

## 衍射光学系统激光雷达接收波束展宽及作用距离分析

高敬涵<sup>1,2</sup>, 李道京<sup>1\*</sup>, 周凯<sup>1,2</sup>, 崔岸婧<sup>1,2</sup>, 吴疆<sup>1,2</sup>, 王焯菲<sup>2,3</sup>, 刘凯<sup>2,3</sup>, 谭沁年<sup>3</sup>, 高阳<sup>3</sup>, 姚园<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院空天信息创新研究院微波成像技术国家级重点实验室, 北京 100190;

<sup>2</sup>中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049;

<sup>3</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

**摘要** 对基于衍射光学系统的激光雷达的波束展宽方法和作用距离进行了分析,介绍了实验样机的研制情况。根据实际激光雷达的成像特点并结合宽幅成像的需求,提出了离焦扩束、加柱面镜扩束以及基于衍射镜的波长变化扩束3种接收波束展宽方法,进行了仿真计算并给出了实验样机的部分测试结果。给出了扩束情况下激光雷达的作用距离表达式,同时讨论了模数转换(AD)采样量化对接收信号采样的影响,明确了接收扩束产生的增益下降可由电子学放大器来弥补的观点,并结合实际数据给出了验证结果和分析结果。

**关键词** 遥感; 激光雷达; 衍射光学系统; 激光扩束; 宽视场接收; 雷达方程

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220658

### 1 引言

为保证探测距离,激光雷达的接收望远镜应采用较大口径,以便接收更多的回波能量<sup>[1-2]</sup>。使用单元探测器接收时,通常认为增大接收口径会减小接收波束宽度。为实现宽的接收波束从而形成较大观测幅宽,往往需要采用阵列探测器进行接收<sup>[3]</sup>。以口径为100 mm、焦距为480 mm的光学系统为例,假定用一个光敏面尺寸为9.5 μm的单元探测器接收,当中心波长为1.55 μm时,对应的接收波束宽度约为20 μrad,接近衍射极限,覆盖3 mrad接收视场(FOV)所需的探测器阵列规模为150×150,导致采用相干探测体制的激光雷达的通道数剧增,并使系统的技术实现极为复杂。

增大单元探测器光敏面,使之达到1 mm,原理上即可用一个通道实现激光回波信号的宽视场接收。与之对应的典型应用有合成孔径激光雷达(SAL)和逆合成孔径激光雷达(ISAL)<sup>[4]</sup>。SAL/ISAL的成像原理与传统光学系统的成像原理不同,其获取的是“斜距-多普勒频率”二维图像信息,经合成孔径处理后再成像,要求接收系统具有宽的接收视场,但不要求光学系统具有高的空间角分辨率。

大光敏面探测器的信号带宽有限,不能满足SAL/ISAL的宽带信号探测要求。为基于全光纤光路实现激光回波信号的相干探测,可采用带有高阶相位扩束镜的光纤准直器,同时借助中继镜形成的压缩光路,将宽视场激光回波信号收入芯径为9.5 μm的单模

保偏光纤中。上述方法可以等效实现大光敏面探测器的功能<sup>[5]</sup>,而且要求光纤准直器和中继镜的直径不小于所需的光敏面尺寸,且中继镜应处于离焦状态。文献<sup>[6]</sup>将高阶相位扩束镜和中继镜的功能进行了整合,同时把应用所需的以4个光纤准直器为基础形成的馈源和光学系统进行集成设计,等效实现了上述功能(即将宽视场激光回波信号收入光纤中)。为表述方便,本文将实现上述功能的光纤准直器与中继镜的组合定义为高阶相位扩束组镜。

全光纤光路的接收波束展宽可在主镜<sup>[7]</sup>和馈源<sup>[5]</sup>两处实现,在馈源处实现接收波束展宽可用带有中继镜的压缩光路的原理来解释,这种方式可以兼顾主镜的共孔径功能。本文在文献<sup>[5-6]</sup>的基础上,基于馈源扩束方式,对主镜为衍射薄膜镜<sup>[8]</sup>的激光雷达实验样机的接收波束展宽方法和作用距离进行了分析,介绍了实验样机的测试情况,并给出了系统参数和相关实验结果。

### 2 基于衍射光学系统的波束展宽

波束展宽通常简称“扩束”。对于收发分置的激光雷达系统而言,波束展宽可以分为发射波束展宽和接收波束展宽。发射波束展宽即增大目标区域的照射面积,一般可采用柱面镜作为发射镜进行扩束,目前技术已相对成熟。接收波束展宽即用少量接收通道来实现宽视场接收,与发射扩束结合可保证系统具有较大的瞬时观测幅宽。

收稿日期: 2022-03-11; 修回日期: 2022-04-21; 录用日期: 2022-05-25; 网络首发日期: 2022-06-08

基金项目: 中国科学院重点部署项目(E03701010F)

通信作者: \*lidj@mail.ie.ac.cn

### 2.1 基于离焦方式的单元结构接收二维扩束

基于馈源扩束方式,衍射光学系统激光雷达实验样机的接收扩束系统光路如图 1 所示。

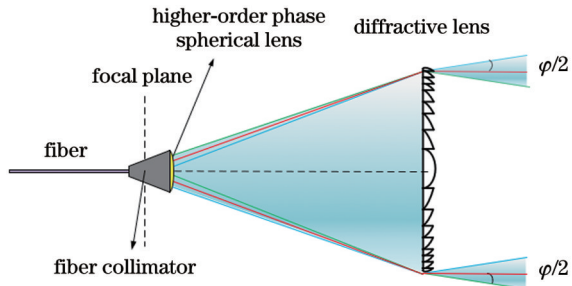


图 1 离焦方式下用光纤准直器接收的光路示意图

Fig. 1 Schematic of optical path received by optical fiber collimator in defocus mode

激光雷达接收系统采用大口径衍射薄膜镜接收时,其接收增益可定义为

$$G_r = \frac{4\pi}{\varphi_a \varphi_e}, \quad (1)$$

式中: $\varphi_a$ 为方向接收波束宽度; $\varphi_e$ 为俯仰向接收波束宽度。将探测器设置在焦点处接收,系统处于合焦状态,此时系统的接收波束最窄,接近衍射极限角,接收增益最大。若系统处于离焦状态,信号光不完全聚焦,用光纤准直器在馈源处实现接收波束展宽时,接收增益会相应下降。其物理过程可以理解为扩束使回波信号能量分布于等效形成的大光敏面上,从而使得单位光敏面上的信号功率密度相对于合焦情况下有所下降。

在中心波长为  $1.55 \mu\text{m}$ ,衍射薄膜镜口径为  $100 \text{ mm}$ ,焦距为  $480 \text{ mm}$  的情况下,高阶相位扩束组镜相对于焦点在轴向前移  $4.5 \text{ mm}$ ,对应的一维波束展宽仿真结果如图 2 所示。可见,接收波束宽度由  $20 \mu\text{rad}$  展宽到  $3 \text{ mrad}$ ,对应的一维接收增益下降了约  $22.4 \text{ dB}$ 。因为轴向离焦的方式是将波束在两个方向同时展宽,所以二维接收增益将下降  $44.8 \text{ dB}$ 。

