

部分相干光在大气湍流中水平传输 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, 陕西 西安 710048)

摘要 基于部分相干高斯-谢尔模型(GSM)光束在强湍流中的光束扩展半径,利用 Andrews 和 Philips 经典漂移方差模型推导了部分相干光在中强弱大气湍流中水平传输的漂移方差表达式,讨论了部分相干光在中、强、弱大气湍流中的展宽和漂移特性。结果表明:部分相干光的光束扩展受湍流的影响比受完全相干光的影响要小,初始半径越小的光束受到湍流的影响越大。短距离传输时,不同波长引起的光束漂移差别很小,且随着初始光束半径的增大这种差别随之减小。传输距离大于 2 km 时,中强湍流中光束漂移均与波长有关且强湍流区漂移量较为明显。传输距离在 10 km 内,光束空间相干长度大于 0.005 m 时,光源空间相干长度对漂移的影响很小。

关键词 光通信;光束扩展;光束漂移;漂移方差模型;高斯-谢尔模型光束;大气湍流

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1106003

Spreading and Wander of Partially Coherent Beam Propagating along a Horizontal-Path in the Atmospheric Turbulence

Ke Xizheng Han Meimiao Wang Mingjun

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

Abstract Based on the formula of beam width of Gaussian-Schell model beam in strong turbulence, the expression of wander variance for a horizontal-path propagating partially coherent beam in the atmospheric turbulence is derived using the general expressions of the beam wander variance models of Andrews and Philips, and the spreading and wander of a partially coherent beam through the whole atmospheric turbulence are discussed. The results show that the partially coherent beam is less affected by turbulence than the fully coherent beam. The smaller the initial beam radius of partially coherent beam is, the more seriously the beam may be affected by turbulence. Within the short propagation distance, the beam wander caused by different wavelengths has little difference, which can reduce as the initial beam radius increases. When the propagation distance is further than 2 km, beam wander in both strong and weak turbulences is related to the wavelength, which is more obvious in strong turbulence. When the spatial coherence length is greater than 0.005 m, it has little effect on the beam wander in propagation distance of 10 km.

Key words optical communications; beam spreading; beam wander; beam wander variance model; Gaussian-Schell model beam; atmospheric turbulence

OCIS codes 060.1660; 270.5565; 010.1330

1 引言

由于大气折射率的随机起伏,激光在大气中传播时将会产生光强闪烁、光束扩展和光斑漂移等大

气湍流效应,这些效应严重制约着激光通信、跟踪和成像等通信系统的性能。90年代初期,Wu^[1]通过对部分相干高斯-谢尔模型(GSM)光束在大气湍流

收稿日期: 2014-04-22; **收到修改稿日期**: 2014-05-31

基金项目: 国家自然科学基金(61377080,60977054,61271110)、陕西省“13115”科技统筹计划(2011KTCQ01-31)、陕西省教育厅产业化培育基金(2010JC17)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2013JQ8011)、陕西省教育厅科研计划(2013JK1104)、陕西省工业攻关科技计划项目(2013K06-08)、西安市科技成果转化基金(CX12165)

作者简介: 柯熙政(1962—),男,教授,主要从事无线激光通信方面的研究。E-mail: xzke@263.net

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”这一现象。这一发现使得湍流大气中部分相干光传输特性的研究愈来愈热^[2-6]。Shirai等^[7]以GSM为例,用相干模式叠加法研究了部分空间相干光在湍流大气中的光束扩展问题。Ji等^[8]对部分相干厄米高斯光束在大气湍流中的光束相对束宽和方向性进行了讨论,发现光束相干性越差,光束展宽受湍流影响越小。Chen等^[9]推导了有限外尺度条件下GSM光束在大气湍流中传输时光束漂移的时间谱。Qian等^[10]通过随机相位屏法数值模拟了不同光束相干度的光束扩展、光束漂移以及光强闪烁,指出相干性越差,光束扩展越明显,光束漂移受光束相干性的影响越小。向宁静等^[11]从光强分布的角度对弱湍流中GSM光束的展宽和漂移进行了研究,得出“光束相干性越差,漂移越明显”的结论。同年,Yu等^[12]对电磁高斯-谢尔光束(EGSM)的漂移进行研究,得出与文献[11]相反的结论。显然,文献[10-12]关于不同光束相干度的漂移研究结果有差异。另外,Andrews和Philips^[13]根据Rytov近似和几何光学近似得到一个适合于弱湍流下的漂移模型,并利用马尔科夫近似推导的光束扩展表达式成功将其推广到强湍流条件下。但该强湍流中漂移方差公式中扩展公式过于复杂,且光束为高斯光束。近年来,Wen等^[14]又利用该模型对艾里光束的漂移进行了研究。以上工作均涉及到部分相干光的光束扩展和漂移问题,但对于强湍流中的光束漂移问题仍需进一步研究。

