

## ANÁLISIS DE IMÁGENES SAR Y SU APLICACIÓN A ESTUDIOS OCEANOGRÁFICOS

A. MARTINEZ<sup>1</sup>; V. MORENO<sup>2</sup> Y J. FONT<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ciencias del Mar (CSIC), Barcelona.

<sup>2</sup>INISEL ESPACIO, Madrid.

### RESUMEN

El radar de apertura sintética (Synthetic Aperture Radar) es un sensor activo que trabaja en el intervalo de frecuencias de las microondas. La característica distintiva del SAR es la síntesis de una antena de grandes dimensiones mediante el seguimiento de las fases de los pulsos recibidos. En este trabajo se presentan las técnicas de proceso de las imágenes SAR, entre las que cabe destacar la eliminación del moteado (speckle) y la corrección panorámica, característicos de las imágenes SAR.

### ABSTRACT

*The synthetic aperture radar, SAR, is an active microwave sensor. The main characteristic of SAR is the synthesis of an effective long antenna as a result of the study of the phase of the received pulses. In this work we show several processing techniques of SAR images, among them, the speckle reduction and the projection of the image over the ground.*

## 1. INTRODUCCIÓN

El radar de apertura sintética (Synthetic Aperture Radar) es un sensor activo que trabaja en el intervalo de frecuencias de las microondas. La característica distintiva del SAR frente a otros sistemas o sensores de microondas es la síntesis de una antena de grandes dimensiones a partir de una antena real más pequeña mediante el seguimiento de las fases de los pulsos recibidos durante un tiempo de integración.

La posibilidad de producir imágenes de alta resolución con independencia de la iluminación solar y de las condiciones meteorológicas hacen del SAR un sensor atractivo para la observación remota de la Tierra. Buena prueba de lo anterior lo constituye el lanzamiento, previsto para 1991, de dos SAR: uno de ellos a bordo del satélite europeo ERS-1, y el otro en la lanzadera espacial norteamericana (SIR-C, Shuttle Imaging Radar).

En este trabajo se presentan las técnicas de proceso de las imágenes SAR, entre las que cabe destacar la eliminación del moteado (speckle) y la corrección de la distorsión panorámica, característicos de las imágenes SAR.

## 2. EL RADAR DE APERTURA SINTÉTICA

Entre los muchos y variados sistemas de radar, los únicos dispositivos con capacidad de formación de imágenes utilizables en teledetección son los denominados radares laterales (SLR Side Looking Radar). Dentro de los radares laterales destaca, por su mejor resolución espacial, el radar de apertura sintética (SAR Synthetic Aperture Radar).

### 2.1. Fundamentos del SAR.

Un radar lateral consiste básicamente en una antena larga,

montada en un avión, paralela a su eje longitudinal. La antena emite pulsos electromagnéticos (en el intervalo de frecuencias de las microondas) estrechos en la dirección perpendicular a su eje. Los pulsos son reflejados en la superficie terrestre. La parte del pulso que es reflejada en la dirección de la antena es recibida por la misma. En función del tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de los pulsos, éstos corresponden a puntos situados a diferentes distancias de la antena, y son ordenados de manera que formen una imagen.

La resolución espacial de un sensor indica la mínima distancia sobre el terreno a la que dos objetos serán representados en la imagen separadamente. En el caso de un radar lateral la resolución viene determinada por las características de los pulsos emitidos. Se pueden distinguir dos tipos de resolución: resolución en la dirección de vuelo (azimuth) y en profundidad, esto es, la dirección perpendicular a la de vuelo (range).

La resolución en profundidad está determinada por la longitud de los pulsos emitidos,  $\lambda$ , que es inversamente proporcional a la frecuencia de repetición, y al ángulo de incidencia  $\theta$  (Leberl, 1990):

$$a_r = \lambda / 2 \cos \theta$$

Estos parámetros pueden ser modificados con cierta libertad por los diseñadores del sistema de forma que se pueda alcanzar una resolución determinada para una incidencia dada.

