

锁模相干激光雷达距离-多普勒成像识别仿真

李远洋¹, 张合勇¹, 王挺峰^{1*}, 郭 劲¹, 苗锡奎²

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 光电对抗测试评估技术重点实验室, 河南 洛阳 471003)

摘要: 传统激光相干探测系统中, 一般采用单频激光作为发射源, 实现目标测量或跟踪; 而在国外典型应用中, 采用锁模脉冲串与相干接收方式融合, 可实现目标距离-多普勒成像(简称 R-D 成像)。因此, 此文重点针对基于锁模 CO₂ 激光的 R-D 成像展开仿真分析。首先建立锁模脉冲串激光模型; 其次对频谱混叠进行展开, 并结合自旋运动中的目标模型开展回波信号的匹配滤波处理; 最后通过相应 FFT 和 IFFT 运算, 可获得目标的 R-D 图像, 并给出含有噪声情况下、自旋目标在不同转动角速度以及不同脉冲回波相叠加所获的成像质量改善的 R-D 图。经过相应仿真分析可知, 采用基于锁模脉冲串的成像方法, 可利用一个大脉冲获得一幅目标 R-D 图, 可作为弹道目标诱饵识别的“运动指纹”特征。

关键词: 相干探测; 锁模激光; R-D 成像; 运动指纹

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0830004

Range-Doppler imaging recognition simulation of the mode-locked coherent lidar

Li Yuanyang¹, Zhang Heyong¹, Wang Tingfeng^{1*}, Guo Jin¹, Miao Xikui²

(1. State Key Laboratory of Laser Interaction with Mater, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Key Laboratory of Electro-Optical Countermeasures Test & Evaluation Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: The emitted laser is a single frequency source in the traditional coherent detection, and this system can be used in the field of objects measuring and tracking. But in the typical lidar system abroad, it can be used in Range-Doppler (R-D) imaging through the mode-locked pulse burst combined with coherent receiving method. Therefore, the numerical simulation of R-D imaging based on the mode-locked laser pulse burst was analyzed. Firstly, the numerical model of the mode-locked pulse burst was built up. Secondly, the unfolded frequency spectral of the laser pulse was given and the matched filter of the echo signal was designed through the spinned-target model. At last, the FFT and IFFT were adopted in the processing while the R-D image can be obtained with different rotating angular speed. On the other hand, the SNR can be enhanced with many frame accumulations based on the R-D image output. From the simulation analysis of R-D imaging, the fingerprint image of the spinned-target with a macro-

收稿日期: 2018-03-10; 修订日期: 2018-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(61205143); 光电对抗测试评估技术重点实验室开放课题(GKCP2016004)

作者简介: 李远洋(1988-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事激光相干探测信号处理方面的研究。Email: liyuanyang1108@sina.cn

通讯作者: 王挺峰(1977-), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光应用技术方面的研究。Email: wtfeng@sina.com

pulse(including many micro pulses) was obtained, it is very important in the target discrimination of the ballistic missile defense.

Key words: coherent detection; mode-locked laser; R-D imaging; motion fingerprint

0 引言

激光雷达技术源于传统的微波或毫米波雷达,二者存在诸多相似处。利用激光雷达同样可获取运动目标距离-多普勒(R-D)图,该图像可同时反映目标自身的运动和几何特征,实现旋转目标运动特性鉴别^[1]。该技术最早应用于林肯实验室的“火池”激光雷达系统^[2-3],该系统利用无调制脉冲、线性调频连续波^[3]及相移键控调制脉冲等不同体制的激光雷达,通过不同的激光发射波形获取目标的二维成像信息^[2]。美国后期采用同位素 ¹³CO₂ 发射激光,研制并开发了 HI-CLASS 系统,通过采用相干锁模脉冲串,提高了发射脉冲的瞬时功率,大幅度提高系统的作用距离^[4-6]。利用这种相干锁模脉冲体制,发射一个大脉冲即可实现距离、速度、倾角的测量^[3],并通过综合目标距离与速度信息,实现目标一次 R-D 成像^[4],成像帧频可达 30 Hz,该系统主要用于千公里级弹道目标的 R-D 成像识别,在末段防御中对真假弹头实时鉴别具有重要作用。在单脉冲 R-D 成像中,存在距离与速度分辨率的权衡问题^[7-8],由于锁模相干激光雷达系统中,大脉冲负责目标速度测量,大脉冲中锁模小脉冲负责距离测量,因此可以同时保持较高的距离与速度分辨率,而锁模激光引入的多纵模问题可以通过相应信号处理算法得到解决。

此文在相干探测基础上,以锁模脉冲串输出激光为发射源,仿真分析其所对应的 R-D 成像,为后续实现系统级研制奠定基础。

1 锁模脉冲构建

锁模激光通过锁定多纵模激光器中纵模间的相位生成。锁模脉冲具有脉宽窄、峰值功率高的特点。锁模激光器生成的瞬时光场 E 可以表达为:

$$E(t)=\text{Re}\{\tilde{E}(t)\}=\text{Re}\left\{\sum_{n=-N/2}^{N/2} E_n \exp[j(\omega_0+n\omega_1)t+j\phi_n]\right\} \quad (1)$$

