



武汉大学学报(信息科学版)

*Geomatics and Information Science of Wuhan University*

ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目： 基于局部相干法的干涉合成孔径声纳复图像配准  
作者： 钟何平, 李涵, 田振, 黄攀, 唐劲松  
DOI: 10.13203/j.whugis20220762  
收稿日期: 2023-09-15  
网络首发日期: 2023-12-08  
引用格式: 钟何平, 李涵, 田振, 黄攀, 唐劲松. 基于局部相干法的干涉合成孔径声纳复图像配准[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).  
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20220762>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中,稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定,且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件,可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定;学术研究成果具有创新性、科学性和先进性,符合编辑部对刊文的录用要求,不存在学术不端行为及其他侵权行为;稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准,正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性,录用定稿一经发布,不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容,只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约,在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版,以单篇或整期出版形式,在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z),所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

Doi: 10.13203/j.whugis20220762

引用格式：

钟何平, 李涵, 田振, 等. 基于局部相干法的干涉合成孔径声纳复图像配准[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, Doi:10.13203/j.whugis20220762. (ZHONG Heping, LI Han, TIAN Zhen, et al. Complex Image Registration for Interferometric Synthetic Aperture Sonar based on Local Coherence Method[J] *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, Doi:10.13203/j.whugis20220762.)

## 基于局部相干法的干涉合成孔径声纳复图像配准

钟何平<sup>1</sup> 李涵<sup>1</sup> 田振<sup>1</sup> 黄攀<sup>\*2</sup> 唐劲松<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海军工程大学海军水声技术研究室, 湖北 武汉, 430033

<sup>2</sup> 潍坊学院数学与信息科学学院, 山东 潍坊, 261061

**摘要:** 复图像配准是干涉合成孔径声纳信号处理中一个非常重要的处理步骤, 直接影响到提取的干涉相位质量, 关系到最终所重建的数字高程模型精度。为提升获取的缠绕相位质量, 在充分分析干涉合成孔径声纳成像特点的基础上, 提出了一种基于局部相干法的干涉合成孔径声纳缠绕相位获取方法。首先分析局部数据块内相位点距离差的变化特点, 在此基础上论证了采用中心相位点距离差代替局部相邻相位点距离差的可行性, 进一步导出了采用局部相干法提取缠绕相位的方法。仿真数据和实测数据试验结果表明: 所提方法提取的缠绕相位质量显著优于经典复图像配准方法, 残差点数量急剧减少, 并且可有效克服传统复图像配准方法中全局偏移量拟合所带来的误差传播, 从而验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 干涉合成孔径声纳; 缠绕相位; 相干法; 配准; 残差点

## Complex Image Registration for Interferometric Synthetic Aperture Sonar based on Local Coherence Method

ZHONG Heping<sup>1</sup> LI Han<sup>1</sup> TIAN Zhen<sup>1</sup> HUANG Pan<sup>\*2</sup> TANG Jinsong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Naval Institute of Underwater Acoustic Technology, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

<sup>2</sup> School of Mathematics and Information Sciences, Weifang University, Weifang 261061, China

**Abstract:** Complex image registration is a very important step during interferometric synthetic aperture sonar signal processing, and its performance is directly related to the accuracy of the final reconstructed digital elevation model. In order to improve the quality of the wrapped phase, a wrapped phase extraction method for interferometric synthetic aperture sonar based on local coherence method is proposed on the basis of fully analyzing the imaging characteristics of the interferometric synthetic aperture sonar. Firstly, the variation characteristics of range difference in local phase data block are analyzed. According to the analysis, the feasibility of using the central phase point range difference to replace the local adjacent phase point range difference is proposed. Further, the method of extracting wrapped phase by coherent method is derived. The experimental results performed on simulated data and real data show that the quality of the extracted wrapped phase by the proposed method is significantly better than that of the classical method, the number of residues is sharply reduced, and the error propagation in the global fitting can be effectively overcome, which helps to verify the effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** interferometric synthetic aperture sonar; wrapped phase; coherent method; registration; residue

收稿日期: 2023-09-15

项目资助: 国家自然科学基金(42176187, 61671461, 41304015), 中国博士后科学基金资助项目(2015M582813)。

第一作者: 钟何平, 博士, 副教授。主要从事干涉信号处理和并行计算方向研究。E-mail: zhaping525@sohu.com

通讯作者: 黄攀, 博士, 讲师, 主要从事干涉合成孔径声纳图像处理方向研究。E-mail: conan1986@126.com

干涉合成孔径声纳（interferometric synthetic aperture sonar, InSAS）与干涉合成孔径雷达（interferometric synthetic aperture radar, InSAR）原理相同，都是利用合成孔径原理获得二维高分辨复图像，然后利用干涉原理反演出成像区域高程信息<sup>[1]</sup>。与 InSAR 相比，InSAS 的发展缓慢，原因在于对合成孔径声纳原理可行性的认识不足和技术实现上的困难。但在部分学者坚持不懈的努力下，通过一系列试验验证了合成孔径技术的可行性，上世纪 90 年代末，InSAS 技术得以快速发展<sup>[2,3]</sup>。

