

SISAR 侧影轮廓中线相位重构及其识别特征提取

罗斌凤^{1,2}, 张守宏¹, 张 涛³, 罗永健^{1,4}

(1. 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西西安 710071; 2. 海军工程大学电子工程学院, 江苏南京 211800;
3. 中科院计算所, 北京 100870; 4. 西安通信学院, 陕西西安 710106)

摘 要: 本文主要研究了利用 SISAR 复侧影像的相位信息提取目标的识别特征的方法. 通过分析复侧影像相位与目标侧影轮廓中线的关系, 提出了一种利用侧影像相邻分辨单元幅度及相位关联特征重构目标侧影轮廓中线相位的算法; 把重构的中线相位作归一化和差分处理作为目标识别特征, 使该特征具有几乎不受目标飞行俯仰变化的影响的优点. 仿真验证了所提中线相位重构的有效性及目标识别方法的可行性, 并分析了信噪比对目标识别的影响.

关键词: 阴影逆合成孔径雷达; 复侧影像; 特征提取; 目标识别

中图分类号: TN959. 3 **文献标识码:** A **文章编号:** 03722112 (2004) 03036805

Shadow Profile Midline Phase Reconstruction and Its Identification Features Extraction for SISAR

LUO Bin2feng^{1,2}, ZHANG Shou2hong¹, ZHANG Tao³, LUO Yong2jian^{1,4}

(1. Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xiidian University, Xi. an, Shaanxi 710071, China;
2. Institute of Electronic, Navy Engineering University, Nanjin, Jiangsu 211800, China;
3. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100870, China;
4. Xi. an Communication Institute, Xi. an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: This paper presents a new method of extracting target recognition features using the phase of shadow profile of SISAR. The relation of the phase of the shadow profile with the middle line of the target shadow is induced. An algorithm of midline phase reconstruction utilizing the correlation between the phase and amplitude of the shadow profile is presented. Target recognition features are extracted by means of normalization and differentiation of the midline phase of shadow profile, which reduces the influence of the elevation angle variety of the target. Finally, the validity of the extraction method is verified by the simulation results and the effect of the noise on the recognition performance is analysed.

Key words: shadow inverse synthetic aperture radar; complex shadow image; feature extraction; target recognition

1 引言

阴影逆合成孔径雷达(SISAR)侧影成像可以获得目标的侧影轮廓特征^[1~3]. 由于 SISAR 是利用电磁波的前向散射特性来探测目标的双基地雷达, 因此可以对低空、陆地和海面上的低可探测性目标(如隐形目标)进行检测、识别(成像)和跟踪^[1~7]. 成像获得的复侧影像的模值(幅度)包含有目标侧影轮廓边沿的高度差信息, 而其相位隐含了侧影轮廓中线的信息. 文献[1, 2]介绍了双基地雷达侧影成像的原理. 文献[2]重点研究了去噪和侧影成像的方法. 文献[3]研究的是利用侧影像幅度信息提取目标识别特征的方法, 该文通过对侧影像幅度的微分, 找出微分曲线的极点分布, 对极点间的距离做归一化处理, 以此作为目标的识别特征. 该特征的提取等同于对微分曲线的硬限幅处理, 无法利用极点间的幅度变化信息; 另一方面, 当目标以不同的俯仰角飞行时, 其侧影像不是简单地倾斜一个俯仰角度可以得到的, 因为复侧影像幅度表征的是目标侧影轮廓沿俯仰方向的上下边沿高度差, 与上下边沿的轮

