

Sensores de microondas en teledetección – I: Aspectos geométricos

Apellidos, nombre	Ruiz Fernández, Luis Ángel (laruiz@cgf.upv.es)
Departamento	Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría
Centro	ETSI. Geodésica, Cartográfica y Topográfica



1 Introducción

La región de microondas del espectro electromagnético cubre un intervalo de longitudes de onda desde aproximadamente 1 mm hasta 1 m. Esta región queda dentro de una gran ventana atmosférica, por lo que cobra especial interés desde el punto de vista de la observación terrestre. Se pueden distinguir dos tipos de sensores, pasivos o activos, dependiendo de que midan la radiación natural o la que ha sido emitida artificialmente.

Tras una breve introducción de los sistemas de microondas pasivos, en este tema se describen los aspectos geométricos de las imágenes obtenidas con sistemas activos: el concepto de radar de observación lateral y su terminología, las resoluciones en la dirección del pulso y del acimut, y por último las distorsiones geométricas propias de estas imágenes.

2 Objetivos

Una vez que el estudiante lea este documento, será capaz de:

- Entender el concepto, funcionamiento y terminología básica de un sistema de radar de observación lateral (SLR).
- Identificar los dos tipos de resolución de las imágenes obtenidas mediante sistemas SLR, según las direcciones del pulso y del acimut, y los factores de los que dependen.
- Interpretar las principales características geométricas propias de las imágenes obtenidas mediante sensores radar, debidas principalmente a distorsiones debidas a la escala y al relieve.

3 Sensores de microondas pasivos

Los sensores pasivos actúan, generalmente, en longitudes de onda comprendidas entre 1 mm y 30 cm. La radiación emitida por la superficie terrestre, cuya emisión máxima se sitúa en unos $9,6 \mu\text{m}$ y disminuye al aumentar la longitud de onda (figura 1), es la principal fuente natural de energía en este intervalo espectral. Otras fuentes de procedencia de esta energía son: la energía solar reflejada, la reflectancia atmosférica y la emisión atmosférica, si bien la intensidad de estas tres es relativamente débil.

En los sensores de microondas, la radiación se captura mediante una antena, a diferencia de los sensores ópticos que utilizan lentes y espejos. Debido a la débil intensidad de la señal, los sensores de microondas pasivos presentan una banda espectral ancha y utilizan antenas con una gran anchura de haz, lo que conlleva a una menor resolución espacial. Operan generalmente en modo puntual y se conocen como radiómetros de microondas. En ocasiones operan describiendo un barrido transversal a la dirección de vuelo, generando de esta forma imágenes (radiómetros de barrido).

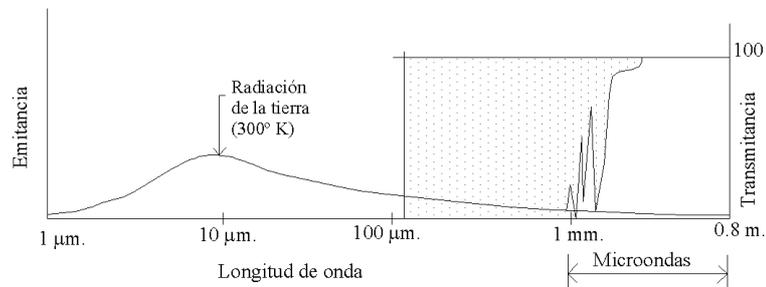


Figura 1.- Energía emitida por la Tierra y ventanas atmosféricas en la región de microondas.

Los sensores de microondas pasivos multibanda, sensibles a varias longitudes de onda en las zonas de absorción atmosférica, son típicos a bordo de los satélites meteorológicos para la estimación de concentraciones de vapor de agua, oxígeno, temperatura atmosférica, etc., aprovechando la dispersión de la radiación por parte de los gases presentes en la atmósfera, la cual mide posteriormente el sensor. La naturaleza de la respuesta de la radiación del microondas depende de factores como la temperatura terrestre, la emisividad y las propiedades eléctricas (constante dieléctrica) de la superficie. La emisividad depende a su vez de la composición del terreno y de la rugosidad de la superficie. La constante dieléctrica es una medida de la forma en que la radiación electromagnética interacciona con los materiales de la superficie, siendo un factor de especial influencia en la respuesta espectral recogida por estos sensores.

