

基于 PS-InSAR 和 GIS 空间分析的 南通市地面沉降监测

何秀凤, 仲海蓓, 何敏

(河海大学 卫星及空间信息应用研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 为提高永久散射体雷达差分干涉测量(PS-InSAR)技术中大气延迟相位提取精度,在采用滤波方法从残余相位中提取大气延迟相位时,提出了基于结构函数的最佳滤波方法及滤波窗口大小的自动确定方法;并对 PS(permanent scatterer)点的线性形变速率进行空间分析,了解其数据分布,探测离群值,然后进行 Kriging 插值,以获得高分辨率的沉降速率图.为验证方法的有效性,以江苏南通市区为试验区域,采用 2006—2007 年间 15 幅 Envisat 卫星 SAR(synthetic aperture radar)图像进行地面沉降监测.结果表明,该方法有利于确保大气延迟相位的提取精度,获得了南通市区高分辨率的沉降速率图,发现南通市区存在多个沉降漏斗,但在 2006—2007 年间没有出现沉降速率特别大的沉降漏斗,大部分区域的沉降速率不超过 $11 \text{ mm} \cdot \text{年}^{-1}$.

关键词: 永久散射体雷达差分干涉测量;地面沉降监测;大气延迟影响;结构函数;空间分析

中图分类号: P237

文献标识码: A

Ground Subsidence Detection of Nantong City Based on PS-InSAR and GIS Spatial Analysis

HE Xiufeng, ZHONG Haibei, HE Min

(Institute of Satellite Navigation & Spatial Information System, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The best filter method was proposed and the window size was determined by the structure function to improve the accuracy of extracting the atmospheric effects from the residual phase by filtering in the Permanent scatterer interferometry SAR (PS-InSAR) technique. The linear deformation rate of permanent scatterers was analyzed to examine the distribution of data and detect outliers, and then was interpolated with Kriging method. To verify the method, Nantong was chosen as the test area and 15 Envisat SAR

images acquired during period of 2006—2007 were used to detect the ground subsidence of Nantong. The experimental results show that the method can improve the accuracy of the extraction of atmospheric effects. A ground subsidence rate map of Nantong with high resolution is generated. Several subsidence funnels are found in Nantong downtown during the period of 2006—2007. There are not large subsidence funnels in Nantong downtown between 2006 and 2007, and the subsidence rate of most regions in Nantong city is no more than 11 mm annually.

Key words: permanent scatterers technique; monitor ground subsidence; atmospheric effects; structure function; spatical analysis

城市地面沉降给城市居民生活和城市可持续发展带来诸多不利影响,我国目前已有 95 个大中城市出现不同程度的地面沉降.为了预防地面沉降带来的灾害,必须进行长期有效的地面沉降监测.传统的沉降监测方法主要有基岩标、分层标测量,水准测量及 GPS 测量等,这些方法只能获取有限点位的变化信息,难以掌握整个地区的地面沉降,且周期长、费用高,无法满足实时或准实时的需要^[1-3].与传统方法相比,合成孔径雷达差分干涉技术(DInSAR)有着独特的高形变敏感度、高空间分辨率、基于面观测和几乎不受云雨天气限制等技术优势,已在监测区域地表形变(如地震位移、火山运动、冰川漂移以及城市沉降等)方面表现出极大的潜力.

但常规 DInSAR 的应用目前受到两个不利因素的制约:一方面是时空失相关引起严重的相位噪声,另一方面是空间与时间尺度上不同的大气相位延迟降

收稿日期: 2009-09-10

基金项目:江苏省科技支撑计划(BE2010316)

第一作者:何秀凤(1962—),女,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为 InSAR 及多源数据融合、变形监测新方法、卫星大地测量等.
E-mail:xfhe@hhu.edu.cn

