

干涉雷达复图像配准与干涉纹图的增强^{*}

杨清友 王 超
(中国科学院遥感应用研究所 北京 100101)

摘 要 干涉雷达复图像之间的精确匹配技术是提高雷达干涉测量精度的关键之一。首先讨论了干涉雷达复图像配准过程中所要考虑的问题,然后给出了一个切实可行的配准方法,并把该方法应用于新疆喀拉卡什 SIR-C/X-SAR L 波段干涉数据处理。干涉雷达复图像配准之后可以生成干涉纹图,为了消除干涉纹图中的噪声,尝试了中值滤波和方向平滑两种方法。这两种方法的优点在于可以在消除噪声的同时有效地保留干涉条纹的边缘信息。

关键词 干涉雷达,配准,干涉纹图

1 引 言

近年来,利用双天线合成孔径雷达(干涉雷达,INSAR)或单天线合成孔径雷达重复轨道干涉测量来提取地表三维位置信息的方法和技术已取得了巨大进展^[1,2]。如今,机载干涉雷达已经能够获取 1m 之内精度的地表高程,而星载 SAR 干涉测量则可以探测到雷达波长量级的地表位置变化。干涉雷达利用空间分开的两付天线对同一区域进行两次成像来得到两幅复图像(包括强度信息和相位信息),这两幅复图像之间的相位差包含了地面目标的三维位置信息。

在干涉雷达数据处理中,两幅复图像的精确匹配技术是提高地表高程测量精度的关键之一。通常要求把两幅干涉复图像配准到亚像元精度。对于机载干涉雷达来说,精确配准两幅复图像已不成问题,因为它一般是通过在同一架飞机上安装两付天线来实现的,因此两幅图像之间的位置关系是固定不变的。但是,对于星载 SAR 干涉测量来说这却是一个大问题,因为目前星载 SAR 干涉测量是利用单一天线在近平行的两个轨道上对同一地区进行重复观测来获取两幅复图像的,我们称之为重复轨道(或重复通过,repeat pass)干涉测量。由于两次成像之间天线的相对位置随着两个轨道之间的相对位置变化而变化,由此得到的两幅复图像之间的位置关系也是复杂多变的。同时,为了进行干涉测量两个轨道之

间必须存在一段间距(称为基线距)。这就使得在轨道完全平行的情况下,两幅复图像所对应的地面视场也是不一样的。鉴于上述复杂情况,有必要对星载 SAR 重复轨道干涉数据的精确配准问题进行深入研究。首先分析了重复轨道干涉复图像配准中所要考虑的问题,然后通过对新疆喀拉卡什 SIR-C/X-SAR L 波段重复轨道干涉数据的处理给出了一个切实可行的配准方法和相应的配准结果,最后尝试了一些干涉纹图(相位差图像)的增强处理方法。

2 干涉雷达复图像配准方法分析

在雷达干涉测量中,配准的关键在于确定两幅复图像之间匹配位置的相对偏移量,一旦知道了两幅图像之间每个匹配位置的相对偏移量,就可以对其中的一幅图像进行插值重采样,完成两幅图像之间的配准。下面通过分析重复轨道干涉测量两幅图像的成像几何差异来讨论合适的配准方法。

对于重复轨道干涉测量,当两轨道完全平行时,两复图像在方位向上的相对偏移量是一个常数,成像差异表现在斜距向上。从图 1 中可以看到,重复成像区相对于两轨道处于不同的位置。众所周知,雷达图像的几何特征之一就是:近距离压缩,远距离拉伸。因此,两复图像的几何畸变是不同的,即相同的地区在两幅图像上受到了不同程度的压缩和拉伸。当平台稳定性好、两轨道平行、基线距 B 很小且图幅宽度不大时,这种收缩和拉伸效应可以忽略

^{*} 中国科学院院长基金资助项目,国家863计划C08主题资助项目
收稿日期:1998-09-01;收到修改稿日期:1998-10-09

不计,此时斜距向的相对偏移量也可视为常数。因此只要找到两复图像的一个局部偏移量就可以配准两复图像。但是,当复图像的图幅宽度较大时,则需要在斜距向上确定多个局部偏移量,然后再作线性拟合来配准两幅复图像。当基线距较大时,计算每个局部偏移量时就必须考虑图像间的收缩和拉伸效应,一般需要加入一个斜距向的比例因子。

