

部分相干光在大气湍流中的光束扩展及角扩展

柯熙政, 王婉婷

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 基于广义惠更斯-菲涅耳原理、交叉谱密度函数, 利用修正 Von Karmon 谱模型以及 ITU-R 颁布的大气折射率结构常数模型, 推导出部分相干高斯-谢尔光束在大气湍流中传输时的束宽及角扩展表达式, 讨论并对比斜程和水平两种传输方式下天顶角、传输距离、湍流强度、相干长度等参数对光束束宽与角扩展的影响, 同时分别从相对束宽和相对角扩展的角度分析各种参数对于光束抑制湍流能力的影响, 并给予相应的物理解释。结果表明: 当天顶角小于 $\pi/3$ 时, 光束在斜程传输时的光束扩展和角扩展量接近于垂直传输, 所受湍流影响很小。传输距离大于 1 km 时, 束宽和相对束宽随传输距离的增加而明显增加。光束相干长度越大, 光束所受湍流影响越大, 而束宽及角扩展会随之减小。

关键词: 部分相干光; 斜程传输; 光束扩展; 角扩展

中图分类号: O43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2726-08

Expansion and angular spread of partially coherent beam propagating in atmospheric turbulence

Ke Xizheng, Wang Wanting

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

Abstract: The generalized Huygens-Fresnel principle and the cross-spectral density function were used to derive the expressions of beam width and angular spread of partially coherent Gaussian-Schell beam when it was propagating in the atmosphere on the basis of the model of the modified Von Karmon spectrum and the atmospheric refractive-index structure constant issued by ITU-R. And then, the impact on the beam propagating in the slant and horizontal ways, caused by the zenith, the transmission distance, the turbulent intensity, the coherent length of the beam and other parameters, were discussed and compared. The impact of the parameters on the ability of anti-turbulence of the beam was analyzed from the perspective of the relative expansion and the relative angular spread respectively and a series of concrete explanations were given. The research results demonstrate that the expansion and the angular spread of the beam suffer little effect from the turbulence during slant path when the zenith is less than $\pi/3$, which is close to vertical transmission. The beam width and the relative beam width of the beam increase with the increasing transmission distance significantly when the distance is greater than 1 km. The larger the coherent length of the beam is, the greater the impact of the turbulence suffers, while the expansion and

收稿日期: 2015-01-10; 修订日期: 2015-02-11

基金项目: 国家自然科学基金(61377080, 60977054, 61271110); 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(2013K06-08)

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。Email: xzke@263.net

the angular spread decrease.

Key words: partially coherent beam; propagation along a slant path; the beam width; the angular spread

0 引言

研究激光光束在大气湍流中的传输,对于激光雷达、卫星通讯、激光制导等领域具有重要意义。20世纪90年代,Wu和Boradman通过对部分相干高斯-谢尔光束在大气中传输的研究,发现“部分相干光比完全相干光抗湍流能力更强”^[1]。Tomohiro等人证明部分相干高斯-谢尔光束在大气湍流中传输时可产生同完全相干激光束相同辐射强度的角分布^[2]。Zhang通过对Yura光束短期湍流扩展半径和Fante光束短期湍流扩展半径进行数值计算,研究其在不同传输参数下的异同^[3];随后,又对高斯光束斜程传输时,等效半径与传输距离、初始半径等参数的关系进行了研究^[4]。Yang等人以厄米-双曲余弦-高斯光束为例,对该光束在大气湍流中水平传输时的束宽扩展和角扩展做了详细研究,分析了传输距离、折射率结构常数、光束阶数以及束腰宽度对束宽及角扩展的影响^[5]。由于在实际应用中经常会涉及到斜程传输,因此,研究光束在斜程传输时其自身及湍流相关参数对光束扩展和角扩展的影响都非常有意义。Qian等人采用多层相位屏的模拟方法,对地空激光大气的长距离斜程传输进行了数值模拟,分析激光在大气中斜程传输时光束各统计参量随天顶角、激光波长和初始半径的变化规律^[6]。Zhang等人以部分相干平顶光束为例,分析了光束在斜程传输时光束阶数、空间相干度、天顶角等参数对光束束宽的影响^[7]。Duan等人对GSM光束在大气湍流中以上行、下行以及水平三种不同路径传输时的平均强度、均方束宽以及角扩展情况进行了研究,并发现在大气湍流中以下行链路传输时光束所受影响最小^[8]。光束在传输过程中会出现束宽扩展和角扩展,这两者是具有不同物理含义但互有联系的两个研究点。已有文献中对天顶角、湍流强度、相干长度等参数的研究大多局限于对相应参数取特定值的方式,没有全面反映光束传输时各种参数对传输特性影响的变化情况,因此,文中针对天顶角、湍流强度、相干长度等参数

