

# 共形衍射光学系统机载激光雷达测深距离的分析

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>

<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, 北京 100049

**摘要** 水深是海底地形测绘的基础数据,对于海洋科学研究具有重要意义。衍射光学系统具有体积小、质量轻的优点,共形设计后可减少载荷对飞机气动性能的影响,有利于形成大光学口径。基于大口径接收共形衍射光学系统介绍了机载测深激光雷达的系统方案和参数,并利用衍射光学系统光谱的窄带宽特点,抑制接收的背景光噪声。以最小可探测信噪比为依据,针对直接探测和相干探测两种方式,对机载激光雷达的海水探测深度进行了分析。结果表明,在接收口径为 0.6 m、瞬时接收视场为 50 mrad、发射平均功率为 50 W 时,白天该系统在直接探测方式下的探测深度为 69 m,在相干探测方式下的探测深度为 86 m。

**关键词** 海洋光学; 激光雷达; 激光测深; 衍射光学系统; 共形设计; 激光本振

中图分类号 P407.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1201001

## Analysis of Airborne Lidar Bathymetry Distance Based on Conformal 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>

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

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Water depths are the basic data for surveying and mapping seabed topography, which is of great significance for marine scientific research. A diffractive optical system has the advantages of small size and light weight, and a conformal design can reduce the impact of the load on the aerodynamic performance of an aircraft, which is conducive to the formation of a large optical aperture. This paper introduces the system scheme and parameters of airborne bathymetry lidar based on a large-aperture receiving conformal diffractive optical system. The narrow bandwidth characteristic of the diffractive optical system is used to suppress the received background light noise. To realize both direct and coherent detection methods, the seawater depth detection of airborne lidar is analyzed based on the minimum detectable signal-to-noise ratio. The results demonstrate that when the receiving aperture is 0.6 m, the instantaneous receiving field of view is 50 mrad, the average transmitting power is 50 W, the detection depth of the system in the direct detection mode during the day is 69 m, and the detection depth in the coherent detection mode is 86 m.

**Key words** oceanic optics; lidar; laser bathymetry; diffractive optical system; conformal design; laser local oscillator

**OCIS codes** 010.3640; 050.1970; 010.4455

收稿日期: 2020-10-12; 修回日期: 2020-11-19; 录用日期: 2020-12-10

基金项目: 中科院重点项目(E03701010F)

\* E-mail: lidj@mail.ie.ac.cn

# 1 引言

机载激光雷达测深是一种测量速度快、精度高的遥感测深技术<sup>[1]</sup>,利用特定波长激光在水中良好的穿透特性和低衰减特性,借助飞机平台获得船舶无法驶入区域的水深数据,在港口建设和海岸带测绘领域有着广阔的应用前景<sup>[2]</sup>。

20 世纪 70 年代初期,美国国家大气与空间管理局研制了机载激光雷达测深(ALB)系统<sup>[3]</sup>,采用重复频率为 50 Hz 的 Nd:YAG 激光器,探测深度可达 10 m,验证了用蓝绿激光探测水下目标的可行性。20 世纪 90 年代,美国研制了扫描海道测量机载激光雷达测量(SHOALS)系统<sup>[4]</sup>,采用重复频率为 1000 Hz 的半导体泵浦固体激光器,在峰值功率为 2 MW、脉冲宽度为 5 ns、航行高度(航高)为 500 m 的情况下,最大探测深度可达 50 m。澳大利亚研制的激光机载测深仪(LADS)<sup>[5]</sup>向海面发射能量为 50 mJ 的脉冲时,最大探测深度可达 70 m。汪权东等<sup>[6]</sup>分析了机载海洋激光测深系统的参量设计与最大探测深度能力,结果表明,当接收望远镜口径为 240 mm,光谱接收范围为 0.5 nm,航高为 500 m 时,该系统的水深探测深度为 49 m。贺岩等<sup>[7]</sup>介绍了我国机载双频激光雷达 Mapper 5000 的系统构成和技术指标,其最大探测深度可达 51 m。

基于当前机载激光雷达技术的发展情况,深入研究提高激光雷达海洋测深距离方法,对海洋激光探测技术的发展和具有重要应用意义。因此,本文在引入大口径共形衍射光学系统和激光本振的条件下,分析了机载激光雷达的海洋测深距离以及激光水深探测模型的性能,给出了机载激光雷达系统的参数,并在激光本振条件下分析了激光雷达的探测性能。

## 2 探测模型

### 2.1 激光在海水中的传输特性

波长为 470~580 nm 的蓝绿激光在海水中的传播时的能量衰减低,且在大气信道中传播时具有大气窗口效应。因此,测深激光雷达通常选择蓝绿激光进行水深测量<sup>[8]</sup>,目前水深探测激光雷达主要用波长为 532 nm 的激光。

海水中溶解物质、悬浮体和各种活性有机体的不均匀性,导致光束在海水中的传输时会因吸收和散射作用发生衰减。与在大气中的传输模型类似,如果传输距离较短,光束能量  $E$  在海水中的衰减服从

