

## 空中运动目标光子探测回波的俯仰姿态敏感规律研究

曲芳慧<sup>1,2\*</sup>, 胡以华<sup>1,2\*\*</sup>, 徐世龙<sup>1,2\*\*\*</sup>, 侯阿慧<sup>1,2</sup><sup>1</sup> 国防科技大学脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;<sup>2</sup> 国防科技大学电子制约技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230037

**摘要** 光子探测技术是研究远小运动目标的有效手段,光子回波受目标在运动过程中姿态变化的影响较大。为了描述空中目标姿态变化过程中光子探测回波的姿态敏感规律,基于海灵格距离和 Canberra 距离理论,定义了光子回波的姿态影响水平,并将其作为影响不同目标光子探测识别性能的定量分析工具。对三种空中目标在一定姿态变化范围内的光子探测回波波形差异度进行仿真研究,分析其变化规律以及目标间的差异,并用两个飞机模型进行了实验验证。结果表明:不同目标的光子回波姿态影响水平具有稳定的特征和明显差异,说明利用光子回波波形的姿态影响水平来区分不同的空中运动目标具有一定的可行性,其统计特征的姿态影响水平可以用于对结论进行进一步验证,并在细节之处加以补充

**关键词** 遥感;光子探测;运动目标;回波特征;姿态影响水平

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202149.0910001

## 1 引言

纳秒脉冲激光照射径向尺寸为几十米的空中目标时,激光回波波形可以反映目标的激光雷达散射截面(LRCS),其中包含着目标的距离、尺寸、强散射中心特征<sup>[1]</sup>。目标运动对回波时延、展宽和能量衰减等参数的影响表现为波形的变化。除了目标的运动速度、方向、距离和高度差等目标态势信息以外,激光入射角和目标姿态角信息的获取对于空中目标探测有着重要意义<sup>[2]</sup>。对目标多姿态角下的光子回波进行采集和分析,就可以对比不同目标由态势变化引起的回波特性的差异。

目前,多角度探测远距离目标主要采用激光反射层析成像技术,利用激光雷达采集到的不同角度下目标的一维距离像积分重建目标的二维轮廓图像,实现目标的识别<sup>[3]</sup>。与此不同,光子探测技术可以直接利用回波快速、有效提取运动目标的信息<sup>[4]</sup>,并且当无法获得全角度下的目标回波时,可以通过分析和提取部分角度的回波特征,达到实现目标区分和识别的目的。

从目标层面来看,空中目标由于距离远、散射截面小,因此激光探测回波强度较弱;而光子计数激光测距技术可以提升探测灵敏度,增加探测距离,实现对空中远小目标的有效探测。以美国 NASA<sup>[5]</sup>、MIT 林肯实验室<sup>[6]</sup>为代表的国外多家研究机构的研究成果展示了光子计数激光雷达的技术优势和应用潜力。目前,国内外对空中运动目标的研究主要集中在线性模式下激光探测的目标散射回波特征,如:李良超<sup>[7]</sup>研究了飞机表面材料和姿态对回波特性的影响;寇添等<sup>[8]</sup>分析了空中目标的距离、速度、进入角和尺寸等因素对脉冲时延和展宽的影响。由于单光子探测器工作在盖革模式下,光子探测的目标回波特性与传统方式存在一定差异,因此,对光子探测模式下运动目标的回波特性进行研究是极有必要的。

本文通过定义光子回波的姿态影响水平来描述空中目标姿态变化过程中光子探测回波的姿态敏感规律,并对 10 km 距离处不同空中目标在一定姿态变化范围内的光子探测回波波形差异度进行研究,分析了不同目标间的差异特性,得到了其变化规律,从而实现了运动目标的区分和识别。

收稿日期: 2021-08-25; 修回日期: 2021-09-29; 录用日期: 2021-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(61871389)、国防科技大学科研计划(ZK18-01-02)

通信作者: \*qfh\_goubaby@163.com; \*\*skl\_hyh@163.com; \*\*\*xushi1988@yeah.net

## 2 光子探测回波表征模型

光子探测系统的坐标系如图 1 所示,光子探测的发射和接收系统位于坐标系的原点处,目标位于俯仰角为  $\omega$ 、与  $x$  轴夹角为  $\sigma$ 、距离为  $R$  的位置处<sup>[9]</sup>。

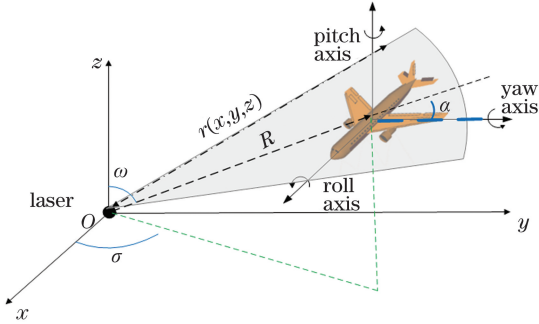


图 1 光子测距扩展目标坐标系

Fig. 1 Extended target coordinate system for photon ranging  
发射的激光服从高斯分布,即

$$g(t) = \frac{E_t}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_s^2}\right), \quad (1)$$

式中:  $\sigma_s = d_{\text{FWHM}} / (2\sqrt{2\ln 2})$ , 其中  $d_{\text{FWHM}}$  为发射激光的半峰全宽;  $E_t$  为激光器的单脉冲能量;  $t$  为时间。

当激光照射目标表面时,对于极小的目标面元的脉冲响应来说,可忽略脉冲展宽,仅考虑时间延迟和强度衰减。整个目标的激光散射截面为所有单元面积的求和,即  $\sigma_r(t) = \int_A d\sigma_r(t)$ 。目标的回波波形信号最终可以表示<sup>[10]</sup>为

$$N_s(t) = T^2 \eta_t \eta_r \eta_q \frac{A_r \cos \alpha}{R^2} \iint_A f_r(x, y, z) \chi(x, y, z) \cdot \frac{g(t - t_0)}{h\nu} \cos \beta dA, \quad (2)$$

