

压电陶瓷液体光学调相器的制备与性能测试

陈悦, 吴陈斌, 梁忠诚, 孔梅梅, 赵瑞, 关建飞, 陈陶*

南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 江苏 南京 210023

摘要 子孔径共相位作为光学综合孔径成像的关键技术之一,其成像相位调制的精度要求小于 0.1λ (λ 为入射光波长)。为满足高精度要求并兼顾大调节范围,利用压电陶瓷管内的填充透明液体构造液体光学调相器,通过压电效应在通光方向产生的微量电位移进行光学相位调节。实验使用波长为 632.8 nm 的迈克耳孙干涉仪装置,采用定线灰度化图像处理方法,在 0~28.0 V 电压下检测到调相器的调相范围为 $0\sim 4\pi$ (外加电压为 150.0 V 时可拓展至 $0\sim 20\pi$),调相精度达到 $\lambda/36$,满足光学综合孔径子孔径相位调制的要求。

关键词 成像系统; 图像处理; 光学综合孔径; 压电陶瓷管; 液体调相器; 干涉检测

中图分类号 TN761

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.2305001

1 引言

光学综合孔径成像是基于多个小口径子镜排列成一定形态的阵列对物体共相成像,其成像分辨率等效于一个大孔径透镜,被广泛应用于天文学、医学、商用、军事科学研究等领域^[1-4]。由于成像系统子孔径存在装载误差且受环境因素影响,工程上需要对每一子镜进行独立的静态或动态相位补偿性调节,补偿精度要求优于 0.1λ (λ 为入射光波长)^[5]。

液体光学器件凭借其紧凑的结构、质量轻、价格低廉且无需机械可动器件等优点,有着潜在的应用市场^[6]。在液体相位调制器研制方面,近年来有液晶调相器、基于电润湿效应的调相等。2006年,刘永军等^[7]通过波前调制极大地改善了平行排列的液晶调制器的成像质量。2012年,Gopinath等^[8]展示了可用于波前校正的电润湿透镜和棱镜技术,为电润湿器件提供了新的应用场景。2014年,赵祥杰等^[9]制备了基于聚合物与网络的液晶相位调制器,减小了该类液晶的光散射强度。2017年,Ashtiani等^[10]提出了一种由多层 SU-8 光刻胶组成的电润湿驱动液体可调谐光学移相器,通过施加 100 V 电压可以实现 171° 的相移。2019年,Wang等^[11]报道了基于电润湿的光流可变光路调制器,光程长度变化高达 1.15 mm。2020年,Wang等^[12]利用柔性电光液晶(LC)层在 85 V 电压下驱动特定波形,实现了 2π 的全相位调制。2021年,陈洛^[13]利用电磁线圈驱动在 150 mA 电流下得到 21π 的相位调制。同年,Zhang等^[14]在 150 V 电压驱动下制作了可实现 6.68π 光学相

移的液体光学调相器。2022年,Wei等^[15]在 135 V 下制作了可实现约 9.685π 相位调制的阵列式光学相位调制器。上述调相器结构较为复杂,制作、封装较困难,响应时间在十 ms 以上,调相范围小。

压电陶瓷管具有灵敏度高、线性度好、集成度高且易于控制等优点,管内可填充透明液体且长度可调,为液体光学调相器的制备提供了新思路^[16]。本文在压电陶瓷管中填充透明液体作为透射式光学调相核心结构,保留了压电陶瓷高精度的调长优点,取代了传统调相器件松散、复杂的结构,拓展了光学调相器件的构建思路,使得光学调相器件的结构紧凑、成本大幅降低而不失调节精度和宽范围。通过迈克耳孙干涉仪得到干涉图像信息,利用电荷耦合器件(CCD)相机摄像记录干涉条纹的变化以反映相位信息,并用定线灰度化图像处理方法检测分数级干涉条纹以检测分析调相性能。实验结果表明,调相器的调相范围和调相精度均优于光学综合孔径子镜相位调制的要求。

2 调相器的工作原理、设计及制备

2.1 工作原理

电介质在某方向受外力作用发生变形时,内部会产生极化现象,其两个相对表面上出现正负相反的电荷,分别对应正压电效应和逆压电效应,二者是可逆的^[17]。应变量 S 与外电场 E 之间存在如下关系:

$$S = d_1 E + d_2 E^2, \quad (1)$$

式中: d_1 、 d_2 为压电应变系数; $d_1 E$ 为逆压电效应; $d_2 E^2$ 为电致伸缩效应。当外加电场 E 小于 10^6 V/m

收稿日期: 2021-12-30; 修回日期: 2022-03-17; 录用日期: 2022-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(61775102,61905117)、南京邮电大学科研基金(NY220050,NY214058)

