

直视式合成孔径激光成像雷达电控抛物波面扫描器

卢智勇^{1,2} 孙建锋¹ 职亚楠¹ 周煜¹ 刘福川^{1,2} 刘立人¹

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所中国科学院空间激光信息传输和探测技术重点实验室, 上海 201800)
²中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 研制了直视式合成孔径激光成像雷达(SAIL)电控抛物波面扫描器,该扫描器由线性相位调制的电光晶体和柱面镜构成,其中电光晶体采用 4 个三角形电极施加电场实现线性相位调制,具有体积小、响应速度快等优点。实验测试表明该直视式 SAIL 电控抛物波面扫描器获得了与理论吻合的抛物波面相位,扫描准确可控,很好地验证了该扫描器在直视式合成孔径激光成像雷达应用的有效性。

关键词 遥感; 电光调制; 抛物波面扫描器; 直视式合成孔径激光成像雷达; 线性调制

中图分类号 TN958 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0828002

Electrically Controlled Parabolic Wavefront Scanner in Down-Looking Synthetic Aperture Imaging Ladar

Lu Zhiyong^{1,2} Sun Jianfeng¹ Zhi Ya'nan¹ Zhou Yu¹ Liu Fuchuan^{1,2} Liu Liren¹

(¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Electrically controlled parabolic wavefront scanner in down-looking synthetic aperture imaging ladar (SAIL) is developed. The scanner is composed of electro-optic crystal and cylindrical lens with the advantages of small shape and high-speed. A linear phase modulation in electro-optic crystal is generated by four triangle electrodes. The systematical experiments confirm that the parabolic wavefront from the scanner agrees with the theoretical value well and is controlled accurately. The usefulness of the scanner is verified.

Key words remote sensing; electro-optic modulation; parabolic wavefront scanner; down-looking synthetic aperture imaging ladar; linear modulation

OCIS codes 280.6730; 230.209; 130.4110; 110.3175

1 引 言

在合成孔径激光成像雷达(SAIL)的远距离成像中,其目标的距离向或交轨向聚焦成像有采用啁啾激光发射及去斜解调接收测距分辨(即侧视 SAIL^[1-5]),也有采用二次相位波前相对扫描的横向距离分辨(即直视式 SAIL^[6-8])。侧视 SAIL 通过频率线性调制产生啁啾信号,国外报道了采用外腔式可调单纵模半导体激光器的方法实现良好的宽带线性调频^[2],属于机械调制,其响应速度慢。直视式

SAIL 采用波前变换原理对目标投射两个同轴同心且偏振正交的对向扫描光束并且进行自差接收,有效地克服了大气、运动平台和散斑等相位变化的影响,可以采用低质量的光学系统获得高分辨的目标图像,具有潜在的应用价值。直视式 SAIL 的关键技术是在目标面上产生两波前相位差为抛物等位线分布的变化相位,一般采用两光束空间对向扫描来实现。由于采用空间相位扫描调制,且成像分辨率可自由设计,因此影响直视式 SAIL 实用的主要因素是扫描速度。

收稿日期: 2014-04-01; 收到修改稿日期: 2014-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(61275110,61377004)

作者简介: 卢智勇(1987-),男,博士研究生,主要从事空间信息光学和晶体光学方面的研究。

E-mail: luzhiyong15@126.com

导师简介: 刘立人(1942-),男,博士,研究员,主要从事激光通信和空间信息光学方面的研究。

E-mail: lirenliu@mail.shnc.ac.cn

扫描一般可分为机械扫描和无机械扫描,文献[6]采用相对旋转偏转系统进行两光束的对向扫描并使光束以空间衍射传播的方式获得内发射光场波前的空间抛物波面相位差,系统体积庞大,传输损失严重,波面误差大,适用性差,速度慢。文献[8]采用柱面镜直接在内发射场平动扫描,属于机械扫描,扫描精度有限、响应速度慢。而对于无机械的线性相位扫描器一般有光学相控阵光束扫描器^[9]、畴反转电光扫描器^[10,11]和棱镜级联电光扫描器^[12],其中光学相控阵光束扫描器通过大量的移相器控制相位来获得远场的光束偏转,且单元尺寸小,生产工艺难度大,成本高,不适用于直视式 SAIL 系统;畴反转电光扫描器通过铁电畴的反转来实现折射率的变化,工艺复杂,制作难度大,同时畴结构的反转质量对波面相位影响大;棱镜级联电光扫描器通过主轴反向的三角形棱镜晶体级联构成,系统体积庞大,其光束容易在级联的界面位置产生反射,损失大量能量,同样不利于直视式 SAIL 的利用。

