

基于空间光调制器的双目标同步光束跟瞄系统

孙婉晴¹, 王子雄^{1*}, 于晋龙¹, 江阳²¹天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072;²贵州大学物理学院, 贵州 贵阳 550025

摘要 传统的光束偏转技术由机械装置实现,然而机械装置具有机械惯性,会导致光束抖动。基于液晶空间光调制器(LCSLM)的新型光束偏转技术不仅能够克服机械惯性的缺陷,而且能够实现单光束输入、多光束输出,无需使用多个装置即可同时控制多光束偏转。为了实现多目标的光束跟瞄,本团队提出了一种基于多光束生成方法的多目标同步跟踪和瞄准方案,该方案将相机作为位置探测器,并使用 LCSLM 偏转光束对目标进行跟瞄。此外,本团队设计并搭建了双目标的同步光束跟踪和瞄准实验系统,当目标分别以 2、3、4、5 mm/s 的速度移动时,光束跟瞄的测量均方根误差分别为 2.7045、5.6014、8.3823、11.9011 μrad 。此双目标跟瞄系统有望应用于激光通信网络的双光束跟踪中。

关键词 光学器件; 空间光调制器; 衍射光栅; 相位调制; 多光束生成; 运动估计; 目标跟踪

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220816

1 引言

激光通信具有信息容量大、损耗低和抗干扰等优点,能够满足大通信容量的需求。捕获、跟踪和指向(ATP)技术是激光通信领域建立稳定物理链路的核心技术之一^[1],ATP 技术的研究重点是位置探测和光束偏转。在位置探测方面,除了象限光电探测器和位置传感二极管以外,相机也被用作粗跟踪和初始对准的位置探测器^[2]。在光束偏转方面,传统的光束偏转技术通常通过万向节和机械反射镜等机械装置实现^[2-3]。然而,机械装置具有质量大、能耗高及机械惯性大等缺点^[3],导致光束偏转的响应速度慢、光束控制不稳定。因此,使用无机械惯性的装置实现光束偏转具有重要意义。

近年来,新型非机械式光束偏转装置,例如声光调制器、电光调制器和液晶空间光调制器(LCSLM)等,得到了广泛应用。LCSLM 除了具有质量轻、能耗低、灵活度高、可编程控制及无机械惯性等优点^[4]以外,还能够校正大气湍流和光束分裂产生的光学像差^[5-6],提供随机接入指向功能,提高光束的偏转效率和偏转精度^[7]。LCSLM 以其无机械惯性的优点被广泛应用于光束跟踪领域。基于 LCSLM 的光束跟踪技术不仅可以 将光束精确地引导至目标,解决目标移动所导致的光束失调问题,建立稳定的自由空间光(FSO)链路^[8],还可以用于重构光束整形系统,实现高能效的 FSO

通信^[9]。

除了无机械惯性之外,LCSLM 的另一个重要优点是能够克服传统机械式光束偏转技术需使用多个装置才能实现多光束偏转的缺点,即,使用单个 LCSLM 可同时控制多个光束的偏转方向。目前,基于 LCSLM 实现多光束生成的方法主要包括复合相位方法^[10-11]、子孔径方法^[12-13]和迭代傅里叶变换(IFT)方法^[12-13]等。多光束生成方法为点对多点通信架构提供了一种可行途径^[14],已被广泛应用于网络通信^[12]、多用户接入无线通信^[12]和双向室内光无线通信^[10,15]等领域。目前,基于 LCSLM 的双目标跟踪方法包括空间偏振分割方法^[16],此方法使用偏振分光棱镜产生两个偏振方向相互垂直的光束实现两个目标的跟踪。当光束的偏振方向与 LCSLM 液晶分子的长轴方向一致时,LCSLM 才能实现光束偏转,这使得此方法跟踪两个目标时仍需使用两个 LCSLM。为了实现使用单个 LCSLM 偏转多个光束以同步跟瞄多个目标,本团队结合基于 LCSLM 的光束跟踪技术和多光束生成方法,提出了一种多目标的同步光束跟踪和瞄准方案,搭建了双目标跟踪和瞄准实验系统。此系统可与两个移动的目标终端进行激光通信,实现激光通信网络。

2 基本原理

2.1 LCSLM 光束偏转原理

纯相位 LCSLM 是一种以液晶为调相材料的数字

收稿日期: 2022-05-05; 修回日期: 2022-06-15; 录用日期: 2022-06-20; 网络首发日期: 2022-07-03

基金项目: 国家自然科学基金(61835003)

通信作者: *wangzixiong@tju.edu.cn

化可编程器件,液晶层是由独立受控的液晶像元组成的像素阵列。通过向像素单元施加电压信号来控制液晶分子的排列方向,改变液晶分子的有效折射率,就可以对光束进行相位调制,实现光束偏转。对整个液晶层施加周期性阶梯离散电压,获得周期性阶梯相位延迟分布^[17],然后用周期性阶梯光栅波面逼近图 1 所示的周期性闪耀光栅(BG)波面,就可以使出射光偏转到特定的角度。

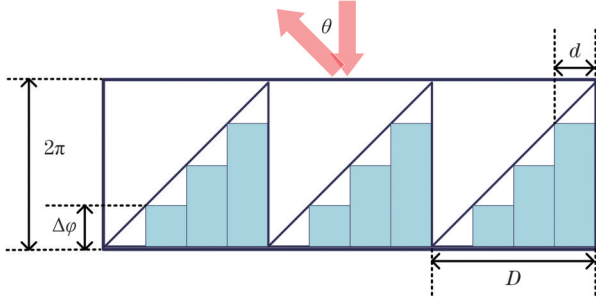


图 1 周期性 BG 示意图^[17]

Fig. 1 Schematic of periodic blazed grating (BG)^[17]

当光束垂直入射时,BG 可实现的光束偏转角 θ 满足光栅方程^[18-19]

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

式中: K 为衍射级次; λ 为入射光的波长; D 为光栅周期, $D = Md$,其中 M 是一个光栅周期内像素的个数, d 为相

邻像素的间距。实验中的衍射级次 $K = +1$ 。当光波长与相邻像素的间距均为定值时,BG 的偏转角取决于一个光栅周期内的像素个数。 M 的最小值为 2,因此,LCSLM 在单一方向上可以实现的最大偏转角 θ_{\max} 为

$$\theta_{\max} = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2d}\right). \quad (2)$$

周期性 BG 中的 M 只能取整数,这使得周期性 BG 只能实现有限个离散的偏转角度。为了实现光束的连续扫描,生成多光束时使用非周期性 BG。非周期性 BG 的工作原理是通过控制相邻像素的相位延迟值来改变光束的偏转角度^[17]。相位延迟值 $\Delta\varphi$ 满足方程 $M\Delta\varphi = 2\pi$,将其代入式(1)可得

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin(\theta). \quad (3)$$

非周期性 BG 中的 M 可以取非整数,因而非周期性 BG 可以获得任意的相位延迟值,从而可以获得连续的偏转角度。

2.2 多光束生成方法

使用复合相位方法、子孔径方法和 IFT 方法生成多光束时均使用 2.1 节所述的非周期性 BG 模型。由 MATLAB 计算生成的相位灰度图如图 2 所示,将此灰度图加载到 LCSLM 的相位屏上即可用于生成双光束。以下将分别介绍复合相位方法、子孔径方法和 IFT 方法的基本原理。

