

非均匀关联随机电磁光束的产生

昌成成 蒲继雄 陈子阳 陈旭东

Generation of non-uniformly correlated stochastic electromagnetic beams

Chang Cheng-Cheng Pu Ji-Xiong Chen Zi-Yang Chen Xu-Dong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 054212 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.054212

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.054212>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I5>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种含时贝塞尔光束的理论性质研究

[Theoretical investigation on a kind of time-dependent Bessel beam](#)

物理学报.2016, 65(14): 144201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.144201>

光在 Metasurface 中的自旋-轨道相互作用

[Spin-orbit interaction of light in metasurface](#)

物理学报.2015, 64(24): 244202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.244202>

从 plasmon 到 nanoplasmonics-----近代光子学前沿及液晶在其动态调制中的应用

[From plasmon to nanoplasmonics-the frontiers of modern photonics and the role of liquid crystals in tune-able nanoplasmonics](#)

物理学报.2015, 64(12): 124214 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124214>

角向偏振无衍射光束的传输特性及其偏振态研究

[Polarization and propagation characteristics of the azimuthally polarized non-diffracting beam](#)

物理学报.2015, 64(6): 064201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064201>

非均匀部分相干光束在自由空间中的传输

[Propagation of non-uniform partially coherent beams in free space](#)

物理学报.2015, 64(3): 034205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034205>

非均匀关联随机电磁光束的产生*

昌成成 蒲继雄 陈子阳 陈旭东†

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建省光传输与变换重点实验室, 厦门 361021)

(2016年10月2日收到; 2016年11月21日收到修改稿)

从理论和实验两方面对非均匀关联随机电磁光束的产生进行了研究. 在理论上基于相位关联与相干度的联系推导出非均匀关联随机电磁光束的 2×2 交叉谱密度矩阵及相干性分布. 理论分析表明, 这种非均匀关联随机电磁光束中两点间的相干度不仅和两点间距有关, 而且和两点的位置有关. 在实验上, 利用两个相位型液晶空间光调制器对入射的完全相干光的两个偏振分量分别加载随机相位调制, 并测量了随机电磁光束的相干度分布. 实验结果表明, 光束中间距相等的两点之间的相干度随着两点与光斑中心的距离的增加而减小. 实验结果与理论结果一致. 这种非均匀关联的随机电磁光束在自由空间光通信和激光微操控等领域具有广阔的应用前景.

关键词: 非均匀关联, 随机电磁光束, 空间相干, 部分相干光

PACS: 42.25.-p, 42.25.Kb, 42.30.Lr

DOI: 10.7498/aps.66.054212

1 引言

空间相干性作为光束重要的特性之一, 受到了人们广泛的关注与研究^[1-4]. 研究表明, 部分相干光能够有效地抑制散斑, 提高成像质量^[5,6]. 同时, 如光学相干断层成像术(OCT)^[7]、显微内窥镜^[8]等基于光学关联的成像方法的成像能力取决于光的相干性. 此外, 部分相干光还被证实能够降低光在随机介质(如湍流大气)中传输时的闪烁^[9,10]. 然而现有的关于部分相干光的研究大部分局限于传统的相干模型, 如高斯-谢尔模型(Gaussian-Schell-model, GSM). GSM光束中两点之间的相干度只与这两点的间距有关, 因此这种相干性分布被称为均匀分布. 此外也有对改进型的谢尔模型部分相干光的研究如 Bessel-Gaussian-Schell-model^[11,12], sinc-Schell-model^[13]等, 但是这些光束中相干度也是只和两点之间的距离有关.

