

Radar de alta resolución en distancia onda continua y modulación lineal en frecuencia para la obtención de imágenes ISAR sin compensación de movimiento¹

CWLFM high range resolution radar for ISAR imaging without motion compensation

Álvaro Blanco del Campo², Alberto Asensio López³,
Javier Gismero Menoyo⁴ y Javier Carretero Moya⁵

Recepción: 16-jun-2008/Modificación: 08-oct-2008/Aceptación: 08-oct-2008
Se aceptan comentarios y/o discusiones al artículo

Resumen

Recientemente han surgido nuevas aplicaciones para los sistemas radar, tanto en el campo civil como en el militar. Estas nuevas aplicaciones exigen la obtención de más información sobre el blanco. Hasta ahora bastaba con saber su posición y velocidad aproximada, sin embargo, la necesidad de una mayor seguridad y control requiere el conocer estas características con mayor precisión, e incluso la obtención de una “imagen radar” del blanco para poder clasificarlo o identificarlo.

¹ Este trabajo ha sido realizado gracias a los fondos recibidos por el Ministerio Español de Ciencia y Tecnología.

² Doctor Ing. Telecomunicaciones, alvaro@gmr.ssr.upm.es, investigador contratado, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid-España.

³ Doctor Ing. Telecomunicaciones, vera@gmr.ssr.upm.es, catedrático de universidad, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid-España.

⁴ Doctor Ing. Telecomunicaciones, javier@gmr.ssr.upm.es, profesor titular, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid-España.

⁵ Ing. Telecomunicaciones, jcarretero@gmr.ssr.upm.es, becario de doctorado, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid-España.

Este artículo explica cómo obtener imágenes ISAR con un radar de onda continua y modulación lineal de frecuencia, no sólo a nivel teórico sino mostrando también los resultados obtenidos en numerosos experimentos durante los cuatro años de duración de un proyecto de investigación financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología español. Destacando la calidad de las mismas y que, sobre los blancos, no se tenía ningún tipo de control ni de colaboración, lo cual, hace que los resultados sean mucho más importantes desde un punto de vista práctico.

Palabras claves: HRR (Radar de Alta Resolución en distancia), compensación de movimiento, ISAR, ancho de banda, milimétricas.

Abstract

Over the last years new radar systems uses have been arisen, both civil and military field. These further uses demand more data about the radar targets. Up to now, was enough to know its location, rough velocity and an approximate motion direction, even though, now there is a growing need of security and control, which requires higher accuracy measuring these targets's characteristics, even to obtain a "radar image" trying to classify or identify it.

This article explains how to obtain ISAR radar images, especially using a Continuous Wave Linear Frequency Modulated Radar (CWLFM), not only in a theoretical way but also showing the results achieved in a lot of different experiments made during a four years research–project sponsored by the Spanish Ministry of Science and Technology, emphasizing the high quality of the images obtained, and also, that any kind of control or collaboration was expected from the target. Making the result more important from a practical point of view, opening up much more possible applications to radar systems.

Key words: CWLFM, radar images, ISAR, doppler, ships, motion compensation.

1 Introducción

Los diseñadores de sistemas radar han de afrontar nuevos retos a la hora de pensar en nuevos dispositivos. La evolución actual y futura de los posibles prototipos conlleva el desafío de conseguir sistemas más ligeros, compactos y con capacidad de multifunción, capaces de obtener gran información sobre el blanco, más allá de su mera posición, dirección y velocidad.

Los sistemas radar convencionales son elementos tremendamente grandes y pesados que acarrear la creación de estructuras adecuadas para su ubicación, funcionamiento y mantenimiento. Una de las principales metas de los nuevos prototipos es hacerlos más ligeros y pequeños para no necesitar estas estructuras para su montaje y además facilitar su transporte y colocación. Aparte de estas características, siempre es interesante conseguir una mayor fiabilidad en los dispositivos, aumentando el tiempo de vida del sistema y, por tanto, abaratando el coste total [1].

Para conseguir estas nuevas características: obtención de mayor información, flexibilidad, tamaño pequeño, ligero, aumento del tiempo de vida, reducción de coste, etcétera, el diseñador radar se puede aprovechar del desarrollo de dos tecnologías principalmente: el desarrollo del procesado digital de señal, que permite el manejo de mayor volumen de información a bajo coste; o el de los Circuitos Monolíticos Integrados (MMICs), gracias a los cuales ya se puede trabajar en bandas altas de frecuencia como Ka, Ku, V ó W.

El procesado digital de señal ha evolucionado enormemente en los últimos años, el desarrollo de dispositivos de generación Digital Directa de Señal (DDS) junto con el de los Procesadores Digitales de Señal (DSP) de propósito general, han conseguido que se puedan generar modulaciones de gran ancho de banda, muy alta calidad y con un precio razonable [2]. Esto, junto con el desarrollo de receptores capaces de muestrear grandes anchos de banda en recepción y de almacenar y procesar la información obtenida, ha posibilitado el desarrollo de *High Resolution Radars* (HRR's). Todo esto a un precio razonable puesto que se ha generalizado su uso para múltiples y muy diversas aplicaciones, posibilitando el desarrollo de sistemas versátiles y multifuncionales [3], es decir, la nueva generación de radares.

En segundo lugar, el desarrollo de los MMICs, tanto por la mejora de los sustratos utilizados (AsGa y SiGe), como por el empleo de nuevos con bandas prohibidas mayores (SiC y GaN), que permiten la construcción de dispositivos amplificadores a frecuencias mayores y con mayor punto de 1 dB de compresión [4]. Desgraciadamente, para alcanzar coberturas razonables, del orden de decenas de kilómetros, todavía se hace necesario transmitir señales de onda continua que no requieran altas potencias de pico [5].

A su vez, gracias al empleo de bandas de frecuencia superiores, es más fácil el desarrollo de componentes y sistemas que manejen mayores anchos

de banda, de varios gigahertzios, y por lo tanto, resoluciones en distancia de centímetros [6], permitiendo obtener más información sobre la forma del blanco (Firma Radar), al menos en su dimensión radial.

Al tener una información tan buena en esta dimensión puede hacerse una primera clasificación [7, 8], sin embargo, gran número de las nuevas aplicaciones que surgen requieren ir más allá, a la identificación del blanco.

Hasta ahora, se ha comentado que es posible conseguir un sistema compacto, ligero, con capacidad para transmitir un gran ancho de banda y todo ello debido al empleo de DSPs, DDSs y monolíticos en bandas altas de frecuencia, pero esto sólo posibilita la obtención y el procesado de información sobre el blanco en una dimensión, la radial. El salto cualitativo de estos sistemas es la obtención de imágenes que sean capaces de competir con los sistemas ópticos o térmicos, no en calidad sino en la posibilidad de obtener imágenes bajo cualquier condición meteorológica (lluvia, nieve, niebla, tormentas de arena, ...) [9].

El elemento que fija la resolución en la segunda dimensión, la azimutal, es la antena del sistema. Para conseguir haces muy estrechos, y por tanto, buena resolución, se necesitan aperturas de varias λ , sin embargo, pese a trabajar a frecuencias elevadas, en las cuales las longitudes de onda son pequeñas, y por tanto se pueden construir antenas con tamaños razonables y haces muy estrechos, a grandes distancias, la resolución azimutal no es suficientemente buena para los blancos típicos (barcos, aviones, coches, etcétera) necesitándose otra solución alternativa al problema.

La posibilidad de mejorar la resolución azimutal se consigue realizando procesado coherente, procesado Doppler, sección 2, similar al realizado en los sistemas *Synthetic Aperture Radar* (SAR). Mediante el almacenamiento sucesivo de los ecos, haciendo que el radar se mantenga quieto y esperando que el blanco se mueva, se puede sintetizar un haz lo suficientemente estrecho como para tener resoluciones buenas en azimut. Sin embargo, existe la necesidad de almacenar toda esta información y procesarla, lo cual puede hacer que el sistema de adquisición sea bastante caro, limitando, por precio, el número de posibles aplicaciones de los radares.

En el Grupo de Microondas y Radar (GMR) se ha desarrollado un radar de alta resolución en distancia con modulación lineal de frecuencia que utiliza un esquema de recepción heterodino [10], que permite el almacenamiento de

datos con gran resolución en distancia, hasta 2 GHz de ancho de banda transmitido, lo que da 7,5 centímetros de resolución, de medio alcance (hasta 20 kilómetros para barcos), y con una frecuencia de muestreo en recepción baja, 10 MHz, pudiendo el sistema almacenar hasta varios segundos del blanco sin generar archivos de gran tamaño, hasta 150 MB. Dado que la tasa binaria final generada no es elevada, se abarata enormemente el sistema de adquisición de datos sin perder resolución en distancia o cualquiera de las características operativas del radar.

Respecto a la resolución azimutal, para mejorarla se utiliza el mismo principio físico que en el SAR, el movimiento relativo entre blanco y radar, es decir, frecuencia doppler, pero en este caso generado por el movimiento propio del radar, las denominadas técnicas ISAR. Estas técnicas, como se explicará en el apartado siguiente, consiguen diferenciar puntos del blanco que están en la misma celda de resolución, gracias a que inducen frecuencias doppler diferentes en los ecos recibidos por el radar en función del ángulo de observación.

En este artículo se explicará de manera sencilla la dependencia entre frecuencia doppler y ángulo de observación, obteniéndose las expresiones matemáticas que expresan dicha relación para un radar que transmita una modulación lineal en frecuencia. También, se explicará el proceso realizado para la obtención de las imágenes, las cuales se presentarán en el penúltimo apartado, especificando el movimiento relativo entre blanco y radar que las han originado. Discutiendo finalmente, en el apartado de conclusiones, su posible utilización para clasificación e identificación de blancos.

2 Procesado doppler: imágenes ISAR. Mejora de la resolución azimutal

La idea de la mejora de resolución azimutal, a través de la rotación del blanco, es conocida desde hace tiempo [11], en este apartado se intenta explicar, de manera sencilla, cómo mediante él se puede mejorar la resolución en azimut para, posteriormente, justificar el caso específico de un radar de onda continua y frecuencia modulada, con alta resolución en distancia, y finalmente comprobar las imágenes que se obtienen.

Suponga como blanco un avión, figura 1, y que todo él se encuentra en la misma celda de resolución. Fíjese en dos blancos puntuales del avión que

estén en los extremos de cada una de las alas, asignándoles a cada uno de estos blancos puntuales un vector de posición \vec{r}_1 y \vec{r}_2 respectivamente. Suponiendo el avión como un sólido rígido, ambos puntos tienen el mismo vector velocidad \vec{v} , sin embargo, la frecuencia doppler sólo se ve afectada por la componente radial de la velocidad, es decir, la proyección sobre el vector de apuntamiento del radar a cada uno de ellos \vec{r}_1 y \vec{r}_2 . Por tanto, $|\vec{v}_1|$ y $|\vec{v}_2|$ serán:

$$|\vec{v}_1| = |\vec{v}| \cdot \cos(\beta_1) = |\vec{v}| \cdot \cos(\gamma + \phi_1), \quad (1)$$

$$|\vec{v}_2| = |\vec{v}| \cdot \cos(\beta_2) = |\vec{v}| \cdot \cos(\gamma + \phi_2). \quad (2)$$

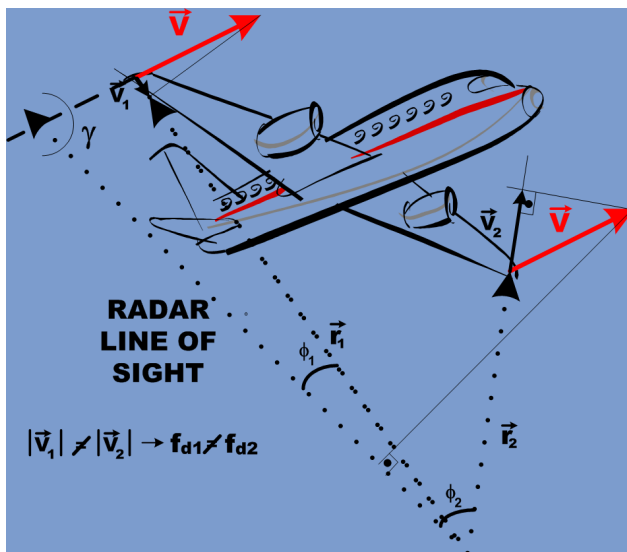


Figura 1: explicación de la variación doppler con el ángulo de observación

Al final lo que interesa es la diferencia de frecuencias entre un reflector y otro para poder estimar el gradiente doppler que va a generar y compararlo con la resolución doppler. Con lo cual se restan las expresiones (1) y (2), resultando

$$\begin{aligned} |\vec{v}_1| - |\vec{v}_2| &= |\vec{v}| [\cos(\gamma + \phi_1) - \cos(\gamma + \phi_2)] \\ &= |\vec{v}| [\cos(\gamma)(\cos(\phi_1) - \cos(\phi_2)) - \sin(\gamma)(\sin(\phi_1) - \sin(\phi_2))]. \end{aligned} \quad (3)$$

Si al mismo tiempo se usa la definición de frecuencia doppler

$$\Delta f_d = \frac{2(|\vec{v}_1| - |\vec{v}_2|)}{\lambda}, \quad (4)$$

siendo Δf_d la diferencia doppler entre los reflectores medida por el radar.

