

激光与光电子学进展

硅基光波导光学相控阵多光束形成方法

周恒超¹, 王春阳^{1*}, 王子硕², 刘雪莲¹, 肖博^{3**}¹西安工业大学信息感知与智能控制重点实验室, 陕西 西安 710021;²长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022;³西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 以激光雷达领域中的多目标探测为应用背景, 提出硅基光波导光学相控阵多光束形成方法, 介绍光波导光学相控阵的工作机理。在光束偏转原理的基础上, 采用子孔径法将总孔径阵列按需划分为多个连续的子孔径, 光束经过各子孔径后会受到不同的相位调制, 最终在出射端形成多个可偏转至不同角度的光束; 根据目标的威胁程度, 调整子孔径的阵元数目并对多光束进行均匀或非均匀划分, 实现各光束能量的合理分配。仿真结果表明, 远场衍射图案在期望的角度上出现预先设置比例的多个光束, 验证该方法的可行性和有效性, 而且该方法可极大地增加相控阵激光雷达的目标探测数目, 缩短扫描时间。

关键词 光学器件; 光波导; 光学相控阵; 多光束; 子孔径; 相位调制

中图分类号 TN252

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1123001

Multibeam Formation Method for Silicon-Based Optical Waveguide Phased Array

Zhou Hengchao¹, Wang Chunyang^{1*}, Wang Zishuo², Liu Xuelian¹, Xiao Bo^{3**}¹Key Laboratory of Information Perception and Intelligent Control, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China;²College of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;³College of Optoelectronic and Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

Abstract Based on the background of multitarget detection in the lidar field, a multibeam formation method for a silicon-based optical waveguide phased array is proposed and the working mechanism of the optical waveguide phased array is introduced. Based on the principle of beam deflection, the total aperture array is divided into several continuous subapertures by the subaperture method. After passing through each subaperture, the beam will be subjected to different phase modulation. Finally, various beams that can be deflected through different angles are formed at the exit end. According to the target threat degree, the number of array elements of the subaperture is adjusted and the multiple beams are divided uniformly or non-uniformly. Then, the energy of each beam can be reasonably distributed. Simulation results show that the far-field diffraction pattern appears at the desired angle, verifying the feasibility and effectiveness of the proposed method. Besides, the proposed method can significantly increase the number of targets detected by a phased array lidar and reduce the scanning time.

收稿日期: 2020-09-15; 修回日期: 2020-10-25; 录用日期: 2020-12-03

基金项目: 中国博士后科学基金(2020M673606XB)

*E-mail: wangchunyang19@163.com; **E-mail: 13610701380@126.com

Key words optical devices; optical waveguide; optical phased array; multibeam; subaperture; phase modulation

OCIS codes 230.7370; 040.1240; 120.5060

1 引言

光束偏转技术广泛应用于自由空间光通信和激光雷达的领域^[1-6]。光学相控阵(OPA)的概念源于传统的微波相控阵^[7-9],但比微波相控阵有着明显的优势,其可以使自由空间光束的偏转不再依赖于机械部件^[5-6],而且光束指向灵活,能够实现无惯性快速扫描^[7-10],因此光束的扫描方式正逐渐向相控阵的电子扫描方式发展。

硅基光波导光学相控阵是近十几年发展起来的一种新型光学相控阵技术^[2],其通过电控加热的方式来改变阵元的折射率,通过控制入射光的相位延迟可以使发射的光束只在指定方向上发生相互干涉,从而产生一束高强度光束,进而实现光束扫描^[3]。硅基光波导光学相控阵是光学相控阵的一个重要发展方向。

