

Un procesador SAR basado en el Chirp Scaling Algorithm

A. Martínez, M. A. Herrero, P. Valenciano y V. Moreno
INISEL ESPACIO - Av. Hurgos 8 bis. 28036 Madrid
Tlf. 3963311 Fax 3963222 - e-mail: amar@mdr.inisel-espacio.es

RESUMEN

El radar de apertura sintética, SAR, sensor remoto en el dominio de frecuencias de las microondas, es el instrumento de teledetección con más futuro en el desarrollo de las tecnologías de observación. El enfoque de los datos brutos SAR presenta serias dificultades. Estas pueden ser resueltas con el método CSA, Chirp Scaling Algorithm que equaliza las trayectorias de migración de profundidad de todo el conjunto de datos brutos de forma que sólo dependan de un valor particular de la profundidad. Inisel Espacio ha implementado una versión del procesador CSA, integrado junto con un grupo de funciones auxiliares en el marco de un entorno de trabajo. El procesador CSA-SLC ha sido sometido a un plan de pruebas para cumplir las especificaciones de la ESA para los productos SLC del ERS-I sobre el análisis de calidad.

PALABRAS CLAVE: Procesador SAR, Chirp Scaling Algorithm, Análisis de calidad

ABSTRACT

Synthetic Aperture Radar, SAR, imaging radar in the microwave frequency domain, is the remote sensing instrument with more future in the observational technologies development. The focussing of SAR raw data presents serious difficulties. These can be resolved with the CSA method, Chirp Scaling Algorithm that equalizes the range migration trajectories of the whole data set with respect to a reference range. Inisel Espacio has implemented a CSA processor, integrated with extra functions in a work station. CSA-SLC processor has succeed a quality analysis to agree with ESA specifications for SLC ERS-I products.

KEY WORDS: SAR processor, Chirp Scaling Algorithm, Quality Analysis

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las tecnologías de observación de la Tierra desde el espacio y su paso al campo civil en los últimos años ha disparado el interés de la comunidad en sus aplicaciones. El principal atractivo que ofrece la Teledetección es la posibilidad de obtener un conocimiento preciso del medio ambiente a una escala global.

Los instrumentos de teledetección más conocidos son aquellos con capacidad de formar imágenes que trabajan en el dominio óptico del espectro electromagnético (visible e infrarrojo). El radar de apertura sintética, SAR, es un sensor remoto completamente diferente a los anteriores. El SAR trabaja en el intervalo de frecuencias de las microondas (longitud de onda entre 1 y 30 cm). Básicamente su funcionamiento es como sigue:

Una antena a bordo de un avión o satélite emite pulsos de microondas en la dirección perpendicular a la de vuelo; estos pulsos llegan a la superficie terrestre donde se dispersan. La radiación electromagnética que es dispersada en la dirección de la antena es recogida por la antena y grabada. Los pulsos retrodispersados recibidos por la antena son posteriormente procesados para la formación de una imagen. La imagen SAR contiene información

sobre el coeficiente de retrodispersión de microondas de la superficie terrestre.

Las propiedades de la superficie que más influyen en el coeficiente de retrodispersión de microondas son la constante dieléctrica y la rugosidad. Las ventajas más importantes que presenta el SAR para la teledetección son:

- El carácter activo del instrumento lo hacen independiente de la iluminación solar, pudiendo recoger imágenes de la superficie terrestre a cualquier hora.
- Las microondas se ven muy poco afectadas por la presencia de nubes, por lo que es posible la toma de imágenes con independencia del tiempo meteorológico y en regiones con cobertura nubosa permanente.
- Las imágenes SAR tienen una resolución espacial elevada (20 m), que permite el estudio de fenómenos de pequeña escala espacial. Por otra parte, las imágenes SAR cubren amplias zonas, lo que permite su utilización a escala global.
- Las imágenes SAR contienen una información complementaria a la de las imágenes ópticas. La selección de la banda de frecuencias, polarización y ángulo de incidencia del SAR

permite remarcar diferentes propiedades de la superficie.