4 Sensores de microondas activos (Radar)

RADAR es un acrónimo de *Radio Detection And Ranging*. Su modo de operación se basa en la generación artificial de microondas en una determinada dirección, las cuales interaccionan con los objetos y se dispersan. La energía retrodispersada (*backscattered*) recibida por el sensor se amplifica y procesa para obtener la posición, las propiedades eléctricas y las propiedades superficiales de los objetos. Se trata, por tanto, de sensores activos y que utilizan radiación que no interfiere con la atmósfera, sino que se transmite a través de ella. Estas dos características permiten adquirir información en cualquier momento del día o de la noche e independientemente de las condiciones atmosféricas, con lo que su potencial, en este sentido, contrasta con las limitaciones de los sensores del visible e infrarrojo.

Un sistema de radar está compuesto normalmente por un dispositivo generador de pulsos u ondas, el *emisor*, conectado a una antena que radia las ondas en una determinada dirección de observación. La señal es dispersada por los objetos y, parte de ella, es devuelta y recogida finalmente por la antena. Se distinguen dos tipos de sistemas: *monoestáticos* y *biestáticos*. Los primeros emiten y reciben las ondas desde la misma posición aproximada, mientras que los sistemas biestáticos lo hacen desde posiciones diferentes, por lo que requieren dos antenas. En un sistema monoestático, la antena tiene una doble configuración que le permite transmitir y

recibir de forma alternativa mediante un *duplexor*. Una *unidad de control* distribuye las señales de forma sincronizada hasta otros componentes del sistema.

4.1 SLAR / SLR: Concepto y terminología

El Radar Aerotransportado de Observación Lateral (SLAR, o *Side-Looking Airborne Radar*) es el sistema más común para la adquisición de imágenes. El sistema radar se monta en el avión y consta de una antena semicilíndrica que se fija al fuselaje paralelamente al eje longitudinal del avión, orientada de forma perpendicular a la línea de vuelo y oblicua a la superficie terrestre hacia un lado. El término SLAR se emplea incluso cuando el sistema se transporta a bordo de un satélite, por lo que en adelante nos referiremos de forma genérica a ambos tipos de vehículos (SLR).

