

临近空间激光传输特性研究

陈海龙, 刘斌, 高保军, 薛娴, 郭胜鹏
(火箭军装备研究院, 北京 100094)

摘要: 基于临近空间大气基本特性, 对激光与大气相互作用进行分析和研究, 采用 MODTRAN 软件分析了临近空间大气的吸收和散射, 给出了 400 ~ 2000 nm 波长激光的透过率曲线, 从激光光斑漂移和扩展两个方面对大气湍流对激光传输的影响进行数值计算, 对发生热晕效应的功率阈值进行数值估算, 结论表明: 与近地空间相比, 临近空间大气对于激光传输影响较弱, 有利于实现高功率激光的长距离传输。

关键词: 临近空间; 吸收散射; 大气湍流; 热晕

中图分类号: P422.3; TN249 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2017.05.005

Research on characteristics of laser transmission in near space

CHEN Hai-long, LIU Bin, GAO Bao-jun, XUE Xian, GUO Sheng-peng
(Equipment Academy of The Rocket Force, Beijing 100094, China)

Abstract: Based on the basic characteristics of atmosphere in near space, the interaction between laser and atmosphere was analyzed and studied. The absorption and scattering of atmosphere in near space was analyzed by the MODTRAN software, and the transmittance curve of laser wavelength within 400 ~ 2000 nm was given. From laser spot drifting and beam radius expanding, the influence of atmosphere turbulence on laser transmission was calculated, and the threshold power of thermal blooming was estimated. The conclusion show that the influence of atmosphere on laser transmission in near space is weaker than that in terrestrial space, which is helpful to realize the long range transmission of high power laser.

Key words: near space; absorption and scattering; atmosphere turbulence; thermal blooming

1 引言

近年来,随着临近空间高超声速武器的快速发展,其高速、机动等特性,对防御系统提出了严峻的威胁和挑战^[1]。激光武器具有攻击目标速度快、转向灵活、杀伤效率高等优点^[2]。但是,激光在大气传输过程中,与大气相互作用,会产生一系列线性效应和非线性效应,导致激光能量衰减、激光光斑发散,对于远距离目标的杀伤效能大幅降低。与近地空间大气相比,临近空间的大气密度相对稀薄,因

此,激光在临近空间传输中的各种线性和非线性效应都有所减弱,有希望发展为拦截临近空间武器的重要手段。

在物理上,以大气热力学结构为主要依据,可以将大气层划分为对流层、平流层、中间层、热成层和外大气层,临近空间主要覆盖 20 ~ 100 km 高度区域,包括平流层的大部、中间层的全部和部分热成层,如图 1 所示^[3]。

激光在大气传输时,与大气分子、气溶胶等发生

作者简介:陈海龙(1987-),助理研究员,博士,主要从事光纤激光器,激光大气传输等方面研究。E-mail: 805987012@qq.com

收稿日期:2016-09-05

的相互作用可以分为两大类,一类是线性效应,主要包括大气吸收、散射和湍流等;另一类是非线性效应,主要包括热晕、受激拉曼散射和大气击穿等^[4]。目前,国内对临近空间激光传输特性的研究主要是理论分析,且只针对低功率激光^[5-6]。本文基于临近空间大气基本特性,对激光传输特性进行计算研究。

