

崂山湾附近海域内波的侧视雷达 (SLAR) 图像信息研究*

郑全安 吴隆业 张东 李晓峰

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛)

提要 在1987年5月进行的海洋航空遥感实验中, 获得了黄海西部崂山湾附近海域($36^{\circ}16' - 36^{\circ}30'N$ $120^{\circ}45' - 121^{\circ}05'E$)的内波侧视雷达(SLAR)图像。这组由8个波组成的内波, 平均波长为 1.32 ± 0.24 km, 向岸传播的平均相速度为 38 cm/s, 平均周期为 57 min; 波峰线与等深线平行, 图像上记录的波峰线长达 40 km。分析表明, 这组内波可以用最低型内波理论模型来描述。

在一定条件下内波具有明显的海面特征, 其中最重要的是海面条带。早在20余年前, 就有关于此类条带的船舶观测记载^[1,5]。这种海面特征自然会在卫星图像上有所反映。例如, 1976年Apel等人便从陆地卫星的可见光图像上发现了内波^[8]。1978年Hughes与Grant还利用航空遥感对内波的海面效应进行了测量^[4]。1978年美国发射了海洋卫星Seasat-1, 该星装载了一部合成孔径雷达(SAR), 通过SAR的图像, 人们在加利福尼亚半岛西南近海等许多海域发现了内波^[6,7,9,11]。此外, NOAA气象卫星、DMSP卫星、Nimbus-7卫星和天空实验室的图像也被用于提取内波信息。其中Apel等人对苏禄海内波的研究就是一个典型例子^[10]。近年来, 内波的雷达成像机制研究取得了明显进展^[7,17]。

80年代以来, 我国学者通过测量海流^[3,4]和水温^[1]等参量对内波开展了观测与研究, 推算了内波的传播方向、速度以及波包结构^[1,5]。

本文将对崂山湾附近海域内波的机载侧视雷达图像进行分析与研究。

一、测 量

1. 遥感系统

本研究用来获取内波雷达图像的航空遥感系统主要技术配置如下。

(1) 航空工作平台 以国产Y-12型飞机为航空工作平台。该机为螺旋桨双发飞机, 最大起飞重量为 5300 kg, 最大载荷为 1700 kg, 巡航速度为 240 km/h。机上配备有完善的导航定位、通信与气象雷达系统, 以适应海洋遥感飞行的需要。

(2) 侧视雷达(SLAR) 机载侧视雷达为瑞典产Ericsson雷达。主要技术指标

* 参加现场实验与资料处理的还有本所孙元福、吴永森、孙玉星、于衍桂、纪育强和国家海洋局北海分局孙厚荫、廖为民、吴万虎等。

收稿日期: 1988年4月15日。

为:

工作频率	9.4GHz (x 波段)
天线	3 m 开槽波导、垂直极化、双侧视
水平波瓣宽	0.5°
垂直波瓣宽	>37°
增益	31dB
发射峰值功率	10 km
脉冲重复频率	1.0 kHz
地面分辨力	60 × 75 m ²
显示范围	双侧 20—40—80 km

雷达图像可以在监视器上实时显示,也可记录在磁带机上,通过地面回放取得图像资料。

2. 测量条件

(1) 遥感飞行条件 遥感飞行于 1987 年 5 月 24 日 8:33—10:42 间进行,在青岛流亭机场起降。航线为流亭—即墨—田横岛 (36°25'N, 120°57'E)—千里岩 (36°16'N, 121°23'E), 往返两次。航高为 2000 m, 航速为 250 km/h。飞行过程中 SLAR 取实时显示,实时记录工作方式。

(2) 现场水文气象条件 实验海区的水文气象参数由最靠近的小麦岛海洋站 (36°03'N, 120°25'E) 和千里岩海洋站的同步观测数据 (8:00) 取均值得出: 气温为 16.0℃, 总云量为 10, 风向 SE, 风速为 9 m/s, SST 为 12.8℃, 盐度为 31.59‰, 海况 2, 波型 U/F, 风浪向 SE, 涌浪向 C, 周期为 3.1s, 波高为 0.5 m, 最大波高为 0.6 m。由地形图查得平均水深为 10 m。

