

# 基于共形衍射光学系统的合成孔径激光雷达 成像探测

李道京<sup>1\*</sup>, 胡烜<sup>1,2</sup>, 周凯<sup>1,2</sup>, 姚园<sup>3</sup>, 乔明<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院电子学研究所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;

<sup>3</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033

**摘要** 合成孔径激光雷达(SAL)可在大前斜视角条件下以较小的光学孔径,对远距离目标进行高分辨率、高数据率成像,是光学成像探测的一种重要形式。对口径为 100 mm、作用距离为 20 km、分辨率为 0.05 m 的 SAL 的工作模式、系统方案、指标参数和关键技术进行分析,并提出与设备整流罩共形的衍射光学系统概念,有利于减少气动影响和设备的体积、质量。借助微波相控阵天线模型,研究基于频率扫描变化的激光波束展宽和一维波束扫描方法,给出相关波束方向图的仿真结果。结果表明,基于曲面共形衍射光学系统的 SAL 成像探测技术具有可行性。

**关键词** 遥感; 衍射光学系统; 合成孔径成像; 激光雷达; 激光波束扫描

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0428001

## Synthetic Aperture Lidar Imaging Detection Based on Conformal Diffractive Optical System

Li Daojing<sup>1\*</sup>, Hu Xuan<sup>1,2</sup>, Zhou Kai<sup>1,2</sup>, Yao Yuan<sup>3</sup>, Qiao Ming<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Institute of Electronics,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

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

<sup>3</sup>Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics,  
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** Synthetic aperture lidar (SAL) can obtain high-resolution and high-data-rate images for remote target with small optical aperture under large forward squint angle condition. Thus, SAL can be an important mode of optic imaging detection. In this study, the working mode, system scheme, performance parameters, and key technologies of SAL with 100 mm diameter, 20 km detection range, and 0.05 m resolution are analyzed. A concept of a diffractive optical system conforming to the dome is proposed to reduce the aerodynamic influence and volume and weight of the equipment. The laser beam broadening and one-dimensional beam scanning method based on frequency scanning change is studied, and the beam pattern simulation results are presented by using the model of microwave phased array antenna. The results show that the SAL imaging detection technology based on curved-conformal diffractive optical system is feasible.

**Key words** remote sensing; diffractive optical system; synthetic aperture imaging; lidar; laser beam scanning

**OCIS codes** 280.3640; 280.6730; 050.1970

## 1 引 言

传统光学成像系统的空间分辨率受系统光学口

径的限制,且会随距离的增加而下降。波长为 1.0640  $\mu\text{m}$ 、口径为 100 mm 的传统光学成像系统的空间衍射极限角分辨率约为 10  $\mu\text{rad}$ ,在 10 km 处

收稿日期: 2019-08-23; 修回日期: 2019-09-27; 录用日期: 2019-10-21

基金项目: 高分专项资助课题(GF0314)

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

对应的衍射极限分辨率为 0.1 m, 在 20 km 处对应的衍射极限分辨率下降为 0.2 m。在实际大气条件下, 传统光学成像系统一般仅能达到 3~4 倍衍射极限分辨率。远距离目标的高分辨率成像需要较大的系统光学口径, 但实际系统中有很多因素限制了系统光学口径的增加。利用合成孔径成像技术, 相干体制激光雷达可在较小光学孔径条件下对远距离目标进行高分辨率成像。当激光波长为  $1.0640 \mu\text{m}$ , 发射信号带宽大于 3 GHz 时, 只要目标的横向运动和自转使其和雷达之间存在微小的转角 ( $14 \mu\text{rad}$ ), 理论上可获得分辨率优于 5 cm 的二维图像。由于激光波长比毫米波短 3 个数量级, 理论上合成孔径激光成像也可在大前斜视角条件下以高数据率对远距离目标实现高分辨率成像。

合成孔径激光雷达 (SAL) 图像在距离-多普勒频率域中具有单色且波长较长的特点, 特别适合于非成像衍射光学系统<sup>[1-2]</sup>, 通过衍射器件 (如二元光学器件和膜基透镜) 实现信号波前控制, 有利于减小焦距与系统的轻量化。在此过程中, 合成孔径雷达 (SAR) 相控阵天线的模型可用于分析衍射光学系统的性能。对于衍射光学系统, 二元光学器件的台阶宽度和相控阵天线的辐射单元间距对应, 二元光学器件的台阶数和移相器的量化位数相对应。

设置衍射光学系统焦点偏离主镜轴线, 使之在口径方向产生波程差, 这和微波频率扫描天线<sup>[3]</sup>类似, 即有可能通过频率扫描实现一定角度的波束扫描, 能极大地扩展 SAL 功能。膜基衍射光学系统的厚度在百微米量级, 其轻薄的特点使得 SAL 所用的非成像衍射光学系统与设备整流罩实现共形, 减少探测设备的体积、质量, 并兼顾气动要求。

目前, 小口径毫米波探测系统已广泛应用于高分辨率 SAR 成像技术中<sup>[4-5]</sup>, 以提升在复杂环境下探测多类目标时的成像、检测和识别能力。提高工作频率有利于 SAR 大前斜视角成像探测, 故继其波段从 Ka 发展至 W<sup>[6-7]</sup> 之后, THz 波段探测系统的研究工作得到高度关注。目前 SAL 工作波段远大于毫米波和 THz 波, 且 SAL 可大前斜视角成像, 将 SAL 技术引入到小口径光学成像探测系统中, 并借鉴成熟的毫米波天线技术<sup>[8]</sup>、微波雷达的空馈电扫描天线<sup>[9-10]</sup>等波束扫描技术, 同时结合被动红外成像技术<sup>[11-12]</sup>, 能进一步提高小口径光学成像探测系统的性能, 这是重要的发展趋势。本文研究基于共形衍射光学系统的 SAL 成像探测问题。

## 2 工作模式

根据对地成像探测需求, SAL 拟采用较大的激光波束宽度, 并通过波束扫描实现宽范围搜索, 这有利于目标探测和捕获。除前斜视条带成像外, 为扩大目标观测范围, SAL 波束需二维扫描并能在多普勒波束锐化 (DBS) 成像状态下工作, 同时应具备目标跟踪功能。其工作模式可分为前斜视条带成像模式、DBS 成像模式及目标探测和跟踪模式。

前斜视条带成像和 DBS 成像模式如图 1 所示。

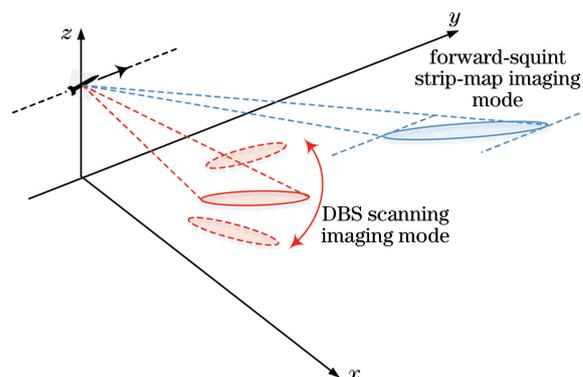


图 1 前斜视条带成像和 DBS 成像模式示意图

Fig. 1 Diagram of forward-squint strip-map imaging and DBS imaging mode

## 3 系统方案

### 3.1 光学系统参数

SAL 成像探测拟使用非成像衍射光学系统, 其光学系统参数如下。

1) 采用透射式光学系统和基于光纤准直器的一发四收馈源来收、发共光路。发射方位向较窄、俯仰向 (距离向) 较宽的椭圆光束的波束宽度为  $0.25 \text{ mrad}(\text{方位向}) \times 1.5 \text{ mrad}(\text{俯仰向})$ , 并设置与之对应的接收视场, 以便于实现距离向的较大幅宽成像。

2) 主镜使用口径为 100 mm 的薄膜透镜衍射器件, 系统焦距为 150 mm。在内视场设置由 4 个接收光纤准直器和 1 个发射光纤准直器组成的馈源, 馈源直径设计为 10 mm, 通过前移离焦使 5 个准直器形成一定的重叠视场, 可等效实现收、发共用 10:1 压缩光路。

3) 馈源处每个接收光纤准直器的直径约为 4 mm, 通过二元光学器件引入高阶相位扩大接收视场, 形成  $2.5 \text{ mrad} \times 15 \text{ mrad}$  宽视场的接收馈源, 再借助 10:1 压缩光路, 将  $0.25 \text{ mrad} \times 1.5 \text{ mrad}$  的接收

