

部分相干 Airy 光束及其传输的研究*

崔省伟 陈子阳 胡克磊 蒲继雄†

(华侨大学, 信息科学与工程学院, 厦门 361021)

(2012 年 10 月 26 日收到; 2012 年 11 月 23 日收到修改稿)

利用高斯-谢尔模型的交叉谱密度公式和惠更斯衍射积分, 得到了部分相干 Airy 光束的表达式. 对不同相干度的部分相干 Airy 光束的无衍射和横向加速偏移的性质进行了理论分析并予以实验验证, 结果一致表明部分相干 Airy 光束也具有无衍射和横向加速度的特性, 而且相干度越低, 部分相干 Airy 光束的无衍射距离越短, 横向加速度越小.

关键词: 傅里叶光学, 全息, 部分相干, 艾里光束

PACS: 42.25.Kb, 42.30.Kq, 42.30.Lr, 42.40.Kw

DOI: 10.7498/aps.62.094205

1 引言

1979 年, Berry 和 Balazs 从自由空间薛定谔方程和近轴波动方程的解中预言了 Airy 光束的存在^[1], 但直到 2007 年, 才被实验所证实^[2]. Airy 光束除了具有与 Bessel 光束的无衍射和自重建的特性以外^[3-5], 还具有横向自由加速度, 使得光束的主瓣在自由空间传输时沿着横向以固定加速度运动, 即轨迹为抛物线^[6]. 由于 Airy 光束的这些特殊性质, 人们将其运用在粒子操控等方面^[7,8], 从而受到了人们的广泛关注和研究^[9]. 大部分的 Airy 光束研究都集中于完全相干 Airy 光束, 而部分相干 Airy 光束的研究则较少涉及. 由于部分相干光具有抗散斑等众多优点引起了研究人员的广泛关注^[10-12]. 例如, Wu 和 Boradman 提出, 部分相干光束的光强分布在湍流介质中传输时受到湍流的影响比完全相干光要小^[13]. 由于 Airy 光束和部分相干光束的特殊性质, 我们对部分相干 Airy 光束进行了研究.

本文从理论和实验上研究部分相干 Airy 光束的传输性质, 主要研究了光束的相干特性对其光强分布和传输性质的影响.

2 实验装置与理论分析

实验装置如图 1 所示, 用 He-Ne 激光器做光源, 首先通过焦距分别为 50 mm 和 300 mm 的透镜 L_1 和 L_2 组成的扩束光学系统, 之间加入一个转动的毛玻璃 P_1 使之变为部分相干光, 再通过起偏器 P_2 , 入射到空间光调制器 (SLM), 通过加载的相位图进行相位调制, 通过检偏器 P_3 和 $2f$ 系统的傅里叶变换透镜 L_3 , 在 L_3 的焦点 ($z=0$) 处用光束分析仪 (CCD) 接收.

我们用杨氏双缝干涉的方法, 对相干度进行测量. 图 2 中的点为在空间光调制器 (SLM) 处实验测得入射光的相干度. 可以看出实验上所测量的相干特性呈高斯型衰减. 从实验测得的相干度来看, 该部分相干模型为高斯谢尔模型, 即相干度满足表达式^[14]

$$\mu(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z=0) = \exp\left\{\frac{-(\mathbf{r}_1^2 + \mathbf{r}_2^2 - 2\mathbf{r}_1\mathbf{r}_2)}{2\delta^2}\right\}, \quad (1)$$

其中, μ 为 $z=0$ 平面上 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ 之间的相干度, δ 为相干长度. 从图中可以看出, 理论模拟曲线和实验测量结果基本一致. 通过变换不同的毛玻璃和改变毛玻璃的位置, 可以得到相干长度不同的部分相干光束.

* 国家自然科学基金 (批准号: 60977068, 61178015) 和强激光与物理重点实验室基金 (批准号: SG-001102) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: jixiong@hqu.edu.cn

