

# 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

刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 提出了合成孔径激光成像雷达(SAIL)的一种统一的工作模式,即激光雷达运动的同时进行光束扫描。同时推导了点目标激光雷达方程,据此还定义了 SAIL 二维数据收集方程,二维数据收集方程组是合成孔径激光雷达的数据产生和收集过程中的完整数学表达,并给出了统一模式的二维数据收集方程。从统一工作模式可以分解出条带扫描模式、聚束模式、滑动聚束模式和光束扫描模式,及其相应的简化二维数据收集方程。上述的光束扫描模式是一种激光雷达和被观察面之间相对静止而只采用光束扫描实现孔径合成成像的新方法,具有特殊的应用范围。

**关键词** 合成孔径激光成像雷达(SAIL); 条带扫描模式; 聚束模式; 滑动聚束模式; 光束扫描模式; 二维数据收集方程; 点目标激光雷达方程

中图分类号 TN958 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092901.0001

## Synthetic Aperture Imaging Ladar (IV): Unified Operation Mode and Two-Dimensional Data Collection Equation

Liu Liren

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

**Abstract** A unified operation mode of synthetic aperture imaging ladar (SAIL) with its linear moving and the footprint scanning is proposed. Moreover, we define a kind of two-dimensional (2-D) data collection equation based on the developed point target ladar equation, which is a complete mathematical description of data acquisition for 2-D SAIL imaging. The unified mode can be decomposed into strip-map mode, spotlight mode, sliding spotlight mode and beam scanning mode, and each correspondingly has a simplified 2-D data collection equation. The beam scanning mode with only the footprint scanning is a new mode, and has special applications.

**Key words** synthetic aperture imaging ladar; strip-map mode; spotlight-mode; sliding spotlight mode; beam scanning mode; the 2-D data collection equation; the point target ladar equation

### 1 引 言

微波合成孔径雷达主要有两种工作模式:一种是条带扫描模式<sup>[1]</sup>,另外一种为聚束模式<sup>[2]</sup>。合成孔径激光成像雷达(SAIL)的原理来自于微波合成孔径雷达,是能够在远距离取得厘米量级分辨率的唯一的光学成像观察手段,国外实验室已经给出了条带模式的验证<sup>[3,4]</sup>,也实现了机载的条带模式的合成孔径激光成像雷达试验<sup>[5]</sup>。

由于光波长远远小于微波波长,光学波段的合

成孔径激光成像雷达在信息获取的实施上与微波合成孔径雷达完全不同。我们已经提出了采用接收望远镜离焦或空间相位调制的方法消除目标回波像差的方法<sup>[6]</sup>,采用离焦或空间相位偏置的方法实现发射望远镜的照明波前二次项控制<sup>[7]</sup>,以及采用双向回路实现望远镜的满足一定相位历程记录的同时接收和发射<sup>[8]</sup>。在此基础上,本文基于滑动聚束微波合成孔径雷达<sup>[9]</sup>的工作模式提出了一种统一的合成孔径激光成像雷达的工作模式,即激光雷达运动的

收稿日期: 2008-08-04; 收到修改稿日期: 2008-09-16

作者简介: 刘立人(1942—),男,研究员,博士生导师,目前主要从事光折变集成光学、空间激光通信和激光雷达等方面的研究。E-mail: lirenliu@mail.shcnc.ac.cn

同时进行光束扫描,由它可以分解出合成孔径激光成像雷达的滑动聚束模式,条带扫描模式,聚束模式和光束扫描模式。其中光束扫描模式不同于微波领域传统的扫描合成孔径雷达模式(ScanSAR)<sup>[10]</sup>,是本文提出的一种新的工作模式,在激光雷达与目标相对静止条件下采用光束扫描实现激光合成孔径成像,因此具有特殊应用。

本文给出了合成孔径激光成像雷达从发射到点散射目标到回波接收和光电探测的点目标激光雷达方程,特别是首次提出并定义了描述合成孔径激光成像雷达数据产生和收集的两维数据收集方程。合成孔径激光成像过程分为两个过程:激光雷达数据产生收集过程和数据处理的成像过程,因此两维数据收集方程是激光雷达数据产生和收集过程中最终的完整数学表达。本文给出了统一工作模式的两维数据收集方程组,同时给出了条带扫描模式,聚束模式,滑动聚束模式和光束扫描模式下的相应的简化二维数据收集方程。

