

**DISCUSION DE DOS METODOS PARA ANALIZAR SUPERFICIES  
MARINAS UTILIZANDO FOTOGRAFIAS AEREAS E IMAGENES  
SLAR**

**DISCUSSION OF TWO METHODS FOR ANALYZING SEA SURFACES  
USING AERIAL PHOTOGRAPHS AND SLAR IMAGES**

Por/By  
Josué Alvarez Borrego\*  
Centro de Investigación Científica y de  
Educación Superior de Ensenada  
División de Física Aplicada  
Departamento de Optica  
Apdo. Postal 2732  
Ensenada, B.C. México

\* Dirección actual:  
Present address:  
Oregon State University  
College of Oceanography  
Corvallis Oregon, 97331  
USA

ALVAREZ BORREGO, J., 1985. Discusión de dos métodos para analizar superficies marinas utilizando fotografías aéreas e imágenes SLAR. Discussion of two methods for analyzing sea surfaces using aerial photographs and SLAR images. *Ciencias Marinas* 11 (2): 7-21 (15)

**RESUMEN**

Se delinear completamente dos métodos (óptico y digital) para analizar imágenes de la superficie del mar. Se discuten y comparan los problemas de distorsión presentes en fotografías aéreas e imágenes SLAR.

**ABSTRACT**

Two methods (optical and digital method) for analyzing images of the sea surface are completely delineated. Distortion problems presents in aerial photographs and SLAR images are discussed and compared.

**INTRODUCCION**

A finales del siglo pasado se iniciaron estudios de la superficie marina utilizando métodos ópticos y oceanográficos (Jerlov, 1976). Los oceanógrafos físicos han tratado de entender las complejas estructuras de la superficie del mar. Ellos han desarrollado técnicas que nos permiten obtener series de

**INTRODUCTION**

Studies of the sea surface using optical and oceanographic methods began by the end of the last century (Jerlov, 1976). Physical oceanographers have tried to understand the structural complexities of the sea surface. They have developed techniques which permit us to obtain time series of the

## DISCUSION DE DOS METODOS PARA ANALIZAR SUPERFICIES

tiempo del oleaje, con las cuales es posible derivar el espectro de potencia, con lo que es posible explicar la generación y propagación de oleaje, intercambios de energía entre volúmenes de agua y también predecir el comportamiento del oleaje. Este conocimiento es útil en el diseño y construcción de puertos. Las series de tiempo de altura del oleaje en un punto específico de la superficie del mar no nos proporcionan información acerca de la dirección de éste. N.F. Barber (1954) utilizó un método óptico para encontrar la dirección del oleaje en la superficie del mar. Investigaciones similares han sido realizadas por Denzil (1969), Sugimori (1975) y por Alvarez y Machado (1985). Ellos utilizaron un método óptico, el cual consiste en tomar fotografías de la superficie del mar y obtener su espectro óptico bidimensional. Ya que este método óptico solamente requiere fotografías de la superficie del mar, puede ser utilizado para estudiar oleaje en aguas tanto profundas como someras.

Existe otro método para analizar la dirección del oleaje en la superficie del mar (método digital). Este método utiliza imágenes SLAR de la superficie marina. Dichas imágenes pueden ser digitalizadas por medio de un digitalizador Optronics de tambor rotatorio (Frank y Rosenfeld, 1984). Estas subescenas se sujetan entonces a análisis digital de transformada de Fourier (DFT), en dos dimensiones, obteniéndose de esta forma el espectro de potencia bidimensional.

En este trabajo se discuten ambos métodos analizando problemas en cada uno. Se delinearán ambas técnicas y se discutirán y compararán problemas de distorsión presentes en fotografías aéreas y en imágenes SLAR.

### METODO OPTICO

Para obtener el módulo cuadrado de la transformada óptica de Fourier o el espectro de potencia de imágenes del mar de una transparencia es necesario utilizar un sistema óptico coherente (Fig. 1). Este sistema incluye un laser He-Ne (1), un pequeño

waves from which we can derive the power spectrum. With this information we can explain wave generation and propagation, interchanges of energy among volumes of water and also forecast wave behavior. This knowledge is used in the design and construction of harbors. The time series of wave-height at a specific point on the sea surface does not give information about the wave direction. N. F. Barber (1954), used an optical method to find out the direction of the waves on the sea surface. Similar investigations have been made by Denzil (1969), Sugimori (1975) and Alvarez and Machado (1985). They used an optical method which consist of taking photographs of the sea surface and obtaining its bidimensional optical spectrum. Since this optical method requires only photographs of the sea surface it can be used for studying waves in deep as well as shallow waters.

There is another method for analyzing the direction of the waves on the sea surface (digital method). This method uses SLAR images of the sea surface. These SLAR images can be digitized using an Optronics rotating drum digitizer (Frank and Rosenfeld, 1984). These subscenes are then subjected to two-dimensional digital Fourier transform (DFT) analysis and so, the bidimensional power spectrum is obtained.

In this paper both methods will be discussed analyzing some problems in each one. Both methods will be delineated and distortion problems present in aerial photographs, and SLAR images will be discussed and compared.

### OPTICAL METHOD

In order to obtain the squared modulus of the optical Fourier transform or power spectrum of sea images contained in a transparency, it is necessary to use a coherent optical system (Fig. 1). 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

orificio (2) y una lente  $L_1$  de distancia focal  $f$  (3). La distancia entre el orificio y la lente  $L_1$  es igual a  $f$ , proporcionando así iluminación colimada sobre el objeto. Una abertura circular (4) determina la extensión del área de iluminación en el objeto (transparencia), el cual se coloca en (5). El objeto se pone dentro de una entrada líquida para poder 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 (Goodman, 1968). El espectro de potencia obtenido es medido con un fotomultiplicador colocado en (7) (Alvarez y Machado, 1985).

illumination area on the objet (transparency) which is placed at (5). The objet is put inside a liquid gate in order to increase the signal to-noise ratio. The lens  $L_2$ , placed at a distance  $f$  (focal length of  $L_2$ ) from the objet, produces an exact Fourier transform of the objet (Goodman, 1968). The power spectrum obtained is measured with a photomultiplier placed at (7) (Alvarez and Machado, 1985).

