基于连接点的机载双天线 InSAR 系统相位偏置估计算法

李银伟，夏慧婷，卢护林，王海涛
（上海无线电设备研究所，上海 201109）

摘　要：针对在茂密森林或沙漠地区部署地面控制点（GCP）对其进行测量非常困难的问题，提出了一种基于连接点的机载双天线 InSAR 系统相位偏置估计新算法。基于 InSAR 原理建立地面高程反演的几何表达式，并根据重叠区域里的连接点高程在两次干涉测高过程中不变的特性建立相位偏置间的线性关系，在用最小二乘法求解相位偏置时，通过对不同的连接点进行加权，使估计出的相位偏置更加准确。对 X 波段机载双天线 InSAR 系统获得的实际数据进行处理，结果表明：与传统的算法相比，该算法无需 GCP，具有更低的成本和更高的效率，且产生的数字高程模型（DEM）具有相似的精度。

关键词：机载双天线；InSAR 系统；相位偏置估计；地面控制点；连接点；最小二乘法
中图分类号：P 237　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.06.018

A Phase Offset Estimation Method Based on Tie Points for Airborne Dual-Antenna InSAR System

LI Yinwei, XIA Huiting, LU Hulin, WANG Haitao
(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: In certain regions of dense forest or desert, deploying man-made ground control points (GCPs) and/or surveying them will be very troublesome. This paper proposes a novel method based on tie points to estimate the absolute phase offset for airborne dual-antenna interferometric synthetic aperture radar (InSAR) system. Firstly, based on the principle of InSAR, the geometric expression of the height retrieval for ground points is established. Secondly, the linear relationship between phase offsets is established according to the invariant height of tie points in the overlapping area during two times of different interferometric data acquisition. Finally, different tie points are weighted when solving the phase offset equations by the least square method, making the estimation of the phase offset more accurate. The real data obtained by the X-band airborne dual-antenna InSAR system are processed. The results show that compared with traditional methods based on GCPs, this method not only has low cost and high efficiency without GCPs, but also obtains similar accurate DEM.

Keywords: airborne dual-antenna; InSAR system; phase offset estimation; ground control point; tie points; least square method

0　引言

InSAR 是一种重要的遥感技术，能获取高分辨率的二维图像及高精度的地面高程信息。InSAR 可将绝对相位信息转换为高度数据[1-4]，目前已成功应用于全球数字高程模型（DEM）的反演。在 InSAR信号处理过程中，首先对配准后的两幅单视复图像进行共轭相乘得到缠绕相位，然后利用相位解缠算法[5-6]消除 2π 整数倍的相位模糊来获取解缠后的相位，解缠后的相位仍不是绝对相位，不能直接用于反演 DEM。因此，在相位解缠后，需要估计解缠后相位和绝对相位间的差异，即相位偏置。在忽略系统误差的情况下，相位偏置是一个恒定值[7]。

收稿日期：2018-09-18；**修回日期**：2018-10-11
基金项目：国家自然科学基金青年科学基金（41601508）；上海市自然科学基金（15ZR1439500，16ZR1434900，17ZR1428700）
作者简介：李银伟（1985—），男，博士，高级工程师，主要研究方向为干涉 SAR 系统设计及信号处理、太赫兹视频 SAR 成像等。

传统的相位偏置估计方法通常利用场景中的自然或人造地面控制点(GCP)来估计相位偏置。利用 GCP 的三维坐标，可获得精确的相位偏置估计值，这使重建高精度 DEM 成为可能。然而，在茂密森林或沙漠的一些地区，不易获得合适的天然 GCP，且难以布置人造 GCP。基于频谱分集[8]和最大似然估计[9]可用于没有 GCP 场景下的相位偏置估计，但精度不高且耗时较多。