本文提出了合成孔径激光成像雷达的可能工作模式,并且归纳成为一种统一工作模式。同时也定义了合成孔径激光成像的二维数据收集方程组,这是合成孔径激光雷达的数据产生和收集过程的完整数学表达。

## 2 合成孔径激光成像雷达的统一工作模式

合成孔径激光成像雷达的统一工作模式的工作原理如图1所示。定义包含激光雷达光学主轴的平面为主平面,光学足迹的中心与雷达直线运动轨迹垂直时为空间和时间的参考原点,其垂线称为成像中心线,成像中心线上的光学足迹的中心定义为成像目标平面的坐标原点,而成像中心线与雷达运动轨迹的交点为雷达的时间参考原点,两中心的距离为 $z_0$ ,被测物体平面与主平面有一定夹角。合成孔径激光成像雷达做直线运动,步进间隔 $\Delta L_1$ ,光学足

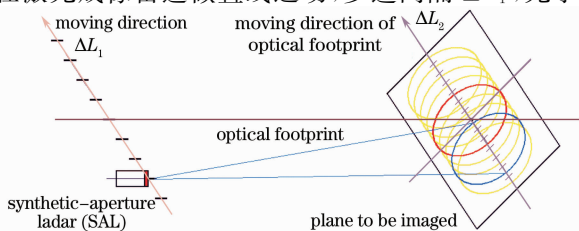


图1 统一工作模式结构示意图

Fig. 1 Configuration for the unified operation mode

迹沿目标平面扫描,步进间隔 $\Delta L_2$ 。

光学足迹是激光照明光斑和外差接收视场共同作用的物面可成像面积。合成孔径激光成像雷达的光学发射系统发射一定发散度的信号光束,在被测目标平面形成一定直径的发射光斑。而光学接收系统具有一定的外差接收视场,在被测目标平面也形成一定直径的可接收面积。发射光斑和可接收面积之小者为物面可成像面积即光学足迹。一般情况下,发射光束与接收视场同轴同心,光束发散度和外差接收视场角相等。

## 3 点目标激光雷达方程

点目标激光雷达方程用于数学描述合成孔径激光成像雷达从激光发射器发射到点散射目标,再反射到回波接收光电流输出的过程。

理想激光发射光源为频率线性调制 $f(t) = f_0 + \dot{f}t$ 的啁啾信号

$$u_0(t) = \sum_p E_0 \text{rect}\left(\frac{t - pT}{\Delta T}\right) \times \exp\left\{j2\pi\left[f_0(t - pT) + \frac{\dot{f}}{2}(t - pT)^2\right]\right\}, \quad (1)$$

式中 $T$ 为激光脉冲周期, $\Delta T$ 为激光脉冲宽度, $\dot{f}$ 为发射激光的频率啁啾速率。

合成孔径激光成像雷达采用高斯发射光束和平衡外差接收,其从一个距离为 $z$ 和位置坐标为 $(\alpha, \beta)$ 的散射点目标的回波探测信号为<sup>[8,11]</sup>

$$i(t; \tau'; \alpha, \beta) = C |\rho(\alpha, \beta)| \exp\left[-\frac{\alpha^2 + \beta^2}{w^2(z)}\right] \times \cos[2\pi\dot{f}\tau't + \Delta\Phi + \Phi(z, \alpha, \beta) + \varphi_\rho(\alpha, \beta)] \times \frac{2J_1\{\pi[d\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}/(\lambda z)]\}}{\pi[d\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}/(\lambda z)]} W(t), \quad (2)$$

$$C = j2\sqrt{2}\eta\pi r_0^2 E_l A_0 \frac{w_0}{w(z)} \frac{M}{\lambda z}, \quad (3)$$

式中 $w_0$ 为发射光束在望远镜出瞳的波腰, $M$ 为望远镜放大倍数, $\rho$ 为目标复反射率而 $\varphi_\rho$ 为其相位, $A_0$ 为激光回波振幅, $E_l$ 为本振激光振幅, $r_0$ 为接收孔径半径, $\eta$ 为探测器量子效率。其中 $\Delta\Phi$ 为代表所有的相位误差,包括脉冲初始频率不同步,初始相位波动,啁啾非线性,系统随机相位变化等。

