

海浪方向谱估计方法的比较*

赵栋梁 管长龙 吴克俭 文圣常

(青岛海洋大学物理海洋研究所, 青岛 266003)

摘 要 分别利用数值模拟和实测资料对目前被认为分辨力较高的最大似然法(MLM)、扩展本征矢方法(EEV)、扩展最大熵方法(EMEP)以及贝叶斯方法(BDM)等四种海浪方向谱估计方法的可靠性进行了分析, 从不同频率、不同噪声水平和不同方向集中度三个角度检验其再现性、稳定性和实用性, 结果表明 MLM、EEV 和 BDM 大致给出相同的方向分布, 其中 BDM 的再现性最好, 但实用性逊于 MLM 和 EEV, EMEP 由于稳定性差, 不适用于实测资料的分析.

关键词 海浪方向谱 估计方法 最大似然法 扩展本征矢方法 扩展最大熵方法 贝叶斯方法

1 引言

海浪方向谱一直是海浪研究的中心课题之一, 它不仅对海浪理论本身, 而且对海浪预报、海洋工程以及日益发展起来的海洋遥感技术都是至关重要的. 虽然人们从 60 年代起对这一问题进行了不懈的探索, 但迄今为止对方向谱的性质了解甚少. 这主要存在两个方面的困难, 首先是难以得到高质量的观测资料, 原则上只有获得每一时刻和地点的浪场信息, 其方向谱才是唯一确定的. 在实际应用中, 一般取有限风区这种理想情形, 认为浪场具有平稳性和各态历经性. 其次, 即使如此, 也需要浪场各个地点的无穷多个信息, 而我们只能记录浪场的有限信息, 如何自这些并不完整的资料之中尽量正确地提取出海浪方向分布的特征, 则涉及到方向谱的估计方法问题.

由有限数据估计海浪方向谱的基本思想最先由 Barber^[1]提出. 由同一物理量在不同位置处的时间序列(仪器阵列情形)或者浪场中某一点处不同物理量的时间序列(定点测量如浮标情形)经傅氏变换构成交叉谱, 海浪的方向分布信息则蕴含在这些交叉谱中. Isobe 等^[2]通过引入不同物理量间的传递函数, 使得仪器阵列、定点测量浮标以及它们的混合均可以看成是一个测量不同海浪特性的复合阵列. 交叉谱与方向谱之间的关系可以写成

本文于 1997-07-02 收到, 修改稿于 1997-10-14 收到.

* 教育部博士点基金资助项目(编号: 98042302)和山东省自然科学基金资助项目(编号: Q 98E 04141).

第一作者简介: 赵栋梁, 男, 34 岁, 讲师, 博士, 从事近岸海浪运动研究.

$$\Phi_{mn}(\omega) = \int_k H_m(\vec{k}, \omega) H_n^*(\vec{k}, \omega) \exp[-i\vec{k} \cdot (\vec{x}_n - \vec{x}_m)] S(\vec{k}, \omega) d\vec{k} \quad (1)$$

(m, n = 1, 2, \dots, M),

式中, Φ_{mn} 为复合阵列中第 m 个与第 n 个海浪特性间的交叉谱; $S(\vec{k}, \omega)$ 为海浪的波数频率谱; $H_m(\vec{k}, \omega)$ 和 $H_n(\vec{k}, \omega)$ 分别为第 m 个和第 n 个海浪特性与波面间的传递函数, 其具体形式参见文献[2, 3]; \vec{x}_m 和 \vec{x}_n 为第 m 个和第 n 个测头位置矢量; \vec{k} 和 ω 分别为组成波波数矢量和圆频率; M 为复合阵列的维数.

所谓方向谱估计就是作式(1)的逆变换. 由于已知的 $\Phi_{mn}(\omega)$ 总是有限的, 所以其逆变换并不是唯一的, 因而问题的反演是多解的. 如何得到一个与实际最为接近的估计值, 人们先后提出了许多方法, 其中分辨力较强的有 MLM^[2]、EEV^[3, 4]、EMEP^[5] 和 BDM^[6]. 由于观测资料的限制, 一个估计方法的可靠性一般是通过数值模拟的方式来检验的, 并且仅以某种特定的频率和噪声水平进行, 显然, 这种方式带有一定的局限性, 同时, 除有些作者对其中的两种方法进行过比较外^[7], 四种估计方法之间几乎没有直接比较其优劣性. 本文试图利用数值模拟和实测资料对上述估计方法进行较为彻底的分析、比较和检验.

