

雷达高分辨距离像自动目标识别方法的改进

陈 凤 杜 兰 保 铮 刘宏伟

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘 要: 在雷达自动目标识别中, 广泛利用基于散射点模型的高分辨距离像(HRRP), 并取得较好的识别效果。由于散射点具有一些特点, 且距离单元内的散射点的情况有时比较复杂, 从而使高分辨距离像出现一些异常, 导致识别发生误判。该文针对发生的问题, 主要讨论了飞机类目标对偏航、俯仰、侧摆三维姿态角变化的敏感性、飞机类目标在正侧视附近的特点以及测试样本的“相干峰”现象, 并提出了相应的改进措施。仿真数据的识别试验结果表明该文提出的改进措施可以有效地提高识别性能。

关键词: 高分辨距离像; 雷达自动目标识别; 最大相关系数模板匹配法; 自适应高斯分类器

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)06-1450-05

Improvement on Radar Automatic Target Recognition Using HRRPs

Chen Feng Du Lan Bao Zheng Liu Hong-wei

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

Abstract: Scattering center target model is widely used to describe the target electromagnetic scattering properties in optical region. It achieves good recognition performance in High Resolution Range Profiles (HRRPs) based Radar Automatic Target Recognition (RATR). Due to the characteristics of scattering center, sometimes HRRPs may appear abnormality, which results in error classification. In order to solve the above problems, this paper mainly discusses the sensitivities of airplane targets with the variation of course, pitch and roll angle, the property of the HRRPs near the airplane target's broadside, and coherent apex phenomena in test data. Corresponding schemes are proposed to improve the recognition performance. Experimental results based on the simulated HRRP data show the proposed schemes can improve the recognition performance effectively.

Key words: High Resolution Range Profile (HRRP); Radar Automatic Target Recognition (RATR); Template Matching Method under the Maximum Correlation Coefficient criterion (MCC-TMM); Adaptive Gaussian Classifier (AGC)

1 引言

根据目标的散射点模型, 雷达目标的高分辨复距离像是宽带信号获取的目标散射点后向子回波在雷达射线上的投影的向量和, 它包含了目标沿距离维较精细的几何结构信息, 具有易于处理和获取的优点, 因而雷达高分辨距离像目标识别备受国内外学者的关注^[1]。由于只取幅度的实距离像与目标散射点模型有更直接的联系^[2], 通常均采用实距离像, 简称距离像(HRRP)。距离像与散射点模型有密切关系。

散射点模型是三维立体模型, 要表示散射点模型和雷达射线之间的关系, 以飞机为例通常需要从目标偏航、侧摆、俯仰三维来描述。高分辨目标识别是目标距离像与已知模板之间关于幅度、平移和姿态的三维优化匹配问题^[3]。幅度敏感性可以通过在一定的测度准则下作幅度归一化来克服(这样做实际只利用了距离像的形状信息, 而牺牲了强度信息)。

平移敏感特征的一种简单处理方法是在计算HRRP相似度时进行滑动匹配。另一种方法是提取平移不变特征, 然后在该特征域进行识别。幅度和平移敏感性都不需要各自建立模板。对HRRP的目标姿态敏感性问题, 通常须分角域建立模板, 由于姿态敏感性包括飞机偏航、俯仰、侧摆三维, 若对这三维都建立模板, 会大大增加运算量和存储量。

散射点在目标上的分布随方位是缓变的, 通常认为在一个较小的姿态变化角域内, 散射点分布模型基本不发生变化, 距离单元内的散射点都无方向性。但是, 在方位向是正侧视附近时, 若将机身近似为一个大的圆柱形散射点的话, 该散射点不再是无方向性的, 而且有极强的方向性。因此, 正侧视距离像有其特殊性。

距离单元内的散射点情况有时比较复杂, 有时某些距离单元的散射后向子回波会发生同向相加, 从而出现在该单元的很大的振幅, 称之为“相干峰”, 这类似于合成孔径雷达(SAR)里的相干斑。但与 SAR 相比, 距离像是一维(纵向)高分辨, 另一位维(横向)较长, 更易出现“相干峰”的情况。

