

基于 Matlab 仿真算法的光源空间相干性研究

王帆, 张永安, 阳胜, 郭胤初, 张亚萍

昆明理工大学理学院, 云南 昆明 650500

摘要 以杨氏双缝实验为基础, 探究了光源空间相干性对干涉的影响情况。首先将光源空间展宽问题等效为平行光照射具有宽度的双缝的问题, 再将两缝近似为离散化的多次光源点阵列, 每相邻点间距非常微小。从光矢量叠加原理出发推导出一种算法, 该算法以两缝中每一对次光源点作为干涉单元, 分别求出各单元在每一个观测点处的干涉光强, 再对所有单元的干涉光强线性叠加, 算出观测点的总光强。最后利用 Matlab 模拟出不同缝宽下, 单色平行光、高斯光谱、矩形光谱分别垂直照射双缝时的光强分布情况。通过模拟结果的对比发现, 双缝展宽对条纹衬比度的影响远甚于光谱展宽。所提算法简化了计算过程, 也极大地提高了程序运行速度。

关键词 物理光学; 空间相干性; 杨氏干涉; 双缝展宽; Matlab 仿真

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.092601

Research on Spatial Coherence of Light Source Based on Matlab Simulation Algorithm

Wang Fan, Zhang Yongan, Yang Sheng, Guo Yinchu, Zhang Yaping

School of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China

Abstract The influence of spatial coherence of light source on interference is explored on the basis of Young's double-slit experiment. Firstly, the spatial broadening problem of light source is equivalent to the problem of double-slit with width illuminated by parallel light. Then the double-slit is approximated to multiple secondary light source point arrays with discretization in which the distance of adjacent points is extremely tiny. An algorithm is deduced based on the principle of wave vector superposition. In this algorithm, each pair of secondary light source points in double-slit is designed as an interference unit. The interference light intensity for each unit at each observation spot of view plane is calculated, respectively. Then, the interference intensity of all the units is linearly superimposed, and the total light intensity of the observation point is calculated. Finally, we use Matlab to simulate the light intensity distribution when the double-slit is vertically illuminated by monochromatic parallel light, Gauss spectrum and rectangle spectrum with different slit widths, respectively. Comparison of simulated results shows that the influence of the double-slit broadening on stripe contrast is much greater than that of the spectrum broadening. The proposed algorithm simplifies computed process and raises program operating speed remarkably.

Key words physical optics; spatial coherence; Young's interference; double-slit broadening; Matlab simulation

OCIS codes 260.3160; 030.1670; 200.4740

1 引言

对于经典的干涉实验, 包括分波前干涉(如杨氏双缝实验)和分振幅干涉(如迈克耳孙干涉仪), 绝大部分光学著作, 如文献[1-2], 已从理论上推导出准单色光(相干光)所形成的干涉条纹的光强分布。对实验中无法避免的光源光谱扩展和空间扩展也有了成熟的理论依据^[1-2], 即光场的时间相干性和空间相干性^[3-5]。

收稿日期: 2017-04-18; **收到修改稿日期:** 2017-05-02

基金项目: 国家自然科学基金(61007061, 61565010)

作者简介: 王帆(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事全息技术在增强现实技术中的应用方面的研究。

E-mail: phy_wangfan@163.com

导师简介: 张亚萍(1978—), 女, 博士, 教授, 主要从事计算全息及其三维显示方面的研究。

E-mail: yapingzhang11@qq.com(通信联系人)

由于光源的光谱相干度违反定标定律,因此在干涉场中会引起光谱变化^[6-16]。大量理论和实验表明,在多色空间相干会聚球面波的焦点区域内振幅等于零的点附近会发生剧烈的光谱变化,这被称为光谱奇异现象^[17-20]。James 等^[11]提出干涉场中光谱变化可能受缝的宽度影响,缝太宽会导致干涉现象消失,太窄会出现理想的干涉条纹,而不会发生光谱变化。陈子阳等^[19]进一步证实了光源光谱宽度、双缝宽度等参量都是影响光谱奇异现象的重要因素,并分析了这些因素对光谱奇异现象影响的程度和趋势^[20]。

由于光源空间大小对干涉现象中的影响(空间相干性)已有完整的理论推导和公式,所以在著作或论文中,都少有对空间相干性的进一步研究和仿真模拟。然而,光源的空间相干性问题是影响干涉场光谱变化的重要因素,光场的空间相干性分布也是单色 LED 的必要研究内容^[21]。随着激光技术的发展,人们已经能够实现极好的单色光,而且根据模拟光谱展宽的仿真结果^[22],以现有激光技术所具有的光谱宽度可近乎完全忽略光谱宽度对干涉的影响。因此,本文主要阐述光场的空间相干性对干涉影响的研究方法和仿真结果。