光学相控阵是相控阵激光雷达技术的研究重点之一,此后科研人员将相控阵的概念延伸到光波段^[11]。光学相控阵除了实现无机扫描外,另一个重要的优点是可以同时控制多个光束的发射^[12-14],即可分别实现搜索、识别以及多目标的实时跟踪等多种功能^[15-16]。微波相控阵中实现多波束的方法主要有三类:时间序列多波束、同时多波束和数字多波束^[17-18]。硅基光波导光学相控阵的机械结构和工作方式与微波相控阵存在很大差异,因此在硅基光波导光学相控阵中采用上述三种方法并不能很好地实现多光束,而且目前在硅基光波导光学相控阵中没有专门的多光束形成方法。在液晶光学相控阵中有两种多光束形成方法,即基于Butler矩阵的全孔径法和子孔径法^[12,18-19]。全孔径法的优点是各光束均利用了整个阵列孔径,而且各光束间有较高的隔离度,缺点是各光束是不独立的;子孔径法是将整个阵列孔径划分为多个独立的子孔径,使其形成各自的光束,该方法存在的问题是各光束均不能利用整个阵列孔径,但该方法的优点是各光束之间是独立可控的,光束形成快速,实现简单。本文在硅基光波导相控阵光束偏转原理的基础上,采用子孔径法实现多光束,最终仿真分析该方法的优缺点,验证该方法具有可行性,为硅基光波导光学相控阵在多目标探测雷达上的应用提供理论指导。

2 硅基光波导光学相控阵的工作机理

硅基光波导光学相控阵系统如图1所示,其主要由光纤阵列(FA)、多模干涉分束(MMI)系统、光波导阵列(移相区)、光栅衍射阵列以及驱动电压控制系统组成^[19]。FA是利用高精度的V型槽将光纤与光波导进行耦合,用于减少光波导与光纤耦合的对准损耗;激光光束经过耦合后进入波导相控阵中,MMI系统利用多级多模干涉分束器级联结构将入射光束分为 N 路, N 路光束分别与光波导阵列的 M 个($N=M$)波导阵元相连接;电控系统通过对移相器波导单元上的加热电极施加不同电压,用来改变相邻阵元间的温度差。由于硅具有热光效应,则相邻阵元间的光束会存在一个相位差,此过程称为热光相位调制过程^[20]。经过热光相位调制的光束由衍射阵列调整后输出并在远场相干叠加,从而实现光束的一维扫描。

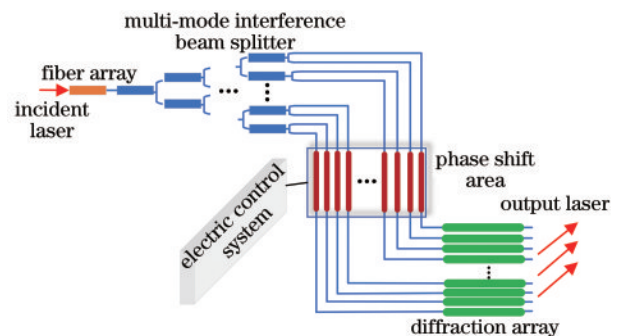


图1 硅基光波导光学相控阵系统

Fig. 1 Silicon-based optical waveguide phased array system

3 硅基光波导光学相控阵光束偏转原理

本文以一维线阵为例进行分析,一个带有 M 个阵元的硅基光波导光学相控阵光束偏转模型如图2所示,其中 $\Delta\varphi$ 为相邻阵元间的附加相位差,又称“阵内相位差”, d 为两个相邻波导阵元的间距, θ 为目标 O 所在角度。

假设各阵元在 O 点处的辐射场振幅均相等,则在衍射角 θ 的方向上,相邻两个波导阵元间的相位差为

$$\Phi = \varphi - \Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta - \Delta\varphi, \quad (1)$$

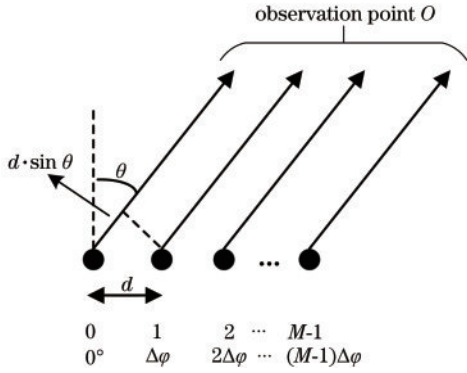


图2 硅基光波导光学相控阵的光束偏转模型

Fig. 2 Beam deflection model of silicon-based optical waveguide phased array

式中： φ 为由相邻阵元间的空间距离 d 产生的相位差，又称“空间相位差”； λ 为入射光束的波长。

当阵元之间的“空间相位差”与“阵内相位差”平衡时^[21]，此时衍射主极大，即波瓣图出现最大值，由(1)式可得

$$\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta - \Delta\varphi = \pm m2\pi, \quad (2)$$

