

一种基于干涉条纹频率的 星载 InSAR 基线估计新方法

徐华平,朱玲凤,刘向华,陈怡菲

(北京航空航天大学电子信息工程学院,北京 100191)

摘要: 现有基于干涉复图像的基线估计方法采用平地假设并利用傅里叶变换估计条纹频率,应用于星载 InSAR 时基线估计误差很大.本文针对星载 InSAR,从基线计算公式和条纹频率估计两个方面对现有基于干涉复图像的基线估计方法进行改进,提出了一种基于干涉条纹频率的高精度星载 InSAR 基线估计新方法.在考虑地球曲率的情况下,推导了星载 InSAR 中基线与干涉条纹频率之间的精确关系式.通过引入半牛顿迭代法,精确估计每一像素点处的干涉条纹频率;对所估计的频率值进行线性拟合,进一步抑制噪声对条纹频率估计精度的影响,获得高精度的干涉条纹频率值,用于基线计算.最后,利用星载 InSAR 仿真数据进行基线估计,所得到的估计精度达到了厘米量级,结果验证了所提方法的有效性.

关键词: 干涉合成孔径雷达;基线估计;干涉条纹频率;半牛顿迭代法;线性拟合

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 09-2212-06

A Novel Baseline Estimation Approach of Spaceborne InSAR Based on Interferometric Fringe Frequency

XU Hua-ping, ZHU Ling-feng, LIU Xiang-hua, CHEN Yi-fei

(Department of Electronic and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: We proposed a novel high precision spaceborne InSAR baseline estimation approach based on interferometric fringe frequency which makes the improvements from two aspects: the baseline calculation formula and the fringe frequency estimation precision. The accurate mathematic relationship between the baseline parameters and the interferometric fringe frequency was deduced considering the earth curvature. Also the Semi-Newton iterative method was introduced to estimate the fringe frequency of each pixel in the complex interferogram. Furthermore, the frequency evaluation was processed by the linear fitting to suppress the noise and the high precision fringe frequency was obtained. With the accurate frequency and the deduced baseline calculation formula, the baseline estimation precision was improved to centimeter. Finally, the computer simulation was employed to confirm the new baseline estimation approach.

Key words: interferometric synthetic aperture radar (InSAR); baseline estimation; interferometric fringe frequency; semi-Newton iterative method; linear fitting

1 引言

InSAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar)是在合成孔径雷达(SAR)基础上发展起来的,通过提取 SAR 干涉复图像的相位信息来获取地表的三维高程和变化信息.根据平台的不同,InSAR 可分为机载 InSAR 和星载 InSAR.相比机载 InSAR,星载 InSAR 作用距离远,覆盖面积广,具有快速覆盖全球的能力^[1~3].基线是 InSAR 系统的重要参量,它被定义为照射同一区域的两部天线相位中心之间的距离.对于星载 InSAR,基线不仅决定着

系统的干涉性能,而且也是反演高程的重要参数,其精度直接影响到最终提取的地表高程或形变的精度,因此精确的基线估计在 InSAR 数据处理中极为重要.

目前,星载 InSAR 基线估计的方法主要包括基于卫星轨道状态矢量法、基于外部控制点法和基于干涉相位信息法^[4].基于卫星轨道状态矢量的估计方法^[5]是利用卫星星历参数,通过两颗卫星位置的矢量差来求取基线参数.由于基线估计精度受卫星定位精度的影响很大,因此基于卫星轨道状态矢量法的基线估计精度较差.基于外部控制点的估计方法^[6]是利用已知高程信息和干

涉相位值的地面控制点,并结合干涉系统的几何关系解方程组得到基线参量.基于控制点的方法对地面控制点的布局和测量精度要求较高,而且在全球范围内很难获得满足需要的地面控制点,因此该方法的应用非常受限.基于干涉相位的估计方法^[7~9]则是直接利用 InSAR 测量数据中获得的干涉相位信息来估测基线,不需要轨道参数的测量值和外部控制点的设置,因此应用较广.

