

基于干涉处理的机载合成孔径激光 雷达振动估计和成像

杜剑波^{1,2} 李道京¹ 马萌^{1,2} 胡烜^{1,2} 乔明¹

¹中国科学院电子学研究所微波成像技术重点实验室, 北京 100190

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 实际飞行过程中载机的俯仰角和偏航角会在顺轨干涉处理的基线中引入交轨基线分量, 在振动条件下对高程起伏地形难以精确成像。为实现机载合成孔径激光雷达(SAL)振动有效估计, 提出了一种基于三探测器正交基线干涉处理的振动估计和成像处理方法, 建立了信号模型并进行了精度分析。该方法需要使视场重叠, 并利用了 SAL 非成像光学系统的特点来实现。介绍了利用一个对地宽幅成像探测器和三个振动估计探测器分置的光学系统实现方案, 并讨论了探测器视场重叠度和信噪比对振动估计性能的影响。振动条件下对高程起伏地形的仿真成像结果验证了该方法的有效性。

关键词 遥感; 激光光学; 合成孔径; 振动估计; 干涉处理; 正交基线; 成像处理

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0910003

Vibration Estimation and Imaging of Airborne Synthetic Aperture Ladar Based on Interferometry Processing

Du Jianbo^{1,2} Li Daojing¹ Ma Meng^{1,2} Hu Xuan^{1,2} Qiao Ming¹

¹Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract The cross-track baseline component of the along-track interferometry processing baseline is introduced by the angle of pitch and yaw in the actual flight, and the accurate imaging of elevation fluctuation terrain is difficult to obtain under the condition of vibration. In order to realize vibration estimation in airborne synthetic aperture ladar (SAL) effectively, a kind of vibration estimation and imaging method is proposed based on interferometry processing of three detectors with orthogonal baselines, and the signal model is established and its accuracy is analyzed. This method need to make the field of view overlap, and it is realized by the characteristic of SAL non-imaging optical system. The optical system containing a wide swath ground imaging detector and three vibration estimating detectors is introduced. The impact of overlapped degree of field of view of detectors and signal-to-noise ratio on performance of vibration estimation are discussed respectively. The imaging simulation results of the elevation fluctuation terrain under platform vibration condition validate the effectiveness of the proposed method.

Key words remote sensing; laser optics; synthetic aperture; vibration estimation; interferometry processing; orthogonal baselines; imaging processing

OCIS codes 280.3640; 280.6730; 110.5100

收稿日期: 2016-05-04; **收到修改稿日期:** 2016-06-02

基金项目: 中国科学院电子学研究所 2013 年创新项目(Y3Z0120247)

作者简介: 杜剑波(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事雷达信号处理方面的研究。E-mail: jianbodu1991@163.com

导师简介: 李道京(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事雷达系统和雷达信号处理等方面的研究。

E-mail: lidj@mail.ie.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

机载合成孔径激光雷达(SAL)可在短时间内实现远距离高分辨率成像,在军事侦察方面具有重要的应用潜力^[1-3]。但激光波长较短,回波信号相位对雷达平台的振动非常敏感,这给机载 SAL 成像处理造成很大困难。

为此,需对振动相位误差进行估计并实施补偿。文献[3-4]提出将经典的相位梯度自聚焦方法(PGA)用于 SAL 振动相位误差估计,但是 PGA 不能估计线性相位误差,因此条带成像时图像拼接困难^[5]。通常 PGA 处理需场景中有孤立强点,而激光波段地面粗糙度的存在使得 SAL 成像场景很难满足这一条件。文献[6]提出将空间相关算法(SCA)用于 SAL 振动相位误差估计,但 SCA 对脉冲间信号的相关性要求较高,当成像场景不均匀时其对振动相位误差的估计效果不好。

除对振动相位误差进行估计补偿外,文献[7]提出了基于差分处理的 SAL 振动对消方法,在顺轨向设置两探测单元,利用同一时刻两探测单元回波信号具有近似相同振动误差的原理,通过两信号相位差分处理对消振动误差相位。在此基础上,文献[8]针对实际中镜头间距较大的问题,提出将两个接收镜头在距离向上交错放置的差分处理实现方法。该方法由于存在交轨基线分量不适宜对高程起伏地形精确成像,且使用双接收镜头使光学系统显得笨重。文献[9]提出了一种下视 SAL 的振动抑制方法,利用同一时刻两路同轴偏振正交回波信号具有近似相同振动误差的原理对消振动误差。该方法构思巧妙,但需要发射两路同轴偏振正交且具有空间抛物相位差的信号,系统实现复杂。

文献[10]提出了使用稳定平台(包括磁悬浮稳定平台)来初步抑制载机振动的思路。在此基础上,文献[11]提出了基于顺轨双探测器的振动误差估计和补偿方法,与差分 SAL 方法消除振动相位误差不同,其利用两探测器在同一空间位置回波信号的顺轨干涉相位估计出振动相位误差,再对回波数据进行相位误差补偿和方位成像。相比其他方法,该方法不依赖于场景,精度较高;估计出的相位误差可直接用于条带连续长时间的相位补偿和成像处理。

本文针对实际飞行过程中载机俯仰角和偏航角对振动条件下高程起伏地形难以精确成像的问题,提出基于三个振动估计探测器和正交基线干涉处理的振动相位误差估计和成像处理方法。由于干涉处理需要重叠视场,因此对内视场多探测器的视场重叠问题进行了研究,并提出了一套成像探测器和振动估计探测器分置的光学系统实现方案。

2 SAL 光学系统和探测器布局

对于传统光学接收系统,相邻探测器的接收视场是不同的,其对应的接收波束和地面场景光斑均不重叠。三探测器信号干涉处理要求各个探测器的接收视场重叠(顺轨向两探测器间距较小,视场平行也近似视场重叠),因此需要配置多个接收镜头,增大了系统的成本和体积。然而,合成孔径激光雷达使用非成像光学系统的特点使内视场多探测器工作在重叠视场的条件下。文献[12]给出了基于差分处理的 SAL 振动对消桌面实验成像处理结果,使用四像元探测器接收回波,其中顺轨向两个探测器就工作在重叠视场下。因此,所讨论的 SAL 光学接收系统分为振动估计探测器和成像探测器,其中振动估计探测器需要重叠接收视场。

2.1 SAL 光学系统

图 1 为机载 SAL 几何模型。其中,全局坐标系为大地坐标系 xyz 。探测器阵列位于高度 H 处,其所在的局部坐标系定义为 $x'y'z'$, x' 轴为接收望远镜中心视线方向,其与大地坐标系中 x 轴的夹角等于雷达入射角的余角,以 θ_0 表示(顺时针为正); y' 轴平行于 y 轴,为雷达平台运动方向,定义为顺轨方向; z' 轴垂直于 x' 轴和 y' 轴(满足右手螺旋定则),定义为交轨方向。雷达平台运动速度为 V 。

