

重复轨道 InSAR 处理中的频域滤波研究

吴涛¹⁾ 王超^{1),2)} 张红^{3),1)} 汤益先¹⁾

¹⁾(中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室,北京 100101)

²⁾(中国科学院遥感卫星地面站,北京 100086) ³⁾(北京师范大学地理学与遥感科学学院,北京 100875)

摘要 在重复轨道 InSAR (synthetic aperture radar interferometry) 处理干涉测量中,干涉图像对在方位向和距离向的频谱偏移是重要的去相干因素,严重影响干涉图的质量,必须对主辅图像对采取适当的频域滤波。本文提出了一种方位向频域滤波和距离向频域滤波的处理流程,即根据频域特征选择在精配准前后做频域滤波。它既能保证精配准的准确度,又能充分降低频谱偏移导致去相干,从而保证干涉图的高质量。利用 4 组不同时间间隔和垂直基线距的 ERS-1/2 SLC (single look complex) 数据对进行实验验证,通过对频域滤波前后相干图和残差点的对比分析,验证了本处理流程的有效性。

关键词 方位向 距离向 频域滤波

中图分类号: P255.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2005)10-1234-08

Spectral Filtering for Repeat-pass SAR Interferometry

WU Tao¹⁾, WANG Chao^{1),2)}, ZHANG Hong^{1),3)}, TANG Yi-xian¹⁾

¹⁾(State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

²⁾(Remote-Sensing Satellite Ground Station, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086)

³⁾(College of Geography and Remote Sensing, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract In repeat-pass synthetic aperture radar interferometry, the decorrelation caused by azimuth and range spectral shifts leads to a deterioration of the quality of SAR interferogram. There is a need to put proper spectral filters on the main and slave images. The paper discusses a new spectral filtering procedure that performs filtering before and after fine coregistration according to spectral characteristics. The procedure will reduce spectral misalignment, improve the accuracy of fine coregistration, and at last obtain high quality of interferogram. Four pairs of ERS-1/2 SLC data with different time interval and nominal baseline are used to analyze the validity of our method. Results show that the average values of coherence after spectral filtering flow are higher than that before spectral filtering flow, moreover the amount of residues is highly decreased. These give evidence to the goodness of the procedure.

Keywords azimuth, range, spectral filtering

1 引言

合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术因其在提取数字高程模型和地表形变监测等方面的卓越表现而受到越来越多研究人员的关注。在重复轨道 SAR 干涉测量中,干涉纹图的质量取决于主、辅图

像的相干性,主、辅图像的相干性又受到诸多去相干因素的影响。这些因素可分为 5 大类^[1,2]:(1) 频谱偏移去相干;(2) 体散射去相干;(3) 热噪声去相干;(4) 时间去相干;(5) 数据处理去相干。它们的综合作用,导致生成的干涉纹图的质量降低。

主辅图像在方位向因为斜视角不同,导致回波信号多普勒中心频率之间的偏移;在距离向因基线距而

基金项目:国家重点基础研究发展规划“973”项目(2001CB309406);预先研究项目(4132202040203)

收稿日期:2004-07-23;改回日期:2004-11-28

第一作者简介:吴涛(1981~),男,中国科学院遥感应用研究所硕士研究生。研究方向为微波遥感。主要从事 SAR 和 InSAR 的图像处理算法研究。E-mail:hbxtwt@163.com

导致影像所反映的地距频率的偏移。正是这两种频率偏移使得主辅图像发生方位向和距离向的频谱偏移,从而成为干涉处理时的去相干因素。为了降低这种频谱偏移去相干,研究人员开展了频域的滤波处理^[3-6]。本文在前人工作的基础上,给出一种频域滤波处理流程,并以 ERS-1/2 SLC 数据为例,分析了不同方向上的频域滤波对干涉相干性和干涉纹图质量的提高,并对精配准前频域滤波的作用做了讨论。

2 SAR 数据频谱特征

2.1 基本特征

首先以 ERS-1/2 SAR SLC 数据为例,分析 SAR 数据的频谱特征。从 ERS-1/2 SLC 数据的头文件中可以知道它的频域参数,如方位向带宽 $B_a = 1378\text{Hz}$,距离向带宽 $B_r = 15.55\text{MHz}$;方位向的采样频率,也就是脉冲重复频率为 $f_{\text{prf}} = 1\ 679\text{Hz}$,距离向采样率为 $f_s = 18.96\text{MHz}$ 。显然 $f_{\text{prf}} > B_a, f_s > B_r$,符合 Nyquist 采样定理。