其中,

$$\chi(x, y, z) = \frac{2P}{\pi\omega^2} \exp\left(-2\frac{x^2 + y^2}{\omega^2}\right), \quad (3)$$

式中:  $T$  为大气单程通过率;  $\eta_t$  和  $\eta_r$  分别为发射和接收系统的效率;  $\eta_q$  为单光子探测器的探测效率;  $A_r$  为探测系统的接收面积;  $f_r(x, y, z)$  为目标的双向反射分布函数 BRDF;  $t_0$  为面元的时间延迟,  $t_0 = 2r_t/c$ ,  $c$  为光速;  $\alpha$  为目标中心轴相对于激光光束传输方向的偏转角;  $\beta$  为面元法线与激光光束传输方向的夹角;  $dA$  为小面元的面积;  $h\nu$  为单光子能量;  $\chi(x, y, z)$  为目标所在位置的激光横截面的强度系数;  $P$  为激光总功率;  $\omega$  为面元处激光光斑的半径,  $\omega = \varphi_0 \times R$ , 其中  $\varphi_0$  为发射激光的半发散角,  $R$  为目

标距离,且  $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 。

设  $t_d = T_{\text{dead}}/\tau$ ,  $T_{\text{dead}}$  为死时间,  $\tau$  为时间栅格的宽度。由于目前光子计数激光雷达的单光子探测器的死时间相对较长,且为防止距离模糊测距系统多采用单触发模式( $i < t_d$ ),因此本文基于光子探测器长死时间情况下的宽脉冲光子探测模型进行研究。当回波脉宽大于时间栅格宽度时,第  $i$  个时间栅格的探测概率<sup>[10]</sup>为

$$P(i) = \{1 - \exp[-N(i)]\} \times \exp\left[-\sum_{j=1}^{i-1} N(j)\right], \quad (4)$$

式中:  $N(i)$  是第  $i$  个时间栅格内的回波光子数,由回波信号光子数  $N_n$  和噪声光子数  $N_s$  组成,即

$$N(i) = N_n(i) + N_s(i), \quad (5)$$

其中,

$$N_s(i) = \int_{t_i} N_s(t) dt. \quad (6)$$

至此,可利用式(4)~(6)求得任意目标的光子探测回波的统计概率分布,即光子波形。

## 3 光子回波波形姿态敏感度表征模型

基于特征值的光子波形差异度分析是将光子波形样本数据投影到特征空间中的某一特征维度,分析这一维度上光子波形样本间的差异。在目标识别工程应用中,需要结合特征差异度和波形匹配度,全面地衡量波形的差异性。波形和特征可以相互补充,从不同角度分析光子波形的变化。为量化、表征目标姿态变化对光子回波的影响,本文基于差异性度量定义光子回波的姿态影响水平。光子回波是光子事件到达时间的统计概率分布,因此本文采用海灵格(Hellinger)距离描述两光子回波波形的差异性和相似性。其定义如下:

在  $[n]$  范围内的概率分布  $p_1 = \{p_1(i)\}$ ,  $i \in [n]$  和  $p_2 = \{p_2(i)\}$ ,  $i \in [n]$ , 它们之间的海灵格距离定义为

$$h(p_1, p_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} \|\sqrt{p_1} - \sqrt{p_2}\|_2. \quad (7)$$

根据定义式,海灵格距离满足三角形不等式,式中的  $\sqrt{2}$  可以保证对于所有的概率分布都有  $h(p_1, p_2) \leq 1$ 。

然而,对目标进行区分、识别时,关注的是全姿态下的平均差异度。平均差异度的定义为

$$\bar{h}_{\Delta\theta} = E_{\theta} [h(p_{\theta}, p_{\theta+\Delta\theta})], \quad (8)$$

式中:  $E_{\theta}(\cdot)$  表示期望值。由此,定义光子回波波形

的相似度参量  $s = 1 - h$ , 平均波形相似度为

$$\bar{s} = 1 - \bar{h}. \quad (9)$$

对于一些标量特征, 差异性度量坎贝拉 (Canberra) 距离可以克服量纲不同带来的差异, 避免度量模型对标量特征的失效。Canberra 距离定义为

$$d(p_1, p_2) = \frac{|p_1 - p_2|}{|p_1 + p_2|}, \quad (10)$$

式中:  $p_1$ 、 $p_2$  表示某一目标在两种姿态下光子波形的特征值, 包括峰度与偏度、范数特征和中心矩特征等。

同理, 全姿态下的平均差异度为

$$\bar{d}_{\Delta\theta} = E_{\theta} [d(p_{\theta}, p_{\theta+\Delta\theta})]. \quad (11)$$

定义光子回波的姿态影响水平为

$$I = \begin{cases} \bar{h}_{\Delta\theta}, \\ \bar{d}_{\Delta\theta} \end{cases}, \quad (12)$$

用其描述姿态角变化对目标光子回波的影响程度, 即光子回波姿态敏感度。其中,  $\bar{h}_{\Delta\theta}$  计算的是光子回波波形的姿态影响水平,  $\bar{d}_{\Delta\theta}$  则表示光子回波统计特征的姿态影响水平。在后续的仿真实验中, 后者可以验证前者对目标姿态敏感度描述的可靠性, 并对目标姿态敏感特征的细节加以补充。

## 4 典型目标光子回波姿态敏感度分析

本节根据第 2、3 节建立的空中目标光子回波模型和光子回波姿态敏感度计算模型, 利用 MATLAB 软件对 F18、F22、F35 三种目标在  $0^\circ \sim 360^\circ$  全姿态角下的光子回波进行仿真 (目标模型参数见表 1), 并利用波形仿真结果计算各目标的姿态敏感性特征, 用以对目标进行区分和识别。在仿真中, 激光器的半发散角为 1 mrad, 可以实现对目标的全覆盖。在仿真过程中, 目标仅俯仰角变化, 翻滚角和偏转角保持不变 (均为  $0^\circ$ )。

