



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 113436123 A
(43) 申请公布日 2021.09.24

(21) 申请号 202110691126.8

(22) 申请日 2021.06.22

(71) 申请人 宁波大学

地址 315211 浙江省宁波市江北区风华路
818号

(72) 发明人 陈郎坤 孟祥超 束进芳 邵枫

(74) 专利代理机构 杭州九洲专利事务所有限公
司 33101

代理人 张羽振

(51) Int. Cl.

G06T 5/50 (2006.01)

G06T 5/00 (2006.01)

G06T 7/30 (2017.01)

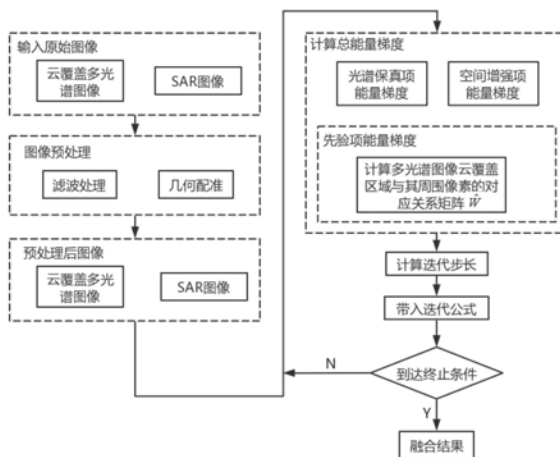
权利要求书4页 说明书10页 附图3页

(54) 发明名称

去云-分辨率提升协同的高分SAR与低分多
光谱图像融合方法

(57) 摘要

本发明涉及一种去云-分辨率提升协同的高分SAR与低分多光谱图像融合方法,包括以下步骤:输入原始图像,选取同一场景的高分SAR图像与低分多光谱图像,并为低分多光谱图像的被云覆盖区域制作掩膜图像;对输入的高分SAR图像与低分多光谱图像进行预处理;建立去云-分辨率提升的协同变分融合模型。本发明的有益效果是:在还原云覆盖多光谱图像被云覆盖区域的同时,使低分多光谱图像与高分SAR图像进行了融合,使得融合图像同时拥有低分多光谱与高分SAR图像的优点。高分SAR图像和低分多光谱图像的融合效果好,高分SAR图像的信息在增强低分多光谱图像纹理结构的同时,提高了低分多光谱的分辨率,且没有破坏多光谱图像的光谱信息。



1. 一种去云-分辨率提升协同的高分SAR与低分多光谱图像融合方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1、输入原始图像,选取同一场景的高分SAR图像与低分多光谱图像,分别记为 I_{SAR_0} 和 I_{MSL} ,并为低分多光谱图像的被云覆盖区域制作掩膜图像,将掩膜图像记为 M_L ;

步骤2、对输入的高分SAR图像与低分多光谱图像进行预处理;得到融合过程中的原始多光谱图像 I_{MSR} 、掩膜图像矩阵 M 和去噪与几何配准后新的SAR图像 I_{SAR} ;

步骤3、建立去云-分辨率提升的协同变分融合模型;去云-分辨率提升的协同变分融合模型由光谱保真项、空间增强项和先验项组成;通过光谱保真项、空间增强项和先验项的能量梯度大小算出变分融合模型迭代时的迭代步长,将计算得到的迭代步长代入迭代公式,最后得到融合结果图像;

步骤4:将SAR图像 I_{SAR} 、融合过程中的原始多光谱图像 I_{MSR} 、融合过程中的掩膜图像矩阵 M 放入设计好的最优融合策略中不断迭代,当达到设置的标准后,输出最终结果图像,最终结果图像为高分SAR图像和低分多光谱图像的去云融合图像,记为 $I_{SAR/MS}$ 。

2. 根据权利要求1所述去云-分辨率提升协同的高分SAR与低分多光谱图像融合方法,其特征在于:步骤1中掩膜图像像素值为0的部分是未被云遮挡的部分,掩膜图像像素值为1的部分是被云遮挡部分。

3. 根据权利要求1所述去云-分辨率提升协同的高分SAR与低分多光谱图像融合方法,其特征在于,步骤2具体包括以下步骤:

步骤2.1、使用现有Lee滤波方法对高分SAR图像进行去噪,去除高分SAR图像中的相干斑噪声,得到去噪后的高分SAR图像,记为 I_{SAR} ;

步骤2.2、对 I_{SAR} 和 I_{MSL} 进行几何配准操作,得到新的SAR图像,记为 I_{SAR} ;根据高分SAR图像 I_{SAR_0} 的大小,将低分多光谱图像 I_{MSL} 和低分多光谱图像的掩膜图像 M_L 放大到与 I_{SAR_0} 相同的大小,记为 I_{MSR} 和 M ; I_{MSR} 和 M 分别作为融合过程中的原始多光谱图像和掩膜图像。

4. 根据权利要求3所述去云-分辨率提升协同的高分SAR与低分多光谱图像融合方法,其特征在于:步骤2.2中使用ENVI软件对 I_{SAR} 和 I_{MSL} 进行配准。

5. 根据权利要求3所述去云-分辨率提升协同的高分SAR与低分多光谱图像融合方法,其特征在于,步骤3具体包括以下步骤:

步骤3.1、变分融合模型的光谱保真项能量梯度函数为:

$$E_{spe} = \sum_{b=1}^B \sum_{k=0}^B \|(Y'_b - Y'_k) - MD(S_b x_b - S_k x_k)\|_2^2$$

上式中, Y'_b 、 Y'_k 分别为第b个、第k个图像波段的多光谱图像数据; x_b 、 x_k 分别为第b个、第k个图像波段期望得到的无云高分多光谱融合结果图像; M 为掩膜图像矩阵; B 为图像总波段数; D 为下采样矩阵; S_b 、 S_k 分别为第b个、第k个图像波段的模糊矩阵; b 、 k 分别为图像波段号;

步骤3.2、变分融合模型的空间增强项能量梯度函数为:

$$E_{spa} = \sum_{b=1}^B \|\nabla Z' - f(M\nabla x_b)\|_2^2$$

上式中, B 为图像总波段数; b 为图像波段号; ∇ 为拉普拉斯运算; Z' 为经过预处理后的高分SAR图像, 记为 I_{SAR} ; $f(\cdot)$ 为矩匹配函数; M 为掩膜图像矩阵; x_b 为第 b 个图像波段期望得到的无云高分多光谱融合结果图像;

$$f(x_b) = \frac{(Z'_b)_{std}}{(x_b)_{std}} * (x_b - (x_b)_{mean}) + (Z'_b)_{mean}$$

上式中, x_b 为第 b 个图像波段期望得到的无云高分多光谱融合结果图像; std 表示为带有该下标的项计算标准差, $mean$ 表示为带有该下标的项计算平均值; Z'_b 为经过预处理后的第 b 个图像波段的高分SAR图像;

步骤3.3、变分融合模型的先验项的能量梯度函数为

$$E_{prior} = \sum_{b=1}^B \left\| x_b - \sum_{i=1}^N \hat{W}_{bi} x_{bi} \right\|_2^2$$

