

基于相关系数的雷达高分辨距离像分帧方法

刘敬^① 张军英^{①②} 杜兰^②

^①(西安电子科技大学计算机学院 西安 710071)

^②(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点研究室 西安 710071)

摘要: 高分辨距离像(HRRP)的方位敏感性造成 HRRP 数据是很长的统计特性连续变化的序列。从 HRRP 序列的统计特性出发,提出一种基于相关系数的 HRRP 分帧方法。外场实测数据的分帧结果表明,该方法可准确划分 HRRP 统计特性的变化,分帧结果与实际飞行轨迹符合;且采用时域模板匹配法(TMM)、谱域最短距离分类器和支撑向量机(SVM)分类器的识别结果均表明,相比目前基于散射点模型的均匀分帧方法,本文方法可有效提高识别率。

关键词: 雷达自动目标识别; 相关系数; 方位敏感性; 高分辨距离像

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)09-2060-05

A Frame Segmentation Method for Radar HRRPs Based on Correlation Coefficient

Liu Jing^① Zhang Jun-ying^{①②} Du Lan^②

^①(School of Computer Science and Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(National Key Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Target-aspect sensitivity makes High Resolution Range Profiles (HRRP) become a long sequence with statistical characteristic changing continuously. A novel frame segmentation method based on correlation coefficient is presented according to the statistical characteristic changes of HRRP sequence. Experimental results for measured data show that the presented method can exactly divide the statistical characteristic changes of HRRPs and the resulting frames are coincident with flying trajectory. Template Matching Method (TMM) classifier in time domain, shortest distance classifier and Support Vector Machine (SVM) classifier in frequency domain are used to evaluate recognition performances. Comparing with the current uniform frame segmentation method based on scattering center model, the presented method efficiently improves the recognition rates.

Key words: Radar Automatic Target Recognition (RATR); Correlation coefficient; Target-aspect sensitivity; High Resolution Range Profile (HRRP)

1 引言

高分辨距离像(High Resolution Range Profile, HRRP)目前已成为雷达自动目标识别(Radar Automatic Target Recognition, RATR)领域的研究热点^[1-4]。距离像有很强的幅度、平移和方位敏感性^[5]。幅度和平移敏感性可分别通过对距离像进行幅度归一化和对距离像序列进行最大滑动相关对齐^[6]解决。产生方位敏感性的原因:(1)目标散射点模型^[7]要随方位角变化;(2)即使在散射点模型保持不变的范围内,方位角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,影响向量和的幅度。

目前解决方位敏感性的方法是根据简单散射点模型理论^[7],按照在视角变化 $\Delta\varphi \leq \Delta R/L_x$ (ΔR 为距离分辨单元长

度, L_x 为目标横向长度)的角域范围内划分观测区间,将观测区间内距离像序列定义为一帧距离像^[7, 8]。该分帧方法基于假设前提:雷达接收到 N 次回波,假设其中每 M 次回波对应的目标方位角为 $\Delta\varphi \leq \Delta R/L_x$ ^[9-11]。基于此假设前提,对所有目标的训练数据均按照每 M 次回波一帧均匀分帧^[9-11],这与实际情况显然不符,因为(1)以飞机类目标为例,分帧应与飞机相对雷达的实际飞行轨迹符合,而不应以主观去均匀划分。且飞机相对雷达视线的转动速度越大,则对应帧中距离像越少。(2)不同目标的横向尺寸 L_x 是不同的;且同类目标的 L_x 还与雷达视线有关, L_x 应是从雷达视线看过去的飞机横向尺寸,随着飞机的转动, L_x 不断变化。(3)飞机两翼的散射点较之机身的散射点要少得多,所以在保证机身的大部分散射点没有越距离单元走动(Migration Through Resolution Cells, MTRC)的情况下,两翼散射点可在一定范围内允许 MTRC,不应完全按照散射点模型理论分帧。

