

doi:10.3788/gzxb20154403.0306001

部分相干光在大气湍流中斜程传输 路径上的展宽与漂移

柯熙政, 韩美苗, 王明军

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048)

摘 要:基于 Andrews 和 Philips 经典漂移方差模型, 利用部分相干高斯-谢尔光束在大气湍流中斜程传输的光束扩展半径, 推导出考虑外尺度情况时部分相干高斯-谢尔光束斜程情况下的漂移方差表达式, 应用随高度变化的大气结构常量模型进行数值计算, 对比分析了部分相干光和完全相干光在大气湍流中的展宽和漂移特性. 结果表明: 相同的传输条件下, 部分相干光比完全相干光的光束扩展更迅速, 受湍流的影响也更小; 初始半径越大, 接收机高度越高, 光束的扩展效应越小; 随着传输距离的增大, 光束的质心漂移方差随光束初始半径的增大而减小, 不同相干性的光束漂移方差变化很小; 完全相干光的光束漂移受波长的影响较小, 而部分相干光的波长越长, 漂移越明显.

关键词: 光束扩展; 光束漂移; 光束漂移模型; 高斯-谢尔光束; 大气湍流; 斜程传输

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

文章编号: 1004-421(2015)03-0306001-5

Spreading and Wander of Partially Coherent Beam through Atmospheric Turbulence in a Slanted Path

KE Xi-zheng, HAN Mei-miao, WANG Ming-jun

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on the the general expression of the beam wander variance modeled by Andrews and Philips, the expression of wander variance for partially coherent Gaussian-Schell model beam considering the outer scale was derived using beam width formula of partially coherent Gaussian-Schell model beam propagating in slanted atmospheric turbulence, combining the turbulence structure constant model varying with height, numerical calculations were conducted and the spreading and wander variance of partially coherent beam and fully coherent beam were comparatively analyzed. The results show that, compared to the fully coherent beam, the partially coherent beam spreads faster and is less affected by turbulence under the same propagation conditions, and the beam spreading effect becomes weaker as the initial beam radius becomes larger or the height of the receiver becomes higher. As the propagation distance increases, the beam wander variance decreases with the increase of initial beam radius, the beam wander variance caused by different coherence have little difference. The wander of fully coherent beam is less affected by the wavelength, while the longer the wavelength of the partially coherent beam, the more obviously the beam wanders.

Key words: Beam spread; Beam wander; Beam wander variance model ; Gaussian-Schell model beam; Atmospheric turbulence; Slant path

OCIS Codes: 060.2605; 010.1300; 010.1330; 010.3310; 280.7060

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61377080, 60977054, 61271110)、陕西省"13115"科技统筹计划(No. 2011KTCQ01-31)、陕西省教育厅产业化培育基金(No. 2010JC17)、西安市科技成果转化基金(No. CX12165)、陕西省自然科学基金基础研究计划(No. 2013JQ8011)、陕西省教育厅科研计划项目(No. 2013JK1104)和陕西省工业攻关科技计划项目(No. 2013K06-08)资助

第一作者: 柯熙政(1962-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为无线激光通信. Email: xzke@263.net

通讯作者: 韩美苗(1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气激光通信. Email: kambibiko@163.com

收稿日期: 2014-07-23; **录用日期:** 2014-09-15

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

光波在大气中传输时,由于大气折射率的随机起伏,会产生光强闪烁、光束扩展和光斑漂移等大气湍流效应,严重制约着激光通讯、跟踪和成像等通信系统的性能. 90年代初期,吴建通过对部分相干高斯-谢尔(Gaussian-Schell Model, GSM)光束在大气湍流中传输的理论研究,发现与完全相干光相比,部分相干光受湍流影响更小^[1]. 这一发现使得湍流大气中部分相干光的传输特性备受关注^[2-4]. 在激光的实际应用中,经常涉及到大气湍流斜程传输的问题,因此研究部分相干光在大气湍流中斜程传输的光束展宽和漂移特性有重要的现实意义.