对于空间相干性的研究可以采用全息干涉测量法^[23],而本文以杨氏双缝实验(分波前)作为干涉对象对光源空间相干性展开研究。在现有著作对杨氏双缝干涉的阐述中,对空间相干性的论证都是基于理想双缝时的光源空间扩展。为了符合更广泛的干涉现象(分振幅),本研究转变着眼点(以单色平行光垂直照射具有空间展宽的双缝)进行空间相干性的研究。根据惠更斯原理,可以将有宽度的缝视为若干个次光源点,也就是说具有空间展宽的光源发出的光场在观察平面上相互叠加而发生干涉。进一步地,从光场矢量叠加的第一性原理出发,理论导出光强标量相加的表达式,并结合计算机编程的迭代法和递推法的思想,提出一种易于编程和快速运算的算法,利用 Matlab 对杨氏干涉实验进行仿真模拟。其结果直观地展示了不同缝宽下干涉条纹的光强分布和条纹衬比度,同时也形象地比较了光谱展宽和双缝展宽对条纹的影响大小。

2 原理与模型分析

2.1 算法原理推导

根据波矢叠加原理, \mathbf{E}_1 和 \mathbf{E}_2 两列光波在观察平面上 x 点叠加后的光场分布为 $\mathbf{E}(x, t) = \mathbf{E}_1(x, t) + \mathbf{E}_2(x, t)$, 其光强为

$$I_{12} = (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2)^2 = \mathbf{E}_1^2 + \mathbf{E}_2^2 + \mathbf{E}_1^* \cdot \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2^* \quad (1)$$

如图 1 所示,假设一束平行光垂直照射理想双缝,将理想双缝 X_1 、 X_2 视为两个次光源点,则 $\mathbf{E}_1(x, t)$ 和 $\mathbf{E}_2(x, t)$ 可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{E}_1(x, t) = \mathbf{E}_{10} \cdot \cos(k_1 r_1 - \omega_1 t + \varphi_{10}) \\ \mathbf{E}_2(x, t) = \mathbf{E}_{20} \cdot \cos(k_2 r_2 - \omega_2 t + \varphi_{20}) \end{cases} \quad (2)$$

若不考虑光源的非单色性,设定 $\mathbf{E}_{10} = \mathbf{E}_{20} = e\sqrt{I_0}$, $k_1 = k_2 = k$, $\omega_1 = \omega_2$, $\Delta\varphi = \varphi_{10} - \varphi_{20}$ 恒定(可设为恒等于零),则 x 点的光强可表示为

$$I_{12}(x) = 2I_0 + 2I_0 \cdot \cos(k \cdot \Delta), \quad (3)$$

式中光程差 $\Delta = r_1 - r_2$, r_1, r_2 分别为缝 X_1, X_2 到观测点 X_m 的光程。

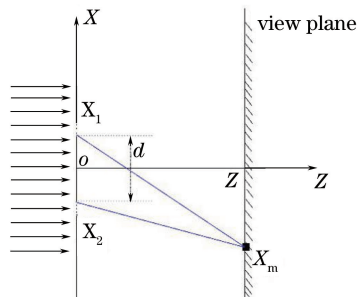


图 1 杨氏干涉实验示意图

Fig. 1 Diagrammatic drawing of Young's interference experiment

以上推论是基于理想情况下双缝的干涉光场和光强的分布情况,而在实际过程中,双缝总是具有一定的宽度。惠更斯原理指出,每一个球面波都可视为一个次光源,从而产生下一级光波传播到更远处。因此,同

样可以将有宽度的双缝视为由无数多个点组成的次光源点阵列。考虑平行光垂直照射非理想双缝,实质上是将光源的空间展宽问题转化为双缝的展宽问题。

图 2(a)所示为分别具有两个次光源点的双缝,每相邻两个点的间距为一微小定值,设为 d_0 。每一个次光源点在观察屏上 x 处的波矢分别为 $\mathbf{E}_1(x)$ 、 $\mathbf{E}_2(x)$ 、 $\mathbf{E}_{1'}(x)$ 、 $\mathbf{E}_{2'}(x)$ 。那么,根据波矢量叠加原理, x 处合矢量为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_{1'} + \mathbf{E}_{2'}, \quad (4)$$

类比(1)式,其光强为

$$I = \mathbf{E}^2 = (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_{1'} + \mathbf{E}_{2'}) \cdot (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_{1'} + \mathbf{E}_{2'})^*。 \quad (5)$$