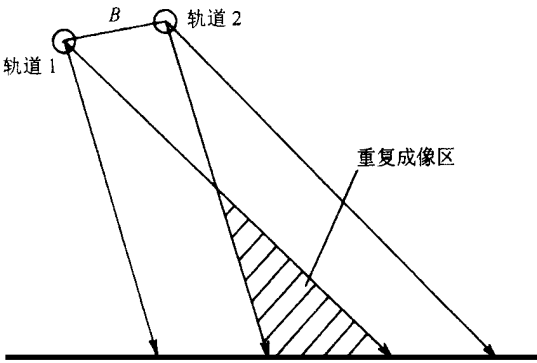


图 1 SAR 重复轨道干涉测量成像几何
Fig. 1 Geometry of SAR repeat-pass interferometry

更为复杂的情况是两轨道不平行,而是以一个角度相交,这时两图像所对应的地面视场也以相应的角度相交。当这个角度较大时,两幅复图像不宜用作干涉测量。在两轨道以小角度相交时,两图像在方位向和斜距向的偏移量都发生复杂的变化。此时的处理方法是:为了提高两图像的相干性,先以相同的多普勒中心频率对两图像进行重新聚焦,然后再计算局部偏移量。这种情况处理起来比较复杂,不作深入讨论。

对于干涉雷达的复图像配准一般采用基于窗口的自动匹配技术。这首先是因为基于特征识别的配准方法很难达到干涉测量所要求的配准精度;其次是因为用于干涉测量的两幅复图像应当具有很大的相关性(大于 0.7),从而适合于作基于窗口的自动匹配。

基于窗口的匹配过程一般是把两幅图像中的一幅作为主图像,另一幅作为辅图像,先在主图像中选定一个局部匹配窗,然后在辅图像中选定一个比匹配窗大的搜索窗,以确保在搜索窗中能够找到一个与匹配窗相区配的数据窗口。此窗口的确定是通过计算匹配质量指标来进行的。两个相匹配窗口中心位置之间的相对偏移量就是我们所要找的一个局部偏移量。

在干涉雷达复图像配准中,衡量两个复数窗口

匹配质量的指标主要有 3 个:

第 1 个是两个复数窗口的相关系数:

$$\rho = \frac{\langle c_1 \cdot c_2^* \rangle}{\{ |c_1|^2 \} \cdot \{ |c_2|^2 \}^{1/2}} \tag{1}$$

其中: c_1 、 c_2 表示两复图像, $*$ 表示复共轭, $\langle \rangle$ 表示数学期望, ρ 为复相关系数,它的模的大小即可作为匹配质量的评价标准,其值越大说明匹配得越好。

第 2 个指标是相位差图像的信噪比^[3]。把复数匹配窗与搜索窗内同样大小的复数窗作复共轭相乘,若两个窗口是基本匹配的,那么根据干涉测量的原理,就能看到干涉条纹(乘积复数的相位),对这个乘积复数窗口作二维 FFT,生成二维条纹谱,谱中的最大值就代表了最亮条纹的两个空间频率 f_x 和 f_y ,谱的信噪比为:

$$SNR = \frac{f_{\max}}{\sum f_{i,j} - f_{\max}} \tag{2}$$

当匹配得好时 SNR 高,反之则低。

第 3 个指标是相位差图像的平均扰动函数^[4]。它定义为:

$$f = \sum_i \sum_j [|p_{(i+1,j)} - p_{(i,j)}| + |p_{(i,j+1)} - p_{(i,j)}|] / 2 \tag{3}$$

其中: $p_{(i,j)}$ 是两复图像在像元 (i,j) 处的相位差,这种累加在相位差图像的相邻像元上进行。 f 越小匹配得越好。

干涉雷达复图像的配准一般分两步进行。第 1 步称为粗匹配,它在搜索窗内按行列以不同的整像元偏移量计算匹配窗与对应窗之间的匹配质量评价指标,由此得到的配准精度在一个像元之内。第 2 步称为精匹配,它通过对复图像作亚像元插值后再计算匹配指标来进行,或者也可通过对粗匹配的匹配指标值作亚像元的插值得到精匹配的位置。其精度要求在 0.01 个像元之内。

