

文章编号: 0253-2239(2008)10-1967-04

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

吴慧云 吴武明 陈金宝 许晓军

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 分析了激光中继镜技术的概念及工作过程,建立了中继镜系统模型,并在 Hufnagel-Valley 5/7 大气湍流模型条件下分别计算了 100 kW 功率,10 km 高度,发射、接收、二次发射望远镜均为外径 0.5 m、内径 0.2 m 望远镜的固体激光中继镜系统和 100 kW 功率,外径 0.5 m、内径 0.2 m 发射望远镜的常规高能激光系统对 1 km 高度目标作用的极值功率密度与目标水平距离的关系曲线。由于中继镜系统对目标可作用时间长,根据相关资料确定常规激光系统和中继镜系统的极值功率密度破坏阈值标准分别为 4000 W/cm^2 和 800 W/cm^2 。分析结果得到常规高能激光系统对目标的最大可作用距离为 1.38 km,中继镜系统的最大可作用距离为 12.2 km。

关键词 激光技术; 高能激光技术; 中继镜系统; 高能激光系统; 数值模拟

中图分类号 TJ95 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20082810.1967

Simulation of Effect of 100 kW Solid-State Laser Relay Mirror System on 1 km Altitude Target

Wu Huiyun Wu Wuming Chen Jinbao Xu Xiaojun

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The concept and work process of laser relay mirror technology are analyzed, and the model of laser relay mirror system is established. The effect on 1 km altitude target of the 100 kW, with 10 km altitude, launching, receiving, secondary launching telescopes with 0.5 m outer diameter and 0.2 m inner diameter telescope solid laser relay mirror system and the conventional high-energy laser system with the same parameters under the Hufnagel-Valley 5/7 atmospheric turbulence model and the marine environment condition are separately calculated. The relay mirror systems interaction time on the target is longer and with the extreme power density damage threshold standards for conventional laser system in relevant literature and the relay mirror system are 4000 W/cm^2 and 800 W/cm^2 . The coverage range of the convention high-energy laser system is 1.38 km, and the coverage range of laser relay mirror system is 12.2 km.

Key words laser technique; high-energy laser technique; relay mirror system; high-energy laser system; numerical simulation

1 引 言

中继镜系统是近年备受各方关注的一种新型结构模式的高能激光系统,也是一项重要的激光系统作战概念^[1]。美国自“星球大战”计划以来一直致力于中继镜技术的研究,进行过数次相关技术的实验并取得成功^[2,3],特别是 2006 年 8 月波音公司在新墨西哥州科特兰空军基地的“星火”光学试验场完成

了首次中继镜系统外场试验,试验的成功极大的促进了中继镜技术从概念向技术的转化。美国军队转型办公室已把中继镜技术作为军队的转型技术,它的发展必将影响未来新一代的激光系统^[4]。

中继镜技术的基本思想是将激光系统的激光源与光束控制部分分离,通过置于高空或太空的中继镜系统接收激光源向其发射的激光束,经系统校正、

收稿日期: 2008-04-02; **收到修改稿日期:** 2005-05-15

基金项目: 国防预研项目、国防科技大学研究生创新基金(S070701)资助课题。

作者简介: 吴慧云(1984—),男,硕士研究生,主要从事高能激光技术及应用等方面的研究。E-mail: huiyun-wu@163.com

导师简介: 陈金宝(1970—),男,博士,研究员,主要从事高能激光技术方面的研究。

净化后重新定向发射到目标上。激光中继镜系统由激光源、中继镜系统和必要的地面通信线路组成^[5]。激光中继镜系统在军事上具有很好的应用前景,低能中继镜系统可用于情报和图片的搜集、导弹的引导、地面干扰、激光通信、激光致盲等;高能中继镜系统可用于对重要目标的直接作用等。

2 模型建立与计算

2.1 模型建立

系统模型如图 1 所示,中继镜系统位于光源正上方 10 km 处,光源为 100 kW 理想固体激光,波长 $\lambda=1.064 \mu\text{m}$,发射望远镜 R_0 、接收望远镜 R_1 、二次发射望远镜 R_2 均为外径 0.5 m、内径 0.2 m 的望远镜,目标高度为 1 km,距光源的水平距离为 X 。中继镜系统光束上行传输方式为准直传输,上行链路两端有完全合作信标与自适应系统作用;光束下行传输方式为聚焦传输,下行链路无自适应系统。常规激光系统则是对目标直接作用,光束聚焦传输且无自适应系统作用。

