

鹦鹉螺激光武器浅析

任国光

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京, 100088)

摘要: 评述了战术激光防空武器的特点和鹦鹉螺激光系统拦截短程火箭的试验, 通过估算和初步数值模拟, 分析了短程导弹对激光的易损性, 认为应加强激光破坏导弹战斗部的数值模拟和实验研究。然后评述了美陆军对战术高能激光武器提出的要求和关键技术考虑。最后分析和评估了鹦鹉螺激光系统存在的问题和面临的挑战, 以及可能采取的一些改进措施。

关键词: 战术激光防空武器 短程导弹

Analysis of Nautilus laser weapon

Ren Guoguang

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing, 100088)

Abstract: This paper briefly reviews the features of the tactical laser air defense weapons and the tests demonstrated that Nautilus laser weapon could intercept short range missiles. We analyze the vulnerability of short range missiles for laser through estimation and primary numerical simulation. The Army's requirements for Tactical High-Energy Laser and key technical considerations were reviewed. Finally, the problems and challenges of Nautilus laser weapon were analyzed and evaluated.

Key words: tactical laser air defence weapons short range missiles

一、近程激光防空武器的特点

随着科学技术的发展, 导弹和航空器的速度越来越快, 命中精度越来越高, 杀伤力越来越大, 作战更加灵活。不但对一些固定目标, 而且对地面部队构成了日益严重的威胁。空中短程火箭攻击武器目标多, 超低空飞行, 速度快, 对防空武器提出了反应时间短, 应变能力强, 命中率高苛刻要求。而现有防空武器由于反应慢, 作战不灵活, 特别是无法对付饱和攻击, 而不能适应现代防空作战环境的要求。

目前的高炮和导弹防空系统反应速度慢, 需要进行费时的目标航迹跟踪和计算射击提前量。另外, 由于必需在速度限定的时滞之后才能进行效果评定, 因此, 一旦射击出现偏差造成脱靶, 防御系统往往来不及作出反应。特别是短程导弹, 总的飞行时间一般仅为 30s, 因此, 防御短程地-地导弹非常困难。高炮和导弹防空武器的另一弱点是命中率不高, 一般只有 60% ~ 70%, 因此, 往往采用双发齐射, 这不仅大大降低了效费比, 而且更难对付众多目标, 而激光武器具有反应速度快和杀伤率非常高的特点。激光以光速攻击目标, 可以不考虑射击提前量, 而且目标的机动性也不会影响激光器的性能。激光武器的杀伤率非常高, 一旦光束锁住目标, 就能将其摧毁或破坏。白沙靶场的高能激光试验系统自 1977 年首次打靶试验以来, 杀伤概率达到 100%。激光型防空武器的另一重要优点是单发成本相当低, 每发成本仅 1000 美元, 因此, 用它来对付在全世界扩散的“廉价低空飞行器”大有好处。

由于短程火箭便宜, 体积小便于隐藏和运输, 能迅速发射。阿拉伯游击队经常用火箭弹攻

击以色列,对以色列的军事基地和居民区构成了严重的威胁。由于用激光武器防御短程火箭效费比高,而且一般的导弹防御系统又难以击落短程火箭。以色列军方认为鸚鵡螺激光系统“看来是我们对付喀秋莎最有前途的武器”^[1]。因此,以色列计划在1998年部署原型系统,这将使以色列成为世界上部署高能激光武器的第一个国家。为对付来自南黎巴嫩的火箭弹的威胁,以国防军计划部署13个战术高能激光武器系统^[2]。作为未来的发展,还将包括防御武装直升机,固定翼飞机和无人侦察飞行器。

