

新型多普勒成像激光雷达原理设计与仿真

姜成昊, 杨进华, 张丽娟, 李 祥

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 采用相干多普勒测量手段获取目标面型变化信息具有明显的优势。基于激光多普勒效应, 设计一套多普勒成像激光雷达实验系统, 同时引入 APFFT 全相位测相处理思路对外差信号进行时频分析, 抑制频谱泄露, 减小噪声对测量结果的影响, 获取高测量精度信号时频曲线。在 MATLAB 软件 simulink 交互式仿真集成环境中进行过程仿真, 证明其可以实现对扫描空间高分辨率、高精度的成像。实验结果表明: 该系统能够较好还原被测目标表面特性, 为激光雷达实现对目标高分辨率与高灵敏度成像提出新的解决思路。

关键词: 多普勒成像; 激光雷达; 高分辨雷达; 外差探测

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)02-0411-06

Schematic design and simulation of new Doppler imaging laser radar

Jiang Chenghao, Yang Jinhua, Zhang Lijuan, Li Xiang

(School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The means of coherent Doppler has obvious advantages to obtain the target range change. Based on laser Doppler effect, designed a set of imaging Doppler lidar experimental system. Introduction all phase measurement phase treatment consideration to do time-frequency analysis for heterodyne signal, restraining spectral leakage and reducing the impact of noise on the measurement results, a high measurement accuracy signal frequency curve will be acquired. The process simulation in the simulink interactive simulation integration environment which comes with MATLAB software, to prove it can achieve higher resolution, high precision imaging for scan space. The experimental results show that the system was able to restore the surface of target feature preferably. It plays a promoting role in high-resolution and high-sensitivity imaging of the target for lidar.

Key words: doppler imaging; laser radar; high-resolution radar; optical heterodyne detection

收稿日期: 2013-06-10; 修订日期: 2013-07-25

基金项目: 吉林省科技发展计划(201150103)

作者简介: 姜成昊(1987-), 男, 博士生, 主要从事激光雷达、视觉检测技术方面的研究工作。Email: jiangch412@126.com

导师简介: 杨进华(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事视觉检测方面的研究工作。Email: yangjh@cust.edu.cn

0 引言

激光雷达工作频率相比微波雷达高出 5 个数量级,这使得其探测的结果在空间分辨率和探测灵敏度上比传统雷达要高出相应的数量级。当雷达与被测目标间存在着相对运动时会产生多普勒频移现象,通过对多普勒频移信号的分析计算可以实现对目标运动状态的测量。多普勒激光雷达具有实用性、高分辨率和远距离三维观测等优点,是其他探测手段难以比拟的^[1],已经广泛应用在对液体流速、风速测量等领域,并取得显著应用效果。

现下对成像激光雷达的研究主要集中在脉冲及相位测距式扫描成像,但在测量距离、成像分辨率中存在较多缺陷,发展中的激光合成孔径成像雷达也存在较多的技术限制。文中将激光多普勒测量技术应用于激光三维成像,设计一套多普勒成像激光雷达实验系统,利用外差探测手段实现对目标多普勒信号回波的检测,并对差频信号做全相位处理后进行时频分析,实现高精度数据分析,精确提取信号携带面型信息^[2]。通过仿真及实验显示该方式能够实现高速成像、高图像分辨率以及高的测距精度,可较好的还原目标的表面特性。由于激光外差技术属于量子限技术(10^{-11} W),比直接探测(10^{-9} W)高两个数量级以上,在激光探测中拥有更大的应用前景^[3],为远距离目标成像提供了新的解决思路和依据,具有很大的应用潜力。