在直视式 SAIL 结构系统中,所发射的光场必须具有抛物波面相位差分布,本文制作了一种高速电控抛物波面扫描器,由线性相位调制的电光晶体和柱面镜构成,其线性相位调制通过在一块条形块状电光晶体上制作两对三角形电极改变晶体的线性折射率空间分布,该扫描器直接位于直视式 SAIL

内发射场位置,施加电压后可以实现较好的抛物波面相位,扫描准确可控,同机械扫描器相比,具有体积小、响应速度快、无惯性运动部件、控制方便、光能利用率高等优点,未来可应用于机载等高速搭载平台的直视式 SAIL 系统。

2 原 理

2.1 电控抛物波面扫描的直视式 SAIL 发射结构

电控抛物波面扫描的直视式 SAIL 发射结构的一般原理如图 1 所示,激光器发出的线偏振光经过 1/2 波片和偏振分束器(PBS)分为等光强和偏振正交的两路光束,这两路偏振正交光束各自经过电控抛物波面扫描器直接进行抛物波面变换,而后两路光束通过偏振合束器再合成为偏振正交的同轴同心光束,然后由发射望远镜主镜将该抛物波面相位放大投射到远场目标位置,其中电控抛物波面扫描器位于发射望远镜主镜的前焦面位置。电控抛物波面扫描器为直视式 SAIL 的核心部件,由电控线性相位调制和二次波面相位调制组成,其线性相位调制的是交轨向相位,二次波面相位调制的是顺轨向相位,通过其共同作用构成直视式 SAIL 的内发射场波面相位,该相位最终决定了远场目标位置的扫描相位。当两光束直接经过电控抛物波面变换后,则对于两偏振正交光束 H 和 V 在内发射场的复场分别为

$$e_H^{\text{in}}(x, y) = \text{Crect}\left(\frac{x}{L_x^{\text{in}}}\right)\text{rect}\left(\frac{y}{L_y^{\text{in}}}\right)\exp\left\{j\frac{2\pi}{\lambda}\left[x\theta_1(U) - \frac{y^2}{2f_y}\right]\right\}, \quad (1a)$$

$$e_V^{\text{in}}(x, y) = \text{Crect}\left(\frac{x}{L_x^{\text{in}}}\right)\text{rect}\left(\frac{y}{L_y^{\text{in}}}\right)\exp\left\{j\frac{2\pi}{\lambda}\left[-x\theta_2(U) + \frac{y^2}{2f_y}\right]\right\}, \quad (1b)$$

式中 $\text{rect}(x/L_x^{\text{in}})\text{rect}(y/L_y^{\text{in}})$ 为内发射场位置的光阑孔径, L_x^{in} 和 L_y^{in} 分别为 x 方向和 y 方向上的宽度, f_y 为产生二次波面相位的柱面镜焦距, 常数因子均归入 C 系数, $\theta_1(U)$ 和 $\theta_2(U)$ 为随电压线性变化的扫描角, 在目标距离为 Z , 发射主镜焦距为 F 时, 光场的放大倍数为 $M = Z/F$, 因此, 最终在目标面上得到所需的水平偏振照明光斑和垂直偏振照明光斑分别为

$$e_H^{\text{in}}(x, y) = \text{Crect}\left(\frac{x}{ML_x^{\text{in}}}\right)\text{rect}\left(\frac{y}{ML_y^{\text{in}}}\right)\exp\left\{j\frac{2\pi}{\lambda}\left[\frac{x\theta_1(U)}{M} - \frac{y^2}{2M^2f_y}\right]\right\}\exp\left(j\frac{\pi}{\lambda}\frac{x^2 + y^2}{Z}\right), \quad (2a)$$

$$e_V^{\text{in}}(x, y) = \text{Crect}\left(\frac{x}{ML_x^{\text{in}}}\right)\text{rect}\left(\frac{y}{ML_y^{\text{in}}}\right)\exp\left\{j\frac{2\pi}{\lambda}\left[-\frac{x\theta_2(U)}{M} + \frac{y^2}{2M^2f_y}\right]\right\}\exp\left(j\frac{\pi}{\lambda}\frac{x^2 + y^2}{Z}\right), \quad (2b)$$

