

基于相干探测的动目标多普勒频谱识别

彭树萍^{1,3} 陈涛¹ 于洪君¹ 赵帅^{1,2} 张合勇^{1,2*}

¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033
² 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033
³ 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 激光相干探测由于其高灵敏及抗干扰特性,在现代精密检测中应用逐渐广泛。由于目标二维信息更能反映目标特性,利用 PCI8522 采集卡与振镜扫描控制信号进行模拟量触发源(ATR)触发同步,快速获取目标二维多普勒频谱。对室内裸露以及伪装网覆盖的旋转漫反射目标进行二维频谱提取,二维频谱图为 31 pixel×31 pixel,目标存在区的频谱范围在 3~7 MHz 之间,通过二维频谱图能对典型目标轮廓进行识别。对图像恢复算法中引入的噪声进行分析,结果表明:其中目标覆盖区中轴线附近噪声概率较大,主要由 200 kHz 的频谱门宽引起;另一类噪声为背景无多普勒频移的 5 MHz 中心信号被频谱门宽限制所致,可作为目标轮廓衬底,无需抑制。该研究为激光相干探测在动目标伪装识别中的应用奠定基础。

关键词 测量; 频谱识别; 数据采集卡; 频谱门; 相干探测

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1208008

Doppler Frequency Spectral Discrimination of Moving Target Based on Coherent Detection

Peng Shuping^{1,3} Chen Tao¹ Yu Hongjun¹ Zhao Shuai^{1,2} Zhang Heyong^{1,2}

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun, Jilin 130033, China
³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Laser coherent detection has applied widely in the area of modern precise detection due to its high sensitivity and anti-disturbance property. The two-dimensional (2D) image information has more ability to reflect the property of the target. Therefore, the PCI8522 data acquisition (DAQ) card and the scanning galvanometer are combined together through analog trigger (ATR) trigger synchronizing for the purpose of receiving the Doppler frequency spectrum. The 2D frequency spectra are obtained for naked and camouflage net covered rotating diffuser, and the imaging size is 31 pixel×31 pixel. The Doppler frequency ranges from 3 MHz to 7MHz, and the target from the noisy background through the 2D frequency spectral image can be distinguished. The noise in the image processing is analyzed and the results are as follows: the area near the center axis of the target has large noise probability and the main reason is the frequency spectral gate with 200 kHz span. The other kind of noise comes from 5 MHz center frequency without Doppler frequency shift restricted by the frequency spectral gate, and there's no need to wipe off this kind of noises because it is the background of the useful information. This research can be the basis of the application of laser coherent detection in the field of moving target camouflage discrimination.

Key words measurement; frequency spectral discrimination; data acquisition card; frequency spectral gate; coherent detection

OCIS codes 120.1880; 120.5800; 280.3340; 040.3060

收稿日期: 2013-07-17; 收到修改稿日期: 2013-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(61205143)

作者简介: 彭树萍(1984—),女,硕士,助理研究员,主要从事激光光电系统自动控制技术方面的研究。

E-mail: pengshuping666@126.com

* 通信联系人。E-mail: yonghezhang1116@126.com

1 引 言

激光相干探测由于其高灵敏性和抗干扰等特点,在远距离目标跟踪、多普勒成像、伪装识别、地雷探测等方面具有广泛应用。早期的激光相干探测主要采用 CO₂ 激光作为发射光源,实现几百甚至上千千米目标的跟踪和多普勒成像,其典型系统为 20 世纪 80 年代麻省理工学院林肯实验室发展的 Firepond 系统以及 20 世纪 90 年代美国空军研究实验室开发的 HI-CLASS 空间目标监视系统^[1-2],其中 Firepond 的多普勒成像功能主要应用于弹道导弹真假弹头识别,通过目标的微多普勒信息进行识别,获得良好的实验效果;而 HI-CLASS 系统主要实现中低轨卫星高分辨成像,用于空间目标编目及测量,该系统在 2006 年后仍呈现诸多报道,现已转入实用阶段。上述两个主要系统的多普勒成像均采用反射层析重建技术,对空间目标进行距离分辨和多普勒分辨,不能直接用于角度分辨。近年来,利用激光相干探测对旋转目标进行多普勒鉴别的研究日益增多,所采取波段朝着短波方向发展^[3-9],主要用于弹道突防领域。另外,在近距离伪装识别及地雷