2011年, Lajunen 和 Saastamoinen^[14]首次提出了非均匀关联部分相干光的概念. 与相干度均匀

分布的部分相干光(比如 GSM)不同的是, 这种非均匀关联部分相干光的相干性不再是均匀分布的, 其光束中两点之间的相干度与这两点的空间位置有关. 研究表明, 通过调控光束的空间关联结构可以实现对光束传输特性的调控. 比如, 非均匀关联部分相干光在传播过程中, 源平面自相干附近点的空间相干度发生突变^[15], 具有自聚焦和最大强度的横向偏移^[14,16,17]等特性, 以及在湍流中传输时拥有较小的闪烁指数^[18]. 本课题组前期的工作中, 在一个位相型液晶空间光调制器(PSLM)上加载相位调制幅度随空间位置变化的动态随机相位, 实现了标量的非均匀关联部分相干光^[19]. 这种非均匀关联部分相干光中, 间距相等的两点之间的相干度随点到光斑中心距离的增大而减小. 在最近的报道中^[20], 我们在两个 PSLM 上分别加载动态的随机相位图, 分别调制入射的完全相干光的两个正交偏振分量, 从而实现了随机电磁光束的两个偏振方向上相干度的独立调制. 在此基础上, 本文拟基于光束相干偏振矩阵, 推导得到非均匀关联随机电磁光束的交叉谱密度矩阵及相干度分布, 并进

* 国家自然科学基金(批准号: 61605049, 61575070, 11304104, 11674111) 和华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chenxd@hqu.edu.cn

行实验验证.

$$(j = x, y; k = x, y), \quad (1)$$

2 理论分析

考虑一个统计稳定的平面光源, 光束中点 $\mathbf{r}$ 处的电场可以用公式 $E_j(\mathbf{r}) = A_j(\mathbf{r})\exp(i\phi_j)$ 表示, 其中 $j = x, y$, A 表示振幅, ϕ 表示相位. PSLM 的反射率基本上不随相位的不同而改变, 因此可以假定振幅 A 不变, 相位 ϕ 是随机变化的. 为了简化起见, 我们省略角频率 ω , 并且假设 $A_x(\mathbf{r}_1) = A_y(\mathbf{r}_1) \equiv A_1$; $A_x(\mathbf{r}_2) = A_y(\mathbf{r}_2) \equiv A_2$. 则光源中 $\mathbf{r}_1$ 和 $\mathbf{r}_2$ 处两点之间的交叉谱密度可以表示为

$$W_{jk}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \langle E_j^*(\mathbf{r}_1) E_k(\mathbf{r}_2) \rangle$$

$$\begin{aligned} W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) &= \begin{pmatrix} W_{xx}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) & W_{xy}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) \\ W_{yx}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) & W_{yy}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) \end{pmatrix} = A_1 A_2 \begin{pmatrix} \mu_{xx}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) & \mu_{xy}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) \\ \mu_{yx}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) & \mu_{yy}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) \end{pmatrix} \\ &= A_1 A_2 \begin{pmatrix} \langle \exp\{-i[\phi_x(\mathbf{r}_1) - \phi_x(\mathbf{r}_2)]\} \rangle & \langle \exp\{-i[\phi_x(\mathbf{r}_1) - \phi_y(\mathbf{r}_2)]\} \rangle \\ \langle \exp\{-i[\phi_y(\mathbf{r}_1) - \phi_x(\mathbf{r}_2)]\} \rangle & \langle \exp\{-i[\phi_y(\mathbf{r}_1) - \phi_y(\mathbf{r}_2)]\} \rangle \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (4)$$

我们知道, PSLM 只对入射光中偏振方向与其液晶指向矢方向平行的偏振分量有相位调制作用, 而对垂直分量没有相位调制^[24]. 为了产生随机电磁光束, 需要对光束的两个正交偏振分量都加载随机相位调制. 因此我们使用两个 PSLM, 其液晶指向矢方向分别平行于入射光中的两个正交偏振分量, 分别对两个分量进行相位调制. 假设 $\phi_x(\mathbf{r})$ 和 $\phi_y(\mathbf{r})$ 分别表示加载在光束中点 $\mathbf{r}$ 处电场的 x, y 偏振分量上的随机相位, 而且这些随机相位在时间上服从均匀概率分布, 其概率密度可表示为

$$p[\phi_j(\mathbf{r})] = \begin{cases} \frac{1}{2\pi\gamma_j(\mathbf{r})}, & \pi - \pi\gamma_j(\mathbf{r}) < \phi_j(\mathbf{r}) < \pi + \pi\gamma_j(\mathbf{r}), \\ 0, & \text{其他,} \end{cases} \quad (j = x, y). \quad (5)$$

