

激光束海面散射回波建模与仿真

任宏光, 于海山, 梅浩, 霍力君
(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘要: 海面散射回波是激光探测系统探测低空掠海目标时的主要干扰, 基于 Pierson-Moscovitz 海浪谱建立了不同风速下粗糙海面的几何模型, 并将其作为海面的高度场。在对海面进行面元分割的基础上, 根据 Cox-Munk 关于海浪坡度的统计模型计算了面元的反射回波, 建立了粗糙海面的光散射模型, 利用该模型对一种圆锥视场入射激光束的散射光分布及探测器接收功率进行了仿真计算。研究结果表明, 粗糙海面的散射光分布与入射角度及风速相关, 圆锥视场入射激光束的散射光主要分布在入射光束镜像方向周围的立体空间, 风速越小, 散射光分布越集中; 风速越大, 散射光分布越分散, 为粗糙海面激光束散射特性分析及散射回波计算提供了重要理论依据。

关键词: 激光探测; 掠海飞行目标; 海面建模; 激光散射; 散射光分布; 风速

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)06-0064-05

Modeling and Simulation of Laser Beam Sea-Scattered Echo

REN Hong-guang, YU Hai-shan, MEI Hao, HUO Li-jun
(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: Sea-scattered echo is the main interference for laser detection system in low-altitude sea-skimming target detection. Based on Pierson-Moscovitz sea wave spectrum, a geometric model of rough sea surface at different wind speeds is established, which is used as the height field of sea surface. By dividing sea surface into facets, and based on Cox-Munk statistical model on sea wave slope, the reflected echo of facet is calculated out, and a light scattering model of rough sea surface is established. By use of the model, a simulating calculation of the scattering light distribution of cone-field incident laser beam and the receiving power of detector is made. The results show that the scattering light distribution of rough sea surface is related with the incident angle and wind speed. For incident laser beam with cone-field, the scattering light is mainly distributed around the stereoscopic space in the mirror-image direction of incident beam. The smaller the wind speed, the more concentrated the distribution of scattering light; the greater the wind speed, the more dispersed the distribution. It provides an important theoretical basis for analysis of laser beam scattering properties and calculation of scattered echo from rough sea surface.

Key words: laser detection; sea-skimming target; sea surface modeling; laser scattering; distribution of scattering light; wind speed

0 引言

激光目标探测系统以其测距精度高、旁瓣效应小和抗电磁干扰能力强等优势在精确制导武器导引和引信目标探测中得到广泛应用。当前, 多类飞行器为躲避敌方防空系统通常采用低空/超低空突防战术, 利用雷达探测盲区快速隐蔽地深入敌区实施快速打击^[1]。例如

法国“飞鱼”反舰导弹可保持 5 m 飞行高度接近目标, 在海况较好时其最低飞行高度可达 2.5 m。在探测超低空掠海飞行目标时, 海面散射回波将对激光目标探测系统造成干扰, 严重时将导致虚警发生, 因此, 研究海面激光的散射特性对海面背景下目标探测与识别具有重要意义。

目前, 国内外学者在粗糙海面建模及海面电磁散射特性方面已经做了大量的研究工作, 而有关海面激光散射特性的研究却不多。文献[2-4]研究了随机海面的建模方法, 并基于几何光学方法分析了激光的海面反射特性, 但缺乏对反射光强度的计算; 文献[3,

收稿日期: 2014-07-23

修回日期: 2014-08-13

作者简介: 任宏光(1963—), 男, 河南洛阳人, 博士, 研究员, 研究方向为引战系统总体、精确制导武器总体技术。

5]计算了粗糙海面对3~5 μm入射红外光的反射率,但未考虑光源的束散角。本文在建立粗糙海面几何模型的基础上,基于Cox-Munk关于海浪坡度的统计模型建立了粗糙海面的激光散射模型,并利用该模型对1 μm波长圆锥视场入射激光束的散射光分布及探测器接收功率进行了仿真计算。