式中: $\tilde{E}(t)$ 为光场复包络,实部为实际光场信号; E_n

为各个纵模的振幅; ω_0 为谐振腔的主振频率,也是激光注入种子的频率; ω_1 为激光器中各个纵模的间隔; ϕ_n 为锁相相位,通过加入这个固定的相位调制,激光的各个非相干纵模被锁在一起,生成窄脉冲序列, n 是锁模激光的模式数,取决于激光的增益损耗曲线。

锁模激光各个参数确定如下:激光纵模间隔 ω_1 为 $2\pi \times 25$ MHz;锁相相位 $\phi_n=0$;对于 2 ns 脉宽的锁模脉冲,模式数 $n=-15, -14, \dots, 15$,共 31 个纵模;谐振腔的主振频率 ω_0 为光波频率量级,该量级过高无法仿真,因此仿真时将主振频率设为 4 GHz,因为外差探测主要是光波频率差,此改动对仿真结果无影响,为满足 Nyquist 定理,仿真时采样至少达到 8 GHz;对于连续的 CO₂ 激光器,纵模振幅 E_n 应服从洛伦兹线形分布,但是由于主动或被动锁模的影响,中心频率的能量被迫向外围模式转移,导致中心频率的能量下降,而外围频率的模式能量有所加强,这种共同作用结果可以用高斯线形描述为:

$$|E_n(\nu_n)|^2=\exp\left[-(\nu_n-\nu_0)^2/(2\sigma_\nu^2)\right] \quad (2)$$

σ_ν 在一个大气压下取 350 MHz。 ν_n 和 ν_0 分别为各纵模频率和主振频率。在电激励 CO₂ 激光器中,会存在增益开关尖峰,而且充入的氮气会导致脉冲序列出现氮拖尾。时间上对脉冲序列的这两种调制可以用一个窄而高的高斯函数与一个宽而平的平顶高斯函数仿真得到。这两个函数的具体参数可以通过不断尝试得到。

利用上述模型与参数,得到锁模 CO₂ 脉冲的时域与频域图如图 1 所示。图 1(a)为时域图,大脉冲的脉宽为 2.52 μ s,其中包含 63 个锁模脉冲,每个锁模脉冲脉宽为 2 ns,峰峰间隔为 40 ns,时域图中大脉冲的增益开关尖峰和拖尾十分明显。图 1(b)为频域图,可见 31 个频谱尖峰以 4 GHz 为中心,以 25 MHz 为间隔等均匀分布,这正是前面提到的锁模激光的最基本特性。

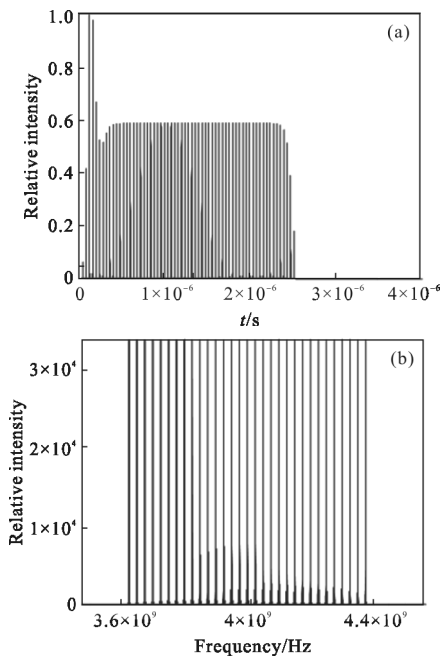


图 1 锁模激光脉冲序列的时域与频域图
Fig.1 Mode-locked laser pulse burst in time and frequency domain

2 参考波形构建

锁模脉冲序列参考波形(参考波形)通过提取少量发射激光能量与本振光叠加得到。参考波形对从回波信号中提取目标特性很重要,是构建匹配滤波器的基本要素。单信道(如同相信道)的参考信号可以表示为:

$$i_{ref}(t) = \frac{q\eta}{hv} \left(\frac{c\epsilon_0}{2} \right) \times$$

$$2\text{Re} \left\{ \int_{A_{detector}} \tilde{E}_{tran}(\rho,t) \times \tilde{E}_{LO}^*(\rho,t) \exp[i(\omega_{LO} - \omega_s)t + i\theta] d^2\rho \right\} \quad (3)$$

积分外都是常量,与探测器的量子特性有关,如果只考虑相对强度,仿真时可以取 1。 ω_{LO} 和 ω_s 分别为连续本振光频率与信号光频率,其差值为拍频频率。 θ 是本振和信号光的相位差。用 4 GHz 的速率采样,将采样结果存入电脑,得到参考波形供后续使用。