探测领域研究较多^[10-17],主要利用点阵扫描或线阵扫描方式,实现对目标的二维(2D)多普勒频谱解析,从而区分出具有不同运动或振动特性的伪装或埋藏目标。而国内在该方面研究较少,目前为止未见目标二维多普勒频谱识别的实验报道。

本文采用激光相干体制,基于全固态单频激光器、高速扫描振镜、PCI8522 数据采集卡(DAQ),实现动目标二维频谱快速提取,为后续搭建近距离伪装识别原理样机奠定技术基础。

2 实验原理

实验中转动目标为自行设计加工的旋转漫反射体,为了获得更大的漫反射面积,对该目标进行一定改装。由于目标本身具有旋转对称性,激光相干探测只能检测到与光束入射方向非正交的速度分量,因此,沿目标中轴线两侧将具有增大或减小的多普勒频移信息。实验中设两路声光调制器(AOM),一路正向调制 80 MHz,另一路逆向调制 75 MHz,在无运动目标多普勒频移信息时,干涉中频信号频率为 5 MHz。整个转动目标频谱识别实验原理如图 1 所示。

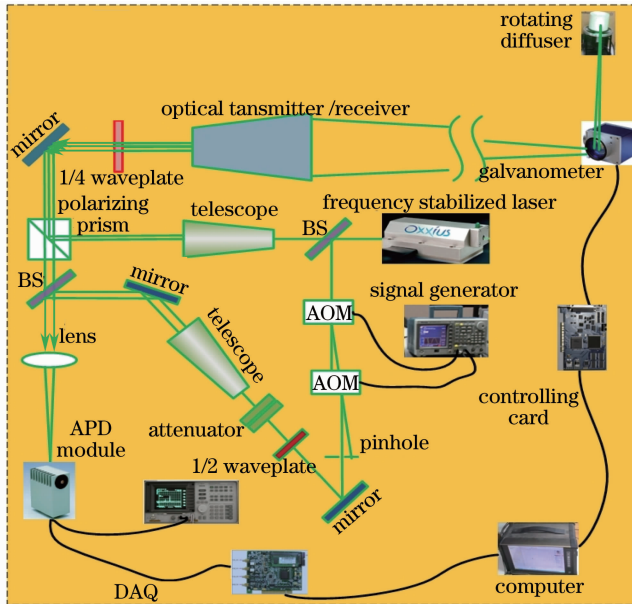


图 1 转动目标二维频谱识别原理图

Fig. 1 Schematic of frequency spectral discrimination for rotating target

如图 1 所示,窄线宽稳频激光出射激光分为两路,其中一路(本振光)经过两级 AOM 调制、1/2 波片、5 倍扩束镜、分束镜、透镜后,入射在雪崩光电二极管(APD)模块光敏感面;另一路光经过 5 倍扩束镜、偏振分光棱镜(BS)、1/4 波片、光学发射系统、光电扫描振镜后入射在旋转漫反射目标表面,目标反射信号原路返回,经过 BS 透射后,聚焦入射在 APD

模块光敏面,与本振光在 APD 表面发生混频,混频后的信号经 PCI8522 数据采集卡采集,将数据存储在上位机,同时上位机控制光电扫描振镜的扫描频率、视场等参数。通过将每个扫描点对应的数据进行快速傅里叶变换(FFT)分析,可得到相应空间位置的二维频谱分布。

3 双卡触发同步

实验中利用光电扫描振镜对目标进行二维空间点阵扫描,光束每指向一个固定位置,数据采集系统需要迅速记录对应位置的回波信号频谱信息,振镜扫描完成指定区域后,需进行相应数据处理并恢复

目标二维频谱信息。在此过程中需要实现扫描控制卡与 PCI8522 数据采集卡触发同步,主要利用振镜扫描控制卡输出信号作为采集卡触发信号,实现同步工作。所用扫描控制卡和 PCI8522 采集卡如图 2 所示。

