

基于 InISAR 像的目标识别方法

李丽亚 刘宏伟 曹向海 吴顺君

(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: 针对目标 ISAR 图像方位向坐标是多普勒频率, 其分辨率和目标运动状态有关, 如果不进行标定, 直接利用 ISAR 像进行识别存在困难, 该文提出了一种基于多特显点的 InISAR 成像方法, 并利用极化映射, 提取特征进行识别。该文利用 ISAR 图像中特显点的多普勒频率和横距的关系, 对整幅 ISAR 像进行横向定向; InISAR 像转换到极坐标格式下, 提取具有旋转和尺度不变性的特征, 对目标分类。详细分析了 4 个主要参数对成像和识别的影响, 仿真实验结果验证了理论分析。

关键词: 干涉式逆合成孔径雷达; 相位缠绕; 特显点; 极化映射

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)09-2089-05

Radar Automatic Target Recognition Based on InISAR Images

Li Li-ya Liu Hong-wei Cao Xiang-hai Wu Shun-jun

(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: The cross-range of ISAR image corresponds with the Doppler frequencies of scatterers, which is decided by the target motion. If the cross-range of ISAR image is not scaled, it is difficult to recognize by ISAR image. In this paper a novel method of interferometric ISAR imaging based on the dominant scatterers is proposed, then the features are extracted from the polar image that is obtained from InISAR image by the polar mapping. The extracted features have invariance with respect to rotation and scale. The effect of the four important parameters on imaging and recognition is discussed, the results of four experiments prove the theory analysis.

Key words: InISAR; Phase unwrapping; Dominant scatterers; Polar mapping

1 引言

逆合成孔径雷达(ISAR)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作横向分辨成像的, 其 ISAR 图像的方位向坐标对应于目标散射点的多普勒频率, 这会导致 ISAR 像不同于目标的真实像。散射点子回波的多普勒依赖于姿态变化率, 不同的姿态变化率(即不同的转速)造成不同的多普勒分布, 即不同姿态变化率下导致不同 ISAR 像。所以, 直接用距离-多普勒 ISAR 进行目标识别比较困难。干涉式逆合成孔径雷达(InISAR)^[1-3]利用多个接收天线观测得到的回波数据进行干涉处理, 可以得到反映目标真实尺寸的像。因为强散射点信噪比较高, 定标误差较小, 本文提出了一种新的基于多特显点的 InISAR 成像方法。在信噪比较低的情况下, 该方法依然能够得到清晰的像, 同时解决了相位缠绕的问题。利用极化映射将 InISAR 像转换到极坐标格式下, 得到目标的极坐标图像并提取其特征; 提取的特征具有尺度和旋转不变性, 维数较小, 能降低运算量。

2 多特显点 InISAR 成像方法

2.1 InISAR 成像原理

在 InISAR 中, 至少要另加一副辅助接收天线和接收通

道, 如要测得目标的距离-方位像, 辅助天线应水平放置(如图 1); 要距离-俯仰像则应高低放置。以下均以距离-方位像为例作具体说明。

如图 1 所示, 设 A, B 分别为两幅天线的相位中心, 间距为 D 。设目标中心位于 Y 轴上, q 为目标的散射点, q 到 A, B 和 O 的距离分别为 R_{qA}, R_{qB} 和 R_q 。设天线 A 发射信号为 $s(t) = \exp(j2\pi f_c t)$, A, B 天线获得的 q 散射点在某成像时刻 t_m 的回波, 经过混频后分别为

$$s_{qA}(t_m) = A_q e^{-j4\pi f_c R_{qA}(t_m)/c} \quad (1)$$

$$s_{qB}(t_m) = A_q e^{-j2\pi f_c (R_{qA}(t_m) + R_{qB}(t_m))/c} \quad (2)$$

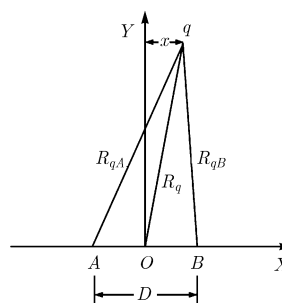


图 1 天线和目标的几何关系

将两者共轭相乘, 并利用目标和天线的几何关系(如图 1), 得

$$\begin{aligned} s_{qB}(t_m)s_{qA}^*(t_m) &= |A_q|^2 e^{j2\pi f_c \left(\frac{R_{qA}(t_m) - R_{qB}(t_m)}{c} \right)} \\ &= |A_q|^2 e^{j\frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{2x(t_m)D}{R_{qA}(t_m) + R_{qB}(t_m)} \right)} \\ &\approx |A_q|^2 e^{j\frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{x(t_m)D}{R_q(t_m)} \right)} \end{aligned} \quad (3)$$

