

# 基于相位调制的光纤干涉型光学相控阵扫描特性研究

任远中<sup>1</sup>, 柴金华<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>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;

<sup>2</sup>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** 为解决光纤干涉型相控阵在实际实用中的扫描控制问题, 建立了一种基于相位调制的光纤干涉型光学相控阵扫描控制的理论模型。该模型以光纤作为相控阵阵元, 采用傍轴近似和远场近似, 通过加载在相位调制器上的扫描控制电压实现光束的扫描; 讨论了一种扫描电压的 $[-\pi, \pi]$ 加载方式; 对扫描角度、阵元间距, 以及相位调制器参数间的关系进行数值分析, 还验证了相控阵路数与调制系数对扫描分辨率的影响。结果表明: 通过 $[-\pi, \pi]$ 的扫描电压加载方式, 可以把控制电压控制在 $\pm V_\pi$ (半波电压)范围内; 在相控阵阵元间距一定时, 随着相位调制器长高比的增大, 在小角度范围内, 扫描角度呈线性增大; 相控阵路数越多, 调制系数越小, 分辨率也就越高。在一维光纤阵元间距为  $125 \mu\text{m}$  时, 当相位调制器的长高比为  $10^3$  量级时, 最大扫描角度可达  $0.1 \text{ rad}$ ; 当调制系数为  $0.3$ , 一维光纤阵元为  $50$  时, 扫描分辨率可达  $210$ 。

**关键词** 光电子学; 光学相控阵; 光纤干涉; 相位调制; 扫描电压

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.152502

## Scanning Characteristics of Fiber-Optic Interferometric Phased Array Based on Phase Modulation

Ren Yuanzhong<sup>1</sup>, Chai Jinhua<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student Brigade, PLA Army Academy of Artillery and Air Defense, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>Electronic Engineering Teaching and Research Section, PLA Army Academy of Artillery and Air Defense, Hefei, Anhui 230031, China

**Abstract** A theoretical model of the scanning control for a fiber-optic interferometric phased array based on phase modulation is proposed to overcome the limitation of scanning control for a fiber-optic interferometric phased array in practice. This model uses optical fibers as the phased-array elements, adopts paraxial and far-field approximations, and uses the scanning-control voltage loaded on the phase modulator to realize the scanning of the beam. A  $[-\pi, \pi]$  charging scheme of scanning voltage is proposed. The relationship among scanning angle, element spacing, and parameters of the phase modulator is numerically analyzed, and the influences of the phased-array path number and modulation coefficient on scanning resolution are verified numerically as well. Results show that the voltage is controlled within  $\pm V_\pi$  (half-wave voltage) by the  $[-\pi, \pi]$  charging scheme; when the spacing of the phased-array elements is constant, the scanning angle increases linearly with an increase in the length-to-height ratio of the phase modulator in the small-angle range; the higher the number of phased-array beams and the smaller the modulation coefficient, the higher the resolution. The maximum scanning angle can reach  $0.1 \text{ rad}$  when the length-to-height ratio of the phase modulator is  $10^3$  orders of magnitude and the spacing of the fiber-array elements is  $125 \mu\text{m}$ , and the scanning resolution is  $210$  when the modulation coefficient is  $0.3$  and the number of fiber-optic elements is  $50$ .

**Key words** optoelectronics; optical phased array; fiber interference; phase modulation; scanning voltage

**OCIS codes** 250.4110; 120.3180; 030.1640

收稿日期: 2019-02-26; 修回日期: 2019-03-06; 录用日期: 2019-03-11

\* E-mail: ch170626@sina.com

# 1 引言

光学相控阵技术是一种新型光束偏转控制技术<sup>[1-3]</sup>,在激光雷达<sup>[3]</sup>及光学成像<sup>[4]</sup>等领域有着良好的应用前景。目前国内外学者研究较多的是液晶光学相控阵<sup>[5-6]</sup>、光波导光学相控阵<sup>[7-9]</sup>,以及微机电(MEMS)系统光学相控阵<sup>[10-11]</sup>。

光纤干涉型相控阵是指以若干光纤为阵列单元,各光纤传输光束形成相干。与集成波导型相控阵相比,其阵元间距受到单根光纤直径的限制,间距较大,而集成波导型相控阵的阵元间距较小,扫描角度也较大,但由于光纤为成熟产品,实用性较强,所以特别适用于远场一定空间范围内的情况。光纤干涉型光学相控阵的关键技术为实时相位校正和扫描控制,尽管文献<sup>[12]</sup>提出了一种滤波型多抖动相位校正方法,但并未给出扫描方案,目前在扫描控制上,研究工作主要集中在集成波导相控阵方面<sup>[13-15]</sup>。考虑到光纤干涉型相控阵的工程实用性,本文在上述研究工作的基础上,建立了一种基于相位调制的

