

用恒定散射技术监测滑坡和构造运动

Carlo Colesanti^{1,2} Alessandro Ferretti^{1,2} Claudio Prati^{1,2} Fabio Rocca^{1,2} 著

杨秀元 译 朱汝烈 校

(¹Dipartimento Elettronica e Informazione, Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci, 32—20133 Milan, Italy; ²Tele-Rilevamento Europa-T.R.E.S.r.l. Piazza Leonardo da Vinci, 32—20133 Milan, Italy; ³ 中国地质调查局水文地质工程地质技术方法研究所, 河北保定, 071051)

[摘要] 已经证实,宇宙差分合成孔径雷达干涉测量(DInSAR),在测绘诸如火山活动之类的地下变形现象具有潜在能力。然而迄今为止,无论大气干扰,还是相位相关变化,都阻碍该技术达到正式运用的可能。通过测定与稳定反射器(恒定散射体 Permanent Scatterers - PS)逐点对应的图像的像素子集,并开发干涉测量数据的长时间序列,正在克服这些缺陷。由欧洲空间组织〔European Space Agency (ESA)〕地球资源卫星(ERS)合成孔径雷达(SAR)传感器在南加利福尼亚上空获得的55帧影像的处理结果表明,恒定散射体(PS)的测量精度非常接近它的理论极限值(大约1mm),对描述一个复杂的断层系统来说,出现毫米级的误差现象,是正常并允许的。已经对南加利福尼亚卫星定位系统综合网络(SCIGN)^{*}的GPS有关固定测站的位移,与其相应的时间序列进行了对应比较。此外,逐个分析恒定散射体的像素特性,为在雷达靶标低相关区探索独特相位创造了可能条件。这使得只要人工建筑物或裸露的岩体有一个可利用的空间分布密度,宇宙空间干涉仪便可在广阔飘渺的区域进行测量。安科纳滑坡(意大利中部)的评价,是通过时间跨度在1992年6月至2000年12月之间的61帧ERS影像的处理分析而做出的。其结果已经与安科纳市政当局在此期间用光学水准测量获得的滑坡变形值做了比较。综观恒定散射体PS与GPS及光学水准测量的特性,发现它们在一定程度上是相互延伸和互补的;亦即,三种技术的互补使用,将有力的提高大地变形监测的质量和可靠性。

[关键词] 恒定散射体技术 合成孔径雷达干涉测量 滑坡 构造 监测

1. 前言

干涉测量方法是基于积累不同时间、具不同微小观察角度的合成孔径雷达(SAR)影像,对其相位进行对比而实现的。理论上讲,它具有沿着传感器-靶标方向(即视准线 Line-of-Sight—LOS),探测出靶标的毫米级运移征兆的潜在能力。尤其有意义的是,它无论在

本文译自 Engineering Geology,2003(68);3~14

测绘火山活动、地震和震前及震后沿活跃地震断层的变形，以及斜坡不稳定性和失稳现象等方面，均堪称完美。除周期不稳定问题外，该方法受到靶标的时间短暂性和几何学形态的抗相关性以及大气层内的人工物体的制约。

在解析单元范围内的电磁剖面图和/或散射体的位置随时间而发生改变的情况下，靶标的时间短暂性所引起的非相关性，使得干涉测量无法实现。观察时间的短暂不利于解决问题，因为地质体的缓慢运动(例如：蠕动漂移)，是不可能被检测、觉察到的。而靶标的反射率，既作为入射角的一个函数变量，又关系到几何抗相关性，并进而限制了对干涉测量有用图像的像对数量，除非这一弊病因靶标的点传导性而被消除(例如：角反射器)。在受任何类型抗相关性影响的区域内，反射率相位的影响是不能依靠产生于远处的干涉图来补偿的；况且由于靶标运移造成的潜在相位条件重要性并非特别显著。最后，大气层的非均质特性给每个合成孔径雷达(SAR)探测器叠加一个大气相位栅网[atmospheric phase screen (APS)]，这个相位栅网能够严格精确的处理变形监测。实际上，即使在那些受抗相关性影响轻微的区域，无论如何使用单独的干涉图，企图从来自大气层的讯号中区分出位移相位成分来，也是极其困难的。

2. 恒定散射体技术

大气层中的人工物体与每个单独的合成孔径雷达探测器之间，均显示出极强的空间关联性，然而在时间上却并不相关。相反，靶标的运移则通常与时间强烈相关，而且能依靠近旁的空间位移现象来显示各种不同程度的空间相关性(例如：由于开发地下水或抽取石油/天然气导致的地面沉降、沿地震断层的变形、局部性的滑坡区域、建筑物的倒塌等)。

大气层的影响，在对合成孔径雷达影像长时间序列的大量数据进行评价后，即可予以消除；如欧洲空间组织(ESA)的地球资源卫星(ERS)档案，便收集了自1991年后期以来的大量数据。为达到开发所有可资利用的影像，并提高大气相位栅网评价的准确度的目标，仅仅只能选择那些受靶标短暂性和几何学抗相关性两者影响均甚轻微的散射体。相位稳定的点状靶标——以下称为恒定散射体(PS)，基于对其电磁波在大气层中的反射回波振幅幅度进行的统计分析而被选中。

所有获取的图像都聚焦并记录在单独的主探测器采样坐标网格上，这为保存也许低于正常基线色散数值的那些信息提供可能。辐射度按动力标准进行了修正，目的是将对应于不同探测器的回波幅度进行比较。幅度数据是在对像素逐个分析(即在空间平均值以外)的基础上，计算所谓的振幅稳度指数，即每一个单独像素的回波振幅幅度平均值与其标准偏差的比

率。这个统计数值，提供了关于每个取样单元的散射重心的预期相位稳度的宝贵信息。对振幅稳度指数给定一个简单的限定值(如一个2.5-3的数值)，使那些恒定散射体备选物 Permanent Scatterers Candidates (PSC) 的稀疏网格单元能得以识别、发现和确认，以明示具恒定散射体期望性能的监测点。