将 (5) 式中的 $\gamma_j(\mathbf{r})$ 称为点 $\mathbf{r}$ 处的相位调制幅度, 其取值范围为 $0 \leq \gamma_j(\mathbf{r}) \leq 1$. 不同的调制幅度对应不同的相位调制范围. 需要注意的是当 $\gamma_j(\mathbf{r}) = 0$ 时, 表示施加在光场中每个点的相位都是 π . 因为实验中对不同点施加的相位调制是统计独立的, 则由参考文献^[20]可知 $\mathbf{r}_1$ 和 $\mathbf{r}_2$ 两点之间光场的相干度满足

$$\begin{aligned} \mu_{jk}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) &= \langle \exp[-i\phi_j(\mathbf{r}_1)] \exp[i\phi_k(\mathbf{r}_2)] \rangle \\ &= \begin{cases} 1, & \mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_2, \quad j = k, \\ \langle \exp[-i\phi_j(\mathbf{r}_1)] \rangle \langle \exp[i\phi_k(\mathbf{r}_2)] \rangle, & \text{其他,} \end{cases} = \begin{cases} 1, & \mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_2, \quad j = k, \\ \text{sinc}[\gamma_j(\mathbf{r}_1)] \text{sinc}[\gamma_k(\mathbf{r}_2)], & \text{其他,} \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

由 (6) 式可知, 当调制幅度与位置 $\mathbf{r}$ 有关时, 所获得的随机电磁光束的相干度分布也是一个与空间位置有关的非均匀分布. 以 $\gamma_j(\mathbf{r})$ 满足反高斯分布为例, 即 $\gamma_j(\mathbf{r}) = 1 - \exp(-r^2/\sigma_0^2)$, 其中 $r = |\mathbf{r}|$, 表示光束中的某点距离光束中心的距离. 则由 (6) 式可得

$$\mu_{jk}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \begin{cases} 1, & \mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_2, \quad j = k, \\ \text{sinc}^2 \left[1 - \exp \left(\frac{-r^2}{\sigma_0^2} \right) \right], & \mathbf{r}_1 \neq \mathbf{r}_2, \quad |\mathbf{r}_1| = |\mathbf{r}_2| = r, \\ \text{sinc} \left[1 - \exp \left(\frac{-|\mathbf{r}_1|^2}{\sigma_0^2} \right) \right] \text{sinc} \left[1 - \exp \left(\frac{-|\mathbf{r}_2|^2}{\sigma_0^2} \right) \right], & \text{其他,} \end{cases} \quad (7)$$

其中 $*$ 号表示复共轭, $\langle \rangle$ 表示空间频率域的系综平均^[21]. 而 $\mathbf{r}_1$ 和 $\mathbf{r}_2$ 处两点电场之间的相干度可以表示为

$$\mu_{jk}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \frac{W_{jk}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)}{\sqrt{W_{jj}(\mathbf{r}_1)} \sqrt{W_{kk}(\mathbf{r}_2)}}. \quad (2)$$

将 (1) 式代入 (2) 式可以得到两点间的关联分布^[22], 表示为

$$\mu_{jk}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \langle \exp\{-i[\phi_j(\mathbf{r}_1) - \phi_k(\mathbf{r}_2)]\} \rangle. \quad (3)$$

考虑到 (2) 式和 (3) 式, 则表征该光源的 2 阶关联性质的交叉谱密度矩阵可以写成^[23]:

其中 $j = x, y; k = x, y$. 由 (7) 式可以看出这种非均匀关联随机电磁光束与 GSM 光束有着较大区别. GSM 光束中两点之间的相干度只与两点的距离有关, 而 (7) 式表示的非均匀关联的随机电磁光束中, 两点之间的相干度既与两点间的距离有关, 也和两点的位置有关.

