T_3 的像素灰度值置为 1,其余像素灰度值置为 0,得到 \hat{I}_{ij} 的云影二值图 CS'_{ij} ,其中 $T_3=0.002$;

(5) 将归一化后子图集 \hat{I}_{ij} 中的 \hat{Y}_{ij}^1 、 \hat{Y}_{ij}^2 和 \hat{Y}_{ij}^3 分别作为蓝、绿和红三个颜色分量,得到一幅红绿蓝 RGB 彩色合成图像,然后将该图像从红-绿-蓝 RGB 色彩空间转换到色相-饱和度-明度 HSV 色彩空间,进而得到一幅饱和度图像 S_{ij} ;再用饱和度阈值 T_4 对 S_{ij} 进行二值化分割,把 S_{ij} 中灰度值小于 T_4 的像素灰度值置为 1,其余像素灰度值置为 0,得到 \hat{I}_{ij} 的饱和度云检测图 $CL2_{ij}$,其中 $T_4=0.02$;

(6) 将归一化后子图集 \hat{I}_{ij} 的云初检二值图 $CL1_{ij}$ 、云影二值图 CS'_{ij} 以及饱和度云检测图 $CL2_{ij}$ 这三者相同空间位置处的像素灰度值相乘,得到云种子图,并将该图像中的云种子像素点在饱和度图像 S_{ij} 中进行区域生长,得到 \hat{I}_{ij} 的云粗检结果图 Cd_{ij} ,其中区域生长使用邻域判断阈值 T , $T=0.03$;

(7) 将归一化后子图集 \hat{I}_{ij} 的阴影初检二值图 SH_{ij} 和云影二值图 CS'_{ij} 相同空间位置处的像素灰度值相乘,得到阴影种子图,并将该图像中的阴影种子像素点在灰度平均图 E_{ij} 中进行区域生长,得到 \hat{I}_{ij} 的阴影粗检结果图 Sd_{ij} ,其中区域生长使用邻域判断阈值 T , $T=0.03$;

(8) 在 8 邻域条件下,用半径为两个像素的圆盘形结构元素分别对归一化后子图集 \hat{I}_{ij} 的云粗检结果图 Cd_{ij} 和阴影粗检结果图 Sd_{ij} 做一次数学形态学闭运算,后将该两幅图中封闭区块面积小于 8 个像素的区块从图像中剔除,并对 Cd_{ij} 和 Sd_{ij} 的对应像素灰度值相加,得到 \hat{I}_{ij} 的云影粗检测图 CS_{ij} ;

(9) 分别从每个归一化后子图集 \hat{I}_{ij} 的云影粗检测图 CS_{ij} 中选取该 \hat{I}_{ij} 的基准对,共得到 \aleph 个基准对:

(9a) 将归一化后子图集 \hat{I}_{ij} 的云影粗检测图 CS_{ij} 中包含的所有 M 个云块与所有 N 个阴影块一一组成云影对,共 $M \times N$ 个;如果 $M=0$ 或 $N=0$,则该归一化后子图集 \hat{I}_{ij} 无基准对,否则统

计每个云影对中云块的面积 S_C 和周长 L_C ，阴影块的面积 S_S 和周长 L_S 、云影对质心连线长度 d 以及倾角 θ ；

(9b) 判断每一个云影对是否满足 1) 式：

$$\left\{ \begin{array}{l} 100 \leq S_C \leq 900 \\ 100 \leq S_S \leq 900 \\ |S_C - S_S| \leq \frac{\alpha}{2} (S_C + S_S) \\ |L_C - L_S| \leq \frac{\beta}{2} (L_C + L_S) \\ d \leq \gamma \sqrt{0.5(S_C + S_S)} \end{array} \right. \quad 1)$$

若满足 1) 式，则将该云影对作为一个候选基准对，并在所有云影对判断完毕后进行步骤 (9e)，若没有一个云影对满足 1) 式，则进行步骤 (9c)，其中 1) 式中 α 为面积约束系数， β 为周长约束系数， γ 为间距约束系数， $\alpha = 0.3$ ， $\beta = 0.25$ ， $\gamma = 3$ ；

(9c) 将 1) 式中面积约束系数 α 、周长约束系数 β 和间距约束系数 γ 同时各增大百分之一，再重新判断是否有云影对满足 1) 式，如有云影对满足 1) 式则将其作为一个候选基准对，并在所有云影对判断完毕后进行步骤 (9e)；否则进行步骤 (9d)；

(9d) 如果 $\alpha < 1$ 、 $\beta < 1$ 且 $\gamma < 5$ ，则转到步骤 (9c)；否则，则该归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 无基准对；

(9e) 在所有得到的候选基准对中选择云影对质心连线长度 d 最小、阴影面积 S_S 最大的候选基准对作为归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的基准对；

(9f) 分别对 16 个归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 重复步骤 (9a) 至 (9e)，得到 \mathcal{K} 个基准对，其中 $\mathcal{K} \leq 16$ ；

(10) 统计上述 \mathcal{K} 个基准对的质心连线主角度和质心连线主长度，得到最终基准对倾角 A 和最终基准对间距 D ；

(11) 根据最终基准对倾角 A 和间距 D 对归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 中的所有云块和阴影块进行配对，得到 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的云影配对结果图 $P_{i,j}$ ；

(12) 将归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的云影配对结果图 $P_{i,j}$ 与云影粗检测图 $CS_{i,j}$ 对应位置处的像素灰度值相减并求绝对值，得到 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的未配对云影块图像；

(13) 根据最终基准对倾角 A 和间距 D 对归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的未配对云影块图像中的云块补充检测对应阴影块，得到 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的阴影补充检测结果图 $AD1_{i,j}$ ；

(14) 根据最终基准对倾角 A 和间距 D 对归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的未配对云影块图像中的阴影块补充检测对应云块，得到 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的云补充检测结果图 $AD2_{i,j}$ ；

(15) 将归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的云影配对结果图 $P_{i,j}$ 、云补充检测结果图 $AD1_{i,j}$ 和阴影补充检测结果图 $AD2_{i,j}$ 的对应像素相加，得到 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的最终检测结果子图 $CaS_{i,j}$ ；

(16) 将 16 个归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 对应的 16 个最终检测结果子图 $CaS_{i,j}$ 按顺序拼接，得到一幅完整的最终检测结果图。

2. 根据权利要求 1 所述的针对 Landsat TM 和 ETM 图像的厚云及其阴影检测方法, 其中所述步骤(10)中统计上述 \mathcal{K} 个基准对的质心连线主角度和质心连线主长度, 按如下步骤进行:

(10a) 设角度阈值 $\Theta=20$, 并设基准对的序号为 π , 其中 $1 \leq \pi \leq \mathcal{K}$, 此处令 $\pi=1$;

(10b) 选择第 π 个基准对;

(10c) 将选中的基准对记为 Δ , 将 Δ 的质心连线倾角分别与其余 $\mathcal{K}-1$ 个基准对的质心连线倾角作差并取绝对值, 得到 $\mathcal{K}-1$ 个基准对的 $\mathcal{K}-1$ 个差异角; 如果这 $\mathcal{K}-1$ 个差异角中有超过 $(\mathcal{K}-1)/2$ 个小于角度阈值 Θ , 则将所有小于角度阈值 Θ 的差异角对应基准对的质心连线倾角与 Δ 的质心连线倾角相加并求平均值, 得到质心连线主角度, 并将该质心连线主角度作为最终基准对倾角 A , 将所有小于角度阈值 Θ 的差异角对应基准对的质心连线长度与 Δ 的质心连线长度相加并求平均值, 得到质心连线主长度, 并将该质心连线主长度作为最终基准对间距 D ; 否则执行步骤(10d);

(10d) 若 $\pi < \mathcal{K}$, 则将 π 的值加 1, 并转到步骤(10b); 若 $\pi = \mathcal{K}$, 并仍未得到最终基准对倾角 A 和最终基准对间距 D , 则将角度阈值 Θ 的值增加 5 且令 $\pi=1$, 并转到步骤(10b)。

3. 根据权利要求 1 所述的针对 Landsat TM 和 ETM 图像的厚云及其阴影检测方法, 其中步骤(11)所述的根据最终基准对倾角 A 和间距 D 对归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 中的所有云块和阴影块进行配对, 是根据云影对是否满足如下公式进行:

$$\begin{cases} A - \delta \leq \theta \leq A + \delta \\ D - \xi \leq d \leq D + \xi \\ S_s \leq aS_c \\ L_s \leq bL_c \end{cases}; \quad 2)$$

若在归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的所有 $M \times N$ 个云影对中有任何一个满足 2) 式, 则将该云影对在一幅与 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的云影粗检测图 CS_{ij} 尺寸相同、所有像素灰度值全为 0 的空白图像的相应位置处保存, 即将云对应像素的灰度值置为 1, 将阴影对应像素的灰度值置为 0.5, 并待所有云影对判断完毕后, 将保存云影对的所有这些图像对应位置的像素灰度值相加, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的云影配对结果图 P_{ij} ; 若没有任何一个云影对满足 2) 式或 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的云影粗检测图 CS_{ij} 中包含的云块个数 $M=0$ 或阴影块个数 $N=0$, 则将一幅与 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的云影粗检测图 CS_{ij} 尺寸相同、所有像素灰度值全为 0 的空白图像作为 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的云影配对结果图 P_{ij} , 其中 a 为面积比系数, b 为周长比系数, δ 为角度松弛变量, ξ 为间距松弛变量, $a = 10$, $b = 5$, $\delta = 20$, $\xi = 20$ 。

