

# 合成孔径激光成像雷达的光学成像处理

孙志伟 侯培培 职亚楠 孙建锋\* 周煜 许倩 卢智勇 刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800)

**摘要** 提出了一种合成孔径激光成像雷达(SAIL)光学成像处理器的原理方案,基于侧视/直视 SAIL 单点目标回波收集方程,对此光学处理器的数据加载时空坐标转换、成像分辨率、成像处理能力等方面进行了理论分析,并进行了实验验证,给出了 SAIL 大口径验证样机获得的目标回波数据的成像结果。此 SAIL 光学处理器结构简单、紧凑、功耗低,且具有实时、实地处理 SAIL 回波信号的能力,在未来机载、星载 SAIL 系统中有广泛的应用前景。

**关键词** 遥感;合成孔径激光成像雷达;成像系统;像重建技术;光学处理

**中图分类号** TN958 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0628004

## Optical Image Processing for Synthetic Aperture ImagingLadar

Sun Zhiwei Hou Peipei Zhi Yanan Sun Jianfeng Zhou Yu Xu Qian

Lu Zhiyong Liu Liren

(Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** A principle scheme of optical synthetic aperture imaging ladar (SAIL) processor is proposed, the temporal-spatial conversion, imaging resolution and the processing capability of this processor are analyzed by the virtue of data collection equation of side-looking/down-looking SAIL, verified experiment is performed, and the imaging results of the collected data of our SAIL demonstrator are displayed. The optical SAIL processor is compact, lightweight and has the ability to real-timely and on-site process the SAIL data, which has a promising application prospect in onboard and satellite borne SAIL systems.

**Key words** remote sensing; synthetic aperture imaging ladar; imaging system; image reconstruction techniques; optical processing

**OCIS codes** 280.6730; 110.3010; 200.4740

## 1 引言

合成孔径激光成像雷达(SAIL)的原理取之于微波波段合成孔径雷达(SAR),是国外报道的能够在数千千米距离实现厘米量级分辨率的唯一的成像观测手段。典型的 SAIL 采用侧视模式对目标发射线性调频的啁啾脉冲激光,接收到的回波信号与引入的本振激光进行外差及复数化探测,在距离向产生与雷达目标等效距离成正比的线性项相位调

制,在方位向产生以目标点方位向位置为中心的二次项相位历程,然后对复数化后的外差信号在距离向进行快速傅里叶变换实现距离向聚焦,方位向进行二次项匹配滤波实现方位向聚焦以实现对目标的孔径合成成像<sup>[1-4]</sup>。最近,一种直视 SAIL 的概念被提出,发射采用两个正交偏振同轴且相对扫面的空间抛物波差的光束,接收采用自差及相位复数化探测,直视 SAIL 与侧视 SAIL 的回波信号具有基

**收稿日期**: 2013-12-16; **收到修改稿日期**: 2014-03-04

**基金项目**: 国家自然科学基金(61377004,61275110)

**作者简介**: 孙志伟(1988—),男,博士研究生,主要从事合成孔径激光成像雷达光学成像处理方面的研究。

E-mail: sunzhiwei@siom.ac.cn

**导师简介**: 刘立人(1942—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光技术和光学信息领域方面的研究。

E-mail: lirenliu@mail.shcnc.ac.cn

\* **通信联系人**。E-mail: sunjianfeng@163.com

本相同的形式,因此可以采用同样的成像过程进行处理<sup>[5]</sup>。

在 20 世纪 60 年代和 70 年代,光学信息处理最成功的应用之一就是微波 SAR 回波数据的成像处理<sup>[6]</sup>,伴随着数字处理能力的提高,这种光学处理方法很大程度上被数字处理方式取代。然而随着未来对星载和机载 SAIL 图像分辨率要求的提高以及实时成像处理的需求,对数字成像处理器的传输和运算速度提出严格要求。光学成像处理器能够提供高速非相干的数据并行处理能力,从而实现实时图像信息获取,并具有很高的动态输出范围,可以降低对通信系统传输数据量和传输带宽的要求。另外,可以实现集成化,有效减小系统的重量和体积,降低系统的功耗,因此在未来合成孔径激光成像雷达的数据处理中具有很大优势。目前微波 SAR 的光学处理已经取得了很大进展,紧凑结构的实时 SAR 光学处理器已经成功研制并应用<sup>[7-8]</sup>,向着 SAR 的全光处理方向迈进一大步。但是目前国际上对合成孔径激光成像雷达的光学成像处理尚处于初级研究阶段,具有较高的研究价值和发展空间。

