

doi: 10.3788/gzxb20174601.0101002

大气湍流尺度对部分相干光传输特性的影响

柯熙政, 薛瑶

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048)

摘 要: 本文在考虑湍流内外尺度的情况下, 对部分相干高斯谢尔模型光束在大气湍流中的传输特性进行了研究. 主要采用考虑湍流内外尺度的修正 Von Karmon 谱模型, 推导了部分相干光在大气湍流中的平均光强分布、光束扩展均方根束宽和漂移方差的解析式. 对比分析了不同湍流强度情况下, 湍流内外尺度对部分相干光在大气湍流中水平和斜程路径上传输特性的影响. 结果表明: 相同条件下, 光束在大气湍流中传输时, 沿斜程传输时的抗湍流能力强于水平传输; 相比于大气湍流内尺度, 大气湍流外尺度对光束漂移影响较大, 外尺度对光束扩展与光强分布的影响较小, 当湍流外尺度增大时, 漂移现象会越来越严重; 相比于大气湍流外尺度, 湍流内尺度对光束扩展与光强分布的影响较大, 当内尺度减小时, 光束扩展现象越来越严重, 光强分布也更分散, 内尺度对漂移几乎无影响.

关键词: 大气光学; 大气湍流尺度; 光强分布; 光束扩展; 光束漂移

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)01-0101002-8

Effect on the Partially Coherent Beam Propagation Properties in the Atmospheric Turbulence Considering Its Scales

KE Xi-zheng, XUE Yao

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

Abstract: Propagation properties of partially coherent Gaussian-Schell model beam, under the condition of considering the atmospheric turbulence of inner-scale and outer-scale, were studied in the atmospheric turbulence. Using the model of modified Von-Karmon spectrum which considers its inner-scale and outer-scale, the expressions of intensity distribution, wander variance and beam width of partially coherent beam were deduced in the atmospheric turbulence. The influence to partially coherent beam, on the turbulence along a slant path and a horizontal path considering the inner and outer scale, were analyzed in different turbulence intensity. The results show that, under the same condition, the anti-turbulence ability of the beam propagated in the atmosphere along a slant path is more better than the horizontal path. In addition, compared with the inner scale of the atmospheric turbulence, the outer-scales of the beam propagated in the atmosphere has a greater effect on the wander variance, the outer-scales have a minor effect on the intensity distribution and beam width, when the outer-scale increasing, wander variance is more serious. Furthermore, compared with the outer scale of the atmospheric turbulence, the inner-scales has more effect on intensity distribution and beam width. When the Inner-scales reduced, the beam expanding phenomenon is becoming more and more serious. Intensity distribution is more scattered, and inner-scales of wander variance almost has no effect.

Key words: Atmospheric optics; Optical communications; Scale of atmospheric turbulence; Intensity distribution; Beam width; Wander variance

OCIS Codes: 010.0010; 010.1330; 010.1300; 010.7060

0 引言

大气湍流是影响光束传输特性最重要的因素之一. 对于部分相干光束在大气湍流中传输特性的研究, 可

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61377080, 60977054)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: 薛瑶(1990-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气激光通信. Email: 631747352@qq.com

收稿日期: 2016-06-16; 录用日期: 2016-08-01

以追溯到 20 世纪 70 年代末和 80 年代初, Leader^[1-2] 在对激光照射在粗糙表面上发生散射的现象进行研究时, 发现其空间相干性变化后提出了研究部分相干光在大气湍流中传输的问题. 随后越来越多的研究人员开始研究大气湍流中部分相干高斯波束的传输问题.

