

# 激光威胁告警中传感器技术的应用与分析

潘慧,艾勇,蒋海丽

(武汉大学电子信息学院,湖北武汉430079)

**摘要:**随着激光武器的发展,激光告警系统变得极其重要,而在激光告警系统中最关键的部件是传感器。按激光告警中传感器组成形式进行了分类并介绍了其组成结构。对于激光告警中的复合传感器技术、CCD型离轴传感器技术、干涉型光纤传感器、集成传感器、多传感器进行了深入的探讨。最后简要分析了传感器的发展趋势。

**关键词:**激光告警; 传感器技术

**中图分类号:**TN249 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2005)02-0132-04

## Application and analysis of sensors technologies based on laser threat warning

PAN Hui ,AI Yong, JIANG Hai-li

(College of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** With the development of laser weapons, laser warning system is getting more and more important. And sensors are the pivotal part in this system. In this paper some classes are presented according to the form of sensors of laser warning, then the structure of these classes are introduced. Advanced sensors technologies of laser warning are described, which include the compound sensors technology, off-axis sensors technology of CCD, optical fiber sensors technology of intervenes, integrate sensors technology, multisensor technology. Finally, the trend of sensors development is introduced.

**Key words:** Laser warning; Sensors technologies

### 0 引言

自1960年第一台红宝石激光器问世以来,军事领域发生了巨大的变化,尤其是激光武器的引入改变了现代战争的格局,对飞机、坦克、雷达、电站、指挥中心等军事目标构成了越来越严重的威胁。面对日益严重的激光威胁,各国军方均在极力发展激光对抗技术。激光告警系统就是迅速探测激光威胁的存在、确定威胁源的方位、种类及工作特性,进行声光报警并通知

相配合的武器系统进行对抗的一种基本光电武器。而在激光告警系统中,最关键的部件是光电传感器。本文通过阐述传感器在激光告警系统中的组成及应用,分析了传感器技术及发展前景。

### 1 传感器的组成原理

传感器是一种把输入物理量变换成为与其不同的物理量的器件。图1是传感器的组成。图中各部件

收稿日期:2004-04-22; 修订日期:2004-07-15

作者简介:潘慧(1979),女,湖南湘乡人,硕士生,主要从事激光告警和卫星光通信等方面的研究。

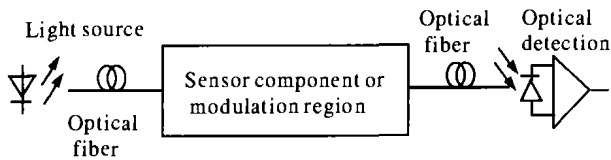


图1 传感器的组成

Fig.1 Setup of the sensors

的功能如下:

敏感元件是能够灵敏地感受被测变量并作出响应的元件。

转换元件把敏感元件的输出量转换成适于传输或测量的电信号部分。

信号调节转换电路是能把传感元件输出的电信号转换为便于显示、记录、处理和控制的有用信号的电路。

在激光告警中,光电传感器可将光信号转换成电信号并进行处理。其任务是探测、定位和描述指向所保护目标的威胁。告警系统对传感器的要求是:传感器灵敏度要高并能防止激光辐射对它的损伤。

## 2 激光告警中传感器的组成形式

按传感器的组成形式激光告警系统可分为以下几类:二极管阵列型、CCD 成像型和相干识别型<sup>[1,2]</sup>。其中光电二极管阵列型激光告警系统是将硅光电二极管以圆阵列形式布置,来覆盖较大的警戒范围。它分为拦截探测型和散射探测型两种。在拦截探测型中,复合探测器内有  $n$  个光学聚焦系统,均匀分布在水平  $360^\circ$  方位角范围内。在散射探测型中,探测视场向下、向外展开,像一个锥形的罩子,当激光穿越“罩子”时,大气气溶胶散射的激光被顶部传感器接收。这类告警器因其技术难度小、成本低成为开发种类最多的激光告警器。典型的产品有德国 AlcatelSEL 公司研制的威胁告警设备(TWE),现装备于“虎”(Tiger)直升机上,也可用于各种新型固定翼飞机和坦克。TWE 的探测波段为  $0.4\sim 1.1\ \mu\text{m}$ 、 $1.4\sim 2.4\ \mu\text{m}$  和  $8\sim 12\ \mu\text{m}$ ,共有 4 个传感器,方位覆盖  $360^\circ$ ,俯仰  $\pm 45^\circ$ ,方位分辨率  $10^\circ$ 。此告警系统可同时识别 1 个目标指示器和 4 个测距机,并可显示全部探测目标。

