

地域数据的可视化：合成光圈雷达差异干涉仪的时间序列实验

Candan Eylül Kilsedar, Luca Frigerio, Manuela Bonano, Gloria Bordogna, Paola Carrara, Pasquale Imperatore, Riccardo Lanari, Mariarosaria Manzo, Antonio Pepe, Maria Antonia Brovelli

Translated by Hanlin Tong and Wendy Qian

关键词：大地理数据，互操作性，DInSAR 变形时间序列，地理可视化，视觉勘探，制图动画，虚拟地球仪

摘要：

本文介绍了一个在城市地理信息系统使用的实验以鼓励科学家，公共管理人员及城市居民使用时间序列来解决科研问题。在本实验中，通过可视化显示城市地区（即那不勒斯，米兰和都灵）及测量差分合成孔径雷达干涉来测量周边城市地表的变形。项目内开发了两个可视化应用程序。首先，将平均变形速度图可视化。其次，将累积变形时间序列图动画化。本文着重于该实验的特点和实施细节。全部可视化效果都覆盖在三维地图（即虚拟地球仪）上。与此同时，我们使用免费的开源软件（FOSS）以实现相互操作性，可复制性和可重用性。

1. 简介

大地理数据（BGD）为监测和评估自然界及大多数人居住的建筑环境提供了可能。尽管如此，我们需要更好的总结和可视化这些数据以方便公共人员及公民以理解。为此，我们需要新方法来自评估地理数据质量以及合成这些地理数据来为非专家提供一致的可理解的和可能的隐藏信息。

在项目“城市地理数据，数据生成，评估及技术意识”中，我们已经对鼓励科学家，公共管理人员和城市居民使用 BGD 的新技术进行了实验。具体来说，该项目旨在通过观测土壤消耗，土地利用和土地覆盖及物联网（IoT）的流动性数据和目前仅涉及建筑的三维城市可视化，来提升对于城市的认知。

在本文中，我们着重于通过差分合成孔径雷达干涉（DInSAR）来测量各个城市周边的往年地面变形情况。应用子集（SBAS）的技术也被应用于本实验中。平均变形速度图和时间序列数据可以通过（OGC）和（WMS）两种方式来检索。但是对于非专业人员来说，数据的解读可能会是一个问题。

除了平均变形速度图，我们还通过减少空间和分析区域的时间分辨率，定义和实现了 BGD 变形时间序列的动画化。他们会帮助非专业人士一目了然地识别出地面领域，而无需花费太多时间

分析单次变形时间序列。每年我们只选择进行一次测量。这是一种帮助非专家识别变形较大的区域的方法。本文将会着重于这方面的描述及其实施细节。具体来说，第2节介绍了相关工作。第三节概述了DInSAR时间算法的主要步骤系列生成。第4节介绍了自动程序用于DInSAR时间序列可互操作共享。第5节介绍了用于DInSAR时间序列的CesiumJS应用程序可视化。最后一部分总结了主要结果，及未来可研究的方向。

2. 地理数据可视化的基本概念

本文的重点是将BGD时间序列可视化的方法。可视化是指通过一系列转换将原始数据转换成图像以传达可理解的信息有特定需求的人群。因此，设计可视化同时考虑了基础知识的传递和设计感。

科学的可视化主要是为了使科学家能够了解并可能从他们的数据中发现一些东西。因此，合适的可视化模式是有利的探索性数据分析和综合。计算机图形学和计算机动画为可视化二维和三维数据提供了很大的帮助。地理可视化是信息可视化的一种形式，其中包含地图学，地理信息系统的原理（GIS），探索性数据分析和信息可视化。这些都被整合到视觉的开发和评估中，这样将有助于探索，分析，合成和表示地理参考信息。而GIS和Web是实现这些需求的地理可视化方法。

对于非专业从业人士而言，地理数据的动画化显得更为直观一些。Andrienko断言“为了能够思考关于数据，头脑更需要感知数据。”从这个意义上讲人们认为“一张照片比一堆数字集合更有价值”。此外，Shneiderman（1996）指出任何视觉探索任务都应从概述或数据的整体表示开始。Ogao和Kraak（2002）补充说，地理数据的动画化提供了“可视全球化过程的可能。”与此同时，Peuquet（1994）根据“何时何地何时何地”的概念来进行地理可视化。他根据不同的地理现象来描述以下三个不同方面的观点：