低了形变测量结果的可靠性^[4]. 针对上述两个问题, Ferretti 等^[5-6]提出了仅跟踪成像区域内雷达散射特性较为稳定的永久散射体(permanent scatter, PS)技术, 该技术是在 DInSAR 基础上, 以保证所获沉降场精度为前提, 损失一定的空间分辨率, 从面状观测转为点状观测, 获得高时间采样率的一种方法, 该方法提高了 DInSAR 技术在形变监测中的可用性和可靠性. PS 技术中大气延迟相位主要采用滤波方法获得. 目前, 最佳滤波方法及滤波窗口大小的确定都是依靠经验, 针对这一问题, 本文提出基于结构函数的最佳滤波方法及滤波窗口大小的自动确定方法, 利用 GIS 空间分析, 对 PS 点目标线性沉降速率分布情况和离群值进行探测, 并进行 Kriging 插值, 以获得高分辨率的沉降速率图. 为验证方法的有效性, 以江苏南通市区为试验区域, 采用 2006—2007 年间 15 幅 Envisat 卫星 SAR 图像进行地表沉降探测.

1 PS-InSAR 技术和空间分析原理

1.1 PS-InSAR 原理

假设有覆盖同一地区的 $K+1$ 幅 SAR 影像, 选择其中一幅影像作为主影像, 其余的所有影像都配准并采样到主影像像素空间, 形成 K 个干涉对. 对于 $K+1$ 幅配准的 SAR 影像, 采用一定的算法探测出研究区内的 PS 点. 对于 K 个干涉对, 借助已有的数字高程模型(DEM)进行差分干涉处理, 就可以得到 K 幅差分干涉相位, 从而得到每个 PS 点的 K 个时序差分干涉相位. 每个 PS 点的差分干涉相位 ϕ_{dint} 包括 DEM 高程误差导致的相位项 ϕ_{dem} , 沿 LOS(line of sight)方向的地表形变相位 ϕ_{def} , 大气影响相位 ϕ_{atm} 及噪声相位 ϕ_{noise} ^[5].

$$\phi_{\text{dint}} = \phi_{\text{dem}} + \phi_{\text{def}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{noise}} = C_h B_{\perp} \delta_H + C_v t v + \phi_{\text{res}} \quad (1)$$

式中: $C_h = 4\pi/(\lambda R \sin \theta)$, λ 为雷达波长, R 为雷达到地面目标的斜距, θ 为雷达入射角; B_{\perp} 为干涉对垂直基线; δ_H 为 DEM 高程改正; $C_v = 4\pi/\lambda$; t 为干涉对时间基线; v 为沿雷达视线方向的线性形变速率; ϕ_{res} 是 PS 点的残余相位, 它是大气延迟、非线性形变和失相关噪声的贡献之和. 式(1)就是 PS-InSAR 方法的相位模型, 利用最小二乘拟合、回归分析等方法求解出最佳的 δ_H 和 v , 即得到了 PS 点的 DEM 高程改正和 LOS 方向上的线性形变速率.

1.2 大气延迟相位估计

雷达干涉图中的大气信号在数学上可以用几个

相互关联的量来描述^[7]: 功率谱、协方差函数、结构函数和分形维数, 其中结构函数是事物空间相关性的定量描述, 其计算公式如下^[8]:

$$D_x(\rho) = E\{[x(r_0, \rho) - x(r_0)]^2\} \quad (2)$$

式中: r_0 为空间坐标; ρ 为位移距离.

结构函数通常可以用幂律过程表示, 即

$$D_x(\rho) = C \rho^{\alpha} \quad (3)$$

式中: C 为常数, 反映了该过程的尺度大小; α 为幂律指数, 当 $\alpha = 0$ 时, $D_x(\rho) = C$ (常数), 表示样本间相互独立. 利用结构函数, 许多学者对干涉测量中的大气延迟进行了估计. 研究表明, 尽管干涉图的绝对结构函数值之间变化很大, 但其中的大气延迟展示出了相似的幂律特性, 对于不同的空间范围, α 在 $2/3$ 和 $5/3$ 之间变化^[8-11].

PS-InSAR 技术从干涉相位中分离出线性形变相位和 DEM 高程改正相位后, 获得的残余相位包含大气延迟、非线性形变和噪声 3 种成分, 由于缺乏具体函数模型, 因而不能用一般的模型求解方法从残余相位中分离大气延迟相位和非线性形变相位. 目前, 一般利用大气延迟和非线性形变的时空相关性特性, 采用不同的滤波方法对残余相位在空间和时间序列上进行滤波, 将大气信号和非线性形变从残余相位中分离出来, 但滤波窗口大小、滤波方法、分离结果的好坏都无法定量描述.