对于轨道平行且基线距很小的情况,精匹配可以按行列进行亚像元搜索来进行。对于轨道不平行或基线距较大的情况,一般在粗匹配的基础上采用多变量的最优化算法来实施精匹配:在粗匹配位置周围以不同的 x 和 y 偏移量、比例因子及旋转因了作亚像元的重采样,再计算匹配质量评价指标;当一个变量的值发生变化时就需要重新进行重采样和计算匹配质量评价指标。多变量最优化算法很多,但是多数都需要计算导数,在此很难操作。1992 年 Qian Lin 等采用了下降的单纯形法来使平均扰动函数最小化,此方法的优点是不必计算导数^[4]。

干涉雷达的复图像配准也可以在成像处理阶段进行^[5],但是我们一般获取的数据都是成像后的图像,故在此不再展开论述。

3 新疆喀拉卡什干涉数据配准

下面给出我们在处理新疆喀拉卡什 SIR-C/X-SAR L 波段的干涉数据时所采用的配准方法和处理结果。表 1 给出了所需的主要成像参数。考虑到机器的内存大小及运算速度,我们把整个条带的数据分成几个小块来处理。图 2 和图 3 给出了 1050×1200 大小的两幅复图像的强度图。其中图 2 的数据编号为 41446(我们称之复图像 1),数据窗口的第 1 个像元(0,0)在整个数据条带中的对应位置为(15170,3340),图 3 的数据编号为 41444(我们称之为复图像 2),数据窗口的第 1 个像元(0,0)在整个条带中的对应位置为(15600,3350)。

表 1 新疆喀拉卡什 SIR-C/X-SAR 成像参数表
Table 1 SIR-C/X-SAR imaging parameters of

Karakax, Xinjiang		
数据编号	41444	41446
图像中心的经纬度	N36.0724678 ,E79.1982880	N36.0473557 ,E79.2181244
图像中心的航迹角/(°)	137.6665107	137.6834259
数据获取模式	20	20
波长/m	0.2422721	0.2422721
方位向线间距/m	4.4907508	4.4907508
斜距向像元尺度/m	3.3312409	3.3312409
视数	1	1
平台高度/km	213.6539764	213.4776459
近距向距离/km	318.5835876	318.5835876
图像中心处地球半径/km	6376.7974195	6376.8073330
星下点的地球半径/km	6370.2651511	6370.2729994
近距入射角/(°)	50.3497963	50.3927803
远距入射角/(°)	52.828803	52.9677315

从轨道的航迹角可以看到两轨道是基本平行的,而在实际数据处理中所取的图幅又比较小,所以拟采用以 x 和 y 方向的偏移量为变量,以相关系数作为匹配质量评价指标来进行粗匹配和精匹配。整个配准过程如下:

(1) 把 SIR-C/X-SAR L 波段的压缩数据解压缩生成两幅复图像,截取两幅大致相同的区域来作匹配处理。

(2) 以复图像 1 为主图像,以复图像 2 为辅图像,在主图像中心确定一个 32×32 的匹配窗,在辅图像中心确定一个 200×200 的搜索窗(搜索窗必须大到足以能够在其内部找到与匹配窗相匹配的窗口)。

