

文章编号: 2095-4980(2019)06-0971-05

JONSWAP 谱海面散射特性受相关参量的影响分析

米晓林, 王晓冰, 贺新毅, 戴 飞

(上海无线电设备研究所 电磁散射重点实验室, 上海 200438)

摘 要: 联合北海波项目(JONSWAP)谱海面主要由风速、风区、谱峰因子等参数确定, 针对模拟 JONSWAP 谱海面时相关参数的数值确定的需要, 利用双叠加方法生成了满足 JONSWAP 谱分布的三维海面, 分析了谱峰因子和方向集中度参数的取值对海面几何模型的影响; 然后利用物理光学法仿真分析了 JONSWAP 谱海面的平均后向散射系数随谱峰因子以及方向集中度参数的变化关系。仿真结果表明, 谱峰因子对海面平均后向散射系数影响小于 1 dB, 方向集中度参数对海面平均后向散射系数影响大于 5 dB。因此得到了在研究 JONSWAP 谱海面的电磁散射时, 谱峰因子可取为平均值以及方向集中度参数取值需要根据海浪的成长状态确定的结论。

关键词: 联合北海波项目谱; 多向波; 造波池; 谱峰因子; 电磁散射

中图分类号: TN781; O451 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201906.0971

Sea surface scattering characteristics of JONSWAP spectrum influenced by its parameters

MI Xiaolin, WANG Xiaobing, HE Xinyi, DAI Fei

(Science and Technology on Electromagnetic Scattering Laboratory, Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 200438, China)

Abstract: The Joint North Sea Wave Project(JONSWAP) spectrum sea surface is mainly determined by parameters such as wind speed, wind area and spectral peak factor. The double stacking method is utilized to generate three-dimensional JONSWAP sea surface. The influence of direction concentration and spectral peak factor on the surface geometry model is analyzed. The physical optics method is adopted to analyze the changes of average backward scattering coefficient of JONSWAP spectrum sea surface with the direction concentration and the spectral factor. The simulation results show that the influence of spectral factor on the average backward scattering coefficient of the surface is less than 1 dB, and the influence of direction concentration parameters on the average backward scattering coefficient of the surface is more than 5 dB. Therefore, when studying the electromagnetic scattering of the JONSWAP spectral sea surface, the spectral peak factor can take the mean value, and the direction concentration parameter should be determined according to the wave growth state.

Keywords: JONSWAP spectrum; multidirectional wave; wave pool; spectral peak factor; electromagnetic scattering

随着对海杂波的深入研究, 提出了用海谱这一物理量来描述海面^[1-3]。海谱是海面的功率密度谱, 是描述海面最基本的方法之一, 反映了海浪能量在波长和传播方向上的统计分布, 它也是海面高度起伏相关函数的傅里叶变换。海谱模型可以通过海浪能量的平衡方程导出, 或者利用定点观测海面或实验室造波池数据计算出海面高度的自相关函数, 再经过傅里叶变换得到。现有文献中提供的各种形式海谱密度大多为半经验、半理论的结果。20 世纪 50 年代以来, 许多海洋工作者对随机海浪做了大量观测和研究, 从得到的大量数据中分析海浪的各种统计值, 然后选择某一函数作为海浪谱密度的近似表达式。常见的海浪谱有 PM(Pierson-Moscowitz)谱、JP (JONSWAP)谱、文氏谱等, 但各种海谱模型表征能量侧重点不同, 导致不同海谱模拟生成的海面有很大差异。

收稿日期: 2018-07-02; 修回日期: 2018-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61471242)

JONSWAP 谱是在德国、英国、美国、荷兰等国家于 1968~1970 年进行的“联合北海波项目”系统测量的基础上提出的国际标准海洋谱, JONSWAP 谱是一种对海面几何建模时常用的功率谱模型, 其谱函数主要由风速、水深、谱峰因子等参数决定。本文主要关注谱峰因子和方向集中度参数对海面电磁散射的影响。根据研究需要, 利用双叠加方法生成了三维多向 JONSWAP 谱海浪, 并结合物理光学法(Physical Optics, PO)仿真分析了不同谱峰因子下或不同方向集中度参数下的海面后向散射系数随方位角的变化关系, 给出了在研究 JONSWAP 海面电磁散射时相关海谱参数的选取的结论。

