

水下距离选通成像雷达激光照明模型

钟 炜 张晓晖 韩宏伟

海军工程大学兵器工程系, 湖北 武汉 430033

摘要 基于脉冲激光器的水下距离选通成像雷达是水下光电探测的重要手段之一,为了在探测距离内获得有效的照明范围,在小角度散射条件下,推导了水体光束扩展函数,提出了一种水下高斯光束激光照明模型。采用532 nm调Q倍频Nd:YAG脉冲激光器实验测量了不同发散角激光在水下目标平面上的照度分布半径。与其他模型仿真结果进行对比表明,该激光照明模型能够较好地吻合实验结果。模型误差随着照明距离和激光发散角的增加而变大,在目标平面直径为1 m的圆形照明区域条件下,仿真得到的照明光斑半径在8.5个衰减长度范围内与实测值误差不得超过0.1 m。

关键词 海洋光学; 距离选通; 主动成像; 光束扩展函数

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0401005

Irradiance Spatial Distribution Model of Laser Source for Underwater Range-Gated Imaging Radar

Zhong Wei Zhang Xiaohui Han Hongwei

Department of Ordnance Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China

Abstract Underwater range-gated imaging is an important method of underwater photoelectric detection. In order to obtain sufficient illuminating areas, an efficient model of the irradiance spatial distribution is derived for Gaussian laser illumination in the water based on small angle scattering theory. Irradiance distribution measurements of a 532 nm laser source with different divergence are presented. The errors of the model become large when the divergence of the laser increases and the illuminating range extends, but the resulting predictions of the analytical model are in good agreement with the experimental measurement over wide range of illuminating distance by limiting the field of illumination to the circle region with a diameter of 1 m. These predictions can give enough precision for underwater range-gated imaging systems.

Key words oceanic optics; range-gated; active imaging; beam spread function

OCIS codes 010.4450; 010.3310; 010.4455

1 引 言

水下激光成像技术具有成像分辨率高、调制解调性能好、作用距离远等优点,不论是在军用还是民用领域都有着重要的应用价值^[1-2]。距离选通技术是一种基于脉冲激光的成像技术,能够选择性地接收不同探测距离的激光回波,从而有效抑制后向散射,提高目标探测距离^[3-7]。高重频水下距离选通成像机制采用重复频率高的激光器作为光源,降低了单脉冲能量,能消除盲区限制^[8]。为了在不同成像距离获得有效的照明区域,构建有效的激光照明模型具有重要的工程意义。目前模拟激光水下照明效果有以下三种方法:1)指数衰减模型不考虑水体散射作用,只适用于照明距离近且散射系数小的情况^[9],当水体散射作用加强时,照明

收稿日期: 2015-12-03; 收到修改稿日期: 2015-12-22

基金项目: 海装十二五预先研究基金(4010501050401)、海军工程大学自然科学基金(435517D43)

作者简介: 钟 炜(1985-),男,博士研究生,主要从事海洋光学方面的研究。E-mail: hg_zhongwei@163.com

导师简介: 张晓晖(1965-),女,博士,教授,主要从事海洋光学、激光探测技术等方面的研究。

E-mail: zhangxiaohui505@sina.vip.com(通信联系人)

$$f_2(r_2)=[1-(a+s_f)\Delta]f_1(r_2)+(\Delta/L^2)\times\iint\beta(|r_1-r_2|/L)\cdot f_1(r_1)\rho_1d\varphi d\rho_1, \quad (2)$$

式中 a 为水体吸收系数, s_f 为水体前向散射系数, $\beta(\alpha)$ 为水体散射相函数。等式右边第一项表示在 $(R-L, R-L+\Delta)$ 区域没有发生散射、吸收的光子在目标面上的分布; 第二项表示被散射光子在目标平面上的分布, 满足卷积形式。对(2)式两端做二维傅里叶变换得到

$$F_2(\mathbf{k})=[1-(a+s_f)\Delta+S(\mathbf{k},L)\Delta/L^2]\cdot F_1(\mathbf{k}), \quad (3)$$

