

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211013

基于自适应波谱斜率的海面风速反演算法研究^{*}

张维星 张锁平 党超群 王斌 孔佑迪

(国家海洋技术中心 天津 300112)

摘要: 对于波浪谱风速反演研究,虽然已经建立了波谱平衡范围斜率为 -4 幂律的初步反演模型,然而对于复杂多变的实测波谱,单一斜率模型的反演效果不佳。针对可变波谱斜率的问题,通过量化波谱函数对应的谱系数,提出一种自适应波谱斜率的风速反演算法。为了验证该算法估算风的准确性,本文通过对NDBC浮标观测的大量风浪数据进行海面风速反演研究,结果显示自适应波谱斜率算法反演风速与实测风速相关系数 $R=0.83$,呈显著相关,且平均偏差BIAS和均方根误差RMSE分别为 0.75 m/s 和 2.48 m/s 。通过近海海试实验验证表明该算法依然有效具有普适性。总的来看,自适应波谱斜率反演风速算法与实测风速之间误差相对较小,反演精度较好,为风浪观测和风浪研究提供了一种新思路,且该算法能够融合应用于海洋观测应用平台,使理论研究和工程实际相结合。

关键词: 海面风速;波浪谱;可变波谱斜率;反演方法

中图分类号: P714 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 170.6050

Research on sea surface wind speed inversion algorithm based on adaptive spectral slope

Zhang Weixing Zhang Suoping Dang Chaoqun Wang Bin Kong Youdi

(National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China)

Abstract: For the study of wave spectrum wind speed inversion, although a preliminary inversion model with a slope of -4 power law in the wave spectrum equilibrium range has been established, however, for the complex and variable measured wave spectrum, the inversion of a single slope model is not effective. Aiming at the problem of variable spectral slope, an adaptive wave spectrum slope wind speed inversion algorithm is proposed by quantifying the spectral coefficients corresponding to the wave spectrum function. In order to verify the accuracy of the algorithm for wind estimation, this paper investigates the inversion of sea surface wind speed by using a large amount of wind and wave data observed by NDBC buoys, and the results show that the correlation coefficient $R=0.83$ between the inversion wind speed of the adaptive wave slope algorithm and the measured wind speed, which is significantly correlated, and the mean deviation BIAS and root mean square error RMSE are 0.75 m/s and 2.48 m/s , respectively. The offshore sea trial experiments show that the algorithm is still effective and universal. In general, the error between the adaptive wave spectrum slope inversion wind speed algorithm and the measured wind speed is relatively small and the inversion accuracy is better, which provides a new idea for wind and wave observation and wind and wave research, and the algorithm can be integrated and applied to the ocean observation application platform, combining theoretical research with engineering practice.

Keywords: sea surface wind speed; wave spectrum; variable spectral slope; inversion method

0 引言

海表面风作为海洋上重要的动力来源,几乎参与了所有的海水运动。上层海洋的主要运动是风应力将动量和能

量从大气传递到海洋引起的,大气风应力具有较宽频谱,使得海水产生复杂的运动,且在不同频段内,对海洋运动的物理过程起到了十分重要的作用^[1]。无论是波涛汹涌的风暴还是平稳缓和的涌浪,最初都源于风和海面的相互作用,因

收稿日期:2022-08-09

^{*} 基金项目:国家重点基础研究发展计划(2018YFC1406004)、江苏省自然资源发展专项(JSZRHYKJ202009)、青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划(2017ASKJ01-02)项目资助

此风和海浪之间存在着很强的相关性^[2]。Harald Sverdrup 和 Walter Munk 最初利用这一相关性来预测给定风速下的波高,20世纪70年代被用来预测全球海浪状况。此后,大量的工作致力于研究风、浪参数之间的关联特性,如 Hsu^[3-4]通过研究热带气旋中风速、波高、周期等特征参数总结了许多现场实测数据的经验公式,通过已知风速便由此估计产生的海浪大小。那么反之,通过已知海浪条件,也可以估计风。

