

超低空状态下海面激光散射特性测试与分析

童广德^{1,2,3}, 王占山^{1,2,3}, 沈正祥^{1,2}

(1. 同济大学 物理科学与工程学院 先进微结构材料教育部重点实验室, 上海 200092;

2. 同济大学 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 200090)

摘要: 在海上使用的超低空雷达设计中, 非常有必要了解不同海情下的海面激光散射特性。针对设计需求, 在实验室内通过人工造波模拟海况, 解决了实际海环境测试的困难, 实现海面激光散射影响因素的定量控制。通过激光散射测试系统, 获取各种状态和不同波束照射角情况下的近场激光散射数据, 经过统计分析给出了规则正弦波海面和 irregular (P-M 谱) 海面的激光散射特性。海面激光散射与漫反射板散射差异较大, 海面散射以表面镜像散射分量为主。激光散射回波起伏随海表面波形空间波长而变化; 散射回波大小随擦地角增大而增大; 在固定的擦地角时, 海情越高相应散射回波越强; 当擦地角足够大时, 散射回波大小随海情变化不大。

关键词: 激光散射; 海表面; 规则正弦波; PM 谱

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0206003

Measurement and analysis of laser scattering characteristic of sea surface under condition of super-low-altitude

Tong Guangde^{1,2,3}, Wang Zhanshan^{1,2,3}, Shen Zhengxiang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Advanced Micro-Structure Materials, Ministry of Education, School of Physics Science and Engineering,

Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Institute of Precision Optical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092,

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

Abstract: It is necessary to know the laser scattering characteristics of sea surface in different sea conditions when designing the laser radar using in super-low altitude. According to the design requirements, low altitude radar work situation was simulated by the wave tank facility to solve the difficulty of actual sea environment testing, and the quantitative control of influence factors of sea surface laser scattering was realized. By using the laser scattering measurement system, the near field laser scattering data of various states and different beam irradiation angles were obtained, and the laser scattering characteristics of sea surface with regular sinusoidal wave and irregular PM spectrum were given by statistical analysis. The result shows that there are large differences between sea surface and Lambertian surface and mirror reflection should be main ingredients in the sea surface scattering distribution. Laser scattering echo fluctuation changes with the spatial wavelength of the sea surface wave

收稿日期: 2015-06-18; 修订日期: 2015-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(11105099, 10978002); 科技部国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ04016403)

作者简介: 童广德(1975-), 男, 研究员, 博士生, 主要从事目标与环境的激光散射特性方面的研究。Email: tgd750317@sina.com

导师简介: 王占山(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事薄膜光学、X 射线光学仪器研制等方面的研究。

and the scattering size increases with the increase of grazing angle. Furthermore, the higher the sea condition is, the stronger the corresponding scattering echo is at a fixed grazing angle, but scattering echo size will not change with the sea conditions when the grazing angle is large enough.

Key words: laser scattering; sea surface; regular sinusoidal wave; PM spectrum

0 引言

海背景具有强散射特性,反舰导弹、作战飞机、武装直升机等掠海低空目标往往将其散射信号隐藏在背景散射信号中,探测低空目标的雷达一直受海杂波的干扰;在很多情况下限制雷达探测能力的不是接收机的内部噪声,而是海杂波。海环境使用下的激光雷达的最佳匹配设计或检测算法离不开海环境的激光散射特性信息。研究海表面的散射特性,讨论海表面散射的概率分布特性和相关性,获取海表面激光散射强度与海情和激光雷达参数的关系,都可以为制定激光雷达方案、选择雷达参数等提供理论依据,指明技术方向^[1-3]。目前国内外众多学者在粗糙海面电磁散射方面已经进行了深入的研究,发表了大量的文章^[4-8],而关于海表面激光散射的研究却鲜有报道,因此针对各向异性粗糙海面激光散射特性进行建模仿真与测试分析是非常必要的。

文中根据激光雷达超低空工作情况,采用人工造波池和模拟试验设施,测量相应状态的海表面激光雷达回波,比较分析激光回波随海情、照射角变化的规律,总结超低空状态下海面激光散射特性,为海背景下的目标检测及各种海上装备的研制、仿真提供重要的参考价值。