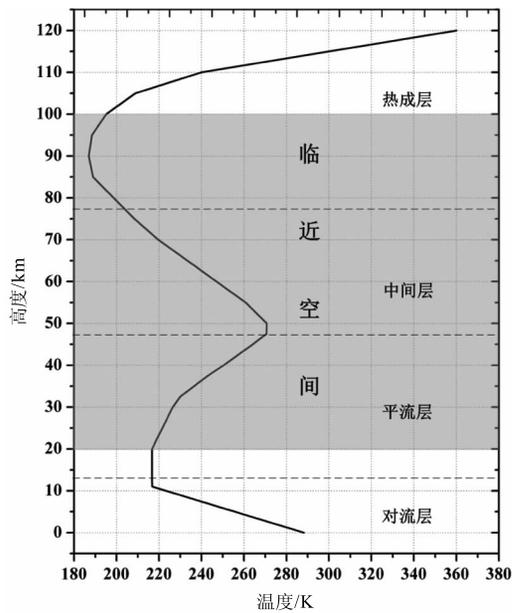


图1 大气分层结构示意图

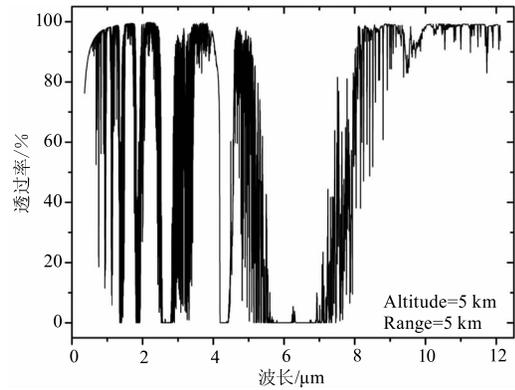
Fig. 1 Sketch map of atmospheric stratification structure

2 临近空间激光传输的线性效应

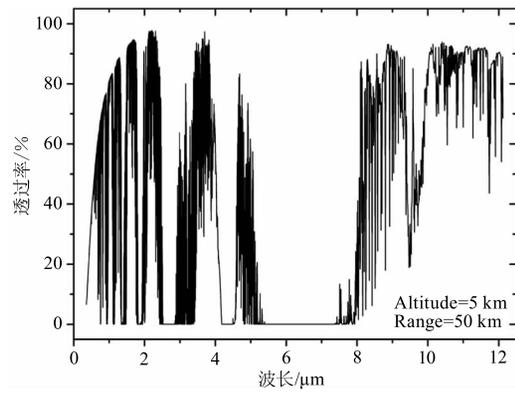
2.1 吸收和散射

在大气激光传输中,吸收和散射是导致激光功率衰减的最主要原因,其中,大气分子吸收和散射是由分子吸收光谱和密度决定的,而气溶胶导致的吸收和散射是由气溶胶种类和浓度决定的。随着近代物理和计算机技术的飞速发展,求解大气辐射传输方程的软件已经日趋成熟,其中由美国空军地球物理实验(AFGL)开发的计算大气透过率及辐射软件包 MODTARN (Moderate Resolution Transmission) 耦合了各种大气模型,可以基于逐线积分拟合的方法快速计算特定路径激光辐射传输的透过率^[7-8]。

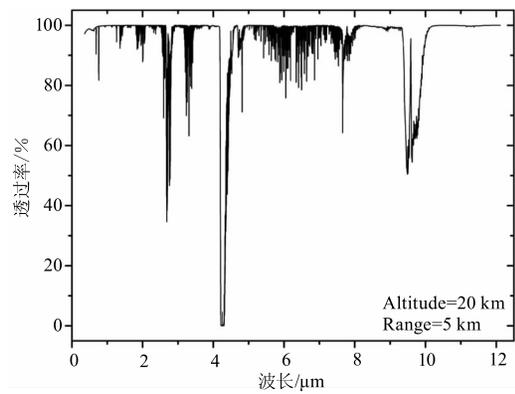
选取 1976 年美国标准大气作为计算模型,分别计算激光在近地空间高度 Altitude = 5 km 和临近空间高度 Altitude = 20 km 沿水平路径传输一段距离 Range = 5 km, 50 km 的透过率。选取乡村型气溶胶模式,假定 Altitude = 5 km 对应的水平能见度 VIS = 12 km, Altitude = 20 km 对应的水平能见度 VIS = 23 km,计算可得激光水平传输透过率曲线,如图 2 所示。



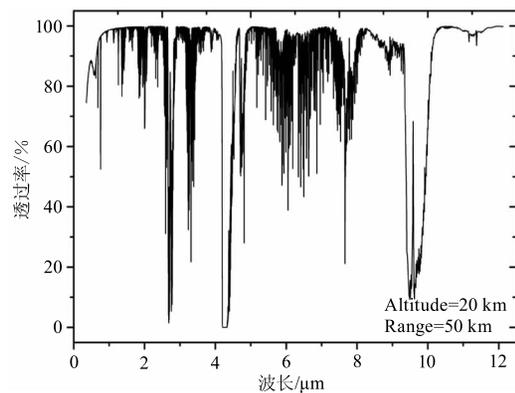
(a)