通信作者: *chent@njupt.edu.cn

时,电致伸缩效应产生的应变比逆压电效应小,可以忽略不计^[18-20]。外加电压在几百伏以内时,应变 S 与外加电场 E 呈线性关系。

在压电陶瓷管内腔中注满透明液体,在逆压电效应作用下,液体的长度会产生微米级位移,将其合理封装并在腔长方向通光,光学相位会产生数微米改变量,即调相范围可达数十波长。设压电陶瓷加电压前的内、外径及高度分别为 r, R, h , 压电陶瓷加电压后的内、外径及高度分别为 r', R', h' , 根据压电陶瓷管壁通电前后体积不变原理,有

$$V_{\text{wall}} = \pi(R^2 - r^2) \cdot h = \pi(R'^2 - r'^2) \cdot h' \quad (2)$$

依据厂家(苏州攀特电陶科技公司)提供的压电陶瓷位移测试曲线可知,直流电压在 $0 \sim 150.0 \text{ V}$ 范围内变化时,通光方向上压电陶瓷管的长度会产生 $0 \sim 5.8 \mu\text{m}$ 的位移伸缩量,记为 Δh 。为了能估算加电压后压电陶瓷管内容积的变化率, Δh 取最大值,即 $\Delta h_{\text{max}} = 5.8 \mu\text{m}$, 设

$$h'_{\text{max}} = \Delta h_{\text{max}} + h, \quad (3)$$

$$R > R', r < r', \quad (4)$$

式中: h'_{max} 为压电陶瓷加电压后的最大高度。

本文选取压电陶瓷作为调相器主体内芯进行设计和制备,其中, $2R = 20 \text{ mm}$, $2r = 15 \text{ mm}$, $h = 12 \text{ mm}$ 。结合式(3)和式(4)并代入压电陶瓷具体参数可得

$$\frac{6000}{6005.8}(R^2 - r^2) = 43.750025 \times 10^6 \mu\text{m}^2 \quad (5)$$

设压电陶瓷管的内、外壁管径变化量分别为 δr 、 δR , 由式(5)可得

$$(R' + r')(R' - r') = (R + r - \delta R + \delta r) \times (R - r - \delta R - \delta r) = 43.750025 \times 10^6 \mu\text{m}^2 \quad (6)$$

合理设定 $\delta R = \delta r = \Delta x$, 即内、外径变化情况一致,得到 $\Delta x = 7 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ 。说明内、外壁厚度的变化远小于微米量级。据此计算加电前后的内腔容积变化量,用 V_0, V_1 表示通电前后内腔的容积,估算结果为

$$V_0 = \pi \times (7.5)^2 \times 12 = 675\pi \text{ mm}^3, \quad (7)$$

$$V_1 = \pi \times [(7.5 + \Delta x)]^2 \times (12 + \Delta h_{\text{max}}) = 675.4523\pi \text{ mm}^3 \quad (8)$$

设加电前后的内腔容积变化率为 η , 即

$$\eta = \frac{V_1 - V_0}{V_0} = 0.067\% \quad (9)$$

由于 $\eta \neq 0$, 可以判定满注密封液体的压电陶瓷管在通电后内腔液体会发生微流动,再考虑到密封液体的热胀冷缩效应,因此在压电陶瓷管端面和石英玻璃之间设置硅胶垫片对其进行补偿。压电陶瓷响应时间小于 $1 \mu\text{s}$, 本器件基于压电陶瓷驱动微液柱的微移动,没有自由液面,其响应时间应与压电陶瓷响应时间在同一数量级,远优于参考文献中诸类光学调相器的响应时间,能够满足合成孔径技术需求。

2.2 结构设计、制备及实验过程

调相器结构如图 1 所示。

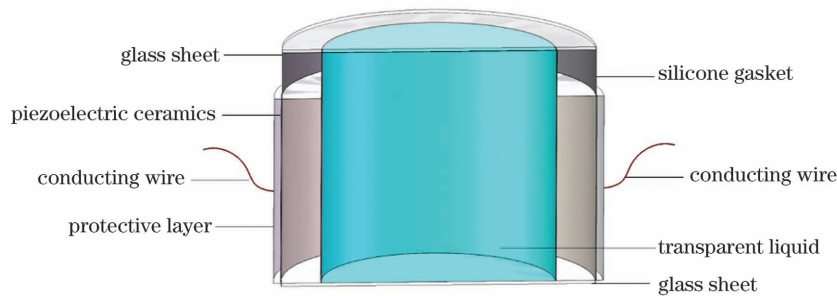


图 1 压电陶瓷光学液体调相器的结构

Fig. 1 Structural diagram of piezoelectric ceramic optical liquid phase modulator

