

湍流大气中部分相干光束扩展对接收光功率的影响

高铎瑞^{1,2} 付 强¹ 赵 昭² 倪小龙^{1,2} 刘显著^{1,2}

(¹ 长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022)
(² 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 研究了部分相干高斯-谢尔模式(GSM)光束的湍流角扩展对接收光功率的影响,对激光角扩展和通信链路接收端光功率进行数值计算和模拟,并定量分析了角扩展对激光通信链路接收功率的影响。研究表明,在部分相干 GSM 光束下接收端功率随着光束束腰半径、空间相干长度和传输距离的增加而减小,随波长的增大而增大。在此基础上,把部分相干 GSM 光束与完全相干高斯光束进行对比,对比结果表明,部分相干 GSM 光束因扩展引起的功率损耗小于完全相干高斯光束,在一定初始参数条件下,部分相干光束接收到的功率是完全相干光束的 2.65 倍。

关键词 光通信; 大气湍流; 对准失配损耗; 光束扩展; 跟踪误差

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.s113003

Influences of Expanding Angle of Partially Coherent Beam on Receiving Optical Power under Atmospheric Turbulence

Gao Duorui^{1,2} Fu Qiang¹ Zhao Zhao² Ni Xiaolong^{1,2} Liu Xianzhu^{1,2}

¹ Institute of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

² Department of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract The effects of the expansion angle of partially coherent Gaussian-Schell (GSM) beam on the receiving optical power are analyzed, numerical calculation and simulation are used in the laser extension angle and the receiving optical power of the laser communication link, and at the same time the influence of the beam's expansion angle on the power of the laser communication link is analyzed quantitatively. The results show that, the receiving power of partially coherent GSM beam is inversely proportional to the beam waist radius, as well as the spatial coherent length and transmission distance. Besides it is proportional to the wavelength. Based on that, when comparing partially coherent GSM beams with coherent Gaussian beams, it turns out that the power loss of the partially GSM coherent light caused by beam expansion is less than coherent Gaussian light. Under the certain condition of initial parameters, the receiving power of partially coherent beam is completely 2.65 times larger than coherent beam.

Key words optical communications; atmosphere turbulence; alignment mismatch loss; beam spreading; tracking error

OCIS codes 060.2605; 010.1330; 010.3310; 010.1300

1 引 言

在大气激光通信中,由于通信光功率与速率的

限制,光端机接收功率达到阈值是实现通信的前提。激光大气传输的功率下降与湍流效应导致的光束扩

收稿日期: 2013-07-01; 收到修改稿日期: 2013-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(60677009)

作者简介: 高铎瑞(1989—),男,硕士研究生,主要从事光学系统设计及激光大气传输特性等方面的研究。

E-mail: gaoduorui@126.com

展紧密关联,是激光大气传输研究和实际工程应用的重要问题^[1-7]。20世纪90年代初期,Wu等^[8-9]指出对高斯-谢尔模型(GSM)光束为代表的部分相干光较完全相干光受湍流大气的影响要小。Gbur等^[10]给出了部分相干光受到大气湍流影响的条件。Shirai等^[11]同样以GSM光束为例,用相干叠加方法研究了部分空间相干光在湍流大气中的光束扩展问题。Andrews等^[12]研究了弱湍流大气中基模激光束的平均光强统计规律。Wang等^[13]研究了精细厄米-高斯光束在大气湍流中的传输。以上工作都涉及到部分相干光的光束扩展问题。

本文根据部分相干GSM光束和完全相干高斯光束角扩展表达式,与激光通信链路传输方程结合,在只考虑湍流作用中光束扩展的影响下,通过数值模拟定量研究了部分相干GSM光束通过大气湍流后的接收端功率,并与完全相干光束进行了对比。最后对其结果给予了合理的物理解释。

2 理论模型

光束扩展是在大气激光传输中由于衍射及湍流效应,引起接收端接收到的光束的面积或者直径扩大的现象。在激光光束直径比湍流涡旋直径大时,湍流涡旋增大,使接收端中心轴的光束强度存在一定的衰减,所以出现光束直径展宽的现象。光束扩展降低了光束截面内的功率密度,使接收机接收到的光功率降低,恶化了系统性能。

