

# SAR 图像运动模糊参数估计

张 荣, 杨建朝, 张 倩, 刘政凯

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 安徽合肥 230027)

摘 要: 本文针对 SAR 图像运动模糊的特点, 提出了一种自适应滤波方法, 结合统计平均思想, 利用自相关的方法成功地提取出运动模糊的点扩展函数的长度, 并把这个长度作为 SAR 图像运动模糊程度的度量。

关键词: SAR; 运动模糊; 差分自相关; 自适应滤波

中图分类号: TN957 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2007) 10-2019-04

## Motion Blur Extent Evaluation of SAR Images

ZHANG Rong, YANG Jiarr chao, ZHANG Q ian, LIU Zheng- kai

(Department of electronic engineering and information science, University of Science & Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

Abstract: The purpose of this paper is to evaluate the blur extent of the motion blurred SAR image. Combined with the averaging operation, a simple adaptive filter was proposed to identify the motion blur extent by using the autocorrelation method, which is expected to be the measure of the motion blurred SAR image.

Key words: SAR(Synthetic Aperture Radar); motion blur; autocorrelation; adaptive filter

### 1 引言

合成孔径雷达(SAR: Synthetic Aperture Radar)是一种全天时、全天候的主动式微波成像雷达,它以飞机或卫星为载体平台进行对地观测,可以获得观测区域的高分辨率雷达图像。在 SAR 图像获取过程中,由于对飞行速度的估计不准确会造成图像运动模糊现象,使得图像质量下降,影响 SAR 图像的实际应用。

运动模糊图像产生的原因是图像获取设备与景物之间的相对运动,要恢复运动模糊图像首先需要对运动模糊的点扩展函数 PSF(Point Spread Function)进行参数估计,国内外对此已经有很多研究。根据图像中典型特征的退化特点,可以从模糊图像中直接测量点扩展函数参数<sup>[1]</sup>,这要求图像中存在点目标或线目标(如陡峭的边缘),并且这些目标的位置必须是可知的,但是对于实际图像这点很难满足,Canon<sup>[2]</sup>等人利用的是运动模糊图像在频域空间的周期零点特性,提出频域方法来估计运动模糊的点扩展函数参数,但是由于实际图像背景多种多样,零点特征经常很难提取,而且该方法非常易受噪声的影响,文献[8,9]给出了频域测量零点的算法,以确定模糊度量。由于斑点噪声的存在,SAR 模糊图像在频域是不存在零点的。基于模型的最大似然(ML: Maxi-

mum Likelihood)模糊度检测方法在文献[3,4]中提出,但是这类方法必须基于噪声模型,并且要求对 PSF 有个比较好的先验估测。Y. Yitzhaky 等人<sup>[5~7]</sup>研究了运动模糊图像的空间域像素的分布特征,利用差分图像自相关函数对运动模糊进行检测。该方法对噪声很敏感,不能直接应用到有严重斑点噪声的合成孔径雷达图像。

本文分析了 SAR 图像的噪声特点及其对图像差分自相关函数的影响,提出了一种自适应滤波方法,消除噪声影响,再计算差分图像的自相关函数来进行运动模糊的参数估计。

### 2 运动模糊参数估计原理

#### 2.1 运动模糊模型

运动模糊一般是一维的,所以运动模糊的点扩展函数也是一维的,假设运动模糊为水平方向的匀速运动,连续的点扩展函数  $h(x)$  可以表示为一个矩形:

$$h(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq t_0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

其中  $t_0$  是摄像设备的曝光时间。在不考虑噪声的情况下,变质模型为:

$$g(x) = f(x) * h(x) \quad (2)$$

对点扩展函数  $h(x)$  做傅利叶变换:

$$H(u) = \int_0^{t_0} e^{-j\omega t} dt = \frac{e^{-j\omega t_0} - 1}{-j\omega}$$

$$= t_0 \cdot \frac{\sin \frac{\omega t_0}{2} + j \cos \frac{\omega t_0}{2}}{j} \cdot Sa\left(\frac{\omega t_0}{2}\right) \quad (3)$$

其中  $Sa\left(\frac{\omega t_0}{2}\right) = \frac{\sin \omega t_0/2}{\omega t_0/2}$ ，是一个具有周期零点的函数，幅度  $|H(u)| = t_0 \cdot Sa\left(\frac{\omega t_0}{2}\right)$ ，所以点扩展函数的频谱幅度具有周期零点特征，零点间隔为  $2\pi/t_0$ 。下图是点扩展函数的时域和频域幅度图示：