2005-11-28 收到, 2006-05-24 改回

国家自然科学基金(69831040)和国家部级基金(413070501)资助课题

可以借鉴 SAR 里抑制相干斑的方法来消除距离像的“相干峰”。

本文将从散射点模型出发, 结合飞机目标的几何形状对飞机偏航、俯仰和侧摆三维的姿态敏感情况作出比较分析, 并较详细分析正侧视附近距离像的散射点模型的特殊性, 进而给出如何合理地建立模板和如何处理测试样本以抑制“相干峰”, 使存储量和计算量降低、识别率提高的几个措施。

本文的具体内容安排如下: 第2节分析飞机类目标对偏航、俯仰、侧摆三维姿态角变化的敏感性; 第3节针对偏航向的方位敏感性特别分析飞机类目标在正侧视附近的方位敏感性问题; 第4节分析距离像的“相干峰”现象, 第5节介绍雷达高分辨距离像目标识别中常用的两种分类器——最大相关系数模板匹配法(MCC-TMM)和自适应高斯分类器(AGC), 并根据前面的分析和雷达 HRRP 目标识别的具体情况提出综合考虑飞机目标三维姿态和正侧视的散射点特性及“相干峰”问题以提高识别性能的相应的改进措施; 第6节给出了基于仿真数据的识别试验结果; 最后是全文的总结。

2 飞机偏航、俯仰、侧摆时的不同姿态敏感性

设在某一小角域(散射点分布保持不变), 共有 M 次回波, 每次回波以 N 个距离单元表示, 根据简单散射点模型, 高分辨复距离像的第 m 次回波第 i 个距离单元的信号回波可以表示为^[4]

$$x_i(m) = \sum_{n=1}^{N_i} \sigma_n \exp \left(-j2\pi f_c \frac{2R_n(m)}{c} - \phi_{n0} \right), \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

其中 N_i 为该距离单元中散射点的个数, $R_n(m)$ 为相对于初始回波散射点的径向位移, σ_n 为其幅度, ϕ_{n0} 为其初始相位, c 为光速, f_c 为信号中心频率。

一维高分辨距离像具有姿态角敏感性^[2-4], 一方面根据简单散射点模型理论, 目标的散射点分布模型要随姿态角变化, 这一变化比较缓慢, 对于微波雷达, 姿态角变化十余度, 可认为目标上的散射点分布不变; 另一方面即使在散射点分布模型保持不变的范围内, 根据式(1)姿态角的微小变化也会改变同一距离分辨单元内散射点子回波间的相位差, 引起回波(即所有子回波向量和)幅度和相位的变化。图1表示出距离像(取 50~200 的距离单元)的方位角转过 0.2° (波长为 5.45cm), 距离像发生明显变化。可以看出, 距离像中尖峰

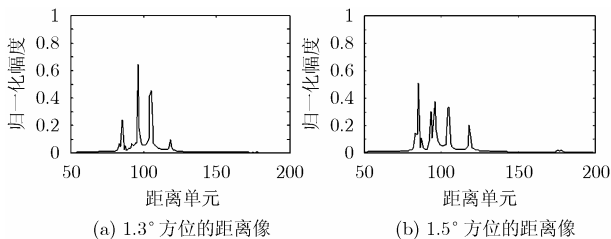


图1 B1B 飞机的单次距离像

的位置基本不变, 但各峰的振幅为众多子回波的向量和, 因而有大的起伏。实际上, 一个距离单元里驻留的散射点随目标转动会有变化。式(1)近似认为 M 次回波该单元里驻留的散射点均相同, 即散射点不发生中间进入或逸出的越距离单元走动。距离像不发生越距离单元走动的条件为^[4]

$$\delta\varphi \leq (\delta\varphi)_{\text{MTRC}} = \Delta R/L \quad (2)$$

式中 ΔR 是距离分辨单元的长度(即距离分辨率), L 是目标的横向长度。

虽然飞机是三维目标, 但其形态是较为扁平的, 且飞行中基本上平行于地面, 因而其距离像对各维的敏感性有很大差别。飞机飞行时的偏航、俯仰或侧摆都会造成雷达目标姿态的变化。图2画出飞机偏航、俯仰和侧摆时各距离单元内散射点的分布及其到雷达的距离的变化。在图2(a)中, 飞机偏航角为 ψ , 机翼上的用黑点标出的特显散射点已由第5个距离单元进入方位变化后的第6个距离单元, 图2(b)中飞机俯仰角为 θ , 图2(c)中飞机侧摆角是 γ 。显然, 由于飞机目标本身几何形状的缘故, ψ 的变化引起距离单元内散射点到雷达射线距离变化较大, 同时散射点越距离单元走动的可能性也大。因此, 当 $\psi = \theta = \gamma$ 时, 记偏航 ψ 前后的距离像为 $X_{\psi b}$ 和 $X_{\psi a}$, 同理, 用 $X_{\theta b}$, $X_{\theta a}$, $X_{\gamma b}$, $X_{\gamma a}$ 记俯仰前后、侧摆前后的距离像, 则有

