

# 部分相干涡旋光束叠加场中的合成 相干涡旋及其动态传输\*

程 科 闫红卫 吕百达†

(四川大学激光物理与化学研究所, 成都 610064)  
(2007 年 11 月 12 日收到, 2008 年 2 月 22 日收到修改稿)

对由两束平行、离轴部分相干平顶涡旋光束叠加形成的合成相干涡旋做了详细研究. 结果表明: 合成相干涡旋的数目和位置与光束阶数、相对离轴距离、相干参数以及相对传输距离有关. 在部分相干范畴内“隐藏”的合成相干涡旋对应于完全相干范畴中的合成光涡旋. 并且证明在相干极限下合成相干涡旋就演化为合成光涡旋.

关键词: 相关奇点光学, 合成相干涡旋, 部分相干平顶光束, 离轴合成

PACC: 4225, 4225K

## 1. 引 言

对场振幅(或光强)零值点附近相位奇异特性的研究已发展成为现代光学的一个新分支——奇点光学. 并在原子俘获、微粒操控、光数据存储、光电子学、光信息处理、高分辨计量学和新型超高分辨显微镜等诸多方面展现出诱人的应用前景<sup>[1]</sup>. 近年来, 奇点光学的研究对象已从完全空间相干光扩展到部分空间相干光(相关奇点光学). 研究表明, 对部分相干光, 一般不存在光强为零的光涡旋(强度涡旋), 但却存在某种“隐藏”形式的奇点, 即光谱相干度为零的相干涡旋<sup>[2-4]</sup>, 或称为相关涡旋<sup>[5, 6]</sup>. 另一方面, 文献中对平行、离轴的两束或多束光干涉形成的光强为零值点附近的奇异特性, 包括合成光涡旋的产生、湮没和拓扑电荷的变化等已做了详细研究<sup>[7-9]</sup>. 然而, 迄今为止研究对象仅限于完全空间相干光干涉形成的合成光涡旋. 本文将合成光涡旋的概念推广到部分相干光叠加形成的相干涡旋, 称为合成相干涡旋. 以两束平行、离轴部分相干平顶涡旋光束叠加形成的合成相干涡旋为例, 研究合成相干涡旋的位置和数目的变化以及合成相干涡旋在自由空间中的动态传输行为, 并证明在相干极限下合成相干涡旋就演化为合成光涡旋.

## 2. 合成相干涡旋

在柱坐标系下,  $z = 0$  处涡旋光束的场分布可写为<sup>[6]</sup>

$$E(r, \phi) = f(r)r^{lm} \exp(im\phi) \exp(i\beta), \quad (1)$$

其中  $r$  和  $\phi$  分别是径向和角向坐标,  $f(r)$  是背景光,  $\beta$  是相位,  $m$  是拓扑电荷. 若背景光是平顶光束, 即<sup>[10]</sup>

$$f(r) = \sum_{n=1}^N \frac{(-1)^{n-1}}{N} \binom{N}{n} \exp\left(-\frac{nr^2}{w_0^2}\right), \quad (2)$$

则平顶涡旋光束可写为

$$E(r, \phi, \rho) = \sum_{n=1}^N \frac{(-1)^{n-1}}{N} \binom{N}{n} \exp\left(-\frac{nr^2}{w_0^2}\right) r^{lm} \times \exp(im\phi) \exp(i\beta), \quad (3)$$

其中  $\binom{N}{n}$  是二项式系数,  $w_0$  是束腰宽度,  $N$  是平顶光束的阶数.

部分相干光束的交叉谱密度函数为<sup>[11]</sup>

$$W_0(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = E^*(\mathbf{r}_1)E(\mathbf{r}_2), \quad (4)$$

其中  $\mathbf{r}_1(r_1, \phi_1), \mathbf{r}_2(r_2, \phi_2)$  是  $z = 0$  平面处两点坐标,  $\cdot$  表示系综平均, 上标星号表示复共轭. 并且假定相位的统计分布是谢尔相关的, 即<sup>[5, 6]</sup>

$$\alpha(|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|) = \exp(-|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|^2/\sigma_0^2), \quad (5)$$

\* 国家自然科学基金(批准号: 10574097)资助的课题.

† E-mail: baidalu0@tom.com

其中  $\sigma_0$  是相关长度.

把 (3), (5) 式代入 (4) 式, 部分相干平顶涡旋光束在源  $z=0$  处的交叉谱密度函数为

$$\begin{aligned}
 W_0(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \rho) = & \sum_{n=1}^N \frac{(-1)^{n-1}}{N} \binom{N}{n} \\
 & \times \exp\left(-\frac{n\mathbf{r}_1^2}{w_0^2}\right) \sum_{n'=1}^N \frac{(-1)^{n'-1}}{N} \binom{N}{n'} \\
 & \times \exp\left(-\frac{n'\mathbf{r}_2^2}{w_0^2}\right) \\
 & \times \exp\left[-\frac{(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)^2}{\sigma_0^2}\right] (\mathbf{r}_1 \mathbf{r}_2)^{m_1} \\
 & \times \exp[i m(\phi_2 - \phi_1)]. \quad (6)
 \end{aligned}$$

现考虑两平行非共线的部分相干平顶涡旋光束在  $z=0$  处的合成. 为简单起见, 设两光束参数相同, 其中心都位于  $x$  轴上, 离轴矢量为  $\mathbf{d}(d, \rho)$ ,  $d_x = d > 0$ ,  $d_y = 0$ , 合成光束的交叉谱密度函数为<sup>[12]</sup>

$$\begin{aligned}
 & W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \rho) \\
 = & \sum_{l_1=-1/2}^{1/2} \sum_{l_2=-1/2}^{1/2} E^*(\mathbf{r}_1 - 2l_1 \mathbf{d}) E(\mathbf{r}_2 - 2l_2 \mathbf{d}) \\
 = & W_0(\mathbf{r}_1 + \mathbf{d}, \mathbf{r}_2 + \mathbf{d}, \rho) \\
 & + W_0(\mathbf{r}_1 + \mathbf{d}, \mathbf{r}_2 - \mathbf{d}, \rho) \\
 & + W_0(\mathbf{r}_1 - \mathbf{d}, \mathbf{r}_2 + \mathbf{d}, \rho) \\
 & + W_0(\mathbf{r}_1 - \mathbf{d}, \mathbf{r}_2 - \mathbf{d}, \rho). \quad (7)
 \end{aligned}$$

合成光束的光谱相干度为<sup>[11]</sup>

$$\mu(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \frac{W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)}{[S(\mathbf{r}_1)S(\mathbf{r}_2)]^{1/2}}, \quad (8)$$

其中  $S(\mathbf{r}_i) = W(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_i)$  ( $i=1, 2$ ) 表示  $\mathbf{r}_i$  处的光强. 合成相干涡旋的位置由下列方程<sup>[2, 3]</sup>决定:

$$\text{Re}[\mu(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)] = 0, \quad (9a)$$

$$\text{Im}[\mu(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)] = 0, \quad (9b)$$

式中  $\text{Re}[\cdot]$  和  $\text{Im}[\cdot]$  分别表示取实部和虚部运算. 由 (6)–(9) 式知, 对于固定的  $\mathbf{r}_1$  和  $m$ , 合成相干涡旋与光束阶数  $N$  相对离轴距离  $d/w_0$  和相干参数  $\alpha = \sigma_0/w_0$  有关. 在本文计算中, 取  $\mathbf{r}_1 = (0.2w_0, 0.6w_0)$  和  $m = -1$ .

