

反射式水下量子成像

项青 杨克成 于龙 夏珉* 李微 郭文平

华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074

摘要 水下成像的成像质量受到激光功率和接收器灵敏度的制约,现有的量子成像方式在自由空间中能够获得较传统成像距离更远、清晰度更高的探测图像。结合自由空间中量子成像方式与水体自身特点,提出了赝热光二阶关联的反射式水下量子成像方法,通过选取水下成像系统的典型参量进行模拟计算,重构了物体的光强起伏图像,设计并实现了成像实验。实验结果与数值仿真一致,表明可以利用二阶光强度关联的量子成像方式重现水下物体的二维图像。

关键词 统计光学; 水下成像; 数值模拟; 后向散射; 赝热光

中图分类号 O431.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0711002

Reflective Underwater Ghost Imaging

Xiang Qing Yang Kecheng Yu Long Xia Min Li Wei Guo Wenping

*School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan, Hubei 430074, China*

Abstract The quality of underwater imaging is restricted by laser power and receiver sensitivity. Existing ghost imaging method in free space can get higher resolution than traditional imaging detection. Based on theory of statistical optics and underwater optical properties, a two dimensional reflective underwater ghost imaging method using pseudothermal light source is presented, a theoretical model is built to simulate the dynamic process of pseudothermal field variation and the optical fields modulation by target, and the light intensity fluctuate image of target is rebuilt. Experiment results agree well with the results of numerical simulations indicating that reflective ghost imaging pattern can be applied to underwater imaging.

Key words statistical optics; quantum imaging; numerical simulate; back scattering; pseudothermal light

OCIS codes 110.3010; 030.1640; 010.1350

1 引 言

水下成像与空气中的成像不同,水介质对光的传播具有强散射和快速吸收功率的作用,并且水对光的散射现象随着照明的增强更趋严重,使水下成像更为困难。常规的水下成像技术分为激光水下扫描成像和距离选通成像。这两种方法分别通过在空间和时间上减少后向散射作用的影响,提高成像能力,但是它们都存在一些固有的不足。前者使用连续激光在窄小的视场内扫描和接收,后者快门打开的时间短,因此对激光功率和接收器灵敏度要求较高,从而制约着成像探测距离与成像质量。

基于量子力学与统计光学的量子成像技术对于照射在目标上的光功率和接收器分辨率要求不高,是利用光场的空间关联实现成像的一种新型成像方式。马里兰大学的史砚华小组在1995年完成了量子成像的首次试验^[1],该实验将相位匹配自发参量下转换产生的正交信号光和闲置光组成的频率纠缠信号-闲置双光子对作为光源。2002年Bennink等^[2]使用赝热光源进行了量子成像,其定性的性质可以媲美双光子成像。光源发出二阶相关的两束光,其中的一束光照射到待成像的物体上,由一个单光子探测器接收,另一束光直接

收稿日期: 2015-01-19; 收到修改稿日期: 2015-03-20

作者简介: 项青(1990-),女,硕士研究生,主要从事光电子技术方面的研究。E-mail: dtcxq1234@sina.com

导师简介: 杨克成(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事光电子技术和激光技术等方面的研究。E-mail: kcyang@hust.edu.cn

*通信联系人。E-mail: hadren@gmail.com

由一个具有空间分辨率的探测器接收,关联两个探测器的光电流得到物体的空间分布信息,从而实现量子成像。自由空间中的量子成像能够获得较传统成像而言距离更远、清晰度更高的探测图像。

本文根据光在水中传播规律,基于统计光学建立了数值模型,得到了光强起伏图像的数值结果,然后设计了水下量子成像实验,用数字微镜空间光调制器调制绿光激光束作为光源,对水中物体重现二维图像,实验结果与理论相符。

