

文章编号:1001-5078(2024)10-1499-08

· 综述与评论 ·

## 美国陆军机动近程激光防空系统解析

刘磊<sup>1,2</sup>, 华卫红<sup>1,2</sup>, 王泽锋<sup>1,2</sup>

(1. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410000; 2. 国防科技大学 南湖之光实验室, 湖南 长沙 410000)

**摘要:**美国陆军机动近程激光防空系统是公开报道的全球首款正式列装部队的伴随式战术激光防空系统。该系统主要为了应对目前美国陆军部队面临的中低空无人机、迫击炮等威胁。文中根据公开报道的信息,对该系统研制进程、组成及主要功能进行了梳理,对系统主要技术指标进行了总结和分析。结合已有的系统相关参数及激光系统理论分析模型,详细分析了该型系统所具备的毁伤能力及在陆军伴随式防空作战中为有效应对无人机威胁可采用的运用方式。本文为深入理解该类型战术激光防空系统在未来战场的作战方式及所能发挥的作用提供参考。

**关键词:**美国陆军;机动近程;激光防空系统

中图分类号:TJ95;TN249 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2024.10.001

## Analysis of the US army laser maneuver short-range air defense system

LIU Lei<sup>1,2</sup>, HUA Wei-hong<sup>1,2</sup>, WANG Zhe-feng<sup>1,2</sup>

(1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410000, China;  
2. Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410000, China)

**Abstract:**The US Army's laser maneuver short-range air defense system is the world's first officially deployed tactical laser air defense system. It is mainly designed to address the current threats faced by the US Army, such as low to medium altitude drones and mortars. This article reviews the development process, composition and main functions of the system, and summarizes and analyzes the main technical indicators of the system. The paper theoretically calculated the destructive ability of this type of system and analyzed the deployment methods that the system can adopt to effectively respond to the threat of drones in the accompanying air defense operations of the army. The article provides a reference for an understanding of the potential methods and roles that this type of tactical laser air defense system can play in future battlefields.

**Keywords:**US army; maneuver short-range; laser air defense system

### 1 引言

近年来,以无人机为代表的低慢小目标在纳卡地区冲突、俄乌冲突等多个军事行动中发挥了越来越重要的作用。美国陆军在海外部队受到了作战对

手空中力量的严峻威胁,为此美国陆军开始重新定义其野战防空概念,并制定新的发展路线图和相应的装备。2019年,美陆军公布建设分层防空反导防御体系的计划<sup>[1]</sup>。这其中包括了以机动近程防空

系统 (Maneuver Short-Range Air Defense, M-SHORAD) 为平台集成高能激光系统的定向能机动近程防空系统 (Direct Energy M-SHORAD, DE-MSHORAD), 以满足美陆军应对诸如中空无人机、迫击炮等威胁的迫切需要。

本文详细梳理了机动近程激光防空系统 (DE-MSHORAD) 的研制情况, 介绍了该系统的组成及主要功能, 并对系统涉及的关键性能及作战应用进行了理论分析, 为理解该型武器作战能力提供了依据。

## 2 系统研制概况

机动近程激光防空系统是基于“斯特瑞克” A1 8×8 轮式装甲车底盘的陆基轮式野战激光近程防空系统。该系统与装甲旅战斗队协同进攻, 使其免受敌方无人机、巡飞弹等中空来袭目标的威胁。此外, 该系统还能用于执行情报、监视和侦察等任务。

系统起源于美国陆军 2018 年发布的“多任务高能激光器” (Multi-Mission High Energy Laser, MMHEL) 项目。2018 ~ 2021 财年, 美国防预算中共安排了近 1.6 亿美元经费用于系统的研制与试验工作, 具体明细如表 1。

表 1 项目年度经费投入及工作计划

Tab. 1 Annual funding investment and plan for the project

年度	经费执行(百万)	主要计划开展工作	备注
2018	78.68	子系统和全系统方案设计	文献[2]
2019	54.74	子系统设计审查; 试验原理样机系统硬件研制与集成	文献[3]
2020	17.88	全系统硬件集成, 开展系统软件设计集成, 准备全系统演示验证试验	文献[4]
2021	7.84	完成全系统软硬件集成、全系统性能测试及演示验证试验	文献[5]

