

随机相位屏法数值模拟太赫兹波在湍流大气中的传输

李婉 曾曙光* 刘雁

三峡大学理学院, 湖北 宜昌 443002

摘要 太赫兹波的大气传输特性对于太赫兹的空间应用有重要意义。采用随机相位屏法研究了太赫兹波在湍流大气中的水平传输特性。在忽略大气对太赫兹波的吸收与散射、仅考虑大气折射率随机起伏的前提下,通过改变传输距离等参数,对太赫兹波经过湍流大气传输后接收面上的平均光强分布和闪烁指数等进行了研究。作为对比,在同等大气湍流条件下,对可见光波也进行了相应的数值模拟与分析。研究表明,同等条件下,太赫兹波受大气湍流的影响明显小于可见光波;大气湍流对太赫兹波的短程应用影响较小。

关键词 成像系统; 太赫兹; 大气湍流; 随机相位屏; 数值模拟; 传输

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.080104

Numerical Simulation of Terahertz Wave Propagating in Turbulent Atmosphere Using the Random Phase Screen Method

Li Wan Zeng Shuguang Liu Yan

College of Science, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China

Abstract The propagation characteristics of terahertz (THz) wave in the turbulent atmosphere are very important to the space applications of THz wave. The horizontal propagation characteristics of THz wave in atmospheric turbulence have been studied by the random phase screen method. Through ignoring the scattering and absorption of THz atmospheric conditions and focusing on the atmospheric refractive index fluctuation, the average intensity distribution and scintillation indexes on the receiver plane were studied under different propagation distances in the atmospheric turbulence. For comparison, the visible light waves were also carried out through numerical simulation and analysis under the same conditions. The results show that under the same conditions, the influence of atmospheric turbulence on THz wave is much smaller than it on the visible light wave. Furthermore, atmospheric turbulence has little impact on the short-range application of THz wave.

Key words imaging systems; terahertz; turbulent atmosphere; random phase screen; numerical simulation; propagation

OCIS codes 010.1300; 010.1330; 010.3310; 040.2235

1 引言

太赫兹(THz)波是指频率在0.1~10 THz内的电磁波,其波长在30~3000 μm ,介于毫米波与红外波之间,是电磁波谱上电子学到光子学的过渡段。由于对该波段了解比较有限,使得太赫兹波成为电磁波谱上唯一未被全面研究的频率窗口,被称之为“太赫兹空隙”^[1-3]。太赫兹波因其辐射能量低、对生物体无伤害、频带宽等优点而被广泛应用于大气遥感^[3]、空间通信^[4]、医学诊断^[5]和太赫兹成像^[6]等领域。近十几年的研究表明,影响太赫兹大气传输的因素主要有水汽的吸收和色散、气溶胶散射、大气辐射、大气湍流、大气折射等^[7]。由于影响因素繁杂,太赫兹大气传输的研究目前仍处于起步阶段,并受到了国内外学者的广泛重视。研究者一方面通过分析透过率谱,探寻太赫兹的大气窗口^[8-9],另一方面从传输过程的损耗着手,探究不同地域的太赫兹传输时其大气吸收、散射与压强、温度、湿度等的关系^[7,10],并提出减少大气传输各种损耗的方法^[11]。在太

收稿日期: 2015-02-10; 收到修改稿日期: 2015-03-05; 网络出版日期: 2015-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(11347117)、三峡大学优秀人才科研启动基金(KJ2011B066)

作者简介: 李婉(1994—),女,本科,主要从事大气光学方面的研究。E-mail: 1049154592@qq.com

*通信联系人。E-mail: zengshuguang19@sohu.com

赫兹传输的新应用探索上,将太赫兹传输技术投入到已成熟的系统中,如 THz 无线数字通信^[12]等。这些已有文献一般都着眼于水汽的吸收和色散、气溶胶散射等因素上,未考虑大气湍流对太赫兹大气传输的影响。本文则在忽略大气中水汽的吸收和色散等因素的前提下,重点研究了大气湍流对 THz 大气传输的影响。

