

光波导光学相控阵边瓣压缩方法研究

彭丽华^{**}, 李明秋^{***}, 黄志伟, 史红伟^{*}

长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 针对光波导光学相控阵的光束优化问题,提出了一种基于遗传算法的幅值和相位混合加权的边瓣优化方法。以一维线阵为例,对混合加权的实现方法进行了分析,并在此基础上对提出的遗传优化算法进行仿真实验。仿真结果表明:优化后的天线方向图将栅瓣压缩为副瓣,同时峰值副瓣电平得到了明显改善;优化搜索过程中有、无主瓣均能达到压缩边瓣的目的。该算法具有良好的收敛性能,采用该算法对方向图进行优化设计,能够有效提高设计的效率和质量,在方向图综合中具有非常好的实际工程应用性。

关键词 光学器件;光波导;光学相控阵;光束优化;遗传算法;混合加权

中图分类号 TN252

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.082301

Method of Sidelobe Suppression with Waveguide Optical Phased Array

Peng Lihua^{**}, Li Mingqiu^{***}, Huang Zhiwei, Shi Hongwei^{*}

College of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Aiming at the beam optimization problem of waveguide optical phased array, we propose a sidelobe optimization method with mixed weighting of amplitude and phase based on genetic algorithm. Taking one-dimensional linear array as an example, we analyze the implementation method of mixed weighting. On the basis of the analysis, the MATLAB simulation in computer is carried out for the proposed genetic optimization algorithm. The simulation analysis shows that the optimized antenna pattern compresses the grating-lobe to the sidelobe. Meanwhile, the peak sidelobe level is greatly ameliorated. We perform a comparative analysis of whether the main lobe is included in the optimized search process, the optimized simulation results show that both of them can achieve the purpose of compressing the sidelobe. This algorithm has good convergent performance and can improve the efficiency and quality of the design by optimizing the design of the direction diagram. It has very good practical engineering applications in the direction diagram synthesis.

Key words optical devices; waveguide; optical phased array; beam optimization; genetic algorithm; mixed weighting

OCIS codes 230.7370; 040.1240; 140.3300

1 引言

光学相控阵技术的概念来源于传统的微波相控阵^[1],且比微波相控阵具有明显的优势。光波导光学相控阵作为光学相控阵的一个重要分支,具有分辨率高、速度快、可控性好等优点,已成为当前国内外的研究热门方向^[2-3]。

基于 AlGaAs 的光波导阵列结构设计避免了液晶相控阵存在的边缘效应问题,同时它还有控制电压低、扫描角度大等优点,代表了光学相控阵的一个

重要发展方向。

由于光波的波长短,且受限于目前的加工工艺,光束质量会不可避免地受光学相控阵的物理器件设计误差及器件材料的非一致性等问题的限制。此外,由于入射光源和驱动电压稳定性的干扰,光束势必会产生边瓣(栅瓣和副瓣)。边瓣的存在不仅会损耗入射光的能量,还会导致扫描精度降低^[4-7]。针对边瓣的压缩,传统的优化方法有幅度加权法^[8]、密度加权法^[9]和相位加权法^[10-11]。为进一步提高扫描光束的质量,本文提出了一种基于遗传算法的幅值和

收稿日期: 2017-12-28; 修回日期: 2018-01-25; 录用日期: 2018-01-28

* E-mail: qitiand@qq.com; ** E-mail: 15714307299@163.com; *** E-mail: 2314836044@qq.com

相位混合加权的方法,通过算法仿真证明本文所提优化方法大大降低了相控阵天线的峰值边瓣电平,取得了良好的边瓣压缩效果,验证了此方法的高效可行性。

2 一维线阵的方向图分析

为方便起见,本研究以一维线阵为例进行分析。假设一个有 N 个单元的一维光波导光学相控阵,其原理图如图 1 所示。设第 i 个单元 ($i=0, 1, \dots, N-1$) 发出的光电场振幅为 A_i , 其相位差为 $i\Delta\varphi$, 相控阵单元方向图函数为 $f_i(\theta)$ 。