### RADAR IMAGES (Digital method)

The word RADAR is an acronym for Radio Detection And Ranging. As its name

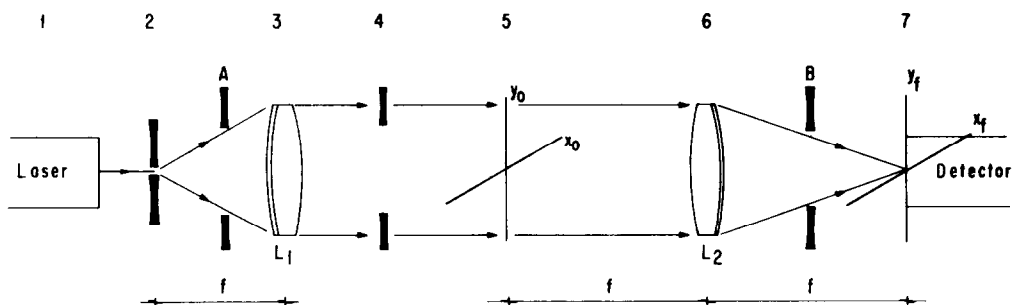


FIG. 1. Sistema óptico coherente para obtener el espectro de potencia de las imágenes del mar contenidas en la transparencia.

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

### IMAGENES DE RADAR (Método digital)

La palabra RADAR son las siglas (en inglés) de detección y alcance de radio. Como su nombre lo implica, el radar se desarrolló como medio de utilizar ondas de radio para detectar la presencia de objetos y determinar su rango (posición). Los sistemas de radar pueden o no producir imágenes y pueden estar en tierra, montados en una aeronave o en una nave espacial.

La resolución espacial de un sistema de radar se determina, entre otras cosas, por el tamaño de su antena. Para cualquier longitud de onda dada, mientras más grande sea la antena mejor será la resolución espacial. En

implies, radar was developed as a means of using radio waves to detect the presence of objects and determine their range (position). Radar systems may or may not produce images and they may be ground-based or mounted in an aircraft or spacecraft.

The spatial resolution of a radar system is determined, among other things, by the size of its antenna. For any given wavelength, the larger the antenna, the better the spatial resolution. On an aircraft it is very difficult to mount a rotating antenna that is very large. To circumvent this problem, most airborne radar remote sensing is done with systems that use an antenna fixed below the aircraft and pinted

## DISCUSION DE DOS METODOS PARA ANALIZAR SUPERFICIES

una aeronave es muy difícil montar una antena rotatoria que sea muy grande. Para resolver este problema, la mayor parte de la percepción remota por radar aereotransportado se realiza con sistemas que utilizan una antena fijada bajo la aeronave y apuntando hacia a un lado. Tales sistemas son llamados radar aereotransportado dirigido de lado (SLAR, por sus siglas en inglés). Los sistemas SLAR producen tiras continuas de imágenes representando áreas muy grandes en tierra, localizadas adyacentes a la línea de vuelo de la aeronave (Lillesand y Kiefer, 1979).

El principio básico de operación de un sistema SLAR se muestra en la Figura 2. La energía de la microonda es transmitida en pulsos muy cortos desde una antena. Estos pulsos de alta energía son emitidos en un período de tiempo del orden de microsegundos ( $10^{-6}$  seg). En la Figura 2a, se muestra la propagación de un pulso indicando las localizaciones del frente de onda en incrementos sucesivos de tiempo. Empezando con las líneas sólidas (numeradas del 1 al 10), el pulso transmitido se mueve hacia afuera radialmente desde la aeronave en un rayo enfocado. Muy pronto después del tiempo 6, el pulso alcanza la casa, y se muestra una onda reflejada (línea quebrada) empezando en el tiempo 7. En el tiempo 12 esta señal de retorno llega a la antena y se registra en ese tiempo en la gráfica de respuesta de la antena (Fig. 2b). En el tiempo 9 el frente de onda transmitido es reflejado del árbol y este "eco" llega a la antena en el tiempo 17. Debido a que el árbol es menos reflectivo de ondas de radio que la casa, se registra una señal más débil en la Figura 2b.

La manera en la cual se crean las imágenes SLAR se ilustra en la figura 3. A medida que la aeronave avanza, la antena (1), se repositona continuamente en la dirección de vuelo a la velocidad de la aeronave,  $V_a$ . La antena cambia de un modo transmisor a uno receptor por un interruptor sincronizador (2). Con cada pulso transmitido (3) se obtienen ecos de los rasgos del terreno que ocurren a lo largo del ancho de un rayo de antena. Estos ecos son recibidos por la antena aereotransportada y procesados para pro-

to the side. Such systems are termed side-looking airborne radar (SLAR). SLAR systems produce continuous strips of imagery depicting very large ground areas located adjacent to the aircraft flight line (Lillesand and Kiefer, 1979).

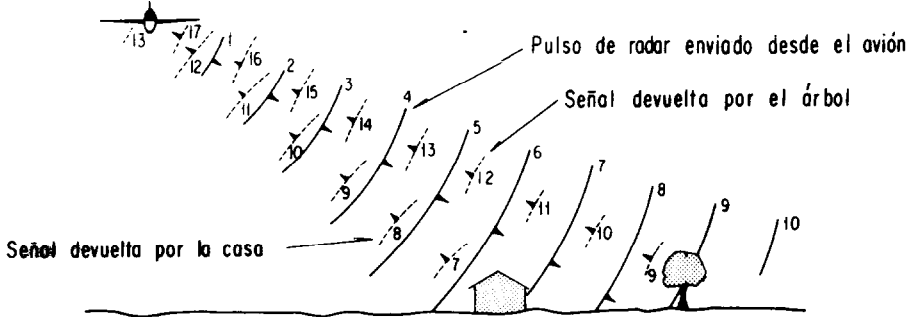
The basic operating principle of a SLAR system is shown in the Figure 2. Microwave energy is transmitted from an antenna in very short pulses. These high energy pulses are emitted over a time period on the order of microseconds ( $10^{-6}$ sec). In Figure 2a, the propagation of one pulse is shown by indicating the wavefront locations at successive increments of time. Beginning with the solid lines (Labeled 1 through 10), the transmitted pulse moves radially outward from the aircraft in a focused beam. Shortly after time 6, the pulse reaches the house, and a reflected wave (dashed line) is shown beginning at time 7. At time 12, this return signal reaches the antenna, and is registered at that time on the antenna response graph (Fig. 2b). At time 9, the transmitted wavefront is reflected from the tree and this "echo" reaches the antenna at time 17. Because the tree is less reflective of radio waves than the house, a weaker response is recorded in Figure 2b.