Por el contrario, la resolución azimutal es directamente proporcional a la distancia entre antena y objeto,  $r$ :

$$a_a = \alpha r L / D$$

donde  $L$  es la longitud de onda del radar y  $D$  la longitud de la antena. Al ser estos parámetros constantes para un sistema, nos encontramos con que la resolución en azimuth se degrada a medida que nos alejamos del sensor. Por otra parte, esta misma relación hace inviable la utilización de tal sistema a bordo de un satélite.

La solución de este problema se consigue sintetizando una antena de grandes proporciones mediante el procesamiento adecuado de los pulsos recibidos. Para ello es necesario que la radiación emitida por la antena sea coherente (con una fase definida y conocida).

A medida que el sensor alcanza y sobrepasa un determinado objeto, la radiación reflejada por éste verá desplazada su frecuencia debido a la velocidad relativa entre ellos (efecto Doppler). El principio que subyace en el SAR es la síntesis de una larga antena mediante el análisis, no sólo del tiempo de llegada de los pulsos, sino también de sus frecuencias. En un determinado tiempo y a una determinada distancia de la antena, las contribuciones de cada punto en la dirección paralela a la trayectoria pueden ser distinguidas por el valor del desplazamiento Doppler de la frecuencia. Esta diferenciación se realiza en la práctica filtrando las señales recibidas con una señal de referencia. La frecuencia de esta señal de referencia es ajustada dependiendo de la historia Doppler del objeto o píxel que se esté procesando. Los pulsos filtrados son sumados o integrados coherentemente durante la duración de la apertura sintética. De esta forma se puede realizar la integración separada de las contribuciones de diferentes objetos en el terreno. Es sorprendente que la frecuencia azimuthal resultante sea independiente de la distancia a la que se encuentra el objeto.

## 2.2. Comparación con sensores ópticos e infrarrojos.

La primera diferencia, y fundamental, entre el radar de apertura sintética y los sensores ópticos e infrarrojos es la radiación electromagnética utilizada.

Visible	0,3 $\mu\text{m}$
Infrarrojo	10 $\mu\text{m}$
Microondas	10 cm

Esto da lugar a la obtención y observación de diferentes propiedades de la superficie, lo cual supone una fuente adicional de información. Las propiedades de la superficie que afectan la dispersión de las microondas son:

- Propiedades eléctricas.
- Rugosidad.
- Forma geométrica.
- Angulo de incidencia.

La mayor penetración de las microondas supone una ventaja, al permitir trabajar con independencia de la cobertura nubosa. Por otra parte, el carácter activo de este tipo de sensores supone la independencia respecto de la iluminación externa (aunque impone serios requisitos de potencia, especialmente en sistemas a bordo de satélites).

## 3. PROCESADO DE IMÁGENES SAR

### 3.1. Reducción del speckle.

Una de las características distintivas de las imágenes SAR frente a otro tipo de imágenes es la presencia de un moteado típico, conocido como speckle. El ruido speckle tiene su origen en la dispersión del pulso de radar incidente por un gran número de elementos dispersores dentro de cada celda de resolución. La orientación aleatoria de estos elementos hace que en el pulso reflejado, constituido por la suma incoherente de las contribuciones de éstos, unas veces se encuentren en fase, dando lugar a interferencias constructivas, y otras fuera de fase, produciendo interferencias destructivas.

La distribución estadística del ruido depende del tipo de detección utilizado para formar la imagen. En el caso del SEASAT, las imágenes están constituidas por la raíz cuadrada de la intensidad recibida, y se puede demostrar que la distribución estadística de los pulsos recibidos de una región homogénea sigue una ley exponencial negativa (Ulaby, 1986). Suponiendo que el número de dispersores en cada celda de resolución es elevado, la distribución estadística del ruido se puede aproximar por una gaussiana con valor medio 1 y desviación típica 0,52. Este resultado se conoce comúnmente como modelo multiplicativo del speckle.

Una de las técnicas más extendidas para reducir el speckle es la de promediar  $n$  píxeles en la dirección azimuthal, formando una imagen con  $n$ -vistas ( $n$ -looks). De esta forma, además de reducir la desviación típica del speckle es un factor  $n^{1/2}$ , se consigue igualar el tamaño del píxel en azimuth y en profundidad.

