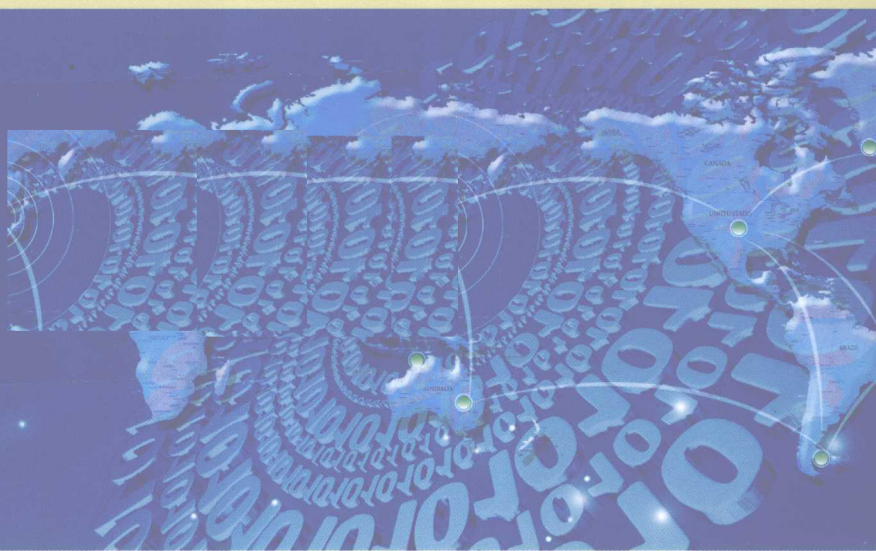




现代光电信息 技术及应用

XIANDAI GUANGDIAN XINXI
JISHU JI YINGYONG



张记龙 郝晓剑 李晓 等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

现代光电信息技术及应用

张记龙 郝晓剑 李晓 张志伟 赵俊奇 赵冬娥 著

国防工业出版社

· 北京 ·

前 言

光具有极快的速度、极大的频宽、极高的信息容量,在现代信息技术中得到了广泛的应用。现代光电信息技术是光学技术、光电子技术、微电子技术,信息技术、光信息技术、计算机技术、图像处理技术等相互交叉、相互渗透和相互结合的产物,是多学科综合技术,它研究以光波为信息的载体,通过对光波实施控制、调制、传感、转换、存储、处理和显示等技术方法,获取所需要的信息,其研究内容包括光的辐射、传输、探测、光与物质的相互作用以及光电信息的转换、存储、处理与显示等众多领域。

现代光电信息技术具有如下特点:其一,有效延伸人眼的视觉功能,使其探测阈值达到光子探测的极限水平,而探测的光谱范围在长波方向达到了亚毫米波段,在短波限则延伸到紫外线、X 射线、 γ 射线乃至高能粒子;其二,以光为信息载体,结合计算机的研究成果,极大地提高了光电系统的响应速度、带宽和信息容量。使超快速现象(核爆炸、火箭发射等)可以在纳秒(ns)、皮秒(ps)甚至飞秒(fs)量级得以记录,利用光网络的多台计算机传输和处理海量信息得以实现。

基于以上特点,现代光电信息技术已经广泛应用于国民经济和国防建设的各行各业。对信息技术产业的快速发展起着重要的作用。

本书是作者在光电信息技术领域多年研究工作的总结,全书共分六章。第 1 章论述激光告警技术及应用;第 2 章论述瞬态表面高温光电探测技术及应用;第 3 章论述甲烷浓度光电测试技术及其应用;第 4 章论述棱镜反射光技术及其在溶液浓度测量中的应用;第 5 章论述人眼视光学特性光电信息技术及应用;第 6 章论述激光光幕技术及应用。

本书第 1 章由张记龙教授撰写,第 2 章由郝晓剑教授撰写,第 3 章由李晓副教授撰写,第 4 章由张志伟副教授撰写,第 5 章由赵俊奇高工撰写,第 6 章由赵冬娥教授撰写,全书由张记龙教授统稿。

本书所涉及参考文献较多,作者虽试图将其一一列出,但也难免疏漏,对于遗漏,请读者谅解。我们对成书过程中参考过的所有文献资料的作者表示真诚的感谢。

现代光电信息技术涉及学科较多,尽管研究和成书过程中作者参阅了大量国内外相关资料,但因作者水平有限,仍难免有欠妥之处,诚恳广大读者批评指正。

目 录

第 1 章 激光告警技术及应用	1
1.1 概述	1
1.2 光谱识别型激光告警技术	2
1.2.1 非成像光谱识别型	2
1.2.2 成像光谱识别型	5
1.3 相干识别型激光告警技术	7
1.3.1 F-P 型激光告警技术	8
1.3.2 Michelson 干涉型激光告警技术	11
1.3.3 光栅衍射型激光告警技术	13
1.3.4 傅里叶变换激光告警技术	19
1.3.5 其他相干激光告警技术	30
1.4 激光告警技术发展趋势	31
参考文献	32
第 2 章 瞬态表面高温光电探测技术及应用	34
2.1 瞬态表面高温测量系统	34
2.1.1 蓝宝石光纤黑体腔传感器设计	34
2.1.2 测温原理	37
2.1.3 某导弹发射箱前框瞬态高温测试	40
2.2 可溯源瞬态表面温度传感器动态校准系统	43
2.2.1 系统组成及工作原理	43
2.2.2 热电偶温度传感器动态特性实验研究	45
2.3 瞬态超高温测试的外推方法	52
2.3.1 蓝宝石光纤黑体腔温度外推测试方法	52
2.3.2 模型的建立及分析	52
2.3.3 外推测温的实验验证	55
参考文献	57
第 3 章 甲烷浓度光电测试技术及其应用	58
3.1 概述	58

