

# Obtención de parámetros geofísicos a partir de señales radar del altímetro RA-2 (ENVISAT)

J. Gómez-Enri\*, C. Gommenginger\*\*, M. Arias\*, J. J. Alonso\* y M. Catalán  
jesus.gomez@uca.es

\* Universidad de Cádiz (UCA). Dpto. de Física Aplicada.  
Avda. República Saharaui, s/n. 11510 Puerto Real. Cádiz

\*\* National Oceanography Centre (NOC). European Way. SO14 3ZH Southampton. U.K.

## RESUMEN

Parte de la información geofísica que se obtiene de los datos altimétricos, proviene de la señal de retorno radar, tras su interacción con la superficie oceánica. A destacar, la altura de ola significativa, la altura del satélite respecto de la superficie oceánica y la velocidad del viento en superficie. Para la obtención de estos parámetros, se ajusta a la señal de retorno, un modelo teórico a partir del cual se obtiene la información. Existen distintos modelos de ajuste, aunque el utilizado en este trabajo se basa en la técnica denominada "Maximum Likelihood Estimator". Junto con los parámetros mencionados, es posible obtener información extra relacionada con la no-linealidad de las ondas oceánicas, conocida como: asimetría de oleaje. Presentamos las capacidades del modelo de ajuste propuesto, especialmente para la obtención de este parámetro no-lineal.

**PALABRAS CLAVE:** altimetría, *retracking*, altura significativa de ola, altura del satélite, asimetría de oleaje.

## ABSTRACT

Radar altimeter ocean averaged waveforms are used to retrieve geophysical information regarding the ocean and atmospheric conditions. As part of this information, the significant wave height, the range and the ocean surface wind speed. In order to obtain this information, a theoretical waveform fit is applied to the real ocean averaged waveforms, and then the geophysical parameters are obtained. There are a set of retracking schemes, but we propose a new one based of Maximum Likelihood Estimation. In addition to this, extra information can be retrieved, regarding the non-gaussian statistics of the ocean waves, known as wave-skewness. Presented here, the capabilities of the ocean retracking scheme proposed, especially as far as the retrieval of the non-linear parameter is concerned.

**KEY WORDS:** altimetry, retracking, significant wave height, altitude, wave-skewness.

## INTRODUCCIÓN

El uso de las medidas tomadas por un radar que se encuentra a cientos de kilómetros de altura respecto de la superficie terrestre, ha suscitado numerosas controversias, sobre todo en lo que respecta a la precisión y exactitud de los datos obtenidos, teniendo en cuenta que el estudio de determinadas señales oceánicas requiere exactitudes a nivel sub-decimétrico. No obstante, el "estado del arte" a este respecto ha evolucionado en los últimos años, pasándose de errores orbitales superiores a 5 m en los años 70, a menos de 5 cm en la actualidad. La existencia de series temporales de datos altimétricos que superan ya los 10 años con niveles de precisión global centimétrica (ERS-2/ENVISAT, TOPEX-POSEIDON/Jason-1), ha permitido signi-

ficativos avances en los estudios de cambio climático, oceanografía, geodesia, etc.

En este trabajo, presentamos la técnica por la cual se obtiene información geofísica a partir de las señales radar del altímetro RA-2 (ENVISAT). Esta técnica se conoce como "retracking". Para ello, describiremos el algoritmo desarrollado en el National Oceanography Centre (NOC). Como resultado de este procesado de las señales, se obtienen una serie de parámetros geofísicos como la altura de ola significativa y la altura del satélite respecto de la superficie oceánica. Además, se incluye una breve descripción de las modificaciones llevadas a cabo a dicho algoritmo, con el objetivo de extraer nueva información relacionada con la no-linealidad de las elevaciones de la superficie oceánica. Presentamos los resultados tras aplicar a las

J. Gómez-Enri, P. Villares, C. Gommenginger, M. Arias, J. J. Alonso y M. Catalán

señales radar el algoritmo NOC tanto en su modo lineal (parámetros obtenidos: altura de ola significativa y punto origen, a partir del cual se obtiene la altura del centro de masas del satélite respecto de la superficie oceánica observada, y posteriormente la altura superficial del mar respecto de un elipsoide de referencia), como no lineal (los anteriores más la asimetría de onda). Hemos utilizado para ello, las señales radar “oceánicas” procedentes del producto SGDR (Sensor Geophysical Data Records) de dicho satélite. La utilización de este algoritmo tiene un doble objetivo: por un lado, permite validar los parámetros suministrados por la ESA, y por otro, obtener información extra a partir de las señales analizadas (asimetría de oleaje).