压电陶瓷管的内腔注满了透明液体(例如 201 甲基硅油),具有“上盖片+硅胶垫片+压电陶瓷管+下盖片”四层结构的调相器件实物如图 2 所示。

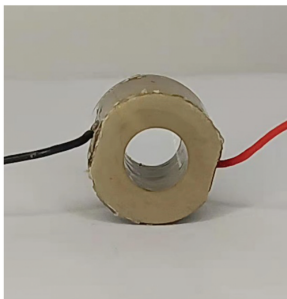


图 2 调相器实物图

Fig. 2 Physical picture of phase modulator

上、下玻璃端面分别作为光束的输入、输出端,由此形成可调液体柱;在上玻璃端面与压电陶瓷管之间设置环形硅胶垫片,在垫片的侧面开孔,用于注液和排气,同时可对调相腔体的非预期体积变化进行补偿;在调相器的内外壁涂覆微米量级绝缘膜起保护作用。

迈克耳孙干涉仪将待测位移信息转变为干涉的光强信息,其信息改变可以通过干涉条纹的变化来获取,设计的激光干涉检测系统的原理如图 3 所示。光源发出的 632.8 nm 单色光经过扩束器扩束后,穿过一对偏振片,光强被调节后进入迈克耳孙干涉仪进行检测,两个同型号的调相器被设置于干涉仪的两个干涉臂光路中,其中一个进行加电压进行调相测试,另一个作为补偿片不加电压,利用 CCD 相机记录相位移动量数据。

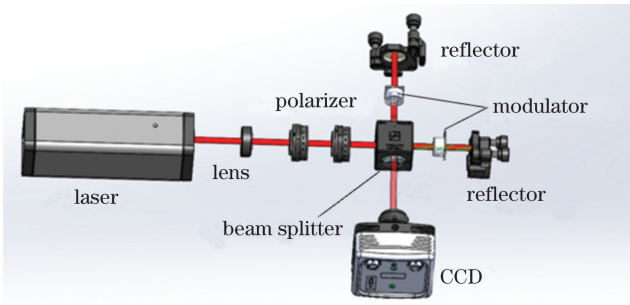


图 3 干涉相位检测系统的光路图

Fig. 3 Optical path diagram of interference phase detection system

3 调相器的性能测试

传统的迈克耳孙干涉仪只能检测到整数条纹的移动,检测精度为 $\lambda/2$ 。本文创新性地提出可以检测到整

数和分数级条纹移动量的定线灰度化图像处理技术,提高了检测相位的精度^[21]。

为了验证检测结果的可行性,首先采用干涉条纹计数仪对调相器的整数条纹进行了检测,再与定线灰度化图像处理技术的结果进行对比。实验结果表明,0~150.0 V 电压范围内的干涉条纹移动数目为 21 条,条纹间隔周期约为 7.0 V。以实验室常见的 0~30.0 V 电压源为基准,计数仪测量的整数条纹的移动数目为 4 条。结合信号发生器、功率放大器、数字示波器、光电探测器等对 25.0 V 电压驱动的调相器进行响应时间测试,器件的开关响应时间约为 7 ms。

3.1 利用定线灰度化图像处理技术检测整数条纹

以干涉图像的中部位置作为水平参考线,记录该参考线上所有灰度值,以反映干涉条纹的强度变化趋势,如图 4 所示。

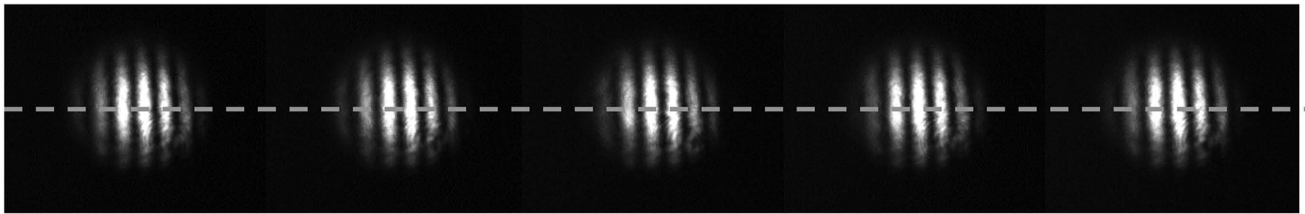


图 4 选取的参考线

Fig. 4 Selected reference line

灰度值与条纹相对位置的关系曲线如图 5 所示,其中 1、2、3、4、5、6 为明纹,1'、2'、3'、4'、5' 为暗纹。

每间隔一定电压检测并记录一次图 5 所示的曲线,得到一系列灰度值与条纹相对位置的关系曲线,并比较它们在暗纹位置、明纹位置上的差异,最终可以得出相位的移动量随电压的变化关系。批量处理 0~30.0 V 电压下的干涉条纹图像,随机选取驱动电压为 1.0、4.0、8.0 V 时对应的灰度值信息,绘制灰度值与水平方向相对位置的关系曲线,如图 6 所示,可以看出,电压为 1.0 V 和 8.0 V 时的明纹中心位置或暗纹