Así y todo, la desviación típica resultante para una imagen con cuatro vistas es del orden de 0,26. La reducción de este valor no sólo mejorará la apariencia visual de la imagen sino que facilitará el proceso de ésta (segmentación y clasificación, por ejemplo).

En la literatura han aparecido diversos filtros para la reducción del speckle, entre los que hemos escogido tres de los más utilizados para su implementación. Recordemos que el comportamiento deseado para un filtro de speckle es que reduzca al máximo el ruido preservando la información textural y de bordes de la imagen.

#### 3.1.1. Filtro de la mediana.

El filtro de la mediana sustituye el valor de cada píxel por la mediana de una ventana centrada en torno a él, normalmente de tamaño  $3 \times 3$  ó  $5 \times 5$ . La mediana de una distribución estadística es el punto que divide la distribución de probabilidad en dos partes iguales. El filtro de la mediana es superior a los filtros de valor medio al preservar mejor los bordes entre regiones. La menor influencia de la presencia de valores extremos y su semejanza al valor promedio de la mayoría de píxeles en cada ventana son las razones de su superioridad respecto a los filtros promediadores.

#### 3.1.2. Filtro sigma.

El filtro sigma es fundamentalmente un filtro promediador.

Sin embargo, a diferencia del filtro de valor medio, tan sólo se utilizan aquellos píxeles cuyos valores difieran en menos de más menos dos desviaciones típicas del valor del píxel central (Lee, 1983). Con esta modificación se pretende agrupar los píxeles correspondientes a regiones diferentes en poblaciones independientes, de forma que no se pierda información de bordes. La suposición principal que subyace en el filtro sigma es que los píxeles de cada región se distribuyen de acuerdo a una función gaussiana, y que aquellos píxeles cuyos valores se alejen más de dos sigma del valor del centro de la ventana corresponden a una región o población independiente.

### 3.1.3. Filtro estadístico de Lee.

El filtro estadístico de Lee constituye un paso diferenciado a la hora de reducir el speckle. En este caso se pretende implementar un filtro basado en las características locales de la imagen para establecer el valor final del píxel en cuestión. El valor filtrado de un píxel se calcula de acuerdo a la ecuación (Lee, 1981):

$$s_f = s_m + \frac{\delta(s)}{s_m^2 \sigma_v^2 + \delta(s)} (s - s_m)$$

donde la anotación empleada se refiere a:

- $s$  valor de intensidad del píxel
- $s_m$  valor medio en la ventana
- $\delta(s)$  varianza en la ventana
- $\sigma_v$  desviación típica del speckle
- $s_f$  valor final del píxel

Examinando la ecuación podemos contemplar el comportamiento del filtro en los dos casos extremos. Por una parte, en regiones homogéneas se verificará que  $s = s_m$  por lo que  $s_f = s_m$ : el filtro deja el valor medio. En regiones heterogéneas se cumplirá que la varianza propia de la imagen es mucho mayor que la debida al speckle:  $\delta(s) \gg s_m \sigma_v^2$ , y por lo tanto el valor final del píxel será precisamente su valor original. En definitiva, el filtro estadístico de Lee preserva los bordes pero a costa de no reducir significativamente el ruido en ellos.

De la aplicación de estos filtros a imágenes SAR podemos establecer que la elección del filtro idóneo es dependiente de la escena que se está analizando. En general, parece que el filtro estadístico aplicado sobre ventana 5x5 suele dar los mejores resultados.

## 3.2. Correcciones geométricas.

Las imágenes SAR, como las de cualquier sensor remoto, están sometidas a diferentes distorsiones geométricas. Con objeto de poder relacionar los puntos de la imagen con un sistema exterior de referencia (o de coordenadas) es preciso realizar diferentes correcciones.

La corrección geométrica de imágenes SAR se realiza generalmente a partir de los datos de efemérides del satélite, para evitar depender de puntos de control sobre el terreno. En el caso de imágenes del océano es muy difícil, por no decir imposible, obtener dichos puntos de control.

