

粗糙海面对高斯分布激光光束的反射模型推导

张晓晖 张爽 孙春生

Modeling of Gaussian laser beam reflection from rough sea surface

Zhang Xiao-Hui Zhang Shuang Sun Chun-Sheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 144204 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.144204

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.144204>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

部分相干环状偏心光束通过海洋湍流的传输特性

Propagation characteristics of partially coherent decentred annular beams propagating through oceanic turbulence

物理学报.2015, 64(20): 204206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.204206>

基于飞秒激光微加工的介质膜损伤修复研究

Study on damage mitigation for dielectric mirrors by using femtosecond laser micromachining

物理学报.2015, 64(15): 154207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154207>

不同光照条件下水下成像背景光的建模与研究

Modeling and simulation of the background light in underwater imaging under different illumination conditions

物理学报.2015, 64(10): 104201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.104201>

激光辐照对热退火金属/掺氟二氧化锡透明导电薄膜光电性能的影响

Effects of laser irradiation on the photoelectric properties of thermal-annealed metal/fluorine-doped tin oxide transparent conductive films

物理学报.2015, 64(3): 034211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034211>

毫秒脉冲激光辐照硅基 PIN 的温度场应力场数值分析

Supercontinuum generation in photonic crystal fiber and tapered single-mode fiber

物理学报.2014, 63(19): 194205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194205>

粗糙海面对高斯分布激光光束的反射模型推导

张晓晖 张爽[†] 孙春生

(海军工程大学兵器工程系, 武汉 430033)

(2015年8月25日收到; 2016年4月13日收到修改稿)

研究激光光束海面反射光强的方向分布特性对海上光电对抗等领域的工程实践具有重要意义. 本文采用分形方法模拟粗糙海面, 并在海面基准坐标系中建立起描述粗糙海面几何特征的数学方程, 然后基于蒙特卡罗方法模拟高斯光束, 依据几何光学原理在基准坐标系下推导了高斯光束的海面反射模型, 采用该模型可以编程计算激光光束海面反射光强的方向分布. 将模拟计算结果与实验结果进行了对比分析, 结果表明该模型可以较好地反映激光光束海面反射光强的分布趋势, 验证了模型的有效性.

关键词: 高斯光束, 海面激光反射, 几何光学

PACS: 42.68.Xy, 42.62.-b, 42.15.-i

DOI: 10.7498/aps.65.144204

1 引言

光辐射经海面反射后在海面上方所形成光场的分布特性是海洋背景下目标探测、遥感与通信的研究基础, 在许多领域中有着十分重要的实际应用. 在海洋遥感领域, 人们主要关注不同的太阳天顶角及水体成分等参数对海水双向反射分布函数(BRDF)的影响, 并以此反演水体温度、水体成分、污染物质等要素来监测海洋^[1-3]; 在海洋激光雷达领域, 学者们主要研究了粗糙海面对于激光光束的透射特性及其后向散射特性^[4-6]. 在海上激光通信领域, 研究人员提出了利用海面作为激光漫反射媒介进行组网通信的设想, 并对激光海面漫反射特性开展了研究^[7,8]. 而在海上光电对抗领域, 目前激光光束已成为现代海战场上实施激光侦察与干扰的主角, 海面也自然而然地成为海上激光光束的巨大反射面, 为了保证己方所发射激光经海面反射后能射入敌方探测系统而不干扰己方的光电系统, 必须深入研究粗糙海面所反射激光光束在海面上方三维空间中的光强分布特性.

现阶段研究激光光束海面反射光强的方向分布特性主要采用粗糙面电磁散射方法, 即将激光光

束的海面反射看作电磁波束的海面电磁散射, 基于麦克斯韦方程组对海面的散射场进行求解. 由于方程的求解较为困难, 研究人员多采用近似方法和数值方法. 近似方法是基于一定的物理近似将方程组简化, 从而便于求解, 主要包括基尔霍夫近似法、微扰法、小斜率近似法、双尺度法以及基于这些近似方法的改进方法^[9-11], 由于对粗糙面的粗糙度、坡度等参数有严格的限制, 使近似方法的适用范围有限, 并由固有的物理近似带来误差^[7]. 数值方法则是采用数值计算方法获得方程组的数值解, 包括矩量法、时域有限差分方法、前后向方法等类型^[12,13], 数值方法计算量大, 因此难以满足如海面等大尺寸目标的计算需求^[9].

