

改进的基于频谱分割的 InSAR 绝对相位确定方法

刘双亚 李世强 冯 锦

(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

摘 要:在利用干涉合成孔径雷达重建数字高程模型的过程中,需要对干涉相位解缠,并估算残余相位模糊数确定绝对相位。频谱分割法是一种利用干涉相位与载频正比关系来确定绝对相位的频域估计算法,然而在估算残余相位模糊数时,不能有效地去除噪声点,算法精度受限。该文对频谱分割法提出了改进:通过设计合理的带通滤波器,来减小系统噪声和去相干因素对高低载频干涉相位的影响,然后根据干涉相位的分布特性,提出了聚类取整法来估算残余相位模糊数,进而确定绝对相位。与传统的频谱分割法相比,改进算法不仅提高了绝对相位的估计精度,还具有较高的运算效率。最后利用 ENVISAT ASAR 的实测数据验证了改进算法的有效性。

关键词:频谱分割法;绝对相位;残余相位模糊数;带通滤波器;聚类取整

中图分类号: TN2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.604

Absolute phase determination in SAR Interferometry based on improved split-spectrum algorithm

Liu Shuangya Li Shiqiang Feng Jin

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: Interferometric synthetic aperture radar relies on determining the digital elevation model by absolute phase, which has to be reconstructed by the process of recovering the unwrapped phase and residual phase ambiguity. The split-spectrum algorithm is one of the frequency-domain algorithms to utilize the carrier frequency in direct proportion to the interferometric phase to determine the absolute phase. However, in the process of estimating the residual integer ambiguity, the algorithm could not avoid noisy points resulting in low accuracy and efficiency. This paper proposes an improved split-spectrum algorithm. To decrease the influence of the systematic noise and decorrelation on interferometric phases with different frequencies, this paper analyses and designs a proper band-pass filter. Moreover, based on the distribution of the interferometric phase, clustering integral algorithm is proposed to determine the residual integer ambiguity. Compared with the original median algorithm, the new improvement has raised the accuracy and efficiency. Lastly, the data of ENVISAT ASAR is simulated to verify the effectiveness of the improved algorithm.

Keywords: split-spectrum algorithm; absolute phase; residual phase integer ambiguity; band-pass filter; clustering integral algorithm

1 引 言

干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)^[1]可以在全天时全天候条件下获得观测区域地形信息的遥感技术,InSAR 获取 DEM 的基本原理是利用两幅天线获取同一区域具有一定视角差的 SAR 图像,再根据精确的轨道参数和绝对相位获取目标高程信息,绝对相位即为回波信号经过成像处理后的真实相位差,是重建 DEM 最为关键的参数之一。然而由于三角函

数的周期性,利用干涉图得到的相位值是绝对相位在 $(-\pi, \pi]$ 或 $(0, 2\pi]$ 范围内的主值,这个相位被称为缠绕相位,它与绝对相位之间相差整周期数。为了确定绝对相位,首先利用解缠算法计算缠绕相位各像素点之间相差的整周期数,从而获得相位连续变化的解缠相位;然后再计算残余相位,即绝对相位与解缠相位之差,对应的整周期数被称为残余相位模糊数,进而确定绝对相位。

目前,相位解缠的方法很多,如枝切法^[2]和区域增长法^[3],通过避开残差点寻找最优积分路径进行解缠,阻止

相位误差的传递;最小费用流^[4]算法通过全局范围内搜索路径和最短枝切来求最小化路径的最优解;以及最小范数法将相位解缠问题转化为最小范数问题,即寻找使得相位梯度与缠绕梯度误差的 L^p 范数达到最小的解缠相位。

干涉相位解缠后,还需要通过相关算法求取残余相位才能确定绝对相位。地面参考点估计法^[5]是最早获取残余相位的算法,它通过一定数量高程信息已知的地面控制点,根据 InSAR 成像的几何关系确定残余相位,算法精度比较高。但是对于大范围雷达干涉图像,控制点最好分布在整幅图像上,并且要避免选择存在解缠相位残差点区域,否则会造成控制范围内局部精度较高、其他部分精度较低的情况。然而对于一些控制点难以布设的高山峡谷或境外地区,由于地面控制点缺乏,无法保证算法精度。

