

文章编号:1007-2780(XXXX)XX-0001-10

面向宽角扫描的液晶偏振光栅级联顺序研究

勾正阳^{1,2,3}, 查正桃^{1,2,3}, 穆全全^{1,3}, 彭增辉^{1,3}, 刘子豪^{1,2,3}, 常 锴^{1,2,3},
鲁兴海^{1,3}, 王启东^{1,3*}

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学 材料科学与光电工程中心, 北京 100049;
3. 光学系统先进制造全国重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:级联液晶偏振光栅在宽角扫描应用中,其衍射效率随角度指向的变化而显著波动,严重制约了系统的能量稳定性。为克服这一瓶颈,本文系统研究了级联序列对二维光束偏转结构衍射效率均匀性的调控机理,旨在确立实现高均匀性衍射能量分布的最优设计范式。通过构建以均匀性评估因子为目标函数的优化方法,并对比理想与实际液晶波片条件下的器件性能,揭示了级联序列影响效率均匀性的内在机制。研究表明,对于采用调制性能较优的液晶波片的级联系统,将大角度光栅置于级联链路前端,可有效抑制衍射效率分布的边缘衰减。对于 $50^{\circ}\times 50^{\circ}$ 的视场范围,采用该优化所得的级联序列后,发射模式下中心与边缘区域的总衍射效率最大差异由40.86%显著降低至13.71%,接收模式下则由44.05%改善至15.36%。本研究不仅为设计高能量均匀性的宽角扫描液晶偏振光栅系统提供了明确的理论指导,并证明了该优化策略在发射与接收共路架构中的兼容性,对于推动激光通信、激光雷达等领域的紧凑型光束偏转技术发展具有重要意义。

关键词:液晶偏振光栅;光束偏转;级联顺序;衍射效率;宽角扫描

中图分类号:O436.1 文献标识码:A doi:10.3724/CJLCD.2026-0187 CSTR:32172.14.CJLCD.2026-0187

收稿日期:2026-09-10;修订日期:2026-09-28.

基金项目:国家自然科学基金(No. U2241224, No. U23A20355, No. 11974345);中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新项目

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. U2241224, No. U23A20355, No. 11974345); Innovation Project of the Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences

*通信联系人, E-mail: qdwang@ciomp.ac.cn

Research on the cascaded sequence of liquid crystal polarization grating in wide-angle scanning

GOU Zhengyang^{1,2,3}, ZHA Zhengtao^{1,2,3}, MU Quanquan^{1,3}, PENG Zenghui^{1,3}, LIU Zihao^{1,2,3},
CHANG Kai^{1,2,3}, LU Xinghai^{1,3}, WANG Qidong^{1,3*}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Center of Material Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *State Key Laboratory of Advanced Manufacturing for Optical Systems, Changchun 130033, China)*

Abstract: In wide-angle beam-steering applications employing cascaded liquid crystal polarization gratings (LCPGs), diffraction efficiency exhibits significant angular dependence, leading to substantial fluctuations in system-level energy stability. To address this critical limitation, this study systematically investigates the role of the cascading sequence in modulating the diffraction efficiency uniformity of a two-dimensional beam-deflection architecture, with the objective of establishing an optimal design paradigm for achieving highly uniform diffracted energy distribution. An optimization framework is developed based on a uniformity evaluation factor as the objective function, and the performance of devices under both ideal and realistic liquid crystal waveplate conditions is compared to elucidate the underlying mechanisms governing the influence of cascade order on efficiency uniformity. Our results reveal that, in a cascaded system employing liquid crystal waveplates with superior modulation performance, placing a large-angle grating at the front end of the cascaded chain can effectively suppress the edge attenuation of the diffraction efficiency distribution. For a field of regard of $50^\circ \times 50^\circ$, the proposed sequence optimization reduces the maximum total diffraction efficiency discrepancy between the central and peripheral regions from 40.86% to 13.71% in transmit mode, and from 44.05% to 15.36% in receive mode. This work not only provides clear theoretical guidelines for designing liquid crystal polarization grating systems with high energy uniformity over wide steering angles, but also demonstrates the compatibility of the proposed optimization strategy with shared-aperture transmit-receive architectures. These findings hold significant promise for advancing compact beam-steering technologies in applications such as laser communication and lidar.

Key words: liquid crystal polarization grating; beam steering; cascade sequence; diffraction efficiency; wide-angle scanning

1 引言

激光通信^[1-2]、机载雷达^[3]、无人平台光束操控^[4]、激光雷达^[5-8]、增强与虚拟现实^[9-11]以及生物显微成像^[12]等前沿技术的迅猛发展,对光束偏转器件提出了兼具宽角度范围、紧凑结构、低功耗、快速响应及高能量效率的苛刻需求。传统机械式光束偏转方案,如万向节系统^[13],普遍存在体积庞大、功耗高、响应迟滞及动态稳定性差等固

有缺陷;而微机电系统(MEMS)快速转向反射镜^[14-16]虽指向精度高,却受制于制造工艺,通常难以实现较大光学孔径。在此背景下,非机械式光束偏转技术凭借其结构紧凑、功耗低、响应迅速等优势,已成为该领域的研究热点^[17-20]。其中,液晶偏振光栅(Liquid Crystal Polarization Grating, LCPG)作为一种新型几何相位光学元件,具有仅数微米的物理厚度和易于实现50毫米以上大孔径的独特优势^[21-22],展现出巨大的应用潜力。