- 何时：描述时间+哪里：描述地点→什么：描述现象
- 何时+什么→哪里
- 哪里+什么→何时

3. DINSAR 时间序列生成

在区域制图和监控地面变形方面，DInSAR已经是是一种合适且成熟的技术。特别是DInSAR可以通过提取合成孔径之间的相位差，从而在略微不同的轨道拍摄雷达（SAR）图像以获取具体位置与实践，来测量在相同雷达传感器上，多次飞行同行的地形变化。经过多年的研究，DInSAR已经可以实现调查长时间序列下的地面变形情况。同时，两种新方法也被开发出来，一种进行全局分类，称为永久散射体（PS）（Ferretti等，2001年；Kampes，2006年），另一种则被称为小基线（SB）（Berardino等）。

PS技术在单个像素的分辨率范围内是基于对与地面上的高连贯的点状结构（即所谓的永久散射体），依旧可以保持变形的基础上实施的。所以即便是使用大基线干涉图时，也能准确获得信息。与之相反的是，SB技术是由基于选择合适的SB干涉图来用于研究与分布式有关的地面上的散射体（DS）。更具体地说，在这项工作中SBAS技术（Berardino等，2002；Lanari等2004）用于恢复在意大利城市地区，因自然原因变形的地面数据。事实上，SBAS技术是最初用来来分析序列多视点（平均）干涉图（Berardino等，2002年），但是，SBAS算法随后进行了改编，从

而使之可以在完整的空间分辨率范围内工作（Lanari 等，2004；Bonano et al.，2012）。SBAS 算法被建议用于监测尤其是在城市地区的建筑物和公共基础设施。在这项工作中，两种算法都用于检索均值变形速度图以及变形时间序列，同时都与 PS 和 DS 目标位置有关。几篇论文描述 SBAS 方法的主要操作步骤，详情参考，Lanari 等（2007）。

在这里，我们总结了该方法的基础知识以及相关的处理阶段。SBAS 的起点是以分离时间和垂直基线为特征的一代 SB DInSAR 干涉图序列分离。首先，将干涉图展开。这样可以从测量的包裹阶段开始恢复整个相位，且不限于 $[-\pi, \pi]$ 间隔。时空相位展开技术，同时也被称为扩展最小值成本流法（EMCF）（Pepe 和 Lanari，2006 年）通常被用于有效地执行多时相的 SB DInSAR 序列干涉图。

图 1（a）显示了 SBAS 处理方法的简化框图。如上所述，在某些情况下，实验方向可能在于研究点状目标的变形（即未分布的超过成像场景的几个像素）。而在点状结构在整个空间尺度上必须要有变形的情况下，SBAS 技术的扩展是必要的（Lanari，2004；Bonano 等，2012）。数据分析开始于每个干涉图皆使用 2π 模减法于低通（LP）相位组件干涉图。然后将残余反转以获得与逐点相关的变形信号的估计结构并将实际信号与其他残差区分开来。例如全空间区域的地形标度以及与多普勒质心（DC）相关标度的频率差。图 1（b）显示了全面 SBAS 技术的框图。

