

Análisis bidimensional de grupos de oleaje a partir de imágenes SAR

J. C. Nieto*, G. Rodríguez** y M. Pacheco**

josecarlos.nieto@uah.es, grodriguez@dfis.ulpgc.es, mpacheco@dfis.ulpgc.es

* Universidad de Alcalá. Escuela Politécnica Superior. Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones

** Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Facultad de Ciencias del Mar. Dpto. de Física

RESUMEN

Este trabajo analiza el agrupamiento del oleaje en dos dimensiones a escala global. Con este fin se utiliza un conjunto de datos compuesto por más de 34.000 imágenes SAR del satélite ERS-2. Los resultados obtenidos se comparan con parámetros de agrupamiento derivados de las salidas de modelos numéricos.

PALABRAS CLAVE: oleaje, grupo de oleaje, estado de mar, SAR (Synthetic Aperture Radar).

ABSTRACT

This work analyses wave groupiness in two dimensions on global scale. For that purpose, a data set composed of more than 34,000 ERS-2 SAR images has been used. The obtained results are compared with wave grouping parameters derived from numerical model outputs.

KEY WORDS: ocean waves, wave grouping, sea state, SAR (Synthetic Aperture Radar)

INTRODUCCIÓN

El agrupamiento del oleaje es un fenómeno que, aunque ampliamente conocido, no está aún apropiadamente explicado (Ochi, 1998). Este fenómeno se estudia históricamente a partir de series temporales de elevaciones de la superficie libre del mar medidas mediante boyas oceanográficas fondeadas en localizaciones fijas del océano.

Actualmente existen más de 15 años de medidas de oleaje a partir de imágenes de radar de apertura sintética (SAR, "Synthetic Aperture Radar") a bordo de satélites artificiales. La posibilidad de utilizar esta fuente de información permitirá un mejor conocimiento de las características de los grupos de oleaje a escala global.

El presente trabajo presenta algunos de los resultados obtenidos del análisis del agrupamiento del oleaje realizado a escala global utilizando más de 34.000 imágenes SAR adquiridas por el satélite europeo ERS-2.

El artículo está estructurado de la siguiente forma: la sección siguiente introduce el fenómeno del agrupamiento del oleaje y su análisis tradicional en el dominio temporal. La sección posterior se centra en los métodos propuestos para estudiar los

grupos de oleaje en dos dimensiones. Posteriormente, estos métodos se aplican al conjunto de datos SAR anteriormente citado y se compara con los resultados obtenidos a partir de modelos numéricos. Finalmente, la última sección presenta las conclusiones del trabajo.

EL FENÓMENO DEL AGRUPAMIENTO DEL OLAJE

Es un hecho conocido que el oleaje tiende a formar grupos de olas individuales de periodos y alturas similares (Longuet-Higgins, 1984). Estos grupos de olas pueden producir daños serios en estructuras marinas, como barcos en ruta, plataformas, diques, etc. La principal razón de estos daños consiste en que el periodo de resonancia de la estructura se encuentra cerca de los periodos de las olas individuales que forman un grupo (Ochi, 1998).

El estudio del agrupamiento del oleaje se ha venido realizando tradicionalmente a partir de los registros de boyas oceanográficas. Estos sensores miden series temporales de elevaciones de ola sobre el nivel medio del mar. A partir de un estudio de la envolvente de las elevaciones se determinan las

J. C. Nieto, G. Rodríguez y M. Pacheco

características estadísticas del agrupamiento del oleaje. La Figura 1 muestra una serie temporal de elevaciones medida por una boya en el Mar Cantábrico (cercañas de Bilbao) y su estimación de la envolvente, $A(t)$, mediante una técnica basada en la aplicación de la transformada de Hilbert.

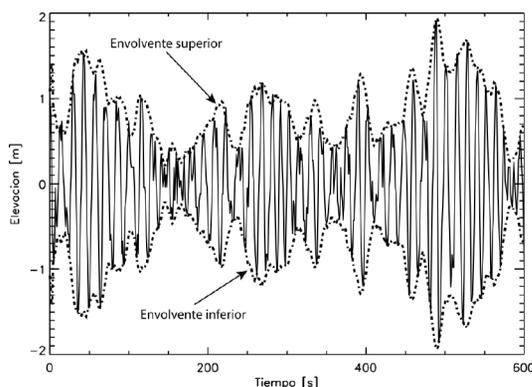


Figura 1. Serie temporal de elevaciones (línea continua) con sus correspondientes estimaciones de la envolvente superior e inferior (líneas discontinuas). Se puede apreciar claramente en la figura el fenómeno del agrupamiento del oleaje a partir de las oscilaciones de largo periodo de la envolvente..

