







也就是说, 这一问题可以转化为在  $(U, g')$  所描述的背景场中独立地研究短波的特性.

假设长波波列为一正弦波列  $Z = A \cos(\Lambda x - \Omega t)$ , 则长波在水平面上产生的背景诱导的速度场为:  $U_1 = A \Omega \cos(\Lambda x - \Omega t)$ . 其中,  $A$  为长波的振幅,  $\Lambda$  为长波的波数,  $\Omega$  为长波的频率.

考虑内波时, 水平面上总的背景诱导速度场为  $U = U_1 + U_2$ . 此时短波的解是一个窄谱波列

$$\begin{cases} \zeta(x, t) = a(x, t) \cos[\theta(x, t)], \\ k(x, t) = \frac{\partial \theta}{\partial x}, \quad \bar{\omega}(x, t) = -\frac{\partial \theta}{\partial t}, \\ \bar{\omega}(k, x, t) = \bar{\omega}_0(k) + kU(x, t). \end{cases}$$

由波射线理论, 短波的传播将由以下方程控制

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \frac{\partial \omega}{\partial k}, \\ \frac{dk}{dt} = -\frac{\partial \omega}{\partial x}, \end{cases}$$

这是一个 Hamilton 系统. 由上式可得:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \frac{\partial \omega_0(k)}{\partial k} + \Omega A \cos(\Lambda x - \Omega t) + U_2(x, t), \\ \frac{dk}{dt} = k \Omega A \Lambda \sin(\Lambda x - \Omega t) + k U_2'(x, t). \end{cases} \quad (2)$$

当不存在内波时  $U_2 = 0$ , 将参照系定在长波之上, 令  $x' = x - \frac{\Omega}{\Lambda} t$ , 则式 (2) 变为

$$\begin{cases} \frac{dx'}{dt} = \frac{\partial \omega_0(k)}{\partial k} - \frac{\Omega}{\Lambda} + \Omega A \cos(\Lambda x'), \\ \frac{dk}{dt} = k \Omega A \Lambda \sin(\Lambda x'). \end{cases} \quad (3)$$

由于在这个 Hamilton 系统中, Hamilton 函数不显含时间  $t$ , 这样

$$\frac{\partial H(x', k, t)}{\partial t} = 0,$$

因此,

$$H = \bar{\omega}_0(k) - \frac{\Omega}{\Lambda} k + k \Omega A \cos(\Lambda x') = \text{const.}$$

对于深水毛细重力波有:

$$\sqrt{g'k + \gamma k^3} - \frac{\Omega}{\Lambda} k + k \Omega A \cos(\Lambda x') = \text{const.}$$

方程组 (2) 的平衡点为

$$x' = \frac{n\pi}{\Lambda}, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$\frac{g' + 3\gamma k^3}{2\sqrt{g'k + \gamma k^3}} = \begin{cases} (\frac{1}{\Lambda} - A)\Omega, & n = 0, \pm 2, \pm 4, \dots \\ (\frac{1}{\Lambda} + A)\Omega, & n = \pm 1, \pm 3, \dots \end{cases} \quad (4)$$

由该系统所描述的物理过程即如图2所示的 Blockage 现象. 有关该部分的分析另文<sup>1)</sup>发表.

该现象表明这样一个事实, 风浪中的短波不是自由波, 而是一种载波, 或称为骑行波 (这一结论已经被国内外大量专家所证明). 在小风速条件下, 其分布被限制在长波波前的小范围内. 因此, 风浪中短波的分布规律应遵从长波的分布规律. 同时, 实验室实验事实以及卫星遥感资料都充分表明, 虽然按照传统的观点, 海面上的风浪是随机的, 然而, 在空间一个相当大的范围内, 其波面斜率分布是有规律的. 因此, 此时短波的波面斜率分布也是有一定规律可循的.

当有内波存在时, 一般情况下无法取得适当的  $x' = x - f(x)t$ , 可使式 (2) 变为如下形式:

$$\begin{cases} \frac{dx'}{dt} = \frac{\partial \omega_0(k)}{\partial k} + F(x'), \\ \frac{dk}{dt} = G(x'). \end{cases}$$

因此, 这时每一时刻的等  $H$  图都在发生改变. 此时方程组所描述的动力特性与方程组 (3) 所描述的动力特性有了本质的差别.

