

doi: 10.3788/gzxb20164508.0829001

超低空状态下海面激光后向散射测量与仿真

童广德^{1,2,3}, 王占山^{1,2}, 沈正祥^{1,2}, 王彪³

(1 同济大学 先进微结构材料教育部重点实验室, 上海 200092)

(2 同济大学 物理科学与工程学院 精密光学工程技术研究所, 上海 200092)

(3 电磁散射国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:海面的激光散射特性是制约激光雷达对低空飞行器进行探测与识别的关键因素之一。模拟超低空状态,通过人工造波池模拟不同海情的海面,采用激光散射测量装置在典型海情下近距离海面获取了激光后向散射数据;采用网格化分割海面,根据 Pierson-Moscowitz 谱构建了三维时变海面几何模型,利用 Torrance-Sparrow 模型模拟分析海面的近距离激光后向散射特性。测量和仿真数据表明:实测与仿真结果一致,海面的激光散射受海面几何波形调制;其强度随擦地角增大而增大;由于海面的随机起伏,海面散射极大值存在较大范围波动,并且波动随擦地角减小而增大。

关键词:超低空;海面;激光后向散射;双向反射函数;人工造波池;测量与仿真

中图分类号: TJ43+9.2; O571.55+3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2016)08-0829001-6

Measurement and Simulation of Laser Scattering from Near Sea Surface

TONG Guang-de^{1,2,3}, WANG Zhan-shan^{1,2}, SHEN Zheng-xiang^{1,2}, WANG Biao³

(1 Key Laboratory of Advanced Micro-structured Materials, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

(2 Institute of Precision Optical Engineering, School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

(3 Science and Technology on Electromagnetic Scattering Laboratory, Shanghai 200090, China)

Abstract: The characteristic of laser scattering of sea surface is one of the key factors which restrict the laser radar to detect and recognize the artificial flying objects near sea surface. To simulate the state of super-low-altitude and by constructing an artificial indoor tank with wave makers to simulate the real sea surface with different conditions, the data of laser back scattering from the near water surface in typical wave conditions was attained. The sea surface was modelled as a regular grid and the height of grid was derived by using the PM spectrum, the back scattering intensity of each sea surface grid was calculated based on the Torrance-Sparrow model, the back scattering characteristic of the near sea surface irradiated by laser was analysed. The experiment and simulation results are in good agreement with each other and show that, the characteristic of laser back scattering of near sea surface is strongly related with the stochastic distribution of sea waves and its intensity has the performance of the stochastic distribution with the sea surface, the intensity of scattering increases with the increasing of grazing angle. Because of the random fluctuation of sea, the maximum of scattering data fluctuates in a large range and the fluctuation values also increase with the increasing of grazing angle.

Key words: Super-low altitude; Sea surface; Back scattering; Bidirectional Reflectance Distribution Function(BRDF); Tank with wave makers; Measurement and simulation

OCIS Codes: 290.1350; 290.1483; 290.5820

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 11105099, 10978002)和科技部国家重大科学仪器设备开发专项(No. 2012YQ04016403)资助

第一作者:童广德(1975-),男,研究员,博士,主要研究方向为光纤光栅传感技术。Email: tonggd_scholar@sina.com

通讯作者:王占山(1963-),男,教授,博士,主要研究方向为薄膜光学、X射线光学仪器研制等。Email: wangzs@tongji.edu.cn

收稿日期: 2016-03-02; **录用日期:** 2016-05-24

0 引言

当用激光雷达对靠近海面运动的飞行器进行探测时,飞行器和海面的激光散射交织在一起,飞行器越靠近海面,海面的激光散射对激光雷达探测目标的影响越严重,因此,海面状态及其散射特性成为制约激光雷达对掠海飞行器进行探测与识别的关键因素.激光在不同状态海面上的散射差别巨大,只有准确掌握不同海面状态下的激光散射性能,才能从复杂的海面散射杂波中准确地探测到目标.