如果风时足够长,缓慢变化的风使得海浪有足够的时间来调整,最终将达到一种平衡态^[5]。由于风生波谱体现在海浪能量谱的高频尾部,平衡状态使得波能谱尾呈现特殊的形状,谱斜率成为了关键特征。Phillips^[6]在研究报告中指出,平衡或饱和频谱斜率为 -5 ,此后形成的理论谱包括 P-M 谱和 JONSWAP 谱在内的经典波浪谱模型便是采用了这种高频渐近线。Phillips^[7]对谱输入源函数进行了深入讨论,将谱斜率从 -5 改为 -4 ,Takagaki 等^[8]的研究使平衡范围 -4 斜率的结论也得到了进一步的验证。此外,在谱峰某特定倍数的频率范围内,频谱斜率为 -4 ,超过此频率后,斜率变为 -5 ^[9-11]。由于平衡范围和饱和范围之间没有明显的界限,因此经常观察到斜率在 -5 和 -4 之间形成一个过渡带。2013年 Thomson 等^[12]将波浪和风测量数据用于评估表面波能量谱的平衡范围,并从波谱系数中估算出风摩擦速度从而推导出风速,结果表明在中等风速条件下,估算波谱具有较强的一致性,也验证了从平衡范围估算风速的可行性。2020年 Voermans 等^[13]同样使用 -4 幂律从波浪谱中估计出风速并对其影响因素进行深入的分析,结果表明风速仅在 $3\sim 12$ m/s 范围内估计效果较好,当风速较小和较大时估计值与实测值之间存在较大的偏差。考虑目前研究及应用方法中对波浪谱平衡范围估计存在理想化情况,海洋实测波谱的广泛研究并没有展示出充足的证据证明完全遵循 -4 或 -5 幂律,相反,波谱斜率在 $-3\sim -6$ 范围内表现出相当大的随机性。观测到斜率为 -4 和 -5 的频谱仅占总数的 $15\%\sim 25\%$,和理论谱模型相差较大。造成这一误差的可能原因一方面是涌浪占比较大时,涌浪对波谱能级会起到一定的调制作用,改变了海表面粗糙度^[14],导致反演效果不佳。另一方面,当风变化很快时,海浪没有充足的时间建立平衡,使得波浪破碎和耗散程度加大,此时风浪波谱将处于非平衡状态^[15]。为进一步提高波浪谱估计风参数的准确性,本文根据平衡范围内谱系数和斜率对波谱能级匹配的算法,通过将谱系数多参数合并处理,探究非平衡态下可变斜率与谱系数之间存在的数学关系,试图得到一个最佳经验公式,然后通过自适应波谱斜率获得对应谱系数进而求得风速。

1 数据与方法

1.1 研究区域及数据

研究区域位于青岛胶州湾外海海域($120.5^{\circ}\text{E}, 36^{\circ}\text{N}$),

气候变化特征显著,海浪要素特征随季节变化明显。通过反演该区域海面风速,一方面能满足海洋观测及海洋环境保护的需求,另一方面通过分析风-浪的时间、空间分布特征能够在一定程度上了解青岛近海海域的海-气变化。为了能够减少大陆近岸及附近船只带来的影响,如图1所示,实验选取相对远离陆地的开阔海域,减少外界环境带来的干扰。

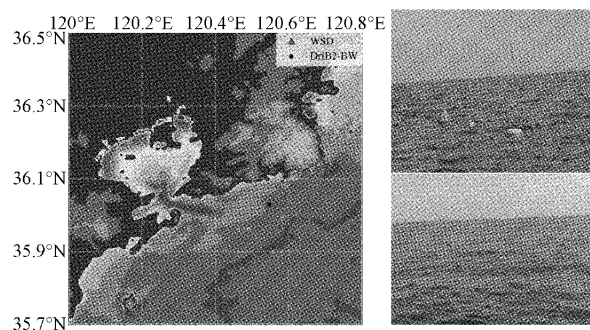


图1 近海海试区域及浮标布放现场

2021年5月14日~7月23日期间,在研究海域布放了一组小型波浪浮标(wave sea drifter, WSD)和漂流式海气界面浮标(drifting air-sea interface buoy, DrIB) DrIB2-BW型标准化浮标。WSD浮标为自主研发的新型波浪浮标,同时搭载加速度和GPS传感器^[16-17],保证浮标输出完整准确的波浪谱数据。DrIB2-BW配备一个3 m高的风速计桅杆以提供实测的风速信息,作为风速反演的对比数据^[18]。本研究反演算法所需要的大量同位风浪数据来源于美国国家数据浮标中心(national data buoy center, NDBC),其中NDBC数据来源于美国国家环境信息中心网站,该数据集包含了从浮标导出的波浪谱和风速数据,且经过了质量控制,本次实验共下载了2016年1月~12月期间位于46027站点的风浪数据作为反演算法研究的基础资料。

1.2 技术方法

技术流程如图2所示,首先构建斜率遵循 -4 幂律的初步反演算法,利用理论谱验证初步反演算法的可行性。其次对NDBC实验数据进行预处理,通过分析波浪谱谱形和参数,对初步反演算法进行改进,进而利用自适应波谱斜率算法进行反演,并与实测数据进行精度对比,验证算法的准确性,最后分析研究区域内海面风速反演效果。