1 探测原理分析

1.1 外差探测原理

雷达发射频率为 f 的激光对目标进行照射,当目标与探测器之间沿光轴方向存在相对运动,接收信号将产生一个与相对运动速度有关的频移量^[4-5]:

$$f_{IF} = f' - f \approx \frac{2v}{c} f = \frac{2v}{\lambda} \quad (1)$$

式中: f_{IF} 为差频项; λ 为入射光波的波长; v 为目标在雷达探测方向上的瞬时速度。

为了提取信号光中包含目标信息的多普勒信号通过外差手段对信号进行接收采样。设信号光 $E_s(t)$, 本振光 $E_l(t)$, 具有相同的偏振态,当它们满足一定夹角的情况下打在光电探测器上将发生相干现象,由

于光电探测器的平方率效应,产生的总光强电流如下^[6,7]:

$$I_{IF} = \frac{\eta_d q_e}{h\nu} \int_{\text{area}} \frac{1}{2} |E_l(t) + E_s(t)|^2 dx' dy' = \frac{\eta_d q_e}{h\nu} \left[\frac{1}{2} A_d \overline{E_l^2}(t) + \frac{1}{2} A_d \overline{E_s^2}(t) + A_d \sqrt{\eta_h} \overline{E_l E_s} \cos[2\pi(f_s + f_l)t + (\varphi_s + \varphi_l)] + A_d \sqrt{\eta_h} \overline{E_l E} \cos[2\pi f_{IF}t + (\varphi_s - \varphi_l)] \right] \quad (2)$$

式中: η_d 为混频效率; φ_s 、 φ_l 与 f_s 、 f_l 为信号光与本振光相位与频率; h 为普朗克常数; ν 为光频。由带通滤波器将第四项分离出来并通过 FFT 变换可以求出 f_{IF} 的取值。

1.2 多普勒成像激光雷达设计分析

采用 CW 调制窄线宽激光对目标进行扫描探测时,被测目标可以看做相对光源以不同的速度进行运动,会带来不同时刻与相对速度有关的连续的多普勒时频曲线。由公式(1)可以计算任意探测目标点相对探测光源的瞬时速度,通过对速度曲线积分可以获得扫描时间内目标各点的相对位置。图 1 显示了不同探测时刻对应目标的距离,其径向速度根据 $R(t)$ 相对时间的倒数计算,而速度的取值直接对应回波信号的多普勒频率的变化。在多普勒扫描探测中只需要对信号解调、整形、细分、计数即可将目标的位置信息完整的提取出来^[8]。