The manner in which SLAR images are created is illustrated in Figure 3. As the aircraft advances, the antenna (1) is continuously repositioned in the flight direction at the aircraft velocity  $V_a$ . The antenna is switched from a transmitter to a receiver mode by a synchronizer switch (2). Each transmitted pulse (3) return echoes from terrain features occurring along a single antenna beamwidth. These echoes are received by the airborne antenna and processed to produce an amplitude/time video signal (4). This signal is used to generate an image product in a film recorder (5). The signal modulates the intensity of a single line cathode ray tube (CRT), exposing an image line on the film. Thus, each line in the image product is a tonal representation of the strength of signals returned from a single radar pulse. Between lines, the film is advanced at a velocity  $V_f$ , which is proportional to the aircraft velocity  $V_a$ . In this

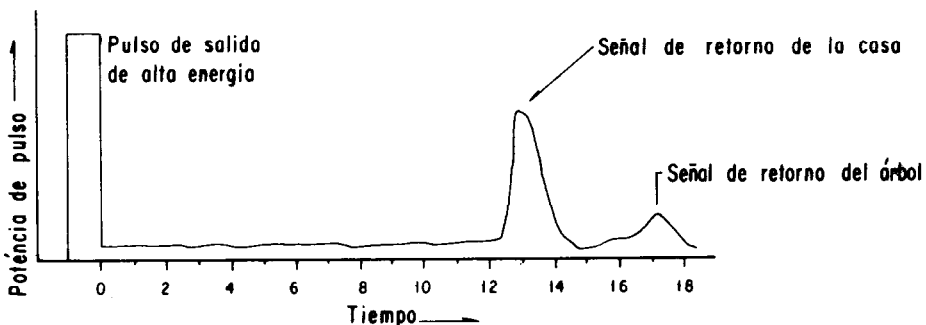
ducir una señal de video de amplitud/tiempo (4). Esta señal es utilizada para generar una imagen producto en una grabadora de película (5). La señal modula la intensidad de un tubo de rayo cátodo de una línea (CRT) exponiendo una línea en la película. Así, cada línea en la imagen producto es una representación tonal de la fuerza de las señales regresadas de un solo pulso o de radar. Entre líneas, la película se avanza a una velocidad  $V_f$ , la cual es proporcional a la velocidad  $V_a$  de la aeronave. De esta forma, la respuesta combinada de muchos pulsos dará una imagen producto bidimensional. Las tiras pueden obtener imágenes en ambos lados de la aeronave o solamente en uno (Lillesand y Kiefer, 1979).

way, the combined response of many pulses will yield a two-dimensional image product. Strips, may be imaged on both sides of the aircraft or only on one side (Lillesand and Kiefer, 1979).

In order to obtain SLAR images of the sea surfaces, a Motorola X-band (3.2 cm wavelength) AN/APS-94E model with a resolution of 30 m in range (perpendicular to the flight path) and a beam width of  $0.45^\circ$  in azimuth (parallel to the flight path), which for a typical range distance of 12.5 Km to target yields an azimuth resolution of 100 m can be used. These SLAR scenes can be digitized using an Optronics rotating drum digitizer with a  $25\mu\text{m}$  spot size corres-



a) Propagación de un pulso de radar (indicando la localización del frente de la onda en intervalos de tiempo 1-17)



b) Resultado de la señal de retorno

FIG. 2. Principio de operación de radar aerotransportado dirigido de lado (SLAR por sus siglas en inglés) después de Lillesand y Kiefer, 1979).

Operating principle of side looking airborne radar (SLAR) (after Lillesand and Kiefer, 1979).

## DISCUSION DE DOS METODOS PARA ANALIZAR SUPERFICIES

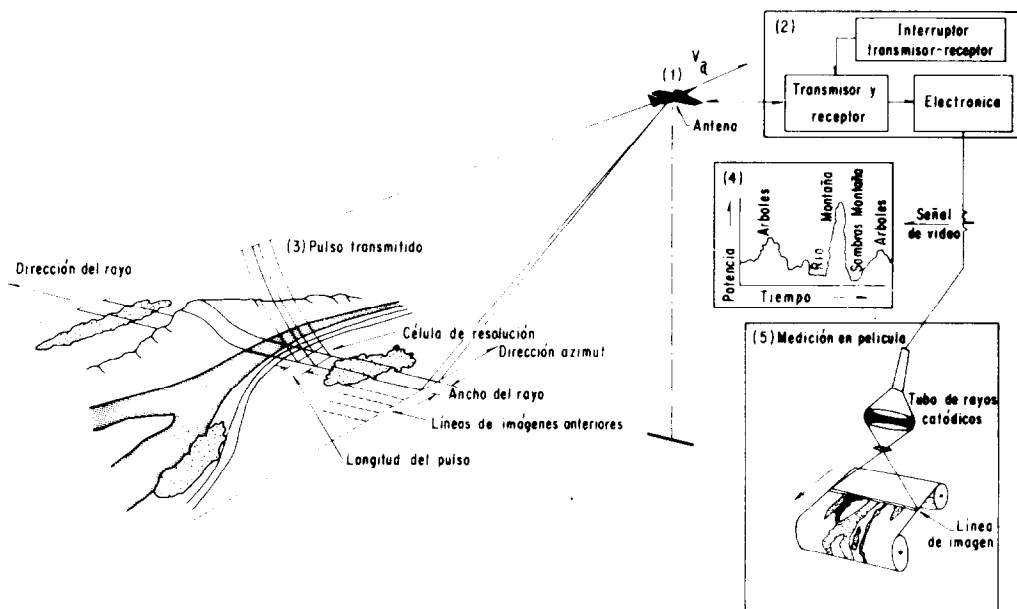


FIG. 3. Sistema de operación de radar aereotransportado dirigido de lado (después de Lillesand y Kiefer, 1979).  
Side looking airborne radar (SLAR) system operation (after Lillesand and Kiefer, 1979).