2 海面风速反演原理及模型

波浪与驱动波场的风之间存在着固有的耦合关系,为了描述看似混乱的风生波特性,通常考虑波浪的能量谱密度。随着不同能量从大气转移到水中,波谱形状会根据动量传递或风应力产生相应的响应,而风应力又和海面风速直接相关,因此我们合理假设仅依据波谱便可估计风速。这种关系在波浪动量传递研究以及实验室的风浪数值模拟

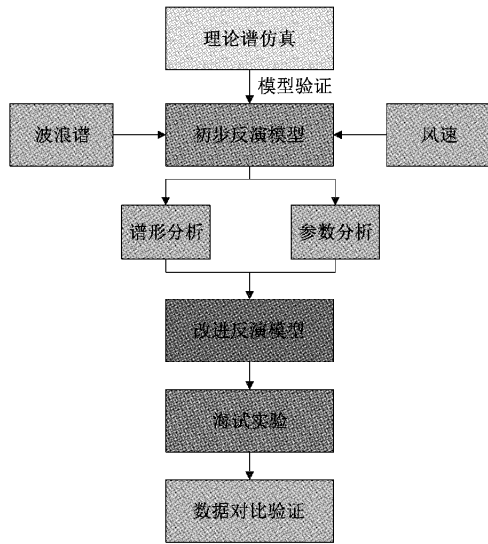


图 2 海面风速反演技术流程

中都得到了广泛的应用^[19]。

使用波浪测量作为海面风的代理测量是基于平衡范围存在这一假设进行的。平衡范围的概念早在 1958 年由 Phillips 提出,平衡是否真实存在,特别是在较高或较低风速时,仍然是科学讨论的问题,但波浪条件受风速影响的基本观点是肯定的。大部分动量从风向表面波的传递发生在波谱的高频段,即所述平衡范围。具体而言,在波谱高频尾部,风能量输入源、波浪破碎和非线性相互作用三者会达到平衡:

$$\frac{dE}{dt} = S_{wind} + S_{nl} + S_{diss}. \quad (1)$$

其中, E 为波谱能量密度。

Phillips 提议,这 3 个过程在平衡范围内会形成一个特殊的形状,而且都是按频率的 -4 次方幂律进行缩放的,如图 3 所示。

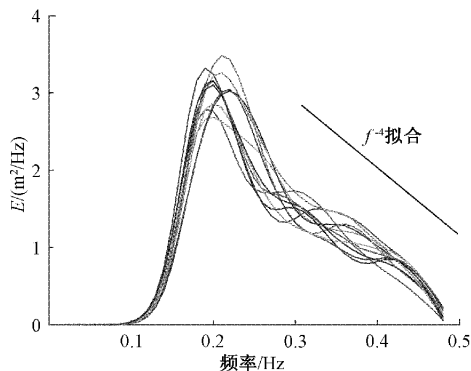


图 3 平衡范围拟合曲线

根据 Phillips 提出的在均匀风速状态下,谱尾平稳态可表示为:

$$E(f) = E_0 f^{-4}, \text{ 且 } E_0 = \frac{4\beta I u_* g}{(2\pi)^3}. \quad (2)$$

其中, f 为频率, β 为常数, $I(p)$ 为方向传播函数, g 为重力加速度, u_* 为风摩擦速度。根据 Juszeko 等实验表明, β 值介于 0.006 到 0.024, 并获得其平均值为 0.012。 $I(p)$ 值介于 1.9~3.1, 取其均值为 2.5。

通常平衡范围选取频率为 $f > 1.5 f_s$, f_s 为风浪峰值频率,区别于波谱峰值频率,因为在涌浪占比较大时,涌浪峰值可能会高于风浪条件下的峰值,使得平衡范围的选取出现偏差,而频率选取上限则需根据浮标采样率和数据精度而定,由于较高频率下,耗散很可能使得波谱达到饱和,致使频谱由平衡范围过渡至饱和范围。

通常浮标携带的风速计测量的是海平面上方 3~5 m 的风速,为便于风速在不同高度处的结果比对,使用风速垂直剖面方程,将风速提升至 10 m 的标准高度:

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right). \quad (3)$$

其中, κ 为冯·卡曼常数,取值为 0.41。 z_0 为海表面粗糙度,可以表示为:

$$z_0 = \alpha \frac{u_*^2}{g}. \quad (4)$$

其中, α 为查诺克参数,取值为 0.012。因此,利用式(2)~(4),风速可以从波谱中估计出来。

3 理论谱风速反演分析

3.1 Pierson-Moscowitz 谱

P-M 谱为经验谱,由于所依据的资料比较充足,分析方法比较合理,自 60 年代中期以后,在海洋工程、海洋科学研究领域得到了广泛的应用。它假设,如果风在一大片区域稳定的吹很长一段时间,那么波浪和风最终会达成一个平衡点,被称为充分发展的海洋。其数学模型为:

$$S(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi f)^5} \exp\left[-\beta \left(\frac{g}{U 2\pi f}\right)^4\right] \quad (5)$$

其中,无因次常数 $\alpha = 0.0081$; $\beta = 0.74$; g 是重力加速度; U 是海表面上方 19.4 m 处的风速。为了便于控制 P-M 谱中主导波频率,将峰值波频率设为:

$$f_p = g/2\pi U \quad (6)$$

上述所示波谱中仅含一个参数 U ,该谱形式也称为单参数谱。通过改变输入参数即风速便可以调整谱形。为验证风速反演模型在不同风速下的适用性,图 4 分别显示了 3 个不同风速输入条件下, P-M 谱平衡范围的最佳拟合曲线。

如图 4 所示,对于不同风速下谱形有明显差异,风生波谱具有较为宽广的谱形,在高频下具有更多的能量。在谱峰以外的谱尾区域,三条拟合曲线完美的与波谱平衡范围相重合且对应于输入风参数。实验表明,初步反演模型适用于 P-M 谱,同时也为平衡范围的选取和反演模型的有效性提供了理论基础。

3.2 JONSWAP 谱

JONSWAP 谱是在中等风况和有限风距情况测得的。

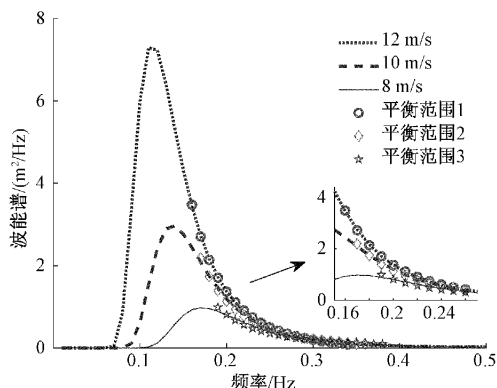


图4 P-M谱适应风输入参数曲线

多数使用经验表明,此谱和实测结果是符合的,而且适用于不同成长阶段的风浪,常被人们认为是P-M谱的改进形式,得到了更为广泛的应用。其数学模型表示为:

$$S(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4} \frac{1}{f^5} \exp\left[-1.25\left(\frac{f_m}{f}\right)^4\right] \gamma \exp\left[-(f - f_m)^2 / (2\sigma^2 f_m^2)\right] \quad (7)$$

式中: α 为能量尺度参数; γ 为谱峰升高因子; f_m 为谱峰频率。

峰形参数 $\sigma = \sigma_a$ (当 $f \leq f_m$), $\sigma = \sigma_b$ (当 $f > f_m$)。对于平均的JONSWAP:

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= 3.3 \\ \sigma_a &= 0.07; \sigma_b = 0.09 \\ \alpha &= 0.076(\bar{X})^{-0.22}; \bar{X} = 10^{-1} \sim 10^5 \\ \omega_m &= 22(g/U)(\bar{X})^{-0.33} \quad f_m = 3.5(g/U)(\bar{X})^{-0.33} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

无因次风区长度为:

$$\bar{X} = gX/U^2 \quad (9)$$

此处 X 为风区长度, U 为10 m高度处的风速。

对于平均JONSWAP谱而言,其变成了两个参数—风距和风速的函数。如图5所示,输入不同风距和风速改变谱形来验证反演模型。

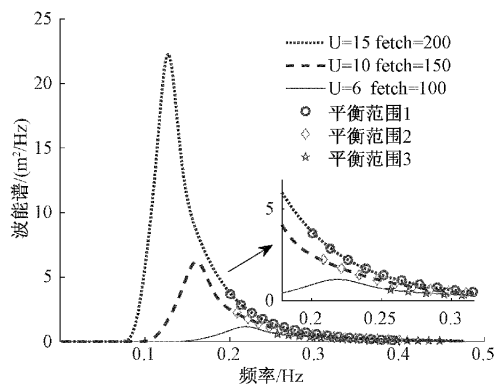


图5 JONSWAP谱适应风输入参数曲线

通过改变双参数,即使区别于P-M谱多一个变量,但谱形的改变仅局限于频谱能量的大小和谱峰频率的平移,并未对谱形形状产生本质变化。因此,拟合曲线与理论谱

仍完美契合且反演风速十分接近于输入风大小。再次从理论上验证了从平衡范围估算风的可行性。但无论是P-M谱还是JONSWAP谱,其高频部分均依赖与 ω^{-5} ,再加上JONSWAP谱只适用于深水,因此使用初步反演模型中的-4幂律和谱系数中的常数参数会对风应力和风摩擦速度的估计产生偏差,但结果仍表明从波谱斜率和求得对应谱系数这一方法中提取风参数信息是切实可行的。