本文根据部分相干GSM光束在强湍流下的光束扩展表达式,利用Andrews和Philips经典漂移方差模型,推导了适合于中强弱湍流效应的漂移方差表达式,通过数值仿真研究了不同波长、初始光束半径以及光束相干参数条件下的部分相干光束通过大气湍流后的展宽和漂移特性。最后对仿真结果进行分析讨论并与现有结果进行比较。

2 光束扩展

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^[15]

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

式中 $\boldsymbol{\rho}$ 为距离光束中心的径向矢量,归一化常数 $K_n = \omega_r^2/\omega_0^2$, ω_r 为参考光束半径, ω_0 为初始光束半径,接收端光束半径即扩展半径 ω 有^[15-18]:

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

$$\zeta_s = \left(1 + \frac{2\omega_0^2}{l_c^2}\right), \quad (2)$$

式中 F 表示相位曲率,这里 $F = \infty$ (准直光束), ρ_0 为球面波通过湍流大气的相干长度, $\rho_0 = (0.55C_n^2 k^2 L)^{-3/5}$,其中 C_n^2 为折射率结构常数, k 为光波的波数, L 为传输距离。 ζ_s 为光源相干参数,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 为空间相干长度, 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。

利用(2)式,如图1所示:取波长 $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$,光源相干参数 $\zeta_s = 3$,传输距离 $L = 2 \text{ km}$,可以看出,初始半径越小的光束,扩展半径受湍流的影响越大,弱湍流下,扩展半径几乎不变,随着湍流的增强,光束扩展越迅速。通过改变传输距离,其他条件一定时,初始半径 $\omega_0 = 0.01 \text{ m}$,图2给出了GSM光束在湍流($C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$)和自由空间($C_n^2 = 0$)下传输2 km的光束扩展。可以看出,部分相干光在自

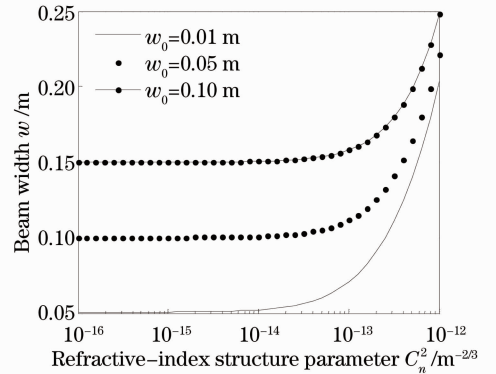


图1 光束半径随折射率结构常数的变化
Fig. 1 Beam width versus refractive-index structure parameter

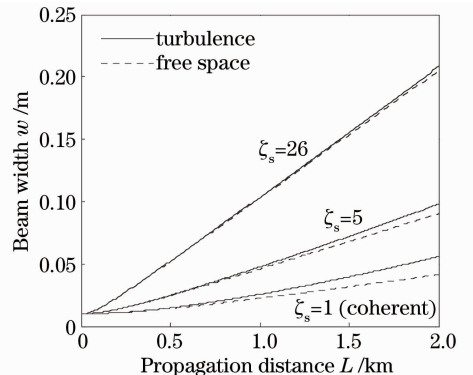


图2 光束半径随传播距离的变化
Fig. 2 Beam width versus propagation distance

由空间中的光束扩展比相对应的完全相干光严重得多,且随着 ζ_s 的增大($\zeta_s=1$ 时为完全相干光)即光源相干性越差时,传输距离越大,两条曲线越接近,说明与完全相干光相比,部分相干光的光束扩展受大气湍流的影响更小。这与文献[8]中以部分相干厄米高斯光束为例得出的结论相符。

