

文章编号: 1007-4619(2007)01-0039-09

基于希尔伯特 黄变换的合成孔径雷达 内波参数提取新方法

甘锡林, 黄韦良, 杨劲松, 周长宝, 史爱琴, 金为民

(卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 国家海洋局 第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012)

摘 要: 基于希尔伯特 黄变换, 发展了合成孔径雷达内波参数提取的新方法, 解决了传统的傅里叶变换不能提取非线性内波群各个孤立子波信息的问题。利用该方法对巴士海峡附近的一幅 ERS-1 SAR 内波图像进行了内波参数提取。希尔伯特 黄变换对内波剖面数据进行了尺度分解, 根据归一化方差最大来提取内波分量。该方法具有自适应性。结果表明, 该方法获取的内波平均波长与傅里叶变换和小波分析具有较好的一致性, 提取得到的反映各个孤立子波信息的波形比小波分析的要清晰, 提高了数据的质量。通过提取的内波信号, 利用极值序列计算了剖面线前后段平均波长大小, 消除了谱分析当中的 180° 模糊问题。计算了明暗点的间隔, 反演得到各个孤立子波的半振幅宽度。利用 CTD 数据获得的跃层深度, 反演前导波振幅, 与验证算例结果在量级上一致。

关键词: 合成孔径雷达; 内波; 希尔伯特 黄变换; 经验模态分解

中图分类号: TP722.6/TP751.1 **文献标识码:** A

A New Method to Extract Internal Wave Parameters from SAR Imagery with Hilbert-Huang Transform

GAN Xi-lin, HUANG Wei-liang, YANG Jin-song, ZHOU Chang-bao, SHI Ai-qin, JIN Wei-min

(State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, Zhejiang Hangzhou 310012, China)

Abstract: A new method to extract internal wave parameters from SAR imagery has been developed based on the Hilbert-Huang Transform (HHT). Internal wave parameters have been retrieved from the ERS-1 SAR image in the Luzou strait. HHT is used to decompose the internal wave profile data. The internal wave component is extracted according to the maximum normalized deflection. The results show that the new method can not only extract the wavelength of internal waves but also extract wave shapes modulated by the internal waves. The mean wavelengths of the internal waves are calculated in order to solve the 180° ambiguity of the internal wave direction. The half width of each soliton is calculated. The internal wave amplitudes retrieved by this new method are about 104m which is in agreement with Liu's report.

Key words: SAR; internal wave; Hilbert-Huang transform; empirical mode decomposition

1 引 言

内波是发生在海洋内部的波动现象, 是引起海

水内部混合, 形成温、盐细微结构的主要原因。随着近代观测技术的进步, 人们普遍认识到, 海洋内波与海洋水声学、水下航行、海洋生物学、海洋光学、海洋沉积学、军事海洋学以及海洋水下建筑学等学科有

收稿日期: 2005-09-12; 修订日期: 2006-06-09

基金项目: 国家 863 项目 (编号: 2002AA633120)。

作者简介: 甘锡林 (1981-), 男, 毕业于南京大学大气科学系, 获理学学士学位。现为国家海洋局第二海洋研究所硕士研究生, 方向为海洋遥感, 主要研究兴趣是遥感数字图像处理、海洋遥感数值模拟与物理参数反演。E-mail: gaxilin@sohu.com.

着密切的联系^[1]。因此,提取内波参数,研究内波特性具有重要的意义。长期以来,它一直成为海洋学家潜心研究的前沿性课题^[2]。

目前人们通常利用锚系来测量内波。如简易温度锚系可以测量内波的时空特征,包括波长、振幅、传播方向和速度等^[3]。然而,锚系测量内波站点有限,水平分辨率不高,难于推算出具有较大空间尺度的内波的波长及传播方向等空间特征。大范围、全天时和高分辨率的合成孔径雷达(SAR)的出现,为内波探测提供了一种全新的方法^[4,5]。综合利用 SAR 数据、CTD 数据和海上同步测量数据等来研究海洋内波是当前的热点。人们从 SAR 图像直接获取的内波信息主要是波向和波长,提取方法包括傅里叶变换和小波变换^[6]。一般来说傅里叶变换有利于获得主波信息^[7],而实际 SAR 图像上常常出现一个个内波群,内波群由不同的波包组成,而同一个波包则包含着不同振幅不同宽度的孤立子波。波群的先导孤立子波必定是最大振幅波,而后继的孤立子波则振幅较小^[8]。采用傅里叶变换无法提取上述内波群的丰富信息。在理论上小波变换比傅里叶变换有所进步,可以获得内波波形信息。然而,小波变换本质上是窗口可变的傅里叶变换,不能解决非线性系统中的波内调制问题^[9]。小波变换的另一个缺点是窗口和小波基的选择具有不确定性。选择不同小波基其结果也不一样,因此最佳小波基的选取非常重要^[10]。

希尔伯特黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)是 Huang 等在 1998 年提出的^[9]。1999 年,他们对该方法作了改进和完善^[11]。HHT 的核心是经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)。Huang 等证明了 HHT 具有小波分析的全部优点,在分辨率上消除了小波分析的模糊和不清晰,具有更准确的谱结构。另外,EMD 能从空间域上直接得到物理意义非常明确的结果^[9,11]。

自 EMD 方法提出以来,在国内外得到大气科学、物理海洋、遥感、机械工程和生命科学等领域学者专家的高度重视。该方法在故障诊断检测、消噪和多尺度分离等方面得到了广泛的应用。如 Loutridis 等利用该方法对机器转子故障进行检测,取得了很好的结果^[12]。Flandrin 则证明了 EMD 方法具有很好的滤波特性^[13]。谭善文等利用 EMD 方法分析了近 400 年北半球气温变化,得出了不同时间尺度的气候变化有规律性的结果^[14]。合成孔径雷达图像噪声大,各种尺度的信息比较多,它使内波

