

# 光波导相控阵激光雷达接收系统设计

吴 超,刘春波,韩香娥

(西安电子科技大学 物理与光电工程学院,陕西 西安 710071)

**摘 要:** 针对光波导相控阵扫描角度大、速度高的特点,设计了光波导相控阵激光雷达的接收系统。该系统采用大视场凝视型的单孔径接收望远镜和 APD 阵列探测器,进行目标信号的接收转换与目标角度测量;同时采用微透镜阵列(MLA)以弥补 APD 阵列产生的探测视场空白,提高回波信号能量利用率。首先给出了设计的总体方案,选择并设计了系统的具体参数;针对选择的器件参数,根据激光雷达方程对系统的性能进行了分析。研究表明:所设计的接收系统具有体积小、结构紧凑的特点,性能指标可满足相控阵激光雷达的探测需要。

**关键词:** 光波导相控阵; 激光雷达; APD 阵列; 信噪比; 角度测量

**中图分类号:** TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1030003

## Design of waveguide optical phased array ladar receiving system

Wu Chao, Liu Chunbo, Han Xiang'e

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** According to the characteristics of high speed scanning of laser beam of the optical waveguide phased array, a staring single aperture, direct detection of the receiving system was designed with a linear APD array for target detection and target location. Considering the structure characteristics of the linear APD array and the demand of target detection, the micro lens array (MLA) was used to reduce the light loss, improve the receiving signal-to-noise ratio(SNR) in design scheme. Based on the ladar equation and considering of the influence of background noise, the influence of the received angle of view on signal-to-noise ratio was calculated and analyzed, the method of target location(Angle) based on single aperture receiving system with the linear APD array was analyzed. The results showed that increasing the pixel number of an APD array, namely reducing the field of view of the APD pixel, could improve the output SNR of the detection system, and improve the target location accuracy at the same time when the field of view of the optical receiving system is fixed. On this basis, considering of the demand of detection range, signal-to-noise ratio, and target location accuracy, the size of the detector array and the receive field of view are chosen. Finally, the performance of the design receiving system has carried on the comprehensive analysis and calculation, the indicators met the design requirements of the system.

**Key words:** optical waveguide phased array; laser ladar; APD arrays; signal to noise ratio; angle measurement

收稿日期:2016-02-05; 修订日期:2016-03-03

基金项目:国家部委预研基金(62401110309);国家自然科学基金(61401341);陕西省自然科学基金(2012JQ8024)

作者简介:吴超(1989-),男,硕士生,主要从事激光雷达方面的研究。Email:wuchaosust@163.com

导师简介:刘春波(1980-),男,副教授,博士,主要从事激光雷达及关联成像方面的研究。Email:chbliu@xidian.edu.cn

## 0 引言

光波导光学相控阵具有扫描角度大、驱动电压低、响应速度快、体积小等突出优点,在激光雷达、医学成像及激光加工等领域具有广阔的应用前景,是光学相控阵技术发展的重要方向<sup>[1-4]</sup>。

西安电子科技大学研制的 GaAs/AlGaAs 光波导相控阵电光扫描系统已实现不小于 1 MHz 的高速扫描和一维不小于 $\pm 10^\circ$ 的扫描范围。基于该扫描系统的激光雷达接收系统设计具有很大挑战性,它对接收系统的灵敏度、响应速度、信号处理速度、接收视场均提出较高要求<sup>[3-6]</sup>。

为了构建光波导相控阵激光雷达原理系统,针对光波导相控阵的工作特点,文中研究设计了体积小、结构紧凑的凝视型单孔径接收探测系统,在研究系统的工作需求基础上,选择确定系统的工作参数,并对其工作性能进行评估。

## 1 光波导相控阵扫描系统简介

光波导光学相控阵波束扫描系统由光波导阵列、激光器、光学耦合系统、控制系统等构成,如图 1 所示。激光器发出的脉冲激光信号被光波导相控阵调制为具有一定分布的光束,通过改变外加电压实现波束的扫描。