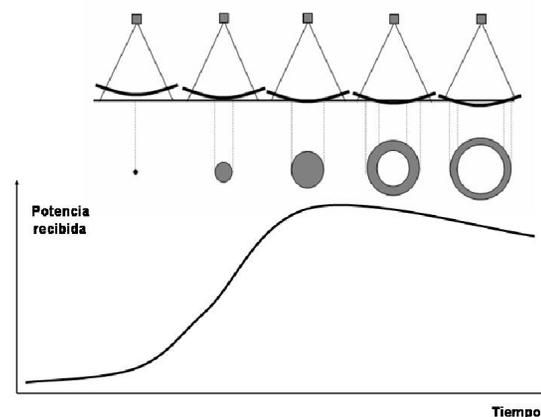
La estructura del trabajo que presentamos es la siguiente: en la segunda sección se explican brevemente las características fundamentales de una señal radar que interacciona con la superficie oceánica; en la siguiente sección se da una descripción somera del algoritmo NOC utilizado para calcular los parámetros geofísicos, con una breve explicación de la técnica en la que se basa: “Maximum Likelihood Estimator”. La siguiente sección se centra en los datos altimétricos utilizados para obtener la altura de ola significativa, el punto origen y el parámetro no-lineal (asimetría de oleaje), para pasar en el apartado 5 a mostrar los resultados obtenidos en un área geográfica concreta: las aperturas mediterránea y atlántica del Estrecho de Gibraltar. Finalizamos en la última sección con las conclusiones obtenidas.

## SEÑAL ALTIMÉTRICA RADAR

Una de las características fundamentales de la señal radar es la relación existente entre la potencia de emisión del pulso producido por el instrumento y la potencia de retorno recibida por éste mismo. La radiación electromagnética producida por el altímetro se ve atenuada doblemente por el efecto de la atmósfera, ya que son dos los pasos que tiene que hacer dicho pulso hasta ser nuevamente recibido por el instrumento. Además, la superficie oceánica absorbe y disipa parte de la señal. La potencia de la señal recibida dependerá, pues, de las características disipadoras de la superficie oceánica, los parámetros característicos del radar y la atenuación doble provocada por la atmósfera.

Un aspecto fundamental de las señales radar es que la información se encuentra en la forma y el tiempo

de retorno del propio pulso radar. La figura 1 muestra la evolución de un pulso reflejado por una superficie plana (se trata de un pulso idealizado en el que se ha suavizado el ruido asociado a la señal). A medida que el pulso avanza hacia la superficie, el área iluminada crece rápidamente pasando de un punto a un disco (el cambio se produce en el momento en el que la señal choca con esta superficie), el cual crece hasta que se convierte en un anillo, lo cual se traduce en una disminución de la energía del pulso recibida. Una de las características de este anillo es que su área permanece aproximadamente constante en el tiempo. La energía de la señal recibida, la cual es proporcional al área observable, crece rápidamente hasta que comienza a formarse el anillo, para en ese momento permanecer constante hasta que el anillo alcanza el límite del ancho de banda del pulso, instante en el que comienza a decrecer.



**Figura 1.** Intersección del pulso emitido por un radar altimétrico a una frecuencia determinada con una determinada superficie. En el eje *y* se representa la energía recibida por el radar.

