

战术激光武器中的自适应光学技术

邵俊峰, 张 强

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 为了改善高能激光大气传输性能, 采用自适应光学系统对发射的高能激光束进行校正。本文论述了大气传输对高能激光的影响, 讨论了用于战术激光武器的自适应光学系统的组成, 并讨论了其主要性能参数。

关键词: 战术激光武器; 自适应光学; 激光主动照明

中图分类号: TJ95; O439

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI 20102712.0033

Adaptive Optics in Tactical High-energy Laser Weapons

SHAO Jun-feng, ZHANG Qiang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Adaptive optics is applied in tactical high-energy laser (HEL) weapons for improvement of laser atmospheric propagation. The influence of atmospheric propagation on high-energy laser is described, and the specific components of adaptive optics in HEL weapons is discussed in detail, especially on several key parameters.

Keywords: tactical high-energy laser weapon; adaptive optics; active laser illumination

1 引 言

美国军方推动陆基战术高能激光武器 (Tactical high energy laser, THEL) 和空基高能激光武器 (Airborne laser, ABL) 的研制, 大大推进了激光武器实用

化的进程。THEL 采用波段 $3.8\ \mu\text{m}$ 的 DF 激光器, 功率为 400 kW, 光束定向器的口径为 0.7 m, 作战距离 5 km, 主要作战用途是战术防御。ABL^[1]采用 $1.315\ \mu\text{m}$ 的 COIL 激光器, 功率为 2~3 MW, 光束定向器的口径为 1.5 m, 作战距离 400 km, 在国家反导系统的框

架下用于弹道导弹上升段的拦截。

在发展战术激光武器的研究中发现,战术激光武器存在一系列技术难题。其中高功率激光大气传输是一个重要问题,需要采取一定技术途径对大气传输进行补偿。如图1所示,典型高能激光武器系统除了光束定向、远场聚焦外,还需要自适应光学系统对发射的HEL进行波前修正。下面先讨论大气传输对高功率激光传输特性的影响,然后讨论用于高能激光武器的自适应光学系统组成,并讨论在不同大气条件下,对自适应光学组成部分的具体需求。

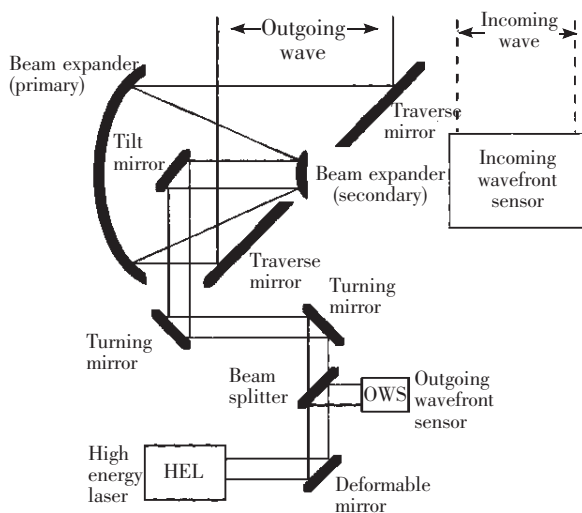


图1 典型高能激光武器系统

2 大气对高功率激光传输特性的影响

衍射与大气无关,即使在真空条件下仍然存在,是激光通过有限口径传输的必然结果,但作为激光大气传输的关键参数,这里简要介绍。远场衍射极限为 $1.22\lambda/D$, 为了提高远场距角能力,一般需要较小的波长。早期激光武器的雏形如美国空军激光实验室 ALL 就使用 CO_2 激光,其波段为 $10.6\mu\text{m}$, 相同发射口径条件下,聚焦能力仅为 COIL (波段 $1.315\mu\text{m}$) 的 $1/64$ 。发射口径是另一重要因素,只有较大的发射口径才能使衍射角较小。例如,美国地基反卫星激光武器 GBL 的口径设计为 3.5 m , 就是为了缩小几百公里外的光束聚焦半径。较大发射口径的主要问题

