

利用多基线数据融合提高分布式卫星 InSAR 系统的干涉相位精度

张秋玲 王岩飞

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘要 分布式卫星干涉合成孔径雷达(InSAR)系统可以通过提供长基线来提高测高灵敏度,但长基线会给干涉相位展开带来困难。结合分布式卫星 InSAR 系统可以同时提供多个稳定基线的特点,该文提出利用多基线数据融合的方法来解决长基线给干涉相位展开带来的困难。文中采用了有效的数据融合方法——最大似然估计(ML)法,对多基线分布式卫星 InSAR 系统的干涉相位进行了估计。模拟结果表明,经过多基线数据融合的干涉相位展开精度要远远大于长基线干涉相位的直接展开精度。

关键词 分布式卫星, 干涉合成孔径雷达(InSAR), 多基线数据融合, 干涉相位

中图分类号: TN959.74

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)11-2011-04

Improving the Interferometric Phase Accuracy of Distributed Satellites InSAR System with Multibaseline Data Fusion

Zhang Qiu-ling Wang Yan-fei

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract Distributed satellites Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) can provide large baseline, by which the sensitivity to topography measure can be improved. But large baseline arises the difficulty in phase unwrapping procedures. Combined the characteristic of multibaseline of distributed satellites InSAR system, a method that utilizes the multibaseline data fusion is proposed to solve the problem of phase unwrapping brought by large baseline in this paper. Maximum likelihood (ML) method that is an effective two-baseline data fusion algorithm is adopted to estimate interferometric phase of distributed satellites InSAR system. The simulation results show that the phase unwrapping accuracy via multibaseline data fusion is higher than that of direct phase unwrapping of large baseline interferometric phase.

Key words Distributed satellites, Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), Multibaseline data fusion, Interferometric phase

1 引言

分布式卫星干涉合成孔径雷达(InSAR)是利用分布式卫星雷达实现干涉测量的一种新技术。分布式卫星 InSAR 可以同时获取测绘区域信息,克服干涉信号间的时间去相关性,而且可以提供长基线以提高测高灵敏度,利用分布式卫星 InSAR 可以获取全球范围内的高精度数字高程图(DEM)。分布式卫星 InSAR 系统的长基线使干涉测量的模糊高度减小,进而提高测高灵敏度,但长基线又给干涉相位展开带来困难,影响干涉测量精度。

利用多频段多基线数据融合提高干涉相位精度是近年来出现的一种新思想。文献[1]首先提出利用多频段数据融合提高相位展开精度,以后又相继出现了利用多基线数据融合提高相位展开精度的方法^[2-4]。分布式卫星InSAR系统可以同时提供多个(≥ 2)稳定基线,结合这一特点,本文提出利用多基线数据融合的方法来解决分布式卫星InSAR系统中长基线给干涉相位展开带来的困难。

本文首先从理论上分析利用分布式卫星 InSAR 系统多基线数据融合提高干涉相位精度的原理,然后论述有效的多基线数据融合方法——ML 相位估计法的具体实现过程,最后通过模拟仿真分析多基线数据融合对分布式卫星 InSAR 系统相位展开精度的影响。

2 利用分布式卫星 InSAR 系统多基线提高干涉相位精度的原理

以相对轨迹为圆的均匀分布的 3 颗卫星^[5]组成的InSAR 系统为例,系统的成像几何关系如图 1 所示。图 1 中 1, 2, 3 分别表示分布式卫星所在的位置, r_1, r_2, r_3 分别为 3 个卫星雷达的作用距离, P 为地面目标点。当轨道半径为 700m, 视角为 35° 时, 在 $T/6$ (基线的变化历程, 其中 T 为轨道周期) 时间段内, 不同卫星间形成的垂直于航迹的基线随卫星运行的变化历程如图 2 所示。由图 2 可知: (1) 3 颗分布式卫星可以提供 3 个不同长度的基线。为了提高测高灵敏度, 一般选择能提供最长基线的两颗卫星参与干涉。(2) 分布式卫星之间形成的基线是不稳定的。如果采取相位补偿方法对基

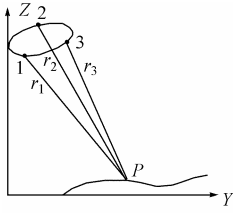


图1 分布式卫星 InSAR 系统的成像几何关系
Fig.1 Imaging geometry of distributed satellites InSAR system

