

文章编号: 1001-1595(2007)04-0395-05

中图分类号: P237

文献标识码: A

# PS-DInSAR 公共主影像的优化选取

陈 强<sup>1</sup>, 晓利<sup>2</sup>, 刘国祥<sup>2</sup>

(1. 香港理工大学 土地测量与地理资讯学系, 香港 九龙; 2. 西南交通大学 测量工程系, 四川 成都 610031)

## Method for Optimum Selection of Common Master Acquisition for PS-DInSAR

CHEN Qiang<sup>1</sup>, DING Xiao-li<sup>2</sup>, LIU Guo-xiang<sup>2</sup>

(1. Department of Land Surveying and Geoinformatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China; 2. Department of Surveying Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Considering the joint effects of spatio-temporal baselines and Doppler centroid frequency difference on interferometric correlation of image pairs in DInSAR, the algorithm for the selection of optimum common master image is proposed. The joint correlation function is given as the coherence measure of interferometric pairs. The model for optimum selection of common master acquisition and the corresponding computing method are presented. The experiments of master image selection by the joint correlation method are performed using the 25 SAR scenes over Shanghai taken by the satellites ERS-1/2 from 1992 to 2002. The testing results show that the joint correlation model and computing method are effective and reliable.

**Key words:** common master acquisition; optimum selection; permanent scatterers; SAR differential interferometry

**摘 要:** 在充分顾及 DInSAR 时空基线跨度及多普勒质心频率差异 3 个因素对干涉相关性影响的基础上, 提出一种 PS-DInSAR 公共主影像的优化选取算法, 采用综合相关测度作为总体干涉相关性的衡量指标, 给出具体的综合相关函数模型及其求解方法。借助欧洲空间局(ESA) ERS-1/2 卫星从 1992-2002 年间飞越上海地区所获取的 25 幅 C 波段 SAR 影像作为源数据, 开展了 PS-DInSAR 公共主影像的优化选取实验。计算结果与分析表明, 综合相关系数模型用于 PS 公共主影像的优化选取是有效的和可靠的。

**关键词:** 公共主影像; 优化选取; 永久散射体; 合成孔径雷达差分干涉

## 1 引 言

基于永久散射体(Permanent Scatterers, PS)的合成孔径雷达差分干涉测量(Synthetic Aperture Radar Differential Interferometry, DInSAR)具有探测微小地表形变的潜力<sup>[1~5]</sup>, 尤其是应用于探测长期累积的缓慢形变(如城市地面沉降), 具有十分突出的技术优势。除了具备常规差分干涉空间分辨率高、覆盖范围广等特点外, PS-DInSAR 还具有非常强健的环境适应能力。首先, 在空间尺度上, 即使 SAR 影像干涉对的有效空间基线处于临界状态, PS 几乎不受几何失相关噪声影响, 均能保持较高的干涉相关性, 这使得干涉测量可以在同一地区的所有多时相 SAR 影像上进行;

其次, 在时间跨度上, 即使经过较长的时间间隔(意大利 Ferretti 等人试验证明可为 6~8 年), PS 均能保持较为稳定的雷达散射特性, 其干涉相关性几乎不受随机扰动的影响; 第三, 在剔除大气延迟对干涉测量精度的负面影响方面<sup>[1~3]</sup>, PS 的高信噪比特性能够保障对大气异质性的成功分离从而提高地表形变探测的精度和可靠性。自 2000 年 Ferretti 等人率先提出 PS 概念以来, 经过近几年的发展, PS-DInSAR 凭借其独特的技术优势, 在监测区域地表形变如火山运动、冰川漂移、山体滑坡以及城市沉降等方面已逐渐展现出广阔的应用前景<sup>[1~3]</sup>。

PS-DInSAR 这一新兴技术正处于理论及应用不断发展和完善阶段, 其处理过程较为复杂, 要

收稿日期: 2006-09-22; 修回日期: 2007-06-01

基金项目: 香港特区政府研究资助局资助项目(PolyU 5161/06E; B-Q02C)

