

文章编号: 1001-3806(2005)04-0414-03

激光干扰星载 CCD 的技术研究

陶小红, 孙晓泉, 蔡晓春

(解放军电子工程学院, 合肥 230037)

摘要: 介绍了 CCD 的工作原理及激光对 CCD 的干扰机理。分析了激光在大气中的传输特性, 对激光干扰星载 CCD 所需的发射功率进行了估算。得出要达到干扰目的必须达到 $\geq 10^9$ W 数量级。最后总结了激光干扰星载 CCD 的几项关键技术。

关键词: 激光; 星载 CCD; 大气传输; 干扰

中图分类号: TN972 **文献标识码:** A

Research of laser disturbing satellite-based CCD

TAO Xiao-hong, SUN Xiao-quan, CAI Xiao-chun

(Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei 230037, China)

Abstract: The working principle of CCD and laser disturbing principle are introduced. After analyzing the laser transmission characteristics in atmosphere, laser output power needed to disturb satellite-based CCD is calculated, which should reach 10^9 W. Finally some key technologies are put forward.

Key words: laser; satellite-based CCD; air transmission; disturb

引 言

现代战争,是以信息战为主导的高科技战争,谁夺取了制信息权,谁就获得了战场的主动。而局部战场的部署、态势、目标特征等高分辨率图像信息是夺取战场信息控制权甚至战争胜败的关键因素。目前,美军充分利用光学波段可以获得高空间分辨率、高的光谱分辨率的特点,大力发展数字化光学成像侦察技术,其卫星的平面成像分辨率已经达到厘米量级。其中, KH-11 “锁眼”式卫星能够认出直径为 10cm~20cm 的物体,它配置有红外传感器,能够在夜间工作。KH-12 卫星是目前最先进的照相侦察卫星,它获得的图像,可以分辨出战场上的各种细节。高分辨率成像侦察卫星的成像仪器多数为 CCD 相机,因此研究激光干扰星载 CCD 成像技术是十分必要的。

1 CCD 工作原理与干扰机理分析

1.1 CCD 工作原理分析

电荷耦合器件 (charge-couple devices, CCD) 具有体积小、重量轻、灵敏度高、寿命长、低功耗、动态范围大等优点,因而受到人们的重视,并在许多领域获得广

作者简介:陶小红 (1980-),男,硕士研究生,主要从事光学侦察与光电对抗方面的研究工作。

E-mail: txheei@ah163.com

收稿日期: 2004-04-21;收到修改稿日期: 2004-06-16

泛的应用,特别是在摄像领域。在工业、军事和科学研究等领域中,如方位测量、遥感遥测、图像制导、图像识别等方面, CCD 更呈现出高分辨率、高准确度、高可靠性等突出优点,尤其是应用于成像侦察卫星上。

当 CCD 工作时,可以用光注入或电注入的方法向势阱注入电荷,以获得自由电子或自由空穴,形成电荷包。提取信号时,利用耗尽层耦合原理,即加在 MOS 电容器上的电压越高,产生的势阱越深,进行电荷的转移。CCD 中的电荷转移必须按照确定的方向。为此, MOS 电容器列阵上所加的电位脉冲必须严格满足相位时序要求,使得任何时候势阱的变化总是朝着一个方向。最后检测出输出电荷,成为视频信号^[1]。

1.2 CCD 干扰机理分析

当强光辐照 CCD 时可使局部 p-n 结退化为电阻,使得电阻降低,伏安曲线变直。当光功率密度超过 CCD 的线性区时, CCD 的输出便会出现饱和,不仅全域辐照可以造成 CCD 全域饱和,还存在一种“光饱和串音”现象。即当用强光辐照 CCD 光敏区局部时,被光照射的区域达到了饱和,未被光照射的区域首先是沿电荷传输方向出现亮线,光强不断增加,则亮线不断加宽,甚至整个光敏区处于饱和。光饱和并没有对器件及其组成材料造成损伤,但却干扰了 CCD 的正常工作。另外,点扩散函数 (PSF) 和调制传递函数 (MTF) 也会软化。