近年来, 研究人员逐渐开始关注在考虑大气湍流尺度以及强度时, 部分相干光束的传播特性. 2004 年, Florida 大学的 Olga Korotkova 等^[3] 研究了部分相干高斯光束在大气湍流中的传输, 得到当内尺度为 1 cm 时, 闪烁指数随传输距离的增大先增大再减小. 2005 年 3 月, 张逸新等^[4] 研究了在弱大气湍流起伏环境下以窄带宽高斯谢尔光束为激光光源的大气通信问题, 得出了湍流大气中传输高斯谢尔光束的波结构函数 (Wave Structure Function, WSF) 和到达角起伏方差解析近似关系. 2008 年 8 月, 韦红艳等^[5] 根据惠更斯菲涅尔原理推出了考虑外尺度时的漂移方差, 得到了斜程传输到相同的接收高度处, 湍流的外尺度越大, 波束的漂移方差越大. 2014 年 3 月, 王伟等^[6] 研究了非 Kolmogorov 大气湍流谱下部分相干厄米高斯光束传输因子的影响, 得到了湍流外尺度越小, 湍流内尺度和光束阶数越大, 光束传输受非 Kolmogorov 大气湍流影响越小, 光束质量越好. 2014 年 9 月, 黄永平等^[7] 基于广义惠更斯-菲涅耳原理和相对 M^2 因子定义的湍流距离, 推导了考虑内外尺度时部分相干平顶 (Partially Coherent Flat-Topped, PCFT) 光束在非 Kolmogorov 大气湍流中的湍流距离的表达式, 得到了 PCFT 光束在非 Kolmogorov 大气湍流中的湍流距离随内尺度的增加而增大, 随外尺度的增加而减小. 2014 年, 李亚清等^[8] 根据修正 Rotov 理论推导出了考虑内外尺度的 Hill 谱下的闪烁方差, 得出若波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $1.315 \mu\text{m}$ 时, 在中等湍流区, 内尺度效应对闪烁指数的影响大于外尺度效应; 当波长为 $3.8 \mu\text{m}$ 和 $10.6 \mu\text{m}$ 时, 在整个湍流强度区域内, 外尺度效应对闪烁指数的影响大于内尺度效应. 2015 年 6 月, 迈阿密大学的 I Toselli 等^[11] 研究了尺度各向异性的湍流及其对自由空间光通信系统性能的影响, 概括了当考虑大气湍流内外尺度和各向异性等因素时, 沿两条正交轴横向传播时光束的特性, 并分析在这样的湍流谱下, 无线光通信链路的闪烁变化、褪色概率、信噪比和误码率等性能. 2015 年 7 月, 美国马里兰大学的 W Nelson 等^[12] 研究了后向散射增强 (Enhanced Backscatter, EBS) 光束在大气湍流中的传播特性, 对 EBS 光束在大气湍流中的传输特性进行了实验仿真和验证, 并提出了一种在冻结湍流的条件下减少检测 EBS 光束时间的新的 “tilt-shift” 算法. 2016 年 3 月, 美国马里兰大学的 W Nelson 等^[13] 研究了大功率激光在大气湍流中的传输, 分析了合成光束和大功率激光在大气湍流中的定向传输, 研究表明, 在强湍流和远距离传输时, 在典型大气条件下, 在发射机平面合成部分相干光束是无效的. 显然, 关于部分相干光在大气湍流中传输特性的研究很多, 但目前为止, 系统地考虑大气湍流内外尺度对部分相干光的光强分布、光束扩展和光束漂移等特性进行的研究还鲜有报道.

本文采用将内外尺度考虑在内的修正 Von Karmon 谱模型, 推导出部分相干光在大气湍流中的平均光强分布、光束扩展均方根束宽和漂移方差的解析式, 并对比分析了不同湍流强度情况下, 湍流内外尺度对部分相干光在大气湍流中水平和斜程路径上传输特性的影响. 最后, 对仿真结果进行分析讨论并与现有结果进行比较.

1 理论计算

部分相干高斯谢尔 (Gaussian-Schell Model, GSM) 光束在大气湍流下斜程传播距离为 z 时, 强度分布表达式为^[14-15]

$$I(\boldsymbol{\rho}, z) = W(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\rho}, z) = \frac{A^2}{\Delta^2(z)} \exp \left[-\frac{|\boldsymbol{\rho}|^2}{2\sigma_s^2 \Delta^2(z)} \right] \quad (1)$$

式中

$$\begin{cases} \Delta^2(z) = 1 + \left[\frac{z}{k\sigma_s \delta} \right]^2 + \frac{2Mz^2}{k^2 \sigma_s^2} \\ \frac{1}{\delta^2} = \frac{1}{4\sigma_s^2} + \frac{1}{\sigma_g^2} \end{cases} \quad (2)$$

参量 A , σ_s 和 σ_g 分别代表光源的光强、束腰宽度以及相干长度. 波数 $k = 2\pi/\lambda$.

$$\begin{cases} M = \frac{1}{2} B_0 B_3 \\ B_0 = 2\pi^2 k^2 \sec \theta \int_0^\infty \varphi_n(\kappa) d\kappa \\ B_3 = \int_{h_0}^H C_n^2(h) \xi^2 dh \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\xi = 1 - \frac{h-h_0}{H-h_0}$, H 代表接收机距离地面的垂直高度, h_0 代表发射机距离地面的垂直高度, $C_n^2(h)$ 代表大气折射率结构模型, 这里采用 ITU-R 在 2001 年所提出的大气折射率常量随高度变化的模型^[16], 即

$$C_n^2(h) = 8.148 \times 10^{-56} v_{\text{RMS}}^2 h^{10} \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) + C_0 \exp(-h/100) \quad (4)$$

式中, $v_{\text{RMS}} = \sqrt{v_g^2 + 30.69v_g + 348.91}$ 是垂直路径风速, v_g 代表近地面风速, C_0 代表近地面大气折射率结构常量。

