

# 脉冲激光测距回波特性及测距误差研究

谢庚承<sup>1,2</sup>, 叶一东<sup>1</sup>, 李建民<sup>1</sup>, 袁学文<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;

<sup>2</sup>中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088

**摘要** 对于飞行目标轨迹测量中常用的脉冲激光测距系统, 回波光形的变化对其测距精度的影响尤为显著。为了研究回光波形变化造成的测距误差, 深入分析了复杂三维飞行目标的回波特性和回波畸变测距误差的影响。以典型的调 Q 脉冲激光测距为基础, 探讨了调 Q 脉冲激光发射脉冲的数学描述, 建立了一种通过飞行目标的反射特性、表面形状及姿态信息计算回波功率分布的理论模型。在此基础上, 以典型目标为例建立了目标模型, 通过仿真模拟研究了脉冲激光回波特性和回波畸变测距误差的影响。搭建了脉冲激光测距实验系统, 加工制作了模拟目标并进行了验证实验。实验结果表明, 飞行目标姿态变化引起的回波脉冲展宽及回波畸变测距误差变化规律与理论分析基本一致, 验证了所建理论模型的有效性。

**关键词** 遥感; 激光测距; 回波特性和; 测距误差; 飞行目标

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0610001

## Echo Characteristics and Range Error for Pulse Laser Ranging

Xie Gengcheng<sup>1,2</sup>, Ye Yidong<sup>1</sup>, Li Jianming<sup>1</sup>, Yuan Xuewen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

<sup>2</sup>Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

**Abstract** For the pulse laser ranging system commonly used in flight target trajectory measurement, the variation of echo waveforms has significant effect on the ranging accuracy. In order to study the range error caused by the variation of echo waveforms, we analyze the echo characteristics of the complex three-dimensional flying target. Based on the typical Q-switched pulsed laser ranging, the mathematical model of transmitted pulse of Q-switched laser is analyzed, and a theoretical model is presented with echo power distribution calculated by the reflection characteristics, surface shape and orientation information of the flying target. On the basis of the above, the target model is built with a typical target, and the characteristics of pulsed laser echo are studied by simulation. The influence of target orientation on echo characteristics and echo distortion range error is analyzed. The pulse laser ranging experiment system is built and the simulated target is processed for verification experiment. The experimental results show that the echo pulse broadening and distortion range error caused by attitude angles variation of flight target are consistent with the basic theory, which verifies the effectiveness of the model.

**Key words** remote sensing; laser ranging; echo characteristics; range error; flying target

**OCIS codes** 280.3400; 140.3538; 250.0040; 280.3640

## 1 引言

由于脉冲激光峰值功率高, 发散角较小, 脉冲持续时间短, 这使得脉冲激光测距在探测距离和测量

精度上具有显著优势<sup>[1]</sup>。现如今脉冲激光测距在飞行目标轨迹测量中扮演着重要的角色<sup>[2]</sup>。对于脉冲激光测距系统, 回波光形的延迟、展宽及幅度的变化对测距精度影响尤为显著。目标形状的不规则和飞

收稿日期: 2017-12-04; 收到修改稿日期: 2018-01-17

基金项目: 中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室基金(HEL 2018-03)

作者简介: 谢庚承(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事激光测距与目标探测方面的研究。E-mail: xgc\_caep@163.com

导师简介: 叶一东(1969—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事目标探测与光束控制等方面的研究。

E-mail: yidongye@163.com

行目标姿态变化引起的波形畸变,从而导致的测量误差也不容忽略。

目前不管是在测距激光雷达还是成像激光雷达领域,国内外学者都对脉冲激光回波特性做了大量研究。徐孝彬等<sup>[3-4]</sup>针对脉冲激光近程探测系统,推导了平面目标的脉冲响应方程和回波方程,并分析了平面目标回波特性对脉冲展宽和测距分布的影响。李磊等<sup>[5]</sup>通过实验验证了倾斜大目标的回波脉冲展宽模型,并分析了回波脉冲展宽特性。寇添等<sup>[6]</sup>分析了空战目标姿态对机载激光雷达脉冲回波时延、展宽和能量衰减等参数之间的变化关系。以上学者在分析目标回波特性中,均以平面大目标为目标模型来分析脉冲激光回波特性及测距误差,忽略了三维目标形状的空间深度对回波脉冲的影响。Steinvall<sup>[7]</sup>用数值模拟的方法研究了圆锥体、球体和圆柱体等不同目标特性对激光雷达散射截面的影响。Grönwall 等<sup>[8]</sup>在此基础上又分析了不同目标形状和时刻鉴别方式对测距误差的影响,但在分析过程中都只考虑了目标正对激光照射方向的回波特性,并未给出任意入射角度下的回波功率计算方法。