式中 $S(\mathbf{k},L)$ 、 $F_1(\mathbf{k})$ 和 $F_2(\mathbf{k})$ 分别为散射相函数 $\beta(|\mathbf{r}|/L)$ 、照度分布 $f_1(\mathbf{r})$ 与 $f_2(\mathbf{r})$ 的二维傅里叶变换; \mathbf{k} 为目标面上空间频谱矢量; r 为目标面上极坐标矢量。如果将整个 $(0, R)$ 区域分为许多宽度为 Δ 的切片, $F_n(\mathbf{k})$ 为经过前 n 个切片散射后在目标面上照度分布的二维傅里叶变换, 其递推公式可以同理表示为

$$F_n(\mathbf{k})=[1-(a+s_f)\Delta+S(\mathbf{k},L)\Delta/L^2]\cdot F_{n-1}(\mathbf{k}). \quad (4)$$

由光源特性可知 $F_0(\mathbf{k})=1$, 对切片的宽度取极限 $(\Delta\rightarrow 0)$, 可以得到

$$F(\mathbf{k},R)=\exp\left\{\int_0^R[S(\mathbf{k},L)/L^2-(a+s_f)]dL\right\}, \quad (5)$$

式中 $F(\mathbf{k},R)$ 与 $F_{bs}(r,R)$ 互为二维傅里叶变换。因为 $F_{bs}(r,R)$ 和 $F(\mathbf{k},R)$ 旋转对称, 可以将 $F(\mathbf{k},R)$ 中的矢量 \mathbf{k} 用标量 k 来替换, $F_{bs}(r,R)$ 中的极坐标矢量 r 用标量 r 来替换, 二维傅里叶变换用 Hankel 变换来替换。采用分部积分方法, (5)式可变形为

$$\begin{aligned} F(k,R) &= \exp\{[Q(k,R)-(a+s_f)R]\}, \\ Q(k,R) &= 2\pi\int_0^R[\int_{\xi}^{\theta}\beta(\alpha)d\alpha]J_0(kR\xi)d\xi, \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $J_0(x)$ 为第一类零阶贝塞尔函数; $Q(k,R)$ 为空间扩展系数; $F(k,R)$ 为水体调制解调函数, 与 $F_{bs}(r,R)$ 互为 Hankel 变换。

3 水下激光照明模型

激光光源出射光强分布 $g(r,R)$ 与光束扩展函数 $F_{bs}(r,R)$ 卷积可得到目标面上照度分布 $i(r,R)$, 换言之, 激光光源出射光强分布的 Hankel 变换 $G(k,R)$ 与水体调制解调函数 $F(k,R)$ 之积为目标面上照度分布的 Hankel 变换 $I(k,R)$ 。假设激光出射强度分布 $g(r,R)$ 为高斯分布^[16], 可以得到

$$\begin{aligned} I(k,R) &= G(k,R)\cdot F(k,R) = \left[\frac{\omega_0}{2\pi}\sqrt{1+\frac{R^2\lambda^2}{\pi^2\omega_0^4}}\cdot\exp\left(-k^2\frac{\pi^2\omega_0^4+R^2\lambda^2}{8\pi^2\omega_0^2}\right)\right]\cdot \\ &\quad \exp[Q(k,R)\cdot R]\cdot\exp[-(a+s_f)R] \end{aligned} \quad (7)$$