二、鸚鵡螺激光系统拦截 BM-21 火箭弹试验

鸚鵡螺激光系统在完成地面试验后,于1996年2月在白沙导弹靶场进行了两次用激光拦截火箭弹的试验,以验证高能激光摧毁短程导弹的可行性。试验装置采用了中红外先进化学激光器和海石光学定向器,为了模拟小型机动战术激光系统的效能,试验时激光器以较低功率输出。鸚鵡螺激光系统防御的特定目标是短程火箭弹,所以试验靶弹选择了最广泛使用的俄制 BM-21 火箭弹,靶弹由以色列提供。第一次试验使用了惰性装药的火箭弹,高能激光被聚焦到火箭弹上15s,将其摧毁。第二次试验一枚带真弹头的火箭弹在射向目标的途中被激光击中而爆炸^[3]。激光与飞行中带真弹头的火箭弹交战,这还是有史以来的第一次。

试验表明鸚鵡螺激光防空武器能捕获和跟踪目标并能把激光束保持在目标上足够长的时间,以致烧穿厚钢外壳或引爆弹头,而引爆弹头仅用了几秒钟。由于火箭弹直径仅122mm,所以激光将照射整个目标。另外,试验还证明激光重新瞄准所需的时间不到1s^[4],因此,它具有攻击多个目标的能力。

分析起来两次拦截成功, BM-21 火箭弹的破坏机理是不同的。第一次采用的惰性装药的火箭弹,也就是说此弹未装药而是装了一种代用品,其重量、体积、重心与 BM-21 火箭弹的高能炸药相同,实际上就是一枚练习弹。因此,激光破坏弹头只能是软化和熔化外壳。这种破坏所需的激光能量较高,所以报道说激光聚焦到靶上达15s。第二次试验拦截的是真弹头,即装填了高能炸药的弹头,激光加热弹头外壳,热量传至弹头内的高能炸药,当温度升高至高能炸药的爆发点时,引爆炸药而使弹头爆炸。因此,使炸药升温至爆发点(一般为300~400℃)所需激光能量比软化和熔化钢外壳低(熔化温度1500℃),所以所需的激光照射时间就短。

三、短程导弹对激光的易损性

一般导弹最薄弱的环节是制导系统(包括窗口、整流罩和传感器)和发动机。前者通常都是一些易损的部件和材料,如光

附表 BM-21 122mm 火箭弹主要性能

弹径	122mm	最大速度	690m/s
弹长	3230mm	最大射程	20.38km
弹重	77kg	杀伤面积	1100m ²
战斗部重量	19.4kg	燃烧室压力	14.21~20.09MPa
炸药及重量	TTA-5, 6.4kg	燃烧时间	1.83s

电元器件,光学玻璃,玻璃钢和陶瓷等。后者虽有金属外壳,但都

处在大的受力状态下,容易被聚焦的激光能量所破坏。附图是打靶试验中所用 BM-21 122mm 火箭弹的剖面图,其主要性能归纳于附表中。由图可见,此弹由战斗部和火箭发动机组成,并无制导系统,而发动机的燃烧时间仅为1.83s,显然可攻击的部位只有战斗部。

激光器系统的性能是保密的,但从空间和战略防御司令部在为工业界举行的情况介绍会

上提供的图表可看出,系统将采用 50kW 的激光器,硬杀伤距离为 1km,对传感器的杀伤距离为 $10\text{km}^{[5]}$ 。根据下式我们可以粗略地估计一下,在目标上产生的激光功率密度:

$$W = (P/\pi)[D/(1.22\beta L)]^2$$

式中, P 为激光器的功率, λ 为激光波长, β 为光束质量, L 为激光射程, D 是发射镜直径, ϵ 是激光的大气透过

率。中红外先进化学激光的波长是 $3.8\mu\text{m}$,海石定向器直径为 1.5m,激光射程为 1km,若选 $\beta = 2$, $\epsilon = 0.25$,则得 $W = 10350\text{W}/\text{cm}^2$

作为战术机动激光系统,发射镜直径可能不超过 1m,若取发射镜直径为 80cm,则在靶面上产生的激光功率密度为 $3000\text{W}/\text{cm}^2$ 。

根据我们进行的初步数值模拟,在不考虑气动和 50% 反射率的情况下,靶面功率密度为 $10^4\text{W}/\text{cm}^2$ 和 $3 \times 10^3\text{W}/\text{cm}^2$ 时,要熔化 8mm 厚的弹钢所需的时间分别为 3.8s 和 14s。在同样的条件下,要使炸药爆炸所需的时间分别为 1~2s 和 4~5s。

