

## 天基光电成像遥感设备面临的威胁及其对抗技术

李勇<sup>1</sup>, 王晓<sup>1</sup>, 易明<sup>2</sup>, 王龙<sup>1</sup>

(1. 北京 947 信箱, 北京 100083;

2. 石家庄军械工程学院 光学教研室, 河北 石家庄 050003)

**摘要:**近年来的几次高技术局部战争中,天基光电成像系统发挥了巨大的作用。然而,天基光电成像遥感设备在军事中的重要性和固有的脆弱性,使其安全与防护问题日益突出。阐述了天基光电成像遥感设备存在的脆弱性和空间军事化所带来的多种恶意威胁,如不同平台的反卫星激光武器、动能拦截弹、高功率微波武器等。针对上述威胁,分析了天基光电成像遥感设备相应的各种对抗、防护技术和手段,包括天基自卫告警、多频谱假目标、多波段隐身伪装和烟幕干扰、光电传感器的加固技术、加强光电成像平台机动能力、携带综合自卫武器等,其中针对天基光电成像传感器着重讨论了最新的抗激光攻击加固技术,如液晶薄膜防护技术等。最后提出了开展相关新概念、低成本防护技术的建议。

**关键词:**空间; 光电成像; 遥感设备; 威胁分析; 对抗技术

**中图分类号:** TN973.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2005)06-0631-05

## Countermeasure technology and threats against space-based photoelectric imaging and remote sensing device

LI Yong<sup>1</sup>, WANG Xiao<sup>1</sup>, YI Ming<sup>2</sup>, WANG Long<sup>1</sup>

(1.Box Number 947 Beijing, Beijing 100083,China;

2.Institute of Optics, School of Shijiazhuang Ordnance Engineering, Shijiazhuang 050003,China)

**Abstract:** The space-based photoelectric imaging system has a great effect on recent high-tech local wars. However, the importance and inherent frangibility of the space-based photoelectric imaging and remote sensing device make problem of safety and protection more serious. In this paper, frangibility and manifold threats against space-based photoelectric imaging and remote sensing device, such as various platforms based anti-satellite laser weapons, kinetic kill vehicles, high power microwave weapons, are presented. In allusion to these threats, several defend technology, countermeasure and corresponding methods including space-based self-protection warning, multi-spectral artificial target, multi-spectral camouflage and smoke interference, photoelectric sensor reinforce, increasing the ability of flexibility of photoelectric imaging platform, carriage of self-protection weapons and so on, are analyzed, in which up to date technologies of laser radiation for space-based photoelectric imaging sensor protection, for example liquid

收稿日期: 2005-01-25; 修订日期: 2005-02-05

作者简介: 李勇(1961-), 男, 安徽颍上人, 高级工程师, 主要从事电子对抗方面的研究。

crystals for protection, are emphasized. Some advice for new concept and low cost defend technology development are presented.

**Key words:** Space; Photoelectric imaging; Remote sensing device; Threat analysis; Countermeasure technology

## 0 引言

随着空间军事化和太空军备竞赛的日益加剧,现代战场已经从陆、海、空进一步延伸到外层空间,未来战争将呈现“四维一体化”的趋势。因此,空间已成为当今维护国家安全、夺取“制信息权”所必须关注和占据的战略制高点<sup>[1]</sup>。从“海湾战争”、“科索沃战争”直到“阿富汗战争”,航天探测系统,尤其是天基光电成像遥感设备,在快速获取战场态势信息、辅助决策、支援部队作战、打击效果评估等方面发挥的作用越来越大,已成为打赢高技术战争的制胜法宝。

没有强大的航天力量,不但没有制天权,还将严重削弱制空权和制海权。美国在 20 世纪 90 年代就提出了“谁能控制空间,谁就能控制世界”的思想。美军航天司令部在其“2020 年设想”中称:美军“今天的军事作战十分依赖于航天能力,在 21 世纪将更加依靠航天能力”。在空间军事装备体系建立和“制天权”的竞争中,军事强国都高度关注天基光电成像遥感设备的研发,不断扩大其分辨率高、图像信息丰富、信息容量大的优势,在预警探测、侦察与监视、打击效果评估等领域初具规模,并形成系列化,有力地支撑着“全球作战”、“信息主宰”、“精确打击”等崭新作战理念的形成与拓展。近年来的几次高技术局部战争,都清晰地向世人展现了天基光电成像系统对现代战争的巨大影响力。