3.2	瓦斯气体检测的基本方法	58
3.3	气体特征光谱吸收原理	60
3.4	基于光谱吸收原理的检测方法	62
3.4.1	差分吸收技术	63
3.4.2	谐波检测技术	65
3.5	瓦斯气体监测系统设计	67
3.5.1	光源模块	69
3.5.2	传感模块	72
3.5.3	光电转换及电路模块	74
3.5.4	信号采集及处理模块	76
3.5.5	测试结果	77
3.6	瓦斯浓度与温度无线光纤光电混合网络	80
3.6.1	系统结构	80
3.6.2	无线传感网络节点	81
3.6.3	节点软件设计	84
3.6.4	区域差分定位算法	85
3.6.5	上位机监控系统	87
3.6.6	试验结果	89
	参考文献	89
第4章	棱镜反射光技术及其在溶液浓度测量中的应用	91
4.1	平面光波在界面的全反射特性和偏振光的产生	91
4.1.1	平面光波的全反射特性	91
4.1.2	消失波的基本概念及其特点	92
4.1.3	偏振光产生的基本原理和方法	93
4.2	金属薄膜的基本特性	95
4.2.1	金属薄膜光学特性的一般特点	95
4.2.2	银膜和金膜在应用中的特点	96
4.2.3	透明基片上的单层吸收膜的反射特性	96
4.3	表面等离子体共振传感器的基本概念和基本理论	98
4.3.1	等离子体与表面等离子体概念	98
4.3.2	表面等离子体共振效应的基本概念	99
4.3.3	表面等离子体波共振的三种解释	100
4.4	棱镜型表面等离子体共振传感器的理论研究	100
4.4.1	棱镜型 SPR 传感器金属膜的厚度	101
4.4.2	棱镜折射率对 SPR 传感器共振角的影响	102
4.4.3	溶液浓度对 SPR 传感器共振角的影响	103

4.4.4	光强度调制型 SPR 传感器测量溶液浓度	105
4.4.5	棱镜型 SPR 传感器的灵敏度与影响因数	106
4.5	保偏光纤及其在棱镜型 SPR 传感器中的应用研究	107
4.5.1	保偏光纤的基本原理	107
4.5.2	保偏光纤的结构特点	108
4.5.3	保偏光纤的精确定位方法	109
4.5.4	温度对保偏光纤的影响	110
4.5.5	棱镜型保偏光纤 SPR 传感器	111
4.6	基于菲涅耳公式测量溶液浓度的简单模型	112
4.6.1	基于菲涅耳公式测量溶液浓度的特点	112
4.6.2	基于菲涅耳公式测量溶液浓度计算模型的建立方法	112
4.6.3	基于菲涅耳公式测量溶液浓度的计算模型的实验装置	115
4.6.4	基于菲涅耳公式测量溶液浓度的计算程序	117
	参考文献	118
第 5 章	人眼视光学特性光电信息技术及应用	121
5.1	人眼屈光系统介绍	121
5.2	几种屈光度测试方法简介	121
5.2.1	插片法	121
5.2.2	光电验光仪器	122
5.3	客观式全自动光电验光原理及验光仪	123
5.3.1	屈光度测量系统	124
5.3.2	监视系统	125
5.3.3	眼底图像处理的计算方法	125
5.3.4	验光仪电子测量系统	126
5.3.5	光学拖动步进电机驱动细分控制技术	135
5.4	人眼角膜屈率图像的亚像素测量技术	139
5.4.1	光学测量原理	139
5.4.2	角膜图像处理	139
	参考文献	144
第 6 章	激光光幕技术及应用	146
6.1	光幕形成及其参数	146
6.2	激光光幕光学系统设计基础	147
6.2.1	高斯光束的传播	147
6.2.2	高斯光束准直扩束系统设计基础	148
6.3	激光光幕的形成技术	150

6.3.1	光源	150
6.3.2	半导体激光器准直系统设计	152
6.3.3	光强高斯分布型激光光幕	152
6.3.4	光强均布型激光光幕	154
6.4	激光光幕光电测速系统	156
6.4.1	激光光幕光电测速光学系统	156
6.4.2	光电检测器件及光电转换电路	158
6.4.3	激光光幕测速系统	162
6.4.4	激光光幕光电系统中的光干扰抑制技术	163
6.5	天幕技术及应用	164
6.5.1	天幕的形成	164
6.5.2	天幕测速系统	165
	参考文献	166

第1章 激光告警技术及应用

激光告警是光电对抗的组成部分,在现代光电信息战争中具有重要的应用。激光告警装置是用来探测和识别敌方来袭激光特征信息的光电被动侦察设备。其探测的对象是目前存在的激光测距机和目标指示器等发出的激光。本章论述激光被动探测原理,重点论述光谱探测和相干探测激光告警技术,并介绍光纤型、光栅型和傅里叶变换型激光告警接收机的相关技术及应用。

1.1 概 述

激光告警技术是光电对抗的组成部分,它是指在太阳光、闪电、雷电等光干扰复杂背景下,实时、可靠地告警敌方激光威胁的存在,确定威胁源的方位、种类及工作特性,进行光电报警的技术。