Así, empleando (3) y (4), se puede relacionar los ángulos de aspecto con las frecuencias doppler inducidas por el movimiento del blanco. Esta igualdad depende en gran medida de la dirección de apuntamiento, en definitiva del ángulo γ . Maximizar la frecuencia doppler inducida por el blanco supone, por lo tanto, encontrar la dirección de apuntamiento adecuada, lo cual no resulta nada evidente en un caso genérico en el cual no se tenga algún tipo de control sobre el movimiento del blanco. De esta condición proviene toda la dificultad de las técnicas ISAR, el intentar maximizar el gradiente doppler y mejorar la resolución en doppler todo lo posible, para intentar obtener la mejor imagen radar del blanco.

Sin embargo, para determinadas aplicaciones de vigilancia o de control, todos los blancos realizan trayectorias parecidas con movimientos parecidos, para los cuales sí se puede maximizar el gradiente doppler, y encontrar, para ellos, la dirección de apuntamiento óptima, obteniendo las mejores imágenes posibles sin necesidad de realizar un procesado de señal complejo que, evidentemente, produce un retardo a la hora de obtener resultados.

Aún así queda por explicar cómo a partir de los ecos radar recibidos se puede obtener: primero, la información en distancia de los blancos y, posteriormente, las frecuencias doppler de los mismos.

3 Procesado doppler: caso de una señal CWLFM

En el caso de un radar de onda continua y modulación lineal de frecuencia, la señal transmitida en función del tiempo se puede expresar como

$$S_t(t) : \cos(\omega_0 T + K T^2), \quad (5)$$

donde:

T_m es el periodo de la señal transmitida

t es el tiempo

$T = \text{mod} \left(\frac{t}{T_m} \right)$ siendo mod el resto de la división

$$T_m = \frac{1}{f_m}$$

$$K = \pi \cdot \Delta f \cdot f_m$$

Δf el ancho de banda transmitido

$$\phi_t(T) = \omega_0 T + kT^2.$$

Por simplicidad, y por no aportar ninguna información útil para el procesado doppler, se ha normalizado la amplitud de la señal y se ha supuesto que la fase inicial de la señal es la misma en cada período, puesto que en recepción se utiliza una muestra de la señal transmitida como oscilador local.

A su vez, los ecos a la entrada del receptor se pueden expresar como una réplica retardada de la señal transmitida, teniendo en cuenta que dicho retardo depende de la posición inicial del blanco respecto al radar y de su dinámica

$$S_R(t) : \cos(\omega_0(T - t_R) + K(T - t_R)^2),$$

donde:

$$\phi_R(T, t_R) = \omega_0(T - t_R) + K(T - t_R)^2$$

$$t_R = \frac{2R(t)}{c}$$

$R(t)$ es la posición del blanco

t es el tiempo.

En recepción se compara la fase transmitida con la recibida ($\phi_t(T)$ y $\phi_R(T, t_R)$), normalmente mediante un mezclador obteniéndose a su salida:

$$\begin{aligned} S_b(T, t_R) &: \cos(\phi_t(T) - \phi_R(T, t_R)) \\ S_b(T, t_R) &: \cos(\omega_0 t_R - K t_R^2 + 2K T t_R), \end{aligned} \quad (6)$$

donde únicamente se reseñan los términos paso bajo de la mezcla, dado que el resto de los términos generados se eliminan con un filtro paso bajo.

La señal de batido obtenida (6) es la muestreada por el ADC del receptor, y la que se procesará para la obtención de las imágenes radar. La forma usual de organizar los datos, una vez digitalizados, es usar la matriz radar (figura 2), la cual es una matriz bidimensional que tiene en cada columna los datos obtenidos en cada barrido lineal de frecuencia y, los barridos consecutivos, se van colocando en columnas consecutivas.

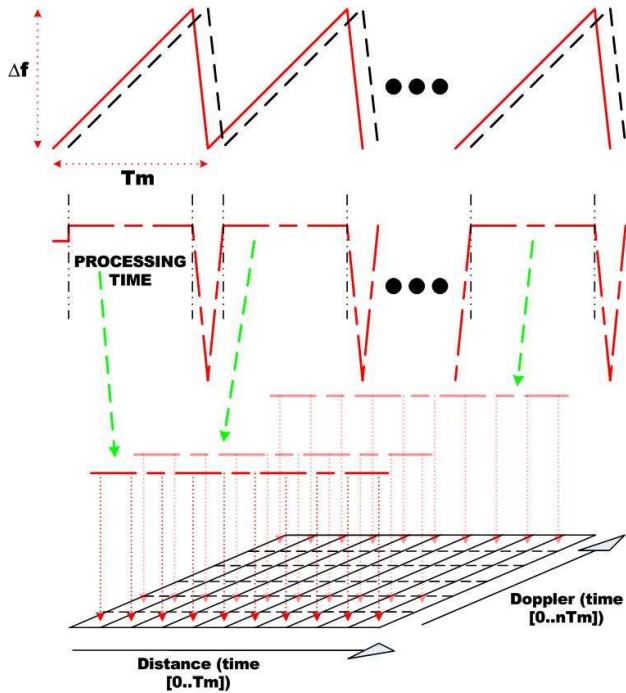


Figura 2: explicación de una matriz radar

Una vez hecho esto, el procesado que se realiza es sencillo, simplemente un enventanado en cada dimensión para mejorar el nivel de los lóbulos secundarios y dos FFT's, una por columnas, para cada barrido lineal de frecuencias y, posteriormente, por filas. El resultado de realizar la primera FFT se denomina imagen tiempo-distancia, figura 3, mientras que el resultado de la segunda, será la imagen distancia-doppler objetivo del sistema.

Para justificar el resultado de este procesado, se analizará lo que sucede en dos casos diferentes: cuando se tiene un blanco quieto y, posteriormente, uno en movimiento; para lo cual lo único que hay que hacer es sustituir t_R de la manera adecuada en (6).

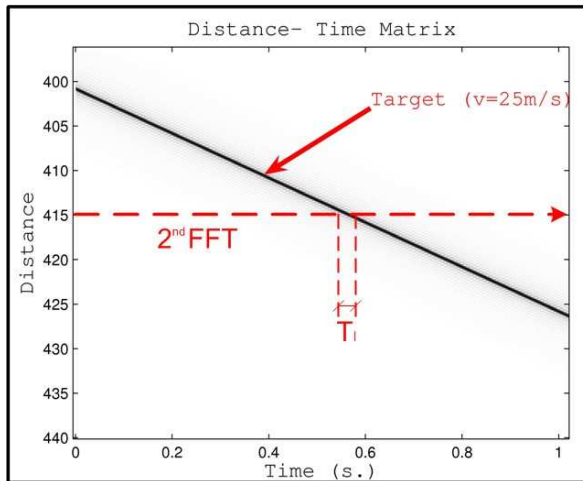


Figura 3: matriz distancia–tiempo con un blanco de velocidad 25 m/s

3.1 Blanco quieto

En este caso el retardo de los ecos, t_R , no varía con el tiempo. Se cumple que

$$t_R = \frac{2R_0}{c}, \quad (7)$$

donde R_0 es la distancia a la que se encuentra el blanco del radar. Sustituyendo (7) en (6), resulta

$$\phi_B(T) = \frac{4\pi f_0 R_0}{c} - \frac{4\pi R_0^2 \Delta f f_m}{c^2} + \frac{4\pi R_0 T \Delta f f_m}{c}.$$

La información de la posición, R_0 , se encuentra en la frecuencia instantánea de la señal de batido

$$f_b(T) = \frac{1}{2\pi} \frac{\delta \phi_B(T)}{\delta T} = \frac{2R_0 \Delta f f_m}{c}, \quad (8)$$

siendo lo que usualmente se conoce como frecuencia de batido. Para hallarlas y separar los diferentes blancos en distancia, hay que calcular las componentes espectrales de frecuencia para cada una de las rampas, siendo (8) la que relaciona esas componentes espectrales con la distancia.

Así se obtiene lo que se denomina perfiles de distancia, siendo la forma más fácil y común de hacerlo, el realizar una FFT por columnas de la matriz radar, obteniéndose una matriz de dimensiones “distancia (frecuencia de batido)–tiempo” (figura 3).

$$f_b(T) = \text{FFT}(S_b(T)).$$

Finalmente se destaca que en este caso las expresiones de la frecuencia de batido no dependen de la rampa que se procese, sino que dependen sólo del retardo respecto al comienzo de su rampa T , cosa que no ocurrirá en el caso siguiente.

3.2 Blanco en movimiento

En este caso se va a suponer que el blanco se desplaza a una velocidad radial constante respecto al sensor, siendo la expresión del retardo

$$t_R = \frac{2R(t)}{c} = \frac{2(R_0 + v \cdot t)}{c},$$

donde R_0 es la posición del blanco en el instante inicial, y t representa el tiempo de manera absoluta, pudiéndose expresar como $t = T + nT_m$, donde T y T_m son las mismas variables que se han utilizado en (5).

Por tanto, de manera análoga al caso anterior, la fase y la frecuencia de la señal de batido son

$$\phi_B(t) = \frac{4\pi f_0(R_0 + vt)}{c} - K \left[\frac{4R_0^2}{c^2} + \frac{4v^2 t^2}{c^2} + \frac{8R_0 vt}{c^2} \right] + \frac{4KT R_0 vt}{c}, \quad (9)$$

resultando la frecuencia de batido según (8)

$$f_b(T) = \frac{2f_0 v}{c} + \frac{2\Delta f f_m}{c} [R_0 + v(T + nT_m)] + \frac{2\Delta f f_m v T}{c} - \frac{4\Delta f f_m}{c^2} v^2 t - \frac{4\Delta f f_m}{c^2} R_0 v. \quad (10)$$

El segundo término de (10) es el mismo que el calculado en (8), al cual se le suma la variación de la posición del blanco en función del tiempo,

$vt = v(T + nT_m)$, haciendo que la frecuencia de batido dependa de la rampa en la que se encuentre, (vnT_m) $n \in \mathbb{N}$, y también, dentro de cada barrido lineal de frecuencia, (vT) . La posición del blanco respecto al radar cambia instantáneamente.

Para hacer un análisis exhaustivo de (10), se compara, término a término, con el de mayor valor de la ecuación, la frecuencia de batido, para comprobar cuáles son comparables a él, y cuáles son despreciables para un sistema de alta resolución en distancia que quiera realizar procesado doppler.

El primer término de (10), $\frac{2f_0v}{c}$, es el término debido al efecto doppler, y su suma a la frecuencia de batido, se conoce como acoplamiento doppler-distancia para radares CWLFM [5]. La explicación física de este acoplamiento es sencilla. El efecto doppler hace que la frecuencia de la señal, reflejada en el blanco y luego capturada por el receptor, no posea exactamente la misma frecuencia con la que fue transmitida. Dado que para un radar CWLFM, la distancia a la que se encuentra el blanco es la diferencia entre la frecuencia de la señal transmitida y el eco recibido, el efecto doppler induce un error en el cálculo de las distancias teniendo que comprobar la importancia de este desplazamiento dividiendo la frecuencia doppler inducida frente a la frecuencia de batido. Por tanto, se obtiene

$$\frac{\frac{2\Delta f f_m R_0}{c}}{\frac{2f_0v}{c}} = \frac{\Delta f f_m R_0}{f_0v} = \frac{Bw_{rel} f_m R_0}{v}. \quad (11)$$

Normalmente, el ancho de banda relativo usado es del 10% o menor, con lo cual la conclusión de la comparación es, que el término doppler, para casos típicos y con velocidades de blanco moderadas, es despreciable frente a la frecuencia de batido. Sin embargo para aplicaciones de muy alta resolución, en las cuales el conocimiento de la posición exacta del blanco sea primordial, puede que sí sea importante. Para comprobarlo, hay que comparar la frecuencia doppler con la frecuencia de batido originada por la resolución en distancia del sistema [6]

$$\Delta f_b = f_b(\Delta R) = f_m \begin{cases} f_b = \frac{2\Delta f R f_m}{c} \\ \Delta R = \frac{c}{2\Delta f} \end{cases},$$

resultando la división

$$\frac{\frac{2f_0v}{c}}{f_m} = \frac{2f_0v}{cf_m}.$$

Para el caso tratado, en el cual se tienen frecuencias de portadora elevadas, banda de milimétricas, y a su vez, con frecuencias moduladoras de kilohertzios, necesarias como se justificará posteriormente en el artículo, esta división puede ser mayor que la unidad, incluso para velocidades bajas, con lo cual, para aplicaciones en las que las velocidades sean elevadas, como en el caso de misiles, o de alta resolución, como altímetros, puede hacerse necesario el compensar esta desviación mediante el cálculo de la velocidad del blanco.

