



DEPARTAMENTO  
DE COMPUTACION  
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - UBA

Universidad de Buenos Aires



## Simulación de Sistemas de Radar Orbitales y Aerotransportados

**Autor:** Pablo A. Perna (LU 40/98)

**Director:** Dr. Julio C. Jacobo-Berlles



## Resumen

Este trabajo propone dos simuladores de radar orbital y aerotransportados y analiza las salidas que estos programas devuelven para compararlas con situaciones reales de adquisición. El análisis parte desde una interacción multidisciplinaria entre la física, la ingeniería y la computabilidad del problema.

Se dividió este trabajo en dos partes, cada una de las cuales intenta alcanzar objetivos marcadamente distintos. La primer parte analiza una herramienta de simulación que propone facilitar el diseño y evaluación de radares de apertura sintética orbitales y aerotransportados, siguiendo la línea de trabajo de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales. Dentro de estas tareas se encuentra decidir a qué parámetro de ingeniería de un posible proyecto aerospacial de radar se debe dar mayor importancia, (i.e.: dimensiones u orientación correcta de antena, frecuencia de emisión de pulsos, etc.), donde una simulación por software de distintas configuraciones permite una rápida y económica manera de evaluarlo.

El otro objetivo que guió la investigación fue el de obtener una herramienta que permita comparar imágenes reales contra sintetizadas para un terreno particular de suelo marciano y poder descartar falsos positivos en la búsqueda de ciertas particularidades del terreno (i.e.: agua debajo de la superficie confundiendo con relieve irregular). Este último problema está orientado a facilitar la interpretación de radargramas obtenidos por el instrumento SHARAD de la sonda MRO en órbita alrededor de Marte.

El conjunto de los programas fue desarrollado en lenguaje Java haciendo énfasis en el diseño de objetos, con el objetivo de reutilizar y modularizar el funcionamiento, para una cómoda migración a otros sistemas de radar y plataformas de procesamiento.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>4</b>
<b>I Simulador CIRawSiS</b>	<b>7</b>
<b>2. Principios físicos del radar de apertura sintética</b>	<b>8</b>
2.1. Las microondas	8
2.1.1. Polarización	9
2.2. Apertura sintética	11
2.2.1. El sistema a simular: Radarsat-1	12
2.2.2. Geometría asociada a un sistema SAR	12
2.2.3. Datos Crudos	14
2.3. Control automático de ganancia	16
<b>3. Artefactos</b>	<b>17</b>
3.1. Speckle	17
3.2. Acortamiento de pendiente	18
3.3. Pseudo sombreado	19
3.4. Inversión del relieve	19
3.5. Sombreado	20
3.6. Diferencia de distancia entre rango cercano y lejano	20
3.7. Patrón de antena	20
3.8. Ángulo de observación	20
<b>4. Complejidad, diseño e implementación</b>	<b>22</b>
4.1. Diseño de clases	22
4.1.1. Reflector (scatterer)	24
4.1.2. Terreno	24
4.1.3. Chirp	25
4.1.4. Patrón de antena	25
4.1.5. Plataforma	26
4.1.6. Trayectoria	26
4.1.7. Adquisición	26
4.2. Ejecución	26
4.2.1. Procesador	27

<b>5. Resultados</b>	<b>29</b>
5.1. Respuesta impulsiva . . . . .	29
5.1.1. Acortamiento de pendiente . . . . .	30
5.1.2. Inversión de pendiente . . . . .	31
5.1.3. Vuelo inestable . . . . .	31
<b>II Simulador de Shallow Radar</b>	<b>35</b>
<b>6. Principios físicos del SHARAD</b>	<b>36</b>
6.1. Reflectividad . . . . .	38
<b>7. Complejidad, diseño e implementación</b>	<b>40</b>
7.1. Complejidad . . . . .	40
7.2. Implementación . . . . .	40
7.3. Diseño . . . . .	42
<b>8. Resultados</b>	<b>45</b>
8.1. Simulación de características del terreno . . . . .	45
8.1.1. Depresiones . . . . .	46
8.1.2. Elevaciones . . . . .	46
8.2. Ancho de la huella . . . . .	48
8.3. Densidad del DEM . . . . .	49
8.4. Modelos de reflectividad . . . . .	50
<b>9. Conclusiones</b>	<b>52</b>



# Capítulo 1

## Introducción

La superficie terrestre es observada desde el espacio en todas las longitudes de onda donde la transmisividad atmosférica es alta. Básicamente, existen dos ventanas atmosféricas: una en el visible e infrarrojo reflectivo ( 300 nm - 2000 nm) y otra en la microondas ( 15 GHz - 0.5 GHz). La ventana del visible es la que acapara, en una relación de 100 a 1, la mayor cantidad de sistemas de observación de la superficie terrestre. Esto se debe a muchas razones, pero cabe recalcar dos: limitaciones de la tecnología de microondas y limitaciones asociadas a la generación de imágenes en el rango de las microondas. En general, la resolución de un sistema de observación está acotada por el límite de difracción  $\frac{\lambda}{L}$ , donde L es la longitud característica de la pupila (o antena) y  $\lambda$  la longitud de onda. Este límite es muy pequeño para sistemas ópticos ( $\lambda \sim nm$ ), pero muy grande para los sistemas que operan en las microondas ( $\lambda \sim cm$ ), aun para antenas con dimensiones del orden de la decena de metros. Esto lleva a que la resolución espacial de los sistemas orbitales de apertura real es muy baja ( $\sim Km$ ). Por último, la energía reflejada/emitada por la tierra es relativamente baja en el rango de las microondas.

Todo esto hace que en la actualidad, el único sistema generador de imágenes de alta resolución en el rango de las microondas sean los radares de apertura sintética (SAR). Como se describe más adelante, el SAR es un radar muy complejo, que hace uso distintas técnicas de procesamiento de señales para sintetizar una imagen a partir de mediciones. En breve, se puede decir que un SAR es un radar que emite pulsos modulados en frecuencia y utiliza simultáneamente la información de retraso temporal y Doppler de los pulsos reflejados para sintetizar una imagen de reflectividades del terreno. La generación de la imagen no es un paso trivial y es realizada por el “procesador SAR”, el cual integra los datos medidos por la antena (datos crudos) e información auxiliar (posición de la plataforma, actitud, etc.).

Como en todo sistema de ingeniería, existen trade-offs entre muchas de las características de ingeniería de un SAR. Por ejemplo, para el caso orbital es necesario un sistema que genere mucha potencia, de manera de que la SNR sea alta luego de un viaje de ida y vuelta del orden de 2000 Km. Esto lleva a antenas grandes, que están limitadas en peso y volumen por el tamaño y la potencia de los lanzadores. Más aun, como veremos más adelante, la resolución espacial de un SAR en azimut es inversamente proporcional al tamaño de la antena en azimut, lo cual es un requerimiento que compite con el requerimiento

de potencia. Este tipo de trade-offs entre parámetros de ingeniería del sistema están presentes en diferentes áreas del desarrollo de un SAR, y su solución no siempre es trivial. Esto es así porque la solución óptima en términos de calidad de imagen (resolución espacial, resolución radiométrica, revisita, etc.) depende en general de la aplicación final para la que es diseñado el sistema. Como ejemplo, existen técnicas de adquisición diseñadas para cubrir grandes áreas del terreno, con baja resolución espacial y buena resolución radiométrica. Asimismo, existen técnicas diseñadas para maximizar la resolución espacial, a costa de la cobertura espacial y la resolución radiométrica.

Como es fácil imaginarse, estas técnicas de adquisición implican parámetros de ingeniería bien distintos. En general, un sistema SAR puede operar en uno o más “modos de adquisición”, los cuales determinan las características de la imagen generada. Pero debido a la estrategia de formación de una imagen SAR, cada modo de adquisición requiere de un procesador SAR distinto.

**Objetivos** En este contexto, este trabajo se propone desarrollar un generador de datos crudos de un sistema SAR genérico. Los datos crudos sintéticos son función de: (1) las características de ingeniería del sistema, (2) la estrategia de adquisición elegida, (3) la geometría de observación y (4) las características del terreno (geométricas y dieléctricas). En el simulador, todos estos parámetros pueden controlarse independientemente, modificando los parámetros de ingeniería y adquisición y tomando como entrada distintas trayectorias/orbitas y distintas superficies.

De esta forma, el generador de datos crudos permite sintetizar corridas para testear procesadores SAR específicos en condiciones de observación específicas y/o para superficies con topografía compleja. Asimismo, es posible estudiar los artifacts asociados a estas condiciones de observación/topografías específicas. Por último, el procesador permite estudiar la performance de distintas combinaciones de parámetros de ingeniería, de manera de optimizar los trade-offs inherentes a la arquitectura SAR para una aplicación dada.

**Historia del Radar** Durante la Segunda Guerra Mundial tanto las agencias militares de investigación y desarrollo como inventores particulares de los distintos países involucrados realizaron esfuerzos para obtener un dispositivo con el cual poder detectar vehículos enemigos a distancia (por aire y mar). Fue Inglaterra la que pudo concretar la construcción del primer radar de funcionamiento efectivo, el que ayudó a ganar la batalla aérea que la enfrentaba con Alemania. El aparato estuvo basado en el ‘Telemobiloscopio’, un trabajo previo llevado a cabo por el alemán *Christian Huelsmeyer* a principios del siglo XX, el cual podía detectar la presencia o no de un barco a través de la niebla, como así también la distancia a la que se encontraba mediante triangulación.

Inglaterra se protegió de los ataques de bombarderos alemanes instalando grandes antenas a lo largo de su costa del mar del Norte. Esto les permitía tener una alerta temprana para ubicar y contraatacar al enemigo.

La resolución angular (ángulo que permite discriminar dos blancos cercanos entre sí como distintos) en estos primeros sistemas de radar se basa únicamente en el ángulo del lóbulo de emisión y recepción de la antena, que a su vez es proporcional al cociente entre el tamaño de la antena y la longitud de onda de la señal emitida  $\frac{\lambda}{L}$ . Las limitaciones que impone esta técnica de detección



lo hace inadecuado para su uso en satélites artificiales, ya que el método para conseguir una resolución aceptable a tales alturas de vuelo (en general mayores a 700km) implicaría utilizar antenas de un tamaño imposible de desplegar en órbita, así como tampoco puede reducirse la longitud de onda emitida debido a la exigencia energética que esto acarrearía.

El avance necesario para lograr resoluciones aceptables vendría en el año 1951 cuando el matemático Carl A. Wiley trabajando para Goodyear Aircraft Corporation solicitó la patente bajo el nombre “Pulsed Doppler Radar Methods and Means” donde se fundamentaron los principios de funcionamiento del primer radar aerotransportado de apertura sintética llamado DOUSER.

Mucho tiempo después, en el año 1978, se puso en órbita el *SEASAT*, la primer misión SAR de uso civil y desarrollada por NASA, que tomaría imágenes desde una órbita de 800km y con resolución de 25 metros durante un corto período de 10 meses hasta que se diera de baja debido a un cortocircuito generalizado, según los expertos. En el ámbito de exploración planetaria podemos encontrar la sonda *Magellan*, que en 1989 en órbita alrededor de Venus, permitió confeccionar un mapa de la superficie por debajo de las nubes opacas al espectro visible que la cubren.

Se lograron adquisiciones de radar a través del montaje de un sensor conocido como SIR-C por fuera del Space Shuttle de la NASA, durante el año 1994. Sus principales características eran la capacidad de trabajar en 3 frecuencias distintas, banda L, C y X, y polarimétricamente en las primeras dos.

La agencia espacial europea (ESA) también tuvo parte en el desarrollo de radares orbitales comenzando con el lanzamiento del ERS-1 en 1994 y luego el ERS-2 en 1995, ambos con las mismas especificaciones técnicas y trabajando en tándem, posibilitando la adquisición de imágenes secuenciales y, por ende, pudiendo medir cambios de características y altura del terreno en el período de un día. La misma agencia continuaría el mismo camino de desarrollo lanzando en 2002 el sistema ENVISAT/ASAR, con mejorada calidad de datos.

La agencia espacial japonesa (JAXA) puso en órbita dos misiones SAR: J-ERS en 1992, con características similares al SEASAT y objetivos geológicos, y más recientemente el ALOS/PALSAR, en 2006, funcionando en banda L y capacidad multipolarimétrica.

También Canadá cuenta con historia en el mundo de las microondas activas al lanzar dos satélites, RADARSAT 1 y 2 trabajando ambos en banda C y contando con varios modos de observación y resoluciones.

Por su parte Argentina, a través de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales, prevé lanzar para el año 2012 un radar de apertura sintética orbital polarimétrico banda L, con el objetivo principal de obtener el valor de humedad del suelo, el cual es un dato importante para evaluar la productividad agrícola. De concretarse este proyecto Argentina se ubicaría en un grupo selecto de países con tecnología radar orbital de múltiples aplicaciones para las necesidades locales.

**Parte I**

**Simulador CIRawSiS**

## Capítulo 2

# Principios físicos del radar de apertura sintética

Los radares orbitales son instrumentos capaces de obtener un mapa de reflectividad a cierta frecuencia y ángulo de incidencia a partir de una superficie. La reflectividad depende de las propiedades geométricas y dieléctricas de la superficie, y por lo tanto proporcionan información acerca de su composición y estructura. Un típico Radar de Apertura Sintética (o SAR por sus siglas en inglés) puede ser considerado como un sistema capaz de posicionar un objeto reflector en las coordenadas de rango (en el eje cruzado al avance del radar) y azimut (en el eje a lo largo del avance) a través del retraso y del corrimiento Doppler de cada pulso recibido. El algoritmo responsable de esta transformación se llama procesador SAR, y es el último paso de la cadena que deriva en el mapa de reflectividad medido. Existe una gran cantidad de artefactos de procesamiento SAR, los cuales degradan e incluso destruyen el contenido de información en algunas áreas del mapa de reflectividad.

### 2.1. Las microondas

Las microondas son ondas electromagnéticas caracterizadas por una longitud de onda que cae en la porción del espectro correspondiente al rango  $0,01m < \lambda < 1m$  (ver tabla: 2.1).

