

## V 型啁啾调频单脉冲激光测速测距方法与实现

吴姿妍<sup>1</sup>, 眭晓林<sup>1\*</sup>, 刘 波<sup>1</sup>, 赵晓龙<sup>1</sup>, 颜子恒<sup>2</sup>, 梅 博<sup>1</sup>, 张奕康<sup>1</sup>

(1. 华北光电技术研究所 固体激光技术重点实验室, 北京 100015;  
2. 中国航空研究院, 北京 100029)

**摘 要:** 为实现雷达远距离动目标实时跟踪探测, 单脉冲线性调频脉冲压缩算法和 V 型啁啾调频脉冲压缩算法为快速获得运动目标的距离速度信息提供算法基础。结合脉冲压缩算法优势以及两种波形脉压算法的弊端, 利用 V 型啁啾调频脉冲发射波形, 提出采用三角调频滤波处理方法, 以解决目标的距离、径向速度值及速度方向信息同时获取的难题, 为单脉冲实现速度矢量信息的隐蔽探测提供解决方案。通过搭建脉冲激光相干测量实验平台, 在接收镜头后连接 17.618 km 延迟光纤以延长目标往返距离, 对转速从 -3.67~3.67 m/s 的转盘进行速度距离测量。在 40 MHz 调制带宽, 4.096  $\mu$ s 调制脉宽, 2.5 GS/s 采样率条件下成功实现单脉冲距离速度多维信息获取, 并对测速准确性进行评估, 距离测量精度达到 0.33 m, 速度测量精度为 0.061 m/s。

**关键词:** 激光雷达; 径向速度; 啁啾调频; 相干测量

**中图分类号:** TN958.98      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20230294

### 0 引 言

雷达作为探测装置, 在智能驾驶汽车、三维成像、自然灾害监测等领域<sup>[1-2]</sup> 发挥重要作用。作为高频、短波长发射源, 激光在测距方面有高精度的优势, 衍生出多种绝对和相对测量技术方法<sup>[3]</sup>。在速度测量方面, 与传统微波雷达相比, 激光波长较短, 对同一运动目标进行探测, 激光产生的多普勒频移数值变化较微波雷达更明显, 在速度探测方面展现出更好的应用前景。现代雷达发展对距离分辨率和探测性能提出更高要求。一方面需要短脉冲提升距离分辨率, 另一方面需要长脉冲提高发射能量, 在雷达发射波形设计方面产生矛盾。线性调频信号因具备大时宽带宽积和脉冲压缩特性, 对能量和分辨率进行解耦, 并抑制杂波信号, 因此被广泛应用于雷达波形设计中。

近年来, 多种基于线性调频的波形设计方案被提出以解决目标距离速度感知问题。在速度测量方面, 按信号处理方式分, 主要有两类。一是线性调频波干涉测量法, 利用三角调频连续波的多普勒效应在一个

周期内两个调频方向上频移量互为相反的特性, 实现距离、速度的准确测量<sup>[4-8]</sup>; 双啁啾调频方案也被研究, 将时间对称的三角调制波形转化为频率对称, 实现上下啁啾波形的同时发射<sup>[9]</sup>, 采用干涉测量法对信号进行处理。二是对脉冲调频信号进行脉冲压缩, 针对远距离探测所需的线性调频脉冲信号, 通过脉冲压缩得到的双峰值进行目标距离速度计算<sup>[10]</sup>。

近年来光子学、微波光子学的快速发展为光啁啾波形的生成及应用<sup>[11]</sup> 提供更多参考。例如光谱整形法<sup>[12]</sup>、半导体激光器电流驱动法<sup>[13]</sup>、基于马赫-曾德尔调制器的电光倍频法等等。其中, Rajveer Dhawan 等人利用单个双驱动马赫-曾德尔干涉仪实现线性双啁啾或交叉啁啾的波形产生<sup>[14]</sup>, 可调谐多波段线性调频信号方案<sup>[15]</sup> 受到关注并被研究。

综合啁啾波形优势与波形生成的可实现性, 研究人员已经在激光雷达领域开展啁啾波形脉冲压缩方面的研究。张鹏飞等人从线性调频脉冲压缩原理出发, 对系统实现问题做出探讨<sup>[16]</sup>。从海胜等人提出多脉冲频域相干累积方法来提高激光雷达弱回波信

收稿日期: 2023-05-18; 修订日期: 2023-09-15

基金项目: 固体激光技术重点实验室基金项目 (6142404200301, H202201030942)

作者简介: 吴姿妍, 女, 博士生, 主要从事相干激光探测等方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 眭晓林, 男, 研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事光电技术探测方面的研究。

号的信噪比<sup>[17]</sup>。杨静等利用电光调制器调制形成的上扫频双边带信号进行压缩,得到目标距离速度信息<sup>[18]</sup>。

为了实现目标的远距离快速跟踪,采用带有调制的单脉冲模式,在一个脉冲周期内,实现距离信息、径向速度信息的多重感知,为远距离目标追踪提供一种新思路。由于单脉冲内单一斜率线性调频脉冲因多普勒失配存在测距误差<sup>[19]</sup>,双啁啾 V 型频率调制脉冲压缩在速度方向判别上存在劣势<sup>[20]</sup>,因此,文中提出基于双啁啾 V 型频率调制脉冲发射波形新算法,利用三角形频率调制波形对其进行滤波处理,根据滤波后双峰值间距以及峰值对应的时间位置,实现目标距离、径向速度大小及方向信息的获取。

### 1 理论推导

利用单载频脉冲信号进行测距时,激光雷达距离分辨率的提升需要脉宽缩短,而探测距离的提升需要

脉宽加长。单线性调频脉冲波形对能量和距离分辨率进行解耦,实现提升探测距离的同时,提升了距离分辨率。但是单线性调频脉冲的模糊函数是倾斜的,多普勒失配会导致匹配滤波器的输出峰值出现偏移,造成测距误差。双啁啾 V 型调频虽然能够通过匹配滤波得到双峰值,以确定径向速度大小和距离,但是无法分辨径向速度的方向。