目前,对于光波在大气湍流中斜程传输的问题还处于初级研究阶段. 2001年国际电信联盟-无线电通信部(International Telecommunications Union-Radio Communication Sector, ITU-R)颁布的随高度变化的大气结构模型,使得从理论上研究波束在斜程情况下的传输特性成为可能^[5]. 张晓欣等^[6]和段美玲等^[7]分别以部分相干平顶光束和厄米高斯光束为例,给出了对应光束在大气湍流中斜程传输的均方根束宽解析表达式. 高明等^[8]和吴国华等^[9]研究了电磁高斯-谢尔光束在斜程大气湍流中的传输特性. 韦宏艳等对斜程传输路径下激光束的扩展半径和漂移方差进行了研究^[10-11]. 范承玉利用昆明实测的近地面大气湍流强度随高度变化的湍流模型计算了不同接收机高度时光束的漂移角^[12]. Richard J. Sasiela利用 Mellin 变换技术给出了斜程情况下光束的漂移方差,但没有给出具体的数值计算结果^[13]. 钱仙妹等通过多层相位屏法数值模拟了不同激光波长的光束扩展和漂移,指出光束的质心漂移与波长无关^[14]. 李亚清等利用光束质心分布图对 GSM 光束的扩展和漂移进行了研究,得出“波长越长,漂移越明显”的结论^[15]. 显然,文献[14]和[15]关于不同波长的漂移研究结果有差异. 另外,Andrews 和 Philips 根据 Rytov 近似和几何光学近似得到一个水平传输的漂移模型,并将其推广到斜程传输中^[16],但利用该模型对 GSM 光束斜程情况下漂移的研究鲜有报道.

本文根据部分相干 GSM 光束在大气湍流中斜程传输时光束扩展表达式,利用 Andrews 和 Philips 经典漂移方差模型,推导了考虑外尺度时部分相干 GSM 光束在大气湍流中斜程传输的漂移方差表达式,结合 ITU-R 给出的大气折射率结构常量模型进行数值计算,对比研究了不同条件下完全相干光和部分相干光通过大气湍流后的展宽和漂移特性,最后对所得结果进行分析讨论并与现有结果进行比较.

1 部分相干 GSM 光束的展宽特性

部分相干 GSM 光束在大气湍流下传播距离为 z 时,接收端的平均光强可以表示为^[16]

$$I(\rho) = K_n \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \exp\left(-\frac{2\rho^2}{\omega^2}\right) \quad (1)$$

式中 ρ 为距离光束中心的径向距离,归一化常量 $K_n = \omega_r^2/\omega_0^2$, ω_r 为参考光束半径, ω_0 为初始光束半径,接收端光束有效半径即扩展半径 ω ^[16-18] 为

$$\omega = \omega_0 \left[\left(1 - \frac{z}{F}\right)^2 + \left(\zeta_s + \frac{2\omega_0^2}{\rho_0^2}\right) \left(\frac{2z}{k\omega_0^2}\right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中,前两项表示由于自由空间衍射引起的扩展量,最后一项表示湍流效应扩展量. F 表示相位曲率,这里 $F = \infty$ (准直光束); z 为传输距离; $\zeta_s = (1 + 2\omega_0^2/l_c^2)$ 表示光源相干参量,它总满足 $\zeta_s \geq 1$ ($\zeta_s = 1$ 时光束是完全相干光, $\zeta_s > 1$ 时是部分相干光, $\zeta_s \rightarrow \infty$ 是完全非相干光); l_c 是空间相干长度, l_c 越小,相干性越差,当 $l_c \rightarrow \infty$ 时是完全相干光, $l_c \rightarrow 0$ 是完全非相干光; ρ_0 为大气湍流中球面波的相干长度,当光束在大气湍流中斜程传输时