3. 测量结果

实验期间分别在 08:49'11", 09:47'18" 和 09:49'40" 获得了出现在田横岛附近海域的内波三组 SLAR 图像。图版 I 为第二组的镶嵌图。图像中的白色为陆地,贯穿整个画面的明暗条带即为内波影像。图 1 为解译图。

(1) 内波的雷达成像原理 海面波与海洋内部过程(如海底地形、内波等)的雷达成像机制与定量反演算法是目前海洋微波遥感物理学研究热点之一。国外已有许多成果发表^[7,17]。由于本研究的主要着眼点是雷达图像所提供的海洋现象信息,因此对内波的雷达成像原理不作详细讨论,而仅仅给出定性的概略介绍。

微波不具备穿透海水的能力。雷达图像上的内波信息通常认为是由内波对海面毛细波(或毛细/重力波)空间分布的调制作用产生的。因为毛细波为雷达波的主要散射体,特别是当雷达波波长与海面波波长满足布拉格共振散射条件时,即

$$\lambda_r = 2\lambda_c \sin \theta$$

式中, λ_r 为雷达波长; λ_c 为海面毛细波波长; θ 为入射角,海面的后向散射最强。对本研究的情况 $\lambda_r = 3 \text{ cm}$, 当 $\theta = 30^\circ$ 时, $\lambda_c = 3 \text{ cm}$ 。这就是说,波长为 3 cm 左右的海面波(毛细/重力波)对雷达的后向射散贡献最大(简称布拉格波)。如果当作为雷达波主要散射体的布拉格波在海面上均匀分布时,雷达图像上的明暗度完全相同,就不会产生任何图

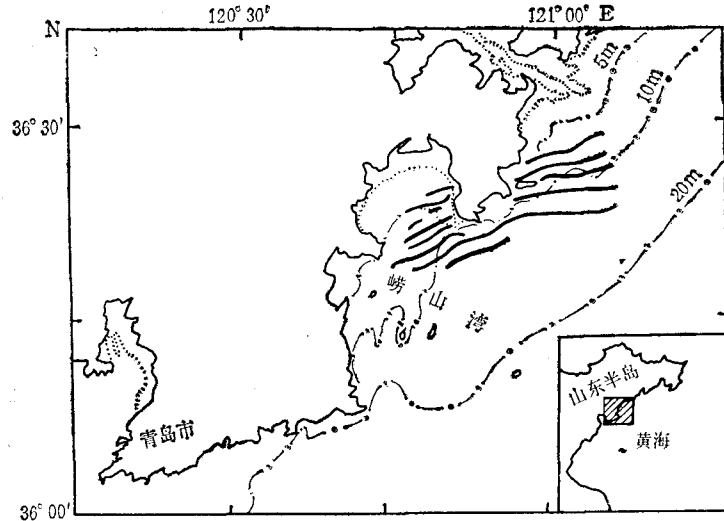


图1 图版 I 的解译图

Fig. 1 Interpretation of plate I

右下小比例尺图中标出了实验海区相对位置。

形。如果由于海洋内部或者外部的原因使布拉格波的空间分布产生规律的变化,而且当这种变化的空间尺度大于雷达的空间分辨力(对本研究为 $60 \times 70 \text{ m}^2$) 时,则雷达图像将以明暗度有规律的改变记录下布拉格波的空间分布。内波虽然不会引起高出海面的海水波动,但由于内波引起海面以下水质点运动方向在温跃层上浮与下降处完全相反,在这样的载体作用下,布拉格波产生有规律的疏、密分布,从而使雷达图像形成有规律的明、暗条带,而且明暗条带的间距恰与内波波长一致^[17]。

(2) 由 SLAR 图像测得的内波信息 实验中取得的 SLAR 图像用 HJ-24 型纠正仪作几何纠正,并与标准地形图匹配得出图像比例尺。根据纠正后的图像测得内波数据与信息如下。

组成波个数	8
波峰线长(图像记录部分)	40 km
波峰线走向	平行于等深线
平均波长	$(1.32 \pm 0.24) \text{ km}$
平均相速度	38 cm/s
传播方向	向岸

二、比较研究

1. 分析计算

由文献 [16] 知,内波的频率-波数关系为:

$$n^2 = gk(\delta\rho/\rho_0)[k\varepsilon + \coth kd + \coth k(D-d)]^{-1} \quad (1)$$