本文针对距离像的方位敏感性, 从距离像序列统计特性的变化出发, 提出一种基于相关系数的分帧方法: 先将距离像序列均匀分成足够小的小帧, 然后经多趟比较与合并直到所有相邻帧的归一化平均距离像的最大滑动相关系数均小于某一阈值 δ 。采用外场实测数据按照该方法对 3 类飞机的 6 段数据进行分帧, δ 取 0.95 且按照初始每帧 32, 64 和 128 个距离像做了 3 组实验, 并从以下 3 个方面验证了本文方法的有效性: (1) 各段数据 3 组分帧实验的帧编号-数据编号走势图完全一致, 说明本文方法的确可将统计特性一致的距离像分为一帧; (2) 分帧结果各帧距离像的个数比例与飞机实际飞行轨迹基本符合; (3) 采用时域模板匹配法(Template Matching Method, TMM)^[3]、谱域最短距离分类器和支撑向量机(Support Vector Machine, SVM)分类器的识别结果均表明, 相比均匀分帧法, 本文的分帧方法可有效提高识别率。

2 基于相关系数的分帧方法

2.1 相关系数分帧方法原理

(1) 平均距离像的稳定性 根据文献[5,7,9,10], 在不发生 MTRC 情况下, 距离像由散射点自身项和交叉项两部分组成, 第 n 个距离单元的第 m 次回波的功率为

$$|x_n(m)|^2 = x_n(m)x_n^*(m) = \sum_{i=1}^{L_n} \sigma_i^2 + 2 \sum_{i=2}^{L_n} \sum_{k=1}^{i-1} \sigma_i \sigma_k \cos[\theta_{nik}(m)] \quad (1)$$

其中 σ_i 为第 i 个散射点子回波的振幅, $\theta_{nik}(m)$ 表示第 m 次回波、第 n 个距离单元的第 i 和第 k 个散射点子回波的相位差, 可以证明 $\theta_{nik}(m)$ 在理论上是零均值对称分布的^[7]。我们所说的距离像指实距离像 $|x_n(m)|$ 。式(1)右边第 1 项是散射点自身项, 为距离单元内散射点的强度和, 与转动无关, 是比较稳定的; 第 2 项是散射点交叉项, 为相异散射点子回波复振幅的共轭相乘, 随转角以零均值做随机变化, 引起方位敏感性。平均距离像消除了交叉项, 其各分量基本反映了各距离单元自身项, 因此我们用帧平均距离像代表一帧距离像。

(2) 平均距离像的相关系数 本文采用相邻两帧的归一化平均距离像的最大滑动相关系数做为两帧相似性的测度。设第 $i, i+1$ 帧的归一化平均距离像分别为 $\mu_i = [\mu_i(1), \mu_i(2), \dots, \mu_i(N)]^T$ 和 $\mu_{i+1} = [\mu_{i+1}(1), \mu_{i+1}(2), \dots, \mu_{i+1}(N)]^T$, 其中 N 为距离单元个数。设 μ_{i+1} 经滑动 τ 与 μ_i 对齐, 它们的相似程度, 可用相关系数

$$\rho = \frac{\mu_i^T \mu_{i+1}}{\|\mu_i\|_2 \|\mu_{i+1}\|_2} = \frac{\sum_{n=1}^N [\mu_i(n) \mu_{i+1}((n + \tau) \bmod N)]}{\|\mu_i\|_2 \|\mu_{i+1}\|_2} \quad (2)$$

完全描述。 $\rho \in [-1, 1]$, ρ 越大, 表示在高维空间中相邻两帧平均距离像相似程度越高, 相邻两帧距离像的统计特性越一致, 当 ρ 大于等于某一阈值 δ 时, 两帧距离像的统计特性已非常接近, 可将它们合并成一帧。

2.2 相关系数分帧方法步骤

步骤 1 初始化 将距离像序列均匀划分成小帧, 对各

帧距离像进行包络对齐, 求各帧平均距离像并进行幅度归一化。初始每小帧距离像应足够少, 确保该小帧内飞机相对雷达视线的转角很小, 没有发生 MTRC; 同时每一小帧距离像也不应太少, 否则平均距离像无法消除距离像中的自身项。

