

文章编号: 1001 - 2486(2003)04 - 0038 - 04

低分辨雷达基于波形特征的飞机架次判别方法*

张汉华, 王 伟, 姜卫东, 陈曾平

(国防科技大学 ATR 国家重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要:通过分析低分辨雷达飞机目标回波波形, 提取出低分辨雷达飞机目标架次可资分类的特征参数作为飞机目标架次判别的特征向量。最后, 采用模糊极大极小神经网络作为分类器, 在低分辨雷达目标识别样机系统对机群目标进行分类识别试验中, 验证了所提取特征的有效性。

关键词:低分辨雷达; 特征提取; 目标识别

中图分类号: TN957. 52 文献标识码: A

Classification of the Aircraft Formation for Low Resolution Radar Based on the Waveform Feature

ZHANG Han-hua, WANG Wei, JIANG Wei-dong, CHEN Zeng-ping

(ATR Lab, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: After analyzing the echo data of aircrafts based on low-resolution radar, this paper has defined and obtained some features of aircrafts as an input for classification by FMM neural networks. The results prove that the features are useful to identify the size and numbers of the aircrafts formation.

Key words: low resolution radar; feature extraction; target identification

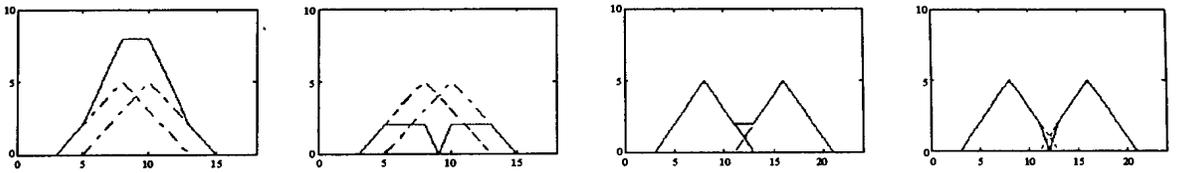
低分辨雷达自动目标识别一直是雷达目标识别研究领域的难点。特别是对非相参雷达, 由于回波之间缺少相位信息, 目前国内比较流行的基于 ISAR 思想的横向超分辨^[1, 2]和角度超分辨^[3-5]方法均无法应用。低分辨雷达测量可以用于目标分类识别的信息主要来自雷达的视频回波^[6-8]。

1 理想雷达飞机目标的架次判别

在理想雷达情况下, 雷达的径向距离分辨力只与发射信号频谱的模有关, 而与相角无关^[9]。设理想雷达发射一个持续时间为 T 的非调频矩形信号(其相关函数是以 $2T$ 为底的三角形)。当出现两个径向速度相同、径向距离相差 τ 的相同目标时, 雷达输出信号的包络如图 1 所示。在理想雷达情况下认为: $\tau > T$ (见图 1(c)、(d)), 可以分辨两个相同的信号(不管接收信号同相或反相, 都能获得两个最大值); $\tau < T$ (如图 1(a)、(b)), 无法分辨两个相同的信号^[9]。

在此, 我们考虑 $\tau < T$ 的情况。当接收信号同相, 有一个最大值区域; 当信号反相, 可获得两个最大值区域。如果噪声可以忽略不计, 若已知每个信号都是时间宽度为 $2T$ 的三角形, 在 $\tau < T$ 的情况下, 可以通过证实回波信号长度大于 $2T$, 就可以推断出在信号开始点再加上 T 时刻有一目标, 而在信号结束点减去 T 时刻有另一目标。在存在噪声的情况下, 虽然不能如上精确估计出目标的峰值位置, 但依据 Bayes 准则设定门限值, 回波信号长度大于该门限值, 判定存在两个以上的目标是可能的。另一方面, 编队飞行的两架飞机既要相互靠近(间距小于低分辨雷达分辨率), 又要避免碰撞(保持飞行的安全距离); 再加上飞机的偏航、横滚等因素影响, 回波信号径向距离差 τ 是时变的。在 $\tau < T$ 的情况下, τ 的变化可能使回波信号在多个回波中一会儿同相, 一会儿反相(即多个回波中交替出现图 1(a) 和图 1(b) 的情况), 在这种情况下, 可以判定飞机的架次; 大多数情况下, τ 的变化使回波信号在多个回波中的变化介