CCD 成像型激光告警系统的传感器是用广角远心鱼眼透镜作为物镜与 CCD 面阵元件相结合构成的,具有精确确定激光源的方位、灵敏度和精度高等

优点,发展很快。典型例子是 ATL 系统公司开发的高精度激光告警接收机(HALWR),已于 1991 年 9 月交付实验样机。HALWR 采用 CCD 工作在非常规的模式,成功地实现了单脉冲探测,截获概率超过 98%。HALWR 覆盖范围为方位角  $30^\circ$ 、俯仰角  $20^\circ$ 、探测波长  $0.4\sim 1.1\ \mu\text{m}$ 、脉宽  $10\sim 200\ \text{ns}$ 、灵敏度为  $0.28\ \text{mW cm}^{-2}$ ,而测量角精度接近  $1\ \text{mrad}$ 。现已服役于美国的陆军。

相干识别型激光告警系统是利用激光的时间相干性来探测和识别激光辐射,分为 Fabry-Perot 型和 Michelson 型。在 Fabry-Perot 型中使用一块透明平行平板,两表面镀有半反半透膜,入射光一部分穿过平板,一部分被后表面反射到前表面,再次为前表面反射后穿过后表面,在两组出射光之间形成干涉。在 Michelson 型中其光学探测器结构主要是由一块分束镜、两块球面反射镜及阵列探测器等构成。相干型告警器不仅能区分激光和非相干光,分辨激光的入射方向,还可以测定激光的波长。典型产品是美国的 AN/AVR-2 型,目前已广泛装备在美军的各种直升机和水面舰艇上。AN/AVR 型质量为  $8.9\ \text{kg}$ ,传感器覆盖  $360^\circ$ ,故障平均间隔时间  $>1200\ \text{h}$ 。每部 AN/AVR-2 的费用为 125000 美元,它可适用于激光指示器、测距机和激光制导武器的威胁。

## 3 激光告警中的传感器技术

由于激光武器的不断发展,为了适应更加复杂的告警需求,激光告警系统开始采用各种先进技术,如复合传感器技术、CCD 型离轴传感器技术、干涉型光纤传感器、集成传感器和多传感器技术。

### 3.1 复合传感器技术

复合传感器技术是通过采用编码孔径方式显示方位,可提高探测的方位角分辨率。通过对多个光学聚焦系统实现编码,采用多个发光二极管围成一个圆形阵列,进行声光报警。例如英国 Lasergage 公司的 RLI 型激光告警系统,复合探测器内含有 5 个光学聚焦系统(水平方向 4 个,垂直方向 1 个),可以探测到水平  $360^\circ$  方向和来自上方空域的激光。RLI 型的方向分辨率:水平  $45^\circ$ 、垂直  $45^\circ$ 、虚警率  $<10^{-3}/\text{h}$ 、探测器视场  $360^\circ$ ,现已广泛投入使用。又如英国的 Plessy Radar

公司研制的警戒装置,复合探测器由散射探测器和直接探测器两部分组成,散射探测器的视场犹如一个锥形罩子,将装置完全罩住。这样散射探测器就能接收到视场内大气气溶胶散射的激光能量。这一部件只能确定有无激光威胁,而不能确定威胁源的方位。位于散射探测器下方的直接探测器可以确定激光威胁源的大致方位,只有被激光束直接照射时才能发挥作用。它由 12 个光学聚焦系统围成一个环形阵列。还有我国的激光警戒系统,此装置的复合探测器中,水平方位采用了由 12 个光学聚焦系统围成的圆形阵列,同时在水平光学聚焦系统的上方还安装了柱面光学细分系统。水平方位对单次激光脉冲探测的角分辨率为  $15^\circ$ ,对多次激光脉冲探测的角分辨率可达  $3^\circ$ ;另外,在水平方位探测系统的上方还安装了另一组光学聚焦系统,用于探测来自上方空域的激光威胁(角分辨率  $45^\circ$ ),以构成全方位监视。虽然这种技术要在特定的条件才能实现告警,但由于其具有成本低、技术难度小、方位分辨率较高、可靠性高和动态范围大等优点,目前在世界各国已广泛应用。