表 1 目标模型参数

Table 1 Parameters of target model

Model	Model size / (mm × mm × mm)
F18	16.49 × 4.65 × 11.55
F22	19.62 × 4.5 × 14.3
F35	15.73 × 3.96 × 10.83

### 4.1 空中目标光子回波波形仿真

一方面, 不同目标本身的材料、形状等存在差异, 因此受目标表面散射截面调制的光子回波不同, 回波随目标姿态角度变化的规律也不同; 另一方面,

对于相同的目标而言, 其姿态变化会导致其表面反射率和起伏强度发生变化, 强散射点发生改变, 因此不同姿态角度范围内同一目标的光子回波的变化规律也不相同。

仿真得到了 F18、F22、F35 三类目标在  $0^\circ \sim 90^\circ$  姿态角范围内的光子回波, 如图 2 所示。可见, 在  $0^\circ \sim 60^\circ$  范围内, 随着目标俯仰角增大, 光子回波变化主要体现在信号幅值的增大上。此外, F18 的光子回波信号的峰度明显增大, F22 的光子回波脉宽减小。与 F18 和 F22 相比, F35 在这一角度范围内的波形变化并不明显。当目标姿态角达到  $60^\circ \sim 90^\circ$  时, 随着俯仰角增大, 三种目标的光子回波均发生明显变化: F18 的回波更加尖锐, 各峰值处的峰度增大, 这是由于其表面起伏明显对回波造成了影响; F22 的回波幅值降低, 且峰值发生位移, 波形分布的偏度增加; F35 的波形变化比在  $0^\circ \sim 60^\circ$  范围内更明显, 说明其回波对这一范围内的姿态角变化更敏感。

### 4.2 目标光子回波姿态敏感度分析

由 4.1 节可知, 光子回波随姿态的变化规律是复杂的。本文用波形相似度来描述目标姿态变化过程中不同角度下目标光子回波之间的差异。在  $0^\circ \sim 360^\circ$  姿态角下, 目标在任意两俯仰角下的光子回波波形相似度如图 3 所示, 色坐标表示光子回波波形的相似度。

总体而言, 当姿态变化较小时, 三种目标的光子回波之间具有较高的相似度, 姿态变化越大, 光子回波相似度越低。平均来看, F35 的光子回波波形在不同姿态角之间的相似度最大, 之后依次为 F18 和 F22, 说明 F22 的光子回波对姿态变化最敏感。一般情况下, 相邻几个姿态角下的光子回波波形很相似, 但 F22 和 F35 都存在如图中标注处的突变角度, 其回波间相似度突然下降, 但是持续数次回波后, 又恢复正常; 相似度随姿态角变化下降得很缓慢, 但是在发生突变的姿态处, 邻近姿态下光子回波的相似度迅速下降。

以上分析了任意两姿态角下光子回波波形的相似度, 从整体上分析了光子回波随姿态变化的差异。同一目标的光子回波的差异性不仅依赖于它们的姿态间隔, 还与它们的具体姿态有关。

根据式 (8) 计算同一目标的两姿态角间隔  $\Delta\theta$  在  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内的光子回波波形的平均差异度, 得到了三种目标的平均波形差异度随姿态角间隔的变化, 如图 4 所示。可见, 随着姿态角间隔增大, 光子



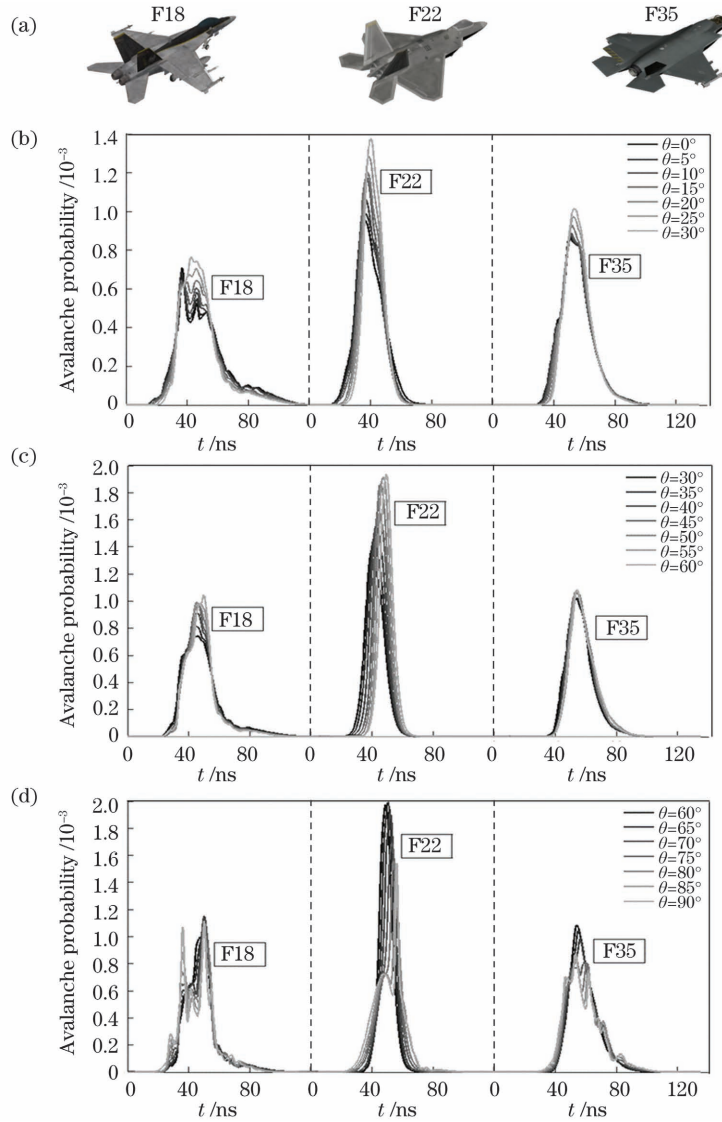


图 2 三类目标及其在  $0^\circ \sim 90^\circ$  姿态角范围内的光子回波。(a) 三类目标；(b) 目标在  $0^\circ \sim 30^\circ$  范围内的回波；(c) 目标在  $30^\circ \sim 60^\circ$  范围内的回波；(d) 目标在  $60^\circ \sim 90^\circ$  范围内的回波

