

基于混合蝙蝠算法的低栅瓣光学相控阵

李文磊², 陈敬业², 时尧成^{1,2*}¹ 机电动态控制重点实验室, 陕西 西安 710065;² 浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027

摘要 为了实现大角度的光束扫描, 提出一种基于混合蝙蝠算法的非均匀间隔光学相控阵来对栅瓣进行压缩。将遗传算法的算子与传统蝙蝠算法相结合, 在相邻阵元最小间隔为 $2\ \mu\text{m}$, 工作波长为 $1550\ \text{nm}$ 的情况下, 优化得到的硅基 64 阵元一维非均匀间隔光学相控阵实现了 80° 的扫描范围, 边模抑制比优于 $-8\ \text{dB}$, 最大远场光束发散角为 0.3° , 并且讨论了优化结果对波长变化的不敏感性。最后, 以 8×8 的二维矩形平面阵列为例, 演示了二维非均匀间隔光学相控阵的优化方法。

关键词 集成光学; 光学相控阵; 非均匀间隔阵列; 边模抑制比; 混合蝙蝠算法

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1813001

Optical Phased Array with Low Grating Lobes Optimized by Using Hybrid Bat Algorithm

Li Wenlei², Chen Jingye², Shi Yaocheng^{1,2*}¹ Science and Technology on Electromechanical Dynamic Control Laboratory, Xi'an, Shaanxi 710065, China;² College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract A grating-lobe-suppressed aperiodic optical phased array optimized by the hybrid bat algorithm is proposed to achieve a large beam scanning range. After the operators of the genetic algorithm are combined with the traditional bat algorithm, the silicon-based 64-unit one-dimensional aperiodic optical phased array is optimized at a wavelength of $1550\ \text{nm}$ and a minimum pitch of $2\ \mu\text{m}$. The side mode suppression ratio is better than $-8\ \text{dB}$ in the 80° scanning range, and the maximum far-field beam divergence angle is 0.3° . The insensitivity of the optimized results to wavelength change is also discussed. With an 8×8 two-dimensional rectangular planar array as an example, the optimization method of the two-dimensional aperiodic optical phased array is demonstrated.

Key words integrated optics; optical phased array; aperiodic array; side mode suppression ratio; hybrid bat algorithm

OCIS codes 010.3640; 130.0250; 150.1135

1 引言

光束扫描是实现激光雷达和自由空间光通信的关键技术之一, 光学相控阵 (optical phased array, OPA) 作为一种固态激光扫描方式, 具有扫描精度高、扫描速度快、可靠性强等特点, 近年来受到人们的广泛关注^[1-5]。特别是随着硅基光子学技术的飞

速发展, 片上集成波导相控阵成为了低成本、小型化、全固态激光雷达的一种理想解决方案^[6-7]。但是受到阵元间耦合串扰以及天线和路由结构尺寸的限制^[8-9], 光学相控阵的阵元间隔达到半波长以内, 导致其辐射远场产生了栅瓣, 影响系统对主瓣的分辨, 这也是光学相控阵进一步扩大扫描范围的主要障碍。

收稿日期: 2020-12-07; 修回日期: 2021-02-15; 录用日期: 2021-04-13

基金项目: 重点实验室基金(6142601180303)、国家自然科学基金(61922070)

通信作者: *yaocheng@zju.edu.cn

要想压缩栅瓣、扩大光学相控阵的扫描范围,最直接的方法就是减小光学相控阵的阵元间隔,而减小阵元间隔将带来严重的耦合串扰。哥伦比亚大学的研究团队提出了一种非均匀宽度的光学相控阵^[10],其利用不同宽度波导的相位失配来抑制阵元间的耦合串扰,成功实现了半波长间隔的一维光学相控阵,使得在 160° 的视场角内无栅瓣产生。同样基于相位失配的思想,上海交通大学的研究小组提出了一种基于亚波长间隔弯曲波导阵列的一维光学相控阵结构^[11],成功实现了 64° 的视场角。利用相位失配抑制阵元间串扰的方法可以改变波导阵元的有效折射率以及群折射率,导致不同波导光栅天线的出射角度难以匹配对齐^[12],因此在设计出新型的天线结构之前,该方法还无法真正进入工业应用。

另外一种抑制栅瓣、扩大扫描范围的方法是使用非均匀间隔排布的光学相控阵^[13-18]。对于非均匀间隔光学相控阵,栅瓣不满足干涉相长条件,光场被分散到背景中。虽然栅瓣的光强没有被主瓣重新利用,但是该方法可以直接应用于二维扫描光学相控阵,例如英特尔研究小组通过非均匀间隔波导光栅阵列,实现了 $80^\circ \times 17^\circ$ 的无混叠扫描范围^[17];加州理工大学的研究小组利用遗传算法优化得到的稀疏