廓构形有很大的关系, 一般而言, 不同的俯仰角度具有不同的侧影轮廓, 其极点的分布亦不同. 为此, 本文研究如何利用复侧影像的相位信息来提取目标的识别特征. 理论上, 目标复侧影像的相位包含有目标侧影轮廓在俯仰方向上的中线的特征, 其相位值在主值区间内与目标侧影轮廓中线坐标值成线性关系. 但在实际应用中, 目标几何结构、飞行姿势, 特别是飞行高度的变化不可避免造成相位卷绕, 即相位模糊; 而侧影成像中非匀速转动和目标各部分之间的相互影响会带来附加相位, 也会造成侧影像相位的畸变和模糊, 使得该相位与目标的中线不具备同样的对应关系, 难以直接应用于目标特征提取. 为此, 本文依据文献[1, 2]中的复侧影像关系式, 通过分析复侧影像相位与目标侧影轮廓中线相位的关系, 发现可以利用侧影像相邻分辨单元幅度及相位关联特征判断相位的卷绕, 应用条件约束重构中线相位. 对重构的中线相位再采用归一化差分的处理方法, 使得提取的相位特征对目标的俯仰角不敏感并能够消除目标非线性转动带来的附加相位的影响. 最后进行了仿真验证工作, 主要包括: 相位重构方法的有效性、

提取的特征的稳健性、信噪比对提取特征的影响等. 对目标相对雷达的位置与姿势对侧影轮廓中线的的影响以及可以采用的方法做了进一步说明.

2 复侧影像相位及其特征分析

图 1 为目标与雷达几何配置关系图, 有复侧影像函数表达式^[1,2]:

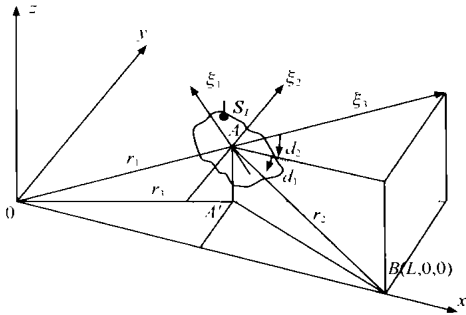


图 1 SISAR 侧影成像雷达的几何结构示意图

$$\hat{H}(N_2) = \int_{c(N_2)-h(N_2)/2}^{c(N_2)+h(N_2)/2} \exp(ikN_1n_1) dN_1 = h(N_2) \# \exp[ikN_1c(N_2)] \sin c \left[\frac{kn_1}{2P} h(N_2) \right] \quad (1)$$

$$\angle(N_2) = \tan^{-1}(\text{real}(\hat{H}(N_2)) / \text{imag}(\hat{H}(N_2))) \quad (2)$$

$\angle(N_2)$ 根据虚部和实部的符号在 $[-P, +P]$ 内取值. 式中 $k = 2P/K, n_1 = \sin \alpha_1 = \frac{zx}{r_1 r_2 r_3}$, 且 $\text{sinc} \left(\frac{x}{P} \right) = \frac{\sin x}{x}$, (N, N_2) 为目标剖面所在平面的直角坐标, $h(N_2)$ 为目标沿 N_2 方向高度差值, $c(N_2)$ 为 $h(N_2)$ 中点在 N_1 轴的坐标值. $h(N_2)$ 决定了 $\hat{H}(N_2)$ 的幅值, $c(N_2)$ 决定其相位. 当考虑 sinc 函数的调制作用时, 由 $\hat{H}(N_2)$ 所求解的 $h(N_2)$ 、 $c(N_2)$ 均存在卷绕现象. 由式(1)有:

- (1) 当 $0 < h(N_2) \left[\frac{P}{kn_1}, |\hat{H}(N_2)| \right]$ 与 $h(N_2)$ 单调一致, 但存在失真;
- (2) 当 $\frac{-P}{kn_1} < c(N_2) \left[\frac{-P}{kn_1} \right]$, 且 $0 < h(N_2) \left[\frac{2P}{kn_1} \right]$ 与 $c(N_2)$ 单调一致且保持线性关系. 在目标飞行俯仰角较小情况下, 考虑 $c(N_2)$ 为坐标值, 通常满足 $|c(N_2)| \left[\frac{h(N_2)}{2} \right]$, 因此主要约束条件为 $0 < h(N_2) \left[\frac{2P}{kn_1} \right]$.

