

基于非周期闪耀光栅的液晶相控阵波控方法研究

孔令讲 朱 颖 宋 艳 杨建宇

(电子科技大学电子工程学院, 四川 成都 610054)

摘要 针对基于二元光栅演化的周期性闪耀光栅,限制了液晶相控阵所能实现的衍射角度数量以及分布,基于微波相控阵理论提出了一种基于非周期性闪耀光栅的液晶相控阵波控方法。通过衍射理论推导,证明周期性闪耀光栅是非周期闪耀光栅的特定形式。并仿真验证了基于非周期性闪耀光栅的方法能够极大地增加扫描角度数量,实现多于周期闪耀光栅 10 倍的可分辨角数量,使液晶相控阵阵列在不需要级联其它器件的前提下,实现视场范围内几乎所有可分辨角的光波束扫描,且不以衍射效率降低为代价。通过光束偏转实验,验证了基于非周期闪耀光栅进行液晶相控阵波控可实现均匀扫描,且可实现周期性闪耀光栅所不能实现的衍射角度。

关键词 光学器件;连续扫描;非周期性闪耀光栅;波束控制法;液晶相控阵

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0123001

A Beam Steering Approach of Liquid Crystal Phased Array Based on Nonperiodic Blazed Grating

Kong Lingjiang Zhu Ying Song Yan Yang Jianyu

(College of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract Periodic blazed grating of binary grating limits the number and distribution of the diffraction angles realized by liquid crystal phased array (LCPA). Inspired by microwave radar phase arrays theory, a beam steering approach of liquid crystal phased array based on a nonperiodic blazed grating is proposed. Through the deduction of diffraction theory, it is verified that periodic blazed grating is a special case of nonperiodic blazed grating. Simulations are presented to testify that the beam steering approach based on nonperiodic blazed grating can obtain steering angles which are ten times as many as those produced by periodic blazed grating. Without combining with other devices, LCPA can realize continuous beam steering of almost all the resolvable spots over the field of view and will not decrease diffraction efficiency. In order to validate the proposed approach, beam steering experiment is performed with single LCPA. The results show that the beam steering approach based on nonperiodic blazed grating can obtain continuous beam steering and steering angles which periodic blazed grating cannot.

Key words optical devices; continuous steering; nonperiodic blazed grating; beam steering approach; liquid crystal phased array

OCIS codes 230.6120; 050.1950; 120.5060; 230.1950

1 引言

自从液晶材料在显示领域得到成功应用后,液晶的独特光电特性开始受到普遍地关注,应用领域也逐渐拓宽。利用液晶光栅器件制作的液晶相控阵就是其中一类具有广泛前景的应用,其具有驱动电

压低,功耗小,重量轻,衍射角度易改变等优点^[1~5],可用于激光雷达、自由空间光通信和光转换器等领域。液晶相控阵通过改变光栅周期或闪耀级次获得不同衍射角度^[6~10],较为常用的是改变光栅周期。目前,大部分液晶相控阵的波束控制方法都是建立

收稿日期: 2010-03-01; 收到修改稿日期: 2010-05-19

基金项目: 国家“十一五”预研项目(H04010201)资助课题。

作者简介: 孔令讲(1974—),男,博士,副教授,主要从事新体制雷达系统与雷达信号处理等方面研究。

E-mail: uestc.kong@gmail.com

在周期性闪耀光栅基础之上。这种基于周期性闪耀光栅的波控方法是指当闪耀级次固定时,每个光栅周期内的移相器数目为相同的整数。

周期性闪耀光栅,因要求各光栅周期内的电极数相同,故可实现光栅周期的数量有限,从而使得衍射角度的数量以及分布也受到限制。导致单片液晶相控阵列在其视场范围内,尤其是大视场范围,无法实现连续扫描。因而 20 世纪 90 年代,一种基于子阵列的粗扫描与精扫描结构相结合的方法被提出,该方法可减小电极寻址数量并实现角度的均匀扫描^[1]。但是其精扫描阵列只能实现较小的视场域扫描^[11]。近些年来又有一些基于精扫器件结合大角度扫描器件获取连续扫描的方法被提出,精扫器件通常采用液晶相控阵,大角度扫描器件通常采用如多重体全息技术、偏光棱镜技术和液晶极化光栅等技术^[10]。但是上述方法中的液晶相控阵的波控模型均是建立在周期性闪耀光栅的基础上,其扫描角度数量仍然受限,单片液晶相控阵无法实现连续扫描。