频谱分割算法(split-spectrum algorithm, SSA)^[6]是最早不使用地面参考点的绝对相位估计算法,它利用绝对相位和信号载频成正比的关系,将距离向频谱分割成两个或两个以上的子带,然后通过绝对相位与子带间差分干涉相位的比例系数即放大因子来确定绝对相位。此算法有一定局限性和适用范围,即子带间差分干涉相位的范围必须在 $(-\pi, \pi]$, 否则需要相位解缠,无法准确估计差分干涉相位,而且放大因子一般是几十甚至上百,对差分干涉相位的精度要求非常高,此外,在估算残余相位模糊数时,不能有效地去除噪声点,使得绝对相位估计精度比较低。改进的基于最大似然估计的多通道 InSAR 高程重建方法^[7]利用聚类分析目标像素点与相邻点的关系来判断此点是不是坏点,然后加权滤波剔除这些坏点,得到残余相位模糊数,该算法具有较高的估计精度。

本文对频谱分割法提出了改进:通过合理规划滤波器宽度和位置,减小噪声和去相干因素的影响,利用 Goldstein 滤波器对高低载频干涉相位滤波,尽量降低差分干涉相位噪声,减弱放大因子对噪声的进一步放大,再依据残余相位模糊数的分布特点,利用直方图聚类取整法估算模糊数。与传统的频谱分割法相比,改进算法提高了模糊数估计的准确度和效率。

2 频谱分割法基本原理

InSAR 的基本原理是利用具有一定视角差的两幅天线获取同一区域的 SAR 图像,然后根据绝对相位来获取地表高程信息和重建 DEM。InSAR 的成像几何关系^[8-9]如图 1 所示, A_1 、 A_2 表示天线相位中心,设 A_1 对目标点 P 成像时的侧视角为 θ , R_1 、 R_2 分别表示 A_1 、 A_2 到目标点 P 的距离, h 为目标点 P 的高程, B 表示基线长度, α 为基线侧滚角。

将主辅图像配准后进行相干处理得到复干涉图^[10]:

$$s_1(t) \cdot s_2^*(t) = A \exp \left\{ -j \frac{2\pi f_c p (R_1 - R_2)}{c} \right\} \quad (1)$$

式中: A 表示幅度, f_c 为信号的工作频率, c 为光速, $p=1$ 表示系统为一发双收的工作模式, $p=2$ 表示系统为自发

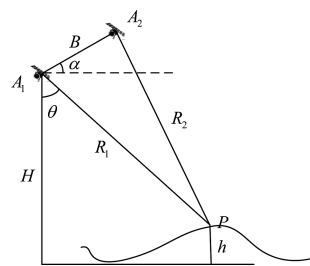


图1 干涉合成孔径雷达几何关系

自收的工作模式。则干涉相位为:

$$\varphi = -\frac{2\pi p f_c}{c} (R_1 - R_2) \quad (2)$$

为了进一步分析干涉相位与地形关系,将干涉相位分解为平地相位和高程相位,去掉由斜距变化引起的平地相位后,则由高度变化引起的高程相位可近似表示为^[11]

$$\varphi_{\text{topo}} \approx -\frac{2\pi p f_c B_{\perp} h}{c R_1 \sin \theta_g} \quad (3)$$

式中: $B_{\perp} = B \cos(\theta - \alpha)$ 表示垂直基线。实际处理过程中,计算得到的相位是地形相位对 2π 取模的结果,即缠绕相位可以表示为:

$$\varphi_{\text{wrap}} = \text{Wrap}(\varphi_{\text{topo}}) \quad (4)$$

式中: $\text{Wrap}(\cdot)$ 表示将相位缠绕到 $(-\pi, \pi]$ 的算子。为了恢复真实相位,首先对 φ_{wrap} 解缠,恢复像素之间的相对相位,则解缠相位为:

$$\varphi_{\text{unw}} = \varphi_{\text{wrap}} + 2k_{\text{unw}} \pi \quad (5)$$

式中: k_{unw} 表示解缠相位缠绕的整周期数,它是随着空间位置的变化而变化的。解缠相位与绝对相位之间还有一个整周期数的相位偏差,即:

$$\varphi_{\text{topo}} = \varphi_{\text{unw}} + 2k_{\text{abs}} \pi = \varphi_{\text{wrap}} + 2k_{\text{unw}} \pi + 2k_{\text{abs}} \pi \quad (6)$$

式中: k_{abs} 表示残余相位模糊数,它在整幅图像中是一个常数。

频谱分割法是利用带通滤波器将距离向频谱分割成中心频率分别为 $f_c + f_0$ 和 $f_c - f_0$ 的频谱,得到载频有一定差别的干涉相位,带通滤波后的干涉相位可表示为:

$$\varphi_{-} = -\frac{2p\pi(f_c - f_0)}{c} \Delta R \quad (7)$$

$$\varphi_{+} = -\frac{2p\pi(f_c + f_0)}{c} \Delta R \quad (8)$$

对 φ_{+} 、 φ_{-} 去除平地后,进行复共轭相乘得到高低载频差分干涉相位可以近似表示为:

$$\varphi_{+/-} = \varphi_{+u} - \varphi_{-u} \approx -\frac{4\pi p f_0 B_{\perp} h}{c R_1 \sin \theta} \quad (9)$$