3 实验结果与分析

我们利用图 1 所示的光路来产生随机电磁光束, 光源是一个 He-Ne 激光器 (Melles Griot), 出射光为沿 x 方向的线偏振光, 假设其为完全相干光. 利用透镜 1, 2 将光斑半径扩大到 2 mm, 再通过半波片把激光的偏振方向旋转 45° . 偏振无关分束镜

(NPBS) 将入射光分成光强相等的两束光, 并分别入射到两个液晶指向矢方向相互垂直的空间光调制器 (SLM) 上. 使用的 SLM 是纯相位型液晶空间光调制器 (Holoeye photonics AG, Pluto), 其分辨率为 1920×1080 , 像素尺寸为 $8 \mu\text{m}$, 帧率为 60 Hz. 在两个 SLM 之间分别放置两个偏振化方向相互垂直的偏振片, 使得入射到 SLM1 上的为 y 方向的偏振光, 入射到 SLM2 上的为 x 方向的偏振光, 两路光的偏振方向分别与对应的 SLM 的液晶指向矢方向平行. 两个 SLM 分别由两台电脑 (PC) 控制, 通过在 SLM 上加载动态随机相位图实现对两个偏振方向上的光的相位调制. 两路光经 SLM 相位调制后, 在 NPBS 处合束成一束随机电磁光束.

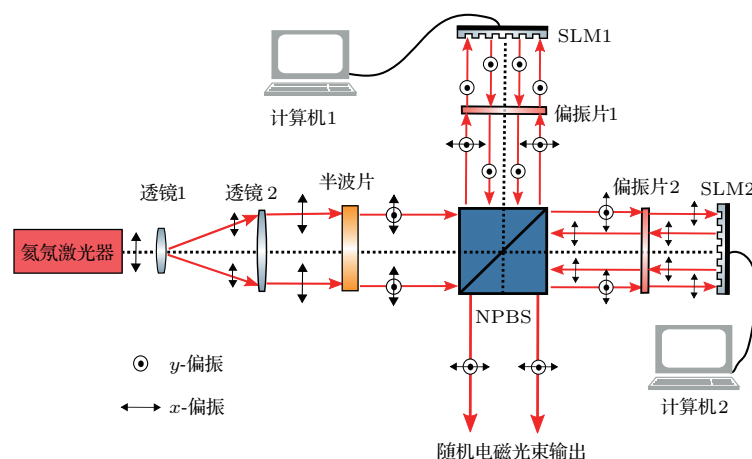


图 1 产生随机电磁光束的光路示意图. NPBS 是偏振无关分束镜

Fig. 1. Generation of non-uniformly correlated stochastic electromagnetic beams. NPBS, non-polarizing beam splitter.

我们使用 Matlab 中的 rand 函数产生 199 张随机相位图. 相位图中不同的灰度值对应于施加在电场上的不同的相位调制. 然后, 我们把这 199 张随机相位图制作成帧率为 60 Hz 的动态图, 并加载在空间光调制器上以实现对入射光的随机相位调制. 需要指出的是, 两个空间光调制器上加载的动态图在时间上是不同步的. 图 2(a) 展示的是 SLM 上加载的动态随机相位图中的一帧, 点 $\mathbf{r}$ 处的相位分布满足 (5) 式所示的均匀概率分布, 其中 $\gamma_j(\mathbf{r}) = 1 - \exp(-r^2/\sigma_0^2)$, 即不同点的调制幅度满足反高斯分布. 在实验中, 我们使用遮光屏挡住其中一路光, 利用杨氏双孔干涉分别测量了随机电磁光束的 x 偏振分量和 y 偏振分量的相干度分布. 实验中所用的双孔的小孔直径为 0.1 mm, 小孔间距

为 1.2 mm. 图 2(b) 中水平方向一对白色圆点表示实验所用双孔的位置. 为了测量我们得到的非均匀部分相干光束的相干度分布, 我们首先将双孔置于光斑的中心位置, 使得两个小孔在光斑的直径上, 且两个小孔到光斑圆心的距离相等; 并从该位置开始, 竖直向上平移双孔, 每次向上移动 0.2 mm, 并分别测量不同位置的相干度. 对应每个双孔位置, 我们实验采集了 90 个干涉图样用于计算相干度. 图 3 中的实验结果是 90 次测量的平均值.