信号受到干扰,进而影响内波参数的反演。EMD 方法的出现提供了内波信号处理的新思路。如 Zeng 等在讨论 EMD 方法的端点延拓的验证的时候,给出了采用 EMD 提取内波模态的一个例子。然而,Zeng 等的结果停留在定性分析的阶段^[15]。EMD 分解后到底哪个分量代表内波的信息,对于这个问题,目前还没有人给出定量的判别准则。本文结合 EMD 方法从能量大小的角度来探讨合成孔径雷达非线性内波信号的提取方法。目的主要有:一是比较希尔伯特黄变换、傅里叶变换和小波分析对内波波长提取效果;二是比较希尔伯特黄变换和小波变换对内波波形的提取效果;三是在提取内波波形的基础上对各个孤立波的半振幅宽度进行计算,进而通过 CTD 辅助数据反演孤立子波的振幅。效果评价采用定性分析,从原始信号和分离后的信号的比较以及内波成像的数学仿真模型来分析结果的好坏,对于内波振幅反演的精度评估方面,采用与 Liu 等的验证算例进行量级上的对比^[4]。

2 内波参数反演原理

描述非线性自由长内波在水平方向传播的 KDV 方程为^[4]:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + (C_0 + \alpha \eta + \alpha_1 \eta^2) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \beta \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} + \kappa \eta - \frac{\epsilon}{2} \frac{\partial \eta^2}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

式中, η 为内波纵向位移,参数 C_0 , α , α_1 , β , κ 和 ϵ 分别为线性项、一阶非线性项、二阶非线性项、弥散项、浅水项和耗散项的系数。如果假设海水由两层水体构成,上下层密度为 ρ_1 和 ρ_2 ,密度之差为 $\Delta\rho$,厚度分别为 h_1 和 h_2 ,水深 $h = h_1 + h_2$,则有:

$$\alpha = \frac{3C_0(h_1 - h_2)}{2h_1h_2} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{C_0h_1h_2}{6} \quad (3)$$

$$C_0 = \sqrt{\frac{g\Delta\rho h_1h_2}{\rho(h_1 + h_2)}} \quad (4)$$

内波相速度 C_p 和线性波速 C_0 之间存在以下关系:

$$C_p = C_0 \left[1 + \frac{\eta_0(h_2 - h_1)}{2h_1h_2} \right] \quad (5)$$

由(2)~(5)可知,当 $h_1 = h_2 = h/2$ 时,一阶线性项消失,并且 $C_p = C_0$ 。此处是内波极性转换点,可以根据极性转换处或 CTD 反演得到的 $C_p = C_0$ 点

处的水深直接获得内波的深度。

发生于海洋内部的内波之所以被 SAR 所探测到,是因为内波引起海表层流场发生辐聚或辐散,改变了海表面的粗糙度,进而影响海面雷达后向散射截面,在 SAR 图像上形成明暗相间的条纹。杨劲松等利用两层模式,通过对内波成像过程的推导,得出由稳定态孤立子内波引起的图像灰度值相对变化为^[16]:

$$\frac{\Delta I}{I_0} = B \operatorname{sech}^2(x'/D) \tanh(x'/D) \quad (6)$$

式中, I_0 是背景海面灰度值, ΔI 是内波海面的灰度值与背景海面灰度值之差, B 是与内波相速度、振幅、松弛率、内波深度、雷达视向等相关的系数, $x' = x - Ct$ 为随内波一起运动的坐标系, l 是内波半振幅宽度:

$$l = \frac{2h_1 h_2}{\sqrt{3\eta_0 |h_2 - h_1|}} \quad (7)$$

单个内波中最亮点和最暗点的位置,可以令(6)式对 x' 的求导为 0 确定:

$$\frac{\partial}{\partial x'} \left(\frac{\Delta I}{I_0} \right) = -\frac{B}{l} \operatorname{sech}^2(x'/D) [3 \tanh^2(x'/D) - 1] = 0 \quad (8)$$

(8)式的解是 $x' = \pm 0.661l$ 于是得到内波半振幅宽度 l 与单个内波最亮点和最暗点间隔 D 之间的定量关系式:

$$l = \frac{D}{1.32} \quad (9)$$

因此,只要计算出灰图图像上反映内波信息的最亮点和最暗点之间的间隔 D ,就有可能反演出内波半振幅宽度。如果把水深和半振幅宽度作为已知数值,从(4),(5),(7)和(9)式可知,要反演内波振幅必需知道混合层深度或相速度和海水的上下层密度。对于只有一个孤立子波群的 SAR 图像,无法计算一个半日潮周期内波的传播距离,因此无法直接从 SAR 图像上计算群速度和相速度。但如果辅助 CTD 数据获得混合层深度,则有可能从(7)式直接计算内波的振幅。两种方法可以互为补充。从(7)式也可以看到,振幅与半振幅宽度存在平方反比关系,换句话说,通过(7)式来反演内波振幅,对半振幅宽度的测量要求要准。

内波波向是内波的一个重要参数。杨劲松等分别利用傅里叶变换和小波变换来测量相邻子图像中的内波波长(在这种情况下,内波波长定义为相邻波峰或波谷之间的距离,这和灰图图像上反映内波

