

文章编号:1007-2780(2017)01-0007-06

傅立叶 1/4 波片法检测液晶光学相控阵 移相量的精度分析

汪相如^{1*}, 贺晓娴¹, 方琳¹, 黄子强²

(1.电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 611731;
2.电子科技大学 电子科学技术研究院, 四川 成都 610054)

摘要:为了更好地实现对液晶光学相控阵的移相分布特性进行高精度的测量, 本文针对傅里叶四分之一波片法的测试精度进行理论仿真和试验验证。仿真结果表明, 该方法测试误差小于 0.08° , 采用标准二分之一波片对其进行验证, 实验结果表明重复精度小于 0.3° 。因此, 针对液晶光学相控阵波控数据 0.5° 移相控制精度要求, 傅里叶四分之一波片法的测试精度和重复精度能够满足移相测量精度要求。

关键词:液晶移相; 相移检测; 傅里叶变换; 四分之一波片法

中图分类号: O734 文献标识码: A doi:10.3788/YJYXS20173201.0007

Precision analysis on the phase delay measurement method of Fourier quarter-wave-plate on liquid crystal optical phased array

WANG Xiang-ru^{1*}, HE Xiao-xian¹, FANG Lin¹, Huang Zi-qiang²

(1.School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and
Technology of China, Chengdu 610054, China;
2.Research Institute of Electronic Science and Technology, University of Electronic
Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: With the purpose of highly precise measuring the phase delay distribution of liquid crystal optical phased array, the accuracy and precision of the measuring method of Fourier Quarter-Plate are both analyzed theoretically and evaluated experimentally. Numerical simulations indicate that the error of this method is smaller than 0.3° when we assumed a couple of ordinary parameters on the system. A practical experiment on a standard half wave plate is also accomplished showing that the accuracy is smaller than 0.3° and the repeat precision is also smaller than 0.3° . Simulations and experiments show

收稿日期: 2016-07-05; 修订日期: 2016-08-25.

基金项目: 国家自然科学基金 (No.61405029; No.91438108)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.61405029; No.91438108)

* 通信联系人, E-mail: xiangruwang@uestc.edu.cn

a good agreement with each other so that a demonstration Fourier Quarter-Plate method can meet the requirement on phase delay measurement better than 0.5° on liquid crystal optical phased array.

Key words: liquid crystal phase delay; phase delay measurement; Fourier transformation; method of quarter plate

1 引言

随着激光技术的快速发展,以液晶光学相控阵(LC-OPA)为代表的激光相控技术,现已成为实时可编程的电控光束扫描技术的重要方案,并且成为当前激光工程的研究热点之一^[1-2]。它的驱动电压低、可控性强、重量轻,而且在器件研制、波控方法等方面已经具有突破性进展^[3-5],在激光通信、光脉冲整形、光信息处理与存储、生物医学成像等许多领域发挥着重要的作用^[6-8]。液晶移相的空间分布特征直接决定液晶相控阵的衍射效率、指向精度、波束赋形等重要技术指标。因此,对液晶相控阵的“电压—相位差”关系进行精确的测量是一个非常重要的研究课题,可能会成为液晶相控阵在下一阶段发展的制约因素。

光学晶体材料移相量的测量方法包括:光谱测相法、补偿法、光强法、相位调试法等。但是这些测量方法仅针对均匀的单元器件,而无法适用于液晶相控阵这类分辨率高的阵列器件。利用液晶电光器件的补偿法^[9]可以对二维的光寻址空间调制器样品进行有效检测,但分辨率有限,无法检测液晶相控阵器件中 $3\ \mu\text{m}$ 电极的具体作用及电极间距等的影响,测量精确度也有待进一步改进。加入显微物镜的光强检测法^[10]在分辨率上有所提高,但由于检测装置中光学器件不均匀或存在污点造成的影响,使其检测结果有干涉条纹影响,而无法准确获得液晶相控阵上每一点的实际相位分布情况。最近,本课题组提出的傅里叶四分之一波片法能够解决此问题^[11],该方法基于传统的四分之一波片法的光学系统,但在数据处理上提出了傅里叶频谱分量的获取方法,不仅能够实现快速自动测量,同时适用于阵列型二维器件,能够进行高分辨率、快速自动的液晶移相分布检测。本文基于该检测方法,从理论和试验两个层面研究该技术的测试精度。

