

Análisis de oleaje y corrientes superficiales mediante radar de navegación en banda X

P. Izquierdo*, J. C. Nieto** y G. Rodríguez***
pizdo2002@yohoo.es, josecarlos.nieto@uah.es, grodriguez@dfis.ulpgc.es

* *Instituto Superior Técnico. Unit of Marine Technology and Engineering. Lisboa. Portugal*

** *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. d e Física*

RESUMEN

Los radares de navegación en banda X se pueden utilizar como un dispositivo activo de teledetección oceanográfica en el rango de las microondas.

El presente trabajo muestra la capacidad de las estaciones costeras medidoras de oleaje basadas en radar de navegación para monitorizar el oleaje en tiempo real. Para ello, se presentan algunos resultados comparativos con medidas in situ realizadas por boyas oceanográficas.

PALABRAS CLAVE: oleaje, radar de navegación, espectro direccional, corrientes superficiales.

ABSTRACT

X-band marine radars are able to be used as an oceanographic microwave active remote sensing tool.

The present work shows the capabilities of marine radar based wave measuring stations on shore for real time ocean wave monitoring. For that purpose, some comparative results are shown by using oceanographic buoy in-situ measurements.

KEY WORDS: ocean waves, marine radar, directional spectrum, surface currents.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo muestra un estudio de evaluación de la capacidad de las estaciones costeras medidoras de oleaje basadas en radar de navegación para monitorizar en tiempo real la evolución espacio-temporal de los campos de oleaje.

El artículo está estructurado como sigue: la siguiente sección describe brevemente el radar de navegación como dispositivo de teledetección activo en el rango de las microondas. Posteriormente se esbozan los pasos para obtener, a través de un proceso de modelización inversa, el espectro del oleaje a partir del espectro de la imagen radar. La sección siguiente muestra resultados comparativos de diversos parámetros espectrales del oleaje obtenidos a partir de las imágenes radar y de registros procedentes de boyas oceanográficas. Finalmente, la última sección, presenta las conclusiones del trabajo.

EL RADAR DE NAVEGACIÓN COMO INSTRUMENTO DE TELEDETECCIÓN OCEANOGRÁFICA

Es conocido que, para distancias cercanas (alcances menores de 10 km), en las pantallas de los radares de navegación convencionales se obtiene una señal debida al oleaje. Esta señal, conocida por su término inglés como "sea clutter", se intenta suprimir para que no interfiera con la detección de buques o líneas de costa. Sin embargo, es posible utilizar dicha señal para determinar las características de los campos de oleaje y su evolución espacio-temporal.

La idea inicial de utilizar radares de navegación convencionales para la medida del oleaje data de los años cincuenta, aunque fue en la década de los años ochenta y, sobre todo, a finales de los noventa cuando se desarrollaron los algoritmos y el "hardware" necesarios para analizar las propiedades del oleaje de forma fiable y en tiempo real.

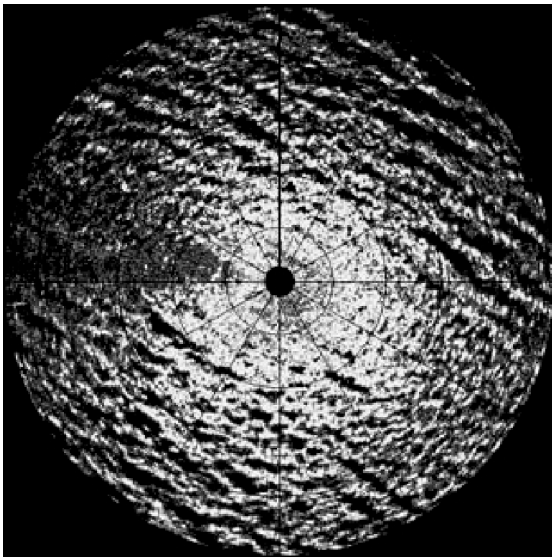


Figura 1. Imagen radar de un campo de oleaje.

A diferencia de otros sensores radar que operan en el rango de las microondas, como es el caso del radar de apertura sintética (SAR, “Synthetic Apertura Radar”) el radar de navegación proporciona imágenes del oleaje con mayor resolución ($5 \times 5 \text{ m}^2$ aproximadamente), aunque su área de cobertura es menor (unos pocos kilómetros cuadrados en comparación con los $5 \times 10 \text{ km}^2$ del SAR a bordo de un satélite en modo oleaje, “wave mode”, o los $100 \times 100 \text{ km}^2$ en modo imagen, “image mode”). La longitud de onda típica de la radiación electromagnética emitida por el radar de navegación es de 3 cm aproximadamente (banda X).