Para obtener imágenes SLAR de la superficie del mar puede utilizarse una banda X motorola (3.2 cm de longitud de onda) modelo AN/APS-94E con una resolución de 30 m de rango (perpendicular al sendero de vuelo) y una anchura de rayo de  $0.45^\circ$  de azimut (paralelo al sendero de vuelo); con el cual, para producir un blanco típico de 12.5 km, puede usarse resolución de azimut de 100 m. Estas escenas SLAR pueden digitalizarse por medio de un digitalizador de tambor rotatorio Optronics, con un tamaño de muestra de  $25\mu\text{m}$  correspondiendo a una área de tierra de  $6.25\text{ m}^2$ . Después, estas subescenas son sujetas a un análisis de transformada de Fourier digital bidimensional, para obtener el espectro de potencia direccional de las olas (Frank y Rosenfeld, 1984).

William McLeish y Duncan B. Ross (1983) utilizaron un radar Westinghouse APD-7, con una longitud de onda de 9 mm y una célula de resolución nominal 8-m instalada en una aeronave, para obtener imágenes del mar.

ponding to a  $6.25\text{ m}^2$  sample on the ground. After, these subscenes are subjected to two-dimensional digital Fourier transform (DFT) analysis, in order to obtain the directional power spectrum of the waves (Frank and Rosenfeld, 1984).

William McLeish and Duncan B. Ross (1983) used a Westinghouse APD-7 radar with a 9-mm wavelength and a nominal 8-m resolution cell installed in an aircraft in order to obtain sea images.

### DISCUSSION

One of the most common, versatile and economical forms of remote sensing is aerial photograph. The basic advantages of aerial photographs are: improved vantage point, capability to stop action, permanent recording, broadened spectral sensitivity, increased spatial resolution and geometric fidelity.

## DISCUSION

Una de las formas mas comunes, versátiles y económicas de percepción remota es la fotografía aérea. Las ventajas básicas de ésta son: un punto de ventaja mejorado, capacidad de detener la acción, registro permanente, sensibilidad espectral ampliada, resolución espacial aumentada y fidelidad geométrica.

Las fotografías aéreas pueden ser tomadas virtualmente con cualquier clase de cámara. Alvarez y Machado (1985) utilizaron una serie de cámaras Hasselblad de 70 mm para obtener fotografías de la superficie del mar.

En general, hay algunos problemas asociados cuando se toman fotografías verticales como; el desplazamiento de relieve, resolución fotográfica, variaciones de escala, desplazamiento de paralaje y exposición de película. La exposición de película puede ser influenciada por dos efectos externos que son: geométricos y atmosféricos. Probablemente, el efecto geométrico más importante que influye la exposición de película es la caída de la exposición. Este efecto es una variación de exposición en plano focal asociada con la distancia en que está un punto de imagen respecto del centro de la imagen. Debido a la caída de exposición, una escena de tierra de reflectancia espacialmente uniforme no produce una exposición espacialmente uniforme en el plano focal. En su lugar, para una escena de tierra uniforme, la exposición en el plano focal se encuentra a su máximo en el centro del formato de película y decrece con la distancia radial desde el centro. Otros efectos geométricos que causan variaciones en el plano focal de irradiancia son: sombreado diferencial, dispersión diferencial y reflexión especular.

Las fotografías también pueden mostrar los efectos de la dispersión diferencial atmosférica. La atmósfera modifica la intensidad y la composición espectral de la energía de iluminación utilizada en fotografía. Bajo condiciones claras, la luz celeste se caracteriza generalmente por una alta proporción de energía "azul" debido a la dominan-

Aerial photographs can be made with virtually any type of camera. Alvarez and Machado (1985), used an array of 70 mm Hasselblad cameras in order to obtain photographs of the sea surface.

In general, there are some problems associated when vertical photographs are taken, such as relief displacement, photographic resolution, scale variations, parallax displacement and film exposure. Film exposure can be influenced by two extraneous effects which are: geometric and atmospheric. Probably the most important geometric effect influencing film exposure is exposure fall-off. This effect is a variation in focal plane exposure purely associated with the distance an image point is from the image center. Because of fall-off, a ground scene of spatially uniform reflectance does not produce spatially uniform exposure in the focal plane. Instead, for a uniform ground scene, exposure in the focal plane is at a maximum at the center of the film format and decreases with radial distance from the center. Other geometric effects that cause variations in focal plane irradiance are: differential shading, differential scattering and specular reflection.

Photographs may also show the effects of differential atmospheric scattering. The atmosphere modifies the intensity and spectral composition of the illuminating energy used in photography. Under clear conditions, skylight is generally characterized by a high proportion of "blue" energy due to the dominance of Rayleigh scattering of short wavelength energy by the gas molecules in the atmosphere. Rayleigh scatter is always accompanied by some degree of Mie scatter owing to the presence of such atmospheric constituents as smoke, dust, or water droplets. In short, the intensity and spectral composition of photographic source energy vary with atmospheric conditions, time and location.

The atmosphere affects exposure in two almost contradictory ways. First, it attenuates (reduces) the energy illuminating a ground object. Second, it acts as a reflector itself, adding scattered "hazelight" or

## DISCUSION DE DOS METODOS PARA ANALIZAR SUPERFICIES

cia de la dispersión de Rayleigh; es decir, dispersión de energía de longitud de onda corta debido a las moléculas de gases en la atmósfera. La dispersión de Rayleigh está siempre acompañada por algún grado de dispersión Mie a causa de la presencia de constituyentes atmosféricos tales como humo, polvo, o gotas de agua. En resumen, la intensidad y la composición espectral de la fuente de energía fotográfica varían con las condiciones atmosféricas, el tiempo y la localidad.

La atmósfera afecta la exposición en dos maneras casi contradictorias. Primero, atenúa (reduce) la energía que ilumina el objeto en tierra. Segundo, actúa como reflector, añadiendo "luz neblinosa" o "luz aérea" a la exposición. La luz aérea se manifiesta particularmente en fotografías a gran altitud (Lillesand y Kiefer, 1979). La iluminación de la cámara se debe en gran parte a la luz reflejada de la superficie, ya que la luz dispersada desde abajo de la superficie es de una menor intensidad. La reflectividad no define completamente la luz dirigida hacia la cámara, ya que el cielo mismo puede tener variaciones angulares de iluminación. Con la iluminación celeste entrando al análisis, el problema pierde precisión, ya que las condiciones del cielo no pueden por lo general ser ordenadas. Sin embargo, para obtener un mapeo de uno a uno del ángulo normal de la superficie de la película, es necesario que la parte del cielo de la cual la luz es reflejada hacia la cámara tenga variaciones monotónicas de iluminación con ángulo de cenit. Así, para una utilidad óptima, el cielo debe estar ya sea claro o uniformemente nublado (Denzil, 1969).