图 1 给出了当  $d/w_0 = 0.8$ ,  $\alpha = 1$  时合成相干涡旋位置随光束阶数  $N$  的变化, 图中空心圆点和实心圆点分别表示拓扑电荷  $m = -1$  和  $m = +1$  (下同). 从图 1 可见, 随着  $N$  的增加, 合成相干涡旋个数逐渐减少, 如  $N \leq 5$  时有 3 个合成相干涡旋, 而  $N > 5$  时只有 1 个合成相干涡旋. 图 2 给出了阶数  $N = 4, 10$  时光强  $S$  的分布, 其他参数与图 1 相同. 图 2 表明, 当  $N = 4, 10$  时, 均存在光强接近零但是不等于零的两个暗强度核. 图 3 给出了光谱相干度的模  $|\mu|$  (图 3(a), (b)) 及  $\text{Re}\mu = 0$  和  $\text{Im}\mu = 0$  (图 3(c), (d)) 的分布, 其他参数与图 1 相同. 从图 3 可以看到, 当  $N = 4$  时有 3 个合成相干涡旋, 其位置分别是  $A(-0.34w_0, -0.57w_0)$ ,  $B(0, -0.82w_0)$  和  $C(0.53w_0, -0.52w_0)$ , 而当  $N = 10$  时仅有 1 个合成相干涡旋, 其位置是  $A(-0.28w_0, -0.71w_0)$ .

图 4 给出了当  $N = 5$ ,  $\alpha = 2$  时合成相干涡旋位

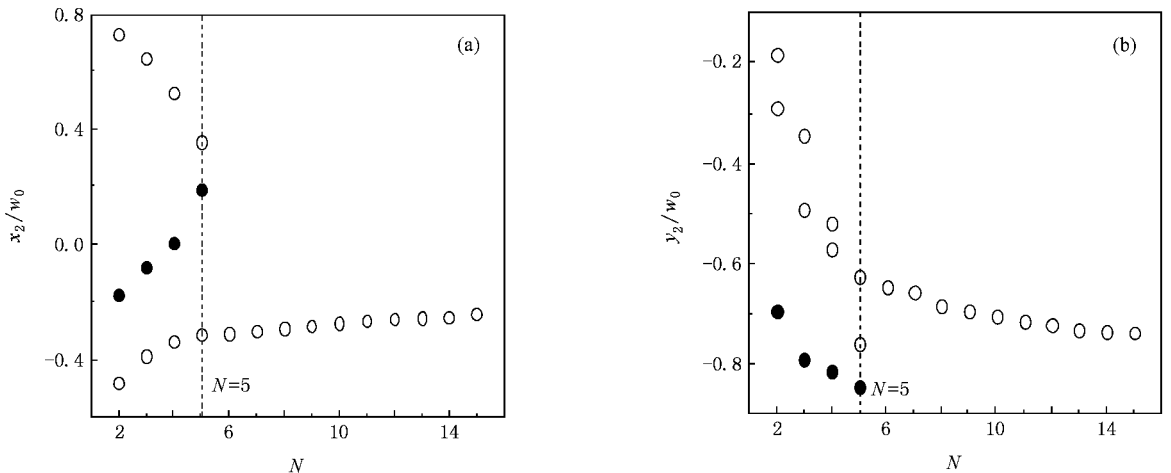


图 1 合成相干涡旋位置随阶数  $N$  的变化  $d/w_0 = 0.8, \alpha = 1$ . (a)  $x_2$  方向 (b)  $y_2$  方向



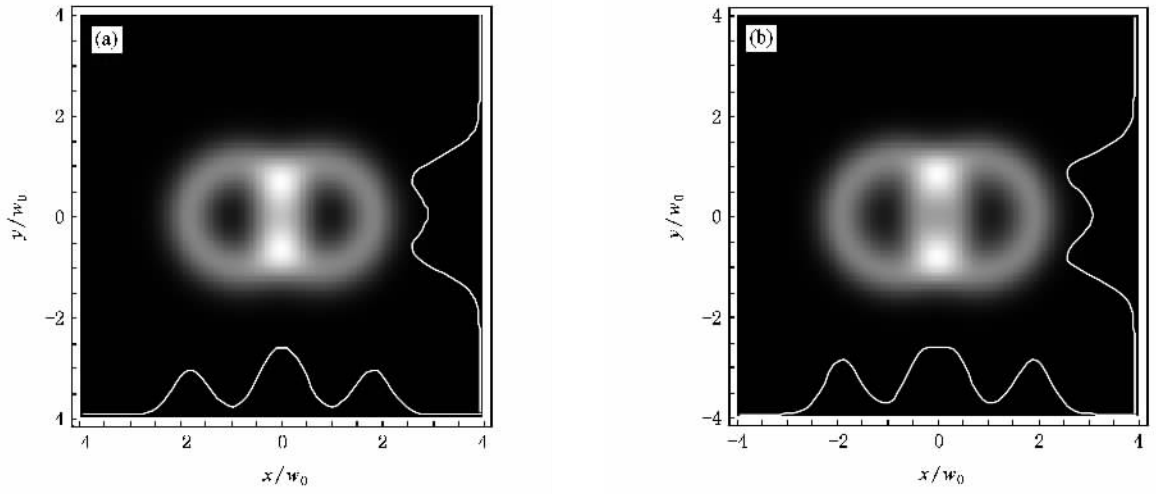


图 2 当  $d/w_0=0.8$   $\alpha=1$  时,  $z=0$  处光强  $S$  的分布 (a)  $N=4$  (b)  $N=10$