La enorme utilidad del SAR se pone de manifiesto al considerar el gran número de proyectos de investigación amparados dentro del programa ERS (European Remote Sensing Satellite) de la Agencia Espacial Europea, ESA, y la confirmación de los programas de seguimiento (ERS-2 y ENVISA1).

Dentro de la cadena de proceso de los datos SAR, desde los datos en el satélite hasta el usuario final, ocupa un papel destacado la generación de las imágenes a partir de los datos brutos, conocida por procesado o preprocesado de datos SAR. En este artículo se presenta el procesador SAR y su entorno de trabajo desarrollados por el Departamento de Teledetección de Inisel Espacio.

EL PROCESADOR CSA

Los datos brutos del SAR están constituidos por la sucesión de pulsos recibidos por la antena; a diferencia de los sensores ópticos, estos datos no forman una imagen. El enfoque de los datos brutos SAR es un problema bidimensional consistente en la correlación de las señales retrodispersadas con una función de referencia: la función de respuesta a impulso del sistema SAR. La manera más directa de realizar la compresión es directamente en el dominio temporal. Sin embargo, la gran carga computacional de este método lo hacen inapropiado; otros métodos que trabajan en el dominio de frecuencias han sido investigados en el pasado, destacando los algoritmos Range- Doppler y w-K <Bennet-80>, <Cafforio-91>.

El propósito de estos métodos es calcular la correlación bidimensional como dos correlaciones monodimensionales. El proceso en la dirección de profundidad (perpendicular al movimiento de la antena) no supone un gran problema, al ser la función de referencia la misma para todos los datos brutos. La compresión en acimut (dirección de vuelo) conlleva más problemas, ya que la función de referencia para la correlación es dependiente de las coordenadas de profundidad y acimut (efecto de migración en profundidad, o range migration), por lo que el proceso en acimut es, en realidad, bidimensional.

La corrección de la migración en profundidad es llevada a cabo en los procesadores SAR clásicos por medio de una interpolación de los datos brutos. Este paso presenta algunos inconvenientes, como son el aumento de la complejidad del procesador y de la carga computacional y la posible inducción de artefactos (blancos fantasmas y anomalías de fase) en el producto final.

Recientemente ha sido propuesto un nuevo algoritmo de proceso SAR que no requiere de interpolaciones: el Chirp Scaling Algorithm (CSA) <Runge-92>, <Cumming-92>. La idea clave del método CSA es ecualizar las trayectorias de migración de profundidad de todo el conjunto de

datos brutos de forma que sólo dependan de un valor particular de la profundidad. El efecto de esta modificación de los datos brutos es que el efecto de migración puede ser compensado exactamente para toda la imagen, al depender únicamente de un valor de la profundidad.

La ecualización de los datos se realiza a partir del teorema de escalado de funciones de fase cuadráticas (Chirp Scaling Theorem). Este teorema establece un método para escalar una señal temporal mediante una cadena de convoluciones y multiplicaciones por funciones de fase <Papoulis-77>.

Una vez efectuada la ecualización, la migración de profundidad de todo el conjunto de datos brutos puede ser corregida. Esta corrección se efectúa al mismo tiempo que la compresión en profundidad, con el consiguiente ahorro de dos operaciones de transformada de Fourier (FFT) respecto a los procesadores clásicos. Recordemos que el cálculo de las FFT es la principal tarea consumidora de tiempo. Después de esta etapa queda por realizar la compresión en acimut y la compensación de la fase por efecto de la ecualización. El diagrama de flujo del proceso se muestra en la figura 1.

Las principales características del procesador CSA en comparación con otros procesadores clásicos son las siguientes:

- El algoritmo CSA produce imágenes SAR de alta calidad, que pueden ser utilizadas para todo tipo de aplicaciones.