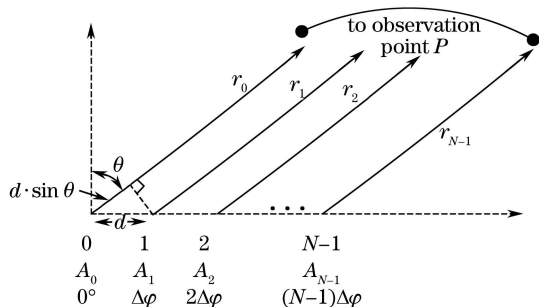


图 1 一维光波导光学相控阵原理图

Fig. 1 Schematic of one dimensional waveguide optical phased array

为了避免光波导阵列内传播场不同的导模间的耦合,实现波导内光场单模传输,假设 AlGaAs 芯层厚度 a 在 $0.40\sim 0.65\ \mu\text{m}$ 范围内^[7],则含有 N 个独立阵元的一维阵列可简化为等间距、单模的多缝光栅模型,即为理想的光波导相控阵。应用多缝光栅衍射叠加定理^[4],通过控制外加电压 U 来改变光通过光波导芯层产生的相位延迟,若相邻两单元的相位延迟差在输出截面上都为 $\Delta\varphi$,则光栅模型的光波导阵列在距离为 r_i 的远场观察点 P 处输出的衍射光电场强度的叠加可表示为

$$E(P) = \sum_{i=0}^{N-1} E_i(P) =$$

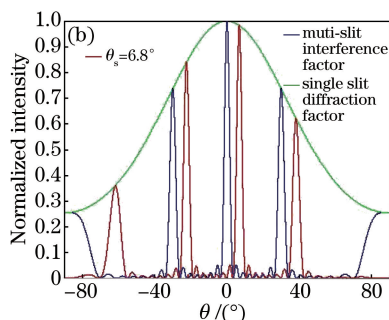
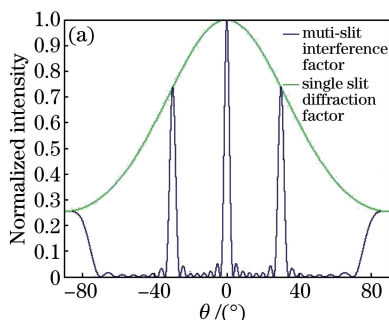


图 2 光波导阵列的空间辐射光场分布。(a) $\theta_s=0^\circ$; (b) $\theta_s=6.8^\circ$

Fig. 2 Spatial radiation optical field distribution of optical waveguide array. (a) $\theta_s=0^\circ$; (b) $\theta_s=6.8^\circ$

$$\sum_{i=0}^{N-1} A_i \exp(-j i \Delta\varphi) f_i(\theta) \frac{\exp[-j(2\pi/\lambda)r_i]}{r_i}, \quad (1)$$

式中: λ 为激光波长; $\Delta\phi = \Delta\varphi_d - \Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d \cdot$

$\sin\theta - \frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta_s$; θ_s 为相控阵波束的扫描角度; $\Delta\varphi_d$

为由相邻单元之间的空间 d 产生的相位差,可称为相邻单元之间的空间相位差; $\Delta\varphi$ 为获得 θ_s 所需的各单元之间的相移差,它由各单元的移相器提供,简称为相邻单元之间的阵内相位差,它的分布可近似表示为需要达到相应波束扫描要求的相位加权量^[8]; θ 为衍射角; A_i 为第 i 个阵列单元对应的出射表面的振幅值,它的分布可近似表示为能够符合光束副瓣目标要求的幅度加权量。假设该相控阵单元方向图为各项同性 [$f(\theta)=1$], 其他条件不变,则相对光强的方向分布函数 $I(\theta)$ 为

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \left\{ \frac{\sin [N(\Delta\varphi_d - \Delta\varphi)/2]}{\sin [(\Delta\varphi_d - \Delta\varphi)/2]} \right\}^2, \quad (2)$$

式中: $\alpha = \pi a \sin \theta / \lambda$; $\left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2$ 为单缝衍射因子,决定强度分布的包络; $\left\{ \frac{\sin [N(\Delta\varphi_d - \Delta\varphi)/2]}{\sin [(\Delta\varphi_d - \Delta\varphi)/2]} \right\}^2$ 为多缝干涉因子,决定光强分布的相干特性^[9]。