指数规律,即  $E = E_0 \exp(-\alpha L)$ ,其中,  $L$  为激光在海水中的传输距离,  $E_0$  为激光脉冲入射时的初始能量,  $\alpha$  为海水中激光光束的衰减系数,其与海洋光学参数之间的关系可表示为<sup>[9]</sup>

$$\alpha = K_d + (c - K_d) \cdot \exp(-0.85cD'), \quad (1)$$

式中,  $K_d$  为漫反射衰减系数,我国近海区域的  $K_d$  (532 nm) 分布范围为 0.037~0.654  $m^{-1}$ ,  $c$  为光束衰减系数,  $D' \approx H \cdot \theta_r$  为激光雷达系统接收视场在海面的直径,  $\theta_r$  为接收视场角,  $H$  为激光雷达到海面的距离。由于海水具有尖锐的前向散射区域<sup>[10]</sup>,大部分光沿着传输方向进行传输,随着激光在海水中的传输距离的增加,回波信号受水体多次散射效应的影响也相应增大,导致准直光场逐渐过渡为漫反射光场<sup>[11]</sup>。

### 2.2 激光发射和接收

不同于在陆地上的探测,机载激光雷达测量海水深度时,激光在气-海界面会发生折射,使等效飞行高度大于实际飞行高度,且接收视场角大于波束发散角。激光在大气、海水中的传输问题可以等效为在折射率均匀的不同介质中的传输问题<sup>[12]</sup>。图 1(a)为航高等效示意图,其中,  $\theta_a$  为激光发射脉冲相对于垂直方向的扫描角,  $\theta_w$  为激光脉冲由水气界面进入海水后的传播方向与垂直方向的夹角,  $H_0 = Hn(\cos \theta_w / \cos \theta_a)^3$  为激光雷达距离海面实际高度  $H$  的等效值<sup>[13]</sup>,海水折射率  $n = 1.34$ 。  $\theta_{T0}$  和  $\theta_T$  分别为等效波束发散角和实际波束发散角,  $\theta_{r0}$  和  $\theta_r$  分别为等效接收视场角和实际接收视场角。图 1(b)为  $\theta_T$  和  $\theta_r$  的等效示意图,其中,细箭头表示发射激光波束,粗箭头表示海底回波信号。根据折射定律可知,  $\sin \theta_a = n \sin \theta_w$ ,计算发现,气-海界面的  $\theta_a$  与  $\theta_w$  极为相近,这表明等效飞行高度

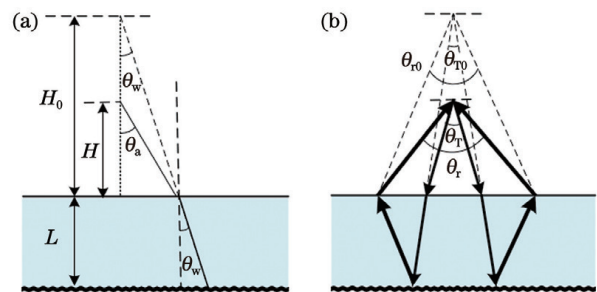


图 1 ALB 的模型。(a) 航高的等效示意图;(b)  $\theta_T$  和  $\theta_r$  的等效示意图

Fig. 1 Model of the ALB. (a) Equivalent schematic diagram of the altitude; (b) equivalent schematic diagram of  $\theta_T$  and  $\theta_r$

$H_0 \approx Hn$ , 即飞行高度变高, 波束发散角和接收视场角会相应变小。

目前 ALB 系统多使用 Dolin-Levin 模型<sup>[14]</sup>, 发射和接收功率之间的关系可表示为

$$P_s = \frac{P_T A_R \rho_s (1 - \rho_w)^2 \eta}{\pi(nH + L)^2} \eta_{\text{ato}} \exp(-2\alpha L) F(\theta_r, L), \quad (2)$$

式中,  $P_s$  为激光脉冲的发射功率,  $P_T$  为激光脉冲的峰值功率,  $A_R = \pi D^2/4$  为光学系统的有效接收面积,  $D$  为接收望远镜的口径,  $R = (nH + L)$  为激光雷达到海底目标的距离,  $\rho_s$  为海底的反射系数,  $\rho_w$  为海面的反射系数(当入射角小于  $30^\circ$  时, 平静海面的反射率一般小于 0.02),  $\eta_{\text{ato}} = \exp(-2\tau_a)$  为双程大气损耗因子,  $\tau_a$  为大气光学厚度(机载平台通常取 0.08<sup>[15]</sup>)。  $\eta = \eta_i \eta_r \eta_m \eta_{\text{oth}} \eta_{\text{ele}}$  为系统的损耗因子,  $\eta_i$  为发射光学系统的损耗,  $\eta_r$  为接收光学系统的损耗,  $\eta_m$  为光学系统的匹配损耗,  $\eta_{\text{oth}}$  为其他光学系统的损耗,  $\eta_{\text{ele}}$  为电子学系统的损耗。  $F(\theta_r, L)$  为由接收视场角  $\theta_r$ 、探测深度  $L$ 、海水光学参数、波束发散角等多种因素导致的损耗因子。文献[6]将  $F(\theta_r, L)$  简化为  $F(\theta_r, L) = m\theta_r$ , 其中,  $m$  为与系统接收视场角  $\theta_r$  相关的因子, 且  $m$  的取值范围为 6~8, 对于海岸带区域的水体,  $m = 8$ 。