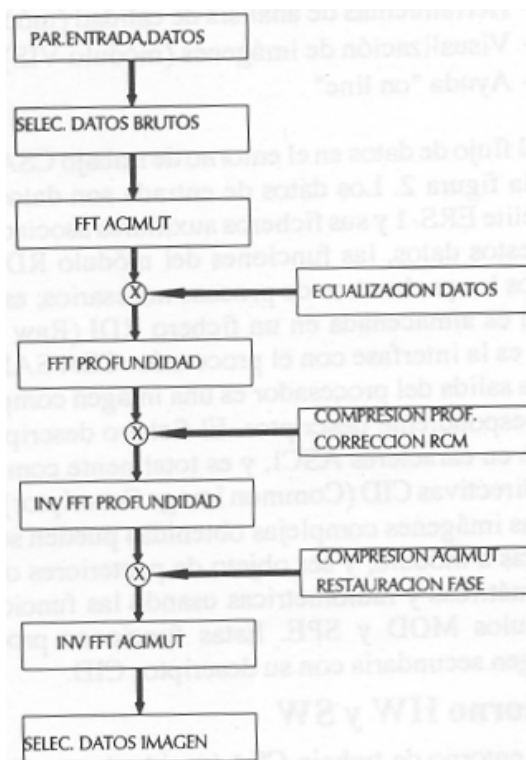


Fig. 1.- Diagrama de flujo del procesador CSA

- No existe necesidad de interpolar los datos SAR antes de ser comprimidos; este hecho

facilita enormemente el diseño del procesador, y evita la posible aparición de artefactos en la imagen.

- La compresión en profundidad se realiza al mismo tiempo que la compresión acimutal, con la consiguiente eficiencia computacional, al requerir tan sólo 4 FFTs.
- El algoritmo CSA es apropiado para el procesamiento de datos SAR tomados en geometrías complejas.

IMPLEMENTACION DEL PROCESADOR CSA

Inisel Espacio ha implementado una versión del procesador CSA. Este procesador está integrado junto con un grupo de funciones auxiliares en el marco de un entorno de trabajo SAR <Martínez-93>, <Inisel Espacio-94>. La interfase de usuario del entorno de trabajo CSA está basada en una estructura amigable de menús y ventanas que facilita su utilización. Las principales funcionalidades del entorno de trabajo CSA se detallan en las siguientes subsecciones, y son básicamente:

- Preprocesado de datos brutos SAR (módulo RDM)
- Procesador CSA Single Look Complex (módulo CSA)
- Funciones de manejo básico de imágenes SAR (módulo MOD)
- Algoritmos de speckle (módulo SPE)
- Herramientas de análisis de calidad (módulo QUA)
- Visualización de imágenes (módulo VIS)
- Ayuda "on line"

El flujo de datos en el entorno de trabajo CSA se muestra en la figura 2. Los datos de entrada son datos brutos del satélite ERS-1 y sus ficheros auxiliares asociados. A partir de estos datos, las funciones del módulo RDM calculan todos los parámetros de proceso necesarios; esta información es almacenada en un fichero ROI (Raw Data Info), que es la interfase con el procesador CSA SAR.

La salida del procesador es una imagen compleja con su correspondiente descriptor. El fichero descriptor está escrito en caracteres ASCII, y es totalmente compatible con las directivas CID (Common Image Descriptor) de la ESA.

Las imágenes complejas obtenidas pueden ser transformadas a módulo, y ser objeto de posteriores operaciones geométricas y radiométricas usando las funciones de los módulos MOD y SPE. Estas funciones producen una imagen secundaria con su descriptor CID.

Entorno HW y SW

El entorno de trabajo CSA ha sido desarrollado en una estación de trabajo Sun S-10/30, con 64

Mbytes de RAM; la capacidad de memoria de disco es de 1.3 Gbytes. El sistema operativo es Sun OS 4.1.3, y el controlador de ventanas es Open Windows 3.0. La interfase de usuario está implementada bajo OSF Motif 1.1.1.

