



光纤相控阵稀疏排布优化算法对比

李明飞 袁梓豪 刘院省 邓意成 王学锋

Comparison between optimal configuration algorithms of fiber phased array

Li Ming-Fei Yuan Zi-Hao Liu Yuan-Xing Deng Yi-Cheng Wang Xue-Feng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 084205 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201768

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201768>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种无需定标的地基激光雷达气溶胶消光系数精确反演方法

An accurate inversion method of aerosol extinction coefficient about ground-based lidar without needing calibration

物理学报. 2019, 68(7): 074205 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181825>

偏振成像激光雷达与短波红外复合光学接收系统设计与分析

Design and analysis of polarization imaging lidar and short wave infrared composite optical receiving system

物理学报. 2020, 69(24): 244202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200920>

一种测量大气消光系数边界值的新方法

A new method of measuring boundary value of atmospheric extinction coefficient

物理学报. 2018, 67(5): 054205 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172008>

基于Zernike模型系数优化的椭球型窗口光学系统像差校正

Aberration correction for ellipsoidal window optical system based on Zernike mode coefficient optimization

物理学报. 2020, 69(24): 244203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200933>

高光谱分辨率激光雷达鉴频器的设计与分析

Design and analysis of high-spectral resolution lidar discriminator

物理学报. 2017, 66(18): 184202 <https://doi.org/10.7498/aps.66.184202>

基于多尺度熵的Duffing混沌系统阈值确定方法

Threshold determination method of Duffing chaotic system based on multi-scale entropy

物理学报. 2020, 69(16): 160501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191642>

光纤相控阵稀疏排布优化算法对比*

李明飞^{1)2)†} 袁梓豪¹⁾²⁾ 刘院省¹⁾²⁾ 邓意成¹⁾²⁾ 王学锋¹⁾²⁾

1) (北京航天控制仪器研究所, 北京 100039)

2) (中国航天科技集团有限公司量子工程研究中心, 北京 100094)

(2020年10月24日收到; 2020年11月11日收到修改稿)

光纤相控阵在激光合束、激光雷达等领域具有应用前景. 光纤阵列配置方式不同于微波相控阵, 光纤天线间距大于波长时存在周期旁瓣问题, 影响主瓣能量分布. 本文从物理模型出发, 建立了基于同心圆环形点阵集合的光学相控阵天线布阵理论模型, 提出了利用解析延拓的傅里叶变换方法实现干涉场强度的快速合成理论, 讨论了在离散采样时数值仿真需关注的采样带宽和采样数目问题, 解决了快速实现多光束干涉场数值仿真的问题. 对比研究了两种优化光学相控阵天线配置的优化算法: 遗传算法和粒子群算法, 分别实现了不同种群数量遗传算法和粒子群算法迭代优化, 分析了二者在优化过程中的收敛速度和优化效果, 得到了峰值旁瓣比 $PSR = 0.270$ 的配置阵列. 所提出的方法有望用于实际的光学相控阵天线配置中, 指导天线主瓣能量最大化的优化设计; 研究模型对不可微分目标函数优化问题的研究有一定参考价值.

关键词: 光纤相控阵, 激光雷达, 遗传算法, 粒子群算法

PACS: 42.87.Bg, 87.55.kd, 02.60.-x, 02.70.Uu

DOI: 10.7498/aps.70.20201768

1 引言

天线阵列技术已经被广泛应用于各个领域, 如微波无线通信、相控雷达系统和卫星通信^[1]等, 而光波段天线阵列则被用于高带宽激光通信、激光相干合束^[2]、光学相控阵雷达^[3-5]和关联成像技术^[6-10]等方面. 在天线阵列优化技术中, 基于稀疏排布的天线阵列技术在近年来引起了学者们的广泛关注^[11-18]. 特别是随着光纤激光技术的成熟, 基于高斯核模型的相干光束阵列合成技术日趋成熟^[19], 人们开始关注光纤阵列及其在激光相干合束、激光雷达、激光通信和光学相控阵雷达等方面的应用价值. 例如, 为了得到高功率输出的激光, 多束光纤激光保持相同相位即可实现强激光的合成, 研究优化提升主光束能量的技术包括: 优化光纤阵列的排布方式增加主光束能量; 优化各光束光

强分布增加主光束能量; 优化各光束相位, 进行闭环控制增加主光束能量等^[2]. 由于稀疏布阵的微波雷达技术的研究文献较多^[11-18], 并且研究对象为电磁场及其波动性, 与光波的研究对象一致, 故光学相控阵列的研究借鉴了微波的研究方法. 在研究光纤阵列排布方式时, 也引入了微波中主瓣与旁瓣的概念, 一般将光学干涉场强度主极大峰称为主瓣, 非主极大峰称为旁瓣, 故对光学阵列的优化问题简化为增大主瓣和抑制旁瓣的优化问题, 因此可参考微波天线阵列采用的优化技术.

本文主要研究光纤激光阵列配置方式的优化, 对光纤激光阵列的干涉场和对应排布方式进行了理论建模, 把这个模型作为优化的目标函数研究最佳光纤阵列配置方式. 研究方法采用遗传算法和粒子群算法进行对比和交叉验证, 一方面从实际效果讨论算法的局限性, 为解决同类问题给出了启发, 另一方面获得了具有实用价值的排布结果, 可指导

* 国家自然科学基金 (批准号: 61805006) 和联合基金 (批准号: 6141B061106) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: mf_li@sina.cn

实际光纤相控阵的设计.

