

# 用光学傅里叶变换方法对合成孔径雷达 海洋波浪图像的频谱分析

张 凤 林\*  
(天津大学精密系)

## 提 要

本文将介绍应用光学傅里叶变换方法检测海洋波浪的存在、波浪周期及传播方向。原始信息从卫星运载合成孔径雷达的底片上得到。文章将给出傅里叶变换结果,并进行适当的讨论。

本文将给出对合成孔径雷达海洋波浪图像进行光学频谱分析的原理和方法,并以侦察和测量位于苏格兰西北约 200 公里的英国北海 Jasin 的波浪为实例作说明。

## 一、原 理

合成孔径雷达探测的海洋波浪可以被看做各种频率反射位相光栅的迭加,在底片上成像后变为振幅调制光栅。把原始信息底片经光学傅里叶变换后,其衍射图形应该存在着两个次极大值。

实际上,对一个圆孔所限定的观察范围,可以用以下的数学公式来描述输入信息

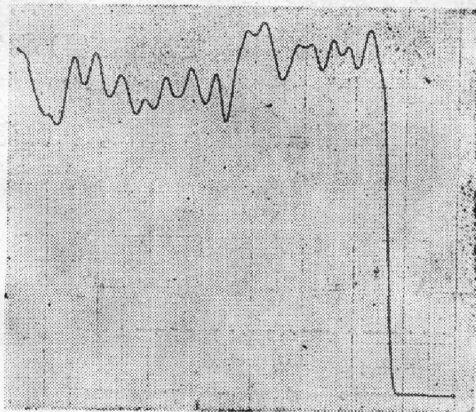


图 1 海洋波浪图象在底片上的  
密度分布曲线

Fig. 1 Image density for sea waves  
on a input film

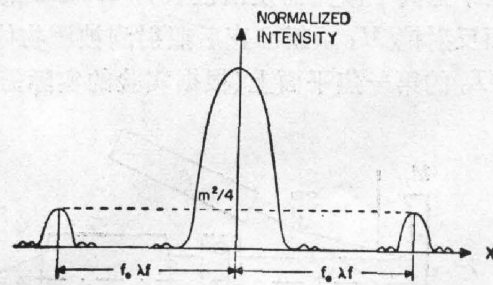


图 2 正弦调幅光栅夫琅和费衍射图的截面图

Fig. 2. Cross section of the Fraunhofer  
diffraction pattern of a sinusoidal amplitude  
grating

收稿日期: 1981年3月9日

\* 赴英国伦敦大学帝国理工学院进修时的工作

$$\left(\text{circ } \frac{r}{R}\right) \left[ \frac{1}{2} + \frac{m}{2} \cos(2\pi f_0 x) \right], \quad (1)$$

其中

$$\text{circ} = \begin{cases} 1 & \text{当 } |r| \leq R \text{ (在孔径内)} \\ 0 & |r| > R \text{ (在孔径外)} \end{cases} \quad (2)$$

是有限圆孔径。而  $[1/2 + m \cos(2\pi f_0 x)/2]$  是周期为  $f_0$  的振幅调制光栅的透过特性。图 1 给出了海洋波浪图像在底片上的密度分布的典型情况，它好象很多正弦光栅的迭加。在进行光学傅里叶变换时，在一定的平面上得到的衍射像，其振幅可以用下式表示：

$$\frac{c}{2} \left\{ \frac{J_1\left(\frac{2\pi R \sqrt{x^2+y^2}}{\lambda f}\right)}{\frac{2\pi R \sqrt{x^2+y^2}}{\lambda f}} + \frac{m}{2} \frac{J_1\left(\frac{2\pi R \sqrt{(x+f_0\lambda f)^2+y^2}}{\lambda f}\right)}{\frac{2\pi R \sqrt{(x+f_0\lambda f)^2+y^2}}{\lambda f}} + \frac{m}{2} \frac{J_1\left(\frac{2\pi R \sqrt{(x-f_0\lambda f)^2+y^2}}{\lambda f}\right)}{\frac{2\pi R \sqrt{(x-f_0\lambda f)^2+y^2}}{\lambda f}} \right\}. \quad (3)$$

从图 2 可以看到，如果我们考虑到光栅调制在一般情况下是很弱的，则衍射强度的次极大值是很小的。假如我们把  $f_0$  看做海洋波浪形成光栅的名义频率，可以很容易估算出其数量大小。