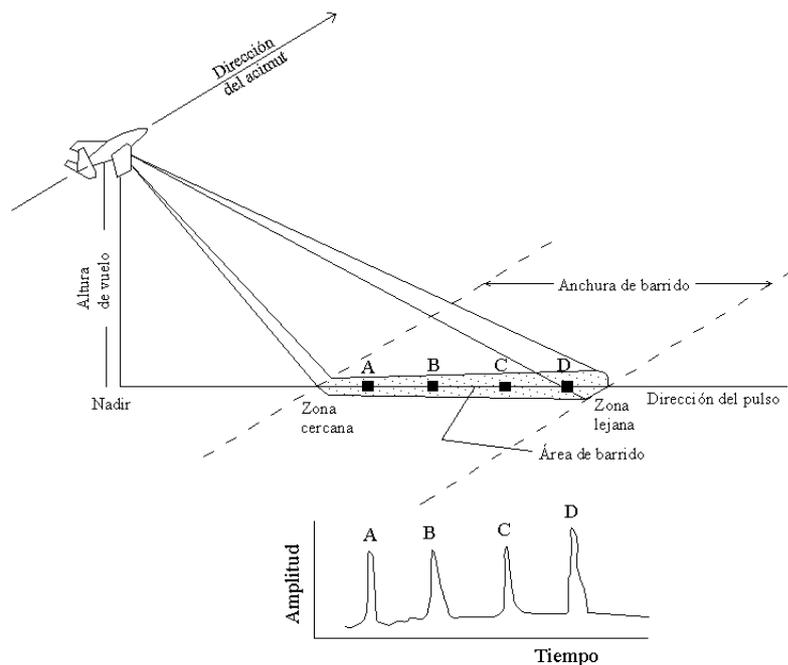


Figura 2.- Principio de funcionamiento de un sistema SLAR

Su funcionamiento se basa en la transmisión de un pulso de corta duración de energía electromagnética monocromática y coherente que llega hasta una estrecha franja del terreno perpendicular a la dirección de vuelo (figura 2). El receptor registra el eco de la señal (*back-scatter*) según va llegando, relacionándola con las distancias en el terreno. De esta forma, las señales reflejadas por los objetos más próximos al nadir se reciben antes, mientras que las de los objetos más lejanos en la dirección del pulso se van recibiendo sucesivamente en el tiempo, de forma que el tiempo de llegada se convierte en medidas de posición. Una vez recibido el último eco de la señal se emite un nuevo pulso, el cual cubre una nueva franja contigua y paralela a la anterior, perpendicular a la trayectoria de vuelo (dirección del acimut). De esta forma se va barriendo toda la superficie y se va generando la imagen, en función de la señal combinada de tiempo y amplitud recogida por el receptor del radar.



Alrededor de los sistemas radar se ha ido desarrollando una **terminología** específica, cuyos principales términos definiremos a continuación:

- Dirección del pulso (*range direction*): Es la dirección horizontal de observación de la antena, aquella en la que se emite el pulso de energía. Generalmente es perpendicular a la dirección de vuelo.
- Distancia en la dirección del pulso (*slant range*): Línea imaginaria que define la distancia lineal entre la antena y un objeto en el terreno.
- Distancia en el terreno (*ground range*): Se refiere a la distancia en el terreno según el plano definido por la dirección del pulso.
- Zona cercana (*near range*): Es la menor de las distancias en la dirección del pulso, o también la parte del terreno/imagen más próxima al nadir.
- Zona lejana (*far range*): Es la mayor de las distancias en la dirección del pulso, o también la parte del terreno/imagen más lejana al nadir.
- Dirección del acimut (*azimuth direction*): Es la dirección horizontal de vuelo. En general, es perpendicular a la dirección del pulso.
- Anchura de barrido (*swath width*): La anchura total de barrido sobre el terreno desde la zona cercana (*near range*) hasta la lejana (*far range*). Se mantiene constante a lo largo de la trayectoria del vehículo, siendo la distancia equivalente al ancho de la imagen.
- Longitud de barrido (*swath length*): Define la longitud equivalente de una imagen en el terreno.
- Resolución según la dirección del pulso (*range resolution*): Es la resolución lineal en la dirección del pulso. Expresa la capacidad del sistema para distinguir dos objetos en el terreno según esta dirección.
- Resolución según el acimut (*azimuth resolution*): Es la resolución lineal según la dirección del acimut. Viene dada por la anchura del haz definido por la emisión del pulso (*beam width*).

Existen varias medidas angulares básicas para definir la geometría de la imagen radar:

- Ángulo de depresión (*depression angle*): Es el ángulo formado entre la dirección del pulso (*range direction*) y la línea que une la antena y el objeto (*slant range*), medido en la posición de la antena según el plano vertical. Es variable, siendo menor en la parte lejana (*far range*) y mayor en la parte cercana (*near range*) de la imagen.
- Ángulo incidente (*incident angle*): Es el formado por el rayo incidente y la vertical en un punto del terreno, entendiendo como vertical la línea recta que une el centro de la Tierra con dicho punto.
- Ángulo incidente local (*local incident angle*): Es el ángulo que forma el rayo incidente con la normal a la superficie del terreno en un punto.
- Ángulo de observación (*look angle*): Ángulo entre el rayo visual y la vertical medida en la antena. En los sensores aerotransportados, los ángulos incidente y de observación coinciden, pero en los transportados por satélite pueden diferir sensiblemente debido al efecto de curvatura terrestre.

La figura 3 muestra gráficamente algunos de los parámetros descritos.