不同于文献 [2] 采用六边形排布, 通过优化相位来实现主瓣能量最大, 本文采用随机排布优化方式. 文献 [3] 研究了基于硅基工艺的阵列设计, 约束条件为 20 倍波长以内且为环形排布, 本文则研究 20 倍波长以外的随机排布. 文献 [6,7] 提出了矩形阵列排布优化方法, 但未讨论详细约束条件和物理模型与仿真参数的设定, 本文在建模过程加入了数值仿真时出现的带宽限制分析及相应物理近似过程参数, 阵列模型采用多环同心圆点阵模型, 从而从根本上避免了矩形点阵模型无法同时消除 X 和 Y 轴两个方向周期性的不足. 文献 [9] 研究方法为矩形阵列, 未对光纤排布进行优化. 综上所述, 本文在建模过程加入了数值仿真时出现的带宽限制分析及相应的物理近似过程参数, 优化模型约束条件为同心环点阵随机抽样排布, 且利用两种不同优化算法进行了研究, 具有创新性和实用性.

2 光纤相控阵光场理论模型

2.1 光纤阵列远场分布模型

设阵列由 N 束光纤激光束构成, 分布在直角坐标系 $x-y$ 平面, 如图 1 所示, 光束通过传输到达观测平面 $\xi-\eta$. 由于光纤激光器采用的是单模光纤输出, 其纤芯半径为 r_0 , 主模式为 LP_{01} 模 (linear polarized, LP), 可通过 Marcuse 模场半径的经验公式计算光纤的模场直径 ω_0 . 研究表明, 单模光纤的模场半径和 LP_{01} 模在一定条件下可用高斯光束精确近似, 光纤模场可按高斯光束建模, 光腰半径 ω_0 等于模场半径 r_0 , 因此第 n 根光纤产生的光场 E_n 可表示为

$$E_n(x, y, z) = \frac{a_n \omega_0}{w(z)} \exp \left[-\frac{r_n^2(x, y)}{w^2(z)} \right] \times \exp \left[-ik \frac{r_n^2(x, y)}{2R(z)} - i\phi_n(z) \right], \quad (1)$$

式中, $r_n^2(x, y) = (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2$, 光束宽度 $w(z)$ 表达式为

$$w(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \right)^2}. \quad (2)$$

高斯光束的等相面曲率半径 $R(z)$ 表达式为

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right]. \quad (3)$$

高斯光束初始相位 $\phi_n(z) = \tan^{-1}(\lambda z / \pi \omega_0^2)$, 波矢 $k = 2\pi/\lambda$.

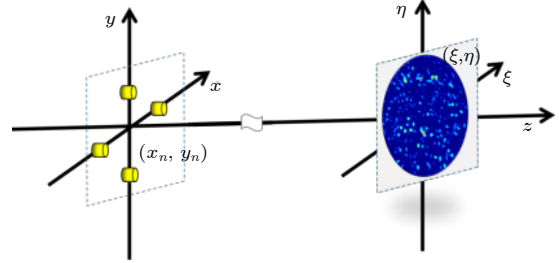


图 1 光纤阵列及远场分布示意图

Fig. 1. Diagrammatic sketch of the fiber array and its far-field intensity.

根据 (1) 式可知光场在不同坐标 (x, y) 和距离 z 的空间分布. 当 $z = 0$ 时, 可得到光纤端面的光场分布:

$$E_n(x, y, z = 0; t) = a_n \exp \left[-\frac{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2}{\omega_0^2} \right] \exp [j\phi_n(t)], \quad (4)$$

其中, $\phi_n(t)$ 为某时刻第 n 束光纤光场的相位, 该结果与文献 [20] 中相同. 当 $z > 0$ 时, 远场区域的范围应满足 $z \gg \pi \omega_0 / \lambda$. 根据实际应用中具体的参数, 单模光纤模场半径 $\omega_0 = 5 \mu\text{m}$, 波长 $\lambda = 1.550 \mu\text{m}$, 计算得知当 $z \gg 10 \text{ m}$ 时, 可按远场条件进行光场近似, N 束光纤从 $x-y$ 平面传播到 $\xi-\eta$ 平面的光强分布可表示为

$$I(\xi, \eta, z = L) = I_0(\xi, \eta) \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N a_m a_n I_{mn}(\Delta x_{mn}, \Delta y_{mn}) \times \exp \left(jk \frac{\Delta x_{mn} \xi + \Delta y_{mn} \eta}{L} \right), \quad (5)$$

其中, $\Delta x_{mn} = x_m - x_n$, $\Delta y_{mn} = y_m - y_n$, 第一项 $I_0(\xi, \eta)$ 表达式为

$$I_0(\xi, \eta) = \pi^2 \omega_0^4 \exp \left(-k^2 \omega_0^2 \frac{\xi^2 + \eta^2}{2L^2} \right), \quad (6)$$

第二项 $I_{mn}(\Delta x_{mn}, \Delta y_{mn})$ 为

$$I_{mn}(\Delta x_{mn}, \Delta y_{mn}) = P(x_m, y_m) P(x_n, y_n) \exp [j\phi_m(t) - j\phi_n(t)], \quad (7)$$

此处 $P(x, y)$ 为各光纤的光瞳函数, 一般为圆域函数.