2 成像系统的数值模拟

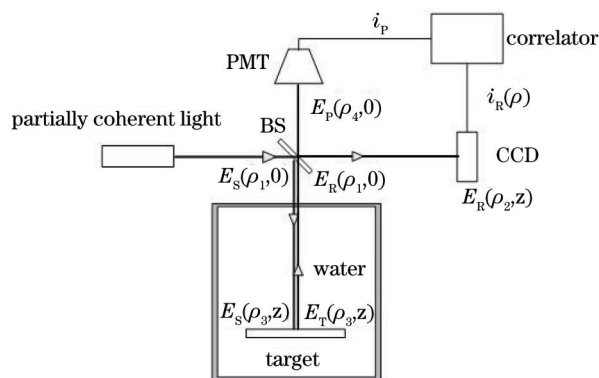


图1 成像系统的模拟原理图

Fig.1 Imaging system setup for simulation

数值模拟采用了图1所示的原理图。设垂直于光轴的平面上坐标为向量 ρ , 利用部分相干光(partially coherent light)作为系统光源,使其通过 50-50 分光镜(BS)分为光场分布相同的两束光,其中一束光 $E_r(\rho_1, 0)$ 作为参考光经过距离为 L 的自由空间,直接照射在具有空间分辨率的 CCD 上,其光场分布为 $E_r(\rho_2, z)$;另一束光 $E_s(\rho_1, 0)$ 作为信号光经过距离为 L 的水下空间,照射在水中的目标物体上,入射光场分布为 $E_s(\rho_3, z)$,经目标反射后光场分布为 $E_t(\rho_3, z)$,反射光经过水体照射到不具有空间分辨率的探测器光电倍增管(PMT),其光场分布为 $E_t(\rho_4, 0)$ 。PMT 和 CCD 分别产生光电流,经过二阶关联计算可以重现被成像物体。

2.1 光源

激光器发出的光为高斯光束,采用数字微镜(DMD)空间光调制器对激光束进行强度调制,利用每个微镜独立反射的方式使每个像素相互独立调制出“0”和“1”两种强度,表示为 $P(\rho)$ 。

2.2 光场的传播

光源经过 50-50 分光镜后分成信号光和参考光。对于参考光,根据衍射的非涅尔近似可知,照射在 CCD 上的光场分布为

$$E_r(\rho_2, z) = -\frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \int d\rho_1 E_r(\rho_1, 0) \exp\left[\frac{ik}{2z}(\rho_2 - \rho_1)^2\right], \quad (1)$$

式中 $z=L$, $k=2\pi/\lambda$ 。

对于信号光,以光入射面的中心作为光轴方向坐标原点,根据光在水中传播规律, z' 平面处的光照度为

$$\langle e(\rho, z') \rangle = \frac{\langle I(\rho, z') \rangle}{z'^2} = \frac{\langle E_s^*(\rho, z') E_s(\rho, z') \rangle}{z'^2}, \quad (2)$$

$$E_s(\rho, z') = -\frac{\exp(ikz')}{i\lambda z'} \int d\rho_1 E_s(\rho_1, 0) \exp\left[\frac{ik}{2z'}(\rho - \rho_1)^2\right] \exp\left[\frac{-(\alpha + \gamma)z'}{2}\right], \quad (3)$$

式中 α, λ 分别为水的吸收和散射系数。在 z' 平面 dz' 路径上单位体积单位立体角后向散射光强度为

$$d\langle I_y(\rho, z') \rangle = dV\beta(\pi) \cdot \gamma \cdot \langle e(\rho, z') \rangle, \quad (4)$$

式中 $\beta(\pi)$ 为后向散射比例系数。

目标与盲点之间每个散射截面上的每个点的后向散射光均会形成光场。能进入探测器的后向散射光

的范围为 $z' \in [z_0, z]$, 成像面上后向散射光的总光强分布为

$$\begin{aligned} & \langle I_{nh}(\rho_4) \rangle \\ &= \int dz' \langle I_n(\rho_4, z') \rangle \\ &= \left[-\frac{\exp(ikz')}{i\lambda z'} \right]^2 \int d\rho \int dI_\gamma(\rho, z') \exp\left[\frac{ik}{z'}(\rho - \rho_4)^2\right] \exp[-(\alpha + \gamma)z'] \end{aligned} \quad (5)$$