在理想半波条件下,单片液晶偏振光栅的理论衍射效率可接近100%^[23]。然而,实现宽角域光束偏转必须级联多个液晶偏振光栅。在级联结构中,光束的衍射路径与锥形入射条件紧密耦合,导致各衍射单元的相位调制状态偏离理想半波条件^[24],从而使系统的总衍射效率产生对角度指向的强烈依赖。这种角度指向依赖带来的效率非均匀性会随偏转角范围的增大而急剧恶化,成为制约其在激光通信等高端领域应用的关键障碍。例如,在激光链路的捕获、对准与跟踪(Acquisition, Tracking and Pointing, ATP)系统中,能量信号的剧烈波动将直接影响通信链路的稳定性与可靠性^[25-26]。此外,若能实现发射与接收系统共光路的级联液晶偏振光栅架构,将极大简化系统装调,降低硬件成本,尤其适用于无人机、小型卫星等空间受限平台,具有重要的工程应用价值。

针对上述问题,已有研究进行了有益探索。查正桃等人报道了视场角为 $35^\circ \times 35^\circ$ 、分辨率为 5° 的二维光束偏转结构^[27],其总衍射效率最大变化量为12.8%,但未深入探讨级联顺序对效率均匀性的影响,也未涉及接收模式下的性能分析。胡芳燕等人分析了单片液晶偏振光栅衍射效率随入射方位角的均匀性^[28],但其结论不适用于级联系统。迄今为止,如何通过优化级联序列来同时提升二维宽角偏转结构在发射与接收模式下的效率均匀性,仍缺乏系统的理论研究与设计指导。

针对上述问题,本文聚焦于级联液晶偏振光栅的级联顺序对二维宽角扫描系统衍射效率均匀性的影响机制,旨在提升衍射效率分布均匀性。本文第2节将建立级联系统的衍射模型,结合光栅方程与衍射效率公式,揭示总衍射效率对级联顺序的依赖关系,并引入均匀性评估因子作为优化目标函数。第3节将系统阐述优化方法,并分别在理想波片和实际液晶波片调制条件下,深入分析最优级联序列的物理机理及其对效率均匀性的提升效果。第4节将对全文进行总结。

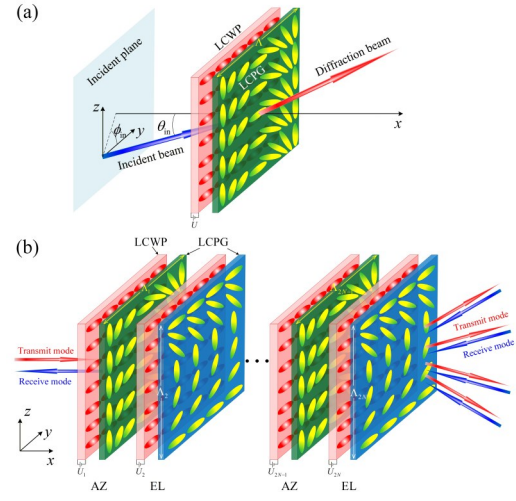


图1 (a)方位衍射单元示意图;(b)包含方位与俯仰衍射单元的二维宽角度光束扫描结构示意图。

Fig. 1 (a) Schematic of azimuth diffraction subelements; (b) Schematic of 2D wide-angle beam steering structure incorporating azimuth and elevation diffraction subelements.

2 级联顺序优化方法

如图1所示,二维光束偏转结构由多个方位(Azimuth, AZ)衍射单元与俯仰(Elevation, EL)衍射单元级联构成。每个衍射单元均由一个电控液晶波片和一个无源液晶偏振光栅组成。对于第 q 级的衍射单元,其入射极角 θ_{in} 和方位角 ϕ_{in} 由前一级的衍射极角 θ_{dif} 和方位角 ϕ_{dif} 决定,衍射角满足光栅方程^[29-30],可由式(1)计算:

式中 $q = 1, 2, \dots, 2N$, $\theta_G^{(q)} = \sin^{-1}(\lambda_0/\Lambda_q)$ 表示第 q 级光栅的光栅角, ξ_q, m_q 分别代表光栅周期方向与 y 轴夹角及衍射级次,对于AZ和EL衍射单元, ξ_q 分别取 0° 和 90° 。通过施加电压 U_q 控制液晶波片的相位延迟,可使衍射单元在+1级(右旋圆偏振光入射)与-1级(左旋圆偏振光入射)之间切换,从而实现光束指向的离散控制。

在给定制级联顺序 Ω 下,系统的总衍射效率 η^{tot} 可通过式(2)计算^[27]:

$$\begin{cases} \sin \theta_{dif}^{(q)} = \sqrt{\sum_{l=1}^q \left[m_l \sin \theta_G^{(l)} \sum_{s=1}^q m_s \sin \theta_G^{(s)} \cos(\xi_l - \xi_s) \right]} \\ \tan \phi_{dif}^{(q)} = \left(\sum_{l=1}^q m_l \sin \theta_G^{(l)} \sin \xi_l \right) / \left(\sum_{l=1}^q m_l \sin \theta_G^{(l)} \cos \xi_l \right) \end{cases}, \quad (1)$$

$$\eta^{\text{tot}}(\Omega) = \frac{\prod_{q=1}^{2N} \left| \int_0^{\Lambda_q} E^{\leftarrow(q)}(\theta_{\text{in}}^{(q)}, \phi_{\text{in}}^{(q)}, U_q) \exp \left[j2\pi \left(\frac{m_q}{\Lambda_q} + \frac{\sin \theta_{\text{in}}^{(q)} \cos \phi_{\text{in}}^{(q)}}{\lambda_0} \right) l \right] dl \right|^2}{\Lambda_q \int_0^{\Lambda_q} \left| E^{\leftarrow(q)}(\theta_{\text{in}}^{(q)}, \phi_{\text{in}}^{(q)}, U_q) \right|^2 dl}, \quad (2)$$