2 理论

2.1 系统光路与检测原理

傅里叶四分之一波片法的光路系统和常规四分之一波片法类似,如图 1 所示。系统采用的单色光源一般选用对应波长的连续激光器,激光经过起偏器出射光成为线偏振光,随后依次经过待测器件、四分之一波片,其中四分之一波片光轴方向和起偏器的起偏方向一致或者相互垂直,待测液晶器件的光轴和前二者的光轴方向交叉 45° 。随后激光经过检偏器入射到光电探测器,并将接收到的激光转换成电信号。

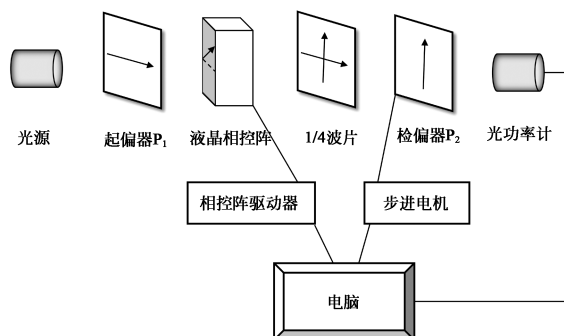


图 1 1/4 波片法自动测试系统

Fig.1 Block diagram of Fourier quarter-plate measuring system

和传统的四分之一波片法不同,本测试系统中的检偏器和光电探测器都和电脑或者具备信号采集和处理能力的控制中心相连。控制中心除了能够通过给步进电机发送控制指令使得检偏器转动外,还能够获取光电探测器的光功率信号,同时控制中心算法还能够依据检偏器角度数据和探测器功率数据,计算器件的液晶移相器件的相移量。

根据四分之一波片法的基本理论,假设透过起偏器后的光功率为 P_0 ,当检偏器与 x 轴夹角为 θ 时,该线偏振光透过检偏器后的功率为^[7]

$$P = P_0 \cos^2(\theta - \frac{\varphi}{2}), \quad (1)$$

其中: φ 是液晶移相器件的 e 光分量和 o 光分量的相移差,由于 o 光分量不是驱动电压的函数,因此可以将相移差 φ 认定为液晶对入射 e 光分量的有效相移。

为了从光功率信息中提取出相移 φ 的值,对光强表达式作傅立叶变换,满足

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} P(\theta) e^{-j\omega\theta} d\theta. \quad (2)$$

由于基波频率 $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$, T 为信号的一个周期。式(1)的周期为 π ,因此基波频率 $\omega_0 = 2$ 。当 $\omega = \omega_0 = 2$ 时,带入式(2),

$$X(j2) = \int_{-\infty}^{\infty} P(\theta) e^{-j2\theta} d\theta = \int_0^{2\pi} P(\theta) \cdot \cos 2\theta d\theta - j \int_0^{2\pi} P(\theta) \cdot \sin 2\theta d\theta. \quad (3)$$

将(1)带入(3)式, $X(j2)$ 的实部可以化简为:

$$\int_0^{2\pi} P \cdot \cos 2\theta d\theta = -\frac{P_0}{4} \cos \varphi \int_0^{2\pi} d\theta. \quad (4)$$

$X(j2)$ 的虚部可以化简为:

$$\int_0^{2\pi} P \cdot \sin 2\theta d\theta = \frac{P_0}{4} \sin \varphi \int_0^{2\pi} d\theta. \quad (5)$$

将(4)和(5)相除,得到:

$$\tan \varphi = -\frac{\int_0^{2\pi} P \cdot \sin 2\theta d\theta}{\int_0^{2\pi} P \cdot \cos 2\theta d\theta}. \quad (6)$$