2 四种海浪方向谱估计方法

2.1 MLM

MLM 最早由 Capon 等^[8] 提出, 其基本思想认为由观测得到的交叉谱中含有噪声, 获得方向谱是自噪声中检测出信号的问题. Isobe 等^[2] 将其推广, 建立了扩展最大似然法, 可应用于各种复合阵列, 其表达式如下:

$$\hat{S}(\vec{k}, \omega) = \frac{K}{\sum_{mn} \Phi_{mn}^{-1}(\omega) H_m^*(\vec{k}, \omega) H_n(\vec{k}, \omega) \exp[-i\vec{k} \cdot (\vec{x}_n - \vec{x}_m)]}, \quad (2)$$

式中, $\Phi_{mn}^{-1}(\omega)$ 为交叉谱矩阵 $\Phi(\omega)$ 的逆矩阵 $\Phi^{-1}(\omega)$ 第 (m, n) 个元素; $\hat{S}(\vec{k}, \omega)$ 为方向谱的估计值; K 为比例系数.

2.2 EEV

本征矢方法首先由 Marsden 和 Juszko^[9] 提出并应用于浮标情形, 后经管长龙等^[3, 4] 加以推广, 成为可适用于任何复合阵列的扩展本征矢方法. 这种方法源于声波探测, 认为事先可把交叉谱矩阵分为信号部分 $I_{mn}(\omega)$ 和含噪声部分 $N_{mn}(\omega)$, 即

$$\Phi_{mn}(\omega) = I_{mn}(\omega) + N_{mn}(\omega). \quad (3)$$

一般这可通过交叉谱矩阵本征值的大小来划分它, 方向谱估计值可写为

$$\hat{S}(\vec{k}, \omega) = \frac{K'}{\sum_{mn} N_{mn}^{-1}(\omega) H_m^*(\vec{k}, \omega) H_n(\vec{k}, \omega) \exp[-i\vec{k} \cdot (\vec{x}_n - \vec{x}_m)]}, \quad (4)$$

式中, K' 为比例系数. 显然, 若认为整个交叉谱均含有噪声, 即 $I_{mn}(\omega) = 0$, 则 EEV 即为 MLM.

2.3 EMEP

这种方法不是直接作式(1)的逆变换得到方向谱, 而是将方向分布函数 $G(\theta, f)$ 视为区间 $[-\pi, \pi]$ 上的概率密度函数, 在 Shannon 熵最大前提下, $G(\theta, f)$ 可以写成

$$G(\theta, f) = \exp\left[\sum_{n=1}^N (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta)\right]. \quad (5)$$

将式(5)直接代入式(1),求解非线性积分方程组来确定系数 a_n 和 b_n ,从而得到方向分布函数,这种计算过程非常繁杂.桥本等^[5]利用泰勒级数展开,由低次向高次逐步逼近的方法,巧妙地解决了这一问题.

2.4 BDM

Hashimoto 等^[6]将 Bayesian 模型引入海浪方向谱的估计,首先对方向分布函数 $G(\theta, f)$ 均匀离散化:

$$G(\theta, f) = \sum_{k=1}^N \exp[x_k(f)] I_k(\theta), \quad (6)$$

$$I_k(\theta) \begin{cases} 1 & (k-1)\Delta\theta \leq \theta \leq k\Delta\theta, \\ 0 & \text{其他 } \theta, \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\Delta\theta = 2\pi/K$, K 为均匀等分的份数.同时考虑到方向分布函数应是光滑连续的,又给出限制条件:

$$x_k - 2x_{k-1} + x_{k-2} \approx 0. \quad (8)$$

以赤池情报基准判据 ABIC 最小作为标准,任意给定初始值,逐步去逼近真实分布,其中还引入了可以任意选取的超参数 u ,在某种程度上增加了计算的复杂性.

3 数值模拟

通常的数值模拟是在某一特定频率和噪声水平下进行的,为克服这一局限性,我们以四种不同的频率 $f=0.5$ 、 1.0 、 1.5 、 2.0 Hz 和四种不同的噪声水平 $NS=1\%$ 、 5% 、 10% 、 15% 进行计算,输入的方向分布函数为

$$\hat{G}(\theta) = A \cos^{2s} \frac{\theta}{2}, \quad (9)$$

式中, s 称为方向集中度,分别取 5 、 10 、 20 、 30 ;常数 A 为归一化系数.所用阵列为由 18 个波高计等间距排列组成的直径为 40 cm 的圆形阵列.限于篇幅,这里只能给出一些代表性的结果(见图 1).