Para un buen análisis de la superficie marina usando fotografía aérea es necesario tener en mente todos los problemas delineados con anterioridad; sin embargo, algunas veces se asume que estos son mínimos; en otro caso, las distorsiones se corrigen utilizando métodos computacionales.

Cuando se estudian fotografías aéreas de la superficie marina, la interpretación consistirá en conocer las diferentes ondas presentes en el área estudiada asociada con su energía y dirección.

"airlight" to the exposure. Airlight manifests itself particularly in high altitude photographs (Lillesand and Kiefer, 1979). The camera illumination is largely due to the light reflected from the surface, since light scattered from beneath the surface is normally of somewhat lower intensity. Reflectivity does not completely define the light directed toward the camera, since the sky itself may have angular variations of luminance. With sky luminance entering the analysis the problem loses precision, because the sky conditions can not be prescribed in general. To obtain a one-to-one mapping of the surface normal angle onto the film, however, it is necessary that the part of the sky from which light is reflected into the camera have monotonic variations of luminance with zenith angle. Thus, for optimum utility, the sky must be either clear or uniformly overcast (Denzil, 1969).

For a good analysis of the sea surface using aerial photographs, it is necessary to keep in mind all the problems delineated above; however, sometimes it is assumed that these are minimum; in another case, the distortions are corrected using computational methods.

When one studies aerial photographs of the sea surface, the interpretation will consist in knowing the different waves present in the studied area, associated with their energy and direction.

It is important to note that the direction in which the water wave travels can not be specified completely from the photograph. The 180° ambiguity persists throughout this analysis so that the optical directional spectrum is obtained only to extent that a priori information excludes wave travel in a direction opposing the wind (Denzil, 1969).

The optical directional spectrum contains information about the wavenumber and about the direction of the waves with respect to the given reference system. The intensity, as a function of wavenumber, measured in the Fourier plane by the detector, is proportional to the energy assigned to the waves in the marine surface (Denzil,



Es importante notar que la dirección en la cual viajan las ondas no puede especificarse completamente a partir de la fotografía. La ambigüedad de 180° persiste a través de este análisis de tal forma que el espectro direccional óptico se obtiene solamente para extender que una información *a priori* excluye el viaje del oleaje en una dirección opuesta al viento (Denzil, 1969).

El espectro direccional óptico contiene información acerca del número de onda y la dirección de ésta con respecto al sistema de referencia dado. La intensidad, como función del número de onda medida en el plano de Fourier por el detector, es proporcional a la energía asignada a las olas en la superficie marina (Denzil, 1969); por su parte la localización o posición en el plano de Fourier de las frecuencias contenidas en el espectro, corresponde a la información contenida en la imagen (Alvarez y Machado, 1985). Debe recordarse que con la técnica fotográfica los espectros obtenidos pertenecen a un cierto intervalo de tiempo muy corto en un tiempo fijo.

La transparencia conteniendo la superficie marina utilizada en el sistema óptico para obtener el espectro de potencia, se considera como un objeto donde los cambios de fase presentados son irrelevantes (objeto de amplitud). Por esta razón se espera que el espectro de potencia tenga simetría (Bracewell, 1965).

Sin embargo, existen algunos problemas asociados con el método, tales como las limitaciones que surgen de la resolución de la película, la atenuación de algunas frecuencias, problemas con la iluminación y contraste al tomar las fotografías aéreas, problemas con aberraciones presentes en el sistema óptico y resolución del mismo (Alvarez y Machado, 1985).

Alvarez y Machado (1985) encontraron que la película Kodak Linograph Shellburst 2476 ESTAR AH Base da un contraste muy alto y tiene alta resolución. Ellos hicieron pruebas para determinar la influencia de efectos de exposición, durante el registro de la imagen del mar, en el espectro de energía

(1969), and the location or position in the Fourier plane of the frequencies contained in the spectrum corresponds to the information contained in the image (Alvarez and Machado, 1985). It should be remembered that with the photographic technique, the spectra obtained pertain to a certain very short time interval at some fixed time.

The slide containing the marine surface used in the optical system to obtain the power spectrum, is considered as an object where the phase changes presented are irrelevant (amplitude object). For this reason it is expected the power spectrum to have dual symmetry (Bracewell, 1965).

However, there are some problems associated with the method such as limitations arising from film resolution, attenuation of some frequencies, problems with the illumination and contrast in taking the aerial photographs, problems with aberrations present in the optical system and resolution of the optical system (Alvarez and Machado, 1985).

It was found (Alvarez and Machado, 1985), that Kodak Linograph Shellburst Film 2476 ESTAR AH Base gives very high contrast and has high resolution. Tests were made to determine the influence of exposure effects, during recording of the sea were made to determine the influence of exposure effects, during recording of the sea image, on the energy spectrum obtained in the optical processor. If an adequate exposure is not achieved, it is preferable to have an under-exposed slide to an over-exposed one, because the former gives better results for the measurements of the power spectrum by letting more energy through. In the event of camera movement, as well as wave movement, during exposure, a lower wave number will represent the high-frequency limit. The long wavelength limit is governed only by the sample contained on the film, which is naturally dependent on camera altitude and focal length. The altitude is a very important factor, because if higher altitudes are involved, a better result is obtained when analyzing the power spectrum. For a higher altitude the number of waves present is larger

## DISCUSION DE DOS METODOS PARA ANALIZAR SUPERFICIES

obtenido en el procesador óptico. Si no se alcanza una exposición adecuada, es preferible tener una transparencia subexpuesta a una sobreexpuesta, debido a que la primera da mejores resultados para las medidas del espectro de potencia dejando pasar más energía. En el caso de movimiento de cámara también como del movimiento del oleaje durante la exposición, un bajo número de onda representará el límite de alta frecuencia. El límite de longitud de onda larga está gobernado solamente por la muestra contenida en la película, la cual es naturalmente dependiente de la altitud de la cámara y de la longitud focal. La altitud es un factor muy importante, ya que si se encuentran involucradas grandes altitudes se obtiene un mejor resultado cuando se analiza el espectro de potencia. Para una mayor altitud, el número de ondas presente es más grande y la longitud de onda en la película es menor. Esto significa que la información en el plano de Fourier aparecerá a cierta distancia lejos del patrón de Airy (componente dc) evadiendo así el ruido causado por los anillos en la función de Airy.