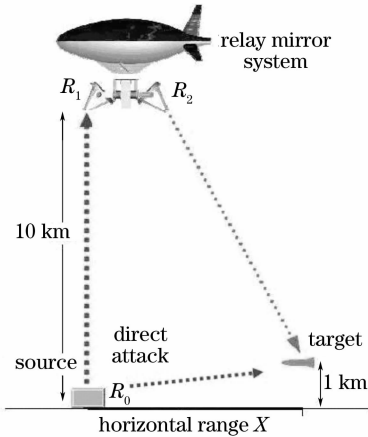


图 1 系统模型图

Fig.1 Model of system

2.2 常规激光系统作用效果计算

对目标直接进行作用,目标处极值功率密度

$$I_p = \frac{\pi D^2 P}{4\lambda^2 z^2} T_{\text{sys}} R_s, \quad (1)$$

式中 D 为发射望远镜口径, P 为光源功率, T_{sys} 为传输过程中的大气透过率, R_s 为传输过程光束的斯特尔比,主要由光源光束质量、大气湍流和热晕影响三部分决定, Z 为传输距离。

光源为理想光源, R_s 仅由大气湍流和热晕两部分决定,可将(1)式变为

$$I_p = \frac{\pi D^2 P}{4\lambda^2 z^2} T_1 T_2 T_3, \quad (2)$$

式中 T_1 为热晕影响因子,即为传输过程中热晕引入的斯特尔比,对强度均匀分布的圆形聚焦光束 $T_1 = (1 + 0.09N^{1.2})^{-1}$, N 为传输过程的热畸变数。

$$N = N_c f(N_E) q(N_F) S(N_w), \quad (3)$$

$$N_w = \frac{\omega Z}{V}, \quad N_E = \alpha Z, \quad N_c = \frac{N_D}{2\pi N_F}$$

式中 α 为大气吸收系数, ω 为光束扫描角速度, V 为光束与大气的相对运动平均风速, $N_F = kn_0 D^2 / 8Z$ 为光束的非涅耳数, n_0 为未受激光加热影响的大气折射率, N_D 为 Bradley-Herrmann 热畸变参数, $f(N_E) = 2[N_E - 1 + \exp(-N_E)] / N_E^2$ 为吸收衰减因子, $q(N_F) = [2N_F^2 / (N_F - 1)][1 - \ln N_F / (N_F - 1)]$ 为聚焦因子, $S(N_w) = (2/N_w^2)[(N_w + 1)\ln(N_w + 1) - N_w]$ 为光束扫描因子,计算过程中取风速 $V = 4 \text{ m/s}$,目标飞行速度为 500 m/s 。

T_2 为传输过程的大气透过率,则 $T_2 = T_{\text{sys}}$ 。

T_3 为湍流影响因子,即为传输过程中湍流引入的斯特尔比

$$T_3 = \begin{cases} (r_0/R_0)^2, & \text{当 } r_0 < R_0 \text{ 时} \\ 1, & \text{当 } r_0 \geq R_0 \text{ 时} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $R_0 = 0.5 \text{ m}$ 为发射望远镜口径, $r_0 = 0.1848\lambda^{6/5} \left[\int_0^h Cn^2 dz \right]^{-3/5}$ 为传输过程大气的相干长度,按照 Hufnagel-Valley 5/7 湍流模型^[6]

$$Cn^2(h) = 8.2 \times 10^{-26} V^2 h^{10} e^h + 2.7 \times 10^{-16} e^{-h/1.5} + Cn^2(0) e^{-10h}, \quad (5)$$

式中 h 为高度(单位为 km), V 为风速,取 $V = 4 \text{ m/s}$,

$$Cn^2(0) = 4.0 \times 10^{-14} m^{-2/3},$$

在海洋环境条件下通过计算得^[7,8],1) 热晕影响因子 T_1 、大气透过率 T_2 、湍流影响因子 T_3 与目标水平距离 X 关系曲线如图 2 所示。2) 目标处极值功率密

