

## 基于随机霍夫变换的干涉ISAR横向定标算法

李飞 纠博\* 刘宏伟

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 针对ISAR像的横向定标、干涉ISAR(InISAR)中相位缠绕问题, 该文提出一种基于随机霍夫变换(Randomized Hough Transform, RHT)的InISAR横向定标算法。该算法基于ISAR像中的特显点, 由特显点的干涉相位主值得到的横向距离与多普勒频率的线性关系, 利用RHT估计真实横向距离与多普勒频率之间的尺度因子, 对ISAR像横向定标, 从而避免了繁琐的相位解缠绕过程。仿真结果表明该算法可以实现对ISAR像的定标, 并具有一定的抗噪声性能。

**关键词:** 干涉ISAR; 随机霍夫变换(RHT); 相位缠绕; 尺度因子; 横向定标

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)01-0049-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.01162

## A Novel Method of Cross-range Scaling Interferometric ISAR Based on Randomized Hough Transform

Li Fei Jiu Bo Liu Hong-wei

(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Considering the phase wrapping issue in the cross-range scaling of interferometric ISAR, a novel algorithm of cross-range scaling is proposed based on Randomized Hough Transform (RHT). Using the linear relationship between the azimuth positions derived from the wrapping interferometric phases and the Doppler frequencies of the dominant scatters in ISAR image, the proposed algorithm estimates the scale factor between true azimuth position and Doppler frequency by RHT and determines the ISAR image scale in the cross-range direction, consequently avoiding the complex phase unwrapping procedure. The simulation results verify the validity and anti-noise capability of the proposed algorithm.

**Key words:** Interferometric ISAR; Randomized Hough Transform (RHT); Phase wrapping; Scale factor; Cross-range scaling

### 1 引言

传统逆合成孔径雷达(ISAR)图像是目标在距离-多普勒平面的2维投影。距离向的高分辨是通过发射宽带信号获得的, 方位向高分辨是依靠目标相对于雷达射线的姿态变化所产生的多普勒效应获得的。ISAR像的横向分布是基于目标转动的多普勒分布, 多普勒的分布与转速有关, 在转速不能精确估计的情况下, 目标的真实尺寸是不确知的。因为多普勒分布依赖于姿态变化率<sup>[1]</sup>, 不同的姿态变化率下, ISAR像可能有较大的区别, 只有确定目标各个散射点的横向距离, 才能得到反应目标真实形状的距离-方位像。

干涉式逆合成孔径雷达(InISAR)成像是近年来发展起来的一种将干涉技术与逆合成孔径雷达相结合的成像方法。InISAR是利用干涉技术, 通过各个天线间的相位信息得到目标横向距离信息<sup>[1-6]</sup>。即通过在水平方向放置多个天线, 通过发射宽带信号获得距离上的高分辨, 再对每个天线的接收数据在横向进行谱分析, 充分分离同一距离单元的散射点(ISAR成像); 对可分离的散射点计算相位差, 进而可获得该散射点相对于基线的水平信息, 再加上距离信息, 就可获得目标横向距离。

然而在实际中, 干涉处理获得的干涉相位可能超出 $(-\pi, \pi]$ 的范围, 也就是说InISAR需要解决相位缠绕问题<sup>[7-9]</sup>。文献[8]提出了基于多特显点的InISAR成像方法, 其中利用路径积分解缠绕算法对干涉相位解缠绕后, 估计特显点横向距离与多普勒的线性关系, 最后根据此线性关系对ISAR像进行定标处理; 但是路径积分解缠绕算法要求各相邻像素的干涉相位 $\varphi$ 的差的绝对值小于 $\pi$ , 该条件在实际

2011-11-10 收到, 2012-11-14 改回

国家自然科学基金(61271024, 61201292, 61201283), 新世纪优秀人才支持计划(NCET-09-0630), 全国优秀博士学位论文作者专项资金(FANEDD-201156)和中央高校基本科研业务费专项资金联合资助课题