本文研究分析了基于连接点的相位偏置估计方法。连接点是指相邻 SAR 影像中具有同一地理位置特征的点，也可称为同名点。在两次干涉测高过程中，连接点的高程值可认为不变。首先，基于连接点高度不变的特征建立双天线 InSAR 两次采集数据中相位偏置间的线性关系；然后相位偏置的估计问题可转化为求解由众多连接点建立的超定线性方程组问题；最后通过处理 X 波段机载双天线 InSAR 实际数据可知，与传统的基于 GCP 的相位偏置估计算法相比，新提出的基于连接点的相位偏置估计方法具有相似的性能。

1　InSAR 高程反演

机载双天线 InSAR 系统的几何模型如图 1 所示。图中：H 为主天线 A_1 相位中心的高度；h 为点目标 P 的高度；r_0 为主天线 A_1 和点 P 间的斜距；B 和 α 分别为基线长度和基线倾角；θ 为下视角。

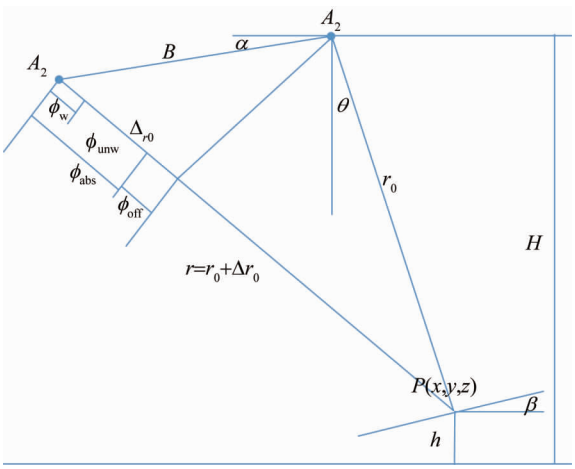


图 1　InSAR 系统几何模型

Fig. 1　Geometric model of InSAR system

以天线 A_1 为参考，得到以下表达式：

$$\phi_{\mathrm{abs}} = \phi_{\mathrm{unw}} + \phi_{\mathrm{off}} \tag{1}$$

$$r - r_0 = \Delta r_0 = \frac{\lambda}{4m\pi}\phi_{\mathrm{abs}} \tag{2}$$

$$r = \sqrt{r_0^2 + B^2 - 2r_0 \cdot B \cdot \cos(\pi/2 - \alpha + \theta)} = \sqrt{r_0^2 + B^2 - 2r_0 \cdot B \cdot \sin(\alpha - \theta)} \tag{3}$$

$$h = H - r_0 \cos\theta \tag{4}$$

式中：ϕ_{unw} 为解缠后相位；ϕ_{off} 为相位偏置；ϕ_{abs} 为绝对相位；m 为与系统运行模式相关的常数变量，如果是标准模式，则 $m = 0.5$，如果是乒乓模式，则 $m = 1.0$。

根据式(1)～(3)，式(4)可表达为

$$h = H - \sqrt{r_0^2 + B^2 - 2r_0 \cdot B \cdot \sin(\alpha - \theta)}\cos\theta + \frac{\lambda}{4m\pi}\cos\theta \cdot \phi_{\mathrm{unw}} + \frac{\lambda}{4m\pi}\cos\theta \cdot \phi_{\mathrm{off}} \tag{5}$$

2　算法

算法的数据采集模型如图 2 所示。对感兴趣的公共区域，可用 InSAR 在飞行方向的同向、反向甚至跨越飞行方向上分别获取 InSAR 回波数据。基于式(5)，针对 2 次数据采集进行成像和干涉处理获得未缠绕干涉相位后，图 2 中重叠区域中的点 P 高度可分别表示为