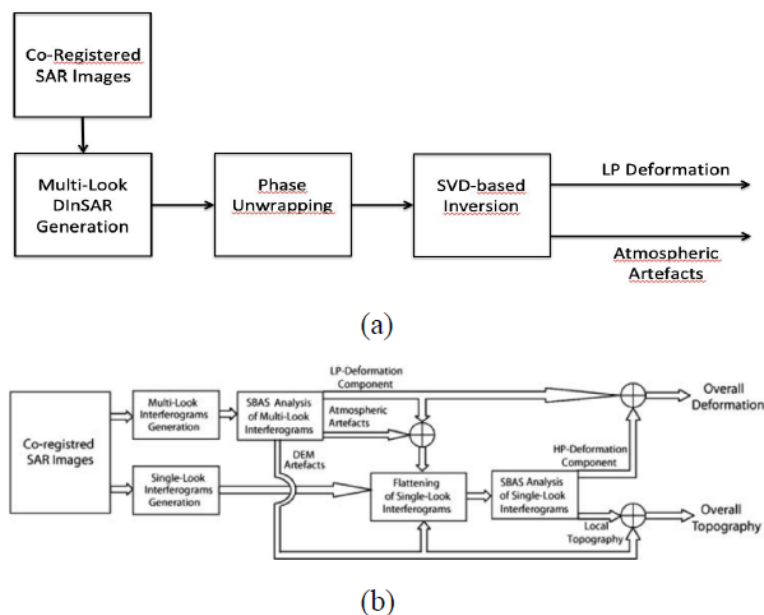


图 1. 低（a）和全（b）空间分辨率尺度下 SBAS 算法的处理链，部分复制自 Guzzetti 等人（2009）。

从 1992 年到 2010 年以来，SBAS 算法一直被应用于存档 SAR 序列及 ERS 和欧洲航天局（ESA）ENVISAT 卫星收集的图像。最大至 400m 的垂直基线，和最久至两年的时间跨度被用于选定在米兰，都灵和那不累死等地的干涉数据对。其 SBAS-DInSAR 变形数据产品以中等空间规模生产，而对于某些选定住宅区和中心区的斑点区域，范围也可以缩小至每栋建筑物。

4. 大地理数据互操作共享的时间序列

需要采用新的方法来填补特定应用程序提供通过处理和分析环境光学数据产生的产品的形式与可互操作的网络基础设施的输入需求之间的差距，以便改进这些产品的发现和利用。此外，根据专业知识、范围和用户的角色，必须提供不同的模式，以确保有效发现和利用 BGD。

在城市地球观测大数据项目中，我们认为空间数据基础设施的潜在用户不仅是科学家，更主要是城市地区的公共管理人员，他们可以利用多源和异构的 BGD 进行规划。此外，市民可能对可视化他们居住或计划居住的城市地区的地理数据感兴趣，这些数据与流动性、三维建筑物、地面变形、土壤消耗、土地使用和土地覆盖有关。这些信息影响生活质量以及房地产投资。

使这些用户能够使用 BGD 的初步方法是向他们提供一个发现设施，让他们知道通过 SDI 可以获得哪些信息。为此，科学家们首先需要了解 BGD 的语义、精确度、分辨率以及最重要的形变时间序列的生成过程，以便了解 BGD 是否是他们的研究兴趣。另一方面，公共行政人员主要需要将这些数据用于规划目的，或者可能希望下载这些数据并在其行政部门的公开数据门户网站上共享这些数据。为此，他们需要知道数据的时间有效性，如果数据受到版权保护，谁是联系人和拥有数据的组织等等。由于公共管理员用于浏览元数据的国家地理数据库(RNDT)格式，该格式被定义为意大利政府共享地理数据的标准，因此我们建立了 RNDT 元数据的目录服务，使 BGD 能够通过自由文本关键字和多面搜索进行查询。

启用 BGD 利用的第二种方法是根据用户角色生成不同的产品和服务。与地面 DS 或 PS 目标有关的形变时间序列，例如上一节所解释的通过分析 SB-DInSAR 干涉图序列产生的变形时间序列，虽然精确，但不适合被作为项目目标用户一部分的非专家理解。即使是专家，我们也需要提供一个易于理解的综合。在接下来的小节中，我们描述了在城市地区通过 DInSAR 测量得到的形变时间序列的共享的基本概念、方法和过程，以便实现适合于专家和非专家的可视化。

4.1 Web 服务互操作性的基本概念

地理数据的标准互操作 Web 共享可以分为两个不同的层次。首先，在语义层面，使用标准的元数据格式，如被叙词表和本体丰富的 INSPIRE 及其意大利扩展 RNDT，已经被提出以实现地理数据的发现(Fugazza 等人，2014)。至于地理数据值的时间序列（即按时间顺序排列的数据值，并使用公共地理参考），已经定义了一个 OGC 标准交换数据格式，即 TimeseriesML (TSML)，这是一种 XML 编码，实现了 OGC 观测和测量时间序列配置文件，目的是允许在信息系统之间交换这些数据集。通过使用 OGC 标准，TSML 目的在于成为一种可互操作的交换格式，可再次用于满足一系列数据交换需求。

其次，在语法层面，OGC 标准已经被定义了，并且现在已经被广泛应用，通过定义一个机器到机器 (MtM) 通信接口来实现地理数据的发现、访问、可视化、查询和处理。这些 OGC 标准包括 Web 目录服务 (CSW)、WMS、Web Map Tile Service (WMTS)、Web Feature Service (WFS) 和 Web 处理服务 (WPS)。此外，具有时间支持 (WMS-T) 的 WMS 也是可获得的，虽然这不是 OGC 标准，但 OGC 提出了服务依赖于时间的数据的最佳实践，映射服务器实现了符合 OGC 最佳实践的 WMS-T。