粗糙海面激光散射性能的建模仿真是研究海面散射的重要方法之一.基于电磁计算方法发展起来的散射计算方法^[1-3],计算量过大且主要应用于理论分析,因此不适用于粗糙海面的散射计算.为计算海面散射性能,提出基于双向反射函数计算法^[4],如 Cook 等^[5]和 He 等^[6]提出的各向同性模型, Ross 等^[7]提出的各向异性双向反射函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)模型. Ross 模型能较为准确地描述远离海面的散射性能,已在海面光散射的实际测量中得到验证^[8-9].在 Ross 模型中,海面散射主要由海表面的反射构成,产生反射的海面比例是由海浪分布、光照角度和海浪间遮挡等决定的.还有一类方法,直接根据反射系数,获取海面散射功率^[10-13].所述仿真主要应用于远距离遥感,适用于满足统计分布的大面积海面散射计算;而在超低空条件下,激光照射的海面有限,局部海面不满足统计分布.

另一种研究海面激光散射的方法是直接测量法.海上实际激光散射测量受海情影响大,实验结果具有较大的随机性,可控性差,难以获取具有指导意义的定量关系.随着人工造波技术的发展,利用造波水池可以精确模拟不同海情的海面状态,为定量研究海面的近距离散射提供了条件.美国海军作战中心利用其位于马里兰州的室内造波设备,系统地开展了室内海环境模拟测量研究,在 90 m×60 m 造波池内完成各频段的电磁波的散射测试,获取了电磁波在不同海情下海面近距离的定量散射规律^[14].但关于海面近距离激光散射特性测量鲜有报道.

本文基于海谱模型和 Torrance-Sparrow 散射模型^[5, 15],建立海面几何模型和海面双向反射分布函数,实现海面散射回波仿真;通过具备模拟不同海况的人工造波池和研制相应的激光散射测量装置,实现不同海况和入射条件下海面的激光散射特性测试;仿真计算与模拟测试结果相互验证,并给出超低空状态下海面激光散射特性.

1 海面激光散射计算

海面是一个大尺度起伏的粗糙表面,海面的激光

散射由大量海面局部镜面的反射组成.因此,海面的激光散射仿真需首先将海面分割为无数微面元,然后计算微面元的激光散射,最后将所有微面元的激光散射进行积分.不同的海面模拟会造成散射信号的巨大差异,基于海谱模型和 Torrance-Sparrow 模型构建了海面的几何模型和微面元的激光散射.

1.1 海面模型

海浪运动是一种复杂的随机过程,海谱模拟是描述海浪的主要途径之一^[16-17].海面某一位置的波高可分解为无限个随机余弦波的叠加,每一个余弦波对应海面的一个谱分量为

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos(\omega_i t + \varepsilon_i) \quad (1)$$

式中, a_i 、 ω_i 分别是组成波的振幅和圆频率, t 为时间, ε_i 为在 $0 \sim 2\pi$ 范围内均匀分布的随机初位相.其中有

$$a_i^2 = 2 \int_{\omega}^{\omega+\Delta\omega} S(\omega) d\omega \quad (2)$$

式中, $S(\omega)$ 为单位频率间隔内的能量,称为能谱,或称为频谱(单位是 $\text{m}^2 \cdot \text{s}$), $\Delta\omega$ 为海面频谱在频率域进行采样的圆频率间隔.在模拟海浪时,采用 Pierson-Moscowitz 谱,简称 P-M 谱^[17],表示为

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

式中, $\alpha = 8.1 \times 10^{-3}$, $\beta = 0.74$ 且都为无量纲常量; g 为重力加速度; U 为海面上 19.5 m 高处的风速.

