

光纤干涉型光学相控阵扫描角度的模拟实验

任远中¹, 柴金华^{2*}

- (1. 中国人民解放军陆军炮兵防空兵学院 研究生大队, 安徽 合肥 230031;
2. 中国人民解放军陆军炮兵防空兵学院 电子工程教研室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 理论分析了光纤干涉型光学相控阵扫描角度与扫描控制电压的关系, 提出了扫描角度与电压关系的实验方法, 即按照场点定点的光强间接测定一定扫描控制电压对应的扫描角度; 采用 M-Z 型干涉光路来模拟 2 光路的光纤干涉型相控阵进行模拟实验, 通过改变相位调制器上的控制电压, 对场点定点接收到的光强大小进行测试, 反演出光纤干涉型相控阵实际的扫描角度。实验结果表明: 扫描控制电压在相位调制的半波电压范围内, 扫描控制电压要比集成波导阵列的控制电压小得多, 扫描角度为 0~6.2 mrad, 在此范围内, 扫描角度的实验值与理论值较好吻合。该模拟实验研究可以为光纤干涉型光学相控阵的远场扫描特性的进一步研究提供参考。

关键词: 光学相控阵; 光纤干涉; 相位调制; 扫描控制电压; 扫描角度

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1218002

Simulation experiment of scanning angle of fiber interferometric optical phased array

Ren Yuanzhong¹, Chai Jinhua^{2*}

- (1. Graduate Student Brigade, Army Artillery and Air Defense Forces College, Hefei 230031, China;
2. Electronic Engineering Teaching and Research Section, Army Artillery and Air Defense Forces College, Hefei 230031, China)

Abstract: The relationship between scanning angle and scanning control voltage of fiber interferometric optical phased array was analyzed theoretically. An experimental method of the relationship between scanning angle and voltage was proposed, which was that the scanning angle corresponding to a certain scanning control voltage was measured indirectly according to the light intensity at a fixed point in the field. In the simulation experiment, the M-Z interferometric optical path was used to simulate the two-path optical fiber interferometric phased array. By changing the control voltage of the phase modulator, the intensity of the light received at the fixed point of the field was tested, and the actual scanning angle of the optical fiber interferometric phased array was calculated. The experimental results show that when the scanning control voltage is in the half-wave voltage range of phase modulation, and the scanning control voltage is much lower than that of integrated waveguide arrays, the scanning angle is 0–6.2 mrad. In this range, the experimental value of the scanning angle is in good agreement with the theoretical

收稿日期: 2019-08-05; 修订日期: 2019-09-15

作者简介: 任远中(1986-), 男, 硕士生, 主要从事光电子技术应用方面的研究。Email: ryz917@sina.com

导师简介: 柴金华(1964-), 男, 教授, 博士, 主要从事激光、光电对抗理论与技术方面的研究。Email: ch170626@sina.com

$$I = \sum_{n=1}^N I_n + 2 \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{r=n+1}^N \sqrt{I_n I_r} [\cos(\beta_{nr} + \psi_0 \sin \omega_n t - \psi_0 \sin \omega_r t)] \quad (1)$$

式中： I_n 为第 n 路的光强，为任意两路 (n 路和 r 路) 总的相位差； ψ_0 为信号发生器对应的调制系数。 ω_n 、 ω_r 为第 n 路和 r 路对应信号发生器的频率。

现考虑两路干涉情形，假设分光器分光比一样，那么，干涉光强为：

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} [\cos(\beta_{12} + \psi_0 \sin \omega_1 t - \psi_0 \sin \omega_2 t)] = 2I_0 + 2I_0 [\cos(\beta_{12} + \psi_0 \sin \omega_1 t - \psi_0 \sin \omega_2 t)] \quad (2)$$

