

ADAPTACIÓN DE VARIACIONES DE ACTITUD DURANTE EL PROCESADO SAR (RADAR DE APERTURA SINTÉTICA) PARA SISTEMAS AEROTRANSPORTADOS

P. PRATS (*), M. BARA (*), A. BROQUETAS (*) Y J. MITTERMAYER (**)

marc.bara@ideg.es

(*) Institut de Geomàtica. Parc de Montjuïc, s/n, Edif. Inst. Cartogràfic
08038 Barcelona

(**) Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Oberpfaffenhofen, Germany

RESUMEN: Esta comunicación presenta un procesador SAR (Radar de Apertura Sintética) por subaperturas basado en el algoritmo ECS (*Extended Chirp Scaling*) para acomodar las variaciones de actitud de la plataforma en sistemas aerotransportados. Se han derivado diversos criterios para el diseño de parámetros del sistema (tamaño de las antenas, variación de actitud permitida, etc.) que dependen directamente de la solución de procesamiento adoptada. Se presentan resultados para demostrar la validez del algoritmo.

ABSTRACT: This paper presents a subaperture SAR (Synthetic Aperture Radar) processor based on the ECS (*Extended Chirp Scaling*) approach to accommodate attitude variations of the platform in airborne systems. Some criteria for the design of system parameters (antenna, size, allowed attitude variations, etc.) which depend directly on the processing method have been derived. Results with real data show the validity of the proposed algorithm.

Palabras clave: radar, SAR, subaperturas, spotlight.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas SAR permiten obtener imágenes de reflectividad del terreno utilizando el concepto de apertura sintética, basado en la síntesis de una antena ficticia de gran longitud para obtener de este modo una alta resolución en azimut (Curlanden, 1991). La principal ventaja de utilizar un sistema radar para la generación de imágenes de la superficie terrestre consiste en que se trata de un sistema activo, que suministra la fuente de iluminación. De este modo se pueden adquirir datos en ausencia de luz solar, y además se puede trabajar en condiciones meteorológicas adversas (nubes, lluvia...) dada la capacidad de penetración de las frecuencias de microondas.

En el caso del SAR aerotransportado, el radar se instala en un avión que se desplaza a una velocidad v a lo largo de una trayectoria rectilínea a altura h constante (Figura 1). El eje de coordenadas está formado por el eje azimut (x) u, perpendicular a éste, el eje *slant range*, cuya proyección al suelo se denomina *ground range*. La antena puede estar orientada en la dirección perpendicular al vuelo —modo *boresight*— o con un cierto ángulo β —modo *squint*. El sistema emite pulsos a una frecuencia *PRF*, recibe los ecos y los almacena en una matriz denominada *raw data*.

Existen varios algoritmos que realizan el procesamiento del *raw data* de diversas formas, entre los que destacan el CSA (*Chirp Scaling Algorithm*) (Raney *et alii*, 1994) y su versión *Extended-CSA* (Moreira *et alii*, 1996).

Existen varios algoritmos que realizan el procesamiento del *raw data* de diversas formas, entre los que destacan el CSA (*Chirp Scaling Algorithm*) (Raney *et alii*, 1994) y su versión *Extended-CSA* (Moreira *et alii*, 1996).

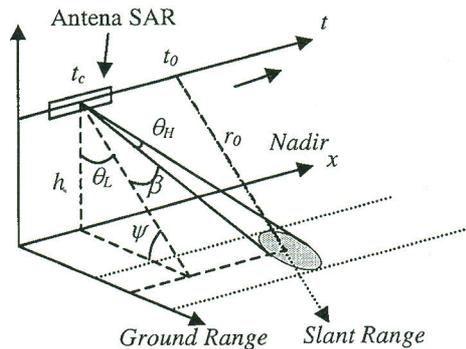


Figura 1. Geometría del SAR aerotransportado.

