

同步扫描水下激光成像系统的蒙特卡洛仿真及优化

肖国梁,屠大维,张旭

(上海大学机电工程与自动化学院,上海 200072)

摘要:针对水下激光同步扫描三角测距成像系统受水介质散射和吸收影响导致作用距离减小、目标反射点图像质量变差等问题,从辐射传输理论出发,采用蒙特卡洛方法建立水下激光传输的随机模型,利用 TracePro 软件进行光线追迹仿真,得到反射点图像相对散射光背景的对比度。探讨了目标距离、激光光强、基线距离、物镜口径等改变对对比度的影响关系,从而对水下激光同步扫描三角测距成像系统参数作了优化设计。最后从系统实际情况和需要出发,确定激光光强 1 W,基线距离 250 mm,成像物镜 50 mm/ $F2$,确保在 7.5 m 距离范围内,有较好的目标反射点图像对比度,从而保证了同步扫描三角测距原理的实施。

关键词:同步扫描;对比度;蒙特卡洛;优化

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.08.007

Monte Carlo simulation and optimal design of synchronous scanning underwater laser imaging system

XIAO Guo-liang, TU Da-wei, ZHANG Xu

(School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Aimed at the short working distance and the low target image quality problems of synchronous scanning trigonometric ranging underwater laser imaging system caused by scattering and absorption, a stochastic model of underwater laser transmission is established by using Monte Carlo method based on the radiation transmission theory. The influence of target distance, laser intensity, baseline distance and objective caliber on the contrast quality of laser illumination target reflection image is discussed using TracePro, and the system parameters are optimized. Finally, based on the actual situation and needs of the system, the laser light intensity of 1 W, baseline distance of 250 mm, and the lens specification 50 mm/ $F2$ are determined to ensure a better image contrast of target reflection point within the range of 7.5 m, thus ensuring the implementation of the synchronous scanning triangulation principle.

Key words: synchronous scanning; contrast; Monte Carlo; optimization

1 引言

水下光成像,尤其是水下主动激光成像技术,相比于水下声成像有较高的成像分辨率,因而在海洋探索以及海洋军事方面具有重要的应用价值。然而,由于水介质具有较强的吸收和散射光学特性,激光在水下传播受到了较大的衰减作用,限制了探测

距离,也影响了水下激光成像系统的成像质量。因此,如何合理设计水下激光成像系统以减小散射光对系统的干扰,显得尤为重要。

目前,已有多种提高水下激光成像系统的技术方法,如:基于时间分离的距离选通法^[1-2]、基于空间分离的同步扫描法^[3-4],以及基于偏振抑制的偏

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61673252);国家重点研发计划课题(No. 2016YFC0302401)资助。

作者简介:肖国梁(1993-),男,硕士,研究方向为激光水下成像。E-mail: xiaogoliang_sh@163.com

通讯作者:屠大维(1965-),男,教授,博导,研究方向为光电检测,精密机械及仪器,机器视觉及控制。Email: tdwshu@staff.shu.edu.cn

收稿日期:2018-12-19

振成像法^[5-7]等,这些方法从定性上讲都能够起到抑制散射的作用,也取得了较好的实际成像效果。然而由于水介质对激光吸收和散射的复杂性,很难对水下激光成像系统进行优化设计,以求达到最佳成像质量和效果。本文针对水下激光同步扫描三角测距成像系统,从辐射传输理论出发,采用蒙特卡洛方法建立水下激光传输的随机模型,对同步扫描水下激光成像系统进行仿真研究,探讨了目标距离、激光光强、基线距离、物镜口径等参数对激光照明目标反射成像质量对比度的影响关系,并对系统参数作了优化设计。

2 激光同步扫描三角测距成像系统

激光同步扫描三角测距成像系统的基本光路如图 1(a)所示。图中 M3 为双面反射振镜,准直激光束经 M3、M1 反射后照射到目标物体上 Q 点, Q 的反射光经 M2、M3 反射,被物镜成像到线阵 CCD 上 Q' 点, Q' 点在线阵 CCD 位置为 x'。根据同步扫描三角测距原理,根据 Q' 点位置值 x', 可计算得到 Q 点坐标(x, z)^[8]。当振镜 M3 来回快速振动,即可完成对物体表面的行扫描,再在摆镜或整体移动/摆动机构的协调下,可完成对物体的三维扫描成像^[8-9]。图 1(b)是采用摆镜完成帧扫描的激光同步扫描三角测距成像系统。