视场信号收入光纤。将馈源处直径约 2 mm 的光纤准直器作为发射馈源,通过扩束形成宽的椭圆波束,

经压缩光路出射 0.25 mrad×1.5 mrad 的椭圆波束。光学系统方案示意图如图 2~4 所示。

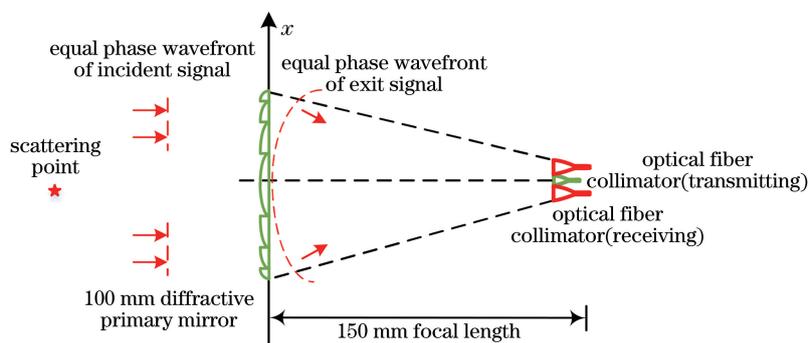


图 2 SAL 透射式衍射光学系统和准直器馈源

Fig. 2 SAL transmissive diffractive optical system and collimator feeder

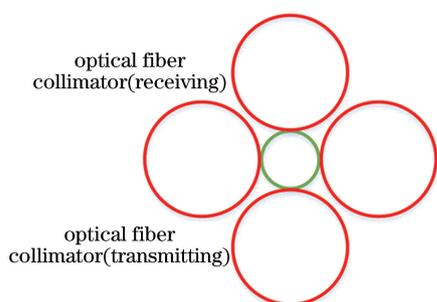


图 3 一发四收的馈源布局

Fig. 3 One-transmitting and four-receiving feeder layout

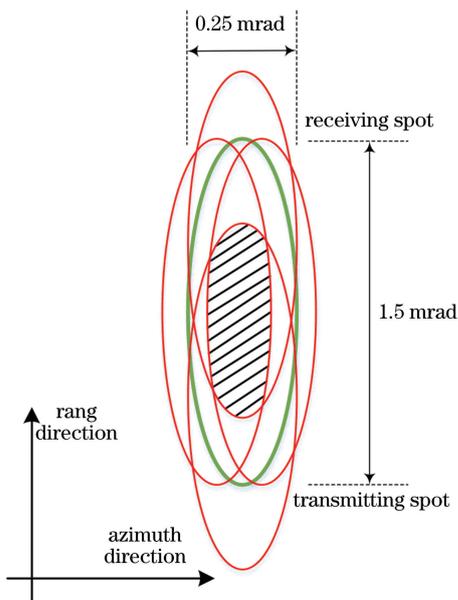


图 4 一发四收形成的发射和接收视场

Fig. 4 Transmitting and receiving field-of-view formed by one-transmitting and four-receiving

值得说明的是,在实际工作中,上述以多个光纤准直器为基础形成的馈源,可通过和光学系统集成实现其功能。

### 3.2 系统组成

基于 SAL 的成像探测系统主要由激光光源(种子源)、定时器、宽带信号产生器、激光信号调制器、功率放大器、发射端和接收端光学系统、在像面附近 2×2 排列的四组光纤准直器阵列、四通道信号处理器、和差探测信号处理器、位置和姿态测量系统(POS)组成。

系统采用全光纤光路,并使接收和发射端光路分置,有利于提高系统的收发隔离度。其中 SAL 所需的宽带信号产生器可由高速数模转换器(DAC)形成,激光信号调制器可由马赫-曾德尔(M-Z)调制器形成,POS 用于提供 SAL 的位置、姿态和速度信息。

与此同时,为保持信号相干性,还需对 SAL 增设 1 个发射信号参考通道和 1 个本振信号参考通道。

### 3.3 波形和激光器选择

为满足近距离工作要求,避免使用窄脉冲峰值功率高且体积、质量较大的固体激光器,考虑采用脉冲宽度在  $\mu\text{s}$  量级的光纤激光器,并采用脉冲压缩技术降低峰值功率并获得高分辨率。所需带宽信号选择频率调制/相位调制信号<sup>[13]</sup>,该信号经 M-Z 调制器被调制到激光载波上。SAL 激光信号发射的平均功率为 300 W,假定脉冲重复频率(PRF)为 100 kHz,脉冲宽度为 1  $\mu\text{s}$ ,占空比为 10%,对应峰值功率为 3 kW,进一步降低峰值功率,使采用的光纤激光器具有可行性。

基于衍射光学系统,为实现一定角度的激光光束扫描,SAL 激光器波长应具有一定的快速调谐能力。激光的中心波长为 1.0640  $\mu\text{m}$ ,目前的激光器波长调谐范围已达到 1.0440~1.0840  $\mu\text{m}$ ,再进一步

扩大范围也是可能的。SAL 激光波长无需连续调节,可根据频率步进激光的特点,引入激光通信中的波分复用技术,使在预置的多个波长上实现窄线宽成为可能。

### 3.4 信号接收和处理

SAL 拟采用一发四收相干接收体制。激光雷达发射高功率宽带信号,目标回波信号经光学系统进入四组光纤准直器,每组光纤准直器都可实现激光信号的相干外差解调和光电探测。对四组光纤准直器阵列的信号进行求和处理可实现目标成像探测,获取目标的距离信息;进行求差比幅/比相处理可获取目标的方位和俯仰角信息,实现目标测角和跟踪。

在对目标跟踪前,系统仅对和通道信号进行成像处理并实施目标识别,目标检测后在跟踪状态。系统需处理四通道信号,为减少信号处理量,可考虑对四组光纤准直器阵列的单脉冲信号进行简单的数字包络检波,形成跟踪所需的和差信号。

在对上述过程进行处理前,SAL 还需对发射参考通道和本振参考通道的信号进行处理,对激光信号相位误差实施定标校正,这样可保证收发系统信号的相干性。

### 3.5 目标成像探测和跟踪

鉴于地面目标的复杂性,SAL 的目标探测在目标的成像和识别后,可在前斜视成像和 DBS 成像两种模式下获取目标图像。目标探测后,系统即可转入单脉冲跟踪状态。通常激光雷达的波束较窄,不利于目标搜索,但有利于提高目标跟踪精度,过窄的激光波束会对目标丢失后的再捕获带来困难,为维持稳定跟踪,必要时 SAL 可采用频率变化的方式来实现波束展宽。

## 4 系统指标分析

### 4.1 成像分辨率

传统激光雷达的空间分辨率受限于衍射极限,其衍射极限对应的空间分辨率近似可表示为

$$\rho_{\text{diff}} = \frac{\lambda r}{D}, \quad (1)$$

式中: $\lambda$  为激光波长; $D$  为光学望远镜口径; $r$  为雷达与目标的斜距。若激光波长为  $1.0640 \mu\text{m}$ ,望远镜口径为  $100 \text{ mm}$ ,斜距为  $20 \text{ km}$ ,则其衍射极限分辨率约为  $0.2 \text{ m}$ 。

SAL 发射的信号为宽带信号,其斜距向分辨率可表示为

$$\rho_r = \frac{kC}{2B}, \quad (2)$$

式中: $B$  为发射信号带宽; $C$  为光速; $k$  为加窗展宽系数。若发射信号带宽为  $4 \text{ GHz}$ ,加窗展宽系数为  $1.3$ ,则其斜距向分辨率约为  $0.05 \text{ m}$ 。若 SAL 发射的信号为窄脉冲,则脉冲宽度约为  $0.25 \text{ ns}$ 。

利用合成孔径成像技术,雷达的横向分辨率可表示为

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

式中: $\theta_a$  为方位向波束宽度。若激光波长为  $1.0640 \mu\text{m}$ ,方位向波束宽度为  $250 \mu\text{rad}$ ,可实现的横向分辨率约为  $0.0025 \text{ m}$ 。可以看出,通过合成孔径成像技术可突破衍射极限,获得远优于衍射极限的横向分辨率。

实际 SAL 能实现的最高横向分辨率为

$$\rho_{g\text{max}} = \frac{\Delta f \lambda r}{2V \cos \theta_s}, \quad (4)$$

式中: $\Delta f$  是慢时频率分辨率,即激光静止时由目标回波信号和本振信号外差所得的频谱宽度; $\theta_s$  是前斜视角,为激光雷达相对目标运动速度与波束指向夹角的余角; $V$  为雷达与目标的相对速度。假定雷达和目标的相对速度  $V$  为  $200 \text{ m/s}$ ,前斜视角为  $87^\circ$ ,激光波长为  $1.0640 \mu\text{m}$ ,斜距为  $20 \text{ km}$ ,若要求目标的横向分辨率为  $0.05 \text{ m}$ ,则其慢时频率分辨率需优于  $37 \text{ Hz}$ ,对应的合成孔径成像时间应不少于  $27 \text{ ms}$ 。 $37 \text{ Hz}$  是频率分辨率的理论极限值,实际工作中可适当加长合成孔径的成像时间,以达到  $37 \text{ Hz}$  的慢时频率分辨率要求。