1 JONSWAP 数学模型

1.1 功率谱

JONSWAP 谱的数学模型为:

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp\left(-\frac{5}{4} \times \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4\right) \gamma \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2}\right] \quad (1)$$

式中: g 为重力加速度; γ 为谱峰因子, 定义为同一风速下的谱峰值 E_{\max} 与 PM 谱的谱峰值 $E_{\text{PM,max}}$ 之比, 利用 JONSWAP 试验中的测量数据确定其值介于 1.5~6.0, 平均值为 3.3; σ 为峰形参量, 其值为

$$\sigma = \begin{cases} 0.07, & \omega \leq \omega_p \\ 0.09, & \omega > \omega_p \end{cases} \quad (2)$$

α 为无因次能量尺度参数, 其值为:

$$\alpha = 0.076 \left(\frac{gF}{U_{10}^2}\right)^{-0.22} \quad (3)$$

式中: F 为风区, 即风以恒定速度吹的距离(km); U_{10} 是海面上空 10 m 处的风速(m/s); ω_p 为峰值频率, 其值为:

$$\omega_p = 22 \left(\frac{U_{10}F}{g^2}\right)^{-0.33} \quad (4)$$

由上述分析, 可得到 JONSWAP 谱在风速为 5 m/s, 风区为 40 km 时, 在不同谱峰因子 γ 下功率谱密度随频率的变化关系如图 1 所示。

JONSWAP 谱从谱形来看, 只有一个主峰, 没有次峰, 谱能量主要集中于主峰处, 该谱中的谱峰因子 γ 用于修正主峰的形状, 使主峰变得更瘦高, 故该谱能逼真地模拟波浪随风区的细小变化。

1.2 方向函数

实际海面的海浪是三维多向不规则波, 因此需要引入方向分布函数^[4-9]来描述海浪相对于风向的能量分布。迄今为止已提出了多种方向分布函数, 常用的方向分布函数为光易型分布函数。方向谱是功率谱和方向分布函数的乘积, 可表示为:

$$S(f, \theta) = S(f)G(f, \theta) \quad (5)$$

式中: $S(f)$ 为功率谱; $G(f, \theta)$ 为方向分布函数, 简称方向函数。光易型分布的方向函数为:

$$G(f, \theta) = G_0(s) \left| \cos \frac{\theta - \theta_0}{2} \right|^{2s} \quad (6)$$

式中: θ_0 为波浪传播的主方向; s 为方向分布集中度参数, 系数 G_0 由式(7)确定:

$$G_0(s) = \frac{1}{\pi} 2^{2s-1} \frac{\Gamma^2(s+1)}{\Gamma(2s+1)} \quad (7)$$

式中 Γ 为伽马函数。在光易型方向函数中, 方向集中度参数若设定为不随频率变化, 则式(7)称为半角余弦型分布。图 2 给出了主传播方向为 0° 时不同方向集中度下的方