(b)



(c)



(d)

图2 一定海拔高度激光水平传输透过率

Fig. 2 Transmission rate of laser horizontal transmission at a certain altitude

典型波长激光水平传输透过率如表 1 所示。对于 1.06 μm 激光,其在临近空间的传输透过率极高,与近地空间相比有显著提升,而 10.6 μm 激光在近地空间和临近空间的传输透过率都比较低。

表 1 典型波长激光水平传输透过率

Tab. 1 Transmission rate of typical laser wavelength

波长/ μm	高度/km	传输距离/km	透过率/%
1.06	5	5	98.1
		50	82.5
	20	5	99.9
		50	98.8
10.6	5	5	97.6
		50	79.4
	20	5	94.8
		50	65.7

对于影响大气吸收和散射的主要因素: H_2O 、 CO_2 、臭氧等吸收气体、分子散射和气溶胶等,其对激光传输透过率影响如图 3 所示。可以看出,影响 1.06 μm 激光透过率的主要因素是 H_2O 和 CO_2 气体的吸收,影响 10.6 μm 激光透过率的主要因素是臭氧的吸收,而分子散射和气溶胶对于激光透过率的影响都比较微弱。

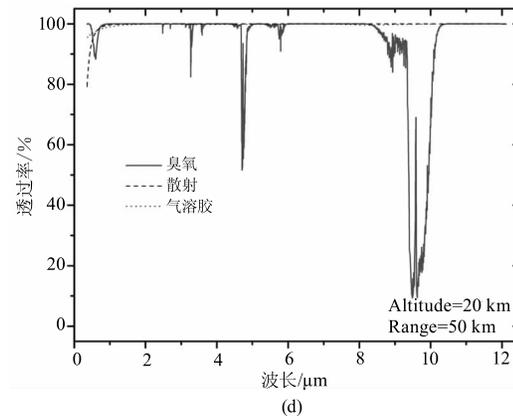
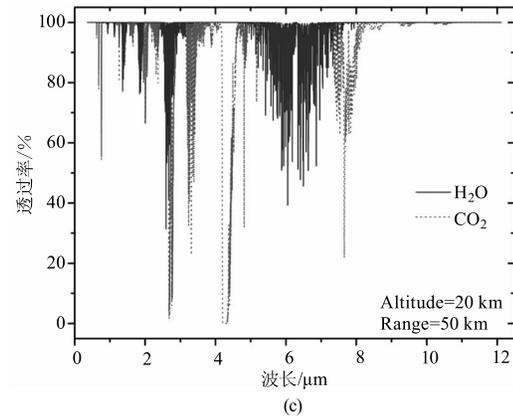
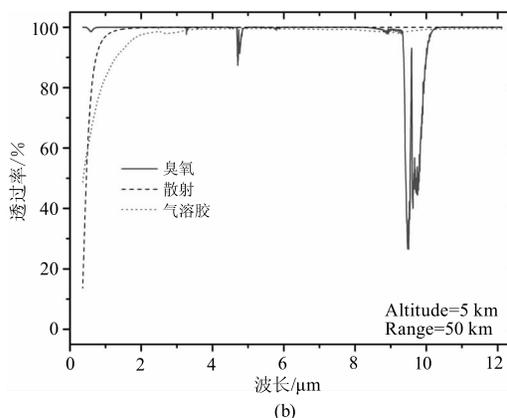
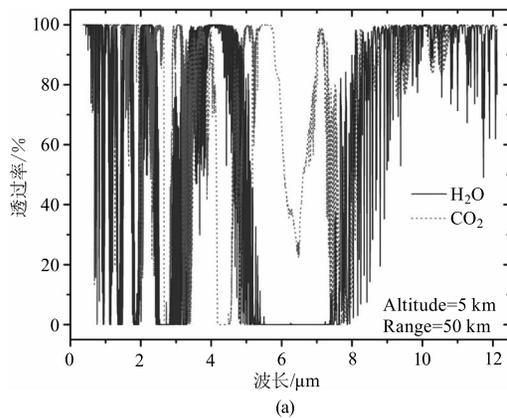


图 3 在大气吸收和散射主要影响因素作用下的激光传输透过率曲线

Fig. 3 Transmission rate curve under the main influence factors of atmospheric absorption and scattering