根据数值模拟结果,可以从再现性、稳定性和实用性三个角度比较 MLM、EEV、EMEP 和 BDM 四种估计方法.再现性是指估计值逼近真值的程度;稳定性是指计算是否稳定、结果是否发散等;实用性则是指计算时间的长短、难易程度等.

无论对于何种噪声水平,MLM 的再现性随频率增大而变优.总的说来,MLM 的峰值略低于输入谱,而噪声水平越高,其峰值就越低.方向集中度 s 的大小似乎不影响 MLM 的结果.就再现性而言,MLM 优于 EEV,但劣于 EMEP 和 BDM.

从理论上讲,对同样的数据进行处理,由 EEV 得到的方向分布要比 MLM 窄,数值模拟结果也确实如此.就我们所给的噪声水平,EEV 的结果总是窄于实际分布,并且频率越高越明显,再现性亦愈差,同时随噪声水平的提高更加显著.同 MLM 一样,方向集中度 s 似乎不影响 EEV 的结果.

这里需要特别强调指出的是在某些情况下,MLM 和 EEV 不能正确地辨别主波向,当噪

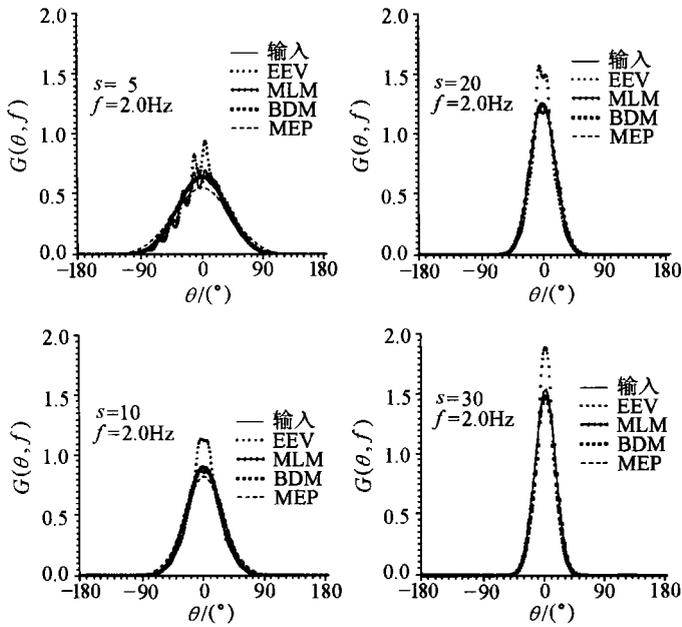


图 1 对应噪声水平 $NS = 10\%$ 、频率 $f = 2.0$ Hz 且方向集中度 s 分别为 5、10、20、30 时四种不同估计方法的比较(数值模拟)

声水平较高时尤为明显,一方面表现为偏离主波向,另一方面表现为产生奇怪的双峰或多峰方向分布,有时亦表现为“秃头”现象。这似乎与估计方法本身存在某种不稳定性有关,适当调整噪声水平,可以消除这种现象,但彼此之间并无确定关系。

由数值模拟结果看,EMEP 的再现性明显依赖于方向集中度 s ,当 s 较小时,EMEP 的结果比实际分布要宽, s 越大,估计值越接近真实分布,可以达到几乎完全相同的地步;当分布较宽且频率较低时(如 $f = 0.5$ 、 $s = 5$ 的情形),EMEP 的结果不但较宽且偏离主波向。与 MLM 和 EEV 不同,以上情况与噪声水平无关。尽管 EMEP 采取由低次向高次逐次迭代方法,大大提高了计算稳定性,但不收敛的情形仍有发生,稳定性略逊于 MLM 和 EEV;由计算时间看,由于 EMEP 需要迭代求解,每一过程的计算时间大约是 MLM 和 EEV 的 20 倍。

除低频且方向集中度较大时 BDM 的结果略窄于真实分布外,其结果几乎跟实际分布完全一致,并且没有主波向偏离,不受噪声水平、分布宽窄以及频率大小的影响。结果表明,只要超参数 u 取得足够大,就能够找到 ABIC 的极小值,且与 u 的大小无关,只是相应地增加了计算时间。BDM 的再现性和稳定性明显优于其他三种方法,但计算时间一般是 MLM 和 EEV 的 400 倍左右。

4 实测资料检验

上一节我们用数值模拟的方式对四种不同的估计方法进行了分析和比较,尽管从分布宽窄、噪声水平高低和频率大小三个不同角度提供了模拟数据,但是可以想象,同实测资料相比,模拟数据还是显得单纯得多。因为我们的最终目的是自观测资料获得海浪方向谱,故研究估计方法

对于实测资料的适应性就显得非常重要. 本文所用实测资料是利用 18 个波高计组成的直径为 40 cm 的圆形阵列获得的不同风速和不同风区下的实验室资料^[10], 取样频率为 50 Hz.