由于 InSAS 和 InSAR 原理相同，在干涉信号处理方面一般都是直接借鉴 InSAR 信号处理算法<sup>[4,5]</sup>，并针对具体应用特点进行优化。干涉信号处理中缠绕相位通常采用复图像配准方法获得<sup>[6,7]</sup>，主要处理步骤包括：控制点对选取、几何变换模型构建、辅图像重采样和干涉相位提取四个步骤。为提高控制点的计算精度，文献[8]提出了联合实、复相关函数的图像配准方法，在分析实、复相关函数测度的基础上，提出了灵敏度测度准则，有效提高了自适应选择控制点的效果。文献[9]针对 InSAS 中噪声严重，相位差平均波动法配准时出现多峰现象的缺点，提出使用多视波动配准方法，有效抑制了多峰现象，并且改善了配准质量。文献[10]提出了先将主辅复图像二值化，然后借助 B 样条函数进行曲线拟合，在辅图像中搜索与主图像中相匹配的曲线段长度，求取各曲线段中心后，完成像元级配准，之后采用插值法进行亚像元级配准。前述配准方法都是基于经典复图像配准框架，需要进行全局偏移量拟合，容易带来偏移量误差传播，从而导致干涉相位误差。为优化 InSAS 复图像配准结果，文献[6]针对 InSAS 系统中低阶多项式全局拟合的不足的问题，推导了斜距偏移量和斜距之间的关系，提出了基于有理函数曲面拟合的全局几何变换模型，并采用仿真和实测 InSAS 数据验证了所提方法的正确性。虽然该模型考虑了测绘带内偏移量的空变特性，但模型推导过程中，地形是以平地

为假设，未考虑高程变化对偏移量的影响。考虑到采用全局多项式进行偏移量拟合的缺点，文献[11]又提出了分段曲面拟合的干涉合成孔径声纳复图像配准方法，首先将复图像在距离向进行分块，然后分别对每个图像内控制点对偏移量进行全局拟合，并将分块偏移量拼接为一个整体偏移量，然后进行辅图像插值进而得到干涉图。该方法数据分块只是简单考虑了偏移量的距离向空变特性，忽略了地形特征，并且直接进行分块偏移量的拼接容易在边缘出现不连续现象，也与实际地形不相匹配。文献[12]提出了基于矩阵拟合的 InSAS 干涉相位估计方法，通过构造与观测数据相对应的协方差矩阵来估计干涉相位，采用矩阵拟合代替特征值分解，提升了干涉相位估计性能，但所提方法需要待配准数据误差控制在一个分辨单元内，之后还涉及复杂矩阵运算。

与 InSAR 工作模式不同，InSAS 通常采用单过次工作方式，并且基线长度一般为 20 个波长以内，在有效成像范围内距离向上像素级偏移量一般仅在数个像素内，方位向可认为无偏移。此外，InSAS 系统工作时，载体距离水底高度小，为提高测绘效率，通常会提升测绘带的宽度。但是随着测绘带宽度不断提升，距离向开角不断增加，沿直线传播的波束受剧烈变化地形遮掩时，将会在声纳图像中波束照射盲区出现阴影，采用全局拟合方式会严重降低干涉相位图质量。为提升获取的缠绕相位图质量，文本直接从 InSAS 成像特点入手，推导局部成像区域像素距离差变化关系，提出了采用局部相干法进行 InSAS 缠绕相位的获取方法。所提方法消除了全局拟合法存在的缠绕相位相互影响的缺点，显著提升了缠绕相位质量，并且具有计算简单优点。最后通过仿真数据和实测数据验证了所提方法的有效性。