基于干涉相位信息的基线估计方法主要有基于绝对相位^[8]和基于干涉复图像两种^[7,9~10].前者依赖于高精度的绝对干涉相位值,需要对缠绕干涉相位进行相位展开处理,而相位展开本身是 InSAR 数据处理中的难点,相位展开过程会引入较大的误差,因此很难实现精确的基线估计.后者直接利用干涉复图像估计基线,不需要相位展开处理,是目前最简洁的基线估计方法.基于干涉复图像的基线估计方法最早是由 Kuldeep Singh 等人^[7]于 1997 年提出,通过对一定距离向范围的干涉复图像进行傅里叶变换获得干涉条纹的频率范围值,然后代入频率与基线之间的关系式求解基线参数.随后,文献^[9]利用 ERS-1/2 的干涉复图像数据对该方法进行了验证;文献^[10]针对机载 InSAR 从 4 个方面对该方法进行了改进,提高了算法的鲁棒性和精度.上述现有的基于干涉复图像的基线估计方法都是在平地假设下得到的基线与条纹频率之间的定量关系式,而且都是利用干涉复图像的傅里叶变换获得条纹频率值,频率估计精度较差,因此无法满足星载 InSAR 高精度测高的要求.

本文针对星载 InSAR,从基线计算公式和条纹频率估计两个方面对现有基于干涉复图像的基线估计方法进行改进,提出了一种基于干涉条纹频率的高精度星载 InSAR 基线估计新方法.论文第二部分给出了传统的、平地假设的基于干涉复图像的基线估计方法;第三部分在考虑地球曲率的情况下,推导了星载 InSAR 中基线与干涉条纹频率之间的精确关系式;第四部分提出了基于干涉条纹频率的高精度星载 InSAR 基线估计新方法.新方法首先引入半牛顿迭代法,直接由干涉复图像精确估计每一像素点处的干涉条纹频率,然后通过对所估计的频率进行线性拟合,进一步提高干涉条纹频率的估计精度,再利用第三部分推导的星载 InSAR 中条纹频率与基线之间的精确关系,求解干涉基线参数;第五部分对所提方法进行了计算机仿真,结果表明该方法的基线长度估计精度可达到厘米量级,远远优于现有的基于干涉复图像的基线估计方法的精度.

2 基于干涉复图像的传统基线估计方法

传统的基于干涉复图像的基线估计方法都是在平地模型下得到的,其几何关系如图 1 所示. A_1, A_2 分别

为两雷达系统,它们之间的基线为 B ,基线倾角为 α . θ 为雷达的视角, r_m 为 A_1 到地面点 P 的距离,即距离向的斜距. r_s 为 A_2 到地面点 P 的距离. H 为 A_1 到地面的高度, h 为地面目标的高度.由几何关系,可得

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} B \cdot u \cos(\theta_0 - \theta) = \frac{4\pi}{\lambda} B \cdot u \sin(\theta - \alpha) \quad (1)$$

其中 ϕ 为两雷达到目标的真实相位差值. u 为收发因子,对于收发分置 InSAR 系统, u 为 0.5,收发同置 InSAR 系统的 u 值为 1. λ 为雷达波长.

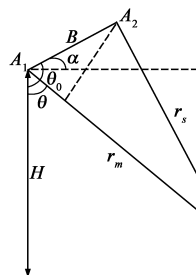


图1 平地模型下星载InSAR几何关系图

在干涉复图像上选取一定斜距范围 $[r_{m,\min}, r_{m,\max}]$ 内的一块数据,并对其进行距离向的傅里叶变换,由干涉条纹频谱图可得到选定斜距范围内条纹的频率范围值为 $[k_{\min}, k_{\max}]$, k_{\min} 和 k_{\max} 分别为选定范围内频率的最小值和最大值.根据式(1),考虑地面平坦,即 $h=0$ 时,可得^[7]

$$k = \frac{d\phi}{dr_m} = \frac{d\phi_{\text{wrapped}}}{dr_m} = \frac{4\pi u}{\lambda} \cdot \frac{H}{r_m^2} \left[B \cos\alpha \cdot \frac{H}{\sqrt{r_m^2 - H^2}} + \sin\alpha \right] \quad (2)$$