ANÁLISIS DE GRUPOS DE OLAJE EN VARIAS DIMENSIONES

El análisis que se muestra en la Figura 1, corresponde a un estudio unidimensional, es decir, en el dominio temporal. En la actualidad cada vez es más frecuente el uso de sistemas de teledetección basados, tanto en tecnologías de vídeo (Piotrowski *et al.*, 2002), como en dispositivos radar operando en el rango de las microondas y que son capaces de proporcionar información espacial (bidimensional) y espaciotemporal (tridimensional) del oleaje. Entre estos últimos dispositivos hay que reseñar el SAR (Hasselmann *et al.*, 1985), y el radar de navegación (Nieto Borge *et al.*, 1999). La descripción del oleaje con estos sensores ha venido llevándose a cabo mediante el espectro direccional del oleaje $E(\omega, \theta)$, magnitud que describe la densidad de energía del campo de oleaje en función de la frecuencia ω y la dirección de propagación θ de cada una de las componentes espectrales de Fourier en las que se descompone la superficie libre del mar.

De la misma forma que los registros de oleaje de boyas se pueden analizar en el dominio espectral

(utilizando el espectro en frecuencia $S(\omega)$), o en el dominio temporal (un ejemplo se muestra en la Figura 1), para las imágenes radar se puede complementar el análisis espectral con el espacial, en el caso del SAR, o espaciotemporal, en el caso del radar de navegación.

En el caso del análisis del agrupamiento del oleaje en dos o más dimensiones, habría que definir un método basado en la envolvente del oleaje (figura 1) a partir de una generalización del método basado en la transformada de Hilbert. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurre con la transformada de Fourier, no existe una única generalización multidimensional de la transformada de Hilbert. Este trabajo utiliza la generalización multidimensional de la transformada de Hilbert propuesta por Stark (1971) para el cálculo de la envolvente. Bajo estas condiciones, y particularizando para el caso bidimensional, la elevación η del oleaje para cada punto de la superficie del mar de coordenadas (x, y) se expresa como

$$\eta(x, y) = A(x, y) \cos(\Phi(x, y)), \quad (1)$$

donde $A(x, y)$ es la envolvente y $\Phi(x, y)$ la fase local. Los fundamentos teóricos para realizar la descomposición mostrada en la ecuación (1) se encuentran detallados en Nieto Borge *et al.* (2004). Una vez estimada la envolvente $A(x, y)$ se puede obtener información de la distribución bidimensional de los grupos de oleaje definiendo las regiones de la superficie del mar cuyo valor de la envolvente se encuentran por encima de un valor umbral determinado. Generalizando los métodos utilizados para series temporales medidas por boyas (Ochi, 1998), uno de los valores umbrales más adecuados es la altura significativa del oleaje H_s (el valor medio del tercio de alturas más altas del registro de oleaje). Así, el umbral antes citado se utiliza aplicado al valor doble de la envolvente (Nieto Borge, 2004), $2A(x, y)$. De esta forma, se determinan las regiones de la superficie del mar con olas consecutivas de altura igual o superior a la altura significativa H_s .

Estimación de la elevación local del oleaje a partir de imágenes SAR

La Ecuación 1 se aplica a la elevación del oleaje $\eta(x, y)$. Sin embargo, cuando se utilizan imágenes SAR de un campo de oleaje no se puede aplicar directamente la expresión (1). Esto se debe a que el retorno radar de la superficie del mar no es una función

directa de la elevación de la olas, sino una imagen de cómo el oleaje dispersa la energía electromagnética. Esta dispersión es función de muchos factores (Hasselmann *et al.*, 1985), cómo la rugosidad de la superficie del océano debida al viento local, modulaciones hidrodinámicas, no linealidades en el proceso de formación de la imagen SAR, etc. La estimación del campo de oleaje responsable de una imagen SAR es un proceso difícil. Sin embargo, bajo ciertas condiciones (Shulz-Stellenfleth *et al.*, 2004), como es el caso de mares de fondo de larga longitud de onda que no se propagan en la misma dirección que la del vuelo (acimut) del avión o del satélite sobre los que están montados los sistemas SAR, es posible estimar el campo de oleaje $\eta(x, y)$ utilizando una aproximación cuasilineal del proceso de formación de imágenes SAR (Shulz-Stellenfleth *et al.*, 2004).