SAL 发射望远镜位于 y' 轴上,发射波束和地面发射光斑在图 1 中用粗实线标注。地面场景回波经接收望远镜接收后,由探测器阵列实现光电转换。

SAL 探测器阵列由成像探测器和三个振动估计探测器 $T_{1\text{raw}}$ 、 $T_{2\text{raw}}$ 、 $T_{3\text{raw}}$ 组成,如图 2 所示,三个振动估计探测器的几何中心位于局部坐标系 $x'y'z'$ 的原点。成像探测器为一个长线状探测器,覆盖接收绝大部分信号光,以扩大 SAL 对地成像幅宽。三个振动估计探测器接收一小部分信号光,用于干涉处理估计振动相位误差。成像探测器和三个振动估计探测器的接收波束和地面接收光斑在图 1 中分别用细实线和细虚线标注。

SAL 工作在一发多收模式,各探测器的等效相位中心位于其与发射望远镜连线的中心位置,等效基线长度为各探测器间隔的 1/2。设 T_{1raw} 、 T_{2raw} 、 T_{3raw} 的等效相位中心分别为 T_1 、 T_2 、 T_3 ,如图 3 所示。若三个振动估计探测器的整体尺寸为 $2\text{ mm} \times 0.4\text{ mm}$ (顺轨向 \times 交轨向),则等效的顺轨基线和交轨基线长度分别为 0.5 mm 和 0.1 mm 。

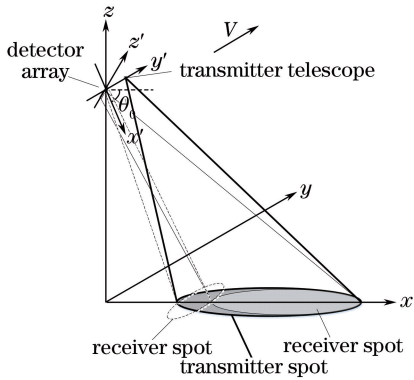


图 1 机载 SAL 几何模型
Fig. 1 Geometric model of airborne SAL

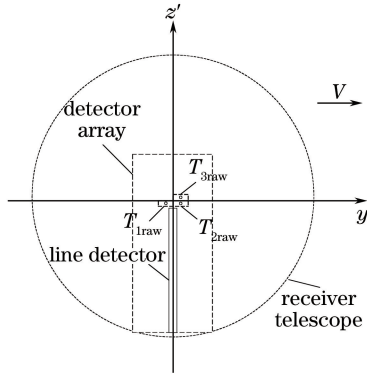


图 2 探测器阵列
Fig. 2 Detector array

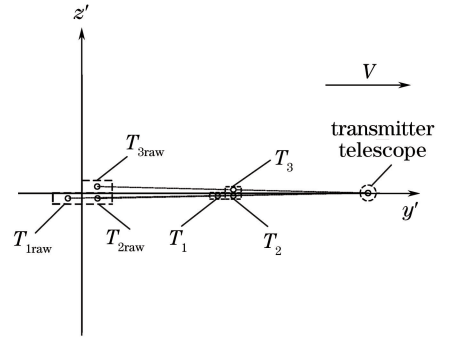


图 3 三个振动估计探测器等效相位中心
Fig. 3 Equivalent phase centers of three vibration estimating detectors

2.2 振动估计探测器布局

为使三个振动估计探测器具有重叠的视场,将其整体前移于焦平面前方,如图 4(a)~(b)所示。此时,信号光不完全聚焦可以获得较大的接收光斑,能同时覆盖各子探测器以实现重叠视场。以口径为 200 mm ,焦距为 500 mm 为例,当前移距离为 $L=4.95\text{ mm}$ 时,可使半视场角为 2 mrad 的接收光恰好完全被探测器 T_{1raw} 和 T_{3raw} 接收,半视场角小于 2 mrad 的接收光能同时被探测器 T_{1raw} 、 T_{2raw} 、 T_{3raw} 接收。因此,可设置前移距离大于等于 $2L=9.9\text{ mm}$,以保证三个振动估计探测器均能被接收光完全覆盖,如图 4(c)所示。考虑到探测器光敏面应尽量覆盖接收光,设前移距离为 $2L$ 。探测器前移后,顺轨向视场由 4 mrad 增加到 4.08 mrad ,交轨向视场由 0.8 mrad 增加到 0.816 mrad ,此时视场变化较小可以忽略,如图 4(d)所示。探测器尺寸与接收视场关系如表 1 所示。

表 1 探测器尺寸与接收视场

Table 1 Size and field of view of the detector

	Line detector (focal plane)	Vibration estimating detector (focal plane)	Vibration estimating detector (in front of focal plane)
Along-track size /mm	0.15	2.0	2.000
Along-track field of view /mrad	0.30	4.0	4.080
Cross-track size /mm	10.00	0.4	0.400
Cross-track field of view /mrad	20.00	0.8	0.816

需要注意的是,表 1 中三个振动估计探测器接收视场的取值为探测器尺寸决定的最大值。对于激光雷达,其接收视场还受限于发射波束宽度,若发射波束宽度较窄,则接收视场的有效值可能小于表 1 中的取值。以发射波束宽度为 $0.3\text{ mrad} \times 21\text{ mrad}$ 为例,在顺轨向,三个振动估计探测器接收光斑覆盖发射光斑,对应接收视场的有效值为 0.3 mrad 。此时,设置前移距离为 5.37 mm ,即可保证三个振动估计探测器均能被接收光完全覆盖。

3 基于正交基线干涉处理的振动估计

3.1 信号模型

当 SAL 不存在俯仰角和偏航角时,顺轨基线完全水平,成像几何模型如图 5 所示。 P 为地面目标散射点,其位置坐标为 (x_p, y_p, z_p) 。飞机平台速度平行于 y 轴,高度为 H 。根据第 2 节分析,等效相位中心 T_1 、 T_2 、 T_3 形成正交基线,其中 T_1 、 T_2 形成顺轨基线,等效长度为 d_1 ; T_3 位于 T_2 所在的 xz 平面上, T_2 、 T_3 形

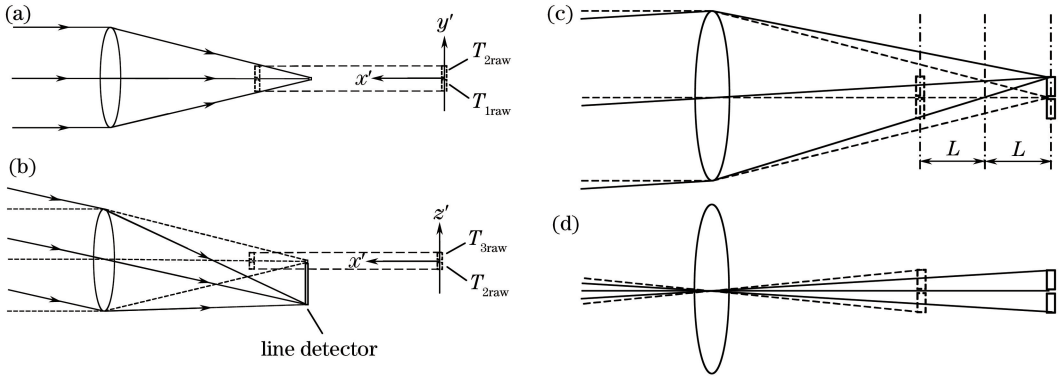


图4 振动估计探测器布局示意图。(a) $x'y'$ 平面接收光路图;(b) $x'z'$ 平面接收光路图;
(c)振动估计探测器前移距离确定;(d)振动估计探测器前移前后视场

