

文章编号: 1002-1582(2026)02-0129-06

基于阵元方向图编辑的激光相控阵栅瓣抑制研究

闫瑞涛*, 韩威, 刘子龙

(中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050800)

摘 要: 激光通信、车载激光雷达、激光遥感成像等领域对激光快速指向提出了非常高的需求, 激光相控阵作为一种电控扫描方式, 具备快速指向, 分辨率高的优势。文章提出了一种基于阵元方向图编辑栅瓣抑制方法, 解决激光相控阵栅瓣过高的问题。基于激光相控阵波束合成理论, 调节每个合成阵元的方向图信息, 打破阵列的周期性排布, 仿真表明, 采用3dB波束宽度分别为130°、30°以及1°三种阵元方向图随机布阵, 可有效降低激光相控阵的栅瓣幅值。

关 键 词: 激光技术; 激光相控阵; 栅瓣抑制

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标识码: A

Research on grating lobe suppression in laser phased arrays based on element pattern editing

YAN Ruitao*, HAN Wei, LIU Zilong

(The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050800, China)

Abstract: Fields such as laser communication, vehicular lidar, and laser remote sensing imaging impose stringent requirements on rapid laser beam steering. As an electronically controlled scanning approach, laser phased arrays offer advantages including high-speed pointing and superior resolution. A grating lobe suppression method based on element pattern editing to address the issue of excessive grating lobes in laser phased arrays is proposed. Building upon the beam synthesis theory of laser phased arrays, the method adjusts the pattern information of each synthesized array element to disrupt the periodic arrangement of the array. Simulation results demonstrate that employing a randomized array configuration with three types of element patterns (featuring 3dB beam widths of 130°, 30°, and 1° respectively) can effectively reduce the grating lobe amplitude in laser phased arrays.

Keywords: laser technology; Optical Phased Array (OPA); side lobe suppression

0 引 言

激光扫描(偏转)技术是激光应用领域的基础技术之一, 可用于激光雷达、激光通信、激光测控、激光制导、激光成像等许多领域。传统光学扫描方式往往采用机械扫描的方式, 机械扫描存在有扫描速度慢、线性扫描范围有限、体积大等缺点。即使是随着微机械(Micro-Electro Mechanical System, MEMS)发展出现的微机械扫描

系统, 可以达到小型化的目的, 依然存在着反射镜面小和指向弛豫的问题, 不能完成光束的快速任意指向, 从实际应用来看微机械扫描系统的谐振频率、扫描角度、线性扫描范围等性能仍然难以满足系统宽视场快速响应的探测需求。

激光光学相控阵^[1-5] (Optical Phased Array, OPA) 作为一种新型非机械光学扫描方法, 摆脱了传统机械扫描速度慢, 装置体积大的性能限制。采用电子可编程方式控制光学孔径上的相位分布来控制

收稿日期: 2025-04-27; 收到修改稿日期: 2025-08-21

作者简介: 闫瑞涛(1992—), 男, 工程师, 从事激光相控阵领域研究。

* 通讯作者: 764528182@qq.com

制光束的方向和形状,使光束波前在指定的方向上彼此同相,从而获得互相加强的干涉,提供适合高动态目标的激光无惯性波束扫描,具有响应快、分辨率高等优点,将在极大程度上缓和激光应用中视场、响应速度、作用距离、载荷体积间的矛盾,满足激光雷达^[6-10]、激光通信^[11,12]、激光测控、激光制导、激光成像等领域的需求。

根据相控阵理论,激光相控阵系统为避免栅瓣出现,阵列之间的单元间距要少于工作波长的一半。由于激光波长较短,普遍工作波长包括 $1.064\mu\text{m}$ 以及 $1.55\mu\text{m}$ 等。这对现有的激光相控阵体制提出了挑战。