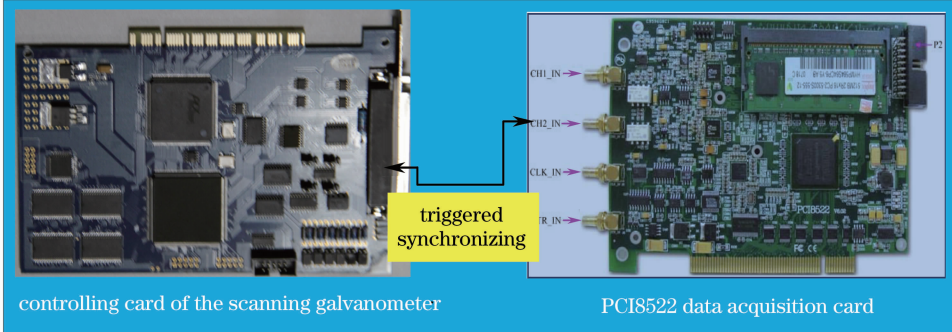


图 2 双卡同步示意图

Fig. 2 Schematic of the synchronizing for two PCI boards

由于 PCI8522 采集卡工作在外触发模式,其触发信号来自于扫描振镜控制卡输出。因此,首先介绍振镜扫描区及主要控制信号,振镜扫描区如图 3 所示。

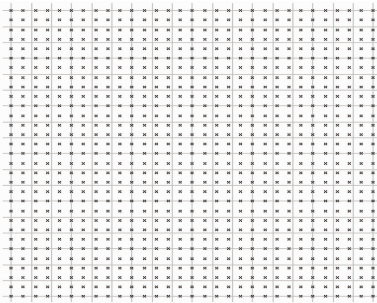


图 3 振镜扫描区域空间分布

Fig. 3 Scanning area of the scanning galvanometer

如图 3 所示,扫描区域点阵为 31 pixel × 31 pixel,全视场约为 35° × 35°,整个区域采用列扫描,每扫描一列结束,朝着相同方向进行第二列扫描,直至扫描结束,结束后扫描光斑停留在振镜左上角。根据扫描振镜原理可知,不同偏摆角度对应不同的驱动电压(模拟信号),由于振镜 X 和 Y 方向分别由两个独立偏摆电机驱动,Y 方向完成一次列扫,X 方向进行一次行扫,因此主要考虑 Y 方向的驱动信号变化即可。图 4 为扫描振镜列扫描控制信号。如图 4 所示,扫描振镜在列方向进行 31 点扫描,对应 30 个阶梯电压变化,将阶梯电压变化边沿(上升或下降均有)作为 PCI8522 采集卡外触发信号。扫描振镜在上述参数设置下,对应 31 个空间位置偏摆电压差值为 8047 mV,两点间电压跨距为 268 mV,

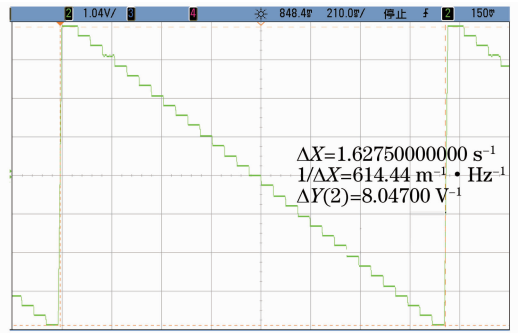


图 4 光电扫描振镜列扫描输出信号

Fig. 4 Output signal of photo-electric scanning galvanometer in Y direction

每个扫描点激光驻留时间为 50 ms,加上光束跳转时间,31 个扫描点对应总时间为 1.627 s,完成一次全幅扫描需要 50.5 s,由于所采用的扫描振镜为模拟控制,因此模拟信号的变化边沿实现对 PCI8522 采集卡触发,采集卡采集存储时间将影响扫描速度,实验中采集卡记录数据长度 5000 点,耗时约为 10 ms,因此,激光在每个扫描点驻留时间需大于 10 ms,实验中最高设置为 20 ms,此时能获得准确记录数据。如果将信号采集数据段减少,或优化程序设计,能将扫描频率提高到百赫兹,可在几秒内恢复出目标二维频谱图。