激光告警装置是用来探测和识别敌方来袭激光特征信息的光电被动侦察设备。其探测的对象是可能存在的激光测距机和目标指示器发出的激光。

激光告警装置可装配于飞机、地面车辆、舰船及卫星上,有两种不同的应用方式,一种为自保护用,另一种为电子保障系统监视临近战场用。如在图 1.1(a) 所示的自保护方式中,坦克或装甲车载激光告警装置告警机载激光目标指示器或测距机发来的激光的各种特征参数;在图 1.1(b) 所示的电子侦察方式中,激光告警装置安装于飞机上,用来监视战区的激光威胁,在坦克或者装甲车上并没有激光告警装置。激光告警装置探测的激光类型见表 1.1。

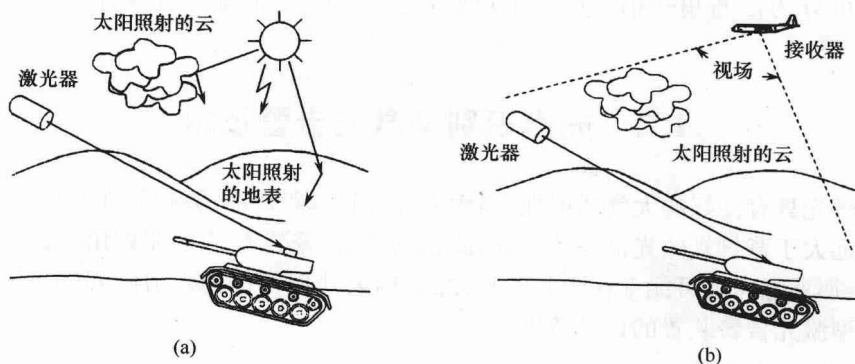


图 1.1 激光告警接收机的两种应用方式
(a) 自保护应用方式; (b) 电子侦察应用方式。

表 1.1 激光告警的典型激光参数

性能	测距机	目标指示器	照明器
波长/ μm	0.69, 1.06, 1.54, 10.6	1.06	0.9, 1.06, 10.6
作用距离/km	5 ~ 20	≤ 10	≤ 5
束散角/mrad	0.5 ~ 2	0.2 ~ 0.5	保持光斑直径恒定为 6m ~ 8m
峰值功率/W	$10^5 \sim 10^7$	$10^6 \sim 10^7$	$10^1 \sim 10^2$
脉宽/ns	10 ~ 20, 50 ~ 60	15 ~ 30, 60 ~ 90	$\leq 10^3$
重频/Hz	0.1 ~ 20	10 ~ 20	$10^3 \sim 10^5$
编码	不编码	脉冲编码	脉冲编码或空间花样编码或偏振编码

激光告警装置由辐射探测和信息处理两部分构成。其中,辐射探测部分是激光告警装置的前端,它必须能及时、灵敏、准确、全方位地接收激光辐射,为后续的信息处理提供可靠的信息;信息处理部分对光电信号进行处理后,得到入射激光的波长、方位等参数,要求它必须能够有效地滤除信号中的噪声干扰,快速地计算、判断出入射激光的波长与方向等信息。理想的激光告警装置应满足如下要求:

- (1) 告警器的视场足够宽,可接收来自各个方向的激光辐射;
- (2) 可告警的光谱带宽足以覆盖敌方可能使用的各种激光;
- (3) 能从太阳光、闪电、曳光弹及各种弹药爆炸产生的复杂光背景中准确分辨出激光脉冲,虚警率为零;
- (4) 能告警来袭激光的方向、波长等参数;
- (5) 告警距离大于 10km ~ 15km,反应时间适应现代战争的要求。

20 世纪 60 年代国外就开始了激光告警方面的研究,80 年代开始逐步装备部队,经过多年的发展,国外研制的激光告警设备已达几十种之多,技术上已日臻成熟。美国、英国、法国、德国和挪威等国家的研究水平较高。根据告警原理的不同,激光告警装置主要分为光谱识别型和相干识别型两类。其中光谱识别型又可分为非成像型和成像型,相干识别型又可分为法布里—珀罗(F-P)型、迈克尔逊型、光栅衍射型、傅里叶变换光谱型等。

1.2 光谱识别型激光告警技术

军用激光具有良好的大气透射性,当激光经过较远距离的传输后,在目标处的光谱辐照度仍然远大于背景光的光谱辐照度,因此,若激光告警装置探测到军用激光某个波长的激光能量,那就意味着可能存在激光威胁,经过相关处理可得到入射激光的方向,这就是光谱识别型激光告警装置的设计依据。

1.2.1 非成像光谱识别型

非成像光谱识别型激光告警装置通常采用具有特定空间分布的光电二极管作为激光告警元件(又称二极管阵列),来确定威胁源的方位,若在圆形阵列中均匀分布 N 个光电二极

管,则水平方向的角度分辨力为 $180^\circ/2N$ 。其成本低、技术难度小、告警灵敏度高,是世界各国开发最早、最为广泛的一种。但缺点是只能探测目前军用激光装备的特定工作波长,仅 $0.85\mu\text{m}$ 、 $1.06\mu\text{m}$ 、 $10.6\mu\text{m}$ 等有限几个,且不能对激光威胁源进行精确定位,虚警率高。

某非成像光谱识别型激光告警系统包括 5 套激光传感器。其中 1 套的光轴指向天顶,另外 4 套沿水平面对称分布,且每相邻两套的光轴互相正交。每套传感器的视场角均为 135° 。这种布置方式使每两相邻传感器有 45° 的重叠角空域,即使得系统的角分辨力为 45° 。当威胁激光源位于某个传感器的视场内时,该传感器便接收到来袭激光,而其余传感器则没有信号;若某两相邻传感器同时收到威胁激光信号,则来袭激光必在这两者的视场重叠区。由此即能判断激光威胁源所处的方位。

