

DOI:10.16136/j.joel.2022.08.0158

部分相干光照明正弦振幅光栅偏振成像的研究

李 昊, 胡小英*, 刘文轩, 肖生柱, 聂建林

(西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710032)

摘要: 偏振成像由于其能检测物体偏振信息并可有效抑制背景噪声信号而受到了广泛关注。以往对正弦振幅光栅成像的研究基本都是在完全相干、非相干、或部分相干照明条件下进行,而本文基于偏振相干统一理论,在部分相干照明条件下考虑了光的偏振态,设计了部分相干光照明正弦振幅光栅的偏振成像系统,据此系统得出其斯托克斯(Stokes)频域计算模型,提供了一种计算 Stokes 物像频域关系的方法,通过透射交叉系数来描述其偏振成像系统的频率响应,说明偏振成像系统是非线性的,对光栅像强度中直流分量、基频、二次谐波进行分析研究,给出一组归一化 Stokes 参数下部分相干光照射正弦振幅光栅像面强度图,并利用 MATLAB 绘制出几组不同物体照明相干间隔与成像系统衍射图样大小比率下的 Stokes 像强度图,扩展了正弦轨迹分析在偏振成像系统性能评估中的应用。

关键词: 偏振成像; 正弦振幅光栅; 部分偏振和部分相干光; 偏振相干统一理论

中图分类号: O463.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)08-0858-07

Study on polarization imaging of sinusoidal amplitude grating illuminated by partially coherent light

LI Hao, HU Xiaoying*, LIU Wenxuan, XIAO Shengzhu, NIE Jianlin

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710032, China)

Abstract: Polarization imaging has attracted extensive attention in recent years due to its ability to detect object polarization information and effectively suppress noise signals of background. The previous research on sinusoidal amplitude grating imaging is basically carried out under the conditions of fully coherent, incoherent or partially coherent illumination. While this paper is based on the unified theory of polarization coherence, and it takes the polarization state of light into account under the condition of partially coherent illumination, and designs a partially coherent light's polarization imaging system illuminated by a sinusoidal amplitude grating, according to which the Stokes frequency domain calculation model is obtained, and a method for calculating the frequency domain relationship of the Stokes object image is provided. Also, the frequency response of the polarization imaging system is described by the transmission cross coefficient, the nonlinearity of the polarization imaging system is showed, direct component, the fundamental frequency and the second harmonic in the grating image intensity are analyzed, and a set of normalized Stokes parameters is given, under which the partial coherent light irradiates the sinusoidal amplitude grating on the image plane intensity map, and this paper uses MATLAB to draw several sets of Stokes image intensity maps under the ratio of the illumination coherence interval of the object to the diffraction pattern size of the imaging system are plotted, which extends the application of the sinusoidal trajectory analysis in the performance evaluation of the polarization imaging system.

Key words: polarization imaging; sinusoidal amplitude grating; partially polarized and partially coherent light; unified theory of polarization coherence

* E-mail: 490027874@qq.com

收稿日期: 2022-03-03 修订日期: 2022-04-30

基金项目: 国防基础研究项目(A0920110019)、陕西省重点实验室开放基金(ZSKJ201301)和总装先进制造(51318020303)资助项目

1 引言

成像系统可采用脉冲响应或传递函数描述。自从将传递函数技术引入图像分析以来,已经发展了多种测量传递函数的方法^[1-3]。最流行方法是扫描技术,其涉及正弦光栅图像的傅里叶分析^[4]。鉴于在实际生活中所得到的光并不都是真正意义上的非相干光或者相干光这两种极端情况,更普遍的则是介乎两者之间“部分相干”。如幻灯机、投影仪和显微镜等就属于这类照明系统^[5-7]。从实用角度来看,研究光学系统在部分相干照明下成像问题是很有必要的。

Hopkins 指出,控制物面相干状态的参数由有效光源的大小给出,定义为光源有效大小与物镜的数值孔径之比^[8]。Becherer 和 Parrent、Swing 和 Clay 等学者从检查物体被部分相干光照明系统的传递函数模糊性的角度研究了这个问题。为简单起见,Becherer 和 Swing 都考虑的是一维成像系统,而 Becherer 讨论具有正弦振幅透射率的物体问题。当然,这不是通常“正弦波目标”,而是强度上的正弦波,这是纯粹非相干分析结果^[9-12]。Swing 对具有正弦强度透射率更常见的正弦波目标进行了相同类型分析。国内学者余景池和艾蕾介绍一种部分相干照明条件下,物镜对基频响应表观传递函数的测量方法,但其忽略了物体高次谐波与实际情况还存在偏差。沈志新和何绍宇给出部分相干成像系统表观传递函数与交叉传递函数间关系,指出表观传递函数具有单独描述非线性光学系统本身性质。向阳和向才新研究了散射体的部分相干成像系统,不同于透射交叉系数和表观传递函数,提出了一种“广义光学传递函数”及“广义像质传递准则”^[13-15]。张润南和蔡泽伟等学者总结了从相干到部分相干光场表征和传输模型、从相干光场的相位测量扩展到部分相干光场的相干测量方法,并阐述了基于相干测量的计算成像新方法,及相干测量技术在生物显微、计算成像、光束表征、光学测量、远场被动探测及无透镜成像等领域典型应用^[16]。