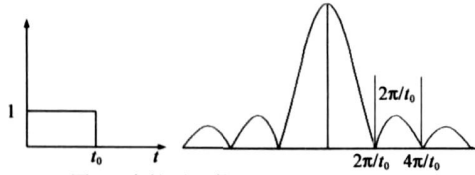


图 1 点扩展函数及其频域幅度图示

矩形运动模糊点扩展函数的频域具有周期零点特征，零点的间隔取决于矩形的长度。相反，从频域的零点间隔也可以推出空间域长度。图像的运动模糊用频域表示为：

$$G(u, v) = F(u, v)H(u, v) \quad (4)$$

其中  $H(u, v)$  就是  $H(u)$ ，可见  $G(u, v)$  与  $H(u, v)$  有相同的零点，也就是说运动模糊图像的频谱在运动模糊方向应该具有周期零点特征，测量频域的零点间隔就可以知道点扩展函数的长度。因此，对运动模糊的估计就是对  $t_0$  的估计。

### 2.2 自相关运动参数估计原理

运动模糊会给图像在模糊方向带来相关性的变化，利用这种变化可以提取出点扩展函数的长度参数。离散情况下，点扩展函数可以写成：

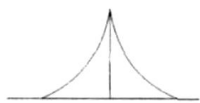


图 2 图像的自相关函数

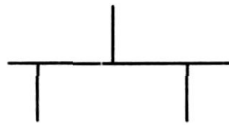


图 3 点扩展函数的自相关函数

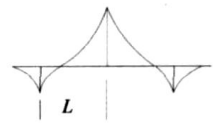


图 4 图像的差分后自相关函数

## 3 SAR 运动模糊估计算法

对于运动模糊的光学图像，用上述自相关方法可以很好的估计运动模糊程度  $L$ 。但是，由于 SAR 固有的斑点噪声，破坏了变质图像的自相关函数特点，使得参数估计错误。

### 3.1 SAR 图像特点

运动模糊的光学图像，频域上具有周期零点特征，但是对于 SAR 运动模糊图像，这种频域上的特征被噪声淹没。运动模糊对光学图像在运动方向的相关性有很大的影响，高频分量减少显著，而 SAR 图像在运动方向的相关性改变比较微弱，高频分量的减少不够明显。

$$h(x) = 1, \quad x = 0, 1, 2, \dots, L-1 \quad (5)$$

如果一幅图像像素间是不相关的，则运动模糊后变质图像的自相关函数会在  $x=0$  出现最大值，在  $x=\pm L$  处出现最小值。因此，通过测量变质图像自相关函数的最大值和最小值的距离就可估计运动模糊参数。由于图像本身通常是相关的，因此利用自相关函数进行运动参数估计分为三步：(1) 对一幅运动模糊图像做差分，去除图像本身的相关性；(2) 求差分图像的自相关函数；(3) 检测自相关函数最大值和最小值的距离，即为运动参数  $L$ 。

用一阶差分在运动模糊方向对图像去相关，这相当于变质图像  $g(x, y)$  跟差分方程  $D(x, y)$  卷积，若运动方向水平， $D(x, y) = [1, -1]$ ，差分处理后的图像用  $M(x, y)$  表示：

$$M(x, y) = g(x, y) * D(x, y) = f(x, y) * h(x, y) * D(x, y)$$

$$= f(x, y) * (h(x, y) * D(x, y)) \quad (6)$$

为了表示的方便，记  $p(x, y) = h(x, y) * D(x, y)$ ，由于运动模糊是一维的，上述讨论可以简化到一维，不失一般性，假设运动方向水平：

$$M(x) = f(x) * p(x) \quad (7)$$

求差分后的图像的自相关数组，用卷积可以表示为：

$$M(x) * M(-x) = (f(x) * p(x)) * (f(-x) * p(-x))$$

$$= (f(x) * f(-x)) * (p(x) * p(-x)) \quad (8)$$

其中， $f(x) * f(-x)$  是图像的自相关函数，其基本形状经统计如下图 2， $p(x) * p(-x)$  是运动模糊退化方程的差分自相关，当退化方程是矩形时，其形状如图 3 所示。所以式(7)的结果应该具有图 4 的形状，从图 4 最大值和最小值的位置可以得到  $L$  的大小。

使得差分图像的自相关系数出现伪最小值，导致运动参数估计错误。

下面的例子显示了噪声对 SAR 图像相关性破坏的程度。图 5(a) 是一幅不模糊的 SAR 图像，图 5(b) 是其人为的运动模糊图(模糊程度  $L=20$ )，图 5(c) 是对应

