

## 机载平台动态杂波背景下多脉冲激光距离 扩展目标回波滤波算法研究

孙俊灵<sup>1</sup>, 马鹏阁<sup>1\*</sup>, 庞栋栋<sup>2</sup>, 金秋春<sup>1</sup>, 陈新永<sup>1</sup>, 单涛<sup>2</sup>, 陶然<sup>2</sup>

(1. 郑州航空工业管理学院 智能工程学院, 河南 郑州 450015;

2. 北京理工大学 信息与电子学院, 北京 100081)

**摘要:** 现代飞机装备机载光电探测系统, 采用红外热像仪搜索空域飞机目标的方位, 利用脉冲激光测距机测量目标的径向距离。机载脉冲激光目标检测是一个动态过程, 当光斑在目标上移动或大气湍流折射导致回波光束偏离接收天线时, 目标时有时无, 导致无法稳定跟踪目标。仅利用目标回波脉冲的幅度信息进行检测, 限制了激光目标的有效作用距离。在机载平台的动态杂波背景下, 将脉冲激光目标视为距离扩展目标, 回波信号看作目标波形像, 结合时间宽度上的波形特征开展检测, 可较好解决动态目标检测问题。鉴于此, 文中提出了一种基于小波变换的多脉冲激光距离扩展目标回波滤波算法。实验结果表明, 所提算法能够较好地保持波形特征。

**关键词:** 机载平台; 动态目标检测; 扩展目标; 目标波形像; 小波变换

**中图分类号:** TN249      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20200449

## Research on echo filtering algorithm of multi pulse laser range extended target in dynamic clutter background of airborne platform

Sun Junling<sup>1</sup>, Ma Pengge<sup>1\*</sup>, Pang Dongdong<sup>2</sup>, Jin Qiuchun<sup>1</sup>, Chen Xinyong<sup>1</sup>, Shan Tao<sup>2</sup>, Tao Ran<sup>2</sup>

(1. School of Intelligent Engineering, Zhengzhou Institute of Aeronautics Industry Management, Zhengzhou 450015, China;

2. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Modern aircraft is equipped with airborne photoelectric detection system. Infrared thermal imager is used to search the azimuth of aircraft target in airspace, and pulsed laser rangefinder is used to measure the radial distance of target. Airborne pulsed laser target detection is a dynamic process. When the light spot moves on the target or the atmospheric turbulence refraction causes the echo beam to deviate from the receiving antenna, sometimes the target is absent, which makes it impossible to track the target stably. Only the amplitude information of target echo pulse is used to detect, which limits the effective range of laser target. In the dynamic clutter background of airborne platform, the problem of dynamic target detection can be solved by considering the pulse laser target as the range extended target and the echo signal as the target waveform image. In view of this, a multi pulse laser range extended target echo filtering algorithm based on wavelet transform was proposed. Experimental results show that the proposed algorithm can keep the waveform characteristics well.

**Key words:** airborne platform; dynamic target detection; extended target; target waveform image; wavelet transform

收稿日期: 2020-11-23; 修订日期: 2021-02-01

基金项目: 河南省科技攻关项目 (192102210106, 192102210094, 202102210330); 国家自然科学基金民航联合基金 (U1833203)

## 0 引言

现代飞机装备机载光电探测系统, 红外单元被动探测搜索空域飞机目标的方位信息(方位角、俯仰角), 激光单元主动照射获取目标的径向距离信息, 实现目标的三维空间定位。远程目标脉冲激光测距通常采取非相干直接探测方式。发射脉冲激光宽度约为 10~20 ns, 经信道传输及目标反射后, 回波脉冲展宽为 30~50 ns。现有远程激光目标检测算法将目标视为点目标, 目标在回波信号中是以一定幅度、宽度的单个脉冲出现的, 目标检测需要较高的信噪比。早期机载激光测距机目标检测信噪比要大于 6.7, 随着数字化多脉冲激光测距机的出现, 数字信号处理技术将可检测信噪比降低至 3 以下。为了增强目标作用距离, 机载脉冲激光测距机在提高激光发射功率的同时不断减小发射脉冲宽度, 以获得较高的峰值功率。随着激光调 Q 技术的发展, 现有激光测距机发射脉冲宽度达到 3~5 ns, 甚至更窄。当信噪比较低时, 通常会采取提高 APD 探测器高压偏置的措施以提高探测灵敏度, 这将同时增大脉冲光杂波。此时, 背景光杂波的脉冲宽度与目标回波的脉冲宽度相当, 利用脉冲幅度阈值对目标进行检测, 虚警率提高。

