

文章编号: 1001-5078 (2006) 09-0889-04

# 星载激光告警探测系统设计

张亚萍

(哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**采用光谱识别型与成像型相结合的原理,提出了两种凝视型星载激光告警探测系统的设计方案,并利用 CODE V 和 ZEMAX 光学软件对两种探测系统进行了仿真模拟与优化。这两种探测系统能对目前典型的四种波长,即 1.315 $\mu\text{m}$ 、2.7 $\mu\text{m}$ 、3.8 $\mu\text{m}$  和 10.6 $\mu\text{m}$  的红外激光进行预警,其理论分析和仿真结果都达到了指标要求。

**关键词:**红外;激光告警系统;卫星;激光武器;光学设计

**中图分类号:** TN977 **文献标识码:** A

## The Design of Satellite Borne Laser Warning Detecting System

ZHANG Ya-ping

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In the paper two schemes of staring satellite borne laser warning detecting system based on the principle of spectrum identify and imaging are introduced. These two systems are analyzed and optimized by using CODE V and ZEMAX softwares. These systems can detect four kinds of typical lasers with wavelength of 1.315 $\mu\text{m}$ , 2.7 $\mu\text{m}$ , 3.8 $\mu\text{m}$  and 10.6 $\mu\text{m}$  at present. The theory analysis and emulation results come to the targets.

**Key words:** infrared; laser warning system; satellite; laser weapon; optical design

### 1 引言

随着反卫星武器的发展,尤其是激光武器的日趋成熟,为提高卫星的生存率,各国对激光威胁的侦察、探测和告警工作都极为重视,先后研制了多种形式的激光告警接收机。目前尚未见有关国外星载激光告警器技术和装备的直接报道,但从对美、俄等国的试验技术跟踪分析研究看来,其应该已装备了星载激光告警与防护设备,并已经具有了一定的空间作战能力<sup>[1-4]</sup>。

国内的激光告警技术研究还处于起步阶段<sup>[5-6]</sup>,尚没有成熟的技术和完整的实验结果。目前我国军用光学成像侦察卫星已经面临激光武器的严重威胁,优先发展激光防御技术,尤其是星载激光告警技术已成为当务之急,具有重大的军事意义和良好的军事应用前景。

### 2 探测系统原理

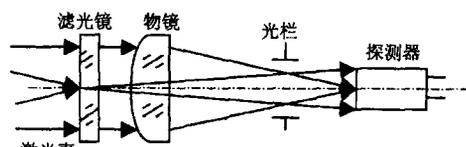


图 1 激光辐射探测系统的原理

Fig 1 optical principle of laser radiation detecting system

星载激光告警系统是一种特殊的光学遥感器,安装在卫星易于受到反卫星激光武器攻击的部位,用于相对地球背景探测、测量、识别和评估敌方激光武器辐射性能的光电设备。探测到的信号由星上数据处理系统进行快速的分析与处理,判断是否有激光武器的袭击,将告警信号发送给卫星及遥感器的

作者简介:张亚萍(1978-),女,博士,主要从事激光告警与气动光学方面研究。E-mail: yaping\_zhang@gmail.com

收稿日期: 2006-03-21

防护体系,并下传至地面控制中心。

激光辐射探测系统的基本光学原理如图 1 所示,来袭激光束通过滤光镜后,选择有用的工作波段,然后由接收物镜会聚在光电探测器的光敏面上,其中光栏的作用是限制视场大小。光电探测器输出来袭激光的各种参数,并判断其威胁性,给出相应的告警信号<sup>[7]</sup>。

目前星载激光告警探测系统的设计按探测工作原理主要有光谱识别型和成像型。光谱识别型通过探测装置探测到某个波长的激光能量,从而判断可能存在的激光威胁,该系统可以探测多个波长的激光,但是不能精确定位来袭方向;成像型通过红外电荷耦合器件 (CCD)或位置传感探测器件 (PSD)将来袭激光成像,可以精确定位来袭方向,但是只能单波长工作<sup>[7-8]</sup>。