### 4.2 前斜视角

SAL 可在大前斜视角条件下成像。前斜视成像时的最大前斜视角  $\theta_{s\text{max}}$  可表示为

$$\theta_{s\text{max}} = \arcsin\left(\frac{1-\Delta}{1+\Delta}\right), \quad (5)$$

式中: $\Delta = 0.5\lambda B/C$ ,为相对带宽因子。显然,信号波长越小,越有利于大前斜视角高分辨率成像。若激光波长为  $1.0640 \mu\text{m}$ ,雷达发射信号带宽为  $4 \text{ GHz}$ ,则最大前斜视角约为  $89.7^\circ$ ,接近  $90^\circ$ ,因此 SAL 具备准前视成像能力。

### 4.3 合成孔径时间和数据率

根据横向分辨率公式,合成孔径时间可表示为

$$T_s \approx \frac{k\lambda r}{2\rho_g V \cos \theta_s}. \quad (6)$$

若雷达成像的横向分辨率为  $0.05 \text{ m}$ ,激光波长为  $1.0640 \mu\text{m}$ ,斜距为  $20 \text{ km}$ ,加窗展宽系数为  $1.3$ ,

雷达速度为 200 m/s,当前斜视角为 87°时,所需的合成孔径成像时间为 26.4 ms。定义合成孔径时间的倒数为数据率,其对应的数据率可优于 37 Hz。所以 SAL 可以在大前斜视角条件下,以高数据率对目标实现远距离高分辨率成像。

#### 4.4 多普勒带宽和脉冲重复频率

由于波长很短,SAL 前斜视工作时其径向运动产生的多普勒中心频率可高达 MHz 量级,但由于其确定了对地观测的几何关系且波束较窄,SAL 可在多普勒模糊状态下工作,最后通过数字信号处理消除模糊并实现成像。在此基础上,SAL 的-3 dB 波束宽度对应的多普勒带宽可表示为

$$B_a = \frac{2V}{\lambda} \cdot \theta_a \cdot \cos \theta_s \cdot \cos \phi, \quad (7)$$

式中: $\phi$  为下视角(地距向和波束指向的夹角,若平台高度为 1 km,斜距为 20 km,对应的下视角为 2.8°)。当方位向波束宽度为 250  $\mu$ rad,斜视角为 87°时,其多普勒带宽约为 5 kHz;当方位向波束宽度为 250  $\mu$ rad,斜视角为 75°时,其多普勒带宽约为 24 kHz。进行 DBS 处理时,PRF 需要大于-3 dB 波束宽度对应的多普勒带宽的  $m$  倍,假定  $m$  为 2~4,可设置 PRF 范围为 50~100 kHz。目前大功率激光器的 PRF 达到 100 kHz 也是有可能的。

#### 4.5 作用距离和成像信噪比

与微波雷达类似,激光雷达的发射增益与发射波束宽度成反比。设激光雷达的俯仰向和方位向发射波束的宽度为  $\theta_b$  和  $\theta_a$ ,则发射增益为

$$G_t = \frac{4\pi}{\theta_b \theta_a}. \quad (8)$$

激光雷达的光学系统较为复杂,影响光学系统传输效率的因素较多。设激光雷达的发射光学系统的传输效率为  $\eta_t$ ,接收光学系统的传输效率为  $\eta_r$ ,外差探测时视场匹配效率为  $\eta_m$ ,并设光学系统的其他损耗为  $\eta_{oth}$ ,则光学系统的传输效率  $\eta_{sys}$  为

$$\eta_{sys} = \eta_t \eta_r \eta_m \eta_{oth}. \quad (9)$$

需要注意的是,与微波雷达中接收机热噪声影响不同,SAL 中需考虑激光本振信号引起的散弹噪声影响,两者相差 1~2 个数量级。与此同时,SAL 成像涉及光学处理和电子学处理两部分,因此需在雷达方程中加入电子学噪声系数,以表征电子学处理噪声等对 SAL 作用距离的影响。

设激光雷达的发射峰值功率为  $P_t$ ,发射信号脉冲宽度为  $T_p$ ,接收望远镜面积为  $S_r$ ,合成孔径成像

后单个分辨单元对应的目标散射截面积为  $\sigma$ (为目标散射系数、距离向分辨率、横向分辨率三者之积),光电探测器的量子效率为  $\eta_D$ ,电子学噪声系数为  $F_n$ ,单脉冲信噪比为  $R_{SNmin}$ 。令激光雷达的最大作用距离为  $d_{max}$ ,则有

$$d_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_t \cdot G_t \cdot \sigma \cdot S_r \cdot \eta_{sys} \cdot \eta_D \cdot T_p}{4\pi \cdot h\nu \cdot F_n \cdot R_{SNmin}}}, \quad (10)$$

式中: $h$  为普朗克常数; $\nu$  为激光频率。

综合上述分析,表 1 给出了飞行高度为 1 km,作用距离为 20 km 的用于条带成像的 SAL 主要系统参数。

表 1 用于条带成像的 SAL 系统参数

Table 1 SAL system parameters for strip-map imaging

Parameter	Value
$\lambda / \mu\text{m}$	1.0640
$P_t / \text{kW}$	3
$T_p / \mu\text{s}$	1
PRF / kHz	100
Average power of transmission / W	300
Flight altitude / km	1
$\phi / (^\circ)$	2.8
$\theta_b, \theta_a / \text{mrad}$	1.5, 0.25
Swath(ground range direction, range transverse) / m	32, 5
$\rho_r, \rho_g / \text{m}$	0.05, 0.05
Target scattering coefficient	0.2
$\theta_s / (^\circ)$	87
$V / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	200
$d / \text{km}$	20
$D / \text{mm}$	100
$\eta_t$	0.9
$\eta_r$	0.8
$\eta_m$	0.5
$\eta_{oth}$	0.5
$\eta_D$	0.5
$F_n / \text{dB}$	3
Electronics system loss	0.75
Atmospheric loss	0.25
$R_{SNmin} / \text{dB}$	-25.4

作用距离为 20 km, 单脉冲成像信噪比为 -25.4 dB。在 87°斜视角下, 通过 2034 个脉冲相干累积, 可获得的成像分辨率约为 5 cm, 单视图像信噪比约为 7.6 dB, 通过 23 视非相干累积可将图像信噪比提升至 14.4 dB; 在 81°斜视角下, 通过 681 个脉冲相干累积, 可获得的成像分辨率约为 5 cm, 单视图像信噪比约为 2.8 dB, 通过 23 视非相干累积可将图像信噪比提升至 9.7 dB。此时, 地距向幅宽约为 100 m。该分析表明, 根据实际情况合理地调整参数, 可将激光发射平均功率降为 150 W。

表 2 给出了飞行高度为 1 km, 作用距离为 10 km 的用于 DBS 成像<sup>[14]</sup> 的 SAL 主要系统参数, 未列出的参数与表 1 一致。

表 2 用于 DBS 成像的 SAL 系统参数

Table 2 SAL system parameters for DBS imaging

Parameter	Value
$\phi / (^{\circ})$	5.7
Swath(ground range direction, range transverse) / m	26, 2.5
$\theta_s / (^{\circ})$	80
$d / \text{km}$	10
Atmospheric loss	0.4
$R_{\text{SNmin}} / \text{dB}$	-13.4

要在 10 km 处通过 DBS 获得 5 cm 分辨率图像, 横向分辨率对应的成像转角约为  $5 \mu\text{rad}$  (100 mm 口径对应的衍射极限为  $10.6 \mu\text{rad}$ ), SAL 的方位向波束宽度  $\theta_a$  为  $250 \mu\text{rad}$ , 则波束锐化比  $N$  为 50。经计算, 50 倍的波束锐化比需要 307 个脉冲的相干累积, 单脉冲成像信噪比为 -13.4 dB, 307 个脉冲相干累积后, 单视成像信噪比为 11.4 dB。

最大波束扫描角速度为

$$\bar{\theta} = \frac{\rho_g \cdot V \cdot 2\theta_a \cdot \cos \theta_s}{\lambda \cdot r} \quad (11)$$

经计算, 80°斜视角对应的最大波束扫描角速度为 81.6 mrad/s, 可获得 26 m(地距向) × 40 m(距离横向) 的图像, 对应的图像数据率为 20 Hz。假定波束在方位向的单方向机械扫描时间为 0.5 s, 扫描角度为 40.8 mrad, 可在 0.5 s 内获得 26 m(地距向) × 400 m(距离横向) 的图像。当平台速度大于 200 m/s 时, 扫描角速度可进一步加快, 减小斜视角, 成像信噪比将会降低。上述参数可保证在 70°斜视角下, 成像信噪比仍优于 10 dB。

