

# 自干涉合成孔径激光三维成像雷达原理

刘立人

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

**摘要** 在直视合成孔径激光成像雷达(SAL)的基础上,提出了一种自干涉的产生三维成像的原理方法。首先对于交轨向正扫描和反扫描的柱面镜进行位置偏置,造成交轨向成像频谱的平移并产生相对线性相延,然后逐一对一对交轨向正扫描和反扫描收集聚焦像进行相干叠加,并由此产生自干涉。自干涉产生的交轨向平展条纹对于目标面的倾斜投射即可产生包含目标高度信息的波痕干涉图,最后通过解包裹算法产生表征目标表面轮廓的等位线图。本方法采用一发一收的雷达结构通过单航过干涉法实现三维成像,结构简单,原理有效,同时具有抗大气、运动平台等相位干扰能力。

**关键词** 成像系统;合成孔径激光成像雷达;直视合成孔径激光成像雷达;干涉合成孔径雷达;三维地形浮雕成像;扫描柱面镜位置偏置

中图分类号 TN958

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201434.0528001

## Principle of Self-Interferometric Synthetic Aperture Ladar for 3D Imaging

Liu Liren

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

**Abstract** On the basis of down-looking synthetic aperture ladar (DL-SAL), a kind of self-interferometric SAL for 3D topographic relief imaging is proposed in this paper. Firstly, the forward-scanning and backward-scanning cylinder lenses for imaging along the orthogonal direction of travel are biased in their positions, it thus introduces a shifted spectrum image with a linear phase term. Then pair of a forward-scanning resulted focused image and the next backward-scanning resulted image are coherently added, therefore a self-interference between the two images occurs. The flat fringes from this self-interference can be obliquely projected to a target plane, so that a subtly rippled interferogram containing the target height information can be observed. Finally, by using the unwrapping algorithm, a contour mapping representing the surface profile will be achieved. This SAL including a transmitter and a receiver realites the 3D imaging by a one-pass interferometry. The features are simple in construction and effective in principle. Moreover, the phase errors from the atmospheric turbulence can be automatically compensated.

**Key words** imaging systems; synthetic aperture imaging ladar (SAL); down-looking SAL; interferometric synthetic aperture radar; 3D topography relief imaging; position biasing of scanning cylindrical lens

**OCIS codes** 280.6730; 280.3640; 110.6880; 110.2970; 110.3175

## 1 引言

合成孔径激光成像雷达(SAL)近些年来得到迅速发展<sup>[1-7]</sup>,实现三维成像必然是一个进一步发展的方向。微波侧视合成孔径雷达(SAR)采用干涉技术实现三维地形浮雕成像<sup>[8]</sup>,常用的方法有单航过

干涉法和两航过干涉法两种,单航过采用一发两收结构的SAR,双航过采用一发一收的SAR。在侧视合成孔径激光成像雷达领域也已经在实验平台规模的实验上实现了具有三维地形浮雕成像的干涉合成孔径激光成像雷达<sup>[9]</sup>,基本方法属于双航过干涉法。

收稿日期: 2013-12-17; 收到修改稿日期: 2014-01-15

作者简介: 刘立人(1942—),男,研究员,博士生导师,目前主要从事空间信息光学方面的研究。

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

由于大气扰动,运载平台的干扰以及其他影响,侧视 SAL 采用一发二收单通过干涉法需要保持二个接收机之间的稳定光频相位关系,采用一发一收两通过干涉法要求两幅图像之间保持光频级相位的同步,因此真正应用是非常困难的。

本课题组提出了一种直视合成孔径激光成像雷达<sup>[7,10]</sup>,基本原理是:对目标投射二个同轴同心且偏振正交的光束并且进行自差接收,其中两个偏振光束波前由交轨向柱面波前和顺轨向的柱面波前组成。在交轨方向上这二个光束的柱面波前的符号相同,曲率半径相同,并作相互反向的平移,因此在快时间轴上产生目标交轨向与目标位置有关的空间线性相位项调制。在运载平台运动的顺轨方向上这二个光束的波前具有符号相反的曲率半径,因此在慢时间轴上产生目标顺轨向位置有关的空间二次项相位历程。最终通过傅里叶变换实现交轨向聚焦成像,通过共轭相位二次项匹配滤波实现顺轨向聚焦成像。由于采用了同轴光束自差接收,大大降低了大气、运动平台、光雷达系统和散斑等相位变化和干

扰的影响,同时简化了系统结构,使得实际应用成为可能。

本文在上述直视 SAL 的基础上,提出了一种自干涉的产生三维地形浮雕成像的原理方法。首先是对于交轨向正扫描和反扫描的柱面镜进行位置偏置,然后逐一对一对交轨向正扫描和反扫描收集聚焦像进行相干叠加,由此产生交轨向自干涉。自干涉产生的平展条纹对于目标面的倾斜投射即可产生包含目标高度信息的波痕干涉图,最后通过传统的解包裹算法产生表征目标表面轮廓的等位线图。该方法采用一发一收的单航过干涉法三维成像,提供了一种实现 SAL 干涉接收实现 3D 成像的可能途径。