恒定散射体备选物 PSC，实际上是作为恒定散射体 PS 总体的一个小子集，因为许多恒定散射体的相位稳定性，并不能直接依靠振幅稳度指数推导而获得。和在以下章节所阐述的一样，通常情况下，适当的恒定散射体空间密度 ($\geq 3-4$ 个PS/km²)，即足够对大气相位栅网 APS 进行修正和补偿。

协同开发所有有效的耦合配对 (Tandem pairs) (在有一天短暂基线的地球资源卫星 ERS—1/2数据的情况下)，能够完善传统的干涉合成孔径雷达(InSAR)数字高程模型(DEM)。作为一种有用手段，已具适用性的数字高程模型(例如摄影测量)能在主图像网格上做重复取样。

给定 N+1个 ERS-SAR (地球资源卫星 - 合成孔径雷达) 数据，其中N个微分干涉图可由普通的主探测器获得。由于恒定散射体不受抗相关作用影响，故所有的干涉图，无论它们的基线正常和短暂与否，均可用于恒定散射体 PS 的处理。

干涉图 (每个单一像素) i 的相位是:

$$\phi_i = \frac{4\pi}{\lambda} r_{Ti} + a_i + n_i + \phi_{topo-res} \quad (1)$$

当 $\lambda = 5.66$ cm 时， r_{Ti} 是靶标可能存在的运移 (相对于此时主探测器的位置)， a_i 是大气的相位影响(以主影像的大气相位栅网表示)， n_i 是抗相关干扰噪音， $topo-res$ 是由于所参照的数字高程模型 DEM 的不精确性引起的地形相位剩余影响。

恒定散射体探索的目标是解析这些相位条件，基本理念是构建形成一个恒定散射体备选物栅格 (PSC grid)，在一个特定的最大距离(例如：2~3 km) 内，以恒定散射体备选物的耦对条件为准，计算每个干涉图相位 i 的相位差 $\Delta \phi_i$ 。

事实上，因为大气相位栅网和空间位置具强烈相关性，对于各有差别的大气层的相位影响而言，要与恒定散射体备选物密切相关的可能性是非常低的(对距离小于1 km的点源， $\sigma_{\Delta a}^2$ 通常低于 0.1 rad^2)。由于相位差与恒定散射体备选物紧密相关，因此，大气相位栅网对其仅有轻微影响。此外，如果恒定散射体备选物实际上具备了恒定散射体的行为特性(即不受抗相关性影响)，那么， n_i 和 Δn_i 也必然都会显示一个非常低的方差。

假设靶标的运移为均匀运动(即有恒稳变形率), 那么, 计算式 (1) 中的第一项则可写为 $(4\pi/\lambda)vT_i$ 。这里 v 是沿地球资源卫星 (ERS) 的传感器 - 靶标视准线 (LOS) 方向的平均变形率, T_i 是相对于主采样器的短基线的变形。

对于一个共扼恒定散射体备选物(1,2)耦对而言, 其每一帧干涉图 i 的位相差是:

$$\Delta\phi_{1,2,i} = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta v_{1,2}T_i + K_0\Delta\varepsilon_{1,2}B_{n,i} + w_{1,2,i} \quad (2)$$

其中, $\Delta v_{1,2}$ 和 $\Delta\varepsilon_{1,2}$ 是在恒定散射体共扼近旁、与之相关的视准线速率差和不同数字高程模型的精度偏差。 $B_{n,i}$ 是干涉图 i 的正常基线(相对于主影像而言)。最后, $w_{1,2,i}$ 是剩余相位条件, 汇集所有其他的影响, 亦即: 相关噪声 Δn_i 、大气相位栅网差异 $\Delta\alpha_i$ 和变形时间可能的不均匀性。

因为 N 个微分干涉图可用来表示每个恒定散射体备选物耦对, 所以有 N 个含有未知数 $\Delta v_{1,2}$ 和 $\Delta\varepsilon_{1,2}$ 的方程式。遗憾的是, 相位数值 $\Delta\Phi_{1,2,i}$ 是隐蔽的, 因此系统为非线性的。事实上, 即使没有变形发生, 地形相的剩余偏差 $\Delta\Phi_{topo-res,1,2,i}$, 通常也会比巨大的基线干涉图超出一个相位周期。[比如: 对于一帧 1200m 基线的干涉图, 其模糊度高差约为7.5m左右; 亦即, 其数字高程模型值相对于恒定散射体备选物 (1,2) 的高程误差值也大约是7.5 m, 正好由一个完整的相位周期的偏差所致]。

这项工作可当作一个光谱的计算问题来考虑, 并且其未知数是与对一个复杂信号 $e^{j\Delta\Phi_{1,2,i}}$ 的周期图峰值($\Delta v_{1,2}, \Delta\varepsilon_{1,2}$)位置最大可能性(ML)的判断相联系而估计得出的, T_i 和 $B_{n,i}$ 是分别沿短基线和正常基线, 在一个不规则采样网格上获得的。当然, 这种可能性只有在剩余相位条件 $w_{1,2,i}$ 足够低的情况下(合理值可能为 $\sigma(w_{1,2}) = 0.6$ [rad]), 即: 在方程式里牵涉到的两个恒定散射体备选物的距离, 能够贴近得表现为近乎一个有效恒定散射体状态(低相关的噪音); 不受不同时间内不均匀变形的影响, 而且尽可能保持与大气相位栅网差异条件极限接近(最后一个条件是, 恒定散射体备选物格栅应该足够密集, 如前文已述, 至少为 3-4 个恒定散射体/km²) 方能具备。

随着 $\Delta v_{1,2}$ 和 $\Delta\varepsilon_{1,2}$ 的判定, 相位差 $\Delta\Phi_i$ 亦可正常计算得出(显而易见 $|w_{1,2,i}| < \pi$)。通过对每组与恒定散射体备选物耦对相关的相位差的解算, 每帧干涉图便能在相应的恒定散射体备选物耦对的稀疏网格中解出; $\Delta v_{1,2}$ 和 $\Delta\varepsilon_{1,2}$ 也能恰当地积分, 从而求得 v 和 ε (假设对于参考点, $v = v_0$ 和 $\varepsilon = \varepsilon_0$)。