El primer paso de la calibración geométrica de una imagen SAR es la localización de los píxeles que la forman. Esta tarea se lleva a cabo mediante la resolución de las dos ecuaciones que gobiernan el proceso de formación de la imagen: la ecuación que define los puntos situados a una determinada distancia de la antena y la ecuación que describe el cono formado por la radiación electromagnética emitida por ella (Curlander, 1984).

A estas dos ecuaciones hay que unirle la condición de que los puntos de la imagen pertenezcan a la superficie de la Tierra, asumiendo un modelo para ésta (por ejemplo, el modelo esférico). Si la zona que cubre la imagen tiene diferencias topográficas importante no es suficiente con introducir un modelo genérico de la forma de la Tierra. Los pulsos reflejados por objetos situados a la misma distancia horizontal del sensor pero a diferentes alturas llegarán con tiempos distintos a la antena, y serán procesados erróneamente. En estos casos es necesaria la introducción de un modelo digital del terreno.

Para la resolución de estas ecuaciones se necesita conocer la posición y velocidad de la antena. Para tener en cuenta los efectos de rotación de la superficie terrestre, el procesador del SAR compara las fases de los pulsos recibidos con una función cuya fase, en el momento de máxima proximidad entre antena y objeto, no es nula, sino que se elige de forma que represente el corrimiento Doppler correspondiente a esta rotación. El conocimiento de esta frecuencia de referencia, o bien del ángulo de inclinación de la antena correspondiente, es esencial para la aplicación del modelo geométrico.

### 3.2.1. Corrección panorámica.

Una distorsión característica de las imágenes de radar es la panorámica. Como se comentó anteriormente, los ejes principales de una imagen SAR son el de azimuth, paralelo a la dirección de movimiento de la antena, y profundidad, perpendicular a ésta. La dirección de profundidad no es paralela al terreno, al resultar de la proyección de la distancia que separa la antena del objeto; recordemos que el procesador del SAR discrimina la distancia a la que se encuentra un punto en función del retardo de los pulsos recibidos. Para reconstruir la imagen es preciso proyectar estas distancias sobre el terreno; este proceso se denomina comúnmente corrección panorámica o paso de geometría "slant range" a "ground range".

La relación entre el tamaño de un píxel antes,  $\delta_s$ , y después de proyectarlo sobre el terreno,  $\delta_g$  es:

$$\delta_g = \delta_s / \sin \theta$$

donde  $\theta$  es el ángulo de incidencia. Al ser el espaciado original de los píxeles constante, por muestrearse los pulsos recibidos a intervalos constantes de tiempo, nos encontramos que el tamaño de los píxeles finales variará a lo largo de la imagen. Esta relación también nos indica que la imagen original, no corregida, estaba comprimida en profundidad, más cuanto menor es la distancia entre antena y objeto (esto es, a menores ángulos de incidencia).

## 4. APLICACIONES OCEANOGRÁFICAS

### 4.1. Imágenes SAR del océano.

Una imagen SAR del océano representa la magnitud de la energía del radar reflejada por la superficie. Al ser la iluminación del radar oblicua, la reflexión especular no será el mecanismo fundamental de formación de la imagen, sino la interacción entre las ondas incidentes y la rugosidad del mar. Es importante destacar que las ondas de radar no penetran en el mar y, por tanto, las características observadas en una imagen SAR corresponden a fenómenos superficiales.

En el caso del radar lateral, SLR, el mecanismo fundamental de interacción entre las ondas de radar y la superficie marina es la modulación de las primeras por las olas marinas mediante dispersión resonante de Bragg para estados calmados del mar y mediante dispersión de Bragg por los rompientes de las olas y dispersión Rayleigh por burbujas de aire y gotitas de agua en el caso de mares muy agitados. Parece bien establecido que las ondas de radar interaccionan más fuertemente con modulaciones con longitudes comparables a la de la longitud de onda incidente.