## 2 一种自干涉直视合成孔径激光三维成像雷达的结构

适合于基本原理的直视 SAL 可以有多种结构,图 1 给出一个具体结构来说明基本原理。

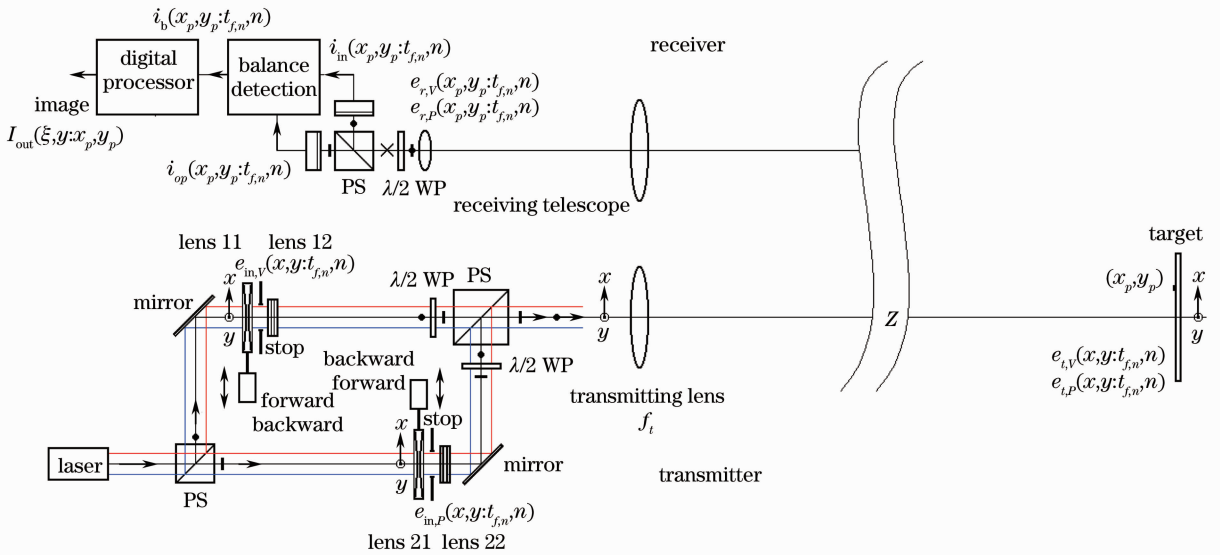


图 1 自干涉合成孔径激光三维成像雷达的一种具体结构

Fig. 1 A configuration of self-interferometric synthetic aperture 3D imaging lidar

激光光源输出平行偏振光束,该光束经过发射偏振分束器(PS)在空间上被偏振分解为两个等强度的偏振正交的光束,即形成一个水平偏振光束和一个垂直偏振光束。水平偏振光束先经过反射镜到距离项柱面镜,顺轨向柱面镜和光阑,再经过  $\lambda/2$  波片旋转偏振态  $90^\circ$  后直接通过发射偏振合束器(PS2)。垂直偏振光束先经过距离项柱面镜,顺轨向柱面镜和光阑,经过反射镜后通过  $\lambda/2$  波片旋转偏振态再通过发射偏振合束器偏转光束。因此发射

偏振合束器再组合了水平偏振光束和垂直偏振光束成为同轴同心且偏振正交的光束,然后由发射主镜成像投影在目标面上,两个光阑都处于发射主镜的焦面上,光阑上的内光场被放大成像于目标面上。因为矩形光斑能够产生均匀的照明条幅,而且具有更好的成像分辨率,所以激光光源输出平行偏振光束和光阑窗口均采用矩形截面。

两交轨向柱面镜作相对运动,其正、反方向定义见图 1 所示。两顺轨向柱面镜静止不动。两交轨向

柱面镜的相位二次项符号相同,其相对移动时能够产生交轨向的线性相位项调制。两顺轨向柱面镜的相位二次项符号相反,SAL 相对于目标运动时能够产生顺轨向二次项相位历程。

目标回波被接收望远镜收集并且通过  $\lambda/2$  波片旋转偏振态  $45^\circ$ ,然后通过偏振分束镜分解为同向接收通道和反向接收通道,最后通过平衡光电探测器输出光电流信号。

交轨向自干涉的要点是必须对于交轨向正扫描和反扫描的柱面镜进行位置偏置,包括同向偏置其使得两柱面镜的中心重合位置偏离出光阑窗口,也包括逆向偏置。同向偏置造成交轨向成像频谱的单边带平移,逆向偏置对于正扫描和反扫描的成像频谱产生相对线性相延,然后逐一对一对交轨向正扫描和反扫描收集聚焦像进行相干叠加。