对于测距激光雷达,在对实际三维飞行目标的探测中,姿态变化及目标形状的空间深度隐藏着丰富的信息,对测距精度的影响也不容忽略。根据测距激光雷达的脉冲回波原理,本文深入分析了飞行目标的脉冲激光回波过程,建立了一种通过飞行目标的反射特性、表面形状及姿态信息计算回波脉冲时域分布的理论模型。并通过仿真模拟研究了飞行目标的脉冲激光回波特性及其对测量精度的影响,为测距误差的分析和修正提供了可靠的信息。最后通过实验验证了理论模型的正确性。

## 2 脉冲激光测距三维目标回波方程

对于激光测距发射系统中常用的调 Q 脉冲激光器,以往关于回波特性分析的文献大多是以高斯分布来描述发射脉冲在时域上的波形分布<sup>[9-11]</sup>。然而调 Q 脉冲激光的输出波形在时域上并不是对称的高斯分布,而是一种上升沿比下降沿更为陡峭的非对称分布。为了更为准确地计算回波脉冲的时域分布,采用重尾函数<sup>[12-13]</sup>作为发射脉冲时域波形的表达式,即

$$S(t) = \left(\frac{t}{\tau}\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (1)$$

式中  $\tau$  为描述脉冲宽度的特征参数,与发射脉冲的半峰全宽(FWHM)  $T_p$  相关,  $T_p = 2.44\tau$ 。由于实际

发射脉冲在时域上并不是无限的,这里将  $S(t)$  中时间  $t$  的定义域设为 0 到正无穷,即发射脉冲从 0 时刻开始。

激光发射脉冲的数值模型可以表示为脉冲激光空间横向分布和脉冲激光时域分布的乘积形式。假设脉冲激光的横向分布为  $g(x, y, z)$ , 则测距系统的发射脉冲激光功率密度的时空分布可以表示为

$$E(x, y, z, t) = P_0 g(x, y, z) S(t), \quad (2)$$

式中  $P_0$  为发射脉冲激光的峰值功率。系统接收到的回波功率可以看作目标在照射光斑内各点回波功率在时间上的叠加。在三维空间中,目标形状的不规则导致表面上各点相对于激光照射方向的深度不同,从而引起了回波脉冲在时间上具有不同的延迟量。因此,在计算每一时间点回波总功率时,不能将目标表面各点处的回波功率直接叠加,必须考虑各点时间延迟对回波功率合成的影响。

假设发射脉冲激光经过距离  $R_t$  到达目标处,并且激光光斑完全覆盖目标表面,则在目标表面反射前的光强时空分布可以表示为

$$E(x, y, R_t, t) = \eta_t P_0 g(x, y, R_t) S(t - R_t/c), \quad (3)$$

式中  $\eta_t$  为发射路径的大气透过率,  $c$  为光速。由于在激光测距应用中,光束发散角较小,探测距离一般远远大于目标尺寸,可以认为激光光斑在目标上横向分布只是  $x, y$  的函数,与  $z$  无关,即

$$E(x, y, t) = \eta_t P_0 g(x, y) S(t - R_t/c). \quad (4)$$

假设目标表面为均匀漫反射,其半球反射率为  $\rho_b$ , 目标表面形状的空间曲面函数为  $z(x, y)$ 。在目标表面反射后,激光脉冲光强的时空分布为

$$E(x, y, t) = \eta_t \rho_b P_0 \iint_A g(x, y) \times S\left[t - \frac{R_t + 2z(x, y)}{c}\right] dx dy, \quad (5)$$

式中  $A$  为发射激光在目标表面上的照射面积。反射光传输距离  $R_r$  到达测距接收系统,则激光测距系统能接收到回光功率波形分布为

$$P_r(t) = \eta_{\text{sys}} \eta_r \frac{A_r}{R_r^2} E(x, y, t) = \frac{\eta_{\text{sys}} \eta_r \eta_t A_r \rho_b P_0}{R_r^2} \iint_A g(x, y) \times S\left[t - \frac{R_r + R_t + 2z(x, y)}{c}\right] dx dy, \quad (6)$$

式中  $\eta_{\text{sys}}$  为系统的光学效率,  $\eta_r$  接收路径的大气透过率,  $A_r$  为接收孔径的面积,  $R_r$  为接收系统到目标的距离。为简化表达式,令系数  $k =$