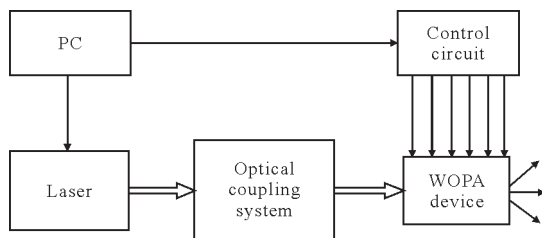


图 1 光波导阵列电光扫描器结构示意图

Fig.1 Structure diagram of optical waveguide array electro-optic scanner

目前 GaAs/AlGaAs 光波导相控阵电光扫描器件的主要参数:扫描速度不小于 1 MHz;扫描角度范围不小于 $\pm 10^\circ$ 。然而,大扫描角度和高扫描速率给接收系统的设计带来了一定困难。

## 2 光学接收系统设计

### 2.1 方案设计思路

对于激光雷达目标探测的应用,探测空间距离接收系统为远场时,接收系统接收的目标回波信号

近似为平面波。

大视场的光学接收系统有单孔径和阵列孔径两种实现方式<sup>[7-8]</sup>。阵列孔径接收视场大,但体积大、结构复杂、加工难度大、成本较高;所以选择体积较小的单孔径系统。

接收光学系统的接收视场范围应该不小于扫描系统的扫描范围。对于单孔径系统,其接收光学系统不仅视场宽,而且信号处理帧频需要大于 1 MHz。传统的基于机械扫描或阵列 CCD 探测器均无法实现如此高速的采集要求。

设计大视场、单孔径的光学望远镜,需要大尺寸的光电探测器匹配。考虑到光电接收灵敏度、响应速度,APD 阵列是理想的选择<sup>[9-10]</sup>。目前 APD 阵列有 16×1、32×1、32×32、256×256 等不同规格,带宽达到 1~10 GHz<sup>[11-12]</sup>,可以实现远距离(高灵敏度)、1 MHz 帧频的采集要求。

针对 APD 阵列的结构特点,会造成某些视场的探测空白和回波信号的能量浪费。目前应用较多的是将微透镜阵列与 APD 阵列结合使用,以提高 APD 阵列的填充因子<sup>[13-14]</sup>。

为满足体积小、质量轻、结构紧凑的要求,该接收系统采用单孔径透射式的光学系统。针对光波导相控阵的扫描角度范围 $\pm 10^\circ$ ,光学接收系统的视场角至少为 20°。针对光波导相控阵一维扫描可达 1 MHz 的扫描速度,20°的扫描范围,并且远距离探测,选择大光敏面尺寸的线阵 APD 设计凝视型光学系统。线阵 APD 的结构特点决定其相邻光敏面之间存在间隙,线阵 APD 的填充因子小于 1,选择线阵微透镜阵列(MLA)与线阵 APD 结合使用,以提高线阵 APD 的填充因子。具体的参数需要满足系统信噪比的要求,见图 2。

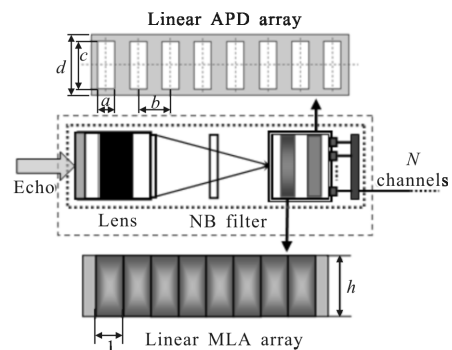


图 2 接收探测系统框图

Fig.2 Block diagram of receiving detection system

光学接收探测系统由两部分组成:光学接收单元和探测器模块。其中,光学接收单元主要实现回波信号的接收、聚焦,探测器模块主要实现信号的感知。

### 2.2 器件选择与参数确定

选择波长为 1 064 nm 的调 Q 激光器,平均功率大于 2 W,脉冲宽度 7~100 ns,重频 1~200 kHz。

图 3 中,Receiving system 表示光学接收系统,MLA 表示微透镜阵列;APD array 表示 APD 阵列。 $f$  表示光学接收系统的像方焦距, $f_0$  表示微透镜阵列的焦距。