# 1 基本理论

## 1.1 模型推导

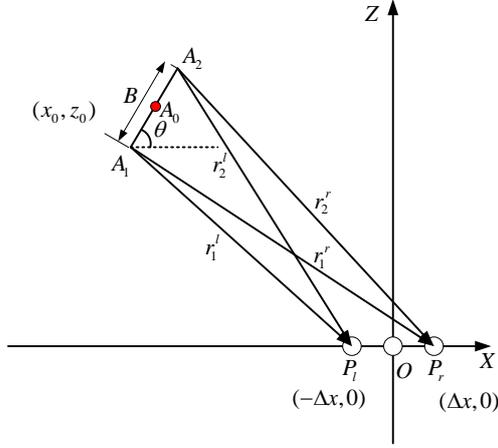


图 1 局部区域像素距离差推导

Fig.1 Derivation of range difference for local pixel  
建立如图 1 所示坐标系，中心像素点为

坐标原点  $O$ ，对应的左右相位点  $P_l$  和  $P_r$  坐

标分别为  $(-\Delta x, 0)$  和  $(\Delta x, 0)$ 。基线中心位

于  $(x_0, z_0)$ ，倾角为  $\theta$ ，长度为  $B$ ，下端点  $A_1$

坐标为  $(x_0 - \frac{B}{2} \cos \theta, z_0 - \frac{B}{2} \sin \theta)$ ，上端点

$A_2$  坐标为  $(x_0 + \frac{B}{2} \cos \theta, z_0 + \frac{B}{2} \sin \theta)$ 。  $P_l$

与  $A_1$  和  $A_2$  两点的距离  $r_1^l$  和  $r_2^l$  可表示为

$$r_1^l = \sqrt{(x_0 - \frac{B}{2} \cos \theta + \Delta x)^2 + (z_0 - \frac{B}{2} \sin \theta)^2}$$

$$r_2^l = \sqrt{(x_0 + \frac{B}{2} \cos \theta + \Delta x)^2 + (z_0 + \frac{B}{2} \sin \theta)^2}$$

两者距离差

$$\Delta r^l = r_1^l - r_2^l = \frac{(r_1^l)^2 - (r_2^l)^2}{r_1^l + r_2^l} \quad (1)$$

根据等效相位中心近似原理有

$$r_1^l + r_2^l = 2\sqrt{(x_0 + \Delta x)^2 + (z_0)^2} \quad (2)$$

此时

$$\begin{aligned} \Delta r^l &= r_1^l - r_2^l \\ &= \frac{(r_1^l)^2 - (r_2^l)^2}{r_1^l + r_2^l} \\ &= \frac{-2B[(x_0 + \Delta x) \cos \theta + z_0 \sin \theta]}{\sqrt{(x_0 + \Delta x)^2 + (z_0)^2}} \end{aligned} \quad (3)$$

按照同样方法可得右侧点  $P_r$  与  $A_1$  和

$A_2$  两点的距离差

$$\begin{aligned} \Delta r^r &= r_1^r - r_2^r \\ &= \frac{(r_1^r)^2 - (r_2^r)^2}{r_1^r + r_2^r} \\ &= \frac{-2B[(x_0 - \Delta x) \cos \theta + z_0 \sin \theta]}{\sqrt{(x_0 - \Delta x)^2 + (z_0)^2}} \end{aligned} \quad (4)$$

此时，左右相位点  $P_l$  和  $P_r$  的距离差梯

度为

$$\begin{aligned} \Delta r &= \Delta r^l - \Delta r^r \\ &\approx \frac{-4B \cos \theta}{\sqrt{(x_0)^2 + (z_0)^2}} \\ &= \frac{-4B \cos \theta}{r_0} \Delta x \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $r_0$  为基线中心点与局部相位块中心点

之间的距离。从  $\Delta r$  表达式可看出相位点  $P_l$

和  $P_r$  的距离差在距离  $r_0$  一定的情况下与间

距  $\Delta x$  成正比。以我们研制的 ChinSAS-150

干涉合成孔径声纳系统为例，其中心频率为

150 kHz，基线长度为 0.12 m，倾角为  $60^\circ$ 。

局部相位差随距离变化关系如图 2 所示，图

中给出了在相位点间隔分别为 0.1 m、0.25 m

和 0.5m 时的距离差。从图 2 中可看出在同样

距离下，距离差随相位点间隔增大而增加。

在同样间隔下，距离差随距离增加而减小。

当  $\Delta x = 0.5m$  时，采样距离从 51 m 变

化到 231 m 时， $\Delta r$  从 0.0024 m 变为 0.0005

m，分别等效为 0.24 和 0.05 个波长。因此

在局部小范围内，距离差变化量  $\Delta r$  在小于

四分之一波长的条件下，可认为距离差变

化和波长相比可忽略,可统一采用中心点距离差近似。

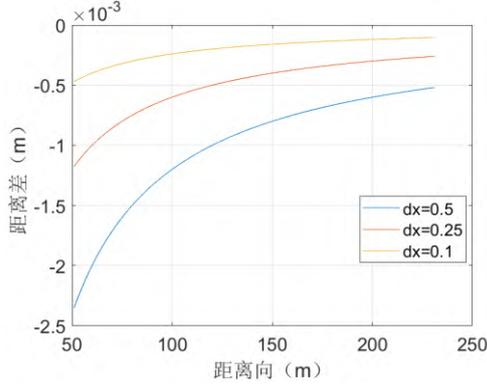


图 2 局部距离差随距离变化关系

Fig.2 Relationship between local range difference and range

### 1.2 相干法缠绕相位估计

假设合成孔径成像后的两幅复图像分

$$\hat{R}_{S_1 S_2}(m, n, u, v) = \frac{\sum_{i=-L}^L \sum_{j=-K}^K S_1(m+i, n+j) S_2^*(m+i+u, n+j+v)}{\sqrt{\sum_{i=-L}^L \sum_{j=-K}^K |S_1(m+i, n+j)|^2} \sqrt{\sum_{i=-L}^L \sum_{j=-K}^K |S_2(m+i+u, n+j+v)|^2}} \quad (7)$$