光纤干涉型光学相控阵扫描控制理论模型,并对扫描特性进行了数值分析。

# 2 理论模型

光纤干涉型相控阵扫描控制系统主要由激光器、分束器、相位调制器、光纤、光纤准直器、相位差检测回路,以及扫描电压控制回路组成。激光器发出的激光经过分束器分为  $n$  束,通过相位调制器调制相位,光束在光纤中传播,通过光纤准直器在远场实现干涉,光电探测器将干涉区域的干涉强度转变为电信号,通过相位差检测器实现相位差的实时校正<sup>[12]</sup>,利用扫描电压发生器实现扫描方向的实时控制。第  $n$  路的相位调制器所加载的电压有  $V_{c,n}$ 、 $V_{f,n}$ 、 $V_0 \sin(\omega_n t)$ ,其中  $V_{c,n}$  为扫描电压发生器产生给第  $n$  路相位调制器的扫描控制电压, $V_{f,n}$  为相位差检测器反馈给第  $n$  路相位调制器的电压, $V_0 \sin(\omega_n t)$  来自信号发生器, $n$  为相控阵路数( $n$  为任意整数), $\omega$  为信号发生器产生信号的频率, $t$  为任意时刻。 $N$  路光纤干涉型相控阵扫描控制示意图如图 1 所示。

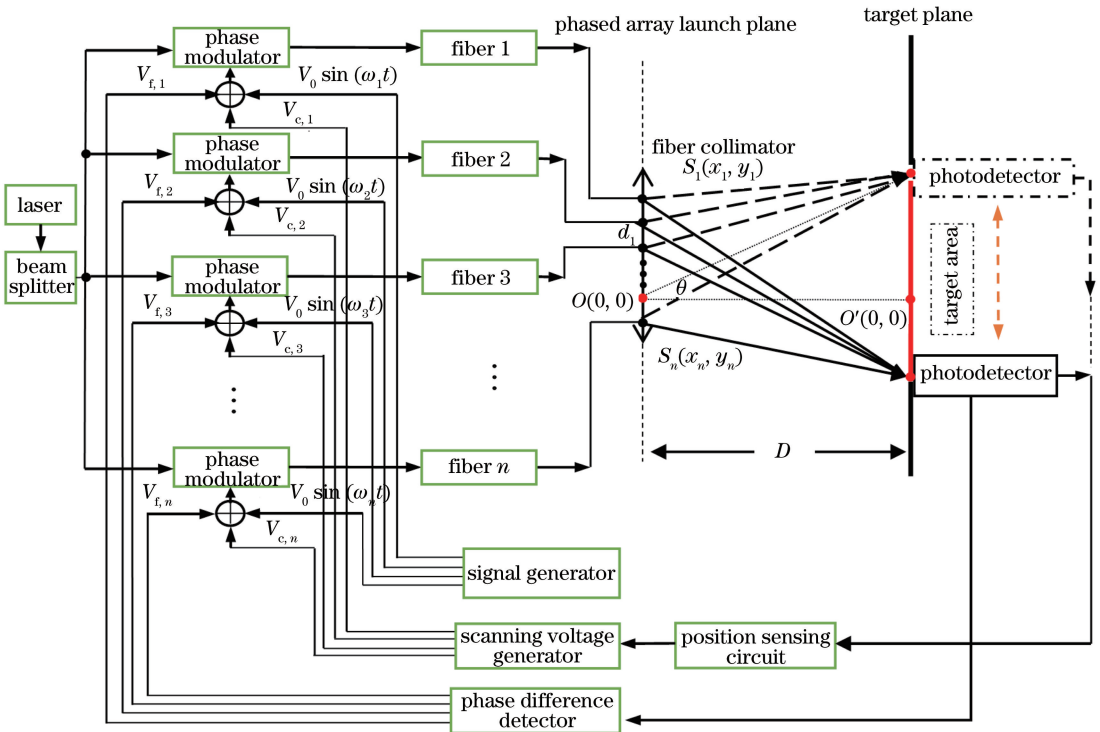


图 1  $N$  路光纤干涉型光学相控阵扫描控制示意图

Fig. 1 Scanning control schematic of  $N$ -beam fiber-optic interferometric phased array

采用文献<sup>[12]</sup>和文献<sup>[16]</sup>的原理和方法,可得  $N$  路光纤干涉相控阵在空间  $P$  点的干涉光强公式为

$$I = \sum_{n=1}^N I_n + 2 \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{r=2, r>n}^N \sqrt{I_n I_r} \times \{\cos[\beta_{nr} + \phi_0 \sin(\omega_n t) - \phi_0 \sin(\omega_r t)]\}, \quad (1)$$