当大气折射率结构常量 $C_n^2(h)$ 模型为常量时, 即为水平传输, 此时, $M = \frac{1}{3} \pi^2 k^2 z \int_0^\infty \kappa^3 \varphi_n(\kappa) d\kappa$. 当在自由空间中传输时, $M=0$. 对于湍流项 M 中的湍流功率谱模型, 采用将内外尺度均考虑在内的修正 Von Karmon 谱^[17], 其表达式为

$$\varphi_n(\kappa, h) = 0.033 C_n^2(h) \exp(-\kappa^2/\kappa_m^2) \times (\kappa^2 + \kappa_0^2)^{-11/6} \quad (5)$$

式中, $\kappa_m = 5.92/l_0$, $\kappa_0 \approx 2\pi/L_0$, l_0 和 L_0 分别代表湍流的内外尺度。

为了分析考虑大气湍流内外尺度时, 部分相干光束强度分布的情况, 对光强进行归一化处理, 定义光束的归一化光强为^[18]

$$I^N(\boldsymbol{\rho}, z) = \frac{I_{\text{ts}}(\boldsymbol{\rho}, z)}{I_{\text{ts}}(\boldsymbol{\rho}, z) |_{\boldsymbol{\rho}=0, \sigma_g \rightarrow \infty, M=0}} \quad (6)$$

式中, $I_{\text{ts}}(\boldsymbol{\rho}, z)$ 为光束在大气湍流中传输时的强度分布, $I_{\text{ts}}(\boldsymbol{\rho}, z) |_{\boldsymbol{\rho}=0, \sigma_g \rightarrow \infty, M=0}$ 为完全相干光束在自由空间中斜程传输时的轴上光强值。

通过计算可求得该光束归一化光强为

$$I^N(\boldsymbol{\rho}, z) = \frac{1 + (z/2k\sigma_s^2)^2}{\Delta^2(z)} \exp\left[-\frac{\rho^2}{2\sigma_s^2 \Delta^2(z)}\right] \quad (7)$$

根据光束扩展均方根束宽定义可知^[19]

$$\omega(z) = \sqrt{\frac{\int I(\boldsymbol{\rho}, z) |\boldsymbol{\rho}|^2 d^2\boldsymbol{\rho}}{\int I(\boldsymbol{\rho}, z) d^2\boldsymbol{\rho}}} \quad (8)$$

将式(1)代入到式(8)中可得

$$\omega(z) = [2\sigma_s^2 \Delta^2(z)]^{1/2} = \left[2\sigma_s^2 + \frac{2}{k^2 \delta^2} z^2 + \frac{4M}{k^2} z^2\right]^{1/2} \quad (9)$$

前两项表示由自由空间衍射引起的光束扩展量, 第三项代表湍流引起的光束扩展量^[2]。

为直观分析湍流对光束扩展影响的大小, 定义相对束宽为湍流中束宽与自由空间束宽之比, 可以得到^[20]

$$\omega_r(z) = \left[1 + \frac{\frac{4M}{k^2} z^2}{2\sigma_s^2 + \frac{2}{k^2 \delta^2} z^2}\right]^{1/2} \quad (10)$$

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弱湍流下的漂移模型^[14]为

$$\langle \rho_c^2 \rangle = 4\pi^2 k^2 \omega^2(L) \times \int_0^L \int_0^\infty \kappa \varphi_n(\kappa, z) H_{\text{LS}}(\kappa, z) \times [1 - \exp(-\Lambda_P L \kappa^2 \xi^2/k)] d\kappa dz \quad (11)$$

式中, $\omega(L)$ 为自由空间时接收端的光束半径, $H_{\text{LS}}(\kappa, z)$ 为低通滤波器, 作用于大于和等于波束大小的不均匀湍流漩涡为

$$H_{LS}(\kappa, z) = \exp[-\kappa^2 \omega^2(z)] \quad (12)$$

式中, $\omega(z)$ 为 GSM 光束在大气湍流中的光束扩展半径, Δ_P 为光束输出参量, 其形式式为

$$\Delta_P = \frac{2L}{k\omega^2(L)} \quad (13)$$

对式(11)最后一项进行几何光学近似, 得到

$$1 - \exp(-\Delta_P L \kappa^2 \xi^2 / k) \cong \frac{\Delta_P L \kappa^2 \xi^2}{k}, \frac{L \kappa^2}{k} \ll 1 \quad (14)$$

在此, $\varphi_n(\kappa, z)$ 选用将内外尺度考虑在内的 Von Karmon 谱, 则将式(12)~(14)以及式(5)代入式(11), 即

$$\langle \rho_c^2 \rangle = 8\pi^2 \times 0.033 L^2 C_n^2 \kappa_0^{1/3} \exp[-k^2 \omega^2(z)] \int_0^L (1-z/L)^2 U(2; \frac{7}{6}; \kappa_0^2 / \kappa_m^2) dz \quad (15)$$

本文将结合式(7)、(10)和(15)对 GSM 光束在大气湍流中斜程和水平两种传输路径的归一化光强分布、相对束宽及漂移方差进行系统的分析与讨论.