当检偏器以某一步进转动时, θ 并不连续,(6)式退化级数求和,

$$\tan \varphi = -\frac{\sum_i P_i \cdot \sin 2\theta_i}{\sum_i P_i \cdot \cos 2\theta_i}, \quad (7)$$

其中: P_i 是检偏器与 x 轴夹角为 θ 时透过检偏器的光功率。

因此,步进电机带动检偏器转动控制的情况下,能够获取一些列角度 θ_i 和一系列光功率值 P_i ,通过式(7),所有的数据能够获得测试结果,可以消除系统随机所造成的误差。从傅里叶频谱的角度来看,该方法仅选择基频分量的值,对其他频率的分量进行了数字滤波,因此该方法能够很好地排除机械振动等其他的随机系统误差。

2.2 精度分析

通过式(7)可以发现,傅里叶四分之一波片法检测误差的来源主要包括 2 个方面:光源功率不稳定、检偏器角度误差,结合式(1),我们可以假设检偏器的转动步进为 1° ,接收到的激光功率 p_i 和检偏器的角度 θ_i 的关系满足

$$p_i = A \cos(2\theta_i - \varphi) + r_i, \quad (8)$$

$$\theta_i = i \Delta \theta, \quad (9)$$

其中:随机变量 r_i 作为实验检测系统的系统误差,源自检测环境、实验器件及仪器等的功率误差; $\Delta \theta$ 是步进角度, A 是功率曲线的幅度。

为了更好地表述检测系统的精度与系统存在的随机误差的关系,本文从两方面对其进行仿真,分别是:随机功率误差 r_i ,步进角度 $\Delta \theta$ 。

2.2.1 随机功率误差 r_i

仿真考虑随机功率误差给系统带来的精度影响,因此我们假设不存在角度误差,同时,步进角度 $\Delta \theta$ 设定为一个恰当的值, $\Delta \theta = 0.1^\circ$,功率幅度 A 设定为 1。

假定步进电机一圈的数据,即:3 600 个数据,针对不同的待测液晶相移 φ ($25^\circ, 55^\circ, 85^\circ, 115^\circ, 155^\circ$),采用 matlab 产生随机变量 r_i ,其中仿真假设 r_i 可以分别取值两个 0.2,和 0.05。基于傅里叶四分之一波片法的基本原理和算法,获取两组数据,并列于表 1 中。

由表 1 可知,随机变量为信号幅值的 1/5 时,平均误差小于 0.3° ;而随机误差为信号幅值的 1/20 时,平均误差则小于 0.1° ,表现非常优秀。

表 1 傅立叶变换算法仿真结果(不同激光功率误差)

Tab.1 Numerical simulation on the method of Fourier Quarter-Plate(Different Laser Power Errors)

Phase delay/ $^\circ$	Amplitude	Power error	Obtained result on phase delay/ $^\circ$	Error on phase delay
25	1	1/20	24.94	0.06
55	1	1/20	54.91	0.09
85	1	1/20	84.93	0.07

续 表

Phase delay/(°)	Amplitude	Power error	Obtained result on phase delay/(°)	Error on phase delay
115	1	1/20	114.91	0.09
155	1	1/20	154.92	0.08
25	1	1/5	24.79	0.21
55	1	1/5	55.15	0.15
85	1	1/5	84.72	0.28
115	1	1/5	115.21	0.21
155	1	1/5	155.28	0.28

2.2.2 步进角度

仿真考虑步进角度给系统带来的精度影响, 因此我们假设不存在角度误差 e_i 和功率误差, 同时, 步进角度 $\Delta\theta$ 分别设置为 9° 、 3° 和 1° , 功率幅度

A 设定为 1。采用 matlab 产生随机变量 r_i , 其中仿真假设 r_i 取值为 0.2。基于傅里叶四分之一波片法的基本原理和算法, 获取三组数据, 并列于表 2 中。

表 2 傅立叶变换算法仿真结果(不同检偏器步进角度误差)

Tab.2 Numerical simulation on the method of Fourier Quarter-Plate (Different Rotator step)