### 3.2 结果分析

当内波不存在时, 整个系统由方程组 (3) 控制. 所呈现的是一组近似定常的图形. 当内波出现时, 整个系统的动力特性发生了改变. 这种改变造成了整个动力系统的重组. 此时原来局限在长波波前的短波摆脱了束缚, 并迅速地分布于整个波面之上. 其漫布的范围取决于内波对表面波影响的范围.

同时, 在本文的实验中, 内波的出现是突然的 (对应于水下运动物体通过实验段), 且是变化的. 这就意味着动力系统重组过程也是变化的. 并且, 由于系统的重组需要有一个过程, 因此, 此时动力系统的重组总是不彻底的. 其结果是, 短波在一个变化的范围内呈现出一种无序的分布 (见图3及图4.).

图1中所看到的两个非常清晰的内波, 是由海洋中两个孤立内波引起的<sup>[1]</sup>. 这相当于在原有的风浪中突然加入了内波的作用. 依照上述讨论, 其结果是使海面上短波的波面斜率分布发生了明显的改变. 正是因为有了这种明显的改变, 才能够利用合成孔径雷达 (SAR) 并配合相应的分析软件, 从貌似随机的风浪之中分辨出内波. 这充分表明, 利用本文所描述的方法, 在海上探寻水下运动物体的轨迹是可行的.

对于密度均一的水, 由于处于深水中的物体是缓慢通过实验段的, 因此, 其产生的扰流在水面上相对于长波的诱导速度是一小量, 相当于  $U_2(x, t) \approx 0$ . 这时整个系统仍然由方程 (3) 所控制. 所以, 此时观测到的短波波面斜率分布并不发生可被观测到的改变. 我们就无法根据它来识别是否有物体通过实验段. 这与我们的实验观测相符.

由控制方程 (1)、(2) 可看出, 无内波存在时, 短波的这种 Blockage 分布只取决于长波的波要素, 以及由风所产生的短波. 这是一种纯粹的表面波特征, 与海水的垂直结构无关. 这一点在本次实验中得到了很好的证明.

1) 王 伟, 沈 正. 短波特征实验及理论解释. 中国科学 (待发表).

正是由于这种无关性,我们在以上所作的各项讨论才正确地反映了短波波面斜率分布及改变的物理本质.

## 4 结论

由本文的实验及理论分析可看出,内波通过改变表面的流场,改变了波面上短波的波面斜率分布.

由于短波波面斜率分布的改变是如此的强烈,因此可十分清楚地根据这种差别识别出水下运动物体移动的轨迹.

短波分布的 Blockage 现象完全是表面波的一种特性,与海水的垂直结构无关.

## 参考文献

- 1 Hughes B A, Dawson T W. Joint Canada-U. S. ocean wave investigation project: an overview of the Georgia Strait experiment. *J. G. R.*, 1988, **93**(C10): 12 219~12 234
- 2 Phillips O M. The dispersion of short wavelets in the presence of a dominant long wave. *J. Fluid. Mech.*, 1981, **107**, 465~485
- 3 Shyu J H, Phillips O M. The blockage of gravity and capillary waves by longer waves and currents. *J. Fluid. Mech.*, 1990, **217**, 115~141
- 4 Hughes B A, Grant H L. The effect of internal waves on surface wind waves. 1. Experimental measurements. *J. G. R.*, 1978, **83**(C1): 443~465
- 5 Garrett C, Munk W. Internal waves in the ocean. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 1979, (11): 339~369

## Distribution of short wind-waves affected by internal wave

Wang Wei<sup>1</sup>

1. *Institute of Physical Oceanography, Laboratory of Physical Oceanography,  
Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003*

**Abstract**—An experimental study of the interaction between short wind-waves and internal wave is reported. It is shown that at low wind speed internal wave excited by moving object in stratified fluid changes the distribution of short wind-waves by changing surface current field. This phenomenon is well explained by a wave-current interaction mode. It implies that the wake of under-water moving object can be distinguished from the changes of the distribution of short wind-waves.

**Key words** Storm, short wind-wave, internal wave experiment