

液晶相控阵衍射效率的优化分析

赵祥杰 刘仓理 张大勇 骆永全

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 衍射效率和扫描范围是影响液晶相控阵实际应用的关键指标, 为了实现较大的扫描范围, 需要制备高分辨率的液晶相控阵器件, 然而在高分辨率下液晶的非线性关联效应会影响其衍射效率, 从而限制了其扫描范围。从非线性关联机理出发, 数值模拟了明确影响衍射效率的关键因素。通过观察液晶材料参数和器件结构参数对衍射效率的影响, 明确优化器件衍射效率的方向。基于优化控制思想, 采用优化算法应用合适的电极电压进一步提高器件的衍射效率, 减小非线性关联效应的影响, 为同时实现较大扫描范围和较高衍射效率的液晶相控阵奠定基础。

关键词 光学器件; 液晶相控阵; 衍射效率; 非线性关联; 优化

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1123002

Optimized Analysis of Diffraction Efficiency for Liquid Crystal Optical Phased Array

Zhao Xiangjie Liu Cangli Zhang Dayong Luo Yongquan

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Diffraction efficiency and scanning range determine the optical performance of liquid crystal optical phased array. To enhance the scanning range, it is necessary to fabricate high spatial resolution device. But due to the limitation of the nonlinear correlation effect, there is a tradeoff between the diffraction efficiency and the scanning range. The key parameters influencing the diffraction efficiency of optical phased array are elucidated based on the mechanism of nonlinear correlation. The effect of the material parameters and device structural parameters on the diffraction efficiency is also investigated, and suggestion is given to enhance the diffraction efficiency. Furthermore, to reduce the effect of nonlinear correlation, optimization method is employed to adapt the voltages applied on each electrode to enhance the diffraction efficiency and proved to be in effect, which will contribute to enlarge the scanning range of optical phased array.

Key words optical devices; liquid crystal optical phased array; diffraction efficiency; nonlinear correlation; optimization

OCIS codes 220.4830; 230.1950; 230.3720; 230.6120

1 引 言

近年来, 基于液晶光学相控阵的非机械光束偏转技术日渐引起人们的关注。由于其具有高分辨力、低功耗、轻质量和可编程等优点, 有望广泛应用于激光雷达、激光通信以及红外对抗等领域^[1-2]。目前利用液晶相控阵以及相应的体全息光栅角度放大装置, 已经可以实现大于 $\pm 45^\circ$ 的光束扫描范围, 基于这种技术路径, 美国 Raytheon 公司已经初步实现了 Apple 装置, 这将是未来光束扫描、跟踪的热

点研究方向^[3-4]。然而, 目前的液晶光学相控阵在光束扫描范围和衍射效率等指标上仍有待改进, 以提高液晶光学相控阵的实用性。为了提高其扫描范围和衍射效率, 根据二元光学的原理, 最直观的做法是减小像素尺寸或增加闪耀周期内的像素数目, 即提高液晶相控阵的空间分辨率, 这样可以更好地逼近理想相位模式^[5]。在高分辨率下, 液晶相控单元之间存在强烈的非线性关联效应, 这对器件的扫描范围和衍射效率都有较大的影响^[6-7]。本文主要研

收稿日期: 2013-05-13; **收到修改稿日期**: 2013-06-14

基金项目: 中国工程物理研究院科技发展基金(2012B0401055)、流体物理研究所发展基金(SFZ20120304)

作者简介: 赵祥杰(1984—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事液晶光学与液晶相位控制阵列及其应用等方面的研究。

E-mail: zxjdouble@163.com

究了高分辨率液晶相控阵进行光束偏转时,影响其衍射效率的主要因素,进而根据数值模拟结果对影响衍射效率的关键参数进行优化,提高其衍射效率,并在此基础上从优化控制思想方面入手,研究控制其相位模式并提高衍射效率的方法。

2 数值模拟方法

光学相控阵通过改变入射光束的波前倾角来实现光束的非机械偏转。通常情况下,由于液晶器件本身相位调制深度有限,因此多采用离散的二元光学原理进行液晶相控阵的光束偏转^[8-9]。目前进行光束偏转时,主要存在两种波控模型:周期闪耀光栅模型和基于微波相控阵波控原理的非周期闪耀光栅模型^[10]。其中前一种波控模型是后一种波控模型的特例,然而在光学相控阵研究优化分析中,由于周期闪耀光栅具有独特优点,因此主要采用周期闪耀光栅模型作为相控阵光束偏转的波控模型进行数值分析。