在双啁啾 V 型调频信号的基础上,利用三角滤波输出不但可以得到目标的真实距离,同时利用一次脉冲可以得到目标的运动速度的大小和方向。文中方案主要是基于激光脉冲相干测距法,当回波光脉冲与本振光信号合束后,经过光电探测器,利用二极管平方律检波特性和带宽特性,对两束光信号的差频进行检测,在原理叙述中,以稳定的光频为基础,主要考虑调制信号在光电检测后的处理过程。

设发射波形为矩形包络的 V 型调频脉冲,其时域表达式如公式 (1) 所示,时频分析图如图 1(a) 所示。

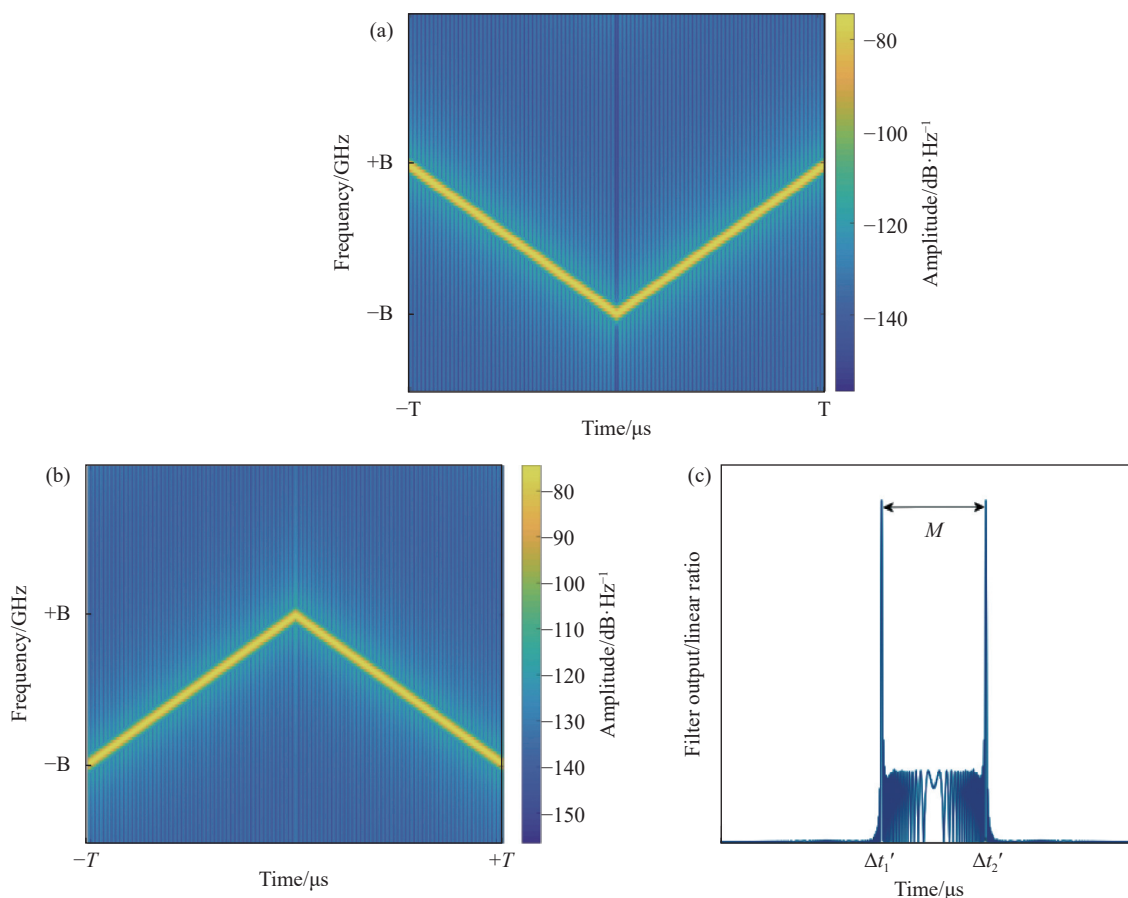


图 1 (a) V 型调频脉冲信号时频分析图; (b) 三角调频信号处理模板时频分析图; (c) 信号模板卷积图

Fig.1 (a) The time-frequency analysis diagrams of V\_type chirp pulse signal; (b) The time-frequency analysis diagrams of triangular FM processing template; (c) Convolution diagram with signal and template

$$s_t(t) = \text{rect}\left(\frac{t+T/2}{T}\right)e^{-j\pi kt^2 - j2\pi Bt} + \text{rect}\left(\frac{t-T/2}{T}\right)e^{j\pi kt^2 - j2\pi Bt} \quad (1)$$

式中:  $T$  为半周期;  $k$  为单边斜率 ( $k$  为正),  $k = 2B/T$ ,  $2B$  为带宽。

若回波从径向速度为  $v$  的运动目标处返回, 检测到的回波差频波形为:

$$s_R(t) = s_t(t)e^{j2\pi f_d t} \quad (2)$$

式中:  $f_d$  为由径向速度引起的多普勒频移,  $f_d = 2v/\lambda$ ,  $\lambda$  为波长。其回波为:

$$s_R(t) = s_t(t)e^{j2\pi f_d t} = \left[ \text{rect}\left(\frac{t+T/2}{T}\right)e^{-j\pi kt^2 - j2\pi Bt} + \text{rect}\left(\frac{t-T/2}{T}\right)e^{j\pi kt^2 - j2\pi Bt} \right] e^{j2\pi f_d t} \quad (3)$$