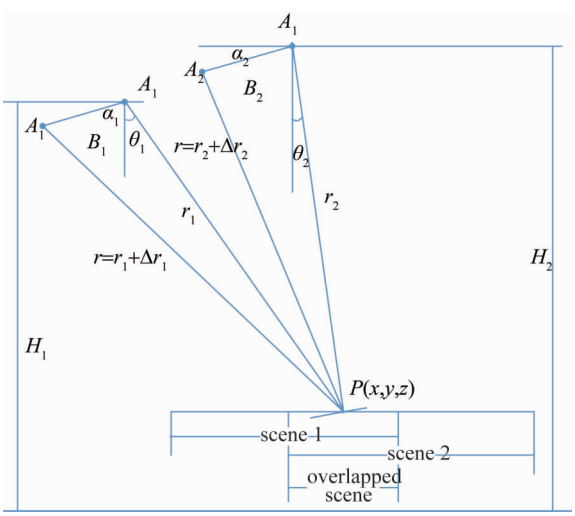


图 2　算法的数据采集模型

Fig. 2　Data acquisition mode of proposed method

$$\begin{aligned} h &= H_1 - \sqrt{r_1^2 + B_1^2 - 2r_1 \cdot B_1 \cdot \sin(\alpha_1 - \theta_1)}\cos\theta_1 + \frac{\lambda}{4m\pi}\cos\theta_1 \cdot \phi_{\mathrm{unw1}} + \frac{\lambda}{4m\pi}\cos\theta_1 \cdot \phi_{\mathrm{off1}} \\ &= H_2 - \sqrt{r_2^2 + B_2^2 - 2r_2 \cdot B_2 \cdot \sin(\alpha_2 - \theta_2)}\cos\theta_2 + \frac{\lambda}{4m\pi}\cos\theta_2 \cdot \phi_{\mathrm{unw2}} + \frac{\lambda}{4m\pi}\cos\theta_2 \cdot \phi_{\mathrm{off2}} \end{aligned} \tag{6}$$

假设

$$\Delta R_i = H_i - \sqrt{r_i^2 + B_i^2 - 2r_i \cdot B_i \cdot \sin(\alpha_i - \theta_i)}\cos\theta_i + \frac{\lambda}{4m\pi}\cos\theta_i \cdot \phi_{\mathrm{unw}i}, i = 1,2 \tag{7}$$

将式(6)重写成

$$\Delta R_1 + \frac{\lambda}{4m\pi}\cos\theta_1 \cdot \phi_{\mathrm{off1}} = \Delta R_2 + \frac{\lambda}{4m\pi}\cos\theta_2 \cdot \phi_{\mathrm{off2}} \tag{8}$$

$$\phi_{\mathrm{off1}} = \frac{\cos\theta_2}{\cos\theta_1} \cdot \phi_{\mathrm{off2}} + \frac{4m\pi}{\lambda}\frac{(\Delta R_2 - \Delta R_1)}{\cos\theta_1} \tag{9}$$

对于确定高度 h 的点 P，$\frac{4m\pi}{\lambda}\frac{(\Delta R_2 - \Delta R_1)}{\cos\theta_1}$ 和 $\frac{\cos\theta_2}{\cos\theta_1}$ 可认为是已知的常数值。因此，相位偏置 ϕ_{off1} 是相位偏置 ϕ_{off2} 的线性函数。2 次数据采集的相位偏置取决于解缠后的相位和系统参数，如下视角、斜距、天线相位中心的参考高度、基线长度和基线倾角。

若点 $P(x,y,z)$ 的真实高度已知，则相位偏置 ϕ_{off1} 和 ϕ_{off2} 可通过式(5)计算。但点 P 的真实高度未知，需要通过上述线性函数来估计 2 次采集的相位偏置 ϕ_{off1} 和 ϕ_{off2}。

