

带球差的部分相干光束在海洋湍流中传输的光强特性

张艳红, 刘永欣*, 陈子阳

华侨大学信息科学与工程学院福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021

摘要 利用广义惠更斯-菲涅耳衍射积分公式得到了带球差的部分相干光束在海洋湍流中传输的光强表达式, 通过数值计算研究了带球差的部分相干光束在海洋湍流中传输的光强特性。研究表明:均方温度耗散率 χ_T 较大、单位质量液体中的湍流动能的耗散率 ϵ 较小或者温度和盐度波动的相对强度 ω 较大时,海洋湍流对光束的扩展影响较大; χ_T 较小、 ϵ 较大或者 ω 较小时,海洋湍流对光束的扩展影响较小;光束的相干长度越小,或者球差越大,光束越扩散。光束在海洋中传输时,球差参数对光束扩散的影响明显小于海洋参数对光束扩散的影响。

关键词 海洋光学; 传输; 带球差的部分相干光束; 海洋湍流; 光强

中图分类号 O436.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.110103

Light Intensity Characteristics of Propagation Partially Coherent Beams with Spherical Aberration in Oceanic Turbulence

Zhang Yanhong, Liu Yongxin, Chen Ziyang

Fujian Provincial Key Laboratory of Light Propagation and Transformation, College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

Abstract A light intensity expression of the partially coherent beam with spherical aberration propagating in the oceanic turbulence is obtained by the extended Huygens-Fresnel diffraction integral formula. Light intensity characteristics of the partially coherent beams with spherical aberration propagating in the seawater are investigated by means of numerical calculation. Results show that the larger the mean square temperature dissipation rate χ_T is, the smaller the dissipation rate of turbulence kinetic energy of unit mass liquid ϵ is, or the larger the relative intensity of temperature and salinity fluctuations ω is, the more obvious the effect of oceanic turbulence on the expansion of the beam is. The smaller the χ_T is, the larger the ϵ is, or the smaller the ω is, the smaller impact of oceanic turbulence on the beam expansion is. At the same time, the smaller the coherence length of the beam is, or the greater the spherical aberration is, the more the beam spread is. However, the influences of the spherical aberration parameters on the diffusion of the laser are significantly weaker than that of the oceanic parameters when the beam propagates in the seawater.

Key words oceanic optics; propagation; partially coherent beams with spherical aberration; oceanic turbulence; light intensity

OCIS codes 010.4455; 010.7060; 260.1960

1 引言

大气湍流和海洋湍流都是自然界中普遍存在的随机介质。大气湍流主要受温度波动的影响,而海洋湍流则是由温度和盐度波动导致的,其模型的能谱较大气湍流更为复杂,所以一直以来少有人研究。最近,随着海洋探测和光通信技术的发展,光在海洋中的传输、成像引起了人们越来越多的兴趣。Korotkova 等^[1-3]先后研究了高斯-谢尔模型电磁光束在海洋湍流传输中的偏振度和光谱的变化,以及海洋湍流对高斯光束传

收稿日期: 2017-05-08; 收到修改稿日期: 2017-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(61505059)、福建省教育厅科技项目(JA15038)、华侨大学高层次人才启动经费(12BS231)

作者简介: 张艳红(1979—),女,硕士,讲师,主要从事光电子方面的研究。E-mail: 37657887@qq.com

* 通信联系人。E-mail: yongxin@hqu.edu.cn

输过程中的光强和相干特性的影响。随后,国内研究者也展开了一系列激光束在海洋湍流中传输的研究^[4-13]。Fu等^[4-5]研究了部分相干径向偏振空心光束和多高斯-谢尔模型光束在海洋湍流中的传输特性。Tang等^[6-8]先后研究了径向偏振光束、电磁涡旋光束和电磁非均匀相干光束在海洋湍流中的传输特性;Lu等^[9-11]研究了海洋湍流对高斯阵列光束和部分相干环状偏心光束传输特性的影响,以及海洋湍流中部分相干环状光束的空间相干性变化;之后,人们又研究了海洋湍流和阵列光束参数对光束质量的影响以及异常空心光束在海洋湍流中传输质量的变化^[12-13]。