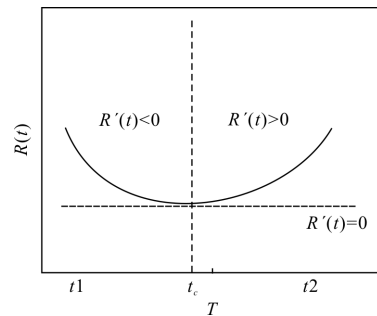


图 1 目标距离相对时间图

Fig.1 Map of target distance relative time

依据以上分析设计多普勒成像激光雷达系统结构如下图 2 所示。

出射激光经分束器分为两束,一路经正弦调制做相位测距获取初始时刻目标距离并对多普勒信号正负取值进行校正,另一路做相干探测。对于相干探

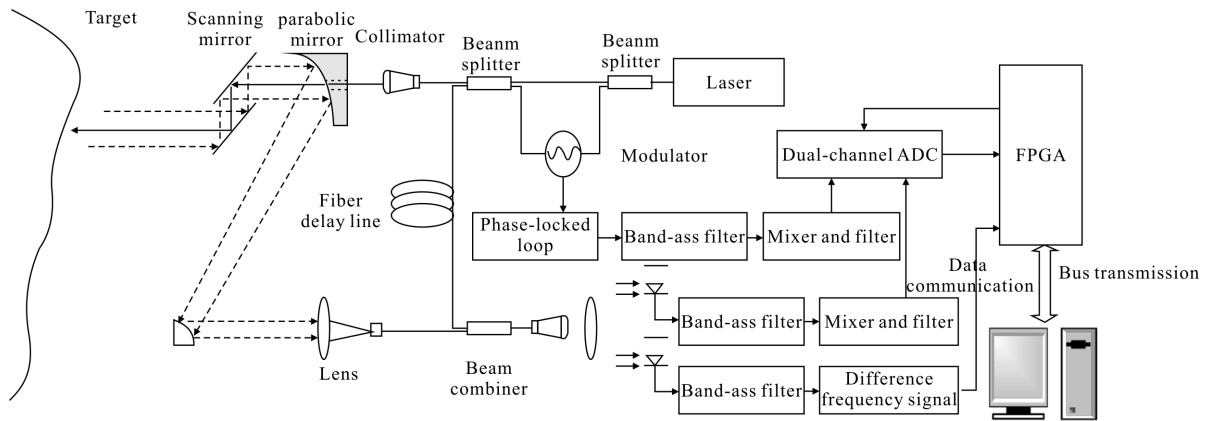


图2 多普勒成像激光雷达设计原理

Fig.2 Design principle of Doppler imaging lidar

测光路,激光信号经过 9:1 光纤分束器将激光分为两束,10%能量出射光作为本振信号,为了补偿激光在传播过程中带来的线宽抖动,接入一定长度的光线延迟线进行距离补偿。90%能量出射光作为探测光经扫描装置对目标进行扫描探测,回波信号经接收天线接收并经光纤耦合系统耦合至光纤,由光纤合束器实现与本振光的合束。合束后光信号经汇聚透镜由光电探测器接收,经过 A/D 与带通滤波器后,获取带有被测目标表面信息的差频信号。通过对差频信号的处理与分析获取扫描目标面型形变量。

由于相干探测本身存在技术限制,测量精度只能维持在一定范围内。探测过程中大气分子的吸收、悬浮颗粒的散射以及湍流会使信号光功率迅速衰减,并严重破坏光源的相干性,随着测量时间的增加,通过积分获取的相对位移误差也会呈现积累的效果。实际测量中多普勒信号的正负取值较难实现判定,为此在系统中添加相位测距系统,在扫描过程中对目标距离信息实时采样,获取目标初始距离的同时对多普勒信号走向进行分析,并与差频信号进行拟合,补偿测量过程中产生的误差,获取扫描目标高分辨三维距离像。

多普勒成像激光雷达中,精确提取信号频谱信息直接影响测量结果的准确度。在实验过程中,软目标及周围环境影响较强的情况下,信号会受到一定的噪声污染,如图3所示。

为了精确计算信号包含频谱信息,在此引入全相位法对获取差频信号进行处理后通过短时 FFT 处理精确计算的信号时频图。采用全相位法分析波

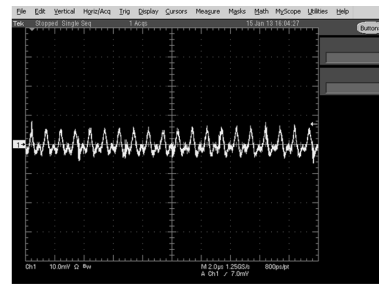


图3 实验获取多普勒差频信号

Fig.3 Design principle of Doppler imaging lidar

形时频信息原理如下:

根据卷积窗的不同,全相位数据预处理可分为无窗、单窗和双窗三种类型。如无窗全相位数据预处理流程解释如下^[9]。

设 $2N-1$ 个点的离散信号表示为:

$$S=[x(-N+1), x(-N+2), \dots, x(0), x(1), \dots, x(N-1)]$$

含有中心点 $x(0)$ 的 N 个 N 维向量:

$$s_0=[x(0), x(1), \dots, x(N-1)],$$

$$s_1=[x(-1), x(0), \dots, x(N-2)],$$

...

$$s_{N-1}=[x(-N+1), x(-N+2), \dots, x(0)]$$

将每个向量进行循环移位,把 $x(0)$ 移到首位,移动后的 N 维向量变为:

$$s'_0=[x(0), x(1), \dots, x(N-1)],$$

$$s'_1=[x(0), x(1), \dots, x(-1)],$$

...

