

中继镜系统上行传输的数值模拟

张京会, 范承玉, 马慧敏, 张鹏飞, 王海涛, 乔春红, 王英俭

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 利用激光大气传输四维程序, 在 H-V5/7 湍流模型下建立了双望远镜中继镜系统上行传输模型。数值研究了地面发射功率对中继平台接收望远镜与地面发射望远镜之间的耦合效率以及中继平台接收功率和接收光场远场峰值功率密度的影响。结果表明: 在文中的条件下, 中继平台接收功率随着地面发射功率的增大而增大, 同时, 中继接收望远镜与地面发射望远镜之间的耦合效率和中继平台接收光场的光束质量随着地面发射功率的增大而下降; 存在一临界热畸变参数 N_{Dc} , 当上行传输的热畸变参数超过这一值时, 中继平台接收光场的远场峰值功率密度不再增加反而下降。对不同湍流效应下的中继镜系统上行传输的临界热畸变参数作了进一步研究, 得到了临界热畸变参数随 D/r_0 值变化的拟合关系式 $N_{Dc}=22.36 \times e^{-0.26(D/r_0)}+36.87$ 。

关键词: 中继镜系统; 上行传输; 耦合效率; 峰值功率密度; 临界热畸变参数

中图分类号: O43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)02-0428-05

Numerical simulation of uplink propagation for relay mirror system

Zhang Jinghui, Fan Chengyu, Ma Huimin, Zhang Pengfei, Wang Haitao, Qiao Chunhong, Wang Yingjian

(Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Using the 4-D code for laser propagation in the atmosphere, uplink for the relay mirror system was simulated. Under H-V5/7 turbulence model, the relationship between launching power and power coupling efficiency between the receiver at the relay platform and the transmitting telescope on the ground, received power and peak power density of far-field at the relay platform was investigated. The result shows that the received power at the relay platform increased with the increase of coupling efficiency and beam quality of the received laser. A critical distortion number N_{Dc} , which when the distortion number exceeded the peak power of the far-field would descend, also existed. The critical value with different turbulence strength for uplink propagation of relay mirror system was further studied, and a fitting result was obtained and could be expressed as $N_{Dc}=22.36 \times e^{-0.26(D/r_0)}+36.87$.

Key words: relay mirror system; uplink propagation; coupling efficiency; peak power density; critical distortion number

收稿日期: 2012-06-22; 修订日期: 2012-07-19

基金项目: 中国科学院合肥物质科学研究院青年人才基金(Y03RC21121); 中国科学院合肥物质科学物质研究院计算中心课题

作者简介: 张京会(1981-), 男, 博士生, 主要从事自适应光学校正方面的研究。Email: jinghui8110@163.com

导师简介: 范承玉(1965-), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光大气传输及自适应光学校正方面的研究。Email: cyfan@aiofm.ac.cn

0 引 言

激光大气传输产生的一系列线性和非线性效应,尤其是大气湍流效应、非线性热晕效应以及湍流热晕的相互作用,将会导致激光束传输质量的严重退化,从而会对众多激光工程的应用产生不利的影响^[1]。激光中继镜技术因能降低大气等因素对激光的影响、拓宽激光武器的作战范围而倍受瞩目^[2-8]。中继镜系统被认为是机载激光和地基激光的威力倍增器,并被冠名为“革命性航空和航天全球激光交战系统”。其基本思想是通过置于高空或太空中的中继镜系统接收激光源向其发射的激光束经系统校正净化后重新定向发射到位于太空、大气或地面的目标上^[3-11]。光束上行传输能量耦合效率、接收功率、接收光场远场峰值功率密度等均是中继镜系统设计的关键因素^[12-13]。文中综合考虑湍流和热晕的影响,利用激光大气传输仿真程序,对 0.60 m 口径激光光束垂直上行传输 30 km 的中继镜系统进行了仿真计算,分析了发射功率、湍流强度等参量对系统的接收功率、耦合效率以及远场峰值功率密度的影响。

1 理论分析

通常,激光大气传输由如下傍轴近似的标量波动方程进行描述:

$$2ik \frac{\partial}{\partial z} \varphi(r, z, t) + \nabla_{\perp}^2 \varphi(r, z, t) + 2k^2 \delta n \varphi(r, z, t) - ik\alpha_t \varphi(r, z, t) = 0 \quad (1)$$