正是由于天基光电成像遥感设备的重要性和固有的脆弱性,使得它必将成为未来敌对双方空间攻防对抗的重要目标。因此,天基光电成像遥感设备的安全与防护问题日益突出。

## 1 天基光电成像遥感设备所面临的威胁分析

### 1.1 天基光电成像遥感设备的脆弱性

在具有“得天独厚”、“居高临下”优势的同时,天

基光电成像遥感设备也因遥感用途和所处环境特点,存在着一些突出的弱点和缺陷。

#### (1) 灵敏度极高,脆弱易损

天基光电成像遥感设备为了满足远距离对地侦察、探测与预警的需求,其灵敏度极高,如设备光学系统的增益,一般大于  $10^5 \sim 10^6$ 。因此,相对其他光电系统而言,它更易被干扰、饱和,甚至被摧毁<sup>[2]</sup>。

此外,其承载平台为减轻发射质量,降低发射成本,总在保证必要刚度和强度条件下,尽量做得又薄又轻,因此,非常“娇嫩”,不仅在导弹或弹片攻击下会“粉身碎骨”,即便是一片 1 cm 大小的空间碎片也可能使它瘫痪。显然,平台的固有缺陷加剧了天基光电成像遥感设备的易损性。

#### (2) 可维修性极差

天基光电成像遥感设备及其平台远在太空轨道上,一旦失灵或受损,就很难维修。即使有可能进行在轨维修,其时间之长、代价之高也是显而易见的。因此,一旦发生故障或受到攻击,其付出的代价和影响极其巨大。

#### (3) 平台轨道固定,变轨能力弱

卫星从地球任何地方过顶的时刻是可以预知的,其行踪完全暴露,不存在隐蔽性。虽然也可装上变轨发动机,改变运行轨道,但一般只改变轨道高度,而不改变轨道倾角,因为改变倾角,消耗的推进剂太多。改变轨道高度不能改变星下点轨迹,虽能改变过顶时刻和重访周期,但用不了很长时间,新的轨道数据就被对方掌握了。

## 1.2 天基光电成像遥感设备所面临的威胁分析

### (恶意攻击)

天基光电成像遥感设备及其平台面临着诸如环境、太空垃圾、电磁辐射等各种自然或人为的多种威胁。更为严峻的是,随着太空军事化和太空军备竞赛的加剧,加之天基光电成像遥感设备所具有的重要战

略侦察地位和巨大军事效益,使其成为空间攻防的主要潜在对象之一。美国的卫星侦察之父埃德温·兰德曾说过:“我们的确负担不起抵抗所有可能威胁的费用。我们必须精确地知道威胁来自何方,以便在那个方向上集中我们的资源”。

目前,威胁最大的恶意攻击性武器大致有:

#### (1) 不同平台的反卫星强激光武器

破坏天基光电成像遥感设备的光学传感器,就等于打瞎了航天器的“眼睛”,使其成为“废铜烂铁”。天基光电成像探测器为达到远距离和高分辨率探测的目的,具有极高的灵敏度。因此,不同平台的强激光极易将其干扰、饱和、甚至致盲<sup>[3]</sup>。

据报道:1975年11月,前苏联使用了陆基强激光对西伯利亚上空正在跟踪和监视其导弹发射的美国预警卫星和侦察卫星进行了跟踪照射攻击,致使这两颗卫星报废,开创了激光武器攻击卫星的先河。1981年3月,前苏联又进行了天基激光武器反卫星试验,试验用的激光器搭载在“宇宙杀手”卫星上,它发出的强激光摧毁了美国一颗红外照相侦察卫星上的红外传感器等相关设备,最终导致这颗卫星失效。前苏联还在萨雷沙甘试验场试验了“双筒望远镜”激光器,摧毁了轨道高度为370~560 km的低轨道卫星,损坏了轨道高度为1200~2700 km卫星上的太阳能设备和光电传感器,还影响到轨道为36000 km卫星上的太阳能电池帆板。目前,俄罗斯又在塔吉克斯坦共和国境内努克列水库附近的高山上建立了一个反卫星激光站。