由式(3)可知, 结构函数幂律指数越接近零, 样本间的相关性越小. 残余相位若只含噪声, 则结构函数幂律指数应接近零, 反之, 如包含大气延迟, 则结构函数应相对较大. 因此, 在提取大气延迟相位时, 可以通过计算滤波后残余相位的结构函数来判断大气延迟相位提取结果的好坏, 若幂律指数接近零, 则表示残余相位中只包含随机噪声, 大气延迟相位提取结果较好, 反之, 若残余相位中仍包含大气延迟, 则分离结果不理想.

1.3 PS 点目标线性形变速率的空间分析

由 PS-InSAR 方法处理得到的 PS 点目标在空间分布上是散乱、无规则的, 为了获得区域性的形变速率, 需要对线性形变速率进行空间插值. 由于地表形变具有空间相关性, 选用 Kriging 方法对 PS 点目标的线性形变速率进行空间插值. 在空间插值之前, 需要对空间数据进行分析, 以了解数据分布和识别离群值.

ArcGIS 软件具有强大的空间数据分析功能, 因此选用 ArcGIS 软件来完成整个空间插值过程. 将 PS 点目标转换为 Shapefile 格式的点要素, 线性形变

速率作为点要素的属性项,在 ArcGIS 中进行空间插值,具体处理过程如 1 所示.首先利用 ArcGIS 地统计模块中的数据分析工具对数据进行探索分析,通过直方图检验数据的分布及是否存在全局离群值,局部离群值由聚类 Voronoi 图识别. Voronoi 图是由在样点周围形成的一系列多边形组成的,某一样点的 Voronoi 多边形生成方法是:多边形内任何位置距这一样点的距离都比该多边形到其他样点的距离要近. Voronoi 多边形生成后,相邻的点就定义为具有相同连接边的样点.聚类 Voronoi 图将所有的多边形单元分配到五级区间中,如果某个多边形单元的级区间与它相邻单元的级区间都不同,这个单元就很可能是离群值,用灰色表示^[12].对于识别出的局部离群值,采用其相邻目标点的平均值代替其原始值,以降低局部离群值对插值精度的影响.数据探测分析完成后,通过 ArcGIS 地统计分析向导工具挑选合适的变异函数模型,确定变异函数,进行 Kriging 插值,获得高分辨率的形变速率图.

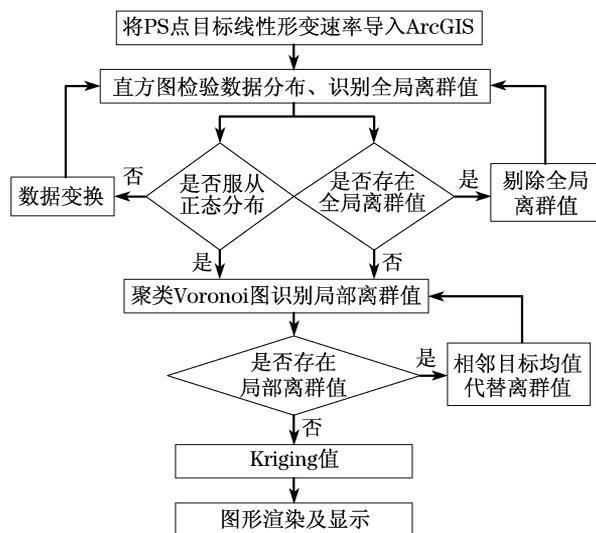


图 1 PS 点目标线性形变速率空间分析流程图

Fig.1 Flow chart of PSs linear deformation rate spatial analysis

2 南通市区沉降监测

2.1 试验数据

南通市区因过量开采地下水引起水位大幅度下降,诱发地面沉降.据南通市区已有地面精密测量资料,市区最大累计沉降量已达 153 mm,地面沉降已成为南通沿海平原地区极需警惕的问题^[13].为此,利用 PS-InSAR 技术研究南通市区 2006—2007 年

间的地面沉降.研究所用数据为欧空局 Envisat 卫星传感器 ASAR 获取的南通市区 2006—2007 年间的 15 幅 SAR 影像,影像参数见表 1,选取 2007 年 8 月 5 日获取的影像为主影像,配准成 14 个干涉对,差分干涉采用 SRTM(shuttle radar topography mission)数据高程模型和荷兰 Delft 大学空间研究中心提供的 Envisat 卫星精密轨道数据.