作者简介: 陈 强(1974), 男, 重庆人, 西南交通大学测量工程系讲师, 主要从事 InSAR 及遥感研究。

经历公共主影像选取、影像配准、相位干涉、PS 识别、信号分离、相位解缠和地理编码等一系列流程,各个处理过程对干涉结果的精度和可靠性都具有显著影响。Ferretti、Prati<sup>[1,2]</sup>等人提出的 PS 干涉测量技术是采用共用惟一主影像的时序差分方法,其公共主影像的选取是基于时间基线最佳(即位于时间跨度中间)的方法确定,而对干涉相关性影响非常显著的因子还包括干涉对的有效空间基线和 Doppler 质心频率;Zhang Hua<sup>[6]</sup>等人提出的一种主影像优化选取算法仅考虑了时间与空间基线,并指出 Doppler 质心频率以及季节因素对干涉相关性具有显著影响。复数影像之间的相关程度对于 InSAR 的成功处理起着决定性作用<sup>[7,8]</sup>,相关性越好,干涉测量结果越可靠,而较低的干涉相关性则可能导致干涉测量失败,如对于检测缓慢累积的地表沉降,必须仔细选择那些既具有一定的时间跨度而且又具有较小空间基线的 SAR 影像集构成干涉对,以保证足够高的干涉相关性,从而提高干涉测量成功的几率,否则可能由于严重的干涉失相关导致干涉测量的不可行。

从多时相 SAR 影像集中选取时空基线和多普勒质心频率参数分布最优的一幅影像作为干涉对的公共主影像,是保障 PS 干涉测量能够取得可靠成果的关键环节之一<sup>[3,6]</sup>。本文在 Ferretti、Kampes 及 Zhang Hua 等人的研究基础上<sup>[1~3,6]</sup>,改进了 PS-DInSAR 公共主影像的选取方法,在充分顾及时空基线跨度及多普勒质心频率三个因素对干涉相关性的影响基础上,提出采用综合相关函数作为总体干涉相关程度的衡量指标,并给出了具体的函数模型和求解方法。借助欧空局(ESA)ERS-1/2 卫星从 1992-2002 年间飞越上海地区所获取的 25 幅 C 波段 SAR 影像作为数据

源,开展了 PS-DInSAR 公共主影像的优化选取实验,对算法的可行性和可靠性进行了分析和讨论。

## 2 主影像优化选取模型及其求解方法

根据常规 DInSAR 理论<sup>[6-8,10]</sup>,构成干涉对的时空基线和 Doppler 质心频率差异是影响干涉相关的重要因素。对于形变测量来说,有效空间基线(即基线的垂直分量)长度越短,几何失相关越小,地形误差对干涉相位的贡献越弱,这极其有利于形变信号的提取;对于测量那些缓慢累计的微小地表形变(如城市地面沉降)来说,影像必须具有较长的时间跨度,而时间跨度的增加极易导致干涉失相关;此外两幅影像多普勒质心频率的差异大小也直接影响干涉相关的程度<sup>[8,10]</sup>。

因此,从多时相 SAR 影像中选取公共主影像时,必须综合考察干涉对的所有组合在时间基线、有效空间基线和多普勒质心频率差异等的分布情况,从中选择整体最优的一幅影像作为所有干涉对的共用主影像。特别是随着可用 SAR 影像数量的增加,优化选取一幅公共主影像问题更加突出。

为寻找解决该问题的有效途径,本文尝试采用一定的数学方法对该问题进行建模,然后以评价测度为判断准则,查找数学模型的最优解,以此实现公共主影像的优化选取。

假设有覆盖同一地区的  $K$  幅 SAR 影像,则可以列出全部影像之间时间基线  $T_{ij}$ 、垂直空间基线  $B_{ij}$  和多普勒质心频率差  $f_{ij}$  的所有组合,其中  $i, j$  分别为影像编号,将时间基线、有效空间基线和多普勒质心频率差分别采用如表 1 所示的形式表达。