参与信号处理的滤波器为发射信号的共轭, 具体表达式如下:

$$y(t) = \alpha s_t^*(t) = \alpha \left[ \text{rect}\left(\frac{t+T/2}{T}\right)e^{j\pi kt^2 + j2\pi Bt} + \text{rect}\left(\frac{t-T/2}{T}\right)e^{-j\pi kt^2 + j2\pi Bt} \right] \quad (4)$$

该滤波器的时频分析图如图 1(b) 所示。

回波信号经滤波器输出  $s_{yout}(f_d, t)$  为:

$$s_{yout}(f_d, t) = \alpha \int_{-\infty}^{\infty} s_R(l)y(t-l)dl = \alpha \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \text{rect}\left(\frac{l+T/2}{T}\right)e^{-j\pi kl^2 - j2\pi Bl} + \text{rect}\left(\frac{l-T/2}{T}\right)e^{j\pi kl^2 - j2\pi Bl} \right] e^{j2\pi f_d l} \left[ \text{rect}\left(\frac{t-l+T/2}{T}\right)e^{j\pi k(t-l)^2 + j2\pi B(t-l)} + \text{rect}\left(\frac{t-l-T/2}{T}\right)e^{-j\pi k(t-l)^2 + j2\pi B(t-l)} \right] dl \quad (5)$$

不考虑交叉项的影响, 该输出结果主要集中在公式 (6) 和公式 (7) 两项上。

$$s_{yout1}(f_d, t) = \alpha \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{l+T/2}{T}\right)e^{-j\pi kl^2 - j2\pi Bl + j2\pi f_d l} \text{rect}\left(\frac{t-l-T/2}{T}\right)e^{j\pi k(t-l)^2 + j2\pi B(t-l)} dl = \alpha e^{j\pi kt^2 + j2\pi Bt} A(t, f_d - kt - kT) \quad (6)$$

$$s_{yout2}(f_d, t) = \alpha \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{l-T/2}{T}\right)e^{j\pi kl^2 - j2\pi Bl + j2\pi f_d l} \text{rect}\left(\frac{t-l+T/2}{T}\right)e^{-j\pi k(t-l)^2 + j2\pi B(t-l)} dl = \alpha e^{-j\pi kt^2 + j2\pi Bt} A(t, f_d + kt - kT) \quad (7)$$

式中:  $A(t, f_d + kt - kT)$  表示线性调频的模糊函数, 表达式如下:

$$A(t, F_D) = \left| \frac{\sin[\pi(F_D + \beta t/\tau)(\tau - |t|)]}{\tau\pi(F_D + \beta t/\tau)} \right|, \quad -\tau \leq t \leq \tau \quad (8)$$

式中:  $\tau$  为脉宽;  $F_D$  为多普勒频移;  $\beta$  为带宽。

该滤波输出两个峰值, 如图 1(c) 所示。该两处峰值分在  $f_d - kt_1' - kT = 0$  和  $f_d + kt_2' - kT = 0$  处, 对应的时间点分别为:

$$\Delta t_1' = \frac{f_d}{k} - T \quad (9)$$

$$\Delta t_2' = -\frac{f_d}{k} + T \quad (10)$$

$\Delta t_2'$  和  $\Delta t_1'$  是绝对值相同, 符号相反的值, 代表了目标多普勒引起的测距误差, 两者相加, 和为 0, 即可以消除该误差, 得到准确的目标距离。同时利用  $\Delta t_2'$  和  $\Delta t_1'$  可以解出目标多普勒的大小和方向。

设:

$$M = |\Delta t_1' - \Delta t_2'| = \left| \frac{2f_d}{k} - 2T \right| \quad (11)$$

在可测速度范围内, 当  $f_d = 0$  时,  $M$  为固定值  $2T$ ; 当  $f_d > 0$  时,  $M < 2T$ ; 当  $f_d < 0$  时,  $M > 2T$ 。且  $f_d$  表示为:

$$f_d = \frac{k}{2}(2T - M) \quad (12)$$

可以解算出目标运动速度和方向。

对比 V 型调频匹配滤波算法, 受多普勒频移  $f_d$  影响, 匹配滤波器输出的两个峰值对应的时间点分别为  $\Delta t_3'$  和  $\Delta t_4'$ 。

$$\Delta t_3' = -\frac{f_d}{k} \quad (13)$$

$$\Delta t_4' = \frac{f_d}{k} \quad (14)$$

虽然两者相加和为 0, 可以消除因多普勒频移带来的测距误差, 但是当径向速度数值一致, 方向不同时, 峰值都会在公式 (13) 和 (14) 表征的两个时间点出现, 无法判断目标的径向速度方向。

对于速度测量范围, 由公式 (11) 可知  $M$  的最小值为零, 对应:

$$f_d = kT = 2B \quad (15)$$

但此时两个峰值已经无法区分, 在实际计算过程中,

是无法计算多普勒频移的,因此可测量的多普勒频率需要满足双峰值可分辨。以 220~180 MHz, 2.048  $\mu$ s 双啁啾 V 型调频为例,得到图 2 结果。

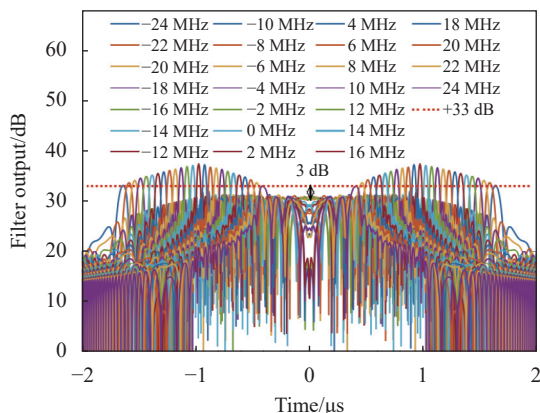


图 2 40 MHz, 2.048  $\mu$ s V 型调频多普勒检测范围

Fig.2 Doppler detection range with 40 MHz, 2.048  $\mu$ s V-type frequency modulation

