

COMPARACION DE DOS METODOS PARA MEDIR EL ESPECTRO OPTICO DE POTENCIA

A COMPARISON OF TWO METHODS TO MEASURE THE OPTICAL POWER SPECTRUM

Josué Alvarez Borrego
Ricardo Villagómez Támez
J. Eduardo Villarreal Barajas

Centro de Investigación Científica
y de Educación Superior de Ensenada
Ave. Espinoza 843
22830 Ensenada, Baja California
México

Alvarez Borrego Josué, Villagómez Támez, R. y Villarreal Barajas, J.E. Comparación de dos métodos para medir el espectro óptico de potencia. A Comparison of two methods to measure the optical power spectrum. *Ciencias Marinas*; 15(2): 111-124 1989.

RESUMEN

Una superficie del mar fue generada por computadora usando un modelo numérico del espectro teórico de potencia de Pierson-Moskowitz. La imagen fue grabada en película fotográfica mediante un microdensitómetro en su modo de escritura. Se usó un sistema óptico coherente (donde las lentes están óptimamente corregidas para aberraciones), para obtener el espectro óptico de potencia de la superficie simulada del mar. Este espectro óptico bidimensional tiene información de las componentes del número de onda (K_x, K_y) en el pico de más alta energía y de la dirección que las ondas tienen a un tiempo específico. Dos métodos de medir el espectro óptico fueron usados: un microdensitómetro y un radiómetro. El primero lee la información del espectro contenida en un negativo (película fotográfica), y el segundo lee la información del espectro directamente *in situ* en el sistema óptico. Ambos resultados son comparados y discutidos.

ABSTRACT

A sea surface was generated by computer using a numerical calculation of the theoretical Pierson-Moskowitz power spectrum. The image was recorded on photographic film by means of a microdensitometer with a writing mode. A double Fourier transform coherent optical system was used for obtaining the optical power spectrum of this simulated sea surface. This spectrum has information about the wavenumber components (K_x, K_y) in the highest energy peak and the direction that the waves have at a specific time. Two methods of measuring the optical power spectrum were used: a microdensitometer and a radiometer. The first one reads the information of the spectrum contained in a negative (photographic film), and the second one reads the information of the spectrum directly *in situ* in the optical system. Both results are compared and discussed.

INTRODUCCION

En Ingeniería Costera es importante conocer las alturas y dirección de las ondas para poder desarrollar un diseño óptimo de

INTRODUCTION

In coastal engineering it is important to know the height and direction of the waves in order to develop an optimum design of the

estructuras de protección de puertos. Además, debido a la dificultad en obtener información del oleaje generado en una área de tormenta (oleaje altamente energético) con el método convencional (por ejemplo, sensores de presión), el análisis óptico de las imágenes del mar puede ser usado como un método alternativo. Alvarez-Borrego y Machado (1985), dan un resumen acerca de las aplicaciones de la óptica al estudio del oleaje y muestran un ejemplo de esta técnica al obtener el espectro de potencia bidimensional de una superficie simulada del mar.

El objetivo de este trabajo es usar dos métodos para obtener información del espectro óptico de potencia de una superficie simulada del mar obtenido en un sistema óptico coherente. El método óptico requiere sólo fotografías de la superficie del mar. El espectro óptico bidimensional contiene la misma información que la película fotográfica.

Es muy importante entender las aberraciones envueltas en el sistema óptico. Joyeux y Lowenthal (1982) realizaron un análisis de las aberraciones envueltas en este sistema óptico. Ellos dijeron: "debe ser corregido para todas las aberraciones presentes en el par de planos focal-infinito del campo útil. Para una cierta medida del objeto, una limitación en el ancho de banda aparece debido al tamaño finito de las lentes de Fourier. Esta limitación no se mantiene cuando el objeto se coloca cerca de la lente. El gran número de lentes que se necesitan para corrección de aberraciones crea un ruido coherente por difusión o reflexión. En la práctica existen buenos sistemas de procesado de Fourier, pero son complejos y caros. Esto explica por qué la gente frecuentemente usa dobletes o tripletes con lentes de Fourier".

De esta manera, teniendo en mente todos los problemas antes mencionados es posible hacer un buen análisis de fotografías del mar con un sistema óptico coherente que lleva un lente doblete de Fourier (doblete porque la lente está compuesta de dos lentes simples).

protection structures for harbors. However, because of the difficulty of obtaining information of waves coming from a storm area with conventional methods (e.g. pressure sensors), the optical analysis of images of sea surfaces can be used as an alternative method. Alvarez-Borrego and Machado (1985) give a short history about the application of optics to the study of waves in the sea and they show an example of this technique obtaining the bidimensional power spectrum of a simulated sea surface.

The aim of this work is to use two methods for obtaining the optical power spectrum of a simulated sea surface in a double Fourier transform coherent optical system. The optical method requires only photographs of the sea surface. The bidimensional optical spectrum contains the same information as the photographic film.

It is very important to understand our optical system due to the problem and aberrations involved. Joyeux and Lowenthal (1982) made an aberration analysis of this optical system. They said: "it must be corrected for all aberrations for the infinity-focal plane pair in the useful field. For a given object size, a bandwidth limitation appears due to the finite size of the Fourier lens. This limitation does not hold when the object is placed close to the lens. The large number of lenses needed for aberration correction induces coherent noise by diffusion or reflection. In practice good Fourier processing systems are available, but they are complex and therefore expensive. This explains why people frequently use ordinary doublets or triplets as Fourier lenses".

So, having in mind these above mentioned problems it is possible to make a good analysis of sea photographs with a double Fourier transform coherent optical system.

