

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0284-03

光束衍射传输的数值仿真方法

叶一东, 李建民, 颜 宏, 王 锋, 雒仲祥

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 为了解决汇聚或发散光束衍射传输的数值仿真问题,研究了透镜成像的复振幅脉冲响应函数,提出了一种物像共轭变换方法。通过将发散或汇聚光波场中的球面波相位因子等效为一个透镜,利用透镜的脉冲响应函数和物像变换关系,将含球面波相位因子光束衍射传输数值模拟问题转化为不含球面波相位因子光束的衍射传输,解决了汇聚或发散光波场的衍射传输的数值仿真问题,具有简单高效,物理意义直观明显的优点。通过对一个方孔-透镜组合的衍射传输问题实际例子的仿真计算,验证了该方法的实用性和有效性。

关键词 几何光学; 衍射传输; 发散或汇聚光束; 数值仿真

中图分类号 O436.1; TN012 **文献标识码** A

Numerical Simulation for Optical Beam Diffraction Propagation

YE Yi-dong, LI Jian-min, YAN Hong, WANG Feng, LUO Zhong-xiang

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract In order to numerically simulate the diffraction propagation of convergence/divergence optical beams, the complex amplitude pulse response function of lens imaging is researched. A novel method called object-image conjugation translation is presented, in which the spherical wave phase factor in convergence/divergence beams is equivalent to a lens, and the spherical wave phase factor is removed in the diffraction propagation with the pulse response function and the object-image translation. This idea is simple but efficient, with a visual physical meaning. The simulation of the diffraction propagation of the optical beam with square aperture-lens assembly, proves the practicality and the validity of the idea.

Key words geometrical optics; diffraction propagation; convergence/divergence optical beam; numerical simulation

1 引 言

对激光束在光学系统中传输的仿真研究中,常常遇到对发散或汇聚光束进行数值模拟的问题,例如计算焦点附近的准近场光场分布等情况。由于光波的相位周期为 2π ^[1],对于发散或汇聚的光波场,当所含球面波曲率半径较小时,其球面波相位因子的数值化采样需要的采样点数量十分庞大,通常超过计算机的存储能力,不能进行数值仿真。另一方面,发散或汇聚光波场在传输过程中空间宽度会发生显著变化,采样间隔和采样范围也要随之改变。因此频谱传输方法或非涅耳衍射积分公式的傅里叶变换算法遇到困难。

为了解决这个问题,文献[2]针对一维情况提出了一种等效空间频谱传输法,文献[3]利用数学变换提出了一种等效菲涅耳数的传输变换方法。利用透镜的物像共轭原理,提出了一种更为简单的算法,其物理意义非常直观而明显,且计算量较小。

2 激光束的衍射传输数值仿真方法

激光束在自由空间和光学系统中的传输,可以用标量衍射理论的基尔霍夫衍射公式来描述^[1~3]。从源光波场 $E_0(x, y)$ 到目标平面光波场 $E_1(x, y)$ 的衍射传输过程可用傅里叶变换和频谱传输的原理进行数值模拟

$$E_1(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda} z \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2} \right] \mathcal{F}[E_0(x, y)] \right\}, \quad (1)$$

式中 \mathcal{F} 和 \mathcal{F}^{-1} 表示傅里叶变换及其逆变换。这就是频谱传输方法。在非涅耳近似下,菲涅耳衍射积分公式

作者简介: 叶一东(1969—),男,中国工程物理研究院应用电子学研究所研究员,博士,主要从事光学工程研究和开发工作。E-mail: yidongye@163.com

可表示为傅里叶变换的形式：

$$E_1(x, y) = \left(-\frac{i}{\lambda z}\right) \exp\left[ik\left(z + \frac{x^2 + y^2}{2z}\right)\right] \iint_{\Sigma} A(\xi, \zeta) \exp\left[\frac{ik}{2z}(\xi^2 + \zeta^2)\right] \exp\left[-i\frac{k}{z}(\xi x + \zeta y)\right] d\xi d\zeta, \quad (2)$$

式中 $f_\xi = x/\lambda z, f_\zeta = y/\lambda z$ 。 $A(\xi, \zeta)$ 是源光波场的复振幅，其中包含着初始电场和光阑的传递函数的影响。显然，积分号中是对 $A(\xi, \zeta) \exp[ik(\xi^2 + \zeta^2)/2z]$ 的傅里叶变换，可以利用快速傅里叶变换算法来计算菲涅耳衍射传输过程。