1 测量原理与方法

根据激光雷达方程,海表面的后向激光散射回波信号如公式(1)所示,海表面的激光散射截面正比于后向散射回波信号,分析海表面的后向激光散射回波信号特征即可得海表面激光散射特性。

$$u = \eta_D P_r = \eta_D \frac{P_t}{\Omega_t R^2} \times \frac{\sigma_s}{4\pi R^2} \times \frac{\pi D^2}{4} \times \eta_r \eta_r \quad (1)$$

式中: t 为发射波束的空间角; D 为激光接收孔径面积; R 为测试距离; η_D 为探测器转换效率; η_t 、 η_r 分别为发射和接收光学系统的传输系数; P_t 为发射功率;

P_r 为接收功率。

海面环境测量如图 1 所示,测量系统由激光测量装置、造波池及其控制设备完成。改变造波池海情和激光测量系统设备的俯仰角,获取不同激光波束照射角、不同海情的散射回波数据。

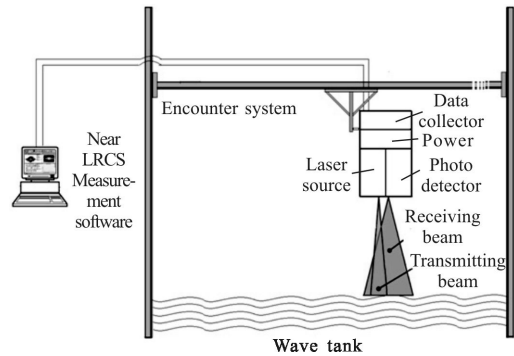


图 1 海面环境测量示意图

Fig.1 Schematic of measurement of sea environment

2 海表面激光散射测量

选择人工造波池及其设施来模拟低空激光雷达对海表面的散射特性探测,造波池如图 2 所示,可在实验室按照要求生成不同海情的海浪。当激光波束以不同擦地角照射模拟海面,改变造波参数模拟多种海情海面,从而完成不同海情海表面的激光散射特性测量,获得一定擦地角范围的海面回波数据。

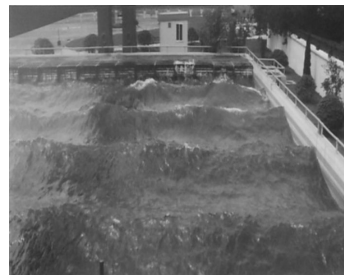


图 2 实验室内人工造波池

Fig.2 Artificial manufacturing-wave-tank in laboratory

激光雷达模拟装置的发射光束与接收光束收发同轴,工作波长为 $1.064 \mu\text{m}$,波束在倾角方向的宽度为 2° ,在方位方向为 60° ,照射倾角角度范围为 50°

~70°。激光测量装置安装在造波池造浪方向的中央，波束中心线投影于造波池中央，如图 3 所示。波束照

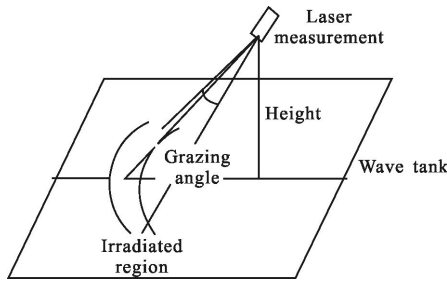


图 3 海表面激光散射测量示意图

Fig.3 Schematic diagram of laser scattering measurements of sea surface

射倾角为波束与水平面交角，主要模拟超低空雷达照射海面的擦地角。试验时，参考超低空激光雷达工作情况，海表面选取规则波和 PM 谱为代表，海情选择 03 级，具体测量参数见表 1。

表 1 海面激光散射特性测量参数

Tab.1 Measurement parameters of laser scattering characteristic of sea surface

Sea condition	Grazing angle/(°)	Angle step/(°)
Calm water surface	50-70	2
Regular surface of 1st wave level	50,60,65,70,75,80	-
Regular surface of 2nd wave level	50,60,65,70,75,80	-
Regular surface of 3rd wave level	50,60,65,70,75,80	-
Irregular surface of 1st wave level	50-80	2
Irregular surface of 2nd wave level	50-80	2
Irregular Surface of 3rd wave level	50-80	2

