

基于光学相控阵的提高 APD 阵列三维成像分辨率方法

王 帅^{1,2}, 孙华燕³, 赵延仲³, 曾海瑞¹, 刘田间⁴

(1. 航天工程大学 研究生院, 北京 101416; 2. 航天工程大学 航天信息学院, 北京 101416;
3. 航天工程大学 电子与光学工程系, 北京 101416; 4. 63981 部队, 湖北 武汉 430311)

摘 要: 小面阵 APD 阵列较低的像元数量限制了其三维成像分辨率。提出了一种基于光学相控阵的提高 APD 阵列三维成像分辨率方法, 用光学相控阵生成与 APD 阵列像元数量相同且位置匹配的光束阵列并实现扫描。光束阵列中子光束发散角小于 APD 阵列中单个像元的瞬时视场角, 子光束在单个像元视场内扫描实现 APD 阵列对目标三维信息的多次采集, 进而提高 APD 阵列的分辨率。在 Matlab 中基于二维标量衍射理论仿真了光束阵列在远场的分布, 并分析了子光束发散角与扩展周期数之间的关系。最后采用液晶相位空间光调制器作为光学相控阵器件, 结合 CCD 接收回波信号, 进一步验证了提出方法的可行性。

关键词: 三维成像; APD; 光学相控阵; 标量衍射

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0406003

Method of improving 3D imaging resolution of APD array based on optical phased array

Wang Shuai^{1,2}, Sun Huayan³, Zhao Yanzhong³, Zeng Hairui¹, Liu Tianjian⁴

(1. Graduate School, Space Engineering University, Beijing 101416, China; 2. School of Space Information, Space Engineering University, Beijing 101416, China; 3. Department of Electronics and Optical Engineering, Space Engineering University, Beijing 101416, China; 4. 63981 Unit of PLA, Wuhan 430311, China)

Abstract: The small number of pixels in APD array is the limitation of three dimension imaging resolution. A method based on optical phased array was proposed to improve 3D imaging resolution of APD array, the optical phased array was used to generate and scan the beam array, the number and position of the beam array were matched with the APD array. The divergence angle of the sub-beam in the beam array was smaller than the instantaneous FOV of a single pixel in the APD array, the APD array acquired multiple acquisitions of the target 3D information by scanning the sub-beam in a single pixel to improve the resolution of the APD array. The distribution of the beam array in the far field was simulated based on the two-dimensional scalar diffraction theory in Matlab, and the relationship between the divergence angle of the beam and the number of extended cycles was analyzed. Finally, the liquid crystal phase spatial light modulator was used as the optical phased array device, and the CCD was used to receive the echo signal, which further verified the feasibility of the proposed method.

Key words: 3D imaging; APD; optical phase array; scalar diffraction

收稿日期: 2018-11-15; 修订日期: 2018-12-23

作者简介: 王帅(1991-), 男, 博士生, 主要从事激光三维成像及激光雷达系统方面的研究。Email: mage1120@foxmail.com

导师简介: 孙华燕(1963-), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光电信息处理与对抗方面的研究。

0 引言

激光三维成像主动发射激光并根据光子飞行时间获取目标表面三维信息,目前已广泛应用于三维重建、自动驾驶及相对导航等。以雪崩光电二极管(APD)阵列作为探测器的激光三维成像方法得益于APD较高的量子效率和信噪比,降低了对激光器的功率要求,对实现激光三维成像系统的小型化具有重要意义,在航天器交会及智能汽车等对体积功耗有严格要求的应用场景有着良好发展前景^[1]。但受限于集成电路工艺水平,APD阵列像元数目普遍偏低。国内商业化的APD阵列最高分辨率仅为 16×16 ^[2],较低分辨率极大地限制了激光雷达的性能,迫切需要在低分辨率小面阵APD的硬件条件限制下有效提升三维成像分辨率的方法。

利用小面阵APD阵列实现高分辨率三维成像目前已有较多的研究。Richard等^[3]较早地利用像元数为 4×4 的APD阵列结合双光楔扫描得到了分辨率为 128×128 的三维图像。郭颖等^[4]利用像元数为 3×3 的APD阵列结合双摆镜系统,有效提高了激光雷达的分辨率。张勇等^[5]采用双光楔扫描方法块状扫描,利用像元数为 5×5 的APD阵列实现了分辨率为 128×128 的三维成像。Akira等^[6]利用焦平面光纤阵列耦合后复用APD阵列的方式,将像元数为 5×5 的APD阵列三维成像分辨率提升至 35×35 ;之后,靳辰飞等^[7]也进行了类似研究,将像元数为 4×4 的APD阵列三维成像分辨率提升至 16×16 。机械扫描是提升APD阵列三维成像分辨率的有效手段,但是扫描线分布的不均匀会造成目标点云密度的不均匀,且机械扫描的滞后角会对成像质量造成一定影响,机械扫描也存在体积较大及功耗较高等问题。