2 仿真分析

2.1 GSM 光束在湍流大气中传输的光强分布

图 1 和图 2 给出了当大气湍流内外尺度和强度不同时, 部分相干光的光强分布在水平和斜程路径下随传输距离变化的影响. 选取参量: 斜程传输时, 天顶角 $\theta = \pi/4$, 发射机高度 $h_0 = 2$ m, 近地面风速 $v_g = 2.8$ m/s; 相干长度 $\sigma_g = 0.02$ m; 束腰宽度 $\sigma_s = 0.05$ m; 波长 $\lambda = 650$ nm, 图 1 中近地面大气折射率结构常量 C_n 为 $1.7 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$; 图 2 中内尺度为 $l_0 = 0.01$ m, 外尺度为 $L_0 = 10$ m.

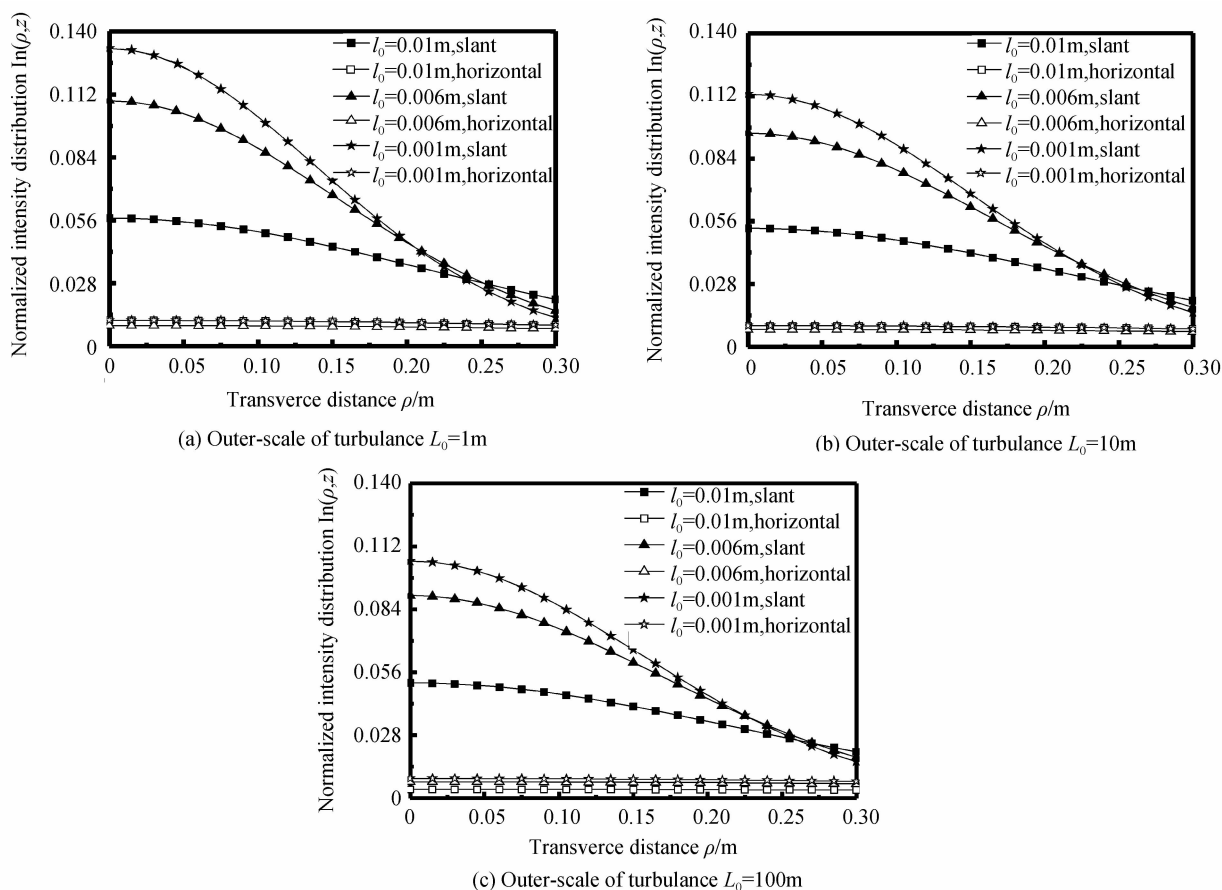


图 1 大气湍流内外尺度对部分相干光的光强分布的影响

Fig. 1 The effects of the scale of atmospheric turbulence on the intensity distribution