El término $\frac{2\Delta f f_m}{c}v(T + nT_m)$ representa la variación en el tiempo de la distancia entre el blanco y el radar. Si se compara con la frecuencia de batido, resulta

$$\frac{\frac{2\Delta f f_m R_0}{c}}{\frac{2\Delta f f_m}{c}v(T + nT_m)} = \frac{R_0}{v(T + nT_m)},$$

lo que supone la comparación entre la distancia a la que se encuentra originalmente el blanco y lo que se desplaza el mismo durante el tiempo de observación. Normalmente este ratio es despreciable, puesto que el tiempo de observación son milisegundos y la distancia a la que se encuentra el blanco es del orden de kilómetros. Sin embargo, para un radar de alta resolución que pretenda obtener imágenes doppler, este término tiene una serie de consecuencias nefastas.

La figura 3 muestra la matriz simulada distancia-tiempo para un radar de 1 GHz de ancho de banda transmitido, entre 28 y 29 GHz, y un kilohertzio de frecuencia moduladora, siendo el blanco dibujado, un móvil puntual con una posición inicial de 400 metros y una velocidad radial de 25 metros por segundo. En ella se pueden observar los dos efectos explicados con anterioridad, por un lado, la posición inicial no es exactamente 400 metros, sino 400,7 metros, debido a la frecuencia doppler, (10) y (11), y el segundo efecto, que el blanco va cambiando su posición a lo largo del tiempo, pudiéndose calcular su velocidad mediante la pendiente de la figura 3

$$v = \frac{\Delta R}{\Delta t} = \frac{426,3 - 400,7}{1,024} = 25 \text{ m/s}.$$

De la figura 3 también se puede explicar el efecto que tiene el movimiento del blanco sobre las imágenes ISAR. Si se almacena suficiente tiempo los ecos del blanco, del orden de segundos, se obtiene una resolución para la 2ª FFT, el cálculo del doppler del blanco, inversamente proporcional al tiempo integrado, es decir, resoluciones de 1 Hz o menores. A mayor tiempo integrado, mayor resolución, sin embargo, con radares de alta resolución en distancia, con celdas de distancia pequeñas, el tiempo que un blanco, o uno de sus reflectores, permanece en una celda de resolución se ve reducido drásticamente. Por lo tanto, aunque se aumente el tiempo almacenado y empleado para hacer la segunda FFT, la resolución efectiva del blanco no mejorará, puesto que habrá migrado a la celda de distancia adyacente. Con esto, queda al descubierto la principal deficiencia de las técnicas ISAR, el movimiento del blanco fija la resolución del sistema y por lo tanto la calidad de las imágenes.

Para intentar paliar esta deficiencia surge toda una algorítmica, más o menos compleja, que intenta mediante procesado de señal, compensar el movimiento en distancia del blanco (*motion compensation*), para aumentar el tiempo de iluminación, y por tanto, la resolución doppler obtenida, a costa, eso sí, de aumentar la carga computacional y el tiempo necesario para obtener una imagen.

El tercer término en (10), $\frac{2\Delta f f_m v T}{c}$, representa la variación de la posición del blanco dentro de cada rampa. Para el caso ideal de estar transmitiendo una rampa lineal en frecuencia sin retrasado, en la cual el valor máximo de T es $\frac{1}{f_m}$, hace que el término valga como mucho $\frac{2\Delta f v}{c}$. Hasta la actualidad, los anchos de banda que manejaban los radares eran reducidos, y por tanto, este factor era despreciable por encontrarse la velocidad de la luz en el denominador, siempre y cuando las velocidades de blanco fueran normales. Sin embargo, en este caso, el gran ancho de banda transmitido hace que este término empiece a cobrar importancia, no tanto en comparación con las frecuencias de batido de los blancos, sino a la hora de la realización de la 2ª FFT, como se verá más adelante en este apartado.

Los dos términos que restan de (10), difieren de los anteriores en que en el divisor aparece la velocidad de la luz al cuadrado, manteniéndose los numeradores en el mismo orden de magnitud. Por tanto, se puede afirmar directamente que son despreciables en magnitud frente a los anteriores, y por ende, frente a la frecuencia de batido del blanco.

Finalmente, queda por comprobar qué se obtiene al realizar la segunda FFT, calculada para cada fila de la matriz radar (figuras 2 y 3).

Recordando la expresión de la mezcla de la señal recibida con la transmitida para un blanco en movimiento, obsérvese (9), y calculando la FFT por filas resulta

$$\text{FFT}(Rx) : \frac{1}{2\pi} \frac{d}{d(nT_m)} \left[\frac{4\pi f_0 R_0}{c} + \frac{4\pi f_0}{c} v(T + nT_m) + \frac{4\pi \Delta f f_m T R_0}{c} + \frac{4\pi \Delta f f_m T}{c} v(T + nT_m) - \frac{4\pi \Delta f f_m v^2}{c^2} (T + nT_m) - \frac{4\pi \Delta f f_m R_0 v}{c^2} \right],$$

quedando

$$\text{FFT}(Rx) : \frac{2f_0}{c} v + \frac{2\Delta f f_m T}{c} v - \frac{2\Delta f f_m R_0}{c^2} v. \quad (12)$$

Al realizar la FFT por filas, aparece de nuevo el término doppler $\frac{2f_0}{c}v$, pero en este caso es el de mayor valor absoluto de todos, con lo cual se justifica el uso de la matriz radar y la denominación de distancia-doppler. Pero aparte del doppler, aparecen otros dos términos que se analizarán de manera análoga al caso de la FFT por columnas.

El segundo término de (12), aparecía también en el resultado del cálculo de la FFT por filas, obsérvese (10), concluyéndose allí que era despreciable. Sin embargo, ahora el término principal de la expresión, la frecuencia doppler, es mucho menor que la frecuencia de batido, y por tanto, habrá que comprobar si en este caso sigue siendo despreciable.

Al realizar la división entre ambos se obtiene

$$\frac{\frac{2f_0}{c}v}{\frac{2\Delta f f_m T}{c}v} = \frac{f_0}{\Delta f f_m T},$$

donde idealmente T varía entre $[0 \dots T_m)$ y, por tanto, el valor mínimo de esta división se obtiene cuando $T = \frac{1}{f_m}$, resultando

$$\frac{f_0}{\Delta f} = \frac{1}{Bw_{rel}}.$$

Como se apuntó con anterioridad, el ancho de banda relativo usado en los sistemas radar hasta ahora es bajo, por ejemplo, para el radar IPIX [12], el

ancho de banda relativo es $1/360$ lo que supone poder despreciar este término frente al de la frecuencia doppler. Sin embargo, para el radar [10, 13, 14], el ancho de banda relativo empleado puede ser de $1/14$, con lo cual no es evidente si puede ser despreciable el término.

Peor se ponen las cosas cuando se transmiten frecuencias elevadas, necesario si se quiere construir un radar de alta resolución en distancia de manera sencilla. Puesto que las frecuencias doppler de los blancos se hacen muy grandes, incluso para velocidades moderadas de los blancos, y hace que trabajar de manera no ambigua en doppler sea muy complicado. Por tanto, es muy común el trabajar de manera ambigua, por lo que no hay que comparar el segundo término de (12) con la frecuencia doppler, sino con el margen doppler no ambiguo que se tiene $\pm \frac{f_m}{2}$.

Explicar el margen no ambiguo de este sistema es muy sencillo a partir del concepto de Matriz Radar. Para calcular las componentes doppler de los posibles blancos, se realiza una FFT por filas. Ésta es calculada a partir de la evolución temporal de los retornos obtenidos en cada celda distancia. Cada muestra temporal de estos retornos se consigue con cada barrido lineal de frecuencia, con lo cual la separación temporal entre dos muestras consecutivas es T_m , el período de la moduladora, y por tanto según Nyquist, las componentes espectrales calculadas a partir de estos valores tendrán un margen ambiguo de f_m , o bien, $\pm \frac{f_m}{2}$ si se diferencia en signo también.

Por ejemplo, para una portadora de 30 GHz y una frecuencia moduladora de 1 KHz, una velocidad mayor que $\pm 2,5$ m/s, sería ya ambigua, aún siendo una velocidad extremadamente baja.

Afortunadamente, como se apuntó en el apartado 2, a la hora de obtener una imagen doppler lo que interesa es el diferencial doppler existente entre los diferentes reflectores que forman el blanco y que, a su vez, caigan en la misma celda de distancia. Siendo interesante el poder discriminarlos aún teniendo una diferencia de velocidad muy pequeña (resolución doppler), mientras que la máxima diferencia posible entre esos dos reflectores, no supere el margen no ambiguo. Optimizar este rango de frecuencias depende de la dinámica del blanco, el cual, en general, está fuera de control, sin embargo, sí se puede maximizar la frecuencia moduladora y posteriormente integrar el máximo tiempo disponible.

Esta forma de actuar en el sistema conlleva a la obtención de imágenes de muy alta resolución, tanto en distancia como en doppler, pero con poca utilidad práctica puesto que existe una gran migración en distancia del blanco. Usualmente, las técnicas ISAR corrigen esta migración de celdas [15]–[17], obteniendo resultados mucho mejores. Sin embargo, este artículo pretende presentar las imágenes desde otro punto de vista posible.

Para determinadas aplicaciones de control o vigilancia, el movimiento relativo entre los blancos y el radar es muy parecido, usando esta información y el estudio de las imágenes que se obtienen debido a esos movimientos, se puede maximizar el gradiente doppler entre los reflectores que forman el barco (optimizando γ en (3)). Para ello resulta muy útil el reducido tamaño del sistema puesto que facilita el transporte.

En el siguiente apartado se presentarán las imágenes obtenidas siguiendo esta línea de desarrollo, sin realizar corrección de movimiento, haciendo hincapié en las mejoras desarrolladas en el sistema y que han permitido tanto aumentar el ancho de banda transmitido como el tiempo de grabación de los blancos, y teniendo en cuenta que la obtención de las imágenes, por tanto, es mucho más rápida.

4 Resultados: imágenes ISAR

En esta sección se presentan las imágenes ISAR obtenidas en alguno de los diferentes experimentos que se han realizado a lo largo de los cuatro años de duración del proyecto. Los resultados están ordenados de manera cronológica para hacer notar la evolución que se ha llevado a cabo en los diferentes prototipos radar desarrollados, a la vez que, intentar explicar las imágenes obtenidas relacionándolas con la dinámica de los blancos almacenados en cada uno de los casos.

4.1 Dos reflectores girando

Éste fue uno de los primeros experimentos que fueron desarrollados, y su fin principal, era estimar las capacidades operativas de los prototipos. Aquí se muestra el resultado obtenido con el primer prototipo radar de alta resolución

en banda milimétrica desarrollado en el GMR de la Universidad Politécnica de Madrid. Éste era capaz de transmitir una señal de onda continua y modulación lineal en frecuencia, con un ancho de banda, seleccionable por el operador, hasta de 2 GHz variando entre 28 y 30 GHz, con una frecuencia moduladora f_m hasta de 10 KHz.