对我们讨论的内波, $D = 10 \text{ m}$, $\lambda = 1.32 \text{ km}$, 因此 $k\varepsilon \ll 1$, kd 和 $k(D-d)$ 为

表1 某些内波观测结果
Tab. 1 Some observations of internal wave in the global oceans

作者(年)	发现内波的海域			内波特征				
	海区	方位	水深(m)	资料	波长(km)	相速度(m/s)	周期(min)	波包内波 的个数
L. R. Apel (1981) ^[5]	太平洋, 加利福尼亚 亚半岛西南近海	25—26°N 112—113°W	15—200	Seasat SAR	0.39	0.42	12.6	5—9
L.-L. Fu and B. Holt (1982) ^[11]	太平洋, 加利福尼亚 亚湾	29—30°N 113—114°W	80—200	Seasat SAR	1—2	1.2	12.42(h)	20(max)
	大西洋	37°30'—39°N 73°30'—74°30'W	20—1000	Seasat SAR	1.3(max)	0.3		30(max)
	大西洋	27—29°N	100—300	Seasat SAR	0.3—0.4			5—11
	佛罗里达近海	79—80°30'W		Seasat SAR				
	太平洋	45°40'—46°30'N 124°00'—124°20'W	10—75	Seasat SAR	1(max)			3—11
	温哥华近海	60—61°N	200—2000	Seasat SAR	0.9—2.7	0.65		4—12
W. Alpers and E. Salusti (1983) ^[6]	大西洋, 加拿大 哈得逊海峡东侧	60—62°W		Seasat SAR	0.38—1.7	1.0	8—34	4
W. Alpers (1985) ^[7]	地中海, 意大利 帕耳米近海	38.5°N 16°E	200—500	Seasat SAR	~1.5			4—10
A. D. Heathenshaw (1985) ^[12]	大西洋, 葡萄牙 菲格腊-达-福日近海 大西洋, 比斯开湾	47°30'—47°50'N 7°10'—7°20'W	160—500	海流计	~1.0	0.45—0.48	30—50	
T. L. Howell and W. S. Brown (1985) ^[13]	太平洋, 北加利福 尼亚近海	38°30'N 123°30'W	50—150	NOAA IR, Seasat SAR 与实测	0.438	0.33	24.6	3
J. R. Apel 等 (1985) ^[10]	苏禄海	6—10°N 118—120°E	100—2,000	DMSP, Landsat Nimbus- 7 SIR-A 图像与实测	5—16	1.8—2.6	35—55	3—10
束星北等 (1985) ^[4]	渤海海峡		56	测温链		0.60		
B. H. Буренков 等 (1985) ^[14]	印度洋	35.5°N			~1		30	6
Г. А. Гришин, С. А. Гродский (1985) ^[15]	大西洋, 非洲 近海摩洛哥	6.5°W 30°N	100—500		1.8			4
尹逊福等 (1986) ^[1]	舟山群岛外侧	123°E			28.0	0.66	12(h)	
赵俊生等 (1987) ^[3]	渤海海峡	36°20'—36°27'N 120°44'—121°02'E	56	船测		0.50		
本研究 (1987)	黄海崂山湾附近		10	机载 SLAR	1.32±0.24	0.38	57	8

小量。于是 (1) 式的一阶近似为

$$n^2 = gk^2 \left(\frac{\delta\rho}{\rho_0} \right) \frac{d(D-d)}{D} \quad (2)$$

内波的相速度

$$c = \frac{n}{k} = \left[g \left(\frac{\delta\rho}{\rho_0} \right) \frac{d(D-d)}{D} \right]^{1/2} \quad (3)$$

这一结果说明,由最低型内波解导出的相速度与波数无关(即非弥散波),而当水深 D 和温

跃层平均深度 d 已知时,相速度 c 仅由相对密度差 $(\delta\rho/\rho_0)$ 决定。图 2 给出了研究海区 c 与 $(\delta\rho/\rho_0)$ 的函数系数曲线,其中 d 为参变量。水深 D 取为 10 m。