### 3.2 CCD 型离轴传感器技术

在激光告警中,采用 CCD 型离轴传感器技术可精确确定激光威胁源的方位。其原理是将激光辐射分成几束,同时成像在几个探测器上。当光辐射的入射位置不同时,在各探测器上形成的光点大小不相同,输出信号也不同。将这些输出信号馈送到电子系统进行处理,就可以精确确定激光威胁源的方位。例如 FOALLS 系统,其视场覆盖在方位上  $75^\circ$ ,俯仰上  $10^\circ$ ,分成 5 个扇形区,系统组件的下半部分有一个嵌入的传感器,覆盖整个视场,另外 5 个传感器配置在各自扇面上。当 5 个扇面上的传感器之一探测到激光信号时,旋转组件的上半部分,使 CCD 成像器件与该扇面成直线。其屏幕显示,在主区域为  $15^\circ \times 10^\circ$ 。威胁扇面的图像,由一个分辨率降低的合成图像覆盖了整个  $75^\circ \times 10^\circ$  的视场。当指示出一个威胁源被定位,即可由十字准线覆盖在背景图像上,也可将威胁源的坐标以列表的形式给出。其缺点是电路较复杂、需要器件多。优点是对威胁源可以进行精确定位,探测范围可达到离轴 1 km。因此 CCD 传感器技术凭借其高灵敏度、高精度的优点,受到世界各国的关注。

### 3.3 干涉型光纤传感器技术

光纤传感器是一种通过对传光特性的检测来感测外部光环境变化的装置。它可在不干扰被测对象状态的情况下传输所感测的信号。图 2 是光纤传感器的原理结构图。光纤传感器通常由光源、传输光纤、传感元件或调制区、光检测等部分组成。

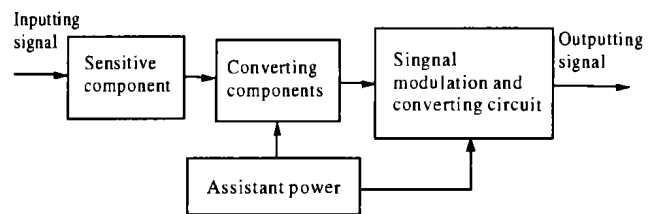


图 2 光纤传感器的原理结构图

Fig.2 Principle map of optical fiber sensors

由于光纤传感器具有检测精度和灵敏度高、可绕曲、体积小、光纤传输线路兼容性好等特点,且动态范围大、响应速度快等优点,被广泛装备在海、陆、空等各种平台上。其中干涉型光纤传感器在军事上一直是研究与开发的主题。

德国的光电激光探测系统(COLDS)<sup>[3]</sup>采用的就是干涉型光纤传感器技术。传感器使用的是半球传感头,直径为 180 nm。在半球传感头中,最高点设有一个中心传感器,余下的半球表面设置有 36 个光学窗口,分上下两层,每层 18 个。光学窗口的直径为 14 nm。每个光学窗口的视场为  $25^\circ$ ,相邻光学窗口的视场相互重叠,可有效消除探测死角。半球传感头的视场为:方位角  $360^\circ$ ,仰角  $60^\circ$ 。光导纤维的输入端作为激光信号的入射平面置于光学窗口的焦平面上,与每个光学窗口相耦合的光纤的长度不同,各光纤的长度相差 5 m,总长 185 m。不同长度的光纤集中成一捆,引向共用传感器的光敏面。

当告警系统的中心传感器探测到有光辐射时,信号立即启动,而停止信号由共用传感器接收。根据启动信号和停止信号之间的时间间隔,可以知道激光辐射通过哪一个光学窗口来确定激光的入射方向。再通过测量光学延迟时间的中心求出激光辐射的入射角。对于  $360^\circ$  方位来说,要想达到  $3^\circ$  的分辨率,36 个光学窗口也是比较少的。但由于每个光学窗口可覆盖  $25^\circ$  孔径角,并且视场重叠,经过精确计算就可以达到较

