

美国 SDI¹⁾ 的进展和一些关键技术

高伯龙

(国防科技大学应用物理系,长沙 410073)

本文介绍自 1983 年开始以后美国 SDI 的演变,简单介绍所取得的进展。特别介绍一些关键技术,包括:动能武器,定向能武器,对抗和反对抗措施。动能武器着重介绍拦截弹、它的制导方法和最新的天基拦截弹“智能卵石”。在本世纪内它们是唯一能部署的。定向能武器着重介绍自由电子激光器和试验激光武器的两颗卫星。对于对抗和反对抗措施只略作介绍,因为公开争议尚激烈。

美国 SDI 代表国际军事技术的最高水平和发展动态。它集中了大量尖端技术,几乎都与物理学有密切关系。本文向一般物理工作者简介它的进展和一些关键技术,希望能符合四化建设要求我们积极跟踪国外先进技术这一目的。

一、历史

SDI 是反弹道导弹系统的继续和发展,70 年代因当时技术不成熟而停止部署。

1983 年里根发表“星球大战”演说后 SDI 重新开始。重新开始的背景原因:(1)地理战略、政治原因,希望近乎完善地全面保护人口,对苏联占战略优势。(2)受一些权威人士影响,对 X 射线激光器过于乐观。主要计划:以卫星为基地的所谓“天基”定向能武器(强激光、粒子束)为主,对战略导弹的助推段、中段、末段层层拦截。如每段拦截效率 $\geq 90\%$, 则漏网率 $\leq 0.1^3 = 0.1\%$ 。

经投下大量资金,开展研究四年,越来越感到不现实。1987 年 6 月作调整,公布三阶段计划。

二、计划

第一阶段:计划以天基去拦截战略弹道导弹的助推段,以地面为基地的所谓“地基”去拦

截中后段。皆为以拦截器直接撞击目标,称动能武器。天基、地基各配探测器。

作战目标为拦截苏联 SS-18 弹头 50%,第一批来袭(设为 4700 枚)的 30%,预定经费 1150 亿美元。

第二阶段:增加天基中段动能拦截弹 9—16 万枚,作战目标为拦截 1 万枚弹头的 50%。

第三阶段:增加天基、地基的激光武器和天基的粒子束武器。作战目标为使敌方的对抗措施基本无效。

执行不久发现:对中段真假目标的识别问题在本世纪末之前难解决,第一阶段的地基中段拦截应移第二阶段。本世纪末以前只有第一阶段是现实的。

三、动能武器

1. 拦截弹

动能武器是古老的技术,如枪弹。一个以 10km/s 飞行的物体,其动能约为它的重量 16 倍的 TNT 炸药所释放的能量。20g 重的物体,在助推段以 10 km/s 的相对速度与弹道导弹相撞,就可以可靠地将其摧毁。拦截器的弹头至少重 2kg (“智能卵石”),几乎无法用加固办法来防御。

由于惯性技术和末制导技术的进展,1983

¹⁾ SDI: Strategic Defense Initiative, 战略防御计划或倡议。

年已发展到可以直接撞击目标,不必用核弹头拦截。成绩有:1984—1987年拦截成功战略级导弹或者卫星三次,长程战术级导弹一次。

由于动能武器已接近成熟,已被列为第一阶段的唯一武器。本世纪末之前工程部署地基,本世纪末部署部分天基。

2. 制导方法

1985年9月13日,F-15在距地面107km处发射反卫星导弹,攻击约550km高的旧军用科学卫星“太阳风”,小型寻的拦截器直接命中了圆柱直径约2.1m的目标,击成100多块碎片。这种小型拦截器长约33cm,直径约30cm,重15kg,在动力飞行阶段靠激光陀螺捷联惯性制导系统制导,中段不制导,达到一定距离时长波红外系统开始搜索,捕获目标后转由红外制导,激光陀螺继续提供惯性基准。光学系统由八个小型红外望远镜和休斯公司的红外探测器组成,靠拦截器的20次/min的缓慢自转来实现圆锥扫描,八个小望远镜是为了增大接收的辐射能量。信息通过微处理机的计算得出导引指令,控制围绕拦截器四周的64支小火箭适时点火以产生所需机动方向的推力,以约10km/s的相对速度直接击中目标。

F-15发射的反卫星导弹是三级导弹,包括各级分离的拦截器。

末制导要求对目标成像以利于识别目标,红外探测器是红外焦平面阵列。它由一组高阻抗半导体探测器和一组半导体放大器组成一个二维(远多于 100×100 ,如 1000×1000)探测器阵列,将其输出混合在一起产生一个有顺序的模拟信号。由于信号弱,从噪声角度需要将探测器冷却到40—100K。

