

文章编号:1001-5078(2013)12-1336-05

· 激光应用技术 ·

机载激光多脉冲展宽识别运动目标和地面背景

徐 强,王海晏,王 芳,杨海燕

(空军工程大学航空航天工程学院,陕西 西安 710038)

摘 要:结合多脉冲累积探测可以提高接收信号信噪比的特点与回波延时会造成脉冲展宽的特点,介绍了一种利用激光多脉冲展宽特性识别运动目标和地面背景的方法。由于目标速度的存在改变了光轴与目标表面夹角而造成回波延时,通过判别与基准脉冲不同的相关度,将其从地面背景区分出来。仿真结果表明,累积平均脉冲个数及次数越多噪声越小,信噪比越大,且多脉冲展宽可有效识别目标与背景,可应用于实际探测中测量目标运动速度及方位。

关键词:累积探测;脉冲展宽;运动目标;回波延时

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2013.12.03

Identifying moving target from background with airborne laser multi-pulse stretching

XU Qiang, WANG Hai-yan, WANG Fang, YANG Hai-yan

(Air Force Engineering University Aeronautics and Astronautics Engineering College, Xi'an 710038, China)

Abstract: The multi-pulse accumulation detection can improve the receiving SNR. The echo delay can cause pulse stretching combining these two properties, a method for identifying the moving target and background with multi-pulse stretching is introduced. As the target speed changes the angle between optic axis and target surface, it causes the echo delay (pulse width) to change. The moving target can be distinguished from the background according to the shape different from the benchmark pulse. The simulation result shows that the more the pulse numbers and times of accumulation average are, the less the noise is, and the better the SNR is. The target and background can be distinguished efficiently by multi-pulse stretching, which can be used to measure the moving speed and location in real target detecting.

Key words: accumulation detection; pulse stretching; moving target; echo delay

1 引 言

激光因其具有高单色性、高方向性、高亮度性及较好的相关性等特点,已在测距、成像、探测等方面得到广泛应用,是为现代战争提供精确化信息处理的重要技术手段之一。其中脉冲激光的特点有:一是激光发射角小,能量在空间相对集中;二是激光脉冲持续时间很短,能在时间上相对集中,因而瞬时功率很大(可达兆瓦级以上)。脉冲激光探测已成为激光应用的主要方面之一。随着机载激光设备的发展,多脉冲累积探测技术的运用可以满足远程探测与测距。通过探测器接收端的数字信号处理器对多个回波进行累加平均等信号处理,提高信噪比,降低

最小可检测信噪比,进而增加最大测程,同时,将淹没在噪声中的弱信号检测出来。

由于光束在传播过程中与介质粒子、障碍物或运动目标接触而发生色散、移位等现象^[1],造成了回波在时间上的扩展,从而产生脉冲展宽。文献[2]中考虑到云的多次散射作用,利用脉冲展宽的宽度不同来区分目标和云,增强目标的识别能力。但传输脉冲信号的展宽会引起信噪比下降,误码率升高,甚至导致信号不能分辨,并由此对通信速率和

作者简介:徐 强(1989-),男,硕士生,研究方向为光电探测与对抗。E-mail:qiangzai.88@163.com

收稿日期:2013-05-22;修订日期:2013-06-06

通信距离形成限制。

目前运动目标与地面背景识别问题大多采用视频处理技术解决,主要方法有光流法、帧间差分法、背景差分法等^[3]。其中,光流法硬件要求高,难以实现对目标实时监控检测;帧间差分法往往提取的目标比较粗糙,比实际的运动目标轮廓要大;背景差分法对背景建模和背景更新要求较高。

综上,本文将多脉冲累积技术与脉冲展宽特性相结合,对运动目标进行探测,由于目标速度的存在改变了光轴与目标表面夹角而造成回波延时,从而通过与基准脉冲的相关度不同,将其从地面背景区分出来。仿真结果表明该方法可以保证信噪比,将信号从噪声中检测出来,并有效识别目标与背景。