记 $s_{qB}(t_m)s_{qA}^*(t_m)$ 的相位为 $\varphi(t_m)$, 由上式得

$$x(t_m) = \frac{\varphi(t_m)\lambda R_q(t_m)}{2\pi D} \quad (4)$$

由于相位差以 2π 为周期, 为使横向测距无模糊, 应保证

$$\left| \frac{2\pi x(t_m)D}{\lambda R_q(t_m)} \right| < \pi \quad (5)$$

实际应用中, 式(5)不一定成立, 则会导致相位模糊, 此时应该对干涉相位解模糊(相位解缠绕)。

2.2 相位解缠绕

InISAR 成像的核心问题是求解能够正确反映真实目标横距的的干涉相位 φ 。在式(5)成立的情况下, 真实相位 φ 等于比相测得的主值 ϕ ; 式(5)不成立时, 相位的真实值 $\varphi = 2k\pi + \phi$ (k 为整数), 其中相位的主值(或缠绕值) $\phi \in (-\pi, \pi]$ 。不能直接用式(4)进行定标。

设 ϕ_p 和 φ_p 分别为缠绕和解缠绕相位, $p = 1, 2, \dots, P$ 。

路径积分解缠绕算法^[4]为

$$\varphi_1 = \phi_1, \quad \varphi_{p+1} = \varphi_p + \Delta p \quad (6)$$

$$\text{其中 } \Delta p = \begin{cases} \phi_{p+1} - \phi_p, & |\phi_{p+1} - \phi_p| < \pi \\ \phi_{p+1} - \phi_p - 2\pi, & \phi_{p+1} - \phi_p > \pi \\ \phi_{p+1} - \phi_p + 2\pi, & \phi_{p+1} - \phi_p < -\pi \end{cases}$$

2.3 多特显点 InISAR 成像原理

在实际应用中, 由于目标 ISAR 像中各像素强度分布的不均匀性, 在低信噪比情况下, 较弱的像素对应的干涉相位估计值会有较大误差, 导致最终相位解缠绕结果出错。此外, 目标通常被认为是刚体, 所有像素的干涉相位和横距之间均满足式(4)的线性关系。本文基于以上两点提出了基于多特显点的 InISAR 的成像方法, 步骤如下:

(1) 选取若干个特显点。假设两幅干涉的 ISAR 像为 $f_A(x, y)$ 和 $f_B(x, y)$ 。选取幅值 $|f_A(x, y)|$ 或 $|f_A(x, y)| + |f_B(x, y)|$ 最大的 Q 个像素点, 只记下其位置; 按此位置在 $f_A(x, y)$ 和 $f_B(x, y)$ 中分别取出 Q 个像素点。在选取特显点的过程中, 参考文献[5]中方法取出没有发生角闪烁的 Q 个特显点。本文中 $Q = 100$ 。

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

(3) 干涉相位主值 ϕ 解缠绕。当目标在匀速或时, 多普勒频率 f_d 与横距 x 成线性关系, 由式(4)知横距 x 与相位差真实

值 φ 成线性关系; 所以多普勒频率 f_d 与相位差真实值 φ 也是线性关系。在发生模糊的情况下, 相位主值 ϕ 在 $(-\pi, \pi]$ 范围内取值, 并做周期性变化, 在一个周期内多普勒频率 f_d 与相位主值 ϕ 成线性关系。将特显点按照多普勒频率大小进行排列, 使用式(6)逐个求出解缠绕值 $\varphi_q, q = 1, 2, \dots, Q$ 。

