

## 信号与信息处理

# 基于激光回波信号的目标检测技术研究

刘严严, 徐世伟

(光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308)

**摘要:** 阐述了利用激光回波信号进行目标检测的理论依据, 讨论了对激光回波信号的光谱、偏振、位置、运动、振动特征的提取的原理, 最后分析总结了利用回波信号强度、脉冲宽度、回波信号追踪、模板匹配、特征向量提取以及模糊聚类对激光回波信号进行目标识别的方法。

**关键词:** 激光回波; 目标检测; 猫眼效应; 光谱; 运动; 偏振

中图分类号: TN241

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-04-0042-04

## Research on Target Detection Technology Based on Laser Echo Signal

LIU Yan-yan, XU Shi-wei

(Science and Technology on Electro-optical Information Security Control Laboratory, Tianjin 300308, China)

**Abstract:** Theory thesis is proposed to target detection by using laser echo signals. The principle of spectrum, polarization, position, motion and vibration characteristics extraction of laser echo is discussed. And the method of target recognition using echo signal intensity, pulse width, echo signal tracking, template matching, feature vector extraction and fuzzy clustering is analyzed and summarized.

**Key words:** laser echo; target detection; chatoyancy; spectrum; motion; polarization

通常光学侦察卫星、制导导弹、无人侦察机、光电跟踪系统和光电测距系统等一些军事上目标上携带的光电传感系统存在“猫眼”效应, 即这些光电系统的光学窗口对入射光有很强的按原路返回的特性。如今, 战场上出现的光电装备日益增多, 如何更有效地分析目标光学镜头的类型和性质, 直接决定着下一步攻击动作的正确性。研究表明, 猫眼效应反射光的某些特性参数与目标特性参数具有对应的规律关系, 例如光强分布模式、发散角、畸变特征、衍射效应等。

### 1 激光回波信号目标检测的理论依据

目标和背景的光学探测特征主要是指它们的

反射或辐射特征, 利用激光对目标的回波进行探测是基于目标的反射特征。是由它们的自身特征、工作状态、所处的环境及探测时间等因素所决定。

激光主动侦察的基本原理为: 通过发射激光束对空间区域进行扫描, 如果在扫描区域内有光学系统, 由于“猫眼效应”, 光学系统就会产生强烈的反射。利用这个原理, 就可以发现目标并确定目标方向及距离, 最后发射强激光或者利用其他武器对光学系统所在目标进行破坏。“猫眼效应”优点在于对于外形相似、目标成像特征无法区别的情况, 利用“猫眼效应”就可以有效地将特定目标提取出来。

在黑夜里, 会看到猫的一双亮眼, 猫眼之所以会特别亮, 是因为来自某一方向的光线进入猫眼之后, 经由眼底的反射, 把光投射到这一方向, 在这个

过程中,猫眼的晶状体如同透镜一样对光有会聚作用。同理,一般的光电武器装备,必然也有类似晶状体功能的透镜会聚入射光线,投射到光电探测器上,探测器表面如猫的眼底也会将投射光线反射回来,这种效应称为“猫眼效应”。这表明,一旦我方发射的激光进入了对方的光电武器装备,反射回来的光会特别强,而反射回来的激光含有目标的多种信息,通过对反射激光信号的分析与处理,就可以识别该目标。

## 2 激光回波信号特征提取

### 2.1 回波信号光谱特征提取

利用激光对回波信号光谱特征的探测,主要是对目标探测器的光谱特征进行探测。只有激光波长在目标光电设备工作波段内,才有可能有较强的回波返回,因此,根据探测到的回波强弱即可判断对方光电设备的工作波段。对目标光谱特征的探测可以采用多波长激光器,跟踪目前的光电设备主要工作波段来选取不同波长的激光器对目标进行探测。