各光纤束的波前相位 $\phi_n(t)$ 随时间变化, 可通过相位控制使得相位差为零. 当光学相控阵为非高斯分布的点光源时, (4) 式仅存在与时间 $\phi_n(t)$ 有关的位相变化, 振幅变为常数项且与空间坐标 (x, y) 的分布无关, 相应地 (6) 式变为常数, 强度为均匀分布.

不同于文献 [6,7,9,20] 中方法, 本文提出 (5) 式可通过解析延拓, 采用快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 实现菲涅耳衍射积分的计算, 从而提升计算速度. (5) 式在空间上解析延拓后变为傅里叶变换形式:

$$I(\xi, \eta, z = L) = I_0(\xi, \eta) |\text{FFT}\{a_n I_n(x_n, y_n)\}|_{n=(-\infty, \infty)}^2 \quad (8)$$

虽然 (8) 式仅在光纤束按规则形状排布时, 例如矩形点阵, 存在解析式, 但可利用数值表达式通过计算机仿真来实现任意排布阵列干涉图案研究. 值得注意的是, (8) 式光强分布与光场归一化的二阶强度关联函数形式相一致, 可用于对二阶强度关联成像中光场周期性的抑制进行优化.

2.2 采样数 M 与带宽 B 分析

在数值仿真光场的计算过程中, 不可避免地需要将理论公式离散化, 故导致出现采样带宽的问题, 该问题因与实际需求联系密切而变得较为复杂. 令光源平面取样宽度为 S_0 , 取样数为 $M \times M$, 采样间距 $\Delta x_0 = \Delta y_0 = S_0/M$, 在实际计算过程中 (8) 式一般采用离散傅里叶变换 (discrete Fourier transform, DFT):

$$I(p\Delta\xi, q\Delta\eta, L) = I_0(p\Delta\xi, q\Delta\eta) |\text{DFT}\{I_n(m\Delta x_0, n\Delta y_0)\}|_{\frac{p\Delta\xi}{\lambda z}, \frac{q\Delta\eta}{\lambda z}}^2 \quad (9)$$

其中, $p, q, m, n = 1, 2, 3, \dots, M$; $(\Delta\xi, \Delta\eta)$ 代表 DFT 后观测平面的空域取样间隔.

根据 Parseval 定理, FFT 变换前后空域与频域能量守恒, 实际应用中的有效带宽 B 等于功率谱积分后 98% 的能量对应的带宽 B . 因此, (4) 式中光纤输出模式为高斯光束, 采样时有效带宽为 $B = 0.79/(\sqrt{\pi}\omega_0)$. 考虑到采用单模光纤模场半径 $\omega_0 = 5 \mu\text{m}$, 光源空间采样约束为

$$\Delta x_0 = \Delta y_0 \leq \frac{1}{2B} = \frac{\sqrt{\pi}\omega_0}{1.58} = 5.6 \mu\text{m}. \quad (10)$$

综合考虑 (9) 式与 (10) 式, 设定观测距离 $L = 1 \text{ m}$ 时, 可计算一维空间 M 的最小取值:

$$M \geq \frac{\lambda L}{\Delta x_0^2} = 4.9 \times 10^4. \quad (11)$$

可见在高斯光源的约束下, 源平面和观测平面采样数 M 非常庞大, 普通计算机难以严格满足采样条件. 本文采样间隔设定为 $\Delta x_0 = \Delta y_0 = 2 \mu\text{m}$, 严格满足采样带宽条件, M 取值则按文献 [21] 所用方法, 一个维度采样点数 $M=8500$, 可以满足对光场近似的数值仿真与分析要求.

3 光纤排布数值仿真

3.1 光纤排布约束条件

光纤排布约束条件主要有光纤间距约束、光纤束尺寸约束和光纤阵列配置形状约束. 光纤按等间距排布时, 根据光学衍射理论, 在观察面 z 处将观测到光强出现周期旁瓣, 其旁瓣间隔 G 与光纤间距 d 的关系为 $G = \lambda z/d$. 按规则排布时, 光纤间距 d 与观测面光强周期旁瓣 G 的分布具有线性关系. 同理, 光纤不按规则形状排列时, 光纤间距 d 为变量, 相应地, 距离为 z 处的光强旁瓣分布也呈现不规则形状分布. 光纤的纤芯、包层决定光纤间距 d 的物理距离设置. 光纤阵列的整体尺寸作为光源尺寸 S_0 , 影响着观察面 z 处的光场主瓣与旁瓣强度分布宽度 W , 二者关系为 $W = \lambda z/S_0$.