本文系统研究了粗糙海面对以不同入射角和方位角入射的激光光束的反射问题, 先基于分形模型在海面基准坐标系里建立起描述粗糙海面几何特征的数学方程, 再采用蒙特卡罗方法将发散角定为确定值、光束截面光强满足高斯分布的激光光束抽样为数量庞大的光线束, 然后根据每根光线直线传播到海面的几何位置、利用菲涅耳定律推导出该光线入射处海面元面所反射光线的方向和能量, 建立起入射激光光束被粗糙海面反射的数学模型, 依

[†] 通信作者. E-mail: zhangshuangyue@sina.com

据该模型, 可以编程计算每根入射光线经海面反射后的光线方向及能量, 通过统计海面三维空间中各方向上所有光线的能量, 就可以得到激光光束入射到粗糙海面后反射光强的空间分布. 利用本文所推导的模型, 模拟计算了某次实验参数下的激光光束水面反射光强的方向分布, 将模拟计算结果与实验结果进行了对比分析, 分析结果验证了模型的有效性.

2 粗糙海面模拟

本文采用Weierstrass分形模型对海面进行模拟. 依据该模型, 海面上任意一点在 t 时刻的高度起伏 $z(x, y, t)$ 可由下式表示^[14]:

$$z(x, y, t) = \delta\eta \sum_{n=0}^{N_f-1} b^{(s-2)n} \sin \{k_0 b^n [(x + V_x t) \cos \beta_n + (y + V_y t) \cos \beta_n] - \omega_n t + \Phi_n\}, \quad (1)$$

式中, δ 与 ω_n 分别为海面高度起伏的均方根和海浪谐波角频率, 大小与海面风速有关, η 为归一化因子, N_f 为模拟中使用的正弦分量的个数, b 为幅度和频率尺度因子, s 为粗糙度, k_0 是空间基波数, Φ_n 为 $[-\pi, \pi]$ 上均匀分布的相位因子, β_n 是第 n 阶海浪的传播方向角, V_x 和 V_y 分别是观察平台相对于 x 轴和 y 轴方向的速度分量.

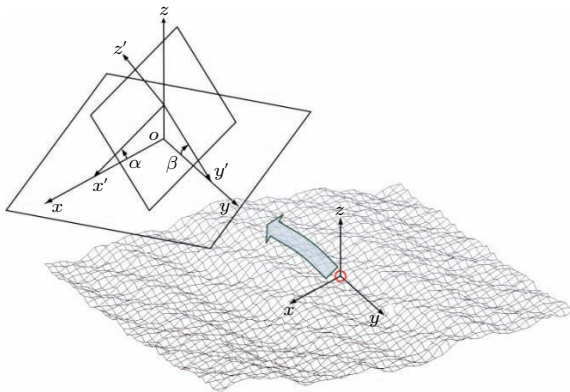


图1 面元局部坐标系示意图

Fig. 1. Diagram of the local coordinate system.

