

文章编号: 1001-3806(2012)05-0645-04

## 液晶光栅相控阵偏转波前测量方法研究

郑春艳<sup>1</sup>, 杨若夫<sup>1</sup>, 刘艺<sup>2</sup>, 吴健<sup>1\*</sup>

(1. 电子科技大学 光电信息学院, 成都 610054; 2. 电子科技大学 物理电子学院, 成都 610054)

**摘要:** 为了测试相控阵激光雷达的关键器件液晶光栅相控阵的偏转光束波前, 以监控和评价雷达扫描光束的质量, 采用带有光束变向功能的径向剪切干涉测量方法, 进行了理论分析和实验验证, 取得了口径为  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$  的偏转波前测试系统与商用 WYKO 干涉仪的比对测试数据。两种仪器对同一块平面样板测出的波前之差的峰谷值小于  $\lambda/20$ , 均方根值小于  $\lambda/200$ , 还取得了实测液晶光栅相控阵不同偏转光束的波前数据。结果表明, 该方法可以对液晶光栅相控阵的偏转波前进行高精度测试。

**关键词:** 测量与计量; 偏转波前测量; 径向剪切干涉; 液晶光栅; 光学相控阵

**中图分类号:** TN247 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.05.018

## Study about deflection wavefront measurement approach of liquid-crystal grating phased array

ZHENG Chun-yan<sup>1</sup>, YANG Ruo-fu<sup>1</sup>, LIU Yi<sup>2</sup>, WU Jian<sup>1</sup>

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

**Abstract:** In order to test deflection wavefront of liquid-crystal grating phased array, a key component in phased array laser radar, and monitor and evaluate the quality of radar scanning beams, a radial shearing interference measurement technology with direction changing function was adopted and theoretical analysis and experimental verification about this method were carried out. Test data were obtained with a  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$  aperture deflection wavefront tester and a commercial WYKO interferometer respectively. The difference of test results is less than  $\lambda/20$  for peak-valley value and less than  $\lambda/200$  for root mean square (RMS) value for the same plane optical element. Deflection wavefront of liquid-crystal grating phased array was measured. The experimental results show that this method can measure deflection wavefront of the liquid-crystal grating phased array with high precision.

**Key words:** measurement and metrology; deflection wavefront measurement; radial shearing interference; liquid-crystal grating; optical phased array

## 引言

光学相控阵激光雷达是一种新体制的激光雷达。光学相控阵技术<sup>[1]</sup>可以实现激光束的无机械灵活偏转控制, 极大地推动了激光雷达的发展。液晶光栅相控阵以其体积小、重量轻、驱动电压低等优点成为了目前国际上光学相控阵研究的热点。液晶光栅<sup>[2-5]</sup>相控阵是通过调节加在液晶材料两极的电压使液晶分子发生旋转, 改变液晶对入射光的折射率, 从而改变激光束的相位延迟, 达到控制透过相控阵的出射光束指向的

目的。液晶光栅类似于一个周期可调的透射式闪耀光栅, 从光栅出射光束的方向随周期不同而改变。要实现快速、高精度的光束动态指向, 保证扫描光束的质量, 就需要对扫描光束的波前进行测试, 实时监控其光束质量, 并反馈给相控阵的波控系统, 以提供相位修正的依据。

目前国内对液晶光栅波前测试的研究还比较少, 本文中针对液晶光栅出射光束的特殊性, 提出了带光束变向装置的剪切干涉测量方法, 用来测试不同方向的扫描偏转光束的波前。

## 1 偏转光束波前测试原理

液晶光栅出射光束的方向随周期不同而改变, 需要一个能灵活测试不同方向光束波前(见图1)的测量系统。为此, 提出一个带光束变向装置的剪切干涉测

基金项目: 国家“十一五”预研课题资助项目 (H04010201)

作者简介: 郑春艳(1975-), 女, 博士研究生, 现主要从事激光波前测试方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: jwu@uestc.edu.cn

收稿日期: 2011-12-21; 收到修改稿日期: 2012-02-28

量系统(见图2)——偏转波前测试系统。光束变向装置用来改变从液晶光栅出射的偏转光束的传播方向,使得不同偏转方向的光束都能沿同一方向出射,再通过一个径向剪切干涉光路<sup>[6-9]</sup>来测试偏转光束的波前。