1. 阵列单元的组成

阵列单元包括激光告警头、信号处理器及报警/显示器等 3 个主要部件。其中,激光告警头由物镜、滤光片及光电转换器件组成;信号处理器包括阈值发生器、阈值比较器、前置放大器、主放大器、相关处理器、A/D 转换器及计算机等;报警/显示器则包括声/光/电警示装置、监视器和存储电路,如图 1.2 所示。图中 VD_1 、 VD_2 为两只相同的并联告警器。

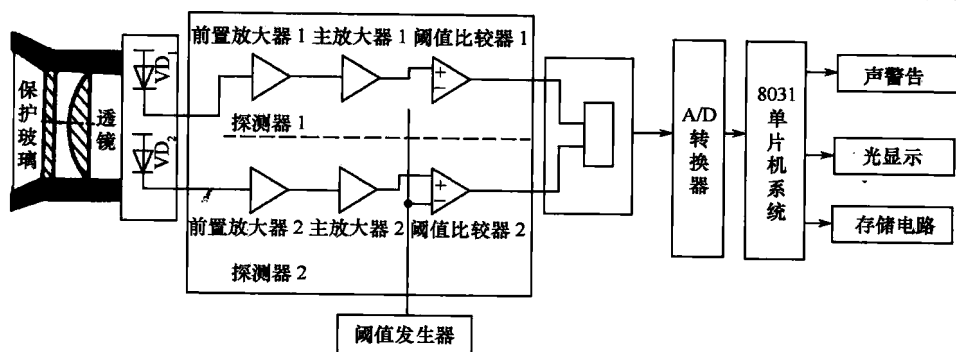


图 1.2 单个告警单元的结构

2. 多元相关告警原理

由图 1.2 看出,每个阵列单元物镜焦平面的同一聚焦点上有两个相同的关联告警器 VD_1 、 VD_2 ,且 VD_1 、 VD_2 各有独立的前置放大器、主放大器及阈值比较器。当有来袭激光进入该阵列单元时,信号经放大后由两阈值比较器进行比较,把低于阈值的噪声滤除,此后送至相关处理器。因为同一单元中的两个并联告警器同时出现白噪声的概率近乎为零,而来袭激光脉冲信号在两个告警器中具有相同的振幅和相位。故对二者做相关处理可确保目标信号被顺利提取,而告警器自身的噪声被有效地去除,从而在兼顾告警灵敏度的条件下使虚警率明显下降(告警器自身的白噪声是产生虚警的主要因素之一)。

3. 杂散光干扰的抑制

自然光及灯光、火焰、炮火闪光等都可能对激光告警器构成光干扰。为消除或抑制其影响,常采取以下措施:

(1) 光谱滤波。利用置入告警光路中的窄带滤光片,只允许激光威胁信号通过,摒弃其他光辐射,可取得很好的效果。

(2) 电子滤波。根据威胁激光信号的脉冲特征也可以抑制干扰。例如,敌方测距激

光的脉冲宽度常为 ns 量级,据此设计滤波器就可减少干扰。

(3)门限控制。威胁激光的幅值通常很高,基于此设计阈值比较器就可剔除低于阈值的噪声。

挪威 Simrad 公司和英国 Lasergage 公司合作研制生产的 RL1 型激光警戒接收机是最先报道且已批量装备部队的光谱识别型激光告警系统。可装备各种舰艇,以及各种飞机、直升机、武器系统和装甲战车。该系统由探测装置和显示器组成,其工作波段为 $0.6\mu\text{m} \sim 1.1\mu\text{m}$ 。探测装置方位覆盖 360° ,亦可探测来自上方的辐射。在一个装置中,有 5 个硅光电二极管探测器,其中 4 个水平安装,每个提供 135° 重复覆盖,相邻单元视场有 45° 的重叠区。还有 1 个垂直安装,提供上方的半球覆盖。显示器能指示激光威胁的到达方向,在水平和垂直方向上有 45° 的分辨能力,其方法是用 8 个发光二极管等间距排成一个圆,圆中心再装 1 个发光二极管(指示来自上方的激光辐射)。

属于此类的激光告警器还有英国 SAVIOUR 型、法国 THOMSON - CSF 型、以色列 LWS - 20 型等。其共同优点是结构简单、成本较低,缺点是定向精度不高。

适当增加阵列单元的数量可以提高角分辨力。例如,英国卜莱塞雷达公司在水平面内以圆对称形式布置 12 个告警单元,每个单元具有 45° 的视场角,每隔 30° 安置一个这样的单元,使每相邻两单元具有 15° 的视角重叠区。这就把水平方位的角分辨力提高到 15° ,系统也复杂一些。

国内此类激光告警装置的研究较晚,较早是在 1985 年报道的由闫万昌等研制的光谱识别型激光报警器,主要用于坦克及装甲车辆的激光警戒;1992 年卢万欣等人也报道了他们研制的光谱识别型激光预警装置。

2009 年,作者研制了光纤天线式非成像激光告警接收机。其主要技术指标为:可告警波长为 $1.06\mu\text{m}$ 、 $1.54\mu\text{m}$;告警视场,水平 $0^\circ \sim 360^\circ$,俯仰 $-10^\circ \sim +90^\circ$;分辨力,顶角 $\leq 30^\circ$ (空间角);告警距离 $\geq 5\text{ km}$ (标准大气条件下,激光器功率 $> 1\text{ mW}$,发散角 $< 2\text{ mrad}$);输入光动态范围 $\geq 50\text{ dB}$;告警概率 $\geq 98\%$;相应时间 $\leq 0.1\text{ s}$;连续工作时间为 12 h 。其原理如图 1.3 所示。

