

文章编号: 2095-2163(2022)07-0129-06

中图分类号: TP391

文献标志码: A

基于加窗的相位相关的多谱段图像匹配

张文琪, 刘本永

(贵州大学 大数据与信息工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 图像匹配是计算视觉领域的基本问题,多谱段图像匹配一直是图像匹配中的一个难点,被广泛应用于土地覆盖、变化检测分析、图像融合中。在利用FFT实现相位相关的基础上,针对其存在频谱泄露和边缘效应的问题,提出一种加窗预处理的相位相关法,对合成孔径雷达图像和光学图像进行匹配,并通过核回归方法生成二维窗函数。实验结果表明基于加窗的相位相关对多谱段图像匹配有效。

关键词: FFT; 相位相关; 核回归; 窗函数; 多谱段图像匹配

Multispectral image matching based on windowed phase correlation

ZHANG Wenqi, LIU Benyong

(College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

[Abstract] Image matching is a basic problem in the field of computational vision. Multispectral image matching has always been a difficult point in image matching. It is widely used in land cover, change detection analysis, and image fusion. Aimed at the problem of spectral leakage and edge effect, on the basis of using FFT to achieve phase correlation, a phase correlation method with windowing preprocessing is proposed to match the synthetic aperture radar image and the optical image and generate a two-dimensional window function through the kernel regression method. The experimental results show that the phase correlation based on windowing is effective for multispectral image matching.

[Key words] FFT; phase correlation; kernel regression; window function; multispectral image matching

0 引言

图像匹配是对表示同一个场景的两幅图像在空间上进行对准确定映射关系的过程。图像匹配技术是计算视觉领域的基本问题,是图像分析和处理的基础。多谱段图像匹配是指在不同类型传感器获取的图像之间进行的匹配,如可见光与红外图像匹配、可见光与合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)图像匹配等^[1]。

随着遥感技术的发展,获取SAR图像方式越来越多,SAR图像具有全天候、全天时的探测能力,且其穿透力强不受天气、云层等因素的影响。可见光图像具有分辨率高、形状纹理信息清晰且色彩丰富的特点,但是其成像质量很容易受光照变化和天气等因素的影响,抗干扰能力较弱。不同的传感器形成的图像可以表示同一场景下不同特征和属性信息,SAR图像和可见光图像可以互补信息。因此,SAR图像与可见光图像的结合对于提供高度互补

的观测场景信息具有重要意义,可以有效地弥补单一模型的不足。多谱段图像匹配一直是图像匹配中的一个难点,其被广泛应用于变化检测、图像融合、导航制导等多个方面。

图像匹配主要分为基于像素灰度的匹配方法和基于特征的匹配方法^[2]。基于特征的匹配方法主要是提取图像中点、线、面等特征并生成特征描述子,通过相应的距离度量方法寻找特征间的对应关系,该方法具有匹配速度快,抗干扰能力较强,灵活性较强等特点。这一类方法主要有SIFT特征匹配算法、Harris特征匹配算法、SURF等。基于灰度像素灰度的匹配方法主要是利用图像的灰度信息进行匹配,该方法计算过程相对简单,但是计算量较大,对噪声、光照和遮挡较为敏感。这一类方法主要有基于互相关的方法、傅里叶方法和互信息方法。傅里叶方法利用图像频域傅里叶变换表示。其中一个代表是基于傅里叶移位定理的相位相关方法,该方法最初是由Kuglin等人^[3]在1975年提出应用于图

基金项目: 国家自然科学基金(60862003)。

作者简介: 张文琪(1996-),女,硕士研究生,主要研究方向:图像处理、模式识别;刘本永(1966-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:机器学习、图像处理、模式识别。