与同样作为表征目标识别特征 $|\hat{H}(N_2)|$ 的相比^[3], $\angle(N_2)$ 作为目标识别特征, 其约束条件有所放宽, 且其恢复的轮廓中线不失真. 所以由 $\angle(N_2)$ 重构中线相位并提取目标识别特征有意义.

设侧影轮廓中线的相位为 $W(N_2) = kn_1c(N_2)$, 若保证 $W(N_2) = \angle(N_2)$, 就是判断约束条件 $0 < h(N_2) \left[\frac{2P}{kn_1} \right]$ 是否满足. 设 $i, i+1$ 为 N_2 方向上相邻分辨单元, 由式(1)有:

$$\begin{aligned} \Delta \hat{H}(i) &= \hat{H}(i+1) - \hat{H}(i) \\ &= \frac{2}{kn_1} \left[\sin \left[\frac{kn_1}{2} h(i+1) \right] \exp(ikn_1c(i+1)) \right. \end{aligned}$$

$$\left. - \sin \left[\frac{kn_1}{2} h(i) \right] \exp(ikn_1c(i)) \right] \quad (3)$$

当 $h(i), h(i+1)$ 同时满足约束条件或同时不满足约束条件时, 有:

$$\begin{aligned} |\Delta \hat{H}(i)| &= (|H(i)|^2 + |H(i+1)|^2 - 2|H(i)+H(i+1)| \\ &\quad \# \cos(kn_1(c(i+1) - c(i))))^{1/2} \quad (4) \end{aligned}$$

一个满足一个不满足有:

$$\begin{aligned} |\Delta \hat{H}(i)| &= (|H(i)|^2 + |H(i+1)|^2 - 2|H(i)+H(i+1)| \\ &\quad \# \cos(kn_1(c(i+1) + c(i))))^{1/2} \quad (5) \end{aligned}$$

若已知 $h(i)$ 满足 (或不满足) 约束条件, 在给定 $kn_1(c(i+1) - c(i))$ 取值范围前提下, 可以由 $|\Delta \hat{H}(i)|, |\hat{H}(i+1)|$ 以及按式(4)、(5)、(3)分别得到的 $|\Delta \hat{H}(i)|$ 的比较来判断 $h(i+1)$ 是否满足 (或不满足) 约束条件, 从而确定如下 G 的取值. 设侧影像的相位表示为

$$\angle(N_2) = \text{angle}(\exp(ikn_1c(N_2))) + PG \quad (6)$$

式中, $\text{angle}(\exp(ikn_1c(N_2)))$ 表示获取 $\exp(ikn_1c(N_2))$ 的相位主值.

$$G = \begin{cases} 0, & h(N_2) \left[\frac{2P}{kn_1} \right] \\ -1, & h(N_2) > \frac{2P}{kn_1} \end{cases} \quad (7)$$

典型的情况, 当目标低空飞行时, 如飞机的机头和机身对应的侧影像幅度 $h(N_2)$ 在俯仰角区间 $[0, \alpha_0]$ 内使得 $h(N_2) < \frac{2P}{kn_1}$ 满足, 侧影轮廓中线对应的奇数分辨单元相邻相位序列或偶数分辨单元相邻相位序列的差不超过 $2P$. 而尾翼对应的 $h(N_2)$ 可能使得 $h(N_2) > \frac{2P}{kn_1}$, 使得式(7)中的 G 取 -1 , 导致该部分侧影像的相位与相邻分辨单元的相位增加了 P 或减少 P . 这就使得侧影轮廓中线相位的恢复产生错误, 需纠正.