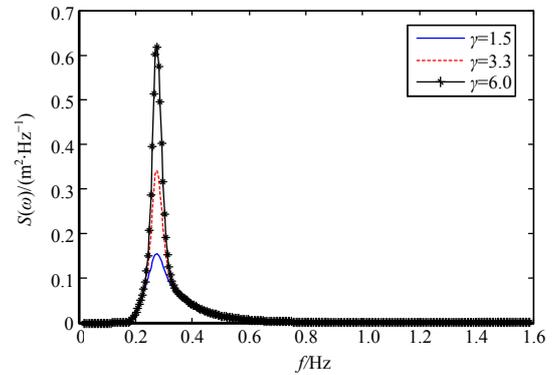


Fig.1 JONSWAP power spectrum under different spectral peak factors

图 1 不同谱峰因子下 JONSWAP 谱功率谱

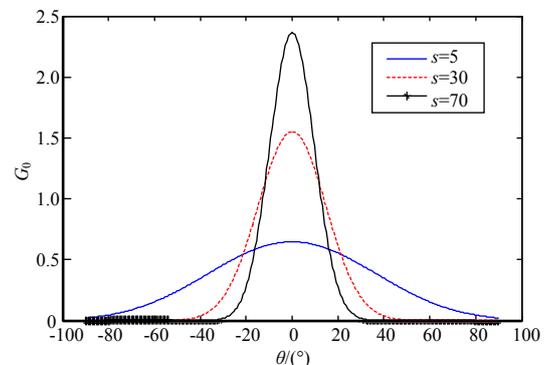


Fig.2 Change of direction function with direction concentration parameter s

图 2 方向函数随方向集中度参数 s 的变化

向函数随角度的分布关系。由图 2 可知，方向集中度参数 s 越大，多向不规则波的波能在主方向范围内越集中，即主方向处波能很大，主方向两侧波能迅速减小，所以 s 越大，越逼近单向不规则波分布，即二维海浪。一般风浪 s 设定为 10 左右，衰减距离短的涌浪 s 设定在 25 左右，衰减距离长的涌浪 s 取值在 75 左右^[5]。

2 几何模型建立

根据 JONSWAP 谱模型，利用双叠加法^[9]建立满足 JONSWAP 谱分布的海浪几何模型，此时三维高度起伏 $\eta(x,y,t)$ 可表示为：

$$\eta(x,y,t) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \zeta_{ij} \cos[k_i(x \cos \theta_{ij} + y \sin \theta_{ij}) - \omega_{di}t + \beta_{ij}] \quad (8)$$

式中： $k_i, \theta_{ij}, \omega_{di}, \beta_{ij}$ 分别为第 i 个组成波的波浪波数、方向角、频率和相位角，且 $k_i = \omega_{di}^2 / g$ 。 ζ_{ij} 为第 i 个频率和第 j 个方向分量下的振幅，即

$$\zeta_{ij} = \sqrt{2S(\omega_i, \theta_j) d\omega d\theta} \quad (9)$$

式(8)便是三维海浪的生成原理，根据所要描述的海谱，对式中相应的参数进行离散，便可通过计算机仿真得到三维多向不规则海面的浪高分布数据。

根据上述分析，建立谱峰因子 γ 为 3.3，海面上空 10 m 风速为 5 m/s，方向集中度参数 s 为 75，风区为 10 km 的三维海浪，其结果如图 3 所示。

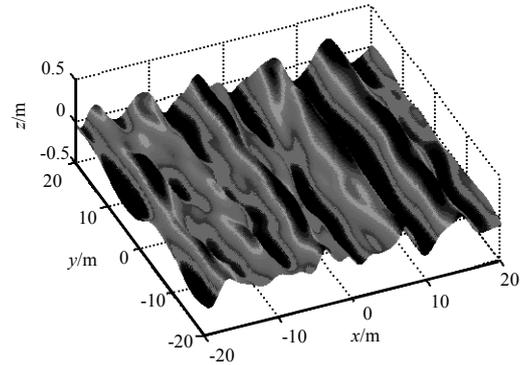


Fig.3 Three-dimensional simulation model of JONSWAP sea surface
图 3 三维 JONSWAP 海面仿真模型

3 物理光学法

物理光学(Physical Optics, PO)法^[10-15]是求解 Helmholtz 积分方程的近似方法，在求解电磁散射问题中应用广泛，其基本思想是：当入射波的波长 λ 和粗糙表面曲率半径 ρ 满足 $\rho > 10\lambda$ 时，粗糙面可视为由许多小的三角面元拼接而成，电磁波在粗糙面的边缘和尖点绕射、面元间的多次散射等作用可以忽略。入射波不能直接照射的区域是暗区，入射波可以直接照射的区域是亮区，计算每一个亮区散射场，叠加后得到总散射场。