当与每组恒定散射体备选物耦对相应的大气相位影响解出后, 其差值即可随之得到:

$$[\alpha_i]_{uw} = [\phi_i]_{uw} - \frac{4\pi}{\lambda} v T_i - K_{\varepsilon} \varepsilon B_{n,i} \quad (3)$$

然而,迄今为止,潜在的时间不均匀变形运动现象,仍可能被错误地解释成大气的特性活动。在同一时间里,两种相位影响有可能呈现出不同的状态:大气相位栅网是非相关的,而与之相反,非线性运动(NLM)则通常为强相关的。

假定非线性运动 NLM 与一次衰退指数相关,对1年的周期非线性运动可能的季节性变化做修正,经过沿短暂时间尺度的维纳滤波处理(Wiener filtering),则均能将大气相位栅网和时间的不均匀变形影响,从恒定散射体备选物中滤除(考虑到了采样时间参差不齐,包括被遗漏缺失的地球资源卫星 ERS 探测器的信息)。

由于大气相位栅网的极高的空间关联性,若恒定散射体的密度能保持较 3~4个 PS/km²更大的话,即使恒定散射体备选物仅有一个很稀疏的格栅,亦足以修正整个映射区域上空的大气层组分。用克利金内插法(Kriging interpolation)做再次最佳滤波(删除特别离散数值),那么在合成孔径雷达各种干涉图的正规合格网格上对大气相位栅网进行重新采样均将成为可能。

即使地球资源卫星 ERS 通常使用精密的宇宙站航线,但在干涉图上的卫星轨道不确定性影响仍不可疏忽。实际上判定大气相位栅网的影响是两个相的总和:包括大气层影响,以及因轨道条件造成的、执行干涉测量作业的传感器轨道的不精准性。然而,后者符合低阶相位多项式,并且即使在稀疏的恒定散射体备选物网格上做判定,也不至于改变低波的数值特征。

微分干涉图是对大气相位栅网的补偿进行再次校正(实际上,是大气相位栅网+卫星运行轨道的不确定性相位条件),并如此前联合判定 v, ε 的步骤一样,已对恒定散射体备选物耦对相关相位差进行过比较,而现在则有可能基于逐个像素方式,凭藉大气相位栅网,对干涉图进行修正,从而鉴别所有的恒定散射体。

当然,为了对一个恒定散射体进行分析,应充分利用足够数量的影像(通常至少需 25-30 帧),用统计学的指标对众多的恒定散射体备选物的 $\Delta v_{1,2}$ 和 $\Delta \varepsilon_{1,2}$, 进行彻底的鉴别和正确评价。