需要说明的是,本文采用美国 1976 年标准大气作为计算模型,考虑到实际临近空间大气的复杂性,比较精确的结果要通过浮空器等大气监测手段获取大气廓线,再将大气廓线数据输入到 MODTRAN 软件中进行计算。

2.2 湍流

大气湍流是指大气中局部温度、压强等参数的随机变化而引起的折射率起伏。当激光在湍流大气中传播时,湍流造成的折射率变化会改变激光相位分布,导致波阵面发生畸变,以及激光光束指向性和光斑分布的改变,对激光传输的影响主要体现为激光光斑的漂移和扩展^[9]。

2.2.1 激光光斑漂移

光斑漂移反映了光斑空间位置的时间变化,对激光在大气中的工程应用,如光学跟瞄系统,具有重要影响。光斑漂移通常以光斑质心位置的变化来描述,光斑质心定义为:

$$\rho_c = \frac{\iint \rho I(\rho) d\rho}{\iint I(\rho) d\rho} \quad (1)$$

其中, ρ 表示激光光斑分布。质心漂移方差为:

$$\sigma_\rho^2 = \langle \rho_c^2 \rangle = \frac{\iint \iint (\rho_1 \cdot \rho_2) I(\rho_1) I(\rho_2) d\rho_1 d\rho_2}{\left[\iint I(\rho) d\rho \right]^2} \quad (2)$$

对于平面波或准直光束在 Kolmogorv 湍流中从 $z = 0$ 到 $z = L$ 的传播, 漂移方差为:

$$\sigma_\rho^2 = 6.08 D^{-1/3} \left[L^2 \int_0^L C_n^2(z) dz + \int_0^L C_n^2(z) z^2 dz - 2L \int_0^L C_n^2(z) z dz \right] \quad (3)$$

其中, D 表示准直光束的发射口径; C_n^2 为表征湍流强度的大气折射率结构常数。常用 Hufnagel-valley 模型描述 C_n^2 随海拔高度 h 的变化关系^[10]:

$$C_n^2(h) = 0.00594 \left(\frac{v}{27} \right)^2 (10^{-5}h)^{10} \exp\left(\frac{-h}{1000} \right) + 2.7 \times 10^{-16} \exp\left(\frac{-h}{1500} \right) + C_n^2(0) \exp\left(\frac{-h}{100} \right) \quad (4)$$

式中, v 是风速; $C_n^2(0)$ 为地表附近的湍流强度。若传播路径上湍流强度均匀, 则漂移方差为:

$$\sigma_\rho^2 = 2.03 C_n^2 D^{-1/3} L^3 \quad (5)$$

上式结果表明, 漂移方差与波长无关。选取 $v = 60$ m/s, $D = 0.5$ m, $C_n^2(0) = 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$, $L = 50$ km, 在临近空间 20 ~ 100 km 高度范围内漂移方差随高度 h 的增加而迅速减小, 当 $h = 20$ km 时, 漂移方差 $\sigma_\rho^2 \sim 2$ mm。

2.2.2 激光光斑的扩展

受湍流大气的影响, 激光光斑在时刻漂移着, 如果长时间观察, 在到达面 ($z = L$) 内因光斑漂移引起的累加效果会形成弥散斑, 导致激光光斑扩展。

根据平均场强衰减到真空中场强的 $1/e$ 值, 可以定义一个特征传播距离 L_c ^[11]:

$$L_c \approx (0.391 C_n^2 k^2 L_0^{5/3})^{-1} \quad (6)$$

其中, L_0 表示湍流外尺度, 另一个特征距离 L_l 由湍流内尺度 l_0 确定:

$$L_l \approx (0.391) C_n^2 k^2 l_0^{5/3})^{-1} \quad (7)$$

在湍流大气中, 当海拔高度 $h = 20$ km 时, 计算可得 $C_n^2 = 6.2 \times 10^{-18} \text{m}^{-2/3}$, 假定湍流内尺度 $l_0 = 1$ mm, 外尺度 $L_0 = 1$ m, 对于 $1.06 \mu\text{m}$ 激光, 其特征传播距离 $L_c \sim 11.8$ km, $L_l \sim 1180000$ km。针对激光光源的 Gauss 光束分布求解场的相干函数, 可获得各种传播条件下被湍流大气扩展的光斑半径。在 $L \gg L_l$ 的情况下有:

$$W^2 = W_{\text{vacuum}}^2 + 4.4 C_n^2 l_0^{-1/3} L^3 \quad (8)$$

这种传播情况很少遇到, 对应于非常远的传播距离。在 $L \ll L_l$ 的情况下有:

$$W^2 = W_{\text{vacuum}}^2 + 2(L\lambda)^2 / (\pi\rho_0)^2 \quad (9)$$

式中, $\rho_0 = \left[1.4572 k^2 \int_0^L C_n^2(z) (z/L)^{5/3} dz \right]^{-3/5}$ 表示球面波的空间相干长度。

如图 4 所示, 对于 $1.06 \mu\text{m}$ 准直基模高斯光束, 选取 $W_{\text{vacuum}|L=0} = 0.25$ m, 计算可得激光光斑半径在无湍流(真空)和有湍流情况下随传播距离的变化。传播距离 $L = 100$ km 时, 在无湍流情况下, 光斑半径 $W_{\text{vacuum}|L=100 \text{ km}} = 0.28$ m, 在有湍流情况下, 光斑半径 $W|_{L=100 \text{ km}} = 0.35$ m。

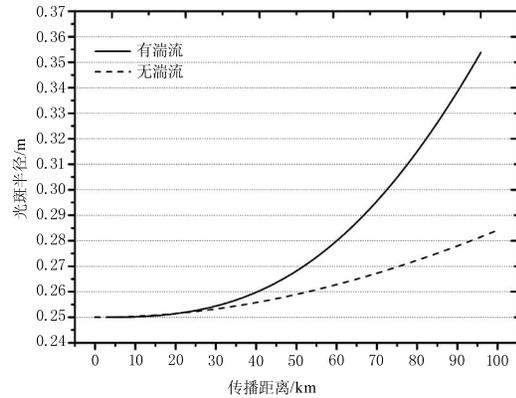


图 4 在有湍流(实线)和无湍流(虚线)情况下, 激光光斑半径随传播距离的变化

Fig. 4 Laser beam radius versus propagation distance with turbulent (solid line) and without turbulent (dashed line)

3 临近空间激光传输的非线性效应

随着激光功率的提高, 激光加热空气足以使其密度发生改变, 导致大气介质的光学性质(如折射率)也随之改变, 这样反过来又会影响到激光的传播。当激光功率足够高时, 除了大气分子和气溶胶吸收和散射造成的衰减效应、大气湍流引起的湍流效应外, 更严重的是其自身加热空气造成的热畸变效应或热晕效应, 以及其他一些非线性效应, 如受激拉曼散射和大气击穿等。

对于连续波或高重复频率脉冲激光, 其热晕效应的功率阈值比受激拉曼散射、大气击穿等非线性效应的阈值都要低, 在大气中传输时更容易发生热晕效应。热晕效应功率阈值水平, 主要与大气介质的光学特性, 尤其是吸收特性有关, 除此之外, 还与大气介质的流体力学特性、运动特性(风速、风向)和热传递特性有关。

根据理想气体的热力学方程, 可以给出横向流动气体中热晕开始出现时的激光功率阈值 P_t ^[12]:

$$P_t = \frac{\pi}{4} \frac{1}{\alpha(n_0 - 1)} \frac{\gamma P_0}{\gamma - 1} \frac{\lambda^2 V}{W} \quad (10)$$

其中, α 表示大气吸收衰减率; n_0 为热晕开始前的大气折射率; γ 为定压摩尔比热与定容摩尔比热之比; P_0 为大气压强; W 为激光光斑半径。根据前面的计算结果, 对于 $1.06 \mu\text{m}$ 激光, 在高度 $h = 20 \text{ km}$ 水平传输的衰减率 $\alpha = 2.4 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}$, 选取 $n_0 - 1 = 3.0 \times 10^{-4}$, $\gamma = 1.4$, $v = 60 \text{ m/s}$, $W = 0.25 \text{ m}$, 可以得到热晕出现时的功率阈值 $P_t \sim 500 \text{ kW}$, 而在 $h = 5 \text{ km}$ 时, 功率阈值仅为 $P_t \sim 40 \text{ kW}$ 。