目前 OPA 包括光纤激光相控阵以及芯片激光相控阵两种主流形式。其中光纤包层厚度约 $125\mu\text{m}$,阵元间距很难缩小。而基于芯片的一维激光相控阵可以将阵元间距做小,但是会导致通道间串扰增加的问题,更进一步,基于芯片的激光相控阵在二维堆叠或大范围拼阵时,同样无法避免栅瓣问题。在雷达、通信、探测等应用领域,激光相控阵的栅瓣不仅会导致主瓣能量降低,还会对通信和探测系统造成干扰。因此,激光相控阵的栅瓣抑制一直是领域研究热点和难点。

在光学相控阵栅瓣抑制问题上,已经有大量的研究工作。包括 2020 年,华北水利水电大学陈建民等提出的不等间距布阵抑制理论^[13]。2021 年,李明飞等将非均匀布阵的抑制方法应用到了光纤激光相控阵^[14]。2024 年,钟永旭等采用基于改进遗传算法和凸优化算法,设计了一种相邻阵元最小间距为 $18\mu\text{m}$ 、工作波长为 1550nm 的多圆环光学相控阵,对栅瓣进行了有效抑制^[15]。抑制算法方面:2021 年,李文磊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^[16]。2024 年,周木春等以哈里斯鹰种群算法将主瓣强度和扫描范围指标数值均维持在较高的状态,实现了多个指标同时优化^[17]。以上,许多工作围绕光纤阵列的非周期排布开展,并实现了栅瓣的有效抑制。

本文通过对激光相控阵合成理论分析,提出通过阵元方向图编辑方式实现栅瓣抑制。通过改变激光相控阵光学发射天线的结构等方式,可实现对阵元发射方向图的编辑,打破单元内能量的周期性分布,实现栅瓣抑制。

1 理论分析

一维激光相控阵如图 1 所示,为一个 N 单元线阵。其中,第 i 个光学发射天线的光场强度为 A_i ,

($i=0,1,2,3,4,\dots,N-1$)。每一个光纤发射单元的方向函数以 $f_i(\theta,\varphi)$ 表示。第 i 个单元远区目标距离为 r_i 。

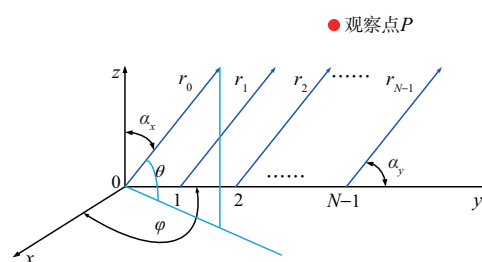


图 1 影像测量系统原理图

设第 i 个光学天线的相位为 $i\Delta\Phi_B$ 。这样,第 i 个光学天线单元在远区目标处产生的光场强度 E_i 可表示为

$$E_i = A_i f_i(\theta, \varphi) \frac{e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} r_i}}{r_i} \quad (1)$$

式中, λ 为光的波长。

对于线性传播媒介,电磁场方程是线性方程,可以应用叠加定律,因此,远场区 P 点的总光场强度可以认为是线阵中 N 个单元在 P 点光场的矢量叠加,故 P 点的总光场强度表示为 E

$$E = \sum_{i=0}^{N-1} E_i = \sum_{i=0}^{N-1} A_i e^{-j\Delta\Phi_B} f_i(\theta, \varphi) \frac{e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} r_i}}{r_i} \quad (2)$$

假设激光各个单元一致,光场幅值 A_i 一致,光场分布函数 $f_i(\theta,\varphi)$ 一致,则式(2)可以表示为

$$E = A f(\theta, \varphi) \sum_{i=0}^{N-1} e^{-j\Delta\Phi_B} \frac{e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} r_i}}{r_i} \quad (3)$$