4. 根据权利要求 1 所述的针对 Landsat TM 和 ETM 图像的厚云及其阴影检测方法, 其中步骤(13)所述的根据最终基准对倾角 A 和间距 D 对归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的未配对云影块图像中的云块补充检测对应阴影块, 通过如下步骤进行:

(13a) 设 M_x 为归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的未配对云影块图像中云块的个数, 其中 $M_x \geq 0$, 若 M_x 等于 0, 则将一幅与 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的云影粗检测图 CS_{ij} 尺寸相同、所有像素灰度值全为 0 的空白图像作为 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的阴影补充检测结果图 $AD1_{ij}$; 否则设 m 为 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的未配对云影块图像中云块的序号, 其中 $1 \leq m \leq M_x$, 此处令 $m = 1$;

(13b) 根据第 m 个云块的质心像素坐标 (X_{cm}, Y_{cm}) , 利用 3) 式求出对应阴影块的质心像素坐标 (X_{sm}, Y_{sm}) ;

$$\begin{cases} X_{sm} = X_{cm} - D * \cos(A) \\ Y_{sm} = Y_{cm} - D * \sin(A) \end{cases} \quad 3)$$

(13c) 在 \hat{I}_y 的灰度平均图 E_{ij} 上选取以像素坐标 (X_{sm}, Y_{sm}) 为中心、 $K \times K$ 大小的窗, 然后将该窗口内灰度值最小的像素点作为种子点, 利用区域生长法在 E_{ij} 中进行区域生长, 得到补充检测的阴影块; 如果补充检测的阴影块其面积和周长分别超过对应云块面积和周长的 φ 倍和 ψ 倍, 则将该补充检测的阴影块剔除, 否则保留, 其中区域生长使用邻域判断阈值 T , $T=0.03$, $\varphi=10$, $\psi=5$, $K=9$;

(13d) 若 $m < M_x$, 则将 m 的值加 1, 并转到步骤(13b); 若 $m = M_x$, 则将得到的所有补充检测的阴影块与对应的云块在一幅与 \hat{I}_y 的云影粗检测图 CS_{ij} 尺寸相同、所有像素灰度值全为 0 的空白图像的相应位置处保存, 即将云对应像素的灰度值置为 1, 将阴影对应像素的灰度值置为 0.5, 得到归一化后子图集 \hat{I}_y 的阴影补充检测结果图 $AD1_{ij}$ 。

5. 根据权利要求 1 所述的针对 Landsat TM 和 ETM 图像的厚云及其阴影检测方法, 其中步骤(14)所述的根据最终基准对倾角 A 和间距 D 对归一化后子图集 \hat{I}_y 的未配对云影块图像中的阴影块补充检测对应云块, 通过如下步骤进行:

(14a) 设 N_x 为归一化后子图集 \hat{I}_y 的未配对云影块图像中阴影块的个数, 其中 $N_x \geq 0$, 若 N_x 等于 0, 则将一幅与 \hat{I}_y 的云影粗检测图 CS_{ij} 尺寸相同、所有像素灰度值全为 0 的空白图像作为 \hat{I}_y 的云补充检测结果图 $AD2_{ij}$; 否则设 n 为 \hat{I}_y 的未配对云影块图像中阴影块的序号, 其中 $1 \leq n \leq N_x$, 此处令 $n=1$;

(14b) 根据第 n 个阴影块的质心像素坐标 (X_{sn}, Y_{sn}) , 利用 4) 式求出对应云块质心像素坐标 (X_{cn}, Y_{cn}) ;

$$\begin{cases} X_{cn} = X_{sn} - D * \cos(A+180) \\ Y_{cn} = Y_{sn} - D * \sin(A+180) \end{cases} \quad 4)$$

(14c) 在 \hat{I}_y 的灰度平均图 E_{ij} 上选取以像素坐标 (X_{cn}, Y_{cn}) 为中心、 $K \times K$ 大小的窗, 然后将该窗口内灰度值最大的像素点作为种子点, 利用区域生长法在 E_{ij} 中进行区域生长, 得到补充检测的云块; 如果补充检测的云块其面积和周长分别超过对应阴影块面积和周长的 φ 倍和 ψ 倍, 则同时剔除该补充检测的云块和它对应的阴影块, 否则都予以保留, 其中区域生长使用邻域判断阈值 T , $T=0.03$, $\varphi=10$, $\psi=5$, $K=9$;

(14d) 若 $n < N_x$, 则将 n 的值加 1, 并转到步骤(14b); 若 $n = N_x$, 则将得到的所有补充检测的云块与对应的阴影块在一幅与 \hat{I}_y 的云影粗检测图 CS_{ij} 尺寸相同、所有像素灰度值全为 0 的空白图像的相应位置处保存, 即将云对应像素的灰度值置为 1, 将阴影对应像素的灰度值置为 0.5, 得到归一化后子图集 \hat{I}_y 的云补充检测结果图 $AD2_{ij}$ 。

针对 Landsat TM 和 ETM 图像的厚云及其阴影检测方法

技术领域

[0001] 本发明属于光学遥感图像处理技术领域,涉及对专题制图仪 TM 图像和增强专题制图仪 ETM 图像的厚云及其阴影检测,可用于遥感图像变化检测、分类以及图像分割等工作的预处理。

背景技术

[0002] 随着空间技术的不断发展,利用中高分辨率的遥感图像进行陆地资源调查、变化检测、植被以及水域的监测等已经越来越普及。由于天气情况复杂多样,卫星在获取遥感图像时极少能遇到大范围区域内完全晴好无云的情况。云的存在使得人们无法从图像中获取云覆盖区之下的真实地表信息,这会对一些后续的分割、分类、变化检测等工作造成困难。为了消除由于云存在而造成的不利影响,提高遥感图像的可用性,人们提出了一些云检测和云去除的方法。

[0003] 云的形状、高度、厚度、成分及分布等情况各有不同,导致其对光学遥感图像产生的影响也具有较大差异。根据云是否完全遮挡地面信息,可将其分为薄云和厚云。薄云是指对太阳入射光和地表反射光只具有部分遮挡效果的云,在其覆盖区仍能反映出一定的地表信息,并且不产生明显的阴影。相对的,厚云是指对太阳入射光和地表反射光具有完全遮挡效果的云,在其覆盖区地表信息被完全屏蔽,并形成明显阴影,使阴影区的地面细节难以分辨。因此,对于薄云只需尽可能恢复或增强云覆盖区下的地面细节信息,即可达到消除其影响的目的,一般采用同态滤波法。而由于厚云遮蔽了在其覆盖下全部的地表信息,仅利用原始图像无法恢复,因而只能先检测出其位置、大小,再利用同一地区其他时期拍摄的无云图像进行像元替换,以达到消除厚云的目的。由于本发明只涉及厚云及其阴影的位置、大小的检测,因此对后续的像元替换不进行阐述。

[0004] 厚云的检测主要有灰度阈值法、空间纹理分析以及光谱分析三类方法。灰度阈值法是根据厚云灰度值比一般地物大这一特点用人工或自适应阈值将其检出,但冰雪也具有较大的灰度值,因此容易与云混淆而产生误检,同时检测效果很大程度受到图像本身和阈值选取的影响。空间纹理分析根据厚云与地物间的空间纹理差异进行区分,最常采用的纹理特征有分形维数和角二阶矩值。虽然空间纹理分析检测效果较灰度阈值法好,但该方法通常需要训练样本,不但耗时且样本的数量和质量直接影响结果准确性。对于多光谱和高光谱数据,由于其包含大量光谱信息,因此广泛采用光谱分析法。普遍认为,厚云在可见光和近红外波段相对于其他地物具有较高反射率,而在热红外波段具有较低的亮温值。具体做法通常是在多个波段图像上通过分别设定阈值进行判断再集体决策,进而将厚云检测出来。中分辨率成像光谱仪 MODIS 图像具有 36 个波段,光谱分辨率较高,针对该图像的光谱分析法已经有大量比较成熟且简单高效的衍生算法。

[0005] 空间分辨率中高的专题制图仪 TM 图像,其光谱分辨率不高,只有 7 个波段,而增强专题制图仪 ETM 图像也只有 8 个波段。现有光谱分析法检测这两种图像中厚云的效果还不够理想,易受到与厚云具有类似光谱反射特性的冰雪干扰,因此常结合其他方法对检测结