此外,SAR 数据在成像时,为了提高分辨率,在

方位向和距离向对信号都有加权处理。如 ERS SLC 数据采用了 Hamming 加权窗(系数为 0.75),具体表达式为^[3]:

$$W(f_a, f_{DC}) = \left(0.75 + 0.25 \cos\left(\frac{2\pi(f_a - f_{DC})}{B_a}\right) \right) \times \left(\text{sinc}\left(\frac{f_a - f_{DC}}{f_{\text{Dop}}}\right) \right)^2 \text{rect}\left(\frac{f_a - f_{DC}}{B_a}\right) \quad (1)$$

$$W(f_r) = \left(0.75 + 0.25 \cos\left(\frac{2\pi f_r}{B_r}\right) \right) \text{rect}\left(\frac{f_r}{B_r}\right) \quad (2)$$

其中, $\text{sinc}()$ 为辛克函数,矩形函数 $\text{rect}(x) = \begin{cases} 1 & |x| \leq 0.5 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$; f_a 为方位向频率, f_r 为距离向频率, f_{Dop} 是与天线波束角有关的多普勒带宽,对 ERS 而言, f_{Dop} 约为 1505Hz 。从上述表达式可见,方位谱以 SAR 数据的多普勒中心频率 f_{DC} 为中心,而距离谱关于零频率对称。

图 1 所示为 ERS-1 SAR SLC 数据在方位向和距离向的频谱曲线及对应窗函数的归一化示意图。由图 1 可以看出式(1)、(2)所描述的频谱特征,同时还发现其窗函数是谱线的包络。

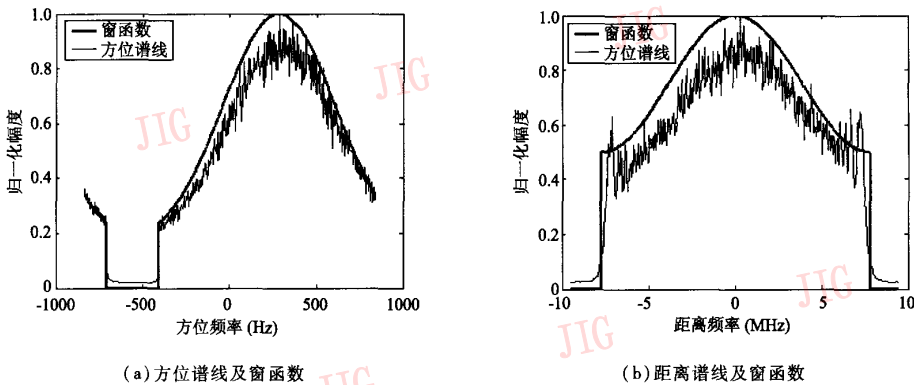


图 1 某一 ERS-1 SAR SLC 数据的方位谱和距离谱(128 条谱线平均),及对应的窗函数

Fig. 1 Azimuth and range spectrum of a ERS-1 SAR SLC data (averaged over 128 lines), and the corresponding window functions

2.2 方位向频谱偏移

f_{DC} 表达式为

$$f_{DC} = \frac{2V}{\lambda} \sin(\theta_s) \quad (3)$$

其中, V 是雷达平台的相对地面速度, λ 为波长, θ_s 为斜视角。进行干涉处理的两幅图像在对同一地面分辨单元成像时,由于 θ_s 不同而导致它们的多普勒中心频率 f_{DC1} 和 f_{DC2} 也不相同,其频谱偏移为

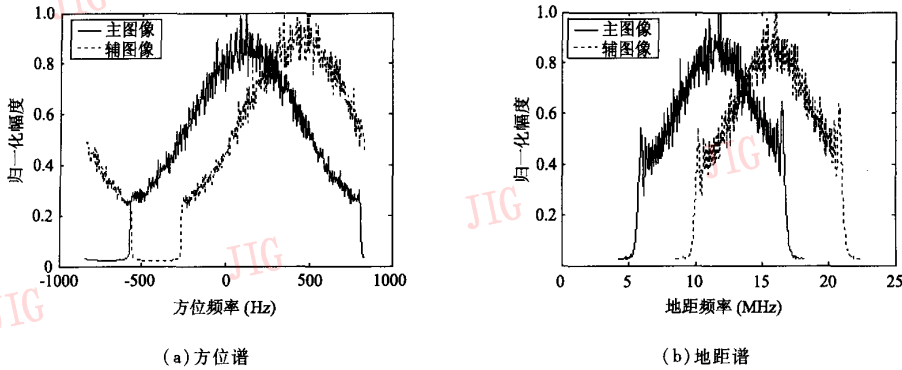
$$\Delta f_a = f_{DC2} - f_{DC1} \quad (4)$$