在实验样机测试过程中,根据收发互易原理,通过

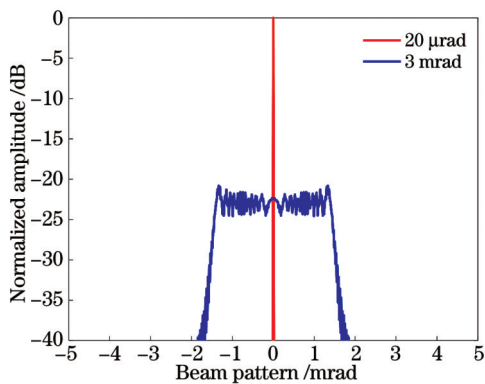


图 2 离焦方式下一维波束展宽的仿真结果

Fig. 2 Simulation results of one-dimensional beam broadening in defocus mode

接收光路发射激光,观察平行光管中的光斑大小即可判定接收波束的宽度。图 3 是离焦方式下接收波束展宽的实验情况,平行光管焦距为  $1750 \text{ mm}$ ,扩束后接收光斑的平均直径为  $5.25 \text{ mm}$ ,对应的激光接收波束展宽至  $3.15 \text{ mrad}$ 。

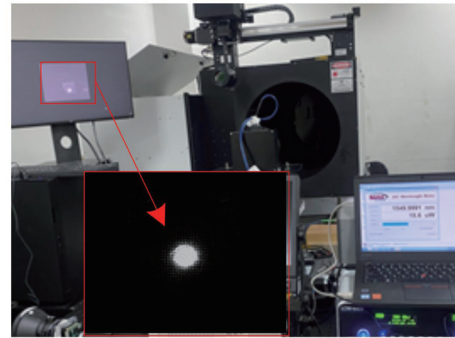


图 3 离焦方式下的接收波束展宽实验

Fig. 3 Receiving beam broadening experiment in defocus mode

### 2.2 基于离焦方式的阵列结构接收二维扩束

上述实验验证了离焦展宽接收视场方法的有效性。本文实验样机采用文献[6]提出的一发四收的馈源布局,在内视场设置 1 个  $2 \times 2$  的光纤准直器阵列进行接收,并用离焦的方式使 4 个光纤准直器之间形成一定的重叠视场,旨在通过多通道正交干涉处理实现振动相位误差估计和补偿<sup>[9]</sup>。此外,这种布局还可以实现四象限探测器<sup>[10]</sup>的功能。对 4 个光纤准直器的信号进行求差比幅/比相处理可以获得目标的方位和俯仰角信息,实现目标的测角和跟踪。

本文所用实验样机的接收光路示意图如图 4 所示,离焦处理使接收波束展宽后,接收系统的总视场为  $5.5 \text{ mrad}$ ,每根光纤对应的接收视场为  $3 \text{ mrad}$ ,形成的重叠视场为  $0.5 \text{ mrad}$ 。

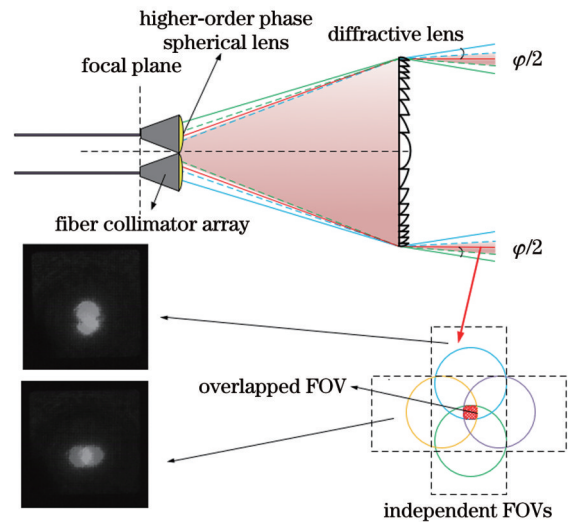


图 4 离焦方式下重叠视场接收光路示意图

Fig. 4 Schematic of overlapping field-of-view (FOV) receiving optical path in defocus mode

### 2.3 基于柱面镜的收发一维扩束

离焦扩束的方式结构简单,但只能实现两维同时扩束,这会大幅降低接收增益,减小系统的作用距离。综合考虑观测幅宽、作用距离和成像分辨率,激光雷达收发波束仅在一个方向展宽即可,另一个方向可以通过扫描来扩大观测幅宽。典型应用有 SAL 高分辨率成像。SAL 图像在斜距-方位向,为了扩大斜距向的幅宽,需要在俯仰向扩束形成宽波束。SAL 的斜距向分辨率  $\rho_r$  取决于发射信号的带宽,方位向分辨率  $\rho_a$  取决于发射波束的方位向宽度,

$$\rho_r = \frac{k \cdot c}{2 \cdot B}, \quad (2)$$

$$\rho_a = \frac{k \cdot \lambda}{2 \cdot \theta_a}, \quad (3)$$

式中:  $k$  为加窗展宽系数;  $c$  为光速;  $\lambda$  为工作波长;  $B$  为信号带宽;  $\theta_a$  为发射波束的方位向宽度。若激光波长为  $1.55 \mu\text{m}$ , 方位向波束宽度为  $100 \mu\text{rad}$ , 加窗展宽系数为 1.3, 则系统可以实现的方位向分辨率为 1 cm。

本文所用实验样机采用一发四收的相干探测接收体制<sup>[6]</sup>, 激光雷达发射高功率宽带信号, 方位向发射波束宽度为  $100 \mu\text{rad}$ , 俯仰向发射波束宽度用柱面镜展

宽至 5 mrad。由于发射光束在方位向上是窄波束, 因此接收波束仅在俯仰向上展宽即可。

柱面镜可以只向光学系统的一个方向引入二阶相位, 从而实现一维扩束。与发射扩束同理, 接收波束也可以通过在光路中加入柱面镜来展宽。在物镜的焦平面上放置柱面镜来改变成像光束的位置, 可以进一步把透过物镜的光束缩小聚集, 即偏离轴线更大角度的光被探测器接收, 实现一个方向上的接收视场展宽。在发射波束进行一维扩束的情况下, 采用离焦的方法将接收波束二维扩束至 3 mrad, 此时, 两个维度上的扩束将导致系统的接收增益下降约 44 dB。而若在接收光路中引入柱面镜进行一维接收扩束, 则相对于离焦扩束方式而言, 系统的接收增益至少可以提高 22 dB, 大幅提升了系统的探测性能。

接收扩束所用柱面镜可以用衍射薄膜镜来实现, 仿真结果如图 5 所示。衍射极限条件下 100 mm 口径对应的接收波束宽度约为  $20 \mu\text{rad}$ , 先通过离焦处理使接收波束二维展宽至  $100 \mu\text{rad}$ , 使之覆盖发射波束的方位向宽度; 然后在光路中引入柱面镜, 将俯仰向波束展宽至 3 mrad, 同时用两个光纤准直器形成  $0.5 \text{ mrad}$  的重叠视场, 则整体接收视场可在俯仰向覆盖 5.5 mrad。