对光束在大气湍流中传输时的影响情况进行全面、系统的分析讨论。

文中以部分相干高斯-谢尔(Gaussian-Schell Model, GSM)光束为模型,利用广义惠更斯-菲涅耳原理、交叉谱密度函数以及束宽、角扩展定义式,推导出光束在大气湍流中沿上行链路传输时,斜程和水平两种方式下的束宽及角扩展表达式,分析了天顶角、传输距离、湍流强度、相干长度等各项参数对光束束宽和角扩展的影响,最后从相对束宽及相对角扩展的角度分析了各个参数对光束抗湍流能力的影响,同时给出相应的物理解释。

1 理论部分

部分相干GSM光束在 $z=0$ 平面内的交叉谱密度^[9]:

$$W^{(0)}(\rho_{s1}, \rho_{s2}, 0) = A \exp\left(-\frac{|\rho_{s1}|^2 + |\rho_{s2}|^2}{4\sigma_s^2}\right) \times \exp\left(-\frac{|\rho_{s1} - \rho_{s2}|^2}{2\sigma_g^2}\right) \quad (1)$$

式中: ρ_{s1}, ρ_{s2} 分别为源平面两点的坐标矢量;参数 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。

基于广义惠更斯-菲涅耳原理,GSM光束通过大气湍流后 z 处的交叉谱密度^[9]:

$$W(\rho_1, \rho_2, z) = \left(\frac{k}{2\pi z}\right)^2 \iint d^2\rho_{s1} \iint d^2\rho_{s2} W^{(0)}(\rho_{s1}, \rho_{s2}, 0) \times \exp\left[-\frac{ik}{2z} [(\rho_1 - \rho_{s1})^2 - (\rho_2 - \rho_{s2})^2]\right] \times \langle \exp[\phi^*(\rho_1, \rho_{s1}) + \phi(\rho_2, \rho_{s2})] \rangle \quad (2)$$

式中: ρ_1, ρ_2 分别为 z 平面两点的坐标矢量; $\langle \cdot \rangle$ 表示系综统计平均。表示为^[10]:

$$\langle \exp[\phi^*(\rho_1, \rho_{s1}) + \phi(\rho_2, \rho_{s2})] \rangle = -4\pi^2 k^2 \sec \alpha \cdot \int_{h_0}^H \int_0^\infty \kappa \phi_\alpha(\kappa, h) \{1 - J_0[|(1-\xi)p + \xi Q| \kappa]\} d\kappa dh \quad (3)$$

式中: $p = \rho_1 - \rho_2$; $Q = \rho_{s1} - \rho_{s2}$; $\xi = 1 - \frac{h-h_0}{H-h_0}$, H 代表接收机距离地面的高度, h_0 代表发射机距离地面的高度; α 为天顶角; J_0 为第一类零阶贝塞尔函数; $\phi_\alpha(\kappa, h)$ 代表大气折射率功率谱。文中采用包含内外尺度的修正

Von Karmon 谱:

$$\phi_n(\kappa, h) = 0.033 C_n^2(h) \exp(-\kappa^2/\kappa_m^2) \times (\kappa^2 + \kappa_0^2)^{-11/6} \quad (4)$$

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; $C_n^2(h)$ 代表大气折射率结构常数。这里采用 ITU-R 在 2001 年颁布的随高度变化的模型:

$$C_n^2(h) = 8.148 \times 10^{-56} v_{\text{RMS}}^2 h^{10} e^{-h/1000} + 2.7 \times 10^{-16} e^{-h/1500} + C_0 e^{-h/100} \quad (5)$$

式中: $v_{\text{RMS}}^2 = \sqrt{v_g^2 + 30.69v_g + 348.91}$ 为垂直路径风速; v_g 代表近地面风速; h 代表传输高度; C_0 代表近地面的大气结构常数, 该值的大小代表了湍流强度的大小。水平传输时, $C_n^2(h)$ 为常数。

将公式(4)代入公式(3)中, 根据贝塞尔函数性质进行计算可得^[11-12]:

$$\langle \exp[\phi^*(\rho_1, \rho_{s1}) + \phi(\rho_2, \rho_{s2})] \rangle = B_0(B_1 p^2 + B_2 p \cdot Q + B_3 Q^2) \quad (6)$$