从以上的粗估可以看出,采用 50kW 的激光器,能在 1km 远的目标上产生 $3 \times 10^3\text{W}/\text{cm}^2 \sim 10^4\text{W}/\text{cm}^2$ 的光强。它可以与弹头交战,引爆弹头内的炸药,或使弹头外壳软化或熔化。但高能炸药的破坏阈值明显低于钢外壳的破坏阈值,因此,引爆弹头内的炸药应是破坏弹头的主要机制。特别是短程火箭,一般弹头外壳与炸药之间无绝热层,激光加热外壳的热量很容易传给高能炸药,可以认为带高能炸药的短程导弹是激光比较容易攻击的目标。

就短程导弹而言,由于发动机早已关机,可供选择的硬杀伤部位就是战斗部,而根据我们的初步数值模拟,带有高能炸药的战斗部可能是短程导弹的薄弱环节(我们估算时还仅用了较低的 50kW 功率)。所以我们认为应该加强激光破坏战斗部的数值模拟和实验研究。

四、美陆军对战术高能激光武器的要求

美陆军认为激光武器是 21 世纪的炮弹,并把它列为陆军未来的关键技术计划。激光防空武器有潜力,特别令陆军感兴趣的是它的反应速度快,作战效费比高和单一设计的装置能对付各种各样的空中威胁。最近战术高能激光武器受到美国和以色列政府的高度重视,将促使陆军的激光武器计划加速发展。陆军将引入创新概念和新技术,以升级它自己需要的激光防空武器系统。它打算从 1998 财年开始执行先期概念技术演示验证计划,在 2001 财年建成战术高能激光武器样机。

陆军过去几年的研究表明,各种短程导弹对地面部队造成了巨大的威胁。陆军认为战术高能激光武器的首要任务是保护前方地区的机动部队,其它的任务包括反侦察、区域防御和支持维护和平的军事行动,它要求激光武器必须是高度机动和可部署的独立发射装置,激光器将安装在载重 5t 的轮式或履带式车辆上,可用 G-17 运输机空运。战术激光武器还必须能对付后期发现的低空威胁,包括能对付饱和和攻击^[6]。防御的目的除短程火箭,火炮和迫击炮弹外,还包括反辐射导弹,攻击直升机和固定翼飞机,以及进行杀伤性攻击和侦察用的无人飞行器,因此,希望要在更远的距离击落目标。由于继续发展扩大的中程防空系统(这是美国与欧洲几个盟国之间的一项合作研究计划)遇到麻烦,国防部一些高级官员已建议战术高能激光武器用于扩大的中程防空系统,以保护美国的远征军^[7]。

陆军认为战术高能激光系统还必须完成非致命性任务,以大大超过目前低高度系统的射



附图 BM-21 型 122mm40 管火箭弹

程,破坏机载传感器和平台。陆军要求战术激光系统必须代替现有被陆军和海军陆战队广泛使用的“尾刺”导弹防空武器。作战系统在重新装药之前必须能对飞航式平台进行 50 次灾难性杀伤。

综上所述,由于美国和以色列要求战术激光武器完成的任务不同,所以对激光系统性能的要求大不相同,如防御目标的范围,激光武器的射程,发射率,机动性,大气传输,与现有和研制中的防空系统配合等。显而易见,鸚鵡螺激光系统不能满足美国的需要,而且鸚鵡螺激光系统是想尽快满足以色列当前反恐怖行动的需要,是一种应急性装置,而美国是把高能战术激光武器当作 21 世纪的武器来发展。

五、陆军要求引入创新概念和新技术

根据上面的叙述,陆军对战术高能激光武器的要求相当高,看来仅仅采用目前现有的技术是达不到的。在美-以联合声明签署后不久,陆军希望工业界对战术强激光系统用于防空武器进行研究和开发投标,要求把新的和创新的高能激光武器的关键技术(例如化学激光器,二极管泵浦固体激光器和自由电子激光器,以及武器系统所需的捕获、跟踪与瞄准系统)和很可能用于高能激光武器系统的其它有关概念引入高能激光防空系统,以便在 2002 年或更早进行一项包括这些技术的综合性武器级演示^[8]。