\*通信作者: 纠博 bojiu@mail.xidian.edu.cn

应用中并不一定成立,如目标在不同姿态下或者干涉相位受噪声污染的情况下,某些散射点不满足该条件;由于解缠绕运算是递推进行的,不满足相邻像素的干涉相位差小于 $\pi$ 的情况,使其中某一点的解缠绕相位发生错误,它不仅改变了序列中该点的解缠绕相位值,而且使后续的散射点的干涉相位也发生改变,即误差传播;这就限制了这种算法的应用场景。在文献[9]中,最小二乘方法的解唯一,而且在一定意义下是最优的。但是它的明显缺点是解缠绕处理把残点和正常点一样纳入计算,使其对四周的采样点产生不良影响,当残点密集时,解缠绕的准确性变差。而分支截断法<sup>[7]</sup>虽然思想简单,但是在编程实现过程中往往要用到递归,使得该算法的实现或程序设计十分繁琐;而且在残点密集的区域,分支形成的策略对测量结果的精度影响很大。针对InISAR相位模糊问题本文提出一种基于随机霍夫变换(Randomized Hough Transform, RHT)<sup>[10,11]</sup>的InISAR定标算法,该算法利用干涉相位主值得到的模糊横向距离与多普勒频率间的线性关系,通过RHT算法对两者之间的尺度因子进行估计,并利用该尺度因子在目标方位向上定标,避免了复杂的相位解缠绕过程。

文章结构如下:第2节介绍InISAR成像原理;第3节给出了基于随机霍夫变换InISAR算法;第4节给出了仿真结果,并同文献[8]算法进行对比,验证算法在无需对干涉相位解缠绕的前提下对ISAR像横向定标的有效性,而且具有一定的抗噪声性能。

## 2 InISAR成像原理

在ISAR成像中,当目标平稳飞行时,通过运动补偿后一般都可以视为匀速转动的转台目标,如图1所示, A 天线收发共用, B 天线只接收信号,  $x$  轴为方位向,  $y$  轴为距离向。设 A, B 水平放置, A, B 之间的间距为  $D$ , 坐标原点为天线基线中点  $O$ 。

为了简化问题,假定目标的中心(旋转中心)位于  $y$  轴上。 $q$  为目标的一个散射点,  $q$  到 A, B 和  $O$  的距离分别为  $R_{qA}$ ,  $R_{qB}$  和  $R_q$ 。由图1可知:

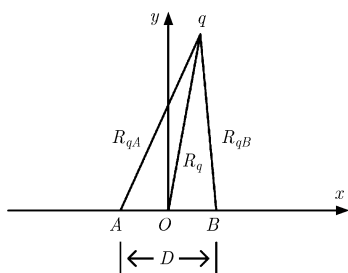


图1 天线和目标的几何关系

$$R_{qA}^2 = y_q^2 + \left(\frac{D}{2} + x_q\right)^2 \quad (1)$$

$$R_{qB}^2 = y_q^2 + \left(\frac{D}{2} - x_q\right)^2 \quad (2)$$

$$\Delta R = R_{qA} - R_{qB} = \frac{2x_q D}{R_{qA} + R_{qB}} \approx \frac{x_q D}{R_q} \quad (3)$$

在式(3)中,  $D$  已知,  $R_q$  可以测量得到。如果能求得波程差  $\Delta R$ , 即可求得  $x_q$ , 实现对散射点  $q$  定标。

假设天线 A 发射线性调频信号, 对回波信号在距离向作匹配滤波(即脉冲压缩)处理并忽略包络走动可得

$$S_A(\hat{t}, t_m) \approx \sigma_A \text{sinc}\left[\Delta f_r \left(\hat{t} - \frac{2R_{qA}(t_0)}{c}\right)\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda} R_{qA}(t_m)\right] \quad (4)$$

其中  $\hat{t}$  表示快时间,  $t_m$  表示慢时间,  $\sigma_A$  为散射点  $q$  在天线 A 处的回波幅度,  $\Delta f_r$  为信号带宽,  $c$  为光速,  $\lambda$  为波长,  $R_{qA}(t_0)$  为成像时刻  $t_0$  时散射点  $q$  至天线 A 的距离。在雷达成像期间, 散射点相对于雷达的转角通常较小, 散射点  $q$  至天线 A 的距离  $R_{qA}(t_m)$  可近似表示为

$$R_{qA}(t_m) \approx R_{qA}(t_0) - \omega x t_m \quad (5)$$

其中  $\omega x t_m$  为成像积累时间内由于旋转产生的距离变化项。对式(4)信号做傅里叶变换可得目标 ISAR 像, 天线 A 在  $t_0$  时刻获得的 ISAR 像复振幅可表示为

$$s_{qA}(t_0) = \sigma_A \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda} R_{qA}(t_0)\right] \quad (6)$$