图 2 (a) 是河北省张北地区 ERS-1/2 SAR 串行(tandem)图像对的方位向频谱示意图,其方位向频谱偏移量约占到整个方位带宽的 22.52%。

2.3 距离向频谱偏移

在距离向,因为基线距的存在使得主辅图像反映的地距频谱范围不同,从而使得距离谱存在偏移 Δf_r 。Bamler 和 Just 给出 Δf_r 的表达式如下^[2]:

$$\Delta f_r \approx f_0 \cdot \sin(\theta) \left[\frac{1}{\sin(\theta_2)} - \frac{1}{\sin(\theta_1)} \right] \quad (5)$$



(a) 方位谱 (b) 地距谱
主图像: ERS-2, 成像时间为 1997 年 9 月 23 日, 景号为 2781, 轨道号为 12683
辅图像: ERS-1, 成像时间为 1997 年 9 月 22 日, 景号为 2781, 轨道号为 32356

图 2 张北地区 ERS-1/2 SAR 串行图像对的频谱示意图
Fig. 2 Spectrum of ERS-1/2 SAR tandem data of Zhangbei district

其中, f_0 为雷达载频, θ_1 和 θ_2 分别为主辅图像的视角, $\theta = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}$ 。将上式按泰勒展开式展开后, 可以得到如下的公式^[7]:

$$\Delta f_r \approx f_0 \frac{B_{\perp}}{R \tan(\theta - \alpha)} = f_0 \frac{B_{\perp} \cos(\theta)}{H \tan(\theta - \alpha)}$$

$$= f_0 \frac{B \cos(\theta - \xi) \cos(\theta)}{H \tan(\theta - \alpha)} \quad (6)$$

其中, R 为斜距, H 为雷达高度, α 为地形坡度角, ξ 为基线与水平方向夹角, B 和 B_{\perp} 分别为基线距和垂直基线距。

图 2(b) 是河北省张北地区 ERS-1/2 SAR 串行 (tandem) 图像对的距离向频谱示意图, 从图中可以看出距离向偏移量约占整个距离谱带宽的 32.9%。

3 频域滤波函数与流程

干涉纹图的频谱是两回波信号频谱的互相关, 它由 3 部分组成: (1) 位于两信号频谱相对偏移处的峰值点, 此时两信号频带相同的部分重叠; (2) 位于共同频带内, 除了峰值点以外的其他部分, 这部分频谱图绕峰值点共轭对称, 它的傅里叶反变换的相位是线性的, 对应于干涉纹图中相位的幅度起伏; (3) 位于共同频带内的其余部分是由信号的噪声产生的。因此, 设计合适的方位向滤波器和距离向滤波器, 不仅要保留干涉数据对的多普勒频率的相同部分, 还要尽可能减少对回波信号的损失。此外, 频

域滤波的另一个重点是滤波在干涉处理中的位置, 即如何确定频域滤波与精配准的处理流程, 尽量减少精配准过程中的处理误差。

3.1 方位向滤波函数

设主辅图像的多普勒中心频率分别为 f_{DC1} 和 f_{DC2} , 根据式 (1) 可得两图像的方位谱理论包络为

$$W(f_a - f_{DCi}) = \left(0.75 + 0.25 \cos\left(\frac{2\pi(f_a - f_{DCi})}{f_{prt}}\right) \right) \times$$

$$\left(\text{sinc}\left(\frac{f_a - f_{DCi}}{f_{Dop}}\right) \right)^2 \text{rect}\left(\frac{f_a - f_{DCi}}{B_s}\right) \quad (7)$$

($i = 1, 2$)

则主图像和辅图像的方位向滤波函数 $F_1(f_a)$ 、 $F_2(f_a)$ 定义如下:

$$F_1(f_a) = \sqrt{\frac{W(f_a - f_{DC2})}{W(f_a - f_{DC1})}} \cdot \text{rect}'(f_a) \quad (8)$$

$$F_2(f_a) = \sqrt{\frac{W(f_a - f_{DC1})}{W(f_a - f_{DC2})}} \cdot \text{rect}'(f_a) \quad (9)$$