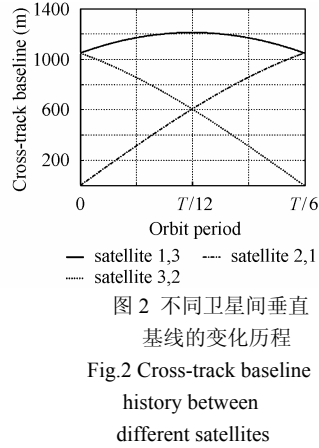


图2 不同卫星间垂直基线的变化历程
Fig.2 Cross-track baseline history between different satellites

线不稳定进行补偿,则3颗卫星构成的分布式卫星 InSAR 系统在短期内可以提供两个独立的稳定基线,这时,可以利用短基线提供的有用信息来提高长基线的相位展开精度,解决测高灵敏度与测高精度之间的矛盾。

短基线数据与长基线数据融合,可以增大干涉相位的非模糊区间、减小 InSAR 的盲角范围,从而提高干涉相位展开精度。

在干涉图中,当高度变化引起干涉相位的变化等于 2π 时,会产生高度模糊,此时对应的高度变化定义为模糊高度 h_{am} 。模糊高度可以表示为^[6]

$$h_{am} = \frac{\lambda r \sin \theta}{B_{yz} \cos(\theta - \alpha)} \quad (1)$$

其中 λ 为雷达波长, r 为雷达作用距离, B_{yz} 为垂直于航迹的基线, θ 为天线视角, α 为基线与水平面的夹角。

为了提高测高灵敏度,分布式卫星 InSAR 系统中的工作基线较长。根据式(1)可知,较长工作基线使模糊高度较小,从而使干涉条纹密集,给干涉相位展开带来困难。

当取卫星 1, 3 进行干涉测量时,根据图 2 可以推出卫星 3, 2 和卫星 2, 1 所提供的垂直于航迹的基线与卫星 1, 3 所提供的垂直于航迹的基线比值,如图 3 所示。用 p 表示卫星 2, 1 提供的基线与卫星 1, 3 提供的基线比值 B_{yz21}/B_{yz13} ,从图 3 中曲线可知,在基线变化过程中, p 的变化范围为 $0 \leq p \leq 1$ 。

假设 $p = 1/n$ (n 为自然数),由于分布式卫星之间的距离远远小于卫星的作用距离,则雷达 2, 1 图像的绝对干涉相位 ϕ_{a21} 和雷达 1, 3 图像的绝对干涉相位 ϕ_{a13} 之间的关系近

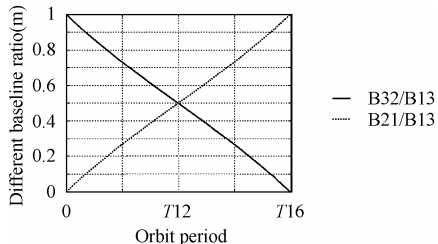


图3 不同卫星间垂直基线与最长垂直基线的比值
Fig.3 Across-track baseline ratio between different satellites 似为

$$\phi_{a21} = (1/n)\phi_{a13} \quad (2)$$

再结合绝对干涉相位 ϕ_a 与目标高度 h 之间的关系 $h = [h_{am}/(2\pi)]\phi_a$, 可以推出 $h_{am21} = nh_{am13}$, 即短基线的模糊高度大于长基线的模糊高度。如果将短基线与长基线的数据进行融合,就可以利用短基线提供的信息来增大模糊高度,加宽干涉条纹,进而提高相位展开精度。对于一般 $p = m/n$ (m, n 互为质数)的取值情况,可以得到同样结论^[2]。

另外,多基线数据融合还可以减小 InSAR 的盲角范围,提高相位展开精度。根据文献[6],要不出现几何失真,分布式卫星 InSAR 系统对地形坡度的限制为

$$\theta - \pi/2 < \gamma < \theta - \arctan(f_0 \Delta \theta / (2B_w)) \quad (3)$$

其中 γ 为地形坡度, f_0 为雷达载频, B_w 为雷达信号带宽, $\Delta \theta$ 为参与干涉的两个雷达的视角之差。结合式(1),式(3)可以改写为

$$\theta - \pi/2 < \gamma < \theta - \arctan(\rho_r \cdot \sin \theta / h_{am}) \quad (4)$$

其中 ρ_r 为斜距向分辨率, $\rho_r = c/(2B_w)$ 。

从式(4)可以看出,当模糊高度 h_{am} 增大时,干涉系统对最大地形坡度的限制降低,即盲角范围减小,所以对坡度较大的测绘区域,多基线数据融合可以提高相位展开精度。