式中： I_0 为每路的光强； β_{12} 为两路之间的相位差； ω_1 、 ω_2 为两路对应调制信号的频率。

干涉相长的条件为 $\beta_{12} = \pi \Delta V / V_\pi + 2\pi d \sin \theta / \lambda + \varphi_{12} = 2\pi k$ (k 为整数)。其中， V_π 为相位调制器的半波电压， $\Delta V = V_1 - V_2$ (V_1 为第一路的扫描控制电压， V_2 为第二路的扫描控制电压)， λ 为光波波长， d 为两相控阵元的间距 (设阵元间距为等间距)， θ 为阵元到目标点的扫描角度，则两路所出射的光束在目标平面场点的光程差为 $d \sin \theta$ ，由于发射阵元满足傍轴条件和远场条件，而目标场点仅符合傍轴条件^[13]下，则光程差 $d \sin \theta = \theta d$ 。 φ_{12} 为其他因素引起的相位差。故： $\beta_{12} = \Delta V \pi / V_\pi + 2\pi \theta d / \lambda + \varphi_{12} = 2\pi k$ (k 为整数)。

β_{12} 包含扫描控制电压所引起的相位变化部分 $\pi \Delta V / V_\pi$ ，扫描角度不同对应空间光程差引起的相位变化部分 $2\pi \theta d / \lambda$ ，设 φ_{12} 均由相控差检测器所在的反馈回路调整为 0，则公式 (2) 可写成：

$$I = 2I_0 + 2I_0 \left[\cos \left(\frac{\pi}{V_\pi} \Delta V + \frac{2\pi}{\lambda} d \theta + \psi_0 \sin \omega_1 t - \psi_0 \sin \omega_2 t \right) \right] \quad (3)$$

因此为满足干涉相长条件，扫描控制电压 ΔV 所引起的相位变化与扫描角度 θ 所对应的空间位置的相位变化的代数和应为 2π 的整数倍，即：

$$\frac{\pi}{V_\pi} \Delta V + \frac{2\pi}{\lambda} d \theta = 2\pi k, (k \text{ 为整数}) \quad (4)$$

当取 $k=0$ 时，有光程差 $\theta d = -\Delta V \lambda / 2V_\pi$ ，也就是扫描角度 θ 为：

$$\theta = -\frac{\lambda}{2dV_\pi} \Delta V \quad (5)$$

这就是扫描角度 θ 与扫描控制电压 ΔV 之间的关系。

2 扫描角度与电压关系的实验方法

如图 1 所示，当要扫描空间任意 m 点，即 m 点

光电探测到的光强最大，相控阵加载的扫描控制电压产生的相位差刚好与空间距离产生的相位差相抵消，从而使得在 m 点对应的角度处干涉光强最大，而其他场点的光强比第 m 点的光强要小。

调制信号 $\psi_0 \sin \omega_1 t$ 的加载是为了对光强是否达到最大值进行判断^[12]，由公式 (3) 可知，当只考虑一路加载调制信号时 (令 $\omega_2=0$)，任意 m 点光强最大值为 $I_{\max} = 4I_0$ ，对于在 $\theta=0$ 方向上的 O 点，不同的扫描控制电压对应的光强为：

$$I_O = \frac{I_{\max}}{2} \left(1 + \cos \left(\frac{\pi}{V_\pi} \Delta V + \psi_0 \sin \omega_1 t \right) \right) \quad (6)$$

由此可知，不同的扫描控制电压对应不同的扫描角度，在扫描方向 $\theta=0$ 的干涉光强强度不同。由此可以设计在 $\theta=0$ 方向上探测光强，通过 $\theta=0$ 方向上接收到的光强大小反演出光学相控阵实际的扫描位置。

在实验光路条件不变的情况下，通过改变扫描方向 θ_m 上的控制电压 ΔV_m ，使得扫描角度 θ 发生改变，在 θ_m 方向上，当 $\psi_0 \sin \omega_1 t = 0$ 时光强取得最大值，此时，在 $\theta=0$ 方向上光电探测器探测到的光强 I_m ，联合条件 $\psi_0 \sin \omega_1 t = 0$ ，及公式 (6) 得出：

$$\theta_m = -\frac{\lambda}{2\pi d} \arccos \left(\frac{2I_m}{I_{\max}} - 1 \right) \quad (7)$$

当相控阵加载的不同扫描控制电压，对 $\theta=0$ 方向上的干涉光强进行数值分析。取调制系数为 0.3，频率为 2.5 kHz，扫描控制电压范围为 $-V_\pi \sim V_\pi$ ，不同的控制电压对应的光强数值曲线如图 2 所示。其中上方曲线为 $\theta=0$ 方向上的干涉光强曲线，下方曲线为信号通过中心频率为 2.5 kHz 的带通滤波器的滤波曲线。实线为电压取正对应的曲线，虚线为电压取负对应的曲线。