在毫米波雷达目标探测中, 基于目标一维距离像开展目标检测与识别的研究已有较多<sup>[1]</sup>。高分辨率目标应被视为距离扩展目标<sup>[2-5]</sup>。在三维扫描成像激光雷达中, 单点目标回波波形被看作是目标的强度像及距离像<sup>[6]</sup>。李艳辉、吴振森等人根据激光雷达方程及粗糙面脉冲波束散射理论, 提出了目标激光脉冲后向散射回波功率即激光目标距离像的连续函数积分表达式, 并获得了斜板、球和圆锥一维距离像的具体形式<sup>[7]</sup>。激光目标信号波形的曲线能够较好反映目标的径向几何外形信息。机载脉冲激光发射脉冲宽度为 3~5 ns, 光脉冲持续宽度 0.45~0.75 m, 相比飞机目标十几、数十米以上的尺寸, 激光回波信号可看作目标的一维距离扩展“波形像”<sup>[8]</sup>, 其中包含有目标的特征信息。

雷达目标检测等价于模式识别领域的分类问题, 通常采用特征提取、分类与识别方法在非平稳环境和杂波条件下获得良好的目标检测性能。提取杂波和目标特征矢量, 通过分类方法检测非平稳环境中的微

弱目标, 已经被证明是有效的<sup>[9]</sup>。因此, 研究既可以提高信噪比又能较好保持目标回波完整波形的滤波算法很有意义。

## 1 机载脉冲激光测距雷达的背景光杂波与目标波形像特性

### 1.1 机载脉冲激光测距雷达背景光杂波

机载脉冲激光测距雷达的目标探测背景光主要为太阳光, 包括太阳直射光、云层反射阳光、地(海)面反射阳光、空间大气散射光及目标体反射阳光等。采用如图 1 所示的 1064 nm 亚纳秒多脉冲激光测距机(发射脉冲宽度 3 ns, 发射频率 1000 Hz, 接收孔径 150 mm), 对阳光背景光杂波信号进行采集。从实验数据看, 阳光背景光对激光探测影响较大。将示波器波形聚焦在局部, 可以看出, 杂波在部分特定频率上能量较集中, 这说明杂波的尖峰脉冲性增强, 即杂波具有一定非高斯脉冲特性。

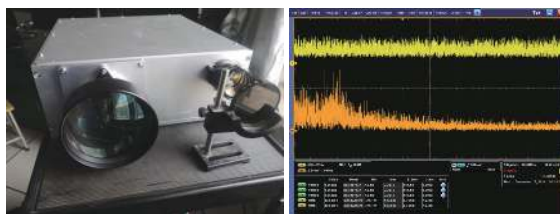


图 1 1064 nm 亚纳秒多脉冲激光测距机采集光杂波信号

Fig.1 Clutter signal of the acquired waveform by the 1064 nm subnanosecond multi-pulse laser rangefinder

1064 nm 亚纳秒多脉冲激光测距机接收采用制冷型探测器。探测器受温度和偏置高压的影响。为了获得较好的探测灵敏度, 通常需要在探测过程中根据温度及信噪比情况动态调整偏置高压。这样会导致在放大较弱回波信号的同时, 光杂波也被放大。如图 1 所示(增加两个高压回波与杂波波形), 当信噪比较低时, 杂波的脉冲特性与目标脉冲信号相近, 很难直接利用幅度阈值区分出单个脉冲目标。

