

MÉTODO MULTIGRID PARA PHASE UNWRAPPING EN INTERFEROMETRÍA SAR

A. Vidal, R. Oviol y M. Ferrando

avidal@dcom.upv.es

*Departamento de Comunicaciones
Universidad Politécnica de Valencia
Camino de Vera s/n, 46022 Valencia
Teléfono: 96 3879710, Fax: 96 3877309*

RESUMEN

La etapa de procesado conocida como 'Phase Unwrapping' es uno de los elementos más críticos en Interferometría de Radar de Apertura Sintética. En este trabajo se presenta un estudio de diversas técnicas basadas en ajuste por mínimos cuadrados. El proceso divide en dos etapas: estima del gradiente sin discontinuidades e integración de dicho gradiente. Para ello se han utilizado interferogramas simulados obtenidos a partir de modelos de elevación reales. De los resultados obtenidos, se demuestra que el enfoque de los mínimos cuadrados utilizando la técnicas multigríd y de multiresolución ofrece resultados prometedores bajo condiciones adversas de aliasing, de efectos topográficos y de ruido.

ABSTRACT

Phase Unwrapping is one of the most critical aspects in Synthetic Aperture Radar Interferometry. This work shows a study on Phase Unwrapping techniques using a Least Squares (LMS) approach. The methods have been carried out through two stages: gradient estimation and gradient integration. Simulated interferograms obtained from real elevation maps have been used for that purpose. The LMS approach gives very good results when combined with multigríd and multiresolution techniques in order to overcome aliasing effects, topographic artifacts and noise.

Palabras clave: Interferometría, SAR, Phase Unwrapping, multiresolución, multigríd.

INTRODUCCIÓN

El Radar de Apertura Sintética (SAR) es un sistema capaz de producir imágenes de la reflectividad a frecuencias de microondas. Las imágenes SAR se construyen a partir del procesado

de la fase y la amplitud de la señal reflejada. Tradicionalmente, se había explotado la información en forma de amplitud, pero en los últimos años se ha desarrollado enormemente la interferometría SAR, que es capaz de obtener información de la elevación del terreno gracias a la fase de las imágenes.

La aplicación de la Interferometría SAR para la generación de Modelos Digitales de Elevación (DEMs) tiene varias ventajas en comparación con la fotografía estereoscópica tradicional. La importancia y versatilidad de la técnica interferométrica se fundamenta, principalmente, en que el SAR trabaja bajo todo tipo de condiciones meteorológicas y en su autonomía respecto a las fuentes de iluminación naturales. La interferometría SAR puede generar DEM's en zonas donde todos los métodos estereoscópicos tradicionales fallan, debido a la falta de patrones identificables en la escena. Por otra parte, la obtención de estas imágenes desde el espacio se beneficia de una gran cobertura sobre la superficie terrestre y de la posibilidad de estudiar la topografía de zonas remotas de difícil acceso y observación por medios tradicionales. Además de la generación de DEM's, la interferometría SAR ha demostrado ser muy útil en el estudio de glaciares, terremotos, erosión, hidrología y vulcanología.

El Unwrapping bidimensional es un paso clave en la extracción de DEMs a partir de datos interferométricos porque los errores cometidos en este proceso afectarán directamente a la calidad resultante. En la actualidad, la etapa de Phase Unwrapping es todavía uno de las áreas de mayor actividad investigadora por la complejidad que entraña. En este trabajo se describe un estudio realizado sobre técnicas de Phase Unwrapping basadas en ajuste por mínimos cuadrados.

Las siguientes secciones se estructuran tal y como sigue. Primero se describe el problema objeto de estudio. Posteriormente se presenta la técnica empleada para la estima del gradiente y a continuación se describe el proceso de integración por multigríd. En la siguiente sección se presentan los resultados obtenidos y finalmente se exponen las conclusiones extraídas del trabajo.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Gracias a la diferencia de fases de dos observaciones SAR de la misma zona con un ángulo de observación ligeramente diferente, es posible obtener la elevación del terreno de dicha zona tal y como se describe en (Ghiglia y Pritt 1998). Sin embargo, la fase se obtiene normalmente en su valor

principal perteneciente al intervalo $[0, 2\pi]$ y la elevación está ligada al valor absoluto de dicha fase que se extiende más allá de dichos límites. Esto da lugar a una incertidumbre acerca del número entero de periodos transcurridos entre dos muestras. La operación por la que se resuelve dicha ambigüedad se denomina 'Phase Unwrapping'.