Debido a su relativa baja frecuencia (comparado con las porciones del espectro correspondientes al visible y al infrarrojo), las microondas tienen propiedades particulares que son importantes para la teledetección. La más importante de ellas es que las microondas pueden penetrar a través de la cobertura nubosa, la niebla, el polvo y cualquier otra condición atmosférica extrema excepto las lluvias más fuertes [4]. Esta propiedad permite monitorear el sistema terrestre utilizando microondas en casi cualquier condición ambiental.

Los sensores de microondas activos proporcionan su propia fuente de radiación para iluminar un blanco. En general, estos sensores se dividen en dos categorías: sensores generadores de imagen y no generadores de imagen. La forma más común de sensores de microondas activos generadores de imagen son los

Cuadro 2.1: Denominación de bandas de microondas.

Banda	Frecuencia (GHz)
P	0,6 - 1
L	1 - 2
S	2 - 4
C	4 - 8
X	8 - 12
Ku	12 - 18
K	18 - 26.5
Ka	26.5 - 40

radares. RADAR es la sigla para *RADio Detection And Ranging*, que caracteriza esencialmente la función y la operación del sensor. El sensor transmite una onda hacia el blanco y mide la porción retrodispersada de la señal. La intensidad de la señal retrodispersada se mide para distinguir entre objetivos diferentes, y el tiempo de demora entre las señales transmitida y reflejada para determinar la distancia (o el rango) al objetivo.

Los sensores de microondas no generadores de imágenes incluyen altímetros y scaterómetros. En la mayoría de los casos éstos son dispositivos generadores de perfiles, que miden en una dimensión lineal, en contraste con la representación de dos dimensiones de los sensores generadores de imagen. Los altímetros radar transmiten pulsos cortos de microondas y miden la demora del viaje de ida y vuelta al blanco para determinar su distancia al sensor. Generalmente, los altímetros miran directamente debajo de la plataforma (nadir) y así miden la altura o elevación del terreno con respecto a la altura de la plataforma. La altimetría de radar es utilizada por aviones y satélites para realizar mapeos topográficos y para la estimación de altura de la superficie del océano. Los scaterómetros se utilizan para hacer medidas cuantitativas precisas de la cantidad de energía retrodispersada por los blancos. La cantidad de energía retrodispersada es función de las propiedades del blanco, como su estructura geométrica, su rugosidad, sus propiedades dieléctricas y el ángulo con el que la energía incide sobre el blanco. Las medidas de scaterómetro sobre la superficie del océano suelen utilizarse para estimar la velocidad del viento a partir del perfil de rugosidad superficial del mar.

### 2.1.1. Polarización

La polarización de una onda se refiere a la orientación del vector eléctrico (E) de dicha onda a medida que avanza con el tiempo (en ortogonalidad con el vector de campo magnético (M)) (figura 2.1). Los radares de observación de la Tierra son diseñados generalmente para transmitir radiación polarizada vertical u horizontal. Esto significa que el campo eléctrico de la onda reside en un plano vertical o en uno horizontal, donde “vertical” y “horizontal” son definidos en relación al plano tangente de la superficie planetaria. De la misma forma, el radar puede recibir radiación polarizada vertical u horizontal, y algunas veces ambas. Los planos de la polarización transmitida y recibida son designados por las letras H y V por Horizontal y Vertical respectivamente. Así la polarización de una imagen de radar puede ser HH (por transmisión horizontal y recepción horizon-

tal), VV (por transmisión vertical y recepción vertical), HV (por transmisión horizontal y recepción vertical) y viceversa.

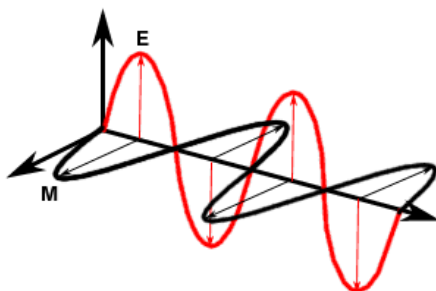


Figura 2.1: Polarización de una onda EM.

Cuando la polarización de la radiación recibida es la misma que la de la radiación transmitida, se dice que la imagen resultante es “copolarizada”. Cuando la polarización de la radiación recibida es ortogonal a la transmitida, se dice que la imagen es “cross-polarizada”. Las señales cross-polarizadas usualmente son provocadas por *scattering* múltiple en el blanco o el terreno (más de un rebote), y tiende a ser menores en intensidad comparadas a las señales copolarizadas.

La polarización se establece por el diseño de la antena de radar, la cual está configurada para tener distintos circuitos de señal en transmisión y recepción. La retrodispersión de microondas desde un objeto depende de la relación entre la polarización de la onda incidente y la geometría estructural de dicho objeto. Se puede obtener muchas más información de un objeto a través de polarimetría que utilizando un radar monopolar.

Para ilustrar el efecto de la polarización, consideremos el sencillo modelo de vegetación compuesto por reflectores lineales dispuestos verticalmente por sobre una superficie rugosa (figura 2.2). Asumiendo que los reflectores lineales actúan como pequeños dipolos verticales, la onda electromagnética verticalmente polarizada incidente logrará retrodispersarse de la vegetación y muy poca energía alcanzará el suelo. Por otro lado, la onda incidente polarizada horizontal pasará principalmente a través de la vegetación y reflejará sobre el suelo. Por lo visto, la señal vertical recibida dependerá más de las características dieléctricas de la vegetación, mientras que la señal horizontal recibida dependerá más de la capacidad del suelo para reflejar la onda.

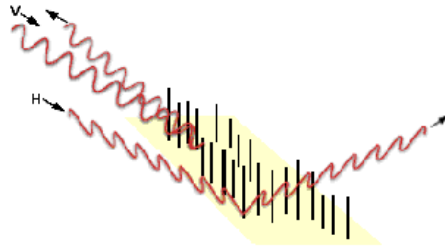


Figura 2.2: Distintas interacciones de una onda EM de acuerdo a su polarización.

A pesar que en los radares actuales la polarimetría es una característica importante este trabajo asume, por la búsqueda de simplicidad, una única polarización, y por ende, simula radares monopolares. La adaptación del simulador a sistema polarimétricos es trivial y significaría un importante aporte a la evaluación de características inherentes de estos radares, tales como el desbalance (diferencias de amplificación entre los dos canales) y cross-talk (influencia indeseada de la señal de un canal en el otro) y sus influencias en la imagen procesada.

## 2.2. Apertura sintética

En el contexto de la teledetección, un sistema SAR construye una imagen de la superficie terrestre observada desde un sistema aerotransportado u orbital. Esto se consigue apuntando el haz de radar aproximadamente perpendicular al vector de movimiento del sensor y transmitiendo pulsos modulados, para luego registrar digitalmente los ecos reflejados por el terreno. Para formar la imagen las mediciones de intensidad deben ser posicionadas en dos direcciones ortogonales. Una dimensión es paralela al haz de radar, tal que la demora en tiempo del eco recibido es proporcional a la distancia o rango a lo largo del haz y hasta el reflector. Al medir la demora temporal, el radar posiciona el eco a la distancia correcta del sensor, a lo largo del eje  $x$  de la imagen. La segunda dimensión de la imagen está dada por el movimiento del sensor en sí mismo. A medida que el sensor se mueve a lo largo de una línea recta nominal por sobre la superficie de la Tierra, el haz de radar barre el terreno por debajo a una velocidad aproximadamente igual a la de la plataforma. El sistema emite pulsos de energía electromagnética, y los ecos recibidos son procesados y posicionados en el eje  $y$ , de acuerdo a la posición del sensor en ese momento, creando una imagen con las coordenadas geométricas correctas. La dimensión  $y$  es llamada azimut (o *along-track*), una analogía con el término *azimutal* del haz de radar rotatorio. Sin embargo, en tecnología SAR, la dimensión de azimut se obtiene usualmente del movimiento lineal del sensor, no por la rotación del haz en un sensor estacionario.

### 2.2.1. El sistema a simular: Radarsat-1

El sistema RADARSAT-1, desarrollado en Canadá y puesto en órbita en el año 1995, fue la plataforma elegida para diseñar y evaluar el simulador CI-RawSiS. La elección estuvo basada entre otras cosas por la disponibilidad de documentación por parte de distintas agencias espaciales y particulares acerca de este radar, la existencia de datos crudos disponibles libremente en Internet, como así también herramientas indispensables tales como un procesador SAR para evaluar la salida del simulador. RADARSAT-1 trabaja en una única frecuencia de 5.3 GHz, en la banda C (5.6 cm de longitud de onda). Cada uno de los siete modos de observación del que dispone ofrece una resolución de imagen distinta. Los modos disponibles incluyen el Fine, el cual cubre un área de 50 x 50 km (2500 km<sup>2</sup>) con una resolución de 10 metros; Standard, cubriendo un área de 100 x 100 km (10.000 km<sup>2</sup>) y resolución de 30 metros; y ScanSAR Wide, con cobertura de 500 x 500 km (250.000 km<sup>2</sup>) y resolución de 100 metros. RADARSAT también tiene la capacidad de dirigir su haz en diferentes ángulos.

Frecuencia & Longitud de Onda	5.3GHz/banda-C 5.6 cm
Ancho de banda RF	11.6, 17.3 ó 30.0 Mhz
Chirp	FM lineal de 40µs
Frec. de repetición de pulsos	1270 a 1345 Hz
Potencia transmitida (pico)	5 kW
Potencia transmitida (promedio)	300 W
Máxima velocidad de adquisición	85 Mb/s (almacenados) 105 Mb/s (transmitidos)
Tamaño de antena	15m x 1.5m
Polarización de antena	HH
Altitud	793-821 km
Inclinación orbital	98.6°
Período	101 minutos
Nodo ascendente	18:00 horas
Heliosincronicidad	14 órbitas por día

Cuadro 2.2: Características del SAR RADARSAT

### 2.2.2. Geometría asociada a un sistema SAR

El propósito de esta sección es la de describir la geometría de adquisición de un sistema SAR y de definir los términos relacionados a ésta que se usarán a lo largo del trabajo.

#### Definición de términos

La figura 2.3 muestra un modelo geométrico simple de la ubicación del radar y de la huella del haz sobre la superficie de la Tierra. Los sistemas de radar pueden ser monoestáticos, biestáticos o multiestáticos, dependiendo de la ubicación del receptor en relación al transmisor. En este trabajo solamente se considera la simulación de un radar monoestático, en el cual la misma antena es usada para transmisión y recepción. Esta configuración es la que se utiliza generalmente en teledetección en la actualidad.

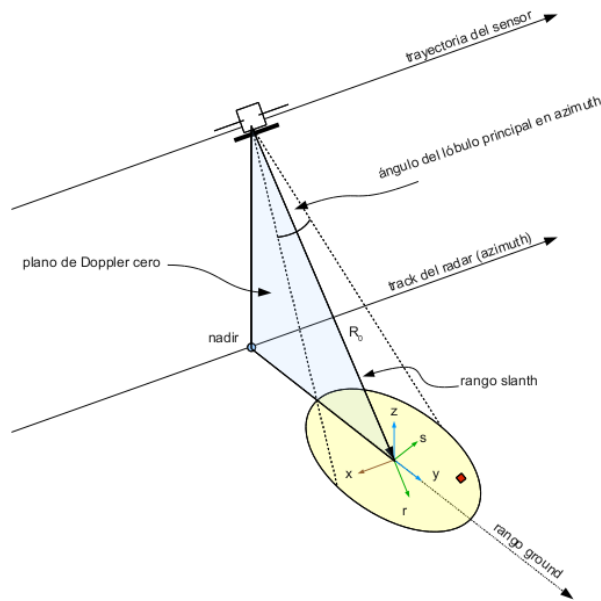


Figura 2.3: Geometría de adquisición del radar.

Los términos usados para describir la geometría SAR se definen a continuación.

**Blanco o target:** Es el punto hipotético situado sobre la superficie de la Tierra al que el SAR está observando. El sistema SAR en realidad visualiza un *area* sobre el suelo, pero para el desarrollo de un simulador se considera un punto representativo sobre el suelo. Este punto es llamado “punto reflector”, o simplemente “reflector” o “scatterer”.

**Huella o footprint:** A medida que la plataforma avanza, son emitidos pulsos de energía electromagnética en dirección al suelo. Durante la transmisión de un pulso individual, la antena de radar proyecta un haz sobre un área del suelo a la que se denomina “huella” o “footprint”. La posición y forma de la huella está determinada por el patrón del haz de antena y por la geometría sensor/Tierra. Es correcto decir que esta huella es “iluminada” por el haz del radar.

**Nadir:** El nadir es el punto de la superficie de la Tierra directamente por debajo del sensor, por lo que el vector normal proyectado desde la superficie de la Tierra pasa a través del sensor. Para un modelo de Tierra esférica, el vector desde el sensor al centro de la Tierra intersecta la superficie terrestre por el punto de nadir. Esto no es cierto para un modelo elipsoidal.

**Track del radar:** A medida que el punto de nadir se mueve a través de la superficie de la Tierra se traza lo que se denomina el “track del radar” o “radar track”.



**Rango:** Inicialmente, el término genérico “rango” puede referirse al rango inclinado (o *slant*) o bien al rango de tierra (o *ground*). El primero se mide a lo largo de la línea de visión del radar, mientras que el último se mide sobre el plano de tierra. Debido a que las operaciones del procesamiento SAR usan las definiciones de rango *slant*, la convención usual es que “rango” se refiera a “rango *slant*”, cuando no se especifica lo contrario. En el caso ideal en el que la antena no tenga anomalías de iluminación (el lóbulo azimutal sea perpendicular a la trayectoria de la plataforma). El rango *slant* se encuentra alineado con el vector de propagación central del lóbulo. El método de localización de blancos en sentido del rango consta de determinar el tiempo empleado por el pulso para alcanzar el objetivo en Tierra, “rebotar” sobre éste y volver al sensor.

**Azimut:** En el contexto del procesamiento SAR, ésta es la dirección alineada con el vector de velocidad relativo de la plataforma. Puede ser considerado como un vector paralelo al movimiento neto del sensor, como se ve en la figura 2.3, o como el vector perpendicular al rango en una imagen procesada de radar.

