

文章编号: 0258-7025(2009)06-1392-05

100 kW 固体激光中继镜系统模拟

吴慧云 陈金宝 吴武明 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 建立了中继镜系统模型, 并进行了一定的近似, 在某地区特定大气条件下, 利用激光大气传输四维程序及相关程序模块, 分别计算了固体激光中继镜系统和常规地基高能激光系统对 1 km 高度, 1 km/s 飞行速度目标的作用效果。根据中继镜系统对目标可作用时间长特点, 选取常规激光系统和中继镜系统的破坏阈值分别为 3 cm 桶中功率 28.27 kW 和 5.655 kW, 分析得出常规高能激光系统可作用目标的最大水平距离为 4.6 km, 中继镜系统可作用目标的最大水平距离为 11.3 km。与常规高能激光系统相比, 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。

关键词 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 O43; TJ95 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093606.1392

Simulation of 100 kW Solid-State Laser Relay Mirror System

Wu Huiyun Chen Jinbao Wu Wuming Xu Xiaojun

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

Abstract The model of laser relay mirror system is established, to calculate the effect of telescope solid-state laser relay mirror system and the conventional high energy laser system on 1-km altitude, 1-km/s speed target by using the "4-D" code of the laser atmosphere propagation. Because the relay mirror system has long time effect on the target, its damage threshold standard for 3-cm bucket power is 28.27 kW and 5.655 kW. The analysis results show that the coverage range of the conventional high energy laser system is 4.6 km, and the coverage range of laser relay mirror system is 11.3 km. Compared with the conventional high energy laser system the relay mirror system reduces the influence of the atmosphere on the laser, and opens up the coverage range of the laser system.

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

1 引言

中继镜技术是近年来备受各方瞩目的一项新型结构的高能激光系统技术^[1]。中继镜系统将光源与光束控制分离, 其工作过程为: 光源向位于高空的中继镜系统发射激光束, 经中继镜系统对准接收后, 由光束校正与净化系统对接收光束进行校正与净化, 提高光束质量, 再由瞄准发射系统将激光束重定向聚焦到目标上完成作用^[2,3]。中继镜系统被认为能有效降低大气对激光的影响, 拓宽激光系统的作用范围, 并命名为“革命性航空和航天全球激光交战系

统”^[4]。美国自“星球大战”计划以来一直致力于该技术的研究并进行了一系列的实验, 军队转型办公室已把中继镜技术作为美军的转型技术, 中继镜技术的发展必将影响到未来一代的高能激光系统^[5]。

2 模型建立

2.1 系统模型及参数设置

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

收稿日期: 2008-06-18; 收到修改稿日期: 2008-10-24

基金项目: 国防预研项目和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等方面的研究。E-mail: kdchenjinbao@yahoo.com.cn

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, 飞行速度为 1 km/s, 距光源的水平距离为 X 。

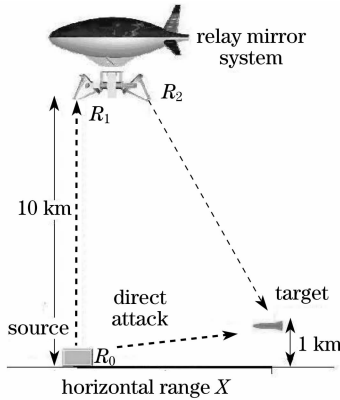


图 1 系统模型图

Fig. 1 Model of system

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作用。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。

2.2 大气条件

采用某地区大气测量数据, 大气湍流参数 Cn^2 , $1.064 \mu\text{m}$ 激光吸收系数 (AP) 和散射系数 (AEO) 随高度分布如图 2~4 所示。