## 5 关键技术分析

SAL 关键技术主要包括激光信号相干性保持、振动相位误差估计与补偿、高分辨率实时成像、高效窄线宽大功率激光器、衍射光学系统设计等。

激光信号相干性保持的主要方法是对发射信号进行相位误差校正以及对本振信号进行数字延时处理<sup>[15]</sup>, 但如何实现实时处理以满足实际应用要求还需深入研究。

在重叠视场条件下的振动相位误差估计和补偿可通过多通道正交干涉处理方法<sup>[16]</sup> 实现, SAL 多通道应基于内视场多探测器, 其一发四收的馈源布局使该方法的应用成为可能。同时需研究基于多探测器的空间相关处理方法(SCA), 该方法可用于正前视顺轨干涉基线不能形成的条件中。

大前斜视角的合成孔径成像处理可采用基于聚束模式的波数域  $\omega K$  算法, 同时可进行子孔径成像处理以提高图像数据率。但由于激光波长短且平台飞行速度快, 激光雷达 PRF 即便高达 100 kHz, 也会存在严重的多普勒模糊现象, 且回波信号的距离徙动量较大, 这给探测器信号的实时处理带来了许多困难。为此, 在成像算法和信号处理硬件两个方面, 需深入研究高分辨率实时成像的探测技术。

衍射光学系统要满足目标搜索、成像、捕获和跟踪等多种功能要求, 其发射和接收波束应具有指向和宽度可变的能力, 类似微波/毫米波雷达的相控阵天线, 并能与设备整流罩共形。SAL 成像可利用非成像衍射光学系统的特点, 全面引入微波/毫米波雷达相控阵天线的理论方法, 设计新型光学系统提高激光雷达的成像性能。除主动激光成像探测外, 主动激光和被动红外结合<sup>[11]</sup> 也将是一个重要的发展方向, 深入研究相关衍射光学系统的设计方法具有重要的理论意义和应用价值。

对于高效窄线宽大功率激光器, SAL 激光信号发射功率应为 300 W, 为了在平台供电有限条件下得到应用, 激光器效率应在 30% 量级; 为保证信号的相干性, 其线宽也应控制在一定范围内。目前波长固定激光器的线宽为 10 kHz(与光谱宽度对应), SAL 若考虑波束频率扫描, 激光器应具备一定的波长调谐能力。目前波长连续调节的激光器的线宽较大, 当中心波长为  $1.0640 \mu\text{m}$  时, 光谱宽度很难优于 0.01 nm, 对应的线宽在 GHz 量级, 这给应用带来了困难。由于 SAL 激光波长无需连续调节, 可考虑使用频率步进激光信号, 目前激光通信上的波分复用

技术已较为成熟, SAL 需引入相关技术, 以保证在预置的多个波长上实现窄线宽。

## 6 衍射光学系统设计

以 100 mm 口径接收衍射光的光学系统为例, 分析衍射光学系统的性能, 并验证其多功能应用的可行性。

### 6.1 平面非成像衍射光学系统

图 5 为平面衍射光学系统的几何模型。

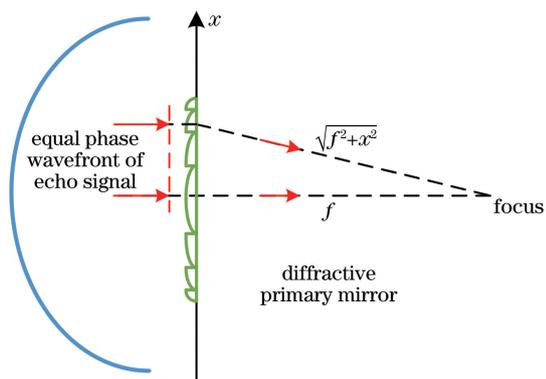


图 5 平面衍射光学系统的几何模型

Fig. 5 Geometric model of planar diffractive optical system

波程差  $\Delta R(x)$  的计算公式为

$$\Delta R(x) = \Delta R(0) + f - \sqrt{f^2 + x^2}, \quad (12)$$

式中:  $\Delta R(0)$  为主镜中心处的波程差;  $f$  为主镜焦距;  $x$  为主镜上各衍射单元的位置坐标。当 SAL 中心波长为  $1.0640 \mu\text{m}$ , 衍射主镜口径为 100 mm, 焦距为 150 mm, 焦距口径比为 1.5, 辐射单元间距为  $1.064 \mu\text{m}$  (一个波长), 辐射单元数约为 100000 时, 在口径方向的最大波程差约为 8 mm (8000 个波长), 对应最大相移量约为 50000 rad。

图 6 为衍射主镜形成的高阶相位变化曲线 (主要为二阶相位, 以  $2\pi$  为模折叠) 和对应的波束方向图。图 7 为主镜相位以  $2\pi$  为模, 四值化处理后的相位变化曲线图和波束方向图, 可以看出, 四值化处理后的主镜的相位具有较好的波束方向, 能实现高的衍射效率。

分析表明, 衍射主镜形成的高阶相位以  $2\pi$  为模折叠后, 其主镜厚度可通过薄膜透镜由 8 mm 减至激光波长量级, 大幅降低了主镜的质量。以上主要是对衍射主镜的性能进行分析, 接收光纤准直器通过二元光学器件引入高阶相位形成  $2.5 \text{ mrad} \times$

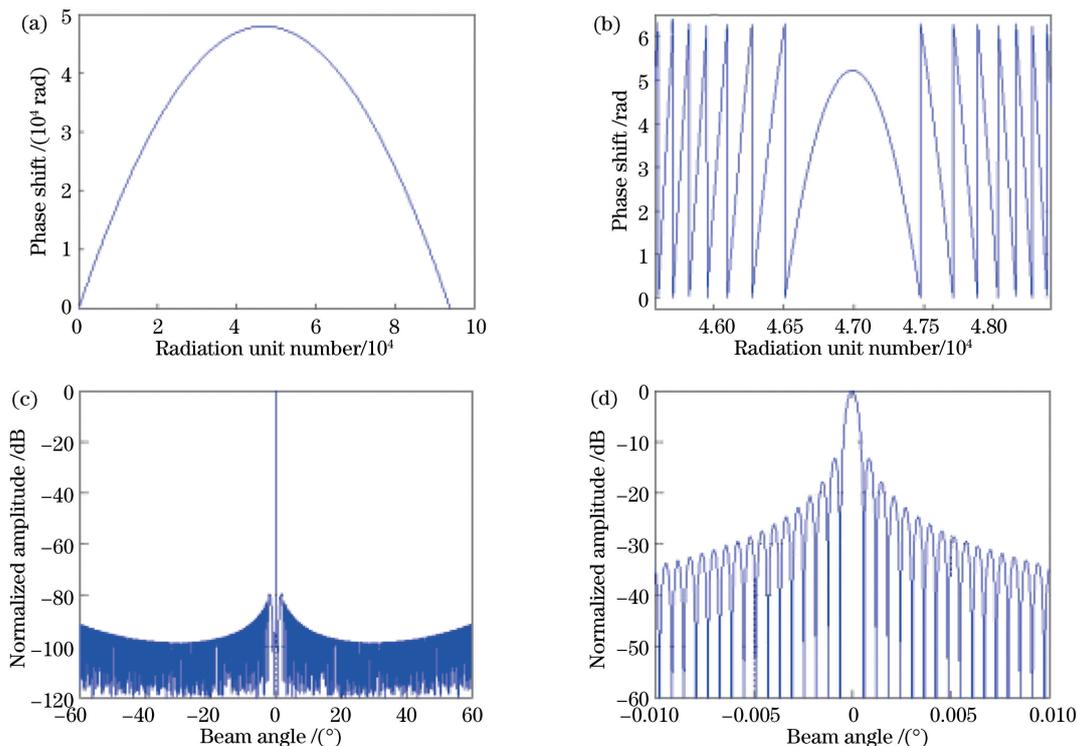


图 6 衍射主镜形成的折叠相位曲线和波束方向图。(a) 不作折叠的相位曲线; (b) 以  $2\pi$  为模折叠的相位曲线; (c)  $\pm 60^\circ$  范围内的波束方向图; (d)  $\pm 0.01^\circ$  范围内的波束方向图

Fig. 6 Folded phase curve and beam pattern of diffractive primary mirror. (a) Phase curve without fold; (b) phase curve folded by  $2\pi$ ; (c) beam pattern in  $\pm 60^\circ$  range; (d) beam pattern in  $\pm 0.01^\circ$  range

15 mrad 的宽视场接收馈源,其性能分析过程与衍射主镜的类似,详细情况参见文献[2]。

图 8 为经集成设计形成的平面衍射光学系统。设计表明:当平面衍射镜焦距为 150 mm,像距为 149.663 mm,物方发散角为  $\pm 0.043^\circ$  (1.5 mrad),空

