

各向异性粗糙海面对掠入射激光的散射特性研究

王新涛¹, 屈惠明¹, 曲红星², 龚靖棠¹, 王琳²

(1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;
2. 中国人民解放军总参谋部 陆航研究所, 北京 101121)

摘要: 针对目前粗糙海面的激光散射场模型并不适用于激光束掠入射的情况以及忽略风速的影响, 基于 Cox-Munk 模型及基尔霍夫近似(KA)模拟各向异性粗糙海面, 建立海面对掠入射激光束的方向反射率分布模型, 仿真分析了方向反射率随风速、风向、入射角、入射方位角、反射角、反射方位角的变化规律, 并通过水池实验进行了验证。结果表明: 粗糙海面对激光束的散射能量主要分布在以被照射海面为顶点的圆锥形角空域, 此空域角方向位于镜面反射方向附近, 且随着风速的增加, 空域角逐渐变大, 对于掠入射的激光束, 由于海浪的遮蔽效应, 空域角方向会偏离镜面方向。该模型可以为激光半主动制导弹对海上小目标射击研究以及利用激光束照射粗糙海面布设激光诱饵研究提供一定理论依据。

关键词: 方向反射率; 粗糙海面; 掠入射; 激光半主动制导

中图分类号: TN977 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)11-2935-05

Grazing incidence laser scattering characteristics of anisotropic rough sea surface

Wang Xintao¹, Qu Huiming¹, Qu Hongxing², Gong Jingtang¹, Wang Lin²

(1. School of Engineering and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. Research Institute of Army Air Technical of PLA General Staff, Beijing 101121, China)

Abstract: In light of the laser scattering field model of the rough sea surface is not suitable for laser beam grazing incidence and ignores the influence of wind speed, based on the Cox-Munk and kirchhoff approximation (KA) simulation model of anisotropic rough sea, directional reflectance ratio distribution model for grazing incidence laser beam was set up, change law of directional reflectance ratio vs wind speed, wind direction, incident angle, incident position angle, reflection angle, reflection position angle was simulated, and the result was verified by pool experiments. Results show that the laser energy scattering of rough sea surface mainly distributes in the conical space angular which in order to irradiated surface for a vertex, this space angular direction locates near the specular reflection direction, as the wind speed increases, space angular becomes larger, for grazing incidence laser beam, due to the shielding effect, the direction of space angular away from the specular direction. The model can provide certain theoretical basis for the research of semi-active laser guided missile shooting small targets at sea and layout of laser decoy in rough sea.

收稿日期: 2013-03-08; 修订日期: 2013-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(61171164); 装备预研基金(62201050103)

作者简介: 王新涛(1988-), 男, 硕士生, 主要从事光电探测与光电成像技术方面的研究。Email: wangxintao.1988@163.com

导师简介: 屈惠明(1967-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光电探测与光电成像技术方面的研究。Email: huimingqu@163.com

Key words: directional reflectance ratio; rough sea surface; grazing incidence; semi-active laser guided

0 引言

随着越来越多军用激光装备在复杂海况背景下的使用,特别是一些以武装直升机为发射平台的激光半主动制导空地导弹,当采用本机照射的作战模式对海上小目标(如只有炮塔露出海面的水陆两栖坦克)进行射击时,会有相当一部分激光束照射到海面上,海面散射激光形成的干扰信号可能会影响导弹的打击精度,因此针对各向异性粗糙海面对激光束散射特性进行建模与仿真分析时非常有必要的。一些专家对粗糙海面的激光散射场模拟建模进行了大量的工作,任海刚计算了海面的反射率,分析了海面灰体假设的可行性^[1],毛红霞、施加宝、杨希伟等计算了海面反射率随风速的变化规律^[2-4],但都没有考虑风向的影响,娄树理、周晓东等针对小角度入射和散射激光束建立了海面散射模型,但并不适用激光束掠入射的情况^[5]。在实战中武装直升机为了躲避敌方雷达的探测,一般采用低空甚至超低空飞行,即指示激光束大角度照射到海面上,同时携带导引头的激光半主动制导导弹也是采用低空飞行,接收到的目标反射信号也是大角度散射。而目前建立的粗糙海面激光散射场模型并不适用于大角度入射和散射的激光束。