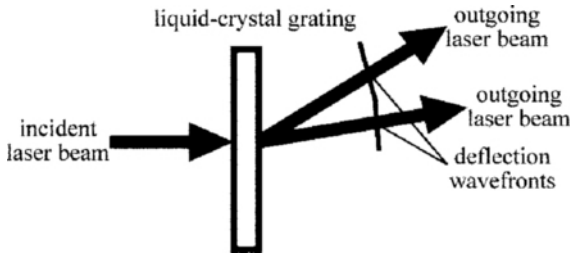


Fig. 1 Scheme of deflection wavefront

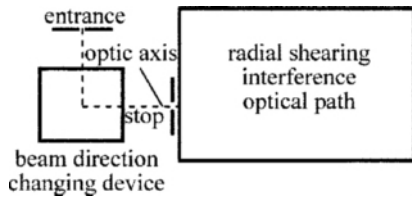


Fig. 2 Scheme of deflection wavefront measurement system

光束变向装置如图3所示,由一个平面反射镜和一个计算机控制的电动组合旋转平移台构成。反射镜垂直固定在旋转台上,其竖直方向的中心线与旋转台转轴的中心线重合,且其反射面与平移台的移动方向成 $45^\circ$ 角。待测偏转光由入光口进入,让入光口中心的垂线经过反射镜初始位置的中心。当偏转光束入射到反射镜上时,由计算机控制组合台动作,使反射镜发生旋转、平移,从而改变入射光的传播方向。

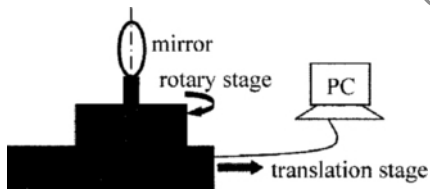


Fig. 3 Scheme of a beam direction changing device

光束变向过程见图4。设 $d$ 为入光口到反射镜初始位置中心的距离, $\alpha$ 为入射光束与平移台平移方向所成夹角, $\beta$ 为反射镜旋转角度, $\Delta d$ 为反射镜的平移距离,则反射镜的旋转角度和平移距离分别为:

$$\beta = \frac{\alpha}{2} \quad (1)$$

$$\Delta d = d \times \tan \alpha \times \tan \left( 45^\circ - \frac{\alpha}{2} \right) \quad (2)$$

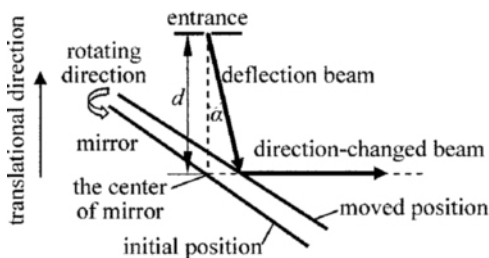


Fig. 4 Scheme of beam direction changing

只要确定了入光口到反射镜初始位置中心的距离,就可方便地得出不同偏转角度光束入射时反射镜的旋转和平移量。该光束变向装置可以校正水平方向 $\pm 90^\circ$ 范围内的偏转光束的传播方向。