信息的相邻最亮点或最暗点之间的间隔是相等的),再利用海浪弥散关系来确定内波波向^[6]。

然而,由于 SAR 图像噪声大,提取内波波形和精确测量 D 值的困难较大,无法实现自动测量^[17]。EMD 方法能够把自然界本身内在的振动很好地分解出来,去噪能力强。本文主要研究如何利用 EMD 方法把反映内波调制的信号分离出来,进而为内波参数反演提供高质量的数据。

3 内波信号提取及参数反演方法

为了引进 EMD 方法提取内波信息,先简要介绍该方法。Huang 等提出的经验模态分解方法,实质是经验性地根据数据的特征尺度,把数据的内部振动函数区分开来,并相应地对数据分解。最终分解得到的本征模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF) 具有两个特征:(1)极值点数目与跨零点数目相等或最多相差一个;(2)由局部极大值构成的上包络和由局部极小值构成的下包络的平均值为零。这两个特征也是 EMD 分解结束的收敛标准。按照这样的标准能够保证计算得到的 IMF 保持振幅和频率调制的物理意义。

Huang 和 Shen 等给出 EMD 方法的过程如下^[9,11]:对时间序列信号 $X(t)$, 求出其局部极小和极大值,对局部极值通过三次样条插值构造信号的上下包络 $Up(t)$ 和 $Down(t)$, 计算上下包络的平均值:

$$m(t) = [Down(t) + Up(t)] / 2 \quad (10)$$

考察 $X(t)$ 与 $m(t)$ 的差:

$$h(t) = X(t) - m(t) \quad (11)$$

将 $h(t)$ 看作新的 $X(t)$, 重复以上过程,直到 $h(t)$ 满足 IMF 分量的特征条件。实际计算中,上下包络的平均值并不严格为 0, 可以定义结束标准为:

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{m_i^2(t)}{h_i^2(t)} \quad (12)$$

式中, n 是信号的长度。当 D 值小于一个给定的小量(一般取到 0.3 即可)时,就认为 $h(t)$ 基本不改变了。这时候得到第一个 IMF 分量 IMF_1 :

$$IMF_1 = h(t) \quad (13)$$

令 $r(t) = X(t) - IMF_1$, 把 r 作为新的 $X(t)$ 重复以上分解过程,得到一系列的 IMF 分量 IMF_1, IMF_2, \dots , 直到 $r(t)$ 不满足可分解的三个条件。也就是说分解的结果是:

$$X(t) = \sum_{i=1}^n \mathbf{M}F_i + r(t) \quad (14)$$

即把原始信号 $X(t)$ 分解成一系列的本征模态函数 $\mathbf{M}F_i$ 和趋势项 $r(t)$ 的和。从以上简介可以看出,该方法不需要像小波分析那样选择不同的小波基函数,自适应性很强。

本文所要分解的对象是一维内波剖面的灰度数据。通过 EMD, 可以把灰度信息从高频到低频层层分离出来。其中必有一层包含了内波的主要信息。根据波浪力学的观点, 海浪谱即方差谱^[18]。因此, 求出分解得到的每一层信号的方差并归一化, 可以估算出各层信号的相对能量的大小。内波的能量非常大, 因此归一化方差最大的信号即代表内波信号^[6]。

本文采用的归一化方差计算式是:

$$\sigma_i = \frac{\text{var}_i^2}{\sum_{i=1}^m \text{var}_i^2} \quad (15)$$

式中, m 代表分解的层数, var_i 代表 $\mathbf{M}F_i$ 的方差。

根据以上讨论, 利用 EMD 进行内波信号提取及参数反演的过程如下: (1) 对 SAR 图像进行几何校正、图像滤波和增强等预处理; (2) 选取内波灰度剖面数据; (3) 对数据进行经验模态分解得到 m 个本征模态函数 $\mathbf{M}F_i$; (4) 计算各个 $\mathbf{M}F_i$ 的方差并归一化; (5) 比较得出方差最大的分量即代表内波分量; (6) 对内波分量计算局部极值对应的下标序列 $\text{LocaM}(i)$, $i=1, \dots, p$ p 是局部极值的数目; 根据下标序列对内波的亮暗点进行定位; (7) 根据序列 LocaM 和分辨率, 计算各个孤立子波的最亮与最暗的间隔 (D) 以及相邻孤立子波波峰或波谷间隔 (波长); 根据剖面线前后段内波波长的平均大小确定内波的传播方向; (8) 根据内波参数反演原理, 计算各个孤立子波的半振幅宽度; 如果借以其他的辅助数据, 还可进一步计算各个孤立子波的振幅等。

4 实例研究

4.1 SAR 内波图像

研究所用图像是 1995 年 6 月 16 日 10 时 29 分的 ERS-1 SAR 图像 (图 1)。该图像成像波段是 C 波段, 图像中心经纬度是北纬 $20^{\circ}01'55''$, 东经 $120^{\circ}17'45''$, 位于台湾以南海域, 巴士海峡附近。图像宽幅为 100 km, 像素点之间的距离是 12.5 m, 方