针对目前建立的粗糙海面激光散射场模型在工程上使用的局限性,文中从理论上推导出各向异性粗糙海面对激光的方向反射率随风速、风向、入射角、入射方位角、反射角、反射方位角变化规律的数学模型,考虑海浪对掠入射激光的遮蔽效应,加入遮蔽系数对模型做适当修正,并仿真分析了海浪对掠入射激光的散射情况。根据此模型可以定量计算不同海况条件、不同掠入射角度下,粗糙海面向各个方向散射的激光干扰信号大小,为激光半主动制导空地导弹对海上小目标射击研究及利用海面布设激光诱饵的研究提供理论依据。

1 理论模型

海浪是由风的作用产生及发展的海面波动,以

重力为复原力,周期范围约为 1~30 s 或更大一些。实际上海浪的波面起伏是由宏观波面起伏和微尺度波面起伏共同贡献的。为了便于工程计算,文中用宏观尺度波面斜率在主风向和侧风向上分布的统计规律表示各向异性粗糙海面。按照 Kirchhoff 近似(KA),若随机粗糙面是大尺度起伏,且其起伏方差、相关长度、平均曲率半径远大于波长,则粗糙面上局部的曲面可用该点处的切平面近似。目前军用激光束的波长为 1.06 μm ,因此可以采用 Kirchhoff 近似的方法,在此对海面做以下假设:(1) 将海面分为 N 个规则的平面面元,每个面元的大小 $\Delta s \gg \lambda \times \lambda$;(2) 每个小面元对入射激光的反射率可以按照菲涅耳反射定律计算,从各个面元反射到同一方向的激光是非相干的;(3) 不考虑小面元边缘处的衍射及激光在面元之间的多次反射;(4) 每个小面元可以用其斜率参数 k_x, k_y 表示。

对于各向异性粗糙海面波面斜率概率密度函数分布,Cox 和 Munk 两人共同研究并于 1954 年提出了 Cox-Munk 坡度分布模型。Cox-Munk 模型认为,海面呈现一定的粗糙度,这种粗糙度可以认为是由许多小波面构成的,这些小波面的坡度 k_u, k_c 应该满足某种统计规律并给出了 k_u, k_c 的联合概率密度函数 $f(k_u, k_c)$ ^[6-7]。

$$f(k_u, k_c) = \frac{1}{2\pi\sigma_u\sigma_c} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{k_u^2}{\sigma_u^2} + \frac{k_c^2}{\sigma_c^2}\right)\right] \quad (1)$$

$$\sigma_u^2 = 3.16 \times 10^{-3} v \sigma_N^2 \quad (2)$$

$$\sigma_c^2 = (0.003 + 1.92 \times 10^{-3} v) \sigma_N^2 \quad (3)$$

$$\sigma_N^2 = \begin{cases} 1 & v < 0.5 \text{ m/s} \\ \frac{0.012 + 0.01 \ln(v)}{0.003 + 0.005 12v} & 0.5 \leq v < 7 \text{ m/s} \\ \frac{-0.145 + 0.085 \ln(v)}{0.003 + 0.005 12v} & v \geq 7 \text{ m/s} \end{cases} \quad (4)$$

式中: σ_u^2, σ_c^2 分别为波面在主风向、侧风向斜率的方差; v 为海平面以上 12.5 m 高度处的风速。在风速为 14 m/s 时,根据 Donelan 方向谱计算, σ_u^2, σ_c^2 分别为 0.026 和 0.011,而按照 Cox-Munk 模型计算, σ_u^2, σ_c^2 分别为 0.0227 和 0.0154,基本吻合,所以可以利用 Cox-Munk 坡度分布模型正确表示各向异性粗糙海面。