3 侧影轮廓中线相位的恢复

设由侧影像得到的各个分辨单元的相位记为 $\angle(i) (i = 1, 2, \dots, M+N)$ ($\angle(1)$ 以机头为起始点). 将 $\angle(i)$ 间隔抽取形成奇数分辨单元相位序列 $\angle_o(i) (i = 1, 2, \dots, M, M \text{ 为奇单元总数})$ 和偶数分辨单元相位列 $\angle_e(i) (i = 1, 2, \dots, N, N \text{ 为偶单元总数})$, 设奇、偶序列相邻的分辨单元的相位差小于 $2P$. 各序列的平均值分别为

$$\angle_j = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \angle_o(i), \quad \angle_e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \angle_e(i) \quad (8)$$

需要指出: 在按式(2)计算相位时, 当侧影像中分辨单元的幅度使得 $h(N_2) < \frac{2P}{kn_1}$ 时, 相邻分辨单元的相位近似相差 P .

情况 1 当所有的 $h(N_2)$ 判为满足 $h(N_2) < \frac{2P}{kn_1}$ (采用前述的判断方法), 即侧影像的相位满足式(9)时,

$$\begin{cases} |\angle(i) - \angle(i-1)| > C_0, & i = 1, 2, \dots, M+N \\ |\angle_o(i) - \angle_o(i-1)| < P, & i = 1, 2, \dots, M \\ |\angle_e(i) - \angle_e(i-1)| < P, & i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (9)$$

侧影轮廓中线相位的恢复方法为:

$$\begin{cases} \xi_j(i_1) = \zeta_j(i_1) - P, \xi_o(i_2) = \zeta_o(i_2) \\ \text{or } \xi_j(i_1) = \zeta_j(i_1), \xi_o(i_2) = \zeta_o(i_2) + P, \zeta_j > \zeta_o \\ \xi_j(i_1) = \zeta_j(i_1) + P, \xi_o(i_2) = \zeta_o(i_2) \\ \text{or } \xi_j(i_1) = \zeta_j(i_1), \xi_o(i_2) = \zeta_o(i_2) - P, \zeta_j < \zeta_o \end{cases} \quad (10)$$

$$i_1 = 1, 2, \dots, N, i_2 = 1, 2, \dots, M$$

然后按照奇、偶间隔排列出新的相位序列 $\xi(i), i = 1, 2, \dots, M + N$.

式(10)的处理消除了相邻分辨单元相位之间相差P这一现象,充分利用奇偶分辨单元相位形成完整的侧影轮廓中线相位.

情况 2 当所有的 $h(N_2)$ 判为满足 $h(N_2) < \frac{2P}{kn_1}$, 但奇、偶序列的相位发生模糊,即侧影像的相位满足式(11)时

$$\begin{cases} | \zeta(i) - \zeta(i-1) | > C_0, i = 1, 2, \dots, M+N \\ | \zeta_j(P_1) - \zeta_j(P_1-1) | > P, P_1 I [1, M] \\ | \alpha | < \zeta_o(P_2) - \zeta_o(P_2-1) | > P, P_2 I [1, N] \end{cases} \quad (11)$$

侧影轮廓中线的相位恢复方法为式(12),然后分别计算新的奇、偶相位序列的平均值 ζ_j, ζ_o ,再按照情况 1 的方法计算侧影轮廓中线相位.

$$\begin{cases} \zeta_j(i) = \begin{cases} \zeta_j(i) - 2P, \zeta_j(P_1) - \zeta_j(P_1-1) > P, i I [P_1, M] \\ \zeta_j(i) + 2P, \zeta_j(P_1) - \zeta_j(P_1-1) < -P, i I [P_1, M] \\ \zeta_j(i), | \zeta_j(P) - \zeta_j(P-1) | < P, P, i I [1, P_1-1] \end{cases} \\ \zeta_o(i) = \begin{cases} \zeta_o(i) - 2P, \zeta_o(P_2) - \zeta_o(P_2-1) > P, i I [P_2, N] \\ \zeta_o(i) + 2P, \zeta_o(P_2) - \zeta_o(P_2-1) < -P, i I [P_2, N] \\ \zeta_o(i), | \zeta_o(P) - \zeta_o(P-1) | < P, P, i I [1, P_2-1] \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