通讯作者: 刘本永 Email: byliu667200@163.com

收稿日期: 2022-02-24

像匹配,这种方法首先分别对两张图像进行傅里叶变换,由时域将其变换到频域,在频域中计算互功率谱的相位差峰值来确定图像间的平移关系。该方法仅利用了两图像互功率谱的相位信息,能够很好地克服光照变化和噪声的影响,具有较强的鲁棒性和抗干扰能力,且计算速度较快,因此在图像匹配、图像拼接等多个方面应用广泛。但是该算法在实际的实现中需要对图像进行离散傅里叶变换,从而产生频谱泄露,其次图像的上下、左右存在差异,是不连续的,在进行傅里叶变换时会产生额外的高频干扰,产生边缘效应。受频谱泄露和边缘效应的影响,会导致相位相关函数的恶化,产生虚假平移峰值,从而导致多谱段图像匹配效果不佳。

本文针对多谱段图像匹配问题,探讨一种基于加窗预处理的相位相关算法,首先使用核回归方法构造二维圆对称窗函数;通过构造的二维窗函数对多谱段图像进行加窗预处理,以降低频谱泄露和边缘效应对多谱段图像匹配的影响,并将相位相关应用于图像匹配以计算图像间的相对平移;针对互功率谱逆变换后仍然存在多个虚假谱峰的现象,考虑到高频干扰和频谱混叠的影响,在进行相位相关后对互功率谱进行频域低通滤波处理以抑制虚假峰值。实验结果表明,本文所探讨的方法可以有效地提高多谱段图像匹配的准确性。

1 相位相关法

基于频域傅里叶变换相位相关原理是根据傅里叶变换平移理论。设同一场景的两幅图像 f_1 和 f_2 分别为参考图像和模板图像,两者之间有平移关系如式(1):

$$f_2(x, y) = f_1(x - \Delta x, y - \Delta y) \quad (1)$$

其中, $(\Delta x, \Delta y)$ 表示平移量。对两边同时进行傅里叶变换可得式(2):

$$F_2(\xi, \eta) = e^{-j2\pi(\xi\Delta x + \eta\Delta y)} F_1(\xi, \eta) \quad (2)$$

其中, F_1 和 F_2 分别表示图像 f_1 、 f_2 的傅里叶变换。

由式(2)可知,仅存在平移关系的两图像的傅里叶变换具有相同的幅值,仅相位不同,而图像 f_1 和 f_2 的归一化互功率谱定义如式(3):

$$R(\xi, \eta) = \frac{F_2(\xi, \eta) F_1^*(\xi, \eta)}{|F_2(\xi, \eta) F_1^*(\xi, \eta)|} \quad (3)$$

将式(2)代入式(3),可得归一化互功率谱的表达式(4):

$$R(\xi, \eta) = e^{-j2\pi(\xi\Delta x + \eta\Delta y)} \quad (4)$$

对式(4)进行傅里叶逆变换可得式(5):

$$r(x, y) = \delta(x - \Delta x, y - \Delta y) \quad (5)$$

综上所述,归一化互功率谱的相位等于两图像的相位差,通过求归一化互功率谱的傅里叶逆变换得到的二维冲击函数的峰值的偏移,可以确定两幅图像的相对平移 $(\Delta x, \Delta y)$ 。

2 核回归二维圆对称窗函数

为了抑制频谱泄露和边缘效应,一般采取的方法就是加入缓慢变化的窗函数,如海明(Hamming)窗,高斯(Gaussian)窗等,使得时域信号边缘突变平滑些。现有的大部分窗函数分成幂窗、三角函数窗、指数窗。其中矩形窗是以时间为变量的零次幂窗,离散时域表达式(6)如下:

$$w(n) = \begin{cases} 1 & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0 & n = \text{others} \end{cases} \quad (6)$$

其中, N 表示窗函数长度。

Bartlett窗是以时间为变量的一次幂窗,由两个长度为 $\frac{N}{2}$ 的矩形窗线性卷积而得,离散时域表达式(7)如下:

$$w(n) = \begin{cases} \frac{2n}{N-1} & 0 \leq n \leq \frac{N-1}{2} \\ 2 - \frac{2n}{N-1} & \frac{N-1}{2} \leq n \leq N-1 \end{cases} \quad (7)$$