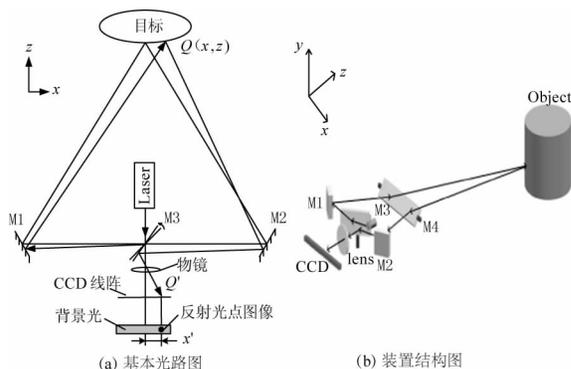


图 1 激光同步扫描三角测距成像原理及装置结构

Fig. 1 Principle and device structure of synchronous scanning trigonometric ranging imaging system

激光在水中传播, CCD 接收器接收到的光信息包括:从目标反射回来并经过水介质吸收、散射损耗后的成像光束;激光向前传播时的后向散射光;目标反射光的前向散射光,以及大量的多次散射等等,这些散射进入接收视场后成为背景光,此外,还有由于发射激光前向散射,目标反射成像光后向散射对目标表面形成的背景照明被目标反射进入物镜口径的背景光。这就使得 CCD 接收器上除得到目标物体上照明光点的反射成像点外,还形成一片较大的背

景光干扰,如图 1(a)所示。当背景光强达到一定程度时,目标反射像点变得模糊,甚至被淹没,严重影响像点位置的确定,甚至不能实施同步扫描测距。反射光点对比度与测量距离、激光强度、基线距离、物镜口径等都有关系,因此,需要对系统参数和系统性能进行综合优化设计。

为便于仿真,将图 1(a)、图 1(b)中光线在所有平面反射镜处对称展开,得到图 2 所示的发射、接收光路及几何关系,光的传播介质为海水,假设水的吸收、散射各向同性,并作如下规定:激光束与相机光轴构成的平面为 xz 平面,以发射、接收对称位置作为建模和计算仿真时的几何关系,此时,激光束与相机物镜主光轴构成等腰三角形,基线距离 B,目标距离 Z₀,成像物镜口径 D,焦距 f,激光光强 I,光束直径 ϕ,波长为 λ,接收器线阵 CCD 长度为 L。

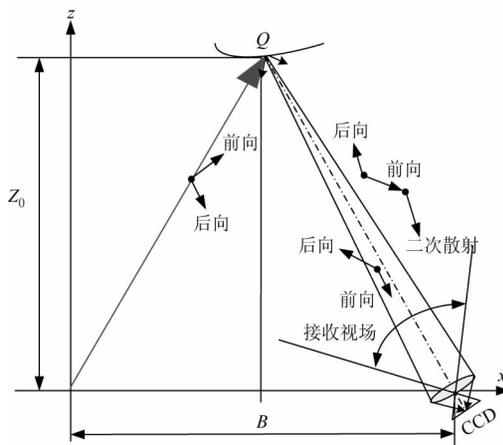


图 2 反射面展开后的发射、接收光路及几何关系

Fig. 2 The emission, receiving optical path and geometric relationship after expansion

要确定激光照明物点 Q 在 CCD 上成像点的位置,要求该图像点有尽可能高的对比度。对比度定义为^[10]:

$$C = \frac{I_t - I_b}{I_b} \tag{1}$$

其中, I_t 和 I_b 分别为 CCD 上像点的光强和背景光平均光强。

3 反射像点对比度的蒙特卡洛仿真

水介质中微粒分布具有随机性,因此光子与水分子粒子的相互作用也表现出随机性。根据辐射传输理论建立水下激光传播的随机模型:将光的传播理解为一群离散的光子流在水介质中的吸收与散射过程,且散射不改变能量;光与水分子以及其中的微粒的相互作用由吸收系数、散射系数以及反映散射的分布函数表达;忽略光波的偏振和干涉现象,追踪介质中光能量的传输。模拟单个光子与水介质的相互