Fig. 4 Layout of vibration estimating detector. (a) Receiving light path in $x'y'$ plane;
(b) receiving light path in $x'z'$ plane; (c) forward movement distance determined by vibration estimating detector;
(d) fields of view of vibration estimating detector before and after forward movement

成交轨基线,等效长度为 d_2 ,其与 x 轴的夹角为 α_0 (逆时针为正)。接收望远镜中心视线方向与 x 轴的夹角为 θ_0 。因为三个振动估计探测器所在平面垂直于接收望远镜中心视线方向,故有 $\alpha_0 = \pi/2 - \theta_0$ 。

当 SAL 存在俯仰角和偏航角时,可视作 T_1 和 T_3 以 T_2 为中心旋转,顺轨和交轨基线偏离原位置。设 θ_p 为俯仰角, θ_y 为偏航角, t_k 为慢时间, T_2 的坐标为 $[0, Vt_k, H]$, T_1 和 T_3 的坐标分别为 $[d_{1x}, Vt_k + d_{1y}, H + d_{1z}]$, $[d_{2x}, Vt_k + d_{2y}, H + d_{2z}]$, 则有

$$\begin{cases} d_{1x} = d_1 \cdot \cos(\theta_p) \cdot \sin(\theta_y) \\ d_{1y} = -d_1 \cdot \cos(\theta_p) \cdot \cos(\theta_y), \\ d_{1z} = -d_1 \cdot \sin(\theta_p) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} d_{2x} = d_2 \cdot \cos(\alpha_0) \cdot \cos(\theta_y) + d_2 \cdot \sin(\alpha_0) \cdot \sin(\theta_p) \cdot \sin(\theta_y) \\ d_{2y} = d_2 \cdot \cos(\alpha_0) \cdot \sin(\theta_y) - d_2 \cdot \sin(\alpha_0) \cdot \sin(\theta_p) \cdot \cos(\theta_y) \\ d_{2z} = d_2 \cdot \sin(\alpha_0) \cdot \cos(\theta_p) \end{cases} \quad (2)$$

将各等效相位中心沿 t_k 对齐到 T_2 ,相当于将 T_1 和 T_3 投影到 T_2 所在的 xz 平面上,形成等效的交轨干涉模型,如图 6 所示。设 T_1 和 T_3 在 xz 平面的投影分别为 T_{1xz} 和 T_{3xz} ,其中, T_{1xz} 、 T_{3xz} 和 T_2 间的长度分别为 T_1 、 T_3 的交轨基线长度,记为 d_{1xz} 和 d_{2xz} ,根据几何关系得

$$\begin{cases} d_{1xz} = \sqrt{d_{1x}^2 + d_{1z}^2} \\ d_{2xz} = \sqrt{d_{2x}^2 + d_{2z}^2} \end{cases} \quad (3)$$

3.2 干涉处理和振动估计

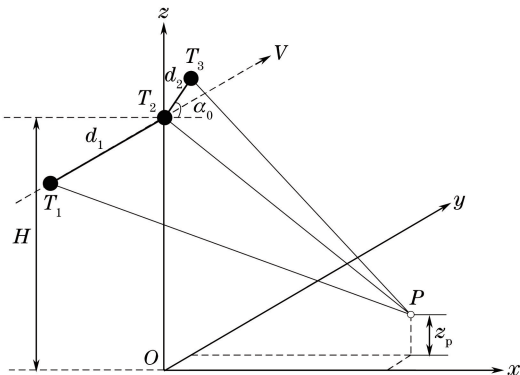


图5 成像几何模型

Fig. 5 Geometric model of imaging

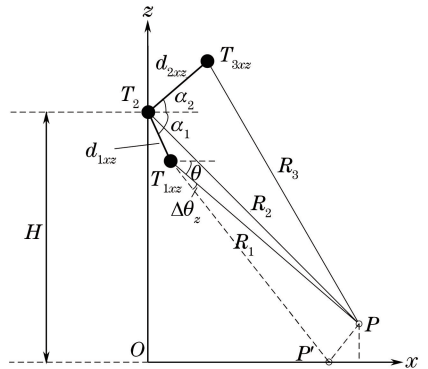


图6 存在俯仰角和偏航角时的交轨干涉模型

Fig. 6 Cross track interferometry model with angle of pitch and yaw

存在振动误差时,可将振动误差在三维坐标系 $[X(t_k), Y(t_k), Z(t_k)]$ 下进行分解,并将 T_1 沿 t_k 前移 Δt_k ,则 T_1 相对于 P 的斜距历程为

$$r_1(t_k + \Delta t_k) = \{[d_{1x} + X(t_k + \Delta t_k) - x_p]^2 + [V(t_k + \Delta t_k) + d_{1y} + Y(t_k + \Delta t_k) - y_p]^2 + [H + d_{1z} + Z(t_k + \Delta t_k) - z_p]^2\}^{1/2}. \quad (4)$$

由于需要将 T_1 和 T_2 沿慢时间对齐,有

$$\Delta t_k = -\frac{d_{1y}}{V}, \quad (5)$$

故

$$r_1(t_k + \Delta t_k) = \sqrt{[d_{1x} + X(t_k + \Delta t_k) - x_p]^2 + [Vt_k + Y(t_k + \Delta t_k) - y_p]^2 + [H + d_{1z} + Z(t_k + \Delta t_k) - z_p]^2} \approx R_1 + \frac{(Vt_k - y_p)^2}{2R_1} + \Delta r(t_k + \Delta t_k), \quad (6)$$

$$\text{式中 } \Delta r(t_k + \Delta t_k) = \frac{1}{2R_1} [2(d_{1x} - x_p)X(t_k + \Delta t_k) + X(t_k + \Delta t_k)^2 + 2(Vt_k - y_p)Y(t_k + \Delta t_k) + Y(t_k + \Delta t_k)^2 + 2(H + d_{1z} - z_p)Z(t_k + \Delta t_k) + Z(t_k + \Delta t_k)^2], R_1 = \sqrt{(d_{1x} - x_p)^2 + (H + d_{1z} - z_p)^2}.$$

同理,可得 T_2 相对于 P 的斜距历程为

$$r_2(t_k) = \sqrt{[X(t_k) - x_p]^2 + [Vt_k + Y(t_k) - y_p]^2 + [H + Z(t_k) - z_p]^2} \approx R_2 + \frac{(Vt_k - y_p)^2}{2R_2} + \Delta r(t_k), \quad (7)$$

$$\text{式中 } \Delta r(t_k) = \frac{1}{2R_2} [2(-x_p)X(t_k) + X(t_k)^2 + 2(Vt_k - y_p)Y(t_k) + Y(t_k)^2 + 2(H - z_p)Z(t_k) + Z(t_k)^2], R_2 = \sqrt{x_p^2 + (H - z_p)^2}.$$

因此, T_1, T_2 关于 P 的斜距差为

$$r_1(t_k + \Delta t_k) - r_2(t_k) = R_1 + \frac{(Vt_k - y_p)^2}{2R_1} + \Delta r(t_k + \Delta t_k) - \left[R_2 + \frac{(Vt_k - y_p)^2}{2R_2} + \Delta r(t_k) \right] = R_1 - R_2 + \Delta r(t_k + \Delta t_k) - \Delta r(t_k). \quad (8)$$