图 3 中的圆点和菱形分别表示: 实验测量的 x 和 y 偏振分量的相干度与光斑中的该点和光斑圆心之间距离的变化关系. 可以看出, 虽然两点之间的距离不变, 但两点之间的相干度随点与光斑中心之间距离 r 的增加而减小. x 和 y 偏振方向实验结果

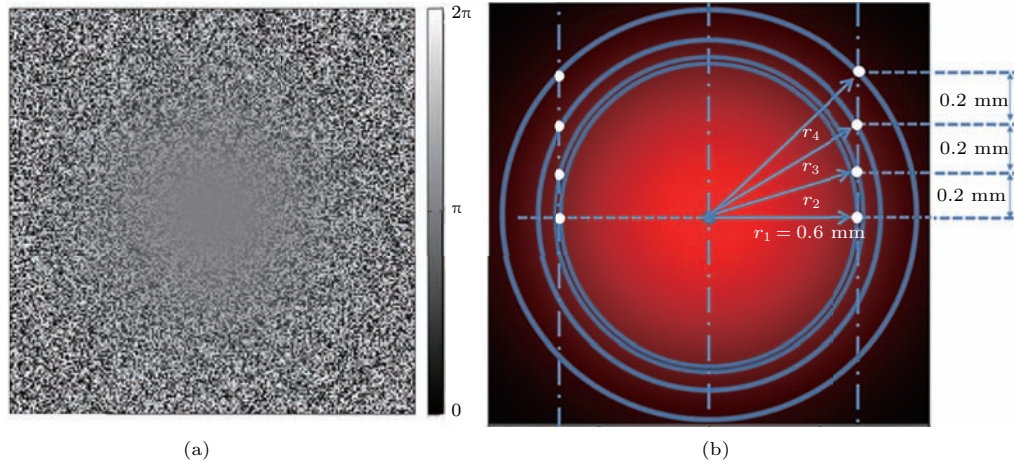


图2 (网刊彩色) (a) 动态随机相位图的一帧; (b) 双孔测量位置示意图

Fig. 2. (color online) (a) One frame of dynamic pattern loaded in SLMs; (b) the schematics for measuring the coherence degree by two-pinhole interference experiment.

的微小差别可能是两个空间光调制器的个体差异所导致. 图3中的实线表示用函数

$$\mu_{jj} = a \times \{\text{sinc}^2[1 - \exp(-b \times r^2)]\} + c$$

拟合的结果. 我们拟合 μ_{xx} 所用的参数分别是 $a = 0.7316, b = 0.3154, c = 0.2684$; 拟合 μ_{yy} 所用的参数分别是 $a = 0.7774, b = 0.2852, c = 0.2226$. 由(7)式可知, 我们测量的随机电磁光束的偏振分量的相干度的理论值应该是

$$\mu_{jj}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \text{sinc}^2 \left[1 - \exp \left(-\frac{r^2}{\sigma_0^2} \right) \right],$$

其中 $r = |\mathbf{r}_1| = |\mathbf{r}_2|$. 参数 a 和 c 产生的原因可能有: 1) 实验所用的杨氏双孔中的小孔尺寸 (0.1 mm) 比液晶空间光调制器像素尺寸 (8 μm) 大很多, 这意味着通过每个小孔的光来自很多个点; 2) 理论上我们假设光源为各态历经的, 然而实验中用 Matlab 所产生的随机相位是离散的而不是连续分布的. 然而, 实验结果表明本文所述产生非均匀关联的随机电磁光束的方法是可行的.