PCI8522 数据采集卡支持双通道,最高采样率为 80 MHz,转换精度为 12 bit,存储深度为 256 MByte,输入量程为 ±1 V 或 ±5 V。支持外部数字触发(DTR)、模拟触发(ATR)及软件触发;触发方向有上升沿、下降沿及双沿,该采集卡原理如图 5 所示。

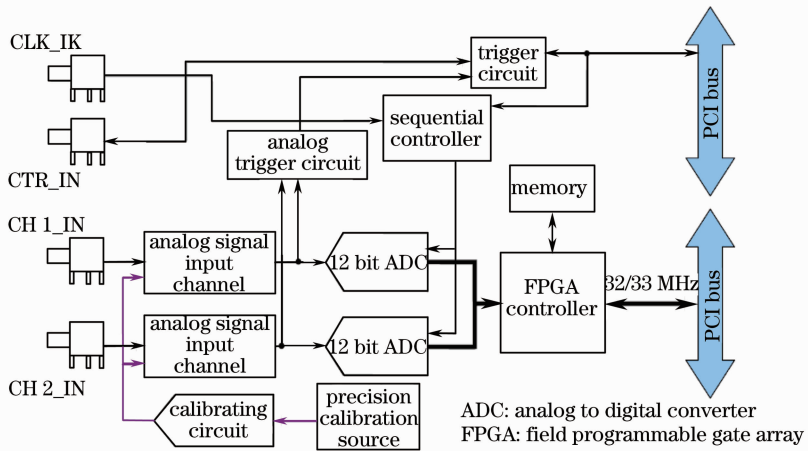


图 5 PCI8522 采集卡工作原理框图

Fig. 5 Schematic of data acquisition for PCI8522 board

由于研究中利用如图 4 所示的振镜扫描控制模拟信号作为 PCI8522 数据采集卡的外部触发信号,因此该采集卡工作在外部 ATR 触发模式,根据扫描方式可知,在每一列内的点与点之间跳变,对应于电压下降沿,在一行与另一行之间对应于电压跳变为上升沿,所以采集卡触发方向为双沿触发。

4 二维频谱提取

扫描振镜与 PCI8522 采集卡的协调工作,可获得光束在目标表面空间位置的有效覆盖以及对应每个位置的频谱,在每一个空间位置处,由于目标转动速度在激光径向方向速度分量不同,因此具有不同的多普勒频率移动信息。在目标表面不同位置所具有的不同频谱分布如图 6 所示。

实验中所用动目标转动速度 52 r/min,漫反射目标直径为 120 mm,在激光沿着目标切线方向入射时,具有最大多普勒频移±2.5 MHz。在不引起速度混叠情况下,该速度大小与识别效果无直接关系,因为系统设定的中心参考频率为 5 MHz,当目标无多普勒频移时,频谱尖峰位于 5 MHz 位置,一旦目标运动引起的频移大于 5 MHz,就不能确定目

标是朝着哪个方向运动,不过该中心频率可以根据实际情况设定,主要由两个 AOM 中心频率决定。图 6 中前者表示目标运动引起多普勒频率减小,后者表示目标运动引起多普勒频率增加。利用 PCI8522 采集卡与扫描振镜控制卡之间的触发同步,实现目标所在空间的二维频谱提取。研究中所用目标为交流伺服电机驱动的漫反射体,其转速可通过改变驱动电压进行调整,经过扫描可得两个不同旋转漫反射目标对应的二维频谱如图 7 所示。

由图 7 可知,由二维扫描获得的目标多普勒频谱分布能清晰反映目标的几何轮廓,在同一目标不同的空间位置,由于转速相同,旋转半径不同,因此在每一列纵向扫描中,凡目标存在的地方具有不同的线速度,造成的多普勒频移量不同,目标纵向几何中心线对应于光束垂直入射方向,因此不具有多普勒频移,所对应的谱峰值为 5 MHz。在目标存在的区域,频率变化范围在 3~7 MHz 之间。为充分显示激光相干探测在伪装目标频谱识别中的应用,对目标进行伪装网覆盖,处于伪装网覆盖的旋转漫反射目标如图 8 所示。