Para conseguir la modulación requerida en este primer prototipo se implementó un esquema en lazo abierto, para lo cual se midió la curva tensión–frecuencia de un oscilador controlado por tensión y se calculó la excitación adecuada para generar una rampa perfectamente lineal. Posteriormente, se conseguía esta excitación mediante un generador de forma de onda arbitraria,

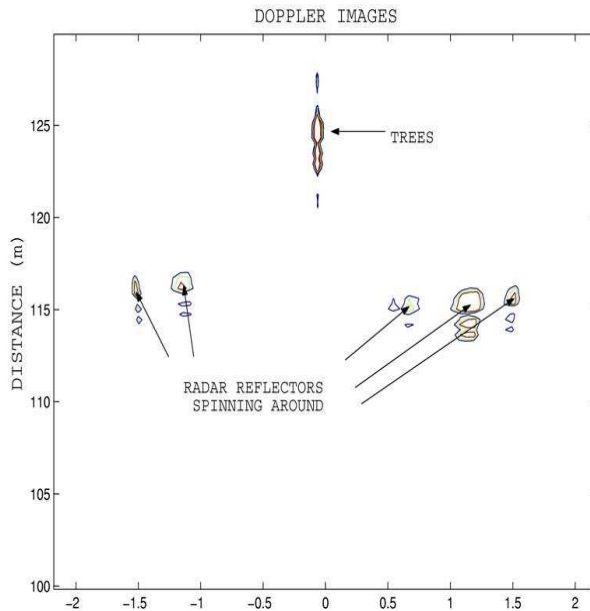


Figura 4: imagen doppler distancia obtenida de los reflectores

Desgraciadamente, y a tenor de los resultados obtenidos, figura 4, este esquema de generación no proporcionaba la resolución en distancia esperada. Se constató que la linealidad de la señal transmitida no era suficientemente buena puesto que las condiciones de uso del VCO diferían de las presentes en el momento de la caracterización. Esto hace inútil este tipo de esquema y el

desarrollo de un radar de alta resolución en distancia, puesto que esta falta de linealidad degrada, y mucho, la resolución final del sistema [18]. Por ello se tuvo que investigar y desarrollar un novedoso esquema de linealización en lazo cerrado para los siguientes prototipos [2].

El experimento en sí consistía en la construcción de una vara metálica con reflectores radar en los extremos, la cual se hacía girar, figura 5, de manera que ambos reflectores poseían en todo momento una velocidad radial respecto al radar, igual en módulo pero de signos opuestos, con lo cual el sistema será capaz de diferenciarlos aun si ambos se encuentran en la misma celda de resolución en distancia.

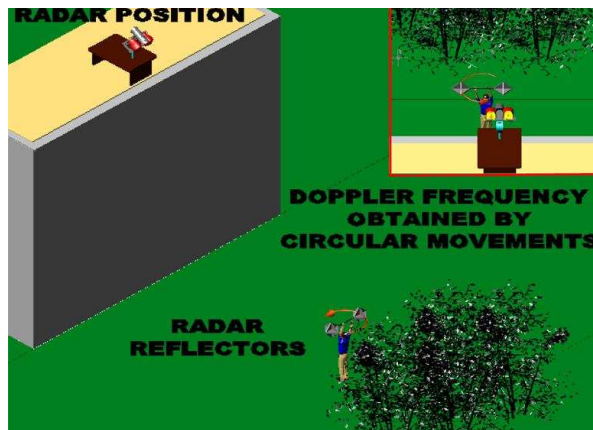


Figura 5: diagrama del experimento

Los parámetros empleados programados en el radar durante el experimento están resumidos en la tabla 1, destacándose la diferencia entre la resolución en distancia teórica, 17 centímetros, y la obtenida en la figura, la alta frecuencia de muestreo empleada, lo cual implica una cantidad de datos generada muy grande, más de 100 MB, en relación con el pequeño tiempo de grabación del blanco, 0,5 segundos, poniendo de manifiesto la otra grave deficiencia del sistema.

La figura 4 muestra la superposición de tres imágenes ISAR diferentes, cada una obtenida integrando 256 rampas diferentes (N), con lo cual se tiene un margen doppler no ambiguo de ± 500 Hz debido a la moduladora de 1 KHz,

Tabla 1: datos del experimento

B_w transmitido	840 MHz
Frecuencia moduladora	1 KHz
Frecuencia de muestreo	15,6 MHz
Tamaño del archivo	104 MB
Tiempo almacenado	0,5 s.

y una resolución doppler de 4 Hz, $\Delta fd = \frac{f_m}{N}$. Lo que diferencia cada una de las tres imágenes es el margen de tiempos integrado para la obtención de la misma. En el primer caso se han utilizado desde la primera a la rampa 256, en el segundo entre la 122 y la 378, mientras que en el último caso, entre la 244 y la 500. Por tanto, entre cada imagen hay una diferencia de 122 milisegundos.

Debido al movimiento de rotación, cuando la barra que sujeta ambos reflectores se encuentra totalmente perpendicular a la dirección de apuntamiento del radar, se tiene que por muy buena resolución en distancia que tenga el sistema, no va a ser capaz de diferenciarlos puesto que caen en la misma celda de resolución. En cambio, si se calcula el doppler de ambos reflectores, uno de ellos estará en ese momento acercándose hacia el radar, mientras el otro estará alejándose, lo que implica que tendrán doppler con el mismo valor absoluto pero de signo contrario, pudiendo diferenciarlos aún estando a la misma distancia.

Efectivamente, en la imagen 4 se pueden observar dos reflectores claramente diferenciados en doppler, dos en la parte negativa, mientras que se observan tres en la parte positiva. Esta diferencia se explica debido a que el tercer reflector que se debería ver a la izquierda, se encuentra en ese instante de tiempo parcialmente oculto por la persona que se encargaba de hacer girar el conjunto, lo cual hace que la potencia reflejada, sea menor y no supere el umbral establecido para la obtención de la imagen.

Finalmente, queda explicar que detrás de la vara girando se encontraban unos árboles, figura 5, los cuales aparecen en la figura 4 aproximadamente a 125 metros. Estos árboles producen una mancha doppler cuyo centro aproximado se encuentra en cero doppler, puesto que no se mueven, pero sin embargo, tienen componentes doppler no nulas, debido al movimiento de las hojas y ramas, producidos por el viento.

Con estos resultados se demuestra que el sistema tiene unas buenas cualidades de discriminación doppler, puesto que es capaz de diferenciar perfectamente ambos reflectores, con una buena sensibilidad, puesto que detectaba el ligero movimiento de las hojas de los árboles, y constantando las deficiencias que habría que mejorar, la falta de linealidad en la generación y conseguir reducir el tamaño de los archivos a procesar aumentando, si es posible, el tiempo de grabación.

4.2 Cuesta de las perdices

El segundo experimento que se presenta es el control de una autovía, situada a una distancia de tres kilómetros y que presenta gran cantidad de tráfico. Para este experimento ya se tenía implementada la generación de señal en lazo cerrado, siendo la resolución en distancia prácticamente la misma que la teórica y se conseguía transmitir un poco más de potencia.

Con esta prueba se estaba intentando estimar la capacidad de discriminación en doppler, como en el caso anterior pero con gran cantidad de blancos, y también poder estimar su fucionalidad para rangos de cobertura mucho mayores.

Los parámetros de este experimento se recogen en la tabla 2, llamando la atención que, aunque se mejoró la linealización del sistema, seguía teniéndose el problema de la gran acantidad de datos a almacenar siendo el tiempo de grabación muy pequeño, el mismo que en el caso anterior.

Tabla 2: datos del experimento

B_w transmitido	100 MHz
Frecuencia moduladora	3 KHz
Frecuencia de muestreo	18,5 MHz
Tamaño del archivo	111 MB
Tiempo almacenado	0,5 s.

En la imagen 6 se puede observar una fotografía de la situación de la autopista con respecto al radar y la imagen ISAR obtenida de los blancos. En la imagen ISAR se puede apreciar la gran cantidad de blancos que se están

desplazando al mismo tiempo por la carretera y como el radar es capaz de distinguirlos por su velocidad y por su resolución en distancia.

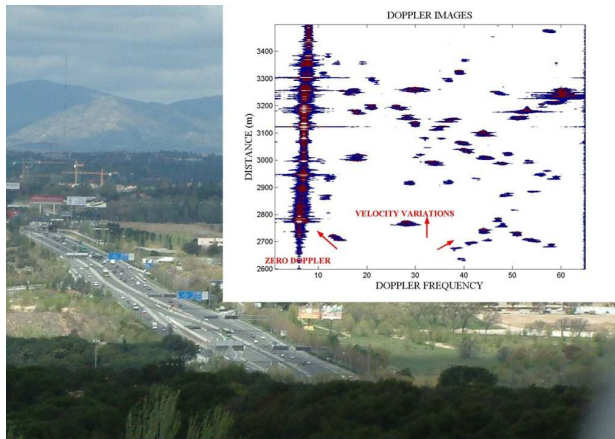


Figura 6: imagen doppler-distancia obtenida de la A-6

De nuevo la imagen es una superposición de múltiples imágenes ISAR, cada una de ellas está obtenida realizando la 2ª FFT con 64 rampas de frecuencia y entre cada imagen hay 128 rampas, obteniéndose así la imagen final presentada como superposición de 13 imágenes ISAR diferentes. Con ello se consigue poder calcular con gran precisión la velocidad de los blancos y a su vez ver la evolución de la misma con respecto al tiempo: si aceleran, frenan o mantienen constante su velocidad. Dada la integración realizada y la frecuencia moduladora, la precisión en la medida de la velocidad es de aproximadamente 1 Km/h.

También debido a la resolución en distancia, 1,5 metros aproximadamente, se puede distinguir entre coches y camiones puesto que se pueden diferenciar por tamaño, sin embargo, no está al alcance el poder distinguir entre diferentes coches o entre coches y motos por ejemplo [13].

Finalmente, queda por destacar la posición e inclinación del cero doppler. Como se puede observar, no se encuentra en frecuencia cero y también tiene una ligera pendiente que hace que a mayor distancia con respecto al radar, el cero doppler se encuentre más alejado de su posición correcta.

Ésta deformación de la imagen se debe a que la frecuencia de muestreo no es múltiplo entero de la frecuencia de muestreo. Cuando sucede esto, la primera muestra de cada rampa no se encuentra en la misma posición relativa respecto a la señal de excitación del VCO. Con ello se introduce una fase ficticia que, a la hora de calcular el doppler, hace que el cero se desplace una frecuencia dependiente de la distancia, consiguiéndose el efecto mostrado en la figura. Esta inclinación se puede corregir, cambiando la frecuencia de muestreo del ADC en recepción, o con procesado de señal, lo cual irremediabilmente hará que se tarde más tiempo en obtener las imágenes.

4.3 Helicóptero

El siguiente experimento fue conseguir capturar los ecos de un helicóptero, una imagen ISAR típica [19, 20] puesto que el movimiento rotatorio de las palas del rotor hace que las imágenes obtenidas sean muy fácilmente reconocibles.

La posibilidad de grabar los datos se debió al tráfico intenso que sufre la autopista del apartado anterior, secciones 4.2 y 4.9, y que hace necesario en determinadas ocasiones su control mediante helicópteros. Una de estas ocasiones, se aprovechó para conseguir los datos mostrados en este apartado, figura 7, con los parámetros operativos resumidos en la tabla 3.

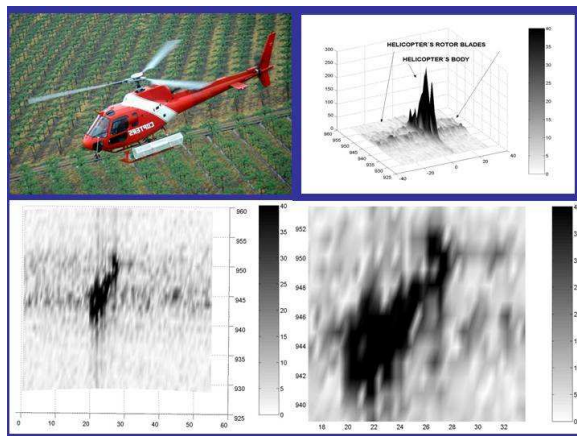


Figura 7: imágenes ISAR de un helicóptero

Tabla 3: datos del experimento

B_w transmitido	200 MHz
Frecuencia moduladora	1 KHz
Frecuencia de muestreo	14 MHz
Tamaño del archivo	102 MB
Tiempo almacenado	0,5 s.

La resolución en distancia teórica del sistema es de 75 centímetros (200 MHz transmitidos), encontrándose el helicóptero aproximadamente a 900 metros de distancia, mientras, las imágenes presentadas se consiguieron integrando 128 rampas consecutivas, obteniéndose una resolución doppler de $\frac{f_m}{N} = \frac{1000}{128}$.