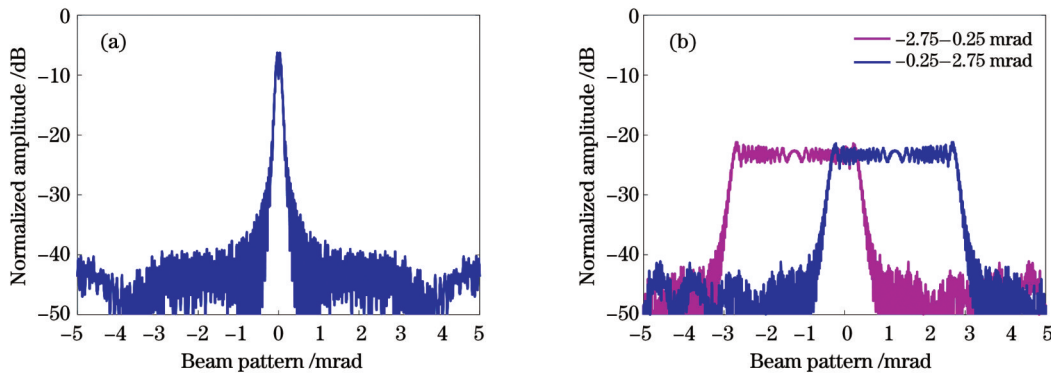


图 5 基于柱面镜的接收波束展宽结果。(a)方位向仿真波束图;(b)俯仰向仿真波束图

Fig. 5 Receiving beam broadening results based on cylindrical lens. (a) Simulation beam diagram of azimuth direction; (b) simulation beam diagram of elevation direction

本文实验样机采用收发分置方案, 发射镜采用 5 cm 口径的柱面镜, 对应的发射波束展宽结果如图 6(a) 所示, 方位向波束宽度为  $78 \mu\text{rad}$ , 俯仰向波束宽度为 4.8 mrad。为减轻系统重量, 发射所用柱面镜也可以考虑用衍射镜实现, 对应的仿真结果如图 6(b)、(c) 所示, 方位向波束宽度为  $75 \mu\text{rad}$ , 俯仰向波束宽度为 4.8 mrad。

### 2.4 基于波长变化的收发二维扩束

对于衍射镜而言, 不同波长的入射光会被聚焦于轴上各焦点。当设计波长为  $\lambda_0$  时, 若入射波长为  $\lambda$ , 则其  $m$  级衍射光对应的焦距为

$$f_m = \frac{\lambda_0 \cdot f_0}{m \cdot \lambda}, \quad (4)$$

式中:  $f_0$  为设计波长对应的理想焦距。可以看出衍射

透镜只对特定波长的光波在像面理想聚焦, 而对于其他波长的光波则无法在理想的焦距上实现聚焦。因此, 采用衍射镜时小范围的波长变化可以等效实现离焦扩束, 且无须采用机械调焦。

本文实验样机使用的是工作波长为  $1.55 \mu\text{m}$  的单频光纤激光器, 其波长调谐范围典型值为 0.8 nm, 波长控制精度为 0.1 nm, 其波长变化范围可以满足激光雷达波束展宽的需要。图 7 是口径为 100 mm、焦距为 400 mm 的衍射镜在入射激光波长分别为 1550.0、1549.6、1549.2 nm 时的波束仿真结果, 对应的实测结果如图 8 所示。在距离 33 m 处的墙上能够明显看到波长变化范围越大, 光斑能量越低, 光斑展宽越明显; 波长变化 0.8 nm 时, 波束展宽了约 7 倍。

波束展宽伴随的增益下降问题限制了远距离的观

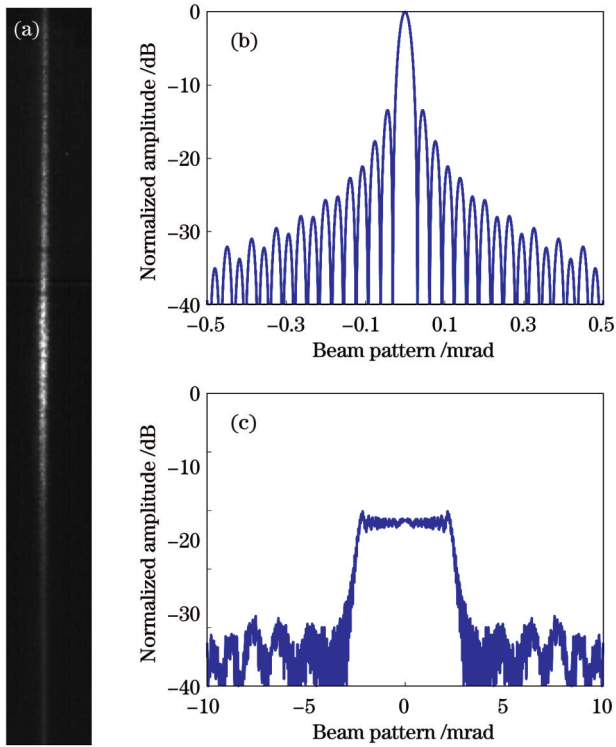


图 6 基于柱面镜的发射波束展宽结果。(a)扩束形成的线状光斑;(b)方位向仿真波束图;(c)俯仰向仿真波束图  
Fig. 6 Transmission beam broadening results based on cylindrical lens. (a) Linear spot formed by beam expansion; (b) simulation beam diagram of azimuth direction; (c) simulation beam diagram of elevation direction

测幅宽,为进一步实现宽幅成像,可以采用波束展宽与波束扫描相结合的方式。在波束扫描模式下,波束仅展宽到一定程度即可,系统的接收增益相对较高,而且在相同的观测幅宽下,作用距离更远,成像所需时间略有增加。

若将上述衍射镜看作是若干个相位单元组成的阵列,则其对于光场相位的变换作用可以用相控阵原理进行解释:在阵列空间插入波程差对应的移相量的共轭值,将接收的平面波转为同相球面波并使其在焦点处聚焦,器件的台阶宽度与相控阵辐射单元间距对应,台阶数与移相器的量化位数对应<sup>[5]</sup>。上述引入二阶相位后的波束展宽现象可以看作是相控阵弧形分布的情况,虽然主瓣和栅瓣的位置并未发生改变,但其光能量变得分散,并不全都集中在主瓣位置,即波束宽度发生了展宽。

根据相控阵原理,在阵列方向引入线性相位可以实现波束扫描。当发射系统采用衍射镜时,通过设置馈源偏离衍射镜轴线,抑或在光路中加入直角棱镜或是改变各阵元的折射率,使波束经各衍射单元后的相位延迟呈递增或递减的线性变化,即可在口径方向引入线性相位,从而使得系统可以通过波长变化来改变主瓣的空间角度位置,实现波束扫描。

引入二阶相位使波束宽度扩束至 5 mrad,再通过焦点偏置 60°引入线性相位,得到的仿真结果如图 9 所示。当波长变化 ±12 nm 时,波束一维扫描范围可达 20.25 mrad,增益和波束宽度变化相对稳定,具有较好

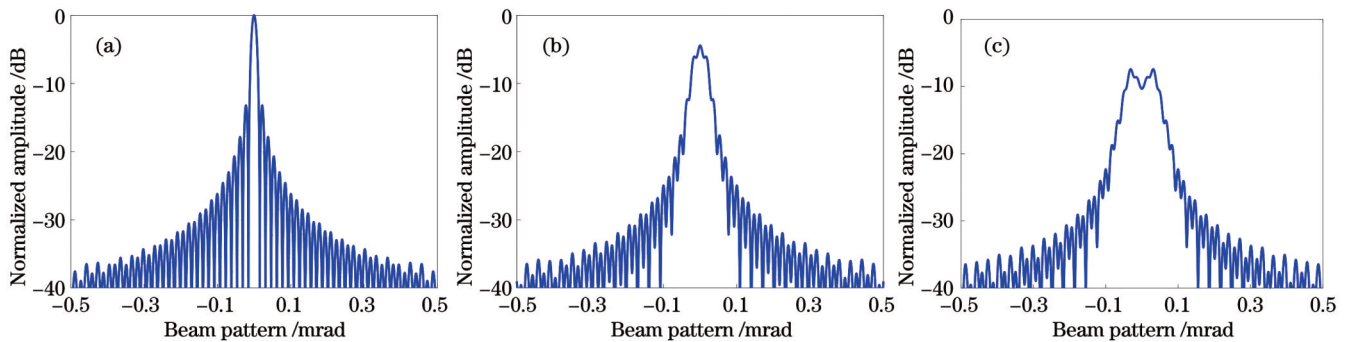


图 7 波束展宽的仿真结果。(a) 1550.0 nm;(b) 1549.6 nm;(c) 1549.2 nm  
Fig. 7 Simulation results of beam broadening. (a) 1550.0 nm; (b) 1549.6 nm; (c) 1549.2 nm