式中 N 为 AZ 衍射单元或 EL 衍射单元的总数, $\Omega = \{\Lambda_1, \xi_1, \dots, \Lambda_{2N}, \xi_{2N}\}$ 表示衍射单元的级联顺序, $E^{\leftarrow(q)}$ 表示第 q 组衍射单元中从液晶偏振光栅进入空气的总透射电场, $l = y \cos \xi_q + z \sin \xi_q$ 为该衍射单元光栅周期方向的积分长度。由式(2)可知, 改变级联顺序 Ω 将重新配置每个衍射单元的工作参数(如入射角、偏振态), 进而影响各角度指向的总衍射效率及其分布均匀性。

为保障系统高效且稳定的运行, 光束偏转结构通常需要在全体指向角度范围内维持高且均匀的能量利用效率, 这就要求衍射效率不仅要尽可能平均值大而且波动性要小, 因此可以定义总衍射效率的评价函数如下:

$$f(\Omega) = \Delta \eta^{\text{tot}} / \bar{\eta}^{\text{tot}}. \quad (3)$$

此处, $\bar{\eta}^{\text{tot}}$ 和 $\Delta \eta^{\text{tot}} = \eta_{\text{max}}^{\text{tot}} - \eta_{\text{min}}^{\text{tot}}$ 分别代表全角度指向阵列上总衍射效率的均值与不均匀度, 这里选择 $\Delta \eta$ 作为不均匀度是用以量化不同角度指向之间的衍射效率最大差异。本研究旨在通过优化级联顺序, 使评价函数 $f(\Omega)$ 最小化, 从而获得在发射和接收模式下均能实现最优能量均匀性的级联方案。值得注意的是, 接收模式与发射模式的计算方法相同, 仅入射角设定为发射模式的相应衍射角。本文以表1所示的光栅角序列为例(波长 $\lambda_0 = 1064 \text{ nm}$, 液晶双折射率 $\Delta n =$

0.105), 采用有限元法进行仿真分析^[31]。

表1 级联液晶偏振光栅的光栅角序列

Tab. 1 Grating angle sequence of cascaded LCPG

偏转范围	光栅角 θ_G (°)					
	AZ ₁	AZ ₂	AZ ₃	EL ₁	EL ₂	EL ₃
50° × 50°	3.57	7.14	14.28	3.57	7.14	14.28

图2展示了在发射与接收模式下, 所有可能级联顺序的评价函数分布。可以看出, 两种模式下评价函数的响应值及其变化趋势具有高度一致性。需要说明的是, 这种现象在其他基于布拉格型光栅级联的光束偏转系统中同样存在。因此, 可针对单一模式进行优化, 即可保证收发共路系统在全视场范围内的性能一致性。观察图2(a)可知, 评价函数呈现出明显的区域划分, 其中评价函数小的区域(H型, 高均匀性)对应的级联顺序具有共同特征: 将AZ与EL两类衍射单元分别按光栅角从大到小独立级联; 而评价函数大的区域(L型, 低均匀性)的级联顺序则完全相反。表2列出了H型和L型中具有代表性的级联顺序, 后续将基于这两种典型序列进行机理分析。需要指出的是, 本文在定义衍射单元级联索引时, 始终以发射模式的传播方向为正方向。

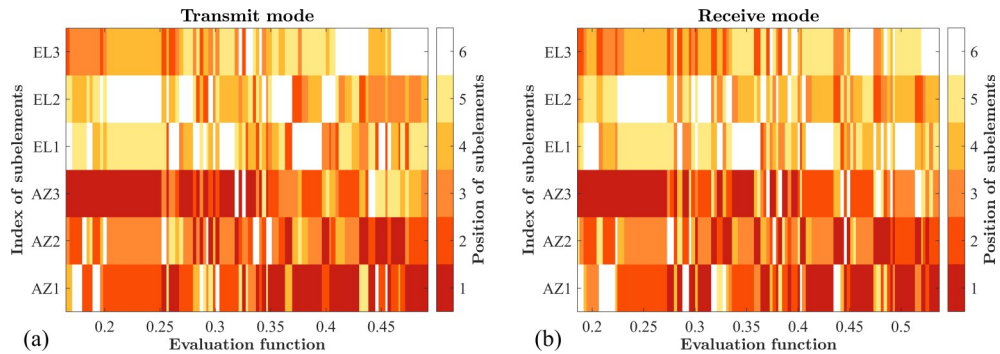


图2 (a)发射模式下所有可能的级联顺序的评价函数分布;(b)接收模式下所有可能的级联顺序的评价函数分布。

Fig. 2 (a) Distribution of the evaluation function with cascaded sequence of transmit mode; (b) Distribution of the evaluation function with cascaded sequence of receive mode.