规则形状点阵排列方式主要包括圆形排列、四边形排列和多边形排列. 文献 [6] 报道了利用遗传算法优化随机排列光源的方案并实验验证了结果的有效性, 但采用方形点阵作为坐标基座导致 x 与 y 方向存在耦合, 优化后 y 方向仍存在周期性旁瓣, 优化效果不理想. 此外, 四边形排列仅适用于优化光束数目 N 满足 \sqrt{N} 为整数的情况. 圆形排列方式因具有先天的对称性, 在微波天线稀疏排布优化时常被采用, 有望解决上述问题. 本文采用圆形排布方式作为坐标优化约束, 可有效避免 x 与 y 方向不对称的问题, 并且优化的光束数目不受 \sqrt{N} 为整数的限制.

3.2 光纤排布目标函数

光纤排布的优化目标函数根据约束条件和约束参数建立, 本文采用光场主瓣值最大, 旁瓣值相对主瓣达到最小的原则建立目标函数, 提出了一种采用多环同心圆点阵作为坐标基座生成坐标排布的集合, 从集合中随机选取 N 个坐标作为初始排布,

由于集合全集坐标具有对称性, 确保了初始坐标选取的均匀性并解决了 x 与 y 方向旁瓣的不对称问题和优化的光束数目 N 不受 \sqrt{N} 为整数的限制问题. 最终约束条件变为光纤最小间距 d 和排布最大空间半径 R_0 , 二者决定优化集合的大小.

图 2 给出了坐标排布集合 U , 优化时从集合中选取子集 $U_N \subseteq U$. 图 2 中空心圆表示全集坐标, 实心圆表示初始化的 N 束光纤坐标位置. 图 3 给出了图 2 中光纤按单环排布方式对应坐标产生的光场强度分布, 为显示旁瓣细节采用了取对数的方式调节对比度, 图 3 中右侧强度条为取对数后的结果. 与文献 [20] 中圆环的光场分布对比, 仿真结果一致, 表明参数设置合理.

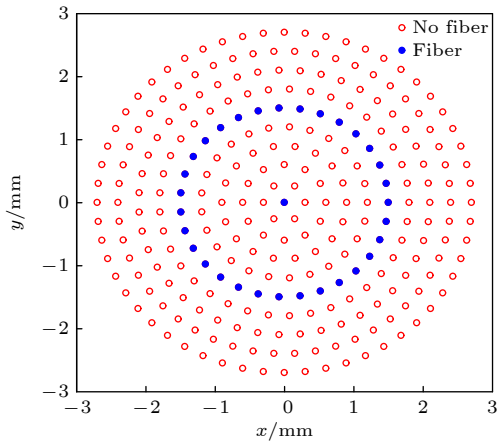


图 2 光纤的配置集合与单环排布方式

Fig. 2. Fiber configuration set and single ring configuration.

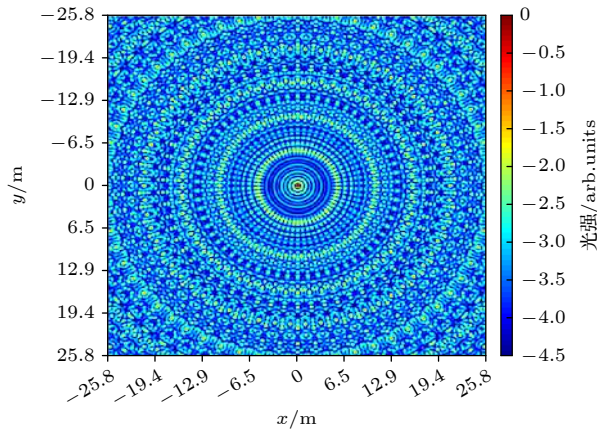


图 3 光纤单环排布产生的光场强度分布

Fig. 3. Far-field intensity distribution of the single ring configuration.

由于光场强度分布进行了归一化处理, 故主瓣最大值恒等于 1, 优化的目标函数变为优化除 $(0, 0)$ 邻域对应的宽度为 W 的主峰外寻找旁瓣峰值 P_{sl}

的最小值, 目标函数表示为

$$\text{fitness} = \min(P_{sl}^i), \quad (12)$$

其中, fitness 即为目标函数; $i = 1, 2, 3, \dots, C_N^U$. (12) 式表示从集合 U 中随机选取 N 个坐标进行光纤的排布, 在所有可能的排布中选取 P_{sl}^i 最小值作为优化结果. 第 i 次排布对应的峰值与旁瓣值比例定义为

$$P_{sl}^i = \frac{I_{\text{max side lobe}}^{(i)}}{I_{\text{main lobe}}^{(i)}}. \quad (13)$$

定义光纤排布集合第 m 个圆环的半径为 R_m , 设每个圆环放置 K 个光纤, 则圆环上各光纤坐标间隔 d_m 与圆环半径和每环坐标点数目 K 有如下关系:

$$d_m = 2R_m \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi}{n}\right) \right]. \quad (14)$$

根据 (14) 式, 可定义光纤坐标最小间隔 $d_{\min} = \min\{d_m, \Delta R\}$, 其中 $\Delta R = R_m - R_{m-1}$. 在参数设计时, 只要确保坐标空间物理间隔 d_{\min} 大于光纤实际的物理尺寸, 就可满足此约束条件, 并利用该条件来约束优化过程.

