

•光电探测•

## 基于虚像相位阵列的光谱测量技术研究与应用

李红梅,谭中伟,张磊

(北京交通大学 光波技术研究所 全光网络与现代通信网教育部重点实验室,北京 100044)

**摘要:**虚像相位阵列(VIPA)具有色散角度大、结构简单、成本较低等优势,对波分复用、色散补偿、脉冲整形等领域产生了重大影响。虚像相位阵列与衍射光栅结合解决了光谱混叠现象,使其在光滤波器、光谱成像、光谱处理等领域的应用成为可能。基于虚像相位阵列的光谱仪具有采集时间短、频谱测量范围宽、光谱分辨率高等优点,能应用于气体检测、分子科学、微生物学等领域,因此成为研究热点。基于ZEMAX光学软件对VIPA二维成像进行了仿真,分析了VIPA的厚度和入射角对其衍射、损耗、光谱分辨率和空间分辨率的影响,讨论了VIPA用于成像时的最佳厚度和角度,最后阐述了基于VIPA的布里渊和光频梳光谱仪,论述了不同类型光谱仪的性能和应用,并对未来进行了展望。

**关键词:**虚像相位阵列;光谱仪;光谱测量;光谱成像;ZEMAX

中图分类号:O433.1

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2016)-06-0010-05

## Research and Application of Spectral Measurement Technology Based on Virtually Imaged Phased Array

LI Hong-mei, TAN Zhong-wei, ZHANG Lei

(Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Institute of Light Wave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The virtually imaged phased array (VIPA) has a significant impact on many areas such as wave-length division multiplexing (WDM), dispersion compensating and pulse shaping due to its advantages including large angular dispersion, simple structure and low cost. Combined with diffraction grating, the spectral aliasing phenomenon is solved by VIPA to make it possible to be used in optical filter, spectral imaging and processing. The spectrometer based on VIPA has been a research topic due to its superiorities such as quick acquisition time, wide range of spectral measurement and high spectral resolution and can be applied in many areas such as gas detection, molecular science and microbiology. Based on ZEMAX optical software, VIPA 2-D imaging is simulated, the effects of the thickness and the incident angle of the VIPA on diffraction, loss, spectral and spatial resolutions are analyzed and the best imaging thickness and angle of the VIPA are discussed. Brillouin and optical frequency comb spectrometers based on VIPA are introduced. The performances and applications of spectrometers are proposed and the future development is forecasted.

**Key words:** virtually imaged phased array (VIPA); spectrometer; spectral measurement; spectral imaging; ZEMAX

传统的光栅光谱仪因其制作工艺和分辨率的限制已经无法满足人们对某些应用的特殊需求,因

此多种类型的新型光谱仪被提出。目前最常见的有布里渊光谱仪和光频梳光谱仪。布里渊光谱仪

的基本原理是布里渊散射,能够提供非入侵性和非标记性的对比机制的微观空间分辨率,因此已经被广泛应用于远程遥感<sup>[1]</sup>、材料科学<sup>[2]</sup>和生物医学<sup>[3]</sup>等应用领域。当把 VIPA 应用于布里渊光谱仪时,能够显著节省采集时间和降低系统的复杂度,并且能抑制背景噪声,扩展布里渊光谱仪的应用范围。光频梳在光谱学中有革命性发展,有快速测量、大带宽覆盖、密集频谱采样和绝对的频率精确性等特点<sup>[4]</sup>。基于 VIPA 的光频梳光谱仪具有结构紧凑、参考频率精确稳定、相位稳定等优点<sup>[5]</sup>,被应用于天体摄谱仪和人类呼吸系统分子标记等领域。因此 VIPA 一直受到研究者的青睐,特别是与衍射光栅结合解决了光谱混叠的问题之后更是成为研究热点并得到了广泛的应用。然而在光谱成像的光路中存在多级反射和衍射,使得理论推导更为复杂,并且在实验过程中也存在因为制作工艺造成的实验操作困难和实验结果存在误差等问题,而具有强大仿真和分析能力的 ZEMAX 软件能有效解决这些问题。文中提出用 ZEMAX 光学软件仿真 VIPA 二维光谱成像,并结合仿真结果分析了其衍射级次、损耗、光谱分辨率和空间分辨率,讨论了 VIPA 用于成像时的最佳角度和厚度。最后阐述了基于 VIPA 的布里渊和光频梳光谱仪,论述了不同类型光谱仪的性能和应用,并对未来进行了展望。同时用实验验证了仿真的正确性。