由于波前测试结果要为液晶光栅各栅相控阵的相位修正提供依据,所以要求波前测试的分辨率要高。再考虑到测试的便捷、稳定性等,采用径向剪切干涉法来测量偏转波前。该方法是利用被检波面本身形成的两个径向上错位的波面产生干涉,不需引入外来参考光,所以稳定性比较好。且该方法只需采集一幅干涉条纹图即可反演待测波前,测试方便。测试使用面阵CCD相机来采集干涉图样,这样利用像素高的CCD相机可以提高反演波前的分辨率。采用的剪切干涉光路如图5所示,与通常的三角形光路不同,呈四边形结构。传统的三角形光路中反射镜与水平方向呈不规则角度,不便于调节。改成四边形光路后,光路结构较为对称,反射镜都与水平方向成 $45^\circ$ 角,光路调节难度降低,可以减小调整误差,而且经 $45^\circ$ 摆放的反射镜反射后光斑不会变形,可提高测试精度。该光路由一个分束镜、3个反射镜( $M_1, M_2, M_3$ )及一个开普勒望远系统构成。望远系统由两个凸透镜 lens 1 和 lens 2 组成,两个透镜分别位于四边形光路的两个相对支路中(任意一对支路都可)。设两个凸透镜的焦距分别为 $f_1$ 和 $f_2$ ,它们的比值 $M = \frac{f_1}{f_2} < 1$ 称为径向剪切比。入射光束经分束镜后分成两路,反射光(用虚线表示)经凸透镜1后由反射镜1和2反射,射入凸透镜2得到扩束 $\frac{1}{M}$ 倍的光束,再经反射镜3和分束镜反射射出;透射光(用实线表示)经反射镜3射入凸透镜1,再由反射镜2和反射镜1反射进凸透镜1得到缩束 $\frac{1}{M}$ 倍的光束,从分束片透射而出,扩束光束和缩束光束在空中重叠产生剪切干涉条纹,经可变光阑滤除未重叠部分后,由面阵CCD相机采集干涉图样。

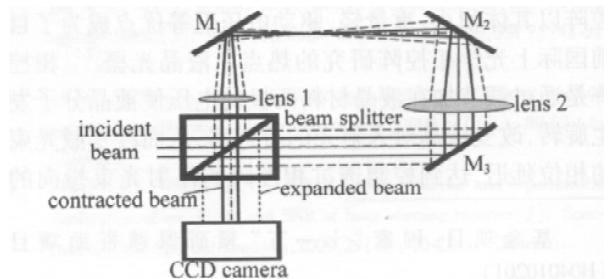


Fig. 5 Optical structure of the new quadrilateral radial shearing interferometer

由得到的剪切干涉条纹,经过傅里叶变换、滤波等计算可反演出剪切波面的相位分布,再迭代得到缩束

波面相位分布<sup>[10]</sup>:

$$\phi(x, y) = \sum_{i=0}^{n-1} \phi_{\text{opd}}(\beta^i x, \beta^i y) + \phi(\beta^n x, \beta^n y) \quad (3)$$

式中  $n$  为迭代次数  $\beta = M^2 < 1$ ,  $\phi_{\text{opd}}(\beta^i x, \beta^i y)$  为剪切波面相位分布。当迭代次数大到一定程度时  $\beta^n$  趋近于 0,  $\phi(\beta^n x, \beta^n y)$  项接近常数, 可以忽略, 这样就得出缩束波前  $\phi(x, y)$ , 再放大  $\frac{1}{M}$  倍即可得出待测波前  $\phi(Mx, My)$ 。

这样只测试一幅条纹图即可得到待测光束的波前。为提高测试精度, 减小光学器件面型误差、调试误差等系统误差对测量结果的影响, 可在放入待测器件前先保存一幅条纹图作为参考条纹图, 测试得到的畸变条纹图

与之进行比较, 在计算中扣除掉系统误差的影响。

## 2 偏转光束波前测试系统与 WYKO 干涉仪测试精度比较

根据上述原理研制出一套口径  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$  偏转光束波前测试仪, 剪切比为  $1/2$ , 用准直 He-Ne 光 (波长  $0.6328\mu\text{m}$ ) 作为测试光源。为验证系统的测试精度, 把本系统与商用高精度 (峰谷 (peak-valley, PV) 值小于  $\lambda/50$ ) 的 WYKO 干涉仪进行比对检测, 即分别对同一块  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$  的光学平板的透射波前进行测试。由于元件边框会有一些误差, 为避开误差的影响, 取中心约  $8.1\text{mm} \times 8.1\text{mm}$  的面积进行比较, 相位采用波长做单位, 测试结果如图 6 所示。

