

文章编号:1004-4213(2010)09-1606-5

水下非均匀光场的分布特性*

徐洪梅, 张志刚, 郑冰

(中国海洋大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要:为了克服水下探测中后向散射光背景噪音的影响,提出了非均匀光场水下探测方法,推导出非均匀光场的照度分布函数与接收口径、目标与接收器的距离以及海水的体积衰减系数几个因素有关.通过搭建集束光水下图像系统,对其产生的非均匀光场的分布特性和水下探测特性进行了水池实验.观测结果为,在 0.6 倍能见度下,可分辨 1 mm 细节,在 1 倍能见度时,可分辨目标轮廓,在 1.5 倍能见度时,可探测到目标.结果证明,该系统具有宽视角、全景深、图像清晰度高等特点.

关键词:应用光学;水下目标图像探测;非均匀光场;集束光水下图像系统;光场分布函数

中图分类号:P733

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103909.1606

0 引言

利用水下光场探测目标时,水中悬浮微粒对光的后向散射效应是影响水下光学成像质量和观察距离的主要因素^[1-2].克服后向散射影响的办法主要是采用距离选通技术^[3]或同步扫描技术^[4-5].但这两种采用在时间或空间上将散射背景光与目标光相分离的方法,会在分离散射背景的同时,把必要的和有用的探测空间同时分离出去,从而产生很大的探测盲区,因此消除散射背景不彻底.

目前,国内外的水下成像技术主要采用均匀照明的激光作为照射光源.用传统的均匀光场照明始终无法解决强烈的后向散射光背景噪音和视距受限的问题^[6].即使增加光源功率,也会使目标亮度和背景亮度同时增加,因此对于增大探测距离的效果也不明显,反而会引起设备体积和重量的急剧增加.

本论文提出的水下非均匀光场目标探测的方法,目的就在于发展一种无盲区的、消除水下散射背景噪音(包括多次散射光在内)的目标图像探测技术,使得在保持光功率不变情况下,仅提高分布光源的最高与最低亮度的比值,就可有效地提高水下探测的能见距离,改善成像质量.

1 非均匀光场的建立

从理论分析和计算可知,对于距离相差为二倍能见度的近距离和远距离探测目标,若采用均匀照明形式的话,则目标信号强弱相差 e^7 倍;若探测距离相差为三倍能见度,目标信号强弱相差 e^{10} 倍以

上^[7].这种能量分布既不科学又不合理.

本文设计的非均匀光场中,其能量分布与水下三维空间坐标轴上按所在水介质光衰减规律相匹配,如图 1,对近距离目标用弱光场照明,以尽可能减小后向散射噪音的影响;远距离目标用强光场照明,来提高目标信号的强度,同时较强的后向散射光经过长距离的传输到达接收器时也会降低.

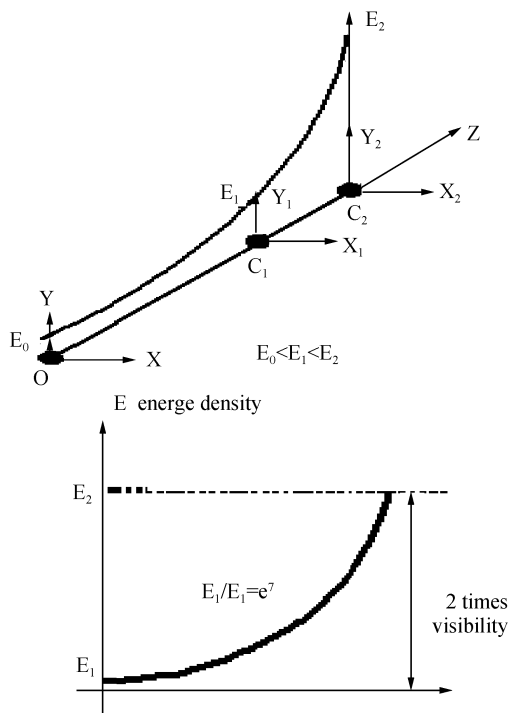


图 1 非均匀光场的能量密度分布
Fig. 1 Power density distribution of inhomogeneous illumination field

为了实现非均匀光场的光场分布,构建了以集束式光源为核心的集束光水下图像系统,其结构如图 2.