理论上可取信号带宽的 55% 作为可检测频率的

范围。根据系统参数设计,可检测频率  $f_d$  范围为:

$$-1.1B \leq f_d \leq +1.1B \quad (16)$$

## 2 实验验证与分析

具体实验方案图如图 3 所示,激光器发射连续单频激光,经 2 : 8 分束器 1 分成两束后,20% 端作为本振光,与返回光做差频处理,80% 端作为信号光。信号光经声光调制器 (AOM),调制成 V 型调频的脉冲光,再经过 1 : 9 的分束器 2,90% 端作为发射光经过镜头 1 发出,10% 作为监测光。信号光照射到目标后,作为返回光从镜头 2 入射,为测试该方案的测距能力,加入延迟光纤以延长返回光时间。返回光、监测光通过合束器 1 后,再经过合束器 2 与本振光合束。合束器 2 的输出光通过探测器 (PD) 转化为电信号,经过信号采集、下变频以及滤波处理后,得出目标的距离速度信息。该系统组成能够实现发射时刻校准,同时模拟单镜头收发一体式方案中存在的环形器光泄露现象。

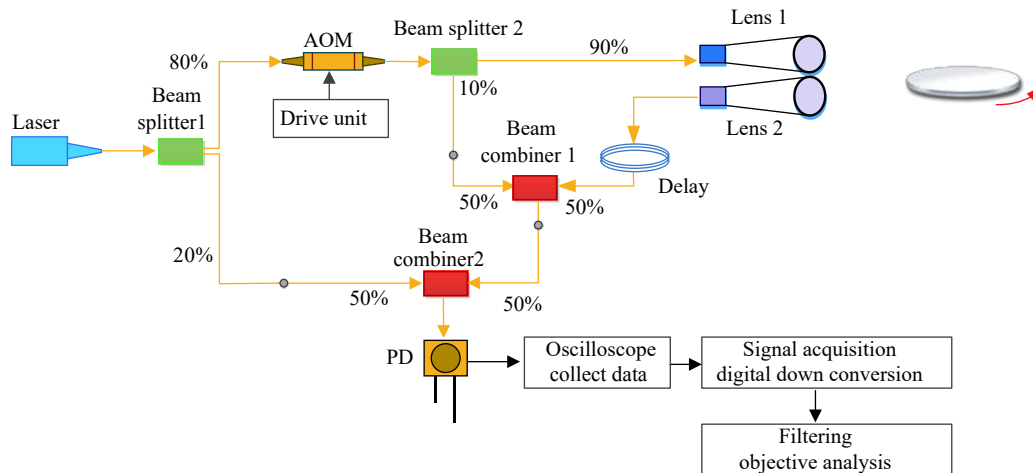


图 3 单脉冲激光相干测速测距实验方案图

Fig.3 Scheme diagram of single-pulse laser coherent velocity and range measurement experiment

实验中,激光源采用波长为 1.55  $\mu$ m 单频连续激光,声光调制器 (AOM) 的中心频率为 200 MHz。利用 AD9910 产生 220~180 MHz 的 V 型调频信号作为信号输入,结合自研功率放大器驱动 AOM,最终生成脉宽为 4.096  $\mu$ s,重频为 2 kHz 的脉冲光。光电探测器转换效率为 0.9 A/W。示波器采样率为 2.5 GS/s。系统实物图如图 4(a) 所示,测量合作目标为转轮,如图 4(b) 所示。

转轮半径  $R$  为 0.065 m,  $n$  为转速,  $\theta$  为飞轮速度矢量方向与激光入射方向的夹角。则设定的合作目标的径向速度  $v_s$  为:

$$v_s = 2\pi n R \cos \theta \quad (17)$$

由于测试的合作目标距离较近,为了验证测距能力,在回波处在增加延时光纤,延时光纤利用单载频矩形包络脉冲信号进行相干测量标定,对应延时光纤长度为 17.618 km。利用示波器进行采集,得到如图 5

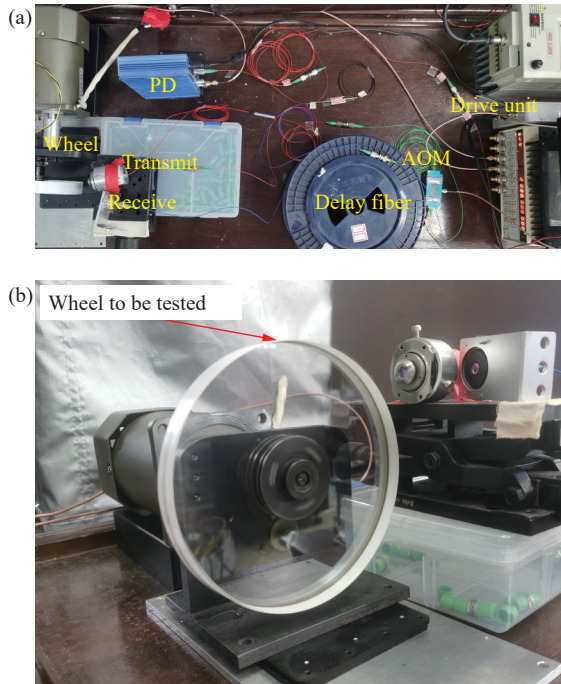


图 4 实验平台。(a) 系统实物图; (b) 待测转轮

Fig.4 Experiment platform. (a) System physical diagram; (b) Wheel to be tested

结果。

图 5(a) 中紫色方框内是触发信号, 在检测到该信号上升沿, 发射调制后的激光脉冲; 红色方框内是脉冲信号与本振信号的差频信号, 模拟单镜头环形器结构中 1 端到 3 端的光泄露现象, 也表征距离测量的基准点; 绿色方框内是回波信号与本振信号的差频信号。