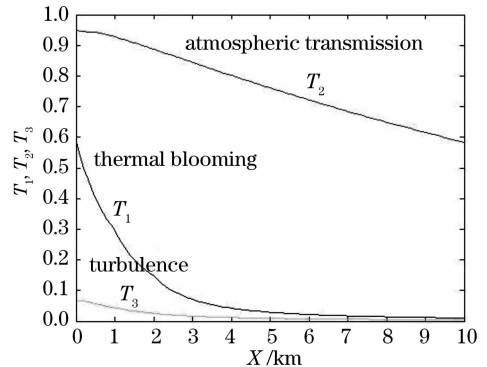


图 2 T_1 、 T_2 、 T_3 与 X 关系曲线图

Fig.2 Relation curve of T_1 , T_2 , T_3 and X

度 I_p 与目标水平距离 X 关系曲线如图 3 所示。

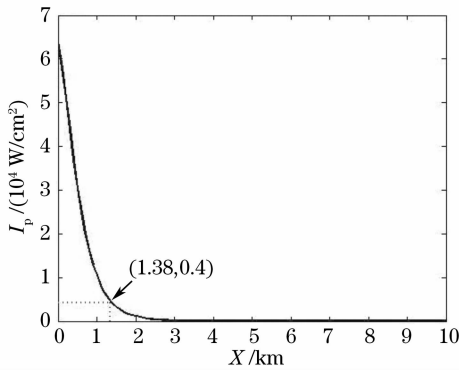


图 3 极值功率密度与目标水平距离 X 关系曲线

Fig. 3 Relation curve of extreme power density I_p -target horizontal distance X

参照相关文献[9],取目标的功率密度破坏阈值为 4000 W/cm^2 ,由计算结果得到常规激光系统在该条件下对 1 km 高度目标可作用的最大距离为 1.38 km。

2.3 中继镜系统作用效果模拟

2.3.1 模型近似

对中继镜系统模型模拟近似得到,1)系统上行链路的两端使用完全合作信标,能高精度的测定出大气湍流作用效果,通过高精度自适应系统能有效的校正大气湍流造成的影响;此外,对于 0.5 m 口径、100 kW 功率、 $\lambda=1.064 \mu\text{m}$ 的激光束垂直上行准直传输 10 km 过程的热畸变参数 N_D 在数十量级以内,按照现有技术水平,对于传输过程 $N_D < 466$ 的准直光束^[10,11],自适应系统对热晕影响的校正同样是非常有效的。美国 1998 年国家导弹防御系统激光选项防务报告中对地基激光太空中继镜系统(上行传输距离 7578 km)经系统校正后湍流的影响因子取为 95%,热晕影响因子取为 92%^[12]。对系统模型中湍流传输距离为 10km,折合系统抖动等影响,设定系统校正后湍流的影响因子和热晕影响因子分别取 95%和 90%。2)中继镜系统能实现理想对准接收,光束耦合接收以及系统转换净化过程中的能量效率为 100%。

2.3.2 上行传输计算

光源功率 $P=100 \text{ kW}$, $\lambda=1.064 \mu\text{m}$,光束内外径分别为 0.5 m 和 0.2 m,传输距离为 10 km,经计算得接收场的强度分布如图 4 所示。上行传输过程中大气透过率 $T_{\text{sys1}}=0.8761$,湍流和热晕的影响因子为 $0.95 \times 0.90=0.855$,系统接收的总功率

$$p_L = 2\pi \int_{0.1}^{0.25} I(r)rdr = 61.1009 \text{ kW},$$

系统的能量接收效率

$$\eta = 2\pi \int_{0.1}^{0.25} I(r)rdr / \left[2\pi \int_0^{\infty} I(r)rdr \right] = 61.1\%.$$