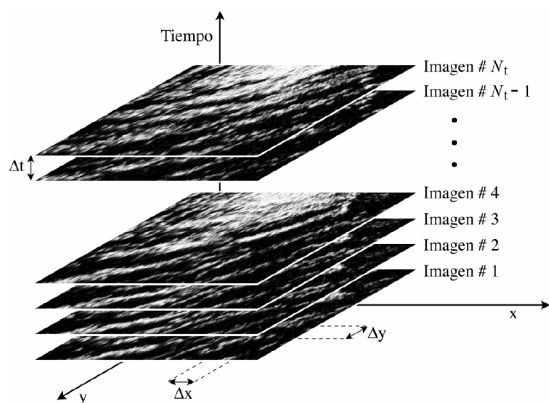


Figura 2. Esquema que muestra la serie temporal de N_t imágenes radar digitalizadas que se utiliza para el análisis del oleaje y los parámetros que definen las resoluciones en el espacio (Δx , Δy) y el tiempo (Δt).

Por tanto, el radar de navegación es un sistema de teledetección activo que opera a distancias cercanas. Esta propiedad permite instalar estaciones permanentes basadas en esta tecnología en zonas cercanas a la costa o en plataformas petrolíferas con el fin de monitorizar permanentemente el medio marino. La Figura 1 muestra un ejemplo de campo de oleaje detectado por un radar de navegación a bordo de un buque en ruta.

Funcionamiento del radar de navegación

El radar de navegación opera transmitiendo pulsos de ondas electromagnéticas focalizadas en un haz muy estrecho. La señal recibida por el radar es originada por la retro-dispersión de los campos electromagnéticos debido a las ondas capilares y demás rugosidades de la superficie, causadas por el viento local, cuyo tamaño sea del orden de la longitud de onda de la radiación electromagnética incidente. El patrón de dispersión electromagnética está modulado por las ondas más largas, como el mar de viento, o el mar de fondo, que son precisamente las ondas que se quieren medir. La señal recibida por el radar se digitaliza en tiempo real y se almacena como series temporales de imágenes. Los valores en la imagen radar están codificados en niveles de grises, que, como ocurre en general con todos los radares, no son una función directa de las elevaciones de la superficie libre del mar, sino de cómo dicha superficie dispersa los campos electromagnéticos. Por tanto, a partir de la imagen radar no se pueden conocer directamente los valores absolutos de ningún parámetro físico y es necesario aplicar técnicas de modelización inversa. Estos modelos transforman los valores de la serie temporal de imágenes radar (véase la Figura 2) en parámetros relativos a los movimientos verticales de la superficie libre del mar (Nieto Borge *et al.*, 2004).

ANÁLISIS DE OLAJEY CORRIENTES CON RADAR DE NAVEGACIÓN

Como se comentó en la sección anterior el análisis del oleaje mediante radar de navegación se basa en un método de modelización inversa (Izquierdo González, 2003), cuyos pasos se enumeran a continuación:

- Obtención del espectro de la imagen $I(\mathbf{k}, \omega)$ (espectro de la serie temporal de imágenes radar estimado a partir de una transformada de Fourier

P. Izquierdo, J. C. Nieto y G. Rodríguez

tridimensional), donde ω es la frecuencia y $\mathbf{k}=(k_x, k_y)$ el vector número de onda.

- Filtrado de las componentes espectrales del espectro de la imagen, en el espacio de frecuencias ω y números de onda $\mathbf{k}=(k_x, k_y)$, que no pertenecen al oleaje (Nieto Borge *et al.*, 2004). Para ello, se considera la relación de dispersión de ondas de gravedad lineales

$$\omega = \varpi(\mathbf{k}) = \sqrt{gk \tanh(kd) + \mathbf{k} \cdot \mathbf{U}} \quad (1)$$

donde g es la aceleración de la gravedad, d es la profundidad y $\mathbf{U}=(U_x, U_y)$ es la corriente superficial. Conocida la profundidad d , y como resultado del filtrado, al analizar la distribución de las componentes espectrales en el espacio de frecuencias y números de onda, se obtiene también la estimación de la corriente superficial \mathbf{U} (Senet *et al.* 1997).

La estimación del espectro direccional de oleaje en número de onda $F(\mathbf{k}, \omega)$ se obtiene mediante la relación de dispersión (1) y del espectro de la imagen $I(\mathbf{k}, \omega)$. A partir del espectro $F(\mathbf{k}, \omega)$ se determinan los momentos espectrales m_i ($i = -1, 0, 1, 2$),

$$m_i = \frac{1}{(2\pi)^i} \int_{\mathbf{k}} \int_{\omega} F(\mathbf{k}, \omega) \omega^i d\omega d^2\mathbf{k} \quad (2)$$

y, con ellos, los parámetros de oleaje correspondientes (Izquierdo González *et al.*, 2005).