* 收稿日期: 2003-01-14
基金项目: 国家部委项目资助(4130304-01)
作者简介: 张汉华(1975-), 女, 博士生。



(a) $\tau < T$ 同相信号 (b) $\tau < T$ 反相信号 (c) $\tau > T$ 同相信号 (d) $\tau > T$ 反相信号
 (a) $\tau < T$ in-phase (b) $\tau < T$ quadrature-phase (c) $\tau > T$ in-phase (d) $\tau > T$ quadrature-phase

图1 当 $\tau < T$ 和 $\tau > T$ 以及两个目标的接收信号同相或反向时雷达输出信号的包络

Fig. 1 Identify two same targets under ideal condition

于完全同相和完全反相之间, 回波可能不会交替出现图 1(a) 和图 1(b) 的情况, 但由于回波信号的幅度值将周期性地起伏^[10] 或抖动, 目标的无线电波纹图^[7] 边缘将出现或深或浅的“疏齿”纹理, 在这种情况下, “疏齿”深度无疑也可作为判定飞机架次的一个有用特征。

2 低分辨雷达飞机目标的特征提取

低分辨雷达的回波波形中确实蕴含了可资分类识别(大小、架次)的特征信息^[7~9]。针对雷达飞机目标回波的具体波形情况定义了左右截点, 截取出与目标回波真实信息有关的有效数据, 去掉无用数据的干扰; 由于目标的大小和架次多少对回波的宽度有直接的影响, 定义了目标的回波展度和相对中心位置; 为了描述目标单个回波与多个回波波峰的抖动情况, 定义了峰顶平度、主峰的数目, 以及“疏齿”深度等。

定义 1 设复波形 $w_m(t)$ 的傅氏变换为 $W_m(v)$, 能量 $E_m = \int_{-\infty}^{\infty} |w_m(t)|^2 dt < \infty$, 则波形中心为

$$o_m = \frac{1}{E_m} \int_{-\infty}^{\infty} t |w_m(t)|^2 dt, \text{ 波形展度 } WE = 2 \sqrt{\frac{\pi}{E_m} \int_{-\infty}^{\infty} (t - o_m)^2 |w_m(t)|^2 dt}, \text{ 左截点 } \lambda_1 = o_m - WE/2; \text{ 右截点 } \lambda_2 = o_m + WE/2.$$

定义 2 设复波形 $w_m(t)$ 上点 $t = i$ 的值为 $p_i = w_m(i)$, 则复波形 $w_m[t]: p_i = w_m(i) \left(\lambda_1 \leq i \leq \lambda_2 \right)$ 为波形 $w_m(x)$ 的有效波形。

定义 3 设复波形 $w_k[t]: p_k = w_m(k) \left[\lambda_1 + \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{3} \leq k \leq \lambda_2 - \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{3} \right]$, 则 $w_k[t]$ 是有效波形 $w_m[t]$ 的子序列, δ^2 为波形 $w_k[t]$ 的标准方差, x 为波形 $w_k[t]$ 的均值, 有效波形 $w_m[t]$ 的峰顶平度 $CON = \delta/x$ (见图 2, x 轴为采样点数, y 轴为回波幅度大小)。

定义 4 设有效波形 $w_i[t]$ 模值最大的点的复数值为 p_i , 对回波有效波形组 $\{w_i[t]\}$, 按回波先后可以得到 $\{p_i\} (p(t))$ 。设 $p(t)$ 的傅氏变换为 $P(v)$, 能量 $E_p = \int_{-\infty}^{\infty} |p(t)|^2 dt < \infty$, 则中心频率为 $f_m =$

$$\frac{1}{E_p} \int_{-\infty}^{\infty} v |P(v)|^2 dv, \text{ 平均宽度 } B = 2 \sqrt{\frac{\pi}{E_p} \int_{-\infty}^{\infty} (v - f_m)^2 |P(v)|^2 dv}.$$

定义 5 设有效波形 $w_m[t]$ 包络的极大值和极小值序列为 $w_l[t]$ 和 $w_q[t]$ 。令 $p_l = \text{abs}(w_m(l)) \left(\lambda_1 < l < \lambda_2 \right)$, 则 $\xi_l = p_k[l_1, l_k]$ 代表波形 $w_l[t]$ 的下标序列; 令 $p_q = \text{abs}(w_m(q)) \left(\lambda_1 < q < \lambda_2 \right)$, 则 $\xi_q = h_v[q_1, q_w]$ 代表波形 $w_q[t]$ 的下标序列。且有 $q_1 < l_1 < q_2 < l_2 < \dots < q_w$ 组成下标为 $\xi = p[0, K]$ 的极值序列, 设 $\eta \in (0, 1)$, 若 $\inf(p_{2k+1} - p_{2k}, p_{2k+1} - p_{2k+2}) > p_j \times \eta$, 则主峰数值 p_{k++} (见图 3, x 轴为某次采集的回波样本数; y 轴为主峰数)。