2.1 完全相干高斯光束

完全相干高斯光束通过湍流大气传输的角扩展公式为^[14]

$$\theta = \sqrt{\frac{2}{k^2 \omega_0^2} + 4(0.545C_n^2)^{6/5} k^{2/5} L^{6/5}}, \quad (1)$$

式中 ω_0 为初始光束束腰半径,波数 $k = 2\pi/\lambda$, λ 是光波波长, C_n^2 是大气折射率结构常数(表征湍流的强弱), L 为传输距离。

2.2 部分相干GSM光束

部分相干GSM光束在湍流大气中角扩展表达式为^[12]

$$\theta_{\text{GSM turb}} = \sqrt{\frac{2}{k^2} \left(\frac{1}{\omega_0^2} + \frac{1}{\sigma_0^2} \right) + 4(0.545C_n^2)^{6/5} k^{2/5} L^{6/5}}, \quad (2)$$

(2)式右边第一项表示部分相干GSM光束在自由空间中的扩展角,与空间相干长度 σ_0 (束腰处的横向相干长度)、束腰半径 ω_0 和波长 λ 有关,但不随传

输距离 L 变化。第二项表示大气湍流引起的角扩展,与折射率结构常数 C_n^2 、波长 λ 和传输距离 L 有关,这与自由空间的角扩展不同。当传输距离足够长时,第二项即湍流引起的角扩展将起主要作用。

令 $C_n^2 = 0$,得到GSM光束在自由空间的角扩展公式:

$$\theta_{\text{GSM free}} = \sqrt{\frac{2}{k^2} \left(\frac{1}{\omega_0^2} + \frac{1}{\sigma_0^2} \right)}. \quad (3)$$

为了便于直观和定量地描述光束抗拒湍流扩展的能力,引入相对角扩展

$$\frac{\theta_{\text{GSM turb}}}{\theta_{\text{GSM free}}} = \sqrt{1 + \frac{4(0.545C_n^2)^{6/5} k^{2/5} L^{6/5}}{(2/k^2)[(1/\omega_0^2) + (1/\sigma_0^2)]}}, \quad (4)$$

用以定量比较光束参数变化时在湍流大气中光束角扩展受湍流影响的大小。

图1给出了在不同传播距离下,部分相干光和完全相干光束角扩展 θ 随束腰半径 ω_0 的变化情况,计算参数为: $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $\sigma_0 = 2 \text{ cm}$, $C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 。由图1曲线可知,当 $\omega_0 < 1 \text{ cm}$ 时,光束的角扩展 θ 随光束初始发射半径 ω_0 的增加急剧下降;而当 $\omega_0 > 1 \text{ cm}$ 时,随光束初始发射半径 ω_0 的增加光束扩展角 θ 基本保持不变。在同一初始发射光束束腰半径 ω_0 条件下,光束传播距离 L 越大,光束扩展角 θ 越大。并且部分相干光经湍流后的扩展角比完全相干光小,表明部分相干光受大气湍流的影响小于完全相干光。

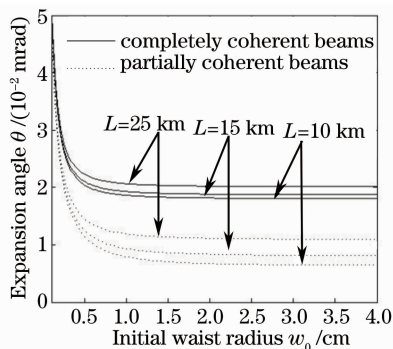


图1 光束扩展角 θ 随束腰半径 ω_0 的变化
Fig. 1 Variation of beam expansion angle θ with waist radius ω_0

图2比较了GSM光束在大气湍流和自由空间中角扩展和相对角扩展随束腰半径的变化,计算参数为: $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $\sigma_0 = 2 \text{ cm}$, $L = 25 \text{ km}$, $C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 。由图2可以看出束腰半径 ω_0 越大,相对角扩展越大,说明束腰半径越大,光束扩展角受湍流大气的影响越大。