在激光大气传输中,数值模拟发挥了重要作用,已经成功应用于普通光源传播^[13]、航天飞机与激光雷达的地面模拟测试等^[14]。由于湍流介质的随机性,很难得到解析解,而数值模拟可以选择一定条件下的传输参量,对结果进行统计分析,更加直观。在激光大气传输的数值模拟中,通常采用构造随机相位屏的方法,即将传输路径看成真空与薄相位调制屏相间而成^[15]。产生相位屏方法有快速傅里叶变换(FFT)反演法、Zernike 多项式法、分形相位屏法等^[16]。合适的相位屏可以快速准确地得出结果,并且采用随机相位屏的方法可以直观地模拟出不同传输条件下的传输结果,如平均光强分布、光斑漂移等,将理论研究和实验研究结合起来。

为了更为直观地研究太赫兹波在湍流大气中的传输行为,采用构造多层随机相位屏的方法数值模拟了大气湍流中的 THz 波传输,与理论结果进行了对比。并在同等大气湍流条件下,通过数值模拟对比了太赫兹波与可见光波的大气传输特性。

2 理论模型

大气湍流是指由于大气密度的随机变化导致折射率随机变化的现象。大气湍流可导致光波在其中传输时出现波前随机起伏引起接收面的光强起伏、光束扩展和光束漂移等湍流效应^[17]。按照 Kolmogorov 的湍流理论,大气湍流可用大气折射率起伏功率谱密度来描述。目前,已经得到理论与实验支持的几个主要谱模型有 Kolmogorov 谱、Von Karman 谱、Tatarskii 谱和 Hill 谱等^[18]。采用 Von Karman 谱来进行数值模拟与分析,其表达式为^[18]

$$\Phi_n(K) = 0.033 C_n^2 (K^2 + L_0^{-2})^{-1/6} \exp\left[-\left(\frac{KL_0}{5.92}\right)^2\right], \quad (1)$$

式中 $K^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$ 为空间波数, l_0 、 L_0 分别为内、外尺度, C_n^2 为大气折射率结构常数,与距离地面高度有关,其白天近地面附近其值一般在 $10^{-15} \sim 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 之间。

对于 Von Karman 谱,理论上高斯光束在经过湍流大气传输距离 L 后,接收面上的平均光强分布表示为^[18]

$$\langle I(r, L) \rangle = \frac{k^2 w_0^2}{4L^2} \int_0^\infty Q J_0\left(\frac{krQ}{L}\right) \exp\left[-\frac{kQ^2}{4\Lambda L}\right] \exp\left[-\frac{1}{2} D_{sp}(Q)\right] dQ, \quad (2)$$

式中 k 为波数, r 为径向距离, w_0 为初始束腰大小, $D_{sp}(Q)$ 为球面波结构函数, $\langle \cdot \rangle$ 表示平均值, Λ 为高斯光束参数, Q 为相对坐标参数, $J_0(\cdot)$ 为第一类贝塞尔函数。

随机相位屏法的理论基础是在介质折射率起伏引起的相位变化足够小时,可将光波场的传播分为真空传输与介质折射率相位调制两个独立过程^[15]。相位调制由传播路径上的虚拟相位屏实现,目前常用的构造相位屏的方法是利用湍流空间谱模型产生相空间随机场。数值模拟中的相位场是离散场,可采用分步傅里叶变换方法实现整个光传播过程的模拟。相位屏的网格结构为 $N \times N$ 个正方形网格,网格宽为 Δx ,则相空间波数间隔为 $\Delta K = 2\pi/(N\Delta x)$ 。相应的离散二维复随机场为^[15]:

$$\tilde{S}(p\Delta K, q\Delta K) = a_r \sqrt{F_s(p\Delta K, q\Delta K)} \cdot \Delta K, \quad (3)$$

式中 p, q 为 $-N/2 \sim +N/2$ 之间随机数, F_s 为相位的二维频谱, $a_r = A_r + iB_r$ 是实部和虚部均值都为 0, 方差为 1 的随机数。要正确反映折射率随机起伏对光束传播的影响,其核心就在于构造出合适的相位屏。