美国陆军战略防御司令部从1992年2月起,利用中红外先进化学激光器(MIRACL)进行了一系列试验。1997年10月,美国使用MIRACL和低功率化学激光器(LPCL)进行了激光打卫星实验,“靶星”是美国空军一颗即将报废的运行在420 km低轨道上的卫星,试验验证了强激光反卫星的可行性和有效性。此外,美国还积极开展天基激光武器计划(SBL)<sup>[4]</sup>。

总之,美国、俄罗斯的强激光武器分别具备一定反卫星和应急反卫星能力。

#### (2) 动能拦截弹

动能拦截弹(KKV)是利用高速运动射弹的动能,靠直接碰撞来毁伤目标的杀伤拦截器,它是继核弹

头、破片弹头之后的第三代反卫星武器。目前发展这种技术的国家有美国、英国、俄罗斯和以色列等,但主要工作集中在美国。

反卫星拦截器一般由天基平台发射,对卫星进行攻击、拦截,轨道基本上与目标卫星的轨道相同。其承载的雷达或光学系统引导攻击或拦截目标卫星。目前,美国动能拦截器技术已发展到第三代,正向小型化、智能化和通用化方向发展。预计到2010年前后可能全面部署高性能的多层反导防御体系,并具备动能反卫星能力。

#### (3) 高功率微波武器

高功率微波武器(HPM)又称射频武器或超宽带武器,一般由电子或爆炸型主功率源、射频产生器和天线波束定向器组成。其工作频率范围为10 MHz~100 GHz,功率在100 MW~100 GW之间,并具有窄带和宽带辐射的特点。

高功率微波武器几乎对任何利用电子信号工作的系统都有效。轻者,可在电子线路中产生虚假信号,干扰或使电子装置暂时失效(当吸收微波能量导致过热时,半导体器件会失效。高功率微波武器对电子设备造成的最大威胁是使用周期只有1 ms甚至更短的脉冲);重者,可烧毁电子系统中的敏感半导体器件。最容易烧毁的是红外探测器中连接紧密的半导体器件、低功率集成电路逻辑芯片以及电子控制系统。

## 2 天基光电成像遥感设备防护技术

由于恶意性攻击的威胁日益严峻,使得天基光电成像遥感设备及其平台的拥有国不得不高度重视天基光电成像遥感设备及其平台的防护技术。

### 2.1 天基自卫告警技术

激光反卫星、反星载光电传感器武器技术的日益成熟,使得卫星等平台的“全向、实时”激光告警技术显得现实而迫切。激光自卫告警设备主要接收敌方实施攻击前发射的探测激光,并给出告警信息。这是卫星实施反激光攻击的前提条件,因此备受重视。

美国已经制成半球空域凝视型激光探测与告警装备,如LAHAWS采用鱼镜头收集半球空域内任意方位的来袭激光。由于应用鱼眼视觉原理,故不用扫描设备,能实时发现威胁,不易产生漏警,且体积、

质量和功耗相对减小。

美国 NASA 支持的罗切斯特成像科学中心,自 1990 年以来一直在研制鱼眼凝视式小型激光探测装置,1995 年研制成具有  $120^\circ$  视场角的此类传感器,试验效果良好。课题组长 P.Mouroulis 在 1995 年度研究报告中指出“我们的目标是实现全景凝视探测与告警”。这表明全空域凝视探测是一种发展趋势。

## 2.2 天基平台的多频谱假目标技术

星载光学假目标是对抗以上多种反卫星武器侦察与攻击的一种低成本的对抗手段,能有效地迷惑、对抗反卫星武器的侦察与攻击,大大降低卫星的被攻击概率。即利用轻质材料制成充气式、高气密性和具有卫星可见光/红外复合特征的气囊,模拟卫星的光学特性,也可模拟雷达特征,将其配置在要保护的卫星上,在受到威胁时进行投放,以迷惑、诱骗敌方攻击。多频谱假目标的研制和装备费用都比较低廉,非常适合于天基平台的防护。

2004 年最新外军资料显示,美国非常重视天基假目标技术,认为该技术成本低廉、实施简单、技术相对成熟,并投入巨资研制能模拟卫星雷达和光学特征的通用型、系列化的各种假目标。