位置出现了重合。

在干涉条纹单向平移过程中,灰度曲线每间隔 7.0 V 出现一次极值,可以理解为干涉条纹发生了 1 级移动,即光程调节了 $\lambda/2$,大量的重复性实验支撑了本结论。图 7 所示为随机给出的驱动电压为 3.0 V 和 10.0 V 时的灰度分布曲线及驱动电压为 8.0 V 和 15.0 V 时的灰度分布曲线。为了进一步说明问题,选取 0~28.0 V 电压范围内变化 4 个周期(光程可调量为 2λ ,相位可调量为 4π)的灰度分布曲线来定量检测分数级条纹。

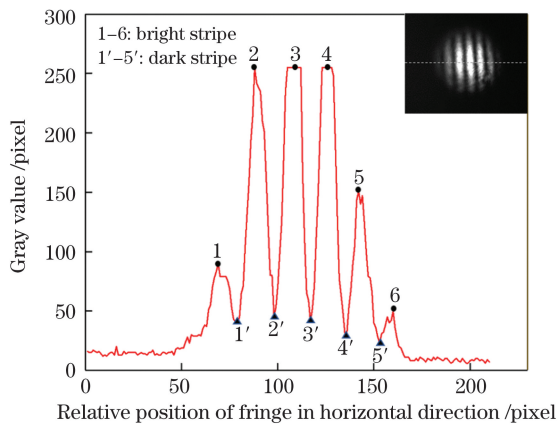


图 5 灰度值与条纹相对位置的关系

Fig. 5 Gray value versus relative position of fringe

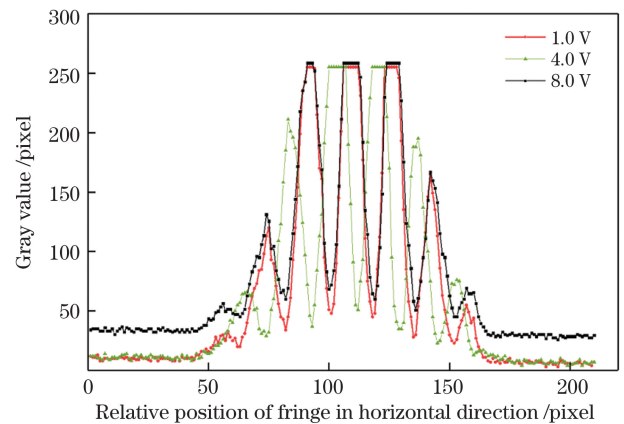


图 6 不同驱动电压下的灰度值

Fig. 6 Gray values under different driving voltages

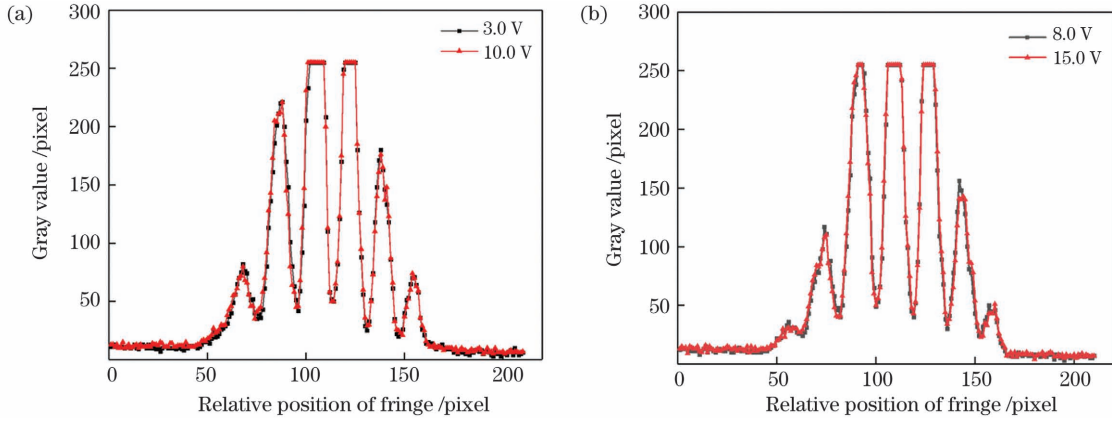


图 7 灰度值随电压的变化曲线。(a)电压为 1.0 V 和 8.0 V;(b)电压为 8.0 V 和 15.0 V

Fig. 7 Gray value versus voltage. (a) Voltages are 1.0 V and 8.0 V; (b) voltages are 8.0 V and 15.0 V

3.2 利用定线灰度化图像处理技术检测分数条纹

干涉条纹能在电压驱动下单向移动,通过比对单个周期内条纹的移动情况,计算某个条纹相对上一个位置的移动量,从而实现干涉条纹的分数级计数^[22]。

利用此方法可以选择跟踪亮纹或暗纹的轨迹进行

测量。由于测量时亮纹部分波峰呈饱和态,不利于计数,最终选择跟踪暗纹的轨迹进行检测。随机选取驱动电压为 3.0 V 和 5.0 V,根据条纹灰度值分布曲线计算两电压对应的灰度值差值,即为条纹移动量(以 pixel 为单位),如图 8 所示。