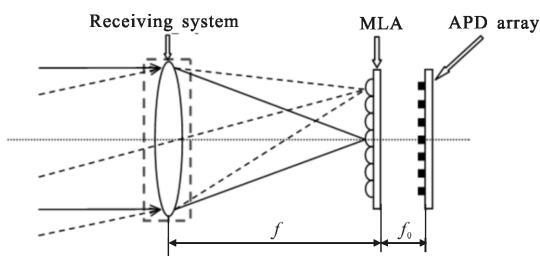


图 3 微透镜阵列和 APD 阵列组成的接收、探测系统示意图  
Fig.3 Schematic diagram of receiving detection system with micro lens arrays and APD arrays

GaAs/AlGaAs 光波导相控阵电光扫描系统实现一维扫描,考虑到成本及探测视场等因素,探测器选择 16×1 APD 阵列,具体参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 16×1 APD 阵列结构参数

Tab.1 Structure parameters of 16×1 APD arrays

Name	Value/ $\mu\text{m}$
Lateral size/a	405
Period/b	500
Longitudinal size/c	1 000
Clearance of APD/g	95
Lateral pixels total size of 16×1APD arrays	8 000

表 2 反向偏压 280 V,16×1 APD 阵列电学参数

Tab.2 Electronics parameters of reverse bias voltage 280 V and of 16×1 APD arrays

Name	Value/ $\mu\text{m}$
Multiplication/ $M$	100
Responsibility/ $R$	25 A/M
Dark current per element/ $I_d$	2 nA
Internal resistance/ $R_L$	1 k $\Omega$
Bandwidth/ $\Delta f$	100 MHz
Temperature/ $T$	296 K

根据系统总体结构和信噪比要求,选择了 Edmund 公司 16 mmVIS-NIR 67-714 compact fixed focal length lens,作为单站激光雷达的单孔径光学接收系统。

最大传感器尺寸 2/3"(8.8 mm×6.6 mm),焦距  $f=16$  mm,2/3"传感器对应的视场角为 30.9°,孔径( $F/\#$ )为  $F/1.4\sim F/16$ ,外径为 33.0 mm,长度为 40.5 mm,接口为 C-Mount。

基于微透镜阵列单元与光敏阵列单元一一对应的原则,如图 3 所示;从微透镜边缘入射的光线经折射后必须落于光敏单元的边缘以内,不能落于间隙内的原则,结合 APD 阵列的尺寸参数,确定出微透镜阵列的焦距  $f_0=3$  mm,周期  $b=500$   $\mu\text{m}$ 。

因为柱面微透镜的填充因子约为 100%,所以柱面微透镜和 APD 阵列结合使用时,入射到柱面微透镜阵列上的光都会会聚到 APD 阵列的光敏面上,即柱面微透镜和 APD 阵列组成系统的填充因子约为 1。

根据探测器尺寸与接收光学系统视场角匹配的原则,选择的探测器的尺寸为(8 mm×1 mm),合理装配,可以得到  $\theta_r=28.1^\circ$  的视场,完全覆盖光波导相控阵的扫描角度,符合要求。最大  $F/\#$  为 1.4,焦距  $f=16$  mm,则最大孔径  $D_{\text{max}}\approx 11.43$  mm。

### 2.3 目标方位确定

阵列 APD 一个显著的特点是各个 APD 阵元之间相互独立,对于单孔径的接收探测系统来说,每个 APD 阵元对应着一个特定的、小的瞬时视场。每个 APD 阵元对应的特定瞬时视场只能接收到位于该视场内的回波信号和背景噪声信号,瞬时视场较小,大大减小了每个 APD 阵元接收到的背景噪声。由于各个 APD 阵元之间的相互独立性,每个 APD 阵元对应的特定的小视场内出现目标,对应的阵元就会产生信号电流,该视场内出现目标不会在其他 APD 阵元上产生电流,就能确定出目标相对于接收系统的方位角,从而对该视场内的目标进行定位。显然,在光学接收系统视场一定的情况下,如果 APD 阵元的数量越多,则每个 APD 阵元对应的瞬时视场越小,从而对出现的该视场内的目标的定位精度越高。