$\eta_{\text{sys}}\eta_r\eta_t A_r \rho_b P_0 / R_r^2$ , 并将时间零点平移至  $t - (R_t + R_r) / c$ , 则接收光功率波形为

$$P_r(t) = k \iint_A g(x, y) S \left[ t - \frac{2z(x, y)}{c} \right] dx dy, \quad (7)$$

式中积分内两项分别代表了激光光强空间分布和回波脉冲时间特性。将激光在目标表面的反射过程看作是一个线性系统的冲击响应, 用单位脉冲响应函数  $\delta(t)$  替换其中的发射脉冲函数  $S(t)$ , 其脉冲响应函数  $h(t)$  可以表示为

$$h(t) = k \iint_A g(x, y) \delta \left[ t - \frac{2z(x, y)}{c} \right] dx dy, \quad (8)$$

式中  $\delta(t)$  为单位脉冲响应函数,  $\delta(t) = \begin{cases} 1, & t = 0 \\ 0, & t \neq 0 \end{cases}$ 。

因此, 回光功率波形可以由卷积计算得到, 即

$$P_r(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) S(t - \tau) d\tau = h(t) * S(t). \quad (9)$$

从(9)式可以看出, 激光回波信号是脉冲响应函数  $h(t)$  与入射脉冲波形  $S(t)$  卷积的结果。脉冲响应函数  $h(t)$  是由目标表面在激光照射方向的纵向分布特性决定, 而卷积的作用正是使输出函数变得平滑并展宽, 输入信号被展宽的程度由脉冲响应函数  $h(t)$  决定。在物理过程上表现为激光回波峰值功率降低, 回光波形展宽。

对于用空间曲面函数  $z(x, y)$  表示的目标表面分布, 激光沿  $z$  方向入射到目标表面, 不同时刻  $t$  先后照射到不同纵向位置  $z$  处的目标表面各点。这里定义位置  $z$  处目标沿激光照射方向的纵向投影截面分布为  $D(z)$ , 即

$$D(z) = \iint_{S_p} \delta[z - z(x, y)] dx dy, \quad (10)$$

式中  $S_p$  为发射激光到达位置  $z$  处时目标被照射表面的投影面积, 由于目标形状的复杂性和姿态的多变性, 通常难以根据(10)式解析求出  $D(z)$  的值。但根据飞行目标表面形状的实际分布情况, 使用三维图像编程工具建立被测目标的几何模型。然后对其进行角度变换、投影等处理, 可以计算得到飞行目标在不同姿态角下沿激光照射方向的纵向投影截面分布  $D(z)$ , 再通过适量的采样点进行曲线拟合并微分可以得到目标的纵向微分投影截面分布  $A(z)$ , 即

$$A(z) = \frac{dD(z)}{dz}. \quad (11)$$

为简化数值计算过程, 假设目标处的激光光斑尺寸远远大于目标尺寸, 可将照射激光在目标处的横场

分布看作为均匀分布, 从而脉冲响应函数  $h(t)$  只与目标纵向投影截面特性有关。由于激光往返飞行时间  $t$  与距离  $z$  成正比,  $z = ct/2$ , 可以将脉冲响应函数  $h(t)$  用时间的纵向微分投影截面  $A'(t)$  表示, 即

$$h(t) = kA \left( \frac{c}{2} \cdot t \right) = kA'(t). \quad (11)$$

因此, 对于入射脉冲波形  $S(t)$ , 其三维目标回波方程可以由卷积计算, 即

$$P_r(t) = k \int_{-\infty}^{+\infty} A'(\tau) s(t - \tau) d\tau = kA'(t) * S(t). \quad (12)$$

### 3 脉冲激光测距回波特性分析

#### 3.1 飞行目标回光波形的数值仿真

根据第2节所建立的计算模型, 使用 Matlab 软件对三维目标回光波形进行仿真。被测目标以某种典型飞行目标为例, 用圆柱面和圆锥面代替目标表面建立目标三维模型。如图1所示,  $z$  轴方向为脉冲激光的照射方向, 定义目标中轴线与激光照射方向即  $z$  轴的夹角  $\theta$  为目标姿态角。

