

1. MINERVA: AN INSAR MONITORING SERVICE FOR VOLCANIC HAZARD

1.1. Resumen

MINERVA (Monitoreo por SAR Interferométrico de Riesgo Ambiental en Áreas Volcánicas) es un proyecto de demostración de servicio a pequeña escala financiado por ESA en el marco del Programa de Usuario de Datos. El objetivo del proyecto es el diseño, desarrollo y evaluación de un servicio de información demostrativo basado en el procesamiento interferométrico de imágenes adquiridas desde el instrumento ASAR a bordo ENVISAT-I o los instrumentos SAR a bordo ERS1 / 2. El sistema se basa en un nuevo enfoque para el procesamiento de datos INSAR, que permite optimizar la calidad de los interferogramas que abarcan desde 35 días hasta varios años, y fusionarlos para generar una solución única que describa la evolución temporal de las deformaciones del terreno en el área de riesgo examinada. El sistema permite actualizar esta solución cada vez que hay una nueva imagen SAR disponible y, por lo tanto, constituye una herramienta innovadora para el monitoreo de los desplazamientos del terreno en áreas de riesgo. El sistema ha sido implementado y demostrado en Osservatorio Vesuviano (Nápoles, Italia), que es la institución responsable de monitorear los fenómenos volcánicos en el distrito volcánico napolitano, y de alertar a las autoridades civiles italianas ("Protezione Civile") en caso de que la actividad de monitoreo revela señales de erupciones inminentes. En particular, el sistema MINERVA se ha utilizado para monitorear las deformaciones del terreno en los Campos de Phlegrean, una zona densamente poblada y de alto riesgo que está sujeta a fases alternativas de elevación y hundimiento, acompañadas a menudo de actividades sísmicas.

1.2. Introducciòn

El objetivo del Servicio de Información de MINERVA es proporcionar al Usuario objetivo, Osservatorio Vesuviano, una herramienta innovadora para monitorear el riesgo ambiental derivado de fenómenos volcánicos en el Área Vesuviana, particularmente la subsidencia en la zona de Campi Flegrei. El Servicio de Información puede interactuar con : - Interfaz de administrador de servicios. Es la interfaz utilizada por el operador para administrar el sistema. A través de esta interfaz dedicada, el operador, a cargo del mantenimiento y las operaciones del Servicio, envía los comandos apropiados al Servicio de información y recibe datos relacionados con el estado del Servicio.- Usuario. MINERVA-IS es capaz de interactuar con el usuario final. El Usuario envía al Servicio solicitudes relacionadas con los productos deseados, y el Servicio de Información los pone a disposición del usuario. El núcleo de MINERVA-IS es la interfaz dedicada, desarrollada en el entorno IDL (Interactive Data Language). Esta interfaz permite interactuar con el sistema y gestionar los diferentes módulos de software implementados y, por lo tanto, el procesamiento de datos satelitales desde los datos sin procesar hasta el producto final. Además de la interfaz del administrador de servicios, MINERVA-IS incluye varios módulos de software que implementan el procesamiento de datos SAR y permiten obtener productos finales. Una característica interesante del Servicio de Información propuesto es la posibilidad de actualizar los mapas de deformación cada vez que una nueva imagen SAR está disponible. Esta característica constituye una innovación importante que hace que MINERVA-IS sea adecuado para monitorear los desplazamientos del suelo en áreas de riesgo. El sistema MINERVA-IS, de hecho, genera un conjunto de datos de interferogramas a partir de varias imágenes SAR $[d_1 \dots d_n]$ de la misma pista y franja. Cada imagen SAR recién adquirida se inserta en el conjunto de datos y se calculan todas sus combinaciones interferométricas posibles con las imágenes preexistentes, abarcando diferentes intervalos de tiempo parcialmente superpuestos. Luego, el sistema fusiona todos los interferogramas (sin envolver) con un enfoque de mínimos cuadrados y produce como solución una serie temporal de mapas de deformación que describe la evolución temporal de los desplazamientos con respecto a la imagen más antigua.

