

# 直视合成孔径激光成像雷达双面反射棱镜旋转发射装置内发射场的空间波前特性研究

马小平<sup>1,2</sup> 孙建锋<sup>1,2</sup> 卢智勇<sup>1,2</sup> 周煜<sup>1,2</sup> 职亚楠<sup>1,2</sup> 许倩<sup>1,2</sup> 刘立人<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光通信与检验技术重点实验室, 上海 201800)

<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 直视合成孔径激光成像雷达(SAIL)中,在发射端主镜的后焦面,两个同轴反向扫描正交偏振发射光束需要具有空间抛物波前相位波前差。采用自差接收探测和相位复数化处理,在轨向产生与目标点横向位置成正比的线性项调制,在顺轨向产生与目标点纵向位置成中心的二次项相位历程,成像原理分别采用傅里叶变换和匹配滤波聚焦成像。提出了一种新的双面反射镜旋转发射结构,实现了同轴正交偏振的双光束,在轨向对远场目标反向扫描且速率相同,同时通过柱面镜控制顺轨向光束相位变化。基于傅里叶光学理论和数学近似,理论分析和公式推导双面反射镜的放置位置对内发射光场分布的影响。建立了物理模型,数值模拟正交偏振双光束在发射端衍射到内发射场物理过程,给出光场强度和相位分布,并且和解析分析结果作对比,给出误差分析和结论。

**关键词** 遥感;雷达;空间抛物面波前相位差;双面反射镜;傅里叶变换;菲涅耳衍射;夫琅禾费衍射

**中图分类号** TN955.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1228001

## Research on Spatial Wave-Front Characteristics of the Inner Optical Fields of the Transmitter with Double-Face Rotatable Reflectors in Down-Looking Synthetic Aperture Imaging Ladar

Ma Xiaoping<sup>1,2</sup> Sun Jianfeng<sup>1,2</sup> Lu Zhiyong<sup>1,2</sup> Zhou Yu<sup>1,2</sup>

Zhi Yanan<sup>1,2</sup> Xu Qian<sup>1,2</sup> Liu Liren<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Space Laser Communication and Testing Technology,

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

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

**Abstract** In down-looking synthetic aperture imaging ladar (SAIL), spatial parabolic wave-front phase differences are requested for two coaxial reverse scanned polarization-orthogonal beams at the rear focal plane of inner optical fields of the transmitter. Using self-heterodyne detection and phase complex-value processing, this kind of SAIL generates a linear phase modulation proportional to the lateral distance in the orthogonal direction, and a parabolic phase history concerted in longitudinal position of the target point in the travel direction, based on the imaging principles of Fourier transformation focus and two-order phase matched filtering, respectively. The novel rotatable structure with double-face reflectors is proposed, in order to make two coaxial polarization-orthogonal beams scan far field target with different directions and the same angular rate in the orthogonal direction. And then, cylinder lens is employed in one of polarization branches to control phase change of the travel direction beam. According to the theory of Fourier optics and mathematical approximation, the effect of the positions of double-face rotatable reflectors on the

**收稿日期**: 2013-07-08; **收到修改稿日期**: 2013-08-06

**基金项目**: 国家自然科学基金(61108069,61275110)

**作者简介**: 马小平(1985—),男,博士研究生,主要从事星地激光通信、激光雷达等方面的研究。

E-mail: maxiaoping@siom.ac.cn

**导师简介**: 孙建锋(1978—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间激光通信、激光雷达等方面的研究。

E-mail: sunjianfeng@163.com

distribution of inner optical field is studied by theoretical analysis and formula derivation. Under physical model constructed, the diffraction of two coaxial polarization-orthogonal beams from laser to inner optical fields is simulated numerically. The comparison results of amplitude and wave-front phase distribution between the discrete simulation and formula analysis are given, and finally, error analysis and conclusions are obtained.

**Key words** remote sensing; ladar; spatial parabolic wave-front phase difference; double-face reflector; Fourier transformation; Fresnel diffraction; Fraunhofer diffraction

**OCIS codes** 280.6730; 280.3420; 230.1150; 070.7345

## 1 引 言

合成孔径激光成像雷达(SAIL)原理源于射频领域微波合成孔径雷达原理,能够在远距离得到厘米量级成像分辨率的唯一的成像观察手段<sup>[1-6]</sup>。但是 SAIL 工作在光频段,由于光波长较短,无法采用微波雷达的技术方法。SAIL 需要在侧视情况下<sup>[7]</sup>工作,即在侧视条件下实施距离向(交轨向)的距离分辨成像,方位向(顺轨向)实施孔径合成的匹配滤波成像,距离分辨的实现需要采用啁啾激光发射,把激光光源分成发射信号和本振光束,接收端采用光学外差接收,那么任何与相位相关联的波面波动和相位干扰,如大气扰动、运动平台、目标散斑<sup>[8]</sup>和激光雷达系统本身相位变化等影响很大,导致雷达性能严重下降。虽然在概念上,可以采用干涉法<sup>[2]</sup>实时测量相位波动,但是实时补偿在实际中很难实现。

中国科学院上海光学精密机械研究所刘立人课题组多年从事合成空间激光成像雷达的理论分析<sup>[7-12]</sup>和实验研究<sup>[5-6]</sup>工作,并且在此基础上,提出了直视 SAIL<sup>[13]</sup>的概念和一般性的原理图。直视 SAIL 采用同轴同心正交偏振光束自差接收,降低了相位变化和扰动的影响,也不需要光学延时线,无需拍频初始相位同步要求,可以使用低质量的光学系统。直视 SAIL 成像原理和侧视 SAIL 成像原理不同,但两者成像算法基本相同。直视 SAIL 没有采用发射孔径自然衍射原理,而是在发射端采用波前变换放大的设计,使得照明光斑很大,以便获得较大光学足趾。所以,直视 SAIL 的本质特点在于:雷达的发射端要产生空间线性相位调制项、空间二次相位历程和照明光斑尺寸,并且要在设计和使用时都具有一定的控制和调整范围。

将基于直视 SAIL 的发射和成像机理,提出一种适用在雷达发射端的全光学结构装置,原理可行,结构简单,易于实现。从傅里叶光学理论出发,利用高等数学近似,推导正交偏振双光束在发射装置内的衍射过程,得到发射主镜后焦面上内发射场的光场、波前相位差分布表达式,重点分析光学透镜

和柱面镜实现两偏振支路衍射光的波前变换过程。进一步建立物理衍射模型,通过计算机数值模拟双光束的衍射过程,得到内发射场的相对光强、相位和波前相位差的分布曲线,并与公式推导的解析解做对比和误差分析。

## 2 直视 SAIL 双面反射棱镜旋转发射结构及其原理

### 2.1 直视 SAIL 工作状态图

直视 SAIL 工作状态示意图如图 1 所示,属于条带模式。飞机运载平台的飞行方向为顺轨方向(Y 方向),与距离向相对应,顺轨的正交方向是交轨向(X 方向),与方位向相对应。机载雷达发射端的光轴方向为雷达的直视方向(Z 方向)。

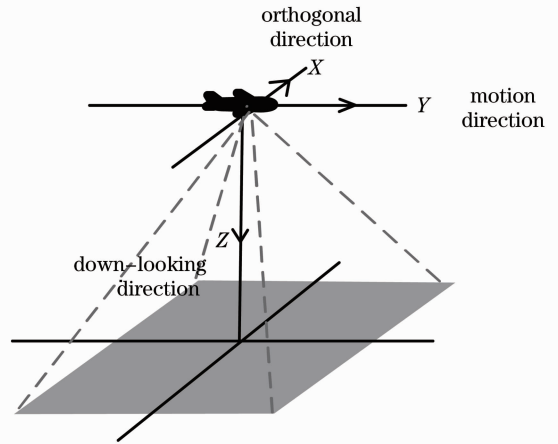


图 1 直视合成孔径激光成像雷达工作状态示意图

Fig. 1 Operation diagram of down-looking SAIL

一个直视 SAIL 的完整系统<sup>[13]</sup>由发射机、接收机和控制计算机组成,本文在雷达系统工作原理的基础上,主要研究发射端结构和实现机理。直视 SAIL 结构原理和成像方法是基于抛物波前差动扫描和自差探测复数化接收,其扫描方式与侧视 SAIL<sup>[14-15]</sup>有所不同。在发射端采用波前变换原理对目标投射两个同轴同心且偏振正交的双光束,使这两个波前的合成相位差为抛物等位线分布。其中,在运载平台运动正交的交轨方向上,主镜内发射