间频率为 55 lp/mm 时,轴上视场 ( $0^\circ$ ) 与轴外视场 ( $0.0215^\circ$ ) 的传递函数值均优于 0.7,满足 4 根放置于轴外视场的单模光纤的接收要求,80% 的入射能量可集中于  $9 \mu\text{m}$  直径范围内。

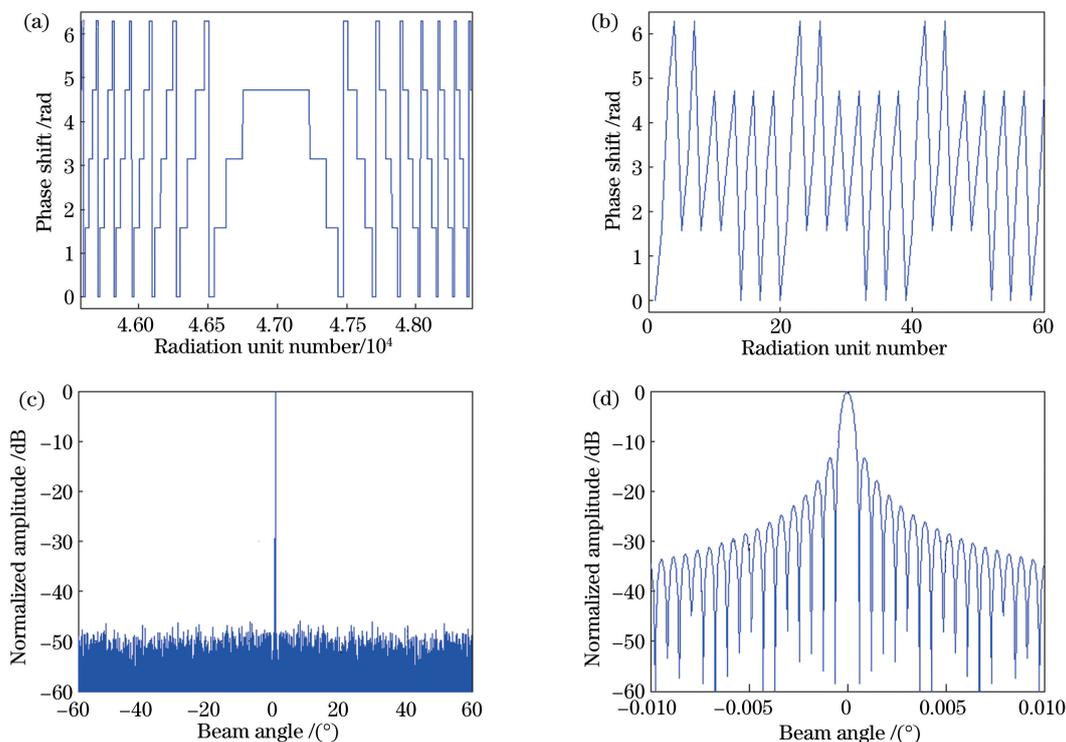


图 7 四值化处理后,主镜的相位曲线和波束方向图。(a)中部辐射单元的相位曲线;(b)左侧辐射单元的相位曲线;  
(c)  $\pm 60^\circ$  范围内的波束方向图;(d)  $\pm 0.01^\circ$  范围内的波束方向图

Fig. 7 Phase curve and beam pattern of primary mirror after four quantization. (a) Phase curve of central radiation unit;  
(b) phase curve of left radiation unit; (c) beam pattern in  $\pm 60^\circ$  range; (d) beam pattern in  $\pm 0.01^\circ$  range

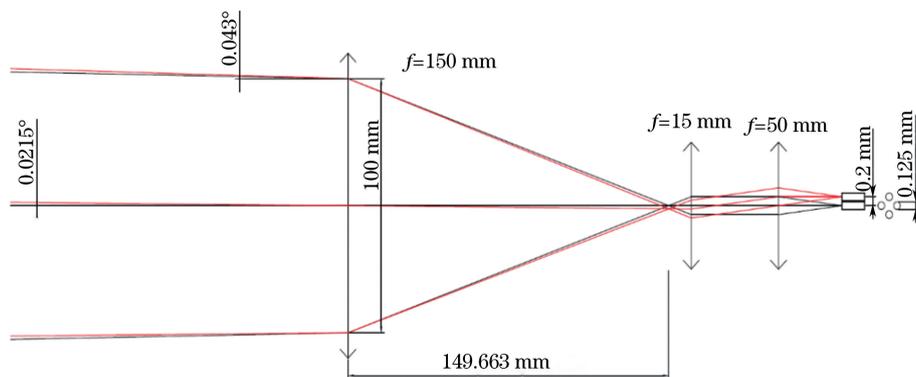


图 8 平面衍射光学系统

Fig. 8 Planar diffractive optical system

## 6.2 基于频率变化的激光波束扫描和展宽

SAL 采用衍射光学系统时,频率变化(波长变化)可使激光波束展宽(这有助于 SAL 在近距离获得宽的观测范围),进一步设置衍射光学系统中焦点偏离主镜的轴线,使之在口径方向产生波程差,这就

有可能通过频率扫描实现一定角度的一维波束扫描,其工作原理和微波频率扫描天线<sup>[3]</sup>类似,在光学中可用光栅原理解释。用频率扫描平面衍射主镜实现一维波束扫描的工作原理如图 9 所示,当焦点位于主镜轴线上时,可通过适当加厚光学系统来引入

光程差  $L$ , 使之在口径方向上产生线性波程差。

根据相控阵天线模型, 若要实现频率扫描, 需满足

$$\frac{2\pi \cdot L}{\lambda_i} = \frac{2\pi \cdot d' \cdot \sin \theta_i}{\lambda_i} + m \cdot 2\pi, \quad (13)$$

式中:  $d'$  为相邻辐射单元的间隔;  $\lambda_i$  为激光波长;  $\theta_i$  为波束指向角;  $m$  为非负整数;  $L$  为相邻两个辐射单元附加的波程差。当薄膜主镜口径为 100 mm,

焦距  $f$  为 150 mm 时, 在波束扫描状态下, 为避免栅瓣的影响, 辐射单元间距应小于半个波长, 仿真中可设置  $d'$  为  $0.532 \mu\text{m}$ , 根据 (13) 式可确定  $L$  为  $1.52 \mu\text{m}$ , 附加的总波程差为 285 mm。当激光波长分别为  $1.0140 \mu\text{m}$ 、 $1.0640 \mu\text{m}$  和  $1.1140 \mu\text{m}$  时, 波束指向分别为  $75^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $50^\circ$ 。通过波长变化, 可实现波束扫描, 具体的仿真结果如图 10 所示。

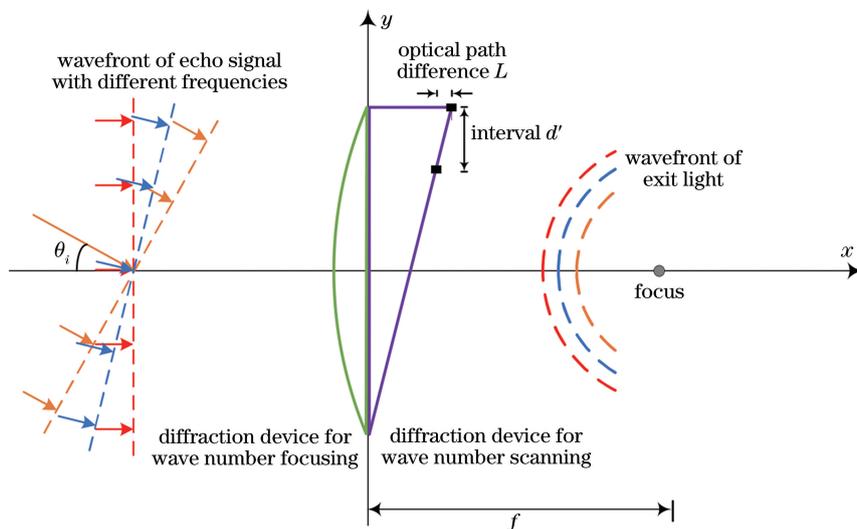


图 9 频率扫描实现波束扫描的光学系统示意图

Fig. 9 Diagram of optical system for frequency scanning to achieve beam scanning

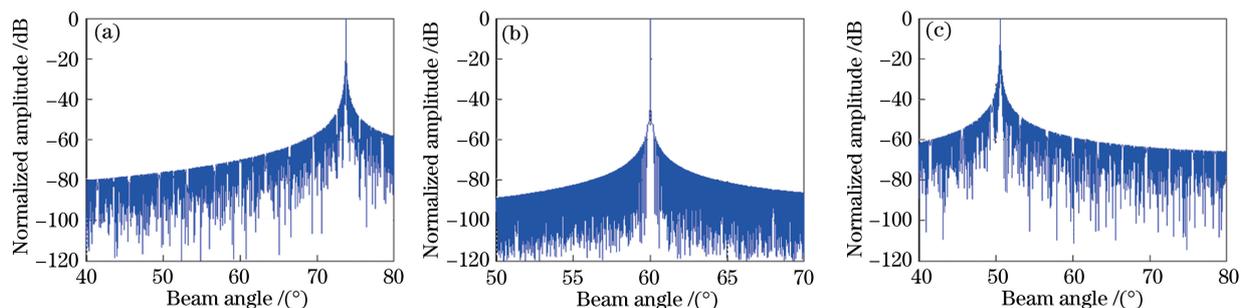


图 10 不同波长对应的波束方向图。(a)  $1.0140 \mu\text{m}$ ; (b)  $1.0640 \mu\text{m}$ ; (c)  $1.1140 \mu\text{m}$