* 国家自然科学基金(40776059)资助

Tel:0532-66781220

Email:tinaxu@ouc.edu.cn

收稿日期:2009-10-16

修回日期:2010-03-09

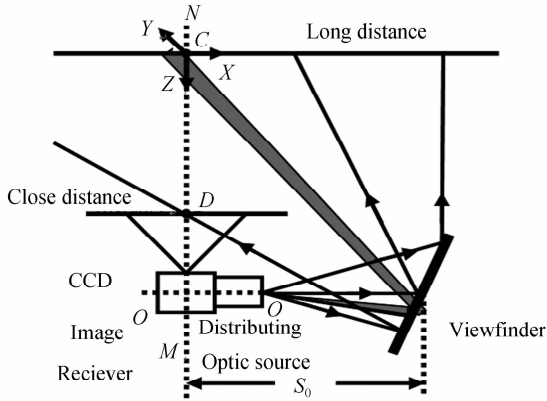


图 2 集束光水下图像系统工作原理图
Fig. 2 Principle of underwater image detection system with distributive light of central power

由集束光源的大范围光束,经过水下反光镜对水下空间进行照明,在离反光镜旋转轴一定距离(光轴距) S_0 处,安置一高清晰度 CCD 图像接收器,其接收光轴 MN 垂直于集束光源光轴 OO' 。集束光源的照度分布如图 3。

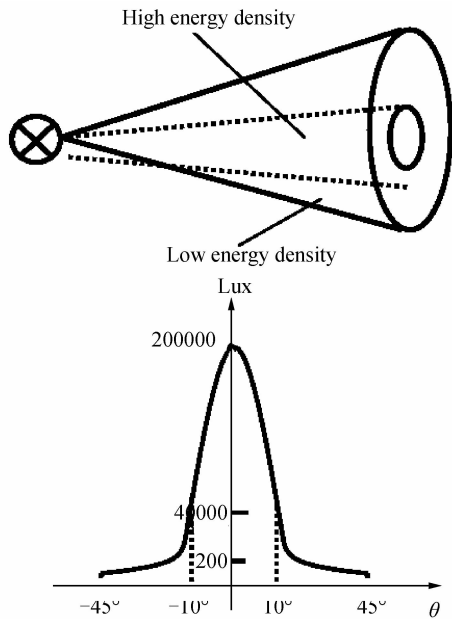


图 3 集束式光源能量分布结构
Fig. 3 Power density distribution of distributive light of central power

由于光源的亮度角分布是按指数规律分布的,可使远距离 C 上获得小角度、高能量密度照明,而探测轴 MN 与集束光源大角度、低能量密度射线相交于近距离 D 处。因此在 Z 轴上形成随着距离的变化,光场强度 E 由强到弱按指数规律而变化。由此建立了水下空间坐标系中沿 X, Y, Z 轴分布的非均匀照明光场。

2 非均匀光场的分布函数

若接收器垂直接收目标反射信号,光源斜向照射水下目标(白色漫反射目标),光轴距为 S_0 。可以

推出,光源光功率与接收器接收到的光功率的关系为

$$P_r = \frac{1}{4} P_0 \left(\frac{D}{L} \right)^2 e^{-c(R+L)} \quad (1)$$

式中, P_r 为接收器接收到的光功率; P_0 为光源发射功率; D 为接收器口径; c 为水介质体积衰减函数; L 为从目标点到接收器之间的路径; R 为空间任意一点目标,由点光源发射光束经目标反射后,再到接收器之间的路径。

根据非均匀光场理念,当系统在这种按所在介质光衰减规律分布的非均匀光场 $E(X, Y, Z)$ 探测时,光场分布应该是在水介质中光衰减公式的反演模式,可得到非均匀光场的分布函数为

$$E(X, Y, Z) = C \cdot \left(\frac{L(X, Y, Z)}{D} \right)^2 e^{cR(X, Y, Z)} \quad (2)$$

(式中 C 为常量)

由式(2)可以看出,非均匀光场的分布函数与接收口径、目标与接收器的距离以及海水的体积衰减系数几个因素有关。在其它参量一定的情况下,探测目标距离越远,所需要的光场强度就越强,二者之间基本上遵循指数规律变化。