进行光束偏转时,首先根据均匀加载时液晶器件的电控响应特性,生成电压-相移曲线,然后根据二元光学闪耀光栅波控模型,将理想相位模式映射为偏转信号电压组。进行相位模式映射时,采用液晶器件电压-相移曲线的线性段。由于像素间的相互作用,每个像素上的实际相移会偏离理想值,因此利用二维液晶指向矢分布模拟程序来观察液晶相控阵在偏转信号电压加载下的实际相位模式。采用的计算方法为

$$f_G = \frac{1}{2}k_{11}(\nabla \cdot \mathbf{n})^2 + \frac{1}{2}k_{22}(\mathbf{n} \cdot \nabla \times \mathbf{n})^2 + \frac{1}{2}k_{33}(\mathbf{n} \cdot \nabla \times \mathbf{n})^2 - \frac{1}{2}(\mathbf{D} \cdot \mathbf{E})^2, \quad (1)$$

$$\gamma \frac{\partial n_i}{\partial t} = -[f_G]_{n_i} = -\left\{ \frac{\partial f_G}{\partial n_i} - \sum_{j=x,z} \frac{d}{dj} \left[\frac{\partial f_G}{\partial \left(\frac{dn_j}{dj} \right)} \right] \right\}, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0, \quad (3)$$

式中 $\mathbf{D} = \epsilon_{\perp} \mathbf{E} + (\epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{E})\mathbf{n}$ 和 $\mathbf{E} = -\nabla \varphi$ 分别代表电位移矢量和电场, ϵ_{\parallel} 和 ϵ_{\perp} 分别为液晶材料的平行和垂直介电常数, φ 为体系中的电势, γ 为液晶的转动粘滞系数。利用液晶粘滞作用作为耗散项,由(1)式得到(2)式,再结合各向异性介质中的静电场麦克斯韦方程即(3)式,采用张弛耦合差分迭代的数值方法,最终获得二维液晶指向矢分布和二维电势分布。取器件下基板电势和无穷远处电势为0电位。根据液晶指向矢转动角与折射率的关系,由液

晶指向矢分布很容易得到液晶相控阵的相位模式。

如无特别指出,所采取的参数如下:相对平行介电常数为11,相对垂直介电常数为3.14,弯曲弹性常数为23.2 pN,展曲弹性常数为23.3 pN,转动粘滞系数为300 m·Pa·s,液晶双折射率为0.37,液晶层厚度为3 μm,电极周期为4 μm,数值模拟中所采用的波长为632 nm,入射偏振方向平行于取向方向。器件预倾角为6°,且液晶取向方向与电极条相互垂直,闪耀光栅周期内的电极数目为8。获得液晶相控阵精确相位模式后,还需要计算闪耀级次偏转光束的远场衍射效率。采用菲涅耳衍射积分公式观察远场闪耀级次的光束分布和相应的衍射效率,所采用的光源为基模的高斯光束。

3 液晶相控阵光束偏转相位模式分析

由于微加工工艺的限制,实际的液晶相控阵电极之间的间距一般大于1 μm,较高分辨率下其电极填充因子一般在0.5~0.7(像素周期2~4 μm时),因此在分析液晶相控阵的衍射效率时必须考虑电极填充因子、非线性关联等因素的影响。图1为不同电极填充因子的液晶相控阵。根据第2节中加载方法实现闪耀偏转时的相位模式(仅给出两个光栅周期,光栅周期内电极数目为8),可以看到,与理想相位模式重置点相比,实际相位模式的重置点存在一个连续变化过渡带,且相位值偏离理想设定值。这是由于相位重置点的两个相邻电极上,加载电压梯度较大,由于边缘场和弹性关联的存在,实际产生的相位模式会被平滑,导致产生回程区并降低衍射效率。

电极的填充因子也是一个重要参量。当填充因

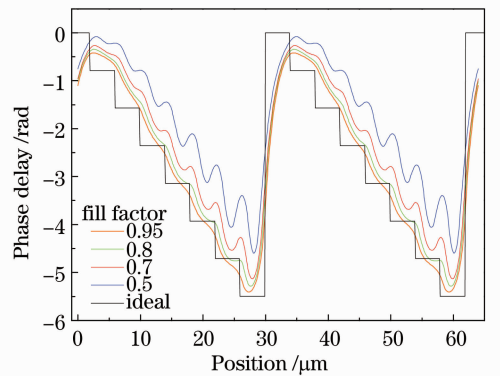


图1 光栅周期32 μm、周期内控制电极数为8时闪耀光栅内的相位模式分布

Fig. 1 Phase mode distribution of blazed grating periods with 8 electrodes per grating period and grating period of 32 μm

