



El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial

Fundamentos de teledetección radar

Proyecto co-financiado por la Comisión Europea

Framework Partnership Agreement 275/G/GRO/COPE/17/10042

Specific Grant Agreement number: 2018/SI2.810140/04

Índice

Índice	2
1 Introducción a la teledetección radar.....	3
1.1 Principios de formación de imagen radar.....	5
1.2 Efectos geométricos	7
1.3 Órbitas y direcciones de observación.....	9
1.4 Dispersión por superficie y por volumen. Coeficiente de retro-dispersión.....	9
1.5 Ángulo de incidencia	10
1.6 Speckle	12
1.7 Polarización.....	12
1.8 Penetración en función de la longitud de onda	13
1.9 La imagen SAR.....	14
1.9.1 La fase en imágenes SAR	14

1 Introducción a la teledetección radar

Si recuperamos algunas figuras del módulo de fundamentos de la teledetección óptica (en concreto la del espectro electromagnético y la de las ventanas atmosféricas), llegamos a las siguientes conclusiones:

- Que las microondas ocupan el rango que va desde 1 cm a 1 metro de longitud de onda en el espectro electromagnético.
- Que según las curvas de absorción, las microondas al tener gran longitud de onda en comparación con el visible o el infrarrojo, esta radiación puede penetrar a través de la cobertura nubosa, niebla, polvo y en general cualquier condición atmosférica salvo lluvias muy fuertes.
- De la misma manera, y por la misma razón de longitud de onda, las microondas no están afectadas de dispersión atmosférica.

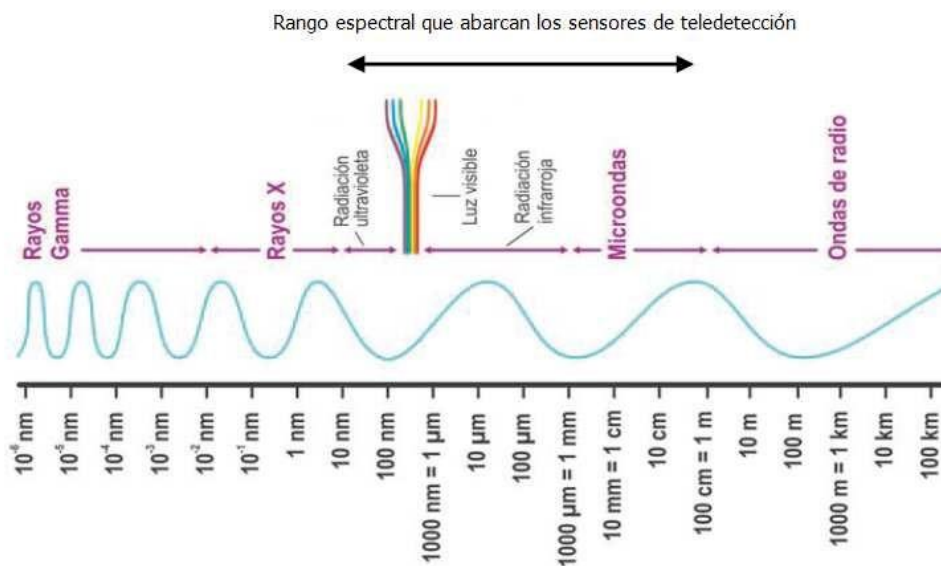


Figura 1 El espectro electromagnético

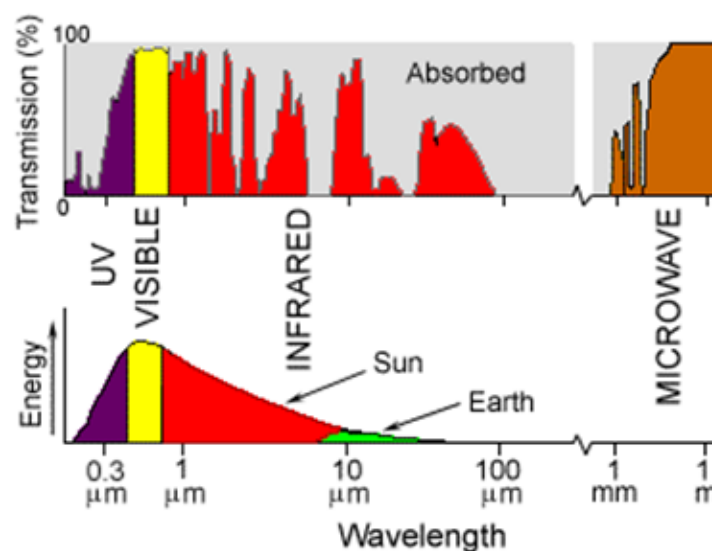


Figura 2 Ventanas atmosféricas y su relación con el máximo de energía emitida por el Sol

Debido a estas propiedades, la radiación microondas puede emplearse para caracterizar cubiertas bajo prácticamente todas las condiciones medioambientales imaginables.

Pero además, y en contraposición a la teledetección pasiva, que necesita de una fuente de iluminación externa al sensor, en la **teledetección activa** los sensores que trabajan en estas frecuencias emiten su propia radiación, la cual capturan después y evalúan los cambios entre el pulso emitido y el reflejado. Al no depender de una fuente externa de iluminación, estos sensores pueden trabajar tanto de día como noche.