Fig. 2 Three kinds of targets and their respective photon echoes in the attitude angle range from  $0^\circ$  to  $90^\circ$ . (a) Three kinds of targets; (b) target echoes in the range from  $0^\circ$  to  $30^\circ$ ; (c) target echoes in the range from  $30^\circ$  to  $60^\circ$ ; (d) target echoes in the range from  $60^\circ$  to  $90^\circ$

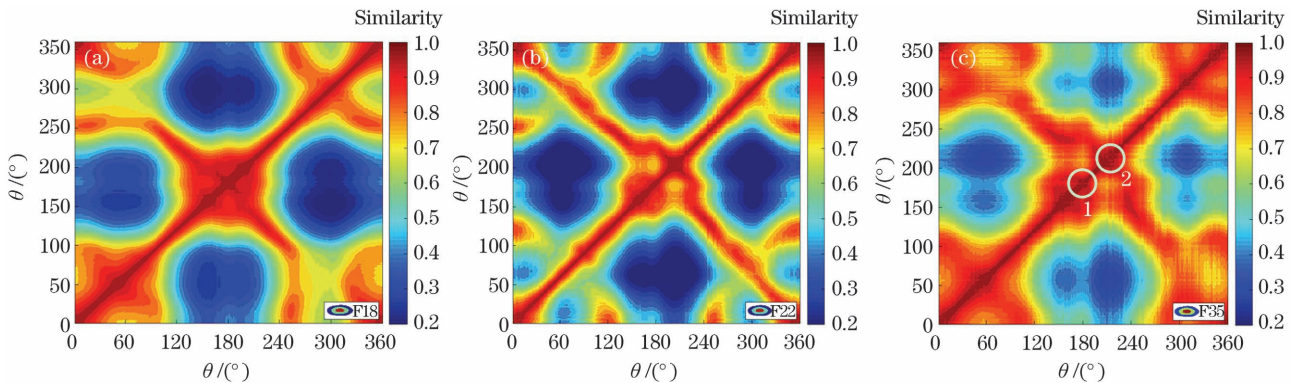


图 3  $0^\circ \sim 360^\circ$  姿态角下任意两幅光子回波波形的相似度。(a) F18; (b) F22; (c) F35

Fig. 3 Waveform similarity of any two photon echoes at  $0^\circ \sim 360^\circ$  attitude angle. (a) F18; (b) F22; (c) F35

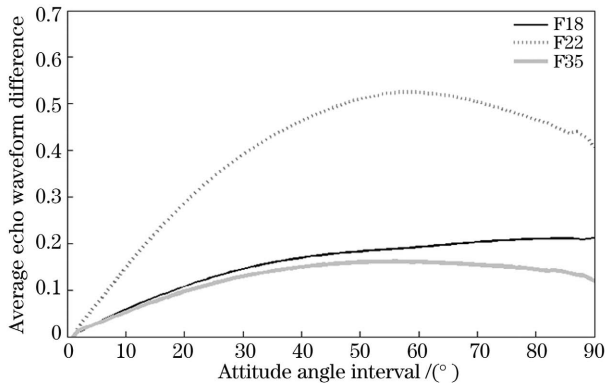


图 4 目标平均回波波形差异度随姿态角间隔的变化  
Fig. 4 Variation of average echo waveform difference of three targets with attitude angle interval

回波波形的平均差异度增大,但对于不同的目标而言,其增长速度和局部变化趋势各不相同。在不同的姿态角间隔下,目标的光子回波会有轻微变化: F22 的平均波形差异度的增幅最大,并在 56°左右到最大值(52.5%),之后,差异度缓缓下降,这与该目标表面形状的起伏和对称性有关;F18 和 F35 的总体波形差异度较小。

图 5 给出了基于波形差异度得到的姿态影响水平分布函数曲线,可见:姿态角间隔对 F22 的光子回波波形影响水平较高,对 F18 和 F35 的光子回波波形影响水平较低。这说明这两种目标的姿态敏感度较低,但 F18 总体上高于 F35。

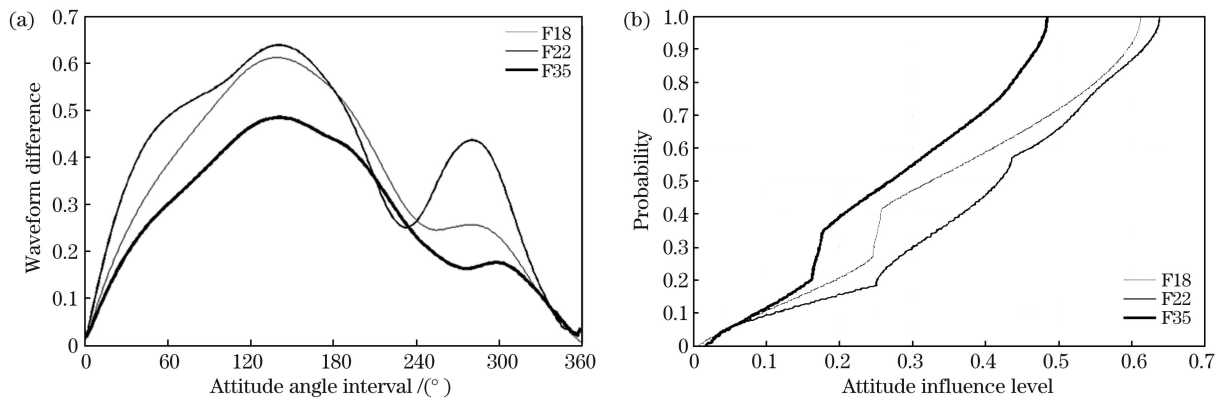


图 5 回波波形差异度的姿态影响水平。(a)任意姿态角间隔的光子回波波形差异度;(b)姿态影响水平分布函数  
Fig. 5 Attitude influence level of echo waveform difference. (a) Photon echo waveform difference at any attitude angle interval; (b) attitude influence level distribution function