图 4 中,1 为光学接收系统;2 为柱面微透镜阵列;3 为 APD 阵列;4 为回波信号入射到一个柱面微透镜上,信号光会聚到 APD 阵元上的光斑图;5 为回波信号入射到两个柱面微透镜交界处,信号光会聚

到两个 APD 阵元上的光斑图。

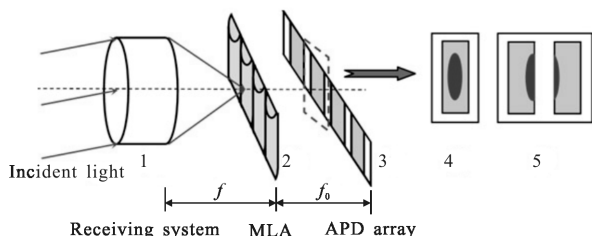


图 4 光学接收系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of optical receiving system

$$\delta\theta = \theta_r / N \quad (1)$$

式中： $\delta\theta$  为线阵 APD 对目标定位的分辨率； $\theta_r$  为光学系统的视场角； $N$  为线阵 APD 阵元的数量。

对于  $N \times 1$  APD 阵列，结合表 2 柱面微透镜和 APD 阵列组合得到的探测模块，每个探测模块阵元对应的瞬时视场角为： $\theta_{i0} = \theta_r / N$ 。由前面讨论知， $N$  层光波导相控阵芯片的出射光束角为： $\theta_{spot}$ 。只要  $\theta_{spot} \leq \theta_{i0}$ ，即每一个每个探测模块阵元对应的瞬时视场完全覆盖一个光束对应的视场范围，落在该视场内的回波信号是可以分辨的。

当照射到柱面微透镜上的光恰好在此微透镜阵元之上时，其也会把光完全会聚到其对应的 APD 阵元之上，如图 4 中 4 所示；当经过光学系统的光照射到两个微透镜阵元之上时，两个微透镜也会把光汇聚到它们两个对应的 APD 阵元上，如图 4 中 5 所示。

假设  $N \times 1$  线阵 APD，不妨将 APD 阵元的编号记为  $i$ ，则  $i=1, 2, \dots, N$ ；将接收视场角范围记为： $(-\theta_r/2 \sim \theta_r/2)$ 。

针对如图 4 中 4 所示的情况，则第  $i$  个阵元接收到目标的回波光信号时，目标所在的视场范围为：

$$(i - N/2 - 1) \cdot \delta\theta \sim (i - N/2) \cdot \delta\theta \quad (2)$$

针对如图 4 中 5 所示的情况，第  $i$  个阵元和第  $i+1$  个阵元同时接收到目标的回波光信号，不妨记第  $i$  个阵元对应通道输出的信号电流为  $I_1$ ，第  $i+1$  个阵元对应通道输出的信号电流为  $I_2$ ，则第  $i$  个通道和第  $i+1$  个通道输出的信号电流之和  $I = I_1 + I_2$ ；由前面知，第  $i (< N)$  个阵元接收到目标的回波光信号时，目标所在的视场范围为：

$$(i - N/2 - 1) \cdot \delta\theta \sim (i - N/2) \cdot \delta\theta \quad (3)$$

则第  $i+1$  个阵元接收到目标的回波光信号时，目标所在的视场范围为：

$$((i+1) - N/2 - 1) \cdot \delta\theta \sim ((i+1) - N/2) \cdot \delta\theta \quad (4)$$

目标在第  $i$  个阵元所对应的视场范围为：

$$(1 - I_1/I) \cdot (i - N/2) \cdot \delta\theta \sim (i - N/2) \cdot \delta\theta \quad (5)$$

目标在第  $i+1$  个阵元所对应的视场范围为：

$$(i - N/2) \cdot \delta\theta \sim (1 + I_2/I) \cdot (i - N/2) \cdot \delta\theta \quad (6)$$

