

PSDInSAR 的永久散射体时序选择方法

曲世勃^{*①②} 王彦平^① 洪文^①

^①(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家级重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要: 已有永久散射体(PS)识别技术均侧重于利用时序数据集的统计特性, 而没有考虑到数据集的时序特性, 这样的处理方式势必带来时序信息的浪费, 造成部分 PS 点的漏选。该文重点关注一种永久散射体具有较好的相位稳定度但在整个监测时间内不连续, 称这种 PS 点为类永久散射体点。文中对类永久散射体的概念及特征进行了详细描述, 利用仿真实验分析了类永久散射体应用的可行性, 根据类永久散射体特性对其进行了有效选择, 形成一种新的永久散射体选择方法——时序选择法。同时对时序选择法以天津地区 Envisat ASAR 影像数据进行实验验证。通过类永久散射体的选择, PS 点数量提高了、不均匀分布特性得到改善, 同时保证了其较高的相干性。

关键词: 合成孔径雷达; 永久散射体干涉技术; PS 点选择; 类永久散射体

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)02-0381-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00185

The PS Selection Method Using Temporal Information in PSDInSAR Technique

Qu Shi-bo^{①②} Wang Yan-ping^{①②} Hong Wen^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: PS (Permanent Scatterers) selection methods mostly used points' statistic characteristics as criteria, which of course ignores temporal information of the data sets, some good permanent scatterers may also be ignored. This paper is focused on quasi permanent scatterers, which have good stability during the whole monitoring period except for a short time disturbance. After introducing the concept of quasi permanent scatterers, its character is simulated, the method of choosing it then formed, which is called PS temporal selection method. Then this method is applied to Envisat ASAR data in Tianjin area. With quasi permanent scatterers' help, the number of PS points increase and distribute evenly, keeping high coherence at the same time.

Key words: SAR; Permanent scatterers interferometry; Permanent Scatterers (PS) selection method; Quasi permanent scatterers

1 引言

重复轨道差分干涉SAR的应用目前受到两大因素的制约: 一是时空失相关; 二是大气相位延迟。由其产生的相位噪声降低了形变测量可靠性^[1]。重轨干涉SAR图像对的时间间隔越长, 干涉相位的噪声越严重; 重轨干涉SAR图像对空间基线距离越大, 干涉相位噪声也会越高。近些年发展的永久散射体差分干涉 (Permanent Scatterers Differential Interferometric SAR, PSDInSAR) 技术主要目的是

为克服时间空间去相干以及大气的影 响, 发展最为迅速^[2-4]。PS技术处理对象为同一区域的重轨观测 SAR数据, 通过对SAR数据集配准将数据重采样到相同空间, 对其序列干涉相位进行分析, 去除干涉相位中的参考相位、地形相位、大气相位等影响, 提取地面形变信息。

PS技术从一组时间序列SAR图像中选取具有高相干性的点做为PS点, 通常为人类建筑, 其散射特性稳定, 具有较小的时间、空间去相干性。永久散射体技术的处理流程复杂, 一般来说处理步骤大致都会包括永久散射体的选择、三角剖分、线性形变速率估计、稀疏网络相位解缠、非线性形变估计、估计大气相位屏^[5,6]。该技术通过检测和确定潜在的相干像元, 即所谓的“永久散射体”, 较好地抑制了

2010-03-04 收到, 2010-05-07 改回

国家自然科学基金重大项目(60890070)和中国科学院知识创新工程领域前沿项目资助课题

*通信作者: 曲世勃 qshibo@163.com

时间去相干和大气信号对地表形变提取的影响,利用幅度离散指数近似相位稳定程度来选择永久散射体候选点,利用周期图方法来估计线性形变量,利用大气相位和非线性形变在时间和空间上频谱特征的不同来估计非线性形变量,最终得到所选择的PS点处的地表形变历史和经过校正的高精度的高程数据。永久散射体的判断和选择是整个PS处理流程的第一步,是PS技术的基础,PS点选择中的误差在后续的处理和形变提取中会被逐渐放大,各步处理误差逐级累加,从而影响最后形变提取的可靠性^[7,8]。从提高参数计算的精度方面考虑,PS点选择一方面需要选取尽可能多的点,而另一方面也需要防止将不可靠的点选为PS点,对测量结果带来不利影响。

