



美国定向能机动近程防空计划进展分析

易亨瑜 锁兴文 易欣仪 齐予

Development analysis of American directed energy maneuver short-range air defense program

YI Hengyu, SUO Xingwen, YI Xinyi, QI Yu

引用本文:

易亨瑜, 锁兴文, 易欣仪, 等. 美国定向能机动近程防空计划进展分析[J]. 应用光学, 2024, 45(3): 485–494. DOI: 10.5768/JAO202445.0310001

YI Hengyu, SUO Xingwen, YI Xinyi, et al. Development analysis of American directed energy maneuver short-range air defense program[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(3): 485–494. DOI: 10.5768/JAO202445.0310001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0310001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[高能激光武器目标打击的多物理场系统仿真](#)

Multiple physical fields system simulation for high energy laser weapon target attacking

应用光学. 2017, 38(4): 526–532 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0401002>

[高能激光远场辐照度分布测量技术及其进展](#)

High energy laser far-field irradiance distribution measurement technology and its developments

应用光学. 2020, 41(4): 675–680 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0409004>

[美国舰载激光系统的成熟度评估](#)

Technology readiness level assessment on ship-borne laser weapon system

应用光学. 2021, 42(1): 9–15 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0101002>

[用于激光定向红外对抗的光学系统设计](#)

Optical system design for laser directional infrared countermeasure

应用光学. 2021, 42(3): 398–403 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0301004>

[激光诱偏干扰技术在车载主动防护系统中的应用](#)

Application of laser induced bias interference technology in vehicle active protection system

应用光学. 2019, 40(2): 217–222 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0201006>

[高能高功率激光参数测量技术研究](#)

Study on parameters measurement technology of high energy and high power laser

应用光学. 2020, 41(4): 645–650 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0409001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 03-0485-10

美国定向能机动近程防空计划进展分析

易亨瑜¹, 锁兴文², 易欣仪³, 齐 予¹

(1. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 军事科学院国防科技创新研究院, 北京 100071; 3. 复旦大学 化学系, 上海 200438)

摘要: 美国定向能机动近程防空 (directed energy maneuver-short range air defense, DE M-SHORAD) 计划通过击伤、摧毁或压制旋转翼无人机、固定翼无人机以及火箭弹、火炮炮弹、迫击炮弹 (rockets, artillery and mortar, RAM) 等威胁目标, 为机动部队提供伴随防空, 对抗新兴威胁, 属于美国陆军防空反导现代化的优先项目之一。首先介绍了 DE M-SHORAD 研制计划; 其次详细分析了系统结构, 并由系统参数评估了系统的作战性能; 最后梳理了系统的研制进展。通过综合分析可知, DE M-SHORAD 系统采用最佳组件, 通过快速原型方法实现激光武器系统在装甲车上的集成; 为降低技术风险, 该计划在发展方式上分为两个阶段, 首先集成、测试 2 kW~5 kW 机动实验型高能激光器 (mobile experimental high-energy laser, MEHEL), 然后再研制 50 kW 级的多任务高能激光器 (multi-mission high-energy laser, MMHEL)。经计算可得: MEHEL 和 MMHEL 对无人机的最大射程分别约为 0.77 km、4.8 km。

关键词: 激光技术; 定向能机动近程防空系统; 快速原型; 激光武器; 高能激光; 装甲车

中图分类号: TN209; TJ953

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202445.0310001](https://doi.org/10.5768/JAO202445.0310001)

Development analysis of American directed energy maneuver short-range air defense program

YI Hengyu¹, SUO Xingwen², YI Xinyi³, QI Yu¹

(1. Institute of Applied Electronic, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China; 2. National Innovation Institute of Defense Technology, Academy of Military Sciences, Beijing 100071, China;
3. Department of Chemistry, Fudan University, Shanghai 200438, China)

Abstract: American directed energy maneuver-short range air defense (DE M-SHORAD) program provides air protection to the maneuvering forces by defeating, destroying, or neutralizing rotary-wing unmanned aircraft systems (UAS), fixed-wing UAS, and rockets, artillery and mortar (RAM) threats, which is one of the priorities of the army air defense and anti-missile modernization. Firstly, the development program of DE M-SHORAD system was introduced. Then, its system architecture was analyzed in detail, and the combat performance was deduced from the system parameters. Finally, the development progress of the system was reviewed. Through the comprehensive analysis, it was showed that the DE M-SHORAD system adopted the optimal components for the integration of laser weapon systems on armored vehicles through a rapid prototyping approach. In order to mitigate the technical risks, the development approach of this program was divided into two phases, first integrating and testing the 2 kW~5 kW mobile experimental high-energy laser (MEHEL), and then developing the 50 kW multi-mission high-energy laser (MMHEL). The calculation results show that the maximum range of MEHEL and MMHEL for UAS is about 0.77 km and 4.8 km, respectively.

