

# Obtención de datos e imágenes ERS-1 mediante simulación. Aplicaciones en interferometría

D. Carrasco, B. Rosich, J. Alonso y A. Broquetas.

Grupo AMR, Departamento de teoría de la Señal y Comunicaciones. E.T.S.I. Telecomunicación. Universidad Politécnica de Catalunya.

C/ Gran Capità s.n. Campus Nord UPC. Mòdul D3. 08071 Barcelona

## RESUMEN

La simulación de imágenes SAR nos permite comprender algunas características de los sistemas SAR y comprobar la calidad de los algoritmos de procesamiento de imágenes SAR. En este artículo se presenta un simulador de señales SAR. Necesita un modelo apropiado de la reflectividad de la escena y un algoritmo para regenerar la señal producida por el SAR. El simulador se ha empleado para generar datos que han sido posteriormente procesados para dar lugar a un interferograma y a partir de éste un modelo digital del terreno. También se presenta un modelo digital del terreno obtenido a partir de datos reales.

**PALABRAS CLAVE:** Simulador SAR, procesador SAR, interferometría SAR.

## ABSTRACT

SAR image simulation allows us to understand some SAR characteristics and to make a quality assessment of the SAR processor algorithm. ASAR raw data simulator is presented here. It requires a correct model of the scene reflectivity and an appropriate algorithm to reproduce the signal registered by the SAR. The simulator has been used to generate data which has been formerly processed to perform an interferogram and the a ground digital elevation model. A DEM obtained from real data is also shown.

**KEY WORDS:** SAR simulator, SAR processor, SAR interferometry.

## INTRODUCCIÓN

Durante las dos últimas décadas, las misiones espaciales han experimentado un gran desarrollo. Actualmente son numerosos los satélites en órbita que llevan a bordo un sistema SAR. La complejidad del mismo y el interés que despiertan las señales que éste proporciona, son buenas razones para emprender el diseño de un Simulador SAR. La simulación de imágenes SAR permite comprender las características asociadas a un sistema SAR real y las distorsiones que éste produce sobre el perfil de la superficie. Por otro lado, resulta una herramienta muy útil durante el proceso de análisis y diseño de algoritmos de reconstrucción de la imagen. Presentamos a continuación el diseño de un Simulador SAR, válido para reproducir las señales obtenidas por cualquier sistema SAR orbital, pero especialmente destinado a la simulación del sistema ERS-1 SAR.

## ESTRUCTURA DEL SIMULADOR

Con el fin de realizar un diseño modular y flexible, se ha dividido éste en dos fases distintas, que pueden ser utilizadas de forma independiente.

El objetivo de la primera fase es simular el mapa de reflectividad de la escena observada sobre el plano *slant-range*, a partir del modelo digital de

dicha superficie (correspondiente a las elevaciones y a su caracterización dieléctrica). El plano *slant-range* es el definido por el eje sobre el cual se sitúan las distancias al radar (eje *slant-range*) y por la dirección acimut, que coincide con la dirección de avance del SAR. Así, en esta fase deben reproducirse las distorsiones que produce el sistema SAR sobre el perfil de la superficie (*foreshortening*, *layover* y *shadowing*), además del ruido presente en las imágenes SAR reales, conocido como *speckle*. El aspecto más interesante de esta primera fase es la interpretación de la imagen bidimensional que se obtiene como resultado, ya que corresponde a la imagen SAR ideal que deseáramos obtener tras el procesamiento del holograma. Esta última característica es la más útil del resultado de esta fase.

La misión de la segunda fase es generar el holograma que registraría el sensor real durante el tiempo de iluminación de la superficie, tomando como punto de partida el mapa de reflectividad obtenido en la primera fase.

## Diseño de la primera fase del simulador

El punto de partida de esta fase es doble. Por una parte, es imprescindible conocer los parámetros de la misión SAR que deseamos simular, tanto los

correspondientes a sus características electromagnéticas (frecuencia de trabajo, ancho de banda de los pulsos radiados, etc.) como los correspondientes a sus características físicas (altura nominal de vuelo, velocidad del satélite, etc.). De este modo, es posible reproducir las condiciones de funcionamiento del sistema y situar correctamente la superficie iluminada en el sistema.