子较高时,受非线性关联的作用,回程区以外本应离散的相位模式被平滑,产生一个近似线性的相位模式。此时相位模式的平滑化有利于液晶相控阵衍射效率的提高。当填充因子较低时(小于 0.8),电极填充区域的相位延迟没有达到理想值,这是由于未被填充区域比例较高,两者之间发生非线性关联,导致填充区域和未填充区域的有效加载电压都无法达到理想值。另外由于非线性关联效应的作用区域有限,未被填充区域出现了高频的相位尖峰,这些尖峰会将能量分配到更高阶的衍射级次上,造成闪耀级次能量的减小。根据以上分析可知,对于一个实际的高分辨率液晶相控阵器件,影响其衍射效率的主要是相位重置点的回程区和实际器件的填充因子,并在后文针对回程区和电极填充因子对衍射效率的影响做了详细的分析。

4 液晶相控阵衍射效率的优化分析

4.1 液晶器件参数对回程区尺寸的影响

回程区的尺寸会首先影响液晶器件的衍射效率,并可以由平方关系的经验公式来描述:^[7]

$$\eta = \eta_i \times (1 - \Delta_F/d)^2. \quad (4)$$

式中 η 为实际衍射效率, η_i 为理想相位模式下的衍

射效率, Δ_F 为回程区尺寸, d 为光栅周期尺寸。非线性关联效应的影响包含电压边缘场效应和液晶材料的弹性关联效应,这两种关联都会平滑器件的相位模式,且使得器件相位重置点的相位模式不能严格重置,同时相位重置点产生回程区。通过改变液晶材料参数或者器件结构参数可以改变其电压-相移特性,因此可以通过这种方法优化其回程区尺寸。为了观察各种材料参数对回程区尺寸的影响,假设存在具有两根电极的器件,其电极宽度为 $7.5 \mu\text{m}$,填充因子为 100%。在两根电极上分别加载电压,使之分别产生 0 和 -2π (632 nm) 的相位延迟,即两个电极之间存在相位重置的关系。利用的数值模拟方法,可以给出其在相位重置下的相位模式,通过进一步观察其相位模式即可给出其回程区尺寸大小的变化,从而对偏转效率进行评判。

在保证相邻像素加载相位差恒定为 2π 的情形下,上述假设器件内通过数值模拟给出的相位模式分布随参数的变化如图 2 所示。可以看到,液晶材料展曲弹性常数、弯曲弹性常数和各向异性介电常数对回程区尺寸几乎没有影响,其回程区尺寸约为 $2.7 \mu\text{m}$ 左右(5%~95%相位区间)。而在相位调制深度不变的前提下,改变液晶层的厚度则可以较为

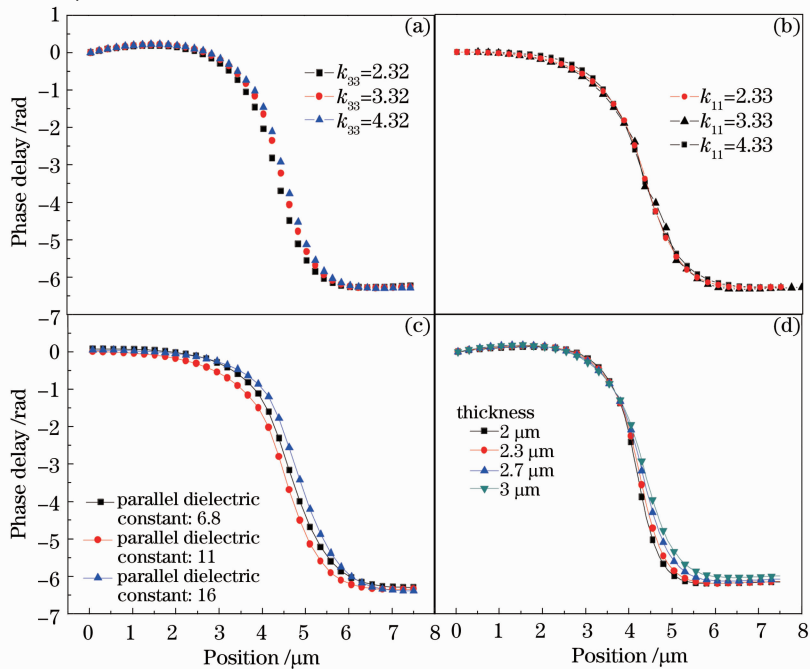


图 2 相位重置点上被平滑的相位模式及其回程区尺寸随不同参数的变化。(a)弯曲弹性常数的影响;