SIMULACION DE LA SUPERFICIE DEL MAR

Se usa un espectro teórico de potencia para obtener una superficie simulada del mar. La técnica empleada para producir una simulación numérica de la superficie del mar con un espectro de potencia específico está basado en la extensión de la teoría de sistemas lineales en una dimensión a dos dimensiones. Bruno y Novarini (1976) dan una explicación del método. Alvarez-Borrego y Machado (1985), y Alvarez-Borrego (1987) muestran la técnica para obtener la imagen simulada en película fotográfica. El Apéndice 1 presenta un resumen de esta técnica usando el microdensitómetro.

En este caso, se usó el espectro teórico de Pierson-Moskowitz. Este espectro de potencia (Fig. 1) es dado por:

$$E_z(K_x, K_y) = (B/2g^2k^4) \exp [-0.74g^2/u^4k^2] \cos^2[\tan^{-1}(K_y/K_x)]. \quad (1)$$

SIMULATION OF THE SEA SURFACE

A theoretical power spectrum is used to provide a simulated sea surface. The technique employed to produce a numerical simulation of the sea surface with a specific power spectrum is based on extension of the 1-D linear system theory to two dimensions. Brunon and Novarini (1976) give an explanation of the method. Alvarez-Borrego and Machado (1985), and Alvarez-Borrego (1987) show the technique for obtaining the simulated image on a photographic film. Appendix 1 presents a review of this technique using the microdensitometer.

In this case, the theoretical Pierson-Moskowitz spectrum was used. This power spectrum (Fig. 1) is given by:

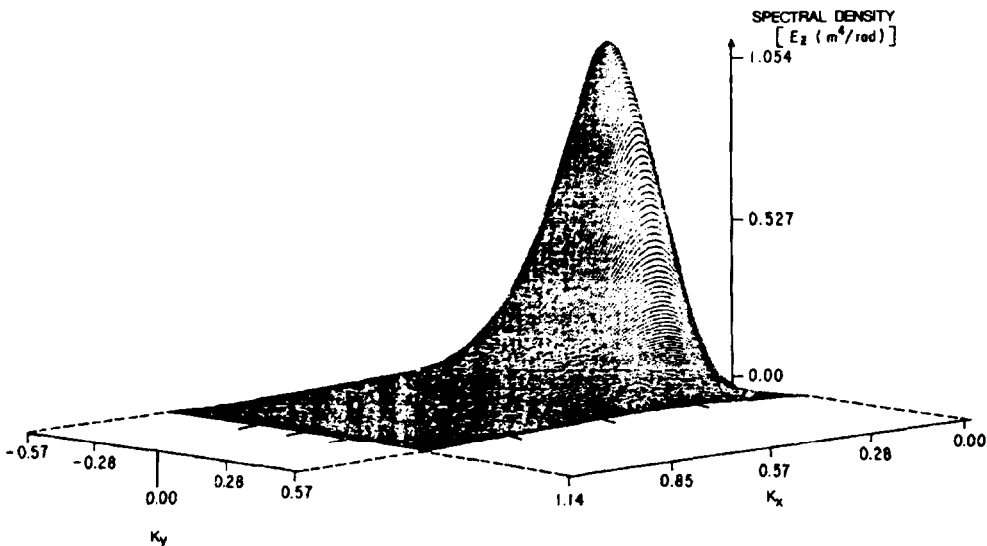


Figura 1. Espectro teórico de Pierson-Moskowitz.
Figure 1. The Pierson-Moskowitz theoretical spectrum.

donde $B = 4.8978\text{m}^2/\text{seg}^4$, $g = 9.81\text{m}/\text{seg}^2$, $u(\text{m}/\text{seg})$ es la velocidad del viento a una altura de 19.5m y $K = (iK_x + jK_y)$ es el vector número de onda. Para el espectro que se muestra en la Figura 1, la velocidad del viento, u se escogió a ser 5.0m/seg.

En este trabajo usamos la Kodak technical pan film 2415. Un intervalo de valores de densidad fue escrito sobre la película fotográfica con el microdensitómetro, y se obtuvo una respuesta cuasilineal (Fig. 2). Trabajamos con aquellos valores que estuvieron en la región "lineal" de la gráfica (entre 1.5-3.0 valor de densidad).

Esta simulación de la superficie del mar no hace uso de la intensidad de la luz reflejada del sol como una variable. Debido a que nuestra aproximación es sólo de primer orden, se constituye así sólo una aproximación a la situación física real.

TRANSFORMADA DE FOURIER OPTICA DE LA IMAGEN FOTOGRAFICA

Para obtener el módulo al cuadrado de la transformada de Fourier óptica o espectro de potencia de la imagen del mar contenida en la transparencia, es necesario usar un sistema óptico coherente (Fig. 3). El sistema óptico incluye un láser He-Ne 1, un agujerito 2, y una lente L_1 de distancia focal F 3. La distancia entre el agujerito y la lente L_1 es igual a f , por tanto provee iluminación colimada sobre el objeto. Una abertura circular 4 determina la extensión del área iluminada sobre el objeto (transparencia), el cual es colocada en 5. El objeto es puesto dentro de una celda líquida para incrementar la razón señal a ruido. La lente L_2 , colocada a una distancia f (longitud focal de L_2) del objeto, produce una transformada de Fourier exacta del objeto. El espectro de potencia obtenido es medido con un detector colocado en 7.

La transformada de Fourier bidimensional en el plano 7 de la transmitancia de amplitud compleja $t_0(X_0, Y_0)$ (o la transparencia) es dada por:

where $B = 4.897\text{m}^2/\text{sec}^4$, $g = 9.81\text{m}/\text{sec}^2$, $u(\text{m}/\text{sec})$ is the wind velocity at a height of 19.5m and $K = (iK_x + jK_y)$ is the wave number vector. For the simulation spectra shown in Figure 1, the wind velocity, u was chosen to be 5.0m/s.

In this work we used Kodak technical pan film 2415. A range of density values was written on the photographic film with the microdensitometer, and a quasilinear response was observed (Fig. 2). We worked with the values which are in the "linear" region of the graph (among 1.5-3.0 density values).