1.3. Descripción general del algoritmo

El procesamiento de imágenes SAR es un elemento clave de MINERVA-IS. Consiste en diferentes algoritmos que permiten generar mapas de deformación y secuencia de deformación a partir de datos sin procesar o de complejo de aspecto único (SLC). En lo sucesivo, se proporciona una breve descripción general de la cadena Interferométrica SAR (InSAR) 4.1. Algoritmos de preprocesamiento de imagen. La función de preprocesamiento se utiliza cuando Envisat ASAR, recibido mediante una estación terrestre satelital local (es decir, estación terrestre móvil RAPIDS), los datos deben procesarse. Este primer paso del procesamiento de datos SAR es necesario para generar un archivo CEOS de nivel 0 que puede ser procesado por la cadena de procesamiento InSAR de MINERVA. Se explotan dos algoritmos para preprocesar los datos ASAR. El primero convierte el archivo sin procesar recibido en un archivo de datos sin formato estructurado (incluye sincronización, reformateo, descompresión y descarte de datos que no son ASAR), el boletín convierte el archivo de datos sin formato en formato CEOS de nivel 0. 4.2 Algoritmo de enfoque. todo, enfocado a imágenes Single Look Complex. Esta operación debe ser muy precisa para preservar la información de fase que se utilizará en el procesamiento interferométrico. En particular en la dirección del rango, los retornos de la escena observados están correlacionados con las réplicas de pulso transmitidas. Este proceso tiene como objetivo mejorar la resolución de la imagen enfocada en la dirección del rango y se llama rango de compresión. En dirección azimutal, es necesario estimar la frecuencia CentralDoppler a partir de datos comprimidos de rango. Los algoritmos utilizados para enfocar imágenes en la dirección azimutal implementan tanto la compresión azimutal como la migración de rango. Los algoritmos utilizados por MINERVA-IS se basan en la evaluación analítica de la función de transferencia del sistema SAR bidimensional (STF) y su compensación mediante el uso de la Transformada rápida de Fourier (FFT). [1, 2, 3, 4.

1.4. Correregistro

Este paso generalmente se realiza en dos etapas. El primer paso, denominado "correregistro grueso", consiste en estimar el cambio relativo, en ambas direcciones de acimut y rango, entre las dos imágenes SLC. Los cambios se calculan utilizando órbitas satelitales precisas y tienen una precisión de unos pocos píxeles. En un segundo paso, denominado "correregistro fino", el emparejamiento se refina a escala de subpíxeles. Los pequeños parches extraídos de ambas imágenes tienen correlación cruzada, y los cambios locales estimados se utilizan para resolver los parámetros de la transformación que hace que una de las imágenes (el "esclavo") coincida exactamente con la otra (el "maestro"). Posteriormente, se aplica una operación de remuestreo al esclavo, es decir, el valor de cada píxel del esclavo se interpola para dar el nuevo valor en la transformación aplicada.

1.5. Generación de productos interferométricos.

Una vez que se registran los dos SLC, el interferograma se genera multiplicando una imagen por el conjugado complejo de la otra y se extrae la fase de la imagen compleja resultante, la fase interferométrica. Además, también se genera la imagen de coherencia interferométrica correspondiente. Esta es una medida de la correlación normalizada entre las dos imágenes y, por lo tanto, se considera como un mapa de calidad de la imagen de fase interferométrica. Por lo general, los productos interferométricos son "multilook", es decir, promediados en una determinada ventana, para aumentar la señal al ruido. proporción. Por supuesto, esto también causará una pérdida de resolución; Por ejemplo, los factores promedio típicos utilizados con los sistemas ERS SAR son 4 para el rango y 20 para el acimut, lo que lleva a una resolución final de aproximadamente 100 x 100 m. Dado que el interferograma así obtenido está relacionado tanto con la topografía como con la deformación del suelo, un Se realiza una operación de corrección topográfica posterior. La información orbital precisa y un modelo digital de elevación (DEM) se utilizan para calcular las "franjas sintéticas relacionadas con la topografía que luego se restan del interferograma. La fase interferométrica medida es solo la parte fraccional de la diferencia de fase,

es decir, un valor en el intervalo $[-\pi, \pi]$). Para tener la cantidad total de la diferencia de fase, se debe estimar el número correcto de ciclos de fase enteros; esta operación se conoce como "desenvolvimiento de fase". Existen varios algoritmos para el desenvolvimiento de fase, basados en general en una estimación del gradiente de fase, seguido de una integración de este gradiente realizada a través de la minimización de una norma global apropiada (posiblemente ponderada). Las imágenes de coherencia y amplitud multilook a menudo se usan para la selección de la función de ponderación, ya que contienen información sobre la ubicación de estimaciones poco confiables del gradiente de fase. El algoritmo utilizado por el sistema MINERVA se describe en [5] y nos permite desenvolver eficientemente el interferograma en condiciones de baja coherencia

1.6. Geocodificación

El paso final del procesamiento InSAR (Interferométrico SAR) es la compensación de las distorsiones geométricas intrínsecamente presentes en cualquier imagen SAR y esencialmente relacionadas con la topografía de la escena. Al utilizar la información de topografía y los datos precisos de la órbita, es posible calcular la transformación que asigna la cuadrícula SAR a una cuadrícula cartográfica geo-referenciada (generalmente UTM). Esta transformación se aplica a todos los productos interferométricos, que luego se vuelven a muestrear.