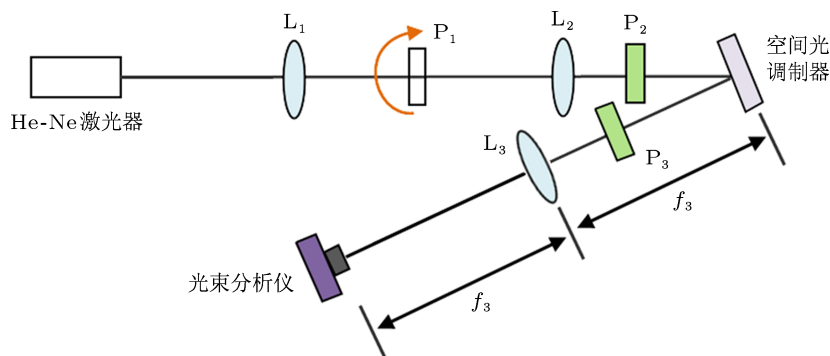


图1 部分相干 Airy 光束的实验装置

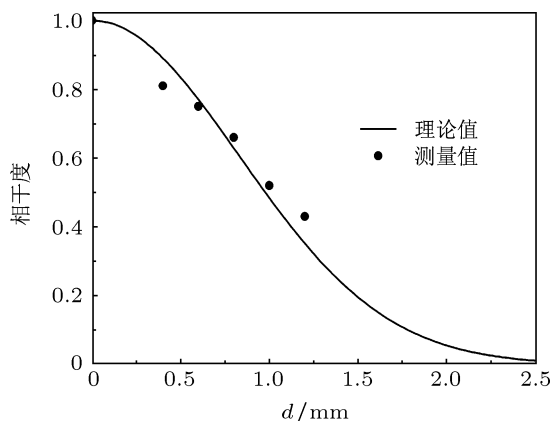


图2 部分相干光束的相干度理论模拟曲线和实验测量结果

实验上测量的相干度基本符合高斯 - 谢尔模型, 因此部分相干 Airy 光束的交叉谱密度可表示为^[15]

$$W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z_0) = u(\mathbf{r}_1, z_0)u^*(\mathbf{r}_2, z_0)\mu(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2). \quad (2)$$

利用交叉谱密度公式和惠更斯衍射积分, 通过 ABCD 矩阵方法来研究部分相干 Airy 光束. 光束在通过空间光调制器 (SLM) 之后通过一个焦距为 f 的单透镜, 其 ABCD 矩阵可表示为^[16]

$$\begin{pmatrix} -z/f & f \\ -1/f & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & f+z \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & f \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

引入波矢 $k = \frac{2\pi n}{\lambda}$, 实验系数 $c_0 = \frac{[3]\sqrt{6\phi}}{l}$, ϕ 为全息相位图的相位最大改变角, l 为全息相位图的边长, 我们可以将部分相干 Airy 光束的光强表示为^[2]

$$I(x, y, \xi) \propto \left| \text{Ai} \left[\frac{x}{x_0} - (\xi/2) \right] \exp \left[a_0 \frac{x}{x_0} - (a_0 \xi^2/2) \right] \right|^2$$