本文提出了一种 SAIL 光学成像处理器的原理性方案,利用液晶空间光调制器(LCSLM)加载 SAIL 回波信号,柱面光波实现方位向二次项相位补偿,然后利用球面透镜完成二维傅里叶变换,成像结果由 CCD 或 CMOS 接收。由于光学系统固有的高速并行处理特点,使得此光学 SAIL 处理器具有

实时、实地处理 SAIL 回波信号的能力。另外,对于 SAIL,回波信号的纯相位数据在目标重建中占有主导地位,因此,可以仅仅利用一个纯相位 LCSLM 加载 SAIL 回波信号的纯相位数据完成成像处理,相比微波 SAR 的光学处理器,具有结构紧凑,重量轻,功耗低等优点,在未来机载、星载 SAIL 系统中有广泛的应用前景。

## 2 SAIL 光学成像处理

SAIL 的顺轨向(方位向)和交轨向(距离向)的回波信号的数据收集都是采用离散时间的采样方式,为实现简洁明了的成像过程分析,采用连续时间量,这种情况下,离散时间采样间隔趋于无穷小。SAIL 发射及接收望远镜主要有矩形与圆形两种口径,矩形口径的优势在于光学足趾各个位置的方位向成像分辨率相同,另外发射及接收方向性函数正交可分离变量<sup>[9]</sup>,因此这里采用矩形孔径。

### 2.1 侧视/直视 SAIL 数据收集方程

侧视 SAIL 的工作状态是其激光光轴与目标面有一定夹角,雷达搭载平台的运动方向为方位向,方位向的正交方向为距离向,光轴方向为雷达的侧视方向。直视 SAIL 的工作状态是其激光光轴垂直于目标面,雷达搭载平台的运动方向为顺轨向,顺轨向的垂直方向为交轨向,光轴方向为雷达的直视方向<sup>[5]</sup>,如图 1 所示。

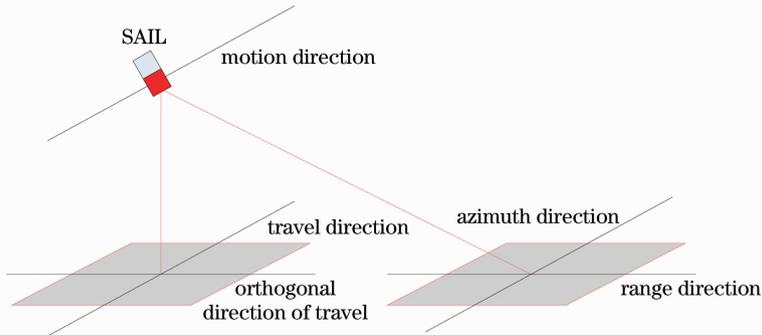


图 1 侧视 SAIL 和直视 SAIL 的工作方式

Fig. 1 Operation modes of side-looking SAIL and down-looking SAIL

SAIL 光学处理器的成像过程可以用目标面上的一个成像分辨单元 $(x_k, y_k)$ 的散射来表示,对于条带扫描模式的侧视 SAIL 与直视 SAIL,上述单一目标点的数据收集方程<sup>[5,10]</sup>可以统一归纳为

$$i_k(t_t, t_s; x_k, y_k) = A(x_k, y_k)S(x_k, y_k - v_y t_s)W(t_t) \times \exp[j2\pi f_{eq}(x_k)t_f] \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda F}(y_k - v_y t_s)^2\right], \quad (1)$$

式中设定交轨向为  $x$  方向,顺轨向为  $y$  方向。 $A(x_k, y_k)$  为与 SAIL 结构、系统安排和目标点特性等有关的接收光场因子。 $S(x_k, y_k - v_y t_s)$  为由发射光斑和接收方向性特性决定的光学足趾函数,侧视 SAIL 是由光学天线孔径的衍射产生,直视 SAIL 是由发射机内口径成像产生。 $t_t$  为交轨向快时间, $t_s$  为顺轨向慢时间, $v_y$  为雷达搭载平台顺轨向的运动速度,

