

# 應用時域相關點雷達干涉觀測嘉義、台南地區地表變形

季強昇<sup>[1]</sup> 蕭宇伸<sup>[2]</sup> 洪偉嘉<sup>[3\*]</sup>

**摘要** 嘉義與台南地區過去因過度抽取地下水，導致地層下陷情形嚴重，而長期地層下陷將會導致結構物破壞、排水不易與積水不退，同時在沿海地區造成土壤鹽化，因此如何快速與精確監測下陷範圍與下陷速率為重要議題。多時域雷達干涉技術(Multi Temporal InSAR, MT-InSAR)技術為涉及多時期影像之雷達干涉處理方法，不僅可獲得大範圍地表變形資訊，同時可獲得高量測精度。時域相關點雷達干涉技術(Temporarily Coherent Point SAR Interferometry, TCPInSAR) 為MT-INSAR方法之一，本文採用TCPInSAR搭配2007年3月至2011年3月共16幅ALOS PALSAR影像，綜合分析嘉義與台南地區之地表變形速率成果，並與水準資料進行比對。經本研究分析成果顯示，在嘉義與台南地區共可獲得時域相關點(Temporarily Coherent Point, TCP)點位密度達點位密度達171.54(像素/平方公里)，TCPINSAR成果與水準測量成果比對之均方根誤差約0.8公分/年，顯示TCPINSAR具有高準確性，並且能有效應用於地層下陷監測。

**關鍵詞**：地層下陷、雷達干涉技術、水準測量

## Detection of Ground Surface Deformation in Chiayi and Tainan by Using Temporarily Coherent Point SAR Interferometry

Chiang-Sheng Chi<sup>[1]</sup> Yu-Shen Hsiao<sup>[2]</sup> Wei-Chia Hung<sup>[3\*]</sup>

**ABSTRACT** Chiayi and Tainan County is suffering severe subsidence caused by groundwater withdrawal. Long term land subsidence results in deformation of buildings and civil infrastructures, poor drainage, flooding and sea-water intrusion. How to effective monitor land subsidence become a major issue in Taiwan. Multi-temporal InSAR (MT-InSAR) techniques, involving the processing of multiple acquisitions in time, provide the possibility to measure ground displacements to a degree of accuracy comparable to the conventional survey. The study applied TCPInSAR with 16 ALOS PALSAR acquisitions from 2007 to 2011 to derive land deformation. Validate TCPInSAR method by comparing with leveling data, and the result demonstrate that the TCP density of TCPINSAR is about 171.54 pixel/km<sup>2</sup>. TCPINSAR yields vertical displacements matching the leveling result to 0.8 cm/year (RMS). Results of this study demonstrate the effectiveness of TCPInSAR in monitoring land subsidence.

**Key word** : Subsidence, Interferometric SAR, Leveling

<sup>[1]</sup> 國立中興大學水土保持學系碩士生

Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichng 402, Taiwan

<sup>[2]</sup> 國立中興大學水土保持學系助理教授

Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichng 402, Taiwan

<sup>[3]</sup> 國立交通大學土木工程學系兼任助理教授(\* 通訊作者 E-mail : [khung@itrigc.com.tw](mailto:khung@itrigc.com.tw))

Department of Civil Engineering, National Chiao Tung University, Hsinchu 300, Taiwan

## 一、前言

隨著台灣西部平原地區產業的發展，用水的需求也大量的增加，而因抽取地下水之成本較為低廉，使得台灣西部平原許多地區地下水大量被抽取，進而產生地層下陷導致地勢低窪，而台灣地區降雨時間集中且降雨強度大，常在短時間內帶來大量水量，低窪地區常因排水不及產生嚴重淹水，且台灣地狹人稠，人口多其中於西部平原區，建築及交通道路等也多集中於此，若有地層下陷災害將會導致嚴重生命財產安全危害，因此使用一種有效快速的監測方法就顯得更加重要。

傳統上測量地表變形的的方法主要為水準測量及 GPS，但是這些方法皆為點狀測量，測量成果之精度受到點位密度的影響，若要增加點密度或是測量大面積區域時，則會耗費大量的人力時間及經費。

近年來隨著遙測技術的發展，合成孔徑雷達差分干涉技術((Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry, DInSAR)大量被應用在觀測地表變形上，DInSAR 為利用不同時間之雷達影像進行干涉，由相位差計算出地表之三維資訊，DInSAR 可以在短時間內取得大面積且高精度資訊，其精度可達公分等級，因此近年來大量應用在觀測地表變化方面。