在部分相干光照明情况下,偏振成像系统通常是非线性系统,本文利用偏振相干统一理论,设计正弦振幅光栅偏振成像系统,且据此系统建立 Stokes 像的频域数学模型及 Stokes 像的强度分布数学模型,对其透射交叉系数进行分析,给出不同的物体照明相干间隔与成像系统衍射图样大小比率下,各个部分透射交叉系数关系、物体基频的表观传递函数、二次谐波的表观传递函数及一组归一化 Stokes 参数下 4 个方向上的像平面强度分布

情况。

2 成像系统物像光谱关系

图 1 是正弦振幅光栅偏振成像系统成像示意图,为了简化,此处所有处理都限于光源、物体、出瞳和像面的一维变化。 β 平面中非相干光源照亮 ζ 平面中物体。通过成像系统将 ζ 平面成像到 x, y 平面上,其中出瞳在 α 平面中。光源 β 平面与物体 ζ 平面间偏振片 P 和四分之一波片 QWP 用以产生待测偏振光,出瞳 α 平面与像平面间偏振片 P 与四分之一波片 QWP 是用来测量系统中 Stokes 参数的,获取其偏振信息。本文中光源与光栅物体距离用 z_0 表示,出瞳与像面间距离用 z_1 表示,光源传播方向上光轴为 z 轴正方向。

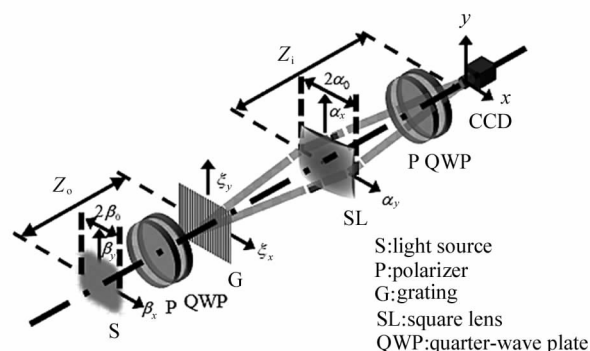


图 1 部分偏振和部分相干光照射正弦振幅光栅成像系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of an imaging system with partially polarized and partially coherent light illuminating a sinusoidal amplitude grating

如图 1 所示,部分相干矢量理论中物面光强度基本量可由广义 Stokes 参数获得:

$$\begin{cases} S_0^{\text{in}}(x_1, x_2) = \langle \tilde{E}_x(x_1, t) \tilde{E}_x^*(x_2, t) + \tilde{E}_y(x_1, t) \tilde{E}_y^*(x_2, t) \rangle \\ S_1^{\text{in}}(x_1, x_2) = \langle \tilde{E}_x(x_1, t) \tilde{E}_x^*(x_2, t) - \tilde{E}_y(x_1, t) \tilde{E}_y^*(x_2, t) \rangle \\ S_2^{\text{in}}(x_1, x_2) = \langle \tilde{E}_x(x_1, t) \tilde{E}_x^*(x_2, t) + \tilde{E}_y(x_2, t) \tilde{E}_y^*(x_1, t) \rangle \\ S_3^{\text{in}}(x_1, x_2) = \langle i[\tilde{E}_x^*(x_2, t) \tilde{E}_x(x_1, t) - \tilde{E}_y(x_1, t) \tilde{E}_y^*(x_2, t)] \rangle \end{cases} \quad (1)$$

式中, $S_i^{\text{in}}(x_1, x_2)$, $i=0, 1, 2, 3$ 是光学成像系统物平面中的广义光强 Stokes 参数, x_1 和 x_2 为一维像面 x 上两个靠近光轴的点,尖括号表示较长时间平均值, $E(x, t)$ 是在点 x 位置处和 t 时刻光干扰相关信号。则光学成像系统像面上光强广义 Stokes 参数 $S_i^{\text{im}}(x_1, x_2)$, $i=0, 1, 2, 3$ 为:

$$S_i^{\text{im}}(x_1, x_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} S_i^{\text{in}}(\zeta_1, \zeta_2) p(\zeta_1) p^*(\zeta_2) h(x_1 -$$

$$\zeta_1)h^*(x_2 - \zeta_2)d\zeta_1 d\zeta_2, i = 0, 1, 2, 3, \quad (2)$$

式中, $S_i^{\text{im}}(x_1, x_2)$ 是像平面中光强广义 Stokes 参数, $p(\zeta)$ 是物体振幅透射率, $h(x - \zeta)$ 是成像系统空间平稳的振幅脉冲响应, 符号 $(*)$ 用于标记共轭, ζ_1 和 ζ_2 为一维物平面 ζ 上两个靠近的光轴点。像平面中广义 Stokes 参数则是关注的量。在实际空间平稳态下由式(2)得:

$$S_i^{\text{im}}(x) = \iint_{-\infty}^{\infty} S_i^{\text{in}}(\zeta_1, \zeta_2) p(\zeta_1) p^*(\zeta_2) h(x - \zeta_1) h^*(x - \zeta_2) d\zeta_1 d\zeta_2, i = 0, 1, 2, 3. \quad (3)$$