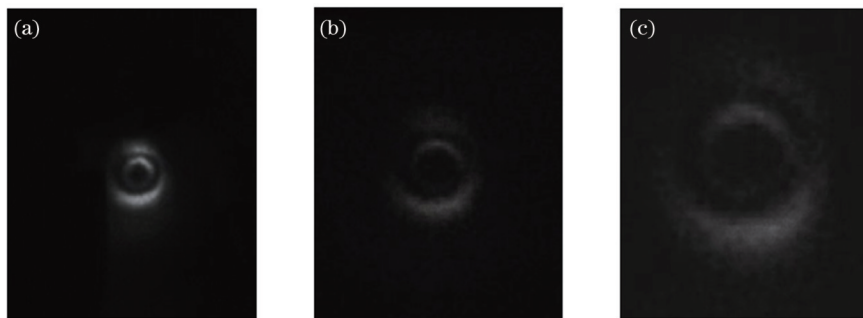


图 8 波束展宽的实验结果。(a) 1550.0 nm;(b) 1549.6 nm;(c) 1549.2 nm  
Fig. 8 Experimental results of beam broadening. (a) 1550.0 nm; (b) 1549.6 nm; (c) 1549.2 nm

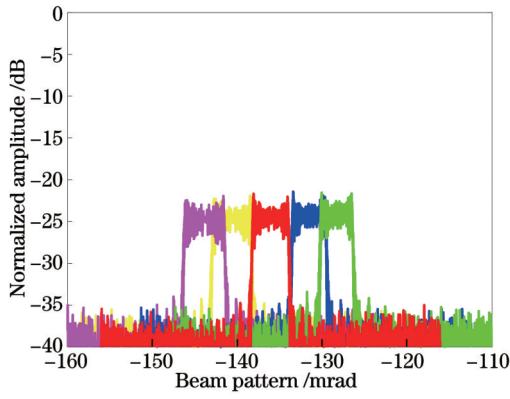


图9 基于波长变化的波束扫描仿真结果

Fig. 9 Simulation results of beam scanning based on wavelength change

的扫描效果。上述基于衍射光学系统的波长变化扩束扫描的方式,其发射和接收波束具有指向和宽度可变的能力,可以满足目标搜索、成像、捕获和跟踪等多种功能要求。

### 3 扩束激光雷达作用距离分析

#### 3.1 作用距离方程和损耗分析

激光和微波同属于电磁波,由雷达作用距离方程可导出激光雷达作用距离方程。对于收发同轴或者收发系统间距远小于其作用距离的激光雷达系统,作用距离方程<sup>[11]</sup>可表示为

$$R_{SN} = \frac{\eta_{sys} \cdot \eta_{ato} \cdot P_t \cdot G_t \cdot \sigma \cdot A_r \cdot T_p}{4\pi \cdot \Omega \cdot F_n \cdot h \cdot f_c \cdot R^4}, \quad (5)$$

式中: $R_{SN}$ 为接收到的单脉冲信噪比; $P_t$ 为发射信号的峰值功率; $G_t = \frac{4\pi}{\theta_a \theta_e}$ 为发射增益,其中 $\theta_e$ 为俯仰向发射波束宽度, $\theta_a$ 为方位向发射波束宽度; $R$ 为激光雷达与目标之间的距离; $\sigma = \rho \cdot A_t$ 为目标散射截面,其中 $\rho$ 为目标平均反射系数, $A_t$ 为目标有效照射面积; $\Omega$ 为目标散射立体角; $A_r = \pi D^2/4$ 为接收望远镜的有效接收面积,其中 $D$ 为接收望远镜的口径; $\eta_{ato}$ 为双程大气损耗因子; $\eta_{sys}$ 为系统损耗因子,包括电子学损耗和光学损耗; $f_c$ 为激光频率; $h$ 为普朗克常数; $F_n$ 为电子学噪声系数; $T_p$ 为脉冲宽度。

需要注意的是,上述作用距离方程仅在接收波束宽度等于衍射极限 $\left(\varphi_a = \varphi_e = \frac{\lambda}{D}\right)$ 的条件下才成立。宽视场信号由不同的探测器接收,此时接收增益不下降。在本文实验样机所处的离焦扩束情况下,将宽视场激光信号收至一根或少量光纤,接收增益会下降,因此需要考虑接收波束展宽带来的接收增益损耗。定义扩束损耗因子为

$$\eta_{wid} = \frac{G_{r-wid}}{G_{r-nar}} = \frac{4\pi / (\varphi_a \varphi_e)}{4\pi / (\lambda/D)^2} = \frac{(\lambda/D)^2}{\varphi_a \varphi_e}. \quad (6)$$

此外,为了获得较高的混频效率,要求回波信号与本振信号的相位、波前和偏振方向严格匹配。在远距离探测条件下,介质和目标的退偏效应使得信号光的偏振态随着时间变化,从而产生随机变化的偏振噪声,影响探测性能。因此,还需要在作用距离方程中引入接收扩束损耗因子 $\eta_{wid}$ 和偏振损耗因子 $\xi$ 。此时,系统接收到的目标返回的信号功率 $P_s$ 可表示为

$$P_s = \frac{P_t \cdot G_t}{4\pi \cdot R^2} \times \frac{A_r}{4\pi \cdot R^2} \times \frac{4\pi \cdot \sigma}{\Omega} \times \eta_{wid} \cdot \eta_{sys} \cdot \eta_{ato} \cdot \xi. \quad (7)$$

对于相干探测体制的激光雷达,还可以通过相干多脉冲积累来提升信噪比。若相干积累脉冲数为 $N$ ,信噪比可对应提高 $N$ 倍,相干积累后的信噪比为

$$R_{SN} = \frac{\eta_d \cdot \eta_{wid} \cdot \xi \cdot \eta_{sys} \cdot \eta_{ato} \cdot P_t \cdot G_t \cdot \rho \cdot A_t \cdot A_r \cdot N}{4\pi \cdot \Omega \cdot R^4 \cdot F_n \cdot h \cdot f_c \cdot B}, \quad (8)$$

式中: $\eta_d$ 为探测器的光电转换效率; $B$ 为信号带宽。

#### 3.2 模数转换量化的影响

本文所用的相干激光雷达样机由收发光学望远镜、窄脉冲激光器、四通道激光本振平衡探测器、发射通道、信号产生单元和数字采集单元组成,系统原理框图如图10所示。

回波信号与激光本振信号经耦合器、平衡探测器后所形成的基带信号还须进入信号采集系统进行模数转换(AD)并采样,同时滤除直流以及杂波干扰。本文实验样机中AD采样输入信号的范围为 $-0.5 \sim +0.5$  V,量化位数为12位,对应的量化电平为 $\pm 0.12$  mV,50  $\Omega$ 负载时对应的量化功率为 $-68.2$  dBm。当AD输入功率大于 $-68.2$  dBm时,AD才可以正常采样。减少AD量化电平可以减小其对小信号采样的影响。