### 2.3 探测信噪比

噪声是影响探测系统性能的关键因素, 一个光电探测系统的探测能力通常由探测信噪比  $R_{\text{SN}}$  决定, 可表示为<sup>[17]</sup>

$$R_{\text{SN}} = \frac{\bar{i}_s^2}{\bar{i}_{\text{SN}}^2 + \bar{i}_{\text{Th}}^2 + \bar{i}_{\text{Bk}}^2 + \bar{i}_{\text{Dk}}^2}, \quad (3)$$

式中,  $\bar{i}_s^2$  为信号电流的均方值,  $\bar{i}_{\text{Bk}}^2$  为背景噪声电流的均方值,  $\bar{i}_{\text{SN}}^2 = 2eBP_s s(\lambda)$  为散弹噪声电流的均方值,  $\bar{i}_{\text{Th}}^2 = 4kTB/R_L$  为热噪声电流的均方值,  $\bar{i}_{\text{Dk}}^2 = 2eBI_d$  为暗电流的均方值。对于直接探测系统, 激光回波信号直接入射到光探测器的光敏面上, 光探测器响应光的辐射强度并输出相应的电流和电压, 其回波信号电流的均方值  $\bar{i}_s^2 = P_s^2 s^2(\lambda)$ 。其中,  $B$  为探测器的电子学频宽,  $s(\lambda) = \eta_D e/h\nu$  为探测器对于波长为  $\lambda$  的激光的电流响应度(A/W), 电子电荷量  $e = 1.602 \times 10^{-19}$  C,  $\eta_D$  为光电探测器的量子效率,  $\nu$  为激光频率, 普朗克常数  $h = 6.626 \times 10^{-34}$  J·s,  $I_d$  为探测器的暗电流, 波尔兹曼常量  $k = 1.38 \times 10^{-23}$  J/K,  $T$  为探测器的工作温度(K),  $R_L$  为负载电阻, 一般情况下不同参数的取

值如表 1 所示。

表 1 光电探测系统的参数

Table 1 Parameters of the photoelectric detection system

Parameter	Value
$I_d/A$	$10^{-12}$
$s(\lambda)/(A \cdot W^{-1})$	0.043
$T/K$	300
$R_L/M\Omega$	50

对于 ALB 系统, 在晴朗的白天中探测时, 太阳光的辐射是背景光噪声的重要组成部分。背景噪声电流的均方值  $\bar{i}_{\text{Bk}}^2 = 2eBP_{\text{Bk}} s(\lambda)$ , 其中,  $P_{\text{Bk}}$  为背景光功率(W)。一般来说, ALB 系统接收到的背景噪声主要是系统视场角内的背景光功率, 可表示为<sup>[16]</sup>

$$P_{\text{Bk}} = L_s A_R \Delta\lambda \frac{\pi\theta_r^2}{4}, \quad (4)$$

式中,  $L_s$  为背景光的光谱辐亮度。白天的光谱辐亮度为  $0.14 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$ , 晴朗夜空背景光的光谱辐亮度约为白天的  $1/10^5$ ,  $\Delta\lambda$  为光学系统的光谱接收范围。

工程上通常用信号电流与噪声电流的均方根值之比表征探测系统的探测能力和精度, 对于 ALB 系统, 其测深精度与回波信号  $R_{\text{SN}}$  的平方根成正比,  $R_{\text{SN}}$  越高, 测深精度就越高, 对应的探测深度也越大。

## 3 激光雷达参数

近年来衍射成像光学系统得到了快速发展, 轻量级衍射光学系统更易形成大接收口径的光学系统。胡焯等<sup>[18]</sup>论述了 10 m 口径衍射光学系统在天基合成孔径激光雷达系统中的应用问题; 李道京等<sup>[19]</sup>提出了共形衍射光学系统概念并将其引入合成孔径激光雷达中; 李道京等<sup>[20]</sup>提出了艇载 1 m 衍射口径激光通信和干涉定位系统概念, 并分析了该系统的性能。机载激光雷达使用大口径共形衍射光学系统, 不仅能大幅度增加光学系统的接收口径, 还可以利用窄光谱范围降低背景噪声, 有望在大幅度提高激光雷达系统性能的同时减少对载机气动性能的影响。

### 3.1 系统布局

机载激光雷达系统可安装在机腹下, 激光发射和接收采用光路分置方式, 设置 1 个口径为 0.6 m 的大口径共形接收望远镜和 1 个口径约为 5 cm 的小口径发射望远镜, 具体结构如图 2 所示。其中, 小

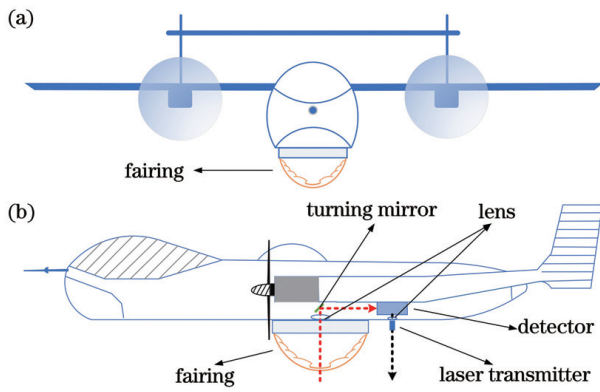


图 2 机载激光雷达系统的示意图。(a)正视图；  
(b)侧视图

Fig. 2 Schematic diagram of the airborne lidar system.  
(a) Front view; (b) side view