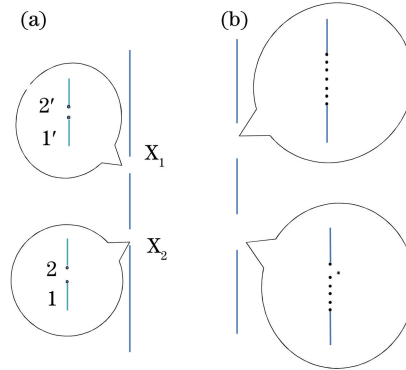


图 2 双缝次光源点阵列离散化放大示意图

Fig. 2 Enlarged diagrammatic drawing of the secondary light point array with discretization of the double-slit

因为波矢可用三角函数表述,故合并共轭项,(5)式展开为

$$I = \mathbf{E}_1^2 + \mathbf{E}_2^2 + \mathbf{E}_{1'}^2 + \mathbf{E}_{2'}^2 + 2\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 + 2\mathbf{E}_{1'} \cdot \mathbf{E}_{2'} + 2\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_{1'} + 2\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_{2'} + 2\mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{E}_{1'} + 2\mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{E}_{2'}, \quad (6)$$

继续对(6)式进行整理,有

$$I = \mathbf{E}_1^2 + 2\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_{1'} + \mathbf{E}_{1'}^2 + \mathbf{E}_2^2 + 2\mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{E}_{2'} + \mathbf{E}_{2'}^2 + 2\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 + 2\mathbf{E}_{1'} \cdot \mathbf{E}_{2'} + 2\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_{2'} + 2\mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{E}_{1'}, \quad (7)$$

式中 $\mathbf{E}_1(x)$ 、 $\mathbf{E}_2(x)$ 、 $\mathbf{E}_{1'}(x)$ 、 $\mathbf{E}_{2'}(x)$ 分别可表示(不考虑时间响应)为

$$\begin{cases} \mathbf{E}_1(x) = \mathbf{E}_{10} \cos(kr_1), \mathbf{E}_2(x) = \mathbf{E}_{20} \cos(kr_2) \\ \mathbf{E}_{1'}(x) = \mathbf{E}_{1'0} \cos(kr_{1'}), \mathbf{E}_{2'}(x) = \mathbf{E}_{2'0} \cos(kr_{2'}) \end{cases} \quad (8)$$

由于相邻次光源点间距 d_0 非常微小,在此作光程近似

$$r_1 \approx r_2, r_{1'} \approx r_{2'}. \quad (9)$$

又因为平行光照射,4 个点的振幅相等,即

$$\mathbf{E}_{10} = \mathbf{E}_{20} = \mathbf{E}_{1'0} = \mathbf{E}_{2'0} = e \sqrt{I_0}, \quad (10)$$

所以,可近似看作

$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{E}_2, \mathbf{E}_{1'} = \mathbf{E}_{2'}. \quad (11)$$

将(11)式代入(7)式中,(7)式中 $2\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 + 2\mathbf{E}_{1'} \cdot \mathbf{E}_{2'}$ 可变换为 $\mathbf{E}_1^2 + \mathbf{E}_2^2 + \mathbf{E}_{1'}^2 + \mathbf{E}_{2'}^2$,所以(7)式再变形为

$$I = \mathbf{E}_1^2 + 2\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_{1'} + \mathbf{E}_{1'}^2 + \mathbf{E}_2^2 + 2\mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{E}_{2'} + \mathbf{E}_{2'}^2 + \mathbf{E}_1^2 + 2\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_{2'} + \mathbf{E}_{2'}^2 + \mathbf{E}_2^2 + 2\mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{E}_{1'} + \mathbf{E}_{1'}^2, \quad (12)$$

对上式每三项按完全平方方式合并为

$$I = (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_{1'})^2 + (\mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_{2'})^2 + (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_{2'})^2 + (\mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_{1'})^2, \quad (13)$$

类比(1)式,(13)式可化简为

$$I = I_{11'} + I_{22'} + I_{12'} + I_{21'}, \quad (14)$$

式中 $I_{11'}$ 代表 X_1 缝的点 1 与 X_2 缝的点 $1'$ 在观察屏上 x 处干涉后的光强,其余三项以此类推。

以上推论表明双缝中所有点在 x 处的干涉结果(光场之和的模方)等效于每一对次光源点分别干涉后的光强线性叠加。每一对次光源点中的两个点分别来自于两个缝,而不属于同一缝中。

将(14)式进一步按照(3)式展开,有

$$I = 8I_0 + 2I_0 [\cos(k \cdot \Delta_{11'}) + \cos(k \cdot \Delta_{22'}) + \cos(k \cdot \Delta_{12'}) + \cos(k \cdot \Delta_{21'})], \quad (15)$$