交轨向与快时间有关的窗函数为  $W(t_f)$ ，侧视 SAIL 窗口宽度为快时间连续采集宽度，直视 SAIL 的窗口最大宽度为单光束光学足趾交轨向宽度； $f_{\text{eq}}(x_k)$  为目标在交轨向快时间上产生的等效拍频频率。 $\lambda$  为雷达发射激光中心波长， $F$  为雷达光学足趾在目标面上的等效曲率半径。

应当注意上述公式中的两项相位指数项是 SAIL 成像的关键，前一项为交轨向线性相位调制项，后一项为顺轨向二次项相位历程。

## 2.2 SAIL 光学处理器原理方案

SAIL 光学处理器的原理性方案如图 2 所示，利用 LCSLM 加载 SAIL 回波信号，柱面光波实现方位向二次项相位补偿，然后利用球面透镜完成二维傅里叶变换，成像结果由 CCD/CMOS 接收。

柱面光波的母线方向平行于 LCSLM 交轨向数

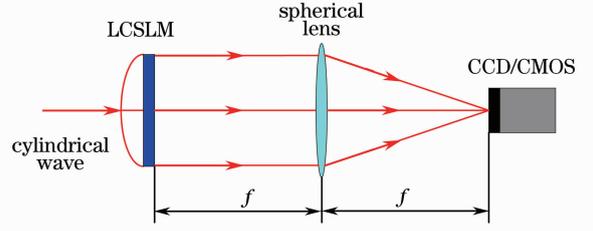


图 2 SAIL 光学处理器原理方案

Fig. 2 Principle scheme of optical SAIL processor

据加载方向，为了实现准确的傅里叶变换，LCSLM 的后表面与 CCD/CMOS 的光敏面分别位于球面透镜的前后焦平面上。设定球面透镜前后焦平面的空间坐标分别为  $(\alpha, \beta)$ ， $(u, v)$ ，其中  $\alpha, u$  为交轨向， $\beta, v$  为顺轨向。入射柱面波的光场为： $i_c(\beta) = \exp[j(\pi/\lambda_c f_c)\beta^2]$ ，令振幅为 1，LCSLM 的调制函数为： $t_{\text{LCSLM}}(\alpha, \beta)$ ，则球面透镜后焦面的光场为

$$e_{\text{bf}}(u, v) = \frac{1}{j\lambda_c f} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} i_c(\beta) t_{\text{LCSLM}}(\alpha, \beta) \exp\left[-j2\pi\left(\frac{u\alpha}{\lambda_c f} + \frac{v\beta}{\lambda_c f}\right)\right] d\alpha d\beta = \frac{1}{j\lambda_c f} \mathcal{F}\{i_c(\beta)\} * \mathcal{F}\{t_{\text{LCSLM}}(\alpha, \beta)\}, \quad (2)$$

式中  $\lambda_c$  为入射光波长， $f$  为球面透镜焦距，球面透镜后焦面光场为入射光场与 LCSLM 调制函数的卷积，CCD/CMOS 接收的光场强度信号为： $I(u, v) = |e_{\text{bf}}(u, v)|^2$ 。

有多种产生柱面光波的光学装置，如正柱面透镜，负柱面透镜以及离焦柱面望远镜，可根据实际需要选择。

## 2.3 二维时-空转换及成像

SAIL 回波信号本质上为二维时间流信号，LCSLM 位于二维空间坐标上，因此，在数据加载过程中，存在二维时间到二维空间的转换。设定 LCSLM 交轨向、顺轨向的宽度分别为  $a, b$ ，所加载

雷达信号快时间采样宽度为  $T_f$ ，慢时间采样宽度为  $T_s$ ，为了保证加载过程中的数据一致，有如下等比例关系：

$$\frac{t_f}{T_f} = \frac{\alpha}{a}, \quad \frac{t_s}{T_s} = \frac{\beta}{b}, \quad (3a)$$

即

$$t_f = \frac{T_f}{a}\alpha, \quad t_s = \frac{T_s}{b}\beta, \quad (3b)$$

(3b)式给出了二维时-空转换关系，定义  $K_f = T_f/a$ ， $K_s = T_s/b$  分别为交轨向，顺轨向的时空转换因子。因此加载前述 SAIL 点目标回波信号后，LCSLM 的光调制函数为

$$t_{\text{LCSLM}}^t(\alpha, \beta; x_k, y_k) = A(x_k, y_k) S\left(x_k, y_k - \frac{v_y T_s}{b}\beta\right) W\left(\frac{T_f}{a}\alpha\right) \text{rect}\left(\frac{\alpha - a/2}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{\beta - b/2}{b}\right) \times \exp\left[j2\pi f_{\text{eq}}(x_k) \frac{T_f}{a}\alpha\right] \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda F} \left(\frac{v_y T_s}{b}\right)^2 \left(\frac{b}{v_y T_s} y_k - \beta\right)^2\right], \quad (4)$$