为了计算高斯光束的海面反射, 本文将分形方法模拟的海面看作由许多面元构成, 当面元足够小时可将面元视为平面, 然后以这些面元为反射面计算高斯光束的海面反射. 面元的划分方法是, 首先

如图1所示建立海面基准坐标系 x, y, z , 然后分别沿 x 轴与 y 轴方向以 5 cm 为间隔将海面划分为大量面元. 对每一面元建立其相应的局部坐标系 x', y', z' , 局部坐标系的 x' 轴与 y' 轴方向由面元两相邻边构成, z' 轴方向为面元的法线方向. 假设面元局部坐标系的 x' 轴与海面基准坐标系 x 轴的夹角为 α , y' 轴与 y 轴的夹角为 β , 那么基准坐标系与局部坐标系的关系可以表示为:

$$\begin{cases} x' = x \cos \alpha - z \sin \alpha, \\ y' = y \cos \beta - z \sin \beta, \\ z' = x' \times y', \end{cases} \quad (2)$$

由上式可得, 面元的法向单位矢量在基准坐标系中的表达式为

$$\mathbf{n} = z' = x \sin \alpha \cos \beta + y \cos \alpha \sin \beta + z \cos \alpha \cos \beta. \quad (3)$$

3 高斯光束的蒙特卡罗模拟

依据光学谐振腔理论, 高斯光束在垂直于传播方向 z'' (即光束轴线) 的截面上, 其光强满足高斯分布:

$$I(r, z'') = I_0(z'') \exp \left(-\frac{2r^2}{\omega^2(z'')} \right), \quad (4)$$

式中, $I_0(z'')$ 为截面中心处的光强, r 为距截面中心的距离, $\omega(z'')$ 为 z'' 点处的光斑半径. 采用蒙特卡罗方法模拟高斯光束时, 将高斯光束看作由大量光线构成, 每根光线所携带的能量相同, 那么高斯光束在垂直于传播方向截面上的光强分布就可以由大量光线与截面交点的数量分布进行模拟, 在已知高斯光束的发射位置且每根光线的能量相同的情况下, 只需抽样得到每根光线的方向即可.

由(4)式可知, 光线和截面的交点与截面中心之间的距离 r 服从高斯分布, 而光线在截面上相对于传播方向的方位角 $\Delta\phi$ 服从均匀分布, 因此通过下式可以抽样得到统计特性满足高斯光束特性的光线:

$$\begin{cases} r = \frac{\omega(z'')}{2} \sqrt{-2 \ln(R_1)} \cos(2\pi R_2), \\ \Delta\phi = 2\pi R_3, \end{cases} \quad (5)$$

式中, R_1, R_2, R_3 为在 $[0, 1]$ 上均匀分布的伪随机数. 由于 r 不是便于计算的方向参数, 需要对其进

行转换. 依据几何关系可知, 光线与高斯光束传播方向的夹角 $\Delta\theta$ 与 r 的关系为

$$\Delta\theta = \arctan\left(\frac{|r|}{z''}\right), \quad (6)$$

当传播距离 z'' 足够远时, 高斯光束的远场发散角 ε (全角) 为

$$\varepsilon \approx \frac{2\omega(z'')}{z''}. \quad (7)$$

由 (5) 式—(7) 式可得, 采用蒙特卡罗方法模拟高斯光束时可以通过

$$\begin{cases} \Delta\theta = \arctan\left(\frac{1}{4}\left|\varepsilon\sqrt{-2\ln(R_1)}\cos(2\pi R_2)\right|\right), \\ \Delta\phi = 2\pi R_3 \end{cases} \quad (8)$$

随机抽样得到光线的方向参数.

4 高斯光束的海面反射模型

在上述高斯光束抽样模型的基础上, 计算所有抽样光线经海面反射后的方向与能量, 首先需要得到所有光线相对于海面基准坐标系的入射角和入射方位角.