其中 ϕ_{wrapped} 为缠绕相位,即从干涉复图像中提取的干涉相位值.可看到干涉条纹频率 k 的值随着斜距 r_m 取值单调减小.则斜距为 $r_{m,\min}$ 时的频率值为 k_{\max} ,斜距为 $r_{m,\max}$ 时的频率值为 k_{\min} .根据水平和垂直基线与基线长度和倾角之间的关系,即 $B_x = B \cdot \cos\alpha$, $B_y = B \cdot \sin\alpha$,将基线参数 B 和 α 变量替换为 B_x, B_y ,由式(2)可以得到^[7]

$$\begin{pmatrix} p(r_{m,\min}) \cdot g(r_{m,\min}) & p(r_{m,\min}) \\ p(r_{m,\max}) \cdot g(r_{m,\max}) & p(r_{m,\max}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{\max} \\ k_{\min} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中 $p(r_m) = \frac{4\pi u H}{\lambda r_m^2}$, $g(r_m) = \frac{H}{\sqrt{r_m^2 - H^2}}$.求解方程组(3),可得到基线参数值 B_x, B_y ,即实现了基线的估计.

文献^[7]利用频谱图直接获取距离向干涉条纹的频率范围 k_{\min} 和 k_{\max} ,求得的频率值精度很低,使得基线估计值误差很大,远远不能满足基线精确度的需求.另外,式(3)是在平地假设下得到的,因此若直接应用于星载 InSAR,会引入很大的基线估计误差.

3 考虑地球曲率的星载 InSAR 基线估计

本文考虑了地球曲率对星载 InSAR 系统的影响,重

新推导了基于干涉复图像的基线估计方法中条纹频率与基线之间的定量关系式. 考虑地球曲率的星载 InSAR 几何关系如图 2 所示. 其中 R_e 为地球半径.

式(1)给出的干涉相位对斜距求导, 得

$$k = \frac{d\varphi}{dr_m} = \frac{4\pi u}{\lambda} B \cdot \left[\cos\alpha \frac{d(\sin\theta)}{dr_m} - \sin\alpha \frac{d(\cos\theta)}{dr_m} \right] \quad (4)$$

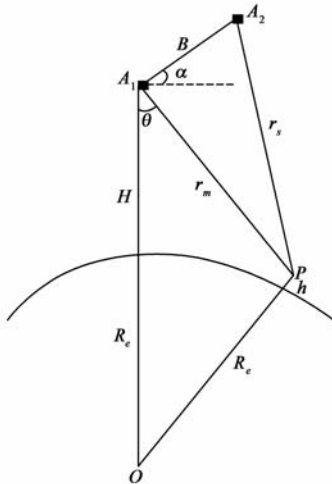


图2 考虑曲率的星载InSAR系统几何模型

根据图 2, 由余弦定理可得到

$$\cos\theta = \frac{(H + R_e)^2 + r_m^2 - (h + R_e)^2}{2r_m(H + R_e)} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)中, 在 $h = 0$ 时有

$$k = \frac{d\varphi}{dr_m} = \frac{4\pi u B}{\lambda} \left[\frac{(H^2 + 2HR_e)^2 - r_m^4}{2r_m^2(H + R_e)\sqrt{[(2R_e + H)^2 - r_m^2][r_m^2 - H^2]}} \cdot \cos\alpha - \frac{r_m^2 - H^2 - 2HR_e}{2r_m^2(H + R_e)} \cdot \sin\alpha \right] \quad (6)$$

从式(6)中很难看出干涉条纹频率 k 的值随 r_m 大小变化的情况, 因此直接对式(6)两边求导, 并利用式(5), 可以得到:

$$\frac{dk}{dr_m} = \frac{4\pi u B}{\lambda} \cdot \frac{H^2 + 2HR_e}{r_m^3} \left[\left(\frac{\cos\theta + 1}{\sin\theta} + \frac{\cos^2\theta}{\sin^3\theta} \right) (-\cos\alpha) - \sin\alpha \right] \quad (7)$$

由于 $\sin\alpha > 0, \cos\alpha > 0$, 则 $\frac{dk}{dr_m} < 0$, 所以在考虑地球曲率条件下条纹频率 k 的值仍随 r_m 单调递减.

