

# 部分相干修正贝塞尔高斯光束通过 光阑透镜的光谱特性\*

王 莉<sup>1</sup> 王庆峰<sup>1</sup> 王喜庆<sup>1</sup> 吕百达<sup>2</sup>

(1 西南交通大学, 成都 610031)

(2 四川大学激光物理与化学研究所, 成都 610064)

**摘 要** 基于部分相干光的传输理论, 研究了部分相干修正贝塞尔高斯光束(MBGB)通过光阑透镜系统后, 轴上光谱位移及光谱开关. 数值计算结果表明, 光谱开关主要与截断参量、光束菲涅耳数以及光谱相干度有关. 光谱开关的个数随着光束菲涅耳数以及截断参量的增大将增多, 而随光谱相干度的增大而减少. 但当截断参量增大到一定值时, 光谱开关将消失. 例如, 当光谱相干度取 0.5 时, 截断参量大于 2.2, 光谱开关将消失, 仅表现出蓝移.

**关键词** MBGB; 截断参量; 光谱相干度; 菲涅耳数; 光谱开关

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

## 0 引言

1986 年 Wolf 证明, 当部分相干光源的光谱相干度不满足定标定律时, 从光源发出的光在传输过程中, 其光谱将会发生变化. 这种光谱移动现象称为 Wolf 效应<sup>[1]</sup>. 人们对这类光谱变化已作了比较深入的研究<sup>[2~5]</sup>. 1999 年, 蒲继雄等人研究发现在一定条件下, 伴随着光谱移动在临界点会出现光谱突然由蓝移快速跃变为红移(或相反)的新现象, 称之为光谱开关<sup>[6~8]</sup>, 该现象已经得到实验证实<sup>[9]</sup>. 光谱开关在光谱测量和光谱选择等方面具有重要的应用价值<sup>[10,11]</sup>. 到目前为止, 大多数理论研究所用的部分相干光模型都是高斯-谢尔模型光束<sup>[1~12]</sup>. 最近, Ponomarenko 引入了一类新的部分相干光模型, 该光束可由拉盖尔-高斯光束相干叠加而成, 称为部分相干修正贝塞尔高斯光束(MBGB)<sup>[13,14]</sup>. 本文以部分相干 MBGB 为模型, 就部分相干 MBGB 通过光阑透镜系统后轴上的光谱位移及光谱开关作了详细的数值计算和分析, 得到一些有意义的结果.

## 1 理论分析

如图 1, 在  $z=0$  处的光阑透镜系统中, 透镜焦距为  $f$ , 光阑半径为  $a$ . 设部分相干 MBGB 入射到光阑透镜上, 部分相干 MBGB 的交叉谱密度函数为<sup>[13,14]</sup>

$$W^{(0)}(r'_1, \varphi'_1, r'_2, \varphi'_2, 0, \omega) = S^{(0)}(\omega) \frac{\xi^{-m/2}}{1-\xi} \exp[-im(\varphi'_1 - \varphi'_2)] \exp\left[-\frac{1+\xi}{1-\xi} \frac{r_1'^2 + r_2'^2}{\omega_0^2}\right] I_m\left(\frac{4\sqrt{\xi}}{1-\xi} \frac{r'_1 r'_2}{\omega_0^2}\right) \quad (1)$$

式中,  $S^{(0)}(\omega)$  为源光谱,  $\omega = 2\pi c/\lambda$  为频率.  $\xi$  为光谱相干度, 且有  $0 < \xi < 1$ ,  $\omega_0$  为  $m=0, \xi=0$  时高斯部分的束宽, 设  $\xi$  和  $\omega_0$  与频率  $\omega$  无关,  $I_m(x)$  为  $m$  阶修正贝塞尔函数.

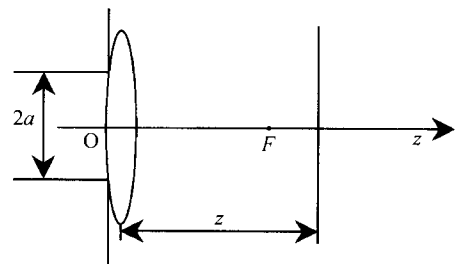


图 1 光阑透镜系统

Fig. 1 A schematic diagram of the system of aperture lens

根据部分相干光传输理论, 交叉谱密度函数通过近轴 ABCD 光学系统的传输满足<sup>[15]</sup>

$$W(r_1, \varphi_1, r_2, \varphi_2, z, \omega) = \left(\frac{k}{2\pi B}\right)^2 \iiint W^{(0)}(r'_1, \varphi'_1, r'_2, \varphi'_2, 0, \omega) \exp\left\{-\frac{ik}{2B}[A(r_1^2 - r_2^2) - 2r_1 r_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + 2r_2 r'_2 \cos(\varphi_2 - \varphi'_2)] + D(r_1^2 - r_2^2)\right\} r'_1 r'_2 dr'_1 dr'_2 d\varphi'_1 d\varphi'_2 \quad (2)$$

式中,  $(r'_i, \varphi'_i)$  和  $(r_i, \varphi_i)$  ( $i=1, 2$ ) 分别表示入射面  $z=0$  和出射面  $z=z$  上点的极坐标.