海明窗是一种三角函数窗,离散时域表达式(8)如下:

$$w(n) = 0.54 - 0.46 \cos^2 \frac{\pi n}{N-1} \quad (8)$$

其中, $0 \leq n \leq N-1$ 。

高斯窗是一种指数窗,离散时域表达式(9)如下:

$$w(n) = e^{-\frac{1}{2}(\frac{n}{\sigma(N-1)})^2} \quad (9)$$

其中, $-\frac{(N-1)}{2} \leq n \leq \frac{(N-1)}{2}$, σ 为高斯函数标准差。

与矩形窗相比,海明窗、Bartlett窗、高斯窗在时域上由中心向边缘缓慢衰减,而在频域上旁瓣衰减较大,可以有效减小频谱泄露和边缘效应的影响,如图1所示。

对图像加入二维 hamming 窗处理,使得边缘处突变较少、更加连续,从而削弱了边界效应的影响,如图2所示。

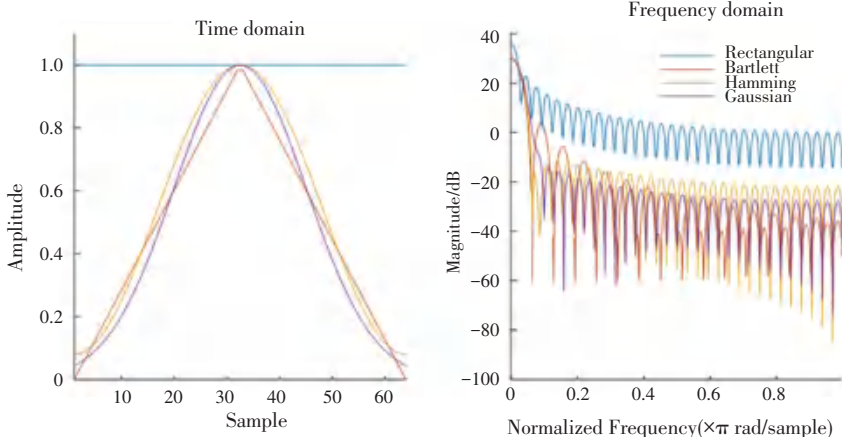
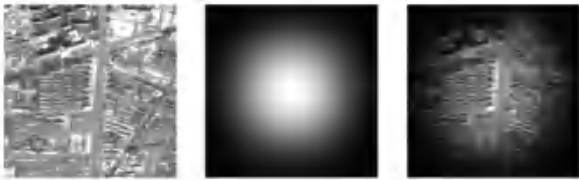


图 1 时域频域窗函数对比

Fig. 1 Comparison of window functions in time domain and frequency domain



(a) 原图像 (b) 二维海明窗 (c) 加窗后图像

图 2 图像加窗效果

Fig. 2 Image windowing effect

如果一维窗函数具有良好的性质,则可以通过一维窗函数来构造二维窗函数。一般构造方法有两种:乘积法是通过将两个一维窗函数直接相乘得到二维窗函数,称为可分离型窗函数,设 $w_1(n_1)$ 和 $w_2(n_2)$ 是一维窗函数,则二维可分离窗函数,式(10):

$$w_R(n_1, n_2) = w_1(n_1) w_2(n_2)^T \quad (10)$$

因该方法是直接将两个一维窗函数直接相乘得到一个参数矩阵,根据二维窗的性质,该方法不具有最优效果。1972 年 T.S. Huang^[4] 提出通过旋转法得到二维窗函数,如果一维窗函数具有良好性质且对称,则是通过将一维窗函数进行旋转构造二维窗函数。对一维窗函数 $w(x)$ 进行旋转得到二维窗函数 $w(x, y)$, 式(11):

$$w(x, y) = w(\sqrt{x^2 + y^2}) \quad (11)$$

核回归作为一种非线性方法,已经在图像处理的多个领域得到了应用^[5]。其应用于构造二维圆对称窗函数的基本思想是:由一维窗的各项权值拟合出一条曲线 $w(x)$, 然后经过重采样获取二维圆对称窗 $w(\sqrt{x^2 + y^2})$ 的权值。如果由一维窗的各