This simulation of the sea surface does not make use of the intensity of reflected sunlight as a variable. Because our approximation is of the first order, so it constitutes only an approximation to the real physical situation.

OPTICAL FOURIER TRANSFORM OF THE PHOTOGRAPHIC IMAGE

To get the squared modulus of the optical Fourier transform or power spectrum of the sea image contained in the transparency, it is necessary to use a coherent optical system (Fig. 3). The optical system includes a He-Ne laser 1, a pinhole 2, and a lens L_1 of focal distance f 3. The distance between the pinhole and the lens L_1 is equal to f , thus providing collimated illumination on the object. A circular aperture 4 determines the extent of the illuminated area on the object (transparency), which is placed at 5. The object is set inside a liquid gate to increase the signal to noise ratio (SNR). The lens L_2 , placed at a distance f (focal length of L_2) from the object, produces an exact Fourier transform of the object. The power spectrum obtained is measured with a detector placed at 7.

The 2-D Fourier transform at plane 7 of the complex amplitude transmittance to (X_0, Y_0) (or the transparency) is given by:

$$U_f(X_f, Y_f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} t_o(X_o, Y_o) \exp[(-2\pi j/\lambda f)(X_o X_f + Y_o Y_f)] dX_o dY_o \quad (2)$$

donde λ es la longitud de onda de la luz del láser, f es la longitud focal de la lente de transformación, j es el número imaginario $(-1)^{1/2}$ y $U_f(X_f, Y_f)$ es la amplitud compleja al punto (X_f, Y_f) en el plano de transformación, (X_o, Y_o) siendo las coordenadas en el plano del objeto.

where λ is the wavelength of the light involved, f is the focal length of the transform lens, j is the imaginary number $(-1)^{1/2}$ and $U_f(X_f, Y_f)$ is the complex amplitude at a point (X_f, Y_f) in the transformation plane, (X_o, Y_o) being coordinates on the object plane.

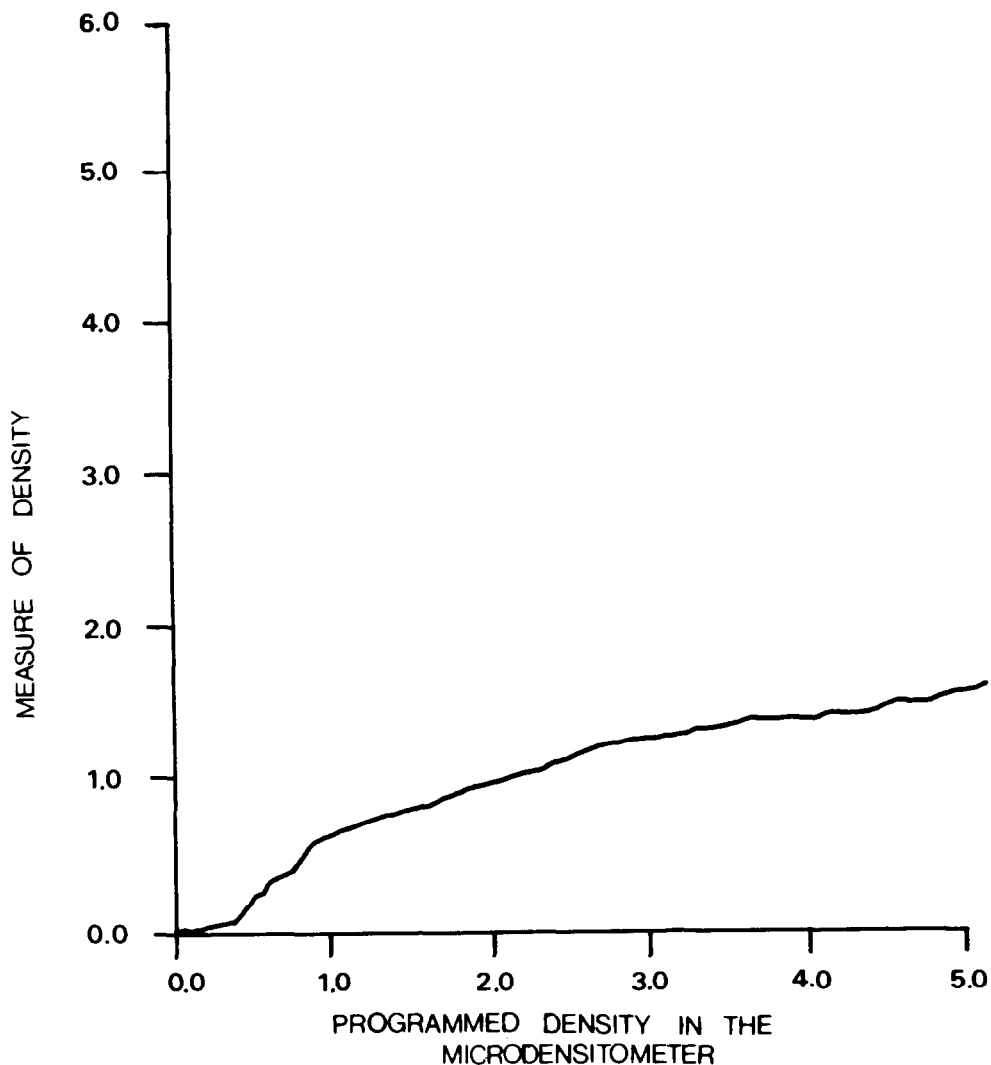


Figura 2. Respuesta de la película Kodak technical pan 2415 a los valores de densidad escritos con el microdensitómetro.

Figure 2. Film Kodak technical pan 2415 response to values of density written with the microdensitometer.