Llegamos por lo tanto a las siguientes conclusiones fundamentales en la teledetección radar:

- Es independiente (o casi) del tiempo atmosférico.
- Funciona tanto de día como de noche (con iluminación solar o sin ella).
- Permite determinar características asociadas a la rugosidad del terreno.

La fracción microondas en las que se trabaja en la teledetección radar se subdivide a su vez en los siguientes grupos.

Banda	Longitud de onda (cm)	Frecuencia (GHz)
Ka	0.75 – 1.2	40 – 25
K	1.2 – 1.67	25 – 18
Ku	1.7 – 2.5	17.6 – 12
X	2.5 – 4	12 – 7.5
C	4 – 8	7.5 – 3.75
S	8 - 15	3.75 – 2
L	15 – 30	2 – 1
P	60 - 120	0.5 – 0.25

Tabla 1 Longitudes de onda y frecuencias radar

Las diferentes frecuencias en las que se trabaja en radar tienen una capacidad mayor o menor de penetrar en las cubiertas, en función de su longitud de onda. Las principales aplicaciones según las bandas se resumen en la siguiente tabla.

	Ka	Ku	X	C	S	L	P
Uso general, más usado							
Penetración de cubierta vegetal							
Captura subsuelo							
Estimación de biomasa							
Monitoreo de agricultura							
Monitoreo de océanos y hielos							
Estudios de subsidencias							
Monitoreo de nieve							
Muy alta resolución							

Tabla 2 Aplicaciones de las diferentes bandas radar

1.1 Principios de formación de imagen radar

El fundamento básico de una imagen radar es un sensor que emite un pulso en el rango de las microondas y a través del transcurso de tiempo entre su emisión y su recepción, y de la amplitud del pulso retornado, se puede obtener la distancia del sensor a la que se encuentra el objeto en el que rebotó el pulso.

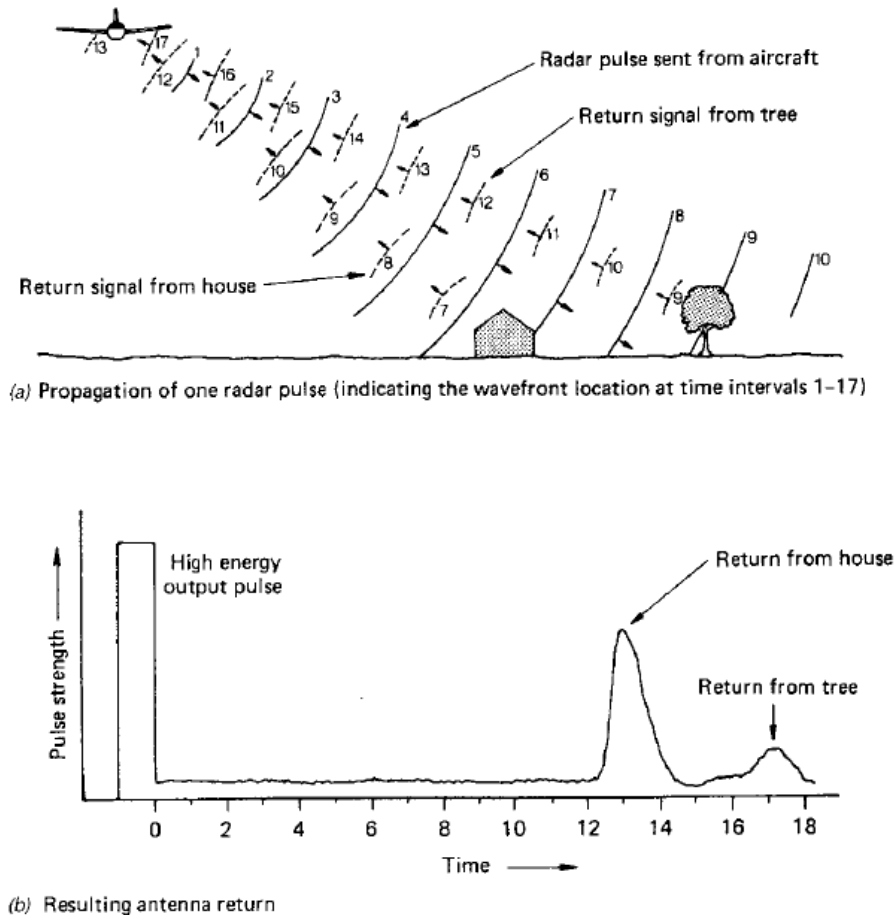


Figura 3 Fundamentos de emisión y receptor de un pulso radar. Fuente: John Wiley & sons, Inc. (1994)

En este caso es importante señalar la diferencia entre el fundamento del sensor LiDAR y el del radar. En el caso del LiDAR, todos los retornos de un pulso vienen de la misma dirección, mientras que en el caso del radar, todos provienen del mismo **acimut**, pero en distintos **alcances**.

Las medidas radar pueden describirse mediante una ecuación básica que relaciona la potencia, la distancia, la reflectividad y las características de la antena:

$$P_r = \frac{P_t}{4\pi R_t^2} G \frac{\sigma}{4\pi R_r^2} A$$

Donde:

- P_r es la potencia del pulso recibida.
- P_t es la potencia del pulso emitida.
- R_t es la distancia entre la antena emisora y el objeto en el terreno.
- R_r es la distancia entre el objeto en el terreno y la antena emisora.
- G es la ganancia de la antena.
- A es el área de la antena.
- σ es la retro-dispersión del objeto en el terreno.