Otro método para obtener imágenes de la superficie marina es el sistema de radar. Entre las varias técnicas de microondas desarrolladas para medir olas superficiales oceánicas desde aeronaves o satélites, se considera que las imágenes obtenidas por medio de radar contienen la mayor cantidad de información, ya que poseen el potencial de medir longitud de onda, dirección del oleaje y altura de las olas en el océano. Sin embargo, la imagen de radar no es un mapa uno a uno de la escena en la superficie oceánica. Algunas olas oceánicas no son captadas por el radar, haciendo entonces imposible el recobrar el espectro completo bidimensional de la onda oceánica. La ausencia de imágenes ocurre por ejemplo, cuando la función de transferencia de radar, que describe la conexión entre el campo de la onda real y la imagen de radar, es tan pequeña que la señal de radar cae debajo del nivel de ruido para ciertos parámetros de olas oceánicas (Alpers y Ross, 1981). Para un sistema de radar de apertura real (SLAR) la modulación de la sección transversal del radar por parte de las grandes ondas oceánicas, es responsable de la formación de imágenes de olas.

and the wavelength in the film is smaller. This means that the information in the Fourier plane will appear at a certain distance away from the central Airy pattern (dc component), thus avoiding the noise caused by the rings in the Airy function.

Another method for obtaining images of the sea surfaces is the radar system. Among the various microwave techniques developed for measuring ocean surface waves from aircraft or satellites, imaging radars are considered to contain the greatest amount of information. They have the potential of measuring wavelength, wave direction, and wave height of the ocean waves. However, the radar image is not a one-to-one map of the imaged scene on the ocean surface. Some ocean waves are not imaged by the radar, thus making it impossible to recover the full two-dimensional ocean wave spectrum from radar images. Nonimaging occurs, e.g., when the radar transfer function, which describes the connection between the real wave field and the radar image, is so small that the radar signal drops below noise level for certain ocean wave parameters (Alpers and Ross, 1981). For a real aperture radar system (SLAR) the modulation of the radar cross section by the long ocean waves is responsible for the formation of wave images.

It exists some parameters very important, which we need to keep in mind in order to make a good interpretation from SLAR images, e. g., the resolution of a SLAR system in the azimuth direction, which is determined by the angular beamwidth of the antenna and the ground range (Lillesand and Kiefer, 1979). All SLAR imagery of ocean surface waves known show that swell is not, or is very poorly imaged, when traveling in azimuthal direction. However, SLAR imagery of wind generated waves during high sea states shows very little azimuthal dependence due to strong nonlinear hydrodynamics effects leading to an almost isotropic distribution of the Bragg scattering waves. But still, the waves are imaged slightly better when they propagate in radial direction toward the antenna (Alpers and Ross, 1981).

Existen algunos parámetros muy importantes que necesitamos tener en mente para poder hacer una buena interpretación de imágenes SLAR. Por ejemplo, la resolución de un sistema SLAR en la dirección del azimut, la cual es determinada por la anchura de rayo angular de la antena y el rango de tierra (Lillesand y Kiefer, 1979). Todas las imágenes conocidas, de ondas oceánicas superficiales, muestran que ondas de Leva no se captan o se captan muy pobremente cuando se viaja en una dirección azimutal. Sin embargo, las imágenes SLAR de olas generadas por el viento durante estados de alta mar, muestran muy poca dependencia azimutal debido a fuertes efectos hidrodinámicos no lineales, que conducen a una distribución casi isotrópica de las ondas de dispersión de Bragg. Aun así, las olas son captadas un poco mejor cuando se propagan en dirección radial hacia la antena (Alpers y Ross, 1981).

Un punto muy importante es que las señales de radar no son relativamente afectadas por las nubes, humo o niebla, pero los ecos de una alta precipitación pueden ser considerables. Este rasgo, combinado con una operación diurna/nocturna, hace del radar una herramienta particularmente valiosa cuando se llevan a cabo operaciones que dependen del tiempo (Lillesand y Kiefer, 1979).

No haciendo caso de la longitud de onda, las señales de radar pueden transmitirse y/o recibirse en diferentes modos de polarización. Esto es, la señal puede filtrarse de tal manera que sus vibraciones de ondas eléctricas están restringidas a un solo plano perpendicular a la dirección de propagación de la ola. Una señal SLAR puede transmitirse ya sea en un plano horizontal (H) o vertical (V) (Lillesand y Kiefer, 1979).

Se ha encontrado que los principales factores que influyen la intensidad de la señal de retorno de los objetos, son sus características geométricas y eléctricas (Lillesand y Kiefer, 1979). El efecto relativo de la geometría sensor/objeto en la intensidad de las señales de regreso del radar está compuesta por el efecto de rugosidad de la su-

A very important point is that the radar signals are relatively unaffected by clouds, smoke, fog, and echoes from heavy precipitation can be considerable. This feature, combined with day/night operation, makes radar a particularly valuable tool when time-dependent operations are undertaken (Lillesand and Kiefer, 1979).

Irrespective of wavelength, radar signals can be transmitted and/or received in different modes of polarization. That is, the signal can be filtered in such a way that its electrical wave vibrations are restricted to a single plane, perpendicular to the direction of wave propagation. A SLAR signal can be transmitted in either a horizontal (H) or a vertical (V) plane (Lillesand and Kiefer, 1979).

It has been found that the primary factors influencing objects to return signal intensity are their geometrical and electrical characteristics (Lillesand and Kiefer, 1979). The effect of the relative sensor/object geometry on the intensity of radar return signals is compounded by the effect of surface roughness. The roughness of an object's surface is a function of its relief variations in relation to the wavelength of the reflected energy. Surfaces with roughness essentially equal to or greater than the transmitted wavelength appear "rough". The electrical characteristic of terrain features works closely with their geometrical characteristics to determine the intensity of radar returns. One measure of an object's electrical character is the complex dielectric constant. Water has a dielectric constant of 80 approximately.

The geometry of SLAR imagery is fundamentally different from that of photography. This difference basically results because SLAR is a distance rather than an angle measuring system. The influences this has on image geometry are many and varied. I will mention only two: scale distortion and relief displacement. SLAR systems use one of two types of image recording systems. A slant range image recording system involves a constant CRT sweep rate across each line. Consequently, the spacing between return signals on slant range imagery is directly pro-

perficie. La rugosidad de la superficie de un objeto es una función de las variaciones de su relieve en relación a la longitud de onda de la energía reflejada. Superficies con rugosidades esencialmente iguales o mayores que la longitud de onda transmitida aparecen "rugosas". La característica eléctrica de los rasgos del terreno trabaja muy de cerca con sus características geométricas para determinar la intensidad de los retornos del radar. Una medida del carácter eléctrico de un objeto es la constante dieléctrica compleja. El agua tiene una constante dieléctrica de 80, aproximadamente.