(4) 利用式(4)和真实相位 φ , 得出 Q 个特显点对应的横向距离 $x_q, q = 1, 2, \dots, Q$ 。

(5) 求解多普勒频率与横距的关系。由上面分析知, 特显点的多普勒值 f_d 和其对应的横距 x 应该成线性关系, 即

$$x = k \times f_d + b \quad (7)$$

对 Q 个特显点有

$$\mathbf{F}\mathbf{H} = \mathbf{X} \quad (8)$$

其中 $\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_{d1} & f_{d2} & \dots & f_{dQ} \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}^T$, $\mathbf{X} = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_Q]^T$,

$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} k \\ b \end{bmatrix}$ 即为得多普勒与横距的关系。求解矩阵方程, 解得

参数 \mathbf{H} 。根据最小二乘原则, 即残差的平方和最小, 有

$$(\mathbf{F}^T \mathbf{F})\mathbf{H} = \mathbf{F}^T \mathbf{X} \quad (9)$$

(6) 按照式(7)和参数 \mathbf{H} , 对整幅 ISAR 像进行定标成像。

3 目标识别方法

3.1 图像预处理

InISAR 图像的预处理包括图像阈值分割和归一化。设有一幅大小为 $M \times N$ 的 InISAR 图象, 记作: $f_0(x_i, y_j), i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N$ 。本文采用固定阈值分割方法, 这里阈值 T 取值如下:

$$T = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f_0(x_i, y_j) \quad (10)$$

阈值分割后的图像为 $f_1(x, y)$ 。归一化后的图像 $f_2(x, y)$ 由下式可得

$$f_2(x_i, y_j) = \frac{f_1(x_i, y_j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f_1(x_i, y_j)} \quad (11)$$

3.2 特征提取

为了充分利用 InISAR 像中目标几何结构特征, 尽可能提取低维数的特征; 本文使用了极化映射^[6,7]。如图 2 所示, InISAR 图像的平面坐标和极坐标关系, 图中图像为用基于多特点 InISAR 像。

由上所示归一化之后的二维 InISAR 图像为: $f_2(x_i, y_j), i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N$; 假设极化映射后的图像为 $f_p(r_m, \theta_n), m = 1, 2, \dots, M_r, n = 1, 2, \dots, N_\theta$, M_r, N_θ 分别表示 r 向和 θ 向的采样点数。参照图 2, 极坐标图像中的坐标 r 和 θ 与 InISAR 图像的坐标 x 和 y 之间的关系如下:

$$(x_k, y_k) = (x_c, y_c) + (r_m \cos \theta_n, r_m \sin \theta_n) \quad (12)$$

其中 $r_m = R_{\min} + (m-1)\Delta r, \Delta r = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{N_r - 1}, \theta_n = -\pi +$

$(n-1)\Delta\theta, \Delta\theta = \frac{2\pi}{N_\theta - 1}, k = 1, 2, \dots, M_r N_\theta; (x_c, y_c)$ 是图像中心点, 实际上是目标的几何重心, 从 InISAR 图像数据估计得到^[8]; R_{\max} 表示极坐标系中的最大半径, 用距离中心最远的点到中心的距离作为 R_{\max} ; $R_{\min} = 0$; $\Delta r, \Delta\theta$ 分别表示 r 向和 θ 向的采样间隔, $\Delta r, \Delta\theta$ 太大, 采样不足数据的丢失, 相反地, $\Delta r, \Delta\theta$ 太小, 过采样数据冗余。与极坐标 (r_m, θ_n) 对应的 (x_k, y_k) 并不一定都是整数; 此时, 可以利用二维插值的方法得到较为精确的 (x_k, y_k) 坐标的对应值, 本文中使用的二维线性插值。

选取极坐标 InISAR 图像中 r 向的投影 $f_r(r)$ 和 θ 向的投影 $f_\theta(\theta)$ 作为识别的特征, 即

$$\begin{aligned} f_r(r_m) &= \int_{-\pi}^{\pi} f_p(r_m, \theta) d\theta \\ &= \sum_{n=1}^{N_\theta} f_p(r_m, \theta_n), \quad m = 1, 2, \dots, M_r \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} f_\theta(\theta_n) &= \int_{-\pi}^{\pi} f_p(r, \theta_n) dr \\ &= \sum_{m=1}^{M_r} f_p(r_m, \theta_n), \quad n = 1, 2, \dots, N_\theta \end{aligned} \quad (14)$$