式中:  $I_n$  为第  $n$  路的光强;  $I_r$  为第  $r$  路的光强;  $\psi_0 = \frac{\omega n_0^3}{c} \frac{r_{33}}{2} \frac{V_0}{d} l$  为调制系数 ( $c$  为光速);  $\beta_{nr} \equiv \beta_{c,n,r} + \beta_{p,n,r} + \beta_{i,n,r}$  为任意两路 ( $n$  路、 $r$  路) 光强的总相位差, 其中  $r$  为任意一路相控阵路数;  $\beta_{c,n,r} \equiv \frac{\omega n_0^3 r_{33} l}{2cd} \times (V_{c,n} - V_{c,r})$  为扫描控制电压引起的相位差,  $n_0$ 、 $r_{33}$ 、 $l$ 、 $d$  分别为相位调制器的 LiNbO<sub>3</sub> 电光晶体的折射率、电光系数、波导长度、波导厚度;  $\beta_{p,n,r} \equiv k[(x_n - x_r)x' + (y_n - y_r)y'] / D$  为相控阵第  $n$  路和第  $r$  路空间位置引起的相位差, 其中  $k$  为光波的波矢量大小;  $(x_n, y_n)$ 、 $(x_r, y_r)$  分别为第  $n$  路和第  $r$  路出射光在发射平面对应的坐标;  $(x', y')$  为距相控阵发射面为  $D$  的扫描平面上位置  $P$  的坐标。发射阵元符合傍轴条件和远场条件, 而  $P$  点仅符合傍轴条件<sup>[16]</sup>。  $\beta_{i,n,r} \equiv \frac{\omega}{c} n_i l_n - \frac{\omega}{c} n_i l_r$  为光纤长度引起的相位延迟, 其中  $n_i$  为光纤折射率;  $l_n$  为第  $n$  路光纤的长度;  $l_r$  为第  $r$  路光纤的长度。  $\beta_{i,n,r} \equiv \frac{\omega n_0^3}{c} \frac{r_{33}}{2} \times \frac{V_{f,n} - V_{f,r}}{d} l$  为由反馈网络相位差检测器引起的相位延迟。

对于二路光纤干涉型光学相控阵相干涉, 干涉光强为

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

由文献[12]可知, 为使光强最大, 需要使余弦项  $\cos \beta_{nr} = 1$ , 即

$$\beta_{nr} \equiv \beta_{c,n,r} + \beta_{p,n,r} + \beta_{i,n,r} + \beta_{f,n,r} = 2m\pi (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (3)$$

为满足(3)式的相位条件, 令

$$\beta_{i,n,r} + \beta_{f,n,r} = 2n\pi (n \in \mathbf{R}), \quad (4)$$

$$\beta_{c,n,r} + \beta_{p,n,r} = 2m\pi (m \in \mathbf{R}). \quad (5)$$

为达到相位条件(4)式的要求, 本文采用文献[12]提出的滤波型多抖动相控方法。为达到相位条件(5)式的要求, 综合扫描电压发生器所产生的电压应满足的条件进行分析。由电光晶体的特性<sup>[17]</sup>可知, 改变光波  $2\pi$  相位所需的控制电压为  $2V_\pi$ 。

为简化计算, 考虑两路光纤干涉情形, 设  $y_1$ 、 $y_2$ 、 $y'$  均为 0,  $x_1$ 、 $x_2$  的间距为相控阵列周期  $d_1$ , 根据  $\beta_{c,1,2}$ 、 $\beta_{p,1,2}$  的定义以及(5)式, 可得相控阵相位扫描电压差值与空间位置的关系为

$$\frac{\pi}{V_\pi} \Delta V + k(x_2 - x_1)x' / D = 2m\pi, \quad (6)$$

式中:  $\Delta V = V_{c,1} - V_{c,2}$  为加载在第一路相位调制器上的扫描控制电压  $V_{c,1}$  与加载在第二路相位调制器上的扫描控制电压  $V_{c,2}$  的差值。注意到,  $\theta = x' / D$ , 其中  $x'$  为目标在扫描平面上的水平距离, (6)式也可表示为

$$\Delta V = \frac{V_\pi (2m\pi - kd_1\theta)}{\pi}. \quad (7)$$

对于传统的加电方案,  $m = 0$ , 根据(7)式可得相控阵相位扫描电压与空间位置的关系为

$$\Delta V = -\frac{2dd_1}{n_0^3 r_{33} l} \theta. \quad (8)$$

同理可得, 在  $N$  路干涉时, 扫描控制电压与空间位置的关系为

$$\Delta V_{n,r} = -\frac{2dd_{n,r}}{n_0^3 r_{33} l} \theta. \quad (9)$$

相控阵在采用均匀布置  $d_{n,n-1} = \dots = d_{2,1} = d_1$ , 相邻两阵元相位控制电压差均相同的情况下,  $V_{n,n-1} = \dots = V_{2,1} = \Delta V$ 。将  $\Delta V_{n,r} = (n-r)\Delta V$  和  $d_{n,r} = (n-r)d_1$  代入(9)式, 结果与(8)式相同。

由此可知, 对于任意  $N$  路相控阵, 扫描控制电压与晶体的尺寸、折射率、电光系数、相控单元的阵元间距, 以及偏转角度有关, 其中控制电压正比于偏转角度。

### 3 扫描电压的 $[-\pi, \pi]$ 加载方式

在相控阵中, 由于相位调制器器件电压取值有限, 而扫描中需要尽可能取得大的扫描角度, 在讨论扫描角度满足傍轴条件  $\theta < 0.2 \text{ rad}$ <sup>[18]</sup> 时, 对于一定的偏转角, 针对(8)式可以采取  $2\pi$  加电方案<sup>[13]</sup>, 在此基础上加一个偏置电压即可构成  $[-\pi, \pi]$  加载方式, 其原理为: 设相邻相控单元相位调制器附加相位差为  $\Delta\varphi$ , 所需的控制电压为  $\Delta V$ , 若以第一路光纤相位调制器为基准, 第  $N$  路的附加相位延迟与第一路的相位差为  $\Delta\varphi_n = (n-1)\Delta\varphi$ , 则对每一路相控元的相位调制器所加载的控制电压阶梯如图 2(a) 所示。