同样选择一定斜距范围 $[r_{m,\min}, r_{m,\max}]$ 的干涉复图像数据, 则由条纹频率 k 的值随 r_m 单调递减的规律, 仍然得到 $r_{m,\min}$ 对应的条纹频率为 k_{\max} , $r_{m,\max}$ 对应的条纹频率为 k_{\min} . 再由式(7)得到

$$\begin{pmatrix} q(r_{m,\min}) & f(r_{m,\min}) \\ q(r_{m,\max}) & f(r_{m,\max}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{\max} \\ k_{\min} \end{pmatrix} \quad (8)$$

其中

$$q(r_m) = \frac{2\pi u}{\lambda} \cdot \frac{(H^2 + 2HR_e)^2 - r_m^4}{r_m^2(H + R_e)\sqrt{[(2R_e + H)^2 - r_m^2][r_m^2 - H^2]}} \quad (9a)$$

$$f(r_m) = -\frac{2\pi u}{\lambda} \cdot \frac{r_m^2 - H^2 - 2HR_e}{2r_m^2(H + R_e)} \quad (9b)$$

$f(r_m), q(r_m)$ 分别表示关于斜距 r_m 的两个函数. B_x, B_y 分别表示基线水平分量和垂直分量.

比较式(8)和式(3), 可以看到考虑曲率的基线参数计算公式比传统平地模型下的基线参数计算公式复杂. 由于考虑地球曲率的影响, 由式(8)计算得到的星载 InSAR 基线参数的精度会大大提高.

4 高精度星载 InSAR 基线估计新方法

由第三部分中考虑地球曲率的基线估计原理可知频率范围值 k_{\min} 和 k_{\max} 的求取是基线估计的关键所在, k_{\min} 和 k_{\max} 估计精度直接影响最终基线的估计精度. 本文首先引入半牛顿迭代法对复图像一定距离向范围内各像素点进行频率的估计, 然后采用线性拟合进一步抑制频率估计噪声, 从而获得条纹频率的精确估计. 将获得的精确条纹频率值代入式(8), 能够实现 InSAR 基线的精确估计.

4.1 半牛顿迭代法估计干涉条纹频率

以干涉复图像距离向第 i 个像素点为中心, 选取其 $2N + 1$ 大小的一维邻域干涉复数据 E_i , 并对数据幅度进行归一化, 得到邻域内像素点的值为 $y_{i,n}, n = -N, \dots, N, y_{i,n} \in E_i$. 首先对邻域内的各点进行快速傅里叶变换(FFT), 然后通过对频谱幅度峰值点附近进行插值处理, 求得频率粗估计值 $f_{i,0}$.

邻域内像素点值可由下式表示: $y_{i,n} = e^{j2\pi n T f_i + j\varphi}, n = -N, \dots, N$, 其中 T 是距离向的采样间隔. 由于 φ 是未知的, 所以引入半牛顿迭代法^[11]求取零点. 则估计频率的迭代公式为

$$f_{i,t+1} = f_{i,t} - \operatorname{Re} \left\{ \frac{H'_t(f_{i,t})}{H_t(f_{i,t})} \right\} \quad (10)$$

其中 $H(f) = \sum_{n=-N}^N y_{i,n} e^{-j2\pi n T f}$ (11)
 $H'_t(\cdot)$ 表示 $H(f)$ 对 f 求一次导数后的函数, $H''_t(\cdot)$ 表示 $H(f)$ 对 f 求二次导数后的函数, t 为迭代次数.

将粗估计时得到的 $f_{i,0}$ 作为迭代的初始值, 利用式(10), 依次迭代至频率值变化很小为止, 一般迭代 30 次左右, 此时可以得到精确的频率估计值 f_i . f_i 与式(6)中条纹频率值 k_i 之间的关系为

$$k_i = 2\pi \cdot f_i \quad (12)$$

4.2 线性拟合抑制条纹频率噪声

利用半牛顿迭代法得到在一定距离向范围内干涉

复图像的条纹频率值.由式(7)可知,理论上 k 的值应随着 r_m 取值的变大而单调减小,但是由于系统噪声的影响,半牛顿迭代法估计的频率值 k 总体上随着 r_m 取值的变大而减小,同时伴随有些微小的起伏波动.此处系统噪声主要来源于 InSAR 系统基线的时间空间相关损失^[12]和系统热噪声,在干涉图像上主要表现为加性噪声^[13].

为抑制噪声的影响,论文根据式(7)给出的频率随斜距的变化规律,提出采用线性拟合的方法对频率估计值进行拟合,求得最终精确度很高的频率范围值.将拟合后求得的 k_{\min} 和 k_{\max} 代入式(8)中,可以得到基线参数值 B_x, B_y .