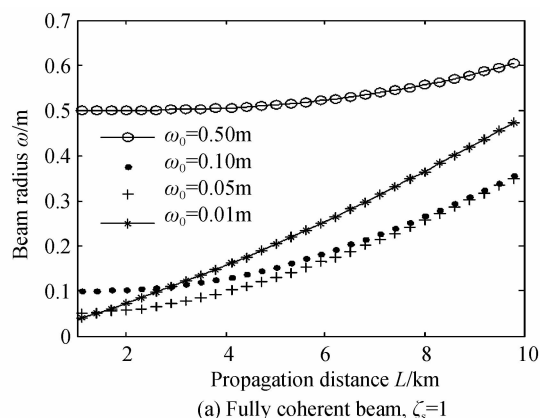
$$\rho_0 = [1.46k^2 \int_0^L C_n^2(z) (1-z/L)^{5/3} dz]^{-3/5} \quad (3)$$

式中, $C_n^2(z)$ 为描述湍流大气折射率结构常量,这里采用 ITU-R 公布的随高度变化的大气结构常量模型 Hufnagel-Valley, 设 $\xi = z/L$, 则

$$C_n^2(z) = C_n^2(\xi L) = C_n^2(\xi H / \cos \theta) = 8.148 \times 10^{-56} v_{\text{RMS}}^2 \cdot (\xi H / \cos \theta)^{10} \times \exp(-\xi H / \cos \theta / 1000) + 2.7 \times 10^{-16} \times \exp(-\xi H / \cos \theta / 1500) + C_{n0}^2 \exp(-\xi H / \cos \theta / 100) \quad (4)$$

式中, θ 为天顶角, H 为发射端和接收端之间的垂直高度 ($0 \leq H \leq L$), $v_{\text{RMS}} = \sqrt{v_g^2 + 30.69v_g + 348.91}$ 为垂直路径风速, v_g 为近地面风速 (一般取 $v_g = 21$ m/s, C_{n0}^2 为近地面附近的大气结构常量 (一般取 $C_{n0}^2 = 1.7 \times 10^{-14}$ m^{-2/3})).

将式(3)、(4)代入式(2)进行数值积分计算并绘制光束扩展半径随传输距离变化的曲线,如图1、2.



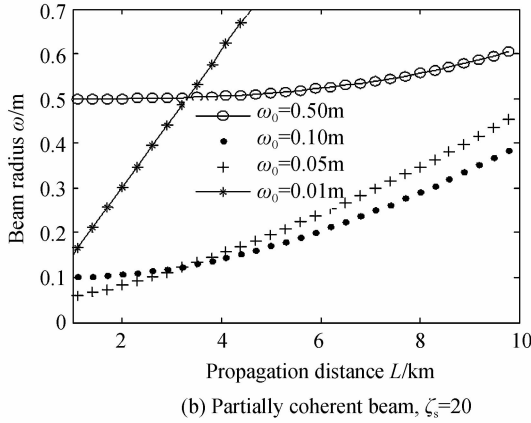


图1 不同初始半径时有效光束半径随传输距离的变化
Fig.1 Effective beam radius versus propagation distance with different initial beam radius

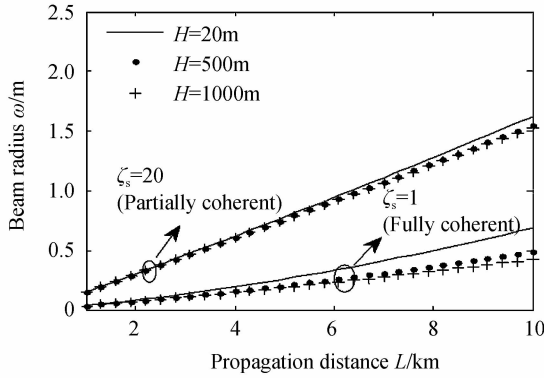


图2 不同接收机高度时有效光束半径随传输距离的变化
Fig.2 Effective beam radius versus propagation distance with different receiver heights