(b)展曲弹性常数的影响;(c)各向异性介电常数的影响;(d)相同相位调制深度下,液晶层厚度的影响

Fig. 2 Dependence of smoothed phase profile and flyback region on different parameters. (a) Influence of bend elastic constant; (b) influence of splay elastic constant; (c) influence of dielectric anisotropy; (d) influence of liquid crystal cell thickness with the same phase modulation depth

显著的减小其回程区尺寸,如图 2(d)所示,当液晶层厚度分别为 2, 2.3, 2.7, 3 μm 时,其回程区尺寸分别为 1.9, 2.1, 2.3, 2.6 μm (5%~95% 相位区间)。改变液晶各向异性介电常数时,可以看到回程区有一个明显的平行移动,然而这个移动几乎不影响回程区的尺寸。

4.2 液晶参数对衍射效率的影响

图 3 给出了在不同电极填充因子下,液晶相控阵衍射效率随液晶展曲弹性常数和弯曲弹性常数的变化关系。可以看到,在电极填充因子较高的情形下(填充因子大于 0.6),改变液晶材料展曲弹性常

数和弯曲弹性常数都不会影响器件的衍射效率。仅在电极填充因子较小时,改变展曲弹性常数和弯曲弹性常数会改变器件的衍射效率。当电极填充因子较小时,改变液晶弹性常数会改变液晶器件内部的液晶指向矢平衡态分布,这个过程虽然相对复杂,但是由于液晶本身弹性常数的调节范围较小,因此实际对器件衍射效率的影响很小。综上所述,进行液晶相控阵设计时,当电极填充因子较高时(大于 0.6),无需考虑液晶弹性常数对其衍射效率的影响,这与 4.1 节中弹性常数对相位重置点回程区尺寸的影响是一致的。

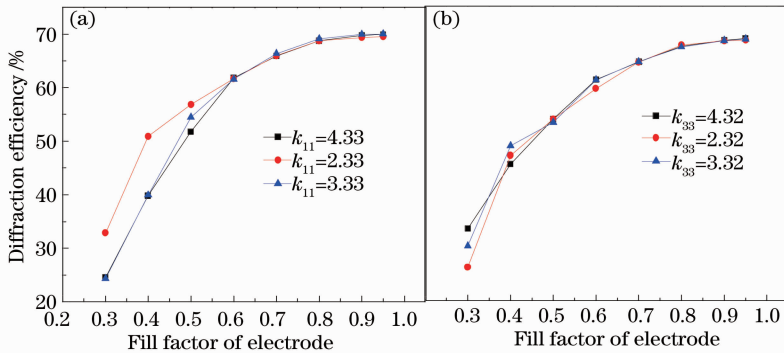


图 3 不同电极占空比下,液晶相控阵衍射效率随(a)液晶材料展曲弹性常数和(b)弯曲弹性常数的变化关系
Fig. 3 Under different fill factors of electrodes, the dependence of diffraction efficiency of liquid crystal optical phased array on (a) splay elastic constant and (b) bend elastic constant

如图 4 所示,在不同电极填充因子下,液晶材料各向异性介电常数对衍射效率的影响。当电极填充因子较高时,可以看到较小的各向异性介电常数所对应的衍射效率较高,这主要是因为各向异性介电常数较小时,器件的阈值电压较高, $V-\varphi$ 曲线线性段的陡度较大,因此各像素对相邻像素的影响较小。

根据图 4 可知,当电极填充因子大于 0.5 时,应选择具有较小介电各向异性的液晶材料。然而由于集成电路(IC)芯片的驱动电压有限且考虑到功耗等实际问题,在实际选用液晶材料,还需保证液晶材料的各向异性不应过低,否则 IC 芯片输出的电压信号无法实现全部的相位调制深度。

4.3 液晶器件结构参数对衍射效率的影响

进行液晶相控阵设计时,器件结构是必不可少的一部分。考虑到对衍射效率的影响,应该明确电极填充因子、液晶层厚度、相位调制深度、像素周期以及闪耀光栅周期内电极数目对衍射效率的影响,这样才能保证液晶相控阵器件进行光束偏转时具有最大衍射效率。