对目标光谱特征的探测拟采用多波长激光器,目前的光电设备主要工作在可见光、近红外、中红外和远红外波段,因此,可以采用4种波长的激光器对目标进行侦察,激光器波长为:0.53  $\mu\text{m}$ 、1.06  $\mu\text{m}$ 、4.8  $\mu\text{m}$  和 10.6  $\mu\text{m}$ ,分别对应可见光、近红外、中红外和远红外波段,只有激光波长在目标光电设备工作波段内,才有可能有较强的回波返回,因此,根据探测到的回波强弱即可判断对方光电设备的工作波段。图1为激光回波信号光谱特征探测示意图。



图1 激光回波信号光谱特征探测示意图

### 2.2 目标的位置特征提取

通过测量激光从发射到返回经过的飞行时间便可以计算出探测器到目标的直线距离  $R$  为

$$R = ct/2 \quad (1)$$

式中,  $c$  为光速;  $t$  为激光脉冲飞行时间。由于光速在大气层内的速度与真空中有一定差别,以及大气湍流和波动,光速在测量范围内并不是常数。测距精度为

$$\Delta R = \frac{c\Delta t + t\Delta c}{2} \quad (2)$$

式中,  $\Delta t$  为光束飞行时间  $t$  的测量精度;  $\Delta c$  为光速在大气层内外的速度差。

通过猫眼效应的激光回波测得目标作用距离的方程为

$$R = (16 \times 0.838 \cdot P_0 \cdot \frac{A_s A_r}{\pi^2 \theta_t^2 \theta_s^2 P_{\min}} \cdot (\rho_s \cdot \tau_t \cdot \tau_s^2 \cdot \tau^2 \cdot \tau_r))^{1/4} \quad (3)$$

式中,0.838是分布在Airy斑第一个暗环内部的功率百分比;  $P_0$  为激光发射功率;  $A_s$  是目标光学系统的有效接收面积;  $A_r$  是接收系统光学望远镜的面积;  $\theta_t$  为发射激光发散角;  $\theta_s$  为反射激光发散角;  $\rho_s$  是光学系统“猫眼效应”反射系数;  $\tau_t$  为发射光学系的透过率;  $\tau_s$  是目标光学系统的透过率;  $\tau$  为激光单程大气透过率;  $\tau_r$  为接收光学系统的透过率; 探测器的最小探测功率  $P_{\min}$ 。

### 2.3 回波信号运动特征提取

利用激光对回波信号运动特征的提取主要是对目标进行测速。最简单的激光测速方法是对运动目标进行连续测距,由距离随时间的变化率计算出目标的速度。但这种方法测量精度不高。通过探测激光回波经目标调制后产生的多普勒频移,不仅具有很高测量精度,而且单次测量便可以得到目标的径向速度。激光束作用于目标产生的多普勒频移量  $f_d$  为

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} \quad (4)$$

式中,  $\lambda$  为激光波长;  $v_r$  为目标在径向  $r$  速度。

由上式可知,由于多普勒频移  $f_d$  与激光波长  $\lambda$  成反比,激光产生的多普勒频移量比微波雷达大许多倍,因而激光雷达对运动目标速度测量精度要比微波雷达高得多。例如,用10.6  $\mu\text{m}$  的  $\text{CO}_2$  激光时,1 m/s 径向速度运动的目标会产生约189 kHz 的多普勒频移量,而对35 GHz 的微波雷达则只产生约233 Hz 的多普勒频移。

在有了目标的位置及相对速度情况下,通过一定时间观测的积累,可以得到目标的运动矢量及其

矢量速度,这样就可以依据得到的参数确定目标的运动轨迹。

## 2.4 回波信号偏振特征提取

目标回波偏振特征检测主要是根据目标表面特征的差异会影响回波偏振度,由于目标表面特征的差异会影响回波偏振度,偏振成像可以利用不同目标散射光偏振度的差异来消除高漫反射率目标的干扰,从而使偏振成为可以用于目标提取和识别的重要特征。偏振探测技术可实现某些隐身目标探测。图2为偏振特征测量实验示意图。