式中  $i, j$  为临时变量, 局部窗口尺寸为  $(2L+1) \times (2K+1)$ 。  $S_1(m, n)$  和  $S_2(m, n)$

可采用复数表示为

$$S_1(m, n) = |S_1(m, n)| e^{j\phi_1(m, n)} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \hat{R}_{S_1 S_2}(m, n, u, v) &= \frac{\sum_{i=-L}^L \sum_{j=-K}^K |S_1(m+i, n+j)| |S_2(m+i+u, n+j+v)| e^{j(\phi_1(m+i, n+j) - \phi_2(m+i+u, n+j+v))}}{\sqrt{\sum_{i=-L}^L \sum_{j=-K}^K |S_1(m+i, n+j)|^2} \sqrt{\sum_{i=-L}^L \sum_{j=-K}^K |S_2(m+i+u, n+j+v)|^2}} \quad (10) \end{aligned}$$

当主辅复图像对准时, 在局部窗口内有  $\phi_1(m+i, n+j) - \phi_2(m+i+u, n+j+v) \approx \phi_1(m, n) - \phi_2(m+u, n+v)$  即可用局部窗口内的中心点相位差代替其邻域范围内像素的相位差。当两幅图像完全对准时,  $|\hat{R}_{S_1 S_2}(m, n, u, v)|$  取得最大值, 从

别为  $S_1(m, n)$  和  $S_2(m, n)$ , 则图像域内相关

函数定义为

$$\begin{aligned} \hat{R}_{S_1 S_2}(m, n, u, v) &= \frac{E[S_1(m, n) S_2^*(m+u, n+v)]}{\sqrt{E[|S_1(m, n)|^2]} \sqrt{E[|S_2(m+u, n+v)|^2]}} \quad (6) \end{aligned}$$

式中  $E(\cdot)$  为求均值运算,  $m, n$  为主图像局部中心点,  $u, v$  为相应的方位向和距离向上的像素偏移量。在满足各态历经条件下, 统计平均可用时间平均替代, 此时相关函数变为

$$S_2(m, n) = |S_2(m, n)| e^{j\phi_2(m, n)} \quad (9)$$

式中  $\phi_1(m, n)$  和  $\phi_2(m, n)$  分别表示复图像中对应相位点与上下接收阵因距离产生的相位差, 将其带入上式后有

表达式中可看出,  $\hat{R}_{S_1 S_2}(m, n, u, v)$  中的相位值体现了局部窗口内中心像素点与上下接收阵之间因距离差产生的相位差, 即

$$\phi_1(m, n) - \phi_2(m+u, n+v) = 4\pi \cdot \frac{r_1 - r_2}{\lambda}$$

式中  $r_1$  和  $r_2$  表示中心像素点与上下接收阵

之间的距离， $\lambda$  表示波长。由于求解  $\phi_1(m,n) - \phi_2(m+u,n+v)$  的过程用到了相位取主值操作，直接得到的相位即为相位差的缠绕，也就是所要估计的缠绕相位。考虑到采样对相关函数峰值的影响，获得一维相关系数后，采用傅里叶变换插值来进一步提高相关系数峰值估计精度。

### 1.3 算法流程

采用局部相干法提取 InSAS 缠绕相位流程如图 3 所示。在开始计算前，根据系统工作参数和相关处理区域大小进行像素点外推，并设置局部主窗口尺寸。计算时，首先选定主、辅局部窗口覆盖的区域，再沿着距离向移动主局部窗口，计算重合区域的相干系数，由此获得与一定距离偏移对应的复相干系数序列。对获取的相干系数序列做傅里叶插值；取序列中幅度最大的相干系数作为主窗口中心像素点的干涉相位值。重复以上过程，直至所有像素点完成缠绕相位计算。

缠绕相位的计算过程中不涉对复图像的插值，而是在求解距离向偏移量时同时获得。并且得益于 InSAS 的单过次工作方式，方位向上可认为不存在偏移，因此只需在距离向上移动辅局部窗口即可。局部相关法仅在局部小窗口内完成缠绕相位估计，不同相位点的缠绕相位估计过程相互独立性，消除了传统配准方法中的全局拟合误差传播风险，并且适合并行计算。