永久散射体的选择方法主要有基于图像幅度的,基于图像相位的,基于图像相关系数的^[6]。目前的选择方法均是对大量数据集的整体无序统计判断,忽略了重轨干涉SAR数据集的时序特性,从而造成了对部分永久散射体点的误判和漏判。意大利学者Ferretti, Zan, Perissin等人分别在论文中对类永久散射体的现象进行描述^[9-11]。本文对已有的PS选择方法进行分析后,总结了已有PS选择方法存在的问题,文中对类永久散射体的概念及特征进行了详细描述,利用仿真实验分析了类永久散射体应用的可行性,根据类永久散射体特性对其进行了有效选择,形成一种新的永久散射体选择方法——时序选择法。同时对时序选择法进行了实验验证,以天津地区做为实验区域,采用欧洲空间局的Envisat卫星C波段ASAR影像为源数据。经过实验,永久散射体时序选择法有效地识别出了类永久散射体点,其相干性和时序形态均与理论分析结果吻合较好。

2 已有的PS选择方法

从PS技术处理流程来看,选取适当个数、可靠的PS点是PS算法的关键。对PS的识别目前有基于相干性和幅度分析两种算法:

(1)相干系数法,即根据相干系数,以适当的阈值选择高相干的点做为PS点。由于相干系数估计窗的影响,降低了图像分辨率,很多时候也因此漏掉了可靠的PS点。故应该在估计窗大小和图像分辨率间做出权衡选择。相干系数计算表达如式(1)所示^[12]。相关系数越大,干涉相位的噪声越低。

$$\gamma = \frac{\left| \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n M(i, j) S^*(i, j) \right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |M(i, j)|^2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |S(i, j)|^2}} \quad (1)$$

式中 M 和 S 分别表示构成干涉对的两个SAR影像的

局部像素信息(复数)块,*表示复数共轭算子。

(2)在雷达图像中具有小幅度离差值的点一般都会具有较小的相位离差值。因此,可以用幅度离差值将具有较小相位离差值的点选择出来。幅度离差方法也正是基于这样的原理:永久散射体点的幅度稳定性和相位稳定性都很好^[2,3]。该方法首先由Ferretti提出,通过像素点的时序上幅度离差间接评价相位离差值,选择出合适的PS点。一般用SAR信号振幅的变化系数(coefficient of variation)来标志相位稳定度^[6]。对一个给定的像元,振幅标准离差定义为 $\text{std}(V)/E[V]$, $E[V]$ 为均值, $\text{std}(V) = \sqrt{E[V^2] - E[V]^2}$ 为信号振幅的标准差。当离差指数小于给定的阈值时(阈值的选择受SAR数据集的大小、实验区域的面积以及图像分辨率和图像质量的影响,可以灵活选择)该分辨元最终被确定为PS点。该算法的计算基于像素幅度,其优点是保持了分辨率。但这种方法受影像数量的影响较大,在影像数量较少时,不能正确地对幅度稳定性进行统计,产生较大的误差,该误差会体现在PS点的误选中,并在后续永久散射体处理步骤中与其他误差累计并放大。

图1是对天津地区Envisat ASAR数据利用相干系数方法、幅度离差方法和相位离差方法分别进行的PS点选择操作,PS点的选择结果具有较好的一致性。由于选点方法各自的准则不同,因此具体选点的位置随阈值变化而变化,PS点位置和PS点数量并不具有可比性,但是整体PS点分布状态和分布稀疏程度均一致。这3种方法各自具有优缺点。相干系数法具有比较明确的物理含义,但由于估计窗的作用使分辨率降低^[7],尤其是对相对低分辨率的星载图像来说分辨率的降低对PS点选择更不利。幅度离差法和相位离差法基于单个像素点的计算有效地保持了空间分辨率。以上方法所选择出的永久散射体点均表现出PS点数目较少、分布不均匀的特点。同时已有方法均体现在对数据集的统计特性分析上,忽略了其时序特性,造成了时序信息的浪费。