1 粗糙海面的高度场

海面是由大量不同浪高、不同波长、不同传播方向和相位的波浪叠加而成的,具有随时间、风速和风向变化的特性。当前,国内外对海面建模的方法可以划分为基于物理、基于构造和基于动力模型3大类,其中,基于构造的方法包括几何模型构造与海浪谱构造两类,是目前较为常用的海面建模方法^[6-9]。当采用基于海浪谱与方向谱函数的建模方法时,粗糙海面的波面方程为^[10]

$$z(x, y, t) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_{ij} \cos(k_i x \cos \theta_j + k_i y \sin \theta_j - \omega_i t + \varepsilon_{ij}) \quad (1)$$

式中: m 为频率分割数; n 为方向分割数; A_{ij} 为第*i*个频率、第*j*个方向成分波的波幅; k_i 为波数; ε_{ij} 为第*i*个频率、第*j*个方向波的相位,其值为0~2π间的随机值。根据海浪谱反演理论,波幅 A_{ij} 的表达式为

$$A_{ij} = \sqrt{2S(\omega_i)G(\omega_i, \theta_j)\Delta\omega\Delta\theta} \quad (2)$$

式中: $S(\omega_i)$ 为第*i*个频率的频谱函数; $G(\omega_i, \theta_j)$ 为第*i*个频率、第*j*个方向的方向分布函数。当采用Pierson-Moscowitz频谱函数时, $S(\omega_i)$ 的表达式为

$$S(\omega_i) = \frac{\alpha g^2}{\omega_i^5} \exp[-\beta(\frac{t}{U\omega_i})^4] \quad (3)$$

式中: α 为Phillips常数; $\beta=0.74$; g 为重力加速度; U 为海面上19.5 m高处风速; ω_i 为角频率。对于方向分布函数 $G(\omega_i, \theta_j)$,根据波浪立体观测计划SWOP导出的公式^[10]为

$$G(\omega_i, \theta_j) = \begin{cases} \frac{1 + a_1 \cos 2\theta_j + a_2 \cos 4\theta_j}{\pi} & |\theta_j| \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 & |\theta_j| > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (4)$$

根据式(1)~式(4),对不同风速下粗糙海面的波面进行模拟,图1给出了不同风速下海面的高度场,对应海面风速分别为4.5 m/s, 7 m/s与10 m/s。

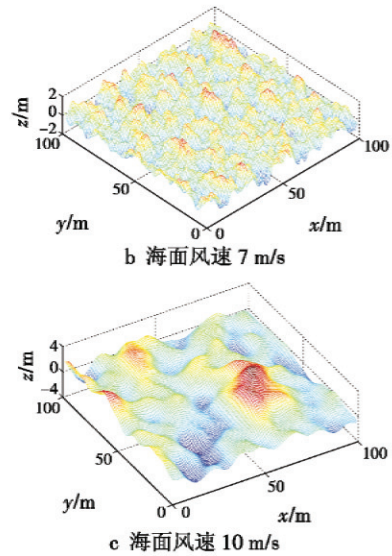
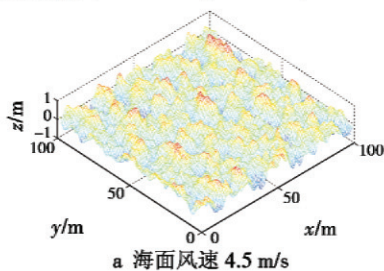


图1 不同风速下粗糙海面的高度场

Fig.1 Height field of rough sea surface under different wind speeds

2 粗糙海面的激光散射建模

平静无风的海面可以视为镜面,光辐射的反射遵循Fresnel定律。设 θ_1 为入射角, θ_2 为折射角,海水的复折射率为 $n_2 = a - bi$,大气的折射率为 n_1 ,根据Fresnel定律,菲涅尔反射系数在垂直方向和水平方向的极化分量分别为^[3]

$$\rho_{\perp} = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \quad (5)$$

$$\rho_{\parallel} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (6)$$

海面的反射率为

$$\rho = (|\rho_{\perp}|^2 + |\rho_{\parallel}|^2)/2 \quad (7)$$

海水的复折射率是入射光波长的函数,激光近程探测系统广泛使用半导体激光器,其发射波长为近红外光,本文取1 μm波长激光对应的海水折射率 $n_2 = 1.365 - 1.41 \times 10^{-4}i$,图2为平静海面不同入射角时海面反射率的计算结果。