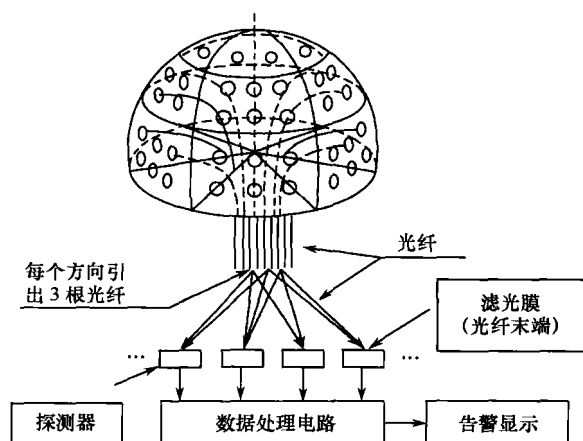


图 1.3 光纤天线激光告警机原理框图

该系统由光学天线、激光识别模块、编码识别处理模块及显示模块等几部分组成。光学天线可以覆盖全部的告警视场,水平按顶角 30° 的空间角排布光纤,其中虽然最小识别角度为 30° ,但考虑到激光入射方向偏离芯径光轴角度太大会影响光通量,所以这里选择每两根光纤有一定重叠夹角;激光识别模块将待测波长的激光从复杂的背景光中提取出来,其中涉及光学分离及电路处理两部分,光学部分采用滤光片及高灵敏光电二极管阵列采集微弱的光信号,既简单稳定成本又低,电路部分涉及微弱信号的处理,采用锁相放大、滤直去噪等技术得到理想的输入信号;编码识别处理模块将前期处理好的信号进行 A/D 转换、储存及识别编码类型;显示模块提供处理信息的实时显示,实现报警功能。

系统电路部分原理图如图 1.4 所示。当有脉冲激光来袭时,与光纤末端连接的光电二极管阵列告警单元产生感应电流,在前置放大电路的作用下,光电二极管输出的电流信号被放大成电压信号输出。峰值保持电路输出的信号一路经过比较器电路输入到控制芯片,由于光学接收天线前端设计了不同波长的光学窗口,所以不同窗口信号的输出就表征了特定波长激光信号的输入;另一路信号经由多路高精度的 A/D 转换器实现来袭激光强度的数字化表征,这样来袭激光入射方向在原有窗口的基础上可以实现编码细分,从而来袭激光的方向判别精度可以达到几度。其样机如图 1.5 所示。

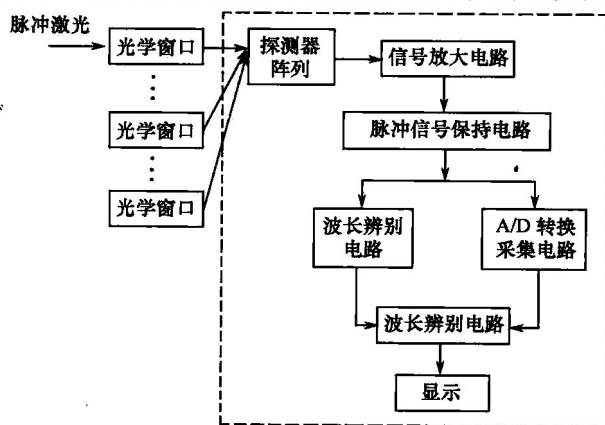


图 1.4 系统电路部分原理示意图

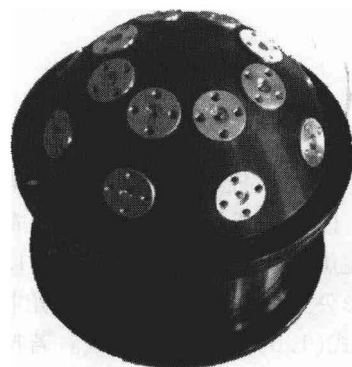


图 1.5 光纤天线激光告警样机

1.2.2 成像光谱识别型

成像光谱识别型激光告警设备通常也由探测和显控两个部件组成,探测部件主要由广角物镜或鱼镜头、CCD 面阵、窄带滤光片、分光镜、光电转换元件、有关电子线路及计算机组成;显控部件主要包括激光光斑显示器、警示信号装置、控制部件、指令传送接口以及信息存储单元等。其优点是:①视场大。采用鱼眼透镜可实现全空域的凝视监测,不需扫描,不存在由扫描而可能引起的漏探测。②角分辨率高。采用 CCD 成像器件,像元尺寸小(μm 级),为精度定位提供了先决条件,可使定向精度达 1mrad 左右。③虚警率低。采用双通道和帧减技术,消除了背景干扰,突出了激光信号,大大降低了虚警率。缺点是光学系统复杂,只能单波长工作且成本高,难以小型化。国外代表产品有美国陆军武器对抗办公室和仙童公司共同研制的激光寻的和警戒系统(LAHAWS)、美国 AIL 系统公司和 IMO 光电系统公司生产的 HALWR 高精度激光告警接收机,加拿大 HARLID 高角分辨率

