

孪生光束干涉法测量光源的空间相干性*

满天龙 万玉红[†] 江竹青 王大勇 陶世荃

(北京工业大学, 微纳信息光子技术研究所, 北京 100124)

(北京工业大学应用数理学院, 北京 100124)

(2013年6月6日收到; 2013年6月27日收到修改稿)

定量测定光源空间相干性在部分相干光成像, 非相干全息术及光信息处理领域具有重要的研究价值. 本文基于三角全息干涉光路提出了一种测量光源空间相干性的新方法. 利用三角干涉全息光路系统中分束镜产生的孪生光束进行干涉获得干涉图, 通过调整光源中心位置在写入平面内偏离光轴的量, 改变两孪生光束空间分离量的大小, 采集对应的一系列干涉图, 计算干涉图样的对比度, 从而对光源照明空间的波前上一系列不同距离的点对之间的空间复相干度进行测量. 实验系统光路配置较为简单且不需要使用特殊加工的光学元件. 针对一个准单色的扩展光源设计并进行实验, 结果表明利用文中提出的方法可以准确的测量光源的空间相干性, 实验结果相对于理论计算值的误差仅为3.8%.

关键词: 相干性, 全息干涉, 干涉仪, 光学应用

PACS: 42.25.Kb, 42.40.Kw, 07.60.Ly, 42.40.My

DOI: 10.7498/aps.62.214203

1 引言

了解与测量某一光场的空间相干性在许多实际应用领域中有重要的研究价值. 在光信息处理领域, 需要定量的测定信号光场的空间相干性, 以便实现对于滤波器的优化设计^[1]; 在太阳能收集领域, 为了提高孔径天线的耦合效率, 需要对阳光的空间相干性进行精确的测量^[2-4]; 在激光雷达成像以及自由空间光通信领域, 根据定量测量到的受大气湍流影响的激光或部分空间相干光信号的空间相干性, 可以实现系统的优化设计以提高雷达的探测精度或提高自由空间光通信的通信质量^[5-7]; 此外, 还可以通过测量光场的空间相干性实现全息记录以及全息图的非相干再现^[8-10]. 对于给定线度为 b 的准单色扩展光源, 其发出的光波前经过一段距离的空间传播至某一平面 z . 光源在 z 平面上的空间相干性反映为该平面处光源发出的光波前上提取出的间隔为 Δx 的两个次波源发出的光波之间的相关性. 描述光源空间相干性的具体参数为空间复相

干度, 如果参与干涉的两束光波强度相等, 则空间复相干度的大小等于两个次波源发出的光波之间的干涉图样的对比度, 位相等等于两个次波源发出的光波之间的干涉图样的位相^[11].

现有的测量光源空间复相干度的方法大多基于杨氏双孔干涉仪的基本原理^[12-15], 虽然可以实现空间复相干度的精确测量, 但是这些方法中需要使用一些特殊元件, 如纳米孔径阵列^[12]、横向剪切板^[9,15]或位相掩膜^[16], 限制了这些方法的广泛应用. 本文提出了用于定量测量准单色扩展光源空间复相干度的孪生光束干涉法. 该方法基于三角干涉仪的基本原理, 考察非轴上光源发出的光束经过分束后的两束光波所形成的干涉图样的对比度随光源中心位置的变化, 从而对分波面上间隔不同的两点之间的空间复相干度进行测量. 整个系统光路配置较为简单且不需要使用特殊加工的光学元件.

2 原理与理论分析

三角干涉仪采用一种同轴共路的光路配置^[17],

* 国家自然科学基金项目青年科学基金(批准号: 61107002)、北京工业大学基础研究基金(批准号: X4006111201301)和北京工业大学研究生课程建设(批准号: CR2012-B-010)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: yhongw@bjut.edu.cn