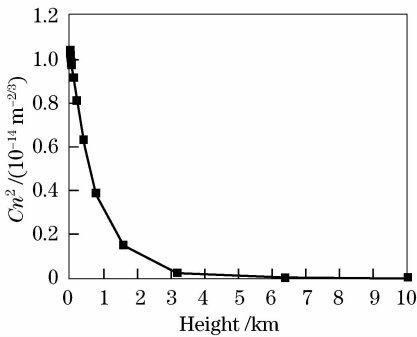


图 2 Cn^2 分布图

Fig. 2 Distribution of Cn^2

同时, 设定大气风速为 $V=4 \text{ m/s}$, 与目标运动方向相反。

3 模型计算

3.1 直接作用

由“4-D”程序对系统直接作用过程进行计算, 并利用相关的程序模块对计算结果进行处理, 得到 Y , 不同水平距离目标处的光斑如图 5 所示, 目标处 3 cm 桶中功率与目标水平距离关系曲线如图 6 所示。

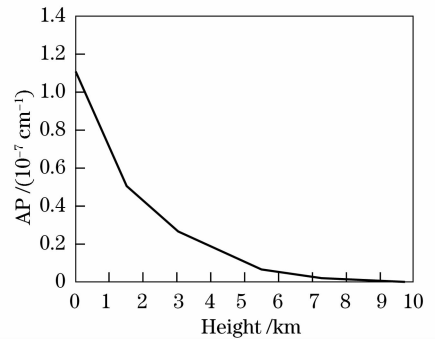


图 3 AP 分布图

Fig. 3 Distribution of AP

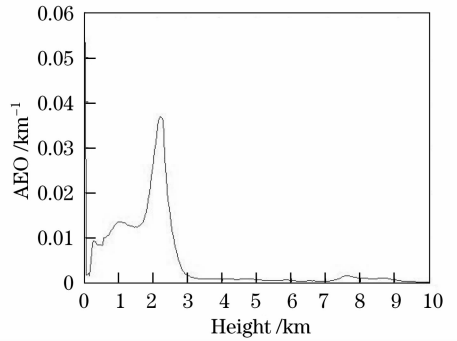


图 4 AEO 分布图

Fig. 4 Distribution of AEO

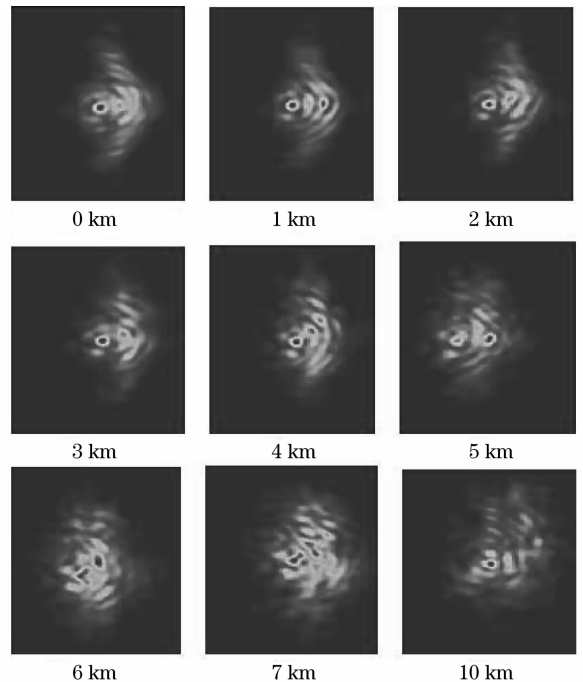


图 5 不同水平距离目标处的光斑

Fig. 5 Facula under different X

参照文献 [6, 7], 取目标处平均功率密度 1000 W/cm^2 为破坏标准, 如连续激光攻击“战斧”Block 3 导弹的可行部位及破坏阈值如表 1。考虑目标上半径 3 cm 的破坏面积, 取系统破坏阈值为