果进行改善。另外,由于专题制图仪或增强专题制图仪图像的第六波段比其他波段图像的空间分辨率低,光谱分析法使用起来非常不便。

[0006] 图像中有厚云存在时往往还伴有阴影,它会导致地表信息几乎无法分辨,因此在检测厚云的同时常常还将其阴影一同检测出来。2010年李炳燮、马张宝、齐清文等在文献“Landsat TM 遥感影像中厚云和阴影去除”(遥感学报,2010, Vol. 14, No. 3, Pages:534-545)中通过对比分析同一地区不同时期图像中有云地域与无云地域间的光谱特征,提出了云地域和云阴影地域增强模型来检测厚云及阴影。该方法需要经过人工灰度匹配的一幅年份相近、相同季节的图像作为辅助,对辅助图像要求较高,并且需要人工参与。1996年 Zhenlei Cai 和 Anthony T. S. 在文献“Cloud detection and removal in satellite images for tropical regions”(1996 3rd International Conference on Signal Processing Proceedings, 1996, Vol. 2, Pages:1174-1177)中先对图像做非监督聚类,人工选择最佳聚类结果并从中找出云和阴影类,再通过云和阴影的位置关系进行云影配对以去除误检。该方法对聚类结果要求较高且需要人工参与,而且云和阴影的配对准则不完备导致配对稳定性不高,因而检测准确性受到影响。2010年 Jianzhong Feng、Linyan Bai、Huajun Tang 等在文献“A new context-based procedure for the detection and removal of cloud shadow from moderate-and-high resolution satellite data over land”(Proceedings 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium2010, Pages:1718-1721)中针对 FY-3-A 图像和 HJ-1-A 图像特点,通过计算其中某个特定可见光波段与近红外波段图像的比值,采用阈值分割将厚云和阴影粗略检测出来,然后利用太阳、卫星和厚云的空间关系在灰度直方图上反映的特征进行进一步确认。该方法在考虑光谱信息的同时还结合了成像时的空间关系以及像素邻域信息,但算法存在缩放效应,并且只适用于 FY-3-A 或 HJ-1-A 图像,不能直接用于专题制图仪 TM 图像或增强专题制图仪 ETM 图像的厚云及阴影检测。

发明内容

[0007] 本发明的目的在于针对上述已有技术的不足,提出一种针对 Landsat TM 和 ETM 图像的厚云及其阴影检测方法,以消除对辅助信息的需求,提高自动化程度和检测准确度。

[0008] 本发明是这样实现的:

[0009] 实现本发明目的的技术思路是:根据专题制图仪图像或增强专题制图仪图像在除第六波段外的第一至第七波段厚云和冰雪的灰度值大,而阴影的灰度值小的特点,分别检测出厚云、冰雪和阴影;利用厚云及冰雪的饱和度极低这一性质检测出厚云和冰雪;根据厚云和阴影在各波段间的灰度值变化量小的特点检出云和阴影,从而排除冰雪。利用厚云及阴影的伴随关系对厚云和阴影进行配对,以除去误检,并通过对未配对成功的厚云和阴影进行补充检测,消除漏检。具体步骤包括如下:

[0010] (1) 输入一幅包含除第六波段外的第一至第七波段专题制图仪 TM 图像或增强专题制图仪 ETM 图像,以输入图像长的 $1/4$ 和宽的 $1/4$ 分别作为要获得子图像的长和宽,将输入图像分为互不重叠的 16 组子图像,用每一组子图像包含的 6 个波段图像 Y_{ij}^b 构成一个子图集 I_{ij} ,其中 i 、 j 分别为行和列方向分成子图的序号, $i = \{1, 2, 3, 4\}$, $j = \{1, 2, 3, 4\}$, b 为波段序号, $b = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$;

[0011] (2) 将各子图集的各波段子图像 Y_{ij}^b 分别进行维纳滤波去噪, 并归一化处理, 得到归一化后子图像 \hat{Y}_{ij}^b 和归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$;

[0012] (3) 将归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 所有波段图像 \hat{Y}_{ij}^b 的相同空间位置处的像素灰度值相加并求平均值, 得到一幅灰度平均图像 E_{ij} , 用云阈值 T_1 对 E_{ij} 做二值化分割, 即把 E_{ij} 中灰度值大于 T_1 的像素灰度值置为 1, 其余像素灰度值置为 0, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的云初检二值图 $CL1_{ij}$; 再对 E_{ij} 用阴影阈值 T_2 进行分割, 把 E_{ij} 中灰度值小于 T_2 的像素灰度值置为 0.5, 其余像素灰度值置为 0, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的阴影初检二值图 SH_{ij} , 其中 $T_1=0.8$, $T_2=0.1$;

[0013] (4) 对归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 所有波段图像 \hat{Y}_{ij}^b 的相同空间位置处的像素灰度值求方差, 得到一幅方差图像 V_{ij} , 用云影阈值 T_3 对 V_{ij} 进行二值化分割, 把 V_{ij} 中灰度值小于 T_3 的像素灰度值置为 1, 其余像素灰度值置为 0, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的云影二值图 CS'_{ij} , 其中 $T_3=0.002$;

[0014] (5) 将归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 中的 \hat{Y}_{ij}^1 、 \hat{Y}_{ij}^2 和 \hat{Y}_{ij}^3 分别作为蓝、绿和红三个颜色分量, 得到一幅红绿蓝 RGB 彩色合成图像, 然后将该图像从红-绿-蓝 RGB 色彩空间转换到色相-饱和度-明度 HSV 色彩空间, 进而得到一幅饱和度图像 S_{ij} ; 再用饱和度阈值 T_4 对 S_{ij} 进行二值化分割, 把 S_{ij} 中灰度值小于 T_4 的像素灰度值置为 1, 其余像素灰度值置为 0, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的饱和度云检测图 $CL2_{ij}$, 其中 $T_4=0.02$;

[0015] (6) 将归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的云初检二值图 $CL1_{ij}$ 、云影二值图 CS'_{ij} 以及饱和度云检测图 $CL2_{ij}$ 这三者相同空间位置处的像素灰度值相乘, 得到云种子图, 并将该图像中的云种子像素点在饱和度图像 S_{ij} 中进行区域生长, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的云粗检结果图 Cd_{ij} , 其中区域生长使用邻域判断阈值 T , $T=0.03$;

[0016] (7) 将归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的阴影初检二值图 SH_{ij} 和云影二值图 CS'_{ij} 相同空间位置处的像素灰度值相乘, 得到阴影种子图, 并将该图像中的阴影种子像素点在灰度平均图 E_{ij} 中进行区域生长, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的阴影粗检结果图 Sd_{ij} , 其中区域生长使用邻域判断阈值 T , $T=0.03$;

[0017] (8) 在 8 邻域条件下, 用半径为两个像素的圆盘形结构元素分别对归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的云粗检结果图 Cd_{ij} 和阴影粗检结果图 Sd_{ij} 做一次数学形态学闭运算, 后将该两幅图中封闭区块面积小于 8 个像素的区块从图像中剔除, 并对 Cd_{ij} 和 Sd_{ij} 的对应像素灰度值相加, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的云影粗检测图 CS_{ij} ;

[0018] (9) 分别从每个归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的云影粗检测图 CS_{ij} 中选取该 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的基准对, 共得到 \times 个基准对;

[0019] (9a) 将归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的云影粗检测图 CS_{ij} 中包含的所有 M 个云块与所有 N 个阴影块一一组成云影对, 共 $M \times N$ 个; 如果 $M=0$ 或 $N=0$, 则该归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 无基准对, 否则统计每个云影对中云块的面积 S_c 和周长 L_c , 阴影块的面积 S_s 和周长 L_s 、云影对质心连线长度 d 以及倾角 θ ;

[0020] (9b) 判断每一个云影对是否满足 1) 式:

$$[0021] \quad \left\{ \begin{array}{l} 100 \leq S_c \leq 900 \\ 100 \leq S_s \leq 900 \\ |S_c - S_s| \leq \frac{\alpha}{2}(S_c + S_s); \\ |L_c - L_s| \leq \frac{\beta}{2}(L_c + L_s) \\ d \leq \gamma \sqrt{0.5(S_c + S_s)} \end{array} \right. \quad 1)$$

[0022] 若满足 1) 式, 则将该云影对作为一个候选基准对, 并在所有云影对判断完毕后进行步骤 (9e), 若没有一个云影对满足 1) 式, 则进行步骤 (9c), 其中 1) 式中 α 为面积约束系数, β 为周长约束系数, γ 为间距约束系数, $\alpha = 0.3$, $\beta = 0.25$, $\gamma = 3$;

[0023] (9c) 将 1) 式中面积约束系数 α 、周长约束系数 β 和间距约束系数 γ 同时各增大百分之一, 再重新判断是否有云影对满足 1) 式, 如有云影对满足 1) 式则将其作为一个候选基准对, 并在所有云影对判断完毕后进行步骤 (9e); 否则进行步骤 (9d);

[0024] (9d) 如果 $\alpha < 1$ 、 $\beta < 1$ 且 $\gamma < 5$, 则转到步骤 (9c); 否则, 则该归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_j$ 无基准对;

[0025] (9e) 在所有得到的候选基准对中选择云影对质心连线长度 d 最小、阴影面积 S_s 最大的候选基准对作为归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_j$ 的基准对;