上式中, \hat{W} 为通过高分SAR图像得到的多光谱图像云覆盖区域与其周围像素的对应关系矩阵; \hat{W}_{bi} 为第 b 个图像波段上云覆盖区域第 i 个位置的系数值; x_b 为第 b 个图像波段期望得到的无云高分多光谱融合结果图像; x_{bi} 为无云高分多光谱融合结果图像第 b 个图像波段上云覆盖区域第 i 个位置的像素值; N 为云覆盖区域的总像素点个数;

步骤3.4、为光谱保真项、空间增强项和先验项的能量梯度函数设置权重, 得到变分融合模型完整的能量函数:

$$E = \lambda_1 \sum_{b=1}^B \sum_{k=0}^B \left\| (Y'_b - Y'_k) - MD(S_b x_b - S_k x_k) \right\|_2^2 + \sum_{b=1}^B \hat{w}_b \left\| \nabla Z' - f(M \nabla x_b) \right\|_2^2 + \lambda_2 \sum_{b=1}^B \left\| x_b - \sum_{i=1}^N \hat{W}_{bi} x_{bi} \right\|_2^2$$

上式中, b, k 分别为图像波段号; N 为云覆盖区域的总像素点个数; λ_1 和 λ_2 为设置的权重, λ_1 和 λ_2 均为常数; \hat{w}_b 为自适应权重矩阵;

$$\hat{w}_b = \frac{\text{cov}(My_b, MI) / \text{var}(MI)}{\sum_{b=1}^B \text{cov}(My_b, MI) / \text{var}(MI)}$$

上式中, I 为低分多光谱图像通过IHS变换得到的亮度矩阵, y 代表原始低分多光谱图像 I_{MSR} , y_b 代表融合过程中的原始多光谱图像 I_{MSR} 的第 b 个图像波段; M 为掩膜图像矩阵, cov 为相关性计算, var 为方差计算;

步骤3.5、通过对变分融合模型完整的能量函数求导, 得到每个图像波段的总能量梯度矩阵:

$$\begin{aligned} \nabla E(x_b) = & \\ & -\lambda_1 \sum_{k=0}^B \sum_{t=p,q} S_b^T D^T M_t^T [M_t (y_{t,b} - y_{t,k}) - M_t D(S_b x_b - S_k x_k)] \\ & -\hat{w}_b \sum_{t=p,q} M_t^T [M_t \Delta Z' - f(M_t \Delta x_b)] + \lambda_2 (x_b - \sum_{i=1}^N \hat{W}_{bi} x_{bi}) \end{aligned}$$

上式中, M_t 分为 M_p 和 M_q 两部分, y_t 也分为 y_p 和 y_q 两部份, $M_p=M$, $M_q=1-M$; y_p 为 I_{MSR} 与 \hat{W} 经过运算后得到的多光谱图像 \hat{I}_{MS} , y_q 为放大到与 I_{SAR0} 相同大小的低分多光谱图像 I_{MSR} , Z' 为经过预处理后的高分SAR图像, $\nabla E(x_b)$ 为图像波段b的总能量梯度矩阵;

步骤3.6、根据得到的能量梯度矩阵求出进行融合模型迭代时, 每次迭代的步长 τ :

$\tau_b =$

$$\frac{[\nabla E(x_{b,n})]^T \nabla E(x_{b,n})}{[\nabla E(x_{b,n})]^T [\lambda_1 \sum_{k=0}^B \sum_{t=p,q} S_b^T D^T M_t^T M_t D S_b + \omega_b \sum_{t=p,q} \hat{M}_t^T f(\hat{M}_t \Delta)] \nabla E(x_{b,n}) + \lambda_2 [\nabla E(x_{b,n})]^T \nabla E(x_{b,n})}$$

上式中, τ_b 为图像波段b的迭代步长, $\nabla E(x_b)$ 为图像波段b在第n次的迭代后的总能量梯度矩阵, $\hat{M}=M$ 为掩膜矩阵, $[\cdot]^T$ 为矩阵转置;

步骤3.7、设计迭代公式为:

$$x_{b,n+1} = x_{b,n} - \tau_{b,n} \nabla E(x_{b,n})$$

上式中, $x_{b,n}$ 为第n次迭代后的图像波段b的结果图像; $x_{b,n+1}$ 为根据 $x_{b,n}$ 再迭代一次后的图像波段b的结果图像; $\tau_{b,n}$ 为图像波段b第n次迭代后的迭代步长; 初始化融合影像为 \hat{I}_{MS} ;

设置迭代终止条件为:

$$||x_{n+1} - x_n||_2 / ||x_n||_2 \leq d$$

其中, d 为设置的终止条件的阈值。

6. 根据权利要求5所述去云-分辨率提升协同的高分SAR与低分多光谱图像融合方法, 其特征在于, 步骤3.3中, 通过高分SAR图像得到的多光谱图像云覆盖区域与其周围像素的对应关系矩阵 \hat{W} 的具体方法如下:

根据掩膜图像 M_r 找到被云覆盖区域, 并选择其中一个被云覆盖的位置 (t_1, t_2) , 记为中心坐标; 以中心坐标为中心, 建立一个 $n*n$ 大小的窗口, 在该窗口范围内, 以 (t_1, t_2) 和窗口内其它像素 (i, j) 为中心像素, 建立两个大小为 $k \times k$ 大小的图块 K_1 和 K_2 , K_1 放在中心坐标, K_2 在矩阵 N 不断移动, 并通过新的SAR图像上的像素信息, 计算中心坐标位置小块 K_1 与矩阵 N 内周围像素小块 K_2 的对应关系:

$$Dis(i, j) = (I_{SAR}(i, j) - I_{SAR}(t_1, t_2))^2 x \in [t_1 - [k/2], t_1 + [k/2]], y \in [t_2 - [k/2], t_2 + [k/2]]$$

得到图块 K_1 和 K_2 内, 每个对应图块之间的距离矩阵 Dis ; 其中 $I_{SAR}(i, j)$ 为新的SAR图像上位置 (i, j) 处的像素值; $I_{SAR}(t_1, t_2)$ 为新的SAR图像上位置 (t_1, t_2) 处的像素值; $Dis(i, j)$ 为距离矩阵 Dis 在位置 (i, j) 处的距离值; x 为期望得到的无云高分多光谱融合结果图像, y 为多光谱图像; 通过 K_2 在窗口范围 N 内滑动, 得到窗口范围内以各个位置为中心的图块 K_2 和以中心位置为中心的图块 K_1 之间的距离矩阵 \hat{Dis} ; 再通过 \hat{Dis} 矩阵计算中心像素与周围像素的关系;

通过公式:

$$\hat{D}_{is} = G * \hat{Dis}$$

得到中心像素与周围像素的距离矩阵 \hat{D}_{is} , 其中 G 为 $k*k$ 大小的高斯矩阵;

再通过公式：

$$W(i,j)=\begin{cases} \hat{D}_{is}(i,j) & M_R(i,j)=0 \\ 0 & else \end{cases}$$

得到去除被云覆盖部分的像素影响的距离矩阵 W ；上式中， $W(i,j)$ 为去除被云覆盖部分的像素影响的距离矩阵 W 在位置 (i,j) 上的值； $\hat{D}_{is}(i,j)$ 为中心像素与周围像素距离矩阵 \hat{D}_{is} 在位置 (i,j) 上的值； $M_R(i,j)$ 为掩膜图像矩阵在位置 (i,j) 上的像素值；其中 $M_R=M$ 为掩膜图像矩阵；