场的两个光束波前具有相同曲率并作相反方向的光学扫描偏转,在快时间轴上产生与目标点交轨方向位置成正比的线性相位调制项;在顺轨方向上,发射主镜内发射场的两个光束的波前具有符号相反的曲率半径并作方向相同的光学扫描偏转,在慢时间轴上产生与目标点顺轨向位置有关的空间二次项相位历程。最终在雷达系统的接收端,分别在交轨向通过傅里叶变换聚焦成像,顺轨向通过共轭相位二次项匹配滤波聚焦成像。

文献[13]中仅仅提出了直视 SAIL 的概念和基本原理,并没有提出发射端的具体实施结构和数值分析模拟。文献[16]描述直视 SAIL 发射结构实例中,位于 H 偏振光路偏转器和 V 偏振光路偏转器

的两块平面反射镜以相同方向、相同速率往复旋转,来实现双光束在交轨向对远场目标面同速反向光学扫描。而在实验中,由于两块反射镜无法采用同一个电机驱动,既没有考虑与时间有关的偏转参数误差,也没有分析双面反射镜的放置位置对内发射光场分布的影响。

## 2.2 双光路扫描的偏转误差对内发射场空间波前相位差的影响

根据文献[13]所述,假设偏振正交两支路的反射镜在光学扫描过程中,与时间有关的偏转参数分别为  $\alpha_1^{\text{in}}$  和  $\alpha_2^{\text{in}}$ ,令偏转误差表征为  $\Delta\alpha$ ,即  $\alpha_2^{\text{in}} = \alpha_1^{\text{in}} + \Delta\alpha$ 。那么,内发射场光场的空间波前相位差为

$$\Delta\varphi^{\text{in}}(x_{\text{in}}, y_{\text{in}}) = -\frac{\pi}{\lambda} \left\{ \frac{x_{\text{in}} \left( 1 + \frac{2\Delta\alpha}{\alpha_1^{\text{in}}} \right) \frac{\alpha_1^{\text{in}} t_f}{2} + \left[ 2 \frac{\Delta\alpha}{\alpha_1^{\text{in}}} + \left( \frac{\Delta\alpha}{\alpha_1^{\text{in}}} \right)^2 \right] \frac{(\alpha_1^{\text{in}} t_f)^2}{2}}{R_1^{\text{in}}/2} \right\} + \frac{\pi}{\lambda R_3^{\text{in}}} y_{\text{in}}^2, \quad (1)$$

式中  $\frac{1}{R_3^{\text{in}}} = \frac{1}{R_1^{\text{in}}} + \frac{1}{R_2^{\text{in}}}$ ,  $R_1^{\text{in}}$  和  $R_2^{\text{in}}$  分别表示内发射场的等效二次项曲率半径,  $t_f$  为扫描时间。从(1)式可以看出,由于存在偏转误差因子  $\frac{\Delta\alpha}{\alpha_1^{\text{in}}}$ ,内发射光场的空间波前相位差在交轨向引入包含  $\frac{\Delta\alpha}{\alpha_1^{\text{in}}}$  和  $(\alpha_1^{\text{in}} t_f)^2$  的时变因子,最终的回波信号在交轨向,产生与目标点横向  $x_p$  位置为斜率比例因子的线性相位项和包含  $t_f^2$  的时变常数相位项调制,通过一维傅里叶变换聚焦将产生目标点横向位置  $x_p$  的二次项相位,并不是目标点横向坐标  $x_p$  的点扩展函数,从而引入成像失真。本文提出的直视 SAIL 双面反射棱镜旋转发射装置结构,两偏振支路共用一块双面反射棱镜,保证  $\Delta\alpha=0$ ,在接收端经过数字信息图像处理,最终得到目标点的扩展函数,避免因为双光路扫描速率不同引起成像失真。

## 2.3 直视 SAIL 双面反射棱镜旋转发射装置

该直视 SAIL 双面反射棱镜旋转发射装置如图 2 所示,采用非光纤的全光结构,由激光光源、偏振分束器(PBS)、反射镜、双面反射棱镜、偏振合束器(PBS)、柱面镜、发射目镜和发射主镜组成,具体的光束传输如图 2 所示。激发发射光束经过 PBS1,分为两个等光强、偏振正交的水平偏振支路(H 偏振支路)光束和垂直偏振支路(V 偏振支路)光束。H

偏振支路光束经过双面反射棱镜、平面反射镜到 PBS2;V 偏振支路光束经过双面反射棱镜、平面反射镜,再经过波前变换柱面镜到 PBS2。PBS2 将 H 偏振支路光束和 V 偏振支路光束组合为同轴同心、偏振正交、具有抛物等相位波差的光束,经过发射望远镜目镜和发射望远镜主镜后,投射到远场目标面。图示中,标定双面反射棱镜和发射目镜之间距离  $d$ ,V 偏振支路的柱面镜与发射目镜之间的距离为  $f_2$ ,发射目镜和望远镜主镜(焦距  $f_1$ )的离焦距离  $R^{\text{in}}$ 。其中,柱面镜的焦距为  $f_0$ ,发射后目镜的焦距为  $f_2$ 。

在发射装置中,V 偏振支路波前变换柱面镜、PBS2 和发射望远镜目镜,构成了同轴同心双光束的波前变换结构,使得平行入射光束变换为偏振正交且具有空间抛物波前相位差分布的偏振正交双光束,具体变换原理如图 3 所示。

其中,在主镜内发射场的交轨向产生具有相同曲率并作相反方向扫描的双光束波前,在顺轨向产生具有符号相反曲率半径并作相同方向扫描双光束波前。需要注意的是,由于双面反射棱镜位于发射目镜前焦面的前端,  $d > f_2$ 。在衍射过程中,由于双面反射镜偏转并不位于目镜前焦面处,离焦距离  $d - f_2$  将改变主镜后焦面光场相位分布和光斑移动的位移,故从理论上分析离焦距离  $d - f_2$  对内发射光场以及接收端成像的影响。