Preprocesado de datos SAR

El propósito de las funciones de preprocesado SAR es el obtener automáticamente todos los parámetros requeridos para la entrada del procesador SAR. La mayoría de estos parámetros son extraídos de los ficheros auxiliares de los datos brutos SAR; por otra parte, los parámetros Doppler (centroide Doppler, variación FM y su variación con la profundidad) necesitan ser calculados aparte. Las funciones incluidas en el módulo RDM son las siguientes:

- Extracción de parámetros de los ficheros auxiliares
- Cálculo de los parámetros Doppler a partir de los vectores orbitales
- Estimación del centroide Doppler con el método de análisis espectral
- Estimación del centroide Doppler por correlación temporal
- Estimación de la variación FM con el método de correlación de looks

El procesador CSA-SLC

El procesador CSA-SLC es el corazón del entorno de trabajo. La versión instalada actualmente del procesador tiene una arquitectura secuencial y permite procesar imágenes SLC de un tamaño reducido. El diagrama de flujo del mismo se presentó en la figura 1.

Con el objetivo de poder procesar imágenes SLC correspondientes a una escena completa (100 km x 100 km) y de aumentar la eficiencia del proceso, se está desarrollando en la actualidad una nueva versión del procesador CSA-SLC. La nueva arquitectura consiste en procesar la imagen en bloques, estableciendo una estrategia diferente, según la dirección en profundidad o acimut, en la extracción de dichos datos totalmente correlacionados. Estos bloques, ya procesados, se ensamblan para formar la imagen final.

La función de referencia en la dirección de profundidad es una copia de la función del pulso emitido, la función chirp. La función de referencia en la dirección de acimut depende de la fase del objetivo durante el tiempo que este está sobre el haz. Debido al efecto del "range migration" la longitud de la función de referencia en acimut no es constante. Además, el centroide Doppler no centrado en cero es otra dificultad adicional. Estas consideraciones se deben tener en cuenta a la hora de extraer la parte de imagen totalmente correlacionada.

Esto permitirá obtener imágenes en formato 4 bytes float complex data o 2 bytes integer complex

data, cumpliendo así las especificaciones oficiales de la ESA para los productos SLC del ERS-1.

En la nueva versión del procesador CSA se han incluido funciones de ventana para la selección de bandas de frecuencia tanto en profundidad como en acimut.

Funciones de manejo de imágenes

El módulo MODulus contiene varias funciones usadas para convertir las imágenes complejas producidas en imágenes detectadas y el manejo posterior de las mismas.

- Función de detección de amplitud o intensidad
- Corrección por la geometría de adquisición
- Rotación de imágenes
- Submuestreado de imágenes
- Proyección de la imagen sobre el terreno

Filtros de speckle

El módulo SPEckle contiene los siguientes filtros para la reducción del ruido de speckle, característico de las imágenes SAR: filtro promediador, filtro de la mediana, filtro Sigma, filtro estadístico de Lee y filtro geométrico.

Herramientas de análisis de calidad

El módulo QUALity contiene varias funciones utilizadas para el análisis de calidad de las imágenes SAR <Martínez-93>.

- *Función de análisis de blancos puntuales.* El análisis de calidad de blancos puntuales se realiza a través de la medida de los siguientes parámetros: resolución espacial (anchura a -3 dB), anchura a-10 dB, PSLR e ISLR.
- *Función de análisis de blancos extensos.* El análisis de n blancos extensos, o análisis radiométrico, consiste en la medida de las estadísticas en una región homogénea de la imagen. Las salidas del análisis son: intensidad media n en la zona y desviación estándar, índice de speckle y la resolución radiométrica.

Herramienta de presentación de imágenes

La herramienta de representación de imágenes es compatible con las directivas CID. Además de la representación de imágenes reales, la herramienta dispone de una interfase con las funciones de análisis de calidad SAR.