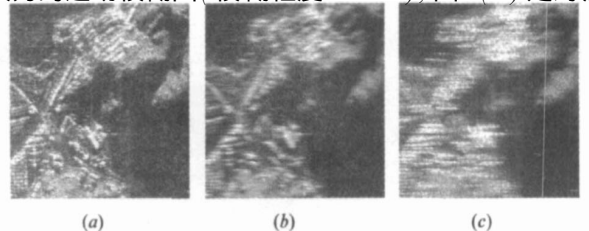


图 5 SAR 图像及其运动模糊图像

的真实运动模糊 SAR 图像。

应用自相关方法提取运动模糊参数时, 利用的是差分自相关数组, 图 6 显示了图 5(b) 和(c) 的差分自相关函数图形。图 6(a) 很好的显示了运动模糊的特征, 测量得到  $L = 20$ , 而 5(c) 跟理论图形有很大的差别, 中间最大值两边有两个很小的值, 这正是斑点噪声引起的, 所以直接利用自相关方法不能检测 SAR 图像运动模糊特征。

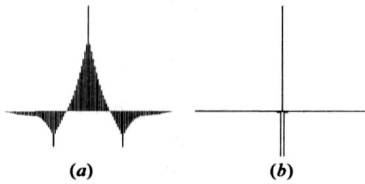


图 6 图 5 中 (b) 和 (c) 图像的差分自相关函数

检测 SAR 图像运动模糊特征。

### 3.2 本文方法

针对 SAR 图像的噪声特点, 本文设计了一种自适应滤波方法, 去除噪声对自相关函数的影响, 再通过计算差分图像的自相关函数估计运动参数, 具体方法包括三个步骤: ①运动方向检测; ②滤波处理; ③统计平均检测。

#### 3.2.1 方向检测

在估测运动模糊程度之前, 首先要检测运动模糊的方向。运动模糊的图像在运动模糊的方向相关性较其他方向更强, 所以在这个方向做差分去相关, 就能够去除图像更多的能量。根据这一特点, 我们在不同的方向对运动模糊图像做差分去相关, 去相关后能量最小的方向就是运动模糊的方向。对于 SAR 图像, 由于斑点噪声降低了图像的相关性, 利用上述方法检测的灵敏度不够高。为了提高灵敏度, 本文定义差分能量比  $\beta$  取代差分能量作为运动模糊方向的检测参数。差分能量比是利用运动模糊产生运动方向上的相关性来定义的, 它用运动模糊方向和其垂直方向上像素分布的差别来衡量:

$$\beta = \frac{E_x}{E_y} \quad (8)$$

其中  $E_x = \sum_i D_{xi}^2$ ,  $E_y = \sum_i D_{yi}^2$ ,  $D_{xi}$  图像在  $x$  方向做差分去相关后的矩阵值,  $D_{yi}$  是图像在  $y$  方向做差分去相关后的矩阵值。该参数定义假设图像是各向同性的, 所以对于不模糊的 SAR 图像, 理论值是 1, 值越小, 模糊程度越大。

对一幅图像在不同方向计算  $\beta$ , 最小  $\beta$  值对应的方向即为运动模糊方向。

#### 3.2.2 自适应滤波处理

运动模糊图像的像素会差生拖尾, 而斑点噪声的影响就是打断了这些拖尾, 从而破坏了运动模糊的相关性特征, 选择一维中值滤波把拖尾连接起来, 运动模糊产生的相关性就有可能被检测出来。图 7 显示了中值

滤波对 SAR 噪声影响的消除, 由图可见, 随着中值滤波的窗口长度增大, 噪声的影响越来越小, 像素间的相干性也越来越好。

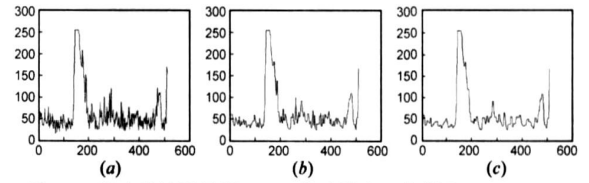


图 7 一维中值滤波结果,  $a b c$  的滤波窗口分别为 3、5、7

本文首先计算差分图像自相关函数, 检测最大值和最小值之间的距离  $L_1$ , 中值滤波后, 计算差分图像的自相关函数, 并检测最大值和最小值之间的距离  $L_2$ , 如果  $L_2 > L_1$ , 增加中值滤波的窗口长度, 重复以上步骤, 直到  $L_2 = L_1$ 。

#### 3.2.3 统计平均检测

本文运用平均思想来进一步消除斑点噪声和背景的影响。先对图像做差分去相关, 然后把图像进行分块, 分别求自相关函数, 最后把每个分块的自相关函数平均值作为变质图像的差分自相关函数, 提高运动参数检测的稳健性。