图1给出了不同初始半径下斜程传输时准直光束的扩展半径随传输距离的变化曲线,参量为: $\lambda=1.06\ \mu\text{m}$, $H=500\ \text{m}$, $K_n=1$.可以看出,传输距离10 km内, $\omega_0=0.5\ \text{m}$ 即光波近似为平面波时,光束有效半径几乎不变,扩展效应很小,与理论结果相符.同时,图1(a)、(b)对比后发现,接收机高度一定时,与完全相干光相比,部分相干光的光束扩展更迅速.其中,光束初始半径较小如 $\omega_0=0.01\ \text{m}$ 时,扩展变化最为明显.

图2分析了不同接收机高度时完全相干光和部分相干光斜程传输情况下的展宽特性,取 $\omega_0=0.01\ \text{m}$.由图可知,相同条件下,部分相干光比完全相干光束宽扩展更明显,有效半径更大.传输距离一定时,接收机高度越高,扩展效应越小,说明斜程传输比水平传输更有利于光束在大气湍流中的传输.这与文献[7]中利用厄米高斯光束的研究结果一致.同时,从图中还可以看出,与完全相干光相比,部分相干光在不同接收机高度时扩展变化曲线更接近,即部分相干光的光束扩展受大气湍流的影响更小.这是由于随着接收机高度的增加,湍流强度越来越弱,部分相干光因自由空间中衍射引起的扩展量加剧导致,这与文献[15]的结论相符.

2 部分相干 GSM 光束的漂移特性

Andrews 和 Philips 基于几何光学近似和 Rytov 近似,引入高斯滤波函数得到一个弱湍流下的漂移模型

$$\langle \rho_c^2 \rangle = 4\pi^2 k^2 \omega^2(L) \int_0^L \int_0^\infty \kappa \phi_n(\kappa, z) H_{LS}(\kappa, z) \times [1 - e^{-\Lambda_p L \kappa^2 \xi^2 / k}] d\kappa dz \quad (5)$$

式中,波长为 λ ,光波波数 $k=2\pi/\lambda$, κ 是空间波数, $\omega(L)$ 是自由空间下接收端处的光束半径. $H_{LS}(k, z)$ 是低通滤波器,仅仅对于当随机不均匀湍流漩涡的尺寸等于和大于光束大小时才对光束扩展有贡献,即

$$H_{LS}(\kappa, z) = \exp[-\kappa^2 \omega^2(z)] \quad (6)$$

式中, $\omega(z)$ 选用 GSM 在大气湍流下的光束扩展半径即式(2)来研究斜程大气湍流中的光束漂移. Λ_p 是光束输出参量

$$\Lambda_p = \frac{2L}{k\omega^2(L)} \quad (7)$$

由于光束漂移主要是由湍流的大尺度引发,故 $\phi_n(\kappa, z)$ 选用考虑大尺度的指数谱^[16]

$$\phi_n(\kappa, z) = 0.033 C_n^2(z) \kappa^{-11/3} [1 - \exp(-\kappa^2/\kappa_0^2)] \quad (8)$$

式中, κ_0 是与外尺度 L_0 对应的空间波数, $\kappa_0=1/L_0$.对式(5)中的最后一项运用几何光学近似有

$$1 - e^{-\Lambda_p L \kappa^2 \xi^2 / k} \simeq \frac{\Lambda_p L \kappa^2 \xi^2}{k}, L \kappa^2 / k \ll 1 \quad (9)$$

将式(6)~(9)带入式(5)中,积分计算后得

$$\langle \rho_c^2 \rangle = 7.25 L^2 \int_0^L \left(1 - \frac{z}{L}\right)^2 C_n^2(z) \omega^{-1/3}(z) \times \left[1 - \left(\frac{\kappa_0^2 \omega^2(z)}{1 + \kappa_0^2 \omega^2(z)}\right)\right]^{1/6} dz \quad (10)$$

一般情况下,式(10)中含有超几何函数,为了便于分析,直接对其进行数值积分来研究波长、光源相干参量对光束漂移的影响.