表 2 衍射效率均匀性最佳与最劣的级联类型所对应的级联顺序

Tab. 2 The cascade sequence corresponding to the cascade type with the best and worst diffraction efficiency uniformity

级联类型	衍射单元在级联结构中的位置					
	1	2	3	4	5	6
H	AZ ₃	EL ₃	AZ ₂	EL ₂	AZ ₁	EL ₁
L	AZ ₁	AZ ₂	AZ ₃	EL ₁	EL ₂	EL ₃

3 结果与讨论

3.1 理想波片条件下的级联顺序研究

本小节首先基于理想波片模型(即液晶波片能对不同入射角和偏振态的光实现完美圆偏振调制)进行分析。在该理想前提下,以总衍射效率最大值归一化,定义不均匀度 $\Delta\eta = \eta - \eta_{\max}$ 。图3展示了在H型和L型级联顺序下,发射与接收模式中不均匀度在二维角度指向阵列上的分布。

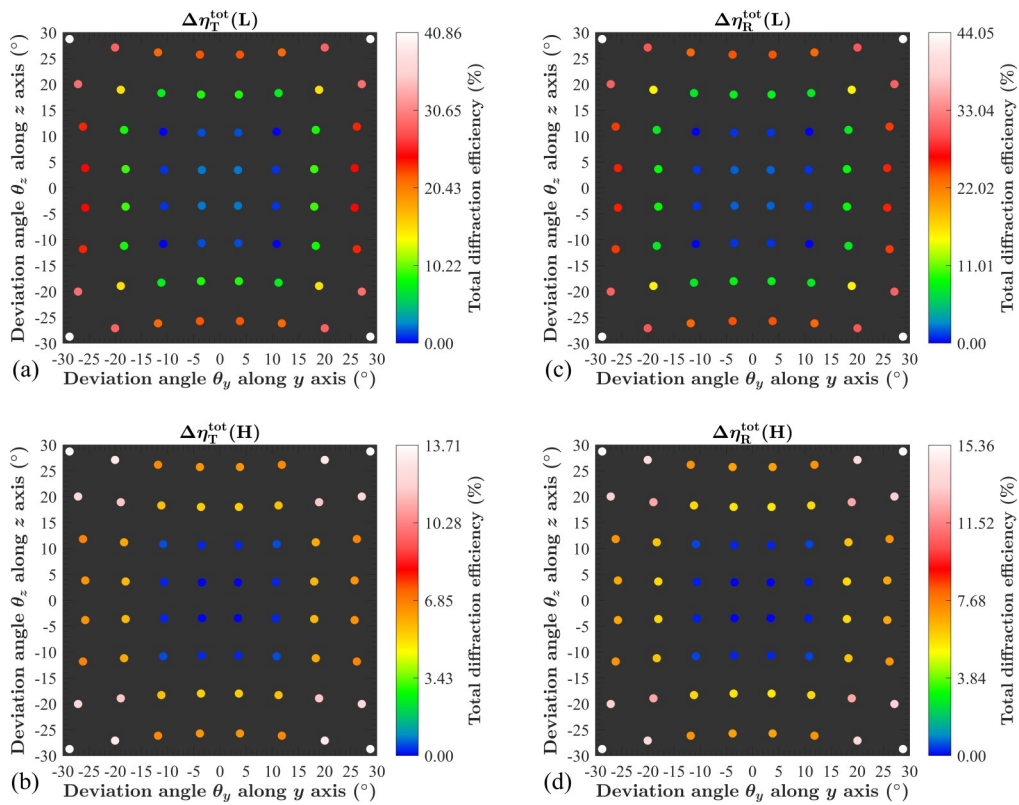


图3 两组不同级联顺序的衍射效率不均匀度在(a)~(b)发射模式与(c)~(d)接收模式下对角度指向阵列的分布

Fig. 3 Distributions of the non-uniformity of (a)~(b) transmit mode and (c)~(d) receive mode over the angular pointing array

仿真结果表明,无论级联顺序如何,不均匀度均呈现中心区域最低、边缘区域最高的特征,这源于边缘视场光束经历了更严重的斜入射累积效应,导致衍射效率降低。然而,对比图3(a)与3(b)(发射模式)以及图3(c)与3(d)(接收模式)可知,级联顺序的调整能显著改变这种非均匀性的程度。在L型序列下,发射模式总衍射效率分布于57.41%至98.27%之间,最大不均匀度高达40.86%;接收模式效率分布于53.80%至97.85%之间,最大不均匀度达44.05%。相

反,在H型序列下,发射模式效率提升并收窄至74.48%~88.19%,不均匀度降至13.71%;接收模式效率为73.20%~88.55%,不均匀度仅为15.36%。这表明,H型级联顺序能显著缓解中心与边缘区域的效率差异。

产生上述差异的根本原因在于,不同级联顺序导致了各衍射单元上锥形入射角的不同累积方式。斜入射可等效为在液晶偏振光栅上附加了一个额外的等效扭曲角(Equivalent Twist Angle, ETA)^[24]。根据Floquet-Bloch矢量衍射理

论^[32],ETA的表达式为:

$$\Phi^{(q)} = \frac{\pi \sin \theta_G^{(q)} \left| \sin \theta_i^{(q)} \cos \phi_i^{(q)} + m_B \sin \theta_G^{(q)} \cos \xi^{(q)} / 2 \right|}{\Delta n \sqrt{\left[n_o + \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \sqrt{n_e^2 - (n_e^2/n_o^2 - 1) \sin^2 \theta_i^{(q)} \sin^2 \alpha} d\alpha \right]^2 - 4 \sin^2 \theta_i^{(q)}}} \quad (4)$$