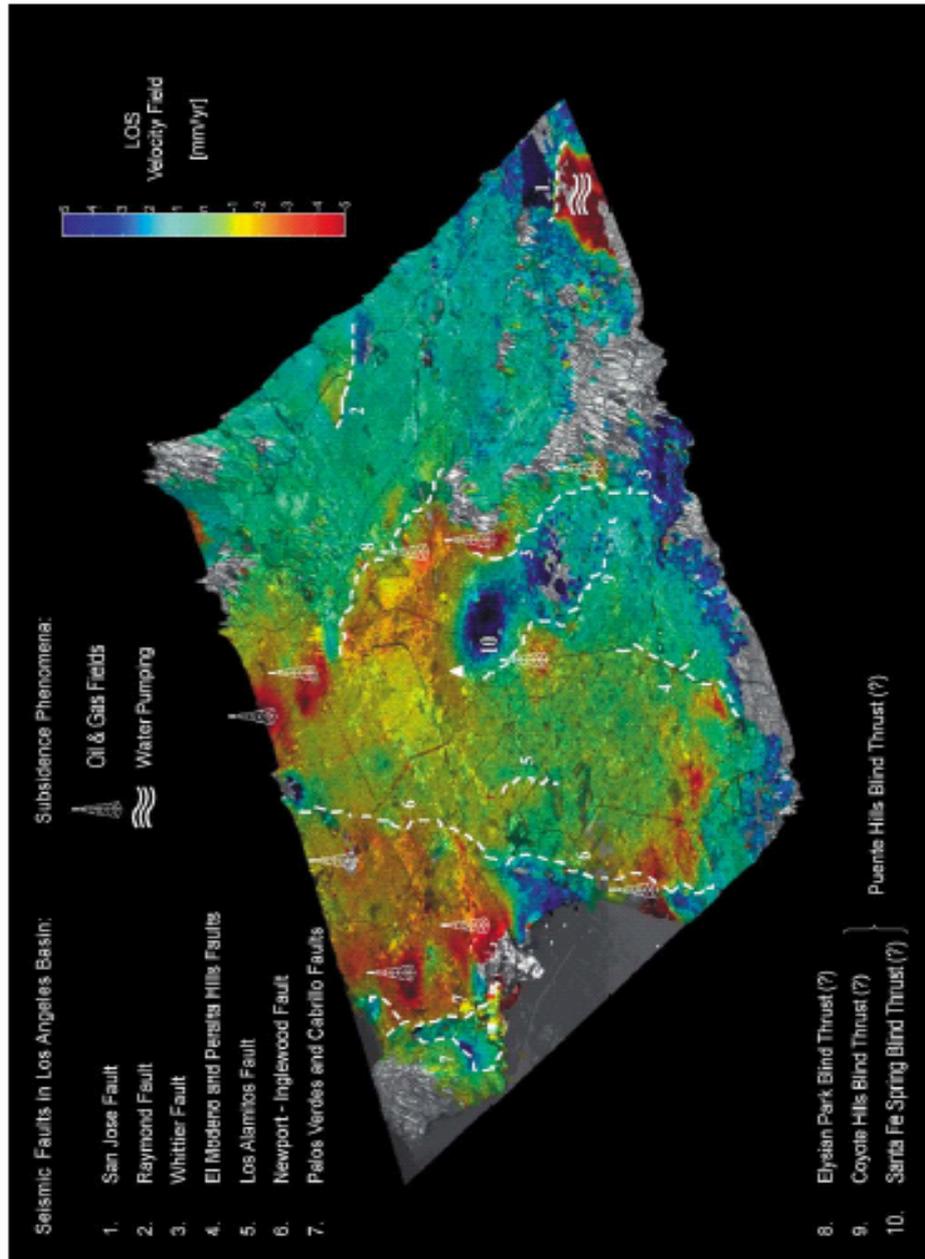


图 1. 在洛杉矶盆地的一个面积大约 $60 \times 60 \text{ km}^2$ 上的速率评价域的ERS卫星视线的方位指示鸟瞰图

靶标位移系统的灵敏度用唯一的矢量表达： $e = 0.41$; $n = -0.09$; $u = 0.91$ (东, 北, 上)。相关参考测点选择在Downey, 接近试验基地的中心。因此, 干涉仪的灵敏度对于垂直位移是最大的。基准数据高程视图模型被直接地从合成孔径雷达数据和一个坐标异常的地面测控点的非优先级信息中判定。地形起伏在视觉化过程中被过分夸大。速度场是附加在所有的影像上的不连续平均数, 而且 $\pm 5 \text{ mm/a}$ 的数值是使视觉饱和化的唯一目标。在Downey选择的基准测点, 标为白色, 并且假定为不动的, 是自1998年6月以来运行的南加利福尼亚卫星定位系统综合网络的GPS监测站(DYHS)。在低密度的恒定散射体的区域留下的非彩色影像相当于区内时间上强烈非均匀运动的非自然变形影响的面积(例如: 狭长的海滨区的港口)。在这种情况下, 平均的变形率不是非常重要的指标。短基线指示已知的断层和经论证的隐伏压断层的位置。由抽取地下水 and 开采石油或天然气引起的非天然变形区域能够被识别。

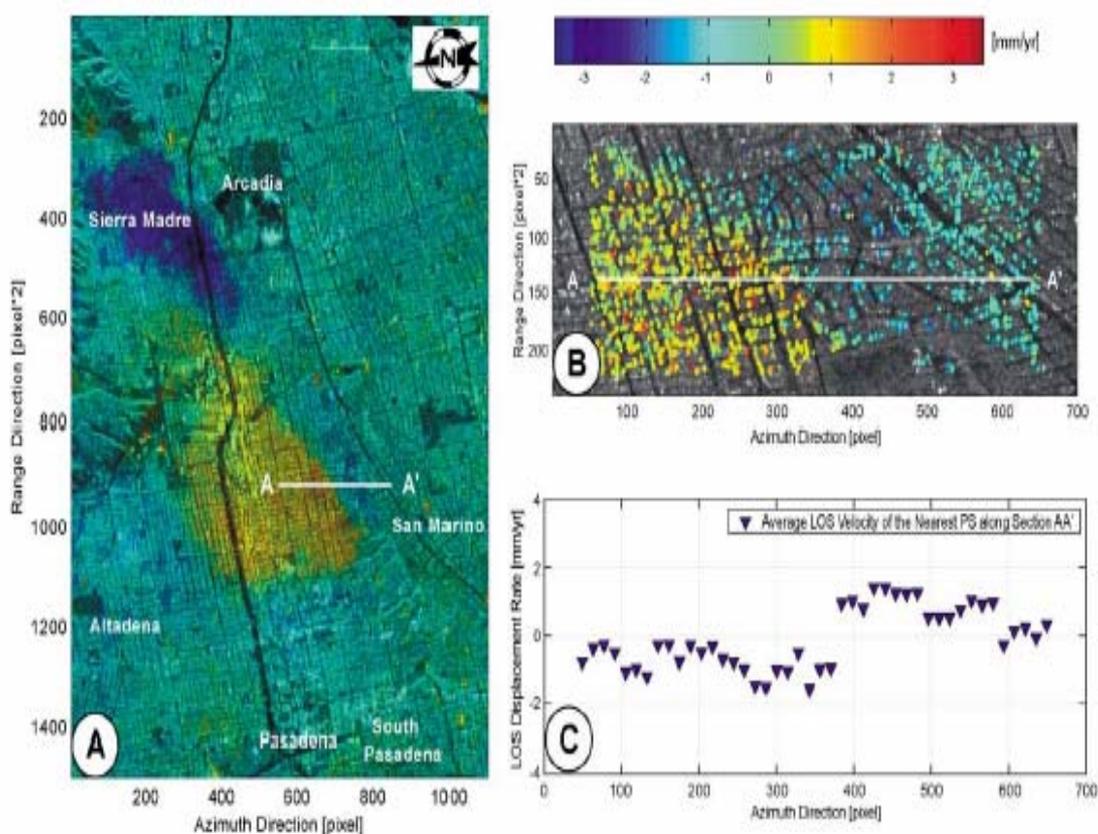


图 2

(A) 评估瞄准的速度场横穿雷蒙德断层 为了使用最小内插法,数据报告在合成孔径雷达坐标(范围,方位角)中不应写在地理坐标中。采样步调在倾斜范围和方位都是大约4 m(ERS 影像已经被范围方向的一个传递因数 2插入)。恒定散射体的密度是非常高的(超过 200个PS/km²),所以那评估瞄准的速度场看起来是连续的。和图 1. 中一样,速度值的计算是在Downey的基准测点被假定不动的前提下进行的(南加利福尼亚卫星定位系统综合网络, 2000)。

(B) 靠近AA 横剖面。恒定散射体的位置和速度已标明,而且他们的密度能再增加。断层分割的两个区域相应的分离速度值低于0.4mm/a。

(C) 沿AA 剖面的相关恒定散射体视准线位移速率 极易识别出呈阶段性的、非连续的约2mm/a的平均变形率,而且断层的上盘能以几十米的空间解算结果来定位。

Table 1
Comparison between GPS and PS average deformation rates along the ERS Line-of-Sight