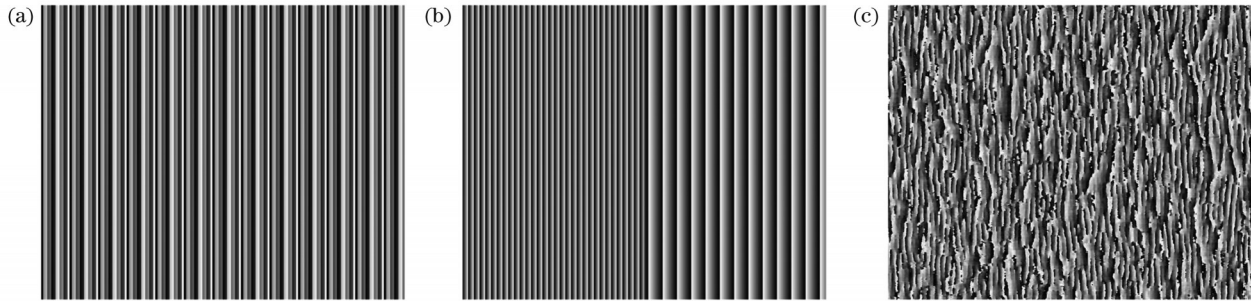


图 2 不同方法生成的相位灰度图。(a)复合相位方法;(b)子孔径方法;(c)IFT 方法

Fig. 2 Phase grayscale maps generated with different methods. (a) Composite phase method; (b) sub-aperture method; (c) iterative Fourier transform (IFT) method

复合相位方法的原理是将多个相位叠加来构建可以形成多个偏转光束的复合相位^[10-11]。假设共需要 J 个具有不同偏转角度的光束,将第 j 个光束的偏转角记为 θ_j ,其中, $j = 1, 2, \dots, J$ 。LCSLM 中对应偏转角 θ_j 的任意行第 p 列像素的相位 φ_{pj} ^[20] 表示为

$$\varphi_{pj} = \frac{2\pi}{\lambda} y_p \sin(\theta_j), \quad (4)$$

式中: y_p 为任意行第 p 列像素中心的 y 坐标。通过叠加 J 个光束的相位来构建复合相位,则任意行第 p 列像素的叠加相位 φ_p 可以表示为

$$\varphi_p = \arg\left[\sum_{j=1}^J \exp(i\varphi_{pj})\right]. \quad (5)$$

子孔径方法的原理是将 LCSLM 的整个相位屏划

分成 J 个子孔径,光束照射到 J 个子孔径上,通过对每个子孔径进行独立编程来控制单个光束的偏转方向,从而实现多光束偏转。 J 个子孔径在理论上可以形成 J 个独立的偏转光束,对应偏转角 θ_j 的第 j 个子孔径中相邻像素的相位延迟值 $\Delta\varphi_j$ 为^[21]

$$\Delta\varphi_j = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin(\theta_j), \quad (6)$$

式中: $j = 1, 2, \dots, J$ 。当光束入射到 LCSLM 后, J 根光束的光场在远场发生相干重叠,设第 j 个光束的光场复振幅分布为 E_j ,则总光场的复振幅分布 E 可以表示为

$$E = \sum_{j=1}^J E_j. \quad (7)$$

在 IFT 方法中,Gerchberg-Saxton(GS)算法被广

泛使用。GS 算法将入射光幅度 $A_0(x)$ 和远场目标光幅度 $A_1(u)$ 作为空间域和频率域的幅度约束。式(8)和式(9)描述了 GS 算法的迭代过程^[12], 即入射面的光场复振幅 $E_0(x)$ 和出射面的光场复振幅 $E_1(u)$ 重复执行傅里叶变换和傅里叶逆变换。

$$E_1^k(u) = \mathcal{F}[E_0^k(x)] = \mathcal{F}\{A_0^k(x) \exp[i\varphi_0^k(x)]\}, \quad (8)$$

$$E_0^{k+1}(x) = \mathcal{F}^{-1}[E_1^k(u)] = \mathcal{F}^{-1}\{A_1^k(u) \exp[i\varphi_1^k(u)]\}, \quad (9)$$

式中: \mathcal{F} 表示傅里叶变换; \mathcal{F}^{-1} 表示傅里叶逆变换; k 为迭代次数。迭代开始时, 将初始相位与 $A_0(x)$ 结合形成入射光场, 然后代入 GS 算法中执行傅里叶变换。

如果在第 k 次迭代中频域计算的幅度 $A_1^k(u)$ 逼近 $A_1(u)$, 则退出程序, 否则, 用 $A_1(u)$ 替换 $A_1^k(u)$, 相位 $\varphi_1^k(u)$ 保持不变, 执行傅里叶逆变换; 之后进入第 $k+1$ 次迭代, 用 $A_0(x)$ 替换空间域计算的幅度 $A_0^{k+1}(x)$, 相位 $\varphi_0^{k+1}(x)$ 保持不变, 执行傅里叶变换。重复执行此迭代过程, 直至获得最佳的相位解。

3 双光束生成的仿真和实验

LCSLM 的 $N \times N$ 个像素位于 x - y 平面上, 第 n 个像素的坐标为 (x_n, y_n) 。应用夫琅禾费远场近似, 在观察平面 σ - ξ 上, 远场复振幅分布 $E(\sigma, \xi)$ 的计算公式^[21]为

$$E(\sigma, \xi) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=1}^{N \times N} A_n \exp(i\varphi_n) \cdot \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda L} (x_n \sigma + y_n \xi)\right] dx dy = \sum_{n=1}^{N \times N} A_n \exp(i\varphi_n) \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda L} (x_n \sigma + y_n \xi)\right], \quad (10)$$

式中: A_n 为第 n 个像素的幅度; φ_n 为第 n 个像素的相位; L 为 x - y 平面与 σ - ξ 平面之间的距离。根据式(10)可以仿真得到双光束的远场归一化光强(NLI)分布。仿真参数如下: LCSLM 的分辨率为 50×50 , 入射光的波长为 650 nm , LCSLM 相邻像素的间距为 $12.5 \mu\text{m}$, 两个光束的偏转角度分别为 0.2° 和 -0.5° 。

图 3 描述了双光束一维远场 NLI 分布的仿真结果。由图 3 可见, 在 0.2° 和 -0.5° 以外的角度上存在衍射旁瓣, 此衍射旁瓣是由相邻像素之间的相位凹陷引起的。使用复合相位方法、子孔径方法和 IFT 方法时, 衍射旁瓣的最大 NLI 分别为 14% 、 8% 和 5% 。仿真结果表明, 相较于复合相位方法和子孔径方法, IFT 方法可以有效地抑制衍射旁瓣。

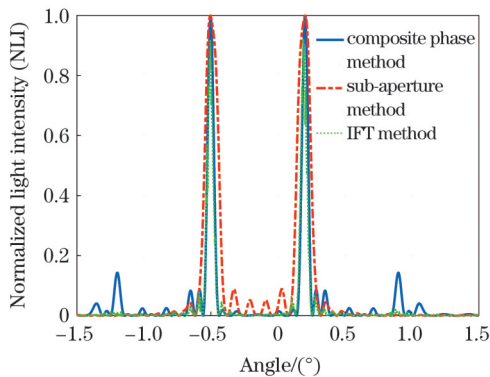


图 3 双光束一维远场 NLI 分布的仿真结果

Fig. 3 Simulation result of one-dimensional far-field normalized light intensity (NLI) distribution for double-beam

