

2 m 衍射口径星载双波长陆海激光雷达系统研究

李道京^{1*}, 高敬涵^{1,2}, 崔岸婧^{1,2}, 周凯^{1,2}, 吴疆^{1,2}¹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;²中国科学院大学, 北京 100049;

摘要 针对对地三维成像和海洋水深测量的需求,对轨道高度为 500 km、口径为 2 m 的谐衍射光学系统星载双波长陆海激光雷达系统进行了分析。基于单光子阵列探测器,分析了大口径衍射光学系统的合成孔径实现方式,并设计了系统参数。波长为 1.55 μm 的陆地观测激光雷达的主要性能指标为:地面像元分辨率 4 m, 轨间瞬时幅宽 4 km, 高程测量精度 0.3 m。波长为 0.516 μm 的海洋观测激光雷达的可探测水深达 30 m。分析了激光本振阵列探测器的结构,提出了基于相干探测的光学合成孔径技术,有望采用计算成像的方式,利用多个子口径的低分辨率复图像信号相干合成高分辨率图像,同时提高图像的信噪比。相同系统参数下的对比分析表明,波长为 1.55 μm 的陆地观测激光雷达采用相干探测体制后,探测性能优于传统的直接探测。采用子口径结构,可降低衍射光学系统的加工难度,同时子口径结构焦距短的特点使得光学系统的轴向尺寸和重量大幅减小。

关键词 遥感; 激光雷达; 衍射光学系统; 光学合成孔径; 阵列探测器

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0310001

1 引言

星载激光雷达具有运行轨道高、观测范围广的优点,可以精确、快速地获取大尺度三维空间信息,近年来已被广泛应用于海洋遥感、地形测绘、大气环境探测^[1-3]等领域,是国内外研究的热点。美国于 2018 年发射了基于光子计数的 ICESat-2 卫星,实现了对地表的三维测量。中国于 2019 年发射了搭载激光测高仪的高分七号卫星,星载激光雷达在对地观测遥感应应用中的地位日趋重要^[4]。

目前,星载激光雷达的系统参数^[5-6]为:轨道高度在 500 km 左右;波长主要为 1.064 μm 和 0.532 μm ;脉冲重复频率较低,在百赫兹量级。用于陆地观测的星载三维成像激光雷达的高程精度约为 0.3 m,离散布设的波束数量较少,通常不超过 10 个,对应的地面离散光斑直径在 30 m 量级。用于海洋观测和水深测量的星载激光雷达正处于关键技术攻关阶段^[7-8]。

随着激光器和探测器技术的发展,星载激光雷达逐渐从单点探测发展为线阵推扫成像、面阵三维成像,系统的成像分辨率和测高精度也在不断提高^[9]。目前,星载对地三维成像激光雷达的观测幅宽较小,等效的地面像元分辨率较低。为了在有限的卫星平台资源条件下进一步扩大观测幅宽,提高三维成像效率,研究基于新技术体制的激光雷达迫在眉睫。

激光单色性的特点使得激光雷达特别适合采用衍射光学系统。为了减小星上激光发射功率有限的影响,星载三维成像激光雷达应考虑采用大口径轻量衍射薄膜镜接收回波信号^[10-11]。文献[12]介绍了星载大口径衍射式激光雷达的接收光学系统,文献[13]介绍了 10 m 衍射口径的星载合成孔径激光雷达的系统指标和实现方案。

在基于直接探测的单光子探测器投入应用^[14-15]的同时,基于激光本振的相干探测技术也在快速发展,规模越来越大的激光本振阵列探测器^[16-18]由于

收稿日期: 2021-05-14; 修回日期: 2021-05-30; 录用日期: 2021-06-08

基金项目: 中科院重点部署项目(E03701010F)

通信作者: *lidj@mail.ie.ac.cn

灵敏度远优于单光子探测器,已引起研究人员的广泛关注。基于衍射光学系统和相干探测体制,发展新一代星载激光雷达具有现实意义。

针对对地三维成像和海洋水深测量的需求,本文基于衍射光学系统、单光子阵列探测器和激光本振阵列探测器,研究了 2 m 衍射口径双波长星载激光雷达的实现方案。

2 2 m 口径衍射光学系统的光学合成孔径实现

本文的星载激光雷达设计有 1.55 μm 和 0.516 μm 两个波长,陆地观测使用 1.55 μm 波长,海洋观测使用 0.516 μm 波长,双波长激光接收系统通过衍射技术共用一个 2 m 口径的衍射薄膜主镜,回波经分光后进入不同波段的探测器,双波长

激光雷达的总体结构如图 1 所示,其中 λ_1 和 λ_2 分别代表 1.55 μm 和 0.516 μm 两个波长。

基于单光子探测器的星载激光雷达采用收发分置方式,大口径接收衍射薄膜镜和小口径发射望远镜(位于主镜两侧,口径约为 0.2 m)的布置如图 2 所示。图 2(a)所示为大口径衍射薄膜镜,现阶段 2 m 口径衍射薄膜镜的直接加工难度较大,需将大口径分为若干小口径分别加工,再采用光学合成孔径技术将多个小口径拼接组装成大口径^[19]。12 个子口径衍射薄膜镜通过光学合成孔径技术形成的一个大口径如图 2(b)所示,其中也给出了衍射条纹的分布,其中 d 为子口径衍射薄膜镜的直径, D 和 F 分别表示合成孔径后等效的大口径衍射薄膜镜的直径和焦距。当子口径为 0.5 m 时,该结构的接收面积接近一个 2 m 口径望远镜的接收面积。