三维波动海面的描述为

$$y(x, z, t) = \sum_{j=-J}^J \sum_{i=1}^{\infty} a_{ji} \cos [k_i (x \cos \theta_j - z \sin \theta_j) - \omega_i t + \varepsilon_{ji}] \quad (4)$$

$$a_{ji}^2 = 2 \int_{\theta}^{\theta+\Delta\theta} \left[\int_{\omega}^{\omega+\Delta\omega} S(\omega) A(\omega, \theta) d\omega \right] d\theta \quad (5)$$

式中, i, j 为序号(频谱序列中第 i 个,方向序列中第 j 个), k_i 为第 i 个正弦海浪的波数,对于深水波有 $k_i = (\omega_i)^2/g$, g 为重力加速度; ε_{ji} 为随机相位(可以通过随机函数生成,实现海浪随机性的模拟); θ 为海浪主方向(一般取为平均风向)和单元波的波向之间的夹角; $A(\omega, \theta)$ 为方向分布函数,选用根据波浪立体观测计划(Stereo Wave Observation Project, SWOP)方向扩展函数^[16],表示为

$$A(\omega, \theta) = \frac{1}{\pi} (1 + p \cos 2\theta + q \cos 4\theta) \quad (6)$$

$$p = 0.50 + 0.82 \exp \left[-0.5 \left(\frac{\omega}{\omega_{\max}} \right)^4 \right], |\theta| \leq \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

$$q = 0.32 \exp \left[-0.5 \left(\frac{\omega}{\omega_{\max}} \right)^4 \right], |\theta| \leq \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

式中, ω_{\max} 为对应能量最大海谱的圆角频率.

为了模拟激光照射的局部海面,首先将海面进行网格划分,选择大地坐标,坐标系如图 1(0, 1, 2, ..., m 、 n 、 M 、 N 为网格顶点序号),将海面划分为 $M \times N$ 个网

格微面元,要求网格足够小,工程上要求相邻网格顶点位置表面法向之间的夹角小于 $1/10$ 的镜像反射展宽角度(一半的展宽角度即为双向反射分布函数中最大值对应角度和临近最大值一半对应角度的差值);再根据海情,模拟出海面海浪频谱和方向谱,生成起伏的海面,获取每一个网格点的高度(坐标 Y 值)。

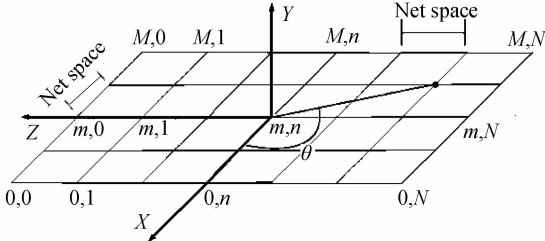


图1 海表面网格划分

Fig. 1 The grid of sea surface

不同风速情况下的模拟海面如图2,当风速为 1.5 m/s 时,海面波浪振幅较小,周期也很小;当风速增加到 15 m/s 时,海面波浪振幅较大,周期也较大,此时为大尺度的海浪起伏。