收稿日期: 2023-10-07; 修回日期: 2023-11-22

基金项目: 装备技术基础课题 (2022-ZBKJ-02)

作者简介: 易亨瑜 (1969—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事激光技术研究。E-mail: yihengyu1@sina.com

Key words: laser technology; directed energy maneuver-short range air defense system; rapid prototyping; laser weapon; high-energy laser; armored vehicle

引言

武装分子对固定阵地的 RAM 袭击,多年来一直是以色列的心腹之患,也曾经是伊拉克、阿富汗的美军和北约盟军的严重威胁。目前随着无人机的技术发展,其战场应用和打击能力也日益显著。为应对导弹、火箭弹、无人机的非对称威胁,增强作战部队在行军途中或前沿阵地上的伴随防空能力,美国陆军认识到,必须拥有威力可控、可预测、可重复使用的精确打击武器,以应对这些新兴的威胁。激光武器系统可提供这些属性,只需要燃料就能作战,不需要常规武器的弹药后勤保障,增强了部队的战术行动能力,并显著降低了武器单发成本,彻底扭转了美军作战中成本不利的局面。因此,美国陆军积极开发和部署定向能武器,作为其防空反导现代化的优先发展事项,重点是使用高能激光器来提供“高能激光-间接火力防护能力(indirect fire protection capability-high energy laser, IFPC-HEL)”和“DE M-SHORAD 能力”,其中 DE M-SHORAD 项目旨在研制具有伴随防空能力的装甲车车载激光武器。在 2017 年 4 月陆军作战能力发展司令部提出的 6 层防空反导概念中,DE M-SHORAD 装备承担着第 2 层防空任务。

在卡车车载激光武器领域中,除美国外,俄罗斯、以色列、英国、土耳其、法国、日本等多国也在大力发展,这方面已有较多文献阐述^[1-6]。而在装甲车车载激光武器领域中,只有美国、德国少数国家在发展部队的伴随防空能力,这方面仅有一篇简讯^[7]。与卡车相比,装甲车空间有限,对激光武器系统的体积有较严苛的限制。本文将详细介绍美国陆军装甲车车载激光武器的相关研制计划及其发展规划,深入分析样机系统的结构、作战性能、研制进展等。

1 研制计划

1.1 计划内容

美国陆军的机动近程防空(maneuver-short range air defense, M-SHORAD)计划,是通过摧毁、击伤或压制旋转翼、固定翼无人机以及 RAM 等威胁目标,为机动部队提供伴随防空,对抗新兴威胁,属于陆军防空反导现代化的一部分,如图 1 所

示^[8]。该计划属于陆军的采购计划,在实施方式上采用多阶段、多系列方式,在斯特瑞克装甲车上快速部署机动近程防空-增量 1 以及后续的增量 2、增量 3 等装置,增加相应的机动性和生存能力。其中,增量 1 为初始机动近程防空,属于一种传统防空武器系统,由集成在装甲车上多个地对空导弹发射器、传感器和一门火炮组成,于 2020 年 8 月 4 日开展测试,2022 年 2 月 4 日签署 124 套系统合同。增量 3 提供一种新的近程防空导弹,以取代目前的毒刺导弹,将在 2023 财年启动合同的征集和授予。



图 1 车载激光武器将为部队提供 RAM 防护

Fig. 1 Vehicle-mounted laser weapons will provide RAM protection for troops

增量 2 即 DE M-SHORAD,是在斯特瑞克装甲车上集成 50 kW 级激光防空能力,它在增量 1 的基础上,提供反情报、监视和侦查的能力。这将是一套专用的防空系统,可编入旅级部队执行作战行动,提供防空和火力支援。美国陆军打算通过数年的持续研发和试验测试,原计划在 2022 财年后将其变成采购项目。

1.2 发展规划

为降低技术风险,DE M-SHORAD 计划采用 2 个阶段进行实施。第一阶段是集成和测试 2 kW~5 kW 机动实验型高能激光器(MEHEL),如图 2(a) 所示^[9]。目标是将波音公司的便携式激光系统快速地集成到装甲车上,开展不同场景下的实战测试,判断是否值得后续支持,并为后续计划奠定技术基础。MEHEL 的承包商为负责激光武器系统的波音公司,以及提供斯特瑞克平台的通用动力公司。第二阶段是研制 50 kW 级 MMHEL 样机,雷声公司的设计样式如图 2(b) 所示^[10]。其中 MEHEL 项目为技术演示计划,而 MMHEL 项目为装备

采购计划。MMHEL 样机的总承包商为科尔德技术公司, 提供电源管理和冷却系统, 雷神公司负责 50 kW 级高能激光器、光束发射器、光电/红外目标捕获和跟踪系统以及 Ku720 多任务雷达, 联合团队还包括洛奇动力和热管理研究公司、通用动力公司和提供附加传感器的应用技术联合公司。诺·格公司作为作战光源子系统的供应商, 曾参与样机的竞标设计。而在科尔德技术公司和诺·格公司各自提供的 MMHEL 样机设计方案中, 都保留了传统防空武器。



(a) 机动实验型高能激光器



(b) 多任务高能激光器

图 2 美国高能激光器

Fig. 2 American high-energy lasers

第一阶段发展的 MEHEL 样机, 可使战士提前获得高能激光系统的实践操作经验, 而且通过 MEHEL 提供的实验操作, 卓越火力中心将能更好地开发成熟的战略、技术、程序(tactics, techniques, procedures, TTPS) 和作战概念 (concept of operations, CONOPS)。这样, 一旦 50 kW MMHEL 最终产品问世, 美国陆军将能够尽快形成作战能力。TTPS 和 CONOPS 的关键是作战空间管理, 包括己方卫星和飞机误伤的避免、打击威胁目标所需的武器类型选择, 以及机动部队防护所需的武器分布, 这些都需要通过大量的试验测试来逐步形成和完善。