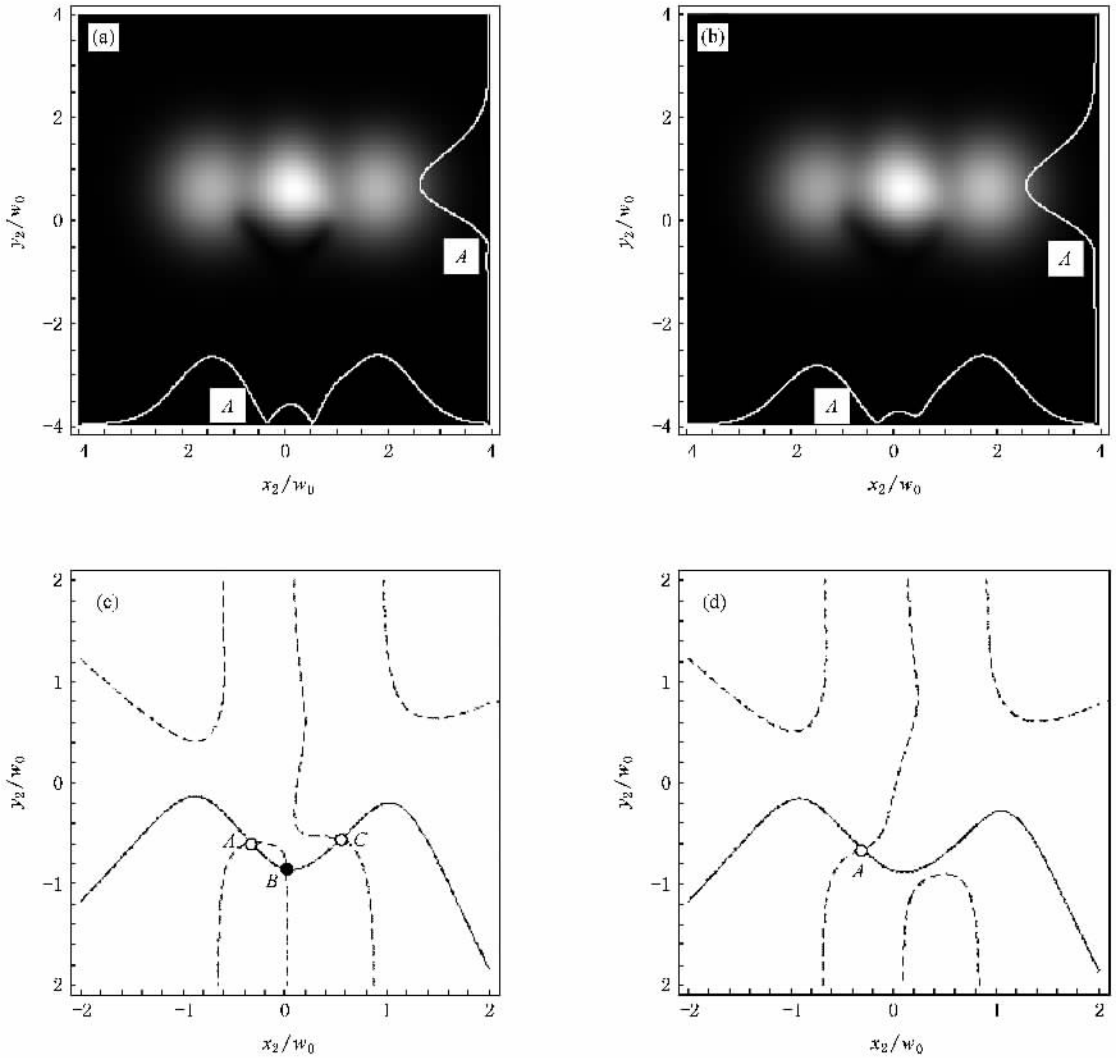


图 3 当  $d/w_0=0.8$   $\alpha=1$  时,  $z=0$  处光谱相干度的模  $|\mu|$  及  $\text{Re}\mu = \alpha$  (实线) 和  $\text{Im}\mu = \alpha$  (虚线) 的分布 (a) 和 (c)  $N=4$ , (b) 和 (d)  $N=10$

置随相对离轴距离  $d/w_0$  的变化.从图 4 可以看到,合成相干涡旋的数目随  $d/w_0$  的增加而增加,如  $d/w_0 < 1$  时有 1 个合成相干涡旋,而  $d/w_0 \geq 1$  时有 3 个合成相干涡旋.图 5 为在相对离轴距离  $d/w_0 = 0.4, 1.5$  时光强  $S$  的分布,其他参数与图 4 相同.当  $d/w_0$  增加时会伴随有暗强度核的增加,如图 5(a)中当  $d/w_0 = 0.4$  时仅有 1 个暗强度核,而图 5(b)中当  $d/w_0 = 1.5$  时有 2 个暗强度核.图 6 给出了光谱相干

度的模  $|\mu|$  (图 6(a)(b))及  $\text{Re}\mu = 0$  和  $\text{Im}\mu = \alpha$  (图 6(c)(d))的分布,其他参数与图 4 相同.从图 6 可以看到,合成相干涡旋数目随着  $d/w_0$  的增加而增加,如图 6(a)(c)中当  $d/w_0 = 0.4$  时有 1 个合成相干涡旋  $A(-0.03w_0, -0.01w_0)$ ,而图 6(b)(d)中当  $d/w_0 = 1.5$  时有 3 个合成相干涡旋,分别为  $A(-1.51w_0, 0.03w_0)$ ,  $B(-0.2w_0, -2.22w_0)$  和  $C(1.5w_0, 0.03w_0)$ .

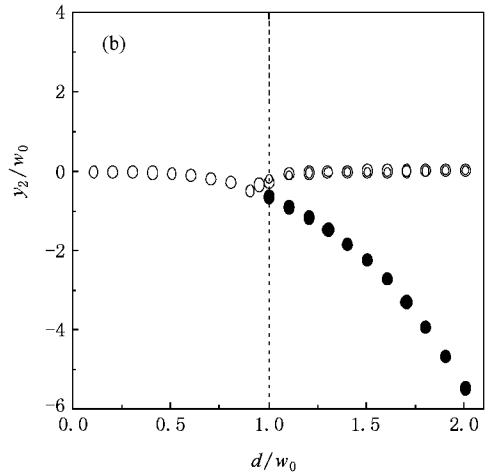
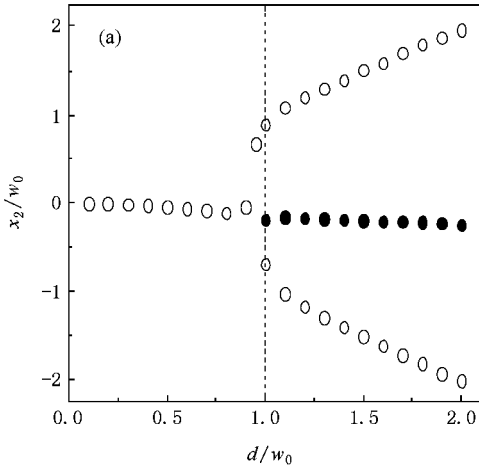


图 4 当  $N = 5, \alpha = 2$  时,合成相干涡旋位置随相对离轴距离  $d/w_0$  的变化 (a)  $x_2$  方向 (b)  $y_2$  方向