CCD 的少数几个像元受强光辐照破坏后,其效果

将是整个器件无信号输出,而不是像场中存在几个暗点。这归因于其结构和工作方式,器件会因驱动信号的混乱无法工作。此外,其串行输出的结构又必然导致当中间某处由汽化造成断路时整个器件将无信号输出^[2]。

2 激光干扰星载 CCD

激光对近地面 CCD 干扰的阈值试验与分析已有许多家单位做过研究^[3~5]。由于光学成像卫星工作在 300km 左右的高空,所以,用激光干扰星载 CCD 相机时,必须考虑大气对激光传输的影响。这些影响可分为线性和非线性的,其中大气分子和大气气溶胶的吸收与散射,大气湍流等属于线性效应,其效应的大小与激光强度无关。而受激喇曼散射、热晕等属于非线性效应,非线性效应的大小与激光强度密切相关。此外,激光干扰星载 CCD 时,激光所达到的功率还受卫星角速度和卫星所处位置的影响。现以军事上最常用的 1.06 μm 激光器为例,初略对激光经过大气干扰星载 CCD 所需的输出功率进行估算。

2.1 激光输出功率要求

高能激光武器能否有效地达到干扰星载 CCD 的目的,取决于激光束在经过远距离传输后达到目标的激光功率密度是否能达到或超过干扰所需的阈值功率密度 I_m 。定义光束质量如下:

$$\beta = (P_i/P_a)^{1/2} \quad (1)$$

式中, P_i 是理想激光束在目标处的一定半径之内的功率, P_a 是实际光束在目标处相同半径内的功率。因为基模光束的远场发散角为 $4\lambda/\pi D$ (D 是激光发射镜的有效口径),故达到干扰目的所需聚焦光束的输出激光功率为^[6]:

$$P \geq \frac{I_m \beta^2 S}{\eta T} = \frac{I_m \beta^2 \pi \left(\frac{4\lambda}{\pi D} R \right)^2}{4\eta T} \quad (2)$$

式中, η 是系统的传输效率, T 是大气透过率, S 是照射在目标上的光斑面积, R 是目标距离。

2.2 大气衰减与大气层的折射误差

对于 1.06 μm 这一最为重要的激光波长,理论和实践都表明:光辐射的衰减因子主要是大气气溶胶的吸收和散射,诸如水汽, CO_2 等分子的吸收和大气分子的散射在大多数情况下仅占总衰减的 1%,完全可以忽略不计。国内学者基于自己的试验结果和所提出的大气气溶胶模型,编制了 CRTRAN 计算软件,并且进一步发现对于 1.06 μm 波长的激光,大气透过率可以用下式进行计算:

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

式中, θ 为天顶角, K 为一常数,取决于大气气溶胶类型,如在乡村 $K=2\ 288$,城市 $K=3\ 132$, V_m 为能见度。

随着距地面高度的增加,衰减效应明显减小,至 40km 处衰减几乎为 0。已经计算出 1.06 μm 激光在晴朗标准大气压下 ($V_m > 23$) 垂直经过大气层的透射率可达 0.91^[7]。

大气层按离地面高度及其物理、电气特性,大体可分为 5 层:对流层、平流层、中间层、热成层和逸散层。激光在穿越大气层时,大气折射指数的变化使激光的传输发生偏折,激光束将偏离目标并向折射指数大的方向偏折。如图 1 所示, r_0 为地球半径, ϕ 为地心张