式中 $\Delta_{11'}$ 为点 1 和点 1' 到 x 处的光程差, 其余三项以此类推。上式中后 4 项为光波叠加的干涉项光强, 第一项为次光源点直射的本底光强。但由于模型中每一个光源点都将会被叠加两次, 所以最终结果需要加以修正为

$$I = \frac{1}{2} \{8I_0 + 2I_0 [\cos(k \cdot \Delta_{11'}) + \cos(k \cdot \Delta_{22'}) + \cos(k \cdot \Delta_{12'}) + \cos(k \cdot \Delta_{21'})]\}, \quad (16)$$

即

$$I = 4I_0 + I_0 [\cos(k \cdot \Delta_{11'}) + \cos(k \cdot \Delta_{22'}) + \cos(k \cdot \Delta_{12'}) + \cos(k \cdot \Delta_{21'})]. \quad (17)$$

如图 2(b) 所示, 将每一个缝的次光源点数量增加到 N 个 (两个缝的展宽相同, 光源点数量相同), 则 x 处的波矢量之和为 $\mathbf{E}(x) = \sum_{n=1}^N \mathbf{E}_n$, x 处总光强为

$$I = \left| \sum_{n=1}^N \mathbf{E}_n \right|^2. \quad (18)$$

按照上述推导, 并按照 (17) 式的形式, I 可写为

$$I = 2NI_0 + \frac{2I_0}{N} \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N \cos(k \cdot \Delta_{p,q}), \quad (19)$$

式中 p 为 X_1 缝的光源点, q 为 X_2 缝的光源点。

综上所述, 对于光源空间相干性问题, 先将问题的核心转化到平行光照射具有展宽的双缝上, 其次利用两步近似法 (次光源点离散化、同一缝中次光源点光程近似相等) 将干涉的光场矢量相加问题转化为每一对光源点相互干涉的光强标量相加问题, 如 (19) 式所示。这极大地简化了运算步骤, 也为计算机编程实现模拟结果提供了快速的运算方法, 因为对 (18) 式的编程难度以及运算时间远远超过了 (19) 式。

因此, 基于上述所有推导和证明, 以 (19) 式为理论基础, 通过 Matlab 仿真实现了双缝展宽对干涉影响的模拟结果。

2.2 仿真模型

按照 2.1 节所述理论推导模拟的杨氏双缝干涉实验参数包括: 缝屏距 $z = 1.5$ m, 单色平行光波长 $\lambda_0 = 632.8$ nm, 缝间距 $d = 1.5$ mm, 相邻次光源间隔 $d_0 = 0.01$ mm。设缝宽为 D , 则次级光源点数量为

$$N = D/d_0 + 1, \quad (20)$$

模拟结果包括缝宽 $D = 0.05, 0.1, 0.2$ mm 的干涉条纹光强和条纹衬比度。

两缝 X_1, X_2 都沿着 X 平面 (图 1) 分别向 X 正向和 X 负向展宽, 每个次级光源点的 X 向坐标分别为 $X_1(p), X_2(q)$ 。那么, 两次光源点到观测点 x 的光程差为

$$\Delta_{p,q} = \sqrt{[x - X_1(p)]^2 + z^2} - \sqrt{[x - X_2(q)]^2 + z^2}. \quad (21)$$

设平行光光强 $I_0 = 1$, 则观测点 x 处的光强为

$$I(x) = 2N + \frac{2}{N} \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N \cos(k \cdot \Delta_{p,q}). \quad (22)$$

对于非单色平行光垂直照射有宽度的双缝时, 依据 (22) 式先算出每一个波长 (单色光, 具有相干性) 透过双缝后, 所有次光源点在观测点 x 处的光强之和。对于不同波长的光 (非相干) 按照上述过程分别计算出在 x 处的光强, 然后再求和, 得到多色光经过有宽度双缝后在观测点 x 处的总光强, 从而再推广至整个观察平面的光强分布。本研究分别模拟了高斯光谱和矩形光谱在不同缝宽下的干涉情况。高斯光谱和矩形光谱的能量分布如图 3 所示, 二者中心波长均为 $\lambda_0 = 632.8$ nm。

3 模拟结果与讨论

3.1 单色光, 双缝展宽干涉条纹光强

单色平行光透过理想双缝时形成的条纹是理想干涉条纹, 其衬比度应恒定为 1。图 4(a)、(b)、(c) 分别显示了缝宽为 0.05, 0.1, 0.2 mm 的干涉条纹光强分布。根据结果可知, 当双缝有一维宽度时, 所形成的亮纹