通过对大量实测资料进行计算, MLM 和 EEV 均表现出相当的稳定性, 没有出现数值模拟时的发散情形, 大概是由于这两种方法都要求有噪声存在以保证其计算的稳定性, 而实际风浪资料本身已提供了足够的噪声, 表明两者对实测资料具有较强的适应性. 还有一个特点是 EEV 的结果一般比 MLM 要窄一些, 频率越低, 这种现象越明显(见图 2). 这可以解释为低频

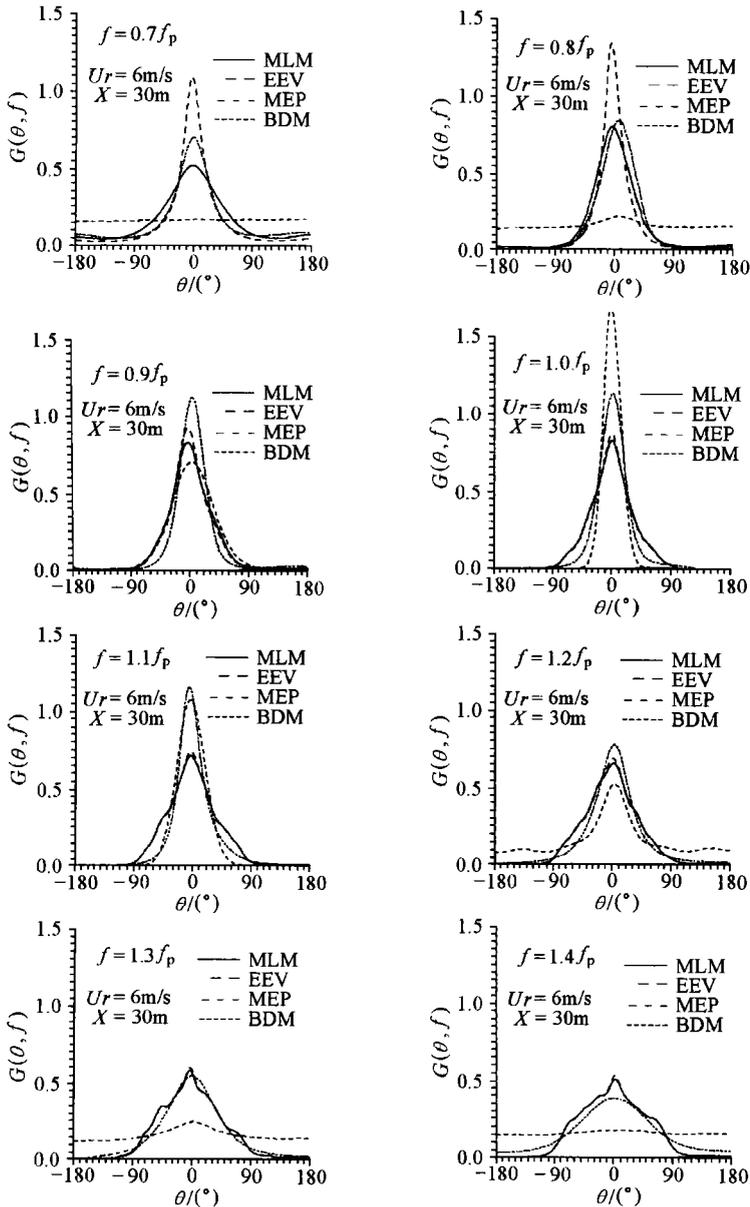


图 2 由实测数据比较四种不同的估计方法, 图中分别对应于频率 $0.7f_p$ 、 $0.8f_p$ 、 $0.9f_p$ 、 $1.0f_p$ 、 $1.1f_p$ 、 $1.2f_p$ 、 $1.3f_p$ 、 $1.4f_p$, 其中 f_p 为峰频, 这是风区为 30 m、风速为 6 m/s 的情形

一般含噪声较少,高频含噪声较多,MLM 试图让整个交叉谱中噪声影响最小,而 EEV 则事先将信号部分分离出来,再使余下噪声部分影响最小.显然噪声比例越大,可分离信号部分所占比例越小,因而在高频域两者结果越接近.