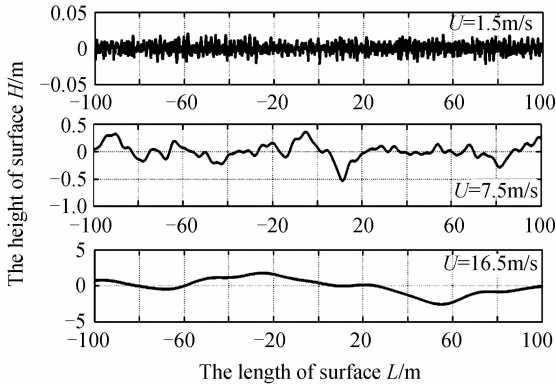


图2 不同风速情况下海面的高度起伏曲线

Fig. 2 The curve of sea surface in different wind speed

1.2 海面散射计算

当海面划分为大量的微面元时,每一个微面元可近似为平面.采用 Torrance-Sparrow 模型可计算每一微面元的散射,最后积分获得激光的整体后向散射。

每一个微面元所在的坐标系如图3,微面元法向为 Y 轴(与高度方向一致,向上为正),微面元所在平面为 XOZ (X 轴与风速方向一致);用球坐标 (R, θ, φ) 表示, θ 为天顶角, φ 为方位角。 $\mathbf{I}(\theta_i, \varphi_i)$ 是光源入射方向的单位矢量; $\mathbf{V}(\theta_v, \varphi_v)$ 是探测器(视线)位置方向的单位矢量,微面元的法向是 $\mathbf{H}(\theta_h, \varphi_h)$,它是平分 \mathbf{V} 和 \mathbf{I} 夹角的单位矢量。 \mathbf{H} 相对微面元法向 \mathbf{N} 偏移角度 α ,其中 $\cos \alpha = \mathbf{H}\mathbf{N}$ 。

由 Torrance-Sparrow 模型,任一微面元的双向反射分布函数 $f_r^{[5]}$ 为

$$f_r = \frac{F}{\pi} \frac{D}{\cos \theta_i} \frac{L}{\cos \theta_v} \quad (9)$$

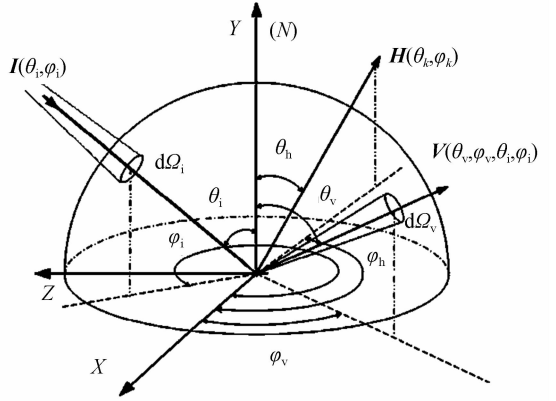


图3 微面元的坐标及入射和反射方向示意图

Fig. 3 Schematic diagram of coordinate and direction of incident and reflecting on the micro surface element 式中, F 为菲涅尔反射系数; L 为几何衰减因子,主要为照射阴影和视线遮挡引起的衰减; D 为微面元的表面斜率分布函数; L 可表征为

$$L = \min \left\{ 1, \frac{2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})(\mathbf{N} \cdot \mathbf{V})}{(\mathbf{V} \cdot \mathbf{H})}, \frac{2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})(\mathbf{N} \cdot \mathbf{I})}{(\mathbf{V} \cdot \mathbf{H})} \right\} \quad (10)$$

D 采用 Beckmann 分布模型^[5],描述为

$$D = \frac{1}{m^2 \cos^4 \theta_i} e^{-\left(\frac{\tan \theta_i}{m}\right)^2} \quad (11)$$

式中, m 为微面元粗糙度均方根与入射波光长的比值。

根据激光雷达方程,任一微面元散射回波的功率 $P_{nm}^{[18]}$ 为

$$P_{nm} = \frac{P_t G_t}{4\pi R_i^2} \frac{\sigma_{nm}}{4\pi R_v^2} \frac{A_r}{4} \eta_{atm} \eta_{sys} \quad (12)$$

$$\sigma_{nm} = 4\pi \cos \theta_i \cos \theta_v \left(\frac{F}{\pi} \frac{D}{\cos \theta_i} \frac{L}{\cos \theta_v} \right) \xi_{nm} \quad (13)$$

式中, ξ_{nm} 为序号 m, n 的微面元的面积, σ_{nm} 为微面元的激光散射截面, P_t 为发射功率, G_t 为发射增益, A_r 为探测器接收孔径的面积, R_i, R_v 分别为发射窗口与面元中心和接收窗口与面元中心的距离, η_{atm}, η_{sys} 分别为大气衰减和系统衰减。

将所有微面元的散射功率累加即得到粗糙海面的散射回波总功率为

$$P_r = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N P_{nm} \quad (14)$$

为了方便与目标散射截面比较,设定雷达距离照射海面中心的距离为 R_0 ,近场局部海面的等效散射截面可以表征为

$$\sigma = \frac{4P_r}{P_t G_t A_r \eta_{atm} \eta_{sys}} (4\pi R_0^2)^2 \quad (15)$$

2 激光散射测试装置与海面模拟

为了模拟防空激光雷达探测飞行器掠海飞行的实际状态,海浪的激光后向散射模拟测试实验是在大型造波池上完成的.通过龙门吊结构,激光雷达(包括激

光发射源、探测器测试装置、电源、高速采集器等)置于大型人工造波池上方 3 m,如图 4.