口径发射望远镜的光束发散角为  $50 \mu\text{rad}$ ，海面光斑尺寸约为  $5 \text{ cm}$ ，通过二维扫描可实现  $15^\circ \times 15^\circ$  的视场覆盖。大口径接收望远镜采用共形衍射光学系统<sup>[19]</sup>，接收瞬时视场角为  $50 \text{ mrad}$ ，通过折反镜的二维机械扫描可实现较大的工作视场。采用透射式衍射光学系统接收时，通过光路压缩可大幅减少折反镜的尺寸，便于二维机械扫描的实现。假定用比例为  $4:1$  的压缩光路实现  $15^\circ$  的扫描范围，则折反镜的旋转范围应达到  $30^\circ$ 。

基于激光本振的相干探测方式下采用全光纤光路接收时，需构建基于光纤阵列的激光本振阵列探测器。此时，激光雷达发射高功率信号，回波信号经光学系统进入 100 组光纤准直器或带有微透镜的光纤接收单元，每组光纤都可实现激光信号的相干外

差解调和光电探测，通过 100 组光纤阵列覆盖  $50 \text{ mrad}$  的瞬时接收视场。每组回波信号经光电探测和模数(AD)采样后，可获取海面和海底回波的距离和角度信息，实现水深探测。大口径接收望远镜的  $50 \text{ mrad}$  瞬时视场由 100 组光纤阵列覆盖实现，每组光纤覆盖的视场角约为  $5 \text{ mrad}$ ，航高为  $500 \text{ m}$  时的瞬时视场海面覆盖范围为  $25 \text{ m}$ ，每组光纤的海面覆盖范围为  $2.5 \text{ m}$ 。将接收视场设计成近线状椭圆形，光纤阵列按照  $50 \times 2$  排列，可使每组光纤的海面覆盖范围在  $0.5 \text{ m}$  量级，即作业时海面水平的网格精度优于  $0.5 \text{ m}$ 。

激光光束二维扫描接收的衍射光学系统光路如图 3 所示，基于光纤阵列的激光本振阵列探测器结构如图 4 所示。可以发现，激光本振阵列探测器由

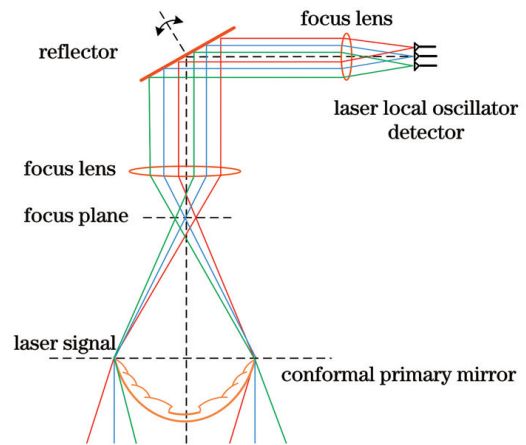


图 3 衍射光学系统的二维扫描光路  
Fig. 3 Two-dimensional scanning optical path of the diffractive optical system

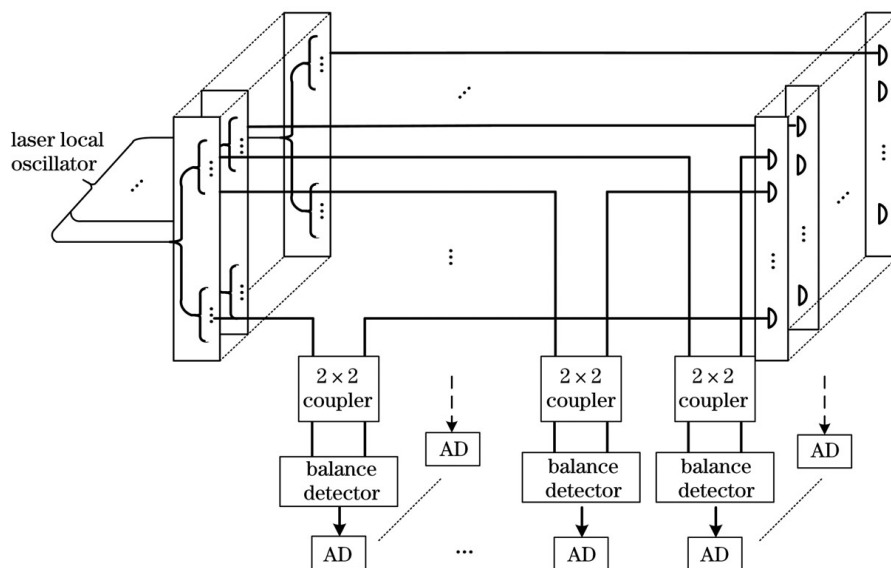


图 4 激光本振阵列探测器的结构

Fig. 4 Structure of the laser local oscillator array detector

多个红外波段激光单元探测器拼接形成, 光纤阵列中的激光回波信号与激光本振信号通过  $2 \times 2$  耦合器后, 传输至阵列探测器每个单元, 以实现平衡探测; 经过级联的 AD 采样和信号处理获取海面 and 海底回波的距离和角度信息, 实现水深探测。图 4 的左侧为激光本振光纤功分网络, 右侧为激光回波信号接收光纤阵列网络, 每个接收单元光纤端头与高阶相位微透镜相连, 以引入高阶相位, 使光纤可实现宽视场激光信号的接收。在直接探测方式下, 激光瞬时接收视场的覆盖可直接采用规模大于 100 的焦平面阵列探测器完成。