2019 年 8 月, 美国陆军开始定向能机动近程防空系统研制与测试工作。主要研制进展情况如

表 2。

表 2 项目研制进展情况

Tab. 2 Progress of the project

时间	内容	备注
2019 年 8 月	美陆军快速能力和关键技术办公室 (RCCTO) 选择 Kord 技术公司作为项目主承包商。该公司将项目激光武器模块的分包合同授予雷神公司和诺斯罗普·格鲁曼公司。	文献[6]
2021 年 5 月	完成 DE-MSHORAD 系统原型机研制	文献[7]
2021 年 8 月	通过作战测试与评估, 美国陆军最终选定雷神公司开发该系统的激光武器模块, 并签订了 1.23 亿美元合同。	文献[8]
2022 年 4 月	美国陆军在白沙导弹靶场对该系统开展为期 4 周实弹演训, 完成了该武器系统的作战评估。	
2023 年 3 月	美国陆军第 1 装甲师第 60 防空炮兵团第 4 营完成了 DE-MSHORAD 新装备训练。	文献[9]
2023 年 9 月	美陆军第 1 装甲师第 60 防空炮兵团第 4 营接收第一批 4 套 DE-MSHORAD 系统, 标志着该型系统进入实战部署阶段。	
2024 年 4 月	系统部署到中东地区, 在真实战场环境中进行能力测试。	文献[10]

## 3 系统基本情况

DE-MSHORAD 系统主要由高能激光光子系统、目标探测引导子系统、指控通信子系统、电源和热管理子系统、斯特瑞克 A1 8×8 轮式装甲车平台组成, 系统外观如图 1。



图 1 DE-MSHORAD 系统外观

Fig. 1 DE-MSHORAD system

高能激光光子系统是 DE-MSHORAD 系统的核心, 主要由激光器和光束定向器组成。激光器参考 MMHEL 项目公开的信息, 采用 IPG 公司激光器, 由 20 到 25 个光纤激光放大器模块合束实现 50 kW 功率输出<sup>[11]</sup>。光束定向器采用雷神公司多光谱瞄准

系统 (Multi-Spectral Targeting System B, MTS-B) 结构,可以实现远程空中监视、高空目标截获、跟踪、测距等功能<sup>[12]</sup>。

目标探测引导子系统主要包括 Ku720 有源相控阵雷达<sup>[13]</sup> 和 LOCUST 目标捕获与跟踪子系统 (LOCUST Independent Target Acquisition and Tracking System, LOCUST\_ITATS)<sup>[14]</sup>。Ku720 有源相控阵雷达源自雷神公司的 KuRFS 系统,是一种采用氮化镓 (GaN) 天线的 Ku 波段雷达,能有效探测 8000 m 外的无人机、迫击炮弹等小型目标。LOCUST 目标捕获与跟踪系统集成了可见光相机、短波红外相机、中波红外焦平面阵列、激光指示仪、激光测距仪等装置的综合光电探测系统,采用宽视场 (FOV) 红外传感器用于捕获目标和窄视场 (FOV) 红外传感器用于精密跟踪目标。能够捕捉和跟踪 300 ~ 5000 m 远、高 10 ~ 3000 m 的巡航导弹、武装直升机或无人机目标。

指控通信子系统实现自动、半自动和手动模式下的目标获取、瞄准点选择与管理功能,且能让系统与美国陆军现役使用的作战管理系统进行互联互通。

电源和热管理子系统实现对其他子系统的供电和冷却,保证系统具备较强的可持续作战能力。

斯特瑞克 A1 8X8 轮式装甲车平台为最新第三代的 DVH-A1 型载车平台<sup>[13]</sup>,额定总质量约 28.5 t,新的 450 马力 Caterpillar C9 发动机提供更充足的电力,此外改进的双 V 型车底以加强车辆防雷性能,配备三名乘员,最高行驶速度 92 km/h,最大行程范围为 550 km。

美国 KBR 子公司科尔德技术公司 (Kord) 是该系统总体承包商,负责全系统集成,并承担系统的电源和热管理子系统研制。雷神公司负责提供高能激光光子系统 (包括激光器和光束定向器) 以及 Ku720 有源相控阵雷达。BlueHalo 公司负责提供 LOCUST 目标捕获与跟踪子系统。加拿大通用动力公司负责提供“斯特瑞克”A1 轮式装甲车。