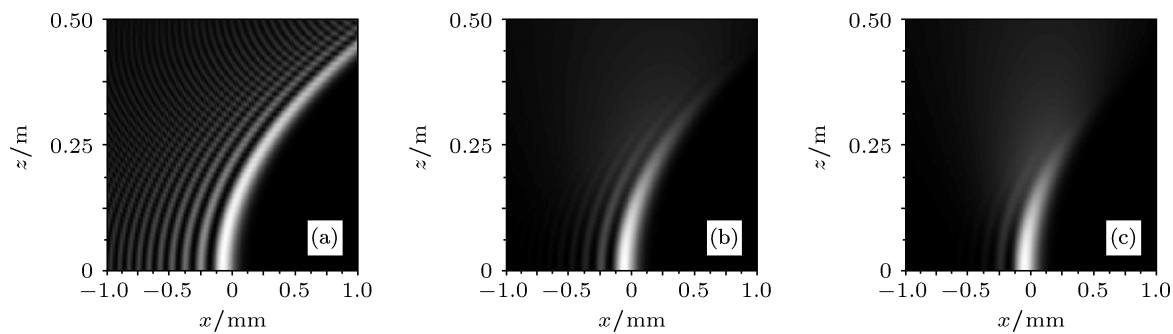
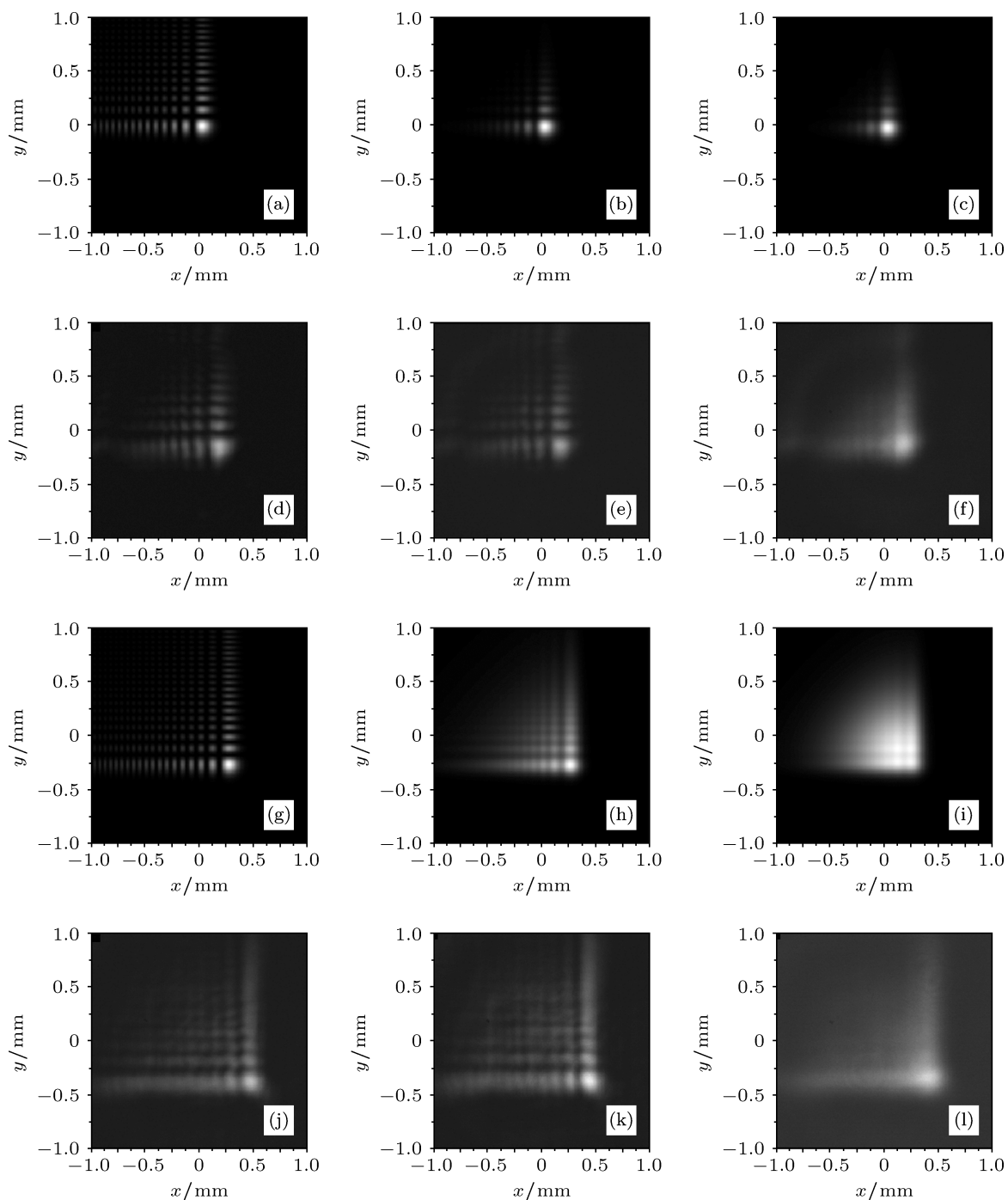
$$\begin{aligned} & -i(\xi^3/12) + i \left(\frac{x}{x_0} \xi/2 \right) \Bigg] \\ & \times \text{Ai} \left[\frac{y}{y_0} - (\xi/2) \right] \exp \left[a_0 \frac{y}{y_0} - (a_0 \xi^2/2) \right. \\ & \left. - i(\xi^3/12) + i \left(\frac{y}{y_0} \xi/2 \right) \right] \Bigg|^2. \quad (4) \end{aligned}$$

(3) 式中 $x_0 = y_0$ 为特征长度, 归一化的传播距离 $\xi = \frac{z}{kx_0^2}$, 部分相干 Airy 光束的系数 $a_0 = \frac{\omega_0^2 + 2\delta^2}{2c_0^2\omega_0^2\delta^2}$, ω_0 为入射光的光腰半径.

3 理论模拟与实验结果

不同相干长度的 Airy 光束在自由空间中传输截面光强的理论模拟对比, 如图 3 所示. 图 3(a), (b), (c) 分别是完全相干、 $\delta = 1.1 \text{ mm}$, $\delta = 0.83 \text{ mm}$ 的 Airy 光束传输截面光强的理论模拟. 可以看出, 部分相干 Airy 光束的相干度越低, 主瓣光强在自由空间传输的衰减越快, 无衍射距离也就越短, 而且完全相干的 Airy 光束偏移量要比部分相干 Airy 光束大.