3 光束漂移

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^[13]:

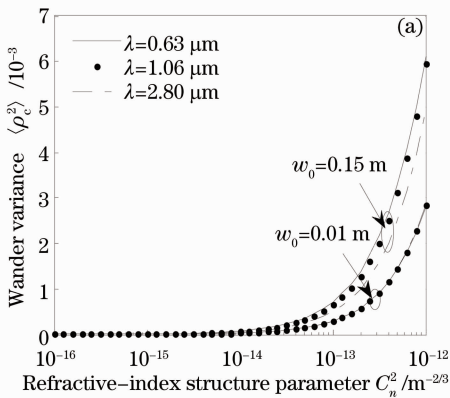
$$\langle \rho_c^2 \rangle = 4\pi^2 k^2 \omega^2(L) \int_0^L \int_0^\infty \kappa \phi_n(\kappa) H_{LS}(\kappa, z) \times \{1 - \exp[-\Delta_P L \kappa^2 (1 - z/L)^2 / k]\} d\kappa dz, \quad (3)$$

式中光波数 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长, κ 为空间波数, L 为发射端和接收端之间的距离, z 为传输距离, 大小为 $0 \sim L$ 。 $\omega(L)$ 是自由空间中接收端 L 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波束大小时才对波束扩展有贡献。这里 $H_{LS}(k, z)$ 表达式为

$$H_{LS}(\kappa, z) = \exp[-\kappa^2 \omega^2(z)], \quad (4)$$

式中 $\omega(z)$ 选用 GSM 在大气湍流下的光束扩展半径[即(2)式]来研究整个湍流下的光束漂移。 Δ_P 是光束输出参数:

$$\Delta_P = \frac{2L}{k\omega^2(L)}. \quad (5)$$



由于光束漂移主要是由于湍流的大尺度引发的,故此选用考虑大尺度的指数谱^[13]

$$\phi_n(\kappa) = 0.033 C_n^2 \kappa^{-11/3} [1 - \exp(-\kappa^2 / \kappa_0^2)], \quad (6)$$

式中 κ_0 为与外尺度 L_0 对应的空间波数, $\kappa_0 = 1/L_0$, C_n^2 为折射率结构常数, 表征湍流的强弱, 在水平传输时为常数。对(3)式中的最后一项运用几何光学近似有

$$1 - \exp[-\Delta_P L \kappa^2 (1 - z/L)^2 / k] \approx \frac{\Delta_P L \kappa^2 (1 - z/L)^2}{k}, \quad \frac{\Delta_P L \kappa^2}{k} \ll 1. \quad (7)$$

将(4)~(7)式代入(3)式中,进行积分计算后,得

$$\langle \rho_c^2 \rangle = 7.25 C_n^2 L^2 \int_0^L \left(1 - \frac{z}{L}\right)^2 \omega^{-1/3}(z) \times \left\{1 - \left[\frac{\kappa_0^2 \omega^2(z)}{1 + \kappa_0^2 \omega^2(z)}\right]^{1/6}\right\} dz. \quad (8)$$

一般情况下,(8)式中含有超几何函数,为了便于分析,直接对其进行数值积分来研究波长、光源相干参数对光束漂移的影响。设参数为: $\kappa_0 = 0.3 \text{ m}^{-1}$, $\zeta_s = 26$, 不同波长下的光束漂移对比图如图3所示。从图3(a)可以看出,传输距离 $L=1 \text{ km}$ 时,波长对光束漂移影响很小。光源初始光束半径 w_0 的增大,减小了因波长不同而导致的漂移差别。图3(b)中,取 $w_0=0.01 \text{ m}$,与图3(a)对比后发现,传输距离增大时,中强起伏区漂移方差迅速增长,此时波长与漂移有关,且波长越短,漂移越明显。