2.3 目标反射面

大多数真实目标表面对于光波长来说足够粗糙, 假设目标物体具有微观随机高度变化, 零均值、复值高斯随机过程, 自相关函数为

$$\langle T^*(\rho_3')T(\rho_3) \rangle = \lambda_0^2 \bar{T}(\rho_3) \delta(\rho_3' - \rho_3), \quad (6)$$

平均强度反射系数(均方散斑反射系数) $\bar{T}(\rho_3)$ 是成像的物体信息。

2.4 关联运算

参考光探测器 CCD 接收到的光强为

$$\langle I_R(\rho_2) \rangle = \langle E_R^*(\rho_2, z)E_R(\rho_2, z) \rangle. \quad (7)$$

由于 PMT 不具有空间分辨率, 故探测到的光强可设为其感光面上光强对面积的积分

$$\langle I_P \rangle = \int d\rho_4 [\langle I_{nh}(\rho_4) \rangle + \langle I_T(\rho_4, 0) \rangle]. \quad (8)$$

二阶空间光强度关联函数为

$$\langle C(\rho_2) \rangle = \langle I_R(\rho_2) \cdot I_P \rangle = \langle I_R(\rho_2) \rangle \langle I_P \rangle + \left| \langle E_P^*(\rho_4, z)E_R(\rho_2, z) \rangle \right|^2, \quad (9)$$

式中 $\left| \langle E_P^*(\rho_4, z)E_R(\rho_2, z) \rangle \right|^2 \neq 0$ 说明信号光场与参考光场在两时空点的瞬时光强并非完全独立, 而该项是热光场中两时空点复相关函数的模方, 它表征的是两处光场的空间相干性。

将(9)式写成归一化形式为

$$g = \frac{\langle I_R(\rho_2) \cdot I_P \rangle}{\langle I_R(\rho_2) \rangle \langle I_P \rangle}. \quad (10)$$

理论上关联计算的是探测器在响应周期内的平均值。模拟和实验中光场的变化是由一个周期内数字显微镜输出强度图片决定的, 且每次输出图片的时间间隔远大于相干时间, 因此上述式中 $\langle \rangle$ 表示系综平均。设输出的随机强度图片数为 N , 二阶相干函数为归一化形式为

$$g = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_R(\rho_2) \cdot I_P}{\left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_R(\rho_2) \right] \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_P \right]}. \quad (11)$$

2.5 数值模拟结果

由计算机随机产生二维矩阵来模拟波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 的高斯光束, 高斯阵列的每个像素宽度取 $14 \mu\text{m}$ 。假设光源到分光镜的距离忽略不计, 分光镜到物平面、物平面到 PMT 探测平面、分光镜到 CCD 探测平面的距离, 按折射率等效的空气距离都为 $L = 3 \text{ m}$ 。待测物体如图 2 所示, 亮条纹宽度为 1 mm , 反射系数取 1, 其他部分反射系数取 0。

令关联次数 $N = 20000$ 。假设光路中仅存在吸收不存在散射, 即 $\langle I_{nh} \rangle = 0$ 。图 3 为归一化形式的 g 光强分布, $1 < g < 2$ 且 $g \approx 1$, 不代表接收到的真实光强, 只表示空间上光强的起伏。亮条纹宽度为 1 mm 。定义信噪比 R_{sn} 为亮条纹强度的平均值与标准差的比值。改变关联次数经过多次的图像叠加。此时的信噪比为 2.581。

对于存在后向散射的水体, 探测器接收到的光强包含后向散射部分, 即 $\langle I_{nh} \rangle \neq 0$ 。水下量子成像的按照表 1 给出的典型参量。