式中 ω_0 为照明激光束腰半径, 束腰位于原点。通常有 4 个因素影响照明激光在水下目标面上的照度分布: 激光出射强度分布、水体的折射作用、水体多次散射作用以及水体对光能量的吸收作用。由(7)式可知, 激光在水下目标平面上照度分布的 Hankel 变换由三项因子相乘: 第一项表示照明激光出射强度分布, 考虑到水体的折射作用, 将自由空间中光波长 λ 由水中光波长 λ' 来代替; 第二项表示激光经水体多次散射在光源与目标夹角 2θ 范围内的光能量, 根据小角度散射条件, 2θ 范围外的散射能量可以忽略; 第三项为光能量指数衰减定理, 表示经过水体传播没有被吸收和散射的光能量。(7)式进一步化简得到

$$I(k,R) = K(R)\cdot\exp\left[-\frac{k^2\lambda'^2}{8\pi^2\omega_0^2}R^2+Q(k,R)\cdot R-\frac{k^2\omega_0^2}{8}\right], \quad (8)$$

式中 $K(R)$ 为归一化系数, 对(8)式进行 Hankel 变换即得到照明激光在水下目标面上照度分布 $i(r,R)$ 。

4 实验结果与分析

实验测量了不同发散角激光经过水体传播在目标平面上的照度分布半径。实验装置如图 2 所示(①水箱; ② 激光器; ③ 负透镜; ④ 水箱窗口; ⑤ 移动支架; ⑥ 照度计)。

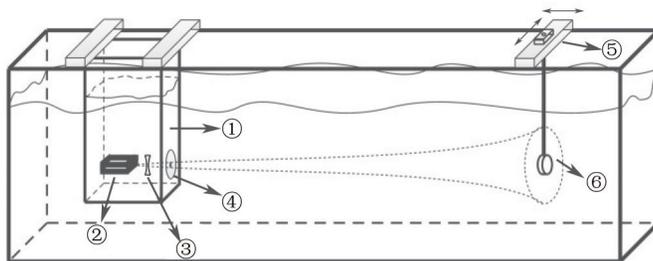


图2 实验装置示意图

Fig.2 Diagram of experimental setup

实验水池长为 100 m, 宽为 5 m, 高为 2 m, 水深 1.54 m。激光器采用华日公司 Spruce-532/20-A 型调 Q 倍频 Nd:YAG 脉冲激光器, 激光波长为 532 nm, 单脉冲能量为 3 mJ, 脉冲宽度为 15 ns, 平均功率为 17 W, 重复频率为 4~10 kHz, 发散角为 0.074 mrad。激光光束 X 方向的光束质量因子 M^2 为 1.192, Y 方向的光束质量因子 M^2 为 1.148, 光斑不对称度为 1.09, 束腰位于出光口以内 100 mm 处。由于激光器没有防水功能, 水池侧面没有光学窗口, 为了实验方便, 将激光器置于水箱(436 mm×648 mm×919 mm)中, 水箱前端激光出光窗口内侧镀有增透膜, 外侧镀有憎水膜。探测器为上海嘉定学联仪表厂生产的 ZDS-10W-2D 型水下照度计。可移动支架能够实现水下照度计横向、纵向平移, 实验中已测量支架的水平性。实验水体散射系数 s 为 0.121 m^{-1} , 衰减系数 w 为 0.213 m^{-1} , 水体衰减系数 w 、吸收系数 c 、散射系数 s 之间满足 $w=c+s$ 。

实验用激光器出射光束发散角很小, 为了对不同成像距离的目标区域(直径为 1 m 的圆面)进行有效照明, 需要通过连续变倍放大系统增加照明光束的发散角。因为光在水中传播时散射作用明显, 连续变倍放大系统放大倍率范围的设计需要以有效的水下照明模型为基础。为了验证照明模型的适用性, 现阶段采用几种不同焦距的负透镜来放大照明光束发散角, 以实现目标区域的有效照明。另外, 激光器出射光束可近似为细光束^[12], 受测量设备精度限制, 很难对其水下照明效果进行直接测量, 而且光束发散角很小时, 各模型误差也较小。通过负透镜放大照明光束发散角的方法可以使水体的空间扩展作用变得更明显, 有利于实验测量和模型对比研究。