### 3.2 系统参数

目前测深 ALB 系统的波长以 532 nm 为主, 为提高激光雷达的测深距离, 光学系统需采用大接收口径。大口径带来的气动问题, 可通过设计共形的衍射薄膜镜与整流罩实现; 大口径带来的质量问题, 可通过轻量的衍射薄膜镜解决<sup>[21]</sup>。激光属于窄带信号, 其信号带宽通常为其脉冲宽度的倒数。为获得最大的探测  $R_{SN}$ , 接收系统采用匹配滤波, 系统接收带宽通常设置为信号带宽, 当信号脉冲宽度为 10 ns 时, 对应的信号带宽为 100 MHz。衍射光学系统容易获得窄光谱接收范围, 为了抑制太阳背景光, 衍射光学系统的光谱范围可设计在 0.01 nm 量级, 对应的系统频域带宽为 10.6 GHz。表 2 为实验设计的机载激光雷达系统参数, 采用的共形衍射光学系统的接收口径为 0.6 m, 发射脉冲能量为

表 2 本系统的参数

Table 2 Parameters of our system

Parameter	Value	Parameter	Value
$H / m$	500	$\rho_w$	0.02
$P_T / mW$	1	$\rho_s$	0.10
$\tau / ns$	10	$\eta_{ato}$	0.64
$\theta_r / mrad$	50	$\eta$	0.30
$D / m$	0.6	$L_S / (W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1} \cdot sr^{-1})$	0.14
$\theta_r / \mu rad$	50	$\alpha / m^{-1}$	0.08
PRF / Hz	5000	$B / MHz$	100
$m$	8	$\Delta\lambda / nm$	0.01

10 mJ, 发射脉冲宽度为 10 ns, 脉冲重复频率 (PRF) 为 5 kHz, 激光发射平均功率在 50 W 量级。

## 4 激光雷达探测系统的性能

### 4.1 直接探测

采用大口径共形衍射光学系统时, 直接探测情况下激光测深系统的单脉冲  $R_{SN}$  可表示为<sup>[6]</sup>

$$R_{SN} = \frac{P_s s(\lambda)}{\sqrt{2eB [s(\lambda)(P_s + P_{Bk}) + I_d] + 4kTB/R_L}} \quad (5)$$

对于直接探测方式, 根据表 2 的参数, 在近岸海域 ( $\alpha = 0.08$ ) 进行水深探测, 计算得到系统探测深度与接收回波  $R_{SN}$  的关系如图 5 所示。

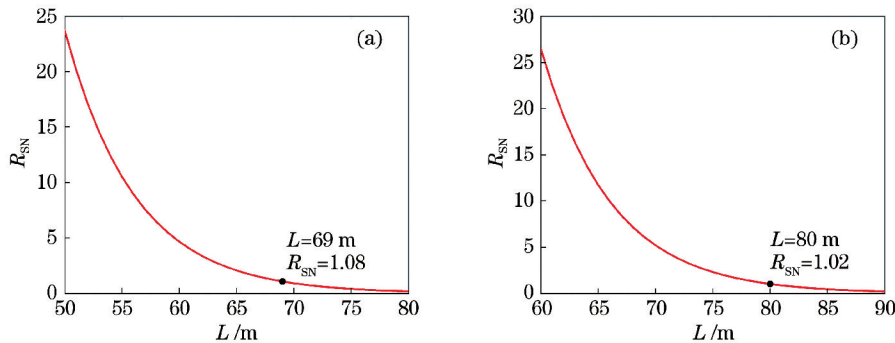


图 5 共形衍射光学系统的探测深度与  $R_{SN}$  关系。(a) 白天; (b) 夜间

Fig. 5 Relationship between of the detection depth and the  $R_{SN}$  of the conformal diffractive optical system.

(a) Day; (b) night

若将  $R_{SN}$  的最小值  $R_{SNmin} = 1$  设置为激光测深系统的最小  $R_{SN}$  阈值, 由图 5(a) 可知, 白天工作时, 系统可探测到的水下深度为 69 m, 此时回波信号的能量为  $2.59 \times 10^{-16}$  J, 等效的探测灵敏度约为 692 个光子 (每个光子的能量为  $3.74 \times 10^{-19}$  J)。信号电流的均方值  $\bar{i}_s^2 = 1.24 \times 10^{-18}$  A<sup>2</sup>, 信号光散弹噪

声电流的均方值  $\bar{i}_{SN}^2 = 3.56 \times 10^{-20}$  A<sup>2</sup>, 背景噪声电流的均方值  $\bar{i}_{Bk}^2 = 1.07 \times 10^{-18}$  A<sup>2</sup>, 暗电流的均方值  $\bar{i}_{dk}^2 = 3.20 \times 10^{-23}$  A<sup>2</sup>, 热噪声电流的均方值  $\bar{i}_{Th}^2 = 3.31 \times 10^{-20}$  A<sup>2</sup>。这表明白天工作时背景光噪声对探测性能的影响较大, 系统工作在背景噪声限下的