La geometría de las imágenes SLAR es fundamentalmente diferente a la de las fotografías. Esta diferencia resulta básicamente debido a que SLAR es un sistema de medición de distancia y no de ángulo. Las influencias que esto tiene sobre la geometría de imagen son muchas y variadas. Menciono dos solamente: distorsión de escala y desplazamiento de relieve. Los sistemas SLAR utilizan uno de dos tipos de sistemas de registro de imágenes. Un sistema registrado de imágenes de rango inclinado incluye una velocidad de barrido CRT constante a través de cada línea. Consecuentemente, este espaciamiento entre señales de retorno en imágenes de rango inclinado es directamente proporcional al intervalo de tiempo entre ecos de rasgos del terreno adyacente. Este intervalo es directamente proporcional a la distancia inclinada y no a la horizontal entre el sensor y cualquier objeto dado. En un sistema de registro de imágenes de rango de tierra, el barrido CRT incorpora una corrección de cronometraje hiperbólico en el cual el espacio entre puntos de la imagen es aproximadamente proporcional a la distancia horizontal de tierra entre los rasgos del terreno. La escala del rango variará con cambios de la altitud de la aeronave, y la escala de azimut será dependiente de la sincronización precisa entre la velocidad de la aeronave y el transporte proporcional de la película pasando la CRT. Mantener una escala consistente en la colecta y registro de datos SLAR es un trabajo complejo, ya que la escala en la dirección del rango se determina por la velocidad de la luz, y la escala en la dirección del azimut se determina por la velocidad de la

portional to the time interval between echoes from adjacent terrain features. This interval is directly proportional to the slant, rather than horizontal, distance between the sensor and any given object. In a ground range image recording system, the CRT sweep incorporates a hyperbolic timing correction in which the spacing between image points is approximately proportional to the horizontal ground distance between terrain features. The range scale will change in aircraft altitude, and the azimuth scale will be dependent on precise synchronization between the aircraft ground speed and the proportional film transport speed past the CRT. Maintaining consistent scale in the collection and recording of SLAR data is a complex task. Whereas scale in the range direction is determined by the speed of light, scale in the azimuth direction is determined by the speed of the aircraft. To reconcile and equalize these independent scales, strict control of flight parameters is needed. In most systems, this is provided by an inertial navigator and control system (Lillesand and Kiefer, 1979).

Relief displacement in SLAR images is one-dimensional and perpendicular to the flight line. However, unlike photography, the direction of relief displacement is reversed. This is because radar images display ranges, or distances, from terrain features to the antenna. When a vertical feature is encountered by a radar pulse, the top of the feature is reached before the base. Accordingly, return signals from the top of a vertical feature will reach the antenna before the returns from the base of the feature. This will cause a vertical feature to "lay over" the closer features, making it appear to lean toward the nadir. This radar layover effect, most severe at near range, is compared to photographic relief displacement (Fig. 4) (Lillesand and Kiefer, 1979).

In order to make a correct interpretation of the SLAR images of the sea surface, a two-dimensional digital Fourier transform must be obtained. The only problem I see here is when it is necessary to compute a lot of data contained in the numerical matrix obtained from the SLAR images, because

aeronave. Para reconciliar e igualar estas escalas independientes, se necesita un control estricto de los parámetros de vuelo. En la mayoría de los sistemas esto es provisto por un sistema de navegante inercial y de control (Lillesand y Kiefer, 1979).

Los desplazamientos de relieve en las imágenes SLAR son unidimensional y perpendiculares a la línea de vuelo. Sin embargo, a diferencia de la fotografía, la dirección del desplazamiento de relieve está invertida. Esto se debe a que las imágenes de radar muestran rangos o distancias de los rasgos del terreno a la antena. Cuando se encuentra un rasgo vertical por un pulso de radar, la punta del rasgo se alcanza antes que la base. De acuerdo a esto, las señales de retorno de la punta de un rasgo vertical llegarán a la antena antes que los retornos de la base del rasgo, esto causará que un rasgo vertical se "coloque sobre" los rasgos más cercanos, haciendo que parezca que se inclina hacia el nadir. Este efecto, más severo en rasgos cercanos, se compara al desplazamiento de relieve fotográfico (Fig. 4) (Lillesand y Kiefer, 1979).

Para poder hacer una interpretación correcta de imágenes SLAR de la superficie del mar, se debe obtener una transformada de Fourier digital bidimensional. El único problema se observa cuando es necesario computar muchos datos contenidos en la matriz numérica obtenida de las imágenes SLAR, debido a que los cálculos FFT en dos dimensiones toman mucho tiempo y espacio en la computadora. Por esta razón, deben escogerse pequeñas áreas de las imágenes SLAR para análisis rápidos o para detectar imágenes débiles de olas (ya que imágenes débiles de olas se detectan más fácilmente en una muestra fotográfica), en tanto que las transformadas digitales (DFT) se han utilizado para análisis más cuantitativos. Comparaciones entre estimaciones de OFT y DFT de longitudes de onda dominantes y de dirección no han revelado ningún desacuerdo significativo (Vesecky, 1982).

## CONCLUSIONES

Para poder hacer una buena interpretación de imágenes de superficies marinas

calculaciones such as FFT in two dimensions, take a lot of time and so much space in the computer. For this reason, small areas from the SLAR image must be chosen in order to obtain the directional power spectrum.

Generally, the optical transforms (OFT's) have been used for a quick analyses or to detect weakly imaged waves (since weakly imaged waves are more easily detected in a photographic display) and the digital transforms (DT's) for more quantitative analysis. Comparisons between OFT and DFT estimates of dominant wavelength and direction have not revealed any significant disagreement (Vesecky, 1982).