## 1 VIPA 二维光谱成像原理

VIPA 本质上是一块玻璃平板,玻璃板前后面分别镀反射率为 100% 和 95% 的高反膜。入射光束与 VIPA 呈一定夹角,进入玻璃板后经后表面进行反射,反射的光又经过玻璃板前面反射再次经后面折射反射,如此反复,全部出射光之间相互发生干涉。出射光束中的光由于波长不同,折射出的光角度各不相同,形成色散效应<sup>[6]</sup>。仅使用 VIPA 色散特性进行光谱分析面临输出光谱重叠的问题,辅以衍射光栅,能够对分离重叠的光谱,进而实现宽带波分解复用。根据成像面上的光场分布<sup>[7]</sup>可知,输出光束与输出角度、波长、空间分布有关,光场周期性分布,光强等间距相互平行分布。在玻璃板出射光线与衍射光栅后,分别放置  $x$  方向和  $y$  方向的傅里叶透镜,可以实现输出光谱与二维平面上的点一一对应,得到二维光谱<sup>[8]</sup>。如果在接收二维光谱前的路

径上放置待测气体样品,便能通过得到的光谱获得待测气体吸收光谱,此方法用来验证二维光谱成像的实际效果,如图 1 所示。

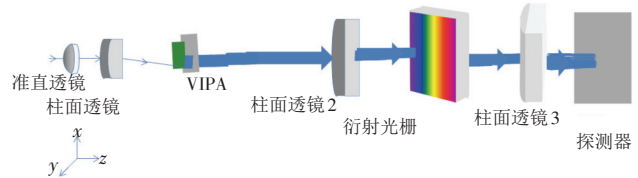


图1 虚像相位阵列和衍射光栅联合产生二维光谱原理图

## 2 仿真和分析

用 ZEMAX 软件对 VIPA 的二维成像原理进行仿真分析。ZEMAX 作为著名的通用、高效的光学设计软件之一,具有强大的光学设计和仿真分析功能,在光路仿真上,具有视觉绘图容易,可选择多种玻璃、可以和目镜物镜联合仿真、转换为现实器件容易等优点。仿真中采用的光源为点光源,经凸透镜准直后由柱透镜聚焦进入 VIPA。VIPA 由两块相互平行的平面进行仿真,前表面留一部分作为入射窗口,其余镀 100% 的全反膜,后表面镀 95% 的反射膜。入射光通过入射窗口进入 VIPA,在两个面之间进行多次反射,然后经过 VIPA 在  $y$  方向的柱透镜进行聚焦,到达衍射光栅。衍射光栅与  $y$  轴呈  $90^\circ$ ,然后经过衍射光栅在  $x$  方向的柱透镜进行聚焦,最终到达检测器。其中柱透镜 2 和 3 均为傅里叶透镜。在 ZEMAX 非序列条件下,建立仿真光路,如图 2 所示。



图2 虚像相位阵列二维光谱成像的 ZEMAX 仿真

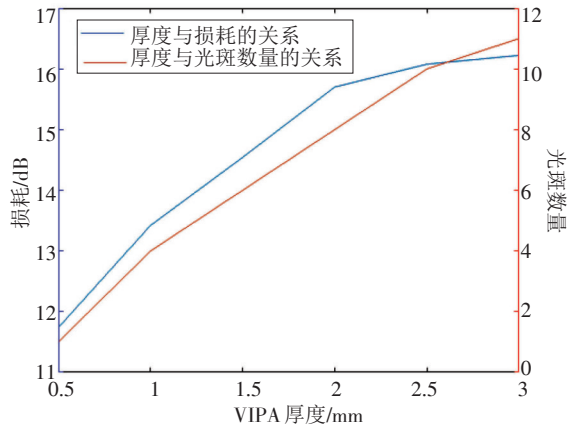
然后对 ZEMAX 仿真模型执行以下操作:

- (1) 设置 VIPA 厚度为 0.5 mm;
- (2) 设置 VIPA 倾角(入射角)为  $0.5^\circ \sim 2^\circ$ , 并分别记录的每个角度时探测器的光斑数量和输出功率;
- (3) 设置 VIPA 厚度为 1 ~ 3 mm, 并对每个厚度重复步骤(2);
- (4) 对仿真结果进行统计分析。

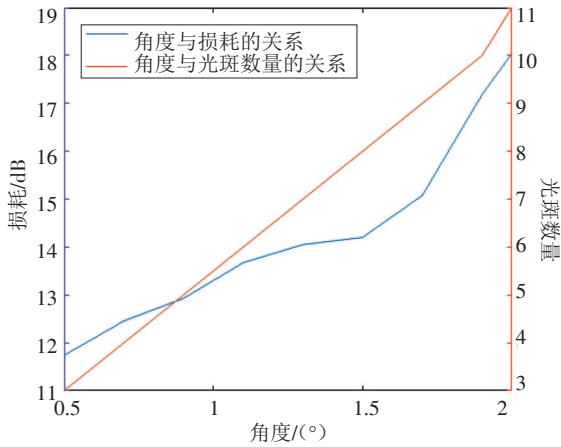
结果如图 3 所示。

由图 3a 可知,随着 VIPA 厚度的增加,其输出损耗和光斑数量增加。由图 3b 可知,随着 VIPA 角度

的增加,其输出损耗和光斑数量增加。这是因为厚度和角度会影响成像面的衍射。



(a) VIPA 厚度对输出损耗和光斑数量的影响



(b) VIPA 角度对输出损耗和光斑数量的影响

图3(a) VIPA 厚度对输出损耗和光斑数量的影响

(b) VIPA 角度对输出损耗和光斑数量的影响

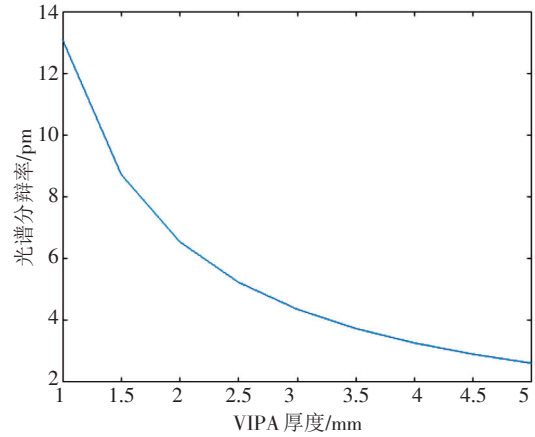
由成像面上的光场分布和入射光束进入 VIPA 的入射条件可得总的衍射级次为<sup>[9]</sup>

$$M = \frac{4nd \sin \theta_1}{\pi} > \frac{4 \cos \theta_1}{\pi} \quad (1)$$

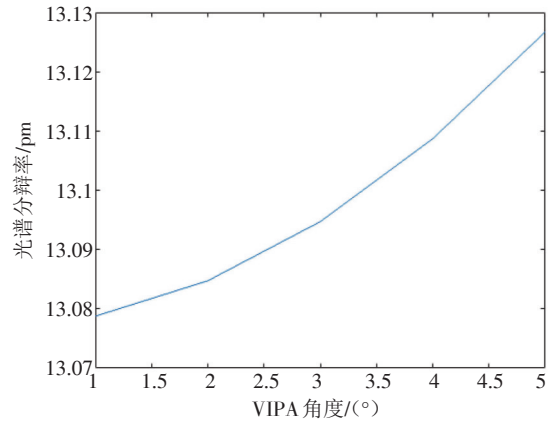
其中,  $\theta_1$  为 VIPA 倾角;  $d$  为 VIPA 厚度。由式(1)可得, VIPA 成像时会产生多级衍射, 然而高级衍射导致衍射损耗, 当角度越大时产生的光斑数量越多, 即衍射级次越多, 导致的衍射损耗越大。因此要想减少衍射级次从而减少衍射损耗需要使用较小的人射角, 并且只有在一级衍射区域的限制范围内, 才能建立起像和光谱的一一映射的关系。然而 VIPA 的角度和厚度还会影响其光谱分辨率和空间分辨率。在理想情况下, VIPA 的光谱分辨率可表示为<sup>[10]</sup>

$$FWHM = \frac{\lambda_0^2}{2\pi nd \cos \theta_1} \frac{1 - R_1 R_2}{\sqrt{R_1 R_2}} \quad (2)$$

