

海浪谱的光学探测及信息处理

冯大增 夏绍丰 章志鸣

(复旦大学物理系)

摘要 建立了一套光学—计算机混合处理系统用以分析海浪航空底片,并得到了海浪方向谱和能谱。实验结果与现有的海浪理论符合较好,同时显示了该方法有可能发展成一种实用的实时海浪探测方法。

关键词 海浪谱,傅氏变换

Optical Detecting and Processing of Seawave Spectrum

Feng Dazeng, Xia Saofeng, Zhang Zhiming

(Physics Department of Fudan University)

Abstract In this paper, a hybrid Optical-Digital processor is set up to analyse aerial sea photographs, and the directional seawave spectrum and power spectrum are obtained using the processor. The experiment results agree with the seawave theory well and show that the processor and processing method can become one of the practical method to analyse seawave spectrum in real time.

Key Words seawave spectrum, Fourier transform

海浪是在40年代中期由于军事需要而兴起的一个研究领域^[1]。到了50年代中期,人们开始研究海浪谱(海浪能量相对于海浪频率或波长的分布)。海浪谱能解决绝大部分有关海浪的问题。

Stilwell^[2]首先提出在特定条件下拍摄海浪航片,并用相干光傅里叶变换系统处理。Raymond^[3]等较为严格地导出了海浪底片傅里叶功率谱与海浪谱的关系,同时用光电倍增管扫描方法测量了一维方向的斜率谱。1983年Keller等利用CCD面阵作为接收器件进行了海浪谱分析。他们的研究都体现了这种方法的光学并行处理的优点。

我们首次建立了一套由相干光傅里叶变换,1024光电二极管阵列、步进马达及IBM/XT计算机组成的光学—计算机混合处理系统。海浪航片经傅里叶变换后用1024列阵探测器转换成光电信号,光电信号经高速A/D变换及接口电路以DMA方式送入计算机内存,从而实现了二维光强的高速数据采集。利用此系统检测海浪航空底片得到了海浪的方向谱以及频谱,并与几种理论频谱(N谱^[1], P-M谱^[1], 文圣常谱^[4])进行了比较。实验结果与文圣常提出的理论谱符合较好。

1990年12月14日收稿

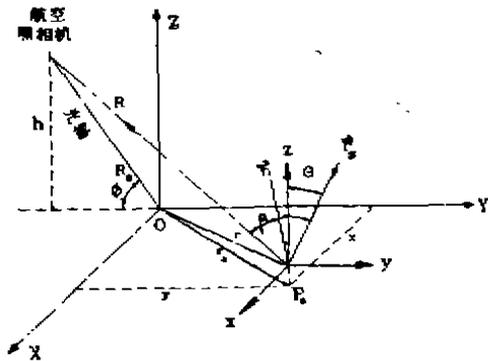


图 1 海浪航片拍摄示意图

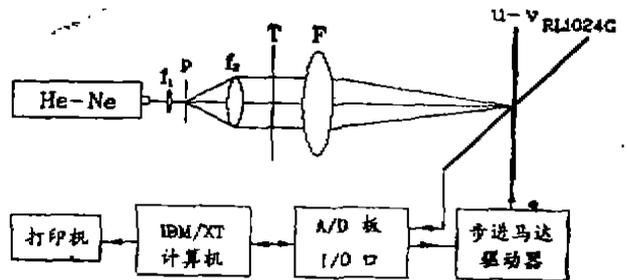


图 2 海浪谱的光学——计算机混合处理系统

海浪航片的光信息处理

1. 海浪反射光光强分布

图 1 是拍摄海浪航片的示意图。其中 \vec{r}_0 是光线入射方向， \vec{n} 是 P 点处海浪波面的法向。经反射点进入照相机的光强为：

$$I = L(\theta)\Gamma(\beta) \quad (1)$$

其中 $L(\theta)$ 是以 θ 角入射到海洋表面的光强， $\Gamma(\beta)$ 是海洋表面对入射角为 β 光的反射系数。

对于充分成长海浪波，海浪波高比波长小得多，可以认为 θ' (\vec{n} 与 \vec{z} 的夹角) 为小量。将 (1) 式在 $\theta' = 0$ 处展开并只保留一次项有^[3]：

$$I(x, y, \theta', \psi') = L(\theta)\Gamma(\beta) \approx I_0 + I_1 g_1(x, y, \psi')\theta' \quad (2)$$