液晶移相 φ /(°)	步进/(°)	r_i 最大值	测量相位/(°)	误差
25	9	1/5	26.31	1.31
77	9	1/5	77.27	0.27
108	9	1/5	109.16	1.16
276	9	1/5	276.45	0.45
302	9	1/5	302.77	0.77
25	3	1/5	25.23	0.23
77	3	1/5	77.46	0.46
108	3	1/5	108.56	0.56
276	3	1/5	276.82	0.82
302	3	1/5	303.01	1.01
25	1	1/5	25.29	0.29
77	1	1/5	77.23	0.23
108	1	1/5	108.37	0.37
276	1	1/5	276.16	0.16
302	1	1/5	302.15	0.15
25	1	1/5	25.02	0.02
77	1	1/5	76.97	0.13
108	1	1/5	108.01	0.08
276	1	1/5	276.01	0.07
302	1	1/5	301.97	0.10

通过以上仿真数据可知, 相同类型、强度的干扰噪声下, 给定一致的初相位分别采用不同步进

角度的情况下, 进行计算获得结果情况: 9° 步进的样本所得结果的平均误差为 0.792; 3° 步进的平

误差为0.616;1°步进的平均误差为0.240,0.1°步进的平均误差为0.080。步进角度的大小对移相的计算精度有明显的影响。在实际检测过程中,来自外界的噪声可能是多种形式的影响,并不能预测其数学期望或方差。所以为了实现液晶相控阵的高分辨检测,应尽可能多地采集实验数据。

3 实验验证

为了测试系统测量的准确性,对标准的1/2波片进行试验,将1/2波片放入系统中,代替液晶相控器件。实验所用到的设备主要有:Coherent波长为1 064 nm光源一台(功率稳定性优于5%)、武汉优光1 064 nm的高偏振隔离度的起偏器和检偏器各一个、1 064 nm的四分之一波片一个、DGM60-ASM34BK-D步进电机一个(转动精度优于1/80°)、Ophir光功率计一个(精度优于10 nW),液晶相控阵器件和驱动器一套、标准波片若干、1/2波片。系统中的各器件的机械转动采用PI公司的差分转动调整架,转动精度优于0.1°。入射光依次通过起偏器、1/2波片、1/4波片、检偏器。运行自动检测程序,控制步进电机以0.1°为步进旋转,即电机步进为0.1°,带动检偏器从0°起旋转,光功率计在其每转动0.1°时获取当前光功率数据并进行存储。随着检偏器的旋转,光功率计上获取到的光功率信息不同,总体呈正弦信号。

检偏器分别在0°,0.1°,0.2°……360°的情况下,光功率计获取的信息如图2所示。由于实验测量中存在小量的激光光源不稳定、环境光影响、机械振动等,引入的随机误差,用傅里叶四分之一波片法代替传统四分之一波片法可以减少这些随机误差给实验结果带来的影响。

通过对光功率计获取并存储下的这组数据进

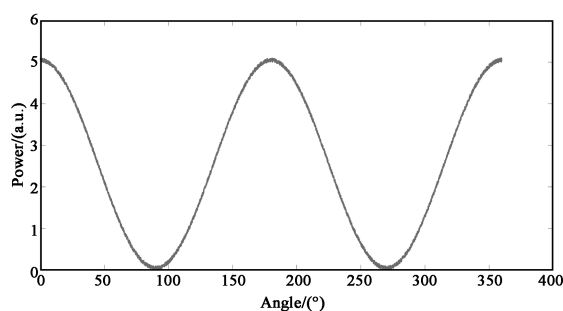


图2 检测1/2波片的探测器激光功率

Fig.2 Detected laser power on the standard half wave plate

行傅立叶计算,结果为180.2°,理论上1/2波片产生的相位延迟应该是180°,因此测量误差为0.2°。

对1/2波片进行40次重复测试,测试结果为均处于179.8°~180.3°,数据方差为0.013 6,测试结果基本保持稳定,就重复性而言,40次测量结果基本能够处于±0.3°的偏差。