3 多基线数据融合方法

多基线数据融合方法中,比较有效的方法是最小二乘(LS)法和最大似然估计(ML)法^[3],其中ML法同时利用了 SAR 图像的相位信息和幅度信息,相位估计精度很高,而且没有LS算法中相邻像素点的干涉相位差小于 π 的假设条件,所以本文采用ML算法来实现分布式卫星 InSAR 系统中的多基线数据融合。

图 2 中,不同卫星雷达图像相位差之间的关系近似为

$$\left. \begin{aligned} \phi_{23} &= (1-p)\phi_{13} = (1-p)\phi \\ \phi_{12} &= p\phi \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中 ϕ_{12} 表示雷达 1, 2 图像的干涉相位, ϕ_{13} 表示雷达 1, 3 图像的干涉相位, ϕ 表示雷达 1, 2, 3 数据融合后得到的干涉相位。

如果 3 个雷达图像对应于同一目标点的像素为

$$\mathbf{P}^{(w)} = [p_1^{(w)} \ p_2^{(w)} \ p_3^{(w)}] \quad (6)$$

其中 $p_u^{(w)}$ 表示不同雷达图像上同一目标点的像素值, u 表示不同雷达,这里 $u = 1, 2, 3$, w 表示多视数, $w = 1, 2, \dots, N_L$ 。则 $\mathbf{P}^{(w)}$ 相对于干涉相位 ϕ 的条件概率密度函数为^[2]

$$f(\mathbf{P}^{(1)}, \mathbf{P}^{(2)}, \dots, \mathbf{P}^{(N_L)} | \phi) = \prod_{w=1}^{N_L} \frac{1}{\pi^3 |\Gamma|} \exp(-\mathbf{P}^{(w)H} \Gamma^{-1} \mathbf{P}^{(w)}) \quad (7)$$

式中 H 表示共轭转置, Γ 是一个 hermitian 协方差矩阵, hermitian 矩阵经归一化后的对角元素为 1, 非对角元素为 $\exp\{j\phi x_{i,j}\} \rho_{i,j}$, 其中 $\rho_{i,j}$ 为对雷达 i, j 图像间的相关系数, $(i, j) = (1, 3), (1, 2), (2, 3)$, $x_{i,j}$ 为卫星 i, j 提供的基线相对于基线 B_{yz13} 的比值, $x_{i,j} = 1, 1-p, p$ 。

取式(7)的对数,得到对数似然函数,求对数似然函数的最大值,可以得到干涉相位 ϕ 的最大似然(ML)估计^[2]

$$\begin{aligned} \max_{\phi \in [-n\pi, n\pi]} & \left(|\rho_{12}| - |\rho_{23}| |\rho_{13}| \right) \operatorname{Re} \left[\exp(-j\phi(1-p)) \sum_{w=1}^{N_L} p_1^{*(w)} p_2^{(w)} \right] \\ & + \left(|\rho_{13}| - |\rho_{12}| |\rho_{23}| \right) \operatorname{Re} \left[\exp(-j\phi) \sum_{w=1}^{N_L} p_1^{*(w)} p_3^{(w)} \right] \\ & + \left(|\rho_{23}| - |\rho_{12}| |\rho_{13}| \right) \operatorname{Re} \left[\exp(-j\phi p) \sum_{w=1}^{N_L} p_2^{*(w)} p_3^{(w)} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $\rho_{i,j}$ 可以通过 SAR 图像估计出来

$$\hat{\rho}_{i,j} = \frac{\left| \sum_{w=1}^{N_L} p_i^{*(w)} p_j^{(w)} \right|}{\sqrt{\sum_{w=1}^{N_L} |p_i^{*(w)}|^2 \sum_{w=1}^{N_L} |p_j^{(w)}|^2}} \quad (9)$$

从上式可知,干涉相位影响相关系数估计。由于干涉相位中包含地形引起的相位信息,要准确估计相关系数,需要对此相位进行估计并补偿。而此相位估计比较繁杂,为此在实际相关系数估计中,常常利用干涉图像的幅度来估计相关系数

$$\hat{\rho}_{i,j} = \begin{cases} \sqrt{2\hat{\gamma}-1}, & \hat{\gamma} > 0.5 \\ 0, & \hat{\gamma} \leq 0.5 \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$\hat{\gamma} = \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M |p_i(l,m)|^2 |p_j(l,m)|^2}{\sqrt{\left(\sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M |p_i(l,m)|^4 \right) \left(\sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M |p_j(l,m)|^4 \right)}} \quad (11)$$