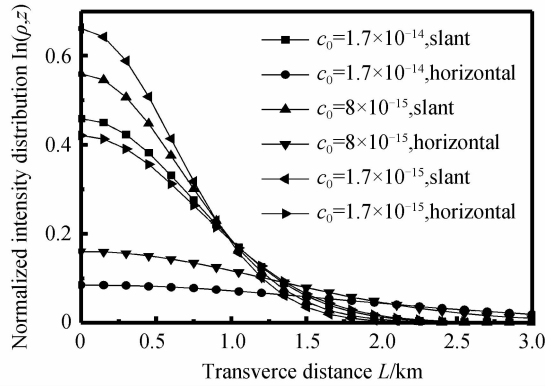


图2 大气湍流强度对部分相干光的光强分布的影响

Fig. 2 The effects of intensity of atmospheric turbulence on the intensity distribution

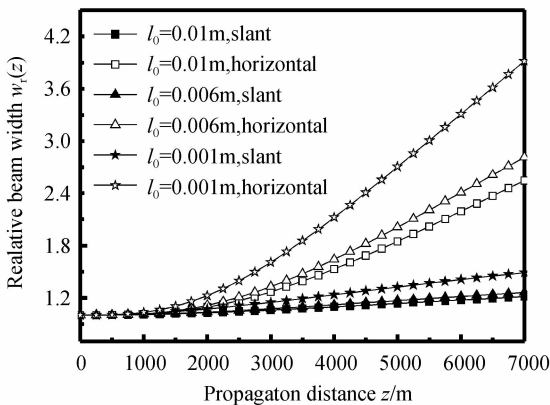
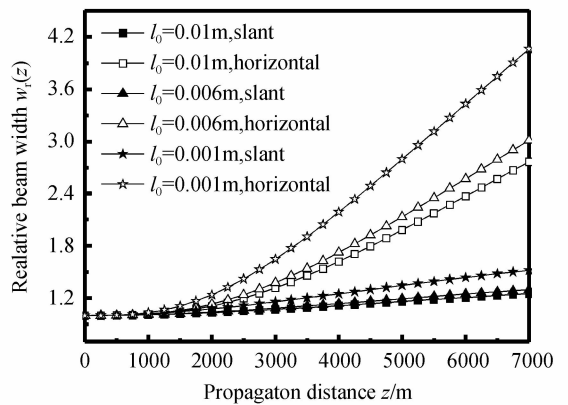
从图1可以看出,无论是水平还是斜程传输,随传输距离的增大,光强分布越分散.随着内尺度 l_0 的增大,光强分布越集中.相比于水平传输,斜程传输时光强分布更集中,光强峰值更大.对比(a)、(b)、(c)三幅图,可以看出,当外尺度 L_0 增大时,曲线变化趋势很小.产生该结果的主要物理原因在于湍流内尺度越小,光束截面包含的小湍流漩涡越多,照射在这些漩涡上的光束会发生更严重的衍射,这样就使得光束的强度在空间和时间上出现随机分布更严重,从而导致光强变得更分散,这与文献[15]的结论类似,这说明部分相干光斜程传输时比水平传输时抗湍流效果更好.

从图2可以看出,湍流强度越大,光强分布越分散.湍流强度最大时,随着传输距离的增加,沿水平路径传输时的归一化光强变化不大,但光强分布很分散;沿斜程路径传输时,归一化光强随着传输距离的增大而减小.湍流强度减小时,在传输距离大于1000 m时,斜程路径上的归一化光强大于弱湍流时沿水平路径传输的归一化光强,这是因为当光束在大气中传输时,大气折射率的随机起伏会导致波束出现相位畸变,使得光束在传输一定距离后产生光束扩展,从而导致光强分布更加分散,峰值光强也更弱,并且随机起伏越大,光强越分散.

2.2 GSM 光束在湍流大气中传输的光束扩展

图3和图4给出了当大气湍流内外尺度和强度不同时,部分相干光的光束扩展在水平和斜程路径下随传输距离变化的影响.选取参量:斜程传输时,天顶角 $\theta=\pi/4$,发射机高度 $h_0=2$ m,近地面风速 $v_g=2.8$ m/s,相干长度 $\sigma_g=0.02$ m,束腰宽度 $\sigma_s=0.05$ m,波长 $\lambda=650$ nm,图3中近地面大气折射率结构常量 C_0 为 $1.7\times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$,图4中内尺度为 $l_0=0.01$ m,外尺度为 $L_0=10$ m.