高的测量精度。技术指标为:可实现 $1^\circ$ 的角分辨率,加权延迟时间可达到 $2.5\text{ ns}$ ,光学部分的总延迟时间为 $1\text{ }\mu\text{s}$ 。目前已投入使用。

此激光告警系统的优点是只采用了两个传感器,却有36个光学窗口。

### 3.4 集成传感器技术

为了保证低的虚警率,又因为当选用未冷却的探测器阵列时,由于探测能力和对探测灵敏度的需求,传感器应采用双波段探测体制。可使用集成传感器<sup>[4]</sup>满足这一技术要求,其探测范围可覆盖从红外到可见光波段。

美国的Sandia实验室研制的千赫兹频率的集成激光传感器,原设计是采用一个斩光探测器和一个未斩光探测器相结合的方法来探测连续波与脉冲激光。为使质量达到最小,新研制的传感器仅采用一个斩光探测器。可是在一半时间内传感器接收不到输入脉冲,解决的办法是采用机电装置代替另一个探测器来检测连续波和脉冲激光信号。另外来自阳光反射和红外辐射的地球背景光使探测器的探测级别难以达到极低,因此还需要采用光电背景抑制技术。传感器可采用二维阵列获得更多的有效信息。集成传感器采用两个或三个线性阵列来探测与定位连续波源和脉冲源。通过采用一套可见光阵列和一套红外阵列来覆盖可见光到红外波段,这两种传感器各自独立工作,信号处理方式基本相同。集成传感器的虚警率低,反应时间为毫秒级,且每个阵列以一维线性的形式定位激光的威胁,目前已投入使用。若采用三维阵列形式,虚警率将更低。这种集成传感器的优点是体积小、质量轻、功耗低,可探测到连续波和脉冲激光,虚警率低,可以达到一定的技术目标。

### 3.5 多传感器技术

多传感器技术是将雷达、光电传感器、声传感器等不同频段传感器有机地组合于一体,构成一体化的综合探测系统,它可大幅度降低虚警率,并能对抗多批、多频段、多层次的威胁。其基本特征是:通过对不同频段的多种传感器进行“叠加”,实现性能和功能的“互补”。如美国的MWR多传感器警戒接收机就是采用多传感器技术的一个典型代表。其激光警戒分系统共采用了4只激光传感器,每只传感器的壳体中均封

装有F-P标准具调制器、光电探测器及数字化线路。可达到的技术指标:探测波段为 $0.45\sim 1.1\text{ }\mu\text{m}$ ,探测到第一个激光脉冲的几率为95%,虚警率 $<10^{-3}/\text{h}$ 。另外除可识别激光和非相干光外,还可测量入射激光的波长、脉宽、脉冲重复频率、强度及入射方向等参数。

多传感器数据融合系统<sup>[5]</sup>,属于高级阶段的一体化,其优点是:

- (1) 可以拓宽监视探测的覆盖面;
- (2) 可以发挥各种传感器的优点,取长补短,提高跟踪精度;
- (3) 多传感器抗干扰的性能优于单传感器;
- (4) 用多个低成本的传感器融合得到的数据信息可以代替高价格、高精度的传感器,降低了成本。

多传感器数据融合技术在像素级、特征级和决策级3个不同层次上进行。该技术发展很快,全世界已研制出50多个军用多传感器数据融合系统(其中绝大多数是美国研制的)。最近几年,在单个传感器小型化和模块化的基础上,向深层融合的方向发展,即不同功能的传感器共用孔径和传输通道,甚至出现了共用功能单元的趋势。例如红外波段和 $\text{CO}_2$ 激光不仅可共用孔径、光传输通道,甚至可以共用探测器件,更深层次的是在不同传感器通道中可实现功能部件彼此共用或随时组合复用。

多功能一体化作为多传感器一体化系统的一种发展趋势,不仅要解决多传感器的集成,还要利用更复杂的数据融合技术使信息得到有效利用。预计今后类似的多功能一体化激光告警系统将会更多。