Fig. 10 Beam pattern corresponding to different wavelengths. (a)  $1.0140 \mu\text{m}$ ; (b)  $1.0640 \mu\text{m}$ ; (c)  $1.1140 \mu\text{m}$

当焦点偏离衍射主镜轴线时, 焦点到衍射主镜不同位置的光程差会含有线性项, 该线性项可用于实现基于频率扫描的波束扫描, 波束扫描角也可根据 (13) 式确定。焦点偏离主镜轴线时, 波束扫描的平面衍射光学系统的工作原理如图 11 所示。

对基于焦点偏置实现波束扫描的薄膜主透镜, 需对衍射器件产生的光程差进行折叠并量化处理, 这种处理通常以中心波长为基准, 当折叠周期为一个波长时, 薄膜主镜的厚度在波长量级。此时, 对于其他波长, 该衍射光学系统将存在散焦和色散现象。为此, 本文拟通过扩大折叠周期, 对部分波长实现聚

焦, 从而实现激光波束的频率扫描。

假定折叠周期为  $l$ , 那么对于波长为  $\lambda_m = \frac{l}{m}$  的信号也可实现聚焦, 举例说明如下。

当主镜口径为 100 mm, 焦距为 150 mm, 焦点偏置角为  $60^\circ$ , 中心波长为  $1.0640 \mu\text{m}$ , 相邻辐射单元间隔为  $1.064 \mu\text{m}$  时, 若折叠周期为  $106.4 \mu\text{m}$  (中心波长的 100 倍), 对  $1.064 \mu\text{m}$  内的光程差以  $2\pi$  为模进行四值化处理 ( $106.4 \mu\text{m}$  厚度内对应的台阶数为 400), 则  $1.0133$ 、 $1.0431$ 、 $1.0535$ 、 $1.0640$ 、 $1.0747$ 、 $1.0857$ 、 $1.0969$ 、 $1.1200 \mu\text{m}$  波长的信号均可实现聚

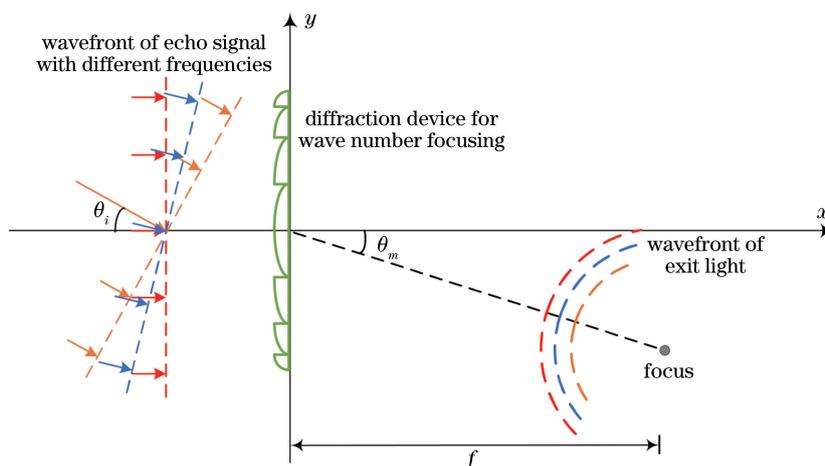


图 11 焦点偏离主镜轴线时,频率扫描实现波束扫描的光学系统示意图

Fig. 11 Diagram of optical system for frequency scanning to achieve beam scanning when focus deviates from axis of main mirror

焦,对应的波束宽度为  $0.0006^\circ$  (约  $10.6 \mu\text{rad}$ ),波长间隔约为  $10 \text{ nm}$ ,波束指向间隔为  $0.6^\circ$  (约  $10.6 \text{ mrad}$ )。波长  $1.0133$ 、 $1.0640$ 、 $1.1200 \mu\text{m}$  对应的波长变化范围约为  $100 \text{ nm}$ ,波束扫描角为  $6^\circ$ ,波束方向图如图 12 所示。

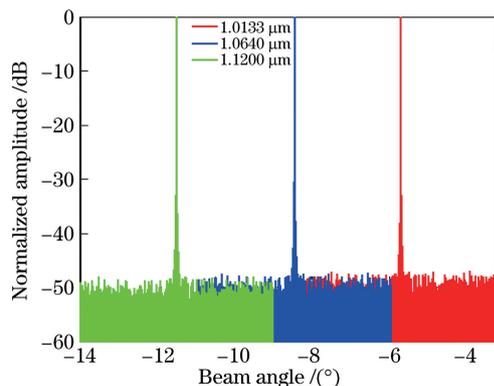


图 12 波长为  $1.0133$ 、 $1.0640$ 、 $1.1200 \mu\text{m}$  时对应的波束方向图

Fig. 12 Beam pattern when wavelengths are  $1.0133$ ,  $1.0640$ , and  $1.1200 \mu\text{m}$

若折叠周期为  $10.64 \mu\text{m}$  (中心波长的 10 倍),对  $1.0640 \mu\text{m}$  内的光程差以  $2\pi$  为模进行四值化处理(在  $10.64 \mu\text{m}$  厚度内对应的台阶数为 40),则  $0.8866$ 、 $0.9672$ 、 $1.0640$ 、 $1.1822$ 、 $1.3300 \mu\text{m}$  波长的信号均可实现聚焦,对应的波束宽度为  $0.0006^\circ$ ,波长间隔约为  $100 \text{ nm}$ ,波束指向间隔为  $6^\circ$  (约  $106 \text{ mrad}$ )。  $0.9672$ 、 $1.0640$ 、 $1.1822 \mu\text{m}$  波长对应的波长变化范围约为  $200 \text{ nm}$ ,波束扫描角为  $12^\circ$ ,波束方向图如图 13 所示。

从仿真结果看,不同的折叠周期对应不同的激光波束频率扫描性能,但 SAL 波束可步进扫描的特

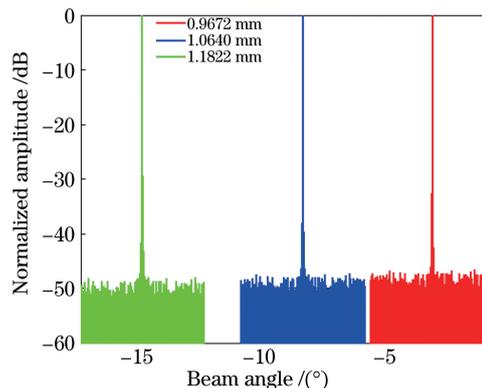


图 13 波长为  $0.9672$ 、 $1.0640$ 、 $1.1822 \mu\text{m}$  对应的波束方向图

Fig. 13 Beam pattern when wavelengths are  $0.9672$ ,  $1.0640$  and  $1.1822 \mu\text{m}$

点使之应用成为可能。增大焦点偏置角,可扩大波束扫描范围,同时可使波束扫描中心接近望远镜轴线方向;加大折叠周期,可使波束指向间隔变小。根据实际需要,通过优化参数有可能获得连续覆盖的波束频率扫描性能。

SAL 采用衍射光学系统时,大范围的频率变化可实现波束扫描,小范围的频率变化可使激光波束展宽,这有助于 SAL 在近距离获得宽的成像探测范围。中心波长为  $1.0640 \mu\text{m}$ ,折叠周期为  $106.4 \mu\text{m}$  的仿真表明:当波长为中心波长  $1.0640 \mu\text{m}$  时,聚焦良好;当波长为  $1.0638 \mu\text{m}$  (波长变化  $0.2 \text{ nm}$ ) 时,波束将展宽为原来的 2 倍,主镜增益下降约  $3 \text{ dB}$ ;当波长为  $1.0636 \mu\text{m}$  (波长变化  $0.4 \text{ nm}$ ) 时,波束将展宽为原来的 3 倍,主镜增益下降约  $5 \text{ dB}$ 。三种波长对应的波束方向图如图 14 所示。

