

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0248-04

部分相干平顶光束的光谱传输特性

张 艳, 张 彬, 文 侨

(四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘要 根据平顶光束模型和部分相干光理论,推导出部分相干平顶光束的光谱传输公式,并定量研究部分相干平顶光束在自由空间传输时光谱特性的变化,详细分析了不同阶数的平顶光束在传输过程中的轴上光谱的演变规律以及光源的光谱宽度、空间相干参量等对光谱特性的影响。研究表明,部分相干平顶光束在自由空间传输时,光源的光谱宽度、空间相干参量对相对谱移量影响较大,但对光谱分布随传输距离的总体变化趋势影响较小,而光谱分布随传输距离的总体变化趋势主要由平顶光束的阶数所决定。

关键词 激光光学; 光谱特性; 交叉谱密度函数; 平顶光束; 部分相干

中图分类号 O436; TN012 **文献标识码** A

Spectral Properties of Partially Coherent Flat-Topped Light Beams Propagating

ZHANG Yan, ZHANG Bin, WEN Qiao

(College of Electronics Information, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract Based on the flat-topped beam model proposed by Li and the partially coherent light theory, the spectral propagating expression of the partially coherent flat-topped beam is derived, and its variation of spectral properties is studied quantitatively in the free space. The variation rule of the on-axis spectrum of the flat-topped light beam for different orders in the propagating process is analyzed in detail. The effects of the source's spectrum width and the spatial coherence parameter on the spectral properties are discussed. It shows that when the partially coherent flat-topped beam propagates in the free space, the light source parameters have more effects on the value of the relative frequency shift than on the total change trend of the spectrum along the propagation distance, which is primarily determined by the order of flat-topped beam.

Key words laser optics; spectral properties; cross-spectral density function; flat-topped light beam; partially coherent

1 引 言

Wolf^[1]首次证明了当光源的光谱相干度满足定标定律时,从光源发出的光在传输中保持光谱不变,而违反定标定律的光源发出的光,即使在自由空间中传输其光谱也会发生变化。这种由于光源的光谱相干度违反定标定律的光谱变化就是相关诱导的光谱变化。此后的研究发现,满足定标定律的光源发出的光经光阑衍射后,在衍射光场也观察到光谱的变化,这种光谱的变化称为衍射诱导的光谱变化。针对这两种光谱变化的产生机理,人们进行了大量的理论和实验研究^[1~7]。然而,在现有的光谱特性研究中,没有对这两种机制造成的光谱变化进行综合研究,而实际光束在传输过程中这两种机制造成

的光谱变化常常是同时存在的,并且对于部分相干的平顶光束却较少涉及。本文针对部分相干平顶谢尔模型光束,定量研究了其在自由空间中传输时的光谱特性,从衍射诱导和相干诱导的角度对实际的光谱特性进行了物理解释,详细分析了光源的空间相干参量以及谱宽等因素对光谱变化的影响。

2 理论模型

由经典的光场相干性理论可知,部分相干光可用空间-频率域中的交叉频谱密度函数描述。根据交叉谱密度函数的定义^[8]以及激光光束在自由空间传输的 Collins 公式表示^[9]可得到部分相干光通过自由空间后的交叉频谱密度函数的传输公式为

基金项目: 国家自然科学基金(60108004)资助课题。

作者简介: 张 艳(1977-),女,贵州人,四川大学电子信息学院博士研究生,主要从事光束传输与控制的研究。

E-mail: eileen_zy001@sohu.com

$$W(x_1, x_2, z, \omega) = \frac{k}{2\pi B} \iint W_0(x'_1, x'_2, z=0, \omega) \exp\left\{\frac{ik}{2B}[A(x_1^2 - x_2^2) - 2(x_1x'_1 - x_2x'_2) + D(x_1^2 - x_2^2)]\right\} dx'_1 dx'_2, \quad (1)$$

式中 x'_1, x'_2 为入射面 ($z=0$) 上的两点, x_1, x_2 为出射面 z 上的两点。

根据 Li 等提出的平顶光束模型^[10]以及描述部分相干光的谢尔模型^[11], 部分相干平顶光束的交叉谱密度函数可表示为

$$W_0(x'_1, x'_2, z=0, \omega) = S^0(\omega) \sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M \alpha_m \alpha_{m'} \exp\left\{-\left[\left(m p_m \frac{x_1'^2}{\omega_0^2}\right) + \left(m' p_{m'} \frac{x_2'^2}{\omega_0^2}\right) + \frac{(x'_1 - x'_2)^2}{2\sigma^2(\omega)}\right]\right\}, \quad (2)$$