## 二、实验与测试

海洋波浪的检测法是将海洋波浪成像在人造卫星运载的合成孔径雷达底片上。被检测的信息记录在条带形的底片上(底片图像对应于海面上 35 公里宽条带状的覆盖区，比例尺约为 1/700000)，而在傅里叶变换光学台上进行的。实验的光学处理装置如图 3 所示，在这个系统中氩离子激光器发出波长为 488nm 的准直光束，通过扩束镜(空间滤波器)  $SP_1$ ，由抛物面反射镜  $M_1$  重新准直后照射到被测物体  $O$ (信息底片)。物体  $O$  位于第一组傅里叶透镜  $FTL_1$  的第一焦平面上(根据实验的实际需要，决定是否用液槽  $LC$ )，因而，在物镜第二

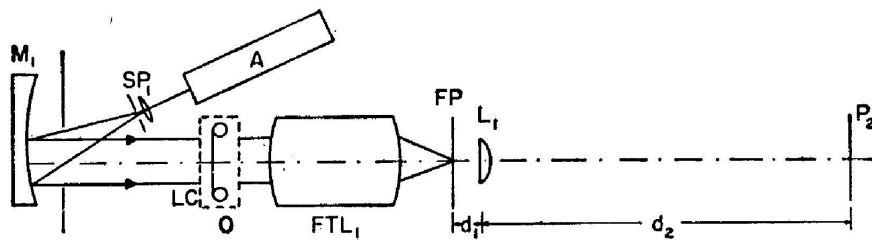


图 3 光学处理装置

A—氩离子激光器( $\lambda=488\text{nm}$ );  $SP_1$ —空间滤波器;  $M_1$ —抛物面反射镜; O—物体(信息底片); LC—液槽;  
 $FTL_1$ —傅里叶变换透镜( $f=700\text{mm}$ ); FP—傅里叶平面;  $L_1$ —放大用透镜;  $P_2$ —最终像平面

Fig. 3 The optical processor.

A—argon-ion laser( $\lambda=488\text{nm}$ );  $SP_1$ —spatial filter;  $M_1$ —parabolic mirror; O—object (input film); LC—liquid gate;  $FTL_1$ —fourier transform lens ( $f=700\text{mm}$ ); FP, —Fourier plane;  $L_1$ —Magnifying lens;  $P_2$ —final image plane

焦平面上可以得到物像的傅里叶变换结果。从图 1 标准密度测量的结果可知,在极大值和零级之间距离约 800 nm,这一信息表明,在第二焦平面上傅里叶变换结果必须被放大到足够分辨出次极大值的程度。同时,标准密度测量表明,由于振幅的调制,在次极大值中光的衍射强度是很弱的。基于这一原因,我们在光学系统中采用了平凸透镜  $L_1$ ,它可以把傅里叶平面上光强度分布图象放大 15 倍,同时用振幅滤波器减小零级的光强度。在傅里叶焦平面上应用高通振幅滤波器可以得到很好的结果。图 4 所示的高通限幅滤波器,实际是记录在 Ilford Ortho 底片上的夫琅和费衍射图像,最后在像平面  $P_2$  的底片上得到被放大和滤波的结果。

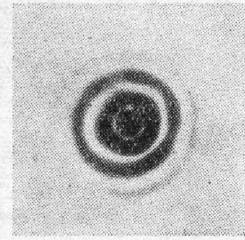


图 4 高通限幅滤波器(原始记录在 Ilford Ortho 底片上)  
Fig. 4 The high-pass amplitude filter (originally recorded on Ilford Orthofilm)

这个装置的另一种实验安排是为了处理原始信息底片。从图 5 可知,二次傅里叶变换透镜  $FTL_2$  是用来获得信息底片的图像,移开滤波器和放大透镜,以便使光束通过第二组傅里叶变换透镜  $FTL_2$ ,最后形成原始信息底片的二次光学傅里叶变换图像。成像范围和原物像一样大小,直径为 50 mm 的圆。

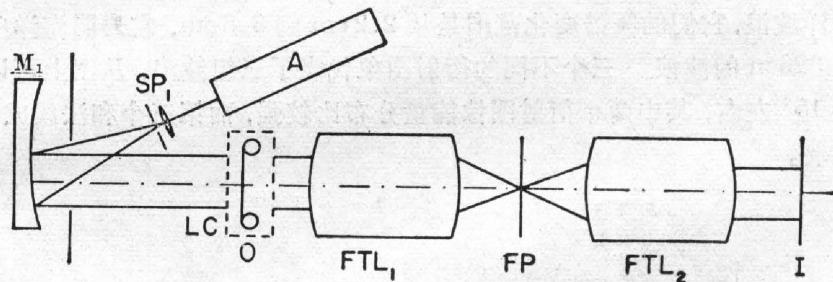


图 5 光学记录装置

A—氩离子激光器( $\lambda=488\text{ nm}$ );  $SP_1$ —空间滤波器;  $M_1$ —抛物面反射镜; O—物体(信息底片);  
LC—液槽;  $FTL_1$ ,  $FTL_2$ —傅里叶变换透镜( $f=700\text{ mm}$ ); I—最后成象

Fig. 5 System for recordings.