将式(1)代入式(2), 并令  $r_1=r_2=0$ , 得到零阶部分相干 MBGB 交叉谱密度函数通过 ABCD 光学系统后  $z$  处轴上的光谱

$$W(0, \varphi, z, \omega) = 4\pi^2 \left(\frac{N_w}{z_f}\right)^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \frac{1}{1-\xi} S^{(0)}(\omega) \int_0^{\xi} \int_0^{\xi} \exp\left[-\frac{1+\xi}{1-\xi}(u^2 + v^2)\right] I_0\left(\frac{4\sqrt{\xi}}{1-\xi} uv\right) \cdot$$

\* 四川省应用基础研究基金(02GY029-54)和西南交通大学基金(2004B19)资助

Tel: 028-66633108 Email: liwang@nec.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2006-01-15

$$\exp \left[ i\pi \frac{N_w(z_f-1)}{z_f} \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right) (u_1^2 - v_2^2) \right] u v d u d v \quad (3)$$

式中  $N_w = \omega_0^2 / \lambda_0 f$  为光束的非涅耳数,  $z_f = z/f$  为相对距离,  $\delta = a/\omega_0$  为截断参量,  $u = r_1'$  和  $v = r_2'$  为相对坐标,  $\omega_0$  为中心频率,  $\lambda_0$  为与中心频率相对应的波长. 式(3)中利用了贝塞尔函数的性质, 即只有当  $m=0$  时  $J_m(0)$  才不为零, 因此对于高阶部分相干 MBGB 轴上光谱不作讨论. 式(3)表明, 零阶部分相干 MBGB 通过光阑透镜后的光谱特性与光束非涅耳数  $N_w$ 、相对距离  $z_f$ 、源光谱  $S^{(0)}(\omega)$  以及截断参量  $\delta$  有关.

设源光谱  $S^{(0)}(\omega)$  为高斯型

$$S^0(\omega) = \exp \left[ -\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\sigma_0^2} \right] \quad (4)$$

式中  $\sigma_0$  为谱宽. 将式(4)代入式(3)得到

$$W(0, \varphi, z, \omega) = 4\pi^2 \left( \frac{N_w}{z_f} \right)^2 \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \exp \left[ -\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\sigma_0^2} \right] \cdot \frac{1}{1 - \xi^2} \int_0^\xi \int_0^\xi \exp \left[ -\frac{1 + \xi}{1 - \xi} (u^2 + v^2) \right] I_0 \left( \frac{4\sqrt{\xi}}{1 - \xi} uv \right) \cdot \exp \left[ \frac{i\pi N_w(z_f-1)}{z_f} \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right) (u_1^2 - v_2^2) \right] u v d u d v \quad (5)$$

式(5)是分析零阶部分相干 MBGB 通过光阑透镜系

统后轴上点光谱变化的基本方程.

## 2 数值计算结果和分析

利用式(5)对轴上光谱进行数值计算. 图 2 为轴上归一化光谱  $S(\omega) = S(0, z, \omega) / S_{\max}(0, z, \omega)$  随相对距离  $z_f$  的变化. 计算参量为  $\omega_0 = 3.2 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ ,  $\sigma_0 = 0.6 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ ,  $N_w = 1$ ,  $\xi = 0.5$ ,  $\delta = 0.3$ . 后面图中  $\omega_0$ 、 $\sigma_0$  的取值与图 2 相同. 由图 2 可以看出轴上光谱存在多个峰值, 当  $z_f = 0.0105$  时, 光谱最大值对应的频率  $\omega_{\max}$  向大于中心频率  $\omega_0$  的方向移动, 此时发生蓝移. 在临界点  $z_f = 0.0111$  处, 两个主峰相等, 且旁瓣的峰值也相等. 当  $z_f$  继续增大时, 光谱的移动将由蓝移迅速跃变为红移(光谱最大值对应的频率  $\omega_{\max}$  向小于中心频率  $\omega_0$  的方向移动), 此时光谱的移动有一个迅速的突变发生, 这种现象称为光谱开关<sup>[7~9]</sup>. 红移随着  $z_f$  增大而减小, 在  $z_f = 0.0127$  处谱移为零, 此时在主峰两侧有两个相等的旁瓣. 在  $z_f = 0.0148$  处, 再次出现临界点, 但相对临界点  $z_f = 0.0111$  时的两个主峰, 此时两个主峰间的相对距离有所增大. 比较图 2(d) 和(h)可以看出随着  $z_f$  的增大, 单峰时旁瓣的峰值将减小, 且旁瓣的谱移增大.