4 实验分析与模型改进

4.1 波浪谱数据集分析

虽然有许多已发表的波谱测量报告证实了-4,或-5或-4~-5的斜率转变,但对现场波谱的仔细检查表明,测量的波谱斜率在一定范围内随海洋动力学而变化。例如,Forristall在墨西哥湾通过波浪骑士测得的波谱分析数据显示了許多明显偏离-4或-5斜率的例子。Donelan等^[20]通过阵列测波提到了波谱斜率范围为-3.5~-5。Young^[21]通过分析澳大利亚西北岸10多年的风场波谱数据,提出了从-1.7~-7更大范围的谱斜率。Hwang等^[22]通过浮标测量的风浪谱数据中也描述了类似的谱斜率变化范围。此外,通过机载扫描激光系统测量的均匀风浪场海表面波数谱中也发现了可变波谱斜率。

图6所示为2016年NDBC 46027站点测得的波浪谱斜率占比情况。在样本数据量足够大的条件下,斜率不再为固定常数,可变斜率覆盖了一8~0的整个范围。各部分占比也呈现出随机性,一方面证实了实测波谱斜率的可变性,另一方面表明初步模型中的固定参数将不再适用于平衡范围内谱形和谱系数中涉及的风速信息的解析。

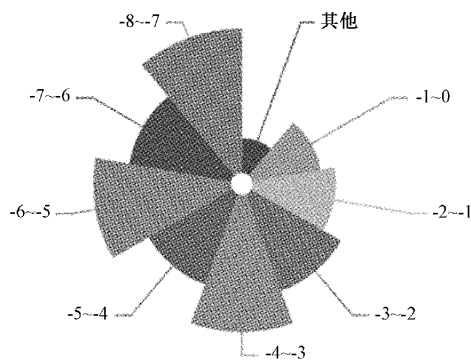


图6 波谱斜率占比

4.2 模型改进及验证

Hwang在2017年研究论文中同样指出观测波谱斜率的随机性,并试图与风速、有效波高、谱峰周期及其他无量纲组合等各种风浪参数信息关联起来,然而并没有形成具体的结论。Voermans等研究表明谱系数与波龄、波陡、风时、风区等参数密切相关由此可见其影响因素之多、之复杂。本文认真对待以上建议,区别于从特征参数入手研究,而是在初步反演模型方法的基础上,针对不同波谱斜率,求

得频率对应次数 n 和谱系数 c (谱系数为去除风摩擦速度之外的部分), 将谱系数看成一个整体, 减小各部分影响因素对整体系数产生的误差。

图 7 所示为谱系数相对于频谱斜率的分布状况。并用多项式进行了拟合。结果表明二者具有强烈的非线性关系。

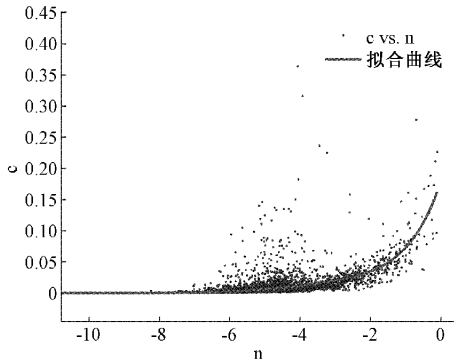


图 7 谱系数和斜率拟合曲线

为找到最佳的拟合曲线, 对谱系数和斜率进行了不同阶数的多项式近似拟合, 结果如式(10)所示。由图 6 可知, 样本数据斜率主要集中在 $-8 \sim -2$ 的范围内, 对于超过该范围的斜率值, 考虑原始数据采集错误或后续平滑处理不充分所致, 但散点图表明整体具有一致趋势。通过对比、分析比较, 选用五阶多项式作为最终结果更为符合。

根据以上分析, 将式(2)更改为:

$E(f) = Cu \cdot f^n$, 其中 C 随斜率变化表达式如式(11)所示。

$$\left. \begin{aligned} f(x) &= 0.000\ 202\ 4x^3 + 0.004\ 977x^2 + \\ &\quad 0.039\ 3x + 0.102\ 3 \\ f(x) &= 0.000\ 031\ 68x^4 + 0.001\ 023x^3 + \\ &\quad 0.011\ 98x^2 + 0.062\ 16x + 0.124\ 9 \\ f(x) &= 0.000\ 006\ 197x^5 + 0.000\ 239\ 4x^4 + \\ &\quad 0.003\ 532x^3 + 0.025\ 36x^2 + 0.092\ 51x + 0.146 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$C = 0.000\ 006\ 197n^5 + 0.000\ 239\ 4n^4 + 0.003\ 532n^3 + 0.025\ 36n^2 + 0.092\ 51n + 0.146 \quad (11)$$

为描述反演风速数据质量与对比分析, 引入了常用的评估指标如均方根误差、相关系数和偏差。根据式(12)~(14)计算反演风速的误差:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y'_i - y_i)^2}, \quad (12)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (13)$$

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y'_i - y_i), \quad (14)$$

为验证改进后反演模型的准确性, 实验选用 2016 年

NDBC 46026 站点数据进行实验验证。

如图 8 所示, 估计风速与真实风速数据具有较强的一致性, 数据相对集中, 在小于 10 m/s 的中低风速段, 样本数据密度较大, 反演效果较好。对于超过 15 m/s 的较高风速, 数据相对离散, 误差有所增加。总体而言, 相关系数达到 80% 以上, 偏差为 0.75 m/s, 最小均方根误差为 2.48 m/s。该误差范围对于一般海洋观测、海洋工程等活动是可以接受的, 且是值得信赖的。如图 9 所示, 风摩擦速度的计算结果与图 8 的变化相一致, 同时风速和摩擦速度的关系也得到了进一步的证实。

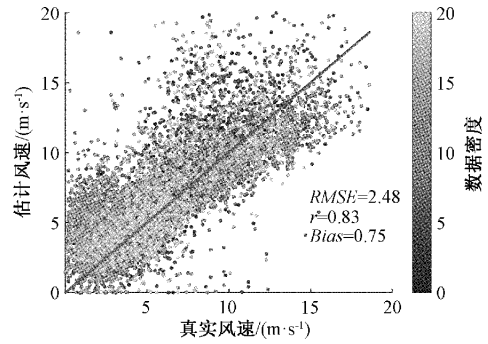


图 8 估计风速与真实风速对比

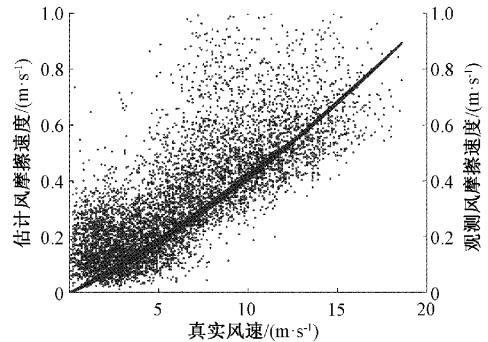


图 9 摩擦速度与风速对比

如图 10 所示, 本文还给出了模型改进前后的对比效果及其在时间序列上的细节。图 10(a) 为初步模型反演结果, 反演结果较实际值偏离较大, 数据起伏变化较为剧烈。图 10(b) 为改进模型后计算结果。显然在整体趋势上, 改进后曲线效果更符合实际、误差更小, 数据延续性更好。但在风速较大时, 明显峰值异常凸起, 变化幅度增大, 这与以上分析相一致, 可能是高风速下多项式拟合偏差或是高风速在波谱中导致的非平衡态。

4.3 海试实验验证与分析

为验证该反演算法的普适性, 将青岛近海海试得到的风浪数据进行了研究。利用改进的风速反演算法计算结果与实测风速进行了对比。由于实验观测期间, 风速相对较低, 对于大于 15 m/s 的相对较高风速数据样本较少, 使得实验风速范围略有缺失。对于中低风速反演结果如图 11 所示, 整体相关系数达到了 0.85, 其他评估指标也与上述