### 1.2 脉冲激光目标的一维距离波形像及其特征

#### (1) 激光目标回波波形像

脉冲激光目标回波信号是由工作在线性模式的 APD 光电探测器接收并转换目标反射脉冲激光功率得到的。脉冲激光雷达接收距离  $R$  处目标的反射光功率  $p_R$  可看作发射激光脉冲激励输入大气传播信

道,并经由目标反射传播的系统响应。脉冲激光接收光功率可由发射信号、大气信道脉冲响应、目标反射脉冲响应等卷积计算得到:

$$p_R(R) = C_A P_0 \tau_H(R) * h_c(R) * h_t(R) = \left[ \left( \beta \frac{D^2}{\pi R^4 \theta^2} \eta_{\text{Atm}}^2 \eta_{\text{sys}} P_0 \right) \times \frac{c \tau_H}{2} \right] * A_c(R) = K \cdot \tau_H(R) * A_c(R) \quad (1)$$

由公式(1)可以看出,系统和环境参数  $K$  相对稳定时,距离  $R$  处目标的激光回波波形由沿入射方向上的激光脉冲光束宽度  $\tau_H$  和激光目标有效反射面积随距离变化的函数  $A_c(R)$  确定。激光目标波形离散序列  $s(n)$  可由有限长序列  $\tau(n)$  和  $A_c(n)$  线性卷积得到:

$$s(n) = \sum_{k=0}^{\infty} \tau(k) * A_c(n-k) \quad (2)$$

假设照射到目标的激光光束脉宽  $\tau_H$  为 5 ns,由光速可计算对应距离分辨单元  $dR$  为 0.75 m。发射脉冲光束径向长度为 1.5 m,依  $dR$  可离散为 2 点序列  $\tau(n)=\{1,1\}$ 。沿径向长度上的激光目标有效反射截面函数  $A_c(R)$  也可按照  $dR$  离散化得到。长度为 15 m 的目标可离散化为 20 点序列。脉冲宽度  $\tau_H$  越窄,回波波形像对目标外形特征的映射越清晰。

(2) 脉冲激光目标回波波形及其特征

时域脉冲激光目标回波波形的基本特征包括目标波形序列长度、强散射中心等。

1) 目标波形序列长度——目标径向尺寸

沿激光入射角度,目标的径向尺寸信息可由目标所在位置提取的回波波形序列总长度表征。目标波形序列长度与实际目标的径向尺寸、目标姿态(激光入射角度)、发射激光脉冲宽度等因素有关。

2) 目标波形强散射中心

目标强散射中心对应于目标激光有效反射面积较大的区域,其数量、散射中心峰值点位置、波形幅度在径向尺寸上的起伏变化等特征反映了目标的总体结构。散射中心是指目标回波波形中的波峰,其数量不随目标姿态的变化而变化。散射中心可由波形中的峰值点来确定。

3) 波形起伏变化

目标波形的起伏变化在一定程度上反映了飞机自身的外形特征,其幅度与一定入射角度的激光有效

反射面积变化相关。但当目标距离较远时,低信噪比下非相干直接探测方式接收的激光回波波形的起伏变化受到杂波及噪声影响较大。

(3) 激光目标的几何分割比特征

激光目标基本特征中,强散射中心的数量属于姿态不敏感特征。目标波形序列长度及散射中心波形起伏变化均对目标姿态存在一定的敏感性。

如图 2 所示,载机位于  $O$  点,空中飞机目标由线段  $AB$  表示,其中  $BT=l_1, AT=l_2$ 。载机激光雷达照射到目标上的反射面积最大处位于  $T$  点。发射激光的束散角为  $\Psi$ ,  $OT$  为目标距离  $R$ ,目标平面与  $OT$  的夹角为  $\alpha$ ,  $CD$  为激光光斑的直径  $D$ 。