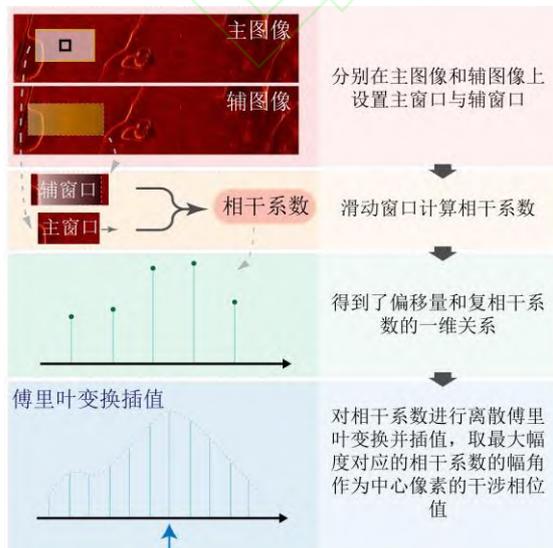


图 3 局部相关法 InSAS 缠绕相位提取流程

Fig.3 Wrapped phase extraction process for InSAS by local coherent method

## 2 试验结果分析

为验证所提方法性能，我们采用仿真复图像和真实复图像数据进行了缠绕相位提取试验，并与经典的互相关法、最大频谱法和平均波动法所提取的干涉图进行了对比分析。试验过程中，相关系数计算时，局部主窗口大小设置为  $5 \times 21$ ，对应的辅窗口大小设置为  $5 \times 41$ ，最大偏移量设置为 10。

仿真数据生成时采用圆锥场景，圆锥半径为 10 m，系统工作参数如表 1 所示。图 4(a)和图 4(b)分别为仿真后所得的主图像和辅图像。图 4(c)为配准前的缠绕相位图，近距离相位条纹模糊。图 4(d)为图 4(c)所对应的相位质量图，近距离相关系数低，远距离相关系数高。采用互相关法、最大频谱法和平均波动法配准所得的干涉图分别如图 5(a)、图 5(b)和图 5(c)所示，三种配准方法所得干涉图质量相差不大，近距离相位条纹清晰度都得到了显著提升，但相位图上整体分布着颗粒状噪声。采用局部相关法得到缠绕相位如图 5(d)所示，颗粒状噪声得到了有效抑制，缠绕相位条纹清晰度得到了进一步改善。为进一步比较不同配准方法所得干涉相位质量，图 6 给出了四种方法所得干涉相位图所对应的相位质量图，从图 6(a)、图 6(b)和图 6(c)可看出，在圆锥边缘和顶端，由于曲面变化率大，所得干涉相应位置质量较低。本文所提方法干涉图对应的质量图 6(d)整体质量高，有效抑制了地形快速变化导致的低质量干涉相位出现。

表 1 仿真系统参数

Tab.1 Parameters of Simulation System

| 参数        | 数值   | 参数          | 数值      |
|-----------|------|-------------|---------|
| 带宽 (kHz)  | 60   | 脉冲重复间隔 (ms) | 200     |
| 载频 (kHz)  | 150  | 子阵长 (m)     | 0.08    |
| 脉宽 (ms)   | 20   | 基线长度 (m)    | 0.08    |
| 声速 (m/s)  | 1500 | 速度 (m/s)    | 3       |
| 采样率 (kHz) | 100  | 采样距离 (m)    | 36-58.5 |

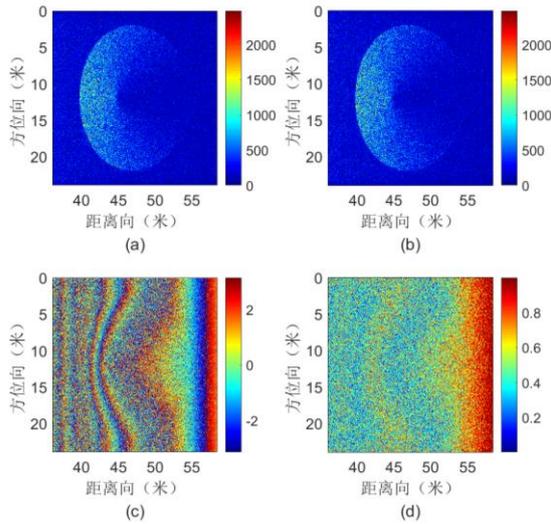


图 4 仿真数据信息 (a)主图像; (b)辅图像; (c)配准前干涉图; (d) 相位质量图

Fig.4 Information of simulated data. (a)Master image; (b) Slave image; (c) Wrapped phase before registration; (d) Phase quality map