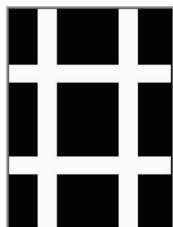


图 2 数值模拟使用的目标图

Fig.2 Target picture for numerical simulation

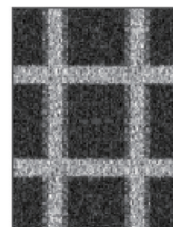


图 3 光路中无散射时光强关联的仿真结果

Fig.3 Simulation correlation result without scattering in light path

表 1 水下成像系统的典型参量

Table 1 Typical parameters of underwater imaging system

Parameter	Value
λ/nm	532
n	1.33
α/m^{-1}	0.04
γ/m^{-1}	0.16
L/m	3
$\beta(\pi)/\text{s}^{-1}$	0.07

20000次关联后光强分布如图4所示。亮条纹宽度为1 mm,信噪比为1.517。可以看出后向散射光会降低信噪比,但不改变物体的反射率信息在统计上的空间分布。

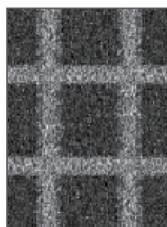


图 4 水下光路光强关联的仿真结果

Fig.4 Simulation correlation result with scattering in light path

图5为关联次数与信噪比的关系,横轴代表关联次数。其中实线为光路中无散射时的信噪比在不同关联次数下的拟合,虚线为水下光路的信噪比在不同关联次数下的拟合。

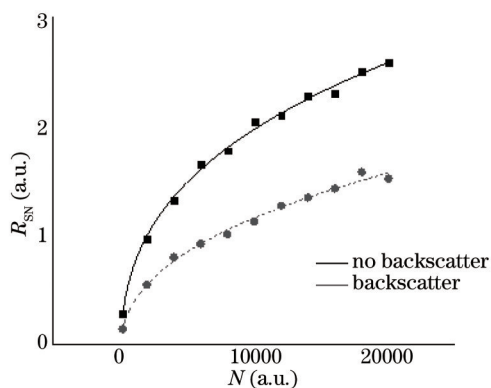


图 5 强度关联仿真图像的信噪比与关联次数的关系

Fig.5 Relationship of $R_{S/N}$ and measuring number in simulation

3 实验验证

为了进一步验证水下量子成像的理论,设计了如图6所示的实验。光源为 CrystaLaser 的 Diode Pumped Green 532 nm 激光器产生激光束,经过望远镜系统扩束为宽度为 16 mm 光束照射到 DMD 上,计算机随机生成强度图片作为调制信号输入 DMD。选用的数字微镜 DMD 光调制系统为 XD-ED01N 对光进行强度调制,光场分布为已知,经过自由空间传播后,探测到的光强在理论上可以计算出来,因此可以省去使用 CCD 的参考光。

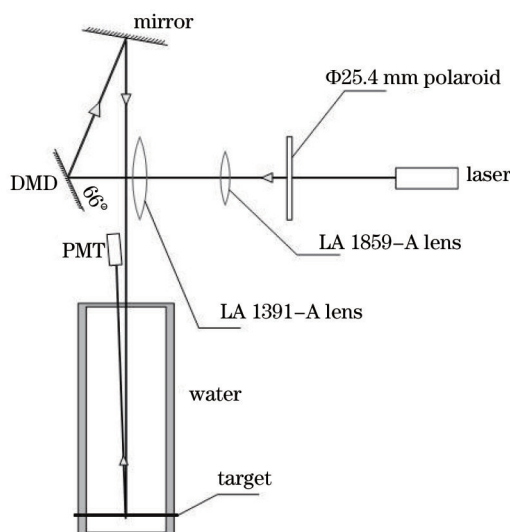


图 6 成像系统光路结构示意图

Fig.6 Diagram of imaging system setup for experiment

与数值模拟中的参量相对应,在实验中使用的目标物体为图 7 所示的井字纹图案。调制后输出光经过 3 m 水下光路照射到目标物体表面,反射到 PMT 上,作为信号光。选用的 PMT 为 R9880U。图 8 给出了 PMT 探测 500 次中第 K 次的电压 V 的数据统计分布图。从图中可以看出探测光强存在强烈涨落,是包含目标信息的部分,同时光电流中还存在直流信号,形成背景项,是造成图像对比度下降的原因。