图3描述了不同条件下光束在大气湍流中斜程传输的漂移方差变化.设参量为: $k_0=0.3\ \text{m}^{-1}$, $H=500\ \text{m}$, $\omega_0=0.01\ \text{m}$,图3(a)中可以明显看出,完全相干光在不同波长条件下斜程传输时漂移变化很小,这与文献[14]中用数值模拟方法研究结果相符.而部分相干光波长越长,漂移越明显,与文献[12]中清利用光斑质心分布图得出的结论一致.其他条件一定,取波长 $\lambda=0.63\ \mu\text{m}$,图3(b)显示,光束斜程传输($H=500\ \text{m}$)相同距离时,接收机高度越高,漂移效应越小,与水平传输($H=0\ \text{m}$)相比,斜程传输明显受湍流的影响较小.接收机高度 H 一定,传输距离在5 km之内,相干性越差,漂移方差越小.同时,与图3(a)相比,短距离传输漂移效应更小,与文献[12]研究结果相同.图3(c)、(d)中,保持图3(a)其他条件不变,改变 κ_0 和 ω_0 ,分别给出了不同湍流外尺度和初始光束半径时光束的漂移方差曲线图.图3(c)中, κ_0 越小即湍流外尺度越大,漂移越

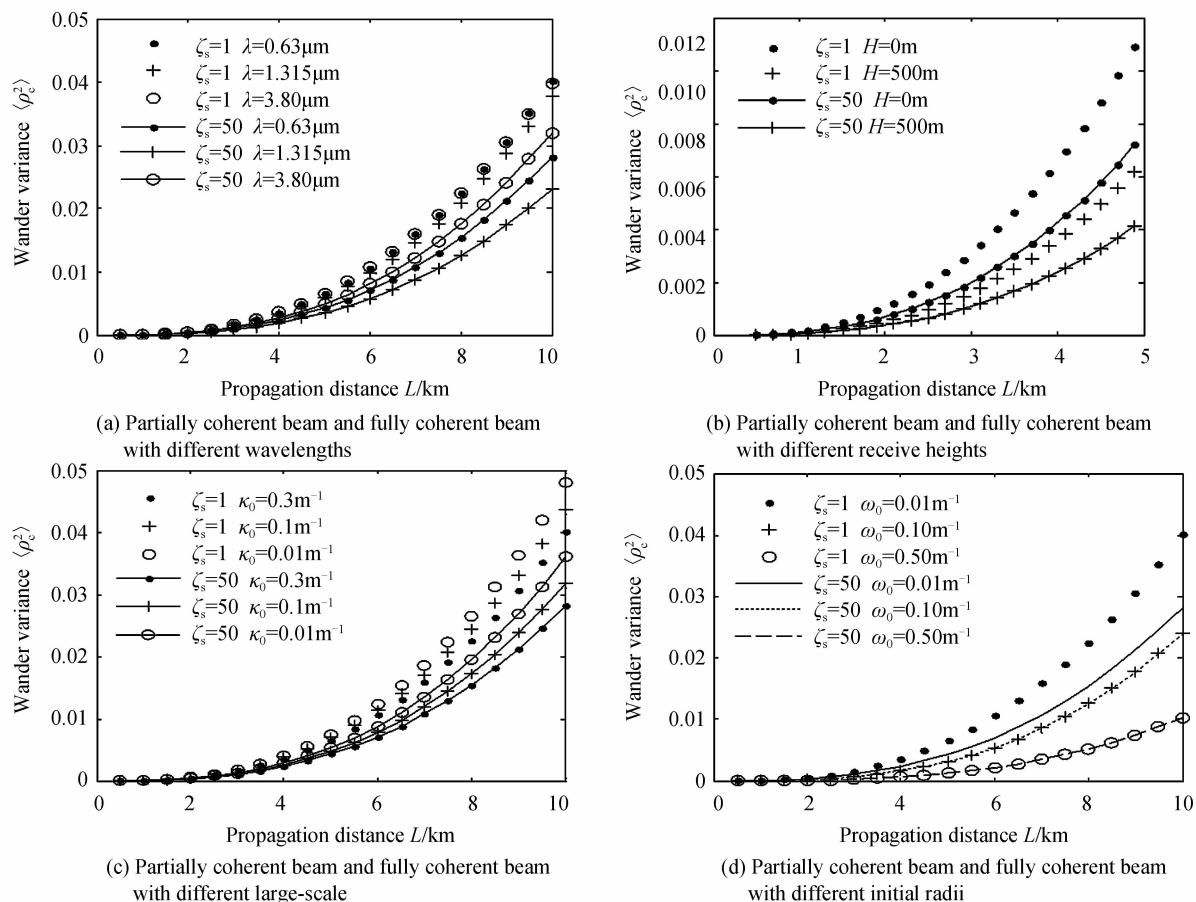


图3 漂移方差随传输距离的变化

Fig. 3 Beam wander variance versus propagation distance

明显,且部分相干光较完全相干光漂移效应更小;图3(d)中,当传输距离大于2 km时,初始半径越小的光束,漂移变化越大,且初始束腰半径为0.1 m和0.5 m时,部分相干光和完全相干光的漂移方差变化曲线差别很小。

3 结论

本文由高斯-谢尔光束的平均光强推导出大气湍流中光束斜程传输时的光束扩展表达式,对比分析了大气湍流对完全相干光和部分相干光的展宽影响.利用Andrews和Philips的经典漂移方差模型,研究了部分相干光和完全相干光在湍流中斜程情况下的光束漂移特性,结果表明:

1)与完全相干光相比,部分相干光的光束扩展更迅速.光束的扩展效应与传输距离、初始光束半径和接收机高度有关.斜程传输距离一定时,初始半径越大,接收机高度越高,光束的扩展效应越小。

2)与水平传输相比,相同传输距离条件下,接收机高度越高,光束的漂移效应越小,受湍流的影响也越小.接收机高度一定,相干性越差,漂移方差越小.湍流外尺度越大,漂移越明显,且部分相干光较完全相干光漂移效应更小。