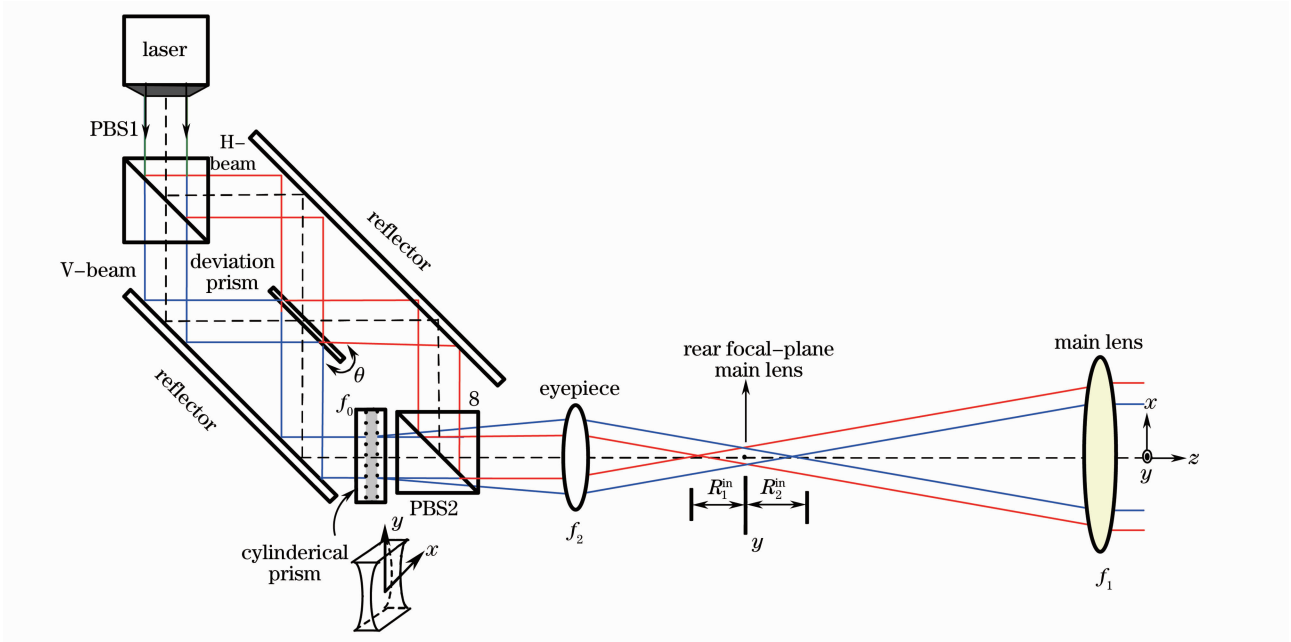


图 2 直视 SAIL 双面反射棱镜旋转发射结构示意图

Fig. 2 Double-side reflection configuration of single-prism rotation at the transmitting terminal of down-looking SAIL

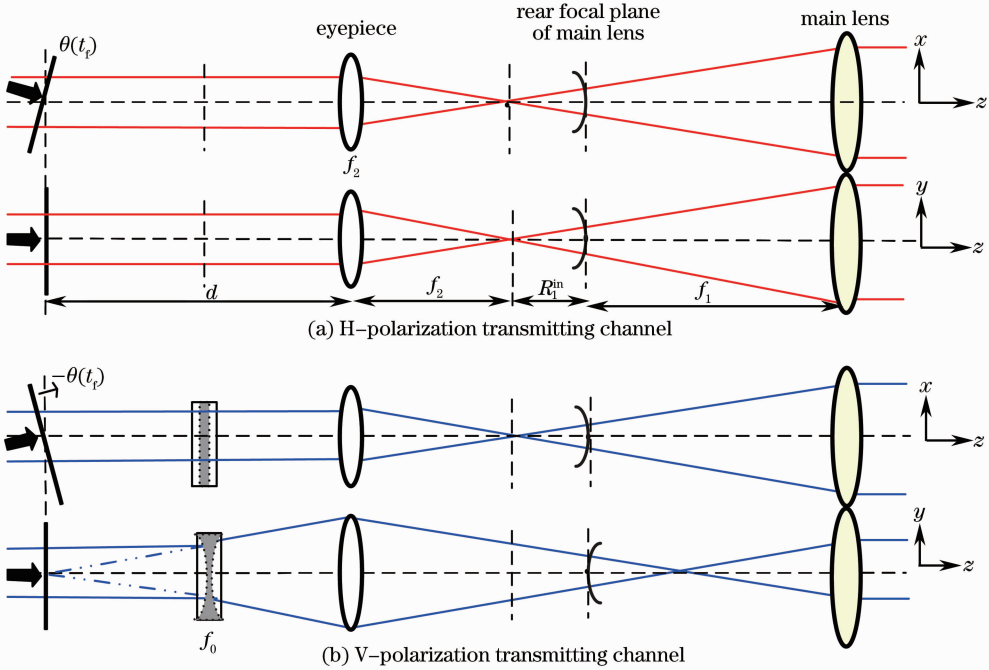


图 3 正交偏振同轴双光束波前变换原理图

Fig. 3 Wavefront transformation diagram for two-coaxial polarization-orthogonal beams

### 2.4 双面反射棱镜偏转扫描位置 $d$ 对空间波前相位差影响的理论分析

假设激光光源受到矩形孔径调制的平面波，孔径尺寸为  $D_x \times D_y$ ，光场分布函数为  $\text{rect}\left(\frac{x}{D_x}, \frac{y}{D_y}\right)$ 。经过双面反射镜后，令 H 偏振支路和 V 偏振支路光场分布为  $u_{\text{H1}}(x_1, y_1) = \text{rect}\left(\frac{x_1}{D_x}, \frac{y_1}{D_y}\right) \exp(jk\theta x_1)$  和

$u_{\text{V1}}(x_1, y_1) = \text{rect}\left(\frac{x_1}{D_x}, \frac{y_1}{D_y}\right) \exp(-jk\theta x_1)$ ，其中偏振角度  $\theta = \theta(t_f)$ 。如果令  $\alpha^{\text{in}}$  为双面反射偏转镜与时间有关的偏转参数，其扫描宽度为  $T_f$ ，扫描时间  $t_f$  的范围  $(-T_f/2, T_f/2)$ ，那么  $\theta(t_f) = \frac{\alpha^{\text{in}} t_f}{f_2}$ 。激光波长为  $\lambda$ ，波失大小  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。

首先考虑 H 偏振支路传播光束的波前变换。令发射目镜后焦面光场分布为  $u_H(x_2, y_2)$ , 发射目镜近似无穷大。先考虑交轨向 (X 方向) 如图 3(a) 所示, 根据傅里叶光学理论<sup>[17]</sup>可得

$$u_{H2}(x_2, y_2) = \frac{1}{j\lambda f_2} \exp\left[j\pi \frac{1-d/f_2}{\lambda f_2} (x_2^2 + y_2^2)\right] \cdot \mathcal{F}[u_{H1}(x_1, y_1)], \quad (2)$$

式中  $\mathcal{F}[\cdot]$  表征傅里叶变换, 进一步可得

$$u_{H2}(x_2, y_2) = \frac{D_x D_y}{j\lambda f_2} \exp\left[j\pi \frac{1-d/f_2}{\lambda f_2} (x_2^2 + y_2^2)\right] \cdot \text{sinc}\left[D_x \frac{x_2 - \theta f_2}{\lambda f_2}, D_y \frac{y_2}{\lambda f_2}\right], \quad (3)$$

(3) 式乘积关系可以表明, 平行光束入射在目镜后焦面形成的聚焦光斑尺寸为  $2 \frac{\lambda f_2}{D_x} \times 2 \frac{\lambda f_2}{D_y}$ 。在该焦平面的交轨方向, 光斑中心随着双面反射单棱镜偏转角度  $\theta = \theta(t_i)$  的变化而移动距离  $x_c = \theta f_2$ 。光斑的尺度在微米量级, 相对入射平行光束口径  $D_x \times D_x$  较小, 可以只考虑对光斑移动中心  $(\theta f_2, 0)$  附近区域内的波前作相位变换, 那么交轨向和顺轨向分别对  $x_c = \theta f_2$  和  $y_c = 0$  附近区域内相位因子作泰勒级数近似展开, 并进行坐标变换  $u = x_2 - x_c, v = y_2$ , 即

$$u_{H2}(u, v) = \frac{D_x D_y}{j\lambda f_2} \exp\left[j\pi \frac{1-d/f_2}{\lambda f_2} (\theta f_2)^2\right] \exp\left[j\pi \frac{1-d/f_2}{\lambda f_2} 2\theta f_2 u\right] \text{sinc}\left(\frac{D_x}{\lambda f_2} u, \frac{D_y}{\lambda f_2} v\right). \quad (4)$$