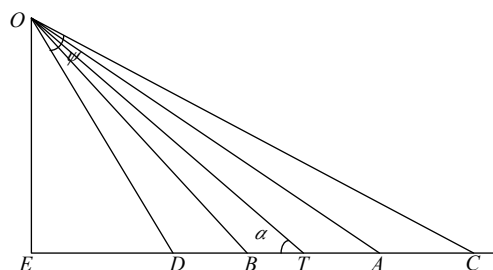


图 2 目标姿态示意图

Fig.2 Schematic diagram of target attitude

目标上发生反射的尺寸设为  $L$ ,由  $D=2R \tan(\Psi/2)$ ,束散角  $\Psi=1 \text{ mrad}$ ,则光斑直径  $D=R/1000$ 。在目标相对载机距离  $R \geq 20 \text{ km}$  时,光斑直径  $D$  大于目标尺寸,  $L=l_1+l_2$ ,此时目标属于远程点目标。可以看出,对于点目标,当激光入射角度发生变化或者目标转动时,目标与载机的相对姿态均会发生变化。激光回波信号中目标波形序列长度对应于沿入射方向的目标径向长度,即:目标  $AB$  向入射方向  $OT$  的投影为  $BT \cdot \cos \alpha + TA \cdot \cos \alpha$ 。 $T$  点为激光目标波形最强散射中心峰值点位置。

定义最强散射中心峰值点  $T$  对目标波形序列  $s(n)$  的几何分割比为  $G$ ,则当与目标姿态相对变化时,有:

$$G = \frac{BT \cdot \cos \alpha}{BT \cdot \cos \alpha + TA \cdot \cos \alpha} = \frac{BT}{AB} \quad (3)$$

由公式(3)可知,几何分割比  $G$  不受姿态影响。单帧观测数据中,目标波形峰值点所在位置、回波波形“像”中调制的目标反射面积变化特征(如波形序列长度、反射中心数量等)是脉冲激光距离扩展目标的

回波主要特征。

## 2 机载平台动态杂波背景下脉冲激光目标波形提取算法

### 2.1 算法原理

远程亚纳秒脉冲激光目标回波信号具有幅度微弱、非平稳的特点。小波变换既保有傅里叶变换方法的优点,又具有短时傅里叶变换的良好局域特性。小波变换适合对信号的局部现象进行分析,在处理非平稳信号和微弱信号方面有着独特的优势。基于小波变换研究动态杂波背景下脉冲激光目标波形的检测,提出了适应背景动态杂波的波形提取算法。

在小波域,杂波背景下脉冲激光目标波形的检测按照 Neyman-Pearson 准则进行假设检验判决。设小波分解尺度为  $j$ , 目标回波信号的小波系数可表示为:

$$H_1 : d_x^j = d_s^j + d_c^j \quad (4)$$

$$H_0 : d_x^j = d_c^j \quad (5)$$

式中:  $H_1$  为有目标波形存在的假设;  $H_0$  为无目标波形存在的假设;  $d_s^j$  是尺度  $j$  下信号的小波系数;  $d_c^j$  是尺度  $j$  下杂波与噪声的小波系数。按照小波分解重构的要求,这里的小波系数通常是指小波分解得到的高频系数。由小波变换的理论可知,高斯噪声经过小波变换之后依然是高斯的。在杂波背景服从高斯分布的前提下,可以假设背景杂波与电路噪声的小波系数  $d_c^j$  服从均值为  $\mu$ , 方差为  $\sigma^2$  的高斯分布。小波变换是线性变换,有:

$$p(d_x^j|H_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(d_x^j - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

$$p(d_x^j|H_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(d_x^j - N_j\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

式中:  $N_j$  为目标波形小波系数均值的估计值。

在 Neyman-Pearson 准则下,小波域脉冲激光目标波形存在的似然比检验  $\Lambda(d_x^j)$  表示为:

$$\Lambda(d_x^j) = \frac{P(d_x^j|H_1)}{P(d_x^j|H_0)} = \exp\left(\frac{N_j(2d_x^j - 2\mu - N_j)}{2\sigma^2}\right) \quad (8)$$