式中  $\text{rect}[(\alpha - a/2)/a]\text{rect}[(\beta - b/2)/b]$  表示 LCSLM 的孔径因子。注意经过时空转换因子调制后，点目标回波信号中的交轨向的等效拍频频率变为  $f_{\text{eq}}(x_k)T_f/a$ ，顺轨向二次项相位等效曲率半径为  $F(b/v_y T_s)^2$ ，经过柱面光波补偿后的 LCSLM 后表面的出射光场为： $e_{\text{ff}}(\alpha, \beta; x_k, y_k) = t_{\text{LCSLM}}^t(\alpha, \beta; x_k, y_k) \times i_c(\beta)$ ，显然，

为了实现二次项补偿，有如下关系：

$$\lambda_c f_c + \lambda F \left(\frac{b}{v_y T_s}\right)^2 = 0, \quad (5a)$$

即

$$f_c = -\frac{\lambda F}{\lambda_c} \left(\frac{b}{v_y T_s}\right)^2, \quad (5b)$$

因此,

$$e_{ff}(\alpha, \beta; x_k, y_k) = A(x_k, y_k) S\left(x_k, y_k - \frac{v_y T_s}{b} \beta\right) W\left(\frac{T_f}{a} \alpha\right) \exp\left(j \frac{\pi}{\lambda F} y_k^2\right) \text{rect}\left(\frac{\alpha - a/2}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{\beta - b/2}{b}\right) \times \exp\left[j 2\pi f_{eq}(x_k) \frac{T_f}{a} \alpha\right] \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda F} \frac{v_y T_s}{b} y_k \beta\right]. \quad (6)$$

(6)式顺轨向相位也为线性项,上述光场经过二维傅里叶变换在球面透镜的后焦面上的光场为

$$e_{bf}^k(u, v; x_k, y_k) = C(u, v; x_k, y_k) \mathcal{F}_{\alpha \rightarrow \frac{u}{\lambda_c f}} \left\{ W\left(\frac{T_f}{a} \alpha\right) \right\} * \text{sinc}\left(\frac{au}{\lambda_c f}\right) * \delta\left[\frac{u}{\lambda_c f} - \frac{T_f}{a} f_{eq}(x_k)\right] \times \mathcal{F}_{\beta \rightarrow \frac{v}{\lambda_c f}} \left\{ S\left(x_k, y_k - \frac{v_y T_s}{b} \beta\right) \right\} * \text{sinc}\left(\frac{bv}{\lambda_c f}\right) * \delta\left(\frac{v}{\lambda_c f} + \frac{v_y T_s}{\lambda F b}\right), \quad (7)$$

交轨向成像分辨率  $R_{ot}$  由相干点扩散函数  $\mathcal{F}_{\alpha \rightarrow \frac{u}{\lambda_c f}} \{W(T_f \alpha/a)\} * \text{sinc}(au/\lambda_c f)$  的最小值全宽度,交轨向成像位置为  $u = \lambda_c f T_f f_{eq}(x_k)/a$ ,顺轨向成像分辨率  $R_t$  为相干点扩散函数  $\mathcal{F}_{\beta \rightarrow \frac{v}{\lambda_c f}} \{S(x_k, y_k - v_y T_s \beta/b)\} * \text{sinc}(bv/\lambda_c f)$  的最小值全宽度,成像位置为  $v = -\lambda_c f v_y T_s y_k / \lambda F b$ ,注意沿顺轨向分布的目标散射点在成像之后相对位置发生了反转,即产生了顺轨向的“镜像”效应,在光学处理器中可以利用与激光器主轴成  $45^\circ$  夹角的平面反射镜进行消除。

## 2.4 目标成像压缩比

对于目标面上尺寸为  $\Delta x \times \Delta y$  的面目标,成像尺寸为

$$\Delta u = \frac{\lambda_c f T_f}{a} \Delta f_{eq}(\Delta x), \quad \Delta v = \frac{\lambda_c f v_y T_s}{\lambda F b} \Delta y, \quad (8)$$