Station ID	Location	GPS ^a (mm/year)	SAR- b^b (mm/year)	Δ (mm/year)	SAR- μ^c (mm/year)	SAR- σ^c (mm/year)	N^d
AZU1	Azusa	-0.21	0.38	0.59	1.46	0.89	14
BRAN	Burbank	-4.19 ^c	0.39	4.58 ^c	0.45	0.1	2
CIT1	Pasadena	2.12	2.01	-0.11	1.44	0.38	48
CLAR	Claremont	6.27	4.91	-1.36	3.52	0.77	41
HOLP	Hollydale	-3.12	-2.53	0.59	-1.54	0.71	7
JPLM	Pasadena	1.49	0.6	-0.89	0.65	0.66	49
LBCH	Long Beach	-10.48 ^c	-2.29	8.19 ^c	-3.29	0.65	7
LEEP	Hollywood	-0.37	0.25	0.62	-0.09	0.50	33
LONG	Irwindale	4.58 ^c	1.32	-3.26 ^c	0.31	0.51	18
USC1	Los Angeles	-4.41	-4.42	-0.01	-3.57	0.55	26
WHC1	Whittier	-2.99	-2.96	0.03	-3.08	0.41	9

^a南加利福尼亚卫星定位系统综合网络GPS数据在 JPL 处理。视准线投射的通用模型投影区域速率为19.3 mm/a (JPL测站 GPS计算评价结果)。从GPS速率中剔除。

^b 在 N 个恒定散射体之中到GPS监测站的判定的位置接近最好的偶对。对于 CLAR , JPLM , LBCH 和 LEEP 测站 (南加利福尼亚卫星定位系统综合网络, 2000), 仅仅考虑其最接近的恒定散射体。

^c N 个邻近的恒定散射体的速度数值的平均值和标准偏差。色散数值不会使持久散射技术的精度受到干扰, 因为它强烈地依赖速度域的斜度, 局部变形现象的影响就象沿着油田的对应活跃的断层和沉陷的变形现象影响一样。

^d 能识别在GPS接收估计的位置周围的一个 100米 的映射范围的恒定散射体的数目。由于恒定散射体的密度较低, 对于 CLAR 和 JPLM 监测站, 要用一个的 500 m 映射圈, 在对于 LEEP 测站的时候, 要用一个 1500米 的映射圈。

^e JPL测站 GPS解决方案不坚持用GPS速率(通用广域网)评价这些在临时卫星轨道和固定标准阵列的中心测站(SOPAC))。修订视准线的共模投影区域(以17.9mm/a的速率估计开发临时卫星轨道和固定标准行列中心变形趋势), 临时卫星轨道和固定标准行列中心的速率眼着瞄准方向: BRAN测站: -0.45mm/a; LBCH测站: -2.60 mm/a; LONG测站: -0.36mm/a, 而且是与恒定散射体的干涉差分合成孔径雷达的监测结果相一致的。

3. 恒定散射体分析的结果输出

在恒定散射体上, 一旦所有的大气相位栅网被判断且予以消除, 那么, 亚米级精度的标高高程 (由于入射角角度存在的宽散射, 相对于基准轨道, 通常为 ± 70 mdeg。)和毫米级的变形检测(由于恒定散射体的高相位相干性)便均可成为现实。开发长时间跨度的特别稳定的恒定散射体, 尤其是能用前所未有的、有时甚至优于0.1mm/a 的精度来测定相关靶标的视准线 LOS 速度, 将具有特别重要的意义。

复合干涉图恒定散射体研究的最后结果是:

- 恒定散射体的地图在影像及其坐标中标示出: 纬度、经度和精确的标高(标高精度优于 1m)。

- 每个恒定散射体的视准线 LOS 平均变形率: 精度通常在 0.1 ~ 1 mm/a之间, 有赖于可利用的干涉图数量和每个单独恒定散射体 PS 的相位稳定度)。

- 位移的时间序列 (即考虑每一个独立基准影像)显示出, 它们与每一个合成孔径雷达探测器相对应的恒定散射体 PS 位置的视准线 LOS 相关联系。因此, 时间序列表现为恒定散射体 PS 的运移量相对于时间的一个函数 (单次测量精度范围通常为 1 ~ 3mm)。

就所有的微分干涉测量的应用而言, 其时间和空间的结果均非绝对的。变形数据与主影像(在时间方面)相关; 而其(在空间方面的)成果, 则是参照已知标高和运移的相关点计算而获得的。