由似然比检验判决准则,有:

$$\begin{aligned} H_1 : \exp\left(\frac{N_j(2d_x^j - 2\mu - N_j)}{2\sigma^2}\right) &> \lambda \\ H_0 : \exp\left(\frac{N_j(2d_x^j - 2\mu - N_j)}{2\sigma^2}\right) &< \lambda \end{aligned} \quad (9)$$

式中:调整参数  $\lambda$  可获得给定的虚警概率  $P_{fa}$  值。对上式求对数,有:

$$\begin{aligned} H_1 : x = \frac{d_x^j - \mu}{\sigma} &> \left(\frac{\sigma}{N_j} \ln \lambda + \frac{N_j}{2\sigma}\right) = \beta \\ H_0 : x = \frac{d_x^j - \mu}{\sigma} &< \beta \end{aligned} \quad (10)$$

式中:  $\frac{N_j}{\sigma}$  为信杂比。

设统计量  $x = \frac{d_x^j - \mu}{\sigma} \sim N(0, 1)$ , 由公式 (6) 可得到虚警概率为:

$$P_{fa} = \int_{\beta}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (11)$$

这样,对于给定  $P_{fa}$  可由公式 (11) 得到阈值  $\beta$ 。进一步,由公式 (6) 可得到检测概率  $P_d$  为:

$$P_d = \int_{\beta}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - A_j)^2}{2}\right) dx \quad (12)$$

在小波系数服从均值为  $\mu$ , 方差为  $\sigma^2$  的高斯分布的前提下,得到尺度  $j$  下的小波分解系数的阈值为:

$$Th_j = \beta\sigma + \mu \quad (13)$$

对信号进行小波分解,得到高频系数进  $d_j$  行阈值处理,大部分高频系数可作为噪声置为零,再结合全部低频系数  $c_j$  利用小波重构完成降噪。

对于高频系数进行置零,多少才是最合适的,结合不同评估方法形成软阈值、硬阈值等处理算法<sup>[10]</sup>。设高频系数  $d_j$  经阈值处理后的小波系数为  $\hat{d}_j$ , 按照软阈值方法,

$$\hat{d}_j = \begin{cases} \text{sgn}(d_j)|d_j| - Th_j, & |d_j| > Th_j \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (14)$$

由硬阈值方法,有:

$$\hat{d}_j = \begin{cases} d_j, & |d_j| > Th_j \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (15)$$

公式 (10) 中的统计量  $X = (d_x^j - \mu)/\sigma$  是小波系数  $d_x^j$  对噪声小波系数的均值和标准差归一化的结果。由  $x \sim N(0, 1)$ ,  $x$  与杂波均方根  $\sigma$  无关,而似然比判决值

$\beta$  由虚警概率  $P_{fa}$  确定。在  $\beta$  不变的情况下对  $x$  进行检测, 可以获得恒定的虚警概率。在零均值高斯杂波背景下, 这一目标波形检测提取方法具有较好的鲁棒性。

实际上, 阈值  $Th_j$  与杂波背景均值  $\mu$  和方差  $\sigma^2$  有关, 均是未知, 需要加以估计。采取删除措施<sup>[10]</sup>, 先将尺度  $j$  下的小波系数按绝对值大小进行排序, 然后删除从最大值起始的一部分小波系数, 认为这些被删除的小波系数是激光目标波形的小波系数, 取剩余的小波系数作为杂波小波系数的估计  $\hat{d}_j, k(k = 1, 2, \dots, M_j), M_j$  为尺度  $j$  下总的小波系数个数。那么均值和标准差的无偏估计量分别为:

$$\hat{\mu} = \frac{1}{M_j} \sum_{k=1}^{M_j} \hat{d}_{j,k} \quad (16)$$

$$\hat{\sigma} = \frac{1}{M_j - 1} \sum_{k=1}^{M_j} (\hat{d}_{j,k} - \hat{\mu}) \quad (17)$$