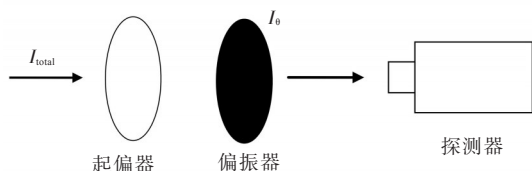


图2 偏振特征测量实验示意图

自然界的物体如树木、泥土和表面粗糙的其他物体对偏振光的消偏作用往往比人造光滑物体更大,因此偏振成像提供了识别杂乱自然背景中人造目标的手段。如夜晚车灯背景下的汽车牌照,因为背景光为非偏振光而金属牌照的反射光的偏振度较高,采用偏振光照明主动成像方式可以有效减小背景光干扰,提高目标图像对比度。这是利用表面散射光偏振差异的目标识别技术的优点。

## 2.5 回波信号目标姿态特征

当激光束经过目标反射后照射在电荷耦合器CCD上时,会形成一个光斑,设光斑在CCD探测器上的位置坐标为 $(h, v)$ ,则光斑中心点与CCD探测器中心点的相对位置就反映了回波入射角度的变化,同时也反映了目标反射面法线的变化,即目标姿态的变化。图3给出了光斑位置变化示意图。

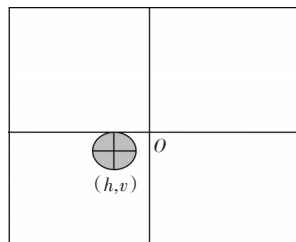


图3 光斑位移检测示意图

回波信号姿态特征仅适用于目标姿态的微小变化。通过该方法可以获得目标小范围的振动特征。

## 2.6 回波信号振动特征提取

每个运动的目标如飞机、车辆、导弹等都有它特有的机械振动频谱,通过目标反射回的激光光束可以探测出目标的特征振动频谱。

当目标受到激光束照射后,目标表面的机械振动将对激光束调制并产生多普勒频移 $f_b$ 为

$$f_b = f_0 \frac{4\pi A}{\lambda} \quad (5)$$

式中, $f_0$ 为目标振动频率; $A$ 为最大振动幅度; $\lambda$ 为波长。

## 2.7 其他特征

此外,利用激光主动探测手段还可以得到目标的成分特征(激光雷达测气体成分)、目标成像(激光主动照明成像技术)等,在此不赘述。

## 3 激光回波信号的目标识别

### 3.1 激光回波信号强度识别法

在实际中,镜头与背景回波信号强度相差较大,相关文献中详细介绍了这点。这给目标识别带来了极大的便利。应用脉冲激光发射源,对回波信号采用双回路接收。第一回路为漫反射回波信号检测放大电路(高增益放大电路),增益与带宽根据漫反射目标的理论计算及实验数据设计;第二回路为镜头回波信号检测放大电路(低增益放大电路),增益与带宽根据对光学类目标的理论计算及实验数据设计。然后分别进行阈值检测,根据增益与带宽根据对漫反射目标的脉冲信号,可以判断出目标类别。两路过门脉冲信号,可以判别出目标类别。

### 3.2 激光回波信号脉宽识别法

由光的传播速度可以算出,距离每增加1 m,传输时间增加约6.7 ns,如果背景为有一定纵深的曲面,激光作用到背景表面上的时间将不同,反射时刻也不同,经接收APD的累积将是一个展宽的激光回波信号。纵深愈大,展宽愈大。即纵深每增加1 m,脉宽将增加6.7 ns。

一般漫反射小目标的纵深都不大,所以它对激光的反射信号的宽度都很窄。而漫反射大目标不仅面积大,其纵深也大,所以它对激光的反射信号的宽度都比较宽。在接收通道设计回波信号脉宽检测电路,比较不同目标激光反射信号的脉宽可区分大小目标。