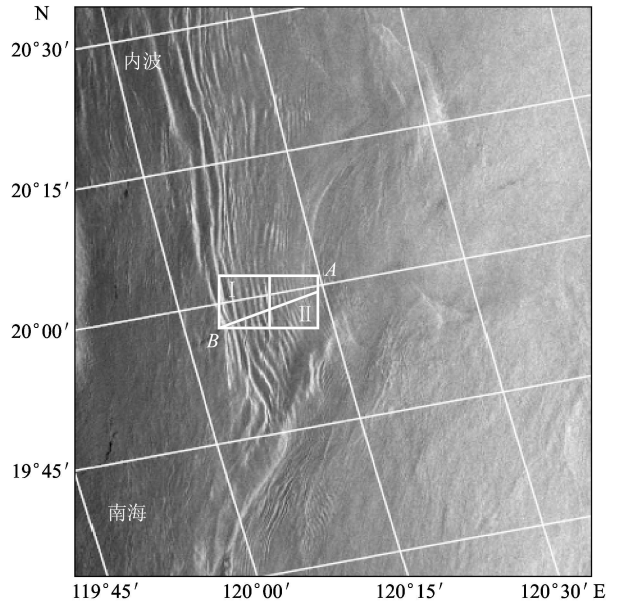


图 1 1995 年 6 月 16 日巴士海峡内波 SAR 图像、
取样数据线 AB、子图像 I 和 II

Fig 1 ERS-1 SAR image showing internal solitons packets in the Luzon Strait on June 16, 1995

向与北向的夹角是 192.8° 。该图显示了黑潮经过巴士海峡入侵南海形成较强的内波^[4]。逆着内波传播方向看, 该内波是明一暗相间的, 属于下降型内波, 而内波波包长达 200 km, 每一个波包含有超过 10 个孤立波, 宽达 25 km, 从前导波往后波长逐渐减小, 同步的测量数据证明, 该内波的前导波最大振幅达到 100 多 m^[4]。

4.2 傅里叶分析方法

为了获取内波波长并确定内波传播方向, 同时选取图 1 中紧邻的子图像 I 和 II, 对该子图像进行二维快速傅里叶变换, 得到内波能量的空间谱分布如图 2(a) 和 (b) 所示。图 2 中, 距离向波数用 k_x 表示, 方位向波数用 k_y 表示, 单位是 rad/m, 则二维波数 $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$, 波长 $\lambda = 2\pi/k$ 。主波波数在图 2 中用 “×” 号表示, 峰值连线的方向平行于内波传播方向。可以看出, 单个子图波数谱存在 180° 模糊问题。但根据计算得出图 2(a) 中主波波长是 1265 m, 图 2(b) 中主波波长是 912 m, 两者的平均波长是 1088 m, 利用海浪弥散关系可以确定内波从 II 往 I 传播, 图 2(a) 波向是 8.1° ; 图 2(b) 波向是 11.3° 。然而, 从图 2 只获得了主波波长和波向信息, 内波波群的其他信息如半振幅宽度难以从中获得。而在内波参数反演中, 半振幅宽度却是重要的物理量。

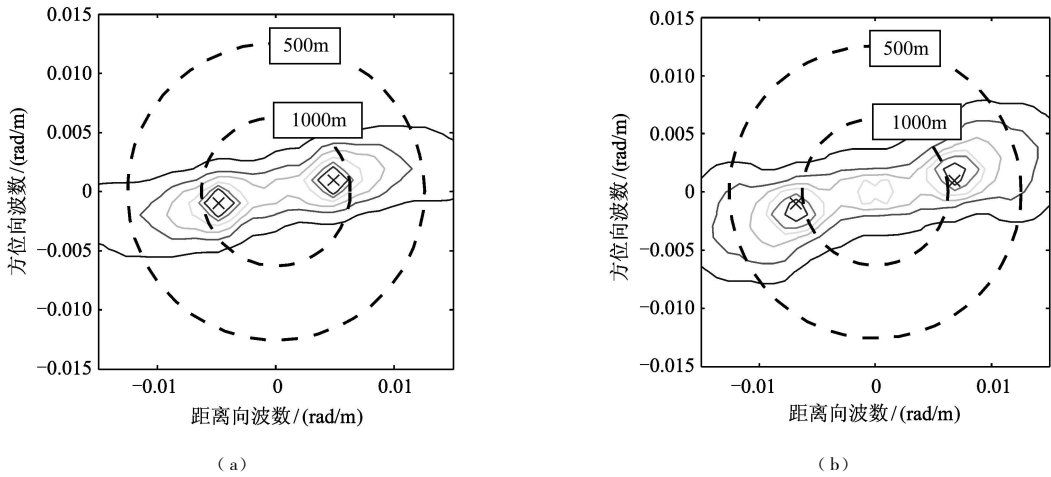


图 2 子图像 I (a)和 II (b)的二维波数谱

Fig 2 Wave spectrum for I (a) and II (b) subimages

4.3 EMD 方法和小波分析

为了提取内波信号,取图 1 中横跨子图 I 和 II 的 AB 线灰度剖面为研究对象,进行 Symmlet 小波分解和经验模态分解得到图 3。图 3 中横坐标是像元数,相邻两点距离为 12.5m,图 3(a)中分量 1—10 表示 Symmlet 小波分解后的 10 个分量 $S_1 \sim S_{10}$ ^[19],图 3(b)中模态 1—10 表示 EMD 分解后的 10 个本征模态函数 $IMF_1 \sim IMF_{10}$ 。对这些分量分别计算方差并利用 (15) 式归一化后的结果见表 1。采用一维傅里叶变换可以计算每个分量的波长,结果也列在表 1 中。根据内波信号归一化方差最大的原理可以自动检测出内波分量。从表 1 可看出, Symmlet 小波分解的第 6 分量 S_6 和 EMD 分解的第 8 分量 IMF_8 代表内波分量,两者的波长都在 1097m 左右。这和傅里叶变换获得的平均波长是一致的。