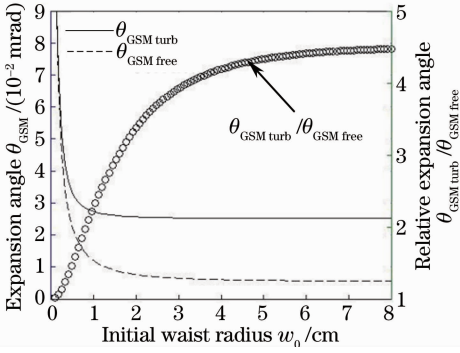


图2 相对角扩展 $\theta_{\text{GSM turb}}/\theta_{\text{GSM free}}$ 随束腰半径 w_0 的变化情况

Fig. 2 Variation of relative expansion angle $\theta_{\text{GSM turb}}/\theta_{\text{GSM free}}$ with waist radius w_0

图3展示了不同湍流强度下,部分相干光角扩展 θ 随空间相干长度 σ_0 的变化,计算参数为: $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $w_0 = 5 \text{ cm}$, $L = 25 \text{ km}$ 。光束在自由空间的角扩展 $\theta_{\text{GSM free}}$ 与 C_n^2 和 L 无关。由图3可知,随 σ_0 的增加,部分相干 GSM 光束的扩展角减小,相对角扩展 $\theta_{\text{GSM turb}}/\theta_{\text{GSM free}}$ 增大,表明部分相干 GSM 光束的角扩展受湍流大气的影响增大。在同一 σ_0 下,湍流强度增加,光束扩展角增大,在自由空间中 ($C_n^2 = 0$),光束的扩展角最小。表明光束的空间相干长度越大、湍流越强,角扩展越明显。

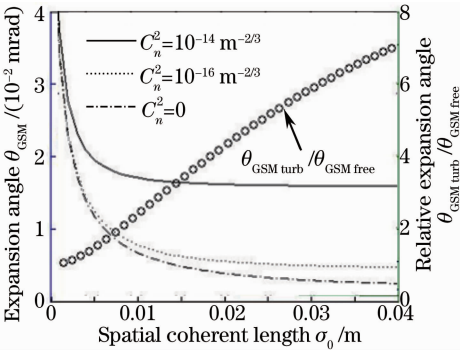


图3 部分相干光角扩展 θ 随空间相干长度 σ_0 的变化
Fig. 3 Variation of expansion angle θ of partially coherent beam with the spatial coherent length σ_0

3 通信链路传输方程模型

比光束直径小的涡漩会导致光束扩展,使得光束在大气湍流中传播时比在真空中发散得更快。因此,对于相同的通信距离,为了保证探测信噪比,大气湍流中所要求的激光发射功率比真空中大。

通信光束若以衍射极限角发射,激光通信的链路可以简单描述成^[15]:

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot \eta_{ot} \cdot L_s \cdot \eta_s \cdot L_{\text{APT}} \cdot G_r \cdot \eta_{or}, \quad (5)$$

式中 P_r 为接受的信号功率; P_t 为发射单元的发射功率; G_t 为发射光学天线增益; η_{ot} 为发射光学单元的透射率; L_s 为自由空间引起的链路衰减; η_s 为信道引起的功率损失; L_{APT} 为捕获、对准、跟踪 (APT) 对准失配引起的功率损耗; G_r 为接收光学天线增益; η_{or} 为接收光学系统效率。

本文只针对湍流引起的光束扩展对 APT 对准失配损耗的影响,忽略其他影响,对部分相干 GSM 光束和完全相干高斯光束进行对比。为了更直观描述部分相干光到达接收端的功率与完全相干光束的差异,由此引入相对功率 $P_{r \text{ part}}/P_{r \text{ comp}}$ 。

对于服从高斯分布的激光光束,在视轴处的光强最大,如果激光光束视轴存在一定的误差,接收端处的激光光束强度将呈高斯分布下降,因而需要考虑高斯光束的离轴损耗。对于大多数的空间激光通信系统,激光光束的发散角通常定义为功率下降到峰值的 $1/e^2$ 所对应的角度,对应峰值功率的 $1/7.4$ 。高斯分布的离轴衰减近似表示为^[15]

$$L_{\text{APT}} = G(\theta_{\text{off}}) \exp[-8(\theta_{\text{off}}/\theta_{\text{div}})^2], \quad (6)$$