在下文中，我们描述了针对专家和非专家的 DInSAR 测量的互操作共享所采用的技术。

4.2 DInSAR 测量共享

DInSAR 测量是通过一个文本头编码生成的，文本头编码描述测量的特征，如时间和空间分辨率和范围、变形单元和地理参考系统。此外，点态测量（时间干涉相干性、形变速度和地理坐标，即经纬度）与剩余地形测量一起报告。这些信息构成了 TimeseriesML 构想的一组时间序列，每个测量点（经纬度）一个。我们需要的是以一种适合两种用户的形式来服务这样一组时间序列：专家和非专家。由于专家们可能需要通过查询地图上的每一个测量点来分析定量数据值随时间的变化，我们已经建立了一个关于 DInSAR 测量的 WFS。此外，通过启用 WMS 生成每个点在整个时间跨度内的平均变形速度的图，从而提供了一个综合（见图 2）。

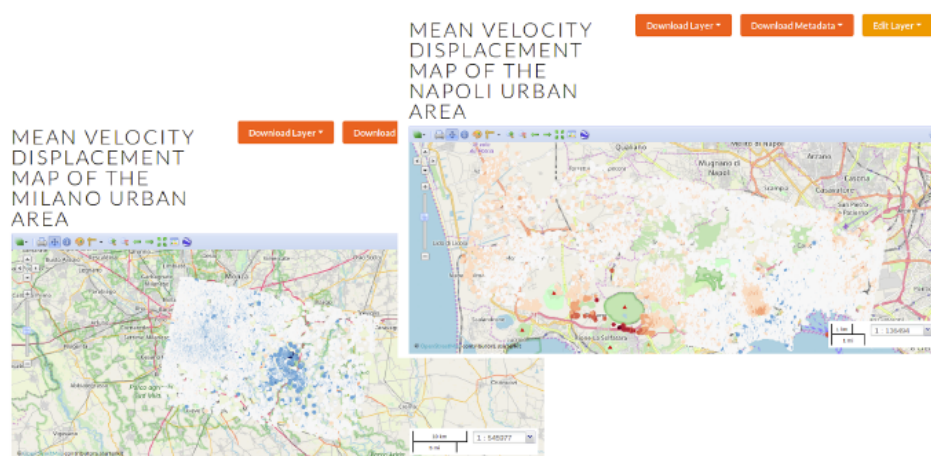


图 2. 部署在 IREA 数据节点中的米兰和那不勒斯平均变形速度图，可通过 WMS 访问

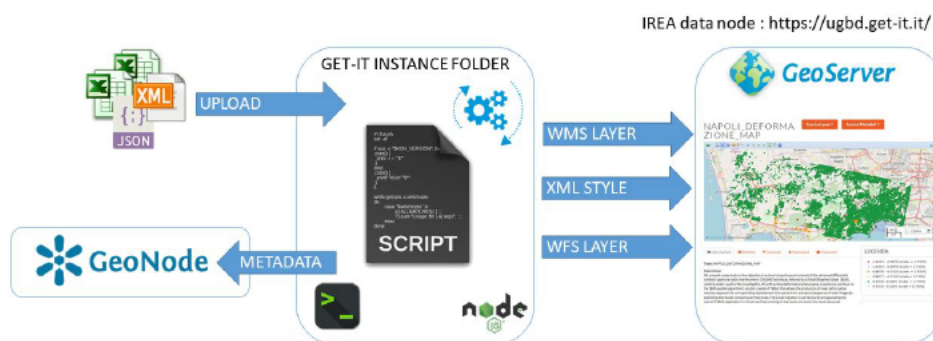


图 3. Web 部署元数据，平均变形速度图和累积变形的时间序列

为此，在 CNR IREA 的旗舰项目 RITMARE 中开发的 GET-IT 工具（Lanucara 等人，2017 年）已经得到使用，DInSAR 测量数据格式已经解析和翻译如下（见图 3）：

- 一个包含变形速度平均值的 CSV 文件，以便创建一个 WMS；
- 一个 CSV 文件，其中包含配置 WFS 所需的一组时间序列值，以便检索与任何单一测量点有关的一系列值；
- 一个 CSV 文件，用于 WMTS 服务，其中每一行包含每一个变形值及其空间和时间坐标；
- 一个简单的 GeoJSON 文件，其中包含从用于填充 RNDT 元数据的原始文件中提取的一些元数据字段；
- 一个 XML 文件，其中包含地图可视化的样式（WMS 地图上可视化的点的颜色基于平均值和基于缩放级别的点的大小）。