式中： $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。在光学相控阵中将用于光束扫描的零级主极大 ($m=0$) 称为主瓣^[20]，也就是用于扫描的光束，此时 $\Delta\varphi$ 的表达式为

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

式中： θ_s 为扫描光束的空间扫描角。整理可得， θ_s 为

$$\sin \theta_s = \frac{\lambda}{2\pi d} \Delta\varphi. \quad (4)$$

由(4)式可知，若 $\Delta\varphi=0$ ，则光束不发生偏转，即指向阵列的法线方向 ($\theta_s=0$)；若 $\Delta\varphi \neq 0$ ，则光束就要偏转到 θ_s 方向。由(4)式表明，控制相邻阵元间的附加相位差 $\Delta\varphi$ 就能改变光束在空间中的指向，从而实现偏转扫描，这就是硅基光波导光学相控阵的光束扫描原理^[20-21]。

4 硅基光波导光学相控阵的多光束形成

在第3节光束偏转原理的基础上，采用子孔径法来实现对硅基光波导相控阵的多光束划分。子孔径法的划分基本原理：耦合进入波导的光束经

过多模干涉分束区后分为 N 路，并分别与光波导阵列的 M 路波导单元相连接。为了在出射端形成 K 路光束，此处将硅基光波导光学相控阵的总孔径划分出 K 个不同的逻辑子孔径，每个子孔径看作一个可进行单独控制的小型硅基光波导相控阵^[17]。由第3节提到的光束偏转原理可知，电控系统通过对 K 个子孔径各自对应的移相区域中的波导单元施加不同电压，可以使经过各个移相区域的光束分别受到不同的相位调制，从而满足各自扫描角度所对应的相位差。此时，出射端光束就会指向 K 个方向，从而形成多光束，划分情况如图3所示。为了更直观地理解子孔径法思想，图4为形成4个光束的硅基光波导光学相控阵的简化结构。

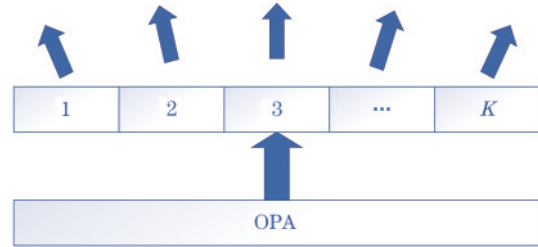


图3 子孔径法划分示意图

Fig. 3 Diagram of subaperture method division

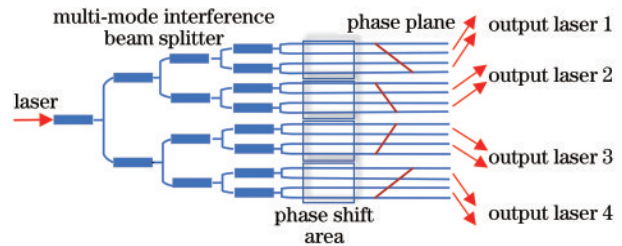


图4 4个光束的硅基光波导光学相控阵的简化结构

Fig. 4 Simplified structure of silicon-based optical waveguide phased array with four beams

将硅基光波导相控阵的总孔径分为 K 个子孔径，其相当于 K 个子相控阵，其中第 n 个子相控阵的阵元数为 S_n 。由(4)式可知，将各个子相控阵中相邻阵元的相位差设为 $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2, \dots, \Delta\varphi_n, \dots, \Delta\varphi_K$ 。此时，当以平面光入射且振幅为1时，硅基光波导光学相控阵出射端面的复振幅^[17]为

$$U(x) = \sum_{n=n_1}^{n_1+S_1-1} \left[w \left(\frac{x-nd}{d} \right) \cdot \exp(jn\Delta\varphi_1) \right] + \sum_{n=n_2}^{n_2+S_2-1} \left[w \left(\frac{x-nd}{d} \right) \cdot \exp(jn\Delta\varphi_2) \right] + \dots + \sum_{n=n_K}^{n_K+S_K-1} \left[w \left(\frac{x-nd}{d} \right) \cdot \exp(jn\Delta\varphi_K) \right], \quad (5)$$