式中  $\Delta f_{eq}(\Delta x)$  为目标宽度产生的回波拍频带宽。侧视 SAIL 目标回波信号的交轨向拍频带宽<sup>[9]</sup>为

$$\Delta f_{side}(\Delta x) = \frac{2\Delta z}{c} \dot{f} \approx \frac{2\Delta x \cos \theta}{c} \dot{f}, \quad (9)$$

式中  $\Delta z$  为目标交轨向距离宽度,  $\Delta x$  目标交轨向宽度,  $\theta$  为目标平面与雷达目标主平面夹角,  $c$  为光速,  $\dot{f}$  为激光频率啁啾率。SAIL 光学处理器侧视目标交轨向成像压缩比为

$$\rho_{ot, side} = \frac{\Delta u}{\Delta x} = \frac{2\lambda_c f T_f \dot{f} \cos \theta}{ac}, \quad (10)$$

直视 SAIL 的交轨向拍频带宽<sup>[5]</sup>为

$$\Delta f_{down} = \frac{2\Delta x \epsilon}{\lambda R_1}, \quad (11)$$

式中  $\epsilon$  为与扫描器和相应光学系统结构有关的时间偏转参数,  $R_1$  为目标面照射光波交轨向等效二次项曲率半径。SAIL 光学处理器直视目标交轨向成像压缩比为

$$\rho_{ot, down} = \frac{2\lambda_c f T_f \epsilon}{a\lambda R_1}. \quad (12)$$

SAIL 光学处理器交轨向成像压缩比为

$$\rho_t = \frac{\Delta v}{\Delta y} = \frac{\lambda_c f v_y T_s}{\lambda F b}, \quad (13)$$

为使成像结果保持目标长宽比,有  $\rho_{ot, side}(\rho_{ot, down}) = \rho_t$ 。

## 3 信号处理能力

上述分析均假设 LCSLM 及 CCD/CMOS 为连续面阵,实际上受限于 LCSLM 及 CCD/CMOS 离散化像素数量及面阵大小, SAIL 光学成像处理器的数据加载能力以及成像探测能力均在一定范围内,在忽略球面透镜孔径影响的情况下,两者共同决定了 SAIL 光学处理器的空间处理能力。另外,数据加载速度, LCSLM 刷新频率以及 CCD/CMOS 的响应速度等因素决定了 SAIL 光学处理器的时间处理能力。在实际应用中,应当根据需求选择系统参数。

### 3.1 数据加载能力

设定 LCSLM 交轨向、顺轨向像素数量分别为  $N, M$ , 离散化回波数据矩阵一一对应地加载到 LCSLM 上,即每一个像素加载一个回波采样点数据。

#### 3.1.1 顺轨向

LCSLM 顺轨向像素数目为  $M$ , 显然,可以加载的最大顺轨向采样点数也为  $M$ , 并且  $M$  至少要与顺轨向一个光学足趾采样点数  $M_{ft}$  相等以实现每个目标点的孔径合成成像。这里值得注意的是条带扫描模式下  $M$  个采样点对应的目标顺轨向宽度为  $(M - M_{fp}) v_y \Delta t_s$ , 其中  $\Delta t_s$  为顺轨向慢时间采样间隔。因此, LCSLM 每次循环能够加载的目标顺轨向最大宽度为  $\Delta y_{max} = (M - M_{fp}) v_y \Delta t_s$ 。

#### 3.1.2 交轨向

交轨向回波数据是以一定的时间采样宽度在满足奈奎斯特采样定律的情况下获得的。LCSLM 交轨向像素数目为  $N$ , 交轨向快时间采样宽度为  $T_f$ , 那么在恰好满足奈奎斯特采样定律的情况下确定的

目标回波交轨向最大拍频带宽为  $\Delta f_{\max} = N/2T_t$ 。则 LCSLM 可加载的侧视 SAIL 目标交轨向最大宽度为

$$\Delta x_{\max, \text{side, up}} = \frac{Nc}{4T_t f \cos \theta}, \quad (14a)$$

可加载的直视 SAIL 目标交轨向最大宽度为

$$\Delta x_{\max, \text{down, up}} = \frac{N\lambda R_1}{4T_t f \epsilon}. \quad (14b)$$