公开资料显示, $10 \sim 100 \text{ kW}$ 功率水平的激光可以对中近距离目标实施有效毁伤, 根据以上计算结果, 武器量级的连续被激光束在临近空间传输过程中一般不会发生热晕等非线性效应。

4 结 论

在临近空间, 由于大气相对比较稀薄, 对于特定波长激光(如 $1.06 \mu\text{m}$ 激光)的吸收和散射作用明显下降, 湍流效应对激光传输的影响不显著, 并且不容易发生非线性效应, 适合高功率激光的长距离传输。

参考文献:

- [1] LI Shuyan, REN Lixia, SONG Qiugui, et al. Overview of anti-hypersonic weapon in near space[J]. Modern Radar, 2014, 36(6): 13 - 18. (in Chinese)
李淑艳, 任利霞, 宋秋贵, 等. 临近空间高超音速武器防御综述[J]. 现代雷达, 2014, 36(6): 13 - 18.
- [2] GUO Qinpeng, ZHAO Shanghong, SHI Lei, et al. Study on propagation characteristics of laser beam through the near space[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(12): 1188 - 1191. (in Chinese)
郭钦朋, 赵尚弘, 石磊, 等. 激光在临近空间中的传输特性研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(12): 1188 - 1191.
- [3] HUANG Ming, XIA Zhixun, WANG Lin. Analysis on "air-to-air" link transmission characteristic of laser communication in near space[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(4): 660 - 664. (in Chinese)
黄明, 夏智勋, 王林. 临近空间“空-空”激光通信链路传输特性分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(4): 660 - 664.
- [4] ZHU Weigang, HOU Guojiang, PEI Shibing. Application of space-based lasers constellations for ballistic missile defense[J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(2): 121 - 124. (in Chinese)
朱卫纲, 侯国江, 裴世兵. 空间激光武器网在弹道导弹防御中的应用[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(2): 121 - 124.
- [5] LU Daren, CHEN Zeyu, GUO Xia, et al. Recent progress in near space atmospheric environment study[J]. Advances In Mechanics, 2009, 39(6): 674 - 681. (in Chinese)
吕达仁, 陈泽宇, 郭霞, 等. 临近空间大气环境研究现状[J]. 力学进展, 2009, 39(6): 674 - 681.
- [6] DONG Haiyan, LI Wei, DAI Ming, et al. Research of high power fiber laser atmosphere propagation[J]. Optical Technique, 2007, 33(6): 830 - 832. (in Chinese)
董海燕, 李伟, 戴明, 等. 大功率光纤激光大气传输特性的研究[J]. 光学技术, 2007, 33(6): 830 - 832.
- [7] SUN Yiyi, DONG Hao, BI Zhaohui, et al. Inter-comparison of models for radiative transfer in the atmosphere[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(2): 149 - 153. (in Chinese)
孙毅义, 董浩, 毕朝辉, 等. 大气辐射传输模型的比较研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(2): 149 - 153.
- [8] ZHAO Shaoqin, ZHANG Chu. Simulation on atmospheric transmission characteristic of laser and its impact on laser ranging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, (11): 55 - 60. (in Chinese)
赵少卿, 张雏. 激光大气传输特性仿真及对激光测距的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2013, (11): 55 - 60.
- [9] WU Lin, YING Jiaju, GENG Biao. Effect on laser propagation in the atmospheric turbulence[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(10): 974 - 977. (in Chinese)
武琳, 应家驹, 耿彪. 大气湍流对激光传输的影响[J]. 激光与红外, 2008, 38(10): 974 - 977.
- [10] M H Mahdih. Numerical approach to laser beam propagation through turbulent atmosphere and evaluation of beam quality factor[J]. Optics Communications, 2008, 281(13): 3395 - 3402.
- [11] 饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012. 467 - 469.
- [12] WANG Xinkuan. Study of effects of steady-state thermal blooming on high energy lasers propagation in the atmosphere[D]. Xi'an: Xidian University, 2009. (in Chinese)
王新宽. 强激光大气传输稳态热晕效应的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.