

· 光学设计 ·

光学相控阵消栅瓣的方法

孙鸿伟¹, 何景宜¹, 熊仕富², 尉佩³

(1. 长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022; 2. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;
3. 长春理工大学现代光学测试研究室, 吉林 长春 130022)

摘要: 光学相控阵技术是一种新型的光束偏转技术, 具有扫描快、抗干扰、分辨率高和高保密性等优点, 但栅瓣的存在一直是光学相控阵研究的瓶颈问题之一。综述了光学相控阵的历史、原理、发展现状和趋势, 说明了栅瓣的影响, 并在原有消除栅瓣方法基础上提出了一种新型的方法来消除栅瓣, 即改变非规则光学相控阵的入射光相位, 此方法有效地抑制了光学相控阵的栅瓣, 最后讨论了三种方法的优缺点, 并对发展前景进行了展望。

关键词: 光学器件; 光学相控阵; 栅瓣

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2013)-05-0010-05

Method of Grating Lobes Reducing of Optical Phased Array

SUN Hong-wei¹, HE Jing-yi¹, XIONG Shi-fu², YU Pei³

(1. Institute of Space Photo-electronic Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. School of Photo-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 3. Laboratory of Contemporary Optical Measure Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The technology of optical phased array is a new beam deflection technology with the advantages of fast scanning, anti-jamming, high resolution and secrecy. But grating lobe is one of the bottleneck problems in the research optical phased array technology. Incorporating with the history, principles, development actuality and tendency of optical phased array technology, the influences of grating lobe are explained. Based on the presented methods of grating lobes reducing, a new method of changing the incident light phases of irregular optical phased array is introduced. The grating lobes of optical phased array are restrained effectively by the method. The advantages and disadvantages of three methods are discussed. And the development prospects of optical phased array technology are forecasted.

Key words: optical device; optical phased array; grating lobe

光学相控阵是一种新型的光束转向技术, 光束转向技术由于具有巨大的潜力被广泛应用于许多方面, 包括雷达、大面积扫描技术、自由空间激光通信、激光打印技术和条形码阅读器等诸多方面^[1-6], 其发展先后经历了机械光束偏转技术、微机电光束偏转技术、电光光束转向技术和光学相控阵技术。

机械光束偏转技术由于其具有高的光束效率和大的扫描区域曾被广泛应用于各领域中, 但是机械光束转向技术也有诸多限制^[7-8]。首先, 机械的偏转

对加速度和速度非常敏感, 所以, 如果装置具有大的加速度或者速度, 装置的精度会受到很大的影响。其次, 高精度的机械装置复杂并且价格昂贵。最后, 机械转向装置由于受扫描速度的影响, 不能应用于快速移动的物体, 比如雷达追踪。

随着科技的发展, 微机电光束偏转技术进入我们的视野^[9-10]。微机电技术具有比机械光束偏转技术更高的扫描速率和低的功率损耗。但是, 微机电技术依旧没有摆脱机械装置, 所以其扫描速度依旧

受到限制,没有超过毫秒至微秒的范围。

在1971年R.A.Meyer^[11]用尺寸为15 mm×23 mm,厚度为0.1 mm的钽酸锂晶体材料制作了第一台多通道位相调制器,具有46个阵列单元的一维光学相控阵器件,每个单元都有独立的控制电极,完成了对激光光束的相位控制,用简单的实验装置验证了光学相控阵扫描的概念,这样,非机械光束转向技术开始发展起来,即光学相控阵。

光学相控阵光束转向的原理是通过调节从各个相控单元辐射出的光波之间的相位关系,使其在设定方向上彼此相同,产生相互加强的干涉,干涉的结果是在该方向上产生一束高强度光束,而在其他方向上从各相控单元射出的光波都不满足彼此相同的条件,干涉的结果彼此抵消,从而实现光束的偏转。