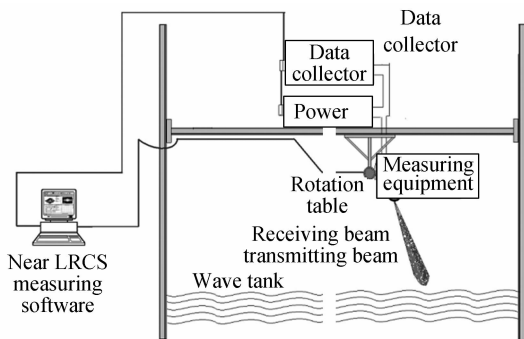


图 4 海背景激光散射测量示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the experiment test of laser scattering of sea background

激光雷达发射扇面形状的激光光束,在赤道面激光光束为环形,在各个角度上的强度相等;在子午面内激光为窄光束,为高斯光束,光束宽度为 2° ,激光光束与水面的夹角定义为擦地角,如图 5.

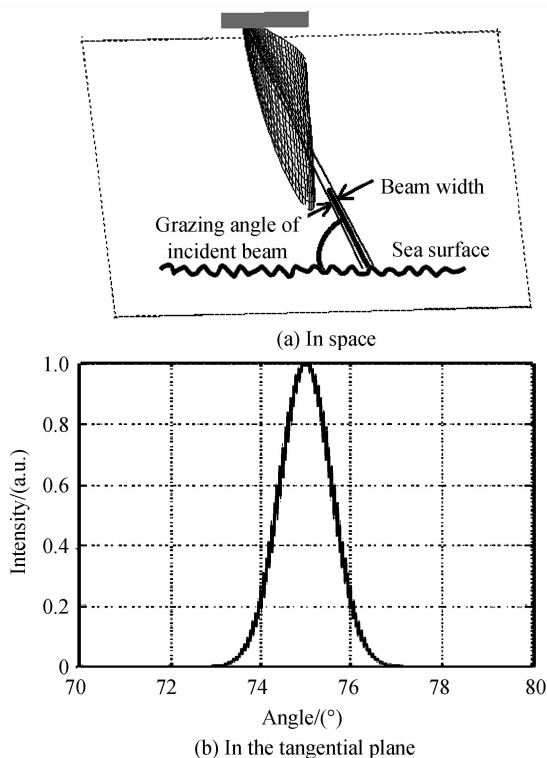


图 5 激光光束示意图

Fig. 5 Diagram of laser beam

测试时,测试现场如图 6. 按照实验要求,在造波池上可定量生成不同海情下的规则的正弦海面、不规则的 PM 谱海面,同时,可改变激光光束的擦地角.



图 6 测试的海表面

Fig. 6 Tested surface of sea

3 测量结果与分析

针对规则正弦波海面和不规则 PM 谱海面,通过在造波池内进行了激光散射特性测量和利用散射模型进行了理论计算,得到了海面的近距离激光后向散射的来源与特性.

3.1 规则正弦波海面的激光后向散射特性

在擦地角为 80° 时,三级海情的规则正弦波水面激光后向散射测量与仿真结果如图 7. 规则正弦波水面振荡周期约为 5s,40s 内约有 8 个周期. 由图 7 可看出,规则正弦波水面的激光后向散射具有明显的周期性特点,水面散射的极大值数目与水面正弦波的周期数一致. 测量与模拟仿真数据相比,两者波形相似,散射截面极大值接近,二者极大值的平均值相差仅 20%. 测试受天空背景等影响,导致测试回波信号电平的最小值较大,即测试回波电平始终含有背景杂波信号.