进一步考虑  $\left\{R_1^{\text{in}} / \left(2 \frac{\lambda f_2}{D_x}\right), R_1^{\text{in}} / \left(2 \frac{\lambda f_2}{D_y}\right)\right\} \gg 1$ , 即聚焦光斑从发射目镜后焦面到主镜后焦面距离  $R_1^{\text{in}}$  相对光斑尺寸近似无穷大, 可以用夫琅禾费衍射来分析衍射过程, 得到:  $e_H^{\text{in}}(\alpha, \beta) = \frac{\exp(jkR_1^{\text{in}})}{j\lambda R_1^{\text{in}}} \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda R_1^{\text{in}}} (\alpha^2 + \beta^2)\right] \mathcal{F}[u_{H2}(u, v)]$ , 进一步通过坐标还原  $\alpha = x_{\text{in}} - x_c, \beta = y_{\text{in}}$ , 且令  $\phi = (1-d/f_2)R_1^{\text{in}}$ , 为简化表达, 式中复常数记作  $K_H$ , 最终得到 H 偏振支路内发射场光场为

$$e_H^{\text{in}}(x_{\text{in}}, y_{\text{in}}) = K_H \exp\left[j \frac{\pi(f_2 - d)}{\lambda} \theta^2\right] \exp\left\{j \frac{\pi}{\lambda R_1^{\text{in}}} [(x_{\text{in}} - \alpha^{\text{in}} t_i) 2 + y_{\text{in}}^2]\right\} \cdot \text{rect}\left[\frac{f_2}{R_1^{\text{in}} D_x} (x_{\text{in}} - \alpha^{\text{in}} t_i - \phi \theta), \frac{f_2}{R_1^{\text{in}} D_y} y_{\text{in}}\right]. \quad (5)$$

V 偏振支路发射目镜前焦面的柱面镜对传播光束进行波前变换, 分析有所不同。激光光源经过距离  $d - f_2$  的非涅耳衍射后, 衍射到柱面镜。该柱面镜在 Y-Z 方向上的焦距  $f_0 = \frac{f_2 f_2}{R_1^{\text{in}} + R_2^{\text{in}}}$ , 相位分布函数为  $t_0 = \exp\left(j \frac{\pi}{\lambda f_0} y^2\right)$ 。则发射目镜后焦面光场分布  $u_{V2}(x_2, y_2)$  为

$$u_{V2}(x_2, y_2) = \frac{\exp[jk(d - f_2)]}{j\lambda f_2 \cdot j\lambda(d - f_2)} \mathcal{F}\left\{u_1(x_1, y_1) \otimes \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda(d - f_2)} (x^2 + y^2)\right] \cdot t_0\right\}, \quad (6)$$

简化表达, 式中振幅和传播因子为复常数可忽略, 记作  $K_V$ , 进一步可得

$$u_{V2}(x_2, y_2) = K_V \text{sinc}\left(D_x \frac{x_2 + \theta f_2}{\lambda f_2}, D_y \frac{y_2}{\lambda f_2}\right) \exp\left\{-j\pi\lambda(d - f_2) \left[\left(\frac{x_2}{\lambda f_2}\right)^2 + \left(\frac{y_2}{\lambda f_2}\right)^2\right]\right\} \otimes \exp\left[-j\pi\lambda f_0 \left(\frac{y_2}{\lambda f_2}\right)^2\right], \quad (7)$$

同样的分析, 交轨向和顺轨向分别对  $x_c = -\theta f_2$  和  $y_c = 0$  附近区域内泰勒级数近似展开, 并进行坐标变换  $u = x_2 - x_c, v = y_2$ , 得

$$u_{V2}(x_2, y_2) = K_V \exp\left[j\pi\lambda(f_2 - d) \frac{x_c^2}{(\lambda f_2)^2}\right] \text{sinc}\left(D \frac{u_2}{\lambda f_2}, D \frac{v_2}{\lambda f_2}\right) \exp\left\{j\pi\lambda(f_2 - d) \left[\frac{-2x_c u_2}{(\lambda f_2)^2}\right]\right\} \otimes \exp\left[-j\pi\lambda f_0 \left(\frac{v_2}{\lambda f_2}\right)^2\right], \quad (8)$$

(8) 式可以看出, 在距离向 (Y 方向) 存在卷积关系, 聚焦光斑具有一定宽度, 不满足夫琅禾费近似条件, 需要用非涅耳衍射考虑该方向上的衍射过程:

$$e_V^{\text{in}}(\alpha, \beta) = \frac{\exp(jkR_1^{\text{in}})}{j\lambda R_1^{\text{in}}} \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda R_1^{\text{in}}} (\alpha^2 + \beta^2)\right] \mathcal{F}\left[u_{H2}(u, v) \exp\left(j \frac{\pi}{\lambda R_1^{\text{in}}} v^2\right)\right], \quad (9)$$

坐标还原  $\alpha = x_{in} - x_c, \beta = y_{in}$  且令  $\phi = (1 - d/f_2)R_1^{in}$ , 则 V 偏振支路内发射场光场为

$$e_V^{in}(x_{in}, y_{in}) = K_V \exp\left[j \frac{\pi(f_2 - d)}{\lambda} \theta^2\right] \exp\left\{j \frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{(x_{in} + \alpha^{in} t_t)^2}{R_1^{in}} - \frac{y_{in}^2}{R_2^{in}}\right]\right\} \cdot \text{rect}\left[\frac{f_2}{D_x R_1^{in}}(x_{in} + \alpha^{in} t_t + \phi\theta), \frac{f_2}{D_y R_1^{in}} y_{in}\right]. \quad (10)$$

最终得到, 直视 SAIL 单棱镜双面反射发射装置中 H 偏振支路和 V 偏振支路内发射后光场分布, 两个内发射波前的空间相位为抛物面函数  $\Delta\varphi^{in}(x_{in}, y_{in})$ , 满足直视 SAIL 对发射端内发射光场波前相位差的要求, 即

$$\Delta\varphi^{in}(x_{in}, y_{in}) = -\frac{2\pi}{\lambda R_1^{in}/2} \theta f_2 x_{in} + \frac{\pi}{\lambda R_3^{in}} y_{in}^2. \quad (11)$$

由此可见, 由于双面反射镜的偏转扫描位置  $d$ , 内发射场产生相位因子为  $\frac{\pi(f_2 - d)}{\lambda} \theta^2$  的相位延迟, 但是不改变内发射光场面的相位分布。光斑在扫描

过程中, 在两支路的距离向上, 偏移量由原来的  $\pm \alpha^{in} t_t$  变为  $\pm (\alpha^{in} t_t + \phi\theta)$ 。同时由(11)式可以看到, 内发射光场的空间波前相位差呈现抛物等位线分布, 满足直视 SAIL 对发射端内发生光场的要求。

两个内发射光场由焦距为  $f_1$  的发射主镜, 通过夫琅禾费衍射到远场目标面, 目标中心距离为  $Z$ , 则作用距离产生的放大倍数为  $M = Z/f_1$ 。若分析一个目标点  $(x_p, y_p)$  在接收天线面上的回波接收信号, 回波过程同样用夫琅禾费衍射分析, 分别得到光场为

$$\begin{cases} e_H^{TR}(x_p, y_p) = K_{TR} W\left(\frac{x_p}{M}, \frac{y_p}{M}\right) \text{rect}\left\{\frac{f_2}{D_x R_1} \left(x_{in} - \alpha t_t - \frac{\phi}{f_2} \alpha t_t\right), \frac{f_2}{D_y R_1} y_{in}\right\} \exp\left\{j \frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{(x_p - \alpha t_t)^2}{R_1} + \frac{(y_p - \beta t_s)^2}{R_1}\right]\right\} \times \\ \exp\left\{j \frac{\pi}{\lambda Z} [x_p^2 + (y_p - \beta t_s)^2]\right\} \exp\left\{j \frac{\pi}{\lambda Z} [(x - x_p)^2 + [y - (y_p - \beta t_s)]^2]\right\} \exp\left[j \Delta\varphi_H + j \frac{\pi(f_2 - d)}{\lambda} \theta^2\right] \\ e_V^{TR}(x_p, y_p) = K_{TR} W\left(\frac{x_p}{M}, \frac{y_p}{M}\right) \text{rect}\left[\frac{f_2}{D_x R_1} \left(x_{in} + \alpha t_t + \frac{\phi}{f_2} \alpha t_t\right), \frac{f_2}{D_y R_1} y_{in}\right] \exp\left\{j \frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{(x_p + \alpha t_t)^2}{R_1} - \frac{(y_p - \beta t_s)^2}{R_2}\right]\right\} \times \\ \exp\left\{j \frac{\pi}{\lambda Z} [x_p^2 + (y_p - \beta t_s)^2]\right\} \exp\left\{j \frac{\pi}{\lambda Z} [(x - x_p)^2 + [y - (y_p - \beta t_s)]^2]\right\} \exp\left[j \Delta\varphi_V + j \frac{\pi(f_2 - d)}{\lambda} \theta^2\right] \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $K_{TR}$  为复常数,  $R_1 = M^2 R_1^{in}, R_2 = M^2 R_2^{in}, \alpha = M \alpha_{in}$ , 且  $1/R_3 = 1/R_1 + 1/R_2$ ;  $t_s$  为慢时间;  $\beta$  是慢时间顺轨向的照明光斑中心位置时间参数。目标点回波产生的相位差可以进一步表达为