3 光波场衍射传输的物像共轭变换方法

设透镜前距离为 d_0 处的物平面上一个点光源 $\delta(x_0, y_0)$ ，经过透镜后，在其像面(透镜后距离 d_1 处)上产生一个脉冲响应。 Goodman^[1]研究了薄透镜的脉冲响应函数，给出像面上的脉冲响应为

$$h(x_0, y_0; x_1, y_1) = \frac{1}{\lambda d_0 d_1} \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda d_0}(x_0^2 + y_0^2) + \frac{\pi}{\lambda d_1}(x_1^2 + y_1^2)\right] \times \iint P(x, y) \exp\left\{-i\frac{2\pi}{\lambda d_1}[(x_1 - Mx_0)x + (y_1 - My_0)y]\right\} dx dy, \quad (3)$$

式中 $M = -d_1/d_0$ ，是透镜的成像放大率。

当透镜孔径无穷大时，孔径函数 $P(x, y) = 1$ ，并利用透镜的物像关系

$$1/d_0 + 1/d_1 = 1/f, \quad x_1 = Mx_0, \quad y_1 = My_0, \quad (4)$$

于是，(3)式变换为

$$h(x_0, y_0; x_1, y_1) = \frac{1}{\lambda d_0 d_1} \exp\left[-i\frac{\pi}{\lambda M d_1}(x_1^2 + y_1^2) + i\frac{\pi}{\lambda d_1}(x_1^2 + y_1^2)\right] \times \iint P(x, y) \exp\left\{-i\frac{2\pi}{\lambda d_1}[(x_1 - Mx_0)x + (y_1 - My_0)y]\right\} dx dy = M \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda(d_1 - f)}(x_1^2 + y_1^2)\right] \delta(x_1 - Mx_0, y_1 - My_0). \quad (5)$$

物平面处的源光波场通过与透镜的脉冲响应函数进行卷积运算，即可得像平面上的光波场分布。

设源平面 P_0 处有一个源光波场，它含有一个曲率半径为 f 的球面波相位因子的汇聚或发散光波场，该光波场可以表示为

$$\tilde{E}_0(x, y) = E_0(x, y) \exp\left(ik\frac{x^2 + y^2}{2f}\right), \quad (6)$$

式中 $E_0(x, y)$ 表示去除了球面波相位因子的那部分光波的复振幅，它含有自己的相位因子， \exp 的幂项表示球面波相位因子，其球面波的曲率半径为 f 。目的是为了计算源光波场 $\tilde{E}_0(x, y)$ 经过距离 d_1 衍射传输后，到达位置 P_1 处的光波场分布 $\tilde{E}_1(x_1, y_1)$ 。

根据(6)式，可以假想紧靠源光波场 $\tilde{E}_0(x_1, y_1)$ 前面有一个焦距为 f 的透镜，如图 1 所示。光波场 $\tilde{E}_1(x_1, y_1)$ 可以看作光波场 $E_0(x, y)$ 经过一个焦距为 f 的薄透镜的相位变换后得到的。设 P_1 平面是物平面 Q_1 通过该透镜成像得到的像平面，由透镜成像的高斯公式可求得 Q_1 平面到透镜的距离

$$d_0 = d_1 f / (d_1 - f). \quad (7)$$

由菲涅耳衍射积分公式可以计算出光波场

$E_0(x, y)$ 通过距离 d_0 传播到位置 Q_1 处的光波场 $E_1(x, y)$ 。透镜的成像性质，通过“物光波场” $E_1(x, y)$ 与透镜的脉冲响应函数卷积，可以得到光波场 $E_0(x, y)$ 在像平面处的光波场，于是

$$\tilde{E}_1(x, y) = E_1(x_0, y_0) * h(x_0, y_0; x, y) = \frac{1}{M} \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda(d_1 - f)}(x^2 + y^2)\right] E_1\left(\frac{x}{M}, \frac{y}{M}\right). \quad (8)$$

