

# 1. A region-growing technique to improve multi-temporal DInSARinterferogram phase unwrapping performance

## 1.1. Resumen

Presentamos una solución eficiente para mitigar los errores de desenvolvimiento de fase (PhU) que pueden afectar los interferogramas de conciencia sintética diferencial (SAR) de tiempo múltiple y temporal múltiple. Con este objetivo, proponemos una estrategia que, a partir de una red preferida de interferogramas diferenciales, complementa las operaciones de PhU con un procedimiento avanzado de crecimiento de región multitemporal (RG) que explota las relaciones espacio-tiempo entre los interferogramas computados. En particular, el método propagado implementa un procedimiento iterativo que, en cada paso, permite corregir una secuencia de interferogramas previamente sin envolver en un píxel seleccionado, es decir, píxel candidato, explotando los valores de fase (sin envolver) en su 'semilla' vecina píxeles (es decir, los que ya están correctamente desenvueltos). Después de su estimación, las fases sin envolver se utilizan para recuperar productos de deformación de la superficie, como mapas de velocidad de deformación media y series de tiempo de desplazamiento, a través de técnicas de interferometría SAR diferencial de línea de base (avanzada) (DInSAR). La eficacia del algoritmo RG PhU presentado se demuestra mediante el análisis de un conjunto de datos de imágenes SAR adquiridas por el European Remote Sensing (ERS) -1 / 2 sensores sobre el área de megaciudades de Estambul, Turquía

## 1.2. Multi-temporal RG PhU technique

En esta sección, presentamos los fundamentos de la técnica propuesta de RG PhU. Comenzamos presentando el proceso de selección de los interferogramas necesarios para la implementación del procedimiento desarrollado. Según, consideramos un conjunto de  $N + 1$  Imágenes SAR recopiladas en épocas ordenadas  $(t_0, t_1, \dots, t_N)$ , correctamente registrado en una imagen de referencia, por ejemplo, la adquirida en  $t_m$ , con respecto al cual también estimamos el temporal  $T [t_0 - t_m, \dots, t_N - t_m]$  T y espacial  $B [b_0, b_1, \dots, b_N]$  T vectores de referencia; tenga en cuenta que este último es relevante para el componente perpendicular con respecto a la línea de visión del radar (LOS). Cada imagen SAR puede, entonces, ser fácilmente representada por un punto en el tiempo / perpendicular  $T \times B$  plano de referencia, ver imagen 1 (un), donde calculamos una triangulación de Delaunay (ver característica 1 (b)); cada arco de esta triangulación, conectando a diferentes puntos, identificando datos interferométricos en el camino. ; por lo tanto, eliminamos de la triangulación calculada de todos los triángulos que involucran al menos un arco de línea base "grande". Luego de la identificación de dicha sub-triangulación, el conjunto relevante de  $M$  Interferogramas SBDInSAR, es decir  $= [1, 2, \dots, M]$  T, se genera Entonces, esta secuencia entre ferogramas se desenvuelve utilizando una de las técnicas de PhU actualmente disponibles, obteniendo así la secuencia correspondiente de interferogramas sin envolver, es decir  $= [1, 2, \dots, M]$

El método desarrollado RG PhU nos permite corregir los errores de PhU que corrompen el secuencia en correspondencia con píxeles mal desenvueltos (es decir, candidato), a partir de las fases de alta calidad calculadas relevantes para los píxeles para los que

La operación de desenvolvimiento anterior se ha llevado a cabo con éxito (es decir, píxeles de semillas). En consecuencia, el punto de partida del enfoque RG propuesto consiste en la selección de los píxeles de semillas y candidatos. Para este objetivo, tenemos que introducir un índice de calidad de la recuperación de PhU, que se logra mediante la siguiente estrategia: para cada píxel  $P$  del azimut / rango  $Un \times R$  g plano espacial, primero calcule la serie temporal de deformación correspondiente (sin realizar ninguna operación de flujo atmosférico) invirtiendo el secuencia desenvuelta a través del algoritmo SBAS (o uno de los enfoques multitemporales SB DINSAR avanzados disponibles), y luego, estimamos los valores del factor de coherencia temporal (Pepe y Lanari 2006) que se calcula de la siguiente manera:

### 1.3. Experimento

Hemos investigado la efectividad del enfoque PhU multitemporal RG propuesto mediante el uso de un conjunto de datos SAR compuesto por 53 imágenes adquiridas sobre órbitas descendentes (Track336, Frame 2781) por theERS-1 / 2 satélites de 1992 a 2006, que se representa ilustrativamente en el  $T \times B$  plano como se muestra en la figura 1 (un). Los sitios de prueba incluyen a Estambul, uno de los países más grandes del mundo (con 10 millones de rúpías), ubicado entre la falla de prueba Norteafricana, que fue bloqueada por la mayor Mw 7.4 Terremoto de Izmit el 17 de agosto de 1999 (Reilinger et al. 2000), causando en toda la región más de 17,000 muertes además de daños severos y pérdidas económicas. El análisis presentado explota una secuencia de interferogramas DInSAR multitemporales, seleccionados como se describe en la sección anterior, limitando las líneas de base perceptivas y temporales máximas de los pares de datos SAR a 400 m y 2500 días, respectivamente. Como resultado, recuperamos un conjunto de 138 interferogramas SAR diferenciales, consulte la función 1 (b), calculada después de una operación compleja de múltiples miradas con 4 miradas en la dirección de rango y 20 miradas en la de acimut (Lanari et al. 2007), resultó en una dimensión de apixel de aproximadamente 100 m  $\times$  100 m.

Para investigar el rendimiento del enfoque de PhU multitemporal propuesto, previamente desenvolvimos la secuencia calculada de interferogramas DInSAR a través del algoritmo de PhU EMCF y, posteriormente, aplicamos a los interferogramas sin envolver el espacio propuesto / procedimiento de tiempo RG. Posteriormente, explotamos el procedimiento SAS-DINSAR para calcular los mapas de velocidad de deformación media y las menciones de desplazamiento de ambas secuencias de los interferogramas envueltos (es decir, EMCF y EMCF + RGones). un) y (b) muestran que el método se ajusta para mapas de velocidad (en color), superpuestos en una imagen de amplitud SAR de múltiples miradas (escala de grises) del área, correspondiente a las secuencias de interferogramas EMCF y EMCF + RGunwrapped, respectivamente. Tenga en cuenta que dentro de los dos mapas solo hay puntos con coherencia temporal en el valor del umbral umbral seleccionado  $\hat{c} = 0.7$ , que representa un valor típico utilizado en los análisis SBAS-DINSAR (ver, por ejemplo, Manzo et al. 2012), están incluidos. Como resultado, logramos un aumento en el número de píxeles coherentes de aproximadamente 300 15,000 a 50,000 píxeles coherentes. Para mejorar aún más la ganancia lograda en términos de densidad espacial de datos de alta calidad, también calculamos, ver imagen 3 (c), los histogramas de los valores de coherencia temporal relevantes para los dos experimentos; La mejora, obtenida mediante la aplicación de la técnica RG PhU, es evidente.

### 1.4. On the Extension of the Minimum Cost Flow Algorithm for Phase Unwrapping of Multitemporal Differential SAR Interferograms

Se presenta una extensión del algoritmo de flujo de costo mínimo (MCF) que se ocupa de una cuadrícula de datos dispersa, que permite desenvolver los interferogramas de radar de apertura sintética diferencial multitemporal (SAR) para la generación de series temporales de deformación. El enfoque propuesto explota tanto las características espaciales como las relaciones temporales entre múltiples interferogramas relevantes para una secuencia elegida adecuadamente. En particular, la solución presentada implica dos pasos principales: en primer lugar, para cada arco que conecta los píxeles vecinos en la cuadrícula de azimut / rango interferométrico, los gradientes de fase sin envolver se estiman mediante la técnica MCF aplicada en el plano de referencia temporal / perpendicular. Después de este paso, estas estimaciones se utilizan como punto de partida para la operación de desenvolvimiento espacial implementada nuevamente a través del enfoque MCF pero llevada a cabo en el plano de acimut / rango. Los resultados presentados, logrados con datos SAR de satélite de detección remota europeos reales y simulados, confirman la efectividad del algoritmo extendido de desenvolvimiento MCF.