式中 θ_{off} 为离轴的角度,对于实际系统,通常对应跟踪误差; θ_{div} 为功率下降到 $1/e^2$ 所对应的湍流大气中的光束扩展角。

4 数值计算结果与物理解释

结合(1)、(2)、(4)和(6)式,得出完全相干高斯光束和部分相干 GSM 光束通过湍流后的接收光功率表达式

$$P_{r \text{ comp}} = \exp\left[-8 \frac{\theta_{\text{off}}^2}{2/(k^2 w_0^2) + 4(0.545 C_n^2)^{6/5} k^{2/5} L^{6/5}}\right], \quad (7)$$

$$P_{r \text{ part}} = \exp\left[-8 \frac{\theta_{\text{off}}^2}{2(1/w_0^2 + 1/\sigma_0^2)/k^2 + 4(0.545 C_n^2)^{6/5} k^{2/5} L^{6/5}}\right]. \quad (8)$$

图4展示了不同相干长度的接收光功率 P_r 随跟踪误差 θ_{off} 的变化。计算所取参数: $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $w_0 = 5 \text{ cm}$, $L = 20 \text{ km}$, $C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 。从图4中

可以看出,随跟踪误差 θ_{off} 的增大,接收到的光功率 P_r 下降很快。且 σ_0 越大跟踪精度下降的速度越快,但并不是 σ_0 越小越好。如果空间相干长度过

小,其光束发散的很快,将导致平均接收光功率下降。当 $\sigma_0 \rightarrow \infty$ 时,退化为完全相干光,其接收功率受跟踪误差的影响最为明显。

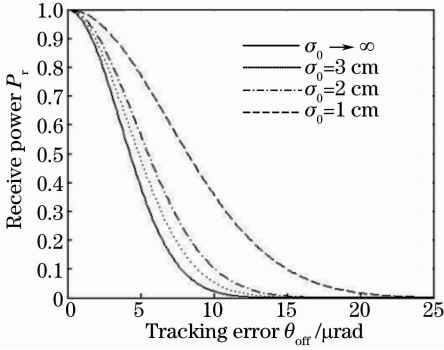


图 4 接收光功率 P_r 随跟踪误差 θ_{off} 的变化
Fig. 4 Variation of receiving optical power P_r with tracking error θ_{off}

图 5 显示了不同离轴角度和不同波长下部分相干 GSM 光束和完全相干高斯光束接收功率随光束

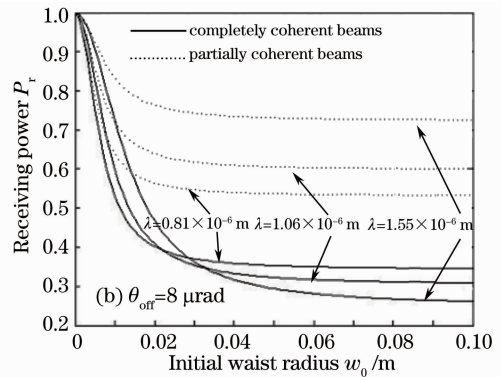
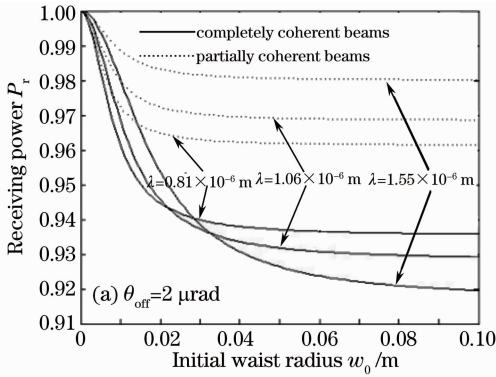


图 5 接收光功率 P_r 随光束束腰半径 w_0 的变化。(a) 跟踪误差 $\theta_{\text{off}} = 2 \mu\text{rad}$; (b) 跟踪误差 $\theta_{\text{off}} = 8 \mu\text{rad}$

Fig. 5 Variation of receiving optical power P_r with waist radius. (a) Tracking error is $2 \mu\text{rad}$; (b) tracking error is $8 \mu\text{rad}$

图 6 展示了部分相干 GSM 光束和完全相干高斯光束下,接收到的光功率 P_r 和相对功率 $P_{r \text{ part}} / P_{r \text{ comp}}$ 随束腰半径 w_0 的变化,计算参数为: $\lambda =$

