

直视合成孔径激光成像雷达原理

刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所中科院空间激光通信和检验技术重点实验室, 上海 201800)

摘要 提出了直视合成孔径激光成像雷达(SAIL)概念,发射采用两个正交偏振同轴且相对扫描的空间抛物波差的光束,接收采用自差及相位复数化探测。在轨向产生与目标点横向位置正比的线性项相位调制,在顺轨向产生以目标点纵向位置为中心的二次项相位历程,成像处理采用傅里叶变换实现轨向聚焦和采用匹配滤波实现顺轨向聚焦。直视 SAIL 与侧视 SAIL 一样能够使用小光学孔径在远距离实现高分辨率二维成像,但具有本质独特性即线性和二次相位项和光学足趾及其相关联的成像分辨率无论在设计和使用时都具有很大的控制调整范围,并克服了存在于侧视 SAIL 中的许多技术难点。直视 SAIL 在原理和方法上都属于光学领域。给出了直视 SAIL 的一般性体系结构,在数学上详细描述了包括目标信息获取和成像处理的基本原理。

关键词 遥感;合成孔径激光成像雷达;直视雷达;空间抛物面相位差;自差探测;线性项相位调制;二次项相位历程;傅里叶变换;匹配滤波

中图分类号 TN958 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0928002

Principle of Down-Looking Synthetic Aperture Imaging Ladar

Liu Liren

(Key Laboratory of Space Lasercom and Testing Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract A kind of down-looking synthetic aperture imaging ladar (SAIL) is proposed, with a transmitter of two coaxial counter-deflected polarization-orthogonal beams of spatial parabolic phase difference and a receiver of self-heterodyne detection combined with phase complex-valued processing. In the orthogonal direction of travel, a linear phase modulation proportional to the lateral distance of target point and a quadratic phase history centered in the longitudinal position of target point in the travel direction are collected respectively. The image is focused by the Fourier transform and matched filtering in the two respective directions. Similar to the side-looking SAIL, the suggested down-looking SAIL achieves the fine-resolution, long-distance and two-dimensional imaging with modest aperture diameters, but it has inherent feature that the linear and quadratic phase terms and the size of optical footprint together with their associated imaging resolutions are controllable and variable in a large scale no matter in use or design. And, down-looking SAIL has overcome many difficulties in side-looking SAIL. The down-looking SAIL belongs to optics in the principle and means. This paper gives the general construction of down-looking SAIL, and details mathematically the principle including the data collection and the image processing.

Key words remote sensing; synthetic aperture imaging ladar; down-looking radar; spatial parabolic phase difference; self-heterodyne detection; linear phase modulation; quadratic phase history; Fourier transform; matched filtering

OCIS codes 280.6730; 280.340; 110.1080; 110.3175; 110.2970

1 引 言

合成孔径激光成像雷达(SAIL)的原理来源于射频领域的合成孔径雷达原理,是能够在远距离得

到厘米量级成像分辨率的唯一光学成像观察手段^[1~7]。其是以侧视为必要工作条件,即在侧视条件下实施距离向的距离分辨成像,并在此基础上在

收稿日期: 2012-06-29; 收到修改稿日期: 2012-07-20

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

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

方位向实施孔径合成即二次项相位历程的匹配滤波成像。侧视 SAIL 工作在光频段,完全不能采用微波技术方法,因此存在许多问题。侧视 SAIL 采用光学外差接收,受大气扰动、运动平台振动、目标散斑和激光雷达系统本身相位变化等影响很大^[3,8],虽然在概念上可采用干涉法实时测量相位波动并进行实时补偿^[2,5,7],但这在实际应用中是很困难的。侧视 SAIL 为了在方位向保证无扰动的二次项相位历程,要求拍频信号的初始相位严格同步,因此需要采用氰化氢(HCN)光谱滤波触发控制技术^[1]。在侧视 SAIL 中发射孔径决定了照明光斑尺寸和成像分辨率,为了增大发射光斑尺寸需要采用较小的发射光学天线口径,而为了增大接收能量则需要采用较大的接收光学天线口径,这造成外差接收视场角减少,所以匹配激光发散角和接收视场角是相互矛盾的^[9~13]。定义光学足趾为照明光斑和外差接收视场所关联的目标面接收尺度的较小者,理想光学足趾下照明光斑尺寸等于外差接收尺寸。因此为了得到大的理想光学足趾需要在大口径接收系统中采用阵列光电探测器。侧视 SAIL 为了降低拍频频率和抑制非线性啁啾的影响而需要长距离延时的本振光束,不论是采用光纤延时线或附加通道数字延时,为了控制相位变化在技术上是相当复杂的^[2,4]。侧视 SAIL 因为侧视而造成目标成像阴影,在光频段因为目标远远大于波长使得阴影效应更加明显。上述这些因素严重影响了侧视 SAIL 的实用化。