对于任意一路光纤, 其输出截面上光场相位改变  $2\pi$  的整数倍 (即控制的电压相差为  $2V_\pi$  的整数倍) 并不影响光纤阵列的远场分布, 即  $\varphi_n = (n-1)\Delta\varphi$  与  $\varphi_n = (n-1)\Delta\varphi + 2m\pi (m = 0, \pm 1, \dots)$  对应于同一光强分布。

对于  $N$  路光纤干涉型光学相控阵, 取典型数据: 扫描角度  $\theta = 0.1 \text{ rad}$ 、 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 、 $d_1 = 125 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $V_\pi = 3.24 \text{ V}$ 、 $\Delta V = 52.26 \text{ V}$ , 则  $N$  路光纤干涉型相控阵的传统加电方案、 $2\pi$  加电方案, 以及  $[-\pi, \pi]$  加电方案对比如表 1 所示。

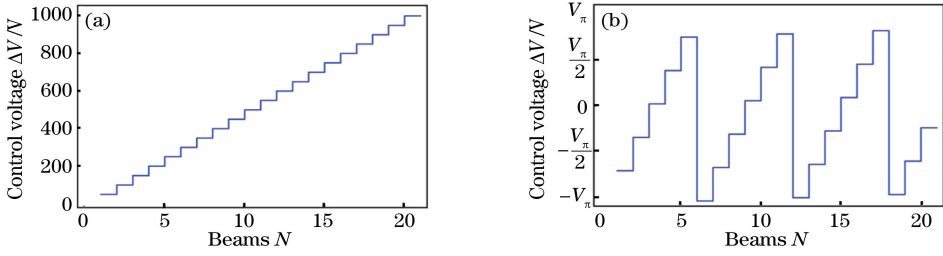


图 2 相位调制器的加电方式。(a)传统的加电方式;(b)  $[-\pi, \pi]$ 加电方式

Fig. 2 Charging scheme of phase modulator. (a) Traditional charging scheme; (b)  $[-\pi, \pi]$  charging scheme

表 1 三种加电方案对比表

Table 1 Comparison of three charging schemes

Beams of $N$	Voltage of traditional charging scheme $(N-1)\Delta V / V$	Voltage of $2\pi$ charging scheme $\Delta V / V$	Voltage of $[-\pi, \pi]$ charging scheme $\Delta V' / V$	Value of $m$
1	0	0	-3.24	0
2	52.26	0.42	-2.82	8
3	104.52	0.84	-2.40	16
4	156.77	1.25	-1.99	24
5	261.30	1.67	-1.57	32
6	313.55	2.09	-1.14	40
7	365.81	2.51	-0.73	48
8	418.06	2.93	-0.31	56
9	470.32	3.34	0.10	64
10	522.58	3.76	0.52	72
11	574.84	4.18	0.94	80
12	627.10	4.60	1.34	88
13	679.36	5.01	1.77	96
14	731.61	5.43	2.19	104
15	783.87	5.85	2.61	112
16	836.13	6.27	3.03	120
17	888.39	0.21	-3.03	129
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$N$	$(N-1)\Delta V$	$(n-1)\Delta V \% 2V_\pi$	$(n-1)\Delta V \% 2V_\pi - V_\pi$	$[\Delta V_n / 2V_\pi]$

表 1 中光束 1 为参考基准光束,其余各光纤相位调制器上加载的控制电压由(7)式计算,对于光纤相控阵,参考路光束相位为 0,其他相位调制器上的传统加载电压的大小则由(7)式中在  $m=0$  的情况下计算得出,对于第  $N$  路光纤相位调制器上的加载电压为  $(N-1) \times \Delta V$ 。表 1 中 % 为求余符号。

采用  $2\pi$  加电方案,对所有加载控制电压模  $2V_\pi$  求余,如第 9 路传统加载电压需要 470.32 V,  $470.32 = 64 \times (2 \times 3.24) + 3.34$ ,故对其模  $2V_\pi$  求余后得到 3.34 V,偏置半波电压后为 0.1 V。

通常对于第  $N$  路相控阵,由(8)式确定扫描方向上第一路相对于参考路需加载的电压值,按照传统电压加载方案,第  $N$  路相对于参考路需加载的电压值为  $(N-1) \times \Delta V$ ,对其模  $2V_\pi$  求余的数值

为  $(n-1) \Delta V \% 2V_\pi$ ,偏置半波电压后为  $(n-1) \times \Delta V \% 2V_\pi - V_\pi$ 。综上所述,采用  $[-\pi, \pi]$  加电方案,实现将传统电压加载方案的高电压转化为控制电压在  $[-V_\pi, V_\pi]$  范围内的控制电压,如图 2 (b) 所示。