将图 2 中 InISAR 图像逆时针旋转 45° , 尺度缩小 $1/4$, 得到图 3 中 InISAR 像。如图 4 和图 5 是由极化映射方法得到的极坐标图像, 分别对应于图 2 和图 3 中 InISAR 图像, 并提取了各自的特征 $f_r(r)$ 和 $f_\theta(\theta)$ 。比较图 4, 图 5 知, 极坐标图像和 $f_\theta(\theta)$ 都有 $\pi/4$ 的平移。由上分析, 通过动态选择 R_{\max} 使图像具有了尺度不变性; θ 向的平移不变性保证了图像的旋转不变性。

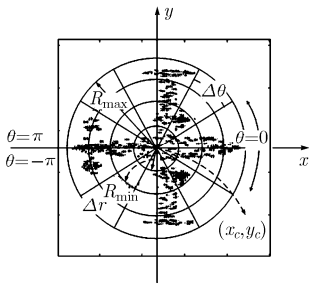


图 2 距离-方位二维平面与极坐标系

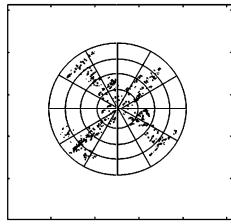


图 3 旋转和尺度变换后的图像

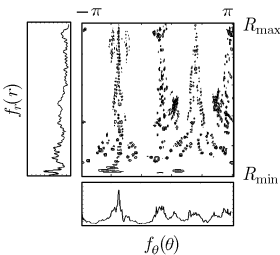


图 4 图 2 中 InISAR 像对应的极坐标图像

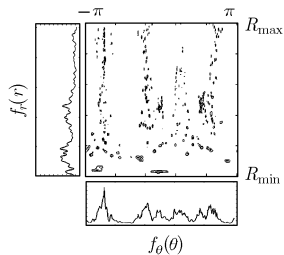


图 5 图 3 中 InISAR 像对应的极坐标图像

3.3 识别方法

利用式(13)和式(14)提取训练样本的特征组成训练库。假设有一测试样本 $g_{\text{test}}(s_u, t_u)$, 提取其 r 向和 θ 向的特征: $g_{\text{test}_r}(s_u, t_u)$ 和 $g_{\text{test}_\theta}(s_u, t_u)$, 其中 s_u 表示测试样本的未知类别, t_u 表示测试样本的未知方位位置。 r 向的归一化相关系数如下式:

$$C_r(s, t) = \frac{g_{\text{train}_r}(s, t) g_{\text{test}_r}(s_u, t_u)}{\|g_{\text{train}_r}(s, t)\| \|g_{\text{test}_r}(s_u, t_u)\|} \quad (15)$$

其中 $s = 1, 2, \dots, S; t = 1, 2, \dots, T$ 。 $g_{\text{train}_r}(s, t)$ 表示第 s 类, 且方位位置为 t 的训练样本的 r 向投影特征, S 为训练样本的类别数, T 为训练样本的方位位置。 θ 向特征因方位位置的不同有平移, 故要对 θ 向做滑动相关; 取所有归一化滑动相关系数中的最大值用作识别, 最大值对应的滑动次数反应了两幅图像方位位置差别, 这里记最大的相关系数为 $C_\theta(s, t)$ 。给出如下识别方法:

- 第 1 步 计算 $g_{\text{test}}(s_u, t_u)$ 和训练样本 $g_{\text{train}}(s, t)$ 的 r 向归一化相关系数 $C_r(s, t)$;
- 第 2 步 计算 $g_{\text{test}}(s_u, t_u)$ 和训练样本 $g_{\text{train}}(s, t)$ 的 θ 向滑动相关系数的最大值 $C_\theta(s, t)$, 并记录相应的滑动点数;
- 第 3 步 融合 r 向和 θ 向特征, 定义

$$R_\theta = \alpha \times C_r(s, t) + (1 - \alpha) \times C_\theta(s, t) \quad (16)$$