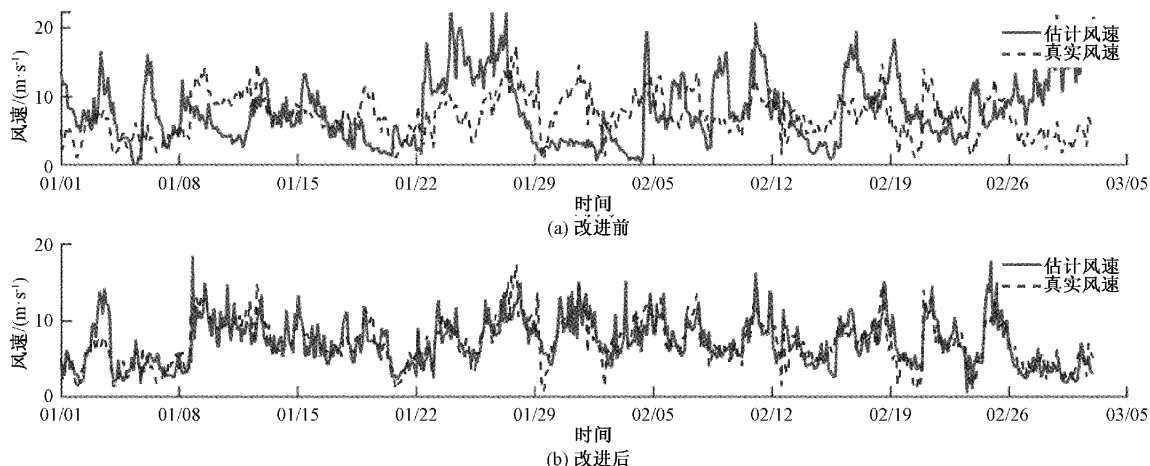


图10 改进前后估计风速和真实风速时间序列对比

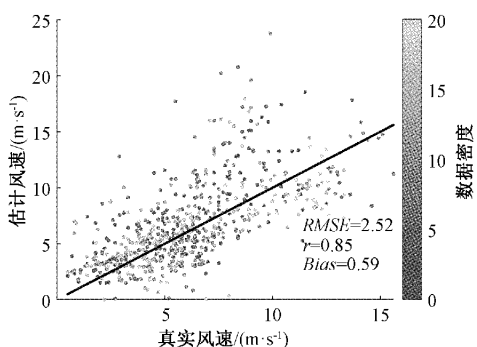


图11 海试风速反演效果

结果相差无几,达到了实验预期的效果,实验证明在不同海域海况下该反演方法依然有效。

图12所示为不同风速下的误差情况,对于RMSE,整体变化相对平稳,主要集中在2~4 m/s,在风速低于2 m/s和高于18 m/s的部分,误差有所增大。同样对于偏差而言,从中风速(8~10 m/s)向两侧偏离的趋势更为明显。这可能是因为浮标对极低风速产生的小浪没有很好的响应,而诸如洋流等地球物理噪音在低风速时对风的估计有很大的影响。其他间接的风速估计方法,如遥感,也总是高估低风速^[22]。对于低风速涌浪占比较大的情况,以及高

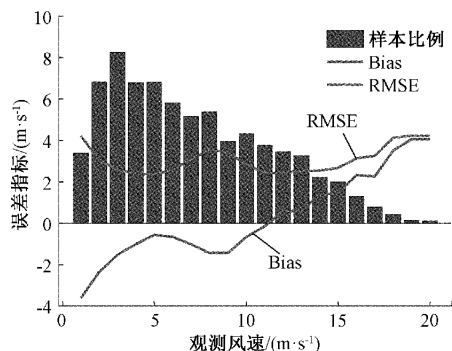


图12 不同风速反演误差分析

风速下平衡是否存在问题成为以后研究和算法模型改进的重点。

5 结 论

本文提出了一种基于浮标测量波浪谱的海表面风速估计方法,详细阐述了实测波谱资料中平衡范围的斜率分布情况。基于理论谱和-4幂律的初步反演模型,考虑到海面风浪的复杂情况,通过探究波谱斜率和系数的关系,对波浪谱平衡范围进行了参数化改进,并给出了经验公式。使用NDBC数据集和近海实测数据进行了反演实验及对比验证。根据试验结果可以得到以下结论:

该风速反演方法的的相关系数可达到80%以上,均方根误差控制在2.5 m/s左右,并且具有通用性,不足之处是经验公式需要大量的样本数据支撑,其准确度随数据量增大可进一步的提高。

改进后的风速反演算法可以应用于海洋空投浮标、海表面小型化漂流浮标以及水下平台发射浮标之中,具有十分广阔的应用前景^[24-26]。为风、浪的同步观测提供了一种新的方法和思路。

致谢

感谢NDBC网站(<http://www.ndbc.noaa.gov/>)和NCEI网站(<https://www.ncel.noaa.gov/data/oceans/ndbc/cmanwx/>)提供的公开数据支撑,以及感谢本次海试实验参与浮标设计与布放的工作人员。

参考文献

- [1] 李向一,刘国强,何宜军,等.热带气旋下海浪对大气向海洋输入的动量和能量的影响[J].海洋学报,2021,43(11):61-69.
- [2] 曾玉明.紧凑型高频雷达海面风场反演及浪流相互作用效应研究[D].武汉:武汉大学,2019.
- [3] HSU S A. Estimating wave height using wind speed