$$\Delta\varphi^{TR}(x_p, y_p; \alpha t_t, \beta t_s) = \frac{\pi}{\lambda} \left[-\frac{2x_p \alpha t_t}{R_1/2} + \frac{(y_p - \beta t_s)^2}{R_3}\right] + \Delta\varphi_H - \Delta\varphi_V, \quad (12)$$

式中  $\Delta\varphi_H, \Delta\varphi_V$  分别是 H 偏振支路和 V 偏振支路与相位有关的变化和干扰, 同光轴条件下有  $\Delta\varphi_H - \Delta\varphi_V \approx 0$ , 即有自动消除相位变化和干扰的能力。可以看到, 回波相位差随时间变化呈现抛物线变化特征, 快时间上是与目标点横向位置成正比的线性相位调制项, 慢时间上是目标纵向位置为中心的相位二次项。回波信号进入直视 SAIL 的接收端装置, 通过  $2 \times 90^\circ$  光学桥接器<sup>[18]</sup> 的同相通道平衡探测器、 $90^\circ$  相移通道平衡探测器和复数化处理器后, 所得数据由数字图像处理成像, 即在交轨向进行一维傅里叶变换聚焦成像, 顺轨向进行二次项相位历程的共轭二次项相位匹配滤波聚焦成像。令  $S_x(x)$  和  $S_y(y)$  分别为交轨向和顺轨向相干点扩展函数, 最终, 通过离散化计算处理, 一个二维目标点所有点的成像为

$$I(x, y) = \sum_P K_P S_x(x) \delta(x + x_p) S_y(y) \delta(y - y_p). \quad (14)$$

式中  $K_P$  为常数。

由此可知, 直视 SAIL 双面反射棱镜旋转发射装置的特点在于不需要在内发射场单独放置不同曲率半径的柱面镜。可以按照实验要求, 通过设定目镜后焦面、主镜后焦面和内发射场之间的距离  $R_1^{in}, R_2^{in}$ , 来调节内发射光场像散波面的曲率半径, 装置简单, 结构灵活多变, 易于控制。一方面, 使用一块双面反射棱镜保证双光束扫描速率绝对相等、方向相反, 避免偏转误差  $\Delta\alpha$  引入的成像失真; 另一方面, 通过合理地控制双面反射棱镜的离焦距离  $d - f_2$  以及通过双面反射棱镜的旋转引起的光场相移和发射目镜的傅里叶变换作用, 来改变内发射场光

斑在交轨向的位移,即偏转位置  $d$  不改变内发射光场的相位分布和空间波前相位差,只引入与离焦距离  $d-f_2$  相关的光斑偏移量,满足直视 SAIL 对发射端的要求,实现对远场目标的光学扫描。

### 3 数值模拟仿真及解析结果分析

#### 3.1 数值模拟仿真模型和参数设置

根据直视 SAIL 发射端的装置结构(见图 2)和双光束波前变换原理(见图 3),作离散的数值仿真分析,Matlab 软件模拟光束在发射端中的衍射传播以及在主镜后焦面上光场分布。

雷达发射光束在发射端装置中衍射属于近场的菲涅耳衍射。初始入射光束近似看作矩形光阑调制

的平面波,表示为  $u_1(x,y) = \text{rect}\left(\frac{x}{D_x}, \frac{y}{D_y}\right)$ 。圆形发射目镜口径为  $D_2$ ,对光场相位调制表达为

$$t_{\text{eye}}(x,y) = \exp\left[-j \frac{\pi}{\lambda f_2}(x^2 + y^2)\right] \text{circ}\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{D_2/2}\right),$$

在 V 偏振支路柱面镜尺寸为  $D_0 \times D_0$ ,调制函数为

$$t_0(x,y) = \exp\left(j \frac{\pi}{\lambda f_0} y^2\right) \text{rect}\left(\frac{x}{D_0}, \frac{y}{D_0}\right), \quad (15)$$

式中  $\text{circ}\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{D_2/2}\right)$  为圆域函数表达式。那么,分别设在 H 偏振支路和 V 偏振支路的衍射传输,离散分析内发射光场模型为

$$\begin{cases} e_{\text{H}}^{\text{in}}(x,y) = \{[u_1(x,y) \otimes h(x,y,d)] \cdot t_{\text{eye}}(x,y)\} \otimes h(x,y,f_2 + R_1^{\text{in}}), \\ e_{\text{V}}^{\text{in}}(x,y) = \{[u_1(x,y) \otimes h(x,y,d-f_2)] \cdot t_0(x,y)\} \otimes h(x,y,f_2) \cdot t_{\text{eye}}(x,y) \otimes h(x,y,f_2 + R_1^{\text{in}}), \end{cases} \quad (16)$$

式中  $h(x,y,z) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda z}(x^2 + y^2)\right]$  是菲涅耳衍射因子,表示发射光束在距离  $z$  上的菲涅耳衍射。根据采样要求,设定离散采样间隔。基于傅里叶光学理论,根据实验装置结构和上述数值仿真模型,设定模拟参数,具体值如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Parameter setting of numerical simulation

Item	Value
Wavelength $\lambda$ /m	$0.533 \times 10^{-6}$
Size of incident beam $D_{1x} \times D_{1y}$ /m <sup>2</sup>	$0.012 \times 0.006$
Distance from deflector to eyepiece $d$ /m	0.240
Focal length of cylinder lens $f_0$ /m	0.120
Size of cylinder lens $D_0 \times D_0$ /m <sup>2</sup>	$0.08 \times 0.08$
Focal length of eyepiece lens $f_2$ /m	0.240
Diameter of eyepiece $D_2$ /m	0.08
Focal length of main lens $f_1$ /m	0.600
Size of inner optical field $D_{\text{in}} \times D_{\text{in}}$ /m <sup>2</sup>	$0.03 \times 0.03$
Defocus of eyepiece and main lens $R_1^{\text{in}}$ /m	0.06

此外,双面反射镜的偏转扫描角度  $\theta(t_i)$  随时间变化,给定其交轨向扫描范围是  $[-5^\circ, 5^\circ]$ ,取其最大扫描角度值作模拟参数  $\theta_c = 5^\circ$ 。