4.3 基于干涉条纹频率的星载 InSAR 基线估计新方法

结合第三部分推导的基线和干涉条纹频率的精确关系式以及 4.1、4.2 中对干涉条纹频率精确估计的方法,论文所提出的星载 InSAR 基线估计新方法的流程图如图 3 所示,具体的实现步骤为:

(1) 频率粗估计:选取一定距离向范围的干涉复图像数据,并对每个像素点选择邻域,利用 FFT 及插值的方法粗略估计各像素点的频率值.

(2) 半牛顿迭代法精确估计干涉条纹频率:利用式(10)和(11)对步骤 1 中的粗估计值进行半牛顿迭代,直至频率变化很小为止.并将求得的精确频率值通过式(12)转换为所需要的条纹频率值.在实际实现中,通常选取几条距离线的数据叠加为一维数据以抑制噪声.

(3) 干涉条纹频率线性拟合:为进一步抑制噪声对估计精度的影响,再利用线性拟合的方法,对步骤(2)获得的条纹频率值进行线性拟合.

(4) 干涉基线计算:利用式(8)中基线和干涉条纹频率的关系,求得最终基线参数值.

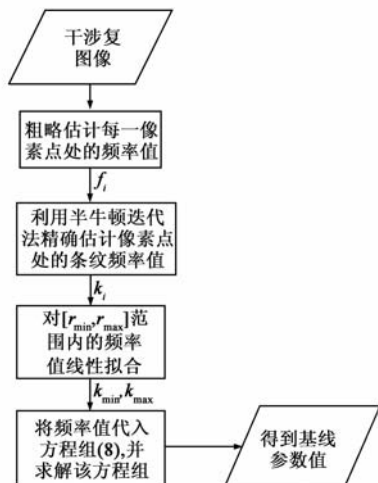


图3 基于干涉条纹频率的星载InSAR基线估计方法流程图

5 仿真分析及结果

利用收发分置星载 InSAR 系统进行数据仿真,此时 $u = 0.5$. 利用表 1 中给出的参数仿真星载 InSAR 回波数据,并通过 SAR 成像、图像配准和图像干涉获得干涉相位图如图 4 所示.由表 1 给出的参数,可以得到基线水平和垂直分量的理论值分别为 $B_x = 141.421\text{m}$, $B_y = 141.421\text{m}$.

在图 4 对应的干涉复图像中选取一定距离向范围的干涉复图像数据,其对应的干涉相位如图 4 中实线框内的部分,其中 $r_{m,\min}$ 为 690712.8 m, $r_{m,\max}$ 为 691695.8 m.采用文献[7]中给出的方法估计该图像区域的干涉条纹频率.直接对距离向 $[r_{m,\min}, r_{m,\max}]$ 内的干涉复图像进行傅里叶变换可得到干涉条纹的频谱图,如图 5 所示.根据带宽的定义,可以得到频率值范围 $k_{\min} = 0.05752427$ 和 $k_{\max} = 0.06327670$.将 k_{\min} 和 k_{\max} 代入文献[7]中给出的平地模型基线估计式(3),得到基线参数 $B_x = 7177.8\text{m}$, $B_y = -7705.7\text{m}$,误差为 7 km 左右,误差太大.

表 1 主要的星载 InSAR 参数

InSAR 参数	数值
卫星高度 H	514 km
信号波长 λ	0.031 m
下视角 θ	40°
基线长度 B	200 m
基线倾角 α	45°
距离向像素间隔	1.0 m
波束中心处斜距 R_0	691204.8 m