在进入AD前的系统衰减量约为13 dB<sup>[12]</sup>,若光电探测器输出带宽为10 GHz,电子学放大器的电子学带宽为4 GHz,AD采样速率为4 GSa/s,则对应的激光散粒噪声功率 $h \cdot f_c \cdot B = -63$  dBm。经系统衰减后,AD输入功率约为 $-76$  dBm,小于AD的量化功率,无法正常AD采样。

为避免探测的灵敏度损失,系统设计至少要保证散粒噪声功率大于量化功率。若引入一个增益 $G_a = 20$  dB、电子学噪声系数 $F_n = 3$  dB的放大器,则光电探测器输出的信号经采集系统衰减、放大器放大后的散粒噪声功率约为 $-53$  dBm,大于AD量化功率,AD可正常采样。

基于上述参数,若光电转换后的信号功率为 $-80$  dBm,则信号经采集系统衰减、放大器放大、AD采样后的仿真结果如图11所示,其中红点标记出的是信号对应的频点。通过对比AD采样前后4096个脉冲的相干积累结果可以发现,加入放大器后AD量化对小信号采样的影响已不明显。仿真结果表明,收发扩束带来的增益损耗可以通过增设放大器来弥补,放大

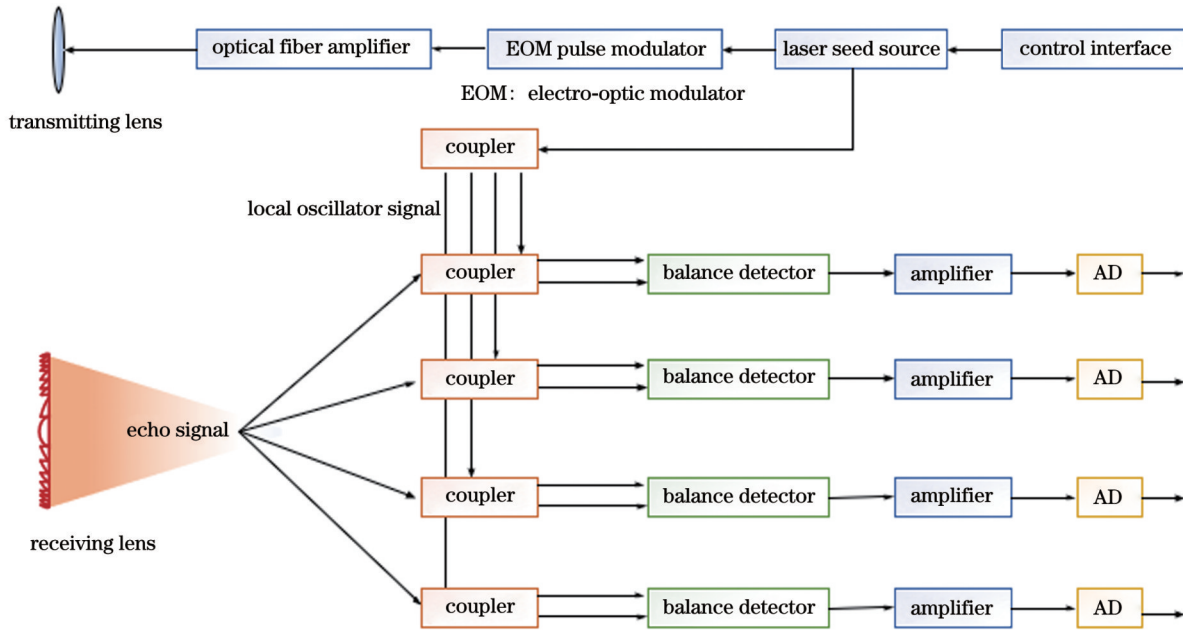


图 10 激光雷达系统原理图  
Fig. 10 System schematic of LiDAR

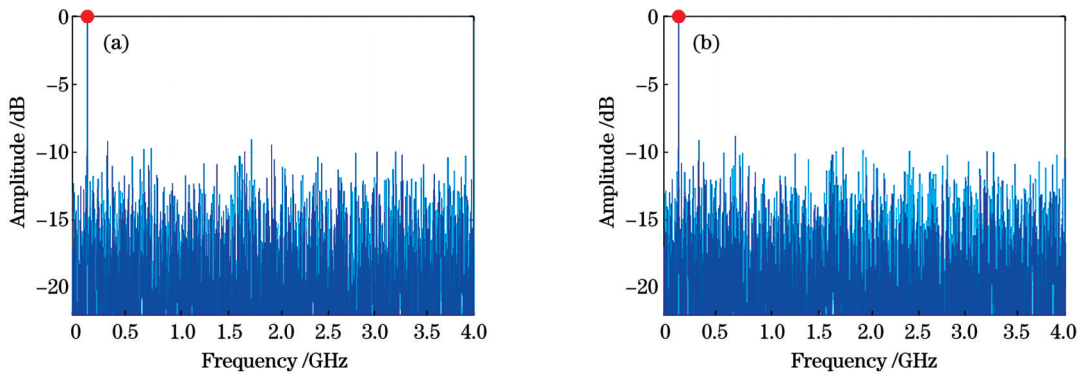


图 11 AD 采样结果。(a) 采样前的信号频谱; (b) 采样后的信号频谱  
Fig. 11 AD sampling results. (a) Signal spectrum before sampling; (b) signal spectrum after sampling

器的噪声系数仅会使信噪比略有下降。仿真结果同时表明,放大器的使用和噪声功率的增大有助于小信号的正常采样。在 AD 输入端,当噪声功率为  $-56$  dBm 时,  $-70$  dBm 量级(小于 AD 量化功率)的小信号也可以正常采样。上述参数与实际实验样机的参数相同,仿真分析结果也与实际测试结果相近。

### 3.3 地物目标作用距离

系统参数如表 1 所示。发射  $5$  ns 窄脉冲,对应的斜距向分辨率为  $0.75$  m,距离  $1100$  m 处波束宽度对应的俯仰向分辨率为  $5.5$  m,方位向分辨率为  $0.11$  m。

地物目标对应的参数如表 2 所示。用上述系统参数进行计算,在距离  $1100$  m 处,目标回波的单脉冲信噪比为  $-8.6$  dB,经  $8192$  个脉冲相干积累后,信噪比可提升至  $30.5$  dB。

图 12 是对  $1.1$  km 处烟囱的探测结果,回波信号出现在第  $2502$  个距离门,计算可得目标距离平台  $1123.2$  m。由图 12(f) 可以看出,系统接收的回波单脉

表 1 样机系统参数

Table 1 Parameters of prototype system

Parameter	Value	Parameter	Value
$P_t$ / kW	20	Average power of transmission / W	10
$T_p$ / ns	5	Pulse repetition frequency / kHz	100
$\theta_c$ / mrad	5	Adjustment range of wavelength / nm	0.8
$\theta_a$ / $\mu$ rad	100	Number of receiving echo channel	4
$\varphi_c$ / mrad	3	Amplifier gain / dB	20
$\varphi_a$ / mrad	3	$\lambda$ / $\mu$ m	1.55
$B$ / MHz	200	$D$ / mm	100
$\eta_d$	0.5	$\eta_{ato}$	0.6-0.8
$\eta_{sys}$	0.4	$F_n$ / dB	3