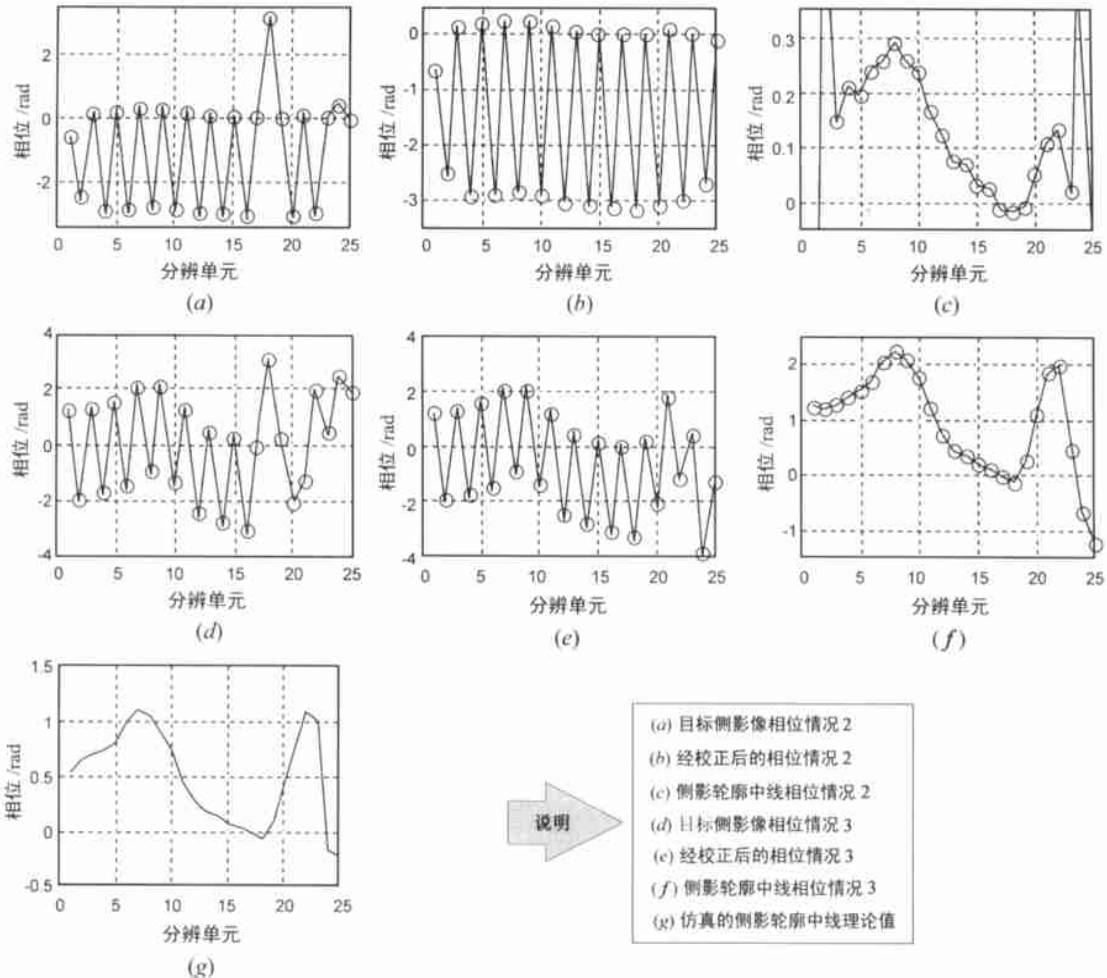
式(12)的处理对发生模糊的奇偶分辨单元的相位进行了相位解卷绕.