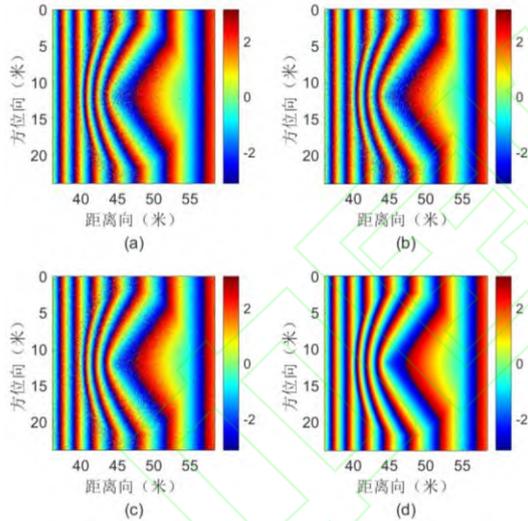


图 5 不同方法所得干涉图 (a)互相关法; (b)最大频谱法; (c)平均波动法; (d)所提方法

Fig.5 Wrapped phase by different method. (a) Cross-correlation method; (b) Maximum spectrum estimate method; (c) Average fluctuation function method; (d) The proposed method.

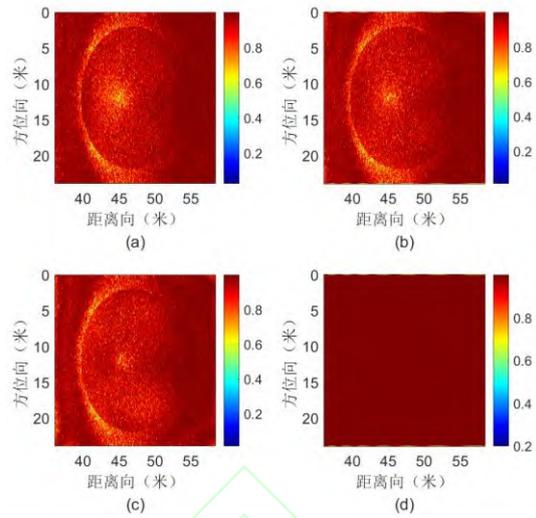


图 6 不同方法所得干涉图相位质量 (a)互相关法; (b)最大频谱法; (c)平均波动法; (d)所提方法

Fig.6 Phase quality map of wrapped phase by different method. (a) Cross-correlation method; (b) Maximum spectrum estimate method; (c) Average fluctuation function method; (d) The proposed method.

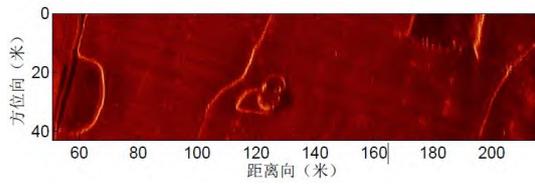
为进一步验证局部相干法缠绕相位提取性能,使用实测干涉合成孔径声纳数据成像结果进行了性能测试。原始数据是ChinSAS-150海试样机在浙江千岛湖试验过程中所采集的,试验样机系统参数如表 2 所示。图 7(a)和图 7(b)分别为试验中所使用的主图像和辅图像,数据块大小为  $2160 \times 8800$  像素,方位向长度为 43.2m,距离向上为 51m-216m。成像场景中地形丰富,近距离有一凹陷区域,中间部分有凸出地形。配准前的缠绕相位如图 7(c)所示,近距离和远距离相位条纹模糊,中心波束位于 80-100m 之间,因信噪比高,相位条纹比较清楚。采用经典的互相关法、最大频谱法和平均波动法获得的缠绕相位分别如图 7(d)、图 7(e)和图 7(f)所示。从实际数据处理结果来看,三者中互相关法结果图 7(d)较好,远近距离干涉相位条纹清晰度都得到了改善,但相位整体噪声严重。最大频谱法所得干涉相位结果图 7(e)中条纹方向没有得到好的保持。平均波动法获取的干涉图 7(f)中近距离干涉条纹模糊。由此可见传统复图像配准受控制点选择和全局偏移量拟合结果影响大。采用所提局部相干法所得干涉相位如图 7(g)所示,干涉

图整体质量得到显著提升,干涉条纹方向得到较好保持,近距离和远距离的干涉条纹清晰度也得到显著增强。

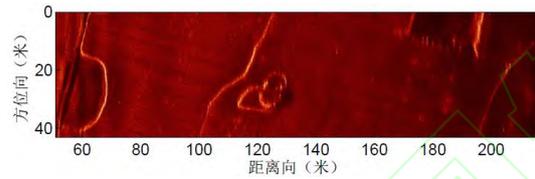
表 2 InSAS 系统参数

Tab.2 Parameters of InSAS System

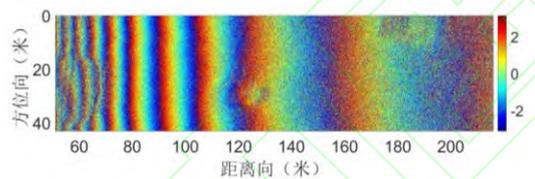
| 参数        | 数值   | 参数          | 数值     |
|-----------|------|-------------|--------|
| 带宽 (kHz)  | 20   | 脉冲重复间隔 (ms) | 320    |
| 载频 (kHz)  | 150  | 子阵长 (m)     | 0.04   |
| 脉宽 (ms)   | 20   | 基线长度 (m)    | 0.12   |
| 声速 (m/s)  | 1500 | 速度 (m/s)    | 2.5    |
| 采样率 (kHz) | 40   | 采样距离 (m)    | 51-216 |