步骤 2 一趟比较与合并 从 $i=1$ 开始, 比较第 i 帧与第 $i+1$ 帧归一化平均距离像的最大滑动相关系数 ρ : 若 $\rho \geq \delta$ 则合并它们做为帧, 接着比较第 $i+2$ 与第 $i+3$ 帧; 否则接着比较第 $i+1$ 与第 $i+2$ 帧。 δ 为一预先设置的接近于 1 的阈值。本次一趟比较合并将所有归一化平均距离像最大滑动相关系数大于等于 δ 的相邻两帧合并成一帧。

步骤 3 根据 2 一趟比较合并分帧的结果, 重新计算各帧归一化平均距离像, 然后重复 2, 直到一趟比较结果中所有相邻帧归一化平均距离像的最大滑动相关系数均小于 δ , 此时分帧成功。

图 1 直观地解释了该分帧算法, 第 1 行为初始帧序列, 第 2 行为一趟比较合并分帧结果, 第 3 行为最终分帧的结果。当然, 图 1 只是示意图, 实际需多趟比较合并才能得到最终分帧结果。

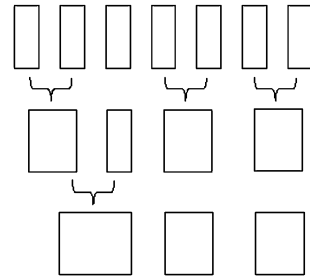


图 1 相关系数分帧方法原理图

3 实测数据实验结果

采用某单位 ISAR 实验雷达实测飞机数据, 3 类飞机的飞行轨迹在地平面上的投影如图 2 所示。雅克-42 的第 2, 5 段, 安-26 的第 5, 6 段, 奖状的第 6, 7 段数据作为训练数据, 其它各段数据作为测试数据。训练数据段基本包含了测试数据段内各种方位角的情况, 但俯仰角有所不同。

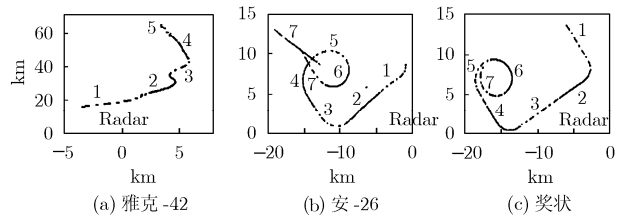


图 2 飞行轨迹

3.1 分帧结果

实测数据每段有 26000 个距离像, 对每段训练数据, 分别以初始每帧 32, 64 和 128 个距离像按照相关系数分帧算

法进行分帧，阈值 $\delta = 0.95$ 。

表1为初始每帧32, 64和128个距离像的各目标训练数据段的分帧结果。可以看到随着初始每帧距离像个数的增多, 帧个数逐步减少。这是由于距离像序列的统计特性是连续变化的, 初始帧内距离像个数越多, 则分帧结果各帧的统计特性变化越粗糙, 帧个数也越少。

表1 各目标各训练数据段分帧结果

| 初始每帧距 离像个数 | 雅克-42 帧个数 | | 安-26 帧个数 | | 奖状帧个数 | |
|---------------|-----------|-----|----------|------|-------|------|
| | 第2段 | 第5段 | 第5段 | 第6段 | 第6段 | 第7段 |
| 32个 | 312帧 | 98帧 | 225帧 | 363帧 | 396帧 | 502帧 |
| 64个 | 117帧 | 88帧 | 104帧 | 156帧 | 193帧 | 230帧 |
| 128个 | 77帧 | 73帧 | 71帧 | 75帧 | 108帧 | 105帧 |

图3为雅克-42飞机第2, 5段分帧结果的帧编号-数据编号走势图, 图中曲线为各帧最大数据编号的连线。曲线斜率较大处, 表明对应帧包含的距离像较多, 且该帧对应的较长数据段距离像的统计特性是稳定的; 反之, 曲线斜率较小处, 对应帧包含的距离像较少, 且距离像的统计特性在与该帧相邻的数据段内变化比较剧烈。相同数据段, 在初始每帧32, 64与128个距离像的情况下, 曲线长度虽然随着帧个数不同而不同, 但曲线在相同数据编号处的变化趋势(斜率)大致相同, 说明相关系数分帧法是按照实际距离像序列统计特性的变化进行分帧的。