3 非均匀光场的分布特性实验

为了验证非均匀光场的分布特性,研制了以集束光源为核心,包括水下探测部分、水上控制部分以及连接两者的缆线三部分的集束光水下图像系统,并进行了相应的水池实验。实验是在能见度为 1.575 m 的水质中进行的,实验所用水介质的体积衰减系数 c 为 2.2,取其最远观测距离为 2.60 m(即 1.65 倍能见度),此时目标板轮廓模糊可辨。测得光轴距为 77.5 cm。

为方便之后的测量和讨论,在水池的俯瞰平面上标记出 9 条横轴和 9 条纵轴,纵轴间距 15 cm,横轴间距 30 cm,如图 4。

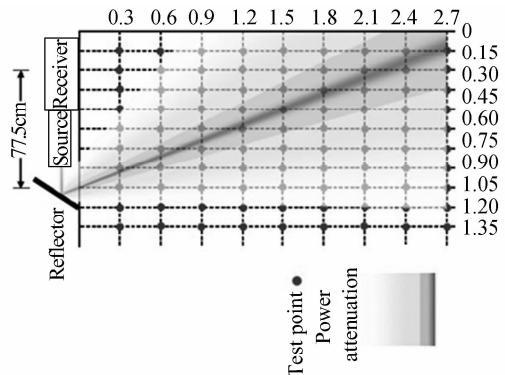


图 4 非均匀光场的分布实验图
Fig. 4 Experiment of distribution characteristics in inhomogeneous illumination field

用水下照度计测量出每条横轴与纵轴交点处的光照强度(每次测量时均将照度计放到水下同一深度),如表 1. 根据表中所测得的数据,可得到非均匀光场的三维照度分布图,如图 5.

表 1 实验测得各交叉点的照度值
 Tabel 1 Illumination of each across point

| Vertical axis/cm | Horizontal axis/cm | | | | | | | | | |
|------------------|--------------------|-------|-------|-------|--------|--------|---------|-------|-----|--|
| | 0 | 15 | 30 | 45 | 60 | 75 | 90 | 105 | 120 | |
| 30 | 3.5 | 6.5 | 10.5 | 33.5 | 250 | 730 | 125 000 | 1 250 | 117 | |
| 60 | 21 | 33 | 108 | 540 | 5 400 | 33 000 | 10 100 | 790 | 130 | |
| 90 | 61 | 184 | 615 | 2 800 | 11 440 | 12 500 | 2 740 | 520 | 138 | |
| 120 | 200 | 550 | 1 710 | 5 410 | 7 940 | 4 700 | 1 410 | 440 | 154 | |
| 150 | 410 | 1 150 | 2 400 | 4 300 | 3 750 | 1 900 | 720 | 310 | 150 | |
| 180 | 780 | 1 400 | 2 270 | 2 560 | 1 850 | 1 050 | 535 | 272 | 156 | |
| 210 | 965 | 1 430 | 1 520 | 1 450 | 1 060 | 620 | 360 | 218 | 137 | |
| 240 | 890 | 1 070 | 1 140 | 915 | 670 | 450 | 286 | 195 | 136 | |
| 260 | 786 | 940 | 845 | 724 | 510 | 370 | 245 | 164 | 120 | |

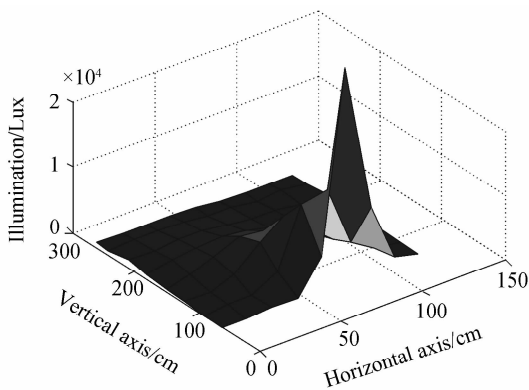


图 5 非均匀光场的三维照度分布图
 Fig. 5 Three-dimensional illumination distribution of inhomogeneous illumination field

从图 5 可以看出,实验中所观测到的每个点的照度分布与非均匀光场的理论分布基本一致:在每个横截面中,光源射出方向上的中心区域为高能量密度区,此区域较窄且能量集中,与旁边的弱光部分的光强落差较大,特别是在光源附近处最大衰减将近 1 000 倍.且由于水对光传播的衰减作用,从表中可明显看出照度变化曲线的峰值在随着远离光源而逐步减小,同时不断向接收器的方向偏移.