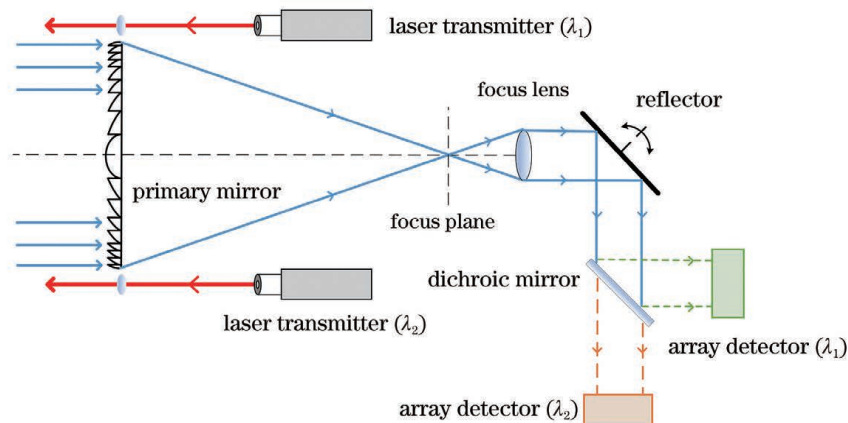


图 1 双波长激光雷达的总体结构图

Fig. 1 Overall structural diagram of dual wavelength lidar

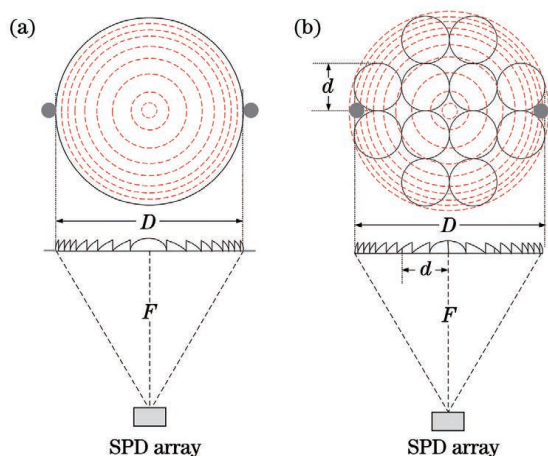


图 2 收发光学系统的布置示意图。(a)大口径衍射光学系统;(b)合成孔径衍射光学系统

Fig. 2 Layout diagrams of transceiver optical system. (a) Large aperture diffractive optical system; (b) synthetic aperture diffractive optical system

衍射薄膜镜可看作为菲涅耳波带片,对无穷远轴上的物点成像。菲涅耳波带片是一个具有系列同心圆环的二元振幅图形,圆环沿半径方向呈周期性分布。在要求的波长 λ_0 , 焦距 f , 半径 r 和衍射效率下,可以对菲涅耳波带片的结构参数进行设计^[20],包括相位台阶数 L ,波带片的周期数 $M = r^2 / (2f\lambda_0)$,环带数 $K = ML$,第 k 个环带的半径 $r_k = \sqrt{2kf\lambda_0/L}$ 以及最小线宽 $v_{\min} = \sqrt{2Kf\lambda_0/L} - \sqrt{2(K-1)f\lambda_0/L} \approx r/2K$ 。

本文将衍射薄膜镜的口径设计为 2 m,将焦距设计为 4 m,将菲涅耳波带片的波长设计为 $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$,故周期数 $M = 80645$ 。若台阶数 $L = 8$,对应的环带数 $K = 645162$,最小线宽约为 0.775 μm 。若台阶数 $L = 12$,对应的环带数 $K = 967743$,最小线宽约为 0.516 μm 。当将折叠周期设计为

1.55 μm 时,波长为 0.516 μm 的激光也可高效率透过该衍射薄膜镜,0.516 μm 波长对应的等效台阶数为 4。

基于谐衍射原理,通过适当增大折叠周期,本文的谐衍射透镜对 1.55 μm 激光的 2 级衍射谐振光和 0.516 μm 激光的 6 级衍射谐振光的衍射效率均接近 100%。将折叠周期设计为 3.1 μm ,即可保证波长为 1.55 μm 和 0.516 μm 的激光均高效率透过,当台阶数 $L=12$ 时,对应的环带数 $K=395079$,最小线宽可增大至 1.9 μm 左右,这有利于加工。将大口径分成子口径、折叠光路并适当加大焦距,均可减小加工难度,从目前国内的加工能力看,这些措

施有可行性。

图 3 为折叠周期设计为 1.55 μm 时,大口径衍射主镜和合成孔径衍射主镜对应的光程差折叠条纹、点扩展函数 (PSF) 和光学传递函数 (MTF)。上述基于圆形子口径拼接的光学合成孔径的“缝隙”较大,孔径的稀疏对图像分辨率和信噪比会有一定影响,采用六边形子口径结构可减少子口径拼接带来的稀疏性,有利于保证图像质量。