$$s'_{N-1}=[x(0), x(-N+1), \dots, x(-1)]$$

则全相位数据向量可以表示为:

$$S_{ap} = \sum_{N=0}^{N-1} S'_N \tag{3}$$

对于向量 $s_i(n)$, 设其傅里叶变换为 $S_i(k)$, 则 $s_i'(n)$ 的傅里叶变换为: $S_i'(k) = S_i(k) e^{j \frac{2\pi ki}{N}}$, 根据傅里叶变换的线性性质可以推出全相位数据的傅里叶变换为:

$$S_{ap}(k) = \sum_{i=0}^{N-1} S_i(k) e^{j \frac{2\pi ki}{N}} = \sum_{i=0}^{N-1} \left[\sum_{n=0}^{N-1} s(n-i) e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} \right] e^{j \frac{2\pi ki}{N}} \quad (4)$$

对于获取任意一段差频信号全相位数据傅里叶变换为:

$$\begin{aligned} S_{ap}(k) &= \frac{A}{2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \left(\frac{e^{j(2\pi f(n-i)T/N + \varphi_i)}}{+e^{-j(2\pi f(n-i)T/N + \varphi_i)}} \right) \cdot e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} e^{j \frac{2\pi ki}{N}} = \\ &= \frac{A}{2} e^{j\varphi_i} \sum_{i=0}^{N-1} e^{j \frac{2\pi}{N} (k-fT)i} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j \frac{2\pi}{N} (k-fT)n} + \\ &= \frac{A}{2} e^{-j\varphi_i} \sum_{i=0}^{N-1} e^{j \frac{2\pi}{N} (k+fT)i} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j \frac{2\pi}{N} (k+fT)n} = \\ &= \frac{A}{2} e^{j\varphi_i} \frac{\sin^2 [\pi(k-fT)]}{\sin^2 [\pi(k-fT)/N]} + \\ &= \frac{A}{2} e^{-j\varphi_i} \frac{\sin^2 [\pi(k+fT)]}{\sin^2 [\pi(k+fT)/N]} \quad (5) \end{aligned}$$

实数序列的全相位频谱成对称分布, 对于 $k < N/2$ 部分, 各谱线的幅度为:

$$A_{1k_{ap}} = \frac{A}{2} \frac{\sin^2 [\pi(k-fT)]}{\sin^2 [\pi(k-fT)/N]} \quad (6)$$

而原始信号傅里叶变换为:

$$\begin{aligned} S_1(k) &= \frac{A}{2} e^{j\varphi_i} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j \frac{2\pi}{N} n(fT-k)} = \\ &= \frac{A}{2} e^{j[\varphi_i + \frac{N-1}{N} \pi(fT-k)]} \cdot \frac{\sin [\pi(fT-k)]}{\sin [\pi(fT-k)/N]} \quad (7) \end{aligned}$$

其谱线的幅值为:

$$A_{1k} = \frac{A}{2} \frac{\sin [\pi(fT-k)]}{\sin [\pi(fT-k)/N]} \quad (8)$$

对比公式(6)、(8), 全相位谱分析法幅度谱的包络为传统频域数字鉴相法的平方, 因此其主谱线更加突出, 旁瓣衰减更大, 更好的还原目标多普勒信号频谱特性, 抑制频谱泄漏。

对信噪比 10 dB 的信号进行全相位谱分析, 采用 hanning 窗进行初始数据处理, 获取原始信号(见图 4(a))及其频谱(见图 4(b))与全相位数据(见图 4(c))以及全相位数据频谱线图见图 4(d))如图 4 所示。