主要技术参数如表 1 所示。

表 3 系统主要技术参数

Tab. 3 Main technical parameters of the system

序号	参数名称	参数大小	备注
1	作用目标类型	1~3 类无人机, RAM	文献[15]
2	目标探测距离/km	8	文献[13]
3	激光总功率/kW	50	文献[15]
4	激光波长/ $\mu\text{m}$	1	/
5	最大回转速度/ $(\text{rad} \cdot \text{sec}^{-1})$	3.0	文献[15]
6	视轴稳定精度/ $\mu\text{rad}$	优于 10	文献[16]
7	激光出光总时长/s	120	
8	目标监视时长/h	8	
9	尺寸包络 (L × W × H)/ $\text{mm}^3$	750 × 750 × 750	
10	光束定向器	质量/kg	135
11	激光器模块	尺寸包络 (L × W × H)/ $\text{mm}^3$	1500 × 1000 × 1500
12	激光供电	质量/kg	1150
13	模组	尺寸包络 (L × W × H)/ $\text{mm}^3$	1500 × 750 × 1500
14	散热模组	质量/kg	540
15		尺寸包络 (L × W × H)/ $\text{mm}^3$	1500 × 2000 × 1000
16	电源模组	质量/kg	950
17		尺寸包络 (L × W × H)/ $\text{mm}^3$	1500 × 1500 × 500
18		质量/kg	500
19	激光系统载荷总质量/t	3.28	/
20	系统核定成员数量	3	
21	最高行驶速度/ $(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	92	
22	最大行驶距离/km	550	文献[13]
23	系统总重量/t	27.22	
24	尺寸包络 (L × W × H)/ $\text{mm}^3$	6.95 × 2.72 × 2.64	

## 4 系统关键参数与性能分析

### 4.1 系统发射口径分析

系统光束定向器外形包络尺寸为<sup>[15]</sup>: 750 mm × 750 mm × 750 mm, 结合跟瞄发射系统外形结构布局, 可估算光束定向器发射窗口尺寸约为 500 mm × 500 mm, 如图 2 所示。

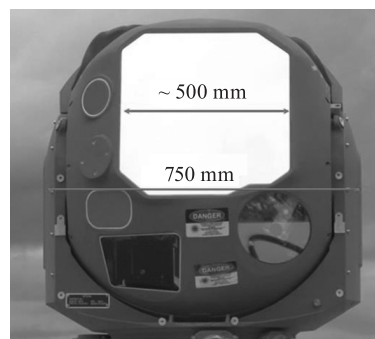


图 2 光束定向器外观

Fig. 2 Appearance of acquisition tracking pointing system

DE-MSHORAD 系统激光器是由原来 4~6 路激光器 (单路功率 2~3 kW) 通过空间合束实现 10 kW 输出升级为 20~25 路激光器空间合束输出

50 kW<sup>[11]</sup>,采用同轴发射结构光束定向器发射激光。根据以上报道信息具体分析该系统可能采用的合束方案有两种。

方案一是根据报道的由20~25路激光直接通过光束定向器空间合束输出,激光器采样2~3 kW 光纤激光器。由于光源是通过非相干合束方式实现高功率发射的,单束激光通过系统主镜按照一定占比大小进行发射,所以还需要对系统发射子口径进行分析。

考虑到该合束方式是各子光束在远场的能量叠加,系统设计时一般先计算不同发射子口径 $D_{\text{子}}$ 与发射功率下单束光的远场光斑功率密度,再根据实际合束子光束数量(N)评估总的到靶功率密度大小。参考文献[17],子束功率与发射口径的关系满足 $D_{\text{总}} \approx \sqrt{N}D_{\text{子}}$ ,可计算得到子口径大小约为:8~11 cm,子口径发射光束质量 $\beta$ 在5~8左右。

方案二是光源采用4路激光基于光纤合束器实现约8.4 kW 输出,然后再通过6路空间合束后由同轴系统发射,发射子口径估计在15~19 cm左右,子口径发射光束质量 $\beta$ 在5~8左右。

#### 4.2 系统能力与作战应用分析

##### (1) 主要分析模型

DE-MSHORAD 系统激光能量通过大气定向传输到目标表面形成对目标有效杀伤,大气对激光效果的影响主要表现在线性效应和非线性效应两个方面:线性效应主要包括吸收和散射造成的能量衰减,大气湍流造成的光束扩展、光束漂移等;非线性效应主要包括热晕效应、大气击穿等。

最终激光经过大气传输后对目标的毁伤判定由激光到靶功率密度和能量密度两指标决定。当这两个指标皆大于目标毁伤阈值时,激光系统实现对目标的毁伤。表4为无人机典型材料的激光毁伤阈值<sup>[18]</sup>。

根据公开资料 DE-MSHORAD 系统主要以1~3类无人机构为作战目标<sup>[15]</sup>。美国防部将军用无人机划分为5个类别,对应的每个类别无人机参数如表5<sup>[19-20]</sup>。

根据美军公开报道的系统实战测试更多采用商用低成本无人机<sup>[21]</sup>,对于军用无人机往往采用更高成本的玻璃纤维、碳纤维复合材料作为壳体,对其实现毁伤的阈值将进一步提高。对于1类无人机毁伤功率密度阈值选择100 W/cm<sup>2</sup>,辐照时长为5 s。对2~3类无人机毁伤功率密度阈值选择200 W/cm<sup>2</sup>,辐照时长为10 s。