光学相控阵扫描的基本原理如图1所示。这里光学相控阵是由 M 个调制单元(又称移相器)组成的一维阵列,相位的变化与坐标成正比。

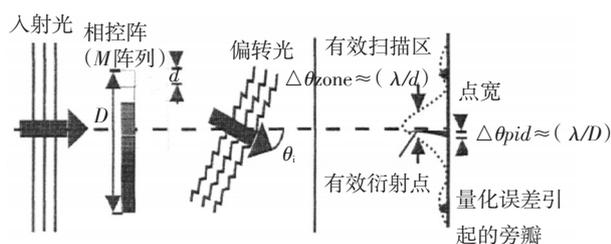


图1 光学相控阵原理图

光学相控阵具有结构简单^[12]、成本低、扫描范围大、速度快、分辨率高等诸多优点,但是光学相控阵的扫描器受激光波长的限制,使其在制作工艺上的难度加大,对涉及的光学工艺技术、计算机软件技术、电子技术等诸多技术提出了新的要求。现如今,人们已经通过使用钽酸锂晶体,液晶等材料,使光学相控阵向着更加实用化方向发展,使其在光学对准和跟踪的子系统(APT)技术、光学扫描技术、激光相控雷达以及光学激光通信等方面具有广阔的发展潜力和应用前景。

1 栅瓣问题的提出

光学相控阵由于具有诸多优点,使其在激光通信、激光雷达和激光扫描等领域的应用得到了越来越广泛的关注,然而栅瓣的存在,不仅降低了光束的扫描范围、提高了误码率,而且还削弱了主瓣的能

量,降低了能量的利用率,使其在应用发展方面受到很大的限制。

光学相控阵相当于可通过电光调节的可控光栅,光栅中的零级主极大相当于光学相控阵的主瓣,其他的主极大就是栅瓣,其光强可与主极大比拟;光栅中的次极大就是副瓣,也称旁瓣。基于现有的研究,可以通过二项式阵列和多尔夫-切比雪夫阵列消除副瓣^[13],对于栅瓣,当满足 $d < \lambda$ 时,没有栅瓣。但是在光波中,波长很短,所以满足这样的条件非常困难,这也是光学相控阵急需解决的主要问题之一,下面介绍三种消除栅瓣的方法,并做比较。

2 消除栅瓣的方法

由光学相控阵的原理可知,光学相控阵是入射光射入到光学元件阵列发生干涉,所以在抑制栅瓣的方法上,可以从入射光和阵元方面采取措施来抑制栅瓣。

2.1 改变阵元间距消栅瓣

改变阵元间距来消除栅瓣,即使用非规则相控阵^[14-15],这种方法的提出使得相控阵单元间距小于半个波长的限制被打破,Yin提出了一种获得更加优良技术的光学相控阵,下面是一个简单的例子。

假设一个具有4个相控阵单元的光学相控阵^[14-15],入射波长为 $\lambda = 532 \text{ nm}$,两个相控单元的距离为 $L = 3 \mu\text{m}$,所有相控单元有相同的相位,为了与单一横向模式波导相匹配,光斑大小的 $w_0 = 3 \mu\text{m}$,为了主栅瓣在所有栅瓣的中心,所有相控单元有相同的初始相位,每个相控单元的间隔为 d_1 、 d_2 、 d_3 。图2为模拟的规则光学相控阵与非规则光学相控阵。

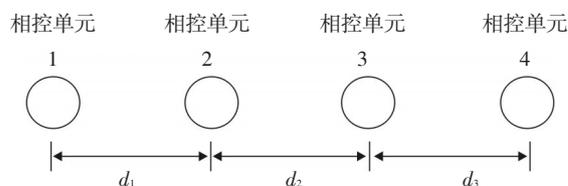


图2 含4个相控单元的光学相控阵

采用对比的方法,首先模拟出规则的光学相控阵,假设 $d_1 = d_2 = d_3 = 20 \mu\text{m}$,用仿真技术模拟出图像。

由图3和图4可以看出,光学相控阵有许多的栅瓣,这些栅瓣将极大地影响光效率和信号的信噪比。为了减少栅瓣,设计出一种非规则的光学相控阵,采用1:2:1.5的形式,如图5,此时的 $d_1=10\mu\text{m}$, $d_2=20\mu\text{m}$, $d_3=15\mu\text{m}$ 。