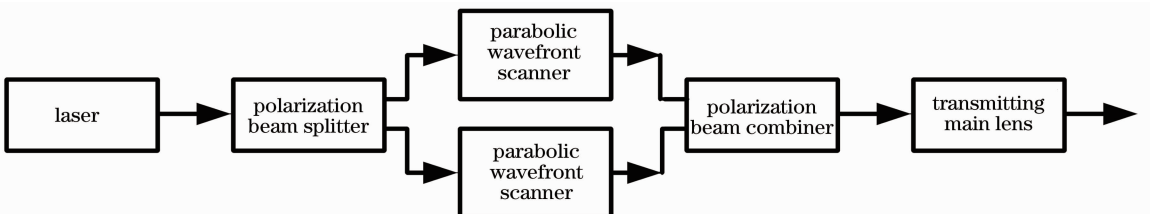


图 1 电控抛物波面扫描直视式 SAIL 发射结构的一般原理图

Fig. 1 General scheme of down-looking SAIL transmitting antenna based on electrically controlled parabolic wavefront scanner

此时,两偏振正交光束的相位差为

$$\Delta\varphi(x,y) = -\frac{2\pi}{\lambda} \frac{x}{M} \theta(U) + \frac{2\pi}{\lambda} \frac{y^2}{M^2 f_y}, \quad (3)$$

式中 $\theta(U) = \theta_2(U) - \theta_1(U)$, 可以看出波面相位差的相位分布随电压扫描变化, 呈现抛物等位线分布, 满足直视式合成孔径激光成像雷达的发射波面要求。

2.2 电控抛物面扫描器

电控抛物面扫描器如图 2 所示, 由电控的线性相位调制晶体与柱面镜紧靠组合而成。该单元结构的工作过程如下: 当线偏振光垂直入射电光晶体后, 在出射位置产生至上而下的波面倾斜, 其倾斜量随电压线性变化, 该变化方向为直视式 SAIL 扫描的交轨向方向(即平行纸面的上下方向), 而后进入紧靠的柱面镜, 柱面镜的二次波面相位的调制方向为垂直纸面, 为直视式 SAIL 的顺轨向方向。这样, 最终从该扫描器单元出射的波面相位为

$$\phi(x) = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{L}{D} x n_0^3 \gamma \frac{U}{h} + \frac{2\pi}{\lambda} \frac{y^2}{2f_y}, \quad (4)$$

式中 L 为电光晶体的有效作用长度, h 为施加电场方向的厚度, D 为晶体的宽度, γ 为晶体的电光系数, n_0 为晶体未加电场的初始折射率, U 为施加的电压, λ 为工作波长, f_y 为顺轨向柱面镜的焦距。



图 2 电控抛物面扫描器结构图

Fig. 2 Structure schematic diagram of electrically controlled parabolic wavefront scanner

电控的线性相位调制晶体如图 3 所示, 采用条形块状铌酸锂(LN)晶体材料, 光沿着晶体的 x_2 轴方向, 在晶体的 x_3 轴方向施加电场, 由于施加两对平行的三角形电极, 且电场方向相反, 为了避免近邻的正负三角形晶体放电, 中间间隔一定距离, 为了防止空气击穿, 可以在切割晶体时使中间间隔凸起, 对于平行于 x_3 轴的线偏振光(e 光), 其折射率随电场