式中,等号右边的分母中的可以用 r_0 代替,因为 r_0 与 r_i 的差与 r_0 相比是非常小的,故用 r_0 代替 r_i 后对光场强度分布基本没有影响。但是,在考虑单元之间的相位时,不能用 r_0 代替。设天线单元之间的间距为 d ,则 r_i 为

$$r_i = r_0 - id \cos \alpha_y \quad (4)$$

式中, α_y 为矢量 r_i 的方向余弦

$$\cos \alpha_y = \cos \theta \sin \varphi \quad (5)$$

因此,式(1)可以表示为

$$E = A e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} r_0} f(\theta, \varphi) \sum_{i=0}^{N-1} e^{-j\Delta\Phi_B} e^{j\frac{2\pi}{\lambda} \cos \alpha_y} \quad (6)$$

可见,合成光场强度 E 是 θ, φ 的函数,应以 $E(\theta, \varphi)$ 表示,若不考虑幅度和相位的常数项,则 $E(\theta, \varphi)$ 为

$$E(\theta, \varphi) = f(\theta, \varphi) \sum_{i=1}^{N-1} e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda} id \cos \theta \sin \varphi - i\Delta\Phi_B\right]} \quad (7)$$

式中, $f(\theta, \varphi)$ 是光学阵元的方向图,其余为阵列因子。因此,远场出光场强度是单个光学阵元方向图与阵列因子的乘积。

基于式(7),假设单个方向图幅值为 A ,远场的光场分布表示为

$$I(\theta) = |E(\theta)|^2 = A^2 \frac{\sin^2 \left[\frac{N}{2} \left(\frac{2\pi}{\lambda} d \cos \theta \sin \varphi - \Delta \Phi_B \right) \right]}{\sin^2 \left[\frac{1}{2} \left(\frac{2\pi}{\lambda} d \cos \theta \sin \varphi - \Delta \Phi_B \right) \right]} \quad (8)$$

式中, A 为发射振幅; λ 为光波的工作波长,在式(8)的基础上

$$\frac{2\pi}{\lambda} d \cos \theta \sin \varphi - \Delta \Phi_B = 2m\pi, m = 1, 2, 3 \quad (9)$$

当参数关系满足式(9)时,出现栅瓣。

根据式(8)、(9)可以看出,阵列方向图由于单元间距 d 的不同而发生变动,即,随着单元间距 d 逐渐增加,需考虑导致栅瓣出现的情况。即,随着单元间距 d 值逐渐增加,其孔径长度也随之逐渐增长,从而使阵列主光束逐渐变窄,与此同时,栅瓣也随之产生。以往论文^[25]通过改变间距 d 来抑制栅瓣,此时阵元间距 d 不在是常数,用 d_m ($m = 0, 1, 2, \dots$)来表示阵元之间的间距值,则式(7)可以表示为

$$E(\theta) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{j \left[\frac{2\pi}{\lambda} \sum_{m=0}^{N-1} d_m \cos \theta \sin \varphi - \Delta \Phi_B \right]} \quad (10)$$

通过进一步分析式(6),可以发现,不仅阵元间距 d 会影响远场光强分布,阵元的方向图函数 $f_i(\theta, \varphi)$ 也会影响远场光强分布,当每个阵元的方向图函数不相同,式(7)无法转换为式(8),此时的远场的光场分布为

$$E = |E(\theta, \varphi)|^2 = \left| f_i(\theta, \varphi) \sum_{i=1}^{N-1} e^{j \left[\frac{2\pi}{\lambda} i d \cos \theta \sin \varphi - i \Delta \Phi_B \right]} \right|^2 \quad (11)$$

从式(11)可以看出,假使单个阵元方向图 $f(\theta, \varphi)$ 不一致,则远场光强分布随之改变,从而影响栅瓣能量分布,基于式(11)开展仿真计算,可分析出阵元方向图编辑对栅瓣的抑制效果。

2 仿真实验

2.1 阵元间距 d 对栅瓣影响

首先,基于式(8),仿真不同阵元间距 d 情况下栅瓣出现情况。仿真条件为:波长1550nm,一维激光相控阵,阵列单元数量16个,所有阵元方向图相同,阵元方向图如图2所示,高斯光束,3dB宽度100°。