2.1 拍频信号频谱与混叠

如果本振光信号的频率低于出射锁模激光中心模式频率 400 MHz,得到采样的拍频信号后,做 FFT 可得到拍频信号的功率谱周期图。频谱中出现 31 个尖峰,对应于锁模脉冲中 31 个纵模与本振光分别干涉的结果,如图 2(a)所示。中心频率的纵模干涉得到的信号频谱尖峰正好等于 400 MHz,如图 2(b)所

示,而且能够得到各个频谱尖峰之间相隔 25 MHz,尖峰的宽度约为 $1/25 \times 10^{-6}$ MHz。由于该信号是实信号,所以应该存在对称的正频与负频,此处负频省略。

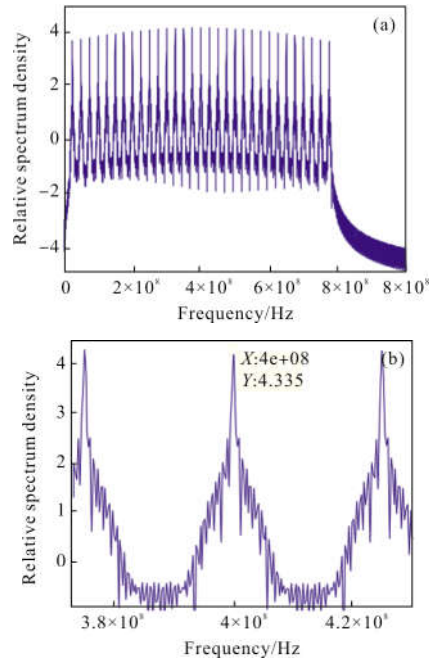


图 2 本振光与发射光取样拍频信号的功率谱
Fig.2 Power spectrum of the beat signal for a mixing transmitter-local oscillator laser

如果本振光频率与中心纵模频率差值小于锁模激光的频率带宽,会发生频率的混叠现象,因为此时信号的正频与负频出现了位置上的重合。取本振光的频率高于中心纵模频率 6.25 MHz,拍频信号频谱如图 3 所示。零频附近出现 62 个频率尖峰,因为正频和负频的频谱都聚集到零频附近,导致混

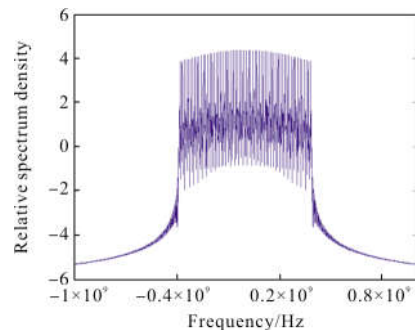


图 3 本振光频率高于出射激光中心模式频率 6.25 MHz 所获拍频功率谱
Fig.3 Power spectrum of the beat signal for a mixing where the local oscillator frequency is 6.25 MHz higher than the transmitter laser frequency

叠谱的出现。为得到如图 2 所示的拍频频谱,需要对低频(Intermediate Frequency, IF)频谱进行去混叠处理,将负频频谱与正频频谱进行拆分,然后重新叠加。具体算法将阐述如下。

2.2 去混叠与解析参考信号

为更清晰地表示混叠谱,取中频 6.25 MHz 时域拍频信号 Fourier 变换的实部,并只取出正频部分,如图 4 所示。图中 P 指向未混叠谱的正频尖峰, N 指向未混叠谱的负频尖峰,其他正负频尖峰交替以此类推。图 4 中最靠近零频的是中心纵模产生的频谱尖峰,尖峰的频率值正好等于 6.25 MHz。尖峰与尖峰间的频率间隔都是 12.5 MHz。

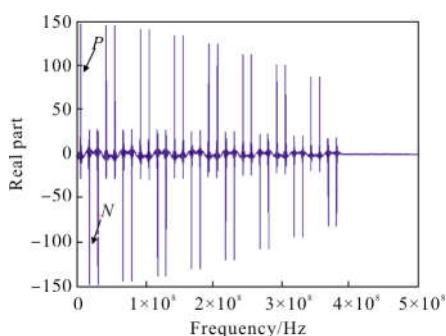


图 4 拍频信号 Fourier 变换的实部和正频率部分
Fig.4 Real part and non-negative frequency of Fourier transform of beat signal spectrum

为了得到非混叠谱,对图 4 所示频谱的处理算法流程如下:

(1) 将拍频信号进行采样(采样长度取决于采样速率与激光的模式间隔与模式数),做快速 Fourier 变换(FFT)。取出 0~500 MHz 范围内的混叠谱,如图 4 所示。将该混叠谱等分成 20 个信号片段,其中每个片段包含 25 MHz 的频率范围。经过这样的处理后,每个信号片段都会包含一个正频和一个负频的频谱尖峰。将每个片段作为一行,按时间顺序排列成一个 20 列的矩阵。

(2) 将这个由信号片段组成的矩阵复制成两个相同的矩阵 A 和 B , 矩阵 A 的上半部分设为零,矩阵 B 的下半部分设为零。这个操作将矩阵 A 的正频全部变零,而矩阵 B 将频谱的负频全部变为零。