海面小面元散射的几何示意图如图 1 所示, 入射光线用单位矢量 \mathbf{p} 表示, 入射角为 θ_i , 入射方位角为 φ_i (入射光线在 \mathbf{xoy} 面上的投影与 \mathbf{x} 轴的夹角, 逆时针方向为正), 反射光线用单位矢量 \mathbf{q} 表示, 反射角为 θ_r , 反射方位角为 φ_r (反射光线在 \mathbf{xoy} 面上的投影与 \mathbf{x} 轴的夹角, 逆时针方向为正), 激光束的入射功率为 P_i , 束散角为 θ_0 , 光强为 I_0 , 激光光源距海面的距离为 R 。风向与 \mathbf{x} 轴的夹角为 γ (逆时针方向为正), 则海面小面元斜率 k_x, k_y 在主风向和侧风向上可以表示为:

$$k_u = k_x \cos \gamma + k_y \sin \gamma \quad (5)$$

$$k_c = -k_x \sin \gamma + k_y \cos \gamma \quad (6)$$

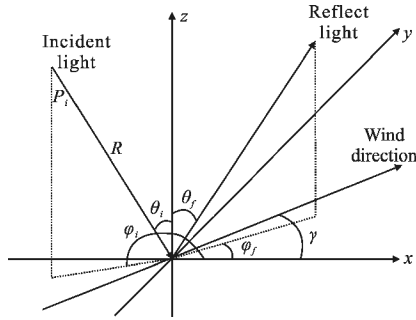


图 1 海面散射的几何示意图

Fig.1 Geometrical diagrammatic sketch of sea surface scattering

单位矢量 \mathbf{p}, \mathbf{q} 可以表示为:

$$\mathbf{p} = (-\sin \theta_i \cos \varphi_i, -\sin \theta_i \sin \varphi_i, -\cos \theta_i) \quad (7)$$

$$\mathbf{q} = (\sin \theta_r \cos \varphi_r, \sin \theta_r \sin \varphi_r, \cos \theta_r) \quad (8)$$

海面小面元单位法线矢量 \mathbf{N} 为:

$$\mathbf{N} = \frac{\mathbf{q} - \mathbf{p}}{\sqrt{2(1 - \mathbf{q} \cdot \mathbf{p})}} \quad (9)$$

海面小面元的本地入射角 w 为:

$$w = \arccos(\sqrt{2(1 - \mathbf{q} \cdot \mathbf{p})}) \quad (10)$$

海水的折射率 n 取 1.33, 所以小面元的本地折射角 w' 为:

$$w' = \arcsin\left(\frac{1.33}{w}\right) \quad (11)$$

假设激光束是无偏的, 根据菲涅耳反射定律得小面元的反射率 $\rho(w)$:

$$\rho(w) = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\sin(w - w')}{\sin(w + w')} \right)^2 + \left(\frac{\tan(w - w')}{\tan(w + w')} \right)^2 \right) \quad (12)$$

激光束照射的海面 $N \Delta s$ 在 \mathbf{XOY} 平面上的投影 S_0 可以表示为:

$$S_0 = N \Delta s \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \cos(\arctan(k_u)) \cos(\arctan(k_c)) \cdot f(k_u, k_c, \sigma_u, \sigma_c) dk_u dk_c = N \Delta s \chi(\sigma_u, \sigma_c) \quad (13)$$

其中展平因子^[8] $\chi(\sigma_u, \sigma_c)$ 为:

$$\chi(\sigma_u, \sigma_c) = (1 + \sigma_u^2 + \sigma_c^2)^{-1/2} \leq 1$$

海面斜率在 \mathbf{x}, \mathbf{y} 方向上的分量 k_x, k_y 可用小面元法线的倾斜斜率表示:

$$k_x = \frac{N_x}{N_z}, k_y = \frac{N_y}{N_z} \quad (14)$$

可使激光束从矢量 \mathbf{p} 方向入射, 经镜面反射到矢量 \mathbf{q} 方向的小面元的概率 $F(k_u, k_c)$ 为:

$$F(k_u, k_c) = \iint f(k_u, k_c) dk_u dk_c \quad (15)$$

将变量 k_u, k_c 向变量 θ, φ 进行雅可比变换得:

$$dk_u dk_c = \begin{vmatrix} \frac{\partial k_u}{\partial \theta} & \frac{\partial k_u}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial k_c}{\partial \theta} & \frac{\partial k_c}{\partial \varphi} \end{vmatrix} d\theta d\varphi \quad (16)$$

