

高山峡谷区 D-InSAR 滑坡监测数据特征分析

谢谟文, 王增福, 胡 嫔, 黄洁慧

(北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

The Characteristic Analysis of D-InSAR Data for Landslides Monitoring in Alpine and Canyon Region

XIE Mowen, WANG Zengfu, HU Man, HUANG Jiehui

摘要: 对同一区域制订了 8 景 Radarsat-2 降轨的编程数据, 重点研究卫星视线与地表法线夹角对于后向散射系数和相干系数的影响。研究表明, 由于 SAR 数据成像原理的特殊性, 一种模式的 SAR 监测并不能有效覆盖研究区域的整个范围。卫星视线与地表法线夹角对后向散射系数和相干系数的影响明显, 从而得出有效 SAR 数据的局部入射角阈值, 并根据阈值得出研究范围内降轨数据、升轨数据以及它们联合监测的可信区域。为进一步制定升轨编程数据进行区域滑坡早期识别提供依据, 以达到全区域监测的目的。

关键词: 合成孔径雷达差分干涉测量; 滑坡灾害; 局部入射角; Radarsat-2 编程数据

一、引言

滑坡是地质灾害中最为常见的一种, 滑坡的研究也是地质灾害防灾减灾的重要课题。从地质灾害事件的经验与教训中可看出, 对重大滑坡灾害进行监测, 从而进行有效的预测预报分析是防灾减灾的最好途径。

合成孔径雷达差分干涉技术(D-InSAR)是一种极具潜力的空间对地测量技术, 具有全天时、全天候、高精度、大范围等特点, 它能以厘米量级甚至更小尺度获得某一地区连续的地表形变信息。而利用 D-InSAR 技术可以在一定时期内监测区域地表的变形, 是辅助目前传统监测手段的一种切实可行的空间对地观测技术。

D-InSAR 技术在滑坡上的应用最早开始于 1995 年, 法国学者 J. Achache 等利用从 ERS-1 获取的 1991 年夏季的 SAR 数据通过 D-InSAR 技术处理得到 6 幅干涉图, 并对法国南部 Saint-Etienne-de-Tinee 滑坡进行了研究, 证明了 D-InSAR 技术监测滑坡形变精度与地面监测方法监测精度的一致性^[1]。随后各国也陆续开始对其进行研究, 1996 年 Fruneau 等利用 ERS-1 卫星得到的 1991 年 8 月 20 日至 9 月 4 日的数据对法国阿尔卑斯地区的 La Clapiere 滑坡区域进行 D-InSAR 处理得到 6 幅相关性较好的差分干涉图, 清楚地记录了数据获取期间的位移变化情况, 且揭示了整个滑坡区域不同地点变形梯度不一致、西部形变较快的滑坡特点, 与地面测量结果

相一致^[2]。V. Rizzo 和 M. Tesauro 在 2000 年也利用 ERS-1/ERS-2 数据对意大利 Randazzo 滑坡进行研究, 经 D-InSAR 处理从干涉图中得到突发性滑坡前后的坡体位移变化情况和整个滑坡体 70 天内位移变化的清晰图像^[3]; 之后 F. Colesanti 等在 2003 年利用 ERS 卫星数据对美国 Southern California 和意大利 Ancona 地区进行研究, 通过 D-InSAR 与 PS 技术的结合使监测结果达到了毫米级的精度, 同时证明结合 PS 技术可进行植物覆盖区域的监测^[4]; 2005 年 F. Catan 等采用 1993 年的 JERS 数据对意大利 Valdarno Superio 和 Laion 滑坡进行监测, 通过对两个典型地质地貌实例研究, 证明 D-InSAR 能定量地确定地形的性质如斜面及地形变化的评定等^[5]; 2008 年 V. Singhroy 等利用 RADARSAT-1 数据监测加拿大 Thunder River 滑坡, 通过 D-InSAR 处理得到永久冻融带边坡活动及其邻近区域运动变形值, 并得到其活动较大和减小的月份^[6]。

国外对 InSAR 技术的研究较早, 且已经进入实用阶段, 相关成果也发表较多, 国内的起步较晚, 受限于研究资料的获取, 只有少数研究机构从事相关研究工作, 实际应用也只是处于起步阶段。2002 年 Xia Y 等利用 D-InSAR 与 PS 技术相结合对三峡库区新滩滑坡和链子崖滑坡进行了研究^[7]; 2005 年中国地质环境监测院与德国地球科学研究中心在三峡库区重点灾害监测点秭归县卡子湾、树坪、链子岩等滑坡体上安装了角反射器利用 D-InSAR 技术进行监测分析; 2010 年中国地质调查局成都地质