En una superficie que no es plana y que se compone de puntos normalmente distribuidos con una determinada elevación, el pulso necesitará más tiempo para chocar con todos esos puntos y, por lo tanto, el eco tardará más tiempo en ser recibido por el radar. Si aplicamos este concepto a la superficie oceánica, es posible observar que la inclinación del eco recibido está directamente relacionada con la altura de ola significativa. El punto central del área inclinada sirve para conocer la distancia entre el satélite y la superficie observada, y la potencia total del eco recibido es proporcional al coeficiente de dispersión, el cual está relacionado con la la velocidad del viento en superficie.

## RETRACKING

### Algoritmo NOC

Los algoritmos para el procesado de señales de retorno radar que interaccionan con la superficie oceánica, se diseñan para obtener con un alto nivel de precisión, información relacionada con las condiciones atmosféricas y oceánicas, determinando una serie de parámetros geofísicos. Brown (1977), describió la interacción de la señal radar con la superficie oceánica. La interacción de esta señal con la superficie iluminada se ha descrito como la convolución de tres términos:

$$P_r(t) = P_{FS}(t) * q(h) * P_{PT}(t) \quad (1)$$

Donde  $t$  es el tiempo,  $h$  es la altura del satélite respecto a la superficie observada,  $P_{FS}$  es la respuesta esperada para una superficie plana,  $q(h)$  es la función de densidad de probabilidad de las elevaciones de la superficie oceánica y  $P_{PT}(t)$  es la respuesta correspondiente al área iluminada. La superficie oceánica interacciona con el pulso emitido por el radar altimétrico, de tal forma que el eco recibido en el propio instrumento, puede ser dividido en las tres partes comentadas anteriormente (Figura 1).

El algoritmo de procesado de las señales oceánicas radar NOC, fue diseñado inicialmente para procesar señales procedentes del altímetro ERS-1. Posteriormente, ha sido modificado incluyendo las características propias de las señales RA-2, de tal forma que actualmente se utiliza de forma cuasi-operacional. La posibilidad de obtener información extra, radica en lo teorizado por Srokosz (1986), quien teorizó una función de densidad de probabilidad para las elevaciones oceánicas, añadiendo dos términos relacionados con el carácter no lineal de las ondas oceánicas (asimetría de onda y asimetría de cruce). En este trabajo, sólo nos ocuparemos de la asimetría de onda utilizando señales RA-2, lo cual supone una cierta novedad, en el sentido de que el algoritmo utilizado operacionalmente por la ESA no incluye este término no lineal (Gómez-Enri *et al.* 2006). Desde un punto de vista físico, este término no lineal hace referencia al hecho de que la función de densidad de probabilidad de las ondas están ligeramente desplazadas hacia los valles respecto de las crestas, con lo que existe una cierta asimetría entre la potencia recibida por los valles y las crestas de las ondas (el modelo lineal presupone que no existe tal asimetría).

### Estimador de máxima similitud

La señal de retorno reflejada por un área iluminada correspondiente a la superficie oceánica (Figura 1), se utiliza para obtener la información relacionada con las condiciones oceánicas (parámetros geofísicos). La técnica conocida como estimador de máxima similitud (Maximum Likelihood Estimator, MLE), permite ajustar un modelo teórico de retorno de señal radar (asumiendo que las ondas en la superficie oceánica tienen estadística no-Gaussiana) a las señales reales (Challenor y Srokosz, 1989). Teniendo en cuenta que el pulso retorno se encuentra afectado por ruido con unas determinadas características ("fading noise") (Ulaby *et al.*, 1982), MLE es capaz de ajustar el pulso a un modelo, el cual es función de los parámetros que deseamos estimar, teniendo en cuenta, a su vez, la estadística conocida concerniente al ruido asociado a la señal. Esta técnica, produce estimas no correlacionadas entre sí, minimizando la varianza asociada a las mismas. Uno de los aspectos fundamentales, es que es posible calcular la matriz de varianza-covarianza de las estimas, lo cual nos da una medida del posible error cometido al estimar los parámetros geofísicos. Este procedimiento se encuentra explicado en mayor detalle en Challenor y Srokosz (1989) y más recientemente en Gómez-Enri *et al.* (2006). Como ya hemos mencionado, en este trabajo hemos utilizado el algoritmo "retracking" en dos modos diferentes: modelo lineal (MLE-4) y modelo no-lineal (MLE-5).