式中: φ_{+u} 、 φ_{-u} 分别表示去平地后的高低载频干涉相位。根据绝对相位与载频的正比关系,估计的地形相位(即绝对相位)可以表示为:

$$\varphi_{\text{topoe}} = \frac{f_c}{2f_0} \cdot \varphi_{+/-} = \Delta k \cdot \varphi_{+/-} \quad (10)$$

式中: $\Delta k = \frac{f_c}{2f_0}$ 被称为放大因子。后文用到的 ENVISAT

ASAR 实验数据中载频为 C 波段,带宽为 16 MHz,可知放大因子至少为 $\Delta k = \frac{f_c}{B_r} = 333$,由于实验数据的模糊高度为 120.992 m,则差分干涉相位的模糊高度至少为 40 km,这么大的模糊高度使得差分干涉相位很小,可以保证在 $(-\pi, \pi]$,因此,差分干涉相位不需要解缠。

3 改进算法流程

改进的频谱分割法流程如图 2 所示,可以分为两个步骤:带通滤波得到差分干涉相位和聚类取整确定残余相位模糊数^[12]。

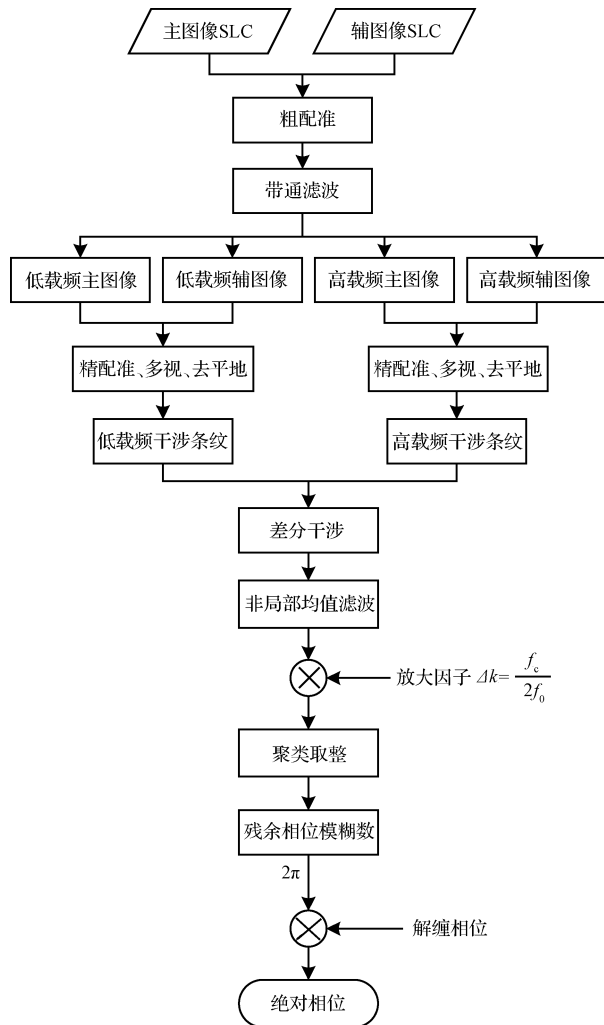


图 2 改进的频谱分割算法流程

3.1 带通滤波获取差分干涉相位

首先对 SLC 主辅图像进行配准,然后再利用带通滤波器对信号距离向频谱进行滤波处理,得到高低载频干涉相位,然而在配准过程中,精配准的插值处理会改变距离向频谱,而粗配准只是像素点移动,频谱不会出现扭曲,因此为了得到高质量的高低载频干涉相位,应该在滤波之后再精配准。带通滤波是利用中心频率分别为 $f_c + f_0$ 和

$f_c - f_0$ 的滤波器对 SLC 图像的距离向频谱进行滤波,对应的滤波器频谱 $H_b(f)$ 和 $H_l(f)$ 的幅度如图 3 所示,得到载频为 $f_c + f_0$ 和 $f_c - f_0$ 、带宽为 B_{sub} 的子带图像(主辅)。为了减小放大因子,提高算法精度,带通滤波器应处于原始信号频谱两边的边缘位置,以便增大 $H_b(f)$ 和 $H_l(f)$ 的中心频率之差,但是滤波器宽度也不应过窄,否则会降低高低载频干涉相位的相关性。