台灣西部地區有許多縣市都有地層下陷之狀況，較嚴重者如彰化、雲林、嘉義、台南、屏東等地區，故本次研究從中選擇嘉義台南兩處作為研究地區，利用相關技術觀測下陷情形，並利用現有之水準資料以檢核是否適用於地表變形之觀測。

## 二、研究區域概述

本次研究區域選擇在嘉義以及台南沿海地帶，該地區主要下陷之區域為嘉義縣布袋鎮、義竹鄉及台南縣北門區、學甲區等地，這些區域位於八掌溪下游兩側沖積平原，為台灣地層下陷嚴重地區之一，平均下陷量平均每年約有 3 至 4 公分，較嚴重區域可達每年 4 公分以上。

研究區域總面積約 1180 平方公里，主要下陷的鄉鎮區域面積約有 240 平方公里，當地主要產業以養殖漁業及農業為主，農漁業所占面積就超過當地一半以上，因此對水資源之需求相當大，故常有抽取地下水以減少用水成本的情況，導致地下水位下降，且當地為沖積平原，主要地質組成為砂質土及黏土等土壤，皆為細顆粒易壓縮土壤，若地下水位下降導致有效應力上升即可能產生大量壓縮。



圖 1 研究區域範圍圖

Fig.1 Range of study area

## 三、研究原理與方法

近年來 DInSAR 大量被應用於地表變形的觀測上，然而 DInSAR 有容易受到地表覆蓋物(例如植被)變化

影響而無法取得真實地表變化量的缺點，為了改善這種情況有 Ferretti et al.(2000)提出永久散射體的概念(Permanent Scatterer,PS)，利用訊號較穩定的點選為 PS 點，並以這些點作相位解算以得到變形量，之後又有多位學者如 Hooper et al.(2004)改良提出永久散射體干涉技術(Persistent Scatterers SAR Interferometry, PSInSAR)，降低因地形及地面覆蓋物等而產生之誤差。

本研究使用 Zhang et al.(2011)提出的時域相關點雷達干涉技術(Temporarily Coherent Point SAR Interferometry,TCPIInSAR)，TCPIInSAR 為使用最小二乘法進行變形參數解算，並使用離群檢測方式估算殘差大小來區分相關點是否含有相位模糊度，取代了容易產生錯誤或失敗的相位解纏步驟。

## 1. 原理

### (1) DInSAR

DInSAR 為使用兩張不同觀測同一地點時間的雷達影像進行干涉，計算出地形變化而產生的相位差，進而找出影像時間內的地形變化。

### (2) TCP-InSAR

本次研究使用 Zhang et al.(2011)提出的時域相關點雷達干涉技術(Temporarily Coherent Point SAR Interferometry,TCPIInSAR)作為觀測地表變形之方法。

TCP-InSAR 為利用 DInSAR 之結果，使用一單窗對每個影像對中像素作偏移量標準差計算

$$\sigma_{x,i} = \sqrt{\frac{3}{2N} \cdot \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\pi\gamma} \chi^2}$$

$\sigma_{x,i}$ 為第 x 組影像中第 i 個像素偏移量標準差，N 為單窗尺寸， $\chi$ 為過取樣參數， $\gamma$ 為影像對於此單窗之交互相關性：

$$|\hat{\gamma}| = \frac{|\sum_{i=1,j=1}^{n,m} s_1(i,j)s_2^*(i,j)|}{\sqrt{\sum_{i=1,j=1}^{n,m} s_1(i,j)s_1^*(i,j) \sum_{i=1,j=1}^{n,m} s_2(i,j)s_2^*(i,j)}}$$

我們可以計算出影像對中每個像素的偏移量 $Q_{i \times j}$ ，並以這些偏移量組成偏移量矩陣 $Q_{l \times m}$ ：

$$Q_{l \times m} = \begin{bmatrix} Q_{1,1} & Q_{1,2} & \cdots & Q_{1,m} \\ Q_{2,1} & Q_{2,2} & \cdots & Q_{2,m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Q_{l,1} & Q_{l,2} & \cdots & Q_{l,m} \end{bmatrix}$$