表4 无人机典型材料激光毁伤阈值

Tab.4 Laser destruction threshold of UAV materials

典型材料	毁伤阈值
玻璃纤维	200~300 W/cm <sup>2</sup> ,5 s
碳纤维	200~500 W/cm <sup>2</sup> ,10 s
薄铝板	100 W/cm <sup>2</sup> ,5 s
泡沫、玻璃钢材料、航模轻木	100 W/cm <sup>2</sup> ,2~6 s
电子调速器	100 W/cm <sup>2</sup> ,7 s
电池	100 W/cm <sup>2</sup> ,17 s

表5 无人机分类及对应典型壳体材料

Tab.5 UAV classification and materials

类别	最大起飞重量/kg	高度/m	空速/(km·h <sup>-1</sup> )	典型壳体材料
1	<9	<365 AGL	<185	泡沫、轻木、玻璃钢材料
2	10~25	<1000 AGL	<460	碳纤维、玻璃纤维复合材料
3	25~600	<5500 MSL	<460	
4	>600	<5500 MSL	不限	
5	>600	>5500 MSL	不限	

AGL:离地高度;MSL:平均海平面

考虑 $1/e^2$ 截断高斯光束远场,在传输远场不同半径 $r$ 范围内的平均功率密度为<sup>[22-23]</sup>:

$$\langle I(r) \rangle = nP_0 T \{1 - \exp[-2r^2/R_{\text{all}}^2]\} / (\pi r^2) \quad (1)$$

这里不考虑空间耦合效率和耦合精度的影响,式中 $n$ 为空间合束路数, $P_0$ 为系统激光出口子输出功率, $T$ 为激光在传输路径上的大气透过率, $R_{\text{all}}$ 为传输大气作用下总光斑扩展半径,含总能量86.5%的环围区域( $r = R_{\text{all}}$ )的平均功率密度为:

$$\langle I(R_{\text{all}}) \rangle = 0.865 P_0 T / (\pi R_{\text{all}}^2) \quad (2)$$

远场光斑的86.5%环围能量半径 $R_{\text{all}} = 0.6366 \lambda L \beta_{\text{all}} / D_{\text{子}}$ ;  $\beta_{\text{all}}$ 为远场光斑扩展倍数; $\lambda$ 为激光波长; $L$ 为激光传输斜距,单个发射子口径 $D_{\text{子}} = 2R_{\text{子}}$ 。 $R_{\text{子}}$ 为子光束半径。

根据文献[24]分析,光纤激光在近距离(2~5 km)传输时,采用较低功率光束合成能够有效缓解热畸变。DE-MSHORAD 系统单路功率2~3 kW,以下分析大气影响只考虑能量衰减及湍流对光斑扩展。

DE-MSHORAD 系统激光斜程传输时采用拟合公式(3)计算传输透过率<sup>[25]</sup>。

$$T = \exp\{-\sec\theta(K/V_M)[1 - \exp(-0.835H)]\} \quad (3)$$

式中,  $\theta$  为传输天顶角;  $H$  为传输高度 (km);  $K$  为区域参数 (乡村 2.828; 城市 3.132; 沙漠 2.496);  $V_M$  为地面的大气能见度 (km)。

在不考虑系统抖动影响, 光束扩展关系为<sup>[26-27]</sup>

$$\beta_{\text{all}}^2 = \beta_0^2 + 0.925(D_{\text{子}}/r_0)^2 \quad (4)$$

$\beta_0$  为系统发射出口光束质量, 大气相干长度<sup>[28]</sup>

$$r_0 = \left[ 0.423 \sec \theta k^2 \int_0^H C_n^2(h) dh \right]^{-3/5} \quad (5)$$

式中,  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $C_n^2(h)$  为大气折射率结构常数。常用大气折射率结构常数划定湍流的强弱<sup>[22]</sup>:  $C_n^2 = 6.4 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$  时为弱湍流;  $C_n^2 = 1.6 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$  时为中湍流;  $C_n^2 = 2.5 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$  时为强湍流。

(2) 分析结果

大气湍流条件分别选择  $C_n^2 = 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$  弱湍流大气条件和  $C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$  中等湍流大气条件。能见度  $V_M$  优于 23 km。考虑系统对目标跟瞄俯仰角变化范围在  $1^\circ \sim 85^\circ$ 。当系统采用合束方案一时, 单路输出功率 2.5 kW, 20 路合束, 系统发射子孔径选择估算最大值 11 cm, 系统出口光束质量  $\beta_0$  选 5。当系统采用合束方案二时, 单路输出功率 8.4 kW, 6 路合束, 系统发射子孔径选择估算最大值 19 cm, 系统出口光束质量  $\beta_0$  选 5。