赵文等^[8]采用像元数为 8×8 的APD阵列与像元数为 50×50 的灰度相机对同一视场成像,然后基于EM算法融合视场三维图像与二维图像将三维成像分辨率提升至 50×50 。郝刚涛等^[9]利用像元数为 32×32 的APD阵列结合高分辨率灰度相机作为辅助,基于权值优化分块自适应灰度-距离马尔科夫随机场的稀疏距离图像重构方法得到了分辨率为 256×256 的三维图像。孙剑等^[10]利用达曼光栅分束得到与APD阵列像元数匹配的 8×8 光束阵列照射目

标,用数字微镜装置偏转回波实现随机采样,结合压缩感知提高了三维成像分辨率。图像融合方法能够在不降低APD阵列成像帧频的情况下提高三维成像分辨率,但是对光照有较高要求且算法复杂。

针对提高小面阵APD三维成像分辨率的问题,文中提出了一种基于光学相控阵的光束阵列扫描方法。光束阵列的子光束数与APD阵列像元数一致,每个子光束发散角小于对应APD像元视场角,且在对应APD像元视场之内扫描,从而完成对每个像元视场的细分,最终实现高分辨率三维图像。

1 方法概述

1.1 阵列光束扫描提高分辨率原理

APD阵列各个像元之间相互独立,每个像元接收的信号不会对其周围像元产生影响。因此,当APD阵列采用单孔径接收光学系统时,每个像元的视场可以等效为一个独立的瞬时视场,每个像元仅能接收并响应其对应的瞬时视场内的回波信号^[11-13]。利用APD阵列的这一特性,采用光学相控阵生成一个子光束数量和位置关系与APD阵列中的各个像元一一对应的光束阵列,图1为 8×8 APD阵列的系

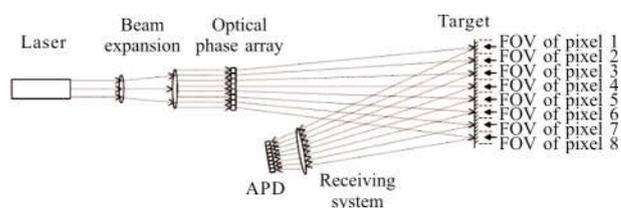


图1 8×8 APD阵列结合 8×8 光束阵列扫描的系统侧视图

Fig.1 System side view sketch of the 8×8 APD array with the 8×8 beam array

统侧视图,接收光学系统采用凝视成像,即APD阵列中每个像元的瞬时视场是恒定的。光束阵列中每个子光束发散角需小于APD阵列中每个像元瞬时视场角(在光束阵列中每个子光束在其对应的扫描像元瞬时视场内),图2左侧部分为图1中 8×8 光束阵列照射在目标表面偏转4个角度的示意图,每次扫描时光束阵列偏转角度不同,子光束在目标表面照亮的区域也不同,各子光束中光子返回到APD阵列中对应像元的飞行时间也不同。如此多次扫描,记录每次扫描时脉冲激光发射时间和每个像元接收到对

应于光束回波信号时独立记录的接收时间,实现每个像元的细分多次采样。多次扫描后按照扫描时偏转角度存放每次采集的点云,即可提高整个 APD 阵列的三维成像分辨率,如图 2 右侧所示。这种扫描方法使得光束阵列在每个像元同时扫描,相对于单光束扫描,文中扫描效率提升倍数与 APD 阵列的像元数相同,有效缩短了扫描时间。

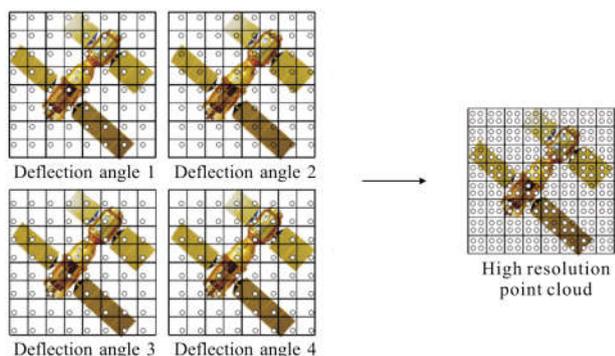


图 2 光束阵列在对应 APD 阵列像元视场角内扫描示意图

Fig.2 Beam array is scanned in the FOV of the corresponding pixel of the APD array

这种扫描成像方式的系统视场角是由接收光学系统视场决定的。假设接收光学系统视场角为 θ_{FOV} , APD 阵列像元数为 $n_{APD} \times n_{APD}$, 则 APD 阵列中每个像元的对应瞬时视场在一维为 θ_{FOV}/n_{APD} 。像元细分的前提是光束阵列中每个子光束发散角 θ_{sub} 小于对应像元瞬时视场角,如公式(1)所示。

$$\theta_{sub} < \theta_{FOV}/n_{APD} \quad (1)$$

且阵列光束的最大偏转角 θ_{diver_max} 需要大于等于对应像元的瞬时视场角,以便子光束的扫描范围能够覆盖对应像元的整个瞬时视场,如公式(2)所示。

$$\theta_{diver_max} \geq \theta_{FOV}/n_{APD} \quad (2)$$

综上,当光学相控阵调制发射的光束阵列满足公式(1)和公式(2)时,即可通过光束阵列扫描提高 APD 阵列三维成像分辨率。根据瑞利判据,光斑的分辨极限是当两个光斑能量最大值与最小值重叠时。此时,APD 阵列中每个像元分辨率理论最高提升倍数 i_s 如公式(3)所示。