同理, 天线 B 在  $t_0$  时刻获得的 ISAR 像复振幅为

$$s_{qB}(t_0) = \sigma_B \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda} (R_{qA}(t_0) + R_{qB}(t_0))\right] \quad (7)$$

经干涉处理得到干涉相位

$$\varphi_{AB} = 2\pi D x_q / (\lambda R_q) \quad (8)$$

由干涉相位可求得横向坐标

$$x_q = \frac{\lambda R_q \varphi_{AB}}{2\pi D} \quad (9)$$

由于相位差以  $2\pi$  为周期, 为使横向测距无模糊应满足

$$\left| \frac{2\pi x_q D}{\lambda R_q} \right| < \pi \quad (10)$$

如果不对干涉相位解模糊, 则最大无模糊横向距离范围为  $X_{\max} \in \left[-\frac{\lambda R_q}{2D}, \frac{\lambda R_q}{2D}\right]$ 。

## 3 基于RHT干涉ISAR横向定标算法

在实际应用中, 干涉相位并不一定满足  $|\varphi| < \pi$ ,

因此InISAR对目标定标需要解决干涉相位缠绕问题。传统InISAR成像过程中常采用路径积分解缠绕算法、最小二乘法<sup>[7-9]</sup>等。解决相位解缠绕方法，路径积分解缠绕算法要求各相邻像素的干涉相位 $\varphi$ 的差的绝对值小于 $\pi$ ，该条件在实际应用中是不一定成立，而且该算法存在误差传播的缺点；最小二乘法在残点密集时，解缠绕的准确性变差。由于多普勒与横向距离之间为线性关系，所以只要能够准确估计多普勒与横向距离之间的比例因子或尺度因子，就能够对目标ISAR像进行定标。本文提出一种基于随机霍夫变换的干涉ISAR横向定标算法，该算法利用经典的直线检测算法RHT精确估计多普勒与横向距离间的尺度因子，然后对目标ISAR像进行定标，从而避免了繁琐的相位解缠绕过程。

### 3.1 随机霍夫变换(RHT)

在 InISAR 相位缠绕问题中，由于干涉相位与散射点横向距离是线性关系，本文通过随机霍夫变换<sup>[10]</sup>估计线性关系的参数，并对 ISAR 像进行定标。对于直线方程：

$$y = \alpha_1 x + \alpha_2 \quad (11)$$

传统霍夫变换(Hough Transform)将一数据点 $(x_1, y_1)$ 映射为参数空间的一条直线 $\alpha_2 = y_1 - \alpha_1 x_1$ 。利用两个数据点 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 通过求解式(12)的方程组可以确定参数空间中的一点。

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= \alpha_1 x_1 + \alpha_2 \\ y_2 &= \alpha_1 x_2 + \alpha_2 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

RHT 的基本思想<sup>[10,11]</sup>是，首先建立数据点集合 $D$ ，然后从集合 $D$ 中随机选取两个数据点 $d_1 = (x_1, y_1), d_2 = (x_2, y_2), d_1 \neq d_2$ 。随机选取数据点的方法是：使每个数据点被抽取到的概率相等，即 $D$ 中所有数据点以相同概率被抽取为 $d_1$ ，等概率地从 $D - \{d_1\}$ 中抽取数据点 $d_2$ 。求解式(12)，即可得到参数空间中一点 $p_i = (a_1(i), a_2(i))$ ，并将此参数插入参数点集合 $P$ 中。假如图像中存在一条以 $(a_1, a_2)$ 为参数的直线，经过一定次数循环之后，会有多个 $p_i$ 累

计在参数空间中的 $(a_1, a_2)$ 参数点。因此通过检测参数点集合 $P$ 中的累计点就可以检测到图像中的直线。随机霍夫变换具体实现方法请参阅文献[10,11]，在此不再详细讨论。