- during a tropical cyclone[J]. *Mariners Weather Log*, 2015, 59(3): 10-12.
- [4] HSU S A. Estimating met-ocean parameters during a tropical cyclone for marine science and engineering[J]. *Journal of Energy and Power Technology*, 2021, 3(2): 1-1.
- [5] 何艳丽,黄飞龙.地波雷达在海面风场探测的应用[J]. *国外电子测量技术*,2013,32(12):80-83.
- [6] PHILLIPS O M. The equilibrium range in the spectrum of wind-generated waves [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1958, 4(4): 426-434.
- [7] PHILLIPS O M. Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1985, 156(7): 505-531.
- [8] TAKAGAKI N, TAKANE K, KUMAMARU H, et al. Laboratory measurements of an equilibrium-range constant for wind waves at extremely high wind speeds[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2018, 84: 22-32, DOI: 10.1016/j.dynatmoce.2018.08.003.
- [9] ROMERO L, MELVILLE W K, KLEISS J M. Spectral energy dissipation due to surface wave breaking [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2012, 42(9): 1421-1444.
- [10] ROMERO L, MELVILLE W K. Airborne observations of fetch-limited waves in the Gulf of Tehuantepec[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2010, 40(3): 441-465.
- [11] LENAIN L, MELVILLE W K. Measurements of the directional spectrum across the equilibrium saturation ranges of wind-generated surface waves[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2017, 47(8): 2123-2138.
- [12] THOMSON J, D'ASARO E A, CRONIN M F, et al. Waves and the equilibrium range at Ocean Weather Station P [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(11): 5951-5962.
- [13] VOERMANS J J, SMIT P B, JANSSEN T T, et al. Estimating wind speed and direction using wave spectra[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(2),DOI:10.1029/2019JC015717.
- [14] VINCENT C L, THOMSON J, GRABER H C, et al. Impact of swell on the wind-sea and resulting modulation of stress[J]. *Progress in Oceanography*, 2019, 178: 102164, DOI: 10.1016/j.pocan.2019.102164.
- [15] HWANG P A. Surface wave spectral properties of centimeter to decameter wavelengths: variable spectral slope and non-equilibrium spectrum [J]. *Ocean Dynamics*, 2020, 70(9): 1267-1279.
- [16] 杨梦雨,管雪元,李文胜.基于 MEMS/GPS/地磁组合的弹体姿态解算[J]. *电子测量技术*,2017,40(4): 60-63.
- [17] 王波,李民,刘世萱,等.海洋资料浮标观测技术应用现状及发展趋势[J]. *仪器仪表学报*,2014,35(11): 2401-2414.
- [18] CENTURIONI L R, TURTON J, LUMPKIN R, et al. Global in situ observations of essential climate and ocean variables at the air-sea interface [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 419, DOI: 10.3389/fmars.2019.00419.
- [19] 徐瑾.2016年苏北近海海面风场和波浪场多尺度变化及耦合机制的数值模拟研究[D].南京:南京信息工程大学,2020.
- [20] DONELAN M A, HAMILTON J, HUI W H. Directional spectra of wind-generated ocean waves[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1985, 315(1534): 509-562.
- [21] YOUNG I R. Directional spectra of hurricane wind waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2006, 111(C8), DOI: 10.1029/2006JC003540.
- [22] HWANG P A, FAN Y, OCAMPO-TORRES F J, et al. Ocean surface wave spectra inside tropical cyclones[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2017, 47(10): 2393-2417.
- [23] 赵文凯,赵世军,单雨龙,等.激光测风雷达风场探测性能评估[J]. *中国测试*,2022,48(1):147-153.
- [24] 刘宁,魏晓辉,王斌,等.基于 MEMS 加速度计空投浮标的波浪测量方法试验研究[J]. *海洋科学*,2020, 44(9):146-153.
- [25] SHONTING D, MIDDLETON F, KNOX J, et al. A submarine-launched wave measuring buoy[J]. *Ocean Engineering*, 1996, 23(6): 465-481.
- [26] RAGHUKUMAR K, CHANG G, SPADA F, et al. Performance characteristics of "Spotter," a newly developed real-time wave measurement buoy [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2019, 36(6): 1127-1141.

作者简介

张维星,硕士研究生,主要研究方向为海面风浪感知及其算法研究。

E-mail: zhangweixing96@163.com

张锁平(通信作者),博士,高级工程师,主要研究方向为海洋观测技术研究。

E-mail: iot323@163.com