此外一些基于新技术的方法也得到发展,如级联电光陶瓷(PMN-PT)光相控阵与压电驱动的微棱镜的方法,虽在 $-12^\circ \sim +12^\circ$ 的角度范围内实现了 1800 个可分辨角度的扫描^[12],但仍难以实现视场范围内所有可分辨角度的扫描。

本文基于微波相控阵理论提出了一种基于非周期性闪耀光栅的液晶相控阵波控方法,并利用衍射理论的推导验证了周期性闪耀光栅是非周期性闪耀光栅的一种特例。通过仿真,表明这种基于非周期性闪耀光栅的波控方法可在不降低扫描效率的前提下,可极大地增加单片液晶相控阵器件的可分辨扫描角度数量。最后进行光束偏转实验,验证基于非周期性闪耀光栅的波控方法能够实现周期性闪耀光栅所不能实现的衍射角度,使液晶相控阵器件的衍射角度均匀分布,实现整个视场域内光波束的连续扫描。

2 周期性闪耀光栅

液晶相控阵主要由电极与液晶盒组成,单个电极与其在液晶盒中所控制的液晶区域一起构成了一个相控单元。通过控制电极在相控单元上加载不同的电压,可以对入射光产生不同的相位延迟^[1,13,14]。因而对液晶相控阵列施加一定的周期性台阶电压面便可获得周期的阶梯状相位延迟分布,类似于二

元光学中的二元光栅结构。

在二元光学理论中,二元光栅是由多个具有相同周期的二元光栅波面组成,利用阶梯形的二元光栅波面逼近于线性闪耀面,使出射光闪耀在特定角度,实现光束的偏转^[10]。对液晶相控阵加载周期的离散电压便可实现这种周期的阶梯闪耀光栅模型。因而当光束垂直入射时,周期性闪耀光栅的偏转角度满足光栅方程的一般形式^[15]:

$$D \sin \theta = m \lambda, \quad (1)$$

式中 θ 表示表示液晶相控阵对光束的衍射角度, m 为衍射级次, λ 为光束波长, $D = M d$ 为光栅周期, M 表示每个光栅周期内的相位台阶数, d 表示相邻电极间距。由(1)式可知,衍射级次及光束波长一定时,周期性闪耀光栅的偏转角度实际上取决于光栅周期 D 。由于 $D = M d$,故当电极间距 d 一定,可实现的偏转角度及偏转角度的数量最终取决于 M 。因此对于周期性的闪耀光栅,为了保证出射波阵面的闪耀周期相同,则 M 的数量有限,因而只能实现有限数量的离散的衍射角度,无法进行光波束的连续扫描。

此外,在二元光学理论中,为了在衍射角度上获得最大衍射效率,限制了一个光栅周期中的最大相位延迟值必须为 2π 的整数倍。在实际液晶相控阵的应用中,最大相位延迟值一般只取为 2π ,因为在相同液晶材料的情况下,要实现大于 2π 的相位延迟值,液晶盒厚度将增加,液晶相控阵的响应速度也会降低。因此,对于周期性闪耀光栅,相邻相控单元相位延迟差 $\Delta\alpha$ 为