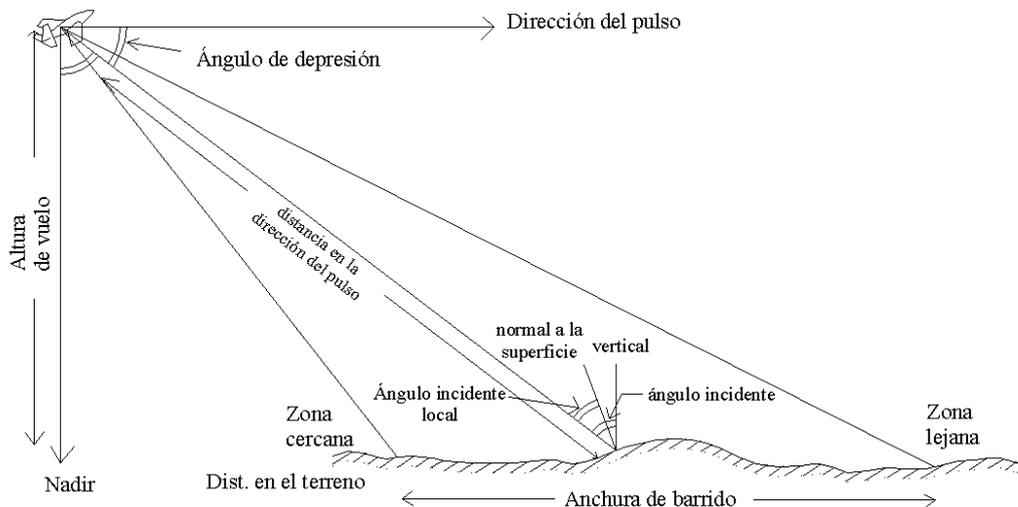


Figura 3.- Geometría y terminología de un sistema SLAR.

4.2 Resolución en la dirección del pulso

La medida del intervalo de tiempo que transcurre entre la emisión de una señal de energía y su recepción se utiliza para conocer la posición de los objetos según la dirección del pulso (*range direction*). Si R_s es la distancia desde la antena hasta un objeto, y t el intervalo de tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de un pulso

$$R_s = \frac{c \cdot t}{2} \quad (1)$$

donde c es la velocidad de la luz. La distancia sobre el terreno (*ground range distance*), R , será

$$R = \frac{R_s}{\cos \theta_d} = \frac{c \cdot t}{2 \cos \theta_d} \quad (2)$$

donde θ_d es el ángulo de depresión.

La resolución según la dirección del pulso (*range resolution*), tal y como se ha definido anteriormente, se refiere a la capacidad de un sistema radar para diferenciar dos objetos según esta dirección. Está relacionada con la duración del pulso transmitido, esto es, la longitud física de la señal de microondas. Dos objetos podrán identificarse independientemente si el pulso reflejado proveniente del



primero termina de recibirse antes de que empiece a hacerlo el pulso proveniente del segundo objeto. Así pues, cuanto menor sea la duración del pulso mejor será esta resolución.

Suponiendo que τ sea la duración del pulso, la resolución medida en el terreno, R_r , (*ground range resolution*) viene dada por la distancia en el terreno correspondiente a la duración del pulso

$$R_r = \frac{\tau \cdot c}{2 \cos \theta_d} \quad (3)$$

(Nótese que esta expresión es una aproximación aplicable a pequeñas distancias en el terreno)

Esta resolución es dependiente, por lo tanto, del ángulo de depresión, siendo mejor cuanto menor sea este ángulo (a menor ángulo, mayor es su coseno y menor es la distancia que el sensor puede diferenciar espacialmente). Esto implica que, objetos separados por una misma distancia, pueden ser resueltos espacialmente (aparecerán como dos objetos separados) en la parte lejana de la imagen (*far range*) pero no serlo (aparecerán como un solo objeto) en la parte cercana (*near range*).

La razón por la que no se utilizan pulsos de muy corta duración en el diseño de los sistemas radar se debe a que, al disminuir la duración del pulso, también se limita la cantidad de energía que llega a un objeto, llegando a un punto en el que la señal reflejada que llega al receptor es demasiado débil para ser registrada. La duración del pulso en los sistemas SLAR suele oscilar entre 0,05 μ s y 0,3 μ s, y la resolución en el terreno entre 8 m y 25 m.