激光束在经过非理想光学元件后通常会产生像差,例如球差等。因此,实际中的一些激光束一般都具有球差。Wang等^[14]研究了带球差的部分相干光束在大气湍流中的传输特性,并与自由空间中光束的传输进行了比较。Li等^[15]实验上研究了球差光束在大气湍流中的传输特性(包括光强分布和桶中功率PIB)。本文主要对带球差的部分相干光束在海洋湍流中传输的光强特性进行详细研究。

2 理论推导

假设一带有球差的高斯-谢尔模型光束在海洋中传输,光场在光源平面的交叉谱密度可以表示为^[14]

$$W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, 0, \omega) = \exp\left(-\frac{\mathbf{r}_1^2 + \mathbf{r}_2^2}{\omega_0^2}\right) \exp\left[-\frac{(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)^2}{L_c^2}\right] \exp[-ikC_4(\mathbf{r}_1^4 - \mathbf{r}_2^4)], \quad (1)$$

式中 ω 为频率, $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ 是光源平面的位置矢量, ω_0, L_c 分别代表束腰宽度和相干长度, C_4 为球差系数, λ 为波长, $k=2\pi/\lambda$ 为波数。

令 $s=C_4\omega_0^4$, (1)式可以表示为

$$W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, 0, \omega) = \exp\left(-\frac{\mathbf{r}_1^2 + \mathbf{r}_2^2}{\omega_0^2}\right) \exp\left[-\frac{(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)^2}{L_c^2}\right] \exp\left[-\frac{iks(\mathbf{r}_1^4 - \mathbf{r}_2^4)}{\omega_0^4}\right]. \quad (2)$$

当光束在海洋中传输时,根据广义的惠更斯-菲涅耳原理,利用源平面的交叉谱密度矩阵元可得到光束在海洋湍流中传输到 $Z=z$ 平面的交叉谱密度为^[8]

$$W(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, z, \omega) = \frac{k^2}{4\pi^2 z^2} \iiint \iiint W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, 0, \omega) \exp\left[-\frac{ik}{2z}(\mathbf{r}_1 - \boldsymbol{\rho}_1)^2 + \frac{ik}{2z}(\mathbf{r}_2 - \boldsymbol{\rho}_2)^2\right] \times \\ \exp\left[-\frac{1}{\rho_0^2}(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)^2\right] d^2\mathbf{r}_1 d^2\mathbf{r}_2, \quad (3)$$

式中 $\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2$ 为 $Z=z$ 平面上两点的位置矢量, ρ_0 为球面波在海洋湍流中传播后的相干长度,可表示为^[8]

$$\rho_0 = \left(\frac{3}{\pi^2 k^2 z \int_0^\infty \kappa^3 \Phi_n(\kappa) d\kappa}\right)^{1/2}, \quad (4)$$

式中 κ 为空间波数, $\Phi_n(\kappa)$ 为海水折射率波动的功率谱。关于海水折射率波动的空间能谱模型,可以从文献[1,16]中得到,这个模型是由温度波动和盐度波动组成的二元线性多项式。当海洋湍流为各向同性且均匀时,这个模型是成立的,经过特殊化考虑之后的一维谱可写成^[1]

$$\Phi_n(\kappa) = 0.388 \times 10^{-8} \epsilon^{-1/3} \kappa^{-11/3} [1 + 2.35(\kappa\eta)^{2/3}] f(\kappa, \omega, \chi_T), \quad (5)$$

式中 ϵ 为单位质量液体中的湍流动能的耗散率,可以在 $10^{-4} \sim 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ 范围内取值; $\eta=10^{-3} \text{ m}$ 为Kolmogorov微尺度(内尺度); ω 为温度和盐度波动的相对强度,海洋中 ω 的取值范围是 $-5 \sim 0$ 。 $\omega=0$ 时,(5)式成为盐度场波动的频谱^[16]。 $f(\kappa, \omega, \chi_T)$ 可以表示为^[1]

$$f(\kappa, \omega, \chi_T) = \frac{\chi_T}{\omega^2} (\omega^2 e^{-A_T \kappa^\delta} + e^{-A_S \kappa^\delta} - 2\omega e^{-A_{TS} \kappa^\delta}), \quad (6)$$