La característica más llamativa de las imágenes ISAR de helicópteros es el efecto producido por las aspas. De manera análoga a los reflectores girando del apartado 4.1, las palas de los rotores, debido a su movimiento rotatorio tan rápido, ocupan todo el espectro doppler de la imagen (figura 7), sólo que en este caso el efecto es más llamativo puesto que la velocidad de giro es mucho más elevada, repartiéndose la potencia de sus ecos en todo el espectro doppler [21]. También en la figura, aunque con menor potencia, se puede observar el mismo efecto con el rotor trasero.

Aparte de la imagen de las aspas, se muestran otras dos en la parte de abajo de la figura 7, siendo la derecha un zoom de la de la izquierda. En ellas se puede apreciar una vista lateral aproximada del helicóptero, siendo una imagen para un determinado instante de tiempo dentro de la grabación. De hecho, una de las conclusiones de este experimento es la tremenda variabilidad de las imágenes obtenidas, aun grabándose tan poco tiempo. De todas las imágenes obtenidas, sólo la imagen mostrada puede representar una vista aproximada de un helicóptero, al menos, de manera visual. Sin embargo, las aspas, sí están presentes en todas las imágenes y, precisamente por ello, ya se han propuesto diversas técnicas que utilizan ese movimiento para detección automática de blancos [22, 23, 24].

Las conclusiones obtenidas con este experimento fueron principalmente dos: la primera fue la constatación de la necesidad de poder aumentar el tiempo de grabación de los blancos para poder aumentar las posibilidades

de obtener una buena imagen, aun sin tener control sobre su trayectoria, y poder identificar o clasificar el blanco [9]. La segunda conclusión es la tremenda dependencia de la imagen obtenida frente a pequeñas variaciones en el movimiento del blanco. A pesar de ello, se pueden encontrar aplicaciones en las cuales las trayectorias o movimientos del blanco puedan formar imágenes ISAR útiles.

4.4 Barcos

Debido al experimento del helicóptero se estudió otro tipo de móviles, a los que fuera especialmente útil el empleo de las técnicas ISAR, y que se pudieran obtener buenas imágenes. Uno de los casos que mejores perspectivas presentaban eran los barcos, [25]–[27], estos, de manera similar a las aspas del helicóptero, tienen un movimiento típico intrínseco a su desplazamiento producido por las olas del mar. Este movimiento, como se verá más adelante, puede ser utilizado para la obtención de buenas imágenes ISAR.

Los barcos tienen tres ejes de rotación principales, siendo perpendiculares entre sí y diferenciándose cada uno por la dirección que tienen. El primero es el movimiento de cabeceo (*Pitch Motion*), que sufren, principalmente, cuando navegan en sentido opuesto a las olas del mar. El eje de rotación se encuentra en el lateral del barco, figura 8 arriba derecha, y siguiendo la teoría del plano de proyección de la imagen [28], la cual afirma que el plano de proyección de la imagen ISAR es perpendicular al vector de rotación efectivo ($\vec{\Omega}_{eff}$), y a su vez contiene la dirección de apuntamiento del radar (\vec{LOS}), la imagen obtenida, si se apunta al barco desde la popa, prácticamente paralelo a su línea de crujía, será una representación aproximada del perfil del barco. Si se observa, en una misma celda de distancia caería la parte alta del mástil y su base, y por tanto, el radar no sería capaz de distinguirlos, sin embargo, debido al movimiento de cabeceo, cuyo centro de rotación se sitúa por debajo del barco, estos dos puntos, tienen diferente radio de giro y misma velocidad angular, y por lo tanto, diferente velocidad radial respecto al radar y por ende, frecuencia doppler. Por tanto, la imagen ISAR aproximada que se obtiene es una representación del perfil del barco.

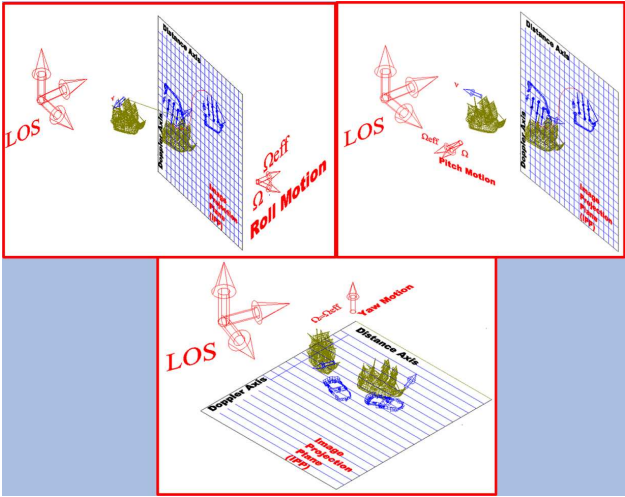


Figura 8: tipos de giro e imágenes ISAR obtenidas con un barco

El segundo eje de rotación posible es el de balanceo (*Roll Motion*), siendo en este caso, el eje de giro la línea de crujía del propio barco. Este eje de giro hace balancear al barco de babor a estribor y viceversa. Ahora, siguiendo la teoría del plano de proyección de imagen y con la misma dirección de apuntamiento, el resultado es, también, una representación del perfil del barco, figura 8 arriba a la izquierda. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el movimiento de balanceo en los barcos, normalmente, es despreciable frente al de cabeceo [29], aunque no siempre, por ejemplo, en barcos pequeños con las olas incidiendo lateralmente al barco, o cuando la dirección de apuntamiento del radar sea prácticamente perpendicular al eje longitudinal del barco.

Por último, el movimiento de guiñada, cuyo eje de rotación es perpendicular a la superficie del mar y cuya imagen ISAR sería una representación de la planta del buque, figura 8 abajo. Este movimiento, es el menos común de los tres, y se produce cuando el barco realiza un cambio de dirección brusco. Para barcos grandes es aún menor puesto que no son capaces de realizarlo de manera rápida y, por lo tanto, las frecuencias doppler inducidas son despreciables frente a las de los otros dos movimientos. Sin embargo, para embarcaciones pequeñas en situaciones de maniobra, como puede ser dentro de puertos o en bocanas, puede no ser despreciable.

Desafortunadamente, a la hora de procesar un barco real, el eje de rotación que posee es una suma vectorial de los tres movimientos a la vez, y además, ésta varía rápidamente con el tiempo. La imagen obtenida varía así dependiendo del momento inicial que se escoja para integrar.

Una de las aproximaciones más extendidas es aproximar los movimientos del barco como sinusoidales, y por lo tanto, para obtener una buena imagen hay que intentar maximizar uno de ellos e intentar minimizar el resto [25]. Por ejemplo, en el caso representado en la figura 8, la proyección de la velocidad inducida por el movimiento de cabeceo sobre la dirección de apuntamiento del radar es mínima, figura 8 arriba derecha, con lo cual la frecuencia doppler también lo será. Por lo tanto, y suponiendo que no realiza un movimiento de guiñada, es probable que en estas condiciones se obtenga una buena imagen del perfil del barco, figuras 9 y 10.

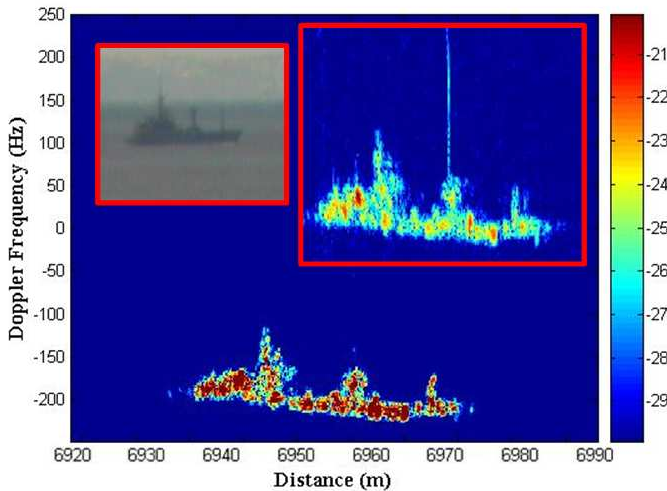


Figura 9: imagen ISAR del buque alerta

Sin embargo, esta configuración no es la única que puede dar una buena imagen del blanco. Por ejemplo, en el caso de que el desplazamiento del barco sea prácticamente perpendicular a la dirección de apuntamiento del radar, la proyección del movimiento de cabeceo se minimiza, maximizándose la de balanceo, figura 11, aunque debido a la diferencia de velocidades que induce cada uno de los movimientos, no se puede asegurar cuál es el predominante.

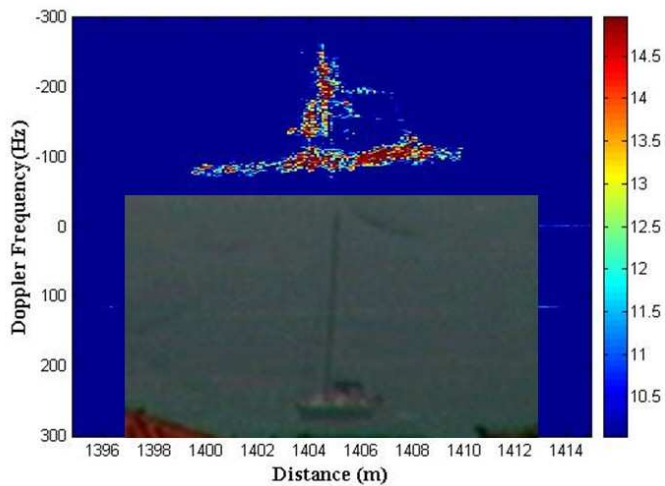


Figura 10: imagen ISAR de un velero

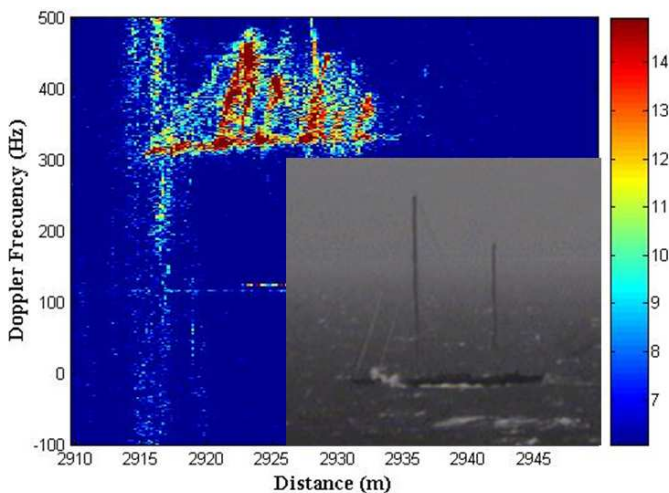


Figura 11: foto e imagen ISAR de un velero de grandes dimensiones

4.5 Buque Alerta

Se realizaron varias campañas de recogida de datos para la obtención de imágenes ISAR de barcos que pasaban por el Estrecho de Gibraltar en la ciudad de Tarifa. En un intento por probar la viabilidad de este tipo de sistemas para la ayuda de vigilancia perimetral, se obtuvieron imágenes ISAR para intentar desarrollar funciones de clasificación e identificación.

En una primera campaña, realizada en febrero de 2005, se grabaron datos pertenecientes a un buque de la Armada Española, el Alerta. Para este experimento el receptor radar que estaba funcionando era ya el prototipo heterodino [10, 13], y por tanto, el tamaño del archivo a procesar es bastante menor si se mantiene el tiempo de grabación. También existe la posibilidad de mantener el mismo tamaño aumentando el tiempo de grabación a segundos, gracias a lo cual se pueden obtener sucesivas imágenes ISAR del blanco y esperar que en alguna se maximice el gradiente doppler inducido por alguno de los movimientos del barco [25, 26].

En este caso el barco se encontraba aproximadamente a una distancia de siete kilómetros y la posición relativa al radar se puede ver en la foto de la figura 9. Debido al apuntamiento longitudinal del radar hacia el blanco, se puede suponer que el observador se encuentra en una situación parecida a la de la figura 8, y por tanto, se sabía que se podría obtener una buena imagen del perfil.

El resultado presenta una resolución en distancia final, después de la primera FFT, de 19 centímetros, y para la dimensión azimutal se han integrado 256 rampas, es decir, 512 milisegundos para una resolución doppler de 2 hertzios aproximadamente. A su vez, para mejorar el nivel de lóbulos secundarios, y a pesar de perder algo de resolución, se ha realizado un eventanado en distancia y en doppler tipo *Hamming*.