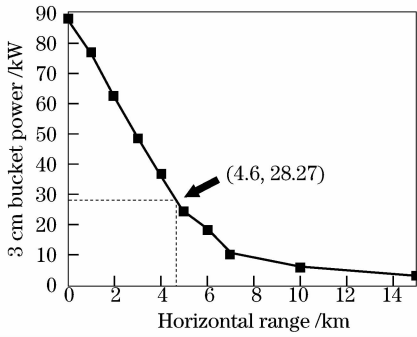


图 6 3 cm 桶中功率与目标水平距离的关系曲线

Fig. 6 Relational curve of 3-cm bucket power and X

3 cm, 桶中功率 $\pi \times 3^2 \times 1000 = 28.27$ kW。

表 1 连续激光攻击“战斧”Block 3 导弹的可行部位及破坏阈值

Table 1 Possible parts and damage threshold of “Tomahawk” Block 3 missile under laser attacks in a row

Destruction spot	Destruction threshold standard
Aluminum sheet of fuel tank	$10^3 \sim 10^4$ W/cm ²
Epoxy glass fiber reinforced plastic froth clamps core structure detection unit	10^3 W/cm ² (2~3 s)
K9 glass	COIL: 10 W/cm ²
10-mm warhead steel shell	$500 \sim 1000$ W/cm ² (15 s)
Tail wing(aluminum)	10^4 W/cm ²

由计算结果可得,常规地基激光系统对目标的可作用最大水平距离为 4.6 km。

3.2 中继镜系统计算

3.2.1 模型近似

对系统有以下两点近似:

1) 系统上行链路的两端使用完全合作信标,能高精度地测定出大气湍流作用效果,通过高精度自适应系统能有效地校正大气湍流造成的影响。美国 1998 年国家导弹防御系统激光选项报告中对地基激光太空中继镜系统(1.315 μ m 激光上行传输距离 7578 km)经系统校正后湍流引入的斯特尔比取为 0.95,热晕引入的斯特尔比取为 0.92^[8]。在本大气条件下,系统激光束垂直准直上行 10 km 传输过程的热畸变参数 $N_D = 2.8$,引入的斯特尔比为 $S = (1 + N_D^2 / 8\pi^4)^{-0.5} = 0.995$ ^[9-11]。因此,系统忽略热晕的影响并设定校正后湍流引入的斯特尔比为 0.95。

2) 中继镜系统能实现理想对准接收,光束耦合以及系统转换净化过程中的能量效率为 100%。

3.2.2 上行传输计算

理想光源功率 $P = 100$ kW, $\lambda = 1.064$ μ m,光束内外径分别为 0.5 m 和 0.2 m,传输距离为 10 km,湍流引入的斯特尔比为 0.95,经计算得接收场的强

度分布如图 7 所示。

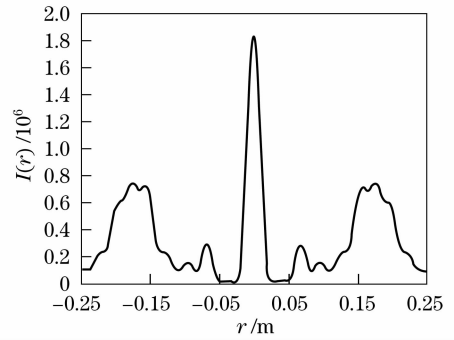


图 7 接收场的强度分布图

Fig. 7 Receive field intensity distribution

上行传输过程中大气透过率 $T_{sys} = 0.8761$,主要影响为大气的散射。

$$系统接收的总功率 P_L = 2\pi \int_{0.1}^{0.25} I(r)rdr =$$

68.83 kW。

3.2.3 下行光束计算

经上行计算可得系统二次光源的功率 $P_L = 68.83$ kW,光束质量由上行传输过程湍流影响决定, $\beta \approx 1 / \sqrt{1 \times 0.95} = 1.026$ 。此外,需要考虑光源能量分布不均匀引入的影响,引入 T_1 为光源能量分布不均匀引入的斯特尔比,定义为:对两功率相同光源,理想情况下能量分布不均匀光源与能量分布均匀光源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^[12]为