式中 χ_T 为均方温度耗散率, $A_T=1.863 \times 10^{-2}$, $A_S=1.9 \times 10^{-4}$, $A_{TS}=9.41 \times 10^{-3}$, $\delta=8.284(\kappa\eta)^{4/3} + 12.978(\kappa\eta)^2$ 。

将(2)式代入(3)式,可以得到

$$W(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, z, \omega) = \frac{k^2}{4\pi^2 z^2} \iiint \iiint \exp\left(-\frac{\mathbf{r}_1^2 + \mathbf{r}_2^2}{\omega_0^2}\right) \exp\left[-\frac{(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)^2}{L_c^2}\right] \exp\left[-\frac{iks(\mathbf{r}_1^4 - \mathbf{r}_2^4)}{\omega_0^4}\right] \times$$

$$\exp\left[-\frac{ik}{2z}(\mathbf{r}_1 - \boldsymbol{\rho}_1)^2 + \frac{ik}{2z}(\mathbf{r}_2 - \boldsymbol{\rho}_2)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{\rho_0^2}(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)^2\right] d^2\mathbf{r}_1 d^2\mathbf{r}_2. \quad (7)$$

令 $\boldsymbol{\rho}_1 = \boldsymbol{\rho}_2 = \boldsymbol{\rho}$, 可以得到输出平面的光强分布为

$$I(\boldsymbol{\rho}, z) = \frac{k^2}{4\pi^2 z^2} \iiint \exp\left(-\frac{\mathbf{r}_1^2 + \mathbf{r}_2^2}{\omega_0^2}\right) \exp\left[-\frac{ik}{2z}(\mathbf{r}_1 - \boldsymbol{\rho})^2 + \frac{ik}{2z}(\mathbf{r}_2 - \boldsymbol{\rho})^2\right] \times \\ \exp\left[-\frac{(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)^2}{L_c^2}\right] \exp\left[-\frac{iks(\mathbf{r}_1^4 - \mathbf{r}_2^4)}{\omega_0^4}\right] \exp\left[-\frac{1}{\rho_0^2}(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)^2\right] d^2\mathbf{r}_1 d^2\mathbf{r}_2. \quad (8)$$

令 $\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2 = \mathbf{R}_1, \mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2 = \mathbf{R}_2$, 应用积分公式 $\int_0^{2\pi} \exp[-ix \cos(\varphi - \phi)] d\phi = 2\pi J_0(x)$ [$J_0(\cdot)$ 为第一类零阶贝塞尔函数], 将(8)式化简为

$$I(\boldsymbol{\rho}, z) = \frac{k^2}{z^2} \iint \exp\left(-\frac{\mathbf{R}_1^2 + \mathbf{R}_2^2}{2\omega_0^2}\right) \exp\left(-\frac{\mathbf{R}_1^2}{L_c^2}\right) J_0\left\{\left[\frac{k}{2z} + \frac{ks(\mathbf{R}_1^2 + \mathbf{R}_2^2)}{2\omega_0^4}\right] \mathbf{R}_1 \mathbf{R}_2\right\} \times \\ J_0\left(\frac{k\boldsymbol{\rho}\mathbf{R}_1}{z}\right) \exp\left(-\frac{\mathbf{R}_1^2}{\rho_0^2}\right) \mathbf{R}_1 \mathbf{R}_2 d\mathbf{R}_1 d\mathbf{R}_2. \quad (9)$$

3 数值模拟与分析

利用数学软件 Mathematica 对(9)式进行编程, 通过模拟计算得到图 1~5, 若无特殊说明, 计算参数为: $\omega_0 = 2 \text{ cm}, L_c = 1 \text{ cm}, \lambda = 0.6328 \text{ }\mu\text{m}, ks = 5, \eta = 10^{-3} \text{ m}, \epsilon = 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}, w = -2.5, \chi_T = 10^{-10} \text{ K}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