图 4 描述了双光束二维和三维远场 NLI 分布的仿真结果。由图 4(a)、(d) 可见, 使用复合相位方法生成的双光束的远场在 0.9° 和 -1.2° 处存在较大的衍射旁

瓣。由图 4(b)、(e) 可见, 使用子孔径方法生成的双光束的远场在 $0.2^\circ \sim -0.5^\circ$ 之间存在衍射旁瓣, 且比复合相位方法产生的衍射旁瓣的 NLI 小。对比图 4 中的 6 幅图可见, IFT 方法生成的双光束远场的衍射旁瓣的 NLI 最小。

考虑到实验光路的复杂性, 本次实验选用日本滨松光子学株式会社制造的 X15213 系列纯相位型反射式 LCSLM, 其由 1272×1024 个像素组成, 相邻像素的间距为 $12.5 \mu\text{m}$, 液晶面的有效面积为 $15.9 \text{ mm} \times 12.8 \text{ mm}$, 填充因子为 96% 。实验中相机记录的双光束二维远场光强分布如图 5 所示, LCSLM 相位屏自身的反射会在中心产生一个零阶光斑。对比图 4(a) 与图 5(a)、图 4(b) 与图 5(b)、图 4(c) 与图 5(c) 可以发现, 仿真的二维远场光强分布与实验测量的二维远场光强分布吻合。IFT 方法生成的每一束光束均可利用 LCSLM 全部的像素单元, 这使得 IFT 方法产生的衍射旁瓣几乎完全被抑制, 但其生成相位灰度图所需的时间为 94.57 s 。子孔径方法产生的衍射旁瓣的光强虽然没有 IFT 方法产生的衍射旁瓣的光强小, 但该方法可以单独控制每一束光束的偏转方向, 并且其生成相位灰度图所需的时间为 0.03 s , 比 IFT 方法所需时间短, 此方法适用于实时动态的光束跟瞄。因此, 在下述的光束跟踪和瞄准实验中使用子孔径方法生成双光束, 以同步跟瞄双目标。对于多目标的同步光束跟瞄, 只要将 LCSLM 的相位屏划分为相应数目的 J 个子孔径, 即可用于生成多光束, 同步跟瞄多目标。然而, 当需要跟瞄几十个甚至更多目标时, 因为只有 $1/J$ 个像素用来生成其中的一束光, 每一束光束的能量降低并且受限于 LCSLM 相位屏的面积, 所以子孔径方法就不再适用。

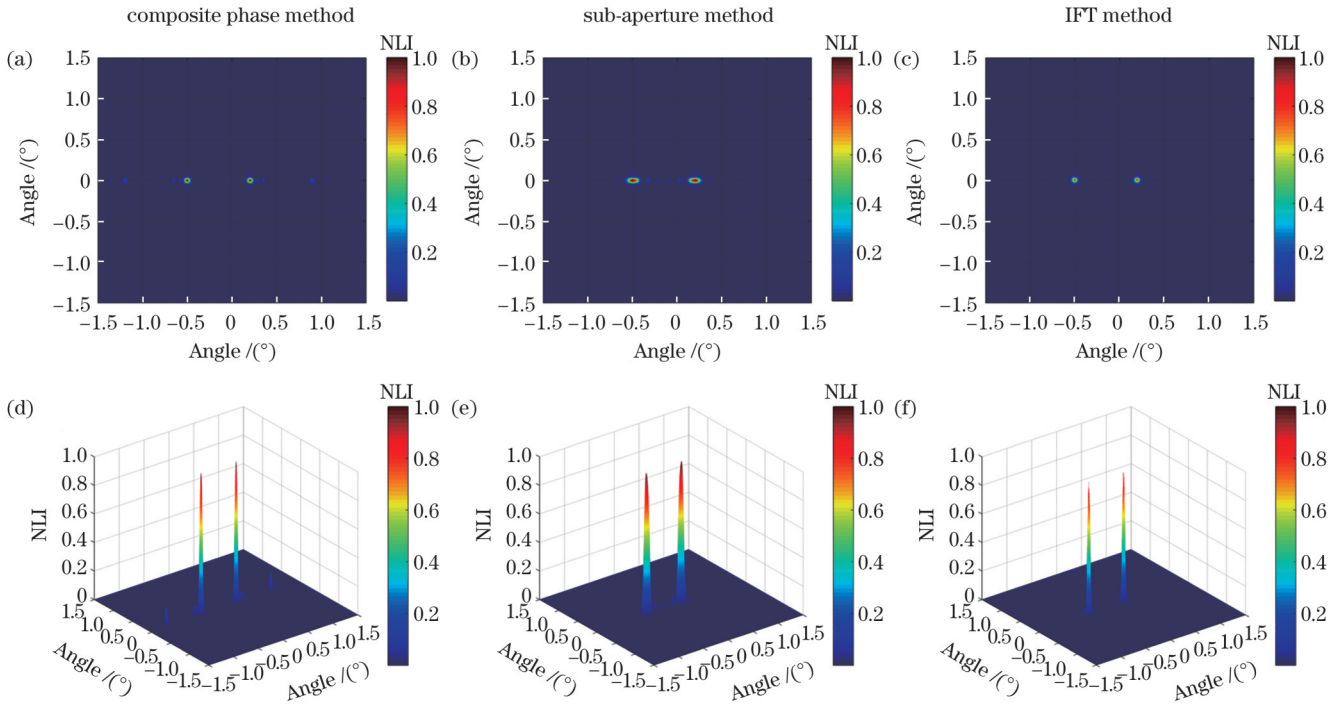


图 4 双光束远场 NLI 分布的仿真结果。(a)~(c)使用复合相位方法、子孔径法和 IFT 方法生成的二维图；(d)~(f)使用复合相位方法、子孔径法和 IFT 方法生成的三维图

Fig. 4 Simulation results of far-field NLI distribution for double-beam. (a)–(c) Two-dimensional diagrams generated using composite phase method, sub-aperture method, and IFT method, respectively; (d)–(f) three-dimensional diagrams generated using composite phase method, sub-aperture method, and IFT method, respectively

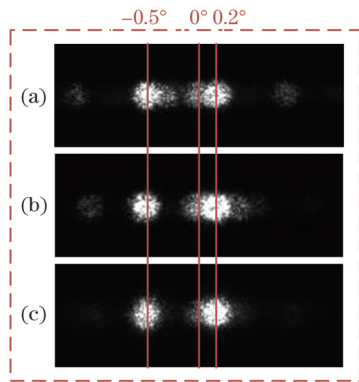


图 5 双光束二维远场光强分布的实验结果。(a)复合相位方法；(b)子孔径方法；(c)IFT 方法

Fig. 5 Experimental results of two-dimensional far-field light intensity distribution for double-beam. (a) Composite phase method; (b) sub-aperture method; (c) IFT method