图 5(b) 是对红色方框内信号进行时频分析, 从中可以看到发射信号是脉宽为 4.096  $\mu\text{s}$ , 调频从 220~180 MHz 的 V 型调频信号。

图 5(c) 是使用 17.618 km 延迟光纤, 转盘速度为  $-0.91 \text{ m/s}$  时, 对示波器采集到的黄色方框内的信号进行数字下变频以及三角滤波处理的结果。

为了对比验证该方案在测速方面的优势, 分别采用 V 型匹配滤波和三角滤波对相同延长线, 不同转速条件下采集到的信号进行处理。得到表 1 和表 2 数据。

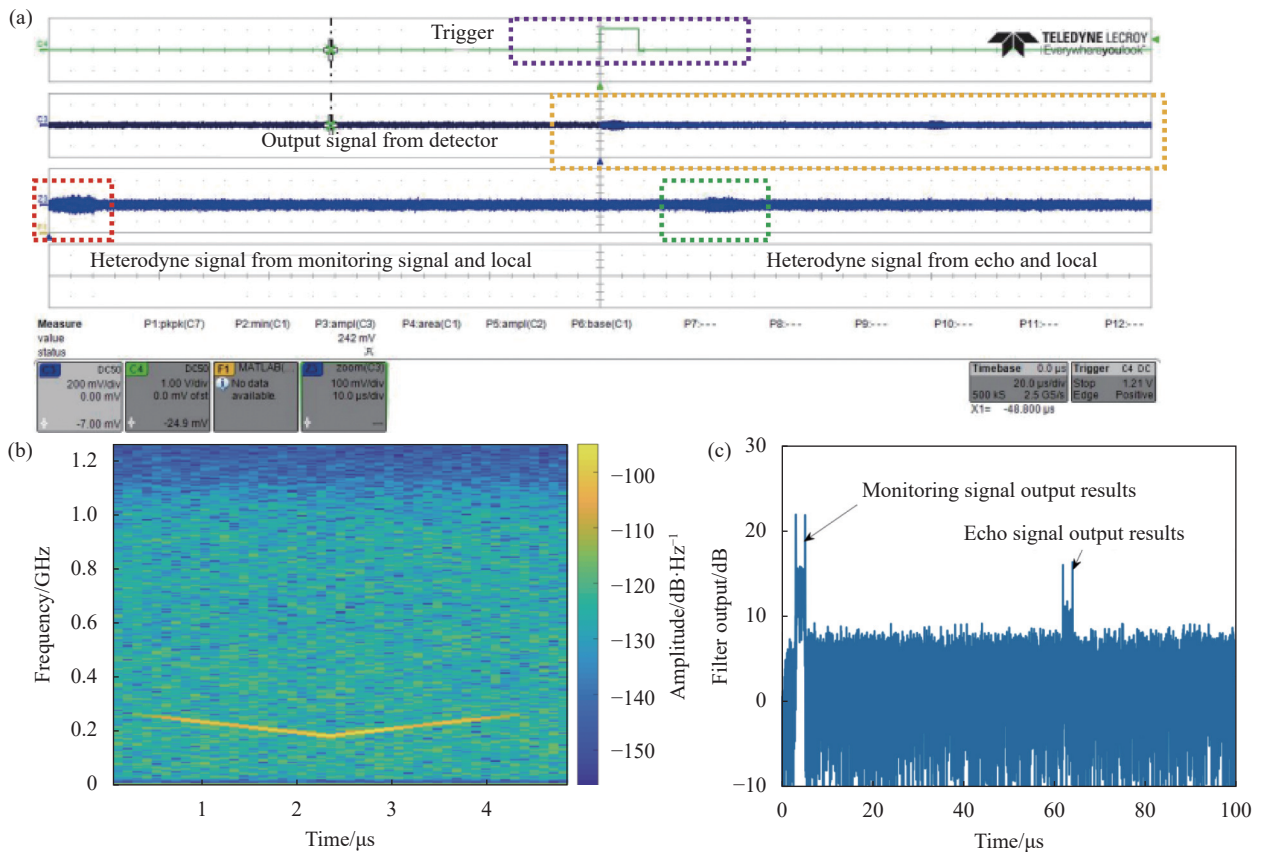


图 5 (a) 探测器输出的相干信号; (b) 监测光与本振光的相干光时频分析图; (c) 回波光信号处理结果

Fig.5 (a) Heterodyne signal from detector; (b) The time-frequency analysis diagram with data from monitoring signal and local light; (c) The signal processing result of echo light

表 1 不同延长线转速 V 型调频匹配滤波测量结果

Tab.1 Measurement results of different extension lines and different velocity on V-shaped FM matched filter

$L_s/km$	$v_s/m \cdot s^{-1}$	$L_m/km$	$v_m/m \cdot s^{-1}$
17.618	-3.67	17.618 8	3.389
	-2.75	17.618 8	2.540
	-1.83	17.618 9	1.696
	-0.91	17.619 0	0.881
	+0.91	17.618 8	0.894
	+1.83	17.618 9	1.726
	+2.75	17.618 9	2.553
	+3.67	17.618 8	3.456

表 2 不同延长线转速 V 型调频三角滤波测量结果

Tab.2 Measurement results of different extension lines and different velocity on V-type FM triangular filter

$L_s/km$	$v_s/m \cdot s^{-1}$	$L_n/km$	$v_n/m \cdot s^{-1}$
17.618	-3.67	17.618 4	-3.374
	-2.75	17.618 7	-2.519
	-1.83	17.618 8	-1.676
	-0.91	17.618 7	-0.851
	+0.91	17.618 4	+0.845
	+1.83	17.618 7	+1.685
	+2.75	17.618 8	+2.524
	+3.67	17.619 1	+3.366