实验中, 将不同焦距(25、38、50、75、100、150 mm)的负透镜置于激光器出光口外 100 mm 处, 以获得不同发散角的照明激光。首先调节水下照度计深度和横向位置到达测量照度最大值, 记录读数 I_p 。然后横向平移照度计直至照度计读数下降为 I_p/e^2 , 记录移动的距离, 并定义为照明光斑的 e^{-2} 半径。图 3 为实验结果与激光照明模型仿真结果。仿真模型中采用散射相函数, 该散射相函数在点扩展函数测量^[8]和图像复原^[11]中已有成功应用, 即

$$\beta(\alpha) = \frac{s \cdot \alpha_0}{2\pi(\alpha_0^2 + \alpha^2)^{3/2}}, \quad (9)$$

式中取模型参数 $\alpha_0 = \theta/2$, 计算得 $s_0/s_f = 0.895$, $s_f/s > 0.999$, 满足小角度散射条件。将(9)式代入(8)式, 并对计算结果进行 Hankel 变换可以得到照明激光在水下目标面上照度分布 $i(r, R)$ 。

如图 3 所示, 实验测量 e^{-2} 半径比仿真结果略大, 这是因为小角度条件假设光源与目标夹角 2θ 外的能量可忽略, 这给模型带来误差。实验与仿真的误差如图 4 所示, 随着激光传输距离和发散角的增大, 误差也越来越大。实际上, 水体每一次散射过程都会有少数光子的散射角大于 θ , 随着激光传输距离的增加, 散射次数也相应增加, 目标范围外的光子也就越来越多。当激光发散角增大时, 光子由于多次散射作用将更容易超出目标范围。实验用照度计的测量误差小于 $\pm 4\%$, 疲劳误差小于 $\pm 1\%$, 示值再现性误差小于 $\pm 1\%$ 。实验结果是通过 10 次测量取平均得到的, 基本消除了示值再现性误差; 每一次使用照度计之前, 光敏面都用盖子密封, 以消除疲劳误差; 通过计算可知, 照明光斑 e^{-2} 半径的测量误差小于 $\pm 2\%$, 如图 4 中误差棒所示。

为了说明模型的适用性, 将该模型与其他模型作了对比研究。图 5 给出了 $R=30 \text{ m}$ 时, Duntley^[12]、Voss^[13]、Hou^[14]和本文的 $F_{bs}(r, R)$ 曲线, 其中 r 为目标平面上偏离光束中心的距离。图 6 给出了采用 $f=-50 \text{ mm}$ 负透镜时, 不同激光照明模型与实验结果的对比。由图 5 和图 6 可知, 指数衰减模型(图 6 中 EA)没有考虑水体散射作用, 所模拟照明光斑没有空间展宽效果; Voss^[13]和 Hou^[14]模型 F_{bs} 衰减较快, 照明激光空间展宽效果不明显;

Duntley^[12]模型 F_{BS} 变化较平缓,展宽效果大于实际水平;本文 F_{BS} (图 5 中 current)在 r 较小时变化平缓,在 r 较大时快速衰减,具备 Duntley、Voss 和 Hou 模型的优点,所得到的照明模型(图 6 中 current)能够较好地模拟激光照明效果。另外,蒙特卡罗模型也能够得到较准确的仿真结果,但因为计算量大,只给出了 R 为 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 m 处的计算结果。