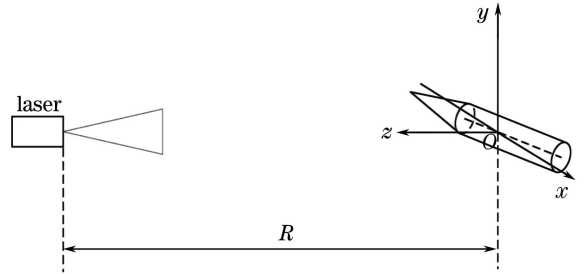


图1 激光对飞行目标模型照射示意图

Fig. 1 Schematic of laser irradiation on flying target model

取目标半径为 0.5 m, 长度为 4 m, 目标姿态角  $\theta = 60^\circ$ 。并假设激光远场光斑完全覆盖目标表面, 使用三维建模软件 UG(Unigraphics NX) 建立目标模型后, 可以得到沿照射方向的纵向投影截面分布  $D(z)$ , 再通过适量的采样点经过曲线拟合可以得到的目标的纵向微分投影截面分布  $A'(t)$  如图3所示。

假设仿真参数分布为  $\eta_{\text{sys}} = 0.8, \eta_t = \eta_r = 0.4, A_r = 0.02 \text{ m}^2, \rho_b = \rho_r = 0.2, R_t = R_r = 13 \text{ km}$ 。激光发射脉冲半峰全宽  $T_p = 12 \text{ ns}$ , 根据(1)式仿真得到发射脉冲的归一化功率分布如图4所示。根据(12)式仿真得到姿态角  $60^\circ$  时回波脉冲的归一化功率分布如图5所示。从回波仿真结果中可以看到, 回波脉冲在时域上表现为展宽和变形, 展宽和变形的程度由目标形状和姿态决定, 即目标相对于激光照射方向的纵向微分投影截面面积  $A'(t)$  决定。

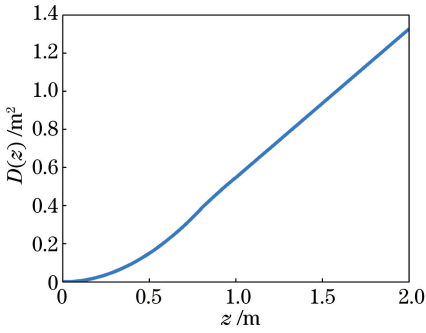


图 2 目标的纵向投影截面分布

Fig. 2 Longitudinal projected section distribution of target

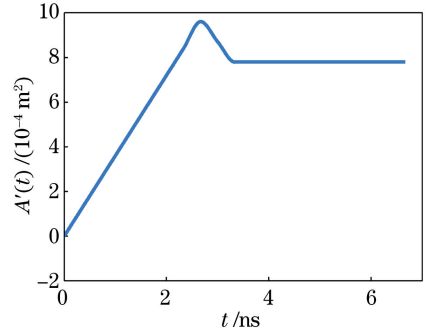


图 3 目标的纵向微分投影截面分布

Fig. 3 Differential of longitudinal projected section distribution of target

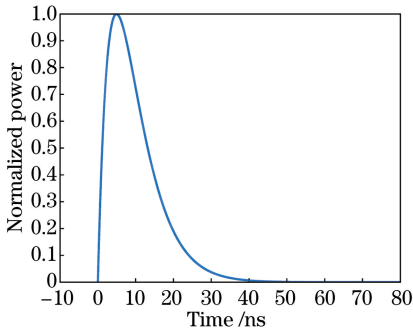


图 4 发射脉冲波形

Fig. 4 Waveform of transmitted pulse

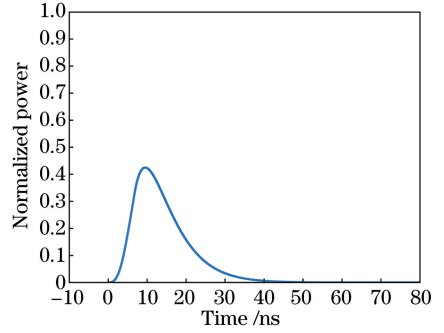


图 5 回光脉冲波形

Fig. 5 Waveform of received pulse

### 3.2 目标姿态对回光波形的影响

在 3.1 节的数值仿真基础上,改变目标姿态角,得到不同姿态角时被测目标的  $A'(t)$ ,其他仿真参数不变。根据(12)式仿真得到目标不同姿态角时回波脉冲的归一化功率分布如图 6 所示。从图 6(a)中可以看出,随着目标姿态角的减小,脉冲激光测距

回波信号幅值减小,回波脉冲展宽。回波信号峰值功率随着目标姿态角的增加且近似呈指数函数增长如图 6(b)所示。因此,为了保证测距系统的探测性能,在接收系统电路设计时,必须以姿态角最小时的探测功率为参考基准。