3 海表面激光散射特性

3.1 规则波海面激光散射特性

规则正弦波海表面激光散射特性测量结果如图 4 所示，规则波光面的激光散射具有明显的周期性特点，水面散射峰值数目与水面正弦波的周期数吻合（规则波海表面振荡周期约为 5 s，40 s 内约有 8 个周期）。

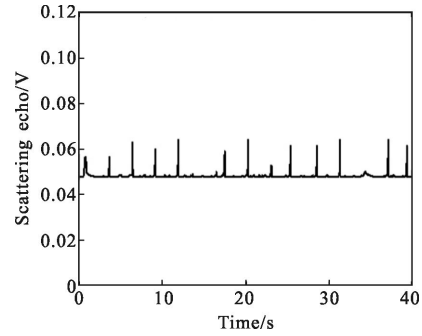


图 4 规则波 2 级模拟海表面激光散射回波信号

Fig.4 Echo signal of simulating sea surface laser scattering of second level regular wave

比较不同海情的、不同擦地角条件下规则波海表面散射回波，针对每种状态的测试回波，提取回波信号的最大值表征该状态下的散射回波强度。激光散射测量结果如图 5 所示，可以看到；海情越高，海表面的散射回波就越强；擦地角越大，海表面散射回波也越强；擦地角较大时，海表面回波散射随海情增加时，散射增强不明显。进一步比较分析可知：海表面散射以表面镜像散射分量为主，从而表现为散射强度随海表面波形周期变化；因为测试数据为激光后向散射数据，产生镜像散射的局部主要为与激光波束垂直的海表面部分，从而表现为散射强度随擦地角增大而增大；擦地角固定时，海情越高，垂直于波束的海表面部分越多，相应散射越强；当擦地角大于 80°时，垂直于波束的海表面部分的面积随海情变化不大，则散射强度也变化不大。

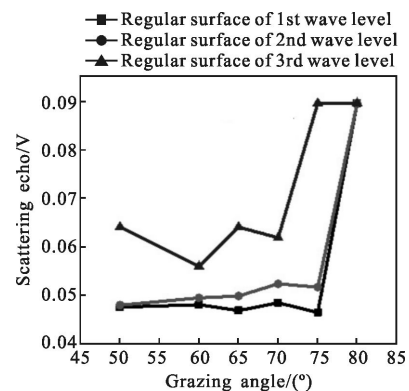


图 5 不同海情、不同擦地角下规则波海表面激光散射回波强度

Fig.5 Echo intensity of regular wave sea surface laser scattering in different sea conditions and different grazing angles

对于平静海表面，其散射远小于起伏的海表面，如图 6 所示，擦地角为 50°~70°的激光波束照射平静

海表面的散射回波强度很弱, 此时与激光波束垂直的海表面面积非常少, 这与激光散射主要表现为镜像散射占主要成分的现象非常吻合。

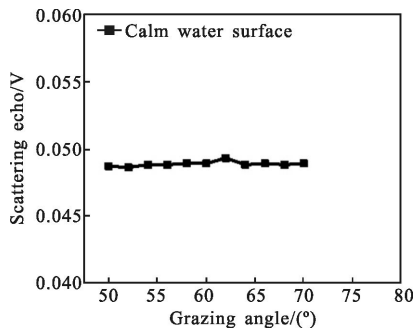


图 6 平静海表面的激光散射回波

Fig.6 Laser scattering echo of calm sea surface

3.2 不规则波(PM 谱)海表面的激光散射特性

对于满足 PM 谱分布的不规则波海表面, 选择擦地角 78°、2 级 PM 谱海表面激光散射测量数据分析, 如图 7 所示, 相比于规则波海表面, 不规则波海表面的散射峰值点更多, 其激光散射回波大小仍随海表面波形变化, 再次表明激光散射主要为镜像散射。