两个偏振方向相互垂直的光束经偏振无关分束镜 (NPBS) 后合束成随机电磁光束. 为了测量随机电磁光束中 x 和 y 偏振方向的光场分量之间的相干度 μ_{xy} , 我们搭建了一个改进型的马赫-曾德尔干涉仪, 如图4所示. x 偏振方向的光从偏振分束镜 (PBS) 中透过, 而 y 偏振方向的光被 PBS 反射. 用半波片将 y 偏振分量的偏振方向转 90° , 变成 x 偏振. 在干涉仪的两臂分别放置两个可调狭缝 (A1, A2), 使得 A1, A2 刚好分别挡掉两臂光束的一半, 经过另一个偏振无关分束镜合束之后入射到杨氏

双孔. 我们用一台 CCD (Ophir, SP620U) 来记录干涉图样. 对应每个双孔位置, 我们实验采集了 90 个干涉图样用于计算相干度. 实验结果如图5所示, 图中圆点表示 90 次实验测量结果的平均值, 实线表示用函数

$$\mu_{xy}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = a \times \text{sinc}^2[1 - \exp(-b \times r^2)] + c$$

拟合的结果. 其中 $a = 0.2932, c = 0.4895$. 这组参数和拟合 μ_{xx} 和 μ_{yy} 所用的参数差别较大. 我们认为可能是因为产生随机电磁光束的光路中 (如图1所示) 偏振无关分束镜到两个空间光调制器的距离没有完全一致, 以及两个空间光调制器的像素没有做到完全的一一对应.

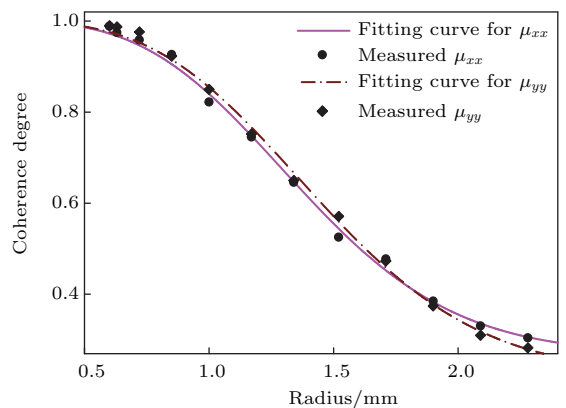

 图3 圆点和菱形分别表示的 μ_{xx}, μ_{yy} 的实验测量结果与小孔-光斑中心之间距离 r 的关系; 实线、虚线分别表示 μ_{xx}, μ_{yy} 的拟合曲线

 Fig. 3. Circles and diamonds represent the measured μ_{xx} and μ_{yy} , respectively; solid line and dot-dash line represent the fitting curve of μ_{xx} and μ_{yy} , respectively.

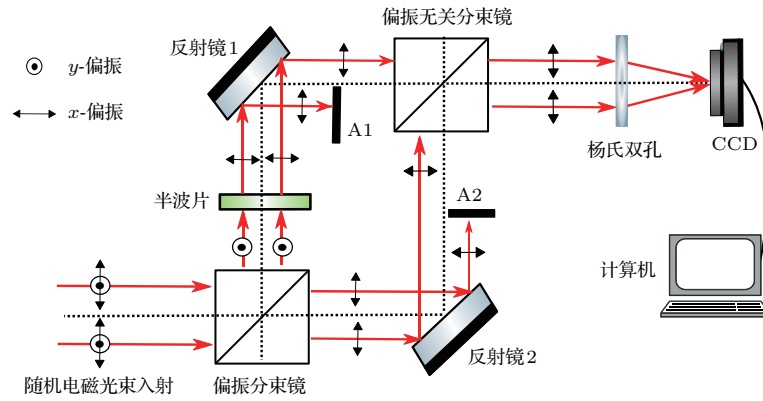
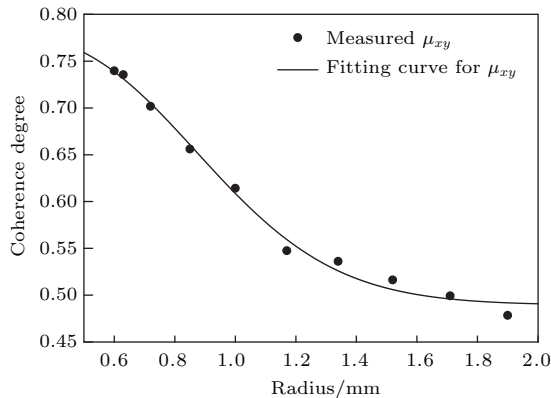