利用直方圖找出此矩陣偏移量之峰值 $Q_c$ ，

$$Q_c = \text{peak}\{\text{hist}_{2D}(Q_{l \times m})\}$$

$$|Q_{i,j} - Q_c| < A$$

A 為門檻值，利用上式去除偏移量差異過大的像素點。之後改變不同單窗大小，將會產生不同偏移量，每個點位會得到一組偏移量序列，若此組序列之偏移量標準差小於所需精度時，則將該點位保留。以此方式找出各個影像對中之候選點，於各影像對中皆有選中之候選點則為最後使用之 TCP 點。

## 2. 使用影像

本研究中使用 ALOS(Advanced Land Observing Satellite)衛星 2007 年一月至 2011 年一月間 16 幅影像資料(軌道 Track：447，Frame：450)，ALOS 衛星為一太陽同步衛星，由日本宇宙航空研究開發機構(Japan Aerospace Exploration Agency,JAXA)於 2006 年 1 月發射，衛星週期為 46 天，平均航高約 691.65 公里，傾斜角約 98.16°。研究中使用衛星搭載的 PALSAR 探測器所拍攝之影像，為使用 L-band 波段(波長 23.5cm)的雷達影像，雷達常用波段之坡長由短至長有 X-band、C-band、L-band 等波段，其中 L-band 為一波長較長的波段，長波長的優點為有較高的穿透性，不容易受到天候的影響，並且較容易穿透地表的植被覆蓋，而研究區域內包含許多農業用地，因此使用 L-band 可以降低植生隨時間變化對研究結果的影響。

表 1 使用影像

Table 1 Using images

衛星軌道(Track/Frame)	影像時間(y/m)	影像時間(y/m)
447/450	2007/01	2009/07
	2007/03	2009/09
	2007/07	2009/10
	2007/10	2010/01
	2008/01	2010/03
	2008/04	2010/07
	2008/06	2010/10
	2008/07	2011/01

### 3. 研究流程

利用表 1 中 16 幅影像組成影像對並設定門檻範圍以去除不合適之影像對，再將符合之影像對生成干涉對後做選取 TCP 點的步驟(圖 2)。

篩選影像對之參數使用垂直基線小於 900m，時間基線介於 90 天至 1200 天之間的影像對，篩選後共使用 45 對影像對(圖 2)。理論上垂直基線越小效果會較好，但為了避免組成的影像對不足的情形而選擇較折中的門檻。

表 2. 研究各參數資訊

Table 2 Study information

垂直基線(m)	900
時間基線(day)	90-1200
影像對數	45
研究區域面積	1180.1km <sup>2</sup>
TCP 點數	202,434
水準點數	164