再通过归一化公式：

$$\begin{cases} C(t_1,t_2)=\sum_{i,j} W(i,j) \\ w(i,j)=\frac{W(i,j)}{C(t_1,t_2)} \end{cases}$$

得到当中心坐标为 (t_1,t_2) 时，中心像素与周围像素的关系矩阵 w ；其中 $C(t_1,t_2)$ 表示中心坐标 (t_1,t_2) 对应的距离矩阵 W 在 $n*n$ 窗口内，所有坐标上的值累加后的和；

通过中心像素与周围像素的关系矩阵 w ，在 I_{MSR} 上计算出被云覆盖点 (t_1,t_2) 处的像素值，并将其填入 $I_{MSR}(t_1,t_2)$ 中，更新 I_{MSR} ，并令 $M_R(t_1,t_2)=1$ ；在云覆盖区域不断移动中心位置的坐标 (t_1,t_2) ，直到所有的云覆盖位置都被移动到过，并且该位置的像素都被计算并已重新填充进 I_{MSR} ；这个新的 I_{MSR} 记为 \hat{I}_{MS} ；

重复以上步骤，根据掩膜图像矩阵 M 找到被云覆盖区域，计算并记录每一个被云覆盖的位置对应的关系矩阵 w ，整合得到整个云覆盖区域与周围像素的关系矩阵，记为 \hat{W} 。

7. 根据权利要求5所述去云-分辨率提升协同的高分SAR与低分多光谱图像融合方法，其特征在于：步骤3.7中终止条件的阈值代表每次迭代后与前一次的迭代结果的差异变化，取值范围在 10^{-7} 到 10^{-9} 。

去云-分辨率提升协同的高分SAR与低分多光谱图像融合方法

技术领域

[0001] 本发明属于图像处理技术领域,尤其涉及一种去云-分辨率提升协同的高分SAR与低分多光谱图像融合方法。

背景技术

[0002] SAR (Synthetic Aperture Radar) 为主动对地观测系统,基于物体对微波的反射特性成像得到,具有不受到云雾干扰的全天候成像优势,此外,高空间分辨率(高分)SAR影像含有的纹理信息丰富。多光谱图像是基于物体对光的反射率特性成像,具有多个波段,但多光谱图像极易受云雾遮挡的影响,且空间分辨率往往相对较低。因此将高分SAR图像与低分多光谱图像融合,利用它们的互补信息弥补单一成像的不足,生成无云覆盖高分多光谱影像,从而更精确的显示地物的特征,具有重要意义。

[0003] 目前,常见的SAR与多光谱图像融合方法主要有:采用非下采样contourlet变换(NSCT)和模糊C均值聚类(FCM)相结合的图像融合算法、基于曲波(Curvelet)变换的图像融合方法、基于神经网络的融合方法等。在这些方法中,应用较为广泛的是基于曲波变换的图像融合方法,因为曲波变换是一种更适合于图像处理的多尺度几何分析(MGA)方法,具有较强的方向性。这种融合方法的基本思想是:首先,使用HSI变换将多光谱图像从RGB转换到HSI颜色空间。其次,对多光谱图像的亮度分量I和SAR图像进行曲波变换,并进行融合。之后,对融合结果进行逆曲波变换得到新的I分量。最后,用新的I分量代替原来的I分量,并使用逆HSI变换得到最终的融合图像。

[0004] 上述方法主要适用于无云多光谱影像的融合,其旨在利用高分SAR影像提升低分多光谱影像的空间分辨率,但对SAR影像不受云雾影响的全天候成像优势考虑不足,难以适用于云覆盖多光谱影像的融合。

发明内容

[0005] 本发明的目的是克服现有技术中的不足,提供一种去云-分辨率提升协同的高分SAR与低分多光谱图像融合方法。

[0006] 这种去云-分辨率提升协同的高分SAR与低分多光谱图像融合方法,包括以下步骤:

[0007] 步骤1、输入原始图像,选取同一场景的高分SAR图像与低分多光谱图像,分别记为 I_{SAR_0} 和 I_{MSL} ,并为低分多光谱图像的被云覆盖区域制作掩膜图像,将掩膜图像记为 M_L ,该掩膜图像可通过现有云检测方法或根据实际需要在专业软件中(如ENVI)手动勾选得到;

[0008] 步骤2、对输入的高分SAR图像与低分多光谱图像进行预处理;得到融合过程中的原始多光谱图像 I_{MSR} 、掩膜图像矩阵M和去噪与几何配准后新的SAR图像 I_{SAR} ;

[0009] 步骤3、建立去云-分辨率提升的协同变分融合模型;去云-分辨率提升的协同变分融合模型由光谱保真项、空间增强项和先验项组成;通过光谱保真项、空间增强项和先验项的能量梯度大小算出变分融合模型迭代时的迭代步长,将计算得到的迭代步长代入迭代公

式,从而使目标图像不断迭代更新,最后得到融合结果图像;

[0010] 步骤4:将SAR图像 I_{SAR} 、融合过程中的原始多光谱图像 I_{MSR} 、融合过程中的掩膜图像矩阵 M 放入设计好的最优融合策略中不断迭代,当达到设置的标准后,输出最终结果图像,最终结果图像为高分SAR图像和低分多光谱图像的去云融合图像,记为 $I_{SAR/MS}$ 。

[0011] 作为优选,步骤1中掩膜图像像素值为0的部分是未被云遮挡的部分,掩膜图像像素值为1的部分是被云遮挡部分。

[0012] 作为优选,步骤2具体包括以下步骤:

[0013] 步骤2.1、由于高分SAR图像成像传感器的特征,SAR图像中含有大量的相干斑噪声,这些噪声会对后期融合造成影响;使用现有Lee滤波方法对高分SAR图像进行去噪,去除高分SAR图像中的相干斑噪声,得到去噪后的高分SAR图像,记为 I_{SAR} ;

[0014] 步骤2.2、又由于高分SAR图像与低分多光谱图像一般存在地理偏差,因此需要对 I_{SAR} 和 I_{MSL} 进行几何配准操作,得到新的SAR图像,记为 I_{SAR0} ;根据高分SAR图像 I_{SAR0} 的大小,将低分多光谱图像 I_{MSL} 和低分多光谱图像的掩膜图像 M_L 放大到与 I_{SAR0} 相同的大小,记为 I_{MSR} 和 M ; I_{MSR} 和 M 分别作为融合过程中的原始多光谱图像和掩膜图像。

[0015] 作为优选,步骤2.2中使用ENVI软件中的配准功能对 I_{SAR} 和 I_{MSL} 进行配准。

[0016] 作为优选,步骤3具体包括以下步骤:

[0017] 步骤3.1、变分融合模型的光谱保真项能量梯度函数为:

$$[0018] \quad E_{spe} = \sum_{b=1}^B \sum_{k=0}^B \|(Y'_b - Y'_k) - MD(S_b x_b - S_k x_k)\|_2^2$$