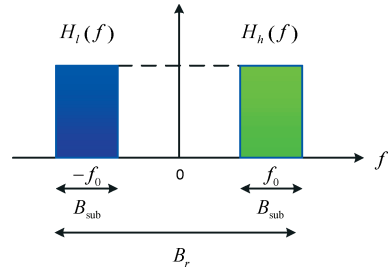


图 3 带通滤波器

将滤波得到的高低载频主辅图像进行精配,由文献[12]可知,配准偏移量的均方误差为:

$$\sigma_{CR} = \sqrt{\frac{3}{2N_r}} \cdot \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\pi\gamma} \quad (11)$$

式中: N_r 为距离向采样点数, γ 表示主辅图像相关系数。当频谱分割子带宽度为 B_{sub} 时,配准偏移量的均方误差为:

$$\sigma_{split} = \frac{1}{2} \frac{B_r}{B_r - B_{sub}} \sqrt{\frac{B_r}{B_{sub}}} \frac{1}{\sqrt{N_r}} \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\pi\gamma} \quad (12)$$

式(11)、(12)之比是一个常量:

$$\frac{\sigma_{split}}{\sigma_{CR}} = \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{B_r}{B_r - B_{sub}} \sqrt{\frac{B_r}{B_{sub}}} \quad (13)$$

当 $B_{sub} = \frac{1}{3} B_r$ 时,比例系数最小,精配准的偏移误差最小, $\sigma_{split} = 1.061\sigma_{CR}$,此时对应的滤波器中心频率为 $f_0 = \pm \frac{1}{3} B_r$ 。

由于放大因子比较大,差分干涉相位估计精度要求高,此处利用 4×4 双 3 次卷积法^[13]对高低载频主辅图像进行插值处理,实现精配准。此外,为了减小相位噪声,分别对高低载频干涉相位进行多视处理及 Kalman 滤波^[14],不仅能更清晰地反映干涉条纹细节信息,也能在一定程度上避免由噪声引起的差分干涉相位缠绕。

3.2 聚类取整确定残余相位模糊数

由 3.1 节得到的差分干涉相位,由式(10)即可获得绝对相位,然而放大因子 Δk 一般比较大,即使传输函数很小的变化,对绝对相位的估计也会有很大的影响,因此直接由式(10)估算的绝对相位精度很低,为了缓和这种情况,可以先通过枝切法等相关算法^[2]计算解缠相位,再由式(6)和式(10)计算残余相位模糊数从而获得绝对相位,模糊数的计算公式为:

$$k_{\text{abs}} = \frac{1}{2\pi} \left[\varphi_{+/-}(t) \frac{f_c}{2f_0} - \varphi_{\text{unw}}(t) \right] \quad (14)$$

对于整幅图像来说模糊数 k_{abs} 是一个常数, 由于放大因子过大, 图像上每个像素单元的 k_{abs} 有很大不同, 对整幅图像的模糊数取平均, 虽然能得到比较好的结果, 但是不能有效地避开噪声点, 估计精度受限。在此依据干涉相位分布特性提出了直方图聚类取整法来确定残余相位模糊数。

由文献[15]可知, 干涉相位 φ 的概率密度分布可以表示为:

$$pdf(\varphi; |\gamma|, L, \varphi_0) = \frac{\Gamma(N + \frac{1}{2})(1 - \beta^2)^L \beta}{2\sqrt{\pi}\Gamma(L)(1 - \beta^2)^{L + \frac{1}{2}}} + \frac{(1 - |\gamma|^2)^L}{2\pi} F_1\left(L; 1; \frac{1}{2}; \beta^2\right) \quad (15)$$

式中: φ_0 表示干涉相位的预期值, L 为视数, $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数, γ 表示主辅图像的相关系数, $\beta = |\gamma| \cos(\varphi - \varphi_0)$, F_1 为高斯超几何分布函数。

当视数为 1 时, 干涉相位的概率密度分布为:

$$pdf(\varphi) = \frac{1 - |\gamma|^2}{2\pi} \frac{1}{1 - |\gamma|^2 \cos^2(\varphi - \varphi_0)} \cdot \left\{ 1 + \frac{|\gamma| \cos(\varphi - \varphi_0) \arccos[-|\gamma| \cos(\varphi - \varphi_0)]}{\sqrt{1 - |\gamma|^2 \cos^2(\varphi - \varphi_0)}} \right\} \quad (16)$$