3 类永久散射体识别散射特性依据

地物的散射机理虽然复杂,但基本可以归结为两种情况:分布式散射和点散射。以下分别对这两种情况的散射特性进行叙述并以此做为类永久散射体识别的依据。

情况 1 对于分布式散射单元来说,散射单元要比雷达波长长很多倍,每个散射单元都是很多地形因素和多个散射特性共同作用的结果。在干涉处

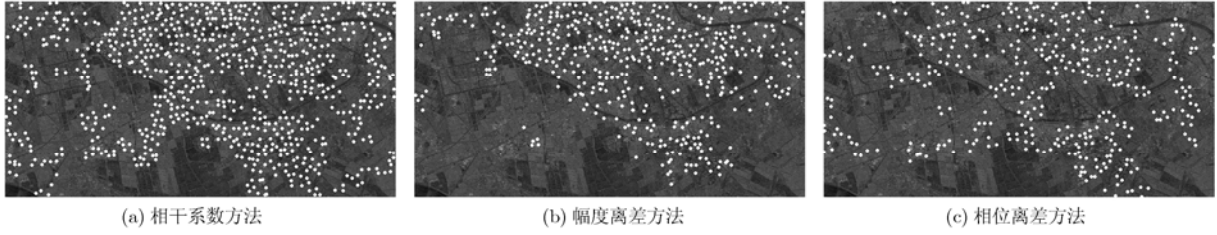


图 1 永久散射体选择方法比较

理中尤其关心的是相位特性，虽然单个散射单元的相位呈均匀分布，但是两相干像元的干涉相位分布却是多视视数和相干系数的函数^[13-15]。

$$\text{pdf}(\varphi; \gamma, L, \varphi_0) = \frac{\Gamma(L + 1/2)(1 - \gamma^2)^L |\gamma| \cos(\varphi - \varphi_0)}{2\sqrt{\pi}\Gamma(L)(1 - \gamma^2 \cos^2(\varphi - \varphi_0))^{L+1/2}} + (1 - \gamma^2)^L / (2\pi) \cdot {}_2F_1(L, 1; 1/2; \gamma^2 \cos^2(\varphi - \varphi_0)) \quad (5)$$

其中 φ, γ, L 分别为干涉相位，相干系数和视数， φ_0 为干涉相位中心，在以下仿真计算中取 0。

$$\Gamma(L) = (L - 1)! \cdot {}_2F_1(L, 1; 1/2; \gamma^2 \cos^2 \varphi)$$

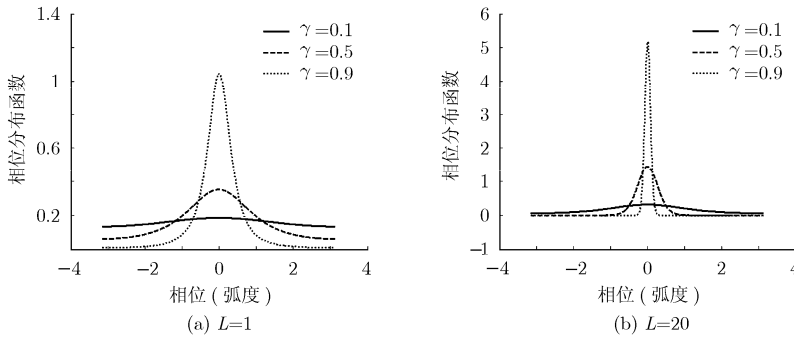


图 2 干涉相位分布函数在不同视数下受相干性影响曲线

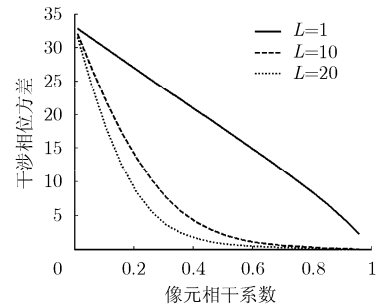


图 3 干涉相位方差受相干性影响曲线

情况 2 对于一个点散射即分辨单元内具有一个主散射体的分辨单元，回波信号可以看做主散射体的回波。杂波是该分辨单元中其他次要散射体的综合作用。散射回波的相位信息对应着主散射体与雷达间的距离，杂波的相位信息则具有随机分布的特性。