### 3.2 横向定标算法

当目标匀速转动时，由式(5)可知多普勒频率 $f_d$ 与横向距离 $x$ 成线性关系，该线性关系式可写为

$$x = k \times f_d + b \text{ 或 } f_d = \frac{2\omega x}{\lambda} \quad (13)$$

由式(9)可以看出横向距离 $x$ 与干涉相位真实值成线性关系，为了便于分析在此重写为式(14)。由式(13)与式(14)可得多普勒频率 $f_d$ 与干涉相位真实值的关系如式(15)。

$$\varphi = \frac{2\pi D x}{\lambda R} \quad (14)$$

$$f_d = \frac{\omega \varphi R}{\pi D} \quad (15)$$

其中式(14)与式(15)是在干涉相位不模糊的情况下得到的，由此可以看出多普勒频率 $f_d$ 与 $\varphi$ 在一条直线上，并得到多普勒频率 $f_d$ 与横向距离 $x$ ，干涉相位的线性比例因子(即尺度因子)分别为 $\frac{2\omega}{\lambda}, \frac{\omega R}{\pi D}$ ，其对应关系如图2和图3所示。

在相位模糊的情况下，干涉相位主值 $\phi$ 在 $(-\pi, \pi]$ 范围内取值，并做周期性变化，即 $\varphi = \phi + 2m\pi$ 。在一个相位周期内多普勒频率与干涉相位主值 $\phi$ 成线性关系，所以多普勒频率 $f_d$ 与干涉相位主值 $\phi$ 的关系曲线成锯齿状，两者关系如式(16)，根据式(9)由干涉相位主值 $\phi$ 求得的模糊横向距离 $\hat{x}$ 与多普勒频率 $f_d$ 关系如式(17)。多普勒频率 $f_d$ 与模糊横向距离 $\hat{x}$ ，干涉相位主值 $\phi$ 的关系如图4和图5所示。

$$f_d = \frac{\omega \phi R}{\pi D} + \frac{2m\omega R}{D} \quad (16)$$

$$\hat{x} = \hat{k} \times f_d + \hat{b} \text{ 或 } f_d = \frac{2\omega \hat{x}}{\lambda} + \frac{2m\omega R}{D} \quad (17)$$

其中 $m$ 为整数。

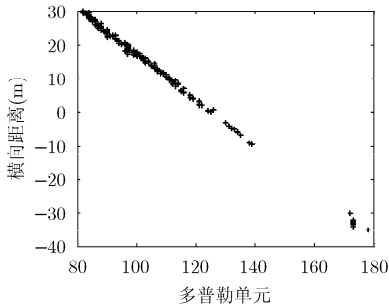


图2 多普勒与横向距离关系

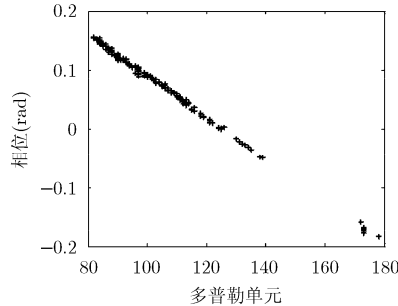


图3 多普勒与干涉相位关系

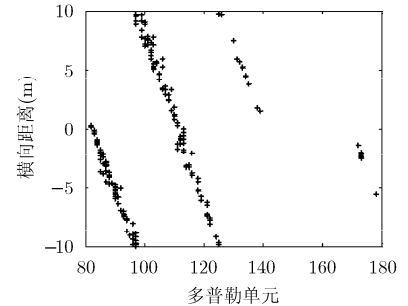


图4 多普勒与模糊横向距离关系

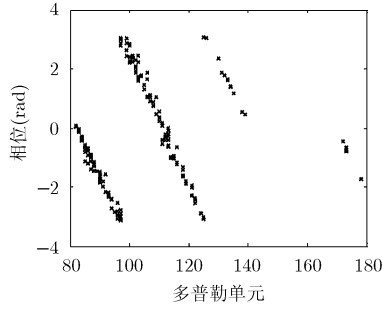


图5 多普勒与干涉相位主值关系

比较式(13)与式(17), 式(15)与式(16), 可知在干涉相位不模糊与干涉相位发生模糊的两种情况下, 真实横向距离  $x$  与多普勒频率  $f_d$  的尺度因子  $k$  与模糊横向距离  $\hat{x}$  与多普勒频率  $f_d$  的尺度因子  $\hat{k}$  相同, 即  $\lambda/(2\omega)$ , 该尺度因子只与目标转速  $\omega$ ,  $\lambda$  有关, 而直线截距参数对成像结果的影响只是使目标整体在方位向上的平移, 对最终ISAR像的定标没有影响。由上述分析可知, 只需对散射点的模糊横向距离  $\hat{x}$  与多普勒频率  $f_d$  的尺度因子精确估计, 就可以成功对ISAR像定标, 从而避免干涉相位解缠绕的过程。

