

# 部分相干光脉冲经各向异性介质散射的光谱和相干特性

丁超亮 张永涛 王海霞 赵志国 潘留占

(洛阳师范学院物理与电子信息学院, 洛阳 河南 471022)

**摘要** 根据一级波恩近似和非稳态场的散射理论, 研究分析了部分相干光脉冲经各向异性介质散射的光谱和相干特性。通过数值计算给出了介质参数和脉冲参数对各向异性介质散射场光谱密度和光谱相干度的影响。结果表明, 与各向同性介质散射场的光谱密度和光谱相干度分布都具有轴对称性分布相比, 各向异性介质散射场的光谱密度和光谱相干度分布都不对称。最后对所得主要结果进行了物理解释。

**关键词** 相干光学; 散射; 一级波恩近似; 部分相干光脉冲; 光谱密度; 光谱相干度

**中图分类号** O435 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0729001

## Spectra and Coherence Properties of Partially Coherent Pulse Scattered by Anisotropic Media

Ding Chaoliang Zhang Yongtao Wang Haixia Zhao Zhiguo Pan Liuzhan

(College of Physics and Electronic Information, Luoyang Normal University, Luoyang, Henan 471022, China)

**Abstract** Based on the first-order Born approximation and scattering theory of non-stationary fields, the spectra and coherence properties of partially coherent pulse scattered by anisotropic media are studied and analyzed numerically. The dependences of medium parameters and pulse parameters on the spectral density and spectral degree of coherence of partially coherent pulse scattered by an anisotropic medium are given. Results show that, compared with the case of isotropic medium, the distributions of spectral density and spectral degree of coherence of partially coherent pulse scattered by an anisotropic medium are asymmetrical. Finally, physical interpretation of the main results is given.

**Key words** coherence optics; scattering; first-order Born approximation; partially coherent pulse; spectral density; spectral degree of coherence

**OCIS codes** 030.1670; 140.3538; 320.5550; 290.2558

### 1 引言

近年来,随着激光技术的发展,光散射技术成为人们研究物质和认识世界的一种手段,在生物医学诊断、大气环境监测、雷达遥感和成像、材料探测等领域有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。光散射技术的一个特点是可以通过测量散射场的信息获取散射体的信息,因而可以通过对散射场信息的分析了解散射体的特

性。按照光与物质相互作用的形式光散射可分为线性散射和非线性散射。对于光的线性散射,介质对入射光波的响应是线性的,并且可以用折射率或介电常数来描述,近年来引起了广泛的关注,并取得了一些新成果<sup>[2-11]</sup>。然而,这些成果多数限于稳态光束或光波的散射。2002年,Pääkkönen等<sup>[12]</sup>提出了部分相干光脉冲模型,这种光脉冲模型同时考虑了

**收稿日期:** 2013-01-05; **收到修改稿日期:** 2013-03-10

**基金项目:** 国家自然科学基金(61275150,61108090,61078077)、河南省科技厅自然科学基金(112300410062)、河南省教育厅科学技术研究重点项目(13A140797)、河南省高校科技创新团队和人才支持计划项目(13IRTSTHN020,13HASTIT048)

**作者简介:** 丁超亮(1982—),男,博士研究生,副教授,主要从事超短脉冲的传输与变换方面的研究。

E-mail: dingchaoliang2006@126.com

**导师简介:** 潘留占(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事部分相干光、激光传输与变换等方面的研究。

E-mail: panliuzhan@263.net(通信联系人)

脉冲的空间相干性和时间相干性,是具有广泛代表性的一种模型,完全相干的光脉冲可以看作它的一个特例;Torres-Company 等<sup>[13]</sup>讨论了部分相干光脉冲的产生方法;Lajunen 等<sup>[14]</sup>给出了部分相干光脉冲的相干模表示。部分相干光脉冲经光学系统的传输特性也被广泛研究<sup>[15-20]</sup>,Ding 等<sup>[21-22]</sup>研究了部分相干光脉冲经各向异性随机介质散射的光谱和相干特性。本文重点研究了脉冲参数和介质参数对散射场光谱密度和相干度的影响。

## 2 理论模型

在空间-时间域中,部分相干光脉冲的互相关函数可表示为<sup>[12,14]</sup>

$$\Gamma(t_1, t_2) = \Gamma_0 \exp \left[ -\frac{t_1^2 + t_2^2}{2T_0^2} - \frac{(t_1 - t_2)^2}{2T_c^2} + i\omega_0(t_1 - t_2) \right], \quad (1)$$