表 1 时间基线-空间基线-Doppler 质心频率差异组合表

Tab. 1 Combination of spatial baselines, spatial baselines and Doppler centroid frequency difference

影像序号	1	2	3	...	K
1	0	$T_{12} - B_{12} - f_{12}$	$T_{13} - B_{13} - f_{13}$	...	$T_{1K} - B_{1K} - f_{1K}$
2	$T_{21} - B_{21} - f_{21}$	0	$T_{23} - B_{23} - f_{23}$	...	$T_{2K} - B_{2K} - f_{2K}$
3	$T_{31} - B_{31} - f_{31}$	$T_{32} - B_{32} - f_{32}$	0	...	$T_{3K} - B_{3K} - f_{3K}$
...	...	...	...	0	$T_{(K-1)K} - B_{(K-1)K} - f_{(K-1)K}$
K	$T_{K1} - B_{K1} - f_{K1}$	$T_{K2} - B_{K2} - f_{K2}$	$T_{K3} - B_{K3} - f_{K3}$	$T_{K(K-1)} - B_{K(K-1)} - f_{K(K-1)}$	0

影响干涉相关性的主要因素为两幅影像获取的时间间隔、垂直空间基线和多普勒质心频率差<sup>[6,8,10]</sup>。两幅 SAR 影像成像时间间隔越长,时

间失相关越严重;有效空间基线越大,导致雷达对地面入射角差异增大,这极易引起几何失相关;多普勒质心频率差异越大,干涉相关性越小。因此,

在充分顾及时间基线、有效空间基线和多普勒质心频率差异三个因素对干涉相关贡献的基础上,建立如下的综合相关(Joint Correlation, JC)函数模型。

$$y^m = \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^{K-1} c(B_{\perp}^{k,m}, B_c)^{\alpha} \times [c(T^{k,m}, T_c)]^{\beta} \times [c(f_{DC}^{k,m}, f_c)]^{\theta} \quad (1)$$

其中,函数  $c$  为单体因素的相关性测度,其定义为

$$c(x, a) = \begin{cases} 1 - \frac{|x|}{a} & x < a \\ 0 & x \geq a \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $y^m$  为综合相关系数,  $T^{k,m}$ ,  $B_{\perp}^{k,m}$  和  $f_{DC}^{k,m}$  分别为影像  $k$  和  $m$  所形成干涉对的时间基线、垂直空间基线和多普勒质心频率差,  $B_c$ ,  $T_c$  和  $f_c$  分别为其临界条件,  $\alpha$ ,  $\beta$  和  $\theta$  为对应的指数因子,代表各单体因素的贡献程度。

上述函数模型能够充分表达干涉相关的实际情况。干涉对的时间基线、垂直空间基线和 Doppler 质心频率差的绝对大小与单体因素相关性测度  $c$  成递减关系<sup>[10]</sup>。基线参数越大,干涉相关性越小,当基线参数为临界值,相关系数达到零即完全失相关, Doppler 质心频率差异与相关函数值的关系也服从相同的规律<sup>[10]</sup>。因此,借助该模型则可将主影像的优化选取转化为一个目标函数的极值求解。

将式(1)看作一个优化函数,  $T^{k,m}$ ,  $B_{\perp}^{k,m}$  和  $f_{DC}^{k,m}$  是函数的所有离散取值,将所有组合形成干涉对的基线参数分别代入综合相关函数,当自变量  $T^{k,m}$ ,  $B_{\perp}^{k,m}$  和  $f_{DC}^{k,m}$  的取值使得目标函数达到最大值时,这组参数被认为是模型的最优解,所对应的影像  $m$  即为基线分布综合最佳的一幅公共主影像。

### 3 实验数据与结果分析

#### 3.1 影像数据

为验证上述提出的 PS-DInSAR 公共主影像的优化选取算法,选择欧洲空间局 ERS-1/2 卫星于 1992-2002 年间对中国上海地区成像所获取的 C 波段 SAR 数据为处理对象。上海地区由于历史上过度的地下水抽取和近年来大规模的城市建设,地面沉降问题非常突出<sup>[11,12]</sup>。使用 PS-DInSAR 技术探测和监测该地区的地面沉降具有极其重要的社会意义和经济价值<sup>[12,13]</sup>。覆盖该地区的 25 幅 SAR 影像的参数信息参见文献[9]中的表 1,这里不再累述。