粗糙面表面面元电磁流为：

$$\begin{cases} \mathbf{J} = \hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}^i = \frac{1}{\eta_0} \{ -(\hat{\mathbf{e}}_i \cdot \hat{\mathbf{h}})(\hat{\mathbf{n}} \cdot \hat{\mathbf{k}}_i)(1 - R_H)\hat{\mathbf{h}} + (\hat{\mathbf{e}}_i \cdot \hat{\mathbf{v}})(\hat{\mathbf{n}} \cdot \hat{\mathbf{h}})(1 + R_V) \} E_0 p(x,y) e^{-jk\hat{\mathbf{k}}_i \cdot \mathbf{r}} \\ \mathbf{M} = \mathbf{E}^i \times \hat{\mathbf{n}} = -\{ (\hat{\mathbf{e}}_i \cdot \hat{\mathbf{h}})(\hat{\mathbf{n}} \cdot \hat{\mathbf{h}})(1 + R_H)\hat{\mathbf{h}} + (\hat{\mathbf{e}}_i \cdot \hat{\mathbf{v}})(\hat{\mathbf{n}} \cdot \hat{\mathbf{k}}_i)(1 - R_V) \} E_0 p(x,y) e^{-jk\hat{\mathbf{k}}_i \cdot \mathbf{r}} \end{cases} \quad (10)$$

式中： R_H, R_V 为局部极化反射系数，分别为：

$$\begin{cases} R_H = \frac{\sin \phi - \sqrt{\epsilon_c - \cos^2 \phi}}{\sin \phi + \sqrt{\epsilon_c - \cos^2 \phi}} \\ R_V = \frac{\epsilon_c \sin \phi - \sqrt{\epsilon_c - \cos^2 \phi}}{\epsilon_c \sin \phi + \sqrt{\epsilon_c - \cos^2 \phi}} \end{cases} \quad (11)$$

式中： ϕ 为入射余角； ϵ_c 为复介电常数，其计算式为：

$$\epsilon_c = \epsilon_r - j60\lambda\sigma_e \quad (12)$$

式中： ϵ_r 为相对介电常数； σ_e 为表面物质的传导率，单位为 S/m。

由此得到散射场：

$$\begin{cases} \mathbf{E}^s(\mathbf{r}) = -j \frac{\omega \mu_0}{4\pi r} e^{-jkr} \cdot \int_S \{ \mathbf{J}(\mathbf{r}') - [\mathbf{J}(\mathbf{r}') \cdot \hat{\mathbf{k}}_s] \hat{\mathbf{k}}_s + \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} [\mathbf{M}(\mathbf{r}') \times \hat{\mathbf{k}}_s] \} e^{jkr' \cdot \hat{\mathbf{k}}_s} ds' \\ \mathbf{H}^s(\mathbf{r}) = -j \frac{\omega \mu_0}{4\pi r} e^{-jkr} \cdot \int_S \{ \mathbf{M}(\mathbf{r}') - [\mathbf{M}(\mathbf{r}') \cdot \hat{\mathbf{k}}_s] \hat{\mathbf{k}}_s + \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} [\mathbf{J}(\mathbf{r}') \times \hat{\mathbf{k}}_s] \} e^{jkr' \cdot \hat{\mathbf{k}}_s} ds' \end{cases} \quad (13)$$

4 仿真结果及分析

通过对第 1 节 JONSWAP 谱的数学模型分析可知, 固定风速、风区下, JONSWAP 谱还受谱峰因子以及方向集中度参数的影响, 谱峰因子主要表征谱函数在峰值频率下功率谱的提升程度, 在几何模型上则表现为波峰和波谷处海浪的尖锐程度; 方向集中度参数主要表征三维海面在主传播方向上的集中程度, 方向集中度参数的选取与海浪的成长状态相关。因此, 本节主要针对不同谱峰因子和方向集中度参量下的三维海浪进行散射特性计算, 并分析其对散射特性的影响, 以确定在仿真或者造浪试验研究 JONSWAP 谱海面电磁散射时相关海浪参数的选取。仿真时, 海水介电常数根据双 Debye 模型^[14]给出。