就非专家参与而言，通过提供时间序列图像，可以更好地了解时间变形信息，其中每个像素的值由不同的颜色表示，反映了从时间跨度开始的变形累积。这些信息适用于动画可视化，如下一节所述，以便能够一眼看出从时间跨度开始到结束的累积变形的变化。

为了对时间序列集进行处理，生成一个单时间的光栅层，并使用 WMTS 编译所有时间相关的光栅层，在此基础上设计并开发了一个参数化的自动化程序。除了时间序列的集合，该过程以像素（例如，80 米）、时间戳（例如，年份）和主题分辨率（例如，5mm）的期望空间分辨率作为输入，并生成以下结果：

- 一个 GeoJSON 文件，用于一年中单一颜色的每个值间隔，条件是计算了值分布的最小值和最大值，以适当地量化数据范围；
- 一个 GeoTIFF 文件，用于一年中单个颜色的每个值间隔，使用 Node.js 代码中空间抽象化库（GDAL）的 `gdal_rasterize` 函数创建，输入先前创建的每个 GeoJSON 文件；
- 每个时间戳（例如，年份）的 GeoTIFF 文件，通过合并以前的 GeoTIFF 文件创建。这是通过在 Node.js 代码中使用 GDAL 的 `gdal_merge` 函数来实现的。然后，使用 GeoServer 的 ImageMosaic 插件将 GeoTIFF 图像作为 WMS-T 提供。然后，使用集成到 GeoServer 中的 GeoWebCache 对每个 GeoTIFF 文件进行平铺，并使用 WMTS 提供（参见图 4）。

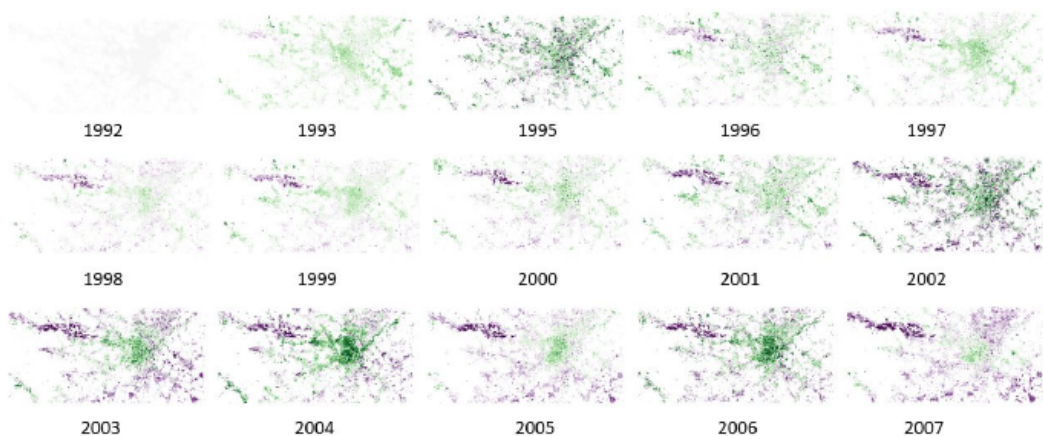


图 4. 都灵的栅格时间序列

5. 用 CesiumJS 可视化 DinSAR 变形时间序列

DInSAR 形变时间序列的可视化主要通过 GeoServer 使用 CesiumJS 和 OGC 标准实现。CesiumJS 是一个免费的开源库，提供高性能和跨平台的可视化以及 Web 上三维地理数据的探索。我们用于可视化的所有库都是免费的开放源码软件（FOSS）。此外，我们使用 VR-TheWorld 服务器构建了使用 CesiumJS 的虚拟地球的地形。它为整个地球提供了一个 90 米分辨率的数字地面模型高程模型（DEM），包括水深测量。在网络地理信息系统中，我们提供了六个基本地图，它们是必应地图航空、图箱卫星街道、OpenStreetMap、CARTO 暗色地图、花蕊地图和花蕊水彩地图。更改基本地图的能力使用户能够选择最适合查看重叠颜色的基本地图。网络地理信息系统可以在这六个基本地图和三个城市之间进行切换。对于每个城市，不论是平均变形速度图或是累积变形动画都可以被打开（见图 5）。利用 WMS 技术从 GeoServer 中获取平均变形速度层，并将其叠加到虚拟地球上。所有图层都使用单一样式，以便在不同城市之间进行比较。这个样式是通过使用 GeoServer 中的 OGC 标准样式图层描述符（SLD）定义的。可以单击每个变形点，以使用绘图显示其累积变形时间序列（见图 5）。用于创建绘图的数据是通过向 GeoServer 发出 WFS 请求检索来的。