La Figura 2 (a) muestra una imagen ASAR (“Advanced SAR”) de un campo de oleaje adquirida por el del satélite europeo Envisat. La correspondiente estimación del campo de oleaje utilizando el método de inversión cuasilineal propuesto por Shulz-Stellenfleth *et al.* (2004) se puede ver en la Figura 2 (b). La Figura 3 (a) muestra la estimación de la envolvente $A(x, y)$ del campo de oleaje estimado en la Figura 2 (b). Aplicando el umbral de altura significativa H_s descrito anteriormente, se obtendrían las regiones de la superficie del mar que contienen olas individuales cuya altura es mayor que H_s . La Figura 3 (b) muestra estas regiones. Una vez estimadas las regiones de agrupamiento olas, se puede proceder a estudiar las propiedades estadísticas de dichas regiones.

ESTUDIO DEL AGRUPAMIENTO DEL OLAJE A ESCALA GLOBAL

Para comprobar el rango de aplicación del método descrito anteriormente, se ha utilizado un amplio conjunto de imágenes SAR adquiridas por el satélite europeo ERS-2 en su modo de operación de oleaje (“wave mode”) durante las tres últimas semanas de septiembre de 1996. Cada imagen SAR en modo oleaje cubre un área de $5 \times 10 \text{ km}^2$ aproximadamente. El conjunto de datos está formado por más de 34.000 imágenes distribuidas globalmente. Se ha aplicado un control de calidad a cada imagen SAR de forma que se eliminen aquellos casos en los que el proceso de formación de la imagen es altamente no lineal (Nieto Borge *et al.*, 2004). Así, todos aquellos campos de oleaje cuya dirección de propagación relativa fuese paralela a la dirección de vuelo del satélite ERS-2 fueron desechados. Además, con el fin de eliminar aquellas imágenes con presencia de hielos polares y que pudiesen afectar al resultado, las imágenes adquiridas en latitudes menores de -60°N y mayores de 60°N fueron eliminadas.

Una vez realizado el control de calidad, se aplicó la inversión cuasilineal y se estimó la envolvente bidimensional $A(x, y)$ y, utilizando los umbrales de altura significativa, se estimaron las áreas de aquellas regiones con olas individuales consecutivas de altura igual o superior a H_s . Para cada imagen SAR se estimó el valor medio del área de cada uno de los grupos de olas detectados. La Figura 4 muestra un mapa con los resultados obtenidos para las tres semanas de septiembre (finales del invierno y prin-

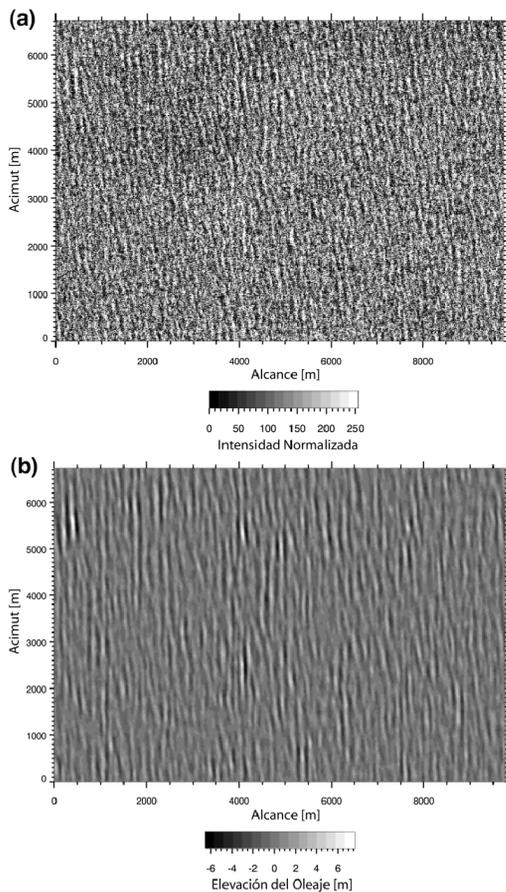


Figura 2. Imagen ASAR adquirida por el satélite Envisat (a) y estimación del campo de oleaje utilizando un método de inversión cuasilineal (b). La medida se realizó el 9 de julio de 2002 a las 19:25:17 UTC en $42,71^\circ\text{N}$ y $136,96^\circ\text{O}$.