### 3 星载激光告警探测系统设计

星载激光告警探测系统的设计原则,首先要求光学系统探测距离远、接收空域大、抗干扰能力强;其次要求系统结构简单、方案先进、原理新颖及成本低廉<sup>[9]</sup>;并且满足以下几个要求:1)在普通的红外激光采集系统中光路大都采用反射式结构,以增加光辐射的收集能力,而星载告警系统为避免由于强激光引起的过载需要衰减能量,并且考虑到设计和安装方便,必须采用透射式光路结构;2)根据实战经验,激光反卫星武器的照射时间一般在 1~100s,激光告警系统的反应时间应为毫秒量级,才能满足激光防护系统的要求;3)目前,根据战场上激光武器的跟踪调查,来自威胁源激光的波长主要有以下四种,1.315 $\mu\text{m}$ (氧碘激光器)、2.7 $\mu\text{m}$ (氟化氢激光器)、3.8 $\mu\text{m}$ (氟化氙激光器)和 10.6 $\mu\text{m}$ (二氧化碳激光器)<sup>[10]</sup>,告警系统至少能够对这四种典型波长激光进行探测。

为达到以上要求,本文将光谱识别型和成像型原理结合设计了两套凝视型告警系统,可以探测宽光谱范围内的来袭激光并进行精确定位。设计选取的两种探测器为 PbSe和 HgCdTe,对于 PbSe反应时间小于 50 $\mu\text{s}$ ,对于 HgCdTe则反应时间小于 1 $\mu\text{s}$ ,甚至是纳米量级,能够满足设计要求。

#### 3.1 设计方案一

在激光接收机中分别设置对应四种波段的光谱通道,其探测系统的基本原理如图 2 所示。

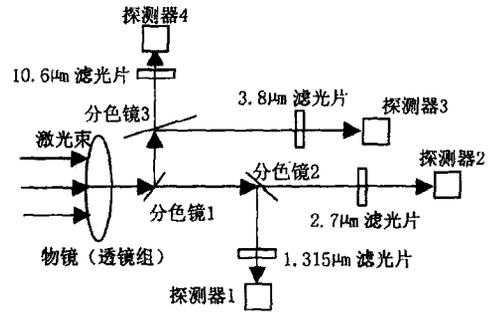


图 2 四光谱通道光路

Fig 2 beam path with four channels

来袭激光经过共用的透镜组后进入分光系统,其中分色镜 1对波长大于 3.0 $\mu\text{m}$ 全反,小于 3.0 $\mu\text{m}$ 全透;分色镜 2对波长小于 2.0 $\mu\text{m}$ 全反,大于 2.0 $\mu\text{m}$ 全透;分色镜 3对波长小于 5.0 $\mu\text{m}$ 全反,大于 5.0 $\mu\text{m}$ 全透。这样在四个探测器上对四种波段进行独立的检测,实现了光谱识别。采用波段分光镜,其优点是通过控制分光镜的分光比可以控制不同波段的激光到达探测器的能量,从而与光电探测器的响应谱段和响应率匹配。四个探测器为面阵探测器,其中探测器 1、2和 3各用一个 PbSe红外面阵探测器,探测器 4采用 HgCdTe红外面阵探测器。面阵产生的整帧视频信号与仅包含背景信号的原始帧用数字方法相减,帧减的结果显示为一个表示位置(方位角和俯仰角)的亮点,可以精确定位辐射源的方位。

根据以上设计思路选定光学结构,并按照技术指标要求和像差理论,确定初始结构参数,用 CODE V软件设计分析计算并进行了优化。此设计思路的优点在于对方位、波长的测定极为准确,但从经济角度考虑红外探测器价格比较昂贵,该方案中需要四个红外探测器,使整体成本上升。

