

文章编号: 1001-0920(2011)07-1036-05

基于灰色系统的雷达目标高分辨距离像识别

肖永生^{1a,2}, 周建江^{1a}, 刘思峰^{1b}, 张可^{1b}, 刘伟强^{1a}

(1. 南京航空航天大学 a. 信息科学与技术学院, b. 经济与管理学院, 南京 210016; 2. 南昌航空大学信息工程学院, 南昌 330063)

摘要: 雷达目标高分辨距离像(HRRP)提供了目标散射点沿雷达视线方向(LOS)的分布情况, 针对这一特性, 结合灰色系统关联度模型的特点, 提出了基于灰色系统理论的雷达目标高分辨距离像识别方法. 通过对 5 种飞机目标高分辨距离像的仿真实验验证了所提出方法的可行性和有效性.

关键词: 灰色系统; 灰色关联分析; 雷达自动目标识别; 高分辨距离像

中图分类号: TN959

文献标识码: A

Radar target recognition by high-resolution range profile based on gray system

XIAO Yong-sheng^{1a,2}, ZHOU Jian-jiang^{1a}, LIU Si-feng^{1b}, ZHANG Ke^{1b}, LIU Wei-qiang^{1a}

(1a. College of Information Science and Technology, 1b. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China. Correspondent: XIAO Yong-sheng, E-mail: xysfly@nuaa.edu.cn)

Abstract: High-resolution range profile(HRRP) of a radar target offers the distribution of scatter points along the radar line of sight(LOS). Combining the characteristic of gray relational grade models, an HRRP recognition approach based on gray system is proposed. Simulations results based on the HRRP dataset of five aircraft models show the effectiveness and feasibility of the proposed approach.

Key words: grey system; grey relational analysis; radar automatic target recognition; high-resolution range profile

1 引言

雷达自动目标识别(RATR)是指雷达发射信号获取目标的回波信息, 利用已有的目标先验知识判断未知目标的类别^[1]. 高分辨距离像(HRRP)是高分辨雷达发射宽带雷达信号获取目标沿雷达视线散射点子回波投影的向量和的幅值, 是目标的重要结构特征, 由于其易于获取和进行处理, 已成为雷达自动目标识别领域的研究热点^[2-6]. 当采用的雷达信号体制不同时, 所获得的目标的特征数据也不同. 按雷达信号体制划分, 雷达目标识别可大致分为低频区、谐振区和光学区(高频区)的目标识别. 现代雷达一般都工作在光学区, 人们常用散射中心模型描述目标电磁散射特性. 根据该模型, 当目标姿态角发生变化时, 部分散射中心会从一个距离单元移动到另一个距离单元, 发生散射中心越距离单元走动(HTRC), 目标 HRRP 随之剧烈变化. 雷达目标 HRRP 对姿态敏感, 因此需要大

量的模板数据对目标进行描述. 对于不同目标, 这些模板数据在空间中的分布表现出高度的非线性可分性^[6], 增加了识别的难度.

自从 1982 年邓聚龙教授提出灰色系统理论以来^[7], 灰色系统理论便得到迅速发展, 尤其是在众多科学领域中的成功应用, 赢得了国内外学者的广泛关注和肯定. 灰色关联分析是灰色系统理论的重要分支, 其基本思想是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密. 曲线越相似, 相应序列之间的关联度越大, 反之则越小^[8]. 目前广泛应用的关联度模型有邓聚龙教授提出的邓氏关联度^[8-9], 该关联度利用序列的位移差来反映序列之间的发展过程和量级的相近性; 刘思峰等人提出的灰色绝对关联度、灰色相对关联度和灰色综合关联度等, 主要是根据序列的相似程度来计算序列间的关联程度^[10]; 王清印提出的 B 型关联度^[11], 主要根据序列发展过程的相

收稿日期: 2010-04-16; 修回日期: 2010-07-02.

基金项目: 国家软科学研究计划重点项目(2008GXSS5D115); 江苏省研究生创新基金项目(CX09B-081Z).

作者简介: 肖永生(1980-), 男, 博士生, 从事雷达信号处理、雷达目标识别的研究; 周建江(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 从事雷达信号处理、目标识别和目标特性分析等研究.

近性和相似性, 综合考虑序列总体位移差、速度、加速度等因素构建关联度; 党耀国等人提出的灰色斜率关联度, 用序列折线斜率的接近程度表示序列之间的关联程度等^[12].