其中 m_B 为衍射主级次。ETA 越小,单片光栅的衍射效率越高。图 4 给出了发射模式下,H 型和 L 型序列中各衍射单元的 ETA 及衍射效率

率在全角度指向上的分布(角度索引按逐行排列)。可见,ETA 越小的单元,其衍射效率越高。

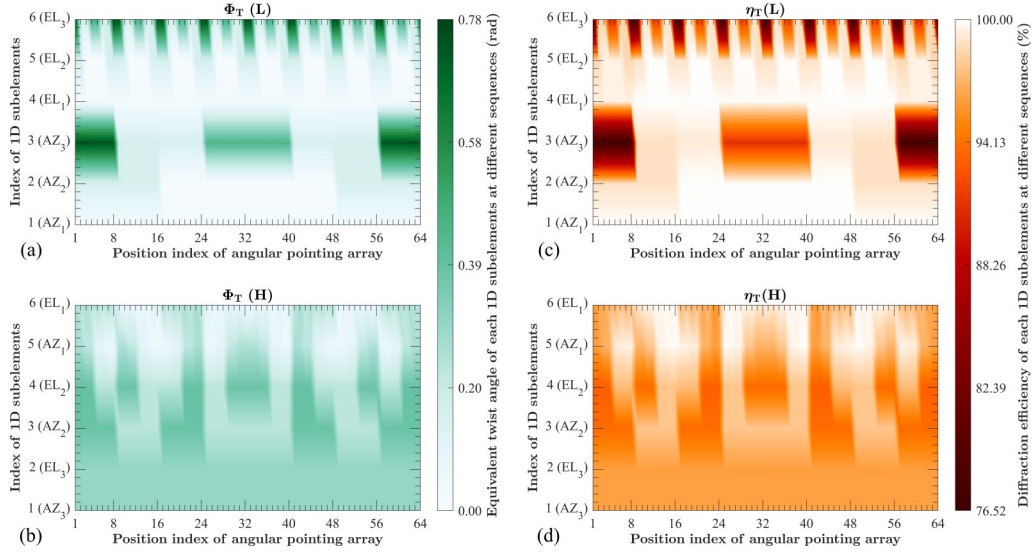


图 4 发射模式下各衍射单元的(a)~(b)等效扭曲角和(c)~(d)衍射效率对角度指向的分布

Fig. 4 (a)~(b) Equivalent twist angle and (c)~(d) diffraction efficiencies of all diffraction subelements under transmit mode with the angular pointing

进一步分析发现,两种序列的均匀性差异主要源于大光栅角衍射单元(AZ3和EL3)所处的位置。在L型序列中,AZ3和EL3被置于级联链路末端。此时,前序元件已使光束产生大角度偏转,因此入射至该两片光栅的光束同时包含大、小角度成分。由式(4)可知,大光栅角元件的ETA对入射角极为敏感,入射角的波动将导致ETA剧烈变化,进而引起衍射效率的极端二值化跳变(约77%和99%),严重劣化了总效率的均匀性。相反,在H型序列中,AZ3和EL3被前置,入射光尚未经历显著偏转,入射角始终保持在较小范围内,ETA得以维持较低水平,所有元件的衍射效率均稳定在93%~99.9%的连续区间内,从而实现了优异的整体均匀性。

综上,大角度光栅在级联链路中的前置,本质上是将其置于小入射角工作区间,从而有效

规避了因锥形入射效应引起的效率剧烈波动。

3.2 实际波片调制下的级联顺序研究

实际液晶波片在电压驱动下,其圆偏振调制能力会因锚定条件、相位延迟量等因素而偏离理想状态^[33-34]。本文以非手性的负性液晶波片(双折射率0.1,厚度5.5μm)为例,其圆偏振入射下最佳工作圆偏振度(Degree of Circular Polarization, DoCP)的视角分布如图5所示。DoCP的定义为:

$$\text{DoCP} = j \frac{E_p E_s^* - E_s E_p^*}{E_p E_p^* + E_s E_s^*} \quad (5)$$