Una de las claves de este proceso es el modelo de superficie de la Tierra escogido. El compromiso entre complejidad de cálculo y precisión de los resultados limita las alternativas posibles a un modelo de superficie plana y a un modelo localmente esférico. Entre ellos hemos optado por un modelo esférico, ya que además de ajustarse más fielmente a la situación real, permite todos los cálculos necesarios con un alto grado de precisión y no introduce, a diferencia del modelo plano, distorsiones indeseadas.

El primer paso en esta fase es modelar la superficie de la escena. Esto se consigue mediante lo que denominamos facetas planas, que consisten en dos planos construidos a partir de tres puntos del mapa de alturas de la superficie. De este modo se aproxima la superficie real por pequeños planos tangentes a ella, que a pesar de constituir un modelo continuo resultan apropiados para reproducir el comportamiento SAR deseado.

Cada una de las facetas construidas se caracteriza con un coeficiente de reflexión. Este coeficiente depende de múltiples factores, pero básicamente pueden resumirse en los siguientes:

- Polarización de emisión y de recepción. Ambas determinan el coeficiente de la matriz de dispersión que nos interesa calcular.
- Distancia al radar. La fase asociada a la reflectividad depende del camino eléctrico recorrido. Es decir, nos interesa conocer con la mayor precisión posible la separación entre cada uno de los blancos de la superficie observada y el satélite durante el tiempo de iluminación. Para ello, el modelo de Tierra localmente esférica resulta especialmente adecuado.
- Rugosidad microscópica de las facetas. Las superficies reales presentan un nivel de rugosidad microscópica que es conveniente añadir también a las facetas construidas para aproximarnos en lo posible a la situación real. La superposición de esta rugosidad puede conseguirse mediante la asociación de un diagrama de radiación a cada una de las facetas, con una directividad fácilmente controlable en función del grado de rugosidad deseado. Al aumentar el nivel de rugosidad microscópica, mayor es la dispersión de la radiación reflejada por la superficie, y por lo tanto la directividad asociada a las facetas debe ser menor.

La reflectividad finalmente calculada para cada faceta se sitúa en la posición correspondiente sobre el plano *slant-range*, en función de su distancia mínima al radar y de su posición acimutal. Deno-

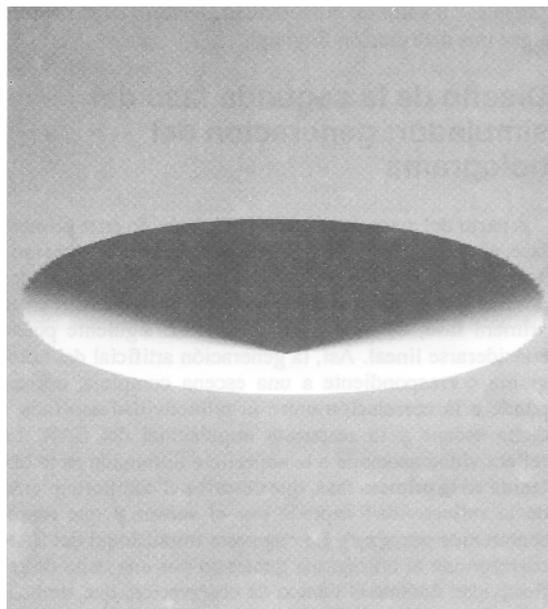


Figura 1. Simulación de una escena cónica con *speckle*

minamos simbólicamente a este proceso proyección sobre el plano *slant-range* es importante tener en cuenta que sobre una misma posición del plano *slant-range* pueden proyectarse múltiples facetas y que la reflectividad correspondiente a dicha posición consistirá en la suma coherente de cada una de las reflectividades.

Este comportamiento coherente del SAR es el responsable del ruido multiplicativo (*speckle*) inherente a las imágenes SAR reales.

Para simular el *speckle* hemos optado por modificar el comportamiento del modelo digital real, de forma que dicho ruido se genere de manera natural. La idea es considerar facetas de pequeñas dimensiones, con el fin de acercarnos al modelo real de la superficie, en el que cada celda está compuesta por múltiples dispersores puntuales. La complejidad del cálculo y el tiempo de ejecución limitan el número de facetas por muestra *slant-range* que podemos considerar, pero son suficientes unas tres facetas por muestra en cada dirección para obtener un adecuado comportamiento. En estas condiciones se ha comprobado que la generación de *speckle* es la correcta. El comportamiento aleatorio de dicho ruido puede conseguirse mediante la introducción de una cierta aleatoriedad sobre la escena real. Para ello, se superpone a las elevaciones reales una altura gaussiana aleatoria con un valor de desviación estándar opcional en función del grado *despeckle* deseado.