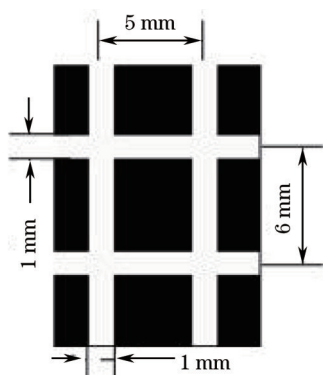


图 7 实验验证使用的待测物体

Fig.7 Target picture for experiment

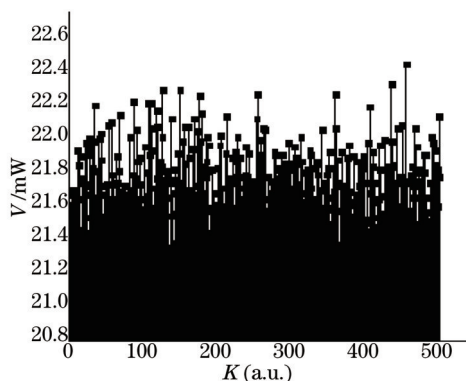


图 8 PMT 获取的电压数据分布图

Fig.8 Voltage data obtained by PMT

计算机生成的光强随机图片经过自由衍射传播的计算值为参考光。两者光强在计算机中进行关联,从而恢复出物体的信息,计算结果如图 9 所示。亮条纹宽度约为 1mm,信噪比 0.96。为此结果符合原始图像的信息特征,也与数值结果一致。

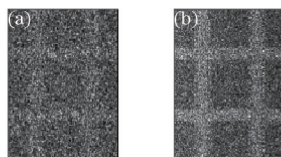


图 9 强度关联的实验结果。(a)关联次数 $N=2000$ 时的实验结果;(b)关联次数 $N=20000$ 时的关联结果

Fig.9 Experimental correlation results. (a)Result when measuring number $N=2000$; (b) result when measuring number $N=20000$

分别对 PMT 获得的结果进行不同次数的关联计算,并对得到的结果图像计算其信噪比,得到的信噪比随关联次数影响的曲线如图 10 所示。

图 10 的结果表明:随关联次数增加,信噪比逐渐提高,与数值结果一致。如果要提高信噪比获得更清晰的图像,可以增加测量次数,但这意味着要增加系统延时。进一步对比图 5 与图 10,在实验中亮条纹的反射系数 $\bar{T}(\rho_3) < 1$,使得信噪比下降;不同浑浊程度的水体后向散射对信噪比下降程度的影响不同,后期工作将

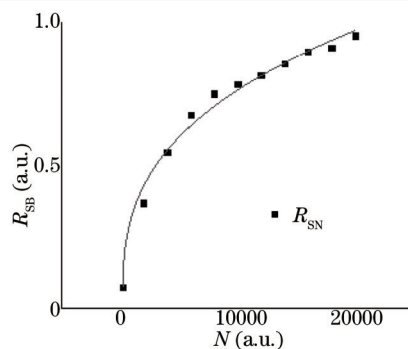


图 10 强度关联实验图像的信噪比与关联次数的关系

Fig.10 Relationship of R_{SN} and measuring number in experiment

对其做进一步研究。

4 结 论

基于统计光学的原理,结合水的光学特性,将量子成像技术引入到水下成像探测领域,设计了一种新的水下成像的方法,对其原理进行了理论推导和数值模拟,并设计了水下的实验装置对其进行验证。在实现水下量子成像的实验中,信号光使用的是不具有空间分辨率探测器进行探测,获得的是包含目标物体信息的总光强;参考光是计算出具有空间分辨率但不包含目标物体信息的二维光强分布。实验结果与理论计算结果相符,这种成像方式能对水中物体进行清晰的成像,且其信噪比随关联次数增加而增加。这种新型成像方式的优势在于将图像的空间分辨与目标物体信息分离,路径上的水体后向散射会降低图像的信噪比,对图像的空间分辨率没有影响。因此,这种成像方式为浑浊水体和远距离水下成像提供了可能。

