

正交长基线毫米波 InSAR 运动目标三维成像

马萌^{1,2,3}, 李道京^{1,2}, 李烈辰^{1,2,3}, 杜剑波^{1,2,3}, 乔明^{1,2}

(1. 微波成像技术重点实验室,北京 100190;2. 中国科学院电子学研究所,北京 100190;
3. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:提出了一种基于差频测角定位、等效去平地相位和模糊数估计相结合的相位解缠方法. 根据波束指向信息在差频下干涉测角,对目标进行粗定位;然后借鉴干涉合成孔径雷达(InSAR)中的去平地相位技术,实现等效去平地相位,缓解相位解缠压力;最后对模糊数进行统计估计,完成相位解缠. 实际数据处理结果表明,该方法不仅解决了目标尺寸较大引起的相对相位缠绕问题,而且可以获得目标的绝对相位,实现了对运动目标的三维定位与三维成像.

关键词:毫米波雷达;干涉逆合成孔径雷达(InSAR);运动目标成像;相位解缠;三维成像

中图分类号:TN958 **文献标识码:**A

3-D imaging for moving targets based on millimeter-wave InSAR with long orthogonal baselines

MA Meng^{1,2,3}, LI Dao-Jing^{1,2}, LI Lie-Chen^{1,2,3}, DU Jian-Bo^{1,2,3}, QIAO Ming^{1,2}

(1. Science and Technology on Microwave Imaging Laboratory, Beijing 100190, China;
2. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This paper proposed a novel phase unwrapping method which unites beat-frequency localization, equivalent ground interferometric phase removing and ambiguity number estimation. First, a rough localization is conducted under the beat frequency with the information of beam pointing. Then, by introducing the technology of ground interferometric phase removing in interferometric synthetic aperture radar(InSAR), an equivalent approach is used to alleviate the pressure of phase unwrapping. At last, the ambiguity number is estimated by statistic processing. The practical data processing results showed that the proposed method can not only solve the relative phase wrapping caused by large target size, but also obtain the absolute phase, making three-dimensional(3-D) localization and 3-D imaging possible.

Key words: millimeter-wave radar, interferometric inverse synthetic aperture radar(InSAR), moving target imaging, phase unwrapping, three-dimensional(3-D) imaging

PACS: 84. 40. Xb

引言

传统的单天线逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR)通常获取的是目标在距离-多普勒二维平面的投影图像,无法得到目标在三维空间中的位置和精确的尺寸信息. 为此,结合干涉测角和 ISAR 二维成像的 InSAR 技术成为研究热

点^[1-2]. 干涉逆合成孔径雷达(InSAR)利用多个天线获取有一定视角差的 ISAR 复图像,通过干涉处理得到目标散射点的三维空间位置,从而对目标的尺寸与形状进行估计.

目前,有关正交基线 InSAR 技术的文献报道分别从系统设计与信号处理等方面研究了三维成像的基本原理与数据处理流程^[3-5]. 此外,国内外一些单

收稿日期:2015-03-18,修回日期:2016-04-01

Received date: 2015-03-18, revised date: 2016-04-10

基金项目:中国科学院院支撑项目,国家自然科学基金(61271422)

Foundation items: Supported by Supporting Program of Chinese Academy of Sciences, National Natural Science Foundation of China (61271422)

作者简介(Biography): 马萌(1989-),男,河南周口人,博士研究生,研究方向为雷达信号处理. Email: mameng_ee@163.com

位进行了外场试验,如北京跟踪与通信技术研究所对 30 km 远的飞机进行了三维成像^[6];意大利比萨大学对入港船只与公路汽车进行三维成像,估计目标尺寸信息^[7-8]. 在已公开的报道中,通常需要合理地设计系统基线长度,来避免相位缠绕问题;然而,基线长度较短会降低干涉测角精度,影响远距离目标的三维成像效果. 为解决该问题,文献[9]设计了长短基线相结合的多基线系统结构,利用多基线进行相位解缠,但这增加了系统的复杂程度;文献[10]与文献[11]利用邻近散射点的干涉相位差异进行横向定标,解决了由于斜视引起的绝对相位缠绕问题,但当目标尺寸过大时,仍会出现相对相位缠绕;文献[12]直接采用 InSAR 中的路径积分法对 InSAR 缠绕相位进行相位解缠,但对于 ISAR 目标而言,目标散射点通常离散分布,干涉相位不满足相位连续性假设,因此该方法受到限制;文献[13]将回波分为中心频率不同的两路信号,通过共轭相乘获取等效差频下的成像结果,扩大了测角不模糊范围,实现了对目标的粗定位,但不能获得目标的三维成像结果.

中国科学院电子学研究所于 2014 年研制了正交长基线毫米波 InSAR 原理样机,并在国内首次开展了正交长基线毫米波 InSAR 运动目标三维成像试验. 本文基于该试验获取的实际数据研究了正交长基线条件下的运动目标三维成像问题,并在文献[13]的基础上,提出了一种基于差频测角定位、等效去平地相位和模糊数估计相结合的相位解缠方法. 首先利用波束指向信息在差频下干涉测角,对目标进行粗定位;然后借鉴 InSAR 中的去平地相位技术,实现等效去平地相位,缓解相位解缠压力;最后对模糊数进行统计估计,完成相位解缠. 对实际数据的处理结果表明,所提方法可以有效解决长基线带来的相位缠绕问题,实现了对目标的三维定位与三维成像.