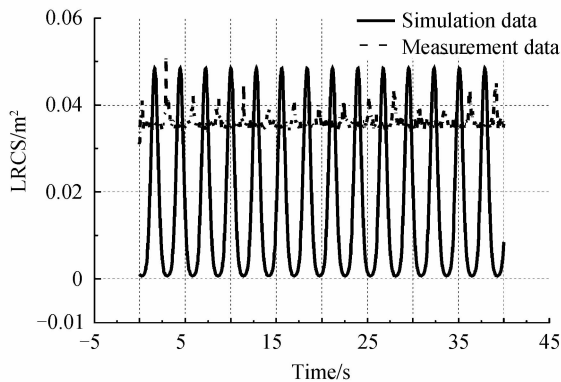


图 7 规则正弦波水面激光后向散射测量与仿真结果
Fig. 7 Measurement and simulation results of laser scattering of regular sea surface

当风速、擦地角分别为 4.5 m/s 和 80° 时,规则正弦波海面几何波形和激光散射信号的时域特征如图 8,其强度的变化是随着海面几何波形变化而变化,受海面几何波形调制的.

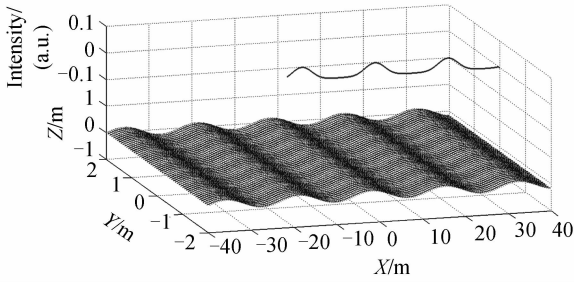


图8 规则正弦波海面几何波形和激光散射信号

Fig. 8 Geometric waveform and laser scattering signal of regular surface of sea

3.2 不规则的海面

图9示出了在擦地角为 70° 和 80° 时三级海情PM谱海面激光后向散射测量与模拟结果.结果表明,测量与模拟均随机出现散射极大值,且极大值之间间隔一致,对应的极大值大小接近,极大值起伏特点也是一致的,在擦地角 70° 时两者极大值平均值仅相差17%,在擦地角 80° 时两者的极大值平均值相差4%.

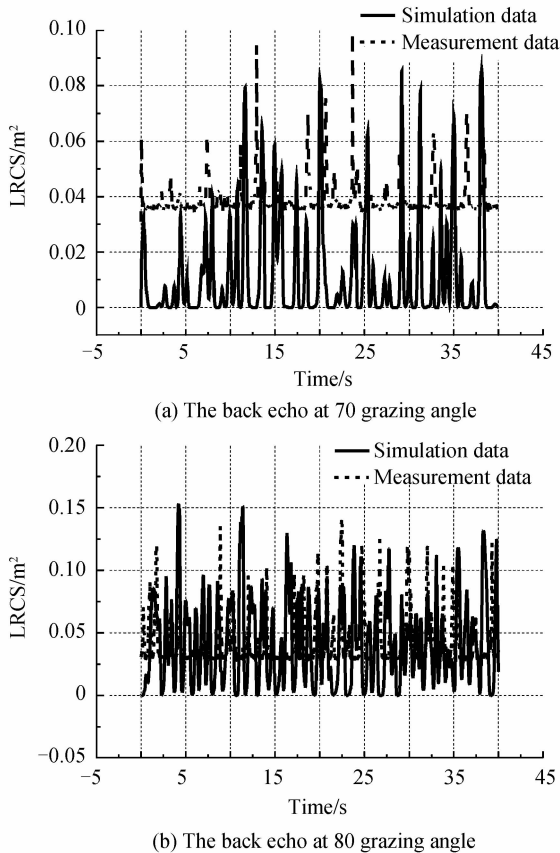


图9 三级海情不规则海面散射测量与仿真结果

Fig. 9 Measurement and simulation results of irregular sea surface scattering with three stage sea conditions

当风速、擦地角分别为 4.5 m/s 和 80° 时,不规则正弦波海面几何波形和激光散射信号的时域特征如图10,由图可知激光散射信号强烈依赖于海面几何波形,是受海面几何波形调制的.