表 2 烟囱对应的目标参数

Table 2 Target parameters corresponding to chimney

Parameter	Value
$A_1 / \text{m}^2$	0.6
$\Omega$	$\pi$
$\xi$	0.2
$\rho$	0.2

冲信噪比很低,仅在时域波形上分辨不出信号。对回波进行 8192 个脉冲相干积累后,对应的积累时长为 80 ms,信噪比可提升约 39 dB,能够明显分辨出信号,

对应的距离-多普勒域的成像结果如图 12(b)、(d)所示。大气湍流会给目标回波信号引入一个随慢时间变化的相位误差,这将影响信号的相干积累效果并导致成像结果在多普勒频域上存在散焦现象,信号功率分散在  $-1 \sim 1$  kHz 的多普勒频率范围内,降低了信噪比。采用相位梯度自聚焦算法(PGA)<sup>[13]</sup>对回波信号聚焦后的结果如图 12(c)、(e)所示,可见,信号被聚焦于一点,多普勒频谱的近区副瓣明显下降,积分副瓣比和峰值副瓣比都有所提高。8192 个脉冲相干积累后的峰值信噪比约为 30 dB,对应的单脉冲信噪比为  $-9$  dB,与上文的理论计算值接近。

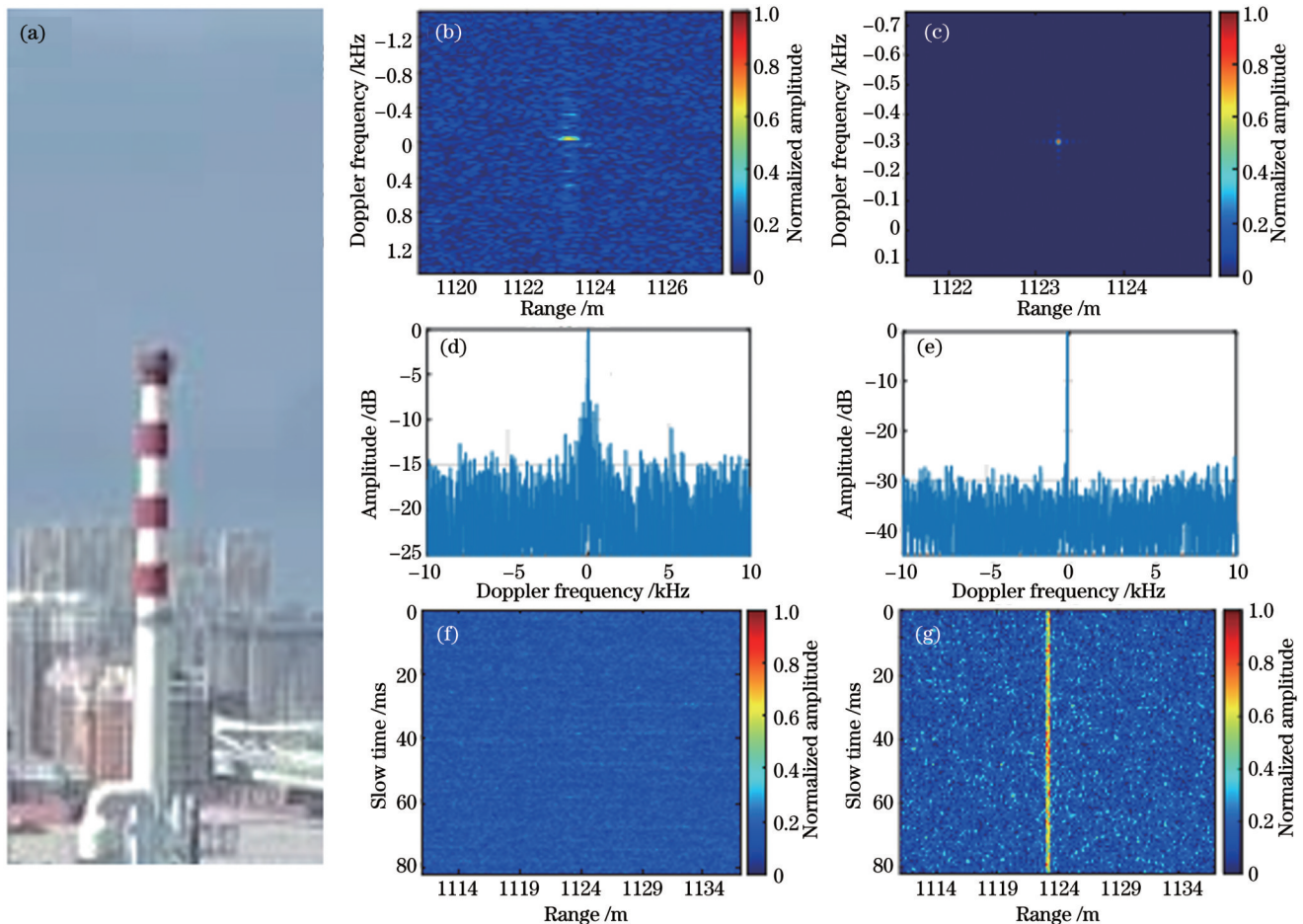


图 12 距离 1.1 km 处烟囱的探测结果。(a) 烟囱照片;(b) 距离-多普勒域成像结果;(c) PGA 处理后的距离-多普勒域成像结果;(d) 成像结果的多普勒维剖面图;(e) PGA 处理后成像结果的多普勒域剖面图;(f) 信号的时域波形;(g) PGA 处理后再作低通滤波后的信号时域波形

Fig. 12 Detection results of chimney at the distance of 1.1 km. (a) Photograph of chimney; (b) range-Doppler domain imaging result; (c) range-Doppler domain imaging result after PGA processing; (d) Doppler domain profile of imaging result; (e) Doppler domain profile of imaging result after PGA processing; (f) time domain waveform of signal; (g) time domain waveform of signal after PGA processing and low-pass filtering

此外,聚焦后的信号对应的多普勒频率较为集中,且由于目标相对系统静止,目标回波对应的多普勒频率在零频附近,因此可对聚焦后的信号在多普勒频域作带宽为 2 kHz 的低通滤波处理,进一步滤除杂散干扰。低通滤波后再作傅里叶逆变换获取的信号时域波形如图 12(g)所示,可以看出接收回波的单脉冲信噪

比得到了大幅提升。对于运动目标而言,可在回波信号对应的多普勒频率附近处作带通滤波处理来提升信噪比。

### 3.4 高反射率目标的作用距离

与微波雷达不同的是,激光雷达的目标散射截面受激光波长、目标表面材料及粗糙度、目标几何结构形

状等因素的影响,这些因素共同决定了激光雷达系统的探测距离及识别目标的性能。例如,对于激光角反射器,在入射后向一般不到 1 mrad 的衍射极限角度范围内集中的散射功率可以达到散射总功率的 84%<sup>[14]</sup>。本文采用的高反射率目标对应的目标参数如表 3 所示。采用上述系统参数进行计算,在距离 5400 m 处,单脉冲信噪比为 -8.6 dB,经 40960 个脉冲相干积累后,信噪比可提升至 37.5 dB。