从图3可以看出,无论水平或者斜程传输时,随着传输距离的增大,光束扩展越来越严重.当传输距离大于1000 m时,曲线变化趋势较大,光束扩展现象明显.随着内尺度 l_0 的减小,光束扩展现象越来越严重.考虑内外尺度时,相对于水平传输,斜程传输的光束扩展更小,这是由于斜程传输时的大气结构常量小于靠近地面的水平传输,因此,光束斜程传输时受到的湍流影响较小.对比图3中的(a)、(b)、(c)三幅图,可以看出,当外尺度 L_0 增大时,三幅图的曲线很接近,这说明外尺度的变化对光束扩展的影响不大.

(a) Outer-scale of turbulence $L_0=1\text{m}$ (b) Outer-scale of turbulence $L_0=10\text{m}$

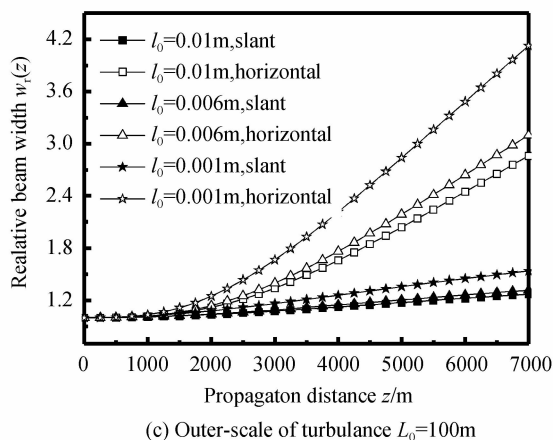


图 3 大气湍流内外尺度对部分相干光的光束扩展的影响
Fig. 3 The effects of the scale of atmospheric turbulence on the beam width

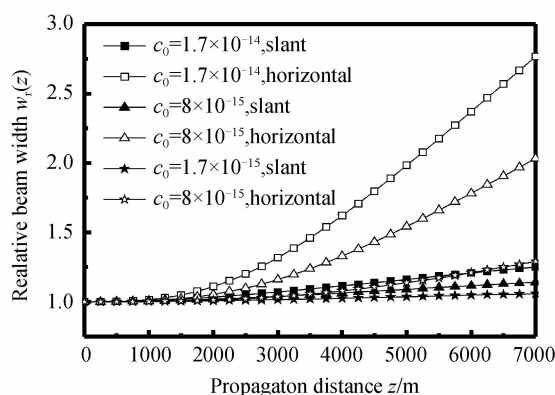
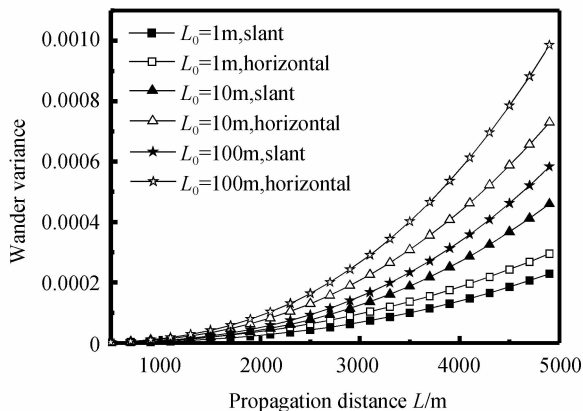


图 4 大气湍流强度对部分相干光的光束扩展的影响
Fig. 4 The effects of intensity of atmospheric turbulence on the beam width

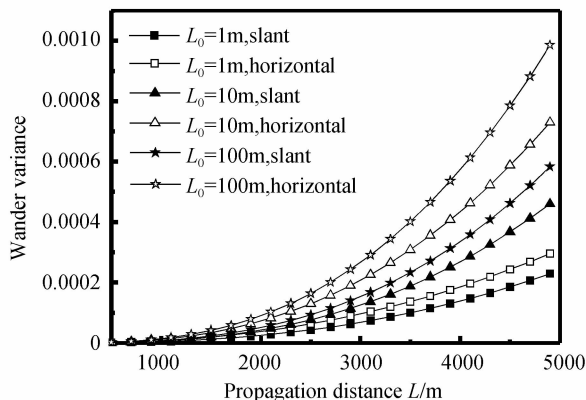
从图 4 可以看出,在湍流较强时,随着传输距离的增加,沿水平路径传输时的光束扩展尤为严重;湍流强度最小时,光束扩展现象不明显,这说明当湍流较弱时,部分相干光在大气湍流中的光束扩展与传输路径无关.随着湍流强度的增大,光束扩展现象更加严重,这是因为光束受到大气折射率的影响,产生的波前相位畸变会随着传输距离的增加而严重,从而使得光束受到湍流的影响越大.