表 1 南通市区 ASAR 影像数据和基线参数

Tab.1 ASAR images over Nantong and baseline parameters

编号	成像时间	垂直基线/m	时间基线/d
1	2006-01-22	-910	-560
2	2006-02-26	-203	-525
3	2006-05-07	230	-455
4	2006-09-24	-671	-315
5	2006-10-29	-280	-280
6	2006-12-03	12	-245
7	2007-03-18	428	-140
8	2007-04-22	41	-105
9	2007-05-27	32	-70
10	2007-07-01	71	-35
11	2007-08-05	0	0
12	2007-09-09	270	35
13	2007-10-14	85	70
14	2007-11-18	328	105
15	2007-12-23	-313	140

2.2 大气延迟相位提取结果分析

以有明显大气延迟影响的干涉对(编号 9)为例,截取南通市区 7 km × 10 km 的范围进行试验,如图 2 所示.对 PS 点的残余相位进行空间低通滤波,采用不同的滤波窗口和滤波方法进行试验,计算滤除大气延迟相位后残余相位的结构函数的幂律指数,结果如表 2 所示,图 3 为对应的滤波后的残余相位图.滤波窗口为 50 像素 × 50 像素和 25 像素 × 25 像素时,滤波后的残余相位结构函数幂律指数相对较



图 2 干涉对 9 的残余相位图

Fig.2 Residual phase diagram of the interferogram 9

大,对应残余相位图中也有明显的颜色跳变,大气延迟没有滤除干净;滤波窗口半径为 10 个像素时,幂律指数非常接近于零,对应的残余相位图也没有颜色跳变,大气延迟相位分离结果最佳;经比较还可以看出,以距离为权值的均值滤波方法的结果优于另外两种方法.可见利用结构函数的幂律指数可以判断残余相位中是否含有大气延迟影响,可以检验大气延迟相位的提取结果是否正确.