4 光束跟踪和瞄准实验

4.1 实验建立

在室内环境下进行单目标和双目标的光束跟踪和瞄准实验。双目标的同步光束跟踪和瞄准实验框图如图 6 所示,实验系统主要由 LCSLM、激光器、准直器、偏振片、消偏振分束器(NPBS)、角度放大镜(AM)、相机和步进电机组成。激光器发射激光的中心波长为 650 nm,最大输出功率为 10 mW。光束首先经过输出光斑直径为 2 mm 的准直器进行准直,之后经过偏振

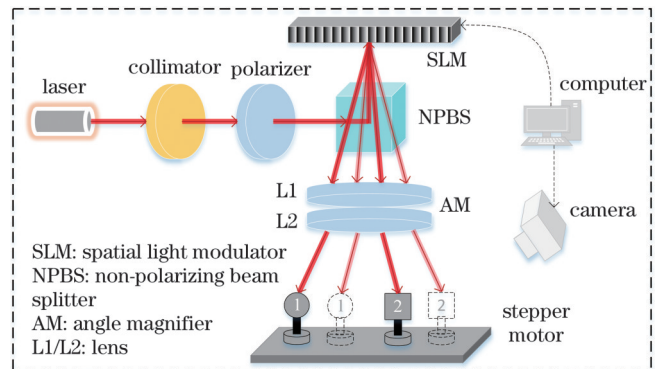


图 6 双目标的同步光束跟踪和瞄准实验框图

Fig. 6 Experimental block diagram of synchronous beam tracking and aiming for double-target

片进行调制,以保证光束的偏振方向平行于 LCSLM 液晶分子的长轴方向。NPBS 在空间上将光束分成相互垂直的两束,其中一束光向上传输垂直入射到 LCSLM 上。

入射光的波长为 650 nm, LCSLM 相邻像素的间距为 12.5 μm ,根据式(2)可得从 LCSLM 反射的光束的最大偏转角度为 ± 26 mrad。反射的光束经过 AM 后,最大偏转角度被线性放大到 ± 57.9 mrad。控制步进电机,使目标在视场范围内移动。跟瞄系统反射的光束与步进电机之间的垂直距离为 86.25 cm,目标位置的变化范围为 $-5 \sim +5$ cm。

本实验使用的相机是杭州海康机器人技术有限公

司生产的工业面阵相机 MV-CA050-11UM, 其由 2448×2048 个像素组成, 像素大小为 $3.45 \mu\text{m}$, 最大帧率为 35.1 frame/s 。双目标的同步光束跟踪和瞄准算法流程图如图 7 所示。首先, 被跟踪的两个目标散射周围环境的光, 在相机中进行成像, 使用特征匹配方法对图像进行处理获得两个目标的初始位置和当前位置, 并通过通信串口将其发送到 MATLAB 中; 其次, 在 MATLAB 中将两个目标初始位置和当前位置的偏移量 Δx_1 和 Δx_2 转换为预偏转角 θ_1 和 θ_2 , 根据式 (1) 所示的光栅方程得到相应 BG 的周期 D_1 和 D_2 ; 之后, 使用子孔径方法生成相位灰度图, 并将其加载到 LCSLM 的相位屏上, 以控制双光束的偏转方向, 实现从 LCSLM 反射的光束被动跟踪两个移动的目标; 最后, 目标和光斑之间保持固定的相对位置 (以避免两者重叠), 用相机捕获目标和光斑的图像, 对图像进行处理后分别获取目标位置的测量值和光斑位置的测量值。对于单目标的光束跟踪, 只需要使用双目标算法流程的左半部分或右半部分; 对于多目标的同步光束跟踪, 此双目标算法仍然适用。

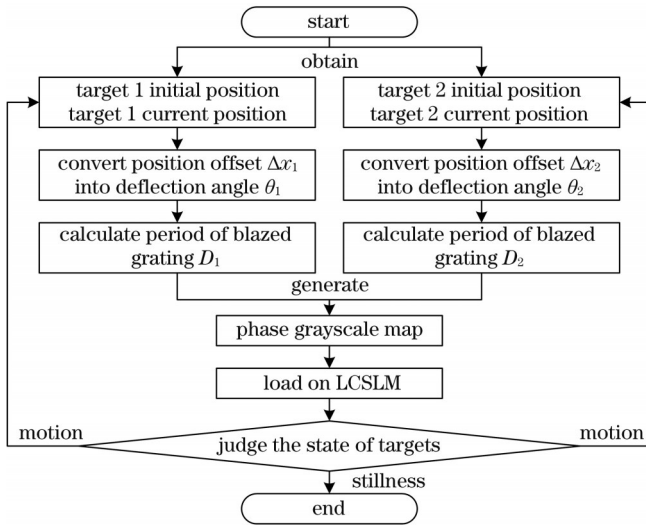


图 7 双目标的同步光束跟踪和瞄准算法流程图

Fig. 7 Algorithm flowchart of synchronous beam tracking and aiming for double-target

4.2 滤波处理

卡尔曼滤波方法可以估计运动物体的位置和速度等参数。大气湍流会导致光斑闪烁, 从而使得光斑位置的测量值存在不可避免的误差。为了估计光斑位置的真实值, 使用卡尔曼滤波方法处理光斑位置的测量值, 以获得光斑位置的估计值。

卡尔曼滤波包括预测和更新两个步骤。双目标通过步进电机以几乎恒定的速度移动, 光束同样以几乎恒定的速度对目标进行跟踪, 光斑的运动遵循恒速运动模型。光斑的先验状态预测和先验协方差预测^[22]分别表示为

$$\hat{x}_t = F\hat{x}_{t-1}, \quad (11)$$

$$P_t = FP_{t-1}F^T + Q, \quad (12)$$

式中: \hat{x}_t 和 \hat{x}_{t-1} 分别表示 t 时刻的先验状态估计和 $t-1$ 时刻的后验状态估计; P_t 和 P_{t-1} 分别表示 t 时刻的先验协方差估计和 $t-1$ 时刻的后验协方差估计; 光斑状态定义为 $\hat{x}_t = [\hat{x}, \dot{\hat{x}}]^T$; \hat{x} 和 $\dot{\hat{x}}$ 分别表示光斑在时刻 t 的位置和速率; T 表示矩阵的转置; F 为状态转移矩阵; Q 为过程噪声的协方差矩阵。状态转移矩阵和过程噪声的协方差矩阵^[23-24]分别表示为

$$F = \begin{bmatrix} 1 & T_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$Q = \begin{bmatrix} T_0^3/3 & T_0^2/2 \\ T_0^2/2 & T_0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中: T_0 为步进跟踪周期的时间间隔。增益系数方程、光斑后验状态更新和后验协方差更新^[22]分别表示为

$$g_t = P_t h^T (h P_t h^T + R)^{-1}, \quad (15)$$

$$\hat{x}_t = \hat{x}_t + g_t (z_t - h \hat{x}_t), \quad (16)$$

$$P_t = (I - g_t h) P_t, \quad (17)$$

式中: g_t 为卡尔曼增益; \hat{x}_t 为 t 时刻的后验状态估计; P_t 为 t 时刻的后验协方差估计; R 为测量噪声的协方差; z_t 为光斑位置的测量值; I 为单位矩阵; 测量向量 $h = [1, 0]$ 。