1 正交长基线 InSAR 差频测角定位原理

正交基线 InSAR 系统三维成像几何模型如图 1 所示,其中 T_1 、 T_2 和 T_3 代表组成正交基线的三个天线, T_1 发射信号, T_1 、 T_2 和 T_3 同时接收. 两正交基线的长度分别为 b_{12} 和 b_{13} . 目标到三天线的斜距分别为 r_1 、 r_2 和 r_3 ,其中 r_1 与两基线的夹角分别为 α_{12} 与 α_{13} , r_1 对应的方位角与仰角分别为 β 和 γ . 设目标速度为 v ,其可分解为沿斜距方向的径向速度 v_r 与垂直于斜距方向的横向速度 v_c . 参考文献[14]中

的成像与干涉处理方法,可以得到两基线的干涉相位为:

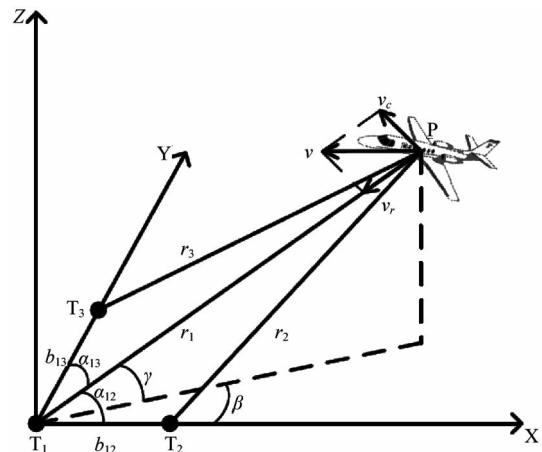


图 1 正交基线 InSAR 三维成像几何模型
Fig. 1 Geometric model of 3-D imaging for InSAR with orthogonal baselines

$$\phi_{1i} = -\frac{2\pi f_0}{C}(r_1 - r_i) \quad (i = 2, 3), \quad (1)$$

其中 f_0 为发射信号载频, C 为光速. 当斜距远大于基线长度时有:

$$\alpha_{1i} \approx \arccos\left(-\frac{C}{2\pi b_{1i} f_0} \phi_{1i}\right) \quad (i = 2, 3), \quad (2)$$

则目标散射点在三维空间中的位置即可得到:

$$P = r_1 (\cos\alpha_{12}, \cos\alpha_{13}, \sqrt{1 - \cos^2\alpha_{12} - \cos^2\alpha_{13}}) \quad (3)$$

以上是对单个散射点的三维定位方法,对所有目标散射点进行三维定位,便可得到目标的三维成像结果. 接下来分析系统的不模糊测角范围和测角精度,设不模糊测角范围为 $\Delta\alpha_{1i}$,由干涉相位误差引起的测角误差为 $\sigma_{\alpha_{1i}}$ ($i = 2, 3$),则:

$$\Delta\alpha_{1i} \approx 2\pi \left| \frac{\partial\alpha_{1i}}{\partial\phi_{1i}} \right| = \frac{C}{f_0 b_{1i} |\sin\alpha_{1i}|}, \quad (4)$$

$$\sigma_{\alpha_{1i}} = \left| \frac{\partial\alpha_{1i}}{\partial\phi_{1i}} \right| \sigma_{\phi_{1i}} = \frac{C}{2\pi f_0 b_{1i} |\sin\alpha_{1i}|} \sigma_{\phi_{1i}}$$

其中 $\sigma_{\phi_{1i}}$ 为干涉相位 ϕ_{1i} 的测量精度. 可以看出,当斜距方向不在基线法线方向时,系统的有效基线长度缩短为 $b_{1i} |\sin\alpha_{1i}|$;当系统的载频降低时,不模糊测角范围将扩大,而测角精度会随之降低.

为扩大系统的不模糊测角范围,文献[13]将回波信号在快时间频域分为互不重叠的两部分,构建中心频率相差为带宽一半的两路信号,通过共轭相乘等效将回波信号的载频降低为带宽的一半. 该方法被称作双频共轭处理. 由于系统发射线性调频信

号,双频共轭处理后的信号仍为线性调频信号,后续的成像处理与干涉处理流程不变。

双频共轭处理在成像前等效降低了回波信号的载频,导致成像结果在多普勒维分辨率下降,不能获得目标的轮廓信息. 本文同时借鉴双频共轭处理与多频率相位解缠技术^[15],对上述的两路信号分别进行成像与干涉处理,然后对两路干涉相位进行共轭相乘操作,从而得到具有多普勒维高分辨率的差频干涉相位. 设系统带宽为 B_r , 两路信号的中心频率分别为 f_1 和 f_2 , 其对应的干涉相位分别为 $\phi_{i_1}^1$ 和 $\phi_{i_1}^2$ ($i=2, 3$), 通过共轭相乘可以得到:

$$\begin{aligned}\phi_{i_1}^{21} &= \arg\{\exp(j\phi_{i_1}^2) \text{conj}[\exp(j\phi_{i_1}^1)]\} \\ &= -\frac{2\pi(f_2 - f_1)}{C}(r_1 - r_i) \\ &= -\frac{\pi B_r}{C}(r_1 - r_i)\end{aligned}\quad (5)$$

其中 $\phi_{i_1}^{21}$ 为差频干涉相位, 其等效载频与双频共轭处理后相同, 为 $B_r/2$. 相比于原始载频, 差频干涉相位对应的不模糊测角范围扩大了 $2f_0/B_r$ 倍. 在实际处理过程中得到的差频干涉相位仍存在绝对相位缠绕, 当不模糊测角范围大于系统的波束宽度时, 可通过波束指向信息进行相位解缠, 得到差频下的绝对相位, 实现对目标的测角定位。