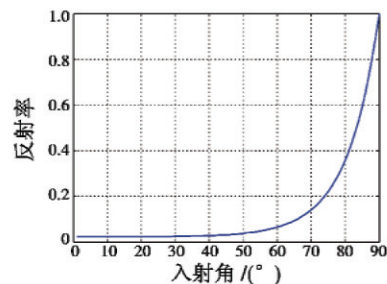


图2 平静海面的反射率

Fig.2 Reflectance of calm sea surface

平静无风的海面在现实中是不存在的,在研究一定风速与风向下粗糙海面的散射回波时,可将波面分

割为若干个小面元,每个面元近似视为镜面,如将小面元的线度划分至厘米量级,此时面元线度仍远大于入射激光的波长,菲涅尔反射定律仍然适用^[2],本文沿 X 、 Y 轴采用等间距的方法对海面进行分割。

图 3 为面元对入射激光反射的几何示意图。

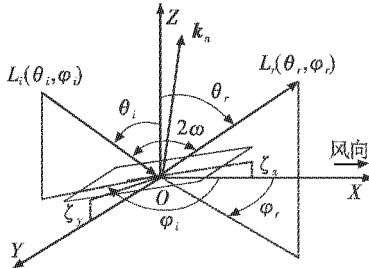


图 3 面元激光反射几何示意图

Fig. 3 Geometry diagram of laser reflection by facet

图中: $OXYZ$ 为海面地理坐标系; O 点与面元中心点重合; XOY 平面为水平面; 风沿 X 轴正方向传播, 面元在沿风向与侧风向的坡度分别为 ζ_x, ζ_y ; 激光的入射角与入射方位角分别为 θ_i, φ_i ; 反射光的反射角与反射方位角分别为 θ_r, φ_r ; k_n 为面元法向矢量; ω 为入射角。根据 Cox-Munk 对海面的观测统计, 面元坡度 ζ_x, ζ_y 服从二维高斯概率密度函数^[11]

$$p(\zeta_x, \zeta_y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\zeta_x^2}{\sigma_x^2} + \frac{\zeta_y^2}{\sigma_y^2}\right)\right] \quad (8)$$

式中, 坡度 ζ_x, ζ_y 为入射角度 (θ_i, φ_i) 及反射角度 (θ_r, φ_r) 的函数。其算式为^[12]

$$\begin{cases} \zeta_x = -\frac{\sin \theta_i \cos \varphi_i + \sin \theta_r \cos \varphi_r}{\cos \theta_i + \cos \theta_r} \\ \zeta_y = -\frac{\sin \theta_i \sin \varphi_i + \sin \theta_r \sin \varphi_r}{\cos \theta_i + \cos \theta_r} \end{cases} \quad (9)$$

σ_x, σ_y 为坡度沿风向与侧风向的标准差, Cox-Munk 给出了其与风速 U 的关系式为

$$\begin{cases} \sigma_x^2 = 0.00316U \pm 0.004 \\ \sigma_y^2 = 0.003 + 0.00192U \pm 0.004 \end{cases} \quad (10)$$

海面面元对 (θ_i, φ_i) 方向入射光在 (θ_r, φ_r) 方向的反射光辐亮度为^[13]

$$L_r(\theta_r, \varphi_r) = \frac{2\rho(\omega) \cdot \cos^2 \omega \cdot p(\zeta_x, \zeta_y)}{(\cos \theta_i + \cos \theta_r)^3} \cdot d\Omega_i \cdot L_i(\theta_i, \varphi_i) \quad (11)$$

式中: $\rho(\omega)$ 为入射角 ω 对应的海面反射率; $d\Omega_i$ 为激光器对面元反射点的立体角; L_i 为 (θ_i, φ_i) 方向的辐射光亮度。根据几何关系, 入射角 ω 与立体角 $d\Omega_i$ 的表达式分别为

$$\cos \omega = \sqrt{\frac{1 + \sin \theta_i \sin \theta_r \cos(\varphi_i - \varphi_r) + \cos \theta_i \cos \theta_r}{2}} \quad (12)$$