设 $\tau$ 为波路信号的真实延迟时间,定义 $\tau'$ 为回波信号的等效时间延迟,按照激光脉冲内接收和激光脉冲间接收两种情况其可以分别表达为 $\tau' = \tau$ 或者 $\tau' = \tau - NT$ ,即目标信号时间延迟扣除 $N$ 整数倍激光脉冲周期后的余数延迟时间。

其中二次项历程为

$$\Phi(z; \alpha, \beta) = \pi \frac{\alpha^2 + \beta^2}{\lambda F}, \quad (4)$$

其中等效总焦距  $F$  为

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F_t} + \frac{1}{F_r} = \frac{1}{f_t} + \frac{1}{f_r} + \frac{1}{f_{\text{add}}}, \quad (5)$$

发射等效曲率半径为  $F_t = f_t$ ; 接收等效焦距为  $f_r$ , 附加的波面可控二次项等效半径  $f_{\text{add}}$ , 而合成的接收等效焦距为  $F_r$ 。

由于回波时延所产生的探测窗口函数为

$$W(t) = \text{rect}\left[\frac{t - (\Delta T + \tau')/2}{\Delta T - \tau'}\right]. \quad (6)$$

激光发射光束也可以采用平面波, 其分析数学相类似。

## 4 统一工作模式的二维数据收集方程

事实上合成孔径激光成像过程可分为两个主要过程: 激光雷达的数据产生收集过程和数据处理的成像过程, 前一过程由合成孔径激光雷达完成, 后一过程由计算机完成。在这里定义合成孔径激光成像的二维数据收集方程, 用于描述合成孔径激光成像雷达的用于二维成像的距离方向和方位方向上的数据产生和收集, 两维数据收集方程是合成孔径激光雷达数据产生和收集过程中完整数学表达。

统一工作模式的坐标系如图 2 所示, 设定激光雷达的步进时间间隔为  $\Delta t$ , 以雷达时间原点为相对时间参考点 ( $t=0$  和  $m=0$ ), 则激光雷达的移动距离  $m\Delta L_1$  和光学足迹的移动距离  $m\Delta L_2$ 。

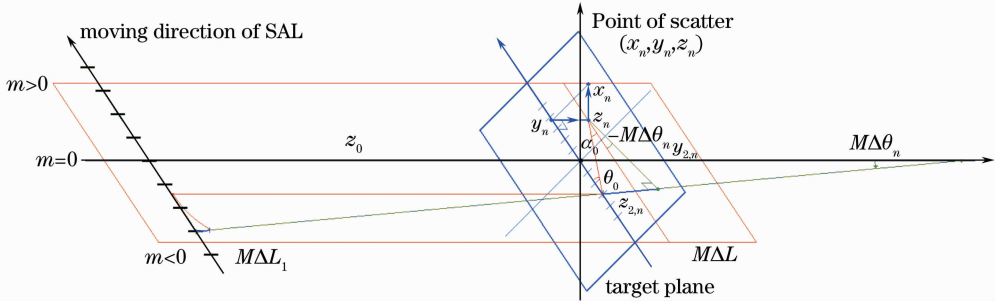


图 2 统一工作模式的坐标系

Fig. 2 Coordinate system for unified operation mode

在物体斜平面  $(\alpha, \beta)$  上第  $n$  个目标散射点的坐标为  $(\alpha_n, \beta_n)$ , 其在雷达-目标的相同坐标系中  $(x, y)$  的坐标位置为

$$x_n = \alpha_n \sin \varphi; \quad y_n = \beta_n; \quad z_n = \alpha_n \cos \varphi. \quad (7)$$

因此第  $n$  个目标散射点的坐标可以用  $(x_n, y_n, z_n)$  表示, 其中  $x_n$  是目标散射点到主平面投影的垂距,  $y_n$  是投影点到聚束中心线的距离,  $z_n$  是投影点到轨迹投影交线的距离。目标散射点  $(x_n, y_n, z_n)$  在轨迹投影交线上的投影点  $y_n$  到激光雷达坐标中心的目标视角为

$$\theta_n = y_n / z_0. \quad (8)$$

$$\text{定义} \quad \Delta\theta = (\Delta L_1 - \Delta L_2) / z_0. \quad (9)$$

对于第  $m$  个激光雷达和光学足迹位置连线的激光雷达上, 目标散射点在主平面内的投影的波面到物

面上的轨迹投影线的距离为

$$z_{2,n,m} \cong z_n - y_n m \Delta\theta. \quad (10)$$

而其距离为

$$y_{2,n,m} \cong y_n - m \Delta L_2. \quad (11)$$

在目标点  $(x_n, y_n, z_n)$  点上对应的相位为  $\exp\left(j \frac{\pi}{\lambda} \frac{x_n^2 + y_{2,n,m}^2}{z_0 + z_{2,n,m}}\right)$ 。