将 R_1 进行泰勒展开,并设雷达-目标射线方向与 x 轴的夹角为 θ (逆时针为正),得

$$R_1 \approx R_2 + \frac{-d_{1x} \cdot x_p + d_{1z} \cdot (H - z_p)}{R_2} = R_2 + (-d_{1x} \cdot \cos \theta + d_{1z} \cdot \sin \theta), \quad (9)$$

式中第 2 项表示基线 d_{1xz} 在雷达-目标射线方向的投影,设 d_{1xz} 与 x 轴的夹角为 α_1 (逆时针为正),可进一步化简得

$$R_1 = R_2 + d_{1xz} \cdot \cos(\theta - \alpha_1), \quad (10)$$

故

$$r_1(t_k + \Delta t_k) - r_2(t_k) = d_{1xz} \cdot \cos(\theta - \alpha_1) + \Delta r(t_k + \Delta t_k) - \Delta r(t_k). \quad (11)$$

设 λ 为激光波长, T_1 和 T_2 关于 P 的干涉相位为

$$\varphi_{12}(t_k) = -\frac{4\pi d_{1xz} \cdot \cos(\theta - \alpha_1)}{\lambda} - \frac{4\pi}{\lambda} [\Delta r(t_k + \Delta t_k) - \Delta r(t_k)], \quad (12)$$

式中第 1 项为由俯仰角和偏航角引入的交轨干涉相位分量,第 2 项为由振动误差引起的顺轨干涉相位。可见, T_1, T_2 的干涉相位为两者的耦合,若直接将 T_1, T_2 的干涉相位用于顺轨干涉估计,则不能准确地估计出振动相位误差。因此,需要对 T_1, T_2 的干涉相位进行交轨干涉相位补偿。

由(12)式可知,交轨干涉相位与雷达-目标视线方向 θ 有关。由于 θ 与场景目标的斜距和高度有关,故交轨干涉相位可分为平地相位和地面高程相位两部分^[13]。设图 6 中地面上 P' 点高度为 0,其斜距与 P 点相同, P' 与 P 的雷达-目标视线方向夹角为 $\Delta\theta_z$,则 P 点去除平地相位后的干涉相位为

$$\Delta\varphi_{12}(t_k) = -\frac{4\pi d_{1xz} \cdot [\cos(\theta - \alpha_1) - \cos(\theta - \Delta\theta_z - \alpha_1)]}{\lambda} - \frac{4\pi}{\lambda} [\Delta r(t_k + \Delta t_k) - \Delta r(t_k)] \approx$$

$$\frac{4\pi d_{1xz} \cdot \sin(\theta - \alpha_1) \cdot \Delta\theta_z}{\lambda} - \frac{4\pi}{\lambda} [\Delta r(t_k + \Delta t_k) - \Delta r(t_k)]。 \quad (13)$$

由几何关系可得

$$\Delta\theta_z = \frac{z_p / \cos \theta}{R_1}。 \quad (14)$$

故

$$\Delta\varphi_{12}(t_k) = \frac{4\pi d_{1xz} \cdot \sin(\theta - \alpha_1) \cdot z_p}{\lambda R_1 \cos \theta} - \frac{4\pi}{\lambda} [\Delta r(t_k + \Delta t_k) - \Delta r(t_k)]。 \quad (15)$$

上述推导表明,若地面场景高程不变($z_p=0$),即地面高程相位为0,则在已知俯仰角 θ_p 和偏航角 θ_y 的情况下,可根据(9)式和(12)式计算出平地相位后进行补偿;若地面场景高程变化,由于缺乏场景目标具体的高程信息,无法根据(15)式直接计算出地面高程相位用于补偿。且交轨基线分量越大,或斜距越短,地面高程相位变化越大。为此,需利用正交基线结构,将 T_3 、 T_2 的地面高程相位用于对 T_1 、 T_2 的地面高程相位补偿,从而获取振动引起的顺轨干涉相位。

类似地,可得 T_2 、 T_3 关于目标点 P 的干涉相位为

$$\varphi_{32}(t_k) = -\frac{4\pi d_{2xz} \cdot \cos(\theta - \alpha_2)}{\lambda} - \frac{4\pi}{\lambda} [\Delta r(t_k + \Delta t_{k2}) - \Delta r(t_k)]， \quad (16)$$

式中 α_2 为基线 d_{2xz} 与 x 轴的夹角(逆时针为正)。

由于 T_2 、 T_3 之间的顺轨基线分量较小, Δt_{k2} 较小,可认为 T_2 、 T_3 之间振动误差的近似相等,即(16)式中第2项近似为0,则有

$$\varphi_{32}(t_k) \approx -\frac{4\pi d_{2xz} \cdot \cos(\theta - \alpha_2)}{\lambda}。 \quad (17)$$

故可进一步得到关于目标点 P 的地面高程相位为

$$\Delta\varphi_{32}(t_k) = \frac{4\pi d_{2xz} \cdot \sin(\theta - \alpha_2) \cdot z_p}{\lambda R_3 \cos \theta} \approx \frac{4\pi d_{2xz} \cdot \sin(\theta - \alpha_2) \cdot z_p}{\lambda R_1 \cos \theta}。 \quad (18)$$

将 T_2 、 T_3 的地面高程相位对 T_1 、 T_2 去除平地相位后的干涉相位进行补偿,得顺轨干涉相位估计为

$$\Delta\varphi(t_k) = \Delta\varphi_{12}(t_k) - \Delta\varphi_{32}(t_k) \cdot \frac{d_{1xz} \cdot \sin(\theta - \alpha_1)}{d_{2xz} \cdot \sin(\theta - \alpha_2)} = -\frac{4\pi}{\lambda} [\Delta r(t_k + \Delta t_k) - \Delta r(t_k)]。 \quad (19)$$

至此,对于 T_1 、 T_2 ,俯仰角和偏航角引入的交轨干涉相位分量,即平地相位和地面高程相位已分别被去除和补偿,获得的顺轨干涉相位可以用于振动相位误差估计。

根据(19)式,顺轨干涉相位反应了在慢时间间隔为 Δt_k 内振动引起的斜距误差变化量,因为 Δt_k 较小(数个脉冲重复周期量级),所以可认为振动在该慢时间内线性变化,即认为顺轨干涉相位等效估计出了振动产生的径向速度 $V_r(t_k)$,有

$$V_r(t_k) = -\frac{\lambda \Delta\varphi(t_k)}{4\pi \Delta t_k} = \frac{\lambda V \Delta\varphi(t_k)}{4\pi d_{1y}}。 \quad (20)$$

3.3 数据处理流程

顺轨干涉估计振动既可以在不进行方位成像的条件下进行,也可以将慢时域划分为多个子孔径,在多普勒域或慢时域成像后进行。若不进行方位成像估计振动,可对距离压缩后的回波以每个脉冲重复周期重复一次上述估计过程,即在三探测器干涉处理时,通过计算复相关系数提取干涉相位

$$s_{ij}(m) = \text{angle} \left[\sum_{n=1}^N s_i(m, n) \cdot s_j^*(m, n) \right]， \quad (21)$$