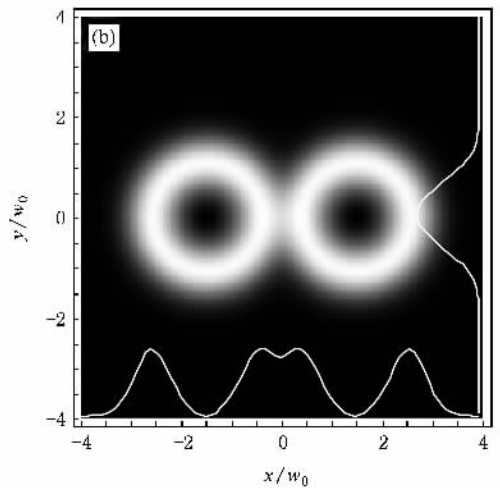
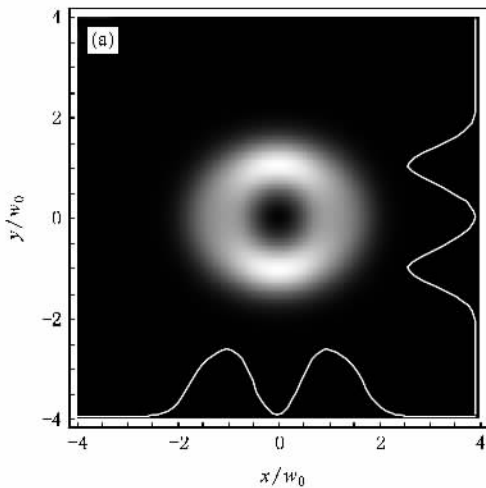


图 5 当  $N = 5, \alpha = 2$  时,  $z = 0$  处光强  $S$  的分布 (a)  $d/w_0 = 0.4$  (b)  $d/w_0 = 1.5$

图 7 给出了当  $N = 5, d/w_0 = 0.5$  时光强  $S$  随相干参数  $\alpha$  的变化.从图 7 可见,合成相干涡旋的数目随  $\alpha$  的增加而减少,如  $\alpha \leq 0.3$  时有 3 个合成相干涡旋,而  $\alpha > 0.3$  时只有 1 个合成相干涡旋,并且合成相干涡旋的位置随着相干参数  $\alpha$  的增加而向原点

(0, 0) 靠近.图 8 给出了相干参数  $\alpha = 0.3, 2, 5, 100$  时光强  $S$  的分布,其他参数与图 7 相同.从图 8 可见,当  $\alpha$  增加时,暗强度核数目会减少,且暗强度核的位置会向原点(0, 0)靠近.图 9 给出了相干参数  $\alpha = 0.3, 2, 5, 100$  时,光谱相干度的模  $|\mu|$  分布.图 10

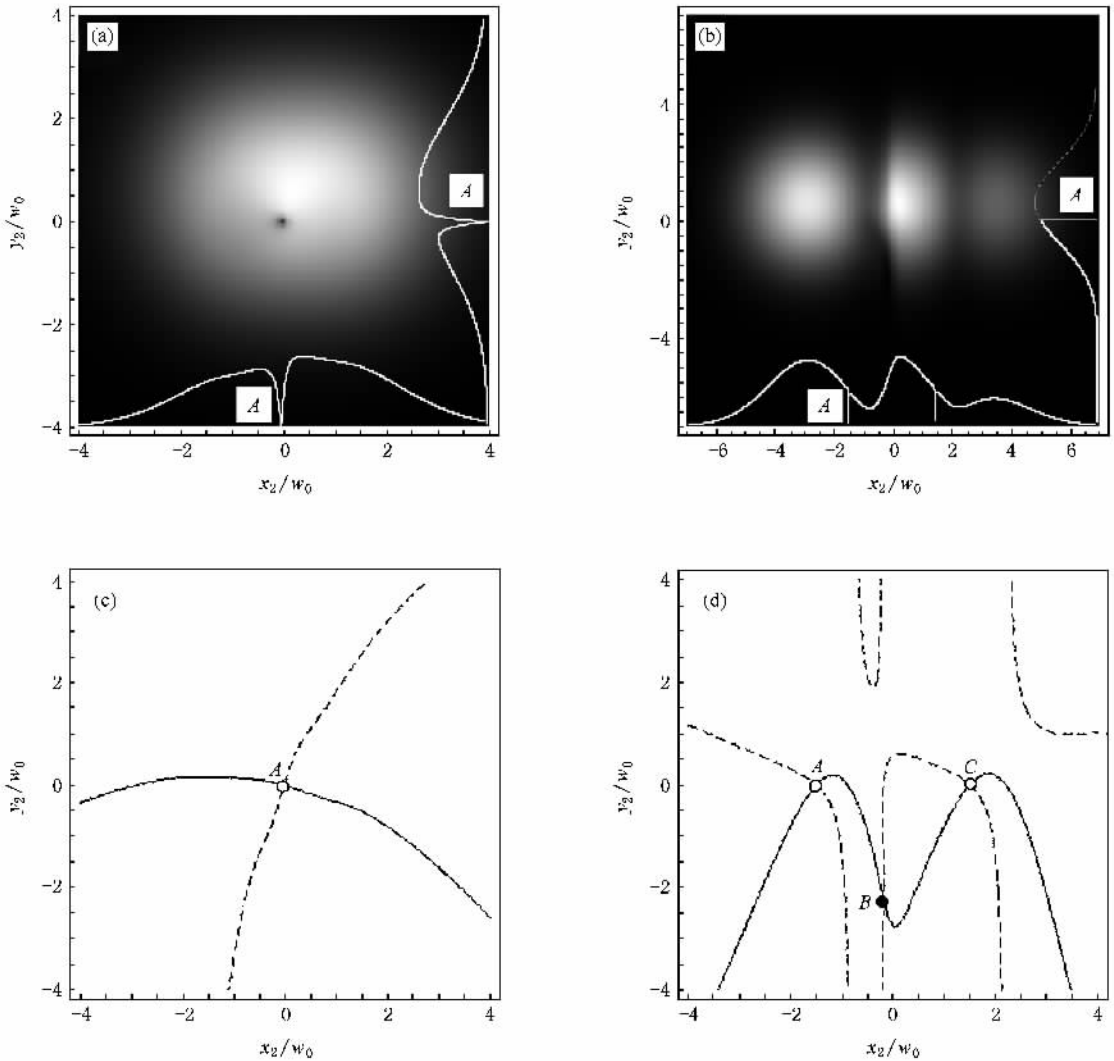


图 6 当  $N = 5, \alpha = 2$  时,  $z = 0$  处光谱相干度的模  $|\mu|$  及  $\text{Re}\mu = \alpha$  (实线) 和  $\text{Im}\mu = \alpha$  (虚线) 的分布 (a) 和 (c)  $d/w_0 = 0.4$ , (b) 和 (d)  $d/w_0 = 1.5$

给出了相干参数  $\alpha = 0.3, 2, 5, 100$  时,  $\text{Re}\mu = 0$  和  $\text{Im}\mu = 0$  的分布, 其他参数均与图 7 相同. 从图 9(a) 和图 10(a) 可以看出, 当  $\alpha = 0.3$  时存在 3 个合成相干涡旋, 位置分别为  $A(-0.11w_0, -0.37w_0)$ ,  $B(-0.39w_0, -0.01w_0)$  和  $C(-0.49w_0, 0.0065w_0)$ . 当  $\alpha > 0.3$  时仅有 1 个合成相干涡旋, 位置分别为  $A(-0.04w_0, -0.04w_0)$  (图 9(b) 和图 10(b)),  $A(-0.01w_0, -0.0075w_0)$  (图 9(c) 和图 10(c)). 图 9(d) 和图 10(d) 表明, 当  $\alpha = 100 \gg 1$  时, 合成相干涡旋位置为  $A(-0.00002w_0, -0.00002w_0)$ . 进一步可以证明, 在相干极限 ( $\alpha \rightarrow \infty$ ) 下, 合成相干涡旋移到原点  $(0, 0)$ , 此处恰好是两束非共线完全相干平顶涡旋光束 ( $N = 5, d/w_0 = 0.5$ ) 的合成光涡旋的位置, 这时合成相干涡旋演化为合成光涡旋. 因为当相干