式(16)的概率密度如图 4 所示, 则干涉相位概率密度函数关于 $\varphi - \varphi_0 = 0$ 对称。为了估计残余相位模糊数, 定义残余相位变量为:

$$\varphi_{\text{offset}} = 2k_{\text{abs}}\pi = \varphi_{\text{topoe}} - \varphi_{\text{unw}} \quad (17)$$

由于残余相位模糊数 k_{abs} 是常数, 则 φ_{offset} 的概率密度服从式(16)分布, φ_{offset} 的统计分布直方图关于 $2k_{\text{abs}}\pi$ 对称, 也就是说 $\frac{\varphi_{\text{offset}}}{2\pi}$ 的统计分布直方图关于 k_{abs} 对称, 对应峰值点的位置即为模糊数估计值, 而且相关系数越大, 概率密度图越尖锐, 标准差越小, 更容易找到峰值点的位置, 因此为了获得高精度残余相位模糊数, 去掉相关系数小于门限 γ_i 的像素点, γ_i 一般取 0.6 结果会比较好。

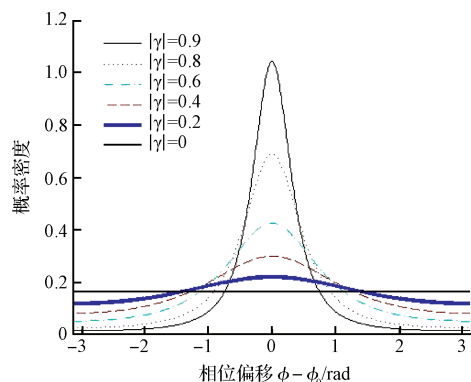


图 4 不同相关系数下干涉相位概率密度函数

聚类取整法就是依据干涉相位概率密度函数提出的一种聚类分析方法, 具体实现步骤为: 根据上述改进的频谱分割法得到了残余相位模糊数, 去掉相关系数小于门限 γ_i 的像素点, 假定 m 和 n 为分别为模糊数估计值范围内的最小和最大的整数, 利用直方图将 $[i - 0.5, i + 0.5)$ 范围内的点归为一类, 其中 $i = m, m + 1, \dots, n$, 从 $i = m$ 开始对每一类依次进行数量的累加, 当累加和第 1 次超过统计总量一半时, 对应的整数 i 就是估计的残余相位模糊数 k_{abse} 。相比于传统的均值和中值^[16]法估算模糊数, 直方图聚类取整法结合模糊数的分布特性, 滤除相关系数小的点, 利用累加取整缓和偏差比较大的点对结果的影响, 在一定程度上避免了噪声点的干扰。

根据估计的模糊数和解缠相位, 绝对相位的估计值为:

$$\varphi_{\text{abse}} = \varphi_{\text{unw}} + 2k_{\text{abse}}\pi \quad (18)$$

4 实测数据仿真结果与分析

4.1 ENVISAT ASAR 数据说明

利用 ENVISAT ASAR 对美国 Las Vegas 某山区的观测数据对改进的频谱分割法进行实验, 该区域平均高度为 880 m, 最高高度可达 1 242 m, 雷达工作模式为重复轨道观测, C 波段运行, 重访周期为 70 天, 多视处理后图像大小为 1 001 × 1 000, 分辨率为 15 m × 15 m, 具体参数如表 1 所示。

表 1 系统参数

参数	ENVISAT ASAR
载频 f_c /GHz	5.3
带宽 B_r /MHz	16
距离向采样频率 F_r /MHz	19.2
入射角 $\theta(^{\circ})$	33.65

由第 2 章可知, ENVISAT ASAR 的模糊高度和放大因子保证了差分干涉相位在 $(-\pi, \pi]$, 差分干涉相位的观测值即为真实值, 为了提高改进算法的精确度, 在此分别对不同带宽下的滤波器进行试验和分析, 并给出设计合理带通滤波器的方法。

4.2 结果与分析

带通滤波前后干涉图如图 5(a)~(c) 所示, 其中 (b)、(c) 分别表示载频为 $f_c + f_0$ 和 $f_c - f_0$ 的干涉图, 可以看出, 由于平地相位的存在, 干涉条纹过于密集, 还可能导致差分干涉相位缠绕, 为了后续处理方便, 需要去除平地相位, 可以通过轨道参数和几何关系得到平地相位并去除, 也可以通过频谱估计法^[10]消除。去除平地后的干涉相位如图 5(d)~(f) 所示, 与图 5(a)~(c) 对比可以发现, 去平地后的干涉相位更能反映地形的变化。为了减小系统噪声和基线去相干等因素的影响, 对去平地后的高低载频干