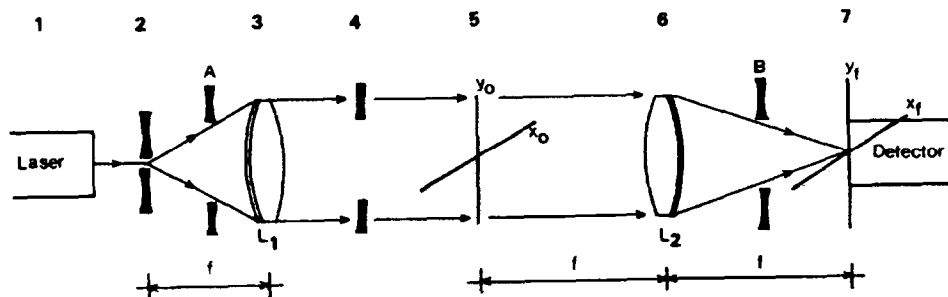


Figura 3. Sistema óptico coherente para obtener el espectro de potencia de las imágenes del mar contenidas en la transparencia.

Figure 3. Coherent optical system for obtaining the power spectrum of the sea images contained in the transparency.

RESULTADOS Y DISCUSION

La computadora fue programada para producir una cierta densidad de puntos por unidad de área para cada valor de altura de la onda en todo el campo, dando como resultado una perspectiva normal de la superficie simulada (Fig. 4). La velocidad del viento, un parámetro en la simulación, tuvo un valor de 5.0m/seg.

RESULTS AND DISCUSSION

The computer was programmed to produce a certain density of dots per unit area for each value of wave height in the wave field, giving as a result a normal perspective of the simulated surface (Fig. 4). The wind velocity, a parameter in the simulation, had a value of 5.0m/sec.

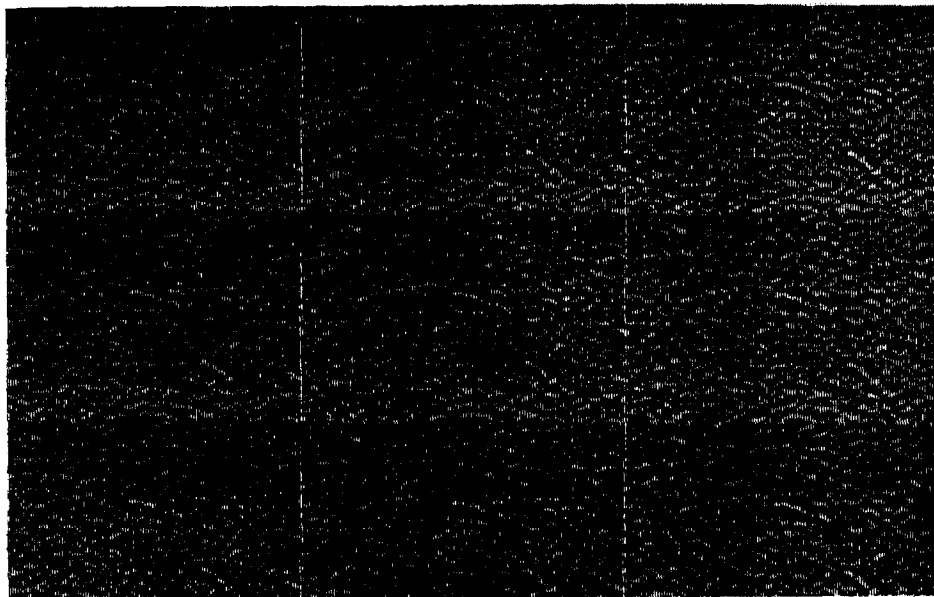


Figura 4. Nueve realizaciones de la superficie del mar generados con el espectro teórico de Pierson-Moskowitz.

Figure 4. Nine sea surface realizations generated by the Pierson-Moskowitz theoretical spectrum.

Teoría lineal de primer orden (Dean y Dairymple, 1984), fue usada para calcular las longitudes de onda de las ondas en agua profunda con períodos de 2 a 6 segundos. La Tabla I muestra las longitudes de onda en micrones de las ondas presentes en la película fotográfica y la Tabla II muestra los números de onda correspondiente a los puntos en el plano de Fourier de nuestro sistema óptico, obtenida a través de la relación $X_f = \lambda f f_x$, donde f_x es la asociada componente de frecuencia espacial.

La Fig. 5 muestra el espectro óptico bidimensional. Este espectro de potencia fue obtenido usando el sistema óptico que se mostró en la Figura 3 donde la función de entrada fue la Figura 4. Este espectro tiene información de las componentes números de onda (K_x, K_y) presentes en el pico de más alta energía y de la dirección que las ondas tienen a un tiempo específico t , con respecto a un sistema dado de referencia. Este espectro tiene una ambigüedad direccional de 180° .

El sistema óptico usado en este trabajo tuvo una resolución espacial de 104 líneas/mm por tanto resuelve satisfactoriamente todas las frecuencias contenidas en la imagen simulada.

Se usó un microdensitómetro para leer la información contenida en un negativo (la fotografía se muestra en la Fig. 5). El error, en la posición de lectura, con el microdensitómetro es $\pm 1 \mu\text{m}$. Para obtener los valores que se muestra en la Fig. 6, fue necesario un promedio estadístico en la información contenida en la Figura 5. Debido a la abertura de lectura que fue 50×200 micrones (50 micrones en la dirección X_f y 200 micrones en la dirección Y_f), ésta abertura fue pequeña comparada con la medida del diámetro teórico del speckle (193 micrones).

Por tanto, cuatro mediciones en la dirección X_f fueron tomadas produciéndose así una abertura de 200×200 micrones, y de éstas cuatro mediciones se tomó un promedio para producir un valor para cada ΔK en cada fotografía.

Tabla I. Longitud de onda de las ondas.
Table I. Wavelength of the waves.