其中

$$B_0 = 2\pi^2 k^2 \sec \alpha \int_0^\infty 0.033 \kappa^3 (-\kappa^2/\kappa_m^2) \times (\kappa^2 + \kappa_0^2)^{-11/6} d\kappa \quad (6a)$$

$$B_1 = \int_{h_0}^H C_n^2(h) (1-\xi)^2 dh \quad (6b)$$

$$B_2 = 2 \int_{h_0}^H C_n^2(h) (1-\xi) \xi dh \quad (6c)$$

$$B_3 = \int_{h_0}^H C_n^2(h) \xi^2 dh \quad (6d)$$

将公式(1)、公式(6)代入公式(2), 并令 $\rho_1 = \rho_2 = \rho$, 进行积分求解后即可得 GSM 光束斜程传输时的强度分布式^[13]:

$$I(\rho, z) = W(\rho, \rho, z) = \frac{A^2}{\Delta^2(z)} \exp\left[-\frac{|\rho|^2}{2\sigma_s^2 \Delta^2(z)}\right] \quad (7)$$

其中

$$\Delta^2(z) = 1 + \left[\frac{z}{k\sigma_s \delta}\right]^2 + \frac{2Mz^2}{k^2\sigma_s^2} \quad (7a)$$

$$\frac{1}{\delta^2} = \frac{1}{4\sigma_s^2} + \frac{1}{\sigma_g^2} \quad (7b)$$

$$M = \frac{1}{2} B_0 B_3 \quad (7c)$$

公式(7)~(7c)与参考文献[12]中水平传输条件下所推导出来的强度分布表达式类似。当大气折射率

结构常数 $C_n^2(h)$ 模型为常数时, 即为水平传输, 此时,

$$M = \frac{1}{3} \pi^2 k^2 z \int_0^\infty \kappa^3 \phi_n(\kappa) d\kappa. \quad \text{当在自由空间中传输时, } M=0.$$

根据光束均方根束宽定义^[14]:

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

将公式(7)代入公式(8)中可得光束束宽:

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

公式(9)的前两项表示由自由空间衍射引起的光束扩展量, 与光束参数项 δ 和传输距离 z 有关; 第三项代表湍流引起的光束扩展量, 与湍流项 M 和传输距离 z 有关。

为分析光束扩展所受湍流影响的大小, 求出相对束宽:

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

式中: $\omega_{\text{urb}}(z)$ 代表光束在湍流中传输时的束宽; $\omega_{\text{free}}(z)$ 代表光束在自由空间中传输时的束宽。

根据角扩展的定义式可求出光束的角扩展^[15]:

$$\theta = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{\omega(z)}{z} = \left[\frac{2}{k^2 \delta^2} + \frac{4M}{k^2}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

同公式(9)类似, 公式(11)的第一项代表自由空间中引起的角扩展, 与光束参数项 δ 有关; 第二项代表由湍流引起的角扩展, 与湍流项 M 有关。

进而可求得光束的相对角扩展表达式:

$$\theta_r = \frac{\theta_{\text{urb}}}{\theta_{\text{free}}} = [1 + 2M\delta^2]^{1/2} \quad (12)$$

式中: θ_{urb} 代表光束在湍流中传输时的角扩展; θ_{free} 代表光束在自由空间中传输时的角扩展。

2 GSM 光束在大气湍流中传输时的光束扩展

根据公式(9)、(10)可对天顶角、传输距离、湍流强度、光束相关参数对光束束宽及相对束宽的影响进行计算与分析。

图 1 为光束束宽和相对束宽随天顶角的变化。计算所取参数: 总传输距离 $L=1000$ m; 斜程传输时,

近地面大气折射率结构常数 $C_0=1.7\times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$; 相干长度 $\sigma_g=0.02 \text{ m}$; 束腰宽度 $\sigma_s=0.05 \text{ m}$; 波长 $\lambda=650 \text{ nm}$; 近地面风速 $v_g=2.8 \text{ m/s}$; 湍流内尺度 $l_0=0.01 \text{ m}$; 湍流外尺度 $L_0=10 \text{ m}$; 发射机高度 $h_0=2 \text{ m}$ 。从图中可以看出, 光束在大气湍流中传输时, 其束宽和相对束宽随天顶角的增大而增大; 在天顶角小于 $\pi/3$ 时, 束宽及相对束宽随天顶角的变化并不明显, 当大于 $\pi/3$ 时, 相对束宽随天顶角的增大而迅速增加, 光束受到的湍流影响也迅速增大; 当光束为垂直传输时, 束宽最小, 而水平传输时扩展最为严重, 受到的湍流影响也最大。产生该现象主要是由大气折射率结构常数随高度的变化引起的, 光束传输时的大气信道越靠近地面, 受到的湍流影响越大, 即天顶角越大, 越接近水平传输, 光束扩展越严重。