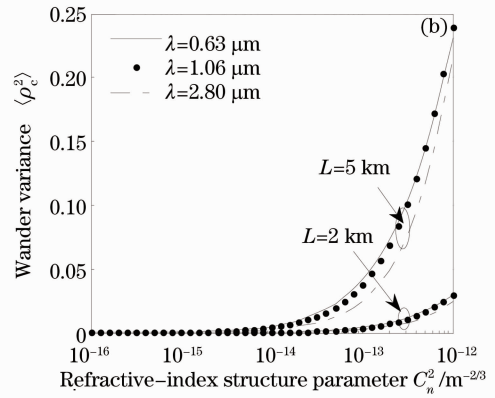


图3 漂移方差随折射率结构常数的变化

Fig. 3 Beam wander variance versus refractive-index structure parameter

图4中,设仿真参数为 $\kappa_0 = 0.3 \text{ m}^{-1}$, $\zeta_s = 3$, $w_0 = 0.05 \text{ m}$ 。由图4(a)中可以看出,传输距离在 10 km 内,弱湍流下光源空间相干长度对光束漂移影响很小,与文献[10]中的结论吻合。图4(b)和

(c)显示,在 $l_c \leq 0.005 \text{ m}$ 范围内,中湍流时光源空间相干长度的变化对漂移有一定的影响,漂移量差别在 $0.01 \sim 0.1 \text{ m}$ 范围内,随着湍流的增强,由于空间相干长度不同导致的漂移起伏差别变小。

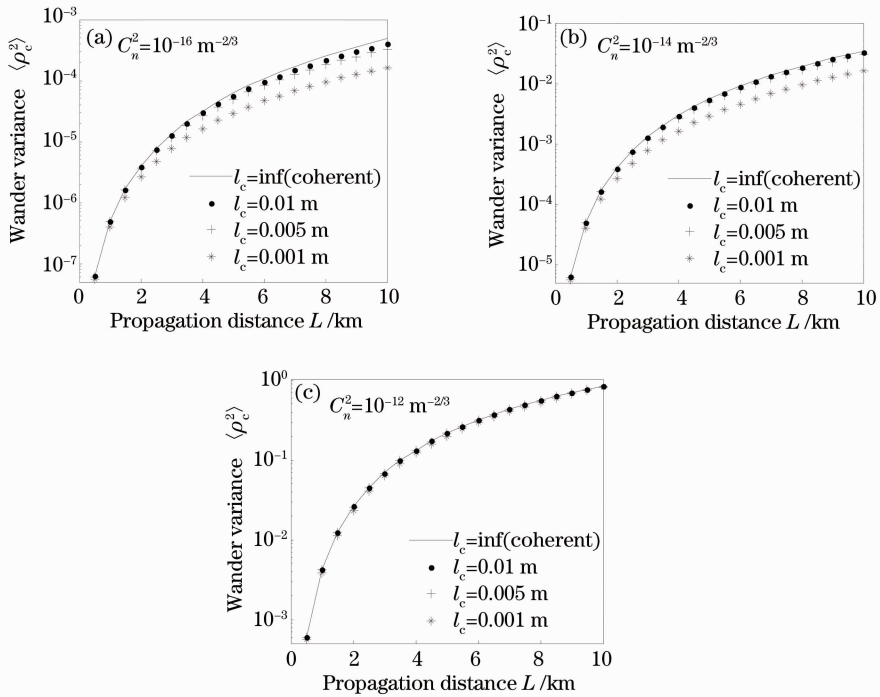


图 4 漂移方差与光束空间相干长度的关系

Fig. 4 Relationship with beam wander variance and the spatial coherence length

4 结 论

由 GSM 光束的平均光强引入大气湍流下的光束扩展表达式,分析了大气湍流对 GSM 光束的展宽影响。利用 Andrews 和 Philips 的经典漂移方差模型,研究了部分相干光在整个湍流过程的光束漂移特性,结果表明:

1) 与完全相干光相比,部分相干光的光束扩展受大气湍流的影响较小,但在自由空间中由衍射引起的光束扩展加剧。因此,在实际情况中,应权衡二者的利弊根据实际需要寻求最优光束。

2) 在可见光波段及近红外波段短距离传输时,波长对漂移影响很小。为了减小大气湍流的影响,应该尽量选取适当的大初始半径、长波长以及距离地面较高的位置发射。

3) 在通常的激光工程发射系统条件下,光源空间相干长度变化对漂移影响很小。因此在研究光束漂移特性时,不必严格使用单模激光器。

以上结论为部分相干光在不同湍流下的光束展宽和漂移提供一种新的研究方法,从而更全面地了解部分相干光在不同湍流中的传播特性。

参 考 文 献

1 J Wu. Propagation of a Gaussian-Schell beam through turbulent media [J]. J Mod Opt, 1990, 37(4): 671-684.

2 Pu Lili, Zhou Yu, Sun Jianfeng, *et al.*. Receiving characteristics of coherent lidar under partially coherent condition [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1228002.