由式(2)可得, VIPA 厚度会对光谱分辨率产生显著的影响, 而角度对光谱分辨率的影响不大。厚度从 1 mm 增加到 5 mm, 光谱分辨率减少了约 13 pm, 而角度从 1° 增加到 5°, 光谱分辨率增加了约 0.05 pm, 如图 4 所示。



(a) VIPA 光谱分辨率与厚度的关系



(b) VIPA 光谱分辨率与角度的关系

图4(a) VIPA 光谱分辨率与厚度的关系

(b) VIPA 光谱分辨率与角度的关系

因此一般情况下想要获得较好的光谱分辨率, 应控制 VIPA 的厚度不要太大。又 VIPA 的空间分辨率随着角度的增加而减少, 因此综合以上分析, 当 VIPA 用于成像时为了减少损耗, 提高空间分辨率又能得到良好的光谱分辨率, 需要认真调节 VIPA 的入射角和厚度, 一般入射角在 1°~3°, 厚度为 1.5 mm 左右。

### 3 实验

根据上述理论和仿真,进行 VIPA 二维光谱成像的实验验证。实验装置如图 5 所示。其中,3 个布拉格衍射光栅的反射光作为光源,光波长分别为 1 546.60、1 546.65、1 546.90 nm,并且布拉格光栅的带宽小于 0.2 nm,衍射光栅每毫米线数为 1 100, VIPA 的 FSR 为 100 GHz,厚度为 1.5 mm, VIPA 前光束的入射角为  $2^\circ$ ,准直光束的半径为 1.2 mm, VIPA 前用于聚焦的透镜的焦距为 150 mm, VIPA 后柱透镜 2 焦距为 200 mm,柱透镜 3 的焦距为 250 mm。

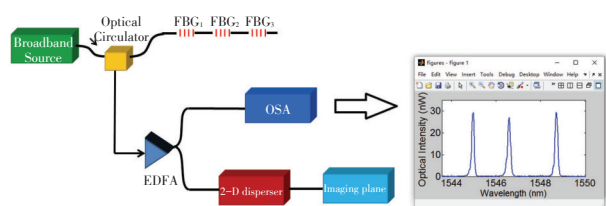


图 5 实验装置图

实验过程如下。布拉格光栅的波长随着温度或压力变化,其反射光经过环形器后进入 VIPA 二维成像装置,经过 VIPA 和衍射光栅分光后光谱进行二维展开,然后到达红外成像系统成像。光谱仪(OSA)用于校正和对比。实验结果如图 6a 所示。每一光斑对应着某一波长。可以看出,基于 VIPA 的二维成像系统具有良好的分辨率,在波长间隔较小时仍能显示每一波长的光。图 6b 为 ZEMAX 仿真结果。可以看出,在误差允许的范围内,实验结果和仿真结果基本一致,从而验证了仿真模型的正确性。