图4 改进的马赫-曾德尔干涉仪 (A1, A2 是可调狭缝)

Fig. 4. Experimental setup of modified Mach-Zehnder interferometer. A1, A2, knife-edges.

图5 两个偏振分量之间的相干度 μ_{xy} 与小孔-光斑中心之间距离 r 的关系Fig. 5. Coherence degree μ_{xy} as a function of distance between the point and the beam center, r .

4 结 论

本文在完全相干光的基础上, 通过加入合适的相位调控, 获得了一种非均匀关联的随机电磁光束. 我们在两个相位型液晶空间光调制器上, 分别加载了调制幅度由光斑中心沿径向呈反高斯型增加的动态随机相位, 并使用这两个空间光调制器分别调制激光器输出的完全相干光的两个正交偏振分量. 理论分析表明所产生的随机电磁光束具有非均匀的相干度分布. 实验测量结果与理论分析基本符合. 本文提出的产生非均匀关联随机电磁光束的方法可应用于光通信与传输, 以及激光微操控等领域. 我们将在后续研究中探讨这种非均匀关联随机电磁光束的传输特性.

参考文献

[1] Mei Z R 2014 *Opt. Lett.* **39** 4188
 [2] Wang F, Korotkova O 2016 *Opt. Lett.* **41** 516

[3] Hyde M W, Basu S, Voelz D G, Xiao X F 2015 *Opt. Eng. Lett.* **54** 120501
 [4] Pu J X, Dong M M, Wang T 2006 *Appl. Opt.* **45** 7553
 [5] Wang Y X, Meng P H, Wang D Y, Rong L, Panezai S 2013 *Opt. Express* **21** 19568
 [6] Redding B, Choma M A, Cao H 2012 *Nat. Photonics* **6** 355
 [7] Ryczkowski P, Turunen J, Friberg A T, Genty G 2016 *Sci. Rep.* **6** 22126
 [8] Gora M J, Sauk J S, Carruth R W 2013 *Nat. Med.* **19** 238
 [9] Arpalı Ç, Arpalı S A, Baykal Y, Eyyuboğlu H T 2010 *Appl. Phys. B* **103** 237
 [10] Avramov-Zamurovic S, Nelson C, Guth S, Korotkova O, Malek-Madani R 2016 *Opt. Commun.* **359** 207
 [11] Wang X Y, Yao M W, Qiu Z L, Yi X, Liu Z J 2015 *Opt. Express* **23** 12508
 [12] Zhu Q Z, Wu F T, Hu R, Feng C 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 184101 (in Chinese) [朱清智, 吴逢铁, 胡润, 冯聪 2016 物理学报 **65** 184101]
 [13] Mei Z R, Mao Y H 2014 *Opt. Express* **22** 22534
 [14] Lajunen H, Saastamoinen T 2011 *Opt. Lett.* **36** 4104
 [15] Zhang L, Chen Z Y, Cui S W, Liu J L, Pu J X 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 034205 (in Chinese) [张磊, 陈子阳, 崔省伟, 刘绩林, 蒲继雄 2015 物理学报 **64** 034205]
 [16] Mei Z R, Tong Z S, Korotkova O 2012 *Opt. Express* **20** 26458
 [17] Tong Z S, Korotkova O 2012 *J. Opt. Soc. Am. A* **29** 2154
 [18] Gu Y, Gbur G 2013 *Opt. Lett.* **38** 1395
 [19] Cui S W, Chen Z Y, Zhang L, Pu J X 2013 *Opt. Lett.* **38** 4821
 [20] Chen X D, Chang C C, Chen Z Y, Lin Z L, Pu J X 2016 *Opt. Express* **24** 21587
 [21] Wolf E 2007 *Introduction to the Theory of Coherence and Polarization of Light* (Cambridge: Cambridge University Press) pp174–179
 [22] Tervo J, Setälä T, Friberg A T 2012 *Opt. Lett.* **37** 151
 [23] Wolf E 2003 *Phys. Lett. A* **312** 263
 [24] Shirai T, Wolf E 2004 *J. Opt. Soc. Am. A* **21** 1907