3)光束的质心漂移方差随光束初始半径的增大而减小,且完全相干光的光束漂移受波长的影响较小,而部分相干光的波长越长,漂移越明显。

完全相干光和部分相干光斜程情况时受到大气湍流的影响程度不同,光束的展宽和漂移特性的变化也不相同.本文对全面了解光波在湍流大气中斜程传输的传播特性提供了新思路.实际情况中,如何选取最优光束以获得更好的传输效果,还有待进一步分析研究。

参考文献

- [1] WU J. Propagation of a Gaussian-Schell beam through turbulent media[J]. *Journal of Modern Optics*, 1990, **37**(4): 671-684.
- [2] HUANG Yong-ping, ZENG An-ping. Propagation properties of hermite-gaussian beams in non-kolmogorov turbulence[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(7): 818-823.
黄永平, 曾安平. 厄米-高斯光束在非Kolmogorov大气湍流中的传输性质[J]. *光子学报*, 2012, **41**(7): 818-823.
- [3] RAO Lian-zhou, QU Biao, CHEN Zi-yang, et al. The spectral changes of partially coherent light diffracted by a slit [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(3): 467-470.
饶连周, 渠彪, 陈子阳, 等. 部分相干光经单缝衍射后的光谱变化[J]. *光子学报*, 2007, **36**(3): 467-470.
- [4] LIU Jun, WU Peng-li, GAO Ming. Wander and spreading of polarized and partially coherent laser propagation on slant path in turbulence atmospheric [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **10**(39): 199-204.