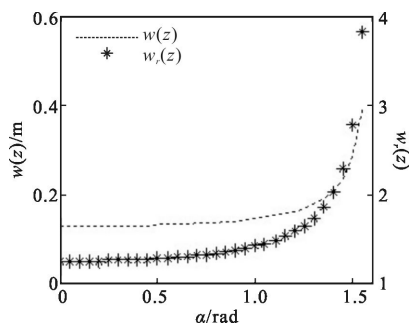


图 1 光束束宽和相对束宽随天顶角的变化

Fig.1 Beam width and relative beam width versus zenith

图 2 为光束束宽和相对束宽随传输距离的变化。计算所取参数: 斜程传输时, 天顶角 $\alpha=\pi/4$, 近地面大气折射率结构常数 $C_0=1.7\times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$; 水平传输时, 大气折射率结构常数 $C_0=1.7\times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$; 相干长度 $\sigma_g=0.02 \text{ m}$; 束腰宽度 $\sigma_s=0.05 \text{ m}$; 波长 $\lambda=650 \text{ nm}$; 近地面风速 $v_g=2.8 \text{ m/s}$; 湍流内尺度 $l_0=0.01 \text{ m}$; 湍流外尺度 $L_0=10 \text{ m}$; 发射机高度 $h_0=2 \text{ m}$ 。从图中可以看出, 在传输距离约小于 1000 m 时, 光束在水平和斜程传输时的束宽和相对束宽几乎不随距离增加而变化, 并且两种传输方式下的束宽和相对束宽值相等; 在传输距离约大于 1000 m 时, 光束束宽和相对束宽均随着传输距离的增加而增加; 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, 从而使得光束扩展变得严重, 同时受到的湍流影响也随之变大。与水平传输相比, 斜程传输时的束宽和相对束宽增加较缓慢且其值更

小, 即斜程传输时的光束扩展更小, 抗湍流特性更强。

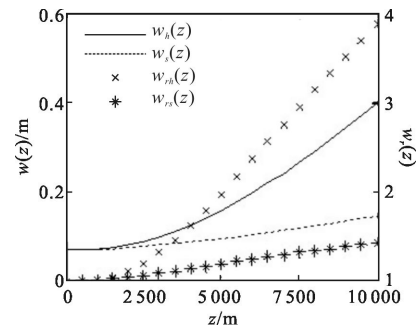


图 2 光束束宽和相对束宽随传输距离的变化

Fig.2 Beam width and relative beam width versus propagation distance

图 3 为光束束宽和相对束宽随湍流强度的变化。计算所取参数: 总传输距离 $L=10000 \text{ m}$; 斜程传输时, 天顶角 $\alpha=\pi/4$; 相干长度 $\sigma_g=0.02 \text{ m}$; 束腰宽度 $\sigma_s=0.05 \text{ m}$; 波长 $\lambda=650 \text{ nm}$; 近地面风速 $v_g=2.8 \text{ m/s}$; 湍流内尺度 $l_0=0.01 \text{ m}$; 湍流外尺度 $L_0=10 \text{ m}$; 发射机高度 $h_0=2 \text{ m}$ 。图中, C 代表水平和斜程传输时的湍流强度大小, 可以看出, 无论光束以水平还是斜程方式传输, 其束宽和相对束宽均随着湍流强度的增加而增加, 即湍流越强, 光束所受湍流影响越大; 同时还可以发现, 光束在斜程传输时的束宽和相对束宽均明显小于水平传输, 同时光束所受湍流影响更小。这主要是由于大气折射率的随机起伏会导致波束出现相位畸变, 而且随机起伏越大, 相位畸变越严重, 进而导致光束扩展加剧。

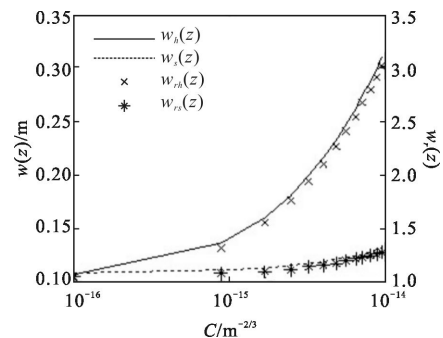


图 3 光束束宽和相对束宽随湍流强度的变化

Fig.3 Beam width and relative beam width versus turbulent intensity

图 4 为光束束宽和相对束宽随相干长度的变化。计算所取参数: 总传输距离 $L=10000 \text{ m}$; 斜程传输时, 天顶角 $\alpha=\pi/4$, 近地面大气折射率结构常数