由图 4 可知,接收机所在位置大约是纬度 0.15 m 处,可称为接收器轴线方向,根据非均匀光场的理论,在此方向的光场照度应该随距离增加呈指数规律变化.为了验证这一点,画出这条轴线上的照度分布曲线,如图 6.

由图 6 可以看出,在接收器轴线方向的照度值随探测距离的增加而增加,二者之间的关系基本符合指数规律.与上节推导出的光场分布函数模型基本一致.

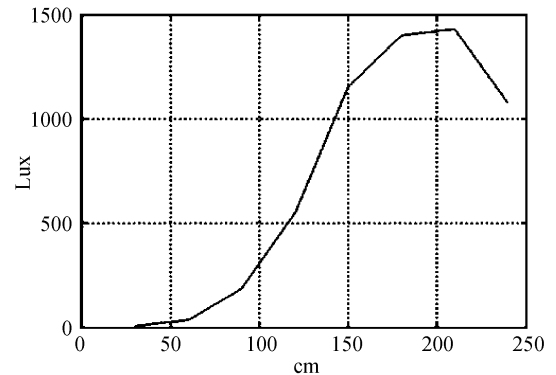


图 6 接收器轴线方向的照度分布曲线
 Fig. 6 Illumination distribution curve in axis of receiver

按照非均匀光场的分布理论,接收器接收到的不同距离处目标的照度值应该基本相同.目标点辐射到接收器接收平面上的照度的计算公式可用式(3)计算,即

$$E_a = \frac{I_A}{L^2} e^{-cR} \tag{3}$$

分别计算接收器轴线上不同距离处目标辐射到接收器的照度,如表 2.可以看出,在非均匀光场的近距离范围中,接收器接收到的不同距离的目标点的光照度基本相等,符合上节所述的非均匀光场分布理论;远距离目标点的光照度虽然随探测距离的增加而有所减弱,但相差不是很大,基本属于同一个数量级.这证明了所设计的集束光水下图像系统所产生光场符合非均匀光场的光场分布.

表 2 接收器收到的不同距离处目标的照度值
 Tabel 2 Illumination of receiver signals from different distance

| Distance/cm | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 | 260 |
|------------------|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Illumination/Lux | 37 | 24 | 31 | 27 | 19 | 8 | 3 | 1 | 0.5 |

4 非均匀光场水下成像性能实验

为了验证所设计集束光水下图像系统的成像性能,进行了相关的水池实验.实验中所用接收系统的视角为 $83^\circ \times 65^\circ$,水池透明度为 3.5 倍衰减长度,观测目标为 $40.5 \text{ cm} \times 50.5 \text{ cm}$ 矩形分辨率板,如图 7.图 8 给出了 $c=7 \text{ m}^{-1}$ 的情况下(透明度 50 cm),在不同观测距离上的实验图片.

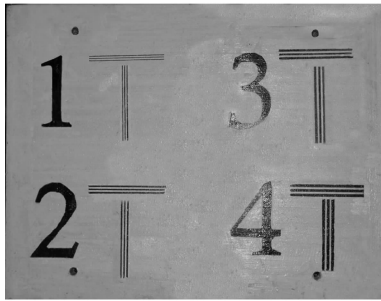
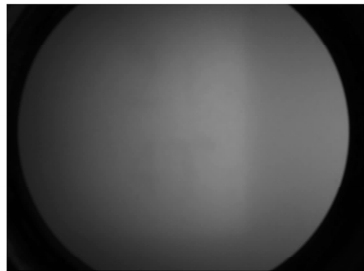