式中: x 为光屏的横坐标; w 为矩形窗函数; n_1, n_2, \dots, n_K 分别为 K 个子孔径的起始阵元在总孔径中的位置, 即

$$\{n_1, n_2, \dots, n_K\} = \{0, (0 + S_1), \dots, (0 + S_1 + S_2 + \dots + S_{K-1})\}. \quad (6)$$

根据衍射理论中的傅里叶变换关系^[20-21], 当得到多光束时, 硅基光波导光学相控阵的远场复振幅为

$$U(\theta) = d \cdot \exp\left(-j \frac{1}{2} kd \sin \theta\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{1}{2} kd \sin \theta\right) \times (A + B + \dots + C + \dots + D), \quad (7)$$

其中

$$A = \frac{\sin\left[\frac{S_1}{2} X_1(\theta)\right]}{\sin\left[\frac{1}{2} X_1(\theta)\right]} \exp\left[-j \frac{S_1 - 1}{2} X_1(\theta)\right], \quad (8)$$

$$B = \frac{\sin\left[\frac{S_2}{2} X_2(\theta)\right]}{\sin\left[\frac{1}{2} X_2(\theta)\right]} \exp\left[-j \frac{S_2 - 1}{2} X_2(\theta)\right], \quad (9)$$

$$C = \frac{\sin\left[\frac{S_n}{2} X_n(\theta)\right]}{\sin\left[\frac{1}{2} X_n(\theta)\right]} \exp\left[-j \frac{S_n - 1}{2} X_n(\theta)\right], \quad (10)$$

$$D = \frac{\sin\left[\frac{S_K}{2} X_K(\theta)\right]}{\sin\left[\frac{1}{2} X_K(\theta)\right]} \exp\left[-j \frac{S_K - 1}{2} X_K(\theta)\right], \quad (11)$$

式中: $k = 2\pi/\lambda$; $X_n(\theta) = kd(\sin \theta - \sin \theta_n)$, 其中 θ_n 为第 n 个子相控阵出射光束的偏转角度。(7)~(11)式中的虚数项和常数项均不影响远场的光强分布, 忽略后可简化为

$$U'(\theta) = \operatorname{sinc}\left(\frac{1}{2} kd \sin \theta\right) (A + B + \dots + C + \dots + D). \quad (12)$$

(12) 式为硅基光波导光学相控阵多光束的远场振幅, 由 sinc 函数和周期函数两部分的乘积构成。sinc 函数包含单缝衍射因子(阵元因子)^[20], 其决定了强度分布的包络; 周期函数包含多缝干涉因子(阵列因子), 其决定了光强分布的相干特性。由(12)式可知, 阵元因子只与阵元间距 d 有关, 故对应的单缝衍射光强分布包络的形状在偏转过程中不发生变化; 阵列因子与 θ_n 有关, 这相当于在偏转过程中, 由多缝干涉引起的光强分布包络的形状发生了平移。因此, 在 sinc 函数所形成的单缝衍射的包络内会存在 K 个光强的极大值, 并且分别指向 K 个偏转方向, 依次为 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n, \dots, \theta_K$ 。根据划分方式可分为均匀划分和非均匀划分。

均匀划分是将硅基光波导光学相控阵的总孔径均匀划分出 K 个不同的逻辑子孔径, 也就是说,

K 个子孔径所对应的移相区域中的波导单元数目是相同的。最终, 经过相位调制后在出射端形成的 K 个光束在作用距离、扫描范围与扫描分辨率等指标上均完全相同。以双光束划分为例, 均匀划分情况如图 5 所示, 图中样式相同的阵元划分为同一子孔径中。

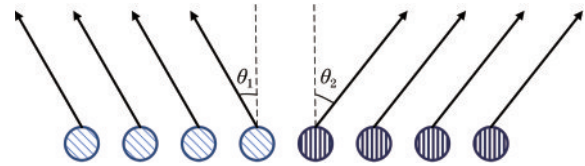


图 5 双光束的均匀划分示意图

Fig. 5 Diagram of uniform division of double beams

非均匀划分是将硅基光波导光学相控阵的总孔径划分出 K 个不同的逻辑子孔径, 与均匀划分不同的是, 此处 K 个子孔径所对应的移相区域中的波导单元数目是不同的。最终, 经过相位调制后在出射端形成的 K 个光束在作用距离和扫描分辨率等指标上也是不同的。双光束的非均匀划分情况如图 6 所示。