本文结合雷达目标 HRRP 的空间分布所对应的物理特性以及灰色关联分析理论的关联度模型的具体意义, 提出了基于灰色系统理论的雷达目标 HRRP 识别. 首先介绍 HRRP 的研究现状和灰色关联分析的发展背景, 以及 HRRP 的特性; 然后结合 HRRP 特性提出基于灰色系统理论的雷达目标 HRRP 识别方法; 最后以仿真实验验证了所提出方法的可行性和有效性.

2 HRRP 特性

雷达工作在光学区, 即雷达发射宽带信号波长远小于目标尺寸时, 目标模型为反映目标结构特性的相互独立的散射点集合. 在一定雷达视角 (LOS), 雷达发射信号被各散射点延时和幅度调制后形成相应的散射点子回波, 目标回波即为这些散射点子回波的矢量和. 目标回波可表示为雷达中心频率 f 的函数, 即

$$\psi(f) = \sum_{k=1}^N a_k \exp\left(j \frac{2\pi f}{c} d_k\right) = \sum_{k=1}^N a_k \exp(j2\pi f t_k). \quad (1)$$

其中: j 表示虚数符号; N 为目标的散射点总数; a_k 为对应第 k 个散射点的强度, 对第 k 个各向同性的非色散点目标而言, a_k 为常数; c 为电磁波传播速度; d_k 为第 k 个散射点到雷达的径向距离, d_k 对应第 k 个散射点的波达时间. 当雷达系统的带宽为 B 时, 雷达距离分辨率为 $\Delta d = c/2B$. 距离分辨率与发射信号的带宽成反比. 对于宽带雷达而言, 雷达发射信号带宽大, 距离分辨率高, 此时目标在雷达视线上被分割成宽度为 Δd 的距离单元, 各单元内的回波幅度等于该单元内所有散射点的回波矢量和. 目标第 i 个距离单元的信号回波可表示为

$$x(i) = \psi_i(f) = \sum_{k=1}^{N_i} a_{ik} \exp(j2\pi f t_{ik}) = I(i) + jQ(i). \quad (2)$$

其中: N_i 为该距离单元内目标的散射点总数, a_{ik} 为该单元内第 k 个散射点的散射强度, t_{ik} 为该单元内第 k 个散射点的波达时间^[13-14]. 在雷达目标 HRRP 识别中, 一般取复距离像的模

$$X = [|x(1)|, \dots, |x(d)|]^T = [\sqrt{I(1)^2 + Q(1)^2}, \dots, \sqrt{I(d)^2 + Q(d)^2}]^T, \quad (3)$$

其中 d 表示距离单元数, 即 HRRP 的像点个数或向量维数.

HRRP 反映了在一定雷达视角上目标散射点的散射强度沿雷达视线的分布情况, 即散射点的几何关系, 提供了目标结构特征信息, 包括散射中心位置、回波强度、散射中心的个数等, 这是进行雷达目标 HRRP 识别的物理基础, 如图 1 所示. 当雷达视角变化时, HRRP 会随之变化. 当然, 对于不同的目标, 由于散射点分布不相同, 所得到的 HRRP 也不相同, 如图 2 所示.

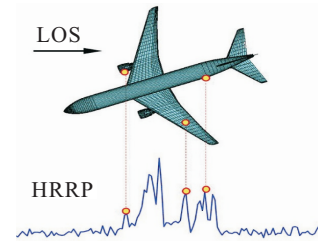
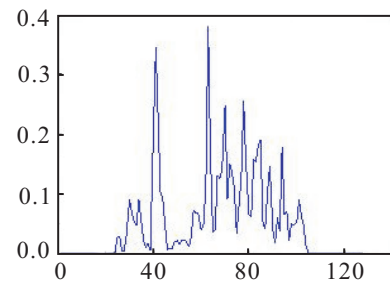
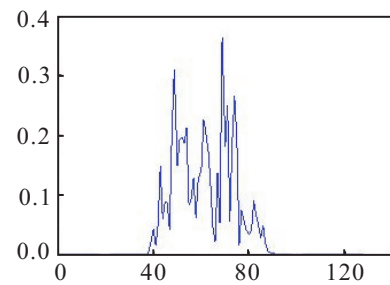