Un valor adecuado puede considerarse, por ejemplo, media longitud de onda. Con esta aleatorización se consigue que la orientación de las facetas así como su distancia al radar posean un comportamiento aleatorio. De este modo, la suma coherente de la reflectividad de todas las facetas pertenecientes a la misma posición sobre el plano *slant-range* es un valor de reflectividad aleatorio cuyo módulo sigue una distribución Rayleigh.

### Diseño de la segunda fase del simulador: generación del holograma

A partir del mapa de reflectividad obtenido en la primera fase, podemos pasar a la reproducción de la señal generada por el SAR. Puede considerarse que las no linealidades propias de un sistema SAR han sido introducidas en la primera fase, de modo que el proceso siguiente puede considerarse lineal. Así, la generación artificial del holograma correspondiente a una escena compleja, corresponde a la correlación entre la reflectividad asociada a dicha escena y la respuesta impulsional del SAR. La reflectividad asociada a la superficie iluminada es la obtenida en la primera fase, que describe el comportamiento de la reflectividad captada por el sensor y que representaremos por  $\gamma(x,r)$ . La respuesta impulsional del SAR corresponde al holograma generado por una delta de reflectividad durante el tiempo de observación, que simbolizaremos mediante la función  $g(\cdot)$ . Así, el holograma de la escena observada,  $h(\cdot)$ , puede obtenerse mediante la relación:

$$h(x', r') = \iint \gamma(x,r)g(x'-x, r'-r, x,r) dx dr \quad (1)$$

Las variables  $x$  y  $r$  indican la posición del blanco sobre el plano *slant-range*, y  $x'$  y  $r'$  corresponden a la posición acimut del satélite y la distancia medida por el radar respectivamente.

La correlación anterior se implementa en el dominio transformado por razones de eficiencia, donde, aplicando la transformada bidimensional de Fourier respecto  $x'$  y  $r'$ , toma la forma:

$$H(\epsilon, \eta) = \iint \gamma(x,r)G(\epsilon, \eta; x,r) e^{-j\epsilon x} e^{-j\eta r} dx dr \quad (2)$$

Las variables  $\epsilon$  y  $\eta$  representan las variables transformadas de  $x'$  y de  $r'$  respectivamente y la función  $G(\cdot)$  corresponde a la transformada bidimensional de Fourier de la respuesta impulsional, cuyo comportamiento es el descrito por la siguiente expresión:

$$G(\epsilon, \eta; x,r) = G_0(\epsilon, \eta) \sqrt{1+\beta} r e^{j r \psi(\epsilon, \eta)} \quad (2)$$

$$G_0(\epsilon, \eta) = G(\epsilon, \eta; x,r)_{(x,r)=(0,0)}$$

La característica más importante del comportamiento de esta función es su varianza respecto a la posición *range* del blanco ( $r$ ), es decir, el hecho de que la respuesta generada por puntos situados a distinta distancia al satélite sean diferentes. Esto dificulta la obtención de la expresión del holograma, de forma equivalente a lo que sucede en el proceso de reconstrucción de la imagen. De todos modos, si examinamos el comportamiento de dicha función, observamos que puede descomponerse en una componente invariante,  $G_0$ , y otra que contenga la dependencia respecto, tanto en módulo como

en fase es importante destacar que la fase depende linealmente de la posición *range*, lo que facilitará el desarrollo matemático. El algoritmo de simulación implementado resuelve el problema de la varianza de forma análoga a la propuesta en [2]:

- El comportamiento variante con  $r$  del módulo de la transformada de la respuesta impulsional se asocia a la reflectividad de la escena, creando una nueva reflectividad que denominaremos reflectividad modificada:

$$\bar{\gamma} = \sqrt{1+\beta} r \gamma(x,r) \quad (4)$$

Con ello se consigue que la expresión del holograma en el dominio transformado corresponda a la transformada inversa de la reflectividad modificada evaluada en puntos que depende del término de fase variante de la respuesta impulsional.