对信号做全相位处理后只能获取该段信号的谱线分布, 为了提取整段扫描时间内信号频率时变信

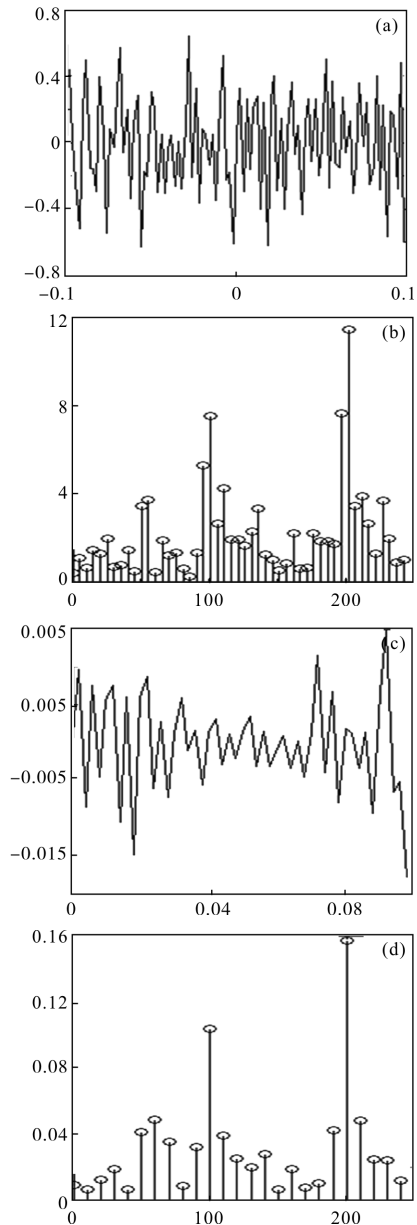


图 4 原始回波信号及全相位信号频谱图

Fig.4 Original echo signal and APFFT signal spectrum

息, 可以根据目标特性以及测量精度的需求选择合适的窗口大小对信号做分段全相位数据处理, 对处理后的全相位离散信号做短时傅里叶分析即可计算出探测信号的时频曲线。相比传统能量重心法, 采用该方法频率的计算精度可获得 0.01~0.001 级频率分辨率的改善, 能够准确提取出每个采样点的中心频率。通过全相位处理与相位测量数据分析有效处理探测过程中软目标对探测结果的影响, 适用于存在强干扰频率的场合。

实际应用中, 单频激光光源能够保持在千赫

兹甚至百赫兹量级的线宽,在短时间通过光纤延迟线其线宽可以达到几十赫兹量级,理论上采用多普勒成像激光雷达在低速扫描可以达到微米量级甚至更高的探测精度。由于信号处理存在误差,随着扫描速度的增加其测量精度降低趋势,但相对速度达到100m/s也能达到分米量级的测量精度。

2 基于 SIMULINK 雷达成像仿真

通过对多普勒成像激光雷达原理的研究,在 MATLAB 软件 simulink 环境中对多普勒成像激光雷达成像过程进行仿真。简化仿真过程,对探测目标采取一维扫描,选取如图 5 中所示曲面作为扫描目标进行扫描成像,仿真参数设定见表 1。

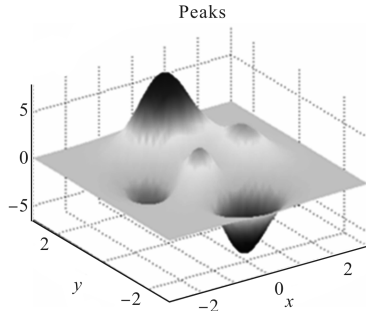


图 5 仿真目标

Fig.5 Simulation target

表 1 Simulink 仿真参数表

Tab.1 Simulation parameters table

Parameter name	Parameter values
Start distance/m	50
Wavelength of modulation wave/m	200
Wavelength of laser source/nm	1 550
Simulation time/s	6.1

通过 simulink 建立如下仿真模型见图 6,并将仿真参数代入模块中。模型上半部分为激光相位测距系统,将带有相位延迟的回波信号与原始信号通过 Complex phase difference 模块实现鉴相,获取初始探测距离。模型下半部分为多普勒频移探测处理模型,由 subsystem 反射目标多普勒信号,并通过短时 FFT 分析模块做时频分析得到如图 7 所示信号。由于探测器与信号处理电路本身等原因引入大量随机噪声,在低通滤波器模块中通过 Fir 滤波器滤除系统与噪声信号,获得如图 7 所示的信号图。