所以，选择阵列 APD 的规格时，应该结合测角的要求确定阵列 APD 的规模。

### 3 性能分析

AlGaAs 光波导相控阵激光雷达系统参数如表 3 所示。

表 3 AlGaAs 光波导相控阵激光雷达系统参数

Tab.3 Parameters of AlGaAs waveguide phased array laser radar system

Parameter	Value
Wavelength $\lambda/\mu\text{m}$	1.06
Divergence angle $\theta/\text{mrad}$	14
Light transmittance of optical waveguide chip $\eta$	0.4
Transmittance of optical transmitting system $\eta_t$	0.9
Transmittance of atmospheric $\tau$	0.8
Target reflectivity $\rho$	0.9
Transmittance of optical receiving system $\eta_r$	0.9
Bandwidth of narrow-band filter $\Delta\lambda/\text{nm}$	10

艾里斑尺寸：

$$D_{\text{airy}} = 2.44 \lambda F = 2.44 \lambda f / D_0 = 3.62 \mu\text{m} \quad (7)$$

式中： $\lambda$  为波长，取  $1.06 \mu\text{m}$ ； $F$  为光学系统  $F$  数，取 1.4。

可见  $D_{\text{airy}}$  远小于探测器每个像元的横向尺寸  $405 \mu\text{m}$ ，这样的光学系统分辨率高，系统的能量利用率为 100%，完全符合光学探测的要求。

针对扩展目标，回波信号和背景噪声经过光学接收系统后，被汇聚到探测器光敏面上，在探测器内会产生散粒噪声，经过探测器的雪崩转换过程后，探测器输出信号电流的信噪比为 SNR，直接反映了整个光学接收系统及探测器（不包括探测器之后的放大电路）的性能。

对于脉冲激光，APD 输出的信噪比表达式可以表示为<sup>[15]</sup>：

$$SNR_p = \left(\frac{S}{N}\right)_p = \frac{(i_s M)^2}{2e(i_s + i_d + i_b)M^2 F \Delta f + \frac{4K_B T \Delta f}{R_L}} \quad (8)$$

$$i_s = P_r R_A \quad (9)$$

$$i_b = P_{Bk} R_A \quad (10)$$

$$P_r = \frac{P_t \rho \cos \theta_s S_c \tau_r^2 \eta_r \eta_r}{\pi R^2} \quad (11)$$

$$P_{Bk} = P_{Bsun} + P_{Bsky} = \tan^2\left(\frac{\theta_r}{2}\right) \tau_r \Delta \lambda S_c (\rho \tau_r E_{sun} \cos \theta_s \cos \alpha + \pi L_{sky}) \quad (12)$$

式中： $P_r$ 为探测器接收到的光功率； $P_{Bk}$ 为探测器接收到的背景光功率； $R_A$ 为探测器响应度； $2e(i_s + i_d + i_b)M^2 F \Delta f$ 是分别由信号光电流、背景光电流和反向饱和暗电流引起的噪声功率的平均值； $\Delta f$ 为探测器的测量带宽； $K_B$ 为玻耳兹曼常数； $T$ 为开尔文温度； $R_L$ 为探测器的内阻； $M$ 为 APD 的倍增因子，对于硅探测器  $F$  取 1.96； $\Delta \lambda$  为窄带滤波片的带宽。

取太阳光线与目标法线的夹角  $\theta_s = \pi/4$  rad，接收光学系统光轴与目标法线的夹角  $\theta_s = 0$  rad，地面处太阳光谱在  $1.06 \mu\text{m}$  的照度  $E_{sun} = 360 \text{ W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$ ，天空亮度辐射光谱在  $1.06 \mu\text{m}$  的亮度  $L_{sky} = 5.23 \text{ W/m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr}$ 。

从公式(8)~(12)可以看出：影响信噪比的带宽有两个，一个是探测器的测量带宽  $\Delta f$ ，一个是窄带滤波片的带宽  $\Delta \lambda$ 。对于探测器的测量带宽，结合激光脉冲宽度和阈值检测的要求取  $\Delta f = 100 \text{ MHz}$ 。