(3) 将矩阵 A 的行和列全部进行翻转,全部元素取复共轭,按时间顺序重新展开两个矩阵,得到两个等长度向量。将向量 A 的最后一个 DC(直流)

元素去掉后,将向量 B 连接在 A 后,得到的频谱为去混叠之后的频率谱,如图 5 所示。

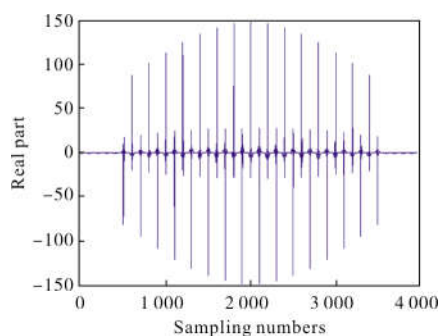


图 5 将图 4 中的谱按算法去混叠后得到的谱
Fig.5 Anti-aliasing spectrum of Fig.4 using this algorithm

(4) 图 5 所得到的频谱没有负频,而且中频在 506.25 MHz。为了得到时域的复解析信号,首先将图 5 中的负频全部填零,然后做 Fourier 逆变换,得到中频为 506.25 MHz 的复解析信号,如图 6 所示。

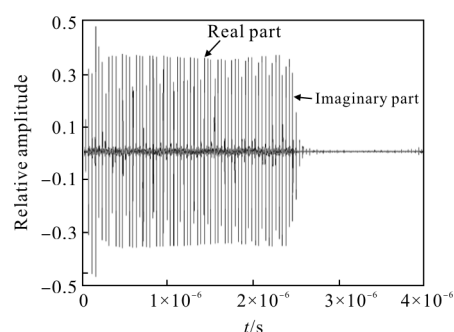


图 6 中频为 506.25 MHz 的复解析信号
Fig.6 Complex analytic signal whose IF is 506.25 MHz

(5) 将所得到的中频为 506.25 MHz 的复解析信号直接乘 $\exp(-i\omega_{IF}t)$,其中 ω_{IF} 为 $2\pi \times 506.25$ MHz。经过该操作后,中频为 506.25 MHz 的带通解析信号被降频到基带。基带的时域信号如图 7 所示。

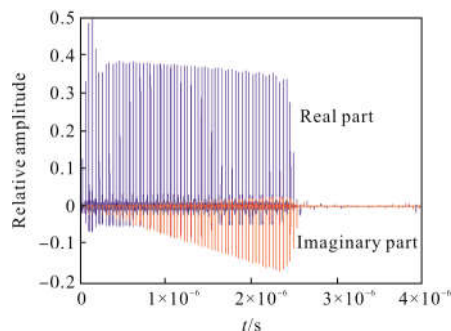


图 7 基带复解析参考信号
Fig.7 Complex analytic reference signal on base band

该信号被储存起来,后续会被用于构成提取目标特性匹配滤波解卷积滤波器。文中后面部分将称这个基带的复解析参考信号为 OPM 信号。

3 目标模型建立

对于转动目标,其角速度与目标的姿态与形状密切相关,所以如果能够获取不同距离处目标的平均多普勒频谱展宽,不但可以得到目标的大小信息、转动速度,而且还可以对目标进行成像,这就是距离-多普勒成像的原理。目标几何参量、姿态、角速度和脉冲宽度、表面粗糙度等因素对激光距离多普勒像^[9]及其噪声特性^[10]的影响有较为完备的模型,在此基础上,下面给出锁模激光外差探测目标模型的建立过程。

当发射锁模激光与目标作用后,漫反射回波信号特性会发生改变。首先,目标上不同位置点的产生的回波信号的时间不同,距离越远,时间延迟越大;其次,目标上各点回波信号的多普勒频移不同;再次,由于发射激光与目标表面各点法线不平行,所以漫反射体的反射率不同;最后,由于目标表面粗糙,所以各点产生的回波信号都会携带一个随机相位。下面通过实例,具体阐述目标模型的构建方法。

仿真的目标为一个锥体,该锥体围绕它的中轴进行匀速转动,并且转轴与发射系统的光轴成 30°,如图 8 所示,锥体的长度为 2 m,底面直径为 1 m,锥体转动角速度为 20 rad/s。目标本身是 3D 模型,此处可以将锥体向垂直于光轴方向投影,得到目标的 2D 模型,缺省的一维是沿着光轴的距离,这一距离通过给 2D 模型的每点赋值得到,随后阐述。