2.3 沉降结果及分析

利用 PS-InSAR 技术对表 1 中列出的 ASAR 数据进行处理,得到研究区域 PS 点的线性形变速率,

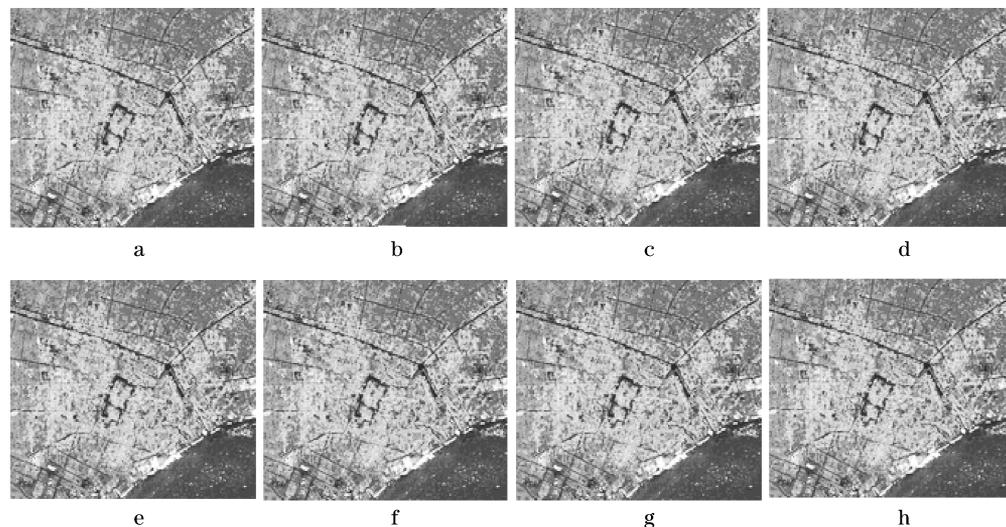


图 3 干涉对 9 滤波后残余相位图

Fig.3 Filtered residual phase of the interferogram 9

如图 4 所示,一个圆点表示一个 PS 点目标,圆点的颜色表示线性形变速率的大小,各种颜色表示的具体值域见图示,形变速率的单位是 $\text{mm} \cdot \text{年}^{-1}$,负值表示沉降,正值表示抬升,颜色偏深的地区即为沉降速率相对较大的地区;三角形表示基准点位置,选择不同的基准点做过多次试验,多次试验结果均显示三角形周围区域形变量非常小,所以选择三角形所在位置为基准点.

在所选研究区域内,共探测出 25 047 个 PS 点目标,区域内最大的形变速率为 $-16.8 \text{ mm} \cdot \text{年}^{-1}$,平均形变速率为 $-4.2 \text{ mm} \cdot \text{年}^{-1}$.从图 4 中可看出 PS 点目标多分布在市区(南通市区、通州市区、海门市区),而在其他乡村范围内 PS 点则分布非常稀疏,由于 Kriging 插值需要满足正态分布及二阶平稳的前提假设^[13],为保证插值的准确性,选取 PS 点分布较密集、年沉降速率较大的南通市区进行 Kriging 插值.通过直方图检验,南通市区内 PS 点目标的线性形变速率近似服从正态分布,且不存在全局离群值;

表 2 干涉对 9 滤波后残余相位结构函数幂律指数计算结果

Tab.2 Structure function power-law index of the interferogram 9's filtered residual phase

滤波窗口/ (像素×像素)	滤波方法	滤波后残余相位 结构函数幂律指数
50×50	均值滤波	0.087
50×50	以距离为权的均值滤波	0.062
25×25	均值滤波	0.044
25×25	以距离为权的均值滤波	0.026
25×25	最小二乘滤波	0.037
10×10	均值滤波	0.009
10×10	以距离为权的均值滤波	0.004
10×10	最小二乘滤波	0.011

通过聚类 Voronoi 图检验局部离群值,利用相邻 PS 点目标线性形变速率的平均值代替其原始值.为检验减弱离群值影响方法的有效性,将南通市区的 PS 点分割成两部分,75%的点用来空间结构建模及生成表面,25%的点用来验证预测的质量,称为测试数据,测试数据是从所有 PS 点中随机选出的,均匀分布于整个研究区域.分别对局部离群值处理前后 PS 点目标的线性形变速率进行内插,测试数据的精度结果如表 3 所示,可见以相邻点均值代替局部离群值的方法有效减弱了局部离群值对空间插值的影响,提高了内插精度.

表 3 消除离群值影响前后插值结果比较

Tab.3 Interpolation results of before and after reducing the impact of outliers

数据类型	误差均值/mm	均方根误差/mm	平均标准误差/mm
原始数据	-0.022	1.931	1.814
消除离群值影响的数据	0.012	1.639	1.580