本文基于抛物波前差动扫描和自差探测复数化接收的方法,提出了一种直视 SAIL,基本原理是: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光束并且进行自差接收,这两个波前的合成相位差为抛物等位线分布。在沿运载平台运动正交的交轨方向上两个光束的波前具有相同曲率并作相互反向的偏转,因此在快时间轴上产生目标交轨方向与目标点位置成正比的空间线性相位项调制,在运载平台运动的顺轨方向上两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与目标点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,这种成像处理算法与侧视 SAIL 相同。

直视 SAIL 的本质特点是空间线性相位项调制、空间二次项相位历程和照明光斑尺寸及其相关联的成像分辨率无论在设计和使用时都具有很大的控制和调整范围。直视 SAIL 具有如下优点: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,不需要光学延时线,没有拍频初始相位同步要求,并可使用低质量的光学系统。由于在发射机内采用了波前变换放大的设计而不是发射孔径自然衍射的原理,使得照明光斑可以很大而且抛物相位差可控,同时由于采用自差探测使得接收口径可以很大,因此能够同时实现大的光学足趾,高的成像分辨率和较强的回波接收强度。由于采用直视观察,成像无阴影。虽然直视 SAIL 的基本原理与侧视 SAIL 不同,但是其成像采用与侧视 SAIL 相同的交轨向傅里叶变换和顺轨向相位二次项匹配滤波的算法。直视 SAIL 适合于对地观察应用,逆 SAIL 的形式也特别适用于空间活动小目标的探索。

本文第二节中给出了直视 SAIL 的一般性物理结构,第三节在数学上详细描述了包括目标信息获取和成像处理的基本原理,第四节分析了成像分辨率和讨论了成像中的交叉干扰问题。

2 直视合成孔径激光成像雷达的一般性结构

直视 SAIL 工作状态是其光轴垂直对准目标面,雷达搭载平台的运动方向为顺轨方向(记为 y 方向),顺轨的正交方向为交轨方向(x 方向),光轴方向为雷达的直视方向(z 方向),图 1 给出了直视 SAIL 和侧视 SAIL 的工作方式示意,均属于条带扫描模式^[14]。

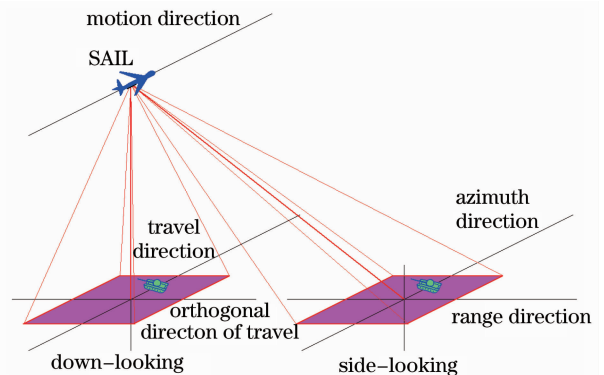


图 1 直视 SAIL 和侧视 SAIL 的工作方式
Fig. 1 Operation modes of down-looking SAIL and side-looking SAIL

本文提出的直视 SAIL 一般性结构的功能模块图见图 2,一个直视 SAIL 由发射机、接收机和控制计算机构成。对于一个特定的应用系统可以根据要求对模块的排布和结构进行具体设计。