DoCP=1和-1分别对应完美的右旋和左旋圆偏振光。图5表明,DoCP调制能力随入射极角增大而退化,且受方位角影响。其退化规律取决于液晶的锚定与分子指向矢分布。

为探究实际波片调制能力对最优级联顺序

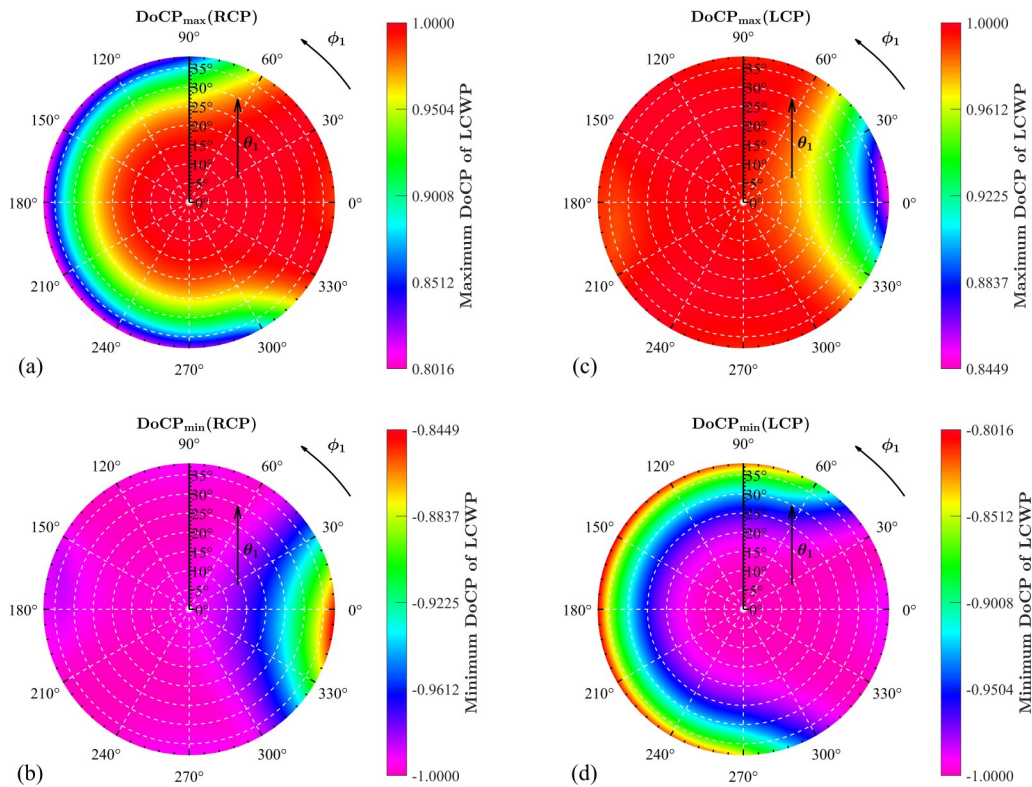


图5 右旋圆偏振入射下,液晶波片的最大(a)和最小(b)调制圆偏振度;左旋圆偏振入射下,最大(c)和最小(d)调制圆偏振度。

Fig. 5 Maximum (a) and minimum (b) modulated degrees of circular polarization of the liquid crystal waveplate under right-handed circularly polarized incidence; maximum (c) and minimum (d) modulated degrees of circular polarization under left-handed circularly polarized incidence.

的影响,表3展示了发射模式下,大光栅角前置与后置两种情形中,波片厚度(5.0 μm 、5.5 μm 、6.0 μm)引起的相位延迟偏差(-10%、0、+10%)对评价函数的具体影响。

结果表明,当存在相位延迟偏差时,由于偏振态退化导致衍射效率降低,级联系统的评价函数整体升高,均匀性绝对值下降。例如在-10%

偏差下,前置与后置评价函数分别由基准态的0.220和0.513恶化至0.302和0.644。然而,对比所有偏差状态可以发现,“后置”的评价函数始终显著高于“前置”,即“前置优于后置”的核心规律在器件非理想状态下依然能够成立。这证实了本文提出的优化方法在实际器件中同样有效,尽管器件相位延迟偏差会限制均匀性的绝对值,但最优级联顺序的拓扑结构(大光栅角前置配置的优越性)具有相对稳健性,并不会因波片调制能力存在一定范围内的整体偏差而发生反转。

应当说明的是,液晶偏振光栅的衍射效率主要取决于布拉格条件的偏离程度(即式(4)所表征的等效扭曲角)以及入射光的DoCP^[22]。鉴于此,这里“大光栅角前置”之所以能成为最优配置,其原因在于,相较于液晶波片性能所导致的DoCP劣化而言,此时不同衍射路径累积的布拉格条件偏离所造成的衍射效率损失更为严重。

表3 基于大光栅角前置和后置两种情形,液晶波片的相位延迟偏差对评价函数所造成的影响

Tab. 3 Effects of phase retardation deviation of a liquid crystal waveplate on the evaluation function in two large-grating-angle configurations: front and rear

波片厚度	相位延迟偏差	评价函数	
		前置	后置
5.0 μm	-10%	0.302	0.644
5.5 μm	0	0.220	0.513
6.0 μm	+10%	0.228	0.505

然而,一旦液晶波片引起的DoCP劣化占据主导因素,则上述“大光栅角前置”的结论将可能不再适用。例如, $30^\circ \times 30^\circ$ (AZ和EL序列均为 $1.36^\circ, 2.72^\circ, 5.46^\circ, 5.46^\circ$) 的二维级联系统,其光栅角和入射角度均较小,布拉格偏离程度较弱。若采用最大相位延迟为 2π 的正性液晶波片,则由该波片引起的DoCP劣化较为显著,并成为影响衍射效率的主导因素,进而导致“大光栅角前置”策略失效。对于此类情形,虽然最优级联顺序或发生改变,但本文所提计算方法仍具备适用性。

综上所述,针对液晶波片调制性能较优的情形,二维宽角扫描级联结构高能量均匀性设计的一般性准则可表述为:负责不同偏转方向的衍射单元(AZ与EL)应各自独立地将其内部大光栅角单元前置,而两个方向单元之间的相对级联位置可以任意穿插。这种“组内独立优化,组间任意组合”的设计自由度极大简化了二维系统的设计与装调复杂度。对于液晶波片调制能力严重退化的特殊情况,上述准则虽未必严格成立,但本文的计算方法仍可直接推广应用。

4 实验验证

根据已有的衍射效率测量光路^[22],对工作波长为 1064nm ,光栅角为 5.12° 的LCPG在不同入射极角下的衍射效率进行测量,测量结果与仿真数据的对比如图6所示。测量结果表明,LCPG的衍射效率随极角的分布实测曲线趋势和大小均保持一致。测量值和仿真值之间的绝对偏差在 $0.4\% \sim 2.5\%$ 之间,其主要来源于LCPG制备误差导致的衍射效率分布整体下降。上述对比表明,仿真模型能够较好预测实际器件的角响应,同时初步验证了H型级联序列在实际条件下的有效性。

参 考 文 献:

- [1] Hoy C, Stockley J, Shane J, *et al.*. Non-mechanical beam steering with polarization gratings: a review [J]. *Crystals*, 1995, 11(4): 361.
- [2] Winker B, Mahajan M, Hunwardsen M. Liquid crystal beam directors for airborne free-space optical communications [C]. *Aerospace Conference Proceedings*, 2004: 1702-1709.