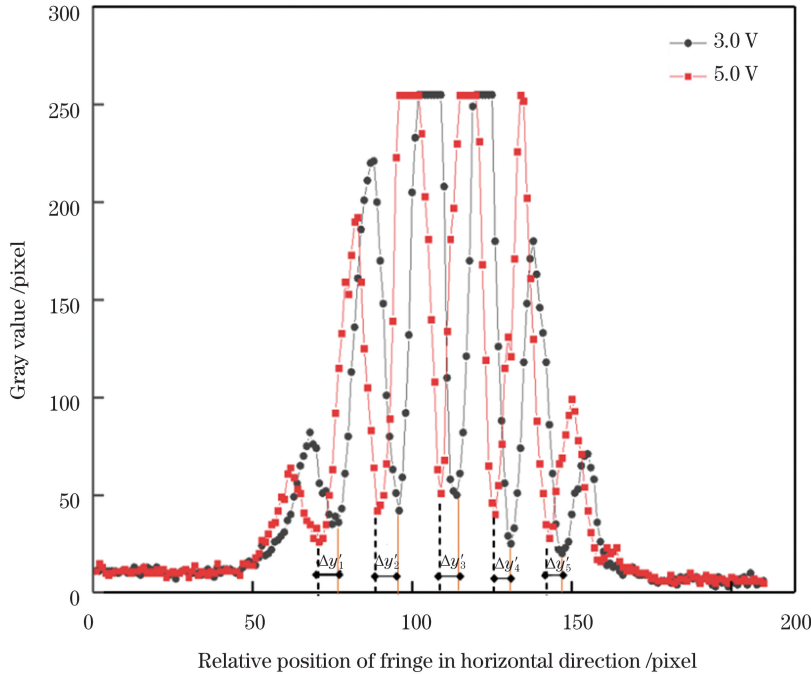


图 8 不同外加电压下的条纹灰度值

Fig. 8 Fringe gray values under different applied voltages

用 $\Delta\bar{y}''$ 表示在 0~28.0 V 范围内驱动电压每改变 1.0 V 暗纹移动的距离平均值,用 $\Delta\bar{H}'$ 表示在 0~28.0 V 范围内暗纹间隔的平均值:

$$\Delta\bar{y}'' = \frac{\Delta\bar{y}'_1 + \Delta\bar{y}'_2 + \dots + \Delta\bar{y}'_{28}}{28}, \quad (10)$$

$$\Delta\bar{H}' = \frac{\Delta\bar{H}'_0 + \Delta\bar{H}'_1 + \dots + \Delta\bar{H}'_{28}}{29}, \quad (11)$$

式中: $\Delta\bar{y}'_1 \sim \Delta\bar{y}'_{28}$ 为 0~28.0 V 范围内暗条纹移动的距离; $\Delta\bar{H}'_0 \sim \Delta\bar{H}'_{28}$ 为 0~28.0 V 范围内暗条纹的间隔。

将 0~28.0 V 范围内的相关数据代入式(10)、(11)得

$$\Delta\bar{y}'' \approx 2.57, \Delta\bar{H}' \approx 18.1. \quad (12)$$

可见:驱动电压每改变 1.0 V,暗纹平均移动 2.57 pixel;电压每改变 7.0 V,暗纹平均移动 18 pixel,即电压每改变(7.0/18)V,干涉条纹图像平均移动 1 pixel,且能被图像法检测出来。因为迈克耳孙干涉仪的条纹移动周期为 $\lambda/2$,所以能被检测到的调相器光程调节精度为 $\lambda/36$ 。图 9(a)所示为在 0~28.0 V 实验室电源电压区间实测的调相光程随外加

电压的变化曲线,可以看出,调相光程与外加电压呈良好的线性变化关系。在更精细的电压调节下,例如随机选取 3.0~4.0 V 电压范围,每间隔 0.2 V 调节一次并记录光程变化,调相光程与外加电压也呈现出良好的线性变化关系,如图 9(b)所示。