接收系统的输出信噪比随窄带滤波片的接收带宽的关系如图 5 所示。

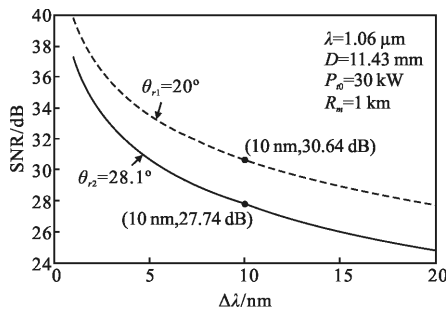


图 5 信噪比随探测带宽的变化曲线

Fig.5 Curve of signal-to-noise ratio with the detection bandwidth

从图 5 中可以看出：当波长  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ ，发射功率  $P_t = 30 \text{ kW}$ ，接收系统的孔径  $D = 11.43 \text{ mm}$ ，探测距离  $R_m = 1 \text{ km}$ ，探测器测量带宽  $\Delta f = 100 \text{ MHz}$ ，接收光学系统视场角为  $\theta_r = 20^\circ$  时的信噪比始终大于接收光学系统视场角为  $\theta_r = 28.1^\circ$  时的信噪比。窄带滤波片的

带宽  $\Delta \lambda$  直接影响到背景噪声的大小，随着窄带滤波片带宽的减小，背景噪声随着减小，但窄带滤波片的成本却是成倍的增加。结合实际成本因素，窄带滤波片带宽  $\Delta \lambda = 10 \text{ nm}$ 。接收光学系统视场角为  $\theta_r = 20^\circ$  时，信噪比  $SNR = 30.64 \text{ dB}$ 。接收光学系统视场角为  $\theta_r = 28.1^\circ$  时，信噪比  $SNR = 27.74 \text{ dB}$ 。即窄带滤波片带宽  $\Delta \lambda = 10 \text{ nm}$  时，完全符合接收信噪比要求。

采用  $16 \times 1$  APD 阵列作为探测器，总的像素尺寸为  $8 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ；运用公式(8)~(12)及表 3 的参数，计算得到设计的光学接收系统的性能如图 6 所示。

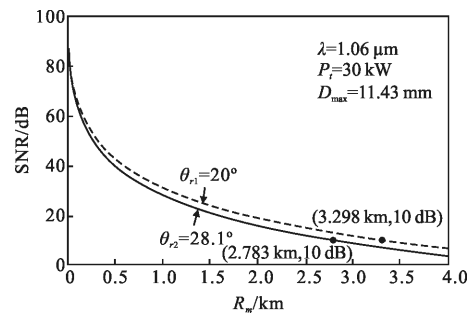


图 6 信噪比随探测距离变化曲线

Fig.6 Curve of signal-to-noise ratio with the detection range

从图 6 中可以看出：当波长  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ ，发射功率  $P_t = 30 \text{ kW}$ ，接收孔径  $D_{\text{max}} = 11.43 \text{ mm}$ ，接收光学系统视场角为  $\theta_r = 20^\circ$  时的信噪比始终大于接收光学系统视场角为  $\theta_r = 28.1^\circ$  时的信噪比。接收光学系统视场角为  $\theta_r = 20^\circ$  时，信噪比  $SNR = 10 \text{ dB}$  时，探测距离  $R_m = 3.298 \text{ km}$ 。接收光学系统视场角为  $\theta_r = 28.1^\circ$  时，信噪比  $SNR = 10 \text{ dB}$  时，探测距离  $R_m = 2.783 \text{ km}$ 。

从图 7 中可以看出：当波长  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ ，探测距离  $R_m = 1 \text{ km}$ ，接收孔径  $D_{\text{max}} = 11.43 \text{ mm}$ ，接收光学系统