**Ancho de lóbulo o Beamwidth:** El haz del radar puede considerarse un cono, y la huella como la intersección de este cono con el suelo. El haz tiene dos dimensiones significativas: su ancho angular en el plano azimut y de elevación respectivamente. En cada uno de estos planos, el *ancho de lóbulo de media-potencia*, o simplemente *beamwidth* está definido por el ángulo contenido por los “bordes”, que a su vez están definidos cuando la potencia de la radiación cae por debajo de los 3 dB con respecto al máximo. En azimut, con una apertura uniforme, el ancho del lóbulo es aproximadamente la longitud de onda dividida por el largo de la antena en esa dirección.

**Clutter:** En el contexto general de radar se denomina clutter a toda señal recibida por el sensor que no es de interés para el usuario, por ejemplo: lluvia, aves, construcciones edilicias y reflejos del mar. Específicamente para SAR, se llama clutter a cualquier reflexión de microondas desde el terreno donde no haya un scatterer dominante. La intensidad recibida de estos blancos extendidos tiene características estadísticas interesantes para el análisis de la imagen. En el caso particular de la misión MRO-SHARAD, también se agrega a la definición de clutter el retorno fuera de nadir (cráteres, montañas y volcanes a los costados del track de radar) que podrían confundirse con la señal esperada de sondeo subterráneo.

### 2.2.3. Datos Crudos

La metodología de adquisición comienza con un pulso emitido por la antena de radar. Luego el sensor deja el modo de emisión para encender el conjunto amplificador-conversor analógico/digital durante una ventana de tiempo para la que está calculado que retornará la señal de eco desde el terreno. El pulso electromagnético retorna alterado en distintas características con respecto a la señal originalmente emitida: cambios de amplitud debido a la distancia recorrida y a las propiedades geométricas y dieléctricas del suelo, diferencias de fase debidas también a la distancia y distribución de los objetos en el blanco, incremento o decremento de frecuencia debido al efecto Doppler provocado por la velocidad

relativa de la plataforma con respecto a cada uno de los reflectores del terreno. La antena convierte el pulso electromagnético en una señal de voltaje variable en el tiempo. La señal obtenida tiene una estructura similar a la siguiente

$$x(\tau) = \cos\{2\pi f_0\tau + \phi(\tau)\}$$

donde la frecuencia de la portadora  $f_0$  es muchos órdenes de magnitud mayor que el ancho de banda de la modulación,  $\phi(\tau)$  (5.4 GHz versus 30 MHz en el caso de RADARSAT-1).

Teniendo en cuenta que la información precisada para procesar la imagen se encuentra en el relativamente angosto ancho de banda y que la frecuencia central de la portadora no es de interés, la señal captada por la antena pasa luego por un filtro de demodulación por cuadratura que se deshace de esta última. Por cuestiones inherentes a esta transformación, la señal resultante se descompone en dos canales que representan una seguidilla de valores complejos con un ancho de banda que va de -15 MHz a 15 MHz, transformada a lo que se llama *banda base*. De esta forma es posible adquirir a través del conversor A/D utilizando una velocidad de muestreo más económica y cumpliendo con el criterio de Nyquist para no provocar aliasing en la señal adquirida. Los dos vectores resultantes (parte real e imaginaria) se almacenan en una fila de la matriz compleja resultado, que se continuará y así se repite el procedimiento para los siguientes pulsos emitidos, formando una matriz.

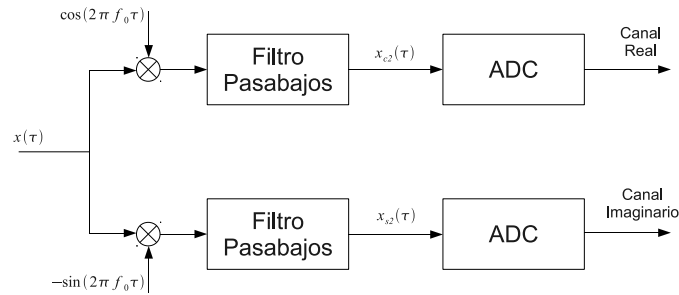


Figura 2.4: Demodulación de una señal para remover la frecuencia portadora.

Las dos señales individuales son llamadas *componentes en cuadratura* de la señal compleja, o los canales *I* y *Q* por *in-phase* y *quadrature*. El retorno de los ecos que es recibido por RADARSAT puede ser enviado simultáneamente a una estación terrena para luego ser procesado o ser resguardado en su unidad de almacenamiento. En cualquiera de los dos casos, el ancho de banda de transmisión o la capacidad de almacenamiento es un recurso escaso, teniendo en cuenta el tamaño de los datos adquiridos (alrededor de 200 MB por cada 100 km en la dirección de azimut). Es por esta razón que los datos son cuantizados a valores de 4 ó 5 bits antes de ser enviados/almacenados. La técnica empleada para esto es la de Cuantización Adaptiva por Bloques (*Block Adaptive Quantization*) que permite asignar un rango dinámico variable a cada bloque consecutivo de ecos recibidos. Este procedimiento se efectúa en el mismo radar a través de un Control Automático de Ganancia (AGC), el cual asigna una ganancia a un bloque de adquisiciones de acuerdo a la intensidad con los que son recibidos sus ecos.

Por su parte, CiRAWSiS realiza los cálculos de simulación en matemática de punto flotante para luego segmentar en bloques la matriz resultante y asignar

```

18168 0 ! Bytes per line, bytes per header.
7.500000 7.500000 ! i,q bias
0 8538.000 4.4668
765 8538.000 3.9811
773 8538.000 4.4668

```

Cuadro 2.3: Ejemplo del contenido de un archivo .fmt con información respecto del control automático de ganancia.

un control de ganancia acorde a los máximos absolutos alcanzados para ambos canales (I y Q) dentro de cada uno de estos bloques. De esta forma los datos de señal cruda replican el formato estándar y son aptos para ser manipulados por herramientas de procesamiento SAR.

### 2.3. Control automático de ganancia

El ancho de banda disponible al subsistema de transmisión de datos es limitado. Con el propósito de cumplir con la velocidad de transmisión se necesita reducir por debajo de lo convencional la cantidad de bits empleados para codificar cada una de las muestras. El ancho de banda disponible para el caso particular de RADARSAT es de 85 Mbits/seg para datos pre-almacenados y 105 Mbits/seg para datos generados en tiempo real; teniendo en cuenta esta limitación, se emplean 4 bits para codificar las muestras de cada uno de los canales I y Q.

El requerimiento global de rango dinámico es alcanzado, dentro de las limitaciones impuestas a los datos de salida por la cuantización de 4-bits, a través de la inclusión de un "Control Automático de Ganancia" (AGC por sus siglas en inglés) dentro del subsistema de recepción. Éste asegura que los niveles de señal a la entrada de los conversores analógico-digital sean óptimos sin importar la reflectividad de la escena observada y los efectos de rango. La información acerca de la ganancia seleccionada para la adquisición de una o varias líneas de muestras se entregan acompañando los datos crudos de la imagen para poder compensar los efectos del AGC de una forma fácil dentro de la estación terrena de procesamiento.

Con este tamaño de muestra el volumen de información cruda que se debe enviar por cada adquisición de una imagen en modo standard de 100 km x 100 km con resolución de 25 metros y tamaño de pixel de 12.5 metros es de 8192 x 8192 x 8 bits ó 64 MB.

## Capítulo 3

# Artefactos

**Resumen** La observación a través de radar de una porción de terreno no puede compararse directamente con una imagen óptica de ese mismo lugar. Es importante tener en cuenta las alteraciones geométricas y radiométricas que el propio sistema de radar aporta a la imagen al momento de analizar una adquisición, teniendo cuidado de no obtener falsas conclusiones de su equivocada interpretación. A su vez, es necesario que cualquier simulación pueda reflejar estos artefactos en su producto sintético, de tal forma que el simulador se convierta en una herramienta adecuada para analizar los parámetros que gobiernan a estas aberraciones y permitan evaluar estadísticamente su impacto en la imagen finalmente obtenida.

Los distintos artefactos que se podrían encontrar en una imagen de radar son:

1. Debido a coherencia
  - a) *Speckle*
2. Debido a topografía
  - a) Acortamiento de la pendiente (*foreshortening*)
  - b) Pseudo sombreado
  - c) Inversión del relieve (*layover*)
  - d) Sombreado
3. Debido a diferencias de iluminación
  - a) Diferencia de distancia entre rango cercano y lejano
  - b) Patrón de antena
  - c) Ángulo de observación

### 3.1. Speckle

Los sistemas SAR son radares que basan su funcionamiento en la conservación de la coherencia de la señal emitida. Esto significa que se tiene control sobre la fase instantánea con la que es emitido cada pulso y es posible, a su

vez, discriminar con que fase arriba a la antena la onda retrodispersada. La propiedad de coherencia conlleva la aparición del fenómeno de *speckle*, ruido multiplicativo provocado por la interferencia de distintos reflectores dentro de la misma celda de resolución, afectando el eco recibido. Esta alteración se refleja en una aleatoriedad de la magnitud de cada pixel. El *speckle* se manifiesta en la imagen de radar como ruido sal & pimienta, picoteandola con pixeles de tono oscuro y claro azarosamente distribuidos.

El método utilizado por el simulador para reproducir el ruido *speckle* en la imagen consiste en incrementar o decrementar la altura de los vértices de las facetas que representan el terreno. La diferencia entre el valor real y el forzado es proporcional a una variable aleatoria que sigue una distribución normal. La alteración incorporada intenta simular la variabilidad de los reflectores naturales dentro de cada unidad de resolución del sistema. Por esto mismo, es necesario modelar el terreno con facetas al menos 4 veces más pequeñas que el tamaño de pixel, considerando que cuanto mayor sea la densidad de facetas, mayor veracidad tendrá la simulación del *speckle*.

### 3.2. Acortamiento de pendiente

El *acortamiento de pendiente* o *foreshortening* es el efecto por el cual la ladera de una montaña o colina que se encuentra enfrentada a la línea de propagación del radar aparece comprimida en la imagen. La imagen de esta ladera por lo tanto aparecerá más brillante que otras características en la misma. El acortamiento más marcado ocurre cuando la pendiente de la ladera se aproxima a la perpendicular del vector de propagación del pulso de radar. En la figura 3.1 se puede apreciar como en dos ventanas de tiempo  $L_1$  y  $L_2$ , donde la primera es mayor que la segunda, se observa ambas pendientes, comprimiendo la energía recibida de la primera en 2 píxeles y de la segunda en 7. Esta diferencia en distribución de intensidad de señal junto a la mayor respuesta de la ladera enfrentada a la línea de visión del radar con respecto a la ladera más alejada de éste, provoca junto a las irregularidades geométricas un incremento del brillo de la pendiente cercana con respecto a la otra. En ciertas oportunidades la base y cima de la montaña se pueden ver reflejadas simultáneamente, por lo que en la imagen resultante se observará una completa anulación del frente de la ladera. El efecto de acortamiento se reduce utilizando un modo de observación desde un ángulo de incidencia alejados de la normal a la ladera cercana, a pesar de que esto provoque mayor cantidad de efecto sombras en la imagen.

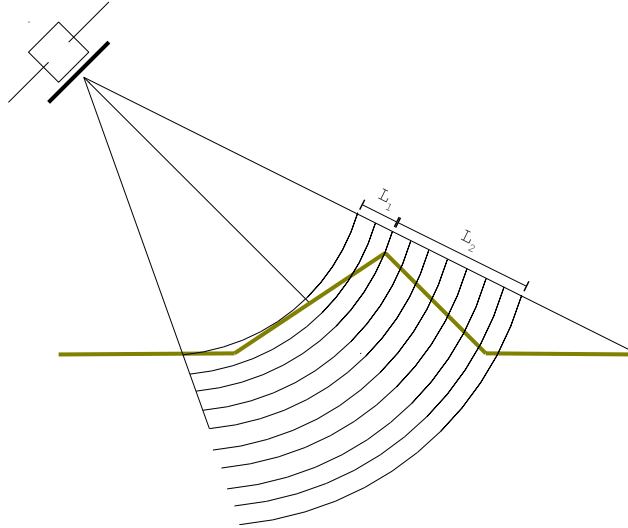


Figura 3.1: Acortamiento de pendiente o “foreshortening”

### 3.3. Pseudo sombreado

Es un efecto por el cual la ladera opuesta de las colinas y las montañas aparece ampliada. Es el resultado de la propagación de las señales de retorno sobre una distancia más grande ( $A'$ ,  $B'$ ) que la distancia horizontal real ( $A$ ,  $B$ ). Esta dispersión de la respuesta no siempre es perceptible.

### 3.4. Inversión del relieve

La *inversión del relieve* o *layover* es el efecto donde la imagen de un objeto aparece inclinado hacia la dirección de la antena de radar. Esto se debe a que las cimas de los objetos o de las cuevas son reflejadas antes que sus bases. Los efectos de inversión son más grandes sobre el lado del rango cercano de las imágenes.

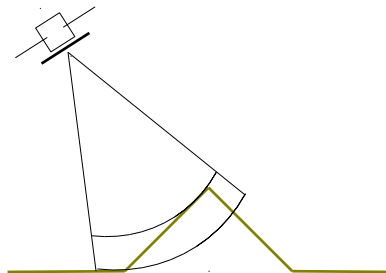


Figura 3.2: Inversión del relieve

### 3.5. Sombreado

El hecho que el instrumento de radar emita su propia energía que luego ha de devolver el terreno no evita que tenga algunos de los inconvenientes que se producen en la imágenes ópticas, las cuales reciben luz solar. Así como el ángulo en el que se encuentra el Sol con respecto al relieve del terreno puede generar zonas oscuras de sombras, lo mismo puede suceder con la iluminación de microondas del radar. Cualquier detalle del terreno que se oculte por detrás de un obstáculo a la línea de visión del radar será un punto oscuro en la imagen procesada.

### 3.6. Diferencia de distancia entre rango cercano y lejano

La ecuación del radar establece que la intensidad de la señal recibida del eco del blanco observado es inversamente proporcional a la distancia de separación entre el instrumento y el blanco elevado a la cuarta. Esta disparidad de intensidad entre blancos cercanos y lejanos es más visible en las imágenes adquiridas a través de radares aerotransportados que aquellas tomadas con radares orbitales; esto es debido a que en el caso satelital la distancia entre blancos en rango cercano y rango lejano proyectada en la línea de visión del radar es despreciable en comparación con la altura de vuelo.