是大气湍流问题。下文将详细讨论大气湍流造成的影响。

大气湍流影响主要通过 C_n^2 来表示^[2]。主要物理概念包括 Fried 相干长度 r_0 、准直平面角 θ_0 、闪烁指数 σ 以及湍流频率 f_c 。

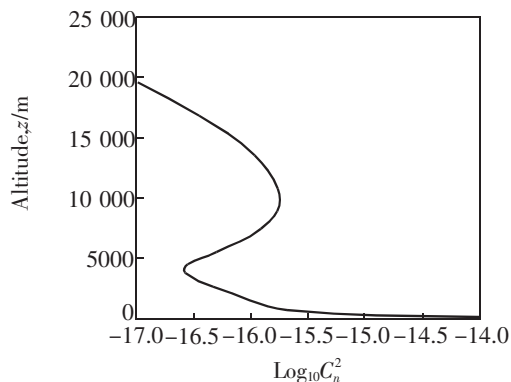


图2 大气湍流强度与高度的关系

Fried 相干长度 r_0 是描述大气波前畸变范围的物理量, r_0 越大, 表示大气湍流影响越小。在地表情况下, 也就是地基激光武器应用场景中, r_0 约为 $1\sim 10\text{ cm}$; 在 ABL 应用场景中, r_0 约为 $0.1\sim 1\text{ m}$ 。可见, 在地面条件下, 大气波前畸变要比空基应用严重得多。相干长度 r_0 是一个非常重要的物理量, 一旦战术激光武器的发射口径大于该值, 在没有自适应光学的补偿条件下, 波前畸变将严重影响光束传输。同时, 在自适应光学的波前传感器设计中, 孔径阵列的口径应该为 r_0 量级, 由此测得的波前畸变才能达到要求的精度。

$$r_0 = \left[\frac{2.905}{6.88} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \int C_n^2(z) \left(\frac{R-z}{R} \right)^{5/3} dz \right]^{-3/5} \quad (1)$$

准直平面角 θ_0 是描述具有一定发散角的激光在大气中传输时、光束中的各部分可视为经历相同路径的物理量, θ_0 指所能允许的最大激光发散角。这个概念比较复杂, 主要应用于自适应光学信标光。由于大气的影响, 信标激光的发散角若过大, 其经历的大气路径将不同, 回波信号用于修正波前将无效。显然, θ_0 是距离和大气湍流强度的函数。在一定的湍流条件下, 距离越远, θ_0 将越小, 对信标光的发散角要求将越高。若 $\theta_0 < \lambda/D$, 自适应光学系统将无法

用于修正大气。

$$\theta_0 = \left[2.905 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \int C_n^2(z) z^{5/3} dz \right]^{-3/5} \quad (2)$$

湍流频率 f_c 是描述大气湍流频率的物理量。在目标较近、目标运动速度较慢时, f_c 约为 100 Hz; 在目标较远、目标运动速度较快时, f_c 约为 1 000 Hz。

$$f_c = \left[0.102 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \int C_n^2(z) W_E^{5/3}(z) dz \right]^{3/5} \quad (3)$$

闪烁指数 σ 是描述湍流造成的能量损失的物理量。ABL 系统应用环境下, 闪烁指数约为 0.1~0.5, 其正比于大气湍流强度。

$$\sigma_R^2 = 0.561 k^{7/6} \int C_n^2(z) z^{5/6} \left(1 - \frac{z}{L} \right)^{5/6} dz \quad (4)$$

大气散射与波长有关, 波长越长, 散射越弱。

大气吸收特性与分子的电子能级、振转能级有关。大气吸收表现出来的最主要的特点是热晕现象 (Thermal blooming), 热晕现象是高功率激光大气传播特有的现象。热晕现象是非线性过程, 对于高功率激光产生的结果相当严重, 存在临界功率 P_{ci} , 一旦大于该值, 到靶功率密度将不能继续提高, 反而会下降。风速将影响热晕。下图是利用 THEL 理论计算的结果, 当风速大时, 热晕现象明显降低^[3]:

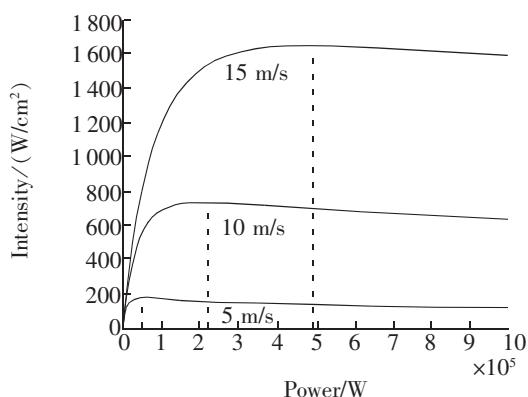


图3 功率密度与发射功率、风速的关系

3 用于战术激光武器的自适应光学系统

3.1 自适应光学技术的发展

在自适应光学技术发展之前, 即使再大口径的宇宙观测光学系统也无法实现高分辨率的成像。导致

星星闪烁、远处目标晦暗不清的大气湍流在望远镜发明之初就困扰着天文学界。1704 年, 牛顿写道: “唯一的补救措施就是最安静的空气, 或许是在云层之上的山顶才行”。直到上世纪中期, 自适应光学技术才逐步发展起来。雷达工程师最先提出使用破碎的波前拼合整体的波前。在上世纪 50 年代, 雷达方面的专家实现了波前重整, 并且用来跟踪运动物体。自适应光学技术借鉴雷达相类似的技术。1953 年, Horace W. Babcock 第一个提出使用电子束控制的薄膜实现光学谱段波前补偿技术, 但当时技术不成熟。直到上世纪 70 年代美国军方开始关注, 自适应光学才有了突飞猛进的发展^[4]。当时的需求主要来源于冷战时期的两个重要任务: 一是苏联的军事卫星大量发射, 美国需要对这些卫星进行识别成像, 这也室当时发展的主要动力; 另外一个因素就是战术激光武器研制的需求。直到 1983 年, 飞利浦实验室的 Robert Q. Fugate 才实现了激光导星的实验验证 SWAT (Short wavelength adaptive techniques)。实际上, 激光导星技术发展是战术激光武器中自适应光学应用的前提。战术激光武器中需要导星来测量战术激光武器与目标之间的大气湍流, 导星须为一个点目标, 靶标和尾焰均为面目标, 不能作为导星。但是, 可以使用主动照明的激光人为制造出一个导星。在战术激光武器系统中, 这个导星一般称为 BILL (Beacon ILLumination laser), 为了区分导弹和尾焰, 还需其他波段的激光照明整个弹体, 一般称为 TILL (Tracking ILLumination laser), 这里不再详细介绍。

3.2 战术激光武器中的自适应光学系统组成

从上节论述已知, 大气湍流和热晕对高功率激光远场聚焦的性能产生了严重的影响, 采用大气补偿技术能够部分克服大气影响。自适应光学系统利用相位共轭的原理抵消大气湍流的影响, 相位共轭原理如图 4 所示。自适应光学系统主要包括导星 (BILL)、波前传感器 (Wavefront sensor)、微机 (用于波前重构算法) 以及触动器 (Actuators) 和变形镜 (Deformable mirrors) 等主要部分。

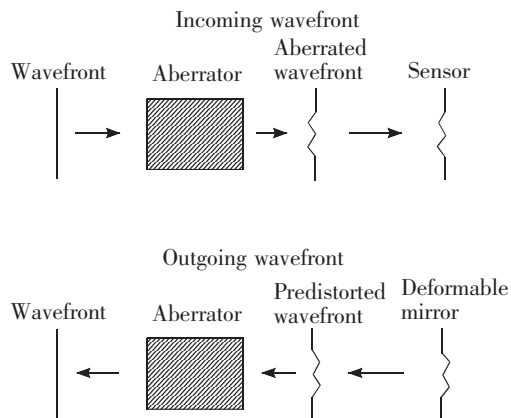


图4 相位共轭

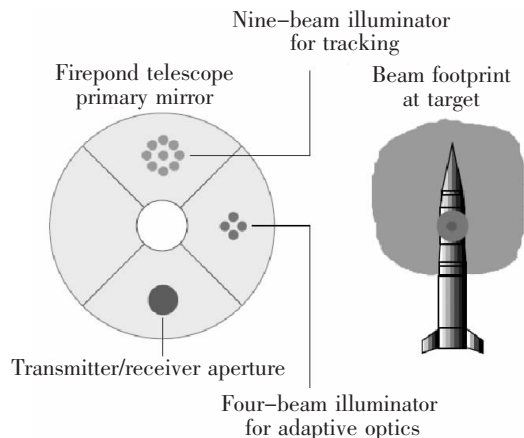


图5 激光主动照明信标光

导星 BILL 用来测量波前信息的激光主动照明光源。为了提高成像质量,降低大气闪烁造成的影响,采用多光束主动照明,图5为多光束激光主动照明提高探测信噪比的示意图。从上节讨论可知,BILL 的发散角需 $<\theta_0$,在 ABL 系统中, $\theta_0/(\lambda/D)$ 在 1.2~0.5 之间^[5],上限对应弱湍流情况,下限对应强湍流情况。前文已经叙述过,若该比值 <1 ,自适应光学将无效,这也是 ABL (作用距离达几百公里) 难于实现的重要原因。