$C_0=1.7\times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$;水平传输时,大气折射率结构常数 $C_n^2(2)=1.7\times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$;束腰宽度 $\sigma_s=0.05 \text{ m}$;波长 $\lambda=650 \text{ nm}$;近地面风速 $v_g=2.8 \text{ m/s}$;湍流内尺度 $l_0=0.01 \text{ m}$;湍流外尺度 $L_0=10 \text{ m}$;发射机高度 $h_0=2 \text{ m}$ 。从图中可知,在相干长度小于 0.02 m 时,光束的束宽随着相干长度的增加逐渐减小,在大于 0.02 m 时,其值几乎不再随相干长度变化,即相干性越差,光束扩展越严重;而光束相对束宽则是在相干长度小于 0.05 m 时,随相干长度的增加迅速增大,当相干长度大于 0.05 m 时,其值几乎不再随相干长度变化,即相干性越差,其抗湍流特性越强;由于光束扩展由自由空间衍射和湍流两者共同决定,因此可知,相干性越差,光束受自由空间衍射的影响越大。对比水平和斜程两种传输方式,可知斜程方式传输时光束所受湍流的影响要小于水平传输。

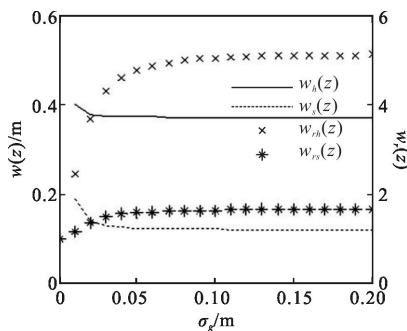


图 4 光束束宽和相对束宽随相干长度的变化

Fig.4 Beam width and relative beam width versus coherent length

图 5 为光束束宽和相对束宽随束腰宽度的变化。计算所取参数:总传输距离 $L=10\ 000 \text{ m}$;斜程传输时,天顶角 $\alpha=\pi/4$,近地面大气折射率结构常数 $C_0=1.7\times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$;水平传输时,大气折射率结构常数 $C_n^2(2)=1.7\times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$;相干长度 $\sigma_g=0.02 \text{ m}$;波长 $\lambda=$

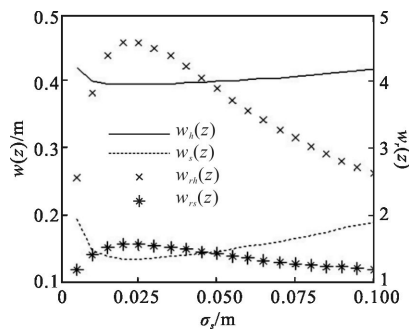


图 5 光束束宽和相对束宽随光束束腰宽度的变化

Fig.5 Beam width and relative beam width versus waist width

650 nm ;近地面风速 $v_g=2.8 \text{ m/s}$;湍流内尺度 $l_0=0.01 \text{ m}$;湍流外尺度 $L_0=10 \text{ m}$;发射机高度 $h_0=2 \text{ m}$ 。从图 5 中可知,光束束宽随着束腰宽度的增加先减小后增大;而光束相对束宽则随着束腰宽度的增加先增大后减小;光束在斜程方式传输时所受湍流影响更小,扩展也更小。这同参考文献[7]中所得到的部分相干平顶光束斜程传输时的相对束宽随束腰宽度的变化情况类似。

3 GSM 光束在大气湍流中传输时的角扩展

根据公式(11)、(12)可对天顶角、传输距离、湍流强度、光束相关参数对光束角扩展及相对角扩展的影响进行计算与分析。

图 6 为光束角扩展和相对角扩展随天顶角的变化。计算所取参数:总传输距离 $L=10\ 000 \text{ m}$;斜程传输时,近地面大气折射率结构常数 $C_0=1.7\times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$;相干长度 $\sigma_g=0.02 \text{ m}$;束腰宽度 $\sigma_s=0.05 \text{ m}$;波长 $\lambda=650 \text{ nm}$;近地面风速 $v_g=2.8 \text{ m/s}$;湍流内尺度 $l_0=0.01 \text{ m}$;湍流外尺度 $L_0=10 \text{ m}$;发射机高度 $h_0=2 \text{ m}$ 。从图中可知,光束在大气湍流中传输时,其角扩展和相对角扩展随着天顶角的增大而增大;在天顶角小于 $\frac{\pi}{3}$ 时,角扩展和相对角扩展几乎不随天顶角的变化而变化,当大于 $\frac{\pi}{3}$,即接近于水平传输时,角扩展和相对角扩展随天顶角的增大迅速增大。这可从大气折射率结构常数随高度的变化情况得到解释。