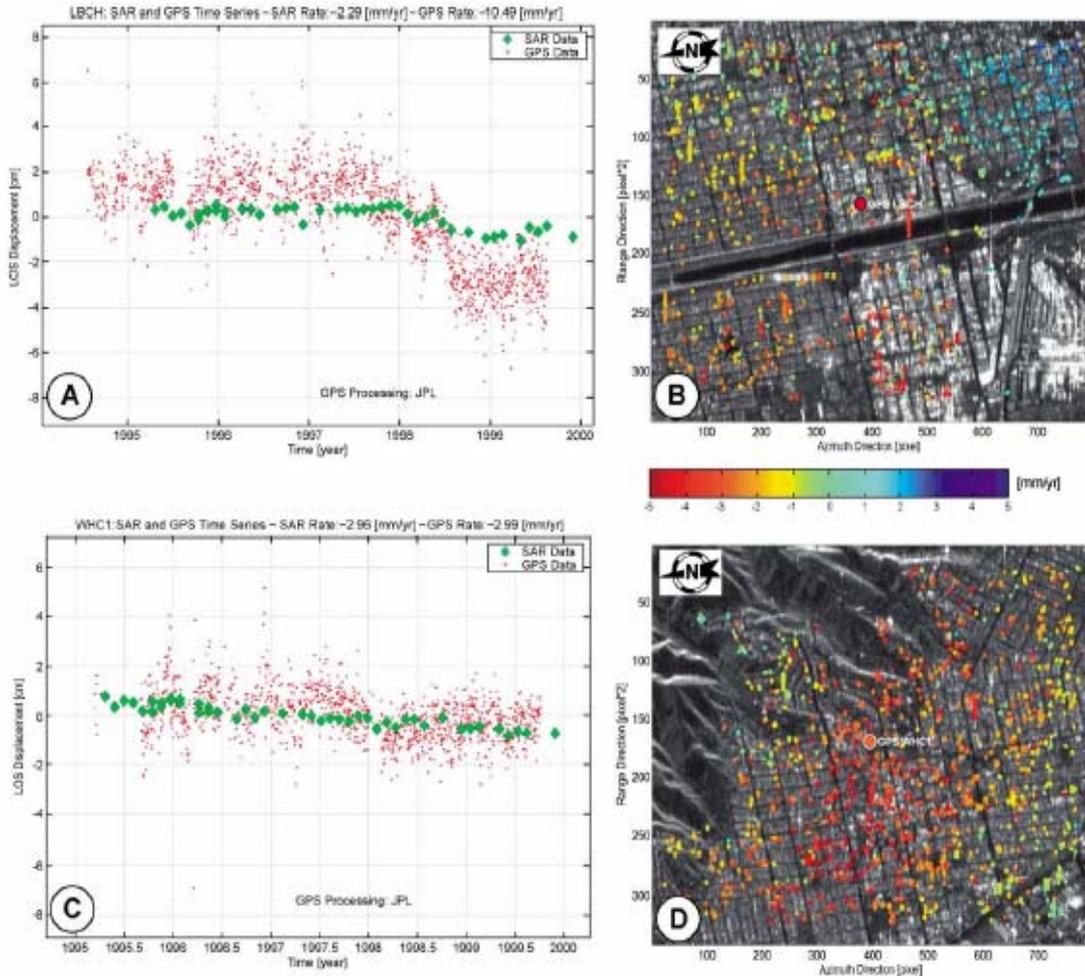


图 3.

(A) 在 JPL和GPS的时间序列之间的比较

相对于南加利福尼亚卫星定位系统综合网络，把LBCH测站安置在海滨附近，并评估GPS接收站最接近的恒定散射体的位置变换。在这一个测站上，发现在这二个系统的观测速度数值估计之间缺乏一致性(详见表 1.)。然而，两者的时间序列有相似的倾向，在 1998 年表现出厘米级的沉陷。讯号对杂音比的不同主要是由于二个系统的运转频率不同引起：GPS 使用L波段；SAR使用C波段。