由图 6 和图 7 可知:在三种目标中,F35 的峰度和偏度受姿态变化的影响较小(分别低于 0.1 和 0.15),且在全姿态角度间隔内的回波差异度近似关于 180°对称,并在 90°、180°和 270°左右达到极小值,其由峰度和偏度诱导的影响水平明显低于 F18 和 F22,容易区分;F18 和 F22 的姿态影响水平分布较

为相似,并且分布曲线有交叉,但 F18 的峰度和偏度差异度的峰值大于 F22,且其姿态影响水平分布函数更接近线性分布。

图 8 给出了回波中心矩差异度的姿态影响水平,其中:二阶矩反映的是回波脉宽,其与图 4 所示回波波形的姿态影响水平分布一致;三阶矩反映的

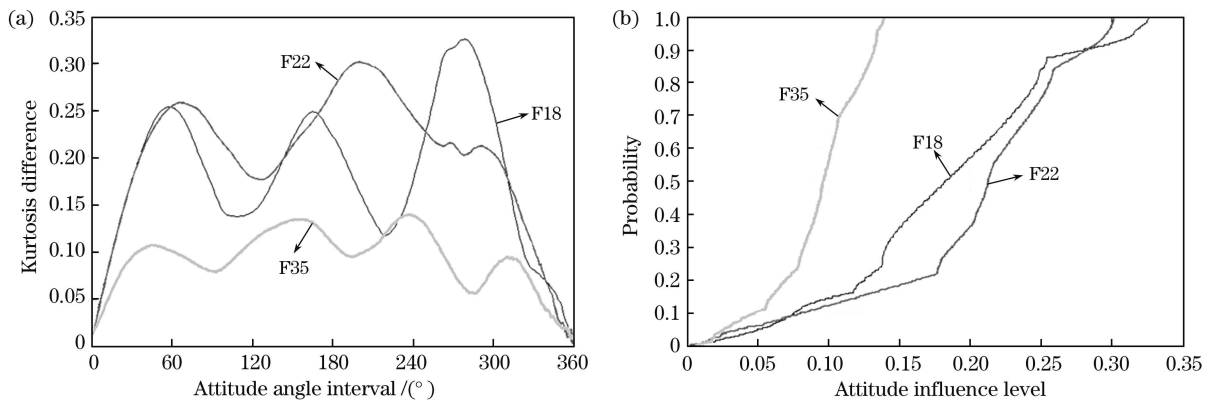


图 6 峰度差异度的姿态影响水平。(a)任意姿态角间隔的光子回波峰度差异度;(b)姿态影响水平分布函数  
Fig. 6 Attitude influence level of kurtosis difference. (a) Photon echo kurtosis difference at any attitude angle interval; (b) attitude influence level distribution function

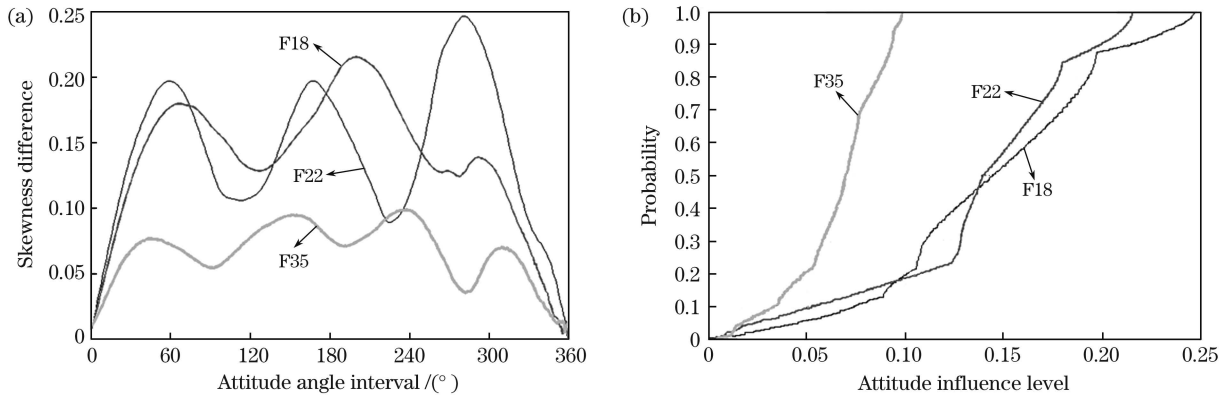


图 7 偏度差异度的姿态影响水平。(a)任意姿态角间隔的光子回波偏度差异度;(b)姿态影响水平分布函数  
Fig. 7 Attitude influence level of skewness difference. (a) Photon echo skewness difference at any attitude angle interval; (b) attitude influence level distribution function