上述一维阵列均匀排列,目标方向在0°时,阵元间距从1μm到100μm依次增大,远场光强分布

如图3所示,可以看出,当阵元间距为1μm时,激光相控阵合成的方向图没有栅瓣出现,随着阵元间距 d 增加,栅瓣数量急剧增多。当阵元间距增加到100μm时,栅瓣间隔约0.01rad,这将严重影响光纤激光相控阵的使用。

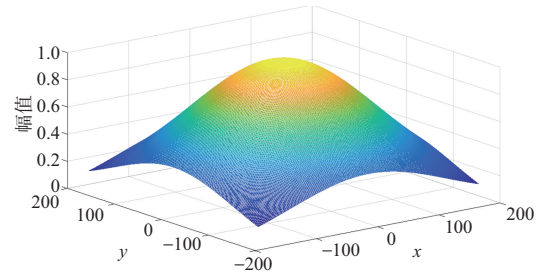


图2 单个阵元高斯光束示意图

2.2 阵元方向图编辑对栅瓣影响

基于式(11),通过改变发射天线的大小或者增加微透镜等方式,可以改变单元方向图函数,继而解除激光相控阵的周期性排布。仿真条件为:阵列具备图4所示的三种方向图函数,3dB波束宽度分别为130°、30°以及1°,三种阵元随机分布,阵元数量为16个,波长1550nm,阵元间距4μm,阵元方向图不同的仿真结果如图5所示,相同仿真条件下,阵元方向图相同的仿真结果如图6所示,对比两次仿真结果,可以看出,采用130°、30°以及1°三种阵列单元随机布阵(图5),相比于传统的统一单元布阵(图6),可以极大的抑制栅瓣幅值。

本文方法对栅瓣的抑制程度与其他方法比较如表1所示。可以看出,本文的栅瓣抑制比更优,考虑对阵方向图的编辑,从一定程度上也起到了随机布阵的作用,栅瓣抑制结果属阵元方向图编辑和随机布阵的叠加,对周期性的破坏更为彻底。

2.3 阵元方向图编辑对分辨率影响

激光相控阵分辨率是工程应用的重要指标,影响激光雷达、激光通信等领域应用的效能,分析本方法对主波束分辨率的影响对后续研究具有积极的指导意义。

激光相控阵分辨率受阵元数量、阵元间距、激光波长、相位控制精度、空间传输衍射效应以及阵元方向图的影响。本方法主要考虑阵元方向图变化对主瓣波束宽度的影响。经仿真分析,在1550nm,16阵元,4μm阵元间距等条件下,分析了波束宽度从0°到180°变化情况,结果如图7所示。从图中可以看出,在上述仿真条件下,当阵元发射的高斯光束从0°增加到20°时,激光相控阵主波束(3dB)波束宽度随之增大,当单个阵元波