在高信噪比像元上，可以用时序振幅信息来衡量相位噪声水平。本文以图 4 对该理论进行定性说明， S 为主散射回波信号， C 为散射单元内的杂波信号，方差 σ_a 。虚线矢量 Z 表示该散射单元的测量回波信号，为主散射回波信号与杂波的矢量叠加。观测信号 Z 的方差大小与杂波 C 的方差大小相同。图 5 是对该理论的定量仿真分析结果。仿真共设置 100

$$= \frac{\Gamma(1/2)}{\Gamma(L)\Gamma(1)} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\Gamma(L+i)\Gamma(1+i)}{\Gamma(1/2+i)} \frac{(\gamma^2 \cos^2 \varphi)^i}{i!}$$

为超几何函数(hypergeometric)。图 2 为分布式散射单元干涉相位的概率分布图，两图的视数 L 分别为 1 和 20，可见干涉相位的分布情况受视数、相干系数影响。当视数增大时，干涉相位的离差就会比较小，相位的错误概率就会降低，这也就是多视降噪的原理。当相干系数增大时，干涉相位的概率分布函数方差也逐渐减小，这也说明了相干系数越大相位准确程度越高。图 3 为分布式散射单元干涉相位方差随相干系数以及多视视数的变化趋势。同样显示出随着相关系数的增加干涉相位的方差越小，且视数越大方差越小。

个点，36 幅图像。用复数信号 $z = s + n$ 表示观测量，信号幅度均设置为 1。噪声分别加于信号实部和虚部，其标准方差从 0.01 到 0.1 均匀变化。图中表示出相位标准离差指数(以 * 表示)和幅度离差指数(以 + 表示)与噪声标准方差(横轴数值)之间的关系。可以看出在噪声较低的时候，幅度离差指数和相位离差指数近似相等。在高信噪比的情况下可以用幅度离差值近似估计相位离差值。

综合情况 1，情况 2 可以得到结论：具备永久散射体特性的散射单元，其相干性、信噪比、幅度离差、相位离差的均表现出较好的特性，即相干性高、信噪比高、幅度离差、相位离差小。由此所形成的不同永久散射体选择方法虽然从选择原理和选择标

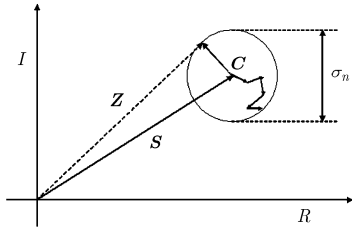


图4 信号与杂波噪声的矢量叠加示意图

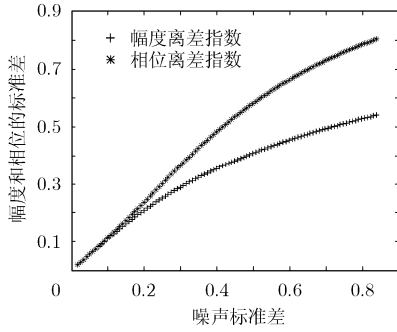


图5 相位离差指数与幅度离差指数的近似程度仿真

准上不同,但对散射单元的区分有效性却是类似的。由于幅度离差方法的有效性兼顾简捷性,因此本文的类永久散射体选择方法以此为基础,对永久散射体的时序特性做进一步辨别区分。

4 类永久散射体的识别方法

类永久散射体是对通常意义的PS点的扩充,其关系如图6所示。本小节对类永久散射体进行定义和区分,然后将其应用于PS点的时序选择。雷达图像在整个监测时间内不可避免会发生一定变化,图7是截取的天津地区一小块实验区域的放大图,圆圈内指示出地物在不同观测时刻明显的幅度变化。图8是对类永久散射体的概念进行的直观解释,其中粗实线表示散射体的高稳定性,只有比较少的点能贯穿整个时间区间段一直保持很高的稳定性,大多数点都在或长或短的时间段上保持稳定。从统计特性参数上来看,类永久散射体点具有较大的幅度标准离差值。图9是对一般非相干点和类永久散射体的数值模拟解释,图9(a)的点在前半段时序上剧烈抖动在后半时间轴上表现平稳,图9(b)的点除中间时段上有一次剧烈波动外,前后半段时序特性均表现平稳。可以看出虽然散射体点的数值统计特性相同,