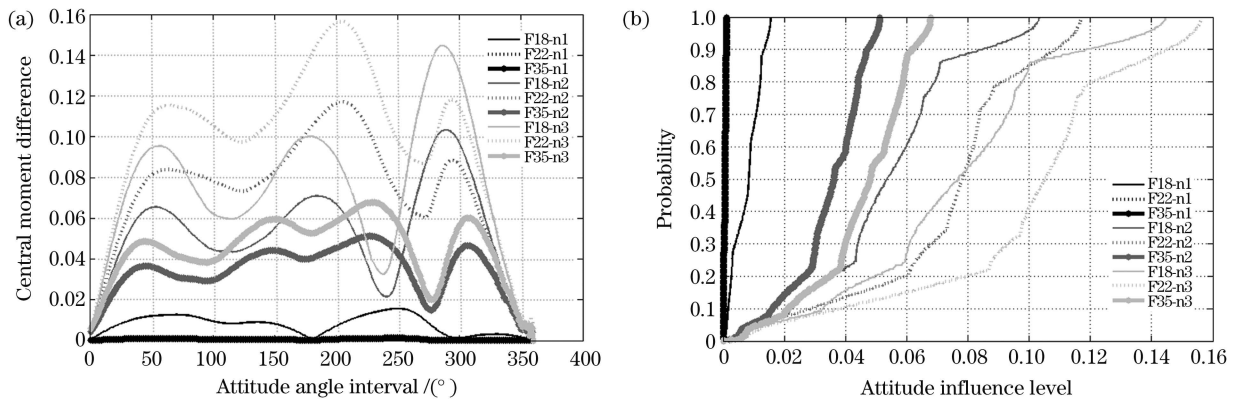


图 8 中心矩差异度的姿态影响水平。(a)任意姿态角间隔的光子回波中心矩差异度;(b)姿态影响水平分布函数  
Fig. 8 Attitude influence level of central moment difference. (a) Central moment difference of photon echo at any attitude angle interval; (b) attitude influence level distribution function

是回波的偏斜程度。在由回波中心矩反映的目标光子探测回波姿态影响水平的比较中,依旧是 F22 回波波形受中心距差异度的影响最大,之后依次为 F18 和 F35,与回波波形的姿态敏感性影响水平分布特点一致。

表 2 总结了基于不同诱导参数衡量姿态变化对运动目标光子探测回波影响的结果,其中均值和中值表示影响水平的幅度,方差则表征影响水平的波动情况。表 2 不仅比较了三种目标的姿态影响水

平,还比较了不同目标的回波特征在不同诱导参数下的稳健性。例如,从光子回波波形的姿态影响水平中值来看,F22 的光子回波姿态敏感度高于 F18 和 F35,这与其大部分统计特征的姿态影响水平基本一致。比较偏度的姿态影响水平中值发现其与上述结论稍有差异。因此,利用光子回波波形的姿态影响水平来区分不同的目标具有一定可行性,根据统计特征的姿态影响水平可以进一步对结果进行验证,并在细节之处加以补充。

表 2 光子回波姿态影响水平分析

Table 2 Influence level analysis of photon echo attitude

Attitude influence level		F18	F22	F35
Photon echo waveform	Mean	0.3482	0.3949	0.2783
	Median	0.3254	0.4198	0.2708
	Standard deviation	0.1792	0.1750	0.1409
Kurtosis	Mean	0.1823	0.2010	0.0930
	Median	0.1824	0.2128	0.0962
	Standard deviation	0.0749	0.0711	0.0309

续表

Attitude influence level		F18	F22	F35
Skewness	Mean	0.1438	0.1374	0.0661
	Median	0.1442	0.1395	0.0702
	Standard deviation	0.0546	0.0506	0.0222
Second moment	Mean	0.1959	0.1602	0.0821
	Median	0.2159	0.1846	0.0832
	Standard deviation	0.2159	0.1846	0.0832
Third moment	Mean	0.3951	0.3139	0.1763
	Median	0.4210	0.3609	0.1807
	Standard deviation	0.1792	0.1415	0.0673
Fourth moment	Mean	0.4853	0.4151	0.2314
	Median	0.5173	0.4621	0.2369
	Standard deviation	0.2166	0.1561	0.0865

### 4.3 实验验证及分析

为了验证理论模型的可靠性,本课题组开展了光子计数激光雷达探测实验,对目标模型进行探测,并采集、处理实验数据,获得了两个目标模型的光子回波概率分布。实验中,基于飞行时间测距原理(TOF法),采用激光雷达对目标进行探测,脉冲激光波长为 1550 nm,实验现场图以及目

标的三维点云成像效果如图 9 所示,图中 9(a)中的“1”为激光雷达系统,“2”为目标 J-15 和 SU-35 的 1:72 缩比模型。由图 9(b)、(c)可见,不能依靠三维点云成像对外形相似的两架飞机进行准确、显著区分,其细节特征无法清晰呈现,而且由于点云积累需要较长的扫描时间,无法进行连续、有效探测。

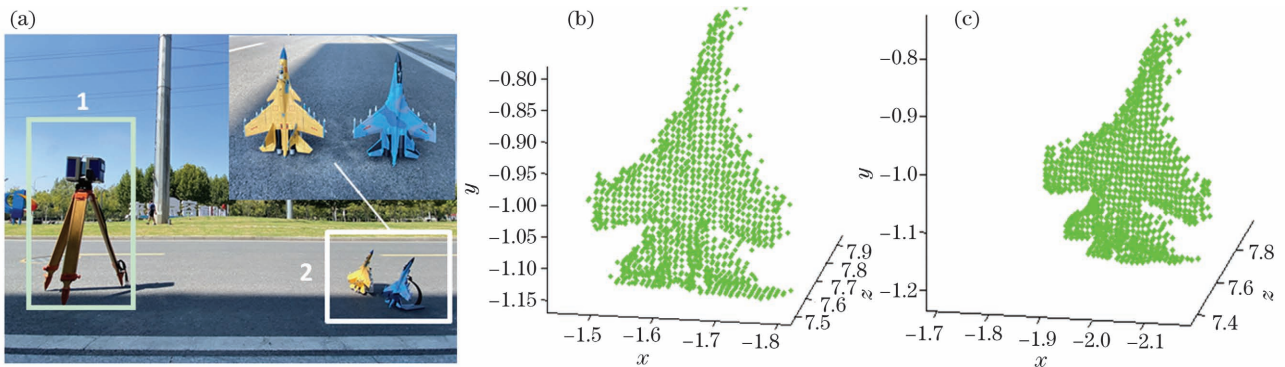


图 9 实验设备和目标模型。(a)实验现场图;(b)J-15 的三维点云成像图;(c)SU-35 的三维点云成像图

Fig. 9 Experimental equipment and target models. (a) Experimental field photo; (b) three-dimensional point cloud image of J-15; (c) three-dimensional point cloud image of SU-35