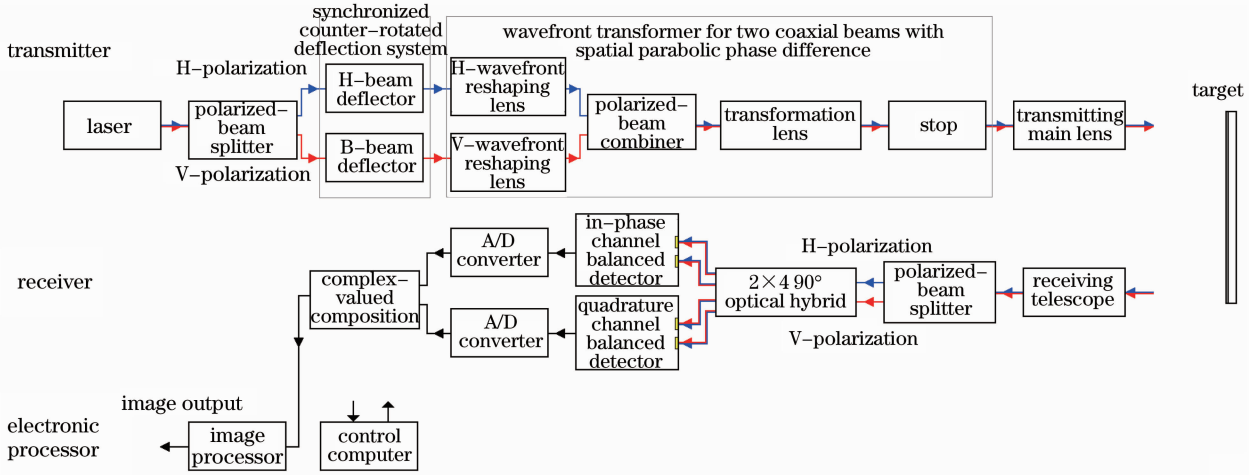


图 2 直视 SAIL 的一般原理图

Fig. 2 General scheme of down-looking SAIL

直视 SAIL 的第一个关键问题是发射机必须产生具有空间抛物相位波前差的同轴偏转正交偏振的发射双光束。激光光源输出的偏振光束经过发射偏振分束器在空间上被偏振分解为两个等强度的偏振正交的 H-偏振光束和 V-偏振光束, H-偏振光束先经过 H-偏振光路偏转器然后再通过 H-偏振光路波前变形镜到发射偏振合束器, V-偏振光束先经过 V-偏振光路偏转器然后再通过 V-偏振光路波前变形镜到发射偏振合束器。H-偏振光束偏转器和 V-偏振光束偏转器事实上组成一个同步相对旋转偏转系统以实现两光束的精确对向扫描。该发射偏振合束

器将 H-偏振光束和 V-偏振光束再组合为同轴同心且偏振正交的抛物相位波差的光束, 因此 H-波前变形镜和 V-波前变形镜, 发射偏振合束器和变换透镜构成了关键性的能从输入平行光束产生偏振正交和具有空间抛物相位波前差的同轴双光束的波前变换器。搭载平台的运动可以在交轨向产生与目标横向位置成正比的线性相位项调制, 同时在顺轨向产生以目标纵向位置为中心的可控二次项相位历程。因此应当设计两个波前变形镜和变换透镜的结构参数使得在发射主镜后焦面上产生两个内发射光场分布, 其具有如下的空间相位二次项形式:

$$e_H^{\text{in}}(x, y) = CW(x, y) \text{rect} \frac{x - \alpha^{\text{in}} t_f}{L_x^{\text{in}}} \text{rect} \frac{y}{L_y^{\text{in}}} \exp \left\{ j\pi \left[\frac{(x - \alpha^{\text{in}} t_f)^2}{\lambda R_1^{\text{in}}} + \frac{y^2}{\lambda R_1^{\text{in}}} \right] \right\}, \quad (1a)$$

$$e_V^{\text{in}}(x, y) = CW(x, y) \text{rect} \frac{x + \alpha^{\text{in}} t_f}{L_x^{\text{in}}} \text{rect} \frac{y}{L_y^{\text{in}}} \exp \left\{ j\pi \left[\frac{(x + \alpha^{\text{in}} t_f)^2}{\lambda R_1^{\text{in}}} - \frac{y^2}{\lambda R_2^{\text{in}}} \right] \right\}, \quad (1b)$$

式中 R_1^{in} 和 R_2^{in} 为等效二次项曲率半径; $\text{rect}(x/L_x^{\text{in}})\text{rect}(y/L_y^{\text{in}})$ 为光场振幅分布函数, 其中 L_x^{in} 和 L_y^{in} 分别为 x 方向和 y 方向上的宽度; t_f 为光束扫描的快时间, 扫描的中心偏移量为 $\alpha^{\text{in}} t_f$, 其扫描宽度为 T_f , 即扫描的起始和终结时间为 $(-T_f/2, T_f/2)$, α^{in} 为与扫描器和相应光学系统结构有关的时间偏转参数。发射主镜后焦面上存在一个限定内光场的矩形光阑, 矩形孔径平行光束偏振方向, 窗口函数即为

$$W(x, y) = \text{rect} \left(\frac{x}{K_w L_x^{\text{in}}} \right) \text{rect} \left(\frac{y}{L_y^{\text{in}}} \right), \quad (2)$$

式中 K_w 是由于光束偏转造成的可成像有效条幅宽度因子(见后)。可见两个内光场波前的空间相位差为抛物面函数:

$$\Delta\varphi_{\text{in}}(x, y) = -\frac{2\pi}{\lambda R_1^{\text{in}}/2} x(\alpha^{\text{in}} t_f) + \frac{\pi}{\lambda R_3^{\text{in}}} y^2, \quad (3)$$

式中 $1/R_3^{\text{in}} = 1/R_1^{\text{in}} + 1/R_2^{\text{in}}$ 。事实上发射望远镜主镜后焦面上的内发射光场的受限光阑可以为矩形孔径也可以为圆形孔径。矩形光斑能够产生均匀的照明条幅, 所以具有更好的成像分辨率^[15]。应当注意光场的场强及其传播因子为复常数, 在本文中为了简化表达均忽略不计并一直记作为 C 。

图 3 给出了一种同轴双光束波前变换器的具体结构, 变换透镜的焦距为 f_2 , V-偏振光路的波前变形镜为柱面镜, 其焦距为 f_2 , H-偏振光路无波前变形镜。以图中的位置安排并考虑准几何投影变换^[7, 11, 16], 有 $R_1^{\text{in}} = R_2^{\text{in}} = f_2/2$ 。