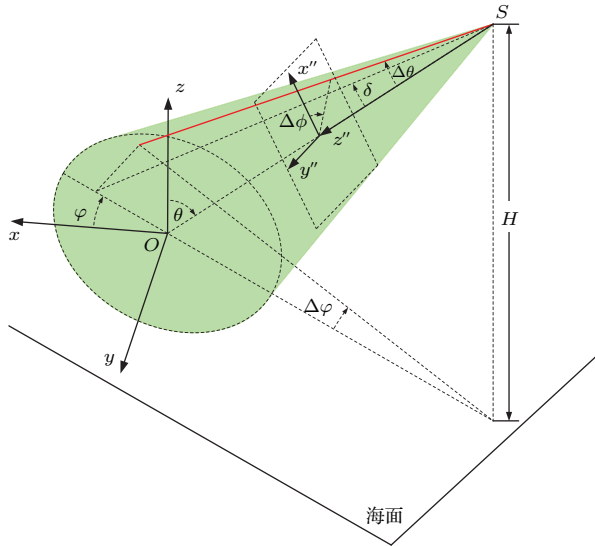


图2 (网刊彩色) 激光光束入射海面示意图

Fig. 2. (color online) Diagram of incident laser beam on sea surface.

如图 2 所示, 激光光束从高度为 H 处传播至海面, 其传播方向相对于海面基准坐标系的入射角和入射方位角分别为 θ 和 φ . 以其中任意一条光线为例 (图中红色光线), 假设其相对于高斯光束传播坐

标系 x'', y'', z'' 的方向参数为 $(\Delta\theta, \Delta\phi)$, 那么该光线相对于海面基准坐标系的入射角 θ_i 和入射方位角 φ_i 可由图中所示的几何关系得到:

$$\begin{cases} \theta_i = \arctan\left[\left(\frac{\tan^2\Delta\theta\sin^2\Delta\phi\cos^2\delta}{\cos^2(\theta+\delta)} + \tan^2(\theta+\delta)\right)^{1/2}\right], \\ \varphi_i = \varphi + \Delta\varphi \\ = \varphi + \arctan\left(\frac{\tan\Delta\theta\sin\Delta\phi\cos\delta}{\sin(\theta+\delta)}\right), \end{cases} \quad (9)$$

$$\delta = \arctan(\tan\Delta\theta\cos\Delta\phi), \quad (10)$$

因此, 光线的入射方向单位矢量在海面基准坐标系中可以表示为

$$\mathbf{k}_i = \mathbf{x}\sin\theta_i\cos\varphi_i + \mathbf{y}\sin\theta_i\sin\varphi_i - \mathbf{z}\cos\theta_i. \quad (11)$$

依据反射定律, 反射光线的方向单位矢量可由入射方向单位矢量与面元的法向单位矢量得到:

$$\mathbf{k}_r = \mathbf{k}_i - 2(\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{n})\mathbf{n}. \quad (12)$$

将 (3) 和 (11) 式代入 (12) 式可得

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_r = & \mathbf{x}(\sin\theta_i\cos\varphi_i - 2p\sin\alpha\cos\beta) \\ & + \mathbf{y}(\sin\theta_i\sin\varphi_i - 2p\cos\alpha\sin\beta) \\ & - \mathbf{z}(\cos\theta_i + 2p\cos\alpha\cos\beta), \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} p = & \sin\theta_i\cos\varphi_i\sin\alpha\cos\beta \\ & + \sin\theta_i\sin\varphi_i\cos\alpha\sin\beta \\ & - \cos\theta_i\cos\alpha\cos\beta. \end{aligned} \quad (14)$$

假设入射激光光束的垂直偏振分量与平行偏振分量的强度相同, 则依据菲涅耳定律可以得到海面的反射率为

$$R = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta'_i - \theta'_t)}{\sin^2(\theta'_i + \theta'_t)} + \frac{\tan^2(\theta'_i - \theta'_t)}{\tan^2(\theta'_i + \theta'_t)} \right], \quad (15)$$

式中, θ'_i 为入射光线相对于面元法向方向的入射角, θ'_t 为相对应的折射角, 依据斯涅耳定律可得:

$$\begin{cases} \theta'_i = \pi - \arccos(\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{n} / |\mathbf{k}_i| |\mathbf{n}|), \\ \theta'_t = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin\theta'_i\right), \end{cases} \quad (16)$$

其中 n_1 为入射光线所处介质的折射率, n_2 为折射光线所处介质的折射率. 由此可以得到光线经海面反射后的能量强度.