La resolución teórica que se puede obtener mediante un sistema SAR es de $\delta x = L_p/2$ (Curlander, 1991). Es decir, la resolución es la mitad de la longitud de la antena en azimut (L_p) y es independiente de la distancia al blanco —limitado por la potencia a transmitir—. Finalmente, cabe mencionar que en el caso aerotransportado es necesario aplicar compensación de movimiento a la señal, debido a los desplazamientos de la plataforma respecto a la trayectoria idealmente lineal (Bara *et alii*, 1998).

En este artículo se establecen los vínculos que relacionan dos aspectos globales del SAR: el tipo de procesamiento de la señal, y el diseño de parámetros de sistema. Este trabajo se ha desarrollado en el ámbito de la línea de investigación en SAR llevada a cabo por el *Institut de Geomàtica*, donde también se encuadran otros trabajos relacionados con el procesado SAR. Uno de ellos es el Proyecto Europeo RAPSODI, que tiene como objetivo el desarrollo de un sistema aerotransportado multisensor para la detección de vertidos en el océano.

SUBAPERTURAS

Durante la adquisición de datos SAR puede haber variaciones en la actitud del avión, debido generalmente a turbulencias. Estas variaciones pueden hacer que la antena apunte hacia zonas más adelantadas o atrasadas a las previstas, es decir, se reflejan en variaciones del

ángulo de *squint*. Si estas variaciones son rápidas (en comparación al tiempo de apertura), el ancho de banda Doppler de los datos a procesar aumenta en consecuencia. Así, si se supera la frecuencia de muestreo en azimut (*PRF*), se tienen artefactos en la imagen final (*aliasing*). En esta sección se resume brevemente el algoritmo implementado para evitar este efecto, basado en un procesado por subaperturas.

El principio de subaperturas (Moreira *et alii*, 1994) se basa en procesar el *raw data* en pequeños bloques individuales (de tamaño, p.e., $T_{sub} = 256$ píxeles, y tiempo de solapamiento $T_{ovl} = 32$). De este modo, el tratamiento frecuencial se restringe a una zona en la que los datos sí se encuentran confinados dentro del ancho de banda del sistema (*PRF*). En nuestro caso se ha implementado el procesador de subaperturas con el algoritmo E-CSA (Moreira *et alii*, 1996), en lo que respecta a la parte que corrige la migración en rango.

El funcionamiento del algoritmo lo podemos observar en la figura 2. Empieza con la compensación de movimiento (MoCo) de 1er orden sobre el *raw data* ya demodulado. A continuación se inicia un bucle que irá formando las subaperturas y las irá procesando por separado: funciones H_1 (escalado chirp), H_2 (compresión en rango y RCMC) y H_{31} (corrección de la fase residual introducida por H_1) del E-CSA, y la compensación de movimiento de 2º orden. El criterio para la formación de las subaperturas es el siguiente:

$$B_{az_{sub}} \leq PRF \quad (1)$$

Es decir, el ancho de banda de cada subapertura debe ser inferior a la *PRF* del sistema. Para conocer el ancho de banda deberemos tener en cuenta el *squint* del vuelo dado por la actitud del avión (ángulos *yaw* θ_y y *pitch* θ_p). La relación de estos dos ángulos con el *squint* se puede aproximar (Moreira *et alii* 1994):

$$\sin(\beta(t, r_0)) = \sin\theta_L(t, r_0) \cdot \sin\theta_y(t) + \cos\theta_L(t, r_0) \cdot \sin\theta_p(t) \quad (2)$$

donde θ_L es el ángulo de apuntamiento. Además del *squint*, deberemos tener en cuenta también el ancho de haz a -3dB de la antena en azimut:

$$B_{az_{sub}} = f_{D_{max_{sub}}} - f_{D_{min_{sub}}}$$

$$B_{az_{sub}} = \frac{2 \cdot v}{\lambda} \left(\sin\left(\beta_{max_{sub}} + \frac{\theta_H}{2}\right) - \sin\left(\beta_{min_{sub}} - \frac{\theta_H}{2}\right) \right)$$

donde β_{max} y β_{min} son el *squint* máximo y mínimo dentro de la subapertura, respectivamente, y λ es la longitud de onda. Cada subapertura se procesa a una frecuencia central $f_{D_{sub}}$, que será la media entre la máxima $f_{D_{max_{sub}}}$ y la