如图 3 所示,光学合成孔的 12 个子镜能够较好地替代大口径主镜,但系统的轴向尺寸仍较大,通常可通过折叠光路^[21]来缩小体积。

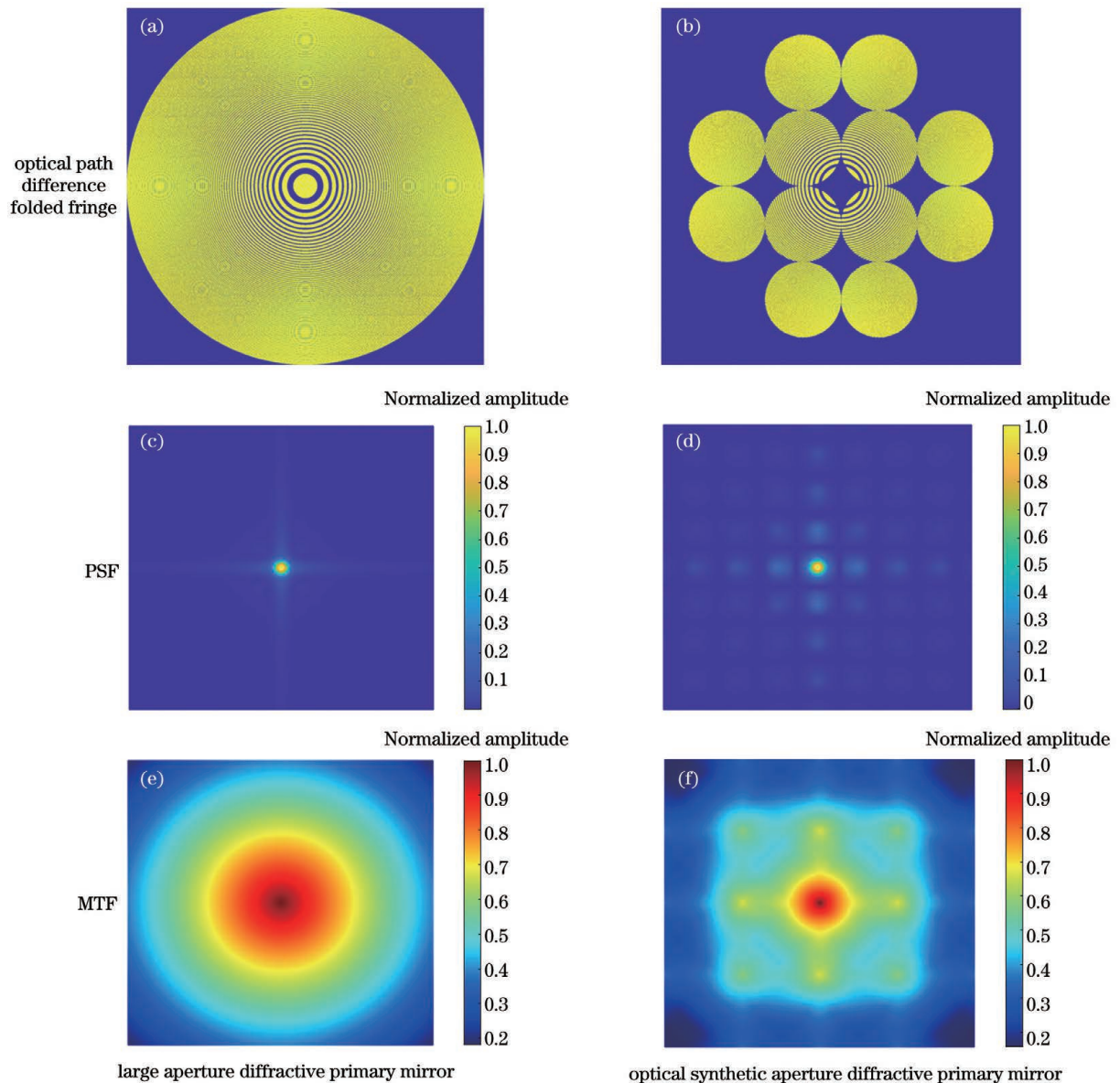


图 3 大口径和光学合成孔径衍射主镜对应的光程差折叠条纹、PSF 和 MTF

Fig. 3 Optical path difference folded fringes, PSFs and MTFs of large aperture and optical synthetic aperture diffractive primary mirrors

3 系统参数设计

3.1 对地三维成像

波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 的星载激光雷达主要用于对地三维成像,激光雷达发射的交轨向波束宽度为 8 mrad ,顺轨向波束宽度为 $80 \mu\text{rad}$ 。当轨道高度为 500 km 时,发射波束在地面上的光斑的交轨向尺寸为 4000 m (地面瞬时幅宽),顺轨向尺寸为 40 m ,通过交轨向波束扫描可进一步扩大观测幅宽。

采用规模为 10 (顺轨向) \times 1000 (交轨向) 的单光子面阵探测器,每个像元的接收视场角(FOV, F_{OV})为 $8 \mu\text{rad}$,对应的交轨向分辨率和顺轨向分辨率均为 4 m ,由此可实现地面瞬时幅宽为 4 km 的对地三维成像。

交轨向波束扫描可扩大观测幅宽,由于发射镜

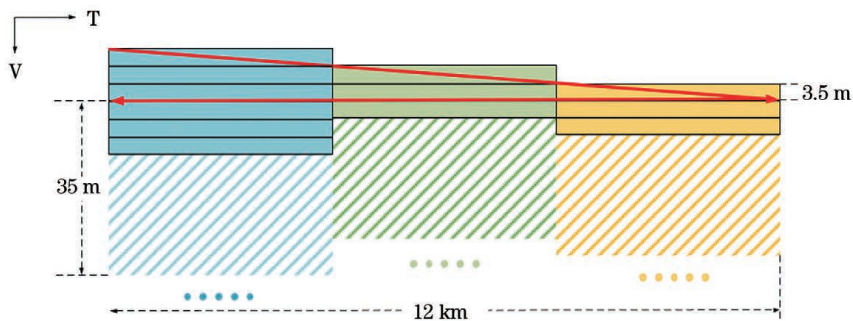


图 4 激光发射波束扫描方式示意图

Fig. 4 Schematic of laser beam scanning mode

基于上述像元规模为 10×1000 的面阵探测器,采用上述方法交轨向扫描 3 次,可在实现扩大幅宽的同时,保证顺轨向 70% 区域(重叠区域)的激光点云网格密度优于 4 m 。

顺轨向重叠区域的设置使得通过滑窗处理实现多脉冲积累、提高探测信噪比成为可能,当可积累的脉冲数为 N 时,基于单光子探测的非相干积累可将信噪比提高 \sqrt{N} 倍,基于相干探测的相干积累可将信噪比提高 N 倍。

图 4 所示的面阵探测器在顺轨向的像元为 10 行,其中重叠区域为 7 行,对应的可积累脉冲数为 7,经过顺轨滑窗处理^[24]实现了非相干积累,将信噪比提升了约 4.2 dB 。

当光学系统的口径为 2 m , F 数为 2,系统焦距约为 4 m ,探测器像元尺寸 $32 \mu\text{m}$ 时,系统角分辨率约为 $8 \mu\text{rad}$,对应的地面像元分辨率约为 4 m 。目前,探测灵敏度较高的单光子阵列探测器技术较成熟,其像元尺寸通常为 $15 \mu\text{m}$,国内面阵探测器的规模已达到 $2048(64 \times 32)$,采用 1000 像元线阵单光

的口径较小,设置小口径折反镜即可实现激光发射波束扫描;使用大口径衍射光学系统进行接收,通过压缩光路并设置小口径折反镜来实现接收波束扫描^[22]。由于收、发望远镜是分置的,在波束扫描过程中,要求收、发视场是高精度同步的。本文的激光雷达收发波束扫描采用频率扫描方式^[23],可减少机械转动部件。

当卫星地速为 7000 m/s ,激光雷达脉冲重复频率(PRF)为 2 kHz 时,每个脉冲周期内地面光斑顺轨向运动 3.5 m ,发射波束对应的地面交轨幅宽为 4 km ,在 3 个脉冲周期内交轨向扫描 3 次,可在地面形成约 12 km 的扫描幅宽。增加交轨向扫描次数可进一步扩大幅宽。激光发射波束的扫描方式如图 4 所示,其中 V 代表卫星顺轨运动方向,T 代表卫星交轨运动方向。

子探测器的激光雷达国外已有报道^[9],本文像元规模为 10×1000 的面阵探测器研制具有可行性。

综合考虑体积、重量和功耗,波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 的星载激光雷达的激光发射平均功率拟设计在 300 W 量级,采用多个子激光器经功率合成形成所需发射功率。采用单光子阵列探测器时,激光器的发射波形选为窄脉冲,当脉冲宽度为 5 ns 时,对应的距离向(高程向)分辨率为 0.75 m 。

3.2 海洋水深测量

衍射光学系统容易获得窄的光谱接收范围,这对太阳背景光有较好的抑制,有利于激光水深探测。星载激光雷达进行海洋观测时使用 $0.516 \mu\text{m}$ 波长,为了集中能量^[25]实现足够的水深探测距离,本文激光雷达的发射波束宽度设计为 $8 \mu\text{rad}$ (海面光斑尺寸为 4 m),接收视场设计为 $80 \mu\text{rad}$ (海面覆盖尺寸为 40 m),接收选用像元规模为 10×10 的单光子面阵探测器,必要时通过交轨向波束扫描扩大观测范围,激光发射平均功率拟设计在 200 W 量级。

4 激光雷达探测性能

4.1 对地三维成像

对地观测时,激光雷达方程确定了作用距离和单脉冲信噪比的关系,其单脉冲信噪比表达式可写为

$$S_{\min} = \frac{\eta_{\text{sys}} \cdot \eta_{\text{ato}} \cdot P_t \cdot G_t \cdot \sigma \cdot A_r \cdot T_p}{4\pi \cdot \Omega \cdot F_n \cdot h \cdot f_c \cdot R^4}, \quad (1)$$