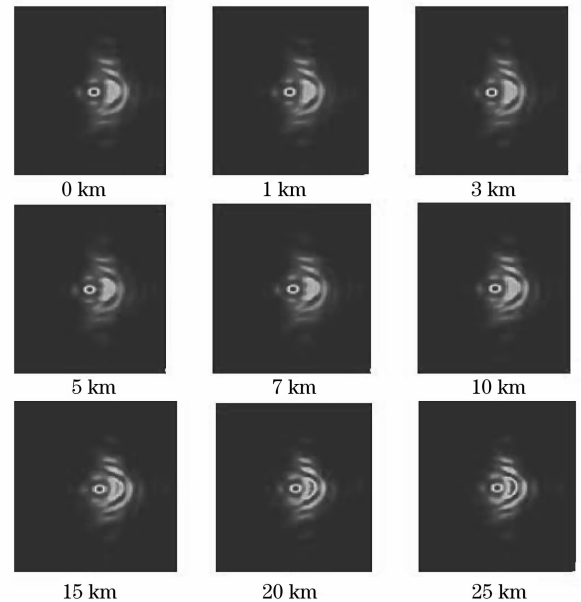


图 8 不同水平距离目标处的光斑

Fig. 8 Facula under different X

$$U = \frac{2\pi}{i\lambda f} \int_{r_1}^{r_2} \frac{A(r)}{f} r dr, \quad (1)$$

其中 f 为聚焦距离, $\frac{A(r)}{f}$ 为振幅, r_1, r_2 分别为发射望远镜的内外径。对本系统 $r_1 = 0.1, r_2 = 0.25, f = Z, \frac{A(r)}{f} = \sqrt{I(r)}$, 代入计算可得 $T_1 = 0.8977$ 。

利用 4-D 程序对下行传输过程进行计算时, 需要对 ap. dat, aeo. dat, cn2. dat, Inoutl. dat 的数据按照系统 10 km 高度进行倒置和修改。计算得不同水平距离目标处的光斑如图 8 所示。目标处 3 cm 桶中功率与目标水平距离关系曲线如图 9 所示。

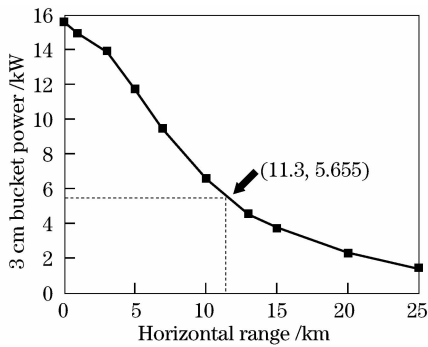


图 9 3 cm 桶中功率与目标水平距离的关系曲线

Fig. 9 Relational curve of 3-cm bucket power and X

中继镜系统位于 10 km 高空, 与地基系统相比对目标的可作用时间长, 破坏阈值低。考虑到中继镜平台的实际跟踪水平及稳定性比地基系统要差, 折合各方面影响, 参照文献[13], 取 10 km 高度中继镜系统对 1 km 高度目标可作用时间是对应条件下常规激光系统可作用时间的 5 倍, 故中继镜系统的破坏阈值取为常规激光系统破坏阈值的 1/5, 即 3 cm 桶中功率 $\pi \times 3^2 \times 200 = 5.655$ kW。由结果得, 中继镜系统对目标的最大可作用水平距离为 11.3 km。

4 结果分析

在本大气条件下, 中继镜系统与常规高能激光系统对 1 km 高度目标作用的最大水平距离分别为 11.3 km 与 4.6 km, 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。此外, 中继镜系统的另一关键优势在于系统位于高空, 可以在较为良好的环境中进行难度较大的跟瞄任务, 降低了对带宽、积分时间和探测能力的要求。当对更高目标作用时中继镜系统的优势将更加明显。