5 结果与分析

为了验证上述模型的有效性, 本文采用上述模型依据某次湖上实验的参数, 模拟计算了激光光束的水面反射, 并将其与实验结果进行了对比. 实验采用 CCD 探测激光光束的湖面反射光强在不同方向上的变化, 激光器与 CCD 的相对位置关系如图 3 所示, 激光器距离湖面高度为 H , 以入射角 θ 和方位角 φ 向湖面发射激光, CCD 距离湖面高度为 H_r , CCD 与激光器的水平距离为 D , 具体实验参数如表 1 所示.

为了消除环境光对实验结果的影响, 实验在晚上进行, 因此模拟计算中没有考虑环境光的影响.

实验中湖面较为平静, 风速小于 2 m/s. 计算结果与实验结果的对比如图 4 所示.

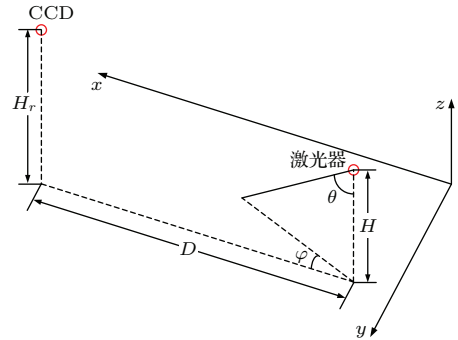


图 3 实验方位示意图

Fig. 3. Position of experimental equipment.

表 1 实验参数
Table 1. Experimental parameters.

实验编号	D/m	CCD 参数			激光器参数			
		视场角/ $^\circ$	像素	H_r/m	$\theta/^\circ$	$\varphi/^\circ$	H/m	发散角/ $^\circ$
1	168	5.5(H) \times 4.5(V)	320(H) \times 256(V)	12.7	83	10	3.5	40(H) \times 5(V)
2	168	5.5(H) \times 4.5(V)	320(H) \times 256(V)	12.7	83	15	3.5	40(H) \times 5(V)
3	168	5.5(H) \times 4.5(V)	320(H) \times 256(V)	12.7	83	20	3.5	40(H) \times 5(V)