二维阵列有效抑制了栅瓣,使得扫描范围扩大到 $16^\circ \times 16^\circ$ ^[18]。但之前的许多研究只是针对阵列因子进行优化^[15-16],或者将单个阵元的远场简单假设为高斯分布^[14],并且传统智能算法会存在提前收敛到局部最优的情况^[19]。

本文提出一种基于混合蝙蝠算法的非均匀间隔光学相控阵优化方法。混合蝙蝠算法针对传统蝙蝠算法(BA)局部搜索能力弱的问题,融合了遗传算法(GA)的算子,提升了算法的性能。利用该方法,本文成功实现了在较大阵元间隔范围内的栅瓣抑制。此外,本文还比较了不同优化角度和扫描范围以及边模抑制比(side mode suppression ratio, SMSR)的关系,分析了所提出的优化方法与二维扫描光学相控阵方法的兼容性。

2 基本原理与算法模型

2.1 光学相控阵的基本原理

光学相控阵的概念是由微波阵列天线类比演变而来,其基本思想是将光学天线按阵列排布,通过调节相邻阵元的输出相位差,使得输出光的波前发生倾斜,从而实现光束偏转。对于 N 单元一维光学相控阵,其结构如图 1 所示。

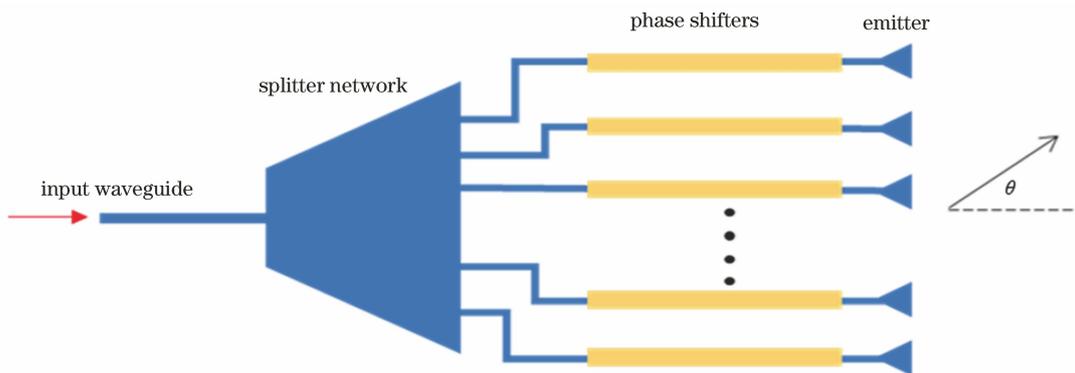


图 1 一维光学相控阵结构示意图

Fig. 1 Schematic of the one-dimensional optical phased array

输入的激光经过分光网络分成独立的 N 路,每一路光信号经过相移器调制后被路由到间隔为 d 的天线阵列,最后经光学天线辐射至自由空间进行干涉。对于利用绝缘衬底上的硅(silicon-on-insulator, SOI)平台制作的光学相控阵,分光网络通常是由级联的多模干涉耦合器(multi-mode interferometer, MMI)或者 Y 分支组成,同时由于硅材料具有很高的热光系数^[20] ($dn/dT \approx 1.8 \times 10^{-4}$ RIU/K),因此利用简单的加热电极结构便可制成高效的相移器。

根据方向图定理,光学相控阵的远场分布 $E(\theta)$ 可以表示为阵元因子 $S(\theta)$ 和阵列因子 $F(\theta)$ 的乘积,其中阵元因子表示单个阵元工作时的远场分布情况,而阵列因子则与天线阵元的排布以及每个天线阵元辐射光信号的相位有关。

在扫描过程中,光学相控阵远场分布受阵元因子包络的调制^[9]。单个阵元的发射面积越小,其阵元因子的远场发散角越大,能够覆盖的远场空间越大,因此更加有利于实现大的扫描范围;单个阵元的发射面积越大,其阵元因子的远场发散角越小,导致

其主瓣偏离中心角度时光强迅速下降。因此,光学相控阵在进行大角度扫描时,主瓣强度会产生明显的衰减,导致 SMSR [$R_{\text{SMSR}} = 10 \times \lg_{10}(I_{\text{sidelobe}}/I_{\text{mainlobe}})$], 其中 I_{sidelobe} 表示旁瓣的光强大小, I_{mainlobe} 表示主瓣的光强大小]减小。由此可见,阵元因子是光学相控阵扫描范围的一个重要影响因素。