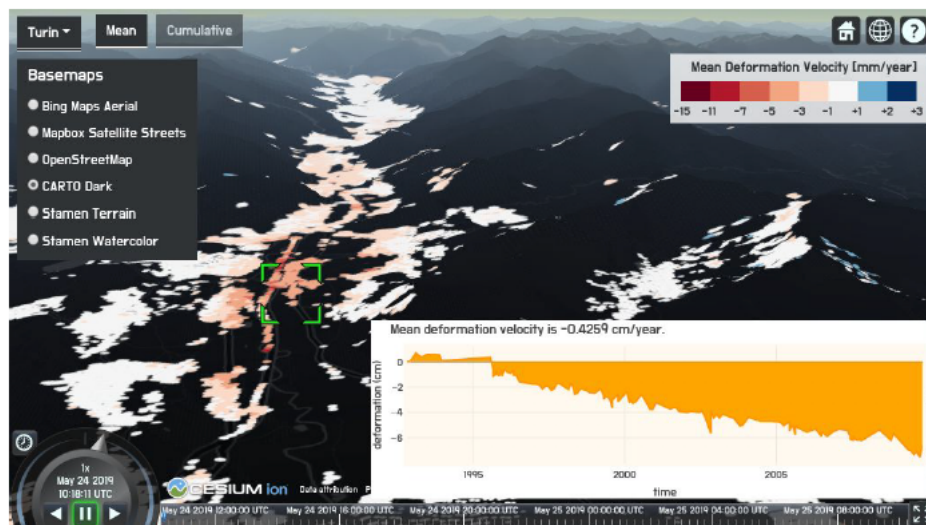


图 5. 平均变形速度可视化和查询

从 1992 年到 2010 年，每年生成的累积变形光栅图层由 WMS-T 服务，使用了 GeoServer 的 ImageMosaic 插件。每个栅格层都使用 GeoWebCache 集成到 GeoServer 中，并使用 WMTS 服务。然后，我们使用 CesiumJS 的动画和时间线窗口小部件对光栅图层进行动画处理，用动画展示了那不勒斯、米兰和都灵 18 年来的地面变形。平铺图层在动画期间增强了用户体验。

颜色间隔不超过平均变形速度约 1 毫米/年和变形 5 毫米的标准差（Casu et al.，2006）。在一个间隔中有值的所有点都使用单一颜色着色。此外，由于数据同时具有负值和正值，用于可视化的配色方案应该坚持不同的方案，在这些方案中，同等重视数据范围的中端临界值和两端的极值。在不同的方案中，中间的间断用浅色来强调，低端和高端用具有对比色的深色来强调。

(Brewer, 1994)。我们使用 ColorBrewer 2.0 选择了十一类发散数据的配色方案 (Harrower et al. 2003)。在这种情况下, 对于数据范围的两个部分(负值和正值), 间隔的数量都不超过弦映射的建议类数量, 即在 5 到 7 之间。考虑到标准差, 事实上数据的性质是分散的, 以及建议的类的数量为合唱地图, 我们使用的颜色方案可见于图 5 和 6。在平均变形速度的配色方案中, 白色代表变形速度在零, $[-1, 1]$ mm/年左右的平均值; 红色的颜色代表的是小于-1 毫米/年的数值; 蓝色的颜色代表高于 1 毫米/年的数值。在累积变形的色彩方案中, 白色是为变形值在零, $[-5, 5]$ 毫米左右; 紫色调用于值小于 -5 毫米, 绿色调用于值大于 5 毫米。对于累积变形, 同样的风格(配色方案)被用于所有的城市, 以便在它们之间进行比较。由于平均变形速度和累积变形速度均集中在零点附近, 地层向低值和高值方向变宽。