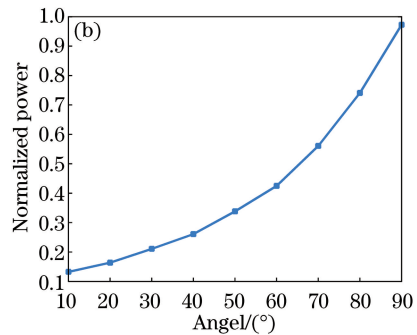
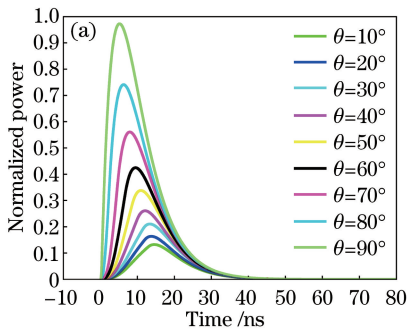


图 6 目标不同姿态角下的回波特性。(a)回光波形;(b)峰值功率

Fig. 6 Echo characteristics of target with different angles. (a) Waveforms of received pulse; (b) peak power

根据对回波特性的分析可知,目标姿态变化除了引起回波峰值变化外,还引起了回光波形的畸变。对于测距接收系统,回波展宽导致了上升沿平缓,并且造成了上升沿判别时刻的后移。因此,在目标位置不变时目标姿态的变化导致判别时刻后移引入了

测距误差。当目标空间上有一定尺寸大小且测距精度要求较高时,该项误差不容忽略。

### 3.3 目标姿态对回波畸变测距误差的影响

对于脉冲激光测距,影响测距精度的因素主要有大气折射修正误差、计数量化误差、计数器晶振频

率漂移误差、时刻鉴别抖动误差、回波畸变测距误差<sup>[14]</sup>。大气折射误差可以通过探空的气象资料采用大气分层法,选择合适大气折射修正模型进行测距误差修正。计数器晶振频率漂移误差与计数器频率稳定度成线性关系,可以通过温度补偿法提高计数器频率稳定度,从而减小该项误差。计数量化误差与计数器的时间分辨率有关,可以通过提高计数器晶振频率来减小该项误差的大小。时刻鉴别抖动误差是由于回波信号前沿叠加的噪声引起的时间漂移,可以根据时刻鉴别方式和脉冲波形选择相应的计算公式进行标准差的估算<sup>[15]</sup>。回波畸变测距误差是由于回光脉冲波形发射畸变而产生的随机误差,根据3.1节所分析,目标姿态变化主要引入了回光波形的畸变,因此,这里主要分析目标姿态变化对回波畸变测距误差的影响。

回波畸变引入的测距误差主要表现在回波电路时刻鉴别的定时误差。对于脉冲激光测距而言,目前的时刻鉴别方法主要有前沿时刻鉴别法、峰值时刻鉴别法和恒比定时时刻鉴别法<sup>[16-17]</sup>。前沿时刻鉴别法是通过固定阈值来确定脉冲信号的起止时刻,即将输入信号与固定的阈值电压进行比较,并使用比较器判断鉴别点过阈值时间;前沿时刻鉴别法只判断脉冲信号前沿是否过阈值点,信号的动态范围较宽,但信号幅度变化而会导致漂移误差。峰值时刻鉴别法即利用微分电路,将回波信号的峰值点转变为零点,以此作为脉冲到达时刻。峰值时刻鉴别法虽然能有效地克服信号幅度变化产生的漂移误差,要求回波峰值附近有较大的斜率变化才能保证其精度,但通常测距回波信号峰值点附近斜率也较小,叠加噪声干扰后,会降低定时精度。恒比定时时刻鉴别法是根据脉冲信号幅度动态调整阈值电平大小,从而消除信号幅度变化引起的漂移误差,一般取脉冲上升前沿半峰值点为起止时刻;基本原理是对脉冲输入信号分两路进行线性衰减和延迟,再通过比较器进行时刻鉴别。恒比定时时刻鉴别法可消除回波幅值变化带来的漂移误差,并且过零点处的斜率较大,噪声引起的抖动误差很小。

通过比较恒比定时时刻鉴别法更能满足高精度脉冲激光测距的要求,这里以恒比定时时刻鉴别法为时刻鉴别方式来分析目标姿态对回波畸变测距误差的影响。对于取脉冲上升前沿半峰值处为定时点的恒比定时时刻鉴别法,结合(12)式的回波方程表达式可以得到测距结果为<sup>[8]</sup>

$$R = \frac{c}{2} \text{sol}_t \left\{ P_r(t) = \frac{1}{2} \max[P_r(t)] \right\} - R_{\text{offset}}, \quad (13)$$