由图 2 可知,当温跃层平均深度 d 为 4 m,相对密度差 $(\delta\rho/\rho_0)$ 为 6.0×10^{-3} 时,或者 d 为 5 m, $(\delta\rho/\rho_0)$ 为 5.9×10^{-3} 时,由理论模式 (3) 式给出的相速度与本研究由 SLAR 图像测得的数值 (38 cm/s) 相同。

$(\delta\rho/\rho_0)$ 的特征值为 10^{-3} 。例如文献 [1] 给出在舟山群岛外海 60 m 水深处 5 月下旬的 $(\delta\rho/\rho_0)$ 测量值为 4×10^{-3} ,而本研究海区为强跃层区^[2],在夏初 (5 月份) 出现 $(\delta\rho/\rho_0)$ 为 6×10^{-3} 的情况是完全可能的。因此,可以认为,本研究的测量结果可以用小扰动最低型内波理论模型来概括。

另外,当取 d 为 5 m, $(\delta\rho/\rho_0)$ 为 5.9×10^{-3} 时由频率-波数关系 [(2) 式] 得出研究海区的内波角频率

$$n = 1.8 \times 10^{-3} \text{ rads/s}$$

或频率 $f = 2.9 \times 10^{-4} \text{ Hz}$ 。由此推出内波的周期

$$T = 57 \text{ min.}$$

2. 他人观测结果

如前所述,国内外均有许多内波观测(现场测量与遥感)数据发表。表 1 摘录了最近的观测结果。对比可知,本研究得出的数据与其他结果处在同一范围之内。

三、讨论与小结

1. 本研究取得的机载侧视雷达图像表明,实验期间 (1987 年 5 月 24 日) 在南黄海西部崂山湾附近水深约 10 m 的近岸浅水区,存在着内波,由 SLAR 图像测得的波包内的波的个数为 8,波峰线与等深线平行,长度至少为 40 km,平均波长为 132 km。这一组内波向岸传播,平均相速度为 38 cm/s。由内波频率-波数关系推出的周期为 57 min。

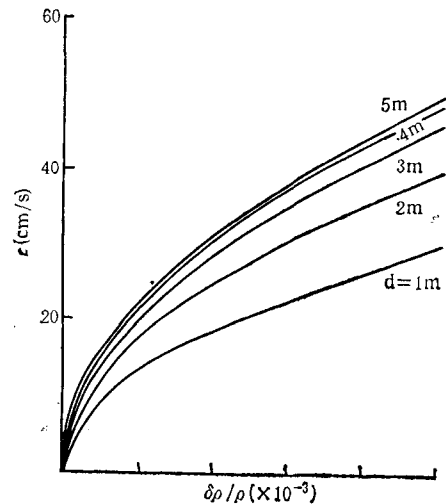


图 2 研究海区内波相速度与上、下层流体相对密度差之间的关系

Fig. 2 Relationship between internal wave phase speed and relative density difference of upper and lower fluid layers in the study sea area

(横坐标刻度数码自左至右为: 0, 2, 4, 6, 8, 10)

2. 本研究得出测量结果与其他研究成果大体一致,但平均波长与周期均偏大,而相速度则偏小。可以认为这是浅水内波的一种特点,其他研究成果给出的数据也呈这种趋势。

3. 分析表明,研究海区的内波可以用小扰动最低型内波解来描述。当取 d 为 5m, $(\delta\rho/\rho_0)$ 为 5.9×10^{-3} 时,理论模型给出的结果与 SLAR 测量结果吻合。

4. 本研究取得的 SLAR 图像虽仅为一次实验结果,但是已经得出许多重要的内波信息。为了得到研究海区内波的季节变化与年际变化规律,则需要多次重复观测,必要时还应与现场调查相结合。例如,对内波运动至关重要的密度剖面数据则需由现场测量来获得。