$$i_s = \left(\frac{2\theta_{FOV}}{n\theta_{sub}} \right)^2 \quad (3)$$

APD 阵列分辨率理论最高提升倍数 i 如公式(4)所示。

$$i = \left(\frac{2\theta_{FOV}}{\theta_{sub}} \right)^2 \quad (4)$$

2.2 光束阵列扫描方法设计

2.2.1 光学相控阵的光束控制原理

光束阵列的生成与扫描是提升 APD 阵列三维成像分辨率的关键,文中采用光学相控阵的光束阵列调制方法实现光束阵列的生成与扫描。光学相控阵的光束阵列调制方法基于衍射光学理论,通过加载不同调制相位实现对光束阵列的调制。光学相控阵调制方法相较于微透镜阵列及光纤阵列等分束方法,能够在同一光学相控阵上同时实现阵列光束的生成与扫描,并且能够根据不同的接收视场角加载不同调制相位与之匹配,具有体积较小且参数调节方便的优势。

假设入射光束的复振幅分布为 $U_{in}(x, y)$, 光学相控阵对入射光束的调制相位为 t_{opa} , 则经过光学相控阵调制后的出射光束复振幅分布 $U(x_0, y_0)$ 如公式(5)所示。

$$U_0(x_0, y_0) = t_{opa} \cdot U_{in}(x, y) \quad (5)$$

根据衍射光学理论,光学相控阵出射光束在距离为 z 处的复振幅分布 $U(x_z, y_z)$ 如公式(6)所示。

$$U_z(x_z, y_z) = \frac{e^{i\frac{2\pi z}{\lambda}}}{i\lambda z} e^{i\frac{\pi}{\lambda z}(x_z^2 + y_z^2)} F\{U_0(x_0, y_0)\} \quad (6)$$

文中采用级联调制的方式,在单个光学相控阵级联加载光束阵列生成调制相位 t_g 和光束阵列扫描调制相位 t_s , 用单个光学相控阵同时实现阵列光束的生成与扫描。级联后光学相控阵的调制相位 t_{opa} 如公式(7)所示。

$$t_{opa}(x, y) = t_s(x, y) \cdot t_g(x, y) \quad (7)$$

由公式(5)~(7)可知,最终远场光束复振幅分布如公式(8)所示。

$$U_z(x_z, y_z) = \frac{e^{i\frac{2\pi z}{\lambda}}}{i\lambda z} e^{i\frac{\pi}{\lambda z}(x_z^2 + y_z^2)} F\{t_s(x, y)\} * F\{t_g(x, y)\} * F\{U_{in}(x, y)\} \quad (8)$$

光束阵列相对强度分布 $I_z(x_z, y_z)$ 如公式(9)所示。

$$I_z(x_z, y_z) = |F\{t_s(x, y)\} * F\{t_g(x, y)\} * F\{U_{in}(x, y)\}|^2 \quad (9)$$

由公式(9)可以看出:远场光束的强度分布受到入射光束复振幅、光束生成调制相位和光束扫描调制相位的共同调制作用。下文分别设计光束生成调制相位 t_g 和光束扫描调制相位 t_s , 并分析关键参数。

2.2.2 光束阵列生成调制相位设计

文中采用二元相位光栅的设计方法设计光束阵列生成调制相位,使加载光束生成调制相位后的光学相控阵达到与二元相位光栅相同的分束目的。二元相位光栅的设计方法通过周期内调制相位的非均匀分布实现远场光束阵列光强的均匀分布,设计方法较为成熟,能够快速生成强度均匀且衍射效率较高的光束阵列。

二维二元相位光栅设计一般先从一维开始,然后二维扩展^[14-15]。一维二元相位光栅的远场光束阵列分布由单个周期内的跳变点坐标 $\{a_l, b_l\} (l=1, 2, \dots, L)$ 决定。假设一维二元相位光栅单个周期的调制相位 $t_{g,x,y}(x)$ 如公式(10)所示。

$$t_{g,x,y}(x) = \begin{cases} e^{i\pi}, & \text{other} \\ 1, & a_l \leq x \leq b_l \end{cases} \quad (10)$$

对调制相位 $t_{g,x,y}(x)$ 作傅里叶级数展开,如公式(11)所示。

$$t_{g,x,y}(x) = \sum T_{g,x}(m) e^{i2\pi mx} \quad (11)$$

式中: $T_{g,x}(m)$ 为傅里叶级数展开式各个衍射级次的傅里叶变换系数,如公式(12)所示。

$$T_{g,x}(m) = \begin{cases} 2 \sum_{l=1}^L (b_l - a_l) - 1, & m=0 \\ \frac{i}{\pi m} \sum_{l=1}^L (e^{-i2\pi m b_l} - e^{-i2\pi m a_l}), & m \neq 0 \end{cases} \quad (12)$$