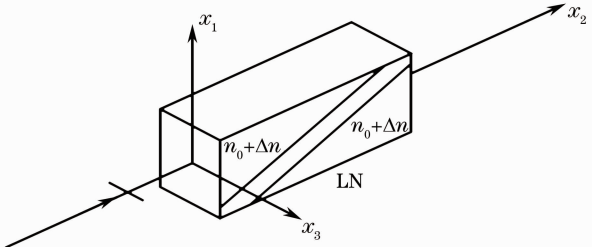


图 3 铌酸锂晶体的线性相位调制

Fig. 3 Linear phase modulation in LiNbO_3 crystal

的变化为 $n_e + \Delta n$, 其中 $\Delta n = \frac{1}{2} n_e^3 \gamma_{33} \frac{U}{h}$, 当施加的电场与极化方向相同时 $\Delta n < 0$, 相反时 $\Delta n > 0$ 。因此, 经过有两块施加反向电场的 LN 晶体后, 其 x_1 方向(即交轨向 x)的相位延迟为

$$\phi(x) = k \frac{L}{D} x n_e^3 \gamma_{33} \frac{U}{h} + k L n_e, \quad (5)$$

式中 n_e 为 LN 晶体 e 光折射率, γ_{33} 为 e 光的电光系数。而对于垂直于 x_3 轴的线偏振光(o 光), 同样可获得交轨向的相位延迟

$$\phi(x) = k \frac{L}{D} x n_o^3 \gamma_{13} E_3 + k L n_o, \quad (6)$$

式中 n_o 为 LN 晶体 o 光折射率, γ_{13} 为 o 光的电光系数, 且 $k L n_e$ 和 $k L n_o$ 为常数相位, 对成像无影响。因此, 最终从 LN 晶体出射后其波面在交轨向随电压线性变化, 可以实现交轨向的高速无机械扫描。

3 制作与检测实验

从一块生长晶体中切割出一块 $6 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ ($x_1 \times x_3 \times x_2$) 的块状铌酸锂晶体, 同时对两通光的 $x_1 x_3$ 面进行抛光, 在 x_3 方向施加 4 个 $5 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的三角形电极(其中两两平行), 金属电极为铜电极, 其表面三角形电极间的垂直斜面间隔大约为 2 mm , 通光口径为 $1 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 4 个电极连接高压电源对晶体施加一定的变化电场, 其后紧靠的柱面镜焦距为 $f_y = 50 \text{ mm}$, 电光晶体和柱面镜在正交方向的共同波面变换组成直视式 SAIL 的电控抛物面扫描器。

对加工制作好的电控抛物面扫描器进行功能测试, 电控抛物面扫描器在直视式 SAIL 的应用主要体现在晶体出口位置的波面相位, 对相位的检测一般采用干涉法, 如图 4 为直视式 SAIL 电控抛物面扫描器的实验测量装置, 采用偏振的马赫曾

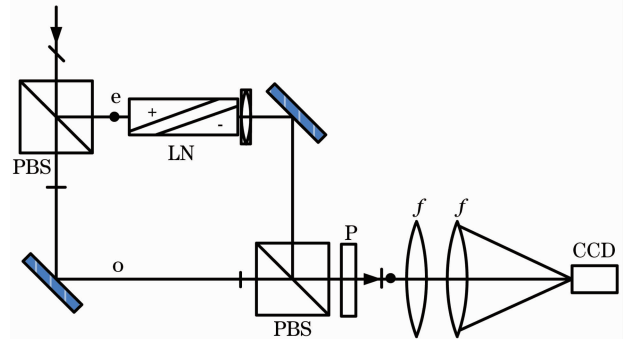


图 4 直视式 SAIL 电控抛物面扫描器实验测量装置图

Fig. 4 Test arrangement for electrically controlled parabolic wavefront scanner in down-looking SAIL

德尔干涉仪来检测其波面扫描的相位。该装置除去检偏器可直接作为直视式 SAIL 的发射装置,其目标位置为电荷耦合器件(CCD)接收的位置。为了方便观测发射双光束的波面相位差,在偏振合束器后放置检偏器,且在发射主镜后放置一个相同焦距的透镜,用以等效远场的光路传播,在透镜的后焦面放置 CCD 观测其自差干涉场。由于不同的线偏振光对 LN 电光晶体的相位调制是不同的,因此在实验中分别测试了 o 偏振光和 e 偏振光的相位扫描变化。

当垂直于晶体 x_3 轴的线偏振光(o 光)垂直入射电控抛物波面扫描器后,其波面相位受到调制,当施加电场时,在目标面位置的光场波面呈抛物变化,如图 5 所示。从图中可以看到该电控抛物波面扫描器的波面相位随着电压扫描变化,电压增大,抛物条纹越多越细,同时,条纹的变化方向还与电场的施加方向有关。