式中: $\nabla_{\perp}^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ 为横向 Laplacian 算符; $k = 2\pi/\lambda$, λ 为激光波长; $\varphi(r, z, t)$ 为光场函数; $n = n_t + n_b$ (n_t 、 n_b 分别为大气湍流和激光加热大气引起的折射率扰动); $\alpha_t = \alpha_a + \alpha_s$ 为大气消光系数; α_a 、 α_s 分别为吸收和散射系数。通过对公式(1)的数值计算可以得到中继接收望远镜处的光场分布。

大气湍流相干长度,也常被称为 Fried 常数;在平面波情况下表示为^[14]:

$$r_0 = \{0.423k^2 \sec \Omega \int dh C_n^2(h)\}^{-3/5} \quad (2)$$

由于大气相干长度综合了大气湍流强度 C_n^2 、传输激光波长 λ 和传输高度 h 等大气传输特征参量,

可以用来描述各种不同传输条件下的湍流效应,是作为描述激光大气传输湍流效应非常重要的一个物理量,且常常被用作定标参量使用。

热畸变参数 N_D , 通常用以量度热晕相位畸变的强度,且功率越大, N_D 越大,热晕效应越明显,表示为^[15]:

$$N_D = 8\sqrt{2} \pi \frac{\pi n_T}{\lambda \rho C_p} \int_0^L dz \alpha(z) [P \exp(-\int_0^z \varepsilon(z) dz)] / [|\mathbf{v} + z\boldsymbol{\omega}| D(z)] \quad (3)$$

式中: $\boldsymbol{\omega}$ 为激光旋转角速度; n_T 为折射率随温度的变化率; α 为大气吸收系数; ρ 为大气密度; \mathbf{v} 为风速; C_p 为定压比热容。

中继镜系统上行传输过程的能量耦合效率可表示为:

$$\eta = \frac{\int_S I_1(x, y) dx dy}{P_0} = \frac{\int_S I_1(x, y) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I_1(x, y) dx dy} \times \eta_T \quad (4)$$

式中: P_0 为发射功率; $I_1(x, y)$ 中继接收面上的光强分布; S 表示在中继镜接收口径上的积分; η_T 为传输路径上的大气透过率。

目标处的峰值功率密度可以有效评估中继镜系统的性能。假定中继接收望远镜与地面发射望远镜可以实现理想对准接收,光束在系统内部传输时无损耗,光源为理想环形平台光束,不考虑光束抖动以及中继平台抖动所造成的损耗。故可只考虑传输路径上大气透过率、中继镜有限口径造成的能量损失以及大气中传输时光场畸变所引起的 Strehl 比的影响。目标处的峰值功率密度可以表示为^[16]:

$$I_p = \frac{\pi D_{FM}^2 P_0}{4\lambda R} \eta T_2 S_R \quad (5)$$

可以看出,目标处的峰值功率密度是中继镜二次发射望远镜口径 D_{FM} 、地面发射功率 P_0 、波长 λ 、二次发射焦距 R 、系统上行耦合效率 η 、二次发射透过率 T_2 以及系统总斯特列尔比 S_R 的函数。若只考虑二次发射在真空中传输 ($T_2 = 1$), 则:

$$I_p = \frac{\pi D_{FM}^2 P_0 \eta S_R}{4\lambda R} \quad (6)$$

文中重点研究发射功率、湍流强度等参数对中

继镜系统上行传输的影响,激光波长、望远镜口径及二次发射焦距均为定值,所以目标处的峰值功率密度可

表示为: $I_p = P_0 \eta S_R$ 。其中, $c = \frac{\pi D_{FM}^2}{4\lambda R}$ 在这里为一常数。

2 模拟计算

2.1 参数条件

发射激光为环形平台准直光束,波长为 $1.315 \mu\text{m}$,地面发射、中继接收/二次发射望远镜的口径均为 0.60 m ,遮拦比均为 0.20 。大气湍流结构常数 C_n^2 分布采取 H-V5/7 模型描述:

$$C_n^2(h) = 5.94 \times 10^{-53} (21/27)^2 \cdot h^{10} \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) + 1.7 \times 10^{-14} \exp(-h/100) \quad (7)$$