2.3 GSM 光束在湍流大气中传输的光束漂移

图 5 和图 6 给出了当大气湍流内外尺度和强度不同时,部分相干光的光束漂移在水平和斜程路径下随传输距离变化的影响.选取参数:斜程传输时,天顶角 $\theta = \pi/4$,发射机高度 $h_0 = 2$ m,近地面风速 $v_g = 2.8$ m/s;相干长度 $\sigma_g = 0.02$ m;束腰宽度 $\sigma_s = 0.05$ m;波长 $\lambda = 650$ nm,图 5 中近地面大气折射率结构常量 C_0 为 $1.7 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$,图 6 中内尺度为 $L_0 = 0.01$ m,外尺度为 $L_0 = 10$ m.



(a) Inner-scale of turbulence $L_0 = 0.01\text{m}$



(b) Inner-scale of turbulence $L_0 = 0.006\text{m}$

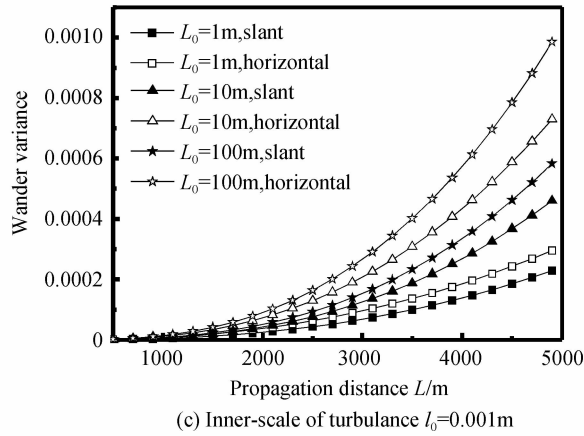


图5 大气湍流内外尺度对部分相干光的光束漂移的影响

Fig. 5 The effects of the scale of atmospheric turbulence on the wander wander variance

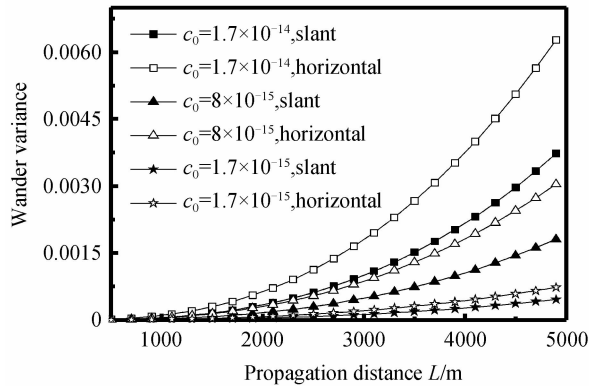


图6 大气湍流强度对部分相干光的光束漂移的影响

Fig. 6 The effects of intensity of atmospheric turbulence on the wander wander variance

从图5可以看出,无论水平或者斜程传输,随着传输距离的增大,光束漂移越来越严重.当传输距离大于1000m时,曲线变化趋势较大,随着外尺度 L_0 的增大,漂移现象越来越严重.当内外尺度一定时,水平传输时引起的漂移比斜程传输时更严重,这是由于斜程传输时的大气结构常量小于靠近地面的水平传输,因此,光束斜程传输时受到的湍流影响较小.对比(a)、(b)、(c)三幅图,可以看出,当内尺度 l_0 变化时,三幅图的曲线很接近,这说明内尺度的变化对光束漂移的影响不大.这与文献[12]的结论类似.

从图6可以看出,在湍流强度较强时,传输距离大于1000m后,光束漂移迅速增大.在湍流强度较弱时,随着传输距离的增大,曲线几乎不发生变化,这说明当湍流较弱时,部分相干光在大气湍流中的光束漂移与传输路径无关.可见,随着湍流强度的增大,光束漂移现象迅速增大,这是因为光束受到大气折射率的影响,产生的波前相位畸变会随着传输距离的增加而严重,从而使得光束受到湍流的影响越大.对比图3与图5可以看出,光束扩展比漂移大了2个数量级,这说明湍流大气中波束的扩展效应比漂移效应更显著.

3 结论

本文以修正 Von Karmon 谱模型和 ITU-R 颁布的随高度变化的大气结构常量模型为基础,对考虑大气湍流内外尺度部分相干 GSM 光束在水平和斜程路径上的归一化强度分布、相对束宽及光束漂移进行了数值计算与分析.结果表明:1)相比于水平传输,斜程传输的抗湍流效果更好;2)光强分布随着湍流强度的增大和内尺度的减小而更加分散,从而导致束宽增大;3)相对束宽随着湍流强度的增大而增大,随着内尺度的减小而增大,从而导致光束受湍流地影响变大;4)光束漂移随着湍流强度的增大而增大,随着外尺度的增大而增大;5)外尺度对光强分布及光束扩展几乎没有影响,内尺度对光束漂移几乎没有影响.本文的研究对在现实应用中分析部分相干光的各项湍流效应有重要的参考价值.