1.3 研制经费

在经历了耗资巨大的 ABL 计划后, 美军在新型武器技术研发上, 都采用“尽早开展技术演示、尽快判断是否具有发展前景”的思路。美国第一套舰载激光武器(laser weapons system, LaWS)正是

在“早试验、早验证”中不断发掘军方需求^[11]。

2015 年 8 月 26 日在新墨西哥州阿尔伯克基市, 波音公司展示了便携式反无人机激光武器, 并进行打靶演示, 如图 3 所示^[12]。该系统可以拆分为 2 kW 光纤激光器、光束发射器、液体冷却器和控制单元等 4 个组件, 其控制单元包括 XBOX 360 游戏机手柄和一台安装了目标跟踪软件的笔记本电脑。



图 3 波音公司的紧凑型反无人机激光武器系统

Fig. 3 Compact anti-UAV laser weapon system of Boeing company

鉴于波音公司便携式激光武器体积紧凑, 因此美国陆军考虑将其集成到装甲车上, 形成 MEHEL 样机, 为陆军提供伴随防空。通过前期的演示打靶效果, 2018~2019 财年美国陆军正式在技术成熟计划下 DS3 支项中划拨 MMHEL 项目经费, 分别为 82.000 百万美元和 56.894 百万美元, 2020~2021 财年陆军将 MMHEL 项目升级到技术成熟计划主项下, 各年经费分别为 17.882 百万美元和 7.844 百万美元。其中 2020 财年还得到了国防部长办公室制造技术计划的经费支持, 将 MMHEL 从科学技术过渡到 M-SHORAD 采购计划; 2023 财年后, MMHEL 项目由陆军快速能力和关键技术办公室 (rapid capabilities and critical technologies office, RCCTO) 接管, 正式列入 M-SHORAD 计划, 其经费如图 4 所示。

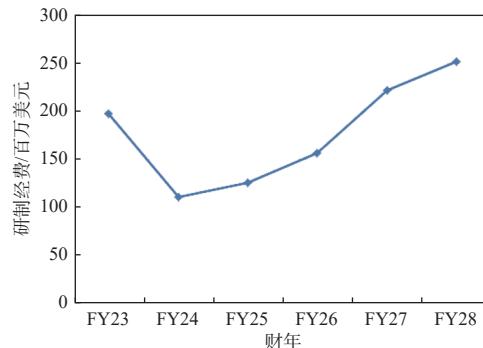


图 4 陆军预算的 DE M-SHORAD 计划研制经费

Fig. 4 DE M-SHORAD development program in U.S. army budget activity

2 系统结构及性能

2.1 作战平台

在美国陆军中广泛使用布雷德利重型战车、履带式或 8×8 轴斯特瑞克装甲车、悍马军车和新型联合轻型战术车等车型。选择这些通用平台来集成定向能防空系统，便于迅速推广到整个陆军部队中。

斯特瑞克装甲车安装 350 马力的卡特彼勒 C7 发动机、艾里逊 3200SP 自动变速箱，重约 16 500 kg，在简易铺装路面上最高时速为 97 km/h，单箱燃料可以行驶 530 km。它拥有多个武器站选项，允许集成反无人机系统以及机枪、榴弹发射器、反坦克导弹等其他武器。装甲车车体由高硬度钢制成，还可配备陶瓷复合装甲，以增强其对重机枪弹药和聚能装药弹头的防护。

与悍马军车和新型联合轻型战术车等四轮驱动车辆相比，8×8 轴斯特瑞克装甲车虽然体积较大，但拥有较出色的越野机动性能和低维护设计，能在崎岖地形上展现较好的机动灵活性。机动远程防空的目标，正是为“多域战”计划的小分队提供伴随防空服务。美国陆军强调，防空部队必须能够跟上前线作战部队，因此斯特瑞克装甲车成为 DE M-SHORAD 计划的战术平台。

2.2 作战光源

近年来，高功率激光器在民用和国防领域都得到了广泛的应用，其中结构紧凑的高功率激光系统成为当前的一个研究热点。全固态激光器具有高效、小型、弹药无限、后勤维护方便等优点，有望能达到 2 kW/kg 功率重量比。其中光纤激光器成为人们重点关注的对像。光纤激光器的研究始于 20 世纪 60 年代，早期因光纤制作工艺、稀土掺杂工艺以及泵浦技术制约而进展缓慢，80 年代后稀土掺杂光纤制作工艺的完善有效增加了光纤的增益并降低了背景损耗，半导体激光器的进步解决了高效泵浦源问题，光纤光栅谐振腔的出现简化了激光器结构，双包层光纤及其侧抽运方式的出现，这些技术进步促进了高功率光纤激光器的成功研制。由于现有装甲车缺乏激光系统安装的足够空间，因此激光系统的小型化因素至关重要。光纤激光器通过一组光纤光缆与光束发射器相连，因为光纤可以弯曲，所以节省了昂贵的折轴光学系统，从而降低了系统体积和集成成本，并最终实现在现有战术武器系统中的集成和系统