相较于  $2\pi$  加电方案,  $[-\pi, \pi]$  加电方案为双极性电压加载方式,可把控制电压控制在一定的范围之内。

### 4 扫描角度

设各路光强相同,激光波长  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ ,晶体的工作电压范围为  $-15 \sim 15 \text{ V}$ ,光纤包层直径为  $125 \mu\text{m}$ ,  $d_1$  取值大于  $125 \mu\text{m}$ ,相位调制器采用的介质为  $\text{LiNbO}_3$  电光晶体,其折射率  $n_0 = 2.25$ ,

LiNbO<sub>3</sub> 晶体电光系数  $r_{33} = 30 \times 10^{-12}$  m/V, 晶体波导长度  $l$  与晶体波导厚度  $d$  的比值为  $l/d$ 。

对于  $N$  路光纤干涉型相控阵, 结合(8)式, 对

表 2 不同  $l/d$  和  $d_1$  对应的扫描角度

Table 2 Scanning angles for different  $l/d$  and  $d_1$

$d_1/\mu\text{m}$	$\theta_{\text{max}}/\text{mrad}$					
	$l/d = 100$	$l/d = 500$	$l/d = 1000$	$l/d = 2000$	$l/d = 3000$	$l/d = 5000$
125	2.05	10.3	20.5	41.0	61.4	102
250	1.03	5.13	10.3	20.5	30.7	51.2
500	0.512	2.56	5.12	10.3	15.4	25.6
1000	0.256	1.28	2.56	5.12	7.69	12.8

由表 2 可知, 在  $d_1$  一定时, 随着  $l/d$  的增大, 在小角度范围内, 扫描角度也呈线性增大; 而在  $l/d$  一定时, 随着  $d_1$  的增大, 扫描角度呈反比例减小。例如, 为实现 100 mrad 的扫描, 在光纤阵元间距为 125  $\mu\text{m}$  情况下, 晶体波导长度  $l$  与晶体波导厚度  $d$  的比值约为 5000, 即所需的调制器波导长度  $l$  应为 mm 量级、波导厚度  $d$  应为  $\mu\text{m}$  量级, 目前工程上可以实现。为完成更高角度的扫描, 则  $l/d$  比值要进一步增大, 其对相位调制器件的要求也就更严苛。

### 5 调制系数的影响

在  $\theta=0$  方向, 对于两路光纤干涉型相控阵, 一

$d_1$  分别取值 125, 250, 500, 1000  $\mu\text{m}$ ,  $\Delta V$  取晶体的最大工作电压 15 V, 不同的  $l/d$  对应的最大扫描角度如表 2 所示。

路加载调制信号而另一路不加载, 其光强公式为(2)式, 由于加载了调制信号(电压大小为  $V_0 \sin(\omega t)$ ), 光强在扫描方向中心位置处产生抖动, 且因为调制信号的加载方式与扫描控制电压的加载方式相同, 故其抖动角度  $\theta'_{\text{max}}$  与调制电压的关系与(8)式类似, 则两者之间的关系为

$$V_0 \sin(\omega t) = -\frac{2dd_1}{n_0^3 r_{33} l} \theta'_{\text{max}} \quad (10)$$

光强分布如图 3(a)所示, 抖动幅度最大在  $\omega t = \pm \pi/2$  处,  $\sin(\omega t) = \pm 1$ , 此时抖动的幅度为

$$\theta'_{\text{max}} = -\frac{V_0 n_0^3 r_{33} l}{2dd_1} \quad (11)$$

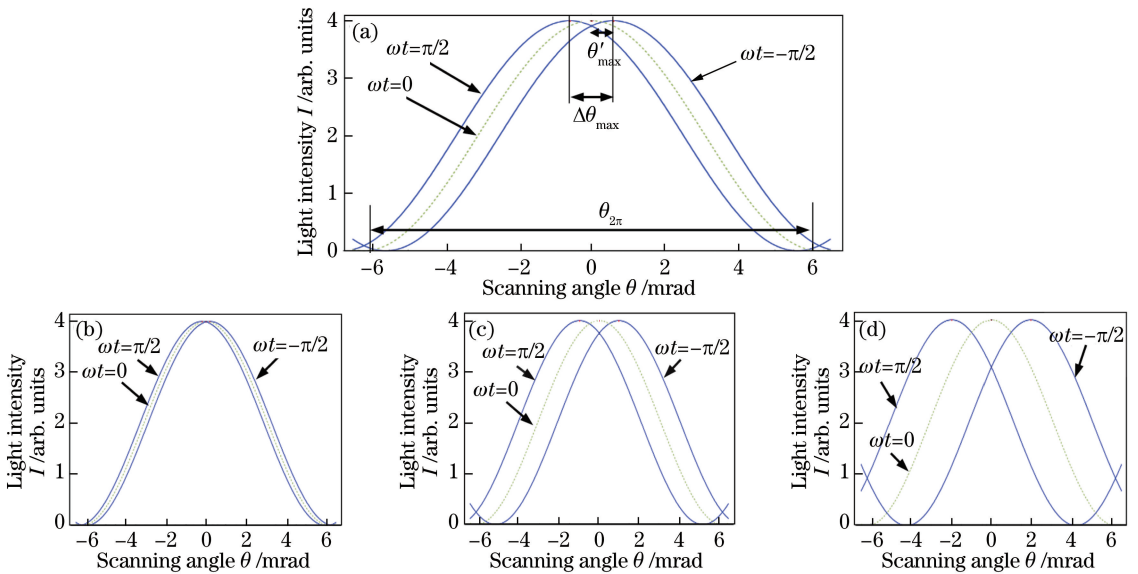


图 3 不同调制系数  $\phi_0$  对应的光强抖动。(a)  $\phi_0 = 0.3$ ; (b)  $\phi_0 = 0.1$ ; (c)  $\phi_0 = 0.5$ ; (d)  $\phi_0 = 1$