式中 $S^0(\omega)$ 为源光谱, $\sigma(\omega)$ 为空间相关长度, ω_0 为束腰宽度, M 为平顶光束的阶数, 且

$$\alpha_t = (-1)^{t+1} \frac{M!}{t!(M-t)!}, \quad p_t = \sum_{t=1}^M \frac{\alpha_t}{t}, \quad (t = m, m') \quad (3)$$

将(2)式代入(1)式, 通过复杂的积分变换, 可得到平顶谢尔模型光束在自由空间传输后的交叉谱密度函数解析表达式为

$$W(x_1, x_2, z, \omega) = S^0(\omega) \frac{k\sigma^2(\omega)}{B} \exp\left[-\frac{ikD}{2B}(x_1^2 - x_2^2)\right] \sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M \alpha_m \alpha_{m'} (4g_m g_{m'}^* - 1)^{-1/2} \times \exp\left[-\frac{k^2\sigma^2(\omega)(g_m^* x_1^2 - x_1 x_2 + g_m x_2^2)}{B^2(4g_m g_{m'}^* - 1)}\right], \quad (4)$$

式中

$$g_t = \frac{t\beta^2 p_t}{1-\beta^2} + \frac{i\sigma^2(\omega)kA}{2B} + \frac{1}{2}, \quad (t = m, m') \quad (5)$$

$$\beta = \left[1 + \frac{\omega_0^2}{\sigma^2(\omega)}\right]^{-1/2}, \quad (6)$$

β 为光束空间相干参量, 通常, $0 \leq \beta \leq 1$, $\beta = 1$ 和 $\beta = 0$ 分别对应于完全空间相干光和完全空间非相干光。

令(4)式中的 $x_1 = x_2 = x$, 即可得到平顶谢尔模型光束在自由空间传输后的光谱函数

$$S(x, z, \omega) = S^0(\omega) M(x, z, \omega), \quad (7)$$

式中调制函数为

$$M(x, z, \omega) = \frac{k\sigma^2(\omega)}{B} \sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M \alpha_m \alpha_{m'} (4g_m 4g_{m'}^* - 1)^{-1/2} \exp\left[-\frac{k^2\sigma^2(\omega)(g_m^* + g_m - 1)x^2}{B^2(4g_m g_{m'}^* - 1)}\right], \quad (8)$$

(7), (8)两式表明, 平顶谢尔模型光束在自由空间中传输后的谱特性与源处的谱密度 $S^0(\omega)$, 空间相干参量 β , 平顶光束阶数 M 等有关。

对于轴上光谱 ($x=0$), 分析(8)式可知, 式中 $k\sigma^2(\omega)/B$ 项表示了光源相干特性对光谱函数的调制, 会造成传输过程中光谱的移动; $\sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M \alpha_m \alpha_{m'} (4g_m 4g_{m'}^* - 1)^{-1/2}$ 项中虽然隐含了 β , $\sigma(\omega)$ 等表示相干特性的参量, 但该项更显著地表现了平顶光束的光束轮廓对光谱的调制, 可以等效认为是光阑衍射作用对光谱的调制, 会造成传输过程中光谱的移动。

假设源光谱 $S^0(\omega)$ 为中心频率 ω_0 的洛伦兹线型, 即

$$S^0(\omega) = S_0 \frac{\Gamma^2}{(\omega - \omega_0)^2 + \Gamma^2}, \quad (9)$$

式中 S_0 为正常数, Γ 为源光谱谱宽。

将(9)式代入(7)式, 即可计算源光谱为洛伦兹线型的平顶谢尔模型光束在自由空间中传输后的光谱分布。

为了方便讨论, 计算中采用归一化光谱 $S(\omega)$ 和相对谱位移 $\delta\omega/\omega_0$

$$S(\omega) = \frac{S(x, z, \omega)}{S_{\max}(x, z, \omega)}, \quad \frac{\delta\omega}{\omega_0} = \frac{\omega_{\max} - \omega_0}{\omega_0}, \quad (10)$$

式中 $S_{\max}(x, z, \omega)$ 和 ω_{\max} 分别为 z 处最大光谱强度值及其相应的频率。

3 数值计算和分析

3.1 光束形状对光谱的影响

利用(7)~(10)式进行数值计算, 计算所用参量: 源光谱的中心频率 $\omega_0 = 3 \times 10^{15}$ rad/s, 源光谱的谱宽 $\Gamma = 0.6 \times 10^{15}$ rad/s, 空间相干参量 $\beta = 0.9$, 折射率 $n = 1$ 。图 1 给出了阶数 $M = 15$ 的部分相干平

