文章编号: 2095-4980(2015)03-0478-04

光学相控阵光束偏转效率影响因素仿真分析

田俊林^{a,b}, 潘旭东^{a,b}

(中国工程物理研究院 a.高能激光科学与技术重点实验室; b.应用电子学研究所,四川 绵阳 621999)

摘 要:介绍了光学相控阵光束偏转技术的基本原理,根据夫琅和费衍射与傅里叶变换理论 建立了光学相控阵模型,针对光学相控阵参数对偏转效率的影响进行了仿真分析。仿真结果表 明,相控阵单元数量对偏转效率的影响很小,而增大相控阵填充率,减小相控阵单元总体尺寸, 减小偏转角度,则可以有效地提高光学相控阵的偏转效率。

关键词:光学相控阵;光束偏转;夫琅和费衍射;傅里叶变换 **中图分类号:**TN24 **文献标识码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201503.0478

Simulation analysis on beam steering efficiency of Optical Phased Array

TIAN Junlin^{a,b}, PAN Xudong^{a,b}

(a.Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser; b.Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: The principle of beam steering technology based on Optical Phased Array(OPA) is introduced. By using Fraunhofer diffraction and Fourier transform, the model of OPA is established. The influence of main parameters of OPA on beam steering efficiency is simulated. It shows that the beam steering efficiency of OPA can be improved by increasing duty ratio, and decreasing total unit size and steering angle; while the number of OPA units has a very small impact on beam steering efficiency.

Key words: Optical Phased Array; beam steering; Fraunhofer diffraction; Fourier transform

光学相控阵(OPA)技术是一种可编程、非机械、实时、模块化的光束偏转控制技术。通过控制施加于相控阵 列各个相控单元的电压可以对通过相控单元的光波相位进行调制,进而实现光束的偏转控制^[1]。传统的基于机 械转动的光束偏转控制技术具有两方面的问题: a)机械转动系统由于自身机械特性的限制,其响应速度较低, 对于大口径、大转动惯量的光学系统更是如此; b)提高机械转动系统的性能(响应速度、指向精确度、稳定性) 必然会导致系统庞大的体积、重量以及复杂的电路控制系统,限制了其在机载、天基等特殊场合的应用。光学 相控阵技术通过对入射光束相位控制实现光束偏转控制,克服了机械转动光束偏转控制技术的上述缺点,因而 在激光雷达、激光通信、激光定向能等方面具有广阔的应用前景^[2-3]。

1 光学相控阵光束偏转原理

光学相控阵光束偏转的基本原理是,通过调节从各个相控单元出射的光波之间的相位关系,使其在设定方向上干涉相长,而在其他方向上干涉相消,最终结果是在该方向上产生一束高强度的光束,在其他方向上光强 接近于零,从而实现光束偏转^[4]。

图 1 所示为光学相控阵原理图,一束平行光沿 Z 轴正方向传播,相位调制器沿 X 轴放置。当相位调制器对 入射光的相位调制作用可以表示为

$$\Delta \phi = k \sin \left(\theta_0 \right) x \tag{1}$$

时,入射光经相位调制器调制后即发生 θ_0 角度的偏转,其中k为波数。

第3期

2 光学相控阵光束偏转模型

考虑实际情况,构成光学相控阵的阵列单元之间很难做到无缝拼接。在此,将光学相控阵建模为带阵列单元间隙的阶梯相位调制模型,如图 2 所示。假设考虑间隙的相控单元总体尺寸为 D,相控单元有效尺寸为 d,则相控阵列尺寸为 L=ND, N 为相控单元个数。



图 1 光学相控阵原理图

Fig.2 Stair-mode phase-modulation OPA model with unit spacing 图 2 考虑阵列单元间隙的阶梯相位调制光学相控阵模型

考虑相控单元之间间隙的情况,相控阵列对入射光相位的调制作用可以表示为:

$$\Delta\phi(x) = \begin{cases} k\sin(\theta_0) \times nD, & nD - \frac{d}{2} \le x \le nD + \frac{d}{2} \\ no \text{ light,} & nD - \frac{D}{2} < x < nD - \frac{d}{2}, nD + \frac{d}{2} < x < nD + \frac{D}{2} \end{cases}, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \frac{N-1}{2}$$
(2)