如何选取这一部分最大的小波系数, 可以采用

Donoho 阈值来确定。Donoho 在小波变换的基础上提出了小波阈值去噪方法, 并证明了该方法在最小方差意义下可达到最佳估计值。

$$\sigma_j = \frac{med(|d_x^j|)}{0.6745} \quad (18)$$

$$Th_j = \sigma_j \sqrt{2 \ln(n)} \quad (19)$$

式中:  $\sigma_j, n$  和  $Th_j$  分别为尺度  $j$  下的小波系数的标准差、原始信号长度和阈值水平;  $med$  表示求中位数。通过 Donoho 阈值对小波系数进行处理, 将最大的小波系数作为目标波形加以删除, 剩余的小波系数采用公式 (13) 再进行阈值处理, 小于该阈值的小波系数的数值置为零。要指出的是, 公式 (13) 中的均值和标准差可由公式 (16) 和公式 (17) 加以估计, 但阈值参数  $\beta$  是一个与回波波形幅值及杂波强度 (信杂比) 有关的参数。因此, 通过实时估计杂波强度, 动态调整阈值参数  $\beta$ , 可以实现自适应地消减杂波, 检测目标波形。所提算法步骤如下表 1 所示。

表 1 目标回波波形自适应检测算法

Tab.1 Adaptive detection algorithm of target echo waveform

|  |
|--|
| Input: Echo observation signal $s(n)$  |
| Output: Target waveform $s'(n)$  |
| Step1. For the target echo signal $s(n)$ with clutter and noise, the symmetrical wavelet basis function is used for discrete wavelet transform, and the low-frequency coefficients $c_{j,k}$ and the high-frequency coefficients $d_{j,k}$ are obtained; |
| Step2. The Donoho threshold $T_j$ of wavelet decomposition high frequency coefficients is calculated, and the wavelet coefficients larger than $T_j$ are deleted from $d_{j,k}$ ;  |
| Step3. According to the observed data, the root mean square of each segment of clutter is stored to evaluate the clutter intensity;  |
| Step4. According to the clutter condition, the threshold $Th_j$ is set by Eq. (13), and the coefficients less than the threshold value in the remaining wavelet decomposition high-frequency coefficients are set to zero, and $d'_{j,k}$ is obtained;   |
| Step5. $c_{j,k}, s'(n)$ is obtained by IDWT reconstruction of $d'_{j,k}$ .   |

### 3 杂波背景下目标波形自适应检测仿真实验

图 3 给出了 F-22 飞机目标径向与激光入射方向夹角分别为  $60^\circ$  和  $30^\circ$  时的目标波形 (纵轴为电压信号幅度, 单位 V; 横轴为距离, 单位 m)。对不同杂波背景下, 给定信噪比的目标观测回波信号, 采用文中提出的算法进行杂波背景下目标波形检测。

如图 4 所示, 针对信噪比为 0.2 的多脉冲目标信

号, 首先进行多脉冲回波信号积累, 然后采用不同小波域的阈值调整参数  $\beta$  值检测波形。可以看出, 随着  $\beta$  的增大, 对杂波的抑制能力增强。在目标波形检测算法自动执行时, 算法依据杂波强度估计自动调整参数  $\beta$  的数值, 实现保波形特征的自适应检测。

通过开展多次上述实验, 统计结果表明: 针对不同杂波背景下、不同速度多脉冲回波积累后的目标信号, 所提算法对姿态角  $60^\circ$  目标波形 (13 点样本) 的总