### 3.6 结论

随着激光告警系统的日趋复杂,传感器的应用已经发生了巨大的变化。光纤技术和集成传感器技术只是在某方面解决了一些特定的问题,范围比较窄;复合传感器应用虽很广泛,但其探测范围较窄;CCD型及高灵敏度、高精度离轴探测技术已受到关注,可能向激光侦察及预警方向发展;多传感器技术有其独特的优点,在探测范围越来越广,精度要求越来越高,信息量越来越大的情况下,它可通过将各种传感器信息进行准确的获取、综合、过滤、融合,最终准确无误地进行决策。因此将是今后激光告警发展的主流。

(下转第145页)

表 1 不同腔型下的参数值  
Tab.1 Parameters of different cavities

Cavity	Totally reflecting mirror R/m	$L_2 /$ m	$D /$ m <sup>-1</sup>	$\omega_{10} /$ mm	$\omega_{20} /$ mm	$\omega_{30} /$ mm	Output power/W
Plane-plane cavity	$\infty$	0.13	7.69	2.82	2.82	0.42	7.2
	1	0.12	7.50	2.88	2.93	0.43	8.0
Plane-concave cavity	2	0.13	8.88	2.87	2.85	0.42	7.3
	3	0.13	8.69	2.86	2.81	0.42	7.4
	-1	0.13	8.95	2.78	2.95	0.44	5.8
Plane-convex cavity	-2	0.13	9.25	2.80	2.89	0.43	7.2
	-3	0.14	9.23	2.96	2.80	0.44	7.1

### 3 结 论

对于给定的腔型,为获得最大的稳定激光输出,必须选择最佳的激光棒位置。如果增大泵浦功率,必

须适当改变激光棒的位置,使激光腔在新的泵浦条件下仍能工作于热不灵敏状态。本文给出的输出平均功率值是在泵浦电压 1000 V,重频 10 Hz 时,晶体对称放置于腔中间的结果。所给出的理论变化趋势对谐振腔的设计有一定的指导作用。

### 参 考 文 献:

- [1] Walter Koechner;孙文,江译文,程国祥.固体激光工程[M].北京:科学出版社,2002.
- [2] Vittorio Magni. Resonators for solid-state lasers with large-volume fundamental mode and high alignment stability[J].Applied Optics, 1986,25(1):107-117.
- [3] 陈同生,蓝信钜,刘耀蓝.棒和调制器的位置对 Nd:YAG 锁模激光器的影响[J].激光技术,1996,20(1):34-36.
- [4] 翟华金,李宝其,陈聪,等.激光棒位置对热不灵敏凹凸腔运转特性的影响[J].光学学报,1994,14(10):1026-1030.
- [5] 徐荣青,刘以安,王建,等.高输出功率的热稳谐振腔的设计[J].华东船舶工业学院学报,1999,13(4):29-32.
- [6] 吕百达.固体激光器件[M].北京:北京邮电大学出版社,2002.

(上接第 135 页)

### 4 前景展望

随着激光威胁的日趋复杂,激光告警系统中的传感器将向以下几个方面发展:

(1) 研制响应波段更宽的激光传感器,来适应未来战场的需要。

(2) 与其他种类的警戒装置(如雷达、红外、毫米波、紫外)相结合,构成全波段、一体化的传感器告警设备。

(3) 在单个传感器小型化和模块化的基础上,向深层集成的方向发展,即不同功能的传感器共用孔径和传输通道,甚至会出现共用功能单元的趋势。

(4) 将采用高级的多传感器数据融合技术,获得有关威胁目标的精确位置、属性估计以及对战场态势和威胁等级进行适时而完整的评价。

(5) 虚拟传感器融合技术将会有长足的发展。

通过运用新型敏感材料,提高传感器灵敏度;选

择合适材料滤除杂波干扰,提高传感器抗干扰能力。可以预计,随着激光告警系统向模块化和组件化方向发展,传感器技术将会不断完善,不断发展,最终将进入一个崭新的境界。

### 参 考 文 献:

- [1] 施德恒.机载激光告警系统述评[J].光机电信息,2001,18(9):19-24.
- [2] 付伟.机载激光告警器与机载自卫系统[J].光与控制,1997,(1):50-55.
- [3] 付伟.光纤前端的激光告警系统[J].红外与激光技术,1995,24(2):17-23.
- [4] 付伟.星载激光告警技术[J].应用光学,2002,23(4):21-25.
- [5] 刘中杰.战场多传感器数据融合技术综述[J].电光系统,1997,(2):30-34.