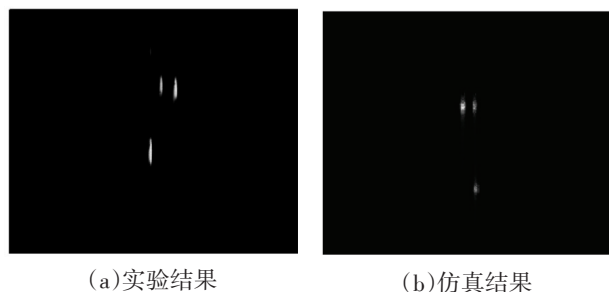


图 6 实验结果及仿真结果

## 4 应用

### 4.1 基于 VIPA 的布里渊光谱仪

布里渊光谱仪的原理是布里渊散射,能够对微

观空间分辨率提供非入侵性和非标记性的对比机制,因此已经被广泛应用于远程遥感、材料科学和生物医学应用领域。把基于 VIPA 的布里渊光谱仪和小孔结合,能够准确和快速测量弱散射样品的布里渊光谱,并能优化接收信号效率,且能使实验设置简单高效,有望应用于布里渊显微镜<sup>[9,11]</sup>。使用 3 通道的 FP 带通滤波器(3FPF)和一个二阶的 VIPA 可以提高光谱消光比<sup>[12]</sup>,实验装置如图 7 所示<sup>[12]</sup>。

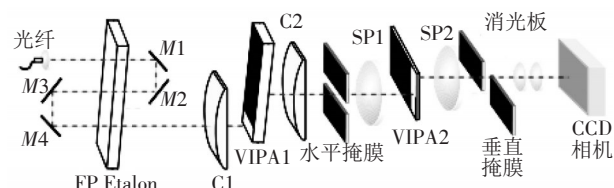


图 7 基于 3 通道 FP 滤波器和 VIPA 的布里渊光谱仪结构图

通过改变 F-P 腔和入射光束的角度,滤波器的带宽能够分离出想要的布里渊散射信号,这就可以抑制光谱仪内部激光反射和由于样品弹性散射产生的背景噪声。此外,使用碘分子吸收池作为凹槽滤波器和单阶 VIPA 结合使用<sup>[13]</sup>,可以比多阶 VIPA 光谱仪装置简单高效,节省成本,并能有效吸收瑞利散射,灵活控制信噪比,改善布里渊光谱质量。Meng 提出了一种自定义的最小方差拟合算法从 VIPA 光谱仪中检测出布里渊频移<sup>[14]</sup>。相比于传统的对比已知样品谱线的光谱检测方法,该方法能使光谱漂移精确度达到 1 MHz 左右。

### 4.2 基于 VIPA 的光频梳光谱仪

光频梳光谱仪具有光带光谱宽、采集时间短、灵敏度和分辨率高等优点,可用于即时感知分子线的吸收和减少长期漂移的影响,因此被应用于人类呼吸分析、工业、生物医学等领域<sup>[16-17]</sup>。Sarah 等人<sup>[18]</sup>指出,可以通过带有 VIPA 的光频梳实现对光谱仪应用范围的扩展,实验装置如图 8 所示<sup>[18]</sup>。此光谱仪能够弥补此前光谱仪只能通过计算传递函数方法间接获得光谱相位的缺陷,实现直接测量信号光的相位,能应用在各种光系统中。Grzegorz<sup>[19]</sup>等人提出一种快速增强腔的光谱仪<sup>[19]</sup>,该光谱仪能被 PDH 或者高频锁锁定,通过带有光频梳的色散校准的 VIPA 获得频率轴,能完成未定光梳模式测量和提高频率精确性,且使频率轴校准过程更简单、精



确、不需要在良好吸收谱的位置测量,也不需要使用附加的光频梳(即不需要双光频梳技术)。此外通过 VIPA 二维面阵光谱仪和可调谐 F-P 结合,能够简化系统装置,提高光谱分辨率,用于气体光谱的测量<sup>[20]</sup>。

