InSAR DEM的质量评价

刘国祥[①], 晓利[①],李志林[①],陈永奇[①],刘文熙[②],李志伟[①]

(① 香港理工大学土地测量及地理资讯学系,香港;② 西南交通大学土木工程学院测量工程系,成都 610031)

摘要: 首先简要介绍 InSAR的技术背景及其数据处理;然后选择香港作为试验区,将欧空局 ERS- 1/2 卫星对该地区所获取的 6幅时序 SAR复数图像组合成 15个干涉对进行处理并得到了 15个相关图,对干涉相关性和数据质量进行了统计分析;最后基于 Tandem干涉对建立 DEM并利用地面控制点进行纠正,选择局部区域与已有的 DEM比较,对干涉 DEM的精度做了分析和评价。

关键词: 合成孔径雷达干涉(InSAR);数字高程模型;数据处理;精度

中图分类号: TP72 文献标识码: A 文章编号: 1000- 3177(2000)60- 0007- 04

1 引 言

合成孔径雷达干涉(Synthetic Aperture Radar Interferometry, InSAR)是新近发展起来的空间观测技术,它是传统的 SAR遥感技术与射电天文干涉技术相结合的产物。在许多地学研究应用中,其全天候、全天时、高分辨率、高精度和数据处理高自动化等特征已得到体现,尤其在制图[1]、土地利用分类和大规模地监测厘米级或更小的地球表面形变[2]等方面具有广阔的应用前景。近十年来,一些欧美国家对 InSAR理论和应用做了大量的研究,与此同时,澳大利亚、巴西、加拿大、中国、丹麦、法国、德国、荷兰、挪威、俄罗斯、南非、瑞典和英国等都相继开展了各自的机载 SAR成像试验,商业星载 SAR系统,如欧空局的 ERS- 1/2 日本的 JERS- 1和加拿大的 RADARSAT- 1等陆续升空并获取了大量的卫星数据。

在制图方面,1986年,美国 JPL的 Zebker等人率先发表了他们使用 NASA CV 990机载 InSAR系统对旧金山海湾地区获取数据并生成 DEM的试验结果[1],自此,国际上许多学者也开始使用 InSAR技术进行制图研究。由于 InSAR还处于发展时期,所以一些实质性的问题还需进一步研究,如优化的 SAR成像系统的设计和实施,一些相关数据的处理算法(如相位解缠、干涉相位滤波和基线估计等)需进一步改善,气象变化引入的干涉相位噪音修正等[5]。此外,针对不同地区,干涉 DEM的精度、精度的影响因素分析及提高精度的途径是目前研究的焦点[3, 5]。

我们利用 6幅 ERS- 1/2 SAR重复降轨图像首次考察了 InSAR在香港地区的可应用性。我们首先构成 15个干涉像对并逐一处理,然后通过统计比较,分析干涉相关性的时序特征和原数据的质量,最后选择局部试验区建立干涉 DEM,并对此作精度评价和提出改善方案。

2 InSAR的技术背景

SAR是能主动发射微波信号并接收、记录地面反射信号的雷达成像传感器。在微波频率范围内,雷达信号几乎不受云雨和白昼的限制[3]。一般情况下,机载系统使用间距固定的两个 SAR同时采集信号,即可获得两个不同视角且覆盖同一区域的雷达图像(称单通双天线系统),而星载系统一般使用单天线采集信号。对某一局部地区来说,一次卫星通过只能获得一幅图像,然后卫星再以一定的时间间隔和微小的轨道偏离(相邻两次轨道间隔为几十米至一公里左右)重复对该地区成像(称多通单天线系统)。SAR粗数据需经预处理,以形成具有一定分辨率的雷达图像。其每一分辨元的影像信息记录了地表反射的能量(灰度)大小和与雷达斜距有关的相位信号,常用复数矩阵表示,故可称为复数影像。实际上,与摄影测量类似,基于 SAR图像对的灰度信息匹配

作者简介: 刘国祥,西南交通大学测量工程系讲师;1999年 6月开始在香港理工大学土地测量与地理资讯学系攻读博士学位,主要从事 InSAR研究。

基金项目: 香港理工大学研究设备基金项目(G- 9025)和研究基金项目(G- V747)的资助。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