其中 $I_0 = [L(\theta)\Gamma(\beta)]_{\theta'=0}$

$$I_1 = [2\Gamma(\beta)dL(\theta)/d\theta + L(\theta)d\Gamma(\beta)/d\beta]_{\theta'=0}$$

$$g_1 = [d\beta/d\theta']_{\theta'=0}$$

由图 1 中给出的几何关系，不难证明^[3]，在垂直拍摄 ($\phi_0 = 90^\circ$) 以及蓝空晴天 ($dh(\theta)/d\theta \neq 0$) 的条件下， I_1 、 g_1 都是相对于海浪斜率变化的慢变函数。可以认为是一常数 $I_1 g_1 = C_0$ 。

$$I(x, y, \theta') = I_0 + C_0 \theta'(x, y) \quad (3)$$

即在特定条件下拍摄海浪，进入相机的光强分布直接正比于海浪的斜率分布。

2. 海浪航片的光信息处理

图 2 的上部是用来处理海浪航片的相干光傅里叶变换系统。其中 T 是海浪航片，F 是一傅里叶透镜，U-V 平面是 F 的后焦面。在拍摄海浪时，选择适当的底片并控制曝光时间，使得作用区位于底片 H-D 曲线的线性区。则在平行光入射时，若在透射光中只保留 θ' 的一次项，则透射光可表示为：

$$I_T \approx I_{0T} + I_{1T}\theta' \quad (4)$$

其中 I_{0T} 、 I_{1T} 是一与入射光强、底片灵敏度、曝光时间，以及 H-D 曲线线性区斜率等有关的常量。

透射光经光学傅里叶变换后，透镜后焦面 U-V 平面上的光强分布为：

$$I'(u, v) = |F(I_{0T})|^2 + I_{1T}^2 |F[\theta'(x, y)]|^2$$

上式中的第一项主要集中在 U-V 平面零点附近，下面将不予考虑。

$$I(u, v) = I_{1T}^2 |F[\theta'(x, y)]|^2 \quad (5)$$

又根据海浪斜率谱定义

$$\begin{aligned} S_{\theta}(\vec{K}) &= S_{\theta'}(\vec{k}) = (2\pi)^{-2} \int \overrightarrow{\theta'(x_0)} \cdot \overrightarrow{\theta'(x_0 + \vec{x})} \exp(-i\vec{k} \cdot \vec{x}) d\vec{x} \\ &= F[\overrightarrow{\theta'(x_0)} \cdot \overrightarrow{\theta'(x_0 + \vec{x})}] = |F[\theta'(x, y)]|^2 \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\overrightarrow{\theta'(x_0)} \cdot \overrightarrow{\theta'(x_0 + \vec{x})}$ 表示 $\theta'(\vec{x})$ 的自相关, $S_{\theta}(\vec{k})$ 是以波矢表示的斜率谱, \vec{k} 是海浪的波矢。

由(5)、(6)式, $S_{\theta}(\vec{k})$ 正比于 U-V 平面上的光强分布 即,

$$S_{\theta}(k, \psi) = CI(k, \psi) \quad (7)$$

上式给出了海浪底片的傅里叶功率谱与海浪斜率谱间的关系。其中 C 是一较难确定其绝对值的常量, 因而通过分析海浪照片只能得到海浪斜率谱的相对值。

3. 海浪谱与海浪斜率谱的关系

当 $\theta' \ll 1$ 时, $dh(x, y)/dx = \theta' \cos \psi'$, 其中 $h(x, y)$ 是海浪浪高

$$\begin{aligned} \text{则 } F(\theta') &= \frac{1}{(2\pi)^2} (\cos \psi')^{-1} \iint dh(x, y)/dx \exp(ik_x \cdot x + ik_y \cdot y) dx dy \\ &= \frac{ik}{(2\pi)^2} \iint h(x, y) \exp[i(k_x \cdot x + k_y \cdot y)] dx dy \\ &= ikF[h(x, y)] \end{aligned} \quad (8)$$

又海浪方向谱定义为:

$$S(k, \psi) = |F[h(x, y)]|^2 \quad (9)$$

由(8)、(9)得到:

$$S(x, \psi) = S_{\theta}(k, \psi)/k^2 \quad (10)$$

又考虑到深水波的色散关系 $\omega = (gk)^{1/2}$, g 为重力加速度, 有

$$S(\omega) = \frac{2\omega^3}{g^2} \int_0^{2\pi} S(k, \psi) d\psi = \frac{2}{\omega} \int_0^{2\pi} S_{\theta}(k, \psi) d\psi \quad (11)$$

$S(\omega)$ 即海浪的频谱, 它不包含海浪传播方向的信息。由(7)、(10)、(11)式, 只要探测到航片傅里叶功率谱分布 $I(k, \psi)$ 即可得到海浪方向谱 $S(k, \psi)$, 以及频谱 $S(\omega)$ 的相对值。