### 3.7. Patrón de antena

El terreno no es iluminado con intensidad constante sobre la huella observada por el radar, si no que se ilumina siguiendo un patrón que se lo conoce como *patrón de antena*. La intensidad máxima se encuentra en dirección al centro de la huella y decrece apartándose de éste, siguiendo una función sincoidea que describe el patrón de antena.

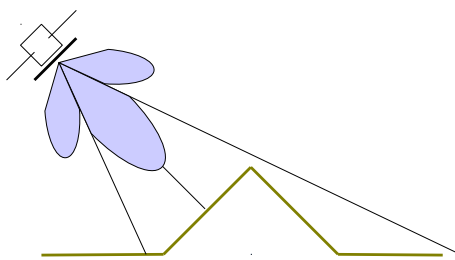


Figura 3.3: Diagrama representando la potencia emitida en función del ángulo de emisión.

### 3.8. Ángulo de observación

El reflejo sobre una faceta alcanza un máximo con una incidencia perpendicular sobre su superficie, y disminuye a medida que la señal incide más rasante.

En el caso de que el ángulo de incidencia varíe sensiblemente del rango cercano al lejano, la simulación debe dar cuenta de éste fenómeno.

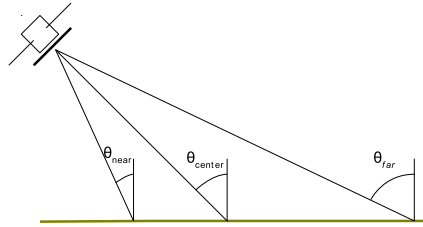


Figura 3.4: Diferentes ángulos de incidencia a distintos rangos



## Capítulo 4

# Complejidad, diseño e implementación

**Resumen** La simulación de los datos crudos de radar llevada a cabo en forma exacta, queriendo decir con esto que tenga en cuenta alteraciones de orbita/vuelo, patrón de antena irregular, scattering variable en el terreno, etc, requiere un mayúsculo poder de cálculo. La demanda de procesamiento deviene del intenso censado de los muchos elementos del terreno durante cada emisión de pulsos y es inherente e insalvable como método de simulación preciso. Durante este capítulo se explicará en detalle la complejidad del algoritmo en función del tamaño de la entrada. A su vez se mostrará cómo fue implementada la paralelización del simulador aprovechando la sencilla partición de las tareas a ejecutar.

**Iteración sobre el terreno** Siendo modelado el terreno con  $N$  por  $M$  facetas podemos escribir la complejidad como perteneciente al orden  $O(N \cdot M)$

La elección del lenguaje tuvo como principales motivantes a la necesidad de diseñar el sistema basandose en una diseño orientado a objetos, con suficientes librerías matemáticas que satisfagan el requerimiento de cálculo, y fue deseable el hecho de generar código ejecutable que pudiese correr en distintas plataformas sin exigir una recompilación, siguiendo el concepto *WORA* (Write Once Run Anywhere). Conformando estas premisas, se decidió por seleccionar a Java de Sun como lenguaje de desarrollo, ya que cuenta con las características nombradas y tiene la ventaja de ser de uso masivo en la actualidad y familiar para el autor de este trabajo.

### 4.1. Diseño de clases

El dominio del problema se descompuso en distintas clases y en sus relaciones, que intentan describir la complejidad de la simulación. Estas clases y la física asociada a cada una se encuentran detalladas a continuación:

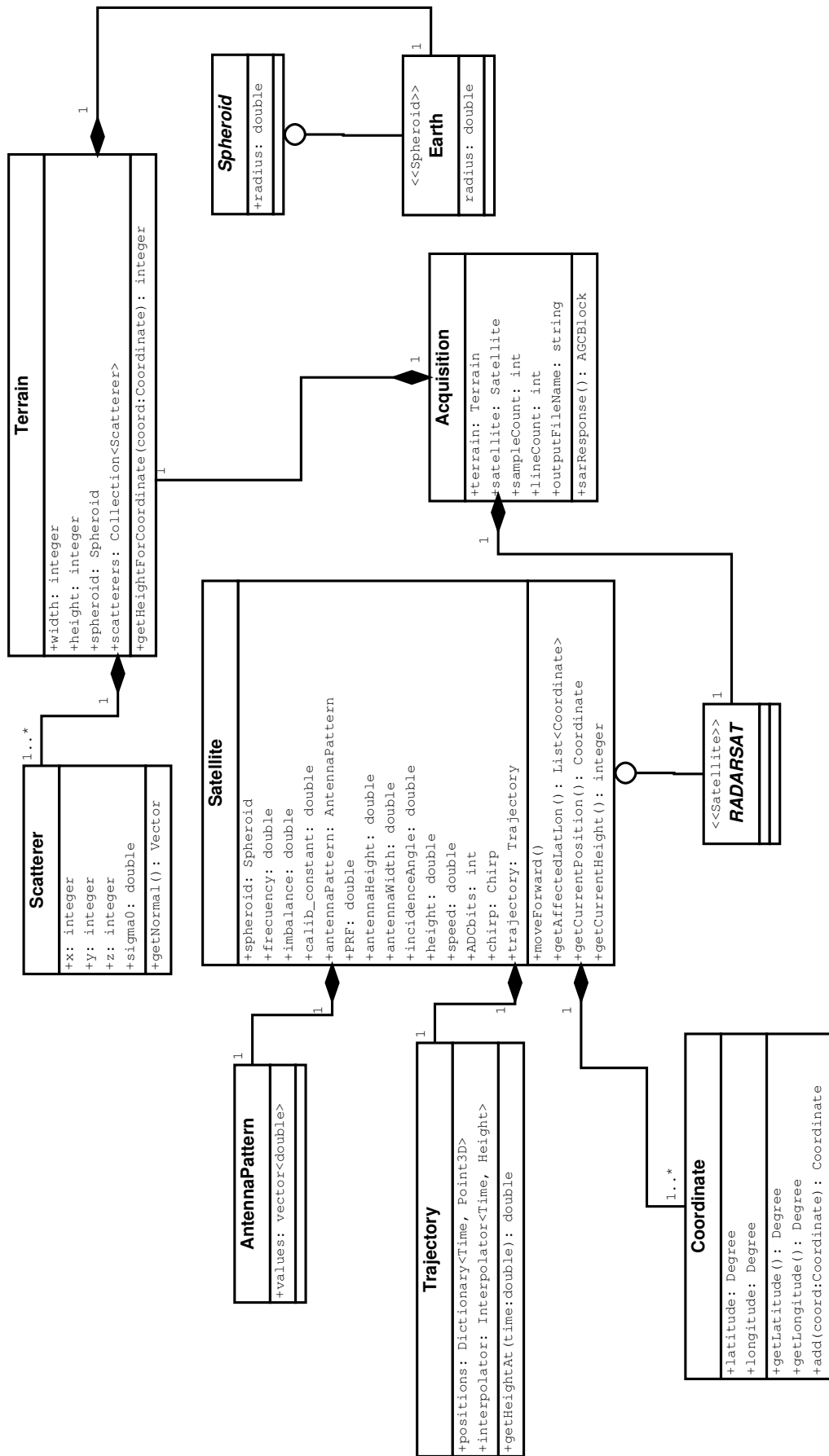


Figura 4.1: Diagrama de clases para el sistema de simulación CIRawSiS.

### 4.1.1. Reflector (scatterer)

Es la unidad elemental que compone al terreno; se caracteriza por sus parámetros de ubicación (expresada en latitud/longitud o metros con respecto a un origen de coordenadas), orientación (enfrentado u oblicuo a la señal incidente) y propiedades dieléctricas asociadas. La geometría es calculada a partir del mapa digital de terreno que se ingrese a la simulación, pudiendo ser éste sintetizado o producto de un relevamiento real de la superficie (sea terrestre o marciana). El vector normal de cada faceta, que representa su orientación, se computa a partir del plano establecido por 3 de sus esquinas. Las características dieléctricas se expresan a través del *coeficiente de retrodispersión o backscattering*, el cual determina el cociente entre la amplitud de señal incidente y la retrodispersada, siendo un dato extraído del mapa de reflectividades que compone el input de la simulación. El coeficiente de backscattering es la derivación de al menos dos características físicas de cada faceta discretizada de terreno, su composición química y rugosidad espacial. Con la sencillez como objetivo, se limita en este trabajo a asumir al cociente de retrodispersión como un valor prefijado a cada faceta, y no derivado de sus características físicas.

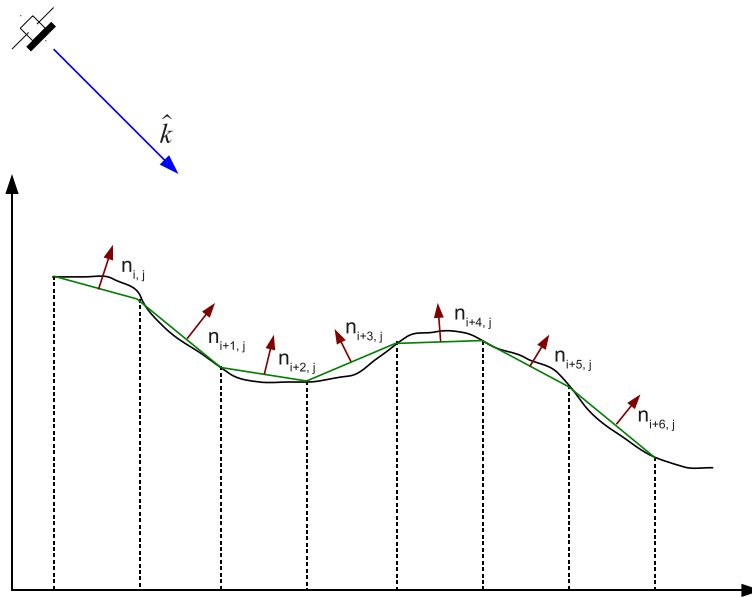


Figura 4.2: Esquema de discretización del terreno basado en un Modelo Digital de Elevación.

### 4.1.2. Terreno

Describe la topografía del escenario de entrada. Se instancia a partir de un modelo digital de terreno, o DEM por sus siglas en inglés (alternativamente llamado DTM o *Digital Terrain Model*), donde se especifica la altura en metros de cada coordenada del suelo con respecto al cero convencional de cada esferoide (nivel del mar para La Tierra y nivel de cero elevación para Marte). La información contenida dentro del archivo DEM está dispuesta en forma de matriz rectangular, donde se informa las coordenada de latitud / longitud de las

esquinas superior-izquierda e inferior-derecha junto a su altura correspondiente. Esta clase es la encargada de calcular la información derivada de los datos basales, tales como orientación del vector normal a cada una de las facetas que lo componen.

### 4.1.3. Chirp

La clase chirp modela la forma de onda del pulso emitido por el radar. Esta señal consiste en una onda sinusoidal modulada por frecuencia (FM) centrada en la frecuencia de trabajo del sistema  $f_0$  y con un determinado ancho de banda, o sea, una excursión en un rango de frecuencias (5.3 GHz y hasta 30 MHz respectivamente en el caso de RADARSAT). La duración del chirp emitido, simbolizado por  $T_r$ , es otro parámetro que lo caracteriza, con valores típicos del orden de microsegundos. La excursión en frecuencia es lineal en función del tiempo, de tal forma que la frecuencia instantánea es igual a  $f_0 + K_r * \tau$  para un tiempo  $|\tau| < T_r/2$ , siendo  $K_r$  la velocidad de incremento en frecuencia o *range FM rate*. La señal es sampleada directamente del instrumento y almacenada en un archivo, con una discretización temporal idéntica a la utilizada en el modo de recepción. Con el objetivo de economizar en velocidad de muestreo, y al igual que la salida de señal cruda, el chirp está expresado en forma compleja (parte imaginaria y real) y en banda base.

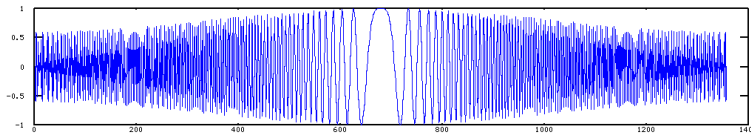


Figura 4.3: Discretización en banda base y parte real del chirp emitido por el radar. Se distingue la modulación producto del retraso en el módulo de amplificación durante el encendido y apagado del emisor.

### 4.1.4. Patrón de antena

Para simular efectivamente la emisión real de una antena de radar es preciso contar con el patrón de emisión y recepción en cada ángulo posible en azimut y elevación con respecto al vector normal del plano de ésta. Esto significa conocer con qué intensidad la antena puede llegar a emitir señal hacia cada punto del terreno. Esto puede realizarse de dos formas distintas: almacenando en una matriz cada ángulo azimutal y de elevación junto a la intensidad de emisión correspondiente ó caracterizarlo a través de una ecuación general. El primer método conlleva ventajas con respecto al segundo, como ser una representación más veraz del patrón de antena (ya que es producto de una medición directa) y un acceso más veloz al dato (tan rápido como acceder a una *look-up table* evitando cálculos que involucran trigonometría y números en punto flotante). En la práctica es infrecuente contar con el patrón de antena caracterizado por medición directa y la ecuación general es la opción obligada, considerando que puede calcularse en función del tamaño de la antena en ancho y alto y la longitud de onda utilizada. En cualquier caso, se asume que el patrón de emisión y recepción es idéntico, hipótesis aceptable en la mayoría de los casos.

#### 4.1.5. Plataforma

Esta clase informa sobre los distintos parámetros de ingeniería y de trayectoria del sistema. Estos incluyen la altura de vuelo, la velocidad, posición y ángulos de navegación instantáneos, ganancias absolutas, entre otros. En el caso de los radares orbitales, tales como RADARSAT, la trayectoria es tan estable que termina afectando poco el resultado final.

#### 4.1.6. Trayectoria

A través de una instancia de esta clase se describe el patrón de vuelo (en el caso aerotransportado) y de orbitación (para el caso satelital) del sistema radar. La información se carga desde un archivo en el cual se asocia un tiempo en segundos con la diferencia de altura instantánea con respecto a la recta teórica de vuelo.