作用,通过叠加原理获得整个光束在水介质中传输的结果^[11-12]。

利用蒙特卡洛方法建立水介质中激光传输的模型,需确定光子在与水介质中的微粒发生一次相互作用之后新的位置,具体分解为运动步长的确定以及运动方向的确定。根据辐射传输理论其步长 s 可由 Beer's Law 计算^[13]:

$$s = \frac{-\ln(\xi_1)}{c} \quad (2)$$

其中, ξ_1 为 $0 \sim 1$ 上均匀分布; c 为水介质的衰减系数。

散射后光子行进方向由光子的方位角 ϕ 和散射相函数 $\beta(\theta)$ 共同确定。散射相函数 $\beta(\theta)$ 采用双项 Henyey-Greenstein 状态函数描述^[14]:

$$\phi = 2\pi\xi_2 \quad (3)$$

$$\beta(\alpha, g_1, g_2; \theta) = \alpha\beta(g_1; \theta) + (1 - \alpha)\beta(g_2; \theta) \quad (4)$$

$$\beta(\theta) = \frac{1 - g^2}{4\pi(1 + g^2 - 2g\cos\theta)^{\frac{3}{2}}} \quad (5)$$

其中, ξ_2 为 $0 \sim 1$ 上均匀分布; θ 为散射角; α 为权重系数; g_1, g_2 为各向异性因子,取值范围 $[-1, 1]$, 表征前向散射和后向散射的比例。

光子新位置的确定如图 3 所示。光子在点 (x, y, z) 出发生一次散射, 散射后新位置点 (x', y', z') 由步长 s 、方位角 ϕ 以及 $\beta(\theta)$ 共同确定:

$$|\vec{r}| = s = \frac{-\ln(\xi_1)}{c} \quad (6)$$

$$\begin{cases} x' = x + \vec{r} \cdot \vec{x} \\ y' = y + \vec{r} \cdot \vec{y} \\ z' = z + \vec{r} \cdot \vec{z} \end{cases} \quad (7)$$

其中, μ_x, μ_y, μ_z 为矢量 \vec{r} 在对应坐标轴下方向余弦。

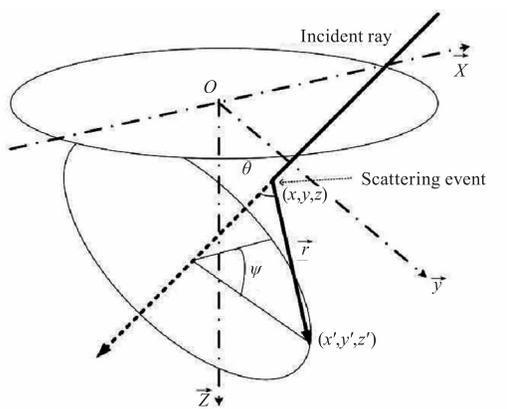


图 3 散射后光子位置的确定

Fig. 3 Position determination of photon after scattering

当一次相互作用发生之后,光子继续运动的概率由单次散射反照率 ω_0 确定^[13]:

$$\omega_0 = \frac{b}{c} \quad (8)$$

其中, b 和 c 分别是激光的散射系数和衰减系数。

为了避免无限制的追踪光子而浪费计算机资源,设定散射权值 W_n 以及阈值 W_t 。光子追踪终止条件为:

$$W_t < W_n = \omega_0^n \quad (9)$$

其中, W_n 为光子发生了 n 次散射之后的权值。

重复上述过程,对大量光子的追踪并对进入接收视场内的光子进行数据统计与分析,即可获得 CCD 上光子的分布。

采用 Tracepro 光学分析软件,按照图 2 所示几何关系建立 3D 仿真模型,并通过对激光光源、水介质固有特性以及目标表面散射模型的定义,表征光子在水介质中传输过程中的相互作用,得到 CCD 上像点处总的光线条数 N_i , 以及由于各种原因引起的背景光线条数 N_b , 包括发射光、成像光在水介质传输时的后向散射、前向散射以及多次散射进入接收视场的光线、发射光前向散射,成像光后向散射对目标表面形成的背景照明被目标反射进入物镜孔径的光线,按照下式可得到像点的对比度:

$$C = \frac{N_i - N_b}{N_b} \quad (10)$$

为便于 Tracepro 软件仿真光子传输过程中的吸收和散射,根据软件的相关定义,对仿真参数作如下规定:

(1) 光源及相关规定

光源为准直激光束,波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$, 激光束直径 $\phi = 4 \text{ mm}$, 且光强分布遵循高斯分布,追踪阈值 $W_t = 10^{-7}$, 光线追迹数量为 10 万条。

(2) 水介质固有光学特性

根据海水的部分可见光吸收光谱定义海水的吸收特性,并采用线性插值的方法补全波长从 420 nm 到 700 nm 的整段吸收光谱。对于波长为 532 nm 激光,仿真时的吸收系数 $a = 0.153 (1/\text{m})$ 。

海水的体散射相函数 $\beta(\theta)$ 采用双项 Henyey-Greenstein 状态函数描述^[13]。设置仿权重系数 $\alpha = 0.9$, 散射相函数的异向因子 $g_1 = 0.924, g_2 = -0.1$, 散射系数 $c = 0.230 (1/\text{m})$ 。

(3) 目标表面光学模型

通常而言,现实中的物体表面,是介于镜面与朗伯面之间的一种光学表面。TracePro 软件采用双向散射分布函数(BSDF)描述物体表面光的反射、透

射、吸收和散射^[15],如图4所示。

$$BSDF = \frac{A}{B + |\vec{\beta} - \vec{\beta}_0|^G} \quad (11)$$

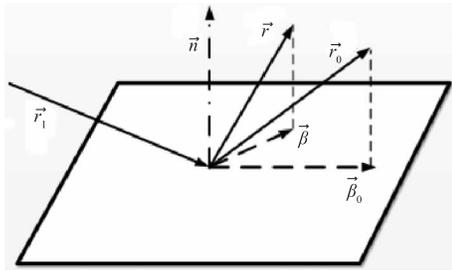


图4 目标表面ABG BSDF 散射模型

Fig.4 ABC BSDF scattering model on target surface

其中, \vec{r}_1 为入射光方向; $\vec{\beta}_0$ 为镜面方向的单位向量 \vec{r}_0 在表面上的投影; $\vec{\beta}$ 为散射方向的单位向量 \vec{r} 在表面上的投影,两者之间的差的绝对值 $|\vec{\beta}_0 - \vec{\beta}|$ 为 BSDF 的变量。选用准幂数倒数模型(ABG BSDF 模型),并将目标表面的相关光学参数设置为:吸收系数 0.3,镜面反射率 10^{-5} ,表面散射率 0.7,ABG BSDF 的参数 $B = 1, G = 0$,利用软件自动求解参数 A 以满足能量守恒定律。

4 仿真结果分析及系统优化设计

忽略探测器透镜表面微弱的反射以及吸收,并将 CCD 感光面设置为完全吸收作为光学分析面,对图2系统3D模型进行光线追迹仿真。改变不同参数,可仿真得到目标反射像点的对比度。

图5为目标距离与激光照明点反射光强的关系,此时,基线距离为200 mm,成像物镜50 mm/ $F1.4$,图中曲线1、曲线2、曲线3分别对应发射激光0.5 W、1 W、1.5 W。由图可见,随着目标距离的增加,反射光强在单对数的坐标系中几乎为直线,呈指数衰减趋势,很好的符合了 Beer-Lambert 定律,也验证了模型的正确性。

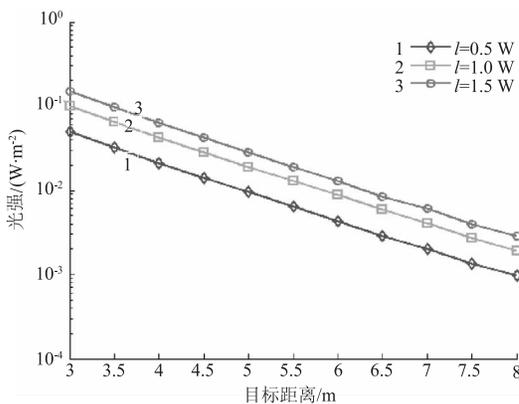


图5 目标距离与光点反射光强关系

Fig.5 Relationship between target distance and spot light intensity

图6为目标距离改变与反射像点对比度的关系,此时,基线距离为200 mm,成像物镜50 mm/ $F1.4$,图中曲线1、曲线2、曲线3分别对应发射激光0.5 W、1 W、1.5 W。由图可见,随着目标距离的增加,图像的对比度呈逐渐下降趋势。