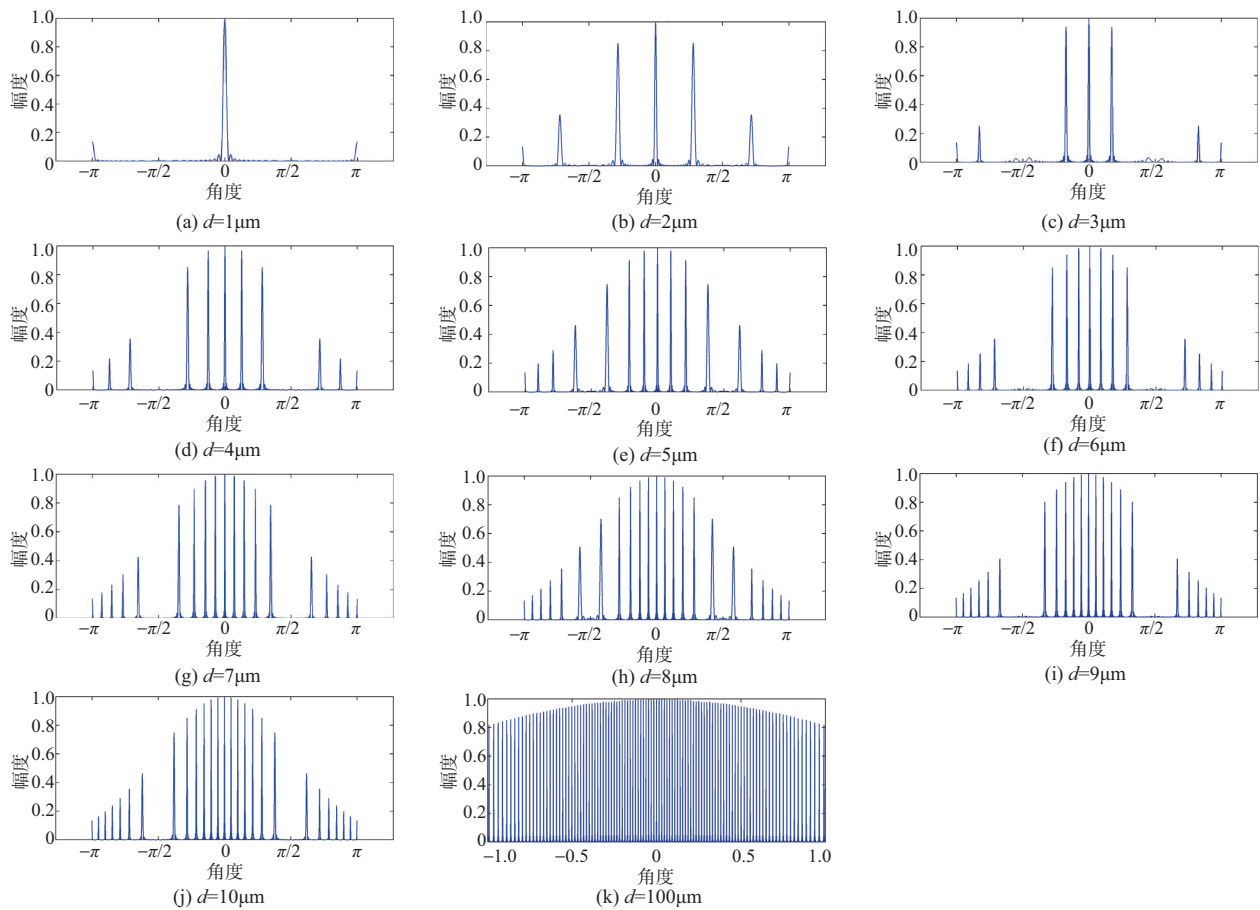


图3 阵元间距 d 对栅瓣影响(VISO图,可放大):不同 d 对应激光相控阵列方向图

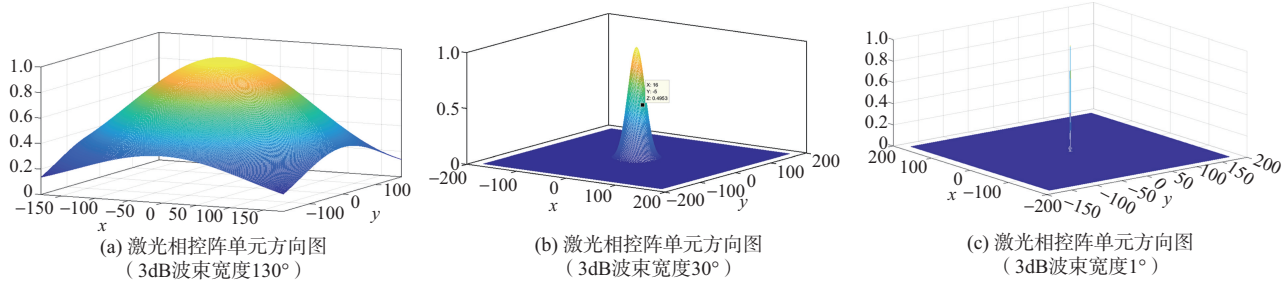


图4 不同阵元方向图示意

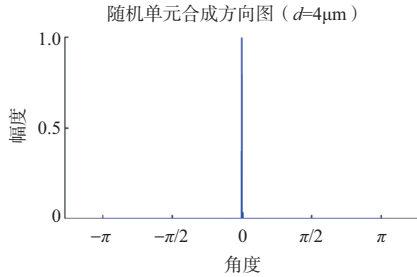


图5 不同阵元方向图随机布阵光场分布

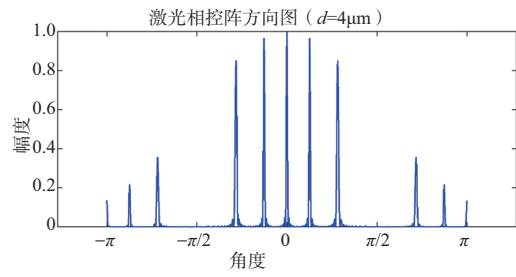


图6 相同阵元方向图光场分布

表1 不同方法对栅瓣抑制比较

序号	抑制方法	栅瓣抑制比(主瓣/栅瓣)/dB
1	基于爬坡算法的片上低栅瓣二维光学相控阵 ^[18]	6~7
2	低旁瓣大扫描角多圆环光学相控阵优化设计 ^[15]	15
3	基于改进种群算法的光学相控阵多目标栅瓣优化 ^[17]	16.11
4	基于阵元方向图编辑的激光相控阵栅瓣抑制	20.1

束宽度从 20° 进一步增加到 180 度时激光相控阵主波束的波束宽度没有变化。

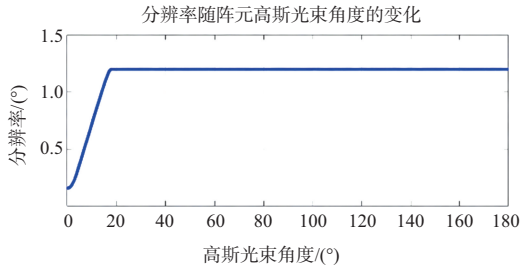


图7 分辨率随阵元方向图波束宽度变化关系

本文通过仿真比较了阵元波束宽度在 130°、30°、1° 以及阵元方向图编辑四种情况的主波束宽度, 结果如表 2 所示。