[0026] (9f) 分别对 16 个归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_j$ 重复步骤 (9a) 至 (9e), 得到 \mathcal{K} 个基准对, 其中 $\mathcal{K} \leq 16$;

[0027] (10) 统计上述 \mathcal{K} 个基准对的质心连线主角度和质心连线主长度, 得到最终基准对倾角 A 和最终基准对间距 D ;

[0028] (11) 根据最终基准对倾角 A 和间距 D 对归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_j$ 中的所有云块和阴影块进行配对, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_j$ 的云影配对结果图 P_{ij} ;

[0029] (12) 将归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_j$ 的云影配对结果图 P_{ij} 与云影粗检测图 CS_{ij} 对应位置处的像素灰度值相减并求绝对值, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_j$ 的未配对云影块图像;

[0030] (13) 根据最终基准对倾角 A 和间距 D 对归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_j$ 的未配对云影块图像中的云块补充检测对应阴影块, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_j$ 的阴影补充检测结果图 $AD1_{ij}$;

[0031] (14) 根据最终基准对倾角 A 和间距 D 对归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_j$ 的未配对云影块图像中的阴影块补充检测对应云块, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_j$ 的云补充检测结果图 $AD2_{ij}$;

[0032] (15) 将归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_j$ 的云影配对结果图 P_{ij} 、云补充检测结果图 $AD1_{ij}$ 和阴影补充检测结果图 $AD2_{ij}$ 的对应像素相加, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_j$ 的最终检测结果子图 CaS_{ij} ;

[0033] (16) 将 16 个归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_j$ 对应的 16 个最终检测结果子图 CaS_{ij} 按顺序拼接, 得到一幅完整的最终检测结果图。

[0034] 上述针对 Landsat TM 和 ETM 图像的厚云及其阴影检测方法, 其中所述步骤 (10) 中统计上述 \mathcal{K} 个基准对的质心连线主角度和质心连线主长度, 按如下步骤进行:

[0035] (10a) 设角度阈值 $\Theta = 20$, 并设基准对的序号为 π , 其中 $1 \leq \pi \leq \mathcal{K}$, 此处令 $\pi = 1$;

[0036] (10b) 选择第 π 个基准对;

[0037] (10c) 将选中的基准对记为 Δ , 将 Δ 的质心连线倾角分别与其余 $\aleph-1$ 个基准对的质心连线倾角作差并取绝对值, 得到 $\aleph-1$ 个基准对的 $\aleph-1$ 个差异角; 如果这 $\aleph-1$ 个差异角中有超过 $(\aleph-1)/2$ 个小于角度阈值 Θ , 则将所有小于角度阈值 Θ 的差异角对应基准对的质心连线倾角与 Δ 的质心连线倾角相加并求平均值, 得到质心连线主角度, 并将该质心连线主角度作为最终基准对倾角 A , 将所有小于角度阈值 Θ 的差异角对应基准对的质心连线长度与 Δ 的质心连线长度相加并求平均值, 得到质心连线主长度, 并将该质心连线主长度作为最终基准对间距 D ; 否则执行步骤(10d);

[0038] (10d) 若 $\aleph < \aleph$, 则将 \aleph 的值加 1, 并转到步骤(10b); 若 $\aleph = \aleph$, 并仍未得到最终基准对倾角 A 和最终基准对间距 D , 则将角度阈值 Θ 的值增加 5 且令 $\aleph = 1$, 并转到步骤(10b)。

[0039] 上述针对 Landsat TM 和 ETM 图像的厚云及其阴影检测方法, 其中步骤(11)所述的根据最终基准对倾角 A 和间距 D 对归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 中的所有云块和阴影块进行配对, 是根据云影对是否满足如下公式进行:

$$[0040] \quad \begin{cases} A - \delta \leq \theta \leq A + \delta \\ D - \xi \leq d \leq D + \xi \\ S_S \leq aS_C \\ L_S \leq bL_C \end{cases}; \quad 2)$$

[0041] 若在归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的所有 $M \times N$ 个云影对中有任何一个满足 2) 式, 则将该云影对在一幅与 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的云影粗检测图 CS_{ij} 尺寸相同、所有像素灰度值全为 0 的空白图像的相应位置处保存, 即将云对应像素的灰度值置为 1, 将阴影对应像素的灰度值置为 0.5, 并待所有云影对判断完毕后, 将保存云影对的所有这些图像对应位置的像素灰度值相加, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的云影配对结果图 P_{ij} ; 若没有任何一个云影对满足 2) 式或 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的云影粗检测图 CS_{ij} 中包含的云块个数 $M=0$ 或阴影块个数 $N=0$, 则将一幅与 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的云影粗检测图 CS_{ij} 尺寸相同、所有像素灰度值全为 0 的空白图像作为 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的云影配对结果图 P_{ij} , 其中 a 为面积比系数, b 为周长比系数, δ 为角度松弛变量, ξ 为间距松弛变量, $a = 10, b = 5, \delta = 20, \xi = 20$ 。

[0042] 上述针对 Landsat TM 和 ETM 图像的厚云及其阴影检测方法, 其中步骤(13)所述的根据最终基准对倾角 A 和间距 D 对归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的未配对云影块图像中的云块补充检测对应阴影块, 通过如下步骤进行:

[0043] (13a) 设 M_x 为归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的未配对云影块图像中云块的个数, 其中 $M_x \geq 0$, 若 M_x 等于 0, 则将一幅与 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的云影粗检测图 CS_{ij} 尺寸相同、所有像素灰度值全为 0 的空白图像作为 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的阴影补充检测结果图 $AD1_{ij}$; 否则设 m 为 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的未配对云影块图像中云块的序号, 其中 $1 \leq m \leq M_x$, 此处令 $m = 1$;

[0044] (13b) 根据第 m 个云块的质心像素坐标 (X_{cm}, Y_{cm}) , 利用 3) 式求出对应阴影块的质心像素坐标 (X_{sm}, Y_{sm}) ;

$$[0045] \quad \begin{cases} X_{sm} = X_{cm} - D * \cos(A) \\ Y_{sm} = Y_{cm} - D * \sin(A) \end{cases}; \quad 3)$$

[0046] (13c) 在 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的灰度平均图 E_{ij} 上选取以像素坐标 (X_{sm}, Y_{sm}) 为中心、 $K \times K$ 大小的窗, 然后将该窗口内灰度值最小的像素点作为种子点, 利用区域生长法在 E_{ij} 中进行区域生长,

得到补充检测的阴影块；如果补充检测的阴影块其面积和周长分别超过对应云块面积和周长的 φ 倍和 ψ 倍，则将该补充检测的阴影块剔除，否则保留，其中区域生长使用邻域判断阈值 T , $T=0.03$, $\varphi=10$, $\psi=5$, $K=9$ ；

[0047] (13d) 若 $m < M_x$ ，则将 m 的值加 1，并转到步骤(13b)；若 $m = M_x$ ，则将得到的所有补充检测的阴影块与对应的云块在一幅与 \hat{I}_y 的云影粗检测图 CS_{ij} 尺寸相同、所有像素灰度值全为 0 的空白图像的相应位置处保存，即将云对应像素的灰度值置为 1，将阴影对应像素的灰度值置为 0.5，得到归一化后子图集 \hat{I}_y 的阴影补充检测结果图 $AD1_{ij}$ 。

[0048] 上述针对 Landsat TM 和 ETM 图像的厚云及其阴影检测方法，其中步骤(14)所述的根据最终基准对倾角 A 和间距 D 对归一化后子图集 \hat{I}_y 的未配对云影块图像中的阴影块补充检测对应云块，通过如下步骤进行：

[0049] (14a) 设 N_x 为归一化后子图集 \hat{I}_y 的未配对云影块图像中阴影块的个数，其中 $N_x \geq 0$ ，若 N_x 等于 0，则将一幅与 \hat{I}_y 的云影粗检测图 CS_{ij} 尺寸相同、所有像素灰度值全为 0 的空白图像作为 \hat{I}_y 的云补充检测结果图 $AD2_{ij}$ ；否则设 n 为 \hat{I}_y 的未配对云影块图像中阴影块的序号，其中 $1 \leq n \leq N_x$ ，此处令 $n = 1$ ；

[0050] (14b) 根据第 n 个阴影块的质心像素坐标 (X_{sn}, Y_{sn}) ，利用 4) 式求出对应云块质心像素坐标 (X_{cn}, Y_{cn}) ；

$$[0051] \quad \begin{cases} X_{cn} = X_{sn} - D * \cos(A+180) \\ Y_{cn} = Y_{sn} - D * \sin(A+180) \end{cases}; \quad 4)$$

[0052] (14c) 在 \hat{I}_y 的灰度平均图 E_{ij} 上选取以像素坐标 (X_{cn}, Y_{cn}) 为中心、 $K \times K$ 大小的窗，然后将该窗口内灰度值最大的像素点作为种子点，利用区域生长法在 E_{ij} 中进行区域生长，得到补充检测的云块；如果补充检测的云块其面积和周长分别超过对应阴影块面积和周长的 φ 倍和 ψ 倍，则同时剔除该补充检测的云块和它对应的阴影块，否则都予以保留，其中区域生长使用邻域判断阈值 T , $T=0.03$, $\varphi=10$, $\psi=5$, $K=9$ ；