参数  $\alpha \rightarrow \infty$  时, 将  $x_1 = 0.2w_0, y_1 = 0.6w_0, m = -1, N = 5$  和  $d = 0.5w_0$  代入 (6)–(8) 式, 并将结果代入 (9a) (9b) 式得

$$\begin{aligned} & (0.7x_2 + 0.6y_2 + 0.35)A \\ & + (0.7x_2 + 0.6y_2 - 0.35)B \\ & - (0.3x_2 - 0.6y_2 + 0.15)C \\ & - (0.3x_2 - 0.6y_2 - 0.15)D \\ & = 0, \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned} & (0.6x_2 - 0.7y_2 + 0.3)A \\ & + (0.6x_2 - 0.7y_2 - 0.3)B \\ & + (0.6x_2 + 0.3y_2 + 0.3)C \\ & + (0.6x_2 + 0.3y_2 - 0.3)D \\ & = 0. \end{aligned} \tag{11}$$

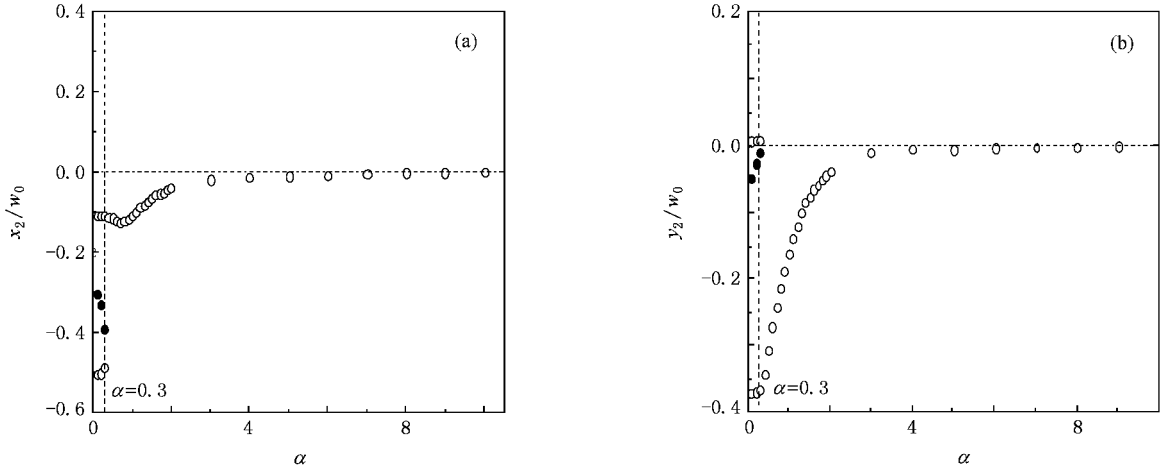


图 7 当  $N = 5, d/w_0 = 0.5$  时, 合成相干涡旋位置随相干参数  $\alpha$  的变化 (a)  $x_2$  方向 (b)  $y_2$  方向

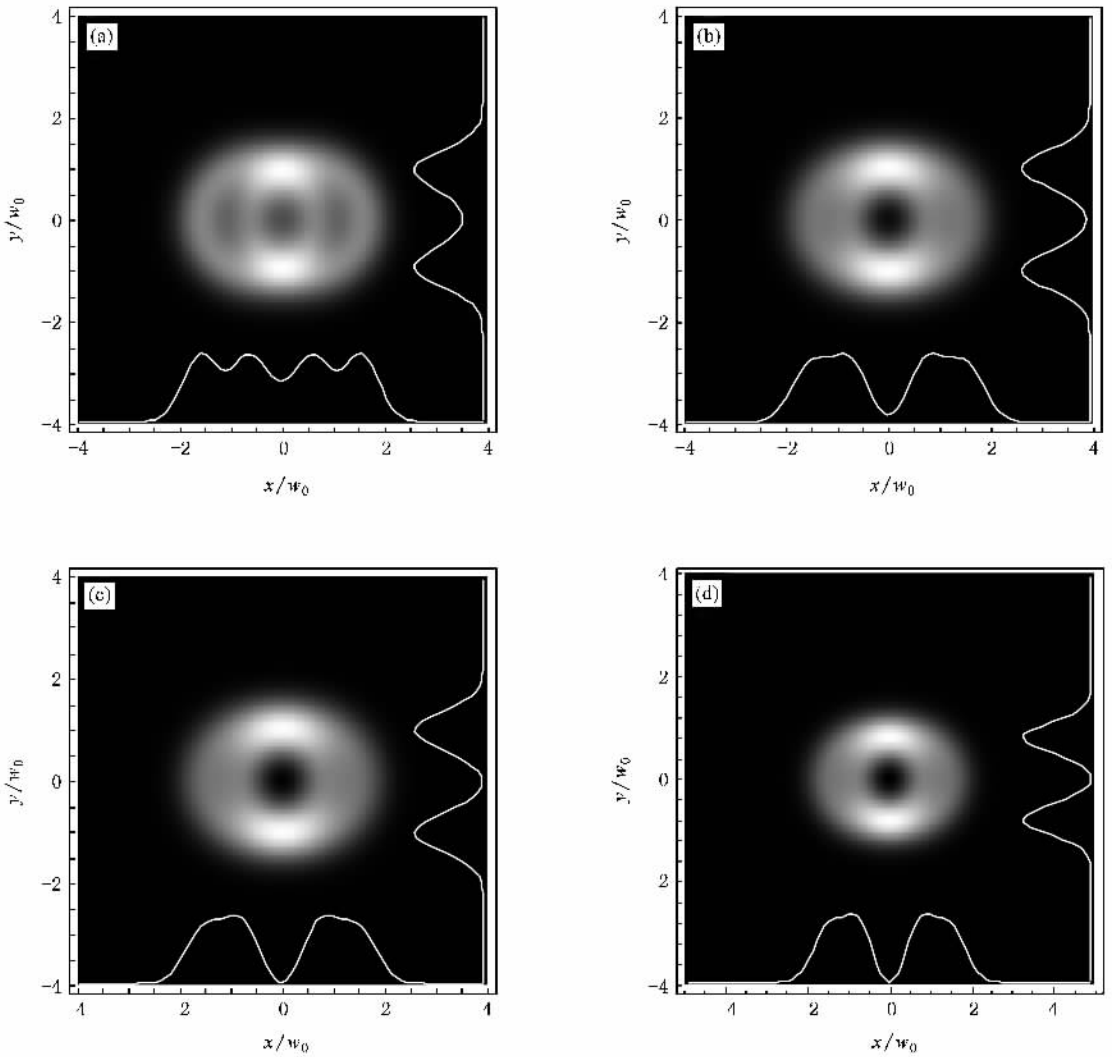


图 8 当  $N = 5, d/w_0 = 0.5$  时,  $z = 0$  处光强  $S$  的分布 (a)  $\alpha = 0.3$  (b)  $\alpha = 2$  (c)  $\alpha = 5$  (d)  $\alpha = 100$