式中: h 为距离地面高度,单位为 m 。风速采用 Bufton 风速模型,即

$$v(h) = 5 + 30 \exp\{-[(h-9400)/4800]^2\} \quad (8)$$

吸收系数随高度的变化为:

$$\alpha(h) = 7.62 \times 10^{-5} \exp(-8.14 \times 10^{-5} h^{1.2}) \quad (9)$$

上行传输采用 61 单元自适应光学系统完成闭环校正,信标方式为合作信标,不考虑系统像差。仿真中,对光束垂直上行传输距离为 30 km 的情况进行了模拟计算。

2.2 计算结果

2.2.1 发射功率对中继接收光束质量的影响

大气相干长度 r_0 为 0.13 m 。增大发射功率,传输过程的热畸变参数随之增大。计算得到的中继系统的接收能量分布及耦合效率分别如图 1 和图 2 所示。可以看出,随着热畸变参数 N_D 的增大,中心遮拦和接收口径外的能量占的比例逐渐增大。这是因为随着 N_D 的增加,热晕效应导致的光斑扩展逐步增

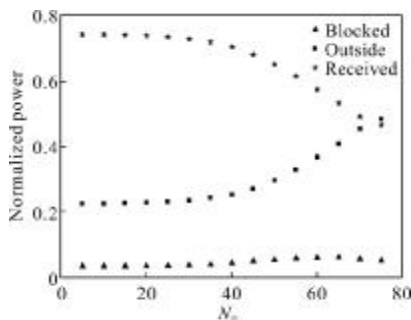


图 1 接收能量分布随 N_D 的变化

Fig.1 Received power distribution versus N_D

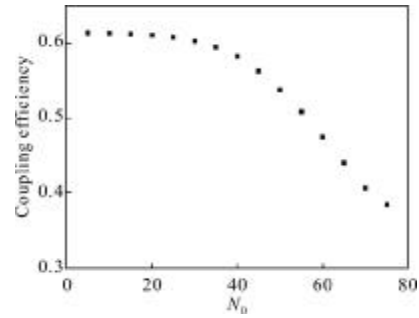


图 2 耦合效率随 N_D 的变化

Fig.2 Coupling efficiency versus N_D

强,从而导致接收到的能量在接收面所占比例下降,耦合效率随 N_D 的增加逐步降低。

接收功率、接收光场的远场峰值 Strehl 比随热畸变参数 N_D 的变化如图 3、4 所示。随着发射功率的增大接收效率的降低,接收功率却一直在增大,同时,接收光场的远场峰值斯特列尔比也在逐步下降。可见,用接收功率、耦合效率或是 Strehl 比之中的任何一个都不足以描述发射功率对中继上行传输光束性质的影响。

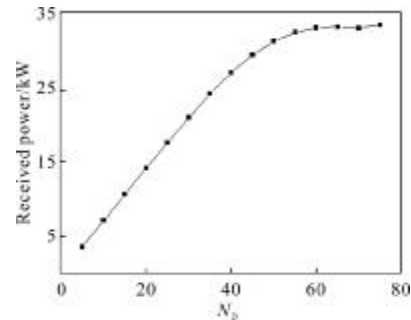


图 3 接收功率随 N_D 的变化

Fig.3 Received power versus N_D

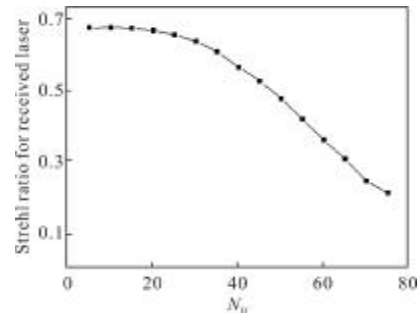


图 4 接收光场的远场 Strehl 比随 N_D 的变化

Fig.4 Strehl ratio of received laser in the far-field versus N_D

由于接收光场的远场峰值功率密度综合了发射功率、耦合效率以及接收光场的 Strehl 比,因而可以

有效评估中继镜系统的性能。接收光场的远场峰值功率密度随的变化如图 5 所示。可以看出,随着 N_D 的增大,中继系统的接收光场的远场峰值功率密度出现一极大值,即存在一临界热畸变参数 N_{DC} ,当中继上行传输的热畸变参数 N_D 超过这一临界值时,接收光场的远场峰值功率密度不再增大,反而下降。可见,这一临界热畸变参数对中继镜系统发射功率的选取有十分重要的意义。