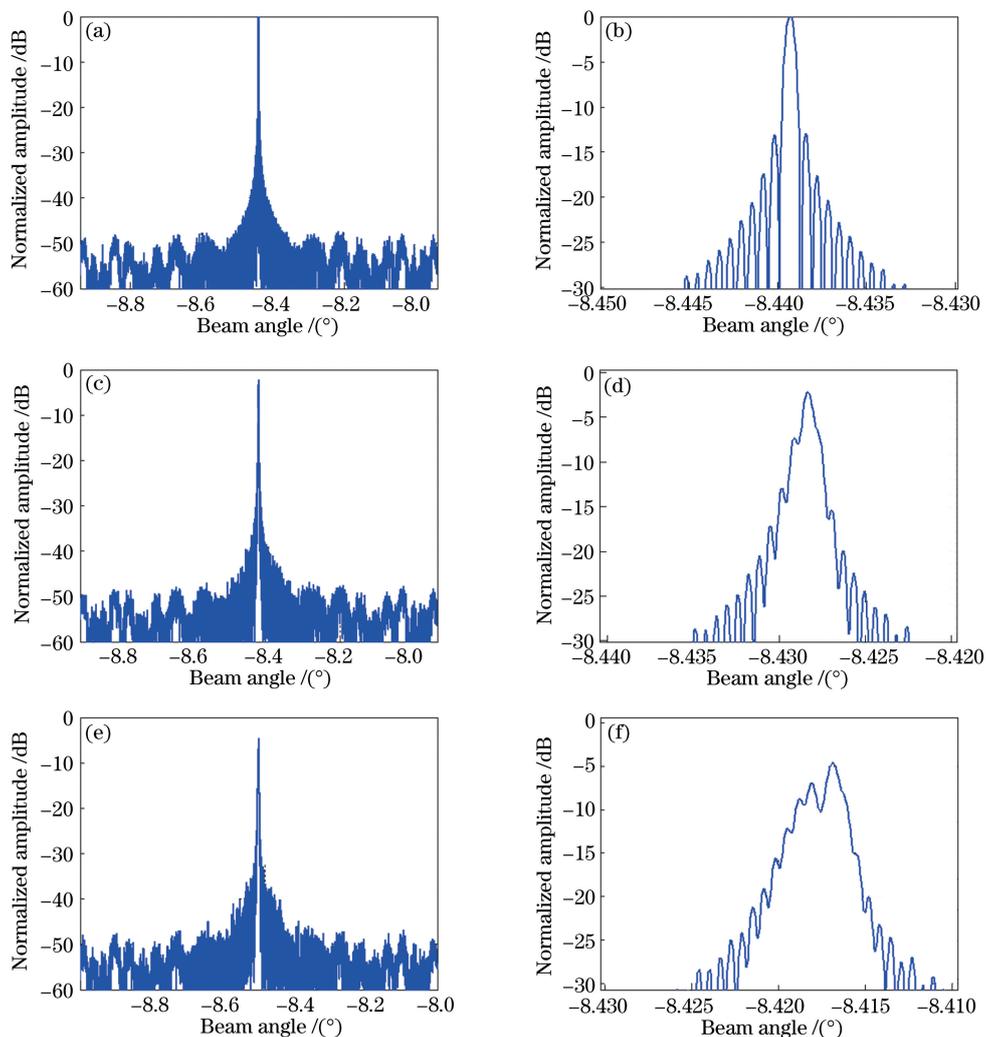


图 14 不同波长对应的波束方向图。(a)(b) 1.0640  $\mu\text{m}$ ; (c)(d) 1.0638  $\mu\text{m}$ ; (e)(f) 1.0636  $\mu\text{m}$

Fig. 14 Beam pattern corresponding to different wavelengths. (a)(b) 1.0640  $\mu\text{m}$ ; (c)(d) 1.0638  $\mu\text{m}$ ; (e)(f) 1.0636  $\mu\text{m}$

### 6.3 曲面共形的衍射光学系统和波束二维扫描

上述分析表明,衍射主镜形成的高阶相位以  $2\pi$  为模折叠后,其主镜厚度可通过薄膜透镜由 8 mm 减至百微米量级,这大幅降低了主镜的质量。与此同时,将薄膜透镜共形设置在设备整流罩内侧,或将设备整流罩内侧直接加工成所需的基于二元光学器件的衍射镜,可形成曲面共形衍射光学系统。图 15 为曲面共形衍射光学系统的几何模型。

波程差  $\Delta R(x)$  的计算公式为

$$\Delta R(x) = \Delta R(0) - f + \sqrt{f^2 - x^2}. \quad (14)$$

为使问题简化,这里的曲面共形以球面共形为例,并假定球面半径为焦距。在中心波长为 1.0640  $\mu\text{m}$ ,衍射主镜口径为 100 mm,焦距  $f$  为 150 mm,辐射单元间距为 1.064  $\mu\text{m}$  的条件下,对曲面共形衍射主镜形成的相位变化曲线和波束方向图进行仿真分析,同时计算了曲面共形衍射主镜与平面主镜的波程差

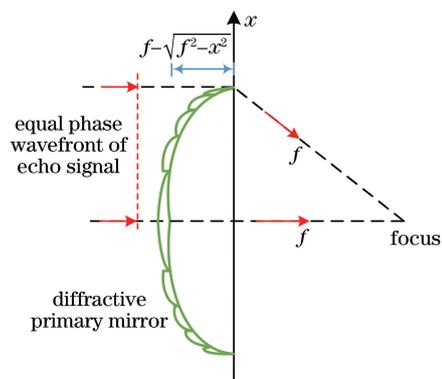


图 15 曲面共形衍射光学系统的几何模型

Fig. 15 Geometric model of curved-conformal diffractive optical system

和相位误差,相关结果如图 16 和图 17 所示。

仿真结果表明:曲面共形衍射主镜在口径方向的波程差约为 8.5 mm;曲面共形衍射主镜与平面主镜的最大波程差仅为 0.5 mm。曲面共形衍射主镜

形成的高阶相位以  $2\pi$  为模折叠后,其主镜厚度也可通过薄膜透镜方式减至百微米量级,从而实现与设备整流罩共形。在此基础上,可形成基于频率变化

的具有一维波束扫描功能的曲面共形衍射光学系统,光路示意图如图 18 所示。

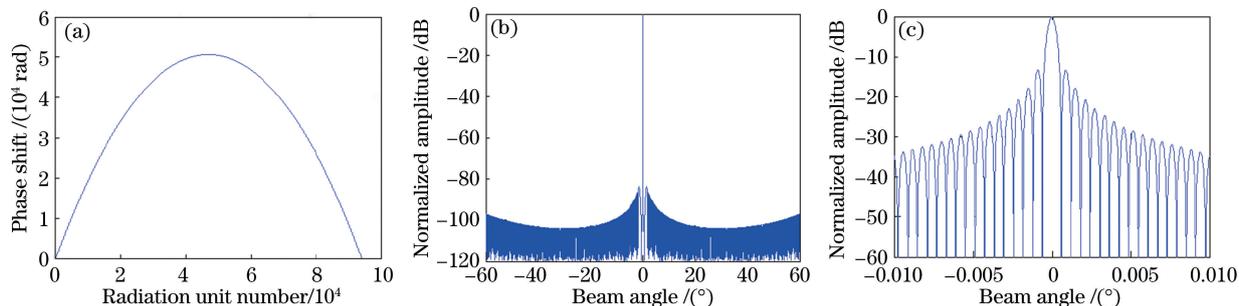


图 16 曲面共形衍射主镜形成的相位曲线和波束方向图。(a)不作折叠的相位曲线;(b)  $\pm 60^\circ$ 范围内的波束方向图;(c)  $\pm 0.01^\circ$ 范围内的波束方向图

Fig. 16 Phase curve and beam pattern of curved-conformal diffractive primary mirror. (a) Phase curve without fold; (b) beam pattern in  $\pm 60^\circ$  range; (c) beam pattern in  $\pm 0.01^\circ$  range

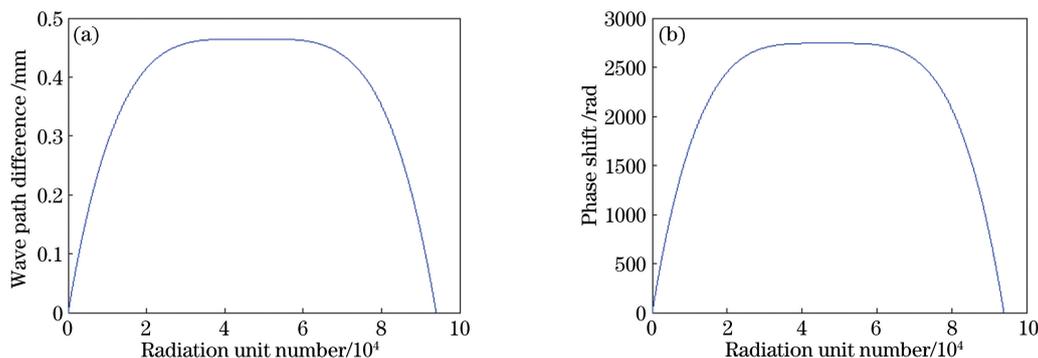


图 17 曲面共形衍射主镜与平面主镜的波程差和相位误差。(a)波程差;(b)相位误差

Fig. 17 Wave path difference and phase error between curved-conformal diffractive primary mirror and planar primary mirror. (a) Wave path difference; (b) phase error