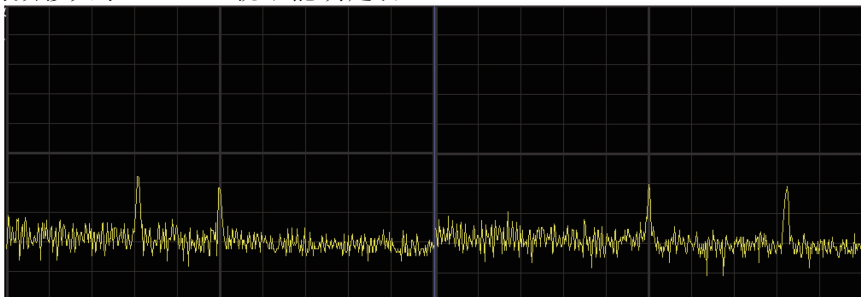


图 6 目标表面不同位置对应的频谱分布

Fig. 6 Frequency spectral distribution of target at different positions

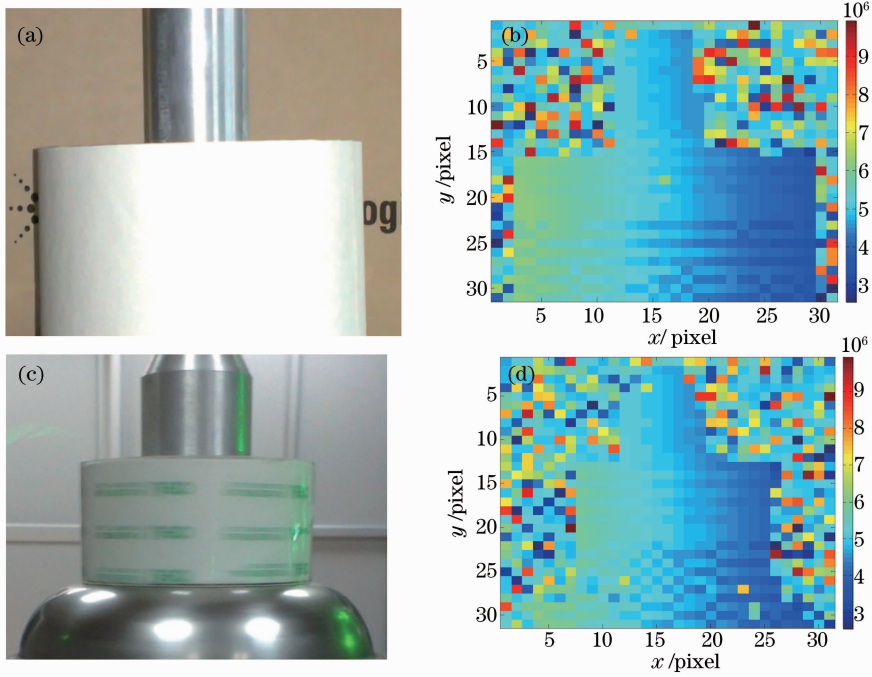


图 7 不同旋转漫反射目标(a)和(c)对应的二维多普勒频谱分布(b)和(d)

Fig. 7 Two different rotating diffusers (a) and (c); 2D Doppler frequency spectral distributions (b) and (d) for them, respectively



图 8 处于伪装网覆盖下的目标(激光入射在不同位置)

Fig. 8 Targets under camouflage nets (the laser incidents on different positions)

在伪装状态下目标的扫描点阵仍是 $31 \text{ pixel} \times 31 \text{ pixel}$, 每个扫描点激光驻留 30 ms , 在此时间段内, 利用振镜控制板卡输出信号触发 PCI8522 数据采集卡进行数据取样, 采样率设定为 40 MHz , 激光每个驻留位置记录数据长度 5000 个, 并对每段数据进行 8192 点 FFT 运算, 不足的数据点数自动补 0, 整个 FFT 计数的频率分辨率为 4.88 kHz , 针对上述带伪装网覆盖的旋转漫反射目标, 不同时刻扫描对应的二维多普勒频谱分布如图 9 所示。