对于一维光学相控阵,其阵列因子为

$$F(\theta) = \sum_{n=1}^N \omega_n \cdot \exp[j2\pi/\lambda(x_n \sin \theta)], \quad (1)$$

式中: λ 表示工作波长; x_n 表示第 n 个阵元的位置; N 表示光学相控阵的阵元总数; θ 表示远场在极坐标中的极角; $\omega_n = |\omega_n| \exp(j\varphi_n)$ 表示每个阵元出射光强的复振幅; j 表示虚数单位。由于本文不涉及幅度加权,因此令 $|\omega_n| = 1$ 。

根据(1)式,可以得出光学相控阵远场主极大即主瓣和栅瓣的位置

$$\sin \theta = \left(m + \frac{\Delta\varphi}{2\pi}\right) \frac{\lambda}{d}, \quad (2)$$

式中: m 表示栅瓣的级次; $\Delta\varphi$ 表示相邻两个阵元的相位差。从(2)式可以看出,通过改变 $\Delta\varphi$ 能够实现主瓣光束指向偏转。对于波导光栅这种阵元因子中心对称的结构^[12], 当 $\Delta\varphi = \pi$ 时,主瓣和栅瓣的光强相等,无法将其分辨,这就限制了光学相控阵扫描视场的扩大。要想实现 180° 无栅瓣扫描,需要天线阵元的间隔小于 $\lambda/2$ 。

2.2 混合蝙蝠算法

蝙蝠在飞行觅食过程中不断发出声波脉冲,然后根据接收的回波信号动态调整自己的飞行方向,同时在接近目标的过程中蝙蝠会增加脉冲的发射频率并减小脉冲的响度。受蝙蝠搜索定位方式的启发,剑桥大学的 Yang^[21] 在 2010 年提出了一种新型的群智能优化算法——蝙蝠算法。该算法具有模型简单、收敛速度快、易于实现等优点,受到了人们的广泛关注。每个蝙蝠个体代表一个求解变量维度,求最优解的过程就是迭代求蝙蝠最优位置的过程。

蝙蝠算法包括两个关键操作:蝙蝠个体位置的更新以及脉冲发射频率和响度的迭代。对于一个 N 维解空间,蝙蝠个体的位置 \mathbf{x}_i 是一个 N 维的向量,其更新规则为

$$\begin{cases} \mathbf{x}_i^{\text{new}} = \mathbf{x}_i^{\text{old}} + \mathbf{v}_i^{\text{new}} \\ \mathbf{v}_i^{\text{new}} = \mathbf{v}_i^{\text{old}} + (\mathbf{x}_i^{\text{old}} - \mathbf{x}_{\text{best}}) \times f_i \\ f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min}) \times \beta \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $\mathbf{x}_i^{\text{new}}$ 、 $\mathbf{x}_i^{\text{old}}$ 分别表示蝙蝠个体 i 更新前后的位置; $\mathbf{v}_i^{\text{new}}$ 、 $\mathbf{v}_i^{\text{old}}$ 分别表示蝙蝠个体 i 更新前后的飞行速

度; \mathbf{x}_{best} 表示当前的全局最优位置; f_i 表示蝙蝠个体 i 发出的脉冲频率; f_{\max} 和 f_{\min} 分别表示蝙蝠发出脉冲的最大频率和最小频率,需要根据解的范围来选择; β 表示区间 $[0, 1]$ 内的随机数。为了获得更快的收敛速率,蝙蝠算法中还设计了一种在当前最优解附近的局部搜索方式,对应的蝙蝠 i 位置的更新规则为

$$\mathbf{x}_i^{\text{new}} = \mathbf{x}_{\text{best}} + \epsilon \bar{A} \mathbf{I}, \quad (4)$$

式中: ϵ 表示 $[-1, 1]$ 之间的随机数; \bar{A} 表示当前所有蝙蝠个体的平均脉冲响度; \mathbf{I} 为单位向量。

与生物学蝙蝠搜索方式一样,为了使得求解定位更加精确,蝙蝠算法也会在求解的过程中减小脉冲响度并且增大脉冲发射频率,其更新规则为

$$\begin{cases} r_i^{t+1} = r_i^0 [1 - \exp(-\gamma t)] \\ A_i^{t+1} = \alpha A_i^t \end{cases}, \quad (5)$$

式中: r_i^{t+1} 和 r_i^t 表示蝙蝠个体 i 在 t 和 $t+1$ 迭代步的脉冲发射频率; r_i^0 为蝙蝠个体 i 的最大脉冲发射频率; A_i^{t+1} 和 A_i^t 分别表示蝙蝠个体 i 在 t 和 $t+1$ 迭代步的脉冲响度; γ 为大于 0 的常数; α 为区间 $[0, 1]$ 内的常数。