已有的液态调相器控制方法得到的相位调制幅值

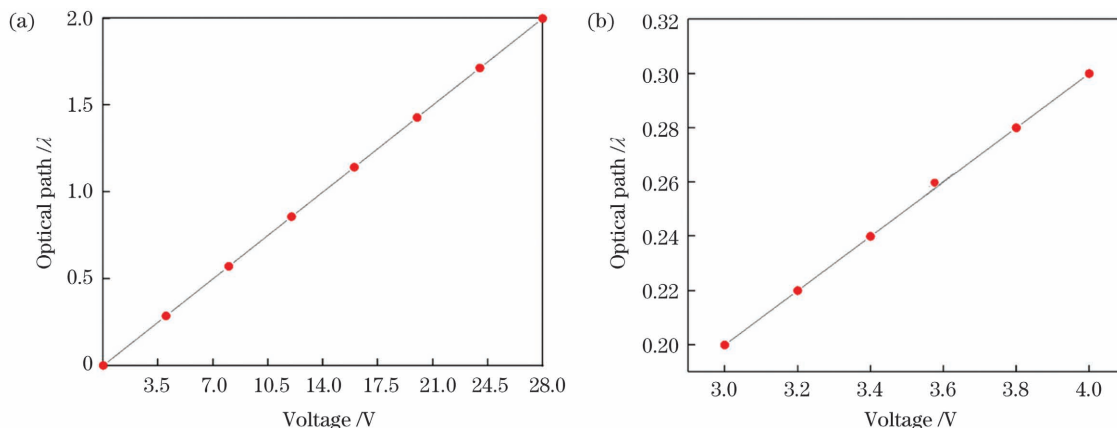


图 9 光程随电压的变化。(a)电压为 0~28.0 V;(b)电压为 3.0~4.0 V

Fig. 9 Optical path versus voltage. (a) Voltage is 0~28.0 V; (b) voltage is 3.0~4.0 V

表 1 液态调相器的相位调制幅值范围和控制条件对比
Table 1 Comparison of phase modulation amplitude range and control condition of liquid phase modulator

Method	Phase modulation range	Reference
Liquid crystal	$2\pi@85$ V	[11]
Electrowetting	$6.68\pi@150$ V	[13]
Electromagnetic driving	$21\pi@150$ mA	[14]
Piezoelectric ceramics	$4\pi@28$ V	This paper

3.3 器件响应时间测试

响应时间是衡量调相器件性能的重要指标之一,

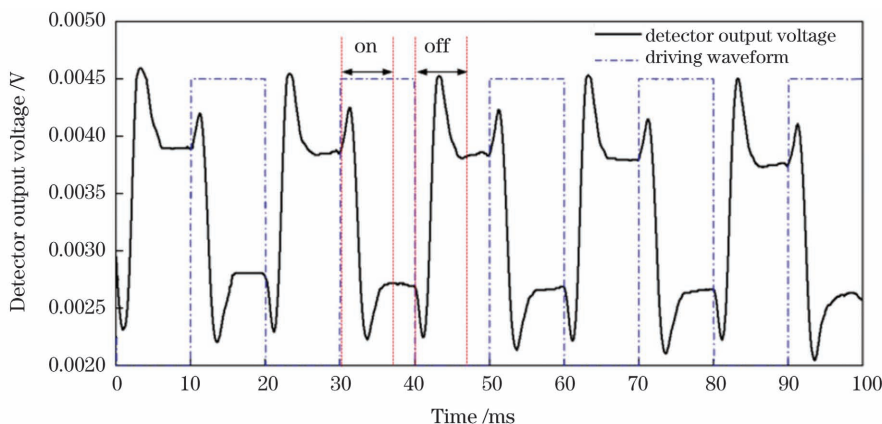


图 10 调相器在驱动电压为 25.0 V 时的时间响应曲线

Fig. 10 Time response curve of phase modulator at driving voltage of 25.0 V

4 结 论

基于压电陶瓷制备了光学液体调相器并实现了输

的控制范围如表 1 所示。电磁驱动的方法需要大电流控制,电流热效应对液体调相器不利,因此液体调相器大多倾向于电压控制。相较于液晶或电润湿的电压控制方案,本文调相器的单位电压调相效率高,因此可在低电压下工作。此外,压电陶瓷的控制精度可达纳米量级,所以本调相器的调相精度也较高。

本文利用函数信号发生器、功率放大器、光电探测器、数字示波器等搭建了特定电压下器件开关响应时间的测量系统。函数信号发生器输出周期为 20 ms 的方波信号,功率放大器将其放大到 25.0 V 作为器件驱动电压,调相干涉图像经光电探测器检测后以电信号形式与驱动电压一起输入数字示波器,得到图 10 所示的响应曲线,方波驱动电压可表征直流电源(DC)的开和关,可以看出器件的开、关响应时间均约为 7 ms。

综上所述,基于定线灰度化处理得到的光程随电压的变化曲线可知,对于 15 mm 口径的调相器,在 0~28.0 V 电压范围内调相器的调相范围可达 $0\sim 4\pi$,被检测到的调相精度为 $\lambda/36$,满足光学综合孔径的调相精度和检测要求,响应时间也较快。

出,结合迈克耳孙干涉仪检测手段,创新性地提出了定线灰度化图像处理方法,对调相器进行了性能检测和结果分析。得到了干涉条纹的基本移动规律,且调节

范围和精度均优于光学综合孔径子孔径的成像要求,为光学综合孔径的共相调节提供了参考。所制备的压电陶瓷管的线性工作范围为 $0\sim 150.0\text{ V}$,因此本调相器的调相范围还可拓展至 20π 以上。