情况 3 当存在部分的 $h(N_2)$ 满足 $h(N_2) > \frac{2P}{kn_1}$, 侧影轮廓中线的恢复方法为:

以第一个分辨单元的相位 $\zeta(1)$ 为基准,逐一检查 $\zeta(i), i = 1, 2, \dots, M+N$ 是否满足式(13).

$$| \zeta(i) - \zeta(i-1) | < C_0, i = 2, 3, \dots, M+N \quad (13)$$

设分辨单元 $\zeta(P) - \zeta(P-1) < C_0, P I (2, 3, \dots, M+N)$, P 为第一个满足式(13)的分辨单元序号,则首先对 $\zeta(1), \zeta(2), \dots, \zeta(P-1)$ 的相位序列按照情况 2 的方法进行解模糊处理,然后分别计算新的奇、偶相位序列的平均值 ζ_j, ζ_o ,并按



照式(14)计算 P 点的相位.再检测分辨单元 P, P + 1, ..., M + N, 如果满足式(13), 则按照式(14)校正, 最后按照情况 2 的方法计算归一化侧影轮廓中线相位.

$$\langle(P) = \begin{cases} \langle(P) - P, \langle_0 \rangle \leq \langle_j, P \text{ 为奇数} \\ \langle(P) + P, \langle_0 \rangle \leq \langle_j, P \text{ 为奇数} \\ \langle(P) - P, \langle_0 \rangle \leq \langle_j, P \text{ 为偶数} \\ \langle(P) + P, \langle_0 \rangle \leq \langle_j, P \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (14)$$

式(14)是对侧影像发生畸变而导致分辨单元的相位添加 P 的部分进行了校正.

式(9)、(11)和式(13)中, C_0 为判决相位属于何种情况的门限, 等价于 $kn_1(c(i+1) - c(i))$ 取值范围, 其取值对侧影轮廓中线相位重构具有影响, 它的确定取决于目标外形和沿 N_2 方向的分辨率及信号波长. 通过分析仿真, 当 $C_0 = P/2$ 时, 可以恢复俯仰角在 $0.6 \sim 0.8$ 范围内六种飞机的侧影轮廓中线相位.

图 2 是仿真的米格 229 飞机的侧影像相位和恢复的侧影轮廓中线相位的比较图. 图 2(a) 中分辨单元 18 相位发生模糊, 图 2(b) 按照情况 2 的方法处理获得相位的解模糊. 图 2(c) 显示了正确恢复的侧影轮廓中线相位. 其中分辨单元 1, 2, 24, 25 发生错误, 是由于它们的幅度接近于零, 其相位受周围分辨单元副瓣的影响. 图 2(d) 中, 分辨单元 21 的相位与分辨单元 20 的相位差小于 $P/2$, 图 2(e) 按照情况 3 的方法处理相位获得恢复. 图 2(f) 为恢复的正确的侧影轮廓中线相位. 图 2(c) 和 2(e) 中的侧影轮廓相位的曲线与图 2(f) 中的曲线存在细微的差异, 这是由于侧影像的分辨率有限所引起的. 图 2(d) 和图 2(g) 中, 恢复的相位存在一定的倾斜, 这是由于目标相对于雷达的非线性转动引起的附加相位造成的.

4 侧影轮廓中线相位的特征提取

在侧影成像中, 总是存在着目标相对于雷达的微小的非匀速转动分量, 该分量对于目标侧影像的相位来说是不可以忽略的. 由侧影成像的非匀速转动模型我们可以得出一般性的结论^[8]: 即分辨单元越偏离旋转中心, 在其上的附加相位越大, 且与到旋转中心的距离近似为线性关系. 因此整个分辨单元的相位 $\langle_c(N_2)$ 是在 $W(N_2)$ 基础上叠加了一个近似线性的附加相位 $\langle_L(N_2)$. 由于俯仰角对相位 $W(N_2)$ 和 $\langle_L(N_2)$ 的影响, 俯仰角越大, 附加相位对 $\langle_c(N_2)$ 的影响越小, $\langle_c(N_2)$ 越接近 $W(N_2)$, 对 $\langle_c(N_2)$ 做如下的归一化处理.