[0019] 上式中, Y'_b 、 Y'_k 分别为第b个、第k个图像波段的多光谱图像数据; x_b 、 x_k 分别为第b个、第k个图像波段期望得到的无云高分多光谱融合结果图像; M 为掩膜图像矩阵; B 为图像总波段数; D 为下采样矩阵; S_b 、 S_k 分别为第b个、第k个图像波段的模糊矩阵; b 、 k 分别为图像波段号;

[0020] 步骤3.2、变分融合模型的空间增强项能量梯度函数为:

$$[0021] \quad E_{spa} = \sum_{b=1}^B \|\nabla Z' - f(M\nabla x_b)\|_2^2$$

[0022] 上式中, B 为图像总波段数; b 为图像波段号; ∇ 为拉普拉斯运算; Z' 为经过预处理后的高分SAR图像,记为 I_{SAR} ; $f(\cdot)$ 为矩匹配函数; M 为掩膜图像矩阵; x_b 为第b个图像波段期望得到的无云高分多光谱融合结果图像;

$$[0023] \quad f(x_b) = \frac{(Z'_b)_{std}}{(x_b)_{std}} * (x_b - (x_b)_{mean}) + (Z'_b)_{mean}$$

[0024] 上式中, x_b 为第b个图像波段期望得到的无云高分多光谱融合结果图像; std 表示为带有该下标的项计算标准差, $mean$ 表示为带有该下标的项计算平均值; Z'_b 为经过预处理后的第b个图像波段的高分SAR图像;

[0025] 步骤3.3、变分融合模型的先验项的能量梯度函数为

$$[0026] \quad E_{prior} = \sum_{b=1}^B \left\| x_b - \sum_{i=1}^N \hat{W}_{bi} x_{bi} \right\|_2^2$$

[0027] 上式中, \hat{W} 为通过高分SAR图像得到的多光谱图像云覆盖区域与其周围像素的对应关系矩阵; \hat{W}_{bi} 为第b个图像波段上云覆盖区域第i个位置的系数值; x_b 为第b个图像波段期望得到的无云高分多光谱融合结果图像; x_{bi} 为无云高分多光谱融合结果图像第b个图像波段上云覆盖区域第i个位置的像素值; N为云覆盖区域的总像素点个数;

[0028] 步骤3.4、根据需要,为光谱保真项、空间增强项和先验项的能量梯度函数设置权重,得到变分融合模型完整的能量函数:

$$[0029] \quad E = \lambda_1 \sum_{b=1}^B \sum_{k=0}^B \left\| (Y'_b - Y'_k) - MD(S_b x_b - S_k x_k) \right\|_2^2 + \sum_{b=1}^B \hat{w}_b \left\| \nabla Z' - f(M \nabla x_b) \right\|_2^2 + \lambda_2 \sum_{b=1}^B \left\| x_b - \sum_{i=1}^N \hat{W}_{bi} x_{bi} \right\|_2^2$$

[0030] 上式中, b、k分别为图像波段号; N为云覆盖区域的总像素点个数; λ_1 和 λ_2 为设置的权重, λ_1 和 λ_2 均为常数; \hat{w}_b 为自适应权重矩阵;

$$[0031] \quad \hat{w}_b = \frac{\text{cov}(My_b, MI) / \text{var}(MI)}{\sum_{b=1}^B \text{cov}(My_b, MI) / \text{var}(MI)}$$

[0032] 上式中, I为低分多光谱图像通过IHS变换得到的亮度矩阵, y代表原始低分多光谱图像 I_{MSR} , y_b 代表融合过程中的原始多光谱图像 I_{MSR} 的第b个图像波段; M为掩膜图像矩阵, cov为相关性计算, var为方差计算;

[0033] 步骤3.5、通过对变分融合模型完整的能量函数求导,得到每个图像波段的总能量梯度矩阵:

$$[0034] \quad \begin{aligned} \nabla E(x_b) = & \\ & -\lambda_1 \sum_{k=0}^B \sum_{t=p,q} S_b^T D^T M_t^T [M_t (y_{t,b} - y_{t,k}) - M_t D(S_b x_b - S_k x_k)] \\ & -\hat{w}_b \sum_{t=p,q} M_t^T [M_t \Delta Z' - f(M_t \Delta x_b)] + \lambda_2 (x_b - \sum_{i=1}^N \hat{W}_{bi} x_{bi}) \end{aligned}$$

[0035] 上式中, M_t 分为 M_p 和 M_q 两部分, y_t 也分为 y_p 和 y_q 两部份, $M_p = M, M_q = 1 - M$; y_p 为 I_{MSR} 与 \hat{W} 经过运算后得到的多光谱图像 \hat{I}_{MS} , y_q 为放大到与 I_{SAR} 相同大小的低分多光谱图像 I_{MSR} , Z' 为经过预处理后的高分SAR图像, $\nabla E(x_b)$ 为图像波段b的总能量梯度矩阵;

[0036] 步骤3.6、根据得到的能量梯度矩阵求出进行融合模型迭代时,每次迭代的步长 τ :

$$[0037] \quad \tau_b = \frac{[\nabla E(x_{b,n})]^T \nabla E(x_{b,n})}{[\nabla E(x_{b,n})]^T [\lambda_1 \sum_{k=0}^B \sum_{t=p,q} S_b^T D^T M_t^T M_t D S_b + \omega_b \sum_{t=p,q} \hat{M}_t^T f(\hat{M}_t \Delta)] \nabla E(x_{b,n}) + \lambda_2 [\nabla E(x_{b,n})]^T \nabla E(x_{b,n})}$$

[0038] 上式中, τ_b 为图像波段b的迭代步长, $\nabla E(x_b)$ 为图像波段b在第n次的迭代后的总能量梯度矩阵, $\hat{M} = M$ 为掩膜矩阵, $[\cdot]^T$ 为矩阵转置;

[0039] 步骤3.7、设计迭代公式为：

$$[0040] \quad x_{b,n+1} = x_{b,n} - \tau_{b,n} \nabla E(x_{b,n})$$

[0041] 上式中, $x_{b,n}$ 为第n次迭代后的图像波段b的结果图像; $x_{b,n+1}$ 为根据 $x_{b,n}$ 再迭代一次后的图像波段b的结果图像; $\tau_{b,n}$ 为图像波段b第n次迭代后的迭代步长; 初始化融合影像为 \hat{I}_{MS} ;

[0042] 设置迭代终止条件为：

$$[0043] \quad ||x_{n+1} - x_n||^2 / ||x_n||^2 \leq d$$

[0044] 其中, d为设置的终止条件的阈值。

[0045] 作为优选, 步骤3.3中, 通过高分SAR图像得到的多光谱图像云覆盖区域与其周围像素的对应关系矩阵 \hat{W} 的具体方法如下：

[0046] 根据掩膜图像 M_R 找到被云覆盖区域, 并选择其中一个被云覆盖的位置 (t_1, t_2) , 记为中心坐标; 以中心坐标为中心, 建立一个 $n \times n$ 大小的窗口, 在该窗口范围内, 以 (t_1, t_2) 和窗口内其它像素 (i, j) 为中心像素, 建立两个大小为 $k \times k$ 大小的图块 K_1 和 K_2 , K_1 放在中心坐标, K_2 在矩阵 N 不断移动, 并通过新的SAR图像上的像素信息, 计算中心坐标位置小块 K_1 与矩阵 N 内周围像素小块 K_2 的对应关系：

$$[0047] \quad \text{Dis}(i, j) = (I_{\text{SAR}}(i, j) - I_{\text{SAR}}(t_1, t_2))^2 \quad x \in [t_1 - [k/2], t_1 + [k/2]], y \in [t_2 - [k/2], t_2 + [k/2]]$$