在光电处理器中,光电流信号先通过傅里叶变换进行交轨向聚焦成像,然后实现相邻距离像轨迹的自干涉相干叠加,最后采用相位二次项历程共轭

匹配滤波实现顺轨向聚焦成像。

### 3 信息获取过程分析

交轨向柱面镜  $L_{11}$  和  $L_{21}$  可以为正透镜或者负透镜,现采用负透镜,焦距为  $f_x$ ,因此相位分布为二次项  $\exp\left(j\frac{\pi}{\lambda f_x}x^2\right)$ 。顺轨向柱面镜  $L_{12}$  和  $L_{22}$  的负号相反。取  $L_{12}$  的相位分布为  $\exp\left(j\frac{\pi}{\lambda f_y}y^2\right)$ , $L_{22}$  的相位分布为  $\exp\left(-j\frac{\pi}{\lambda f_y}y^2\right)$ ,其中焦距为  $f_y$ 。

距离项柱面镜的扫描从静态固定位置开始,到达终点后再开始返回固定点。因此前一段扫描称之为正向扫描,后一段扫描称之为反向扫描。

#### 3.1 正向扫描二维数据收集

对于正向扫描( $n$  为偶数),垂直偏振光束和水平偏振光束在各自光阑位置上的内光场可以分别表达为

$$\begin{aligned} e_{in,V}(x,y;t_{f,n},n \text{ is even}) &= E_0 \text{rect}\left(\frac{t_{f,n}}{T_f}\right) \text{rect}\left(\frac{x}{W_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{W_y}\right) \times \\ &\quad \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda f_x}(x - v_x t_{f,n} - S_b - S_a)^2\right] \exp\left(j\frac{\pi}{\lambda f_y}y^2\right), \\ e_{in,P}(x,y;t_{f,n},n \text{ is even}) &= E_0 \text{rect}\left(\frac{t_{f,n}}{T_f}\right) \text{rect}\left(\frac{x}{W_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{W_y}\right) \times \\ &\quad \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda f_x}(x + v_x t_{f,n} - S_b + S_a)^2\right] \exp\left(-j\frac{\pi}{\lambda f_y}y^2\right), \end{aligned} \quad (1)$$

光阑窗口宽度为  $W_x \times W_y$ ,扫描时间为系统快时间其变量记为  $t_{f,n}$ ,柱面镜运动速度为  $v_x$ ,扫描时间宽度为  $T_f\left(-\frac{T_f}{2} \leq t_{f,n} \leq \frac{T_f}{2}\right)$ , $S_b$  为正反扫描中的相位二次项附加的相等的中心位移, $2S_a$  为正反扫描中的相位二次项附加的中心相对偏离,因此  $t_{f,n} = 0$  的两个交轨向柱面镜的中心位置分别位于

$$\begin{aligned} S_1 &= S_b + S_a, \\ S_2 &= S_b - S_a. \end{aligned} \quad (2)$$

由发射主镜产生的发射光场通过夫琅禾费衍射到达目标面,因此目标面上的光场事实上是内光场的尺度放大( $-M$  倍)。 $M = Z/f_t$ ,其中  $Z$  是目标距离, $f_t$  是发射主镜焦距。忽略水平偏振光束和垂直偏振光束的相同相位因子如夫琅禾费衍射相位二次项,因此正向扫描的垂直偏振光束和水平偏振光束在目标面上的外光场分别表达为

$$\begin{aligned} e_{t,V}(x,y;t_{f,n},n \text{ is even}) &= E_t \text{rect}\left(\frac{t_{f,n}}{T_f}\right) \text{rect}\left(\frac{x}{MW_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{MW_y}\right) \times \\ &\quad \exp\left[j\frac{\pi}{M^2 \lambda f_x}(x + Mv_x t_{f,n} + MS_b + MS_a)^2\right] \exp\left[j\frac{\pi}{M^2 \lambda f_y}(y - n\Delta Y)^2\right], \\ e_{t,P}(x,y;t_{f,n},n \text{ is even}) &= E_t \text{rect}\left(\frac{t_{f,n}}{T_f}\right) \text{rect}\left(\frac{x}{MW_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{MW_y}\right) \times \\ &\quad \exp\left[j\frac{\pi}{M^2 \lambda f_x}(x - Mv_x t_{f,n} + MS_b - MS_a)^2\right] \exp\left[-j\frac{\pi}{M^2 \lambda f_y}(y - n\Delta Y)^2\right], \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $\Delta Y$  为顺轨向采样距离间隔, $E_t = E_0 t_{at}/M$ , $t_{at}$  为大气通过率。可以看到光学足址(扫描条幅)的尺度为

$MW_x \times MW_y$ 。

采用一个目标点来分析回波收集情况。目标回波由接收望远镜接收,从目标到光学望远镜接收天线的传播也用夫琅禾费衍射描述。假定目标点 $(x_p, y_p)$ 的有限尺度为 $d_x \times d_y$ ,在光学接收天线平面上的正向扫描的垂直偏振和水平偏振的接收场强分别为

$$e_{r,v}(x_p, y_p; t_{f,n}, n \text{ is even}) = \rho(x_p, y_p) E_r \text{rect}\left(\frac{t_{f,n}}{T_f}\right) \text{rect}\left(\frac{x_p}{MW_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y_p - n\Delta Y}{MW_y}\right) \times \\ \exp\left[j \frac{\pi}{M^2 \lambda f_x} (x_p + Mv_x t_{f,n} + MS_b + MS_a)^2\right] \exp\left[j \frac{\pi}{M^2 \lambda f_y} (y_p - n\Delta Y)^2\right], \\ e_{r,p}(x_p, y_p; t_{f,n}, n \text{ is even}) = \rho(x_p, y_p) E_r \text{rect}\left(\frac{t_{f,n}}{T_f}\right) \text{rect}\left(\frac{x_p}{MW_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y_p - n\Delta Y}{MW_y}\right) \times \\ \exp\left[j \frac{\pi}{M^2 \lambda f_x} (x_p - Mv_x t_f + MS_b - MS_a)^2\right] \exp\left[-j \frac{\pi}{M^2 \lambda f_y} (y_p - n\Delta Y)^2\right], \quad (4)$$