### 3.3 激光回波信号追踪识别法

在某些条件下,大气或背景后向散射信号与镜头目标信号幅度脉宽相当,上述两种方法无法识别目标。激光在传输和反射过程中,因大气湍流的影响和漫反射激光之间的随机相互干涉导致激光光强的随机起伏变化,并且大气使得对激光的后向散射处于不定状态,这样回波波形、幅度会产生无规则的变化。这虽然会对激光侦察产生干扰且影响侦察概率,但可以利用回波信号的随机性采取时间追踪法来识别回波信号的特性。采用的方法是对第一次回波进行记忆,下次回波到来后重新对幅度或脉宽进行比较,若两者时间相关,幅度或脉宽相符则为目标。

### 3.4 模板匹配识别法

对于单次探测条件下的激光回波信号,由于其波形分布信息反映了目标特性分布对回波信号的调制。通过对激光回波信号的小波变换,提取出不同变换尺度下激光回波波形分布特征。通过回波的脉冲宽度和能量特征可以反映出目标的反射尺寸和反射率信息。通过模板匹配和模式识别技术,结合典型目标与激光回波信号的调制关系,就可能得到回波信号特征与目标特性的映射关系,并获得对目标特性的求解结果。

### 3.5 特征向量提取法

对于更高精度的要求,可以由多角度激光照射条件下的多次激光回波数据,得到针对同一目标的时间、空间和属性联合调制函数的另一组值,可以消除目标各子部分的时间、空间、属性求解的不确定性,从而建立起更为稳定的激光回波信号与目标特性关系模型,达到精确目标特性求解结果。对于提取的特征量,还需要通过实验的方法验证其稳定性和有效性。通过分析,提取出最能反映目标本质

的特征集,并通过选用合适的模式识别方法完成对目标的识别工作。

### 3.6 模糊聚类的目标检测方法

基于光学回波细微特征的目标识别技术,在获取目标的多种特征信息后如何对目标进行有效的检测、分类、划分是目标识别的重要问题。事物之间的界限有些是确定的,有些是模糊的,当聚类涉及事物之间模糊界限时,需要模糊聚类的分析方法。

聚类就是按照事物间的相似性进行区分和分类的过程,是一种无监督的分类。聚类分析则是用数学方法研究和处理所给定对象的分类。模糊聚类理论的发展推动了其在生产实践中的应用,模糊聚类已经在众多的领域获得广泛的应用,其应用范围涉及到通讯系统中的信道均衡、时间序列的预测、神经网络的训练、参数估计、医学诊断、天气预报、食品分类、水质分析等领域。

模糊聚类的最成功的应用是在模式识别和图像处理领域中。模式识别中一个最重要的问题是特征提取,模糊聚类不但能从原始数据中直接提取特征,还能对已经得到的特征进行优选和降维操作;在提取完特征后就需分类器设计,模糊聚类算法既可以提供最近邻原型分类器,还可以用来进行特征空间划分和模糊规则提取,以构造基于模糊IF-THEN规则的分类器。

## 4 结 论

目标的探测识别技术一直是一项研究热点。高技术条件下的局部战争,由于各种伪装与隐形技术及抗干扰技术的大量应用,战场的透明度日渐减弱。尽管红外、微波等高新技术广泛应用于目标的侦察中,但由于来自各渠道的信息缺乏完整性和不确定性(即模糊性),使得确定性信息处理的理论和方法已不再完全适用。如何获取目标的多种信息,快速准确地完成目标识别,有的放矢地对目标实施打击具有重要意义。文中主要讨论了利用激光探测手段对目标进行探测和识别的可行性,可以说利用激光回波特征对目标进行探测识别是目标探测识别领域的一项不可或缺的重要手段。

(下转第59页)



据实施干扰前后多通道光谱成像系统目标识别概率的变化情况评估激光对多通道光谱成像系统的干扰效果。

设实施干扰前与实施干扰后,系统对目标的识别概率分别为 $P_0$ 和 $P_s$ ,定义 $K$ 为多通道光谱成像系统干扰后对目标的识别概率与干扰前对目标的识别概率之比,即有

$$K=P_s/P_0 \quad (11)$$

式中, $K$ 值的大小反映了激光对多通道光谱成像系统的干扰效果,可直接用于评估对多通道光谱成像系统的干扰效果。

依据 $K$ 值的大小,可以将对多通道光谱成像系统的干扰效果划分为若干等级。例如,可将干扰效果由弱到强划分为以下4个等级:

- (1)当 $0.72 \leq R < 1$ 时,为1级干扰;
- (2)当 $0.46 \leq R < 0.72$ 时,为2级干扰;
- (3)当 $0.18 \leq R < 0.46$ 时,为3级干扰;
- (4)当 $0 \leq R < 0.18$ 时,为4级干扰。

达到三级干扰以上为有效干扰。

### 3 结 论

与其他电子干扰干扰效果评估方法的研究相比,目前对多光谱成像侦察设备的评估方法研究还很不充分,评估方法还不成熟,有许多理论和技术问题还需要深入研究和探索。

从被干扰对象的角度出发,提出了一种对多光谱成像侦察设备的干扰效果计算方法,以干扰后对

目标的识别概率与干扰前对目标的识别概率之比为依据,提出了一种对多光谱成像侦察设备的干扰效果评估方法,可对多光谱成像侦察设备进行干扰效果评估。

### 参考文献

- [1] 高卫,黄惠明,李军.光电干扰效果评估方法[M].北京:国防工业出版社.
- [2] 彭望泽.防空导弹武器系统电子对抗技术[M].北京:宇航出版社,1995.
- [3] 薛利敏,张洪向,李敏勇.效力准则的电子战干扰效果度量的研究[J].火力与指挥控制,2004,29(3):58-60.
- [4] 王世勇,付有余,郭劲,等.脉冲激光对CCD图像跟踪系统干扰效果评估[J].激光与红外,2002,32(1):20-22.
- [5] 高卫,贺伟.烟幕对光电观瞄设备干扰效果的评估准则[J].光子学报,2007,36(增刊):270-273.
- [6] 周立伟.目标探测与识别[M].北京:北京理工大学出版社,2002.
- [7] Rosenfeld Azriel, Avinash C KAK. Digital picture processing: 2th ed[M]. New York: Academic Press, 1982.
- [8] 徐蓉,门涛,张荣之.临近空间平台光电探测系统在空间态势感知中的应用[J].中国光学与应用光学,2010,3(6):546-553.
- [9] 韩强盛,张保洲,卢利根,等.快速光电探测系统响应时间精密测量装置[J].照明工程学报,2015,26(2):1-5.
- [10] 张正茂,胡心.基于PSpice的光电探测电路仿真分析[J].光电技术应用,2012,27(5):69-72.

(上接第45页)

### 参考文献

- [1] 熊群力,陈润生,杨小牛,田宏.综合电子战——信息化战争的杀手锏[M].2版.北京:国防工业出版社,2008.
- [2] 侯振宁.激光有源干扰原理及技术[J].光机电信息,2002(3):22-26.
- [3] 黄涛,胡惠灵,胡以华,等.空间目标识别中的激光探测技术[J].激光与红外,2010,40(7):685-688.
- [4] 谷锁林,孙华燕,张永继,等.空中目标的激光主动探测[J].激光与红外,2005,35(7):476-478.
- [5] 赵勋杰,高稚允,张英远.基于“猫眼”效应的激光侦察技术及其在军事上的应用[J].光学技术,2003,29(7):415-417.
- [6] 丁宇,蔡军.高重频 $2\mu\text{m}$  Ho:GDVO<sub>4</sub>固体激光器[J].光电技术应用,2016,31(3):28-32.
- [7] 刘宗新,刘景鹏.高精度远距离激光测距系统设计[J].光电技术应用,2016,31(5):1-4.
- [8] 赵龙,张骏,杨海梅,等.激光探测水下振动特征的多尺度变换与时频分析[J].光电技术应用,2016,31(5):8-11.
- [9] 李宇海,王锴.针对1~10cm空间碎片的红外与可见光融合探测技术[J].光电技术应用,2016,31(6):15-19.
- [10] 黄涛,胡惠灵,胡以华,等.空间目标识别中的激光探测技术[J].激光与红外,2010,40(7):685-689.