参考文献

[1] LEADER J C. Atmospheric propagation of partially irradiation[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1978, **68**

- (2); 175-185.
- [2] OUYANG C F. Irradiance scintillation of a partially coherent source in extremely strongly turbulence[J]. *Applied Optics*, **18**: 1133-1135.
- [3] KOROTKOVA O, ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Model for a partially coherent gaussian beam in atmospheric turbulence with application in lasercom[J]. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 2004, **43**(2): 330-341.
- [4] ZHANG Yi-xin, TAO Chun-kan. Angle-of-arrival of gaussian-schell beam propagation in atmospheric turbulence[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 424-427.
张逸新,陶纯堪. 湍流大气传输高斯谢尔光束的到达角起伏[J],光子学报,2005,**34**(3):424-427.
- [5] 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.
- [6] WANG Wei-wei, LI Jin-hong, LAI Yun-zhong, et al. Influence of non-kolmogorov atmospheric turbulence on propagation factors of partially coherent hermite-gaussian beams[J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2014, **26**(3): 031010-147.
王伟伟,李晋红,赖云忠,等. 非 Kolmogorov 大气湍流对部分相干厄米高斯光束传输因子的影响[J]. 强激光与粒子束, 2014,**26**(3): 031010-147.
- [7] HUANG Yong-ping, DUAN Zhi-chun, ZHANG Bin, et al. Change of turbulence distance for partially coherent flat-topped beams propagating through non-kolmogorov turbulence[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(9): 245-250.
黄永平,段志春,张彬,等. 部分相干平顶光束在非 Kolmogorov 大气湍流中湍流距离的变化[J],中国激光. 2014,**41**(9): 245-250.
- [8] LI Ya-qing, WU Zhen-sen. Scintillation of partially coherent gaussian-schell model beam propagation in slant atmospheric turbulence considering inner- and outer-scale effects[J]. *Chinese Physics B*, 2014, **23**(7): 409-416.
- [9] HAN Qi-qi, WANG Qiang, MA Jing, et al. Experimental research on vibration influence and compensation of space light to fiber coupling efficiency[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(3): 933-939.
韩琦琦,王强,马晶,等. 振动对空间光-光纤耦合效率影响及补偿实验研究[J]. 红外与激光工程, 2014, **43**(3):933-939.
- [10] LIU Dan, LIU Zhi, LIU Yan, et al. Performance analysis on atmosphere laser communication system based on circular polarization shift keying[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(11): 3111-3115.
刘丹,刘智,刘艳,等. 基于圆偏振移位键控的大气激光通信性能分析[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(11):3111-3115.
- [11] TOSELLI I, KOROTKOVA O. General scale-dependent anisotropic turbulence and its impact on free space optical communication system performance[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2015, **32**(6): 1017-25.
- [12] NELSON W, PALASTRO J P, WU C, et al. Enhanced backscatter of optical beams reflected in turbulent air[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2015, **32**(7): 1371-8.
- [13] NELSON W, SPRANGLE P, DAVIS CC. Atmospheric propagation and combining of high-power lasers[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(7): 1757-1764.
- [14] LI C Q, ZHANG H Y, WANG T F, et al. Investigation on coherence characteristics of Gauss-Schell model beam propagating in atmospheric Turbulence[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(22): 224203-766.
- [15] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Laser beam propagation through random media[M]. Bellingham; SPIE Optical Engineering Press, 2005: 195.
- [16] 吴健,杨春平,刘建斌. 大气中的光传输理论[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2005:142-147.
- [17] WEI Hong-yan. Study on the characteristic of laser beam in the slant path through the atmospheric turbulence[D]. Xi'an; Xidain University, 2006: 5-12
韦宏艳. 斜程湍流大气中激光光束传输特性研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2006:5-12,17-22.
- [18] TOMOHIRO S, ARISTIDE D, EMIL W. Mode analysis of spreading of partially coherent beams propagating through atmospheric turbulence[J]. *Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision*, 2003, **20**(6): 1094-1102
- [19] YANG A L, LI J H, LÜ B D. A comparative study of the beam-width spreading and angular spreading in atmosphere turbulence [J]. *Acta Physia Sinica*, 2009, **58**(4): 2451-2460.
- [20] JI X, CHEN X, LU C B. Spreading and directionality of partially coherent Hermite-Gaussian beams propagating through atmospheric turbulence[J] *Journal of the Optical Society of America A*, 2008, **25**(1): 21-28.