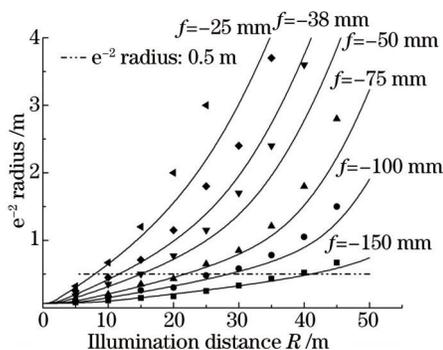


图 3 实验与仿真结果

Fig.3 Results of experiments and simulation

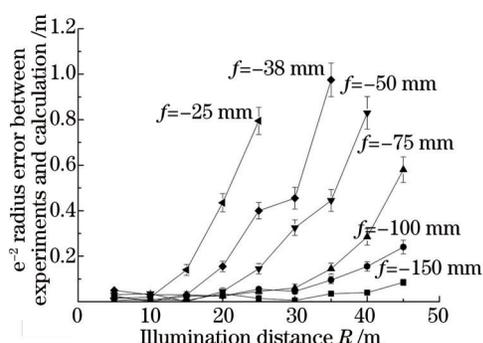


图 4 e^{-2} 半径实验与仿真结果误差

Fig.4 e^{-2} radius error between experiments and simulation

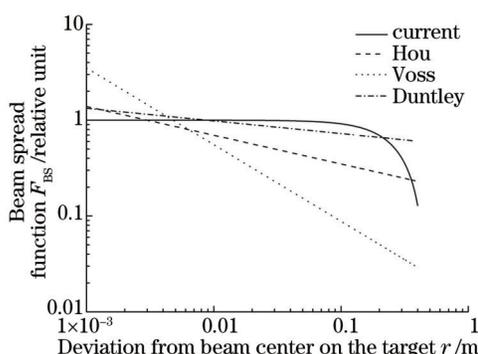


图 5 不同 F_{BS} 模型对比 ($R=30$ m)

Fig.5 Comparison of different F_{BS} models ($R=30$ m)

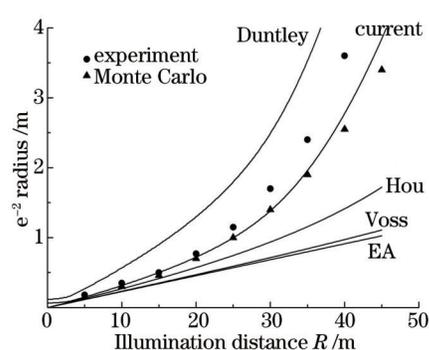


图 6 不同模型仿真激光照明效果与实验数据对比 ($f=-50$ mm 负透镜)

Fig.6 Comparison of experimental data and simulation results for laser illumination by different models (concave lens $f=-50$ mm)

在水下距离选通成像雷达工程设计中,需要权衡照明区域和目标探测极限距离这两个参数。缩小照明区域可以使目标中心照度增加,更利于目标探测,但随着探测范围的减小,目标识别难度更大。为了尽可能地增加目标探测距离并实现有效识别,通常将照明区域限制在常用探测目标特征长度范围。水下激光成像的主要探测目标为线缆、蛙人以及鱼类等,不妨设照明区域直径为 1 m 的圆面,计算表明光源与该区域张角满足小角度散射条件。考虑到光束在不同水体传播距离与水体衰减系数 w 有关,通常采用衰减长度来表示光束传播距离。定义水体衰减长度为水体衰减系数的倒数 $1/w$,表示水下光束能量下降到 $1/e$ 倍时的传播距离,实验水体衰减系数为 0.213 m^{-1} ,水体衰减长度为 4.7 m。使用照明光斑 e^{-2} 半径来近似照明区域半径,图 3 中已用点横线标明照明区域半径为 0.5 m 的界限,结合图 4 中的误差分析可知,照明区域半径为 0.5 m 时,照明模型在 8.5 个衰减长度(40 m)范围内都能够较好地仿真目标上照度分布,误差不超过 0.1 m。

5 结 论

随着水下作业深度的增加,基于激光辅助照明的主动成像技术以其分辨率高、调制解调性能好等优点成为水下探测的重要手段。考虑到水体对可见光强烈的散射作用,为了在水下获得有效的照明区域,构建准确的水下激光照明模型具有重要的工程意义。从光源与目标的张角很小以及自然水体以米氏散射为主这两个条件出发,将水体看作线性空间不变系统,提出了水下激光照明模型。通过与指数衰减、蒙特卡罗、Duntley^[12]、Voss^[13]和 Hou^[14]模型的仿真结果进行对比,该模型能够更好地吻合实验数据,对水下距离选通成像