由图 9 知, 伪装网覆盖下的目标由三部分组成, 每部分对应不同几何半径, 即对应于不同的多普勒频率, 从图 9 的 4 个子图中均可分辨出目标几何轮廓类似于金字塔形, 每个频谱图中均存在一些噪声

点, 该类噪声主要分为两大类: 1) 主要出现在目标几何中心; 2) 空间分布无规律。

第一种噪声主要来自本振光中 5 MHz 信号的影响(图 9 中色标表示多普勒频移), 因为物体的几何中心表面法线与入射光方向垂直, 此时目标在光束方向无速度分量, 即无多普勒频移, 因此记录数据的 FFT 变换频谱中只在中心 5 MHz 处出现尖峰, 对此情况, 在数据处理算法中设定频谱门宽 200 kHz 进行屏蔽。门宽 200 kHz 是因为以 5 MHz 频谱尖峰作为参考信号, 此时峰值较强, 若不剔除, 将影响后续谱峰提取, 当真实的频谱尖峰值大于 5 MHz 峰值时, 才不会造成影响。为消除谱峰小于 5 MHz 峰值时谱峰的误提取, 将 5 MHz 谱峰进行屏蔽, 门宽设定依据是由激光器短期频率稳定度决定, 干涉信号频谱全宽反映激光频率稳定性, 而实验中所用的激光器频率稳定性在 200 kHz 左右, 故设定频谱门宽 200 kHz 。门宽设定偏小, 将不能屏蔽中心频率附近峰值较大的次峰, 门宽过大, 将抹掉中心频率周围本来可识别的有用峰值, 由此增加噪声点。针对图 9(a) 中所示分析点 1 及分析点 2 展开研究, 采用列扫描方式的分析点 1 数据有别于周围数据, 对其数据分析的结果如图 10 所示, 对分析点 2 的数据分析结果如图 11 所示。

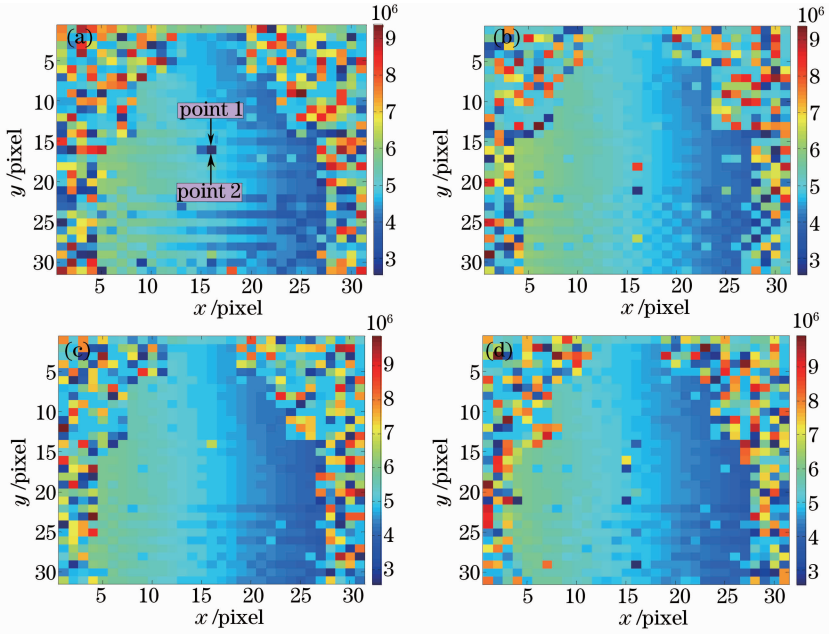


图 9 处于伪装网覆盖下的目标在不同扫描时刻下对应的二维多普勒频谱

Fig. 9 2D Doppler frequency spectra for the target under camouflage nets at different scanning time