2 基于等效去平地相位的模糊数估计方法

在差频下, 干涉相位解缠主要体现为绝对相位解缠, 利用系统的波束指向角即可实现相位解缠. 虽然差频测角定位能够实现对目标的三维成像, 但随着等效载频的降低, 系统的测角精度也随之下落, 三维成像结果受干涉相位误差的影响较大, 未能发挥长基线的优势. 本节将利用差频测角定位结果, 对原始载频下的相位缠绕模糊数进行估计, 在原始载频下实现干涉相位解缠。

差频下解缠得到的干涉相位等比例扩大后即原始载频下的绝对干涉相位, 只是在扩大的同时干涉相位误差也随之增加, 不能达到提高测角精度的目的. 然而, 同一模糊区间内的干涉相位模糊数相同, 可以根据原始载频下的干涉相位获得具有相同模糊数的二维图像区域, 然后统计对应区域内由扩大后的差频干涉相位计算得到的模糊数, 实现对该区域模糊数的估计. 根据文献^[16]的分析, 干涉相位误差满足零均值对称分布, 因此计算相同模糊区间内模糊数的平均值或中位数即可得到原始载频下的模糊数估值, 实现相位解缠。

但是, 在原始载频下干涉相位缠绕严重, 具有相同模糊数的区间较小, 这给模糊区间划分带来困难, 同时样本点较少也不利于模糊数的准确估计. 这里, 考虑借鉴 InSAR 中的去平地相位技术来减轻相位缠绕程度. InSAR 中的去平地相位本质上是利用参考平面高程这一先验信息, 去除参考平面引起的相位缠绕, 使去平地后的干涉相位仅仅反映目标相对于参考平面的高程信息, 从而有效地降低了干涉条纹密度, 缓解了相位解缠压力. 而对于 InISAR 而言, 去平地相位操作在三维空间内进行, 参考平面的空间位置与实际目标位置的接近程度决定了等效去平地相位的效果. 图 2 给出了等效去平地相位原理的示意图, 设目标以速度矢量 \mathbf{v} 运动, 则可以等效为目标静止而天线以相反的速度 \mathbf{v} 运动. 以坐标原点处的天线为中心, 根据目标速度构建等多普勒锥面与等斜距球面, 二者的割线即为等多普勒等斜距圆. 每个等多普勒等斜距圆对应于 ISAR 二维图像中的一个像素. 现将基线 b 分解为平行于目标速度的平行基线 $b_{//}$ 与垂直于目标速度的垂直基线 b_{\perp} . 在同一个等多普勒等斜距圆上, 不同位置处平行基线产生的干涉相位相同, 干涉相位差异主要由垂直基线产生. 因此, 当目标速度估计准确时, 等效去平地相位操作实质去除了平行基线产生的干涉条纹, 而剩余干涉相位主要由垂直基线产生, 此时可以通过估计目标平面的姿态(如横滚角)来获取更接近实际目标位置的参考平面, 进一步去除垂直基线产生的干涉条纹。

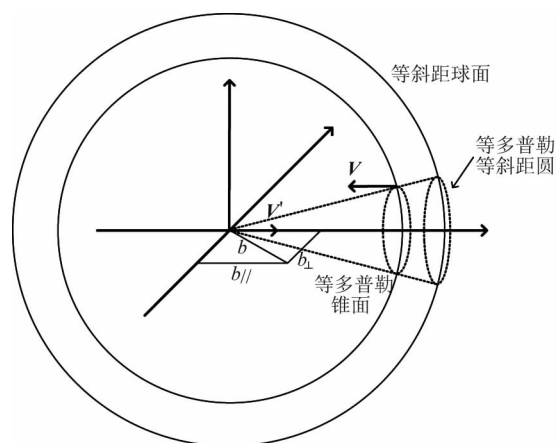


图 2 等效去平地相位原理

Fig. 2 Schematic diagram of equivalent ground interferometric phase removing

为获取目标的速度信息, 本文采用文献^[17]中的方法, 对目标进行三维速度分解, 然后结合差频测角定位结果计算参考平面对应的干涉相位, 完成等

效去平地相位操作. 生成参考平面干涉相位的具体流程如图 3 所示.

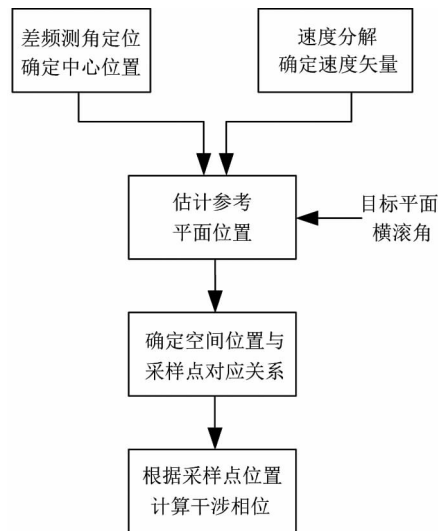


图 3 生成参考平面干涉相位流程图
Fig. 3 Flowchart of reference plane interferometric phase generation

第一步,对差频测角定位的结果进行统计平均,得到的平均值认为是目标几何中心位置 $P_0(x_0, y_0, z_0)$;