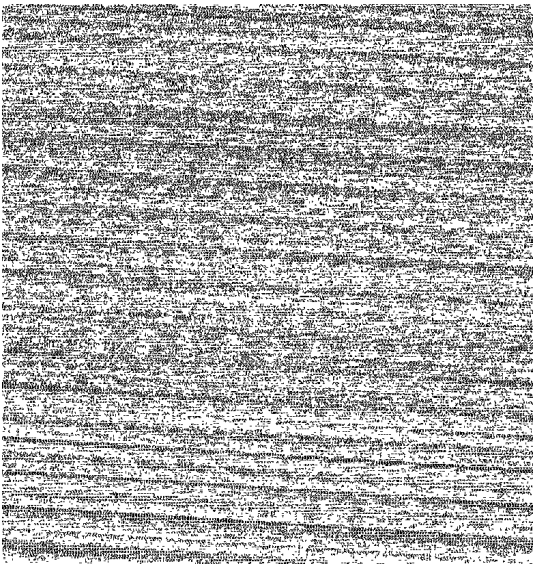


图 2 复图像 1 的强度图

Fig. 2 Intensity image of complex image 1

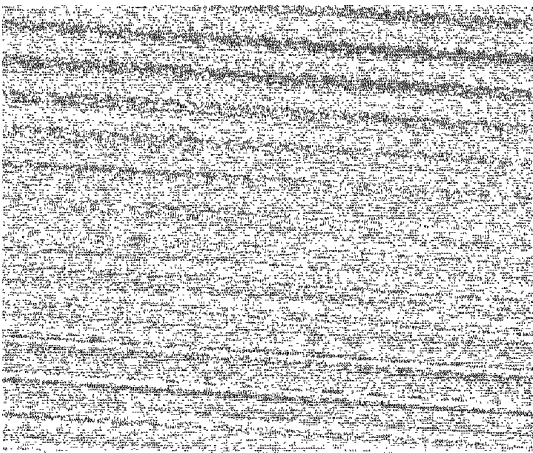


图 3 复图像 2 的强度图

Fig. 3 Intensity image of complex image 2

(3) 在搜索窗内确定一个 32×32 的窗口,计算该窗口与匹配窗之间的相关系数,按行列搜索,计算并保存每一个相关系数值,相关系数达到最大时的窗口就是与匹配窗达到粗配准时窗口,记下它们中心像元之间的相对偏移量。

(4) 在主图像中确定 N 个均匀分布的 32×32 大小的匹配窗, 根据上面得到的偏移量确定相应的 N 个 50×50 的搜索窗。

(5) 按行列搜索, 确定 N 个粗配准位置, 以粗配准位置为中心取一个 3×3 的相关系数窗口, 然后用二元三点插值法插值相关系数来确定 N 个局部的精确配准位置, 配准的精度由插值间隔来控制。

(6) 把这 N 个匹配窗的中心位置作为控制点, 每一个控制点都对应着一个局部的精确偏移量, 删除相关系数小于 0.7 的控制点, 用剩下的控制点进行二阶多项式拟合来确定两幅图像中任何一个匹配位置的相对偏移量。二阶多项式拟合是一个求矛盾方程组的最小二乘解问题, 采用奇异值分解的方法很容易求出拟合系数。

(7) 根据相对偏移量用双线性插值法对辅图像作插值重采样, 至此完成配准操作。

上述算法可以在时间域或频率域中实现。图 4 给出了该配准算法的流程图。在实际数据处理中, 我们取 $N=36$, 插值间隔为 0.01 个像元。因此, 若不考虑插值算法的误差我们的匹配精度可达到 0.01 个像元的精度, 这个精度可以满足干涉测量的要求。在表 2 给出了其中 6 个匹配窗中心像元的位置、粗配准和精配准时的相关系数以及精配准后的局部偏移量。从表中可以看出, 经过精配准后相关系数都比粗配准时有了提高。

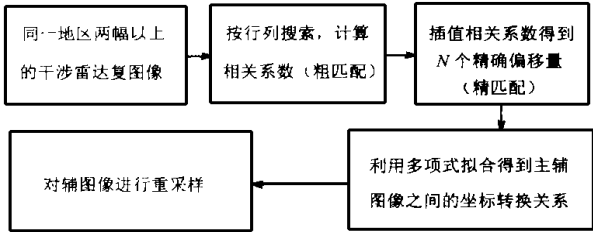


图 4 干涉雷达复图像配准流程图

Fig. 4. Flow chart for INSAR complex image registration

在利用控制点进行二阶多项式拟合时, 我们所用的二阶多项式为齐次方程组:

$$\begin{cases} u = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4y^2 + a_5xy \\ v = b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4y^2 + b_5xy \end{cases} \quad (4)$$

其中: $a_0 \sim a_5, b_0 \sim b_5$ 为拟合参数, (x, y) 为主图像中的像元坐标, (u, v) 为主图像和辅图像对应配准位置的相对坐标偏移量, 根据这个偏移量可以换算出两复图像之间的坐标转换关系。表 3 给出了 a

