引文格式:钟何平,李涵,田振,等.干涉合成孔径声纳局部相干法复图像配准[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(4):739-745.DOI:10.13203/j.whugis20220762

Citation: ZHONG Heping, LI Han, TIAN Zhen, et al. Complex Image Registration for Interferometric Synthetic Aperture Sonar with Local Coherence Method[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(4):739-745.DOI:10.13203/j.whugis20220762

干涉合成孔径声纳局部相干法复图像配准

钟何平[1] 李 涵[1] 田 振[1] 黄 攀[2] 唐劲松[1]

1 海军工程大学电子工程学院,湖北 武汉,430033

2 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(interferometric synthetic aperture sonar, InSAS)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InSAS成像特点的基础上,提出了一种基于局部相干法的InSAS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实验结果表明: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。

关键词:InSAS;缠绕相位;相干法;配准;残差点

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-04-26

DOI:10.13203/j.whugis20220762 **文章编号**:1671-8860(2025)04-0739-07

Complex Image Registration for Interferometric Synthetic Aperture Sonar with Local Coherence Method

ZHONG Heping[1] *LI Han*[1] *TIAN Zhen*[1] *HUANG Pan*[2] *TANG Jinsong*[1]

1 School of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

2 School of Mathematics and Information Sciences, Weifang University, Weifang 261061, China

Abstract: **Objectives**: Complex image registration is a very important step during interferometric synthetic aperture sonar (InSAS) 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 InSAS based on local coherence method is proposed. **Methods**: First, 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. **Results**: 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. **Conclusions**: The proposed method can effectively improve the quality of wapped phase extraction in the InSAS system.

Key words: interferometric synthetic aperture sonar; wrapped phase; coherent method; registration; residual point

---

基金项目:国家自然科学基金(42176187,61671461,41304015);中国博士后科学基金(2015M582813);山东省自然科学基金(ZR2023MD122)。

第一作者:钟何平,博士,研究员,主要从事干涉信号处理和并行计算方向研究。1209041071@nue.edu.cn

通信作者:黄攀,博士,副教授。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,都是先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[1]。与InSAR相比,InSAS发展缓慢,原因在于对InSAS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,一系列实验验证了合成孔径技术的可行性,20世纪90年代末,InSAS技术得以快速发展[2-3]。

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[4-5],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[6-7],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4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InSAS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,再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通常采用单航次工作方式,并且基线长度一般在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,本文直接从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。

1 基本理论

1.1 模型推导

建立如图1所示的坐标系,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θ,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$(x_0+\frac{B}{2}\cos\theta,z_0+\frac{B}{2}\sin\theta)$。

由图1可得P_l与A_1和A_2两点的距离r_1^l和r_2^l的计算公式为:

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

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

两者距离差为:

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

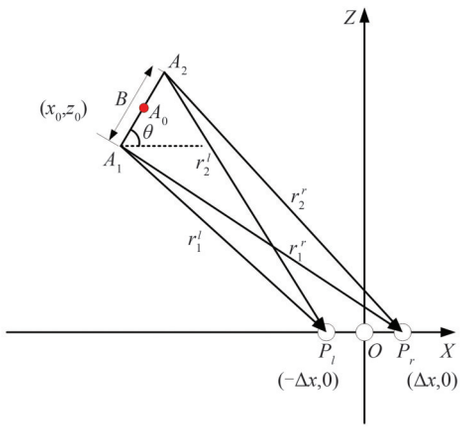


图 1　局部区域像素距离差推导

Fig. 1　Derivation of Range Difference for Local Pixel

根据等效相位中心近似原理有：

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

此时，

$$\Delta r^l = r_1^l - r_2^l = \frac{(r_1^l)^2-(r_2^l)^2}{r_1^l+r_2^l} = \frac{-2B\left[(x_0+\Delta x)\cos\theta + z_0\sin\theta\right]}{\sqrt{(x_0+\Delta x)^2+(z_0)^2}} \tag{3}$$

按照同样方法可得右侧点 P_r 与 A_1 和 A_2 两点的距离差为：

$$\Delta r^r = r_1^r - r_2^r = \frac{-2B\left[(x_0-\Delta x)\cos\theta + z_0\sin\theta\right]}{\sqrt{(x_0-\Delta x)^2+(z_0)^2}} \tag{4}$$

此时，左右相位点 P_l 和 P_r 的距离差梯度为：

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

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 Δr 的表达式可看出，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 Δx 成正比。以笔者研制的 ChinSAS-150 InSAS 系统为例，其中心频率为 150 kHz，基线长度为 0.12 m，倾角为 60°。局部相位差随距离变化关系如图 2 所示，给出了在相位点间隔分别为 0.1 m、0.25 m 和 0.5 m 时的距离差。可以看出，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 $\Delta x = 0.5$ m 时，采样距离从 51 m 变化到 231 m 时，Δr 从 0.002 4 m 变为 0.000 5 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 Δr 在小于 1/4 个波长的条件下，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。