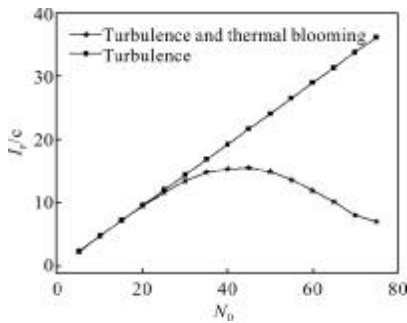


图 5 接收光场的远场峰值功率密度随 N_D 的变化

Fig.5 Peak power density of received laser in the far-field versus N_D

2.2.2 不同湍流效应下的结果

通过将 $C_n^2(h)$ 乘以一定因子来改变传输路径上的大气相干长度时,接收光场远场峰值功率随 N_D 变化关系如图 6 所示。可以看出,大气相干长度不同时,临界热畸变参数有所不同, r_0 越大,临界热畸变参数越大,同时相同热畸变参数下的峰值功率密度越大。如图中所示, r_0 为 0.10 m、0.13 m、0.20 m 时的临界热畸变参数分别为 41、44、48。究其原因,文中采用了 61 单元自适应光学系统进行上行传输的校正,发射望远镜口径 D 以及变形镜驱动器间隔 d 均为定值。随着大气相干长度 r_0 的增大, D/r_0 减小,湍

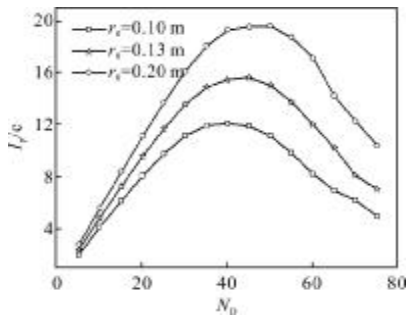


图 6 不同 r_0 接收光场的远场峰值功率密度随 N_D 的变化

Fig.6 Peak power density of received laser in the far-field versus N_D with conditions of different r_0

流效应变弱,同时, d/r_0 减小,变形镜的空间校正剩余方差减小,对湍流影响的校正能力增强。因此,大气相干长度越大,相同热畸变参数下光场所受到的湍流的影响越小。所以,大气相干长度越大,临界热畸变参数越大。

2.2.3 临界热畸变参数随的变化

为了进一步研究临界热畸变参数随湍流效应的变化关系,对 D/r_0 的取值为 1~10 时的情形进行了计算。通过数值仿真笔者可以得到每种情况下的临界热畸变参数 N_D ,如图 7 所示。在文中的条件下,对临界热畸变参数与 D/r_0 值进行拟合,得到关系式为:

$$N_{DC} = 22.36 \times e^{-0.26(D/r_0)} + 36.87 \quad (10)$$

可见,随着 D/r_0 的增大,临界热畸变参数呈指数下降。当时,可以认为湍流的影响被完全校正,此时计算结果与只考虑热晕时的情形相近。

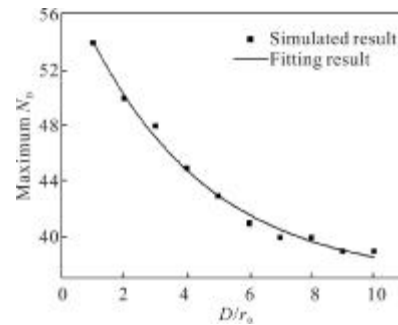


图 7 临界热畸变参数随 D/r_0 的变化

Fig.7 Critical distortion parameter versus D/r_0

3 结论

文中对激光波长 1.315 μm ,口径为 0.60 m 以及遮拦比为 0.2 的双望远镜中继镜系统,激光垂直上行准直传输 30 km 时热畸变参数 N_D 对接收光场能量性质的影响做了初步研究,结果表明:增大发射功率可以提高接收功率,但同时耦合效率和接收光场的远场峰值斯特列尔比会下降;另外,接收光场的远场峰值功率密度随 N_D 的增加会出现一极大值,即存在一临界热畸变参数,当热畸变参数超过这一临界值时,中继接收光场的远场峰值功率密度不再增大反而下降;在不同湍流效应下,临界热畸变参数随 D/r_0 呈指数下降的趋势。文中仿真结果可以对中继镜系统的设计和发射功率的选取提供一定的参考价值 and 科学依据。