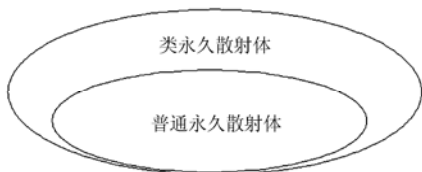


图6 类永久散射体与普通永久散射体的集合关系

但在时间分布状态上却表现出很大差异,因此产生幅度选择法的误判PS点。

时序PS选择法的提出主要是解决时序上幅度突变带来的PS点的误选。为了简化分析,我们先模拟时间序列幅度变化,在分析其变化特点后提出解决问题的办法。下面用一个长度为20的数组来表示时间序列上的20个幅度变化情况,如图10所示。 $a=[0.1\ 0.2\ 0.1\ 0.15\ 0.16\ 0.8\ 0.9\ 0.85\ 0.8\ 0.9\ 0.8\ 0.9\ 0.85\ 0.8\ 0.9\ 0.8\ 0.9\ 0.85\ 0.8\ 0.9]$,其平均幅度值为0.673;振幅标准离差为0.47198。这样大的离差值在PS点选择中通常会被视为非PS点。

本文对时间序列数值进行小范围的离差计算,每个点均和时序上相近 n 个点一起计算离差。 n 值的选取应该根据数据集的大小、图像的数据质量、分布状态等因素灵活选择。图11表示离差计算值,除了5点6点之间的一个尖峰外,其他地方均表现出离差较小的特性,其局部离差平均值为0.20196,在我们实际处理中这类“变化却幅度稳定”的类永久散射体点的性质可以描述成:在整个时序数据集中振幅标准离差值较大,但是其局部离差值除具有一个较大尖峰值外都很小。按照这样的特性,我们可以把这类散射体点重新选为PS点。

5 实验设计分析

以上分析均是以理想状态的情况为例进行的。为进一步证明时序PS选择方法的有效性,本文利用实际数据进行永久散射体提取实验。实验采用欧空局Envisat ASAR单视复数据。表1列出实验数据的主要参数信息。图12为实验区域的幅度图,在图13中对各辅图像数据相对主图像的时间基线和空间基线分布状态进行标注。图14,图15为永久散射体算法的处理流程以及类永久散射体选择方法框图。首先在众多的实验数据中选取一幅主图像,在粗、精配准后将其他辅图像均重采样到主图像空间上,然后进行干涉处理后得到干涉复数据,其干涉相位包含形变信息、地形信息、大气延迟相位信息。实验采用经典的振幅离差法和时序选择法进行对比实验,两种方法均采用相同幅度离差值做为初选标准,因此两种方法可以进行对比实验。从实验结果可以看出在相同幅度离差判别标准下,时序选择方法可

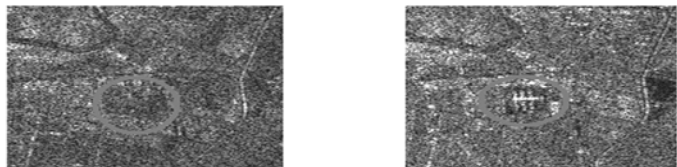


图7 城区地物变化在雷达图像中表现实例(以天津地区ASAR图像数据为例)

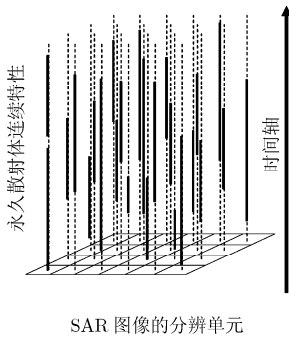
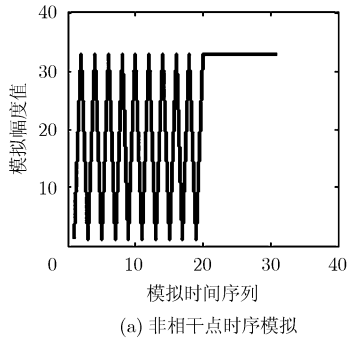
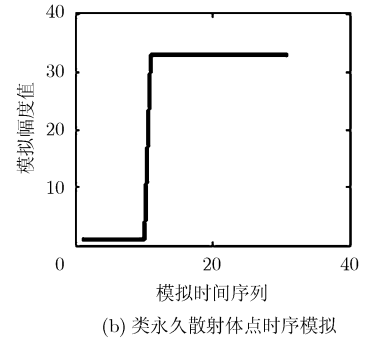