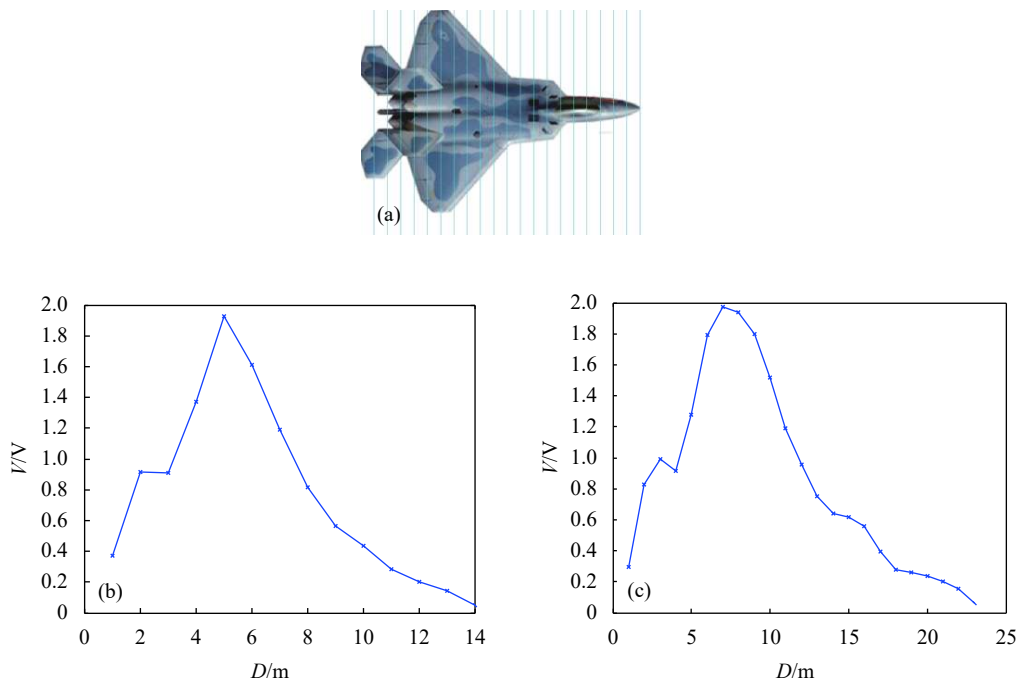


图 3 F-22 飞机目标外形及不同入射角的目标波形像序列。(a)F-22 飞机外形;(b)入射角 60°的目标回波序列;(c)入射角 30°的目标回波序列  
Fig.3 F-22 waveform sequences of different irradiating angles. (a)Outline of the F-22 airplane; (b)Target echo sequence with an incident angle of 60°;(c)Target echo sequence with an incident angle of 30°

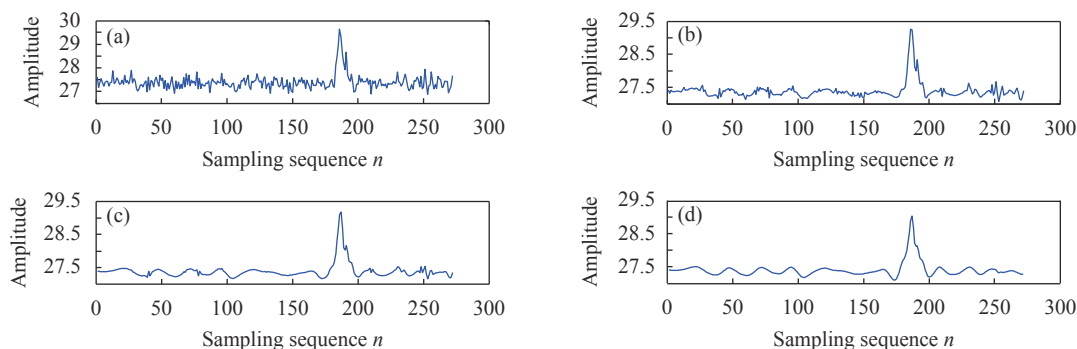


图 4 均匀杂波, SNR=0.2, 针对相同飞机目标信号采取不同  $\beta$  值检测波形。(a) 积累后的目标信号;(b) Donoho 阈值  $\beta=1$  时提取的距离扩展目标回波波形;(c) Donoho 阈值  $\beta=1.5$  时提取的距离扩展目标回波波形;(d) Donoho 阈值  $\beta=2.5$  时提取的距离扩展目标回波波形  
Fig.4 Detected waveform for the same airplane target with homogeneous clutter under the condition of various  $\beta$  and SNR=0.2. (a) Cumulative target signal;(b) Range extended target echo waveform extracted under the Donoho threshold  $\beta=1$ ; (c) Range extended target echo waveform extracted under the Donoho threshold  $\beta=1.5$ ; (d) Range extended target echo waveform extracted under the Donoho threshold  $\beta=2.5$