改造。

IPG 公司 2009 年研制出 10 kW 单模光纤激光器^[13]，成为工业加工中的首选。IPG 激光器是通过多束激光的空间合成来实现输出功率的进一步提高，属于一种简单的非相干合成技术，其原理示意图如图 5(a) 所示^[14]。该方案的主要优点是：光束合成为功率叠加方式，对子束光谱、相位噪声、偏振态等参数没有要求，可以采用工业激光器，合成系统简单、可靠。该方案的缺点是：合成后远场发散角较整孔径发射大，远场功率密度为子束功率的线性叠加，随着子束数量的增加，合束后激光束的光束质量将出现明显退化。

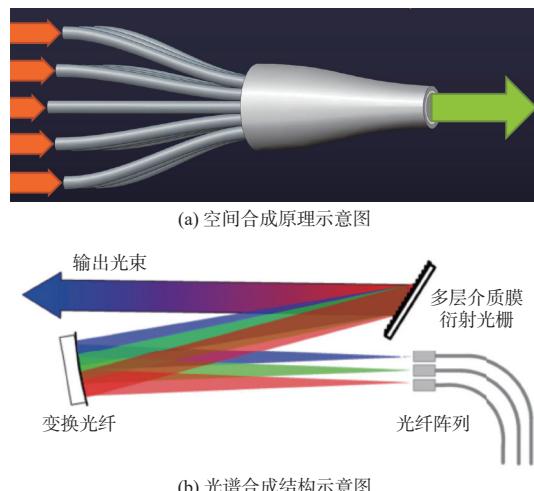


图 5 光纤激光器原理和结构

Fig. 5 Principle and structure of fiber lasers

洛·马公司的光谱合成光纤激光器，采用介质光栅（或体光栅）等色散元件，将不同角度入射的、波长略有不同的光束，反射成为波长重叠的单个高功率光束，如图 5(b) 所示^[15]。其本质上也属于非相干合成技术。该方案的优点是：除具有上述空间合成方式的优点外，合成后光束质量较好，基本与子束数量无关，合成后远场发散角与子束相同，故远场功率密度远大于空间合成方式。该方案的缺点是：对参与合成的子束波长、线宽等特性有较高要求，而且受带宽限制，存在功率定标放大的物理上限。

第一阶段 MEHEL 样机采用 IPG 公司 2 kW~5 kW 商用现货光纤激光器，其典型插头效率大于 40%^[16]，如图 6(a) 所示^[17]。第二阶段 MMHEL 样机可能采用 IPG 公司 50 kW 多模光纤激光器，参照 LaWS 样机信息^[11]，可能包括 4 个激光器橱柜，如

图 6(b)所示^[17]。表 1 为 2012 年 IPG 公司高功率光纤激光器的技术指标^[17]。



图 6 不同激光武器系统中的作战光源

Fig. 6 Combat light sources in different laser weapon systems

表 1 IPG 公司的高功率光纤激光器

Table 1 High-power fiber lasers of IPG company

输出功率/kW	光束参数积/mm×mrad	输出光纤口径/mm
2	2.2	50
4	2.2	50
6	2.2	50
10	5.0	100
20	5.0	100

MMHEL 系统未来也可能采用洛·马公司的 50 kW 光谱合成光纤激光器, 目前在美国陆海空各军兵种的激光武器中, 洛·马公司光谱合成光纤激光器逐渐成为战术激光武器的首选作战光源。洛·马公司在 2014 年 1 月 28 日研制出 30 kW 高光束质量光纤激光器, 电光效率达到 43%; 2017 年 3 月完成 60 kW 光纤激光器的研制, 交付陆军集成在高能激光移动演示器上; 2022 年 2 月在“下一代先进紧凑型激光器 (laser advancements for next-generation compact environments, LANCE)”计划支持下, 交付空军 50 kW 级 LANCE 激光器, 创建了机载激光系统领域可行性开发的关键基准, 将体积缩小为原来的 1/6^[18], 准备集成到战斗机中; 2023 年 1 月 24 日针对陆军 DE M-SHORAD 计划, 专门研制出相应的 50 kW 级“机动近程防空系统定向能拦截器 (directed energy interceptor for maneuvering short-range air defense system, DEIMOS)”, 并演示了首次出光^[19]。

2.3 探测与发射单元

波音公司便携式激光武器如图 7 所示^[12]。可固定在三角架上使用, 发射装置上有 2 个大镜面, 分别负责光束发射和目标的跟踪瞄准。

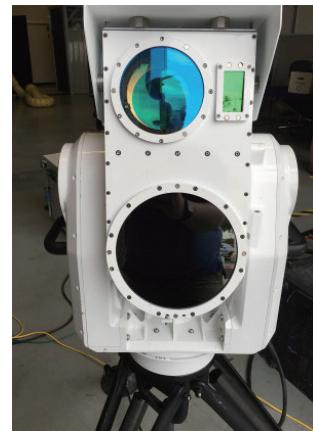


图 7 波音公司的光束发射器和目标成像器

Fig. 7 Beam transmitter and target imager of Boeing company

雷神公司的发射装置如图 8 所示^[20], 是一台 0.75 m×0.75 m×0.75 m 的多光谱仪。在纯电池供电下, 多光谱仪的目标跟瞄装置可工作 8 h, 多光谱仪的传感器装置与“捕食者”无人机上的相同, 包括一个光电/红外传感器、一个激光指示器和一个激光照明器。