$$d\Omega_i = \pi \left(\frac{d_L}{2r_{im}}\right)^2 \quad (13)$$

式中: d_L 为激光器发光面直径; r_{im} 为光源与面元反射点之间的距离。

当激光器的发射视场为圆锥视场时, 光源的辐射出射度为

$$M = \frac{P_i}{\pi \cdot (d_L/2)^2} \quad (14)$$

式中, P_i 为激光器的发射功率。激光器在 (θ_i, φ_i) 方向的辐射光亮度 $L_i(\theta_i, \varphi_i)$ 为

$$L_i(\theta_i, \varphi_i) = \frac{M}{d\Omega_i} \quad (15)$$

式中, $d\Omega_i$ 为激光器发射视场的立体角。对于圆锥视场激光束, $d\Omega_i$ 的算式为

$$d\Omega_i = \frac{\pi \cdot w^2(r_{im})}{r_{im}^2} \quad (16)$$

式中, $w(r_{im})$ 为距离光源 r_{im} 处光斑的半径, r_{im} 为光源与海面反射点之间的距离。面元在 (θ_r, φ_r) 方向探测器上的辐射功率为

$$P_r(\theta_r, \varphi_r, \theta_i, \varphi_i) = L_r(\theta_r, \varphi_r, \theta_i, \varphi_i) \cdot ds \cdot \cos \theta_r \cdot \Omega_D \quad (17)$$

式中: ds 为面元面积; Ω_D 为探测器对面元反射点的立体角。其算式为

$$\Omega_D = \pi \left(\frac{d_D}{2r_{rm}}\right)^2 \quad (18)$$

式中: d_D 为探测器光敏面直径; r_{rm} 为探测器与面元反射点之间的距离。光斑覆盖面元在探测器上的辐射总功率为

$$P_{\text{total}} = \sum_{m=1}^N P_r(\theta_{rm}, \varphi_{rm}, \theta_{im}, \varphi_{im}) \quad (19)$$

式中: N 为光斑覆盖面元的数量; $(\theta_{im}, \varphi_{im})$ 为第 m 个面元入射光的入射角与方位角; $(\theta_{rm}, \varphi_{rm})$ 为第 m 个面元反射光的反射角与方位角。

3 粗糙海面散射回波计算

本文对一种机载激光器光束的海面散射光分布及探测器的接收功率进行了仿真计算, 图 4 为激光器 T 与探测器 R 的位置及相应参数示意图, $OXYZ$ 为海面地理坐标系, 其中 XOY 平面为水平面。激光器的位置坐标为 $(0, 0, h_T)$, θ_i 为激光器圆锥视场的发散角, 激光束光轴的入射角为 θ , 方位角为 φ (从 X 轴正方向逆时针到光轴在水平面内投影 MO 的角度), 探测器的位置坐标为 (x_D, y_D, h_R) 。激光器发光面的直径取 2.5 cm, 探测器光敏面的直径取 2 cm。

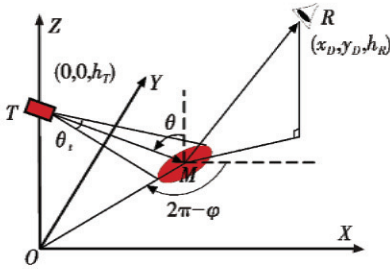


图 4 激光器与探测器位置及参数示意图

Fig. 4 Schematic diagram of laser and detector locations and the parameters

图 5 为海面散射光亮度分布随激光束光轴入射方向 (θ, φ) 变化的仿真结果, 仿真时激光器位置取 $(0 \text{ km}, 0 \text{ km}, 2 \text{ km})$, 图 5a 对应的 (θ, φ) 的取值为 $(30^\circ, 225^\circ)$, 图 5b 对应 (θ, φ) 的取值为 $(45^\circ, 250^\circ)$, 激光器的峰值功率为 5 MW , 光束发散角 θ_i 为 1 mrad 。此外, 在远距离传输时, 应考虑大气对激光的衰减效应, 本文取大气能见度为 20 km , 对应大气衰减系数为每千米 0.0899 。由图 5 可知, 当圆锥视场激光束以固定方向入射时, 其海面散射光亮度分布范围较大, 在反射角上的散布可达 50° , 在反射方位角上的散布可达 70° , 但散射光强主要集中在入射角 (θ, φ) 镜像方向周围的立体空间。