5 结 论

讨论了中继镜平台位于光源垂直上方 10 km, 且发射、接收均为 0.5~0.2 m 口径望远镜, 在该条件下, 上行光束准直传输是近似最优的^[14]。其他参数条件下光束上行传输时, 其最优上行传输方式需要通过计算确定, 取目标函数为接收光束能量、光束质量、能量分布影响因子三者的乘积, 在确定传输距离、发射、接收望远镜内外径等参数后由光束聚焦距离唯一决定, 可计算得出对应条件下的最佳传输方式以及对应的二次发射光源性质, 在此基础上进行系统下行计算。

参 考 文 献

- Edward A. Duff, Donald C. Washburn. The Magic of Relay Mirrors[C]. *SPIE*, 2004, **5413**: 139~143
- Wu Huiyun, Chen 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]. California: Naval Postgraduate School, 2006, 1~5
- 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
- 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
- Shi Yanxia, Huang Xiaonian. High-energy laser weapon seriously imperils survivability of ballistic missiles[J]. *Aerospace China*, 2004, **37**(10): 33~35
- 石艳霞, 黄小念. 高能激光武器对弹道导弹的威胁分析[J]. *中国航天*, 2004, **37**(10): 33~35
- Liu Shuying, Shao Yuanpei, Ji Shifan. Using tactical laser weapon to hit cruise missile [J]. *Modern Defence Technology*, 2001, **29**(1): 9~11
- 刘淑英, 邵元培, 计世藩. 用战术激光武器反巡航导弹[J]. *现代防御技术*, 2001, **29**(1): 9~11
- Steven G. Leonard. Laser options for national missile defense [D]. Alabama: Air Command and Staff College Air University, 1998. 75~84
- L. C. Bradley, J. Herrmann. Phase compensation for thermal blooming[J]. *Appl. Opt.*, 1974, **13**: 331~334
- 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]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 54~58

- 饶瑞中. 湍流大气中准直激光束的 Strehl 比与锐度[J]. 中国激光, 2005, **32**(1):54~58
- 12 Ji Jiarong. Higher Optics Course [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2007. 203~207
季家镛. 高等光学教程[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2007. 203~207
- 13 Gregory E. Glaros. Broad departmental application of directed energy systems [J]. *The Hatton, London, Directed Energy Weapon Smi Conference*, 2004. 7~28
- 14 Wu Huiyun, Wu Wuming, Chen Jinbao *et al.*. Simulation of effect of 100 kW solid-state laser relay mirror system on 1 km altitude target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10):1967~1970
吴慧云, 吴武明, 陈金宝 等. 100 kW 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

***Chinese Optics Letters* (《中国光学快报》)**
2009 年“Digital and Computer-Generated Holography”
专题征稿启事

Chinese Optics Letters (《中国光学快报》) 计划于 2009 年 12 月在正刊上推出“Digital and Computer-Generated Holography”(“数字与计算全息”)专题, 特向国内外广大读者以及作者征集该方面原创性的研究论文。征稿范围包括:

- Digital holography theory and systems
- Phase unwrapping
- Computer generated holograms
- Spatial light modulators for holography
- Holographic optical elements
- 2D and 3D pattern recognition
- Three-dimensional imaging and processing
- Three-dimensional display
- 2D-3D content conversion
- Shape and deformation measurement
- Holographic imaging and microscopy
- Holographic Optical Micro-Manipulation

Feature Editor:

Ting-Chung Poon, Ph. D., Professor

Bradley Department of Electrical and Computer Engineering

Virginia Tech

Blacksburg, Virginia 24061 USA

截稿日期: 2009 年 7 月 15 日

投稿方式以及格式: 可直接将稿件电子版发至邮箱: col@mail.shcnc.ac.cn [主题标明“专题(具体名称)投稿”], 或通过网上投稿系统直接上传稿件(投稿类型选择 focus issue submission, 备注中写明具体专题名称, 推荐用此方式投稿), 详情请参见《中国光学快报》网站: <http://www.col.org.cn>。投稿必须是英文稿, 其电子版请使用 Latex 或者 MS-Word 格式。有任何问题请发邮件至 col@mail.shcnc.ac.cn 询问。