式中  $T_0$  和  $T_c$  分别为脉冲宽度和脉冲时间相干长度,  $t_1$  和  $t_2$  为任意两个可探测时间点,  $\omega_0$  为载波频率,  $\Gamma_0$  为一常数。对(1)式作傅里叶变换可得到交叉谱密度表达式:

$$W(\omega_1, \omega_2) = W_0 \exp \left[ -\frac{(\omega_1 - \omega_0)^2 + (\omega_2 - \omega_0)^2}{2\Omega_0^2} - \frac{(\omega_1 - \omega_2)^2}{2\Omega_c^2} \right], \quad (2)$$

式中脉冲光谱宽度:

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{1}{T_0^2} + \frac{2}{T_c^2}}, \quad (3)$$

脉冲光谱相干宽度:

$$\Omega_c = \frac{T_c}{T_0} \Omega_0, \quad (4)$$

$$W_0 = \frac{T_0}{2\pi\Omega_0} \Gamma_0, \quad (5)$$

式中  $\omega_1$  和  $\omega_2$  分别为脉冲频率元素,  $W_0$  为常数。(3)和(4)式给出了脉冲宽度、时间相干长度和脉冲光谱宽度、光谱相干宽度间的关系。光谱相干宽度表征脉冲不同频率元素之间的相干性,当  $\Omega_c \rightarrow \infty$  时为常见的完全相干高斯脉冲;而当  $\Omega_c \rightarrow 0$  时为稳态多色光源,此时,脉冲频率元素之间完全非相干。当  $\Omega_c$  取  $0 \sim \infty$  之间的任意值时,可得到部分相干光脉冲。类似于空间相干性不同的光源可以产生相同的远场光强分布,具有相同光谱分布的多色光场不同频率元素之间也可以有不同的相干性。超短光脉冲是非稳态多色光场,因此需要其不同频率元素之间的相干性<sup>[13-14]</sup>。并且,文献[23]指出,超短脉冲的超光速传输现象也是脉冲不同频率元素之间干涉的结果。

假设一个由(2)式表示的具有交叉谱密度函数的部分相干光脉冲,沿单位矢量  $s_0$  入射到如图1所示的准均匀各向异性介质上,介质体积为  $D$ ,经介质散射后分别沿单位矢量  $s_1$  和  $s_2$  方向。在介质表面处的交叉谱密度函数为

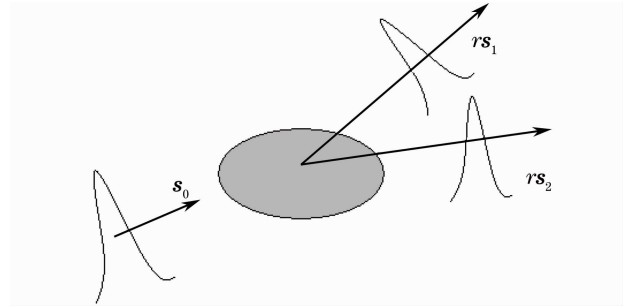


图1 脉冲散射示意图

Fig. 1 Schematic of scattering of a partially plane-wave pulse

$$W^{(i)}(\mathbf{r}'_1, \mathbf{r}'_2, \omega_1, \omega_2) = W_0 \exp \left[ -\frac{(\omega_1 - \omega_0)^2 + (\omega_2 - \omega_0)^2}{2\Omega_0^2} - \frac{(\omega_1 - \omega_2)^2}{2\Omega_c^2} \right] \exp[i(k_2 s_0 \cdot \mathbf{r}'_2 - k_1 s_0 \cdot \mathbf{r}'_1)], \quad (6)$$

式中  $\mathbf{r}'_1$  和  $\mathbf{r}'_2$  分别为入射面上的位置坐标,  $k_1$  和  $k_2$  为波数。假设随机介质具有散射势  $F(\mathbf{r}, \omega_0)$ , 并且散射过程满足一级波恩近似<sup>[24]</sup>, 则散射势相关函数可以表示为

$$C_F(\mathbf{r}'_1, \mathbf{r}'_2, \omega_0) = \langle F^*(\mathbf{r}'_1, \omega_0) F(\mathbf{r}'_2, \omega_0) \rangle_m, \quad (7)$$