图 8 雷神公司的多光谱仪

Fig. 8 Multi-spectrometer of Raytheon company

2.4 系统参数

装甲车载高能激光器的主要特征包括: 实验作战管理网络界面、模块化的设计方式、装甲防护的机动作战平台。表 2 是 MEHEL 和 MMHEL 的单元参数对比。

MEHEL 样机除激光器之外, 依然保留了 50 mm 口径的 M2 型机关枪, 另外装备了照相机进行目标探测和跟踪, 以及可干扰无人机的电子对抗设备。MMHEL 作战光源可能也采用 IPG 公司的工业激光器模块。比较而言, MMHEL 样机可能因 50 kW 激光器体积较大以及空间限制, 移除了传统火力武器。由于装甲车空间有限, 在研制过程中承包商不得不对斯特瑞克装甲车进行部分改造。

表 2 DE M-SHORAD 系统单元参数

Table 2 Unit parameters of DE M-SHORAD system

参数	MEHEL	MMHEL
作战光源	IPG公司5 kW商用光纤激光器, (之后升级到10 kW、18 kW)	IPG公司50 kW光纤激光器 (或洛·马公司50 kW光纤激光器)
束控和发射单元	大约10 cm口径的发射望远镜, 低抖动精确指向和跟踪系统	雷神公司的多光谱仪
探测与跟踪单元	目标捕获用的红外宽视场相机, 目标精跟踪用的红外窄视场相机和Ku波段雷达	光电/红外传感器、 激光指示器和激光照明器
操作界面	计算机接口	计算机接口
总控单元(BMC3I)	机动航空火力集成作战运行软件	机动航空火力集成作战运行软件
电力	28 V直流电池	未披露
热管理	使用聚乙二醇/水混合物进行先进蒸汽压缩	使用聚乙二醇/水混合物进行先进蒸汽压缩
反无人机移动集成能力组件	拥有传统防空火力武器	无

2.5 毁伤能力

作战中高能激光对目标的破坏,主要是激光束产生的热使目标加热、烧蚀、熔化、诱导爆炸、燃烧或致盲。目标材料的破坏阈值常用功率密度作为判定指标。对于激光器输出功率为 P 、发射口径为 D 、射程为 L ,激光波长为 λ 、光束质量为 β 的聚焦光束,激光在目标上的远场功率密度可统一为^[21]

$$I = \frac{0.84\tau P}{\pi R^2} = \frac{0.84\tau P}{\pi L^2 \left[\left(1.22\beta \frac{\lambda}{D} \right)^2 + \left(1.22 \frac{\lambda}{r_0} \right)^2 + \sigma \right]} \quad (1)$$

式中: σ 为光束发射器的跟踪精度; 大气透射率 τ 和大气相干长度 r_0 分别与大气能见度和大气湍流强度有关。由式(1)可知,当大气湍流效应可忽略时,激光输出功率越大、波长越短、光束质量越好,激光的打击能力越强。

MEHEL 和 MMHEL 样机的毁伤目标为无人机,无人机的蒙皮材料大都为复合材料,已有文献通过研究^[22-23],得到了复合材料的激光毁伤阈值是 18.7 W/cm²,并且复合材料的质量烧蚀率随着激光辐射功率的提高而增大。MEHEL 样机采用 IPG 公司 5 kW 单模激光器为作战光源,根据试验经验,表 1 中光纤激光器光束参数积 BPP = 2.2 mm² × mrad,其光束质量等效于 $\beta_0 = 3.67$ 。假设激光经过内部光学链路到达发射望远镜处光束质量退化为 $\beta = 5$,根据表 1 参数,在一般大气湍流强度下,取大气湍流折射率结构常数 C_n^2 为 10^{-15} m^{-2/3},大气能见度取 15 km^[6],则 MEHEL 样机的最大射程约为 $L = 0.77$ km,与外媒报道基本一致。MMHEL 样机采用 IPG 公司 50 kW 多模激光器为作战光源,假设雷神公司多光谱仪的发射口径为 30 cm,发射望远

镜处光束质量退化为 $\beta = 9$,在相同大气情况下,其最大射程约为 $L = 4.8$ km。

MEHEL 和 MMHEL 样机的电力供应,可以选择标准 220 V 电源插座、军用车辆上的发电机或便携式电池组。在持续供电下可无限次发射激光,在纯电池供电下 MEHEL 样机能完成两轮发射^[12],而 MMHEL 样机可持续出光 2 min^[24]。

目前为减小体积,提高系统坚固性,战术激光武器一般不含自适应光学单元,因此其作战性能受大气影响较大。美国海军研究实验室测试了 4 路光纤激光组束对 3.2 km 外目标的辐射效果,发现在多公里传播距离和中、高强度湍流下,不同光束合成产生的激光束,在目标上的能量几乎没有区别^[25]。这从式(1)也可以看到,当大气湍流效应不可忽略时,大气相干长度 r_0 减少,导致光束质量 β 对激光打击能力 I 的影响降低。未来可考虑通过调节子束相位^[26-28]来抑制大气湍流像差中的低阶项,从而提高战术激光武器的作战能力。