2 激光多脉冲累积探测

由空气中介质粒子、地面障碍物等导致的低信噪比环境中,如何提高激光探测的信噪比,降低目标检测的虚警概率,是激光探测要解决的技术难题之一。

多脉冲探测^[4]是在一个工作周期内发射一串光脉冲,每一次探测、处理的过程都由一个相对较大的系统时钟控制,保持发射、接收的同步性。随着激光器技术的发展,目前半导体激光器和固体激光器都可以达到较高的重复频率,同时,高速信号采集和处理电路技术飞速发展,为多脉冲接收的后续高速数据处理提供了可能。激光多脉冲探测原理框图如图1所示。

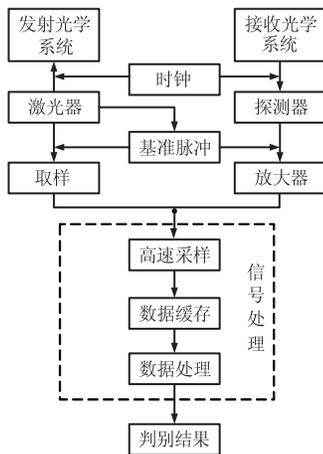


图1 激光多脉冲探测原理框图

设激光带噪声的回波信号^[5]为 $y_i(t) = s(t) + n_i(t)$, 噪声信号为 $n_i(t)$, 累积平均前强度信噪比为 $R_{S,N} = s(t)/V_n$, 其中, 噪声强度 $V_n = \sqrt{E[n^2(t)]}$, 为噪声的均方根。

进行多脉冲累积平均:

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y_i(t) &= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} [s(t) + n_i(t)] \\ &= s(t) + \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} n_i(t) \end{aligned} \quad (1)$$

激光回波信号 $s(t)$ 为确定性信号, 噪声 $n_i(t)$ 是均值为零的高斯白噪声, 不同时刻的值相互独立、互不相关。则根据其性质可得 N 个脉冲累积平均后, 噪声功率为:

$$\begin{aligned} P'_n &= E \left[\left[\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} n_i(t) \right]^2 \right] \\ &= \frac{1}{N^2} E \left[\sum_{i=0}^{N-1} n_i^2(t) + 2 \cdot \sum_{i=0}^{N-2} \sum_{j=i+1}^{N-1} [n_i(t) \cdot n_j(t)] \right] \\ &= \frac{E \left[\sum_{i=0}^{N-1} n_i^2(t) \right]}{N^2} = \frac{N \cdot E[n^2(t)]}{N^2} = \frac{P_n}{N} \end{aligned} \quad (2)$$

噪声强度为:

$$V'_n = V_n / \sqrt{N} \quad (3)$$

则强度信噪比为:

$$R'_{S,N} = \frac{s(t)}{V_n / \sqrt{N}} = \sqrt{N} \cdot R_{S,N} \quad (4)$$

由此可得, 多脉冲累加平均信噪比改善满足 \sqrt{N} 的关系, 脉冲个数越多, 信噪比改善越大。

3 多脉冲展宽识别

3.1 多脉冲技术对运动目标的特性

图2为激光多脉冲探测示意图, 假设目标的横向尺寸为 d , 激光脉冲的重复周期为 T , 脉宽为 τ 。目标相对激光探测器的运动速度为 v 。速度 v 的存在使目标表面与载机光轴产生一定的夹角, 当激光光束相对目标倾角变化时, 光斑内各点到光源处高低差发生变化, 造成回波延时, 从而产生了脉冲展宽的现象^[6]。

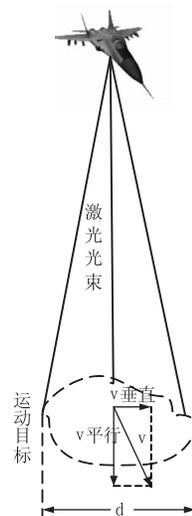


图2 激光多脉冲探测示意图

载机从空中向下对运动目标进行探测,由于脉冲周期较短,在多个激光脉冲周期内,目标的尺寸大小与横向位移对回波延时作用较小,而平行于光束方向的速度,使目标远离或靠近激光探测器作用较为明显,进而影响了脉冲展宽程度。因此,相邻脉冲往返时间差可近似为 $\Delta\tau = 2 \cdot v_{\text{平行}} \cdot t / c$,即为脉冲的展宽, t 为脉冲发射时发射机与目标位置间的传输时间,则回波脉冲串的脉宽相对发射脉冲变为 $\tau' = \tau + \Delta\tau$ 。