La señal que vuelve al sensor y es medida por este (P_r) depende de muchos parámetros. Para caracterizar un objeto a partir de la señal recibida, el parámetro que lo determina es el **coeficiente de retro-dispersión** (σ), el cual mide la capacidad reflectiva del objeto, la cual a su vez depende de su geometría y de sus propiedades dieléctricas. La medición normalizada de este parámetro en relación al terreno se denomina σ_0 y se define por unidad de área terreno. Se expresa típicamente en decibelios (dB) y varía en relación al ángulo de incidencia, la longitud de onda de la señal y la polarización.

Los sistemas radar **capturan las imágenes lateralmente**, tal y como se muestra en la Figura 3. La necesidad de observar en esta disposición geométrica se justifica mediante la Figura 4, en la que se ve cómo en el caso de una disposición vertical implicaría una ambigüedad a la hora de determinar qué objeto se está observando realmente.

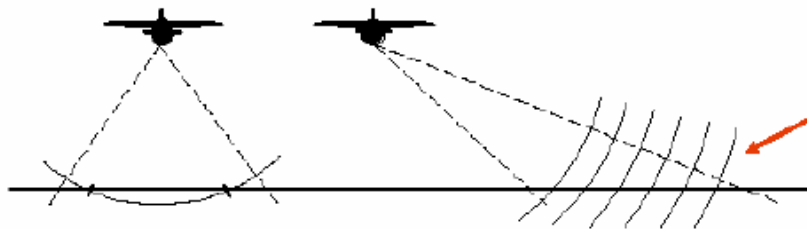


Figura 4 Justificación de la necesidad de observación lateral en sistemas de imagen radar

En un sistema radar de iluminación lateral se produce una imagen de alta resolución de la superficie bajo observación. Al moverse a lo largo de su trayectoria, el radar ilumina hacia un lado de la dirección de vuelo franjas continuas y paralelas entre sí de la superficie en estudio y acumula la información de las microondas que se reflejan. La señal que se graba a bordo, se procesa apropiadamente para formar una imagen digital. La distancia entre el radar y el objetivo en la superficie en la dirección perpendicular al vuelo se llama **alcance**, mientras que se conoce como **acimut** la distancia a lo largo de la trayectoria. Por lo tanto, en un sistema radar la resolución tiene dos dimensiones, una en la dirección del alcance y otra en la dirección del acimut. Mediante procesamiento digital de la señal, la imagen puede enfocarse y obtener así una resolución mejor que la de un radar convencional.

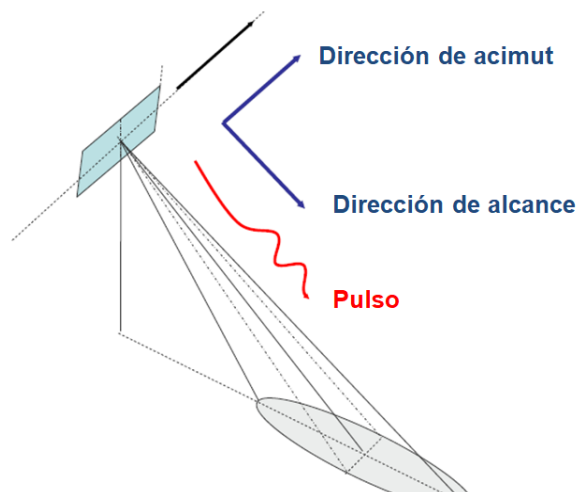


Figura 5 Geometría de adquisición en una imagen radar

La propia geometría de adquisición implica dos cosas:

- Que el píxel no es cuadrado, ya que existe diferente resolución en la dirección del acimut y en la del alcance.

- b) Van a existir importantes efectos causados por la topografía; es decir, existirán distorsiones geométricas en la imagen.

Ocurre que en sistemas radar de apertura real, la apertura del radar θ viene determinada por la siguiente expresión:

$$\theta = \frac{\lambda}{L}$$

Donde L es la longitud de la antena y λ la longitud de onda en la que opera el radar. Esta expresión puede transformarse en resolución en acimut resultando:

$$R_A = \frac{\lambda R}{L}$$

Siendo R la distancia de la antena al objeto a observar. Tomando ejemplos numéricos: un radar de 10 metros de longitud de antena, operando en banda C (longitud de onda 5 centímetros) y observando objetos a 1000 kms de distancia, proporciona una resolución en acimut de 5 kilómetros. Estas características serían las comunes en sensores radar embarcados en satélites, y puesto que antenas de centenares de metros no son tecnológicamente viables, es necesario emplear otra técnica.

Los sistemas radar de apertura sintética o SAR son más sofisticados que los de apertura real. Se puede aumentar considerablemente la resolución en acimut simulando una antena de dimensiones mayores a la que realmente se emplea. Un *array* de antenas es equivalente a una antena que se mueve a lo largo de una línea si las señales se miden de manera coherente (amplitud y fase como una función del tiempo) y se añaden las unas a las otras, asumiendo que el objeto está estático durante el momento de la captura.