$$\langle_c(N_2) = (\langle_c(N_2) - \min(\langle_c(N_2))) / (\max(\langle_c(N_2)) - \min(\langle_c(N_2))) \quad (15)$$

为了消除 $\langle_L(N_2)$ 以及俯仰角变化对 $W(N_2)$ 的影响, 令 $d\langle_c(N_2) = \langle_c(N_2) - \langle_c(N_2 - 1)$ (16)

由于 $\langle_L(N_2)$ 近似线性, $\langle_L(N_2)$ 的差分近似为常数, 只是造成 $d\langle_c(N_2)$ 的上下平移, 而 $d\langle_c(N_2)$ 几乎消除了 $\langle_L(N_2)$ 的影响. 同时, 在侧影轮廓中线相位恢复正确的条件下, 归一化并差分的侧影轮廓中线相位不随俯仰角的不同而变化, 因为该差分处理等同于对侧影轮廓中线旋转了一个俯仰角度, 使其水平. 该特性进一步改善了提取的目标识别特征的性能. 因此我们把目标识别特征定义为式(16)即归一化侧影轮廓中线相位的

差分.

在侧影成像中, 考虑侧影像的分辨率不高的因素, 侧影轮廓中线的模板采用了在不同俯仰角时侧影像相位恢复的归一化侧影轮廓中线相位的差分值的平均, 即

$$\overline{d\langle_c(N_2)} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K d\langle_c(i; \Delta, N_2) \quad (17)$$

式中, K 为样本总数, Δ 为俯仰角间隔, 用相关法进行目标识别.

图 3 是目标在俯仰角为 $[0, 51.7^\circ]$ 的范围内, 间隔为 0.17° 的 8 条归一化侧影轮廓中线相位的差分值及其平均值曲线. 图中 \circ 为 8 条归一化侧影轮廓中线相位的差分值, $*$ 为平均值, 向下平移 0.1 便于显示. 可见, 归一化目标侧影轮廓相位的差分值基本上消除了俯仰角和附加相位对识别特征的影响, 具有不随俯仰角变化的特征. 但在尾翼部分对应的分辨单元中, 部分分辨单元的特征与平均值存在较小的差异, 这是由于在侧影轮廓中线相位的恢复过程中, 判决门限 C_0 使用固定值引起的. 因此 C_0 选取的问题仍有待进一步研究.

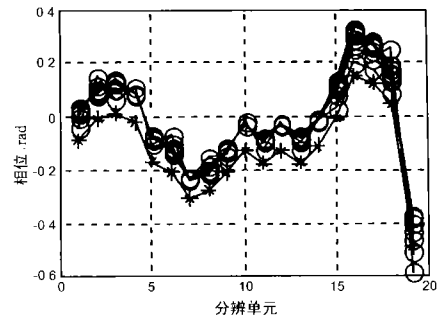


图 3 归一化侧影轮廓中线相位的差分值及其平均值

5 仿真结果

仿真中, 雷达波长为 0.134m, 基线距离为 381.5km, 目标飞行速度为 200m/s, 高度为 100m, 相干处理时间 8 秒. 在俯仰角为 $[0, 51.7^\circ]$ 的范围内, 各目标按照 0.107° 的角度间隔产生了 80 个侧影像. 然后按文中的方法恢复其侧影轮廓中线相位并经过归一化和差分处理, 再与用式(17)产生的模板匹配进行识别, 判为对应相关值最大的目标类型, 识别结果为表 1. 信号幅度定义为侧影轮廓各分辨单元对应高度差的均方根值, 噪声为高斯白噪. 上部为识别率, 下部为其他目标误判为该类的误判率.