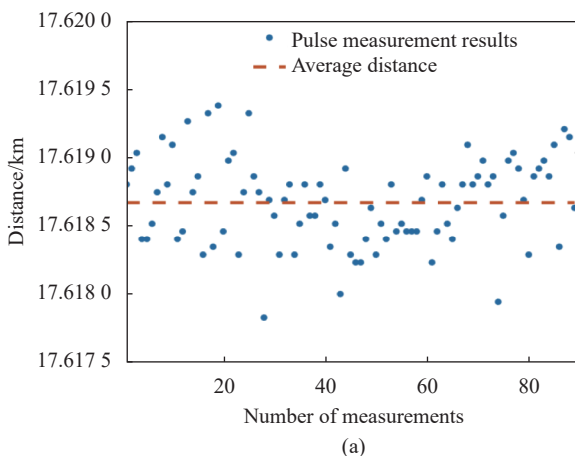
表 1、表 2 中,  $L_s$  代表光纤延长线对应距离,  $v_s$  代表设定不同转速条件下的转轮速度, “+”代表顺时针转动, 即向着接收镜头方向转动, “-”代表逆时针转动, 即远离接收镜头方向转动。  $L_m$  为经示波器采集、数字下变频后匹配滤波的解算距离,  $v_m$  为该方法下的径向速度。  $L_n$  为经示波器采集、数字下变频后三角滤波的解算距离,  $v_n$  为三角滤波方法解算的径向速度。从表 1 中可以看出, 对于不同方向数值相同的转速, V 型调频匹配滤波的方法无法分辨速度方向。而表 2 中数据可以准确表征速度的大小和方向。

为了表征所提方案及搭建系统的测距测速精度和测速准确性, 对在同一延长光纤 17.618 km 下, 不同转速测得的多个脉冲测量结果进行统计, 距离结果见图 6(a), 速度测量结果见图 6(b)。

当设置转速从 -3.67~+3.67 m/s 递进, 每次递进 0.92 m/s 时, 距离测量方面得到多脉冲测量后的距离平均值为 17.618 6 km, 测量标准差为 0.33 m。转速从 -0.91 m/s 递增到 -3.67 m/s 速度测量方面, 标准差  $\sigma$  依次为 0.055、0.061、0.058、0.045 m/s。

对测速准确度进行分析时, 由于飞轮速度矢量方向与激光入射方向存在夹角, 在数据处理上, 首先计算各测量值与相应设置值的比值, 求得该比值平均值为 0.921, 得出夹角数值为 22.868°。将此夹角数值带入到设置的转盘径向速度中, 计算出在该夹角条件下, 理论上应探测到的径向速度。