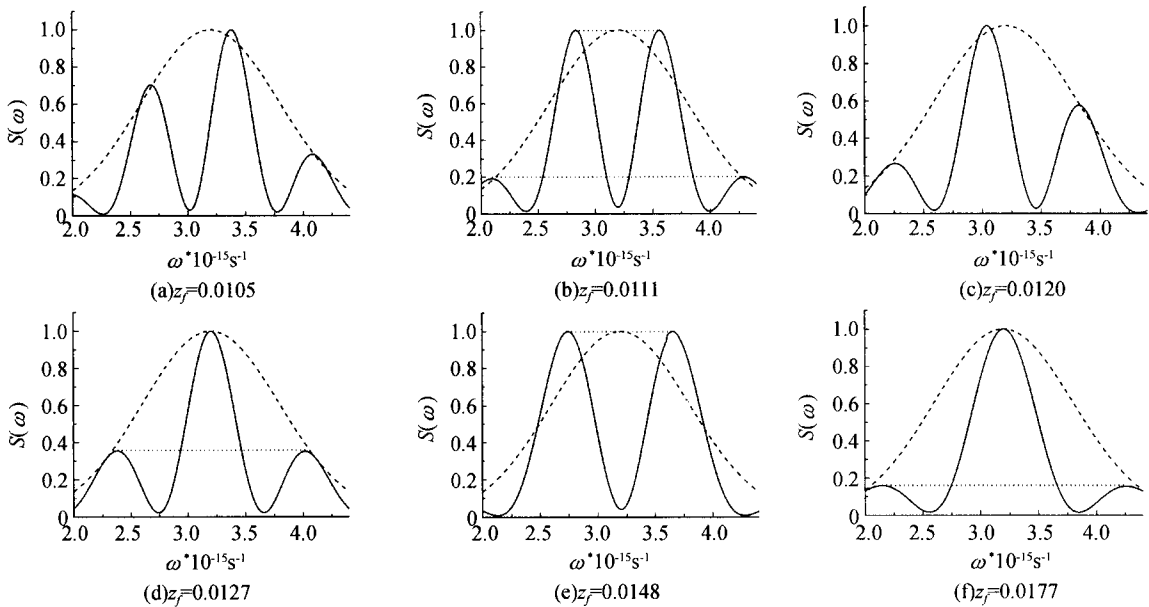


图 2 轴上归一化光谱随相对距离  $z_f$  的变化

Fig. 2 Normalized on-axis spectrum varies with relative distance  $z_f$

图 3 为不同截断参量情况下, 相对光谱移动  $\delta\omega/\omega_0$  随相对传输距离的变化情况. 其中  $N_w = 1$ ,  $\xi = 0.5$ . 由图 3(a)、(b)可以看出轴上有多个光谱开关, 且截断参量增大时, 光谱开关的个数也增多. 但当截断参量增大到一定值(如  $\delta = a/\omega_0 > 2.2$ ) 时, 光

谱开关将消失, 仅表现出蓝移. 由图 3(c)还可以看出, 随着相对传输距离  $z_f$  的增大, 谱移也将逐渐增大; 当  $z_f = 1$  时, 谱移达到最大值, 即几何焦点处轴上光谱的移动具有最大值; 随着  $z_f$  的继续增大, 谱移将逐渐减小.

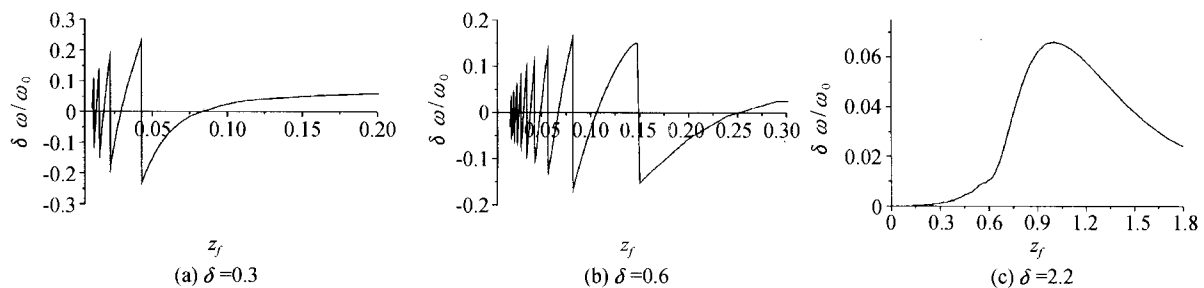
图3 相对光谱移动  $\delta\omega/\omega_0$  随相对传输距离  $z_f$  的变化Fig. 3 Relative spectral shift  $\delta\omega/\omega_0$  versus relative distance  $z_f$ 