式中  $*$  号表示复共轭,  $\langle \rangle$  表示系综平均。则散射远场的交叉谱密度函数在位置矢量  $\mathbf{r} s_1$  和  $\mathbf{r} s_2$  ( $s_1^2 = s_2^2 = 1$ ) 处可以表示为<sup>[25]</sup>

$$W^{(s)}(\mathbf{r} s_1, \mathbf{r} s_2, \omega_1, \omega_2) = W_0 \exp \left[ -\frac{(\omega_1 - \omega_0)^2 + (\omega_2 - \omega_0)^2}{2\Omega_0^2} - \frac{(\omega_1 - \omega_2)^2}{2\Omega_c^2} \right] \frac{\exp[i\mathbf{r}(k_2 - k_1)]}{r^2} \times \iint_{DD} C_F(\mathbf{r}'_1, \mathbf{r}'_2, \omega_0) \exp\{-i[\mathbf{K}_1 \cdot \mathbf{r}'_1 + \mathbf{K}_2 \cdot \mathbf{r}'_2]\} d^3 \mathbf{r}'_1 d^3 \mathbf{r}'_2, \quad (8)$$

式中  $\mathbf{K}_1 = -k_1(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_0)$  和  $\mathbf{K}_2 = k_2(\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_0)$ ,  $k_j = \omega/c (j=1, 2)$ ,  $r$  为介质与观测点的距离。

对于高斯相关准均匀各向异性介质, 其散射势相关函数为<sup>[6, 25]</sup>

$$C_F(\mathbf{r}'_1, \mathbf{r}'_2, \omega_0) = C_0 \exp \left[ -\frac{(x'_1 + x'_2)^2}{8\sigma_{Rx}^2} - \frac{(y'_1 + y'_2)^2}{8\sigma_{Ry}^2} - \frac{(z'_1 + z'_2)^2}{8\sigma_{Rz}^2} - \frac{(x'_1 - x'_2)^2}{2\sigma_{rx}^2} - \frac{(y'_1 - y'_2)^2}{2\sigma_{ry}^2} - \frac{(z'_1 - z'_2)^2}{2\sigma_{rz}^2} \right], \quad (9)$$

式中  $C_0$  为常数;  $\sigma_{Rx}, \sigma_{Ry}, \sigma_{Rz}$  分别为介质在  $x, y, z$  方向的有效半径;  $\sigma_{rx}, \sigma_{ry}, \sigma_{rz}$  分别为介质在  $x, y, z$  方向的相关长度, 一般情况下满足:  $\sigma_{Rx} \gg \sigma_{rx}, \sigma_{Ry} \gg \sigma_{ry}, \sigma_{Rz} \gg \sigma_{rz}$ 。

将(9)式代入(8)式, 可获得

$$\begin{aligned} W^{(s)}(r\mathbf{s}_1, r\mathbf{s}_2, \omega_1, \omega_2) &= W_0 \exp \left[ -\frac{(\omega_1 - \omega_0)^2 + (\omega_2 - \omega_0)^2}{2\Omega_0^2} - \frac{(\omega_1 - \omega_2)^2}{2\Omega_c^2} \right] \frac{\exp[ir(k_2 - k_1)]}{r^2} \times \\ &\quad (2\pi)^3 \sigma_{Rx} \sigma_{Ry} \sigma_{Rz} \sigma_{rx} \sigma_{ry} \sigma_{rz} C_0 \exp \left\{ -\frac{1}{2}\sigma_{Rx}^2 [k_2(s_{2x} - s_{0x}) - k_1(s_{1x} - s_{0x})]^2 - \right. \\ &\quad \frac{1}{2}\sigma_{Ry}^2 [k_2(s_{2y} - s_{0y}) - k_1(s_{1y} - s_{0y})]^2 - \frac{1}{2}\sigma_{Rz}^2 [k_2(s_{2z} - s_{0z}) - k_1(s_{1z} - s_{0z})]^2 - \\ &\quad \frac{1}{8}\sigma_{rx}^2 [k_2(s_{2x} - s_{0x}) + k_1(s_{1x} - s_{0x})]^2 - \frac{1}{8}\sigma_{ry}^2 [k_2(s_{2y} - s_{0y}) + k_1(s_{1y} - s_{0y})]^2 - \\ &\quad \left. \frac{1}{8}\sigma_{rz}^2 [k_2(s_{2z} - s_{0z}) + k_1(s_{1z} - s_{0z})]^2 \right\}, \quad (10) \end{aligned}$$