激光告警器。国内信阳空军第一航空学院应用 CCD 研制了机载激光告警机。

1. 鱼眼透镜的设计

鱼眼透镜是一种焦距极短且视角很大的广角镜头,它的设计和计算与普通镜头有许多差异。普通光学系统对无穷远处物体的理想成像高度满足

$$y' = f \tan \omega \quad (1.1)$$

式中: y' 为理想像的高度; f 为系统的物方焦距; ω 是无穷远处物体对应的视场半角。

鱼眼透镜的最大优点在于可以凝视半球或超半球空域,其相应视场的半角满足

$$|\omega| \geq \frac{\pi}{2} \quad (1.2)$$

由式(1.1)可知,当 $|\omega| = \pi/2$ 时, $|y'| \rightarrow \infty$, 该光学问题已不能应用高斯光学解释。同时,在 $|\omega| > \pi/2$ 时,由于入射光方向从右侧射入,也不符合高斯光学的基本约定。所以对于鱼眼透镜而言,式(1.1)是无效的。为了正确地描述像高尺寸 y' 与视场半角 ω 之间的关系,则有

$$y' = c f \omega \quad (1.3)$$

$$y' = 2f \sin\left(\frac{\omega}{2}\right) \quad (1.4)$$

$$y' = 2f \tan\left(\frac{\omega}{2}\right) \quad (1.5)$$

$$y' = f \sin \omega \quad (1.6)$$

式中,各量的含义与式(1.1)相同(c 是比例系数)。

以上公式的选择是对系统成像的一种方式:系统按公式的约定把超大空域的场景投影在焦平面上。由此可知,式(1.3)~式(1.6)对应着不同的成像关系。式(1.3)为等距投影公式、式(1.4)为等立体角投影公式,实际中应用的最为广泛;而式(1.5)为体视投影,式(1.6)为正投影公式。若按式(1.3)设计鱼眼透镜,则称其为等距投影型鱼眼透镜,其他同理。

从设计角度来讲,用式(1.3)~式(1.6)中的一种形式代替传统的式(1.1),通过引入幅值很大的负畸变,从而使像得到高度的压缩,将本来不能成像的视场也包容到焦平面上。鱼眼透镜的作用就是以畸变为代价而大幅扩大视场的一种特殊光学系统,其在军事中的应用非常有价值,在激光告警系统中,探测部件采用 180° 视场的等距投影型广角鱼眼透镜作为物镜,视场覆盖整个上半球,可接收来自任何方向的激光辐射,接收的激光辐射通过光学系统成像在面阵 CCD 上。

2. 成像型激光告警器实例

美国陆军武器对抗办公室和仙童公司共同研制的激光寻的和警戒系统“拉赫韦斯”(LAHAWS)是成像型激光告警设备的代表。该系统由探测和显示两个部件组成,探测部件用广角远心鱼眼透镜作物镜,采用双通道消除背景及 100×100 面阵 CCD 成像探测,光学系统配置如图 1.6 所示。

其工作原理为:鱼眼透镜接收的激光辐射通过 4:1 分束镜分成两个光学通道,80% 的光能通过窄带滤光片,经光谱滤波后聚集于 CCD 光敏面,其余 20% 再经两块分束镜和窄

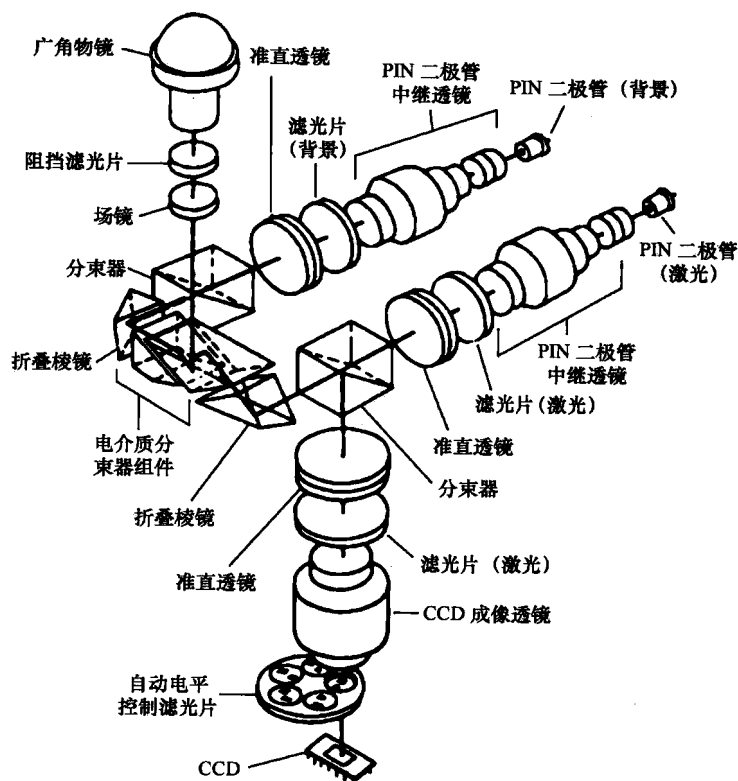


图 1.6 LAHAWs 的光学系统结构图

带滤光片进一步分成 1:1 的两条光学通道,各自进入一个 PIN 硅光电二极管探测器中,其中一个通道包含激光和背景信号,另一通道只包含背景信号,经相减放大,把 PIN 光电二极管的输出,经差分放大和高速阈值比较器处理后,区分出背景照明和激光辐射,产生音响及灯光指示。光电二极管有输出信号时,对 CCD 面阵输出的视频信号进行模数转换和数字帧相减处理,消去背景,突出了激光光斑图像,由计算机解算出激光源的角度信息送火控系统或对抗系统,并在显示器上以亮点的形式显示出来。为防止强激光造成器件饱和,系统采用了自动增益控制措施。LAHAWs 工作波长为 1.06 mm,覆盖空域为半球范围(方位 360°,俯仰 0°~90°);威胁定向精度为 3°。