通过特殊的光路结构使入射到干涉仪的光波可以沿顺时针和逆时针两个方向传播. 在干涉仪的出射平面上, 沿顺时针和逆时针两个方向传播的光波具有不同的放大倍率, 且由于是共路传播, 它们彼此之间光程差为零, 故在三角干涉仪的出射平面上可以忽略光源的时间相干性对干涉图样带来的影响, 单纯的分析空间相干性对干涉图样对比度以及相位带来的影响. 反过来, 也可以根据所得干涉图样的特性定量地分析光源空间相干性. 三角干涉仪原理示意如图 1 所示, 一个准单色扩展光源位于 (x, y) 平面上, 其中心位置在 x 方向上相对于光轴的偏移量为 x_0 . 该光源发出的光波在分光棱镜上被等强度的分解为两部分, 且这两部分光波分别按顺时针和逆时针传播 (图中分别用两种不同的虚线标示出了顺时针和逆时针传播的光束), 并在图像采集器 (charge coupled device, CCD) 平面 (x_c, y_c) 上叠加形成干涉图样, 最后用 CCD 将干涉图样记录下来.

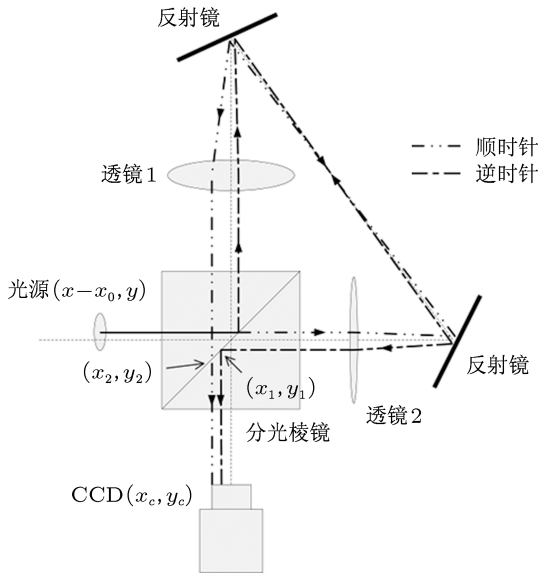


图 1 三角干涉仪原理示意图

这里给出一维情况的具体理论分析, 分析的结果可以直接拓展到二维情形. 假设准单色扩展光源发出光波的复振幅为 $E_0(x-x_0)$, 其中心位置偏移系统光轴 x_0 . 经过分光棱镜后按顺时针和逆时针传播到 CCD 记录平面的两束光波的复振幅分别为 E_{cw} 和 E_{ccw} :

$$\begin{aligned} E_{cw}(x; x_1) &= E_0\left(-\frac{f_2}{f_1}x + x_1\right), \\ E_{ccw}(x; x_2) &= E_0\left(-\frac{f_1}{f_2}x + x_2\right), \end{aligned} \quad (1)$$

其中 f_1 和 f_2 分别为透镜 1 和透镜 2 的焦距, x_1 和 x_2 是按顺时针和逆时针方向传播的光束在分光棱

镜分光平面上相遇时各自的中心位置, 根据几何关系可推导出两中心位置之间的间隔 Δx 为

$$\Delta x = |x_1 - x_2| = \frac{|f_1^2 - f_2^2|}{f_1 f_2} x_0. \quad (2)$$

两光束在 CCD 上叠加形成的干涉图样强度的最大值 $I_{\max}$ 和最小值 $I_{\min}$ 分别为

$$\begin{aligned} I_{\max} &= |E_{cw}|^2 + |E_{ccw}|^2 + 2E_{cw}E_{ccw}|j_{12}|, \\ I_{\min} &= |E_{cw}|^2 + |E_{ccw}|^2 - 2E_{cw}E_{ccw}|j_{12}|, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $|j_{12}|$ 是中心位置相隔 Δx 的两点之间的复相干度的模. 干涉图样对比度 V 根据下式计算:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (4)$$

根据范西特-泽尼克 (Van Cittert-Zernike) 定理^[1], 对于一个均匀的圆形光源, 在如图 1 的光路配置中, 分光棱镜分光平面上两点 x_1 和 x_2 之间的复相干度的模为

$$|j_{12}(x_1, x_2)| = \left| \frac{J_1(v)}{v} \right|, \quad (5)$$

其中

$$v = \frac{\pi b}{\lambda z} \Delta x, \quad (6)$$

其中 $J_1(v)$ 表示一阶贝塞尔函数, b 为光源直径, λ 为中心波长, z 为光源至分光棱镜分光平面的距离. 在实际应用中, 常用空间相干宽度作为具体的参数衡量光源在某一平面上的空间相干性. 空间相干宽度 d_c 定义为 (5) 式所表示的一阶贝塞尔的主瓣宽度的一半, 即 $|j_{12}|$ 第一次下降到零时所对应的两点的空间间隔,