图 5 为电极填充因子和像素周期对液晶相控阵衍射效率的影响。如图 5(a)所示,衍射效率随电极填充因子的增加而增加。当电极填充因子达到某一阈值后(阈值填充因子定义为衍射效率下降为电极完全填充时衍射效率为 90%时的填充因子),其衍射效率会急剧下降。当像素周期分别为 8, 6, 4, 2.5 μm 时,其阈值填充因子分别约为 80%、70%、60% 和 40%。小于阈值填充因子时,电极填充区域和未填

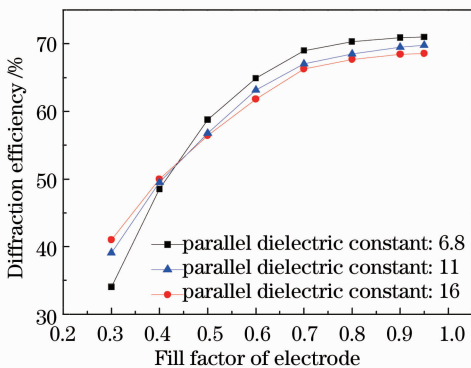


图 4 不同电极占空比下,液晶各向异性介电常数对液晶相控阵衍射效率的影响

Fig. 4 Dependence of liquid crystal optical phased array diffraction efficiency on the dielectric anisotropy with different fill factors of electrodes

充区域之间的相互非线性关联作用较强,导致填充区域的实际相位值小于理想值,同时相位模式中出现高频相位尖峰,这些导致衍射效率的急剧下降。因此电极之间的间距(未填充区域的尺寸)是决定衍射效率的关键因素,当电极间距为 $1.3\sim 1.8\ \mu\text{m}$ 甚至更小时,可以忽略电极填充因子对衍射效率的影响。随着液晶层厚度的减小,这个数值也相应地减小,因此对于微加工工艺水平的要求也就越高。另

外还可以看到,电极填充因子大于 95% 时,像素周期越大,衍射效率越高。这是因为在增大像素周期时,回程区尺寸不变,因而回程区尺寸占整个光栅区域的比例减小,闪耀级次衍射效率较高。尽管增加像素周期可以增加衍射效率,却同时减小了扫描范围。液晶相控阵应该同时具备较大的扫描范围和衍射效率,因此需要在保持较大的衍射效率时尽量选择较小的像素周期尺寸。

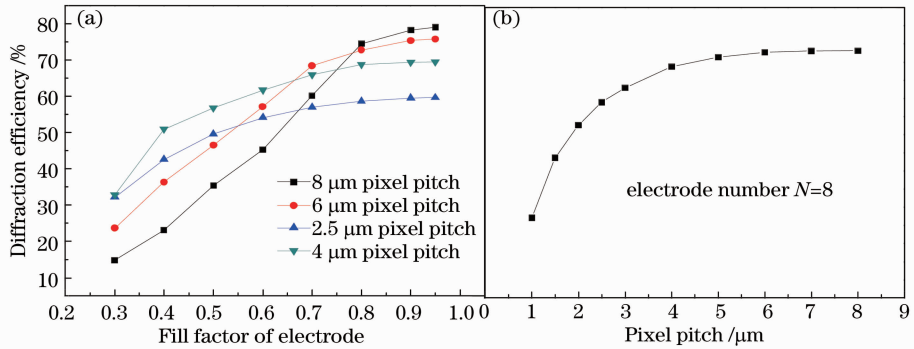


图 5 液晶相控阵衍射效率随(a)电极填充因子和(b)像素周期尺寸的变化关系

Fig. 5 Dependence of liquid crystal optical phased array diffraction efficiency on (a) electrode fill factor and (b) pixel pitch

图 5(b)为采用八电极作为一个闪耀光栅周期进行光束偏转时,衍射效率随像素周期的变化。当像素周期接近液晶层厚度时,衍射效率开始急剧下降。由于采用的填充因子为 0.8,其电极间距全部小于 $1.5\ \mu\text{m}$,因此相位模式中的相位尖峰对衍射效率几乎没有影响。然而回程区尺寸占光栅周期的比例随着像素周期的减小而增大,从而减小衍射效率。从图中可以看出当液晶器件像素周期小于 $4\ \mu\text{m}$ 时,衍射效率会急剧下降。因此认为,当器件像素周期约为 $4\ \mu\text{m}$ 时,该器件同时具有较大的偏转角度和较高的衍射效率。这个阈值像素周期可以决定该器件的有效空间分辨率。根据 4.1 节和 4.2 节中的结论,为了提高器件的有效空间分辨率可以通过降低液晶层厚度或者适当减小液晶材料各向异性介电常数来实现。