鉴于激光束掠入射到粗糙海面上, 海浪之间将互相遮蔽, 修正遮蔽系数的经验公式为 $s(\theta)$ ^[9], 将入射角 θ_i 、反射角 θ_r 分别代入遮蔽系数 $s(\theta)$, 即可得到入射遮蔽系数 $s(\theta_i)$, 散射遮蔽系数为 $s(\theta_r)$ 。

$$s(\theta) = \left[1 - \operatorname{erfc} \left(\frac{\cot \theta}{\sqrt{80} \sigma_u} \right) \right] [1 + f(\theta)]^{-1} \quad (17)$$

式中: $f(\theta) = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{2}{\pi} \right)^{1/2} \frac{\sigma_u}{\cot \theta} \exp \left(-\frac{\cot^2 \theta}{2 \sigma_u^2} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{\cot \theta}{\sqrt{80} \sigma_u} \right) \right]$ 。

假设激光束在小面元上的照度为 E_w , 散射方向

立体角 $\Omega = \iint \sin \theta d\theta d\varphi$, 所有小面元在单位立体角内的散射功率 P_r 为:

$$P_r = \sum (E \Delta s \rho(w) F(k_u, k_c) s(\theta_i) s(\theta_r)) / \Omega =$$

$$\frac{I_0 \cos(w)}{R^2} N \Delta s \rho(w) f(k_u, k_c) \begin{vmatrix} \frac{\partial k_u}{\partial \theta} & \frac{\partial k_u}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial k_c}{\partial \theta} & \frac{\partial k_c}{\partial \varphi} \end{vmatrix} \frac{d\theta d\varphi}{\sin \theta d\theta d\varphi} S(\theta_i) S(\theta_r) = \frac{P_i}{\chi(\sigma_u, \sigma_c)} \frac{\cos(w)}{\cos \theta_i \sin \theta_r} \rho(w) f(k_u, k_c) \begin{vmatrix} \frac{\partial k_u}{\partial \theta} & \frac{\partial k_u}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial k_c}{\partial \theta} & \frac{\partial k_c}{\partial \varphi} \end{vmatrix} s(\theta_i) s(\theta_r) \quad (18)$$

定义在某一方向上单位立体角内散射的激光功率与入射激光功率之比为该方向上的方向反射率, 则各向异性粗糙海面的方向反射率与风向、风速、入射角、入射方位角、反射角、反射方位角的关系 $\rho(\theta, \varphi, \theta_r, \varphi_r, \nu)$ 为:

$$\rho(\theta, \varphi, \theta_r, \varphi_r, \nu) = \frac{P_r}{P_i} = \frac{1}{\chi(\sigma_u, \sigma_c)} \frac{\cos(w)}{\cos\theta_r \cos\theta_f} \rho(w) f(k_u, k_c) \begin{bmatrix} \frac{\partial k_u}{\partial \theta_r} & \frac{\partial k_u}{\partial \varphi_r} \\ \frac{\partial k_c}{\partial \theta_r} & \frac{\partial k_c}{\partial \varphi_r} \end{bmatrix} s(\theta_r) s(\theta_f) \quad (19)$$

2 仿真结果及分析

根据上述建立的各向异性粗糙海面对入射激光的方向反射率分布模型, 利用计算机仿真分析在不同的海况背景下, 粗糙海面对掠入射激光的散射情况。图 2~图 5 分别给出了粗糙海面对入射激光束的方向反射率随风向、风速、入射角及反射角变化二维