参 考 文 献

- [1] 刘丽, 江月松. 综合孔径成像原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 2-3.
Liu L, Jiang Y S. Principle and application of synthetic aperture imaging[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 2-3.
- [2] Xiang M, Pan A, Zhao Y Y, et al. Coherent synthetic aperture imaging for visible remote sensing via reflective Fourier ptychography[J]. Optics Letters, 2021, 46(1): 29-32.
- [3] Tang J, Wang K Q, Ren Z B, et al. RestoreNet: a deep learning framework for image restoration in optical synthetic aperture imaging system[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 139: 106463.
- [4] 何志毅, 黄裕, 张雨益, 等. 空间光调制器扫描接收的距离选通成像激光雷达[J]. 光学学报, 2020, 40(12): 1201001.
He Z Y, Huang Y, Zhang Y Y, et al. Range-gated imaging LiDAR by scanning reception of space light modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 1201001.
- [5] 何云涛, 江月松, 王长伟. 电光调制在被动综合孔径成像探测中的应用[J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1201-1207.
He Y T, Jiang Y S, Wang C W. Application of electro-optic modulation in passive synthetic aperture imaging detection[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(6): 1201-1207.
- [6] 程阳, 曹杰, 王营博, 等. 介电弹性体驱动液体透镜的设计与分析[J]. 光学学报, 2021, 41(5): 0522004.
Cheng Y, Cao J, Wang Y B, et al. Design and analysis of liquid lens driven by dielectric elastomer [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(5): 0522004.
- [7] 刘永军, 胡立发, 曹召良, 等. 一种用于光学成像系统的新型液晶相位调制器[J]. 光学学报, 2006, 26(4): 527-530.
Liu Y J, Hu L F, Cao Z L, et al. A novel liquid crystal phase modulator for the optical imaging system [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(4): 527-530.
- [8] Gopinath J T, Bright V M, Cogswell C C, et al. Simulation of electrowetting lens and prism arrays for wavefront compensation [J]. Applied Optics, 2012, 51(27): 6618-6623.
- [9] 赵祥杰, 刘仓理, 曾建成, 等. 基于聚合物网络液晶的近红外波段快响应相位调制器[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0623001.
Zhao X J, Liu C L, Zeng J C, et al. Fast response phase modulator in infrared waveband based on polymer network liquid crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0623001.
- [10] Ashtiani A O, Jiang H R. A liquid optical phase shifter with an embedded electrowetting actuator [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2017, 26(2): 305-307.
- [11] Wang Q H, Xiao L, Liu C, et al. Optofluidic variable optical path modulator[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 7082.
- [12] Wang X Z, Fells J A J, Shi Y P, et al. A compact full 2π flexoelectro-optic liquid crystal phase modulator[J]. Advanced Materials Technologies, 2020, 5(12): 2000589.
- [13] 陈洛. 基于电磁驱动效应的液体光学调相器的研制[D]. 南京: 南京邮电大学, 2021: 46-47.
Chen L. Reseach and fabrication of liquid optical phase modulator based on electromagnetic driving effect[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2021: 46-47.
- [14] Zhang W J, Zhao R, He Y J, et al. Electrowetting-actuated optofluidic phase modulator[J]. Optics Express, 2021, 29(2): 797-804.
- [15] Wei X, Zhao R, Liang Z C, et al. Design, fabrication, and characterization of an optofluidic phase modulator array based on the piezoelectric effect[J]. Optics Letters, 2022, 47(6): 1315-1318.
- [16] 韩一石, 赵蓓丝, 罗吴金, 等. 一种倍频因子及输出相位连续可调的微波光子移相系统[J]. 光子学报, 2020, 49(6): 0606001.
Han Y S, Zhao B S, Luo W J, et al. A photonic microwave phase-shifting system with continuously tunable phase shift and frequency multiplication factor[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(6): 0606001.
- [17] 李飞, 张树君, 徐卓. 压电效应: 百岁铁电的守护者[J]. 物理学报, 2020, 69(21): 217703.
Li F, Zhang S J, Xu Z. Piezoelectricity: an important property for ferroelectrics during last 100 years[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(21): 217703.
- [18] 谢丽, 王家秋, 钟哲强, 等. 压电陶瓷驱动器疲劳对变形镜校正带宽的影响[J]. 光子学报, 2019, 48(9): 0912005.
Xie L, Wang J Q, Zhong Z Q, et al. Influence of fatigue of piezoelectric ceramic actuators on correction bandwidth of deformable mirrors[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(9): 0912005.
- [19] 刘力, 杨莉松, 王桂英, 等. 利用光纤共焦扫描显微镜的轴向响应曲线测定压电陶瓷的逆压电伸缩效应[J]. 光学学报, 2001, 21(3): 380-382.
Liu L, Yang L S, Wang G Y, et al. Measurement of converse piezoelectric expand and contract of PZT with the axial response curve of fiber optical confocal scanning imaging microscope[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(3): 380-382.
- [20] Iurlova N A, Oshmarin D A, Sevodina N V, et al. Modeling of deformation of a plate using piezoelectric elements located on its surface[J]. Computational Continuum Mechanics, 2019, 12(4): 415-426.
- [21] 杨晓许, 周泗忠, 相里斌. 转镜式傅里叶变换光谱仪光程差非线性的拟合法补偿[J]. 光子学报, 2005, 34(11): 1647-1650.
Yang X X, Zhou S Z, Xiangli B. Compensating nonlinearity of optical path difference of rotary Fourier transform spectrometer with fitting interferogram[J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(11): 1647-1650.
- [22] 苏俊宏. 长度测量中干涉条纹的自动识别技术研究[J]. 光子学报, 2003, 32(5): 615-617.
Su J H. Research on automatic recognition technology for interference fringes in measurement of length [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(5): 615-617.