当光学相控阵的入射光为单位振幅平面光时,经过光束生成调制相位 $t_{g,x}$ 调制后光束在远场各个衍射级次 $P_{g,x}(m)$ 的相对光强分布如公式(13)所示。

$$P_{g,x}(m) = |T_{g,x}(m)|^2 \quad (13)$$

根据公式(13),即可以光束的均匀性和衍射效率为评价标准,构建目标函数 E^2 计算跳变点坐标,如公式(14)所示。

$$E^2 = \alpha \{ [P(0) - P_E P'(0)]^2 + 2 \sum_{m=1} [P(m) - P_E P'(m)]^2 \} + (1-\alpha)(1-P_E)^2 \quad (14)$$

式中: α 为光束均匀性和衍射效率的权重调节参数; $P'(m)$ 为各级光强分布理论目标值; P_E 为各级光束衍射效率之和。由 APD 阵列在一维的像元数可知所需分束比为 $1 \times n$,令 $m=n$ 后由公式(14)经过迭代最优化即可得到光束阵列生成调制相位在 x 方向单个周期内的跳变点坐标及一维分布 $t_{g,x,y}(x)$ 。对 $t_{g,x,y}(x)$ 周期扩展 k 次后可得到 t_g 在 x 方向的分布 $t_{g,x}$ 。对 $t_{g,x}(x)$ 转置后可得在 y 方向的分布 $t_{g,y}$,最终光束阵列生成调

制相位 t_g 如公式(15)所示。

$$t_g = t_{g,x} \cdot t_{g,y} \quad (15)$$

由此即可在远场得到分束比为 $n \times n$ 的光束阵列生成调制矩阵。

同时,为了满足扫描要求,光束阵列中相邻子光束之间的间隔角 θ_{interval} 需要与单个像元的视场角相等,如公式(16)所示。

$$\theta_{\text{interval}} = \theta_{\text{FOV}} / n_{\text{APD}} \quad (16)$$

根据衍射光学理论, θ_{interval} 受到 t_g 中单个周期物理长度 $d_{g,\text{period}}$ 的调制。当 n_{APD} 为奇数时, θ_{interval} 等于两个衍射级次之间的夹角;当 n_{APD} 为偶数时,光束的分束是通过偶数衍射级次的缺级实现的, θ_{interval} 等于两个衍射级次之间的夹角的2倍,如公式(17)所示。

$$\theta_{\text{interval}} = \begin{cases} \lambda / d_{g,\text{period}}, & n_{\text{APD}} \text{ 为奇数} \\ 2\lambda / d_{g,\text{period}}, & n_{\text{APD}} \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (17)$$

式中: λ 为光学相控阵的入射光波波长。综合公式(16)与公式(17),当视场角为 θ_{FOV} 时, t_g 中单个周期长度如公式(18)所示。

$$d_{g,\text{period}} = \begin{cases} n_{\text{APD}} \lambda / \theta_{\text{FOV}}, & n_{\text{APD}} \text{ 为奇数} \\ 2n_{\text{APD}} \lambda / \theta_{\text{FOV}}, & n_{\text{APD}} \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (18)$$

令光学相控阵的物理尺寸为 $D \times D$,结合公式(18)可知扩展周期数 k 如公式(19)所示。

$$k = \begin{cases} \frac{D \theta_{\text{FOV}}}{n_{\text{APD}} \lambda}, & n_{\text{APD}} \text{ 为奇数} \\ \frac{D \theta_{\text{FOV}}}{2n_{\text{APD}} \lambda}, & n_{\text{APD}} \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (19)$$

综上,光束阵列的生成调制相位 t_g 如公式(20)所示。

$$t_g(x, y) = \left\{ \sum_{l=1}^L \text{rect} \left[\frac{\text{rem} \left(\frac{x}{d_{g,\text{period}}} \right) - \frac{b_l + a_l}{2}}{b_l - a_l} \right] + e^{i\pi} \sum_{l=1}^L \text{rect} \left[\frac{\text{rem} \left(\frac{x}{d_{g,\text{period}}} \right) - \frac{a_{l+1} + b_l}{2}}{a_{l+1} - b_l} \right] \right\} \cdot \left\{ \sum_{l=1}^L \text{rect} \left[\frac{\text{rem} \left(\frac{y}{d_{g,\text{period}}} \right) - \frac{b_l + a_l}{2}}{b_l - a_l} \right] + e^{i\pi} \sum_{l=1}^L \text{rect} \left[\frac{\text{rem} \left(\frac{y}{d_{g,\text{period}}} \right) - \frac{a_{l+1} + b_l}{2}}{a_{l+1} - b_l} \right] \right\} \quad (20)$$