COMPARACIÓN CON MEDIDAS IN SITU

Con el fin de estimar la capacidad de los radares de navegación para medir parámetros de estado de mar se han utilizado los datos correspondientes a una estación radar en costa localizada en el Cabo de Peñas, Asturias. Se han usado datos de oleaje registrados por una boya oceanográfica fondeada en las cercanías de la zona marina iluminada por el radar. La comparación entre los resultados procedentes de la boya y el radar se realiza a partir de la estimación del espectro del oleaje. En el caso de la boya utilizada, el registro de oleaje consiste en una serie temporal de elevaciones de la superficie libre. Por tanto, se obtiene información de los periodos de las olas detectadas, es decir, de las frecuencias asociadas, y no de las longitudes de onda, o sus números de onda asociados. Es decir, en vez del espectro de oleaje tridimensional $F(\mathbf{k}, \omega)$, en el caso de series tempo-

rales de elevaciones de ola, se determina únicamente un espectro en frecuencia $S(\omega)$, que está relacionado con $F(\mathbf{k}, \omega)$ mediante la expresión

$$S(\omega) = \int_{\mathbf{k}} F(\mathbf{k}, \omega) d^2\mathbf{k} \quad (3)$$

Por tanto, se compararán los parámetros que se derivan del espectro en frecuencia $S(\omega)$ para ambos sensores, la boya y el radar. Es preciso señalar que existen boyas de oleaje que pueden determinar, además de las elevaciones de las olas, algunas propiedades direccionales del oleaje. En ese caso se pueden comparar un número mayor de parámetros que los derivados de la función $S(\omega)$.

Resultados de la comparación

A la hora de comparar los parámetros de oleaje definidos a partir de los momentos espectrales (2) hay que tener en cuenta cual es el valor de la frecuencia máxima de integración. Esta frecuencia, denominada frecuencia de Nyquist, está relacionada con el mínimo cambio temporal que el sensor puede registrar. Este mínimo cambio temporal viene dado por el tiempo de muestreo Δt de la serie de datos (la serie temporal de elevaciones en el caso de la boya y la serie temporal de imágenes en el caso del radar). La frecuencia de Nyquist y su frecuencia angular asociada vienen dadas por la expresiones respectivas $f_{Ny} = 2/\Delta t$, o $\omega_{Ny} = 2\pi f_{Ny}$.

Las Figuras 3 a 5 muestran la comparación los momentos espectrales m_0 (Figura 3), m_1 (Figura 4) y m_2 (Figura 5). Cada punto de la serie temporal corresponde a una medida realizada por los sensores (el radar y la boya). Se realizaba una medida cada hora. En cada figura se muestran los resultados obtenidos por el radar y los correspondientes para la boya utilizando la frecuencia de Nyquist propia de la boya (cruces en las figuras) y la frecuencia de Nyquist propia del radar (círculos en las figuras). Se observa que los resultados se acercan más cuando se utiliza la misma frecuencia de Nyquist (la del radar). Esto se debe a que el radar de navegación muestrea la superficie del mar con menor resolución temporal que la boya. Asimismo, a medida que aumenta el orden del momento espectral las diferencias entre los resultados de la boya y el radar aumenta, ya que los momentos espectrales de mayor orden dan mayor peso a frecuencias más altas (cambios más rápidos).

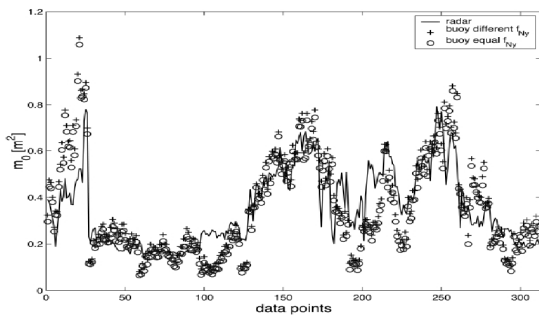


Figura 3. Comparación del momento espectral m_0 obtenido mediante el radar y la boya para diferentes frecuencias de Nyquist.

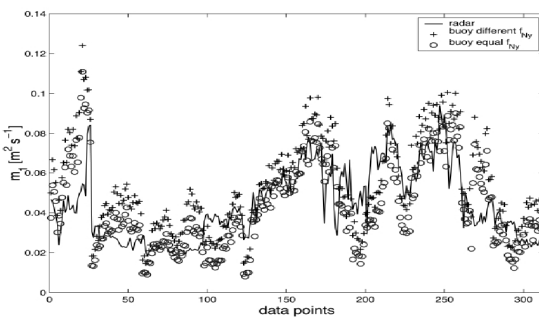


Figura 4. Comparación del momento espectral m_1 obtenido mediante el radar y la boya para diferentes frecuencias de Nyquist.