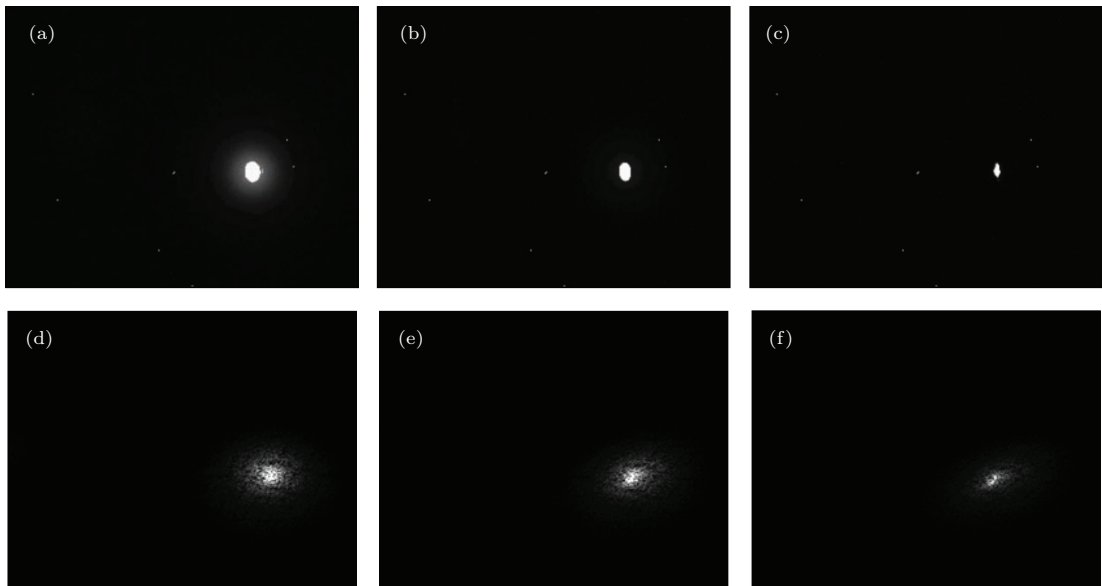


图 4 实验结果与模拟结果 (a) 实验结果 $\varphi = 10^\circ$; (b) 实验结果 $\varphi = 15^\circ$; (c) 实验结果 $\varphi = 20^\circ$; (d) 模拟结果 $\varphi = 10^\circ$; (e) 模拟结果 $\varphi = 15^\circ$; (f) 模拟结果 $\varphi = 20^\circ$

Fig. 4. Experimental results and simulation results: (a) Experimental results $\varphi = 10^\circ$; (b) experimental results $\varphi = 15^\circ$; (c) experimental results $\varphi = 20^\circ$; (d) simulation results $\varphi = 10^\circ$; (e) simulation results $\varphi = 15^\circ$; (f) simulation results $\varphi = 20^\circ$.

图 4(a)—图 4(c) 为实验过程中 CCD 在不同方向拍摄的图像, 图 4(d)—图 4(f) 为模拟计算得到的图像, 其灰度值与进入 CCD 的辐射强度的关系如图 5 所示, 计算过程中, 以模拟计算得到的 $\varphi = 10^\circ$ 时进入 CCD 的辐射强度最大值为基准, 相对辐射强度小于 25% 时, CCD 的灰度值与辐射强度成正比, 相对辐射强度超过 25% 时, 灰度值达到饱和.

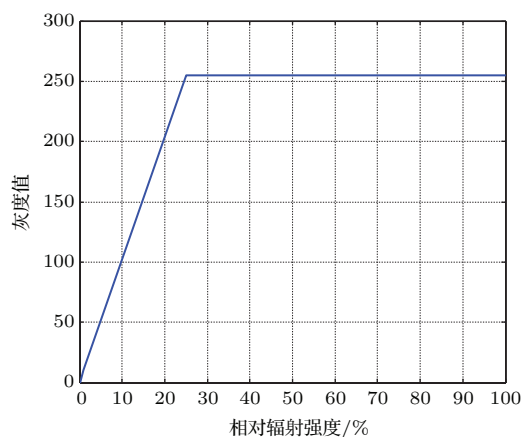


图 5 CCD 的灰度值与辐射强度的关系

Fig. 5. The relationship between radiation intensity and CCD gray value.

图 4 中的亮斑为激光光束在湖面形成的光斑, 因此图像中光斑大小与灰度值的变化可以反映激光光束的湖面反射光强在不同方向上的分布趋势. 从实验图像中可以看到, 随着激光的入射方位角增大, 图像中的光斑面积逐渐减小, 表明 CCD 能够接收到的反射光能量逐渐减少, 而模拟计算结果较好地反映了这一趋势, 说明该模型可以有效计算粗糙海面所反射激光光束在海面上方三维空间中的光强分布特性.

6 结 论

本文系统研究了粗糙海面对于以不同入射角和方位角入射的激光光束的反射问题, 在分形模型

模拟的粗糙海面与蒙特卡罗模拟的高斯光束基础上, 本文依据几何光学原理推导了高斯光束的海面反射模型, 依据该模型编程计算了某次实验参数下激光光束的水面反射光强的分布特性, 模拟计算结果与实验结果的对比表明模拟计算结果可以较好地反映激光光束海面反射光强的分布趋势, 验证了本文推导模型的有效性.