对实验中得到的目标光子回波概率分布进行数据处理,处理结果如图 10 所示。可见,外形相似的两个目标,其回波波形差异度的姿态影响水平分布虽然整体相似,但 SU-35 的波形差异度整体没有超过 0.5,且集中分布在 0.45~0.5 范围内,而 J-15 的波形差异度集中分布在 0.5~0.6 范围内。由

图 10(c)、(d)可以看出,可以通过峰度差异度和偏度差异度姿态影响水平分布的明显差异对目标进行区分。SU-35 的目标回波差异度整体较小(小于 0.5),J-15 的目标回波差异度相对较大(大于 0.5)。实验结果与仿真结果基本一致,验证了通过光子回波姿态影响水平区分目标的可行性。



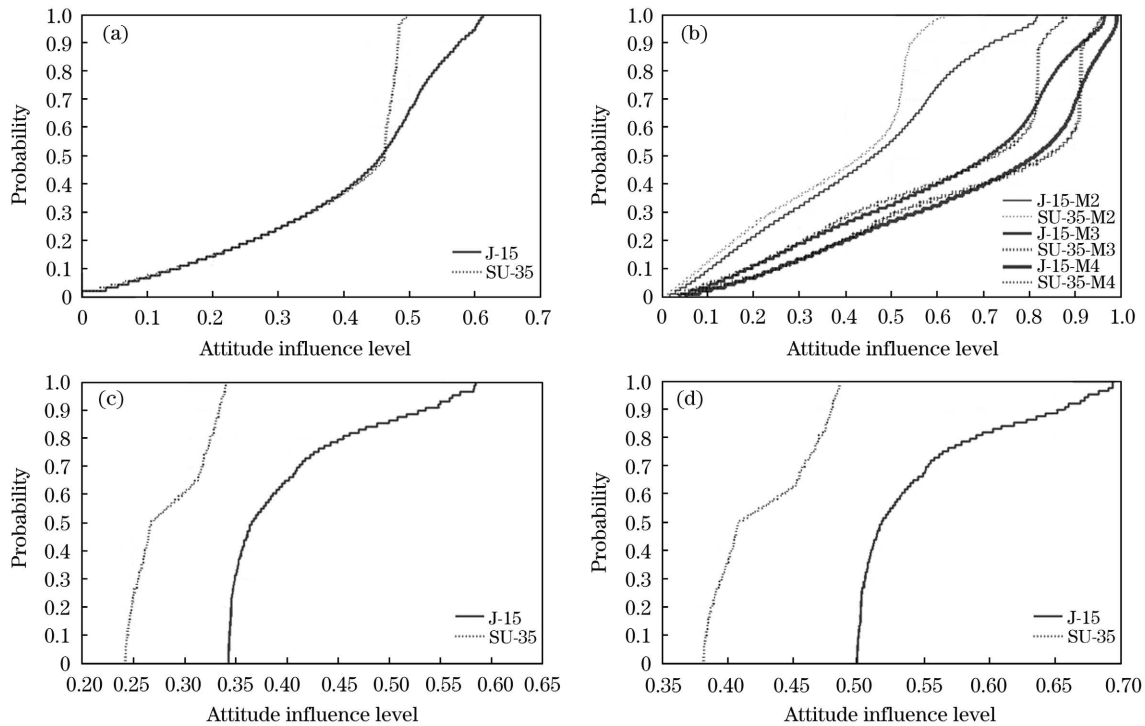


图 10 实验目标回波差异度的姿态影响水平。(a)回波波形差异度的姿态影响水平分布函数;(b)中心矩差异度的姿态影响水平分布函数;(c)峰度差异度的姿态影响水平分布函数;(d)偏度差异度的姿态影响水平分布函数

Fig. 10 Attitude influence level of echo difference of experimental targets. (a) Attitude influence level distribution function of echo waveform difference; (b) attitude influence level distribution function of central moment difference; (c) attitude influence level distribution function of kurtosis difference; (d) attitude influence level distribution function of skewness difference

## 5 结 论

运动目标识别是光子探测目标识别的难点之一。受光子探测机制的影响,目标的结构和材质多样性决定了不同的空中目标在不同角度下的回波具有较大的复杂性。基于光子探测回波理论,本文提出了光子回波姿态影响水平的概念,用其描述目标的光子回波姿态敏感度,并利用建模和仿真数据,定量研究了三种典型空中运动目标的姿态敏感度,通过对比明确了其各自的特点及相互之间的差异,并通过实验对此方法进行了验证。结果表明:同类型不同型号的空中目标的光子回波姿态影响水平的显著差异可以用来对目标进行区分,这为目标识别工作提供了新方法和数据支撑,具有较高的理论和应用价值。需要说明的是,对于空中目标在其他角度范围的运动特点,此理论的具体适用条件还有待更加深入的讨论。

## 参 考 文 献

[1] 彭勃, 魏玺章, 刘振, 等. 中段目标高分辨距离像姿态敏感性影响度量方法[J]. 宇航学报, 2013, 34

(6): 833-841.

Peng B, Wei X Z, Liu Z, et al. Impaction measurement of target-aspect sensitivity on HRRP-based RATR techniques for ballistic target in midcourse [J]. Journal of Astronautics, 2013, 34 (6): 833-841.

[2] 寇添, 王海晏, 王芳, 等. 机载激光探测空中目标脉冲回波特性研究[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0414001.

Kou T, Wang H Y, Wang F, et al. Research on pulse echo characteristic of airborne laser detecting air target [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35 (4): 0414001.

[3] 胡以华, 张鑫源, 徐世龙, 等. 激光反射层析成像技术的研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(4): 0401002.

Hu Y H, Zhang X Y, Xu S L, et al. Research progress of laser reflective tomography techniques [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48 (4): 0401002.