涉图进行 Kalman 滤波^[14],滤波后干涉相位如图 5(g)~(i)所示,相位滤波不仅大大提高了去平地相位的清晰度,还在一定程度上避免了由噪声引起的差分干涉相位的缠绕。

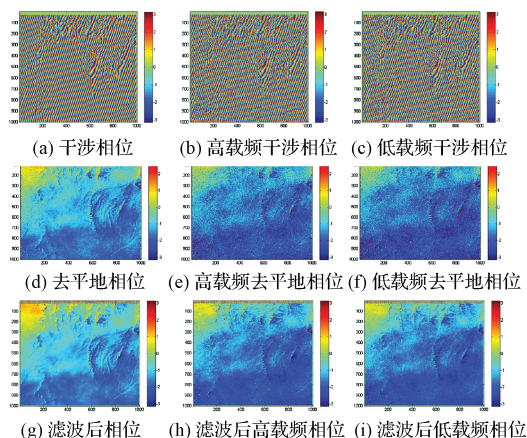


图5 滤波前后干涉相位

为了避免噪声进一步放大,在差分干涉相位放大前对其进行非局部均值^[17]去噪,最终得到残余相位模糊数分布如图 6(a)所示,然后利用直方图统计模糊数,并将相关系数低于 0.5 的点去掉,以便减小直方图包络的主瓣宽度。同时在利用直方图统计模糊数时,还应该注意步长的设定,步长太大达不到估算的精度,太小主瓣不突出,处理

的模糊数大小是 800×800 ,模糊数范围在 $[-20, 30]$,步长设为 0.1,得到模糊数统计直方图如图 6(b)所示。

传统确定模糊数的方法是对图 6(a)直接求均值。文献[17]利用中值滤波降低直方图主瓣宽度,设定中值滤波窗口大小为 21×21 ,得到模糊数归一化直方图统计包络结果如图 6(c)所示,可以看出中值滤波后主瓣宽度减小,主瓣峰值点对应的位置即为残余相位模糊数。

通常在相位解缠时,基本上都是假定地形平缓连续变化,干涉相位是对地形的充分采样,并且相邻像元间的相位差在半个周期之内。但是如果观测地形是高山峡谷等地区,极有可能出现相位不连续的点^[18],使得模糊数在某种程度上不是一个常数,再加上放大因子、噪声、叠掩等因素的影响,模糊数的统计包络主瓣过宽。在此根据模糊相位分布特性,利用直方图聚类取整法估计模糊数,从整数最小的一类开始累加,如图 6(d)中左半部分区域表示累加和的数量第 1 次超过总量一半的情况,对应的整数即为估计的残余相位模糊数。

由第 2 章可知,对于 ENVISAT ASAR 的数据,不同滤波器带宽下差分干涉相位范围都在 $(-\pi, \pi]$,为了设计合理的带通滤波器,验证算法的有效性,在此对不同带宽下的滤波器进行处理,选取子带的宽度为:

$$B_{\text{sub}} = (3 + 0.25n) \text{ MHz} \quad (19)$$

式中: $n = 0, 1, 2, \dots, 24$ 。

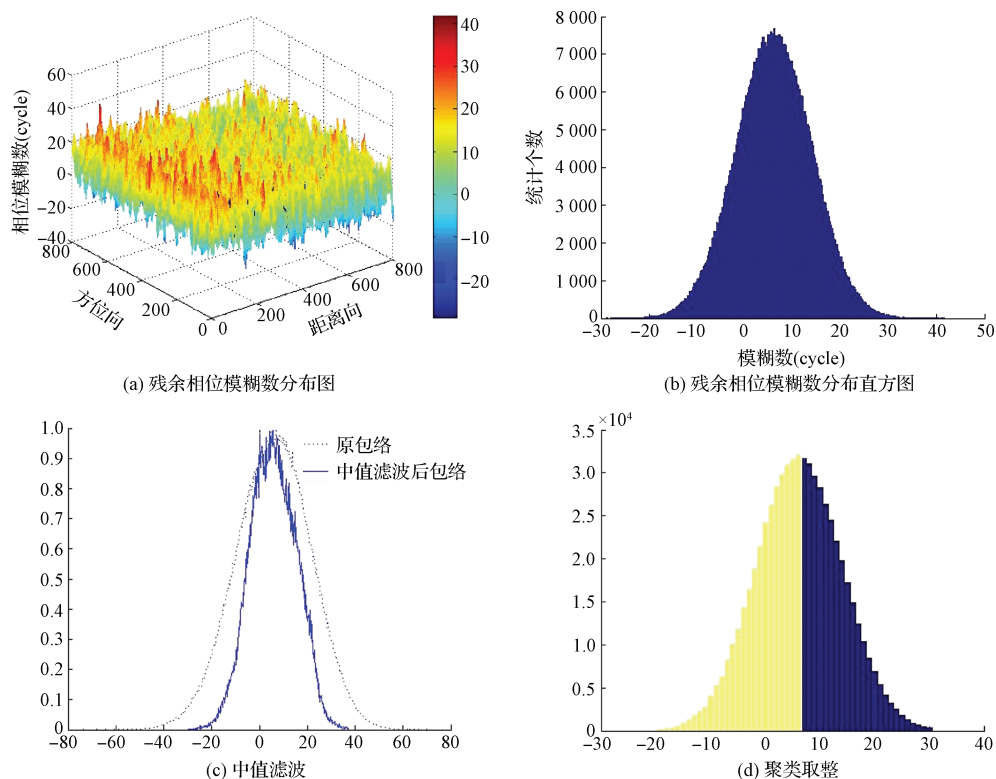


图6 改进的频谱分割法得到的残余相位模糊数

利用地面参考点算法估计的相位模糊数为6.045 4 (cycle),如图7所示为不同滤波器带宽下,由直接均值、中值滤波和聚类取整算法得到残余相位模糊数的估算结果,可以看出,当带通滤波器宽度为4~8 MHz时,聚类取整算法模糊数估算结果都是6 (cycle),与地面参考点法得到的估计值接近;当滤波器宽度小于4 MHz时,由于滤波器宽度太窄,高低载频信号的相关系数比较小,出现了不可忽视的偏差;当滤波器宽度大于8 MHz时,两个带通滤波器会重叠,放大因子太大,引入的噪声也很大,模糊数估计不准确。利用直接均值和中值滤波算法得到的结果波动比较大,当滤波器宽度在4.5~7 MHz时,模糊数估计值在(6-0.5,6+0.5)范围内。

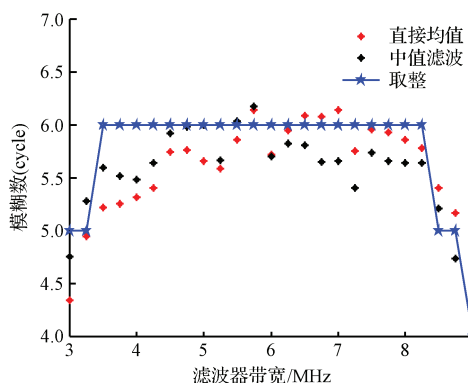


图7 不同带宽下模糊数结果

如表2所示为带通滤波器宽度从4 MHz变化到8 MHz时,对图7中模糊数求得均值和标准差,并且列出了3种算法的消耗时间。可以看出,与直接均值法相比,中值滤波算法虽然能减小模糊数统计直方图包络的主瓣宽度,但是计算量大、耗时长、受噪声干扰大、模糊数的估计精度不高。聚类取整法依据干涉相位分布特性估算模糊数、误差小、算法效率高,在滤波器带宽窄、信噪比低的情况下仍然有较高的准确度,估计结果与地面参考点法估计结果最为接近。因此,为了降低去相关和放大因子的影响,提高模糊数估计结果的精度,带通滤波器的宽度最好设置为 $\frac{1}{3}B_r$ 左右。

表2 不同算法模糊数比较

方法	均值(cycle)	标准差(cycle)	耗时/s
地面参考点	6.045 4	0.235 7	—
均值	5.814 2	0.240 1	0.029 566
中值滤波	5.759 1	0.203 7	44.367 153
聚类取整	6.000 0	0.000 0	0.119 689

由于模糊数在整幅图像中是一个整数,其估计值应该在 $k_{obs} \pm 0.5$ 范围内才能保证准确性,否则如果模糊数偏差1 (cycle),地形高度将会偏差120 m,给高程估计带来很大

的影响,因此要选择合适的滤波器宽度和模糊数估计算法,保证模糊数估计偏差在 ± 0.5 范围内。此外,还可以对比不同滤波器带宽下的模糊数估计值,提高算法的鲁棒性。

由以上的分析可知,对ENVISAT ASAR的实测数据处理结果验证了改进算法的有效性,并且与原始算法相比,具有更高的运行效率和精度。

5 结论

为了提高InSAR对复杂地形的测量精度,提出了一种改进的基于频谱分割的InSAR绝对相位确定算法,该方法设计了合理的带通滤波器,然后结合残余相位模糊数的分布特性,提出了直方图聚类取整算法估计模糊数,通过对ENVISAT ASAR实验数据进行仿真分析,验证了算法的有效性,提高了算法估计精度和效率。