对于第  $m$  个激光雷达和光学足迹位置连线的激光雷达上, 产生距离变化有

$$z_{1,n,m} = \frac{[m(\Delta L_1 - \Delta L_2)]^2}{2z_0}. \quad (12)$$

其将产生相位偏置,  $\Delta L_1 > \Delta L_2$  时和  $\Delta L_1 < \Delta L_2$  时所偏置的二次项符号相反, 即

$$\exp\left\{j \pm \frac{\pi}{\lambda} \frac{[m(\Delta L_1 - \Delta L_2)]^2}{z_0}\right\}. \quad \begin{cases} + (L_1 > L_2) \\ - (L_1 < L_2) \end{cases} \quad (13)$$

因此对于发射过程的单程光程有

$$\exp(j\varphi_{n,m}^t) = \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda} (z_0 + z_{2,n,m})\right] \exp\left(j \frac{\pi}{\lambda} \frac{x_n^2 + y_{2,n,m}^2}{F_{t,n}}\right) \exp\left\{\pm j \frac{\pi}{\lambda} \frac{[m(\Delta L_1 - \Delta L_2)]^2}{z_0}\right\}. \quad (14)$$

而对于接收过程的单程光程有

$$\varphi_{n,m}^y = \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda}(z_0 + z_{2,n,m})\right] \exp\left(j \frac{\pi}{\lambda} \frac{x_n^2 + y_{2,n,m}^2}{F_{r,n}}\right) \exp\left\{\pm j \frac{\pi}{\lambda} \frac{[m(\Delta L_1 - \Delta L_2)]^2}{z_0}\right\}. \quad (15)$$

所以发射和接收过程后的波面相位为  $\exp(j\varphi_{n,m}) = \exp(j\varphi_{n,m}') \exp(j\varphi_{n,m}'')$ , 因此可以得到统一工作模式的波前相位的通用公式

$$\exp(j\varphi_{n,m}) = \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda} 2(z_0 + z_n)\right] \exp(j\Phi_{n,m}), \quad (16)$$

其中

$$\exp(j\Phi_{n,m}) = \exp\left(j \frac{\pi}{\lambda} \frac{x_n^2}{F}\right) \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda} \frac{(y_n - m\Delta L_2)^2}{F}\right] \exp\left\{\pm j \frac{2\pi}{\lambda} z_0 [(m\Delta\theta \mp \theta_n)^2 - \theta_n^2]\right\}. \quad (17)$$

第  $n$  个目标散射点的时间延迟表达为

$$\tau' = \frac{2(z_0 + z_n)}{c} \quad \text{or} \quad \tau' = \frac{2(z_0 + z_n) - NT}{c}. \quad (18)$$

采用点目标激光雷达方程, 可以得到第  $n$  个点目标在第  $m$  个扫描上的时间扫描一维数据收集方程为

$$i(t; \tau'_n; n; m) = C |\rho(\alpha_n, \beta_n)| \exp\left[-\frac{x_n^2 + (y_n - m\Delta L_2)^2}{w^2(z_0)}\right] \cos[2\pi f \tau'_n t + \Delta\Phi(n, m) + \Phi(n, m) + \varphi_\rho(n)] \times \frac{2J_1\{\pi[d \sqrt{x_n^2 + (y_n - m\Delta L_2)^2} / (\lambda z_0)]\}}{\pi[d \sqrt{x_n^2 + (y_n - m\Delta L_2)^2} / (\lambda z_0)]} W(t). \quad (19)$$

因此一个完整的滑动聚焦合成孔径激光成像雷达的两维数据收集方程为

$$I(t, m\Delta Y) = \sum_m \left[ \left( \sum_n i(t; \tau'_n; n; m) \right) \otimes \delta(Y - m\Delta Y) \right]. \quad (20)$$