[0048] 得到图块 K_1 和 K_2 内, 每个对应图块之间的距离矩阵 Dis ; 其中 $I_{\text{SAR}}(i, j)$ 为新的SAR图像上位置 (i, j) 处的像素值; $I_{\text{SAR}}(t_1, t_2)$ 为新的SAR图像上位置 (t_1, t_2) 处的像素值; $\text{Dis}(i, j)$ 为距离矩阵 Dis 在位置 (i, j) 处的距离值; x 为期望得到的无云高分多光谱融合结果图像, y 为多光谱图像; 通过 K_2 在窗口范围 N 内滑动, 得到窗口范围内以各个位置为中心的图块 K_2 和以中心位置为中心的图块 K_1 之间的距离矩阵 \hat{D}_{is} ; 再通过 \hat{D}_{is} 矩阵计算中心像素与周围像素的关系;

[0049] 通过公式：

$$[0050] \quad \hat{D}_{is} = G * \hat{D}_{is}$$

[0051] 得到中心像素与周围像素的距离矩阵 \hat{D}_{is} , 其中 G 为 $k \times k$ 大小的高斯矩阵;

[0052] 再通过公式：

$$[0053] \quad W(i, j) = \begin{cases} \hat{D}_{is}(i, j) M_R(i, j) = 0 \\ 0 & else \end{cases}$$

[0054] 得到去除被云覆盖部分的像素影响的距离矩阵 W ; 上式中, $W(i, j)$ 为去除被云覆盖部分的像素影响的距离矩阵 W 在位置 (i, j) 上的值; $\hat{D}_{is}(i, j)$ 为中心像素与周围像素距离矩阵 \hat{D}_{is} 在位置 (i, j) 上的值; $M_R(i, j)$ 为掩膜图像矩阵在位置 (i, j) 上的像素值; 其中 $M_R = M$ 为掩膜图像矩阵;

[0055] 再通过归一化公式：

$$[0056] \quad \begin{cases} C(t_1, t_2) = \sum_{i,j} W(i, j) \\ w(i, j) = \frac{W(i, j)}{C(t_1, t_2)} \end{cases}$$

[0057] 得到当中心坐标为 (t_1, t_2) 时, 中心像素与周围像素的关系矩阵 w ; 其中 $C(t_1, t_2)$ 表示中心坐标 (t_1, t_2) 对应的距离矩阵 W 在 $n \times n$ 窗口内, 所有坐标上的值累加后的和;

[0058] 通过中心像素与周围像素的关系矩阵 w , 在 I_{MSR} 上计算出被云覆盖点 (t_1, t_2) 处的像素值, 并将其填入 $I_{MSR}(t_1, t_2)$ 中, 更新 I_{MSR} , 并令 $M_R(t_1, t_2) = 1$; 在云覆盖区域不断移动中心位置的坐标 (t_1, t_2) , 直到所有的云覆盖位置都被移动到过, 并且该位置的像素都被计算并重新填充进 I_{MSR} ; 这个新的 I_{MSR} 记为 \hat{I}_{MS} ;

[0059] 重复以上步骤, 根据掩膜图像矩阵 M 找到被云覆盖区域, 计算并记录每一个被云覆盖的位置对应的关系矩阵 w , 整合得到整个云覆盖区域与周围像素的关系矩阵, 记为 \hat{w} 。

[0060] 作为优选, 步骤 3.7 中终止条件的阈值代表每次迭代后与前一次的迭代结果的差异变化, 取值范围在 10^{-7} 到 10^{-9} 。

[0061] 本发明的有益效果是:

[0062] 本发明利用 SAR 图像不被云雾遮挡的特性, 通过 SAR 图像得到多光谱图像云覆盖区域与其周围像素的对应关系, 并结合多光谱图像未被云覆盖区域的光谱信息和 SAR 图像的纹理信息有针对性的设计出最优融合策略-去云-分辨率提升的协同变分融合模型。使融合图像修复了云覆盖区域的同时, 保留了更多的光谱信息和纹理信息, 从而在不使融合图像光谱信息失真的情况下, 有效提高了融合结果的结构信息和去云效果; 实现云覆盖低分多光谱影像分辨率提升和云区信息重建的协同处理。

[0063] 本发明方法在还原云覆盖多光谱图像被云覆盖区域的同时, 使低分多光谱图像与高分 SAR 图像进行了融合, 使得融合图像同时拥有低分多光谱与高分 SAR 图像的优点。高分 SAR 图像和低分多光谱图像的融合效果好, 高分 SAR 图像的信息在增强低分多光谱图像纹理结构的同时, 提高了低分多光谱的分辨率, 且没有破坏多光谱图像的光谱信息。

附图说明

[0064] 图 1 为本发明图像融合方法的总体流程框图;

[0065] 图 2 (a) 和图 2 (b) 分别为经过预处理后的云覆盖多光谱图像与 SAR 图像;

[0066] 图 3 为用本发明图像融合方法得到的去云融合结果图像;

[0067] 图 4 为使用对比方法前对多光谱图像云遮挡部分预还原后的图像;

[0068] 图 5 (a)、图 5 (b)、图 5 (c)、图 5 (d) 分别为使用 GS、PRACS、AWLP、MTFGLP 方法将图 4 与 SAR 图像融合后得到的结果图像。

具体实施方式

[0069] 下面结合实施例对本发明做进一步描述。下述实施例的说明只是用于帮助理解本发明。应当指出, 对于本技术领域的普通人员来说, 在不脱离本发明原理的前提下, 还可以对本发明进行若干修饰, 这些改进和修饰也落入本发明权利要求的保护范围内。

[0070] 实施例一

[0071] 为了使高分SAR与低分多光谱图像的融合图像更好的满足其他工程项目的需求,需使高分SAR与低分多光谱图像的融合图像既要有多光谱图像中的云区信息重建,又要将SAR图像中的纹理信息加入多光谱图像中,并对多光谱图像进行分辨率的提升,同时不破坏多光谱图像中的光谱信息。为此,本申请实施例一提供了一种如图1所示去云-分辨率提升协同的高分SAR与低分多光谱图像融合方法:

[0072] 步骤1、输入原始图像,选取同一场景的高分SAR图像与低分多光谱图像,分别记为 I_{SAR0} 和 I_{MSL} ,并为低分多光谱图像的被云覆盖区域制作掩膜图像,将掩膜图像记为 M_L ,该掩膜图像可通过现有云检测方法或根据实际需要在专业软件中(如ENVI)手动勾选得到;

[0073] 步骤2、对输入的高分SAR图像与低分多光谱图像进行预处理;得到融合过程中的原始多光谱图像 I_{MSR} 、掩膜图像矩阵 M 和去噪与几何配准后新的SAR图像 I_{SAR} ;