参考文献

- [1] 曹名字,李世强,李宁.多基线InSAR最大后验高程反演算法的改进[J].国外电子测量技术,2015,34(7):55-61.
- [2] XIAO F, WU J, ZHANG L, et al. A new method about placement of the branch cut in two-dimensional phase unwrapping[C]. Asian & Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2007:755-759.
- [3] 刘慧,周荫清,徐华平,等.基于区域增长的相位展开新算法[J].仪器仪表学报,2006,27(增刊3):2232-2234.
- [4] PEPE A, BONANO M, YANG Y, et al. New improvements of the extended minimum cost flow phase unwrapping for processing multitemporal full resolution interferograms[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2011:1349-1352.
- [5] 靳国旺. InSAR获取高精度DEM关键处理技术研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学,2007.
- [6] BIOUCAS-DIAS J, KATKOVNIK V, ASTOLA J, et al. Absolute phase estimation: Adaptive local denoising and global unwrapping[J]. Applied optics, 2008, 47(29):5358-5369.
- [7] 袁志辉,邓云凯,李飞,等.改进的基于最大似然估计的多通道InSAR高程重建方法[J].电子与信息学报,2013,35(9):2161-2167.
- [8] 耿辉,谢亚楠,王波,等. InSAR测高原理及精度分析[J].电子测量技术,2011,32(2):39-41.
- [9] 罗华,雷斌,胡玉新.融合机载高分辨率InSAR数据的DEM生成方法[J].国外电子测量技术,2013,32(8):26-30.

- [10] RICHARDS M A. A beginner's guide to interferometric SAR concepts and signal processing [AESS Tutorial IV][J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2007, 22(9):5-29.
- [11] 杨磊, 赵拥军, 王志刚. 基于频移的干涉 SAR 去平地效应方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2004, 18(4):15-20.
- [12] BRCIC R, EINEDER M, BAMLER R. Interferometric absolute phase determination with TerraSAR-X wideband SAR data[C]. Radar Conference, 2009: 1-6.
- [13] CHUNG-CHI L, MING-HWA S, HUANN-KENG C, et al. The efficient VLSI design of BI-CUBIC convolution interpolation for digital image processing[C]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2008: 480-483.
- [14] NIES H, LOFFELD O, WANG R. Phase Unwrapping using 2D-Kalman Filter -Potential and Limitations[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008: 1213-1216.
- [15] 刘宝泉. 干涉合成孔径雷达测量关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [16] GONZÁLEZ J H, ANTONY J M W, BACHMANN M, et al. Bistatic system and baseline calibration in

TanDEM-X to ensure the global digital elevation model quality[C]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2012, 73(3):3-11

- [17] BUADES A, COLL B, MOREL J M. A non-local algorithm for image denoising[C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005: 6065.
- [18] FENG C, WEIWEI Z. A phase unwrapping algorithm for discontinuous object measurement [C]. 2010 Symposium on Photonics and Optoelectronic (SOPO), 2010: 1-4.

作者简介

刘双亚, 1990 年出生, 中国科学院大学电子学研究所信号与信息处理专业硕士研究生, 主要研究方向为干涉合成孔径雷达绝对相位确定。

E-mail: 1023650614@qq.com

李世强, 1967 年出生, 研究员, 主要研究方向为分布式星载 SAR 系统与干涉 SAR 系统设计及信号处理。

E-mail: lishiq@mail.ie.ac.cn

冯锦, 1970 年出生, 副研究员, 主要研究方向为干涉合成孔径雷达成像处理技术。

E-mail: fengyizheng1970@hotmail.com

(上接第 22 页)

- [16] FANG J, XU Z, ZHANG B, et al. Fast compressed sensing SAR imaging based on approximated observation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2013, 7(1): 352-363.

作者简介

胡文强, 1986 年出生, 男, 湖北洪湖人, 中国科学院大

学电子学研究所通信与信息系统专业硕士研究生, 主要研究方向为成像雷达动目标检测。

E-mail: wabye@foxmail.com

齐向阳, 1974 年出生, 男, 2001 年毕业于中国科学院电子学研究所, 获得信号与信息处理专业博士学位, 现为中科院电子学研究所研究员, 主要研究方向为星载 SAR 系统仿真、高分辨率成像技术和成像新体制。

E-mail: qixy@mail.ie.ac.cn