对长波红外探测器的性能要求与惯性制导系统的精度有很大关系。如动力飞行段惯导的精度较差,则要求红外系统开始搜索的距离较早,搜索的空间角较大,能捕获目标的距离较远(否则末制导跟踪不过来),这对红外系统的灵敏度和分辨率要求很高,器件难制,体积重量都较大。反之则末段负担较轻。提高惯性制导系统精度的关键是激光陀螺和加速度计的精度。

如在助推段制导精度嫌不足,可加其它制导系统组成复合制导。

末制导除长波红外制导外,还有雷达制导、激光制导、星光制导等,但看来都不如长波红外有前途。

其实,许多战术导弹的制导方法也差不多。例如,反坦克导弹的动力飞行段不过换成一级火箭,中段是“平飞段”,末段也用红外制导。但惯性制导系统制导和红外制导的要求要低得多。它不需低温,红外望远镜只一个,不旋转(也有以恒速快速旋转的)。

3. “智能卵石”

“智能卵石”本身是一个功能齐全的小卫星。不装燃料,它就是一个近乎完整的探测器,除预警需天基卫星的监视跟踪系统帮助以提高效率外,具备其它一切功能。装上燃料,它就能机动,成为一枚拦截弹。最新估计,部署4600颗就可以达到战略防御的目的。

“智能卵石”之所以成为可能,是因为近代技术的进展,特别是微电子学的进展。即使是1988年的技术,已可以将Cray-1巨型机(6000万次机)那样功能的计算机制成100g的超小型机;在60度视场内,在1000km外能看到单个建筑物,光电图象有10—100亿分辨点的相机小于250g;20g重的光纤陀螺组成150g的捷联惯导系统;小巧的火箭推进系统;多用途的天线等。这些都是关键技术。

据报道,“智能卵石”长约1m,重约40kg,其中包括外壳和太阳能电池板等重量。如果是这样,它的本身会更轻。多数外刊报导说结构重量(“干重”,不算保护壳和推进剂)为4.5kg,有一定可信度。

估计未来成本可能低于40万美元/颗。1988年6月原估计第一阶段部署要花1150亿美元,现在由于技术的进步和天基方案的改变,有可能用550亿美元即可完成部署。

4. 超高速射弹

拦截弹不过是动能武器中超高速射弹中的一种。

超高速指超出常规速度以上(2km/s以上)。

美国国防部 1991 年财政年度关键技术计划中把超高速射弹列为 20 项关键技术之一。正在研究的推进系统有 7—8 种。SDI 把其中以电流代炸药的“电磁炮”列入末段防御计划中,估计到第二阶段才能用。

四、定向能武器

定向能武器分激光武器和粒子束武器两类。首先,让我们估计一下激光武器所需的平均功率。

设激光器的平均功率为 P , 拦截时间为 Δt , 照射在目标的光斑面积为 A , 大气和器件传输损耗引起的衰减系数为 r , ($r < 1$), 则激光照射靶的能量面密度 I 为

$$I = rP\Delta t/A.$$

又设反射镜的直径为 D , 镜至靶的距离为 R , 则衍射极限的发散角为 λ/D , 由于光束质量的非理想性(包括激光器和光学系统的抖动)和在大气中传播的畸变, 发射角为它的 n 倍, $n > 1$, 则

$$A = \pi(Rn\lambda/D)^2.$$

代入得

$$P = IA/(r\Delta t) = \pi I(nR\lambda)^2/(r\Delta tD^2). \quad (1)$$

破坏阈值 $I_{\min} = 1\text{kJ}/\text{cm}^2$ (软靶) 至 $100\text{kJ}/\text{cm}^2$ (硬靶)。标准助推器可用 $I_{\min} = 10\text{kJ}/\text{cm}^2$ 。对于天基助推段, 设 $R = 1000\text{km}$, $D = 10\text{m}$, 据计算 $\Delta t = 0.1\text{s}$, 代入(1)式得

$$P_{\min} \cong 30(n\lambda)^2/r \text{ MW}. \quad (2)$$

式中 λ 用 μm 为单位。

由此可见,降低 P_{\min} 的途径是光束质量要好,大气传输损耗及畸变要小,波长要短,反射镜的直径要大,距离要近。有些是目前工艺技术尚未能作到的,如 $D = 10\text{m}$; 有些是互有矛盾的,如紫外光波长虽短但大气损耗大;有些是难作到的,如 R 比 1000km 小得很多,即使从防护角度也是不利的。

1. 化学激光器

自 1983 年以来,对 HF 或 DF 化学激光器作了相当多的研究。激光的波长为 2.6—3.6

μm , 以 $\lambda = 2.6\mu\text{m}$, $n\lambda = 5\mu\text{m}$, $r = 1$ 代入(2)式,则得 $P_{\min} = 760\text{MW}$ 。看来波长太长了。目前只制成 2MW 的激光器。