式中  $E_r = \frac{d_x d_y}{\lambda Z} E_{iat}$ ,  $\rho(x_p, y_p)$  为目标点的光场反射率。

正向扫描时的一路探测接收产生同相电流为

$$i_{ip}(x_p, y_p; t_{f,n}, n \text{ is even}) = \frac{\eta S_d}{2} \left[ \frac{\sqrt{2}}{2} e_{r,1}(x_p, y_p; t_{f,n}, n) + \frac{\sqrt{2}}{2} e_{r,2}(x_p, y_p; t_{f,n}, n) \right] \times \\ \left[ \frac{\sqrt{2}}{2} e_{r,1}(x_p, y_p; t_{f,n}, n) + \frac{\sqrt{2}}{2} e_{r,2}(x_p, y_p; t_{f,n}, n) \right]^* = \frac{\eta}{2} \rho^2(x_p, y_p) E_r^2 \text{rect}\left(\frac{t_{f,n}}{T_f}\right) \text{rect}\left(\frac{x_p}{MW_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y_p - n\Delta Y}{MW_y}\right) \times \\ \left\{ 1 + \cos \frac{2\pi}{M^2 \lambda f_x} \left[ 2(x_p + MS_b) Mv_x \left( t_f + \frac{S_a}{v_x} \right) \right] \right\} \exp\left[j \frac{\pi}{M^2 \lambda f_y / 2} (y_p - n\Delta Y)^2\right], \quad (5)$$

式中  $\eta$  为光电探测率,  $S_d$  为接收望远镜主镜接收面积。另外一路探测接收产生  $\pi$  相移电流为

$$i_{op}(x_p, y_p; t_{f,n}, n \text{ is even}) = \frac{\eta S_d}{2} \left[ \frac{\sqrt{2}}{2} e_{r,v}(x_p, y_p; t_{f,n}, n) - \frac{\sqrt{2}}{2} e_{r,p}(x_p, y_p; t_{f,n}, n) \right] \times \\ \left[ \frac{\sqrt{2}}{2} e_{r,v}(x_p, y_p; t_{f,n}, n) - \frac{\sqrt{2}}{2} e_{r,p}(x_p, y_p; t_{f,n}, n) \right]^* = \frac{\eta}{2} \rho^2(x_p, y_p) E_r^2 \text{rect}\left(\frac{t_{f,n}}{T_f}\right) \text{rect}\left(\frac{x_p}{MW_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y_p - n\Delta Y}{MW_y}\right) \times \\ \left\{ 1 - \cos \frac{2\pi}{M^2 \lambda f_x} \left[ 2(x_p + MS_b) Mv_x \left( t_f + \frac{S_a}{v_x} \right) \right] \right\} \exp\left[j \frac{\pi}{M^2 \lambda f_y / 2} (y_p - n\Delta Y)^2\right]. \quad (6)$$

因此,正向扫描平衡接收的输出电流可表示为

$$i_b(x_p, y_p; t_{f,n}, n \text{ is even}) = i_{in}(x_p, y_p; t_{f,n}, n \text{ is even}) - i_{op}(x_p, y_p; t_{f,n}, n \text{ is even}) = \\ \eta \rho^2(x_p, y_p) E_r^2 \text{rect}\left(\frac{t_{f,n}}{T_f}\right) \text{rect}\left(\frac{x_p}{MW_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y_p - n\Delta Y}{MW_y}\right) \cos\left\{ \frac{2\pi}{M^2 \lambda f_x} \left[ 2(x_p + MS_b) Mv_x \left( t_f + \frac{S_a}{v_x} \right) \right] \right\} \times \\ \exp\left[j \frac{\pi}{M^2 \lambda f_y / 2} (y_p - n\Delta Y)^2\right]. \quad (7)$$

### 3.2 反向扫描二维数据收集

反向扫描取  $v_x = -v_x$ ,垂直偏振光束和水平垂直偏振光束在各自光阑位置上的内光场可以分别表达为

$$e_{in,v}(x, y; t_{f,n}, n \text{ is odd}) = E_0 \text{rect}\left(\frac{t_{f,n}}{T_f}\right) \text{rect}\left(\frac{x}{W_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{W_y}\right) \times \\ \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda f_x} (x + v_x t_{f,n} - S_b - S_a)^2\right] \exp\left(j \frac{\pi}{\lambda f_y} y^2\right), \\ e_{in,p}(x, y; t_{f,n}, n \text{ is odd}) = E_0 \text{rect}\left(\frac{t_{f,n}}{T_f}\right) \text{rect}\left(\frac{x}{W_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{W_y}\right) \times \\ \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda f_x} (x - v_x t_{f,n} - S_b + S_a)^2\right] \exp\left(-j \frac{\pi}{\lambda f_y} y^2\right). \quad (8)$$