$$\|X_{\psi b} - X_{\psi a}\| \gg \|X_{\gamma b} - X_{\gamma a}\|, \|X_{\psi b} - X_{\psi a}\| \gg \|X_{\theta b} - X_{\theta a}\| \quad (3)$$

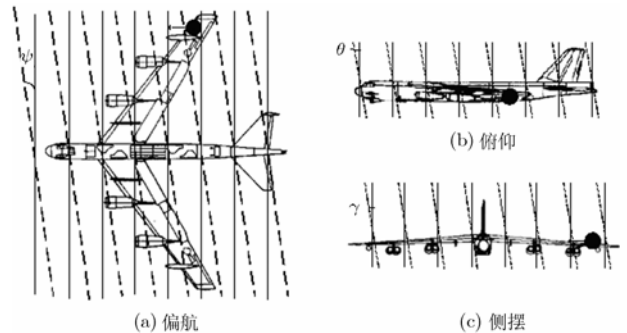


图2 B-52 飞机的散射点模型示意图

仿真试验也验证了以上两式的结果, 如图3所示, 将B-52飞机原姿态为偏航 145° 俯仰 3° 侧摆 3° 的距离像作为基准, 分别做出只有其中一维转动(另两维保持不变)时距离像相关系数的变化曲线, 角度变化从 0° 到 20° 。比较3条曲线可见, 方位(偏航)敏感性要大得多, 更考虑到实际飞机飞行时, 俯仰角和侧摆角变化较小, 因而无须对不同的俯仰角、侧摆角分别建模, 只须对不同的偏航角建立模板库, 这将大大降低模板数量, 减少存储量, 提高计算速度。本文第5节仿真试验就是用 3° 的仰视角(仰视角含义见第5节)做训练数据, 5° 的仰视角做测试数据, 对不同的偏航角分帧建立模板, 所得识别效果良好, 说明距离像在俯仰维和侧摆维具有良好的推广能力。

3 正侧视时极强的方位敏感性

在雷达目标识别中, 一般认为对方位连续变化的一个小

角域里距离像的平均像能较好表征该角域的距离像。从式(1)的距离像表示式,第 m 次回波第 i 个距离单元的功率可展开如下式^[4]:

$$|x_i(m)|^2 = x_i(m)x_i^*(m) = \sum_{n=1}^{N_i} \sigma_n^2 + 2 \sum_{n=2}^{N_i} \sum_{k=1}^n \sigma_n \sigma_k \xi_{ink}(m) \quad (4)$$

式中

$$\begin{aligned} \xi_{ink}(m) &= \cos[\theta_{ink}(m)] \\ &= \cos\left[(\phi_{n0} - \phi_{k0}) - \frac{4\pi f_c}{c}[R_n(m) - R_k(m)]\right] \end{aligned} \quad (5)$$

展开式中,第1项是散射点自身项,第2项是散射点交叉项, σ_n 为第 n 个散射点回波的振幅, $\theta_{ink}(m)$ 表示第 m 次回波、第 i 个距离单元的第 n 和第 k 个散射点回波的相位差,可以证明 $\xi_{ink}(m)$ 在理论上是零均值对称分布的^[4]。距离平均像可以消去散射点交叉项,得到稳定的自身项,因此,通常采用距离平均像来表征相应角域的距离像的主要特征^[4]。但是,由于式(4)是基于简单散射点模型的,认为目标的散射特性在一定小的角域里可以用一系列无方向性的散射点来表征,试验证明,它一般是正确的,但也有例外,当对目标做正侧视照射时,散射点模型将发生变化,须另作考虑。下面对正侧视时的情况作具体说明。