Period (sec)	Wavelength (m)	Wavelength in the film (μm)
2.0	6.27	45.65
3.0	14.05	102.30
4.0	24.98	181.89
5.0	39.03	284.20
6.0	56.20	409.23

Tabla II. Localización de los números de onda del mar en el plano de Fourier del sistema óptico.

Table II. Localization of the Sea Wave Numbers on the Fourier Plane of the Optical System.

Period (sec)	Wave number ($2\pi/\lambda$)	X_f Fourier Plane (mm)
2.0	1.0021	13.92
3.0	0.4472	6.25
4.0	0.2515	3.54
5.0	0.1609	2.29
6.0	0.1118	1.60

First order linear theory (Dean and Dairymple, 1984), was used to calculate the wavelengths of the deep water waves with periods from 2 to 6 seconds. Table 1 shows the wavelengths in microns of the waves present in the photographic film and Table 2 shows the wave numbers corresponding to the points in the Fourier plane of our optical system, obtained through the relation $X_f = \lambda f f_x$, where f_x is the associated spatial frequency component.

Figure 5 shows the bidimensional optical spectrum. This power spectrum was obtained using the optical system shown in Figure 3 where the function input was the Figure 4.

Además 20 fotografías (como las de la Fig. 5) fueron usadas para realizar un promedio estadístico, porque quisimos quitar el ruido producido por la no uniformidad en el grano de la película.

This spectrum has information about the wave numbers (K_x and K_y) in the highest energy peak and the direction that the waves have at a specific time t , with respect to a given reference system. This spectrum has a directional ambiguity of 180° .

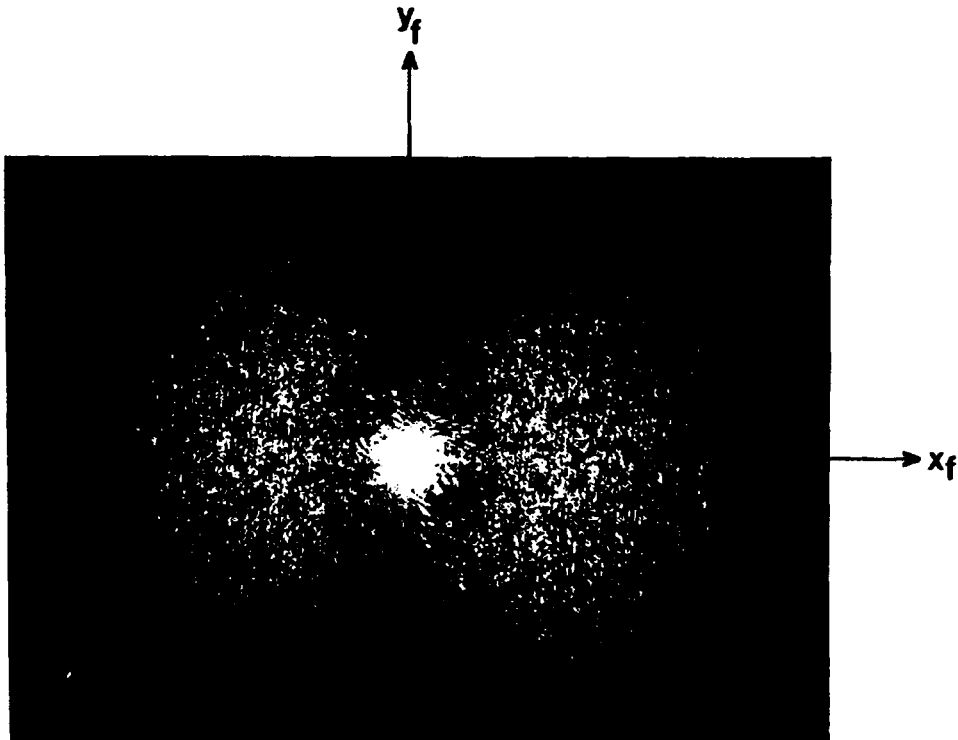


Figura 5. Espectro óptico de potencia de la superficie simulada del mar (Fig. 4).
Figure 5. Optical power spectrum of the simulated sea surface (Fig. 4).

Podemos ver en la Figura 6 que los valores de densidad obtenidos con el microdensitómetro siguen aproximadamente la curva teórica del espectro (línea continua). La diferencia es debido a dos factores: diámetro de la abertura de lectura del microdensitómetro y la no uniformidad en el grano de la película. La línea punteada corresponde al ruido introducido por del patrón de Airy (componente dc).

La Figura 7 muestra el espectro teórico y el espectro de potencia obtenido con nuestro procesador óptico coherente (dibujos normali-

The optical system used in this work had a spatial resolution of 104 lines/mm thus it resolves satisfactorily all frequencies contained in the simulated images.

A microdensitometer was used for reading the information contained in a negative (the photograph is shown in Fig. 5). The error, in the lecture position, with the microdensitometer was $\pm 1\mu\text{m}$. In order to obtain the values shown in Figure 6, a statistical average was necessary in the information contained in Figure 5. Because the lecture aperture was 50×200 microns (50 microns in