当对光波导阵列施加一个外加电压时,激光在通过光波导的芯层后会产生相位延迟 $\Delta\varphi$ ($\Delta\varphi \neq 0^\circ$),不同的 $\Delta\varphi$ 使辐射强度在单缝衍射的包络下发生不同程度的平移,两者共同作用,达到光束扫描的目的。这就是光波导光学相控阵的扫描原理^[7]。图 2(a) 为未偏转时的空间辐射光场分布;图 2(b) 中的红色曲线表示偏转角度 $\theta_s=6.8^\circ$ 的空间辐射光场分布。各参数的取值如下:阵列单元 $N=8$,波导阵列

间距 $d = 2 \mu\text{m}$, 波导的芯层厚度 $a = 0.6 \mu\text{m}$, 激光波长 $\lambda = 1 \mu\text{m}$ 。

3 混合加权的遗传优化研究

3.1 优化模型

建立一个可以通过调节振幅大小和相控阵内移相器的相移值来实现对边瓣压缩^[11-12]的一维线性阵列模型, 其远场 P 点的场强分布可以表示为

$$E(P) = \sum_{i=0}^{N-1} A_i \exp(-j\alpha_i) \exp[ji(\Delta\varphi_d - \Delta\varphi)], \quad (3)$$

式中: A_i 为第 i 个阵元权重的量化后的幅值; α_i 为第 i 个阵元权重的边瓣抑制相位, 通过调节 α_i 值可以实现对栅瓣的压缩, 且主瓣不受影响, 仍满足相干相长的条件 ($\sin\theta - \sin\theta_s = 0$)。因此, α_i 项中一定包含 $\sin\theta - \sin\theta_s$ 。

对线性阵列而言, 阵列权值优化的相位^[13]和幅度加权函数为 $w_i = A_i e^{j\alpha_i}$, 取幅度-相位为优化变量, 令 $x = [\alpha_i | A_i]$, 为满足光波导光学相控阵对方向图的复杂要求, 远场幅度方向图应在规定的上、下限之内^[14], 即

$$|E(\theta)_{\min}| \leq |E(\theta)| \leq |E(\theta)_{\max}|, \quad (4)$$

式中: $-\pi \leq \theta \leq \pi$; $|E(\theta)_{\min}|$ 和 $|E(\theta)_{\max}|$ 分别为期望方向图幅度的下限和上限, 它们之间满足

$$E(\theta)_{\min} = \begin{cases} |E(\theta)_{\max}| - c, & \theta \text{ is in main lobe region} \\ 0, & \theta \text{ is out of main lobe region} \end{cases}, \quad (5)$$

当 θ 位于主瓣区域内时, $|E(\theta)_{\min}|$ 有非零值, 其中 c 表示波束的范围; 当 θ 不在该区域时, $|E(\theta)_{\min}|$ 表示方向图的下限。

通过分析可知, 适应度函数定义为超出功率方向图上、下限之外的部分, 可以表示为

$$f = \sum_{i=1}^N |E(\theta_i) - E(\theta_i)_{\max}|^2 + \sum_{i=1}^N |E(\theta_i) - E(\theta_i)_{\min}|^2. \quad (6)$$

优化函数 f 越小, 表示效果越好, 则优化模型可以设定为 $\min_x(f)$ 。

根据给定的远场方向图, 每个位于方向图指定限制值之外的点均给适应度函数增加了一个数值, 该数值即为该点与远场方向图的功率差值, 以此来描述给定方向图的性能。通过选择不同的尝试解反复评估适应度函数, 通过遗传过程实现对尝试解的

修改, 使之逐渐收敛到最优解, 对应返回适应度函数最小的解。

3.2 遗传优化算法的应用

一个全局极小化问题可以形式化为一个对 (S, f) , 其中 $S \in \mathbf{R}^n$ 是 \mathbf{R}^n 中的有界集, $f: S \rightarrow \mathbf{R}$ 为 n 维实值函数。所要求解的问题是寻找 $x_{\min} \in S$, 使 $f(x_{\min})$ 为 S 上的全局极小值, 即找到 $x_{\min} \in S$ 满足: $\forall x \in S: f(x_{\min}) \leq f(x)$ 。

遗传算法是最具有代表性的随机算法之一, 它通过模拟自然界生物的进化过程来达到对搜索及其最优化问题的一种自适应随机搜索寻优技术。

采用遗传算法^[15]对幅度和相位进行混合加权, 即对幅度和相位同时进行优化, 实现方向图综合。这里假设光波导光学相控阵不进行扫描, 即 $\theta_s = 0^\circ$ 。为了更好地观察波束的优化效果, 用快速傅里叶变换来求解远场方向图, 其优化算法的流程图如图 3 所示。