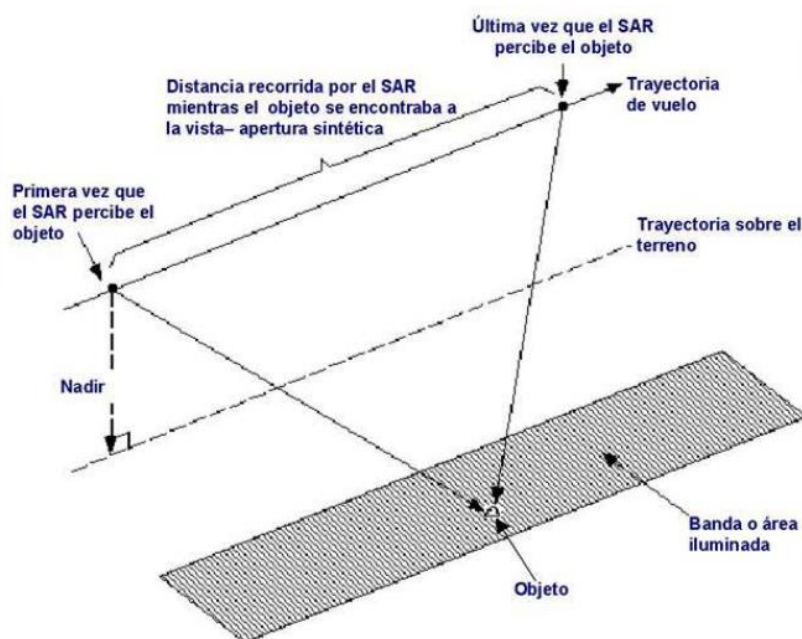


Figura 6 Fundamentos de los sensores radar de apertura sintética o SAR

Mediante procesamiento digital de la señal, la imagen puede enfocarse y obtener una resolución mejor que la de un radar convencional.

1.2 Efectos geométricos

Por la propia geometría de la adquisición se van a producir una serie de efectos geométricos que se van a traducir en un desplazamiento por el relieve, los cuales se muestran en la Figura 7.

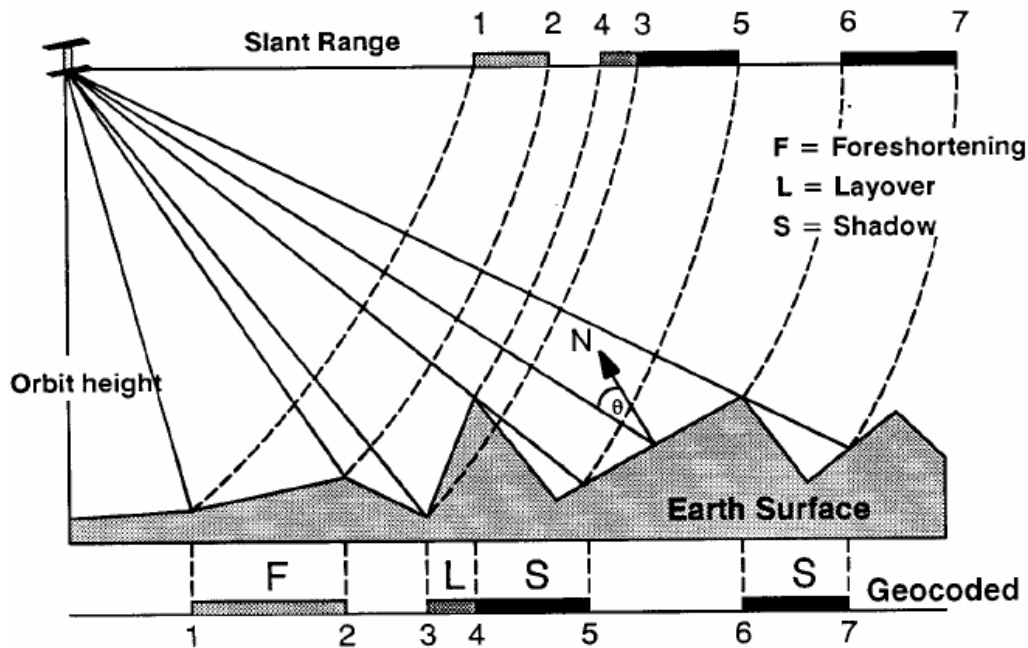


Figura 7 Efectos geométricos en una imagen SAR

Los efectos geométricos que se producen en una imagen radar y el relieve son los siguientes:

- Escorzo (*foreshortening*):** Consiste en la apariencia de compresión de las partes de la escena que están inclinadas hacia el sensor. En el caso de pendientes orientadas de manera opuesta al sensor estas superficies se alargan. Implica que la pendiente afectada en una imagen tenga una apariencia más brillante.
- Inversión por relieve (*layover*):** Ocurre cuando la energía reflejada en la parte superior de un objeto se recibe antes que la que proviene de la parte inferior. En este caso, al procesar la imagen, la parte superior del objeto se verá desplazada y puesta encima de su base.
- Sombras (*shadow*):** Son zonas no iluminadas por el sensor en las que por lo tanto no existen valores registrados.