式中: P_t 为发射信号的峰值功率; $G_t = \frac{4\pi}{\theta_c \theta_a}$ 为发射增益,其中 θ_c 为交轨向波束宽度, θ_a 为顺轨向波束宽度; $\sigma = \sigma_0 \rho_c \rho_a$ 为分辨单元对应的目标散射截面积,其中 σ_0 为目标散射系数, ρ_c 为交轨向分辨率, ρ_a 为顺轨向分辨率; $A_r = \frac{\pi D^2}{4}$ 为接收望远镜的有效接收面积,其中 D 为接收望远镜口径; F_n 为电子学噪声系数; T_p 为脉冲宽度; h 为普朗克常数; f_c 为激

光频率; Ω 为目标后向散射立体角; R 为卫星高度; η_{ato} 为大气损耗; η_{sys} 为激光雷达的系统损耗,主要包括光学系统损耗与电子学系统损耗: $\eta_{\text{sys}} = \eta_{\text{ele}} \cdot \eta_{\text{opt}}$,其中 η_{ele} 为电子学系统损耗, $\eta_{\text{opt}} = \eta_t \cdot \eta_r \cdot \eta_m \cdot \eta_D \cdot \eta_{\text{oth}}$ 为光学系统损耗, η_t 为发射光学系统损耗, η_r 为接收光学系统损耗, η_m 为光学系统匹配损耗, η_D 为光电探测器的量子效率导致的光学系统损耗, η_{oth} 为其他光学系统损耗。探测器的最小可探测功率为 $h \cdot f_c \cdot B_r$ (其中 B_r 为信号带宽),同时考虑了电子学噪声系数的影响。

表 1 所示的星载激光雷达系统参数具有可行性。当激光器发射 5 ns 窄脉冲时,根据上述参数计算可知,每像元单脉冲信噪比约为 0 dB。在顺轨向采用滑窗处理,实现 7 个脉冲的非相干积累,使信噪比提升至 4 dB 左右,基本满足单光子阵列探测器三维成像要求。

表 1 星载激光雷达的系统参数

Table 1 System parameters of space-borne lidar

Parameter	Value	Parameter	Value
R	500 km	PRF	2 kHz
P_t	30 MW for narrow pulse, and 1.5 kW for broad pulse	θ_c	8 mrad (land), and 8 μ rad (ocean)
T_p	5 ns for narrow pulse, and 100 μ s for broad pulse	θ_a	80 μ rad (land), and 8 μ rad (ocean)
B_r	200 MHz for narrow pulse, and 500 MHz for broad pulse	FOV	8 μ rad (land), and 80 μ rad (ocean)
D	2 m	A_r	2.36 m ²
ρ_c	4 m	ρ_a	4 m
σ_0	0.2	Ω	π
η_{ato}	0.2	F_n	3 dB
η_{ele}	0.5	η_{opt}	0.3

4.2 海洋水深测量

文献[26-27]研究了机载激光雷达海洋测深问题,星载激光雷达测深方程可写为

$$P_r(h') = \frac{\eta_{\text{sys}} \cdot \eta_{\text{ato}} \cdot P_t \cdot G_t \cdot \sigma \cdot A_r}{4\pi \cdot \Omega \cdot (nH + h')^4} \cdot (1 - \rho_w)^2 \cdot \exp(-2ah') \cdot F(h') = \frac{\eta_{\text{sys}} \cdot \eta_{\text{ato}} \cdot P_t \cdot \sigma_0 \cdot A_r}{\pi \cdot (nH + h')^2} \cdot (1 - \rho_w)^2 \cdot \exp(-2ah') \cdot F(h'), \quad (2)$$

式中: $P_r(h')$ 为接收功率; H 为卫星到海面距离; h' 为水深; n 为海水折射率; a 为海水中激光光束的衰减系数; ρ_w 为海表的反射系数(当入射角小于 30°时,平静海面的反射率一般小于 0.02); $F(h')$ 为由接收视场角、探测深度、海水光学参数、波束发散角等多种因素导致的损耗因子,其表达式^[26]为

$$F(h') = \phi m \exp\left(-\frac{2b_t}{\cos \theta_w}\right) \int_0^\infty (x + \sqrt{1+x^2})^{\left(\frac{-2b_t}{x \cos \theta_w}\right)} \times \exp\left[-\frac{x^2 m^2}{4} \left(\frac{D^2 \cos^2 \theta_w}{4h^2} + \Theta^2\right)\right] J_1(\phi m x) dx, \quad (3)$$

式中: $\Theta = \frac{F_{\text{ov}}}{2} \cdot \frac{H+h'}{h'}$; $\psi = \frac{\theta_a}{2} \cdot \frac{H+h'}{h'}$; θ_w 是激光

脉冲由水气界面进入海水之后的传播方向与垂直方向的夹角; J_1 是一阶贝塞尔函数; $x = \kappa h' / m$, 其中 κ

为极坐标系中与入射光轴方向正交的位置向量经傅里叶变换后的空间频率; b_i 是水体前向散射系数; m 为散射角平均余弦的函数。

海水特性参数取值由表 2 给出, 在参数确定后, 可以得到 $F(h')$ 与 h' 的关系曲线, 如图 5 所示。

表 2 激光雷达的海洋特性参数

Table 2 Parameters of marine characteristics of lidar

Parameter	Value	Parameter	Value
b_i	0.4	α	0.08
m	8	ρ_w	0.02
n	1.34	θ_w / rad	0

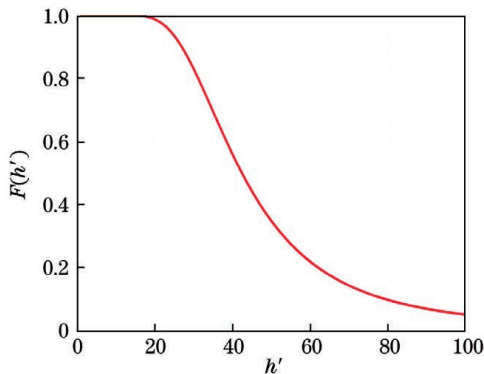


图 5 $F(h')$ 与 h' 的关系曲线

Fig. 5 Relationship between $F(h')$ and h'

根据表 1 所示的激光雷达系统参数, 可以计算出回波信噪比与水深的关系。当海水较为清澈时, 测量深度为 34 m 时的回波信噪比可达到 4 dB, 基本满足基于单光子探测器的浅海海域测深要求。若水深为 30 m, 回波信噪比可优于 8 dB, 在浅海海域可获得较好的探测效果。

5 基于相干探测的光学合成孔径和陆地探测性能分析

上述单光子探测器还属于直接探测器, 考虑到相干探测技术的发展以及相干探测的灵敏度和抗干扰能力优于直接探测, 研究相干探测体制在星载激光雷达中的应用具有重要意义。海水具有去相干和退偏的特点, 不便于采用与宽发射脉冲对应的脉冲压缩技术。因此, 基于宽脉冲激光器, 主要研究相干探测体制在陆地观测星载激光雷达中的应用, 这并不妨碍相干探测应用于窄脉冲水深测量雷达中, 在此基础上使用非相干积累以改善信噪比。