表 3 高反射率纸对应的目标参数

Table 3 Target parameters corresponding to high reflectivity paper

Parameter	Value
$A_r / m^2$	0.3
$\Omega / rad$	0.02
$\xi$	0.5
$\rho$	0.8

图 13 是对 5.4 km 处的高反射率合作目标的探测结果,回波信号出现在第 4356 个距离门处,计算可得目标距离平台 5392.7 m。由图 13(f)可以看出,系统接收的回波单脉冲信噪比很低,仅在时域波形上分辨不出信号。对回波进行 40960 个脉冲相干积累后,信噪比可提升约 46 dB,对应的距离-多普勒域的成像结果如图 13(b)、(d) 所示。由于距离远且积累时间长达 400 ms,大气湍流引入的相位误差影响变大,因此各回波脉冲的时间相干性变差,成像结果严重散焦,散焦后的多脉冲信噪比仅为 7 dB。图 13(c)、(e) 是信号聚焦后的结果,40960 个脉冲相干积累后的峰值信噪比约为 37 dB,对应的单脉冲信噪比为 -9 dB,与上文的理论计算值接近。对聚焦后的信号在多普勒频域作带宽为 1 kHz 的低通滤波处理获得的信号时域波形如图 13(g) 所示,接收回波的单脉冲信噪比得到了大幅提升。

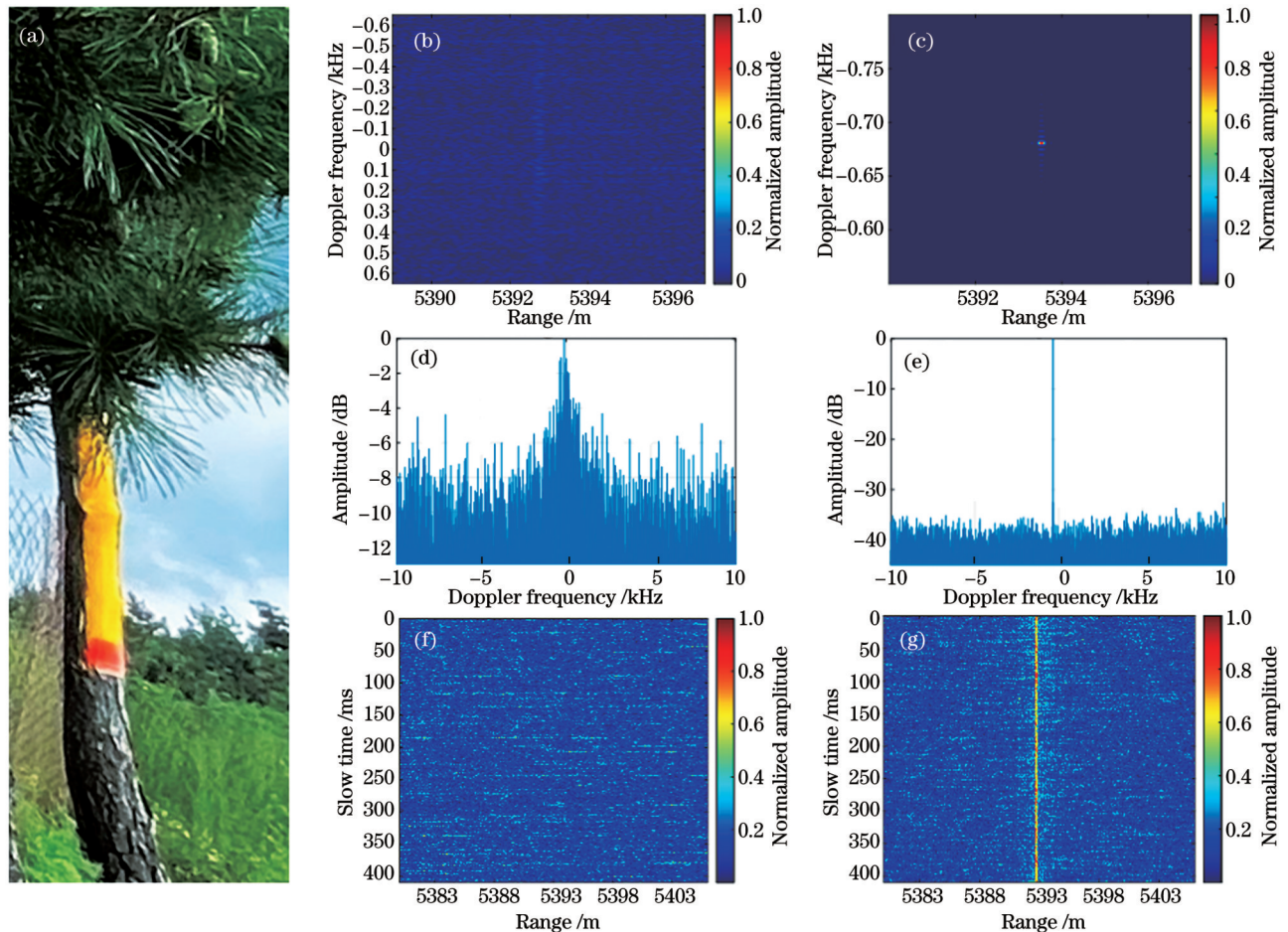


图 13 距离 5.4 km 处高反射率目标的探测结果。(a)高反射率目标照片;(b)距离-多普勒域成像结果;(c)PGA 处理后的距离-多普勒域成像结果;(d)成像结果的多普勒维剖面图;(e)PGA 处理后成像结果的多普勒维剖面图;(f)信号的时域波形;(g)PGA 处理后再作低通滤波后的信号时域波形

Fig. 13 Detection results of high reflectivity target at a distance of 5.4 km. (a) Photograph of high reflectivity target; (b) range-Doppler domain imaging result; (c) range-Doppler domain imaging result after PGA processing; (d) Doppler domain profile of imaging result; (e) Doppler domain profile of imaging result after PGA processing; (f) time domain waveform of signal; (g) time domain waveform of signal after PGA processing and low-pass filtering



上述实验数据和分析结果表明,高反射率目标要比同样面积的自然地物目标的回波强度高 20 dB 以上。因此,为使系统能够探测到 5 km 处的自然地物目标,光电探测器后面的放大器增益应达到 50 dB 量级并适当延长相干积累时间。

## 4 结 论

本文对基于衍射光学系统的激光雷达系统进行了分析,提出了离焦扩束、加柱面镜扩束以及基于衍射镜的波长变化扩束共 3 种接收波束展宽方法,并进行了仿真计算和相关实验,在 100 mm 接收口径条件下将接收视场为 3 mrad 的激光信号收入一根光纤,验证了所提方法的有效性。本文研制的激光雷达实验样机利用衍射镜轻薄的特点,实现了接收系统的轻量化和大口径,并结合收发扩束系统,对 1.1 km 和 5.4 km 距离处的目标进行了成像探测。结果表明,本文所提方法有效,有望满足远距离宽幅高分辨率成像的要求,持续开展相关研究工作具有重要意义。接收扩束导致的接收增益损耗可以通过合理配置系统参数以及在系统的电子学部分加入高增益放大器来弥补。