因此,振幅为A的平面波经过阶梯型相位调制阵列后,出射光波的复振幅可以表示为:

$$U_0(x) = \operatorname{Rect}(\frac{x}{L}) \times \{\operatorname{Rect}(\frac{x}{d}) \{\operatorname{Aexp}[ik\sin(\theta_0)x] \times \frac{1}{D}\operatorname{Comb}(\frac{x}{D})\}\}$$
(3)

根据夫琅和费衍射理论,利用傅里叶变换,可得远场复振幅及光强分布为:

$$U(f) = \frac{1}{i\lambda z} \exp(ikz)\exp(i\pi\lambda zf^{2})F\{U_{0}(x)\} = \frac{1}{i\lambda z}\exp(ikz)\exp(i\pi\lambda zf^{2}) \times AL\frac{d}{D}\operatorname{sinc}(Lf) \cdot \left\{\operatorname{sinc}(df) \times D\operatorname{Comb}[D(f - \frac{\sin\theta_{0}}{\lambda})]\right\} = (4)$$

$$\frac{1}{i\lambda z}\exp(ikz)\exp(i\pi\lambda zf^{2}) \times AL\frac{d}{D}\sum_{n=-\infty}^{+\infty}\left\{\operatorname{sinc}[d(\frac{n}{D} + \frac{\sin\theta_{0}}{\lambda})] \times \operatorname{sinc}\left\{L[f - (\frac{n}{D} + \frac{\sin\theta_{0}}{\lambda})]\right\}\right\}$$

$$I(f) = \left(\frac{AL}{\lambda}\frac{d}{D}\right)^{2} \left|\sum_{n=-\infty}^{+\infty}\left\{\operatorname{sinc}[d(\frac{n}{D} + \frac{\sin\theta_{0}}{\lambda})] \times \operatorname{sinc}\left\{L[f - (\frac{n}{D} + \frac{\sin\theta_{0}}{\lambda})]\right\}\right|^{2}$$
(5)

$$I(f) = \left(\frac{AL}{\lambda z}\frac{a}{D}\right)^2 \left| \sum_{n=-\infty} \left\{ \operatorname{sinc}[d(\frac{n}{D} + \frac{\sin \theta_0}{\lambda})] \times \operatorname{sinc}\{L[f - (\frac{n}{D} + \frac{\sin \theta_0}{\lambda})]\} \right\} \right|$$
(1)

令 $\tan \theta = x_0/z$,远场光强分布可进一步表示为:

$$I(\theta) = \left(\frac{AL}{\lambda z}\frac{d}{D}\right)^2 \left|\sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left\{\operatorname{sinc}\left[d(\frac{n}{D} + \frac{\sin\theta_0}{\lambda})\right] \times \operatorname{sinc}\left\{L\left[\frac{\tan\theta}{\lambda} - (\frac{n}{D} + \frac{\sin\theta_0}{\lambda})\right]\right\}\right|^2$$
(6)

3 仿真分析

以上述光学相控阵模型为基础,分析光学相控阵相关参数对光束偏转效率的影响。每一组仿真中只变化一个参数,其余参数保持不变,表1所示为仿真计算中所采用的4组参数。

表 I 伤具参数					
Table1 Simulation parameters					
No.	duty ratio v=d/D	total unit size D/µm	unit number N	steering angle $\theta_0/(^\circ)$	wavelength λ /nm
1	0.4 0.8	10	7	2	1 064
2	0.8	5 10	7	2	
3	0.8	10	5 7 9	2	
4	0.8	10	7	1 2 3	