第二步,根据速度分解结果,确定目标速度矢量 $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)$;

第三步,设目标平面横滚角为 θ ,与横滚角相关的单位向量设为 \mathbf{u}_r ,其在目标平面内且与目标速度矢量垂直.当横滚角为 0 时, $\mathbf{u}_r = \mathbf{u}_{r,0} = (v_y / \sqrt{v_x^2 + v_y^2}, -v_x / \sqrt{v_x^2 + v_y^2}, 0)$.根据目标平面内的两个向量可以确定参考平面的法线向量 $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$,即求解以下方程组:

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = 0 \\ \mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_r = 0 \\ \mathbf{v} \cdot \mathbf{u}_r = 0 \\ \mathbf{u}_r \cdot \mathbf{u}_{r,0} = \cos\theta \end{cases} \quad (6)$$

得到法线向量后可根据目标平面过点 P_0 计算参考平面的空间位置表达式;

$$(x - x_0)n_x + (y - y_0)n_y + (z - z_0)n_z = 0 \quad (7)$$

第四步,根据目标速度矢量确定空间位置与二维图像采样点的对应关系,计算采样点的空间位置,即求解下列方程组;

$$\begin{cases} (x - x_0)n_x + (y - y_0)n_y + (z - z_0)n_z = 0 \\ xv_x + yv_y + zv_z = rv_r \\ x^2 + y^2 + z^2 = r^2 \\ f_d = -\frac{2v_z f_0}{C} \end{cases} \quad (8)$$

第五步,根据采样点空间位置,计算其到三天线的斜距,根据式(1)得到对应的干涉相位.

通过上述操作可以生成参考平面干涉相位.需要注意的是:步骤三中需要目标平面的横滚角信息.在实际应用中,可以结合先验信息设置横滚角初值(由于飞机一般平飞,通常可设置为 0),然后根据等效去平地相位后的效果对横滚角进行搜索,以尽可能降低干涉条纹密度;参考平面的干涉相位与目标实际所在平面的干涉相位会有差别,但后续可以通过恢复平地相位操作来确保最终相位解缠的正确性,只要参考平面干涉相位的变化趋势与目标干涉相位相近,即可达到降低干涉条纹密度的目的.

经过等效去平地相位处理后,原始载频下的干涉条纹密度降低,甚至出现相位不再缠绕的情况,有利于模糊区间的划分与模糊数的统计.在模糊区间划分时,应遵循:尽可能多地将具有相同模糊数的区域划为同一区间,以增加统计样本个数;对于离散分布的目标散射点,由于无法判断其模糊数是否相同,应将其划分为不同的区域.在干涉相位分区完成后,对相应区域内由扩大后的差频干涉相位得到的模糊数进行统计,计算其平均值或中位数即可完成模糊数估计.

对以上的相位解缠方法进行总结,得到方法流程图如图 4 所示.其中, $I_i (i = 1, 2, 3; j = 0, 1, 2)$ 表示天线 T_i 在载频 f_j 下得到的二维图像, k 与 k' 分别为对应干涉相位的模糊数及统计后的模糊数估值,下标 g 表示等效去平地后的相位, φ 表示未解缠的相位.

3 实际数据处理

实际数据来自中科院电子所研制的正交长基线毫米波 InSAR 原理样机对飞机目标的三维成像试验.表 1 给出了主要的系统参数与目标运动参数,其中波束指向对应的方位角与仰角由安装在天线上的指示器测量得到,精度较低;目标速度矢量采用文献[17]中的方法估计得到.根据实际数据对应的参数,计算得到基线 12 与基线 13 对应的等效基线长度分别约为 3.6 m 与 10.4 m,测角不模糊范围分别约为 0.14° 与 0.05° ,对应的目标不模糊尺寸分别约为 12 m 和 4 m.对于飞机目标尺寸而言,两基线都有可能产生测角模糊,在三维成像中需要进行相位解缠.

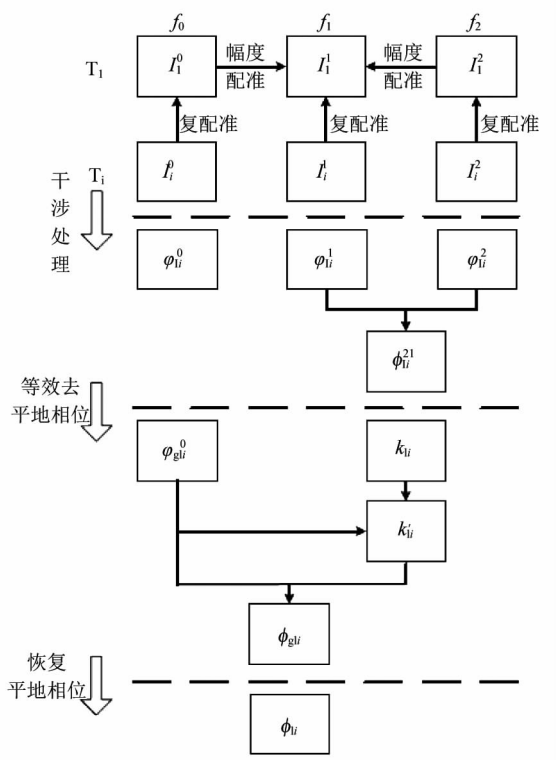


图4 相位解缠方法流程图
Fig.4 Flowchart of proposed phase unwrapping method

表1 试验参数
Table 1 Experiment parameters

参数	数值
系统载频 f_0	35 GHz
系统带宽 B_r	400 MHz
基线 12 长度 b_{12}	9.4 m
基线 13 长度 b_{13}	10.6 m
波束宽度	$3^\circ \times 3^\circ$
波束指向方位角 β	-168°
波束指向仰角 γ	19°
目标斜距 r_1	5 050 m
目标速度矢量 v	(3.36, -129.36, 10.86) m/s