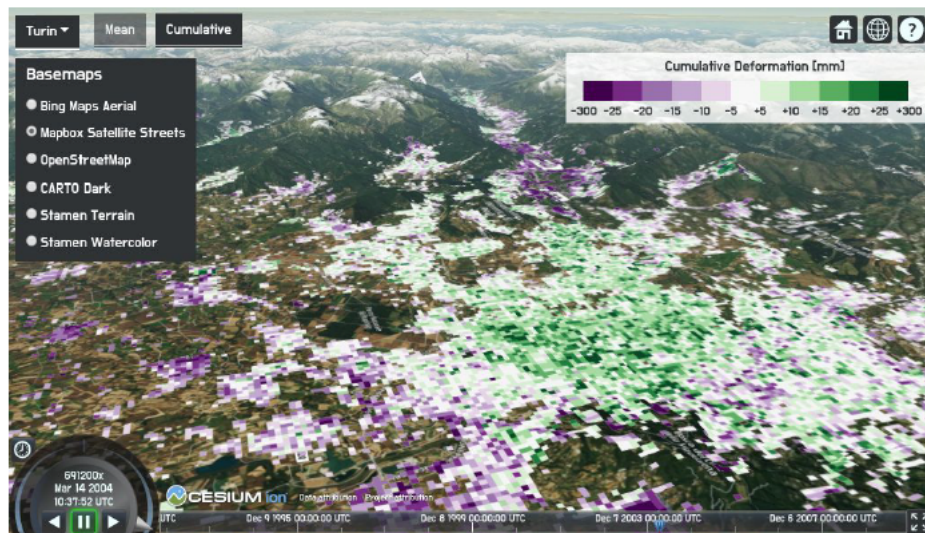


图 6. 累积变形动画的栅格图层

可以通过按动画小部件中的播放按钮来启动动画, 动画的速度可以使用相同的小部件进行调整。此外, 使用时间轴小部件, 可以手动实时滚动。可视化的源代码可以在 Github 上找到。

6. 总结

在创建一个 SDI 以支持城市规划时, 最主要的关注点是使公共管理人员能够发现, 比如, 查询和检索符合他们所需的 BGD。因此我们需要确保 BGD 语义、格式、沿袭和辅助信息能够由元数据正确地表达, 并且能通过编录服务有效地检索。此外, 为了能够充分利用 BGD, 我们需要通过可互操作地标准和有效的可视化来提供对于 BGD 的访问。

本文介绍了在城市地球观测大数据项目中, 对三个城市地区(那不勒斯、米兰和都灵)的 DInSAR 形变时间序列进行的生成、合成、共享和可视化实验。在原有时间序列生成算法的基础上, 提出了一种新的时间序列合成与共享方法。合成 BGD 是实现 BGD 有效共享的前提和关键步骤。它的目的是强调 BGD 最重要的特质和模式, 通过使消费者只关注相关方面, 从而避免导致他们承担过多的信息量。我们给出了通过利用 FOSS 和 OGC 标准, 实现 DInSAR 时间序列合成与共享的具体方法细节。这种方法是可调整的, 因为可以通过考虑不同的方面来调整测量的粒度: 测

量的准确性，以便不突出噪音；实践平台的特定资源，可以对瓦片维度施加限制；最后，目标受众所需的度量的所需详细程度。我们相信这种参数化方法足够灵活，可以为通过不同的测量精度、硬件特性和用户需求划分属性的情况建模。

综合的可视化使科学家、公共管理人员和城市地区的市民能够检测到变形的时空规律。使用虚拟地球仪，从而结合地形数据丰富可视化。在 Web 上使用开放标准和 FOSS 可以最大限度地实现互操作性、可复制性和可重用性。在未来，同样的方法也将用于帕多瓦和罗马，这是城市地理大数据项目的另外两个焦点城市。