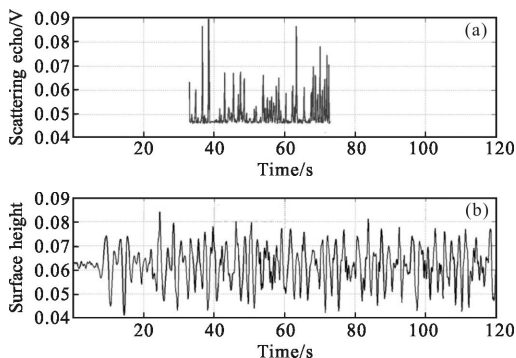


图 7 不规则波模拟海表面激光散射回波信号

Fig.7 Echo signal of simulating sea surface laser scattering by irregular waves

再进一步比较分析不规则海表面散射回波强度, 不同海情的不规则海表面在不同波束擦地角条件下激光散射回波强度测量结果如图 8 所示, 不规则海表面的激光散射极大值随擦地角变化较大, 擦地角越大, 反射越强, 这可以认为是擦地角大时与激光波束垂直的海表面部分多, 因此散射强。

比较相同波束照射擦地角、不同海情海表面的激光散射回波强度, 也如图 8 所示, 海情越高, 海表面的激光散射回波强度就越强。这也可以认为海情高

时与激光波束垂直的海表面部分多, 散射自然较强。

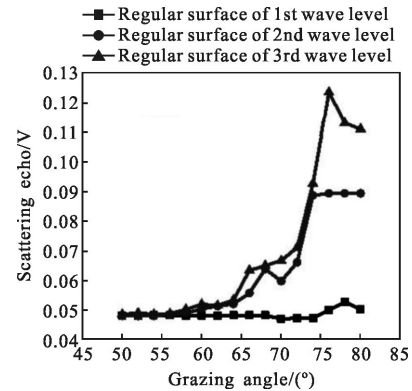


图 8 不同海情不规则波海表面不同擦地角条件下激光散射特性

Fig.8 Laser scattering properties of sea surface of irregular waves in different sea conditions and different grazing angles

4 结论

文中在实验室利用人工造波池模拟了不同海情、不同擦地角下的超低空激光雷达工作状态, 获取了大量激光散射回波数据。通过对不同擦地角、不同海情下规则波或者不规则波海表面激光散射回波统计分析, 海表面激光散射与漫反射板散射差异较大, 海表面散射以表面镜像散射分量为主。激光散射具有散射回波起伏随海表面波形周期变化; 散射回波大小随擦地角增大而增大; 擦地角固定时, 海情越高相应散射回波越强; 当擦地角足够大时, 散射回波大小随海情变化不大的特性。总而言之, 近距离海表面后向激光散射不同于粗糙面散射, 激光散射贡献应该主要来自与激光波束垂直的海表面局部。

参考文献:

- [1] Xue Qianzhong, Wu Zhensen, Li Liangchao, et al. Characteristics of detonator laser beam scattering from an object in the near field [J]. *Journal of Xidian University (Natural Science)*, 2000, 27(5):594-596. (in Chinese)
- [2] Zhou Yafan, Zhao Jun, Zhang Jian. Academic analysis and measuring method research on scattering characters of offshore laser [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2006, 21(4): 31-34. (in Chinese)
- [3] Geng Zhixiang, Chen Zuntian. Sea surface scattering model of laser fuze taking account of time factor [J]. *Journal of Detection & Control*, 2009, 31(3): 64-67. (in Chinese)

- [4] Yang Chunping, Wu Jian. Properties of laser scattering from the waved seawater surface [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(4): 526–530.
- [5] Yang C P, Wu J. Study of laser scattering property for random cylinder surface [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, 13(5):21–524.
- [6] Li Liangchao, Wu Zhensen, Deng Rong. Comparison of the back laser rader cross-section calculation of complex object with the measurement of scale-model[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(6): 770–774. (in Chinese)
- [7] Wu Zhensen, Xie Donghui, Xie Pinhua, et al. Modeling reflectance function from rough surface and algorithms [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(8): 897–901. (in Chinese)
- [8] Zhang Yandong Wu Zhense. Light scattering and imaging of two-dimensional rough sea surface in the infrared [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(9): 1039–1043. (in Chinese)