图 2(a) 中，控制电压 $\Delta V=0$ V，干涉光强的最大值为 4，光强曲线的峰峰值最小，控制电压从 $0 \sim V_\pi$ 变化的过程中，如图 2(a)~图 2(g) 实线曲线，光强最大值从 4 逐渐减小到 0；而从图 2(a)~图 2(d) 实线部分，光强峰峰值随着控制电压的变化，从控制电压 $\Delta V=0$ V 取得最小，控制电压逐渐增大，当 $\Delta V=V_\pi/2$ 即 1.62 V 时，峰峰值最大，如图 2(d) 所示。从图 2(d)~图 2(g) 实线曲线，光强峰峰值从 $\Delta V=V_\pi/2$ 取得最大值，逐渐减小，当 $\Delta V=V_\pi$ 即 3.24 V 时，峰峰值取得极小值，接近为 0，如图 2(g) 所示。同理，控制电压从 $V_\pi \sim 0$ 的变化过程如图 2(g)~图 2(a) 虚线曲线所示，

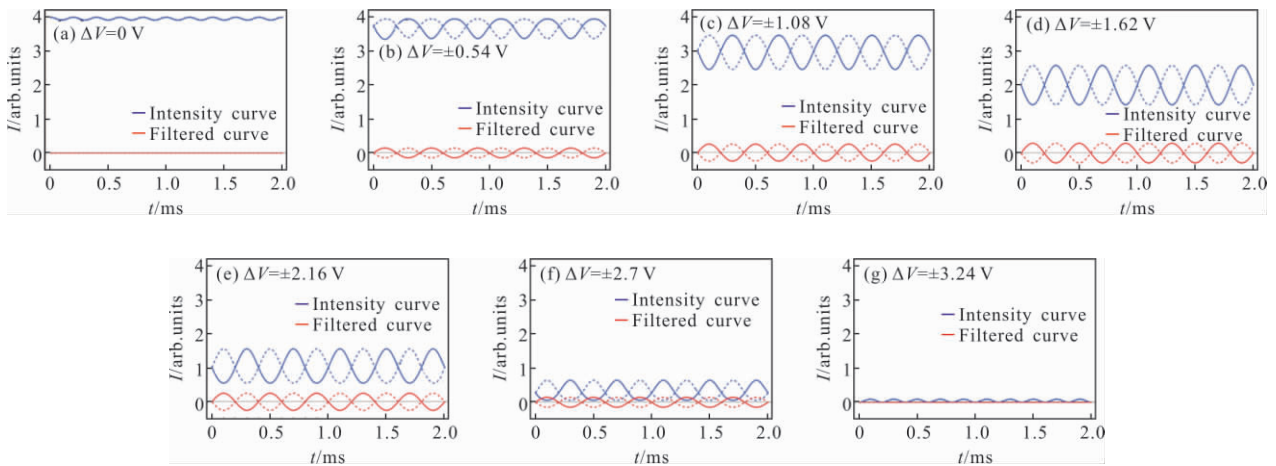


图 2 在 $\theta=0$ 方向上,不同扫描控制电压对应的光强变化

Fig.2 In the scanning angle of $\theta=0$, the light intensity change corresponds to different scanning control voltages

与 $0 \sim V_\pi$ 的过程刚好相反。

3 模拟实验

用 M-Z 光纤干涉光路来模拟两路光纤干涉型光学相控阵的发射以及远场空间干涉情况,模拟实验组成示意图如图 3 所示,主要包括激光器,光纤耦合器,相位调制器,光电探测器,扫描电压发生器,相位差检测器,调制信号,加法器等。激光器发出的激光经过第一个光纤耦合器分为两束光,其中一束光通过相位调制器进行调制,另一束光则不经过调制直接在光纤中传播,光纤耦合器 2 输出光模拟某场点的光。测定光纤耦合器 2 输出端的光强,由此光强推算出扫描角度。另外,探测器的光信号送入相位差检测器,由滤波电路可测量滤波信号的峰峰值。