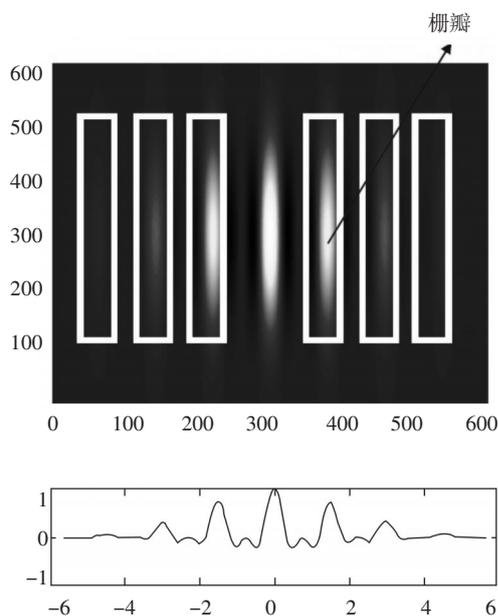


图3 四元光学相控阵远场衍射图案的横截面轮廓

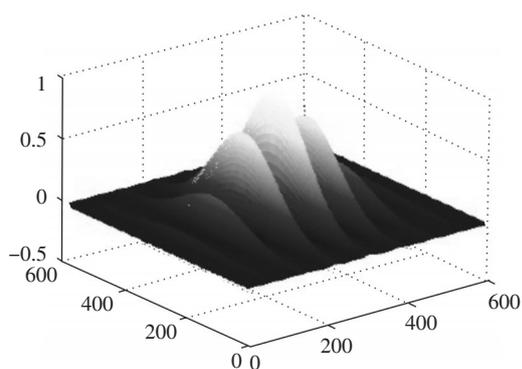


图4 四元光学相控阵相应的远场衍射图案的三维曲线图

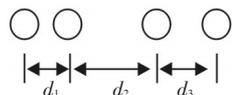


图5 含4个相控单元的非规则光学相控阵

由图6和图7可以看出,非规则光学相控阵增加了光效率和信号的信噪比,光学相控阵的一个主要瓶颈问题将被解决。

总的来说,非规则光学相控阵可以提高扫描速度,对于提高光束效率和光束质量有很大的好处。由图4和图7对比可以得出,非规则光学相控阵把栅

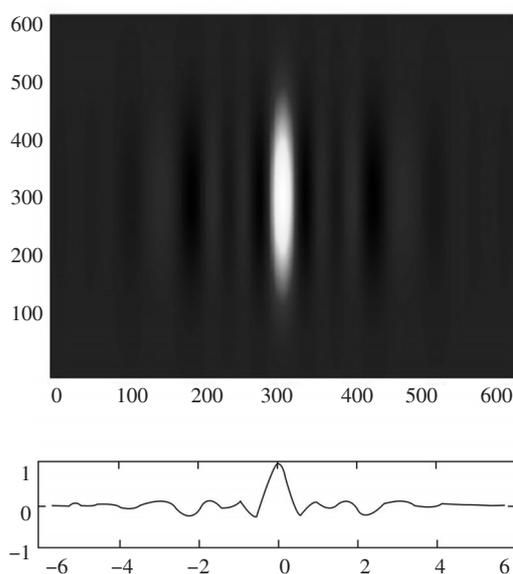


图6 四元非规则光学相控阵远场衍射图案的横截面轮廓

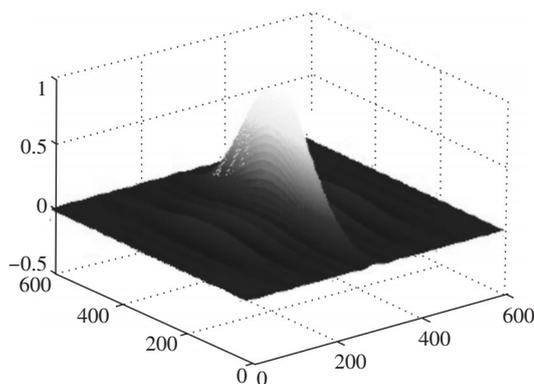


图7 四元非规则光学相控阵相应的远场衍射图案的三维曲线图

瓣的能量从主光栅的80%降到了15%。但是对于副瓣的能量,通过改变相位间隔依旧无法消除,但是消除栅瓣已经极大地促进了光学相控阵在雷达的目标识别、高分辨率显示器和自由激光通信中的应用。

2.2 改变入射光的相位来消栅瓣

改变入射光的相位^[16]就是在不改变原有光学相控阵阵元间距的基础上,在周期性的相位上加上一个非周期的入射光相位,所加入的相位可以是正,可以是负,这样可以不受到器件的限制,通过改变光束的位置来消除栅瓣。