#### 4.1.7. Adquisición

En la clase adquisición se agrupan todos los componentes que conforman el escenario, junto al instrumento y sus parámetros que se emplearán para efectuar la simulación. Es la clase encargada de la simulación total, conteniendo el algoritmo que itera por sobre todas las facetas del terreno y todas las posiciones instantáneas de la plataforma.

### 4.2. Ejecución

El entorno de ejecución del CiRawSiS es un cluster de computadoras situado en el Instituto de Astronomía y Física del Espacio. El mismo cuenta con 11 nodos cada uno con procesadores Intel Xeon E5420 doble QuadCore corriendo a 2.50GHz de velocidad, disponiendo de 171GB de memoria RAM. La comunicación inter-nodo se efectúa con el protocolo Ethernet Gigabit de 1000Mbps. El almacenamiento magnético disponible es de 1TB. El sistema corre una distribución GNU/Linux CentOS 5 con librerías MPI (*Message Passing Interface*) instaladas para asistir a los programas con requerimientos de paralelización. En el caso del CiRawSiS, la paralelización consiste en la ejecución particionada (cada proceso simula una parte disjunta de la otra), por lo que no requiere la intercomunicación a través de mensajes MPI.

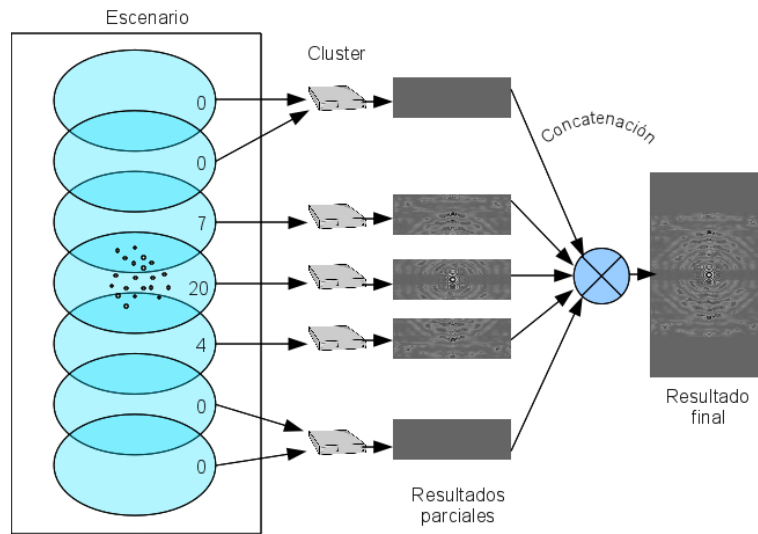


Figura 4.4: División de tareas de una simulación ejecutada en un cluster

#### 4.2.1. Procesador

Se han desarrollado una gran variedad de algoritmos para procesar eficazmente datos SAR y convertir la señal cruda en una imagen bien enfocada. La técnica más utilizada es la del algoritmo *Range-Doppler*, el cual corrige adecuadamente la variación de varios parámetros a lo largo del rango, tales como el centroide Doppler, la razón de modulación en frecuencia del azimut, y la migración de rango. El algoritmo de escalamiento de chirp logra una calidad mejorada de imagen por sobre el algoritmo de Range-Doppler, al reemplazar el interpolador de la corrección de migración en rango por una operación de escalado en rango de tiempo/azimut dentro del dominio de las frecuencias. El algoritmo *omega-K* corrige la migración de rango mediante una migración en rango en el dominio bidimensional de las frecuencias y tiene la posibilidad de manejar una mayor apertura y ángulos de squint más pronunciado que el resto de los algoritmos. Para imágenes de mediana y baja resolución, como las denominadas *quick-look*, se desarrolló el algoritmo SPECAN (por *SPECTral ANalysis*). Éste minimiza la cantidad de memoria y computación requerida al usar una corta y única operación FFT de compresión.

El procesador SAR utilizado en este trabajo es el *SAR Training Processor* provisto gratuitamente por la *Alaska Satellite Facilities* (figura 4.5) a través de su página web (<http://www.asf.alaska.edu/sardatacenter/softwaretools>). Es una implementación del algoritmo de Range-Doppler. Tiene la capacidad de generar los subproductos de cada uno de los pasos del procesamiento, que están descritos debajo en mayor detalle.

A grandes rasgos, un procesador SAR toma como entrada la matriz de datos formada por la secuencia de respuestas unidimensionales de cada uno de los pulsos emitidos y efectúa un proceso llamado *compresión de pulso* o *matched filtering* para convertir el eco extendido en el tiempo de cada uno de los reflectores individuales del terreno en un único pixel en la imagen.

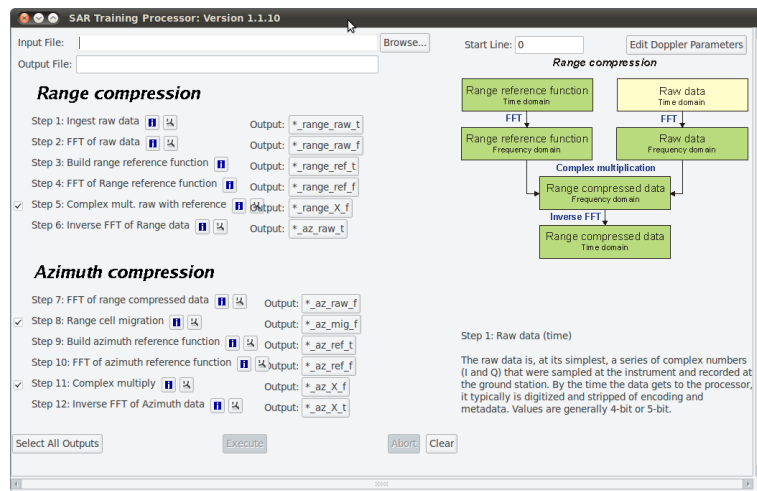


Figura 4.5: Interface de usuario del procesador de la Alask Satellite Facilities.

# Capítulo 5

## Resultados

### 5.1. Respuesta impulsiva

Evaluar la respuesta impulsiva del sistema generador-procesador es uno de los métodos para caracterizar su correcto desempeño. En el ámbito SAR, la señal proveniente de un único reflector aislado en el terreno ó blanco puntual puede considerarse una respuesta impulsiva, situación para la cual los datos crudos y su imagen procesada tiene características bien conocidas. La señal recibida por un radar SAR proveniente del eco del blanco puntual en el caso ideal (antena bien orientada) está dada por

$$\begin{aligned} h_{imp}(\tau, \eta) = & w_r(\tau - 2R(\eta)/c)w_a(\eta - \eta_c) \times \\ & \times \exp\{-j4\pi f_0 R(\eta)/c\} \times \\ & \times \exp[j\pi K_r\{\tau - 2R(\eta)/c\}^2], \end{aligned} \quad (5.1)$$

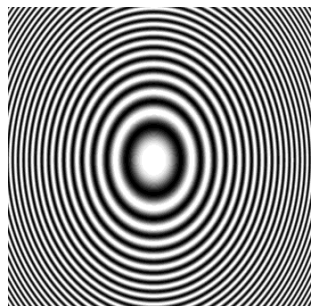
donde  $R(\eta)$  es la distancia en rango slant del reflector en el terreno para el tiempo  $\eta$ ,  $w_r()$  es la función rectangular  $rect(\frac{\tau}{T_r})$  que retorna 1 para todo momento  $\tau$  en el que el sensor recibe la señal y 0 para cuando no lo hace,  $w_a()$  es la función rectangular  $w_a(x) = rect(\frac{x}{X})$ , que retorna 1 para aquellos reflectores que se encuentren a una distancia azimutal  $x$  de la plataforma menor al ancho  $X$  de la huella sobre el terreno.

Para modelar la señal recibida desde una superficie en el suelo, la reflectividad es convolucionada por su respuesta impulsiva en dos dimensiones, resultando en la señal SAR en banda base

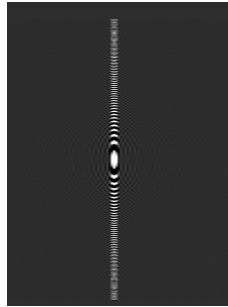
$$s_{bb}(\tau, \eta) = g(\tau, \eta) \otimes h_{imp}(\tau, \eta). \quad (5.2)$$

Se efectuó una simulación de un único reflector ideal ubicado sobre una terreno plano. Se muestran a continuación la imagen cruda obtenida, los pasos intermedios de su procesamiento y la imagen resultado.

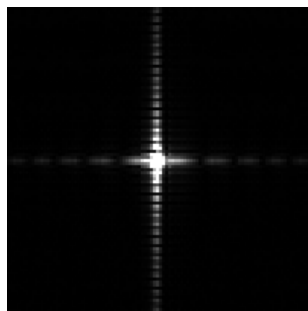




(a) Parte real de los datos crudos de un reflector único.



(b) Parte real de la imagen comprimida en rango.



(c) Imagen enfocada en amplitud de un único reflector.

Figura 5.1: Cadena de procesamiento de una respuesta puntual SAR

### 5.1.1. Acortamiento de pendiente

La calidad geométrica de la simulación fue evaluada intentando recrear el efecto de *acortamiento de pendiente*. La corrida de la simulación tomó como entrada una elevación sintética en forma de diente de sierra de 100 metros de alto a lo largo del eje de rango en tierra y con altura constante a lo largo del eje de avance en azimut. Los reflectores se encuentran a una distancia de 25 metros en ambos ejes. El resultado se puede observar en la figura 5.2 donde se puede ver la ladera más cercana al radar comprimida a un ancho aproximadamente de un tercio de la ladera opuesta.

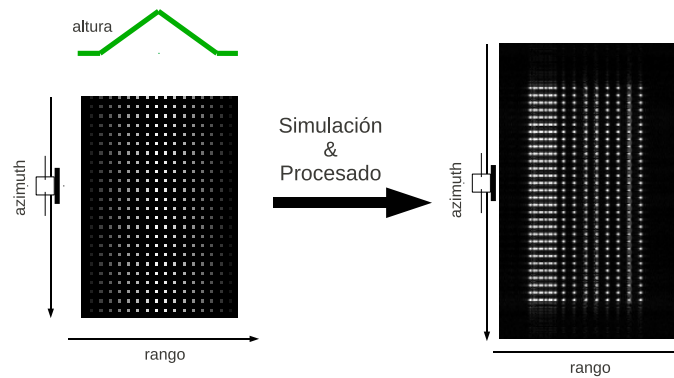


Figura 5.2: Acortamiento de pendiente simulado.

### 5.1.2. Inversión de pendiente

Para evaluar el efecto de inversión de pendiente se sintetizó un nuevo escenario que consiste en una semiesfera por arriba de un terreno plano. El punto más alto de la semiesfera se encuentra a 200 metros con respecto al nivel del plano de suelo y los reflectores se encuentran dispuestos equidistantes en una grilla con una separación de 25 metros entre uno y otro.

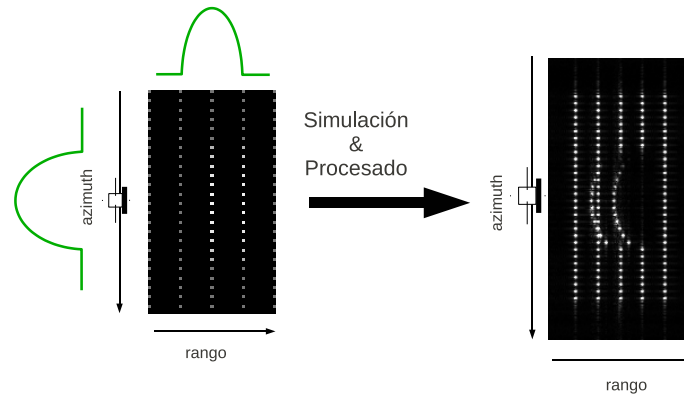


Figura 5.3: Inversion de pendiente simulado.

### 5.1.3. Vuelo inestable

Es habitual encontrar inestabilidades durante las adquisiciones de radar en sistemas aerotransportados. Éstas son producto de ráfagas de viento que golpean sobre el avión, pozos de aire, irregularidades en el empuje del motor, maniobras del piloto u otros motivos. Por esta razón una gran cantidad de procesadores SAR cuentan con módulos de corrección de alteración de vuelo denominados *MoCo* (del inglés *MOTION COMPENSATION*). Utilizando la información de posición instantánea adquirida por giróscopos y receptores GPS dentro de la aeronave es posible alimentar estos algoritmos con el propósito de mejorar el enfoque de la imagen.

*CIRawSiS* admite alteraciones de trayectoria para dar cuenta de las deformaciones que se puedan producir por ese motivo en la imagen procesada y de esta forma poder evaluar los algoritmos *MoCo* con información precisa de alteración de trayectoria de vuelo.

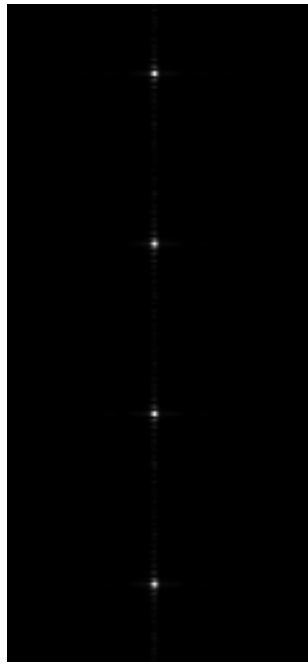
En el caso orbital el exiguo rozamiento que existe entre la plataforma y la tenue atmósfera a elevadas alturas supone una trayectoria que se aleja muy poco de la órbita kepleriana teórica.

La simulación consiste de 40 reflectores alineados a lo largo del eje azimutal y posicionados en el centro de la huella de rango distanciados 200 metros uno del otro, sobre un terreno plano. La trayectoria sintética comprende una curva de altura variable y sinusoidal de frecuencia 3Hz y 600 metros de amplitud. A pesar de ser una variación de trayectoria inverosímil es de utilidad para hacer notoria la afectación de la imagen final.