顶光束在自由空间传输的轴上归一化光谱的三维分布图,图中 z_0 为高斯-谢尔模型(GSM)光束的瑞利长度。可以看出在近场区域光谱出现了扭曲,中心频率交替出现了蓝移和红移;接近远场区域光谱未出现扭曲,而是单一地发生了光谱蓝移。

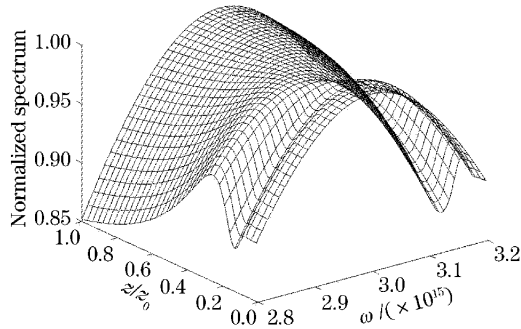


图1 平顶光束在自由空间传输的三维光谱分布
Fig.1 Three-dimensional spectrum of a flat-topped beam propagating in the free space

图2给出了不同阶数的平顶光束在自由空间中传输时其相对谱移随传输距离的变化曲线,当 $M=1$ 时,对应于高斯-谢尔模型光束,它在近场和远场均只发生蓝移。阶数 $M>1$ 的平顶光束传输时,其近场区的轴上光谱会出现蓝移-红移的交替变化过程。已有的理论和实验^[2,3]已证明了高斯-谢尔模型光束经硬边光阑衍射后出现了所谓的光谱开关现象^[2],而当平顶光束的阶数 M 足够大时,平顶-谢尔模型光束的传输特性与经硬边光阑衍射的高斯-谢尔模型光束是完全等效的,因此,也会出现光谱开关现象;而当平顶光束的阶数较小时,则等效于高斯-谢尔模型光束经软边光阑衍射的情况,此时,部分相干平顶光束在近场的光谱相对偏移量是缓慢变化的,并没有出现光谱开关,只是随着阶数的增加,相对谱移量变化明显加剧。进一步分析图2可知,在远

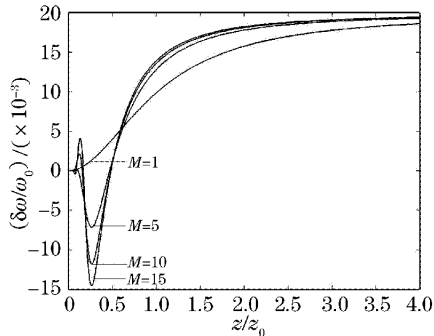


图2 平顶光束阶数对相对谱移的影响
Fig.2 Effect of the beam order of a flat-topped beam on the on-axis relative spectrum shift

场区,不同阶数的部分相干平顶光束的轴上光谱均出现蓝移,且随着光束阶数的增加,蓝移量增大,并且随着传输距离的增加,相对谱移量趋于稳定值。

上述现象的可能解释是,当 $M=1$ 时,可以忽略光阑衍射效应对相对谱移的影响,而只是由于光源的部分相干特性造成了光谱的蓝移。当 $M>1$ 时,则可以认为其光谱同时受到了光源相干特性光阑衍射的调制,在近场区域,光阑衍射对光谱的作用更为显著,以致出现了光谱红移-蓝移交替的现象;在远场区域,光源的相干特性影响更为显著,从而在远场并没有发生光谱开关,而只是发生了光谱蓝移。