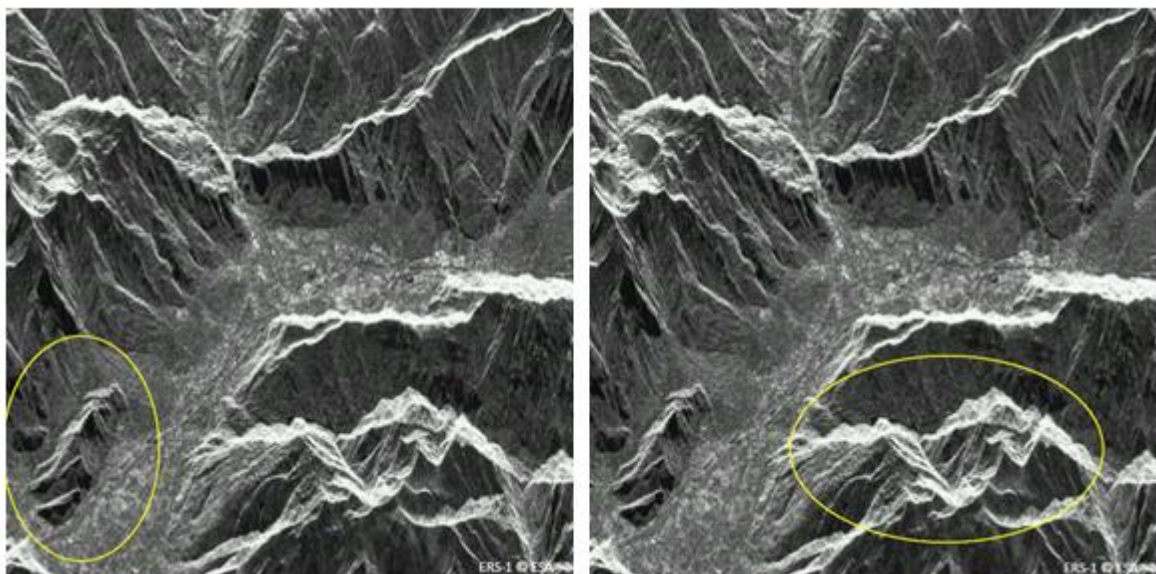


Figura 8 Ejemplos de escorzo (izquierda) y de inversión por relieve (derecha) en una imagen SAR. La toma de la imagen está realizada desde arriba hacia abajo. Fuente: ESA

1.3 Órbitas y direcciones de observación

Relacionado con el punto anterior está el hecho de que un satélite SAR que orbita alrededor de la Tierra observará la misma zona según recorre la órbita en sentido ascendente o descendente con respecto al planeta. Esto es así porque el sensor captura datos con independencia de que la superficie esté o no iluminada por el Sol. De esta forma, tendremos diferentes direcciones de observación sobre la misma zona, pudiendo usar esta información para obtener una mejor caracterización de la superficie.



Figura 9 Ejemplo de diferente huella del satélite Sentinel 1A a su paso por Madrid (ascendente/descendente)

1.4 Dispersión por superficie y por volumen. Coeficiente de retro-dispersión.

Mientras que en teledetección óptica las longitudes de onda son tan cortas que prácticamente toda la energía recibida por la superficie terrestre se refleja, en el caso de teledetección radar las longitudes de onda empleadas son lo suficientemente grandes como para poder penetrar cierto tipo de superficies, de forma que la dispersión será el resultado de la combinación de la dispersión producida por la superficie, por el interior e incluso por capas de material más profundo.

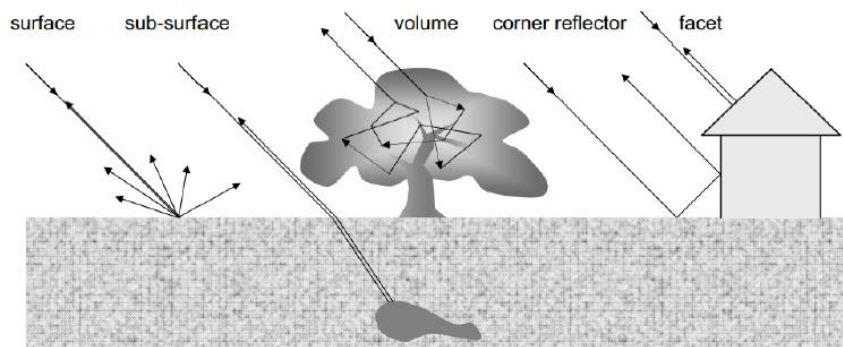


Figura 10 Mecanismos de dispersión

La dispersión a una determinada longitud de onda variará por una serie de condiciones, como el tamaño físico de los dispersores, las propiedades eléctricas de estos y su contenido en humedad. La propia longitud de onda de los pulsos SAR y la polarización de estos (de este asunto trataremos más adelante), también afectarán a la retro-dispersión de la señal.

Se producen fenómenos de **dispersión por superficie** cuando la radiación incide sobre una superficie determinada. Este fenómeno depende de la rugosidad o textura de dicha superficie y de su constante dieléctrica, resultando:

- A mayor rugosidad en superficie mayor será la retro-dispersión y más brillante se observará en la imagen radar. Las superficies lisas reflejan poca o ninguna de la energía emitida de vuelta al sensor radar, y por eso saldrán oscuras en la imagen. La vegetación tiene una rugosidad moderada comparada con la escala de las longitudes de onda radar y por eso aparecerán representadas en grises o grises claros en una imagen radar.