式中表达式 $\text{sol}_t \{a(t)=b(t)\}$ 表示 $a(t)=b(t)$ 时对应的时刻 $t$ ,式中 $R_{\text{offset}}$ 是与具有一定宽度的发射脉冲波形相关的距离修正量,结合(1)式可以表示为

$$R_{\text{offset}} = \frac{c}{2} f \text{sol}_t \left\{ S(t) = \frac{1}{2} \max[S(t)] \right\}. \quad (14)$$

为了研究回波畸变测距误差随目标姿态角变化的规律,将目标姿态角 $90^\circ$ 的理想回波作为参照标准。根据图6仿真得到的回光波形,结合(13)式时刻鉴别的计算公式,可以得到姿态角变化对回波畸变测距误差的影响如图7所示。可以看到,回光波形畸变导致的测距误差随目标姿态角的减小而增大。从物理过程来看,随着目标姿态角的变小,激光光斑能量在纵向上越分散,回波畸变越严重。这种角度变化对测距误差的影响,一方面由目标物体自身决定,另一方面,还与探测方向有关。

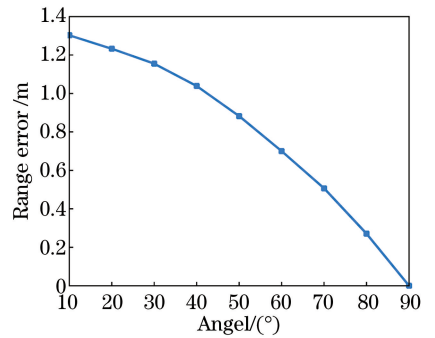


图7 姿态角变化对回波畸变测距误差的影响  
Fig. 7 Effect of attitude angles variation on distorted waveform range error

为了研究回波畸变测距误差与回波脉冲展宽量的关系,同样根据图6仿真得到的回光波形计算得到回波脉冲展宽随目标姿态角变化的规律如图8所示

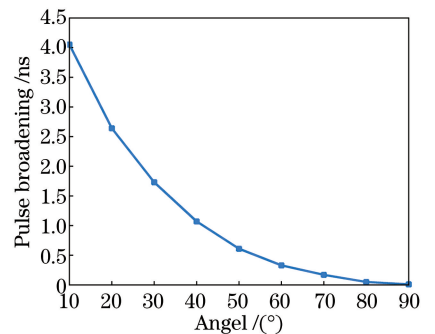


图8 姿态角变化对脉冲展宽的影响  
Fig. 8 Effect of attitude angles variation on pluse broadening

示。可以看出,这种回光波形畸变导致的测距误差并不与脉冲展宽量成线性关系,从而说明了是由回波脉冲展宽和上升沿平滑共同引起的测距误差。当姿态角从 $10^\circ$ 变化为 $60^\circ$ 时,回波脉冲展宽量急剧下降,而对应的回波畸变测距误差并未随着目标姿态角增大而急剧减小。这是由于目标本身形状的不规则也会引入一定量的回波畸变。从以上分析可以得出,若发射脉冲和回波脉冲都不是严格对称的高斯波形时,在分析回波信号的时刻鉴别误差时,只考虑回波展宽带来的时刻鉴别误差并不准确,需要综合考虑整个回光波形畸变带来的定时误差。

## 4 实验结果

### 4.1 实验系统搭建

以上用三维目标回波计算模型对脉冲激光回波特性及其测距误差的影响进行了分析,所建模型是否符合实际应用还需要进一步进行实验验证。搭建的脉冲激光测距系统组成示意图如图9所示,实验