式中 L, M 为相关系数估计时用到的像素个数。

从式(8)可知,干涉相位的 ML 估计无需干涉处理,就可以直接从多个 SAR 图像中估计出干涉相位;ML 估计不仅利用了 SAR 图像的相位信息,而且利用了 SAR 图像的幅度信息,因此相位估计精度很高(以下模拟结果可以证明);相位估计中用到的加权因子——相关系数是地形坡度和视角的函数,所以 ML 相位估计是一种自适应相位估计。

单基线 ML 相位估计区间为 $[-\pi, \pi]$, 而多基线 ML 相位估计可以将干涉相位的非模糊区间展宽到 $[-n\pi, n\pi]$ ^[2]。原理上只要 n 足够大,多基线 ML 相位估计就可以实现干涉相位展开,但是当 n 较大时,ML 相位估计会出现一些大的相位噪声^[4],影响干涉相位精度,所以取 n 时,要折中考虑这两方面的因素。

4 模拟仿真与性能分析

下面对分布式卫星 InSAR 系统中的多基线数据进行融合,分析其性能。选择非对称的高斯山坡为模拟测绘区域,山坡的 DEM 如图 4 所示,其中左山坡坡度小于右山坡坡度。

假设卫星轨道高度为 500km,雷达信号的中心频率为 9.6GHz,信号带宽为 55MHz,轨道半径为 700m,视角为 35°,天线尺寸为 0.8m×5m,多视数为 8。根据测绘区域的 DEM 和图 1 的几何关系,取 $p=0.2$,产生 3 个包含相位噪声的 SAR 图像^[2],对这 3 个 SAR 图像进行配准、干涉处理,可

以得到图 5 所示(去除了平地效应)的干涉图。由于 $h_{am32} > h_{am13}$, 所以图 5(b)的干涉条纹比图 5(a)的干涉条纹宽。

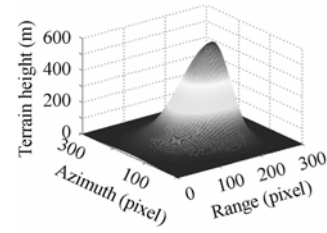


图 4 模拟地形的 DEM

Fig.4 DEM of simulated terrain

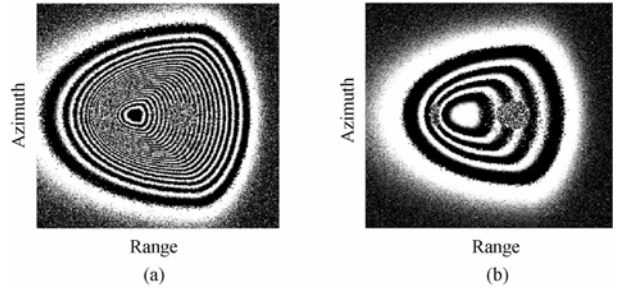


图 5 干涉相位图

(a) 图像 1, 3 的干涉结果 (b) 图像 2, 3 的干涉结果

Fig.5 Interferogram

(a) Interferometric result of image 1,3

(b) Interferometric result of image 2,3

图 5 中左右两边部分区域被噪声淹没。这是由于模拟地形坡度较大, SAR 图像出现几何失真(左边出现叠掩现象,右边出现阴影现象)引起的。

根据式(8)和式(10)对模拟数据进行 ML 相位估计,其中相关系数估计时取 $L = M = 10$, ML 相位估计结果如图 6 所示。图 6 中曲线为模拟数据中一条方位线的相位估计,其中细实线为图像 1, 3 的干涉结果,粗实线为理论上图 5(a)的相位展开结果,虚线为 ML 相位估计结果。从图 6 中可以看出,ML 相位估计展宽了相位的非模糊区间。由于测绘区域地形较高,ML 相位估计后的相位还是折叠的。

分布式卫星 InSAR 系统基线长,地形变化较大的测绘区域的干涉条纹密集且噪声大,为此选择适用于条纹密集、且具有降噪功能的干涉相位展开法——区域增长法^[7]对 ML 相位估计后的折叠相位进行展开。