[0074] 步骤3、建立去云-分辨率提升的协同变分融合模型;去云-分辨率提升的协同变分融合模型由光谱保真项、空间增强项和先验项组成;通过光谱保真项、空间增强项和先验项的能量梯度大小算出变分融合模型迭代时的迭代步长,将计算得到的迭代步长代入迭代公式,从而使目标图像不断迭代更新,最后得到融合结果图像;

[0075] 步骤4:将SAR图像 I_{SAR} 、融合过程中的原始多光谱图像 I_{MSR} 、融合过程中的掩膜图像矩阵 M 放入设计好的最优融合策略中不断迭代,当达到设置的标准后,输出最终结果图像,最终结果图像为高分SAR图像和低分多光谱图像的去云融合图像,记为 $I_{SAR/MS}$ 。

[0076] 步骤1中掩膜图像像素值为0的部分是未被云遮挡的部分,掩膜图像像素值为1的部分是被云遮挡部分。

[0077] 步骤2具体包括以下步骤:

[0078] 步骤2.1、由于高分SAR图像成像传感器的特征,SAR图像中含有大量的相干斑噪声,这些噪声会对后期融合造成影响;使用现有Lee滤波方法对高分SAR图像进行去噪,去除高分SAR图像中的相干斑噪声,得到去噪后的高分SAR图像,记为 I_{SAR} ;

[0079] 步骤2.2、又由于高分SAR图像与低分多光谱图像一般存在地理偏差,因此需要对 I_{SAR} 和 I_{MSL} 进行几何配准操作,得到新的SAR图像,记为 I_{SAR} ;根据高分SAR图像 I_{SAR0} 的大小,将低分多光谱图像 I_{MSL} 和低分多光谱图像的掩膜图像 M_L 放大到与 I_{SAR0} 相同的大小,记为 I_{MSR} 和 M ; I_{MSR} 和 M 分别作为融合过程中的原始多光谱图像和掩膜图像。

[0080] 实施例中,步骤2.2中使用ENVI软件中的配准功能对 I_{SAR} 和 I_{MSL} 进行配准。

[0081] 步骤3具体包括以下步骤:

[0082] 步骤3.1、变分融合模型的光谱保真项能量梯度函数为:

$$[0083] \quad E_{spe} = \sum_{b=1}^B \sum_{k=0}^B \|(Y'_b - Y'_k) - MD(S_b x_b - S_k x_k)\|_2^2$$

[0084] 上式中, Y'_b 、 Y'_k 分别为第b个、第k个图像波段的多光谱图像数据; x_b 、 x_k 分别为第b个、第k个图像波段期望得到的无云高分多光谱融合结果图像; M 为掩膜图像矩阵; B 为图像总波段数; D 为下采样矩阵; S_b 、 S_k 分别为第b个、第k个图像波段的模糊矩阵; b 、 k 分别为图像波段号;

[0085] 步骤3.2、变分融合模型的空间增强项能量梯度函数为：

$$[0086] \quad E_{spa} = \sum_{b=1}^B \|\nabla Z' - f(M\nabla x_b)\|_2^2$$

[0087] 上式中, B为图像总波段数; b为图像波段号; ∇ 为拉普拉斯运算; Z' 为经过预处理后的高分SAR图像, 记为 I_{SAR} ; $f(\cdot)$ 为矩匹配函数; M为掩膜图像矩阵; x_b 为第b个图像波段期望得到的无云高分多光谱融合结果图像;

$$[0088] \quad f(x_b) = \frac{(Z'_b)_{std}}{(x_b)_{std}} * (x_b - (x_b)_{mean}) + (Z'_b)_{mean}$$

[0089] 上式中, x_b 为第b个图像波段期望得到的无云高分多光谱融合结果图像; std表示为带有该下标的项计算标准差, mean表示为带有该下标的项计算平均值; Z'_b 为经过预处理后的第b个图像波段的高分SAR图像;

[0090] 步骤3.3、变分融合模型的先验项的能量梯度函数为

$$[0091] \quad E_{prior} = \sum_{b=1}^B \left\| x_b - \sum_{i=1}^N \hat{W}_{bi} x_{bi} \right\|_2^2$$

[0092] 上式中, \hat{W} 为通过高分SAR图像得到的多光谱图像云覆盖区域与其周围像素的对应关系矩阵; \hat{W}_{bi} 为第b个图像波段上云覆盖区域第i个位置的系数值; x_b 为第b个图像波段期望得到的无云高分多光谱融合结果图像; x_{bi} 为无云高分多光谱融合结果图像第b个图像波段上云覆盖区域第i个位置的像素值; N为云覆盖区域的总像素点个数;

[0093] 步骤3.4、根据需要, 为光谱保真项、空间增强项和先验项的能量梯度函数设置权重, 得到变分融合模型完整的能量函数:

$$[0094] \quad E = \lambda_1 \sum_{b=1}^B \sum_{k=0}^B \|(Y'_b - Y'_k) - MD(S_b x_b - S_k x_k)\|_2^2 + \sum_{b=1}^B \hat{w}_b \|\nabla Z' - f(M\nabla x_b)\|_2^2 + \lambda_2 \sum_{b=1}^B \left\| x_b - \sum_{i=1}^N \hat{W}_{bi} x_{bi} \right\|_2^2$$

[0095] 上式中, b、k分别为图像波段号; N为云覆盖区域的总像素点个数; λ_1 和 λ_2 为设置的权重, λ_1 和 λ_2 均为常数; \hat{w}_b 为自适应权重矩阵;

$$[0096] \quad \hat{w}_b = \frac{\text{cov}(My_b, MI) / \text{var}(MI)}{\sum_{b=1}^B \text{cov}(My_b, MI) / \text{var}(MI)}$$

[0097] 上式中, I为低分多光谱图像通过IHS变换得到的亮度矩阵, y代表原始低分多光谱图像 I_{MSR} , y_b 代表融合过程中的原始多光谱图像 I_{MSR} 的第b个图像波段; M为掩膜图像矩阵, cov为相关性计算, var为方差计算;

[0098] 实施例中, 设置 $\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 100$ 。

[0099] 步骤3.5、通过对变分融合模型完整的能量函数求导, 得到每个图像波段的总能量梯度矩阵:

$$\begin{aligned}
& \nabla E(x_b) = \\
[0100] \quad & -\lambda_1 \sum_{k=0}^B \sum_{t=p,q} S_b^T D^T M_t^T [M_t (y_{t,b} - y_{t,k}) - M_t D(S_b x_b - S_k x_k)] \\
& -\hat{w}_b \sum_{t=p,q} M_t^T [M_t \Delta Z' - f(M_t \Delta x_b)] + \lambda_2 (x_b - \sum_{i=1}^N \hat{W}_{bi} x_{bi})
\end{aligned}$$

[0101] 上式中, M_t 分为 M_p 和 M_q 两部分, y_t 也分为 y_p 和 y_q 两部份, $M_p = M, M_q = 1 - M$; y_p 为 I_{MSR} 与 \hat{W} 经过运算后得到的多光谱图像 \hat{I}_{MS} , y_q 为放大到与 I_{SAR0} 相同大小的低分多光谱图像 I_{MSR} , Z' 为经过预处理后的高分SAR图像, $\nabla E(x_b)$ 为图像波段b的总能量梯度矩阵;