尽管在数值模拟情形下,EMEP 的再现性优于 MLM 和 EEV,但对实测资料,EMEP 给出完全不同于另外三者的不尽合理的结果.除峰频附近外,在低频和高频处几乎都是均匀分布.峰值附近的结果也缺乏规律性,有时甚至给出主波向偏离风向甚远的结果.这些均说明此时 EMEP 的计算不稳定性非常突出,不适用于实测资料的分析.

BDM 对实测资料同样表现出相当令人满意的稳定性,这大概是由于 BDM 本身已充分考虑到噪声影响问题.当 MLM 和 EEV 的结果差别较大时,BDM 的结果一般比 MLM 窄,比 EEV 要宽;当 MLM 和 EEV 比较接近时,BDM 一般要窄一些.同时我们发现,与数值模拟时相比,超参数应选得更大一些,以保证顺利搜索到 ABIC 的极小值.

5 几点结论

5.1 尽管 EMEP 的数值模拟结果尚好,但似乎不宜对实测资料进行分析,这主要是由其自身的不稳定性造成的.

5.2 MLM、EEV 和 BDM 均适用于对实测资料的分析,并给出大致相同的方向分布.

5.3 从整体而言,BDM 最为真实地反映了海浪的方向分布.

5.4 对工程和实际应用而言,应当选择 MLM 或 EEV,它们不仅所需计算时间短,且具有相当的精度.

5.5 虽然从计算稳定性和再现性来看,BDM 应该是最佳的,而且对理论研究也是一种较好的选择,但由于所需计算时间太长,不适用于实际应用,特别是现场观测.

对迄今为止被认为最先进的四种海浪方向谱估计方法,本文从数值模拟和实测资料直接对这四种估计方法进行了比较验证,其结果不仅具有理论意义,而且有一定的实用价值.

感谢胡海红小姐耐心地打印了全稿以及钱成春副教授和孙士才教授在计算机使用方面所给予的帮助.

参考文献

- 1 Barber N F. The directional resolving power of an array of wave detectors. *Ocean Wave Spectra*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., USA, 1963, 137~150
- 2 Isobe M, Konda K, Horikawa K. Extension of MLM for estimating directional wave spectrum. In: *Symposium on Description and Modelling of Directional Seas*. DHI and MMI, Copenhagen, 1984, 1~15
- 3 管长龙,文圣常,张大错.分析海浪方向谱的扩展本征矢方法——I.方法的导出. *海洋与潮汐*, 1995, 26(1): 58~62
- 4 管长龙,文圣常,张大错.分析海浪方向谱的扩展本征矢方法——II.方法的验证、比较和应用. *海洋与潮汐*, 1995, 26(3): 241~246
- 5 桥本典明,永井纪彦,浅井正等.海洋波の方向スペクトルの推定における最大エントロピー原理法(MEP)の拡張. *港湾技术研究所报告*, 1993, 32(1), 3~25
- 6 Hashimoto H, Kobune K, Kameyama Y. Estimation of directional spectrum using the Bayesian approach and its application to field data analysis. *Report of the Port and Harbour Research Institute*, 1987, (26): 57~100
- 7 柳淑学,俞聿修.方向谱估计方法. *港口工程*, 1994 (1): 25~32
- 8 Capon J, Greenfield R J, Kolker R J. Multidimensional maximum-likelihood processing of a large aperture seismic array. *Pro-*

ceedings IEEE, 1967, 55, 192~211

- 9 Msrden R F, Juszko B A. An eigenvector method for the calculation of directional spectra from heave, pitch and roll buoy data. *J. Phys. Oceanogr.*, 1987, 16, 2052~2060
- 10 Zhao Dongliang, Masuda Akira, Wen Shengchang. A laboratory study of directional spectra with maximum-likelihood method—I. Developing wind wave. *Acta Oceanologica Sinica*, 1999, 18(1), 59~74

Comparisons on estimating method of directional spectrum

Zhao Dongliang,¹ Guan Changlong,¹ Wu Kejian,¹ Wen Shenchang¹

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

Abstract—Based on numerical simulation and observation data, the four estimating methods of directional spectrum, maximum-likelihood method (MLM), extended eigenvector method (EEV), extended maximum-entropy principle (EMEP) and Bayesian directional method (BDM) are studied about their reliabilities respectively. It is shown that MLM, EEV and BDM basically give the same directional distribution in general. However, BDM holds the best reproducibility in any cases, and is inferior to MLM and EEV in practicality. EMEP is not suitable to real observation data because of its poor stability.

Key words Directional spectrum, estimating method, maximum-likelihood method, extended eigenvector method, extended maximum entropy principle, Bayesian directional method