光谱识别型激光告警装置灵敏度较高,但由于告警原理决定了这种类型的告警装置只能识别几个波长,不能给出波长,且不能告警可调谐脉冲激光,对抗效能不高。因此随着激光种类的增多,以及可调谐激光器的发展,各国都积极研究相干告警技术。

1.3 相干识别型激光告警技术

激光的相干性、单色性、方向性和高亮度性是激光最基本的属性。激光的单色性决定了激光的时间的相干性,激光的空间相干性和激光的方向性是紧密联系在一起。激光的单色性,使其具有优良的时间相干性。一台稳频单模 He-Ne 激光器发出 632.8 nm 谱线,相干时间可达到 1.3×10^{-4} s,相应相干长度 $L_c = 4 \times 10^7$ mm。而非激光辐射的相干长

度只有几微米到几厘米。例如,白炽灯的中心波长在 550nm,波长带宽 > 300nm,其相干长度 $L_c \approx 10^{-3}$ mm。激光由于有极好的方向性,所以也具有极好的空间相干性。尽管干涉现象多种多样,但为满足相干条件,则总是把由同一光源发出的光分成两个或者两个以上的相干光束,使它们经过不同的路径后再相遇以产生干涉。因此,用干涉仪作传感器就可识别激光,使其两束光的光程差大于背景杂光的相干长度而远远小于激光的相干长度,那么背景杂光的干涉条纹即使产生,也将被淹没在均匀的背景照明中,而激光干涉条纹的清晰度并不降低,还能非常鲜明地出现在背景上。这样激光入射其上便受到调制产生相长干涉和相消干涉,非激光入射其上则不产生干涉造成的强度调制而表现为直流背景,二者得以区别开。

激光告警装置常常工作在太阳光下,或者在具有闪电、火光的恶劣环境中,为了鉴别非激光现象,当被测激光相对于非激光光源具有高的相干性时,可利用相干告警技术。相干告警是目前激光告警技术中最有效的方法之一。不仅可以区分激光和非相干光,而且可以测出入射激光的参数,如波长、入射方向等。根据产生相干光的方式,相干识别型激光告警装置可分为两大类:基于分振幅干涉的激光告警装置(包括法布里—珀罗(F-P)型、迈克尔逊型、傅里叶变换型)和基于分波面干涉的激光告警装置(光栅衍射型)。

1.3.1 F-P 型激光告警技术

F-P 型激光告警装置是利用 F-P 标准具对激光的调制特性来告警和识别激光的,它包括一个或多个 F-P 标准具,其后接有 CCD。

1. F-P 标准具的结构及工作原理

F-P 相干告警技术利用 F-P 标准具对激光的调制特性来告警和识别激光。F-P 标准具由两块内表面镀有半反半透膜的相距为 d 的平行玻璃板组成,其间的介质折射率为 n ,如图 1.7 所示。

当一束激光投射其上,一部分穿过第一块玻璃平板,另一部分被后表面反射回到前表面,再次被前表面反射后穿过后表面,从后面的板将有多束光穿出,形成等倾干涉,二相邻出射光的光程差为

$$OPD = \frac{2nd}{\cos\theta'} - 2d\tan\theta'n_0\sin\theta = 2nd\cos\theta' \quad (1.7)$$

结合折射定律

$$n\sin\theta' = \sin\theta \quad (1.8)$$

可以得到出射光的光强

$$I = \frac{I_0}{2}(1 + \cos\varphi) \quad (1.9)$$

式中: φ 为两相邻出射光的位相差,且有

$$\varphi = \frac{2\pi OPD}{\lambda} = \frac{4\pi nd}{\lambda}\cos\theta' \quad (1.10)$$

式(1.7)~式(1.10)中: I_0 为入射光强; I 为出射光强; θ' 为透射光线折射角; λ 为入射光波长; n 为标准具的折射率; d 为标准具的厚度。

于是当 F-P 标准具绕平行于其表面的轴旋转、调制入射光时,出射光强为

$$I = \frac{I_0}{2} \left(1 + \cos \frac{4\pi nd}{\lambda} \cos \theta' \right) \quad (1.11)$$

可得到 I 与 θ' 的关系曲线图如图 1.8 所示,可见出射光强信号是一个随 θ' 变化的调频波,对称分布于 $\theta' = \theta = 0$ 的两侧。

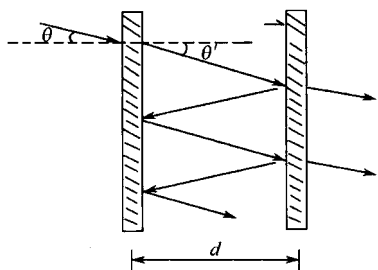


图 1.7 F-P 标准具结构简图

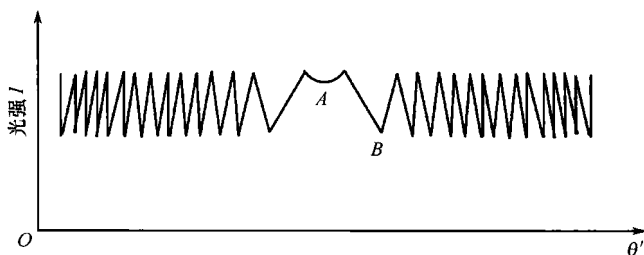


图 1.8 标准具出射光强 I 与折射角 θ' 的关系曲线

光强透过率为

$$T_{FP}(\theta) = \frac{I}{I_0} = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{4\pi nd}{\lambda} \cos \theta' \right) \right] \quad (1.12)$$