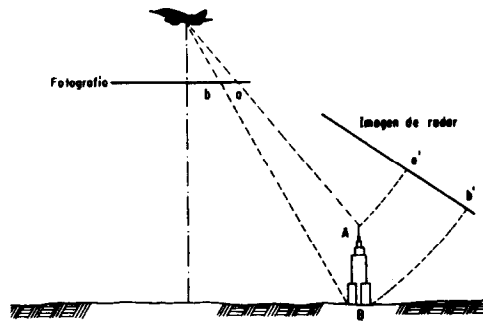


FIG. 4. Comparación de distorsión de relieve entre imágenes de fotografía e imágenes de radar (después de Lillesand y Kiefer, 1979).

Comparison relief distortion between photographs and SLAR images (after Lillesand and Kiefer, 1979).

## CONCLUSIONS

In order to make a good interpretation of images of the sea surfaces, it is necessary to keep in mind all the distortion problems involved in the photographs or SLAR images.

I may conclude that a "good optical system" for processing can be formed by a pair achromatic doublets, by taking the proper alignment precautions.

By the use of optical analysis it is possible to resolve the variation of density in the photographic emulsion into the compo-

## DISCUSION DE DOS METODOS PARA ANALIZAR SUPERFICIES

es necesario tener en mente todos los problemas de distorsión involucrados en fotografías o en imágenes SLAR.

Puede concluirse que un "buen sistema óptico" para el procesamiento se puede formar con un par de lentes (dobletes) acromáticos, tomando las precauciones adecuadas de alineamiento.

Por medio del uso de análisis óptico es posible resolver las variaciones de densidad en la emulsión fotográfica en las componentes del espectro de Fourier bidimensional de la superficie. Cuando una transparencia de una superficie se coloca en un plano focal de una lente, la transformada de Fourier de las variaciones aparece como amplitud de luz en el otro plano focal. En el registro de la transformada, la distribución de densidad representa distribución de pendiente, la dirección de la ola es el ángulo de azimut, el número de onda es proporcional al radio desde el centro, y la densidad óptica está relacionada funcionalmente con la amplitud espectral.

En el caso de un movimiento de la cámara, lo mismo que un movimiento de la onda durante la exposición, un bajo número de onda representará el límite de alta frecuencia. El límite de longitud de onda está gobernado solamente por la muestra contenida en la película, la cual depende naturalmente de la altitud de la cámara y de la longitud focal.

Un examen de la técnica fotográfica revela un número de limitaciones. Es estrictamente aplicable sólo durante la luz del día para mares relativamente en calma bajo condiciones de cielo despejado.

Las comparaciones entre las estimadas de OFT y DFT de longitud de onda dominante y dirección de las olas no han revelado ningún desacuerdo significativo.

Para las imágenes SLAR de ondas oceánicas, se puede concluir:

a) Las ondas oceánicas se captan mejor cuando viajan en la dirección de alcance (por ejemplo, perpendicular a la dirección de vuelo).

nents of the two-dimensional Fourier spectrum of the surface. When a transparency of a surface photograph is placed in one focal plane of a lens, the Fourier transform of the variations appears as light amplitude in the other focal plane. In the transform recording, density distribution represents slope distribution, wave direction is the azimuth angle, wavenumber is proportional to the radius from the center, and the optical density is functionally related to the spectral amplitude.

In the event of camera movement, as well as wave movement, during exposure, a lower wave number will represent the high-frequency limit. The long wavelength limit is governed only by the sample contained on the film, which is naturally dependent on camera altitude and focal length.

An examination of the photographic technique reveals a number of limitations. It is strictly applicable only in daylight for relatively smooth seas under clear sky conditions.

Comparisons between OFT and DFT estimates of dominant wavelength and direction of the waves have not revealed any significant disagreement.

For SLAR images of ocean waves can be concluded:

a) Ocean waves are imaged best when traveling in the range direction (i. e., perpendicular to the flight direction).

b) Swell traveling in the azimuth direction (i.e., in the flight direction) is not, or only poorly, imaged.

c) For high sea states, ocean waves are imaged at all directions, although the greatest image contrast still occurs when they travel in range direction:

d) Waves are better imaged at HH polarization than at VV polarization because of the higher contribution from tilt modulation.

Radar signals are relatively unaffected by clouds, smoke and fog. This feature, combined with day/night operation, makes radar a particularly valuable tool (compared with

b) Ondas de Leva que viajan en la dirección del azimut (por ejemplo, en la dirección de vuelo), no son captadas o sólo se captan pobremente.

c) Para estados de alta mar, las olas oceánicas se captan en todas direcciones, aunque el contraste de imagen más grande aún ocurre cuando viajan en la dirección de alcance,

d) Las olas se captan mejor en la polarización HH que en la VV debido a la contribución más alta de la modulación de inclinación.

Las señales de radar no son relativamente afectadas por nubes, humo y neblina. Este rasgo, combinado con una operación diurna/nocturna, hace del radar una herramienta particularmente valiosa (comparada con las fotografías) cuando se llevan a cabo operaciones que dependen del tiempo.

#### LITERATURA CITADA

ALPERS Werner R., Ross Duncan B. and Rufenach Clifford L. On the detectability of ocean surface waves by real and synthetic aperture radar. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 86, No. C7, July, 1981.

ALVAREZ Borrego Josué and Marco A. Machado. Optical analysis of a simulate image of the sea surface. *Applied Opticas*, Vol. 24, No. 7, April, 1985.

photography) when time dependent operations are undertaken.

---

BARBER, N. E. Finding the direction of travel of sea waves. *Nature London*, 154, 1954.

BRACEWELL R. The fourier transform and its applications. McGraw-Hill, New York, 1965, pp. 14-16.

DENZIL Stilwell Jr. Directional energy spectra of the sea from photographs. *Journal Geophysical Research*, Vol. 74, No. 8, April, 1969.

FRANK I. González and C. L. Rosenfeld. SLAR and in situ observations of ocean swell modification by currents and bathymetry at the Columbia River entrance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-22, No. 6, November 1984.

GOODMAN Joseph. Introduction to Fourier optics. McGraw-Hill, New York, 196

JERLOV N. G. Marine Optics, Vol. 14 American Elsevier, New York, 1976.

LILLESAND M. Thomas and Kiefer W. Ralph. Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley and Sons, New York, 1979.

VESECKY John F. and Stewart Robert H. The observation of ocean surface phenomena using imagery from SEASAT synthetic aperture radar: An assessment. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 87, No. C5, April, 1982.

WILLIAM MLeish and Duncan B. Ross. Imaging radar observations of directional properties of ocean waves. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 88, No. C7, May 1983.