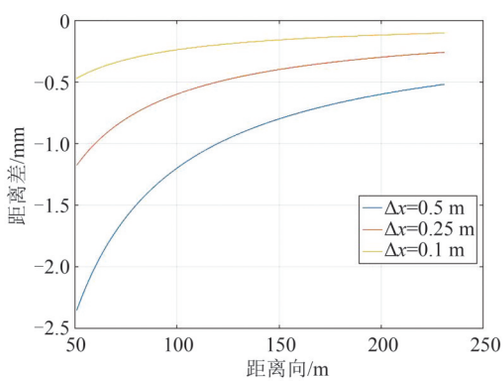


图 2　局部距离差随距离变化关系

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别为 $S_1(m,n)$ 和 $S_2(m,n)$，则图像域内的相关函数定义为：

$$\hat{R}_{S_1S_2}(m,n,u,v) = \frac{E\left[S_1(m,n)S_2^*(m+u,n+v)\right]}{\sqrt{E\left[\left|S_1(m,n)\right|^2\right]E\left[\left|S_2(m+u,n+v)\right|^2\right]}} \tag{6}$$

式中，$E(\cdot)$ 为求均值运算；(m,n) 为主图像局部中心点；u、v 分别为相应的方位向和距离向上的像素偏移量；$S_2^*(m,n)$ 表示对 $S_2(m,n)$ 取共轭。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：

$$\hat{R}_{S_1S_2}(m,n,u,v) = \frac{\sum_{i=-L}^{L}\sum_{j=-K}^{K} S_1(m+i,n+j)S_2^*(m+i+u,n+j+v)}{\sqrt{\sum_{i=-L}^{L}\sum_{j=-K}^{K}\left|S_1(m+i,n+j)\right|^2}\sqrt{\sum_{i=-L}^{L}\sum_{j=-K}^{K}\left|S_2(m+i+u,n+j+v)\right|^2}} \tag{7}$$

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：

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

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

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，将其代入式(7)后有：

$$\hat{R}_{S_1S_2}(m,n,u,v)=\frac{\sum_{i=-L}^{L}\sum_{j=-K}^{K}|S_1(m+i,n+j)||S_2(m+i+u,n+j+v)|\mathrm{e}^{\mathrm{j}[\phi_1(m+i,n+j)-\phi_2(m+i+u,n+j+v)]}}{\sqrt{\sum_{i=-L}^{L}\sum_{j=-K}^{K}\left|S_1(m+i,n+j)\right|^2}\sqrt{\sum_{i=-L}^{L}\sum_{j=-K}^{K}\left|S_2(m+i+u,n+j+v)\right|^2}} \tag{10}$$

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,$|\hat{R}_{S_1S_2}(m,n,u,v)|$取得最大值,从表达式中可看出,$\hat{R}_{S_1S_2}(m,n,u,v)$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:

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

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;λ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及对复图像的插值,而是在求解距离向偏移量时同时获得。得益于InSAS的单航次工作方式,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。

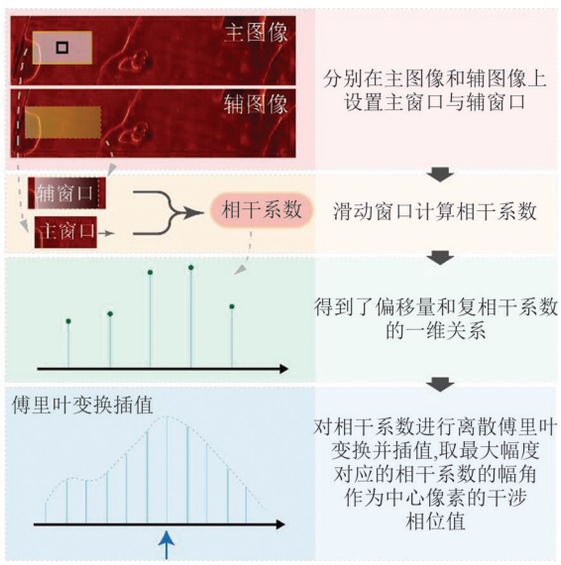


图3 局部相关法InSAS缠绕相位提取流程

Fig. 3 Wrapped Phase Extraction Process for InSAS by Local Coherent Method

2 复图像配准实验结果分析

为验证所提方法性能,采用仿真复图像和真实复图像数据进行了缠绕相位提取实验,并与采用经典的互相关法、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。实验过程中,计算相关系数时,局部主窗口大小设置为5×21像素,对应的辅窗口大小设置为5×41像素,最大偏移量设置为10像素。