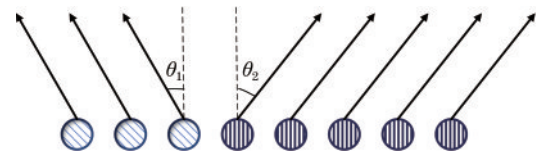


图 6 双光束的非均匀划分示意图

Fig. 6 Diagram of non-uniform division of double beams

针对上述两种划分情况提出一个概念, 即“比例系数”, 其表征了子孔径的阵元数占整个相控阵总阵元数的比例, 用 R 来表示, 则第 n 个子孔径的比例系数 R_n 满足

$$R_n \in (0, 1]. \quad (13)$$

所有子孔径的比例系数的集合构成比例向量 \mathbf{R} , 可表示为

$$\mathbf{R} = [R_1 R_2 \dots R_n \dots R_K], \quad (14)$$

$$R_1 + R_2 + \dots + R_n + \dots + R_K = 1. \quad (15)$$

扫描范围与扫描分辨率是光学相控阵中两个重要的参数指标。

光束扫描范围是指主瓣与正负一级栅瓣之间的角宽度^[20-22]。对于硅基光波导相控阵来说,主瓣与一级栅瓣之间的角距离为

$$\theta = \arcsin(\lambda/d)。(16)$$

由于孔径划分前后光波长 λ 与阵元中心间距 d 均未发生变化,因此光束扫描范围也不会改变。

扫描分辨率是指扫描范围与扫描光束宽度的比值^[20]。光束宽度是指主瓣最大值两侧功率密度下降到一半的两个方向之间的夹角,又称波束角或波束宽度。对于等间距光波导阵相控阵来说,光束宽度的计算公式^[21]为

$$\theta_{BW} = \frac{0.886\lambda}{Nd \cos \theta}。(17)$$

将子孔径划分过程中的比例系数 R_n 代入(21)式,可得

$$\theta_{BW} = \frac{0.886\lambda}{NR_n d \cos \theta}。(18)$$

由(9)式可以看到,孔径划分后子孔径所对应的光束宽度与比例系数 R_n 成反比,也就是说,划分的子孔径数越多, R_n 值越小,对应的光束宽度就越大,因此扫描分辨率会随之降低。

5 仿真与分析

以波导宽度为 500 nm、加热区域长度为 400 μm 、 $N=200$ 、 $\lambda=1550 \text{ nm}$ 和 $d=5 \mu\text{m}$ 的硅基光波导光学相控阵为例,对双光束、三光束和四光束进行划分模拟,仿真各自的均匀与非均匀划分情况并对其进行分析。表 1 为仿真参数设置, R_u 与 R_{nu} 分别为均匀与非均匀划分情况下的比例向量,图 7 为仿真结果。

表 1 均匀与非均匀划分的参数设置

Table 1 Parameter setting for uniform and non-uniform division

K	R_u	R_{nu}	Angle 1 / (°)	Angle 2 / (°)	Angle 3 / (°)	Angle 4 / (°)
2	[1/2 1/2]	[0.4 0.6]	1	-1	/	/
3	[1/3 1/3 1/3]	[0.2 0.3 0.5]	1	-1	2	/
4	[1/4 1/4 1/4 1/4]	[0.1 0.2 0.3 0.4]	1	-1	2	-2