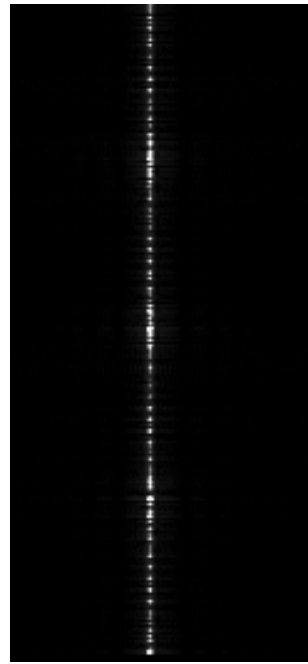
Perturbaciones en la trayectoria tienen un impacto mayor sobre la focalización en el eje azimutal que con la focalización de rango. Este fenómeno se explica teniendo en cuenta el origen de la señal de referencia para cada uno de los casos. La señal de referencia para el rango se genera a partir de un oscilador controlado de frecuencia modulada (FM) lineal interno al radar y tiene una duración de decenas de microsegundos (muy pequeña en comparación a las variaciones de la trayectoria más extendidas en el tiempo).

La variación en frecuencia de la señal de referencia en azimut se produce por efecto Doppler, debido a la velocidad relativa variable entre el radar y el blanco. La frecuencia inicialmente aumenta a medida que el primero se acerca al segundo para luego decrecer mientras se alejan. De esta forma se genera, en caso de un vuelo perfectamente recto, un cambio bien caracterizado en frecuencia del retorno de la señal. La dependencia de la referencia azimutal con la geometría de vuelo/orbitación provoca que el enfoque en la dirección azimutal sea más sensible a inestabilidades de la trayectoria de lo que son en rango.

Se puede observar en los resultados representados en la figura 5.4 que el desenfoque se restringe al eje azimutal.



(a) Trayectoria estable.



(b) Trayectoria erratica.

Figura 5.4: Comparación entre 2 simulaciones utilizando una trayectoria lineal y otra sinusoidal.



**Parte II**

**Simulador de Shallow  
Radar**

## Capítulo 6

# Principios físicos del SHARAD

SHARAD es un radar de sondeo (o penetración) actualmente en órbita alrededor de Marte, montado sobre la plataforma del Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). Está diseñado para caracterizar dieléctricamente los cien metros superiores de la subsuperficie marciana. Resumidamente, el radar SHARAD emite ondas EM desde su antena dipolo, las cuales parcialmente se reflejan y también penetran la superficie de Marte. Las ondas transmitidas al interior se reflejarán desde interfaces dieléctricas subsuperficiales. La antena dipolo colecta una parte de la energía reflejada por los reflectores pertenecientes a la superficie y subsuperficie Marciana, con un retraso entre la última y la primera de acuerdo a la velocidad de propagación de la onda a lo largo de las profundidades. Una imagen dieléctrica (o “radargrama”) de los estratos está construida, en una dirección, por el retraso en tiempo de la onda y, en la dirección ortogonal, por el movimiento del MRO a través de su órbita. El radargrama es una secuencia de adquisiciones de apertura sintética

SHARAD se diferencia de los SAR típicos en dos aspectos principales: (I) no es un radar *side-looking*, sino que emite/escucha directamente al punto de nadir por debajo, y (II) es un radar de penetración (GPR por *Ground Penetrating Radar*) en tanto los ecos recibidos no sólo retornan de la superficie sino también de las profundidades de Marte. El punto (I) implica que siempre habrá ambigüedades de izquierda/derecha, y (II) implica que siempre habrá solapamiento entre lo observado en la superficie con lo observado en profundidad. Esto se debe al hecho de que el eco recibido es el resultado de la combinación de: (1) ecos superficiales de nadir, (2) ecos subsuperficiales de nadir, (3) ecos superficiales fuera de nadir y (4) ecos subsuperficiales fuera de nadir, todos éstos arribando al radar antes y después de los ecos de nadir. La adición de una 3<sup>era</sup> dimensión genera ambigüedades en el método bidimensional utilizado para posicionar cada eco en el radargrama. Aun cuando se asume que los radargramas contienen información estratigráfica acerca de la corteza marciana, ellos no pueden ser interpretados de forma directa como secciones geológicas subsuperficiales debido a las ambigüedades nombradas anteriormente. Varias aproximaciones han sido propuestas para salvar este obstáculo [10]. Las más exitosas y consistentes han sido aquellas basadas en modelos de interacción electromagnética entre el medio

de capas que representa la corteza marciana y la onda plana emitida.

En la figura 6.1 se detalla la geometría de observación del sensor. Cualquier pulso que emplee un tiempo  $t$  en ir y volver de la plataforma a la superficie puede provenir de dos zonas distintas equidistantes de nadir y a distancia  $t/(2c)$  del radar. Las ambigüedades izquierda/derecha se producen al utilizar únicamente el tiempo de vuelo del pulso electromagnético para percibir la distancia en rango de cada elemento en el terreno, mientras que en el eje azimutal la discriminación se hace a través del cambio de frecuencia Doppler, producto de las distintas velocidades relativas de los elementos del terreno por delante y detrás del sensor.

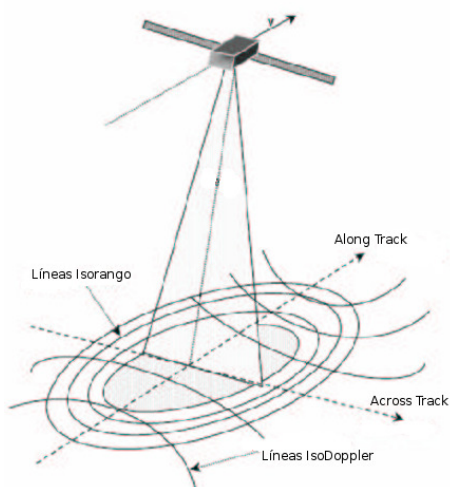


Figura 6.1: Iluminación del SHARAD sobre la superficie marciana

La información necesaria para completar una simulación de respuesta superficial consiste en: datos de ingeniería intrínsecos del instrumento (ancho efectivo del lóbulo de emisión/recepción, velocidad de muestreo en rango, resolución azimutal, longitud de onda emitida, inclinación de la órbita) y datos de la adquisición a efectuar (modelo digital de elevación, mapa de características dieléctricas del suelo, par latitud/longitud de la trayectoria particular).

Las características de ingeniería del SHARAD son provistas libremente por NASA y por el constructor del instrumento, de origen italiano. Por el lado del dato superficial, existen dos tipos de modelos digital de elevación que pueden ser usados como entrada en el simulador, cada uno de ellos con distintas características. El primero en considerarse es el MOLA (por traducción del inglés Altimetro Laser del Orbitador de Marte) a bordo del Mars Global Surveyor. Desde su arribo a Marte en 1998, MOLA consiguió mapear la altimetría de su superficie completa con resolución vertical de 2 metros localmente y 30 metros global, y con un espaciado horizontal de 160 metros ( $1/128^\circ$ ). El instrumento está provisto de un LIDAR (Light Detection And Ranging) que consiste en un emisor de pulsos laser y un cronómetro que registra el tiempo que demora cada uno de los pulsos en viajar desde la plataforma hasta la superficie marciana y retornar. En función de este tiempo y conociendo con cierta precisión la órbita de la sonda, se conforma una grilla que describe la topografía del planeta.



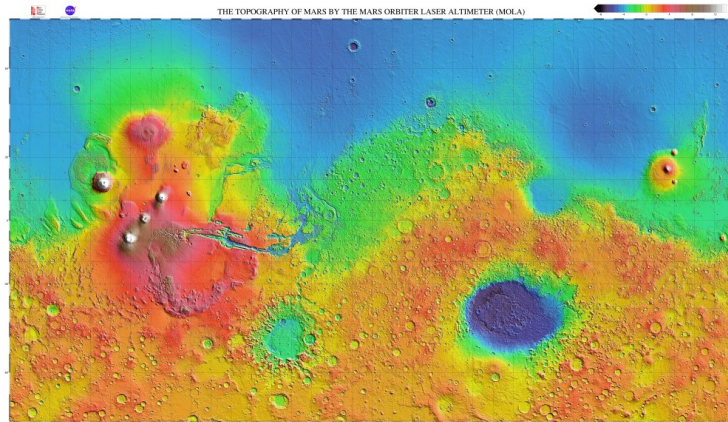


Figura 6.2: La cobertura de altimetría de Marte por parte de MOLA abarca todo el planeta.

La otra fuente de información superficial es la provista por la cámara HRSC (High Resolution Stereo Camera) con la que está equipada el orbitador Mars Express. El HRSC toma imágenes estereoscópicas con las que a través de un post-procesamiento se pueden alcanzar resoluciones horizontales y verticales de hasta 59 metros y 10 metros respectivamente. Esta mejora en densidad de puntos se ve opacada por la actual pobre cobertura planetaria de DTM's adquiridos y procesados, debido en parte al pequeño *swath* del instrumento. Por este motivo, en este trabajo se utilizaron los DEM's del HRSC tan sólo como complemento de otra grilla MOLA que la solape espacialmente.

## 6.1. Reflectividad

La onda electromagnética emitida por el radar y que incide en una porción del terreno marciano puede reflejarse especularmente, refractarse a través de la interfase atmósfera-suelo, ó una combinación de ambos fenómenos. Distintos modelos físicos fueron propuestos para describir el comportamiento de una onda electromagnética (o la luz visible como caso particular) al “golpear” la transición de dos medios de propagación. Para este trabajo se consideraron 3 modelos de reflexión, con distinta complejidad entre ellos. A saber:

**Lambert** El más sencillo de los modelos implementados es el Lambertiano o también llamado “ley de emisión del coseno”, en la cual se supone que la intensidad de la señal propagada en dirección a un vector  $\hat{k}$  que incide sobre una superficie con normal  $\hat{n}$  se refleja en forma isotrópica, también llamada difusa, con intensidad proporcional a  $\hat{k} \cdot \hat{n}$ . El producto interno de estos vectores unitarios resulta en el equivalente al coseno del ángulo entre ellos, de allí el nombre por el que se conoce a este modelo. No se considera ninguna propiedad dieléctrica de los medios por los que se propaga la onda ni tampoco la polarización de la onda incidente, por lo que su aplicación, a la vez de ser simple, es la más general e imprecisa.

**Fresnel** El cálculo de reflectividad via Fresnel ofrece una mejora al modelo Lam-

bertiano al incorporar entre sus parámetros a la constante dieléctrica de los medios que definen la interfase. De esta forma se pueden considerar valores dieléctricos típicos de la superficie marciana y de su atmósfera para una simulación más precisa. La intensidad retornada de la superficie depende de la polarización de la onda electromagnética emitida, expresada para el caso de una emisión polarizada horizontal empleada por SHARAD como:

$$R_s = \left[ \frac{n_1 \cos \theta - n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta\right)^2}}{n_1 \cos \theta + n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta\right)^2}} \right]^2$$

donde  $\theta$  es el ángulo de incidencia de la onda,  $n_1$  y  $n_2$  las constantes dieléctricas de los medios.

Hagfors El modelo Hagfors[9] considera, tal como Fresnel, la constante dieléctrica para el cálculo de reflectividad y a su vez incorpora los parámetros de rugosidad de la superficie. Aunque no existen en la actualidad mapas de rugosidad de superficie marciana, estos valores podrían ser inferidos observando las sombras proyectadas sobre la superficie, provocadas por las irregularidades del terreno, con herramientas ópticas, tales como el sensor de alta resolución HiRISE a bordo del MRO.

$$R_s = \frac{C \rho_0}{2} (\cos^4 \theta + C \sin^2 \theta)^{-3/2}$$

donde el parámetro  $C$  se toma generalmente como la inversa cuadrada de la altura rms del terreno.

## Capítulo 7

# Complejidad, diseño e implementación

### 7.1. Complejidad

Se analizarán aquí los motivos por los cuales la complejidad de la simulación de SHARAD no es computacionalmente exigente. En primer lugar el objetivo del algoritmo es generar las ambigüedades izquierda-derecha de la observación directa a nadir. Ésto significa que la simulación detallada de la ingeniería y navegación puede ser pasada por alto y que tan sólo es necesario encargarse de la geometría de observación. Esta decisión nos permite evitar el cálculo del gran volumen de datos crudos recibidos por el radar.

De esta forma, el radargrama se sintetizará en forma ideal -en sentido de la ingeniería- y cada una de sus columnas (que representan una única posición azimutal del terreno) no presentará ambigüedades adelante-atrás producidas por un mal enfoque Doppler.

Por lo tanto, a consecuencia de lo anterior, por cada pulso sólo será necesario “recorrer” los puntos del terreno que se encuentren sobre la línea *across-track* en el que fue emitido y no por sobre el total de la superficie de la huella del radar.

Si consideramos una cantidad  $n$  de facetas, que componen al terreno efectivamente barrido, como el tamaño de la entrada al algoritmo, entonces podemos suponer que la complejidad del mismo es lineal con respecto a  $n$ . Esto se debe a que cada una de las facetas es accedida una única vez durante la simulación para calcular la distancia y su orientación al satélite.

### 7.2. Implementación

Como primer paso del algoritmo, se carga en una matriz en memoria el *modelo digital de elevación* (DEM en inglés) de la zona que se quiera analizar. Dos modelos de elevación fueron elegidos para efectuar las simulaciones, los provenientes del sensor MOLA con un tamaño de pixel de 160 metros y los DTM, generados con imágenes del sensor HRSC del *Mars Express*, con píxeles de 2 metros de lado. Los tiempos de ejecución para las corridas utilizando MOLA

fueron del orden de minutos, mientras que para las que utilizaban DTM fueron del orden de decenas de minutos; consecuencia esperable considerando que la proporción de la cantidad de información para procesar entre uno y el otro es 6400:1 para un área de igual tamaño. A continuación se cargan, desde un archivo provisto por NASA, las alturas de distintos puntos registrados de la órbita en un vector, deteniéndose en aquéllos equiespaciados por la resolución azimutal del instrumento. En esos puntos se inicia el procedimiento de generación de una columna del radargrama. Desde el punto de nadir instantáneo se obtienen las alturas del terreno a ambos lados del track del orbitador sobre el terreno. La velocidad de este paso del algoritmo también depende de la densidad de puntos con los que está registrado el modelo digital de elevación. La extensión de esta recta perpendicular al radar track se asume de 1 grado a cada lado, y para cada uno de los puntos del terreno que sean “pisados” por ella se calcula la retrodispersión teniendo en cuenta altura, posición en el terreno y orientación a la plataforma. La altura y la distancia al radar definen en que momento su eco llegará al sensor en relación al resto de los ecos. La orientación de la faceta correspondiente a la grilla, considerando alguno de los tres modelos de scattering, determina la intensidad de la señal recibida. Aquellos ecos que son recibidos en un mismo intervalo de discretización temporal del conversor A/D del radar son percibidos como una única señal con intensidad igual a su suma de intensidades. Este procedimiento es repetido por cuantos pulsos haya emitido el radar durante su trayectoria y el resultado es posteriormente graficado conformando el radargrama final.