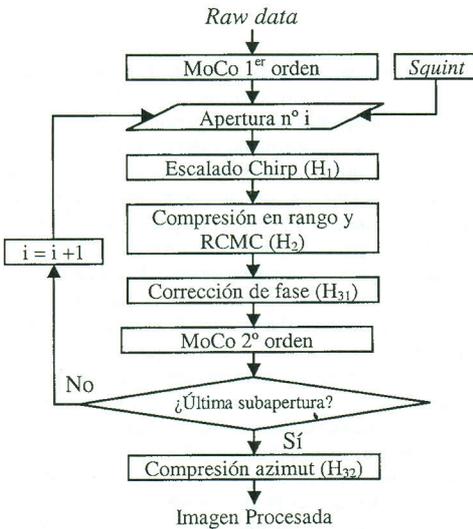


Figura 2. Diagrama de bloques del algoritmo por subaperturas.

mínima $f_{D_{\text{minsub}}}$ dentro de la subapertura. De este modo conseguiremos procesar todas las subaperturas sin provocar artefactos en la imagen. Una vez corregida la migración en rango y los desplazamientos del avión, cada subapertura se encuentra almacenada en disco. Así, se dispone de un 'raw data' nominal, donde sólo resta aplicar la compresión azimut, y que todavía se caracteriza por un ancho de banda global mayor a la PRF. Este hecho se considera mediante una *extensión espectral*, concepto utilizado también para la acomodación de la variación en rango de (2) (Moreira *et alii*, 1994). Todas las subaperturas se combinan en el dominio frecuencial (línea a línea), extendiendo el rango de frecuencias de acuerdo con la región ocupada por cada una de ellas. Se suman coherentemente para obtener la línea completa, para finalmente aplicar el filtro de compresión en azimut (H_{32} del E-CSA). La imagen resultante se caracteriza por un aumento en la densidad de muestras, capaz de contener el mayor ancho de banda impuesto por la actitud inestable.

En cuanto a los requisitos de hardware, la ventaja del procesador por subaperturas es la poca memoria necesaria: es suficiente con el tamaño de una subapertura. El inconveniente es la necesidad de una *corner turn* de la matriz total, y el tiempo invertido en el proceso de extensión espectral.

RESULTADOS

Para verificar el algoritmo se han procesado datos *stripmap* en modo *spotlight* (Mittermayer *et alii*, 1999), yq que el *spotlight* es un caso particular (lineal) donde es necesario acomodar la gran variación Doppler dentro de la señal.

Se han utilizado datos captados por el sistema E-SAR de la Agencia Espacial Alemana (DLR) durante el 1999 sobre Oberpfaffenhofen (Alemania). Este sistema se caracteriza por un haz de antena muy ancho (8°) que permite simular procesado *spotlight* dentro de la apertura sintética *stripmap*. Los parámetros son los siguientes:

Parámetros	Valor
Frecuencia de trabajo	$f_0 = 9,6$ GHz
Fre. Repetición pulsos	$PRF = 1000$ Hz
Ancho de haz stripmap	$\theta_H = 8^\circ$
Squint stripmap	$\beta = 5^\circ$
Resolución en rango	2,5 m
Ancho de haz spotlight	$\theta_{H_{\text{spotlight}}} = 4^\circ$

Tabla 1. Parámetros de la simulación.

Así pues, se ha simulado una apertura *spotlight* con un haz de 4° , dentro de una apertura *stripmap* de 8° . Des-

pués del uso del procesador por subaperturas descrito anteriormente, se ha obtenido una resolución en azimut de $\delta x \approx 0.19$ m, mientras que la imagen convencional presenta un valor de $\delta x \approx 0.48$ m. Los resultados obtenidos aparecen en la figura 3 donde se comparan las imágenes a igualdad de resolución ($\delta x \approx 3$ m). Se puede apreciar que el procesador por subaperturas proporciona una imagen de alta calidad, ya que permite un mayor promediado para la disminución del ruido *speckle*.