### 3.2 成像探测能力

#### 3.2.1 像素选择

成像处理结果由 CCD/CMOS 接收, 设定其交轨向、顺轨向宽度分别为  $L_{ot}$ 、 $L_t$ , 像素宽度分别为  $T_{ot}$ 、 $T_t$ 。为了保证 SAIL 光学处理器的成像分辨率, 应当满足 CCD/CMOS 的像素宽度不大于相应方向上的成像分辨率, 即  $T_{ot} \leq R_{ot}$  且  $T_t \leq R_t$ 。

严格来讲, 成像输出顺轨向空间截止坐标应当为  $T_t$  的整数倍, 否则会导致成像输出顺轨向宽度由于 CCD/CMOS 像素整数化而延长或缩短, 进而影响最终成像结果。设定每次循环对顺轨向宽度为  $nv_y \Delta t_s$  的目标进行处理, 式中  $\Delta t_s$  为顺轨向慢时间采样间隔,  $n$  为正整数, 成像顺轨向宽度为

$$\Delta v = \frac{\lambda_c f v_y T_s}{\lambda F b} n v_y \Delta t_s, \quad (15)$$

则空间截止坐标为  $v_{\text{cutoff}} = \Delta v/2$ , 当  $v_{\text{cutoff}} = mT_t$ , 式中  $m$  为正整数, 得到准确的最终成像结果。当  $mT_t < v_{\text{cutoff}} < (m+1)T_t$ , 由于成像截取位置必须为 CCD/CMOS 像素整数倍  $mT_t$  或  $(m+1)T_t$ , 如果成像循环次数为  $P$ , 则导致目标像较准确的成像结果缩短  $2P(v_{\text{cutoff}} - mT_t)$  或延长  $2P[(m+1)T_t - v_{\text{cutoff}}]$ , 且截止频率越大,  $T_t$  越小, 目标像的畸变越小, 因此为了得到准确的成像结果, 应当满足  $v_{\text{cutoff}} = mT_t$ 。

#### 3.2.2 空间接收能力

由 CCD/CMOS 顺轨向宽度确定的成像最大截止空间坐标  $v_{\text{cutoff, max}} = L_t/2$ , 则 CCD/CMOS 每次循环能够接收的顺轨向最大目标宽度为

$$\Delta y_{\max, \text{re}} = \frac{L_t \lambda F b}{\lambda_c f v_y T_s}, \quad (16)$$

交轨向最大可接收成像宽度为 CCD/CMOS 交轨向宽度为  $L_{ot}$ , 即  $\Delta u_{\max} = L_{ot}$ , 因此, 侧视 SAIL 可接收目标交轨向最大宽度为

$$\Delta x_{\max, \text{side, re}} = \frac{acL_{ot}}{2\lambda_c f T_t f \cos \theta}, \quad (17a)$$

直视 SAIL 可接收目标交轨向最大宽度为

$$\Delta x_{\max, \text{down, re}} = \frac{a\lambda R_1 L_{ot}}{2\lambda_c f T_t f \epsilon}. \quad (17b)$$

综上所述, 由 SAIL 光学处理器数据加载能力及成像探测能力确定的每次循环能够处理的目标顺轨向最大宽度为:  $\min(\Delta y_{\max, \text{up}}, \Delta y_{\max, \text{re}})$ , 侧视 SAIL 目标交轨向最大宽度为:  $\min(\Delta x_{\max, \text{side, up}}, \Delta x_{\max, \text{side, re}})$ , 直视 SAIL 目标交轨向最大宽度为:  $\min(\Delta x_{\max, \text{down, up}}, \Delta x_{\max, \text{down, re}})$ 。

### 3.3 实时成像能力

相对于数字处理, SAIL 光学处理器的优势之一在于其并行、高速处理能力, SAIL 回波信号实时处理要求光学处理器每次循环处理时间  $\Delta t_p \leq \Delta t_s$ , 即成像刷新频率  $f_{\text{image}}$  应当不小于回波数据刷新频率  $f_{\text{echo}}$ 。在光学处理器数据贯通的情况下,  $f_{\text{image}}$  主要取决于 LCSLM 的刷新频率。