5.1 基于相干探测的光学合成孔径

基于计算成像的光学合成孔径, 文献[28]开展

了一些探索性的工作。基于激光本振相干阵列探测器, 本文提出的新的光学合成孔径衍射主镜如图 6 所示。在这里, 激光本振相干探测器的设置可保证多个子口径望远镜接收信号相位的正确传递, 由此可使光学合成孔径成像过程在模数转换采样后, 在计算机上通过软件实现, 即可大幅减小光学系统的焦距。

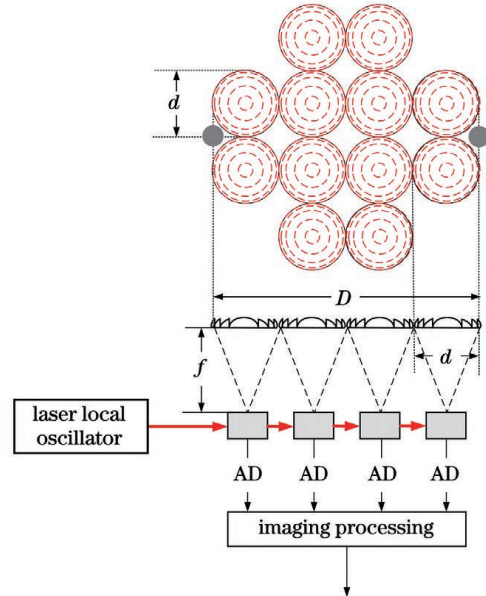


图 6 基于激光本振相干阵列探测器的光学合成孔径衍射主镜

Fig. 6 Optical synthetic aperture diffractive primary mirror of coherent detector array based on laser local oscillator

假定大口径和子口径薄膜镜的 F 数均为 2, 2 m 口径对应的焦距为 4 m, 0.5 m 口径对应的焦距为 1 m。图 6 所示的光学系统可采用具有相同条纹的衍射子镜, 且由焦距决定的系统轴向尺寸、体积和重量较图 2(b) 所示系统将大幅减小。

与此同时, 在图 6 所示结构下, 参照微波阵列天线雷达成像方法^[29], 对每个子镜探测器对应像元的激光回波信号进行三维成像处理, 即可提升系统角分辨率和对应的地面像元分辨率, 并等效实现大口径对应的信噪比。当子镜口径为 0.5 m, F 数为 2, 系统焦距为 1 m, 探测器像元尺寸为 $32 \mu\text{m}$ 时, 系统角分辨率约为 $32 \mu\text{rad}$, 对应的地面像元分辨率约为 16 m。对 12 个子镜探测器对应像元的回波信号进行三维成像处理后, 可将系统角分辨率提升为 $8 \mu\text{rad}$, 将对应的地面像元分辨率提高为 4 m。12 个子镜信号相干合成后的信噪比在原理上提升了 10.8 dB, 可以基本等效实现 2 m 口径对应的图

像信噪比。

对探测器法向像元对应的回波信号和偏离法向 4 mrad 方向像元对应的回波信号进行三维成像仿真, 成像算法采用 Omega-K 算法, 500 km 斜距

单元对应的 1 个子镜和 12 个子镜的成像结果分别如图 7 和图 8 所示, 其中 X 和 Y 分别为为交轨向和顺轨向的空间位置, 仿真结果验证了所提方法的有效性。

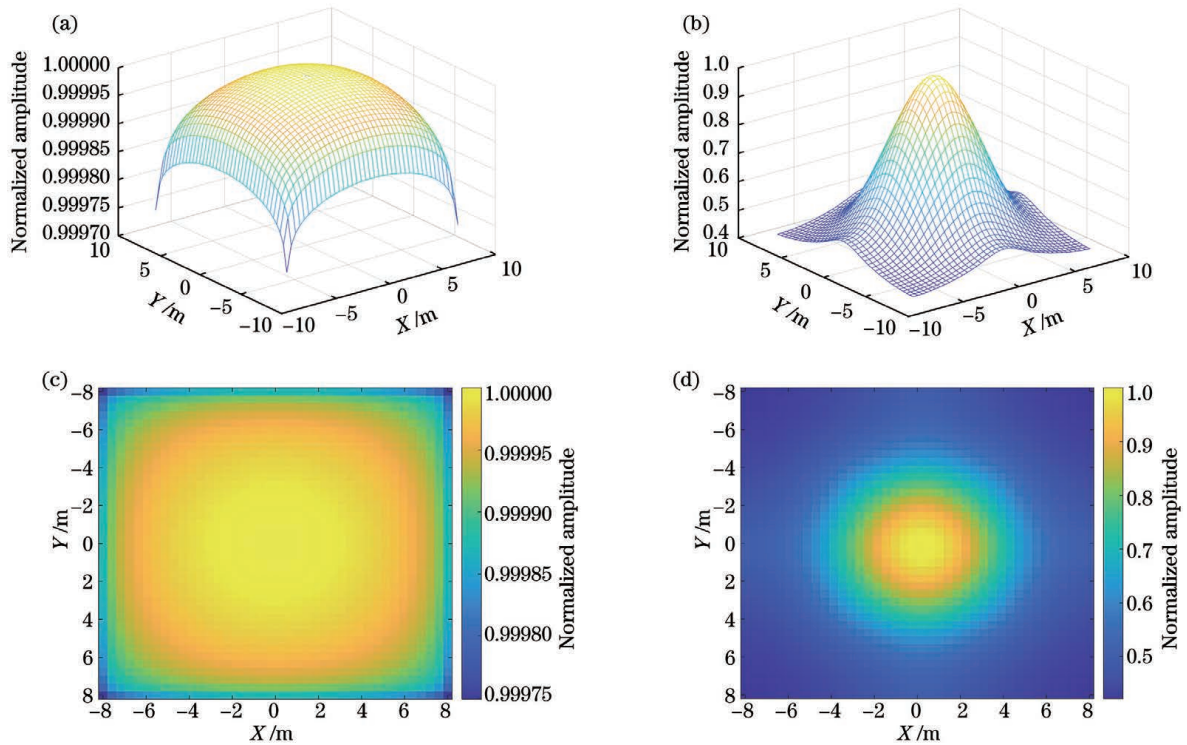


图 7 法向三维成像结果。(a)(c)1 个子镜; (b)(d)12 个子镜

Fig. 7 3D imaging results in normal direction. (a)(c) 1 sub-aperture; (b)(d) 12 sub-apertures