技术同样可以重建地表 3D模型,但由于空间分辨率的限制,精度明显受限[3]。然而,InSAR却主要是联合雷达像对的相位信息并进行处理来重建地表 3D模型,由于雷达斜距差可以子波长级的精度来确定,因而 DEM精度得到显著提高[1]。使用 InSAR建立 DEM的基本思路是:利用覆盖同一地区的复数雷达像对提取相位差图(即干涉图),并借助于雷达平台的姿态数据重建地表数字高程模型[1,3]。所涉及的主要数据处理环节如图 1所示,其中相位解缠和基线参数的确定是关键处理技术,由于篇幅所限,这里不详细介绍。

3 香港地区的干涉相关性分析

为考察 InSAR在香港应用的潜力,我们选择了覆盖香港地区的 6幅 ERS- 1/2卫星重复降轨 C波段 SAR图像(轨道节点编号为 404/3159),成像时间跨度为 1996年 3月 18日到 1999年 11月 9日,其中包括一对 Tandem SAR数据(分别由 ERS- 1于 1996年 3月 18日和 ERS- 2于 1996年 3月 19日获取,二者成像时间间隔仅 1天,平行垂直基线长度为- 76m/- 101m)。SAR初图像均已由欧空局处理成单视复数影像,斜距和方位向的分辨率分别为 7.9m和 4.0m,影像地面覆盖范围约为 100km×100km。图 3显示了覆盖香港地区的 SAR灰度纹理特征,影像中较亮的区域为城市区(注意:图中标出的矩形区域为下一节将要进一步处理的区域)。