从式(3)很明显看出, 对于透光物体, 从物体强度 $p(\zeta_1) p^*(\zeta_2)$ 到图像强度 $S_i^{\text{im}}(x)$ 的过渡是非线性的。该结论的意义在于, 常规图像评估技术和标准通常不适用于此类系统。此外, 如果 $S_i^{\text{in}}(\zeta_1 - \zeta_2)$ 表示照明相干性发生变化, 则相同光学系统和物体可能会产生不同偏振图像 $S_i^{\text{im}}(x)$ 。

由于这种系统本质上是非线性的, 因此不可能通过传递函数来表征它们。由于其实用性, 采用频域分析法, 对式(3)作傅里叶变化得一维成像偏振图像光谱为:

$$S_i^{\text{im}}(f_x) = \int P(\gamma) P^*(f_x - \gamma) \left\{ \int S_i^{\text{in}}[f_x - (\sigma + \gamma)] H(f_x - \sigma) H^*(\sigma) d\sigma \right\} d\gamma, i = 0, 1, 2, 3, \quad (4)$$

它是两个空间频率函数, 其中 σ, γ 分别为成像系统空间频率与透光物体空间频率, f_x 为光空间频率, 式(4)仅在模糊意义上构成传递函数, 对于任意偏振图像, 光学系统本质上是非线性的。目标光谱和系统传递函数之间正常线性乘法关系不再适用。式(4)大括号中积分是仪器和照明特征, 称为“透射交叉系数”, 而大括号外因子 $P(\gamma)$ 和 $P^*(f_x - \gamma)$ 仅由透光物体决定。

3 成像系统模型建立

下面对光学成像系统进行说明。给出入射在物体表面光的互强度和成像系统的振幅脉冲响应及其傅里叶变换。在以下各节中将使用它们来解决成像问题并确定正弦振幅光栅表面上的传递函数, 像空间中的距离通过成像系统的横向放大倍率进行归一化。如图2所示, 孔径为 $2\beta_0$ 非相干光源(S)照亮距离为 z_0 正弦光栅(G)。正弦光栅通过透镜(SL)成像系统成像到位于距离为 z_i 观察屏上, 其出瞳孔径为 $2\alpha_0$ 。

对于这种具有均匀辐照度的光源由范西泰特-塞

尼克定理得物平面上入射光束广义 Stokes 参数为:

$$S_i^{\text{in}}(\zeta_1, \zeta_2) = \text{const} \text{sinc}[2\pi i \beta_0 (\zeta_1 - \zeta_2) / \lambda z_0], \quad (i = 0 \sim 3), \quad (5)$$

式中, ζ_1 和 ζ_2 为一维物平面 ζ 上两个靠近光轴的点, z_0 是非相干光源平面 β 与物平面 ζ 间距离。入射光在物平面上广义 Stokes 参数中心到第一个零的距离称为物体照明的相干间隔。式(5)傅里叶变换为:

$$S_i^{\text{in}}(f_x) = N \begin{cases} \hat{s}_i, & |f_x| \leq \beta_0 / \lambda z_0 = f_1 \\ 0, & |f_x| > \beta_0 / \lambda z_0 = f_1 \end{cases}, \quad (i = 0 \sim 3) \quad (6)$$

式中, $\hat{s}_i$ 是光源张量波归一化 Stokes 参数, N 为常数, 式(6)用于定义参数 f_1 。

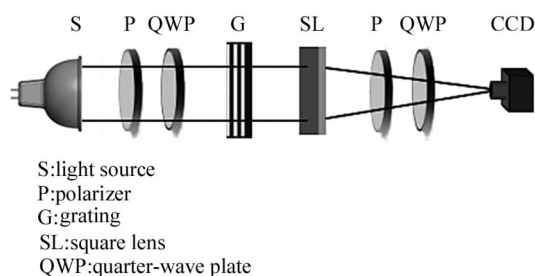


图2 成像系统模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the imaging system model

为了强调相干效应并使像差引起复杂性最小化, 对衍射受限光学进行了限制。由点目标引起的成像系统出射光瞳在表征夫琅禾费衍射的通常近似下振幅脉冲响应是:

$$h(x) = \text{const} \text{sinc}[2\pi i \alpha_0 x / \lambda z_i], \quad (7)$$

式中, z_i 是从出射光瞳平面 α 到像平面 x 的距离。规定式(7)中脉冲响应中心到脉冲响应第一个零点距离为成像系统衍射图案尺寸。式(7)傅里叶变换为:

$$H(f_x) = \text{const} \begin{cases} 1, & |f_x| \leq \alpha_0 / \lambda z_i = f_0 \\ 0, & |f_x| > \alpha_0 / \lambda z_i = f_0 \end{cases}. \quad (8)$$