Para imágenes SAR, sin embargo, la situación es bastante más compleja, debido a la necesidad de incluir el movimiento de las olas durante el período de apertura (Alpers, 1979). Hasta el momento se han propuesto algunos modelos con aplicación limitada a determinados casos, y la investigación y discusión siguen activos en este campo.

### 4.2. Fenómenos observables.

Algunos procesos dinámicos marinos modulan la energía de las olas generadas por el viento, que son las que forman la rugosidad de la superficie que interacciona con las ondas de radar. Esta modulación se traduce en la imagen en zonas con diversas texturas e intensidades, que estarán relacionadas con la estructura y naturaleza del fenómeno marino correspondiente, además de con variaciones espaciales de la tensión de arrastre del viento (Vesecky, 1982).

Entre los procesos marinos superficiales observables en las imágenes SAR podemos señalar las ondas de gravedad largas y las corrientes variables asociadas a estructuras hidrográficas como frentes, remolinos y filamentos. También fenómenos subsuperficiales, como ondas internas o incluso variaciones topográficas, pueden llegar a detectarse por sus efectos en la rugosidad de la superficie.

Las ondas internas, propagaciones horizontales de perturbaciones producidas en la interfase entre masas de agua distintas, provocan en la superficie zonas alternativamente de convergencia y divergencia del flujo que afectan a las olas. En el caso de aguas poco profundas, una fuerte corriente a lo largo de un fondo variable puede producir movimientos verticales que queden reflejados en alteraciones de la superficie. Los frentes marinos son fronteras entre dos masas de agua con características físico-químicas diferenciadas (temperatura y salinidad) en equilibrio con el fuerte gradiente de densidad. Además de diferencias en la rugosidad a ambos lados, los frentes son zonas de convergencia superficial, llegando en casos muy intensos a producir rompientes de olas. Son regiones dinámicamente muy activas, con formación de meandros, remolinos y filamentos, todas ellas estructuras superficiales ligadas a las corrientes y de dimensiones muy adecuadas para ser identificadas en las imágenes SAR. Frentes marinos se observaron ya con el SAR del SEASAT (verano de 1978), y estudios preparatorios al lanzamiento del ERS-1 han demostrado que pueden distinguirse bien de las variaciones de rugosidad causadas por el viento, e incluso permitir estimaciones de la intensidad de la corriente asociada.

En la fase actual, la observación y estudio de estos fenómenos dinámicos requiere la toma de datos in situ mediante campañas oceanográficas. Un programa conjunto de análisis de imágenes del ERS-1 y medidas directas en el mar va a ser llevado a cabo en 1992 por el Instituto de Ciencias del Mar en el Mediterráneo Occidental. Las posibilidades que se abren con el empleo de imágenes SAR son numerosas, al permitir el seguimiento en el tiempo y la observación a nivel global de los océanos.

## 5. BIBLIOGRAFIA

- ✓ ALPERS, W. & RUFENACH, C.L. (1979): The effect of orbital motions on SAR imagery of ocean waves. *IEEE Trans. Ant. Propagat.* AP-27: 685-690.
- ✓ CURLANDER, J.C. (1984): Utilization on spaceborne SAR data for mapping. *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing* GE-22: 106-112.
- ✓ LEBERL, F.W. (1990): *Radargrammetric Image Processing*. Artech House, Norwood, MA. pp 32-35.
- ✓ LEE, J.S. (1981): Speckle analysis and smoothing of Synthetic Aperture Radar Images. *Comp. Graph. Image Process.* 17: 24-32.
- ✓ LEE, J.S. (1983): A simple speckle smoothing algorithm for Synthetic Aperture Radar Images. *IEEE Trans. Sys. Man Cyber.* SMC-13: 85-89.
- ✓ ULABY, F.T., MOORE, R.K. & FUNG, A.K. (1986): *Microwave Remote Sensing Vol.II: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory*. Artech House, Norwood, MA. pp 682-687.
- ✓ VESECKY, J.F. & STEWART, R.H. (1982): The observation of ocean surface phenomena using imagery from SEASAT SAR: an assessment. *J. Geophys. Res.* 87: 3397-3430.