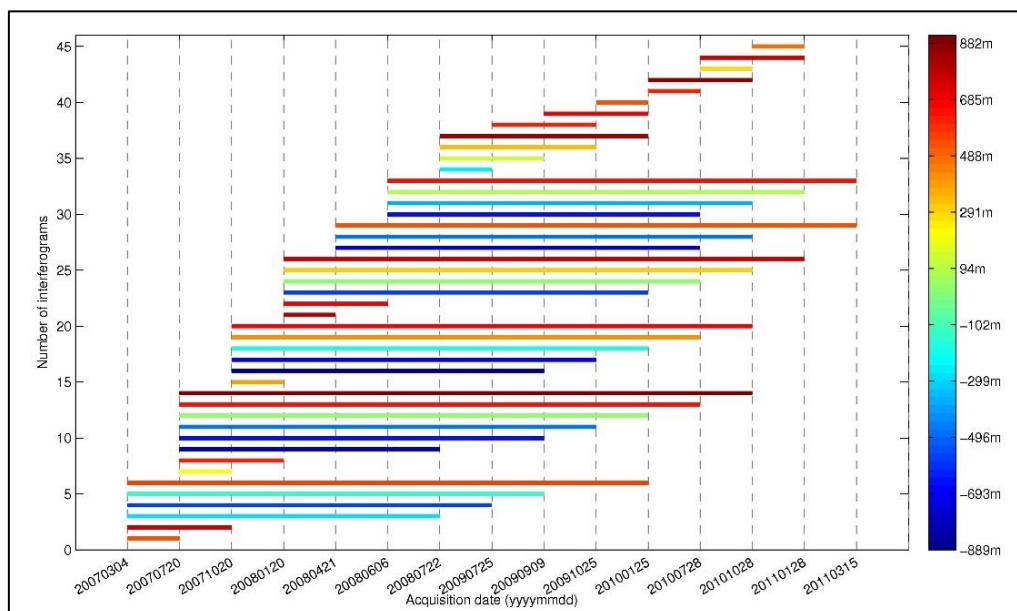


圖 2 各影像對基線圖

Fig.2 Baseline of each image pair

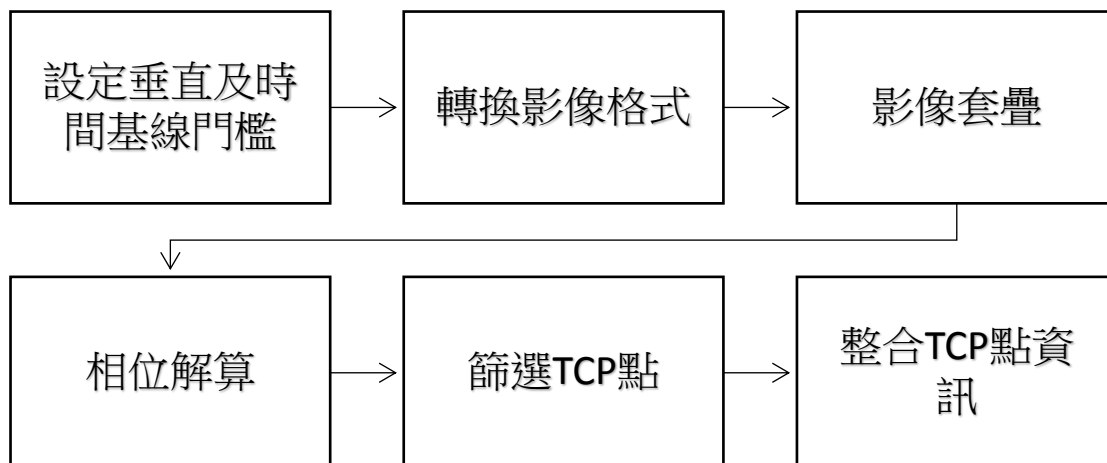


圖 3 研究流程簡圖

Fig.3 Study process

#### 四、研究成果

TCP-InSAR 成果在研究區域內約有 202,434 點，點密度約  $171.54(\text{pixel}/\text{km}^2)$ ，而研究區域內有 164 個水準點，點密度為  $0.14(\text{個}/\text{平方公里})$ ，明顯看出 TCP-InSAR 的點密度遠高於水準測量。

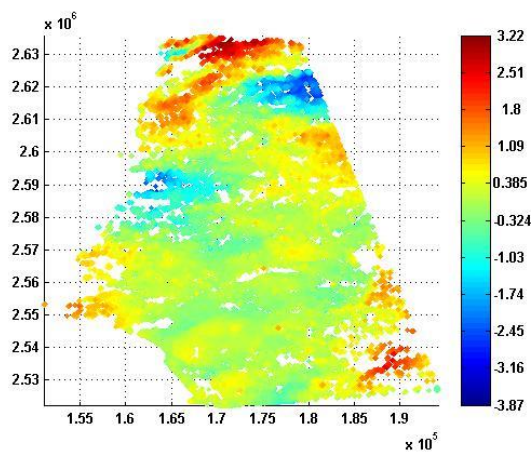


圖 4 TCP 原始成果

Fig.4 TCP initial results

我們利用 Surfer 將這些點位內插並網格化為  $250 \times 250$  公尺之網格，製作成如圖 5 的下陷速率圖，可以明顯看到紅色部分為主要下陷區域，約有每年 3 至 4 公分的下陷速率。