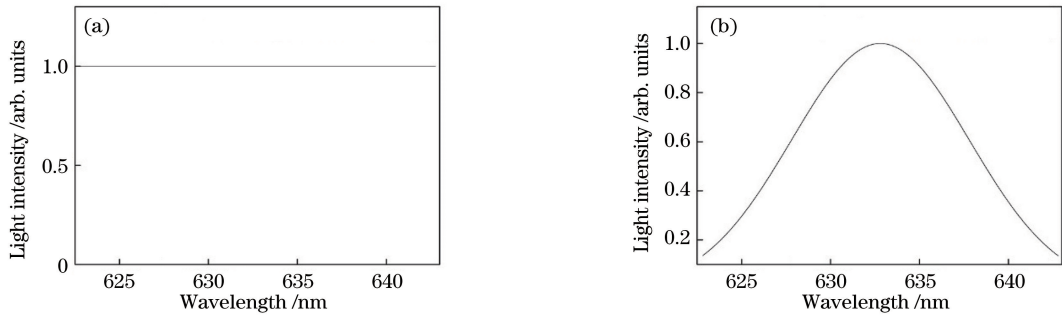


图3 (a)矩形光谱和(b)高斯光谱的光强分布

Fig. 3 Light intensity distribution of (a) rectangular spectrum and (b) Gauss spectrum

光强会非常明显地向两侧衰减。对比图4(a)、(b)、(c)可以发现,缝宽每增大一倍,其亮纹衰减速度便会急剧加快。图4(d)为三种缝宽下的条纹衬比度整合图,从中也可看出,条纹衬比度由缝宽所引起的差异是非常显著的。由此可以推演,当缝宽继续增大,不仅条纹可识别范围缩小,而且中央条纹衬比度也逐渐衰退直至完全趋于零,即整个观察平面上不再出现条纹,稳态干涉消失。

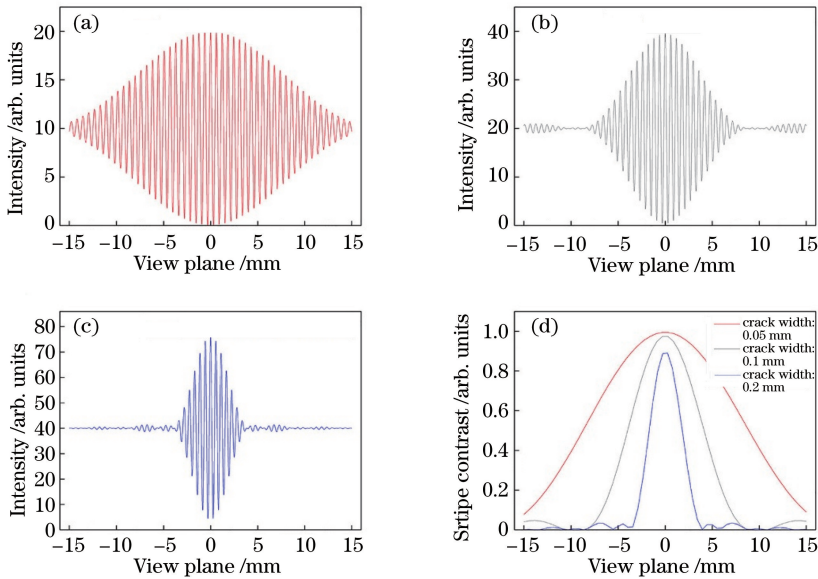


图4 双缝一维展宽下的干涉条纹光强。(a)缝宽为0.05 mm;(b)缝宽为0.1 mm;(c)缝宽为0.2 mm;(d)条纹衬比度

Fig. 4 Interference stripe intensity by the double-slit broadening with 1D.

(a) Crack width is 0.05 mm; (b) crack width is 0.1 mm; (c) crack width is 0.2 mm; (d) stripe contrast

图4(a)、(b)、(c)中单缝的次光源数量分别为 $0.05/0.01=5$, $0.1/0.01=10$, $0.2/0.01=20$ 个。每一个次光源点的光强为1,所以两个缝总共引起的本底光强为 I_0 (a)=10, I_0 (b)=20, I_0 (c)=40。在图中表现为条纹光强的平均值。如果在模拟中将次光源间隔 d_0 设定为更小值,那么同一种缝宽的次光源点便会随之增多,进而引起条纹光强的平均值增大。实际干涉仪中双缝的宽度总是连续的,理论上应存在无数多个次光源点,而在计算模拟过程中只能取有限数量。然而,这种由于次光源采集数量的不同而引起的本底光强变化,并不会导致条纹衬比度的变化。因此,本研究的理论模型和计算方法能够在一定精度内准确地描述出双缝展宽对干涉条纹的影响情况。