4.3 Resolución en la dirección del acimut

En la dirección del acimut (definida por la línea de vuelo), la resolución viene determinada por el tipo de sistema empleado en la captación de la señal y en la generación posterior de la imagen. Pueden distinguirse dos tipos de sistemas: **radar de apertura real (RAR)** y **radar de apertura sintética (SAR)**.

- El **radar de apertura real** es más simple y permite una resolución menor en la dirección del acimut, definida por la anchura del haz de emisión del pulso proyectado sobre el terreno, según la expresión

$$R_a = \beta \cdot R_s \quad (4)$$

donde β es el ángulo definido por el haz (*beam width*) y R_s la distancia desde la antena al terreno, según la dirección del pulso. Evidentemente, la resolución en el acimut se ve mejorada cuando la anchura del haz es menor, es decir, en la parte cercana (*near range*) (figura 4).

La anchura del haz (*beam width*) puede expresarse en función de la longitud de onda del sistema (λ) y de la longitud física de la antena del radar (l)

$$\beta = \frac{\lambda}{l} \quad (5)$$

Por lo que la resolución del acimut en un sistema de radar de apertura real puede expresarse

$$R_a = \frac{\lambda \cdot R_s}{l} \quad (6)$$

Además de la distancia en la dirección del pulso (R_s), pueden modificarse otros dos parámetros para incrementar la resolución del sistema: disminuir la longitud de onda e incrementar la longitud de la antena. Ambas opciones presentan sus limitaciones. Las longitudes de onda operativas están por encima de 1 cm (aunque el rango del microondas comience en 1 mm), y la longitud de la antena está limitada por el tamaño del avión y por sus condiciones de estabilidad.

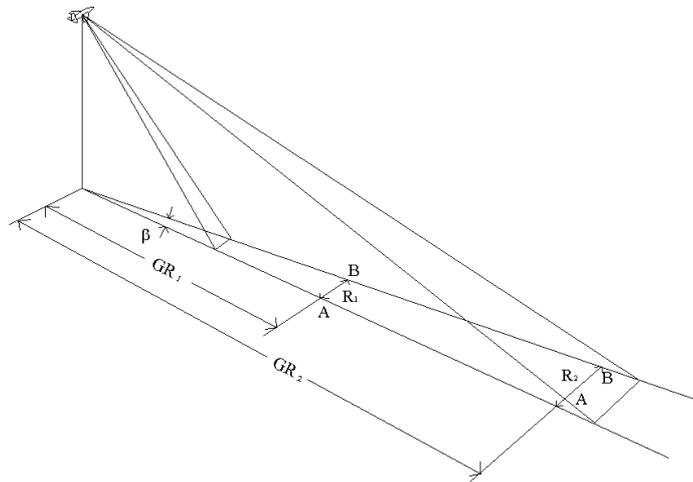


Figura 4.- Relación entre la resolución según el acimut, la anchura del haz y la distancia en el terreno (adaptado de Lillesand y Kiefer, 2000).

Los sistemas radar de apertura sintética (SAR) presentan mayor complejidad que los de apertura real, pero permiten solucionar algunas de las limitaciones inherentes a éstos, como la reducción de la resolución en el acimut en la parte lejana de la imagen. Además, la apertura progresiva del haz al alejarnos del nadir en la dirección del pulso implica que los objetos se observen un mayor número de veces (aparecen en un mayor número de barridos transversales).

El principio de un radar de apertura sintética se basa en el hecho de que los puntos de la escena quedan barridos por el radar durante un intervalo de tiempo a medida que el avión o el satélite se desplaza según su trayectoria (figura 5a). El sistema recoge la energía reflejada durante un intervalo de tiempo, reconstruyendo la señal reflejada total mediante la integración de todas las señales recibidas durante ese intervalo. De esta forma, se utiliza el desplazamiento del sensor a lo largo de su trayectoria para transformar una antena simple, de pequeña longitud, en una serie efectiva de antenas que pueden ser integradas matemáticamente.