Debido a que gran parte de las aplicaciones del SAR requieren de la preservación de su fase, se ha verificado también este aspecto del algoritmo. Para ello, se ha procesado la misma imagen tanto con un procesador convencional (un solo bloque) como con el nuevo algoritmo. Comparando las fases de estas dos imágenes, se ha medido una diferencia en la media y variancia de tan sólo 3.7×10^{-40} y 0.73° respectivamente.

CRITERIOS DE DISEÑO

El criterio para poder procesar sin alias con un solo bloque es bien conocido. Dada una PRF del sistema y un ancho de banda procesado PRF_{ap} , el máximo desplazamiento Doppler sin *aliasing* es:

$$\Delta f_{D_{\text{max}}} = \frac{PRF - PRF_{ap}}{2} \quad (4)$$

Sabiendo la relación geométrica entre squint y frecuencia Doppler, obtenemos el máximo valor de *squint* permisible:

$$\beta_{\text{max}} = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda \cdot \Delta f_{D_{\text{max}}}}{2 \cdot v} \right) \quad (5)$$

Por ejemplo, para los parámetros del E-SAR y utilizando $PRF_{ap} = 250$ Hz, tenemos que $\Delta f_{D_{\text{max}}} = 375$ Hz y por tanto las variaciones de squint permitidas son $\beta_{\text{max}} = \pm 3.95^\circ$, que se consideraría un valor aceptable. El inconveniente de utilizar un haz de antena ancho, para acomodar variaciones de squint, estriba en el hecho que deben utilizarse una PRF y una potencia transmitida mayores, redundando también en un requerimiento mayor de capacidad de almacenamiento. Estos parámetros se verían reducidos proporcionalmente para un sistema SAR con un ancho de haz menor. En ese caso, debemos determinar las condiciones en las que el proceso por subaperturas permite recuperar una imagen de calidad, estableciendo los nuevos criterios de diseño ligados a esta estrategia de tratamiento de la señal.

Como se ha visto anteriormente, el procesado por subaperturas permite aprovechar todos los instantes de tiempo en los que el blanco es observado, aunque se produzcan en zonas alejadas de las nominales. De todas formas, si la variación de actitud provoca que un blanco sea visible un tiempo menor al nominal, esa información ya no puede recuperarse. En general, se puede afirmar que los instantes en los que un blanco situado en

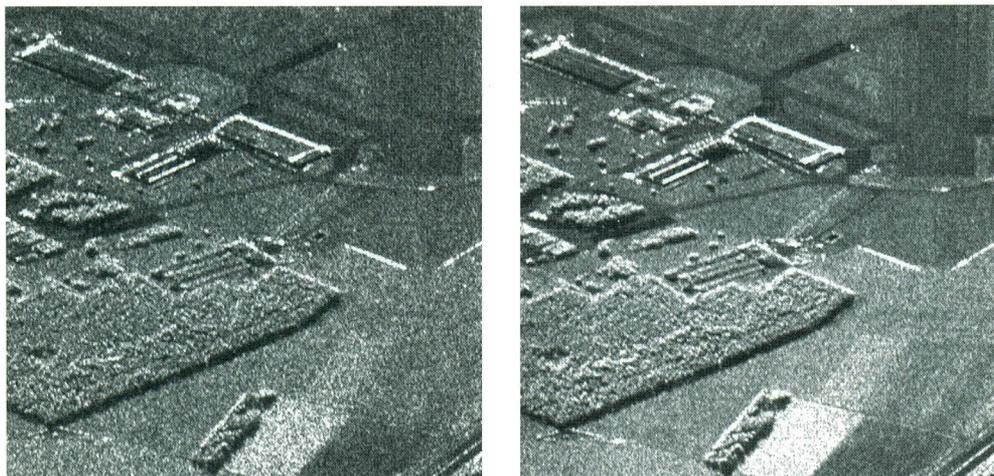


Figura 3. Comparación entre imágenes después del procesador SAR convencional (izquierda) y por subaperturas (derecha), a igualdad de resolución final.