#### 3.2 基线组合

一方面,借助于 DESCW (Display Earth Remote Sensing Swath Coverage, Eurimage 与 ESA/ESRIN 合作开发) 软件,快速估算出影像组合所形成全部干涉对的垂直空间基线和时间基线;另一方面,通过分析并提取 SAR 影像头文件的 Doppler 质心频率参数,计算出干涉对的 Doppler 质心频率差值。

作为示例,图 1 和图 2 分别显示了编号为 10-18 的影像与其余所有影像组合形成干涉对的垂直空间基线、时间基线(参考影像为序号 16)的分布情况。

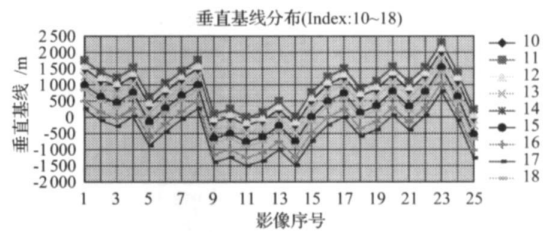


图 1 干涉对的垂直空间基线分布

Fig. 1 Normal baselines distribution of interferometric pairs

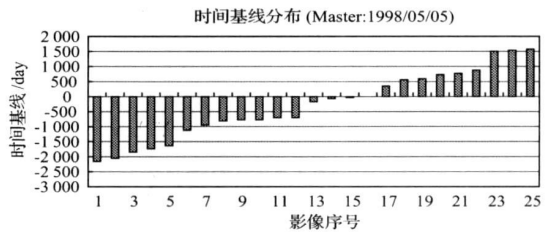


图 2 以 1998/05/05 为主影像的时间基线分布

Fig. 2 Temporal baselines distribution on 1998/05/05 master acquisition

从两种基线分布图来看,最长的垂直基线长度超过 2 000 m,最长的时间间隔超过 6 年。在这些超长基线条件下,如果采用常规差分干涉方法进行地表形变信号的提取,将会由于严重的失相关噪声,导致干涉测量完全不可行。而如果仅仅将处理对象集中在那些具有稳定散射特性的 PS 像素子集上,则 PS 上的地形数据误差和大气延迟误差等能够被分离,从而精确提取 PS 上的地表形变信号,其他低信噪比像素集的形变信息可通过内插方法计算得到<sup>[1,2]</sup>。

#### 3.3 主影像优化选取结果与分析

根据上述所有干涉对组合得到的基线数据,

采用前述的相关函数模型逐影像计算其综合相关系数,其中基线参数临界值和指数因子的采用原则分别如下。

1. 采用所有干涉对的最大基线值作为函数模型中3种基线参数的临界值,即时间基线临界值为  $T_c = 3\ 800\text{ d}$ ,空间基线临界值为  $B_c = 2\ 300\text{ m}$ ,Doppler 质心频率基线临界值为  $f_c = 4\ 100\text{ Hz}$ 。

2. 为比较并分析3种基线参数对最终综合相关性的贡献程度,对指数因子  $\alpha$ ,  $\beta$  和  $\theta$  分别取不同的组合值,即  $[\alpha, \beta, \theta]$  取值分别为  $[1, 1, 1]$ ,  $[2, 1, 1]$ ,  $[1, 2, 1]$ ,  $[1, 1, 2]$ ,  $[2, 2, 1]$ ,  $[2, 1, 2]$  和

$[1, 2, 2]$ ,以考查指数因子的取值差异是否会对目标函数的优化起导向影响。也就是说,前述的优化函数模型是否会由于指数因子的不同而产生显著的摆动。

依据上述原则确定的各基线临界值和指数因子,并借助各干涉对的基线参数值,分别计算以每一影像为主影像下的综合相关系数值,对每一指数因子下的相关系数进行排序,考查其中最大的3个数值。表2列出了在每组指数因子下综合相关性最大的前面3个影像,分别用不同色调标识了这3个数值。