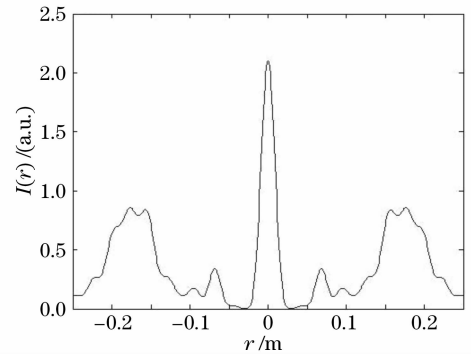


图 4 接收场的强度分布图

Fig. 4 Receiving field intensity distribution

2.3.3 中继镜系统作用效果计算

对中继镜系统整个传输过程光束的斯特尔比 $R_S = R_{\text{Sup}}R_{\text{Sdown}}$,根据模型近似有 $R_{\text{Sup}}=0.855$ 。下行传输过程中的大气湍流、热晕和二次发射光源能量分布不均匀引入的影响由三部分决定,式(1)改为

$$I_p = \frac{0.855\pi D^2 p_L}{4\lambda^2 z^2} T_1 T_{\text{sys2}} T_3 T_4, \quad (5)$$

式中 T_1 为下行传输过程中热晕引入的斯特尔比, $T_1 = (1 + 0.09N^{1.2})^{-1}$, N 为热畸变参数^[8,9],计算过程中取风速为 4 m/s,目标飞行速度为 500 m/s, T_{sys1} 为上行传输过程中大气透过率, T_{sys2} 为下行传输过程中大气透过率, T_2 为整个传输过程的大气透过率, $T_2 = T_{\text{sys1}} \times T_{\text{sys2}}$, T_3 为下行过程的湍流影响因子:

$$T_3 = \begin{cases} (r_0/R_2)^2, & \text{当 } r_0 < R_2 \text{ 时} \\ 1, & \text{当 } r_0 \geq R_2 \text{ 时} \end{cases} \quad (6)$$

式中 $R_2 = 0.5 \text{ m}$ 为二次发射望远镜口径, $r_0 = 0.1848\lambda^{6/5} \left[\int_{h_1}^{h_2} Cn^2 dz \right]^{-3/5}$ 为下行传输过程中大气相

干长度, p_L 为中继镜系统发射的激光功率 61.1 kW, T_4 为二次发射光源能量分布不均引入的斯特尔比,定义为,对两功率相同光源, T_4 为理想情况下能量分布不均匀光源对应目标处峰值功率对理想情况下能量分布均匀光源对应目标处峰值功率之比,对圆对称聚焦光束,目标处峰值功率总是位于焦点处,焦点处光场^[13]

$$U = \frac{2\pi}{i\lambda f} \int_{r_1}^{r_2} \frac{A(r)}{f} r dr, \quad (7)$$

其中 f 为聚焦距离, $A(r)/f$ 为振幅, r_1 、 r_2 分别为发射望远镜的内、外半径。对系统 $r_1 = 0.1 \text{ m}$, $r_2 = 0.25 \text{ m}$, $f = Z$, $A(r)/f = \sqrt{I(r)}$, 代入计算得 $T_4 = 0.8972$ 。

在海洋环境条件下对中继镜系统计算可得, 1) 热晕影响因子 T_1 、大气透过率 T_2 、湍流影响因子 T_3 与目标水平距离 X 关系曲线如图 5 所示。2) 目标处极值功率密度 I_p 与目标水平距离 X 关系曲线如图 6 所示。