濮莉莉, 周煜, 孙建锋, 等. 激光雷达部分相干外差探测接收特性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1228002.

3 Chen Xiaowen, Li Binzhong, Tang Mingyue. Directionality of apertured partially coherent beams propagating through atmospheric turbulence [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0913002.

陈晓文, 李宾中, 汤明玥. 受光阑限制的部分相干光通过湍流大气传输的方向性[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0913002.

4 Zhang Xiaoxin, Dan Youquan, Zhang Bin. Spreading of partially coherent flat-topped beams propagating along a slant path in turbulence 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.

5 Ding Chaoliang, Zhang Yongtao, Wang Haixia, *et al.*. Spectra and coherence properties of partially coherent pulse scattered by anisotropic media [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0729001.

丁超亮, 张永涛, 王海霞, 等. 部分相干光脉冲经各向异性介质散射的光谱和相干特性[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0729001.

6 Meng Xiangyu, Guo Chunlei, Wang Yong, *et al.*. Research on partially coherent light propagate on in synchrotron beamlines [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0734001.

孟祥雨, 郭春磊, 王勇, 等. 同步辐射光束线中部分相干光的传播研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0734001.

7 T Shirai, A Dogariu, E Wolf. Mode analysis of spreading of partially coherent beams propagation through atmospheric turbulence [J]. J Opt Soc Am A, 2003, 20(6): 1094-1102.

8 X Ji, X Chen, B Lü. Spreading and directionality of partially coherent Hermite-Gaussian beams propagating through atmospheric turbulence [J]. J Opt Soc Am A, 2008, 25(1): 21-28.

- 9 C Chen, H Yang. Temporal spectrum of beam wander for Gaussian Shell-model beams propagating in atmospheric turbulence with finite outer scale[J]. *Opt Lett*, 2013, 38(11): 1887–1889.
- 10 Qian Xianmei, Zhu Wenyue, Wang Ainting, *et al.*. Numerical simulation for coherent and partially coherent beam propagation through atmospheric turbulence [J]. *Chin Phys Lett*, 2010, 27(4): 044214.
- 11 Xiang Ningjing, Wang Mingjun, Wang Tairong. Average intensity and spreading of a partially coherent Gaussian-Schell model beam propagation through atmospheric turbulence [J]. *Laser Journal*, 2012, 33(5): 4–6.
向宁静, 王明军, 王太荣. 部分相干高斯-谢尔光束在大气湍流中的平均强度与展宽[J]. *激光杂志*, 2012, 33(5): 4–6.
- 12 S Yu, Z Chen, T Wang, *et al.*. Beam wander of electromagnetic Gaussian-Schell model beams propagating in atmospheric turbulence [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(31): 7581–7585.
- 13 L C Andrews, R L Phillips. *Laser Beam Propagation through Random Media* [M]. Bellingham: SPIE Press, 2005. 201–250.
- 14 W Wen, X Chu. Beam wander of an Airy beam with a spiral phase [J]. *J Opt Soc Am A*, 2014, 31(4): 685–690.
- 15 D K Borah, D G Voelz. Spatially partially coherent beam parameter optimization for free space optical communications [J]. *Opt Express*, 2010, 18(20): 20746–20758.
- 16 J C Ricklin, F M Davidson. Atmospheric turbulence effects on a partially coherent Gaussian beam: implication for free-space laser communication [J]. *J Opt Soc Am A*, 2002, 19(9): 1794–1802.
- 17 O Korotkova, L C Andrews, R L Phillips. Model for a partially coherent Gaussian beam in atmospheric turbulence with application in lasercom [J]. *Opt Eng*, 2004, 43(2): 330–341.
- 18 Xifeng Xiao, David G Voelz. Beam wander analysis for focused partially coherent beams propagating in turbulence [J]. *Opt Eng*, 2012, 51(3): 026001.

栏目编辑：王晓琰