高分辨距离像对偏航向方位变化敏感,而且对不同的偏航方位敏感程度不同。图4将某一目标(Mig-21飞机)的距离像峰值(单位:分贝)画在极坐标中, 0° 表示雷达射线正对机头时的距离像的峰值, 90° 表示正侧视时距离像的峰值, 180° 表示正对机尾时距离像的峰值,依次逆时针旋转到 360° 。从图4可知雷达在斜视时距离像峰值随方位维有些微起伏,约20dB,但其起伏在正侧视时就剧烈的多,在 5° 的方位变化范围内峰值就有40dB的起伏,方位敏感性极强。实际上,对飞机作正侧视观测时,其极强的后向散射是由近似圆柱形的机身造成的,其它分量相比之下非常微弱。如果要将机身的正侧视后向散射仍要用散射点来表示的话,则该散射点不再是无方向性的,而且有极强的方向性。更有甚者,对所有飞机类目标的正侧视具有类似的情况,距离像都表现为中间为窄脉冲,而两侧很小。图5为3种正侧视的距离像,要将它们用平均距离像作出识别是有困难的。我们对试验结果进行了分析,当测试样本在位于正侧视区间时,经常发生误判。好在雷达目标识别是在检测到目标后进行的,根据检测到的航迹,已大致获得目标的相对偏航信息,在进行识别时应避开正侧视的情况。

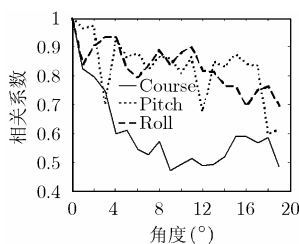


图3 飞机偏航、俯仰、侧摆向单距离像相关系数

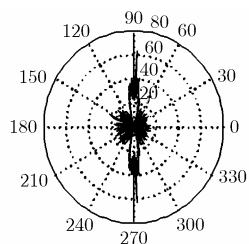


图4 $0\sim 360^\circ$ 距离像峰值图

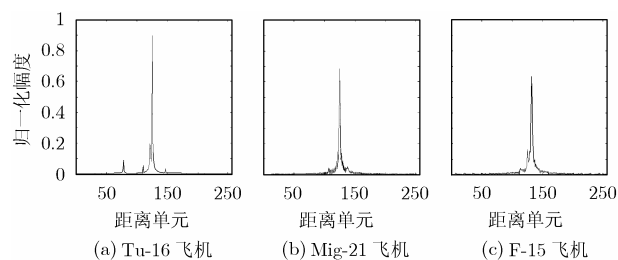


图5 正侧视时单距离像

将正侧视及其附近的距离像峰值与视角的关系画于图6中, 90° 对应正侧视。可见在方位角变化不到 1° 的范围内,距离像功率已降到半功率点,正侧视距离像对方位极度敏感。这种情况也表明,作为基于散射点模型的距离像识别的式(1)在这里已不再适用,式(1)认为各散射点在规定的角域里无方向性,而对飞机作正侧视照射时,机身近似为长的圆柱体,相当的后向散射有极强的方向性。这时用一定角域(一般为 $3\sim 5^\circ$)的距离平均像作为该角域的主要特征不再成立,须作特殊考虑。为此,下面对一定角域可用距离平均像表征主要特征作一些说明。

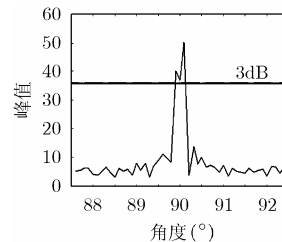


图6 正侧视附近距离像峰值图(Mig-21)

为了举例验证上面的分析,以Tonardo飞机为例进行比较。当方位角为 $20\sim 25^\circ$ 时,以0.01作为采样间隔,图7(a)画出该角域平均距离像与其它各距离像间相关系数的曲线(实线)和此平均距离像与其它4类目标对应角域距离像的相关系数曲线(虚线)。可见用平均距离像作为所在角域的区别各目标的主要特征是合适的。

图7(b)是 90° 附近 5° 角域(即从 87.5° 至 92.5°)的相应情况。这时用平均距离像作为表征明显不合适。

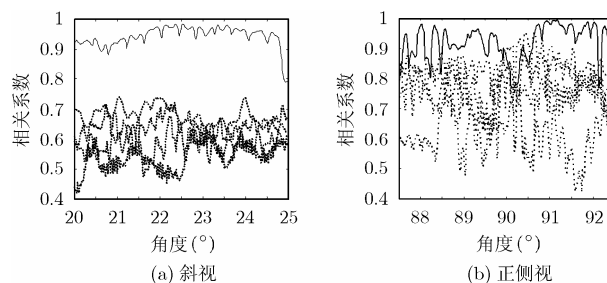


图7 距离像类内和类间相关系数图

事实上,当采用判别准则涉及到距离像平均含义的相关法^[7,8]和自适应高斯分类器^[8]时,误判的测试样本中相当一部分是来自正侧视及其附近的样本。若根据方位信息去除正侧视时的训练样本,可以降低由此引起的误判率。