采用文献[14]中的成像方法进行成像, 天线 T_1 的二维成像结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 单天线获取的二维图像在斜距—多普勒域, 无法对飞机的尺寸进行有效估计. 此外, 图像中飞机右翼与机身完全分离, 是由于机腹的遮挡产生了阴影, 因此传统的相位解缠方法已不再适用。

经过干涉处理后, 得到两条基线在原始载频下的干涉相位图, 如图 6 所示. 为抑制噪声影响, 以下所有的干涉相位图均是经过门限处理后形成的, 即对图像幅度做归一化后, 取 -35 dB 为幅度门限, 只保留幅度高于该门限值的区域对应的干涉相位. 在原

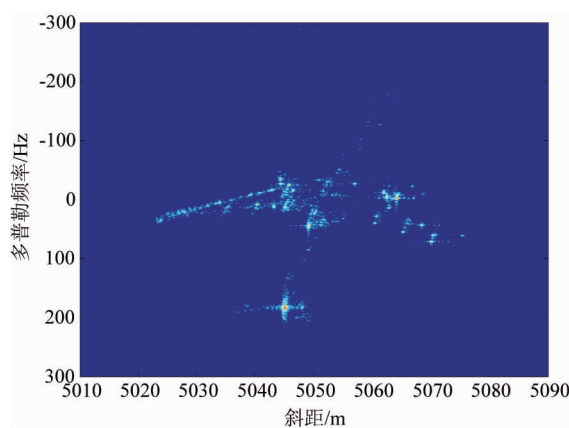


图5 二维成像结果
Fig.5 Result of 2-D imaging

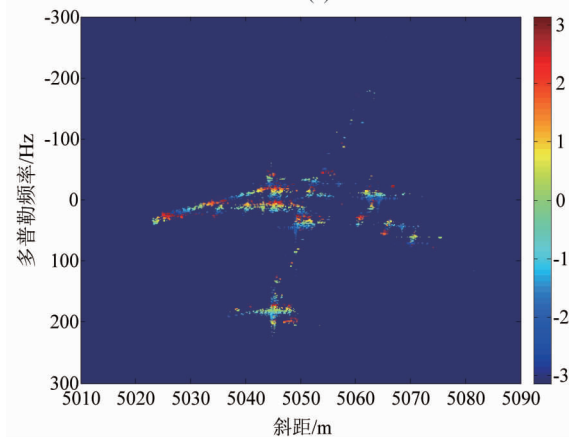
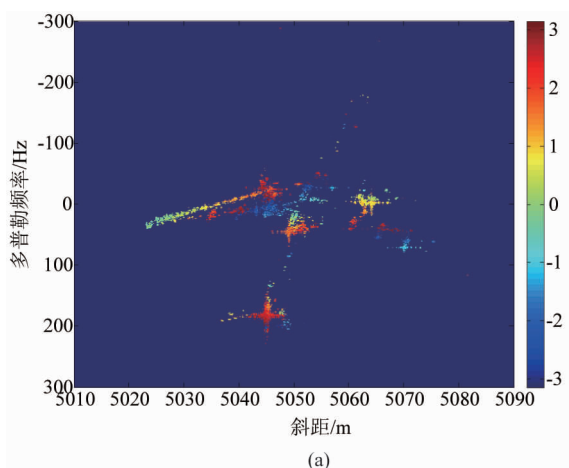


图6 原始载频下干涉相位图 (a) 基线 12, (b) 基线 13
Fig.6 Interferometric phase under original carrier frequency (a) baseline 12, (b) baseline 13

始载频下, 由于测角不模糊范围较小, 两条基线的干涉相位缠绕严重, 尤其是基线 13, 干涉条纹在纵向的分布十分密集, 仅根据干涉相位图进行相位解缠十分困难。

采用本文提出的差频测角定位方法进行处理,

得到在差频 200 MHz 下的干涉相位图,如图 7 所示.可以看出,等效载频的大幅度降低使得目标尺寸不会引起相对相位缠绕.而且对于试验系统,差频下的测角不模糊范围在 8° 以上,远大于波束宽度,因此可以根据波束指向角计算差频下 α_{12} 与 α_{13} 对应的干涉相位模糊数,实现差频下的绝对相位解缠.

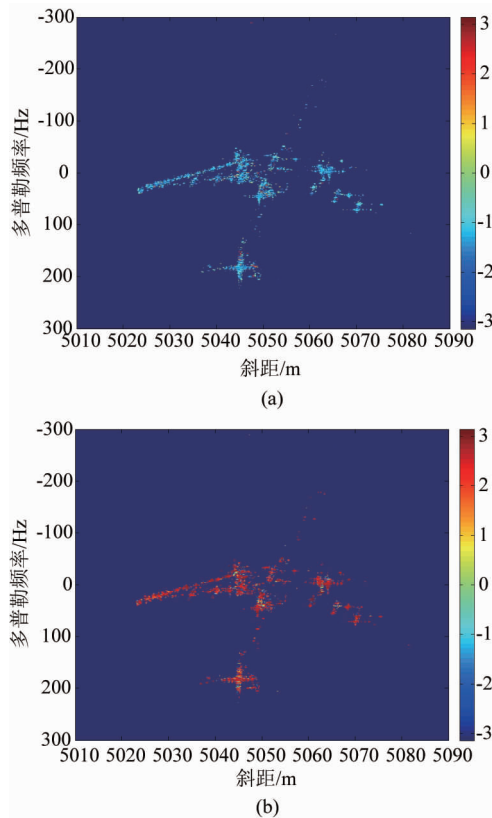


图 7 差频下干涉相位图 (a) 基线 12, (b) 基线 13
Fig. 7 Interferometric phase under beat-frequency carrier (a) baseline 12, (b) baseline 13