從圖 5 中可以看到台南學甲區附近有一下陷區(紅圈處)，該區域並沒有被水準網所涵蓋，顯示該技術有可以測量到一些傳統測量方法較難以到達或是未施測的地方。

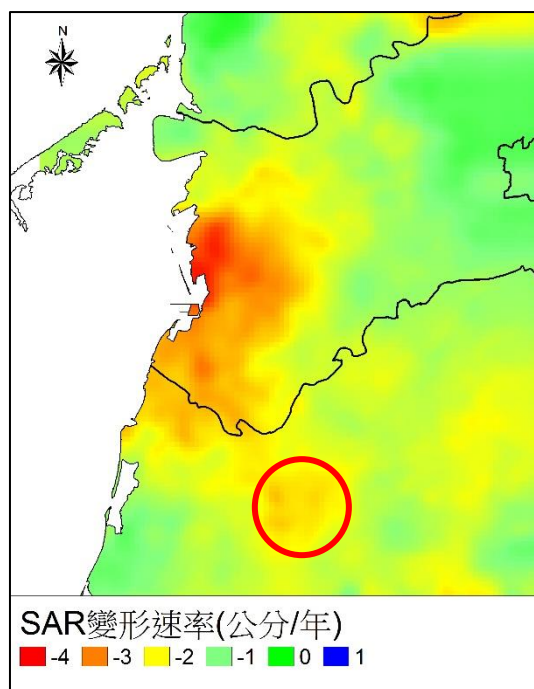


圖 5 TCP-InSAR 成果圖

Fig.5 TCP results

為了檢驗 TCP-InSAR 之精度，將成果與研究區域內 164 個水準點(圖 6)做差值的計算，使用的水準資料為民國 96 年至 100 年所施測之水準測量，最大下沉速率的點位約有每年接近 5 公分，位於東石鄉和布袋鎮交界附近(紅圈處)。

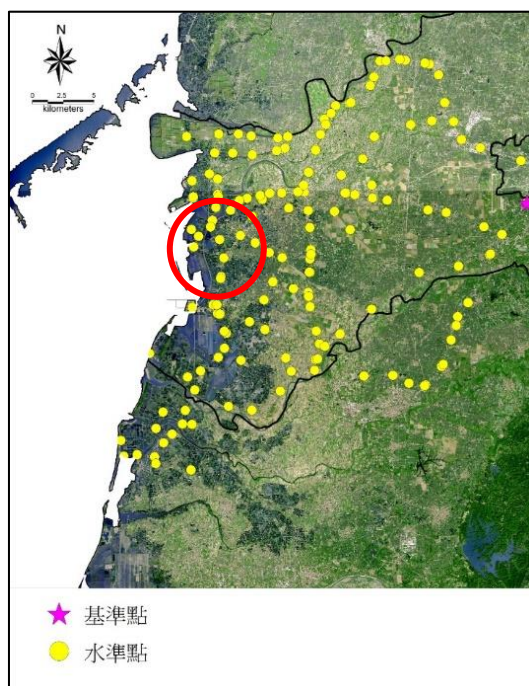


圖 6 水準點分佈圖

Fig.6 leveling point location

我們將網格化的 SAR 資料與水準點做套疊，把水準點與該位置網格的 SAR 值做差值的計算，顯示出大部分的點差異都在 1 公分之間，最大也只好 2 公分，164 個水準點中有 121 點誤差在 1 公分之內，占全部約 74%(圖 7)，將所有差值取其方均根約為 0.8(公分/年)，為一個相當不錯的成果。

從差值點分佈(圖 7)可以看到差異較大的點多集中在同一區域，有可能為當地水氣較為豐沛影響雷達訊號，另一可能為衛星視角的誤差，研究中是使用衛星平均視角，因此在影像中沿衛星軌道中間部分會較為精準。