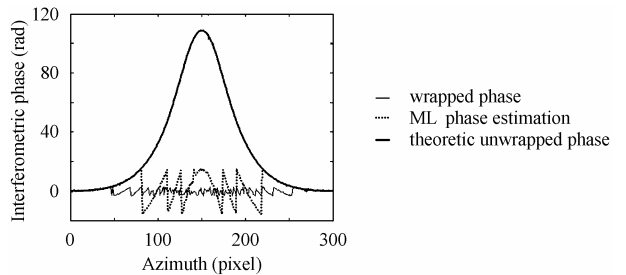


图 6 双基线 ML 相位估计

Fig.6 Bi-baseline ML phase estimation

选择测绘区域左上角的一个像素作为相位展开种子,可

信度阈值的初始值为 $\pi/4$ ，步长为 $\pi/2$ ，对 ML 相位估计结果进行相位展开，相位展开误差如图 7 所示。为了比较，图 8 示出了图 5(a)经区域增长法直接展开的相位误差。图 7 和图 8 中不同灰度等级表示不同相位误差大小，灰度级越大，相位误差越大，图中较亮的区域是误差较大的叠掩区和阴影区。对比图 7 和图 8 可以看出，在盲角区域(即叠掩区域)附近，数据融合后的相位展开误差明显小于干涉图的直接相位展开误差。

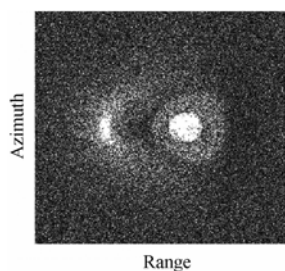


图 7 ML 相位估计后的区域增长展开误差
Fig.7 Phase error of region growing algorithm after ML phase estimation

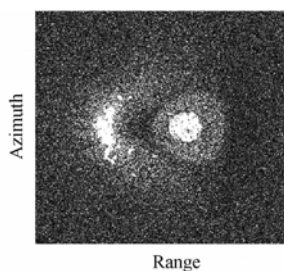


图 8 干涉相位的直接区域增长展开误差
Fig.8 Phase error of region growing algorithm for interferometric phase

由于 ML 相位估计展宽了干涉相位的非模糊区间，即使在无几何失真区域，数据融合后的相位展开误差也小于直接相位展开误差。将图 4 中的模拟数据乘上一个高程比例因子 0.75，作为新的模拟数据，新模拟数据中不存在几何失真区域。定义原始数据的高程比例因子 $scale=1$ ，那么新模拟数据的高程比例因子为 $scale=0.75$ 。不同模拟数据的相位展开误差如表 1 所示。

表 1 不同地形坡度模拟数据的相位展开误差
Tab.1 Unwrapping phase error for different terrain slope

高程因子 scale	相位展开误差(rad)	
	多基线数据融合	直接相位展开
1	0.9356	1.6737
0.75	0.3168	0.3977

从表 1 中结果可以看出，无论对于几何失真区域还是无几何失真区域，多基线数据融合后的相位展开精度都明显大于单基线干涉图的直接相位展开精度。此结论同样适用于 p 的其它取值，所以分布式卫星 InSAR 系统可以采用多基线

数据融合来补偿长基线对干涉相位精度产生的影响。

5 结束语

本文结合分布式卫星 InSAR 系统的多基线特点，提出利用多基线数据融合的方法来解决分布式卫星 InSAR 系统中长基线给干涉相位展开带来的困难。通过理论分析和模拟仿真证明了：多基线数据融合可以展宽分布式卫星 InSAR 系统干涉相位的非模糊区间，减小盲角范围，从而补偿了长基线对干涉相位展开精度的影响。

参考文献

- [1] Madsen S N, Zebker H A. Automated Absolute Phase Retrieval in Across-track Interferometry. IGARSS'92, Houston, TX, May 1992: 1582-1584.
- [2] Lombardini F. Absolute Phase Retrieval in a Three-element Synthetic Aperture Radar Interferometer. Proc.1996 CIE International Conference of Radar, Beijing, China, 8th-10th October 1996: 309-312.
- [3] Ghiglia D C, Wahl D E. Interferometric Synthetic Aperture Radar Terrain Elevation Mapping from Multiple Observations. IEEE Digital Signal Processing Workshop, 1994: 33-36.
- [4] Corsini G, Diani M, Lombardini F, Pinelli G. Simulated analysis and optimization of a three-antenna airborne InSAR system for topographic mapping. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2518-2529.
- [5] 林来兴. 微小卫星分布式飞行组成虚拟卫星研究. 微小卫星分布式飞行及应用论文集. 北京: 国家高技术航天领域专家委员会微小卫星技术组, 2000: 1-35.
- [6] Massonnet D. Capabilities and limitations of the interferometric cartwheel. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2001, 39(3): 506-520.
- [7] Xu W, Cumming I. A region-growing algorithm for InSAR phase unwrapping. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1999, 37(1): 124-134.

张秋玲: 女, 1970 年生, 博士生, 研究方向为干涉合成孔径雷达系统设计和信号处理。

王岩飞: 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波成像雷达系统及其理论、数字信号处理等。