参考文献:

- [1] Wang Yingjian. Some study on the laser propagation in the atmosphere and its phase compensation [D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1996. (in Chinese)
王英俭. 激光大气传输及其相位补偿的若干问题研究 [D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 1996.
- [2] Ren Guoguang, Huang Jijin. Major progress of U.S. 2005 high-energy laser technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(6): 5-6. (in Chinese)
任国光, 黄吉金. 美国高能激光技术 2005 年主要进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 43(6): 5-6. (in Chinese)
- [3] Wu Huiyun, Chen Jinbao, Xu Xiaojun. Tactical laser relay mirror system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(12): 23-27. (in Chinese)
吴慧云, 陈金宝, 许晓军. 战术激光中继镜系统 [J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(12): 23-27.
- [4] Duff E A, Washburn D C. The magic of relay mirrors [C]//*SPIE*, 2004, 5413: 137-144.
- [5] Justin D Mansell, Arturo A Jacobs, Maynard M. development of an adaptive optics Test-Bed for relay mirror applications [C]//*SPIE*, 5894: 589401-1-13.
- [6] Mansell J D. Beam shaping for relay mirrors [C]//*SPIE*, 2006, 6290: 62900.
- [7] Spencer M G, Agrawal B N, Romano M, et al. Acquisition, tracking, pointing and line-of-sight control laboratory experiments for a space-based bifocal relay mirror [C]//*SPIE*, 2002, 4714: 54-64.
- [8] Chen Jinbao, Wu Huiyun, Wu Wuming, et al. Simulation of the effect of slanting propagation relay mirror system [J]. *Infrared and Engineering*, 2009, 38(2): 245-249. (in Chinese)
陈金宝, 吴慧云, 吴武明, 等. 斜程传输中继镜系统作用效果模拟 [J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(2): 246-248.
- [9] Jeffrey Di erks, Susan Ross, Aaron Brodsky. Relay mirror experiment overview: a GBL pointing and tracking demonstration [C]//*SPIE*, 1991, 1482: 146-158.
- [10] Sydney P F, Dillow M A, Anspach J E, et al. Relay mirror experiment scoring analysis and the effects of atmospheric turbulence [C]//*SPIE*, 1991, 1482: 196-208.
- [11] Wu Huiyun, Wu Wuming, Chen Jinbao, et al. Simulation of effect of 100kw solid-state laser relay mirror system on 1 km altitude target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(10): 1967-1970. (in Chinese)
吴慧云, 吴武明, 陈金宝, 等. 100 kW 功率固体激光中继镜系统对 1 km 高度目标作用效果模拟 [J]. *光学学报*, 2008, 28(10): 1967-1970.
- [12] Wu Huiyun, Zhao Haichuan, Wu Wuming, et al. Beam shaping used to improve power coupling efficiency of the relay mirror system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(1): 1-4. (in Chinese)
吴慧云, 赵海川, 吴武明, 等. 用于提高中继镜系统能量耦合效率的光束整形 [J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 1-4.
- [13] Wu Huiyun, Zhao Haichuan, Wu Wuming, et al. Analysis of the evaluation function used in optimization of a relay mirror system [C]//*SPIE*, 2011, 8192: 819209-1-6.
- [14] Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004: 114-153. (in Chinese)
苏毅, 万敏. 高能激光大气传输 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 114-153.
- [15] Chu Xiuxiang. Study on the propagation and transform of laser beams through a relay mirror system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009: 49-54. (in Chinese)
储修祥. 中继镜系统激光传输与变换的理论研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009: 49-54.
- [16] Hartman M, Restaino S, Baker J, et al. EAGLE/Relay mirror technology development [C]//*SPIE*, 2002, 4724: 110-117.