表2 不同波束宽度分辨率

序号	阵元波束宽度/(°)	主波束分辨率/(°)
1	130	1.22
2	30	1.22
3	1	0.5025
4	130、30、1 随机布阵	0.6387

仿真结果表明, 随机方向图编辑方法会引起主瓣展宽, 仿真表明, 在 3dB 波束条件下, 波束宽度从 0.5025° 展宽到 0.6387° (相比于 1 度阵元波束宽度), 增加了 27.1%。但是相比较与机械扫描系统, 本方法主瓣宽度仍满足激光雷达分辨率要求, 且通过优化方向图组合比例可进一步抑制展宽。

3 结 论

本文针对目前激光相控阵常见的栅瓣干扰问题, 通过分析激光相控阵合成机理, 给出了一种基于阵元方向图编辑的栅瓣抑制方式, 从电磁场能量分布调控的全新维度解决了栅瓣抑制难题, 实现激光能量在主瓣的高效集中。

上述方法从根本上破坏栅瓣形成的相位相干条件, 仿真显示在 4μm 间距下栅瓣抑制比提升巨大。同时, 本文方法在应用层面兼容标准半导体工艺 (如 CMOS 兼容的硅光工艺), 无需复杂的布阵设计。最后, 本文方法可与非均匀排布等方法同时使用, 为多维参数协同调控提供新思路, 同时也为相关算法给出了更多的控制向量。此类方向图可重构技术将推动相控阵更进一步的走向工程应用, 对 5G/6G 移动通信、智能驾驶激光雷达等产业具有变革性意义。