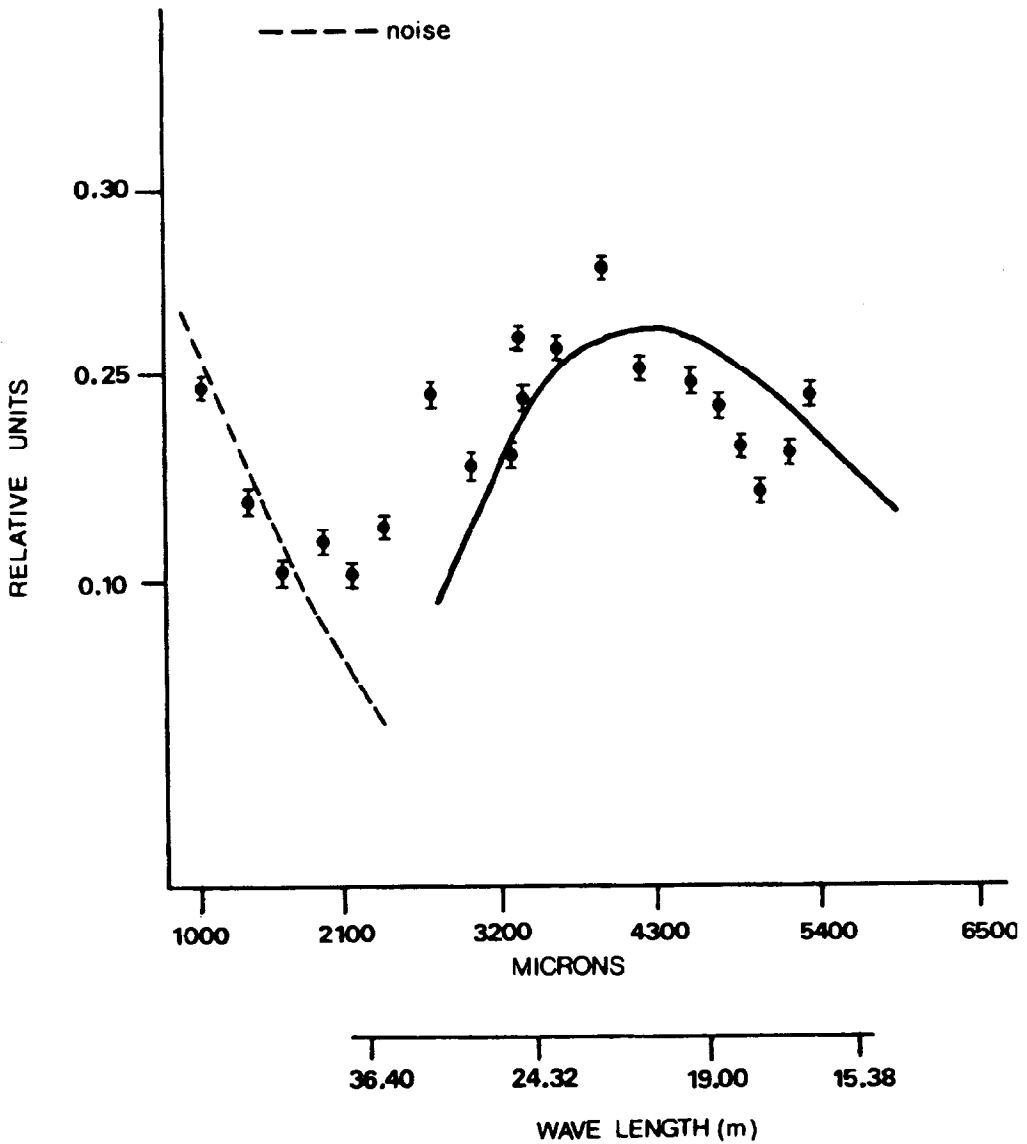


Figura 6. Comparación entre el espectro óptico de potencia leído con el microdensitómetro y el espectro teórico de potencia de Pierson-Moskowitz (línea continua).
Figure 6. Comparison between the optical power spectrum read with the microdensitometer and the Pierson-Moskowitz theoretical power spectrum (continuous line).

zados), usando el radiómetro. La intensidad, como una función del número de onda, medida en el plano de Fourier por el detector es proporcional a la energía asignada a las ondas en la superficie marina simulada (Denzil, 1969) y la localización o posición en el plano de Fourier de las frecuencias obtenidas en los espectros corresponden a la información contenida en la simulación (Alvarez y Machado, 1985). La abertura del detector fue de $1000\mu\text{m}$ de diámetro. En la Figura 7 podemos ver sólo una buena comparación entre el espectro teórico y las mediciones obtenidas con el detector para el pico de más alta energía y altas frecuencias. En bajas frecuencias los valores obtenidos con el detector fueron más grandes que la teoría, debido a que el centro de abertura del detector está en las frecuencias más bajas del espectro, así que el detector recibe energía del patrón de Airy y por lo tanto los valores obtenidos con el detector son más grandes. Los diferentes símbolos en la Figura 7 representan diferentes mediciones obtenidas con el detector.

Las magnitudes de las estimadas espectrales determinadas por los dos métodos se conocen solo relativamente (unidades relativas).

CONCLUSIONES

Los resultados muestran que es mejor usar un radiómetro para obtener la información del espectro de potencia bidimensional que un microdensitómetro debido a la no uniformidad en el grano de la película. Además la abertura de lectura en el microdensitómetro es pequeña comparada con la medida del diámetro teórico del speckle y por tanto se requiere de un promedio estadístico. Las mediciones obtenidas con el radiómetro son más rápidas.

Las magnitudes de las estimadas espectrales determinadas por los dos métodos se conocen solo relativamente.

El espectro tiene una ambigüedad direccional de 180° .

the X_f direction and 200 microns in Y_f direction), this aperture was small compared with the size of the speckle theoretical diameter (193 microns). Thus, four measurements in the X_f direction were taken producing an aperture of 200×200 microns, and from these four measurements an average was taken to produce a value for each ΔK in each photograph.

However, 20 photographs (as Fig. 5) were used in order to make a statistical average, because we wanted to remove the noise introduced by the non-uniformity in the grain of the film.

We can see in Figure 6 that the density values obtained with the microdensitometer follow approximately the theoretical curve of the spectrum (continuous line). The difference is due to two factors: aperture diameter of lecture with the microdensitometer and non-uniformity in the grain of the film. The dashed line corresponds to the noise introduced by the Airy pattern (dc component).