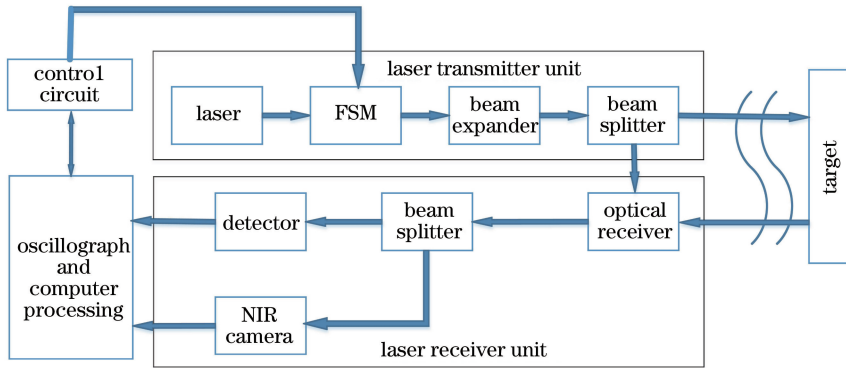


图9 脉冲激光测距系统

Fig. 9 Pulsed laser ranging system

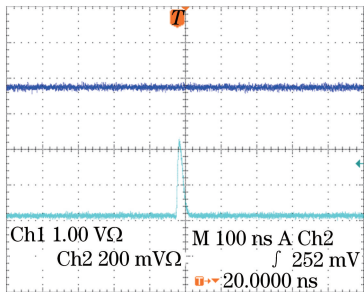


图10 单个脉冲回光波形

Fig. 10 Waveform of single pulse echo

为了进一步验证所建模型和分析结论的正确性,在测距实验中通过旋转目标从而改变目标中轴线与激光发射光轴的夹角来模拟目标在飞行过程中姿态的变化。依次改变目标姿态角并采集回波脉冲,与第3节中的理论仿真一样,同样以目标姿态角

系统采用1064 nm调Q脉冲激光器作为发射激光,脉冲宽度为12 ns,脉冲重复频率为20 Hz,激光发散角为0.3 mrad,脉冲能量为80 mJ。测距接收系统采用雪崩光电二极管(APD)探测目标的回波脉冲。再经过光电转换将回波信号通过前置放大器后送至数字示波器进行显示和全波形采样。

### 4.2 实验结果与数据分析

根据第3节仿真时所用目标的三维形状加工制作了模拟目标。目标长度为4 m,直径为0.5 m,目标固定于13 km外的空旷地带。由于脉冲激光测距系统的激光发散角为0.3 mrad,通过调整测距系统的发射光轴可使光斑完全覆盖目标表面。激光脉冲发射部分通过电流变化和衰减片控制光功率的变化,使得回波脉冲在数字示波器中未达到饱和。经过数字示波器采样得到的单个脉冲回波信号如图10所示。根据第二节所建立的理论模型可以仿真得到相应的理论回光波形如图11所示。可以看出,实际的回光波形与仿真得到的理论回光波形基本一致。

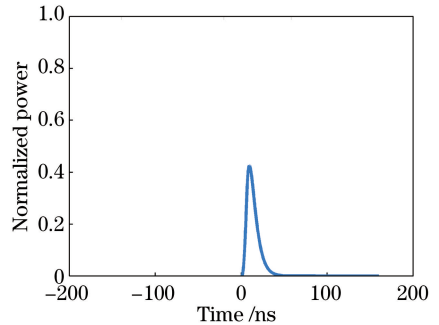


图11 单个脉冲回光理论波形

Fig. 11 Theoretical waveform of single pulse echo

$90^\circ$ 时的实测回波作为参照标准,分别采样得到目标不同姿态角下的回光脉冲波形。对接收波形进行处理后,计算得到不同姿态角下的回波脉冲展宽量。回波脉冲展宽的实验数据与理论数据的对比如

图 12 所示。由采样得到的测距回光脉冲波形,同样根据(13)式的时刻鉴别计算公式,得到实际回波畸变测距误差与理论结果的对比如图 13 所示。

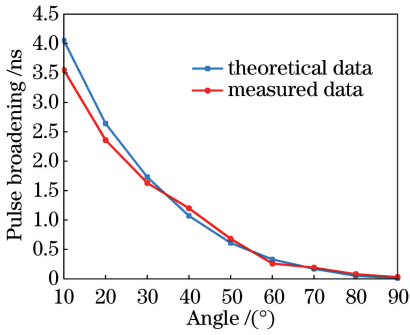


图 12 回波脉冲展宽的理论数据与实验数据

Fig. 12 Comparison between theoretical and measured data of echo pulse broadening

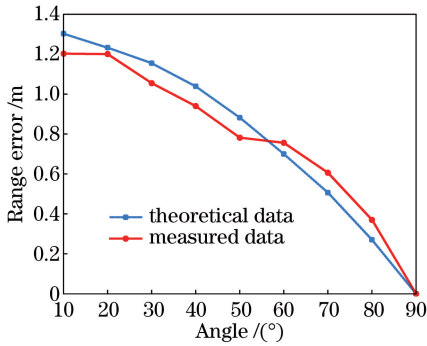


图 13 回波畸变测距误差的理论数据与实验数据

Fig. 13 Comparison between theoretical and measured data of distorted waveform range error

从图 12 和图 13 可以看到,由于大气湍流和系统带宽的影响,以及加工制作的模拟目标并不是理想的均匀漫反射体而是粗糙表面,理论仿真与实验结果并未完全重合。但是在一定误差范围内,理论仿真结果与实验数据的变化规律基本上保持一致,验证了所建立的三维目标激光测距回波计算模型的有效性。