3.3 光纤排布优化算法

如图 2 所示, 取 $N = 32$, 则总的有效排布数 $C_N^U \simeq 10^{42}$, 样本数太大, 难以穷尽. 从上述样本中寻求最优解的问题, 采用传统的枚举法显然不切实际, 而遗传算法和粒子群算法正是解决该类问题的重要手段.

3.3.1 遗传算法优化

遗传算法 (genetic algorithm, GA) 主要功能是寻找最优化和搜索问题的最优解, 最早是由美国的 Holland 教授于 1975 年提出的, 在诸多领域被广泛应用, 是较为成熟的技术. 本文设定光源排布尺寸 $S_0 = 6000 \mu\text{m}$ 和光纤最小间隔 $d_{\min} = 260 \mu\text{m}$, 从而可确定集合 U 的元素由 9 个间隔不小于 d_{\min} 的同心环坐标点构成, 元素个数为 279. 本文利用遗传算法的思想, 具体的执行步骤如图 4 所示, 随机从集合 U 中抽取 32 个坐标点重复 N_{pop} 次作为初始种群, 计算种群峰值旁瓣比值 (peak-sidelobe ratio, PSR), 将种群按 PSR 值从小到大排序后进行染色体两两交叉, 并抽取 M_{mute} 个染色体进行变异.

本文分别选取种群数 $N_{\text{pop}} = 10, 20, 50$ 进行

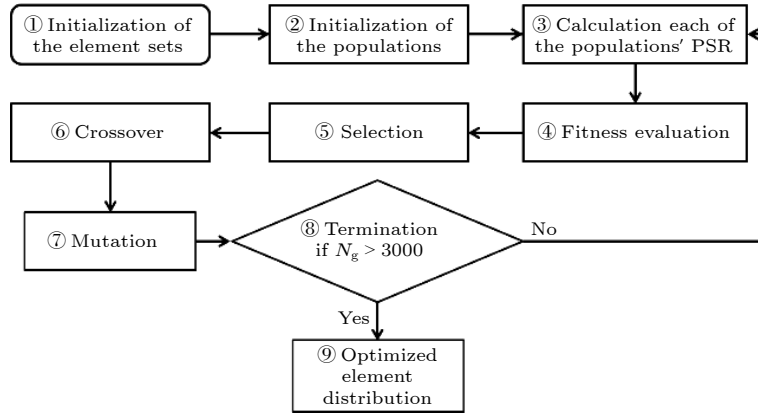


图 4 遗传算法的工作流程

Fig. 4. Flow chart of the genetic algorithm.

优化, 并固定染色体变异数量 $M_{\text{mute}} = 3$. 种群坐标选取方法采用随机从集合中抽取的方法, 每次抽取 $N = 32$ 个坐标, 重复 10 次、20 次和 50 次随机过程分别得到 10 组、20 组和 50 组 (x, y) 坐标集合, 各组均满足 $U_{\text{pop}} \subseteq U$, 遗传代数 $N_g = 3000$.

优化结果如图 5 所示, 在相同遗传代数的情况下, 种群数量并非越少或者越大越好. 当 $N_{\text{pop}} = 10$ 和 50 时, 3000 代对应的峰值旁瓣比 PSR 在 0.280 附近, 二者区别不大; 然而二者的最优解与 $N_{\text{pop}} = 20$ 时相差较大, 显然种群数量为 $N_{\text{pop}} = 20$ 时, 得到的 PSR 优于 0.270, 是三组种群中的最优解.

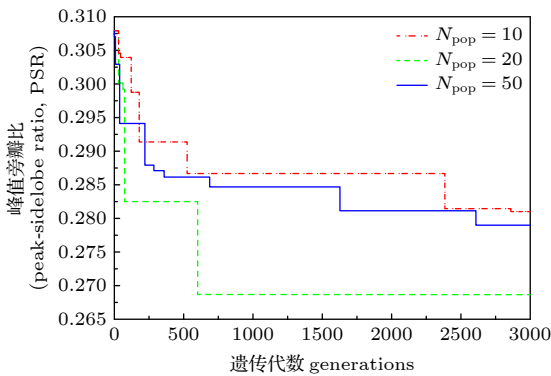


图 5 种群数分别为 $N_{\text{pop}} = 10, 20, 50$ 时遗传算法的优化结果

Fig. 5. Genetic algorithm optimized results with populations $N_{\text{pop}} = 10, 20, 50$.

3.3.2 粒子群算法优化

粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 是一种进化计算技术, 1995 年由 Eberhart 博士和 Shi 博士提出, 源于对鸟群捕食行为的研究. 鸟群觅食中每个个体知道其历史最好的值 p_{best} , 知晓整个种群的历史最优值 g_{best} . 每个个体将根据两条线

索修正自身位置信息, 即当前位置与历史最优值 p_{best} 的距离和当前位置与种群历史最优值 g_{best} 的距离. PSO 算法兼顾了灵活性和鲁棒性以及并行运算的特点, 特别是对于不可微分的函数求解明显优于传统方法. 不同于遗传算法或模拟退火等算法, 粒子群优化算法一般不会陷入局部最优解.