图 1 给出了带球差的部分相干光束在海水中传输时不同传输距离处的归一化光强分布。从图中可以看出, 带球差的部分相干光束在海洋介质中传输时, 归一化光强分布始终保持高斯分布不变, 但随着传输距离的增加, 光束逐渐展开, 光斑变大, 并且随着海洋的均方温度耗散率 χ_T 的增加, 光束扩展越明显, 但当 $\chi_T \leq 10^{-10}$ 时, χ_T 对光强分布的影响已不再明显。

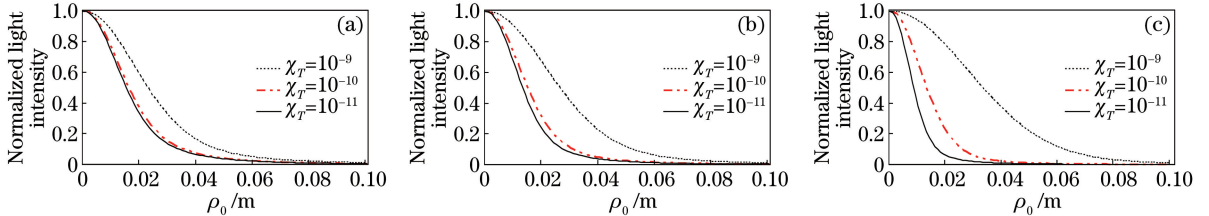


图 1 带球差的部分相干光束在海洋湍流中传输时不同传输距离处的归一化光强分布。

(a) $z = 0.5 \text{ km}$; (b) $z = 1 \text{ km}$; (c) $z = 5 \text{ km}$

Fig. 1 Normalized light intensity of partially coherent beams with spherical aberration at different propagation distances in oceanic turbulence. (a) $z = 0.5 \text{ km}$; (b) $z = 1 \text{ km}$; (c) $z = 5 \text{ km}$

图 2 为带球差的部分相干光束在不同海洋湍流中传输 $z = 1 \text{ km}$ 的归一化光强分布。图 2(a)为在不同 ϵ 下的海洋湍流中的光强分布, 随着 ϵ 的减小, 带球差的部分相干光束的光斑扩展变明显, 但 $\epsilon \geq 10^{-7}$ 时, ϵ 对

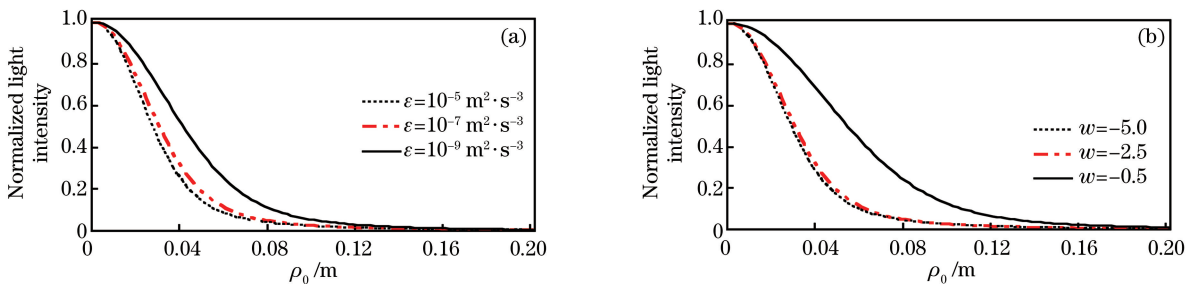


图 2 带球差的部分相干光束在不同海洋湍流中传输 $z = 1 \text{ km}$ 的归一化光强分布。(a) ϵ 不同; (b) w 不同

Fig. 2 Normalized light intensity of partially coherent beams with spherical aberration at $z = 1 \text{ km}$ in oceanic turbulence under different parameters. (a) Different ϵ ; (b) different w

光强分布的影响很小。图 2(b)为不同 ω 下的海洋湍流中的光强分布,随着 ω 的增大,部分相干光束的光斑扩展越来越明显,但 $\omega \leq -2.5$ 时, ω 对光强分布的影响很小。可以看出,带球差的部分相干光束在海洋湍流中传输时, χ_T 较大、 ϵ 较小和 ω 较大时,海洋湍流较强,对光束的扩展影响也较明显; χ_T 较小、 ϵ 较大和 ω 较小时,海洋湍流较弱,对光束的扩展影响较小。