分析如图 3 的作战场景。DE-MSHORAD 系统 B 采用伴随方式防护目标 A。A 和 B 之间间隔距离为  $L$ 。以下分别考虑无人机从图 3 中 1~8 方向对 A 目标实施攻击时系统的防护能力。假设 1 方向无人机的过顶系统 B 前被毁伤。2、3、7、8 方向无人机的过系统 B 过航捷点前被毁伤。4、5、6 方向为过 A 顶前被毁伤。

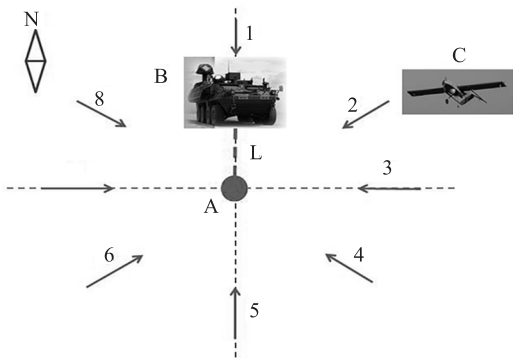


图3 DE-MSHORAD 系统伴随防御示意图

Fig.3 DE-MSHORAD system accompanying defense

下面分析为防护 1~3 类无人机攻击, DE-MS-

HORAD 系统 B 和 A 目标的有效布设方式。对于 1 方向来袭无人机 C 与 A、B 目标三者之间的几何关系, 如图 4。

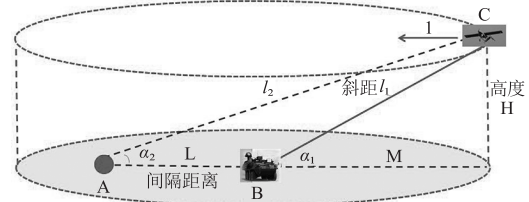
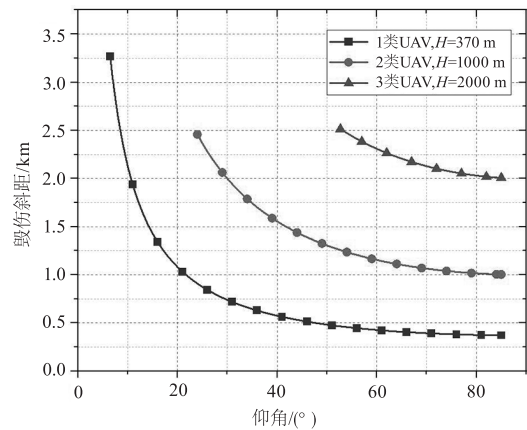


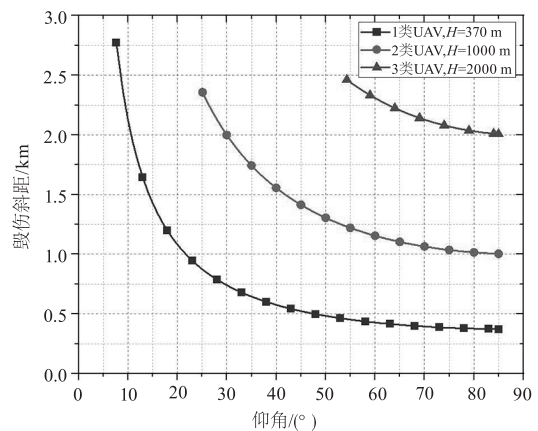
图4 无人机与地面目标的几何关系

Fig.4 Geometric relationship between UAV and ground targets

假设系统 B 采用合束方案一, 针对 1 方向来袭 1~3 类无人机的工作俯仰角  $\alpha_1$  与斜距投影 M 变化关系如图 5。



(a)  $C_n^2 = 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$



(b)  $C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$

图5 采用方案一的系统 B 对 1 方向来袭无人机的俯仰角与斜距投影关系

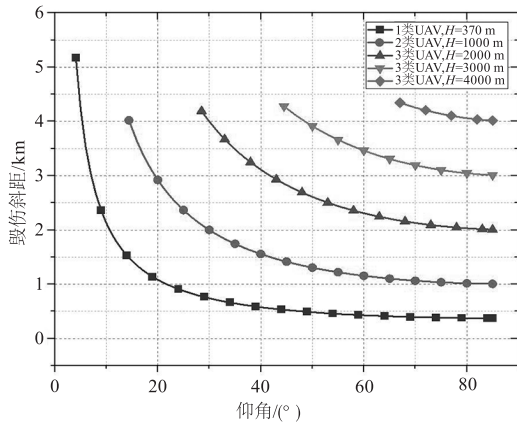
Fig.5 The elevation and slant relationship of the incoming