(x_0, r_0) es observado por el radar deben cumplir la siguiente relación:

$$|\theta_{az}(t; x_0, r_0) - \beta(t, r_0)| \leq \frac{\theta_H}{2} \quad (6)$$

donde $\theta_{az}(t; x_0, r_0)$ es el ángulo azimut respecto a un punto a lo largo de toda la trayectoria y $\beta(t, r_0)$ es el ángulo de squint en función del tiempo acimut, cualquiera que sea su variación. El ángulo θ_{az} es una recta de pendiente $m_{az} = -\theta_H/T_{obs}$, donde T_{obs} es el tiempo nominal de observación. A partir de (6) se puede extraer el tiempo de observación total T'_{obs} , que en general será distinto a T_{obs} . Para continuar el análisis, podemos considerar el caso más simple en que el squint es una recta de pendiente m_{β} :

$$|m_{az}(r_0) \cdot (t - t_0) - m_{\beta}(t - t_0)| \leq \frac{\theta_H}{2} \quad (7)$$

Así, el valor de T'_{obs} es:

$$T'_{obs}(r_0) = \frac{\theta_H}{|m_{az}(r_0) - m_{\beta}|} \quad (8)$$

Se puede establecer el criterio que el cambio en el tiempo de observación (debido a la actitud) no debe suponer una pérdida de resolución superior a un factor α . De esta forma, la pendiente del *squint* debe cumplir:

$$\left| \frac{m_{az}(r_0) - m_{\beta}}{m_{az}(r_0)} \right| \leq 1 + \alpha \quad (9)$$

Así, comprobamos que el procesado por subaperturas es sensible a las variaciones del squint, y no a su margen de valores. La ecuación (9) es un criterio útil para establecer las máximas variaciones de actitud de la plataforma SAR, cuando se utiliza el procesado por subaperturas. Si es necesario considerar términos de orden superior en el desarrollo de β , debe utilizarse la expresión más general dada por (6).

CONCLUSIONES

Se ha presentado un algoritmo capaz de acomodar las variaciones de actitud de la plataforma SAR y de procesar datos *spotlight*. También se han definido una serie de criterios sobre la actitud permitida, en función de parámetros de diseño del sistema (haz de la antena, *PRF*) y de la estrategia de procesado (convencional o por subaperturas).

BIBLIOGRAFÍA

- J. C. CURLANDER, R. N. McDONOUGH (1991). *Synthetic Aperture Radar. Systems and Signal Processing*. Wiley.
- R. K. RANEY, H. RUNGE, R. BAMLER, I. G. CUMMING, F. H. WONG (1994). "Precision SAR Processing Using Chirp Scaling", *IEEE Trans. Geosc. Rem Sens. (TGRS)*, Vol. 32, No. 4, Julio 1994.

- A. MOREIRA, J. MITTERMAYER, R. SCHEIBER (1996). "Extended Chirp Scaling Algorithm for Air- and Spaceborne SAR Data Processing in Stripmap and ScanSAR Imaging Modes", *IEEE TGRS*, Vol. 35, No. 5, Septiembre 1996.
- M. BARA, J. CHACÓN, A. BROQUETAS, J. C. CRESPO, "Procesado de Imágenes SAR Aerotransportado con Compensación de Movimiento", XIII Simposium URSI, Pamplona, España, Septiembre 1998.
- J. MITTERMAYER, A. MOREIRA, O. LOFFELD (1999). "Spotlight SAR Data Processing using the Frequency Scaling Algorithm", *IEEE TGRS*, Vol. 37, No. 5, Septiembre 1999.

- A. MOREIRA, Y. HUANG (1994). "Airborne SAR Processing of Highly Squinted Data Using a Chirp Scaling Approach with Integrated Motion Compensation", *IEEE TGRS*, Vol. 32, No. 5, Septiembre 1994.

AGRADECIMIENTOS

Los autores querrían agradecer al Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) su soporte y colaboración, y a la Agencia Espacial Alemana (DLR) el suministro de los datos E-SAR. ESTE trabajo ha sido parcialmente financiado por la Comisión CICYT, ref. TIC99-1050-C03-03.