$$d_c = \frac{1.22\lambda z}{b}. \quad (7)$$

通过 (2) 式、(5) 式和 (6) 式可见, 改变入射平面上光源的中心位置 x_0 即可改变两个孪生光束之间的空间距离 Δx , 从而引起复相干度的变化. 通过 (3) 式和 (4) 式可见, 若两孪生光束的振幅 E_{cw} 和 E_{ccw} 相等, 则通过 (4) 式计算的干涉图样的对比度等于复相干度的模 $|j_{12}|$. 实验中, 不断改变 x_0 并计算干涉图样的对比度, 即可实现对光源的空间相干性的测量.

3 实验系统及测量结果

实验光路如图 2 所示, Newport 公司制造的高压电弧灯发出的光经过中心波长 λ 为 532 nm 带宽 $\Delta\lambda$ 为 10 nm 的干涉滤波片后变为单色光. 在光

源的像平面上放置一个直径 b 为 0.1 mm 的针孔, 针孔至分光棱镜反射面的距离 z 为 40 mm, 透镜 1 和透镜 2 的焦距分别为 $f_1 = 150$ mm, $f_2 = 250$ mm. 针孔至透镜 1 和透镜 2 的距离分别为 f_1 和 f_2 , CCD 至透镜 1 和透镜 2 的距离分别为 f_1 和 f_2 , 两透镜的位置关系如图 2 中所示. 将针孔安装在一维精密平移台上, 沿 x 方向改变针孔位置, 并用 CCD 拍摄得到的干涉图样, 图 3 给出不同 Δx 值对应的干涉

图样.

根据原理部分的分析可知, 三角干涉仪消除了光源时间相干性对干涉图样的影响, 所以实验中获得的干涉图样只受到光源空间相干性的影响. 由 (2) 式、(3) 式和 (4) 式可知, 实验中拍摄的干涉图样的对比度即为中心位置相隔 Δx 的两点之间的复相干度的模 $|j_{12}|$. 改变光源的中心位置 x_0 记录多组干涉图样, 并分别按 (2) 式和 (4) 式计算 Δx 与 $|j_{12}|$,