$R_{SN}$  可表示为

$$R_{SN} = \frac{P_s s(\lambda)}{\sqrt{2eBs(\lambda)P_{Bk}}} \quad (6)$$

由于  $nH \gg L$ , 则背景噪声限下的最大探测深度可表示为

$$L = \frac{1}{2\alpha} \ln \left[ \frac{P_T D (1 - \rho_w)^2 \rho_s \eta_{ato} m}{\pi n^2 H^2 R_{SN}} \cdot \sqrt{\frac{s(\lambda) \eta}{2eBL_s \Delta \lambda}} \right] \quad (7)$$

系统工作在背景噪声限时, 增大接收视场角, 接收的背景光噪声也会增大。因此, 通过增大接收口径、减少光学系统的光谱接收范围能有效提高接收  $R_{SN}$  并增加探测深度。

由图 5(b) 可知, 夜晚工作时, 系统可探测到的水下深度为 80 m, 此时回波信号的能量为  $4.33 \times 10^{-17}$  J, 等效的探测灵敏度约为 115 个光子。信号电流的均方值  $\bar{i}_s^2 = 3.46 \times 10^{-20}$  A<sup>2</sup>, 信号光散弹噪声电流的均方值  $\bar{i}_{SN}^2 = 5.95 \times 10^{-21}$  A<sup>2</sup>, 背景噪声电流的均方值  $\bar{i}_{Bk}^2 = 1.07 \times 10^{-23}$  A<sup>2</sup>, 暗电流的均方值  $\bar{i}_{Dk}^2 = 3.20 \times 10^{-23}$  A<sup>2</sup>, 热噪声电流的均方值  $\bar{i}_{Th}^2 = 3.31 \times 10^{-20}$  A<sup>2</sup>。这表明在夜间工作时背景光噪声较小, 此时热噪声是直接探测系统的主要噪声源, 探测性能主要受热噪声限制, 此时的  $R_{SN}$  可表示为

$$R_{SN} = \frac{P_s s(\lambda)}{\sqrt{4kTB/R_L}} \quad (8)$$

同理可知, 热噪声限下的最大探测深度可表示为

$$L = \frac{1}{2\alpha} \ln \left[ \frac{P_T A_R (1 - \rho_w)^2 \rho_s \eta_{ato} m}{\pi n^2 H^2 R_{SN}} \cdot \frac{s(\lambda) \eta \theta_r}{\sqrt{4kTB/R_L}} \right] \quad (9)$$

由于夜间背景光的光谱辐亮度远远低于白天, 系统工作在热噪声限下, 增大接收口径或接收视场角都会在一定程度上增加探测深度。而在白天工作时, 背景噪声对探测性能的影响较大, 因此, 激光雷达探测系统的工作时间应尽量选在晨昏或夜晚。此外, 采用大口径共形衍射光学系统有助于增加探测深度。近年来, 随着单光子探测技术的发展<sup>[2]</sup>, 基于光子计数的激光雷达已经投入应用, 如瑞士 Leica 公司推出的 SPL100 单光子激光雷达<sup>[22]</sup>。假定直接探测方式下光电探测器完成光电转换至少需要 30 个光子, 采用单光子探测技术可进一步提高探测深度。

## 4.2 相干探测

相比直接探测激光雷达, 基于激光本振的相干

探测激光雷达(如合成孔径激光雷达<sup>[23]</sup>)和激光通信技术也得到了快速发展, 本振信号的存在使目标微弱回波也可进行光电转换, 为后续信号的累积提供了条件, 且其探测灵敏度优于 1 个光子。通常激光本振功率可设置得足够高(mW 量级), 使接收端仅受限于量子噪声且容易实现窄带滤波, 从而获得较高的探测灵敏度, 其灵敏度比直接探测激光雷达高 20 dB<sup>[24-25]</sup>。

海水多次散射对激光信号会产生严重的退偏效应, 进一步影响相干探测激光雷达的探测效率和探测距离。为了缓解海水退偏的影响, 可通过发射圆偏振激光信号, 用线偏振光纤接收激光回波信号, 此时理论上的最大偏振能量损失为 50%, 但还需考虑相干探测导致的光纤阵列耦合效率下降问题。发射圆偏振信号时, 若采用正交的两路线偏振光纤接收, 可避免偏振产生的能量损失问题。实验在激光雷达方程中引入退偏损失系数  $\sigma$ , 并取  $\sigma = 0.5$ , 同时定义光纤阵列耦合效率  $\eta_{cou} = 0.5$ , 则相干探测方式下发射和接收功率之间的关系可表示为

$$P_s = \frac{P_T A_R (1 - \rho_w)^2 \eta}{(nH + L)^2} \cdot \frac{\rho_s}{\pi} \sigma \eta_{ato} \eta_{cou} \times \exp(-2\alpha L) F(\theta_r, L) \quad (10)$$