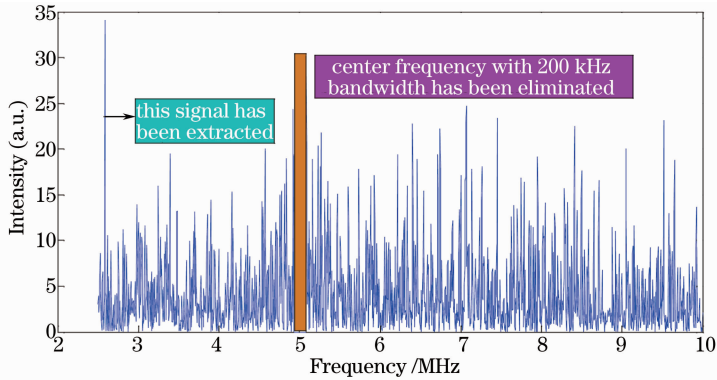


图 10 伪装目标频谱噪声分析(分析点 1)

Fig. 10 Noise analysis of frequency spectrum for camouflaged target (analysis point 1)

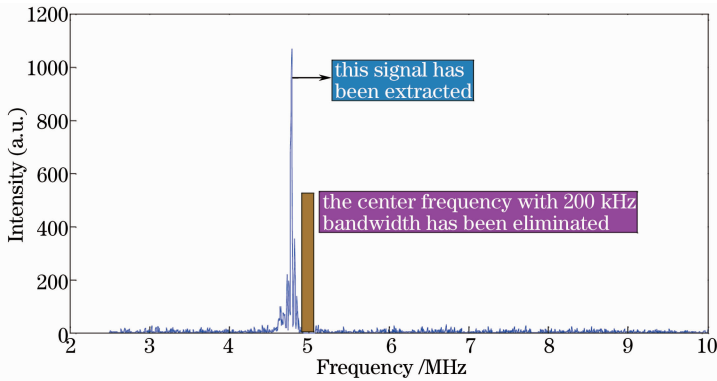


图 11 伪装目标频谱噪声分析(分析点 2)

Fig. 11 Noise analysis of the frequency spectrum for camouflaged target (analysis point 2)

由图 10 可知,由于目标表面与光束垂直,回波无多普勒频移,因此回波信号与本振光干涉的 5 MHz 中频信号与本振信号中本身具有的中心频率

相叠加,获得峰值更强的 5 MHz 信号,此时采用 200 kHz 的频谱门进行频率剔除,原本是滤除本振信号中的 5 MHz 干扰,如今将有用信号一并滤除,

此时对频谱门控后的信号进行峰值提取,获得的频率为 2.6 MHz 左右,明显低于周围的 5 MHz 正常信号,因此该噪声点完全由于图像恢复算法引起,可通过后期的算法改进获得抑制,不属这里讨论范畴。由于目标旋转不完全同轴以及目标中轴线并不完全垂直于振镜扫描图案中心点与目标连线,导致在同一列扫描中同一旋转半径的目标具有不完全相同的多普勒频移,所以,并不是目标中轴线上每个扫描点都出现数据提取噪声,但可以肯定,凡目标存在区域,中轴线出现数据提取噪声的概率远大于其余位置。所以,在图 11 中,同样是中轴线附近同一列扫描数据,该位置目标多普勒频移信号偏离 5 MHz,因此能获得准确的数据。

对于图 9 各子图中目标不存在区域的杂乱噪声,主要来自背景回波,峰值主要集中在 5 MHz 附近,由于采用了以 5 MHz 为中心的频谱门控,所以在周围本来无有用信号的频率处,提取出一个相对较大的峰值,而该峰值出现的频率位置是随机的,所以,导致在无目标处获得的频谱是杂乱的。所获二维频谱图是原始信号的直接恢复,由于目标存在区域与其他空间区域的频谱特性区别明显,所以没有采用任何轮廓识别与提取算法,当然,也可采取相应的轮廓识别算法,那将是后续研究内容。这里已将频谱图中存在的两类典型噪声进行分析,各自产生的原因都已明确,背景噪声可滤掉,但是滤掉之后的均匀背景反而不太易于与目标图案进行对比,所以,这里暂时未将背景噪声滤掉,下一步研究将围绕图像滤波及增强展开。