En la figura 9 se puede observar perfectamente la arboladura del buque, con el castillo de proa en la zona más cercana al radar y los dos mástiles en la línea de crujía del barco, uno en la parte media y otro en la zona de proa. Toda la arboladura obtenida en la imagen ISAR, se corresponde perfectamente con el perfil real del barco, que se puede observar en la fotografía obtenida del barco, percibiéndose la relación proporcional entre la altura del buque y la frecuencia doppler obtenida en cada zona del barco.

Del buque se grabaron 1,2 segundos y, durante ese tiempo, aunque no se puede observar con claridad el movimiento armónico que se explicaba con anterioridad, sí se observa que para el final del archivo la arboladura ha desaparecido enmascarada por el doppler asociado al movimiento de traslación del casco. La máxima excursión que se obtiene en la imagen doppler es aproximadamente de 100 Hz, y corresponde con la zona del castillo de popa, y además, a partir del cálculo de su frecuencia doppler central, -200 hertzios, se puede calcular que el barco se está alejando respecto al radar, la proa está más alejada que la popa, y a una velocidad aproximada de 3,8 kilómetros por hora, aunque en este caso y debido a las frecuencias tan altas se puede ser ambiguo en doppler pudiendo ser la velocidad $3,8 + 13,5 * k$ km/h, siendo k el número de vueltas que da la frecuencia doppler respecto a la moduladora de 500 Hertzios. Para deshacer esta ambigüedad, la solución más fácil pasa por hacer un tracking en distancia del blanco y calcular el valor de k , obteniéndose un valor de $k = 1$. La tabla 4 muestra los datos de configuración del radar.

Tabla 4: datos del experimento

B_w transmitido	1000 MHz
Frecuencia moduladora	500 Hz
Frecuencia de muestreo	4 MHz
Tamaño del archivo	40 MB
Tiempo almacenado	1,273 s.

Finalmente, hay que destacar que aproximadamente a la mitad del archivo grabado, se obtiene una imagen distancia-doppler llamativa por su gran ancho de banda doppler. Aproximadamente a la mitad del barco, en la zona donde se encuentra colocado uno de los mástiles, aparece un blanco bastante potente que tiene componentes en todo el espectro doppler y que desaparece de manera muy rápida, dejando una imagen parecida a las trazas del helicóptero. Este tipo de trazas son típicas de elementos con un movimiento rotatorio de velocidad elevada, sugiriendo la idea de la antena de un radar girando sobre su eje.

La explicación de que surja y desaparezca en un breve período de tiempo, a diferencia de las aspas del helicóptero, es por la sección radar de la antena que es muy pequeña, y sólo cuando el radar está apuntando en la misma dirección, su potencia reflejada crece lo suficiente para ser detectada. Además, en estas

condiciones la velocidad radial de los extremos de la antena es máxima y, por tanto, lo será también el ancho de banda doppler detectado.

Posteriormente se comprobó que en ese mástil del barco, efectivamente, se encontraba funcionando un radar, el ARIES [30], en el desarrollo del cual el GMR participó años atrás y que fue el origen de esta línea de investigación.

Las conclusiones obtenidas con este experimento fueron dos: la primera, la gran resolución en distancia y en doppler alcanzadas ya con este prototipo, y las cuales, junto con una dirección de apuntamiento adecuada, parece que permiten obtener imágenes ISAR de suficiente calidad como para extraer ciertas características de forma y tamaño de los barcos. La segunda conclusión es la necesidad de aumentar algo más el tiempo de grabación de los blancos. El conseguir grabar segundos de información de los blancos, permitiría la obtención de secuencias de imágenes más largas que podrían ser más útiles desde el punto de vista práctico de un operador radar que una imagen estática [26], sin quitarle importancia a la otra posibilidad de obtener una imagen con la mayor resolución doppler posible, utilizando algoritmos de corrección de movimiento que permitan aumentar al máximo posible el tiempo de integración, eso sí, a costa de carga computacional y tiempo necesario en obtener los resultados.

4.6 Carguero

El siguiente experimento fue la captura de los ecos radar de un buque de grandes dimensiones en la misma localización, el Estrecho de Gibraltar. En esta ocasión se grabó mucho más tiempo a costa de generar un archivo de datos más grande que en el caso anterior, y similar a los primeros. Los parámetros de este experimento se recogen en la tabla 5.

Tabla 5: datos del experimento

B_w transmitido	1000 MHz
Frecuencia moduladora	1000 Hz
Frecuencia de muestreo	800 KHz
Tamaño del archivo	125 MB
Tiempo almacenado	20 s.

El tiempo grabado es de 20 segundos, sin embargo, el resultado fue poco esperanzador, figura 12, principalmente porque ninguno de los movimientos del barco: balanceo, cabeceo o guiñada, son lo suficientemente importantes como para producir una imagen buena. En este caso, el movimiento de traslación hace que el casco tenga un ancho de banda doppler, 2º término de 12, y que oculta el resto de componentes doppler que son producidos por los giros del blanco.

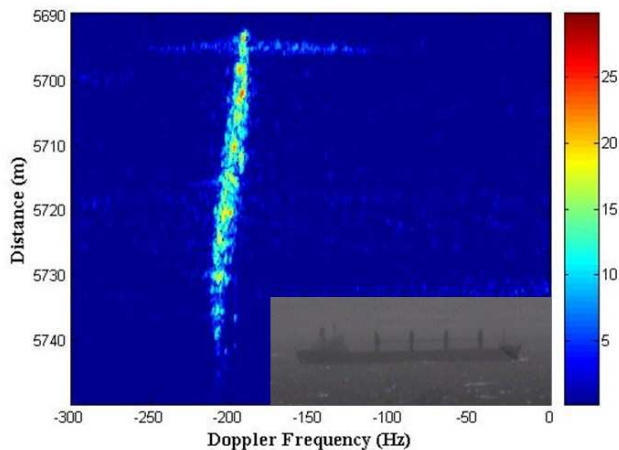


Figura 12: imagen ISAR de un barco de grandes dimensiones

En todas las imágenes ISAR de los barcos presentados en este artículo se obtiene este efecto del casco, y es aún más llamativo en el caso de móviles más rápidos como coches, sección 4.2, pero lo que sucede es que el doppler de las super estructuras inducido por los giros del blanco, es mayor que este efecto. Pero para barcos grandes, al poseer giros de cabeceo y alabeo tan extremadamente lentos, esta condición no se cumple no pudiendo obtenerse información sobre el perfil del barco [16].

Para mejorar esta situación, bien hay que utilizar algoritmos de compensación de movimiento y comprobar si se ve el perfil o la planta del barco [16], o si se puede, conseguir una mejor ubicación del radar respecto al blanco, por ejemplo, con una componente longitudinal mayor, para conseguir maximizar la frecuencia doppler que el poco movimiento de cabeceo pueda inducir sobre el radar.

La otra característica reseñable de la imagen ISAR presentada en la figura 12 es la aparición de un gran ancho de banda doppler en la proa del buque. Este ancho de banda mayor que el resto del barco es producida por la estela del barco. Este desplazamiento de agua genera un blanco de elevada potencia, similar en aspecto y características a la cresta de una ola, que ya se usa para detección en imágenes SAR [31, 32]. La espuma producida puede verse en la fotografía del barco adjunta a la imagen ISAR, figura 12, o más claramente en el caso del segundo velero que será presentado posteriormente, figura 11.

4.7 Velero

La siguiente prueba se llevó a cabo también en el Estrecho de Gibraltar y buscaba encontrar situaciones mejores para la obtención de imágenes ISAR, bien buscando direcciones de apuntamiento mejores o intentando probar con barcos que poseyeran movimientos de cabeceo y balanceo mayores, produciendo gradientes doppler lo suficientemente grandes para obtener una buena imagen del blanco.

La primera situación de este tipo que se presentó fue un velero que estaba realizando una navegación contra el viento, siendo bastante fuerte (de unos 70 Km/h sostenidos), realizando una navegación de guiñada que le hizo colocar su línea de crujía prácticamente paralela a la dirección de apuntamiento. Al mismo tiempo, la dirección del viento y, por tanto la de las olas, era prácticamente perpendicular a su eje longitudinal, incrementando enormemente su movimiento de balanceo. Por tanto era una situación ideal para la obtención de una imagen ISAR de su perfil, en la misma configuración que la representada en la figura 8.

Los datos de configuración del radar están recogidos en la tabla 6, la resolución en distancia del sistema es de aproximadamente 19 centímetros, y la integración realizada para la obtención del doppler es de 1024 rampas, con lo cual la resolución doppler es de 1 Hz. Sin embargo, a diferencia del caso anterior, no se ha realizado algún tipo de inventariado, ni en distancia ni en doppler a los datos.

Las imágenes ISAR obtenidas están representadas en las figuras 10 y 13. En la primera de ellas se puede observar la similitud entre el perfil del barco y la imagen ISAR obtenida. Se identifica perfectamente el mástil del velero,

Tabla 6: datos del experimento

B_w transmitido	1000 MHz
Frecuencia moduladora	1000 Hz
Frecuencia de muestreo	800 KHz
Tamaño del archivo	60 MB
Tiempo almacenado	9,5 s.

obteniéndose un gradiente doppler de 150 hertzios, pero la característica más importante de este experimento fue el poder obtener el periodo de oscilación del movimiento armónico del blanco, puesto que al grabar suficiente tiempo, se pudo constatar que la arboladura del velero cambiaba efectivamente de orientación respecto al centroide doppler del blanco. Durante la mitad de un periodo la arboladura se acerca al radar e induce un doppler positivo que se suma al doppler inducido por el movimiento de traslación, y durante la otra mitad se aleja, doppler negativo. El período de oscilación del barco es el doble del tiempo transcurrido entre las figuras que presentan la mayor diferencia doppler entre el casco y los mástiles. Estas imágenes están en la figura 13, arrojando un valor de seis segundos.

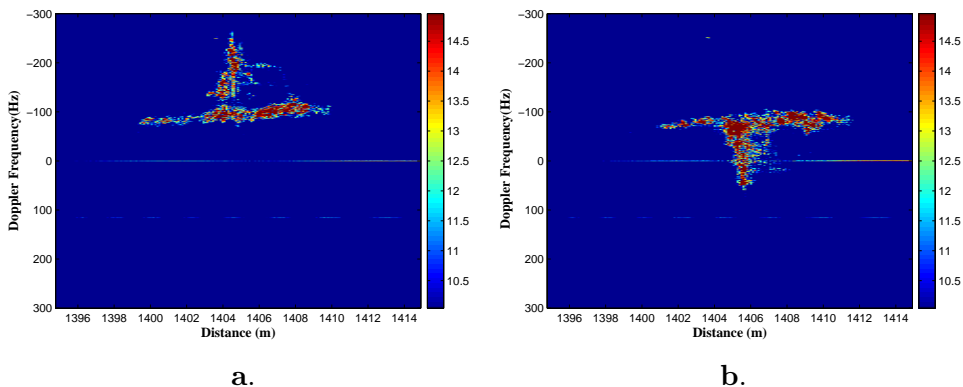


Figura 13: evolución temporal de las componentes doppler: a) imagen ISAR para $t = 0,9$ s b) imagen ISAR para $t = 3,9$ s

Este período se puede relacionar con el de las olas, siendo éste uno de los parametros básicos que caracterizan el estado de mar. Evidentemente,

será también función de la velocidad del blanco y de la dirección de traslación del mismo con respecto a la de las olas.

En este caso no se aprecia el desplazamiento de agua del velero puesto que el blanco prácticamente está parado, 2 Km/h según los -100 Hz de la frecuencia doppler central, y, por tanto, esta velocidad no es suficiente como para dejar una estela suficientemente importante en el agua, no apreciándose ninguna línea vertical en la imagen distancia–doppler.

De este experimento se puede observar que esta configuración de apuntamiento del radar respecto al blanco puede ser buena para la obtención de imágenes ISAR, y además, grabando suficiente tiempo, se puede obtener información sobre las condiciones de mar, que pueden favorecer o complicar en gran medida la obtención de buenas imágenes ISAR maximizando o minimizando el gradiente doppler de los barcos.

4.8 Velero II

La última que se presenta realizada en Tarifa, consistía en probar la otra configuración indicada para la obtención de una imagen del perfil del barco. El velero, en este caso, se encuentra prácticamente perpendicular a la dirección de apuntamiento, por lo que los movimientos de traslación y de cabeceo son minimizados, y en cambio, el movimiento de balanceo va a ver incrementada su importancia a la hora de obtener una imagen del perfil del buque.

Las características operativas del radar vienen recogidas en la tabla 7, mientras que para la obtención de las imágenes ISAR se han integrado 1024 rampas y se ha realizado un enventanado de *Hamming* en la dimensión doppler únicamente.