把原始数据、 S_6 分量和 IMF_8 分量绘制在一起,得到图 4。从图 4 可以看出, S_6 分量和 IMF_8 分量的波动起伏情况基本和原始序列内波波动情况一致。这也间接地验证了采用方差最大原则可以检测内波分量的理论结果。从图 4 还可以看出,在信号的两端, IMF_8 分量保持了原始内波序列的一个特征波,而 S_6 分量则没有反映出这个特征波,这正是 EMD 方法具有高分辨率高清晰度的直接体现。另外,在 350—450 的地方, S_6 分量存在模态混淆现象。从波形的分布来看, IMF_8 分量更加符合内波成像仿真模型 (6) 式体现的 $\text{sech}^2 x \tanh x$ 函数关系,而 S_6 则与之差别大。因此, IMF_8 分量更接近内波波动的物理本质,更加适合用来提取内波参数。

表 1 小波分解和经验模态分解的各分量的归一化方差和波长

Table 1 The normalized deflection and wavelength for each m ode by wavelet deccm position and em p i r i c a l m ode deccm position

分量	Symmlet 小波分解		EMD 分解	
	归一化方差	波长	归一化方差	波长
1	0.0545	46	0.0834	41
2	0.1563	82	0.0446	73
3	0.1425	162	0.0589	140
4	0.0552	234	0.0288	146
5	0.0781	713	0.0181	250
6	0.5079	1097	0.0053	432
7	0.0029	1585	0.0305	713
8	0.0000	3566	0.0729	1097
9	0.0013	7131	0.0031	1585
10	0.0012	14263	0.0004	3566

如果分别在图 1 的子图 I 和 II 选取剖面线,计算内波波长,也可以消除谱分析当中的 180° 问题,确定波向,本文在此不再重复^[6]。本文从选取的剖面线前后段的平均波长来直接确定波向。如图 4 (b) 中,从 IMF_8 分量振幅最大的一端算起,依次计算局部极值对应的 X 轴下标,得到序列 $LocaM(i), i=1, \dots, p$ 。根据局部极值序列可以得到计算孤立子波相邻亮点距离,得到内波波长:

$$\lambda_i = [LocaM(2 \times i - 1) - LocaM(2 \times i + 1)] \times 12.5, \quad i = 1, \dots, m - 1 \quad (16)$$

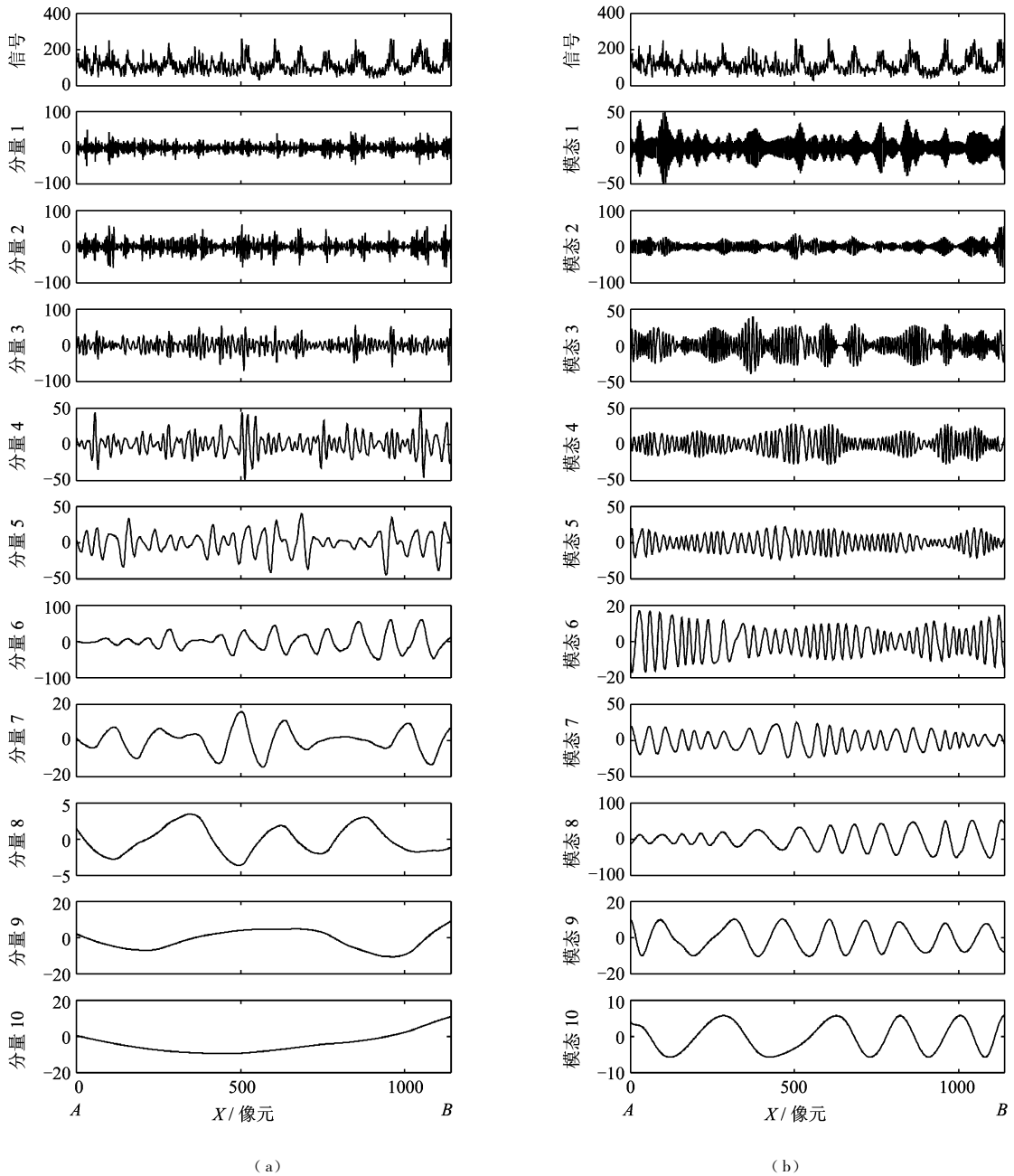


图 3 内波剖面的小波分解 (a) 和经验模态分解 (b)