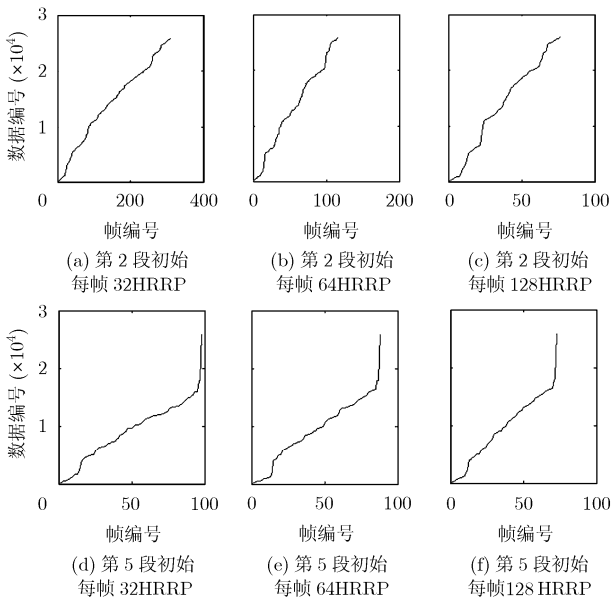


图3 雅克-42分帧结果的帧编号-数据编号走势图

图4为初始每帧128个距离像的各目标训练数据段分帧结果的帧编号-数据编号走势图。将各段走势图与图2的飞行轨迹比较, 可发现它们大致吻合。即当飞机相对雷达视线有

突然大角度转动, 对应帧包含较少距离像, 当飞机长时间相对雷达只作径向移动, 对应帧包含较多距离像。以雅克-42第5段为例, 飞行轨迹显示开始飞机相对雷达做较平和的转动, 轨迹图末端, 飞机相对雷达有一段较长径向运动; 帧编号-数据编号走势图则为近似的直线部分加上较长的一个拖尾, 直线部分与平和的转动吻合, 较长拖尾则与较长径向运动吻合。其他数据段分析类似, 在此不再赘述。

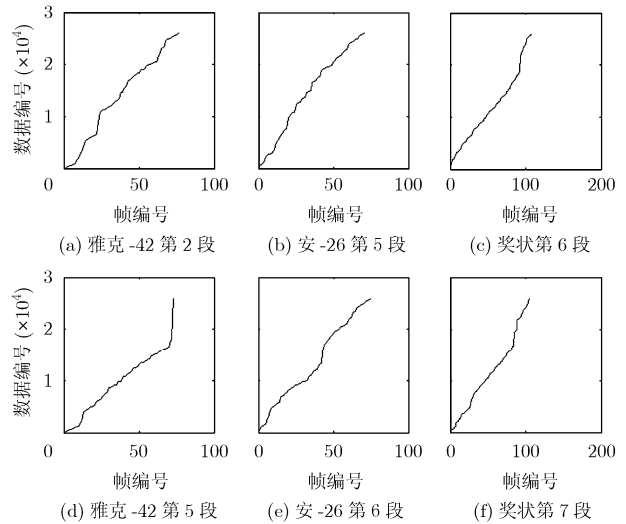


图4 各目标初始每帧128个距离像帧编号-数据编号走势图

3.2 识别结果

采用时域TMM^[3], 谱域最短距离分类器和谱域SVM分类器对相关系数分帧法和均匀分帧法^[11]的识别结果进行比较。均匀分帧法各训练数据段均分为25帧, 每帧1040个距离像。

3.2.1 时域TMM识别结果比较 设有s类目标, 所有目标帧个数之和为a。TMM分类器。训练过程: (1)对各帧距离像进行包络对齐; (2)求各帧归一化平均距离像; (3)以各帧归一化平均距离像为模板建立模板库 $Z_a = \{z_i = (\mu_i, b_i), i = 1, 2, \dots, a\}$, μ_i 为第i个模板, $b_i \in \{1, 2, \dots, s\}$ 为 μ_i 对应的目标类别号。测试过程: 对任一测试距离像幅度归一化得 x , 计算 x 与 μ_i 的最大滑动相关系数 ρ_i , 判决 x 属于 $\arg \max_{i=1, \dots, a} \rho_i$ 所决定的类。