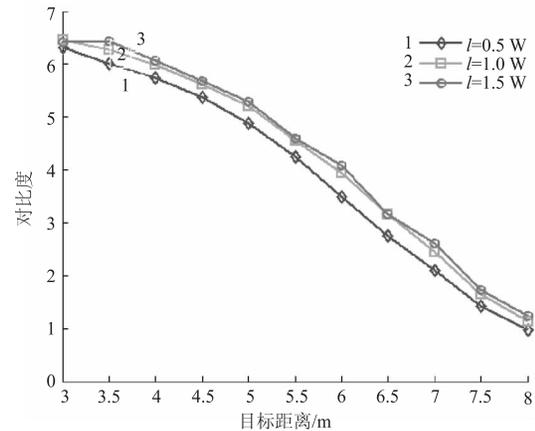


图6 目标距离与成像对比度关系

Fig.6 Relationship between target distance and imaging contrast

图7为激光光强改变与反射像点对比度的关系,此时,基线距离为200 mm,成像物镜50 mm/ $F1.4$,图中曲线1、曲线2、曲线3分别对应目标距离5 m、6 m、7 m。由图6可见,在一定范围内,增大激光光强可以有效提升对比度,但当激光光强增大到一定程度后,再继续增大光强,目标反射光点对比度提升并不明显,这主要是因为发射激光增强,各种散射光也随之增大。

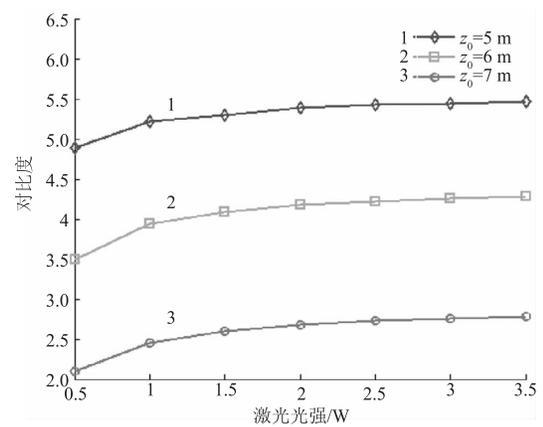


图7 激光光强与图像对比度关系

Fig.7 Relationship between laser intensity and image contrast

图8为基线距离改变与反射像点对比度的关系,此时,激光光强为1 W,成像物镜50 mm/ $F1.4$,图中曲线1、曲线2、曲线3分别对应目标距离5 m、6 m、7 m。由图可见,随着基线距离的增加,图像对比度呈上升趋势,当基线距离超过500 mm时,对比

度基本不再增加。这是因为,基线距离增大,相当于接收光路与发射光路隔离增大,使发射激光的后向散射光进入物镜视场的机会减少,但基线距离增大到一定值后,这种隔离效果提升不明显。

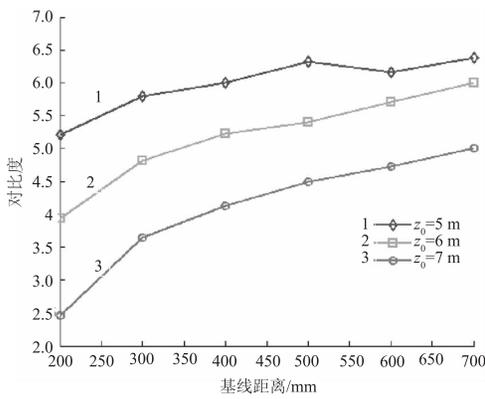


图 8 基线距离与图像对比度关系

Fig. 8 Relationship between baseline distance and image contrast

图 9 为物镜口径改变与反射像点对比度的关系,此时,激光光强为 1 W,基线距离为 200 mm,图中曲线 1、曲线 2、曲线 3 分别对应目标距离 5 m、6 m、7 m。由图可知,物镜口径增大成像对比度略有下降,但影响不大。