## 4 实验验证

根据前述分析及利用现有设备, 搭建了一套 SAIL 光学处理器实验室验证装置, 并给出了对大口径 SAIL 演示样机所获得的目标回波信号的成像处理结果。

#### 4.1 实验装置

SAIL 光学处理器实验室验证装置结构如图 3 所示, 因为 SAIL 回波信号中纯相位数据在成像中起主导作用, 加之现阶段反射式 LCSLM 指标性能优于透射式 LCSLM, 因此采用反射式纯相位 LCSLM 加载 SAIL 回波信号纯相位数据, 像素矩阵为  $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$ , 像素尺寸为  $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$ , 长轴对应顺轨

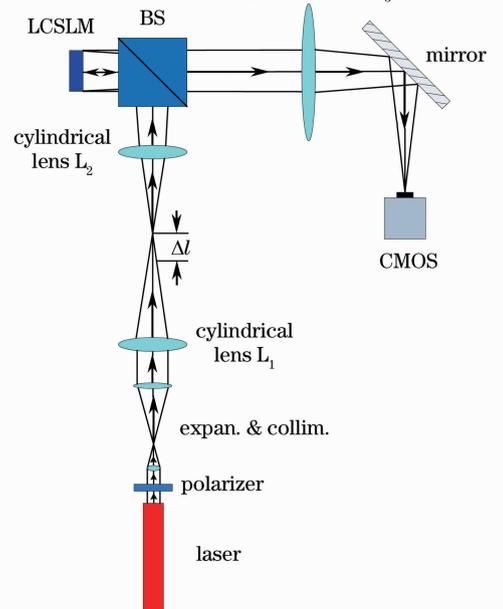


图 3 SAIL 光学处理器实验室验证装置结构

Fig. 3 Experimental set-up of optical SAIL processor

向。激光器波长为 632.8 nm, 受限于 LCSLM 调制性能, 需加一个偏振方向平行于 LCSLM 长轴方向(顺轨向)的起偏器, 准直扩束器的扩束倍率为  $20\times$ , 采用离焦量为  $\Delta l$  的柱面望远镜产生所需的柱面光波, 优势在于较小的离焦量即可满足要求, 且可根据不同的操作模式自由调节离焦量以产生所需的柱面光波。柱面透镜  $L_1, L_2$  完全相同, 口径为  $25\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ , 焦距为  $f_2=150\text{ mm}$ 。为了消除所用 LCSLM 对入射光、反射光的夹角限制, 引入了一个尺度为  $25\text{ mm}\times 25\text{ mm}\times 25\text{ mm}$  的分束棱镜。LCSLM 前表面同时位于  $L_2$  后焦点及球面透镜  $L_3$  的前焦面上, 此处柱面光波等效曲率半径为  $f_c=f_2^2/\Delta l$ 。  $L_3$  口径为 60 mm, 焦距为 200 mm, 所用 CMOS 像素矩阵  $1280\text{ pixel}\times 1024\text{ pixel}$ , 像素大小  $5.2\text{ }\mu\text{m}\times 5.2\text{ }\mu\text{m}$ , 长轴对应顺轨向。

#### 4.2 实验结果

实验数据来自斜视 SAIL 大口径验证样机<sup>[3]</sup>。雷达目标中心距 14 m, 等效合成孔径二次项半径约为 2.6 m, 光学足迹为  $22\text{ mm}\times 22\text{ mm}$ , 激光频率啁啾率为  $1.2674\times 10^{13}\text{ Hz/s}$ 。目标方位向步进间隔为 0.1 mm, 外差信号拍频中心频率为 2.5 kHz, 距离向采样率为 2.5 M, 采样宽度为 40 ms, 因此, 距离向采样点数为  $10^5$ , 目标为三个英文字母“C”, “A”, “S”的组合, 总尺寸为  $36\text{ mm}$ (顺轨向) $\times 10\text{ mm}$ (交轨向), 倾斜  $45^\circ$  放置, 如图 4(a)所示, 整个目标理论顺轨