## 2.3 天基平台的多频谱隐身技术

对航天器进行隐身伪装,尽量削弱、隐蔽航天器的可见光、红外及雷达波的暴露特征,降低航天器的被探测概率,增强抗毁能力。例如利用流行的多频谱隐身伪装技术,在卫星表面增加光电/雷达隐身涂层,改变其光电、雷达辐射特性,达到隐身的目的。

此外,等离子体隐身技术是近年来发展起来的新隐身技术,其基本原理是:利用等离子体产生器、产生片或放射性同位素,在被保护目标表面形成一层等离子体云,控制等离子体的能量、电离度、振荡频率等特征参数,使照射到等离子体云上的雷达波在遇到等离子体的带电离子后,两者发生相互作用,电磁波的一部分能量传给带电粒子,被带电粒子吸收,电磁波能量逐渐衰减;另一部分电磁波受一系列物理作用的影响,绕过等离子体云或产生折射改变传播方向,使达到保护目标的能量很小,从而实施防护。

## 2.4 天基无源干扰烟幕技术

20 世纪 90 年代末,美国宣布正在进行高度保密

的天基无源干扰烟幕技术研究。不久有资料透露,大气层下的抗红外烟幕剂中的固体粉末发烟剂有望用于太空中对抗红外探测器的侦察。此后,美国又进行在微重力条件下金属粉末材料的红外消光特性和动力学特性研究。显然,这是在研究烟幕如何用于太空环境(真空、微重力等)。

然而,由于涉及高度机密,所披露的技术内容只限于烟幕材料,例如,美国全美工业公司提出应选鳞片黄铜粉作发烟剂;德国 Feistel 公司提出鳞片状金属粉作抗红外发烟剂;斯坦福研究所指出,鳞片状铝粉表现了最大的红外消光特性,质量消光系数可达  $2\sim 3 \text{ m}^2/\text{g}$ ,并指出,鳞片状青铜粉、铜粉也很有使用前景。其他披露的内容只涉及烟幕材料红外消光机理及其与烟幕微粒大小、取向、表面特征、粒子的复折射率及均匀性等研究课题<sup>[5]</sup>。

从所掌握的信息分析,目前美国正在研发的粉末型红外消光烟幕用于空间武器的隐身无源干扰,很可能已进入工程化设计实验阶段。

## 2.5 天基光电成像传感器的加固技术

对天基光电成像传感器进行多手段综合加固,是保护天基光电成像设备最直接的对抗技术,也是卫星拥有投入最多的研究领域。由于现阶段强激光对光电传感器的威胁最大,所以对激光攻击的防护是首要的。美国第六代光学成像侦察卫星——先进锁眼-11 就采取了防激光武器保护手段,从重要性和技术难度分析,美国应已装备了一定的防护激光攻击设备。

目前,抗激光攻击的加固技术发展非常迅速。流行的防护技术有:选择光谱带通滤光片、机械快门、限幅器、光学开关、易熔或牺牲材料等;此外,最新发展的还有:可变波长液晶薄膜防护技术、自聚焦和自散焦限幅器、光限幅器、非线性光学定位/非线性反射镜等。

### (1) 快门技术

天基光电传感系统的“眼睑”式激光防护快门技术,是在受到威胁时发出警告,启动“眼睑”式快门防护系统关闭光路,即让“快门”阻断强激光的攻击,待激光干扰消失后,再开“门”工作,从而起到完全的防护作用。目前,美国已研制出快于 4000 次/s 的快门机构。

## (2) 吸收式防护材料技术

利用有机或无机染料分子对入射光的选择性吸收来实现对空间光电系统中的光电器材的保护。一般的吸收性材料同时也会衰减进入光电探测器的有用光波。近年来,人们对一类新的反向饱和吸收式(RSA,例如 metal-porphyrin)非线性材料进行了深入的研究并取得了一定的进展。此类材料对低于特定阈值光强的入射光吸收甚微,当入射光强超过阈值时其吸收系数快速增加(~100倍)。但是,只能工作在超强光强条件下,且其有效作用时间只是在纳秒量级。尽管如此,美军仍在积极支持反向饱和吸收式材料的研究。

## (3) 反射式防护材料技术

反射式防护一般可采用多层阶跃式光薄膜、渐变式光学薄膜或全息膜对特定频带进行滤除。这种方法在现阶段被广泛采用。其缺点在于只能对固定波长的激光进行防护,若所需防护的激光谱线很多时,会严重衰减信号光。美军正积极地寻找替代方案。