假设 $S \times T$ 个 R_θ 值中的最大值对应的训练样本为 $g_{\text{train}}(s', t')$, 则将未知类别的测试样本 $g_{\text{test}}(s_u, t_u)$ 判为 s' , 并可以根据 t' 和滑动点数判断出测试样本的方位; α 为权重, 在 $[0, 1]$ 之间取值。 α 值的大小决定 r 向和 θ 向特征对判决的贡献, 当 $\alpha = 0.5$ 时, 就是平均准则的特征融合, 在本文中 $\alpha = 0.4$ 。

4 仿真实验及其结果

仿真实验中, 选取 3 种飞机模型, 俯视图如下图 6 所示, 参数如表 1 所示。雷达中心频率 5GHz, 波长 6cm, 信号带宽 400MHz; 采用转台模型, 转速 ω , 积累时间 5s; 飞机起飞时, 目标距雷达 R , 在水平面上投影为 R_{zoy} , 俯仰角为 θ , 天线间距 D 。在实验中对每一类飞机, 按照不同参数, 每幅天线得到方位向 $0^\circ \sim 180^\circ$ 以 5° 为间隔的 36 幅 ISAR 图像; 按照本文第 2 节方法, 利用多特显点成像方法求得 36 幅 InISAR 图像; 按照文中第 3 节的特征提取方法提取每幅 InISAR 图像的 r 向特征和 θ 向特征。

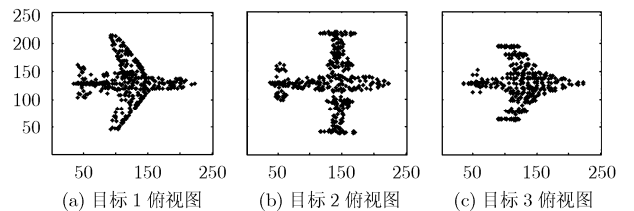


图 6 飞机模型俯视图

表1 飞机模型参数

	长(m)	宽(m)	高(m)	散射点个数
目标 1	70.5726	62.9683	20.8361	458
目标 2	69.3857	67.9052	23.1203	457
目标 3	70.5933	49.9414	15.1625	457

转速 ω , 距离 R (R_{xoy}), 俯仰角 θ 和天线间距 D 是比较重要的参数, 根据这 4 个参数的不同取值, 作如下 4 个实验, 分析这 4 个因素对成像和识别的影响。在每个实验中根据不同的参数生成了若干组数据, 使用这若干组数据做 2 个实验 (1) 和 (2)。(1) 只用一组数据进行识别。在方位向上, 以 20° 为间隔, 取每类飞机的 9 幅 InSAR 图像作为训练样本, 即: 0° , 20° , 40° , 60° , 80° , 100° , 120° , 140° 和 160° , 共 27 幅 InSAR 图像。剩下的 81 幅图像作测试样本。在 (2) 中使用多组数据, 用其中的一组作为训练, 其他的作为测试。

4.1 实验 1: 不同的俯仰情况

尽管 InSAR 像能反应目标的真实尺寸, 但该真实尺寸仅是在特定成像平面上的; 当视角变化时, 不仅投影的射线有变化, 成像平面也会有变化。此实验分析俯仰角度的变化对识别性能的影响, 参数选择如下: $\omega = 0.5^\circ/s$, $R_{xoy} = 20\text{km}$, $D = 1\text{m}$, θ 分别为 0° , 15° , 30° 和 45° 。图 7(a) 和 7(b) 分别实验是 (1) 和 (2) 的 10 次蒙特卡罗实验结果。从图 7(a) 知, 识别率随着俯仰角度的增加而下降; 这是因为随着俯仰角度的改变, 雷达与目标之间的视线也发生改变, 致使成像平面发生了变化; 由图 7(b) 得, 在同一 SNR 下, 30° 俯仰作训练时, 识别率最高, 这说明了俯仰角差越大, 图像差别越大, 识别率也越低。