和 b 两组拟合参数。

随着一些专用的干涉雷达系统的升空, 干涉数据质量越来越高, 这里所用配准方法可以方便地处理大部分的干涉复图像的配准问题。

在两幅复图像精确配准后我们可以生成两幅重要的图件: 复相关图和干涉纹图。图版 I 图 5 是以 3×3 的窗口大小计算的复相关图的强度图, 其值的大小说明了数据质量的高低。复相关图的相位图实际上也是干涉纹图, 只是作了 3×3 的平滑处理。图版 I 图 6 为把主图像和重采样后的辅图像对应像元进行复共轭相乘后得到的单视干涉纹图。

表 2 匹配窗的配准参数
Table 2 Parameters of registration windows

序号	位置	相关系数 (粗配准)	相关系数	列偏移量 (像元数)	行偏移量 (像元数)
1	(300, 87)	0.748612	0.757287	3.030	-4.840
2	(500, 262)	0.865321	0.870172	2.990	-4.840
3	(100, 437)	0.887246	0.899682	2.950	-4.820
4	(700, 612)	0.953054	0.965447	2.920	-4.760
5	(900, 787)	0.785042	0.799766	2.930	-4.790
6	(1100, 962)	0.849298	0.868440	2.870	-4.780

表 3 二阶多项式拟合参数表
Table 3 Parameters of quadric polynomial regression

a_0	$3.064523e+00$	b_0	$-4.935089e+00$
a_1	$-3.896012e-04$	b_1	$3.131417e-04$
a_2	$6.915214e-05$	b_2	$2.803838e-04$
a_3	$1.167267e-07$	b_3	$-4.896725e-08$
a_4	$9.422673e-08$	b_4	$-2.499983e-07$
a_5	$-5.551648e-08$	b_5	$-1.781451e-07$

4 干涉纹图的增强处理

从图版 I 图 6 的干涉纹图中我们看到, 在明暗变化的条纹之上分布着许多噪声。为了提高干涉测量的精度, 必须有效地消除这些噪声。这些噪声的来源主要有几个方面^[6]: (1) 雷达阴影, 在图像上的阴影部分没有真实的地面信息, 因此得到的相位差必然是杂乱无章的噪声, 干涉图中那些比较密集的噪声主要是由雷达阴影引起的; (2) 匹配噪声, 当出现局部匹配失准时将引入噪声; (3) 系统噪声; (4) 斑点噪声, 这是相干成像系统所特有的, 一般采

用多视处理来消除;(5) 时相变化引入的噪声,当重复成像的时间间隔较大时,地物特性随时间发生的变化将导致干涉复图像间的相关性降低。

对于消除干涉纹图中的噪声可以采用中值滤波和方向平滑两种方法。在干涉纹图增强中采用中值滤波是一种较好的选择,因为干涉纹图有着丰富的边缘信息,而这些明暗边缘必须予以保留。中值滤波的优点就在于能有效地保护边界信息,而同时又能消除孤立点和线段。中值滤波的原理很简单,用一个窗口在图像上扫描,把窗口内包含的图像像元按灰度级升序排列,取灰度值居中的像元灰度为窗口中心像元的灰度,便完成了中值滤波。图版 I 图 7 为图版 I 图 6 经过中值滤波后的干涉纹图。我们可以看到条纹质量已大为改善。

在干涉纹图中采用方向平滑则是基于这样的事实:干涉纹图中噪声的合理取代值应该是该处条纹方向的平均值。干涉纹图中的条纹具有明显的方向性,当没有地形变化时相位差在方位向为常数,在斜距向上从近距到远距线性增加,当相位差增加到 2π 时,又重新开始从负 π 增加到 π ,在这种情况下方位向条纹线是直的,斜距向呈锯齿状。当有地形变化时,这些条纹又受到了地形的调制,但基本上可以按 4 个方向来平滑:与方位向平行的方向,与方位向成正负 45° 角的两个方向,与方位向垂直的方向。作噪声消除时,先在噪声周围的 4 个方向上计算灰度变化的方差或绝对偏差,找出一个灰度变化最小的方向,把这个方向当作该处的条纹方向,以该方向上的若干像元灰度的平均值来取代噪声,达到噪声平滑的目的。图版 I 图 8 显示了对图版 I 图 6 进行方向平滑后的结果。可以看出这种方法的增强效果也是很明显的。