仿真数据生成时采用圆锥场景,圆锥半径为10 m,系统工作参数见表1。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,3种配准方法所得的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4

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)中可看出,在圆锥边缘和顶端,由于曲面变化率大,所得干涉相应在位置质量较低。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

Table 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^{-1})	1 500	速度/ (m·s^{-1})	3
采样率/kHz	100	采样距离/m	36～58.5

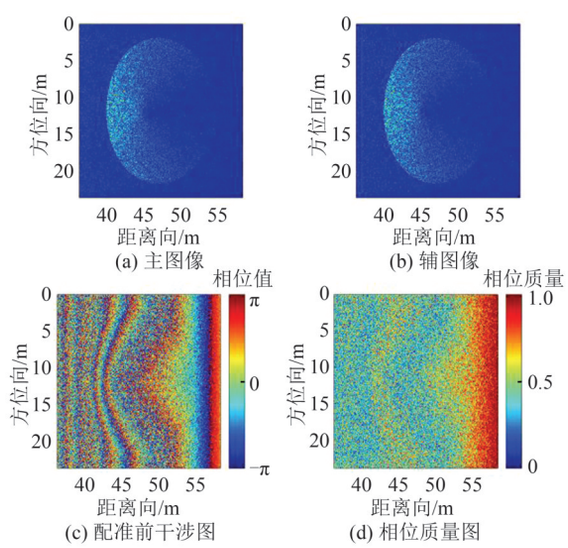


图 4　仿真数据信息

Fig. 4　Information of Simulated Data

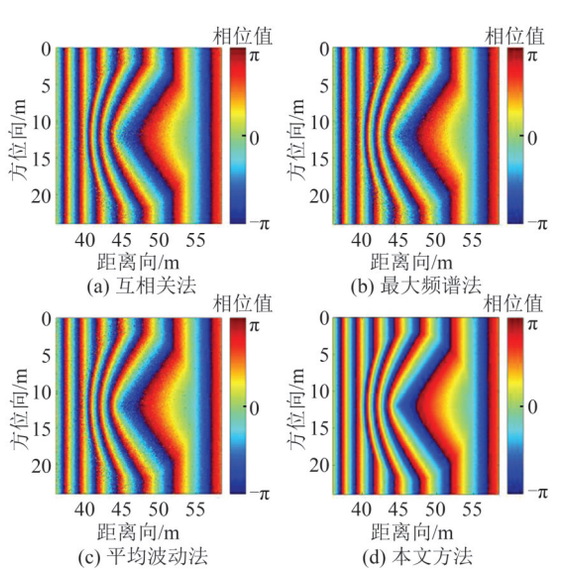


图 5　不同方法所得干涉图

Fig. 5　Wrapped Phase by Different Methods

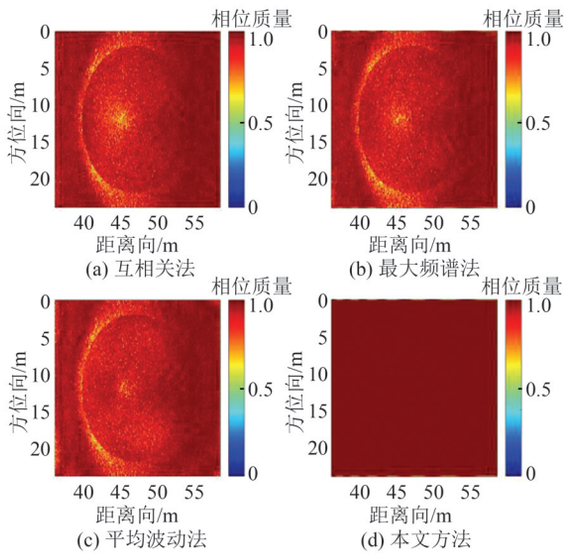


图 6　不同方法所得干涉图相位质量

Fig. 6　Phase Quality Map of Wrapped Phase by Different Methods

为进一步验证局部相干法缠绕相位提取性能,使用实测 InSAS 数据成像结果进行了性能测试。原始数据是 ChinSAS-150 海试样机在中国浙江省千岛湖实验过程中所采集的,实验样机系统参数如表 2 所示。

表 2　InSAS 系统参数

Table 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^{-1})	1 500	速度/ (m·s^{-1})	2.5
采样率/kHz	40	采样距离/m	51～216

图 7(a)和图 7(b)分别为实验中所使用的主图像和辅图像,数据块大小为 2 160×8 800 像素,方位向长度为 43.2 m,距离向上为 51～216 m。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 80～100 m 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(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。