尽管如此, 当目标函数所需消耗的计算资源过于庞大时, 例如本文情况, 粒子群算法难于实现并行计算, 所以实际运行效率方面, 粒子群算法的收敛速度与遗传算法相比并无明显优势. 本文所采用的粒子群算法如下:

$$\begin{aligned}
 V_i^{k+1} = & r_2 \cdot \text{sign}(r_3) \cdot V_i^k \\
 & + (1 - r_2) \cdot C_1 \cdot r_1 \cdot [p_i^k_{\text{best}} - S_i^k] \\
 & + (1 - r_2) \cdot C_2 \cdot (1 - r_1) \cdot [g_i^k_{\text{best}} - S_i^k] \\
 & + (1 - r_2) \cdot C_1 \cdot r_1 \cdot [S_i^k - p_i^k_{\text{worst}}], \quad (15)
 \end{aligned}$$

其中, $\text{sign}(r_3)$ 作为函数定义如下:

$$\text{sign}(r_3) = \begin{cases} +1, & r_3 > 0.05, \\ -1, & r_3 \leq 0.05, \end{cases} \quad (16)$$

其中, V_i^k 是第 i 个个体在第 k 次迭代的速度矢量; r_1, r_2, r_3 是三个分布在 0—1 的随机数; 当前个体位置为 S_i^k ; C_1 和 C_2 取经验值 1.5; $p_i^k_{\text{worst}}$ 为个体最差位置, $k = 1, 2, 3, \dots, K$.

按图 6 中粒子群算法工作流程, 随机从集合中抽取 32 个坐标点重复 N_{pop} 次作为初始种群 S_i^k , 计算种群中每一组染色体的峰值旁瓣比 PSR 值, 找到并更新整个种群中的当前最优个体 p_{best} , 当前最差个体 p_{worst} 和种群历史最优个体 g_{best} , 用于计算速度值 V_i^{k+1} . 重复迭代计算 K 次, 本文统一取 $K = 3000$, 与 3.3.1 节遗传算法迭代次数一致, 输出优化

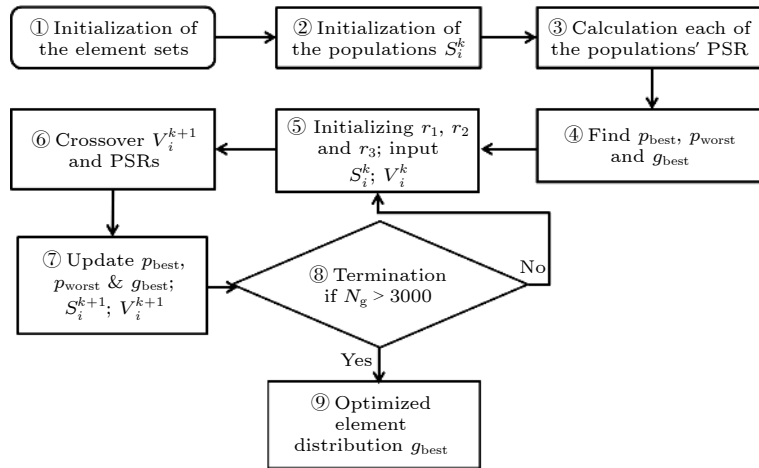


图 6 粒子群算法工作流程图

Fig. 6. Flow chart of the particle swarm optimization.

的坐标分布结果 g_{best} 对应的坐标元素集合. 按图 6 流程, 分别取 $N_{pop} = 10, 20, 50$ 时, 得到的 PSR 优化结果如图 7 所示. 经 3000 次迭代后 PSR 值分别收敛于 0.30, 0.29 和 0.27 附近, 最优的 PSR 值随种群数量增大而相应地依次减小. 从图 7 可知, 不同于 GA, 在相同迭代次数下, PSO 算法下降的速度与种群数量正向相关, 即初始化的种群越大, 收敛速度越快; 种群数量越大, 得到的最优值越小. 这一结论是与粒子群的核心运行机制密切相关的, 可理解为由于粒子群算法的并行特性, 种群数量越大则搜索的样本数越多, 并且其总是按全局最优的方向前进, 故得到上述结论与理论预期基本一致.

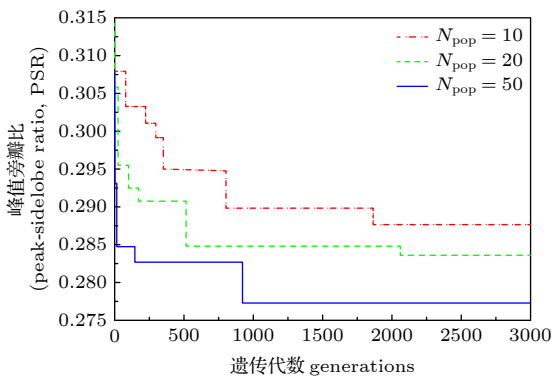


图 7 种群数分别为 $N_{pop} = 10, 20, 50$ 时粒子群算法的优化结果

Fig. 7. Particle swarm optimization algorithm results with populations $N_{pop} = 10, 20, 50$.

4 优化算法对比分析

通过第 3 节分析可知, 在相同遗传代数条件

下, GA 算法对种群数量的选取较为敏感, 在 $N_{pop} = 10, 50$ 时, 相对于 $N_{pop} = 20$, 二者均陷入了局部最优, PSO 算法随种群数量增加下降速度增加, 优化的 PSR 减小, 但带来了计算量的增加. 考虑到算法的效率和优化结果, GA 算法是目前较优的选择.