Tabla 7: datos del experimento

B_w transmitido	1000 MHz
Frecuencia moduladora	1000 Hz
Frecuencia de muestreo	1,6 MHz
Tamaño del archivo	160 MB
Tiempo almacenado	12,7 s.

El gradiente doppler entre el casco del barco y la parte más alta es de 160 Hz, mientras el período del movimiento armónico es de 2,8 segundos (figura 14). Este valor tan pequeño induce a pensar a que el movimiento principal del barco que induce la imagen es el de cabeceo, puesto que un movimiento de balanceo con este período haría zozobrar el barco, y sin embargo, a pesar de la dirección de apuntamiento, el movimiento de cabeceo puede ser el más importante puesto que la velocidad de traslación del velero es muy alta, 40 Km/h, y además, la reducción del período medido se explica porque en este caso el barco se encuentra navegando con la proa hacia las olas.

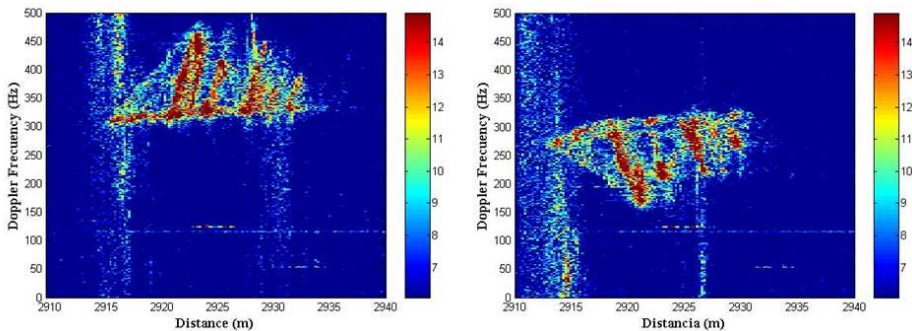


Figura 14: movimiento armónico del blanco entre $t = 1,6$ s y $t = 3$ s

Aparte de la vista de perfil del barco, hay que destacar que se pueden percibir elementos de gran detalle en las imágenes ISAR, como los cables que unen el palo mayor con la proa del barco, los estays, y la aparición de potentes retornos de mar generados por la navegación del barco. En este caso, dada la derrota del barco y su alta velocidad, realizaba un movimiento de cabeceo de mucha amplitud, levantando gran cantidad de agua cuando volvía a chocar contra el agua, como se puede observar en la fotografía de la figura 11. Esta agua poseería una velocidad tan elevada que sería ambigua en doppler, produciendo las líneas verticales ya explicadas.

La conclusión es la posibilidad de también utilizar esta dirección de apuntamiento, al menos para veleros que tengan movimientos de cabeceo y de balanceo mayores que el de un buque, y que produzcan un gradiente doppler lo suficientemente grande como para observar el perfil del barco, como veleros o embarcaciones de dimensiones reducidas.

4.9 Cuesta de las perdices 2

Finalmente, a modo de comparación para poder reflejar la mejora y progresión, tanto del sistema como del procesado de señal que se realiza, se presentan los dos últimos experimentos que son muy parecidos a los dos primeros de esta sección 4.1 y 4.2.

En el primero, se presenta una nueva grabación de la autovía, con las características operativas reflejadas en la tabla 8, destacando el aumento del tiempo grabado, manteniéndose aproximadamente el tamaño del archivo, y además la mejora de la resolución en distancia, transmitiéndose 10 veces más de ancho de banda, consiguiéndose una resolución final de 18 cm.

Tabla 8: datos del experimento

B_w transmitido	1000 MHz
Frecuencia moduladora	1000 Hz
Frecuencia de muestreo	8 MHz
Tamaño del archivo	120 MB
Tiempo almacenado	2 s.

En las nuevas imágenes, figuras 15 y 16, llama poderosamente la atención dos diferencias con la figura 6. Por un lado la perfecta verticalidad del cero doppler debido a que ya se ha resuelto el problema de sincronismo existente en recepción y, por otro lado, la forma perfectamente cuadrada de los vehículos diferenciándose de la que se obtenía anteriormente.

Para explicar esta forma hay que recurrir a la expresión de los términos existentes en la señal de batido que se obtiene en recepción. En (12), el segundo término representa la variación de la frecuencia doppler que se recibe en el receptor en función del ancho de banda transmitido, ΔfT , y de la velocidad que posee el móvil, v . En este caso, como los coches, camiones y diferentes vehículos que se desplazan por una autopista poseen una velocidad elevada, este término deja de ser despreciable, sobre todo, frente al margen no ambiguo de frecuencias doppler del sistema, $\pm \frac{f_m}{2}$.

Por ejemplo, para el caso de la imagen 16, se tiene que los datos a emplear en la ecuación son $\Delta f = 10^9$ Hz, $f_m = 10^3$ Hz, $c = 3e8$ m/s, una velocidad de móvil $v = 100$ Km/h y un tiempo de procesado efectivo en cada rampa

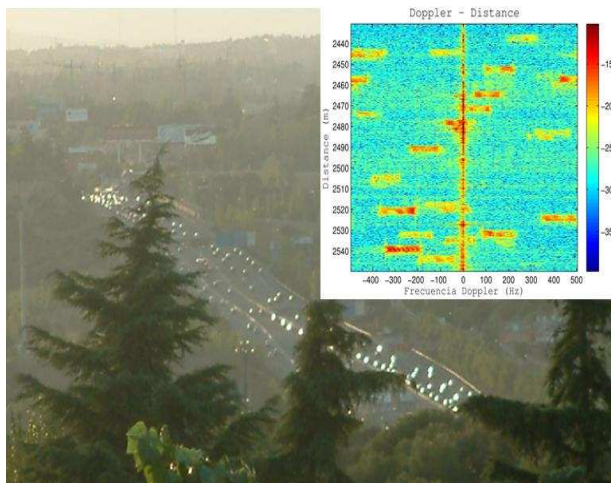


Figura 15: fotografía e imagen ISAR con 256 rampas integradas

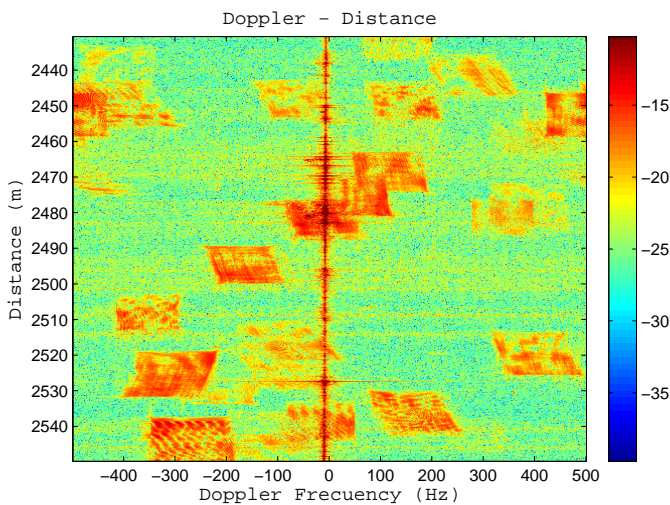


Figura 16: Imagen ISAR con 1024 rampas integradas.

de $T = 0,7 \cdot 10^{-3}$ s, resulta que el término arroja un valor de 130 hertzios, dejando de ser despreciable frente al margen doppler no ambiguo de 1 KHz,

y que prácticamente coincide con el representado. La diferencia estriba en el ángulo de apuntamiento, que no es paralelo a la dirección de desplazamiento y por lo tanto la velocidad medida no será exactamente la real.

Es más, para radares que barran tanto ancho de banda y aplicaciones de control de tráfico, ésta es una característica tremendamente interesante, puesto que, directamente de la imagen ISAR y a través de la anchura doppler que da el blanco se puede deshacer la ambigüedad que se tiene en doppler y, posteriormente, a partir del valor inicial de la frecuencia doppler que posea el blanco se sabe la velocidad que posee en todo momento, e incluso la variación de la misma mediante imágenes sucesivas.

A tenor de los resultados, queda reflejada una clara mejora y evolución del sistema, tanto en su funcionamiento como en el procesado posterior, como también un mejor conocimiento del origen de las imágenes obtenidas, que permiten, como en este caso, el descubrir posibles aplicaciones de estos sistemas como para control de tráfico, aportando ventajas competitivas frente a sistemas actuales, como puede ser el aumento de la distancia entre el radar y el blanco, posibilidad de control de la velocidad en un rango de distancias grande, o su alta precisión.

4.10 Grúa

El segundo experimento para comparar con los resultados iniciales es la grabación de los ecos procedentes de una grúa tipo torre, usada en la construcción. Este caso es semejante al de los reflectores presentados en la sección 4.1, salvo por las dimensiones y porque en este caso la barra que antes giraba, y que ahora sería el brazo de la grúa, tiene una sección radar suficiente como para verse en la imágenes ISAR.

En este experimento se aumentó la frecuencia moduladora, en un intento de no ser ambiguo en toda la extensión de la grúa, puesto que al ser tan ancha, la velocidad lineal en los extremos es elevada y con la frecuencia tan alta de uso podría exceder el margen no ambiguo. Sin embargo, la velocidad de giro no era tan alta como la esperada y el margen doppler no ambiguo es bastante mayor que el inducido por el blanco.

En la imagen ISAR, figura 17, se observa perfectamente la parte móvil de la grúa. En la parte inferior derecha, los reflectores de mayor distancia

detectados corresponden al contrapeso de la grúa, la cual giraba en sentido horario y se estaban acercando al radar, por eso de su doppler positivo. En la esquina opuesta de la imagen, arriba a la izquierda, se puede ver el otro extremo de la grúa, que evidentemente se estaba alejando del radar, doppler negativos, reseñando la existencia de un blanco, aproximadamente a 70 metros del radar y con un doppler -250 Hz, que no se encuentra en la línea doppler-distancia que marca el resto de la grúa. Esto supone un reflector que no gira solidariamente con el resto de la antena, puesto que su velocidad no corresponde con la distancia a la que se encuentra.

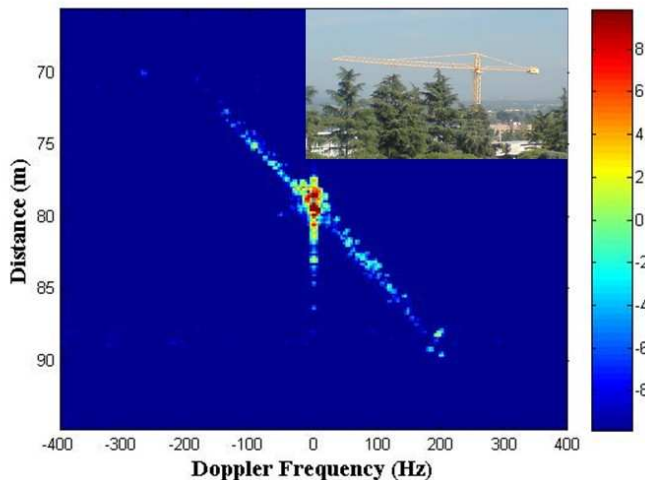


Figura 17: imagen ISAR de una grúa. Integración 1024 rampas

Para explicarlo hay que fijarse en la foto de la grúa, éstas son usadas para el transporte de materiales de construcción dentro de la obra, y para ello disponen de un carrito de transporte de mercancías llamado carro de pluma y del que cuelga el gancho para colocar los materiales. Este carrito, en el instante de grabación, se encontraba alejándose del radar dirigiéndose hacia el centro de giro, y por tanto, debido a su movimiento compuesto, de giro solidario con la grúa más el suyo propio, la velocidad relativa respecto al radar es mayor y, por lo tanto, posee un doppler negativo mayor, en valor absoluto, que el que le correspondería si fuera un sólido rígido girando solidariamente con la grúa, explicándose así la aparición de este reflector.

También se observan blancos en cero doppler y a mayor distancia que el centro de giro. Estos blancos se corresponden con la torre de la propia grúa, los cuales, debido a la anchura de haz de la antena transmisora, son radiados también, encontrándose más alejados que el centro de giro gracias a la geometría del experimento.

En esta última prueba presentada queda reflejada también la mejora tanto en la capacidad del sistema para aumentar la información almacenada acerca de los blancos con alta resolución, tabla 9, así como el procesado realizado con ellos, obteniéndose imágenes con una calidad suficiente como para ser una gran ayuda a los operadores radar, o también para su empleo en algoritmos de clasificación e identificación de blancos [9].