常见的群智能优化算法大都存在局部收敛的问题,蝙蝠算法也不例外^[19]。为了避免陷入局部最优,可以在蝙蝠算法的基础上引入遗传算法的算子——选择、交叉和变异。在每次迭代过程中,根据个体适应度的大小,选取较优的个体传入下一代,然后子代个体间两两进行交配重组,并且每个个体以 P_m 的变异率进行染色体变异,最后生成新的种群。遗传算子的加入能够增加蝙蝠算法种群的多样性,从而提高算法的搜索能力以及跳出局部最优的概率。

为了获得非均匀间隔光学相控阵的最优排布方式,本文采用混合蝙蝠算法。该算法在蝙蝠算法的基础上引入遗传算法中所用的选择、交叉以及变异操作,改善了蝙蝠算法的局部搜索能力^[22-23],其流程如图 2 所示。

根据图 2 所示的流程,混合蝙蝠算法实现非均匀间隔光学相控阵优化的具体步骤如下:

1) 参数初始化。光学相控阵阵元间隔的排列方式对应蝙蝠个体的位置 \mathbf{x}_i , 起始需要确定的算法参数有种群规模 p_{size} 、迭代次数 G 、蝙蝠种群的起始位置 \mathbf{x}_i 、初始脉冲发射频率 r_i^0 、初始脉冲响度 A_i^0 、脉冲响度损耗因子 α 、脉冲发射频率增大因子 γ 、脉冲频率的最大、最小值 f_{\max} 和 f_{\min} , 以及与遗传算

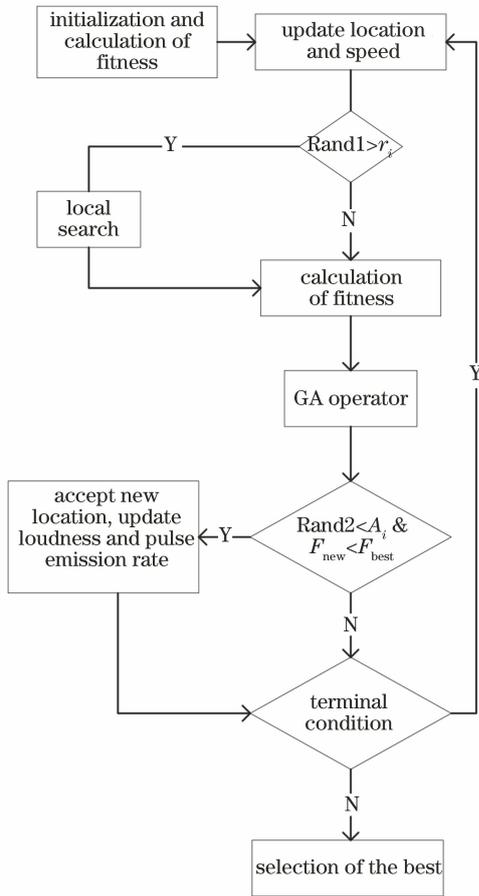


图 2 混合蝙蝠算法的流程

Fig. 2 Flowchart of the hybrid bat algorithm

法相关的变异率 P_m 。在优化非均匀间隔光学相控阵时,选取 SMSR 作为适应度函数,计算初始随机种群的适应度值,选出最优个体的位置 \mathbf{x}_{best} 。

2) 根据(3)式更新蝙蝠个体的位置 \mathbf{x}_i 。

3) 随机生成一个 $[0, 1]$ 区间的随机数 Rand1 , 若 Rand1 大于当前蝙蝠个体的脉冲发射频率 r_i , 则根据(4)式进行局部搜索重新更新蝙蝠个体的位置 \mathbf{x}_i 。判断新的位置是否满足解的边界条件,若超出边界,则在解空间随机生成一个新解。

4) 计算新位置处的蝙蝠个体适应度。

5) 根据步骤 4) 计算得到的适应度,执行遗传算法算子操作,包括选择、交叉以及变异。

6) 随机生成一个 $[0, 1]$ 区间的随机数 Rand2 , 若 Rand2 小于当前蝙蝠个体的脉冲响度 A_i 并且当前个体的适应度值 F_i 小于当前最优个体的适应度值 F_{best} , 则蝙蝠个体 i 接受新的位置,并根据(5)式更新脉冲发射频率 r_i 和脉冲响度 A_i 。

7) 选出新的最优个体位置 \mathbf{x}_{best} , 判断是否达到最大迭代次数 G , 若否,则转到步骤 2); 若是,则输出最优解 \mathbf{x}_{best} 。