J. C. Nieto, G. Rodríguez y M. Pacheco

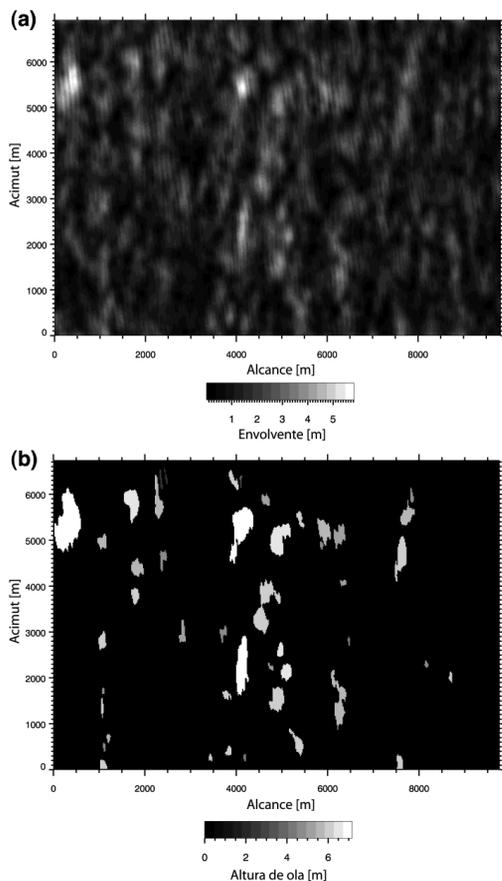
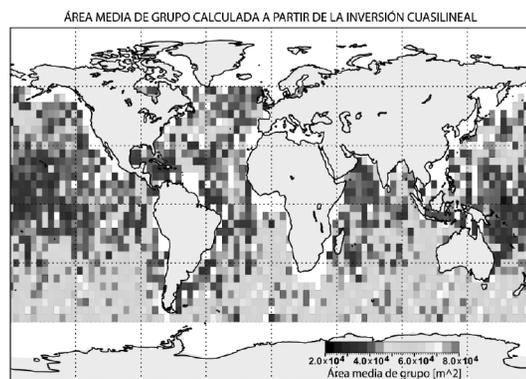


Figura 3. Estimación de la envoltura bidimensional (a) correspondiente al campo de oleaje de la Figura 2 (b). Clasificación de las áreas con olas consecutivas de altura superior a H_s (b).

cipios de la primavera en el hemisferio sur). Se observa que la mayor actividad del agrupamiento se concentra en el hemisferio sur, al norte de la Antártida. Las zonas de mayor agrupamiento del oleaje siguen las direcciones de propagación de las tormentas. Así, se puede observar que al este de Argentina la agrupación del oleaje es mucho menor que en la zona de Sudáfrica. Esto se debe a que América del Sur se comporta como una pantalla frente a la propagación de los estados de mar. Asimismo, en el hemisferio norte existe menor actividad del agrupamiento debido fundamentalmente a dos razones: la primera es la existencia de estados de mar no tan severos, ya que durante este periodo del año (finales del verano y principios del otoño) las tormentas son menos frecuentes en este hemis-

ferio. La segunda razón es que las tendencias de agrupamiento del oleaje aumentan con la distancia de propagación del oleaje y en el hemisferio norte las distancias oceánicas son menores que en el hemisferio sur. No obstante, se pueden apreciar zonas de mayor agrupamiento en el norte, como al sur de Alaska, este de Japón y regiones del Atlántico entre el norte de las Antillas y Europa Occidental correspondientes a la zona de propagación de los huracanes en esta época del año.