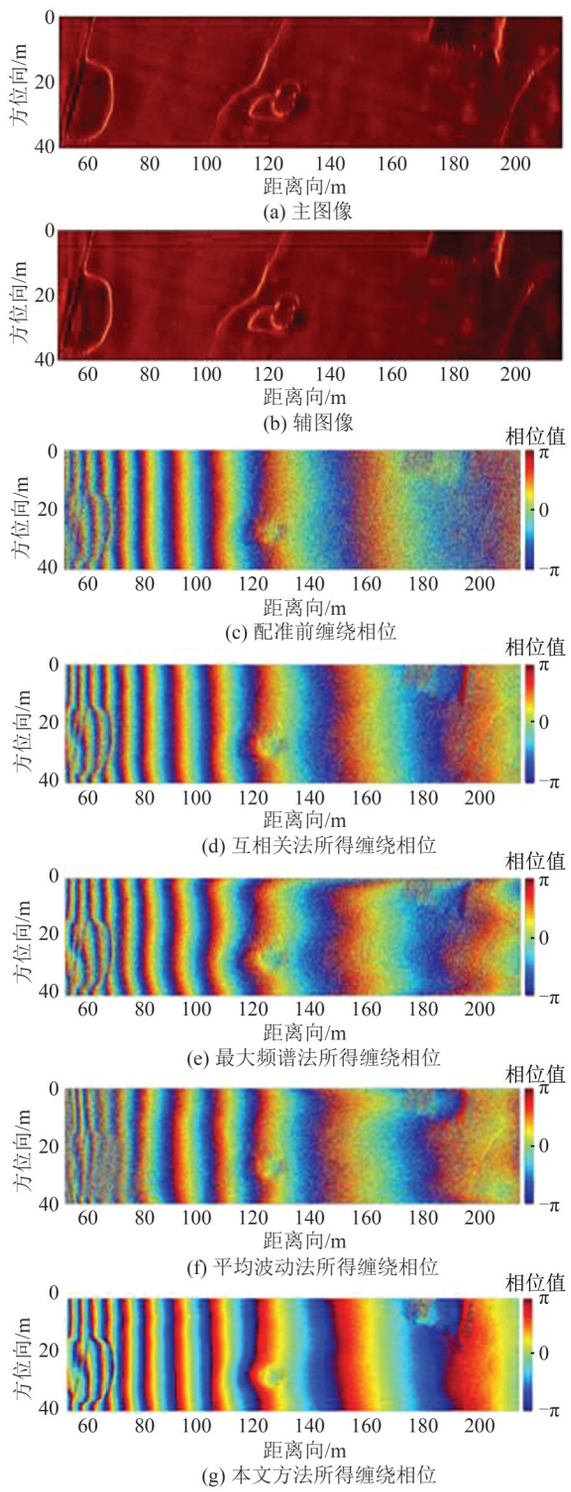


图7 真实数据缠绕相位提取实验

Fig. 7 Wrapped Phase Extraction Experiment Performed on Real Data

为定量分析不同复图像配准方法性能,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345 930个,相关系数均值为0.518 5。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14 455、15 114和15 854个,相关系数均值分别为0.934 4、0.932 2和0.928 5,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0.996 6。真实InSAS数据配准前的缠绕相位图残差点为2 399 000,相关系数均值为0.561 0。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0.975 6。

表3 不同配准方法结果比较

Table 3 Result Comparison of Different Registration Methods

数据	方法	残差点数/个	相关系数均值
仿真数据	配准前	345 930	0.518 5
	互相关法	14 455	0.934 4
	最大频谱法	15 114	0.932 2
	平均波动法	15 854	0.928 5
	本文方法	0	0.996 6
真实数据	配准前	2 399 000	0.561 0
	互相关法	1 834 876	0.657 8
	最大频谱法	1 918 410	0.643 7
	平均波动法	2 223 736	0.592 0
	本文方法	29 401	0.975 6

3 结 语

本文提出了一种基于局部相干法的InSAS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。实验数据结果表明,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,所提方法有效克服了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

[1] 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.
ZHANG Sen, TANG jinsong, CHEN Ming, et al. Development and Sea Trial of Interferometric Synthetic Aperture Sonar [J]. *Technical Acoustics*, 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] 刘纪元. 合成孔径声呐技术研究进展[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 283-288.
LIU Jiyuan. Advancement of Synthetic Aperture Sonar Technique[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(3): 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] 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.
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.

[7] 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呐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.
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.

[8] 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.
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(4): 563-569.

[9] 秦晓东,黄勇,刘维,等. 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.
QIN Xiaodong, HUANG Yong, LIU Wei, et al. A Multilook Average Fluctuation Function Method for Interferometic Sythetic Aperture Sonar Image Registration[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2011, 30(6): 443-447.

[10] 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.
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.

[11] 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(8): 1259-1264.
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.

[12] 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.
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.