$$M \Delta\alpha = 2\pi. \quad (2)$$

假设液晶相控阵中 $M=4$ 即 $\Delta\alpha=0.5\pi$,则周期性闪耀光栅的出射波阵面如图 1 所示。

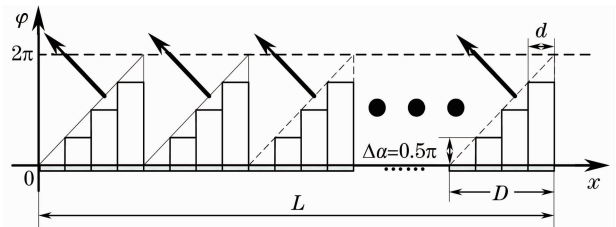


图 1 周期性闪耀光栅的出射波阵面

Fig. 1 Output wavefront for periodic blazed grating
图中 L 为液晶相控阵的孔径,基于二元光栅理论,周期性闪耀光栅的出射光束相位分布 $U'(x)$ 为^[16,17]

$$U'(x) = \left\{ \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - nd) \exp(in\Delta\alpha) \right] \otimes W(d) \right\} \cdot W(D) \otimes \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(x - mD), \quad (3)$$

式中 $W(d)$ 与 $W(D)$ 为矩形窗函数, 假设出射光束幅度为 1, x 为液晶相控阵后表面的位置坐标值。由于液晶相控阵具有一定的孔径, 因而实际的出射相位分布 $U(x)$ 可写为

$$U(x) = U'(x)W(L), \quad (4)$$

式中 $W(L)$ 为矩形窗函数。根据衍射理论可知远场光束的衍射图样与液晶相控阵出射表面的光束复分布为傅里叶变化关系^[16], 可得出周期性闪耀光栅模型的远场光束复分布振幅为

$$E'(u) = \frac{d}{D} \sum_m \text{sinc}(d\pi u) \frac{\sin \pi D(u - \Delta\alpha/2\pi d)}{\sin \pi d(u - \Delta\alpha/2\pi d)} \delta\left(u - \frac{m}{D}\right), \quad (5)$$

式中 $u = \sin\theta/\lambda$, $\text{sinc}u = \sin u/u$, θ 为远场观察点与液晶相控阵阵面法线的夹角。对于液晶相控阵孔径限制下的 $U(x)$, 其远场光强分布表现为一个 sinc 函数卷积 $E'(u)$, 获得的衍射角度、理想衍射效率与 $U'(x)$ 完全相同, 因此只用 $E'(u)$ 就可以计算出周期性闪耀光栅模型的衍射角度与衍射效率。将(1)、(2)式代入(5)式, 远场光束复分布振幅可以化简为

$$E'(m) = \sum_m \frac{\sin(m\pi/M)}{m\pi} \frac{\sin \pi(m-1)}{\sin \pi(m-1)/M}, \quad (6)$$

故每个级次的光束远场光强可被写为

$$I = |E'(m)|^2 = \left[\frac{\sin(m\pi/M)}{m\pi} \frac{\sin \pi(m-1)}{\sin \pi(m-1)/M} \right]^2. \quad (7)$$

由于液晶盒厚的原因, 液晶相控阵能够实现的 最大相位延迟值一般取为 2π , 其衍射角度全为 1 级闪耀角, 即 $m=1$ 。此外出射波束的幅度为 1, 故在衍射角度 0 时, 所有的波束光强累加为 $I_0=1$ 。各衍射角度的衍射效率可以写为^[1]

$$\eta = I/I_0 = \left[\frac{\sin(\pi/M)}{\pi/M} \right]^2. \quad (8)$$

由以上方程可知, 周期性闪耀光栅的可实现衍射角度及衍射效率均取决于 M 值的选取。假设液晶相控阵的独立可寻址电极数为 1440, 相邻电极间距为 $5 \mu\text{m}$, 光束波长为 $0.635 \mu\text{m}$, 则根据(1)、(8)式可获得周期性闪耀光栅可实现的衍射角度分布及其衍射效率。此外, 考虑到出射激光的衍射极限分辨角为 $\theta_{\text{div}} \approx \lambda/L$ ^[15], 因而周期性闪耀光栅可分辨的衍射角度分布及其衍射效率如图 2 所示。由于负衍射角度情况与正角度相同, 图中只给出了正衍射角度, 其中 $\theta_{\text{max}} = \arcsin(\lambda/2d)$ 为最大衍射角度。从图 2 中可得出周期性闪耀光栅的以下三个特点:

1) 周期性闪耀光栅的衍射角度呈离散分布, 仅

可实现有限的角度;

2) 周期性闪耀光栅的衍射角度呈现不均匀分布, 在小角度 ($\theta < 0.1\theta_{\text{max}}$) 时衍射角度较为密集, 但是随着衍射角度增大, 其分布则变得更加稀疏。因此在很大的角度范围内无法实现光束能量的闪耀, 波控受到了较大的限制。如图 2 中的角度范围 ($0.5\theta_{\text{max}}, \theta_{\text{max}}$) 内仅仅只能实现 3 个衍射角度;

3) 由(8)式可知, 周期性闪耀光栅的扫描效率随着扫描角度的增大而减小。

针对周期性闪耀光栅的波控方法所带来的问题, 本文提出了一种基于非周期性闪耀光栅的波控方法, 该方法能够使单片的液晶相控阵阵列获得更多的可分辨角度, 实现整个视场域内均匀、连续的波束扫描。

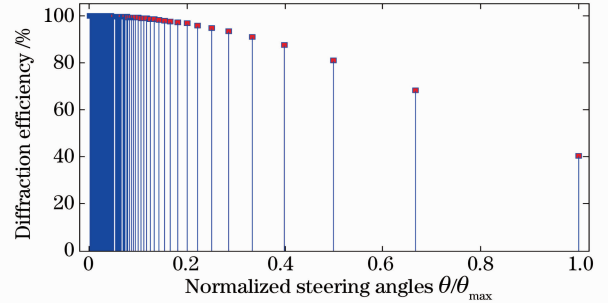


图 2 周期性闪耀光栅的可分辨衍射角度分布及其衍射效率

Fig. 2 Resolvable diffraction angles and efficiencies of periodic blazed grating

3 非周期性闪耀光栅

非周期性闪耀光栅模型与周期性闪耀光栅模型一样, 都会在液晶相控阵的出射面上形成一种阶梯形相位延迟分布。但其波控思想源于微波相控阵雷达, 即通过控制相邻电极的相位差来改变同相波前的位置, 从而达到一定角度偏转的目的, 因而其扫描角度取决于方程^[18]:

$$-\Delta\alpha = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta, \quad (9)$$

式中 $\Delta\alpha, d$ 的含义与周期性闪耀光栅相同, 且非周期性闪耀光栅的出射相位分布也由 $\Delta\alpha$ 决定。由于此时非周期性闪耀光栅的阶梯形相位延迟分布 $U'(x)$ 已不一定遵循二元光栅结构, 则其出射光束相位分布可写为

$$U'(x) = \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - nd) \exp(in\Delta\alpha) \right] \otimes W(d), \quad (10)$$

式中假设出射光束幅度为 1, 同样由于液晶相控阵

具有一定的孔径,液晶相控阵的实际出射相位分布为

$$U(x) = U'(x)W(L), \quad (11)$$

式中 $L, W(d), W(L)$ 的含义与周期性闪耀光栅模型相同。

如上所述,单个光栅周期内的最大相位延迟值不超过 2π 。假设 $\Delta\alpha = 0.6\pi$, 此时非周期性闪耀光栅模型的液晶相控阵出射波阵面 $U(x)$ 如图 3 所示。与图 1 相比,图 3 中的阶梯相位面呈现非周期性,即 $D1 \neq D2$, 且光栅周期 $D1$ 内的相位分布也不同于 $D2$ 。在 $D1, D2$ 处的相位延迟并非置位为 0。结合 (2) 式可知,每个光栅周期内的电极数为 $M = 2\pi/\Delta\alpha = 10/3$ 。这里 M 为非整数,即此时液晶相控阵的出射波阵面为非周期性闪耀光栅模型。因此采用非周期闪耀光栅进行波控,可实现任何相位延迟值 $\Delta\alpha$ 。当 $\Delta\alpha$ 取值使 2π 能够被其整除时,非周期闪耀光栅可演变为周期闪耀光栅,因而非周期闪耀光栅可实现周期闪耀光栅的所有可实现的衍射角度。