式中  $s_{0x}, s_{0y}, s_{0z}, s_{1x}, s_{1y}, s_{1z}, s_{2x}, s_{2y}, s_{2z}$  分别为  $\mathbf{s}_0, \mathbf{s}_1$  和  $\mathbf{s}_2$  的三维坐标分量。根据(10)式, 令  $\mathbf{s}_1 = \mathbf{s}_2 = \mathbf{s}$ ,  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ , 可得到散射场的光谱密度和光谱相干度表达式

$$\begin{aligned} S^{(s)}(r\mathbf{s}, \omega) &= \frac{W_0}{r^2} \exp \left[ -\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\Omega_0^2} \right] (2\pi)^3 \sigma_{Rx} \sigma_{Ry} \sigma_{Rz} \sigma_{rx} \sigma_{ry} \sigma_{rz} C_0 \times \\ &\quad \exp \left\{ -\frac{1}{2}k^2 [(s_x - s_{0x})^2 \sigma_{rx}^2 + (s_y - s_{0y})^2 \sigma_{ry}^2 + (s_z - s_{0z})^2 \sigma_{rz}^2] \right\}, \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |\mu^{(s)}(r\mathbf{s}_1, r\mathbf{s}_2, \omega_1, \omega_2)| &= \left| \frac{W^{(s)}(r\mathbf{s}_1, r\mathbf{s}_2, \omega_1, \omega_2)}{\sqrt{S^{(s)}(r\mathbf{s}_1, \omega_1)} \sqrt{S^{(s)}(r\mathbf{s}_2, \omega_2)}} \right| = \exp \left[ -\frac{(\omega_1 - \omega_2)^2}{2\Omega_c^2} \right] \times \\ &\quad \exp \left\{ -\left( \frac{1}{2}\sigma_{Rx}^2 - \frac{1}{8}\sigma_{rx}^2 \right) [k_2(s_{2x} - s_{0x}) - k_1(s_{1x} - s_{0x})]^2 - \right. \\ &\quad \left( \frac{1}{2}\sigma_{Ry}^2 - \frac{1}{8}\sigma_{ry}^2 \right) [k_2(s_{2y} - s_{0y}) - k_1(s_{1y} - s_{0y})]^2 - \\ &\quad \left. \left( \frac{1}{2}\sigma_{Rz}^2 - \frac{1}{8}\sigma_{rz}^2 \right) [k_2(s_{2z} - s_{0z}) - k_1(s_{1z} - s_{0z})]^2 \right\}. \quad (12) \end{aligned}$$

由(11)式和(12)式可知, 光谱密度分布与脉冲参数和介质相关长度有关, 而光谱相干度分布与脉冲参数、介质有效半径和介质相关长度有关。以下将给出数值计算结果说明介质参数和脉冲参数对部分相干光脉冲散射场光谱密度和光谱相干度的影响。

### 3 数值计算结果和分析

利用(11)式和(12)式对部分相干光脉冲经各向异性介质散射的光谱和相干特性做了数值计算和分析, 讨论了介质相关长度对光谱分布的影响, 以及介质有效半径、介质相关长度、脉冲参数对光谱相干度的影响。计算参数为波长  $\lambda_0 = 800 \text{ nm}$ 。为方便计

算, 选择入射脉冲的方向  $\mathbf{s}_0$  沿  $z$  轴, 且沿  $z$  轴方向探测光谱密度和光谱相干度。

图 2 为相对光谱密度  $S^{(s)}(r\mathbf{s}, \omega)/S^{(s)}(r\mathbf{s}_0, \omega)$  随单位坐标  $s_x, s_y$  的变化规律。由图 2 可知, 部分相干光脉冲经各向异性介质[图 2(a), (c)]散射的光谱密度分布与各向同性介质[图 2(b)]情况不同, 各向异性介质散射场的光谱密度分布不对称, 当  $x$  方向介质相关长度小于  $y$  方向时[图 2(a)], 光谱密度在  $x$  方向分布较为集中, 当  $x$  方向介质相关长度大于  $y$  方向时[图 2(c)], 光谱密度在  $y$  方向分布较为集中, 而各向同性介质散射场的光谱密度分布具有轴对称性[图 2(b)]。

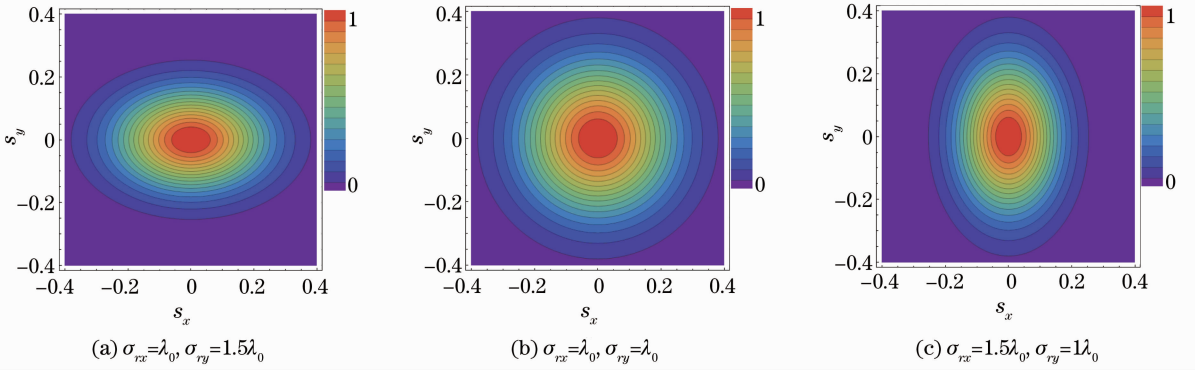


图 2 相对光谱密度  $S^{(s)}(rs, \omega)/S^{(s)}(rs_0, \omega)$  随单位坐标  $s_x, s_y$  的变化规律