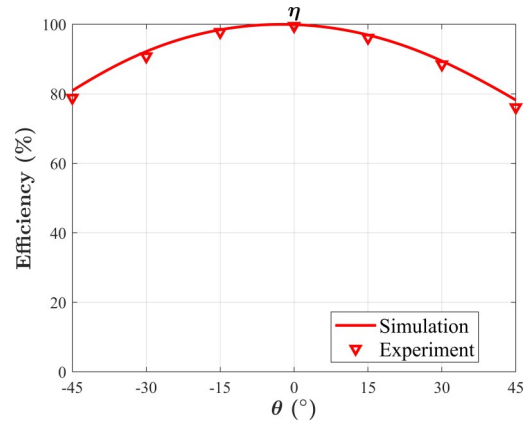


图6 单片LCPG衍射效率随入射极角的分布测量与仿真结果对比

Fig.6 Comparison of measurement and simulation for diffraction efficiency of the LCPG with polar angle

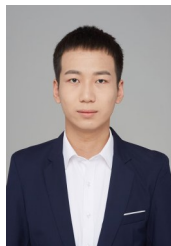
5 结 论

本文系统研究了级联序列对宽角扫描液晶偏振光栅二维光束偏转结构衍射效率均匀性的影响,并提出了一种以均匀性评估因子为目标的级联顺序优化方法。研究表明,对于采用调制性能较优的液晶波片的级联系统,将大角度光栅置于链路前端是抑制衍射效率非均匀性的有效策略。其物理机制在于,该排布方式可避免大光栅角单元在斜入射条件下引发剧烈的等效扭曲角波动。仿真结果表明,对于 $50^\circ \times 50^\circ$ 的视场范围,采用该优化准则后,发射模式下总衍射效率的最大差异可由 40.86% 降至 13.71% ,接收模式下可由 44.05% 降至 15.36% ,均匀性提升效果显著。同时,该优化准则在发射与接收模式下具有一致性,为收发共路系统的设计提供了理论支撑。此外,研究还讨论了该准则对实际液晶波片非理想调制的鲁棒性。本研究的结论可推广至任意扫描范围的二维级联液晶偏振光栅架构,为设计高性能、紧凑型宽角光束偏转系统提供了重要的理论依据和实践指导。

-
- [3] Zhang J, Song Y, Wang J, *et al.*. Research on technology of airborne optoelectronic tracking platform based on dual liquid crystal polarization grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2024, 53(3): 0311002.
- [4] Buck J, Serati S, Serati R, *et al.*. Polarization gratings for non-mechanical beam steering applications [C]. Acquisition, Tracking, Pointing, and Laser Systems Technologies XXVI, 2012: 159-164.
- [5] Collis R T H. Lidar [J]. *Appl. Opt.*, 1970, 9: 1782-1788.
- [6] Kattawar G W, Plass G N. Time of flight lidar measurements as an ocean probe [J]. *Appl. Opt.*, 1972, 11: 662-666.
- [7] Hair J W, Hostetler C A, Cook A L, *et al.*. Airborne high spectral resolution lidar for profiling aerosol optical properties [J]. *Appl. Opt.*, 2008, 47: 6734-6752.
- [8] Li Y, Luo Z, Wu S T. High-precision beam angle expander based on polymeric liquid crystal polarization lenses for LiDAR applications [J]. *Crystals*, 2022, 12: 349.
- [9] Xiong J, Wu S T. Planar liquid crystal polarization optics for augmented reality and virtual reality: From fundamentals to applications [J]. *eLight*, 2021, 1: 3.
- [10] Solomashenko A B, Afanaseva O L, Shishova M V, *et al.*. Industrial applications of AR headsets: a review of the devices and experience [J]. *Light: Advanced Manufacturing* 2025, 6: 23.
- [11] Chen B, Li C, Li X, *et al.*. SiC diffractive waveguides for augmented reality: single-layer, full-color, rainbow-artifact-free display with vision correction [J]. *eLight* 2025, 5: 21.
- [12] Wu X, Jiang X, Xie Y, *et al.*. Integrated multifunctional computational imaging platform using cascaded electrically tunable liquid crystal elements [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2025, 20(4): e02040.
- [13] McManamon P F, Bos P J, Escuti M J, *et al.*. A review of phased array steering for narrow-band electrooptical systems [J]. *Proc. IEEE*, 2009, 97(6): 1078-1096.
- [14] Koh K H, Kobayashi T, Lee C. A 2-D MEMS scanning mirror based on dynamic mixed mode excitation of a piezoelectric PZT thin film S-shaped actuator [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(15): 13812-13824.
- [15] Hofmann U, Janes J, Quenzer H J. High-Q MEMS resonators for laser beam scanning displays [J]. *Micromachines*, 2012, 3: 509-528.
- [16] Chan T K, Megens M, Yoo B W, *et al.*. Optical beam-steering using an 8×8 MEMS phased array with closed-loop interferometric phase control [J]. *Opt. Express*, 2013, 21(3): 2807-2815.
- [17] He Z, Gou F, Chen R, *et al.*. Liquid crystal beam steering devices: principles, recent advances, and future developments [J]. *Crystals*, 2019, 9(6): 292.
- [18] An J, Kim Y, Kim Y, *et al.*. Achromatic beam deflector with electrodynamic phased arrays. *Light Sci Appl* 2025, 14: 276.
- [19] 张国峰, 张军勇, 王驰. 利用双光栅实现液晶空间光调制器绝对干涉校准[J]. 光学精密工程, 2025, 33(23): 3630-3638.
- ZHANG G F, ZHANG J Y, WANG C. Absolute interferometric calibration of liquid crystal spatial light modulators using dual gratings[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(23): 3630-3638. (in Chinese)
- [20] 查正桃, 勾正阳, 刘子豪, 等. 基于评估因子反演的扭曲液晶聚合物螺距与厚度的同步测量方法[J]. 液晶与显示, 2026, 41(8): 1086-1093.
- ZHA Z T, GOU Z Y, LIU Z H, *et al.*. Simultaneous measurement of pitch and thickness in twisted liquid crystal polymer based on evaluation factor inversion[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2026, 41(8): 1086-1093. (in Chinese)
- [21] 陈璉, 杨程亮, 穆全全, 等. 基于琼斯矩阵的液晶偏振光栅扭曲角及厚度的测量方法[J]. 液晶与显示, 2021, 36(5): 656-662.
- CHEN J, YANG C L, MU Q Q, *et al.*. Method for measuring the twist angle and thickness of liquid crystal polarization grating based on Jones matrix[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(5): 656-662. (in Chinese)
- [22] Zha Z T, Gou Z Y, Peng Z H, *et al.*. Research on energy transfer characteristics for liquid crystal polarization gratings under conical incidence [J]. *Opt. Express*, 2025, 33(15): 32479-32489.