此外在图 3 中,可将 3 个包含不同周期的台阶型闪耀光栅结合,形成 1 个导出寻址线的周期 D' , 且 $D' = 10d$, 从而减小可寻址数目。此时形成的周期 D' 可使寻址数目减小为 10 个。

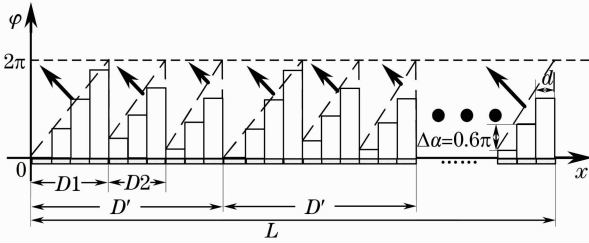


图 3 非周期性闪耀光栅的出射波阵面

Fig. 3 Output wavefront for nonperiodic blazed grating

与周期闪耀光栅类似,可根据远场光束的衍射图样与液晶相控阵出射表面的光束复分布的傅里叶变化关系,分析非周期闪耀光栅模型的衍射角度与衍射效率。因此根据衍射理论中的傅里叶变化关系,可得非周期闪耀光栅模型的远场光束复分布振幅为

$$E(u) = \frac{\sin(\pi u d)}{\pi u d} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(2\pi u - \frac{2\pi}{d}n + \frac{\Delta\alpha}{d}\right) = E_2(u)E_1(u), \quad (12)$$

式中 $E_2(u) = \frac{\sin(\pi u d)}{\pi u d}, E_1(u) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(2\pi u - 2\pi n/d + \Delta\alpha/d)$ 且 $u = \sin \theta/\lambda$ 。当 $\Delta\alpha = 0.6\pi$ 时,根据上式可得出远场归一化光强分布,如图 4 所示。图中的深色区域 $[-\theta_{\max}, \theta_{\max}]$ 为可实现的扫描区域,波

控偏转如果超出此区域,就会在其他的角度上发生非预期的光束偏转。在可扫描区域中,图中 n 总是为零。将(9)式代入(12)式可获得光强分布为

$$I = \left[\frac{\sin(\Delta\alpha/2)}{\Delta\alpha/2} \right]^2, \quad (13)$$

当 $\Delta\alpha = 0$ 时,光能量全部集中在 0, 此时的光束能量 $I_0 = 1$, 故各衍射角度上的衍射效率为

$$\eta = I/I_0 = \left[\frac{\sin(\Delta\alpha/2)}{\Delta\alpha/2} \right]^2. \quad (14)$$

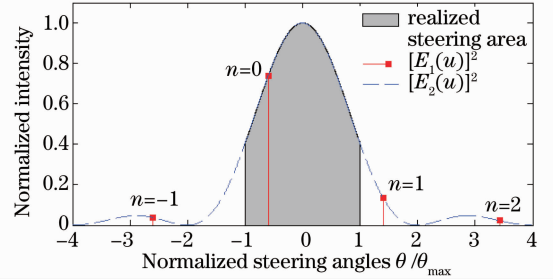


图 4 非周期性闪耀光栅的远场归一化光强分布
Fig. 4 Far-field normalized intensity for nonperiodic blazed grating

(14)式与周期性闪耀光栅的衍射效率计算公式(8)式非常相似。当 2π 能够被 $\Delta\alpha$ 整除时,两式完全相同。假设液晶相控阵的电极个数为 1440, 相邻电极间距为 $5 \mu\text{m}$, 光束波长为 $0.635 \mu\text{m}$, 非周期性闪耀光栅模型可实现的衍射角度及其衍射效率分布如图 5 所示。图中的灰色区域为可扫描区域。根据(9)式可知,如果不考虑相控单元相位量化的影响,在可扫描区域中,任何可分辨的衍射角度均可实现。但考虑到角度的可分辨性,因此实际在 $0 \sim \theta_{\max}$ 的范围内可分辨的扫描角度为 720 个,比同等条件下周期性闪耀光栅实现的可分辨角提高了 10 多倍。如果引入相位量化因素,衍射角度的精度及扫描效率会有一定的误差,但角度数量不变,仍然比周期性闪耀光栅模型有很大的提高。此外,与图 2 相比,基于