附件 1

本文式(7)到式(8)步骤较多, 过程如下:

$$E(\theta, \varphi) = f(\theta, \varphi) \sum_{i=1}^{N-1} e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda} id \cos \theta \sin \varphi - i \Delta \Phi_B\right]} \quad (1)$$

设

$$|f(\theta, \varphi)|^2 = A^2 \quad (2)$$

$$S = \sum_{i=1}^{N-1} e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda} id \cos \theta \sin \varphi - i \Delta \Phi_B\right]} \quad (3)$$

$$\beta_i = i \left[\frac{2\pi}{\lambda} d \cos \theta \sin \varphi - \Delta \Phi_B \right] \quad (4)$$

$$|E(\theta, \varphi)|^2 = A^2 |S|^2 \quad (5)$$

$$|S|^2 = \left(\sum_{i=0}^{N-1} e^{j\beta_i} \right) \cdot \left(\sum_{k=0}^{N-1} e^{j\beta_k} \right) \quad (6)$$

$$|S|^2 = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} e^{j(\beta_i - \beta_k)} \quad (7)$$

设

$$\frac{2\pi}{\lambda} d \cos \theta \sin \varphi - \Delta \Phi_B = \Delta \alpha \quad (8)$$

$$|S|^2 = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} e^{j(i-k)\Delta \alpha} \quad (9)$$

利用等比数列求和公式(10)以及三角恒等式(11)对公式(9)进行求和

$$\sum_{n=0}^{N-1} e^{jna} = \left| \frac{1 - e^{jNa}}{1 - e^{ja}} \right| \quad (10)$$

$$\left| \frac{1 - e^{jNa}}{1 - e^{ja}} \right|^2 = \frac{\sin^2\left(\frac{Na}{2}\right)}{\sin^2\left(\frac{a}{2}\right)} \quad (11)$$

以上

$$I(\theta) = |E(\theta)|^2 = A^2 \frac{\sin^2\left[\frac{N}{2}\left(\frac{2\pi}{\lambda} d \cos \theta \sin \varphi - \Delta \Phi_B\right)\right]}{\sin^2\left[\frac{1}{2}\left(\frac{2\pi}{\lambda} d \cos \theta \sin \varphi - \Delta \Phi_B\right)\right]}$$

参考文献:

- [1] 李润泉, 王智, 崔桀, 等. 阵列波导激光相控阵光束偏转特性研究[J]. 光学技术, 2018, 14(02): 129—132
Li Run Quan, Wang Zhi, Cui Can, et al. Study on beam deflection characteristics of arrayed waveguide laser phased array[J]. Optical Technique, 2018, 44(2): 129—132.
- [2] 吕秀品, 冯克成, 刘伟奇. 学相控阵扫描的理论研究[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2002.
Lü Xiupin, Feng Kecheng, Liu Weiqi. Theoretical study on optical phased array scanning[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2002.
- [3] 闫爱民, 职亚楠, 孙建峰, 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): 7.
Yan Aimin, Zhi Yanan, Sun Jianfeng, et al. Research progress on optical phased array scanning technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(10): 7.
- [4] 马鹏飞, 于磊, 王政, 等. 基于 SiN 平板波导光栅的 128 通道光学相控阵[J]. 激光技术, 2024, 48(6): 832—837.
Ma Pengfei, Yu Lei, Wang Zheng, et al. 128-channel optical phased array based on SiN planar waveguide grating[J]. Laser Technology, 2024, 48(6): 832—837.
- [5] 刘家盈, 李自强, 杨然, 等. 光纤激光相控阵相干合成技术研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2023, 35(4): 36—48.
Liu Jiaying, Li Ziqiang, Yang Ran, et al. Research progress on