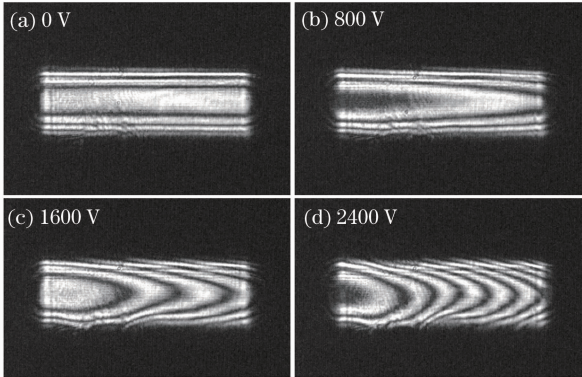


图 5 不同电压下的干涉图(o 光)

Fig. 5 Interferogram with different voltages (o light)

当平行于晶体 x_3 轴的线偏振光(e 光)垂直入射电控抛物波面扫描器时,同样施加电压并对干涉场进行记录,如图 6 所示为内发射场放置电控抛物波面扫描器记录的干涉场随电压变化图像。从图中可以看到该电控抛物波面扫描器的波面相位随着电压扫描变化,其抛物波面实现无机械扫描变化,但其边缘仍然有些畸变。相比于 o 光入射的波面相位扫描器,e 光具有更明显的扫描效果,对比图 5、6 可以发现,在相同电压下 e 光扫描具有更密集的条纹分布,这是因为 e 光的晶体电光系数 $\gamma_{33} > \gamma_{13}$ 的缘故,但从其图像质量、均匀程度可以看出 o 光出射的波面相位均匀性比 e 光好,其主要原因是由于该实验用的电光晶体 e 光的均匀性较差,施加电场后偏离线性相位严重。

由于不同的电光晶体可能存在不同的线性电光系数和半波电压,为了准确地获得实验用电光的

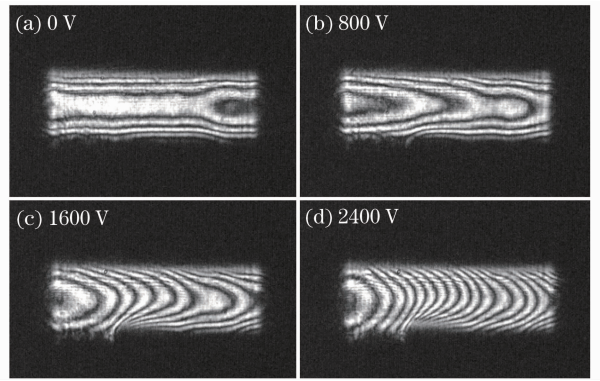


图 6 不同电压下的干涉图(e 光)

Fig. 6 Interferogram with different voltages (e light)

系数和半波电压,将电光晶体的三角形电极改用一对矩形平板电极,仍采用上述装置,将干涉场调整到 2~3 个条纹,施加电压后条纹发生移动,记录下条纹从明到暗变化的电压值,图 7 为 LN 晶体的相位差随电压的变化关系图。因此,在波长为 632.8 nm,平均折射率 n_e 为 2.203, n_o 为 2.286,通光长度 $L = 60$ mm,施加电场的有效长度为 50 mm,宽度 D 为 6 mm,厚度 h 为 1 mm 的情况下,对实验获取的数据进行线性拟合,可求得电光系数 $\gamma_{33} = 30.1 \times 10^{-12}$ m/V 和 $\gamma_{13} \approx 7.713 \times 10^{-12}$ m/V,该电光系数与理论值吻合(理论电光系数为 $\gamma_{33} = 30.8 \times 10^{-12}$ m/V, $\gamma_{13} \approx 8.6 \times 10^{-12}$ m/V)。这时 e 光的半波电压为 $U_{\lambda/2} \approx 39$ V, o 光的半波电压 $U_{\lambda/2} \approx 137.4$ V。对电控抛物波面扫描器施加最大电压为 2400 V 时,其 o 光大约为 18 个半波电压,理论在 3 mm 口径范围内可观测大约 5 个条纹(以一个全波电压在 6 mm 孔径可观测一个条纹),其 e 光大约为 61 个半波电压,理论在 3 mm 口径范围内可观测大约 15 个条纹,这与实验上干涉图样 6 个(o 光)和 15 个(e 光)个条纹相符。对于要获得图中干涉场更为准确的波面相位,进一步采用条纹跟踪技术、最小二乘法拟合出其具体的波面相位,如图 8 所示为电压在 2400 V 下的抛物波面。