(B) 靠近区域主机上面的GPS固定接收站

LBCH 和 800恒定散射体最靠近。每个恒定散射体的基准点的颜色表示它的平均观测速度值(数值为 ± 5 mm/a)，唯一目的是使视觉化达到饱和。

(C) 和(A) 一样对于南加利福尼亚卫星定位系统综合网络固定GPS监测站的WHC1测站

被查明位于 Whittier学院。合成孔径雷达-卫星全球定位测量站是非常一致的。

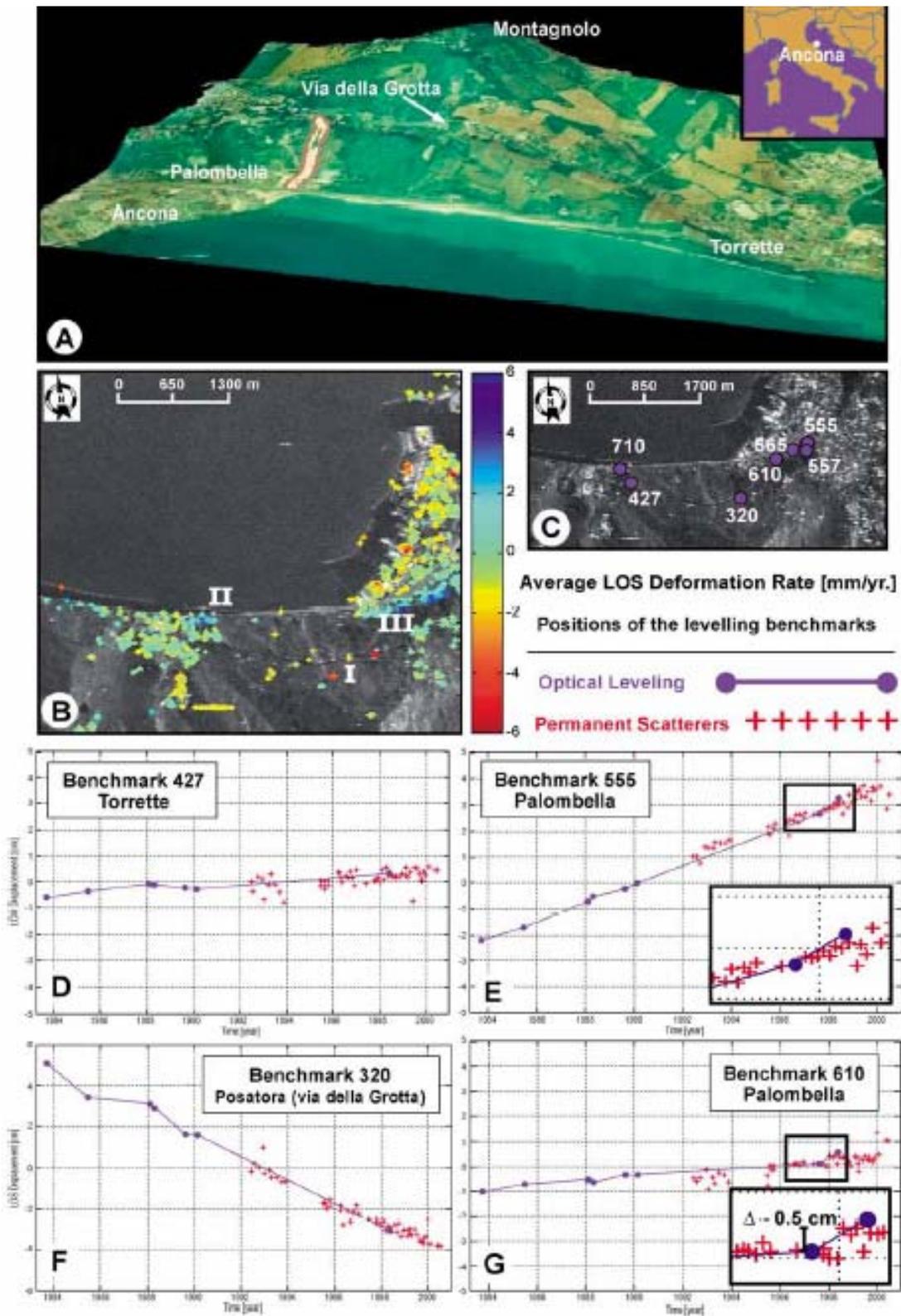


图 4

(A) 在意大利中心被“Grande Frana di Ancona”(安科纳大滑坡)影响的区域的航空照片(在一个低分辨率的数字高程模型上的重叠)为视觉化目的地形的垂直比例尺被过分渲染。斜坡面以一个大约 10° 的平均倾角向北方指向大海,并且表现出几个悬崖的连续演化,壕沟和交向斜杆斜坡的特色(数据来源于安科纳政府当局)。

(B) 评定个别恒定散射体所在的滑动面积和它的直接的环境的平均视线变形率(大约 $4 \times 5 \text{ km}^2$)。

识别出大约 820个恒定散射体,其中12 在斜坡中的前缘区域(),主要沿着“via della Grotta”。在都市上游前部区域的两侧的有数十个恒定散射体可利用(分别在 Torrette (II) 和 Palombella (III))。靶标位移系统的灵敏度用单位矢量表达: $e = 0.37$; $n = -0.09$; $u = 0.92$ (东, 北, 上)和海港位置相关(到滑坡的斜坡前沿的距离 3 公里)。所有的速度数值都通过一个位于 Chiaravalle 和 Camerata Picena 之间,大约安科纳南西部 11 公里,并假定为不动的相关参考测点计算。没有一个优先级的信息被地面控制测点的坐标异常利用。每个恒定散射体的位置和视线变形速率在多影像反射地图上被重叠,在合成孔径雷达中显示的坐标、距离和方位角均用一个彩色的标记识别。既然数据不是地形编码,水平比例尺就得有一个定性的基准。位置变化速率为 $\pm 6 \text{ mm/a}$,其目的是使视觉化饱和。在安科纳港口区域,当地的沉降现象的影响到个别建筑物。在这些影响效应很可能与土壤压实和滑坡位于都市的西南这些因素没有关系。

(C) 一些基准点的位置和地址

在1983、1985、1988、1988、1989、1990、1997 和 1998 年共8次光学光学水准测量作业中的基准点编码。估计在多影像反射率地图上,被描述的所有基准点在100m范围内至少有一个恒定散射体。

(D) 光学水准测量变位数据与相关的基准点

报告中已叙述了沿着 ERS 视线投射在同一的地段、与最相邻的PS相关的变形时间序列。遗憾的是,挑选的PS表现了一个相当强的噪音行为($\sigma = 3.5 \text{ mm}$)。即使在1990 年进行的水准测量作业数量相于进行有效比对而言明显不足的情况下,其总体结果仍然呈现了很好的一致性。

(E) 与 (D) 的情况类似,Palombella 基准点 555位于在滑坡体前缘的之东部 即(图 (B) 之III处)。

(F) 与 (D) 的情况相似,Posatora(cia della Grotta)基准点 320的位置在滑坡体前缘的一片荒地,即(图 (B) 之I处)。

(G) 与 (D) 的情况相似,基准点 610地点在 Palombella,仍在在滑坡体前缘的之东部 即(图 (B) 之III处)。在1997年12月21日到1998年1月25日之间获得的 ERS恒定散射体时间序列极为突出地显示出递进运移(约0.5cm)现象,这与1997 和 1998年之间水平基准测量的基准点位移量值极为吻合。

4. 洛杉矶盆地的恒定散射体分析:地震断层监测及其与恒定散射体PS和GPS数据间的比较

图 1所示,系对自1992年至1999年间、遍布南加利福尼亚上空的55个地球资源卫星ERS探测器测得的视准线速度场进行解算、测定、评价所获的鸟瞰图。已经确认的恒定散射体 PS超过500,000个,使其平均密度达150个PS/ km^2 。假定的不动基准测点,选择在Downey(在距洛杉矶市南东20公里的一个试验基地的中心),有关数据来自于南加利福尼亚全球卫星定位综合测量网络的 GPS 固定监测站。

在图片中,可清晰地看到由于开采石油、天然气以及抽取地下水而导致的地下沉陷现象。另外,速度场梯度的局部极大值,鲜明地反映了其与已知的活跃地震断层位置间的相关性(加利福尼亚市政当局,1994)。若能实施高密度的精密测量,追循视准线 LOS 滑动速率成分指出滑动位置,有可能推断得非常准确(图 2)。

事实上,速度场显示的局部变形显然与隐伏逆断层—即缓倾角倒转断层—之间的联系极为密切:(i)在到达地表面前终止,(ii)呈现的滑动速率仅为每年毫米级,而且,(iii)在沿逆断层发生地震事件之前,其确切位置很难予以标注和绘出。

对挤压构造部位的隐伏逆断层的鉴别和监测（如加利福尼亚），是关系到对地震风险可靠性评价这一具挑战性的关键性棘手难题。在图1 速度场地图中，显示了在洛杉矶中央附近，被判断出的、名为艾利舍（Elysian）公园的隐伏逆压断层的位置，与其滑动速率非常吻合一致。通过速度场的非均匀性突变，还进一步判别出了在该区域接近彭特（Puente）山的隐伏断裂；该断裂已被证实确认。