在得到差频绝对干涉相位后,可以进行三维成像处理.但由于差频下测角精度较低,三维成像结果已无法反映目标的真实形状与尺寸.然而可以利用其统计平均值对目标的三维位置进行粗估计,统计得到目标所在的方位角与仰角分别为 -167.8° 与 18.9° ,为后续的等效去平地相位提供了条件.

按照第 2 节中的方法生成参考平面干涉相位,这里令目标平面横滚角为 0.在原始载频下,经过等效去平地后的干涉相位如图 8 所示.根据第 2 节中的分析,可以计算得到基线 12 分解后的垂直基线长度约 9.39 m,基线 13 分解后的垂直基线长度约 0.93 m.考虑到斜距方向不在基线法线方向,可计算得到基线 12 与基线 13 的垂直基线对应的有效基线长度分别约为 3.45 m 与 0.93 m,对应的测角不模

糊范围分别约为 0.14° 与 0.53° ,对应的目标不模糊尺寸分别约为 12 m 和 46 m.因此,经过等效去平地相位操作,图 8 中基线 13 的干涉条纹已基本去除;而对于基线 12,其垂直基线对应的目标不模糊尺寸与等效去平地相位前相同,图 8 中基线 13 的相位缠绕程度有所降低,说明 0 横滚角假设合理,估计的目标平面与目标真实平面接近.

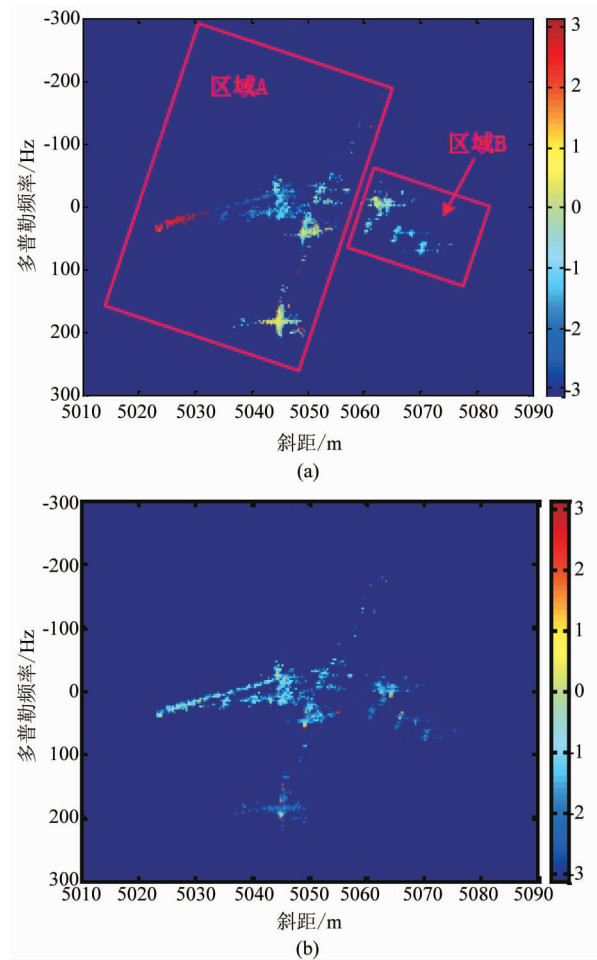


图 8 等效去平地后的干涉相位图 (a) 基线 12, (b) 基线 13
Fig. 8 Interferometric phase after equivalent ground phase removing (a) baseline 12, (b) baseline 13

由于飞机右侧机翼与机身间断,现将干涉相位分为两个区域进行模糊数统计,分区示意图如图 8 (a) 所示(统计时滤除区域 A 左侧相位缠绕部分).基线 13 的干涉相位分区情况与基线 12 相同.统计得到的模糊数直方图如图 9 所示.

可以看出,统计的模糊数基本满足对称分布,计算模糊数均值与中位数以对其进行估计.计算结果为:基线 12 区域 A 平均值 -1.17 ,中位数 -1 ,区域 B 平均值 -1.13 ,中位数 -1 ;基线 13 区域 A 平均值 1.93 ,中位数 2 ,区域 B 平均值 0.46 ,中位数 1 .从基