图4为不同光束菲涅耳数情况下,相对光谱移动  $\delta\omega/\omega_0$  随相对传输距离  $z_f$  的变化情况. 其中  $\xi=0.5, \delta=0.3$ . 由图可以看出光谱开关的分布与光束

菲涅耳数  $N_w$  有关,且随着  $N_w$  的增大,轴上的光谱开关个数也将增多. 由图还可以看出随着  $z_f$  的增大,相对光谱跃迁量也逐渐增大.

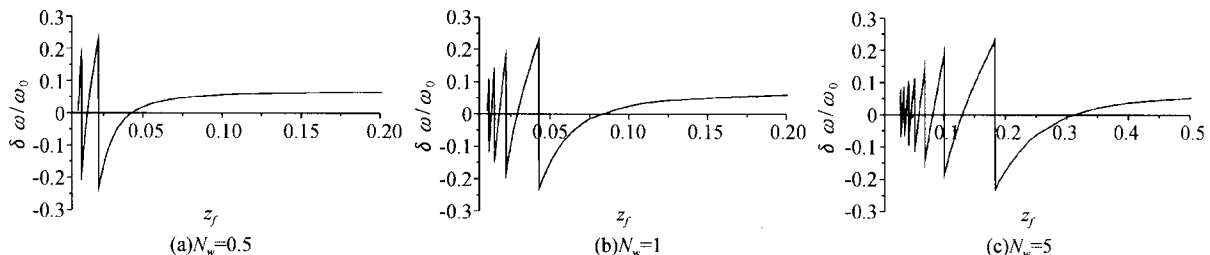
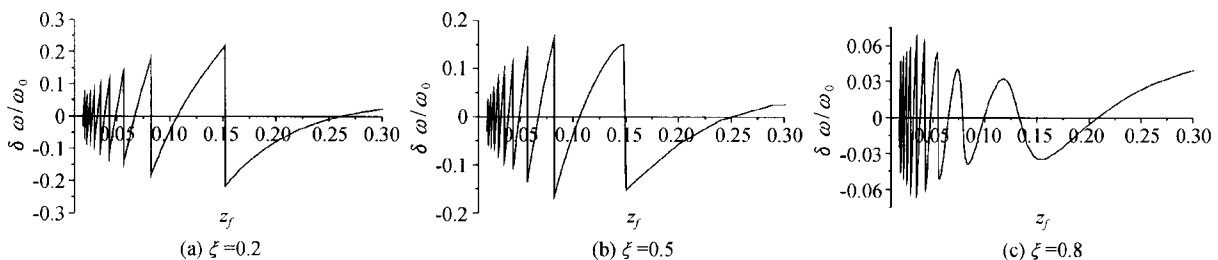
图4 相对光谱移动  $\delta\omega/\omega_0$  随相对传输距离  $z_f$  的变化Fig. 4 Relative spectral shift  $\delta\omega/\omega_0$  versus relative distance  $z_f$ 

图5为不同光谱相干度  $\xi$  情况下,相对光谱移动  $\delta\omega/\omega_0$  随相对传输距离  $z_f$  的变化情况. 其中  $N_w=1, \delta=0.3$ . 可以看出,每条曲线中有9个特殊的  $z_f$  值. 当  $z_f$  等于这9个临界值时,光谱发生快速变

化,即光谱开关出现. 由图5(c)还可看出当  $\xi=0.8$  时,最后两个临界值处光谱开关消失. 比较图5(a)、(b)、(c)可以发现,当相干度  $\xi$  变化时,光谱开关出现的位置将发生小的移动.