将式(13)离散化, 横向距离  $x$  与多普勒频率  $f_d$  在方位单元-多普勒单元平面内的关系如式(18)。

$$x = \frac{f_{\text{PRF}}\lambda}{2N\omega} l_f + b' \quad (18)$$

其中  $l_f$  表示多普勒单元号,  $b'$  为截距,  $N$  为多普勒单元总个数,  $c$  为光速,  $f_{\text{PRF}}$  为脉冲重复频率。  $l_f$  项的系数为随机霍夫变换要估计的尺度因子  $k$ , 如式(19)。

$$k = \frac{f_{\text{PRF}}\lambda}{2N\omega} \quad (19)$$

由随机霍夫变换可以得到尺度因子的估计值  $k'$ , 则根据式(19)可得转速估计值如式(20)。

$$\omega = \frac{f_{\text{PRF}}\lambda}{2k'N} \quad (20)$$

基于随机霍夫变换估计尺度因子的干涉ISAR横向定标算法步骤如下:

(1)在ISAR像中选取  $Q$  个特显点, 并记录特显点在ISAR像中的对应位置。假设两幅用于干涉的ISAR像为  $f_A(x, y)$  和  $f_B(x, y)$ 。选取幅值  $|f_A(x, y)|$  或者  $|f_A(x, y)| + |f_B(x, y)|$  最大的  $Q$  个像素点, 记下其在整幅图像中的位置; 然后按照此位置分别在  $f_A(x, y)$  和  $f_B(x, y)$  中取出  $Q$  个像素点。在选取过程中, 要测试该像素点是否发生角闪烁, 最终选取  $Q$  个没有发生角闪烁的像素点。如果目标散射点在ISAR像中能被充分分离,  $Q$  个强像素点可以看作  $Q$  个强散射点, 或称为特显点。

(2)利用干涉法测角技术, 对  $Q$  个特显点进行测角, 得到干涉相位主值  $\phi_q, q = 1, \dots, Q$ 。

(3)利用随机霍夫变换对散射点横向距离与多普勒频率  $f_d$  的尺度因子  $k$  精确估计。由步骤(2)得到的干涉相位主值根据式(9)可求得模糊横向距离  $\hat{x}$ ; 观察式(17)可知, 模糊横向距离  $\hat{x}$  与多普勒频率  $f_d$  虽然分布在多条直线上, 但是这些直线的斜率即模糊横向距离  $\hat{x}$  与多普勒频率  $f_d$  间的尺度因子相同, 所以在利用随机霍夫变换估计直线参数时, 可以利用所有数据点对直线斜率进行投票, 从而提高估计精度, 而直线截距对最终定标结果没有影响, 因为截距对定标影响只是使目标在方位向上有一定的平移量。

(4)根据步骤(3)中估计的尺度因子对ISAR像进行定标, 得到目标的距离-方位像。

#### 4 仿真结果

本节首先定义角度  $\theta$ : 飞机机头指向与方位向夹角。本文分别对  $\theta = 45^\circ$ ,  $\theta = 0^\circ$  两种情况(即目标不同姿态)进行仿真实验, 并同文献[8]提出的基于多特显点干涉ISAR横向定标算法的结果作比较。仿真中所给出的方位向尺寸的定义为: 机头至机尾在方位向上的投影长度, 而在以下仿真结果中不另作解释。

仿真实验中以散射点模型为基础, 对一个包含330个散射点的飞机目标进行仿真, 目标的散射点模型的距离-方位视图如图6所示, 仿真参数如表1所示。

表1 仿真参数

中心频率	5 GHz	积累时间	5 s
脉冲重频	50 Hz	基线长度	60 m
信号带宽	400 MHz	距离	20 km
采样频率	480 MHz	飞机长度	70 m
目标转速	0.5°/s	飞机宽度	60 m

仿真情况1:  $\theta = 45^\circ$ , 干涉相位满足文献[8]算法中相位解缠绕的条件, 该算法能够准确地对ISAR像定标; 仿真情况2:  $\theta = 0^\circ$ , 存在少量干涉相位数据不满足相位解缠绕条件, 文献[8]算法因为不能正确对干涉相位进行解模糊所以并不适用于这种情况; 然而本文提出的基于随机霍夫变换InISAR横向定标算法不需要对干涉相位解模糊, 只是通过模糊横向距离  $\hat{x}$  与多普勒频率  $f_d$  数据估计尺度因子  $k$ , 所以能够对这种情况的目标ISAR像正确定标。在两种仿真情况下的参数估计结果与定标结果分别如表2, 表3所示。此外, 几何特征对目标识别是重要的参数, 所以我们给出目标的几何特征(包括目标长度、目标