3 仿真计算与结果分析

根据前文对基本原理的分析,光学相控阵远场分布同时受到阵元因子和阵列因子的影响,而混合蝙蝠算法需要在给定的阵元间隔范围内对阵列分布进行优化。因此,在执行优化算法前,需要先确定单个阵元的远场分布以及阵元间隔的最大值和最小值。

3.1 阵元因子

选取基于 SOI 平台的端面发射一维光学相控阵作为优化对象,其中芯层硅的厚度为 220 nm,上包层和氧化物缓冲层(buried oxide, BOX)的材料均为二氧化硅,假设其厚度为无穷大。出射单模波导的宽度为 500 nm,工作波长为 1550 nm,利用 Lumerical FDTD solution 软件仿真得到单个阵元的远场分布包络,如图 3 的虚线所示。由于所研究的相控阵是一维阵列,因此图 3 只给出了横向的归一化场强分布。

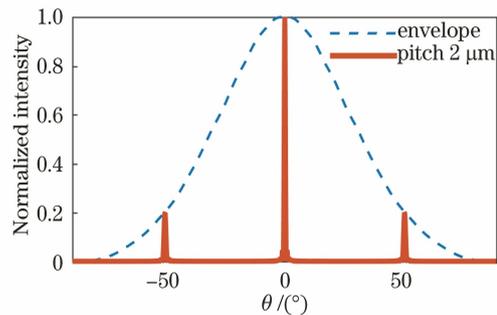


图 3 阵元因子包络(虚线)以及 $2 \mu\text{m}$ 均匀间隔光学相控阵的远场分布(实线)

Fig. 3 The element envelope (dotted line) and the far-field distribution of the uniform optical phased array with $2 \mu\text{m}$ pitch (full line)

为了与非均匀间隔光学相控阵远场效果作对比,本研究同时计算了波导间隔为 $2 \mu\text{m}$ 的 64 阵元一维均匀间隔光学相控阵的远场分布,如图 3 实线所示。可以看到,在 $\theta = \pm 50^\circ$ 的地方均出现明显的栅瓣,这也就限制了该相控阵的扫描范围为 50° 。

3.2 阵元间隔范围

根据耦合模理论,两个平行波导间的耦合强度可以用公式 $\kappa = (\beta_e - \beta_o)/2$ 来计算^[24],其中 β_e 和 β_o 分别表示超模理论中偶对称模和奇对称模的传播常数。对于所选取的单模波导阵列,仿真了相邻波导间隔 d 与耦合强度 κ 的关系,结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出,当波导间隔大于 $1.4 \mu\text{m}$ 时,相邻两波导的耦合强度几乎不随波导间隔的增大而

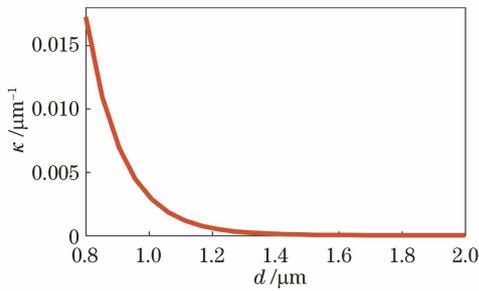


图 4 波导耦合强度与波导间隔的关系

Fig. 4 Relationship between waveguide coupling strength and waveguide pitch

变化,因此波导间隔应不小于 $1.4 \mu\text{m}$ 。但考虑到加工精度和容差的问题,本文选取的阵元最小间隔为 $2 \mu\text{m}$;同时为了不使整个器件尺寸过大,选择的最大阵元间隔为 $7 \mu\text{m}$ 。

3.3 混合蝙蝠算法优化结果及分析

为了获得大视场、低栅瓣的光学相控阵,对 64 通道端面发射一维光学相控阵的排布方式进行优化。混合蝙蝠算法中蝙蝠算法部分的种群个体数量、最大脉冲发射频度、最大脉冲响度、最大脉冲频率、最小脉冲频率分别设置为 50、0.9、0.9、1、0。为了方便与蝙蝠算法结合,遗传算法部分采用了实数编码方式,并根据轮盘赌规则进行选择操作,交叉则采用离散重组的方式,变异率为 0.02。由于在执行优化算法的过程中,只能在某一特定的偏转角度下寻找最优解,因此分别在 0° 、 20° 和 40° 偏转角的情况下对非均匀间隔阵列的排布进行优化。这三组解在 $0^\circ \sim 50^\circ$ 范围内进行光束扫描时,其 SMSR 的变化情况如图 5 所示。可以看出,在 0° 偏转角下执行优化算法时,能够得到相对更低的 SMSR (-15.61 dB),但是其在进行大角度光束扫描的过程中 SMSR 迅速降低;而在 40° 偏转角度下执行优化算法时,虽然