引入激光本振后信号电流的均方值  $\bar{i}_s^2 = 2P_s P_{Lo} s^2(\lambda)$ ,  $P_{Lo}$  为本振光功率。系统的噪声源中还需考虑本振光引起的噪声, 本振光散弹噪声电流的均方值  $\bar{i}_{Lo}^2 = 2eBP_{Lo} s(\lambda)$ , 此时系统的  $R_{SN}$  可表示为<sup>[17]</sup>

$$R_{SN} = \frac{\sqrt{P_s P_{Lo} s(\lambda)}}{\sqrt{eB [s(\lambda)(P_s + P_{Bk} + P_{Lo}) + I_d] + 2kTB/R_L}} \quad (11)$$

由(11)式可知, 增大本振光功率有利于抑制除信号光引起的噪声外的其他噪声, 从而获得高转换增益。由于本振光本身也会引起散弹噪声, 所以本振光功率也不是越大越好, 一般在 5~10 mW 之间, 由本振光引起的散弹噪声电流均方值  $\bar{i}_{Lo}^2$  在  $1.38 \times 10^{-15} \sim 2.75 \times 10^{-15}$  A<sup>2</sup> 之间, 即本振光引起的散弹噪声远远大于其他噪声。

衍射光学系统的光谱接收范围很窄, 窄带滤波可以很好地抑制背景光噪声。采用大口径共形衍射光学系统时, 白天的背景光功率仅为  $7.77 \times 10^{-4}$  mW, 远远小于本振光功率, 因此引入本振激光后, 可认为背景噪声对系统的影响极小, 此时, 系统

的  $R_{SN}$  可表示为

$$R_{SN} = \sqrt{\frac{\eta_D P_s}{h\nu B}} \quad (12)$$

可以发现,引入本振激光虽然会增加系统噪声,但信号电流的均方值比直接探测方式下扩大了  $P_{Lo}/P_s$  倍(一般情况下,  $P_{Lo}$  要比  $P_s$  大 5~7 个数量级),因此,引入本振激光可以提高探测信号的  $R_{SN}$ 。(12)式为引入本振激光后系统能达到的最大  $R_{SN}$ ,也被称为量子探测极限或量子噪声限,此时的最大探测深度可表示为

$$L = \frac{1}{2\alpha} \ln \left[ \frac{P_T D^2 \sigma \rho_s (1 - \rho_w)^2 \eta \eta_D \eta_{ato} \eta_{cou} m \theta_r}{4h\nu B n^2 H^2 R_{SN}^2} \right] \quad (13)$$

用表 2 中的参数在开放型海域进行探测时,探测深度与接收的单脉冲回波  $R_{SN}$  关系如图 6 所示。可以发现,单脉冲探测时系统可探测到的水下距离为 86 m,此时回波信号的能量为  $2.59 \times 10^{-16}$  J,等效的探测灵敏度约为 10 个光子,比直接探测系统提高了约 18 dB。与本振光混频后的信号电流均方值  $\bar{i}_s^2 = 7.54 \times 10^{-15}$  A<sup>2</sup>,信号光散弹噪声电流的均方值  $\bar{i}_{SN}^2 = 5.61 \times 10^{-22}$  A<sup>2</sup>,背景噪声电流(白天)的均方值  $\bar{i}_{BK}^2 = 1.07 \times 10^{-18}$  A<sup>2</sup>,暗电流的均方值  $\bar{i}_{DK}^2 = 3.20 \times 10^{-23}$  A<sup>2</sup>,热噪声电流的均方值  $\bar{i}_{Th}^2 = 3.31 \times 10^{-20}$  A<sup>2</sup>。这表明相干探测系统的探测深度比直接探测系统大,且工作性能几乎不受工作时段影响。引入本振激光后,系统还可采用多脉冲非相干累积技术进一步增加探测深度。

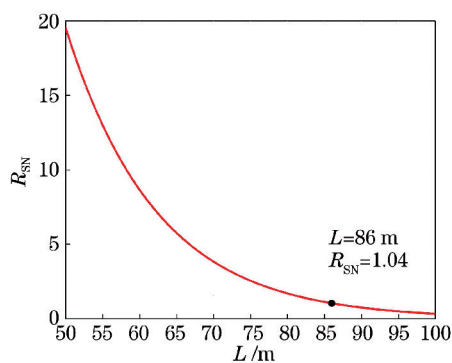


图 6 引入本振激光后探测深度与接收回波  $R_{SN}$  的关系

Fig. 6 Relationship between detection depth and  $R_{SN}$  after the introduction of the local oscillator laser

## 5 结 论

基于共形衍射光学系统,分析了直接探测和相干探测两种方式下机载激光雷达海洋测深系统的探

测距离,并设计了系统参数,给出了基于光纤阵列的激光本振阵列探测器结构。实验结果表明,引入本振激光能使系统工作在量子噪声限,通过相干探测可以提高系统的探测灵敏度。最后,提出了通过多脉冲非相干累积可进一步增加探测距离的思路,对新一代海洋测深机载激光雷达的研制具有一定的指导意义。