实验装置及测量结果

1. 实验装置

图 2 是用来检测海浪谱的光学—计算机混合处理系统。其中 f_1, p, f_2 完成空间滤波及扩束, F 是一傅里叶透镜, 在其后焦面上形成海浪底片 T 的傅里叶谱。用 1024 光电二极管阵列将焦平面上的光强转换为视频信号。我们研制了一块高速 A/D 板用来转换视频信号。A/D 板在接口电路产生的与视频信号同步的外触发信号作用下, 将信号转换为八位数字量, 并利用 IBM/XT 内空闲 DMA 通道以 DMA 方式送入计算机内存。I/O 口用来控制步进马达的转动。我们用 Turbo C 语言编制了一套数据采集与存盘以及海浪谱处理程序, 用以完成海浪谱的探测与处理, 最后由显示器或打印机输出结果。

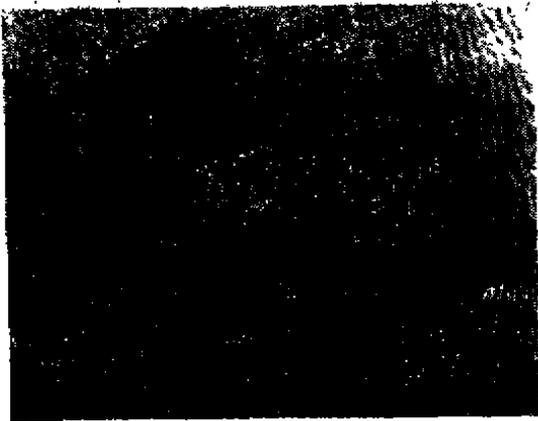


图 3 海浪航空底片

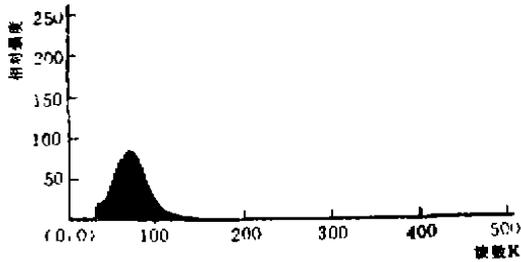


图 4 海浪波方向 30°，最强海浪的波数 = 0.066 (1/m)

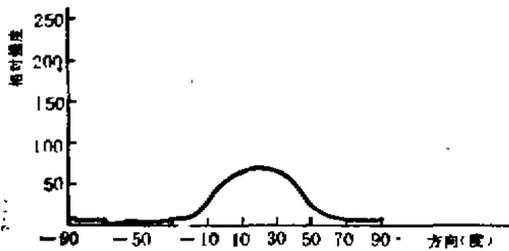


图 5 波数 = 0.078(1/m)
波长 = 14.2(m)

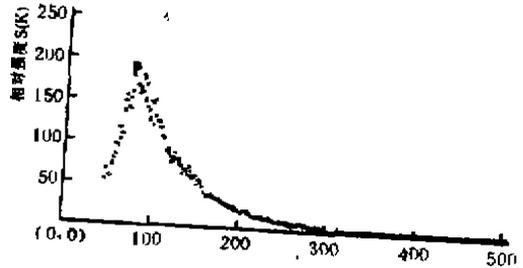
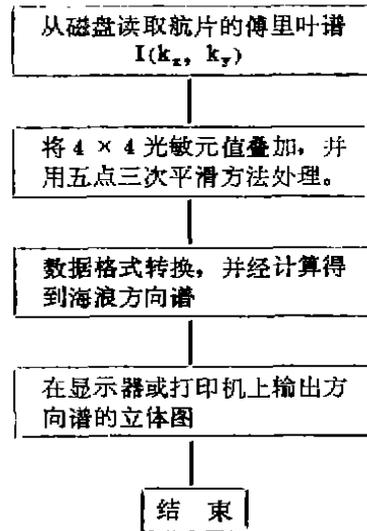


图 6 海浪能谱(斜率谱)

表 1 方向谱处理程序框图



利用图 2 的处理系统，对我国渤海海域的航空底片进行了测量和处理。图 3 是一张海浪航空底片照片。

2. 海浪方向谱测量

海浪方向谱由(10)式给出，只要测得航片傅里叶功率谱即可得到海浪方向谱。有限孔径的平行光照射底片，使得探测面上存在一定粒

度的散斑分布， $d \sim \lambda f / D$ ，其中 f 是傅里叶透镜焦距， D 是孔径直径， d 是散斑直径，实验中 $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ ， $f = 1200 \text{ mm}$ ， $D \sim 10 \text{ mm}$ ，算得 $d \sim 80 \mu\text{m}$ 。而线列阵光敏元线度为 $26 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ ，因此探测结果中必然反映出严重的散斑噪音作用。为此在处理过程中取 4×4 个光敏元作为一探测元，并进行适当的光滑处理。处理后散斑作用明显减少。表 1 给出了方向谱处理程序框图。图 4 是某一方向海浪谱分布，图 5 是某一波长方向谱分布。