- coherent combining technology of fiber laser phased array[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2023, 35(4): 36—48.
- [6] 陈敬业, 赵世, 李文磊, 等. 大视场硅基光学相控阵激光雷达芯片研究进展(特邀)[J]. 光学学报, 2024, 44(15): 1513028. Chen Jingye, Zhao Shi, Li Wenlei, et al. Research progress of large-field-of-view silicon-based optical phased array lidar chips (Invited)[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(15): 1513028.
- [7] 苏杭, 张福领, 赵渊明, 等. 应用于全固态激光雷达的光学相控阵技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(17): 1728001. Su Hang, Zhang Fuling, Zhao Yuanming, et al. Research on optical phased array technology for all-solid-state lidar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(17): 1728001.
- [8] 付云浩. 目标自适应光学相控阵激光雷达成像技术研究[D]. 吉林大学, 2024. Fu Yunhao. Research on Target-adaptive optical phased array laser radar imaging technology[D]. Jilin University, 2024.
- [9] 胡鹤鸣, 李杰, 陈柏松, 等. 面向激光雷达的硅基光学相控阵芯片及其探测方法的研究进展[J]. 光学学报, 2024, 44(15). DOI: 10.3788/AOS240940. Hu Heming, Li Jie, Chen Baisong, et al. Research progress of silicon-based optical phased array chips and their detection methods for lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(15).
- [10] 封治华, 张福领, 董光焰, 等. 基于级联式的硅基光学相控阵激光雷达天线研究[J]. 光电子技术, 2022, 42(4): 8. Feng Zhihua, Zhang Fuling, Dong Guangyan, et al. Research on cascaded silicon-based optical phased array lidar antenna[J]. Optoelectronic Technology, 2022, 42(4): 8.
- [11] 毕明喆, 苏煜炜, 马万卓, 等. 基于光纤激光相控阵的空间激光通信系统[J]. 应用光学, 2016, 37(6): 4. Bi Mingzhe, Su Yuwei, Ma Wanzhuo, et al. Space laser communication system based on fiber laser phased array[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(6): 4.
- [12] 宋义伟, 胡景森, 李贝, 等. 从光学相控阵技术展望激光通信的发展趋势(特邀)[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(7): 0706003. Song Yiwei, Hu Jingsen, Li Bei, et al. Prospects for the development trend of laser communication from optical phased array technology (Invited)[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(7): 0706003.
- [13] 陈建明, 郝一方. 光学相控阵栅瓣的改善及优化方法[J]. 光电与控制, 2020, 27(2): 107—110. Chen JianMin, Jia YiFang. Grating lobe improvement and optimization methods for optical phased arrays[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(2): 107—110.
- [14] 李明飞, 袁梓豪, 刘院省, 等. 光纤相控阵稀疏排布优化算法对比[J]. 物理学报, 2021, 70(8): 084205-1 - 084205-8. Li Mingfei, Yuan Zihao, Liu Yuansheng, et al. Comparison between optimal configuration algorithms of fiber phased array[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(8): 084205-1 - 084205-8.
- [15] 钟永旭, 汪祥宇, 谌诗洋, 等. 低旁瓣大扫描角多圆环光学相控阵优化设计[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(21): 2122001. Zhong Yongxu, Wang Xiangyu, Shen Shiyang, et al. Optimized Design of Multi-Circular Optical Phased Array with Low Sidelobe and Large Scanning Angle[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(21): 2122001.
- [16] 李文磊, 陈敬业, 时尧成. 基于混合蝙蝠算法的低栅瓣光学相控阵[J]. 光学学报, 2021, 41(18): 1813001. Li Wenlei, Chen Jingye, Shi Yaocheng. Optical Phased Array with Low Grating Lobes Optimized by Using Hybrid Bat Algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(18): 1813001.
- [17] 皇甫一珺, 周木春. 基于改进种群算法的光学相控阵多目标栅瓣优化[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(12): 20240339. Huangfu Yijun, Zhou Muchun. Optical phased array multi-objective gate optimisation based on improved population algorithm[J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(12): 20240339.
- [18] 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. Du Shujian, Zhang Lingxuan, Wang Guoxi, et al. On-chip low-grating-lobe two-dimensional optical phased array based on climbing algorithm[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(9): 0913001.