表2 参数估计

	本文估计 尺度因子 $k$	文献[8]估计 尺度因子 $k$	尺度因子 $k$ 理论值
仿真情况1	-0.7031	-0.6881	-0.6875
仿真情况2	-0.6886	-0.5392	-0.6875

表3 定标结果

	文献[8]估计方 位向尺寸(m)	本文估计方 位向尺寸(m)	真实方位 尺寸(m)
仿真情况1	50.937	49.687	49.497
仿真情况2	55.000	70.937	70.000

宽度)估计结果, 如表4所示。

在两种仿真情况下得到的模糊横向距离  $\hat{x}$ 、解模糊横向距离  $x$  与多普勒频率  $f_d$  的关系如图7所示。图7(a)和图7(b)中标记符为 + 的数据点是经过路径积分相位解缠绕后得到的横向距离数据; 标记符为  $\circ$  的数据点是模糊横向距离数据; 实直线是由文献[8]算法对相位解缠绕后估计得到的横向距离与多普勒频率关系; 虚线是利用随机霍夫变换对横向距离与多普勒频率的尺度因子  $k$  估计得到的关系曲线。

表4 目标几何特征估计结果

	飞机长度(m)	飞机宽度(m)
仿真情况1	70.268	59.676
仿真情况2	70.937	60.937

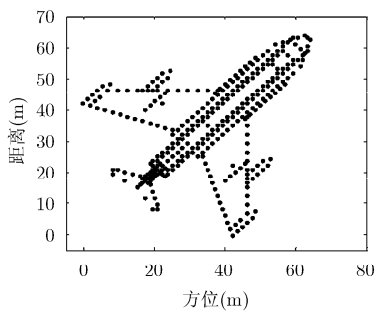
由表3可知在两种仿真情况下本文提出的横向定标算法均能精确地对目标ISAR像定标。在仿真情况1下由图7(a)可知, 本文算法估计的横向距离与多普勒频率关系曲线同数据所在直线几乎完全平行。在仿真情况2下, 虽然存在少量干涉相位数据不满足相位解缠绕条件, 但对本文算法无影响。由图7(b)可知, 本文算法所估计的横向距离与多普勒频率关系曲线仍然是平行于数据所在直线; 而文献[8]算法最终估计的关系曲线明显与数据所在直线相交。而且由表2与表3所列的仿真结果可知, 本文算法对尺度因子以及目标横向尺寸的估计精度都要优于文献[8]算法。两种仿真情况下所得到的目标真实距离-方位像如图8和图9。由估计结果可以看出, 本文算法在无需对干涉相位解缠绕的前提下对ISAR像横向定标的有效性。

为了验证本算法的稳健性能, 图10给出了 SNR = 5 dB 时基于随机霍夫变换的干涉 ISAR 定标结果, 信噪比定义为<sup>[12]</sup>

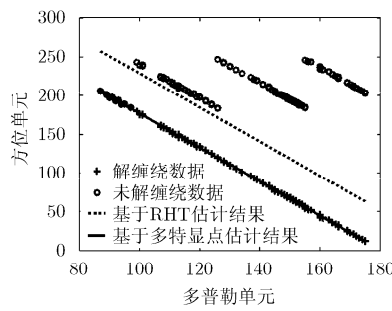
$$SNR = 10 \times \lg \left( \frac{\bar{P}_s}{P_{\text{Noise}}} \right) = 10 \times \lg \left( \frac{\sum_l P_{s,l}}{L \times P_{\text{Noise}}} \right) \quad (21)$$