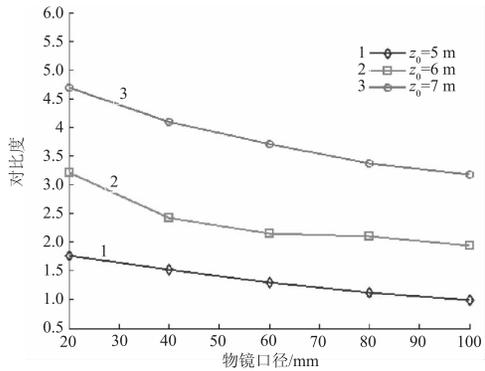


图 9 物镜口径与图像对比度关系

Fig. 9 Relationship between objective caliber and image contrast

根据前面分析可知,增大目标距离,会导致激光照明点反射光强急剧下降,对比度急剧下降;增大激光光强,反射成像光点的对比度略有增加,但总体衰减趋势不变,过分增大激光光强,反而导致散射光得到加强,对测量造成干扰;增大基线距离,在一定范围内有效,但受系统体积的限制,基线距离不宜过大;而物镜口径对对比度的影响不大。综合折衷考虑,取激光光强为 1 W、基线距离 250 mm,成像物镜 50 mm/F2,同步扫描三角测距系统的扫描光点反射图像对比度随测量距离的变化如图 10 所示,该系

统当测量距离为 7 m 时,仍能较好地获得测量结果。图 11(a) 系统参数优化后为线阵 CCD 上反射光点与背景强度二维图,图 11(b) 为线阵 CCD 上反射光点与背景强度三维图。此时,目标距离为 7 m。

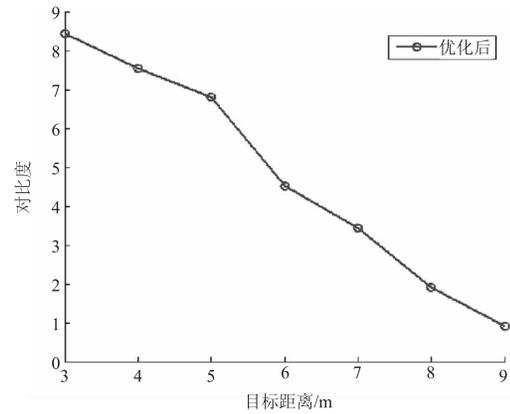
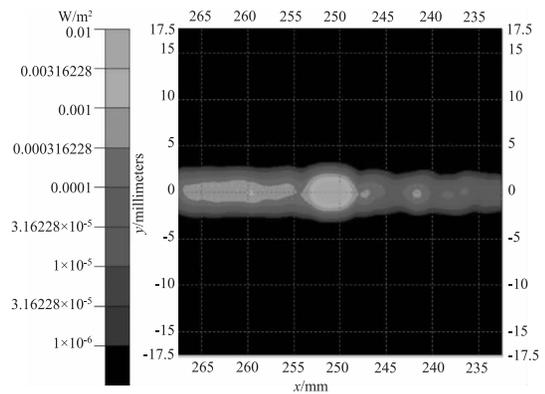


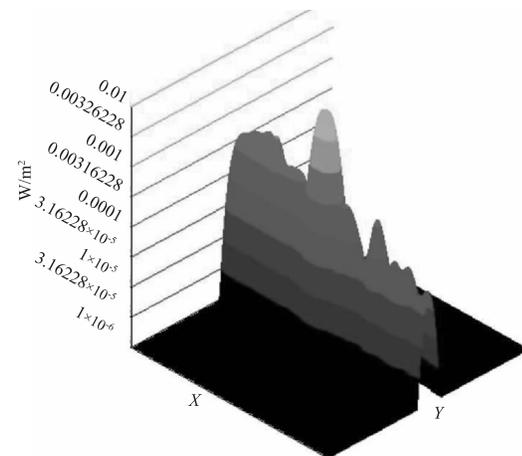
图 10 系统参数优化后反射光点

图像对比度与测量距离的关系

Fig. 10 Relationship between image contrast of reflected spot and measurement distance after system parameters optimized



(a) 线阵 CCD 上图像强度二维图



(b) 线阵 CCD 上图像强度三维图

图 11 系统参数优化后线阵 CCD 上反射光点与背景强度

Fig. 11 Reflected spot and background intensity on linear CCD after system parameters optimized