Tabla 9: datos del experimento

B_w transmitido	1000 MHz
Frecuencia moduladora	2000 Hz
Frecuencia de muestreo	2 MHz
Tamaño del archivo	89 MB
Tiempo almacenado	5,7 s

5 Conclusiones

En este artículo se ha intentado explicar una posible evolución de los radares hacia sistemas que sean capaces de obtener más información de los blancos, sin esperar algún tipo de colaboración por parte del mismo. Hasta ahora, se dedicaban a localizar un blanco y, mediante su seguimiento en el tiempo, poder realizar una estimación sobre su velocidad y dirección de desplazamiento.

El futuro puede consistir en conseguir más información del blanco: mayor precisión en la posición y velocidad del blanco, materiales que lo forman, mejora en la probabilidad de detección e incluso la obtención de una imagen aproximada de la forma del blanco, de manera que con la nueva información sea factible una clasificación del mismo o incluso una identificación concreta de él.

Para poder conseguir las nuevas funcionalidades, algunos cambios han de realizarse a la hora de diseñar un sistema radar. Primero, manejar mayores anchos de banda para aumentar la resolución en distancia y, por tanto, tener

una mayor precisión a la hora de calcular su posición y velocidad, siendo una solución sencilla aumentar la frecuencia portadora.

Sin embargo, con esta mejora no es suficiente para obtener una “imagen radar” del blanco, se requiere también una buena precisión en una segunda dimensión, la dimensión en azimut. El hecho de subir en frecuencia permite obtener antenas con dimensiones reducidas y haces de radiación estrechos, pero no lo suficiente como para tener la resolución necesaria para obtener imágenes, sobre todo, si los blancos se encuentran alejados del radar.

Una solución es el procesado doppler, el cual, gracias al movimiento relativo entre el radar y el blanco, puede mejorar la resolución en la dimensión azimutal. La forma de conseguirlo ha sido explicada de forma sencilla en el artículo, y mucho más profusamente para el caso específico de un radar CWLFM. Las técnicas ISAR poseen la ventaja de no tener que desplazar el radar para obtener la resolución en azimut, técnicas SAR, en cambio, dependen del movimiento del blanco para obtener la imagen.

Se ha explicado cómo, a pesar de esta dependencia, y para determinados blancos y aplicaciones, se pueden obtener muy buenos resultados sin tener algún tipo de control sobre el movimiento o trayectoria del blanco, aprovechando movimientos intrínsecos de los blancos y optimizando la dirección de apuntamiento.

Se han mostrado las imágenes obtenidas con un sistema radar de alta resolución, en entornos reales y sin ningún tipo de control sobre los blancos, constatándose la mejora alcanzada durante cuatro años de proyecto de investigación. Estos hacen ser optimista sobre su posible aplicación futura en determinadas aplicaciones, en las cuales pueden presentar una seria ventaja competitiva frente a los sistemas utilizados hasta la actualidad, como la robustez frente a la mala meteorología que no presentan los sistemas ópticos o térmicos.

Finalmente, hacer notar que en ninguno de los casos se ha realizado algún tipo de compensación de movimiento, y que, sin quitar importancia a esta otra línea de desarrollo que también se está llevando dentro del grupo investigador, puede que una simplificación del procesado de señal a realizar, y por tanto reducción de requisitos de procesado, almacenamiento de datos y rapidez a la hora de obtención de resultados a bajo coste, signifique la diferencia entre su implantación o no.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer en primer lugar al Ministerio de Ciencia y Tecnología por la subvención económica a través de los proyectos TIC-2002-04569-C02-01 y TIC-2002-04569-C02-02; al personal colaborador, tanto del GMR de la Universidad Politécnica de Madrid, como al del Grupo de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad de las Palmas de Gran Canaria, como también, y muy especialmente, a toda la dotación del puesto de vigilancia marítima del estrecho con su responsable, el capitán de corbeta José, por su inestimable ayuda a la hora de llevar a acabo este proyecto de investigación.

Referencias

- [1] Mark E. Russell. *Future of RF Technology and Radars*. 2007 IEEE Radar Conference, ISSN 1097-5659, 11-16 (April 2007). Referenciado en 131
- [2] J. L. Jiménez, J. Gismero, J. M. Pardo and D. Ramírez. *Large time-bandwidth product and low phase noise LFM signal generation for high resolution radar*. International Radar Conference, ISBN 1-58053-993-9, Toulouse-France, 11-16 (October 2004). Referenciado en 131, 147
- [3] E. Adler, J. Clark, M. Conn, Phu Phuong, B. Scheiner. *Low-cost enabling technology for multimode radar requirements*. Proceedings of the 1998 IEEE Radar Conference, 1998, RADARCON 98, ISBN 0-7803-4492-8, 50-55 (11-14 May 1998). Referenciado en 131
- [4] Amin K. Ezzeddine. *Advances in Microwave & Millimeter-wave Integrated Circuits*. National Radio Science Conference, 2007, NRSC 2007, ISBN 977-5031-86-9, 1-8 (13-15 March 2007). Referenciado en 131
- [5] Nadav Levanon and Eli Mozeson. *Radar Signals*, ISBN 9780471663072. John Wiley & Sons, 2004. Referenciado en 131, 140
- [6] Merrill I. Skolnik. *Radar Handbook*, 2nd edition, ISBN 007057913X. McGraw-Hill, 1990. Referenciado en 132, 140
- [7] K. B. Eom and R. Chellappa. *Noncooperative target classification using hierarchical modeling of high-range resolution radar signatures*. IEEE transactions on signal processing, ISSN 1053-587X, 45(9), 2318-2327 (September 1997). Referenciado en 132

- [8] K. B. Eom. *Time-varying autoregressive modeling of HRR radar signatures*. IEEE transactions on aerospace & electronic systems, ISSN 0018-9251, **35**(3), 974–988 (July 1999). Referenciado en 132
- [9] Cristina Carmona Duarte, B. Pablo Dorta Naranjo, Alberto Asensio López and Álvaro Blanco del Campo. *High resolution CWLFM radar for vessel detection and identification for maritime border security*. Conference on Security Technology, 2005. CCST '05. 39th Annual 2005 International Carnahan, ISBN 0-7803-9245-0, Gran Canaria–Spain, 304–307 (October 2005). Referenciado en 132, 153, 169
- [10] A. Asensio López, A. Blanco del Campo, J. Gismero Menoyo, D. Ramirez Morán, G. Torregrosa Penalva, B. P. Dorta Naranjo and C. Carmona Duarte. *High range-resolution radar scheme for imaging with tunable distance limits*. IEE Electronics letters, ISSN 0013-5194, **40**(17), 1085–1086 (19 August 2004). Referenciado en 132, 144, 157
- [11] W. F. Gabriel. *Superresolution techniques and ISAR imaging*. Proceedings of the 1989 IEEE National Radar Conference 1989, 48–55 (29–30 March 1989). Referenciado en 133
- [12] S. Haykin. *Radar vision*. Record of the IEEE 1990 International Radar Conference, 585–588 (7–10 May 1990). Referenciado en 143
- [13] A. Blanco del Campo, A. Asensio López, B. P. Dorta Naranjo, J. Gismero Menoyo, D. Ramírez Morán and C. Carmona Duarte. *Vehicle control classification and identification through ISAR imaging*. European Radar Conference 2005, EURAD 2005, ISBN 2–9600551–3–6, París, 65–68 (6–7 October 2005). Referenciado en 144, 150, 157
- [14] A. Blanco del Campo, A. A. López, B. P. D. Naranjo, J. G. Menoyo, D. R. Morán and C. C. Duarte. *CWLFM millimeter-wave radar for ISAR imaging with medium range coverage*. 2005 IEEE International Radar Conference, ISBN 0–7803–8881–X, 933–938 (9–12 May 2005). Referenciado en 144
- [15] Chen Chung Ching and H. C. Andrews. *Target-Motion-Induced Radar Imaging*. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, ISSN 0018-9251, **1**, 2–14 (January 1980). Referenciado en 145
- [16] J. M. Muñoz Ferreras, F. Pérez Martínez, J. Calvo Gallego, A. Blanco del Campo, A. Asensio López and B. P. Dorta Naranjo. *Focused ISAR images of maritime targets using a high resolution LFM CW millimeter-wave radar*. IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, 2006. MELECON 2006, ISBN 1–4244–0087–2, 521–524 (16–19 May 2006). Referenciado en 160

- [17] J. M. Muñoz Ferreras, J. Calvo Gallego, F. Pérez Martínez, A. Blanco del Campo, A. Asensio López and B. P. Dorta Naranjo. *Motion compensation for ISAR based on the shift-and-convolution algorithm*. 2006 IEEE Conference on Radar, ISBN 0-7803-9496-8, 5 (24–27 April 2006). Referenciado en 145
- [18] S. O. Piper. *Homodyne FMCW radar range resolution effects with sinusoidal nonlinearities in the frequency sweep*. Record of the IEEE 1995 International Radar Conference, ISBN 0-7803-2121-9, 563–567 (8–11 May 1995). Referenciado en 147
- [19] R. Bhalla and Hao Ling. *Fast inverse synthetic aperture radar image simulation of complex targets using ray shooting*. IEEE International Conference Image Processing, 1994. Proceedings. ICIP-94, ISBN 0-8186-6952-7, 1, 461–465 (13–16 November 1994). Referenciado en 151
- [20] M. Hagelen, A. Wahlen and T. Brehm. *ISAR imaging of flying helicopters at millimeter-wave frequencies*. First European Radar Conference, 2004. EURAD, ISBN 1-58053-993-9, 265–268 (2004). Referenciado en 151
- [21] Victor C. Chen and Hao Ling. *Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis*, ISBN 978-1580532884. Artech House Publishers, Morwood MA, 2002. Referenciado en 152
- [22] Qun Zhang and Tat Soon Yeo. *Three-dimensional SAR imaging of a ground moving target using the InISAR technique*. IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, ISSN 0196-2892, **42**(9), 1818–1828 (September 2004). Referenciado en 152
- [23] Sang Ho Yoon, Byungwook Kim and Young Soo Kim. *Helicopter classification using time-frequency analysis*. IEE Electronics letters, ISSN 0013-5194, **36**(22), 1871–1872 (26 October 2000). Referenciado en 152
- [24] J. Muñoz Ferreras, F. Pérez Martínez and M. Burgos García. *Helicopter classification with a high resolution LFM CW Radar*. IEEE transactions on aerospace and electronic systems, Accepted for publication. Referenciado en 152
- [25] Ling Wang, Daiyin Zhu and Zhaoda Zhu *Study on airborne ISAR imaging of ship targets*. Proceedings 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '04, ISBN 0-7803-8742-2, **6**, 3934–3937 (20–24 September 2004). Referenciado en 153, 155, 157
- [26] S. Musman, D. Kerr and C. Bachmann. *Automatic recognition of ISAR ship images*. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, ISSN 0018-9251, **32**(4), 1392–1404 (October 1996). Referenciado en 157, 159

- [27] D. Pastina, A. Montanari and A. Aprile. *Motion estimation and optimum time selection for ship ISAR imaging*. Proceedings of the 2003 IEEE Radar Conference, ISSN 1097-5659, 5-8 (7-14 May 2003). Referenciado en 153
- [28] V. C. Chen and W. J. Miceli. *Simulation of ISAR imaging of moving targets*. IEE Proceedings Radar, Sonar & Navigation, ISSN 1350-2395, **148**(3), 160-166 (June 2001). Referenciado en 153
- [29] Donald R. M. Wehner. *High resolution radars*, 2nd edition, ISBN 0890067279. Artech house, 1995. Referenciado en 154
- [30] F. Pérez Martínez, A. Asensio López, J. Gismero Menoyo, J. I. Alonso Montes, F. Casanova and J. Monje. *ARIES: a high-resolution shipboard radar*. Proceedings of the IEEE Radar Conference 2002, ISBN 0-7803-7357-X, 148-153 (May 2002). Referenciado en 159
- [31] Pengfei Du, Ziyue Tang, Yongliang Wang and Yongjian Sun. *Ship wakes detection in SAR images based on the joint radon transform and entropy*. International Conference on Radar 2006, CIE '06, ISBN 0-7803-9582-4, 1-4 (October 2006). Referenciado en 161
- [32] Yingjian Liu, Mingqiang Fang, Qian Feng and Laibu Wang. *An automatic ship detection system using ERS SAR images*. Proceedings 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003, IGARSS '03, ISBN 0-7803-7929-2, **4**, 21-25, 2656-2658 (July 2003). Referenciado en 161