前面讨论中假设光栅单元周期内电极数目仅有 8 条,得到阈值像素周期为 $4\ \mu\text{m}$ 。为了验证阈值像素周期的概念,同样选取 $32\ \mu\text{m}$ 作为一个闪耀光栅周期,通过改变光栅周期内电极数目,即改变其空间分辨率,观察电极数目对衍射效率的影响,结果如图 6 所示。由于光栅周期不变,其扫描范围相同,而由图 6 可以看到,进一步增加空间分辨率对最终衍射效率几乎没有影响。因此制备器件时,无需进一步增加其空间分辨率,这减小了器件制备时的工艺难度。

图 7 为相位调制深度和液晶层厚度(LC)对衍

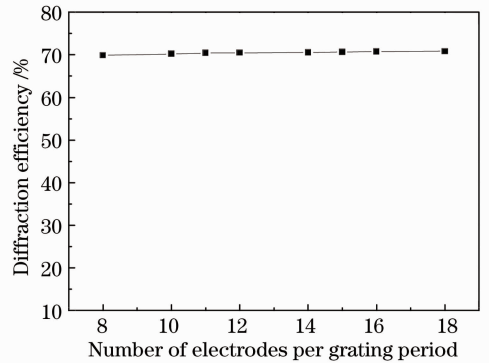


图 6 像素尺寸达到阈值像素周期后,进一步减小电极尺寸对最终衍射效率的影响

Fig. 6 Dependence of liquid crystal optical phased array diffraction efficiency on the reduced pixel pitch with limited pixel pitch

射效率的影响。图 7(a)为保持液晶双折射率不变,通过改变液晶层厚度来改变相位调制深度并观察其对衍射效率的影响。可以看出,电极填充因子大于 0.7 时,衍射效率随相位调制深度(即液晶层厚度)减小而增大;而当填充因子较小时,衍射效率几乎不随相位调制深度变化。图 7(b)为保持相位调制深度不变时,通过改变液晶双折射率和液晶层厚度来观察衍射效率的变化。从中可以看到,电极填充因子大于 0.7 时,其变化规律与图 7(a)中相似;而电极填充因子小于 0.7 时,与图 7(a)中不同,衍射效率明显随液晶层厚度的减小而减小。因此为了保证

较高的衍射效率,首先器件应该具有较小的相位调制深度(略大于 2π),其次采用较大双折射率的液晶,尽量减小液晶层厚度。在减小液晶层厚度的同时,对器件的电极填充因子要求较高。实际制备器

件时,微加工工艺线条制作能力很难达到 $1\ \mu\text{m}$ 以下,因此需要综合考虑液晶层厚度和电极填充因子对器件衍射效率的影响。

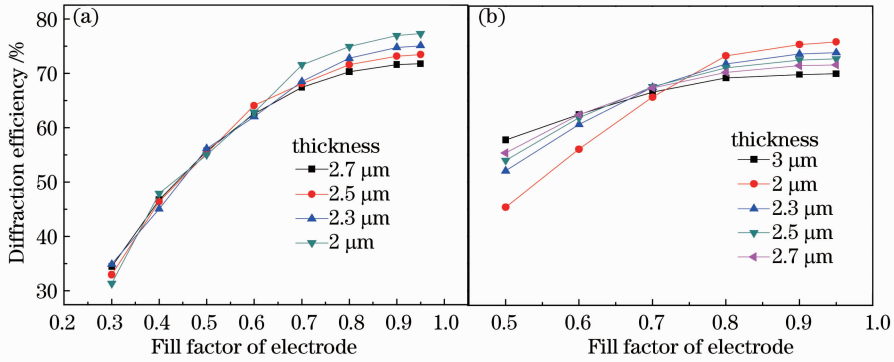


图 7 液晶相控阵相位衍射效率随(a)相位调制深度和(b)液晶层厚度的变化关系

Fig. 7 Dependence of liquid crystal optical phased array diffraction efficiency on (a) phase modulation depth and (b) liquid crystal cell thickness