- Considerando la modificación anterior, podemos obtener el holograma a partir de:

$$H(\epsilon, \eta) = G_0(\epsilon, \eta) \iint \bar{\gamma}(x,r) e^{j\epsilon x} e^{j r (\eta - \psi(x,r))} dx dr \quad (5)$$

que supone interpolar los valores de interés de la reflectividad modificada a partir de los valores conocidos. Es decir, podemos representar el holograma como:

$$H(\epsilon, \eta) = G_0(\epsilon, \eta) \bar{\Gamma}(\epsilon, \eta - \psi(\epsilon, \eta)) \quad (6)$$

Antitransformando este resultado se obtiene finalmente una expresión para el holograma generando al iluminar una escena determinada, considerando el comportamiento variante en *range* de la respuesta impulsional del SAR.



Figura 2. Simulación de una escena cónica sin *speckle*

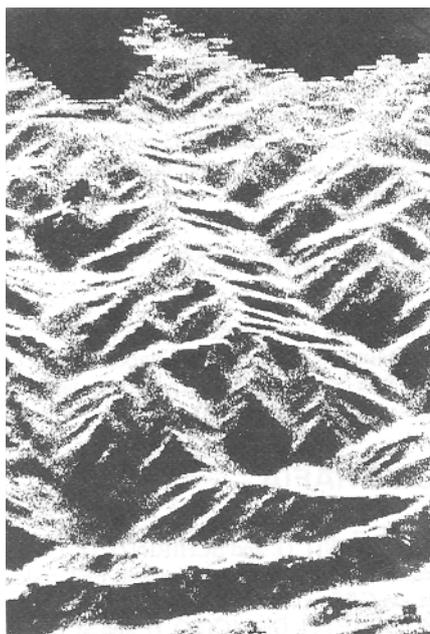


Figura 3. Simulación de la Imagen SAR en una zona del Ampurdán.

## APLICACION DEL SIMULADOR A INTERFEROMETRIA

Las imágenes SAR son imágenes bidimensionales en las que la información de la escena real se reduce a una proyección sobre el plano *slant-range*, de modo que no disponemos directamente de la información de la elevación de los puntos de la superficie. Sin embargo, es posible obtener esta información a partir de dos imágenes SAR de la misma escena tomadas desde distintas posiciones. Este proceso se conoce como interferometría SAR.

A partir de la simulación de dos imágenes SAR desde distinta posición es posible recuperar la información de elevación. La obtención del interferograma puede realizarse a partir de las imágenes obtenidas en la primera fase de la simulación o bien a partir de las imágenes resultantes de procesar el holograma simulado, equivalentemente al proceso que tendría lugar a partir de los datos reales recibidos del satélite. En el primer caso, se obtienen muy buenos resultados, mientras que en el segundo aparecen algunas distorsiones indeseadas debidas a las aproximaciones realizadas en los algoritmos de simulación del holograma y de reconstrucción de la imagen.

## RESULTADOS

Presentamos a continuación algunos resultados de la simulación y posterior procesado de hologramas a partir de modelos digitales también simulados y a partir de un modelo digital real.

La figura 1 representa la imagen simulada de una superficie en forma cónica en la que no se ha introducido *speckle*, mientras que la figura 2 corresponde a la simulación equivalente pero intro-

duciendo el ruido multiplicativo propio de las imágenes SAR. Ambas simulaciones han sido realizadas con los parámetros correspondientes al satélite ERS-1.

La figura 3 representa la imagen SAR simulada de una zona del Ampurdán a partir de un modelo digital real. Como muestra de la utilidad del simulador en Interferometría se muestra el interferograma (franja) obtenido para esta imagen en la figura 4. A partir de estas franjas es posible recuperar el mapa de alturas original, con la ventaja añadida de que se dispone del modelo original de alturas del terreno (empleado en la primera etapa del simulador) para comparar con los resultados obtenidos.