Los puntos del terreno situados en la parte próxima (*near range*) quedan registrados un número menor de veces que los puntos situados en la parte lejana

(*far range*), consiguiéndose así una resolución en el acimut prácticamente constante, independientemente de su posición. De esta forma pueden sintetizarse antenas efectivas equivalentes a varios kilómetros.

Se plantea el problema de separar los diferentes componentes de reflectancia según su posición, de forma que el sistema discrimine las distintas reflectancias provenientes simultáneamente de los puntos situados en diferentes posiciones a lo largo de la dirección del acimut. Esto se consigue en la práctica gracias al efecto *Doppler*, que consiste en la variación de la frecuencia de una onda en función de las posiciones relativas del transmisor y del reflector. Dentro del ámbito del haz generado por la antena, la señal de retorno de un objeto situado por delante del avión/satélite presentará una frecuencia mayor. Inversamente, el retorno de la señal de un objeto situado por detrás del avión/satélite tendrá una frecuencia menor. Procesando las señales de retorno en función de este desplazamiento de las frecuencias (efecto *Doppler*) puede conseguirse un ancho de haz (*beam width*) muy corto (figura 5b).

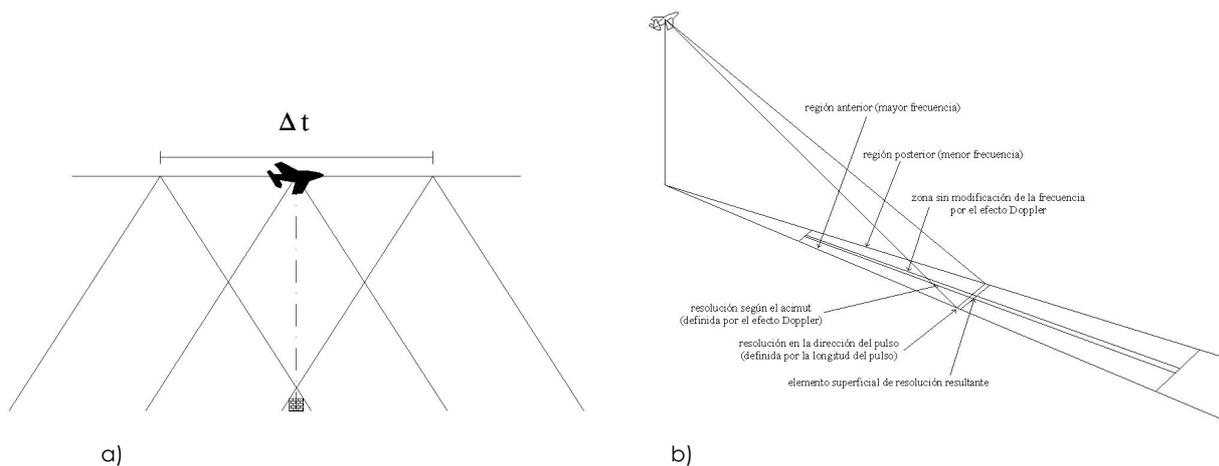


Figura 5.- a) Formación de una antena de apertura sintética. b) Resoluciones de un sistema SLR (adaptado de Lillesand y Kiefer, 2000).

La ecuación que define la máxima resolución en el acimut (R_a) que puede conseguirse con un sistema SAR es

$$R_a = \frac{l}{2} \quad (7)$$

donde l representa de nuevo la longitud de la antena. Comparando esta expresión con la de un sistema RAR apreciamos algunas simplificaciones notables. En primer lugar, la resolución ya no depende de la posición del punto (R_s) ni de la altitud del sensor. Sin embargo, la naturaleza de la señal SAR resulta en un incremento del ruido (*speckle*), el cual puede reducirse a expensas de la resolución en el acimut. Cada imagen se divide en "sub-haces", y cada uno de ellos proporciona una "vista" independiente. Las vistas se promedian produciendo una imagen que presenta menos ruido y menos resolución en el acimut



$$R_a = (N) \frac{l}{2} \quad (8)$$

Otra característica de esta ecuación es que, en teoría, cuanto menor sea la antena mejor es la resolución, al contrario de lo que ocurría en los sistemas RAR. Además, la resolución resulta independiente de la longitud de onda de la señal.