3.2 源光谱参量对光谱的影响

图3和图4分别给出了不同光谱宽度和不同空间相干参量的部分相干平顶光束($M=15$)的相对谱移随传输距离的变化曲线。

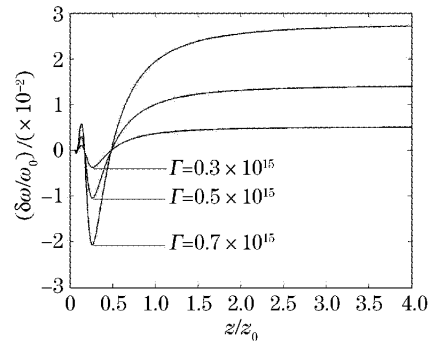


图3 光谱宽度对相对谱移的影响
Fig.3 Effect of spectral widths on the relative spectral shift

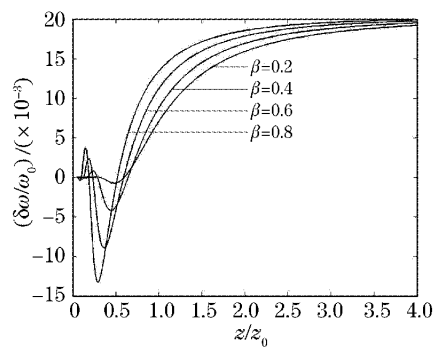


图4 空间相干参量对相对谱移的影响
Fig.4 Effect of the spatial coherence parameter on the relative spectral shift

从图3可以看出,光源的光谱宽度越大,相对谱移量则越大。然而,光谱宽度的变化只影响相对谱移量的大小,而不会影响相对谱移随传输距离的变化趋势,也不会改变零相对谱移量出现的位置。其

主要原因在于光源的光谱宽度越窄,光源的单色性越好,时间相干性越好,传输中的相对谱移量越小;当谱宽足够窄时,从光源发出的光可以看成是理想单色光,在传输过程中光束的相对谱移量为零,说明理想的单色光束在传输中不会发生谱移。

分析图 4 可知,空间相干参量的变化影响了相对谱移量的大小,这是因为空间相干参量越大,空间相干性越好,相对谱移量越大。随着空间相干参量逐渐减小,空间相干性越差,相对谱移量减小,出现零相对谱移量的位置滞后。当光束的空间相干性变化很差(如 $\beta=0.2$)时,光阑衍射作用不明显,光束在近场区域的蓝移几乎消失,而只在远场区域出现蓝移。

4 结 论

给出了部分相干平顶光束在自由空间中传输的光谱公式,研究了部分相干平顶光束在自由空间中传输的光谱特性,给出了归一化的三维光谱分布图,分析了光束在轴上光谱变化特点,从衍射诱导和相干诱导的角度对其进行了较为全面的物理解释。详细讨论了光束阶数和光源参量对光谱的影响,结果表明,光源的谱宽越窄,相对谱移量越小;光源的空间参量越小,相对谱移量越小。部分相干平顶光束在自由空间中传输时,光源的光谱宽度、空间相干参量对相对谱移量影响较大,但对谱移随传输距离的总体变化趋势的影响较小,而谱移随传输距离的总体变化趋势则主要由平顶光束的阶数所决定。

参 考 文 献

- 1 Zagorka Dacic, Emil Wolf. Changes in the spectrum of a partially coherent light beam propagation in free space [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1988, **5**(7): 1118~1126
- 2 Jixiong Pu, ChaoCai, Shojiro Nemoto. The spectral changes of partially coherent light focused by an apertured lens with chromatic aberration [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(4): 239~242
- 3 Weijian Wang, Emil Wolf. Propagation of Gaussian Schell-model beams in dispersive and absorbing media [J]. *J. Modern Optics*, 1992, **39**(10): 2007~2021
- 4 Lü Baida, Pan Liuzhan. The spectral changes and spectral switches of spatially partially coherent polychromatic light diffracted by an apertured [J]. *Science in China (Series G)*, 2003, **33**(5): 454~463
吕百达,潘留占. 被光阑衍射的多色部分空间相干光的光谱异变和光谱开关 [J]. *中国科学(G 辑)*, 2003, **33**(5): 454~463
- 5 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
- 6 Ji Xiaoling, Xiao Xi, Lü Baida. Effect of atmospheric turbulence on the propagation properties of spatially partially coherent polychromatic light [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(11): 3396~4001
季小玲,肖 希,吕百达. 大气湍流对多色部分空间相干光传输特性的影响 [J]. *物理学报*, 2004, **53**(11): 3396~4001
- 7 C. Palma, G. Cincotti, G. Guattari. Spectral shift of a Gaussian Schell-model beam beyond a thin lens [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(2): 378~383
- 8 Leonard Mandel, Emil Wolf. *Optical Coherence and Quantum Optics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 63
- 9 Lü Baida. *Propagation and Control of High-Power Lasers* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999. 23~24
吕百达. *强激光的传输与控制* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 23~24
- 10 Yajun Li, Wolf E. New expressions for flat-topped light beams [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **206**: 211~215
- 11 A. Starikov, E. Wolf. Coherent-mode representation of Gaussian Schell-model sources and their radiation fields [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**: 923~928