收稿日期: 2011-11-03

作者简介: 谢谟文(1965—), 男, 湖北监利人, 教授, 主要从事 GIS 应用开发及岩土工程教学与研究工作。

调查中心采用 D-InSAR 技术监测四川甲居滑坡,取得该滑坡两期位移量^[8]。

综合国内外研究现状发现,D-InSAR 技术在滑坡监测方面的成功实例都仅仅局限于地表形变幅度较大、自然环境较为合适、地势起伏较平缓的滑坡监测。因为受到各种条件的严格制约,D-InSAR 技术在陡峭滑坡区域的监测效果并不理想。C. Delacourt和 P. Allemand 等在 2007 年甚至提出 D-InSAR 技术不适合山区研究的结论,给出的理由是因为受到与地形、地表状态和大气影响相关的多种条件的严格限制^[9]。本文通过分析 SAR 数据的特征,并根据数据特征提出了解决 D-InSAR 技术应用于山区的方法。

由于合成孔径雷达技术是依靠目标的后向散射原理来获取数据的^[10],而后向散射特性又跟局部入射角关系密切。因此研究局部入射角成为关键步骤,而局部入射角与 SAR 数据的后向散射系数之间的关系研究以及局部入射角与 InSAR 数据的相干系数之间的关系研究,是分析 SAR 数据干涉特征的关键。

二、局部入射角对 SAR 数据的影响

局部入射角是卫星视线的方向 V_s 与地表法线 V_n 之间的夹角,其示意图如图 1 所示。

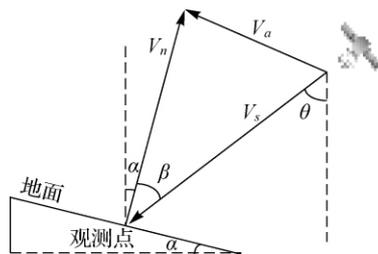


图 1 局部入射角示意图

本研究使用的数据是 Radarsat-2 的降轨编程数据, Radarsat-2 降轨数据的参数为入射角 39.83° ,方位角 189.48° ,可由区域的 DEM(如图 2 所示)通过空间分析得到。地表的坡度(如图 3 所示)、坡向(如图 4 所示)。

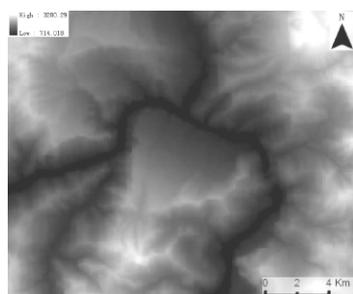


图 2 研究区域的 DEM



图 3 研究区域的坡度图

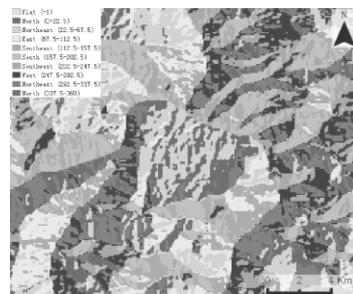


图 4 研究区域的坡向图

而局部入射角则由卫星的视线参数和地表的坡度、坡向共同解得,如图 5 所示。

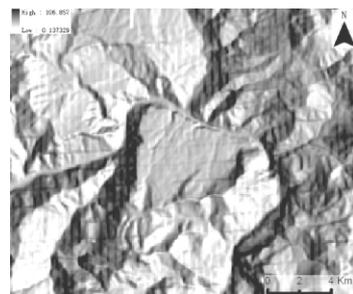


图 5 局部入射角分布图

由于局部入射角的角度值为小数类型,因此数据不便于统计,为研究方便,将局部入射角分布图以每 10° 为一组进行分类,如图 6 所示。再按照分类区域分别统计每组区域内的各相干系数和后向散射系数的平均值(如表 1、表 2 所示)。

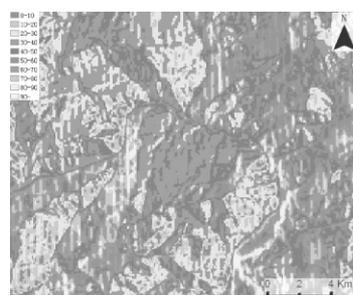


图 6 局部入射角重分类图

表1 局部入射角与相干系数关系表

角度/(°)	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8
10	0.203	0.267	0.202	0.195	0.192	0.202
20	0.200	0.245	0.197	0.189	0.189	0.197
30	0.198	0.219	0.191	0.185	0.186	0.188
40	0.190	0.197	0.181	0.177	0.177	0.179
50	0.183	0.190	0.176	0.174	0.174	0.175
60	0.176	0.180	0.171	0.170	0.171	0.169
70	0.168	0.172	0.165	0.164	0.166	0.165
80	0.161	0.164	0.159	0.157	0.160	0.160
90	0.154	0.157	0.154	0.153	0.155	0.156
120	0.146	0.156	0.147	0.145	0.142	0.142