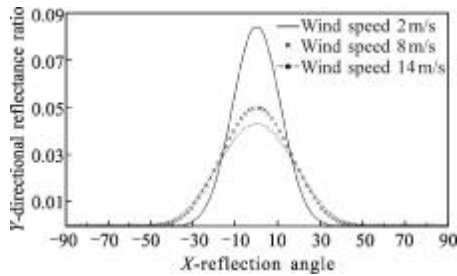


图 2 入射角 0°, 风向 0°, 不同风速下, 方向反射率随反射角变化的仿真结果

Fig.2 Simulation result of directional reflectance ratio vs reflection angle under incident angle 0°, wind direction 0° and different wind speeds

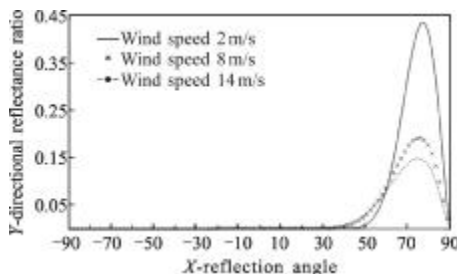


图 3 入射角 80°, 风向 0°, 不同风速下, 方向反射率随反射角变化的仿真结果

Fig.3 Simulation result of directional reflectance ratio vs reflection angle under incident angle 80°, wind direction 0° and different wind speeds

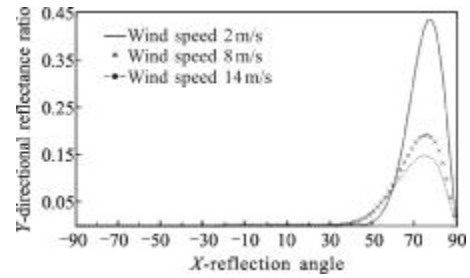


图 4 入射角 80°, 风向 60°, 不同风速下, 方向反射率随反射角变化的仿真结果

Fig.4 Simulation result of directional reflectance ratio vs reflection angle under incident angle 80°, wind direction 60° and different wind speeds

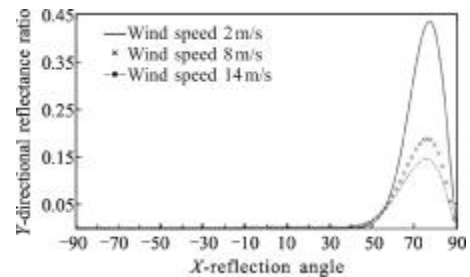


图 5 风向 0°, 风速 8 m/s, 不同风速下, 方向反射率随反射角变化的仿真结果

Fig.5 Simulation result of directional reflectance ratio vs reflection angle under incident angle 0°, wind direction 8 m/s and different wind speeds

仿真曲线, 其中横轴为激光束反射角, 纵轴为方向反射率。图 6 为粗糙海面对掠入射激光束的方向反射率随反射角、反射方位角变化的三维仿真曲线。

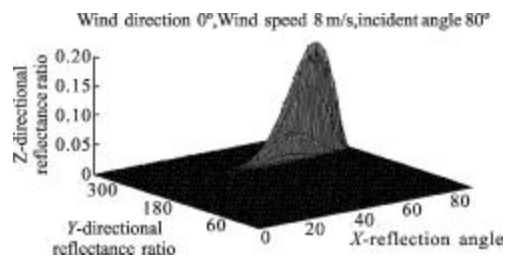


图 6 风向 0°, 风速 8 m/s, 不同风速下, 方向反射率随反射角、反射方位角变化的三维仿真结果

Fig.6 3D simulation result of directional reflectance ratio vs reflection angle and reflection position angle

根据上述仿真结果, 可以得到以下结论:

- (1) 各向异性粗糙海面对激光束的散射以前向为主, 后向散射很弱, 其中前向散射的光束主要集中在镜面反射方向。

(2) 对同一入射光束(入射角、入射方位角不变),随着风速的增大,各向异性粗糙海面对激光束方向反射率峰值逐渐减小且散射光的分布范围逐渐变宽。风向的变化会使较大风速条件下的方向反射率随反射角的变化曲线变窄。