Fig. 2 Contour graph of the relative spectral density as a function of unit coordinates  $s_x$  and  $s_y$

图 3 为光谱相干度  $|\mu^{(s)}(rs, rs_0, \omega, \omega_0)|$  随单位坐标  $s_x, s_y$  变化的三维图。计算中选取  $s_1 = s_0, s_2 = s, \omega = 1.2\omega_0, T_0 = 3 \text{ fs}, T_c = 5 \text{ fs}$ 。由图 3 可知,部分相干光脉冲经各向异性介质[图 3(a), (c)]散射的光谱相干度分布与各向同性介质[图 3(b)]情况不同,各向异性介质散射场的光谱相干度分布不对称,当  $x$  方向的介质有效半径和相关长度分别

小于  $y$  方向时[图 3(a)],光谱相干度在  $x$  方向分布较为集中,当  $x$  方向的介质有效半径和相关长度大于  $y$  方向时[图 3(c)],光谱相干度在  $y$  方向分布较为集中,而各向同性介质散射场的光谱相干度分布也具有轴对称性[图 3(b)]。因为,在  $s_1 = s_0, s_2 = s$  条件下,得到的光谱相干度

$$|\mu^{(s)}(rs, rs_0, \omega, \omega_0)| = \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\Omega_c^2}\right] \exp\left[-\left(\frac{1}{2}\sigma_{Rx}^2 - \frac{1}{8}\sigma_{rx}^2\right)k^2(s_x - s_{0x})^2 - \left(\frac{1}{2}\sigma_{Ry}^2 - \frac{1}{8}\sigma_{ry}^2\right)k^2(s_y - s_{0y})^2\right]. \quad (13)$$

由(13)式可知,  $\sigma_{Rx} < \sigma_{Ry}, \sigma_{rx} < \sigma_{ry}$  时,光谱相干度在  $x$  方向分布较为集中,  $\sigma_{Rx} > \sigma_{Ry}, \sigma_{rx} > \sigma_{ry}$  时,光谱相干度在  $y$  方向分布较为集中。

图 4 为介质有效半径和介质相关长度对光谱相

干度  $|\mu^{(s)}(rs, rs_0, \omega, \omega_0)|$  分布的影响。计算参数为  $T_0 = 3 \text{ fs}, T_c = 5 \text{ fs}$ 。由图可见,随着介质有效半径和相关长度的增加,光谱相干度分布集中于中心区域,即  $z$  轴附近。

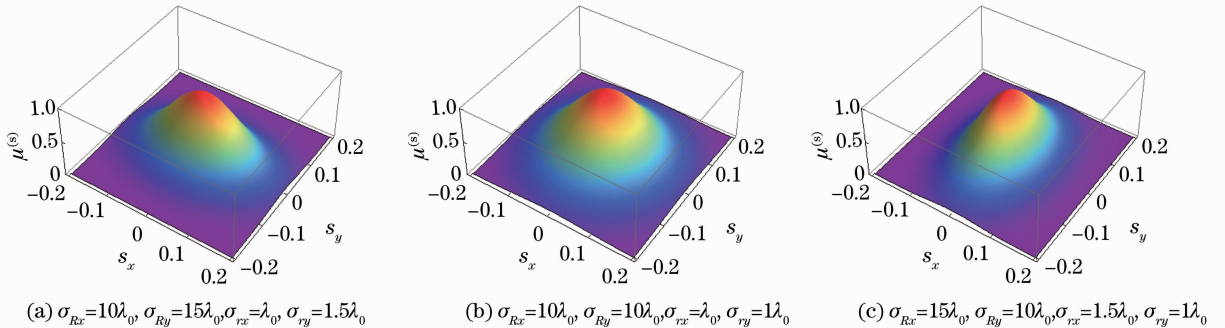


图 3 不同介质方向性条件下光谱相干度  $|\mu^{(s)}(rs, rs_0, \omega, \omega_0)|$  随单位坐标  $s_x, s_y$  变化的三维图