这样,通过选择所加的非周期性相位,可以使主瓣处的相位差依旧为零,达到相干相长,在原来的栅瓣位置处达不到相干相长的条件,既可以消除栅瓣

的强度,此过程在不改变阵元位置情况下,通过软件来改变入射光的相位,即通过计算机编程来达到消除栅瓣的作用。

2.3 改变非规则光学相控阵的入射光相位

对于光学相控阵栅瓣的存在,在原有的方法上提出一种新的方法来抑制光学相控阵的栅瓣,即改变非规则光学相控阵入射光的相位。

非规则光学相控阵在限制栅瓣方面已经起到了很大的作用,但是对于高精度的激光通信以及雷达的探测方面依旧存在很大的误码率,所以要更大比例消除栅瓣,使光学相控阵的有效光强利用率达到最大。

改变非规则光学相控阵的相位,就是在原有的周期性相位上,加上一个非周期性的相位,所加相位是任意的,可以是正,也可以是负,这样可以在非规则光学相控阵原有的基础上,继续降低栅瓣以及副瓣的光强,提高光强的利用率。

通过选择在非规则光学相控阵所加的非周期性相位,可以使主瓣处的相位差依旧为零,达到相干相长,在原来的栅瓣位置处达不到相干相长的条件,既可以消除栅瓣的强度,此过程通过使用软件和硬件相结合的方法达到消除栅瓣的作用。则总的电场表达式变为

$$E(\theta) = \sum_{n=-M}^M A_n e^{j\left[\frac{2\pi n}{\lambda} d_m (\sin \theta - \sin \theta_0) + \Delta\phi\right]} \quad (1)$$

相邻相位差为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d_m (\sin \theta - \sin \theta_0) + \Delta\phi_m \quad (2)$$

式中,第一项为周期性的相位调制,是现存光学相控阵所具有的相位调制,第二项为在周期性的相位调制中所加的非周期相位调制。为了使主栅瓣满足相干条件即为

$$\sin \theta - \sin \theta_0 = 0 \quad (3)$$

式中,第二项必须含有 $(\sin \theta - \sin \theta_0)$,所以可以把第二项设为

$$\Delta\phi_m = g(t)(\sin \theta - \sin \theta_0) \quad (4)$$

式中, t 为步长系数,可以通过电光效应来调节, $g(t)$ 为所寻求函数,把式(4)代入式(2)所得相邻相位差为

$$\Delta\phi = g(t)(\sin \theta - \sin \theta_0) + \frac{2\pi}{\lambda} d_m (\sin \theta - \sin \theta_0) = (\sin \theta - \sin \theta_0)(g(t) + \frac{2\pi}{\lambda} d_m) \quad (5)$$

当式(5)第一项等于零时,满足主栅瓣条件,但由

于所加相位以及不等间隔 d_m ,不满足栅瓣形成条件 $(\sin \theta - \sin \theta_0)(g(t) + \frac{2\pi}{\lambda} d_m) = \pm 2m\pi$,所以适当选择 $g(t)$ 与 d_m ,即使 $g(t)$ 与 d_m 相互匹配,在减少栅瓣的时候可以把栅瓣减少到很小,当栅瓣光强不能与主瓣相比,既不存在栅瓣了。

改变相位后的光强表达式可以写成

$$I(\theta) = |E(\theta)|^2 = N^2 \sin^2(\pi a \sin \theta / \lambda) \cdot \frac{\sin^2\left[\frac{N\pi(d_m + g(t)(\sin \theta - \sin \theta_0))}{\lambda}\right]}{(d_m + g(t)(\sin \theta - \sin \theta_0))^2} \quad (6)$$

这样,可以把栅瓣减少到与主栅瓣的光强比例接近无穷,达到消栅瓣的目的。

此方法打破了只是改变单一变量的方法来消除光学相控阵栅瓣,同时在硬件上以及软件上同时改变了光学相控阵的入射光相位,使主瓣上的相位依旧保持着相长相干,栅瓣上的相位不满足相长相干,从而更大强度地消除栅瓣,提高光能利用率以及降低误码率。此方法在理论上是可行的,但是非规则光学相控阵器件在加工上比较困难,所以此方法在实用性上有一定的局限性,但随着科技的发展,它将有更广阔的发展空间。

3 总 结

光学相控阵作为一种新型的非机械器件,具有非常广阔的发展前景,但是由于存在栅瓣,给光学相控阵的发展带来了很大的影响,在综述前两种光学相控阵消除栅瓣的方法基础上,提出了通过改变非规则光学相控阵的入射光相位来消除栅瓣的方法。这三种方法中涉及改变光学相控阵间距的方法在实际器件加工方面,存在一定的局限性,现在工艺手段在这方面还有进一步的提高,涉及改变光学相位的方法,对软件的要求极高。三种方法各自具有各自的优缺点,但都可以有效地消除光学相控阵的栅瓣。通过消除栅瓣可以提高成像质量以及降低误码率,使光学相控阵在其空间激光通信等方面可以有更进一步的应用。光学相控阵在未来应用领域具有非常广阔的发展前景^[17-19]。

参考文献

- [1] A Polishuk, S Arnon. Communication performance analysis of microsatellites using an optical phased array antenna[J]. Opt.