3 技术进展

3.1 MEHEL 进展

第一代 MEHEL 装配了 2 kW 激光器和 10 cm 口径光束发射器,2016 年 4 月在锡尔堡参加了卓越机动中心主办的 2016 年机动火力集成实验(maneuver fires integration experiment 2016, MFIX-16),在数百米之外击落空中无人机,耗时 15 s,演习期间总共击落了 23 架小型旋转翼无人机中的 21 个目标。

2016 年 12 月,MEHEL 样机的激光器升级为 5 kW 系统,同时又集成了 Ku 波段雷达和反无人机

移动集成能力组件,使其能够自动检测和跟踪目标。除硬件升级外,系统软件也进行升级,可以实现移动射击功能。2017年3月~4月,5 kW级MEHEL样机参加了联合突发威胁防御组织主办的反无人机硬杀伤挑战赛,在此期间承包商操作员击毁了50余架小型旋转翼无人机,并首次打击了固定翼无人机系统,如图9所示^[29]。此后,士兵在锡尔堡接受MEHEL样机的操作培训,并在2017年4月机动火力集成实验(MFIX-17)期间击毁了一些小型旋转翼和固定翼无人机。其中士兵首次操作便击落1架无人机,显示了样机操作简便。2018年,第2“斯特瑞克”骑兵团在德国南部格拉芬沃尔训练基地使用5 kW级MEHEL样机开展了实弹射击。



图9 MEHEL样机对无人机的摧毁数量

Fig. 9 Number of UAVs destroyed by MEHEL prototype

之后MEHEL样机再次升级到10 kW,以增大有效射程或减少相同射程下目标毁伤所需的时间,10 kW级MEHEL样机参加2018年机动火力集成实验(MFIX-18)和联合作战人员评估。

总之,美国陆军在推进DE M-SHORAD计划中,不断通过一系列演示试验,深入发展对装甲车载激光武器的作战需求,并在试验中不断完善武器系统。MEHEL样机的推出,不仅减少了DE M-SHORAD计划的技术风险,而且还能使战士提前获得高能激光系统的实践操作经验,并支持军方对TTPS和作战概念的开发。美国陆军原计划2018年将MEHEL样机升级到18 kW^[7],目前尚未查到后续进展。

3.2 MMHEL进展

MMHEL是一套基于斯特瑞克装甲车的50 kW级激光演示器,美国陆军打算在2018~2021财年研发MMHEL样机,并希望在2022财年后将其变成为采购项目。2022年10月,美国陆军采购方式进行了调整,M-SHORAD-增量2将于2025财年从RCCTO过渡到陆军导弹和空间项目执行官员M-SHORAD产品办公室,由M-SHORAD产品办公室主持竞争性采购,以支持批量化生产。MMHEL项目的时间发展脉络如图10所示。在图10中,虚线表示“暂时搁置”。

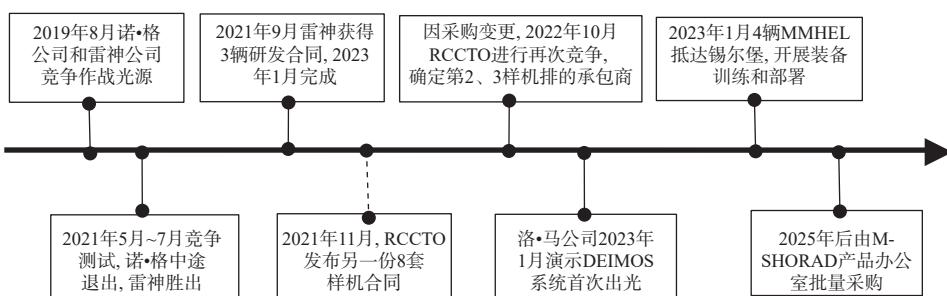


图10 MMHEL项目立项、实施及部署时间进展

Fig. 10 Schedule of project approval, implementation and deployment of MMHEL

2019年8月,RCCTO选择科尔德技术公司作为主要承包商,由诺·格公司和雷神公司竞争开发了50 kW激光器子系统。2021年5月~7月,诺·格公司和雷神公司在锡尔堡开展MMHEL样机的竞争性测试,虽然诺·格公司中途退出,但是美国陆军还是在各种作战场景下,成功完成MMHEL样机性能的测试,并最终选定雷神公司的50 kW激光器作为样机的作战光源。

2021年9月,RCCTO签署1.239亿美元合同,

订购3套MMHEL系统,原计划2022年9月交付,推迟数月后,于2023年1月将4套MMHEL系统完成排级单位组建,交付给位于锡尔堡的美国陆军,开展装备训练和部署。2023年4月14日在亚利桑那州尤马靶场上,4套MMHEL系统开展实弹测试,在短时间内成功击落了多架第1、2、3类无人机,但在摧毁RAM方面仍存在一些挑战^[21]。

2021年11月,美国陆军与科尔德技术公司和雷声公司签订另一份合同,额外订购8套MMH-

EL 系统: 2023 年交付 4 套, 2024 年交付剩余 4 套, 以组建第 2、第 3 排。该公司将对 MMHEL 系统进行设计升级, 以减轻整体重量并提高可维护性。2022 年 10 月, 鉴于采购主体单位的变更, RCC-TO 打算经过再一次竞争, 重新确定第 2、第 3 排的承包商, 以便在 2025 年移交给 M-SHORAD 产品办公室时能进行批量化生产。前期由于电源和热管理系统出现故障, 诺·格公司在 2021 年竞争测试中途退出竞标, 导致竞争不够充分。与此同时, 洛·马公司也在为美国陆军 DE M-SHORAD 计划研制出相应的 50 kW 级 DEIMOS 激光武器。