图8 类永久散射体概念示意图



(a) 非相干点时序模拟



(b) 类永久散射体点时序模拟

图9 非相干点和类永久散射体概念数值解释图

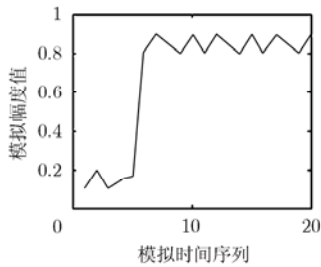


图10 模拟序列时序振幅数值

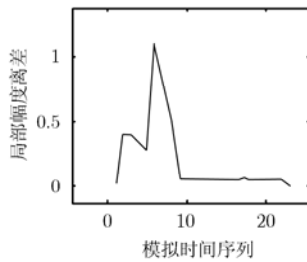


图11 模拟序列振幅局部偏差值

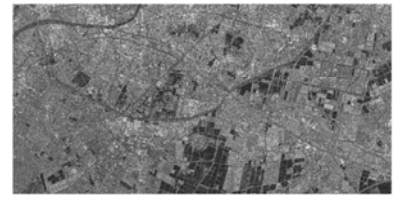


图12 实验区域幅度图像

表1 实验数据概要

数据地区	图像数目	获取时间	主图像轨道号	平均基线距离(m)	平均时间间隔(天)
天津	17	2004-03-05~2007-10-26	14028	174.5	470

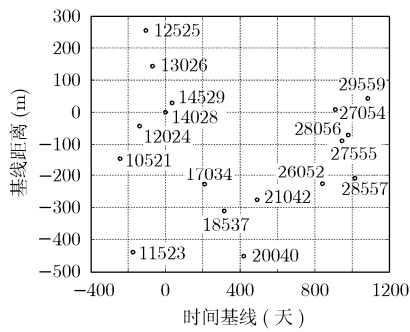


图13 实验数据时间基线空间基线分布状态

均匀，尤其弥补了原本PS点分布稀疏的区域，从而纠正了最后形变速率的估计值，使整个区域的形变估计不局限于部分过于集中的PS点的形变计算值，使形变监测更准确。

图16中白色方框标注出的点是类永久散射体点。与长达3年的漫长监测时间相比，这两个点的变化发生时间是短暂的，这样的变化并没有改变其做为永久散射体的性质。图17是其中两个点对应的时序幅度变化图，与仿真分析中的图形类似，说明检测出的类永久散射体点与仿真分析一致。从类永久体点的帮助下，扩大了PS点的分布范围，增大了PS点的分布密度，同时对已有PS点进行部分修正。为