式中: rem 为取余函数。

2.2.3 光束阵列扫描调制相位设计

光束阵列扫描调制相位 t_s 通过调节光学相控阵中相控单元之间的相位差实现光束阵列扫描^[16],其原

理是通过相邻相控单元之间的等差相位产生波前倾斜来偏转光束传播方向^[17],如图 3 所示。

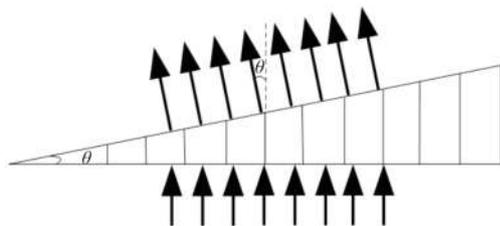


图 3 波前倾斜偏转光束传播方向的示意图

Fig.3 Schematic of beam deflection by tilting the wavefront

假设光学相控阵是理想的连续相控阵,即不考虑相控单元之间间距的情况下,当光束阵列在 x 方向扫描角度为 θ_x 时,相位延迟最大的相控单元加载的调制相位 φ_{\max} 如公式(21)所示。

$$\varphi_{\max} = e^{i2\pi \frac{D \tan \theta_x}{\lambda}} \quad (21)$$

又因为相邻的相控单元之间的延迟是等差的,所以相邻相控单元之间的调制相位 $\Delta\varphi$ 如公式(22)所示。

$$\Delta\varphi = e^{i2\pi \frac{D \tan \theta_x}{\lambda l_{\text{OPA}}}} \quad (22)$$

由公式(22)可知: t_s 在 x 方向的调制相位 $t_{s,x}$ 如公式(23)所示。

$$t_{s,x}(x) = e^{i2\pi \frac{x D \tan \theta_x}{\lambda l_{\text{OPA}}}} \quad (23)$$

同理可得 t_s 在 y 方向的调制相位 $t_{s,y}$ 。综上,光束阵列的扫描调制相位 t_s 如公式(24)所示。

$$t_s(x, y) = e^{i2\pi \left(\frac{x D \tan \theta_x}{\lambda l_{\text{OPA}}} + \frac{y D \tan \theta_y}{\lambda l_{\text{OPA}}} \right)} \quad (24)$$

3 实验与分析

3.1 基于二维标量衍射理论的光束阵列扫描分析

在 Matlab 中根据二维标量衍射理论进行仿真分析,以验证文中方法光束阵列扫描效果。仿真参数按照实物参数设计,其中 APD 的像元数为 8×8 ,光学相控阵的相控单元数为 720×720 ,单个相控单元的尺寸为 $6.3 \mu\text{m} \times 6.3 \mu\text{m}$,接收光学系统的视场角为 $50 \text{ mrad} \times 50 \text{ mrad}$,则每个像元的视场角为 $6.25 \text{ mrad} \times 6.25 \text{ mrad}$ 。令 $z=10 \text{ m}$,当光束阵列扫描时,其中 9 个偏转角度的光斑分布分别如图 4 所示,第 1 个偏转角度液晶调制器加载的调制相位如图 5 所示。每个

图的对应物理尺寸是 0.5 m ,图中的白色框线是 APD 各个像元的接收视场范围。

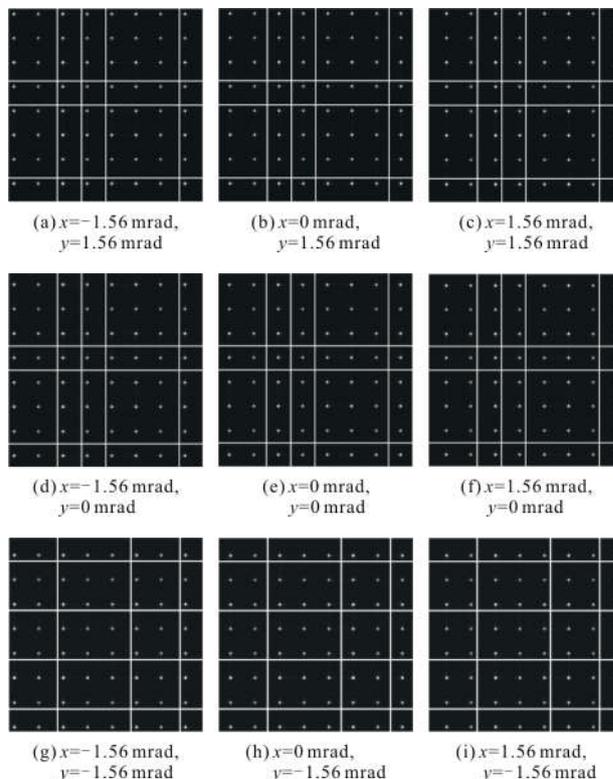


图 4 光束阵列远场分布图

Fig.4 Distribution of beam array in far field

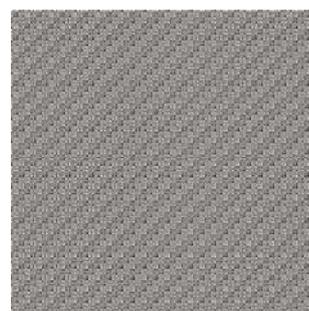


图 5 $x=-1.56 \text{ mrad}, y=1.56 \text{ mrad}$ 时液晶空间光调制器加载相位图

Fig.5 Phase loaded by the liquid crystal spatial light modulator when the angle is $x=-1.56 \text{ mrad}, y=1.56 \text{ mrad}$