雷达中激光变倍放大系统的设计具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 Hou W. Ocean sensing and monitoring: Optics and other methods[M]. Bellingham: SPIE Press, 2013: 87-116.
- 2 Nie Ying, He Zhiyi. Underwater imaging and real-time optical image processing under illumination by light source with different wavelengths[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0710002.
聂 瑛, 何志毅. 不同波长光源照明的水下成像及光学图像实时处理[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0710002.
- 3 Kou Tian, Wang Haiyan, Wang Fang, *et al.*. Study on back-scattering light intensity in airborne laser range-gated imaging[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0113003.
寇 添, 王海晏, 王 芳, 等. 机载激光距离选通成像大气后向散射光强研究[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0113003.
- 4 Fournier G R, Bonnier D, Forand L, *et al.*. Range-gated underwater laser imaging system[J]. Opt Eng, 1993, 32(9): 2185-2190.
- 5 Cao Fengmei, Jin Weiqi, Huang Youwei, *et al.*. Review of underwater opto-electrical imaging technology and equipment (I) -underwater laser range-gated imaging technology[J]. Infrared Technology, 2011, 33(2): 63-69.
曹峰梅, 金伟其, 黄有为, 等. 水下光电成像技术与装备研究进展(上)-水下激光距离选通技术[J]. 红外技术, 2011, 33(2): 63-69.
- 6 Huang Youwei, Wang Xia, Jin Weiqi, *et al.*. Temporal model of underwater laser range-gated imaging and pulse stretching[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(11): 3177-3183.
黄有为, 王 霞, 金伟其, 等. 水下激光距离选通成像与脉冲展宽的时序模型[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3177-3183.
- 7 Han Hongwei, Zhang Xiaohui, Zhong Wei. Measurements on time-domain broadening of underwater laser pulse propagating based on depth of gating profile[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0612003.
韩宏伟, 张晓晖, 钟 炜. 基于选通深度曲线的脉冲激光水下传输时域展宽测量[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0612003.
- 8 Han J, Luo T, Sun L, *et al.*. Research of application of high-repetition-rate green laser in underwater imaging system[C]. SPIE, 2013, 8905: 89051Y.
- 9 Han Hongwei, Zhang Xiaohui, Ge Weilong. Study of the mode and maximum detecting performance of underwater laser range-gated imaging system[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0109001.
韩宏伟, 张晓晖, 葛卫龙. 水下激光距离选通成像系统的模型与极限探测性能研究[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0109001.
- 10 Jaffe J S. Monte Carlo modeling of underwater-imaging formation: Validity of the linear and small-angle approximations[J]. Appl Opt, 1995, 34(24): 5413-5421.
- 11 McLean J W, Voss K J. Point spread function in ocean water: Comparison between theory and experiment[J]. Appl Opt, 1991, 30(15): 2027-2030.
- 12 Duntley S Q. Underwater lighting by submerged lasers and incandescent sources[R]. San Diego: Scripps Institution of Oceanography, 1971.
- 13 Voss K. Simple empirical model of the oceanic point spread function[J]. Appl Opt, 1991, 30(18): 2647-2651.
- 14 Hou W, Gray D J, Weidemann A D, *et al.*. Comparison and validation of point spread models for imaging in natural waters[J]. Opt Express, 2008, 16(13): 9958-9965.
- 15 Petzold T J. Volume scattering functions for selected ocean waters[R]. La Jolla: Scripps Institution of Oceanography, 1972.
- 16 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong, *et al.*. Laser principle[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2011: 70-74.
周炳琨, 高以智, 陈侗嵘, 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 70-74.

栏目编辑: 史 敏