可见上述两个公式组成的两维数据收集方程是激光雷达数据产生收集过程中完整的和直观的数学表达。

设光学足迹的直径为  $D$ , 一个目标点的光学足迹最大时间扫描数目为

$$K = D / (\Delta L_2). \quad (21)$$

## 5 基本工作模式分解

事实上, 上述合成孔径激光成像雷达的统一工作模式及其一般化二维数据收集方程可以分解出基本的工作模式及其相应的数据收集方程, 即滑动聚焦模式, 条带扫描模式, 聚焦模式和光束扫描模式。

### 5.1 滑动聚焦模式

合成孔径激光成像雷达作直线运动, 在运动中光学足迹以较慢的速度扫描被测目标平面内所关注的成像区域, 这时有  $\Delta L_1 > \Delta L_2$ 。从(19)式得到

$$i(t; \tau'_n; n; m) = C |\rho(\alpha_n, \beta_n)| \exp\left[-\frac{x_n^2 + (y_n - m\Delta L_2)^2}{w^2(z_0)}\right] \cos[2\pi f \tau'_n t + \Delta\Phi(n, m) + \Phi(n, m) + \varphi_\rho(n)] \times \frac{2J_1\{\pi[d \sqrt{x_n^2 + (y_n - m\Delta L_2)^2} / (\lambda z_0)]\}}{\pi[d \sqrt{x_n^2 + (y_n - m\Delta L_2)^2} / (\lambda z_0)]} W(t). \quad (22a)$$

从(17)式得到

$$\exp(j\Phi_{n,m}) = \exp\left(j \frac{\pi}{\lambda} \frac{x_n^2}{F}\right) \exp\left(-j \frac{\pi}{\lambda} \frac{y_n^2}{z_0}\right) \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda} (y_n - m\Delta L_2)^2 \frac{1}{F}\right] \times \exp\left\{j \frac{\pi}{\lambda} [(y_n - m(\Delta L_1 - \Delta L_2))]^2 \frac{2}{z_0}\right\}. \quad (22b)$$

其方位方向的相位二次项历程因子为  $m^2 \left[ \Delta L_2^2 \frac{1}{F} + (\Delta L_1 - \Delta L_2)^2 \frac{2}{z_0} \right]$ 。

### 5.2 条带扫描模式

合成孔径激光成像雷达作直线运动, 在运动中光学足迹等间隔地照明和接收被测目标平面(见图3)。这时有  $\Delta L_1 = \Delta L_2 = \Delta L$  和  $\Delta\theta = 0$ 。从(19)式得到

$$i(t; \tau'_n; n; m) = C |\rho(\alpha_n, \beta_n)| \exp\left[-\frac{x_n^2 + (y_n - m\Delta L)^2}{\omega^2(z_0)}\right] \cos[2\pi f \tau'_n t + \Delta\Phi(n, m) + \Phi(n, m) + \varphi_\rho(n)] \times \frac{2J_1\{\pi[d\sqrt{x_n^2 + (y_n - m\Delta L)^2}/(\lambda z_0)]\}}{\pi[d\sqrt{x_n^2 + (y_n - m\Delta L)^2}/(\lambda z_0)]} W(t). \quad (23a)$$

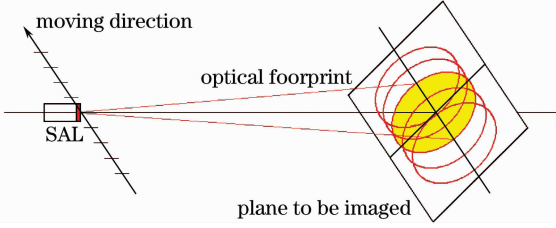


图3 条带扫描模式结构示意图

Fig. 3 Configuration for the strip-map mode

从(17)式得到

$$\exp(j\Phi_{n,m}) = \exp\left\{j \frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{x_n^2 + (y_n - m\Delta L)^2}{F}\right]\right\}. \quad (23b)$$

其方位方向的相位二次项历程因子为  $m^2 \frac{\Delta L^2}{F}$ 。

这是条带模式合成孔径激光成像雷达的典型波前空间相位表达式,可以改变发射过程等效波面曲率和接收过程的等效二次项焦距对于目标产生合适的二次项相位历程,即合适的多普勒频移。