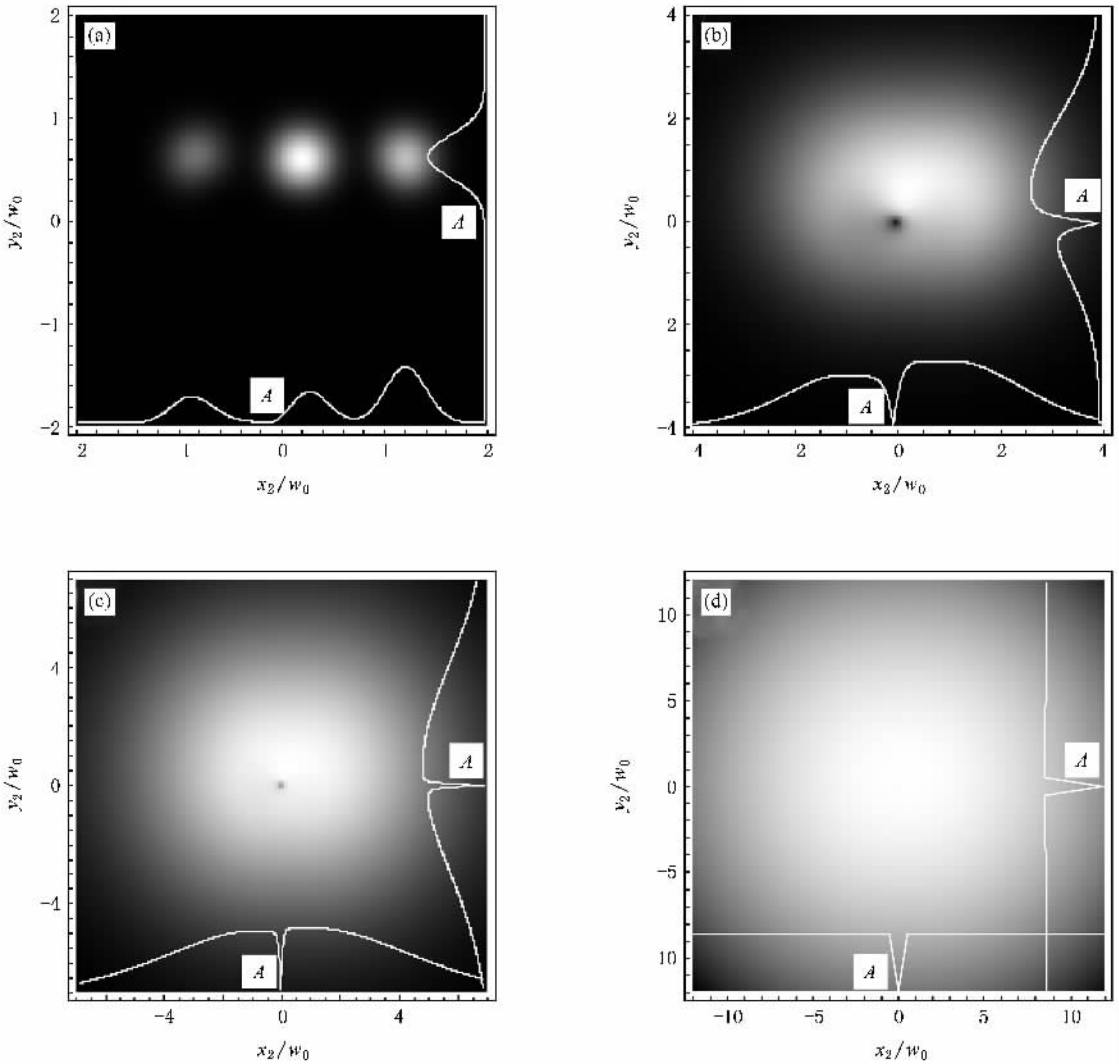


图9 当  $N=5, d/w_0=0.5$  时,  $z=0$  处光谱相干度的模  $|μ|$  分布 (a)  $α=0.3$  (b)  $α=2$  (c)  $α=5$  (d)  $α=100$

其中

$$A = \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N \frac{(-1)^{n+n'-2}}{N^2} \binom{N}{n} \binom{N}{n'} \times \exp\{-n[(x_2 + 0.5)^2 + y_2^2] - 0.85n\}, \quad (12)$$

$$B = \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N \frac{(-1)^{n+n'-2}}{N^2} \binom{N}{n} \binom{N}{n'} \times \exp\{-n[(x_2 - 0.5)^2 + y_2^2] - 0.85n\}, \quad (13)$$

$$C = \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N \frac{(-1)^{n+n'-2}}{N^2} \binom{N}{n} \binom{N}{n'} \times \exp\{-n[(x_2 - 0.5)^2 + y_2^2] - 0.45n\}, \quad (14)$$

$$D = \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N \frac{(-1)^{n+n'-2}}{N^2} \binom{N}{n} \binom{N}{n'} \times \exp\{-n[(x_2 - 0.5)^2 + y_2^2] - 0.45n\}. \quad (15)$$

解方程组(10),(11),得到  $x_2 = y_2 = 0$ . 并且容易证明,当  $x_1, y_1$  取其他值时,即参考点位置变化时,当  $α \rightarrow \infty$ ,方程组(9a)(9b)的解仍为  $x_2 = y_2 = 0$ . 这说明此时合成相干涡旋位置与参考点选择无关.