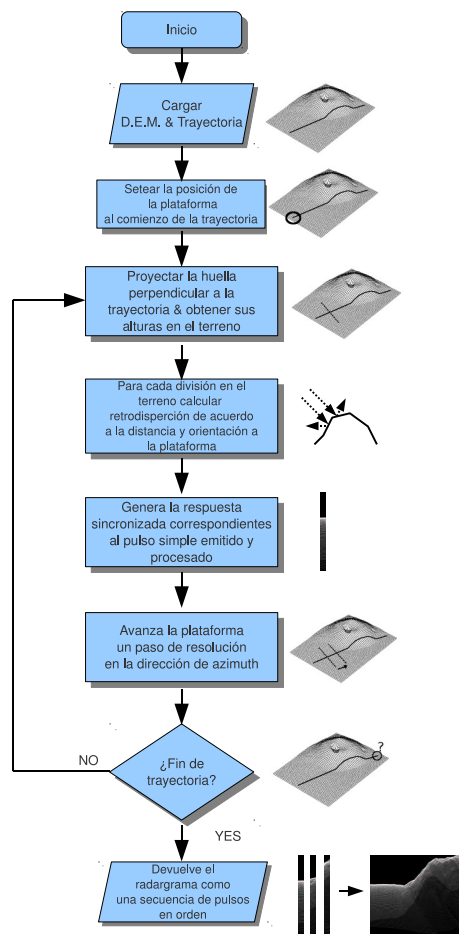


Figura 7.1: Diagrama de flujo de la simulación SHARSIM.

### 7.3. Diseño

La división de clases del simulador comienza con la clase principal que representa la corrida, llamada *Run*. En ella se definen las distintas instancias e interacciones de los objetos. Su primer responsabilidad es la de instanciar un objeto *SHARAD* con la trayectoria correctamente definida a través de su par inicial y final de latitud/longitud marciana y altura local de la órbita. A su vez se instancia la clase *Terrain* cuya responsabilidad es la de cargar desde un archivo en disco el modelo digital de terreno correspondiente al radagrama a realizar. *Terrain* también provee rutinas de utilidad tales como aquella que calcula el vector normal para cualquiera faceta en el terreno y la conversión de coordenadas hacia y desde latitud-longitud y columna-fila de la matriz que soporta el DEM, entre otras. La clase *Mars* se encuentra asociada al terreno y contiene la información que corresponde al esferoide marciano, utilizándose, por ejemplo, para calcular la distancia entre dos coordenadas del planeta.

Los parámetros de ingeniería y órbita se encuentran especificados en la clase *SHARAD*. De ésta se derivarán las coordenadas en el terreno por las que pasa

la línea de nadir.

El resultado de la simulación se almacena dentro de una instancia de la clase *Radargram*, la cual convierte los ecos individuales asociados a una intensidad de respuesta con un punto  $(x, y)$  dentro del radargrama sintético con su correspondiente amplitud.

La estructura desacoplada del diseño permite reutilizarlo para la simulación de otros sistemas con parámetros disímiles. Éste podría ser el caso de la sonda *MARSIS* (*Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding*), otro radar de penetración en órbita alrededor de Marte, que cuenta con una profundidad mayor de inspección y resolución espacial más gruesa.

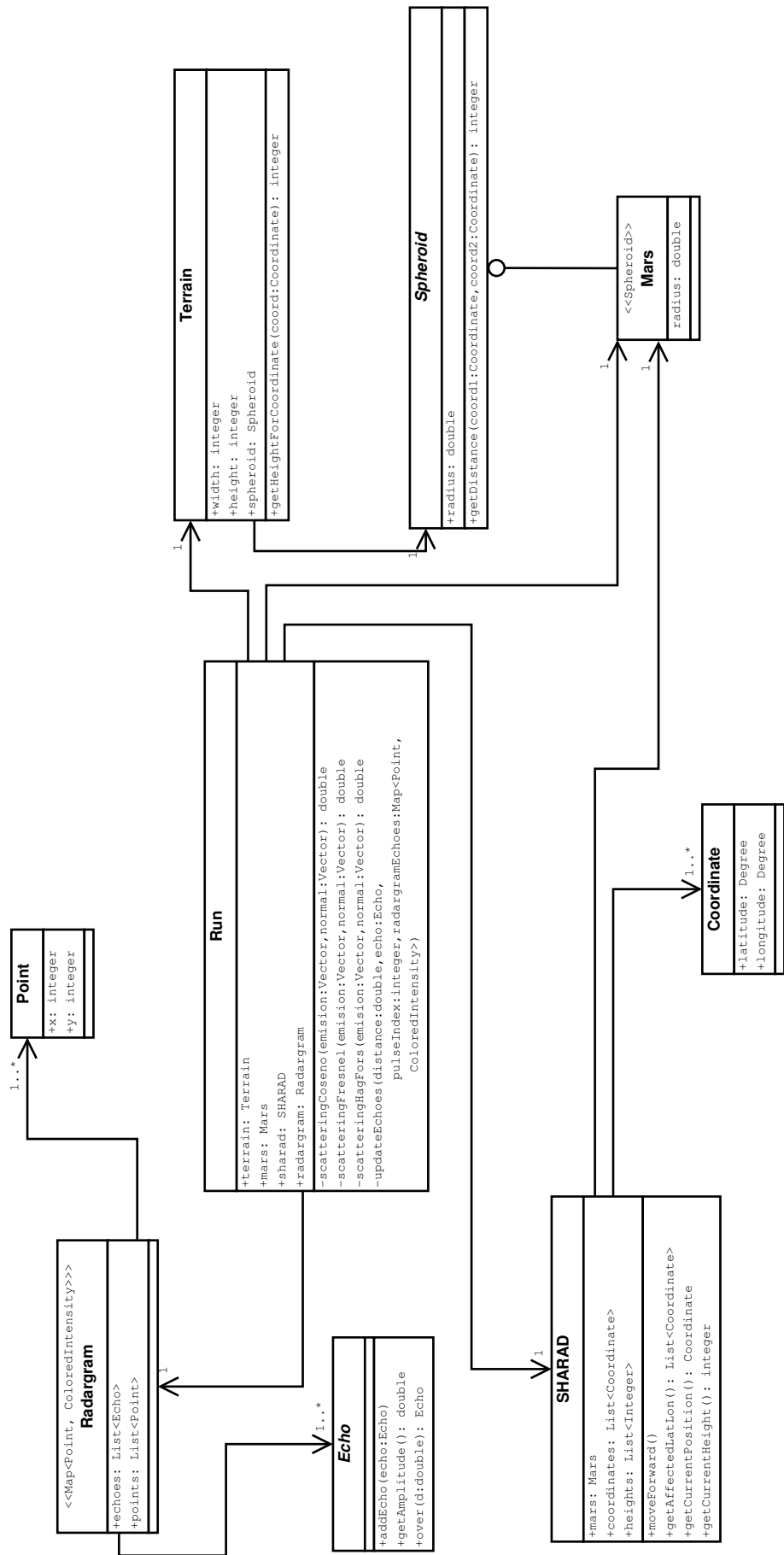


Figura 7.2: Gráfico UML del diseño de clases del SHARSIM

## Capítulo 8

# Resultados

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos en distintas corridas del simulador SHARSim con el propósito de evaluar su eficiencia en cuanto a calidad de simulación. El sistema donde se efectuaron las simulaciones fue una computadora de escritorio con 2 GB de memoria y procesador de núcleo doble a una frecuencia de reloj de 2.8 GHz; con tiempos promedio de corrida de aproximadamente dos minutos.

No se han evaluado los tiempos de simulación de cada corrida, siendo estos bastante acotados en duración. El tamaño de la entrada de datos está restringido por la capacidad del radar para proveer radargramas. Esto deriva en que la entrada del algoritmo es una matriz de tamaño siempre acotado, donde el tiempo de ejecución del mayor de los problemas resulta prácticamente instantáneo corriendo en computadoras de escritorio modernas.

### 8.1. Simulación de características del terreno

Para considerar exitosa a una simulación de radargrama SHARAD es necesario evaluar la precisión con que se pueden replicar la geometría y la radiometría observada. Errores en la estimación de la altura de la órbita de un sensor pueden provocar alteraciones en la localización de cada retorno de pulso dentro del radargrama simulado. Sin embargo, en la práctica, esto no es muy significativo debido a la baja elipticidad de la órbita del MRO (periapsis: 255km y apoapsis: 320km). La densidad y la precisión de la localización de los puntos de la grilla que describe al terreno también tiene impacto en la geometría resultante de la simulación. Con el propósito de evaluar las dos fuentes de DEM con las que contamos en la actualidad se corrieron simulaciones donde la entrada del mapa digital de elevación elegido fueron los provenientes del instrumento MOLA y del HRSC respectivamente.

En cuanto a la radiometría, la intención al desarrollar este simulador fue la de proveer una herramienta que ayude a la discriminación de señales que provengan de las capas inferiores del suelo marciano, y no la de generar una simulación exacta de la intensidad de señal percibida por el instrumento SHARAD, siendo ésta dependiente de factores desconocidos al autor, tales como calibración interna del radar y constante dieléctrica intrínseca del tipo de terreno observado. Es por esta razón que el énfasis fue puesto en la precisión de la simulación de intensidad



*relativa* de cada reflector en el terreno con respecto a otro reflector en el mismo radargrama.

### 8.1.1. Depresiones

En la figura 8.1 se pueden observar la similitud entre la geometría de una simulación (arriba a la izquierda) y un radargrama observado (abajo a la izquierda) para las zona aledañas al Elysium Mons. Es apreciable en el radargrama la influencia de parte de la ladera volcánica y cráteres dispuestos a los costados del track del radar. El detalle en azul señala la influencia de un cráter cercano a nadir en el radargrama real y su simulación, pudiendo éste ser confundido con la respuesta de un estrato subterráneo. La adquisición comienza en la coordenada identificada con **A** y termina en **B**.

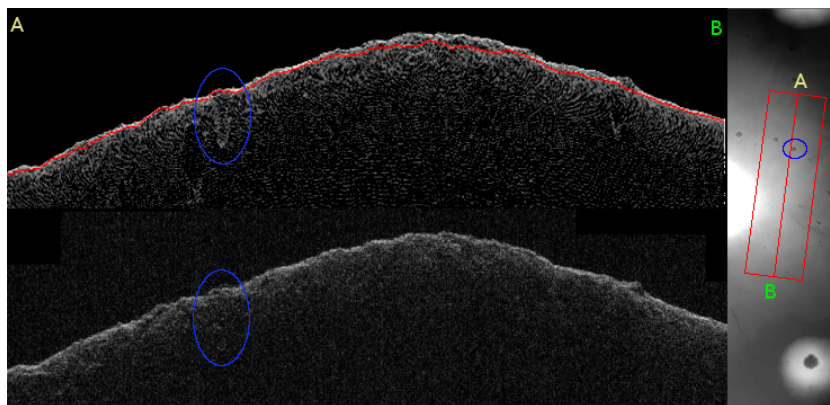


Figura 8.1: Geometría de una simulación (arriba izquierda) y radargrama observado (abajo izquierda). Mapa digital de terreno en escala de grises (derecha). La adquisición comienza en la coordenada identificada con **A** y termina en **B**.

### 8.1.2. Elevaciones

Se utilizó como entrada un modelo de terreno próximo a la caldera del volcán *Pavonis Mons*, que se encuentra muy cerca del ecuador marciano. El experimento intenta evaluar el criterio de posicionamiento de la señal retornada del nadir por el simulador. En la figura 8.2 puede observarse que el retorno de señal proveniente de la ladera lateral al track llega con menor demora al sensor con respecto al rebote de nadir.

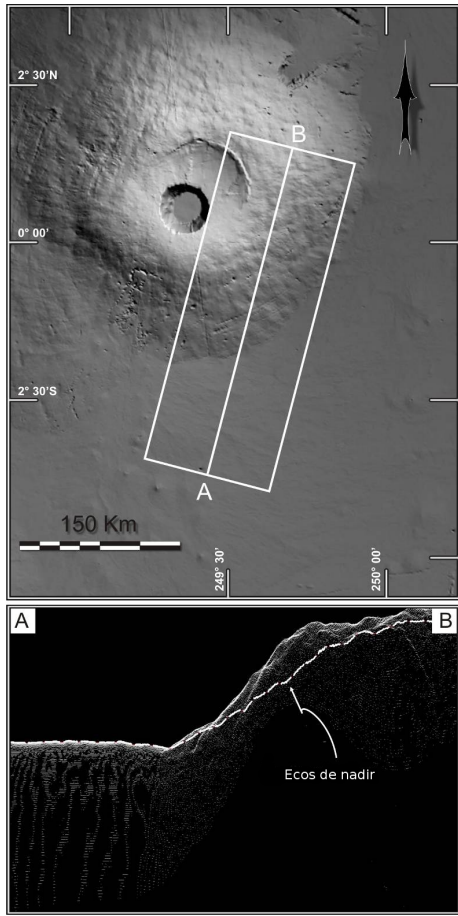


Figura 8.2: DEM de MOLA del sector de Pavonis Mons utilizado para simular el radargrama (arriba). El track de la plataforma y el area iluminada está marcada por el rectángulo blanco (el comienzo y el fin de la simulación está marcada con A y B respectivamente). En el radargrama simulado (abajo) la reflexión de nadir está marcada con una línea cortada.