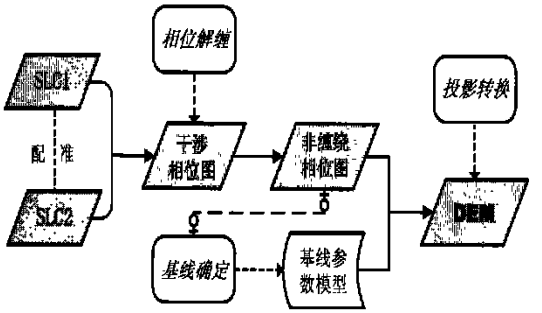


图 1 使用 InSAR建立 DEM的过程

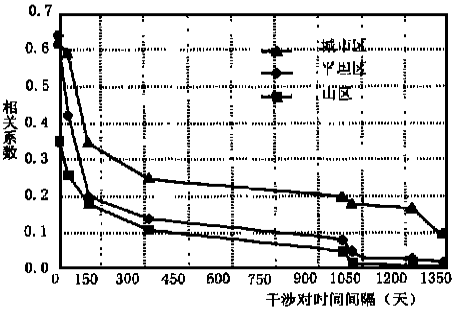


图 2 干涉相关性的时态特征

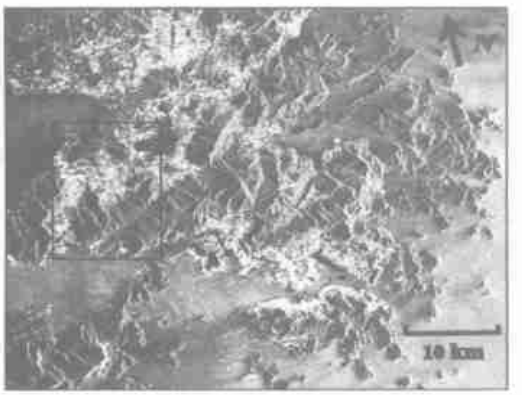


图 3 SAR灰度图像

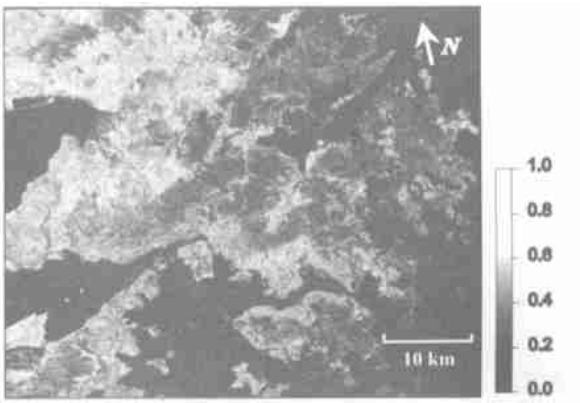


图 4 Tandem干涉对相关图

InSAR应用的关键是干涉像对的相位相关性[3]要足够高,否则,干涉相位的噪声不仅致使相位解缠变得相当困难[4],而且将严重地影响干涉产品的精度。这 6幅 SAR图像可以形成 15个干涉像对。我们利用 Atlantis Scientific Inc.的商业软件 Ev InSAR逐对进行处理,计算出了 15个干涉相位相关图,并针对城市区、平坦区(植被稀少)和山区(有植被覆盖)三种类别的地表分别进行了统计分析。平均相关系数随成像时间间隔变化的趋势显示在图 2中。实际上,相位相关程度的高低主要取决于三个因素:(1) SAR的热噪声;(2)成像期间由地表扰动(如植被生长和风对植被的影响、土壤湿度变化等)导致的失相关,即时态失相关;(3)不同雷达观测视角导致的失相关,即基线失相关[3]。一般来说,单通双天线系统几乎不存在时态失相关问题,而多通单天线系统则随成像间隔的加大而变得严重。基线失相关随垂直基线长度的增加而变得严重。由于这些干涉对的垂直基线长度在 55m~ 606m范围内,均小于 ERS- 1/2的临界干涉基线长度[3](约为 1.1km),所以基线失相关不占主导地位。因此图 2中的结果说明,干涉相关性随成像时间间隔的加大而逐渐降低,即时态失相关变得严重。由于城市地区较

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

易保持稳定,因而受时态失相关的影响较小,有植被覆盖的山区受时态失相关的影响最为显著。

从 15个干涉相关图的比较来看, Tandem干涉对的总体相关性最高。图 4给出了 Tandem干涉对的相关图(其它 14个干涉对的相关图未列出),相关系数已归划到 0~ 1之间。右侧由黑到白的灰度柱表示图中不同灰阶所对应的相关系数大小。当相关系数为 0(纯黑)时,说明干涉相位完全不相关,当相关系数为 1(纯白)时,说明干涉相位完全相关。相关性分布是不均匀的,东部地区和港岛的相关性仍然偏低,西部地区相关程度较高,这主要是因为受了东西地形起伏差异和不同植被覆盖特征等因素的影响。由此不难看出,对香港的自然地表特征来说,获得相对较长时间跨度的有效卫星干涉像对具有一定的难度。为改善时态相关性,建议尽量使用长波段(如 L波段)数据。实践证明, L波段(波长为 23. 5cm)数据受地表扰动的影响明显比 C波段(波长为 5. 6cm)数据小[2, 3, 5]。此外,随着优化设计的新一代卫星 SAR系统的发射升空(如欧洲空间局将于 2000年年底发射 ENVISAT-1 ASRA),这种状况可望得到改善。

4 干涉 DEM的形成和质量评价

4. 1 干涉数据的处理和分析

在建立 DEM前,根据下面两个原则选择合适的 InSAR数据是极为重要的: (1)保证干涉像对的相关性足够高; (2)在控制基线失相关的前提下,尽量选择长基线像对。前者以提高干涉相位的质量,即控制干涉相位噪声为出发点,而后者则是从降低模糊高(ambiguity height)[3],从而抑制相位噪声误差传播来考虑的,而且空间和时间尺度上的气象变化所引起的相位延迟影响也同样可以受到抑制[5]。结合上节干涉分析结果和这两个原则,我们选择 Tandem干涉对做进一步处理。值得指出的是,欧空局将相邻飞行时间间隔约为 4. 2秒的 5套轨道状态矢量数据附在每幅 SAR图像数据的头文件上一并分发给用户,我们这里利用这些轨道数据来确定干涉基线参数。尽管成像时间间隔仅为一天,但由于雷达迭掩和阴影现象的存在以及覆盖植被特别等原因,所以一些局部区域的相位相关性仍然很低。因此,我们仅选择了一个总体相位相关性相对较高的西部地区,即元朗区(图 3中的矩形区域)作为进一步考察的对象。封 3彩图 1显示了由 Tandem干涉对所形成的与地形相关的干涉相位图。右侧的彩色柱表示图中不同颜色所对应的干涉相位大小,一个完整的干涉条纹(相当于 0°~ 360°的相位变化)使用“蓝→绿→黄→红”的渐变颜色表示。该干涉对的名义模糊高为 106. 3m /cycle,即 360°的相位变化对应着 106. 3m的高程变化。干涉相位图中的每一像素均存在整周模糊度,因此须对缠绕的干涉图进行相位解缠。我们使用基于路径控制的积分法[4]和基于最小二乘的整体求解算法对干涉图分别进行了解缠试验。从解缠结果比较分析来看,积分法的结果相对合理和可靠,这一点与一些学者的看法一致。由于篇幅所限,这里未显示解缠后的干涉相位图。生成干涉 DEM的进一步处理步骤是基于干涉基线参数和绝对干涉相位的几何转换和投影变换。最后,从已有的数字地图上选择了 8个平面控制点和 5个高程控制点来校正干涉 DEM。