4 高分辨距离像中的“相干峰”

前面已经提到过, 高分辨距离像中某一距离单元的振幅为该单元所有散射点回波向量和的振幅在雷达射线上的投影, 随方位角的变化振幅会有起伏。但各距离单元内散射点的情况是复杂的, 不能简单认为其向量和满足大数定律, 振幅服从高斯分布(实振幅服从瑞利分布)。实际上, 各个距离单元里散射点的情况是不同的, 大致可分为3类情况: 第1种是距离单元由一个特显点和众多相对小得多的杂散散射体构成; 第2种是一个距离单元中分布众多的小散射点, 它们组成杂波, 且其中没有明显的特显点; 第3种是一个距离单元中有少数几个, 特别是2~3个特显点, 同时也伴随有许多小杂波。距离单元回波为各散射点回波之和, 在某些情况下会出现子回波近似相干相加, 使该距离单元呈现出大的振幅, 这类似于合成孔径雷达图像的“相干斑”。实际上, 距离像的分辨单元纵向是高分辨, 而横向对目标无分辨能力, 即分辨单元为横向条带, 子回波的相角随方位的改变可能有大的变化, 更易出现类似于“相干斑”的特大“相干峰”振幅。这会使整个距离像严重偏离平均距离像, 也不能用高斯起伏来表征。这种情况显然易于产生误判。

从上面的讨论可知, 作为模板的平均像已是众多实距离像的非相干平均, “相干峰”不存在, “相干峰”主要存在某些测试样本中。如果能把这种“相干峰”效应削弱, 就可以提高识别率。合成孔径雷达里抑制“相干斑”的方法是可以借鉴的。SAR 里抑制相干斑一般采用多视非相干平均的方法。在高分辨雷达里, 即使是搜索雷达, 每次波束扫过目标约有 50 ms, 在此期间目标方位角的变化约有 0.2° 。实际上, 一般目标距离像在相隔 0.1° 以上, 相干性已不太强。因此用每次扫描所得距离像回波作间隔选取 2~3 个(如取首、尾和中间的 3 个)作平均, 可使幅度起伏特大的状况得到改善, 从而提高识别率。

5 改进措施

为了验证改进措施的有效性, 我们采用两种最常用的基于高分辨距离像的雷达自动目标识别方法——最大相关系数模板匹配法(MCC-TMM)和自适应高斯分类器(AGC), 下面先对这两种方法做简单介绍。

5.1 MCC-TMM 介绍

MCC-TMM 主要识别步骤如下:

(1)建立模板库: 计算并存储等角域分帧、平移匹配后各帧的平均距离像, 记为

$$\{\mu_{ik} | i = 1, 2, \dots, C, k = 1, 2, \dots, K\}$$

其中 C 是目标数目, K 是各目标的帧数。

(2)识别阶段: 将测试样本 z 和平均距离像模板 μ_{ik} 幅度归一化, 记为 $\bar{z}$ 和 $\bar{\mu}_{ik}$, 计算相关系数:

$$\rho_{ik} = \max_{\tau} (\bar{\mu}_{ik}^T \bar{z}(\tau)) = \max_{\tau} (\mu_{ik}^T z(\tau)) / (\|\mu_{ik}\| \cdot \|z\|) \quad (6)$$

最后联合方位匹配和类别判决, 若

$$j = \arg \max_i \left(\max_k \rho_{ik} \right), \quad i = 1, 2, \dots, C, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (7)$$

则测试距离像样本 z 属于目标 T_j 。

5.2 AGC 介绍

AGC 方法是在 MCC-TMM 的基础上, 同时考虑距离像的平均像和方差像的模板匹配法。由于利用了距离像的二阶信息, AGC 更好地刻画了距离像的幅度起伏信息, 与 MCC-TMM 相比能更好辨别不同目标。AGC 主要识别步骤如下:

(1)训练数据和测视数据幅度归一化。

(2)建立模板库: 计算等角域分帧的平移匹配后的平均距离像和方差像, 并按方位顺序存放为 $\{\mu_{ik}, c_{ik} | i = 1, 2, \dots, C, k = 1, 2, \dots, K\}$, 其中 C 是目标数目, K 是各目标帧数, $\mu_{ik} = [\mu(1), \mu(2), \dots, \mu(L)]^T$, $c_{ik} = [\sigma^2(1), \sigma^2(2), \dots, \sigma^2(L)]^T$, $\mu(i), \sigma^2(i)$, $i = 1, 2, \dots, L$ 为第 i 个距离单元的均值和方差。

(3)识别阶段: 设与相应方位的模板平移匹配后的测试样本为 z , 将其归一化为 $\bar{z}$, 计算距离:

$$d_{ik} = \sum_{n=1}^N \ln \sigma_{ik}^2(n) + \sum_{n=1}^N \frac{[\bar{z}(n) - \mu_{ik}(n)]^2}{\sigma_{ik}^2(n)}, \quad i = 1, 2, \dots, C, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (8)$$

最后是联合方位匹配和类别判决, 若

$$j = \arg \min_i \left(\min_k d_{ik} \right), \quad i = 1, 2, \dots, C, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (9)$$

则测试距离像样本 z 属于目标 T_j 。

5.3 改进措施

(1)忽略俯仰向和侧摆向信息, 对飞机偏航向建立模板, 可大大减少模板数量。

(2)在模板库建立时将方位敏感性极强的正侧视附近数据去除。

(3)距离像的非相干平均可减弱“相干峰”。事实上, 对于警戒雷达一次扫描, 很难获得长的距离像序列。容易估算出每分钟 6 转, 波束宽度为 2° 的警戒雷达在采样频率为 400Hz 时一次扫描所获得的距离像个数仅为 20。实时处理时, 单次扫描天线转动而相位中心不变, 飞机移动引起了目标对雷达射线的方位的转动, 以仿真数据为例, 采样间隔为 0.01° , 20 个距离像只能得到 0.2° 的方位转动范围。实测数据试验和仿真数据试验表明, 减去平均像的距离像剩余部分在方位转过 0.2° 时, 相关性已不太强, 如图 8 所示, 纵坐标表示角域内第一次距离像与其它各次距离像的相关系数, 可见在方位变化到约 0.2° 后, 相关系数已无明显减小。实际应用中, 我们可用所得的 20 个距离像的首、尾及中间三次像非相干平均来消除“相干峰”, 从而达到实时处理的目的。

6 仿真试验

本文利用雷达后向散射仿真软件^[9]仿真了 5 类飞机目标

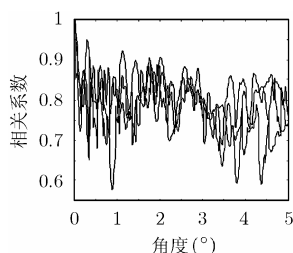


图 8 距离像相关系数曲线

的转台数据, 雷达和飞机的参数如表 1 所示, 由于前 3 个飞机的尺寸较后两个目标要大许多, 为了增加识别的难度, 前 3 个目标按 2:1 的比例缩小, 使 5 个目标的大小基本一样。考虑到高分辨距离像的对称性, 训练数据的方位角范围是 $0 \sim 180^\circ$, 根据第 1 节的分析, 用 3° 仰视角仿真数据做模板, 测试数据采用 5° 仰视角的转台数据。这里仰视角指的是雷达射线与飞机平面(图 2(a))的夹角, 仰视角与俯仰角、侧摆角存在如下关系:

$$\begin{cases} \sin(\phi) = \cos(\varphi) \cdot \sin(\theta) \\ \sin(\phi) = \cos(\varphi) \cdot \cos(\gamma) \end{cases}$$

$$0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ, \quad 0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ, \quad 0^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$$

其中 ϕ 为视角, φ 偏航角, θ 俯仰角, γ 侧摆角。当 $90^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$ 时, 利用对称性质求得对应的 θ, γ 。

表 1 仿真试验飞机和雷达

雷达参数	中心频率		5520MHz
	脉冲重复频率		400Hz
	采样频率		400 MHz
	信号带宽		400 MHz
飞机类型	机长(m)	机宽(m)	缩比
Tu-16	34.80	33.00	2: 1
B-52	49.50	56.40	2: 1
B-1B	44.80	23.80	2: 1
Tornado	16.72	13.91	1: 1
Mig-21	15.76	7.15	1: 1