上面讨论了带球差的部分相干光束在不同海洋湍流中传输时的归一化光强,接下来讨论不同参数的带球差的部分相干光束在海洋湍流($\chi_T = 10^{-10}$, $\epsilon = 10^{-7}$, $\omega = -2.5$)中传输的归一化光强。

图 3 给出了不同相干长度的带球差的部分相干光束在海洋湍流中分别传输 1 km 和 5 km 的归一化光强分布。由图可知,相干长度越小,光束扩散越明显,并且这种现象随着传输距离的增加基本不变。

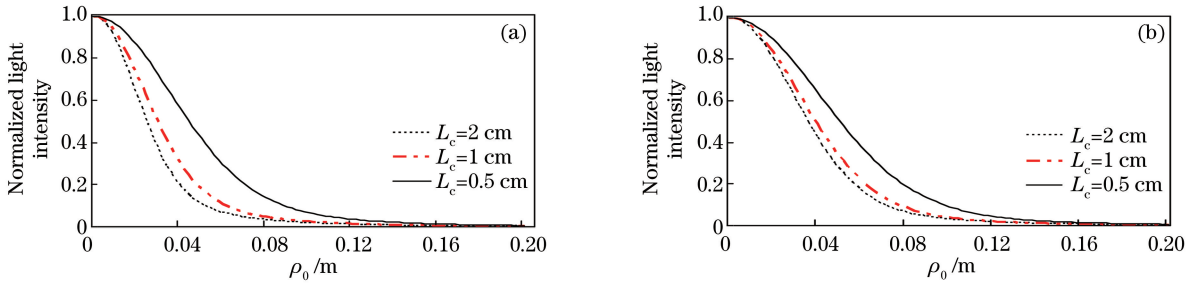


图 3 不同相干长度的带球差的部分相干光束在海洋湍流中传输(a) $z=1$ km 和(b) $z=5$ km 的归一化光强分布
Fig. 3 Normalized light intensity of partially coherent beams with spherical aberration under different coherent lengths at (a) $z=1$ km and (b) $z=5$ km in oceanic turbulence

图 4 是带不同球差的部分相干光束在海洋湍流中传输 1 km 和 5 km 的归一化光强分布。由图可知,随着球差参数的增大,光束扩展变得明显,但传输距离不同时,不同球差对光束扩展的影响都很小。比较图 4 与图 1(b)、(c)以及图 2 可知,在海洋中传输时,光束的球差参数对光束扩散的影响明显弱于海洋参数。

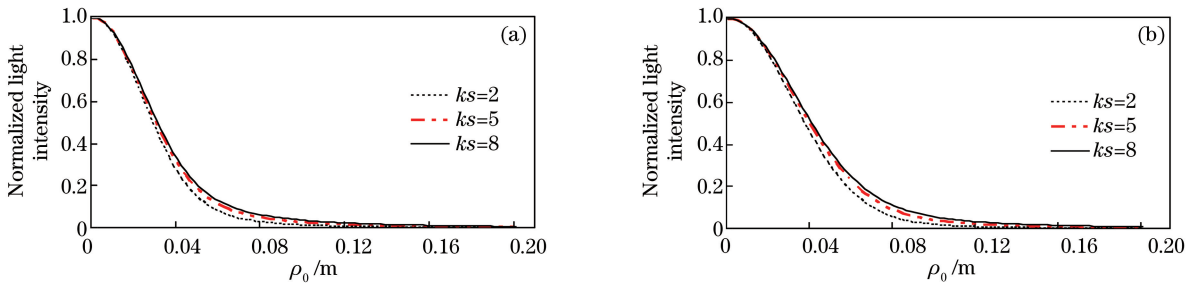


图 4 带不同球差的部分相干光束在海洋湍流中传输(a) $z=1$ km 和(b) $z=5$ km 的归一化光强分布
Fig. 4 Normalized light intensity of partially coherent beams with spherical aberration under different coherent lengths at (a) $z=1$ km and (b) $z=5$ km in oceanic turbulence