其中,

$$\text{rect}'(f_a) = \begin{cases} 1 & f_a \in \text{公共方位谱区间} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

3.2 距离向滤波函数

为了去掉频谱的非公共部分, 整个距离向频域滤波的过程分为 3 个阶段: 反 Hamming 加权、去除频谱偏移、重新 Hamming 加权。

反 Hamming 加权函数为

$$W_{invH}(f_r) = \frac{1}{0.75 + 0.25 \cos\left(\frac{2\pi f_r}{f_s}\right)} \text{rect}\left(\frac{f_r}{B_r}\right) \quad (11)$$

经反 Hamming 加权后,距离频谱近似为方形谱。

确定距离频率偏移 Δf_r 后,就可得到主辅图像
的公共频谱带宽 $B_c = B_r - |\Delta f_r|$ 。假设主图像距离
谱的右侧和辅图像距离谱的左侧是频谱公共区,则
主、辅图像的新加权函数分别为

$$W_1(f_r) = \left(0.75 + 0.25 \cos \left(2\pi \frac{f_r - \frac{1}{2} |\Delta f_r|}{B_r - |\Delta f_r|} \right) \right) \times \text{rect} \left(\frac{f_r - \frac{1}{2} |\Delta f_r|}{B_r - |\Delta f_r|} \right) \quad (12)$$

$$W_2(f_r) = \left(0.75 + 0.25 \cos \left(2\pi \frac{f_r + \frac{1}{2} |\Delta f_r|}{B_r - |\Delta f_r|} \right) \right) \times \text{rect} \left(\frac{f_r + \frac{1}{2} |\Delta f_r|}{B_r - |\Delta f_r|} \right) \quad (13)$$

经过上述处理后,保留下来的就是主辅图像距
离向的公共频谱。

3.3 频域滤波流程

一直以来,关于频域滤波在干涉处理中的位置
和作用都没有统一的说法^[4,5]。在这里提出一种处
理流程,它既能兼顾精配准,又能很好地去谱移去
相干,如图 3 所示。

由于相干系数是精配准过程重要的评价指标,
因此从精配准的角度而言,主辅图像的相干性越高,
越能保证精配准的顺利进行。但是如上所述,在方
位向存在多普勒中心频率的偏移,在距离向存在因
基线距导致的距离频谱的偏移。这两种谱移因素导
致去相干。在图 3 所示的流程中,精配准之前的方
位或距离向频域滤波就是考虑到精配准而设计的。
如果方位谱移较大,那么就进行方位向频域滤波,如
果距离谱移较大,那么就进行距离向频域滤波。滤

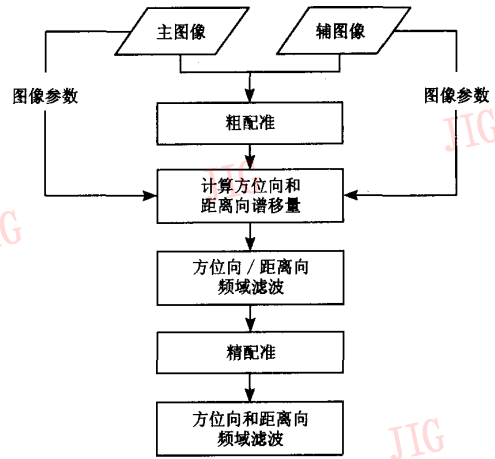


图 3 频域滤波处理流程

Fig. 3 Flow of spectral filtering

波后相干性会增加,精配准受噪声影响更小,配准将
更准确。获取此时的精配准参数,并将之用于原始
图像的精配准中。这样做是为了尽量保留原始图像
的信息。如果在滤波后的图像上做精配准,将会因
为滤波而损失掉部分相位信息,产生新的处理去相
干,影响干涉纹图的质量。