式(8)用于定义参数 f_0 。

4 正弦振幅光栅物体物像关系

正弦振幅光栅物体振幅透过率为:

$$p(\zeta) = 1 + \cos 2\pi f_{x_0} \zeta, \quad (9)$$

式中, f_{x_0} 是光栅空间频率。式(9)的傅里叶变换是:

$$P(r) = \delta(r) + \frac{1}{2} \delta(r - f_{x_0}) + \frac{1}{2} \delta(r + f_{x_0}), \quad (10)$$

将式(6)、(8)、(10)代入式(4), 之后两边作逆傅

里叶变换得到:

$$\begin{aligned} S_i^{\text{in}}(x) = & \int S_i^{\text{in}}(-\sigma)H(-\sigma)H(\sigma)d\sigma + \frac{1}{4} \int H(\sigma)[S_i^{\text{in}}(-\sigma - f_{x_0})H(-\sigma) + S_i^{\text{in}}(-\sigma + f_{x_0})H(-\sigma)]d\sigma + \\ & \int [S_i^{\text{in}}(f_{x_0} - \sigma)H(f_{x_0} - \sigma) + S_i^{\text{in}}(-\sigma)H(f_{x_0} - \sigma)]H(\sigma)d\sigma \cos 2\pi f_{x_0}x + \\ & \frac{1}{2} \int [S_i^{\text{in}}(f_{x_0} - \sigma)H(2f_{x_0} - \sigma)H(\sigma)]d\sigma \cos 2\pi 2f_{x_0}x = A_i + B_i \cos 2\pi f_{x_0}x + C_i \cos 2\pi 2f_{x_0}x. \end{aligned} \quad (11)$$

因此,对于一维图像形成偏振图像光谱由下式给出:

$$S_i^{\text{in}}(f_x) = \int [A_i + B_i \cos 2\pi f_{x_0}\zeta + \frac{1}{2}C_i[\delta(f_x - 2f_{x_0}) + \delta(f_x + 2f_{x_0})], \quad (12)$$

$$C_i \cos 2\pi 2f_{x_0}\zeta] e^{-2\pi i f_{x_0}\zeta} d\zeta =$$

式中,系数 A_i, B_i, C_i 由式(6)和(8)确定,对式(11)进行积分计算,结果得:

$$A_i = 2\hat{s}_i \left[\begin{matrix} f_0 \\ f_1 \end{matrix} \right] + \frac{1}{2} \hat{s}_i \left\{ \begin{matrix} 2f_0 & f_0 \leq f_1 \text{ and } 0 \leq f_{x_0} \leq f_1 - f_0 \\ f_0 + f_1 - f_{x_0} & f_0 \leq f_1 \text{ and } f_1 - f_0 \leq f_{x_0} \leq 2f_0 \\ 2f_1 & f_0 > f_1 \text{ and } 0 \leq f_{x_0} \leq f_0 - f_1 \\ f_0 + f_1 - f_{x_0} & f_0 > f_1 \text{ and } f_0 - f_1 < f_{x_0} \leq f_0 + f_1 \\ 0 & f_0 + f_1 < f_{x_0} \end{matrix} \right\}, \quad (13)$$

$$B_i = 2\hat{s}_i \left\{ \begin{matrix} (2f_0 - f_{x_0}) & f_0 < f_1 \text{ and } 0 \leq f_{x_0} \leq 2f_0 \\ 0 & f_0 < f_1 \text{ and } 2f_0 < f_{x_0} \\ 2f_1 & f_0 > f_1 \text{ and } 0 \leq f_{x_0} \leq f_0 - f_1 \\ (f_0 + f_1 - f_{x_0}) & f_0 > f_1 \text{ and } f_0 - f_1 < f_{x_0} \leq f_0 + f_1 \\ 0 & f_0 > f_1 \text{ and } f_0 + f_1 < f_{x_0} \end{matrix} \right\}, \quad (14)$$

$$C_i = \frac{1}{2} \hat{s}_i \left\{ \begin{matrix} 2f_0 - 2f_{x_0} & f_0 < f_1 \text{ and } 0 \leq f_{x_0} \leq f_0 \\ 0 & f_0 < f_1 \text{ and } f_0 < f_{x_0} \\ 2f_1 & f_0 > f_1 \text{ and } 0 \leq f_{x_0} \leq f_0 - f_1 \\ 2f_0 - 2f_{x_0} & f_0 > f_1 \text{ and } f_0 - f_1 < f_{x_0} \leq f_0 \\ 0 & f_0 > f_1 \text{ and } f_0 < f_{x_0} \end{matrix} \right\}. \quad (15)$$

将式(13)中符号 $\left[\begin{matrix} f_0 \\ f_1 \end{matrix} \right]$ 读为 f_0 或 f_1 , 取较小者为准。

式(13)、(14)及(15)分别表示式(11)中系数 A 、 B 及 C 的结果,其分别表示正弦振幅光栅直流分量、基频和二次谐波部分,而 f_0/f_1 大小代表光源相干度强弱。为了准确得出非线性系统中直流分量、基频及二次谐波各个部分与物体空间频率关系,图3给出了 Matlab 模拟 f_0/f_1 不同比值时各个系数与固有频率归一化关系示意图,为便于研究,此处取 $\hat{s}_i = 1$ 。图3横坐标光栅空间频率 $T(f_{x_0}) = f_{x_0}/2f_0$ 经过归一化处理,纵坐标为其对应归一化系数值。因式(13)第一项为常数,所以图3(a)只需考虑式(13)第二项。