3 数值模拟与计算

在本节中,采用随机相位屏法对太赫兹波在湍流大气中的水平传输特性进行了数值模拟。不加以特别提及时,计算条件如下:外尺度 L_0 为 15 m,内尺度 l_0 为 1 mm;大气折射率结构常数 $C_n^2 = 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 。对于随机相位屏的设定^[15,19]:步长 Δz 应足够小以保证折射率起伏引起的相位变化 S 足够小,从而能进行分步傅里叶变换,即 $S = k\sigma_n \Delta z \ll 1$ ($\sigma_n^2 = C_n^2 \Delta z^{2/3}$ 为惯性区内各向同性介质折射率起伏的均方差);同时为保证光场特性不依赖于相位屏的构造,需要步长 Δz 大于非均匀元尺度,即 $\Delta z > L_0$ 。结合两个限制条件将传输步长设为 20 m。为保证数值模拟结果准确性,其接收屏网格数 $N = 2^8 = 256$,网格宽度选择 Δx 取内尺度的 1/2。对于平均光

强和闪烁指数等统计量,通过对200次数值模拟实验值取平均获得。

3.1 平均光强分布

图1给出了波长为0.3 mm的THz高斯光束与波长为632.8 nm的可见光高斯光束在湍流大气中传播1 km后接收面上的平均光强分布。可见光高斯光束初始束腰为50 mm,太赫兹高斯光束的初始束腰为300 mm。由图1可知,太赫兹和可见光高斯波束在经过湍流大气传输后,其平均光强分布仍然为高斯分布。THz高斯光束数值模拟的结果与理论值吻合很好;可见光高斯光束数值模拟的结果与理论值偏差要稍大些,特别是在光强较大的地方。这主要是由于可见光频率较大,受大气湍流影响较大,从而使得其随机起伏较大。仿真结果与理论结果相符,说明采用的随机相位屏法参数选取较为合理,结果较为可靠。通过提高随机试验的次数,可以使得数值模拟结果与理论值更为吻合,但需要更长的计算时间。

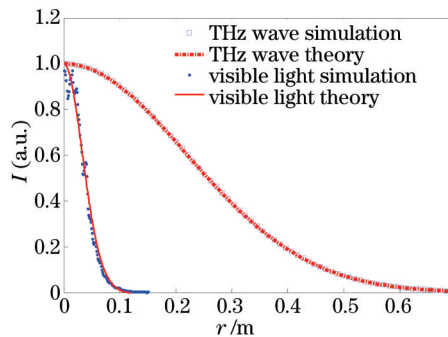


图1 太赫兹波与可见光波在湍流大气中传输1 km后的平均光强分布

Fig.1 Average intensity distribution of THz wave and visible light wave after propagating 1 km in the turbulent atmosphere

3.2 闪烁指数

在大气光学中,通常用归一化光强方差即闪烁指数 σ^2 来表示光强的起伏程度。其表达式为 $\sigma^2 = \frac{\langle I - \langle I \rangle^2 \rangle}{\langle I \rangle^2}$ 。闪烁指数是研究电磁波在湍流大气中传输的重要参数。以下研究太赫兹平面波的闪烁指数随湍流大气中传输距离的变化。

图2分别给出了可见光、1 THz和10 THz的平面波的闪烁指数随距离变化的情况。由图2可知,同等条件下,可见光的闪烁指数远大于10 THz平面波的闪烁指数,而10 THz平面波又远大于1 THz平面波的相应值。这说明平面波的闪烁指数随着频率的增大而增大。另外,随着传输的距离增加,可见光的闪烁指数先增大后减小,最终趋近于1;1 THz和10 THz的平面波的闪烁指数则单调增大,但都远小于1。这说明可见光在大气中传输时出现了所谓的“闪烁饱和效应”^[18],且在大气中传输几百米后就将进入强起伏状态。而对于1 THz和10 THz的太赫兹波,在10 km以内均始终处于弱起伏状态。因此,太赫兹波大气传输受大气湍流的影响明显小于可见光波。

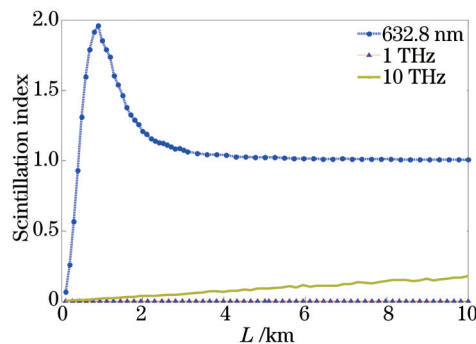


图2 不同传输距离的太赫兹波及可见光波的闪烁指数

Fig.2 Scintillation indexes of terahertz and visible light under different distances