Fig 3 Wavelet decomposition (a) and empirical mode decomposition of the internal wave profile

式中, $m = n/2$ 是孤立子波数目。对图 4(b) 中序号为 1—8 和 9—13 的内波波长进行计算, 平均值分别为 1159.4m 和 897.5m, 由此可以判断内波从 A 往 B 方向传播, 这也可消除单个子图像谱分析当中的 180° 模糊问题。

根据局部极值序列也可以计算孤立子波亮暗点距离:

$$D_i = [\text{Loca M}(2 \times i - 1) - \text{Loca M}(2 \times i)] \times 12.5, \quad i = 1, \dots, m \quad (17)$$

根据 (17) 式和内波半振幅公式 (7), 对 MF₈ 分量前 1—8 个孤立子波进行计算的最终结果如表 2 所示。从表 2 可看出, 每个孤立波的半振幅宽度是不同的, 说明内部含有不同振幅的孤立波。前导波 (序号 1) 半振幅宽度小, 根据 (7) 式得知相应的振幅大, 传播最快。

由于 Liu 等未给出相应的同步观测数据^[4], 本文未能用同步的 CTD 数据来反演内波振幅。但有幸查得了 1991 年 7 月 10 日, 跨越图像的 CTD 数

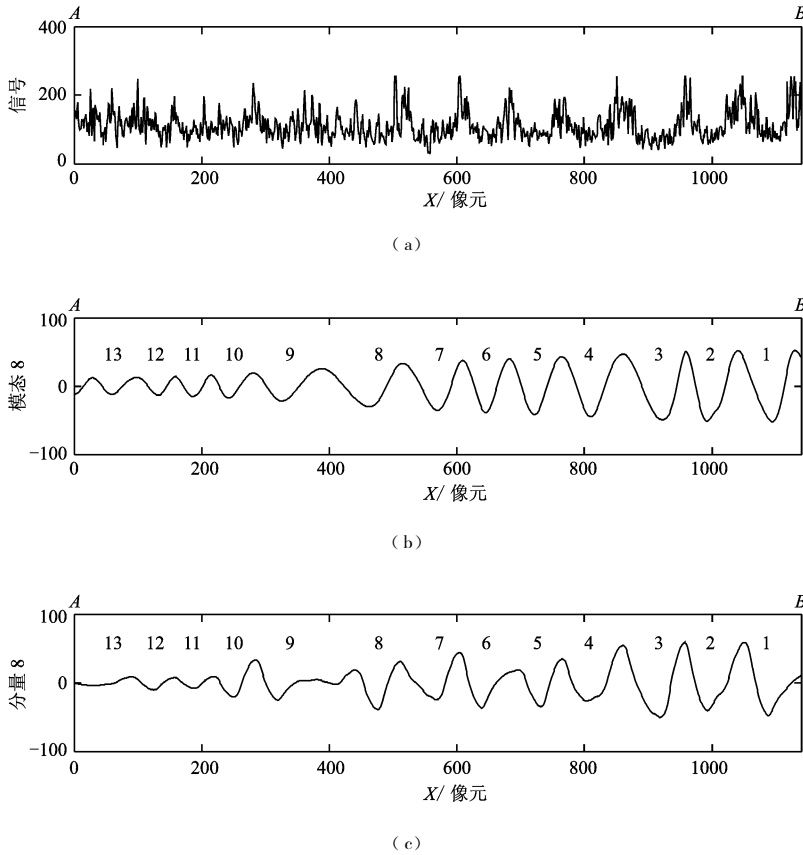


图 4 AB线灰度数据 (a)、EMD分解的第 8 个本征模态分量 (b)和小波分解的第 6 个分量 (c)

Fig 4 Gray intensity data of AB line(a), the 8th component IMF_8 by EMD (b) and the 6th component S_6 by wavelet analysis(c)

表 2 孤立子波序列半振幅宽度的计算结果

Table 2 Half width along a solitons wave packet

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
$D_i(m)$	437.5	612.5	450.0	637.5	525.0	475.0	500.0	662.5
$l_i(m)$	331.4	464.0	340.9	483.0	397.7	359.8	378.8	501.9

据^[20],这可以用来粗略估计该海域附近的夏季混合层深度。图 5 中的三角符号表示 CTD 仪器放置位置,从北往南经纬度坐标分别为 $120.72^\circ E, 20.405^\circ N, 120.715^\circ E, 20.067^\circ N$ 和 $120.72^\circ E, 19.73^\circ N$,图中的虚线框为图像的位置,等值线为相应的水下地形等深线。图 6 显示了前两个 CTD 仪器温盐随水深变化的关系。从图 6 可判断混合层深度大致为 46m。而图像位置的水深大致为 4000m,利用表 2 序号 1 计算的半振幅宽度从 (7) 式可以反演出前导波的振幅为:

$$\eta_0 = \frac{4h_1^2 h_2^2}{\bar{I}^2 3\eta_0 |h_2 - h_1|} = 104(m) \quad (18)$$