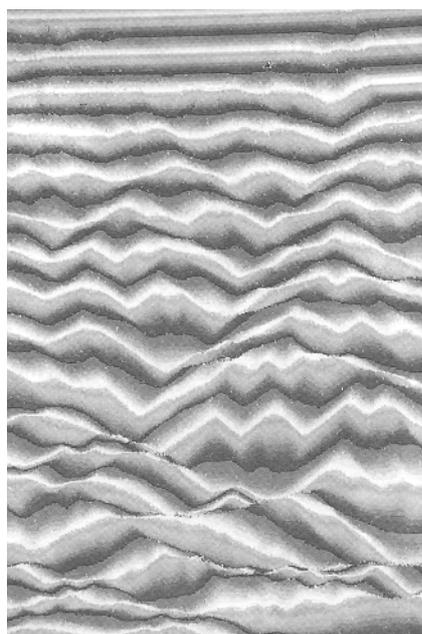
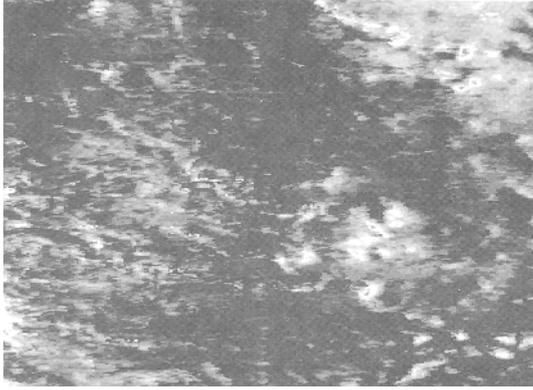


Figura 4. Franjas interferométricas obtenidas en la simulación del Ampurdán

También se ha trabajado en interferometría a partir de datos reales. En concreto se procesó una zona próxima a Ascó en la provincia de Tarragona. El proceso interferométrico dio lugar a un modelo digital del terreno que mediante un giro y un escalado apropiado se pudo comparar con un modelo digital real de alta precisión disponible. El error existente entre el modelo real y el calculado mediante interferometría se muestra en la figura 5. Como se puede apreciar, el error está acotado por debajo de los 10 m. (color azul) en la mayor parte de la zona procesada (70% del área). Localmente se aprecian zonas con gran error debido a errores en el desenrollado de fase.

## CONCLUSIONES

Del trabajo realizado y de los resultados obtenidos puede concluirse que el simulador SAR diseñado es capaz de reproducir las características de un holograma real, así como las distorsiones provocadas por el sistema SAR sobre la escena real.



**Figura 5.** Error entre el DEM obtenido por interferometría a partir de datos reales y un DEM de alta precisión.

El modelo de superficie localmente esférica para la superficie terrestre permite no sólo aproximarnos a la situación real, sino obtener un alto grado de precisión en los cálculos realizados, gracias a lo cual es posible aplicar el simulador a interferometría, donde el tratamiento de la fase es especialmente crítico.

Los resultados obtenidos permiten considerar muy válido el modelo de facetas y el proceso de generación del *speckle* para reproducir las características de las imágenes SAR reales.

Es interesante hacer hincapié en la utilidad de la división del diseño realizado en las dos fases comentadas, ya que ello aporta una mayor compren-

sión del proceso que tiene lugar en un sistema real, permitiendo independizar la proyección del algoritmo de generación del holograma, proporcionando la posibilidad de trabajar con una imagen equivalente al resultado de un proceso SAR ideal.

Finalmente, se ha demostrado la posibilidad de emplear el simulador en la verificación del proceso seguido en interferometría.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la CICYT TIC92- 0645. Los autores agradecen la colaboración del Institut Cartografic de Catalunya, que ha proporcionado los modelos digitales del terreno (DEM) utilizados.

## BIBLIOGRAFIA

- FRANCFBCHETTI, G. and SCHIRINZI, G. 1992. A SAR Processor Based on Two Dimensional FFT codes. *IEEE Trans. on GRS*, vol. AES-18, Nº 5.
- FRANCESCHETTI, G., RICCIO, D. and SCHIRINZI, G. 1992. SARAS: A Synthetic Aperture Radar (SAR) Raw Signal Simulator. *IEEE Trans. on GRS*, vol. 30, Nº 1.
- RANEY, K. 1991. Considerations for SAR Image Quantification Unique to Orbital Systems. *IEEE Trans. on GRS*, Vol. 29, NQ 5.
- CURLANDER. 1982. Location of Spaceborne SAR Imagery. *IEEE Transactions on GRS*, Vol. GE-20.