El procedimiento de PhU presentado se basa en un enfoque de procesamiento de dos pasos que se beneficia de la información disponible de las cuadrículas  $T \times B$  y  $AZ \times RG$ . En particular, la idea

clave es realizar primero, para cada arco que conecta los píxeles vecinos de la cuadrícula (ver Fig. 2), una operación de desenvolvimiento "temporal", que implica el enfoque básico de MCF. El segundo paso se basa en el uso de estos resultados como punto de partida para el desenvolvimiento espacial realizado en cada interferograma individual. Los temas clave de estos dos pasos de procesamiento se describen en el siguiente análisis, que se centra en el uso de interferogramas multilook. En particular, esta sección está organizada de la siguiente manera: en primer lugar, describimos brevemente los aspectos principales del enfoque MCF original. Posteriormente, abordamos las características principales de los pasos temporales y espaciales de PhU, respectivamente

Hemos propuesto una solución para extender el MCU PhUalgorithm que trata con una cuadrícula de datos dispersa [15], para procesar interferogramas DiteSAR multitemporales para la generación de series temporales de deformación. El enfoque implica el cálculo de una secuencia de interferograma elegida correctamente y se basa en la cascada de dos pasos principales, ambos implican el uso de la técnica básica de MCF. En particular, identificamos primero los arcos que conectan los píxeles coherentes vecinos de la cuadrícula de azimut / rango, y para cada uno de estos, estimamos los gradientes de fase sin envolver mediante la técnica MCF aplicada en el plano de línea temporal / perpendicular. Estos resultados se utilizan para iniciar la operación de desenvoltura espacial posterior que se realiza en cada interferograma simple a través del enfoque convencional de MCF. Los resultados presentados obtenidos con datos simulados y reales confirman la efectividad del enfoque. Además, subrayamos que la solución propuesta es naturalmente compatible con el algoritmo SBAS para la generación de series temporales de deformación. La extensión implementada del procedimiento de desenvolvimiento se basa en la aplicación del algoritmo de programación de red para ambos pasos de desenvolvimiento temporal y espacial. En consecuencia, el enfoque general es computacionalmente eficiente.

## 1.5. Conclusión

Hemos propuesto en este trabajo un enfoque efectivo para mitigar los errores de PhU en una secuencia seleccionada adecuadamente de interogramas DInSAR multitemporales previamente desenvolvidos mediante la implementación de un procedimiento de desenvolvimiento de RG espacio-tiempo, basado en la aplicación de la misma temporalidad de PHmemetemporal explotada por el algoritmo EMCAlgorithm. áreas a sus regiones vecinas caracterizadas por relaciones señal / ruido más bajas, se aplica directamente a las secuencias de interferogramas DInSAR multitemporales, sin requisitos específicos sobre el algoritmo de desenvolvimiento utilizado para realizar el paso de desenvolvimiento anterior, sino solo en la selección del interferométrico Pares de datos SAR que tienen que formar un triangulationinthetemporal / / plano de base perpendicular. El enfoque de propuesta permite recuperar secuencias mejoradas de calidad de interferogramas multi-temporales sin envolver que pueden ser explotados de manera rentable para la generación de series de tiempo de deformación superficial a través de enfoques avanzados SB DInSAR. La eficacia de los algoritmos de RGPhU presentados se ha demostrado mediante la aplicación del procedimiento SBAS a una secuencia de ERS-1 / / 2 interferogramas sin envolver relevantes para el área de megaciudades de Estambul