表2 局部入射角与后向散射系数关系表

角度/(°)	景编号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
10	0.696	0.792	0.811	1.295	1.173	0.753	0.837	1.159
20	0.692	0.784	0.790	1.165	0.815	0.768	0.781	1.160
30	0.613	0.684	0.728	0.903	0.567	0.673	0.618	0.957
40	0.431	0.459	0.549	0.621	0.392	0.477	0.434	0.656
50	0.332	0.352	0.431	0.474	0.314	0.366	0.323	0.498
60	0.235	0.242	0.308	0.332	0.230	0.256	0.233	0.356
70	0.159	0.157	0.204	0.221	0.159	0.168	0.166	0.240
80	0.105	0.105	0.134	0.153	0.107	0.110	0.121	0.161
90	0.071	0.071	0.088	0.100	0.075	0.072	0.080	0.103
120	0.042	0.044	0.051	0.063	0.037	0.042	0.054	0.063

将表1以角度列为横轴,以其他列为数据列则可以做出局部入射角与相干系数关系图(如图7所示),以每个单位间的差值为数据列则得到局部入射角与相干系数变化率关系图(如图8所示)。同理从表2得到局部入射角与后向散射系数关系图(如图9所示)和局部入射角与后向散射系数变化率关系图(如图10所示),从曲线图可以看出,SAR影像间的相干系数、后向散射系数与局部入射角有密切的联系。随着局部入射角的不断增大,相干系数和后向散射系数呈不断降低的特点,而且数据和数据变化率均在40°~50°左右呈现出拐点趋势。因此后面的研究将以50°为阈值进行SAR在广域滑坡监测中可信区域的提取。

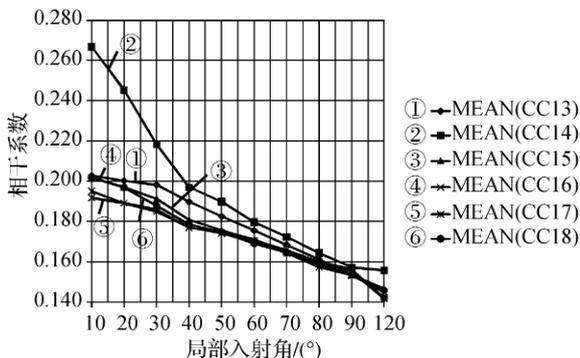


图7 局部入射角与相干系数关系图

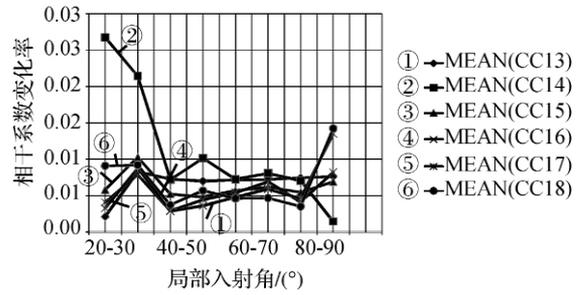


图8 局部入射角与相干系数变化率关系图

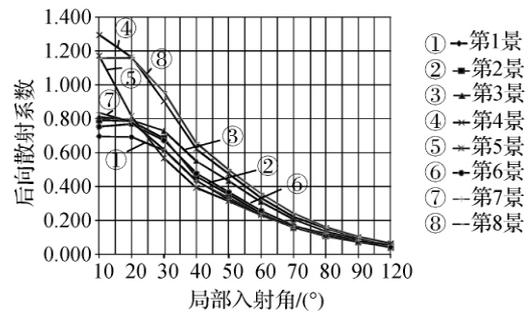


图9 局部入射角与后向散射系数关系图

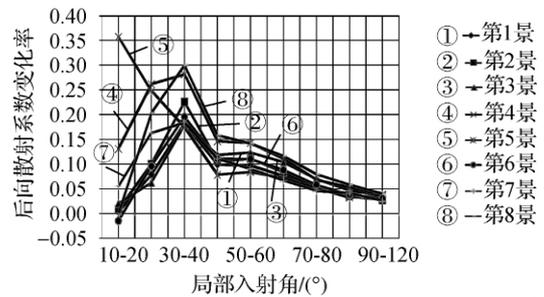


图10 局部入射角与后向散射系数变化率关系图

三、SAR数据可信区域

本研究中根据局部入射角与后向散射系数和相干系数关系得出,局部入射角对SAR数据的影响有直接关系,而且曲线出现拐点的位置在40°~50°之间,故以50°为阈值对局部入射角分布图(如图5所示)进行重新分类,将小于50°的法夹角区域视为可信区域,则分布图如图11所示。