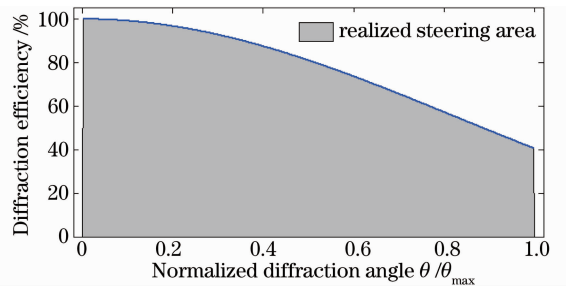


图 5 非周期闪耀光栅可实现的衍射角度及衍射效率分布

Fig. 5 Realizable diffraction angles and efficiencies for nonperiodic blazed grating

非周期闪耀光栅的波控方法可以很好地解决周期闪耀光栅的衍射角度离散及分布不均的问题。并且从(14)式可知,非周期性闪耀光栅模型并没有降低周期性闪耀光栅在对应的衍射角度处的衍射效率,证明采用基于非周期闪耀光栅的波控方法可实现近似均匀的覆盖视场域的波束扫描,并不以降低衍射效率及增加寻址难度为代价。

4 波束控制实验

单片的液晶相控阵由于采用周期闪耀光栅的波控方法,可实现的扫描角度有限,且分布不均。而采用非周期闪耀光栅的波控方法,可实现的扫描角度数量不但可以得到极大的提高而且扫描角度分布近

似均匀。因而为了验证基于非周期闪耀光栅的波控方法是否可行,下面进行光束偏转实验。

实验采用的单片液晶相控阵,电极宽度与电极间距均为 $5 \mu\text{m}$,可控电极数为 720 个,液晶盒厚 $6 \mu\text{m}$,液晶的双折射率为 0.26,能够完成 2π 范围的相位延迟,激光波长为 635 nm ,则最大扫描角度 $\theta_{\text{max}} = \arcsin(\lambda/2d) = 1.8194^\circ$ 。图 6 为光束偏转实验的实验装置示意图。氦氖激光源产生的激光,通过偏振片垂直入射到液晶相控阵孔径上;液晶相控阵上的电极加载了一组根据非周期闪耀光栅波控方法得到的控制电压,使液晶相控阵对入射激光产生相位调制,改变出射激光偏转方向。

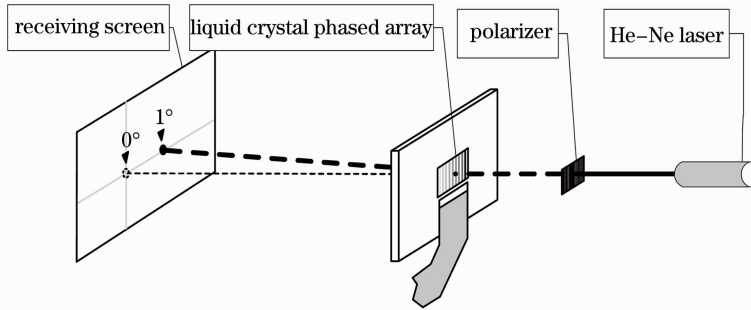


图 6 光束偏转实验的实验装置示意图

Fig. 6 Setup for the beamsteering experiment

光束偏转实验的偏转角度选为 $0^\circ \sim 1^\circ$ 之间均匀分布的 50 个衍射角度,原则上可以选择更多数量的衍射角度,但 50 个衍射角度足以体现出非周期性闪耀光栅模型的连续扫描特性,并且这样也容易分辨出接收屏上光点的变化。对于周期性闪耀光栅模型,根据其光栅方程,在 $0.5^\circ \sim 1^\circ$ 之间只能实现 4 个非均匀分布的衍射角度,分别为 0.5198° , 0.6064° , 0.7277° , 0.9096° ,在衍射角度的数量与分布上其波控性能远低于非周期性闪耀光栅模型。