4. 2 干涉高程结果评价

为检验干涉 DEM的精度,我们使用了外部 DEM作为参考标准。将干涉 DEM取样到参考 DEM的相同空间,两个 DEM的格网元均是 40m×40m。这里使用的是香港地政总署测绘处提供的由 HK80系下 1∶10000数字等高线图所生成的参考 DEM,其高程基准面为 HKPD。由于可得到的外部 DEM数据范围有限,所以下面将分析比较的焦点集中在封 3彩图 1中已标示出的正北向矩形框范围内(约 3. 5km× 3. 5km,以下称为焦点区域)。该区域为高程起伏在 400m左右的山区,干涉条纹在空间尺度上的变化明显加强,平均干涉相关系数为 0. 35。封 3彩图 2和图 5分别显示了干涉 DEM减去参考 DEM的差分结果和差异统计直方图,结果表明: 干涉 DEM相对于参考 DEM的差异均值为+ 11. 1m,差异值统计方差为± 35. 2m。两个断面数据的比较结果如图 6、图 7所示。

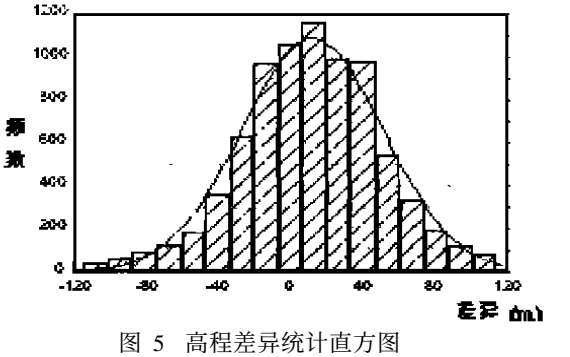


图 5 高程差异统计直方图

显然,干涉 DEM的精度并不太理想,主要原因是: (1)焦点区域被灌木林所覆盖,即使成像时间间隔仅为一天,但因时态失相关仍然存在,所以使干涉相位噪音相应增大,加之该干涉对的模糊高偏大(即

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

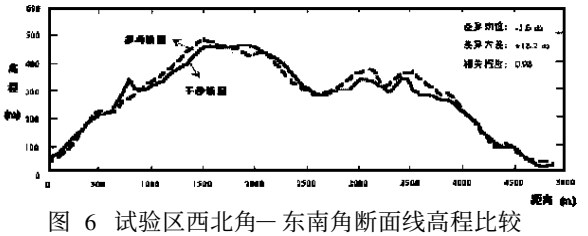


图 6 试验区西北角— 东南角断面线高程比较

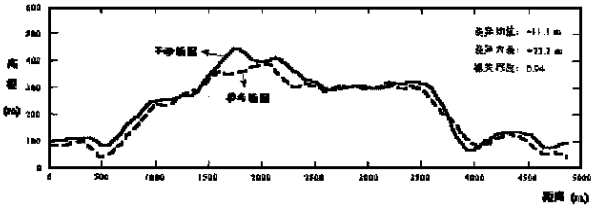


图 7 试验区西南角— 东北角断面线高程比较

垂直基线偏短),故干涉 DEM的精度受到影响; (2)直接采用轨道数据计算基线参数 ,使定轨误差会传播到干涉高程中; (3)焦点区域的大气条件 (对海边地区来说 ,相对湿度变化的影响占主导地位)在空间和时间尺度上的变化可能引起干涉相位的附加延迟 ,从而导致 DEM精度降低; (4)与干涉 DEM不同 ,参考 DEM并没有包含树林的高度。

5 结 论

与基于影像匹配的数字摄影测量技术相比 , InSAR在建立 DEM的数据处理方面具有更高的自动化特征。通过 ERS- 1/2的 15个时序干涉相关图的统计分析可以看出: 对香港的自然地表特征来说 ,获得相对较长时间跨度的有效卫星干涉像对具有一定的难度; 为改善时态相关性 ,建议尽量使用长波段 (如 L波段)数据。 对 ERS- 1/2 Tandem干涉对做进一步处理 ,得到了香港元朗区 ( )的 DEM,从中选择了范围为 3. 5km× 3. 5km的局部山区作为干涉 DEM精度评价的考察区域且与外部参考 DEM相比较 ,差异均值为+ 11. 1m,差异值统计方差为± 35. 2m 进一步改善干涉 DEM精度可采取的措施包括: (1)选择更有效的干涉数据; (2)控制基线失相关 ,降低模糊高; (3)使用足够的地面控制点精确确定干涉基线模型及其参数; (4)寻求修正大气影响的有效途径。