表2 不同指数因子计算下的目标函数最大值  
Tab.2 Maximum function value on different exponential index

目标函数值	指数因子: $[\alpha, \beta, \theta]$						
影像编号	$[1, 1, 1]$	$[2, 1, 1]$	$[1, 2, 1]$	$[1, 1, 2]$	$[2, 2, 1]$	$[2, 1, 2]$	$[1, 2, 2]$
6	0.512 853	0.392 978	0.410 807	0.492 891	0.312 870	0.380 194	0.394 895
13	0.503 468	0.406 791	0.383 825	0.479 669	0.314 213	0.390 216	0.366 981
15	0.529 551	0.424 612	0.415 254	0.506 247	0.335 412	0.408 790	0.398 104
16	0.532 045	0.419 607	0.432 196	0.507 717	0.339 304	0.403 304	0.412 244
19	0.503 368	0.392 210	0.413 316	0.480 064	0.326 245	0.375 964	0.394 662

从上表计算得到的综合相关系数可以看出,最大相关系数值有5次(占总体的~71%)出现在影像序号为16的影像上,对应的指数因子分别为  $[1, 1, 1]$ ,  $[1, 2, 1]$ ,  $[1, 1, 2]$ ,  $[2, 2, 1]$  和  $[1, 2, 2]$ ; 有2次(~29%)出现在影像序号为15的影像上,对应的指数因子分别为  $[2, 1, 1]$  和  $[2, 1, 2]$ 。

为进一步分析综合相关系数的分布,将全体计算数据绘制成相关系数分布图,考察在不同指数因子下综合相关系数的变化情况。图3为采用不同指数因子得到的综合相关系数曲线,可以看出,尽管采用7种指数因子进行计算,但曲线表现出较高的相似性,其趋势和走向非常接近,在不同影像序号上曲线的起伏情况几乎都是一致的。比如,在影像序号为第6,15和16位置处,综合相关系数呈现极大值,在影像序号为14,23位置处,综合相关系数呈现出极小值,遵循着相同的规律。

根据计算得到的综合相关系数序列,选取  $r$  为最大值时对应的影像为主影像。从上面的数据统计和图像分析,可以充分认为,编号为16(即1998年5月5日成像)的影像为第一优选公共主影像,而编号为15(即1998年3月31日成像)和编号为6(即1995年4月10日成像)的影像分别

为第二、三优选的公共主影像。至此,基于综合相关函数模型及其求解方法就完成了时序差分干涉公共主影像的优化选取。

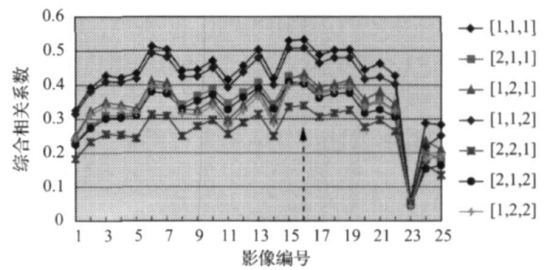


图3 综合相关系数曲线图

Fig. 3 Chart of Joint Correlation coefficient of the interferometric pairs

### 4 结论

PS-DInSAR 技术的第一个重要环节是从多时相 SAR 影像中选取一幅公共影像作为时序差分干涉的惟一主影像,其余所有影像均为从影像,将从影像分别配准并取样到主影像空间,形成多个干涉对。为了提高 PS 干涉测量的成功几率,确保地表形变信号提取的可靠性,必须选取在时

间基线、空间基线和 Doppler 质心频率基线分布最佳的一幅主影像, 以此得到整体最优的基线参数, 从而提高干涉相关性。尤其是随着可用 SAR 影像数量的增加, 优化选取公共主影像问题更加突出。