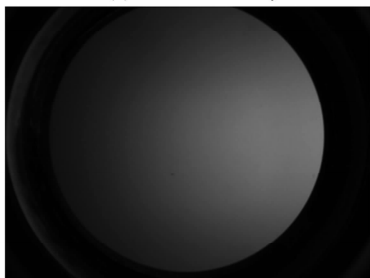
图 7 被观测目标
Fig. 7 Detected target



(a) 0.6 times visibility



(b) 1 times visibility



(c) 1.5 times visibility

图 8 观测结果
Fig. 8 Observation results

由观测结果可以看出,集束光水下图像系统所产生的非均匀光场,在水池中距离 30 cm(0.6 倍能见度)的情况下,可以清晰分辨 1 mm 细节;距离 50 cm(1 倍能见度)时,可分辨目标轮廓;距离 75 cm(1.5 倍能见度),可探测到目标.在目前电功率 150 W 情况下,最大视距可达 1.65 倍能见度.

5 结论

本文提出的非均匀光场水下探测方法,在理论上能够克服后向散射光背景噪音的影响,又能在全空间、无盲区的进行目标图像探测.建立在非均匀光场理论基础上的集束光水下图像系统,具有宽视角、全景深、图像清晰度高等优点.这种建立在非均匀光场理论基础上的观测技术,不仅开辟了水下观测技术的另一创新途径,而且有望应用于航空航天等其他领域的观测中,具有良好的应用前景.

参考文献

- [1] KOCAK D M, CAIMI F M. The current art of underwater imaging-with a glimpse of the past and vision of the future[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2005, **39**(3): 5-16.
- [2] ZHANG Zheng-yu, ZHOU Shou-heng. Analysis of key technology and the applications of underwater target detection by laser[J]. *Journal of Xidian University(Natural Science)*, 2001, **12**(28): 797-801.
章正宇,周寿桓.水下目标探测中的激光技术[J].西安电子科技大学学报(自然科学版),2001,**12**(28):797-801.
- [3] TAN C S, SLUZEK A, SEET G G L, et al. Range gated imaging system for underwater robotic vehicle[C]. *OCEANS 2006 - Asia Pacific*, 2007: 1-6.
- [4] MIKHEEV G M, KALYUZHNY D G, MOGILEVA T N, et al. A single-mirror electromechanical laser scanning system [J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2003, **46** (5): 694-696.
- [5] LOMBARDOA V, MARZULLIB T, PAPPALETTEREB C, et al. A time-of-scan laser triangulation technique for distance measurements[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2003, **39**(2): 247-254.
- [6] ZHENG Bing, ZHAN Xu-qing, FU Min. An underwater imaging system with distributive light of central power[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **2**(36): 368-371.
郑冰,展旭卿,付民.集束光水下图像系统[J].光子学报,2007, **2**(36):368-371.
- [7] JERLOV N G. *Marine optics*[M]. Amsterdam-Oxford-New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976: Series 12.

Distribution Characteristics in the Underwater Inhomogeneous Illumination Field

XU Hong-mei, ZHANG Zhi-gang, ZHENG Bing

(College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract: An underwater image detection theory of inhomogeneous illumination field is proposed to reduce the backward of scattered background noise. The distribution function of inhomogeneous illumination field is derived. It is related to receive aperture, distance between target and receiver as well as seawater volume attenuation coefficient. An underwater image detection system with distributive light of central power is developed. The tank contrast experiment is proposed, which verifies the inhomogeneous illumination field's distribution characteristics and underwater probing characteristics. It can clearly distinguish 1 mm details at 0.6 times visibility and identify targets outlined at one times visibility, as well as detect the target at 1.5 times visibility. The underwater system based on inhomogeneous illumination field theory is effective to overcome the influence of backward scattered background noise. These results suggest that this system has a far detection distance, wide visual angle, full view depth and good image definition.

Key words: Applied optics; Underwater imaging detection; Inhomogeneous optic field; Underwater image detection system with distributive light of central power; Optic field distribution function



XU Hong-mei was born in 1974. She received her Ph. D. degree from Ocean University of China in 2009. Now she is a lecturer, and her research interests focus on underwater observation technology.



ZHENG Bing was born in 1968. He received his M. S. degree in ocean physics from Ocean University of China in 1995. He is now a professor at Ocean University of China, and his research interests focus on underwater observation technology.