Fig. 3 Spectral degree of coherence as a function of the unit coordinates  $s_x$  and  $s_y$  with different medium directionalities

图 5 为脉冲宽度对光谱相干度  $|\mu^{(s)}(rs, rs_0, \omega, \omega_0)|$  分布的影响,计算参数为  $T_c = 5 \text{ fs}, \sigma_{Rx} = 10\lambda_0, \sigma_{Ry} = 15\lambda_0, \sigma_{rx} = \lambda_0, \sigma_{ry} = 1.5\lambda_0$ 。由图 5 可知,随着脉冲宽度的增加,光谱相干度分布基本不变,但光谱相干度的值变小。这是因为

光谱相干度的数值不仅包含频率之间的相干性,还包含空间上的相干性。在(13)式中包含  $\exp[-(\omega - \omega_0)^2/2\Omega_c^2]$  项,其中  $\Omega_c^2 = \frac{T_c^2}{T_0^2} + \frac{2}{T_0^2}$ ,当  $T_0$  增加时,  $\Omega_c^2$  减小,  $\exp[-(\omega - \omega_0)^2/2\Omega_c^2]$  减小。图 6 为脉冲时间

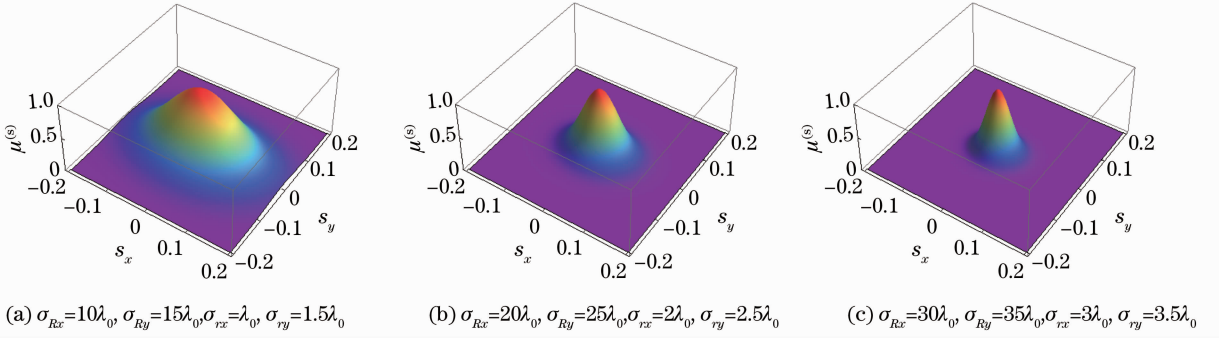

 图 4 不同介质参数下光谱相干度  $|\mu^{(s)}(rs, rs_0, \omega, \omega_0)|$  随单位坐标  $s_x, s_y$  变化的三维图

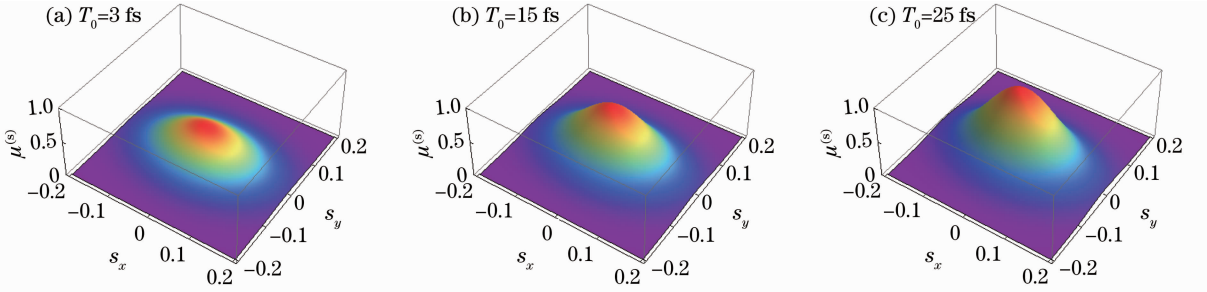
 Fig. 4 Spectral degree of coherence as a function of the unit coordinates  $s_x$  and  $s_y$  with different parameters

 图 5 不同脉冲宽度下光谱相干度  $|\mu^{(s)}(rs, rs_0, \omega, \omega_0)|$  随单位坐标  $s_x, s_y$  变化的三维图