3.2 非单色光,双缝展宽干涉条纹

在单色光照射具有宽度的双缝的模拟基础上,本节将杨氏干涉实验进一步向实际拓展。图5(a)、(b)分别展示了矩形光谱展宽为20 nm和40 nm的平行光照射在0.05 mm的双缝上的条纹光强分布,图5(c)、(d)分别展示了高斯光谱半峰全宽为5 nm和10 nm的平行光照射在0.05 mm的双缝上的条纹光强分布。图5(e)和(f)分别展示了在0.05 mm缝宽下,矩形光谱展宽20,40 nm与单色光的条纹衬比度和高斯光谱半峰全宽为5,10 nm与单色光的条纹衬比度。

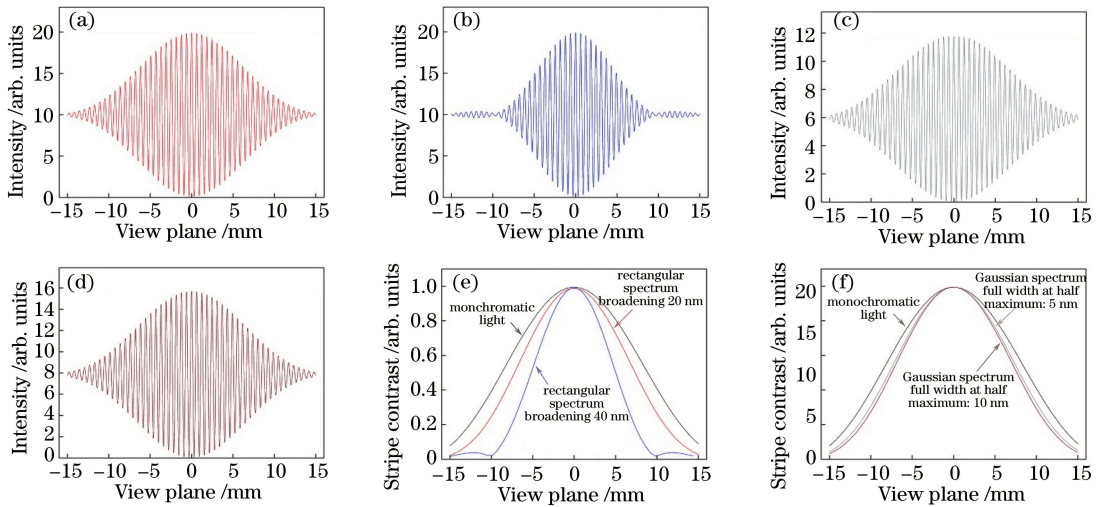


图 5 0.05 mm 双缝宽度下矩形光谱与高斯光谱干涉图样对比。(a)矩形光谱展宽为 20 nm;(b)矩形光谱展宽为 40 nm;(c)高斯光谱半峰全宽为 5 nm;(d)高斯光谱半峰全宽为 10 nm;(e)矩形光谱与单色光的条纹衬比度;(f)高斯光谱与单色光的条纹衬比度

Fig. 5 Interference graph contrast between rectangular spectrum and Gaussian spectrum with the double-slit width of 0.05 mm.

(a) Rectangular spectrum with the broadening of 20 nm; (b) rectangular spectrum with the broadening of 40 nm; (c) Gaussian spectrum with full width at half maximum of 5 nm; (d) Gaussian spectrum with the full width at half maximum of 10 nm; (e) stripe contrast of rectangular spectrum and monochromatic light; (f) stripe contrast of Gaussian spectrum and monochromatic light

从图 5(e)、(f)的对比可以发现,在有双缝展宽的情况下,光谱展宽对干涉条纹的影响不甚明显。特别是对于高斯光谱展宽,干涉条纹衬比度的情况没有太大变化。

图 6 给出了缝宽为 0.1 mm 时,两种光谱的干涉情况。由 3.1 节已知,双缝宽度的增大会引起衬比度衰减加剧,而本节通过图 6(e)、(f)容易发现,当缝宽为 0.1 mm 时,光谱展宽对干涉条纹的影响已趋于消失。特别是对于高斯光谱,如图 6(f)所示,单色光、半峰全宽为 5 nm 的高斯光谱、半峰全宽为 10 nm 的高斯光谱的干涉条纹衬比度几乎完全趋于一致。