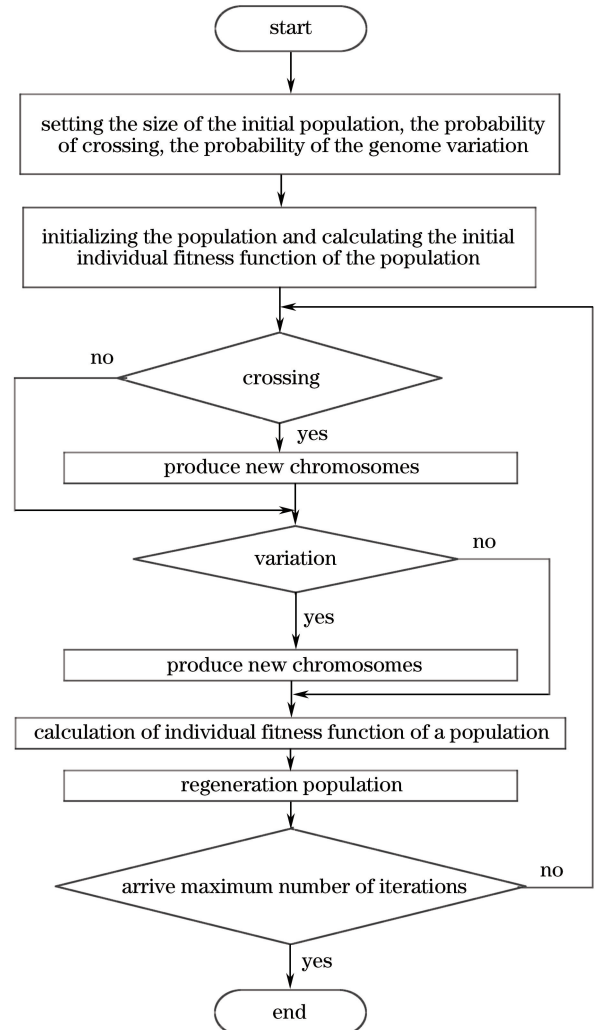


图 3 遗传算法流程图

Fig. 3 Flow chart of genetic algorithm

3.2.1 编 码

该优化算法开始时,从随机候选解中产生一个大小为 50 的初始种群,并根据其性能表现为种群中的每个个体赋予一个分值。由于该优化算法对幅度和相位进行调制加权,取幅度-相位为优化变量($x = [\alpha_i | A_i]$),取量化幅值 $A_i \in [0, 1]$,附加相位值 $\alpha_i \in [0, \pi]$,共有 $2N$ 个变量,采用二进制编码,其中 $1 \sim N$ 范围内的个体对应幅度值编码, $N+1 \sim 2N$ 范围内的个体对应附加相位值编码。从随机候选解中产生一个初始种群,初始种群的范围大小为 50,以建立优化的搜索初始点。这里假定所有随机初始化的种群均符合均匀概率分布。二进制编码形式为 $F_{\text{chrom}} = \{0, \dots, 1\}_{1 \sim 2N}$,其中染色体的长度为 10。

3.2.2 选 择

以适应度作为选择原则为种群中的每个个体赋予一个分值,从种群中挑选出相对较好的个体为父代和母代,通过一定比例实现个体的选择,即适应度为 f_i 的个体将以 $f_i / \sum f_k$ 的概率被复制到下一代,对应父母代表双亲中全部个体所对应的适应度总和。为了增加种群的多样性,需要适当添加一些随机的进化。

3.2.3 交 叉

对基于父代和母代分别产生的子代进行随机交叉,然后按升序排列,并将两个个体交叉点后的右半段互换后得到两个新的个体,并与亲本(原来的两个个体)进行比较,保留适应度大的两个个体。

3.2.4 变 异

初始的变异概率值设为 0.04,变异的范围大小随着迭代次数的增加而衰减,其衰减系数为 1.5,且限定突变的最大范围不超过整个种群的 20%。

4 算法仿真与分析

以上述线阵为例进行遗传优化算法的仿真实验。仿真中取种群的规模 $M = 50$,迭代次数为 10000,幅度值的变化范围为 $0 \sim 1$,相位值的变化范围为 $0 \sim \pi$ 。优化后的混合加权方向图已不存在明显的栅瓣,栅瓣压缩为副瓣水平,同时副瓣也得到明显降低,最大副瓣电平平均低于 -35 dB,取得了满意的优化效果。