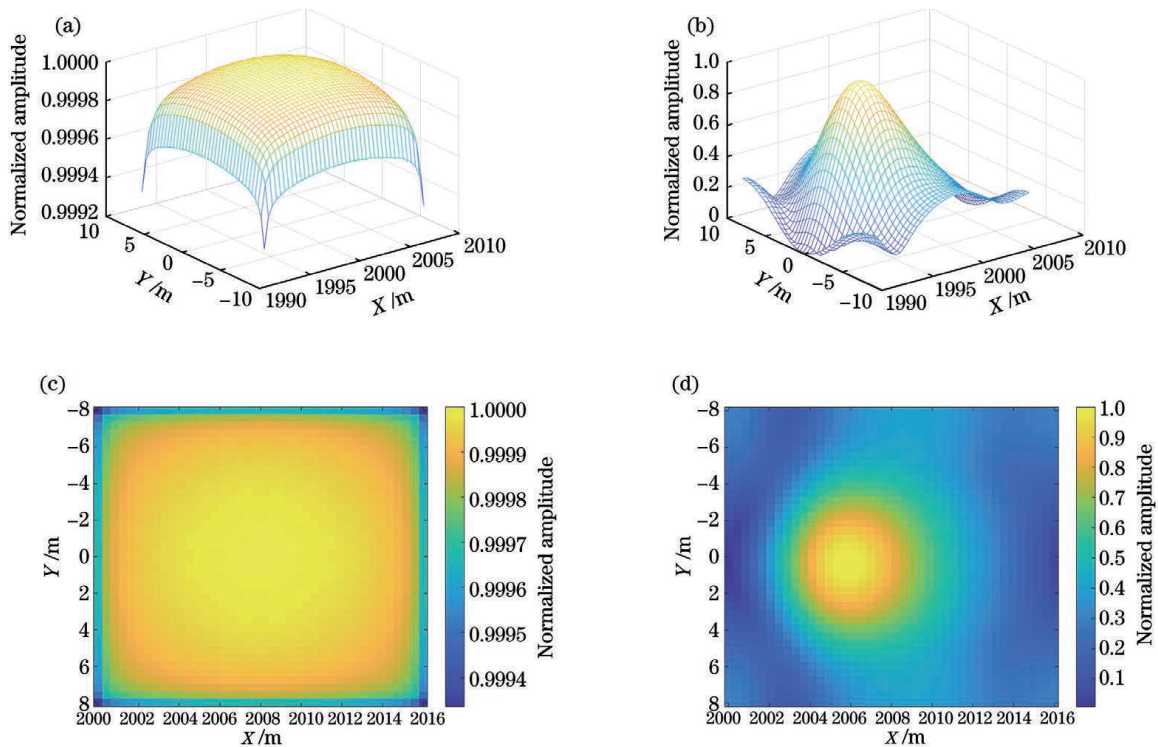


图 8 偏离法向 4 mrad 的三维成像结果。(a)(c)1 个子镜; (b)(d)12 个子镜

Fig. 8 3D imaging results of 4 mrad off normal. (a)(c) 1 sub-aperture; (b)(d) 12 sub-apertures

5.2 激光本振阵列探测器

目前国内外都开展了像元规模较小的激光本振相干阵列探测器的研究工作^[16-17],主要用于发射线性调频信号的激光雷达,其本振信号为单频或线性调频激光信号,本振选用线性调频信号时,可通过去斜接收减小模数转换采样速度和数据量。

文献[16]介绍了 2020 年美国 Point Cloud 公司基于硅光芯片的调频连续波激光雷达本振阵列探测器,像元规模为 512(32×16),其结构形式为激光相控阵结构^[30-32],可供本文的激光本振面阵探测器借鉴。本文所需探测器直接采用文献[16]中的 1.55 μm 波长激光本振阵列探测器结构,通过增加光栅耦合器单元尺寸,使其接近所需的像元尺寸,即可保证光能利用率。

目前国内单元规模为 1000 的激光相控阵收发芯片正处于研制阶段,本文的激光本振面阵探测器具有可行性。在此基础上,有望通过多个子口径的低分辨率复图像信号,以计算成像方式,相干合成高分辨率图像,同时提高图像信噪比。

5.3 陆地观测星载激光雷达系统的参数和性能

光纤激光器适于星载激光雷达,激光本振阵列探测器的引入可使激光雷达发射宽脉冲并使用脉冲压缩技术提高距离分辨率,而宽脉冲也有利于光纤激光器平均功率的提高。星载激光雷达具有探测目标距离向(高程向)变化范围较小的特点,通过合理设计脉冲重复频率和脉冲宽度,可保证距离向(高程向)不模糊测量。

本文设计的发射信号可选为相位编码信号或线性调频信号,信号时宽为 100 μs,带宽为 500 MHz,可通过脉冲压缩将距离向(高程向)分辨率提升至 0.3 m。激光雷达探测范围为 485~500 km,则脉冲前沿回波时间范围为 3.23~3.33 ms,考虑脉宽,则回波时间范围为 3.23~3.43 ms。若脉冲重复频率设置为 2 kHz,则脉冲重复周期为 0.5 ms,发射信号与回波信号的时序如图 9 所示,回波信号在第 6 个重复周期被接收。

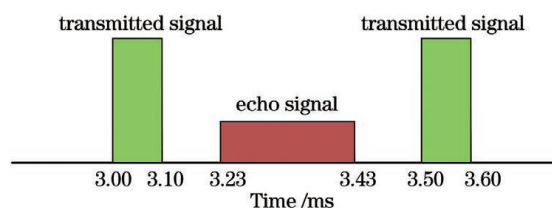


图 9 脉冲重复频率为 2 kHz 时的发射信号与回波信号时序
Fig. 9 Timing sequence of transmitted signal and echo signal at pulse repetition rate of 2 kHz

目前光纤脉冲激光器的平均功率在 30 W 量级,为了实现 300 W 的平均功率,需采用 10 个子激光器,利用功率合成方式形成所需发射功率。在此基础上,本文激光雷达的发射波束交轨向宽度为 8 mrad,可采用 10 个交轨波束宽度为 0.8 mrad 的子激光器结合视场拼接方法实现。为了进一步避免干扰,每个子激光器可使用码分正交或者频分正交信号。

根据表 1 所示的激光雷达参数,采用激光本振阵列探测器,当激光器发射脉宽为 100 μs 的宽脉冲信号并采用脉冲压缩技术时,对于散射系数为 0.2 的目标,每像元单脉冲信噪比约为 0 dB;在顺轨向采用滑窗处理,可实现 7 个脉冲的相干积累,使信噪比提升至 8.4 dB,满足三维成像的要求。对于散射系数小于 0.1 的目标,其探测信噪比优于 4 dB,基本满足三维成像的要求。

6 结 论

对 2 m 衍射口径的星载双波长陆海激光雷达进行了系统分析,涉及的关键技术包括双波段大口径衍射光学系统的设计和制造、大功率高效激光器的研制、大规模单光子和激光本振阵列探测器的研制、基于计算成像的光学合成孔径等,其研制具有一定的可行性,相关研究工作具有重要意义。

致谢 感谢联合微电子中心有限责任公司的金里高级工程师、北方激光研究院有限公司的柯尊贵高级工程师、西安电子科技大学的孙艳玲副教授在探测器技术方面对本文工作的指导和帮助!感谢中国科学院光电技术研究所的马晓亮研究员、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的张志宇研究员、中国科学院西安光学精密机械研究所的谢永军研究员在衍射光学系统技术方面对本文工作的指导和帮助!感谢上海科乃特激光科技有限公司在光纤激光器技术方面对本文工作的指导和帮助!