Figure 7 shows the theoretical spectrum and the power spectrum obtained with our coherent optical processor (normalized plots), using the radiometer. The intensity, as a function of wave number, measured in the Fourier plane by the detector is proportional to the energy assigned to the waves in the simulated marine surface (Denzil, 1969), and the location or position in the Fourier plane of the frequencies obtained in the spectrums correspond to the information contained in the simulation (Alvarez-Borrego and Machado, 1985). The opening at the detector was $1000\mu\text{m}$ diameter. In Figure 7 we can see a good comparison between the theoretical spectrum and the measurements obtained with the detector for the high peak energy and high frequencies only. In low frequencies the values obtained with the detector were larger than the theory, because the opening center at the detector is in the lower frequency of the spectrum, the detector receives energy from the central Airy pattern and therefore the values obtained with the detector are larger.

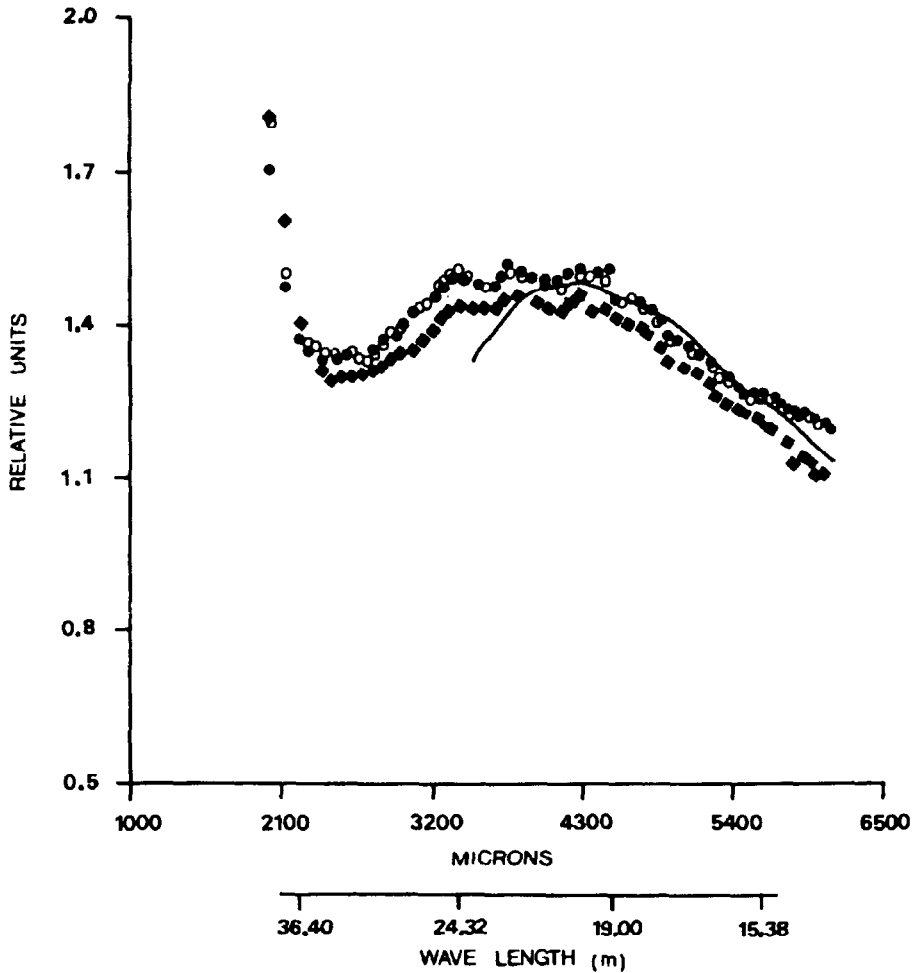


Figura 7. Comparación entre el espectro óptico de potencia obtenido en el sistema óptico, usando el radiómetro, y el espectro teórico de potencia de Pierson-Moskowitz (línea continua).

Figure 7. Comparison between the optical power spectrum obtained in the optical system, using the radiometer, and the Pierson-Moskowitz theoretical power spectrum (continuous line).

AGRADECIMIENTOS

Esto representa un segmento de un proyecto llevado a cabo por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C. Esta investigación fue apoyada económicamente por el Consejo Nacional de Ciencia Y Tecnología de México bajo proyecto PCCNCNA-050000.

The various symbols in Figure 7 represent different measurements obtained with the detector.

The magnitudes of the spectral estimates determined by the two methods are known only relatively (relative units).

APENDICE 1

La reconstrucción de la información digital generada por la computadora para simulación de una superficie del mar se hace con el sistema de reconstrucción del microdensitómetro.

La información referida a la imagen generada por computadora se almacena en una cinta magnética con una densidad de 800 BPI.

La separación digital de cada bit de información se consideró por el sistema del microdensitómetro como la separación espacial de cada elemento imagen en coordenadas rectangulares y con cierto valor de densidad. La imagen por entero está constituida por L elementos donde $L = M \times N$, donde M es el número de renglones y N el número de elementos para cada renglón, donde los valores de la matriz están ordenados y escritos en una película fotográfica technical pan 2415.

La separación espacial de cada elemento imagen está determinada por los valores ΔX y ΔY para cada eje coordenado.

El elemento imagen tiene dimensiones de $(5 \times 5) \mu\text{m}$ a $(50 \times 50) \mu\text{m}$, definidas por las aberturas físicas de reconstrucción del microdensitómetro. En este caso la abertura seleccionada fue de $(20 \times 20) \mu\text{m}$ en la reconstrucción de las imágenes de la superficie del mar. La separación ΔX y ΔY para los elementos imagen estarán relacionados a la dimensión de la abertura seleccionada. En este caso $\Delta X = \Delta Y = 20 \mu\text{m}$.