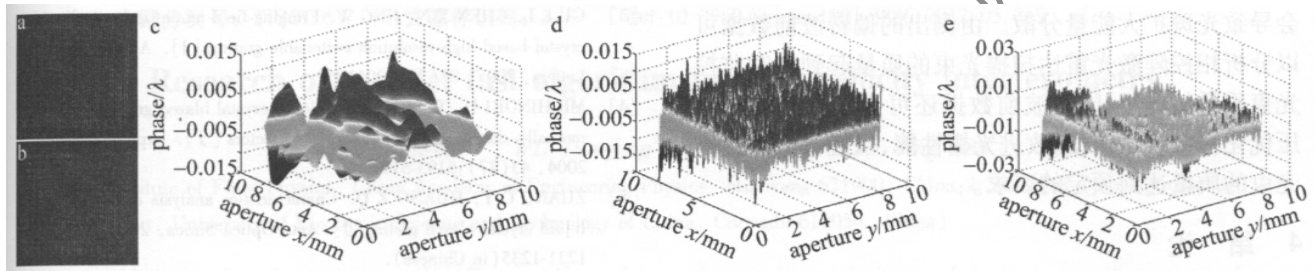


Fig. 6 Wavefront reconstruction comparison of deflection wavefront tester and WYKO interferometer

a—reference interferogram b—distorted interferogram c—wavefront obtained by deflection wavefront tester d—wavefront obtained by WYKO interferometer e—difference between two wavefronts

测出的波前数据比较结果见表 1。从表 1 中的数据可以看出, 本偏转光束波前测试仪测出的波前形状与干涉仪的测试结果基本吻合, 对相位起伏 PV 值小于  $\lambda/25$  的波前能够精确的进行测量, 与干涉仪测试结果相比 PV 值误差小于  $\lambda/100$ , 均方根 (root mean square, RMS) 值误差小于  $\lambda/1000$ , 达到了很高的精度。由于用不同的仪器测试时元件摆放的位置会有一些差别, 所以在逐点比较测试结果时误差明显增大, 但仍保持了较高精度, 两种干涉仪测出的波前之差的 PV 值小于  $\lambda/20$ , RMS 值小于  $\lambda/200$ 。

Table 1 Test data comparison of deflection wavefront tester and WYKO interferometer

	WYKO interferometer	deflection wavefront tester
PV value/ $\lambda$	0.0340	0.0253
RMS value/ $\lambda$	0.0028	0.0034
PV value error/ $\lambda$		0.0087
RMS value error/ $\lambda$		0.0006
phase difference PV value/ $\lambda$		0.0440
phase difference RMS value/ $\lambda$		0.0041

## 3 液晶光栅偏转波前测试结果

用研制出的偏转光束波前测试仪对液晶光栅出射偏转光束的波前进行测试。液晶光栅的最小单元称为

栅指, 以若干个栅指作为一个光栅周期进行加电形成闪耀光栅的相位结构。但与普通锯齿形的闪耀光栅不同, 它是在光栅周期内使各栅指产生不同相移量构成台阶形的相位结构来逼近锯齿形的相位结构。实验采用的光栅一个栅指宽度为  $5\mu\text{m}$ , 可由光栅方程得到光束偏转角度为:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\lambda}{T}\right) = \arcsin\left(\frac{\lambda}{n \times 5}\right) \quad (4)$$

式中,  $T$  为光栅周期,  $n$  为一个光栅周期内包含的栅指数。

用准直 He-Ne 光作测试光源, 对不同周期时的出射偏转波前进行了测试。图 7 是分别由 4 个、6 个、8 个和 10 个栅指构成光栅周期时得到的偏转波前。图中  $x$  为栅指方向,  $y$  为光栅周期方向, 测试区域为  $9.6\text{mm} \times 9.6\text{mm}$ , 相位采用波长做单位。可以看出, 相位基本上在光栅方向变化, 在栅指方向起伏很小, 明显地显示出 1 维结构。

计算得到波前起伏数据见表 2。

Table 2 Wavefront fluctuating data

grating period/ $\mu\text{m}$	RMS value/ $\lambda$	PV value/ $\lambda$
20	0.2002	1.0721
30	0.1755	0.7113
40	0.1640	0.6876
50	0.1484	0.6036