3.2 脉冲展宽相关度判别

为了验证运动目标的脉冲展宽特性,此处忽略云层和空气中介质粒子对激光的散射作用,并将地面背景看成朗伯体,即反射亮度是常数,在各个方向上相等。

假设一个周期内触发三个激光脉冲,即基准脉冲分别为 a 、 b 、 c ,照射到地面背景后反射回波分别为 a_1 、 b_1 、 c_1 ,照射到运动目标后反射回波分别为 a_2 、 b_2 、 c_2 ,如图3所示。

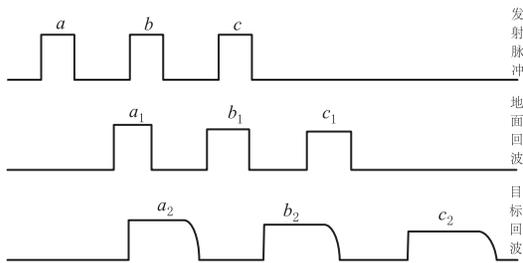


图3 发射脉冲与不同回波脉冲时序波形图

根据公式计算及已有的理论分析^[7-8]得知,激光脉冲打在地面背景后,回波在光程差上没有明显变化,周期与探测器的基准脉冲基本保持一致,且接收概率较为平稳,通过累积平均后波形脉宽与基准脉冲相关程度高。而运动目标的速度改变了光程差,造成回波延时或提前,使脉宽发生了变化,且由于一个周期内探测器的接收角和光斑区域一定,接收概率随着目标运动速度的增加而下降,通过累积平均后波形脉宽与基准脉冲相关程度较低。

根据协方差公式:

$$\text{cov}(X, Y) = E\{[X - E(X)][Y - E(Y)]\} \quad (6)$$

及相关系数公式:

$$\rho_{X, Y} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sqrt{D(X)} \sqrt{D(Y)}} \quad (7)$$

可得回波脉冲的协方差:

$$\text{cov}(a_i, b_i) = E\{[a_i - E(a)][b_i - E(b)]\} \quad (8)$$

$$\text{cov}(a_i, c_i) = E\{[a_i - E(a)][c_i - E(c)]\} \quad (9)$$

$$\text{cov}(b_i, c_i) = E\{[b_i - E(b)][c_i - E(c)]\}; \quad (10)$$

$i = 1, 2$

$$\text{cov}(a_2, a_1) = E\{[a_2 - E(a)][a_1 - E(a)]\} \quad (11)$$

$$\text{cov}(b_2, b_1) = E\{[b_2 - E(b)][b_1 - E(b)]\} \quad (12)$$

$$\text{cov}(c_2, c_1) = E\{[c_2 - E(c)][c_1 - E(c)]\} \quad (13)$$

在此基础上计算相关系数,比较每串回波脉冲的自相关性与互相关性,就可以区分地面背景与运动目标。

4 仿真结果与分析

4.1 多脉冲累积探测仿真实验

进行激光多脉冲探测的模拟仿真分为四部分^[9]:发射激光脉冲模块,接收回波信号模块,噪声扰动和脉冲叠加模块,叠加结果显示模块。

实际系统中采样可以看作 $y(t)$ 与 $\delta(t - iT)$ 卷积的结果,即:

$$y(t - iT) = y(t) * \delta(t - iT) \quad (14)$$

式中, T 为脉冲周期。数字式平均结果为:

$$\begin{aligned} A(t) &= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y(t - iT) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} [y(t) * \delta(t - iT)] \\ &= y(t) * \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \delta(t - iT) \end{aligned} \quad (15)$$

系统的冲击响应函数为:

$$h(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \delta(t - iT) \quad (16)$$

进而得其频域响应函数为:

$$H(j\omega) = \frac{1}{N} \frac{\sin(N\omega T/2)}{\sin(\omega T/2)} e^{-j(N-1)\omega T/2} \quad (17)$$

相应的幅频特性为:

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{N} \frac{\sin(N\omega T/2)}{\sin(\omega T/2)} \quad (18)$$