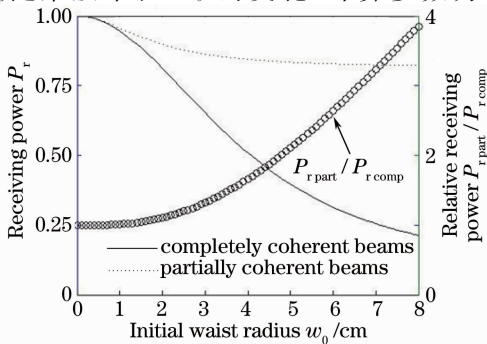


图 6 接收端功率 P_r 和相对功率 $P_{r \text{ part}} / P_{r \text{ comp}}$ 随束腰半径 w_0 的变化

Fig. 6 Variation of receiving power P_r and relative power $P_{r \text{ part}} / P_{r \text{ comp}}$ with waist radius w_0

束腰半径 w_0 的变化,计算参数为 $C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $\sigma_0 = 5 \text{ cm}$, $L = 20 \text{ km}$ 。从图 5 (a)中可以看出部分相干光因光束扩展接收到的功率整体上大于完全相干光。在束腰半径 $w_0 < 2 \text{ cm}$ 时,随着束腰半径 w_0 的增加功率下降得很快。当 $w_0 > 2 \text{ cm}$ 时,光功率 P_r 基本恒定不变。这是因为当光束束腰半径达到一定程度,随着束腰半径的增加,光束扩展角 θ 基本不变。完全相干光和部分相干光束接收光功率随波长的变化有所差别,完全相干光在束腰半径 w_0 较小的情况下(近似 3 cm),功率随波长 λ 的增加而增大。束腰半径逐渐增大,短波长的接收功率大于长波长。而部分相干光的接收光功率始终随波长的增大而增大,说明波长越长,湍流对光束传输的影响越小。进一步比较图 5(a)和(b)可知,同一波长的完全相干光和部分相干光,在跟踪误差 θ_{off} 增加的情况下,功率都下降,这与图 4 给出的结论完全吻合。

$1.06 \mu\text{m}$, $L = 20 \text{ km}$, $\theta_{\text{off}} = 2 \mu\text{rad}$, $\sigma_0 = 2 \text{ cm}$, $C_n^2 = 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ 。由图 6 可知,随着束腰半径 w_0 越大,接收到的光功率越小, $P_{r \text{ part}} / P_{r \text{ comp}}$ 越大,且束腰半径越大,完全相干光功率下降较部分相干光下降得更快。当 $w_0 = 3 \text{ cm}$ 时,相对功率为 1.3,当 $w_0 = 6 \text{ cm}$ 时,相对功率为 2.65,说明随束腰半径的增加,部分相干光在光通信中的损耗比完全相干光小。

图 7 显示了在不同传输距离情况下,接收功率 P_r 随空间相干长度 σ_0 的变化,计算参数为: $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $w_0 = 10 \text{ cm}$, $\theta_{\text{off}} = 2 \mu\text{rad}$, $C_n^2 = 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ 。由图 7 可以看出,随 σ_0 的增加,接收功率降低,说明空间相干长度越大的光束受到湍流的影响越大。如果光的空间相干长度比较小,湍流对光束传输几乎没有什么影响,也就是 σ_0 足够小, GSM 光束有很强的反湍流能力。还可看出接收功

率随传播距离 L 的变化,传播距离 L 越远,接收到的光功率越低。

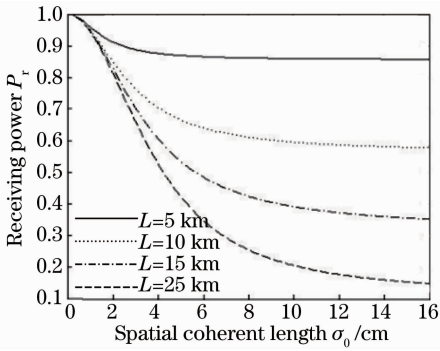


图7 接收功率 P_r 随空间相干长度 σ_0 的变化

Fig.7 Variation of receiving power P_r with the spatial coherent length σ_0

5 结 论

根据部分相干 GSM 光束和完全相干高斯光束的角扩展表达式,结合通信链路传输方程中光束扩展对 APT 对准失配损耗的影响,定量地对接收到的光功率进行分析。结果表明,由于大气湍流光束扩展的影响,随传输距离的增加接收光功率降低;通信系统接收端的光功率随跟踪误差的增大迅速减小;空间相干长度的增加会导致光束扩展严重,降低接收功率;相干性越好的光束受到湍流的影响越大。但相干性并不是越小越好,其存在一定的优化选取范围。对比了三种常用的通信波长,通信波长越长,功率损耗越小,接收到的光功率越多。随光束束腰半径的增大接收功率下降,完全相干光功率下降较部分相干光下降得更快。在相同束腰半径的情况下,部分相干光在大气中因扩展引起的功率损耗小于完全相干光,在一定初始条件下,部分相干光束接收到的功率是完全相干光束的 2.65 倍。