4.3 结果分析

目标位置测量值和光斑位置测量值分别定义为 x_{tar} 和 x_{bea} , 使用卡尔曼滤波处理后的光斑位置估计值定义为 \hat{x}_{fil} 。目标位置测量值和光斑位置测量值之间的偏差定义为测量误差 e_{mea} , 目标位置测量值和光斑位置估计值之间的偏差定义为估计误差 e_{est} 。 e_{mea} 和 e_{est} 的计算公式分别为

$$e_{\text{mea}} = \left[\arctan\left(\frac{x_{\text{tar}}}{l}\right) - \arctan\left(\frac{x_{\text{bea}}}{l}\right) \right] \cdot d_{\text{CAM}}, \quad (18)$$

$$e_{\text{est}} = \left[\arctan\left(\frac{x_{\text{tar}}}{l}\right) - \arctan\left(\frac{\hat{x}_{\text{fil}}}{l}\right) \right] \cdot d_{\text{CAM}}, \quad (19)$$

式中: l 为跟踪系统反射的光束与步进电机之间的垂直距离; d_{CAM} 为相机的像素。测量均方根误差 (RMSE) 定义为 r_{mea} , 估计 RMSE 定义为 r_{est} , 它们的表达式分别为

$$r_{\text{mea}} = \sqrt{\frac{1}{W_s} \sum_{w=1}^{W_s} e_{\text{mea}, w}^2}, \quad (20)$$

$$r_{\text{est}} = \sqrt{\frac{1}{W_s} \sum_{w=1}^{W_s} e_{\text{est}, w}^2}, \quad (21)$$

式中: W_s 为目标位置和光斑位置的采样总数; $e_{\text{mea}, w}$ 和 $e_{\text{est}, w}$ 分别为第 w 次采样中计算得到的测量误差和估计误差。

图 8 描述了单目标以不同速度移动的光束跟踪结果。跟踪轨迹如图 8(a) 所示, 可以观察到, 相较于光斑位置轨迹, 光斑位置估计值的轨迹更加平滑。当日

标以 2 mm/s 的速度移动时,目标位置轨迹与光斑位置估计值的轨迹的斜率变化一致,吻合良好,光束跟瞄的同步性较好。当目标移动速度增加到 3 mm/s 时,光斑位置估计值的轨迹在时间上滞后于目标位置轨迹,并且随着目标移动速度增加到 4 mm/s 和 5 mm/s,滞后越来越明显。测量误差曲线如图 8(b) 所示,可见,随着目标移动速度增加,测量误差逐渐变大。根据式(20)可得:当目标分别以 2、3、4、5 mm/s 的速度移动时,测量 RMSE 分别为 2.7045、5.6014、8.3823、11.9011 μrad 。

当双目标以不同的速度移动时,使用子孔径方法生成双光束来同步跟瞄双目标。图 9~11 分别描

述了双目标以不同的速度移动时的光束跟踪结果。双目标以 2 mm/s 的速度移动时的跟踪轨迹如图 9(a) 所示,可以看到,相较于光斑位置轨迹,光斑位置估计值的轨迹同样更加平滑,双目标位置轨迹与其相应的光斑位置估计值的轨迹几乎重合。双目标以 2 mm/s 的速度移动时的误差曲线如图 9(b) 所示。轨迹之间的误差主要由两个原因引起:一是 LCSLM 的像素数量有限,并且 LCSLM 采用量化的相位调制值,每个像素不能提供理想的倾斜相位调制,光束无法实现理论上的偏转角度;二是实验光路并不能保证光束严格垂直地入射到 LCSLM 上。

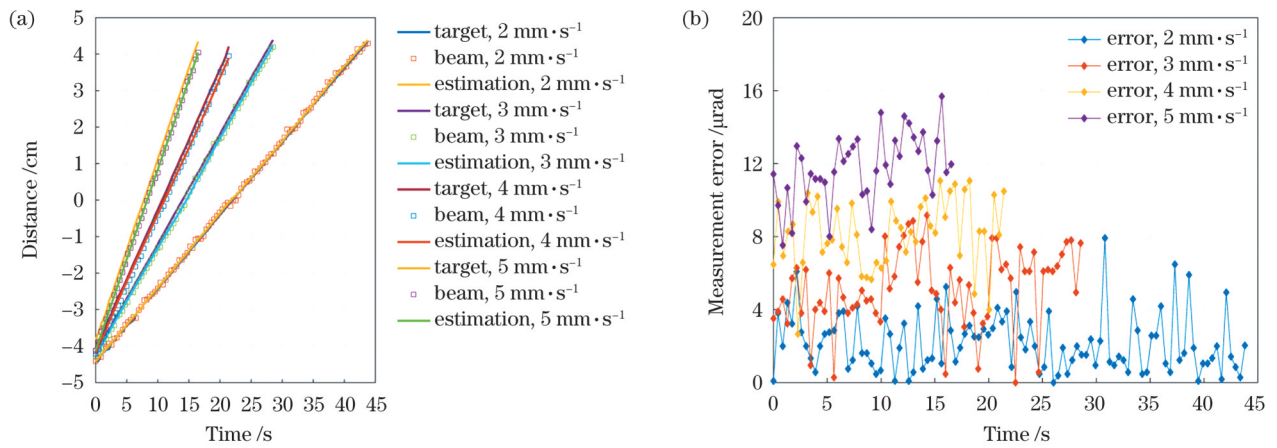


图 8 单目标以不同速度移动的光束跟踪结果。(a)跟踪轨迹;(b)误差曲线

Fig. 8 Beam tracking results of single target moving at different speeds. (a) Tracking trajectory; (b) error curve

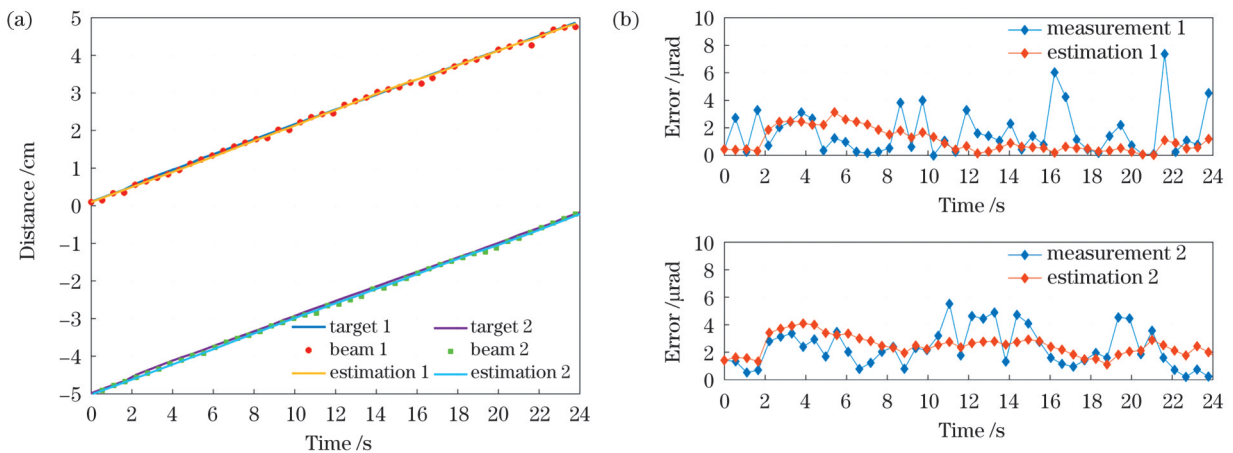


图 9 双目标以 2 mm/s 的速度移动时的光束跟踪结果。(a)跟踪轨迹;(b)误差曲线

Fig. 9 Beam tracking results of double-target moving at speed of 2 mm/s. (a) Tracking trajectory; (b) error curve