- 刘钧, 吴鹏利, 高明. 偏振部分相干激光斜程湍流大气传输的漂移扩展[J]. 中国激光, 2012, **10**(39):199-204.
- [5] ITU-R. Propagation data required for the design of Earth-space systems operating between 20 THz and 375 THz[R]. Geneva:ITU-R Recommendations, 2005, 1621.
- [6] ZHANG Xiao-xin, DAN You-quan, ZHANG Bin. Spreading of partially coherent flat-topped beams propagating along a slant path in turbulent atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(12): 8-14.
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):8-14.
- [7] DUAN Mei-ling, LI Jin-hong, WEI Ji-lin. Spreading of partially coherent Hermite-Gaussian beams in slant atmospheric turbulence[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(9): 2252-2256.
段美玲, 李晋红, 魏计林, 等. 部分相干厄米高斯光束在斜程大气湍流中的扩展[J]. 强激光与粒子束, 2013, **25**(9):2252-2256.
- [8] GAO Ming, LIU Yan-qing, WANG Fei, *et al.* Spread and wander characteristics of polarized and partially coherent laser beam propagated in turbulent atmosphere[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(10): 1001002.
- [9] GAO Ming, LIU Yan-qing, WANG Fei, *et al.* Spread and wander characteristics of aolarized and partially coherent laser beam propagated in turbulent atmosphere[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(10): 1001002.
高明, 刘彦清, 王菲, 吕宏, . 偏振部分相干激光光束在湍流大气中传输的扩展和漂移[J]. 光子学报, 2004, **43**(10): 1001002.
- [10] WU G H, LUO B, YU S, *et al.* The propagation of electromagnetic Gaussian - Schell model beams through atmospheric turbulence in a slanted path[J]. *Journal of Optics A*, 2011, **13**(3): 0357061-0357067.
- [11] WEI Hong-yan, WU Zhen-sen. Study on the effect of laser beam propagation on the slant path through atmospheric turbulence [J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2008, **22**(5-6): 787-802.
- [12] WEI Hong-yan, WU Zhen-sen. Spreading and wander of laser beam propagation on slant path through atmospheric turbulence[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, **23**(4): 611-615.
韦宏艳, 吴振森. 大气湍流中激光光束斜程传输的展宽、漂移特性[J]. 电波科学学报, 2008, **23**(4): 611-615.
- [13] FAN Cheng-yu. The effect of Gaussian-beam wave in slant propagation on atmospheric turbulence[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1999, **16**(6): 519-525.
范承玉. 高斯束状波斜程传输的大气湍流效应[J]. 量子电子学报, 1999, **16**(6): 519-525.
- [14] SASIELA J R, SHELTON J D. Transverse spectral filtering and Mellin transform techniques applied to the effect of outer scale on tilt and tilt aniso-planatism [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1993, **10**(6): 646-660.
- [15] QIAN Xian-mei, ZHU Wen-yue, RAO Rui-zhong. Numerical simulation of turbulent effects of laser propagation along a ground-space slant atmospheric path[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(5): 787-792.
钱仙妹, 朱文越, 饶瑞中, 等. 地空激光大气斜程传输湍流效应的数值模拟分析[J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(5):787-792.
- [16] LI Ya-qing, WU Zhen-sen. Characteristics of a partially coherent Gaussian Schell-model beam propagating in slanted atmospheric turbulence [J]. *Chinese Physics B*, 2012, **21**(5): 054203.
- [17] ANDREWS L C, PHILIPS R L. Laser beam propagation through random media[M]. SPIE Press, Bellingham, 2005, 201-250.
- [18] BORAH D K, VOELZ D G. Spatially partially coherent beam parameter optimization for free space optical communications[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(20): 20746-20758.
- [19] RICKLIN J C, DAVIDSON F M. Atmospheric turbulence effects on a partially coherent Gaussian beam; implication for free-space laser communication[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2002, **19**(9): 1794-1802.