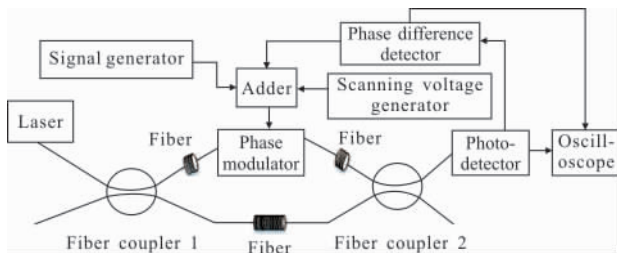


图 3 模拟实验组成示意图

Fig.3 Schematic diagram of simulation experiment

模拟实验中,首先要调整光路:在耦合输入前尽量使两路光的功率一致,使光束在耦合时效果最好。然后调零处理:通过调节相位调制器上的电压,使得

耦合输出后的光强最强,并记录光强最强值 I_{\max} 以及对应的调零电压。最后将调零后的扫描控制电压加载到相位调制器上,测量耦合输出端光强的大小。

4 模拟实验结果与分析

模拟实验中采用激光波长为 1550 nm , 调制系数取典型值 0.3 , 相位调制器采用的介质为 LiNbO_3 电光晶体,其折射率 $n_0=2.25$, LiNbO_3 晶体电光系数 $r_{33}=30 \times 10^{-12}\text{ m/V}$, 半波电压 V_π 为 3.24 V 。测定光纤耦合器 2 输出端的光强,由此光强去推算出扫描角度。另外,探测器的光信号送入相位差检测器,通过滤波电路输出可检测出滤波信号的峰峰值。

如图 4 所示,示波器记录空间某一角度上干涉光强光电转换后的波形(上方黄色波形图),以及通过带通滤波器的滤波波形(下方浅蓝色波形图)。

由图 4(a)可以看出光强出现最大值,扫描控制电压为 0 ,最大值对应的电压为 1.62 V ,为测量数据最大值,光强峰峰值为 220 mV ,也就是光强的抖动,为测量数据抖动最小值。通过滤波后,没有调制频率分量,说明此时干涉最强,由参考文献[10]可知,此种情况为两光束相位差为 0 或者 2π 的整数倍。

图 4(b)~图 4(g)中随着电压的增大,光强最大值减小,从最大值 1.62 V 减小到图 4(g)的 1.28 V ,与仿真结果图 2(a)~图 2 (g)类似;图 4(a)~图 4(g)加载的控制电压分别为 $0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3\text{ V}$,通过相位调制器产生的相位差为 $\pi\Delta V/V_\pi$,则对应的相位差

分别为 0、0.48(约为 $\pi/6$)、0.97(约为 $\pi/3$)、1.45(约为 $\pi/2$)、1.94 (约为 $2\pi/3$)、2.42 (约为 $5\pi/6$)、2.91 (约为 π)。图 4(a)~图 4(d)中,随着电压的增大,光强峰峰值也就越来越大,从 220 mV 到最大为 480 mV,与仿真结果图 2(a)~图 2(d)类似;而图 4(d)对应的角度约为 $\pi/2$,与理论相符。图 4(d)~图 4(g)中,随着电

压的增大,光强峰峰值越来越小,从最大值 480 mV 到最小值 260 mV,与仿真结果图 2(d)~图 2(g)类似。

加载[0 V, -3 V]即近似于[0, $-V_m$]的扫描控制电压,情形与[0 V, 3 V]类似,由公式(5)可知,扫描的角度刚好相反,而由公式(6)可知,与之相对应的正扫描控制电压,在 O 点的光强最大值和峰峰值没有区别。