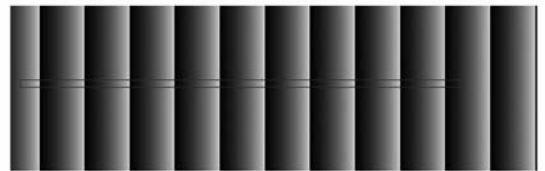


图4 干涉相位图

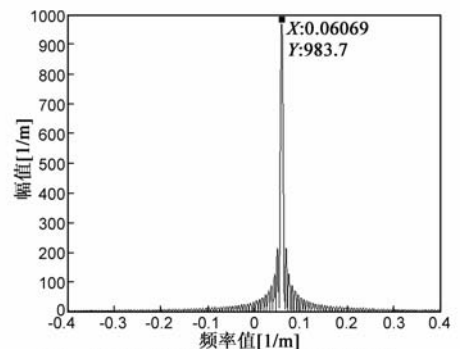


图5 选定距离向范围内干涉条纹频谱

采用本文提出瞬时频率估计方法进行条纹频率估计:首先采用半牛顿迭代法估计瞬时频率,可得到选取

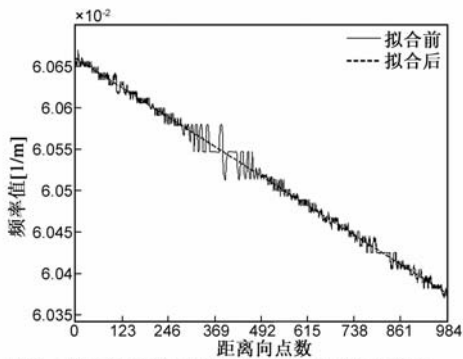


图6 半牛顿迭代后拟合前及拟合后的频率值

距离向范围内干涉条纹频率的精确估计值,此时 $k_{2\min} = 0.06037565$, $k_{2\max} = 0.06065093$, 频率随斜距的变化曲线如图 6 中的实线所示. 可以看出该曲线不光滑, 说明噪声对估计值的影响较大; 为了抑制噪声的影响, 对半牛顿迭代法得到的条纹频率值进行线性拟合, 拟合结果如图 6 虚线所示, 此时频率估计值 $k_{3\min} = 0.060376048$, $k_{3\max} = 0.060659565$.

为了说明考虑地球曲率比平地假设的精确程度, 以及线性拟合对条纹频率估计精度的提高程度, 分别将拟合前和拟合后的频率估计值代入平地假设下的公式(3)和考虑地球曲率下的基线估计公式(8), 得到的基线估计结果及其估计精度见表 2.

表 2 两种模型下以及拟合前后的基线分量比较

		水平分量 (m)	垂直分量 (m)	基线长度误差 (m)
平地模型	拟合前	133.698	128.807	-14.348
	拟合后	144.357	116.973	-14.200
考虑曲率 模型	拟合前	129.600	155.520	2.442
	拟合后	141.415	141.462	0.024

从表 2 可以看出, 本文引入半牛顿迭代法和线性拟合的方法能够大大提高条纹频率的估计精度, 从而提高基线的估计精度. 另外, 比较平地模型和考虑地球曲率模型下的基线估计精度可以知道, 本文推导的考虑地球曲率的基线估计公式更加精确.

6 结论

本文提出了一种新的基于干涉条纹频率的星载 InSAR 基线估计方法. 该方法考虑了星载 InSAR 系统中地球曲率的影响, 推导出了新的基线估计公式, 更符合实际中星载 InSAR 系统的实际几何模型, 提高了基线估计的准确性. 同时本论文摒弃了传统方法中直接利用干涉图像距离向的频谱图获得频率值范围的方式, 而是采用了半牛顿迭代法和线性拟合相结合的方法来精确估计一定距离向范围内干涉条纹的频率值范围, 弥补了传统基线估计方法中频率估计精度低的缺点, 大大改善了基线估计值的精确度. 因此, 本文所提出的新

方法可用于星载 InSAR 高精度地形高程测量.