要实现高速准确的电控抛物波面扫描,必须采用准确优良的控制对抛物波面扫描器进行扫描控制,通过计算机控制驱动高压电源实现对电光晶体线性相位的控制,其结构如图 9 所示。该电源设计采用手动调节和计算机编程驱动控制:手动调节高压直流数显电源,用于给电光晶体上的电极供电,可手工调节面板上的旋钮,实现电压的静态调谐,实验目前采用该方式观测其干涉场;进一步将采用计算机编程可以实现高速的波面相位扫描,通过计算机控制现场可编程门阵列(FPGA)产生连续的三角形周期信号进行

连续扫描,如图 10 所示:控制高压电源的驱动信号,通过计算机控制扫描波形的时间周期,设扫描的时间

周期为 $20 \mu\text{s}$,则对于采集信号位于上升沿 $10 \mu\text{s}$ 的时间内,可以获得总时间低于 $10 \mu\text{s}$ 的快速扫描。

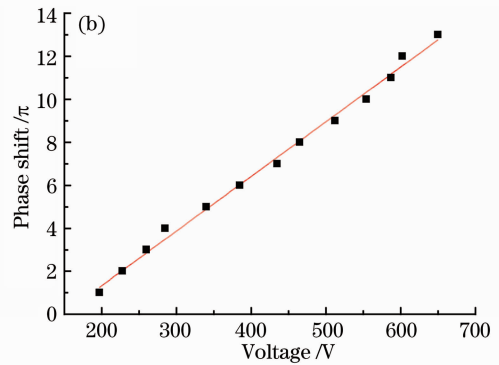
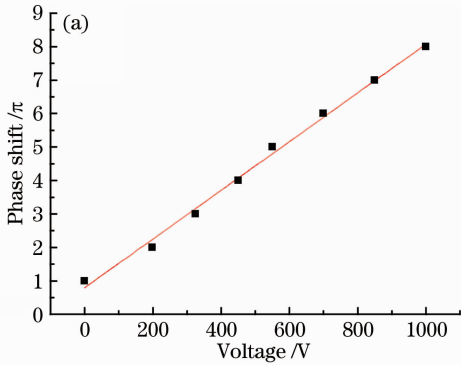


图 7 LiNbO₃ 晶体的相位差随电压的变化。(a)o 光; (b)e 光

Fig. 7 Phase shift of LiNbO₃ crystal versus the applied voltage. (a) Ordinary light; (b) extraordinary light

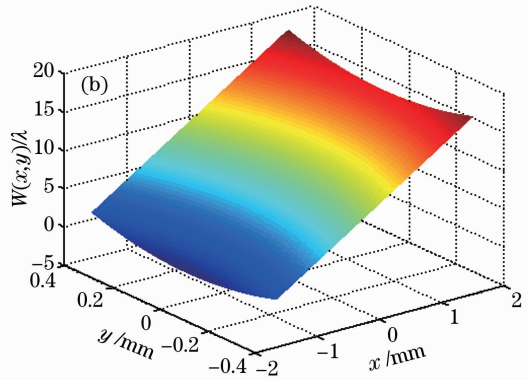
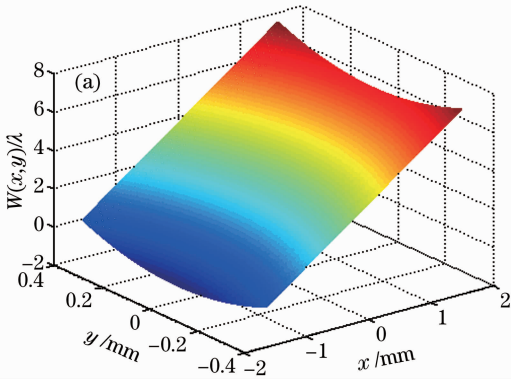