参 考 文 献

- 1 Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, *et al.*. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement[J]. Phys Rev A, 1995, 52(5): R3429-R3432.
- 2 Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W. "Two-photon" coincidence imaging with a classical source[J]. Phys Rev Lett, 2002, 89(11): 113601.
- 3 A Gatti, E Brambilla, L A Lugiato. Entangled imaging and wave-particle duality: from the microscopic to the macroscopic realm[J]. Phys Rev Lett, 2003, 90(13): 133603.
- 4 G Scarcelli, V Berardi, Y Shih. Phase conjugate mirror via two-photon thermal light imaging[J]. Appl Phys Lett, 2006, 88(6): 061106.
- 5 Jeffrey H Shapiro. Computational ghost imaging[J]. Phys Rev A, 2008, 78(6): R061802.
- 6 R Meyers, K S Deacon, Y H Shih. Ghost imaging experiment by measuring reflected photons[J]. Phys Rev A, 2008, 77(4): R041801.
- 7 Ori Katz, Yaron Bromberg, Yaron Silberberg. Compressive ghost imaging[J]. Quantum physics, 2009, 95(13): 131110.
- 8 Chen X H, Liu Q, Luo K H, *et al.*. Lensless ghost imaging with true thermal light[J]. Optics letters, 2009, 34(5): 695-697.
- 9 Karmakar S, Zhai Y H, Chen H, *et al.*. The first ghost image using sun as a light source[C]. 2011 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2011: 1-2.
- 10 Ferri F, Magatti D, Lugiato L A, *et al.*. Differential ghost imaging[J]. Phys Rev Lett, 2010, 104(25): 253603.
- 11 Hui Chen, Tao Peng, Yanhua Shih. 100% correlation of chaotic-thermal light[J]. Phys Rev A, 2013, 88(2): 023808.
- 12 Bache M, Brambilla E, Gatti A, *et al.*. Ghost imaging using homodyne detection [J]. Phys Rev A, 2004, 70(2): 023823.
- 13 Sun Chuandong. Water optical properties and their effect on underwater imaging[J]. Journal of Applied Optics, 2000, 21(4): 39-46.
孙传东. 水的光学特性及其对水下成像的影响[J]. 应用光学, 2000, 21(4): 39-46.
- 14 Li Li, Gao Zhiyun, Wang Xia, *et al.*. Optical backscatter calculations for an underwater range-gated imaging system[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2003, 23(4): 488-491.
李 丽, 高雅允, 王 霞, 等. 水下距离选通成像系统后向散射光的计算[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(4): 488-491.
- 15 Huang Youwei, Jin Weiqi, Wang Xia, *et al.*. Theoretical optical backscattering model for staring underwater laser imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(7): 1191-1197.
黄有为, 金伟其, 王 霞, 等. 凝视型水下激光成像后向散射光理论模型研究[J]. 光学学报, 2007, 27(7): 1191-1197.
- 16 Chen Chao, Zhao Shengmei. Study on high order difference sifted ghost imaging scheme[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(06): 0611002.
陈 超, 赵生妹. 高阶差值筛选鬼成像方案研究[J]. 光学学报, 2014, 34(06): 0611002.
- 17 Chen Jie, Bo Zunwang, Han Shensheng. Sparsity-based ghost imaging with Gaussian-amplitude modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(09): 0911003.
陈 洁, 薄遵望, 韩申生. 高斯振幅调制下基于稀疏性的鬼成像[J]. 光学学报, 2013, 33(09): 0911003.