4 结 论

傅里叶四分之一波片法能够实现对偏振移相器件的相移量进行精确测量,结合恰当的步进控制、信号采集等电路,则能够实现对相移量进行高精度的自动化测量。通过数学仿真,结果表明,该方法的测量精度与采集激光功率误差、测试步进角度有关。基于常规检测仪器和控制仪器参数(功率相对误差小于5%,步进角度为0.1°),该检测方法测试精度的仿真结果小于0.05°。采用该方法对标准的二分之一波片进行试验测量,经过40次的重复测量,测试系统的重复精度小于0.3°。表明傅里叶四分之一波片法具备很好的测试精度和重复精度,能够满足在激光通信、光脉冲整形、光信息处理与存储生物医学成像等许多领域中液晶光学相控阵的移相测量需求。

参 考 文 献:

- [1] MINISCALCO W, WAITE S, FISHER K, *et al.* 10 Gb/s ethernet laser communications using optical space-time division multiple access [C]//Proceedings of 2010 Military Communications Conference, San Jose, California, USA: IEEE, 2010: 1607-1612.
- [2] MCMANAMON P. *Laser Radar: Progress and Opportunities in Active Electro-Optical Sensing* [M]. Washington, DC: National Academy of Sciences, 2014.
- [3] AMAKO J, MIURA H, SONEHARA T. Wave-front control using liquid-crystal devices [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(23): 4323-4329.

- [4] MEYER R A. Optical beam steering using a multichannel lithium tantalate crystal [J]. *Applied Optics*, 1972, 11(3): 613-616.
- [5] 汪相如, 谭庆贵, 黄子强, 等. 液晶光学相控阵的双波束成形和 2 维扫描技术[J]. 激光技术, 2013, 37(5): 631-635.
WANG X R, TAN Q G, HUANG Z Q, *et al.* Dual beam formation and 2-D scan technique of liquid crystal optical phased array [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(5): 631-635. (in Chinese)
- [6] LIU R X, ZHENG X L, LI D Y, *et al.* Retinal axial focusing and multi-layer imaging with a liquid crystal adaptive optics camera [J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(9): 094211.
- [7] 张亚超, 胡立发, 彭增辉, 等. 液晶波前校正器过驱动矩阵的测量方法研究[J]. 液晶与显示, 2014, 29(5): 709-715.
ZHANG Y C, HU L F, PENG Z H, *et al.* Method for characterizing the overdrive-matrix of a liquid crystal wave-front corrector [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(5): 709-715. (in Chinese)
- [8] KURIHARA M, HASHIMOTO N. Liquid crystal optics for laser beam modulation [C]//Proceedings of SPIE 6374, Optomechatronic Actuators, Manipulation, and Systems Control. Boston, MA: SPIE, 2006: 63740D.
- [9] 漆明春, 黄子强, 么周石, 等. 液晶电光器件相位延迟的二维分布特征的测试[J]. 中国激光, 2014, 41(S1): 108004.
QI M C, HUANG Z Q, YAO Z S, *et al.* Measurement of phase delay of two-dimensional distribution characteristics of liquid crystal electro-optic devices [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(S1): 108004. (in Chinese)
- [10] ZHAO X J, LIU C L, ZHANG D Y, *et al.* Direct investigation and accurate control of phase profile in liquid-crystal optical-phased array for beam steering [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(29): 7109-7116.
- [11] 索国国, 汪相如, 黄子强, 等. 傅里叶 $\lambda/4$ 波片双折射检测方法[J]. 激光技术, 2016, 40(1): 131-135.
SUO G G, WANG X R, HUANG Z Q, *et al.* Test method for birefringence of Fourier quarter-wave-plate [J]. *Laser Technology*, 2016, 40(1): 131-135. (in Chinese)

作者简介:汪相如(1983—),男,安徽黄山人,博士,副教授,研究方向为液晶光电子学。E-mail: xiangruwang@uestc.edu.cn

贺晓娟(1996—),女,山西临汾人,硕士,研究方向为液晶光电子学。E-mail: hexiaoxian2@163.com