试验结果: 如图 9 所示, 纵坐标为自适应高斯分类器的识别率, 图 10 纵坐标为相关法的识别率。从这两图可知, 目标数目增大时, 识别率下降; 实时处理时用测试样本非相干平均消除相干峰后的识别率比单次样本测试识别率增高; 将极度敏感的正侧视数据去除后, 识别率增高, 总的识别率增高 1~4 个百分点。

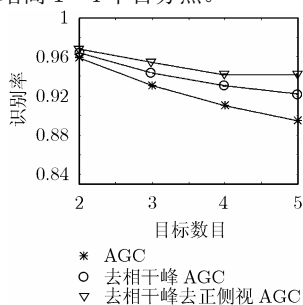


图 9 AGC 识别率

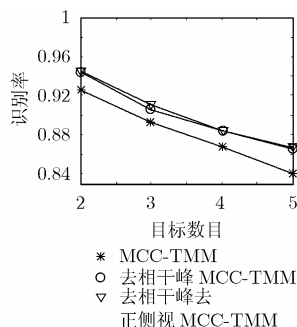


图 10 MCC-TMM 识别率

本文详细分析了飞机类目标 HRRP 的姿态敏感性问题, 指出飞机类目标的 HRRP 主要是对偏航向的方位变化比较敏感, 同时由于正侧视方向的特殊性, 正侧视附近的 HRRP 回波已无法表示目标的结构特性, 因此, 综合考虑了雷达 HRRP 目标识别的实际问题, 本文以 MCC-TMM 和 AGC 两类分类器为例提出了相应的改进措施, 即在训练阶段沿偏航向建立方位模板并去除敏感性极强的正侧视方向的方位模板, 同时利用少量测试样本的非相干平均减弱“相干峰”。从基于仿真数据的试验结果来看, 本文提出的简单的改进措施就可以有效的提高识别性能。

参考文献

- [1] 马建华, 刘宏伟, 保铮. 利用核匹配追踪算法进行雷达 HRRP 识别. 西安电子科技大学学报, 2005, 32(1): 84-88.
- [2] 刘宏伟, 杜兰, 袁莉, 保铮. 雷达高分辨距离像识别研究进展. 电子与信息学报, 2005, 27(8): 1328-1334.
Liu Hongwei, Du Lan, Yuan Li, and Bao Zheng. Progress in radar automatic target recognition based on high range resolution profile. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(8): 1328-1334.
- [3] Du Lan, Liu Hong-wei, and Bao Zheng. Radar HRRP target recognition based on higher order spectra. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2005, 53(7): 2359-2368.
- [4] 杜兰, 保铮, 邢孟道. 飞机目标的雷达一维距离像特性研究. 西安电子科技大学学报, 2002, 28(Sup.): 14-19.
- [5] 杜兰, 刘宏伟, 保铮. 利用目标方位信息改善雷达距离像识别性能. 系统工程与电子技术, 2004, 26(8): 1040-1043.
- [6] 边肇祺, 张学工. 模式识别(第二版), 北京: 清华大学出版社, 2000: 30-31, 136-140.
- [7] Li Hsueh-Jyh, Wang Yung-Deh, and Wang Long-huai. Matching score properties between range profiles of high-resolution radar targets. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1996, 44(4): 444-452.
- [8] Li Hsueh-Jyh and Yang Sheng-Hui. Using range profile as feature vector to identify aerospace objects. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1993, 41(3): 261-268.
- [9] Gorshkov S A, Leschenko S P, Orlenko V M, Sedyshev S Y, and Shirman Y D. Radar Target Backscattering Simulation Software and User's Manual. Boston. London: Artech House Publishers, 2002.
- [10] 廖学军. 基于高分辨距离的雷达目标识别. [学位论文], 西安: 西安电子科技大学, 1999.

陈 凤: 女, 1981 年生, 博士生, 研究兴趣为雷达目标识别。

杜 兰: 女, 1980 年生, 博士生, 研究兴趣为雷达目标识别、雷达成像(SAR/ISAR)和雷达信号处理理论。

保 铮: 男, 1927 年生, 教授, 博士生导师, 中国科学院院士、IEEE 高级会员、中国电子学会会士, 研究方向为雷达信号处理与检测。

刘宏伟: 男, 1971 年生, 教授, 研究方向为雷达信号处理与检测、阵列信号处理、雷达目标识别。