#### 3.2 衍射过程数值模拟结果

通过 Matlab 软件数值模拟,得到在直视 SAIL 发射端的 H 偏振支路和 V 偏振支路内发射光场分布,该数值模拟结果如图 4 和图 5 所示。

图 4 和图 5 可以看出,内发射场光斑尺寸与入

射光斑尺寸成一定比例,光场强度一致,整个光场相位呈现规则的二次抛物相位分布,仅仅在光束口径范围内有所变化。其中在交轨向,随着双面反射镜的偏转,在两个偏振支路的光斑朝相反方向移动[见图 4(a)和 4(c),在 H 偏振支路正向移动,V 偏振支路负向移动];在顺轨向,光斑位于近轴处,不产生偏移[见图 4(b)和 4(d)]。通过图 5(a)和 5(c)得到,在交轨向由于双面反射棱镜作用,相位分布产生反向平移,并且在光斑范围内存在相反的相位起伏变化。同样图 5(b)和 5(d)得到,在顺轨向,H 偏振支路仅仅受到发射目镜聚焦的调制作用,V 偏振支路受到柱面镜二次项相位和发射目镜聚焦的共同调制作用,使 V 偏振支路和 H 偏振支路在近轴区域的波前曲率半径方向反向。进一步的空间波前差相位分布如图 6 所示,同样在旁轴区域,受到柱面镜和发射目镜的共同调制的作用,内发射场波前相位差在交轨向产生与横坐标  $x_{\text{in}}$  呈线性相位调制,在顺轨向产生与纵坐标  $y_{\text{in}}$  二次项相位历程。这一模拟结果也验证了,双面反射棱镜的偏转扫描位置  $d$  不影响内发射场波前相位差分布,该双面反射棱镜旋转发射装置满足直视 SAIL 对发射端光束和波面的要求。

#### 3.3 数值模拟结果和解析分析结果对比分析

基于傅里叶光学理论分析,在光束口径范围内数学近似推导得到的解析解,以及通过计算机离散分析得到的数值解,其对比结果如图 7 和图 8 所示,

分别表示在光束口径范围内, H 偏振支路和 V 偏振支路内发射场分别在方向向和距离向的相对光强和

相位对比图。

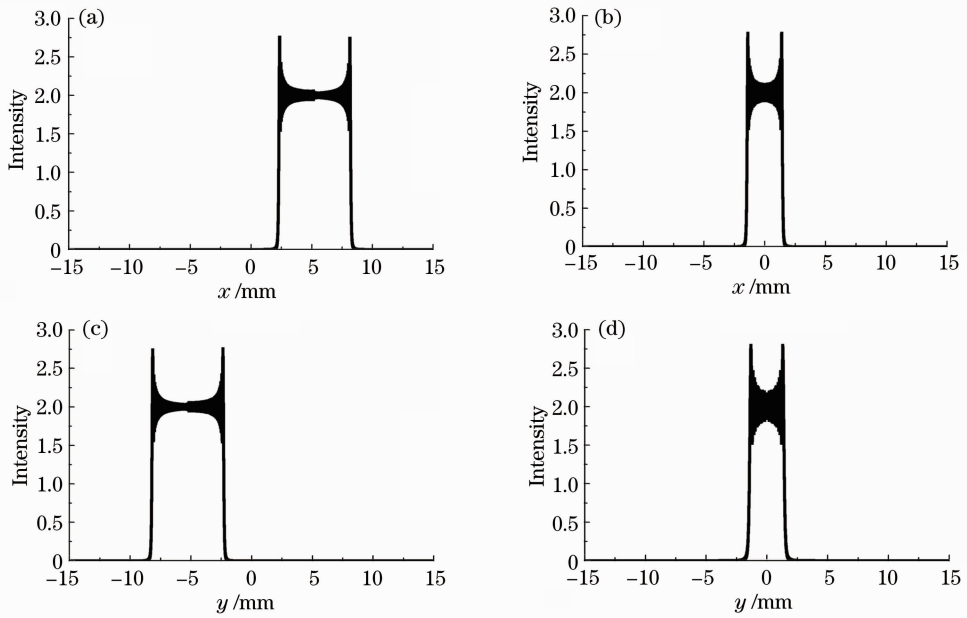


图 4 不同支路的内发射光场强度分布。(a) H 偏振支路的交轨向；(b) H 偏振支路的顺轨向；(c) V 偏振支路的交轨向；(d) V 偏振支路的顺轨向

Fig. 4 Intensity distributions of the inner optical fields. (a) In the orthogonal direction of H-polarization channel; (b) in the travel direction of H-polarization channel; (c) in the orthogonal direction of V-polarization channel; (d) in the travel direction of V-polarization channel

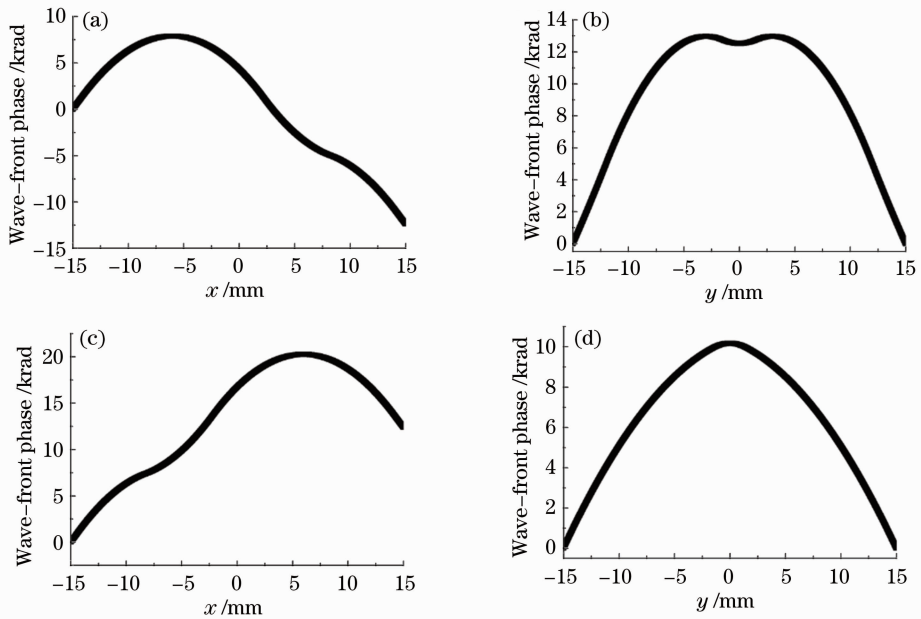


图 5 不同支路的内发射光场相位分布。(a) H 偏振支路的交轨向；(b) H 偏振支路的顺轨向；(c) V 偏振支路的交轨向；(d) V 偏振支路的顺轨向

Fig. 5 Phase distributions of the inner optical fields. (a) In the orthogonal direction of H-polarization channel; (b) in the travel direction of H-polarization channel; (c) in the orthogonal direction of V-polarization channel; (d) in the travel direction of V-polarization channel



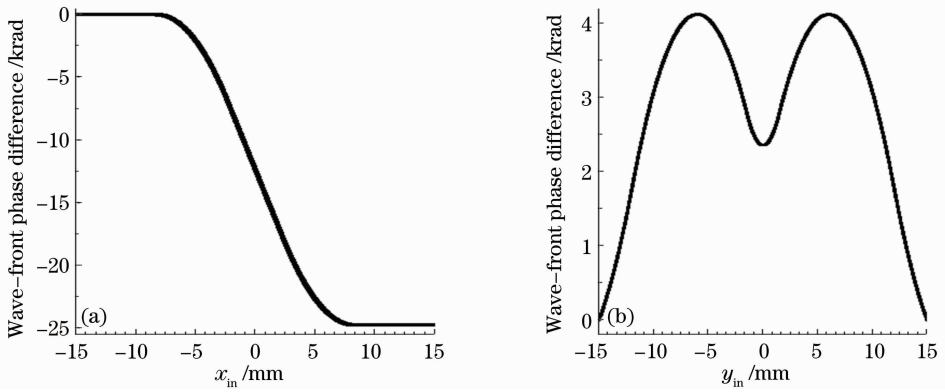


图 6 内发射光场空间波前差相位分布。(a) 交轨向波前相位差；(b) 顺轨向波前相位差

Fig. 6 Phase difference distributions of the inner optical fields. (a) In the orthogonal direction; (b) in the travel direction