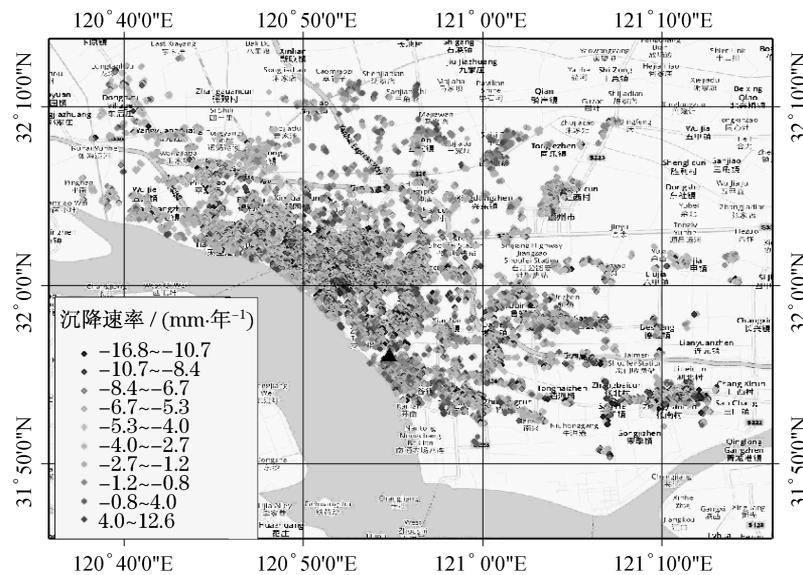


图 4 地表线性形变速率图

Fig.4 Ground linear deformation rate map

数据分析完成后,利用 ArcGIS 地统计分析向导工具进行 Kriging 插值,结果见图 5.图 5 中不同颜色代表了不同的线性形变速率区间,可见南通市有多个沉降漏斗,沉降速率基本上都小于 $11 \text{ mm} \cdot \text{年}^{-1}$.图中以星号为中心的沉降漏斗,覆盖范围及沉

降量相对较大.星号 1 区域主要覆盖了港闸区的南通船舶配套集中工业区,星号 2 区域为唐闸镇街办,星号 4 区域在港闸区政府区域,星号 5 区域覆盖了以南通城市博物馆为中心的区域,星号 6 区域是以紫琅医院为中心的区域.

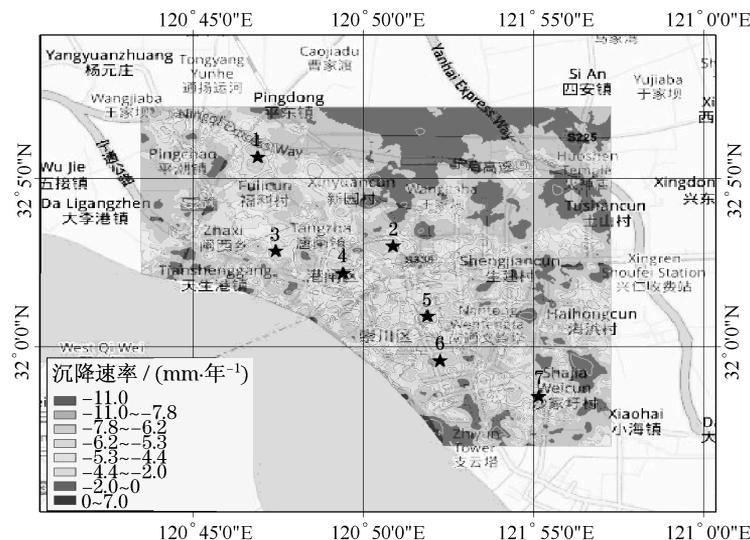


图 5 南通市地面形变速率图

Fig.5 Ground deformation rate map of Nantong city

南通地区属长江冲击平原,由于长期大量集中开采地下含水层,引起地下水位下降,使原来含水的砂层固结、压密,相对隔水的黏性土脱落、收缩,从而使地面产生沉降,在布井密集区产生沉降漏斗.图 5 中星号标出的沉降漏斗均位于工业园区或街道的中心地段,这些地方都是地下水开采最为集中的区域,

所以沉降最为严重.

3 结论

本文利用永久散射体雷达差分干涉测量技术对南通市进行了地面沉降监测,在采用滤波方法从

残余相位中提取大气延迟相位时,提出了基于结构函数的最佳滤波方法及滤波窗口大小的自动确定方法,并选用 Kriging 方法对线性形变速率进行内插,获得了南通市区高分辨的形变速率图. 研究结果显示,利用残余相位结构函数的幂律指数判断残余相位中是否含有大气延迟影响,有利于最优滤波方法和窗口大小的选择. 试验结果表明,南通市区存在多个沉降漏斗,但没有出现沉降量非常大的沉降漏斗,在 2006—2007 年间大部分地区的线性沉降速率不超过 $11 \text{ mm} \cdot \text{年}^{-1}$.