El problema de Phase Unwrapping se ha estudiado durante los últimos 30 años en diversas áreas del conocimiento, como la física de estado sólido, el procesado sísmico o aplicaciones biomédicas. Sin embargo, esta etapa se complica en el caso de la interferometría SAR debido a las condiciones especialmente adversas que tiene que afrontar. De este modo, el proceso se realiza sobre una fase bidimensional, ruidosa y con artefactos provocados por la orografía del terreno tales como pendientes abruptas con respecto al ángulo de inclinación del sensor SAR. La imagen SAR compleja está contaminada por el ruido característico Speckle que aparece por la alta coherencia del pulso enviado y por el ruido térmico del sensor. En la fase de la imagen dicho ruido se modela de manera aproximada por una señal aleatoria de distribución uniforme. En la (Figura 1) se representa una fase simulada en valor principal y la misma señal tras el proceso de 'Phase Unwrapping'.

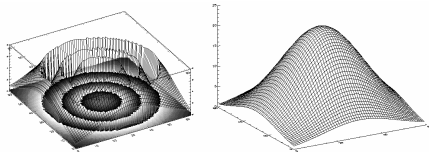


Figura 1.- 'Phase Unwrapping' bidimensional

Para el proceso central de reconstrucción se han desarrollado varios algoritmos basados en la obtención de la fase absoluta por ajuste por mínimos cuadrados. La ventaja principal de los algoritmos desarrollados radica en la combinación del procesado digital de imagen y de poderosas técnicas de cálculo numérico. Además, la flexibilidad de estos métodos permite separar el proceso en dos fases. Primero se deben calcular las derivadas parciales sin discontinuidades (gradiente del interferograma). En segundo lugar, se debe hallar la función que se ajuste mejor a estas derivadas (integración del gradiente). Dichos pasos se explican en las siguientes secciones.

ESTIMA DEL GRADIENTE

El proceso de Phase Unwrapping requiere, de forma implícita o explícita, de una estima del

gradiente para la reconstrucción de la fase absoluta. El gradiente de la fase se puede obtener mediante distintas técnicas. La más sencilla es obtenerlo como la diferencia simple entre muestras en cada una de las dimensiones. Para mejorar este resultado se introduce el concepto de frecuencia instantánea, que equivale bajo ciertas condiciones a las derivadas parciales de la señal. La frecuencia instantánea coincide conceptualmente con la frecuencia de la señal sinusoidal que mejor se ajusta localmente a la variación de fase. Otros métodos más sofisticados propuestos en (Ghiglia y Pritt 1998) incluyen técnicas como la de máxima verosimilitud o la estima por multiresolución (Davidson y Bamler 1996).

La estima por máxima verosimilitud de la frecuencia instantánea descrita en (Ghiglia y Pritt 1998) consigue reducir considerablemente el ruido introducido en estas derivadas, punto de partida del ajuste por Mínimos Cuadrados. Esta mejora se apoya en la información aportada por la intensidad de las imágenes SAR originales. El estimador ML converge hacia el límite de Cramer-Rao si la señal es suficientemente ruidosa, como en nuestro caso. Bajo tal circunstancia, se elimina gran parte del ruido presente en el interferograma solucionando la siguiente expresión:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} [\ln(f(z|\theta))] |_{\hat{\theta}_{ML}} = 0$$

donde z es la señal compleja, θ es el parámetro a estimar, $f(z|\theta)$ representa la función densidad de probabilidad condicionada, y $\hat{\theta}_{ML}$ es la estima ML. Sin embargo, la estima ML no resuelve con facilidad señales de fase con efectos de aliasing.

La estima por Multiresolución se introdujo por (Davidson y Bamler 1996) y (Davidson y Bamler 1996b). La idea es estimar la frecuencia instantánea a baja resolución (una gran ventana de estima) y utilizar esta estima para reducir las variaciones de fase a una resolución superior mediante una simple multiplicación compleja. Se realiza a partir de la diferencia de frecuencias entre resoluciones adyacentes (Figura 2).