#### 3.2 设计方案二

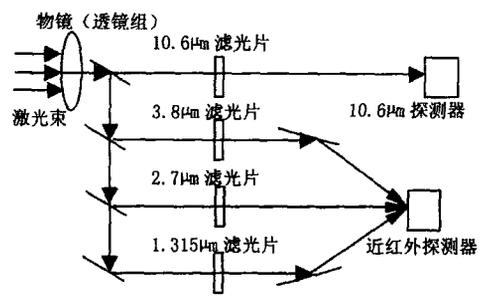


图 3 两光谱通道光路

Fig 3 beam path with two channels

如不需测定来袭激光的具体波长,则图 3 示出

的改进光路更为可取。在接收机中将对应四种波长的光谱通道改为两个通道,即 1. 315 $\mu\text{m}$ 、2. 7 $\mu\text{m}$ 、3. 8 $\mu\text{m}$ 共用一个 InSb红外面阵探测器,10. 6 $\mu\text{m}$ 采用一个 HgCdTe红外面阵探测器。三种近红外波长共用一个探测器,可以压缩结构尺寸和重量,并降低系统成本。

如果图 3 中 1. 315 $\mu\text{m}$ 、2. 7 $\mu\text{m}$ 和 3. 8 $\mu\text{m}$ 的滤光片能够共用,则可以使光路设计进一步精简,并减少分光镜的数量,如图 4 所示。其中转盘滤光片的结构如图 5 所示,将 1. 315 $\mu\text{m}$ /2. 7 $\mu\text{m}$ /3. 8 $\mu\text{m}$ 三个波长的滤光片共同安装在一个旋转圆盘上,通过圆盘的旋转使每次只有一个确定波长的光通过滤光片。与图 3 方案相比,由于使用了转盘滤光片,图 4 光路能够测定来袭激光的具体波长。

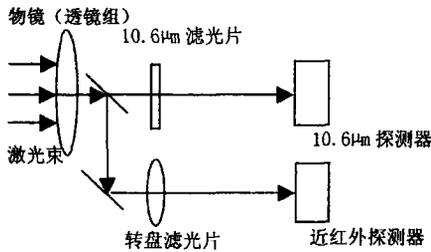


图 4 使用转盘滤光片的两光谱通道光路

Fig 4 beam path with two channels using rotating filter

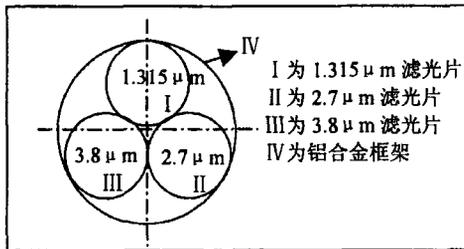


图 5 转盘滤光片的结构

Fig 5 structure of rotating filter

为确定光学系统初始结构参数,用 ZEMAX 软件进行设计分析和优化计算,下面以 10. 6 $\mu\text{m}$  波长为例给出探测光路设计过程,表 1 为设计指标。

表 1 10. 6 $\mu\text{m}$  波长探测光路设计指标

Table 1 the design index of detecting light path for 10. 6 $\mu\text{m}$  laser

设计波长	10. 6 $\mu\text{m}$	视场角 $2\omega$	50°
轨道高度	500km	像元尺寸	30 $\mu\text{m}$ ×30 $\mu\text{m}$

### 3. 2 1 焦距的确定

根据指标要求,红外光学系统轨道高度为 500km,像元分辨率根据需要选定为 200m。方案选

取的接收器件为 256 ×256 的面阵探测器,像元大小为 30 $\mu\text{m}$  ×30 $\mu\text{m}$ 。

设辐射接收器的大小为  $2y$ ,视场角为  $2\omega$ , $f$  为光学系统的焦距,有如下关系式:

$$\frac{2y}{1 - \dots} = - 2f \tan\omega \tag{1}$$

其中,为光学系统的放大率,由于本系统的物距远大于像距,所以  $\dots = 0$ ,由式 (1) 可以求得焦距  $f = - y / \tan\omega = 62\text{mm}$ 。