精配准后,虽然主辅图像配准精度高,但是仍然
受到谱移去相干因素的影响,再做方位向频域和距
离向频域滤波就能达到滤除频谱偏移、降低干涉图
相位噪声的目的。

4 实验与分析

选取不同时间间隔和基线距的 ERS-1/2 SAR
干涉数据对进行分析,具体的数据参数及频谱特征
如表 1 所示。

表 1 ERS-1/2 SAR 干涉数据对及频谱特征

Tab. 1 ERS-1/2 InSAR data pairs and spectral characteristics

干涉数据对	传感器	成像时间	轨道号	景号	基线距 B (m)	平均 f_{dc} (Hz)	平均 Δf_r (MHz)	方位谱偏移 (%)	距离谱偏移 (%)
1	ERS-1	1997-09-22	32 356	2 781	436.92	419.56	5.1153	22.52	32.90
	ERS-2	1997-09-23	12 683	2 781					
2	ERS-1	1995-12-30	23 309	2 979	307.22	289.84	3.9570	19.78	25.45
	ERS-2	1995-12-31	03 636	2 979					
3	ERS-1	1995-12-30	23 309	2 979	72.108	289.84	0.9916	20.02	6.38
	ERS-2	1996-03-10	04 638	2 979					
4	ERS-1	1995-04-06	19 473	2 817	174.96	421.21	2.1221	2.86	13.65
	ERS-1	1995-06-15	20 475	2 817					

表 1 中,数据对 1 和 2 都是间隔一天的 ERS-1/2 串行数据,时间去相干小;数据对 3 是间隔 71 天的 ERS-1/2 数据对,数据对 4 是间隔 70 天的 ERS-1 数据对,它们的时间去相干较大。由 ERS 数据的频谱特征可知,不同传感器的中心多普勒频率之差要远大于同传感器的中心多普勒频率之差,因此前 3 组数据的方位谱偏移都较大,而数据对 4 的方位谱偏移较小。从表 1 所给的基线距也可估计出 4 组数据距离谱偏移的相对大小,即数据对 1、数据对 2 和数据对 4 的距离频谱偏移较大,而数据对 3 的较小。

在实验中,以 1024×1024 的数据块为例进行分析。首先对 4 组数据做方位向频域滤波和距离向

频域滤波,并分析主辅图像相干性和干涉图残差点的变化。方位向频域滤波和距离向频域滤波都在精配准后进行。然后分析滤波对精配准的影响。

4.1 方位向频域滤波和距离向频域滤波分析

根据 3.3 节的讨论,本文先忽略精配准前方位向频域滤波和距离向频域滤波,直接考察精配准后频域滤波的作用。图 4 是 4 组数据滤波前后的干涉纹图的对比图,从图中可以看出,经过频域滤波后,干涉纹图的目视效果有了很明显的改善。在这 4 组数据中,针对数据对 1 和数据对 2 的频域滤波效果更为明显。下面将定量地分析方位向频域滤波和距离向频域滤波对干涉质量的影响。