Generation of non-uniformly correlated stochastic electromagnetic beams*

Chang Cheng-Cheng Pu Ji-Xiong Chen Zi-Yang Chen Xu-Dong[†]

(Fujian Key Laboratory of Light Propagation and Transformation, College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

(Received 2 October 2016; revised manuscript received 21 November 2016)

Abstract

Until now, there have been many reports concerning the generation and propagation of partially coherent beams due to their less influencing ability in turbulent atmosphere and random media. Of particular interest, a Gaussian-Schell model beam has been widely chosen as a special example of partially coherent beam, since its spatial coherence degree is dependent on position only through the difference between the two position vectors. In the scalar domain, many coherent models have been well studied such as Gaussian and multi-Gaussian Schell-model sources, Bessel-Gaussian and Laguerre-Gaussian Schell-model sources and so on. Based on the theory for devising genuine cross-spectral density matrices for a stochastic electromagnetic beam, several scalar models have been also extended to the electromagnetic domain. In recent years, the propagation of partially coherent beams with spatially varying and non-uniform correlations has become a hot topic, because of their interesting characteristics such as locally sharpened and laterally shifted intensity maxima. In one of our previous studies, we have experimentally investigated the generation of non-uniformly correlated partially coherent beams. However, to the best of our knowledge, so far, there has been no investigation on the generation of non-uniformly correlated stochastic electromagnetic beams. In this paper, we theoretically and experimentally investigate the generation of non-uniformly correlated stochastic electromagnetic beams. Based on the relation between phase correlation and optical coherence, we investigate the 2×2 cross-spectral density matrix and the coherence distribution of the non-uniformly correlated stochastic electromagnetic beam we generated. It is shown that the coherence degree between two points in the generated beam depends not only on the distance between them, but also on the distances between the points and the center of the beam. In experiment, we use the Matlab rand function to generate a random phase pattern with uniform distribution. The modulation magnitudes of different positions are different and follow an inverse Gaussian distribution in position. Dynamic phase patterns are created from a series of random grey-scale images. Two phase-only liquid crystal spatial light modulators are employed to display computer-generated dynamic phase patterns and modulate the two orthogonally polarized components of the incident coherent light, respectively, and generate a stochastic electromagnetic beam. We measure the correlation distribution of the generated beam in Young's two-pinhole experiment. It is shown that the experimental observations are in agreement with our theoretical analyses. Other kinds of non-uniformly correlated stochastic electromagnetic beams can also be obtained by this approach. Non-uniformly correlated stochastic electromagnetic beams may have some applications in optical manipulation and free-space optical communication.

Keywords: non-uniformly correlated, stochastic electromagnetic beam, spatial coherence, partially coherent beam

PACS: 42.25.-p, 42.25.Kb, 42.30.Lr

DOI: 10.7498/aps.66.054212

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61605049, 61575070, 11304104, 11674111) and the Subsidized Project for Cultivating Postgraduates' Innovative Ability in Scientific Research of Huaqiao University, China.

[†] Corresponding author. E-mail: chenxd@hqu.edu.cn