可见,文中方法至少实现了 9 个不同角度的光束阵列扫描,能够将 APD 阵列三维成像的分辨率提高 9 倍。

3.2 子光束发散角调制因素分析

光束阵列中子光束在远场的发散角会对分辨率的提升倍数有影响,子光束的发散角受到扩展周期数 k 调制。当在 y 方向偏转角为 0 mrad , x 方向偏

转角度分别为 0 mrad 和 1.56 mrad 时,不同 k 值对应的远场子光束光斑分布如图 6 和图 7 所示。

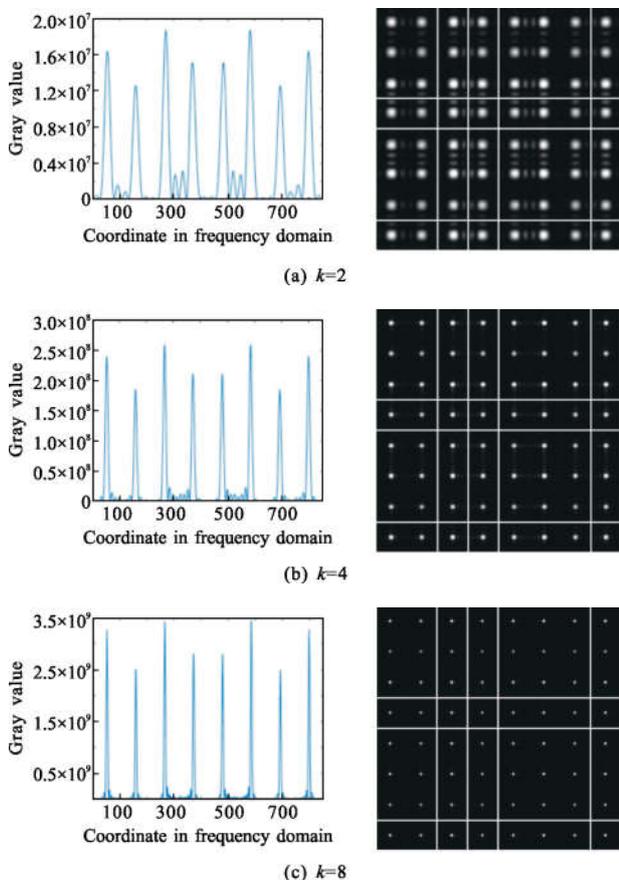


图 6 扫描角度为 0 mrad 时的光束阵列在远场的分布
Fig.6 Beam array distribution in the far field when the scanning angle is 0 mrad

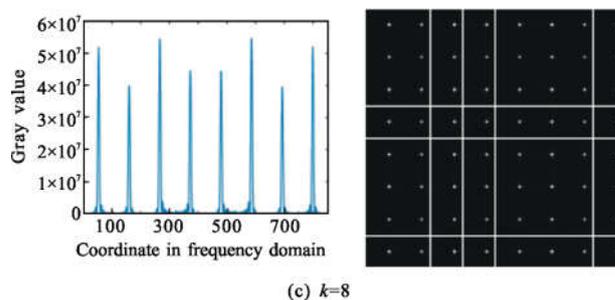
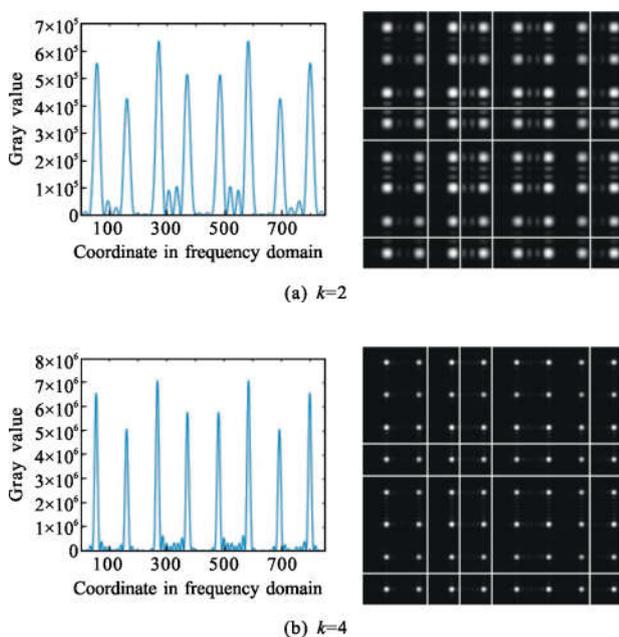


图 7 扫描角度为 1.56 mrad 时的光束阵列在远场分布
Fig.7 Beam array distribution in the far field when the scanning angle is 1.56 mrad

由图 6 和图 7 可知,在不同的扫描角度情况下,子光束发散角均随 k 值的增大而减小。当扫描角度为 0 时,子光束的发散角与 k 的关系如图 8 所示。这体现了入射光束对子光束的调制作用,为了获得更高的扫描分辨率,入射光束需要尽可能扩束实现更多周期调制,从而压缩子光束在远场的发散角大小。