所以,当 F-P 标准具旋转时,激光辐射的入射角为某些特定值时产生相干干涉,为另一些特定值时产生相消干涉。从图 1.8 中可以看出,入射激光的透过率随旋转角而变化,透射光强是一调频波,由其频率最低点可求出激光入射角,从而确定激光源的方位;不同波长激光对应的调频波间隔不同,波形的频率与相干辐射的波长成正比。于是,可以用一个波长已知的相干光源标定标准具然后用这个标准具检测出相干辐射的波长。

2. 基于 F-P 标准具的典型激光告警系统

美国 Dalmo Victor 公司和 Perkin-Elmer 公司的多传感器警戒接收机和美国 Perkin-Elmer 公司研制生产的 AN/AVR-2 型激光告警装置是 F-P 型相干识别装置的典型代表。

图 1.9 是采用 F-P 标准具的相干识别型激光告警装置的基本结构图。标准具的厚度一般为相干辐射波长的 100 倍~2000 倍,其上、下表面的反射率为 40%~60%,标准具绕平行于表面的轴旋转,调制相干辐射。

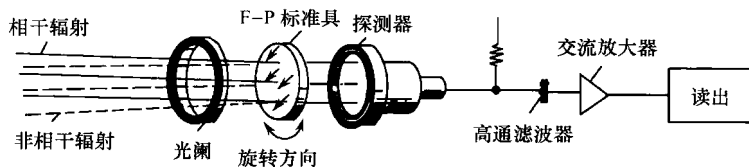


图 1.9 F-P 干涉型激光告警装置结构

在相干辐射的情况下,标准具旋转时,即激光入射角改变 θ 时,标准具的透射率 $T(\theta)$ 也随之改变。 θ 为某些特定值时,入射的激光辐射产生相长干涉,即 $T(\theta)$ 最大;而当 θ 为另一些特定值时,则产生相消干涉,即 $T(\theta)$ 最小。于是,位于标准具后面的光电告警器

的光电输出也随 θ 作相应的变化。而非相干辐射则不能被标准具调制,其投射强度没有变化,因而光电流也没有变化。据此,就可区分相干辐射和非相干辐射。激光辐射的方位,可由此时光电告警器的输出相对于激光垂直于标准具入射时告警器输出的偏差得出,而激光的波长则可以直接用一个波长已知的相干光源标定的标准具测出。

上述的激光告警系统可以采用阶式 F-P 标准具进一步改进,改进的 F-P 干涉型激光告警装置结构如图 1.10 所示。

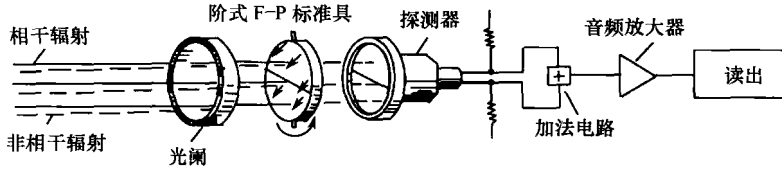


图 1.10 改进的 F-P 干涉型激光告警装置结构

将图 1.10 简化如图 1.11 所示,入射激光从某一个方向通过光阑投射到阶式 F-P 标准具上,该阶式标准具的上半部比下半部高(或低)出 $\lambda/4n$ 的奇数倍,并使标准具围绕垂直于光轴的轴线匀速摆动。

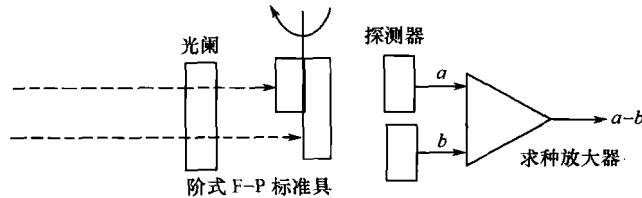


图 1.11 F-P 相干型激光告警装置基本结构简化示意图

于是透过标准具的光强 I 可表示为

$$I = \frac{I_0}{2} [1 + \cos(n^2 - n_0 \sin^2 \theta)] \quad (1.13)$$

并可测得 $I - \theta'$ 曲线,当 $\theta' = \theta = 0$ 时有

$$I = \frac{I_0}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{4\pi nd}{\lambda}\right) \right] \quad (1.14)$$

此时即为 $I - \theta'$ 曲线中的 A 点位置, $\varphi = \varphi_0 = \frac{4\pi n}{\lambda} d$ 。

$I - \theta'$ 曲线上的 B 点位置 $\theta' = \theta'_B$ 出射光强极小,则

$$\varphi_B = \varphi_0 - \pi = \frac{4\pi n}{\lambda} d - \pi = \frac{4\pi n}{\lambda} d \cdot \cos\theta'_B \quad (1.15)$$

于是

$$\cos\theta'_B = 1 - \frac{\lambda}{4nd} \quad (1.16)$$

式 (1.16) 说明只要测出 $I - \theta'$ 中 A、B 两点的角度差 θ'_B , 就可测定入射激光的波长,即

$$\lambda = 4nd(1 - \cos\theta'_B) \quad (1.17)$$