图 8 电压为 2400 V 下的抛物波面。(a) o 光; (b) e 光

Fig. 8 Parabolic wavefront with 2400 V voltage. (a) Ordinary light; (b) extraordinary light

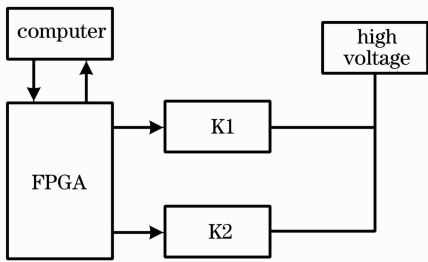


图 9 电控抛物波面扫描器的控制系统框图

Fig. 9 Block diagram of control system of electrically controlled parabolic wavefront scanner

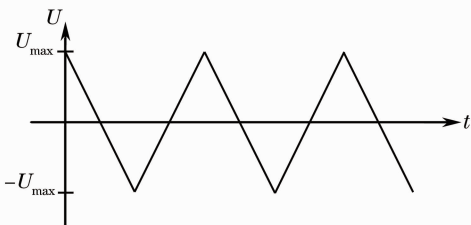


图 10 扫描器的扫描波形图

Fig. 10 Driving wave forms of scanner

对于电光扫描器来说,晶体的电光效应本身不会

限制扫描器的频率特性,因为晶格的谐振频率可以达到 10^{10} Hz,因此,理论上晶体电光扫描的速度 10^{-10} s。但是由于体结构电光扫描器有比较大的电容,实验测得所用 LN 晶体的电容约为 20 pF,因此高速扫描对高压扫描器电源要求比较高。当高压电源使用的谐振频率为 ω 时,每个驱动周期对晶体充放电两次,此时,电源输出的平均功率为 $P=CU^2\omega$,图 11 所示为在

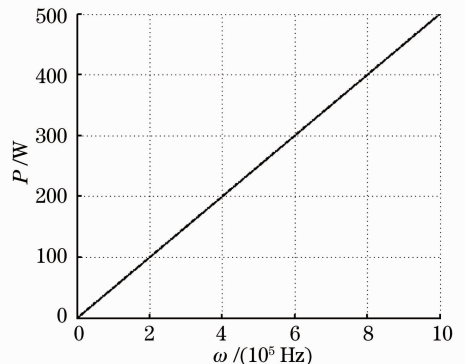


图 11 不同谐振频率下的电源输出功耗

Fig. 11 Output power of different resonant frequencies

该电容为负载且输出电压为 5000 V 时,所需的电源输出功率与谐振频率的关系。因此,在输出功率为 500 W 的电源下,其电控抛物波面扫描器所能达到的调制频率为 1 MHz,实现了高速的电光扫描。

4 讨 论

设计制作了直视式 SAIL 电控抛物波面扫描器,由线性相位调制的电光晶体和柱面镜构成,该扫描器位于直视式 SAIL 内发射场位置,通过施加电压可以产生所需的抛物波面相位。系统的实验测试表明直视式 SAIL 电控抛物波面扫描器获得了准确的抛物波面相位,扫描准确可控,但是与实际应用还存在较大的距离。工作的意义在于提出了一种与文献报道不同的可应用于直视式 SAIL 的抛物波面扫描器结构,理论分析和实验验证表明其具有合理性。通过一个线性相位电光扫描器和柱面镜组合而成,其电光扫描器采用块状 LN 晶体,通过 4 块三角形电极施加电场调制,光能利用率高,控制方便,同时这种电控调制的 SAIL 利用的是光从晶体出射位置的波面相位,更易于控制,质量更好。

电控抛物波面扫描器通过施加电压对电光晶体的折射率进行周期性的连续线性调制,在直视式 SAIL 的应用中由于可以以固定的频率周期性调制,理论上电控晶体的调制速度可以达到 10^{-10} s。但是由于体结构的电光晶体有比较大的电容,所需的电压比较高,因此高速扫描时对高压电源的要求比较高。在实际的电源设计中,通过合理选择参数,提高输出功率,可以进一步提高其扫描速度。