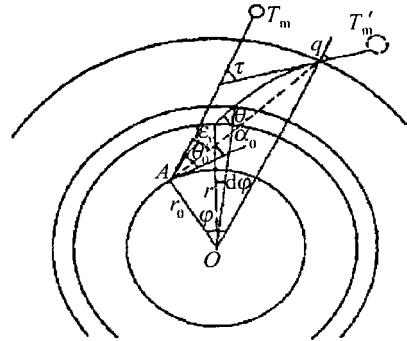


Fig. 1 Sketch map of laser refraction through atmosphere

角, ϵ_i 是初始发射仰角 θ_0 与视线仰角 α_0 之差, r 是大气任一薄层到地心的距离, $d\phi$ 表示地心张角变化, τ 为发射激光束的射线与在 q 点射线的交角。激光由 A 点向目标 T_m 发射,将沿弧线到达 q 点,再沿射线到达 T_m' ,从而偏离目标 T_m 一定距离。有人根据 Snell 定律分析了激光穿越大气层时的折射误差,计算了折射误差与激光束初始仰角的关系,提出了激光攻击卫星时误差修正所需考虑的问题^[8]。

2.3 大气湍流对光束质量的影响

大气湍流实质上是折射率的随机起伏,主要来自大气温度的变化,如下式所示:

$$\delta N \approx \frac{79 \times 10^{-6}}{\gamma - 1} \frac{p}{T^2} \delta T \quad (4)$$

式中, γ 为气体比定压热容与比定容热容之比,对于空气, $\gamma = 1.4$ 。激光束穿过湍流大气时,会出现一系列光学特性的改变。湍流效应与湍流强度有关外,还决定于光束直径 a 和小气团尺寸 l 的相对大小。当 $(a/l) \ll 1$ 时,湍流作用使光束产生随机偏折,使光束传播方向或是光束在接收面上的投影位置发生随机飘荡,称为光束漂移;当 $(a/l) \approx 1$ 时,湍流作用使光束截面发生随机偏转,从而形成到达角起伏;当 $(a/l) \gg 1$ 时,光束光强在空间和时间上随机分布,使光束产生闪烁,相位严重畸变,空间相干性降低,光束扩散,光束面积扩大。

光束漂移在大多数情况下对激光应用的影响不大,但光束扩散会大大降低激光的功率密度,可以等价为了降低了光束质量,一种较为严格的方法是利用光束

质量与波前起伏 δ 的关系:

$$\beta = \exp(2\pi^2 \delta^2) \quad (5)$$

通过计算激光束的波前来求得光束质量。Zemike多模式是一种应用较广的对波前的近似描述^[9]。

2.4 热晕对光束质量的影响

光束通路上的空气因吸收激光能量而温度升高,折射率发生变化,也能使光束畸变,称为热晕。热晕引起畸变与光束强度有关,是一种非线性效应。有热晕的情况下,初始高斯光束在传播路径上的光功率分布可写为:

$$I_p(r, z) = I_p(r, 0) \exp(-\alpha z - N_c e^{-r^2/w^2}) \quad (6)$$

式中, r 是模截面上的径向坐标, α 是吸收系数, w 是光斑半径, N_c 是代表热晕强度的无量纲参数。当有风存在时,热晕强度是风速 v_w , 空气比定压热容 c_p 和密度 ρ 的函数,并可写为:

$$N_c = - \frac{5.88P(dn/dT)}{\pi w^3 n \rho c_p v_w} \frac{1}{2} \alpha_c z^2 \quad (7)$$

式中, P 是光束功率, n 是大气折射率,它是温度的函数。在实验和波动光学计算的基础上,经推导可以证明与热晕相应的光束质量为^[10]:

$$\beta = \sqrt{1 + kN_c^m} \quad (8)$$

式中,参数 k 和 m 依赖于原光束在横截面上的能量分布,如果热晕前横截面上光能均匀分布,则 $k=0.01$, $m=1.2$;而对于高斯光束,则 $k=0.0625$, $m=2$ 。

2.5 工程估算

由光源、传播路径等部分引起的波前畸变、光斑漂移和跳动诸要素所决定的光束质量统统求出后,依次相乘的积便是总的光束质量。当总的光束质量超过 1.7,光束质量会明显变差。

为了克服光束在大气中传输时的线性畸变和非线性热晕,激光武器需要具有光学校正功能的光束发射系统,用于克服激光器的误差、失调、扰动、器件变形和工作介质非线性效应引起的波前误差,以及用于校正大气传输中由于湍流和热晕等效应所造成的光学畸变。为补偿激光大气传输时受到的湍流等影响,可采用自适应光学技术。