式(11)中各个系数在3种不同 f_0/f_1 比值下随物体空间频率变化情况。

不考虑直流分量式(13)第一项常数项的前提下,如图3(a)所示,在 $f_0/f_1 = 0.5$ 时,在区间 $0 < T(f_{x_0}) < 0.5$ 范围内,系数 A 非常数项不变,即直流分量不变,当 $0.5 < T(f_{x_0}) \leq 1$ 时,直流分量随 $T(f_{x_0})$ 增加成线性减小直至1时,直流分量的非常数项骤降为零,只剩常数项;在 $f_0/f_1 = 1$ 时,系数 A 的非常数项随 $T(f_{x_0})$ 增加成线性减小至零;在 $f_0/f_1 = 2$ 时,系数 A 的非常数项在区间 $0 < T(f_{x_0}) < 0.25$ 范围内不变,在区间 $0.25 < T(f_{x_0}) < 0.75$ 内呈线性减小趋势,系数 A 的非常数项在区间 $T(f_{x_0}) \geq 0.75$ 内始终为零。但当 $T(f_{x_0}) \geq 1.0$ 时,直流分量与光源相干度无关,直流分量的非常数项始终为零,只存在

常数项。图 3(a)说明直流分量随着相干度增加而减小,在相同相干度相同情况下,直流分量随 $T(f_{x_0})$ 增

加而减小,且当 $T(f_{x_0}) \geq 1.0$,直流分量与光源相干度无关,只存在常数项。

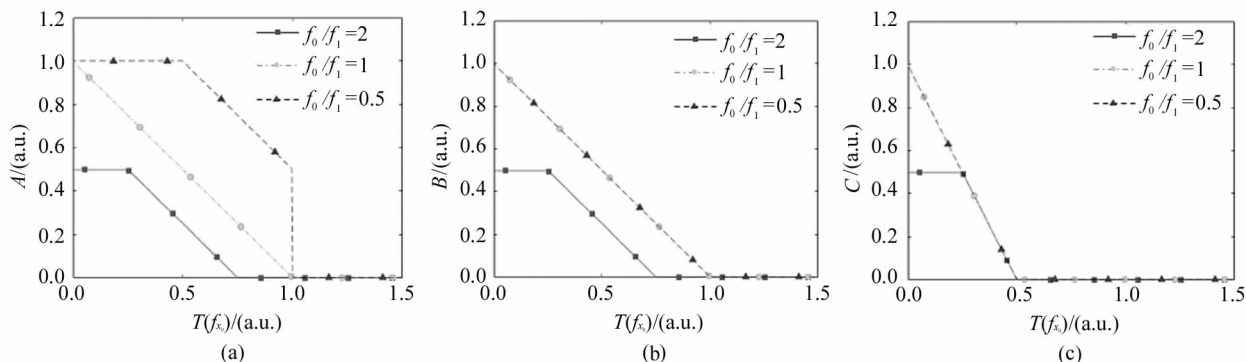


图 3 f_0/f_1 不同比值各个系数与固有频率归一化关系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the normalized relationship between each coefficients and natural frequency under different ratios of f_0/f_1

图 3(b)显示,当 $f_0/f_1 = 1$ 与 $f_0/f_1 = 0.5$ 时,基频分量(系数 B)随 $T(f_{x_0})$ 增加而线性(斜率为-1)减小,但当 $T(f_{x_0}) \geq 1.0$ 时,其与光源相干度无关,始终为零;在 $f_0/f_1 = 2$ 时,系数 B 在区间 $0 < T(f_{x_0}) < 0.25$ 范围内不变,在区间 $0.25 < T(f_{x_0}) < 0.75$ 内,呈线性减小趋势,在区间 $T(f_{x_0}) \geq 0.25$ 内始终为零。

图 3(c)显示,当 f_0/f_1 与 $f_0/f_1 = 0.5$ 时,二次谐波(系数 C)随 $T(f_{x_0})$ 增加而线性(斜率为-2)减小,相较于图 3(b),其减小得更厉害,但当 $T(f_{x_0}) \geq 0.5$ 时,其与光源相干度无关,始终为零;在 $f_0/f_1 = 2$ 时,在区间 $0 < T(f_{x_0}) < 0.25$ 范围内, C 维持不变,但当 $T(f_{x_0}) \geq 0.25$,其变化曲线完全与 $f_0/f_1 = 1$ 和 $f_0/f_1 = 0.5$ 时重合,且当 $T(f_{x_0}) \geq 0.5$ 时,其值始终为零,完全与光源相干度无关。