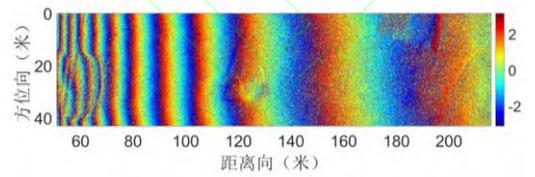
(a)主图像



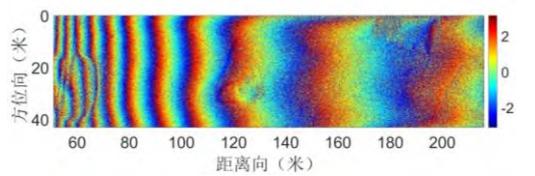
(b)辅图像



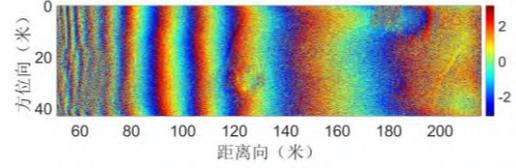
(c) 配准前缠绕相位



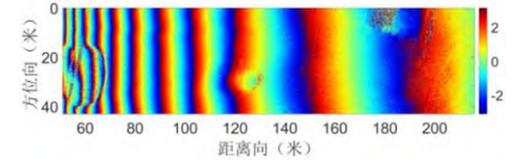
(d) 互相关法所得缠绕相位



(e) 最大频谱法所得缠绕相位



(f) 平均波动法所得缠绕相位



(g)所提方法所得缠绕相位

图 7 真实数据缠绕相位提取试验

Fig.7 Wrapped phase extraction experimental performed on real data

为定量分析不同复图像配准方法性能,我们比较了互相关法、最大频谱法、平均波动法和所提方法所得缠绕相位中的残差点和相关系数均值,其结果如表 3 所示。仿真数据处理时,干涉图配准前残差点数为 345930,相关系数均值为 0.5185。互相关法、最大频谱法和平均波动法处理后的结果中残差点个数分别为 14455、15114 和 15854,相关系数均值分别为 0.9344、0.9322 和 0.9285,没有显著差异。所提方法处理后结果中的残差点为 0,相关系数均值提升到 0.9966。真实 InSAS 数据配准前的缠绕相位图残差点为 2399000,相关系数均值为 0.5610。互相关法和最大频谱法所得结果中残差点数目和相关系数均值优于平均波动法所得结果。所提方法的结果中残差点急剧减少,仅为总像素点数的 0.15%,相关系数均值提升到 0.9756。

表 3 不同配准方法结果比较

Tab.3 Result Comparison of Different Registration

|      |       | Method  |        |
|------|-------|---------|--------|
| 数据   | 方法    | 残差点     | 相关系数均值 |
| 仿真数据 | 配准前   | 345930  | 0.5185 |
|      | 互相关法  | 14455   | 0.9344 |
|      | 最大频谱法 | 15114   | 0.9322 |
|      | 平均波动法 | 15854   | 0.9285 |
|      | 所提方法  | 0       | 0.9966 |
| 真实数据 | 配准前   | 2399000 | 0.5610 |
|      | 互相关法  | 1834876 | 0.6578 |
|      | 最大频谱法 | 1918410 | 0.6437 |

|       |         |        |
|-------|---------|--------|
| 平均波动法 | 2223736 | 0.5920 |
| 所提方法  | 29401   | 0.9756 |

### 3 结语

本文提出了一种基于局部相干法的干涉合成孔径声纳缠绕相位提取方法。在分析局部数据块内相位点距离差的基础上,提出了可采用中心相位点距离差代替局部相邻相位点距离差,进而推导了采用局部相干法提取缠绕相位的方法,并通过仿真数据和实测数据验证了所提方法的正确性。试验数据结果表明局部相干法提取的缠绕相位质量显著优于经典全局拟合方法的结果,并且急剧降低了残差点数量。同时,所提方法有效克服经典方法中全局拟合的误差传播,为后续高精度数字高程模型重建奠定了基础。