### 5.3 聚束模式

合成孔径激光成像雷达作直线运动,在运动中光学足迹恒定地指准在被测目标平面内所关注的成像区域(见图4)。这时有  $\Delta L_2 = 0, \Delta L_1 = \Delta L$  和  $\Delta\theta = \Delta L/z_0$ 。从(19)式得到

$$i(t; \tau'_n; n; m) = C |\rho(\alpha_n, \beta_n)| \exp\left[-\frac{x_n^2 + y_n^2}{\omega^2(z_0)}\right] \cos[2\pi f \tau'_n t + \Delta\Phi(n, m) + \Phi(n, m) + \varphi_\rho(n)] \times \frac{2J_1\{\pi[d\sqrt{x_n^2 + y_n^2}/(\lambda z_0)]\}}{\pi[d\sqrt{x_n^2 + y_n^2}/(\lambda z_0)]} W(t). \quad (24a)$$

从(17)式得到

$$\exp(j\Phi_{n,m}) = \exp\left(j \frac{\pi}{\lambda} \frac{x_n^2}{F}\right) \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda} y_n^2 \left(\frac{1}{F} - \frac{2}{z_0}\right)\right] \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda} (y_n - m\Delta L)^2 \frac{2}{z_0}\right]. \quad (24b)$$

其方位方向的相位二次项历程因子为  $m^2 \frac{2\Delta L^2}{z_0}$ 。

由此可见,聚束模式合成孔径激光成像雷达方位方向的相位历程并不是照明波前和接收等效波前所产生的,而是运动平台距离聚束中心线的斜距变化所造成的,这是与条带合成孔径激光成像雷达和扫描式合成孔径激光成像雷达的关键性不同之处。进一步相比较可见,聚束合成孔径激光成像雷达要求雷达运动中光主轴严格对准目标同一点,主轴定向精度应当高于成像分辨率要求。

### 5.4 光束扫描式

合成孔径激光成像雷达与被测目标相对静止,激光雷达的光学足迹扫描被测目标平面内所关注的成像区域(图5)。这时有  $\Delta L_1 = 0, \Delta L_2 = \Delta L$  和  $\Delta\theta = -\Delta L/z_0$ 。从(19)式得到

$$i(t; \tau'_n; n; m) = C |\rho(\alpha_n, \beta_n)| \exp\left[-\frac{x_n^2 + (y_n - m\Delta L_2)^2}{\omega^2(z_0)}\right] \cos[2\pi f \tau'_n t + \Delta\Phi(n, m) + \Phi(n, m) + \varphi_\rho(n)] \times \frac{2J_1\{\pi[d\sqrt{x_n^2 + (y_n - m\Delta L_2)^2}/(\lambda z_0)]\}}{\pi[d\sqrt{x_n^2 + (y_n - m\Delta L_2)^2}/(\lambda z_0)]} W(t). \quad (25a)$$

从(17)式有

$$\exp(j\Phi_{n,m}) = \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda} 2(z_0 + z_n)\right] \exp\left(j \frac{\pi}{\lambda} x_n^2 \frac{1}{F}\right) \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda} (y_n - m\Delta L)^2 \left(\frac{1}{F} - \frac{2}{z_0}\right)\right] \exp\left(j \frac{\pi}{\lambda} y_n^2 \frac{2}{z_0}\right). \quad (25b)$$