## DATOS UTILIZADOS

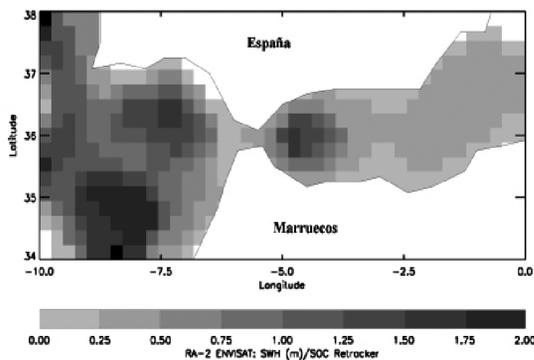
Las señales radar utilizadas, proceden del radar altimétrico de doble frecuencia embarcado en el satélite europeo ENVISAT (RA-2). Para mostrar los parámetros geofísicos obtenidos con el algoritmo NOC, se ha utilizado un ciclo repetitivo de 35 días: ciclo 21, del 20 de octubre de 2003 al 24 de noviembre de 2003.

## RESULTADOS

### Altura significativa de ola

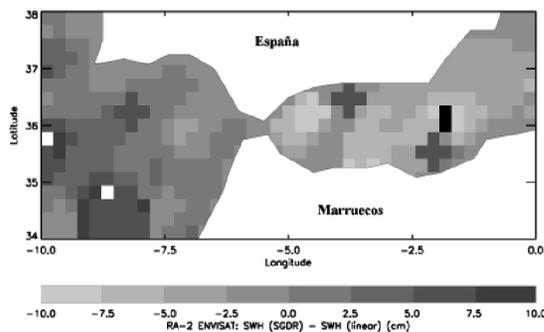
La Figura 2, muestra la distribución geográfica de la altura de ola significativa obtenida con las señales retorno del RA-2 a bordo del satélite ENVISAT (los valores del otro parámetro: punto origen, no se presentan en este trabajo). Estos resultados se han obtenido utilizando el algoritmo NOC lineal (MLE-4).

Los valores presentados son el resultado de promediar las alturas obtenidas en las trazas del satélite en mallas de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ . Posteriormente, los datos se han suavizado con un filtro de paso bajo. Puede observarse, que la apertura atlántica del Estrecho de Gibraltar, presenta valores más altos para la altura de ola significativa (superiores a 2 m), mientras que en el mar de Alborán las alturas son relativamente menores (a excepción de la región más cercana al Estrecho de Gibraltar, con valores relativamente altos).



**Figura 2.** Distribución geográfica de las alturas significativas de ola (m) obtenidas con el algoritmo NOC en su versión lineal (MLE-4).

En la Figura 3, se presenta la diferencia de altura de oleaje (en cm), entre los resultados obtenidos con la versión lineal del algoritmo NOC (*noc\_swh*), y los valores extraídos del producto SGDR (*sgdr\_swh*), obtenidos con el “retracking” usado por la Agencia Espacial Europea. Las diferencias mostradas en la figura provienen de la siguiente operación:  $sgdr\_swh - noc\_swh$ . Los valores oscilan entre -10.0 cm y 10.0 cm. Como puede observarse,

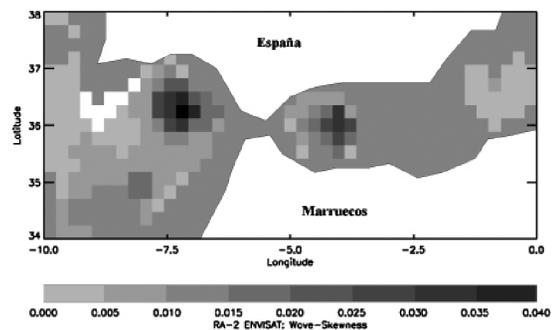


**Figura 3.** Distribución geográfica de las diferencias de altura de oleaje (m) entre los resultados del retracking realizado para generar los productos SGDR y los obtenidos con el algoritmo NOC.

existe una relación directa entre los valores más altos de altura de ola mostrados en la Figura 2 (sur de la apertura atlántica) y las mayores diferencias observadas en la figura 3. El r.m.s. total de las diferencias es de 6.66 cm.