该反演值与 Liu 等的报道结果十分接近。

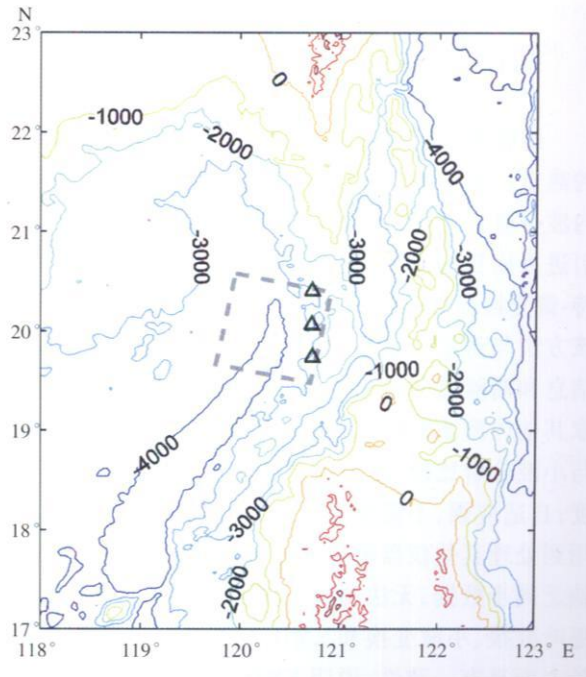


图 5 巴士海峡附近水深图,内波图像和 CTD 仪器位置

Fig 5 Bathymetry map of the Luzou Strait the location of

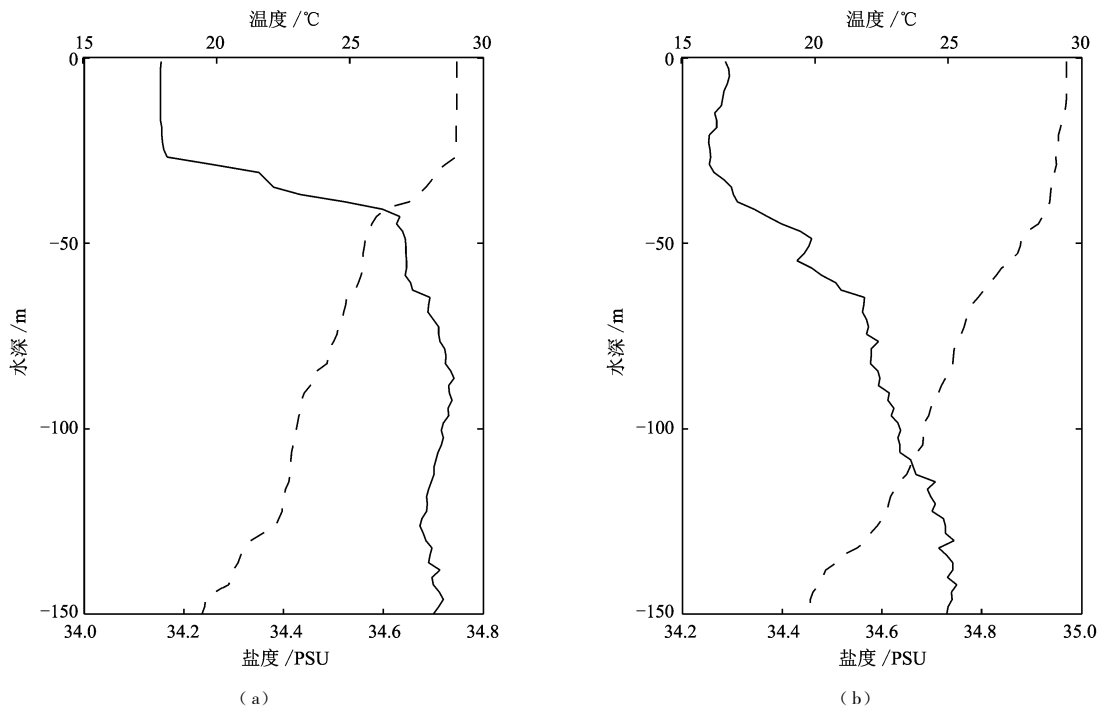


图 6 位于 $120^{\circ} 72' E, 20^{\circ} 405' N$ (a) 和 $120^{\circ} 715' E, 20^{\circ} 067' N$ (b) 的 CTD 仪器测量的温度 (虚线)、盐度 (实线) 剖面

Fig 6 Temperature and salinity profiles from CTD casts at $120^{\circ} 72' E, 20^{\circ} 405' N$ (a) and (b) $120^{\circ} 715' E, 20^{\circ} 067' N$

这说明反演方法是可行的。而从表 2 中最大的半振幅宽度反演得到的内波振幅是 45m, 这说明在内波波包中, 存在振幅不同的孤立子波, 前导波振幅最大。

5 结论与展望

综合利用多种数据研究海洋内波是当今国际上的热点。由于噪声多, 如何从复杂的信号当中提取内波分量, 是 SAR 数据处理其中的一个难题。本文引进采用目前非线性信号处理的前沿方法希尔伯特-黄变换提取合成孔径雷达内波参数。结果证明该方法与傅里叶变换相比, 除了能够提取主波波长信息和消除谱分析当中的 180° 模糊问题外, 还能提取其他内波波群信息, 如半振幅宽度和内波波群等。与小波分解比较, 该方法具有更高的分辨率和清晰度; 自适应性强, 不需要人为干预。该方法可以推广应用到处理其他仪器测量的内波剖面数据。然而由于缺乏同步数据, 无法与海上试验数据进行对比, 但傅里叶变换、小波变换和 EMD 三种方法在提取内波波长方面具有一致性, 说明 EMD 方法是有效的。反演得到的内波振幅与验证算例十分相近, 也说明反演方法可行。以往的内波参数反演当中, 只利用了内波图像中的明暗间隔信息, 很少用到内波的后向散