(8)表明，由 $E_1(x, y)$ 成像得到 $\tilde{E}_1(x_1, y_1)$ 的过程主要是先经过一个坐标变换，把物空间的坐标尺度扩

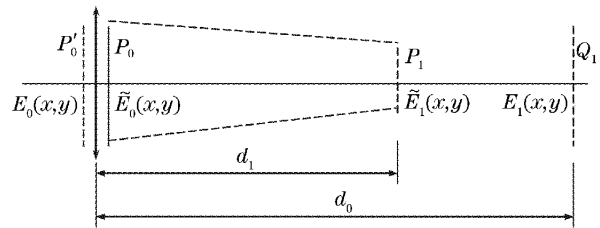


图 1 含球面波相位因子光波场衍射传输的物像共轭关系示意图

Fig. 1 Sketch diagram of object-image conjugation of the optical beam diffraction propagation with spherical wave phase

大了 M 倍,然后乘上一个曲率半径为 $(d_1 - f)$ 球面波相位因子,同时振幅缩小为原来的 $1/M$ 倍。这就是透镜成像的物理过程,无论 f 是正或负都一样。

简言之,先把去除了球面波相位因子的物光波场 $E_0(x, y)$ 通过距离 d_0 传播到位置 Q_1 处得到光波场 $E_1(x, y)$;进一步,由透镜的成像关系得到需要计算的目标平面处的光波场 $\tilde{E}(x_1, y_1)$ 。

4 物像共轭变换方法的应用例子

计算初始光波场,取平面波通过一个边长为 5 mm 的正方形矩孔, $\lambda = 532$ nm,在矩孔后面有一个焦距 $f = 5$ m 的透镜,相当于在初始光波场的基础上叠加了一个球面波相位因子。下面将计算衍射传

输到距离 $z = 5.01$ m 处的光强分布。分别利用频谱传输方法和本文提出的物像共轭变换传输方法,来比较计算结果的正确性。数值模拟的初始采样范围 $x = y = 15$ cm,采样点数均取 $N = 512$,采样间隔则为 $\Delta x = x/N$ 。得到的结果见图 2。

由于矩孔的非涅耳衍射图案是已知的,因此计算结果的正确性可以根据已有的关于矩孔衍射的知识来判断。结果表明,由于汇聚光波场相位在 2π 范围内的高频变化,直接频谱传输方法已不适于本例含球面波相位因子的光波场的计算;而物像共轭变换方法由于避免了对球面波相位因子的采样,因而得到的结果是正确的。

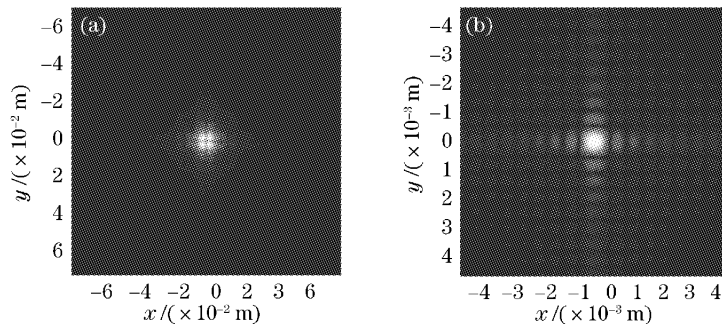


图 2 汇聚光束传输模拟例子。(a) 频谱传输方法得到的不正确结果;(b) 物像共轭变换传输得到的正确结果
Fig. 2 Propagation example of beam with spherical wave phase. (a) The error result of numerical simulation with frequency spectrum propagation; (b) the correct result of simulation with object-image conjugation transformation

5 结 论

针对汇聚或发散光束数值仿真的困难,提出了物像共轭变换方法,将含球面波相位因子光束衍射传输数值模拟问题转化为不含球面波相位因子光束的衍射传输,具有简单高效、物理意义明显的特点,且计算量较小。

参 考 文 献

1 Joseph W. Goodman. Introduction to Fourier Optics [M]. New

York: McGraw Hill, 1968

2 Feng Guoying, Lü Baida, Kong Fanlong *et al.*. Numerical simulation of the axis-asymmetric positive confocal resonator with a 1D VRM [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1997, **9**(1): 65~71

冯国英,吕百达,孔繁龙等. 一维 VRM 非轴对称虚共焦谐振腔的计算 [J]. *强激光与粒子束*, 1997, **9**(1): 65~71

3 Lu Guangshan, Hu Wei, Fu Xiquan *et al.*. Research on the Fourier numerical algorithm of focused beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(3): 227~230

卢光山,胡巍,傅喜泉等. 聚焦光束的傅里叶数值算法研究 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(3): 227~230