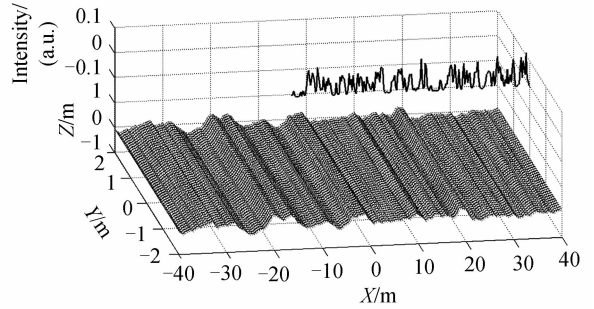


图10 不规则海表面几何波形和激光散射信号

Fig. 10 Geometric waveform and laser scattering signal of irregular surface of sea

3.3 统计分析

激光散射回波起伏受海面起伏影响,以一段时间内散射回波极大值代表海面散射强度,统计散射回波极大值与波束相对海面擦地角之间的关系,给出海面散射强度随擦地角的关系.在相同海情状态下,分别测量和仿真了在不同擦地角时不规则PM谱分布海面的激光后向散射回波,得到了不同擦地角40 s内(大于海浪最大波长的重复周期的2倍)散射回波信号最大值.

由于海面测试较为耗时,在同一种状态的海面测试1次,同时对该种海面状态模拟仿真10次,对模拟仿真数据进行平均,图11给出了风速分别为 4.5 m/s 和 3.5 m/s 的仿真与测量结果.当擦地角大于 65° 时,模拟仿真结果的平均值和测试曲线随擦地角变化趋势及其变化范围基本一致.当擦地角小于 65° 时,探测器

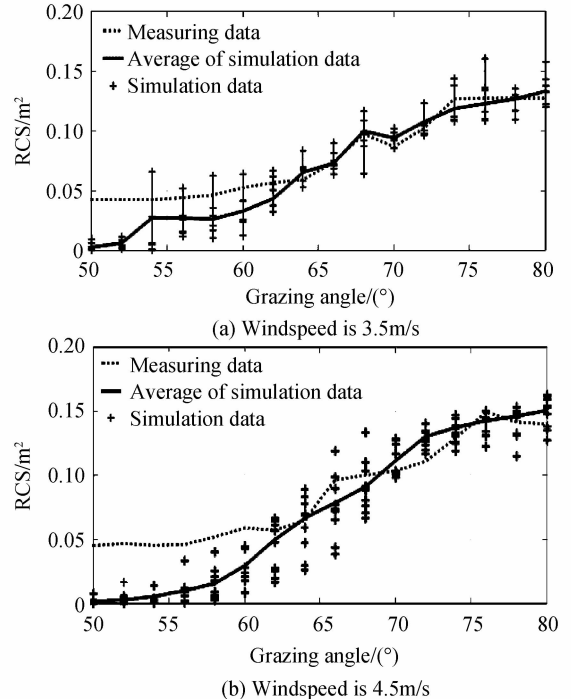


图11 不同擦地角的PM谱海面散射仿真与测试结果

Fig. 11 Simulation and measurement results of laser scattering of PM spectrum distribution surface at different grazing angle

接收到的海面散射弱于天空背景散射,测试结果受背景影响较大,测试曲线基本为背景散射曲线。由图 11 可知,测试数据与仿真均值吻合较好,表明仿真模型与实际海面散射一致;通过 10 次随机模拟海浪过程,仿真数据取值范围较大,表明海面近距离的激光后向散射具有较大的动态范围。