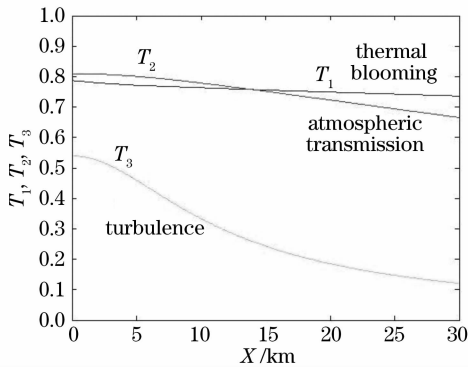


图 5 T_1 、 T_2 、 T_3 与 X 关系曲线图

Fig. 5 Relational curve of T_1 、 T_2 、 T_3 and X

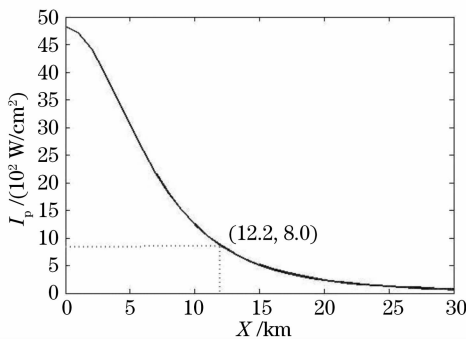


图 6 极值功率密度与目标水平距离 X 关系曲线

Fig. 6 Relational curve of I_p - X

中继镜系统位于高空, 与常规高能激光系统相比对目标的可作用时间长, 因此, 对应的目标功率密度破坏阈值较常规高能激光系统对应的目标功率密度破坏阈值要低, 参照相关文献[6], 取为 800 W/cm^2 , 可得系统对 1 km 高度目标可作用的最大距离为 12.2 km 。

3 结 论

由计算结果表明中继镜系统降低了大气对激光的影响, 拓宽了激光系统的作用范围。当对更高目标作用时, 中继镜系统的优势更加明显。

中继镜系统结构复杂, 与常规激光系统相比增

加了一套自适应系统和一套跟踪瞄准系统, 而且集成化要求高; 同时系统在双光轴的稳定对接、中继镜平台及稳定控制、激光抖动控制与补偿、高精度惯性参考单元、自适应光学系统、光束校正与净化稳定、光学器件的轻质化、高精度光学镀膜、中继镜内部能量传输效率、目标识别跟踪与瞄准等技术上面临挑战。总之, 中继镜系统与常规激光系统相比具有很多的优势同时又面临了许多技术挑战。

参 考 文 献

- Edward A. Duff, Donald C. Washburn. The magic of relay mirrors[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5413**: 139~143
- Wu Huiyun, Cheng Jinbao, Xu Xiaojun. Tactical laser relay mirror system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(12): 23~27
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
- Scott L. Johnson. *Beam Control of Extremely Agile Relaying Laser Source for Bifocal Relay Mirror Spacecraft* [D], Naval Postgraduate School, Monterey, California, September 2006. 1~2
- Ren Guoguang, Huang Jijin. Major progress of U. S. 2005' high-energy laser technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(6): 5~6
任国光, 黄金金. 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
- Ren Guoguang. Review of significant adjustment of American space-based laser program [J]. *Laser and Infrared*, 2003, **33**(3): 165~166
任国光. 评述美国天基激光计划的重大调整[J]. *激光与红外*, 2003, **33**(3): 165~166
- Alan J. MacGovern, David A. Nahrstedt, Michael M. Johnson. Atmospheric propagation for tactical directed energy applications [C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4034**: 128~139
- Wu Bilin, Rao Changhui. Effect of outer scale of atmospheric turbulence on tracking precision of tilted tracking system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 967~970
吴碧琳, 饶长辉. 大气湍流外尺度对倾斜跟踪系统跟踪精度的影响[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 967~970
- Rao Ruizhong. Strehl ratios and sharpness of collimated laser beam in a turbulent atmosphere[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(1): 54~58
饶瑞中. 湍流大气中准直激光束的 Strehl 比锐度[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 54~58
- Gregory E. Glaros. Broad departmental application of directed energy systems[C]. *Directed Energy Weapon SMi Conference*, 2004. 7~28
- Bradley L C, Herrmann J. Phase compensation for thermal blooming[J]. *Appl. Opt.*, 1974, **13**: 331~334
- Xu Xiaojun. *Atmospheric Optics and Auto-Adapted Optics Teaching Printed Lecture* [M]. Changsha: University of National Defense and Science Directed energy Research institute, 2007. 3~5
许晓军. 大气光学与自适应光学教学讲义[M]. 长沙: 国防科大定向能研究所, 2007. 3~5
- Steven G. Leonard. Laser options for national missile defense [R]. Alabama: Air Command and Staff College Air University, 1998. 75~84
- Ji Jiarong. *Higher Optics Course* [M]. Changsha: NUDT Press, 2007. 203~207
季家谔. 高等光学教程[M]. 长沙: 国防科大出版社, 2007. 203~207