Preparation and Performance Test of Optical Liquid Phase Modulator Based on Piezoelectric Ceramic

Chen Yue, Wu Chenbin, Liang Zhongcheng, Kong Meimei, Zhao Rui, Guan Jianfei, Chen Tao*

*College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics(Future Technology),
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China*

Abstract

Objective Optical integrated aperture imaging involves an array of objects in a certain form based on multiple small aperture sub-mirrors arranged in a certain form. Its imaging resolution can be equivalent to that of a large-aperture lens, which is widely used in astronomy, medicine, commerce, military scientific research, and other fields. Resolving the problems of loading error and environmental engineering requires independent static or dynamic phase compensatory adjustment for each sub-mirror to meet the phase modulation accuracy requirement of 0.1λ (λ is the wavelength of incident light) or the higher requirement. Liquid optical devices have potential application prospects owing to their compact structure, light weight, and low price, and they do not require mechanical devices. A piezoelectric ceramic tube has the advantages of high sensitivity, good linearity, strong integration, and easy control. Furthermore, the tube can be filled with clear liquid and its length is adjustable, providing a new approach for the preparation of liquid optical phase modulators. Much research has been conducted on magnesium alloy liquid optical devices and good results have been achieved. However, further research is necessary to make practical engineering applications possible and new liquid optical phase modulators must be developed.

Methods Transparent liquid is filled into the cavity of a piezoelectric ceramic tube. The length of the liquid produces a micrometer-level displacement change because of the inverse piezoelectric effect. Then, encapsulation and illumination are performed in the cavity length direction and the optical phase produces little change. A piezoelectric ceramic tube with an inner diameter of 15 mm, outer diameter of 20 mm, and height of 12 mm is filled with methyl silicone oil and encapsulated with a gasket, an upper cover sheet, and a lower cover sheet. Finally, a Michelson interferometer is used to observe and analyze the accuracy, range, response time, and other performance characteristics of the phaser.

Results and Discussions First, integer fringes are detected using fixed-line grayscale values. Alignment gray value detection involves making a horizontal reference line in the middle of the interference image and recording all gray values on the reference line. These gray values can reflect the intensity change trend of the interference fringes. Then, the curve is detected and recorded once at a certain voltage interval, and a series of curves of the relationship between the gray values and the position of the fringes are obtained. The differences between the positions of the dark and bright fringes are compared; as a result, the phase shift can reflect the relationship between the shift of phase and the voltage (Fig. 6). The interference fringes are recorded, and an extreme value of the grayscale curve appears every 7.0 V interval, which can be understood as a first-order shift of the interference fringe, indicating that the optical path is adjusted by $\lambda/2$ (Fig. 7). Moreover, the fixed-line grayscale values are used to detect the fractional fringes, and the interference fringes can move in one direction under the driving voltage. The fractional counting of interference fringe can be achieved by comparing the movement of the fringes in a single cycle and calculating the movement of a fringe relative to the previous position (Fig. 8). The variation curve of the optical path of phase modulator with the applied voltage measured at 0–28 V shows the good linear relationship (Fig. 9). The measured phaser response time is 7 ms (Fig. 10).

Conclusions To meet the high-precision requirements and achieve a large adjustment range, a liquid optical phase modulator is constructed by filling the transparent liquid into a piezoelectric ceramic tube. Optical phase adjustment is performed through a small electric displacement generated by the piezoelectric effect in the light-transmitting direction. The piezoelectric ceramic tube filled with transparent liquid is used as the core structure of transmissive optical phase modulator. The optical phase modulation devices in this study are not only compact and significantly reduced in cost but also have high precision and a wide range. An experiment is conducted using the fixed-line grayscale values and a Michelson interferometer with a wavelength of 632.8 nm. Under a voltage of 0–28 V, the phase modulator can reach a modulation range of $0-4\pi$ and an accuracy of $\lambda/36$. When the applied voltage is 150 V, the modulation range can be expanded to 20π . This meets the requirements of optical synthetic aperture subaperture phase modulation.

Key words imaging systems; image processing; optical synthetic aperture; piezoelectric ceramic tube; liquid phase modulator; interference detection