4.1 谱峰因子对电磁散射特性的影响

在相同风区和风速下, 设风区 10 km, 风速 5 m/s, 分别生成谱峰因子为 1.5 和 6.0 下的 JP (JONSWAP)谱动态海面, 在相同入射波等外加条件下, 入射波频率 1 GHz, 逆风向观测, 海面大小为 16 m×16 m, 面元尺寸为 0.01 m×0.01 m, 利用 PO 进行计算入射角 0~70°下海面的后向散射系数, 每个角度下对动态海面进行 40 次采样, 采样时间为 1 s, 并对结果求平均, 得到方向集中度 s 为 70 时不同谱峰因子下的后向散射系数随入射角的变化曲线, 如图 4 所示。

由图 4 可知, 在不同谱峰因子下, 三维 JONSWAP 海浪的后向散射系数在不同入射角下最大差值小于 1 dB。因此, 谱峰因子对海浪平均散射系数的影响较小。

4.2 方向集中度参数对电磁散射特性的影响

在谱峰因子为平均值 3.3 时, 其他参数与 4.1 节所述参数相同, 仿真了不同方向集中度参数下后向散射系数随入射角的变化关系, 如图 5 所示。

由图 5 可知, 不同 s 参数下散射系数相差最大值超过了 5 dB, 且从海面的物理结构上分析, s 越大, 三维海面越类似于二维海面。因此在低入射角逆风状态下, 海面的后向散射系数较为集中, 因此较大, 但随着入射角的增大, 后向散射系数较更粗糙分布的低 s 参数的海面散射系数小。

5 结论

本文利用双叠加模型结合 JONSWAP 谱的功率谱和光易型方向分布函数建立了三维动态粗糙海面模型, 并利用物理光学法仿真分析了对 JONSWAP 谱海面在几何结构上产生影响的谱峰因子和方向集中度参数对海面后向电磁散射的影响关系。得到了 JONSWAP 谱海面在造波池模拟试验以及数值仿真研究时, 谱峰因子参量对电磁散射特性的影响较小, 可取为平均值, 方向集中度参数对海面电磁散射的影响较大, 需根据海面的成长状态来确定其相应取值的结论。

参考文献:

- [1] HASSELMANN K, BARNETT T P, BOUWS E, et al. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Projects (JONSWAP) [R]. Hamburg, Germany: Deutsches Hydrographisches Institut, 1973: 1-95.
- [2] TSAI L H, TSENG I F, CHIEN H, et al. Estimation of JONSWAP spectral parameters by using measured wave data [J]. China Ocean Engineering, 1995(3): 275-282.
- [3] CALINI Annalisa, SCHOBER Constance M. Characterizing JONSWAP rogue waves and their statistics via inverse spectral data [J]. Wave Motion, 2016, 71(6): 5-17.

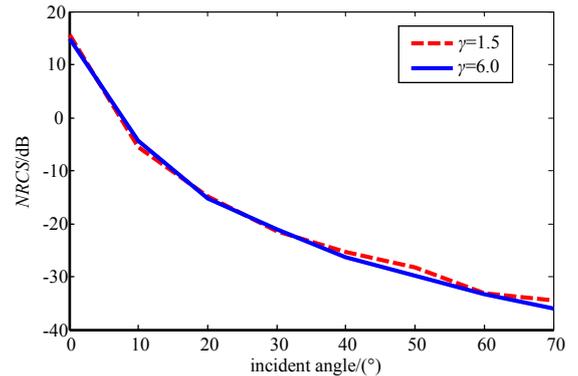


Fig.4 Simulation results of Normalization Radar Cross Section (NRCS) under different spectral peak factors
图 4 不同谱峰因子下的散射系数

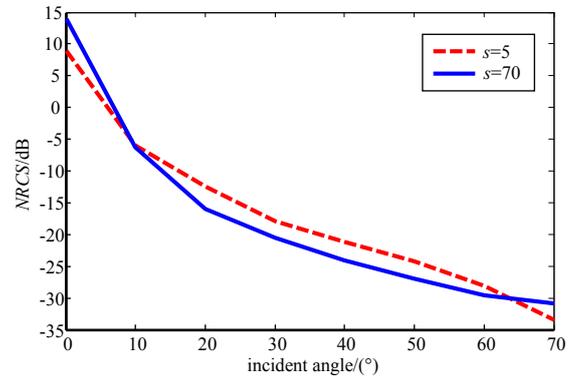


Fig.5 Simulation results of NRCS under different direction concentrations
图 5 不同方向集中度下的后向散射系数