5 液晶相控阵相位模式的控制方法

如图 1 中所述,液晶相控阵中由于非线性关联的相互作用,以及电极填充因子的作用,液晶相控阵进行光束偏转时的相位模式较大地偏离了理想相位模式,这会导致衍射效率的降低。对于实际器件而言,目前很难通过实验的方法精确获得其相位模式分布,因此需要对器件的加载信号电压进行优化控制。根据非周期闪耀光栅波控模型,大孔径液晶相控阵涉及的控制单元数目往往达数千根甚至一万根之多,因此采用优化算法对电极上的加载电压直接优化的工作量极为巨大。通过直接测量液晶相控阵上的实际相位模式分布并进行反馈控制也是获得最优相位模式的技术路径。然而目前难以完成这种高分辨、高数值孔径的测量。因此为了今后的实际应用考虑,需要探索一种新型的相位模式优化控制方法。

由于进行液晶指向矢计算较为复杂,需要简化问题。在非线性关联的影响下,毗邻像素之间的相位模式会互相影响,而这种非线性关联的影响可以采用核函数的概念来描述^[11]。首先根据均匀液晶器件的电压-相移曲线生成理想相位模式,然后将理想相位模式和核函数做卷积得到实际相位模式,用这种数值手段来描述非线性关联对器件相位模式的影响。尽管这种方法采用了核函数预测实际相位模式,而在实际器件中核函数是未知的,这里仅仅设定一个函数描述实际相位模式,并从数值上验证所提出的优化控制方法。这里光栅周期为 $20\ \mu\text{m}$,光

栅周期内电极数目为 8,核函数采用经验形式的高斯函数,其核为 $4\ \mu\text{m}$ 。采用上述核函数计算得到的光栅单元周期相位模式与第 3 节中经数值模拟给出的相位模式比较可见图 8 所示。从中可以看到,采用核函数的卷积形式给出的相位模式与数值模拟给出的误差较小,利用菲涅耳衍射积分公式可以得出此时其闪耀光束衍射效率分别为 56.8% 和 57% 。

在某一特定偏转状态下,液晶相控阵每个电极上加载电压不同,然而此时所有电极上的电压-相移特性是单调变化的,可以将其进行多项式分解,即最终的驱动信号可以利用该多项式系数来表述。这里将某一特定偏转状态的电压-相移特性分解为切比雪夫多项式的前 8 项基函数的叠加,初始系数采用

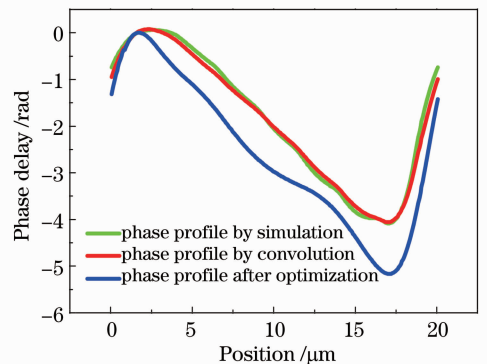


图 8 卷积、数值模拟和优化后的液晶相控阵相位模式
Fig. 8 Phase profile in liquid crystal optical phased array obtained by convolution, numerical simulation and optimization

均匀器件加载时的多项式分解系数,其表达式为

$$V(\varphi) = \sum_{n=1}^8 c_n T_n(\varphi), \quad (5)$$

式中 $V(\varphi)$ 表示该器件在偏转状态下的电压-相移特性, $T_n(\varphi)$ 为切比雪夫多项式基函数。进一步利用随机并行梯度下降 (SPGD) 控制算法对上述系数进行优化,将远场衍射效率作为评价函数,最终获得优化后的加载数据。表 1 给出了(5)式的系数在优化前后的变化(由于切比雪夫多项式的区间特性,表中系数都为归一化系数),同时图 8 中也给出了在上述

表 1 器件电压相移特性多项式分解系数在优化前后的变化

Table 1 Polynomial decomposition coefficients of device voltage-phase shift characteristic before and after optimization

Normalized coefficient	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8
Before optimization	-0.3143	-0.2743	0.02392	-0.0181	0.001256	0.001353	0.003579	0.00518
After optimization	-0.274	-0.32	-0.0169	-0.0137	-0.04988	-0.00612	-0.00795	-0.0406