反向扫描的垂直偏振光束和水平偏振光束目标面上的外光场可以分别表达为

$$\begin{aligned}
 e_{t,v}(x, y; t_{f,n}, n \text{ is odd}) &= E_t \text{rect}\left(\frac{t_{f,n}}{T_f}\right) \text{rect}\left(\frac{x}{MW_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{MW_y}\right) \times \\
 &\quad \exp\left[j \frac{\pi}{M^2 \lambda f_x} (x - Mv_x t_{f,n} + MS_b + MS_a)^2\right] \exp\left[j \frac{\pi}{M^2 \lambda f_y} (y - n\Delta Y)^2\right], \\
 e_{t,p}(x, y; t_{f,n}, n \text{ is odd}) &= E_t \text{rect}\left(\frac{t_{f,n}}{T_f}\right) \text{rect}\left(\frac{x}{MW_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{MW_y}\right) \times \\
 &\quad \exp\left[j \frac{\pi}{M^2 \lambda f_x} (x + Mv_x t_{f,n} + MS_b - MS_a)^2\right] \exp\left[-j \frac{\pi}{M^2 \lambda f_y} (y - n\Delta Y)^2\right]. \quad (9)
 \end{aligned}$$

反向扫描的垂直偏振和水平偏振的接收场强分别为

$$\begin{aligned}
 e_{r,v}(x_p, y_p; t_{f,n}, n \text{ is odd}) &= \rho(x_p, y_p) E_r \text{rect}\left(\frac{t_{f,n}}{T_f}\right) \text{rect}\left(\frac{x_p}{MW_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y_p - n\Delta Y}{MW_y}\right) \times \\
 &\quad \exp\left[j \frac{\pi}{M^2 \lambda f_x} (x_p - Mv_x t_{f,n} + MS_b + MS_a)^2\right] \exp\left[j \frac{\pi}{M^2 \lambda f_y} (y_p - n\Delta Y)^2\right], \\
 e_{r,p}(x_p, y_p; t_{f,n}, n \text{ is odd}) &= \rho(x_p, y_p) E_r \text{rect}\left(\frac{t_{f,n}}{T_f}\right) \text{rect}\left(\frac{x_p}{MW_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y_p - n\Delta Y}{MW_y}\right) \times \\
 &\quad \exp\left[j \frac{\pi}{M^2 \lambda f_x} (x_p + Mv_x t_{f,n} + MS_b - MS_a)^2\right] \exp\left[-j \frac{\pi}{M^2 \lambda f_y} (y_p - n\Delta Y)^2\right]. \quad (10)
 \end{aligned}$$

同样,反向扫描平衡接收的输出电流为

$$\begin{aligned}
 i_b(x_p, y_p; t_{f,n}, n \text{ is odd}) &= i_{in}(x_p, y_p; t_{f,n}, n \text{ is odd}) - i_{op}(x_p, y_p; t_{f,n}, n \text{ is odd}) = \\
 &\quad \eta \rho^2(x_p, y_p) E_r^2 \text{rect}\left(\frac{t_{f,n}}{T_f}\right) \text{rect}\left(\frac{x_p}{MW_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y_p - n\Delta Y}{MW_y}\right) \cos\left\{\frac{2\pi}{M^2 \lambda f_x} \left[2(x_p + MS_b)Mv_x \left(t_{f,n} - \frac{S_a}{v_x}\right)\right]\right\} \times \\
 &\quad \exp\left[j \frac{\pi}{M^2 \lambda f_y / 2} (y_p - n\Delta Y)^2\right]. \quad (11)
 \end{aligned}$$

(7)式和(11)式表达了目标点 $(x_p, y_p)$ 产生的数据收集方程。可见同向位移 $S_b$ 产生了交轨向线性相移动的位置平移,而异向位移 $S_a$ 产生了交轨向线性相移动的时间延时。

## 4 信息处理过程分析

信息处理可以采用传统的交轨向傅里叶变换聚焦和顺轨向共轭相位二次项匹配滤波聚焦成像算法,也可以采用二维傅里叶变换算法<sup>11</sup>。本文采用前一种算法。