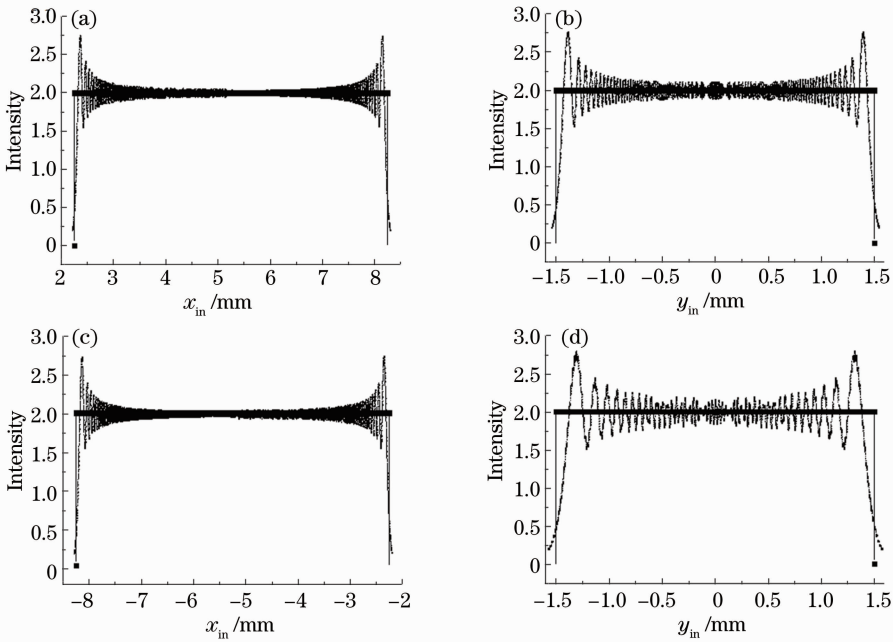


图 7 数值模拟情况(虚线)和解析分析(实线)情况下,内发射光场强度分布对比。(a) H 偏振支路的交轨向；

(b) H 偏振支路的顺轨向；(c) V 偏振支路的交轨向；(d) V 偏振支路的顺轨向

Fig. 7 Intensity distributions of the inner optical fields based on numerical simulation (dash line) and analytical model (solid line). (a) In the orthogonal direction of H-polarization channel; (b) in the travel direction of H-polarization channel;

(c) in the orthogonal direction of V-polarization channel; (d) in the travel direction of V-polarization channel

图 7 和图 8 可以看出,发射后主镜后焦面内发射场光场随着偏转角度的不同,在交轨向上光场中心的偏移量  $x_L$  分别满足  $\pm(f_2\theta + \phi\theta)$ 。其中,图 7 表明其强度的数值模拟的值分布基本以解析分析值为中心而分布,图 8 得到该光场相位数值模拟的值分布情况和解析分析情况基本一致,图 8(b)和(d)显示的两种不同情况下距离向都满足二次项抛物相位分布,但是图 8(a)和(c)的相位分布有所不同,由于光场偏转使得顺轨向光场相位分布不完全按照二次项相位分布,这个和文献[13]的阐述的基本原理有所区别,具体分布如图示。进一步观察的波前相

位差分布情况,如图 9 所示。

图 9 为其波前相位差分布情况,其中图 9(a),在交轨向光斑口径  $[-3, 3]$  范围内,数值模拟情况波前相位差  $\Delta\varphi_s(x_{in}) = 13923.34 \text{ rad}$ ,解析分析情况下波前相位差  $\Delta\varphi_a(x_{in}) = 24751.89 \text{ rad}$ ,但是相位差都呈线性变化趋势,并不影响最终回波信号在经过图像处理器处理时,产生与目标横向左边位置呈正比的线性相位项调制,通过傅里叶变换聚焦成像,最终得到目标点的横向坐标信息;同时,在顺轨向的光斑口径  $[-1.5, 1.5]$  范围内,数值模拟情况下波前相位差是  $\Delta\varphi_s(y_{in}) = 442.071 \text{ rad}$ ,解析分析情况下

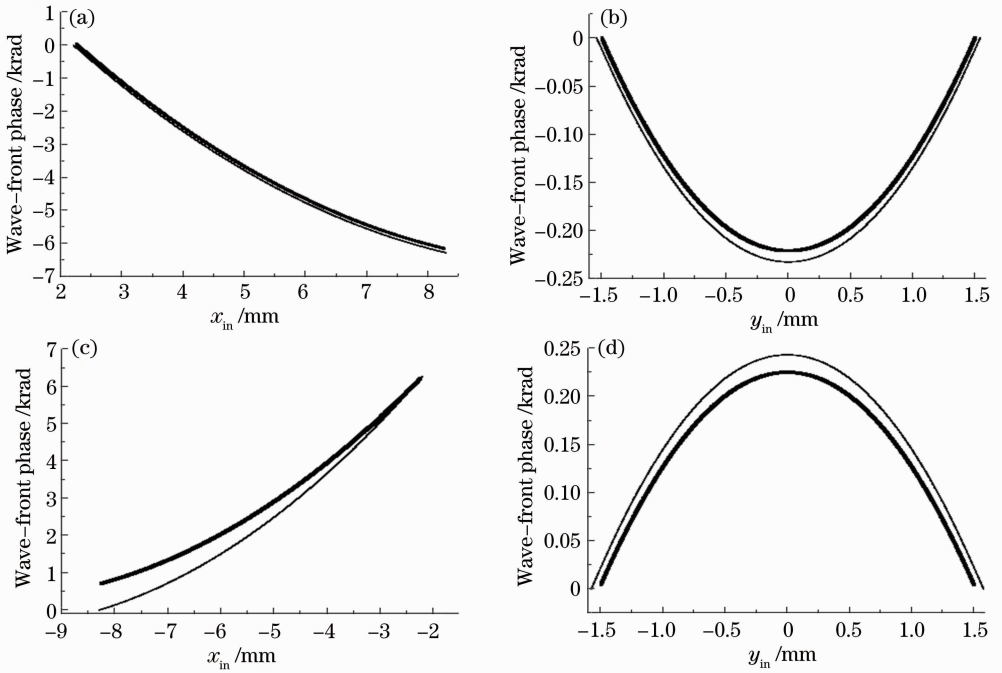


图 8 数值模拟情况(虚线)和解析分析(实线)情况下,内发射光场相位分布对比。(a) H 偏振支路的交轨向; (b) H 偏振支路的顺轨向; (c) V 偏振支路的交轨向; (d) V 偏振支路的顺轨向

Fig. 8 Phase distributions of the inner optical fields based on numerical simulation (dash line) and analytical model (solid line). (a) In the orthogonal direction of H-polarization channel; (b) in the travel direction of H-polarization channel; (c) in the orthogonal direction of V-polarization channel; (d) in the travel direction of V-polarization channel

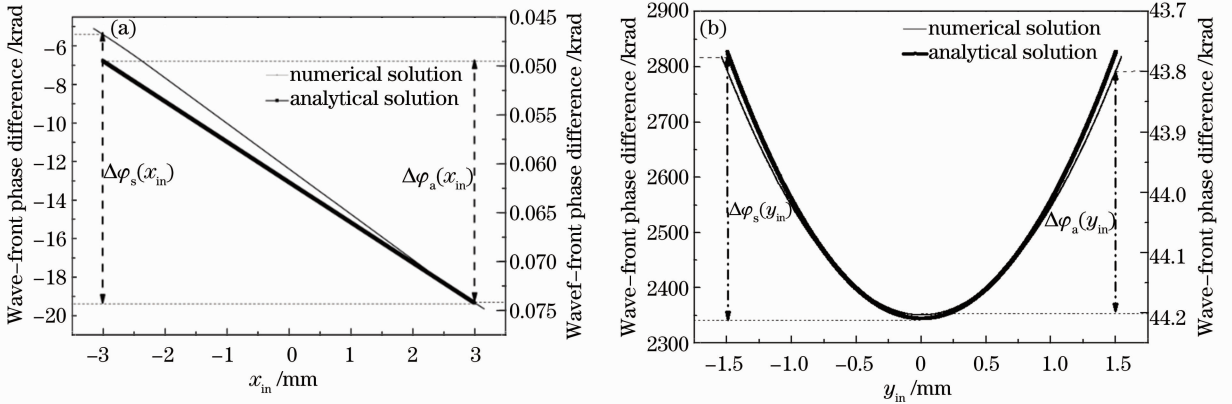


图 9 内发射光场空间波前相位差分布对比。(a)数值模拟; (b)解析分析

Fig. 9 Phase distributions of spatial wave-front phase differences of the inner optical fields based on numerical simulation and analytical model. (a) In the orthogonal direction; (b) in the travel direction