## (4) 可变波长液晶薄膜防护技术<sup>[6]</sup>

手征液晶分子是沿着一条螺旋轴排列的。若入射光波长等于其螺距,则反射光为圆偏振光,其手征与该液晶结构手征相同,透射光亦为圆偏振光,但其手征与液晶结构手征相反。两片手征相反的液晶膜相叠加则可以将任意偏振态入射光全部反射。手征液晶分子反射膜独特之处在于:其螺距可以用外加电/磁场进行调节,随外加电/磁场强度的增加,手征液晶结构的螺距增加。通过这种方式,就能得到一个窄带反射镜(~10 nm),其中心波长可调。这样就可以实现动态激光防护<sup>[7]</sup>。

二色性液晶分子也可以用于激光防护。在普通液晶中掺以少量二色性液晶分子可以制成吸收式强光防护膜。当光沿着二色性液晶分子的分子轴入射时,二色性液晶分子对入射光的吸收最小。若入射光足够强时,被吸收的光能转换为分子动能,从而使原本排向高度一致的液晶分子排向混乱,从而导致更多的二色性液晶分子参与对入射光的吸收。

为获得一个中心波长可调的窄带反射镜以实现动态激光防护,可以同时使用左右手征液晶分子构成的薄膜组合<sup>[8]</sup>。有迹象表明,在美陆军的支持下,加州的有关研究中心正积极开展这方面的工作,但其在激

光防护方面的研究成果未见公开报道。

## 2.6 加强平台的机动能力

美军认为,虽然大多数卫星的推进器可使之进行高度控制、稳定保持和改变轨道等操作,但它们都不足以使卫星躲避一次攻击。而如果加大推进器的功率,就有可能使之对危险做出反应。据称美国正在试验一种以蒸气为动力的卫星推进系统,以大大提高卫星的机动性。在探测到有威胁源存在时,可通过适时的战术机动,从而可以有效地减少被攻击的概率。

## 2.7 平台携带综合自卫武器

对于价值极高的卫星系统来说,使其具备自卫能力将是一种明智的做法,如装备一套光学或雷达传感器以及小型拦截弹。另外还包括破坏或扰乱反卫星武器寻的系统的小型光学或射频干扰系统。随着微卫星技术的不断发展,将来还会出现具有自卫或护卫能力的小型化高能激光器或高功率微波系统。

## 3 结束语

空间攻防装备的发展已成为21世纪武器装备发展的重大动向。以美国为首的发达国家正在加快空间攻防对抗装备的研究。发展有效的空间攻防对抗技术手段,形成先进实用的新型“杀手锏”,既能对强敌构成威慑,打破其“控制空间”的图谋,又能削弱其信息优势。

目前,一方面,针对我方卫星防护的现状,应大大加强卫星防护的顶层设计,本着防“软杀伤”与“硬摧毁”措施相结合,多种手段综合体现“体系对抗”的思路;积极研究多种防护技术,尽快启动相应低成本、新概念防护技术的预先研究。另一方面,密切关注外军在卫星防护技术上的最新进展,以便相应地调整和改进我方对抗技术的重点与方向,以期“知己知彼、百战不殆”。

## 参考文献:

- [1] WANG Yong-zhong. Modern Military Optical Technology [M]. Beijing: Science Press (王永仲. 现代军用光学技术. 北京: 科学出版社), 2004. 455-458.

(下转第640页)