[0102] 实施例中, 设置 $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 100$ 。

[0103] 步骤3.6、根据得到的能量梯度矩阵求出进行融合模型迭代时, 每次迭代的步长 τ :

$$\tau_b =$$

$$[0104] \quad \frac{[\nabla E(x_{b,n})]^T \nabla E(x_{b,n})}{[\nabla E(x_{b,n})]^T [\lambda_1 \sum_{k=0}^B \sum_{t=p,q} S_b^T D^T M_t^T M_t D S_b + \omega_b \sum_{t=p,q} \hat{M}_t^T f(\hat{M}_t \Delta)] \nabla E(x_{b,n}) + \lambda_2 [\nabla E(x_{b,n})]^T \nabla E(x_{b,n})}$$

[0105] 上式中, τ_b 为图像波段b的迭代步长, $\nabla E(x_b)$ 为图像波段b在第n次的迭代后的总能量梯度矩阵, $\hat{M} = M$ 为掩膜矩阵, $[\cdot]^T$ 为矩阵转置;

[0106] 实施例中, 设置 $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 100$ 。

[0107] 步骤3.7、设计迭代公式为:

$$[0108] \quad x_{b,n+1} = x_{b,n} - \tau_{b,n} \nabla E(x_{b,n})$$

[0109] 上式中, $x_{b,n}$ 为第n次迭代后的图像波段b的结果图像; $x_{b,n+1}$ 为根据 $x_{b,n}$ 再迭代一次后的图像波段b的结果图像; $\tau_{b,n}$ 为图像波段b第n次迭代后的迭代步长; 初始化融合影像为 \hat{I}_{MS} ;

[0110] 设置迭代终止条件为:

$$[0111] \quad ||x_{n+1} - x_n||^2 / ||x_n||^2 \leq d$$

[0112] 其中, d为设置的终止条件的阈值。

[0113] 实施例中, 设置 $d = 10^{-7}$ 。

[0114] 步骤3.3中, 通过高分SAR图像得到的多光谱图像云覆盖区域与其周围像素的对应关系矩阵 \hat{W} 的具体方法如下:

[0115] 根据掩膜图像 M_R 找到被云覆盖区域, 并选择其中一个被云覆盖的位置 (t_1, t_2) , 记为中心坐标; 以中心坐标为中心, 建立一个 $n \times n$ 大小的窗口, 在该窗口范围内, 以 (t_1, t_2) 和窗口内其它像素 (i, j) 为中心像素, 建立两个大小为 $k \times k$ 大小的图块 K_1 和 K_2 , K_1 放在中心坐标, K_2 在矩阵 N 不断移动, 并通过新的SAR图像上的像素信息, 计算中心坐标位置小块 K_1 与矩阵 N 内周围像素小块 K_2 的对应关系:

$$[0116] \quad \text{Dis}(i, j) = (I_{SAR}(i, j) - I_{SAR}(t_1, t_2))^2 \quad x \in [t_1 - [k/2], t_1 + [k/2]], y \in [t_2 - [k/2], t_2 + [k/2]]$$

[0117] 得到图块 K_1 和 K_2 内, 每个对应图块之间的距离矩阵 Dis ; 其中 $I_{SAR}(i, j)$ 为新的SAR图

像上位置 (i, j) 处的像素值; $I_{\text{SAR}}(t_1, t_2)$ 为新的SAR图像上位置 (t_1, t_2) 处的像素值; $\text{Dis}(i, j)$ 为距离矩阵 Dis 在位置 (i, j) 处的距离值; x 为期望得到的无云高分多光谱融合结果图像, y 为多光谱图像; 通过 K_2 在窗口范围 N 内滑动, 得到窗口范围内以各个位置为中心的图块 K_2 和以中心位置为中心的图块 K_1 之间的距离矩阵 \hat{D}_{is} ; 再通过 \hat{D}_{is} 矩阵计算中心像素与周围像素的关系;

[0118] 通过公式:

$$[0119] \quad \hat{D}_{is} = G * \hat{D}_{is}$$

[0120] 得到中心像素与周围像素的距离矩阵 \hat{D}_{is} , 其中 G 为 $k*k$ 大小的高斯矩阵;

[0121] 再通过公式:

$$[0122] \quad W(i, j) = \begin{cases} \hat{D}_{is}(i, j) M_R(i, j) = 0 \\ 0 & else \end{cases}$$

[0123] 得到去除被云覆盖部分的像素影响的距离矩阵 W ; 上式中, $W(i, j)$ 为去除被云覆盖部分的像素影响的距离矩阵 W 在位置 (i, j) 上的值; $\hat{D}_{is}(i, j)$ 为中心像素与周围像素距离矩阵 \hat{D}_{is} 在位置 (i, j) 上的值; $M_R(i, j)$ 为掩膜图像矩阵在位置 (i, j) 上的像素值; 其中 $M_R = M$ 为掩膜图像矩阵;

[0124] 再通过归一化公式:

$$[0125] \quad \begin{cases} C(t_1, t_2) = \sum_{i, j} W(i, j) \\ w(i, j) = \frac{W(i, j)}{C(t_1, t_2)} \end{cases}$$

[0126] 得到当中心坐标为 (t_1, t_2) 时, 中心像素与周围像素的关系矩阵 w ; 其中 $C(t_1, t_2)$ 表示中心坐标 (t_1, t_2) 对应的距离矩阵 W 在 $n*n$ 窗口内, 所有坐标上的值累加后的和;

[0127] 通过中心像素与周围像素的关系矩阵 w , 在 I_{MSR} 上计算出被云覆盖点 (t_1, t_2) 处的像素值, 并将其填入 $I_{\text{MSR}}(t_1, t_2)$ 中, 更新 I_{MSR} , 并令 $M_R(t_1, t_2) = 1$; 在云覆盖区域不断移动中心位置的坐标 (t_1, t_2) , 直到所有的云覆盖位置都被移动到过, 并且该位置的像素都被计算并已重新填充进 I_{MSR} ; 这个新的 I_{MSR} 记为 \hat{I}_{MS} ;

[0128] 重复以上步骤, 根据掩膜图像矩阵 M 找到被云覆盖区域, 计算并记录每一个被云覆盖的位置对应的关系矩阵 w , 整合得到整个云覆盖区域与周围像素的关系矩阵, 记为 \hat{w} 。

[0129] 实施例中, 设置 $n=55, k=3$ 。因此 N 为 $55*55$ 的矩阵, K 为 $3*3$ 的小块。

[0130] 实施例二

[0131] 为验证本发明方法的可行性和有效性, 在实施例一的基础上, 本申请实施例二提供了对实施例一中方法的实验验证:

[0132] 图2(a), 图2(b) 分别给出了步骤2预处理后的有云覆盖多光谱图像和SAR图像。从多光谱图像中可以看出该图像被云所覆盖, 被云覆盖区域的地物信息无法得到。而从SAR