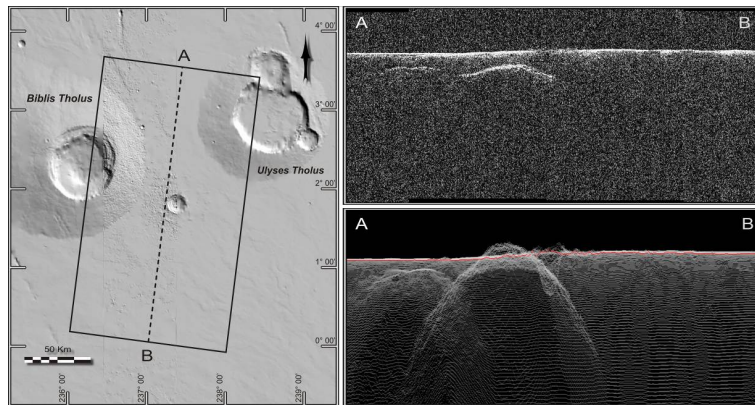
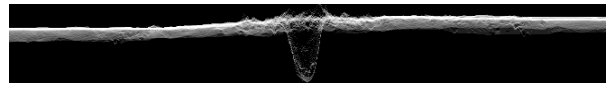


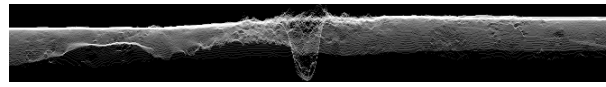
Figura 8.3: Esta figura muestra la comparación entre un radargrama real y la simulación de *clutter*. A la izquierda se encuentra un mapa de alturas MOLA con un realce de resolución proveniente del HRSC-DTM, junto a la huella de observación del radar.

## 8.2. Ancho de la huella

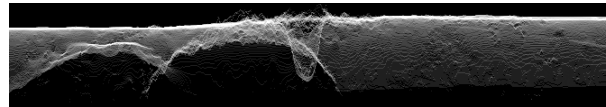
Utilizando el mismo set de datos de la región de Biblis Tholus expuesta en la figura 8.3 se realizó una serie de simulaciones con distintos anchos de huella en el terreno. El propósito de la simulación es el de visualizar la influencia del *clutter* lateral percibido a medida que se incorpora más terreno en la observación. Con pasos de  $0.25^\circ$  marcianos se incrementa el ancho de la huella y progresivamente se suman al radargrama simulado la señal proveniente de distintas características del terreno. En primer lugar aparecen las laderas de ambos depósitos volcánicos (Biblis y Ulyses Tholus) para luego dar lugar a sus respectivos cráteres. A su vez, comparando el número de artefactos presentes en la adquisición registrada con la simulada, es posible obtener la sensibilidad y el tamaño real de la huella del instrumento sobre la superficie.



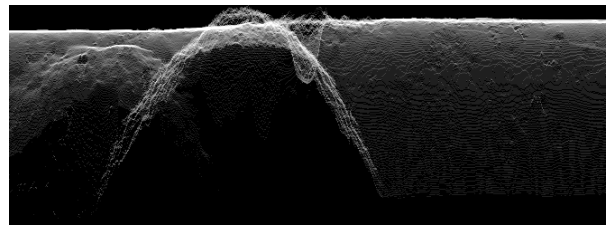
(a) Radargrama simulado para un ancho de huella =  $0.5^\circ$ .



(b) Ancho de huella =  $0.75^\circ$ .



(c) Ancho de huella =  $1.00^\circ$ .



(d) Ancho de huella =  $1.25^\circ$ .

Figura 8.4: Simulaciones SHARSim con ancho de huella incremental.

### 8.3. Densidad del DEM

El siguiente análisis intenta comparar la calidad de la simulación basadas en las dos fuentes de información topográfica marciana que se disponen al momento: los modelos digitales de elevación MOLA y HRSC. Debido a la baja disponibilidad y poca cobertura de los modelos de elevación HRSC, se generó un compuesto entre éste último y los de baja resolución del MOLA con el propósito de evaluar la simulación de alta resolución. En la figura 8.5 se puede apreciar el resultado de las dos simulaciones, comprobando que los 4 cráteres más notorios en cercanía del *track* del radar son visibles en ambos radargramas sintéticos. A pesar de resultar distintas desde el punto de vista cuantitativo, los radargramas simulados que utilizan el DEM de alta resolución no presentan mayor cantidad de artefactos ni manifiestan más complejidad en ellos. Posiblemente existan terrenos que por su irregularidad requieran una resolución topográfica equivalente al HRSC para poder simular fehacientemente su respuesta al radar, aunque en este trabajo no se hayan observado.

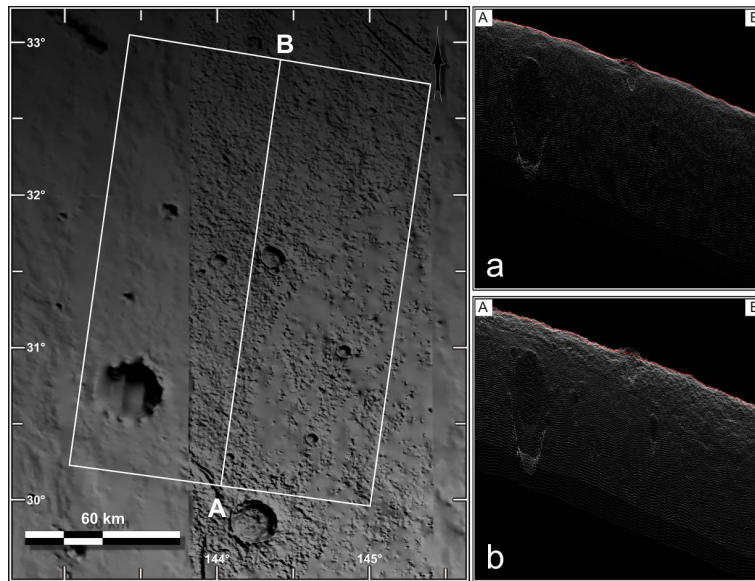


Figura 8.5: A la izquierda de la figura se muestra un mosaico de DEM MOLA y DTM del HRSC utilizados. El track de la plataforma y la zona iluminada está marcada por un rectángulo blanco, siendo A y B en ambas figuras el inicio y fin de la simulación respectivamente. En los radargramas simulados (derecha: MOLA **a**, HRSC DTM+MOLA **b**) el eco de nadir está marcado en rojo.

## 8.4. Modelos de reflectividad

Se testeó el comportamiento de los distintos modelos de reflectividad para una zona ubicada en el ecuador del planeta Marte. Esta evaluación dió como resultado la serie de radargramas sintéticos presentados en la figura 8.6.

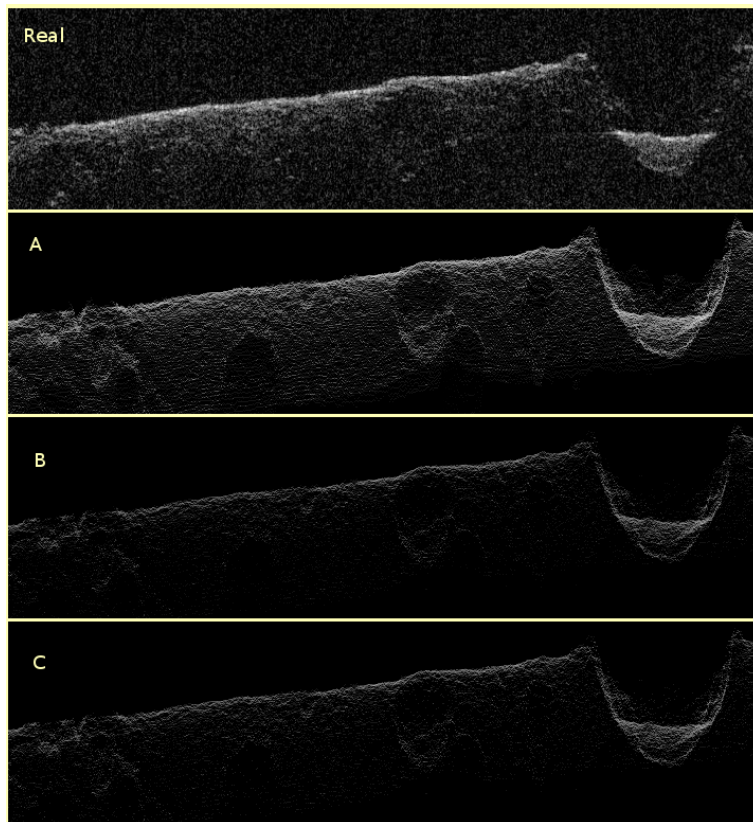


Figura 8.6: Radargramas simulados considerando tres modelos distintos de reflectividad: (A) reflectividad Lambertiana (ley del coseno), (B) Fresnel y (C) Hagfors. Arriba se encuentra el radargrama adquirido.

Se puede observar que con el sencillo modelo del *coseno* ya es posible efectuar contrastaciones en las que se reconocen detalles similares entre el radargrama real y el sintetizado. También es posible ver que para los modelos restantes se asigna un menor peso a la respuesta de reflectores laterales en contraste con la respuesta directa de nadir, haciendo menos visible la información que potencialmente puede confundirse con señal proveniente de capas subsuperficiales.

## Capítulo 9

# Conclusiones

Se presentaron dos simuladores que cumplen objetivos acotados, pero que a su vez sirven como esqueleto para próximas versiones mejoradas. Para el caso de CIRawSiS, se comprobó la factibilidad de una simulación exacta que tenga en cuenta alteraciones en la trayectoria de navegación, perturbación en la actitud de la plataforma, defectos en la ingeniería, daños en la comunicación con la base terrena. Las potenciales aplicaciones no se restringen a la evaluación de un diseño de radar satelital. También se podría adaptar para convertirse en parte de una simulación mucho más grande que incluya una aplicación particular de obtención de información biofísica (i.e. humedad del suelo). De esta forma puede propagarse de forma numérica el error que aporta el sistema a la variable observada. La posibilidad de correr en forma paralela una simulación, que por calcularse en dominio temporal es tan demandante computacionalmente, permite escalar con fluidez mayores requerimientos a más cantidad de nodos en un cluster.

En cuanto a SHARSim, su uso tiene una clara aplicación en la eliminación de ambigüedades de radargramas. A través de éste se puede minimizar la subjetividad del usuario de radargramas al momento de evaluarlos. Incluso podría extenderse su funcionalidad y automatizar el filtrado de ecos superficiales sin intervención de un operador.

Se concluye entonces que el poder de cálculo disponible actualmente a través de procesadores multinúcleo, *clusters* y computación *Grid* permite efectuar simulaciones precisas de adquisiciones de radar. De esta forma es posible satisfacer objetivos como la determinación del alcance, el diseño y la evaluación de un sistema de radar; como también realzar la visualización de los productos operacionales integrando información agregada.

# Bibliografía

- [1] John C. Curlander and Robert N. McDonough, “*Synthetic Aperture Radar, Systems and Signal Processing*”, John Wiley & Sons, EE.UU., 1991.
- [2] Ian G. Cumming, Frank H. Wong, “*Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data, Algorithms and Implementation*”, Artech House, Norwood, MA, 2005.
- [3] Giorgio Franceschetti, Maurizio Migliaccio, Daniele Riccio, Gilda Schirinzi, “*SARAS: a synthetic aperture radar (SAR) raw signal simulator*”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 30, N<sup>o</sup> 1, Enero 1992.
- [4] F. T. Ulaby, R. K. Moore and A.K. Fung, “*Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Vol. I – Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry*” Addison-Wesley, 1981
- [5] J. D. Jackson “*Classical Electrodynamics*” Wiley, 1998
- [6] Oracle-Sun “*JAVA Language*”, <http://www.oracle.com/technetwork/java>, 2010
- [7] NASA, “*Mars Orbiter Laser Altimeter*”, <http://tharsis.gsfc.nasa.gov/MOLA/>, 2010
- [8] Seu, R., Biccari, D., Cartacci, M., Cicchetti, A., Fuga, O., Giuppi, S., Masdea, A., Noschese, R., Picardi, G., Federico, C., Frigeri, A., Melacci, P. T., Orosei, R., Croci, R., Guelfi, M., Calabrese, D., Zampolini, E., Marinangeli, L., Pettinelli, E., Flamini, E. and Vannaroni, G., “*The SHALLOW RADAR (SHARAD) Experiment, a subsurface sounding radar for MRO*”, Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplement, 11:26-36, 2007.
- [9] B. A. Campbell, “*Radar remote sensing of planetary surfaces*” Cambridge, 2002
- [10] M.G. Spagnuolo, F. Grings, P. Perna, M. Franco, H. Karszenbaum, V.A. Ramos, “*Multilayer simulations for accurate geological interpretations of SHARAD radargrams*”, Planetary and Space Science (2010), en prensa.



# Índice alfabético

- acortamiento de pendiente, 30
- aliasing, 15
- ancho de banda, 15
- ancho de lóbulo, 14
- antena, 12
- azimut, 11, 14
  
- backscattering, 24
- beamwidth, 14
- biestático, 12
- blanco, 13
  
- chirp, 12, 25
- clutter, 14
- control automático de ganancia, 15
  
- datos crudos, 14
  
- footprint, 13
- foreshortening, 18
- Fresnel, 51
  
- GPR, 36
  
- Hagfors, 51
- HRSC, 38, 40
- huella, 13
  
- in-phase, 15
- inversión de pendiente, 31
  
- Lambert, 51
- layover, 19
  
- MARSIS, 43
- microondas, 8
- MOLA, 37, 40
- monoestático, 12
- MRO, 37
  
- nadir, 13
  
- órbita, 12
  
- plataforma, 26
- polarización, 9, 12
- procesador SAR, 27
- pseudo-sombreado, 19
  
- quadrature, 15
  
- RADARSAT, 12, 15
- rango, 14
- reflector, 24
- retrodispersión, 24
  
- SAR, 11, 12
- scatterer, 24
- SHARAD, 36
- sombreado, 20
- speckle, 17
  
- target, 13
- terreno, 24
- track, 13
- trayectoria, 26