### 3 2 2 相对孔径的确定

面阵探测器把一幅空间分布的热图像,变化成按时间顺序分布的视频电压信号,所以面阵探测传感器的视频电压信号强弱与像面能量照度、器件的灵敏度、电荷存储、转移和读出均有关。在给定目标能量辐照度  $M_e(\dots, T)$  时,光学系统对辐射聚焦的能力用在辐射接收器上形成的辐照度  $E_{eo}$  来描述。对于轴对称光学系统的轴上点,有下面的公式<sup>[12]</sup>

$$E_{eo} = \frac{a(\dots) o(\dots) M_e(\dots, T)}{4(1 - L/p)} \left(\frac{D}{f}\right)^2 \tag{2}$$

式中,  $a(\dots)$  为大气光谱透过率;  $o(\dots)$  为光学玻璃光谱透过率;  $\frac{D}{f}$  为光学系统的相对孔径;  $L$  为像的(横向)线放大率;  $p$  为像在瞳孔处的线放大率。

从以上公式可以看出,轴上点辐照度与系统的透过率、相对孔径成正比。由此可知,系统的相对孔径越大,像面上辐照度越大,但相对孔径增大又会给外形尺寸和成像质量带来一系列的问题。因此,系统的相对孔径必须与相应的接收器件性能、使用条件和系统工作的灵敏度匹配。综合考虑这些条件后确定相对孔径  $D/f$  为 1 1. 5。

### 3. 2 3 设计结果

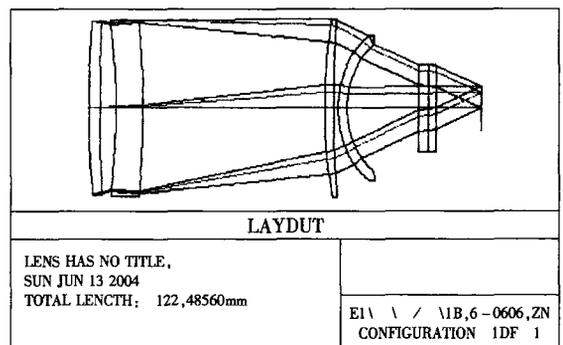


图 6 ZEMAX 仿真优化光学系统

Fig 6 simulate and optimize the optical system using ZEMAX

用 ZEMAX 光学软件设计优化的光学系统,结果如图 6 所示,选型是锗-锗-锗-硅四组物镜,其中光阑在第一面镜上,第九到第十一个面是滤光片,最后成像在像面处的 HgCdTe 红外面阵探测器上。

### 3.2.4 光学系统评价

因为系统探测目标为红外单色激光,其像差校正不是主要问题,只需通过点列图和系统的光程差,即可评价光学系统的优良与否。用 ZEMAX 软件计算结果如下。

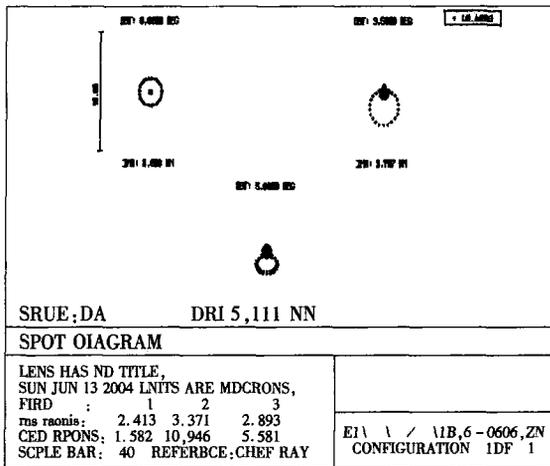


图 7 光学系统点列图 (10.6 μm)

Fig 7 spot diagram of the optical system (10.6 μm)