以下对比优化过程包含主瓣与除去主瓣的优化效果。图 4 为优化过程包含主瓣的优化效果图,图 5 为优化过程除去主瓣的优化效果图,图 4(a)和图 5(a)的第一幅图表示两种优化迭代过程中种群对应的最优适应度值大小及其平均量随迭代次数增加的变化曲线。通过观察图 4~5 可知:随着进化次数增加,群体适应度均发生明显降低,但前者的群体适应度趋于稳定的速度比较慢;二者优化搜索过程的仿真运算时间分别约为 2.77 min 和 3.51 min,可知前者的搜索过程明显快于后者;天线远场方向图的峰值副瓣电平平均已达到最终优化结果。由此可见,两者对边瓣的优化均有自己的优势,均能达到优化边瓣的目的。

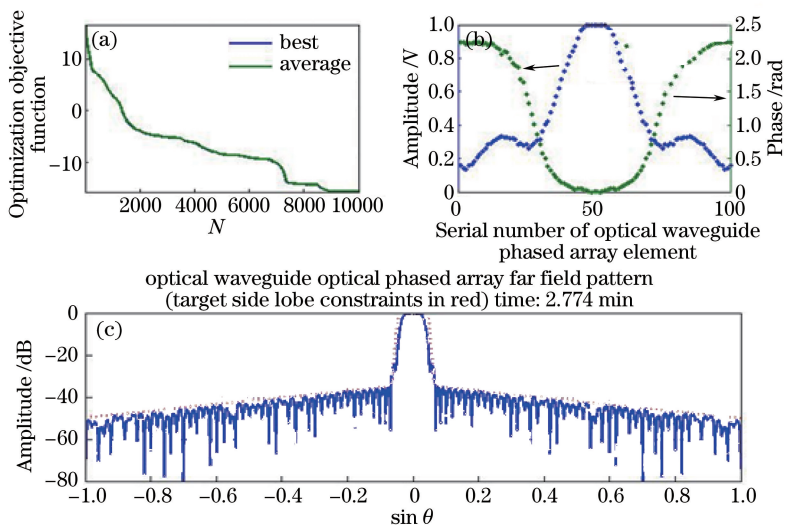


图 4 基于遗传算法(包含主瓣)的优化效果图。

(a) 适应度函数优化曲线; (b) 孔径权重分布; (c) 归一化光能量分布

Fig. 4 Optimization effect diagrams based on genetic algorithm (including main lobe).

(a) Fitness function optimization curve; (b) aperture weight distribution; (c) normalized light energy distribution

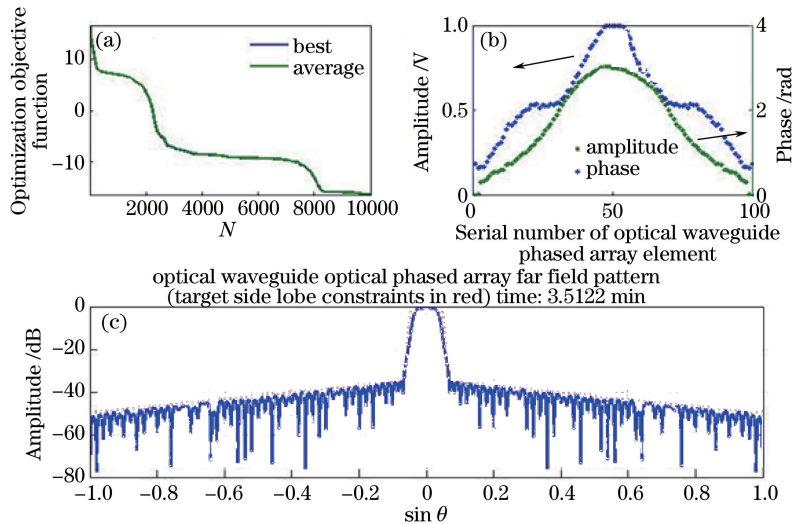


图5 基于遗传算法(无主瓣)的优化效果图。

(a)适应度函数优化曲线;(b)孔径权重分布;(c)归一化光能量分布

Fig. 5 Optimization effect diagrams based on genetic algorithm (excluding main lobe).