参考文献

1 ZEBKER H A, GOLDSTEIN R M. Topographic Mapping from Interferometric Synthetic Aperture Radar observations[J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 91: 4993~ 4999

2 MASSONNET D, BRIOLE P, ARNAUD A. Deflation of Mount Etna Monitored by Spaceborne Radar Interferometry[J]. Nature, 1995, 375: 567~ 570

3 LI F K, GOLDSTEIN R M. Studies of Multibaseline Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars[J], IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28: 88~ 97

4 GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A, WERNER C L. Satellite Radar Interferometry: Two- dimensional Phase Unwrapping [J]. Radio Science, 1988, 23(4): 713~ 720

5 ZEBKER H A, ROSEN P A, Hensley S. Atmospheric Effects in Interferometric Synthetic Aperture Radar Surface Deformation and Topographic Maps[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 103(B4): 7547~ 7563

(上接第 52页)

(3)近景摄影测量技术的发展能大大推动三维模拟的应用 ,但同时又对从事这项工作的人员提出了更高的要求 ,不仅要他们能进行传统的野外测量 ,而且还要能够利用近景摄影测量系统获取数据。

(4)变更地籍管理中的三维模拟不纯粹是测量的事情 ,它对人员的综合素质还提出了更高要求。

参考文献

1 林增杰主编.地籍管理 [M].中国人民大学出版社

2 孙家广 ,等著 .计算机图形学 [M]. 清华大学出版社

3 杨德麟 ,等编著 .大比例尺数字测图的原理方法与应用 [M].清华大学出版社

4 黄兴元 ,汤勤编著 .地理信息系统概论 [M].高等教育出版社

5 郑章 ,等编著 . Visual C+ + 数据库开发技术 [M].机械工业出版社

6 白建军 ,等编著 . OpenGL三维图形设计与制作 [M].人民邮电出版社

7 (美) David J. Kruglinski Scot Wingo著. Visual C+ + 6. 0技术内幕 [M].第五版. Geoge Shepherd希望图书创作室译 [M]. 北京希望电子出版社

8 张祖勋 ,张剑清编著 .数字摄影测量学 [M].武汉测绘科技大学出版社

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

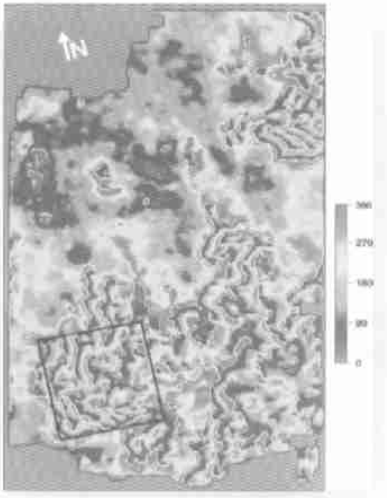


图1：未解缠的干涉相位图(模糊高为106.3m/cycle)

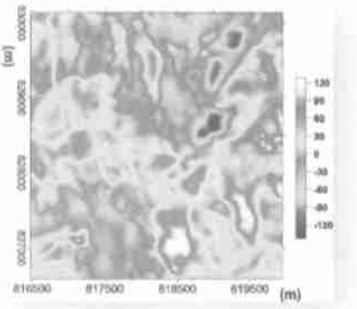
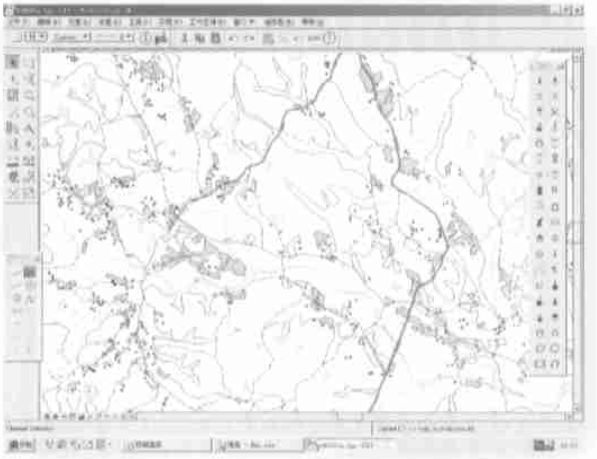


图2：干涉——参考DEM差异图

详见《InSAR DEM的质量评价》一文



详见《RESDISS数字摄影测量工作站及其特性》一文

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net