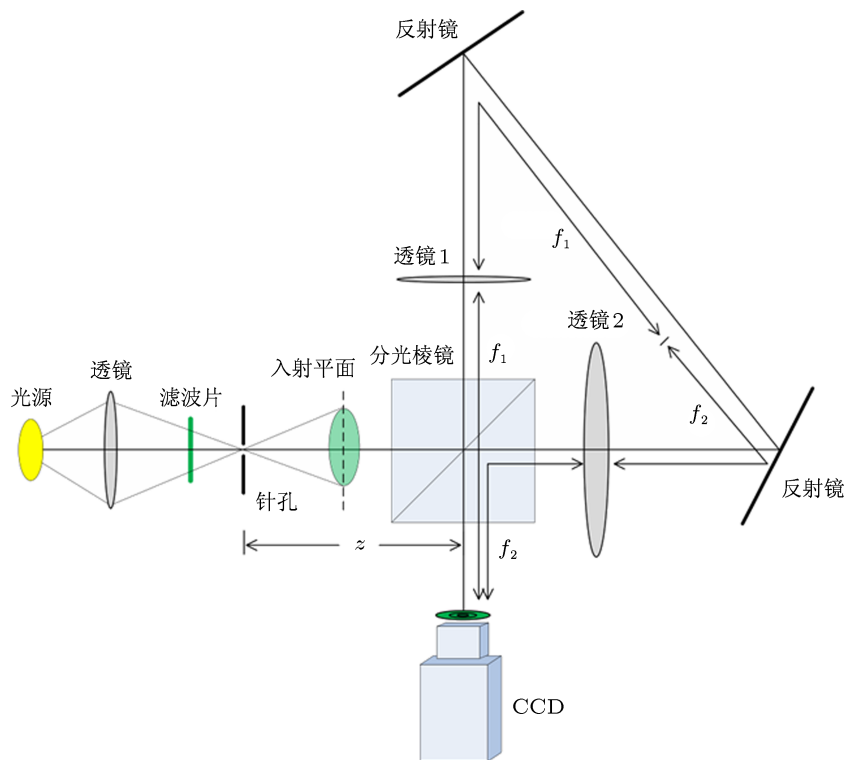


图2 实验光路图

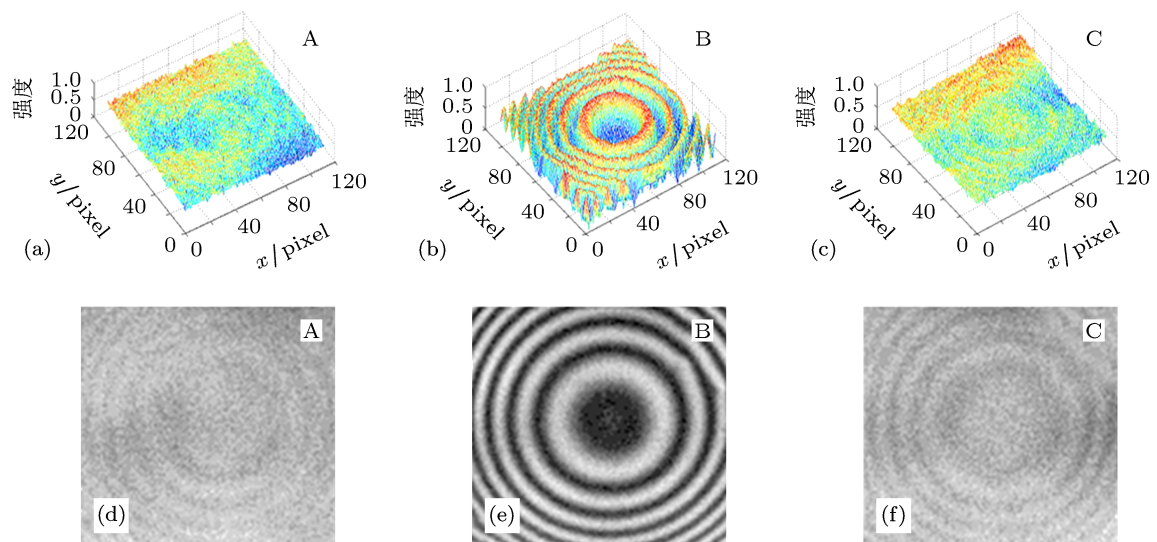


图3 Δx 等于 (a) -0.35 mm; (b) 0.05 mm; (c) 0.35 mm. 时所得干涉图样强度三维分布图; (d)–(f) 给出了对应的干涉图样强度图 (部分放大)

即可测量光源上任意两点的空间复相干度. 图 4 给出了归一化的实验结果与根据 (5) 式所得 $|j_{12}|$ 理论值比较结果 (其中用 * 标示实验值, 曲线为理论计算值).

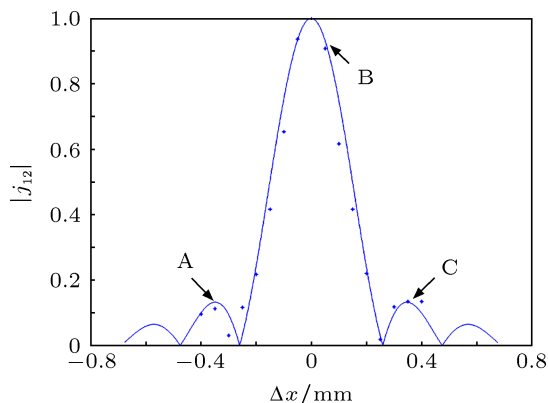


图 4 准单色扩展光源复相干度测量实验结果与理论计算对照图

由图 4 可知实验中所测得的准单色扩展光源的空间相干宽度是 0.27 mm, 根据 (7) 式计算的空间相干宽度 d_c 为 0.26 mm, 实验结果相对于理论计

算值的误差为 3.8%. 在实验中采用精密度更高的平移台并缩小数据采集间隔可以进一步减小该误差, 使测量精度更高.