(a) Fitness function optimization curve; (b) aperture weight distribution; (c) normalized light energy distribution

5 结 论

光波导光学相控阵作为一种新型的光学相控阵,具有结构简单、质量轻、精确稳定、方向可任意控制等优点,应用前景广阔。但是边瓣的存在给光波导光学相控阵的应用带来了很大限制。在对光波导光学相控阵基本原理进行分析的基础上,提出了一种基于遗传算法的幅度和相位混合加权的压缩边瓣的优化方法,以一维线阵为例进行了仿真研究。仿真结果表明,采用该优化算法能够实现对幅值和相位的搜索优化,使优化后的天线方向图的栅瓣电平大大降低,同时峰值副瓣电平也得到明显压缩。此方法简单有效,在天线方向图综合应用中具有广阔的前景。

参 考 文 献

- [1] Meng F W. Analysis on application of microwave technology in the modern phased array radar [J]. *Wireless Internet Technology*, 2016(14): 32-33, 36. 孟凡伟. 微波新技术在现代相控阵雷达中的应用分析[J]. *无线互联科技*, 2016(14): 32-33, 36.
- [2] 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.
- [3] Wang X L, Zhou P, Su R T, *et al.* Current

situation, tendency and challenge of coherent combining of high power fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201001.

王小林, 周朴, 粟荣涛, 等. 高功率光纤激光相干合成的现状、趋势与挑战[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201001.

- [4] Wang L, Shi S X, Li J L. Research on optical waveguide scanning technique based on GaAs/AlGaAs [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, 42(1): 37-39. 王莉, 石顺祥, 李家立. 基于 GaAs/AlGaAs 光波导扫描技术的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, 42(1): 37-39.
- [5] Poulton C V, Yaccobi A, Su Z, *et al.* Optical phased array with small spot size, high steering range and grouped cascaded phase shifters [C]. *Integrated Photonics Research, Silicon and Nanophotonics*, 2016: IW1B.2.
- [6] Hutchison D N, Sun J, Doylend J K, *et al.* High-resolution aliasing-free optical beam steering [J]. *Optica*, 2016, 3(8): 887-890.
- [7] Gao Z. Experimental research on the optical waveguide array electro-optical scanner [D]. Xi'an: Xidian University, 2014. 高中. 光波导阵列电光扫描器的实验研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [8] Shi S X, Liang H W, Li J L, *et al.* Scanning beam side lobe compression method based on optical waveguide array electro-optical scanner: 200710018189.7 [P]. 2007-11-28.

- 石顺祥, 梁华伟, 李家立, 等. 基于光波导阵列电光扫描器的扫描光束边瓣压缩方法: 200710018189.7 [P]. 2007-11-28.
- [9] Li J. Analysis and optimization of optical waveguides optical phased array beams [D]. Xi'an: Xidian University, 2012.
李瑾. 光波导光学相控阵光束分析与优化[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [10] Zhang S S. Phased weighted method to eliminate grating-lobes of optical phased array [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
张珊珊. 基于相位加权方法消除光学相控阵中的栅瓣[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [11] Jin Y D. Analysis and optimization of high quality optical phased array scanning beam [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2015.
金亚东. 高质量光学相控阵扫描光束分析与优化 [D]. 上海: 上海师范大学, 2015.
- [12] Cui N D, Kou J T, Zhao H, *et al.* Optical true time-delay lines of photonic crystal slow light waveguides used in phased array radar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0616001.
- 崔乃迪, 寇婕婷, 赵恒, 等. 应用于相控阵雷达的光子晶体慢光波导光实时延迟线 [J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0616001.
- [13] Li Q S. Research on optimization algorithm of phase weighting scheme for phased array antenna based on genetic algorithm [J]. *Tactical Missile Technology*, 2008(6): 26-29.
李秋生. 相控阵天线相位加权方案的遗传优化算法研究 [J]. *战术导弹技术*, 2008(6): 26-29.
- [14] Shi L, Chen X, Wu W Q, *et al.* Pattern synthesis of antenna based on an adaptive genetic algorithm [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2014, 29(1): 169-177.
石力, 陈鑫, 吴玮琦, 等. 基于自适应遗传算法方向图综合 [J]. *电波科学学报*, 2014, 29(1): 169-177.
- [15] Boeringer D W, Werner D H. Particle swarm optimization versus genetic algorithms for phased array synthesis [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2004, 52(3): 771-779.