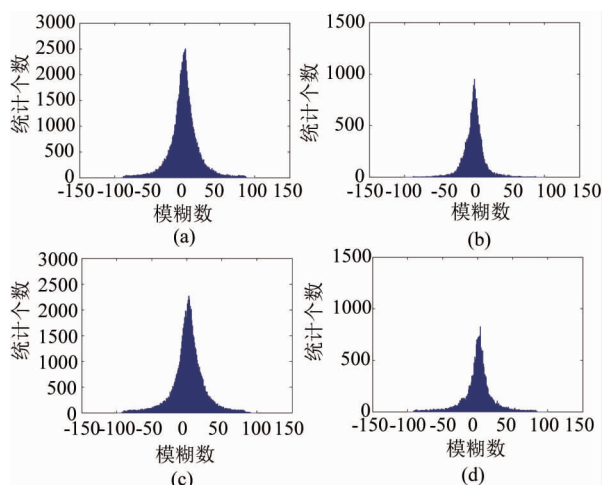


图9 模糊数统计结果 (a) 基线 12 区域 A, (b) 基线 12 区域 B, (c) 基线 13 区域 A, (d) 基线 13 区域 B

Fig. 9 Statistic results of ambiguity number (a) baseline 12 zone A, (b) baseline 12 zone B, (c) baseline 13 zone A, and (d) baseline 13 zone B

线 12 的统计结果来看,区域 A 与区域 B 模糊数相同,均为-1,这也进一步验证了之前的推测:图像中的间断部分由阴影造成,而阴影前后的入射角相同,干涉相位不变.而从基线 13 的统计结果来看,两个区域不在同一个模糊区域.考虑到概率统计的随机性与阴影前后干涉相位的一致性,这里认为基线 12 得到的结果更为可信,即区域 A 与区域 B 模糊数相同.再次对基线 13 整个区域进行模糊数统计,以确定其模糊数,统计结果如图 10 所示,得到模糊数平均值为 1.63,中位数为 2,因此确定其模糊数为 2.

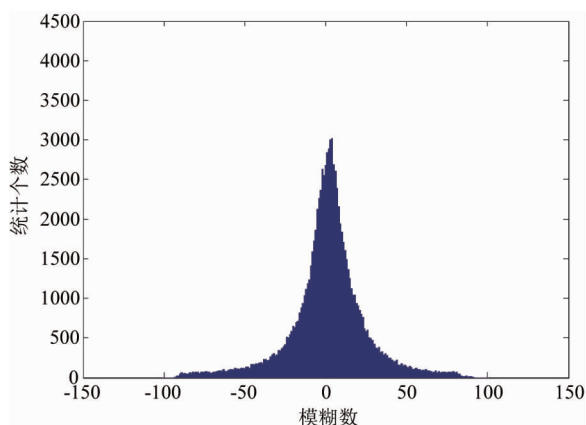


图 10 基线 13 模糊数统计结果

Fig. 10 Ambiguity number statistic results of baseline 13

根据估计的模糊数对去平地后的干涉相位进行相位解缠,然后恢复平地相位即可得到目标的绝对干涉相位,实现三维成像与三维定位.目标的三维成

像结果见图 11.从图中可以看出,目标飞机的三维成像结果轮廓清楚,并可估计其翼展约 65 m,机身长度约 70 m,目标位于(-4 665, -1 020, 1 650) m 位置处.

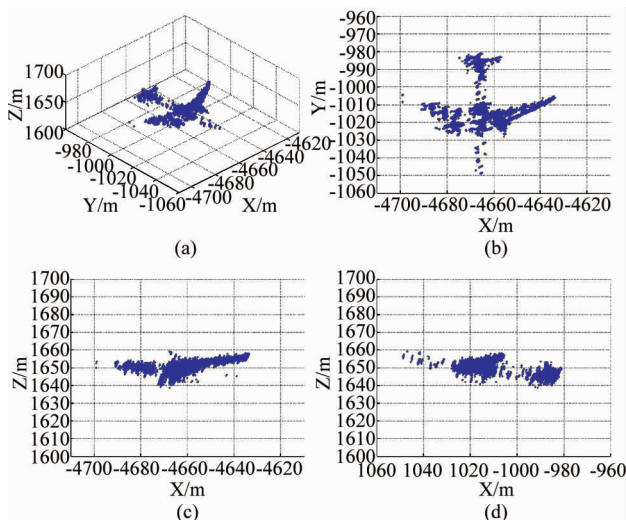


图 11 三维成像结果 (a) 三维图, (b) 俯视图, (c) 正视图, (d) 侧视图

Fig. 11 3-D imaging results (a) 3-D image, (b) top view, (c) front view, and (d) side view

4 结论

针对正交长基线毫米波 InSAR 三维成像中遇到的相位缠绕问题,本文提出了基于差频测角定位、等效去平地相位和模糊数估计相结合的相位解缠方法.该方法不基于相位连续性假设,通过等效去平地相位降低干涉条纹密度,并综合利用差频干涉相位与原始载频干涉相位信息,实现对模糊数的统计估计.对实际数据的处理结果表明,该方法能够有效降低干涉条纹密度,以较大的概率准确估计干涉相位的模糊数,实现相位解缠,完成对目标的三维定位与三维成像.所做的研究工作,对正交长基线 InSAR 三维成像应用具有重要的参考价值.