表2为相关系数分帧法, 雅克-42与安-26初始每帧64个距离像, 奖状初始每帧128个距离像情况下与均匀分帧法采用TMM的识别结果比较, 前者比后者平均识别率提高了7.2533个百分点。另外, 相关系数分帧法, 初始每帧32和64个距离像采用TMM, 相比均匀分帧法采用TMM, 平均识别率分别提高了6.5867和6.0867个百分点。

3.2.2 谱域最短距离分类器识别结果比较 谱域最短距离分类器。训练过程: (1)对各帧距离像进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT); (2)归一化各距离像幅度谱; (3)

表 2 时域 TMM 方法的识别结果比较

| | 相关系数分帧法 | | | 均匀分帧法 | | |
|----------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 雅克-42 | 安-26 | 奖状 | 雅克-42 | 安-26 | 奖状 |
| 雅克-42 | 86.5 | 20.75 | 0.75 | 81.25 | 14.75 | 1.00 |
| 安-26 | 11.75 | 60.25 | 23.00 | 16.00 | 42.25 | 21.25 |
| 奖状 | 1.75 | 19.00 | 76.25 | 2.75 | 43.00 | 77.75 |
| 平均识别率(%) | 74.3333 | | | 67.08 | | |

以各帧平均归一化幅度谱为模板建立模板库 $U_a = \{u_i = (t_i, b_i), i = 1, 2, \dots, a\}$, t_i 为第 i 个模板, $b_i \in \{1, 2, \dots, s\}$ 为 t_i 对应的目标类别号。测试过程: 对任一测试距离像进行 FFT, 并对其幅度谱归一化得 x , 判决 x 属于 $\arg \min_{i=1, \dots, a} \|t_i - x\|$ 决定的类。

表 3 为相关系数分帧法, 3 类目标初始每帧 128 个距离像情况下与均匀分帧法采用谱域最短距离分类器的识别结果比较, 前者比后者平均识别率提高了 0.0833 个百分点。

表 3 谱域最短距离分类器的识别结果比较

| | 相关系数分帧法 初始每帧 128 个距离像 | | | 均匀分帧法 | | |
|----------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 雅克-42 | 安-26 | 奖状 | 雅克-42 | 安-26 | 奖状 |
| 雅克-42 | 97.50 | 20.25 | 0.75 | 98.25 | 23.25 | 2.75 |
| 安-26 | 2.25 | 57.00 | 13.50 | 1.75 | 61.25 | 16.75 |
| 奖状 | 0.25 | 22.75 | 85.75 | 0.00 | 15.50 | 80.50 |
| 平均识别率(%) | 80.0833 | | | 80.00 | | |

3.2.3 谱域 SVM 分类器识别结果比较 谱域 SVM 分类器。训练过程: 采用模板库 U_a 训练 one-against-all SVM 多分类器, SVM 子分类器个数等于目标个数 s 。测试过程: 对任一测试距离像进行 FFT, 并对其幅度谱归一化得 x , 判决 x 属于 $\arg \max_{i=1, \dots, s} (f_i(x))$ 决定的类, 其中 $f_i(x)$ 为第 i 个 SVM 子分类器对应的判别函数值。本文 SVM 分类器的核函数均采用径向基函数(Radial Basis Function, RBF)。

表 4 为相关系数分帧法, 3 类目标初始每帧 64 个距离像情况下与均匀分帧法采用 SVM 分类器的识别结果比较, 前者比后者平均识别率提高了 4.75 个百分点, 其中安-26 的识别率提高了 9.75 个百分点。此外, 相关系数分帧法, 雅克-42 与安-26 初始每帧 64 个距离像, 奖状初始每帧 128 个距离像与 3 类目标初始每帧均为 128 个距离像的情况下采用 SVM 分类器, 平均识别率分别比均匀分帧法采用 SVM 分类器提高了 3.25 和 3 个百分点。与最短距离分类器相比, SVM 分类器属于非线性分类器, 比较表 3 和表 4 可知, 相关系数分帧法相比均匀分帧法较大地提高了谱域 HRRP 帧间的非线性可分性。