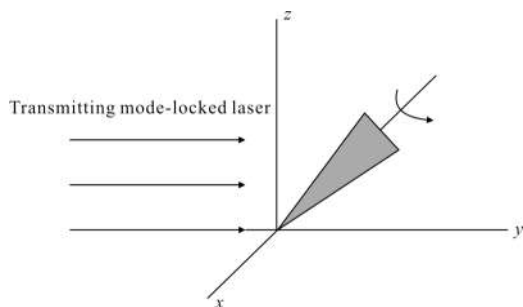


图 8 激光轴与转轴方向呈 30°夹角

Fig.8 30° angle between laser axis and rotation axis

目标投影得到的 2D 模型如图 9 所示。

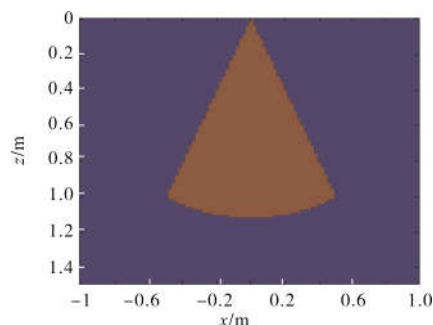


图 9 目标在垂直于光轴平面上的投影

Fig.9 Projection of the target to the plane orthogonal to the beam axis

回波信号的多普勒频移只与目标上各点沿光轴方向的运动速度相关,根据几何上的关系,目标上各点沿光轴的运动线速度产生的多普勒频移量:

$$\Delta f_{\text{dop}} = \frac{2x\omega_{\text{cone}}}{\lambda} \sin\theta \quad (4)$$

式中: ω_{cone} 为角速度 20 rad/s; x 为图 9 中 x 轴方向的投影距离; $\theta=30^\circ$ 为转轴与光轴的夹角; $\lambda=10.6 \mu\text{m}$ 是 CO_2 激光波长。据公式(4),转动目标的多普勒频移量在目标投影上的分布如图 10 所示。

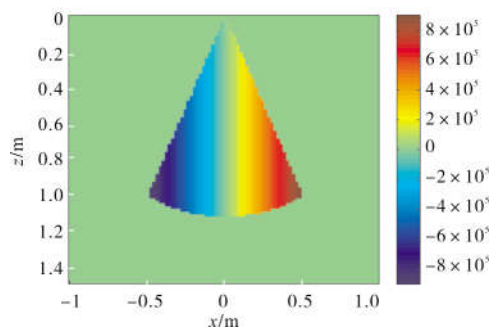


图 10 目标投影平面的多普勒频率分布

Fig.10 Doppler frequency shifts on the target-projection plane

多普勒频移只与投影的 x 坐标有关,因此频移的等强度线垂直于 x 轴。远离转轴的目标点产生的多普勒频移更大。转轴两侧产生的频移方向相反。

将目标投影后,目标上各点沿光轴方向的相对距离信息被缺省,所以应该求出投影上每点轴向相对距离。相对距离的求法需要借助锥体的曲面方程,不再赘述,可得目标上各点的相对距离如图 11 所示。

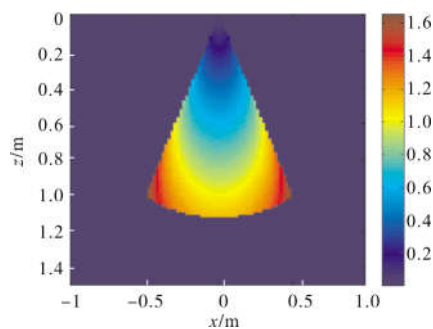


图 11 目标投影平面的相对距离信息

Fig.11 Relative range information on the target-projection plane

目标的漫反射率与激光入射方向与目标表面法线之间的夹角 γ 的余弦的平方成正比。这一夹角可以通过锥体上各点的法线与 y 轴所成夹角的方向余弦求得。锥体上各点法线与各轴方向余弦可以通过对曲面方程的各个变量求偏导数得到，最后用 x 和 z 变量替代 y 变量，即可得到 $\cos^2\gamma$ 与 x 和 z 的关系，如图 12 所示。

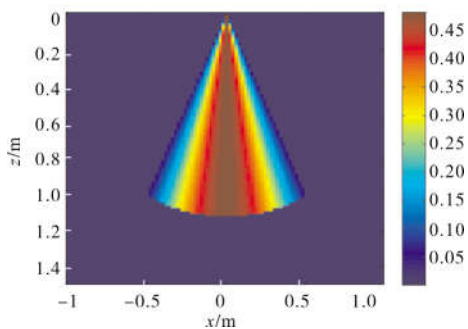


图 12 目标投影平面上各点的漫反射率

Fig.12 Diffuse reflection of the points on the target-projection plane

由于目标表面粗糙，回波信号存在随机相位，可以假设该相位分布是 $0\sim 2\pi$ 范围内的平均分布，如图 13 所示。

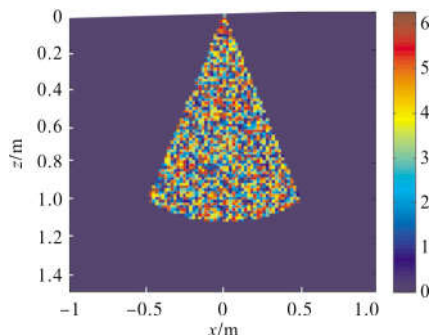


图 13 目标投影平面上各点在 $0\sim 2\pi$ 范围内的随机相位

Fig.13 Radom phase between 0 and 2π on the target-projection plane

发射锁模激光光场与目标上各点发生作用，目标上每一点都会产生不同的回波光场，回波信号是目标上所有点产生的回波光场的相干叠加。根据公式(1)，发射锁模光场为 $\tilde{E}(t)$ 。如果目标投影上第 k 个散射点的距离信息为 r_k ，如图 11 所示，目标的多普勒频移为 $\Delta f_{dop,k}$ ，随机相位为 $\phi_{r,k}$ ，则该点产生的回波光场为：