## 5 结 论

通过推导脉冲激光测距三维目标回波方程,建立了一种通过飞行目标的反射特性、表面形状及姿态信息计算回波功率分布的理论模型,并定义了纵向微分投影截面,简化了卷积计算过程。该理论模型可应用于一些非合作空间目标的回波功率分布模拟。在此基础上,以某飞行目标为例建立目标三维模型,通过数值仿真研究了脉冲激光的回波特性。理论分析了目标姿态变化对回波特性及回波畸变测

距误差的影响。最后设计了验证实验,验证了理论模型与理论分析的正确性。这些结论为飞行目标测距误差研究提供了理论依据。进一步地,若将文中的回波计算模型与实际飞行目标回光波形的测量结果相结合,通过滤波、反卷积等技术可以反演出飞行目标的大致形状及姿态信息。

## 参 考 文 献

- [1] Dai Y J. Laser radar technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 578-596.  
戴永江. 激光雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 578-596.
- [2] Liu L S, Wu B, Wu Z R, *et al.* Accuracy analysis and evaluation for exterior ballistic measurement [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 84-92.  
刘利生, 吴斌, 吴正容, 等. 外弹道测量精度分析与评定[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 84-92.
- [3] Xu X B, Zhang H, Zhang X J, *et al.* Effect of plane target characteristics on ranging distribution for pulse laser detection [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65 (21): 210601.  
徐孝彬, 张合, 张祥金, 等. 脉冲激光探测平面目标特性对测距分布的影响[J]. 物理学报, 2016, 65 (21): 210601.
- [4] Xu X B, Zhang H, Chen S S, *et al.* Plane target echo characteristics of pulsed laser circular-viewing detection [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37 (4): 0414003.  
徐孝彬, 张合, 陈杉杉, 等. 脉冲激光周向探测平面目标回波特性 [J]. 光学学报, 2017, 37 (4): 0414003.
- [5] Li L, Hu Y H, Zhao N X, *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.  
李磊, 胡以华, 赵楠翔, 等. 激光遥感目标回波脉宽展宽特性实验 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2): 246-250.
- [6] 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.  
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.
- [7] Steinvall O. Effects of target shape and reflection on laser radar cross sections [J]. Applied Optics, 2000, 39(24): 4381-4391.

- [8] Grönwall C A, Steinvall O K, Gustafsson F, *et al.* Influence of laser radar sensor parameters on range-measurement and shape-fitting uncertainties [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(10): 106201.
- [9] Ma P G, Qi L, Yang Y, *et al.* Study on airborne multi-pulse lidar target signal simulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0128001.  
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.
- [10] Zhao M B, He J, Fu Q. Simulation modeling and analysis of full-waveform lidar signatures [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0628002.  
赵明波, 何峻, 付强. 全波形激光雷达回波信号建模仿真与分析 [J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0628002.
- [11] Zhao N X, Hu Y H, Lei W H, *et al.* Small target imaging method based on the laser echo waveform analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 748-752.  
赵楠翔, 胡以华, 雷武虎, 等. 激光回波波形分析小目标检测成像方法 [J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(4): 748-752.
- [12] Steinvall O, Chevalier T. Range accuracy and resolution for laser radars [C]. *SPIE*, 2005, 5988: 598808.
- [13] Sun J L, Sun G M, Ma P G, *et al.* Laser target localization based on symmetric wavelet denoising and asymmetric Gauss fitting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(6): 0604001.  
孙俊灵, 孙光民, 马鹏阁, 等. 基于对称小波降噪及非对称高斯拟合的激光目标定位 [J]. *中国激光*, 2017, 44(6): 0604001.
- [14] Cheng P F. Research of key technologies of wide dynamic range and high precision laser distance measurement [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014: 34-43.  
程鹏飞. 大动态范围高精度激光测距关键技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2014: 34-43.
- [15] Huang M S. Time-of-flight laser ranging technique of single transmitted pulse [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 120007.  
黄民双. 单发脉冲飞行时间激光测距技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 120007.
- [16] Yu M. Research on scanning imaging lidar system [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014: 64-69.  
于森. 激光扫描成像系统研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2014: 64-69.
- [17] Xu W P, Huang G H. Research on advanced technology of time measurement for lidar based on constant-fraction discrimination [J]. *Infrared*, 2014, 35(4): 18-24.  
许万鹏, 黄庚华. 基于恒比定时鉴别的激光雷达时间测量前沿技术研究 [J]. *红外*, 2014, 35(4): 18-24.