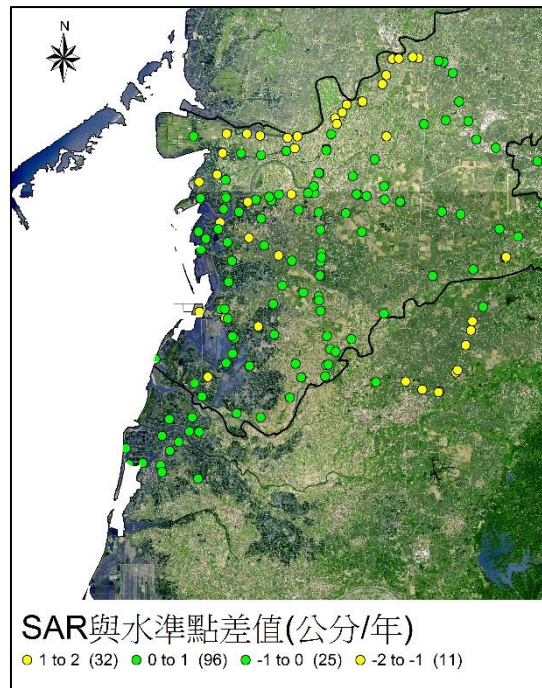


圖 7 SAR 與水準差值圖

Fig.7 difference between SAR and leveling

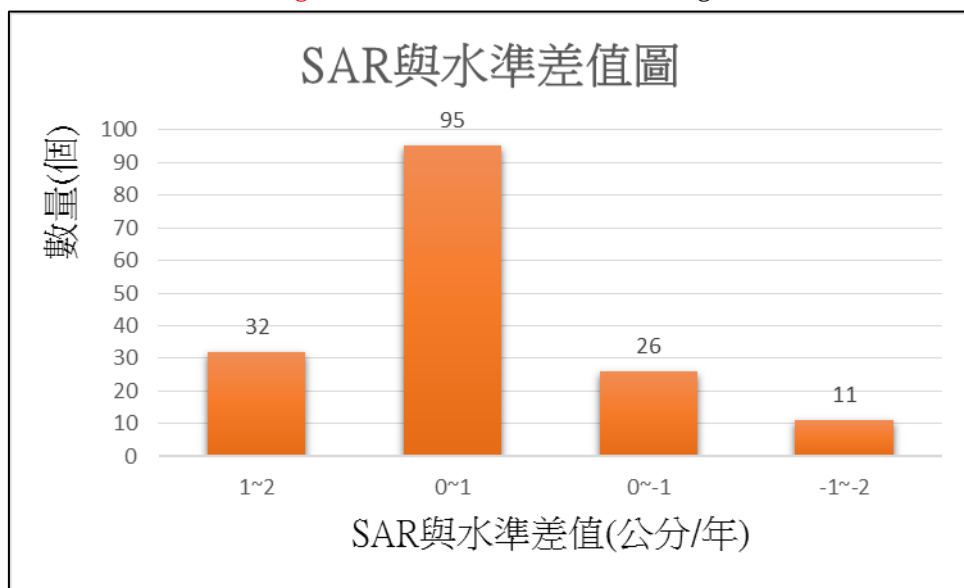


圖 8 SAR 與水準差值數量圖

Fig.8 number of the difference of point between SAR and leveling

## 五、結論與建議

本研究利用 TCP-InSAR 技術觀測嘉義台南地區 2007 年至 2011 年之間地表變形之情形，使用時域相關點雷達干涉(Temporarily Coherent Point SAR Interferometry, TCPIInSAR)作為研究方法，並以水準測量作為成果之驗證。

觀測結果 TCP-InSAR 可以產生約 171.54(像素/平方公里)之點密度，而水準測量則為 0.14(點/平方公里)。下陷區位於嘉義布袋、義竹，台南北門、學甲，與實際情形相似，在與水準點做比較後 RMS 為 0.8(公分/年)，且有 74%的水準點差值在 1 公分之內，顯示研究成果有相當的準確性，顯示出該技術可以作為一種觀測地表變化的方法。

而 TCP-InSAR 之成果也受到基線、影像對數及水平變形等因素的影響，因此未來若想改善 TCP 成果可

以考慮增加影像數量以增加影像對數及加入 GPS 水平位移資料以降低水平方向之影響等方法。

## 六、參考文獻

- [1] 工業技術研究院(2010)，「99 年度彰化、雲林、嘉義與臺南地區地層下陷之監測、調查及分析」，經濟部水利署。
- [2] 黃大任 (2013)，「以時域相關點雷達干涉量測研究彰化、雲林與嘉義地區之地層下陷」，國立交通大學土木工程學系碩士論文。(Huang, D.R. (2013). Detection of Land Subsidence by Temporarily Coherent Point SAR Interferometry in Changhua, Yunlin, and Chiayi, Master Thesis, National Chiao Tung University, Taiwan, ROC, (in Chinese))
- [3] Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F. (2000). "Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry" IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, 38(5), 2202-2212.
- [4] Hooper, A., Zebker, H., Segall, P. and Kampes, B. (2004). "A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers" GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 31(23).
- [5] Zhang, L., Ding, X. and Lu, Z. (2011). "Ground Settlement Monitoring Based on Temporarily Coherent Points between Two SAR Acquisitions" ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66, 146-152.
- [6] Zhang, L., Lu, Z., Ding, X., Jung, H.S., Feng, G. and Lee, C.W. (2012). "Mapping ground surface deformation using temporarily coherent point SAR interferometry: Application to Los Angeles Basin" Remote Sensing of Environment, 117, 429-439.
- [7] Zhang, L., Ding, X., Lu, Z. (2011). "Modeling PSInSAR Time Series Without Phase Unwrapping" IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, 49(1), 547-556.