- [4] 俞聿修,柳淑学. 随机波浪及其工程应用[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2016. (YU Yuxiu,LIU Shuxue. Random wave and its applications to engineering[M]. Dalian,China:Dalian University of Technology Press, 2016.)
- [5] 赵珂,李茂华,郑建丽,等. 基于波浪谱的三维随机波浪数值模拟及仿真[J]. 舰船科学技术, 2014,36(2):37-39. (ZHAO Ke,LI Maohua,ZHENG Jianli,et al. 3-D simulation of random ocean wave based on spectrum of ocean wave[J]. Ship Science and Technology, 2014,36(2):37-39.)
- [6] MITSUYASU Hisashi,TASAI Fukuzo,SUHARA Toshiro,et al. Observation of the directional wave spectra of ocean waves using a cloverleaf buoy[J]. Physical Oceanography, 1975(5):750-760.
- [7] LIU Si,LIU Shuxue,LI Jinxuan,et al. Physical simulation of multidirectional irregular wave groups[J]. China Ocean Engineering, 2012,26(3):443-456.
- [8] LEE Hong Sik,KIM Sung Duk. A three-dimensional numerical modeling of multidirectional random wave diffraction by rectangular submarine pits[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2004,8(4):357-363.
- [9] 米晓林,王晓冰,贺新毅,等. 基于双叠加法模型的三维海面实验室模拟测试技术[J]. 制导与引信, 2016,37(2):19-23. (MI Xiaolin,WANG Xiaobing,HE Xinyi,et al. Simulation and measurement technology of 3-D sea surface in laboratory based on double summation model[J]. Guidance & Fuze, 2016,37(2):19-23.)
- [10] 韦尹煜,吴振森,路越. 粗糙海面上舰船 Kelvin 尾迹的电磁散射仿真[J]. 电波科学学报, 2016,31(3):438-442. (WEI Yinyu,WU Zhensen,LU Yue. Electromagnetic scattering simulation of Kelvin wake in rough sea surface[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2016,31(3):438-442.)
- [11] BIGLARY H,DEHMOLLAIAN M. RCS of a target above a random rough surface with impedance boundaries using GO and PO methods[C]// Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. Chicago,IL,USA: IEEE, 2012:1-2.
- [12] HWANG Joontae,HONG Sukyoon,SONG Jeehun,et al. Radar cross section analysis using physical optics and its applications to marine targets[J]. Journal of Applied Mathematics and Physics, 2015,3(2):166-171.
- [13] 杨鹏举,吴瑞,赵晔,等. 海面上方低飞小目标多普勒谱研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(4):614-618. (YANG Pengju,WU Rui,ZHAO Ye,et al. Doppler spectrum of low-flying small target above time-varying sea surface[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(4):614-618.)
- [14] MEISSNER T,WENTZ F J. The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004,42(9):1836-1849.
- [15] MAO Y,GUO L,DING H. Numerical simulation for the sea echo spectrum of OTHR radar based on JONSWAP sea spectrum[C]// 2011 IEEE International Conference on Microwave Technology & Computational Electromagnetics. Beijing, China:IEEE, 2011:369-371.

作者简介:



米晓林(1993-),男,四川省绵阳市人,硕士,工程师,主要研究方向为目标与环境电磁散射特性.email:mixiaolin@foxmail.com.

王晓冰(1977-),男,山东省滕州市人,博士,研究员,主要研究方向为目标与环境电磁散射特性.

贺新毅(1984-),女,西安市人,博士,高级工程师,主要研究方向为电磁散射算法.

戴飞(1983-),男,江苏省扬州市人,硕士,高级工程师,主要研究方向为海面电磁散射特性测试.