项权值所拟合的函数 $w(x)$ 所属空间为再生核 Hilbert 空间,将拟合函数 $w(x)$ 用多个核函数的线性叠加,即式(12):

$$w(x) = \sum_{i=1}^n a_i k(x, x_i) \quad (12)$$

其中, k 为再生核 Hilbert 空间的核函数; x 为权值在一维窗中对应的位置;而 x_i 表示第 i 项权值在一维窗中对应的位置; a_i 为未知系数。

由其构成的系数向量 \mathbf{a}_n 可使用最小二乘准则估计得到,式(13):

$$\mathbf{a}_n = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_n]^T = \mathbf{K}_n^+ \mathbf{y}_n \quad (13)$$

其中, $+$ 表示矩阵的 Moore-Penrose 广义逆; \mathbf{K}_n 为 n 行 n 列的核矩阵; \mathbf{y}_n 为一维窗各权值构成的列向量。

上述模型称为基于最小二乘的核拟合 (LS-based Kernel Fitting) 模型。当 \mathbf{K}_n^+ 维数过大时, Moore-Penrose 广义逆求解过程对计算机内存要求较高,本文引入递归模型的增量 KNR (Kernel Nonlinear Representer) 算法计算系数向量 \mathbf{a}_n , 降低内存需求。将求得的系数向量 \mathbf{a}_n 代入式(12)生成拟合函数 $w(x)$, 重采样得到二维圆对称窗 $w(\sqrt{x^2 + y^2})$ 。

3 互功率谱低通滤波

由于匹配图像之间差异和 SAR 图像的噪声干扰,相位相关后的互功率谱进行傅里叶逆变换后仍然存在多个虚假峰值,而且在获取数字图像的过程需要对图像进行采样处理,根据奈奎斯特定理,当采

样频率 F_s 小于图像模拟信号最高频率的 2 倍时,得到的频谱会包含原信号中频率大于 $F_s/2$ 的频谱叠加,从而导致频谱混叠,如图 3 所示。可以通过低通滤波器对相位相关得到的互功率谱进一步处理,从而降低高频干扰对相位相关的影响。常用的频域理想低通转移函数如式(14):

$$H(u,v) = \begin{cases} 1 & D(u,v) \leq D_0 \\ 0 & D(u,v) > D_0 \end{cases} \quad (14)$$

其中, D_0 表示截止频率,并设 $D_0 = \min(H,W) * k/2$; k 用于调节截止频率; H 和 W 分别表示图像的高和宽; $D(u,v)$ 是频域中点 (u,v) 到矩阵中心的欧式距离。

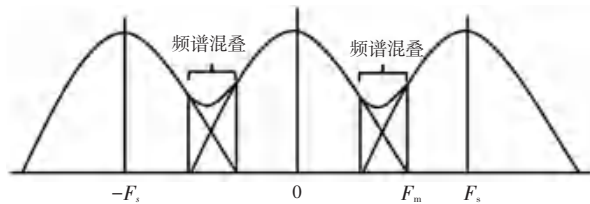


图3 频谱混叠示意图

Fig. 3 Schematic diagram of spectral aliasing

综上所述,将光学图像作为参考图像, SAR 图像作为模板图像。本文的算法流程如下:

- (1) 对 SAR 图像进行滤波去噪,并对其进行边缘补零;
- (2) 分别对 SAR 图像和光学图像进行加窗;
- (3) 计算参考图像和模板图像的互功率谱;
- (4) 对互功率谱进行频域低通滤波;
- (5) 归一化互功率谱;
- (6) 傅里叶逆变换计算相位相关平面的极值点,得到两图像的平移量,从而确定匹配关系。