对恒定散射体变形数据（表 1 和图 3）和南加利福尼亚全球卫星定位综合测量网络的11个GPS测站的相关位移时间序列进行了比较，采集的数据（对于靶标速度的可靠估计）最晚开始于1996年；具高亮度、良好的均一性，从而为鉴定其主要差异性创造了良好条件。恒定散射体技术显示了超出静态 GPS 测量一个数量级的更佳精度，而且允许进行大量的、更高的空间采样（对每平方公里的数百个基准点，每隔35天可重访一次）。更进一步讲，欲对以往已经发生了的变形进行分析（从1992年开始），则利用欧洲空间组织（ESA）的地球资源卫星（ERS）档案数据即可进行。最后，对于广阔的区域监测，就经济成本而言是非常低的；并且由于恒定散射体是自然的雷达靶标，而毋需加以保管、维护。

然而，合成孔径雷达位移测量不是三维 3D 立体的，而从 GPS 固定监测站获取的数据的时间分辨率，却普遍的比宇宙空间合成孔径雷达所提供的数据要高。值得注意的是，与向上和向下的卫星“立交桥”（overpasses）相联系的合成孔径雷达数据的组合，为成果提供了显著的改善，使之接近于双倍恒定散射体的空间密度，从而减小了双倍路径间的时间间隙，并进而使沿着垂直和东—西两个方向撷取二维 2D 变形位移（具有不同的精度数值）信息均成为可能。

合成孔径雷达 SAR 和全球卫星定位系统 GPS 的灵敏度，在某些程度上是彼此互为补充的。SAR 数据对靶标的垂直运动非常敏感，而 GPS 在这方面则较差；另一方面，当变形位移现象发生在大约沿着北 - 南方向时，几乎与卫星轨道平行，则无法仅通过合成孔径雷达数据来发现，因为它们沿地球资源卫星 ERS 视准线 LOS 的投影，对于上行和下行的卫星轨道来说都非常小。

而且，和在个别情况下，合成孔径雷达数据的精度、速度场的低波数成分以及与参考测点的距离，都缓慢地减少、降低。

5. 安科纳(Ancona)滑坡光学水准测量数据的比较

较为进一步的重要结果，是针对因地面变形导致的、已知的“Grande Frana di Ancona”滑坡现象监测，恒定散射体分析的构架中获得的。该滑坡对意大利安科纳市南西Montagnolo

的北海岸边坡 (大约 $2\text{km} \times 1.75\text{km}$) 产生影响 (图4. A)。

主要滑动事件发生于1982年12月13日,造成了严重灾害。从那以后,市政当局已积极开展测量工程项目。1983、1985、1988、1989、1990、1997 和 1998 年开展的光学水准测量活动表明,每年发生几厘米量级的垂直变形。

即使该滑动现象的地质学机制至今仍未阐明,对所有前述的内陆区域的下降和沿海岸线上升轮番活动的地貌特征差别的例证已多有报道。该地区受(散射体)短暂抗相关性影响强烈,阻碍了对低于正常基线微分干涉图相关性的利用。普通的干涉差分合成孔径雷达 DInSAR 不可能擷取到可靠的地面的变形数据。

利用地球资源卫星 ERS 的 61帧影像(1992 年6月- 2000 年12月),在滑动区及与之直接相邻的区域 (大约 $4\text{km} \times 5\text{km}$),判定出了820个恒定散射体 PS;特别在郊外斜坡正面区域和数十个在上升正面的两个近旁区域,确定了12个恒定散射体 PS(图 4)。恒定散射体 PS 位移时间序列已与光学水准测量的数据做了相比较。为进行变形现象的精密描述,即使水平基准点回访的次数很少,其成果的一致性仍较好(图 4)。

再者,两个测量技术的主要特性是互补的。光学水准测量用途很广泛:基准点在某种程度上能自由选择,而且在连续的测量活动之间的时间间隔,能根据附近的特异位移变形现象而确定,当然其预算也是廉价的。精密水平测量的精度非常高,局部精度值可达 $1\text{mm}/1\text{km}$ 级别。

另一方面,高费用成本,常常成为在从开始发生到具有完全变形特征的过程中,阻碍进行足够的水准测量的因素(例如:安科纳,波隆那滑坡等等),尤其对于广阔区域的监测,其费用成本与基准点的空间密度是成比例的。这一点更利于开发恒定散射体研究。况且,ERS 文件档案使对既往变形现象的分析成为可能,再者而非最后,基于对地面基准点的回访,所有逻辑性的困难均可克服。

特别地有趣的是,汇集和存取一个地理信息系统(GIS)环境的所有位移变形数据,是很可能的,使结合交互式程序用地理和地质学的数据进行变形测量也属可行。

这些都可以促进可靠的风险评估和灾害区域的控制,包括:断层在时间/空间上的变形、房舍监测,沉降区域和斜坡不稳定性,连同单一建筑物和基础设施的精密稳度性等,均可进行检测。

6. 结论

方法的灵敏度具有示范性,我们期待恒定散射体的分析能扮演如大地测量一样为人们所需要的重要专业角色;尤其在市区,恒定散射体的密度范围通常可达 $100-300$ 个 PS/km^2 ,完

全可能用其前所未有的空间分解能力来对毫米级的变形现象做出判断。

此外，有关恒定散射体技术与光学水准测量和GPS的不同特性，意味着三种技术存在相互依存的关系，从而使得大地变形监测的可靠性和质量能够被更好地改良。恒定散射体分析不失为在高密度水准网格上的广阔领域内一种良好的廉价监测手段；GPS 则可为低的空间密度网络提供完整的 3D 立体位移数据；而光学水准测量的多样性和垂直精度，能够定位并完整判断重要的局部位移现象，从而避免在遥远的地方对变形影响的区域制定规划，和水准测量基线回访方面资源的极大浪费。