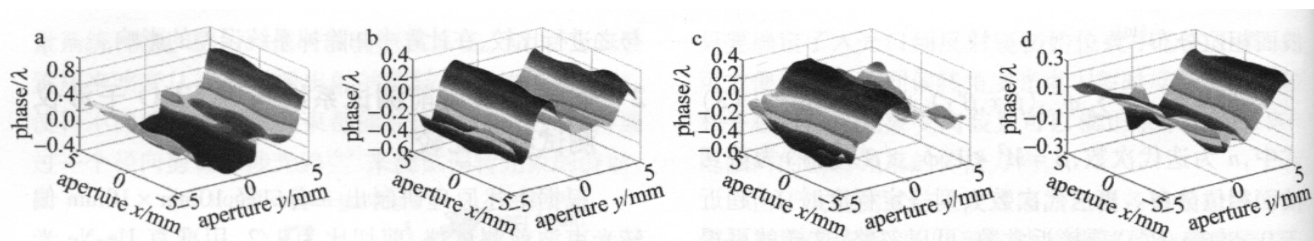


Fig. 7 Deflection wavefront of liquid-crystal gratings

a—grating period:  $4 \times 5 \mu\text{m}$ ; deflection angle:  $1.8^\circ$  b—grating period:  $6 \times 5 \mu\text{m}$ ; deflection angle:  $1.2^\circ$  c—grating period:  $8 \times 5 \mu\text{m}$ ; deflection angle:  $0.9^\circ$   
 d—grating period:  $10 \times 5 \mu\text{m}$ ; deflection angle:  $0.7^\circ$

随着一个周期内的电极数增加,偏转角度减小。二维偏转波前的相位起伏逐渐减小,光束质量变好。理想情况下偏转波前应为平面波,但由于液晶光栅的相位台阶效应、光栅电压相移误差、电场边缘效应等因素会导致出射波前偏离平面波,从而影响远场光束质量,会导致光斑扩大能量分散。由测出的偏转波前数据可以分析相控阵激光雷达扫描光束的质量起到实时监控光束质量的作用,同时波前数据还可为液晶光栅的电压优化提供修正依据,改进光栅性能,以使得出射扫描光束的质量达到预定的要求。

#### 4 结 论

提出带光束变向装置的四边形剪切干涉测量系统来测试液晶光栅的偏转波前。与商用 WYKO 干涉仪的对比试验表明,该系统具有很高的测试精度。对实际液晶光栅的偏转波前进行了测量,得到了不同周期下偏转波前相位分布数据,实验证明了该方法切实可行。虽然实验中是用可见光作为光源,但该方法对近红外波段的波前测试同样适用。该方法不仅可以用来测试液晶光栅的偏转波前,在需要控制光束指向的应用中,也都可以作为分析、调试的一个非常有用的工具。

#### 参 考 文 献

- [1] PAUL F M, TERRY A D, DAVID L C, *et al.* Optical phased array technology [J]. IEEE, 1996, 84(2): 268-298.
- [2] WANG L, LU Y X, HUANG Z Q, *et al.* Influence of marginal effect of electric field on properties of liquid crystal grating [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2007, 22(1): 61-64 (in Chinese).
- [3] GU L L, CHEN X N, JIN Q W. Fringing-field minimization in liquid-crystal-based high-resolution switchable gratings [J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(20): 201106.
- [4] MICHINORI H, TOSHISKI N. Liquid-crystal blazed grating with azimuthally distributed liquid-crystal directors [J]. Applied Optics, 2004, 43(27): 5193-5197.
- [5] ZHANG C Y, HUANG Z Q. Characteristics analysis of binary optic liquid crystal blazed grating [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(7): 1231-1235 (in Chinese).
- [6] KOHNO T, MATSUMOTO D, YAZAWA T. Radial shearing interferometer for in-progress measurement of diamond turning [J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3173: 280-285.
- [7] MURTY M V R K. A compact radial shearing interferometer based on the law of refraction [J]. Applied Optics, 1964, 3(7): 853-857.
- [8] HARIHARAN P, SEN D. Radial shearing interferometer [J]. Scientific Instruments, 1961, 38(11): 428-432.
- [9] LIU D, YANG Y Y, XIA Z T, *et al.* Measurement of transient near infrared laser pulse wavefront with high precision by radial shearing interferometer [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(9): 1372-1376 (in Chinese).
- [10] LI D H, CHEN H X, CHEN Zh P. Simple algorithms of wavefront reconstruction for cyclic radial shearing interferometer [J]. Optical Engineering, 2002, 41(8): 1893-1898.