4 结论

随着蜂群无人机、RAM 等新兴非对称威胁的日益加剧, 为提高作战小分队的伴随防空能力, 美国陆军 2016 年开始研制装甲车载激光武器。从目前信息判断, 目前美国只有 1 套 MEHEL 样机和 4 套 MMHEL 系统, 已形成排级作战能力, 可编入旅级作战部队执行作战行动, 提供防空和火力支援。MMHEL 系统的交付, 为美军增加了下一代武器能力, 将改变当代战场上的游戏规则, 代表美国陆军现代化的一个转型里程碑。除美国外, 德国 2015 年也推出了“拳击手”装甲车载激光武器, 但未披露任何试验信息。2019 年, 以色列披露了装甲车载激光武器的研制计划, 最近英国也想直接利用美国技术发展本国的装甲车载激光武器。

本文详细分析了美国陆军 DE M-SHORAD 计划, 通过分析可知, DE M-SHORAD 系统采用最佳组件, 通过快速原型方法, 去实现激光武器系统在装甲车上的集成。为降低技术风险, 该计划在发展方式上分为 2 kW~5 kW 级 MEHEL 和 50 kW 级 MMHEL 2 个研制阶段, 对无人机的最大射程分别约为 0.77 km 和 4.8 km。

美军高度重视这次转型 MMHEL 系统。据最新报道^[30], 美军为一个排的 MMHEL 装备, 在 2022 年 3 月重建了美军第 60 防空炮团第 4 营, 并于 2022 年 11 月将该部从第 32 陆军防空反导司令部划拨到第 1 装甲师, 之后该部于 2023 年 6 月重建三角洲炮兵连, 直接接管 MMHEL 装备。

目前, 美国陆军正在不同作战环境中利用装甲车载激光武器, 获取在防御 RAM 和无人机系统等应用中的试验数据, 完善不同作战目标的毁伤数据库, 将在士兵训练中评估这些尖端武器装备的

作战能力和局限性, 未来可能将士兵建议反馈到装备系统的升级改造中。近期美国陆军将通过引入新的竞争, 对目前 50 kW 级系统进行技术升级, 同时一方面降低系统开发成本, 另一方面也加大未来产品的生产潜力。远期随着越来越多的 MMHEL 排级装备陆续移交给部队, 美国陆军将能更好地开发成熟的 TPPS 和作战概念, 演练战区级甚至战役级作战空间管理, 将 MMHEL 系统、IFPC-HEL 系统等下一代武器作为关键单元, 无缝集成到陆军现有的综合分层防空反导体系中。

参考文献:

- [1] 刘晓明, 葛悦涛. 美国陆军首次成功试验车载激光武器拦截迫击炮弹和无人机[J]. 飞航导弹, 2014(2): 12. LIU Xiaoming, GE Yuetao. The US army has successfully tested its first vehicle-borne laser weapon to intercept mortar shells and drones[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2014(2): 12.
- [2] 任国光, 伊炜伟, 屈长虹. 高功率光纤激光器及其在战术激光武器中的应用[J]. 激光与红外, 2015, 45(10): 1145-1151. REN Guoguang, YI Weiwei, QU Changhong, et al. High-power fiber lasers and their applications in tactical laser weapons[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(10): 1145-1151.
- [3] 程勇, 郭延龙, 唐璜, 等. 战术激光武器的发展动向[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53: 110004-1-11. CHENG Yong, GUO Yanlong, TANG Huang, et al. Development trend of tactical laser weapons[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53: 110004-1-11.
- [4] 李朝龙, 李明辉, 陈玉华. 激光武器在陆军全域作战中的运用[J]. 激光与红外, 2020, 50(5): 515-520. LI Chaolong, LI Minghui, CHEN Yuhua. The application of laser weapon in the army's whole area operation[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(5): 515-520.
- [5] 丁宇, 杨军, 郑荣山, 等. 俄罗斯“佩列斯韦特”激光武器系统深度解析[J]. 光电技术应用, 2020, 35(5): 6-12. DING Yu, YANG Jun, ZHENG Rongshan, et al. Analysis of Peresvet laser weapon system in Russian in-depth[J]. Electro-optic Technology Application, 2020, 35(5): 6-12.
- [6] 黄沛, 曹国辉, 张海晶, 等. 美国陆军车载战术激光武器发展分析[J]. 激光技术, 2022, 46(6): 817-822. HUANG Pei, CAO Guohui, ZHANG Haijing, et al. Development analysis of US army vehicle tactical laser weapons[J]. Laser Technology, 2022, 46(6): 817-822.