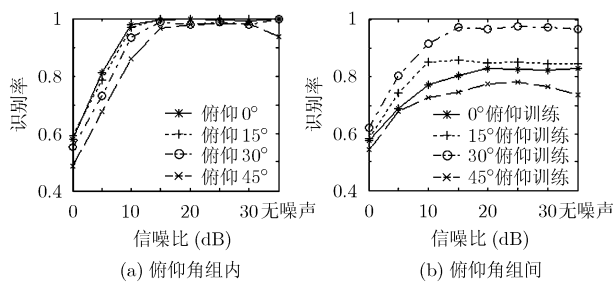


图7 4组俯仰角组内和组间识别

4.2 实验 2 不同的转速情况

在 ISAR 成像中, 横向分辨取决于目标体的多普勒, 多普勒分辨率:

$$\rho_a = \lambda / (2\Delta\theta) \quad (17)$$

其中 $\Delta\theta$ 为转角, 分辨率随着转角的增加而提高。在相同的积累时间下, 不同的转速对应不同的转角。虽然 InSAR 像反应目标的真实结构, 不随转速的变化而改变, 但 InSAR 像是基于 ISAR 得到的, ISAR 像的横向分辨率的不同对

InSAR 也会有影响。下面通过实验 (1) 和 (2) 来分析转速对识别的影响。选择如下参数: $\omega = 0.3^\circ/s$, $0.5^\circ/s$, $0.7^\circ/s$ 和 $0.9^\circ/s$, $R_{xoy} = 20\text{km}$, $D = 1\text{m}$, $\theta = 30^\circ$ 。如图 8(a) 和图 8(b) 分别是 2 个实验 10 次蒙特卡罗实验结果。在图 8(a) 中, 识别率随着转速的增加而增加; 因为随着转速的增加, ISAR 图像中多普勒分辨率在提高, 使得 InSAR 像的成像质量也在升高, 所以使得识别率增加。从图 8(b) 看出, 在同一 SNR 下, 识别率差别不大。转速只影响分辨率, 不会对目标成像形状产生变化, 所以这 4 组识别率变化不大。

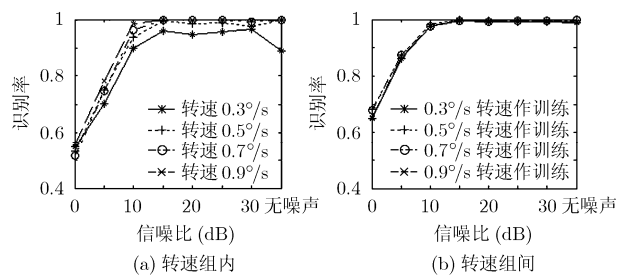


图8 4组转速组内和组间识别

4.3 实验 3 不同的孔径情况

由式(4)得

$$dx(t_m) = \frac{\lambda R_q(t_m)}{2\pi D} d\varphi(t_m) \quad (18)$$

从上式可以看出, 增加孔径 D , 可以提高测角精度, 即提高 InSAR 像的成像质量。下面通过实验研究不同的孔径对识别的影响。选择如下参数: $\omega = 0.5^\circ/s$, $R_{xoy} = 20\text{km}$, $D = 1\text{m}$, 2m , 3m 和 5m , $\theta = 30^\circ$ 。10 次蒙特卡罗实验结果如图 9(a) 和图 9(b)。图 9(a) 中, 在信噪比较低时, 识别率随孔径的增加而增加, 继续增加孔径识别率将稳定在某一水平; 当信噪比较高时, 孔径大小对精度的影响不大。从图 9(b) 知, 在同一 SNR 水平下, 孔径大小只影响精度, 识别率变化不明显。

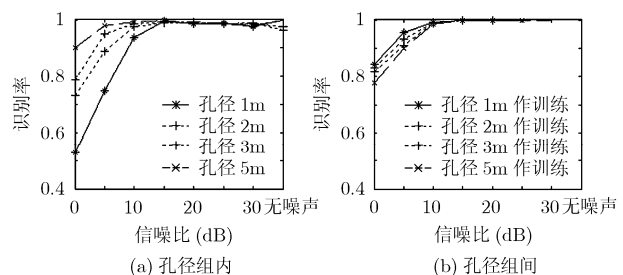


图9 4组孔径组内和组间识别

4.4 实验 4 不同的距离情况

由式(18)知, 干涉法测角的精确度与目标与雷达的距离有很大的关系, 距离越远测角的精度越低。选择如下参数: $\omega = 0.5^\circ/s$, $R_{xoy} = 2\text{km}$, 20km , 38km 和 56km ,