定义 6 扫描有效波形组 $\{w_i[t]\}$, 点 $p_{i,j} = \text{abs}(w_i(j))$, 若 $p_{i,j} \in (z - \varepsilon, z + \varepsilon)$, 则标记 $p_{i,j}$, 按回波先后次序映射得到有效波形组的透析投影图(去掉全 0 的行与列, 见图 4, x 轴为采样点数; y 轴为回波

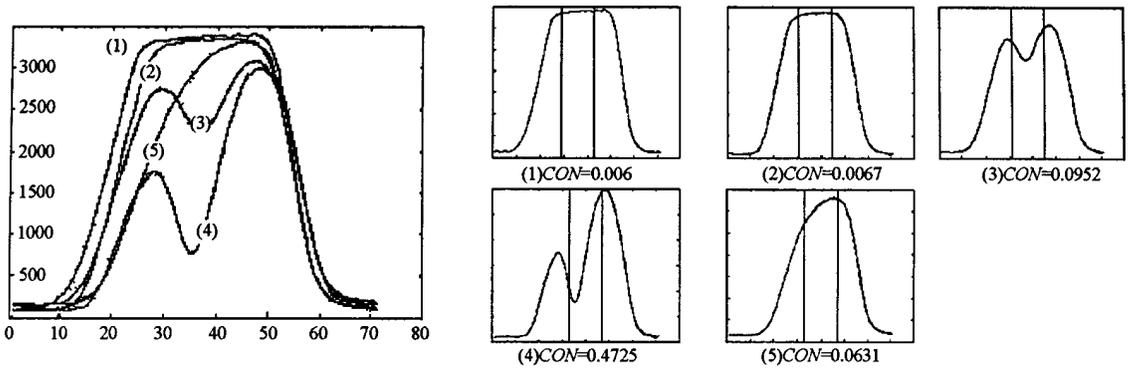
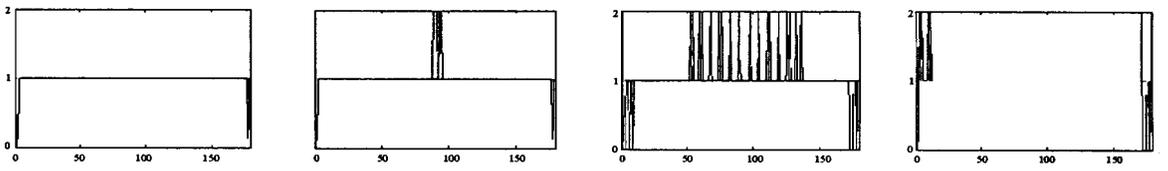


图 2 5 个典型波形的峰顶平度比较
Fig. 2 The value of CON for five typical waves

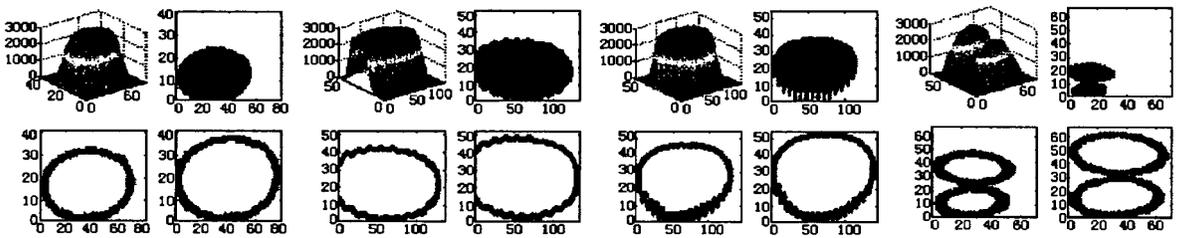


(a) 独立飞行的一架飞机 (a) an aircraft
(b) 编队飞行的两架飞机 (b) two aircrafts in formation
(c) 编队飞行的两架飞机 (c) two aircrafts in formation
(d) 各自飞行的两架飞机 (d) two independent aircrafts