Fig. 3 Light intensity jitter under different modulation coefficients  $\phi_0$ . (a)  $\phi_0 = 0.3$ ; (b)  $\phi_0 = 0.1$ ; (c)  $\phi_0 = 0.5$ ; (d)  $\phi_0 = 1$

对于两路光纤干涉型相控阵, 不同  $\phi_0$  所对应的  $\theta'_{\text{max}}$  值可以由(11)式确定。对于  $N$  路光纤干涉型相控阵, 为了方便探测器信号的识别处理, 采用文献[12]调制信号频率的加载方式, 第  $N$  路加载的调制信号频率为第一路频率  $\omega_0$  的  $(2N-1)$  倍, 结合(1)

式, 在一个周期内对  $t$  求偏导, 解出所有极值, 求得各极值点在光强最大点对应的抖动角度, 取最大的抖动角度即为  $\theta'_{\text{max}}$ , 通常情况下, 最大抖动角度无法利用公式表示, 通过 Wolfram Mathematica 11 软件计算出的不同  $\phi_0$  对应的  $\theta'_{\text{max}}$  值如表 3 所示。

表3  $\psi_0$  与  $\theta'_{\max}$  的关系  
Table 3 Relationship between  $\psi_0$  and  $\theta'_{\max}$

$\psi_0$	$\theta'_{\max}/\text{mrad}$ (all beams load modulation signals)					
	$N=2$ (only one loading signal)	$N=2$	$N=3$	$N=4$	$N=8$	$N=50$
0.05	0.197	0.15	0.089	0.064	0.031	0.00491
0.1	0.394	0.3	0.18	0.129	0.062	0.00983
0.2	0.789	0.6	0.36	0.258	0.124	0.0197
0.3	1.18	0.91	0.53	0.387	0.186	0.0295
0.4	1.58	1.21	0.7	0.516	0.248	0.0393
0.5	1.97	1.52	0.88	0.64	0.31	0.0491
$\pi/4$	3.1	2.39	1.38	1.01	0.488	0.0772
1	3.95	3.04	1.77	1.29	0.621	0.0983
$\pi/2$	6.2	4.77	2.8	2.02	0.975	0.154
$\pi$	7.9	9.55	5.6	4.05	1.95	0.309

由表3可知,在光纤阵元数  $N$  一定的情况下,  $\psi_0$  较小时,抖动幅度较小,抖动幅度与调制系数呈线性关系;而在  $\psi_0$  一定的情况下,光纤阵元数越多,抖动的幅度也就越小,光强也就越集中。

在不同的  $\psi_0$  情况下,抖动的幅度也不同,如图3(b)~(d)所示。 $\psi_0$  越小,抖动的幅度越小,扫描的精度就越高;而  $\psi_0$  越大,抖动也就越明显,相控阵扫描的精度也就越低。如图3(d)所示,当调制系数为1时,抖动的幅度很大,光强极大值的区域也较大。类比瑞利判据,光强最大值与相邻零点之间的范围为可分辨范围,故调制系数的最大值不能超过  $\pi$ 。

当扫描角度一定时,系统分辨率  $p$  为光强周期性分布两波谷(峰)之间的控制电压差对应的角度  $\theta_{2\pi}$  与光强最强时抖动区域角度  $\Delta\theta_{\max}$  之比,在  $V=0$  且  $\psi_0=0.3$  时,光强抖动曲线如图3(a)所示,则分辨率  $p$  应为

$$p = \frac{\theta_{2\pi}}{\Delta\theta_{\max}} \quad (12)$$

相邻光强两波峰之间对应的控制电压为改变光束  $2\pi$  相位的控制电压,而相位调制器的半波电压  $V_\pi$  为相位改变量为  $\pi$  时的电压,因此,使光束产生  $2\pi$  相位所需的控制电压为  $2V_\pi$ ,故(12)式中  $\theta_{2\pi}$  可由(8)式计算得出;对于  $\Delta\theta_{\max}$ ,单边抖动幅度最大对应的控制电压为  $V_0$ ,而光强抖动的范围为单边抖动幅度的两倍,故  $\Delta\theta_{\max}$  可由(11)式计算得出。联立(8)式、(11)式和(12)式,可解得分辨率  $p$  为

$$p = \frac{\theta_{2\pi}}{\Delta\theta_{\max}} = \frac{\pi}{\psi_0} \quad (13)$$

对于2路入射光,可以用(13)式求得其分辨率;而对于光纤阵元数为  $N$  的光纤阵元相控阵,可通过Wolfram Mathematica 11软件计算求得最大抖动角度,图4给出了当光纤阵元数为8和50时,不同调制系数与光强最大抖动幅度的关系。