[0053] (14d) 若 $n < N_x$ ，则将 n 的值加 1，并转到步骤(14b)；若 $n = N_x$ ，则将得到的所有补充检测的云块与对应的阴影块在一幅与 \hat{I}_y 的云影粗检测图 CS_{ij} 尺寸相同、所有像素灰度值全为 0 的空白图像的相应位置处保存，即将云对应像素的灰度值置为 1，将阴影对应像素的灰度值置为 0.5，得到归一化后子图集 \hat{I}_y 的云补充检测结果图 $AD2_{ij}$ 。

[0054] 本发明与现有的技术相比具有以下优点：

[0055] a、本发明与现有的针对专题制图仪 TM 图像或增强专题制图仪 ETM 图像数据的光谱分析法相比，由于只利用了图像本身进行厚云及其阴影的检测，因此无需辅助信息；而且由于整个检测过程不需要人工参与，自动化程度较高；

[0056] b、本发明与现有的针对专题制图仪 TM 图像或增强专题制图仪 ETM 图像数据的光谱分析法相比，由于利用了厚云及其阴影的空间上下文关系信息进行云影配对和补充检测，因而降低了误检和漏检的发生，检测准确度得到提高。

附图说明

[0057] 图 1 是本发明的整体流程图；

[0058] 图 2 是本发明的实验图像；

[0059] 图 3 是本发明的厚云及其阴影检测结果图。

具体实施方式

[0060] 参照图 1, 本发明的实现步骤如下：

[0061] 步骤 1, 输入图像, 将其分为 16 组子图像, 并构成 16 个子图集。

[0062] 一景完整的专题制图仪 TM 图像包括第一至第七波段共 7 个波段图像, 而增强专题制图仪 ETM 图像包括第一至第八波段共 8 个波段图像。由于 TM 图像中的第六波段图像与其他波段图像分辨率不同, 而 ETM 图像中的第六和第八波段图像也与其他波段图像分辨率不同, 因此本发明将一景专题制图仪 TM 图像或增强专题制图仪 ETM 图像中的第一至第五波段以及第七波段图像作为输入图像 X , $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$, 其中 x_1 至 x_5 分别对应第一至第五波段图像, x_6 对应第七波段图像。输入图像 X 的各波段图像 $x_1 \sim x_6$ 其图像尺寸大小相等, 并且各波段图像相同空间位置处的像素对应相同的地理位置。

[0063] 以输入图像 X 中任意一个波段图像长的 $1/4$ 和宽的 $1/4$ 分别作为要获得子图像的长和宽, 将 X 中的每一波段图像都分为互不重叠的 16 个子图像, 其中同一空间位置对应的 6 个波段子图像视为一组, 共得到 16 组子图像; 将每一组子图像包含的 6 个波段子图像 Y_{ij}^b 构成一个子图集 I_{ij} , $I_{ij} = \{Y_{ij}^1, Y_{ij}^2, Y_{ij}^3, Y_{ij}^4, Y_{ij}^5, Y_{ij}^6\}$, 其中 i 和 j 分别为行方向和列方向分成子图的序号, $i = \{1, 2, 3, 4\}$, $j = \{1, 2, 3, 4\}$, b 为波段序号, $b = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。

[0064] 步骤 2, 将各子图集的各波段子图像进行维纳滤波去噪, 并归一化处理, 得到归一化后子图像 \hat{Y}_{ij}^b 和归一化后子图集 \hat{I}_{ij} 。

[0065] 2.1) 将子图集 I_{ij} 中每一幅子图像 Y_{ij}^b 的灰度值区间从 $0 \sim 255$ 转换到 $0 \sim 1$ 之间, 然后采用窗口大小为 3×3 像素的维纳滤波去噪处理, 得到去噪后子图像 \check{Y}_{ij}^b ;

[0066] 2.2) 对去噪后子图像 \check{Y}_{ij}^b 按如下公式进行归一化处理, 得到归一化后子图像 \hat{Y}_{ij}^b , 并构成归一化后子图集 \hat{I}_{ij} , 即 $\hat{I}_{ij} = \{\hat{Y}_{ij}^1, \hat{Y}_{ij}^2, \hat{Y}_{ij}^3, \hat{Y}_{ij}^4, \hat{Y}_{ij}^5, \hat{Y}_{ij}^6\}$,

$$[0067] \quad \hat{Y}_{ij}^b = \frac{\check{Y}_{ij}^b - \min(\check{Y}_{ij}^b)}{\max(\check{Y}_{ij}^b) - \min(\check{Y}_{ij}^b)},$$

[0068] 其中, $\max(\check{Y}_{ij}^b)$ 表示取 \check{Y}_{ij}^b 中最大的灰度值, $\min(\check{Y}_{ij}^b)$ 表示取 \check{Y}_{ij}^b 中最小的灰度值。

[0069] 步骤 3, 将归一化后子图集 \hat{I}_{ij} 中所有波段图像的对应空间位置处的像素灰度值相加并求平均, 得到 \hat{I}_{ij} 的灰度平均图像: $E_{ij} = \frac{1}{6} \sum_{b=1}^6 \hat{Y}_{ij}^b$ 。

[0070] 步骤 4, 分别用云阈值和阴影阈值对 \hat{I}_{ij} 的灰度平均图像 E_{ij} 进行二值化分割, 得到 \hat{I}_{ij} 的云初检二值图 $CL1_{ij}$ 和阴影初检二值图 $SH1_{ij}$ 。

[0071] 4.1) 根据厚云在各波段图像上的灰度值处于灰度区间的极大值一端, 经相加平均后基本处于 0.75 到 1 之间的特性, 设云阈值 T_1 的取值范围为 0.8 到 0.85 之间, 本实例中取 $T_1 = 0.8$;

[0072] 4.2) 根据阴影在各波段图像上的灰度值处于灰度区间的极小值一端, 经相加平均后基本处于 0 到 0.2 之间的特性, 设阴影阈值 T_2 的取值范围为 0.1 到 0.15 之间, 本实例中

取 $T_2=0.1$;

[0073] 4.3) 用云阈值 T_1 对 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的灰度平均图 E_{ij} 做二值化分割, 即把 E_{ij} 中灰度值大于 T_1 的像素灰度值置为 1, 其余像素灰度值置为 0, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的云初检二值图 $CL1_{ij}$;

[0074] 4.4) 用阴影阈值 T_2 对 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的灰度平均图 E_{ij} 做二值化分割, 即把 E_{ij} 中灰度值小于 T_2 的像素灰度值置为 0.5, 其余像素灰度值置为 0, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的阴影初检二值图 SH_{ij} 。

[0075] 步骤 5, 由归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 中所有波段图像的对应空间位置处的像素灰度值求方差, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的方差图像: $V_{ij} = \frac{1}{6} \sum_{b=1}^6 (\hat{Y}_{ij}^b - E_{ij})^2$ 。

[0076] 步骤 6, 用云影阈值对 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的方差图像 V_{ij} 进行二值化分割, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的云影二值图 CS'_{ij} 。

[0077] 6.1) 根据实验统计得出的厚云及其阴影在各波段图像上的灰度值变化量极小的特性, 设云影阈值 T_3 的取值范围为 0.002 到 0.004 之间, 本实例中取 $T_3=0.002$;

[0078] 6.2) 用云影阈值 T_3 对 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的方差图像 V_{ij} 进行二值化分割, 即把 V_{ij} 中灰度值小于 T_3 的像素灰度值置为 1, 其余像素灰度值置为 0, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的云影二值图 CS'_{ij} 。

[0079] 步骤 7, 由于第一波段图像的波谱范围为 0.45~0.52um, 对应蓝光波段, 第二波段图像的波谱范围为 0.52~0.60um, 对应绿光波段, 第三波段图像的波谱范围为 0.63~0.69um, 对应红光波段, 因此将归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 中的 \hat{Y}_{ij}^1 、 \hat{Y}_{ij}^2 和 \hat{Y}_{ij}^3 分别作为红-绿-蓝 RGB 彩色图像中的蓝、绿和红三个颜色分量, 得到一幅 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的红-绿-蓝 RGB 彩色合成图像。

[0080] 步骤 8, 将 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的红-绿-蓝 RGB 彩色合成图像的色彩空间由红-绿-蓝 RGB 转换到色相-饱和度-明度 HSV, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的饱和度图像: $S_{ij} = \frac{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)}{\max(R, G, B)}$, 其中 $\max(R, G, B)$ 表示取组成该像素点的三个颜色分量中最大的灰度值, 反之, $\min(R, G, B)$ 表示取组成该像素点的三个颜色分量中最小的灰度值。

[0081] 步骤 9, 用 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的饱和度阈值对饱和度图像 S_{ij} 进行二值化分割, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的饱和度云检测图 $CL2_{ij}$ 。

[0082] 9.1) 根据厚云的饱和度比一般地面目标都要低的特性, 设饱和度阈值 T_4 的取值范围为 0.02 到 0.03 之间, 本实例中取 $T_4=0.02$;