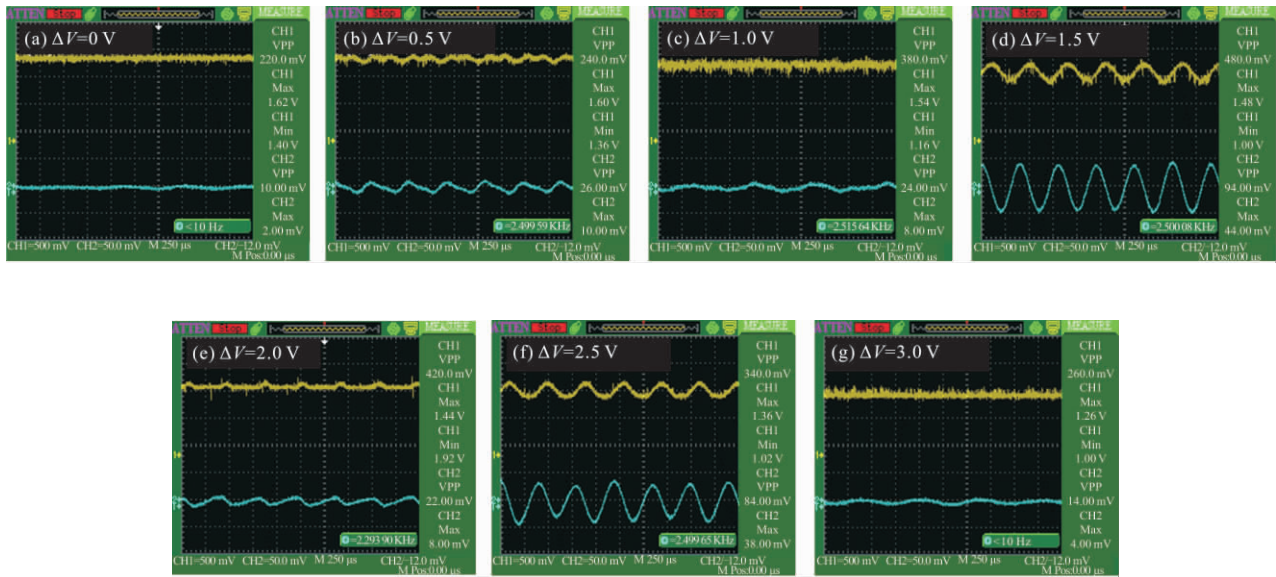


图 4 不同扫描控制电压对应的光强波形图

Fig.4 Light intensity waveforms corresponding to different scanning control voltages

实验中,两路光束的光功率在进入光纤耦合器2要匹配,使得两光束光强基本一样。理论上,光强相同的两光束相位差为 π 的奇数倍时,相干光强为 0,在实验中,由于系统误差,在两光束相位差为 π 时,光强不为 0,此时的光强为干涉光强的最小值,记为 I_{\min} ,则需要对公式(7)进行修正,将公式(7)中的 I_m 和 I_{\max} 都减去 I_{\min} ,则修正后的实际扫描角度为:

$$\theta_m = -\frac{\lambda}{2\pi d} \arccos\left(\frac{2(I_m - I_{\min})}{I_{\max} - I_{\min}} - 1\right) \quad (8)$$

把扫描控制电压,以及从示波器中读出对应的光强输出电压,光强电压变化的峰峰值,对实际扫描角度和理论扫描角度进行分析。实际扫描角度通过公式(8)计算,实际扫描控制电压对应的理论扫描角度用公式(5)算出,得到实际扫描角度和理论扫描角度与扫描控制电压的拟合曲线如图 5 所示,拟合曲线的拟合度为 0.95,拟合曲线的斜率为 1.85 mrad/V,而理论值的斜率为 1.91 mrad/V,可以看出,实际扫

描角度与理论扫描角度都随着扫描控制电压 ΔV 的增加而增加,两曲线虽有一定的误差,但拟合曲线与理论值有很高的重合度,因此实验具有一定的可信度。

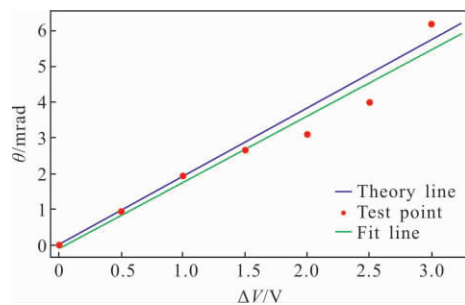


图 5 不同扫描控制电压对应的理论扫描角度与实际扫描角度

Fig.5 Theoretical scanning angle and the actual scanning angle corresponding to different scanning control voltages