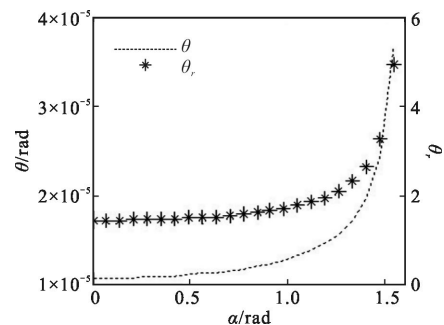
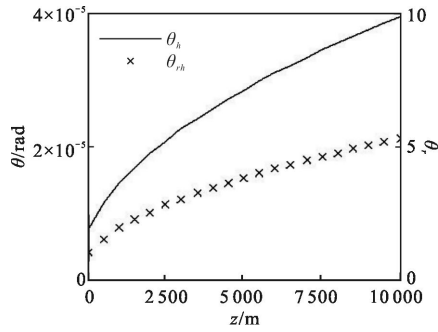


图 6 光束角扩展和相对角扩展随天顶角的变化

Fig.6 Angular spread and relative angular spread versus zenith

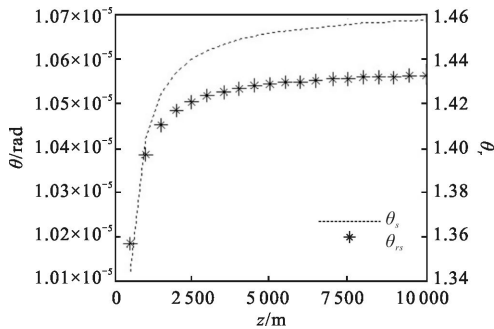
图 7 为光束角扩展和相对角扩展随传输距离的变化。计算所取参数:斜程传输时,天顶角 $\alpha=\pi/4$,近地面大气折射率结构常数 $C_0=1.7\times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$;水平传输时,大气折射率结构常数 $C_n^2(2)=1.7\times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$;相

干长度 $\sigma_g=0.02\text{m}$;束腰宽度 $\sigma_s=0.05\text{m}$;波长 $\lambda=650\text{nm}$;近地面风速 $v_g=2.8\text{m/s}$;湍流内尺度 $l_0=0.01\text{m}$;湍流外尺度 $L_0=10\text{m}$;发射机高度 $h_0=2\text{m}$ 。观察图 7(a)、(b)可知,光束在水平和斜程两种传输方式下传输时,其角扩展和相对角扩展均随着传输距离增加而增加;在传输距离一定时,相比于水平传输,斜程传输时光束的角扩展所受湍流的影响较小。



(a) 水平传输

(a) Horizontal transmission



(b) 斜程传输

(b) Slant transmission

图 7 光束角扩展和相对角扩展随传输距离的变化

Fig.7 Angular spread and relative angular spread versus propagation distance

图 8 为光束角扩展和相对角扩展随湍流强度的变化。计算所取参数:总传输距离 $L=10\ 000\text{m}$;斜程传输时,天顶角 $\alpha=\pi/4$;相干长度 $\sigma_g=0.02\text{m}$;束腰宽度 $\sigma_s=0.05\text{m}$;波长 $\lambda=650\text{nm}$;近地面风速 $v_g=2.8\text{m/s}$;湍流内尺度 $l_0=0.01\text{m}$;湍流外尺度 $L_0=10\text{m}$;发射机高度 $h_0=2\text{m}$ 。从图 8 中可知,光束角扩展和相对角扩展随着湍流强度的增加而增加,而且湍流越强,其增加速度越快;对比图 8(a)、(b)可知,在湍流强度一定的条件下,光束在斜程传输时角扩展所受湍流的影响远小于水平传输。

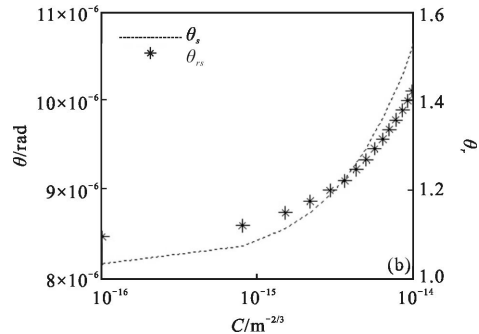
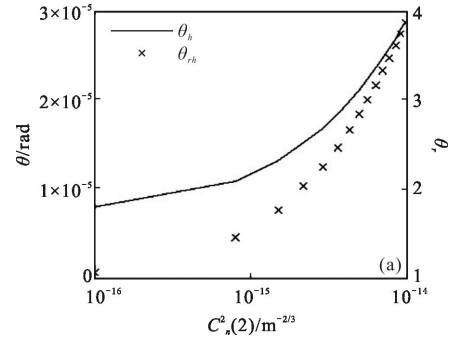