[0083] 9.2) 用饱和度阈值 T_4 对 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的饱和度图像 S_{ij} 进行二值化分割, 即将 S_{ij} 中灰度值小于 T_4 的像素灰度值置为 1, 其余像素灰度值置为 0, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的饱和度云检测图 $CL2_{ij}$ 。

[0084] 步骤 10, 将归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的云初检二值图 $CL1_{ij}$ 、云影二值图 CS'_{ij} 以及饱和度云检测图 $CL2_{ij}$ 的对应空间位置处的像素灰度值相乘, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的云种子图。

[0085] 步骤 11, 利用区域生长法得到 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的云粗检结果图 Cd_{ij} 。

[0086] 11.1) 设区域生长的邻域判断阈值 T 的取值范围为 0.02 到 0.04 之间, 本实例中取 $T=0.03$;

[0087] 11.2) 把 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的云种子图中像素灰度值为 1 的像素点作为云种子点 ;

[0088] 11.3) 利用区域生长方法将每一个云种子点在 \hat{I}_y 的饱和度图像 S_{ij} 中进行区域生长, 得到 \hat{I}_y 的云粗检结果图 Cd_{ij} ;

[0089] 11.3a) 任选一个云种子点;

[0090] 11.3b) 判断以选中的云种子点在 \hat{I}_y 的饱和度图像 S_{ij} 中对应像素为中心的 8 邻域像素点分别与中心像素点的灰度值之差的绝对值是否满足小于邻域判断阈值 T ; 如果满足, 且该邻域像素点在云种子图中对应的像素点不是云种子点, 则将该像素点作为一个新的云种子点加入云种子图; 否则转到步骤 11.3a), 为了防止加入错误的云种子点, 要求新加入的云种子点在 \hat{I}_y 的饱和度图像 S_{ij} 中对应像素的灰度值必须小于等于 $\lambda_1 T_4$, 其中 T_4 为饱和度阈值, λ_1 为 T_4 的约束系数, $\lambda_1=3$;

[0091] 11.3c) 对云种子图中的每一个云种子点和新加入的云种子点重复步骤 11.3a) 和 11.3b), 直到不再有新的云种子点加入云种子点图为止, 则经过这一过程加入了新的云种子点的云种子点图, 即为所要求得的 \hat{I}_y 的云粗检结果图 Cd_{ij} 。

[0092] 步骤 12, 将归一化后子图集 \hat{I}_y 的阴影初检二值图 SH_{ij} 和云影二值图 CS'_{ij} 的对应空间位置处的像素灰度值相乘, 得到 \hat{I}_y 的阴影种子图。

[0093] 步骤 13, 利用区域生长法得到 \hat{I}_y 的阴影粗检结果图 Sd_{ij} 。

[0094] 13.1) 设区域生长的邻域判断阈值 T 的取值范围为 0.02 到 0.04 之间, 本实例中取 $T=0.03$;

[0095] 13.2) 把 \hat{I}_y 的阴影种子图中像素灰度值为 0.5 的像素点作为阴影种子点;

[0096] 13.3) 利用区域生长方法将每一个阴影种子点在 \hat{I}_y 的灰度平均图像 E_{ij} 中进行区域生长, 得到 \hat{I}_y 的阴影粗检结果图 Sd_{ij} ;

[0097] 13.3a) 任选一个阴影种子点;

[0098] 13.3b) 判断以选中的阴影种子点在 \hat{I}_y 的灰度平均图像 E_{ij} 中对应像素为中心的 8 邻域像素点分别与中心像素点的灰度值之差的绝对值是否满足小于邻域判断阈值 T ; 如果满足, 且该邻域像素点在阴影种子图中对应的像素点不是阴影种子点, 则将该像素点作为一个新的阴影种子点加入阴影种子图; 否则转到步骤 13.3a), 为了防止加入错误的阴影种子点, 要求新加入的阴影种子点在 E_{ij} 中对应像素的灰度值必须小于等于 $\lambda_2 T_2$, 其中 T_2 为阴影阈值, λ_2 为 T_2 的约束系数, $\lambda_2=1$;

[0099] 13.3c) 对阴影种子图中的每一个阴影种子点和新加入的阴影种子点重复步骤 13.3a) 到 13.3b), 直到不再有新的阴影种子点加入为止, 则经过这一过程加入了新的阴影种子点的阴影种子点图, 即为所要求得的 \hat{I}_y 的阴影粗检结果图 Sd_{ij} 。

[0100] 步骤 14, 在 8 邻域条件下, 用半径为两个像素的圆盘形结构元素分别对归一化后子图集 \hat{I}_y 的云粗检结果图 Cd_{ij} 和阴影粗检结果图 Sd_{ij} 做一次数学形态学闭运算, 后将该两幅图中封闭区块面积小于 8 个像素的区块从图像中剔除, 并对 Cd_{ij} 和 Sd_{ij} 的对应像素灰度值相加, 得到 \hat{I}_y 的云影粗检测图 CS_{ij} 。

[0101] 步骤 15, 分别从每个归一化后子图集 \hat{I}_y 对应的云影粗检测图 CS_{ij} 中选取该 \hat{I}_y 的基准对, 共得到 \aleph 个基准对。

[0102] 15.1) 归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的云影粗检测图 CS_{ij} 中包含 M 个灰度值为 1 的封闭区块和 N 个灰度值为 0.5 的封闭区块, 它们分别代表云块和阴影块。将所有 M 个云块与所有 N 个阴影块一一组成云影对, 共 $M \times N$ 个; 如果 $M=0$ 或 $N=0$, 则该归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 无基准对, 否则统计每个云影对中云块的面积 S_c 和周长 L_c , 阴影块的面积 S_s 和周长 L_s 、云影对质心连线长度 d 以及倾角 θ , 其中 S_c 、 S_s 、 L_c 、 L_s 和 d 都以像素为单位;

[0103] 15.2) 根据厚云和其产生的阴影具有相似形状的特性, 提出判断每一个云影对是否满足 1) 式:

$$[0104] \quad \left\{ \begin{array}{l} 100 \leq S_c \leq 900 \\ 100 \leq S_s \leq 900 \\ |S_c - S_s| \leq \frac{\alpha}{2}(S_c + S_s); \\ |L_c - L_s| \leq \frac{\beta}{2}(L_c + L_s) \\ d \leq \gamma \sqrt{0.5(S_c + S_s)} \end{array} \right. \quad 1)$$

[0105] 若满足 1) 式, 则将该云影对作为一个候选基准对, 并在所有云影对判断完毕后进行步骤 15.5), 若没有一个云影对满足 1) 式, 则进行步骤 15.3), 其中 1) 式中 α 为面积约束系数, β 为周长约束系数, γ 为间距约束系数, $\alpha = 0.3$, $\beta = 0.25$, $\gamma = 3$;

[0106] 15.3) 将 1) 式中面积约束系数 α 、周长约束系数 β 和间距约束系数 γ 同时各增大百分之一, 再重新判断是否有云影对满足 1) 式, 如有云影对满足 1) 式则将其作为一个候选基准对, 并在所有云影对判断完毕后进行步骤 15.5); 否则进行步骤 15.4);

[0107] 15.4) 如果 $\alpha < 1$ 、 $\beta < 1$ 且 $\gamma < 5$, 则转到步骤 15.3); 否则, 则该归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 无基准对;

[0108] 15.5) 在所有得到的候选基准对中选择云影对质心连线长度 d 最小、阴影面积 S_s 最大的候选基准对作为归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的基准对;

[0109] 15.6) 分别对 16 个归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 重复步骤 15.1) 至 15.5), 得到 \mathfrak{K} 个基准对, 其中 $\mathfrak{K} \leq 16$;

[0110] 步骤 16, 统计上述 \mathfrak{K} 个基准对的质心连线主角度和质心连线主长度, 得到最终基准对倾角 A 和最终基准对间距 D 。

[0111] 16.1) 设角度阈值 $\Theta = 20$, 并设基准对的序号为 π , 其中 $1 \leq \pi \leq \mathfrak{K}$, 此处令 $\pi = 1$;

[0112] 16.2) 选择第 π 个基准对;

[0113] 16.3) 将选中的基准对记为 Δ , 将 Δ 的质心连线倾角分别与其余 $\mathfrak{K}-1$ 个基准对的质心连线倾角作差并取绝对值, 得到 $\mathfrak{K}-1$ 个基准对的 $\mathfrak{K}-1$ 个差异角; 如果这 $\mathfrak{K}-1$ 个差异角中有超过 $(\mathfrak{K}-1)/2$ 个小于角度阈值 Θ , 则将所有小于角度阈值 Θ 的差异角对应基准对的质心连线倾角与 Δ 的质心连线倾角相加并求平均值, 得到质心连线主角度, 并将该质心连线主角度作为最终基准对倾角 A , 将所有小于角度阈值 Θ 的差异角对应基准对的质心连线长度与 Δ 的质心连线长度相加并求平均值, 得到质心连线主长度, 并将该质心连线主长度作为最终基准对间距 D ; 否则执行步骤 16.4);