图 3 f_0/f_1 不同比值各个系数与固有频率归一化关系的模拟仿真结果表明,直流分量随着相干度增加而减小,在相同相干度相同情况下,直流分量随 $T(f_{x_0})$ 增加而减小,且当 $T(f_{x_0}) \geq 1.0$ 时,直流分量与光源相干度无关,只存在常数项,基频分量与二次谐波随着相干度增加而减小,但二次谐波分量较基频分量下降更严重;当在 $f_0/f_1 = 2$ 时,直流分量是非常数项,基频分量及二次谐波数值均下降至 50%,直流分量的非常数项与基频分量在 $T(f_{x_0}) \geq 0.75$,二次谐波在 $T(f_{x_0}) \geq 0.5$ 时,三者数值均为零。总之,区间 $0 \leq T(f_{x_0}) < 0.5$ 内,直流分量、基频和二次谐波 3 个部分都存在; $0.75 \leq T(f_{x_0}) < 1$ 时,二次谐波消失,基频也只在 f_0/f_1 为 0.5 和 1 时存在,直流

分量只存在常数项,这个特点可用于滤波处理。

正弦振幅光栅物体像面基频表观传递函数 B_i/A_i 及二次简谐波表观传递函数 C_i/A_i 如图 4 所示,给出几组介于非相干极限 $f_0/f_1 \ll 1$ 与相干极限 $f_0/f_1 \gg 1$ 之间,且不同 f_0/f_1 比值表观传递函数值,横坐标 $T(f_{x_0}) = f_{x_0}/2f_0$ 表示光栅空间归一化频率,纵坐标为表观传递函数归一化值。

图 4(a)为正弦振幅光栅基频成分表观传递函数,当 f_0/f_1 时, $T(f_{x_0}) = f_{x_0}/2f_0$ 存在一个区间使得基频表观传递函数值恒为 1,随着光源相干度增加,即 f_0/f_1 增大,基频表观传递函数愈加偏离线性区。图 4(b)为正弦振幅光栅二次谐波成分表观传递函数,显然结果类似于图 4(a),当 $f_0/f_1 \gg 1$ 时,基频与二次简谐波表观传递函数完全一致,而在其他相干度情况下,图 4(b)示出当 $T(f_{x_0}) \geq 0.5$ 时,二次简谐波表观传递函数为零。图 4 中参数 $f_0/f_1 \ll 1$ 的曲线被视为是物体受非相干照明,即当系统为线性强度时成像系统表观传递函数的预期形式。需要注意的是,表观传递函数在 $f_0/f_1 = 1$ 时,开始明显偏离线性系统预期形式,只有当系统满足非相干极限 $f_0/f_1 \ll 1$ 条件时,此光学成像系统才呈线性。图 4 中所示曲线只适用于式(9)中物体的单位振幅调制。表观传递函数也会随着不同物体的调制而稍有改变。

利用所构建 Stokes 物像关系,即式(11),在 $f_0/f_1 = 0.5$ 、 $f_0/f_1 = 1$ 、 $f_0/f_1 = 2$ 和一组经过归一化处理 Stokes 参数 ($\hat{s}_0 = 0.7071$, $\hat{s}_1 = 0.3873$, $\hat{s}_3 = -0.3162$) 下,利用 Matlab 模拟了 Stokes 图像 4 个方向结果图,3 种 $R = f_0/f_1$ 值和光栅频率归一化下

正弦振幅光栅物体 Stokes 仿真结果,如图 5(a)~(d)所示。其中 $S_i^{\text{im}} (i=0\sim3)$ 表示像平面上 Stokes 参数值。Distance 表示光栅像面一维位置坐标。 $T(f_{x_0}) = f_{x_0}/2f_0$ 表示归一化光栅空间频率。 f_0/f_1 指照明目标物相干间隔与成像系统衍射图像大小之比。当正弦振幅光栅被部分偏振光照射时,其幅值归一化偏振图像会随着 f_0/f_1 值和光栅空间频率的变化而变化。

需要注意的是,当图 5(a)~(d)中 $T(f_{x_0})$ 取值为 0 和 1 时,显而易见, f_0/f_1 为 0.5, 1.0, 2.0 时, 3

条曲线重合,说明直流分量、基频成分与二次谐波成分数值相当,光源相干度对三者均有影响。在这一组 Stokes 参数下,当 $T(f_{x_0}) \geq 0.6$ 时,二次谐波分量消失,说明光源相干度对其无影响,通过图 4 也可观察到这一现象;当 $T(f_{x_0}) = 0.8$ 且 $f_0/f_1 = 0.5$ 、 $f_0/f_1 = 1$ 时,像平面上 Stokes 参数值是周期变化,存在直流分量与基频成分,说明光源相干度影响二者变化。而 $f_0/f_1 = 2$ 时,只有直流分量存在,基频成分与二次谐波成分消失,说明此时光源相干度变化导致基频成分与二次谐波成分消失。图 5 中不