参 考 文 献

- [1] 尹逊福、孔祥德、潘惠周, 1986. 东海西部陆架海区潮内波特征的初步分析. 海洋学报 8(6): 772—778.
- [2] 付克付, 1980. 海中激光衰减特征与跃层关系的初步探讨. 海洋学报 2(3): 51—58.
- [3] 束星北、赵俊生、王祯祥, 1985. 利用海流观测资料检验近海内波. 海洋学报 7(5): 533—538.
- [4] 束星北、赵俊生、王祯祥, 1985. 用单站测量确定近海内潮波的方向和速度. 海洋学报 7(6): 665—673.
- [5] 赵俊生、耿世江、王祯祥, 1987. 近海潮成内波波包结构的分析. 海洋学报 9(2): 137—144.
- [6] Alpers, W. and E. Salusti, 1983. Scylla and Charybdis observed from space. *J. G. R.* 88(C3): 1800—1808.
- [7] Alpers, W., 1985. Theory of radar imaging of internal waves. *Nature* 314: 245—247.
- [8] Apel, J. R., H. M. Byrne, and J. R. Proni, 1976. A study of oceanic internal waves using satellite imagery and ship data. *Remote Sensing of Environment* 5: 125—136.
- [9] Apel, J. R., 1981. Nonlinear Features of Internal Waves as Derived from the Seasat Imaging Radar, *Oceanography from Space*, ed. by J. F. R. Gower. Plenum Press, pp. 525—533.
- [10] Apel, J. R., J. R. Holbrook, A. K. Liu, et al., 1985. The Sulu sea internal soliton experiment. *J. P. O.* 15(12): 1625—1651.
- [11] Fu, L.-L. and B. Holt, 1982. Seasat Views Oceans and Sea Ice with Synthetic Aperture Radar. *JPL Publication* 81—120 26—41. New York and London, pp. 525—533.
- [12] Heathershaw, A. D., 1985. Some observations of internal wave current fluctuations at the shelf-edge and their implications for sediment transport. *Continental Shelf Research* 4(4): 485—493.
- [13] Howell, T. L. and W. S. Brown, 1985. Nonlinear internal waves on the California continental shelf. *J. G. R.* 90(C4): 7256—7264.
- [14] Hughes, B. A., and H. L. Grant, 1978. The effect of internal waves on surface wind waves 1. Experimental measurements. *J. G. R.* 83: 443—454.
- [15] La Fond, E. C., 1962. *Internal Waves, The Sea*, Vol. 1, Interscience. New York, pp. 731—751.
- [16] Phillips, O. M., 1977. *The Dynamics of the Upper Ocean*. The Cambridge University Press Cambridge, pp. 206—217.
- [17] Robinson, I. S., 1985. *Satellite Oceanography*. Ellis Horwood Ltd., pp. 384—394.
- [18] Вуренков, В. И., А. П. Васильков и Л. А. Стефанцев, 1985. О дистанционном наблюдении внутренних волн по вариациям яркости солнечного излучения, рассеянного толщей вод океана. *Исследование Земли из Космоса* 5: 11—17.
- [19] Гришин, Г. А., С. А. Гродский, 1985. Оценка параметров двухслойной стратификации океана по спутниковым наблюдениям внутренних волн. *Исследование Земли из Космоса* 4: 3—8.