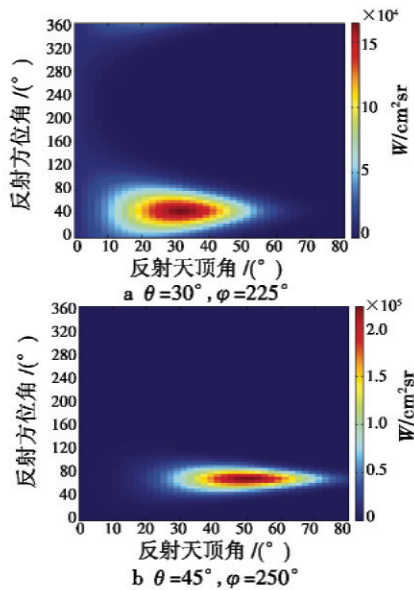


图 5 海面散射光亮度分布

Fig. 5 Radiance distribution of scattered light from sea surface

图 6 为激光束海面散射光亮度分布随风速变化的仿真结果, 计算时激光器位置为 $(0 \text{ km}, 0 \text{ km}, 2 \text{ km})$, 激光束光轴入射方向 (θ, φ) 的取值为 $(45^\circ, 250^\circ)$, 激光器的峰值功率为 5 MW , 光束发散角 θ_i 为 1 mrad 。由图 6 可知, 风速越小, 海面散射光的分布越集中, 光亮度值越大, 这是由于海面风速越小时, 面元坡度的散布范围越小, 海面散射更接近于镜面反射。

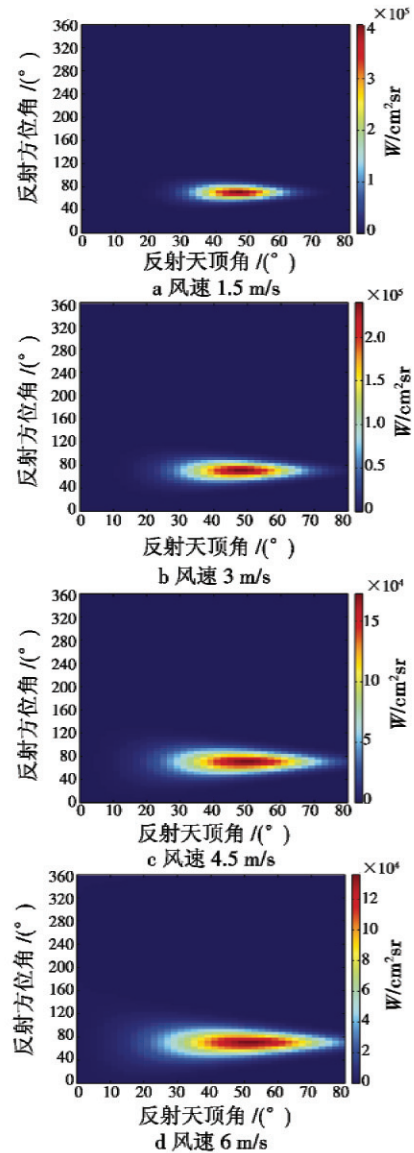


图 6 不同风速海面散射光亮度分布

Fig. 6 Radiance distribution of scattered light from sea surface with different wind speed

图 7 为探测器接收功率随探测器位置的变化曲线, 图中, 纵坐标为探测器的接收功率, 横坐标为探测器与光斑形心连线 MR 相对 Z 轴的天顶角。计算时激光器发光面的直径为 2.5 cm , 探测器光敏面的直径为 2 cm , 峰值功率取 5 MW , 光源中心入射角 (θ, φ) 的取值为 $(30^\circ, 225^\circ)$, MR 方位角取固定值 45° , 与 MT 具有相同长度。由图 7 可知, 当光源中心入射角 (θ, φ) 的取值为 $(30^\circ, 225^\circ)$ 时, 探测器接收功率的最大值并没出现在镜像方向的 $(30^\circ, 45^\circ)$, 而是出现在镜像方向附近的 $(28^\circ, 45^\circ)$ 。这是由于海面面元具有一定坡度, 粗糙海面对入射光的散射方向相对镜像方向存在一定偏差, 散射功率最大值的分布与粗糙海面的高度场有关, 随时间、空间变化。