式中 $s_k(m, n)$ 为等效相位中心 T_k 在第 m 个脉冲第 n 个距离门处的距离压缩信号, $k=1,2,3$, $s_{ij}(m)$ 为 T_i 、 T_j 在第 m 个脉冲处的干涉相位。

将各脉冲重复周期估计出的振动径向速度沿慢时间积分得到整个条带时间内的斜距误差和相位误差,最后对回波数据进行相位误差补偿和成像。若慢时间划分为多个子孔径方位成像后估计振动,则可以每个子孔径重复一次上述过程并进行相位误差补偿。子孔径方位成像后估计振动时,需认为振动在子孔径时间

内也满足线性变化,可能会使补偿后的残余相位误差增大。而不进行方位成像估计振动时,一方面可以避免划分子孔径带来的残余相位误差增大的问题,另一方面无需方位成像使振动估计效率较高,可在使用时优先考虑。振动估计和成像流程如图 7 所示。

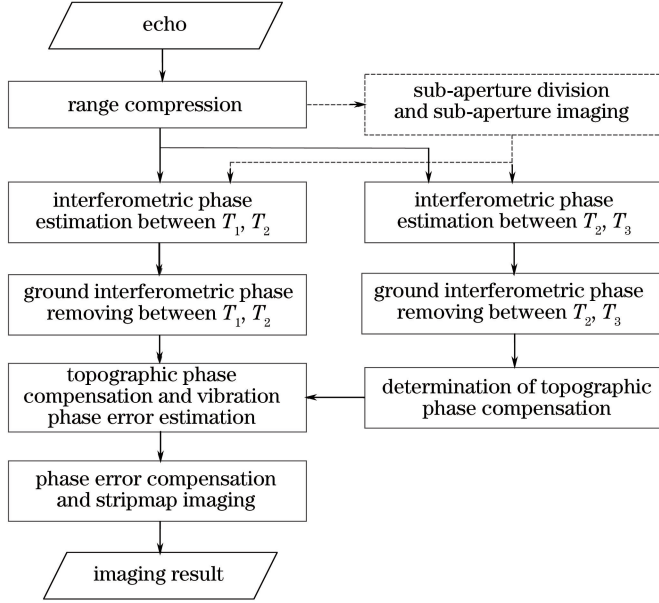


图 7 基于正交基线干涉处理的机载 SAL 振动估计和成像流程图

Fig. 7 Flow chart of vibration estimation and imaging of airborne SAL based on orthogonal baselines interferometry processing

4 仿真分析

4.1 参数设置

4.1.1 顺轨基线长度

T_1 、 T_2 之间的等效基线长度 d_1 对应的慢时间间隔 Δt_k 应不小于一个脉冲重复周期 (PRP)。当 $d_1 = 0.5 \text{ mm}$, $V = 50 \text{ m/s}$, 脉冲重复频率 (PRF) 为 100 kHz 时, $\Delta t_k = 0.01 \text{ ms}$, 恰好为一个 PRP。实际飞行过程中由于载机俯仰角和偏航角的存在,会导致 Δt_k 发生变化,可通过多普勒域相位补偿的方式进行近似延时。若俯仰角、偏航角和基线均较小,则 Δt_k 变化的影响也可以适当忽略。

从(20)式可以看出,振动径向速度与顺轨基线长度及顺轨干涉相位有关,因此在设计顺轨基线长度时也应考虑顺轨干涉估计时是否存在速度模糊问题。考虑顺轨干涉相位以 2π 为周期变化,可得最大不模糊径向速度为

$$V_{\text{rmax}} = \pm \frac{\lambda V}{4d_{1y}} \quad (22)$$

V_{rmax} 对应的振动相位误差信号多普勒频率为

$$f_{d\text{max}} = \frac{2V_{\text{rmax}}}{\lambda} = \pm \frac{V}{2d_{1y}} \approx \pm \frac{V}{2d} \quad (23)$$

当 $V = 50 \text{ m/s}$, $d = 1 \text{ mm}$ 时, V_{rmax} 对应的振动相位误差信号的多普勒频率为 50 kHz 。因为使用稳定平台后,振动误差被限制在 $15 \mu\text{m}$, 20 Hz 范围内,振动相位误差信号多普勒频率约为 5 kHz ,故顺轨基线长度满足顺轨干涉相位不模糊的要求。

4.1.2 交轨基线长度

由于激光波长短, SAL 的地面光斑较小,对应的观测场景范围有限,场景中的地面高程起伏不会太大。通过合理设置等效基线长度 d_2 , 可使 T_3 、 T_2 之间的交轨干涉相位变化不模糊。另外,根据(16)式, d_2 越大 Δt_{k2} 越大, T_3 、 T_2 之间原本忽略的顺轨干涉相位分量造成的误差越大,不利于交轨干涉相位补偿。综上所述,设置 $d_2 = 0.1 \text{ mm}$, 经计算满足上述要求。

机载 SAL 的系统参数设置如表 2 所示。

表 2 机载 SAL 系统参数
Table 2 System parameters of airborne SAL

Parameter	Value
Wavelength	1.55 μm
Bandwidth	3 GHz
Transmit beam width (along-track \times cross-track)	0.3 mrad \times 21 mrad
Pulse repetition frequency	100 kHz
Slant range of center of the scene	3 km
Complementary angle of incident angle	45 $^\circ$
Full-aperture imaging time	18 ms
Full-aperture azimuth resolution	2.6 mm
Height	2121 m
Velocity	50 m/s
Along-track equivalent baseline length	0.5 mm
Cross-track equivalent baseline length	0.1 mm
Pitch angle	3 $^\circ$
Yaw angle	1 $^\circ$
Vibration amplitude	15 μm
Vibration frequency	20 Hz

4.2 振动相位误差信号的估计精度

从(20)式可以看出,顺轨干涉估计出的振动径向速度与顺轨基线长度、地速和顺轨干涉相位有关。顺轨基线越短,测速精度越差。由于探测器结构是刚性的,顺轨基线长度被认为是真值(若其存在误差,属于系统误差可补偿)。故顺轨干涉估计出的振动径向速度精度为

$$\delta_{V_r} = \sqrt{\left(\left|\frac{\partial V_r}{\partial V}\right| \cdot \delta_V\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial V_r}{\partial \Delta\varphi}\right| \cdot \delta_{\Delta\varphi}\right)^2}, \quad (24)$$

式中 $\frac{\partial V_r}{\partial V} = -\frac{\lambda \Delta\varphi}{4\pi d_{1y}} \approx -\frac{\lambda \Delta\varphi}{4\pi d_1}$, $\frac{\partial V_r}{\partial \Delta\varphi} = -\frac{\lambda V}{4\pi d_{1y}} \approx -\frac{\lambda V}{4\pi d_1}$ 。