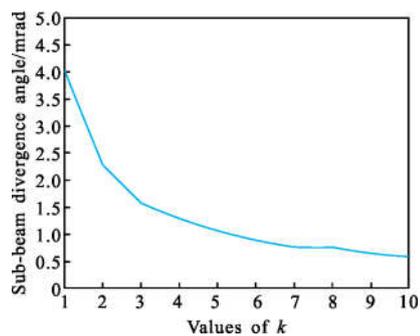


图 8 子光束发散角与 k 的关系

Fig.8 Relationship between sub-beam divergence angle and k

3.3 液晶相位空间光调制器的光束扫描实验

采用液晶相位空间光调制器作为光学相控阵进行了实验。实验系统的发射端和接收端如图 9 所示。

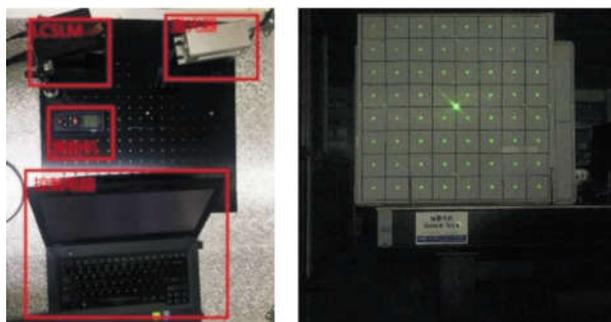


图 9 光束阵列扫描的发射端与接收端
Fig.9 Transmitting and receiving system of beam array scanning

其中接收端用方格画出了接收光学系统的视场范围与 APD 阵列各个像元的视场。方格中每个小格子即代表 8×8 APD 阵列的各个像元对应视场, 每个小格子的大小为 $6.25 \text{ cm} \times 6.25 \text{ cm}$, 方格总大小为 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$, 对应于接收视场的 $50 \text{ mrad} \times 50 \text{ mrad}$ 。

接收探测器采用了 CCD 代替 APD 阵列用于分析光束扫描的效果。当 $z=10 \text{ m}$ 时, 不同扫描角度下的光斑分布如图 10 所示。其中不同偏转角度的调制相位可以由公式(14)、公式(20)及公式(24)计算得到。

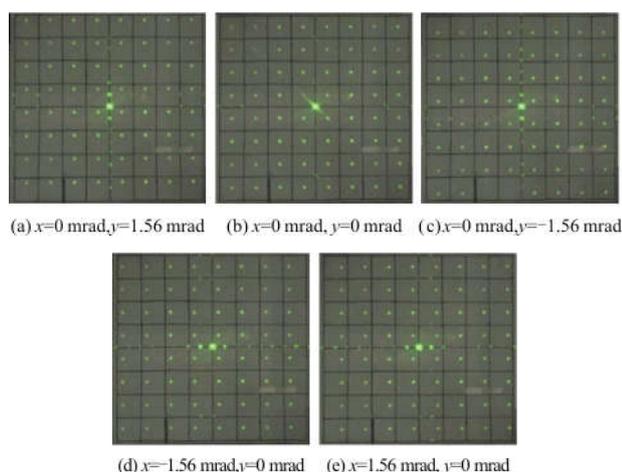


图 10 利用液晶相位空间光调制器扫描时光斑在 10 m 处分布
Fig.10 Spot distribution at 10 m with liquid crystal phase spatial light modulator scanning

从实验结果可以看出, 光束阵列在 10 m 处目标靶板的分布与仿真结构基本相符, 且能够实现光束阵列各个子光束在对应像元视场内的扫描。由于文中仿真中忽略了液晶空间光调制器的占空比对光束阵列的影响, 所以实验结果与仿真结果有一定差异, 例如, 实验结果中出现了中心亮斑, 这是由于液晶光学相控阵中存在部分电路区域无法调制入射光束而对光束全反射形成的。

在三维成像时, 将预先计算的相位调制矩阵依次加载在液晶相位空间光调制器上, 并使用脉冲激光器入射。每次扫描时记录当前的光束阵列偏转角度和 APD 阵列采集的回波, 在多次扫描之后, 将存储的点云按照对应的偏转角度信息依次存放, 即可得到高分辨率的目标点云。

4 结论

文中采用光学相控阵的方法, 生成光束阵列并

实现了扫描。在 Matlab 中根据 APD 阵列和液晶相位空间光调制器的实际参数进行了仿真分析, 分析结果证明文中方法能够至少将 APD 三维成像分辨率提高 9 倍。对不同偏转角度下的子光束发散角进行了分析, 结果证明扩展周期数越多, 子光束的发散角越小。利用液晶空间光调制器进行了实验, 实现了光束阵列在远场的扫描, 证明了文中方法的可行性。文中的方法仅需要单个液晶相位空间光调制器即可实现光束阵列的分束与扫描, 且避免了机械扫描, 在对三维成像体积有小型化及低功耗要求的环境中有良好应用前景。利用文中方法扫描时, 如果在 APD 阵列前添加微透镜阵列, 预期会有更好的成像效果。由于现阶段 APD 阵列像元视场与子光束的光斑对准存在困难, 文中仅用 CCD 接收了光束阵列的回波证明了这种方法提高三维成像分辨率的可行性。下一步工作将利用 APD 阵列接收光束阵列的回波, 实现三维成像分辨率的提高。文中的方法也可用于像元数较多的 APD 阵列, 以进一步提高三维成像分辨率。同时需要说明的是, 采用液晶空间光调制器作为光学相控阵, 分辨率提升效果及成像帧频会受到液晶空间光调制器偏转角度较小及帧率较低的影响, 将文中方法应用于光纤相控阵应会具有更好的分辨率提升效果及成像帧率。