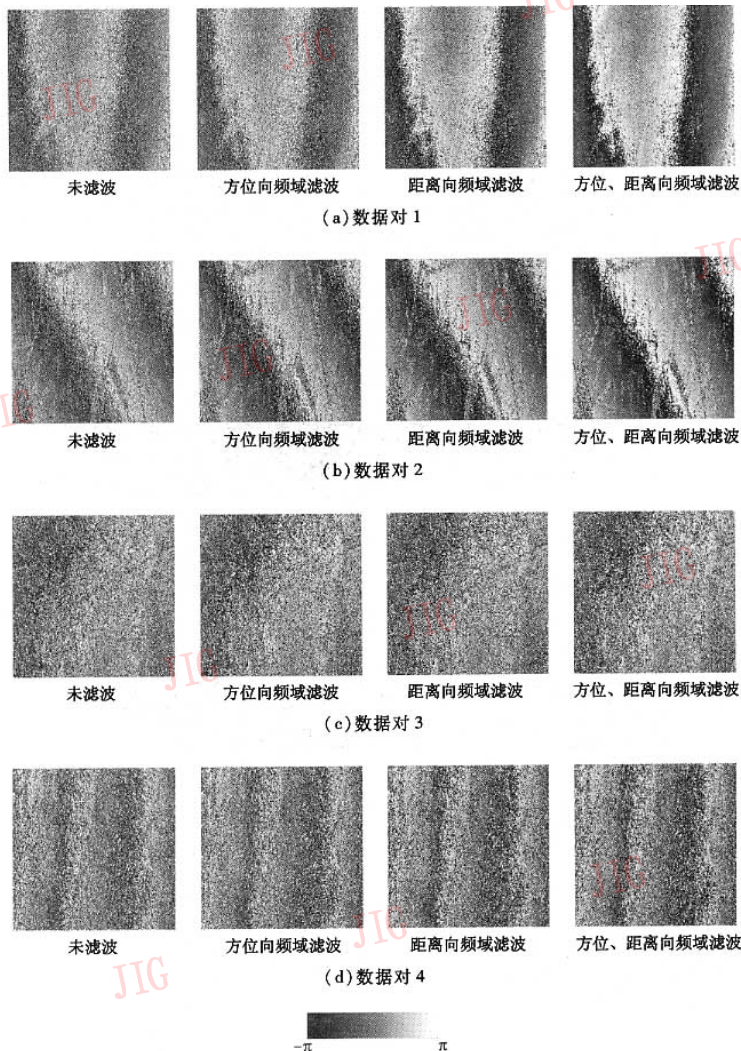


图 4 4 组数据频域滤波前后干涉纹图比较

Fig. 4 Comparison of interferogram before and after spectral filtering

图 5 和表 2 给出了方位向频域滤波和距离向频域滤波后主辅图像的相干直方图与原相干直方图的比较。从中可以看出,主辅图像在滤波之后,相干性都有提高,而且,频谱偏移越大,相干性的提高也越大。如果数据对的距离向谱移占的比重比方位向大,则距离向频域滤波后相干性的提高比方位向频域滤波后相干性的提高要大,反之亦然。对数据对 1 和数据对 2 而言,距离谱偏移明显强于方位谱偏移,距离向滤波后平均相干系数的提高要强于方位向频域滤波

后的结果;数据对 3 方位谱偏移强于距离谱偏移,方位向频域滤波后的平均相干系数 0.365 4 大于距离向频域滤波后的平均相干系数 0.321 2,但是因为谱移占带宽的比重都很小,所以,相干系数的提高不如前两个数据对明显。数据对 4 因为是同种传感器而方位谱移很小,占到带宽的 2.86%,相干系数的提高只有 0.78%。对于数据对 3、4 来说,时间去相干对数据的相干性影响很大,使得方位向频域滤波和距离向频域滤波所起的作用较小。

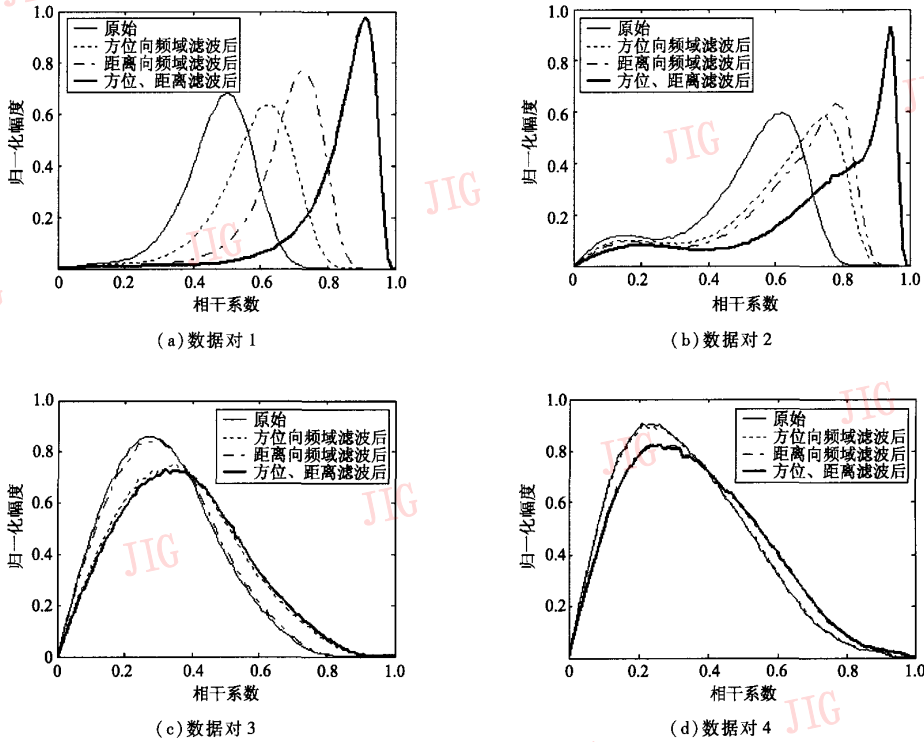


图 5 方位向频域滤波和距离向频域滤波后主辅图像相干直方图的比较

Fig.5 Comparison of coherence before and after azimuth and range spectral filtering