现考虑两束同参数平行、非共线完全相干平顶光束 ( $m = -1$ ) 的合成. 对应于(7)式,合成光束在  $z = 0$  处的场分布

$$E(x, y, 0) = (x - d - iy) \sum_{n=1}^N \frac{(-1)^{n-1}}{N} \binom{N}{n}$$

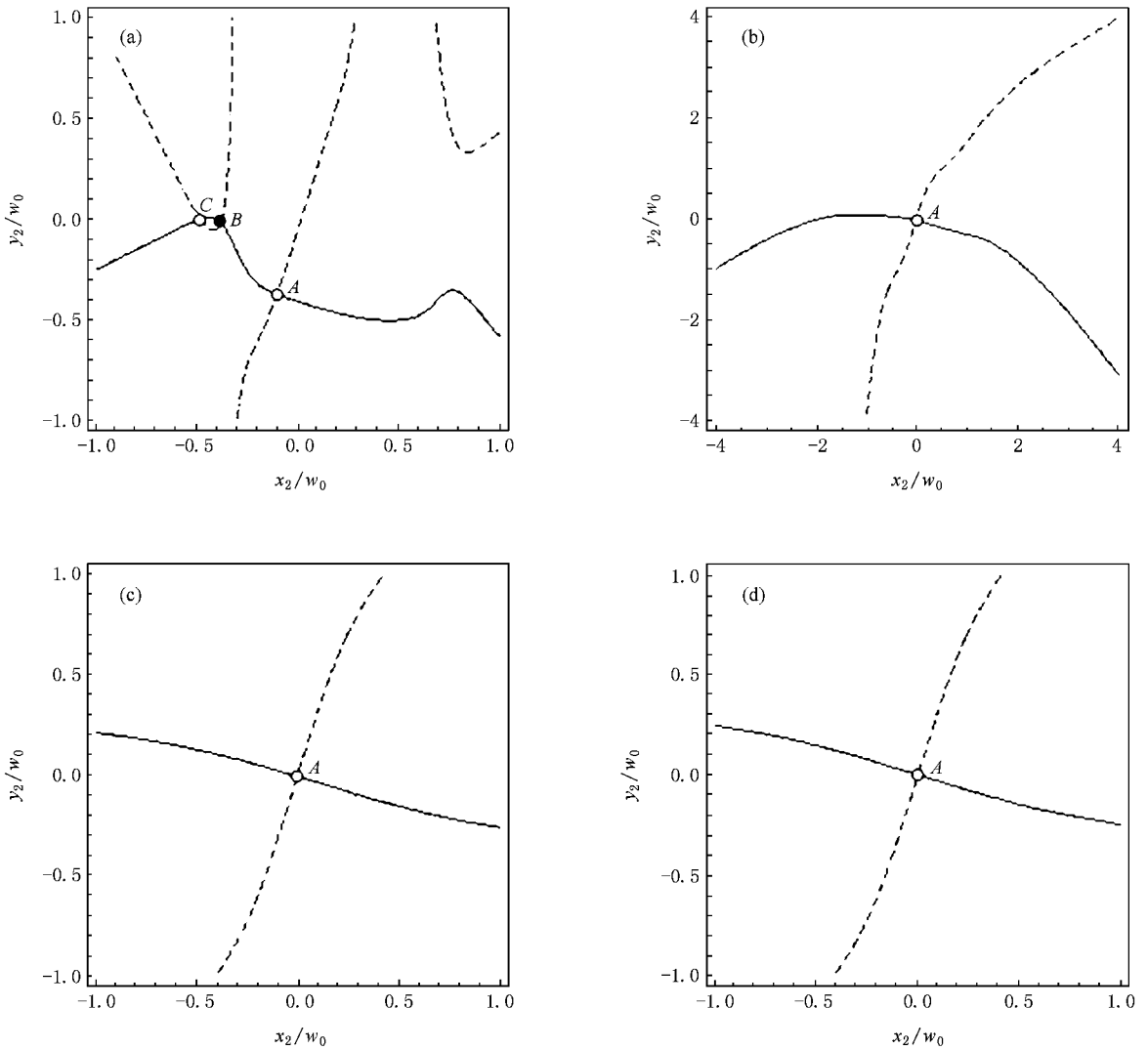


图 10 当  $N=5, d/w_0=0.5$  时,  $z=0$  处  $\text{Re}\mu=\alpha$  (实线) 和  $\text{Im}\mu=\alpha$  (虚线) 的分布 (a)  $\alpha=0.3$  (b)  $\alpha=2$  (c)  $\alpha=5$  (d)  $\alpha=100$

$$\begin{aligned}
 & \times \exp\left\{-\frac{n}{w_0^2}[(x-d)^2 + y^2]\right\} \\
 & + (x+d-iy) \\
 & \times \sum_{n'=1}^N \frac{(-1)^{n'-1}}{N} \binom{N}{n'} \\
 & \times \exp\left\{-\frac{n'}{w_0^2}[(x+d)^2 + y^2]\right\}. \quad (16)
 \end{aligned}$$

合成光涡旋满足条件<sup>[1]</sup>

$$\text{Re}[E(x, y, 0)] = 0, \quad (17)$$

$$\text{Im}[E(x, y, 0)] = 0. \quad (18)$$

方程组(17),(18)的解为

$$x + iy = d \frac{F - G}{F + G}, \quad (19)$$

其中

$$\begin{aligned}
 F &= \sum_{n=1}^N \frac{(-1)^{n-1}}{N} \binom{N}{n} \\
 & \times \exp\left\{-\frac{n}{w_0^2}[(x-d)^2 + y^2]\right\}, \quad (20)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 G &= \sum_{n'=1}^N \frac{(-1)^{n'-1}}{N} \binom{N}{n'} \\
 & \times \exp\left\{-\frac{n'}{w_0^2}[(x+d)^2 + y^2]\right\}, \quad (21)
 \end{aligned}$$

将  $d=0.5w_0, N=5$  代入(19)–(21)式, 得到  $x=y=0$ , 即合成光涡旋位置与合成相干涡旋( $\alpha \rightarrow \infty$ )重合. 于是, 我们证明了在相干极限( $\alpha \rightarrow \infty$ )下, 合成相干涡旋演化成合成光涡旋.

### 3. 合成相干涡旋在自由空间中的动态传输

在自由空间传输时,  $z$  处的交叉谱密度函数由下式<sup>[11]</sup>决定:

$$W_0(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) = \left(\frac{k}{2\pi z}\right)^2 \iint_{\infty} W_0(\mathbf{r}'_1, \mathbf{r}'_2, 0) \times \exp\left\{-\frac{ik}{2z}[(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}'_1)^2 - (\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}'_2)^2]\right\} d\mathbf{r}'_1 d\mathbf{r}'_2, \quad (22)$$

式中  $W_0(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, 0)$  为  $z=0$  处的交叉谱密度函数. 把 (6) 式代入 (22) 式, 并利用关系

$$r_1 \exp(i\phi_1) = x_1 + iy_1, \\ r_2 \exp(i\phi_2) = x_2 + iy_2,$$

将柱坐标系转换为直角坐标系, 得到

$$W_0(x_1, y_1, x_2, y_2, z) = \left(\frac{k}{2zP_1P_2}\right)^2 \sum_{n=1}^N \frac{(-1)^{n-1}}{N} \binom{N}{n} \sum_{n'=1}^N \frac{(-1)^{n'-1}}{N} \binom{N}{n'} \times \left\{ \sigma_0^{-2} + \frac{Q_1^2 + Q_2^2}{\sigma_0^2 P_2} + \frac{k}{2z} [Q_1(ix_1 - y_1) + Q_2(x_1 + iy_1)] \right\} \times \exp\left[-\frac{k^2}{4P_1z^2}(x_1^2 + y_1^2) + \frac{Q_1^2 + Q_2^2}{P_2} - \frac{ik}{2z}(x_1^2 + y_1^2 - x_2^2 - y_2^2)\right]. \quad (23)$$

这里

$$P_1 = \frac{n}{w_0^2} + \frac{1}{\sigma_0^2} + \frac{ik}{2z}, \\ P_2 = \frac{n'}{w_0^2} + \frac{1}{\sigma_0^2} - \frac{ik}{2z} - \frac{1}{P_1\sigma_0^4}, \\ Q_1 = T_1 x_1 - T_2 x_2, \\ Q_2 = T_1 y_1 - T_2 y_2, \\ T_1 = \frac{ik}{2\sigma_0^2 z P_1}, \\ T_2 = \frac{ik}{2z}, \quad (24)$$