## 4 实验结果

实验采用中国科学院电子所提供的 SAR 运动模糊数据。图 8 是其中一幅图像采用自适应滤波对自相关函数的修正过程。图 8(a)、(b)、(c)、(d) 分别显示了用不同窗口滤波处理后, 求得的统计平均自相关数组特征。图中左边的线圈是运动模糊引起的特征, 右边的线圈是噪声引起的特征。可以看到, 随着中值滤波长度的增加, 噪声的特征逐渐减小, 而运动模糊引起的特征逐渐增大。

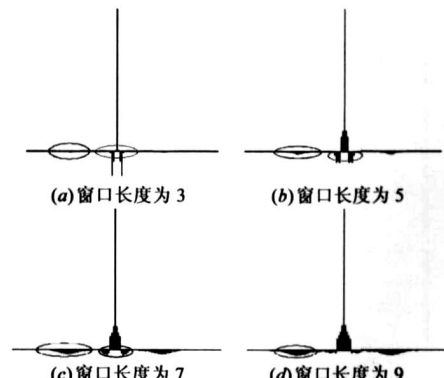


图 8 不同窗口滤波后, 统计平均自相关数组的特征变化

本文对 5120 幅  $256 \times 256$  SAR 图像进行模糊度测试, 实验结果符合主观质量判断。图 9(a)、(b)、(c)、(d) 是其中四幅不同模糊程度的图像及其参数估计。

## 5 结论与分析

SAR 图像处理的一个难点就是其严重的斑点噪

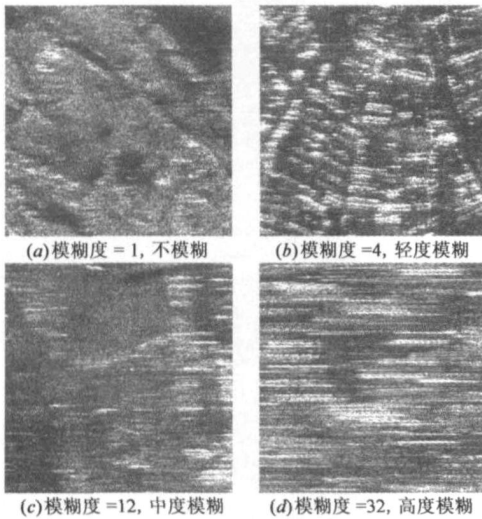


图 9 四幅不同模糊程度的图像及其参数估计

声, 本文根据合成孔径雷达图像的特点, 对雷达图像的运动模糊提出了一种可以满足实际应用的客观评价, 以便指导 SAR 系统成像部分的参数调整。

#### 参考文献:

- [1] A Rosenfeld, A C Kak. Digital Picture Processing [M]. San Diego: 2nd edition, Academic Press, 1982.
- [2] M Cannon. Blind deconvolution of spatially invariant image blurs with phase [J]. IEEE Transaction of acoustics, speech, and signal processing, 1976, 24(1): 58-63.
- [3] R L Lagendijk, A M Tekalp, J Biemond. Maximum likelihood image and blur identification: a unifying approach [J]. Optical Engineering, 1990, 29(5): 422-435.
- [4] G Pavlovic, A M Tekalp. Maximum likelihood parametric blur identification based on a continuous spatial domain model [J]. IEEE Transactions on image processing, 1992, 1(4): 496-

504.

- [5] Y Yitzhaky, N S Kopeika. Evaluation of the blur parameters from motion blurred images [A]. Electrical and Electronics Engineers in Israel, 1996 5 6 [C]. IEEE Press, 1996, 216-219.
- [6] Y Yitzhaky, N S Kopeika. Identification of motion blur for blind image restoration [J]. Graphical Models and Image Processing, November 1997, 59(5): 310-320.
- [7] Y Yitzhaky, I Mor, A Lantzman, N S Kopeika. Direct method for restoration of motion blurred images [J]. JO SA A, 1998, 15(6): 1512-1519.
- [8] 贺卫国, 黎绍发. 匀速直线运动模糊长度的精确估计 [J]. 计算机应用, 2005, 25(6): 1316-1317.
- [9] 王晓红, 赵荣椿. 匀速直线运动模糊的 PSF 之估计 [J]. 计算机应用, 2001, 21(9): 40-41.

#### 作者简介:



张荣女, 1968年2月生于安徽巢县, 博士, 中国科学技术大学电子工程与信息科学系副教授. 主要研究方向为数字图像处理、数据压缩.  
E-mail: zrong@ustc.edu.cn



杨建朝 男, 1983年2月生于河北省灵寿县, 学士, 中国科学技术大学本科生. 研究方向为遥感图像处理.