5 结 论

本文通过建立基于蒙特卡洛仿真的辐射传输理论的随机模型,利用 Tracepro 光线追迹软件对水下激光同步扫描三角测距成像系统进入物镜口径和视场的成像光和散射光进行光线追迹,确定目标反射光点的图像对比度,探讨了反射光点图像对比度随目标距离、激光强度、基线距离以及物镜口径变化的关系,得出了反射光点对比度随目标距离增加急剧下降;激光光强增大,反射光点对比度略有增加,但很快饱和;基线距离增大只是在一定范围内有效,且受系统体积限制;随物镜口径增加变化不大的结论。最后从系统实际情况和需要出发,确定激光光强 1 W,基线距离 250 mm,成像物镜 50 mm/ $F/2$,确保在 7 m 距离范围内,有较好的反射光点图像对比度,从而保证同步扫描三角测距原理的实施。

参考文献:

- [1] Busck J. Underwater 3-D optical imaging with a gated viewing laser radar [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44 (11):6001.
- [2] FAN Youchen, ZHAO Hongli, SUN Huayan. Research on range gated active laser imaging system for moving target [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45 (12): 1427 - 1432. (in Chinese)
范有臣, 赵洪利, 孙华燕. 距离选通技术在运动目标激光主动成像中应用 [J]. *激光与红外*, 2015, 45 (12): 1427 - 1432.
- [3] Kulp T J, Garvis D, Kennedy R, et al. Development and testing of a synchronous-scanning underwater imaging system capable of rapid two-dimensional frame imaging [J]. *Applied Optics*, 1993, 32 (19): 3520 - 3530.
- [4] Jaffe J. Performance bounds on synchronous laser line scan systems [J]. *Optics Express*, 2005, 13 (3): 7738 - 7748.
- [5] Guan J, Zhu J. Target detection in turbid medium using polarization-based range-gated technology [J]. *Optics Express*, 2013, 21 (12): 14152 - 14158.
- [6] Lewis G D, Jordan D L, Roberts P J. Backscattering target detection in a turbid medium by polarization discrimination [J]. *Applied Optics*, 1999, 38 (18): 3937 - 3944.
- [7] Kartazayeva S A, Ni X, Alfano R R. Backscattering target detection in a turbid medium by use of circularly and linearly polarized light [J]. *Optics Letters*, 2005, 30 (10): 1168 - 1170.
- [8] ZHANG Xu, FEI Kai, TU Dawei. The Precision analysis of the triangulation measurement system based on synchronized scanner [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 26 (2): 295 - 302. (in Chinese)
张旭, 费凯, 屠大维. 同步扫描三角测距成像系统的精确建模与分析 [J]. *光电子·激光*, 2015, 26 (2): 295 - 302.
- [9] WANG Xiaojia, GAO Jun, WANG Lei. Survey on the laser triangulation [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25 (s2): 601 - 604. (in Chinese)
王晓嘉, 高隽, 王磊. 激光三角法综述 [J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25 (s2): 601 - 604.
- [10] YU Ruilan, LIU Yong, WANG An. Contrast of interference stripes in optical fiber Michelson interferometer [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, (3): 232 - 236. (in Chinese)
余瑞兰, 刘勇, 王安. 光纤 Michelson 干涉仪干涉条纹对比度的研究 [J]. *大气与环境光学学报*, 2007, (3): 232 - 236.
- [11] Cox W C. Simulation, modeling, and design of underwater optical communication systems [J]. *Dissertations & Theses-Gradworks*, 2012, 34 (9): 930 - 942.
- [12] Gabriel C, Khalighi M A, Bourennane S, et al. Monte-Carlo-based channel characterization for underwater optical communication systems [J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking*, 2013, 5 (1): 1 - 12.
- [13] Mobley C D. *Light and water: radiative transfer in natural waters* [M]. Salt Lake City: Academic Press, 1994.
- [14] Toubanc D. Henyey-Greenstein and Mie phase functions in Monte Carlo radiative transfer computations [J]. *Applied Optics*, 1996, 35 (18): 3270.
- [15] SUN Chengming, ZHAO Fei, Zhang Ze. Modeling and simulation of space object optical scattering characteristics using TracePro [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43 (11): 60 - 64. (in Chinese)
孙成明, 赵飞, 张泽. 基于 TracePro 的空间目标光学散射特性建模与仿真 [J]. *光子学报*, 2014, 43 (11): 60 - 64.