考虑重叠区域中如点 P 一样的 N 个连接点，可利用 2 个相位偏置间的关系获得 N 个如式(9)的线性方程组。那么，估计相位偏置的问题便转化为求解 N 个如式(9)的方程组解的问题。使用矢量符号重写式(9)，有

$$\boldsymbol{L\Phi} = \boldsymbol{B} \tag{10}$$

其中

$$\boldsymbol{L} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{\cos\theta_{2,1}}{\cos\theta_{1,1}} \\ 1 & -\frac{\cos\theta_{2,2}}{\cos\theta_{1,2}} \\ \vdots & \vdots \\ 1 & -\frac{\cos\theta_{2,N}}{\cos\theta_{1,N}} \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} \left(\frac{4m\pi}{\lambda}\frac{(\Delta R_2 - \Delta R_1)}{\cos\theta_1}\right)_1 \\ \left(\frac{4m\pi}{\lambda}\frac{(\Delta R_2 - \Delta R_1)}{\cos\theta_1}\right)_2 \\ \vdots \\ \left(\frac{4m\pi}{\lambda}\frac{(\Delta R_2 - \Delta R_1)}{\cos\theta_1}\right)_N \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$\boldsymbol{\Phi} = \begin{bmatrix} \phi_{\mathrm{off1}} \\ \phi_{\mathrm{off2}} \end{bmatrix} \tag{13}$$

在大多数情况下，该方程组是超定的，因为重叠区域中很可能存在 2 个以上的连接点。在方程组超定的情况下，可以获得最小二乘解，有

$$\boldsymbol{\Phi} = (\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{L})^{-1}\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B} \tag{14}$$

式(14)不能区分高相干连接点和低相干连接点间的差异。为实现此目的，引入加权最小二乘解，有

$$\boldsymbol{\Phi} = (\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{WL})^{-1}\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{WB} \tag{15}$$

式中：$\boldsymbol{W}$ 为 $N \times N$ 权重矩阵，在噪声不相关的情况下，其形式[10]为

$$\boldsymbol{W} = \mathrm{diag}\left\{\frac{1}{\sigma_1^2}, \frac{1}{\sigma_2^2}, \cdots, \frac{1}{\sigma_N^2}\right\} \tag{16}$$

式中：σ_N 为在连接点 N 处干涉相位误差的标准差。可从干涉相干性中得到合理的 σ_N 值[11]，有

$$\sigma = \sqrt{\frac{1 - |\gamma|^2}{2M|\gamma|^2}} \tag{17}$$

$$|\gamma| = |\gamma_1| \cdot |\gamma_2| \tag{18}$$

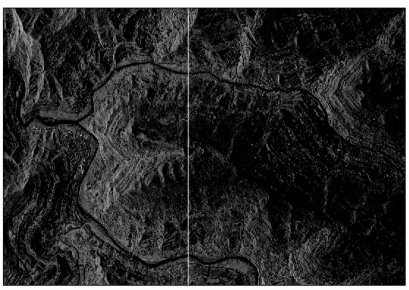
式中：M 为多视数；γ_1，γ_2 分别为 2 次 InSAR 数据采集的干涉相干性，这意味着计算干涉相位误差需要用到 2 次数据采集的相干值，增加了高相干性连接点在估计相位偏置过程中的权重，提高了相位偏置估计精度。另外，还可定义一个相干阈值，在低于该阈值时，将 $1/\sigma_N^2$ 设置为 0。该相干阈值可基于场景相干性的整体情况来选择，如把整幅图像的平均相干系数作为相干阈值。

3 试验结果

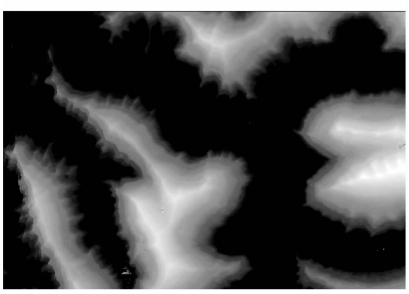
为了验证算法的有效性，对 X 波段机载双天线 InSAR 系统获取的实际回波数据进行处理。该系统由中国科学院电子学研究所所研发，工作在乒乓模式下。在回波数据聚焦成像中，采用具有自动配准功能的扩展波数域成像算法进行处理[12]，载机平台的运动误差采用基于 IMU/DGPS 测量数据的运动补偿方法进行补偿。