- [7] 梓文. 2017 年美国陆军车辆可能配装激光武器[J]. 兵器材料科学与工程, 2017, 40(1): 118.
ZI Wen. US army vehicles could be fitted with laser weapons in 2017[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2017, 40(1): 118.
- [8] ESHEL T. Lifting the veil of Israel's classified laser weapon program[EB/OL]. (2020-01-08)[2023-08-25]. https://defense-update.com/20200108_hel_israel.html.
- [9] SYDNEY J, FREEDBERG J R. Drone-killing laser stars in army field test[EB/OL]. (2017-05-11)[2023-08-25]. <http://breakingdefense.com/2017/05>.
- [10] OSBORN K. Fast-developing high energy laser weapons are increasingly able to expand the attack envelope for army ground units facing enemy air attacks[EB/OL]. (2023-2-1)[2023-08-25]. <https://warriormaven.com/land-army-strykers-drones-laser-directed-energy-maneuver-short-range-air-defensee>.
- [11] 易亨瑜, 齐予, 黄吉金. 舰载激光武器的研制进展[J]. 激光技术, 2015, 39(6): 834-939.
YI Hengyu, QI Yu, HUANG Jijin. Development of ship-based laser weapons system[J]. Laser Technology, 2015, 39(6): 834-939.
- [12] PRIGG M. Watch Boeing test radical new 'silent strike' laser weapon small enough to fit in a suitcase but powerful enough to blast a drone out of the air[EB/OL]. (2015-08-27)[2023-08-25]. <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3213365>.
- [13] GAIL O. IPG photonics offers world's first 10 kW single-mode production laser[EB/OL]. (2009-06-17) [2014-10-11]. <http://www.laserfocusworld.com/articles/2009/06>.
- [14] RUDOLF P, JÜRGEN Z, FRANZ G, et al. High-power beam combining-a step to a future laser weapon system[J]. SPIE, 8547: 854708.
- [15] AFZALL R S, HONEA E, MATTHIAS S L, et al. Spectrally beam combined fiber lasers for high power, efficiency and brightness[J]. SPIE, 8547: 854706.
- [16] IPG's high power CW fiber lasers[EB/OL]. (2023-08-11)[2023-08-25]. <https://www.ipgphotonics.com/en/products/lasers>.
- [17] BILL S. High power fiber laser technology [EB/OL]. (2013-09-10) [2013-10-11]. <http://www.ipgphotonics.com>.
- [18] THOMAS N. First laser weapon for a fighter delivered to the air force[EB/OL]. (2022-7-11)[2023-08-25]. <https://www.thedrive.com/the-war-zone>.
- [19] THOMAS C. Lockheed martin demos 50 kW anti-aircraft frickin' laser beam[EB/OL]. (2023-1-26)[2023-08-25]. https://www.theregister.com/2023/01/26/lockheed_martin_lights_up_50kw.
- [20] STUDI O. Raytheon technologies powers Japan's defence upgrade with innovative counter-strike and air dominance solutions[EB/OL]. (2023-03-13)[2023-08-25]. <https://www.shephardmedia.com/news/air-warfare>.
- [21] 王辉华. 固态激光武器系统指标设计与分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2016, 31(5): 573-578.
WANG Huihua. Index design and analysis of solid state laser weapon systems[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2016, 31(5): 573-578.
- [22] 王贵兵, 刘仓理. 凯芙拉环氧复合材料烧蚀阈值实验研究[J]. 激光技术, 2003, 27(5): 457-459.
WANG Guibin, LIU Cangli. Experimental research of the ablation threshold of Kevlar /epoxy[J]. Laser Technology, 2003, 27(5): 457-459.
- [23] 郭亚林, 梁国正, 丘哲明, 等. 激光参数对碳纤维复合材料质量烧蚀率的影响[J]. 复合材料学报, 2006, 23(5): 84-88.
GUO Yalin, LIANG Guozheng, QIU Zhemin, et al. Effect of laser parameters on mass ablative rate of carbon fiber reinforced composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2006, 23(5): 84-88.
- [24] JEN J. Army short-range air defense laser prototypes take down drones at Yuma[EB/OL]. (2023-04-14)[2023-08-25]. <https://www.defensenews.com/land/2023/04/13>.
- [25] RAJESH U. Laser beam combining technologies are enabling high power laser directed energy weapons on trucks, warships and airplanes[EB/OL]. (2019-6-27)[2023-08-25]. <https://idstch.com/technology/photonics>.
- [26] 易亨瑜, 苏毅, 黄珊, 等. 矩形光束合成的建模与实验验证[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 472-475.
YI Hengyu, SU Yi, HUANG Shan, et al. Modeling and experimental validating on array combination of rectangle laser beams[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(3): 472-475.
- [27] 易亨瑜, 苏毅, 唐淳, 等. 矩形光斑阵列合束的锁相闭环分析[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1253-1258.
YI Hengyu, SU Yi, TANG Chun, et al. Coherent combination analyses of rectangle spot beams array with phase-locked closing-loop[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(5): 1253-1258.
- [28] 易亨瑜, 齐予, 宋伟, 等. 子束排列方式对固体激光器光

- 束合成特性的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(7): 1735-1740.
- YI Hengyu, QI Yu, SONG Wei, et al. Effect of beamlets arrange on beam combination characteristics of solid-state laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(7): 1735-1740.
- [29] TREVITHICK J. The US army's laser-armed stryker has blasted dozens of drones[EB/OL]. (2017-04-17)[2023-08-25]. <http://www.thedrive.com/the-war-zone/9345>.
- [30] US Army. Groundbreaking laser prototype systems delivered to 4th-60th air defense artillery regiment[EB/OL]. (2023-09-21)[2023-11-20]. <https://www.defense-aerospace.com/prototype-laser-air-defense-weapons-delivered-to-us-army>.