ANÁLISIS DE CALIDAD DEL PROCESADOR CSA

El procesador CSA-SLC ha sido sometido a un riguroso plan de pruebas, del que aquí presentamos tan sólo los resultados más relevantes (ver la tabla siguiente). Los datos analizados corresponden a dos bandas de frecuencias acimutales procesadas:

la banda completa (1678.713 Hz) y 1332. Hz. También se incluyen en esta tabla los parámetros de calidad obtenidos por el procesador VMP (Verification Mode Processor) y las especificaciones de la ESA para la validación de procesadores SAR <Sánchez-93>.

La resolución espacial de las imágenes producidas con el procesador CSA se comparan favorablemente con las del procesador VMP, y están

	CSA Banda completa	CSA 1332 Hz	VMP	ESA spec.
Resolución espacial profundidad, m	9.3	9.5	9.8	< 10
PSLR profundidad, dB	- 16.3	- 16.3	- 22.4	< - 18
Resolución espacial acimut, m	4.4	5.1	5.3	< 10
PSLR acimut, dB	-24.3	-19.5	-28.4	<-18
ISLR, dB	- 13.2	- 12.1	- 14.	< - 8
Razón ambigüedad acimut,dB	-24.5	-29.6	-	-
Resolución Radiométrica, dB	3.03	-	-	3.01

TABLA 1. Principales parámetros de calidad del procesador CSA-SLC

dentro de las especificaciones de la ESA para los dos anchos de banda de frecuencia estudiados.

Los valores del PSLR (Peak Side Lobe Ratio) muestran la importancia de los lóbulos secundarios respecto al lóbulo principal de la respuesta del SAR a un blanco puntual. En la dirección de acimut los valores medidos del PSLR entran sin problemas dentro de las especificaciones de la ESA, a pesar de ser superiores a los obtenidos con el procesador VMP. En la dirección de profundidad los valores del PSLR son más altos, y deben ser reducidos mediante el empleo de funciones de ventana apropiadas para cumplir con los requisitos de la ESA.

Los parámetros ISLR (Integrated Side Lobe Ratio) medidos para las dos bandas de frecuencias entran sin problemas dentro de las especificaciones de la ESA. Finalmente, la resolución radiométrica de las imágenes del procesador CSA es completamente equivalente a la del procesador VMP. Respecto al cociente de ambigüedad en acimut, no hemos encontrado ningún valor de referencia para comparar; no obstante, los valores obtenidos son lo suficientemente bajos como para no presentar problemas.

El empleo de funciones de ventana es una técnica muy común en el uso de Transformadas de Fourier (FFT). Todas las funciones de ventana tienen lóbulos laterales en el dominio de la frecuencia de baja amplitud, sin embargo presentan un lóbulo principal ensanchado. Cuanto más se reducen los lóbulos laterales, más se ensanchan los

lóbulo principales, por tanto, se empeora la resolución. Una de las funciones que mejor trata este compromiso son las ventanas de Hamming, con las que se pueden mejorar considerablemente los parámetros de calidad. En el caso de la dirección en acimut solo el 82 % de la banda de frecuencia es procesada y el filtro debe estar centrado en el centroide Doppler y no en el cero de frecuencia, como ocurre con la dirección en profundidad.

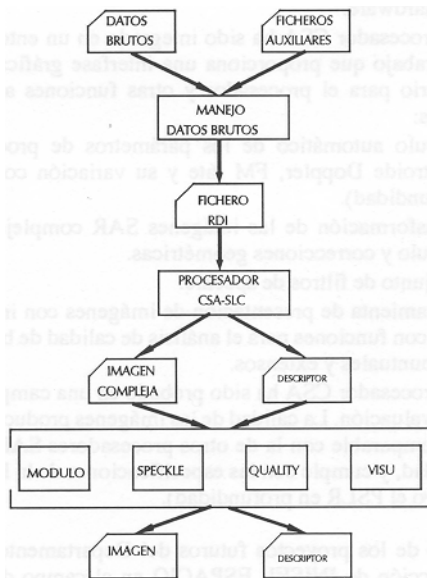


Fig. 2. Flujo de datos en el entorno de proceso CSA-SLC.