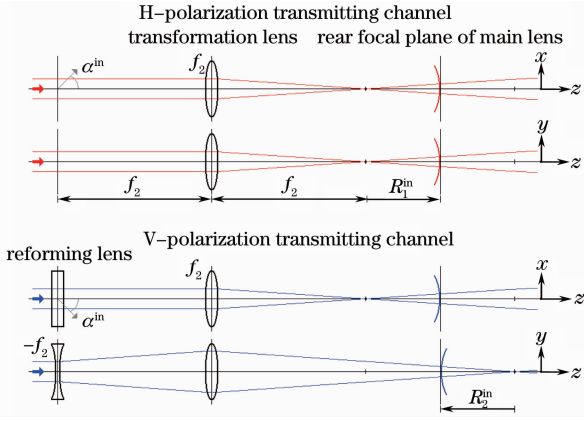


图 3 一种产生空间抛物相位差的正交偏振同轴双光束的波前变换器结构

Fig. 3 A wavefront transformer for two coaxial polarization-orthogonal beams of spatial parabolic phase difference

第二个关键问题是接收机必须实现同轴相干探测及回波信号相位的复数化处理。同样见图 2, 目标回波由接收望远镜接收, 被接收的回波光束通过接收偏振分束镜相应地再分解为偏振正交的 H-偏振光束和 V-偏振光束, 两路光束进入 2×4 90° 光学

桥接器^[17], 其输出为 4 组相互具有 90° 相移的同轴干涉光束对, 其中相移为 0° 和 180° 的两组光束对由同相通道平衡探测器探测, 其输出由同相通道模数变换器转化为数字信号, 而相移为 90° 和 270° 的两组光束对由 90° 相移通道平衡探测器探测, 其输出由 90° 相移通道模数变换器转化为数字信号, 同相通道模数变换器输出的数字信号和 90° 相移通道模数变换器输出的数字信号由数字化复数化处理器产生最终的目标数据, 然后采用数字图像处理器实现目标图像重构。控制计算机用于数据获取和图像处理的流程控制。

3 直视合成孔径激光成像雷达的基本原理

3.1 信息获取过程

直视 SAIL 的两个内发射光场由发射主镜发射向目标, 发射主镜的焦距为 f_1 , 目标中心距离为 Z , 令作用距离产生的放大倍数为 $M = Z/f_1$, 这时在目标面上形成的 H-偏振和 V-偏振的照明波前分别为

$$e_{\text{H}}^{\uparrow}(x, y) = CW \left(\frac{x}{M}, \frac{y - \beta t_s}{M} \right) \text{rect} \left(\frac{x - \alpha t_f}{L_x} \right) \text{rect} \left(\frac{y - \beta t_s}{L_y} \right) \exp \left\{ j \frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{(x - \alpha t_f)^2}{R_1} + \frac{(y - \beta t_s)^2}{R_1} \right] \right\} \times \exp \left\{ j \frac{\pi}{\lambda Z} [x^2 + (y - \beta t_s)^2] \right\}, \quad (4a)$$

$$e_{\text{V}}^{\uparrow}(x, y) = CW \left(\frac{x}{M}, \frac{y - \beta t_s}{M} \right) \text{rect} \left(\frac{x + \alpha t_f}{L_x} \right) \text{rect} \left(\frac{y - \beta t_s}{L_y} \right) \times \exp \left\{ j \frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{(x + \alpha t_f)^2}{R_1} - \frac{(y - \beta t_s)^2}{R_2} \right] \right\} \times \exp \left\{ j \frac{\pi}{\lambda Z} [x^2 + (y - \beta t_s)^2] \right\}, \quad (4b)$$

式中 $R_1 = M^2 R_1^{\text{in}}, R_2 = M^2 R_2^{\text{in}}, \alpha = M \alpha_{\text{in}}, t_s$ 为慢时间, β 是慢时间在平台运动顺轨向的照明光斑中心位置时间参数, 目标面上的照明光斑尺寸为 $L_x = M L_x^{\text{in}}, L_y = M L_y^{\text{in}}$ 。上述公式中最后一项与 Z 有关的相位二次项是发射光束夫琅和费衍射传播产生的远场背景相位二次项。对于一个特定的慢时间, 抛物相位分布随快时间扫描变化, 可见照明光斑的空间相位差具有抛物等位线:

$$\Delta \varphi^{\uparrow}(x, y; \alpha t_f, \beta t_s) = -\frac{2\pi}{\lambda R_1/2} x \alpha t_f + \frac{\pi}{\lambda R_3} (y - \beta t_s)^2, \quad (5)$$