(3) 对同一海况背景(风速、风向不变),随着入射角的增大,各向异性粗糙海面对激光束方向反射率峰值先增大后减小。海平面以上 10 m 高度处风速 8 m/s,当激光束小角度(小于 60°)入射时,方向反射率峰值出现在镜面反射方向,而对于掠入射(大于 60°)的激光束而言,其方向反射率峰值开始偏离镜面反射方向。

(4) 各向异性粗糙海面对激光束的方向反射率分布区域是一个以被照射海面为顶点的圆锥形角空域,风速越大,此空域角越大,风速越小,此空域角越小。若将海面看做表面光滑的镜子,则此空域角无穷小且海面散射的激光能量全部分布在镜面反射方向。

将以上仿真分析结果应用到工程上可知:

(1) 因为海面对激光束的后向散射较弱,当携带激光半主动制导空地导弹的武装直升机采用本机照射的作战方式对海上小目标射击时,海面散射回的激光干扰信号对导弹制导精度的影响可以忽略;(2) 风速越大,海面越粗糙,海面散射的激光束形成的圆锥形空域角越大,在利用激光束照射海面布设激光诱饵时,可以参考文中建立各向异性粗糙海面激光散射场模型,结合海况条件,选择恰当的激光入射角照射海面,只要保证敌方导弹进入海面散射的激光束形成的空域角内,即可达到干扰诱偏的效果^[10];(3) 当激光束掠入射到海面上时,由于海浪之间的相互遮蔽,峰值反射率会减小,峰值反射率的方向也会偏离镜面方向,同时当风速较大时,风向的变化对方向反射率也存在一定的影响。

3 结 论

针对目前粗糙海面的激光散射场模型并不适用于激光束掠入射的情况以及忽略风速的影响,文中建立了各向异性粗糙海面对掠入射激光束的方向反射率分布模型,并仿真分析了激光束方向反射率随风速、风向、入射角、入射方位角、反射角、反射方位角的变化规律。为了验证模型的准确性,笔者曾在实

验室中利用低功率激光器将 1.06 μm 波长激光束照射到利用造波器生成的不同粗糙度的水面上,并采用 147 型激光功率计对散射场中不同高度、不同方位的采样点能量进行多次测量,发现处理后的测量结果与仿真结果基本吻合。因此该数学模型可以为激光半主动制导空地导弹对海上小目标射击研究以及利用激光束照射粗糙海面布设激光诱饵研究提供一定理论依据。

参 考 文 献:

- [1] Ren Haigang, Xing Qiang. Sea surface radiation models in infrared image simulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5): 546-550. (in Chinese)
- [2] Mao Hongxia, Yang Baocheng. The study of the reflection feature of the sea [J]. *Journal of East China Normal University: Natural Science*, 2000, 3: 56-61. (in Chinese)
- [3] Shi Jiabao, Wu Zhenshen, Cao Yunhua. Study on reflection of sea surface in Mid-IR [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(8): 2372-2375. (in Chinese)
- [4] Yang Xiwei, Wang Zuolai, Sun Xiaoquan. Theoretical design of combined laser decoy for warship protection [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2005, 20 (6): 20-24. (in Chinese)
- [5] Lou Shuli, Zhou Xiaodong. Research on infrared reflectance of anisotropic rough sea surface [J]. *The Journal of Light Scattering*, 2011, 23(3): 277-282. (in Chinese)
- [6] Sayer A M, Thomas G E, Grainger R G. A sea surface reflectance model for (A)ATSR, and application to aerosol Retrievals [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2010, 3: 813-838.
- [7] Zhou Y, Sun J F, Luang Zh. Aperture-synthesizing experiment of a down-scaled synthetic aperture imaging ladar [J]. *Acta Optic Sinica*, 2008, 28(12): 2446-2448.
- [8] Yang Chunping, Wu Jian. Properties of laser scattering from the waded seawater surface [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(2): 526-530. (in Chinese)
- [9] Smith B G. Geometrical shadowing of a random rough surface [J]. *IEEE Transaction on Antennas and propagation*, 1967, 15(5): 668-671.
- [10] Li Junbo. Optimization of laser decoy deployment strategy [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2006, 4(2): 12-15. (in Chinese)