4 结 论

主要研究了带球差的部分相干光束在海洋湍流介质中传输的光强特性。研究表明: χ_T 较大、 ϵ 较小或者 ω 较大时,海洋湍流对光束扩展的影响比较明显; χ_T 较小、 ϵ 较大或者 ω 较小时,海洋湍流对光束扩展的影响较小。同时,光束的相干长度越小,球差越大,光束扩散也越明显。但在海洋中传输时,光束的球差参数对光束扩散的影响明显弱于海洋参数对光束扩散的影响。该研究结果在海洋光通信以及成像方面具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Korotkova O, Farwell N. Effect of oceanic turbulence on polarization of stochastic beams[J]. Optics Communications, 2011, 2849(7): 1740-1746.
- [2] Shechepakina E, Farwell N, Korotkova O. Spectral changes in stochastic light beams propagating in turbulent ocean[J].

- Applied Physics B, 2011, 105: 415-420.
- [3] Farwell N, Korotkova O. Intensity and coherence properties of light in oceanic turbulence[J]. Optics Communications, 2012, 285(6): 872-875.
- [4] Fu W Y, Zhang H M. Propagation properties of partially coherent radially polarized doughnut beam in turbulent ocean [J]. Optics Communications, 2013, 304(1): 11-18.
- [5] Fu Wenyu, Zhang Hanmou, Zheng Xingrong. Propagation properties of multi-Gaussian Schell-model beams through oceanic turbulence[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(s1): s113002.
付文羽, 张汉谋, 郑兴荣. 多高斯-谢尔模型光束在海洋湍流中的传输特性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(s1): s113002.
- [6] Tang M M, Zhao D M. Propagation of radially polarized beams in the oceanic turbulence[J]. Applied Physics B, 2013, 111(4): 665-670.
- [7] Xu J, Tang M M, Zhao D M. Propagation of electromagnetic non-uniformly correlated beams in the oceanic turbulence [J]. Optics Communications, 2014, 331: 1-5.
- [8] Xu J, Zhao D M. Propagation of a stochastic electromagnetic vortex beam in the oceanic turbulence[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 57: 189-193.
- [9] Lu L, Ji X L, Li X Q, *et al.* Influence of oceanic turbulence on propagation characteristics of Gaussian array beams[J]. Optik, 2014, 125: 7154-7161.
- [10] Yang Ting, Ji Xiaoling, Li Xiaoqing. Propagation characteristics of partially coherent decentred annular beams propagating through oceanic turbulence[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(20): 204206.
杨婷, 季小玲, 李晓庆. 部分相干环状偏心光束通过海洋湍流的传输特性[J]. 物理学报, 2015, 64(20): 204206.
- [11] Pu Huan, Ji Xiaoling, Yang Ting. Spatial coherence of partially coherent annular beams in oceanic turbulence[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s1): s101002.
蒲欢, 季小玲, 杨婷. 海洋湍流中部分相干环状光束的空间相干性[J]. 光学学报, 2015, 35(s1): s101002.
- [12] Huang Y P, Huang P, Wang F H, *et al.* The influence of oceanic turbulence on the beam quality parameters of partially coherent Hermite-Gaussian linear array beams[J]. Optics Communications, 2015, 336: 146-152.
- [13] Wang Tingting, Wang Jiasi, Yuan Yangsheng, *et al.* Beam propagation factor of anomalous hollow beams in oceanic turbulence[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s2): s201002.
王婷婷, 王家骐, 袁扬胜, 等. 异常空心光束在海洋湍流中传输质量因子[J]. 光学学报, 2015, 35(s2): s201002.
- [14] Wang T, Pu J X. Partially coherent aberrated beam propagating in a turbulent atmosphere[J]. Optik, 2009, 120(16): 829-834.
- [15] Li Xiaoqing, Wang Tao, Ji Xiaoling. Experimental study on propagation properties of spherically aberrated beams through atmospheric turbulence[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 63(13): 134209.
李晓庆, 王涛, 季小玲. 球差光束在大气湍流中传输特性的实验研究[J]. 物理学报, 2014, 63(13): 134209.
- [16] Nikishov V V, Nikishov V I. Spectrum of turbulent fluctuations of the sea-water refraction index[J]. International Journal of Fluid Mechanics Research, 2000, 27(1): 82-98.