$$\tilde{E}_k(t) = b_k \tilde{E} \left(t - \frac{2r_k}{c} \right) \exp \left(i 2\pi \frac{2r_k}{\lambda} \right) \times \exp(i 2\pi \Delta f_{dop,k} t) \exp(i \phi_{r,k}) \quad (5)$$

式中： b_k 是该点的反射率。所以回波信号为目标投影上所有点的回波光场的叠加：

$$E_r(t) = \text{Re} \{ \tilde{E}_k(t) \} = \text{Re} \left\{ \sum_k \tilde{E}_k(t) \right\} \quad (6)$$

式中： $E_r(t)$ 即为回波信号，在前面所建立的目标模型基础上得到的回波信号波形如图 14 所示。

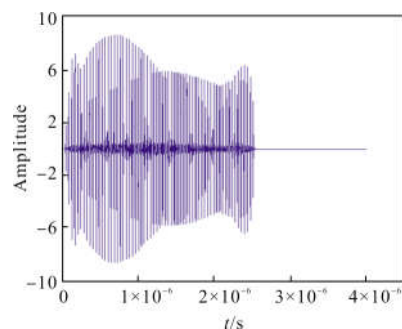


图 14 根据目标模型仿真的回波信号波形 $E_r(t)$

Fig.14 Simulated return signal $E_r(t)$ based on the target model

4 匹配滤波解卷积

回波信号与调制后的本振信号相干叠加，得到回波的拍频信号为：

$$i_l(t) = \frac{q\eta}{hv} \left(\frac{c\epsilon_0}{2} \right) \times$$

$$2\text{Re} \left\{ \int_{A_{\text{detector}}} \tilde{E}_r(\rho, t) \times \tilde{E}_{L0}^*(\rho, t) \exp[i(\omega_{L0} - \omega_r)t + i\theta] d^2\rho \right\} \quad (7)$$

式中： ω_{L0} 和 ω_r 分别为本振光与回波信号频率； θ 是二者之间的不确定相位。回波拍频电流经过放大器和带通滤波器进行信号的放大和滤波后分成两路，分别与中频频率的余弦和正弦信号相乘，然后通过低通滤波，得到基带的两路 $I&Q$ 信号，两路 $I&Q$ 信

号通过 A/D 采样器后, 得到基带的 $I&Q$ 数字信号供计算机进行后续匹配滤波处理。

目标信号 $s_o(t)$ 与发射信号 $s_{tran}(t)$ 相互作用得到回波信号 $s_{rec}(t)$ 的过程可用卷积描述:

$$s_{rec}(t) = s_{tran}(t) \otimes s_o(t) + n(t) \quad (8)$$

目标 $s_o(t)$ 中包含了目标的距离与 Doppler 频移信息, 根据公式(8)可以看出求 $s_o(t)$ 的过程实际上就是卷积的逆过程。多种滤波器都可用于解卷积, 如 Wiener 滤波器、匹配滤波 MF 等。产生匹配滤波器的解卷积条件是接收到的回波信号的载噪比 (CNR) 达到最大值。MF 的具体形式为:

$$Q = S_{tran} / |N|^2 \quad (9)$$

式中: S_{tran} 是 $s_{tran}(t)$ 的 Fourier 变换; N 是 $n(t)$ 的 Fourier 变换。利用该滤波器可以达到最大载噪比输出, 具体过程如下:

(1) 对图 7 所示的 OPM 信号按 40 ns 时间分段, 将每段填零至 2 的整数次幂点。

(2) 对每段信号做 FFT, 并取复共轭。

(3) 将接收回波信号分段, 回波信号的 I 和 Q 两路信号共同组成回波信号复解析形式, 并对每一段回波信号做 FFT。

(4) 将 OPM 信号 FFT 的复共轭与复解析回波信号的 FFT 相乘, 然后做 IFFT, 得到 MF 的输出信号。MF 输出信号实部的瀑布图如图 15 所示。

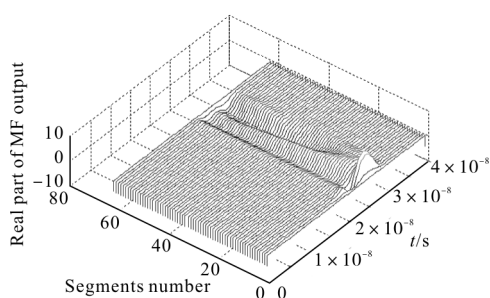
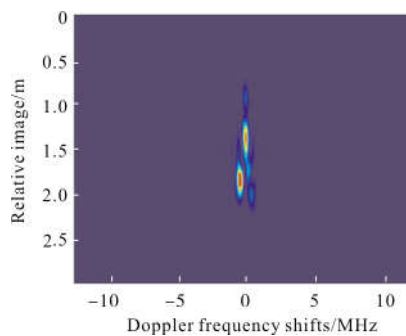