3.3 光强分布的数值模拟

为了更为直观地反映太赫兹波的形态随传输距离的演化,采用随机相位屏法对太赫兹平面波和太赫兹

高斯光束在湍流大气中的传输行为进行了模拟,并与可见光的相应结果进行了对比。

3.3.1 平面波的数值模拟

图3给出了可见光和太赫兹平面波在湍流大气中传输一定距离后的光强分布图。其中图3(a)、(c)、(e)分别为可见光传输100 m、1 km、10 km后的光强分布图;图3(b)、3(d)、3(f)分别为太赫兹波传输100 m、1 km、10 km后的光强分布图。计算中,可见光的波长为632.8 nm,太赫兹的波长为0.3 mm,平面波的初始值均为1。

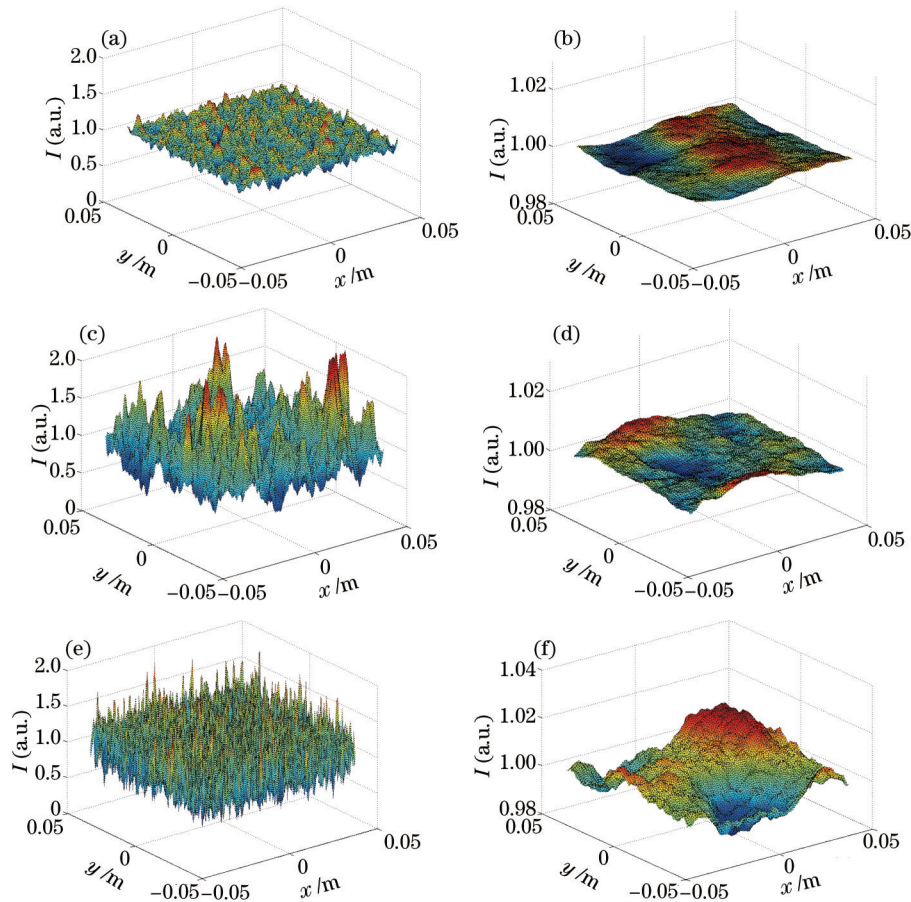


图3 可见光与太赫兹平面波传输不同距离后的光强分布图。可见光(a) 100 m, (c) 1 km, (e) 10 km;
太赫兹平面波(b) 100 m, (d) 1 km, (f) 10 km

Fig.3 Intensity distribution of the visible light and terahertz plane wave after propagating different distances in the turbulent atmosphere. Visible light (a) 100 m, (c) 1 km, (e) 10 km; terahertz wave (b) 100 m, (d) 1 km, (f) 10 km