### Asimetría de oleaje

La Figura 4, muestra la distribución geográfica de la asimetría de oleaje. La magnitud de las asimetrías presentadas oscila entre 0.0 y 0.04. Los valores más altos se encuentran en zonas específicas a ambos lados del Estrecho de Gibraltar. Trabajos anteriores utilizando diferentes ciclos del RA-2-Envisat (Gómez-Enri *et al.*, 2006), muestran que a nivel global, existe una clara correspondencia entre la distribución geográfica de los valores altos y bajos de las asimetrías de oleaje y la distribución geográfica de los valores altos y bajos de los otros dos parámetros. Esto ha sido confirmado en parte por los resultados presentados en este trabajo, pero existe una región al sur de la apertura atlántica, en la que no se observan valores altos de asimetría de oleaje y sí de altura de ola.



**Figura 4.** Distribución geográfica de las asimetrías de oleaje obtenidas con la versión no-lineal del algoritmo NOC (MLE-5).

## CONCLUSIONES

Se han presentado los parámetros geofísicos obtenidos al reprocessar señales radar retorno del altímetro RA-2. Para ello, se ha utilizado el algoritmo NOC (versión lineal y no lineal), el cual se basa en la técnica de ajuste MLE. El análisis se ha centrado en las aperturas atlántica y Mediterránea del Estrecho de Gibraltar, utilizando un ciclo completo de 35 días. De los resultados obtenidos concluimos lo siguiente.

Existe una relación directa entre la distribución geográfica correspondiente a la asimetría de oleaje, y la distribución de los otros dos parámetros, con valores altos (bajos) en las mismas posiciones en las que se observan valores altos (bajos) de altura de ola significativa y punto origen. En condiciones de valores altos de altura de oleaje (hasta 2 m), la asimetría de oleaje puede alcanzar valores de hasta 0.04. No obstante, se ha demostrado la existencia de un área geográfica (sur de la apertura atlántica), en la que esta relación directa no se manifiesta. Esta circunstancia necesita ser analizada con más detalle en futuros trabajos. Los resultados del algoritmo NOC son similares a los presentados en el producto SGDR, según lo demuestra la magnitud de las diferencias de altura de ola significativa obtenidas entre ambos.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco del Programa de Investigadores Postdoctorales de la ESA y ha sido cofinanciado por el Ministerio de Educación y Ciencia (proyecto CGL2004-01473). Agradecemos a P. Challenor y M. Srokosz las sugerencias y consejos recibidos (algoritmo NOC).

## BIBLIOGRAFIA

- BROWN, G. S. 1977. The average impulse response of a rough surface and its applications. *IEEE J. Oceanic Eng.* OE-2: 67-74.
- CHALLENGOR, P. G. y SROKOSZ, M. A. 1989. The extraction of geophysical parameters from radar altimeter return from a non-linear sea surface. En *Mathematics in Remote Sensing*. Clarendon Press, Oxford, pp. 257-268.
- GÓMEZ-ENRI, J., GOMMENGINGER, C. P., SROKOSZ, M. A. CHALLENGOR, P. G. y DRINKWATER, M. 2006. Envisat Radar Altimeter tracker bias. *Mar. Geodesy* 29: 19-38.
- SROKOSZ, M. A. 1986. On the joint distribution of surface elevation and slopes for a nonlinear random sea, with an application to radar altimetry. *J. Geophys. Res.* 91: 995-1006.
- ULABY, F. T., MOORE, R. K. y FUNG, A. K. 1982. *Microwave remote sensing: active and passive. Volume II: Reading, Mass.* Addison-Wesley, 608 p.