其中  $L$  为距离单元总数,  $\bar{P}_s$  为信号平均功率,  $P_{s,l}$  为每个距离单元内的信号功率。

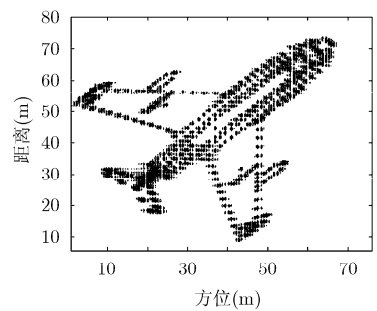
图10(a)为仿真情况1时的结果, 估计的方位向



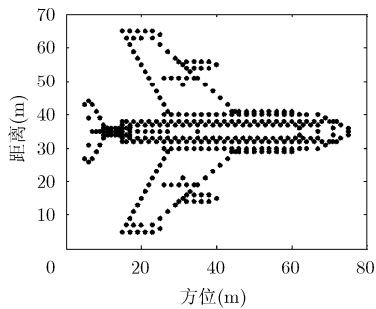
(a) 仿真情况1:  $\theta=45^\circ$  飞机模型图



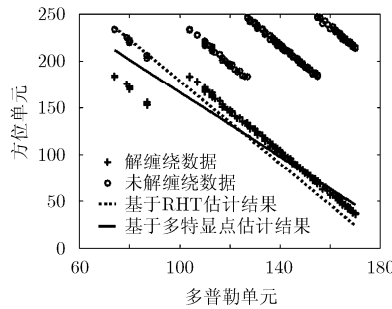
(a) 仿真情况1



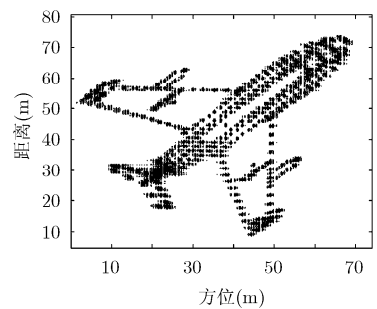
(a) 基于随机霍夫变换InISAR定标结果



(b) 仿真情况2:  $\theta=0^\circ$  飞机模型图



(b) 仿真情况2



(b) 基于多特显点InISAR定标结果

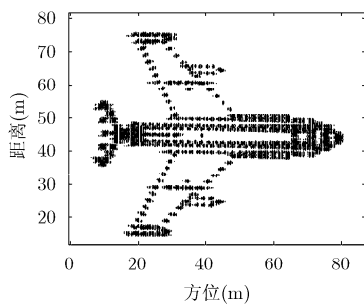
图6 飞机模型图

图7 横向距离与多普勒频率关系图

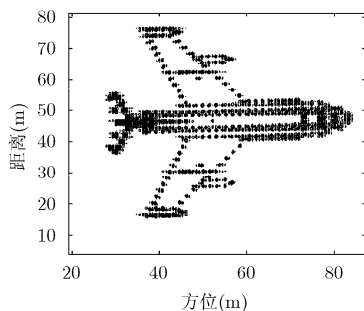
图8 仿真情况1: InISAR定标结果

尺寸为51.187 m, 图10(b)为仿真情况2时的结果, 估计的方位向尺寸为71.875 m。

图11给出2000次蒙特卡洛实验方位向尺寸估计结果, 图11(b)中方差较大的原因是因为随机霍夫变换估计尺度因子 $k$ 时, 存在虚警情况导致的, 也就是说在某次虚警情况下方位向尺寸估计值偏差很大; 而从图11(a)中可以看出方位向尺寸估计平均值与真实值误差并不大。由蒙特卡洛实验结果可看出, 本文提出的算法具有一定的抗噪声性能。