其中  $k$  为波数, 与波长  $\lambda$  关系为  $k = 2\pi/\lambda$ . 由 (7), (22)–(24) 式, 两平行、非共线的部分相干平顶涡旋光束合成的交叉谱密度函数为

$$W(x_1, y_1, x_2, y_2, z) = W_0(x_1 + d, y_1, x_2 + d, y_2, z) + W_0(x_1 + d, y_1, x_2 - d, y_2, z)$$

$$+ W_0(x_1 - d, y_1, x_2 + d, y_2, z) + W_0(x_1 - d, y_1, x_2 - d, y_2, z). \quad (25)$$

图 11 给出了合成相干涡旋位置随相对传输距离  $z/z_0$  ( $z_0 = \pi w_0^2/\lambda$ ) 的变化, 参数  $N = 2$ ,  $d/w_0 = 0.8$ ,  $\alpha = 2$ ,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ,  $\mathbf{r}_1 = (0.2w_0, 0.6w_0)$ . 由图 11 可见, 在自由空间传输时, 会出现合成相干涡旋的移动、产生和湮没. 例如, 当  $0 \leq z/z_0 < 0.5$  时, 有 1 个合成相干涡旋; 当  $0.5 \leq z/z_0 \leq 1.5$  时, 有 4 个合成相干涡旋; 当  $2 \leq z/z_0 \leq 3.5$  时, 有 2 个合成相干涡旋; 当  $4 \leq z/z_0 \leq 5$  时, 有 4 个合成相干涡旋; 当  $5.5 \leq z/z_0 \leq 7$  时, 有 6 个合成相干涡旋; 而当  $7.5 \leq z/z_0 \leq 10$  时, 有 8 个合成相干涡旋. 并且, 它们的位置也发生相应的变化.

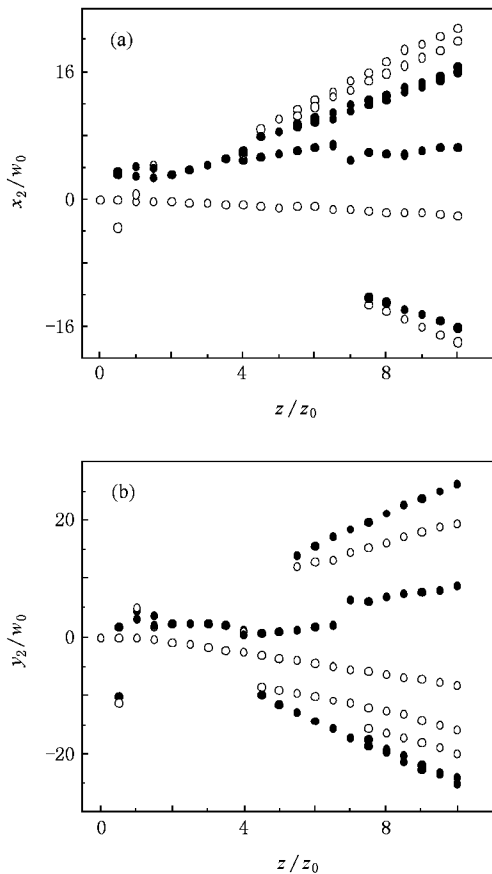


图 11 当  $d/w_0 = 0.5, \alpha = 2, N = 2$  时, 合成相干涡旋位置随相对传输距离  $z/z_0$  的变化 (a)  $x_2$  方向 (b)  $y_2$  方向

### 4. 结 论

本文将完全相干叠加光场中的合成光涡旋推广到部分相干叠加光场中的合成相干涡旋, 并以两束

平行、离轴的部分相干平顶涡旋光束叠加形成的合成相干涡旋为例,做了详细的计算分析.结果表明,合成相干涡旋与平顶光束的阶数  $N$ 、相对离轴距离  $d/w_0$  和相干参数  $\alpha$  等有关.随着  $N, \alpha$  的增加或  $d/w_0$  的减少,合成相干涡旋的数目减少,其位置发生变化.在自由空间传输时,会出现合成相干涡旋的产

生或湮没以及位置移动等现象.在叠加场中存在光强接近零但不等于零的暗强度核.本文还证明,在相干极限下合成相干涡旋就演化为合成光涡旋,此时合成相干涡旋的位置与参考点选择无关.本文研究结果对部分相干涡旋光束叠加场形成的合成相干涡旋特性及其潜在应用有重要参考意义.

- [ 1 ] Soskin M S , Vasnetsov M V 2001 *Prog. Opt.* **42** 219
- [ 2 ] Gbur G , Visser T D 2003 *Opt. Commun.* **222** 117
- [ 3 ] Gbur G , Visser T D , Wolf E 2004 *J. Opt. A : Pure Appl. Opt.* **6** S239
- [ 4 ] Liu P S , Lü B D 2007 *Chin. Phys.* **16** 411
- [ 5 ] Palacios D M , Maleev I D , Marathay A S , Swartzlander G A Jr. 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 143905
- [ 6 ] Maleev I D , Palacios D M , Marathay A S , Swartzlander G A Jr 2004 *J. Opt. Soc. Am. B* **21** 1895
- [ 7 ] Molina-Terriza G , Recolons J , Torner L 2000 *Opt. Lett.* **25** 1135
- [ 8 ] Pyragaitė V , Stabinis A 2002 *Opt. Commun.* **213** 187
- [ 9 ] Maleev I D , Swartzlander G A Jr 2003 *J. Opt. Soc. Am. B* **20** 1169
- [ 10 ] Li Y 2002 *Opt. Lett.* **27** 1007
- [ 11 ] Mandel L , Wolf E 1995 *Optical Coherence and Quantum Optics* ( Cambridge : Cambridge University Press ) p170
- [ 12 ] Li B Z , Lü B D 2003 *J. Opt. A : Pure Appl. Opt.* **5** 303

## Composite coherence vortices in the superimposed field of partially coherent vortex beams and their propagation dynamics \*

Cheng Ke Yan Hong-Wei Lü Bai-Da<sup>†</sup>

( *Institute of Laser Physics and Chemistry , Sichuan University , Chengdu 610064 , China* )

( Received 12 November 2007 ; revised manuscript received 22 February 2008 )

### Abstract

The composite coherence vortices formed by superimposing two parallel , off-axis partially coherent flattened vortex beams are studied in detail. It is shown that the number and position of composite coherence vortices depend on the beam order , relative off-axis distance and coherence parameter , as well as on the free-space relative propagation distance. The “ hidden ” composite coherence vortex in the partial coherence regime corresponds to its counterpart—the composite optical vortex in the full coherence regime. In the coherent limit the composite coherence vortex evolves into the composite optical vortex.

**Keywords :** correlation singular optics , composite coherence vortex , partially coherent flattened beam , off-axis superposition

**PACC :** 4225 , 4225K

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 10574097 ).

<sup>†</sup> E-mail : baidalu0@tom.com