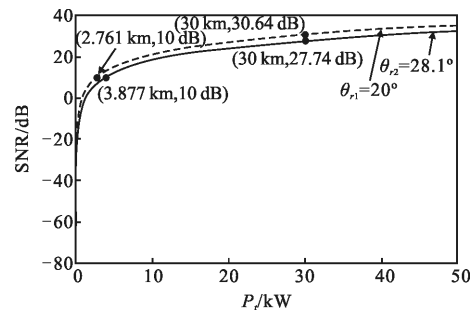


图 7 信噪比随发射功率的变化曲线

Fig.7 Curve of signal-to-noise ratio with the transmission power

视场角为  $\theta_r = 20^\circ$  时的信噪比始终大于接收光学系统

视场角为  $\theta_r=28.1^\circ$  时的信噪比。当接收视场角为  $\theta_r=20^\circ$  时, 信噪比  $\text{SNR}=10\text{ dB}$ , 发射功率  $P_t=3.761\text{ km}$ ; 发射功率  $P_t=30\text{ km}$ , 信噪比  $\text{SNR}=30.64\text{ dB}$ ; 当接收光学系统视场角为  $\theta_r=28.1^\circ$  时, 信噪比  $\text{SNR}=10\text{ dB}$ , 发射功率  $P_t=3.877\text{ km}$ ; 发射功率  $P_t=30\text{ km}$ , 信噪比  $\text{SNR}=27.74\text{ dB}$ 。可见激光器的峰值功率完全满足探测信噪比的要求。

## 4 结 论

针对光波导相控阵的特点, 文中设计了一套基于线阵 APD 的光学接收探测系统, 满足  $\pm 10^\circ$  视场、1MHz 帧频的采集要求。对整个光学接收探测系统的信噪比进行了分析: 设计时应该综合考虑探测距离和信噪比要求, 合理选择光学接收系统的视场、发射系统的功率。对所设计的光学接收探测系统的信噪比分析和计算, 符合实验要求。所选 APD 阵列探测器与单孔径光学系统结合, 每个 APD 阵元对应的瞬时视场小, 能对目标定位, APD 阵列探测器阵元越多或者光学接收系统视场越小, 目标定位精度越高。文中的理论分析和设计结果, 对相关光学系统的设计具有一定的参考价值。

## 参 考 文 献:

- [1] Yan Aimin, Zhi Ya'nan, Sun Jianfeng, et al. Recent development of optical phased array scanning technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(10): 49–55. (in Chinese)
- [2] Jin Yadong, Yan Aimin, Hu Zhijuan, et al. Research progress of optical waveguide phased array scanner [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(8): 16–23. (in Chinese)
- [3] Xue Jingjing, Liu Chunbo, Han Xiang'e. Optimization design of optical waveguide phased array structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(F12): 276–280. (in Chinese)
- [4] Shi Shunxiang, Li Jiali, Wang Guangsheng, et al. A new type of rapid narrow laser beam electro optic scanner [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(11): 1318–1322. (in Chinese)
- [5] Xue Peiyao, Wu Yao, Feng Qian, et al. Design of the large field optical system for four-quadrant detecting [J]. *Chinese Optics*, 2014, 22(6): 1454–1460. (in Chinese)
- [6] Meng Qingji, Zhang Xuyan, Zhou Ling, et al. Key technologies of airborne laser 3D detection imaging system [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(3): 327–339. (in Chinese)
- [7] Liu Xiaomin. The study of non-vignetting receiving features of optical system for electro-optic detecting [J]. *Journal of Applied Optics*, 1999, 20(5): 5–7. (in Chinese)
- [8] Zhang Shuqing, Wang Jingyang, Wang Zhile, et al. Design of infrared optical system for mulit-target compounded simulator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(6): 1454–1460. (in Chinese)
- [9] Philip Gatt, Steven Johnson, Terry Nichols. Geiger-mode avalanche photodiode lidar receiver performance characteristics and detection statistics[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(17): 3261–3276.
- [10] Zhang Dayong, Wu Wenqi, Wu Meiping. Calibration technology of airborne lidar [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(11): 2806–2813. (in Chinese)
- [11] Zheng Ruitong, Wu Guan hao. Pulsed one-dimensional scannerless LiDAR system based on linear APD array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 96–100. (in Chinese)
- [12] Li Fan, Wu Shuangyang, Yang Hongguo, et al. Multi element array detecting technology of lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 295–299. (in Chinese)
- [13] Sun Yanjun, Leng Yanbing, Chen Zhe, et al. Square aperture spherical microlens array for infrared focal plane [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 41(4): 399–403. (in Chinese)
- [14] Ke Caijun, Yi Xinjian. Research on microlens array for improving the fill factor of CCD image sensors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(2): 209–212. (in Chinese)
- [15] Dai Yongjiang. The Principle of Laser Radar [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. (in Chinese)