影响电光晶体线性相位质量的一个最重要的因素是晶体的均匀性,晶体的折射率越均匀,其调制的波面相位越准确、质量越好。而晶体由于生长的结构性缺陷,或应力造成的光弹效应、自身重力、晶体表面形变以及温度变化等容易引起的折射率不均匀,将导致空间分布不同程度的相位调制误差,从而影响到最终的成像质量。实验中很明显地看到折射率不均匀引起的相位调制畸变。由于晶体折射率的非均匀性严重影响直视式 SAIL 的成像质量,必须加以抑制与补偿,可以通过选择质量较好的电光晶体或者采用后期的算法补偿消除等,这将是下一步研究的重点内容之一。

5 结 论

设计制作了直视式 SAIL 电控抛物波面扫描

器,其由线性相位调制的电光晶体和柱面镜构成,该扫描器位于直视式 SAIL 内发射场位置,通过施加电压可以产生所需的抛物波面相位。系统的实验测试表明直视式 SAIL 电控抛物波面扫描器获得了较好的抛物波面相位,扫描准确可控,且电光调制波面与理论吻合,在实验中,晶体的折射率非均匀性对相位的扫描控制影响最大,因此可以尽量采用均匀性好的电光晶体。同机械扫描器相比,具有体积小、重量轻、扫描速度快、无惯性运动部件等优点,该扫描器未来可应用于机载等高速搭载平台的直视式 SAIL 系统。

参 考 文 献

- 1 R L Lucke, L J Richard, M Bashkansky, *et al.*. Synthetic Aperture Ladar (SAL): Fundamental Theory, Design Equations for a Satellite System, and Laboratory Demonstration[R]. Naval Research Laboratory Report, 2002, NRL/FR/7218-02-10, 051.
- 2 M Bashkansky, R L Lucke, E Funk, *et al.*. Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain[J]. *Opt Lett*, 2002, 27(22): 1983-1985.
- 3 B Krause, J Buck, C Ryan, *et al.*. Synthetic aperture ladar flight demonstration[C]. CLEO/2011-Laser Applications to Photonic Applications, OSA Technical Digest (CD), 2011.
- 4 Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu, *et al.*. 2D imaging experiment of a 2D target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging ladar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 2030-2032.
周煜, 许楠, 栾竹, 等. 尺度缩小合成孔径激光雷达的二维成像实验[J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 2030-2032.
- 5 Liu Liren, Zhou Yu, Zhi Ya'nan, *et al.*. A large-aperture synthetic aperture imaging ladar demonstrator and its verification in laboratory space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900112.
刘立人, 周煜, 职亚楠, 等. 大口径合成孔径激光成像雷达演示样机及其实验室验证[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900112.
- 6 Liu Liren. Principle of down-looking synthetic aperture imaging ladar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0928002.
刘立人. 直视合成孔径激光成像雷达原理[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0928002.
- 7 Liren Liu. Coherent and incoherent synthetic-aperture imaging ladars and laboratory-space experimental demonstrations [J]. *Appl Opt*, 2013, 52(4): 579-599.
- 8 Lu Zhiyong, Sun Jianfeng, Zhi Ya'nan, *et al.*. Influence of inner wave-front aberration on down-looking synthetic aperture imaging ladar imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0728001.
卢智勇, 孙建锋, 职亚楠, 等. 直视合成孔径激光成像雷达内发射场波前像差对成像的影响[J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0728001.
- 9 P F Mcmanamon. An overview of optical phased array technology and status[C]. *SPIE*, 2005, 5947: 594701.
- 10 D A Scrymgeour, A Sharan, V Gopalan, *et al.*. Cascaded electro-optic scanning of laser light over large angles using domain microengineered ferroelectrics[J]. *Appl Phys Lett*, 2002, 81(17): 3140-3142.
- 11 D A. Scrymgeour, Y Barad, V Gopalan, *et al.*. Large-angle electro-optic laser scanner on LiTaO₃ fabricated by in situ monitoring of ferroelectric - domain micropatterning [J]. *Appl Opt*, 2001, 40(34): 6236-6241.
- 12 T C Lee, J D Zook. Light beam deflection with electrooptic prisms [J]. *IEEE J Quantum Electronics*, 1968, 4(7): 442-454.