[0114] 16.4) 若 $\pi < \mathfrak{K}$, 则将 π 的值加 1, 并转到步骤 16.2); 若 $\pi = \mathfrak{K}$, 并仍未得到最终

基准对倾角 A 和最终基准对间距 D , 则将角度阈值 Θ 的值增加 5 且令 $\Pi=1$, 并转到步骤 16. 2)。

[0115] 步骤 17, 根据最终基准对倾角 A 和间距 D 对归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 中的所有云块和阴影块进行配对, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的云影配对结果图 P_{ij} 。

[0116] 对于一幅图像中的每一个像素而言, 拍摄时的太阳高度角和拍摄角度是固定不变的, 因此图像中所有厚云及其产生的阴影具有一致的相对空间位置。根据这一特点, 提出判断归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 中的所有云影对是否满足如下公式:

$$[0117] \quad \begin{cases} A-\delta \leq \theta \leq A+\delta \\ D-\xi \leq d \leq D+\xi \\ S_s \leq aS_c \\ L_s \leq bL_c \end{cases} \quad 2)$$

[0118] 若在所有 $M \times N$ 个云影对中有任何一个满足 2) 式, 则将该云影对在一幅与 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的云影粗检测图 CS_{ij} 尺寸相同、所有像素灰度值全为 0 的空白图像的相应位置处保存, 即将云对应像素的灰度值置为 1, 将阴影对应像素的灰度值置为 0.5, 并待所有云影对判断完毕后, 将保存云影对的所有这些图像对应位置的像素灰度值相加, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的云影配对结果图 P_{ij} ; 若没有任何一个云影对满足 2) 式或 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的云影粗检测图 CS_{ij} 中包含的云块个数 $M=0$ 或阴影块个数 $N=0$, 则将一幅与 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的云影粗检测图 CS_{ij} 尺寸相同、所有像素灰度值全为 0 的空白图像作为 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的云影配对结果图 P_{ij} , 其中 a 为面积比系数, b 为周长比系数, δ 为角度松弛变量, ξ 为间距松弛变量, $a=10, b=5, \delta=20, \xi=20$ 。

[0119] 步骤 18, 将归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的云影配对结果图 P_{ij} 与云影粗检测图 CS_{ij} 对应位置处的像素灰度值相减并求绝对值, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的未配对云影块图像, 其中像素灰度值为 1 的封闭区域代表云块, 像素灰度值为 0.5 的封闭区域代表阴影块。

[0120] 步骤 19, 根据最终基准对倾角 A 和间距 D 对归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的未配对云影块图像中的云块补充检测对应阴影块, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的阴影补充检测结果图 $AD1_{ij}$ 。

[0121] 19. 1) 设 M_x 为归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的未配对云影块图像中云块的个数, 其中 $M_x \geq 0$, 若 M_x 等于 0, 则将一幅与 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的云影粗检测图 CS_{ij} 尺寸相同、所有像素灰度值全为 0 的空白图像作为 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的阴影补充检测结果图 $AD1_{ij}$; 否则设 m 为 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的未配对云影块图像中云块的序号, 其中 $1 \leq m \leq M_x$, 此处令 $m=1$;

[0122] 19. 2) 根据第 m 个云块的质心像素坐标 (X_{cm}, Y_{cm}) , 利用 3) 式求出对应阴影块的质心像素坐标 (X_{sm}, Y_{sm}) ;

$$[0123] \quad \begin{cases} X_{sm} = X_{cm} - D * \cos(A) \\ Y_{sm} = Y_{cm} - D * \sin(A) \end{cases}; \quad 3)$$

[0124] 19. 3) 在 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 的灰度平均图 E_{ij} 上选取以像素坐标 (X_{sm}, Y_{sm}) 为中心、 $K \times K$ 大小的窗, 然后将该窗口内灰度值最小的像素点作为种子点, 利用区域生长法在 E_{ij} 中进行区域生长, 得到补充检测的阴影块; 如果补充检测的阴影块其面积和周长分别超过对应云块面积和周长的 φ 倍和 ψ 倍, 则将该补充检测的阴影块剔除, 否则保留, 其中区域生长使用邻域判断

阈值 T , $T=0.03$, $\varphi=10$, $\psi = 5$, $K = 9$;

[0125] 19.4) 若 $m < M_x$, 则将 m 的值加 1, 并转到步骤 19.2); 若 $m = M_x$, 则将得到的所有补充检测的阴影块与对应的云块在一幅与 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的云影粗检测图 CS_{ij} 尺寸相同、所有像素灰度值全为 0 的空白图像的相应位置处保存, 即将云对应像素的灰度值置为 1, 将阴影对应像素的灰度值置为 0.5, 得到归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的阴影补充检测结果图 $AD1_{ij}$ 。

[0126] 步骤 20, 根据最终基准对倾角 A 和间距 D 对归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的未配对云影块图像中的阴影块补充检测对应云块, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的云补充检测结果图 $AD2_{ij}$ 。

[0127] 20.1) 设 N_x 为归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的未配对云影块图像中阴影块的个数, 其中 $N_x \geq 0$, 若 N_x 等于 0, 则将一幅与 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的云影粗检测图 CS_{ij} 尺寸相同、所有像素灰度值全为 0 的空白图像作为 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的云补充检测结果图 $AD2_{ij}$; 否则设 n 为 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的未配对云影块图像中阴影块的序号, 其中 $1 \leq n \leq N_x$, 此处令 $n = 1$;

[0128] 20.2) 根据第 n 个阴影块的质心像素坐标 (X_{sn}, Y_{sn}) , 利用 4) 式求出对应云块质心像素坐标 (X_{cn}, Y_{cn}) ;

$$[0129] \quad \begin{cases} X_{cn} = X_{sn} - D * \cos(A+180) \\ Y_{cn} = Y_{sn} - D * \sin(A+180) \end{cases}; \quad 4)$$

[0130] 20.3) 在 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的灰度平均图 E_{ij} 上选取以像素坐标 (X_{cn}, Y_{cn}) 为中心、 $K \times K$ 大小的窗, 然后将该窗口内灰度值最大的像素点作为种子点, 利用区域生长法在 E_{ij} 中进行区域生长, 得到补充检测的云块; 如果补充检测的云块其面积和周长分别超过对应阴影块面积和周长的 φ 倍和 ψ 倍, 则同时剔除该补充检测的云块和它对应的阴影块, 否则都予以保留, 其中区域生长使用邻域判断阈值 T , $T=0.03$, $\varphi=10$, $\psi = 5$, $K = 9$;

[0131] 20.4) 若 $n < N_x$, 则将 n 的值加 1, 并转到步骤 20.2); 若 $n = N_x$, 则将得到的所有补充检测的云块与对应的阴影块在一幅与 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的云影粗检测图 CS_{ij} 尺寸相同、所有像素灰度值全为 0 的空白图像的相应位置处保存, 即将云对应像素的灰度值置为 1, 将阴影对应像素的灰度值置为 0.5, 得到归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的云补充检测结果图 $AD2_{ij}$ 。

[0132] 步骤 21, 将归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的云影配对结果图 P_{ij} 、云补充检测结果图 $AD1_{ij}$ 和阴影补充检测结果图 $AD2_{ij}$ 的对应空间位置处的像素灰度值相加, 得到 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 的最终检测结果子图 CaS_{ij} 。

[0133] 步骤 22, 将 16 个归一化后子图集 $\hat{\mathbf{I}}_y$ 对应的 16 个最终检测结果子图 CaS_{ij} 按顺序拼接, 得到一幅完整的最终检测结果图 CaS 。

[0134] 本发明的效果可通过如下仿真实验结果进一步说明:

[0135] 1. 实验数据

[0136] 实验所使用的输入图像如图 2 所示, 其中图 2 (a) 至图 2 (f) 分别为除第六、第八波段外的第一至第七波段的增强专题制图仪 ETM 图像, 该图像由一景 L1G 原始数据通过旋转得到, 幅面均为 5800×5600 像素, 灰度级为 256 级。

[0137] 2. 厚云及其阴影检测内容及结果

[0138] 用本发明对图 2 所示的实验数据进行厚云及其阴影检测, 得到如图 3 (a)~(e) 所示的实验结果, 其中图 3 (a) 为云影粗检测图 CS ; 图 3 (b) 为云影配对结果图 P ; 图 3 (c)

为阴影补充检测结果图 AD1 ;图 3 (d) 为云补充检测结果图 AD2 ;图 3 (e) 为最终检测结果图 CaS, 图中白色部分代表云, 灰色部分代表阴影, 黑色部分代表地面。

[0139] 结论 :通过将图 2 所示的实验图像与图 3 (e) 所示的最终检测结果图进行对比观察发现, 图 2 中包含的厚云及其阴影基本都被检测出来, 并且几乎没有错误地将地面物体当作厚云及其阴影检测出来, 可见本发明的检测准确性较高。