4 实验结果及分析

实验通过 200 对大小均为 512×512 的 SAR-光学(OPT)图像,计算相位相关平面中的峰值位置得到两图像的相对平移,以预测匹配坐标。本文用正确匹配率(Correct Matching Rate, *CMR*)评估匹配性能,式(15):

$$CMR = \frac{N_{cm}}{N} \quad (15)$$

其中, N 表示图像匹配对数, N_{cm} 表示正确匹配个数。

通过两图像的匹配误差值 (*MEP*) 判定是否匹配,并设 $MEP \leq 5$ 时为正确匹配, *MEP* 计算如式(16):

$$MEP = \sqrt{(P_x - R_x)^2 + (P_y - R_y)^2} \quad (16)$$

其中, P_x 和 P_y 是预测的匹配点的像素坐标, R_x 和 R_y 是标准的匹配点的像素坐标。

4.1 加窗对匹配的影响

由于 SAR 图像存在斑点噪声,本文采用中值滤波和双边滤波对 SAR 图像去噪,并用不同的窗函数进行实验。使用不同的滤波器和不同的窗函数进行实验的匹配结果见表 1, w/o Window 表示无窗,有 Rot 表示用增量型核回归方式生成的窗函数,无 Rot 表示用乘法法生成的窗函数。结果表明,对 SAR 图像进行简单的中值滤波和双边滤波预处理也可以提高正确匹配率,加入窗函数后的相位相关算法的正确匹配率显著提高,且较乘法法生成的二维窗函数,增量型核回归方法生成的二维窗函数表现更好。

表 1 原图像匹配结果

Tab. 1 Original image matching results

<i>CMR</i> (%)	无滤波	中值滤波	双边滤波
w/o Window	13.0	14.0	17.0
bartlett	19.0	19.0	22.5
Rot bartlett	20.0	20.5	22.5
Gaussian	13.5	18.5	21.5
Rot gaussian	20.5	22.5	24.5
hamming	18.0	20.0	24.5
Rot hamming	25.5	24.0	29.0

此外,当两图像之间存在平移关系,图像除了重叠区域外的信息都是冗余信息,而冗余的信息在计算相位相关时会产生额外的峰值。通过降采样降低冗余信息,并提高计算效率,现将 200 对 SAR-光学图像进行降采样为 300×300 ,得到表 2。结果表明,虽然降采样使得图像的分辨率降低但是其正确匹配率显著提升。

表 2 降采样图像匹配结果

Tab. 2 Down-sampled image matching results

<i>CMR</i> (%)	无滤波	中值滤波	双边滤波
w/o Window	57.5	55.5	56.5
bartlett	55.5	54.0	59.5
Rot bartlett	59.5	59.5	59.0
Gaussian	52.0	51.5	53.0
Rot gaussian	56.5	55.0	58.5
hamming	57.5	58.0	59.5
Rot hamming	63.5	61.5	63.0

4.2 低通滤波对互功率谱的影响

针对相位相关后的归一化互功率谱的傅里叶逆变换存在多个峰值, 考虑到高频干扰和频谱混叠的影响, 本文对两图像的互功率谱进行频域低通滤波, 以抑制虚假峰值。分别采用不加窗的相位相关法、加入 Rot hamming 窗的相位相关法、加入 Rot hamming 窗并进行频域理想低通滤波处理的相位相关法, 对图 4 的两组多波段示例图像进行实验, 结果如图 5 所示。两组图像正确的匹配坐标均为 (30, 30), 图中颜色越亮表示峰值越大, 表明不加窗生成的相位相关平面较加入 Rot hamming 窗的、加入 Rot hamming 窗并进行频域理想低通滤波处理生成的相位相关平面存在更多分布较为的均匀峰值干扰。而对加窗的相位相关进行频域理想低通滤波 (ILPF) 后, 虚假峰值有了进一步的减少。