首先对目标回波进行交轨向聚焦成像,采用傅里叶变换实现。因此,正向扫描的交轨聚焦像为

$$\begin{aligned}
 I_{\text{org}}(\xi, y; x_p, y_p; n \text{ is even}) &= F_{t_f \rightarrow \xi} \{i_b(x_p, y_p; t_{f,n}, n \text{ is even})\} = \\
 &\quad \eta \rho^2(x, y) E_r^2 T_f \text{rect}\left(\frac{x_p}{MW_x}\right) \left\{ \text{sinc}(T_f \xi) \times \left[ \delta\left(\xi - \frac{2(x_p + MS_b)v_x}{M\lambda f_x}\right) + \delta\left(\xi + \frac{2(x_p + MS_b)v_x}{M\lambda f_x}\right) \right] \right\} \times \\
 &\quad \text{rect}\left(\frac{y_p - n\Delta Y}{MW_y}\right) \exp\left[j \frac{\pi}{M^2 \lambda f_y / 2} (y_p - n\Delta Y)^2\right] \exp\left(j2\pi \xi \frac{S_a}{v_x}\right). \quad (12)
 \end{aligned}$$

同样,反向扫描的距离聚焦像为

$$\begin{aligned}
 I_{\text{org}}(\xi, y; x_p, y_p; n \text{ is odd}) &= F_{t_f \rightarrow \xi} \{i_b(x_p, y_p; t_{f,n}, n \text{ is odd})\} = \\
 &\quad \eta \rho^2(x, y) E_r^2 T_f \text{rect}\left(\frac{x_p}{MW_x}\right) \left\{ \text{sinc}(T_f \xi) \times \left[ \delta\left(\xi - \frac{2(x_p + MS_b)v_x}{M\lambda f_x}\right) + \delta\left(\xi + \frac{2(x_p + MS_b)v_x}{M\lambda f_x}\right) \right] \right\} \times \\
 &\quad \text{rect}\left(\frac{y_p - n\Delta Y}{MW_y}\right) \exp\left[j \frac{\pi}{M^2 \lambda f_y / 2} (y_p - n\Delta Y)^2\right] \exp\left(-j2\pi \xi \frac{S_a}{v_x}\right), \quad (13)
 \end{aligned}$$

公式中的 $\delta\left(\xi - \frac{2(x_p + MS_b)v_x}{M\lambda f_x}\right) + \delta\left(\xi + \frac{2(x_p + MS_b)v_x}{M\lambda f_x}\right)$ 项表明交轨向的成像占据了正负两个边带,而同向位移 $S_b$ 表明最终可以平移成像点的位置。为了消除孪生重叠,采用成像频率域单边滤波,令成像面即条幅宽度为 $X_p$  ( $-X_p/2 \leq x_p \leq X_p/2$ ),设计 $MS_b > X_p/2$ 可以实现 $\xi > 0$ 的正频率域单边滤波成像。而设计 $MS_b < -X_p/2$ 可以实现 $\xi < 0$ 的负频率域单边滤波成像。本文分析中均采用正频率域单边滤波成像。

正频率域单边滤波成像条件下,正反向扫描的距离聚焦像分别为

$$I_{\text{org}}(\xi, y; x_p, y_p, n \text{ is even}) = \eta^2(x, y) E_r^2 T_f \text{rect}\left(\frac{x_p}{MW_x}\right) \left\{ \text{sinc}(T_f \xi) \times \delta\left[\xi - \frac{2(x_p + MS_b)v_x}{M\lambda f_x}\right] \right\} \times \left\{ \text{rect}\left(\frac{y_p - n\Delta Y}{MW_y}\right) \exp\left[j \frac{\pi}{M^2 \lambda f_y / 2} (y_p - n\Delta Y)^2\right] \right\} \exp\left(j2\pi\xi \frac{S_a}{v_x}\right), \quad (14)$$

$$I_{\text{org}}(\xi, y; x_p, y_p, n \text{ is odd}) = \eta^2(x, y) E_r^2 T_f \text{rect}\left(\frac{x_p}{MW_x}\right) \left\{ \text{sinc}(T_f \xi) \times \delta\left[\xi - \frac{2(x_p + MS_b)v_x}{M\lambda f_x}\right] \right\} \times \left\{ \text{rect}\left(\frac{y_p - n\Delta Y}{MW_y}\right) \exp\left[j \frac{\pi}{M^2 \lambda f_y / 2} (y_p - n\Delta Y)^2\right] \right\} \exp\left(-j2\pi\xi \frac{S_a}{v_x}\right). \quad (15)$$

可见异向位移最终在交轨成像方向上产生相对线性相位移。

取相邻两个交轨聚焦项,  $n$ (偶数) 和  $(n+1)$ (奇数) 相干叠加组合成为一个交轨项输出, 新序号为  $k = -\infty, \dots, -1, 0, 1, \dots, \infty$ , 即有  $n = 2k; n+1 = 2k+1$ 。所以组合交轨聚焦项为

$$I_{\text{org}}(\xi, y; x_p, y_p; t_{f,n}, k) = I_{\text{org}}(\xi, y; x_p, y_p, n \text{ is even}) + I_{\text{org}}(\xi, y; x_p, y_p, n+1 \text{ is odd}) = 2\eta^2(x_p, y_p) E_r^2 T_f \text{rect}\left(\frac{x_p}{MW_x}\right) \left\{ \text{sinc}(T_f \xi) \times \delta\left[\xi - \frac{2(x_p + MS_b)v_x}{M\lambda f_x}\right] \right\} \times \left\{ \text{rect}\left(\frac{y_p - k\Delta Y}{MW_y}\right) \exp\left[j \frac{\pi}{M^2 \lambda f_y / 2} (y_p - k\Delta Y)^2\right] \right\} \cos\left(2\pi\xi \frac{S_a}{v_x}\right), \quad (16)$$