从图 7 可以看到,远场的衍射图案中出现多个偏转光束,且每个光束基本出现在所期望的角度上;图 7 中非均匀划分情况下,远场衍射图案中多光

束的能量以预先设定的比例出射,表明在硅基光波导光学相控阵中采用子孔径法可以形成多个偏转光束,通过设定比例系数实现对多光束能量的分配

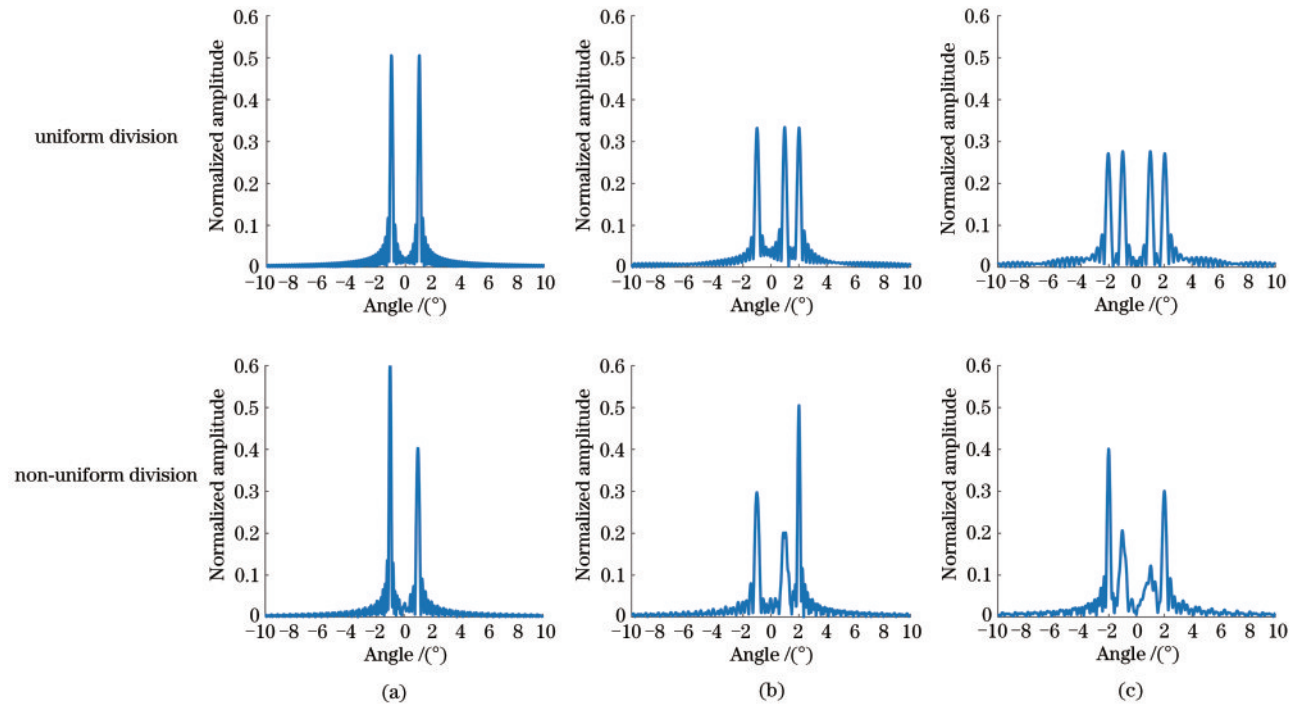


图 7 子孔径法下多光束形成的仿真结果。(a) 双光束; (b) 三光束; (c) 四光束

Fig. 7 Simulation results of multi-beam formation under subaperture method. (a) Double beams; (b) three beams; (c) four beams

是有效的且可行的;比例系数 R_n 值越小,即阵元数越少,则对应的远场辐射光束宽度越宽,这与之前的理论分析结果一致。

选取小的坐标范围,将单光束、双光束与三光束均匀划分的仿真结果进行对比,如图 8 所示。从图 8 可以看到,子孔径划分的过程中,当比例系数 R_n 值分别取 1/2 和 1/3 时,对应的光束宽度明显增大,且均大于 $R_n=1$ 所对应的单光束宽度。综上可以看到,采用子孔径法形成的多光束会降低光束的扫描分辨率。

选取大的坐标范围,对双光束与四光束的均匀划分仿真结果进行对比,如图 9 所示,其中相同序号的光束源于同一子孔径。从图 9 可以看到,从双光束到四光束的形成,每个过程中光束的扫描范围未发生改变,始终保持单光束情况下的扫描范围,由 $\theta = \arcsin(\lambda/d)$ 可得最大扫描范围均为 36.12° ,这