式中 $1/R_3 = 1/R_1 + 1/R_2$ 。一般设计时采用 $R_1 = R_2$, 这时 $R_3 = R_1/2$ 。

可以分析一个目标点 (x_p, y_p) 的成像来解释整个目标的成像过程。目标点 (x_p, y_p) 上的场强为

$$e_{\text{H}}^{\uparrow}(x_p, y_p) = CW \left(\frac{x_p}{M}, \frac{y_p - \beta t_s}{M} \right) \text{rect} \left(\frac{x_p - \alpha t_f}{L_x} \right) \text{rect} \left(\frac{y_p - \beta t_s}{L_y} \right) \exp \left\{ j \frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{(x_p - \alpha t_f)^2}{R_1} + \frac{(y_p - \beta t_s)^2}{R_1} \right] \right\} \times \exp \left\{ j \frac{\pi}{\lambda Z} [x_p^2 + (y_p - \beta t_s)^2] \right\}, \quad (6a)$$

$$e_{\text{V}}^{\uparrow}(x, y) = CW \left(\frac{x_p}{M}, \frac{y_p - \beta t_s}{M} \right) \text{rect} \left(\frac{x_p + \alpha t_f}{L_x} \right) \text{rect} \left(\frac{y_p - \beta t_s}{L_y} \right) \exp \left\{ j \frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{(x_p + \alpha t_f)^2}{R_1} - \frac{(y_p - \beta t_s)^2}{R_2} \right] \right\} \times \exp \left\{ j \frac{\pi}{\lambda Z} [x_p^2 + (y_p - \beta t_s)^2] \right\}. \quad (6b)$$

目标回波由接收望远镜接收, 目标回波用夫琅和费衍射描述, 因此除了传播因素外也将引入一个远场传

播的背景相位二次项,因此目标点 (x_p, y_p) 在接收天线面上的回波接收信号分别为

$$e_H^{\text{TR}}(x_p, y_p) = CW \left(\frac{x_p}{M}, \frac{y_p - \beta t_s}{M} \right) \text{rect} \left(\frac{x_p - \alpha t_f}{L_x} \right) \text{rect} \left(\frac{y_p - \beta t_s}{L_y} \right) \exp \left\{ j \frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{(x_p - \alpha t_f)^2}{R_1} + \frac{(y_p - \beta t_s)^2}{R_1} \right] \right\} \times \exp \left\{ j \frac{\pi}{\lambda Z} [x_p^2 + (y_p - \beta t_s)^2] \right\} \exp \left\{ j \frac{\pi}{\lambda Z} [(x - x_p)^2 + [y - (y_p - \beta t_s)]^2] \right\} \exp(j\Delta\varphi_H), \quad (7a)$$

$$e_V^{\text{TR}}(x, y) = CW \left(\frac{x_p}{M}, \frac{y_p - \beta t_s}{M} \right) \text{rect} \left(\frac{x_p + \alpha t_f}{L_x} \right) \text{rect} \left(\frac{y_p - \beta t_s}{L_y} \right) \exp \left\{ j \frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{(x_p + \alpha t_f)^2}{R_1} - \frac{(y_p - \beta t_s)^2}{R_2} \right] \right\} \times \exp \left\{ j \frac{\pi}{\lambda Z} [x_p^2 + (y_p - \beta t_s)^2] \right\} \exp \left\{ j \frac{\pi}{\lambda Z} [(x - x_p)^2 + [y - (y_p - \beta t_s)]^2] \right\} \exp(j\Delta\varphi_V), \quad (7b)$$

其中两回波的产生的相位差可以进一步表达为

$$\Delta\varphi^{\text{TR}}(x_p, y_p; \alpha t_f, \beta t_s) = \frac{\pi}{\lambda} \left[-\frac{2x_p \alpha t_f}{R_1/2} + \frac{(y_p - \beta t_s)^2}{R_3} \right] + \Delta\varphi_H - \Delta\varphi_V, \quad (8)$$

式中 $\Delta\varphi_H$ 和 $\Delta\varphi_V$ 分别为H-通道和V-通道的大气、运动平台、光雷达系统和散斑的相位变化和干扰。同光轴条件下有 $\Delta\varphi_H - \Delta\varphi_V \approx 0$,即具有自动消除相位变化和干扰的能力。同时可以看到接收面上的目标回波的空间相位与接收面坐标无关,说明自差接收是无方向性的。应当注意这个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。十分有意义的是直视SAIL的线性相位调制项对于目标面中心两侧

距离相同的点具有符号相反的线性相位调制,因此其轨迹可以分开。对比侧视SAIL,其在俯视(即本文的直视)状态下不能够区分这两个点,因此侧视是必需的^[18]。

由此可以计算 $2 \times 4 \ 90^\circ$ 光学桥接器的同相通道平衡接收器和 90° 相移通道平衡接收器的相干接收的积分光功率,这可以等效地在接收天线面上计算,天线尺寸为 $D_x \times D_y$ 。同相通道平衡接收器的相干接收积分光功率为

$$I(x_p, y_p; \alpha t_f, \beta t_s) = C \iint_{D_x \times D_y} [e_H^{\text{TR}}(x, y; x_p, y_p; \alpha t_f, \beta t_s)^* e_V^{\text{R}}(x, y; x_p, y_p; \alpha t_f, \beta t_s) + e_H^{\text{TR}}(x, y; x_p, y_p; \alpha t_f, \beta t_s) e_V^{\text{TR}}(x, y; x_p, y_p; \alpha t_f, \beta t_s)^*] dx dy = CD_x D_y [e_H^{\text{TR}}(x, y; x_p, y_p; \alpha t_f, \beta t_s)^* e_V^{\text{TR}}(x, y; x_p, y_p; \alpha t_f, \beta t_s) + e_H^{\text{TR}}(x, y; x_p, y_p; \alpha t_f, \beta t_s) e_V^{\text{TR}}(x, y; x_p, y_p; \alpha t_f, \beta t_s)^*]. \quad (9)$$