以得出更多的表现稳定的PS点，并且在类永久散射体的帮助下，PS点在整个监测区域的分布更广、更

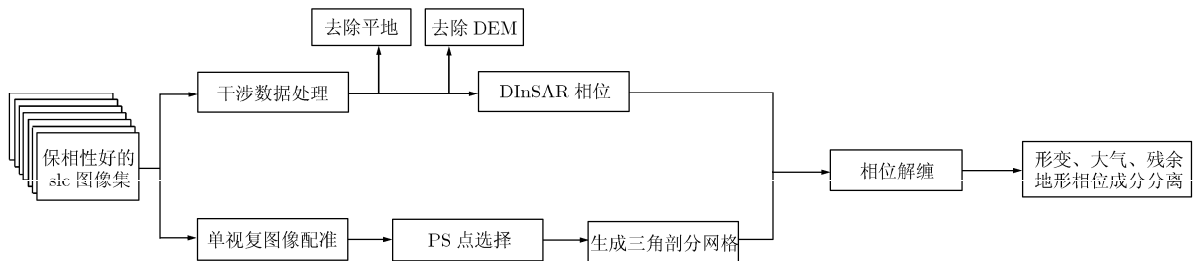


图14 永久散射体处理流程

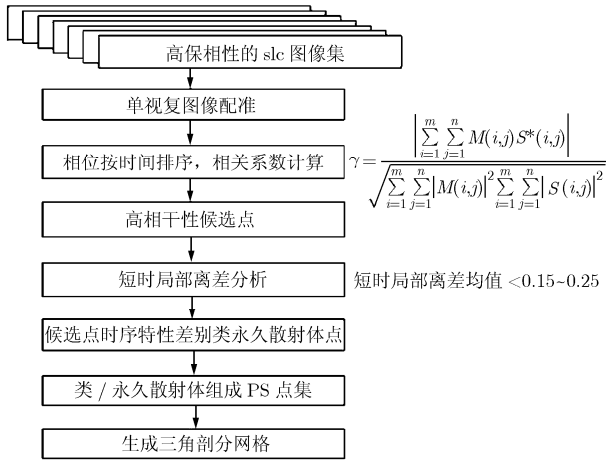


图15 类永久散射选择方法框图

验证类永久散射体点选择的准确性，本文以散射体点的相干性对所选择永久散射体进行验证。由散射体性质可知虽然散射体点通常具有较高相干性，这

点特性在永久散射体点相干系数直方分布图中可以看出，如图18(a)所示。在添加了类永久散射体点后，永久散射体相干系数的整体分布状态并没有明显变化，如图18(b)所示。将类永久散射体的相干系数单独提取出来进行分析，如图18(c)所示，类永久散射体点的相干系数虽然略低但仍然在可靠的范围内。因此类永久散射体技术虽然在PS点选择中相干系数略有损失，但这样的损失在整体PS点集中表现并不明显，同时却改善了永久散射体点的分布状态和数量。

6 结束语

永久散射体的选择是永久散射体干涉测量技术中的基础环节，也是最重要的环节。PS点的误选和漏选都会在后处理过程中产生放大性的误差。本文提出的永久散射体时序选择方法在实际数据处理中由于数据质量较差或缺失有时会导致数据集时间