3. 无因次能谱的计算

以波数表示的能量谱(不包含方向信息)

$$S_0(k) = \int_0^{2\pi} S_0(k, \psi) d\psi$$

以上积分过程由计算机完成。图 6 是航片能量谱的计算结果。

为了与现有的各种理论频谱进行比较^[4], 必须将 $S_b(k)$ 转换成频谱 $S(\omega)$, 由(11)式及深水波色散关系并略去一些常数因子有: $S(\omega) = S_b(k)/\sqrt{k}$, 同时将 $S(\omega)$ 按理论谱方法无因次化^[1]:

$$\tilde{S}(\omega) = \omega_0 S(\omega) / m_0$$

其中 ω_0 是 $S(\omega)$ 极大值处所对应的频率, $\omega_0 = \sqrt{k_0}$, $\tilde{\omega} = \omega / \omega_0$, k_0 是 $S_b(k)/\sqrt{k}$ 极大值处所对应的波数。谱的零阶矩: $m_0 = \int_0^\infty S(\omega) d\omega = \int S_b(k)/\sqrt{k} \cdot \frac{d\omega}{dk} \cdot dk = \int \frac{1}{2k} S_b(k) dk$ 。从而算出谱的尖度因子 $P = \omega_0 S(\omega_0) / m_0$ 。通过以上转换和无因次化过程, 可将以波数表示的能谱转换为无因次化的频谱。表 2 给出以上过程处理程序的框图。图 7 是航片无因次化频谱的计算结果, 图中同时画出了文圣常提出的理论谱(实线)。图 8 是实验数值, P-M 理论谱、N 理论谱曲线。实验结果显示, 实验值与文圣常提出的理论谱符合较好。

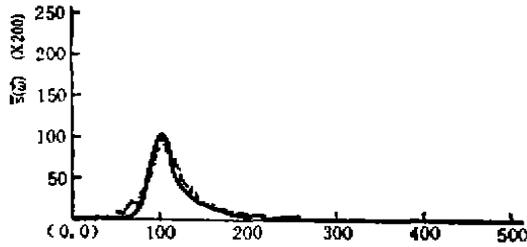


图 7 海浪无因次化频谱与文圣常谱

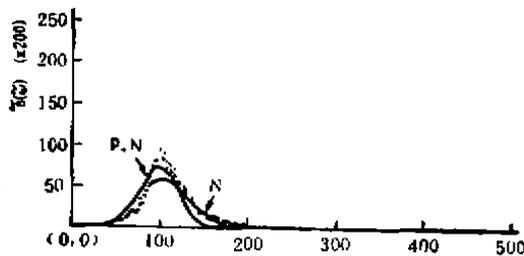


图 8 海浪无因次化频谱、P-M 及 N 谱

表 2 无因次化谱处理程序框图

从磁盘读取 $I(k_x, k_y)$
相同波数光强叠加 计算 $\int_0^{2\pi} I(k_x, k_y) d\phi$
计算海浪斜率谱 $S_b(k)$
转换为海浪能谱 $S(k)$
计算 K_0, ω_0, m_0 和尖度因子 P
将 $S(k)$ 无因次化 为频谱 $S(\omega)$
由 P 值计算各理论谱
结果送打印机或 磁盘文件

结 束

讨 论

海浪谱的光学—计算机混合处理方法, 利用了光学并行处理的特点, 使得处理过程大大减化, 同时由于采用线列阵作探测器, 只要旋转探头即可探测到各个方向上的谱分布, 在方向谱探测上要比采用 CCD 面阵摄象机更为实用。现有的海浪方向谱探测及处理极其复杂, 因此提出的方向谱理论很少。利用本文的实验结果采用数据拟合的方法可以研究海浪方向谱理论。我们建立的系统在分析海浪航片方面具有处理简单、实时性强的特点, 有可能成为研究海浪方向谱理论的一种有效手段。

参 考 文 献

- [1] 文圣常, 余宙文《海浪理论与计算原理》, 科学出版社, 1 (1984)
- [2] D. Stilwell, J. Geophys. Res, 74, 1974 (1969)
- [3] Raymond S. K, IEEE Transactions on Geoscience Electronics GE-10, 51 (1972)
- [4] 文圣常等, “改进的理论风浪频谱” to be published in Acta Oceanologica Sinica.