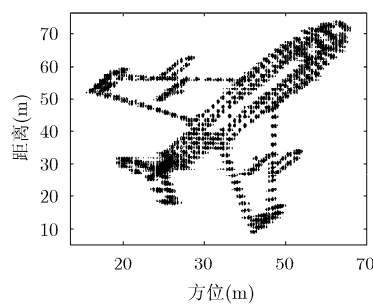


(a)基于随机霍夫变换InSAR定标结果

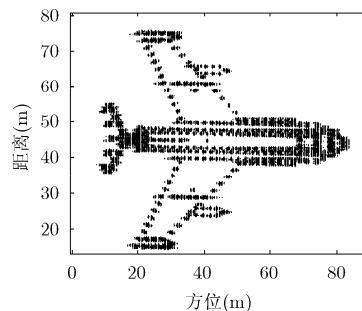


(b)基于多特特点InSAR定标结果

图9 仿真情况2: InSAR定标结果

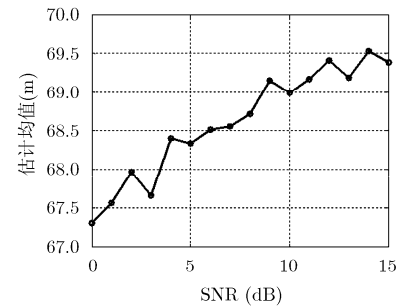


(a)仿真情况1:  $\theta=45^\circ$  定标结果

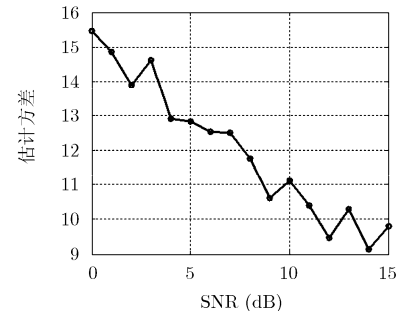


(b)仿真情况2:  $\theta=0^\circ$  定标结果

图10 基于随机霍夫变换 SNR = 5 dB InSAR定标结果



(a)方位向尺寸估计均值



(b)方位向尺寸估计方差

图11 蒙特卡洛实验: 方位向尺寸估计结果

## 5 结束语

在传统干涉ISAR处理中, 干涉相位解缠绕是关键的一步, 因为干涉相位精确与否直接影响对目标方位向位置的估计精度。本文提出一种利用随机霍夫变换对横向距离与多普勒频率之间的尺度因子精确估计, 并不需要对干涉相位解缠绕, 从而简化了干涉处理。值得注意的是, 本文主要考虑匀速旋转目标, 运动补偿、机动目标干涉ISAR定标等问题需要进一步研究。

## 参考文献

- [1] Park Sang-hong, Kim Hyo-tae, and Kim Kyung-tae. Cross-range scaling algorithm for ISAR images using 2-D Fourier transform and polar mapping[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(2): 868-877.
- [2] Felguera-Martín D, Gonzalez-Partida J T, and Burgos-Garcia M. Interferometric ISAR imaging on maritime target applications: simulation of realistic targets and dynamics[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2012, 132: 571-586.
- [3] Ma Chang-zheng, Yeo Tat-soon, Guo Qiang, et al. Bistatic ISAR imaging incorporating interferometric 3-D imaging technique[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(10): 3859-3867.
- [4] Felguera-Martín D, Gonzalez-Partida J T, Almorox-Gonzalez P, et al. Interferometric inverse synthetic aperture radar experiment using an interferometric linear frequency modulated continuous wave millimeter-wave radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2011, 5(1): 39-47.
- [5] Ma Chang-zheng, Yeo Tat-soon, Tan Chee-seng, et al. Three-dimensional imaging using colocated MIMO radar and ISAR technique[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(8): 3189-3201.
- [6] 张群, 马长征, 张涛, 等. 干涉式逆合成孔径雷达三维成像技术研究[J]. *电子与信息学报*, 2001, 23(9): 890-898.
- [7] Goldstein R M, Zebker H A, and Werner C L. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping[J]. *Radio Science*, 1988, 23(4): 713-720.
- [8] 李丽亚, 刘宏伟, 纠博, 等. 基于多特特点的干涉ISAR横向定

- 标技术[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(9): 62-65.
- Li Li-ya, Liu Hong-wei, Jiu Bo, *et al.*. Interferometric ISAR scale method based on dominant scatters[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(9): 62-65.
- [9] Ghiglia D C and Romero L A. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1994, 11(1): 107-117.
- [10] Xu Lei and Oja E. Randomized Hough Transform (RHT): basic mechanism, algorithms, and computational complexities[J]. *CVGIP: Image Understanding*, 1993, 57(2): 131-154.
- [11] Xu Lei, Oja E, and Kultanen P. A new curve detection method: randomized Hough Transform (RHT)[J]. *Pattern Recognition Letters*, 1990, 11(5): 331-338.
- [12] Du Lan, Wang Peng-hui, Liu Hong-wei, *et al.*. Bayesian spatiotemporal multitask learning for radar HRRP target recognition[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(7): 3182-3196.
- 李 飞: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为雷达成像和雷达目标识别.
- 纠 博: 男, 1982年生, 博士, 副教授, 研究方向为自适应信号处理、雷达自动目标识别.
- 刘宏伟: 男, 1971年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达系统、雷达信号处理、雷达自动目标识别等.