UAV in direction 1 using system B of scheme one

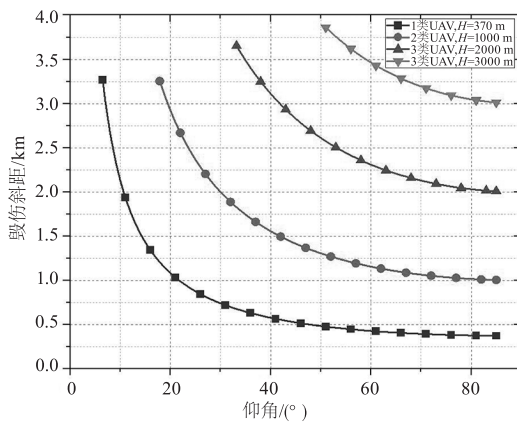
假设系统 B 采用合束方案二, 针对 1 方向来袭 1~3 类无人机的工作俯仰角  $\alpha_1$  与斜距投影 M 变化



关系如图6。



(a)  $C_n^2 = 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$



(b)  $C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$

图6 采用方案二的系统B对1方向来袭无人机的  
工作仰角与斜距投影关系

Fig.6 The elevation and slant relationship of the incoming UAV  
in direction 1 using system B of scheme two

通过以上分析可以看到,采用两套合束方案的系统,都能够对1~2类无人机实现有效毁伤,但无

法对所有三类无人机实现有效杀伤。系统最大毁伤能力为采用合束方案二,能有效应对3000 m以下飞行的三类无人机目标。

考虑无人机横向攻击的场景,如图3中对于3和7方向来袭无人机C与A、B目标三者之间的三维几何关系如图7。目标C飞行高度为H,A与B间布置间距为L,D为C相对B的过顶航捷点, $I_1$ 和 $I_2$ 为系统B针对C不同探测方位角下的斜距。

AB间最大间隔距离L为系统B对C目标过顶航捷点D处的毁伤斜距在地面的投影距离。考虑系统B对无人机斜距小于最大毁伤斜距后,具备一定的交战时间。对于1类无人机,最短交战时长5 s,假设飞行速度为185 km/H,对应飞行距离为257 m;对于2~3类无人机,最短交战时长10 s,假设飞行速度为460 km/H,对应飞行距离为1278 m。

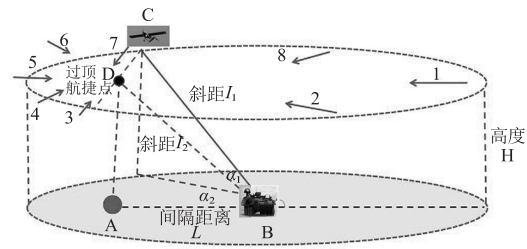


图7 无人机与地面目标的几何关系

Fig.7 Geometric relationship between UAV and ground targets

当无人机从方向5进入系统B毁伤范围后接近D,所需时间大于最短交战时长,可以得到AB间最大间隔距离L为最大毁伤斜距 $I_1$ 的投影距离与最短交战时长下目标飞行距离的差值。针对不同类型无人机,可得最大AB间隔距离L,如表6。

表6 系统B掩护地面目标最大间距

Tab.6 System B covers the maximum distance between ground targets

无人机分类	无人机飞行高度 H/km	方案一:最大间隔距离 L/km		方案二:最大间隔距离 L/km	
		$C_n^2 = 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$	$C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$	$C_n^2 = 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$	$C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$
1类	0.37	2.99	2.48	4.90	2.90
2类	1	0.97	0.85	2.60	1.80
3类	2	0.22	0.16	2.40	1.78
	3	/	/	1.77	1.15

由表6,当系统B采用结构方案一时,针对1类无人机目标,系统B掩护地面目标覆盖半径在2.48~2.99 km;对于2类无人机目标,系统掩护地面目标覆盖半径约0.85~0.97 km;对于飞行高度低于

2 km的3类无人机目标,系统掩护地面目标覆盖半径约0.16~0.22 km。

当系统B采用结构方案二时,针对1类无人机目标,系统掩护地面目标覆盖半径在2.90~

4. 90 km;对于2类无人机目标,系统掩护地面目标覆盖半径1.8~2.6 km;对于飞行高度低于3 km的3类无人机目标,系统掩护地面目标覆盖半径1.15~2.4 km。