Los parámetros utilizados por el microdensitómetro son esencialmente la separación ΔX y ΔY , el número de líneas a grabar es M y N el número de elementos a grabar por línea. Con esta información procedemos a calibrar óptica y en forma análoga el microdensitómetro, colocando además la información contenida en la cinta magnética en su posición lógica correcta.

La calibración óptica consiste en enfocar el sistema óptico inferior sobre el plano que contiene la emulsión fotosensitiva, donde los

CONCLUSIONS

The results show that it is better to use a radiometer for obtaining the information of the bidimensional power spectrum than a microdensitometer due to the non-uniformity of the grain in the film. However, the lecture aperture in the microdensitometer is small compared with the size of the speckle theoretical diameter and thus a statistical average is necessary. The measurements obtained with the radiometer are faster.

The magnitudes of the spectral estimates determined by the two methods are known only relatively.

The spectrum has a directional ambiguity of 180° .

ACKNOWLEDGEMENTS

This represents a segment of a continuing project by the Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C. This research was supported by the National Council of Science and Technology of México through project PCCNCNA-050000.

English translation by the author.

APPENDIX 1

The reconstruction of digital information generated by computer for simulation of a sea surface is made with the reconstruction system of a microdensitometer.

The information referred to the image generated by computer are stored on magnetic tape with a 800 BPI density.

The digital separation of each bit of information is considered by the microdensitometer system as the spatial separation of each

pulsos de luz corresponden a cada bit de información que viene de la cinta magnética que contiene a la imagen la cual será grabada.

Para obtener la calibración análoga, se procede a obtener un histograma de los datos de la matriz de densidad ($M \times N$) contenidos en la cinta magnética. Con los valores de densidad mínimos y máximos, calibramos el sistema digital del microdensitómetro ajustando la ganancia de voltaje mínima y máxima a la fuente de luz del sistema de reconstrucción. El intervalo de voltaje aplicado es de 0.00 volts a 5.11 volts con variaciones de 0.01 volt. Estos voltajes son transformados a 512 valores diferentes de intensidad de luz y ellos son grabados en 512 niveles de grises en la película fotográfica usada.

La imagen fotográfica que se obtiene en la reconstrucción es procesada en un sistema óptico coherente para obtener su espectro óptico de potencia.

Para obtener los resultados finales del espectro de potencia, se tomaron 20 exposiciones del espectro y se digitalizaron. De estas digitalizaciones se llevó a cabo un análisis estadístico como se mencionó anteriormente.

Para llevar a cabo la digitalización con el microdensitómetro se procedió a calibrar en forma óptica y analógica, de igual manera como en el caso de reconstrucción.

La información digitalizada se guarda en cinta magnética.

LITERATURA CITADA

Alvarez Borrego, J. (1987). Optical analysis of two simulated images of the sea surface. Proceedings SPIE. Advances in image processing, Vol. 804, pp. 192-200.

Alvarez Borrego, J. and Machado, G., M. A. (1985). Optical analysis of a simulated image of the sea surface. Applied optics, Vol. 24, No. 7, April 1.

image element in rectangular coordinates and with certain density value. The entire image is constituted by L image elements where $L=M \times N$, M being the number of rows and N the number of elements for each row, of the value-matrix being ordered and written in a photographic film Technical PAN-FILM-2415.

The spatial separation of each image element is determined by the values ΔX and ΔY for each coordinate axis.

The image element has a dimension from $(5 \times 5) \mu\text{m}$ through $(50 \times 50) \mu\text{m}$, defined by the physical apertures of reconstruction for the Microdensitometer system (MICRO-D). In this case the selected aperture is a square up to $(20 \times 20) \mu\text{m}$ in the reconstruction of the sea surface images. The separation ΔX and ΔY for the image elements will be related to the reconstruction aperture dimension selected for the playback of the image. In this case $\Delta X = \Delta Y = 20 \mu\text{m}$.

The utilization parameters for the MICRO-D are essentially the separation ΔX and ΔY , the number of line scans M , the number N of elements in each line scan. With this information we proceed to calibrate optically and in analog form the MICRO-D, placing the magnetic tape information in its correct logical position.

The optical calibration consists of focusing the inferior optical system over the plane that contains the photosensitive emulsion, into which the light pulses corresponding to each bit of information coming from the logical tape that contains the entire image, will be recorded.

To obtain the analogue calibration, we proceed to perform a histogram of the $(M \times N)$ density matrix data recorded on the magnetic tape. With the minimum and maximum image density values, we calibrate in the digital system of the MICRO-D by means of adjusting the minimum and maximum gain of voltage applied to the light source of the reconstruction system. The range of voltage applied is from 0.00 volts up to 5.11 volts with variations of 0.01 volt. These voltages are

Bruno, D. and Novarini, J. (1976). Análisis comparativo de superficies modeladas numéricamente con distintos espectros de potencia. República Argentina, Servicio de Hidrografía Naval, DOF-IT10-76, Junio.

Dean, R. and Dairymple, R. (1984). Water wave mechanics for engineering and scientists. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632.

Denzil Stilwell, Jr. (1969). Directional energy spectra of the sea from photographs. Journal Geophysical Research, 74, No. 8, April 15.

Joyeux, J. and Lowenthal, S. (1982). Optical fourier transform: What is the optimal set up. Applied Optics, Vol. 21, No. 23.

transformed to the 512 different values of the light source intensity and they are recorded in 512 levels of gray in the photographic film used.

The photographic image obtained in the reconstruction is processed in an optical-coherent processing system of images in order to obtain its optical image power spectrum.

To obtain the final results of the power spectrum, 20 exposures were taken from the optical set up and digitized with the MICRO-D and 20 digital profiles were obtained of the corresponding power spectrum from which we take out a statistical analysis as mentioned earlier.

In order to obtain the digitalization with the MICRO-D we proceed to calibrate it optically and analogically, in the same form as the reconstruction case.

The digitized information is kept on the magnetic tape.