表 1 侧影轮廓中线相位特征的识别结果

目标类型	米格229	苏235	F216	F24	歼27	J239
SN= 35dB	97.5%	97.5%	97.5%	100%	91.25%	100%
SN= 25dB	87.5% / 3.75%	95% / 8.75%	95% / 7.5%	93.75% / 7.5%	88.75% / 3.75%	97.5% / 8.75%
SN= 15dB	80% / 18.75%	83.75% / 12.5%	81.25% / 27.5%	82.5% / 8.75%	75% / 18.75%	93.75% / 16.25%
SN= 5dB	50% / 60%	63.75% / 43.75%	45% / 63.75%	33.75% / 28.75%	38.75% / 51.25%	53.75% / 45%

表 1 中的识别结果表明: 在较高信噪比下, 侧影轮廓中线相位重构算法正确, 没有完全识别的原因是目标识别特征起始和尾部存在误差; 在低信噪比条件下, 噪声使得重构算法中所分析的侧影相位的规律发生变化, 导致重构发生错误。

6 结束语

一般说来, 目标的侧影像相位与侧影轮廓中线坐标值成线性关系, 对其解模糊并归一化差分处理后, 提取的特征几乎不受目标俯仰角的变化; 由于受 sinc 函数调制, 侧影像的幅度与侧影轮廓上下边沿的高度差成非线性关系, 并且受目标俯仰角度的影响。因此选择中线相位作为目标识别特征更具有稳健性。需要指出的是: 当考虑目标飞行方位与雷达基线夹角对中线相位特征提取的影响时, 可以采用文献[3]中归一化极点的处理方法, 即在现有中线相位特征基础上提取一个尺度因子, 保证其特征对目标飞行方向与基线的夹角不敏感, 然后再做特征提取。

参考文献:

- [1] B S Surikov, E A Khasina, V V Chapursky. Correlation and spectral functions of one-dimensional radio holograms synthesized at small diffraction angles[J]. Radiotekhnika I Elektronika, 1989, xxii(2): 409- 419.
- [2] 张涛, 张群, 等. 基于时频分析的双基地前向散射雷达侧影成像[J]. 电子学报, 2001, 29(6): 726- 729.
- [3] 张涛, 罗永健, 等. SAR 侧影像的校正及特征提取[J]. 电子与信息学报, 2002, 24(11): 1634- 1640.
- [4] 杨振起, 张永顺, 等. 双(多)基地雷达系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998, 3. 200- 205.

- [5] Nichola J. whills. 双基地雷达[M]. 张祖稷, 吴曼青, 等, 译. 安徽合肥: 机电部 38 所, 1992, 2. 107- 110.
- [6] 李红兵. 俄罗斯新型雷达动态[J]. 雷达与电子战, 1999, 1: 14- 16.
- [7] J I Glaser. Bistatic RCS of Complex Objects near forward scatter[J]. IEEE Trans, V AES22(1985): 70- 78.
- [8] 张涛. 基于双基地前向散射栅栏雷达的侧影成像及识别技术研究[D]. 陕西西安: 西安电子科技大学, 2001.

作者简介:



罗斌凤 男, 1966 年 11 月生于江苏海安县, 博士生, 副教授, 现从事信号处理、雷达成像等方面的研究工作。

张守宏 男, 1938 年生于安徽六安, 西安电子科技大学教授, 博士生导师, 电子学会会士, 主要从事时频分布、雷达成像、阵列信号处理、高分辨信号处理等方面的研究工作。

张涛 男, 1971 年 12 月生于陕西大荔县, 博士, 现在中科院电子所博士后流动站工作, 主要从事阵列信号处理、雷达成像等方面的研究工作。

罗永健 男, 1971 年 11 月生于湖北松滋县, 博士, 现在西安通信学院二系工作, 主要从事阵列信号处理、电信交换等方面的研究工作。