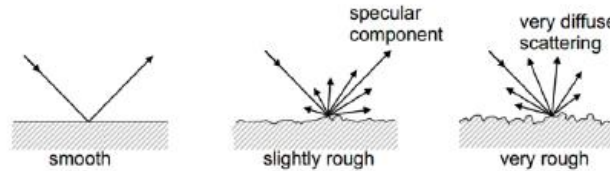


Figura 11 Tipos de reflexión de un pulso radar con una superficie

- A mayor **constante dieléctrica** de una superficie o material, mayor será la retro-dispersión y por lo tanto más brillante se observará un pixel en la imagen radar. Los objetos metálicos y el agua tienen una constante dieléctrica alta (80) mientras que el resto de materiales tienen una más baja. En condiciones secas la constante también es baja (3-8), lo que implica que la humedad en suelos o en cubiertas vegetales puede producir un aumento significativo de reflectividad de la señal radar (25-30). Por lo tanto, este tipo de teledetección puede usarse para obtener el contenido en humedad de los suelos.

Además se producirán fenómenos de **dispersión por volumen** principalmente en cubiertas vegetales.

Estas propiedades definirán el valor del coeficiente de retro-dispersión (σ) ya visto en apartados anteriores. Valores típicos de este coeficiente en diferentes superficies se muestran en la siguiente tabla.

Valores de retro-dispersión	Superficies típicas
Muy alto (más de -5 dB)	<ul style="list-style-type: none"> • Objetos antropogénicos (ambientes urbanos). • Pendientes orientadas hacia el sensor.
Alto (de -10 dB a 0 dB)	<ul style="list-style-type: none"> • Superficies muy rugosas.
Moderado (de -20 a -10 dB)	<ul style="list-style-type: none"> • Superficies rugosas. • Vegetación densa (bosques). • Niveles medios de vegetación.
Bajo (menos de -20 dB)	<ul style="list-style-type: none"> • Cultivos. • Superficies moderadamente rugosas. • Superficies lisas. • Aguas en calma. • Carreteras. • Suelos muy secos (arenas).

Tabla 3 Valores típicos del coeficiente de retro-dispersión

1.5 Ángulo de incidencia

El ángulo de incidencia en teledetección radar se define como el ángulo entre la dirección de iluminación del radar y la vertical de la superficie del terreno. Este ángulo irá cambiando según la altura del sensor sobre el horizonte del lugar. Por ello, la geometría de la imagen variará de punto a punto en la dirección del alcance. El ángulo de incidencia local tomará determinación los siguientes dos factores:

- Toma en cuenta la inclinación local de la superficie.
- Infiere en la intensidad de la imagen en cada pixel.

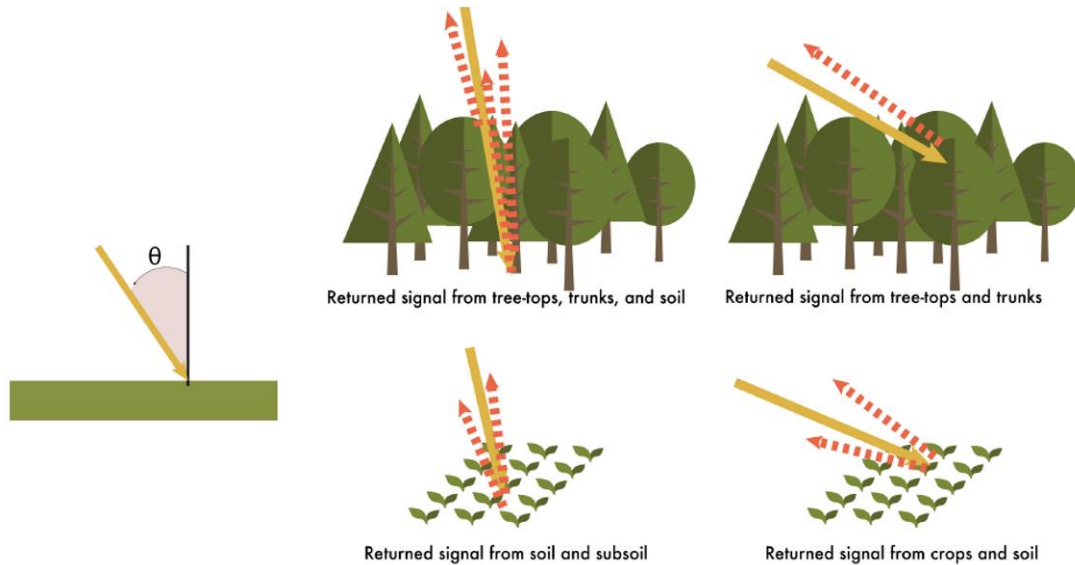


Figura 12 Efectos del ángulo de incidencia sobre las cubiertas iluminadas por un pulso SAR

El retorno de la dispersión superficial:

- Será fuerte con un ángulo de incidencia bajo.
- Se reduce con el incremento del ángulo de incidencia.
- Cuanto más áspera la superficie, más lenta será la reducción.

En cuanto a la dispersión por volumen (superficie áspera o rugosa) será más uniforme para cualquier ángulo de incidencia.

Por lo tanto, la retrodispersión del radar va a depender siempre de este factor. En función de las diferentes aplicaciones se podrá elegir la mejor configuración del radar.

La Figura 13 muestra lo comentado en los anteriores párrafos.