参考文献:

- [1] Liu Yu, Chen Feng, Wang Ying, et al. Measurement of relative position and pose between two spacecrafts based on laser lidar [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0817003. (in Chinese)
刘玉, 陈凤, 王盈, 等. 基于激光雷达的航天器相对位姿测量技术[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 0817003.
- [2] Wang Shuai, Sun Huayan, Guo Huichao, et al. A development and status of single pulse 3D imaging lidar based on APD array [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(4): 389-398. (in Chinese)
王帅, 孙华燕, 郭惠超, 等. APD 阵列单脉冲三维成像激光雷达的发展与现状[J]. 激光与红外, 2017, 47(4): 389-398.
- [3] Heinrichs R, Aull B F, Marino R M, et al. Three-dimensional laser radar with APD arrays [C]//Laser Radar Technology and Applications VI. International Society for Optics and Photonics, 2001, 4377: 106-118.
- [4] Guo Y, Huang G, Shu R. 3D imaging laser radar using

- Geiger-mode APDs: analysis and experiments[C]//Proceedings of SPIE, 2010, 7684(1): 143–153.
- [5] Zhang Yong, Cao Xibin, Wu Long, et al. Experimental research on small scale risley prism scanning imaging laser radar system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(8): 0814001. (in Chinese)
张勇, 曹喜滨, 吴龙, 等. 小面阵块扫描激光成像系统实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0814001.
- [6] Akiyama A, Watanabe T, Doshida M, et al. Optical fiber imaging laser radar[C]//Proceedings of SPIE, 2003, 44(1): 116–127.
- [7] Jin Chenfei, Wang Ye, Cao Lu, et al. Design of fiber-array imaging laser radar system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(11): 115–123. (in Chinese)
靳辰飞, 王野, 曹璐, 等. 光纤阵列成像激光雷达系统的设计[J]. 光电工程, 2012, 39(11): 115–123.
- [8] Zhao W, Han S. Multiple surface range estimation in 3D flash imaging ladar via expectation maximization [C]//International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology, IEEE, 2013: 446–450.
- [9] Hao G, Du X, Zhao J, et al. Dense surface reconstruction based on the fusion of monocular vision and three-dimensional flash light detection and ranging [J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(7): 073113.
- [10] Sun Jian, Liu Qianyu. Three-dimensional laser imaging system and method based on APD array: China, CN105242281A[P]. 2017–10–20. (in Chinese)
孙剑, 刘倩玉. 基于 APD 阵列的三维激光成像系统及方法: 中国, CN105242281A[P]. 2017–10–20.
- [11] Wu Chao, Liu Chunbo, Han Xiang'e. Design of waveguide optical phased array ladar receiving system [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1030003. (in Chinese)
吴超, 刘春波, 韩香娥. 光波导相控阵激光雷达接收系统设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(10): 1030003.
- [12] Yu Xiao, Yao Yuan, Xu Zhengping. Laser imaging optical system design with a shared aperture employing APD array [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(3): 349–356. (in Chinese)
于潇, 姚园, 徐正平. 采用 APD 阵列的共口径激光成像光学系统设计[J]. 中国光学, 2016, 9(3): 349–356.
- [13] Wang Fei, Tang Wei, Wang Tingfeng, et al. Design of 3D laser imaging receiver based on 8×8 APD detector array [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 422–427. (in Chinese)
王飞, 汤伟, 王挺峰, 等. 8×8 APD 阵列激光三维成像接收机研制[J]. 中国光学, 2015, 8(3): 422–427.
- [14] Xu Zhengping, Shen Honghai, Yao Yuan, et al. Scannerless laser active imaging validating system by directly ranging [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2016, 24(2): 251–259. (in Chinese)
徐正平, 沈宏海, 姚园, 等. 直接测距型无扫描激光主动成像验证系统[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 251–259.
- [15] Xu Zhengping, Xu Yongsen, Yao Yuan, et al. Performance verification of staring laser active imaging system [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2017, 25(6): 1441–1448. (in Chinese)
徐正平, 许永森, 姚园, 等. 凝视型激光主动成像系统性能验证[J]. 光学精密工程, 2017, 25(6): 1441–1448.
- [16] Chen Li, Du Peng, Yan Hong, et al. Progress and applied analysis of the optical phased array in beam steering [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(4): 351–355. (in Chinese)
陈黎, 杜鹏, 颜宏, 等. 光学相控阵在光束偏转中的应用分析及进展[J]. 激光与红外, 2013, 43(4): 351–355.
- [17] Engstr M D, Bengtsson J, Eriksson E, et al. Improved beam steering accuracy of a single beam with a 1D phase-only spatial light modulator. [J]. *Optics Express*, 2008, 16(22): 18275–18287.