参 考 文 献

- [1] Zhang Y, Huang W D, Dong C Z, et al. Research on the development of the detection satellite technology in oceanographic lidar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(11): 20201045.
张 扬, 黄 卫 东, 董 长 哲, 等. 海洋激光雷达探测卫星技术发展研究[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(11): 20201045.

- [2] Gong W, Shi S, Chen B W, et al. Development and prospect of hyperspectral LiDAR for earth observation[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 501-513.
龚威, 史硕, 陈必武, 等. 对地观测高光谱激光雷达发展及展望[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 501-513.
- [3] Tang J W, Chen G, Chen W B, et al. Three dimensional remote sensing for oceanography and the Guanlan ocean profiling Lidar[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 460-500.
唐军武, 陈戈, 陈卫标, 等. 海洋三维遥感与海洋剖面激光雷达[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 460-500.
- [4] Fang Y, Cao B C, Gao L, et al. Development and application of lidar mapping satellite[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(11): 20201044.
方勇, 曹彬才, 高力, 等. 激光雷达测绘卫星发展及应用[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(11): 20201044.
- [5] Li Y M, Guo Q H, Wan B, et al. Current status and prospect of three-dimensional dynamic monitoring of natural resources based on LiDAR [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 381-402.
李玉美, 郭庆华, 万波, 等. 基于激光雷达的自然资源三维动态监测现状与展望[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 381-402.
- [6] Guo S Y, Hu X, Yan Z A, et al. Research development of space-borne lidar in foreign countries [J]. Laser Technology, 2016, 40(5): 772-778.
郭商勇, 胡雄, 闫召爱, 等. 国外星载激光雷达研究进展[J]. 激光技术, 2016, 40(5): 772-778.
- [7] Zhang W H, Xu N, Ma Y, et al. A maximum bathymetric depth model to simulate satellite photon-counting lidar performance [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 174: 182-197.
- [8] "Guanlan" marine science satellite overall design and key technology research and development project kick-off meeting for remote sensing applications was held[EB/OL]. [2015-05-10]. <http://www.ouc.edu.cn/e7/08/c10639a190216/page.psp>.
“观澜号”海洋科学卫星总体设计及其遥感应用关键技术研发项目启动会召开[EB/OL]. [2015-05-10]. <http://www.ouc.edu.cn/e7/08/c10639a190216/page.psp>.
- [9] Liu B, Yu Y, Jiang S. Review of advances in LiDAR detection and 3D imaging[J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(7): 190167.
刘博, 于洋, 姜朔. 激光雷达探测及三维成像研究进展[J]. 光电工程, 2019, 46(7): 190167.
- [10] Jiao J C, Su Y, Wang B H, et al. Development and application of GEO membrane based diffraction optical imaging system[J]. Space International, 2016 (6): 49-55.
焦建超, 苏云, 王保华, 等. 地球静止轨道膜基衍射光学成像系统的发展与应用[J]. 国际太空, 2016 (6): 49-55.
- [11] Yang W, Wu S B, Wang L H, et al. Research advances and key technologies of macrostructure membrane telescope [J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(5): 475-482, 564.
杨伟, 吴时彬, 汪利华, 等. 微结构薄膜望远镜研究进展分析[J]. 光电工程, 2017, 44(5): 475-482, 564.
- [12] Zhu J Y, Xie Y J. Large aperture lidar receiver optical system based on diffractive primary lens [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(5): 0518001.
朱进一, 谢永军. 采用衍射主镜的大口径激光雷达接收光学系统[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(5): 0518001.
- [13] Hu X, Li D J. Space-based synthetic aperture LiDAR system with 10 m diffractive aperture [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1210002.
胡焯, 李道京. 10 m 衍射口径天基合成孔径激光雷达系统[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1210002.
- [14] Zhu X X, Wang C, Xi X H, et al. Research progress of ICESat-2/ATLAS data processing and applications [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(11): 20200259.
朱笑笑, 王成, 习晓环, 等. ICESat-2 星载光子计数激光雷达数据处理与应用研究进展[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(11): 20200259.
- [15] Lu Y, He W J, Wu M, et al. Time-correlated Kalman depth estimation of photon-counting lidar [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(3): 0311001.
陆侯, 何伟基, 邬森, 等. 光子计数激光雷达的时间相关卡尔曼深度估计[J]. 光子学报, 2021, 50(3): 0311001.
- [16] Rogers C, Piggott A Y, Thomson D J, et al. A universal 3D imaging sensor on a silicon photonics platform[J]. Nature, 2021, 590(7845): 256-261.
- [17] Hu K, Zhao Y Q, Ye M, et al. Design of a CMOS ROIC for InGaAs self-mixing detectors used in FM/cw LADAR [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(17): 5547-5557.
- [18] Rablau C. Lidar: a new self-driving vehicle for introducing optics to broader engineering and non-engineering audiences[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 1114: 111430C.
- [19] Zhou C H, Wang Z L, Zhu F. Review on optical synthetic aperture imaging technique[J]. Chinese Optics, 2017, 10(1): 25-38.