对干涉纹图进行增强处理时需要考虑的一个问题是处理器的纯净性,在进行增强处理时要尽量避免引入新的误差,尤其是条纹边缘处要尽量避免被模糊。

5 结 论

利用新疆喀拉卡什 SIR-C/X-SAR L 波段的重复轨道干涉数据研究了干涉雷达复图像的精确配准问题和干涉纹图的增强问题。利用给出的配准方法能够把大多数的干涉复图像配准到亚像元的精度,满足了干涉测量的要求。在干涉纹图的增强中采用的中值滤波和方向平滑两种方法既保留了干涉纹图的边缘信息又有效地消除了噪声。为提高后续的相位解缠和数字高程模型重建的精度提供了有力保证。

参 考 文 献 (References)

- 1 Wang Chao, Yang Qingyou. INSAR applications in geosciences. *Remote Sensing Technology and Applications*, 1997, **12**(4): 36-45. (In Chinese) [王超,杨清友. 干涉雷达在地学研究中的应用. 遥感技术与应用, 1997, **12**(4): 36-45.]
- 2 Wang Chao. DEM Generation using SIR-C/X-SAR interferometric data. *Journal of Remote Sensing*, 1997, **1**(1): 46-49. (In Chinese) [王超. 利用航天飞机成像雷达干涉数据提取数字高程模型. 遥感学报, 1997, **1**(1): 46-49.]
- 3 K. Gabriel, R. M. Goldstein. Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIB-B. *Int. J. Remote Sensing*, 1988, **9**(5): 857-872.
- 4 Q. Lin, J. F. Vesecky. New approaches in interferometric SAR data processing. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1992, **30**(3): 560-567.
- 5 D. Fernandes, G. Waller, et al. Registration of SAR images using the chirp scaling algorithm. *IGARSS'96*, 799-801.
- 6 H. A. Zebker J. Villasenor. Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1992, **30**(5): 950-959.

作 者 简 介

杨清友,男,生于 1974 年,中国科学院遥感应用研究所硕士研究生。1995 年毕业于长春科技大学地科系,同年到中国科学院遥感应用研究所攻读硕士学位。现从事干涉雷达数据处理方法研究。已发表论文 1 篇。

Registration of INSAR Complex Images and Interferogram Enhancement

YANG Qing-You WANG Chao

(*Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences Beijing 100101*)

Abstract It is well established that Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry can be used to perform surface elevation mapping and change detection. Among the factors critical to the mapping and detection accuracy is the registration of the INSAR complex images from repeated orbits. This paper presents a method for registering INSAR complex images and two methods for interferogram enhancement. When registering complex images, area based registration method is used and the correlation coefficient between the corresponding data windows of the complex images is selected to evaluate the registration precision. With the method developed in this paper the INSAR complex images can be co-registered with the precision of sub-pixel. An interferogram can be obtained from the co-registered images. To reduce the noise of the interferogram median filter and directional filter were experienced. The advantage of these filters is that the abundant fringe information of the interferogram is saved when smoothing the noise. These data processing methods have been applied to the SIR-C/X-SAR L band interferometric data of the Karakax area in the western China, and valuable results have been obtained.

Key words Interferometric synthetic aperture radar (INSAR), Image registration, Interferogram