致谢

本研究由城市地理大数据项目，一个国家利益项目（PRIN）资助，该项目由意大利教育，大学与研究部（MIUR）资助——id 20159CNLW8。

参考文献

- Andrienko, N., Andrienko, G., 2006. Exploratory Analysis of Spatial and Temporal Data: a Systematic Approach. *Springer Science & Business Media*.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari R., Sansosti E., 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40(11), pp. 2375–2383.
- Bonano, M., Manunta, M., Marsella, M., Lanari, R., 2012. Long term ERS/ENVISAT deformation time-series generation at full spatial resolution via the extended SBAS technique. *International Journal of Remote Sensing* 33(15), pp. 4756–4783. doi.org/10.1080/01431161.2011.638340.
- Brewer, C. A., 1994. Color Use Guidelines for Mapping and Visualization. *Visualization in Modern Cartography*, pp. 123–148.
- Casu, F., Manzo, M., Lanari, R., 2006. A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data. *Remote Sensing of Environment* 102(3-4), pp. 195–210.
- Costantini, M., 1998. A Novel phase unwrapping method based on network programming. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36(3), pp. 813–821.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39(1), pp. 8–20.
- Fugazza, C., Pepe, M., Oggioni, A., Pavesi, F., Carrara, P., 2014. A Holistic, Semantics-aware Approach to Spatial Data Infrastructures. In: *Proceedings of 3rd International Conference on Data Management Technologies and Applications*, pp. 349–356. doi.org/10.5220/0004997603490356.
- Guzzetti, F., Manunta, M., Ardizzone, F., Pepe, A., Cardinali, M., Zeni, G., Reichnbach, P., Lanari, R., 2009. Analysis of Ground Deformation Detected Using the SBAS-DInSAR Technique in Umbria, Central Italy. *Pure and Applied Geophysics* 166(8), pp. 1425–1459.
- Harrower, M., Brewer, C. A., 2003. ColorBrewer.org: An Online Tool for Selecting Colour Schemes for Maps. *The Cartographic Journal* 40(1), pp. 27–37.
- Harrower, M., Fabrikant, S., 2008. The role of map animation for geographic visualization. *Geographic Visualization: Concepts, Tools and Applications*, pp. 44–66.
- Imperatore, P., Pepe, A., 2016: *Geospatial Technology: Environmental and Social Applications*, IntechOpen.

- Kampes, B., 2006. Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique. *The Netherlands: Springer*
- Lanari, R., Casu, F., Manzo, M., Zeni, G., Berardino, P., Manunta, M., Pepe, A., 2007. An Overview of the Small BAseline Subset Algorithm: a DInSAR Technique for Surface Deformation Analysis. *Pure and Applied Geophysics* 164(4), pp. 637–661.
- Lanari, R., Mora, O., Manunta, M., Mallorqui, J. J., Berardino, P., Sansosti, E., 2004. A Small baseline approach for investigating deformation on full resolution differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 42(7), pp. 1377–1386.
- Lanucara, S., Oggioni, A., Modica, G., Carrara, P., 2017. Interoperable Sharing and Visualization of Geological Data and Instruments: A Proof of Concept. In: *International Conference on Computational Science and Its Applications*, pp. 584–599.
- MacEachren, A. M., Kraak, M. J., 2001. Research Challenges in Geovisualization. *Cartography and Geographic Information Science* 28(1), pp. 3–12.
- Massonet, D., Feigl, K. L., 1998. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics* 36(4), pp. 441–500.
- Mora, O., Mallorqui, J. J., Broquetas, A., 2003. Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41(10), pp. 2243–2253.
- Ogao, P. J., Kraak, M. J., 2002. Defining visualization operations for temporal cartographic animation design. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 4(1), pp. 23–31.
- Peltzer, G., Rosen, P. A., 1995. Surface Displacement of the 17 May 1993 Eureka Valley, California, Earthquake Observed by SAR Interferometry. *Science* 268(5215), pp. 1333–1336.
- Pepe, A., Bonano, M., Bordogna, G., Brovelli, M., Calò, F., Carrara, P., Congedo, L., Frigerio, L., Imperatore, P., Lanari, R., Lanucara, S., Manzo, M., Munafò, M., 2018. The “Urban Geomatics for Bulk Information Generation, Data Assessment and Technology Awareness” Project: Detection, Representation and Analysis of the Urban Scenario Changes. In: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* , pp. 2902–2905.
- Pepe, A., Lanari, R., 2006. On the Extension of the Minimum Cost Flow Algorithm for Phase Unwrapping of Multitemporal Differential SAR Interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44(9), pp. 2374–2383.
- Peuquet, D. J., 1994. It's About Time: A Conceptual Framework for the Representation of Temporal Dynamics in Geographic Information Systems. *Annals of the Association of American Geographers* 84(3) pp. 441–461.
- Shneiderman, B., 1996. The Eyes Have It: A Task by Data Type Taxonomy for Information Visualizations. In: *Proceedings of the IEEE Symposium on Visual Languages*, pp. 336–343.
- Strang, G., 1988: *Linear Algebra and Its Applications*, Thomson Learning.