双目标以 3 mm/s 和 4 mm/s 的速度移动时的跟踪轨迹分别如图 10(a) 和 11(a) 所示,可以观察到,随着目标移动的速度增加,两个光斑位置估计值的轨迹在时间上相对于双目标位置轨迹的滞后越来越明显。双目标以 3 mm/s 和 4 mm/s 的速度移动时的误差曲线分别如图 10(b) 和图 11(b) 所示,可见,目标移动速度的增加会导致光束跟瞄误差增加。这主要是因为跟瞄系统存在响应延迟,延迟的来源有两个:1)电压信号控制 LCSLM 中液晶分子的排列方向具有一定的响应延

迟;2)相机的最大帧率为 35.1 frame/s,其采集图像也有一定的响应延迟。如果采用新型液晶材料或先进的驱动方式来提高液晶分子的响应速度,并使用更高帧率的相机,则当目标以相同的速度移动时,光束跟瞄的同步性能得到提升。

根据式(20)和式(21)计算双目标以不同的速度移动时的测量 RMSE 和估计 RMSE,并将其列于表 1。需要说明的是,此数据是图 9(b)、图 10(b)和图 11(b)中误差的均方根值。观察表 1 可知,随着目标的移动

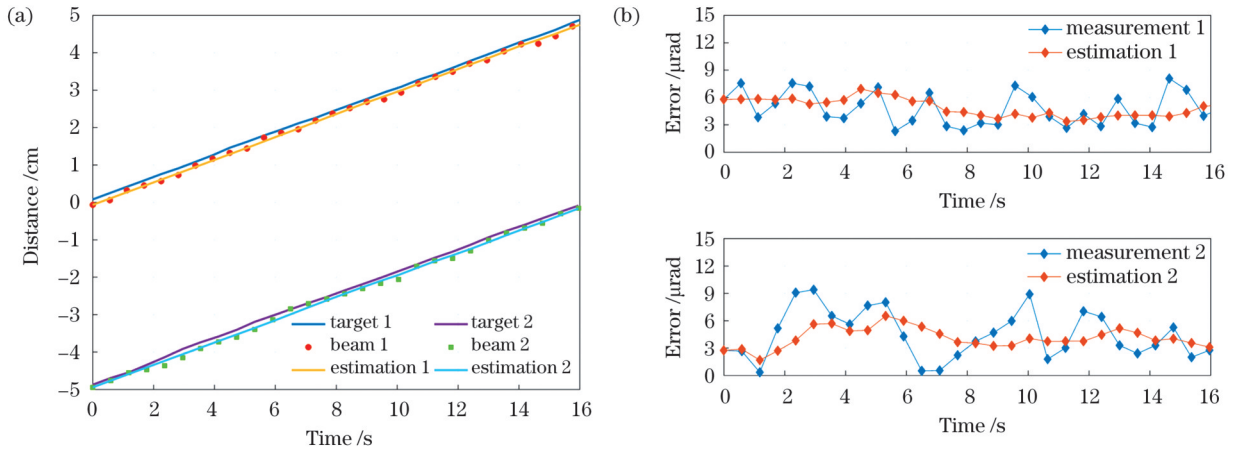


图 10 双目标以 3 mm/s 的速度移动时的光束跟踪结果。(a)跟踪轨迹;(b)误差曲线

Fig. 10 Beam tracking results of double-target moving at speed of 3 mm/s. (a) Tracking trajectory; (b) error curve

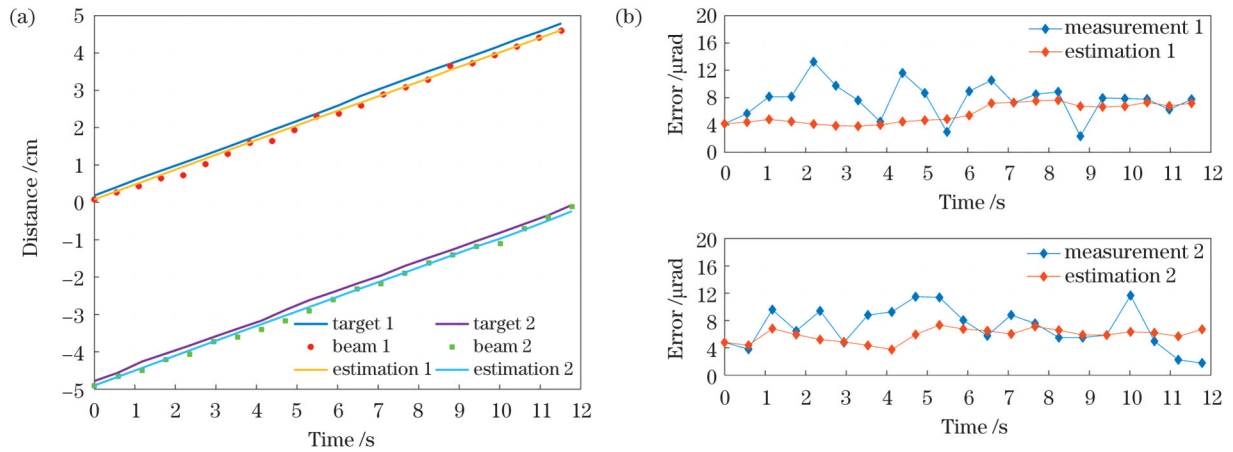


图 11 双目标以 4 mm/s 的速度移动时的光束跟踪结果。(a)跟踪轨迹;(b)误差曲线

Fig. 11 Beam tracking results of double-target moving at speed of 4 mm/s. (a) Tracking trajectory; (b) error curve

速度增加,测量 RMSE 和估计 RMSE 均逐渐变大,并且同一目标在相同速度下的估计 RMSE 均小于测量 RMSE。上述分析说明使用卡尔曼滤波方法滤除了光斑位置测量值中的噪声。

表 1 双目标以不同速度移动时的 RMSE

Table 1 RMSE of double-target moving at different speeds

Speed / (mm·s ⁻¹)	Target	Measurement RMSE /μrad	Estimation RMSE /μrad
2	Target 1	2.3420	1.3713
	Target 2	2.6513	2.5572
3	Target 1	5.1293	4.9986
	Target 2	5.1996	4.2735
4	Target 1	8.0875	5.8294
	Target 2	7.5876	5.9537

定义 t 时刻第 q 个光斑位置的真实值与估计值之间的 RMSE 为 r_t^q , 其表达式为

$$r_t^q = \sqrt{\frac{1}{M_s} \sum_{m=1}^{M_s} (\hat{x}_{t,m}^q - x_{t,m}^q)^2}, \quad (22)$$