作为对照,可参考参考文献[11]波导阵列的扫描角度。参考文献[11]中,设计并制作了硅基二氧化硅波导阵列相控芯片,依据的热光效应的原理,扫描

电压达到 130 V 时, 扫描角度为 5.5° 。为了压制旁瓣, 采用了非等间距的波导结构, 波导间距为 $10\ \mu\text{m}$ 左右。而文中研究光纤干涉型光学相控阵, 由于光纤固有尺寸的限制, 阵元间距比波导阵列的阵元间距大的多, 而扫描的角度与波导间距成反比, 故扫描角度相比于波导阵列相控芯片小的多。另一方面, 相位调制器的工作电压比较小, 在 15 V 左右, 文中在计算扫描控制电压时, 为使公式(4)中的 $k=0$, 扫描电压取值在正负半波电压范围内, 控制电压相比于波导阵列的控制电压小得多, 而相位的变化是通过控制电压变化来实现, 这也是限制文中扫描角度小的的重要因素。

5 结 论

针对光纤干涉型光学相控阵扫描角度与扫描控制电压的关系问题, 在理论分析的基础上, 提出了一种基于相位调制的光纤干涉型光学相控阵扫描角度与扫描控制电压关系的模拟实验方法。由此方法进行的实验表明了对应半波电压范围内, 扫描角度为 $0\sim 6.2\ \text{mrad}$, 实验值与理论值较好地吻合。虽然实验验证的扫描角度只在毫弧度级, 但扫描的距离较远时, 扫描区域仍有较大范围, 适合于实际应用的需求。

基于相位调制的光纤干涉型光学相控阵扫描角度与电压关系的模拟实验方法的优势是: 用 M-Z 光纤干涉模型来模拟两路光纤干涉型光学相控阵的发射以及远场干涉情况, 光路相对简单, 测试点固定的一点, 易于用干涉光路实现; 引入调制信号, 使得光强峰峰值随着扫描控制电压的不同而发生变化, 从另一个角度验证了扫描角度的变化。

文中以二路为例搭建了模拟实验平台, 同理, 可进一步改进实验光路进行多路干涉情形的扫描控制电压与扫描角度关系的模拟实验研究。这些实验研究可以为光学相控阵扫描特性的深入研究提供参考。

参考文献:

- [1] Yan Yuewu, An Junming, Zhang Jiashun, et al. Research progress of optical phased array technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 58-68. (in Chinese)
- [2] Bu Yuming, Du Xiaoping, Zeng Zhaoyang, et al. Research progress and trend analysis of non-scanning laser 3D imaging radar[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(5): 711-727. (in Chinese)
- [3] Zong Wenpeng, Li Guangyun, Li Minglei, et al. A survey of laser scan matching methods [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(6): 914-930.
- [4] Yariv A, Yeh P. *Optical Electronics in Modern Communications* [M]. Chen H M, Shi W H, Wang J L, et al, transl. 6th ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2014: 365-384. (in Chinese)
- [5] Chung S W, Abediasl H, Hashemi H. A monolithically integrated large-scale optical phased array in silicon-on-insulator CMOS [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2018, 53(1): 275-296.
- [6] Xia Runqiu, Chen Qingshan, Liu Yang, et al. Control method of coherent beam combining angle scanning based on linear fiber array[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0906006. (in Chinese)
- [7] Ye Jiayu, Li Lijing, Chen Wen, et al. Study on the characteristics of novel optical phased array based on waveguide [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6): 0620003. (in Chinese)
- [8] Ren Yuanzhong, Chai Jinhua. Research on scanning characteristics of fiber interferometric optical phased array based on phase modulation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(15): 152502. (in Chinese)
- [9] Wu Yalei, Wu Youjin, Zhu Longyang, et al. Mathematical model of all-fiber phase modulators with lead zirconatitanate coating [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007(2): 230-236. (in Chinese)
- [10] Niu Qifeng, Wang Chunyang, Zhang Guangping, et al. Solution of liquid crystal phased array director and its beam deflection [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(12): 2894-2901. (in Chinese)
- [11] Yan Yuewu, An Junming, Zhang Jiashun, et al. Chip of phase control arrays based on silica on silicon [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(4): 7-14. (in Chinese)
- [12] Chai Jinhua, Chen Fei. Methodology of filter-type multi-dithering phase control for quasi parallel light interference[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(1): 99-110. (in Chinese)
- [13] Zhao Kaihua, Zhong Xihua. *Optics* [M]. Beijing: Peking University Press, 1984: 154-157, 162-171. (in Chinese)