图 8 光束角扩展和相对角扩展随湍流强度的变化

Fig.8 Angular spread and relative angular spread versus turbulent intensity

图 9 为光束角扩展和相对角扩展随相干长度的变化。计算所取参数:总传输距离 $L=10\ 000\text{m}$;斜程传输时,天顶角 $\alpha=\pi/4$,近地面大气折射率结构常数 $C_0=1.7\times 10^{-14}\text{m}^{-2/3}$;水平传输时,大气折射率结构常数

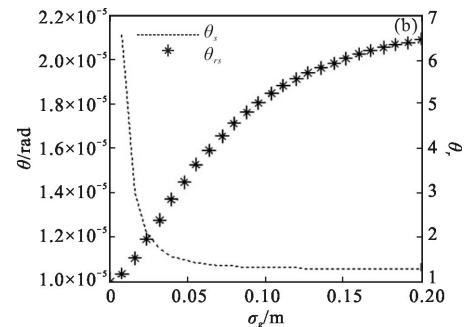
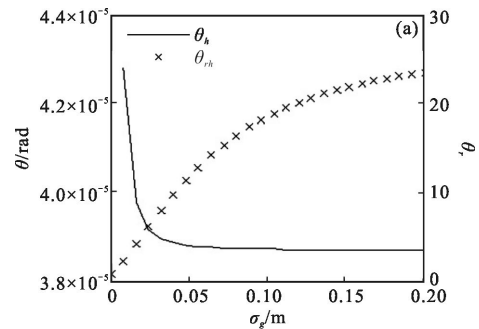


图 9 光束角扩展和相对角扩展随相干长度的变化

Fig.9 Angular spread and relative angular spread versus coherent length

$C_n^2(2)=1.7\times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$;束腰宽度 $\sigma_s=0.05 \text{ m}$;波长 $\lambda=650 \text{ nm}$;近地面风速 $v_g=2.8 \text{ m/s}$;湍流内尺度 $l_0=0.01 \text{ m}$;湍流外尺度 $L_0=10 \text{ m}$;发射机高度 $h_0=2 \text{ m}$ 。从图 9 可知,在相干长度小于约 0.02 m 时,光束角扩展随相干长度的增加而迅速减小,在大于 0.02 m 时,几乎不再随相干长度的增加而变化,说明光束的相干长度越小,角扩展越严重;而光束的相对角扩展则随着相干长度的增加而逐渐增大,即光束的相干长度越大,其受湍流的影响越大。对比图 9(a)、(b)可知,在相干长度一定的条件下,光束斜程传输时角扩展所受湍流影响要比水平传输小很多。

图 10 为光束角扩展和相对角扩展随束腰宽度的变化。计算所取参数:总传输距离 $L=10\ 000 \text{ m}$;斜程传输时,天顶角 $\alpha=\pi/4$,近地面大气折射率结构常数 $C_0=1.7\times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$;水平传输时,大气折射率结构常数 $C_n^2(2)=1.7\times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$;相干长度 $\sigma_g=0.02 \text{ m}$;波长 $\lambda=650 \text{ nm}$;近地面风速 $v_g=2.8 \text{ m/s}$;湍流内尺度 $l_0=0.01 \text{ m}$;湍流外尺度 $L_0=10 \text{ m}$;发射机高度 $h_0=2 \text{ m}$ 。从

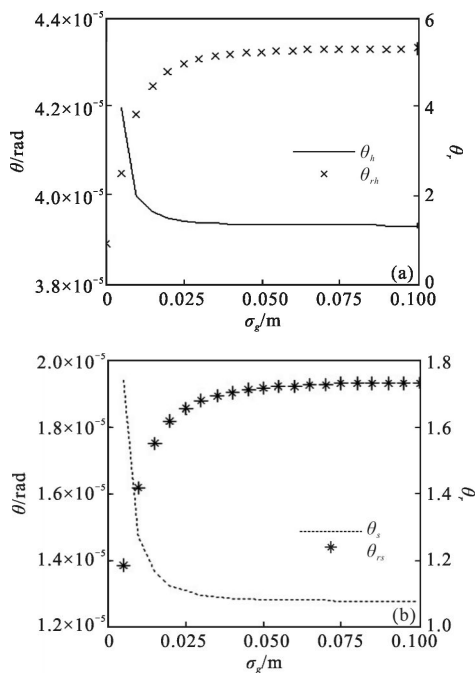


图 10 光束角扩展和相对角扩展随光束束腰宽度的变化

Fig.10 Angular spread and relative angular spread versus waist width

图中可以看出,在束腰宽度小于约 0.02 m 时,光束角扩展迅速变小,而相对角扩展却随着束腰宽度的增加迅速增大;当大于 0.02 m 时,角扩展和相对角

扩展几乎不再随束腰宽度的增加而变化;对比图 10 (a)、(b)可知,在相同束腰宽度下,相比于水平传输,光束斜程传输时角扩展所受湍流影响更小。

4 结论

文中采用修正 Von Karmon 谱和 ITU-R 颁布的随高度变化的大气结构常数模型,推导出部分相干 GSM 光束在大气湍流中传输时的光束束宽及角扩展表达式,并对光束在大气湍流中水平和斜程传输时的束宽和角扩展进行了数值计算与分析。结果表明:

(1) 光束在大气湍流中斜程传输时的束宽及角扩展所受湍流影响小于水平传输,并且斜程传输的天顶角越小,光束所受湍流影响越小。

(2) 光束束宽和相对束宽在传输距离大于 1 km 时增加速度较快,而角扩展和相对角扩展在传输距离小于 1 km 时增加速度较快;湍流强度越强,光束束宽及角扩展所受湍流影响越大,束宽及角扩展越明显。

(3) 天顶角、传输距离、湍流强度等参数对光束束宽与角扩展的影响变化基本一致。

通过对部分相干 GSM 光束在湍流大气中传输特性的讨论,得到光束束宽及角扩展随天顶角、湍流强度及相干长度等参数的变化规律。在现实应用中可根据这些参数的影响状况来选取光束合适的参数。这将对于地空斜程路径的大气激光通信具有重要的指导作用和现实意义。

参考文献:

- [1] Wu J. Propagation of Gaussian-Schell beam through turbulent Media[J]. *Journal of Modern Optics*, 1990, 37(4): 671-684.
- [2] Tomohiro S, Aristide D, Emil W. Directionality of Gaussian Schell-model beams propagating in atmospheric turbulence [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(8): 610-612.
- [3] Zhang Yixin. Comparison of the two spread theories of light beam propagation in Turbulent atmosphere [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 394-398. (in Chinese)
- [4] Zhang Yixin, Wang Gaogang. Average intensity and short-term beam spread of a laser beam propagating in a slant-path atmosphere [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2): 167-170. (in Chinese)

- 张逸新, 王高刚. 斜程大气传输激光束的平均光强与短期光束扩展[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 167-170.
- [5] Yang Ailin, Li Jinhong, Lü Baida, et al. A comparative study of the beam-width spreading and angular spreading in atmosphere turbulence [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(4): 2451-2460. (in Chinese)
杨爱林, 李晋红, 吕百达, 等. 大气湍流中光束束宽扩展和角扩展的比较研究[J]. 物理学报, 2009, 58(4):2451-2460.
- [6] Qian Xianmei, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong. Numerical simulation of turbulent effects of laser propagation along a ground-space slant atmospheric path [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 787-790. (in Chinese)
钱仙妹, 朱文越, 饶瑞中. 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): 787-790.
- [7] 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): 1201101-1-1201101-7. (in Chinese)
张晓欣, 但有权, 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): 1201101-1-1201101-7.
- [8] Duan M L, Li J H, Wei J L. Influence of different propagation paths on the propagation of laser in atmospheric turbulence[J]. *Optoelectronics Letters*, 2013, 9(6): 1.
- [9] Li Chengqiang, Zhang Heyong, Wang Tingfeng, et al. Investigation on coherence characteristics of Gauss-Schell model beam propagating in atmospheric Turbulence [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62 (22): 224203-1-224203-7. (in Chinese)
李成强, 张合勇, 王挺峰, 等. 高斯-谢尔模光束在大气湍流中传输相干特性研究 [J]. 物理学报, 2013, 62(22): 224203-1-224203-7.
- [10] Andrews L C, Phillips R L. Laser beam propagation through random media [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 2005: 195.
- [11] 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.
- [12] Wei L, Liu L R, Sun J F, et al. Change in degree of coherence of partially coherent electromagnetic beams propagating through atmosphere turbulence [J]. *Optics Communications*, 2007, 27(1): 1-8.
- [13] Wu G H, Guo H, Yu S, et al. Spreading and direction of Gaussian-Schell model beam through a non-Kolmogorov turbulence [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(5): 715.
- [14] Greg G, Emil W. Spreading of partially coherent beams in random media [J]. *Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision*, 2002, 19(8): 1592-1598.
- [15] Yang A L, Zhang E T, Ji X L, et al. Angular spread of partially coherent Hermite-cosh-Gaussian beams propagating through atmospheric turbulence [J]. *Optics Express*, 2008, 16(12): 8366.