式中: M_s 为蒙特卡罗仿真的次数; $\hat{x}_{t,m}^q$ 为 t 时刻第 m 次

仿真中第 q 个光斑位置 $x_{t,m}^q$ 的估计值。贝叶斯-克拉美罗下界(BCRLB)给出了估计目标状态的估计误差下限,因此,本文使用 BCRLB 来评估光斑位置的估计性能。BCRLB 定义为贝叶斯信息矩阵(BIM)的逆 $J_B^{-1}(x_t)$, BIM 可以通过式(23)^[25]递归得到。

$$J_B(x_{t+1}) = D_t^{22} - D_t^{21} [J_B(x_t) + D_t^{11}]^{-1} D_t^{12}, \quad (23)$$

式中: $D_t^{11} = F^T Q^{-1} F$; $D_t^{12} = -F^T Q^{-1} = [D_t^{21}]^T$; $D_t^{22} = Q^{-1} + h^T R^{-1} h$ 。为了与相应的光斑位置的真实值和估计值之间的 RMSE 进行比较,定义 t 时刻第 q 个光斑的 BCRLB 度量准则 b_t^q 为

$$b_t^q = \sqrt{[J_B^{-1}(x_t^q)]_{11} + [J_B^{-1}(x_t^q)]_{22}}, \quad (24)$$

式中: $[J_B^{-1}(x_t^q)]_{11}$ 和 $[J_B^{-1}(x_t^q)]_{22}$ 代表 $J_B^{-1}(x_t^q)$ 主对角线上的变量。

图 12 描述了双目标以不同速度移动时光斑位置的真实值与估计值之间的 RMSE 与其相应的 BCRLB 之间的关系,其为使用式(22)和式(24)绘制的时间函数。观察图 12 可知,不同跟瞄速度下光斑位置的真实值与估计值之间的 RMSE 均能逐渐靠近相应的 BCRLB。因

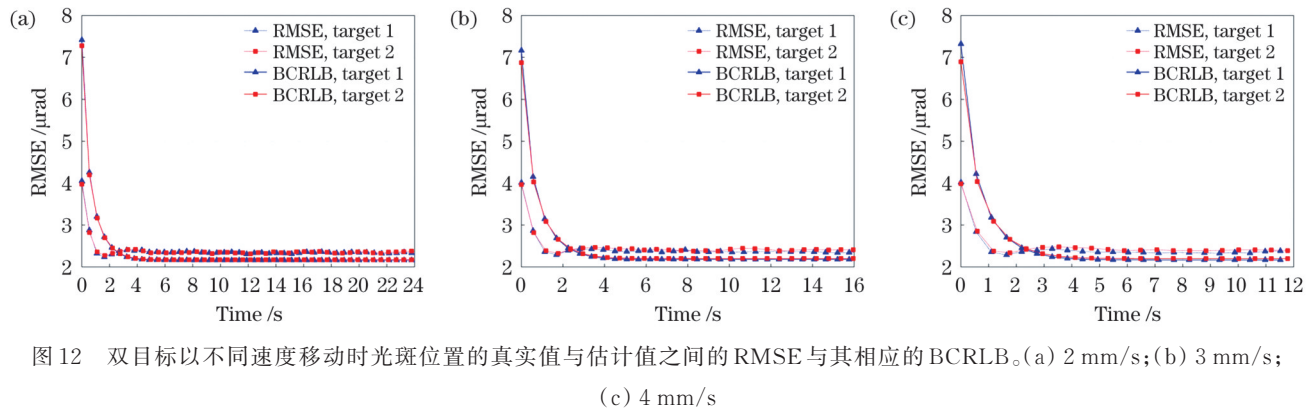


图 12 双目标以不同速度移动时光斑位置的真实值与估计值之间的 RMSE 与其相应的 BCRLB。(a) 2 mm/s;(b) 3 mm/s;(c) 4 mm/s

Fig. 12 RMSE between actual and estimated values of spot positions with their corresponding BCRLB when double-target moves at different speeds. (a) 2 mm/s; (b) 3 mm/s; (c) 4 mm/s

此,使用卡尔曼滤波方法估计光斑位置的效果较好。

5 结 论

本团队结合基于 LCSLM 的光束跟踪技术和多光束生成方法,提出了一种多目标的同步光束跟踪和瞄准方案。该方案使用相机获取目标的位置信息,采用子孔径方法生成用于偏转多光束的相位灰度图,并使用 LCSLM 控制多光束的偏转方向。本团队设计并搭建了双目标的同步光束跟踪和瞄准实验系统,实现了使用单个 LCSLM 偏转两个光束对两个目标进行同步跟瞄,验证了所提方案的可行性,并对跟瞄系统的性能进行了分析。该系统可在 $-57.9 \sim +57.9$ mrad 的视场范围内实现对目标的光束跟瞄,系统的跟瞄误差小于 $20 \mu\text{rad}$,满足跟瞄误差要求。可以预见,随着新型非机械式光束偏转技术的发展,此双目标跟瞄系统在激光通信网络的双光束跟踪机制中具有较好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 师宇斌, 马浩统, 马阎星, 等. 基于液晶相控阵高精度高效率光束偏转数值仿真[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0202002. Shi Y B, Ma H T, Ma Y X, et al. Numerical simulation of high accuracy and high efficiency beam steering based on liquid crystal optical phase array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0202002.
- [2] Chen B, Yu H T. Visual tracking for mobile optical wireless communications[J]. Optics Express, 2020, 28(21): 31119-31126.
- [3] Kawakami K, Okamura H, Komurasaki K. Simultaneous optical tracking of multiple targets in a field of view greater than 20° [J]. Optics Express, 2015, 23(8): 9777-9783.
- [4] Lin Y X, Ai Y, Shan X, et al. Liquid crystal based non-mechanical beam tracking technology[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 91: 103-107.
- [5] Feng F, White I H, Wilkinson T D. Free space communications with beam steering a two-electrode tapered laser diode using liquid-crystal SLM[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(12): 2001-2007.
- [6] Gomez A, Shi K, Quintana C, et al. Beyond 100-Gb/s indoor wide field-of-view optical wireless communications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(4): 367-370.
- [7] Shi Y B, Feng G B, Si L. Experimental analysis of beam aiming and pointing system with phased only spatial light modulators[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9543: 95431W.
- [8] Lu H H, Huang X H, Tsai W S, et al. 800 Gb/s/200 m FSO link with a WDM-PAM4 scheme and SLM-based beam tracking technology[J]. Optics Letters, 2021, 46(6): 1269-1272.
- [9] Cao Z Z, Zhang X B, Osnabrugge G, et al. Reconfigurable beam system for non-line-of-sight free-space optical communication[J]. Light: Science & Applications, 2019, 8: 69.
- [10] Feng F, Sangwongngam P, Faulkner G, et al. Wide field-of-view optical broadcasting for bi-directional indoor optical wireless communications employing PAM-4 modulation[J]. Optics Letters, 2019, 44(24): 6009-6012.
- [11] Feng F, Jin X Q, O'Brien D, et al. All-optical mode-group multiplexed transmission over a graded-index ring-core fiber with single radial mode[J]. Optics Express, 2017, 25(12): 13773-13781.
- [12] Xiao F, Kong L J. Optical multi-beam forming method based on a liquid crystal optical phased array[J]. Applied Optics, 2017, 56(36): 9854-9861.
- [13] Gomez A, Quintana C, Faulkner G, et al. Point-to-multipoint holographic beamsteering techniques for indoor optical wireless communications[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9772: 97720Q.
- [14] Koonen T. Indoor optical wireless systems: technology, trends, and applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(8): 1459-1467.
- [15] Gomez A, Shi K, Quintana C, et al. A 50 Gb/s transparent indoor optical wireless communications link with an integrated localization and tracking system[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(10): 2510-2517.
- [16] Guo H R, Wang X R, Liu X P, et al. Nonmechanical two-user tracking method of space-polarization division using the liquid crystal optical phased array[J]. Optics Communications, 2019, 447: 74-79.
- [17] 孔令讲, 朱颖, 宋艳, 等. 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. Kong L J, Zhu Y, Song Y, et al. A beam steering approach of liquid crystal phased array based on nonperiodic blazed grating[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0123001.
- [18] 段雨飞, 李峰, 杨直, 等. 基于液晶空间光调制器进行光谱调制的飞秒啁啾脉冲放大系统[J]. 中国激光, 2021, 48(11): 1101001. Duan Y F, Li F, Yang Z, et al. Femtosecond chirped pulse amplification system with liquid crystal spatial light modulator for spectral modulation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(11): 1101001.
- [19] 何泽浩, 隋晓萌, 曹良才, 等. 基于参数空间遍历的空间光调制器量化取值优化[J]. 中国激光, 2021, 48(12): 1209002. He Z H, Sui X M, Cao L C, et al. Optimization of quantization value for spatial light modulators based on parameter space traversal [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1209002.
- [20] Engström D, Bengtsson J, Eriksson E, et al. Improved beam steering accuracy of a single beam with a 1D phase-only spatial light modulator[J]. Optics Express, 2008, 16(22): 18275-18287.