应当特别注意:同一物点不产生与接收面坐标有关的相位因子,因此不产生相干探测的方向性函数与接收孔径成反比的问题^[10],因此照明光斑尺寸就是光学足趾尺寸。从积分光强可以直接得到信号的光电流表达。根据上述计算,可以进一步求得 $2 \times 4 \ 90^\circ$ 光学桥接器同相通道平衡接收器和 90° 相移通道平衡接收器的光电流输出分别为

$$i_1(x_p, y_p; \alpha t_f, \beta t_s) = CW \left(\frac{x_p}{M}, \frac{y_p - \beta t_s}{M} \right) \text{rect} \left(\frac{x_p - \alpha t_f}{L_x} \right) \text{rect} \left(\frac{x_p + \alpha t_f}{L_x} \right) \text{rect} \left(\frac{y_p - \beta t_s}{L_y} \right) \cos \Delta\varphi^{\text{TR}}(x_p, y_p; \alpha t_f, \beta t_s), \quad (10a)$$

$$i_Q(x_p, y_p; \alpha t_f, \beta t_s) = CW \left(\frac{x_p}{M}, \frac{y_p - \beta t_s}{M} \right) \text{rect} \left(\frac{x_p - \alpha t_f}{L_x} \right) \text{rect} \left(\frac{x_p + \alpha t_f}{L_x} \right) \text{rect} \left(\frac{y_p - \beta t_s}{L_y} \right) \sin \Delta\varphi^{\text{TR}}(x_p, y_p; \alpha t_f, \beta t_s), \quad (10b)$$

其中 C 也考虑了所有积分和光电变换的系统常数。

复数化处理器进行数字化复数化处理为 $I(x_p, y_p; \alpha, \beta) = I_1 + jI_Q$,得到光电流输出复指数信号为

$$i(x_p, y_p; \alpha t_f, \beta t_s) = CA(x_p, y_p; \alpha t_f, \beta t_s) \exp \left(-j2\pi \frac{x_p \alpha t_f}{\lambda R_1/2} \right) \exp \left[j\pi \frac{(y_p - \beta t_s)^2}{\lambda R_3} \right], \quad (11)$$

上述公式右边第一项函数为回波场强因子,第二项函数为交轨方向(x)上的以目标点交轨向距离 x_p 为斜率比例因子的线性相位项调制,第三项函数为顺轨方位向(y)上以目标点顺轨位置 y_p 为中心的相位二次项历

程。其中

$$A(x_p, y_p; \alpha t_i, \beta t_s) = W\left(\frac{x_p}{M}, \frac{y_p - \beta t_s}{M}\right) \text{rect}\left(\frac{x_p - \alpha t_i}{L_x}\right) \text{rect}\left(\frac{x_p + \alpha t_i}{L_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y_p - \beta t_s}{L_y}\right).$$

3.2 信息处理过程

上述数据收集结果与侧视 SAIL 的数据收集结果相一致,可以在交轨向进行线性相位项调制的一维傅里叶变换聚焦成像,在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。数字图像处理器用于完成这些操作,即为

$$I(x, y) = C \left\{ F_{\alpha t_i \rightarrow \xi} \left\{ A(x_p, y_p; \alpha t_i, \beta t_s) \exp\left(-j2\pi \frac{x_p \alpha t_i}{\lambda R_1/2}\right) \right\} \exp\left[j\pi \frac{(y_p - \beta t_s)^2}{\lambda R_3}\right] \right\} \otimes \exp\left[-j\pi \frac{(\beta t_s)^2}{\lambda R_3}\right], \quad (12a)$$

其中 C 再考虑了傅里叶变换参数,而 $\xi = \frac{x}{\lambda R_1/2}$ 为交轨向空间频率。上式可进一步近似为

$$I(\xi, y) \approx CS_\xi(\xi) \delta\left(\xi_x + \frac{x_p}{\lambda R_1/2}\right) S_y(y) \delta(y - y_p), \quad (12b)$$

式中 $S_x(x)$ 为交轨向相干点扩展函数, $S_y(y)$ 为顺轨向相干点扩展函数。显然目标点成像中心位置在 $(-x_p, y_p)$ 上,最终完成了目标点的成像。

一个二维目标上所有点的成像因此为

$$I(x, y) = \sum_p C_p S_x(x) \delta(x + x_p) S_y(y) \delta(y - y_p). \quad (13)$$