1.7. Cálculo de secuencia de deformación

La tarea del MINERVA-IS es el cálculo de una secuencia de deformación, es decir, una secuencia de mapas ordenada en el tiempo que indica la cantidad de deformación desde un momento de inicio de referencia (generalmente la fecha de la primera adquisición de SAR). Para este fin, el procesamiento descrito en la medida en que necesita un pequeño ajuste y un cálculo de secuencia de deformación de mínimos cuadrados posterior al procesamiento (también conocido como "enfoque de base de datos"). Comenzamos nuestra descripción a partir de imágenes SLC del área considerada. En primer lugar, una de las SLC disponibles se eligen como el maestro de base de datos. Todas las imágenes SLC disponibles se registran y se vuelven a muestrear con respecto a este maestro, lo que garantiza que todos los productos intermedios y finales coinciden con la misma cuadrícula de coordenadas de píxeles maestros a nivel de subpíxeles. Entre sí en todas las combinaciones interferométricas posibles, es decir, aquellas que tienen líneas de base lo suficientemente pequeñas. Los productos interferométricos resultantes se desenvuelven en fase y se convierten en valores de deformación en centímetros a lo largo de la dirección de la línea de visión del satélite. Dado que cada procedimiento de desenvolvimiento de fase proporciona un mapa de deformación relativa, es necesaria una calibración absoluta. Esta calibración generalmente se lleva a cabo identificando un punto estable (es decir, no afectado por ninguna deformación) dentro del área de investigación y usándolo como punto de referencia (deformación cero) en cada deformación. Después de ajustar los interferogramas sin envolver, se realiza el ajuste de mínimos cuadrados para calcular una serie temporal de deformaciones en relación con una imagen de referencia.

Las deformaciones relativas a los datos de referencia se encuentran como soluciones al problema: $y = Hx$

(1) donde $y = [y_1, y_2, \dots, y_k]^T$ es el vector de los valores de fase interferométrica, y $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ es el conjunto de deformaciones desconocidas en las fechas restantes. La matriz del sistema H es la representación matemática de la figura 1. Para cada fila (es decir, para interferograma $y_k = x_j - x_i$) los valores son cero, excepto las columnas correspondientes a las fechas t_i y t_j que son -1 y 1 , respectivamente. Este enfoque se ha descrito en detalle en [7, 8]. Todas las imágenes de secuencia de deformación así generadas tendrán la misma resolución y contendrán el mismo tipo de información de los datos interferométricos originales. Sin embargo, la fusión (en el sentido de los mínimos cuadrados) de la información redundante de estos datos permite minimizar los errores de procesamiento y reducir el ruido general. También nos permite reducir la

decorrelación temporal, que es particularmente fuerte en los interferogramas a largo plazo, mediante la inserción de información de interferogramas a corto plazo para "llenar" parches de decorrelación

1.8. Resultados

La capacidad de MINERVA-IS para el monitoreo de los campos de flegre y para el análisis de los fenómenos de deformación en esta área está bien probada. Algunos de los resultados preliminares obtenidos se ilustran a continuación. Para generar productos finales sobre el área de Phlegrean se utilizaron 16 imágenes SAR adquiridas de 1995 a 2001. Los productos generados se caracterizan por una resolución espacial de aproximadamente 100 m y una precisión de 1 cm. En la Fig. 2, los interferogramas diferenciales geocodificados, el mapa de coherencia y Se muestra el mapa de deformación. El mapa de deformación es el interferograma diferencial sin envolver que se obtiene de las dos imágenes SAR adquiridas respectivamente 6 th Febrero de 1997 y 24 th Septiembre de 1998. En este producto no se eliminan los artefactos atmosféricos.

En lo que respecta a las adquisiciones de ENVISAT ASAR, el número de imágenes disponibles durante la fase de demostración del servicio no fue suficiente. Por esta razón, solo se presentan los resultados generados al procesar los datos de ERS SAR. La adquisición de Las imágenes ASAR continuarán de todos modos en 2004 hasta que se adquiriera un conjunto significativo de imágenes. Demostración posterior se llevará a cabo utilizando ASAR ENVISAT adquirido desde octubre de 2002 hasta 2004

1.9. Conclusión

Una de las características del Servicio de Información MINERVA es la posibilidad de insertar datos geodésicos (GPS, nivelación), para permitir la comparación y validación de datos interferométricos. La comparación entre los datos geodésicos y ERS1 / 2 fue bastante alentadora, señalando deformaciones del terreno comparables para los mismos intervalos de tiempo. Los desarrollos futuros del sistema se orientarán hacia una integración más estrecha entre los datos SAR (ENVISAT) y los datos genéticos del INGV-Osservatorio Vesuviano (INGV -OV) redes de monitoreo, con referencia particular a datos continuos GPS, registrados en casi en tiempo real por un servidor operando en el marco del Equipo de Geodesia INGV-OV. La integración de datos de diferentes técnicas será un poderoso instrumento para fines de protección civil, permitiendo obtener información rápida y precisa para las instituciones locales y nacionales dedicadas a la gestión de emergencias. en caso de evento volcánico