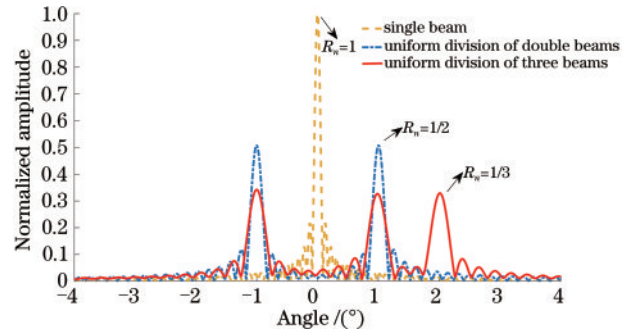


图 8 单光束与双光束和三光束在均匀划分情况下的仿真结果
Fig. 8 Simulation results of single beam, double beams and three beams under condition of uniform division

与理论结果吻合;随着划分光束数目的增多,扫描视场内会出现越来越多的栅瓣,原因在于其他扫描光束的偏转会导致其栅瓣进入扫描视场中。在以后的实际应用中,此问题可采用优化算法压缩甚至消除栅瓣来解决。

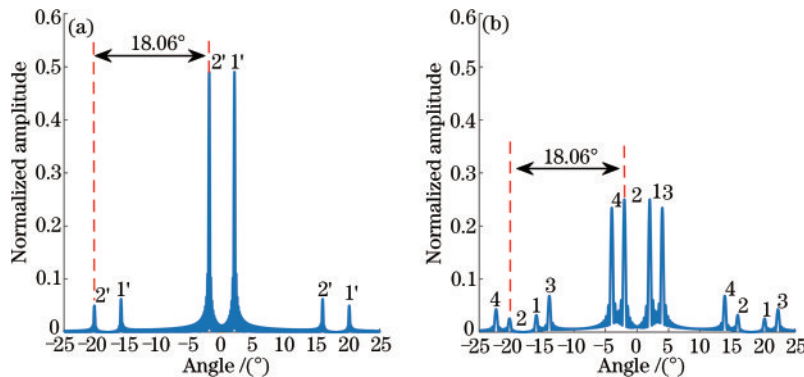


图 9 不同光束在均匀划分情况下的仿真结果。(a) 双光束;(b) 四光束

Fig. 9 Simulation results of different beams under condition of uniform division. (a) Double beams; (b) four beams

通过上述分析可知,在硅基光波导光学相控阵中采用子孔径法实现多光束是切实可行的。均匀划分的情况下,由于每个光束所对应的子孔径的阵元数目相同,因此出射端所形成的多个光束的作用距离、扫描范围及扫描分辨率完全相同,所以均匀划分手段所形成的多个光束适用于多目标探测。在激光雷达领域中,多光束同时扫描可以大大缩短目标探测时间,加快搜索速度。非均匀划分的情况下,由于每个光束所对应的子孔径的阵元数目不相同,所以形成的多个光束的作用距离和扫描分辨率也不相同,为此非均匀划分手段所形成的多个光束适用于跟踪不同威胁程度的目标。对于威胁性较高的目标可给予划分较多的阵元,用来提高扫描光束的作用距离与扫描分辨率,进而保证重点目标的跟踪可靠性与跟踪精度。

6 结 论

硅基光波导光学相控阵具有扫描分辨率高、体积小和全固态化等突出优点,满足激光雷达和空间光通信技术对光束扫描设备的要求,而且具有极高的研究价值。本文从硅基光波导光学相控阵的光束偏转原理出发,以 $N=200$ 、 $\lambda=1550\text{ nm}$ 和 $d=5\text{ }\mu\text{m}$ 的光波导相控阵为例,采用子孔径法对其进行模拟仿真,实现了单光束向二~四个光束的均匀与非均匀划分。当阵元数量增大时,可划分的多光束数目也随之增大,此方法在不改变光束扫描范围的前提下,以牺牲扫描分辨率为代价,极大地增加了光学相控阵多目标探测的数目;当扫描空域的大小一定时,该方法可缩短目标探测时间;在实战环境中,根据目标的重要或威胁程度,采用非均匀划分手段对