5 结 论

本文将 PCI8522 采集卡应用于动目标二维频谱识别中,利用该采集卡模拟 ATR 外触发功能,结合二维扫描振镜扫描控制卡输出模拟信号,通过软件二次开发,实现 PCI8522 采集卡的数据采集与振镜扫描同步。获得 31 pixel×31 pixel 的点阵扫描数据,通过对数据进行 FFT 运算及谱峰提取,获得室内裸露以及带伪装网防护的旋转漫反射目标二维多普勒频谱,目标存在区的多普勒频谱范围在 3~7 MHz 之间,通过频谱图可识别目标轮廓。针对数据提取以及图像恢复算法中引入的噪声进行分析,其中目标覆盖区域中轴线附近出现噪声概率较大,主要由 200 kHz 的频谱门宽引起,通过后续算法改进可进行抑制;另一类噪声为背景无多普勒频移的

5 MHz 中心信号被频谱门宽限制所致,可作为目标轮廓的衬底,无需抑制。

参 考 文 献

- Alfred B Gschwendtner, William E Keicher. Development of coherent laser radar at Lincoln laboratory[J]. Lincoln Laboratory Journal, 2000, 12(2): 383-394.
- Charles L Matson, Debora E Mosley. Reflective tomography reconstruction of satellite features-field results[J]. Appl Opt, 2001, 40(14): 2290-2296.
- Isaac Bankman. Model of laser radar signatures of ballistic missile warheads[C]. SPIE, 1999, 3699: 133-137.
- Brian C Redman, Barry Stann, William Lawler, *et al.*. Chirped AM ladar for anti-ship missile tracking and force protection 3D imaging: update[C]. SPIE, 2006, 6214: 62140O.
- Barry Stann, Brian C Redman, William Lawler, *et al.*. Chirped amplitude modulation ladar for range and Doppler measurements and 3-D imaging[C]. SPIE, 2007, 6550: 655005.
- John Watson, Keith Zondervan. The missile defense agency's space tracking and surveillance system[C]. SPIE, 2008, 7106: 710617.
- Vasyl Molebny, Gary Kamerman, Ove Steinvall. Laser radar in a system perspective[C]. SPIE, 2011, 8037: 803709.
- Dong Jihui, Hu Qiuan, Sun Dongsong. Techniques of depressing image noise in laser imaging tracking system [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0109002.
董吉辉, 胡企铨, 孙东松. 空间激光成像跟踪系统中的图像噪声抑制技术[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0109002.
- Dong Jing, Chen Rui, Li Xiaolong, *et al.*. Lidar coherent detection and feature extraction of moving target based on micro-Doppler effect[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1014001.
董晶, 陈蕊, 李小龙, 等. 运动目标微多普勒效应的激光雷达相干探测及特征提取[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1014001.
- Ning Xiang, James M Sabatier. Acoustic-to-seismic landmine detection using a continuously scanning laser Doppler vibrometer [C]. SPIE, 2003, 5089: 591-595.
- Julien Totems, Veronique Jolivet, Jean-Philippe Ovarlez, *et al.*. Advanced signal processing methods for pulsed laser vibrometry [J]. Appl Opt, 2010, 49(20): 3967-3979.
- James M Sabatier, Ning Xiang. An investigation of acoustic-to-seismic coupling to detect buried antitank landmines [J]. IEEE Trans on Geosci and Remote Sensing, 2001, 39(6): 1146-1154.
- Gregg D Larson, James S Martin, Waymond R Scott. Detection of buried landmines using seismic waves and microphones [C]. SPIE, 2005, 5794: 655-664.
- Timothy V Writer. Determination of speed limitations in acoustic-to-seismic mine detection using a laser doppler vibrometer [C]. SPIE, 2003, 5089: 673-679.
- Waymond R Scott, James S Martin, Gregg D Larson. Experimental model for a seismic landmine detection system [J]. IEEE Trans Geosci and Remote Sensing, 2001, 39(6): 1155-1163.
- Waymond R Scott, Gregg D Larson, James S Martin, *et al.*. Field testing and development of a seismic landmine detection system [C]. SPIE, 2003, 5089: 643-652.
- Vyacheslav Aranchuk, Amit Lal, James M Sabatier, *et al.*. Multi-beam laser Doppler vibrometer for landmine detection [J]. Opt Eng, 2006, 45(10): 104302.

栏目编辑:何卓铭