采用Wolfram Mathematica 11软件进行仿真计算,在周期波峰光强间隔周期内,表4给出了在不同调制系数和不同路数  $N$  的情况下的分辨率。

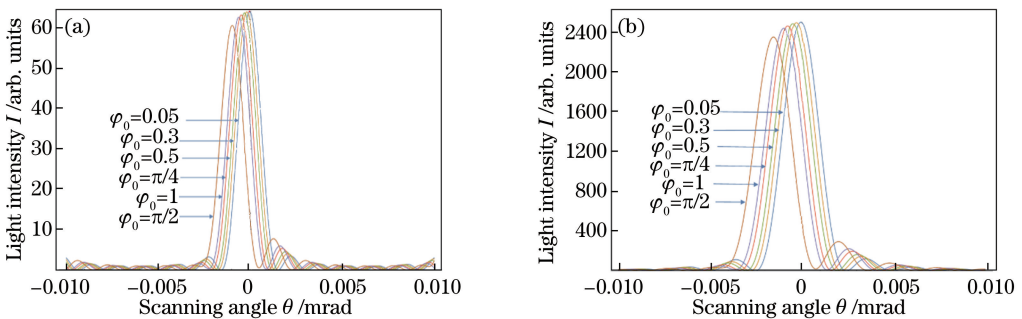


图4 当  $V=0$  时,不同调制系数  $\psi_0$  与光强最大抖动幅度的关系。(a)  $N=8$ ; (b)  $N=50$   
Fig. 4 Relationship between different modulation coefficients  $\psi_0$  and maximum jitters of light intensity at  $V=0$ . (a)  $N=8$ ; (b)  $N=50$

表4 不同  $\phi_0$  和  $N$  所对应的分辨率Table 4 Resolutions corresponding to different  $\phi_0$  and  $N$ 

$\phi_0$	$p$ (all beams load modulation signals)					
	$N=2$ (only one loading signal)	$N=2$	$N=3$	$N=4$	$N=8$	$N=50$
0.05	62.8	41.33	69.66	96.87	199.99	1262.67
0.1	31.4	20.67	34.44	48.06	100.00	630.69
0.2	15.7	10.33	17.22	24.03	50.00	314.71
0.3	10.5	6.81	11.70	16.02	33.33	210.16
0.4	7.8	5.12	8.86	12.01	25.00	157.75
0.5	6.28	4.08	7.05	9.69	20.00	126.27
$\pi/4$	4	2.59	4.49	6.14	12.70	80.31
1	3.1	2.04	3.50	4.81	9.98	63.07
$\pi/2$	2	1.30	2.21	3.07	6.36	40.26
$\pi$	1	0.65	1.11	1.53	3.18	20.06

由表4可知,分辨率与调制系数成反比,调制系数越小分辨率越高,调制系数越大分辨率越低,也就意味着空间可以分辨的方位越少,因此相控阵系统在调制系数的参数选择上不能太大。而相控阵的路数越多,远场的光强能量就越集中,抖动的幅度就越小,可分辨的点也就越多。因此在实际应用中,要根据系统设计参数,合理选择调制系数和相控阵的路数。

波导光学相控阵的分辨率为波导层数  $N$ ,例如,同样是50阵元的波导相控阵,其分辨率为50,但上述光纤干涉型光学相控阵的分辨率在同样的阵元数量情况下比波导型光学相控阵要高很多,但扫描范围却远小于波导光学相控阵,其主要原因是波导相控阵光束存在衍射效应,光强分布受到衍射因子的影响,零级主极大最强,而其他主极大衰减较多,故其扫描范围限定在正负一级主极大之间,大小和波导阵元间距相关,阵元间距越小,扫描范围越宽。一方面,本文采用光直接从光纤出射后在远场形成干涉的方式,由于光纤阵元间距大,故衍射效应可忽略,且光波之间的干涉需要满足远场和傍轴条件,因此扫描范围小。另一方面,波导相控阵考虑的是将零级主极大的半角宽度作为一个点的分辨宽度,本文主要考虑到调制系数的影响,光强在干涉最强处抖动,故  $\Delta\theta_{\max}$  为最大抖动幅度之间的角度,而光纤阵元越多,影响的抖动项就越多,抖动的角度就越小,故分辨率也就越高。

## 6 结 论

在建立的基于相位控制的光纤干涉型光学相控阵扫描的理论模型中,扫描控制回路根据空间位置实时产生扫描电压,从而控制相位调制器,所提出的

$[-\pi, \pi]$ 加电方案可以实现在  $\pm V_\pi$  范围内对扫描光束的实时控制,再结合滤波型多抖动相位校正实时控制回路,形成了整个系统的实时相位控制。理论模型中,采用了傍轴近似和远场近似,该方法在实际应用中易于实现,另外,空间扫描点位置直接出现在相位项中,直观地建立起空间位置与扫描控制电压间的关系,从而为数值分析奠定了基础。分析结果表明:受到光纤固有尺寸的限制,相邻光纤阵元间距最小为  $125 \mu\text{m}$ ,在此基础上,当相位调制器的长高比为  $10^3$  量级时,最大扫描角度可达  $0.1 \text{ rad}$ ,该角度可应用于许多远场情形中。考虑到调制系数的影响,抖动角度随光纤阵元数量的增加而减小,在光纤阵元数为50,调制系数为典型数据0.3时,扫描分辨率可达210,而对于波导型相控阵,在相同阵元数量情况下,其分辨率仅为50,因此,在阵元数相同的情况下,光纤干涉型相控阵的分辨率要远大于波导型相控阵的分辨率。