子孔径的尺寸进行合理分配,进而可对扫描光束的作用距离与扫描分辨率进行调整,这对进一步研究适用于激光雷达等领域的硅基光波导光学相控阵提供了技术指导。

参 考 文 献

- [1] van Acoleyen K, Komorowska K, Bogaerts W, et al. One-dimensional off-chip beam steering and shaping using optical phased arrays on silicon-on-insulator [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(23): 3500-3505.
- [2] Jin Y D, Yan A M, Hu Z J, et al. Research progress of optical waveguide phased array scanner [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(8): 080002.
金亚东, 闫爱民, 胡志娟, 等. 光波导阵列相控阵扫描技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(8): 080002.
- [3] Yan A M, Zhi Y N, Sun J F, et al. Recent development of optical phased array scanning technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(10): 102801.
闫爱民, 职亚楠, 孙建锋, 等. 光学相控阵扫描技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(10): 102801.
- [4] Yan Y W, An J M, Zhang J S, et al. Chip of phase control arrays based on silica on silicon [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(4): 0423001.
颜跃武, 安俊明, 张家顺, 等. 硅基二氧化硅波导阵列相位控制芯片[J]. *光子学报*, 2019, 48(4): 0423001.
- [5] Doylend J K, Heck M J R, Bovington J T, et al. Two-dimensional free-space beam steering with an optical phased array on silicon-on-insulator [J]. *Optics Express*, 2011, 19(22): 21595-21604.
- [6] Hu J, Du S P, Guo H Y. Research progress on beam scanning based on liquid crystal optical phased array [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(11): 110002.
胡婕, 杜升平, 郭弘扬. 基于液晶光学相控阵的光束扫描研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(11): 110002.
- [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] Ye J Y, Li L J, Chen W, et al. Study on the characteristics of novel optical phased array based on wave-guide [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6): 0620003.
叶佳雨, 李立京, 陈文, 等. 一种新型的光波导光学相控阵的特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(6): 0620003.
- [9] Ren Y Z, Chai J H. Research reviews of optical waveguide phased array technology [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2019, 39(5): 1-5, 83.
任远中, 柴金华. 光波导相控阵技术研究综述[J]. *舰船电子工程*, 2019, 39(5): 1-5, 83.
- [10] Kwong D, Hosseini A, Covey J, et al. On-chip silicon optical phased array for two-dimensional beam steering [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4): 941-944.
- [11] Ni S X. Review on development of the new imaging laser radar systems [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(S1): 732-736.
倪树新. 新体制成像激光雷达发展评述[J]. *激光与红外*, 2006, 36(S1): 732-736.
- [12] Lin Y X. Multi-beam optical phased array technology based on liquid crystal [J]. *Optical Communication Technology*, 2018, 42(9): 47-50.
林贻翔. 液晶多波束光学相控阵技术[J]. *光通信技术*, 2018, 42(9): 47-50.
- [13] Sun J, Hosseini E, Yaacobi A, et al. Two-dimensional apodized silicon photonic phased arrays [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(2): 367-370.
- [14] Yan Z Q, Guo T, Wu J, et al. Laser multi-target indication technique based on liquid crystal optical phased array and volume holographic grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(3): 0323001.
闫宗群, 国涛, 吴健, 等. 基于液晶相控阵和体全息光栅的激光多目标指示技术[J]. *光学学报*, 2020, 40(3): 0323001.
- [15] 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.
- [16] Zhang N, Guo X Y, Bai P. Application of multi-beamforming technology in phased array radar [J]. *Telecom World*, 2015(15): 227.
张楠, 郭晓阳, 白鹏. 多波束形成技术在相控阵雷达中的应用[J]. *通讯世界*, 2015(15): 227.
- [17] 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.
- [18] Xiao F. Research on key technology of liquid crystal optical phased array [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
肖锋. 液晶光学相控阵关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [19] Chen H, Wang X F. Independent controllable transmission multi-beam forming technology [J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2011, 30(4): 23-26.
陈昊, 王先发. 独立可控的发射多波束形成技术[J]. *飞行器测控学报*, 2011, 30(4): 23-26.
- [20] Li Y. Silicon-based optical phased array theory research and device design[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
李岩. 硅基光学相控阵理论研究及器件设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [21] Li J L. Study on waveguide optical phased array technology[D]. Xi'an: Xidian University, 2005.
李家立. 光波导光学相控阵技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- [22] Ren Y Z, Chai J H. Scanning characteristics of fiber-optic interferometric phased array based on phase modulation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(15): 152502.
任远中, 柴金华. 基于相位调制的光纤干涉型光学相控阵扫描特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(15): 152502.