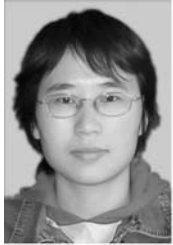
参考文献

- [1] Mark A Richards. A beginner's guide to interferometric SAR concepts and signal processing [J]. IEEE A&E System Magazine, 2007, 22(9): 5-29.
- [2] R Bamler, P Hartl. Synthetic aperture radar interferometry [J]. Inverse Problems, 1998, 14(4): R1-R54.
- [3] Li F K, Goldstein R M. Studies of multi-baseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(1): 88-97.
- [4] Ren Kun, Prinnet V, Shi Xiangquan, et al. Comparison of satellite baseline estimation methods for interferometry applications [A]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. Toulouse, France: IEEE, 2003. 3821-3823.
- [5] Small D, et al. Baseline modelling for ERS-1 SAR interferometry [A]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. Tokyo, Japan: IEEE, 1993. 1204-1206.
- [6] Hiroshi K, Masahiro T. Baseline estimation using ground points for Interferometric SAR [A]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. Singapore: IEEE, 1997. 242-244.
- [7] Kuldeep Singh, Nicolas Stussi, Kwong Leong, Lim Hock. Baseline estimation in interferometric SAR [A]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. Singapore: IEEE, 1997. 454-456.
- [8] 靳国旺, 徐青, 朱彩英, 等. 利用平地干涉相位进行 INSAR 初始基线估计 [J]. 测绘科学技术学报, 2006, 23(4): 278-283.
Jin G W, Xu Q, Zhu C Y, et al. Initial baseline estimation of InSAR based on the phases of flat earth [J]. Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping, 2006, 23(4): 278-283. (in Chinese)
- [9] 李新武, 郭华东, 等. 基于快速傅立叶变换的干涉 SAR 基线估计 [J]. 测绘学报, 2003, 32(1): 70-72.
Li X W, Guo H D, et al. Baseline estimation of interferometric SAR based on fast fourier transform [J]. Acta Geodaetica et Carto Graphica Sinica, 2003, 32(1): 70-72. (in Chinese)
- [10] 唐晓青, 向茂生, 吴一戎. 一种改进的基于干涉相位的基线估计方法 [J]. 电子与信息学报, 2008, 30(12): 2795-2799.
Tang Xiao-qing, Xiang Mao-sheng, Wu Yi-rong. An improved baseline estimation approach based on the interferometric phases [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(12): 2795-2799. (in Chinese)
- [11] Abatzoglou T. A fast maximum likelihood algorithm for frequency estimation of a sinusoid based on newton's method [J]. IEEE transactions on Acoustics Speech and Signal processing, 1985, 33(1): 77-89.

[12] 孟祥东,王彤,保铮.干涉合成孔径雷达的垂直基线对图像相干性的影响[J].电子学报,2008,36(6):1222-1226.
Meng Xiang-dong, Wang Tong, Bao Zheng. The effect of the perpendicular baseline on coherence for SAR Images in InSAR [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(6): 1222 - 1226. (in Chinese)

[13] 徐华平,周荫清,李春升.星载干涉 SAR 中的基线问题[J].电子学报,2003,31(3):437-439.
Xu Hua-ping, Zhou Yin-qing, Li Chun-sheng. The analysis of baseline in spaceborne interferometric SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(3): 437 - 439. (in Chinese)

作者简介



徐华平 女,1977年出生于陕西省渭南市。2003年获得北京航空航天大学信息与系统专业博士。现为北京航空航天大学信息与通信工程专业的副教授,主要研究方向:高分辨率雷达成像,星载干涉 SAR,分布式星载 SAR 等。
E-mail: xuhuaping@buaa.edu.cn



朱玲凤 女,1984年出生于湖南省邵阳市。现为北京航空航天大学信息与通信工程专业的硕士研究生,主要从事合成孔径雷达信号处理方向的研究。
E-mail: lingfengzhu@ee.buaa.edu.cn

电子学报

2011年第9期 Acta Electronica Sinica No.9 2011

(总第343期) (Monthly) (Series No.343)

主管单位 中国科学技术协会
主办单位 中国电子学会
编辑 《电子学报》编辑委员会
主编 李 衍 达
总编辑 刘 力
通信处 北京 1 6 5 信箱
(邮政编码 100036)
电 话 (010)68279116,68285082
传 真 (010)68173796

China Association for Science and Technology
Published by the Chinese Institute of Electronics, Beijing
Edited by Editorial Board of Acta Electronica Sinica
Chief Editor: LI Yan-da
Director: LIU Li
Add: Editorial Office of Acta Electronica Sinica
(P O Box 165, Beijing 100036, China)
Tel: 86-10-68279116, 68285082
Fax: 86-10-68173796

Home page: <http://www.ejournal.org.cn>; <http://dzxu.chinajournal.net.cn>

Email: new@ejournal.org.cn; wanghui@ejournal.org.cn

排版印刷 北京墨禹天成印刷有限公司
国内总发行 北京市报刊发行局

Printed by Moyutiancheng Co. Ltd., Beijing, China
Distributed by

国外总发行 中国国际图书贸易总公司
国内订购处 全国各邮电局

Domestic: Beijing Baokan Faxingju, China
Foreign: China International Book Trading Corporation
Subscription Office—All Local Post Offices in China

国内统一刊号: CN11-2087/TN

邮发代号(国内/国外): 2-891/M436

国内定价 ¥40.00