图 1 目标的 HRRP 与散射点的关系示意图



(a) 飞机 A 在 LOS30° 方向上的 HRRP



(b) 飞机 B 在 LOS30° 方向上的 HRRP

图 2 飞机 A 和 B 在相同姿态下, 相同的 LOS 方向上得到的 HRRP

本文中的 HRRP 是一个 128 维的序列, 对应沿 LOS 方向目标在每个距离分辨单元内的 RCS 的大小, 共 128 个分辨单元. 每个分辨单元内 RCS 的大小, 由单元内散射点反射雷达信号的回波进行矢量和计算得到. 雷达照射目标, 目标散射点不发生 MTRC 时, 若干次照射目标得到的 HRRP 在相互连接的分辨单元内的分量曲线的对比如图 3 所示, HRRP 的变化很小, 不能反映目标结构特征的变化; 雷达照射目标, 目标散射点发生 MTRC 时若干次照射目标得到的 HRRP, 在相互连接的分辨单元内的分量曲线的对比如图 4 所示, HRRP 的变化明显反映了目标结构特征的变化. 这是本文应用灰色系统理论的基础.

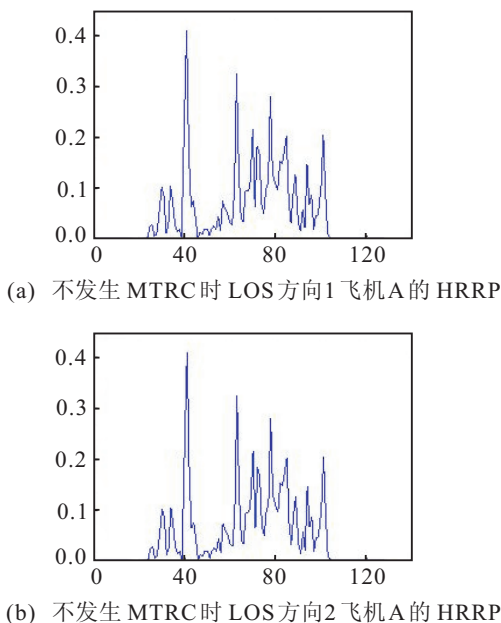


图 3 同一目标散射点不发生 MTRC 情况下 2 次照射得到的 HRRP

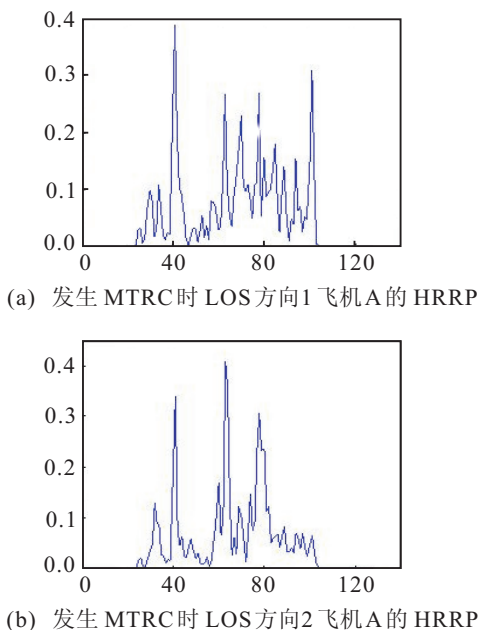


图 4 对同一目标散射点发生 MTRC 情况下 2 次照射得到的 HRRP

3 基于灰色系统的雷达目标 HRRP 识别

灰色系统理论中的灰色关联度分析法是一种新的因素分析方法,依据各因素数列曲线形状的接近程度进行发展态势的分析.当所刻划因素的变量之间所对应的曲线几何形状越接近,即因素发展变化态势越接近时,认为它们之间的关联程度越大.灰色关联度是事物之间、因素之间关联性的量度,是灰色关联分析的基础和工具.本文采用几种常用的关联度模型,即邓氏关联度、斜率关联度以及 B 型关联度等^[15].

结合雷达目标 HRRP 识别的具体应用,将 $H_0 = (h_0(1), h_0(2), \dots, h_0(n))$ 设为目标模板样本,而

$$\begin{aligned} H_1 &= (h_1(1), h_1(2), \dots, h_1(n)), \\ H_2 &= (h_2(1), h_2(2), \dots, h_2(n)), \\ &\vdots \\ H_m &= (h_m(1), h_m(2), \dots, h_m(n)) \end{aligned}$$

为待识别样本, $n = 128$.