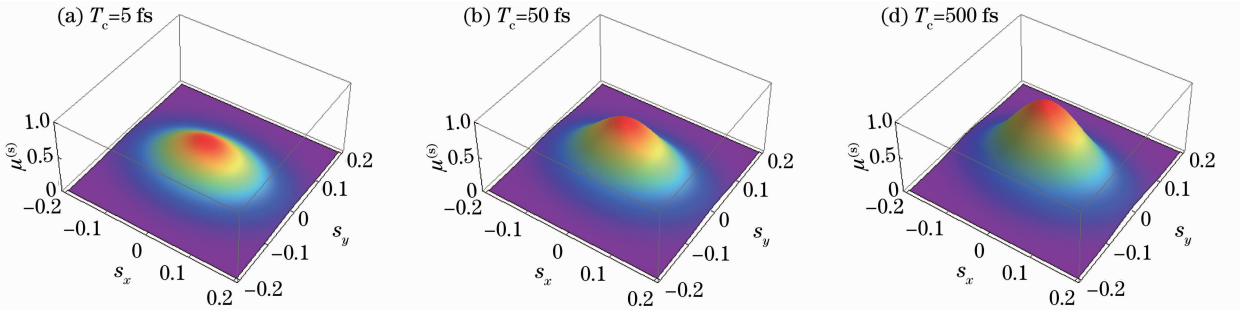
 Fig. 5 Spectral degree of coherence as a function of the unit coordinates  $s_x$  and  $s_y$  with different pulse duration

 图 6 不同脉冲时间相干长度下光谱相干度  $|\mu^{(s)}(rs, rs_0, \omega, \omega_0)|$  随单位坐标  $s_x, s_y$  变化的三维图

 Fig. 6 Spectral degree of coherence as a function of the unit coordinates  $s_x$  and  $s_y$  with different temporal coherent length of pulse

相干长度对光谱相干度  $|\mu^{(s)}(rs, rs_0, \omega, \omega_0)|$  分布的影响,计算参数为  $T_0 = 25 \text{ fs}, \sigma_{R_x} = 10\lambda_0, \sigma_{R_y} = 15\lambda_0, \sigma_{r_x} = \lambda_0, \sigma_{r_y} = 1.5\lambda_0$ 。由图 6 可知,随着脉冲时间相干长度的增加,光谱相干度的值增大。这是因为在(13)式中包含  $\exp[-(\omega - \omega_0)^2/2\Omega_c^2]$  项,其中  $\Omega_c^2 = \frac{T_c^2}{T_0^2} + \frac{2}{T_0^2}$ ,当  $T_c$  增加时,  $\Omega_c^2$  增大,  $\exp[-(\omega - \omega_0)^2/2\Omega_c^2]$  增加。结合图 5 和图 6 可知,在脉冲散射前,脉冲的光谱相干度为  $\exp[-(\omega - \omega_0)^2/2\Omega_c^2]$  [由(6)式得到],即是一个与位置坐标无关的常数;脉冲经介质散射后,光谱相干度的表达式为(13)式,即不仅包含了频率之间的相干性,还包含了空间上的

相干性。因此,光谱相干度与空间坐标有关,但受到脉冲宽度和脉冲时间相干长度的调制。

## 4 结 论

根据一级波恩近似和非稳态场的散射理论研究了部分相干光脉冲经各向异性介质散射的光谱和相干特性,着重研究了脉冲参数和介质参数对散射场光谱密度和光谱相干度的影响。数值计算结果表明,各向异性介质散射场的光谱密度和光谱相干度分布都不对称,当  $x$  方向介质参数小于  $y$  方向时,光谱密度和光谱相干度在  $x$  方向分布较为集中,反之,光谱密度在  $y$  方向分布较为集中,而各向同性介质

散射场的光谱密度和光谱相干度分布具有轴对称性。随着介质有效半径和相关长度的增加,光谱相干度分布集中于中心区域。随脉冲宽度的增加或脉冲时间相干长度的减小,光谱相干度的值减小,但分布不变。本文所得结果为脉冲光散射的实际应用提供了一定的参考意义。