4.4 Características geométricas de las imágenes

Debido a que la posición relativa de los objetos en los sistemas SLR se calcula midiendo distancias en vez de ángulos, la geometría de las imágenes obtenidas presenta diferencias significativas con respecto a la de las fotografías aéreas o las imágenes ópticas. Los cuatro tipos principales de distorsiones geométricas son:

- Distorsión de la escala en la dirección del pulso
- Desplazamiento debido al relieve
- Sombreado
- Efecto causado por la dirección de observación

Distorsión de la escala en la dirección del pulso

Dependiendo del diseño del sistema de formación de la imagen, el barrido puede realizarse de forma proporcional a la dirección del pulso o a la del terreno. En el primer caso, tienen lugar ciertas distorsiones inherentes a la conversión de las distancias a la dirección del terreno, antes siquiera de considerar distorsiones debidas al relieve. La distancia entre dos puntos en las imágenes representadas según la dirección del pulso (*slant range*) es directamente proporcional al intervalo de tiempo transcurrido entre el retorno de las señales de ambos objetos. Dicho intervalo es proporcional a la distancia entre el sensor y el objeto, la cual disminuye a medida que éste se aproxima al nadir.

La distancia en la dirección del terreno, G_r , puede estimarse de forma aproximada, suponiendo un terreno plano, conociendo la distancia en la dirección del pulso, S_r , y la altura de vuelo del avión o del satélite, H , mediante la expresión

$$G_r = \sqrt{S_r^2 - H^2} \quad (9)$$

Desplazamiento debido al relieve

Si el terreno no es llano, los objetos sufren en la imagen fenómenos de desplazamiento conocidos como **acortamiento frontal** (*foreshortening*) e **inversión geométrica** (*layover*).

El **acortamiento frontal** consiste en que los puntos elevados del terreno aparecen desplazados hacia el sensor, debido a que sus distancias en la dirección del pulso son menores que las de los puntos bajos del terreno (figura 6). En zonas de montaña, esto se manifiesta en un acortamiento de las laderas enfrentadas hacia el sensor y, como contrapartida, las laderas opuestas aparecen más extensas.

La **inversión geométrica** se da en aquellas situaciones en las que la distancia en la dirección del pulso hasta la cima de una montaña, por ejemplo, es menor que la distancia hasta su base. En estos casos, la señal de la cima llega antes que la de su base, generándose una inversión en la posición relativa de ambos puntos en la imagen (figura 6). Esto ocurre cuando la suma del ángulo que define la pendiente del terreno y del ángulo de depresión es mayor que 90° .