本文仅对一维相控阵进行理论分析,相关的实验验证涉及相位控制及信号处理等难点,将在下一步工作中进一步考虑。

## 参 考 文 献

- [1] McManamon P. An overview of optical phased array technology and status [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5947: 594701.
- [2] Li R Q, Wang Z, Cui C, *et al.* Research on beam steering of waveguide phased array [J]. Optical Technique, 2018, 44(2): 129-132.  
李润泉, 王智, 崔燊, 等. 阵列波导激光相控阵光束偏转特性研究[J]. 光学技术, 2018, 44(2): 129-132.
- [3] Yan Y W, An J M, Zhang J S, *et al.* Research

- progress of optical phased array technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 020006.  
颜跃武, 安俊明, 张家顺, 等. 光学相控阵技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 020006.
- [4] Wang Y R, Mei H P, Kang L, *et al.* Experimental investigation on retro-reflective laser imaging in turbulent atmosphere[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0401008.  
王钰茹, 梅海平, 康丽, 等. 湍流大气中折返路径激光成像探测实验[J]. *中国激光*, 2018, 45(4): 0401008.
- [5] Huang Z W, Wang C Y, Peng L H, *et al.* Beam optimization of liquid crystal optical phased array based on bat algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 082303.  
黄志伟, 王春阳, 彭丽华, 等. 基于蝙蝠算法的液晶光学相控阵波束优化[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 082303.
- [6] Davis S R, Farca G, Rommel S D, *et al.* Analog, non-mechanical beam-steerer with 80 degree field of regard [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6971: 69710G.
- [7] Peng L H, Li M Q, Huang Z W, *et al.* Method of sidelobe suppression with waveguide optical phased array[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 082301.  
彭丽华, 李明秋, 黄志伟, 等. 光波导光学相控阵边瓣压缩方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 082301.
- [8] Wang Y B, Liang L, Chen Y Y, *et al.* Improved performance of optical phased arrays assisted by transparent graphene nanoheaters and air trenches [J]. *RSC Advances*, 2018, 8(15): 8442-8449.
- [9] 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.
- [10] Koh K H, Lee C. A two-dimensional MEMS scanning mirror using hybrid actuation mechanisms with low operation voltage [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2012, 21(5): 1124-1135.
- [11] Yoo B W, Megens M, Chan T, *et al.* Optical phased array using high contrast gratings for two dimensional beamforming and beamsteering[J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12238-12248.
- [12] Chai J H, Chen F. Methodology of filter-type multi-dithering phase control for quasi parallel light interference[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(1): 014202.  
柴金华, 陈飞. 准平行光干涉的滤波型多抖动相控方法研究[J]. *物理学报*, 2018, 67(1): 014202.
- [13] Li J L, Shi S X, Wang G S, *et al.* Electro-control properties of a new type of rapid optical waveguide electro-optic scanner [J]. *Journal of Xidian University*, 2002, 29(6): 764-767.  
李家立, 石顺祥, 王广生, 等. 新型光波导阵列电光快速扫描器的馈电特性[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2002, 29(6): 764-767.
- [14] Xue J J, Liu C B, Li J, *et al.* Optimization design of optical waveguide phased array structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(s1): s123001.  
薛婧婧, 刘春波, 李瑾, 等. 光波导相控阵阵列结构的优化设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(s1): s123001.
- [15] Du S J, Zhang L X, Wang G X, *et al.* Low side lobe on-chip two dimensional optical phased array based on the hill climbing algorithm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(9): 0913001.  
杜书剑, 章羚璇, 王国玺, 等. 基于爬坡算法的片上低栅瓣二维光学相控阵[J]. *光子学报*, 2018, 47(9): 0913001.
- [16] Zhao K H, Zhong X H. *Optics: volume 1* [M]. Beijing: Peking University Press, 1984: 154-157, 162-171.  
赵凯华, 钟锡华. *光学: 上册* [M]. 北京: 北京大学出版社, 1984: 154-157, 162-171.
- [17] 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: Publishing House of Electronic Industry, 2009: 365-384.  
阿曼·亚里夫, 波奇·耶赫. *光子学: 现代通信光电子学* [M]. 陈鹤鸣, 施伟华, 汪静丽, 等, 译. 6版. 北京: 电子工业出版社, 2009: 365-384.
- [18] Li C D, Yan Y, Hu W T, *et al.* Theoretical study on the pumping efficiency of coupling system described by paraxial approximation[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, 15(8): 991-994.  
李传东, 鄢雨, 胡文涛, 等. 旁轴近似描述的耦合系统模式耦合效率研究[J]. *光学学报*, 1995, 15(8): 991-994.