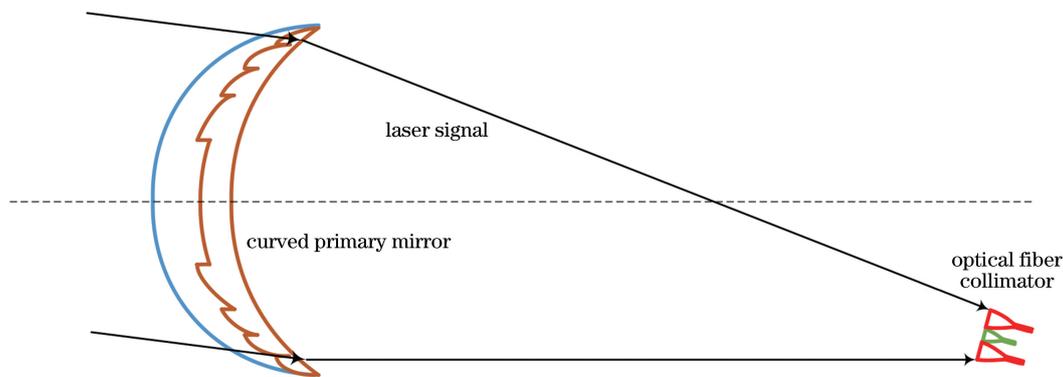


图 18 激光波束一维频率扫描的光路示意图

Fig. 18 Optical path diagram of laser beam one-dimensional frequency scanning

SAL 波束需要在方位向和俯仰向进行二维扫描,通常方位向 DBS 成像的扫描范围比俯仰向大。二维波束扫描可通过设置折、反射镜并通过折、反射镜的二维机械扫描实现,此时馈源保持静止,便于实现激光信号的收发。采用透射式衍射光学系统时,

通过光路压缩,可大幅减小折、反射镜的尺寸,便于二维机械扫描的实现。假定使用 10:1 压缩光路,要实现  $5^\circ$  的波束扫描范围,折、反射镜的旋转范围应达到  $25^\circ$ 。SAL 可使用非成像光学系统的特点,降低图 18 光路实现的难度。

为进一步减小系统设备的体积和质量, SAL 可考虑通过频率扫描实现俯仰向激光波束扫描, 使折、反射镜仅在方位向进行一维机械扫描, 此时折、反射

镜可改为一维机械扫描的光栅, 由此形成基于压缩光路机械扫描和频率扫描的曲面共形衍射光学系统, 如图 19 所示。

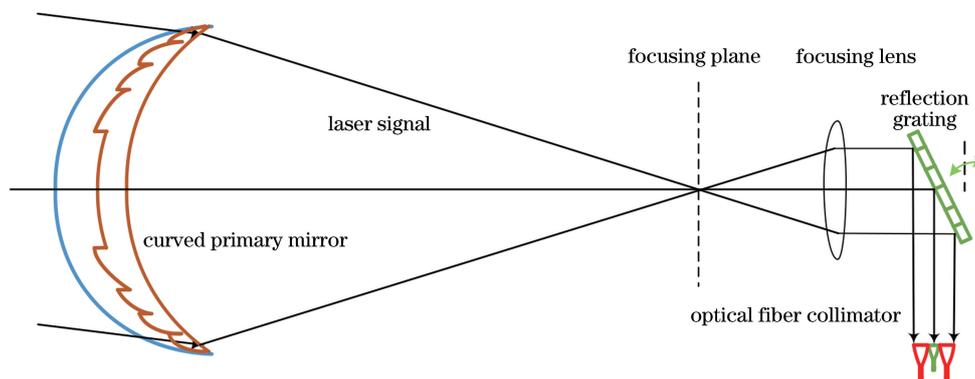


图 19 激光波束二维扫描的曲面共形衍射光学系统的光路示意图

Fig. 19 Optical path diagram of curved-conformal diffractive optical system for laser beam two-dimensional scanning

## 7 结 论

研究了基于曲面共形衍射光学系统的 SAL 成像探测问题, 分析了 SAL 系统方案、指标和关键技术, 阐述了 SAL 成像探测的优势和实施的可行性。

当 SAL 衍射光学系统没有折叠展开过程时, 在满足透射率要求的基础上, 可用较厚的衍射器件实现; 较多的台阶数在保证衍射效率的同时, 能获得较好的激光波束频率扫描性能。进一步结合红外宽视场成像探测, 并持续开展相关研究工作对我国新型高分辨率光学成像探测技术的发展具有重要意义。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Li D J, Hu X. Optical system and detection range analysis of synthetic aperture radar [J]. Journal of Radars, 2018, 7(2): 263-274.  
李道京, 胡焯. 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.
- [3] Song X D, Wang W, Jin M P. Design and implementation of a novel X-band frequency-scanning microstrip antenna array [J]. Radar Science and Technology, 2015, 13(6): 671-674.  
宋小弟, 汪伟, 金谋平. 一种新型 X 波段频扫天线阵的设计与实现[J]. 雷达科学与技术, 2015, 13(6): 671-674.
- [4] Yin D C. Review of development of missile-borne SAR guidance technology[J]. Modern Radar, 2009, 31(11): 20-24.  
尹德成. 弹载合成孔径雷达制导技术发展综述[J]. 现代雷达, 2009, 31(11): 20-24.
- [5] Li D J, Zhang L X, Yu B Z. Research on active radar imaging seeker[J]. Modern Radar, 2003, 25(5): 12-15.  
李道京, 张麟兮, 俞卞章. 主动雷达成像导引头几个问题的研究[J]. 现代雷达, 2003, 25(5): 12-15.
- [6] Neumann C, Senkowski H. MMW-SAR seeker against ground targets in a drone application [C]// Proceeding of EUSAR. [S.l.: s. n.]. 2002: 457-460.
- [7] Malenke T, Oelgart T, Rieck W. W-band-radar system in a dual-mode seeker for autonomous target detection[C]//Proceeding of EUSAR. [S.l.: s. n.]. 2002.
- [8] Xi Y W, Zhang J H, Liu Y P. The latest technique progress on air to ground radar seeker [J]. Fire Control Radar Technology, 2010, 39(2): 17-22.  
习远望, 张江华, 刘逸平. 空地导弹雷达导引头最新技术进展[J]. 火控雷达技术, 2010, 39(2): 17-22.
- [9] Zhu R P, He B F. A new limited scan space fed phased array antenna [J]. Modern Radar, 2003, 25 (6): 49-53.  
朱瑞平, 何炳发. 一种新型有限扫描空馈相控阵天线 [J]. 现代雷达, 2003, 25(6): 49-53.
- [10] Peng X L. Electronically controlled millimeter wave beam steering technologies [J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(1): 85-91.  
彭祥龙. 国外毫米波电扫描技术 [J]. 电讯技术, 2009, 49(1): 85-91.
- [11] Fu Y H. Study on the optical system of eyesafe

- imaging infrared/laserseeker [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- 付彦辉. 人眼安全下红外/激光导引头光学系统总体设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [12] He J. Technology analysis of MMW/IR common aperture compound seeker [J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(7): 1222-1226.
- 何均. 毫米波/红外共孔径复合导引头技术分析[J]. 电讯技术, 2012, 52(7): 1222-1226.
- [13] Du J B, Li D J, Ma M. Research on wideband signal generation for ladar [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(11): 1114003.
- 杜剑波, 李道京, 马萌. 激光雷达宽带信号产生方法研究[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1114003.
- [14] Zhang Z Z. Discussion on several problems in Doppler beam sharpening (DBS) theory and practice [J]. Modern Radar, 1991, 13(2): 1-12.
- 张直中. 多普勒波束锐化(DBS)理论和实践中若干问题的探讨[J]. 现代雷达, 1991, 13(2): 1-12.
- [15] Hu X, Li D J, Zhao X F. Maintaining method of signal coherence in synthetic aperture ladar based on local oscillator digital delay [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0510002.
- 胡烜, 李道京, 赵绪锋. 基于本振数字延时的合成孔径激光雷达信号相干性保持方法[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0510002.
- [16] Du J, Li D J, Ma M, et al. Vibration estimation and imaging of airborne synthetic aperture ladar based on interferometry processing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0910003.
- 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.