数越大,如图 6 所示。

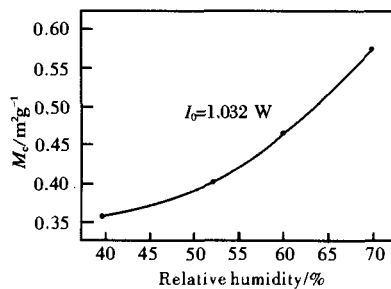


图 6 消光系数随湿度变化曲线

Fig.6 Curve of extinction coefficient varied with air relative humidity

### 参考文献:

- [1] ZHOU Shu-quan. The Basis of Measuring Infrared Radiation[M]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University Press(周书论.红外辐射测量基础.上海:上海交通大学出版社),1991.24-25.
  - [2] XU Xiao-jun,LU Qi-sheng, SHU Bo-hong, et al. Back-scattering model and experiment of laser illuminating[J].Infrared and Laser Engineering(许晓军,陆启生,舒柏宏,等.激光照明的大气后向散射理论模型和试验研究.红外与激光工程),2001,30(1):60-64.
  - [3] CHEN Hai-ping. The Basis of Smoke Screen Technology[M]. Beijing: Weapons Industry Press(陈海平.烟幕技术基础.北京:兵器工业出版社),2002.78-79.
  - [4] PAN Gong-pei, YANG Shuo. Principles of Pyrotechnics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press(潘公配,杨硕.烟火学.北京:北京理工大学出版社),1997.126-127.
  - [5] LI Cheng-jun, XU Ming. Testing the screening performance of smoke agent according to the screening effect of the smoke[J]. Journal of East China Institute of Technology(李澄俊,徐铭.根据烟雾的遮蔽效应测定发烟剂的遮蔽能力.华东工学院学报),1989(1):13-17.
  - [6] ZHOU Zun-ning, PAN Gong-pei, LI Yi. Experimental research of the influence of adding RP on smoke characteristics of modified HC[J].Energetic Materials(周遵宁,潘功配,李毅.赤磷对改进型 HC 发烟剂烟幕性能影响的试验研究.含能材料),2002,10(3):128-131.
  - [7] CHEN Hai-ping, WANG Xuan-yu, AN Gang. The design and application of  $2.4 \times 1.5 \times 1.3 \text{ m}^3$  smoke chamber [J]. Journal of Chemical Defence(陈海平,王玄玉,安刚. $2.4 \times 1.5 \times 1.3 \text{ m}^3$  烟幕柜的设计及应用.防化学报),1999(4):34-38.
  - [8] Earl J McCartney;PAN Nai-xian, MAO Jie-tai, WANG Yong-sheng, et al. Optics of the Atmosphere-Scattering by Molecules and Particles[M].Beijing: Science Press(McCartney E J;潘乃先,毛节泰,王永生,等.大气光学分子和粒子散射.北京:科学出版社),1988.228-268.
  - [9] CHEN Zuo-ru, SONG Jing-pu, LUO Yun-hua, et al. A study on far-infrared obscuring characteristics of phosphorus-derived smoke [J]. Infrared Technology(陈作如,宋敬埔,罗蕴华,等.磷烟的远红外遮蔽特性研究.红外技术),1993,15(1):41-44.
- .....
- (上接第 635 页)
- [2] JIANG Pan-lin, LI Jia-xiang. Threaten environment of electronic attack to military space-based system[J].Space Electronic Warfare(蒋盘林,李加祥.军事空间系统面临的电子攻击威胁环境.航天电子对抗),2003,19(1):1-5.
  - [3] GUAN Xiao-xian, PIAO Xian-qing, SUN Jing, et al. Research on soft-killing tactical laser weapon and its mechanism[J].Infrared and Laser Engineering(关效贤,朴贤卿,孙晶,等.软杀伤战术激光武器及作用机理的研究.红外与激光工程),2004,33(2):118-120.
  - [4] ZHU Wei-gang, HOU Guo-jiang, PEI Shi-bing. Application of space-based lasers constellations for ballistic missile defense[J]. Infrared and Laser Engineering(朱卫纲,侯国江,裴世兵.空间激光武器网在弹道导弹防御中的应用.红外与激光工程),2004,33(2):121-124.
  - [5] QI Sheng-li,LU Zhan-kun. The status and development trend of space electronic warfare technique[J].Electronic Warfare(齐胜利,卢占坤.空间电子对抗技术的现状及发展趋势.电子对抗),2003,26(4):6-9.
  - [6] Collings P J,Patel J S.Handbook of Liquid Crystal Research[M]. UK:Oxford Univ Press, 1997.115-130.
  - [7] Potasek M, Kim S J.Nonlinear transmission of laser radiation for eye and sensor protection[J].Nonlinear Phys And Mat,2000,9 : 343-364.
  - [8] Khoo I C, Wood M V,Shih M Y, et al. Extremely nonlinear photosensitive liquid crystals for image sensing and sensor protection[J].Optics Express, 1999,4(11):432-442.