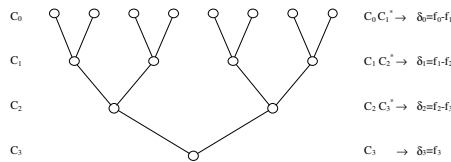


Figura 2.- Estima de la frecuencia instantánea por multiresolución

Este método es en realidad una generalización de las diferencias simples, aplicada a una descomposición jerárquica de la imagen en diferentes resoluciones. Al basarse en diferencias simples mantiene una gran sensibilidad frente al ruido, aunque consigue eliminar el sesgo de la estima y con él las distorsiones globales de pendiente. Gracias a ello cual el resultado converge a un error por aliasing o sobremuestreo igual a cero.

TÉCNICAS LMS MULTIGRID

La segunda parte del proceso de Phase Unwrapping tras la estima del gradiente es la integración de dicho gradiente, que en el presente caso se realiza mediante una aproximación LMS. El planteamiento del problema LMS conduce a una expresión que es análoga a la discretización de una ecuación en derivadas parciales. En concreto, se obtiene la expresión de la ecuación de Poisson, tal y como se deduce en (Pritt 1996) y (Ghiglia y Pritt 1998). Para la resolución de dicha PDE clásica, existen diversos métodos, siendo uno de ellos la técnica iterativa de relajación Gauss-Seidel. La relajación de Gauss-Seidel es esencialmente una operación de filtrado local que consigue eliminar rápidamente las componentes del error de alta frecuencia, pero que converge lentamente para las bajas frecuencias.

El algoritmo multigrad se basa en la idea de aplicar el método de Gauss-Seidel en pequeñas mallas de poca resolución, en las que converge rápidamente y transferir los resultados como paso inicial para otras iteraciones de mayor resolución. La pirámide de distintas resoluciones se muestra en la (Figura 2).

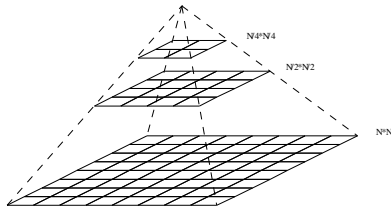


Figura 2.- Método multigrad

El interés principal de las técnicas iterativas de reconstrucción basadas en métodos Multigrad es su capacidad para adaptarse a las condiciones de la fase tales como problemas de aliasing o de baja coherencia. En tales casos, se puede implementar el método de los mínimos cuadrados ponderados, que hasta entonces sólo tenía solución mediante técnicas PCG ('Preconditioned Gradient') y obtendremos otra PDE, que en este caso no será igual a la ecuación de

Poisson, pero que se resolverá igualmente mediante la técnica multigrad.

Las técnicas multigrad no se deben confundir con las técnicas de multiresolución, puesto que su filosofía es diferente, si bien ambas producen resultados a base de variar la resolución de la señal. En el caso de multigrad se varía la resolución para converger más rápidamente hacia una solución de la ecuación diferencial generada. En la (Figura 3) se muestra la evolución del algoritmo para la reconstrucción del mapa de fases partiendo del modelo de elevación del glaciar de Sodankylä (Finlandia). En él se muestran resultados parciales obtenidos para diferentes niveles de descomposición en el grafo multigrad.

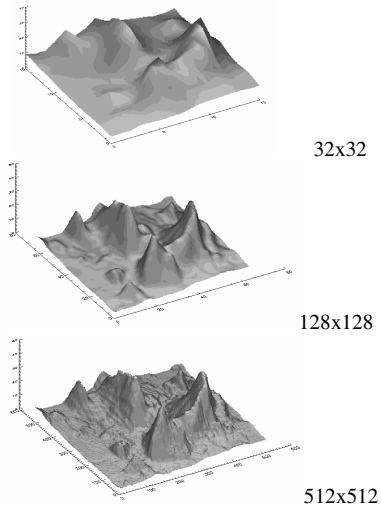


Figura 3.- Evolución del proceso multigrad

RESULTADOS DEL ESTUDIO

La (Figura 4) muestra el interferograma ruidoso de origen sobre el que se va a aplicar el proceso de Phase Unwrapping. Se ha utilizado en este caso el interferograma obtenido por el SAR SIR-C del glaciar de Woodfjordalen (Svalbard, Noruega) ya que adicionalmente existía un DEM de baja resolución de la misma zona. En este caso, el interferograma mostrado en la (Figura 4) tiene una alta densidad de residuos o inconsistencias de fase, hecho que complica el proceso. Por el contrario, no incluye efectos graves no lineales o de aliasing por la topografía. Debido a ello, únicamente se muestra el resultado de la estima por ML, siendo el resultado por multiresolución de similares características.