图 3 四种不同情况下的回波组主峰值变化图

Fig. 3 The pk series under different aircrafts formation

样本数, z 轴为回波幅度大小)。图 4 各小图依次为有效波形组立体图, $Z = \Delta, Z = \Delta/2, Z = \Delta/5$ 的透析投影图, 其中 $\Delta = \text{median}(\{\max(w_i(t))\})$ 。



(a) 独立飞行的一架飞机 (a) an aircraft
(b) 编队飞机的两架飞机 (b) two aircrafts in formation
(c) 编队飞行的两架飞机 (c) two aircrafts in formation
(d) 各自飞行的两架飞机 (d) two independent aircrafts

图 4 四类目标数据回波透析投影图

Fig. 4 Perceive-projected image of four kinds of aircrafts formation

定义 7 提取透析投影图边缘“锯齿”纹理的轮廓, 设 $p_i = (x_i^p, y_i^p)$ 和 $p_j = (x_j^p, y_j^p)$ ($x_i^p \neq x_j^p$, 且 $x_i^p < x_j^p$) 为边缘轮廓 $\omega[x_1, x_N]$ 上任意两个峰点, $\xi_j = p[x_i^p, x_j^p]$ 是从 p_i 到 p_j 的峰点序列, 它是 $\omega[x_1, x_N]$ 的峰点序列 $p[x_1, x_N] = \{p_1, \dots, p_N\}$ 的子序列。 $\Psi_j = v[x_{i-1}^p, x_{j+1}^p]$, 若 $p_i = p_1$, 那么 $x_{i-1}^p = x_1$; 若 $p_i = p_N$, 那么 $x_{i+1}^p = x_N$ 。 Ψ_j 是 $\omega[x_1, x_N]$ 的谷点序列的子序列。如果 ξ_j 和 Ψ_j 均单调非减, 则主导“齿深” $ST_{ij} = \max_{v_l \in \Psi_j} \{ \|p_i - v_l\| \}$; 如果 ξ_j 和 Ψ_j 均单调非增, 则主导“齿深” $ST_{ij} = \max_{v_l \in \Psi_j} \{ \|p_j - v_l\| \}$ 。“疏齿”长度 $SW = \max(ST_{ij})$ 。

3 实测数据分类试验结果

3.1 识别方法

由于提取的目标回波特征会受到噪声的污染, 因此, 识别方法选用模糊极大极小神经网络^[11, 12]。FMM 是一种前馈式全局联接结构的人工神经网络^[13], 具有重新学习和自学习功能。图 5 是文献^[11, 12]中给出的超立方体模糊子集的并集构造模式分类空间的例子。构造 FMM 神经网络的起点是超立方体模糊子集: 属于某一类模式的所有超立方体模糊子集的并集, 就可以构成该类模式的分类空间, 具体表述为 $C_k = \bigcup_{j \in C_k} YB_j$ 。

3.2 识别结果

大量实测数据训练和分类的试验结果表明: 在四种类别(小飞机一架、小飞机两架、大飞机一架、大飞机两架)中进行编队飞行的飞机架次的判别, 两架飞机判为一架的误判率要高一些(见表 1)。这是因为编队密集的两架小飞机可以模拟一架大飞机的基本回波特性, 虽然从波形组中提取的动态特征可以很好地揭示它们之间的区别, 但噪声模糊了分类的边界。

表 1 基于 FMM 的波形特征分类识别结果

Tab. 1 The result of target formation classification by FMM neural networks

目标架数	正确识别率	误判率	平均识别率
单架	96.3%	3.7%	89.4%
两架	82.5%	17.5%	

总体说来, 由于 FMM 具有很强的复杂分类边界形成能力, 从回波波形组中提取的动态特征适当地减少了目标姿态变化对识别结果的影响, 基于 FMM 的波形特征分类识别具有较好的识别结果。另外, FMM 除了误判, 不会出现难以决断的情况, 有助于工程应用的稳定。

4 总结

低分辨雷达回波序列中含有判断飞机目标的架次的动态特征信息^[7~9]。在雷达不具备高分辨能力时, 通过对飞机目标回波波形的详细分析, 提取出回波中可资分类的动态特征信息, 通过神经网络的训练, 可以实现对编队飞机的架次进行粗略分类判别的功能。该方法已经应用于低分辨雷达目标识别样机系统中。