如图7,系统B在最大毁伤斜距范围内,对于2和8方向来袭无人机,在过顶A前具备毁伤能力。根据几何关系,5方向的无人机从进入毁伤范围到过顶航捷点D的距离,相对于3、4、6、7方向最短。当最大间隔距离 $L$ 满足5方向来袭无人机的交战时长要求时,必然满足其他四个方向的交战时长要求。

以上分析是针对能见度23 km的分析结果,在实际系统应用中还需要结合战场环境考虑能见度和湍流的变化、激光系统光轴抖动、瞄准偏差等因素影响,AB最大间隔距离将进一步减小。综合以上分析结果,DE-MSHORAD系统针对1、2类无人机具有较好的打击能力,并且具备应对一定规模的1类集群无人机的攻击能力,针对3类无人机只具备部分飞行高度无人机的打击能力。以上是基于系统技术指标开展的系统特性分析,考虑到系统在实际战场条件下的保障和维护需求,以及军用无人机可能采用的抗损防护措施,系统在实际战术对抗环境的作战效能还需要进一步验证。

## 5 总结

车载战术激光防空系统是未来美国陆军发展的重点武器装备之一。目前已经完成了装备的小批量列装,正在逐步推进实战化应用工作。本文通过公开报道的资料信息,对美陆军机动近程激光防空系统性能参数、毁伤能力范围,针对不同类型无人机的防护目标的布设方式进行了理论分析,为进一步深入研究该类型装备在未来战争中可发挥的作用提供了参考。

## 参考文献:

- [1] Wu Shanghui. The US army promotes delivery, test and verification of palletized high energy laser weapons vigorously[J]. Electronic and Electro-optical Systems, 2022, (3):1-4. (in Chinese)  
伍尚慧. 美国陆军大力发展托盘化高能激光武器[J]. 电光系统, 2022, (3):1-4.
- [2] US DoD. Multi-Mission High energy laser(MMHEL) integration and demonstration(BA 4) PE 0604115A (AX7(BA 4)) FY 2019[R]. Washington: US Department of Defense, 2019.
- [3] Multi-Mission High Energy Laser(MMHEL) integration and demonstration(BA 4) PE 0604115A (AX7(BA 4)) FY 2020[R]. Washington: US Department of Defence, 2020.
- [4] Multi-Mission High Energy Laser(MMHEL) integration and demonstration(BA 4) PE 0604115A (AX7(BA 4)) FY 2021[R]. Washington: US Department of Defence, 2021.
- [5] Multi-Mission High Energy Laser(MMHEL) integration and demonstration(BA 4) PE 0604115A (AX7(BA 4)) FY 2022[R]. Washington: US Department of Defence, 2022.
- [6] US army selects kord technologies to lead directed energy initiative[EB/OL]. [2019-08-01]. <https://kordtechnologies.com/news/us-army-selects-kord-technologies-lead-directed-energy-initiative>.
- [7] Kord completes directed energy M-SHORAD prototype[EB/OL]. [2021-05-06]. <https://insidedefense.com/daily-news/kord-completes-directed-energy-m-shorad-prototype>
- [8] Raytheon moves ahead in army's stryker-mounted 50 kw laser prototype program[EB/OL]. [2021-08-18]. <https://www.defensedaily.com/raytheon-moves-ahead-in-armys-stryker-mounted-50kw-laser-prototype-program/army/>
- [9] US Army receives four DE M-SHORAD high-energy laser weapon prototypes[EB/OL]. [2023-09-26]. <https://defence.m5dergi.com/one-cikan/us-army-receives-four-de-m-shorad-high-energy-laser-weapon-prototypes/>
- [10] US army deploys stryker-mounted laser weapons to middle east[EB/OL]. [2024-03-04]. <https://www.thedefensepost.com/2024/03/04/us-army-laser-weapon/>
- [11] New DE M-SHORAD weapon zaps UAS & other threats the US army is to field a 50 kW laser on stryker combat vehicles to protect convoys. [EB/OL]. [2021-10-27]. <https://www.joint-forces.com/defence-equipment-news/47766-new-de-m-shorad-weapon-zaps-uas-and-others-threats>
- [12] Multi-Spectral Targeting System(MTS). [EB/OL]. <https://www.rtx.com/raytheon/what-we-do/air/mts>
- [13] 详解美国“守护者”陆基激光防空武器系统. [EB/OL]. [2022-08-26]. [http://news.sohu.com/a/580101445\\_121245527](http://news.sohu.com/a/580101445_121245527)
- [14] LOCUST Target Acquisition and Tracking System(TATS). [EB/OL]. [2021-07-12]. [https://bluehalo.com/wp-content/uploads/2021/08/1460102356\\_RevE\\_LOCUST\\_TATS\\_Datasheet\\_20210712.pdf](https://bluehalo.com/wp-content/uploads/2021/08/1460102356_RevE_LOCUST_TATS_Datasheet_20210712.pdf)
- [15] High-energy lasers. [EB/OL]. <https://www.rtx.com/raytheon/what-we-do/integrated-air-and-missile-defense/lasers>