$D = 1\text{m}$, $\theta = 30^\circ$, 通过 2 个实验说明距离对识别的影响。从 10 次蒙特卡罗实验结果(如图 10)看出, 距离对识别的影响和孔径非常相近。如图 10(a), 在 SNR 较低时, 识别率随距离的增加而减小, 如果距离继续减小, 识别率将稳定在某一水平; 当信噪比较高时, 识别率变化不大。从图 10(b)知, 距离远近只影响精度, 当 SNR 较小时, 识别率稍有变化。

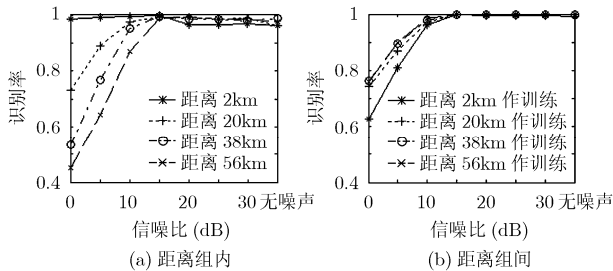


图 10 4 组距离组内和组间识别

5 结束语

距离-多普勒平面内的 ISAR 像, 其横坐标(多普勒频率)值大小取决于目标的转速(姿态的变化率), 使得 ISAR 像和实际的目标像有很大的出入, 因此, 基于 ISAR 图像的目标识别一定要考虑横坐标(多普勒频率)的影响。InISAR 图像能反应目标真实的尺寸, 用于识别能较好地利用目标形状和结构特征。针对传统 InISAR 成像方法问题, 本文提出了一种基于多特显点的 InISAR 成像方法; 并利用极化映射将 InISAR 图像转换到极坐标格式下, 提取极化 InISAR 图像的特征, 进行识别; 仿真实验详细分析了各种因素对成像和识别影响, 并取得了较好的结果。需要指出的是, 本文只是在较理想情况下讨论 InISAR 成像和识别问题, 但实际应用中的问题要复杂, 这也是下一步要做的工作。

参考文献

[1] 余志舜, 朱兆达. 逆合成孔径雷达横向距离定标. 电子学报, 1997, 25(3): 45-48.
 Yu Zhi-shun, Zhu Zhao-da. Cross-range scaling of inverse synthetic aperture radar. *Acta Electronic Sinica*, 1997, 25(3):

45-48.
 [2] Zhang Qun, Yeo Tat Soon, and Du Gan, *et al.* Estimation of three-dimensional motion parameters interferometric ISAR imaging. *IEEE Trans. on Geoscience and Remoting Sensing*, 2004, 42(2): 292-300.
 [3] Wang Genyuan, Xia Xiang-Gen, and Chen Victor C. Three-dimensional ISAR imaging of maneuvering targets using three receivers. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2001, 10(3): 436-447.
 [4] Fornaro G, Franceschetti G, and Lanari R. Interferometric SAR phase unwrapping using Green's formulation. *IEEE Trans. on Geoscience and Remoting Sensing*, 1996, 34(3): 720-727.
 [5] 张群, 马长征, 张涛, 等. 干涉式逆合成孔径雷达三维成像的角闪烁抑制. 西安电子科技大学学报, 2000, 27(增刊): 30-34.
 Zhang Qun, Ma Chang-zheng, Zhang Tao, *et al.* Angle glint suppression of 3-D imaging for the interferometric inverse synthetic aperture radar. *Journal of Xidian University*, 2000, 27(sup.): 30-34.
 [6] Pun C M and Lee M C. Log-polar wavelet energy signatures for rotation and scale invariant texture classification. *IEEE Trans. on Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2003, 25(5): 590-603.
 [7] Kim Kyung-Tae, Seo Dong-Kyu, and Kim Hyo-Tae. Efficient classification of ISAR images. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2005, 53(5): 1611-1621.
 [8] Gonzalez R C and Woods R E. *Digital Image Processing*. Second Edition, New York: Prentice-Hall, 2003: 672-675.

李丽亚: 女, 1981年生, 博士生, 研究方向为雷达成像及雷达目标识别。
 刘宏伟: 男, 1971年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理、雷达自动目标识别等。
 曹向海: 男, 1977年生, 博士生, 研究方向为雷达成像及雷达目标识别。
 吴顺君: 男, 1942年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达系统、雷达信号处理等。