参 考 文 献

- 1 Tatarskii V I. Wave Propagation in a Turbulent Medium[M]. Wen Jingsong, Song Zhengfang, Zeng Zongyong, *et al.*. Transl. Beijing: Science Press, 1978.
塔塔尔斯基著. 湍流大气中波的传播理论[M]. 温景嵩, 宋正方, 曾宗泳, 等译. 北京: 科学出版社, 1978.
- 2 Strohbehn J W. Laser Beam Propagation in the Atmosphere[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1978.

- 3 Guo Jing, Zhang He, Wang Xiaofeng. Beam spread characteristics of laser fuze in the rain[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0113001.
郭婧, 张合, 王晓峰. 激光引信在降雨中的光束扩展特性[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0113001.
- 4 Chen Feinan, Chen Jingjing, Zhao Qi, *et al.*. Properties of high order Bessel Gaussian beam propagation in non-Kolmogorov atmosphere turbulence[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0913001.
陈斐楠, 陈晶晶, 赵琦, 等. 高阶贝塞尔高斯光束在非柯尔莫哥诺夫大气中的传输特性[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0913001.
- 5 Zhang Xiaoxin, Dan Youquan, Zhang Bin. Spreading of partially coherent flat-topped beams propagating along a slant path in turbulent atmosphere[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1201001.
张晓欣, 但有全, 张彬. 湍流大气中斜程传输部分相干光的光束扩展[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1201001.
- 6 Chen Feinan, Chen Yanru, Zhao Qi, *et al.*. Change of propagation quality factor of partially coherence Hermite-Gaussian beams traveling through oceanic turbulence[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0413002.
陈斐楠, 陈延如, 赵琦, 等. 部分相干厄米高斯光束在海洋湍流中光束传输质量的变化[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0413002.
- 7 Tao Rumao, Si Lei, Ma Yanxing, *et al.*. Propagation of truncated coherent cosh-Gaussian beam in non-Kolmogorov turbulence[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0502008.
陶汝茂, 司磊, 马阎星, 等. 截断部分相干双曲余弦高斯光束在非 Kolmogorov 湍流中的传输[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0502008.
- 8 Wu Jian. Propagation of a Gaussian-Schell beam through turbulent media[J]. J Mod Opt, 1990, 37(4): 671-684.
- 9 Santarsier M, Gori F, Borghi R, *et al.*. Spreading properties of beams radiated by partially coherent Schell-model sources[J]. J Opt Soc Am, 1999, 16(7): 106-112.
- 10 Gbur G, Wolf E. Spreading of partially coherent beams in random media[J]. J Opt Soc Am A, 2002, 19(8): 1592-1598.
- 11 Shiria T, Dogariu A, Wolf E. Mode analysis of spreading of partially coherent beams propagating through atmospheric turbulence[J]. J Opt Soc Am A, 2003, 20(6): 1094-1102.
- 12 Andrews L C, Miller W B, Ricklin J C. Spatial coherence of a Gaussian-beam wave in weak and strong optical turbulence[J]. J Opt Soc Am A, 1994, 11(5): 1653-1660.
- 13 Wang F, Cai Y, Eyyuboğul H T. Partially coherent elegant Hermite Gaussian beam in turbulent atmosphere[J]. Appl Phys B, 2011, 103(2): 461-469.
- 14 Chen Xiaowen, Ji Xiaoling. Consistency of the directionality of partially coherent beams in turbulence expressed in terms of the angular spread and the far-field average intensity[J]. Chin Phys B, 2010, 19(2), 024203.
- 15 Jiang Huilin, Tong Shoufeng, Zhang Lizhong. The Technologies and Systems of Space Laser Communication [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. 82-85.
姜会林, 佟首峰, 张立中. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010. 82-85.

栏目编辑: 王晓琪