- [16] Ren Xingyu, Zhang Mingchuang, Wen Quan, et al. Development status of UAV-borne photoelectric pod technology [J]. Automation & Instrumentation, 2024, 39(2): 25 - 29. (in Chinese)  
任星宇, 张明闯, 温泉等. 无人机载光电吊舱技术发展现状[J]. 自动化与仪表, 2024, 39(2): 25 - 29.
- [17] Sprangle P, Hafizi B, Ting A, et al. High-power lasers for directed-energy applications[J]. Applied Optics, 2015, 54(31): 201 - 209.
- [18] Yang Jianbo, Zong Siguang, Chen Lifei. Research on the damage distance of shipborne laser weapon against typical drone swarm targets[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(5): 745 - 751. (in Chinese)  
杨剑波, 宗思光, 陈利斐. 舰载激光武器对典型无人机蜂群目标毁伤距离研究[J]. 激光与红外, 2022, 52(5): 745 - 751.
- [19] Wu Yilun, Sun Chunsheng. Development and operational application of compact photoelectric pod for military UAV [J]. Laser & Infrared. 2023, 53(10): 1568 - 1574. (in Chinese)  
吴依伦, 孙春生. 军用无人机载紧凑型光电吊舱发展及作战运用[J]. 激光与红外, 2023, 53(10): 1568 - 1574.
- [20] Duan Guochen, Zhao Jingli, Zhao Weichao. Application of advanced composite materials in UAV at home and abroad [J]. Fiber Composites. 2022, 39(2): 105 - 114. (in Chinese)  
段国晨, 赵景丽, 赵伟超. 先进复合材料在无人机结构的应用[J]. 纤维复合材料, 2022, 39(2): 105 - 114
- [21] Yin jie. Shortcomings of the mobile laser short range air defense system in the United States [J]. Tank Armored Vehicle, 2021, (13): 54 - 57. (in Chinese)  
殷杰. 美国“机动式激光近程防空系统”的短板[J]. 坦克装甲车辆, 2021, (13): 54 - 57.
- [22] Rohde R S, Buser R G. Index of refraction turbulence effects on thermal blooming in laboratory experiments [J]. Appl. Opt., 1979, 18(5): 698 - 704.
- [23] Qiao Chunhong, Fan Chengyu, Wang Yingjian. Scaling laws about DF high energy laser propagation in real atmosphere [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(12): 1965 - 1969. (in Chinese)  
乔春红, 范承玉, 王英俭. 氟化氘激光大气传输的定标规律[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(12): 1965 - 1969.
- [24] He Wuguang. Simulation study on laser propagation through the atmosphere in optoelectronic countermeasures [D]. Wuhan: University of Electronic Science and Technology of China, 2012. (in Chinese)  
何武光. 光电对抗中的激光大气传输仿真研究[D]. 武汉: 电子科技大学, 2012.
- [25] SONG Zhengfang. Atmospheric attenuation of 1.06 $\mu\text{m}$  laser propagating in a slant path [J]. Laser Technology, 1997, 21(6): 343 - 345. (in Chinese)  
宋正方. 1.06 $\mu\text{m}$  激光的斜程大气衰减[J]. 激光技术, 1997, 21(6): 343 - 345.
- [26] Qiao Chunhong, Fan Chengyu, Huang Yinbo, et al. Scaling laws of high energy laser propagation through atmosphere [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(2): 433 - 437. (in Chinese)  
乔春红, 范承玉, 黄印博, 等. 高能激光大气传输的定标规律[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 433 - 437.
- [27] Guan Qi, Du Taijiao, Chen Zhihua, et al. Estimation of far-field parameters of truncated gauss beams [J]. Modern Applied Physics, 2022, 13(3): 1 - 8. (in Chinese)  
关奇, 杜太焦, 陈志华, 等. 截断 Gauss 光束远场参数预估[J]. 现代应用物理, 2022, 13(3): 1 - 8.
- [28] Sun Yi, Wan Ming. High energy laser system [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004: 132. (in Chinese)  
苏毅, 万敏. 高能激光系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 132.