### 参考文献 (References)

- [1] Zhang Sen, Tang jinsong, Chen Min, et al. Development and sea trial of interferometric synthetic aperture sonar[J]. *Technical Acoustics*, 2012,31(2):167-173. (张森,唐劲松,陈鸣,等.干涉合成孔径声纳海试样机研制与试验[J].声学技术,2012,31(2):167-173)
- [2] Hayes M P, Gough P T. Synthetic aperture sonar: a review of current status[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2009, 34(3): 207-224
- [3] Liu Jiyan. Advancement of Synthetic Aperture Sonar Technique[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2019,34(03): 283-288. (刘纪元.合成孔径声纳技术研究进展[J].中国科学院院刊,2019,34(03): 283-288)
- [4] Zhong H P, Tang J S, Zhang S, et.al. A Quality-Guided and Local Minimum Discontinuity Based Phase Unwrapping Algorithm for InSAR/InSAS Interferograms[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014,11(1):215-219
- [5] Tian Z, Tang J S, Zhong H P, et.al. Extended Range Doppler Algorithm for Multiple-Receiver Synthetic Aperture Sonar Based on Exact Analytical Two-Dimensional Spectrum[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2016,41(1): 164-174
- [6] Huang Pan, Tang Jinsong, Zhong Heping, et al. A New InSAS Registration Method Based on Rational Function Surface Fitting[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(4): 601-607.(黄攀,唐劲松,钟何平等.基于有理函数曲面拟合的 InSAS 复图像配准新方法[J].武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(4): 601-607)
- [7] Zhong Heping, Tang Jinsong, Ma Mengbo, et al. Complex Image Registration Algorithm and Its Optimization for Interferometric Synthetic Aperture Sonar in Shared Memory Environment[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(8): 1169-1173(钟何平,唐劲松,马梦博,等.共享内存环境下的干涉合成孔径声纳复图像配准及优化方法[J].武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(8): 1169-1173)
- [8] Wang Qingsong, QU Jishuang, Huang Haifeng, et al. A method based on integrating real and complex correlation function for insar image coregistration[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*,2012,41(04): 563-569.(王青松,瞿继双,黄海风,等.联合实、复相关函数的干涉 SAR 图像配准方法[J].测绘学报,2012, 41(4): 563-569)
- [9] Qin X D, Huang Y, Liu W, et al. A multilook average fluctuation function method for interferometric synthetic aperture sonar image registration[J]. *Applied Acoustics*, 2011, 30(6):443-447. (秦晓东,黄勇,刘维,刘纪元.干涉合成孔径声纳多视波动配准方法[J].应用声学,2011,30(6): 443-447)
- [10] Liu Baoquan, Feng Dazheng, Li Junxia, et al. An Image Automatic Registration Algorithm for InSAR Complex Images Based on Curve Fitting[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(7): 1666-1669. (刘宝泉,冯大政,李军侠,等.基于曲线拟合的干涉合成孔径雷达(InSAR)复图像自动配准算法[J].电子与信息学报,2007,29(7):1666-1669)
- [11] Huang Pan, Tang Jinsong, Zhong Heping. Piecewise Surface Fitting Method for Complex

Image Registration of Interferometric Synthetic Aperture Sonar[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(8): 1259-1264. (黄攀,唐劲松,钟何平.干涉合成孔径声呐复图像配准分段曲面拟合法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,46(08):1259-1264)

[12] Bai Shengxiang, Zheng Chundi, Zhang Sen. Interferometric Phase Estimation Based on

Weighted Joint Covariance Matrix Fitting[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(4): 475-481. doi: 10.13203/j.whugis20140224.(白生祥, 郑春弟, 张森. 利用加权联合协方差矩阵拟合进行干涉相位估计[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(4): 475-481. doi: 10.13203/j.whugis20140224)

#### 网络首发:

**标题:** 基于局部相干法的干涉合成孔径声呐复图像配准

**作者:** 钟何平, 李涵, 田振, 黄攀, 唐劲松

**Doi:** 10.13203/j.whugis20220762.

**收稿日期:** 2023-09-15

#### 引用格式:

钟何平, 李涵, 田振, 等. 基于局部相干法的干涉合成孔径声呐复图像配准[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, Doi:10.13203/j.whugis20220762. (ZHONG Heping, LI Han, TIAN Zhen, et al. Complex Image Registration for Interferometric Synthetic Aperture Sonar based on Local Coherence Method[J] *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, Doi:10.13203/j.whugis20220762.)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

#### 您感兴趣的其他相关论文:

干涉合成孔径声呐复图像配准分段曲面拟合法

黄攀, 唐劲松, 钟何平

武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(8): 1259-1264.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20190306>

共享内存环境下的干涉合成孔径声呐复图像配准及优化方法

钟何平, 唐劲松, 马梦博, 吴浩然

武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(8): 1169-1173.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20180051>