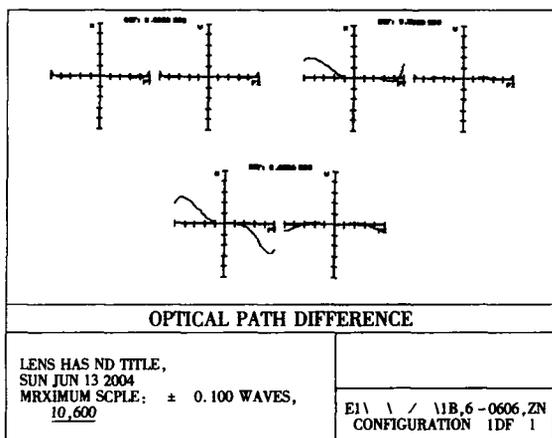


图 8 光学系统光程差 (10.6 μm)

Fig 8 optical path difference of the optical system (10.6 μm)

通过点列图可以看出光线扩散的大略程度,由图 7 可以看出 RMS 值和 GED 值在三个视场内都很小,说明光学系统的能量比较集中,有利于对弱信号的探测。光程差如图 8 所示,已达到 0.1 个波长范围之内,可以通过校正物空间的光线,使其正确地充满光阑面,光学系统的像差校正效果良好。

## 4 结论

方案一采用波段分光镜,能够与光电探测器的响应谱段和响应率匹配,但是光路复杂,成本较高。方案二将 1.315 μm、2.7 μm、3.8 μm 共用一个 InSb 红外面阵探测器,并且通过一个特殊的转盘滤光片简化了光学结构,达到光路简单,成本低的要求。

理论分析和仿真结果表明,两种探测系统能够精确判断来袭激光的波长和方位,并且系统功耗小于 10W,反应时间小于 1ms,各项指标符合设计要求。随着应用于战场的激光武器的发展,此星载激光告警光学系统具有重大的军事意义。

### 参考文献:

- [1] Dave H Hilland, et al Satellite Threat Warning and Attack Reporting [A]. IEEE Aerospace Conference, 1998, 2: 207 - 217.
- [2] V A Manasson, et al Laser Warning Based on Coherence Discrimination [A]. Aerospace and Electronics Conference [C]. Proceedings of the IEEE 1996 National, 2: 869 - 873.
- [3] 任宁,秦凤英. 国外激光对抗预警卫星的技术浅析 [J]. 光电对抗与无源干扰, 2003, (1): 12 - 15.
- [4] 章雅平. 美国陆军激光反卫星实验及初步分析 [J]. 中国航天, 1998, (8): 5.
- [5] 王喜焱,张洁. 激光告警设备的发展过程及现状 [J]. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2002, (6): 22 - 29.
- [6] 付伟. 激光对抗技术发展动态 [J]. 激光与红外, 1994, 24 (2): 34.
- [7] 张洁. 激光告警设备的组成和工作原理 [J]. 航天电子对抗, 2002, (2): 42 - 46.
- [8] 付伟. 星载激光告警与面目标激光告警组网技术 [J]. 现代防卸技术, 2002, 30 (4): 41 - 45.
- [9] 李宏章. 光电对抗系统中激光辐射探测光学系统的研究 [J]. 光电对抗与无源干扰, 1996, (4): 21 - 50.
- [10] 吴新宇,陈拥军,张华达,等. 大视场激光探测与告警技术 [J]. 光电工程, 2004, 7 (31): 5 - 7.
- [11] 农宁宁,林永. 激光武器技术的发展现状 [J]. 电子器件, 1999, 22 (4): 299 - 304.
- [12] 兵器工业第 209 研究所. 光电对抗器系统手册 [M]. 1999, 6.
- [13] B T 科洛勃罗多夫, N 舒斯特. 红外热成像 [M]. (航天工业总公司第三研究院三部、八三五八所联合翻译出版). 1994: 55 - 65.