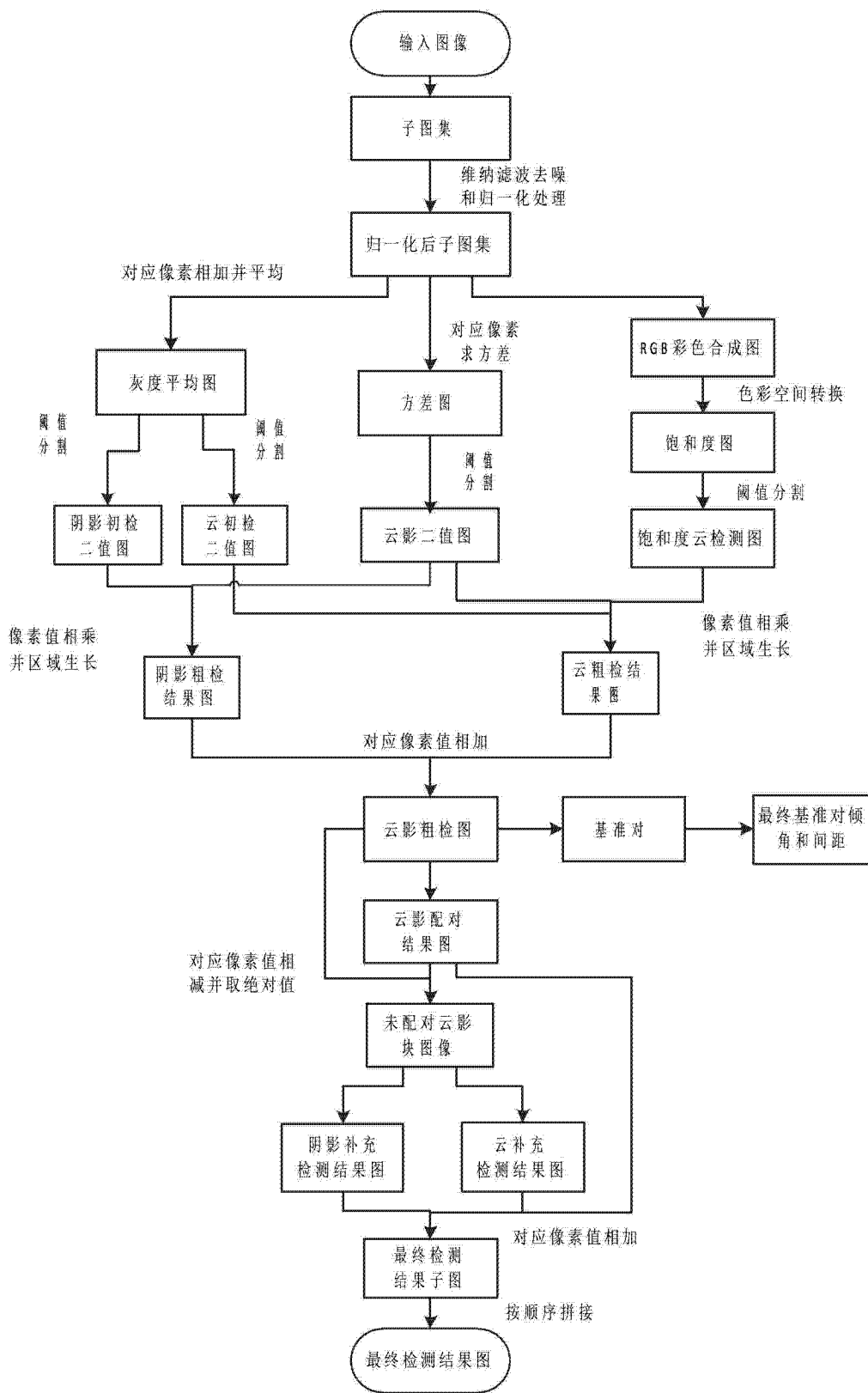


图 1

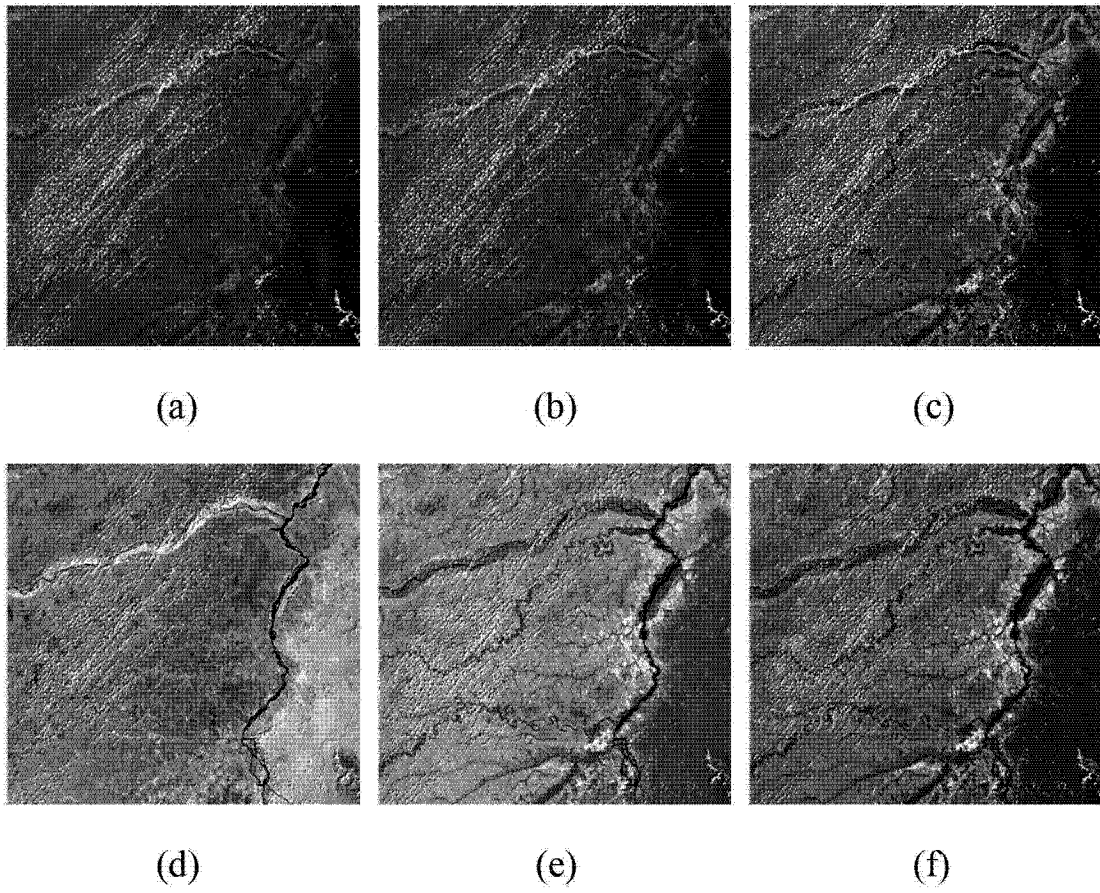
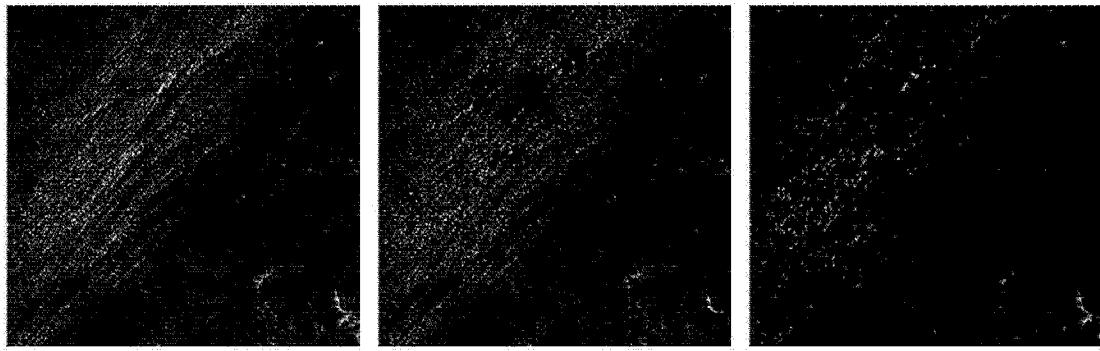


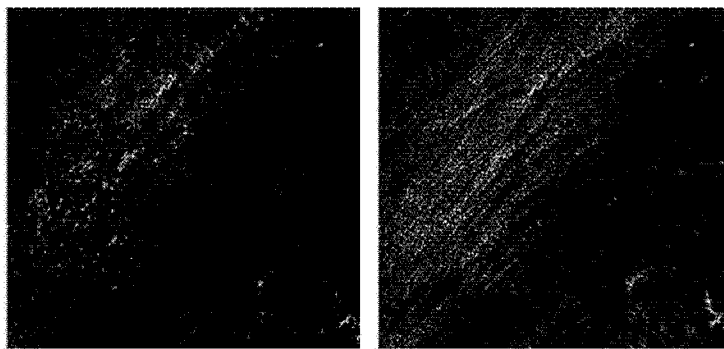
图 2



(a)

(b)

(c)



(d)

(e)

图 3