图像中可以看出,与多光谱图像云覆盖区域对应的SAR图像区域的信息是完整的,拥有丰富的地物信息和纹理信息。

[0133] 图3为最终的去云融合结果图像。通过建立的去云-分辨率提升的协同变分融合模型,使结果图像在保持了多光谱图像的光谱信息的同时,不断的向融入SAR图像的纹理信息并将多光谱图像的云遮挡区域不断还原和优化,最终得到在光谱信息没有失真的条件下,将图像云覆盖区域还原,并融入了丰富的纹理信息的高分辨率结果图像。

[0134] 图4为对多光谱图像云遮挡部分预还原后的图像。在具体实施时,该修复过程是使用Photoshop软件中的填充操作实现的。

[0135] 图5(a)、图5(b)、图5(c)、图5(d)分别为使用GS、PRACS、AWLP、MTFGLP方法将图4与高分SAR图像融合后得到的融合结果图。从这四张融合图像中可以看出它们与本发明的方法相比都有一定的缺陷。图5(a)融入了大量的SAR图像纹理信息,但使多光谱图像原来的光谱信息产生了失真。图5(b)对于多光谱图像被云覆盖的区域没有很好还原,且基本没有融入SAR图像的信息。图5(c)和图5(d)效果相似,融入了一定的SAR图像信息,但是没有对多光谱图像被云覆盖的区域进行很好还原。

[0136] 由此可知,本发明提出的一种去云-分辨率提升协同的高分SAR与低分多光谱图像融合方法对于得到高分SAR图像与低分云覆盖多光谱图像的融合图像拥有较好的效果。

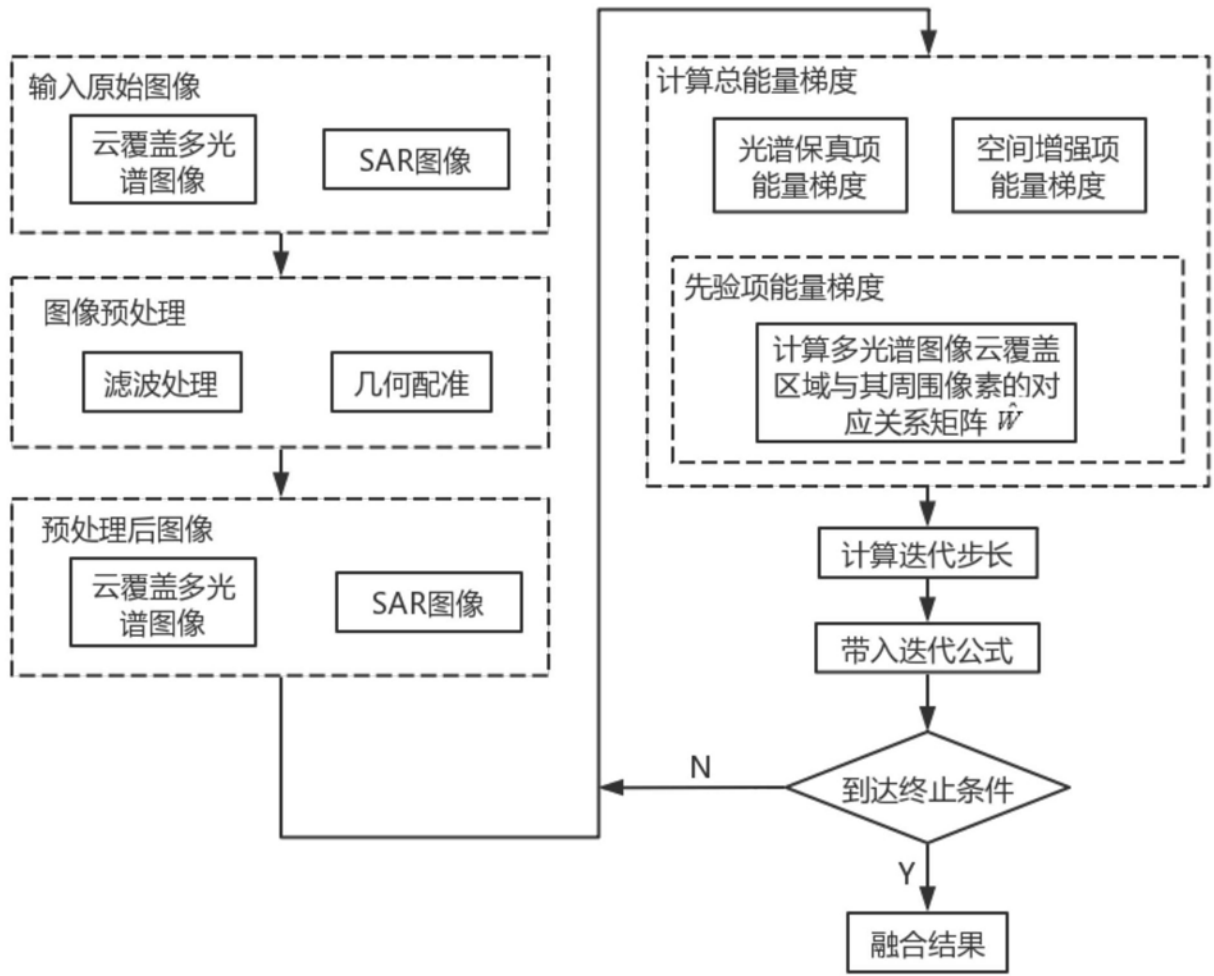


图1

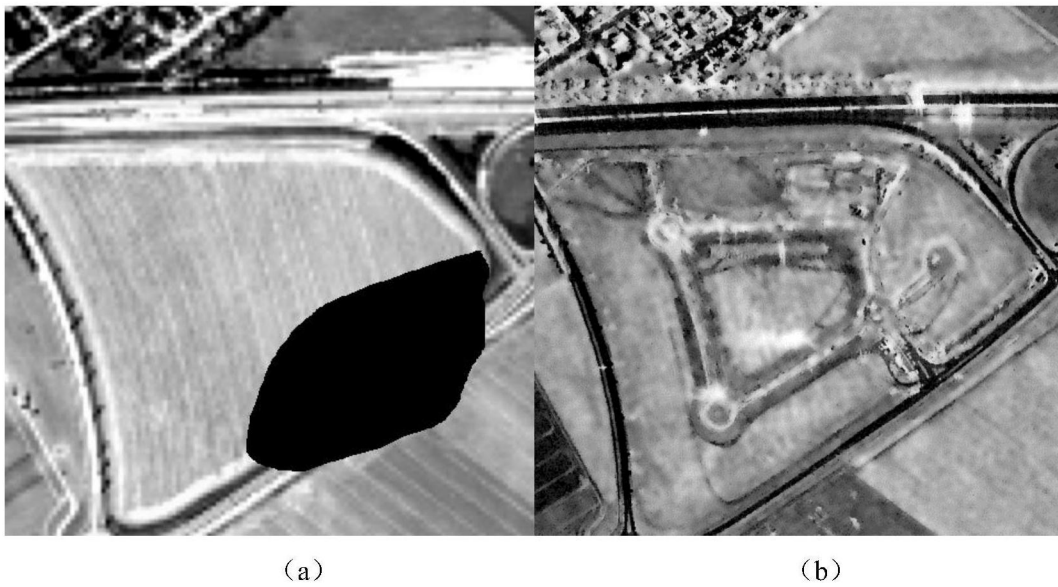


图2



图3



图4



(a)

(b)



(c)

(d)

图5