应当注意:在具体操作时在快时间和慢时间的数据都是离散化采样取得的,因此相关公式都采用离散化计算。

4 分析和讨论

成像分辨率和成像中的交叉干扰是两个核心问题,下面给出进一步分析。

4.1 成像分辨率分析

成像分辨率采用相干点扩展函数的最小值全宽度表达^[16]。顺轨向成像分辨率用目标面上光学足址尺寸的衍射极限来推算,表达为顺轨向积分长度下的相干点扩展函数的全宽度,即

$$d_y = 2\lambda \frac{R_3}{L_y} = \lambda \frac{2R_3}{L_y} = \lambda \frac{2MR_3^{\text{in}}}{L_y^{\text{in}}}. \quad (14)$$

照明光斑在目标面交轨向的移动范围为 $(-kL_x, kL_x)$,其中 $k \leq 0.5$ 为光束中心偏转的可能设计值,则目标面上可成像有效条幅宽度 $K_W L_x$ ($K_W = 1 - 2k$) 内的傅里叶变换最大恒定积分宽度为 $K_F L_x$ ($K_F = 2k$) (见图 4)。同样,交轨方向分辨率用积分长度的相干点扩展函数的最小值全宽度表达,即为在 $K_W L_x$ 范围内的分辨率为

$$d_x = 2\lambda \frac{R_1/2}{K_F L_x} = \lambda \frac{R_1}{K_F L_x} = \lambda \frac{MR_1^{\text{in}}}{K_F L_x^{\text{in}}}, \quad (15)$$

由此可见,表示成像分辨率的顺轨向和交轨向

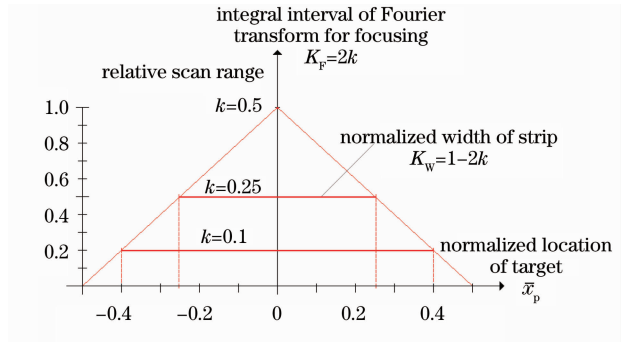


图 4 目标面上有效条幅宽度和傅里叶变换积分宽度与相对扫描范围的关系

Fig. 4 Dependence of the normalized effective strip width and integral interval of Fourier transform on the relative scan range

的相干点扩展函数全宽度均由发射机的内发射光场分布的相对口径所决定,并且随工作距离增长而增大。

4.2 交叉干扰成像的自抑制

在侧视 SAIL 中采用具有本振的外差接收,目标点之间不产生干涉。而在直视 SAIL 中,不同物点的接收场有可能在自相干探测时产生交叉耦合干涉,影响成像质量。上述的直视 SAIL 的成像数学分析中采用了一个物点描述,物体是由许多物点所组成的,因此有必要研究交叉相干干扰存在的判据,这种分析可以只在一个平衡接收通道里进行即可。相对于同相通道在接收天线上多个物点产生的场强为

$$\sum_p [e_H^{\text{TR}}(x, y; x_p, y_p; \alpha t_i, \beta t_s) + e_V^{\text{TR}}(x, y; x_p, y_p; \alpha t_i, \beta t_s)].$$

因此,同相通道平衡接收器的相干接收积分光功率为

$$I(\alpha t_s, \beta t_s) = K \iint_{D_x \times D_y} \sum_p [e_H^{\text{TR}}(x, y, x_p, y_p, \alpha t_s, \beta t_s) + e_V^{\text{TR}}(x, y, x_p, y_p, \alpha t_s, \beta t_s)] \times \sum_p [e_H^{\text{TR}}(x, y, x_p, y_p, \alpha t_s, \beta t_s) + e_V^{\text{TR}}(x, y, x_p, y_p, \alpha t_s, \beta t_s)]^* dx dy, \quad (16)$$

其中任意二个物点 (x_p, y_p) 和 (x_{p+k}, y_{p+k}) 的交叉项的空间相位差为

$$\Delta\varphi^{\text{TR}}(x, y, x_p, y_p, x_{p+k}, y_{p+k}, \alpha t_s, \beta t_s) = \varphi_H^{\text{TR}}(x, y, x_p, y_p, \alpha t_s, \beta t_s) - \varphi_V^{\text{TR}}(x, y, x_{p+k}, y_{p+k}, \alpha t_s, \beta t_s) = -\frac{2\pi}{\lambda Z}x(x_p - x_{p+k}) - \frac{2\pi}{\lambda Z}y(y_p - y_{p+k}), \quad (17)$$