化学激光器的更致命处是要消耗大量原料。天基大型助推段防御,至少需往轨道运送一万吨载荷,而目前的航天飞机每架次只能运送 25t 。它与大型反射镜组合用作地基反卫星武器,或作为末端防御的一部分,倒有可能。

2. 自由电子激光器 (FEL)

近几年来,战略防御部门对可见光段的地基自由电子激光器特别有兴趣。这种激光器可以利用位于空间的反射镜将光束反射到目标上。因为是地基型,所以激光器可以很庞大,但其光束必须穿过大气,而后射向遥远的目标处。

自 1983 年以来, FEL 技术的进展是明显的,在 SDI 计划中已在远红外波段获得数千瓦的平均功率,而在可见光段的平均功率则低得多。理论上,这种激光器的电能转换成光能的效率是 40%。

FEL 是 1976 年以来发展起来的一种新型激光器。它与普通激光器的区别是:激光辐射不是基于原子、分子或离子的束缚电子能级间的跃迁,而是将相对论电子束的动能转换成相干辐射能。原则上,它可从毫米级到 X 光波段连续调谐,不会出现普通有工作物质的激光器在高能时自聚焦、自击穿、热畸变等非线性破坏现象而可以得到极高的功率输出。再由于电子动能直接转换成光辐射能,不经中间环节,故理论上的转换效率很高。除军事用途外,在雷达、生物医学、光化学、激光同位素分离、材料的处理等许多领域的应用都是很有希望的。

按照转换为辐射能利用的是电子的横向动能还是纵向动能,可分为两类,每类又可分为四种。FEL 辐射的激光波长可以随相对论电子的能量很方便地改变。例如,磁致辐射型 FEL 使用空间上周期性变化的静磁场(叫“摇摆器”),电子束通过时,所产生相干辐射的波长为

$$\lambda = \lambda_w(1 + a_w^2)/(2r^2),$$

式中 $r^2 = 1/(1 - v^2/c^2)$ 为电子的相对论能量

因子, λ_w 为摇摆场的空间周期, a_w 为摇摆场参量。

按照(2)式, 理想情形取 $n = r = 1$, 则 $\lambda = 0.3, 1, 3 \mu\text{m}$ 时破坏助推器的功率阈值 P_{min} 依次为 3, 30, 300 MW。故目前自由电子激光器的功率尚需提高好几个数量级才能用于战略防御。所使用波长要短一些, 但紫外辐射透过大气损耗大, 故对可见光波段最感兴趣。

根据美国物理学会的研究报告, 近 $1\mu\text{m}$ 的 FEL 用于战略防御, 尚需证实几个物理概念。高功率、高效率的 $1\mu\text{m}$ 的 FEL 还只是个理论发展的概念, 需要实验验证, 等等。大气传输畸变的校正技术, 大孔径光学系统的技术, 高功率激光对大型反射镜光学涂层的破坏等, 都是待解决的问题。

发展自由电子激光器武器系统非常费钱, 估计一个实战用的地基系统仅激光器就得 360

亿美元以上。一个地基设备将占地 20 平方英里, 有些设施要建在地下, 根本没有机动能力, 如何提高生存力亦将是未来的重要课题。

1990 年 2 月 14 日, 美国用一枚德尔它-2 运载火箭将 SDI 计划两颗用于研究激光武器技术的卫星发射上天。一颗是中继反射镜卫星, 价值 1.45 亿美元, 重 2300 磅, 轨道倾角 43° , 高 250 海里, 轨道寿命 8 个月。它主要试验一个轨道反射镜技术, 将来用作从地面发射的激光束反射到在空间飞行的敌导弹上。试验在 2 月 20 日前后开始。

另一颗是低功率大气试验补偿卫星, 价值 1.3 亿美元, 重 3175 磅, 轨道倾角亦 43° , 高 295 海里, 轨道寿命 2 年半。它的主要任务是探测从地面照射试验卫星上的低功率激光束的畸变, 将判明开发出来的反畸变技术是否能按预想的那样工作。它还要完成几项辅助试验: 紫