试验区位于四川省绵阳市郊区，地形为起伏的山地。在具有重叠区域的 2 个测试区域内分别布置了 8 个和 6 个 GCP。通过传统的基于 GCP 的相位偏置估计算法可得到 2 次干涉测高的精确相位偏置估计值，进而获得绝对相位及测试区域的 DEM，并将 DEM 当做测试区域的真实高程。为了评估所提算法的性能，考虑 0.8 的相干阈值，在重叠区域中随机分布的 135 个点满足阈值，用于建立线性方程组，并用所提算法估计相位偏置值。2 个测试区域的 SAR 图像及估计的相位偏置值反演的 DEM 如图 3 所示。

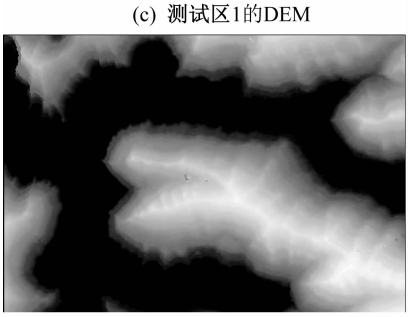
(a) 测试区1的SAR图像



(b) 测试区2的SAR图像



(c) 测试区1的DEM



(d) 测试区2的DEM

图 3　X 波段数据处理结果

Fig. 3　Processing results of X-band data

为定量评估 DEM 反演的精度，借用均方误差(e_{AME})和均方根误差(e_{RMSE})的定义式

$$e_{\mathrm{AME}} = \frac{1}{KL}\sum_{i=1}^{K}\sum_{j=1}^{L}\left|H(x_i,y_j)-H_{\mathrm{ref}}(x_i,y_j)\right| \tag{19}$$

$$e_{\mathrm{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{KL}\sum_{i=1}^{K}\sum_{j=1}^{L}\left|H(x_i,y_j)-H_{\mathrm{ref}}(x_i,y_j)\right|^2} \tag{20}$$

2 块测试区域的统计结果见表 1。可知，2 块测试区域的 DEM 误差都非常小。结果表明：本文所提算法与传统的基于 GCP 的相位偏置估计算法具有相似的性能，都能准确估计相位偏置。

表 1　两种相位偏置估计算法的 DEM 误差

Tab. 1　DEM difference between two phase offset estimation methods

数据	DEM 误差(基于 GCP 方法估计后反演的 DEM 减去本文所提方法估计后反演的 DEM)	
	测试区 1	测试区 2
e_{AME}/m	0.189 0	0.192 5
e_{RMSE}/m	0.157 7	0.167 4

4　结束语

本文提出了一种基于连接点的相位偏置估计新算法。由于连接点高度唯一，因此相位偏置的估计问题可转化为利用重叠区域中的连接点来求解线性方程组的问题。对实际机载双天线 InSAR 数据处理的结果表明：使用本文所提算法估计相位偏置生成的 DEM 与通过传统的基于 GCP 的相位偏置估计算法生成的 DEM 具有非常相似的精度。由于不需要 GCP，本文所提算法具有更低的成本和更高的效率，且能自动估计相位偏置。

参考文献

[1] ROSEN P A, HENSLEY S, JOUGHIN I R, et al. Synthetic aperture radar interferometry[J]. Proceedings of IEEE, 2000, 88(3): 333-382.

[2] BAMLER R, HARTL P. Synthetic aperture radar interferometry[J]. Inverse Problem, 1998, 14(4): 1-54.

[3] 陈筠力，李威. 国外 SAR 卫星最新进展与趋势展望[J]. 上海航天，2016，33(6)：1-19.

[4] 许丽颖，王海涛. 基于双星编队 SAR 三轨法差分干涉技术的基线设计[J]. 上海航天，2017，34(3)：60-65.

[5] GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A, WERNER C L. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping[J]. Radio Sci, 1988, 23(4): 713-720.

[6] PRITT M D, SHIPMAN J S. Least-squares two-dimensional phase unwrapping using FFT's[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(4): 706-708.