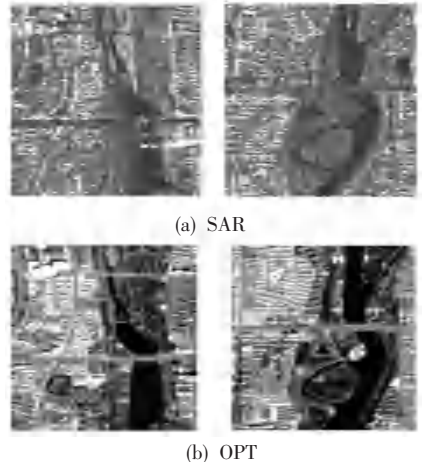


图 4 示例图片
Fig. 4 Sample image

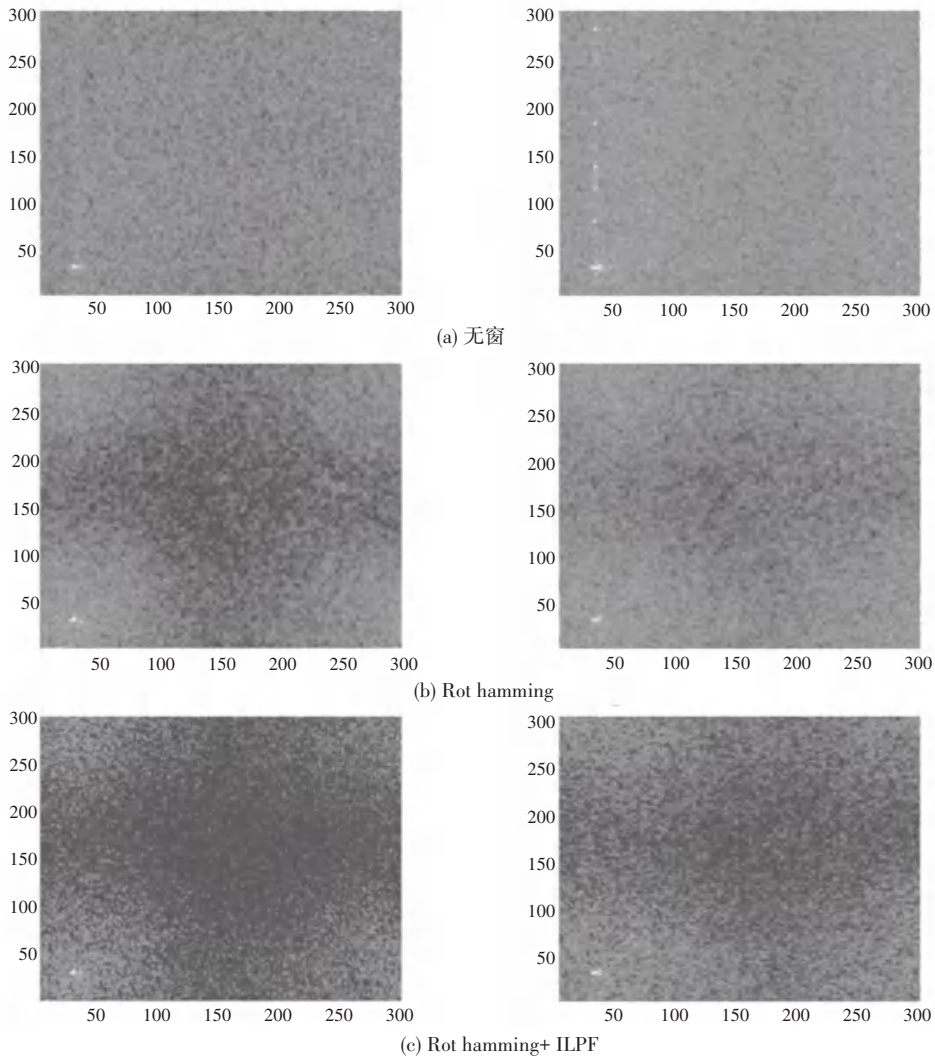


图 5 相位相关平面

Fig. 5 Phase correlation plane