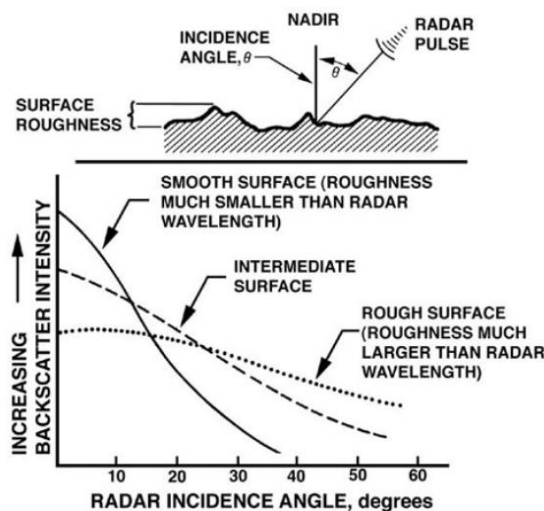


Figura 13 Efectos del ángulo de incidencia en función de la rugosidad del terreno

1.6 Speckle

No debemos olvidar que en la superficie representada por un píxel en la imagen existe una multitud de dispersores y que el píxel obtenido será la suma de las interacciones que la señal tenga con los diferentes objetos y superficies.

La interferencia completamente aleatoria positiva y negativa de estas contribuciones de los dispersores individuales van a causar que varíe el brillo en la imagen incluso para superficies con constante dieléctrica uniforme y además, provocará una apariencia granular incluso para superficies homogéneas.

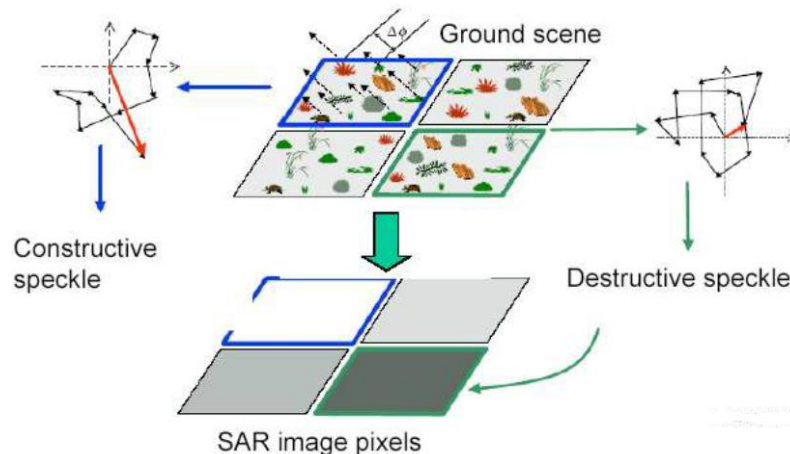


Figura 14 Fundamentos del speckle

El resultado de este fenómeno es una imagen con el denominado efecto de “sal y pimienta”, con una textura de imagen que se asemeja precisamente a este fenómeno. Es un fenómeno que ocurre únicamente con sensores coherentes como el SAR, en los que se producen interferencias de la señal en dimensiones inferiores a la longitud de onda.

Es por esta razón que en segmentación y clasificación de imágenes SAR se incluyan criterios de textura además de la intensidad de las señales.

Para reducir los efectos de *speckle* en una imagen se usan diferentes criterios:

- **Multi-looking:** divide la señal en frecuencias mínimamente solapadas, se procesan estas frecuencias a una resolución imagen reducida y se añaden finalmente para obtener una imagen final.
- **Filtros espaciales:** detecta la resolución total de la imagen, efectúa medias locales sobre los píxeles y finalmente realiza un remuestreo para crear resoluciones más pequeñas pero con el efecto *speckle* reducido.

1.7 Polarización

Independientemente de la longitud de onda, las señales radar pueden transmitirse como campos electromagnéticos vectoriales horizontales (H) o verticales (V), y recibirlos de vuelta como señales horizontales (H), verticales (V) o ambas. Por lo tanto, existen las siguientes posibilidades en la emisión-recepción de la radiación polarizada:

- **HH:** transmitida horizontalmente y recibida horizontalmente.
- **HV:** transmitida horizontalmente y recibida verticalmente.
- **VH:** transmitida verticalmente y recibida horizontalmente.
- **VV:** transmitida verticalmente y recibida verticalmente.

El principio físico básico responsable de la polarización idéntica en la onda de retorno (HH o VV) es la presencia de una superficie de reflejo prácticamente especular. Por ejemplo, el agua en calma (sin olas), aparecen oscuras. Por el contrario, la polarización cruzada (HV o VH) en el retorno es habitualmente más débil y se asocia frecuentemente a diferentes reflexiones debido a, por ejemplo, la rugosidad del terreno.

La polarización múltiple ayuda a identificar las características físicas de la superficie reflectora. Por ejemplo:

- Alineación de estructuras con respecto del radar (HH y VV).
- Carácter aleatorio de la reflexión difusa (en vegetación con HV).
- Estructuras angulares (mediante el uso conjunto de HH, VV y la fase de la señal).
- Rugosidad que induce reflexión (en océanos con VV).