- [23] Xiang X, Kim J, Komanduri R, *et al.*. Nanoscale liquid crystal polymer Bragg polarization gratings [J]. *Opt. Express*, 2017, 25(16): 19298-19308.
- [24] TAN Li, Ho J Y; Srivastava A K, *et al.*. A simplified model for the optimization of LC photonic elements [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(11): 1096-1099.
- [25] Raj A A B, Padmavathi S. Quality metrics and reliability analysis of laser communication system [J]. *Def. Sci. J.*, 2016, 66(2): 175-185.
- [26] Zhou Y, Zhao K, Li W, *et al.*. A link switching and traffic scheduling method for satellite-ground uninterrupted communication [C]. International Conference on Communications, Circuits, and Systems, 2023: 57-67.
- [27] Zha Z T, Gou Z Y, Peng Z H, *et al.*. Research on energy compensation characteristics of beam deflection structure based on liquid crystal polarization grating [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2025, 127: 201102.
- [28] 胡芳燕,王海龙,吴尚,等. 液晶偏振光栅在入射方位角内的衍射均匀性分析[J]. *中国激光*, 2026, 53(13): 1305001.
HuF., WangH., WuS., *et al.*. Analysis of the diffraction uniformity of liquid crystal polarization gratings within the incident azimuth angle [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2026, 53(13): 1305001. (in Chinese)
- [29] Kim J, Miskiewicz M N, Serati S, *et al.*. Nonmechanical laser beam steering based on polymer polarization gratings: Design optimization and demonstration [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2015, 33(10): 2068-2077.
- [30] 方远翔,江伦,裴惠熠,等. 双液晶偏振光栅系统的倾斜误差特性分析[J]. *中国光学(中英文)*, 2024, 17(6): 1387-1396.
FANG Y X, JIANG L, PEI H Y, *et al.*. Tilt error's characteristic analysis of dual liquid crystal polarization grating system[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(6): 1387-1396. (in Chinese)
- [31] Chen W, Zhao Z, Wang C, *et al.*. Linear polarization grating combining a circular polarization grating with a special cycloidal diffractive quarter waveplate [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(23): 33378-33390.
- [32] Russell P St J. Optics of Floquet-Bloch waves in dielectric gratings [J]. *Appl. Phys. B*, 1986, 39(4): 231-246.
- [33] 胡虎,刘雪莲,王春阳,等. 基于偏振补偿的级联式液晶偏振光栅衍射效率优化方法[J]. *液晶与显示*, 2023, 38(7): 880-891.
HU H, LIU X L, WANG C Y, *et al.*. Optimization method of diffraction efficiency of cascade liquid crystal polarization gratings based on polarization compensation [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(7): 880-891. (in Chinese)
- [34] 王启东,穆全全,刘璐璐,等. 宽波段大视角液晶偏振转换器研究进展[J]. *液晶与显示*, 2024, 39(5): 683-696.
WANG Q D, MU Q Q, LIU L L, *et al.*. Research progress on liquid crystal polarization converter with a large field of view and broadband [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(5): 683-696. (in Chinese)

作者简介:



勾正阳,男,硕士研究生,2024年于山西大学获得学士学位,主要从事液晶光学器件的理论与制备技术的研究。E-mail: gouzhengyang24@mails.ucas.ac.cn



王启东,男,博士,研究员,2015年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事液晶光学、几何相位液晶器件、液晶系统应用等方面的研究。E-mail: qdawang@ciomp.ac.cn