本文提出采用综合相关函数对主影像优化选取进行建模, 查找相关系数模型的最优解, 以此实现最佳公共主影像的选取。理论分析和实验计算数据表明, 综合相关函数模型用于最佳公共主影像的选取是可行的。

实验结果和综合相关系数曲线图还充分说明, 不同指数因子对综合相关系数不会产生显著的摆动影响, 综合相关系数模型及其求解方法对于 PS-DInSAR 公共主影像的选取是惟一的, 综合相关系数模型及其求解方法具有较强的稳健性和可靠性。

进一步研究的方向是借助于优化选取得到的公共主影像, 与其余从影像配成干涉对, 开展时序差分干涉处理, 分离并提取 PS 目标干涉相位中的大气分量、DEM 误差和形变信号。

#### 参考文献:

[1] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1): 8-19.

[2] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Non-linear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 38(5): 2202-2212.

[3] KAMPES B M, ADAM N. Velocity Field Retrieval from Long Term Coherent Points in Radar Interferometric Stacks [A]. Proc IGARSS 2003[C]. Toulouse: [s. n.], 2003. 941-943.

[4] LIU Guo-xiang, DING Xiao-li, CHEN Yong-qi, et al. Ground Settlement of Chek Lap Kok Airport Hong Kong, Detected by Satellite Synthetic Aperture Radar Interferometry[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(21): 1778-1782.

[5] WANG Chao, ZHANG Hong, LIU Zhi, et al. Satellite SAR Interferometric Observations of Displacement Associated with Urban Subsidence in Suzhou Eastern China[J]. Progress in Natural Science, 2002, 12(10): 798-801.

[6] ZHANG Hua, ZENG Qi-ming, LIU Yi-hua, et al. The Optimum Selection of Common Master Image for Series of Differential SAR Processing to Estimate Long and Slow Ground Deformation[A]. Proc IGARSS 2005[C]. Seoul: [s. n.], 2005. 4586-4589.

[7] LIU Guo-xiang. Mapping of Earth Deformations with Satellite Radar Interferometry: A Study of Its Accuracy and Reliability Performances[D]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2003. 7-220.

[8] ZEBKER H A, VILLASENOR J. Decorrelation in Interferometric Radar Echoes[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30: 950-959.

[9] CHEN Qiang, LIU Guo-xiang, LI Yong-shu, et al. Automated Detection of Permanent Scatterers in Radar Interferometry: Algorithm and Testing Results[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, 35(2): 112-117. (陈强, 刘国祥, 李永树, 等. 干涉雷达永久散射体自动探测—算法与实验结果[J]. 测绘学报, 2006, 35(2): 112-117.)

[10] WANG Chao, ZHANG Hong, LIU Zhi. Satellite Synthetic Aperture Radar Interferometry[M]. Beijing: Science Press, 2002. (王超, 张红, 刘智. 星载合成孔径雷达干涉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002.)

[11] LIU Yi, ZHANG Xiaolin, WAN Guifu, et al. The Situation of Land Subsidence and Countermeasures in Shanghai for Recent Years[J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998, 9(2): 13-17. (刘毅, 张先林, 万贵富, 等. 上海市近期地面沉降形势与对策建议[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(2): 13-17.)

[12] ZHANG Wei-ran, DUAN Zheng-liang, ZENG Zheng-qiang, et al. Feature of Shanghai Land Subsidence and Its Damage to Social-economic System[J]. Journal of Tongji University, 2002, 30(9): 129-133. (张维然, 段正梁, 曾正强, 等. 上海市地面沉降特征及对社会经济发展的危害[J]. 同济大学学报, 2002, 30(9): 129-133.)

[13] WANG Yong, ZUO Hua. Evaluation of Economical Loss of Land Subsidence in Shanghai[J]. Journal of Natural Hazard, 1993, 2(1): 16-23. (王勇, 左华. 上海市地面沉降的经济损失评估[J]. 自然灾害学报, 1993, 2(1): 16-23.)

(责任编辑: 雷秀丽)