图 4 是对完全相干、 $\delta = 1.1 \text{ mm}$ 、 $\delta = 0.83 \text{ mm}$ 的入射光, 产生的 Airy 光束的传输光强的模拟和实验图. 图 4(a), (b), (c) 分别是在 $z = 0.1 \text{ m}$ 处, 完全相干、 $\delta = 1.1 \text{ mm}$ 、 $\delta = 0.83 \text{ mm}$ 的 Airy 光强理论模拟; 图 4(d), (e), (f), 分别是对应图 4(a), (b), (c) 条件的 Airy 光强实验结果; 图 4(g), (h), (i) 分别是在 $z = 0.2 \text{ m}$ 处, 完全相干、 $\delta = 1.1 \text{ mm}$ 、 $\delta = 0.83 \text{ mm}$ 的 Airy 光强理论模拟; 图 4(j), (k), (l) 分别是对应图 4(g), (h), (i) 条件的 Airy 光强实验结果. 从理论模拟和实验结果可以看出, 部分相干 Airy 光束的主瓣也具有无衍射的性质, 而且 Airy 光束的相干度越高, 其主瓣和旁瓣的光强分布越清楚,


 图3 一维 Airy 光束的自由空间传输截面光强 (a) 完全相干; (b) $\delta = 1.1$ mm; (c) $\delta = 0.83$ mm

 图4 Airy 光束的自由空间传输光强 传输距离 (a)—(f) $z = 0.1$ m, (g)—(l) $z = 0.2$ m; (a)—(c) 和 (g)—(i) 为理论模拟; (d)—(f) 和 (j)—(l) 为实验结果; (a), (d), (g), (j); 完全相干; (b), (e), (h), (k) $\delta = 1.1$ mm; (c), (f), (i), (l) $\delta = 0.83$ mm

在自由空间传输中, Airy 形状的光强分布越好, 无衍射距离越大, 这与图 3 的模拟和实验光强图结果一致.

我们重点对不同相干度的部分相干 Airy 光束在自由空间中传输的偏移量进行了详细研究, 实验测得偏移量随传输距离的结果如图 5 所示, (a)—

(c) 分别为完全相干、 $\delta = 1.1 \text{ mm}$ 、 $\delta = 0.83 \text{ mm}$ 的实验测量点和理论拟合曲线, 其结果基本符合横向上的恒定加速运动. (d) 为 (a)—(c) 三条拟合曲线的对比, 可以直观的看出 Airy 光束的偏移量与相干长度有关, 相干长度越大, 偏移量也越大.