需要说明的是,本文以偏转前后光束中心的光强之比作为偏转效率的评判标准,即:

$$\eta_{\rm ose} = \frac{I_{\theta_0}(\theta_0)}{I_0(0)} \tag{7}$$

式中: I₀(0)为偏转前光束中心的光强; I_a(θ)为偏转 θ 角后光束中心的光强。

3.1 填充率对偏转效率的影响

图 3 所示表示相控阵填充率对偏转效率的 影响。可以看出,随着相控阵填充率v=d/D从 0.4 增加到 0.8,次峰的数量在减少,第一次峰 与主峰的强度之比由 83%(0.782 4/0.944 6)减小 为 44%(0.352 1/0.792 8)。因此,从减少次峰数 量、抑制次峰强度的角度出发,设计光学相控 阵时应增大相控阵单元的填充率v。



3.2 相控单元总体尺寸对偏转效率的影响

图 4 所示表示相控阵单元总体尺寸对偏转 效率的影响。可以看出,随着相控阵单元总体尺寸 D 从 5 μm 增加到 10 μm,次峰的数量在增加,第一次峰与主 峰的强度之比由 19%(0.176 1/0.944 6)增大为 44%(0.352 1/0.792 8)。因此,从减少次峰数量、抑制次峰强度的角 度出发,设计光学相控阵时应减小相控阵单元 的总体尺寸 D。

3.3 相控单元数量对偏转效率的影响

图 5 表示相控阵单元数量对偏转效率的影响。可以看出,相控阵单元数量 N 取不同值时,各衍射峰的位置分布及相对光强几乎不变。这表明,相控阵单元数量对偏转效率的影响很小。因此,设计光学相控阵时可以根据其他方面的考虑(如光束的口径)来选择相控阵单元的数量 N。





3.4 偏转角度对偏转效率的影响

图 6 表示偏转角度对偏转效率的影响。可以看出,随着偏转角度 θ₀从 1°增加到 3°,主峰的相对强度逐渐减 小(0.944 6→0.792 8→0.582 9),第一次峰相对强度逐渐增加到接近于主峰相对强度(0.175 9→0.352 1→0.562 7)。 因此,从增强主峰、抑制次峰的角度出发,光学相控阵适用于偏转角度 θ₀较小的场合。 田俊林等:光学相控阵光束偏转效率影响因素仿真分析



4 结论

本文介绍了光学相控阵光束偏转技术的基本原理,根据夫琅和费衍射与傅里叶变换理论建立了带阵列单元 间隙的阶梯相位调制光学相控阵模型。在此基础上,对光学相控阵参数对偏转效率的影响进行了仿真分析,得 出了增大相控阵填充率、减小相控阵单元总体尺寸、减小偏转角度的光学相控阵设计与应用原则,为光学相控 阵的优化设计与研制提供了一定的指导。

参考文献:

- [1] 李曼,许宏. 光学相控阵技术进展及其应用[J]. 光电技术应用, 2011,26(5):8-10. (LI Man,XU Hong. Progress and application of optical phased array technology[J]. Electro-Optic Technology Application, 2011,26(5):8-10.)
- [2] 吕秀品,冯克成,刘伟奇. 光学相控阵扫描的理论研究[J]. 长春理工大学学报, 2002,25(2):47-49. (LV Xiupin,FENG Kecheng,LIU Weiqi. Theoretical study on the optical phased-array scanning[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2002,25(2):47-49.)
- [3] 董光焰,郑永超,张文平,等. 相控阵激光雷达技术[J]. 红外与激光工程, 2006,35(增刊):289-293. (DONG Guangyan, ZHENG Yongchao,ZHANG Wenping, et al. Technique of phased array radar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(Supplement):289-293.)
- [4] 张华,刘鹏鹏,史晓丁,等. 光学相控阵光束电扫描技术及仿真[J]. 光学与光电技术, 2012,10(3):32-37. (ZHANG Hua, LIU Pengpeng,SHI Xiaoding,et al. Optical phased array electrical beam steering and simulation[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2012,10(3):32-37.)

作者简介:



田俊林(1983-),男,天津市人,博士,助理研究员,主要研究方向为光束控制技术. email:tianjunlin22@163.com. **潘旭东**(1972-),男,四川省遂宁市人,学 士,研究员,主要研究方向为自动控制技术.