可见在交轨成像方向上产生干涉调制  $\cos\left(2\pi\xi \frac{S_a}{v_x}\right)$ , 这是本文的关键点。

下一步实现顺轨向匹配滤波聚焦成像。顺轨向采用二次项相位历程的共轭匹配滤波聚焦成像, 滤波函数为相位历程二次项的共轭函数

$$\exp\left[-j \frac{\pi}{M^2 \lambda f_y / 2} (k\Delta Y)^2\right], \quad (17)$$

在连续函数逼近下, 可以取得解析表达。有二次项匹配滤波方程

$$\left\{ \text{rect}\left(\frac{y_p - y}{MW_y}\right) \exp\left[j \frac{\pi}{M^2 \lambda f_y / 2} (y_p - y)^2\right] \right\} \times \exp\left(-j \frac{\pi}{M^2 \lambda f_y / 2} y^2\right) = MW_y \exp\left[-j \frac{\pi}{M^2 \lambda f_y / 2} (y_p - y)^2\right] \text{sinc}\left(MW_y \frac{y}{M^2 \lambda f_y / 2}\right) \times \delta(y - y_p), \quad (18)$$

因此, 最终的二维聚焦成像输出为

$$I_{\text{out}}(\xi, y; x_p, y_p) = 4\eta^2(x_p, y_p) E_r^2 T_f MW_y \left\{ \text{sinc}(T_f \xi) \times \delta\left[\xi - \frac{2(x_p + MS_b)v_x}{M\lambda f_x}\right] \right\} \times \left\{ \text{sinc}\left(T_y \frac{y}{M^2 \lambda f_y / 2}\right) \times \delta(y - y_p) \right\} \cos\left(2\pi\xi \frac{S_a}{v_x}\right). \quad (19)$$

从上述成像公式中显而易见: 目标点  $(x_p, y_p)$  的成像位置在

$$\xi = \frac{2(x_p + MS_b)v_x}{M\lambda f_x}, \quad (20)$$

$$y = y_p.$$

用点扩散函数表达成像分辨率函数为

$$p(\xi, y) = \text{sinc}(T_f \xi) \text{sinc}\left(MW_y \frac{y}{\lambda M^2 f_y / 2}\right), \quad (21)$$

相当于成像宽度为

$$\delta\xi = \frac{2}{T_f},$$

$$\delta y = 2 \frac{\lambda M^2 f_y / 2}{MW_y} = \lambda M \frac{f_y}{W_y}, \quad (22)$$

应当注意频率和交轨距离之间的关系  $x = \frac{M\lambda f_x / 2}{v_x} \xi$ 。同时令扫描时间宽度为光阑宽度  $(X_p)$  扫描时间的  $K$  倍即  $T_f = K \frac{W_x}{v_x}$ , 则交轨向的距离单位的分辨率为

$$\delta x = \lambda M \frac{f_x}{W_x} \frac{1}{K}. \quad (23)$$

特别应当在交轨项上垂直干涉项  $\cos\left(2\pi\xi \frac{S_a}{v_x}\right)$ , 其周期为

$$\Delta\xi = \frac{v_x}{S_a}, \quad (24)$$

这是用于等位线投影三维测量的核心基础。同时，干涉条纹周期也可以采用距离单位表达：

$$\Delta X = \lambda M \frac{f_x}{X_p} \frac{W_x}{2S_a} = \delta x \frac{W_x}{2S_a}. \quad (25)$$

## 5 讨 论

如图 2 所示，直视 SAL 的侧视观察可以实现 3D 地形浮雕成像。对于平面地形自干涉产生的平展条纹投影将在 SAL 像上沿交轨向产生平行条纹干涉图，因此对于 3D 地形将产生包含目标高度信息的局部变化的波痕干涉图，最后可以采用传统的解包裹算法产生表征目标表面轮廓的等位线图。为了更好地理解，以下给出一个具体的 SAL 的设计考虑。要求作用距离 1.8 km，照明光斑尺寸 7.5 m × 7.5 m，成像分辨率 18 mm。据此设计光阑窗口尺寸 5 mm × 5 mm，交轨向和顺轨向柱面镜聚焦 60 mm，发射主镜焦距 1.2 m，主镜放大率  $M = 1500$ 。给定  $S_b = 2.5$  mm， $S_a = 0.5$  mm，因此干涉条纹周期为 180 mm。