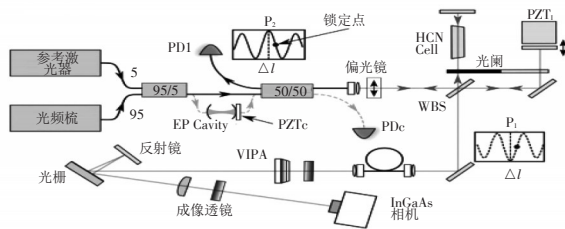


图8 基于VIPA的光频梳实验

## 5 总结与展望

基于VIPA的光谱仪具有采集时间短、分辨率高、测量频谱范围宽等优点,在国外已经得到了广泛的研究,而国内相关研究和文献还很少。基于ZEMAX仿真将VIPA二维光谱成像的研究可视化,讨论了VIPA用于光谱成像时的厚度和入射角,为了兼顾损耗和分辨率,入射角和厚度不能太大也不能太小,入射角为 $1^{\circ}\sim 3^{\circ}$ ,厚度为1.5 mm左右,并用实验进行了验证。所做的仿真和研究为VIPA研究的灵活性提供了可能,可用于VIPA色散定律的研究和VIPA制作,从而促进更高分辨率和探测频谱宽度的光谱仪的应用。基于VIPA的光谱仪在大气环境监测、人类呼吸气体测量、生物和生命科学等领域都具有重要作用,将促进光谱测量技术的研究与应用。

## 参考文献

[1] Fry E S, Emery Y. Accuracy limitations on brillouin lidar measurements of temperature and sound speed in the ocean[J]. Applied Optics, 1997, 36(27): 6887-6894.  
 [2] Koski K J, Yarger J L. Brillouin imaging[J]. Appl Phys Lett, 2005, 87(6):061903.  
 [3] Steelman Z, Meng Z. Brillouin spectroscopy as a new method of screening for increased CSF total protein during bacterial Meningitis[J]. Biophotonics J, 2014, 999:1-7.  
 [4] Jun Ye, Steven T Cundiff. Femtosecond optical frequency comb: principle, operation, and applications[J]. Springer US, 2005, 62(5-6):236-246.

[5] Scott A Diddams. Molecular fingerprinting with the resolved modes of a femtosecond laser frequency comb[J]. Nature, 2007, 445(7128):627-30.  
 [6] Shirasaki M. Large angular dispersion by a virtually imaged phased array and its application to a wavelength demultiplexer[J]. Opt Lett, 1996,21:366-368.  
 [7] Xiao S. A dispersion law for virtually imaged phased-array spectral dispersers based on paraxial wave theory[J]. IEEE J Quantum Electron, 2004,40(4):420-426.  
 [8] Shijun X, Andrew W. 2-D wavelength demultiplexer with potential for \$1000 channels in the c-band[J]. Opt Express, 2004, 12(13): 2895-2902.  
 [9] TAN Zhong-wei, CHEN Zhi-wei. 2D spectral imaging based on a virtually imaged phased array[J]. Infrared and Laser Engineering,2013, 42.  
 [10] Tsia K K, Goda K, Capewell D, et al. Performance of serial time-encoded amplified microscope[J]. Opt Express, 2010, 18(10): 10016-10028.  
 [11] MENG Zhao-kai. Optimizing signal collection efficiency of the VIPA-based Brillouin spectrometer[J]. Innovative Optical Health Sciences, 2015,8:4.  
 [12] Fiore A, Zhang J. High-extinction virtually imaged phased array-based Brillouin spectroscopy of turbid biological media[J]. Appl Phys Lett, 2016, 108:203701.  
 [13] MENG Zhao-kai. Background clean-up in Brillouin microspectroscopy of scattering medium[J]. Optical Society of America, 2014,22:5.  
 [14] MENG Zhao-kai, Vladislav V Yakovle. Precise determination of Brillouin scattering spectrum using a virtually imaged phase array (VIPA) spectrometer and charge-coupled device (CCD) camera[J]. Applied Spectroscopy, 2016, 70(8):1356-1363.  
 [15] Thorpe M J, Balslev-Clausen D, Kirchner M S, et al. Cavity-enhanced optical frequency spectroscopy: application to human breath analysis[J]. Opt Express, 2008,16(4): 2387-2397.  
 [16] Cossel K C, Adler F, Bertness K A, et al. Appl Phys, 2010, 100:917.  
 [17] Gołkowski M, Gołkowski C, Leszczynski J, et al. IEEE Trans[J]. Plasma Sci, 2012,1984:40.  
 [18] Sarah K Scholten, James D Anstie. Complex direct comb spectroscopy with a virtually imaged phased array[J]. Optics Letters, 2016, 41:6.  
 [19] Grzegorz Kowzan, Kevin F Lee. Self-referenced, accurate and sensitive optical frequency comb spectroscopy with a virtually imaged phased array spectrometer[J]. Optics Lett