邓氏关联度模型如下:

$$\gamma(H_0, H_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma(h_0(k), h_i(k)). \quad (4)$$

其中

$$\gamma(h_0(k), h_i(k)) = \frac{\min_i \min_k |h_0(k) - h_i(k)| + \rho \max_i \max_k |h_0(k) - h_i(k)|}{|h_0(k) - h_i(k)| + \rho \max_i \max_k |h_0(k) - h_i(k)|},$$

分辨系数 $\rho \in [0, 1]$, $|h_0(k) - h_i(k)|$ 为模板样本与待识别样本的绝对差值, $\max_i \max_k |h_0(k) - h_i(k)|$ 为分量的最大差值, $\min_i \min_k |h_0(k) - h_i(k)|$ 为分量的最小差值. 对各待识别样本和模板样本的关联度从大到小排序, 关联度越大, 说明待识别样本与模板样本的平均距离越小.

斜率关联度模型如下:

$$\gamma(H_0, H_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n \gamma_i(k). \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} \gamma_i(k) &= \frac{1 + \left| \frac{\Delta h_0(k)}{\bar{h}_0} \right|}{1 + \left| \frac{\Delta h_0(k)}{\bar{h}_0} \right| + \left| \frac{\Delta h_0(k)}{\bar{h}_0} - \frac{\Delta h_i(k)}{\bar{h}_i} \right|}; \\ \bar{h}_0 &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n h_0(k), \quad \Delta h_0(k) = h_0(k+1) - h_0(k); \\ \bar{h}_i &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n h_i(k), \quad \Delta h_i(k) = h_i(k+1) - h_i(k); \end{aligned}$$

$\gamma_i(k)$ 是灰色斜率关联系数, 反映了模板样本曲线和待识别样本曲线在某一分辨单元的变化率的一致程度; $\gamma(h_0, h_i)$ 是灰色斜率关联度, 是整个分辨单元上灰色斜率关联系数的平均值. 利用斜率距离计算样本相似性程度具有许多显著优点, 如对于数据的大小不敏感, 更强调曲线形状的相似性, 物理概念更为明确.

B 型关联度模型如下:

$$\gamma(H_0, H_i) = \frac{1}{1 + \frac{1}{n} d_{0i}^{(0)} + \frac{1}{n-1} d_{0i}^{(1)} + \frac{1}{n-2} d_{0i}^{(2)}}. \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} d_{0i}^{(0)} &= \sum_{k=1}^n d_{0i}^{(0)}(k) = \sum_{k=1}^n |h_0(k) - h_i(k)|, \\ d_{0i}^{(1)} &= \sum_{k=1}^n d_{0i}^{(1)}(k) = \end{aligned}$$

$$\sum_{k=1}^n |h_0(k+1) - h_i(k+1) - h_0(k) + h_i(k)|,$$

$$d_{0i}^{(2)} = \sum_{k=1}^n d_{0i}^{(2)}(k) =$$

$$\sum_{k=1}^n [|h_0(k+1) - h_i(k+1)] -$$

$$2[h_0(k) - h_i(k)] + [h_0(k-1) - h_i(k-1)];$$

$d_{0i}^{(0)}$ 描述相似性的物理特征位移差, $d_{0i}^{(1)}$ 描述相似性的物理特征速度差(一阶斜率差), $d_{0i}^{(2)}$ 描述相似性的物理特征加速度差(二阶斜率差). 即使目标之间的 HRRP 样本曲线不尽相似, 如果在每一分辨单元 HRRP 的差别都不大, 则说明样本之间关系密切; 反之, 说明关系不密切. 将这一性质称为 HRRP 在分辨单元内发展趋势的相近性. 描述相近性的物理特征是位移差, 描述相似性的物理特征是速度差和加速度差. 在某个分辨单元的位移差越小, 说明两样本曲线在此分辨单元的相近程度越大. 同样, 在某分辨单元两函数的一阶斜率差越小, 说明样本曲线在此分辨单元的相似程度越大, 其发展速度越趋于相同. 当两样本曲线的二阶斜率差越小时, 说明两样本曲线在此分辨单元的发展加速度越趋于相同.

4 仿真实验

4.1 目标 HRRP 数据的准备过程

雷达目标回波数据的获得与带宽、载波、俯仰角、目标速度以及高分辨距离像生成方法都有关^[16]. 本文的实验数据是由南京航空航天大学目标特性研究中心提供的 5 种战斗机 (Su 27, F 16, M 2000, J 8 II 和 J 6) 全方位角转台仿真数据, 雷达发射信号带宽为 512 MHz. 这些数据都经过幅度归一化和类内对准的预处理, 用以解决 HRRP 的幅值敏感性和时移敏感性问题^[17]. 所选实验数据中, 每种飞机包含 720 幅 HRRP, 每幅 HRRP 包含 128 个距离分辨单元, 飞机俯仰角变化范围在 3° 以内. 实验时, 每种飞机随机或按某个规律 (如等间隔) 选取一半距离像作为训练数据, 大致包含各种方位角情况, 其余作为测试数据.