设 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $d_1 = 0.5 \text{ mm}$, $\Delta\varphi = 0.15 \text{ rad}$ (平台振动误差 15 μm , 20 Hz), 地速精度 $\delta_V = 0.001 \text{ m/s}$, 故(24)式中第 1 项对应的振动径向速度精度为 0.037 $\mu\text{m/s}$, 可忽略不计。设地速 $V = 50 \text{ m/s}$, 上述参数仿真表明, 当没有噪声影响时, 信号模型误差所产生的顺轨干涉相位精度 $\delta_{\Delta\varphi}$ 优于 1.5 mrad, 则振动径向速度的估计精度 δ_{V_r} 优于 0.018 mm/s。一个脉冲重复周期(10 μs)对应的斜距误差估计精度优于 0.18 nm, 对应的(双程)振动相位误差估计精度优于 1.5 mrad。

对于条带成像, 一个合成孔径时间内的斜距误差由各脉冲重复周期的振动径向速度沿慢时间积分得到, 故残余的相位误差会积累。若残余相位误差具有较大的非线性分量(通常认为在一个合成孔径时间内大于 $\pi/4 \text{ rad}$ 工程上认为大于 $\pi/2 \text{ rad}$), 则其对成像造成的影响不可忽略。

若振动径向速度的估计精度 $\delta_{V_r} = 0.018 \text{ mm/s}$ 不变, 一个合成孔径时间 $T_a = 18 \text{ ms}$, 则积累产生的线性斜距误差为 $\delta_{V_r} \times T_a = 0.32 \mu\text{m}$, 对应的线性相位误差为 2.6 rad。假设各脉冲重复周期的残余相位误差在 $-1.5 \sim 1.5 \text{ mrad}$ 随机均匀分布, 仿真表明, 残余相位误差的非线性分量比上述线性相位误差约小一个量级, 即优于 0.26 rad。残余相位误差的非线性分量在仿真结果中具体给出。

4.3 仿真结果

依据表 3 中的目标场景参数设置, 对由多个点目标排列成的 IECAS 字母场景进行了仿真分析。为降低运算量, 场景地距向尺寸(幅宽)依据振动估计探测器的交轨向视场大小设置。字母场景如图 8(a)所示, 其高程在方位向呈正弦变化, 如图 8(b)所示。场景对应的整个条带成像时间为 200 ms, 约 11 个合成孔径时间。

表 3 目标场景参数

Table 3 Parameters of target scene

Parameter	Value
Azimuth interval between point targets	0.05 m
Ground-range interval between point targets	0.2 m
Azimuth size of letters scene	10.5 m
Ground-range size of letters scene	1.8 m
Range of elevation fluctuation	-1~1 m
Azimuth interval between letters	0.2 m

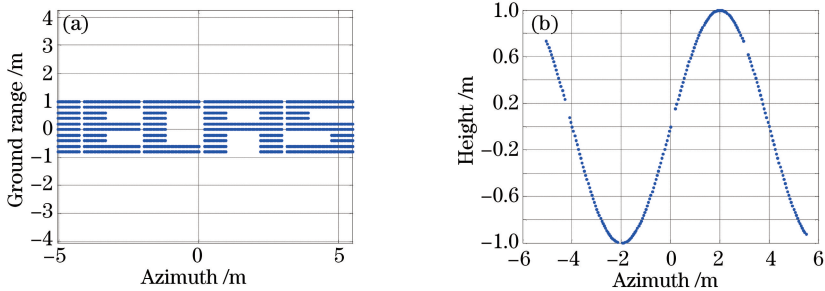


图 8 场景设置示意图。(a)字母场景;(b)高程起伏

Fig. 8 Schematic diagram of scene setting. (a) Letters scene; (b) elevation fluctuation

图 9(a)~(c)分别为加入的振动相位误差、顺轨双探测器补偿后残余相位误差和本文方法补偿后残余的相位误差。可以看出,因为实际飞行过程中载机俯仰角和偏航角的存在,顺轨双探测器估计的振动相位误差不正确,残余相位误差较大;利用三个振动估计探测器的交轨基线补偿俯仰角和偏航角的影响后,残余相位误差很小,可以用于补偿和成像。

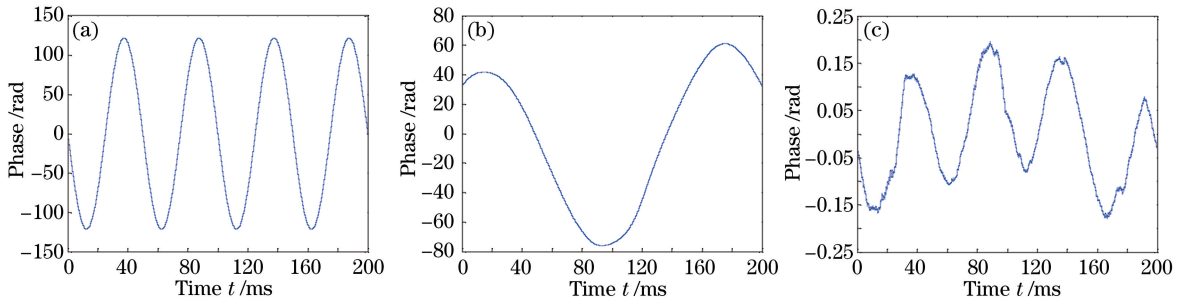


图 9 补偿前后相位误差对比。(a)加入的振动;(b)顺轨双探测器补偿;(c)本文方法补偿

Fig. 9 Comparison of phase error before and after compensation. (a) Added vibration; (b) compensated by the along-track dual-detector; (c) compensated by the proposed method

图 10 比较了补偿前后的成像结果,其中各子图(从左至右)分别为场景成像结果,点阵(字母 E 前三列)成像结果和点目标(字母 E 左上角)成像结果。

可以看出,补偿前,振动误差使成像结果在方位向散焦严重,字母弯曲变形,点目标间难以分辨;顺轨双探测器补偿后,点目标间可以分辨,但点目标的副瓣很高,且存在方位位置偏移,成像结果有较大散焦;本文方法补偿后,点目标在方位向清晰可辨,成像结果聚焦良好,与理想补偿后的成像结果接近。

5 讨 论

5.1 振动估计探测器接收视场重叠度的影响

仿真实验验证了顺轨向两个探测器的接收视场完全重叠时的顺轨干涉估计方法。依照第 2 节中内容,在光学接收系统下,为保证接收视场完全重叠,需设置探测器前移距离满足一定的取值范围。但实际中探测器前移位置受安装条件约束,可能较难实现两个探测器在顺轨向具有完全重叠的接收视场。若两个探测器的接收