A—argon-ion laser ( $\lambda=488\text{ nm}$ );  $SP_1$ —spatial filter;  $M_1$ —parabolic mirror;  
O—object (input film); LC—liquid gate;  $FTL_1$ ,  $FTL_2$  Fourier transform lenses ( $f=700\text{ mm}$ ); I—final image

### 三、研究结果

我们来分析研究 Jasin 海域的不同范围(大致沿着同一路线)的 10 条底片。图 6(a)所示的结果表明,由于海洋表面波动和内部运动产生的振幅调制是比较低的。图 6(b)给出了被放大的傅里叶变换衍射图像。这里,我们应用了图 4 给出的滤波器。在测试过程中由于没有把信息底片放到液槽中,因此,可以很容易发现在图 6(b)中有一条明亮的垂直衍射线(图中为黑线)贯穿衍射图形,它是由底片片茎的双折射以及底片的划痕经衍射后形成的(图 6(b)的比例是 2.5 cm),可用来测量或校对海洋波浪的周期,两个亮点(次极大值)之间的距离为 1.5 cm 到 2 cm,从图 3 可知,像平面  $FP$  和  $P_2$  之间的放大倍率为 15,所以,





图 6 (a) 海洋波浪图像; (b) 放大的傅里叶变换图像  
Fig. 6 (a) Input film; (b) Magnified Fourier transform

在傅里叶平面  $FP$  上的距离约为  $0.1\text{ cm}$  到  $0.13\text{ cm}$ , 由方程(4)可计算出波长, 透镜焦距  $f=700\text{ mm}$ , 激光波长  $\lambda=488\text{ nm}$ ,  $2x=0.13-0.1=0.03\text{ cm}$ , 故  $x\approx 0.60\text{ mm}$ 。图 6(a) 上的直线表示长度比例, 它的原长为  $2.5\text{ cm}$ , 因此, 在信息底片上的波长为  $0.6\text{ cm}$  或  $0.7\text{ cm}$ , 对应于海洋中的实际波长大约在  $370\text{ m}$  至  $475\text{ m}$  之间。

在图 7(a) 的信息底片上, 海洋波浪是不规则的。因此, 要想确定海洋波浪的传播方向是比较困难的。然而, 从图 7(b) 傅里叶变换的衍射图上可以发现, 这里存在着三个传播方向不同的海洋波浪, 它们的频谱变化范围是从  $2.2\text{ cm}$  到  $3.8\text{ cm}$ , 它表明海洋中存在着波长从  $188\text{ m}$  到  $326\text{ m}$  的波浪。三个不同的衍射图象代表了三组波浪, 从图上可以测得彼此的方向夹角为  $15^\circ$  左右, 其中两个衍射图象能量分布比较强, 而第三个和法线成  $15^\circ$  角, 衍射图象能量微弱。

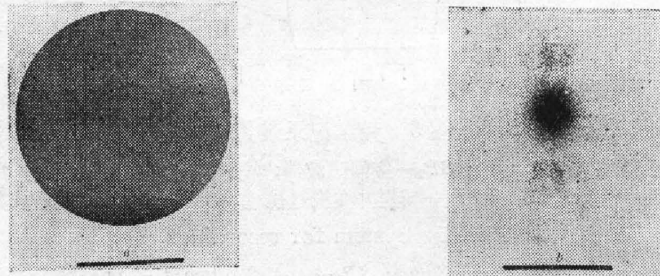


图 7 (a) 海洋波浪图像; (b) 放大的傅里叶变换图像  
Fig. 7 (a) Input film; (b) Magnified Fourier transform

图 8(a) 所给出的第三组结果表明, 海洋波浪图像经过傅里叶变换以后, 形成了具有两个次极大值的衍射, 说明有两组海洋波浪同时存在。从图 8(b) 可以清楚地看到, 它们传播方向的夹角为  $18^\circ$ , 衍射图象比较强的一组 and 法线成  $46^\circ$  角。从图 8(b) 测得两个次极大值之间的距离分别为  $1.9\text{ cm}$  和  $2.6\text{ cm}$ , 它们分别对应海洋中  $378\text{ m}$  和  $276\text{ m}$  的波浪周期。

图 9 给出了两组海洋波浪的像及傅里叶变换频谱。图 9(a) 和 9(b) 是人造卫星相隔一定时间飞过同一个海域所记录下来的结果。从这两张图片上, 我们可以看到很相似的海洋波浪, 但传播方向有所变化。在图 9(b) 上, 由于人造卫星是在和波峰平行方向上观测海洋波浪, 因此在底片上记录的调制比较弱, 所以经光学傅里叶变换后得到的次极大值也比较弱。图 9(c) 和 9(d) 给出了不同的傅里叶变换频谱, 分别对应了  $211\text{ m}$  和  $488\text{ m}$  的海洋波浪周期。