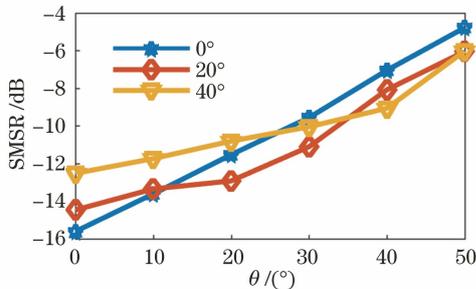


图 5 分别在 0° 、 20° 和 40° 优化得到的 64 单元一维 OPA 的扫描性能

Fig. 5 Beam steering performance of 64 waveguide 1D OPA where the waveguide placement was optimized at the angle of 0° , 20° , and 40°

在整个 50° 的扫描范围内得到的最优 SMSR 仅为 -12.51 dB ,但在大角度扫描过程中,SMSR 变化相对较小。因此,在大角度偏转情况下优化阵元间隔能够获得更大的扫描范围,而在小角度偏转情况下优化阵元排布则有利于得到更低的栅瓣水平。

为了得到相对较低的 SMSR 以及相对较大的扫描范围,最后选择的优化偏转角为 30° 。从第 1 个阵元到第 64 个阵元的相邻阵元间隔 (spacing number) 分布如图 6 所示。图 7 所示为优化后的 64 阵元一维非均匀间隔光学相控阵的远场分布情况,对比图 3 和图 7 可以看出,所采用的混合蝙蝠算法很好地抑制了栅瓣的产生,得到的 SMSR 小于 -13 dB ,光束发散角为 0.23° 。为了验证混合蝙蝠算法的有效性以及分析性能的提升效果,将混合蝙蝠算法与蝙蝠算法以及遗传算法的优化结果进行比较,其中蝙蝠算法和遗传算法中涉及的参数均与混合遗传算法中相应的参数保持一致,3 种优化算法的收敛曲线如图 8 所示。可以看出,混合遗传算法得到了最好的优化结果。

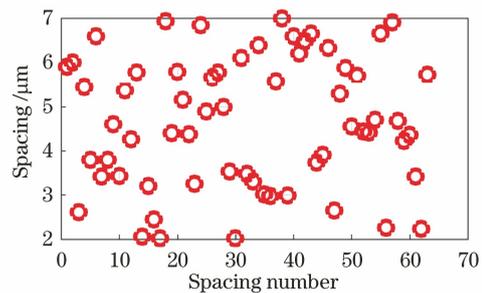


图 6 优化得到的光学相控阵的天线分布情况

Fig. 6 Antenna arrangement of the optimized OPA

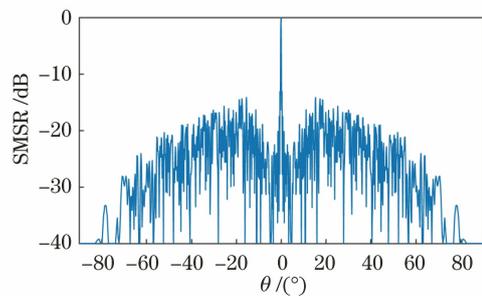


图 7 一维非均匀间隔 OPA 的远场分布

Fig. 7 The far-field pattern of the 1D aperiodic OPA

优化得到的非均匀间隔光学相控阵在不同偏转角情况下的远场分布情况,如图 9 所示。在 0° 、 $\pm 20^\circ$ 、 $\pm 40^\circ$ 的偏转角度下, SMSR 分别为 -13.09 dB 、 -12.23 dB 、 -8.03 dB ,光束发散角分别为 0.23° 、 0.24° 、 0.30° 。