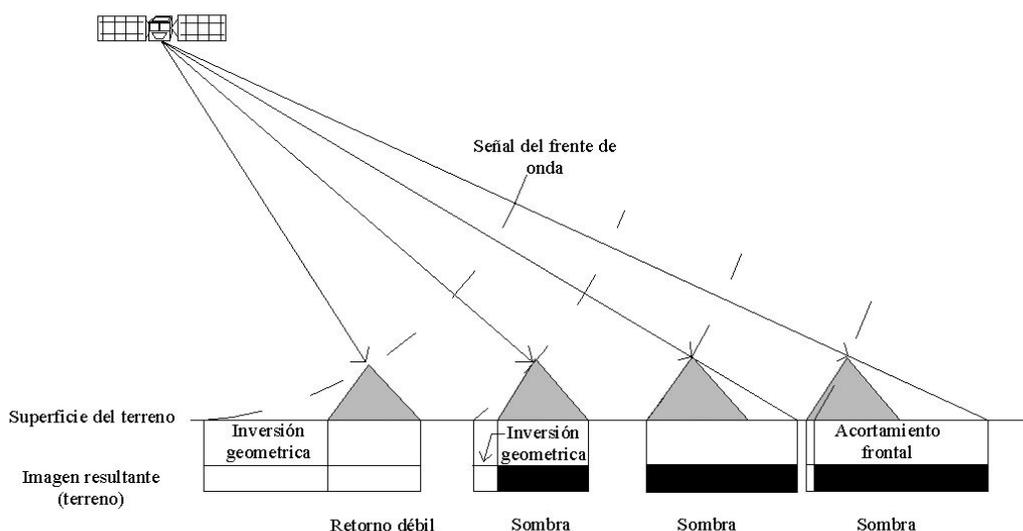


Figura 6.- Esquema de los fenómenos de acortamiento frontal (foreshortening), inversión geométrica (layover) y sombreado (shadowing). (adaptado de RDLP, Geo. Intl., 1998)

Sombreado

Por su propia definición, los sistemas SLR envían la señal de microondas de forma oblicua hacia un lado de la línea de vuelo o acimut de la plataforma o avión. Debido a ello, habrá zonas del terreno a las que no les llegue ninguna señal, esto es, quedarán ocultas, particularmente aquéllas situadas detrás de edificios, cordilleras, o cualquier obstáculo físico situado entre el sensor y el objeto. Como consecuencia de ello se generarán zonas sombreadas en las imágenes (figura 6).

Las zonas sombreadas en las imágenes radar dependen, por lo tanto, de las características de iluminación y del relieve. En concreto, a menor ángulo de depresión y a mayor altura de los obstáculos, como montañas o edificios, mayor será la superficie sombreada.

Efecto de la dirección de iluminación

Todas las características geométricas de las imágenes radar mencionadas hasta el momento (acortamiento frontal, inversión geométrica, sombreado, cambio de escala entre la dirección del pulso y del terreno) dependen, de una forma u otra, de la geometría de la iluminación, es decir, de factores como la altitud del sensor (de especial relevancia en el caso de sensores aerotransportados), el ángulo de



depresión, el ángulo de observación y el relieve de la zona. Variaciones de estos factores pueden ocasionar diferencias significativas en las imágenes, que deberán tenerse en cuenta a la hora de su interpretación.

5 Conclusiones

Las imágenes obtenidas mediante sistemas de radar de observación lateral, bien aerotransportados o a bordo de satélites, poseen unas particularidades geométricas derivadas del proceso de adquisición, así como dos resoluciones espaciales según las direcciones del acimut y del pulso. Los sistemas de radar de apertura sintética (SAR) optimizan la primera de ellas con respecto a los sistemas de apertura real (RAR), haciéndola independiente de la distancia de la antena al objeto y permitiendo su uso desde plataformas espaciales.

A la hora de interpretar estas imágenes es preciso considerar las distorsiones geométricas producidas debidas a variaciones en la escala según la dirección del pulso y, sobre todo, al relieve, como son el acortamiento frontal y, en su caso más extremo, la inversión geométrica.

6 Bibliografía

- Elachi C., 1987. Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing. John Wiley & Sons.
- ESA, 1996. ERS Spaceborne Radar Imagery (CD-ROM, ESA SP-1224).
- Fung A.K. and Ulaby F.T., 1983. Matter-Energy Interactions in the Microwave Region. Manual of Remote Sensing (2ª Ed.), Vol. 1, Colwell R.N. (editor, ASAE).
- Geomatics International, 1998. Radar Distance Learning Program (CD-ROM, RDLP ed. 1.1)
- Henderson F.M. and Lewis A.J., 1998. Manual of Remote Sensing (3ª Ed.) Vol 2: Principles and Applications of Imaging Radar. John Wiley & Sons, Am. Soc. Phot. and Rem. Sens. (ASAE).
- Lillesand T.M. and Kiefer R.W., 2000. Remote Sensing and Image Interpretation (4ª Ed.). John Wiley & Sons.
- Sabins F.F., 1987. Remote Sensing Principles and Interpretation (2ª Ed.). W.H. Freeman and Co.
- Ulaby F.T., Moore R.K. and Fung A.K., 1986. Microwave Remote Sensing: Active and Pasive, Vol. 3: From Theory to Applications. Addison-Wesley.