波前相位差  $\Delta\varphi_a(y_{in})=442.122$  rad,该方向的波前相位差呈二次项相位分布,波差值相等,变化的起伏基本一致,满足回波信号经过图像处理器处理时,进行以目标纵向坐标位置为中心的可控二次项相位历程,通过共轭二次项相位匹配滤波聚焦成像。

#### 4 误差分析

给定一个具体的偏振角度  $\theta$  情况下所做的数值模拟,实验中该偏转角度是一个时变量  $\theta=\theta(t)$ 。以

上的理论分析和内发射场光场数值模拟的对比表明,基于傅里叶光学理论的解析分析符合光束在直视 SAIL 双面反射镜旋转发射结构的衍射过程。两种不同情况下,内发射场光场的相位分布和空间相位波前差的变化趋势基本一致,但是在数值上有所差别,有必要进一步作误差分析说明。

理论解析分析以傅里叶光学理论为基础,由于傅里叶光学理论要求光束传播的傍轴条件,并且经过合理的数学近似,比如将发射目镜看作无限大,这

样在有限区域即光斑范围内的光束衍射分析更能反映实际光束衍射的物理过程,如图7~9所示。模拟依据的理论模型基于近场的菲涅耳衍射,在模拟过程中,采样间隔和衍射距离对两个接收面的解相位有直接的影响。数值模拟过程中,在光束口径范围外的相位分布可能会存在解包络不完整,不能准确地反映相位分布,但是只考虑傍轴或者光束范围内的相位分布情况和空间相位波前差,则不影响直视SAIL成像的基本原理和成像。

## 5 结 论

重点介绍整个系统的发射机理,提出了一种新的直视SAIL双面反射棱镜旋转发射结构,避免了由于反射镜偏转误差因子 $\frac{\Delta\alpha}{\alpha_1}$ 和时变因子 $(\alpha_1 t_f)^2$ 带来的成像失真,实现同轴正交偏振的双光束,在轨道对远场目标反向扫描光斑的曲率半径相同、扫描速率相同,顺轨向对远场目标同向扫描光斑的曲率半径相反、速率相同。优势在于可以根据不同的情况,设定不同的离焦距离 $R_1^{\text{in}}$ 和 $R_2^{\text{in}}$ 来改变内发射光场像散波面曲率,不同的双面反射棱镜偏转位置 $d$ 来改变内发射场光斑的位移。

根据该直视SAIL双面反射棱镜发射装置,基于傅里叶光学理论和一定的数学近似,推导了内发射场光场表达式,进一步完善该直视SAIL双面反射棱镜旋转发射结构的光学理论。双面反射镜的离焦位置 $d$ 对内发射场光场的相位产生延迟,但是不影响其空间波前相位差。建立物理模型,数值模拟正交偏振双光束在发射端衍射到发射主镜后焦面物理过程,给出光场强度、相位以及双光束空间波前相位差的离散模拟分布图,并且与解析分析结果作对比,验证了解析分析结果和离散数值模拟结果是相一致的,为下一步实验室研究或外场实验提供理论依据。

## 参 考 文 献

- 1 S M Beck, J R Buck, W F Buell, *et al.*. Synthetic-aperture imaging lidar: laboratory demonstration and signal processing [J]. *Appl Opt*, 2005, 44(35): 7621-7629.
- 2 M Bashkansky, R L Lucke, E Funk, *et al.*. Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain [J]. *Opt Lett*, 2002, 27(22): 1983-1985.
- 3 J Ricklin, M Dierking, S Fuhrer, *et al.*. Synthetic Aperture Lidar for Tactical Imaging [R]. DARPA Strategic Technology Office, 2007.
- 4 R L Lucke, M Bashkansky, J Reintjes, *et al.*. Synthetic Aperture Lidar (SAL): Fundamental Theory, Design Equations for a Satellite System, and Laboratory Demonstration [R]. Naval Research Laboratory Report NRL/FR/7218-02-10, 2002.
- 5 Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu, *et al.*. 2D imaging experiment of a 2D target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 2030-2032.
- 周煜, 许楠, 栾竹, 等. 尺度缩小合成孔径激光雷达的二维成像实验[J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 2030-2032.
- 6 Liu Liren, Zhou Yu, Zhi Yanan, *et al.*. A large-aperture synthetic aperture imaging lidar demonstrator and its verification in laboratory space [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900112.
- 刘立人, 周煜, 职亚楠, 等. 大口径合成孔径激光成像雷达演示样机及其实验室验证[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900112.
- 7 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging lidar (I): defocused and phase-biased telescope for reception antenna [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(5): 997-1000.
- 刘立人. 合成孔径激光成像雷达(I): 离焦和相位偏置望远镜接收天线[J]. *光学学报*, 2008, 28(5): 997-1000.
- 8 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging lidar (II): spatial phase biased telescope for transmitting antenna [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(6): 1197-1200.
- 刘立人. 合成孔径激光成像雷达(II): 空间相位偏置发射望远镜[J]. *光学学报*, 2008, 28(6): 1197-1200.
- 9 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging lidar (III): circulated duplex telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(7): 1405-1410.
- 刘立人. 合成孔径激光成像雷达(III): 双向环路发射接收望远镜[J]. *光学学报*, 2008, 28(7): 1405-1410.
- 10 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging lidar (IV): unified operation mode and two-dimensional data collection equation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 1-6.
- 刘立人. 合成孔径激光成像雷达(IV): 统一工作模式和二维数据收集方程[J]. *光学学报*, 2009, 29(1): 1-6.
- 11 Liu Liren. Synthetic aperture lidar (V): imaging resolution and antenna aperture shape [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(5): 1408-1415.
- 刘立人. 合成孔径激光成像雷达(V): 成像分辨率和天线孔径函数[J]. *光学学报*, 2009, 29(5): 1408-1415.
- 12 Liu Liren. Synthetic aperture imaging lidar (VI): space-time speckle effect and heterodyne SNR [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(8): 2326-2332.
- 刘立人. 合成孔径激光成像雷达(VI): 时空散斑效应和外差探测信噪比[J]. *光学学报*, 2009, 29(8): 2326-2332.
- 13 Liu Liren. Principle of down-looking synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0928002.
- 刘立人. 直视合成孔径激光成像雷达原理[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0928002.
- 14 Liu Liren. Fresnel telescope full-aperture synthesized imaging lidar: principle [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0128001.
- 刘立人. 菲涅耳望远镜全孔径合成成像激光雷达: 原理[J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0128001.
- 15 Dai Enwen, Sun Jianfeng, Yan Aimin, *et al.*. Demonstration of a laboratory Fresnel telescope synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0528003.
- 戴恩文, 孙建锋, 闫爱民, 等. 菲涅耳望远镜合成孔径激光成像雷达实验室验证[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0528003.
- 16 刘立人. 直视合成孔径激光成像雷达: 中国, 102435996A [P]: [2012-05-02].
- 17 J W Goodman. Introduction to Fourier Optics [M]. K Qin, P Liu, J Chen, *et al.* Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- 18 Zhou Yu, Wang Lingyu, Zhi Yanan, *et al.*. Polarization-splitting  $2 \times 4$   $90^\circ$  free-space optical hybrid with phase compensation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(12): 3291-3294.
- 周煜, 万玲玉, 职亚楠, 等. 相位补偿偏振分光  $2 \times 4$   $90^\circ$  自由空间光学桥接器 [J]. *光学学报*, 2009, 29(12): 3291-3294.