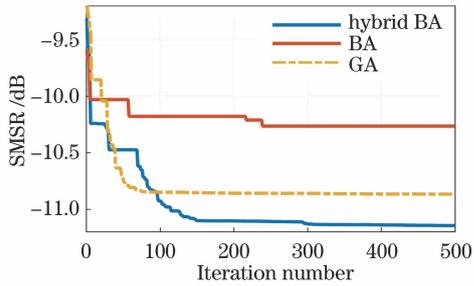


图 8 三种优化方法的收敛曲线对比

Fig. 8 Comparison of convergent curves of three optimization methods

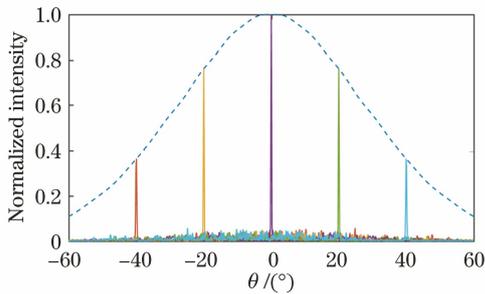


图 9 优化得到的一维非均匀间隔 OPA 大角度光束扫描结果

Fig. 9 Beam scanning results obtained by the optimized 1D aperiodic OPA

阵元因子呈高斯线型,导致在大角度扫描时单个阵元的远场包络会降低主瓣的水平而放大相对更靠近中心的栅瓣,栅瓣抑制比明显下降,因此在设计阵元尺寸时,为了获得更大的扫描范围,应尽量减小波导的宽度,使得单个阵元的远场覆盖范围更大。

目前片上二维光束扫描的实现方案主要包括利用相位加波长调制的一维排布光学相控阵^[17]以及二维排布光学相控阵^[18]两种。一维排布光学相控阵将波导弱耦合光栅平行排布,在垂直于波导传输的方向利用相位调制实现光束偏转,而在平行于波导传输的方向,则通过调节光波长来改变波导光栅的出射角度。因此,一维非均匀间隔光学相控阵的性能对于波长变化的灵敏度也是需要重点考虑的因素。对于优化得到的 64 阵元一维非均匀间隔光学相控阵,当工作波长分别为 1500 nm 和 1600 nm,偏转角为 30° 时, SMSR 从 -10.958 dB 变为 -10.998 dB,光束发散角均为 0.26°,在 100 nm 的波长范围内,其性能表现出良好的一致性。因此,该设计可以与波长调制相结合实现一维非均匀间隔光学相控阵的二维光束扫描。

对于二维矩形平面阵列,可以同时优化行和列的间隔分布来实现远场栅瓣的抑制。以 8×8 的二维光学相控阵为例,假设阵元天线在各个方向的辐

射强度相同,工作波长为 1550 nm,阵元的最小和最大间隔分别为 5 μm 和 9 μm,混合蝙蝠算法的参数与前文一维非均匀间隔光学相控阵优化时的设置相同,优化得到的行间距分布为 8.38 μm、7.68 μm、7.25 μm、7.84 μm、5.35 μm、5.65 μm、6.51 μm;列间距分布为 7.58 μm、7.84 μm、8.83 μm、7.76 μm、6.33 μm、6.85 μm、5.27 μm,在 0° 偏转时, SMSR 为 -4.16 dB。优化前、后二维光学相控阵在 0° 偏转时的远场分布情况如图 10 所示。图 10(a)是阵元间隔为 5 μm 的 8×8 二维光学相控阵的远场分布情况;图 10(b)是优化得到的二维光学相控阵的远场分布情况。可以看出,基于混合蝙蝠算法的非均匀间隔光学相控阵设计同样可以推广到二维光学相控阵的设计。

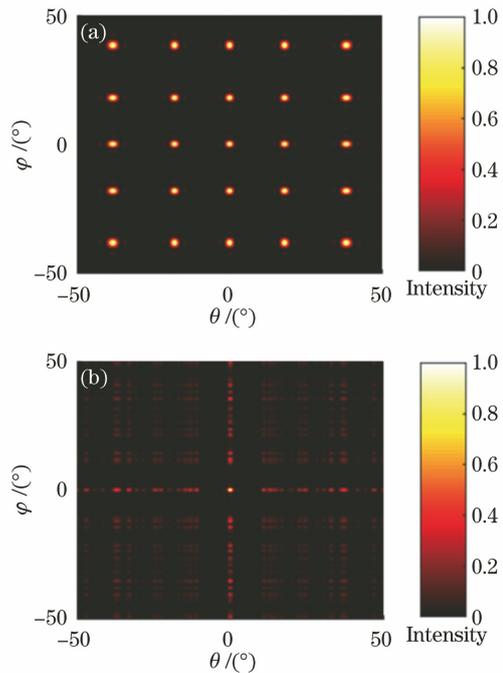


图 10 二维光学相控阵的远场分布。(a)均匀阵列; (b)优化得到的非均匀宽度阵列

Fig. 10 Far-field distribution of 2D OPA. (a) The uniform array; (b) the optimized aperiodic array

4 结 论

针对硅基光学相控阵的栅瓣压缩问题,提出一种基于混合蝙蝠算法的非均匀间隔光学相控阵。对于硅基 64 阵元端面发射一维非均匀间隔光学相控阵,工作波长选为 1550 nm,经过优化设计在 0° 角时, SMSR 达到了 -13.09 dB,并且在整个 80° 的扫描范围内, SMSR 均优于 -8 dB,最大光束发散角为 0.3°,相较于阵元间隔 2 μm 的均匀间隔光学相控