### 参 考 文 献

- [1] Hancock S, McGrath C, Lowe C, et al. Requirements for a global lidar system: spaceborne lidar with wall-to-wall coverage[J]. Royal Society Open Science, 2021, 8(12): 211166.
- [2] Zhu J Y, Xie Y J. Large aperture diffractive telescope design for space-based lidar receivers[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9795: 979508.
- [3] McGrath C, Lowe C, MacDonald M H, et al. Investigation of very low Earth orbits (VLEOs) for global spaceborne lidar[J]. CEAS Space Journal, 2022, 14: 625-636
- [4] Beck S M, Buck J R, Buell W F, et al. Synthetic-aperture imaging laser radar: laboratory demonstration and signal processing [J]. Applied Optics, 2005, 44(35): 7621-7629.
- [5] 李道京, 胡烜. 合成孔径激光雷达光学系统和作用距离分析[J]. 雷达学报, 2018, 7(2): 263-274.  
Li D J, Hu X. Optical system and detection range analysis of synthetic aperture lidar[J]. Journal of Radars, 2018, 7(2): 263-274.
- [6] 李道京, 胡烜, 周凯, 等. 基于共形衍射光学系统的合成孔径激光雷达成像探测[J]. 光学学报, 2020, 40(4): 0428001.  
Li D J, Hu X, Zhou K, et al. Synthetic aperture lidar imaging detection based on conformal diffractive optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(4): 0428001.
- [7] Xu X W, Gao S, Zhang Z H. Inverse synthetic aperture lidar demonstration and outdoor experiments[C] // 2018 China International SAR Symposium (CISS), October 10-12, 2018, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2018.
- [8] Waller D, Campbell L, Domber J L, et al. MOIRE primary diffractive optical element structure deployment testing[C] // 2nd AIAA Spacecraft Structures Conference, January 5-9, 2015, Kissimmee, Florida. Virginia: AIAA Press, 2015: 1836.
- [9] 杜剑波, 李道京, 马萌, 等. 基于干涉处理的机载合成孔径激光雷达振动估计和成像[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0910003.  
Du J B, Li D J, Ma M, et al. Vibration estimation and imaging of airborne synthetic aperture lidar based on interferometry processing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0910003.
- [10] 谭千里. 四象限探测器组件在激光制导技术中的应用[J]. 半导体光电, 2005, 26(2): 155-157.  
Tan Q L. The application of quadrant photodetector module on laser guidance technology[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2005, 26(2): 155-157.
- [11] 李道京, 高敬涵, 崔岸婧, 等. 2 m 衍射口径星载双波长陆海激光雷达系统研究[J]. 中国激光, 2022, 49(3): 0310001.  
Li D J, Gao J H, Cui A J, et al. Research on space-borne dual-wavelength land-sea LiDAR system with 2 m diffractive aperture [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(3): 0310001.
- [12] 李道京, 周凯, 崔岸婧, 等. 多通道逆合成孔径激光雷达成像探测技术和实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(18): 1811017.  
Li D J, Zhou K, Cui A J, et al. Multi-channel inverse synthetic aperture lidar imaging detection technology and experimental research[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(18): 1811017.
- [13] 李燕平, 邢孟道, 保铮. 一种改进的相位梯度自聚焦算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2007, 34(3): 386-391, 427.  
Li Y P, Xing M D, Bao Z. Improved phase gradient autofocus algorithm based on adaptive isolated scatter selection[J]. Journal of Xidian University, 2007, 34(3): 386-391, 427.
- [14] 孙鹏举, 高卫, 汪岳峰. 目标激光雷达截面的计算方法及应用研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(5): 597-600, 607.  
Sun P J, Gao W, Wang Y F. Calculation and application of laser radar cross section for targets[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(5): 597-600, 607.

## Analysis of Receiving Beam Broadening and Detection Range of LiDAR Based on Diffractive Optical System

Gao Jinghan<sup>1,2</sup>, Li Daojing<sup>1\*</sup>, Zhou Kai<sup>1,2</sup>, Cui Anjing<sup>1,2</sup>, Wu Jiang<sup>1,2</sup>, Wang Yefei<sup>2,3</sup>, Liu Kai<sup>2,3</sup>,  
Tan Songnian<sup>3</sup>, Gao Yang<sup>3</sup>, Yao Yuan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

<sup>2</sup>School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China

### Abstract

**Objective** To ensure a detection range, the receiving telescope of lidar should adopt a larger aperture to receive more echo energy. When receiving with a single-element detector, increasing the receiving aperture typically reduces the receiving beam width. Array

detectors are commonly used to receive wide field-of-view echo signals to achieve a wide receiving beam and form a large observation width. Considering an optical system with a 100 mm aperture and 480 mm focal length as an example, it is assumed that a single-element detector with a photosensitive surface size of  $9.5\ \mu\text{m}$  is used for reception. For a central wavelength of  $1.55\ \mu\text{m}$ , the corresponding receiving beam width is approximately  $20\ \mu\text{rad}$ , which is close to the diffraction limit. The size of the detector array required to cover a receiving field-of-view of 3 mrad is  $150 \times 150$ , resulting in a sharp increase in the number of LiDAR channels with a coherent detection system and an extremely complex technical implementation of the system. The size of photosensitive surface of the single-element detector increases to approximately 1 mm. In principle, one channel can realize the reception of a wide field-of-view laser echo signal.

**Methods** Receiving beam broadening can realize the function of a detector with a large photosensitive surface. Receiving beam broadening can be realized at the primary lens or the feed, and the method of realizing receiving beam broadening at the feed can include the common aperture function of the primary lens. Following references [5-6] and the feed beam expansion method, three receiving beam broadening methods, including defocus beam expansion, cylindrical lens beam expansion, and wavelength-conversion beam expansion based on a membrane diffractive lens, are proposed. A simulation calculation was performed. Some verification results are provided in combination with the development of the actual system. In addition, considering the problem of receiving gain reduction caused by beam expansion, the working distance equation of LiDAR in the case of beam expansion is also provided in this paper, and the analysis and verification are conducted based on experimental data.

**Results and Discussions** Based on the three beam expansion methods proposed in this study, the experimental prototype expanded the transmitted beam to 5 mrad in the elevated direction under the condition of beam expansion by a cylindrical lens (Fig. 6). Simultaneously, in the defocus beam expanding mode, to realize coherent detection of the laser echo signal based on the all-fiber optical path, a fiber collimator with a high-order phase beam expander is used to bring the field-of-view of the 3 mrad laser echo signal into a single-mode polarization-maintaining fiber with a core diameter of  $9.5\ \mu\text{m}$  (Fig. 3). The echo signal is further received by the optical fiber collimator array with a high-order phase spherical lens, the overlapping field-of-view of 0.5 mrad is realized, and the total receiving field-of-view of the system is 5.5 mrad (Fig. 4). In the case of beam expansion, the chimney at 1.1 km and the high-reflectivity target at 5.4 km are detected. After multipulse coherent accumulation and self-focusing processing, the signal-to-noise ratio is greater than 30 dB (Figs. 12 and 13), which satisfies the requirements of high-resolution imaging.

**Conclusions** The LiDAR prototype developed in this study utilized the lightweight and thin characteristics of the membrane diffractive lens to realize the lightweight and large aperture of the receiving system. Combined with the receiving beam expander system, the targets at 1.1 and 5.4 km were detected using the receiving beam expander system. These results indicate that the proposed method is effective. Under the condition of a large receiving aperture, combined with transceiver beam broadening, it can not only reduce the number of receiving channels but also ensure the imaging resolution and long-distance detection signal-to-noise ratio, as well as obtain a large instantaneous observation width. It is of great significance to continue relevant research, which is expected to meet the requirements of long-distance, wide-range, high-resolution imaging. The decrease in the receiving gain caused by the receiving beam expansion can be compensated by adding amplifiers to the electronics. At present, electronic amplifiers with a gain of 40–50 dB are very common, and a reasonable design of the system parameters is of great significance.

**Key words** remote sensing; LiDAR; diffractive optical system; laser beam expansion; wide field-of-view reception; radar equation