其方位方向的相位二次项历程因子为  $m^2 \Delta L^2 \left(\frac{1}{F} - \frac{2}{z_0}\right)$ 。

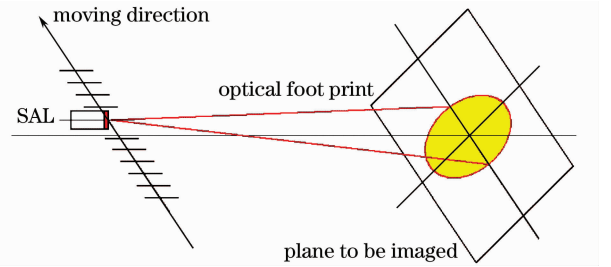


图4 聚束模式结构示意图

Fig. 4 Configuration for the spotlight mode



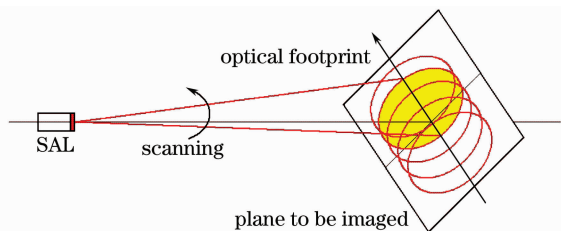


图 5 光束扫描模式结构示意图

Fig. 5 Configuration for the beam-scanning mode

这种光束扫描合成孔径激光成像雷达工作时激光雷达和被观察面之间相对静止而采取激光雷达光束扫描方式进行孔径合成成像。由此公式可见,因为能够利用光学的特点即灵活产生可控的相位历程,解决了雷达扫描产生的本征相位二次项偏置问题( $1/F_{\text{equ}} - 2/z_0 \neq 0$ ),从而能够产生目标点的二次项相位历程。计算上成像坐标系为径向距离方向和扫描角度方向。这种新型工作方式的光束扫描并不存在于微波合成孔径雷达领域,只存在于合成孔径激光成像雷达领域,开阔了合成孔径激光成像雷达的应用范围。

## 6 结 论

提出一种合成孔径激光成像雷达的一种统一的工作模式,即激光雷达运动的同时进行光束扫描。同时还定义了点目标激光雷达方程和二维数据收集方程,二维数据收集方程组是合成孔径激光雷达的数据产生和收集过程中的最终的完整数学表达,并同时给出了统一模式的二维数据收集方程。从统一工作模式可以分解出条带扫描模式,聚束模式,滑动聚束模式和光束扫描模式,及其相应的简化二维数据收集方程。上述的光束扫描模式是一种激光雷达和被观察面之间相对静止而采用光束扫描实现孔径合成成像的新方法,具有特殊的应用。

聚束模式和滑动聚束模式的实施需要有两个运动自由度:激光雷达直线移动和光学足趾扫动,在光频范围保持两种运动的精确同步是非常困难的。条带扫描模式的实施只需要激光雷达直线移动一个运动自由度,光束扫描模式的实施也只需要光学足趾扫动一个运动自由度,因此这两种模式是相对容易实现的。空间激光应用系统的光束扫描的方法及其检验技术可以参见参考文献[12,13]。

二维数据收集后需要进行图像再现处理。理想情况下,距离方向的聚焦像可以通过线性相位调制

项的傅里叶变换压缩取得,方位方向的聚焦像可以通过二次相位项的匹配滤波压缩取得。由于啁啾非线性的存在,可以采用附加光学外差参考通道测量出非线性并进行回波信号的补偿从而在距离方向得到压缩成像;方位方向存在的相位误差可以采用相位梯度算法等自聚焦算法实现压缩成像<sup>[3,4]</sup>。

## 参 考 文 献

- 1 J. C. Curlander, R. N. Mcdonough. *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing* [M]. Han Chuanzhao transl., Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006  
J. C. Curlander, R. N. Mcdonough. 合成孔径雷达——系统与信号处理[M]. 韩传钊译,北京:电子工业出版社,2006
- 2 C. V. Jakowatz, Jr., D. E. Wahl, P. H. Eichel *et al.*. *Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach* [M], Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996
- 3 M. Bashkansky, R. L. Lucke, F. Funk *et al.*. Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(22): 1983~1985
- 4 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
- 5 J. Ricklin, M. Dierking, S. Fuhrer *et al.*. Synthetic aperture lidar for tactical imaging [C]. *DARPA Strategic Technology Office*,
- 6 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging radar (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
- 7 Liu Liren. Synthetic-Aperture 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
- 8 Liu Liren. Synthetic aperture 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
- 9 J. Mittermayer, R. Lord, E. Boerner. Sliding spotlight SAR processing for TerraSAR-X using a new formulation of the extended chirp scaling algorithm[C]. *Proc. IGARSS (Toulouse France)*, 2003. 1462~1464
- 10 R. L. Jordan, B. L. Huneycutt, M. Werner. The SIR-C/X-SAR synthetic aperture radar system [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, **33**(4): 829~839
- 11 Liren Liu. Optical antenna of telescope for synthetic aperture lidar[C]. *Proc. SPIE*, 2008, **7094**: 7094F1~F13
- 12 Liu Liren. Laser communications in space I: Optical link and terminal technology[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(1): 3~20  
刘立人. 卫星激光通信 I 链路和终端技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 3~20
- 13 Liu Liren. Laser communications in space II: Test and verification techniques on the ground[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(2): 147~155  
刘立人. 卫星激光通信 II: 地面检测和验证技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 147~155