References

- [1] LI Dao-Jing, LIU Bo, YIN Jian-Feng, et al. . *High resolution radar moving target imaging detection technology* [M]. Beijing: National Defense Industry Press (李道京, 刘波, 尹建凤, 等. 高分辨率雷达运动目标成像探测技术. 北京: 国防工业出版社), 2014.
- [2] LIU Chen-Lan, GAO Xun-Zhang, LI Xiang. Review of interferometric ISAR imaging [J]. *Signal Processing* (刘承兰, 高勋章, 黎湘. 干涉式逆合成孔径雷达成像技术综述. 信号处理) 2011, 27(5): 737 - 748.
- [3] Wang G Y, Xia X G, Chen V C. Three-dimensional ISAR

- imaging of maneuvering targets using three receivers [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, **10**(3):436-447.
- [4] Xu X J, Narayanan R M. Three-dimensional interferometric ISAR imaging for target scattering diagnosis and modeling [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, **10**(7):1094-1102.
- [5] Zhang Q, Yeo T S. Novel registration technique of InSAR and InSAR [C]. In *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEEE, 2003:206-208.
- [6] LI Hai-Lin. A study on 3-D interferometric ISAR imaging test [J]. *Modern Radar* (黎海林. 干涉 ISAR 三维成像试验研究. *现代雷达*), 2010, **32**(5):22-25.
- [7] Stagliano D, Giusti E, Lischi S, et al. 3D InSAR-based target reconstruction algorithm by using a Multi-Channel ground-based radar demonstrator. [C]. In *2014 International Radar Conference*, IEEE, 2014.
- [8] Lischi S, Massini R, Stagliano D, et al. X-band compact low cost multi-channel radar prototype for short range high resolution 3D-InSAR [C]. In *Proceedings of the 11th European Radar Conference*, IEEE, 2014.
- [9] Zhang Q, Yeo T S, Du G, et al. Estimation of three-dimensional motion parameters in interferometric ISAR imaging [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, **42**(2):292-300.
- [10] Ling M, Yuan W M, Xing W G. Cross-range calibration of interferometric ISAR under a condition of phase ambiguity [C]. In *Asian-pacific Conference on Synthetic Aperture Radar*. IEEE, 2009: 903-906.
- [11] Liu C L, He F, Gao X Z. 3-D calibration of InSAR imaging under a condition of phase ambiguity [C]. In *Proceedings of the 7th European Radar Conference*. IEEE, 2010:435-438.
- [12] LI Li-Ya, LIU Hong-Wei, JIU Bo, et al. An interferometric inverse synthetic aperture radar imaging algorithm for squint model [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University* (李丽亚, 刘宏伟, 纠博, 等. 斜视干涉合成孔径雷达成像算法. *西安交通大学学报*), 2008, **42**(10):1290-1294.
- [13] LIU Bo. Research on moving target imaging and detection for millimeter-wave InSAR [D]. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences (刘波. 毫米波 InSAR 运动目标成像探测技术研究. 中国科学院电子学研究所), 2013.
- [14] LIU Bo, PAN Zhou-Hao, LI Dao-Jing, et al. Moving target detection and location based on millimeter wave InSAR imaging [J]. *J. Infrared MillimWaves* (刘波, 潘舟浩, 李道京, 等. 基于毫米波 InSAR 成像的运动目标探测与定位. *红外与毫米波学报*), 2012, **31**(3):258-264.
- [15] Xu W, Chang E C, Kwok L K, et al. Phase-unwrapping of SAR interferogram with multi-frequency or multi-baseline [C]. In *International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Canada*, 1994, **2**:730-732.
- [16] Lee J S, Grunes M R, Kwok R. Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric SAR imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, **32**(5): 68-78.
- [17] YIN Jian-Feng. Research on the method of SAR high-speed moving target detection and imaging [D]. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences (尹建凤. SAR 高速运动目标检测与成像方法研究. 中国科学院电子学研究所), 2009.

(上接 487 页)

- [2] YUAN Xue-Song, MA Chun-Yan, HAN Yu, et al. A 0.52 THz third harmonic little-orbit gyrotron [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (袁学松, 马春燕, 韩煜, 等. 小回旋三次谐波 0.52THz 回旋管. *红外与毫米波学报*), 2012, **31**(2): 127-131.
- [3] SHI Shao-Hui, LIU Pu-Kun, XU Shou-Xi, et al. Design and simulation of Magnetron Injection Gun of Gyrotron [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology* (史少辉, 刘濮鲲, 徐寿喜, 等. 回旋管磁控注入电子枪的设计. *真空科学与技术学报*), 2014, **34**(10): 1071-1075.
- [4] LAI Guo-Jun, LIU Pu-Kun. Analysis of velocity spread of a W-band gyrotron traveling wave amplifier [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (来国军, 刘濮鲲. W 波段回旋行波管放大器速度零散的分析. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(6): 447-450.
- [5] Jiang W, Luo Y, Yan R. Computational design and optimization of a magnetron injection gun [J]. *IEEE T. ELECTRON DEV.*, 2014, **61**(7): 2547-2551.
- [6] Baird J M, Lawson W. Magnetron injection gun (MIG) design for gyrotron applications [J]. *Int. J. Electron.*, 1986, **61**(6): 953-967.
- [7] Lawson W. MIG scaling [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1988, **16**(2): 290-295.
- [8] Goldberg D E. Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization [C]. In *Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms*, 1987.
- [9] Chen J H, Goldberg D E, Ho S Y, et al. Fitness Inheritance In Multi-objective Optimization [C]. *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2002: 193-262.
- [10] Alsultanb S Z S. A simulated annealing algorithm for the clustering problem [J]. *Pattern Recognition*, 1991, **24**(91): 1003-1008.
- [11] Kirkpatrick S. Optimization by simulated annealing [J]. *Science*, 1983, **220**(4598): 671-680.
- [12] Fan W, Machemehl R B. Using a simulated annealing algorithm to solve the transit route network design problem [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2014, **132**(2): 122-132.
- [13] Metropolis N S, Rosenbluth A W, Rosenbluth M N, et al. Equation of state calculations by fast computing machines [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1953, **21**(6): 1087-1092.