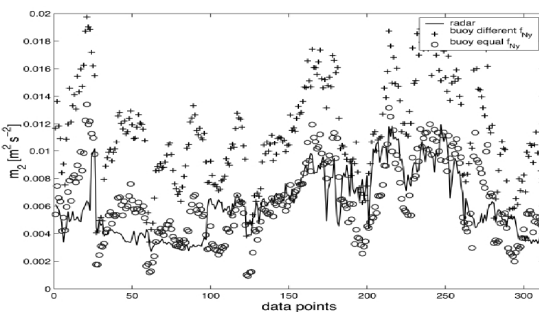


Figura 5. Comparación del momento espectral m_2 obtenido mediante el radar y la boya para diferentes frecuencias de Nyquist.

A continuación se muestran las comparaciones de diversos parámetros de oleaje obtenidos a partir de los momentos espectrales. La Figura 6 muestra la comparación de las estimaciones del periodo medio del oleaje $T_{m02} = \sqrt{m_0 / m_2}$ obtenidas por la boya y el radar utilizando la misma frecuencia de Nyquist. Se observa una buena coincidencia general en los datos, aunque en algunos registros el radar da valo-

res más altos del periodo medio (frecuencias medias menores) debido a los tiempos de muestreo mayores que hacen que el radar no pueda medir en el dominio del tiempo todas las componentes espectrales que mide la boya. La Figura 7 muestra la comparación de la altura significativa $H_s = 4 \sqrt{m_0}$. Se observa en general una buena coincidencia entre las dos series de datos.

La Figura 8 muestra la comparación del valor máximo del espectro en frecuencia $S(\omega)$ obtenido para cada medida. Se observa que la serie de datos correspondiente a la boya presenta cambios más abruptos en el tiempo. Esto se debe a que la estimación espectral de la boya presenta mayor variabilidad estadística que la del radar. La razón se debe a que los registros de la boya son medidas puntuales, sólo se promedia en el tiempo, mientras que el radar promedia en el espacio y en el tiempo.

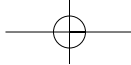
CONCLUSIONES

Las comparaciones mostradas en el presente trabajo muestran que las estaciones medidoras de oleaje basadas en tecnología radar son un instrumento útil para medir en tiempo real el oleaje. Comparado con una boya, las limitaciones principales del radar se producen en aquellos casos en que existe una presencia significativa de oleaje de periodos cortos, ya que la el tiempo de muestreo de la serie temporal (dado por el periodo de rotación de la antena). Estas limitaciones no ocurren cuando el oleaje medido presenta periodos largos, como es el caso del mar de viento desarrollado y del mar de fondo. Como ventaja del radar frente a la boya hay que señalar que el radar proporciona estimaciones del espectro del oleaje más estables y con menos variabilidad estadística.

Hay que indicar también que, como parte del proceso de análisis de los registros del radar, se puede estimar la corriente superficial. Como trabajo a realizar en el futuro, sería útil realizar estudios comparativos de la corriente estimada por el radar y datos obtenidos por sensores in situ.

BIBLIOGRAFÍA

IZQUIERDO, P. 2003. *Análisis de campos de oleaje con radar de navegación y medidas in situ*. Tesis Doctoral. Universidad de las Palmas de Gran Canaria.



P. Izquierdo, J. C. Nieto y G. Rodríguez

- IZQUIERDO, P., GUEDES, C., NIETO, J. C. y RODRÍGUEZ, G. 2004. A comparison of sea-state parameters from nautical radar images and buoy data. *Ocean Eng.* 31: 2209-2225, doi: [10.1016/j.oceaneng.2004.04.004](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2004.04.004).
- IZQUIERDO, P., NIETO, J. C., GUEDES, C., SANZ, R. y RODRÍGUEZ, G. 2005. Comparison of wave spectra from nautical radar images and scalar buoy data. *J. Waterw. Port. C-ASCE*. 131: 123-131, doi: [10.1061/ASCE0733-950X2005131:3123](https://doi.org/10.1061/ASCE0733-950X2005131:3123).
- NIETO, J. C., RODRÍGUEZ, G., HESSNER, K. y IZQUIERDO, P. 2004. Inversion of marine radar images for surface wave analysis. *J. Atmos. Ocean. Tech.* 21: 1291-1300.
- SENET, C. M., SEEMANN, J. y ZIEMER, F. 1997. Current and wave observation from coastal and vessel mounted stations by marine radar. *The 4th Int. Conf. on Remote Sensing for the Marine and Coastal Environments*. Orlando, Florida, pp. 485-491.