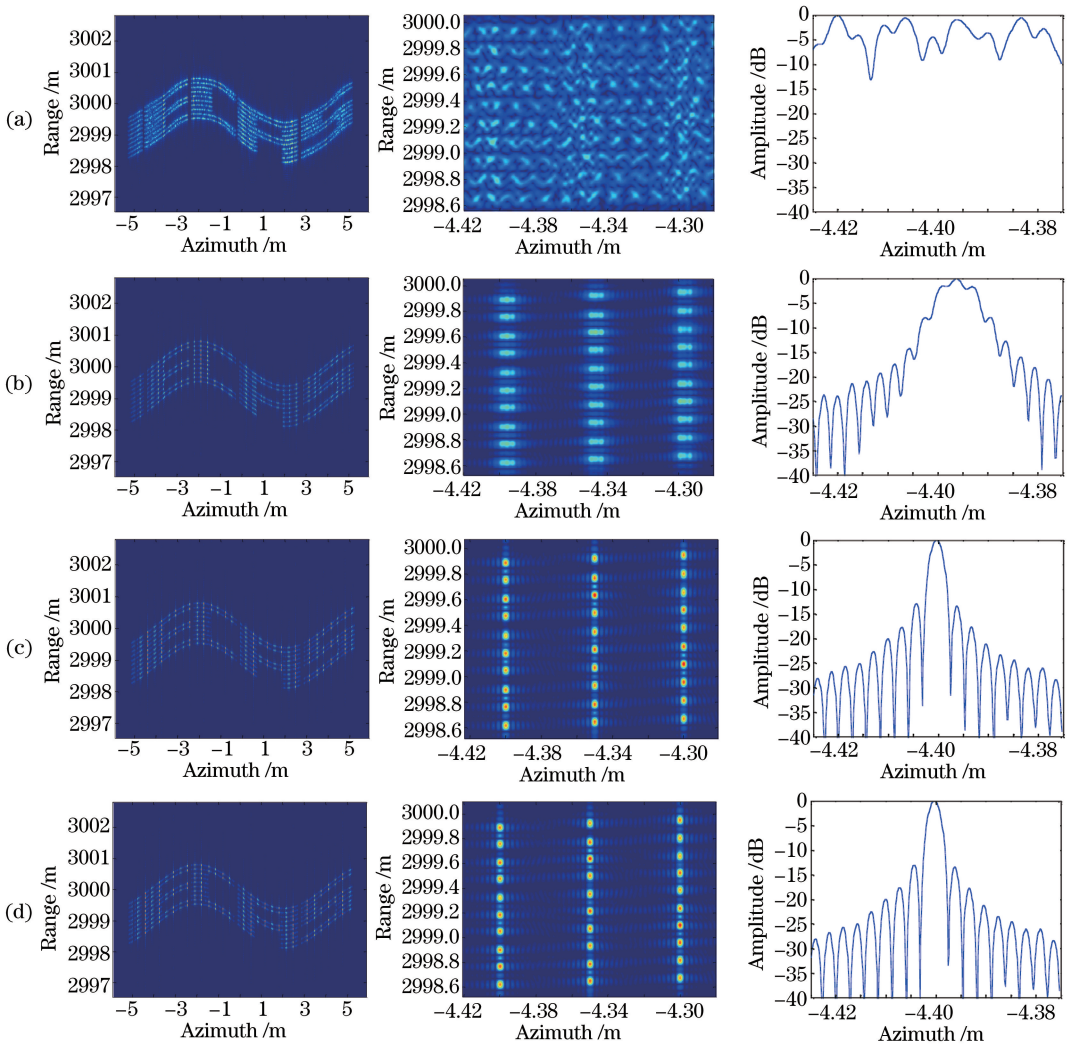


图 10 补偿前后成像结果对比。(a)不补偿;(b)顺轨双探测器补偿;(c)本文方法补偿;(d)理想补偿

Fig. 10 Comparison of imaging results before and after compensation. (a) No compensation;

(b) compensated by the along-track dual-detector; (c) compensated by the proposed method; (d) ideal compensation

视场部分重叠,则由于波束指向不完全一致,两探测器回波信号的多普勒中心频率不同,信号间的相干性变差^[13-14]。设 Δf_{dc} 和 B_d 分别为两信号多普勒中心频率差和多普勒带宽,则两探测器回波信号的相干性为

$$\rho_{\text{rotation}} = 1 - \frac{\Delta f_{dc}}{B_d} \quad (25)$$

图 11(a)给出了接收视场完全重叠、部分重叠(重叠部分占 50%)及完全不重叠 3 种情况的示意图,其中实线表示两个探测器的接收视场,虚线表示发射视场。图 11(b)为回波信号的多普勒频谱,其中 $f_{d\text{tmin}}$ 、 $f_{d\text{tmax}}$ 分别为由发射波束宽度限定的多普勒带宽最小值和最大值。上述三种情况下,探测器信号之间的相干系数分别为 1,0.67,0。

当接收视场部分重叠时,在信号处理前需要预先滤除两信号方位谱不重合的部分,以提高两探测器信号的相干性。若方位波束过窄,滤波处理后两探测器信号仍可能含有不同的振动信息,此时估计出的顺轨干涉相位含有较多的高频分量,使振动相位误差补偿后的残余相位误差较大。在利用复相关系数提取干涉相位时使用方位向多脉冲滑窗处理,或者对顺轨干涉相位进行拟合,可减弱顺轨干涉相位高频分量的影响,减小估计后的残余相位误差。为描述振动误差,多脉冲滑窗处理时窗宽不应过长,可设为振动周期的数十分之一。

设置仿真参数如第 4 节,接收视场部分重叠时的顺轨干涉估计仿真结果如图 12(a)所示。方位波束宽度为 0.3 mrad,多普勒域滤波处理后两探测器信号含有的振动信息不完全相同,经滑窗处理(窗宽为 1 ms,

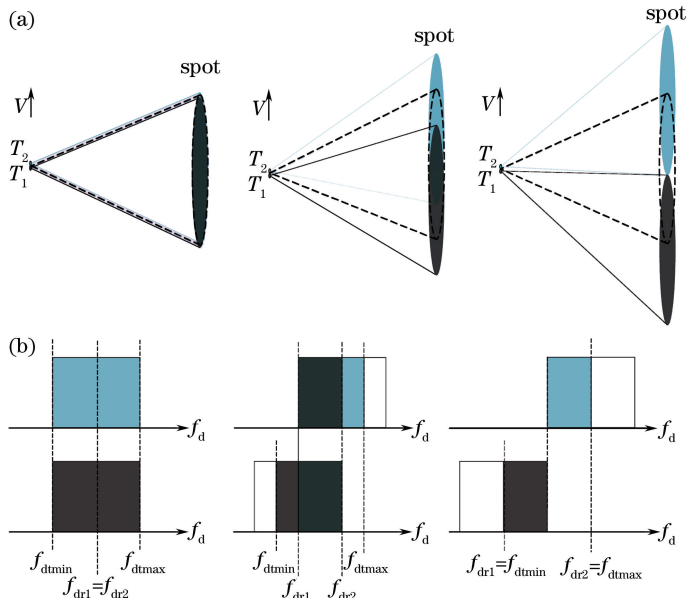


图 11 探测器视场重叠度示意图。(a)探测器视场;(b)方位谱

Fig. 11 Overlapped degree of field of view of detectors. (a) Field of view of the detectors; (b) azimuth spectrum
 对应 100 个脉冲重复周期)和拟合处理后,整个成像时间内的残余相位误差约 5 rad。若增大大方位波束宽度,则可以使残余相位误差进一步减小。以方位波束宽度增加至 0.6 mrad 为例,此时整个成像时间内的残余相位误差约 1.5 rad,如图 12(b)所示。