对飞轮转速与激光雷达实测速度值进行最小二乘法拟合, 得到图 7, 可以看出测量值与设置值呈线性关系, 拟合系数为 0.997 1, 验证了测量方法的准确性。



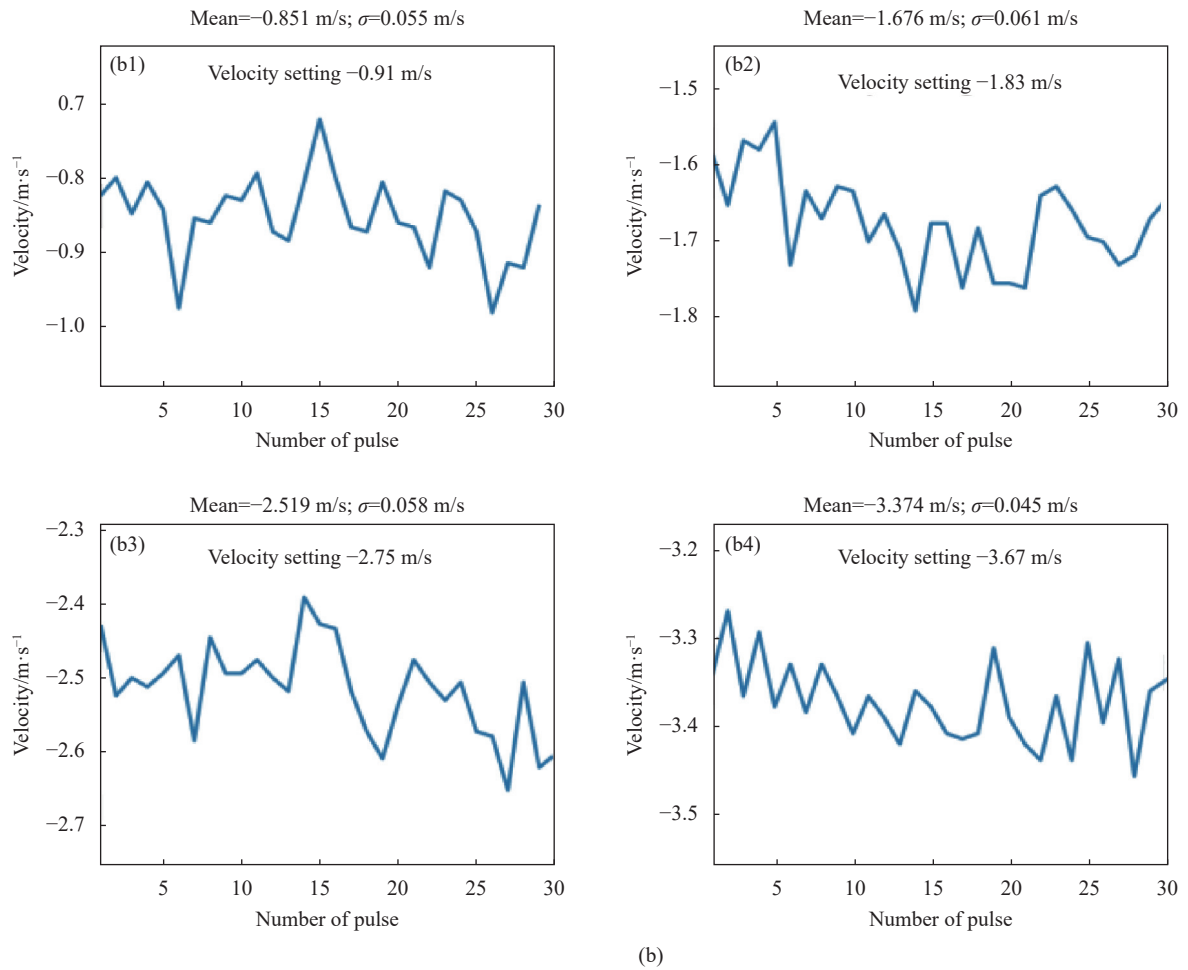


图 6 测量结果。(a) 距离精度; (b) 速度精度

Fig.6 Measurement results. (a) Distance precision; (b) Velocity precision

### 3 结 论

文中提出了一种基于 V 型调频的单脉冲测速测距方法,其特点是从单脉冲信号处理中,不仅能获得距离和径向速度值信息,同时还能获取径向速度方向信息。通过实验验证了该波形设计处理方法的有效性,能够实现运动目标的速度距离测量。

实验中使用 17.618 km 光纤延迟线与转盘模拟远距离处的运动目标,设置  $-3.67\sim+3.67$  m/s,步进为 0.92 m/s 的转盘速度,使用 V 型调频脉冲匹配滤波方法和 V 型调频三角滤波方法进行数据处理并对比。结果表明,V 型调频三角滤波方法可以成功实现距离值、速度值、速度方向的测量,更准确地反映目标的运动变化。利用 40 MHz 调制带宽,4.096 μs 脉宽 V 型啁啾脉冲波形,实现 0.33 m 的距离测量精度,0.061 m/s

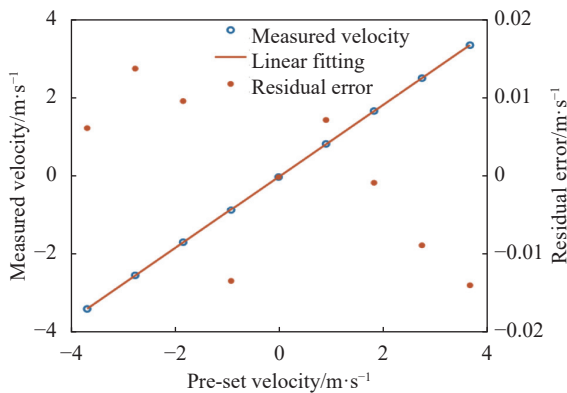


图 7 径向速度从  $-3.67\sim+3.67$  m/s,步进为 0.92 m/s 时,速度测量值与预设值误差

Fig.7 Residual error between the measured velocity and the pre-set velocity when the radial speed is from  $-3.67$  m/s to  $+3.67$  m/s with the 0.92 m/s stepping speed

的速度测量精度。与现有激光测速测距雷达方案相比,单脉冲测量模式在提升激光作用距离、提升测距分辨率以及增强隐蔽性能等方面优势明显。在工程实践上,可进一步采用高调制速率光学器件,设计相关驱动,拓展可探测速率范围,在船舶航行轨迹测量、无人机飞行测量、机载测量等领域有着良好的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] Huang Shaowei, Zhou Yaqi, Mao Xuesong. Method of simultaneous measurement of range and speed for vehicle laser radar [J]. *Optoelectronic Technology*, 2021, 41(2): 153-158. (in Chinese)
- [2] Howell J C, Howland G A, Dixon P B. Photon-counting compressive sensing laser radar for 3D imaging [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(31): 5917-5920.
- [3] Wang Yifan, Xu Xin, Tan Yidong. Laser precision ranging technology [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2021, 42(6): 22-23. (in Chinese)
- [4] Jing Liqiang, Zheng Gang, Sun Bin, et al. Measurement of distance to moving target using frequency-modulated continuous-wave interference technique [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1204001. (in Chinese)
- [5] Shi P, Lu L, Liu C, et al. Optical FMCW signal generation using a silicon dual-parallel Mach-Zehnder modulator [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(6): 301-304.
- [6] Zhang F, Yi L, Qu X. Simultaneous measurements of velocity and distance via a dual-path FMCW lidar system [J]. *Optics Communications*, 2020, 474: 126066.
- [7] Na Q, Xie Q, Zhang N, et al. Optical frequency shifted FMCW Lidar system for unambiguous measurement of distance and velocity [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 164: 107523.
- [8] Yan Ziheng, Sui Xiaolin, Liu Bo, et al. Analysis and rectification of nonlinearity in frequency sweep of laser Doppler velocity measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2413-2418. (in Chinese)
- [9] Ding Y, Guo S, Wu H, et al. Dual-chirp photonics-based radar for distance and velocity measurement based on compressive sensing [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(4): 1-7.
- [10] Yang J, Zhao B, Liu B. Distance and velocity measurement of coherent lidar based on chirp pulse compression [J]. *Sensors*, 2019, 19(10): 2313.
- [11] Hao Wenzhe, Hu Xiong, Xu Qingchen, et al. Experimental research on velocity measurement based on microwave modulated laser technologies [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 0306002. (in Chinese)
- [12] Wang Chao, Yao Jianping. Chirped microwave pulse generation based on optical spectral shaping and wavelength-to-time mapping using a sagnac loop mirror incorporating a chirped fiber Bragg grating [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(16): 3336-3341.
- [13] Li Xuan, Zhao Shanghong, Li Yongjun, et al. Linearly chirped waveform generation with large time-bandwidth product using sweeping laser and dual-polarization modulator [J]. *Optics Communications*, 2018, 410: 240-247.
- [14] Rajveer Dhawan, Reena Parihar, Amol Choudhary. Multiband dual and cross LFM waveform generation using a dual drive Mach Zehnder modulator [J]. *Optics Communications*, 2022, 530: 129144.
- [15] Hao Chen, Bikash Nakarmi, Shilong Pan. Multi-band LFM signal with unidentical bandwidths subjected to optical injection in a DFB laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(8): 391-394.
- [16] Zhang Pengfei, Pan Jingyan, Fan Jieping. Research on coherent laser detection using linear frequency modulated [J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(2): 161-165. (in Chinese)
- [17] Cong Haisheng, Sun Jianfeng, Lu Zhiyong, et al. Multi-pulse coherent accumulation in frequency domain based on frequency-modulation continuous-wave coherent lidar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(3): 0310003. (in Chinese)
- [18] Yang Jing, Zhao Bin, Liu Bo. Long-range coherent lidar based on pulse-compression [C]//Seventh Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications, 2021.
- [19] 理查兹著(美). 雷达信号处理基础 [M]. 邢孟道等译. 北京: 电子工业出版社, 2012: 143-147.
- [20] Li Wenchen, Dan Mei, Wang Xuesong, et al. Velocity Measurement using single linear frequency modulation pulse [J]. *Radar Science and Technology*, 2004, 2(1): 11-16. (in Chinese)