目标的编队情况是复杂的, 本文虽在特征提取时考虑了飞机编队为四、六、八等多架或一大两小、两大两小等混合情况, 由于在试验中未录取到一批多架次这样的目标数据, 因此, 还需在以后试验中做进一步验证。

(下转第 52 页)

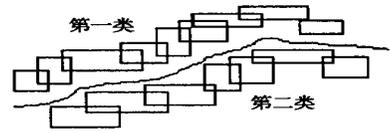


图 5 超立方体模糊子集的并集构造模式分类空间(二维)

Fig. 5 Example of target classification by FMM(2D)

(9) 的杂波视频信号调制 DDS 输出的载带中频信号。这种结构具有一定的通用性,不但可以模拟常规脉冲雷达杂波、相位编码雷达杂波,而且还可以模拟其他脉冲压缩信号的杂波。

5 结论

对相位编码脉冲压缩雷达杂波进行建模与仿真,是现代雷达杂波模拟的重要课题之一。相比常规脉冲雷达杂波模型,相位编码脉冲压缩雷达杂波进行建模应该充分考虑码元的叠加效应影响。根据对杂波数据进行统计性分析,相位编码脉冲压缩雷达杂波的分布函数和常规脉冲雷达杂波的分布函数相同,而分布参数有所不同。相位编码脉冲压缩雷达杂波的功率谱和常规脉冲雷达杂波的功率谱函数相同。脉冲重复周期内的距离波门回波信号的相关性增强,必须考虑空间相关的杂波统计性模型。上述结论为杂波仿真方法及其系统实现提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 雷达系统编写组. 雷达系统[M]. 北京:国防工业出版社,1980.
- [2] 米切尔 R.L. 雷达系统模拟[M]. 陈训达,译. 北京:科学出版社,1982.
- [3] 张志勇,等. X 波段伪码调连续波雷达地杂波分布特性仿真与分析[J]. 电子学报,1999,27(3):70-73.
- [4] 王国玉. 电子系统建模仿真与评估[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1999.
- [5] Marier Jr L J. Correlated K. Distributed Clutter Generation for Radar Detection and Track[J]. IEEE Trans. AES, 1995, 31(4): 568-580.

(上接第41页)

参考文献:

- [1] 邢孟道,保铮. 低分辨雷达的一维横向成像及提高分辨率的方法[J]. 西安电子科技大学学报,2000,27(6).
- [2] 张兴敢,朱兆达. 用 ISAR 横向动态一维像分辨编队飞机架数[C]. 863-308 主题十周年汇报——逆合成孔径雷达论文集,1996(3).
- [3] 王盛利,朱力,倪晋麟,张光义. 利用频谱相位信息进行角度超分辨的研究与实验[J]. 电子学报,2000(6).
- [4] 何子述,黄振兴,向敬成. 米波雷达方位角超分辨外场实验研究[J]. 电子科技大学学报,2000,29(2).
- [5] 单荣光,朱力,李士国. 米波雷达分辨飞机架次的试验研究[C]. 863-308 主题十周年汇报——逆合成孔径雷达论文集,1996.
- [6] Yu W X, Guo G R. Target Detection and Recognition Based on Dynamic Processing Techniques[J]. NAECON-92, U.S.A.
- [7] Nebabin V G. Methods and Techniques of Radar Recognition[M]. English Translation Edited by David K. Barton, Artech House, 1995.
- [8] 郁文贤. 舰船雷达目标识别的智能化方法研究[D]. 国防科技大学论文,1992.
- [9] [法] 卡尔庞蒂埃,Michel H. 现代雷达基础[M]. 吴明德,胡朝阳,译. 北京:电子工业出版社,1987.
- [10] Wehner D R. High Resolution Radar[M]. 2nd edition. Artech House. Artech House Inc. Norwood, MA 02062, USA. 1995.
- [11] 孙真真,陈曾平,庄钊文. 基于模糊极大-极小神经网络的雷达目标识别方法研究[J]. 现代雷达,1998,20(6).
- [12] Sun Z Z, Chen Z P, Zhuang Z W. Radar Target Identification of Aircraft Using Structural Features by FMM Neural Networks[J]. NAECON 97, Dayton, Ohio, 1997.
- [13] Simpson P. Fuzzy Min-max Neural Networks—Part 1: Classification[J]. IEEE Trans. Neural Networks, 1992(3).