对处理得到的速度曲线由积分器进行积分获取目标三维信息,最后与相位测距系统初始距离值相加获取目标距离信息曲线见图 8,目标测量距离在 49~52m 内。仿真结果符合被测面特性,对于系统自身

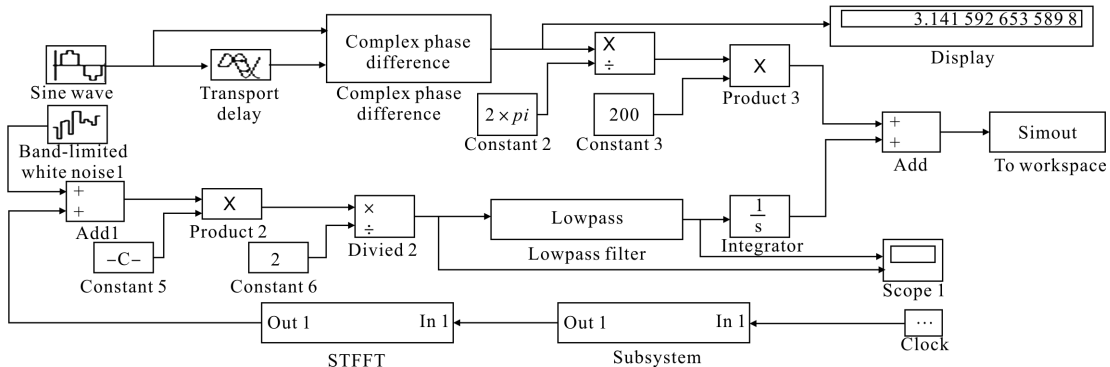


图 6 Simulink 仿真模型

Fig.6 Simulation model of simulink

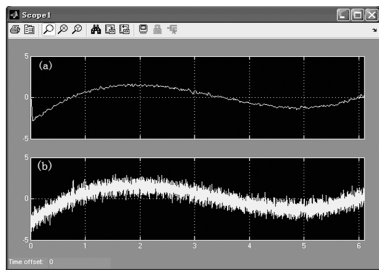


图 7 滤波后和滤波前的信号图

Fig.7 Signal diagram before and after filtering

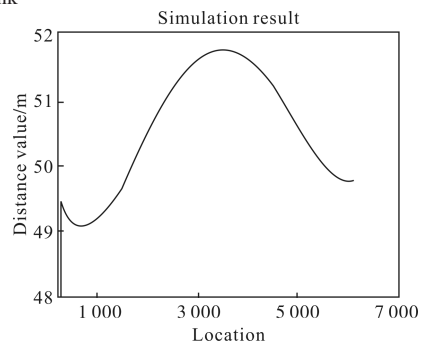


图 8 仿真结果

Fig.8 Simulation results

等因素引起的信号随机噪声现象,在多普勒扫描成像过程中对测量结果不产生积累效应。

3 实验分析

依照图 2 中的系统结构搭建实验平台,激光器选取 1 550 nm 线偏振窄线宽激光器,线宽优于 3 kHz。将待测目标放置在匀速运动的位移平台中,调整光学天线与出射激光光轴使其共轴。由于回波信号混频设计在单模保偏光纤合束器中实现,为了尽量增大空间光耦合进光纤效率,实验采用非球面透镜实现对空间光接收与单模光纤耦合,探测器输出差频信号通过 AD 采样、滤波获取目标多普勒频移信号。