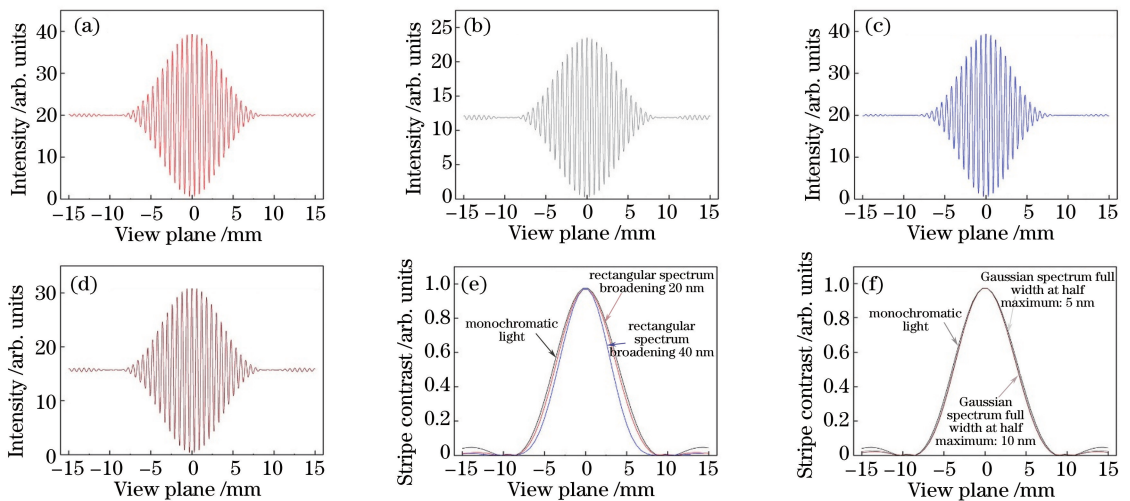


图 6 0.1 mm 双缝宽度下矩形光谱与高斯光谱干涉图样对比。(a)矩形光谱展宽为 20 nm;(b)高斯光谱半峰全宽为 5 nm;(c)矩形光谱展宽为 40 nm;(d)高斯光谱半峰全宽为 10 nm;(e)矩形光谱与单色光的条纹衬比度;(f)高斯光谱与单色光的条纹衬比度

Fig. 6 Interference graph contrast between rectangular spectrum and Gaussian spectrum with the double-slit width of 0.1 mm.

(a) Rectangular spectrum with the broadening of 20 nm; (b) Gaussian spectrum with the full width at half maximum of 5 nm;

(c) rectangular spectrum with the broadening of 40 nm; (d) Gaussian spectrum with the full width at half maximum of 10 nm;

(e) stripe contrast of rectangular spectrum and monochromatic light; (f) stripe contrast of Gaussian spectrum and monochromatic light

4 结 论

本研究从光矢量叠加原理出发,推演出光强线性叠加的计算模型,简化了计算过程,并通过 Matlab 仿真方式模拟出了不同缝宽下,单色平行光和非单色平行光(高斯光谱和矩形光谱)垂直照射双缝的干涉条纹光强分布。模拟结果显示:一定缝宽下,不同光谱展宽对干涉条纹影响甚微;而相同光谱展宽下,不同缝宽对条纹影响却非常显著。数据显示,即便缝展宽相差 0.05 mm,条纹光强也会有较为明显的变化。该结果表明干涉条纹对缝宽的变化响应极为敏锐,双缝展宽对干涉结果的影响远远大于光源的光谱展宽。该结论可以为双缝干涉仪的精度问题提供改善途径,而且可以为光传播中的光谱变化特性等研究课题提供参考。