4.2 实验过程

1) 确定目标模板样本

对于预处理后的雷达目标 HRRP 数据, 为了防止发生散射点 MTRC, 方位角采用每 3° 为一个模板, 在每一模板内等间隔 (每隔 4 个 HRRP 选取一个) 抽取一定数量的样本数据. 对样本数据进行聚类, 得到此模板的聚类中心, 即目标模板样本. 本文每个目标每一模板内抽取 90 个 HRRP 数据, 进行聚类得到 $180^\circ/30^\circ = 60$ 个模板样本, 5 个目标共有 300 个模板样本.

2) 计算测试样本与模板样本关联度

选取测试数据时, 必须保证确定目标模板样本时所用的数据不能再作为测试数据. 根据邓氏关联度、斜率关联度以及 B 型关联度的 3 种灰色关联度量模型, 将测试样本数据和目标模板样本代入式 (4)~(6), 计算出它们的灰色关联度. 灰色关联度的大小反映了待识别样本与模板样本之间的距离尺度. 对于邓氏关联度而言, 灰色关联度表明了待识别样本与模板样本的平均距离; 对于斜率关联度而言, 灰色关联度说明了待识别样本与模板样本的相似程度; 对 B 型关联度模型而言, 灰色关联度综合反映了待识别样本与模板样本的接近程度和相似程度. 本文中每一模板内取出 60 个测试数据, 每个目标共有 $60 \times 60 = 3600$ 个测试样本, 计算每一目标在这 3600 个测试数据与由式 (1) 得到的 5 个目标 300 个模板样本的灰色关联度.

3) 确定测试样本分类

由上一步骤可得到每一测试样本与所有的目标模板样本的关联度, 比较它们的大小, 取最大关联度确定测试样本的分类, 输出目标识别结果以及识别率和平均识别率. 计算目标的每一个测试样本与 5 个目标共 300 个模板样本的灰色关联度, 根据灰色关联度大小, 取最大值, 确定测试样本属于哪一个目标, 统计出每个目标由识别判决出的测试样本总数, 除以每个目标所抽取的测试样本总数, 得到识别率和平均识别率, 即

$$k = \frac{\text{num}}{N_{\text{total}}}. \tag{7}$$

其中: k 为某一目标识别率; num 为识别判断出的属于某一目标的测试样本总数; N_{total} 为目标抽取的样本总数, $N_{\text{total}} = 3600$.

4.3 实验结果与分析

雷达目标识别的研究对象一般是对空目标 (飞机等各种飞行器), 回波数据信噪比一般都比较高 (18~25 dB), 文中信噪比假设为 20 dB. 表 1 是运用邓氏关联度、斜率关联度和 B 型关联度 3 类模型的识别结果以及常用的 TMM 方法的识别结果^[18]. 仿真实验中, 邓氏关联度的分辨系数一般按最少信息原理取 $\rho = 0.5$. 由仿真实验结果可以看出, 将邓氏关联度、斜率关联度以及 B 型关联度 3 类模型应用于雷达目标识别, 识别率达到 80% 以上.

表 1 邓氏关联度、斜率关联度、B 型关联度以及 TMM 的识别结果 %

	邓氏关联度	斜率关联度	B 型关联度	TMM 方法
Su 27	85.833 3	88.25	93.444 4	92.944 4
F 16	80.583 3	84.861 1	82.611 1	80.138 9
M 2000	84.527 8	83	90.138 9	89.305 6
J 8 II	76.361 1	75.194 4	82.944 4	81.111 1
J 6	87.222 2	77.805 6	86.083 3	80.888 9
平均识别率	82.905 6	81.822 2	87.044 4	84.877 8

B型关联度模型相对其他两种关联度模型具有更好的识别效果,因为B型关联度模型兼顾考虑了模板样本曲线与待识别样本曲线的相近性和相似性.同时,B型关联度模型相对TMM(the template matching method)方法而言,也具有更好的识别效果.