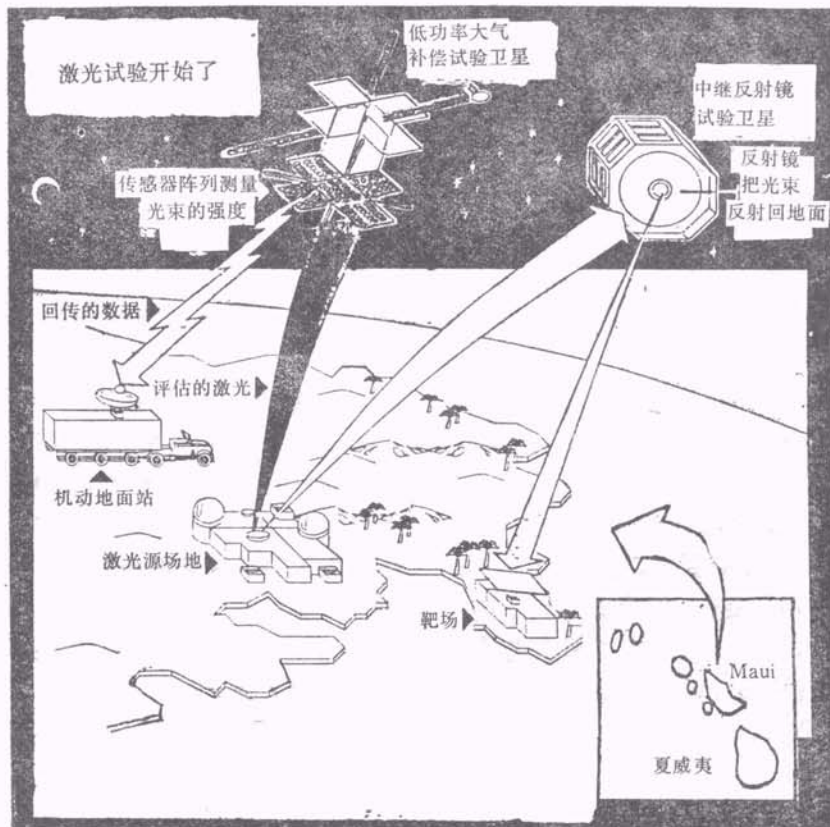


图 1 激光试验示意图

低功率大气补偿试验卫星, 将运转 30 个月, 轨道: 295 海里; 中继反射镜卫星, 将运转 8 个月, 轨道: 250 海里

外尾焰测量,背景试验测量中子水平,一项名称保密的试验等。这些数据对研制识别空间真假弹头的系统是重要的。试验约在发射三星期后开始。

两个试验用的激光器设置在夏威夷 Maui 岛的山顶上。预计,当两颗卫星从 Maui 岛上空经过时,研究人员每天用一颗卫星进行一次试验,每次试验将持续 3—5min。整个试验持续两年半的时间,耗资 3.13 亿美元。这是 SDI 所进行的迄今最雄心勃勃的空间试验,示意图见图 1。此外,这两颗卫星还将帮助发展激光通信系统。

3. X 射线激光器等

战略防御用的 X 射线激光器可能以核爆炸作能源转换成高度聚焦的 X 射线光束。80 年代早期,像泰勒这样的技术权威对 X 射线激光器作战略防御用持乐观态度,据说是鼓舞里根 1983 年提出 SDI 的原因之一。经过七年多实践,一般人都怀疑它的能力,美国国会技术评价局称之为定向能武器中最不成熟的技术。在一些物理问题解决前,无法评估。

准分子激光器、高功率 CO₂ 激光器、Nd 玻璃的固体激光器是有可能作为武器,在早期是被认真考虑的,但现在用于 SDI 已不具竞争力。

4. 粒子束

70 年代后期就已提出将粒子束武器用于战略防御,到 1983 年已进行大量的研究工作,且认识到面临的种种困难。最近的工作主要是研究发射中性氢原子束武器有关的问题,建成了一种强有力的质子加速器,在外层空间真空环境中试验了它的前端。还准备发射一种小型而完全的加速器。

目前中性粒子发生器的性能,尚不能用于战略防御。波束武器的电压和占空比必须提高

两个数量级,而这在 2010—2015 年以前是不可能的。

五、对抗和反对抗措施

对抗 SDI 的措施主要集中在几个领域:(1)诱饵和箔条云;(2)速燃助推器;(3)反卫星武器攻击战略防御的卫星和天基设备。

反对抗措施有:(1)识别真假弹头的研究,特别是战略导弹中段的识别问题,占 SDI 经费相当大的份量。当然,还有反识别,例如使用隐身技术。

(2)发展速燃助推器是对抗天基动能拦截弹的有效手段。它有可能使拦截弹在助推段结束来不及飞到预定目标处。用天基的定向能武器可对抗速燃助推器。部署“智能卵石”于较低轨道上(如 250—300 km),亦可部分对抗速燃助推器。当然,第三类对抗措施(反卫星武器)可反反对抗。

(3)反击反卫星武器的办法有加固卫星、卫星机动、增加卫星高度、“隐身卫星”、对卫星进行保护、将防御任务分配给大量卫星(如“智能卵石”方案)等。

关于加固卫星、加固运载器等,首先有一个材料问题,这是重要的研究领域。

对抗 SDI 和反对抗的措施,公开争议相当激烈,并且未能取得一致的意见。某些措施不像通常所说那样有效,要简单说清楚它们的能力也不是件易事。

本文择要写了一些 SDI 的进展和关键技术。这是一项投资大的系统工程,战略防御计划,并且在不断的变动中,有兴趣的读者可随时注意有关报道。