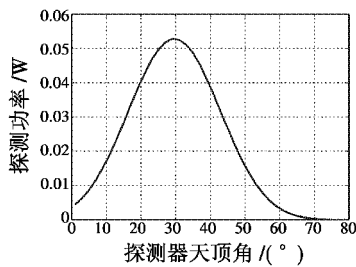


图 7 探测器接收功率随 MR 天顶角的变化曲线

Fig.7 Change of received power by a detector with zenith of MR

4 结论

本文研究了粗糙海面激光束散射的建模与仿真问题,通过 PM 随机海浪谱和方向谱函数建立了不同风速下粗糙海面的几何模型,并将其作为海面的高度场。基于 Cox-Munk 对海浪坡度的统计模型建立了粗糙海面的光散射模型,利用该模型对一种圆锥视场入射激光束的散射光分布及探测器接收功率进行了仿真计算。研究表明,粗糙海面的散射光分布与入射角度及风速相关,对于圆锥视场入射激光束,其散射光主要分布在入射光束镜像方向周围的立体空间,风速越小时,散射光分布越集中;风速越大时,散射光分布越分散。

激光目标探测系统的海面散射回波及回波特征是下一步的研究重点,以期成为激光目标探测系统海杂波计算及抗海杂波干扰提供一定的理论依据,从而提高其在海面背景下目标探测与识别的环境适应性。

参考文献

- [1] 马井军,马维军,赵明波,等. 低空/超低空突防及其雷达对抗措施[J]. 国防科技, 2011(3): 26-35. (MA J J, MA W J, ZHAO M B, et al. Low altitude/very low altitude penetration and radar countermeasures[J]. National Defense Science & Technology, 2011(3): 26-35.)
- [2] 张爽,张晓晖,孙春生. 计算海面激光反射特性的几何光学方法研究[J]. 光学与光电技术, 2012, 10(3): 28-31. (ZHANG S, ZHANG X H, SUN C S. Laser reflection performance from the rough sea surface with geometrical optical method[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2012, 10(3): 28-31.)
- [3] 娄树理,周晓东. 各向异性粗糙海面的红外反射特性研究[J]. 光散射学报, 2011, 23(3): 277-282. (LOU S L, ZHOU X D. Research on infrared reflectance of anisotropic rough sea surface[J]. The Journal of Light Scattering, 2011, 23(3): 277-282.)
- [4] 苏玉民,付金丽,王卓. 三维随机海浪交互式仿真技术研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(1): 175-179. (SU Y M, FU J L, WANG Z. Studying interactive technology of simulation for 3D ocean waves[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(1): 175-179.)
- [5] 毛宏霞,杨宝成,沈国土,等. 海面反射特性研究[J]. 华东师范大学学报, 2000(3): 56-61. (MAO H X, YANG B C, SHEN G T, et al. The study of the reflection feature of the sea[J]. Journal of East China Normal University, 2000(3): 56-61.)
- [6] 任鸿翔,尹勇,金一丞. 大规模海浪场景的真实感绘制[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(12): 1617-1622. (REN H X, YIN Y, JIN Y C. Realistic rendering of large-scale ocean wave scene[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2008, 20(12): 1617-1622.)
- [7] FOURNIER A, REEVES W T. A simple model of ocean waves[C]//Proceedings of the 13th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1986: 75-84.
- [8] WANG C B, WANG Z Y, JIN J Q. et al. Real-time simulation of ocean wave based on cellular automata[C]//Proceedings of CAD/Graphics' 2003, Macao, 2003: 320-326.
- [9] HINSINGER D, NEYRET F, CANI M P. Interactive animation of ocean waves[C]//Proceedings of ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation, 2002: 161-166.
- [10] 潘玉田,马新谋,杨栋. 三维随机波浪的数值仿真研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2010(3): 5-8. (PAN Y T, MA X M, YANG D. Study on numerical simulation of 3D random wave[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2010(3): 5-8.)
- [11] ROSS V, DION D, POTVIN G. Detailed analytical approach to the Gaussian surface bidirectional reflectance distribution function specular component applied to the sea surface[J]. Optical Society of America, 2005, 22(11): 2442-2453.
- [12] REN H G, LIU Y Z, CHEN H P. Calculation of rough sea surface reflection[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006, 27: 1019-1026.
- [13] SCHWENGER F, REPASI E. Simulation of laser beam reflection at the sea surface[C]//The International Society for Optical Engineering, 2011. doi:10.1117/12.883387.