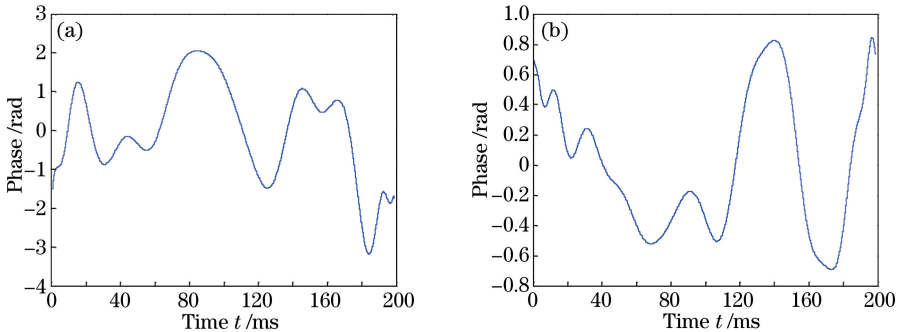


图 12 探测器接收视场部分重叠时的残余相位误差。(a)方位波束宽度 0.3 mrad;(b)方位波束宽度 0.6 mrad

Fig. 12 Residual phase error when field of view of detectors are partially overlapped. (a) Azimuth beamwidth is 0.3mrad;
 (b) azimuth beamwidth is 0.6 mrad

5.2 振动估计探测器的布局

为实现重叠视场,除了将振动估计探测器前移于焦平面前方的方法外,也可以将其置于焦平面后方,两者本质相同。此外,也可将振动估计探测器放在焦平面上,通过在其前面设置微透镜实现重叠视场。

5.3 信噪比的影响

基于干涉处理的振动相位误差估计对信号的信噪比(SNR)要求较高,为减少噪声影响,可采用方位谱滤波和滑窗处理的方法。通过信号方位谱滤波可滤除带外噪声;通过滑窗处理可增加每次振动估计时用于统计的方位脉冲数,两者均能提高 SNR,改善顺轨干涉相位估计精度。在此基础上,通过对顺轨干涉相位的拟合处理,也可减小残余相位误差。

当单脉冲 SNR 为 10 dB 时,经信号方位谱滤波和方位向多脉冲滑窗处理后(窗宽为 1 ms),顺轨干涉相位精度 $\delta_{\Delta\varphi}$ 优于 0.03 rad,根据(24)式可得振动径向速度的估计精度 δ_{V_r} 优于 0.37 mm/s,一个脉冲重复周期对应的相位误差估计精度优于 0.03 rad。在一个合成孔径时间内,若残余相位误差在 $-0.03 \sim 0.03$ rad 随机均匀分布,残余相位误差非线性分量优于 5.4 rad。单脉冲 SNR 为 10 dB 时整个成像时间内的残余相位误差如图 13 所示。

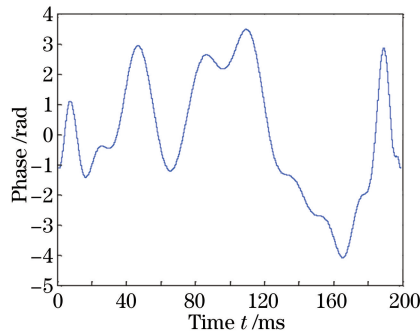


图 13 噪声情况下的残余相位误差

Fig. 13 Residual phase error under noise circumstance

上述结果对应的干涉处理,相对于无噪声条件下残余相位误差较大,但需说明的是,该结果是在全孔径成像条件下进行的,对应的方位分辨率较高(约 2.6 mm),采用子孔径成像时,5 cm 方位分辨率仅需要 1 ms 的子孔径成像时间,子孔径成像时间内的残余相位误差非线性分量小于 0.5 rad,对子孔径成像的影响较小。

6 结 论

介绍了基于正交基线干涉处理的机载 SAL 振动估计和成像方法,通过模型推导和仿真分析验证了该方法的有效性。需要注意的是,在第 2 节参数情况下,将三个振动估计探测器设计为长方形,其尺寸相对光斑覆盖范围较小,对应的信号能量利用率约 20% 较低,未来需对振动估计探测器布局和形状再开展深入的研究工作。另外,文中分析主要是在空间光路中进行的,当把探测器换成光纤准直器/光纤阵列时,通过在光纤准直器/光纤阵列的前方设置微透镜阵列,可使激光信号收入光纤,以形成全光纤相干激光雷达系统,易于实现相干探测。

参 考 文 献

- Ricklin J C, Tomlinson P G. Active imaging at DARPA[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5895: 589505.
- Dierking M, Schumm B, Ricklin J C, *et al.* Synthetic aperture LADAR for tactical imaging overview[C]. The 14th Coherent Laser Radar Conference(CLR), 2007, 9.
- Krause B W, Buck J, Ryan C, *et al.* Synthetic aperture lidar flight demonstration[C]. CLEO: Science and Innovations. Optical Society of America, 2011: PDPB7.
- Crouch S, Barber Z W. Laboratory demonstrations of interferometric and spotlight synthetic aperture lidar techniques[J]. Optics Express, 2012, 20(22): 24237-24246.
- Meng Dadi, Ding Chibiao. A new approach to autofocus considering strip map SAR [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2005, 27(9): 1349-1352.
孟大地, 丁赤彪. 一种用于条带式 SAR 的自聚焦算法[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(9): 1349-1352.
- Attia E H. Data-adaptive motion compensation for synthetic aperture LADAR[C]. 2004 IEEE Proceedings of Aerospace Conference, 2004, 3.
- Stappaerts E A, Scharlemann E T. Differential synthetic aperture lidar[J]. Optics Letters, 2005, 30(18): 2385-2387.
- Zhang Hongyi, Li Fei, Xu Weiming, *et al.* Suppression of the vibration effect in the lidar with differential synthetic aperture[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2015, 34(5): 576-582.
张鸿翼, 李 飞, 徐卫明, 等. 经过改进的差分合成孔径激光雷达对振动的抑制[J]. 红外与毫米波学报, 2015, 34(5): 576-582.
- Liu L R. Coherent and incoherent synthetic-aperture imaging ladars and laboratory-space experimental demonstrations[J]. Applied Optics, 2013, 52(4): 579-599.
- Li Daojing, Zhang Qingjuan, Liu Bo, *et al.* Key technology and implementation scheme analysis of air-borne synthetic aperture lidar[J]. Journal of Radars, 2013, 2(2): 143-151.
李道京, 张清娟, 刘 波, 等. 机载合成孔径激光雷达关键技术和实现方案分析[J]. 雷达学报, 2013, 2(2): 143-151.
- Ma Meng, Li Daojing, Du Jianbo. Imaging of airborne synthetic aperture lidar under platform vibration condition[J]. Journal of Radars, 2014, 3(5): 591-602.
马 萌, 李道京, 杜剑波. 振动条件下机载合成孔径激光雷达成像处理[J]. 雷达学报, 2014, 3(5): 591-602.
- Barber Z W, Dahl J R. Experimental demonstration of differential synthetic aperture lidar [C]. CLEO: Science and Innovations. Optical Society of America, 2015: STh30.
- Wang Chao, Zhang Hong, Liu Zhi. Spaceborne InSAR interferometric measurement[M]. Beijing: Science Press, 2002.
王 超, 张 红, 刘 智. 星载合成孔径雷达干涉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- Zebker H A, Villasenor J. Decorrelation in interferometric radar echoes[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(5): 950-959.