参考文献:

- [1] 张诗玉,李陶,夏耶. 基于 InSAR 技术的城市地面沉降灾害监测研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2008,33(8):850.
ZHANG Shiyu, LI Tao, XIA Ye. Study on urban area subsidence monitoring based on InSAR technique [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33(8): 850.
- [2] 罗小军,黄丁发,刘国祥. 基于永久散射体雷达差分干涉测量的城市地面沉降研究——以上海地面沉降监测为例[J]. 测绘通报,2009(4):4.
LUO Xiaojun, HUANG Dingfa, LIU Guoxiang. Urban ground subsidence detection based on PS-InSAR—a case study for Shanghai[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2009(4): 4.
- [3] 罗海滨,何秀凤. 基于 DInSAR 方法检测南京地表沉降的结果与分析[J]. 高技术通讯,2008,18(4):418.
LUO Haibin, HE Xiufeng. Results and analyses of Nanjing subsidence detection using InSAR [J]. High Technology Letters, 2008, 18(4): 418.
- [4] 陈强,刘国祥,丁晓立,等. 永久散射体雷达差分干涉应用于区域地表沉降探测[J]. 地球物理学报,2007,50(3):737.
CHEN Qiang, LIU Gongxiang, DING Xiaoli, et al. Radar differential interferometry based on permanent scatterers and its application to detecting regional ground subsidence [J]. Chinese J Geophys, 2007, 50(3): 737.
- [5] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1): 8.
- [6] 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.
- [7] 张仁铎. 空间变异理论及应用[M]. 北京:科学出版社,2005.
ZHANG Renduo. Theory and application of spatial variability [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [8] Hanssen R F. Radar interferometry: data interpretation and error analysis[M]. Boston: Kluwer Academic, 2001.
- [9] Treuhart R N, Lanyi G E. The effect of dynamic wet troposphere on radio interferometric measurements [J]. Radio Science, 1987, 22(2): 251.
- [10] Williams S, Bock Y, Fang P. Integrated satellite interferometry: troposphere noise, GPS estimates, and implications for synthetic aperture radar products [J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(B11): 27051.
- [11] Goldstein R M. Atmospheric limitations of repeat-track radar interferometry [J]. Geophysical Research Letters, 1995, 22(18): 2517.
- [12] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京:科学出版社,2006.
TANG Guoan, YANG Xin. ArcGIS geographic information system spatial analysis experimental course [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [13] 田立,钱宇红. 南通市地下水开采现状及开发利用研究[J]. 地下水, 2008, 30(3): 66.
TIAN Li, QIAN Yuhong. Research on nantong groundwater exploitation and development [J]. Ground Water, 2008, 30(3): 66.
- [9] 李蒙,王静,胡兆光. 用电负荷率同供电煤耗关系的定量分析[J]. 中国电力,2005,38(11):40.
LI Meng, WANG Jing, HU Zhaoguang. Quantitative analysis between load factor and coal consumption of electricity supply [J]. Electric Power, 2005, 38(11): 40.
- [10] 杭州华电华源环境工程有限公司. 冰蓄冷空调“移峰填谷”能效折算系数的研究与确定[R]. 杭州:杭州华电华源环境工程有限公司,2009.
Hangzhou Huadian Huayuan Environment Engineering Corporation Limited. Study and determination on “peak load shifting and valley load filling” energy efficiency equivalent coefficient of ice storage system [R]. Hangzhou: Hangzhou Huadian Huayuan Environment Engineering Co Ltd, 2009.
- [11] 中华人民共和国建设部. GB 50189—2005 公共建筑节能设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB50189—2005 Design standard for energy efficiency of public buildings [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2005.
- [12] 国家电网公司. 最高负荷、月均负荷率[EB/OL]. [2009-08-15]. <http://www.sgcc.com.cn/dwxx/qydwyxqk/zgfhyljfh/default.shtml>.
State Grid Company. Maximum load, monthly average load factor [EB/OL]. [2009-08-15]. <http://www.sgcc.com.cn/dwxx/qydwyxqk/zgfhyljfh/default.shtml>.

(上接第 108 页)