上式实为带通窗口滤波器, N 值越大,滤波器的带宽越窄,滤除的噪声越多,因而累积平均次数越多,信噪比提高越大。

仿真实验中产生周期为 50ns,宽度为 5ns,幅度为 0.5V 的脉冲串信号,加入均方根为 0.3V 的高斯白噪声,再对脉冲串信号进行累加平均。图4(a)~图4(d)依次为带噪声的一串脉冲信号波形、进行 10 次、25 次、50 次累积平均后的波形。可看出,累积平均后噪声减小,淹没在噪声中的信号出现,且累积平均脉冲个数及次数越多噪声越小,信噪比越大,

仿真结果与理论分析一致。

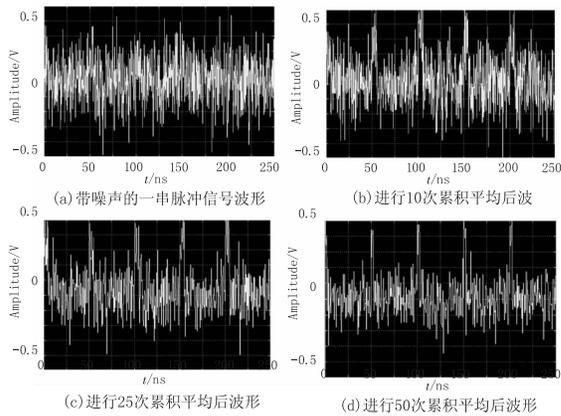


图4 多脉冲累积平均与信噪比关系图

4.2 脉冲展宽目标识别实验

在实验一的基础上,利用脉冲展宽进行目标识别模拟实验,激光波长为 1.064 μm,发射机与接收机距地面目标 5 km,目标速度 v 为 100 km/h,其中 $v_{\text{平行}}$ 为 80 km/h, $v_{\text{垂直}}$ 为 60 km/h,发射机 0.1 s 内连续发射 2000 个周期脉冲,此处观察接收到的第 800 个地面背景回波脉冲与运动目标回波脉冲(也可观察其他回波)。随着脉冲周期增多,接收概率下降,为方便比较对振幅进行归一化处理分别如图 5 所示。

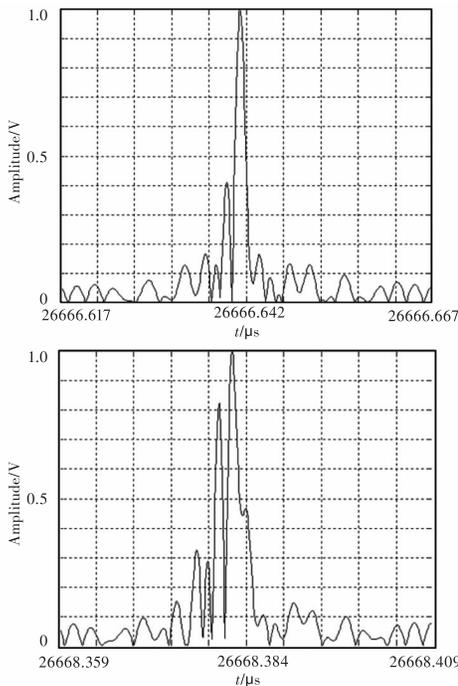


图5 观察的第 800 个地面背景回波与运动目标回波

经过观察与计算,运动目标回波脉冲相对基准脉冲产生了 4~5 ns 的展宽,且延时 1.6~1.8 μs。分别设基准脉冲、地面背景回波、运动目标回波为序列 $X(t)$ 、 $Y(t)$ 、 $Z(t)$,再取各序列中第 300、500、800 个脉

冲分别为 $x_i, y_i, z_i (i = 1, 2, 3)$,根据式(6)~(13),可得各回波序列间脉宽相关系数,如表 1 所示。

表 1 各回波序列间脉宽相关系数

$\rho_{X,Y}$	$\rho_{Y,Z}$	$\rho_{X,Z}$
0.9427	0.7305	0.6783
$\rho_{x1,y1}$	$\rho_{y1,z1}$	$\rho_{x1,z1}$
0.9635	0.8129	0.7691
$\rho_{x2,y2}$	$\rho_{y2,z2}$	$\rho_{x2,z2}$
0.9498	0.7416	0.7028
$\rho_{x3,y3}$	$\rho_{y3,z3}$	$\rho_{x3,z3}$
0.9204	0.6982	0.6215