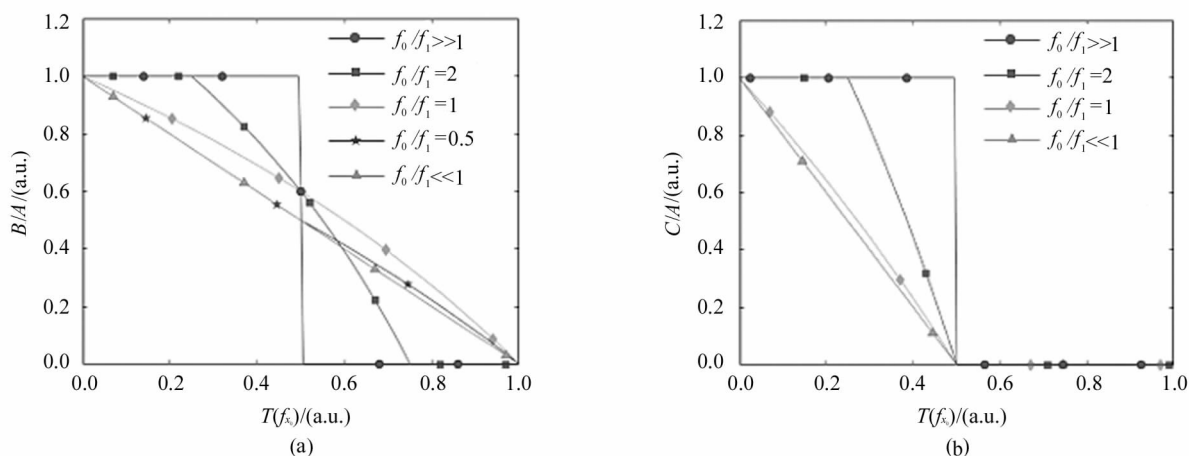


图 4 正弦振幅光栅物体的表观传递函数

Fig. 4 Apparent transfer function of sine amplitude grating objects

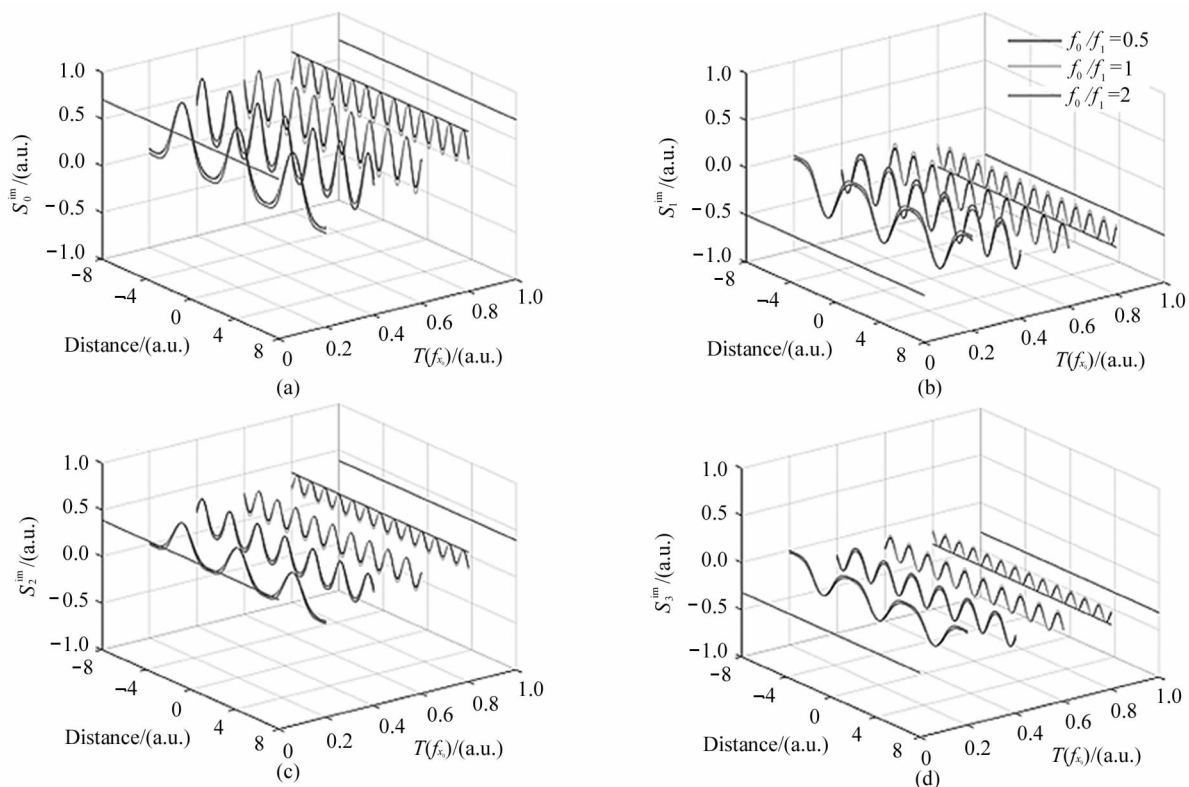


图 5 在 3 种 $R=f_0/f_1$ 值和光栅频率归一化下的正弦振幅光栅物体 Stokes 图像

Fig. 5 Stokes image of sinusoidal amplitude raster object normalized to three $R=f_0/f_1$ values and raster frequency