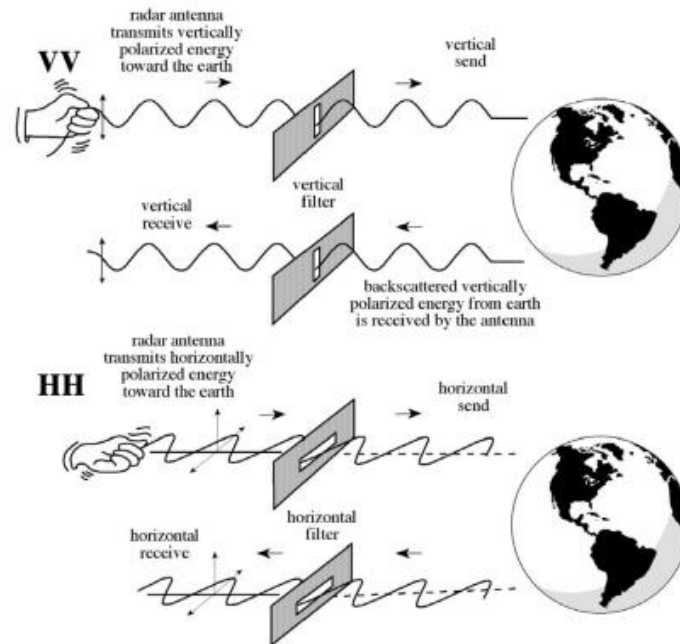


Figura 15 Fundamento de polarización de la antena

1.8 Penetración en función de la longitud de onda

Dependiendo de la frecuencia y de la polarización de la señal, las ondas pueden penetrar en la vegetación y en los suelos en condiciones secas y hasta ciertos límites (por ejemplo en nieve seca o arena). Normalmente, cuanto mayor es la longitud de onda la penetración del pulso es mayor en la superficie. Con respecto a la polarización, las polarizaciones cruzadas (VH/HV) tienen una penetración menor o más débil que las polarizadas en la misma dirección (HH/VV).

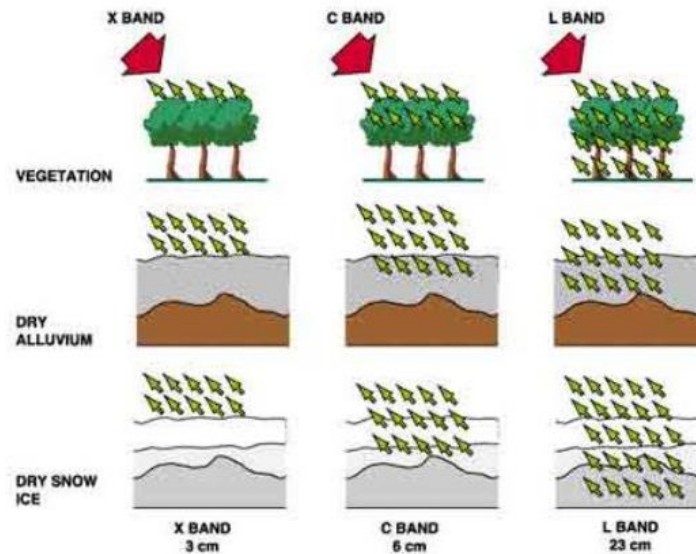


Figura 16 Penetración de diferentes longitudes onda radar en cubiertas

1.9 La imagen SAR

La medida básica en un sistema SAR es una medida de amplitud y otra de fase. Esto se conoce como una **imagen compleja**.

Los principales tipos de imágenes en un sistema SAR son dos:

- La amplitud A.
- El cuadrado de la intensidad, que recibe el nombre de intensidad.

1.9.1 La fase en imágenes SAR

La diferencia de fase entre dispersores de la onda incidente que viaja desde el radar hasta el dispersor y vuelve cambia en función de:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta r}{\lambda}$$

Donde Δr es la diferencia en la distancia de viaje del pulso. Dado que el pixel de una imagen SAR contiene un número muy grande de dispersores, la fase de cada uno de los píxeles se distribuye aparentemente de manera aleatoria.

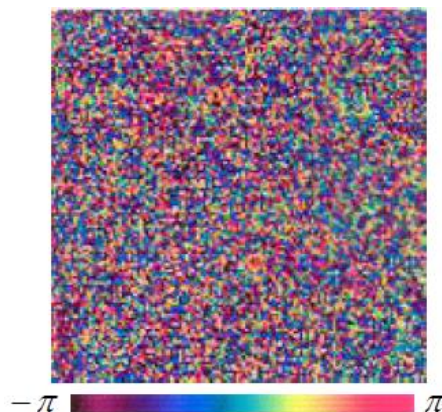


Figura 17 Ejemplo de imagen de una banda de fase de una imagen SAR

Es importante destacar que la fase de una única imagen SAR no es útil. Si la escena se observa en dos imágenes diferentes, en las cuales los dispersores permanecen inmóviles en el terreno, la diferencia de fase entre píxeles de las dos imágenes sí puede ser empleada mediante una de las siguientes técnicas:

- a) **Polarimetría:** el radar mide al mismo tiempo HH, VV, HV y VH y su diferencia de fase.
- b) **Interferometría:** dos radares observan el mismo terreno con un pequeño desplazamiento en el ángulo de observación, o bien el mismo radar observa la misma zona en fechas diferentes desde una órbita ligeramente desplazada.

Estas dos técnicas son bastante avanzadas en cuanto a conocimientos y técnicas, y por lo tanto no están cubiertas en el contenido de este curso.