## 参 考 文 献

- 1 L Tsang, J A Kong, K H Ding. Scattering of Electromagnetic Waves: Theories and Applications [M]. New York: Wiley-Interscience, 2000.
- 2 E Wolf, J T Foley, F Gori. Frequency shifts of spectral lines produced by scattering from spatially random media [J]. J Opt Soc Am A, 1989, 6(8): 1142—1149.
- 3 S Sahin, O Korotkova. Scattering of scalar light fields from collections of particles [J]. Phys Rev A, 2008, 78(6): 063815.
- 4 M Lahiri, E Wolf, D G Fischer, *et al.*. Determination of correlation functions of scattering potentials of stochastic media from scattering experiments [J]. Phys Rev Lett, 2009, 102(12): 123901.
- 5 S Sahin, O Korotkova. Effect of the pair-structure factor of a particulate medium on scalar wave scattering in the first Born approximation [J]. Opt Lett, 2009, 34(12): 1762—1764.
- 6 X Y Du, D M Zhao. Scattering of light by Gaussian-correlated quasi-homogeneous anisotropic media [J]. Opt Lett, 2010, 35(3): 384—386.
- 7 T van Dijk, D G Fischer, T D Visser, *et al.*. Effects of spatial coherence on the angular distribution of radiant intensity generated by scattering on a sphere [J]. Phys Rev Lett, 2010, 104(17): 173902.
- 8 C K Hayakawa, V Venugopalan, V V Krishnamachari, *et al.*. Amplitude and phase of tightly focused laser beams in turbid media [J]. Phys Rev Lett, 2009, 103(4): 043903.
- 9 M Fink. Imaging: sharper focus by random scattering [J]. Nature Photon, 2010, 4(5): 269—271.
- 10 S Sukhov, D Haefner, J Bae, *et al.*. Effect of spatial coherence on scattering from optically inhomogeneous media [J]. J Opt Soc Am A, 2012, 29(1): 85—88.
- 11 M Kocifaj, J. Klacka. Scattering of electromagnetic waves by charged spheres; near-field external intensity distribution [J]. Opt Lett, 2012, 37(2): 265—267.
- 12 P Pääkkönen, J Turunen, P Vahimaa, *et al.*. Partially coherent Gaussian pulses [J]. Opt Commun, 2002, 204(1-6): 53—58.
- 13 V Torres-Company, G Minguez-Vega, J Lancis, *et al.*. Controllable generation of partially coherent light pulses with direct space-to-time pulse shaper [J]. Opt Lett, 2007, 32(12): 1608—1610.
- 14 H Lajunen, P Vahimaa, J Tervo. Theory of spatially and spectrally partially coherent pulses [J]. J Opt Soc Am A, 2005, 22(8): 1536—1545.
- 15 A T Friberg, H Lajunen, V Torres-Company. Spectral elementary-coherence-function representation for partially coherent light pulses [J]. Opt Express, 2007, 15(8): 5160—5165.
- 16 H Lajunen, V Torres-Company, J Lancis, *et al.*. Pulse-by-pulse method to characterize partially coherent pulse propagation in instantaneous nonlinear media [J]. Opt Express, 2010, 18(14): 14979—14991.
- 17 C L Ding, L Z Pan, B D Lü. Changes in the spectral degree of polarization of stochastic spatially and spectrally partially coherent electromagnetic pulses in dispersive media [J]. J Opt Soc Am B, 2009, 26(9): 1728—1735.
- 18 Zhao Zhiguo, Wang Haixia, Zhang Yongtao, *et al.*. Propagation properties of spatially and spectrally partially coherent electromagnetic cosh-Gaussian pulsed beams in free space [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(12): 1202006.  
赵志国, 王海霞, 张永涛, 等. 部分空间相干部分光谱相干双曲余弦高斯脉冲电磁光束在自由空间的传输特性 [J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1202006.
- 19 Wang Haixia, Ding Chaoliang, Zhang Yongtao, *et al.*. Polarization properties of spatially and spectrally partially coherent electromagnetic Hermite-Gaussian pulsed beams [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0326001.  
王海霞, 丁超亮, 张永涛, 等. 部分空间相干部分光谱相干厄米高斯脉冲电磁光束的偏振特性 [J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0326001.
- 20 Zhang Guowen, Tao Hua, Pu Jixiong, *et al.*. Focusing characteristics of partially coherent square flat-topped electromagnetic pulsed beams focused by a phase modulated lens [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0102005.  
张国文, 陶 华, 蒲继雄, 等. 部分相干方形平顶电磁脉冲光束经相位调制透镜的聚焦特性 [J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0102005.
- 21 C L Ding, Y J Cai, O Korotkova, *et al.*. Scattering-induced changes in the temporal coherence length and the pulse duration of a partially coherent plane-wave pulse [J]. Opt Lett, 2011, 36(4): 517—519.
- 22 C L Ding, Y J Cai, Y T Zhang, *et al.*. Scattering of a partially coherent plane-wave pulse on a deterministic sphere [J]. Phys Lett A, 2012, 376(42-43): 2697—2702.
- 23 L G Wang, N H Liu, Q Lin, *et al.*. Superluminal propagation of light pulses: a result of interference [J]. Phys Rev E, 2003, 68(10): 066606.
- 24 M Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- 25 E Wolf. Introduction to the Theory of Coherence and Polarization of Light [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

栏目编辑: 张 腾