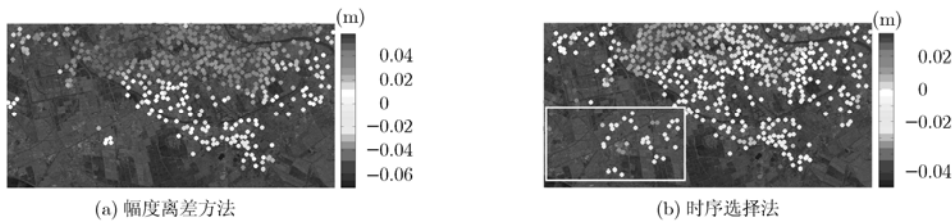


图16 天津永久散射体点幅度离差方法与时序选择法对比实验

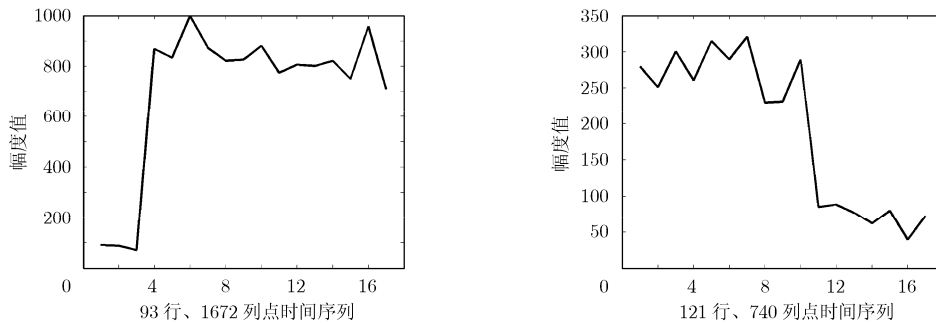


图17 天津两个类永久散射体点的幅度时序变化值

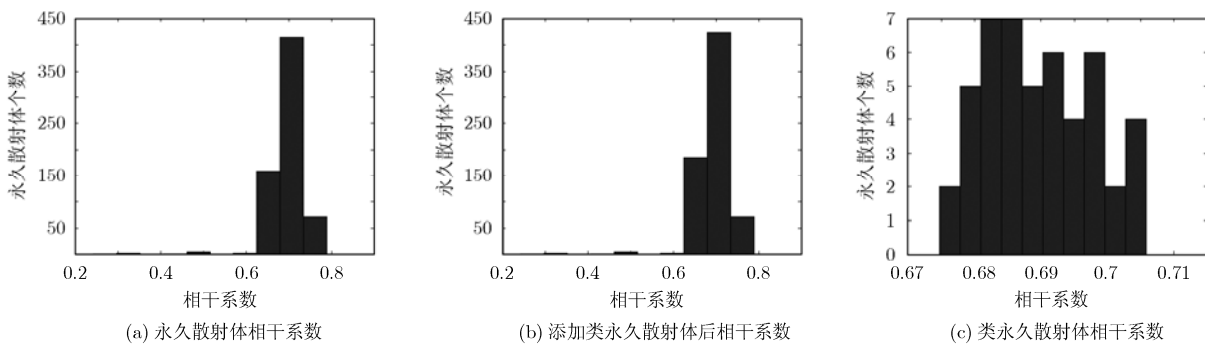


图18 类永久散射体添加前后相干系数直方图对比

分布不均匀。时间分布过度不均会影响对PS点的判断,在以后的研究工作中可以采用谱估计等方法对PS点的时域特性进行进一步研究。时序选择方法通过增加PS点识别的时间维度分辨改善了PS点整体空间分布,增加了PS点数目,但对PS点集相干性的降低比较有限。因此综合来看时序选择法以较小的代价换取了整体监测性能的改善。

参 考 文 献

- [1] Ferretti A, Prati C, and Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8-20.
 - [2] Costantini M, Falco S, Malvarosa F, and Minati F. A new method for identification and analysis of persistent scatterers in series of SAR images[C]. Proc. Int. Geosci. Remote Sensing Symp, Boston, America. July 6-11, 2008: 449-452.
 - [3] Chaabane F, Sellami M, Nicolas J-M, and Tupin F. InSAR permanent scatterers selection using SAR SVA filtering[C]. Proc. Int. Geosci. Remote Sensing Symp, Cape Town, South Africa, July 12-17, 2009: 13-16.
 - [4] De Maio A and Fornaro G. Detection of double scatterers in SAR tomography[C]. Proc. Int. Geosci. Remote Sensing Symp, Cape Town, South Africa, July 12-17, 2009: 172-175.
 - [5] Ferretti A, Prati C, and Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2202-2212.
 - [6] Kampes M. Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique[M]. Germany, German Aerospace Center (DLR), 2006: 6-30.
 - [7] Hooper J. Persistent scatterer radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation[D]. Stanford University, 2006: 18-29.
 - [8] Hanssen R. Radar Interferometry Data Interpretation and Error Analysis[M]. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001: 61-79.
 - [9] Ferretti A, Novali F, Zan F, Prati C, and Rocca F. Moving from PS to slowly decorrelating targets: a prospective view[C]. EUSAR2008, Kostas Papathanassiou, Germany, June 2008: 223-226.
 - [10] Perissin D, Ferretti A, Piantanida R, Piccagli D, Prati C, Rocca F, Rucci A, and Zan F. Repeat-pass SAR interferometry with partially coherent targets[C]. Proc. of Fringe, Frascati, Italy, Nov. 26-30, 2007: 368.
 - [11] Lombardini F and Pardini M. Multiple scatterers identification in complex scenarios with adaptive differential tomography[C]. Proc. Int. Geosci. Remote Sensing Symp, Cape Town, South Africa, July 12-17, 2009: 908-911.
 - [12] Marotti L, Parizzi A, Adam N, and Papathanassiou K. Coherent vs. persistent scatterers: a case study[C]. Proceedings of EUSAR2008, Kostas Papathanassiou, Germany, June 2008: 289-292.
 - [13] Rodriguez E and Martin M. Theory and design of interferometric synthetic aperture radars[J]. *IEEE Proceedings-F*, 1992, 139(2): 147-159.
 - [14] Barber C. The phase statistics of a multichannel radar interferometer[J]. *Waves in Random Media*, 1993, 3: 243-256.
 - [15] Lee J S, Hoppel K W, Mango S A, and Miller A R. Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric SAR imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 30: 10-17.
- 曲世勃: 男, 1980年生, 博士生, 研究方向为干涉 SAR 形变监测。
- 王彦平: 男, 1976年生, 副研究员, 研究方向为干涉 SAR、SAR 三维成像。
- 洪文: 女, 1968年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为 SAR 新概念、新体制、新方法。