***Figura 4.** Distribución global del área media del grupo obtenida para el conjunto de imágenes ERS-2 SAR.

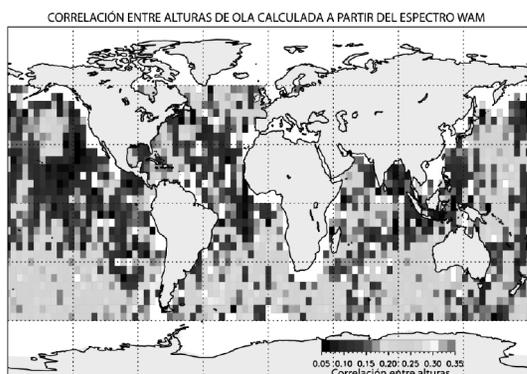
Comparación de los resultados obtenidos con modelos numéricos

Si existe agrupamiento del oleaje hay una alta correlación entre las alturas de olas próximas. Longuet-Higgins (1984) demostró que se podía estimar esta correlación γ para series temporales de elevaciones utilizando el espectro en frecuencia $S(\omega)$. La expresión obtenida se puede generalizar al caso de un espectro direccional $E(\omega, \theta)$ (Nieto Borge *et al.*, 2004). Si el método propuesto anteriormente es consistente, debe existir una relación entre las regiones de la envoltura bidimensional $A(x, y)$ correspondiente a las olas individuales consecutivas con altura superior al valor umbral y coeficiente de correlación entre alturas de oleaje γ .

Para confrontar los resultados obtenidos se utilizaron los espectros direccionales $E(\omega, \theta)$ de las salidas del modelo de oleaje WAM ("Wave Model") procedentes del ECMWF ("European Centre for Medium-Range Weather Forecasts"). La Figura 5

Todas las figuras precedidas de asterisco se incluyen en el cuadernillo anexo de color

muestra el mapa de distribución global de la correlación de alturas de oleaje. Se observa que la distribución global de γ tiene un comportamiento similar a los resultados de la Figura 4. Las diferencias que se observan entre las Figuras 4 y 5 se localizan principalmente en las áreas ecuatoriales, donde son más frecuentes los estados de mar multimodales (compuestos por la superposición de varios campos de oleaje provenientes de diferentes direcciones). En estas zonas el método de inversión cuasilineal presentaba dificultades debido a la existencia de campos de oleaje propagándose en direcciones próximas a la dirección acimutal. El control de calidad descrito anteriormente filtró estos casos.



*Figura 5. Distribución global de la correlación entre alturas de ola obtenida a partir de los espectros direccionales del modelo WAM.

CONCLUSIONES

Se ha aplicado un método para determinar el agrupamiento del oleaje en dos dimensiones a un conjunto de imágenes SAR globalmente distribuidas. Los resultados obtenidos se comparan con parámetros de agrupamiento derivados del modelo numérico WAM. Se observa concordancia entre ambos métodos.

En la actualidad existen más de 15 años de medidas continuas de imágenes SAR desde el espacio. El análisis de esta ingente fuente de datos supondrá en el futuro una información útil a la hora de caracterizar el agrupamiento del oleaje tanto a escala global, como en regiones específicas del océano.

BIBLIOGRAFÍA

- HASSELMANN, K., RANEY, R. K., PLANT, W. J., ALPERS, W., SHUCHMAN, R. A., LYZENGA, D. R., RUFENACH, C. L. y TUCKER, M. J. 1985. Theory of synthetic aperture radar imaging: A MARSEN view. *J. Geophys. Res.* 90: 4659-4686.
- LONGUET-HIGGINS, M. S. 1984. Statistical properties of wave groups in a random sea-state. *Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. A* 312: 219-250.
- NIETO BORGE, J. C., REICHERT, K. y DITTMER, J. 1999. Use of nautical radar as a wave monitoring instrument. *Coastal Engineer.* 37: 331-342.
- NIETO BORGE, J. C., LEHNER, S., NIEDERMEIER, A. y SCHULZ-STELLENFLETH, J. 2004. Detection of ocean wave groupiness from spaceborne Synthetic Aperture Radar, *J. Geophys. Res.* 109, doi: 10.1029/2004JC002298.
- OCHI, M. K. 1998. *Ocean Waves: The Stochastic Approach*. Cambridge University Press, New York.
- PIOTROWSKI, C. C. y DUGAN, P. 2002. Accuracy of bathymetry and current retrievals from airborne optical time-series imaging of shoaling waves. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.* 40: 2606-2618.
- SCHULZ-STELLENFLETH, J. y LEHNER, S. 2004. Measurement of two-dimensional sea surface elevation fields from complex synthetic aperture radar data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 42 (6): 1144-1160.
- STARK, H. 1971. An extension of the Hilbert transform product theorem. *Proc. IEEE.* 59: 1359-1360.

Todas las figuras precedidas de asterisco se incluyen en el cuadernillo anexo de color