同方向上像平面上 Stokes 参数值大小不同, 凸显信息不同, 随着光源相干度增加, 即 f_0/f_1 增大, 所得信息也随之发生变化。

5 结 论

本文基于偏振相干统一理论, 对正弦振幅光栅成像系统在部分偏振、部分相干光照射下的偏振成像进行研究。首先说明了偏振成像系统不同于传统线性系统, 它是非线性的, 并利用 Stokes 法则给出了部分偏振和部分相干照明下正弦振幅光栅像面光强分布数学模型。其次, 给出不同 f_0/f_1 比值时光栅固有频率与正弦振幅光栅 Stokes 像强度公式中各部分系数之间关系, 利用 MATLAB 软件模拟了正弦振幅光栅物体像面基频表观传递函数与二次谐波表观传递函数, 得到了在非相干极限 $f_0/f_1 \ll 1$ 条件下, 此光学成像系统为线性的, 获得在 3 组 f_0/f_1 比值下, 一组归一化 Stokes 参数下 4 个方向 Stokes 像强度分布。这些结论对识别不同条件下偏振信息量研究是非常有意义的, 将有利于生物医学诊断、目标检测与识别等方面的应用。

参考文献:

- [1] XV W H, NING S C, ZHANG F C. Review of partial coherent diffraction imaging[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(21): 214201.
许文慧, 宁守琮, 张福才. 部分相干衍射成像综述[J]. 物理学报, 2021, 70(21): 214201.
- [2] JOSHI S, KHAN S N, SENTHILKUMARAN P. Statistical properties of double-slit interference of partially coherent polarization singular vector beams[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 148: 107727.
- [3] HU S B, HU X Y, LI H. Research on the resolution of two object points by the circular aperture imaging system with arbitrary coherence degree[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2021, 32(9): 1000-1006.
胡守波, 胡小英, 李昊. 任意相干度圆孔成像系统对两物点分辨能力研究[J]. 光电子·激光, 2021, 32(9): 1000-1006.
- [4] CAI X, LAI X. Study on information content of light field on the object surface under various coherent states illumination[J]. Optik, 2021, 248: 168080.
- [5] SHAKERI S M, VAN-VLIET L J, STALLINGA S. Impact of partial coherence on the apparent optical transfer function derived from the response to amplitude edges[J]. Applied Optics, 2017, 56(12): 3518-3530.
- [6] ZHANG S H, ZHOU G C, CUI B Q, et al. A review of Fourier stacked microscopic imaging models, algorithms and systems[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(14): 1400001.
张韶辉, 周国城, 崔柏岐, 等. 傅里叶叠层显微成像模型、算法及系统研究综述[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(14): 1400001.
- [7] KOUSHKI E, ALAVI S A. Diffraction of a partial temporal coherent beam from a single-slit and a circular aperture[J]. Optics Communications, 2019, 441: 33-37.
- [8] HU X Y, HU S B, LIU W G, et al. Polarization imaging of a sinusoidal amplitude grating with partially polarized and partially coherent light[C]//Holography, Diffractive Optics, and Applications X. International Society for Optics and Photonics, October 12-16, 2020, Beijing, China. Washington: SPIE, 2020, 11551: 115511F.
- [9] SHAO Y, LU X, KONIJNENBERG S, et al. Spatial coherence measurement and partially coherent diffractive imaging using self-referencing holography[J]. Optics Express, 2018, 26(4): 4479-4490.
- [10] TANG C X, LIU S H, LI H Q, et al. Influence of light polarization characteristics on rPPG signals[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2021, 32(1): 101-110.
唐春晓, 刘诗红, 李鸿强, 等. 光的偏振特性对 rPPG 信号的影响研究[J]. 光电子·激光, 2021, 32(1): 101-110.
- [11] HAGEMANN J, SALDITT T. Coherence-resolution relationship in holographic and coherent diffractive imaging[J]. Optics Express, 2018, 26(1): 242-253.
- [12] HU X Y, LI H, HU S B, et al. Nonlinearity in polarization imaging system with partially polarized and partially coherent illumination[C]//Computational Optics, September 13-17, 2021, Madrid, Spain. Washington: SPIE, 2021, 11875: 80-87.
- [13] MA X, ZHANG Z, YAO M, et al. Spatially-incoherent annular illumination microscopy for bright-field optical sectioning[J]. Ultramicroscopy, 2018, 195: 74-84.
- [14] PENG H, XV X L, WU S Y. Research on micro pressure sensing method of fiber grating based on stokes parameter[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2020, 31(10): 1018-1024.
彭晖, 徐小来, 邬书跃. 基于斯托克斯参量的光纤光栅微压力传感方法研究[J]. 光电子·激光, 2020, 31(10): 1018-1024.
- [15] HUANG C, JIANG X M, BAI C L, et al. Subwavelength grating polarizing beam splitter with beam deflection[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2019, 30(8): 791-796.
黄诚, 姜夕梅, 白成林, 等. 具有光束偏转功能的亚波长光栅偏振分束器[J]. 光电子·激光, 2019, 30(8): 791-796.
- [16] ZHANG R N, CAI Z W, SUN J S, et al. Optical field coherence measurement and its application in computational imaging[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2021, 58(18): 1811003.
张润南, 蔡泽伟, 孙佳嵩, 等. 光场相干测量及其在计算成像中的应用[J]. 光电子·激光, 2021, 58(18): 1811003.

作者简介:

胡小英 (1978—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事先进成像技术方面的研究。