根据表 1 数据可见仿真结果与理论分析较为符合,可以有效检测出运动目标回波。

在实际目标探测过程中,根据计算相邻回波脉宽相关系数,并设定合适的阈值筛选,便可以区分出地面背景与运动目标的相应回波,再根据回波延时与脉冲展宽程度,反推确定目标运动速度。

5 结束语

多脉冲累积平均探测与脉冲展宽特性已分别被研究与应用,本文将二者的特点相结合,采用多脉冲展宽特性识别运动目标与地面背景,不仅提高了接收信号的信噪比,同时根据脉冲展宽程度与基准脉冲的相关度判别出运动目标。仿真结果表明该方法可有效识别运动目标与地面背景,为实际应用提供了一定的理论基础。

经过理论分析与仿真,仍有两个问题有待研究:一是目标运动速度对于回波的展宽及接收概率的影响,根据公式计算得知运动速度越大,展宽越明显,但当速度超过一定的阈值,目标将很快超出激光光斑区域而造成丢失现象;二是探测距离对于回波展宽及接收概率的影响,过远可能会降低探测精度,过近造成展宽不明显,同时本文为方便讨论与计算,忽略云层、介质颗粒等对于光束的影响,而在实际探测中这些因素都会降低探测距离与精度。综上,如何确定目标合适的运动的速度与探测距离,将精度与展宽效果最大化,提高探测器性能,将是下一步研究的重点。

参考文献:

[1] Lu Hongqiang, Zhao Wei, Xie Xiaoping. Analysis and comparison of pulse broadening caused by atmospheric turbulence and dispersion[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(4):432-438. (in Chinese)
陆红强,赵卫,谢小平. 大气湍流和色散导致脉冲展

- 宽的分析比较[J]. 兵工学报, 2011, 32(4): 432-438.
- [2] Zhao Wei, Zhang Guiyan, Miao Tongqun. Identifying target with pulse stretching characteristic[J]. Laser Journal, 2008, 29(4): 36-37. (in Chinese)
赵伟, 张贵彦, 缪同群. 利用脉冲展宽特性识别云和地面目标[J]. 激光杂志, 2008, 29(4): 36-37.
- [3] Gao Meifeng, Liu Di. Moving object detection based on consecutive blocks frame difference and background subtraction[J]. Application Research of Computers, 2013, 30(1): 299-302. (in Chinese)
高美凤, 刘娣. 分块帧差和背景差相融合运动目标检测[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(1): 299-302.
- [4] Zahng Yu, Zhao Yuan, Yang Yong, et al. Computer simulation and experiments for laser multi-pulse detection[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(1): 60-63. (in Chinese)
张宇, 赵远, 杨勇, 等. 激光多脉冲探测的计算机模拟与实验研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 60-63.
- [5] Zhang Chunfeng, Yang Yi, Liu Chunhua. A multi-pulse based signal processing algorithm for airborne long-distance laser ranging[J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(12): 29-33. (in Chinese)
张春风, 羊毅, 刘春华. 基于多脉冲的机载远程激光测距信号处理算法[J]. 电光与控制, 2010, 17(12): 29-33.
- [6] Ma Pengge, Qi Li, Yang Yi, et al. Study on airborne multi-pulse lidar target signal simulator[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0128001. (in Chinese)
马鹏阁, 齐林, 羊毅, 等. 机载多脉冲激光雷达目标信号模拟器的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0128001.
- [7] Li Lei, Hu Yihua, Zhao Nanxiang, et al. Experiment on the stretching characteristics of pulse Width of laser remote sensing echo[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(2): 246-250. (in Chinese)
李磊, 胡以华, 赵楠翔, 等. 激光遥感目标回波脉冲展宽特性实验[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2): 246-250.
- [8] Bassem R. Mahafza. Radar Systems Analysis and Design[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. (in Chinese)
Bassem R. Mahafza. 雷达系统分析与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [9] Zhang Tinghua, Fan Guihua, He Yonghua. Research on multi-pulsed laser echo signal process method[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2011, 22(1): 93-96. (in Chinese)
张廷华, 樊桂花, 何永华. 多脉冲激光回波信号处理方法研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2011, 22(1): 93-96.