[7] MURA J C, MURIEL P, RAFAEL R, et al. A phase-offset estimation method for InSAR DEM gen-

eration based on phase-offset functions[J]. Remote Sensing, 2012, 3(4): 745-761.

[8] MADSEN S N, ZEBKER H A, MARTIN J. Topographic mapping using radar interferometry: processing techniques[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1993,31(1): 246-256.

[9] EINEDER M, ADAM N. A maximum likelihood estimator to simultaneously unwrap, geocode and fuse SAR interferograms from different viewing geometries into one digital elevation model[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(1): 24-36.

[10] SEN A, SRIVASTAVA M. Regression analysis: theory, methods, and applications[M]. New York: Springer Verlag, 1990, 55-58.

[11] RODRIGUEZ E, MARTIN J M. Theory and design of interferometric synthetic aperture radars[J]. IEE Proceedings-F, 1992, 139(2): 147-159.

[12] LI Y W, XIANG M S, MAO Y. F. Auto-registration imaing algorithm based on extended wavenumber domain for airborne dual-antenna InSAR[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2012, 34(6): 1630-1636.

(本文编辑:姚麒伟)

中国首届国际合成孔径雷达学术研讨会在上海成功举办

2018 年 10 月 10—12 日,IEEE 中国首届国际合成孔径雷达国际论坛(2018 China International SAR Symposium,CISS2018)在上海成功举办。本次论坛以“合成孔径雷达系统研究与成像技术”为主题,由上海航天卫星工程研究所主办,IEEE、IEEEGRSS、IEEEGRSS 上海分会、复旦大学、《上海航天》期刊协办。

随着遥感技术的不断发展,合成孔径雷达因全天时、全天候的优势特点备受关注,此次中国国际合成孔径雷达学术研讨会为第一个在中国举办的 IEEE 级别合成孔径雷达领域国际会议,为 SAR 领域研究人员搭建了全球 SAR 技术交流平台。

论坛设置了大会主报告、优秀论文宣讲、海报展览、参展商宣传推介等多个环节。来自国内外 SAR 领域的知名专家学者、技术委员会成员、投稿作者等共计 120 人出席了此次论坛。CISS2018 主席王辉研究员向各位参会者致欢迎辞。她指出在 2017 年的 IEEE IGASS 会议投稿中,来自中国的文章居一半以上,体现出目前更多的国内 SAR 领域学者渴望走出去与国外的 SAR 领域技术人员交流,CISS2018 的成功申办正是提供了一个供国内外 SAR 领域专业技术人员进一步沟通交流的平台。

本次论坛特邀代尔夫特大学 Peter Hoogeboom 教授、GRSL 主编 Alejandro C. Frery 教授、FHR Joachim Ender 教授、华沙大学 Piotr Samczynski 教授、北京航空航天大学陈杰教授、西安电子科技大学邢孟道教授、复旦大学徐丰教授、北京理工大学曾涛教授、上海航天卫星工程研究所王辉研究员等 9 位国内外 SAR 领域的专家教授作主报告。其中,邢孟道教授针对 GEO-SAR 成像和动目标检测方法进行了阐述;Peter Hoogeboom 教授介绍了自己团队的研究方向,以及在卫星 SAR 系统小型化研究的进展;Ender 教授详细介绍了压缩传感在雷达/SAR 上的应用实现。

本次会议通过优秀论文分享、现场提问等环节,促进了专家学者与各科研团队的沟通交流。会议还设立了论文成果海报展和 SAR 系统与相关组件展览,全面展示了 SAR 领域的发展硕果与未来趋势。在本次会议上,国外专家教授对我国的 SAR 相关技术发展水平表示认可,并与国内企业提出后续持续交流与相关项目的合作意向。

首届 IEEE CISS2018 的成功举办,进一步提升了我国 SAR 研究及其相关专业在国际上的影响力,为国内外 SAR 领域研究人员搭建了思想碰撞的平台,为今后的科研思路提供了新方向。本次论坛达到了预期目的和效果,得到了参会学者的高度评价和普遍认可。