- 周程灏, 王治乐, 朱峰. 大口径光学合成孔径成像技术发展现状[J]. 中国光学, 2017, 10(1): 25-38.
- [20] Wang R Q, Zhang Z Y, Guo C L, et al. Design/fabrication and performance test of a diffractive telescope system with high diffraction efficiency[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(3): 0322001.
- 王若秋, 张志宇, 国成立, 等. 高衍射效率衍射望远镜系统的设计/加工及成像性能测试[J]. 光子学报, 2017, 46(3): 0322001.
- [21] Xu M M, Xue D L, Zeng X F. Design of compact optical system with large aperture and ultra long focal length[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(5): 638-643.
- 徐萌萌, 薛栋林, 曾雪峰. 大口径超长焦距紧凑型光学系统设计[J]. 应用光学, 2018, 39(5): 638-643.
- [22] Li G, Fan X W, Zou G Y, et al. Design of space optical system with double infrared waveband based on image space scanning [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(3): 861-866.
- 李刚, 樊学武, 邹刚毅, 等. 基于像方摆扫的空间红外双波段光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 861-866.
- [23] 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.
- 李道京, 胡焯, 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.
- [24] Hei S S, Wang X Q. Block sliding window channel estimation algorithm based on LMMSE[J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(16): 79-83.
- 黑珊珊, 王晓琴. 基于 LMMSE 的分块滑窗信道估计算法[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(16): 79-83.
- [25] Zhang C Y, Wang C H, Zhan L, et al. Theoretical analysis of fast steering mechanism on spaceborne photon detection lidar [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2019, 40(5): 84-94.
- 张晨阳, 王春辉, 战蓝, 等. 星载光子探测激光雷达指向调整机构的理论分析[J]. 航天返回与遥感, 2019, 40(5): 84-94.
- [26] Li K, Zhang Y S, Liu X D, et al. Study on airborne laser bathymetric system receiver field of view [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0701005.
- 李凯, 张永生, 刘笑迪, 等. 机载激光海洋测深系统接收 FOV 的研究 [J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0701005.
- [27] Gao J H, Li D J, Zhou K, et al. Analysis of airborne lidar bathymetry distance based on conformal diffractive optical system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(12): 1201001.
- 高敬涵, 李道京, 周凯, 等. 共形衍射光学系统机载激光雷达测深距离的分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(12): 0201001.
- [28] Li D J, Zhu Y, Hu X, et al. Laser application and sparse imaging analysis of diffractive optical system [J]. Journal of Radars, 2020, 9(1): 195-203.
- 李道京, 朱宇, 胡焯, 等. 衍射光学系统的激光应用和稀疏成像分析 [J]. 雷达学报, 2020, 9(1): 195-203.
- [29] Li D J, Hou Y N, Teng X M, et al. Sparse array antenna radar technology and its application [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- 李道京, 侯颖妮, 滕秀敏, 等. 稀疏阵列天线雷达技术及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [30] Ma Y X, Wu J, Su R T, et al. Review of optical phased array techniques [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(10): 20201042.
- 马阎星, 吴坚, 粟荣涛, 等. 光学相控阵技术发展概述 [J]. 红外与激光工程, 2020, 49(10): 20201042.
- [31] Yaacobi A, Sun J, Moresco M, et al. Integrated phased array for wide-angle beam steering [J]. Optics Letters, 2014, 39(15): 4575-4578.
- [32] Sun J, Timurdogan E, Yaacobi A, et al. Large-scale nanophotonic phased array [J]. Nature, 2013, 493(7431): 195-199.

Research on Space-Borne Dual-Wavelength Land-Sea LiDAR System with 2 m Diffractive Aperture

Li Daojing^{1*}, Gao Jinghan^{1,2}, Cui Anjing^{1,2}, Zhou Kai^{1,2}, Wu Jiang^{1,2}

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

²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract

Objective Because of its high orbit and wide observation range, a space-borne lidar can accurately and quickly obtain large-scale 3D spatial information. In recent years, it has been widely used in ocean remote sensing, topographic surveying and mapping, and atmospheric environment detection. At present, the observation width of a satellite-to-ground 3D imaging lidar is small, and the resolution of equivalent ground pixel is low. In order to further expand the observation width and improve the 3D imaging efficiency, it is necessary to develop a new type of space-borne lidar. The high monochromaticity of a laser makes lidar particularly suitable for diffractive optical systems. In order to solve the problem of limited transmission power of a space-borne lidar, the use of large-aperture and light-weight diffractive film mirrors should be considered for echo signal reception. Based on the diffractive optical system, single-photon array detector and laser local oscillator array detector, the realization of the 2 m diffractive aperture dual-wavelength space-borne lidar is studied.

Methods In order to meet the requirements of 3D imaging and ocean depth detection, the space-borne dual-wavelength land-sea lidar with a 2 m aperture harmonic diffractive optical system at 500 km orbit height is analyzed. Firstly, due to the difficulty of direct processing of large aperture thin film mirrors at present, it is divided into 12 small aperture sub-mirrors, which are processed separately, and subsequently a large aperture is formed by the optical synthetic aperture technology. Second, based on the single photon array detector, the realization of an optical synthetic aperture of a large aperture diffractive optical system is analyzed, the system parameters are designed, and the detection performance is calculated. Third, the structure of the laser local oscillator array detector is analyzed, and finally an optical synthetic aperture method based on coherent detection is proposed. It is expected to use multiple sub-aperture low-resolution complex image signals to coherently synthesize a high-resolution image by computational imaging and improve the image signal-to-noise ratio.

Results and Discussions The main performance indicators of the land observation lidar with the wavelength of $1.55 \mu\text{m}$ are as follows: the ground pixel resolution is 4 m, the instantaneous width in the cross-track direction is 4 km, and the elevation measurement accuracy is 0.3 m. The detection depth of clear ocean water by an ocean observation lidar with the wavelength of $0.516 \mu\text{m}$ can reach 30 m. In order to further improve the detection performance, an optical synthetic aperture method based on a coherent detection subarray structure is proposed, which is expected to reduce the volume and weight of the system by greatly reducing the axial size of the system while achieving computational imaging. The comparison under the same system parameters shows that the performance of the coherent detection system is better than that of traditional direct detection system. After performing 3D imaging processing on the echo signals corresponding to the 12 sub-mirrors, the angular resolution of the system can be increased to $8 \mu\text{rad}$, and the corresponding ground pixel resolution can be increased to 4 m. After the 12 sub-mirror signals are processed by coherent synthesis, the signal-to-noise ratio can be increased by 10.8 dB theoretically, basically equivalent to achieving the image signal-to-noise ratio corresponding to a 2 m aperture. The effectiveness of the proposed method is verified by performing 3D imaging processing simulation on the pixel echo signals corresponding to the detector's normal direction and the 4 mrad deviation from the normal direction (Figs. 7 and 8).

Conclusions In the space-borne lidar, the large-aperture dual-wavelength harmonic diffractive optical system is used to achieve light-weight, and the along-track direction multi-pulse sliding window processing is adopted to improve the detection performance of the system. The 12 sub-mirrors of the optical synthetic aperture can well replace the large-aperture main mirror (Fig. 3). A single-photon array detector with a scale of 10 (along-track

direction) \times 1000 (cross-track direction) is used. When the laser emits a narrow pulse of 5 ns, the signal-to-noise ratio per pixel is about 0 dB. The sliding window processing realizes the incoherent accumulation of 7 pulses, which can increase the signal-to-noise ratio to about 4 dB, which can basically meet the requirements of 3D imaging. Using a laser local oscillator array detector, the signal-to-noise ratio per pixel of a single pulse is about 0 dB when the laser emits a wide pulse of 100 μ s and adopts pulse compression technology, and the sliding window processing realizes the incoherent accumulation of 7 pulses, which can increase the signal-to-noise ratio to 8.4 dB.

Key words remote sensing; lidar; diffractive optical system; optical synthetic aperture; detector arrays