阵,扫描范围增大了 30° 。对比不同优化角度的扫描情况可以看出,在较大的角度执行优化算法能够实现更大的扫描范围,而在较小的角度执行优化法则可以实现更优的 SMSR,因此在具体应用时应当根据实际需要选择合适的优化角度。另外,所设计的相控阵在 100 nm 的波长范围内具有稳定的 SMSR 和光束发散角,因此该方法同样适用于利用相位加波长调制的一维光学相控阵的设计。最后,以 8×8 的矩形平面阵列为例,展示了非均匀间隔优化设计在二维光学相控阵栅瓣压缩方面的应用。

参 考 文 献

- [1] Poulton C V, Yaacobi A, Cole D B, et al. Coherent solid-state LIDAR with silicon photonic optical phased arrays [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(20): 4091-4094.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Xie W Q, Komljenovic T, Huang J X, et al. Heterogeneous silicon photonics sensing for autonomous cars [J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 3642-3663.
- [6] Chen J Y, Shi Y C. Research progress in solid-state LiDAR [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(7): 190218.
陈敬业, 时尧成. 固态激光雷达研究进展 [J]. *光电工程*, 2019, 46(7): 190218.
- [7] 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.
- [8] Zhang Y, Ling Y C, Zhang K Q, et al. Sub-wavelength-pitch silicon-photonic optical phased array for large field-of-regard coherent optical beam steering [J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 1929-1940.
- [9] Sun J. *Toward accurate and large-scale silicon photonics* [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2013: 94-104.
- [10] Phare C T, Shin M C, Sharma J, et al. Silicon optical phased array with grating lobe-free beam formation over 180 degree field of view [C] // 2018 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 13-18, 2018, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2018: 1-2.
- [11] Xu W H, Zhou L J, Lu L J, et al. Aliasing-free optical phased array beam-steering with a plateau envelope [J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 3354-3368.
- [12] Wu Z J, Jiang W, Xia J S, et al. Optical phased array antenna with wide steering range using grating array superlattices [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10827: 108272U.
- [13] Kwong D, Hosseini A, Zhang Y, et al. 1×12 unequally spaced waveguide array for actively tuned optical phased array on a silicon nanomembrane [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(5): 051104.
- [14] Komljenovic T, Helkey R, Coldren L, et al. Sparse aperiodic arrays for optical beam forming and LIDAR [J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 2511-2528.
- [15] Zhang D C, Zhang F Z, Pan S L. Grating-lobe-suppressed optical phased array with optimized element distribution [J]. *Optics Communications*, 2018, 419: 47-52.
- [16] Yang B, Chen H W, Yang S G, et al. An improved aperiodic OPA design based on large antenna spacing [J]. *Optics Communications*, 2020, 475: 125852.
- [17] Hutchison D N, Sun J, Doylend J K, et al. High-resolution aliasing-free optical beam steering [J]. *Optica*, 2016, 3(8): 887-890.
- [18] Fatemi R, Khachaturian A, Hajimiri A. A nonuniform sparse 2-D large-FOV optical phased array with a low-power PWM drive [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2019, 54(5): 1200-1215.
- [19] Xu D G, Zhao P. Literature survey on research and application of bat algorithm [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(15): 1-12, 31.

- 许德刚, 赵萍. 蝙蝠算法研究及应用综述[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(15): 1-12, 31.
- [20] Shin M C, Mohanty A, Watson K, et al. Chip-scale blue light phased array[J]. Optics Letters, 2020, 45(7): 1934-1937.
- [21] Yang X S. A new metaheuristic bat-inspired algorithm[M]//González J R, Pelta D A, Cruz C, et al. Nature inspired cooperative strategies for optimization (NICSO 2010). Studies in computational intelligence. Heidelberg: Springer, 2010, 284: 65-74.
- [22] Xue F. Research and application of heuristic intelligent optimization based on bat algorithm[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016: 52-55.
- 薛菲. 基于蝙蝠算法的启发式智能优化研究与应用[D]. 北京: 北京工业大学, 2016: 52-55.
- [23] Peng H, Ding Y C. Improved bats algorithm optimization based on genetic hybrid genes[J]. Laser Journal, 2015, 36(2): 23-26.
- 彭泓, 丁玉成. 基于遗传交叉因子的蝙蝠算法的改进[J]. 激光杂志, 2015, 36(2): 23-26.
- [24] Sun X K, Liu H C, Yariv A. Adiabaticity criterion and the shortest adiabatic mode transformer in a coupled-waveguide system[J]. Optics Letters, 2009, 34(3): 280-282.