从图 5 和图 7 对比来看, GA 受初始种群数量影响较大, 本文中初始种群 $N_{pop} = 20$ 时能够得到 PSR 优于 0.270 的效果; 对于 PSO 算法, 初始种群 $N_{pop} = 50$ 时, 得到最佳优化效果 PSR 接近 0.275, 高于遗传算法的 PSR. 可见 GA 在该问题优化方面具有一定的优势, 采用 GA 时需考虑选取最优种群的问题, 而 PSO 算法只需要增大样本数即可, 当前问题适合用遗传算法求解. 若优化的目标函数适用于并行计算, 那么增大种群数量不影响计算效率, 可优先选择粒子群算法.

针对 GA 对光纤阵列排布进行优化后带来的改善情况, 图 8 给出了优化前后的光场强度变化. 值得注意的是, 图 8(a) 是随机排列的光场, 极大地消除了栅瓣效应. 对比图 8(a),(b) 光纤阵列排布前后光场的强度分布情况, 可发现旁瓣值的分布周期性进一步减弱, 旁瓣高度进一步降低. 在图 8(a) 中, 对光场 X 轴和 Y 轴一维强度分布进行投影, 分别显示在 $x-z$ 平面和 $y-z$ 平面, 可看出优化前光场 PSR 大于 0.30, 经优化后 PSR 可优于 0.27. 对光强 $x-y$ 平面的分布在 $z = -0.25$ 平面进行了投影. 图 8 中 z 轴代表强度旁瓣峰值, 可看出图 8(a) 中旁瓣局部有较大旁瓣峰值, 相比之下图 8(b) 中旁瓣峰值分布无论 X 轴还是 Y 轴方向

均无明显旁瓣, 其值在 $z = -0.25$ 的 $x-y$ 平面分布相对均匀, 证明了优化算法的有效性.

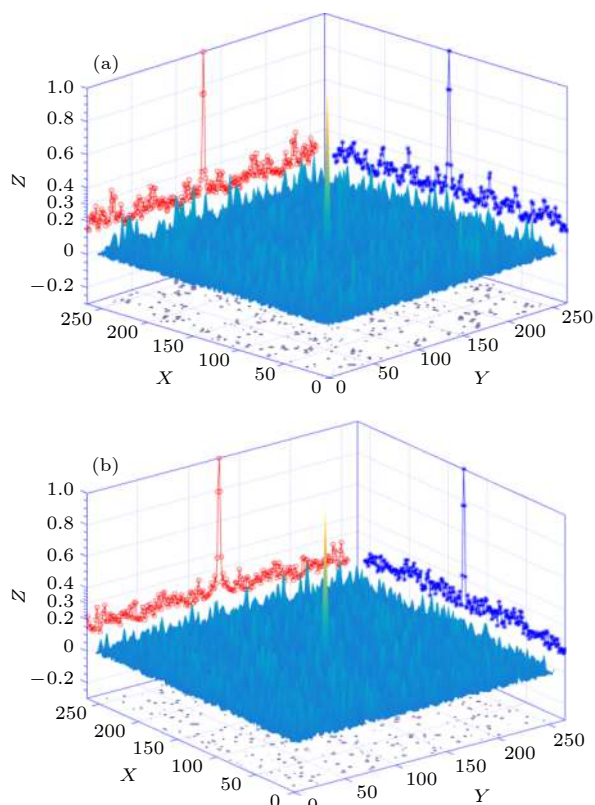


图 8 优化前光场强度分布与遗传算法优化后光场强度分布, $N_{\text{pop}} = 20$

Fig. 8. Far field intensity distribution before and after the genetic algorithm optimized results with the population $N_{\text{pop}} = 20$.

上述结果表明, 由于 GA 和 PSO 算法优化过程均具有随机性, 单一采用哪种算法均不足以全面判断算法是否为全局最优. 在随机排列和样本数巨大 (10^{42}) 的条件下, 现有计算资源有限, 最终的真值无法利用解析函数或枚举的方式知晓, 目前较为可靠的手段是采用在迭代次数上截断, 并采用两种以上算法交叉验证结果有效性的方式来进行光纤配置.

5 结 论

本文从物理模型出发, 建立了基于同心圆环点阵集合的光学相控阵天线布阵理论模型, 提出了利用傅里叶变换方法快速实现干涉场分布的理论, 讨论了在离散采样时数值仿真需关注的采样带宽

和采样数目问题, 实现了快速实现多光束干涉场数值仿真, 有效解决了同类方法存在 X, Y 轴方向坐标优化效果不一致的问题; 对比研究了两种优化光学相控阵天线配置的优化算法: 遗传算法和粒子群优化算法, 实现了不同种群数量的遗传算法和粒子群算法的优化; 对比分析了两种算法在优化过程中的收敛速度和优化结果, 得到了峰值旁瓣比 PSR 优于 0.270 的光纤排布方案. 本文所提出的方法有望用于实际的光学相控阵天线排布中, 指导天线主瓣降低旁瓣能量和非周期性分布的优化设计; 研究模型对类似不可微目标函数的优化问题有一定参考价值.