下面为在光束偏转实验中所采用的波控方法具体步骤:

1) 根据所需的衍射角度,由(9)式计算相控单元的相位延迟差 $\Delta\alpha$;

2) 固定液晶相控阵第一个相控单元的相位延迟值为零,得到所有相控单元的相位延迟值分布;

3) 依据液晶相控阵的电压-相移特性,求取能够实现此相位延迟值分布的电压分布,并寻找最近的可实现电压加载于各个相控单元的电极之上。

图 7 为光束偏转实验得到的 50 个不同衍射角度下的衍射图样,由于衍射图样数量较多,为了方便对比,故将水平分布的衍射图样旋转 90° 变成垂直分布。

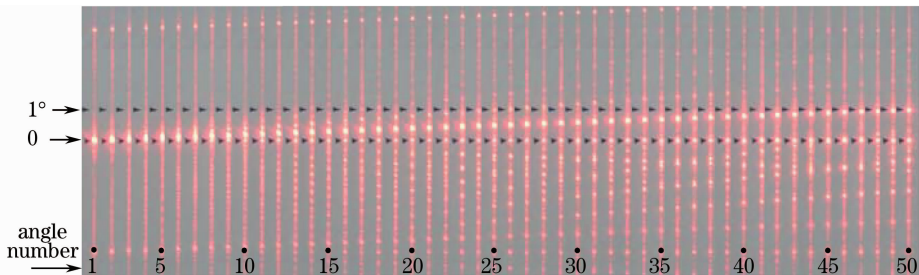


图 7 50 个不同衍射角度下的衍射图样

Fig. 7 Diffraction patterns of 50 different diffraction angles

由图 7 中可知,基于非周期闪耀光栅模型的波控方法能很好的实现 $0\sim 1^\circ$ 之间 50 个衍射角度的均匀扫描。理论上非周期性闪耀光栅可以实现任意角度的扫描,但实际中受到相位量化的影响,扫描精度有限。

此外,由图 7 可看到均匀扫描受到很多因素的限制,且衍射效率较低,带有的杂散光较多,同时中心 0 处的光点也较亮。这些现象与液晶相控阵结构、制作工艺、液晶材料等有关^[19],与波控方法并无关系。其中 0 中心亮点与较强衍射副瓣就是由两相邻电极间隙之间的“相位凹陷”所引起的^[20~22]。

光束偏转实验的结果已经证明改进的波控方法能够摆脱传统波控方法对衍射角度的限制,实现传统波控方法不能实现的衍射角度,使衍射角度均匀分布于视场范围内。

5 结 论

本文从二元光学的角度,分析了基于周期性闪耀光栅的波控方法在衍射角度数量与分布上的弊端,并针对这种弊端提出了一种基于非周期性闪耀光栅模型的波控方法,该方法能够用于单片液晶相控阵完成波束的连续扫描,且不以衍射效率的降低为代价。随后,为了验证单片液晶相控阵基于非周期闪耀光栅进行波控方法的可行性,进行了光束偏转实验,通过实验实现了 $0\sim 1^\circ$ 之间 50 个角度的均匀扫描,而基于周期性闪耀光栅显然无法实现,从而证明了本文所提基于非周期性闪耀光栅模型的波控方法的正确性。虽然本文所提出的可以实现任何角度的偏转,但在实际应用中,衍射角度的精度还会受到相控单元相位量化的制约,具体的制约关系以及提高衍射角度精度的方法,有待于未来的工作中进一步研究。此外基于非周期性闪耀光栅的波控方法最大可寻址电极数及可分辨扫描角度数量之间的制约关系及如何选择可分辨扫描角度也是进一步研究的工作。