射截面来反演内波参数, 如何充分利用 EMD 分解后的内波模态分量, 研究内波信号与内波 KDV 方程各种参数之间的关系, 是下一步继续探讨的内容, 也是未来研究的一个方向。

参考文献 (References)

- [1] Xu Z T. Dynamics of Ocean Internal Waves [M]. Beijing: Science Press, 1999. [徐肇廷. 海洋内波动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.]
- [2] Cai S Q, Gan Z J, Long X M. Characteristics and Evolution of Internal Solitons in the Northern South China Sea [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(5): 1245-1250. [蔡树群, 甘子钧, 龙小敏. 南海北部孤立子内波的一些特征和演变 [J]. 科学通报, 2001, 46(15): 1245-1250.]
- [3] Chen S H, Wu L X, Zhang R H, et al. Characteristics of Internal Waves in the South China Sea and Their Induced Fluctuation Acoustic Intensity Field [J]. Progress in Natural Science, 2004, 14(10): 1163-1170. [陈守虎, 吴立新, 张仁和等. 南中国海内波特征及其引起的声场起伏 [J]. 自然科学进展, 2004, 14(10): 1163-1170.]
- [4] Liu A K. Evolution of Nonlinear Internal Waves in the East and South China Seas [J]. J. Geophys. Res., 1998, 103(C4): 7995-8008.
- [5] Alpers W. Theory of Radar Imaging of Internal Waves [J]. Nature, 1985, 314: 245-247.
- [6] Yang J S, Zhou C B, Huang W G, et al. Study on Extracting Internal Wave Parameter of SAR Images [J]. Remote Sensing

- Technology and Application, 2003, **15**(1): 6-9 [杨劲松, 周长宝, 黄韦良等. 合成孔径雷达图像内波参数提取方法研究 [J]. 遥感技术与应用, 2003, **15**(1): 6-9.]
- [7] Yang J S, Huang W G, Zhou C B. A New Method on Wave Propagation Direction Determination from SAR Imagery [J]. Journal of Remote Sensing, 2002, **6**(2): 113-116 [杨劲松, 黄韦良, 周长宝. 星载 SAR 海浪遥感中波向确定的一种新方法 [J]. 遥感学报, 2002, **6**(2): 113-116.]
- [8] Cai S Q, Gan Z J. Progress in the Study of the Internal Soliton in the Northern South China Sea [J]. Advance in Earth Sciences, 2001, **16**(2): 215-219 [蔡树群, 甘子钧. 南海北部孤立子内波的研究进展 [J]. 地球科学进展, 2001, **16**(2): 215-219.]
- [9] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis [J]. Proc R Soc Lond A, 1998, **454**: 903-995.
- [10] Ródenas J A. Wavelet Analysis in SAR Ocean Image Profiles for Internal Wave Detection and Wavelength Estimation [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1997, **35**: 933-945.
- [11] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. A New View of Nonlinear Water Waves: the Hilbert Spectrum [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999, **31**: 417-457.
- [12] Loutrikis S J. Damage Detection in Gear Systems Using Empirical Mode Decomposition [J]. Engineering Structures, 2004, **26**: 1833-1841.
- [13] Flandrin P, Rilling G, Goncalves P. Empirical Mode Decomposition as a Filter Bank [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, **11**(2): 112-114.
- [14] Lin Z S, Wang S G. EMD Analysis of Northern Hemisphere Temperature Variability During Last 4 Centuries [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2004, **20**(1): 91-96 [林振山, 汪曙光. 近四百年北半球气温变化的分析: EMD 方法的应用 [J]. 热带气象学报, 2004, **20**(1): 91-96.]
- [15] Zeng K, He M X. A Simple Boundary Process Technique for Empirical Mode Decomposition [J]. IEEE, 2004, **2**(4): 4258-4267.
- [16] Yang J S, Huang W G, Zhou C H, et al. The Feasibility of Applying SAR Imagery to the Estimation of Wave Depth and Amplitude [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2003, **1**: 29-32 [杨劲松, 黄韦良, 周成虎等. 利用 SAR 图像计算内波深度和振幅的可行性研究 [J]. 国土资源遥感, 2003, **1**: 29-32.]
- [17] Yang J S. The Synthetic Aperture Radar Remote Sensing Technology for Wind Fields, Ocean Wave and Internal Waves [M]. Beijing: Ocean Press, 2005. [杨劲松. 合成孔径雷达海面风场、海浪和内波遥感技术 [M]. 北京: 海洋出版社, 2001.]
- [18] Zhu Y R. Wave Dynamics for Ocean Engineering [M]. Tianjing: Tianjing University Press, 1991. [竺艳蓉. 海洋工程波浪力学 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1991.]
- [19] Hu C H, Li G H, Liu T, et al. System Analysis and Design Based on MATLAB 6.x [M]. Xian: Xian University Press, 2004. [胡昌华, 李国华, 刘涛等. 基于 MATLAB 6.x 的系统分析与设计——小波分析 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.]
- [20] Liu C T. The CLIVAR and Carbon Hydrographic Data Office (CCHDO). http://whpo.ucsd.edu/data/repeat/pacific/p21_b/index.htm. 2005. [刘超腾. 全球海洋碳和水文数据中心. http://whpo.ucsd.edu/data/repeat/pacific/p21_b/. 2005.]
- [21] Liu A K, Ramp S R, Zhao Y H, et al. A Case Study of Internal Solitary Wave Propagation During ASIAEX 2001 [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, **29**(4): 1144-1156.