4 结 论

本文提出了一种基于三角干涉仪光路产生孪生光束的用于定量测量光源空间相干性的方法. 改变光源相对于系统光轴的中心位置, 产生两个空间分离的孪生光束, 通过分析干涉图样的对比度可得出空间复相干度的大小. 该方法光路配置较为简单, 且不需要特殊加工的光学元件, 可以较为简单的在实验室中实现. 实验与理论分析的对比结果表明, 利用本文提出的方法可以精确测得光源的空间复相干度. 利用本文提出的方法获得的光源的空间复相干度, 可以进一步用来优化光学信息处理或太阳能收集等领域中的系统元件设计. 此外, 定量的测量光源的空间相干性在非相干全息成像领域也有很大的应用价值.

- [1] Zhuang S L, Yu F T S 1982 *Appl. Opt.* **21** 2587
- [2] Heylall M, Jeffrey M G 2011 *Opt. Lett.* **36** 900
- [3] Winston R, Sun Y, Littlejohn R G 2002 *Opt. Commun.* **207** 41
- [4] Agarwal G S, Gbur G, Wolf E 2004 *Opt. Lett.* **29** 459
- [5] Ji X L, Xiao X, Lü B D 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3996 (in Chinese) [季小玲, 肖希, 吕百达 2004 物理学报 **53** 3996]
- [6] Ji X L, Huang T X, Lü B D 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 978 (in Chinese) [季小玲, 黄太星, 吕百达 2006 物理学报 **55** 978]
- [7] Eyyuboglu H T 2005 *Opt. Commun.* **245** 37
- [8] Takeda M, Wang W, Duan Z H, Miyamoto Y 2005 *Opt. Express* **13** 9629
- [9] Naik D N, Ezawa T, Miyamoto Y, Takeda M 2009 *Opt. Express* **17** 10633
- [10] Naik D N, Ezawa T, Singh R K, Miyamoto Y, Takeda M 2012 *Opt. Express* **20** 19658
- [11] Born M, Wolf E 1999 *Principle of Optics* (Seventh Edition) (London: Cambridge University Press) p472
- [12] Iaconis C, Walmsley I A 1996 *Opt. Lett.* **21** 1783
- [13] Santarsiero M, Borghi R 2006 *Opt. Lett.* **31** 861
- [14] González A I, Mejía Y 2011 *J. Opt. Soc. Am. A* **28** 1107
- [15] Mashaal H, Goldstein A, Feuermann D, Jeffrey M G 2012 *Opt. Lett.* **37** 3516
- [16] Cho S, Alonso M A, Brown T G 2012 *Opt. Lett.* **37** 2724
- [17] Gray C 1966 *J. Opt. Soc. Am.* **56** 1513

Measurement of the spatial coherence of extended light source by twin beams-interference method*

Man Tian-Long Wan Yu-Hong[†] Jiang Zhu-Qing Wang Da-Yong Tao Shi-Quan

(*Institute of Information Photonics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*)

(*College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*)

(Received 6 June 2013; revised manuscript received 27 June 2013)

Abstract

The coherence of light source have been employed in many aspects, such as optical processing and optical coherence holography. For this reason it has attracted vast interest in developing quantitative methods for measuring the spatial coherence characteristics of an optical field. We propose a novel method for measuring the spatial coherence degree of optical fields based on the triangular interferometer. Spatially separated twin beams are formed by an interferometer, and the interferogram formed by the twin beams is captured by an image detector. Because the separation of the twin beams is related to the coordinate position of the input beam, a series of positions are sampled by moving a pinhole and corresponding interference patterns are recorded. Then the visibilities of the interference patterns are calculated for measuring the spatial coherence degree. Experimentally measured and theoretically calculated values of spatial coherence degree fit well. The measurement error is 3.8%. Experimental results show the method proposed here is effective, simple, and robust without any special optical elements.

Keywords: coherence, holographic interferometry, interferometers, optical applications

PACS: 42.25.Kb, 42.40.Kw, 07.60.Ly, 42.40.My

DOI: 10.7498/aps.62.214203

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61107002), the Basic Research Foundation of Beijing University of Technology, China (Grant No. X4006111201301), and the Graduate Course Construction Foundation of Beijing University of Technology (Grant No. CR2012-B-010).

[†] Corresponding author. E-mail: yhongw@bjut.edu.cn