参 考 文 献

- Paul F. McManamon, Terry A. Dorschner, David L. Corkum *et al.*. Optical phased array technology[J]. *IEEE*, 1996, **84**(2): 268~298
- Scott Harris. Characterization and application of a liquid crystal beam steering device[C]. *SPIE*, 2001, **4291**: 109~119
- Jamie Harriman, Steve Serati, Jay Stockley. Comparison of transmissive and reflective spatial light [C]. *SPIE*, 2005, **5930**: 59302D: 1~10
- Igor Anisimov, Scott R. Harris, Brian K. Stadler. Characterization of an optical phased array for use in free space

- optical communication antennas[C]. *SPIE*, 2008, **7091**: 709105: 1~10
- Hans Dieter Tholl. Novel laser beam steering techniques [C]. *SPIE*, 2006, **6397**: 639708: 1~14
- Boulder. Nonlinear Systems Inc. Beam steering using liquid crystals[J]. *White Paper*, 2001. 1~4
- Zhang Cuiyu, Huang Ziqiang. Characteristics analysis of binary optic liquid crystal blazed grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1231~1235
- 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
- Cai Dongmei, Yang Huizhen, Ling Ning *et al.*. Diffraction effect of liquid crystal spatial light modulator using for beam deflection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 491~495
- 蔡冬梅, 杨慧珍, 凌 宁 等. 液晶空间光调制器用于光束偏转控制的衍射效应[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 491~495
- Zhang Jian, Xu Lin, Wu Liying *et al.*. Programmable beam steering based on liquid crystal optical phased array [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **37**(8): 1498~1502
- 张 健, 徐 林, 吴丽莹 等. 液晶光学相控阵可编程光束偏转研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(8): 1498~1502
- Paul F. McManamon, Philip J. Bos, Michael J. Escuti *et al.*. A review of phased array steering for narrowband electro-optical systems[J]. *Proc. IEEE*, 2009, **97**(6): 1078~1096
- T. A. Dorschner, D. P. Resler. Optical beam steerer having subaperture addressing[P]. U. S. Patent 5 093 740, Mar. 3, 1992
- J. Bourderionneta, M. Rungenhagenb, D. Dolfia *et al.*. Continuous laser beam steering with micro-optical arrays - experimental results[C]. *SPIE*, 2008, **7113**: 71130Z: 1~11
- Michael K. Giles, Anthony J. Seward, Todd M. Giles. Closed-loop phase-contrast adaptive optics system using liquid crystal phase modulators: experimental results [C]. *SPIE*, 2002, **4493**: 174~183
- Mark T. Gruneisen, Lewis F. DeSandre, James R. Rotge *et al.*. Programmable diffractive optics for widedynamic-range wavefront control using liquid crystal spatial light modulators [J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(6): 1387~1393
- Yu Daoyin. Tan Hengying. *Engineering Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2002. 267~276
- 郁道银, 谈恒英. *工程光学* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. 267~276
- Lewis DeSandre, Mark Gruneisen. Phased array diffractive wavefront control system for continual agile beam steering and tracking [C]. *SPIE*, 2004, **5553**: 83~101
- James A. Thomas, Yeshaiah Fainman. Optimal cascade operation of optical phased-array beam deflectors [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(26): 6196~6212
- Zhang Guangyi. *Phased Array Radar System* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. 39~50
- 张光义. 相控阵雷达系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006. 39~50
- Kong Lingjiang, Yi Wei, Yang Jianyu *et al.*. Research on scanning accuracy of liquid crystal phased array component of laser radar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1080~1085
- 孔令讲, 易 伟, 杨建宇 等. 激光雷达液晶相控阵组件扫描精度分析 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1080~1085
- Xu Lin, Wu Liying, Zhang Jian *et al.*. Effect of phase valley on diffraction efficiency of liquid crystal optical phased array [C]. *SPIE*, 2009, **7133**: 71333L: 1~8
- George F. Barrick, Philip J. Bos, Charles E. Titus *et al.*. Computing the liquid crystal director field in optical phased arrays [J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(4): 924~932
- Uzi Efron, Boris Apter, Eldad Bahat-Treidel. Studies of fringing field effects in liquid crystal beam-steering devices [C]. *SPIE*, 2005, **5936**: 59360P: 1~12