波前传感器有很多种,这里以哈特曼传感器为例介绍波前畸变的测量。哈特曼传感器实际测得波前的导数,通过波前重构算法可以求得波前。前文已经讨论,大气相干长度为 r_0 ,则微孔径口径约为 r_0 ,从而得到微孔径阵列的个数约为 $(D/r_0)^2$ 。波前重构算法、触动器控制电压的计算均可在微机实现,详见姜文汉的讨论^[6]。

变形镜需要能够承受较高功率密度,其个数与

微孔径阵列的个数相当,约 10^3 个。高功率变形镜工艺是区别高功率激光武器系统和成像系统的主要特点,其主要制作材料包括 bimorph 和膜结构等若干种类。美国林肯实验室还对液晶空间光调制器进行了高功率激光控制方面的实验研究。

4 总 结

通过研究发现,自适应光学在战术激光应用中并不是万能的。一方面,当距离较远时,大气影响将更加严重,以至于 $\theta_0/(\lambda/D)$ 远小于 1,导致自适应光学无效;另一方面,当功率较高、风速较小时,非线性的热晕使得相位共轭效果很差。这时,采用最优化焦距控制等技术具有明显的优势^[3]。

本文讨论了大气对高功率激光传输的严重影响,探讨了用于战术激光武器的自适应光学系统的组成,并探讨了其组成结构的关键参数,对发展战术激光武器具有一定参考意义。

参考文献

- [1] Lamberson S. The airborne laser[J]. *SPIE*, 2702: 208-213.
- [2] Perram G P, Marciniak M A, Goda M, et al. High energy laser weapons: technology overview[J]. *SPIE*, 2004, 5414: 0277-786X: 1-25.
- [3] Wall J E, III. *Adaptive Optics for High Energy Laser Systems*[D]. Master of Science Degree thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1994, Chap.5: 69-84.
- [4] Hardy J W. Adaptive optics: technology developed during the cold war is giving new capabilities to ground-based

- astronomical telescope[J]. *Scientific American*, 1994: 40-45.
- [5] Higgs C, Barclay H T, Murphy D V, *et al.* Atmospheric compensation and tracking using active illumination[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 1994, 11(1): 5-26.
- [6] 鲜浩, 李华贵, 姜文汉, 等. 用 Hartmann-shack 传感器测量激光束的波前相位[J]. *光电工程*, 1995, 22(2): 38-45.

作者简介: 邵俊峰(1984-), 男, 汉族, 硕士, 2009年于复旦大学获得硕士学位, 主要从事光电对抗应用相关的研究。

E-mail: shao_junfeng@hotmail.com

《光学 精密工程》(月刊)

《光学 精密工程》是中国仪器仪表学会一级学术期刊, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主办, 科学出版社出版。由国内外著名科学家任顾问, 陈星旦院士任编委会主任, 国家科技部副部长曹健林博士担任主编。

《光学 精密工程》坚持学术品位, 集中报道国内外现代应用光学、光学工程技术、光电工程和精密机械、光学材料、微纳科学与技术、医用光学、先进加工制造技术、信息与控制、计算机应用以及有关交叉学科等方面的最新理论研究、科研成果和创新技术。本刊自2007年起只刊发国家重大科技项目和国家自然科学基金项目及各省、部委基金项目资助的论文。《光学 精密工程》竭诚欢迎广大作者踊跃投稿。

本刊获奖:

中国精品科技期刊
中国科学技术协会择优支持期刊
中国百种杰出学术期刊
第一届北方优秀期刊
吉林省双十佳期刊

国内检索源:

中国科技论文统计源期刊
中国学术期刊(光盘版)
万方数据系统数字化期刊
台湾华艺中文电子期刊网
中国科学引文数据库
中国物理文献数据库
中国期刊网

国际检索源:

《美国工程索引》(EI Compendex)
《美国化学文摘》(CA)
《英国INSPEC》(SA)
《俄罗斯文摘杂志》(PЖ)
《美国剑桥科学文摘》(CSA)

中文核心期刊要目总览(北大)
中国学术期刊综合评价数据库
中国光学与应用光学文摘
中国科学期刊全文数据库
中国光学文献数据库
中国学术期刊文摘
中国物理文摘

电 话: (0431) 86176855
传 真: (0431) 84613409

E-mail: gxjmgc@ciomp.ac.cn gxjmgc@sina.com
<http://www.eope.net>