为了验证系统对目标的成像特性,在实验室条件下对具有一定弯曲半径的纸板进行探测实验。电控位移台带动被测目标实现一次一维运动。载波与本振光相干后获得差频信号,经全相位信号数据处理后对处理信号做短时 FFT 分析获取见图 9 所示信号时频曲线。由于相对运动产生的多普勒信号不经过特殊计算分析无法确定多普勒信号的正负取值,但通过上图可以明显看出在 0.7 s 左右信号出现偏转,为了正确计算出多普勒信号走向,通过对该时间前后相位信号进行解调可以推出信号向相反方向移动。还原目标表面特性曲线如图 10 所示。

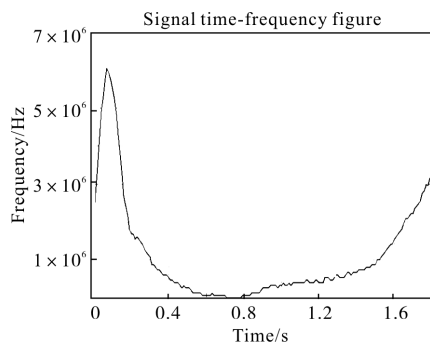


图 9 信号时频图

Fig.9 Signal time-frequency map

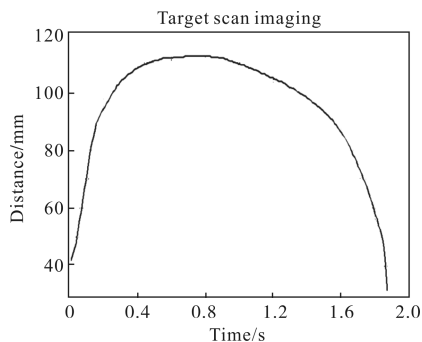


图 10 目标表面信息

Fig.10 Target surface information

测量结果符合目标表面特性,较好还原被测目标面型信息。

4 结论

采用激光相干探测提取扫描目标时产生的多普勒频移信号,并采用 APFFT 对测量信号进行处理分析,进而获取目标的距离像。通过该方法可以实现对目标面型的高精度测量,并且有效抑制存在强干扰情况下频谱泄露,具有良好的环境适应性。在真实运动过程中,激光产生的回波都要经过多次反射,相互干涉,合成,这个过程是相当复杂的过程,而且环境和探测器本身的影响,也会产生大量的噪声信号,在实际操作和分析过程中,还需要不断的进行改进和完善。

参考文献:

- [1] Chanin M L, Garnier A, Hauchecorne A, et al. A doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere [J]. *Geophysical Research Letters*, 1989, 16(1):1273-1276.
- [2] Yao Jinbin, Wang Mingjun, Wu Zhensen. Design principle of laser range Doppler imaging radar system based on detecting space target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35 (4): 445-448. (in Chinese)
- [3] Meng Zhaohua, Hong Guanglie, Hu Yihua, et al. Research on chirped amplitude modulation coherent lidars [J]. *Acta Optica sinica*, 2009, 30(8): 2446-2450. (in Chinese)
- [4] Bassem R Mahafza, Atef Z Elsherbeni. Matlab Simulations for Radar Systems Design [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- [5] Sun Yang, Yuan Shuai, Wu Qian, et al. Laser coherent detection on Micro-Doppler effect of rotational target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1054-1058. (in Chinese)
- [6] Zhang Heyong, Peng Shuping, Zhao Shuai, et al. Experimental research of heterodyne velocity measurement for non-cooperative rotatable target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 784-790. (in Chinese)
- [7] Peng Renjun, Wu Jian, Yang Chunping, et al. Synthesizing aperture in optics with interferometric imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 22(3): 355-359. (in Chinese)
- [8] Zhang Xiaoyuan, Hong Xin, He Shunzhong, et al. Study on measurement technique of scattering-surface displacement utilizing laser doppler effect [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, 27(8):751-755. (in Chinese)
- [9] Wang Zhaohua, Huang Xiangdong, Yang Wei. The measuring phase method of all-Phase FFT [J]. *World SCI-Tech R&D*, 2007, 29(4): 27-32. (in Chinese)