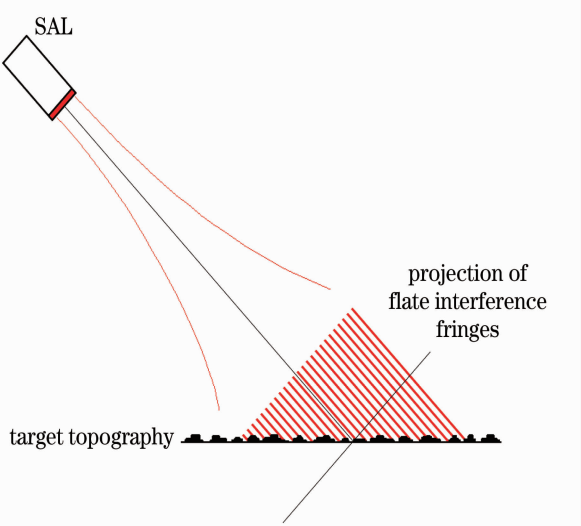


图 2 自干涉 SAL 的干涉条纹的侧视投影实现 3D 地形浮雕成像

Fig. 2 3D topographic relief imaging from an oblique projection of flat interference fringes from a self-interferometric SAL

交轨向柱面镜 lens11 和 lens21 的  $t_{f,n} = 0$  的相位二次项原始中心位置分别为  $S_1 = S_b + S_a$  和  $S_2 = S_b - S_a$ 。以扫描  $(-\frac{W_x}{2}, \frac{W_x}{2})$  为标准，lens11 的宽度为  $\frac{W_x}{2} + \frac{W_x}{2} + S_1 + \frac{W_x}{2}$ ，光学中心位于  $W_x + S_1$  和  $\frac{W_x}{2}$

之间。lens21 的宽度为  $\frac{W_x}{2} + \frac{W_x}{2} + S_2 + \frac{W_x}{2} (S_2 > \frac{W_x}{2})$ ，光学中心位于  $W_x + S_2$  和  $\frac{W_x}{2}$  之间，或者宽度为  $\frac{W_x}{2} + \frac{W_x}{2} + \frac{W_x}{2} + \frac{W_x}{2} (S_2 \leq \frac{W_x}{2})$ ，光学中心位于  $W_x + S_2$  和  $W_x - S_2$  之间。这些公式可用于计算交轨向柱面镜的尺寸。

图 1 给出的是一种原理性结构图，在具体实施上所有分系统均可以进一步简化，例如发射的偏振分离组合和柱面镜扫描分系统的具体设计上具有多种结构的选择。

## 6 结 论

在直视 SAL 的基础上，本文提出了一种自干涉的产生三维地形浮雕成像的原理方法。要点是对于交轨向正扫描和反扫描的柱面镜进行位置偏置，包括同向偏置其使得柱面镜的中心重合位置偏离出光阑窗口，也包括逆向偏置。同向偏置造成交轨向成像频谱的单边带平移，逆向偏置对于正扫描和反扫描的成像频谱产生相对线性相延，然后逐一对一对交轨向正扫描和反扫描收集聚焦像进行相干叠加，并由此产生自干涉。自干涉产生的平展条纹通过侧视方向对于目标面的投射即可产生包含目标高度信息的波痕干涉图，通过传统的解包裹算法产生表征目标表面轮廓的等位线图。

本方法采用一发一收的单航过干涉法三维成像，在直视 SAL 中作一些修改就可以实现 3D 成像，因此结构简单，原理有效。直视 SAL 本身具有抗大气、运动平台等相位干扰能力，因此这种附加的自干涉效应也不受大气、运动平台等相位干扰的影响。本建议提供了一种实现 SAL 干涉接收实现 3D 成像的可能途径。

在直视 SAL 的原始设计中<sup>[7,10]</sup>，交轨向和顺轨向的内光场相位二次项波前是通过光学元件衍射产生的。本文设计交轨向和顺轨向的内光场相位二次项波前采用相位二次项柱面镜直接产生，交轨向扫描采用驱动器直接推动，因此波面及其扫描位置可以获得很高的精确度。交轨向的扫描时间的启点和扫描位置的启点对于所有扫描必须保持不变，一种简单的解决方法是在扫描机械上采用高精度位置传感器来触发扫描时间启点。下一步将在我们已经发展的直视 SAL 装置上开展实验验证工作。

## 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 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.
- 3 J Ricklin, M Dierking, S Fuhrer, *et al.*. Synthetic aperture lidar for tactical imaging [C]. DARPA Strategic Technology Office, 2007.
- 4 B Krause, J Buck, C Ryan, *et al.*. Synthetic aperture lidar flight demonstration [C]. in CLEO; 2011, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2011), paper PDPB7.
- 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. Coherent and incoherent synthetic aperture imaging ladars and laboratory-space experimental demonstrations [Invited] [J]. *Appl Opt*, 2013, 52(4): 579—599.
- 8 C V Jakowatz, D E Wahl, P H Eichel, *et al.*. Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach[M]. Springer US, 1996.
- 9 S Crouch, Z W Barber. Laboratory demonstrations of interferometric and spotlight synthetic aperture lidar techniques [J]. *Opt Express*, 2012, 20(22): 24237—24246.
- 10 Liu Liren. Principle of down-looking synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0920002.  
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): 0920002.
- 11 Liu Liren. 2D Fourier-transform imaging algorithm for synthetic aperture imaging ladars [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0128001.  
刘立人. 合成孔径激光成像雷达的二维傅里叶变换成像算法[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0128001.

栏目编辑: 殷建芳