A STUDY ON SLAR IMAGE SIGNATURES OF INTERNAL WAVES IN THE SEA AREA NEARBY THE LAOSHAN BAY

Zheng Quanan, Wu Longye, Zhang Dong and Li Xiaofeng

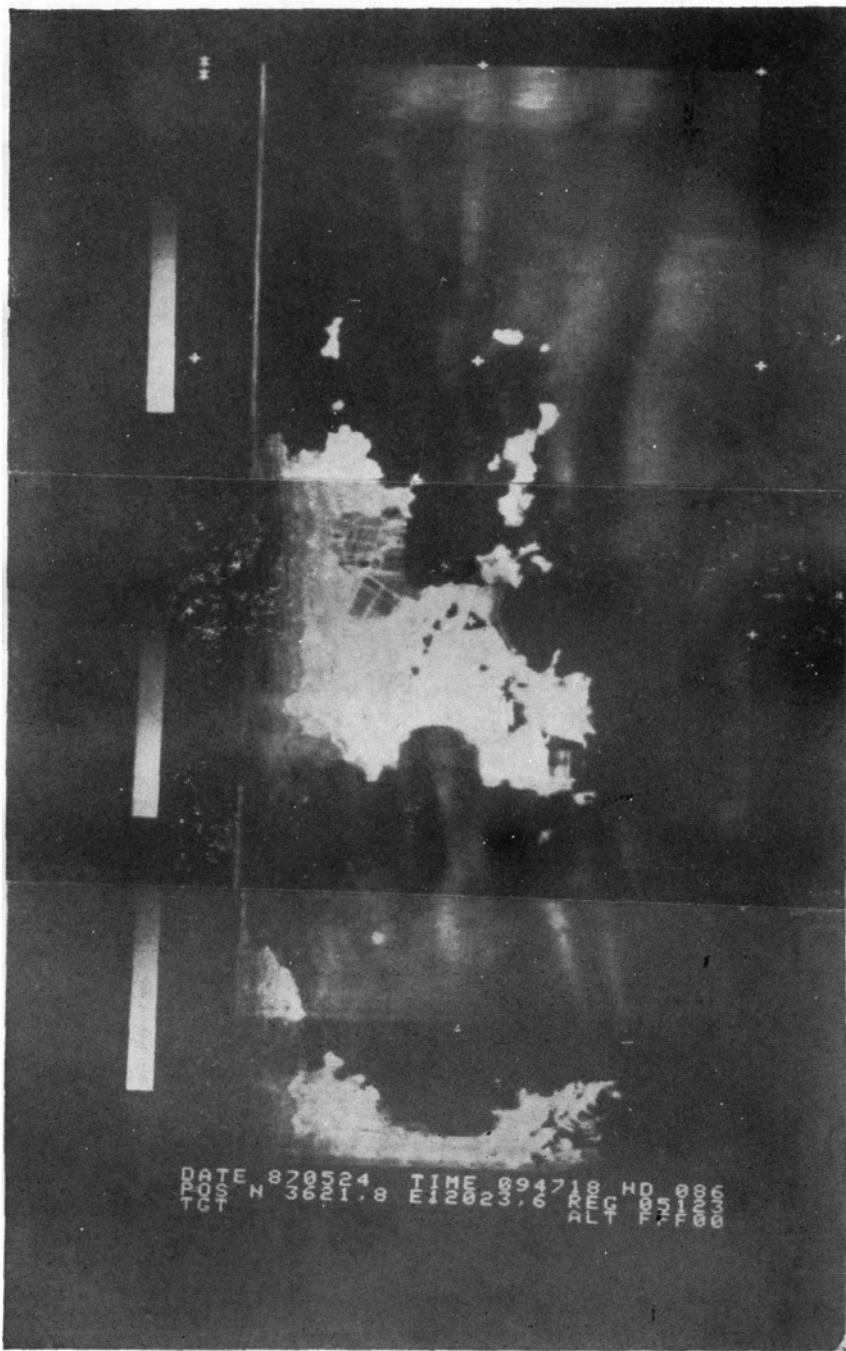
(First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao)

ABSTRACT

The internal wave is a kind of wave motion phenomenon associated with vertical stratification of sea water in the global oceans. On some conditions they may have the obvious features on the sea surface, which can be recorded by satellite or aircraft remote sensing images. Therefore, remote sensing image has become an important source of information for the study of internal wave.

During the marine airborne remote sensing experiment in May, 1987, the time series of SLAR images of internal waves occurring in the offshore shallow water nearby the Laoshan Bay of the western part of the Huanghai Sea ($36^{\circ}16'$ — $36^{\circ}30'$ N, $120^{\circ}45'$ — $121^{\circ}05'$ E) were obtained using an Ericsson SLAR of which the working frequency is 9.4 GHz, and the spatial resolution is $60 \times 75 \text{ m}^2$. This group of internal waves consist of eight waves with the average wavelength of $(1.32 \pm 0.24) \text{ km}$ and the average phase speed propagating shoreward of 38 cm/s measured from the images. The average period of the waves deduced from the theoretical model and the measurements is 57 min. The crest lines are about 40 km long recorded in the images.

The analyses indicate that this group of internal waves can be described by the lowest internal mode. When the average depth of thermoclines is taken as 5 m, and relative density difference 5.9×10^{-3} , the results deduced from the theoretical model agree with measurements of SLAR. The above-mentioned values to be taken are within the reasonable extent. Some observation data of internal waves taken in recent years are listed in the paper. Comparison indicates that the results obtained in this study are within the same extent as those given by the other investigators.



崂山湾附近海域内波的 SLAR 图象

A SLAR image of internal waves occurring in the sea area nearby the Laoshan Bay

1987年5月24日 09:47'18" 拍摄, 航高为 1000 m, 航速为 250 km/h。