5 结 论

本文从雷达目标HRRP所反映的目标结构特性出发,结合灰色系统的灰色关联度模型,提出一种基于灰色系统理论的雷达目标HRRP识别方法.该方法具有物理意义明确、计算简单以及操作方便等特点.最后通过5种飞机目标HRRP的仿真实验结果验证了所提出方法的可行性和有效性.

参考文献(References)

- [1] Ksienski A A, Lin Y T. Optimum frequencies for aircraft classification[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1981, 17(5): 75-83.
- [2] Zhang X D, Shi Y, Bao Z. A new feature vector using selected bispectra for signal classification with application in radar target recognition[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2001, 49(9): 1875-1885.
- [3] Du L, Liu H W, Bao Z, et al. Radar automatic target recognition using complex high-resolution range profiles[J]. IET Radar Sonar and Navigation, 2007, 1(1): 18-26.
- [4] 刘敬,张军英,赵峰.基于SVM与非参数LDA的雷达自动目标识别[J].控制与决策,2007,22(11):1250-1254.
(Liu J, Zhang J Y, Zhao F. Radar automatic target recognition based on SVM and nonparametric LDA[J]. Control and Decision, 2007, 22(11): 1250-1254.)
- [5] Chen B, Liu H W, Bao Z, et al. A kernel optimization algorithm based on fusion kernel for high-resolution range profiles recognition[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(6): 1146-1151.
- [6] Xing M D, Bao Z, Pei B N. Properties of high-resolution range profiles[J]. Optical Engineering, 2002, 41(2): 493-504.
- [7] 邓聚龙.灰色控制系统[J].华中工学院学报,1982,10(3):9-18.
(Deng J L. The grey control system[J]. J of Huazhong University of Science and Technology, 1982, 10(3): 9-18.)
- [8] 邓聚龙.灰色系统论文集[M].武汉:华中理工大学出版社,1989.
(Deng J L. The grey system symposium[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1989.)
- [9] 刘新梅,徐润芳,张若勇.邓氏灰色关联分析的应用模型[J].统计与决策,2008,20(10):23-25.
(Liu X M, Xu R F, Zhang R Y. The application model of Deng grey relational analysis[J]. Statistics and Decision, 2008, 20(10): 23-25.)
- [10] Liu S F, Lin Y. Grey information theory and practical applications[M]. London: Springer-Verlag, 2006.
- [11] 王清印.灰色B型关联分析[J].华中理工大学学报,1987,17(6):77-82.
(Wang Q Y. The grey relational analysis of B-mode[J]. J of Huazhong University of Science and Technology, 1987, 17(6): 77-82.)
- [12] 党耀国,刘思峰,刘斌,等.灰色斜率关联度的改进[J].中国工程科学,2004,6(3):41-44.
(Dang Y G, Liu S F, Liu B, et al. Improvement on degree of grey slope incidence[J]. Engineering Science, 2004, 6(3): 41-44.)
- [13] 陈渤.基于核方法的雷达高分辨距离像目标识别技术研究[D].西安:西安电子科技大学电子信息工程学院,2008:116-118.
(Chen B. Radar HRRP target recognition based on kernel methods[D]. Xi'an: College of Electronic and Information Engineering, Xidian University, 2008: 116-118.)
- [14] 杜兰.雷达高分辨距离像目标识别方法研究[D].西安:西安电子科技大学电子信息工程学院,2007:38-42.
(Du L. Study on radar HRRP target recognition[D]. Xi'an: College of Electronic and Information Engineering, Xidian University, 2007: 38-42.)
- [15] 黄培康,殷红成,许小剑.雷达目标特性[M].北京:电子工业出版社,2005.
(Huang P K, Yin H C, Xu X J. Radar target characteristics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.)
- [16] 谢乃明.灰色系统建模技术研究[D].南京:南京航空航天大学经济与管理学院,2008:85-88.
(Xie N M. Research on the methods of grey systems modeling[D]. Nanjing: College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008: 85-88.)
- [17] Du L, Liu H W, Bao Z, et al. A two-dimensional compounded statistical model for radar HRRP target recognition[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2006, 54(6): 2226-2238.
- [18] 杜兰,保铮,刘宏伟.高分辨距离像雷达自动目标识别的模板匹配问题[C].第九届全国雷达学术年会论文集.北京:国防工业出版社,2004:509-512.
(Du L, Bao Z, Liu H W. Study of template matching method for radar automatic target recognition using high-resolution range profiles[C]. The 9th National Symposium on Radar. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 509-512.)