图 15 MF 输出信号瀑布图

Fig.15 Waterfall plot of the MF output signal

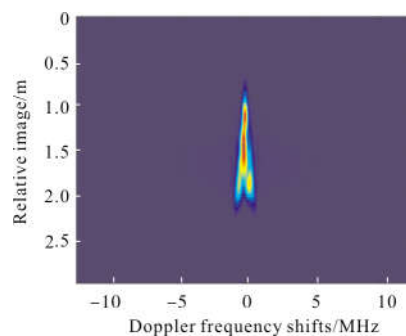
图中每条线代表一段时间信号, 一共有 63 个信号片段。每个信号片段都有 40 ns 的时间长度。不同信号片段上同一时间坐标的点来源于目标上沿光传输方向所有距离相等点产生回波信号。因此拥有同一时间的 63 各点组成一个序列, 每点间隔 40 ns, 对该序列做 Fourier 变换, 可以得到目标同

一相对距离的点的有多普勒频移谱, 然后进行 R-D 成像, 如图 16 所示。



(a) 单帧

(a) Single frame



(b) 10 帧叠加平均

(b) 10 frames accumulation averaging

图 16 转动目标的距离-多普勒成像

Fig.16 R-D imaging of a rotation target

可看出多帧叠加有利于 R-D 成像质量提高。N 帧叠加之后, 图像 SNR 最高可以提高 N 倍。

5 成像能力分析

此处讨论锁模激光脉冲序列的大包络 (后面称为大脉冲) 长度与目标转速之间的关系。大脉冲长度决定了系统的速度分辨率, 脉冲长度越长, 速度分辨率越高, 能够探测到的目标最低转速就越小, 不同脉冲宽度对应的成像效果如图 17 所示。

图 17(a) 表明, 由于速度分辨率过低, 多普勒展宽没有意义, R-D 图像也无法分辨出目标的形状。图 17(b) 示出, 虽然情况有所好转, 但 R-D 图像中目标的形状并不明显, 速度分辨率仍不足。从图 17(c) 可以看出, 当脉宽增大到 10 μ s 后, 大脉冲中锁模脉冲个数足够多, 所得到的 R-D 图像细节清晰, 目标的锥形形状明显。

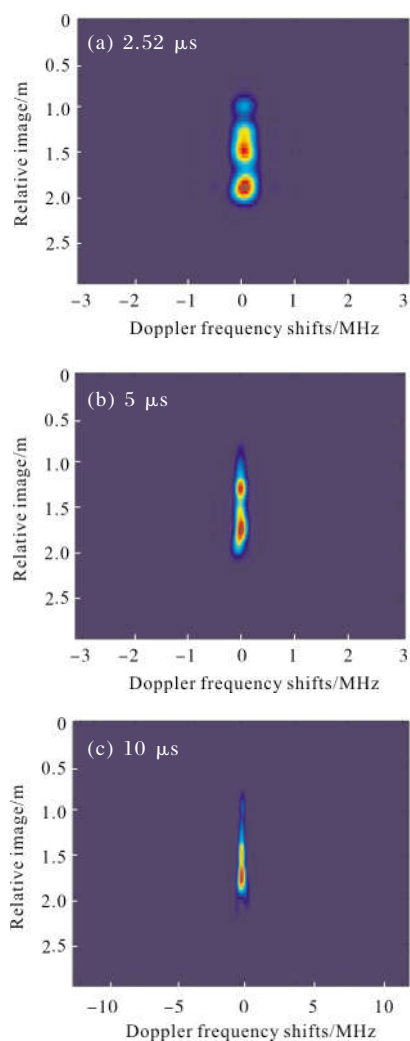


图 17 3 rad/s 转动目标 R-D 图像

Fig.17 R-D image of a target with 3 rad/s rotational rate

图 18 为转速为 10 rad/s 时，大脉冲脉宽为 2.5、5、10 μs 时，得到 5 帧平均后的目标 R-D 图像。与图 17 类似，图 18 中也表现了大脉冲脉宽越大，速度分辨率越高，R-D 图像质量越精细的特性。