## Design and implementation of single pulse laser velocity and ranging scheme based on V-type chirp frequency modulation

Wu Ziyang<sup>1</sup>, Sui Xiaolin<sup>1\*</sup>, Liu Bo<sup>1</sup>, Zhao Xiaolong<sup>1</sup>, Yan Ziheng<sup>2</sup>, Mei Bo<sup>1</sup>, Zhang Yikang<sup>1</sup>

(1. Science and Technology on Solid-state Laser Laboratory, North China Institute of Optoelectronic Technology, Beijing 100015, China;

2. Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100029, China)

### Abstract:

**Objective** Lidar technology offers significant advantages in speed measurement, particularly due to its short-wavelength characteristics. Recent advancements have raised the bar for lidar, demanding higher laser ranging resolution and extended detectable distances. This has led to challenges in designing laser emission waveforms. To address this, frequency modulation (FM) signal modulation is applied to laser pulses, enhancing the capabilities of pulsed laser coherent radar for long-distance, high-precision speed and ranging measurements, especially for maneuvering targets. However, a challenge arises with the single-chirp FM signal of a moving target, where velocity-distance coupling issues can result in ranging errors due to Doppler mismatch. The existing dual-chirp matched filter method faces limitations in distinguishing the radial velocity direction. In response, a proposed solution involves the use of a dual-chirp V-shaped FM triangle filter. This innovative filter, coupled with a sophisticated data processing method, facilitates the measurement of single-pulse speed direction, value, and target distance, overcoming the limitations posed by conventional approaches.

**Methods** The introduction highlights the limitations of both the single-chirp FM and double-chirp V-type FM matched filter methods in speed measurement. Theoretical calculations are then performed using the double-chirp V-type FM triangular filtering method to establish the relationship between speed and the filtered double peak value. The measurable speed value range is determined, considering the performance of existing devices, and a feasible waveform is designed accordingly. To validate the proposed approach, a laser coherence experimental platform is employed, utilizing a 1.55  $\mu\text{m}$  laser for turntable speed measurement. The system incorporates a dual-lens structure for transmitting and receiving, with a 17.618 km delay fiber simulating long-distance targets to assess the impact of the system's components on actual ranging. The measurement effects of the double-chirped V-type matched filter and double-chirped triangular filter are then compared. Finally, the study includes the measurement of rotating disks with varying speeds of optical fibers, from which relevant data are obtained. Precision and accuracy analyses are conducted to evaluate the effectiveness of the proposed double-chirp V-type FM triangular filtering method (Tab.1 and Tab.2) for speed measurement. The results are presented in figures (Fig.6 and Fig.7) to illustrate precision and accuracy aspects.

**Results and Discussions** Using the coherent laser measurement experiment platform, actual sampling data with 17.618 km time-delay optical fibers are analyzed. The dual-chirp V-shaped FM matched filtering scheme is compared and verified, demonstrating its advantages in radial velocity direction measurement. The results of distance measurements with multiple pulses are illustrated in Fig.6 (a), showcasing a precision of 0.33 m. In the wheel speed range from  $-0.91$  m/s to  $-3.67$  m/s with a 0.92 m/s step, the speed measurement precision ranges are 0.055 m/s, 0.061 m/s, 0.058 m/s, and 0.045 m/s (Fig.6 (b)). Concurrently, the speed measurement results are fitted

with the set values in Fig.6 (c), achieving fitting coefficients of 0.997 1. The accuracy of speed measurement is effectively verified.

**Conclusions** The single-pulse double-chirp V-type frequency modulation waveform is designed to meet the requirements of extending the farthest detection distance, improving distance resolution, and achieving high-precision radial velocity measurement. The triangular filtering method employed in this waveform enables the measurement of target distance, velocity value, and velocity direction. This approach accurately reflects changes in the target's movement, providing a valuable reference for determining the motion vector of a three-beam target. The application prospects for this methodology are promising, particularly in fields such as ship navigation trajectory measurement, unmanned aerial vehicle flight measurement, airborne measurement, and other related domains.

**Key words:** lidar; radial velocity; chirp frequency modulation; coherent measurement

**Funding projects:** Solid Laser Key Laboratory Fund (6142404200301, H202201030942)