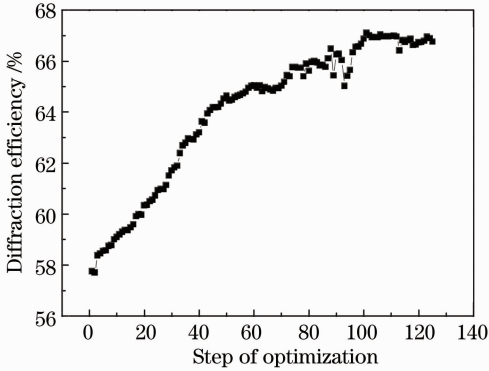


图 9 利用优化算法对液晶相控阵闪耀偏转衍射效率的优化

Fig. 9 Optimization of optical phased array diffraction efficiency by optimization algorithm

6 结 论

通过数值模拟方法分别研究了液晶相控阵衍射效率、回程区尺寸等与液晶器件结构参数和材料参数的关系,认为非线性关联下回程区形成和电极填充因子是影响其衍射效率的主要原因。进一步研究发现,在保持较高填充因子的情况下降低器件相位调制深度、减小液晶层厚度和适当减小液晶材料各向异性介电常数是提高液晶相控阵衍射效率的有效方法。另外对特定液晶材料能够实现的偏转范围进行了讨论。为了减弱非线性关联对液晶相控阵衍射效率的影响,提出了将液晶相控阵电压-相移特性进行切比雪夫多项式分解并利用 SPGD 算法对其系数进行优化的方法。数值结果表明,这种方法可以有效提高液晶相控阵的衍射效率。

优化之后生成的驱动电压信号加载条件下,采用数值模拟得到的优化后的相位模式。与优化之前的模式相比,该相位模式回程区尺寸减小,同时相位模式的波前斜率更加接近于闪耀偏转情形,可以预期其衍射效率会提高。图 9 给出了经 SPGD 算法对多项式系数进行初步优化得到的衍射效率随优化步数的关系。可以看到,优化 120 步之后,衍射效率已经从最初的 57% 上升到 67%。继续优化 SPGD 算法和相应的控制函数,可以进一步减小优化步数并提高衍射效率。

参 考 文 献

- 1 P F Mcmanamon, P J Bos, M J Escuti, *et al.*. A review of phased array steering for narrow-band electrooptical systems [J]. Proc. IEEE, 2009, 97(6): 1078-1096.
- 2 P F McManamon. An overview of optical phased array technology and status [C]. SPIE, 2005, 5947: 594701.
- 3 I Smith, M K O Holz. Wide Angle Beam Steering System: US, WO 2006020353 [P]. U. S. Patent, 2006.
- 4 P F McManamon. Agile non-mechanical beam steering [J]. Optical and Photon News, 2006, 17(3): 24-29.
- 5 Zhao Xiangjie, Zhang Dayong, Luo Yongquan. Electrocontrollable optical beam steering employing reflective liquid crystal spatial light modulator [J]. High Power Laser and Particle Beam, 2012, 24(6): 1324-1328.
- 6 赵祥杰, 张大勇, 骆永全. 反射式液晶空间光调制器光束偏转 [J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(6): 1324-1328.
- 7 S Harris. Numerical optimization of the performance of nematic liquid crystal optical phased array [C]. SPIE, 2003, 5162: 157-171.
- 8 Wang Xinghua, Wang Bin, P J Bos, *et al.*. Modeling and design of an optimized liquid crystal optical phased array [J]. J Appl Phys, 2005, 98(7): 073101.
- 9 Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian. Binary Optics [M]. Beijing: Defense Technology Press, 1998. 1-16.
- 10 金国藩, 严瑛白, 邬敏贤. 二元光学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. 1-16.
- 11 Zhang Cuiyu, Huang Ziqiang. Characteristic analysis of binary optic liquid crystal blazed grating [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(7): 1231-1235.
- 12 张翠玉, 黄子强. 二元光学液晶闪耀光栅的特性分析 [J]. 光学学报, 2008, 28(7): 1231-1235.
- 13 Kong Lingjiang, Zhu Ying, Song Yan. A beam steering approach of liquid crystal phased array based on nonperiodic blazed grating [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0123001.
- 14 孔令讲, 朱颖, 宋艳. 基于非周期闪耀光栅的液晶相控阵波控方法研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0123001.
- 15 E Hallstig, L Sjoqvist, M Lindgren. Intensity variations using a quantized spatial light modulator for non-mechanical beam steering [J]. Opt Eng, 2003, 42(3): 613-619.