参考文献

- [1] Otremba Z 2004 *Opt. Express* **15** 1671
- [2] Sun L J, Tian Z S, Ren X Y, Zhang Y C, Fu S Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 134211 (in Chinese) [孙兰君, 田兆硕, 任秀云, 张延超, 付石友 2014 物理学报 **63** 134211]
- [3] Gleason A C, Voss K J, Gordon H R, Twardowski M, Sullivan J, Trees C, Weidemann A, Berthon J F, Clark D, Lee Z P 2012 *Opt. Express* **20** 7630
- [4] Hu Y X, Vaughan M, Liu Z Y, Lin B, Yang P, Flittner D, Hunt B, Kuehn R, Huang J P, Wu D, Rodier S, Powell K, Trepte C, Winker D 2007 *Opt. Express* **15** 5327
- [5] Barton J S, Jasinski, M F 2011 *Remote Sens.* **3** 1492
- [6] Zheng Y, Yang K C, Xia M, Rao J H 2008 *J. Appl. Opt.* **29** 785 (in Chinese) [郑毅, 杨克成, 夏珉, 饶炯辉 2008 应用光学 **29** 785]
- [7] Li K, Wang J A, Yao Y 2012 *Infrared & Laser Eng.* **41** 1458 (in Chinese) [李恪, 王江安, 姚瑶 2012 红外与激光工程 **41** 1458]
- [8] Xi P L, Li K 2015 *Laser & Infrared* **45** 256 (in Chinese) [席沛丽, 李恪 2015 激光与红外 **45** 256]
- [9] Fan T Q, Guo L X, Jin J, Meng X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 214104 (in Chinese) [范天奇, 郭立新, 金健, 孟肖 2014 物理学报 **63** 214104]
- [10] Nie D, Zhang M 2010 *Chin. Phys. B* **19** 074101
- [11] Qi X, Han X E 2015 *Acta Optica Sin.* **35** 0829003 (in Chinese) [亓晓, 韩香娥 2015 光学学报 **35** 0829003]
- [12] Zhu X M, Ren X C, Guo L X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 054101 (in Chinese) [朱小敏, 任新成, 郭立新 2014 物理学报 **63** 054101]
- [13] Kubicke G, Bourlier C, Saillard J 2008 *Waves Random Complex Media* **18** 495
- [14] Berizzi F, Dalle-Mese E 2002 *IEEE. Tran. Antenn. Propag.* **50** 912

Modeling of Gaussian laser beam reflection from rough sea surface

Zhang Xiao-Hui Zhang Shuang[†] Sun Chun-Sheng

(Department of Ordnance Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

(Received 25 August 2015; revised manuscript received 13 April 2016)

Abstract

Studies on the direction distribution of laser beam intensity reflected from the sea surface is important for engineering practice in the area of optoelectronic confrontation on the sea surface. In the traditional theory of electromagnetic scattering from rough surfaces, the scattered field from the sea surface can be obtained by solving the Maxwell's equations. As is well known, it is difficult to solve the Maxwell's equations. Therefore, the numerical calculation method and approximate analytical method are used to obtain the scattered field from the sea surface. However, for the numerical calculation method, it is difficult to meet the computing requirements of large electrically targets such as the sea surface. Meanwhile the approximate analytical method has certain restrictions on the parameters of rough surface in physical approximation. What is more, the inherent error is also caused by the physical approximation. In this paper, we investigate the laser beam reflection from rough sea surface with Monte Carlo method and principles of geometric optics. The rough sea surface which is simulated with the fractal method is divided into a lot of small planes, and the mathematical equations to describe the geometric characteristics of the planes are established in the sea reference coordinate system. After that, based on the simulation of Gaussian beam with Monte Carlo method, the laser beam is divided into a great number of rays and the statistical properties of the rays satisfy the propagation characteristics of Gaussian beam. Then, the laser beam reflection model from the sea surface is derived in the reference coordinate system. The direction distribution of the laser beam intensity reflected from the sea surface is simulated under a certain experiment condition with this model. The results show that the simulation results of laser beam reflection from the sea surface fit the experimental results well.

Keywords: Gaussian beam, laser reflection form sea surface, geometrical optics

PACS: 42.68.Xy, 42.62.-b, 42.15.-i

DOI: [10.7498/aps.65.144204](https://doi.org/10.7498/aps.65.144204)

[†] Corresponding author. E-mail: zhangshuangyue@sina.com