El resultado de la reconstrucción obtenida con una estima por diferencias simples y por LMS en versión no iterativa (mediante Transformadas rápidas de Fourier) se muestra en la (Figura 5). La gran cantidad de ruido añadido ha provocado que la solución tenga muchos errores, aunque ya muestra parte de la topografía del terreno. Sin embargo, la falta de definición de los patrones de bandas ha causado errores periódicos en elevación, que pueden observarse a simple vista.

En la nueva aproximación de las derivadas parciales se utilizará el estimador ML y el método recursivo multigrad para la integración de la frecuencia instantánea. En este caso se elimina gran parte del ruido presente en el interferograma, por lo que el mapa de elevación tiene un aspecto suavizado. En la (Figura 6) se muestra la reconstrucción, en la que se aprecia una considerable mejora respecto al caso anterior sin una pérdida apreciable de resolución. Con objeto de realizar una comparación cualitativa, se muestra el modelo de elevación original en la (Figura 7).



Figura 4.- Fase del interferograma

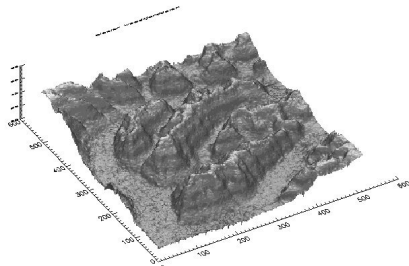


Figura 5.- Estima por diferencias y FFT

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un estudio sobre técnicas de Phase Unwrapping por LMS junto con la utilización de otros métodos tales como la estima de la frecuencia instantánea por máxima verosimilitud y por multiresolución. El estimador ML elimina gran parte del ruido, pero en presencia de variaciones no lineales extiende los errores. El

cálculo por multiresolución es excelente en presencia de no linealidades producidas por aliasing. Pero el único control sobre el ruido es el umbral de adaptación. La superioridad de uno de ellos no se puede concluir de forma absoluta, ya que depende de los datos de entrada. Sin embargo, se puede concluir que los métodos LMS-multigrad en combinación con técnicas de estima de la frecuencia avanzadas presentan resultados altamente prometedores que se pueden mejorar incluso con la introducción de mejoras con modelos de baja resolución o en otras bandas.

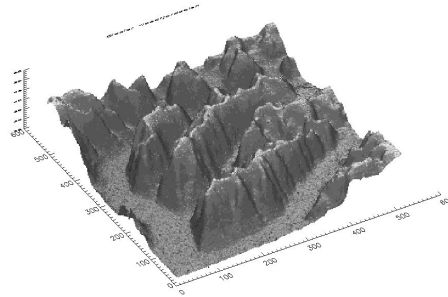


Figura 6.- Estima del gradiente ML y multigrad

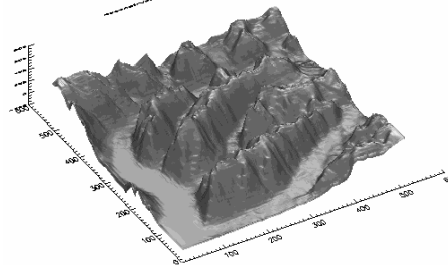


Figura 7.- DEM de la zona

BIBLIOGRAFÍA

- Davidson, G. W. y Bamler R. 1996. A multiresolution approach to improve phase unwrapping. IGARSS'96 Proc.: 2050-2053.
- Davidson, G. W. y Bamler R. 1996. Robust 2-D Unwrapping based on multiresolution. SPIE Proc. vol 2958: 227-237.
- Ghiglia, D. C. y Pritt, M. D. 1998. *Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms and Software*. Wiley, New York.
- Pritt, M. D. 1996. Phase Unwrapping by means of multigrad techniques for Interferometric SAR, IEEE Trans. Geo Remote Sensing, vol. 34, no. 3:728-738.