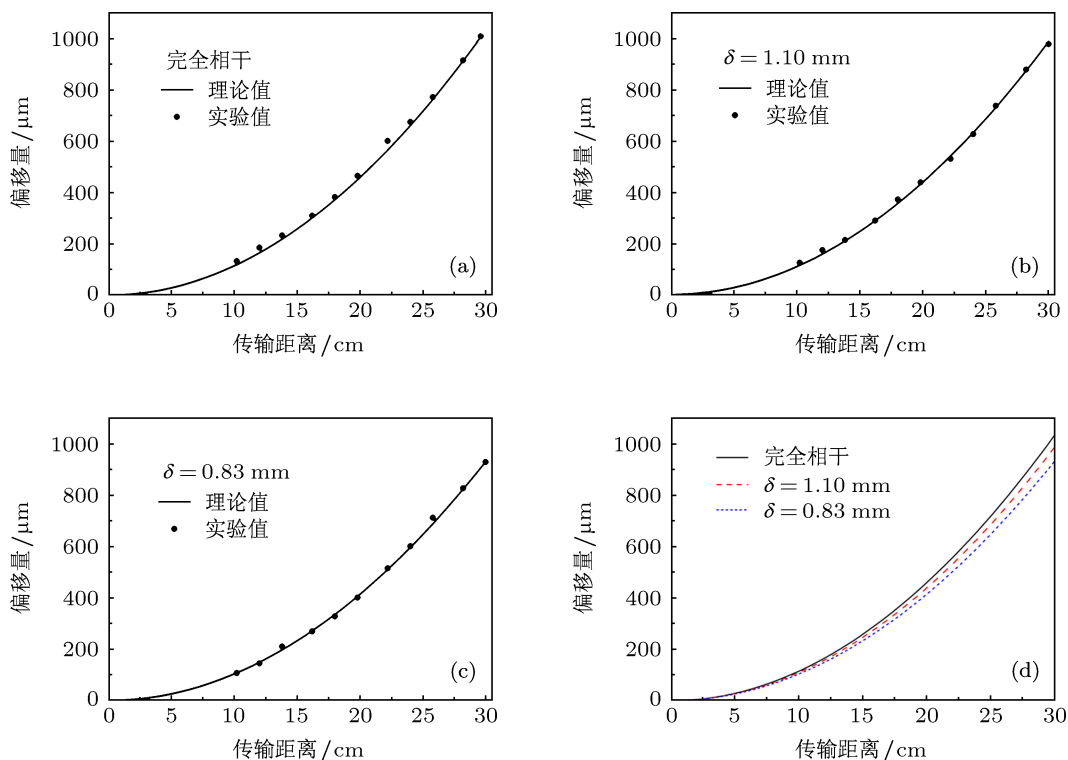


图 5 部分相干 Airy 光束传输的偏移量 (a) 完全相干; (b) $\delta = 1.1 \text{ mm}$; (c) $\delta = 0.83 \text{ mm}$

4 结 论

本文从理论模拟和实验测量两方面分析和验证了部分相干 Airy 光束的传输性质. 结果表明, 部分相干 Airy 光束在自由空间传输也有无衍射和横向的自由加速的性质, 而且随着传输距离的增加, 其光强分布会由主瓣向旁瓣转移. 随着相干度降

低, 部分相干 Airy 光束在自由空间传输时, 主瓣光强衰减加快, 最大无衍射距离和传输时横向的偏移量减小. 这是由于部分相干 Airy 光束的表达式中, a_0 决定 Airy 光束随传输变化的形状变化和加速度, a_0 越小 (δ 越大), 在传输过程中的形状保持越完好, Airy 光束形状同时也决定了它偏转的特性.

- [1] Berry M V, Balazs N L 1979 *Am. J. Phys.* **47** 264
- [2] Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, Christodoulides D N 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 213901
- [3] Ido Kaminer, Rivka Bekenstein, Jonathan Nemirovsky, Mordechai Segev 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 163901
- [4] John Broky, Georgios A. Siviloglou, Aristide Dogariu, Demetrios N 2008 *Optics Express* **16** 12880

- [5] Fan D D, Zhang Q A, Cheng Z M, Zheng W T, Wu F T 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 164103 (in Chinese) [范丹丹, 张前安, 程治明, 郑维涛, 吴逢铁 2012 物理学报 **61** 164103]
- [6] Ren Z J, Wu Q, Zhou W D, Wu G Z, Shi Y L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 174207 (in Chinese) [任志君, 吴琼, 周卫东, 吴根柱, 施逸乐 2012 物理学报 **61** 174207]
- [7] Demetrios N, Christodoulides 2008 *Nature Photonics* **2** 652

- [8] Zheng Z, Zhang B F, Chen H, Ding J P, Wang H T 2011 *Applied Optics* **50** 43
[9] Carvalho M I, Facão M 2010 *Optics Express* **18** 21938
[10] Guo L, T Z L, Liang C Q, Tan Z L 2010 *Chinese Optics Lett.* **8** 520
[11] Li J H, Lü B D 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 074205 (in Chinese) [李晋红, 吕百达 2011 物理学报 **60** 074205]
[12] He X M, Lü B D 2011 *Chin. Phys. B* **20** 094210
[13] Wu J 1990 *Mod. Opt.* **37** 671
[14] Starikov A, Wolf E 1982 *JOSA* **72** 923
[15] He Q S, Jari Turunen 1988 *Optics Communications* **14** 245
[16] Morris J E, Mazilu M, Baumgartl J, Čižmár T, Dholakia K 2009 *Optics Express* **17** 13236

Investigation on partially coherent Airy beams and their propagation^{*}

Cui Sheng-Wei Chen Zi-Yang Hu Ke-Lei Pu Ji-Xiong[†]

(Department of Information Science & Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

(Received 26 October 2012; revised manuscript received 23 November 2012)

Abstract

Based on the cross-spectral density function of Gaussian Shell-Model and Huygens integral, the expression of partially coherent Airy beam was derived. The non-diffraction and acceleration characteristics of partially coherent Airy beam were theoretically studied and experimentally observed. The experimental observation was consistent with the theoretical prediction. Furthermore, the non-diffraction distance and the transversal acceleration decrease with decreasing coherent length.

Keywords: fourier optics, holography, partially coherence, airy beam

PACS: 42.25.Kb, 42.30.Kq, 42.30.Lr, 42.40.Kw

DOI: 10.7498/aps.62.094205

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60977068, 61178015), and the Key Laboratory of High Power Laser and Physics (Grant No. SG-001102).

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