图5 相对光谱移动  $\delta\omega/\omega_0$  随相对传输距离  $z_f$  的变化Fig. 5 Relative spectral shift  $\delta\omega/\omega_0$  versus relative distance  $z_f$ 

### 3 结论

本文详细研究了部分相干 MBGB 通过光阑透镜后轴上的光谱位移及光谱开关. 研究结果表明,光谱开关主要与截断参量、光束菲涅耳数以及光谱相干度有关. 光谱开关的个数随着截断参量和菲涅耳数  $N_w$  的增大将增多,但当截断参量增大到一定值时,光谱开关将消失. 例如,当光谱相干度取 0.5 时,截断参量大于 2.2 以后,光谱开关将消失,仅表现出蓝移. 当光谱相干度  $\xi$  比较差(如  $\xi=0.8$ )时,最后两个临界值处光谱开关将消失. 当光谱相干度  $\xi$  变化时,光谱开关出现的位置将发生小的移动.

### 参考文献

- 1 Wolf E. Invariance of spectrum of light on propagation. *Physics Review Letter*, 1986, **56**(13): 1370~1372
- 2 Palma C, Cincotti G. Spectral shifts of a partially coherent field after passing through a lens. *Optics Letter*, 1997, **22**(10): 671~672
- 3 Pan L Z, Lü B D. The spectral switch of partially coherent light in Young's experiment. *IEEE J Quant Electron*, 2001, **37**(11): 1377~1381
- 4 蔡超, 蒲继雄. 部分相干光被色差透镜聚焦的光谱异常现象. *光子学报*, 2004, **33**(12): 1456~1459  
Cai C, Pu J X. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12): 1456~1459

- 5 冯建国, 赵国志. 部分相干光通过光阑-透镜分离系统的光谱特性. *光子学报*, 2002, **31**(11): 1363~1367  
Feng J G, Zhao G Z. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(11): 1363~1367
- 6 Pu J X, Nemoto Shojiro, Zhang H H. Spectral shifts and spectral switches of partially coherent light passing through an aperture. *Optics Communications*, 1999, **162**(1): 57~63
- 7 Pu J X, Nemoto Shojiro. Spectral shifts and spectral switches in diffraction of partially coherent light by a circular aperture. *IEEE J Quant Electron*, 2000, **36**(12): 1407~1411
- 8 Pan L Z, Lü B D. Spectral switching of Gaussian-Schell-model beams through an aperture lens. *IEEE J Quant Electron*, 2002, **38**(4): 340~344
- 9 Kandpal H C, Anand S, Vaishya J S. Experimental observation of phenomenon of spectral switch for a class of partially coherent light. *IEEE J Quant Electron*, 2002, **38**(4): 336~339
- 10 Kandpal H C, Vaishya J S, Joshi K C. Wolf shift and its application in spectroradiometry. *Optics Communications*, 1989, **73**(1): 169~172
- 11 Pu J X, Nemoto Shojiro. Spectral shifts of partially coherent beams of focused by a lens with chromatic aberration. *Optics Communications*, 2002, **207**(1): 1~5
- 12 赵光普, 吕百达. 多色矢量高斯-谢尔模型光束的焦移和焦开关. *光子学报*, 2006, **35**(1): 142~145  
Zhao G P, Lü B D. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1): 142~145
- 13 Ponomarenko S A. A class of partially coherent beams carrying optical vortices. *J Opt Soc Am A*, 2001, **18**(1): 150~156
- 14 Wang L, Wang X Q, Lü B D. Propagation properties of partially coherent modified Bessel-Gauss beams. *Optik*, 2005, **116**(2): 65~70
- 15 Mandel L, Wolf E. *Optical Coherence and Quantum Optics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 185

## Spectrum Properties of Partially Coherent Modified Bessel-Gauss Beams Passing Through an Aperture Lens

Wang Li<sup>1</sup>, Wang Qingfeng<sup>1</sup>, Wang Xiqing<sup>1</sup>, Lü Baida<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Applied Physics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031

<sup>2</sup> Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064

Received date: 2006-01-15

**Abstract** Based on the propagation theory of partially coherent light, the spectral shift and spectral switch of partially coherent modified Bessel-Gauss beams passing through an aperture lens are studied. Numerical results show that the spectral shift and spectral switch of partially coherent modified Bessel-Gauss beams are dependent upon the spectral degree of coherence, Fresnel number and truncation parameter. The number of spectral switch increases with increasing Fresnel number and truncation parameter, but decreases with increasing spectral degree of coherence. When the truncation parameter is larger than a certain value, the spectral switch disappears. For example, when the spectral degree of coherence equals to 0.5, and the truncation parameter is larger than 2.2, the spectral switch disappears and there is only the blue shift.

**Keywords** MBGB; Truncation parameter; Spectral degree of coherence; Fresnel number; Spectral switch



**Wang Li** was born in October of 1960. She received the B. S. degree in physics and Master degree in electromagnetic field and microwaves technology from Southwest Jiaotong University in 1982 and in 1995, respectively. Her research interests are the propagation and transformation of laser beams.