参 考 文 献

- [1] Lü Naiguang. Fourier optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2016: 185.
吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京:机械工业出版社, 2016: 185.
- [2] Cai Lüzhong. Optics[M]. Beijing: Science Press, 2009: 168-169.
蔡履中. 光学[M]. 北京:科学出版社, 2009: 168-169.
- [3] Zhu Peiping, Tang Esheng, Cui Mingqi. Analyses of spatial coherence of X-ray beam from the synchrotron radiation [J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(2): 49-54.
朱佩平, 唐鄂生, 崔明启. 同步辐射 X 光束空间相干性的物理分析[J]. 光学学报, 1998, 18(2): 49-54.
- [4] Zheng Yuxiang, Chen Liangyao. Morden optics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 220-221.
郑玉祥, 陈良尧. 近代光学[M]. 北京:电子工业出版社, 2011: 220-221.
- [5] Yang Guoguang, Song Feijun. Advanced physics optics[M]. Hefei: University of Science & Technology of China Press, 2008: 52-53.
羊国光, 宋菲君. 高等物理光学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2008: 52-53.
- [6] Pan Liuzhan, Lü Baida. Spectral shifts and spectral switches in Young's experiment at the far zone[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(6): 707-711.
潘留占, 吕百达. 杨氏实验远场的光谱位移和光谱开关[J]. 光学学报, 2003, 23(6): 707-711.
- [7] Pu J, Cai C, Nemoto S. Spectral anomalies in Young's double-slit interference experiment[J]. Optics Express, 2004, 12(21): 5131-5139.
- [8] Kandpal H C, Vaishya J S, Chander R M, *et al.* Field correlations from spectral measurements in Young's interference experiment[J]. Physics Letters A, 1992, 167(2): 120-122.
- [9] Pan L Z, Lü B D. The spectral switch of partially coherent light in Young's experiment[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2001, 37(11): 1377-1381.
- [10] Kandpal H C, Vaishya J S, Chander M, *et al.* Spectral changes due to source correlation in Young's interference experiment[J]. Physics Letters A, 1992, 167(2): 114-119.
- [11] James D F V, Wolf E. Some new aspects of Young's interference experiment [J]. Physics Letters A, 1991, 157(1): 6-10.
- [12] Santarsiero M, Gori F. Spectral changes in a Young interference pattern[J]. Physics Letters A, 1992, 167(2): 123-128.
- [13] Rao Lianzhou, Qu Biao, Chen Ziyang, *et al.* Spectral changes of partially coherent light diffracted by a slit[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(3): 467-471.
饶连周, 渠彪, 陈子阳, 等. 部分相干光经单缝衍射后的光谱变化[J]. 光子学报, 2007, 36(3): 467-470.
- [14] Cai Chao, Pu Jixiong. Phenomena of spectral anomalies of partially coherent light focused by a lens with chromatic aberration[J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(12): 1456-1460.
蔡超, 蒲继雄. 部分相干光被色差透镜聚焦的光谱异常现象[J]. 光子学报, 2004, 33(12): 1456-1460.
- [15] Shu Jianhua, Qu Biao, Zhang Guowen, *et al.* Spectral changes in Young's double-slit interference experiment[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(3): 2316-2320.
舒建华, 渠彪, 张国文, 等. 杨氏双缝实验的光谱变化[J]. 光子学报, 2008, 37(11): 2316-2320.

- [16] Xiao Xi, Lü Baida. Spectral changes in polychromatic Gauss-Schell-model beams passing through a spherically aberrated lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(4): 542-546.
肖 希, 吕百达. 多色高斯-谢尔模型光束通过球差透镜的光谱变化[J]. *光学学报*, 2005, 25(4): 542-546.
- [17] Shu Jianhua, Chen Ziyang, Pu Jixiong. The spectral anomalies in Young's three-pinhole experiment formed by a spatial fully coherent polychromatic wave[J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 2009, 30(4): 399-402.
舒建华, 陈子阳, 蒲继雄. 多色空间相干光经杨氏三孔干涉后的光谱奇异现象[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2009, 30(4): 399-402.
- [18] Hu Xiandai. Study on spectral singularities and spectral switches[D]. Xiaomen: Huaqiao University, 2006.
胡现代. 光谱奇异现象与光谱开关的研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2006.
- [19] Chen Ziyang, Chen Yuan, Liu Xiaoyun, *et al.* Anomalous behaviour of spectrum in Young's double-slit interference experiment[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(5): 695-701.
陈子阳, 陈 媛, 刘晓云, 等. 杨氏双缝干涉实验中的光谱奇异现象[J]. *光学技术*, 2006, 32(5): 695-701.
- [20] Chen Ziyang, Pu Jixiong. Analytical characterization of spectral anomalies in Young's double-slit interference experiment[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(4): 733-737.
陈子阳, 蒲继雄. 杨氏双缝干涉实验中光谱奇异现象的特性分析[J]. *光子学报*, 2007, 36(4): 733-737.
- [21] Lin Huichuan, Tao Hua, He Meng, *et al.* Spatial coherence of high-power single-color LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0323003.
林惠川, 陶 华, 贺 盟, 等. 大功率单色 LED 的空间相干特性[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0323003.
- [22] Wang Liming. Influence of spectral intensity distribution of computer on Young's double slit interference fringes[J]. *Journal of Higher Correspondence Education (Natural Science Edition)*, 2007, 21(5): 45-49.
王立明. 计算机模拟光源的光谱强度分布对杨氏双缝干涉条纹的影响[J]. *高等函授学报(自然科学版)*, 2007, 21(5): 45-49.
- [23] Xie Jianping, Yao Kun, Ming Hai. Measurement of optical coherence with holographic shearing interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 1985, 5(2): 103-106.
谢建平, 姚 焜, 明 海. 全息剪切干涉法测量光场相干性[J]. *光学学报*, 1985, 5(2): 103-106.