CONCLUSIONES Y PROYECTOS FUTUROS

Las principales conclusiones que se pueden derivar de este estudio son las siguientes:

- Ha sido implementado un procesador SAR basado en el Chirp Scaling Algorithm que produce imágenes complejas de un look (SLC). El método CSA presenta ventajas sobre los algoritmos clásicos de procesamiento SAR:
- Eficiencia computacional (sólo requiere 4 FFT).
- Es apropiado, sin modificaciones, para situaciones con alto squint y haz ancho.
- Las operaciones del procesador CSA son FFTs y multiplicaciones, lo que facilitaría su implementación en hardware.
- El procesador CSA ha sido integrado en un entorno de trabajo que proporciona una interfase gráfica de usuario para el procesador y otras funciones auxiliares:
- Cálculo automático de los parámetros de proceso (centroide Doppler, FM rate y su variación con la profundidad).
- Transformación de las imágenes SAR complejas a módulo y correcciones geométricas.
- Conjunto de filtros de speckle.

- Herramienta de presentación de imágenes con interfase con funciones para el análisis de calidad de blancos puntuales y extensos.
- El procesador CSA ha sido probado en una campaña de evaluación. La calidad de las imágenes producidas es comparable con la de otros procesadores SAR de calidad, y cumple con las especificaciones de la ESA (salvo el PSLR en profundidad).

Dentro de los proyectos futuros del Departamento de Teledetección de INISEL ESPACIO en el campo de la tecnología SAR están:

- Calificación del procesador CSA-SLC por parte de la ESA.
- Paralelización del procesador CSA-SLC.
- Desarrollo de un procesador SAR de precisión (CSA- PRI).
- Utilización de las imágenes SAR en diversas aplicaciones prácticas de Teledetección:
 - generación de modelos tridimensionales del terreno mediante interferometría SAR
 - utilización conjunta de imágenes ópticas y SAR mediante fusión de datos
 - detección de barcos y vertidos de petróleo en el mar.

BIBLIOGRAFIA

- BENNETT J.R., CUMMING I.G. and DEANER.A.1980. The digital processing of SEASATSAR data, IEEE Int. Radar Conf. Record pp.168-175.
- CAFFORIO C., PRATI C. and ROCCA C. 1991. SAR data focusing using seismic migration techniques, *IEEE Trans. Geoscience & Remote Sensing GE-27*, pp.194- 207.
- CUMMING I., WONG F. and RANEY K.1992. ASAR Processing Algorithm with no Interpolation, Proc. IGARSS'92, pp.376-379.
- INISEL ESPACIO,1994. CSA study: Final Report, issue 1.2. ESA/ ESTEC contract No.10516/93/NL/FM(SC).
- LI F.K., HELD D.N., CURLANDER J.C. and WU C. 1985. Doppler Parameter Estimation for Spaceborne Synthetic Aperture Radars, *IEEE Trans. Geoscience & Remote Sensing GE-23* , pp.47 -56.
- MARTINEZ A and MARCHAND J.L.1993. Implementation and Quality Analysis of a CSA SAR Processor, Proc. IGARSS93, pp.1179-1181.
- MARTINEZ A. and MARCHAND J.L. 1993. SAR image quality assessment, *Rev. Teledetección 2*: 12-18.
- PAPOULIS A.1977. *Signal Analysis*, McGraw Hill Co., New York.
- RUNGE H. and BAMLER R.1992. A Novel High Precision SAR Focusing Algorithm Based on Chirp Scaling, Proc. IGARSS'92, pp.372-375.
- SANCHEZ J.I. and LAUR H. 1993. ERS-1 SAR Product Validation, Proc. CEOS SAR Calibration Workshop, ESA WPP-O48, pp.295-305.