- Engng, 2003, 42(7): 2015–2024.
- [2] P F Mcmanamon, T A Porscher. Optical phased array technology [J]. IEEE, 1996, 84(2): 268–298.
- [3] 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.
- [4] W R Leeb, W M Neubert, K H Kudielka, et al. Optical phased array antennas for free space laser communications [C]. SPIE, 1994, 2210: 14–29.
- [5] M A Arain, N A Riza. High-beam forming power-code-multiplexed optical scanner for three-dimensional display[C]// SPIE, 2003, 5243: 59–64.
- [6] QU Rong-hui, YE Qing, DONG Zuo-ren, et al. Progress of optical phased array based-on narrow-band electrooptical material[J]. Chinese J. Lasers, 2008, 35(12): 1861–1867.
- [7] S Risse, V Guyenot. Design of a fast and high precision polygonal scanner for HDTV. SPIE, 1997, 3131: 11–19.
- [8] D Rowe. Developments in holographic-based scanner designs. SPIE, 1997, 3131: 52–58.
- [9] Paul B, Ruffin. Optical MEMs-based arrays. SPIE, 2003, 5055: 230–241.
- [10] D Burns, V Bright, S Gustafson, et al. Optical beam steering using surface micromachined gratings and optical phased arrays. SPIE, 1997, 3131: 99–110.
- [11] R A Meyer. Optical beam steering using a multichannel lithium tantalate crystal[J]. Appl. Opt., 1972: 613–616.
- [12] Eli Brooker. Practical phased array antenna systems[M]. Boston: Artech House, 1991: 1–2.
- [13] Nicholas Fourikis. Phase array-based systems and applications[J]. John Wiley & Sons, 1997: 142.
- [14] S Yin, J H Kim, P Ruffin, et al. A fast-speed beam scanner based on optical phased array[C]. SPIE, 2005, 5911: 5911041–59110411.
- [15] S Yin, J H Kim, F Wu, et al. Ultra-fast speed, low grating lobe optical beam scanning using unequally spaced phased array technique[J]. Opt. Comm, 2007, 270: 41–46.
- [16] ZHAN Shan-shan. Phased weighted method to eliminate grating-lobes of optical phased array[J]. Harbin Institute of Technology, 2010.
- [17] 万玲玉, 刘立人, 张明丽, 等. 高速电光相控阵二维激光光束扫描器[P]. 中国发明专利: 200320122621, 2004.
- [18] 瞿荣辉, 叶青, 董作人, 等. 基于电光材料的光学相控阵技术研究进展[J]. 中国激光, 2008, 35(12): 1861–1867.
- [19] 孙亮. 基于光学相控阵的光束扫描研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2008.

《光电技术应用》期刊网站简介

《光电技术应用》期刊网站的网址为: <http://www.gdjsyy.com>。网站设有: 期刊介绍、资质荣誉、编委会、版权声明、征稿简则、征订启示、联系方式等栏目。通过上述栏目, 作者与读者可对期刊的基本情况和编辑部工作有进一步的了解。

为方便作者投稿, 网站设立了期刊的投稿指南及论文格式模板。投稿指南从文章的题名、摘要、引言、结语、参考文献等几个部分提出对所投稿件(文章)的要求、编写方法、应注意的问题等, 供作者参考。论文格式模板以本刊一篇已发表的文章为例, 对刊载文章的体例、格式及部分基本要求进行了较为详细的说明(采用红色说明文字), 以节省文章编辑修改时间, 提高录用的时效。

为使读者及时了解期刊已发表文章的最新信息, 网站增设了在线期刊查询与阅读浏览栏目, 可为读者提供《光电技术应用》期刊2009、2010、2011、2012全年已发表文章题目、作者等信息的查询及文章摘要的阅读浏览。

《光电技术应用》期刊的电子邮箱地址为: nloe@vip.163.com, 热诚欢迎广大作者投稿。

《光电技术应用》期刊编辑部