## 参 考 文 献

- [1] Lu G, Wang Z W, Zhu S C, et al. Performance evaluation of laser bathymetry in the South Yellow Sea region based on VIIRS data [J]. Journal of Marine Sciences, 2018, 36(4): 28-34.  
卢刚, 王宗伟, 朱士才, 等. 基于 VIIRS 数据的南黄海区激光测深性能评估 [J]. 海洋学研究, 2018, 36(4): 28-34.
- [2] Wang X, Pan H Z, Luo S, et al. Bathymetric technology and research status of airborne lidar [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2019, 39(5): 78-82.  
王鑫, 潘华志, 罗胜, 等. 机载激光雷达测深技术与进展 [J]. 海洋测绘, 2019, 39(5): 78-82.
- [3] Kim H H. Airborne bathymetric charting using pulsed blue-green lasers [J]. Applied Optics, 1977, 16(1): 46-56.
- [4] Ye X S. Research on principle and data processing methods of airborne laser bathymetric technique [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2010: 3-13.  
叶修松. 机载激光水深探测技术基础及数据处理方法研究 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2010: 3-13.
- [5] Penny M F, Billard B, Abbot R H. LADS: the Australian laser airborne depth sounder [J]. International Journal of Remote Sensing, 1989, 10(9): 1463-1479.
- [6] Wang Q D, Chen W B, Lu Y T, et al. Analysis of relationship between parameter choice of airborne laser bathymetry and maximum penetrability [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(10): 1255-1260.  
汪权东, 陈卫标, 陆雨田, 等. 机载海洋激光测深系统参量设计与最大探测深度能力分析 [J]. 光学学报, 2003, 23(10): 1255-1260.
- [7] He Y, Hu S J, Chen W B, et al. Research progress of domestic airborne dual-frequency LiDAR detection technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 082801.  
贺岩, 胡善江, 陈卫标, 等. 国产机载双频激光雷达探测技术研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 082801.
- [8] Li T S, Gao X, Zhou X Y, et al. Characteristic

- analysis of underwater laser propagation based on Sahu-Shanmugam and Fournier-Forand volume scattering functions [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(3): 030103.
- 李天松, 高翔, 周晓燕, 等. 基于 Sahu-Shanmugam 和 Fournier-Forand 体积散射函数的水下激光传输特性分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(3): 030103.
- [9] Liu B Y, Li R Q, Yang Q, et al. Estimation of global detection depth of spaceborne oceanographic lidar in blue-green spectral region [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 128-133.
- 刘秉义, 李瑞琦, 杨倩, 等. 蓝绿光星载海洋激光雷达全球探测深度估算[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(1): 128-133.
- [10] Chen F. Optical characteristics of optical channels on airborne laser sounding [J]. *Journal of Applied Optics*, 2000, 21(3): 32-38.
- 陈烽. 机载激光测深中激光传输通道的光学特性[J]. *应用光学*, 2000, 21(3): 32-38.
- [11] Zhou T H, Fan T W, Ma J, et al. Influence of beam parameters on propagation of blue green laser underwater [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2020, 15(1): 40-47.
- 周田华, 范婷威, 马剑, 等. 光束发射参数对蓝绿激光海洋传输特性的影响[J]. *大气与环境光学学报*, 2020, 15(1): 40-47.
- [12] Kopilevich Y I, Surkov A G. Mathematical modeling of the input signals of oceanological lidars [J]. *Journal of Optical Technology*, 2008, 75(5): 321-326.
- [13] Kopilevich Y I, Feygels V I, Surkov A I. Mathematical modeling of input signals for oceanographic lidar systems [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5155: 30-39.
- [14] Feigels V I, Gilbert G D. Lidars for oceanological research: criteria for comparison, main limitations, perspectives [J]. *Proceedings of SPIE*, 1992, 1750: 473-484.
- [15] Xu J J, Bu L B, Liu J Q, et al. Airborne high-spectral-resolution lidar for atmospheric aerosol detection [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0710003.
- 徐俊杰, 卜令兵, 刘继桥, 等. 机载高光谱分辨率激光雷达探测大气气溶胶的研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(7): 0710003.
- [16] 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.
- [17] Dai Y J. The principle of lidar [M]. 6th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
- 戴永江. 激光雷达原理 [M]. 6 版. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Zhi X Y, Jiang S K, Qiao K, et al. Imaging characteristic analysis method for large-aperture diffractive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(17): 1705002.
- 智喜洋, 江世凯, 乔凯, 等. 大口径衍射光学系统成像特性分析方法 [J]. *光学学报*, 2020, 40(17): 1705002.
- [22] Official release of Leica SPL100 new airborne lidar system [EB/OL]. (2017-03-04) [2020-11-10]. [https://m.sohu.com/a/127882794\\_583961](https://m.sohu.com/a/127882794_583961).
- Leica SPL100 新型机载激光雷达系统正式发布 [EB/OL]. (2017-03-04) [2020-11-10]. [https://m.sohu.com/a/127882794\\_583961](https://m.sohu.com/a/127882794_583961).
- [23] Barber Z W, Dahl J R. Synthetic aperture lidar imaging demonstrations and information at very low return levels [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(24): 5531-5537.
- [24] Wang H. Design of homodyne BPSK system for coherent optical communication [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.
- 王海. 相干光通信零差 BPSK 系统的设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [25] Liang H X, Dai Y H, Ai Y, et al. Influence of local oscillator power on sensitivity of coherent detection of space balance detector [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(2): 334-341.
- 梁赫西, 代永红, 艾勇, 等. 本振功率对空间平衡探测器相干探测灵敏度的影响 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(2): 334-341.