由图3(a)、(c)、(e)可知,可见光在传输距离为100 m时,其光强随机起伏的幅度较小,光强分布还可近似看做一个平面;但当传输距离增大至1 km时,光强起伏的幅度变得非常大,光强分布杂乱无章且不能再视为一个平面;当传输距离进一步增大至10 km时,光强随机起伏的幅度不再增加,但光强分布显得更为杂乱。这与图2的结论是一致的。当传输距离较小时,可见光平面波处于弱起伏状态,随机起伏较小;当传输距离较大时,可见光平面波将进入强起伏状态,随机起伏也将非常明显;传输距离进一步增加时,将出现所谓的“闪烁饱和效应”。由图3(b)、(d)、(f)可知,当传输距离从100 m增加到10 km时,太赫兹波的光强起伏从 ± 0.003 增加到 ± 0.02 。但总体上看,10 km以内太赫兹波的光强随机起伏均很小,都可以近似看做平面分布。这说明,太赫兹波在10 km以内,其光强随机起伏程度虽然会随着传输距离不断增加,但其起伏的绝对幅值较小,对其短程应用影响不大。对比图3(a)和图3(b)、图3(c)和图3(d)、图3(e)和图3(f)可知,大气湍流对可见光的影响要远远大于对太赫兹平面波的影响。

3.3.2 高斯光束的数值模拟

为了分析大气湍流对太赫兹光束的影响,对太赫兹和可见光高斯光束在湍流大气中的传输行为进行了模拟,如图4所示。在数值模拟实验中,初始光强分布为 $I_0 = \left| \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w_0^2}\right) \right|^2$,其中 w_0 为初始束腰;可见光波

长为 632.8 nm, 初始束腰为 50 mm; 太赫兹波长为 0.3 mm, 初始束腰为 300 mm。由图 4 可知, 可见光的光强分布不再符合高斯分布, 而是出现了许多随机的尖峰, 失去了原有形状; 而太赫兹波虽然在传播 1000 m 后光强有所减弱, 但仍保持高斯形状, 且其表面较为光滑。这说明大气湍流对可见光波段高斯光束的影响也要明显大于对太赫兹波段的高斯光束的影响。

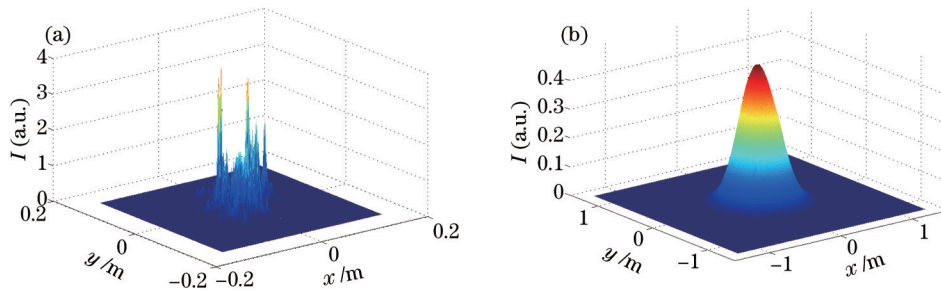


图 4 高斯光束传输 1000 m 后的光强分布图。(a) 可见光; (b) 太赫兹波

Fig.4 Gaussian beam intensity distribution after propagating 1 km in the turbulent atmosphere.

(a) Visible light; (b) THz wave

4 结 论

首先采用随机相位屏法对太赫兹和可见光高斯光束在湍流大气中传输一定距离后接收面上的平均光强分布进行了数值模拟, 并与理论结果进行了对比。结果表明, 利用该方法得到的数值模拟结果与理论结果较为一致, 从而验证了该方法的可靠性。然后对太赫兹和可见光的闪烁指数随湍流大气中传输距离的变化进行了模拟, 结果表明, 可见光波在湍流大气中传输几百米后就将进入强起伏状态, 并将出现“闪烁饱和”现象; 而太赫兹波在 10 km 以内均处于弱起伏状态。最后利用该方法对太赫兹平面波和太赫兹高斯光束在湍流大气中的传输行为进行了模拟, 并与可见光的相应结果进行了对比。结果表明, 大气湍流对可见光的影响要远远大于对太赫兹的影响; 大气湍流对太赫兹大气通信等短程应用影响不大。本文方法简单、直观, 不受光束类型的限制, 还可以推广到太赫兹大气通信等领域。