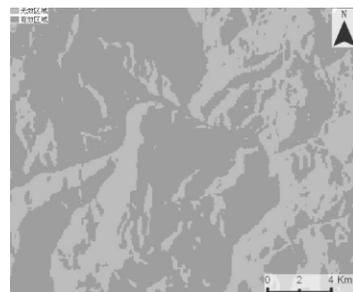


图11 降轨拍摄可信区域分布图

根据栅格量的统计,可信区域的栅格量为 125 846 个,而无效区域的栅格量为 72 985 个,则可信区域范围占研究区域面积的 63.3%。因此可以得出后向散射系数和相干系数都比较强的可信区域并没有覆盖整个区域。

单靠一种拍摄模式(降轨模式)对整个区域进行监测是难以完成的任务,因此本研究还在此基础上模拟了升轨模式下的可信区域分布图, Radarsat-2 升轨数据的参数为入射角 39.79° , 方位角 350.52° , 则获得可信区域分布图如图 12 所示。

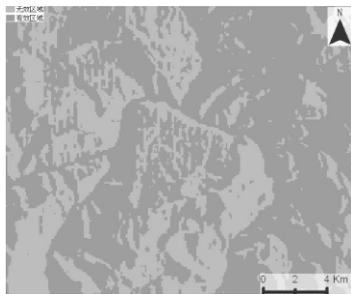


图 12 升轨拍摄可信区域分布图

根据栅格量的统计,升轨拍摄可信区域的栅格量为 128 161 个,占研究区域的 64.5%。而把升轨的范围和降轨的范围叠加之后就可以得出升降轨联合监测对整个研究范围的覆盖度,如图 13 所示。

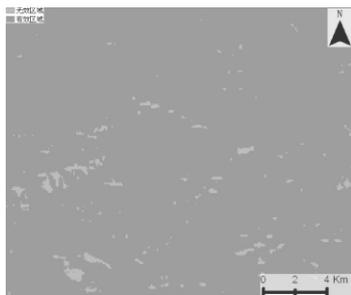


图 13 升轨和降轨同时拍摄可信区域分布图

根据栅格量的统计,升轨降轨同时拍摄可信区域的栅格量为 194 965 个,占总面积的 98.1%。

升轨和降轨联合监测能够有效地增加监测区的有效监测范围,而且使可信区域增加到 98.1%,而分布的无效区域均为细小零星分布或者呈细长条状,因为这些均与滑坡的特征不符合,因此可以排除不可信区域内有滑坡分布的可能。从而进一步使监测的确定性达到全区域覆盖。

四、结论

SAR 数据拍摄时卫星必须与目标区域有一定

的倾斜角度,因此推断对于同一区域只用一种拍摄角度进行监测,则有些区域的数据分析结果是不可信的。在文中通过对 Radarsat-2 降轨数据的研究得出如下结论:

1) SAR 影像的后向散射系数和相干系数与 SAR 卫星的视线方向和地表法线间夹角 β 有密切联系,随着夹角的增大而减小。

2) 根据后向散射系数和相干系数分别与 β 的曲线图得出可信区域的临界角度为 $\beta = 50^\circ$, 大于这个角度的数据将是不可信数据,因此单一拍摄模式的 SAR 监测,并不能覆盖全区域。

3) 本文用同样的方法模拟了 Radarsat-2 通过升轨与降轨联合监测的方法。结果表明该方法能够达到近乎全覆盖的广域滑坡监测。

4) 在下一步的研究计划中,笔者将进一步积累降轨 SAR 数据,同时编程拍摄一定数量的升轨数据。从而进行全区域的监测,并且进行大量的现场验证来达到广域滑坡监测的目的。

参考文献:

- [1] ACHACHE J, FRUNEAU B, DELACOURT C. Applicability of SAR Interferometry for Operational Monitoring of Landslides [C]//Proceedings of the Second ERS Application Workshop. London [s. n.], 1995: 165-168.
- [2] FRUNEAU B, ACHACHE J, DELACOURT C. Observations and Modeling of the Saint-Etienne-de-Tinee Landslide Using SAR Interferometry [J]. *Tectonophysics*, 1996, 265(3): 181-190.
- [3] RIZZO V, TESAURO M. SAR Interferometry and Field Data of Randazzo Landslide (Eastern Sicily, Italy) [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2000, 25(9): 771-780.
- [4] COLESANTI F, FERRETTI A, PRATI C, et al. Monitoring Landslides and Tectonic Motions with the Permanent Scatterers Technique [J]. *Engineering Geology*, 2003, 68(1-2): 31-34.
- [5] CATANI F, FARINA P, MORETTI S, et al. On the Application of SAR Interferometry to Geomorphological Studies: Estimation of Landform Attributes and Mass Movements [J]. *Geomorphology*, 2005, 66(1-4): 119-131.
- [6] SINGHROY V, ALASSET P J, COUTURE R, et al. InSAR Monitoring of Landslides on Permafrost Terrain in Canada [C]//International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Boston [s. n.], 2008: 2451-2454.

(下转第 40 页)

有一定的差别。其主要原因分析如下:

- 1) 仿真的卫星星历与实际卫星位置之间有误差。
- 2) 卫星钟差取自精密星历,与实际钟差之间存在误差。
- 3) 卫星和接收机的硬件通道延迟及噪声没有包括在仿真数据里。
- 4) 仿真的对流层和电离层延迟是一种平滑的模型,与真实情况不一致。
- 5) 在解算过程中接收机钟差是一未知参数,没有包含在仿真数据中。
- 6) 实测数据中含有多路径的影响,而仿真数据中则没有。

五、结束语

本文讨论了 GPS 观测数据的仿真方法。这对于研究 GPS 接收机的检测以及算法等方面有一定的实用价值。本文只是进行了初步的研究,从与实测数据的比较结果可以看出,两者之间还存在差异,需要作进一步研究。

参考文献:

- [1] 许其凤. GPS 卫星导航与精密定位[M]. 北京: 解放军

出版社,1994.

- [2] 陈芳允. 卫星测控手册[M]. 北京: 科学出版社,1992.
- [3] 周忠谟,易杰军,周琪,等. GPS 卫星测量原理与应用[M]. 北京: 测绘出版社,1999.
- [4] 徐绍铨,张华海,杨志强,等. GPS 测量原理及应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社,2002.
- [5] 刘基余,李征航,王跃虎,等. 全球定位系统原理及其应用[M]. 北京: 测绘出版社,1999.
- [6] 刘经南,叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位技术探讨[J]. 武汉大学学报: 信息科学版,2002,27(3): 234-240.
- [7] 高星伟,葛茂荣. GPS/GLONASS 单点定位的数据处理[J]. 测绘通报,1999(4): 8-13.
- [8] 欧吉坤. GPS 测量的中性大气折射改正的研究[J]. 测绘学报,1998,27(1): 563-571.
- [9] 张小红,李征航,蔡昌盛. 用双频 GPS 观测值建立小区域电离层延迟模型研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版,2001,26(2): 140-143.
- [10] 刘维真. GPS 信号信噪比的计算与测量[J]. 导航,1987(2): 1-9.

(上接第 21 页)

- [7] XIA Y, KAUFMANN H, GUO X F. Landslide Monitoring in the Three Gorges Area using D-INSAR and Corner Reflectors [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2004, 70(10): 1167-1172.
- [8] 张建龙, VERNON H, SINGHRO Y, 等. 差分干涉测量技术在四川甲居滑坡监测中应用研究[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2010, 37(5): 554-557.

- [9] DELACOURT C, ALLEMAND P, BERTHIER E, et al. Remote-sensing Techniques for Analysing Landslide Kinematics: a Review [J]. Bulletin de Société Géologique, 178(2): 89-100.
- [10] 黄世奇,刘代志. 星载 SAR 成像与 SAR 图像中一些不确定性因素分析[J]. 测绘学报,2007,36(2): 152-157.

(上接第 32 页)

- [3] 邓敏,刘启亮,李光强,等. 基于场论的空间聚类算法[J]. 遥感学报,2010,14(4): 702-709.
- [4] PENG W X, TAO B, CLEMENTS A, et al. Identifying High-risk Areas of Schistosomiasis and Associated Risk Factors in the Poyang Lake Region, China [J]. Parasitology, 2010, 137(7): 1099-1107.

- [5] 颜峻,袁宏永,疏学明. 用于犯罪空间聚集态研究的优化聚类算法[J]. 清华大学学报: 自然科学版,2009,49(2): 176-178.
- [6] MARTIN A A. Testing for Similarity in Area-based Spatial Patterns: A Nonparametric Monte Carlo Approach [J]. Applied Geography, 2009, 29(3): 333-345.