- [21] Zhang B, Liu Y, Zhao Z Q, et al. Multi-beam steering with low grating lobes using optimized unequally spaced phased array[J]. *Optics Communications*, 2018, 427: 48-53.
- [22] Cheng J H, Yu P P, Huang Y R. Application of improved Kalman filter in under-ground positioning system of coal mine[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2021, 31(8): 0603904.
- [23] Yi W, Yuan Y, Hoseinnezhad R, et al. Resource scheduling for distributed multi-target tracking in netted colocated MIMO radar systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, 68: 1602-1617.
- [24] Sun Y L, Wang C, Wang Z H, et al. Efficient algorithm for tracking the single target applied to optical-phased-array LiDAR[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(35): 10843-10848.
- [25] Tichavsky P, Muravchik C H, Nehorai A. Posterior Cramér-Rao bounds for discrete-time nonlinear filtering[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1998, 46(5): 1386-1396.

Synchronous Beam Tracking and Aiming System for Double-Target Based on Spatial Light Modulator

Sun Wanqing¹, Wang Zixiong^{1*}, Yu Jinlong¹, Jiang yang²

¹*School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;*

²*College of Physics, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China*

Abstract

Objective Acquisition, tracking, and pointing (ATP) technology is a core technology for establishing stable physical links in the field of laser communications. Research on ATP technology focuses on beam deflection. Traditional beam deflection techniques are typically implemented using mechanical devices such as gimbals and mechanical mirrors. However, mechanical devices have the disadvantages of large mass, high energy consumption, and mechanical inertia that result in a slow response to beam deflection and unstable beam control. Therefore, new nonmechanical beam deflection devices have been widely used in recent years, such as acousto-optic modulators, electro-optic modulators, and liquid crystal spatial light modulators (LCSLMs). LCSLMs can overcome the defects of mechanical inertia; therefore, they are widely used for beam tracking. In addition, LCSLMs can overcome the defects of traditional mechanical beam deflection techniques, which require multiple devices to achieve multibeam deflection. The deflection direction of multiple beams can be simultaneously controlled using a single LCSLM. The methods for generating multibeams based on the LCSLM mainly include the composite phase, sub-aperture, and iterative Fourier transform (IFT) methods. Currently, double-target tracking can be achieved using the spatial polarization division method that employs a polarizing beam splitter to generate two beams with perpendicular polarization directions to track two targets. However, this method requires two LCSLMs. To use a single LCSLM to deflect multiple beams for synchronously tracking multiple targets, a scheme of synchronous beam tracking and aiming for multiple targets is proposed by combining LCSLM-based beam tracking technology and the multibeam generation method. This scheme is expected to be applicable to the multibeam tracking mechanism of laser communication networks. We also construct an experimental system of synchronous beam tracking for double-target that can communicate with two mobile target terminals.

Methods In this experiment, a camera was employed as the position detector, and an LCSLM was employed as the beam deflection device. The tracking system mainly consisted of an LCSLM, a laser, collimator, polarizer, nonpolarizing beam splitter (NPBS), an angle magnifier, a camera, and stepper motor. First, the stepper motor controlled the movement of the two targets within the field of view. The two targets were imaged in the camera using scattered light, and the images were processed using the feature matching method to obtain the initial and current positions of the two targets. Subsequently, the offsets of the initial and current positions were converted into pre-deflection angles that were substituted into the grating equation to calculate the period of the corresponding blazed grating. Next, a phase grayscale map was generated using the sub-aperture method and loaded onto the phase screen of the LCSLM. Finally, the NPBS spatially divided the beam into two mutually perpendicular beams, one of which was incident perpendicular to the LCSLM. The LCSLM controlled the deflection direction of the double-beam based on the phase grayscale map, enabling passive tracking and aiming of two mobile targets.

Results and Discussions The far-field normalized light intensity (NLI) distribution of the double-beam is obtained using MATLAB simulation (Fig. 3, Fig. 4). The phase depression between adjacent pixels results in diffraction side lobes. The maximum NLI of the diffraction side lobes generated using the composite phase, sub-aperture, and IFT methods are 14%, 8%, and 5%, respectively. The IFT method can suppress the diffraction side lobes more effectively than the composite phase and sub-aperture methods. The camera records the far-field light intensity distribution of the double-beam during the experiment (Fig. 5). The experimentally measured far-field light intensity distribution is consistent with the simulated far-field light intensity distribution. The beam tracks and aims the double-target moving at different speeds. The trajectories of the double-target positions approximately coincide with those of their corresponding spot position estimations when the double-target moves at a speed of 2 mm/s (Fig. 9), indicating that the synchronicity of beam tracking and aiming is better. As the moving speed of the double-target increases, the lag between the trajectories becomes increasingly evident (Fig. 10, Fig. 11), and the error of beam tracking and aiming also gradually increases. In addition, both the measured root mean square error (RMSE) and estimated RMSE progressively increases (Table 1).

Conclusions The results show that the double-target tracking system can achieve synchronous tracking of two targets using a single LCSLM to deflect two beams. Moreover, the double-target tracking algorithm is also applicable to beam tracking and aiming for multiple targets that verifies the feasibility of the multitarget synchronous beam tracking and aiming scheme. This tracking system can achieve beam tracking of a target within a field of view of ± 57.9 mrad. The tracking error of the system is less than $20 \mu\text{rad}$ that meets the tracking error requirement. This multitarget tracking scheme has promising applications in the multibeam tracking mechanism of laser communication networks. However, improved synchronicity of beam tracking and aiming can be obtained using the filter prediction technique in the tracking algorithm.

Key words optical devices; spatial light modulator; diffraction grating; phase modulation; multibeam generation; motion estimation; target tracking