参考文献

- [1] Ibarra M, Panduro M A, Andrade Á G, Reyna A 2015 *J. Electromagnet. Wave.* **29** 1983
- [2] David K, Kermène V, Marc F, Joel B, Alain B 2017 *Opt. Express.* **25** 13816
- [3] Zhang F Z, Zhang D C, Pan S L 2018 *Appl. Opt.* **57** 4977
- [4] Yin S, Kim J H, Wu F, Ruffin P, Luo C 2007 *Opt. Commun.* **270** 41
- [5] Montoya J, Sanchez-Rubio A, Hatch R, Payson H 2014 *Appl. Opt.* **53** 7551
- [6] Wu H, Wang C L, Gong W L 2018 *Opt. Express* **26** 4183
- [7] Wang K, Li Q, Lin H, Sun S, Gao S B 2016 *Acta. Opt. Sin.* **36** 0227002 (in Chinese) [王凯, 黎全, 林惠祖, 孙帅, 高少博 2016 *光学学报* **36** 0227002]
- [8] Li M F, Yan L, Yang R, Liu Y X 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 064202 (in Chinese) [李明飞, 阎璐, 杨然, 刘院省 2019 *物理学报* **68** 064202]
- [9] Liu C B, Chen J Q, Liu J X, Han X E 2018 *Opt. Express* **26** 10048
- [10] Li M F, Yuan Z H, Zhao L L, Sun X J 2020 **19** 40 (in Chinese) [李明飞, 袁梓豪, 赵琳琳, 孙晓洁 2020 *导航与控制* **19** 40]
- [11] Mandal D, Ghoshal S P, Bhattacharjee A K 2011 *J. Netw. Comput. Appl.* **1** 94
- [12] Bera R, Mandal D, Kar R, Ghoshal S P 2017 *Comput. Electr. Eng.* **61** 151
- [13] Panduro M A, Mendez A L, Dominguez R, Romero G 2006 *Aeu-int. J. Electron. C.* **60** 713
- [14] Reyna A, Panduro M A 2008 *J. Electromagnet. Wave.* **22** 2241
- [15] Chen K S, Zhu Y Y, Ni X L, Chen H 2016 *Int. J. Antenn. Propag.* **2015** 147247
- [16] Reyna A, Panduro M A, Bocio D 2014 *EuCAP. IEEE.* **2014** 1513
- [17] Zhang D, Zhang F, Pan S 2018 *Opt. Commun.* **419** 47
- [18] Wang L L, Fang D G 2003 *Acta Electronica Sin.* **31** 2135 (in Chinese) [王玲玲, 方大纲 2003 *电子学报* **31** 2135]
- [19] Ji X, Pu Z, Jia X 2009 *Opt. Commun.* **282** 2685
- [20] Liu C B, Lu F, Wu C, Han X E 2015 *Opt. Commun.* **346** 26
- [21] Li J C, Yuan C J, Tankam P, Picart P 2011 *Opt. Commun.* **284** 3202

Comparison between optimal configuration algorithms of fiber phased array*

Li Ming-Fei^{1)2)†} Yuan Zi-Hao¹⁾²⁾ Liu Yuan-Xing¹⁾²⁾
Deng Yi-Cheng¹⁾²⁾ Wang Xue-Feng¹⁾²⁾

1) (*Beijing Institute of Aerospace Control Instruments, Beijing 100039, China*)

2) (*Quantum Engineering Research Center, China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100094, China*)

(Received 24 October 2020; revised manuscript received 11 November 2020)

Abstract

Optical fiber phased array can be used in high-power laser beam combination, lidar and other areas. The configuration of the optical fiber array is different from the microwave phased array, which has periodic problems that affect the energy intensity distribution of the main lobe. Starting from the physical model, in this paper we establish a theoretical model of optical phased array antenna array based on a set of concentric circular ring lattices, and propose a theory of the rapid synthesis of randomly configured interference field strengths through using analytical continuation method and Fourier transform method. The problem of sampling bandwidth and sampling number that should be paid attention to in the numerical simulation of discrete sampling are discussed, and the problem of quickly realizing the numerical simulation of multi-beam interference field is solved. Genetic algorithm and particle swarm algorithm for optimizing the configuration of optical phased array antennas are investigated with different populations. The convergence speeds and optimization efficiencies of the two algorithms are compared and analyzed. It is demonstrated that the peak side-lobe ratio PSR can be achieved to be better than 0.270 by the genetic algorithm optimized configuration array under the real fabricate parameter. The proposed method is expected to be used in the actual optical phased array antenna configuration to guide the optimal design of the antenna with low side lobes, and the proposed model is also expected to provide a certain reference value for the study of optimizing the non-differentiable objective function.

Keywords: optical fiber phased array, lidar, genetic algorithm, particle swarm algorithm

PACS: 42.87.Bg, 87.55.kd, 02.60.-x, 02.70.Uu

DOI: [10.7498/aps.70.20201768](https://doi.org/10.7498/aps.70.20201768)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61805006) and the Joint Foundation, China (Grant No. 6141B061106).

† Corresponding author. E-mail: mf_li@sina.cn