4 结论

本文实现了不同海况人工模拟海面的激光后向散射特性的测量;同时构建了海面三维时变模型且实现了海面近距离的后向散射仿真,测量和仿真结果基本一致。测量和仿真数据表明:海面的激光散射受海面几何波形调制,海面的近距离激光后向散射信号的大小强烈依赖于海面的起伏;海面散射强度(一段时间散射回波极大值)随擦地角增大而增大;受海面随机起伏,散射强度波动范围较大,并且波动随擦地角减小而增大。受外界光干扰,测试信号始终大于某一电平,导致小擦地角状态下的散射数据无法获取,今后的研究将增大激光发射功率或者进行光调制以消除外界干扰。

参考文献

- [1] ISHIMARU A. Wave propagation and scattering in random media[M]. New York: Academic Press, 1978.
- [2] BAHAR E. Full-wave solutions for the scattered radiation fields from rough surfaces with arbitrary slope and frequency [J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 1980, **28**(1): 11-21.
- [3] THORSOS E I. The validity of the Kirchhoff approximation for rough surface scattering using a Gaussian roughness spectrum[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1988, **83**(1): 78-92.
- [4] NICODEMUS F E. Directional reflectance and emissivity of an opaque surface[J]. *Applied Optics*, 1966, **5**(7):767-773.
- [5] COOK R L, TORRANCE K E. A reflectance model for computer graphics[J]. *Acm Siggraph Computer Graphics*, 1982, **1**(1): 7-24.
- [6] HE X D, TORRANCE K E, SILLION F X, *et al.* A comprehensive physical model for light reflection[J]. *ACM*

- Siggraph Computer Graphics*, 1991, **25**(4): 175-186.
- [7] VINCENT R, DENIS D, GUY P. Detailed analytical approach to the Gaussian surface bidirectional reflectance distribution function specular component applied to the sea surface[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2005, **22**(11):2442-53.
- [8] ERIC B, FABRICE N, NICOLAS H. Real-time realistic ocean lighting using seamless transitions from geometry to BRDF [C]. *Computer Graphics Forum*. 2010; 487-496(10).
- [9] ROSS V, DION D. Sea surface slope statistics derived from Sun glint radiance measurements and their apparent dependence on sensor elevation[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, **112**(C9): 312-321.
- [10] SCHWENGER F, REPASI E. Simulation of laser beam reflection at the sea surface modeling and validation [C]. SPIE, 2013, **8706**(5): 1-17.
- [11] SCHWENGER F, REPASI E. Sea surface simulation in the infrared modeling and validation [C]. SPIE, 2006, **6239** (A4): 62390J.
- [12] SCHWENGER F, REPASI E. Sea surface simulation for testing of multiband imaging sensors[C]. *Targets and Backgrounds IX: Characterization and Representation*, 2003: 72-84.
- [13] SCHWENGER F, REPASI E. Simulation of laser beam reflection at the sea surface[J]. SPIE, 2011, **8014**: 1779-1781.
- [14] SMITH J R, RUSSELL S J, BROWN B E, *et al.* Electromagnetic forward-scattering measurements over a known, controlled sea surface at grazing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2004, **42**(6): 1197-1207.
- [15] TORRANCE K E, SPARROW E M. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1967, **57**(9):1105-1114.
- [16] 文圣常, 余宙文. 海浪理论与计算原理[M]. 科学出版社, 1984.
- [17] YANG Huai-ping, SUN Jia-guang. Simulation of wave spectrum based on wave simulation[J]. *Journal of System Simulation*, 2002, **14**(9):1175-1178.
杨怀平, 孙家广. 基于海浪谱的波浪模拟[J]. *系统仿真学报*, 2002, **14**(9):1175-1178.
- [18] 戴永江. 激光雷达技术[M]. 电子工业出版社, 2010.