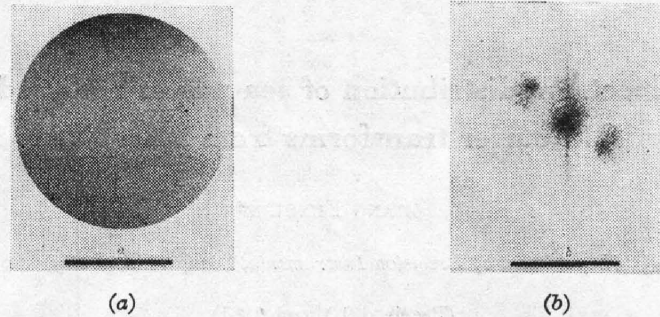


图 8 (a) 海洋波浪图像; (b) 放大的傅里叶变换图像  
Fig. 8 (a) Input film; (b) Magnified Fourier transform.

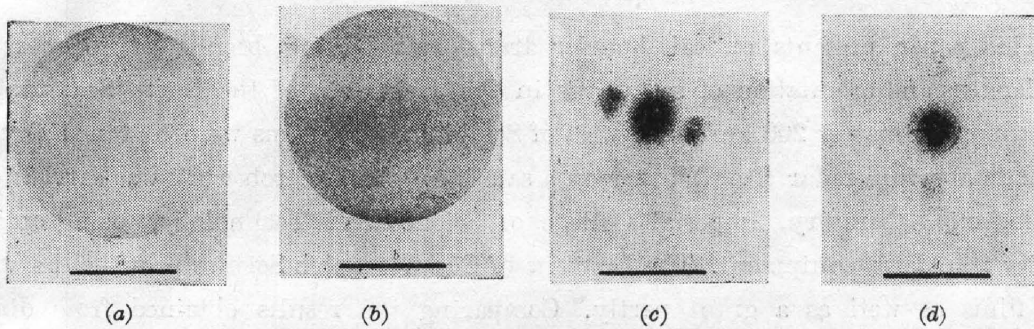


图 9 (a), (b) 同一地区不同时间的海洋波浪图像; (c), (d) 对应的傅里叶变换图像  
Fig. 9 (a), (b) Input films; (c), (d) Magnified Fourier transforms respectively

#### 四、讨 论

由本文提供的实验结果表明,根据人造卫星运载合成孔径雷达得到的海洋波浪图像,用光学傅里叶变换方法检测海洋波浪方向和周期是行之有效的。从图 6 到图 9 可以发现,尽管有时很难从波浪图像上直接看到规则的图形,但是应用上述方法,我们仍然能够比较准确地检测波浪周期和方向。例如,在图 7(a) 上,次极大值的距离是 3cm,给出了三组不同的海洋波浪,它们的周期约 239 m。

#### 参 考 文 献

- [1] D. Stillwell; *J. Geophys. Res.*, 1969, **74**, 1974.
- [2] D. Stillwell, R. O. Pilon; *J. Geophys. Res.*, 1974, **79**, 1277.
- [3] K. Tomiyasu; *Proc. IEEE*, 1978, **66**, No. 5 (May), 563.
- [4] M. E. Barnett, R.W. Smith *et al.*; *Opt. Acta*, 1978, **25**, No. 8 (Aug), 707.
- [5] M. E. Barnett P. R. Harnett *et al.*; «*Proc. SPIE: Vol. 74, Image Processing*», 1976 (Washington: Soc. Photo-Opt. Instrum. Engrs), 130~136.

## **Spectrum distribution of sea waves analysed using optical Fourier transforms from seasat SAR images**

ZHANG FENGLIN\*

*(Department of Precision Instruments, Tianjin University)*

(Received 9 March 1981)

### **Abstract**

This paper presents optical Fourier transforms having been used to measure wavelengths and orientation of sea waves in the Jasin area of the North Sea, that is located approximately 200 km north-west of Scotland. Input films were obtained from a synthetic aperture radar (SAR) borne on a satellite. The research work was carried out in Blackett Laboratory, Imperial College of Science and Technology, using optical Fourier transform equipment. The Institute of Oceanographic Science provided us with SAR films as well as a grant partly. Comparing the results obtained from direct measurement on the sea, or using the computer to calculate optical Fourier transforms of the input films of sea waves, with that obtained from our method, it is obvious that this method is quicker and more reliable.

Under the guidance of Prof. W. T. Welford, the research work was completed by Canadian academic visitor, Dr. R. A. Lessard and the author jointly. I would be grateful to those who might point out any error which I made in this paper.

---

\* Visiting scholars working in Imperial College of Technology, London University, UK.