参 考 文 献

- 1 Yao Jianquan, Wang Jingli, Zhong Kai, *et al.*. Study and outlook of THz radiation atmospheric propagation[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, 21(10): 1582–1588.
姚建铨, 汪静丽, 钟 凯, 等. THz 辐射大气传输研究和展望[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(10): 1582–1588.
- 2 Shen Jin'e, Rong Jian, Liu Wenxin. Progress of terahertz in communication technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(3): 342–347.
申金娥, 荣 健, 刘文鑫. 太赫兹技术在通信方面的研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(3): 342–347.
- 3 Wang Yifeng, Mao Jingxiang. Analysis on development status of terahertz technology and application prospect[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2008, 23(1): 1–5.
王忆锋, 毛京湘. 太赫兹技术的发展现状及应用前景分析[J]. *光电技术应用*, 2008, 23(1): 1–5.
- 4 Chu Hongna. Comprehensive analysis of terahertz communication technology study[J]. *Journal of silicon valley*, 2011, (14): 34–35.
初洪娜. 关于太赫兹通信技术的综合分析探讨[J]. *硅谷*, 2011, (14): 34–35.
- 5 Qi Na, Zhang Zhuoyong, Xiang Yuhong. Application of terahertz technology in medical testing and diagnosis[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(8): 2064–2070.
齐 娜, 张卓勇, 相玉红. 太赫兹技术在医学检测和诊断中的应用研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(8): 2064–2070.
- 6 Zhang Lei, Xu Xinlong, Li Fuli. Review of the progress of T-ray imaging[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, 22(2): 129–134.
张 蕾, 徐新龙, 李福利. 太赫兹(THz)成像的进展概况[J]. *量子电子学报*, 2005, 22(2): 129–134.
- 7 Yao J, Wang R, Cui H, *et al.*. Atmospheric propagation of terahertz radiation[J]. *Remote Sensing-Advanced Techniques and Platforms*, 2012: 371.
- 8 Grischkowsky D R. THz photonics: The synergy of ultrafast optics, electronics, micro-microwaves and quasi-optics[J].

- Terahertz Science and Technology, 2012, 5(1): 48–66.
- 9 Zhou W, Zhang Y. Propagation characteristics of the terahertz pulse in the free space[C]. Infrared Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics, Joint 31st International Conference on. IEEE, 2006: 562.
- 10 Paine S, Blundell R. The terahertz atmosphere[C]. Proc 15th International Symposium on Space Terahertz Technology, 2004: 418–425.
- 11 Ryu C, Kong S G. Atmospheric degradation correction of terahertz beams using multiscale signal restoration[J]. Appl Opt, 2010, 49(5): 927–935.
- 12 Mandehgar M, Yang Y, Grischkowsky D. Atmosphere characterization for simulation of the two optimal wireless terahertz digital communication links[J]. Opt Lett, 2013, 38(17): 3437–3440.
- 13 Frehlich R. Simulation of laser propagation in a turbulent atmosphere[J]. Appl Opt, 2000, 39(3): 393–397.
- 14 Frehlich R. Effects of refractive turbulence on ground-based verification of coherent Doppler lidar performance[J]. Appl Opt, 2000, 39(24): 4237–4246.
- 15 Rao Ruizhong. Modern Atmospheric Optics[M]. Beijing: Science Press, 2011: 367–404.
饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 367–404.
- 16 Zhai Chao, Wu Feng, Yang Qingbo, *et al.*. Simulation research of laser beam atmospheric propagation in free-space optical communication[J]. Chinese J Laser, 2013, 40(5): 0505004.
翟超, 武凤, 杨清波, 等. 自由空间光通信中大气光束传输数值模拟研究[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0505004.
- 17 Yu Jiping, Qi Wenzong, Guo Chunfeng, *et al.*. Numerical simulation of laser propagation through atmospheric turbulence[J]. Laser and Infrared, 2008, 38(6): 523–527.
于继平, 齐文宗, 郭春风, 等. 激光大气传输特性的数值模拟[J]. 激光与红外, 2008, 38(6): 523–527.
- 18 L C Andrews, R L Phillips. Laser Beam Propagation through Random Media[M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 2005.
- 19 Huang Yinbo, Wang Yingjian. Choosing computing parameters in the numerical simulation of laser propagation effects[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2(1): 23–27.
黄印博, 王英俭. 激光大气传输数值模拟中对计算参量的选取[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(1): 23–27.

栏目编辑: 殷建芳