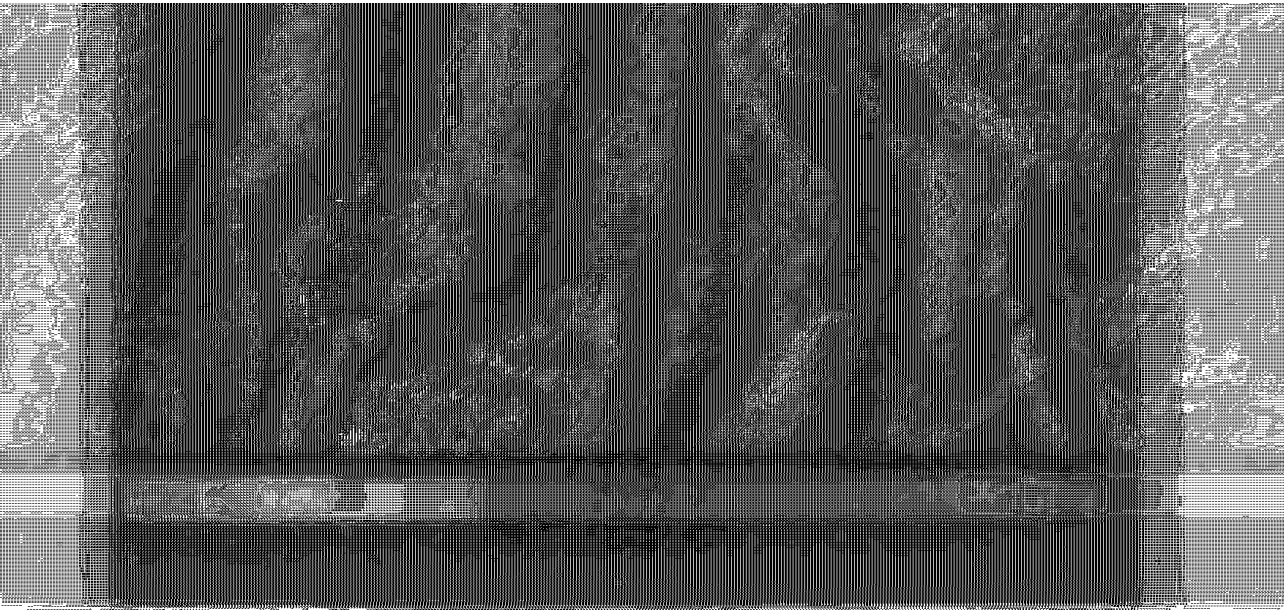


图 5 复相关系数图的强度图

图 6 单视干涉纹图

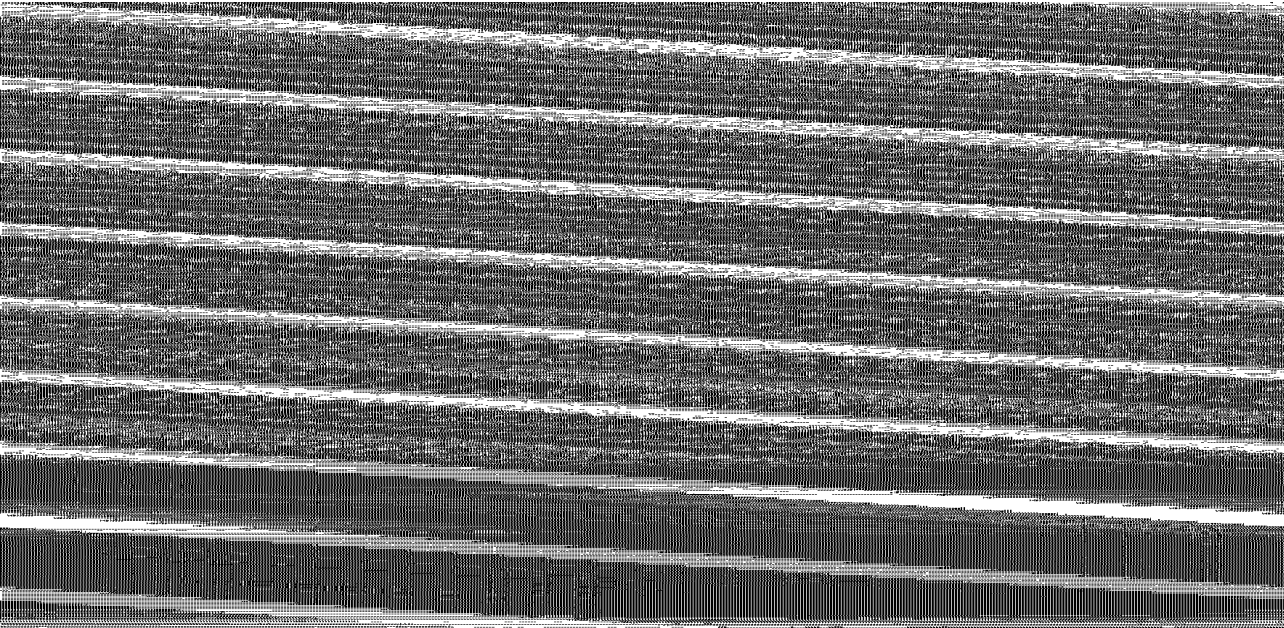


图 7 中值滤波后的干涉纹图

图 8 方向平滑后的干涉纹图