体检测概率大于 0.9, 对于姿态角 30°的目标波形 (24 点样本) 的总体检测概率大于 0.95(虚警概率  $1 \times 10^{-3}$ )。

### 4 结 论

文中分析了并推导了脉冲激光目标的一维距离波形像及其特征, 提出了一种机载平台动态杂波背景下脉冲激光目标波形提取算法。实验结果表明, 所提算法具有较好的保波形特征的检测性能。

### 参 考 文 献:

[1] Feng Bo, Chen Bo, Liu Hongwei . Radar HRRP target recognition with deep networks [J]. *Pattern Recognition*, 2017, 61: 379-393.  
[2] He You, Jian Tao, Su Feng, et al. Novel range-spread target detectors in non-Gaussian clutter [J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 2010, 46(3): 1312-1328.  
[3] Gao Yongchan, Li Hongbin, Braham Himed. Knowledge-aided

- range-spread target detection for distributed MIMO radar in nonhomogeneous environments [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, 65(99): 1-1.
- [4] Abdelmalek Mennad, Arezki Younsi, Mohammed Nabil El Korso, et al. Adaptive detection of range-spread target in compound-gaussian clutter without secondary data [J]. *Digital Signal Processing*, 2016, 60: 90-98.
- [5] Zhou Daiying. Orthogonal maximum margin projection subspace for radar target HRRP recognition [J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2016, 2016(1): 72.
- [6] Gong Wenlin, Zhao Chengqiang, Yu Hong, et al. Three-dimensional ghost imaging lidar via sparsity constraint [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(6): 26133.
- [7] Li Yanhui, Wu Zhensen, Gong Yanjun, et al. Research on one-dimensional range imaging of target laser pulses [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(10): 6988-6993. (in Chinese)  
李艳辉, 吴振森, 宫彦军, 等. 目标激光脉冲一维距离成像研究[J]. *物理学报*, 2010, 59(10): 6988-6993.
- [8] Sun Junling, Ma Pengge, Sun Guangmin, et al. Multi-pulse laser radar target signal simulation based on target echo waveform model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0726006. (in Chinese)  
孙俊灵, 马鹏阁, 孙光民, 等. 基于目标波形模型的多脉冲激光雷达目标信号模拟[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(7): 0726006.
- [9] Wang Pengcheng, Qian Weixian, Chen Qian. Robust visual tracking with contiguous occlusion constraint [J]. *Optical Review*, 2016, 23(1): 40-52.
- [10] Jian Tao, Liao Guisheng, He You, et al. A CFAR detector based on orthogonal wavelet transform[C]//International Conference on Signal Processing. IEEE, 2015: 1963-1967.



第一作者简介：孙俊灵 (1975-), 女, 博士, 讲师, 主要从事激光雷达目标探测方面的研究。曾参与获得河南省科技进步三等奖 1 项 (排名第三), 主持获得河南省国防科技进步一等奖 2 项。Email:sunjunling@emails.bjut.edu.cn



通讯作者简介：马鹏阁 (1976-), 男, 教授, 硕士生导师。主要研究方向为: 激光目标探测、机器视觉等。迄今在 IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters、中国科学、红外与激光工程、光学学报等国内外学术期刊发表研究论文 50 余篇、授权发明专利 7 项。曾主持获得河南省科技进步二等奖 1 项、省科技进步三等奖 1 项, 省国防科技进步一等奖 1 项。Email: mapenge@163.com