[4] 郑向阳. 运动条件下光子计数激光雷达数据处理技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2016.

Zheng X Y. Research of data processing technology



- in photon counting LIDAR systems under movable conditions [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [5] Mccarthy A, Ren X M, Frera A D, et al. Kilometer-range depth imaging at 1550 nm wavelength using an InGaAs/InP single-photon avalanche diode detector [J]. Optics Express, 2013, 21(19): 22098-22113.
- [6] Marino R M, Stephens T, Hatch R E, et al. A compact 3D imaging laser radar system using Geiger-mode APD arrays: system and measurements [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5086: 1-15.
- [7] 李良超. 目标光学特性建模及其应用研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.  
Li L C. Study on modeling and application of target optical characteristic [D]. Xi'an: Xidian University, 2007.
- [8] 寇添, 王海晏, 王芳, 等. 机载激光探测空中目标脉冲回波特性研究 [J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0414001.
- Kou T, Wang H Y, Wang F, et al. Research on pulse echo characteristic of airborne laser detecting air target [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0414001.
- [9] 侯阿慧, 胡以华, 赵楠翔, 等. 扩展目标光子测距回波特性及误差研究 [J]. 中国激光, 2021, 48(4): 0401016.
- Hou A H, Hu Y H, Zhao N X, et al. Echo characteristics and error of extended target for photon ranging [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 0401016.
- [10] Fouche D G. Detection and false-alarm probabilities for laser radars that use Geiger-mode detectors [J]. Applied Optics, 2003, 42(27): 5388-5398.
- [11] Xu X B, Zhang H, Luo M Z, et al. Research on target echo characteristics and ranging accuracy for laser radar [J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 96: 330-339.

## Pitch Attitude Sensitivity of Photon Detection Echo of Moving Airborne Targets

Qu Fanghui<sup>1,2\*</sup>, Hu Yihua<sup>1,2\*\*</sup>, Xu Shilong<sup>1,2\*\*\*</sup>, Hou Ahui<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei 230037, Anhui, China;

<sup>2</sup>Anhui Key Laboratory of Electronic Control Technology, National University of Defense Technology, Hefei 230037, Anhui, China

### Abstract

**Objective** Photon detection technology is an effective method for studying far-away small moving targets, and photon echoes are considerably affected by the attitude change of the target in motion. Because the target motion influences echo parameters such as delay, broadening and energy attenuation, they reflect the change in echo waveforms. Therefore, in addition to acquiring the target postural information such as speed, direction, distance and height difference, the acquisition of the laser incidence angle and target attitude angle is crucial for air target detection. Therefore, by collecting and analysing the photon echo at multiple attitude angles of the target, we can compare different echo characteristics of different targets caused by changes in situations.

**Methods** To describe the attitude sensitivity of the photon detection echo of an airborne target during a change in its attitude, the attitude influence level of photon echoes is defined based on the Hellinger distance and Canberra distance theory, which can be used as a quantitative analysis tool that affects the photon detection and identification performance of different targets. Based on the simulation of the photon echo waveform difference degree of three air targets in a certain range of attitude change, the law and difference between targets are analysed and two aircraft models are used for experimental verification.

**Results and Discussions** Figure 5 shows the horizontal distribution function curve of pose effect based on waveform difference, which shows that the influence of attitude angle change on the photon echo waveform of F22 is high, and the effect of attitude angle change the photon echo waveform of F18 or F35 is low. This suggests that the attitude sensitivity of both targets is low, but the attitude sensitivity of F18 is overall higher than that of F35. The kurtosis and skewness of F35 are slightly affected by changes in the attitude (less than 0.1 and 0.15, respectively).

Moreover, the echo difference degree within the full attitude angle interval is somewhat symmetric at  $\sim 180^\circ$  (Figs.7 and 8), reaching a minimum value at approximately  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  and  $270^\circ$ . The influence level induced by the kurtosis and skewness is lower than that induced by F18 and F22, which is easily distinguishable. The horizontal distribution of the attitude influence for F18 and F22 is similar, and their distribution curves are crossed; however, the peak value of kurtosis and skewness difference of F18 is larger than that of F22. Furthermore, the horizontal distribution function of the attitude influence for F18 shows a nearly linear distribution. In the comparison of the influence levels of the target photon detection echo attitude reflected by the echo center moment, it is still the F22 echo waveform that is most affected by the difference in center distance, followed by F18 and F35, respectively. Consistent with the horizontal distribution characteristics of the attitude sensitivity of the echo waveform. The experimental results show that for both targets with a similar appearance (Fig. 10), although the overall trend of the attitude influence level distribution of the echo waveform difference degree is similar, the waveform difference degree of SU-35 does not exceed 0.5 and ranges from 0.45 to 0.5, and the waveform difference of J-15 ranges from 0.5 to 0.6 [Fig. 11(a)]. Targets are distinguishable based on considerable differences in the horizontal distribution of the attitude influence between both kurtosis and skewness difference degrees [Figs. 11(c) and (d)]. The target echo divergence of SU-35 is relatively small (less than 0.5), whereas that of J-15 is relatively large (more than 0.5). The experimental results agree well with the simulation results, thereby proving the feasibility of discriminating targets based on the influence level of the photon echo attitude.

**Conclusions** The echo complexity of different air targets at different angles is determined by the influence of the photon detection mechanism and the diversity of the target structure and material. Using the photon detection echo theory, this study proposed the concept of photon echo posture affect levels to describe the photon echo of target attitude sensitivity. This method was verified using the modelling and simulation data, quantitative research on the susceptibility of three typical air moving target attitudes, comparison between their characteristics and differences, and experiments. The results show that the obvious difference in the influence level of the photon echo attitude of similar and dissimilar air targets can be used to distinguish the target, providing a new method and data support for target recognition with high theoretical and application values. The other angle range and specific application conditions of the theory for characterising air target movements need to be further discussed.

**Key words** remote sensing; photon detection; moving target; echo characteristics; attitude influence level