表 2 频域滤波前后数据相干性

Tab.2 Coherence before and after spectral filtering

干涉数据对	平均相干系数			
	原始	方位向频域滤波后(提高%)	距离向频域滤波后(降%)	方位向、距离向频域滤波后(降%)
1	0.4719	0.5796(22.82)	0.6745(42.93)	0.8301(75.91)
2	0.5037	0.5911(17.35)	0.6185(22.79)	0.7261(44.15)
3	0.3137	0.3654(16.48)	0.3212(2.39)	0.3740(19.22)
4	0.3338	0.3364(0.78)	0.3613(8.24)	0.3641(9.08)

表 3 给出了滤波前后残差点的变化情况。对数据对 1、2 而言,无论是方位向频域滤波还是距离向

频域滤波,滤波后干涉图的残差点数明显小于未滤波的残差点数,而且降低的幅度很大,特别是当方位

表 3 频域滤波前后干涉纹图残差点数量变化
Tab.3 Residues of interferogram before and after spectral filtering

干涉数据对	残差点			
	原始	方位向频域滤波后(提高%)	距离向频域滤波后(提高%)	方位向、距离频域向滤波后(提高%)
1	571 382	488 578(14.49)	413 286(27.67)	264 372(53.73)
2	508 459	439 989(13.47)	427 143(15.99)	318 073(37.44)
3	548 654	499 242(9.01)	544 223(0.81)	490 167(10.66)
4	530 977	527 491(0.66)	503 698(5.14)	500 934(5.66)

向和距离向频域滤波联合执行时,数据对 1 残差点的减少量达到 53.73%,数据对 2 达到 37.44%,这充分说明了串行数据的去相干和干涉纹图的噪声主要由频谱偏移造成的。数据对 3 主要是方位向频域滤波起着作用,而距离向频域滤波几乎可以忽略不计。但方位向频域滤波对于残差点的减少也只有 9.01%,远小于方位谱移差不多的数据对 1 和 2 的方位向频域滤波效果,这样的结果要归咎于主辅图像的时间间隔太长,导致时间去相干性太大。数据对 4 则反过来,距离向频域滤波的残差点减少占主要,而方位向频域滤波可以忽略。

以上 4 组数据的相干系数和残差点的分析表明,方位向频域滤波和距离向频域滤波对于提高主辅图像相干性和降低干涉图噪声有非常重要的作用,频谱偏移越大,滤波的效果越好。当时间去相干较小时,滤波对相干系数的提高和残差点的减少有较好的效果;而当时间去相干较大时,滤波的效果则受到时间去相干的影响。

4.2 精配准前频域滤波分析

由前可知,方位向频域滤波和距离向频域滤波能够显著地提高主辅图像的相干性,特别是当频谱偏移较大时。因此考虑在精配准前进行方位向频域

滤波或距离向频域滤波,得到相干性增强的主辅图像,获取精配准参数,然后重新从原始未滤波的图像开始进行图像对的精配准。精配准前的滤波过程将很大程度上提高精配准的准确性。

对数据对 1 和 2 而言,因为方位谱移和距离谱移都较大,因此可以选择在精配准前进行方位预滤波和距离预滤波,而对数据对 3 则需进行方位预滤波,对数据对 4 则需进行距离预滤波。这里,以数据对 1、4 为例来分析滤波对精配准的提高效果(另外两组数据与之类似)。

在精配准过程中,在图像上选取 256 个参考点。图 6 给出了数据对 1 在方位向、距离向频域滤波前后的精配准矢量图。为了有效地抑制不良配准点,以 0.474 作为阈值,发现滤波后保留参考点的数目要远远大于滤波前的数目,分别为 249 和 159。保留参考点越多,则精配准越能准确地执行。如果利用滤波后的精配准参数对原始未滤波数据进行精配准,那么主辅图像的相干性将得到提高。滤波后平均相干系数为 0.472 2,相比滤波前的平均相干系数 0.471 9 而言,有了一定的提高。最后干涉纹图的残差点数为 263 492 个,相比原残差点数(264 372 个)也有所降低。