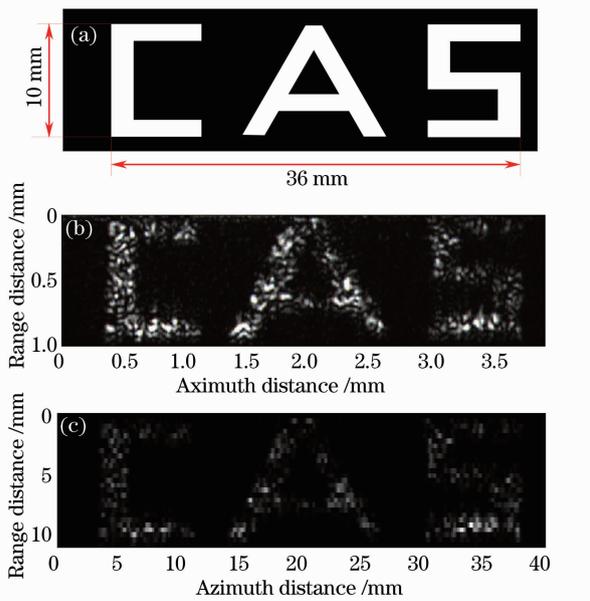


图 4 (a)目标图样; (b) SAIL 光学处理器实验结果;  
(c)数字处理方式成像结果

Fig. 4 (a) Target pattern; (b) imaging result of optical SAIL processor; (c) digital imaging result

向采样点数为 580, 根据具体实验条件及经验, 在不影响成像结果情况下实际采样点数为 460。

显然, LCSLM 顺轨向加载能力大于目标顺轨向宽度, 因此将回波信号纯相位数据提取后通过灰度图一次加载到 LCSLM 上进行成像处理, 为充分利用 LCSLM, 将纯相位数据顺轨向插值成 1920 个采样点, 根据前述公式  $\rho_{\text{ot, side}} = \rho_t$  得交轨向所需采样点为 398, 通过对纯相位数据交轨向等间隔重采样得到, 此时, 仍满足奈奎斯特采样定理。根据公式  $f_c = f_2^2/\Delta l$  及  $f_c = -\lambda F(b/v_y T_s)^2/\lambda_c$  得离焦量  $\Delta l = -31.6\text{ mm}$ 。数据在加载之前对顺轨向的外界相位干扰进行了补偿。

成像结果如图 3(b)所示, 为了对比分析, 给出了数字成像处理结果, 如图 3(c)所示。可以看出两种处理方式成像结果大体一致, 均有较强的散斑效应<sup>[11]</sup>, 另外由于采用光学连续成像处理, SAIL 光学处理器能够提供更加细腻的目标特征。

## 5 结 论

提出了一种适用于侧视 SAIL 和直视 SAIL 的光学成像处理器的原理性方案, 并结合侧视 SAIL 和直视 SAIL 单一点目标统一回波收集方程对成像过程进行了数学描述, 并对 SAIL 光学处理器的时域, 空域处理能力进行了分析, 对系统参数选择具有指导意义。另外搭建了一套 SAIL 光学处理器实验室验证装置, 并给出了对于 SAIL 大口径演示样机获得的目标回波信号的成像处理结果。实验结果证明了该装置的有效性。此 SAIL 光学处理器结构简单、紧凑、功耗低, 且具有实时、实地处理 SAIL 回波信号的能力, 在未来机载、星载 SAIL 系统中有广泛的应用前景。

### 参考文献

- 1 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.
- 2 Liren Liu Coherent and incoherent synthetic aperture imaging ladars and laboratory-space experimental demonstrations [J]. *Appl Opt*, 2013, 52(4): 579–599.
- 3 Liu Liren, Zhou Yu, Zhi Yanan, *et al.*. A large-aperture synthetic aperture imaging ladar demonstrator and its verification in laboratory space [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 112–116.
- 4 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): 112–116.
- 5 Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu, *et al.*. 2D imaging experiment of a 2D target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging ladar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 2030–2032.
- 6 周 煜, 许 楠, 栾 竹, 等. 尺度缩小合成孔径激光成像雷达

- 的二维成像实验[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 2030–2032.
- 5 Liu Liren. Principle of down-looking synthetic aperture imaging ladar [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.
- 6 L J Cutrona, E N Leith, L J Porcello, *et al.*. On the application of coherent optical processing techniques to synthetic-aperture radar [J]. IEEE, 1966, 54: 1026–1032.
- 7 Pascal Bourqui, Bernd Harnisch, Linda Marchese, *et al.*. Optical SAR processor for space application [C]. SPIE, 2008, 6958: 69580J.
- 8 Linda Marchese, Michel Doucet, Pascal Bourqui, *et al.*. A global review of optronic synthetic aperture radar/ladar processing [C]. SPIE, 2013, 8714: 871416.
- 9 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging ladar (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.
- 10 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging ladar (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 laser imaging ladar (VI): space-time speckle effect and heterodyne signal-to-noise ratio [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.

栏目编辑：殷建芳