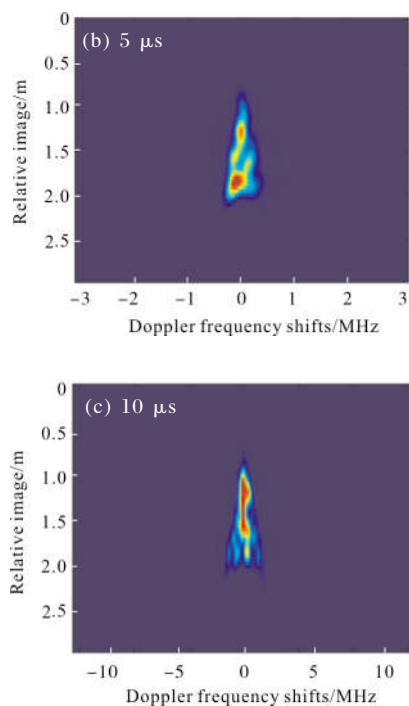
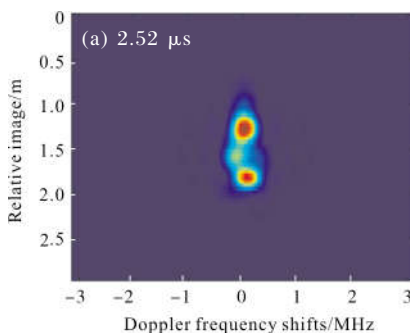


图 18 10 rad/s 转动目标 R-D 图像

Fig.18 R-D image of a target with 10 rad/s rotational rate

由图可知，目标转速越高，引起的多普勒频率移动越大，在 R-D 图中频率轴方向出现展宽，成像显示的等腰三角形的底边逐渐扩大。图 19 显示了 20 rad/s 转速下的 10 帧平均 R-D 成像效果，表现出对目标良好的成像效果。

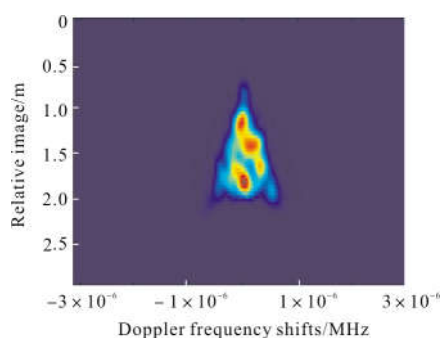


图 19 转速 20 rad/s, 5 μs 大脉宽, 10 帧叠加平均 R-D 成像图
Fig.19 Ten frames averaging R-D image of a target with 20 rad/s rotational rate with a macro pulse width of 5 μs

由图可知，在相同的目标转速、脉宽情况下，成像叠加帧频数越高，图像的信噪比越高，显示出等腰三角形分布的成像特征越明显，适合应用于自旋弹道目标识别等领域。

6 结 论

论文针对基于锁模 CO₂ 相干激光雷达的 R-D 成像开展仿真分析。建立了锁模脉冲串激光模型, 利用频域上的分段操作, 消除了频谱混叠, 并结合自旋运动中的目标模型开展回波信号的匹配滤波处理, 最后通过构建时间序列瀑布图, 并用各时间片段做频谱分析, 获得了目标的 R-D 图像, 并给出了含有相位噪声情况下, 自旋目标在不同转动角速度以及不同脉冲回波数叠加 R-D 图的仿真结果, 并对 R-D 图的成像识别效果进行了分析。此文为开展远程 R-D 成像激光雷达系统研制奠定理论和仿真基础。

参考文献:

- [1] Hu Yang, Zhu Heyuan. 1.55 μm all-fiber coherent Doppler lidar for wind measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): S130001. (in Chinese)
胡杨, 朱鹤元. 1.55 μm 全光纤相干多普勒激光测风雷达 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(S1): S130001.
- [2] Kachelmyer A L. Range-Doppler imaging with a laser radar [J]. *The Lincoln Laboratory Journal*, 1990, 3(1): 87-118. (in Chinese)
- [3] Hao Wenze, 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)
- [4] Dr Paul Konkola1, Charles Crandall, Tim Georges, et al. Pushing the envelope: HI-CLASS range and range-rate[C]// Proceedings of the 2005 AMOS Technical Conference, 2005.
- [5] Mosley D E, Matson C L, Czyzak S R. Active imaging of space objects using the HI-CLASS (high performance CO₂ lidar surveillance sensor) laser system [C]// Proceedings of SPIE, 1997, 3065: 52-60.
- [6] Corbett F, Groden M, Dryden G, et al. The digital imaging processing system for a high powered CO₂ laser radar[C]// Proceedings of SPIE, 1996, 2847: 35-57.
- [7] Bankman I. Analytical model of Doppler spectra of coherent light backscattered from rotating cones and cylinders [J]. *J Opt Soc Am A*, 2000, 17(3): 465-476.
- [8] Gong Yanjun, Wu Zhensen. Analytical model of range - Doppler imaging of rotating cylinders and cones [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(9): 6227-6235. (in Chinese)
宫彦军, 吴振森. 转动圆柱和圆锥的激光距离多普勒像分析模型[J]. 物理学报, 2009, 58(9): 6227-6235.
- [9] Yu Wenying, An Liqian. Analytical model of range-doppler of cone-cylinder combination [J]. *Acta Phys Sin*, 2012, 61(21): 218703. (in Chinese)
于文英, 安里千. 锥柱复合目标激光距离多普勒像分析模型[J]. 物理学报, 2012, 61(21): 218703.
- [10] Osche G R. Optical Detection Theory for Laser Applications [M]. New York: Springer, 2002.