现假设用 $1.06\mu\text{m}$ 的激光器干扰星载 CCD。卫星距地面高度为 300km , $1.06\mu\text{m}$ 的激光在良好天气下垂直穿过大气层的透过率为 0.91。CCD 在近距离被干扰的饱和功率阈值为 $29\text{nW}/\text{mm}^2$ ^[4],可计算出远距离干扰 CCD 所需的阈值功率密度为:

$$I_{th} = \frac{29 \times 10^{-3}}{(3 \times 10^5)^{-2}} = 2.61 \times 10^9 \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (9)$$

如果不考虑系统传输效率损失,可认为 $\eta=1$ 。经验表明,系统的光束质量达到 1.3 以上是很困难的,而达到 2 则较容易。发射望远镜的口径应该在 $1\text{m} \sim 2\text{m}$ 之间,大于 2m 则加工困难,小于 1m 则公认可能会过分限制系统其它部件,取 $D=1.2\text{m}$ 。将以上参数代入 (2) 式中,算出达到干扰目的所需的激光发射功率为 $P \geq 1.03 \times 10^9 \text{ W}$ 。

一般低轨道卫星的运动速度为 7.908km/s ,所以在当激光穿越 300km 时间内,卫星已经移动了:

$$\Delta R = \frac{300 \times 10^3}{3 \times 10^8} \times 7.908 \times 10^3 = 7.908\text{m} \quad (10)$$

卫星的轨道可由平时侦察或其它手段获取。在知道卫星的轨道后,即可确定卫星在某一时间段的具体位置、距离地面高度和飞行速度等参数,卫星的视场角为 $2^\circ \sim 3^\circ$ 。这样就可精确跟踪卫星并进行有效瞄准,持续发射激光干扰星载 CCD,使卫星致盲或致眩。

3 结论

卫星一般距离地面较高,因此,要干扰星载 CCD 需要考虑大气所产生的各种影响。通过估算可知,要达到干扰目的,激光发射功率要达到 10^9 W 数量级以上。因此,高能激光武器干扰星载 CCD 应存在几项关键技术:高能激光器设计技术,精密跟踪瞄准技术,强激光束定向发射技术,大气传输与自适应光学补偿技术。

参考文献

- [1] 王庆友,孙学珠. CCD 应用技术 [M]. 天津:天津大学出版社, 1993. 46~56
- [2] 钟海荣,陆启生,文铁峰 *et al* 激光辐射 CCD 的破坏机理分析 [J]. 强激光与粒子束, 1998, 10(4): 537~542
- [3] 倪晓武,陆建,贺安之. 激光对 CCD 器件破坏时几种阈值的测量 [J]. 激光技术, 1994, 18(3): 153~156
- [4] 蔡德芳,史晓华,文建国 *et al* CCD 探测器饱和和阈值的光谱特性研究 [J]. 激光杂志, 2000, 21(3): 14~15
- [5] 陈德章,卿光弼,张承铨 *et al* 激光对 CCD 固体摄像器的饱和干扰效应 [J]. 激光技术, 1997, 21(3): 146~148
- [6] 孙晓泉,吕跃广. 激光对抗原理与技术 [M]. 北京:解放军出版社, 2000. 84~85
- [7] 杨洋,赵远,乔立杰 *et al* $1.06\mu\text{m}$ 激光的大气传输特性 [J]. 红外与激光工程, 1999, 28(1): 15~19
- [8] 路远,凌永顺,聂劲松. 激光穿越大气层时的折射误差研究 [J]. 红外与激光工程, 2003, 32(1): 69~72
- [9] 阎吉祥. 激光武器 [M]. 北京:国防工业出版社, 1996. 23~24
- [10] 孙晓泉,吕跃广. 激光对抗原理与技术 [M]. 北京:解放军出版社, 2000. 91~92