(下转第61页)

在同一控制时序下,即探测激光主波脉冲,在主波脉冲后延迟产生采样波门,这主要是忽略近距大气回波信号,采样波门与FIFO读入同步启动,将采样数据读入FIFO,由于采用异步FIFO器件,可在启动写入的同时启动数据读出。图3为激光回波数字化时序设计图。

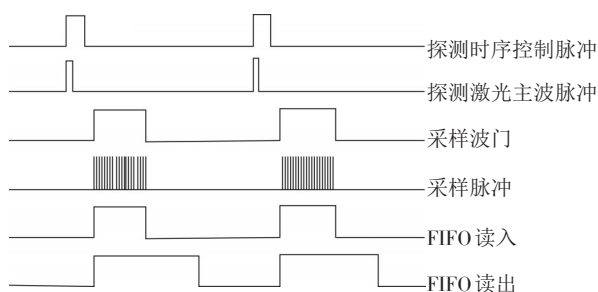


图3 激光回波数字化时序设计

### 3 激光回波信号处理设计

经回波信号波形数字化后得到的数字激光回波数据,还只是基于激光回波脉冲的数字离散化,由于存在噪声、干扰,首先要对其进行滤波处理,然后对目标信号进行检测,并对云等特定目标进行识别<sup>[8]</sup>。主要步骤包括:

#### (1)对采样数据进行滤波处理

激光回波信号一方面受电路自身噪声影响,另一方面由于接收空间杂散光造成激光回波信号夹杂噪声和干扰,因此需对采样数据进行相应滤波处理<sup>[9]</sup>。

#### (2)计算脉冲宽度

在回波脉冲峰值电压两侧根据幅度等于0.5倍峰值电压之间的时间间隔,实际激光脉冲信号宽度不仅与探测目标有关,和探测器本身特性也有关系,通常构造探测系统对典型探测目标回波脉冲,以此作为基准,评估不同目标回波脉冲展宽效应。

#### (3)目标距离计算

通过计算回波脉冲前沿与主波信号时间差计算目标距离,因此系统时统(基准时钟)要求有较高的精度和稳定性。

#### (4)回波功率计算

在步骤(2)中获得的脉冲宽度内对激光回波量化值进行累加,累加结果经归一化后作为回波功率。

## 4 结论

设计了一种适用于脉冲激光测距的回波数字化系统,实现100 MHz采样频率,通过对信号回波展宽效应计算实现对云等目标识别,可应用于对空激光测距、主动激光目标识别等领域。

### 参考文献

- [1] 朱福,林一楠.一种提高脉冲激光测距精度的方法[J].光电技术应用,2011,26(2):17-19.
- [2] 卢静怡,杨志卿,赵向凯,等.基于TDC-GP1的高精度测距研究[J].光电技术应用,2013,28(1):21-24.
- [3] 赵大龙,秦来贵,霍玉晶.激光测距接收技术的研究[J].光电技术应用,2005,20(3):19-21.
- [4] 李静,黄峥.激光引信回波信号处理方法分析研究[J].通信技术,2009,42(11):217-218.
- [5] 赵伟,张贵彦,缪同群.利用脉冲展宽特性识别云和地面目标[J].激光杂志,2008,29(4):36-37.
- [6] 胡以华,王建宇,薛永祺.机载激光遥感成像的激光回波波形数字化技术[J].遥感学报,2001,5(2):110-113.
- [7] 武晓冬,戴波.基于FIFO的高速A/D和DSP接口设计[J].北京石油化工学院学报,2006,14(2):26-29.
- [8] 张海武,李松山,耿林.低信噪比激光弱小回波信号的数字化检测和仿真[J].激光与红外,2007,37(3):211-213.
- [9] 张育琪,徐军,杨佩.脉冲激光测距接收电路的设计[J].通信技术,2010,23(4):30-32.

(上接第14页)

ters, 2016, 41:5.

- [20] LIU Wen-juan, HU Cheng-zhi. Ultra-high-resolution spectrometry incorporating two-dimension dispersing spectrom-

eter and tunable fabry-perot filter[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35:6.