其中只有相位因子 $\frac{2\pi}{\lambda Z}x(x_p - x_{p+k}) + \frac{2\pi}{\lambda Z}y(y_p - y_{p+k})$ 存在于相干接收积分功率的积分式之中, 该积分等同于外差接收的方向性函数, 即^[10]

$$\Theta(x_p - x_k, y_p - y_k) = \iint_{D_x \times D_y} \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda Z}x(x_p - x_k) + \frac{2\pi}{\lambda Z}y(y_p - y_k)\right] dx dy = K \text{sinc}\left(\frac{x_p - x_k}{\lambda Z}D_x\right) \text{sinc}\left(\frac{y_p - y_k}{\lambda Z}D_y\right). \quad (18)$$

显然当

$$\begin{cases} x_p - x_{p+k} \geq \frac{\lambda Z}{D_x} \\ y_p - y_{p+k} \geq \frac{\lambda Z}{D_y} \end{cases}, \quad (19)$$

时即两物点的间隔大于天线衍射极限时, 方向性因子 $\Theta(x_p - x_k, y_p - y_k) \approx 0$, 交叉干扰不存在, 这时(13)式成立, 即整个目标的成像是由各个单独点的成像叠加而成的。事实上在直视 SAIL 设计下, 照明光斑尺寸远大于接收天线的衍射极限, 因此在照明光斑内(19)式的近似是基本成立的, 所以(13)式也总是成立的, 不存在交叉耦合干扰成像。

4.3 可行性分析

本文提出的直视 SAIL 和传统的侧视 SAIL 的主要原理差别: 1) 侧视 SAIL 在交轨向采用侧视方向目标的视距分辨成像原理, 而直视 SAIL 在交轨向采用直视方向垂直目标面上目标的横向距离分辨成像原理。因此侧视 SAIL 采用诸如啁啾激光发射及去斜解调接收的测距方案, 而直视 SAIL 采用二次相位波前相对扫描的横向距离分辨方案。2) 侧视 SAIL 利用发射天线和目标点的作用距离自然衍射形成的空间相位二次项来产生目标的空间二次项相位历程, 而直视 SAIL 在发射系统内部产生两个同轴偏振正交并具有空间抛物相位差的波前, 再使用发射天线主镜投射到目标面, 因此目标二次项相位历程的产生与作用距离的衍射无关。3) 侧视 SAIL 采用光学外差接收技术, 而直视 SAIL 采用光学自差接收技术。由此可见直视 SAIL 的原理充分发挥了光学波前变换的特性, 它的光学足址和分辨率不

受目标距离自然衍射的限制, 可以人为灵活设计。直视 SAIL 成像分辨率随成像距离增长而增大, 这与侧视 SAIL 不同, 其成像分辨率不随距离变化。

侧视 SAIL 采用光学外差探测, 灵敏度高, 但是接收面积受方向性限制。直视 SAIL 的同轴自差接收在原理上无方向性限制, 可以简单地增加接收口径来弥补灵敏度较低的问题。激光散斑效应对于合成孔径激光成像有很大的影响^[8], 对于侧视 SAIL 散斑的振幅和相位随机变化都产生干扰, 而对于直视 SAIL 只存在振幅随机变化的干扰影响。

本课题组已经提出过一种全孔径合成成像激光雷达^[16, 19], 其采用两个同轴同心偏振正交的球面波扫描目标, 将每个目标点的回波转化为时间流信号, 接收端采用同轴相干接收, 同时将目标点编码成为一个复数二次项相位分布, 最终通过二维匹配滤波重构出目标图像。这种全孔径合成的 SAIL 也是直视观察, 在结构上与本文直视 SAIL 基本接近, 可以交换使用。

5 结 论

本文提出的直视合成孔径激光成像雷达的体系是在微波合成孔径雷达概念上发展出来的, 但是在微波波段反而不可能得以实现, 直视 SAIL 无论在原理和方法上都属于光学领域, 是一种全光学概念的合成孔径雷达。

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, Nov. 14, 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 B. Krause, J. Buck, C. Ryan *et al.*. Synthetic aperture lidar flight demonstration [C]. 2011-Laser Applications to Photonic Applications, OSA Technical Digest (CD), 2011, PDPB7
- 6 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
- 7 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): 09001121
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): 09001121
- 8 Liu Liren. Structure and operating mode of synthetic aperture imaging lidar for speckle reduction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1028001
刘立人. 基于散斑抑制的合成孔径激光成像雷达的结构和工作模式[J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 1028001
- 9 Liren Liu. Optical antenna of telescope for synthetic aperture lidar [C]. *SPIE*, 2008, **7094**: 7094F
- 10 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
- 11 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
- 12 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
- 13 Liren Liu. 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
- 14 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
- 15 Liren Liu. 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
- 16 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
- 17 Zhou Yu, Wang Lingyu, Zhi Yanan *et al.*. Polarization-splitting 2×4 90° 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 2×4 90° 自由空间光学桥接器 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3291~3294
- 18 Henri Maitre. Traitement des Images de Radar à Synthèse d'Ouverture[M]. Sun Hong Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. 22~24
麦特尔编. 合成孔径雷达图象处理[M]. 孙洪译. 北京: 电子工业出版社, 2005. 22~24
- 19 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

栏目编辑: 宋梅梅