关键的技术考虑

陆军空间与战略防御司令部的正式招标要求还未公布,预料战术高能激光系统的关键技术考虑包括输出功率、激光波长、发射镜直径、光束质量、高频抖动、反射镜畸变、发射镜高度、占空因子和总工作时间(车载燃料)。

战术高能激光作战系统还必须考虑下面这些问题:

- 环境影响
- 大气传输: 包括湍流和恶劣的天气
- 降低热图象(特征)
- 所需的原动力
- 后勤保障
- 人眼安全
- 目标的易损性
- 目标依次通过标准防空传感器,以及指挥和控制系统。

六、存在的问题和面临的挑战

虽然在高能激光系统试验装置进行的试验中,用激光击落了飞行中的火箭弹,说明基于鸚鵡螺的武器系统能满足以色列的某些要求,但它们仍存在一些问题和面临一些挑战。

1. 射程太短,作战效能不高

虽然鸚鵡螺激光系统击落短程导弹是十分重要的发展,但并不具有战略意义,因为它毕竟只能用于战场的近程防御,而不能解决防御中、远程导弹的问题,而且防御的目标十分有限。其次,由于射程太短,而激光破坏目标一般需 1~5s,所以为防御多管火箭炮发射的火箭弹将需要大量的激光系统。尽管激光武器的单发成本低,但大量激光武器系统的成本是根本承受不起的。为了发挥激光武器的优点和效能,用一台激光装置对付多种目标和多个目标,激光的

射程至少要在 5km 以上。如果像陆军要求那样要对付饱和攻击,而所需的激光系统又不太大,则要求激光有更远的射程。

2. 小型化仍面临挑战

对以色列来说,激光武器主要用于保护北部有限的军事基地和居民区,对系统的机动性要求不高,其实也可以采用固定场地发射系统。而美国的战术激光武器将用于战场。要保护海外远征军,需空运激光系统,所以对机动性要求高。要把大功率激光系统安装在小型的机动平台(如 Bradley 战车或载重 5t 的卡车)上,仍面临挑战。尽管化学激光器使用化学燃料,而不需要巨大的电源,有助于机动化。但化学激光器的受激分子快速碰撞消激活,使激光器只能在较低光腔压力下运转,从而需要庞大的压力恢复系统,又给机动性带来了困难。陆军负责研究、发展和采购的副部长 G. Decker 强调指出,鸚鵡螺击落 BM-21 火箭弹的试验是在一个非常仔细控制的环境中完成的,要把装置放到战术用小型机动平台上,还有很多工作要做^[9]。

激光武器能否用于战术应用的关键是小型化,这是一个工程问题,可能采取的措施有:

- 提高激光武器的效率,通过寻找新方法和新材料,使装置更有效地工作
- 采用塑料件代替钢制零部件
- 采用纤维绕制的复合材料储气罐,提高了压力也就减小了体积和重量
- 采用非致冷光学元件和反射镜,从而取消了大而昂贵的水冷系统,而且避免了水流引起的振动

• 压力恢复系统采用涡轮风扇喷气发动机有助于小型化,从缩小尺寸的观点来看,这将是一个巨大的突破

- 研制高压运行的化学激光器。

3. 近程激光防空武器对自适应光学系统要求高

大功率激光在大气中的湍流和热晕效应是导致光束质量劣化,限制其军事效能的重要因素。战术激光在湍流层中传输,而大气底层几公里处湍流严重将引起光束扩散和漂移。即使是晴朗的天气,大气中也有大量的尘埃和气溶胶,当激光加热空气中的粒子时,将产生热晕,使激光发散。尤其是在湍流层中,湍流与热晕相互作用,将加剧激光束的发散。因此,大气底层由于湍流和热晕效应将大大降低激光武器的效能。根据我们的初步数值模拟计算,在激光功率密度为 $500 \sim 1000 \text{ W/cm}^2$ 的情况下,光束传输距离超过 5km,需要采用自适应光学技术进行补偿。但在短距离内进行补偿,对系统的带宽提出了苛刻的要求,目前在技术上实现闭环还有相当的难度,关键的问题是自适应反射镜的伺服回路能否足够快地工作,在有大气和光学畸变的情况下提供好的高流量波前。我们可根据下式粗估一下:

$$\theta = 2(v_{\text{目}}/c) + (\Delta t/R)v_{\text{目}}$$

式中, $v_{\text{目}}$ 是目标的速度, c 是光速, R 是射程, Δt 是自适应光学系统补偿一次的时间。若取等晕角为 $13\mu\text{R}$, 目标速度为 2Ma , 射程是 10km, 而 θ 应小于等晕角,则可算出 $\Delta t = 0.125\text{ms}$ 。这也就是说需要自适应光学系统每秒校正 8000 次,就目前的技术而言,难度是相当大的。洛克希德-马丁公司正在研制工作在几 kHz 的自适应校正系统。当然对于波长较长的激光,由于大气的相干长度较长($r_0 \propto \lambda^{3/5}$),不用自适应光学技术的传输距离可以远一些。

4. 拦截短程导弹对探测和精度要求高

短程导弹的弹道低,射程短,飞行速度快(全程飞行仅 30s),这就给目标的捕获、跟踪和瞄准带来了困难,关键的问题是这类小火箭弹能否尽早地被雷达发现,以便将激光束瞄准它,并

快放电泵浦 S_2 脉冲激光器的研制*

张中华 孙正和 吴恒莱 于俊华

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨, 150001)

摘要: 计算了 $S_2(B-X)$ 态电子碰撞激发截面, 给出了放电泵浦阈值条件, 设计研制了横向放电 S_2 激光器及快脉冲放电电源。获得均匀的辉光放电, 在中心波长 419.4nm 处首次测到 0.012cm^{-1} 的小信号增益系数。

关键词: S_2 分子 放电激励

Development of fast pulse discharge apparatus of S_2

Zhang Zhonghua, Sun Zhenghe, Wu Henglai, Yu Junhua

(Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001)

Abstract: Based on the theory of electron-impact excitation, the curves of electron-impact excitation cross sections q of $S_2(B-X)$ state can be calculated and the curves show that there are a threshold energy and a maximum value 10^{-16}cm^2 of electron-impact excitation cross section q at the point of 1.8 time of threshold energy. According to the results, the laser threshold condition of discharge pumping S_2 also is given out. The corrosion-resisting and heat-resisting transverse pulse discharge apparatus of S_2 is designed to provide the experimental system and the stable even glow discharge is obtained. The experimental research show that the small signal gain efficient at wavelength 419.4nm is 0.012cm^{-1} .

Key words: S_2 molecule discharge exciting

* 本课题得到国家自然科学基金资助。

有足够的时间将其摧毁。主要的问题是探测和精度, 需要功率强大的雷达, 并使之与激光器协调配合。目前美、以正在发展能探测近程导弹和迫击炮弹的高灵敏度、高精度雷达, 它将用于激光系统样机中。

参 考 文 献

- 1 Jané's Defence Weekly, July 10, 1996: 3
- 2 International Defence Review, March, 1997: 4
- 3 Dupont D G. Insid The Army, February 12, 1996: 1
- 4 Fulyhum D A. AW & ST, March 25, 1996: 58
- 5 Jané's Defence Weekly, October 15, 1994: 1
- 6 Ballistic Missile Defence Monitor, May 17, 1996: 173
- 7 Donnelly J. Defence Week, May 6, 1996: 6
- 8 Inside The Army, May 20, 1996: 5
- 9 Donnelly J. Defence Week, April, 1996

* * *

作者简介: 任国光, 男, 1938 年出生。研究员。现从事强激光技术发展战略研究工作。

收稿日期: 1997-07-07