表 4 谱域 SVM 分类器的识别结果比较

| | 相关系数分帧法 初始每帧 64 个距离像 | | | 均匀分帧法 | | |
|----------|-------------------------|-------|-------|---------|-------|-------|
| | 雅克-42 | 安-26 | 奖状 | 雅克-42 | 安-26 | 奖状 |
| 雅克-42 | 98.50 | 10.75 | 0.50 | 92.25 | 5.25 | 0 |
| 安-26 | 1.00 | 85.25 | 12.75 | 7.50 | 75.50 | 11.50 |
| 奖状 | 0.50 | 4.00 | 86.75 | 0.25 | 19.25 | 88.50 |
| 平均识别率(%) | 90.1667 | | | 85.4167 | | |

4 结束语

本文首先指出目前根据散射点模型的均匀分帧方法存在的若干问题, 进而提出一种基于相关系数的分帧方法。采用本文提出的方法对实测 3 类目标 6 段距离像序列进行分帧, 从对距离像统计特性变化的划分的准确性, 与实际飞行轨迹的符合以及识别率相比均匀分帧法的提高这 3 个方面证明了本文方法的有效性。

参考文献

- [1] Webb A R. Gamma mixture models for target recognition. *Pattern Recognition*, 2000, 33(12): 2045-2054.
- [2] Copey K and Webb A R. Bayesian Gamma mixture model approach to radar target recognition. *IEEE Trans. on AES*, 2003, 39(4): 1201-1217.
- [3] Jacobs S P and O'sullivan J A. Automatic target recognition using high-resolution radar range profiles. [Ph.D.], St. Louis: Washington University, 1999.
- [4] Van der Heiden R and Groen F C A. The box-cox metric for nearest neighbour classification improvement. *Pattern Recognition*, 1997, 30(2): 273-279.
- [5] Xing Mengdao and Bao Zheng. The properties of range profiles of aircraft. *Chinese Journal of Electronics*, 2002, 11(1): 1-6.
- [6] Rothwell E J, Cheng K M, and Nyquist D P. An adaptive-window-width short time Fourier transform for visualization of radar target substructure resonances. *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, 1998, 46(9): 1393-1395.
- [7] 廖学军. 基于高分辨距离像的雷达目标识别. [博士论文], 西安: 西安电子科技大学, 1999.
- [8] Liao Xue-jun. Radar target recognition base on high resolution range profiles. [Ph.D.], Xi'an: Xidian university, 1999.
- [9] Zyweck A and Bogner R E. Radar target classification of commercial aircraft. *IEEE Trans. on AES*, 1996, 32(2): 598-606.
- [9] 裴炳南. 高分辨雷达自动目标识别方法研究. [博士论文], 西安: 西安电子科技大学, 2002.
- Pei Bing-nan. Study of high resolution radar automatic target

- recognition method. [Ph.D.], Xi'an: Xidian university, 2002.
- [10] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术. 北京: 电子工业出版社, 2005: 19-45.
Bao Zheng, Xing Meng-dao, and Wang Tong. Radar Imaging Technique. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 19-45.
- [11] 杜兰, 刘宏伟, 保铮, 等. 一种利用目标雷达高分辨距离像幅度起伏特性的特征提取新方法[J]. 电子学报, 2005, 3(33): 411-415.
Du Lan, Liu Hong-wei, and Bao Zheng, *et al.* A new feature extraction method using the amplitude fluctuation property of target HRRPs for radar automatic target recognition. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 3(33): 411-415.
- 刘敬: 女, 1975年生, 博士生, 研究方向为高分辨雷达自动目标识别、机器学习和智能信息处理.
- 张军英: 女, 1961年生, 教授, 主要研究领域为生物信息处理、雷达自动目标识别、智能信息处理、模式识别.
- 杜兰: 女, 1980年生, 博士生, 研究方向为雷达目标识别、雷达成像和雷达信号处理理论.