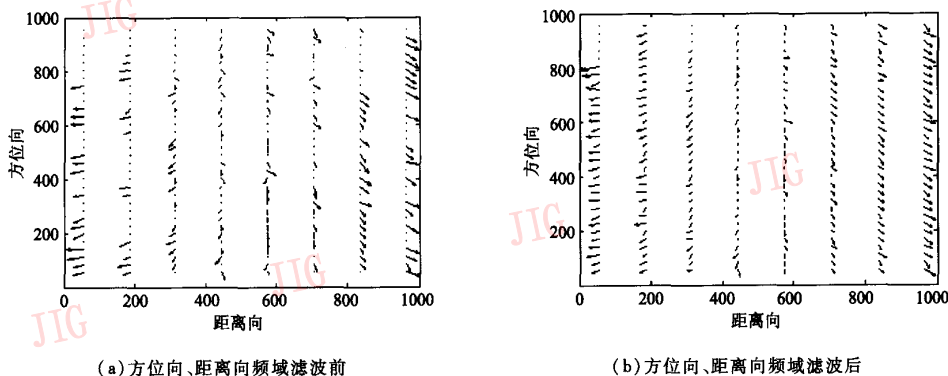


图 6 数据对 1 滤波前后精配准矢量图,阈值为 0.474

Fig. 6 Vectors of fine coregistration before and after spectral filtering for No. 1 data, threshold value 0.474

图 7 是数据对 4 在距离向频域滤波前后的精配准矢量图,选择相干系数阈值为 0.311。滤波后保留参考点为 135 个,要多于滤波前残差点数 120。将滤波后的精配准参数用于原未滤波的精配准中,

得到相干系数为 0.3349,方位向频域滤波和距离频域向滤波后残差点为 500 023。与表 2、表 3 中对应数据相比,干涉图的质量也得到了提高。

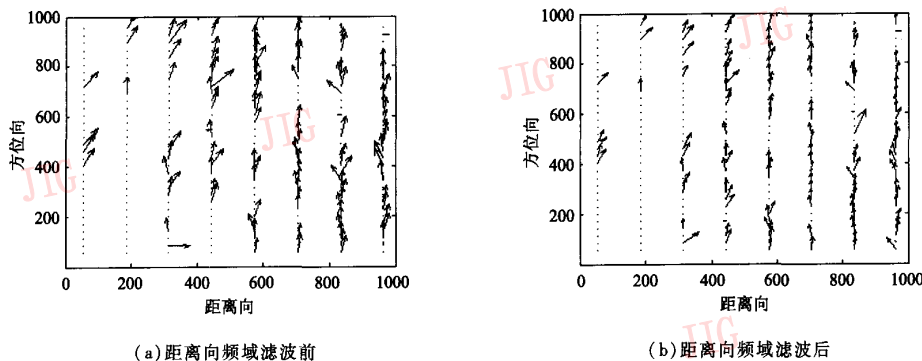


图 7 数据对 4 距离滤波前后精配准矢量图,阈值为 0.311

Fig. 7 Vectors of fine coregistration before and after range spectral filtering for No. 4 data, threshold value 0.311

通过以上的分析我们知道,精配准前的预滤波过程,相比直接进行精配准的处理流程而言,能够提高主辅图像之间的精配准精度,进而达到提高相干性,降低残差点的目的。这种预滤波的处理过程,在频谱偏移去相干较大时尤为重要。

5 结 论

方位向频域滤波和距离向频域滤波是在干涉图生成前的重要步骤。本文通过在精配准前的频域滤波处理,达到提高精配准位置精度的目的;通过在精配准后进行方位向频域滤波和距离向频域滤波,达到提高相干性、降低干涉图噪声的目的。实验结果表明了本文所提出的滤波流程的有效性。

参考文献 (References)

1 Zebker H A, Villasenor J. Decorrelation in interferometric radar echoes[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(5): 950 ~ 959.

2 Bamler R, Just D. Phase statistics and decorrelation in SAR interferograms [A]. In: Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium '93[C]. Tokyo, Japan, 1993: 980 ~ 984.

3 Geudtner D. Die interferometrische Verarbeitung von SAR-Daten des ERS-1, English translation The interferometric processing of ERS-1 SAR data [M]. Germany: DLR, Deutsche Forschungsanstalt für Luft-und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen, 1995.

4 Seymour M S. Refining Low-quality Digital Elevation Models Using Synthetic Aperture Radar Interferometry[D]. Canada: the University of British Columbia, 1999.

5 Wang Chao, Zhang Hong, Liu Zhi. Space-borne Synthetic Aperture Radar Interferometry[M]. Beijing: Science Press, 2002. [王超, 张红, 刘智著. 星载合成孔径雷达干涉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002.]

6 Swart L M Th. Spectral Filtering and Oversampling for Radar Interferometry[D]. Netherlands: Delft University of Technology, 2000.

7 Gatelli F, Guarnieri A M, Parizzi F, et al. The wavenumber shift in SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(4): 855 ~ 864.