

7-3-2020

## Method for Modulation Recognition of Radar Signals in Complex Environment

Jiang Li

*1. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;;2. School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;*

Guoqing Zhao

*1. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;;*

Li Lin

*1. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Method for Modulation Recognition of Radar Signals in Complex Environment

### Abstract

**Abstract:** As the increasing application of intra-pulse modulations, modulation recognition of radar signals becomes difficult in radar reconnaissance systems. Usually, there are multipath interferences along with the intercepted signal. The conventional methods become slowdown because of the multipath interferences. Aiming at radar signals in multipath channel, *a feature extraction method was proposed based on higher order ambiguity function (AF) and singular vector decomposition, adopting the linear support vector machine (SVM) classifier to determine the types of the intercepted radar signals.* Theoretical analysis and simulation results show that the proposed method has good ability to suppress the influence of multipath interferences and good accurate rate at low signal to noise ratios.

### Keywords

radar signal, modulation recognition, multipath channel, higher order time-frequency distribution

### Recommended Citation

Jiang Li, Zhao Guoqing, Li Lin. Method for Modulation Recognition of Radar Signals in Complex Environment[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(5): 997-1002.

## 一种多径环境下的雷达信号脉内调制分类方法

江莉<sup>1,2</sup>, 赵国庆<sup>1</sup>, 李林<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学工程学院, 西安 710071; 2. 西安建筑科技大学信息与控制工程学院, 西安 710055)

**摘要:** 随着新体制雷达及复杂脉内调制方式的广泛应用, 雷达信号调制分类与识别逐渐成为雷达侦察系统中的关键问题。通常截获信号总是存在多径干扰, 导致现有调制分类算法的性能急剧下降。针对多径环境下复杂脉内调制雷达信号, 研究了多径信号在模糊平面的特点, 提出了一种基于高阶模糊函数与奇异值分解的特征提取方法, 利用线性SVM(Support Vector Machine)分类器对不同类型的雷达信号进行调制分类。理论分析与仿真实验表明, 提出的方法能够较好地抑制多径干扰的影响, 在低信噪比环境下具有较高的识别率。

**关键词:** 雷达信号; 调制分类; 多径环境; 高阶时频分布

中图分类号: TN971 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 05-0997-06

## Method for Modulation Recognition of Radar Signals in Complex Environment

Jiang Li<sup>1,2</sup>, Zhao Guoqing<sup>1</sup>, Li Lin<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** As the increasing application of intra-pulse modulations, modulation recognition of radar signals becomes difficult in radar reconnaissance systems. Usually, there are multipath interferences along with the intercepted signal. The conventional methods become slowdown because of the multipath interferences. Aiming at radar signals in multipath channel, a feature extraction method was proposed based on higher order ambiguity function (AF) and singular vector decomposition, adopting the linear support vector machine (SVM) classifier to determine the types of the intercepted radar signals. Theoretical analysis and simulation results show that the proposed method has good ability to suppress the influence of multipath interferences and good accurate rate at low signal to noise ratios.

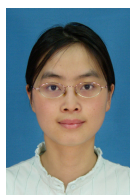
**Keywords:** radar signal; modulation recognition; multipath channel; higher order time-frequency distribution

## 引言

现代电子战中, 电子侦察系统需要对截获信号进行参数提取和分析, 以获取敌方雷达辐射源的情报信息。随着新体制雷达及低截获概率信号的广泛

应用, 仅通过经典的五参数对雷达信号进行描述变得愈加困难。同时, 雷达信号的脉内调制方式越来越复杂多变, 对信号参数提取和分析带来了较大的困难。信号调制类型是侦察截获信号的一个重要参数, 国内外学者已经提出了很多雷达信号调制分类的算法<sup>[1-3]</sup>。

调制识别算法可以分为决策理论和模式识别两类。决策理论的方法利用输入特征向量的统计特征对感兴趣的调制类型进行判别, 通常采用一种分级的识别框架<sup>[4]</sup>, 缺乏模型失配时必要的鲁棒性。



收稿日期: 2014-12-30 修回日期: 2015-03-04;  
基金项目: 国家自然科学基金(61201287); 中央高校基本科研业务费(JB140208);  
作者简介: 江莉(1982-), 女, 陕西商洛, 博士生, 研究方向为智能信号处理; 赵国庆(1953-), 男, 上海, 硕士, 教授, 研究方向为电子战信息处理。

<http://www.china-simulation.com>

模式识别方法一般包括特征提取和分类器设计。目前已有众多特征提取方法应用到调制识别中,提取的信号特征包括瞬时特征<sup>[5]</sup>、高阶统计量<sup>[6]</sup>、时频分析<sup>[7-8]</sup>等。

在实际环境中,截获信号还存在多径干扰,导致传统方法的识别性能急剧下降。对于通信信号,一般需经过盲均衡后再进行调制识别。例如,文献[9]利用盲均衡和多天线接收实现通信系统的信道补偿。对于单站接收系统,恒模算法可以快速、准确地估计出通信信号的信道参数<sup>[10]</sup>,但其前提条件是信号调制方式已知。与通信信号相比,雷达信号持续时间较短,如几个微秒,且调制方式变化更加多样。文献[11]提出一种基于时频域匹配滤波的多径雷达信号估计方法,但该方法仅适合于连续频率调制信号。基于此,本文提出一种多径环境下基于局部模糊函数的自动调制分类算法,不需要预先进行盲均衡处理,对多径干扰具有较好的鲁棒性。

## 1 多径信号与局部模糊函数

在实际环境中,由于多径信道的存在,截获的雷达信号一般都存在多径干扰。假设雷达发射信号为  $\bar{s}$ , 考虑多径干扰,侦察接收机截获到的信号可表示为:

$$\bar{X} = \bar{a}S + \bar{v} \quad (1)$$

其中,  $\bar{X}$  为截获信号,  $\bar{a} = [a_0, a_1, \dots, a_{M-1}]$ ,  $a_i (i=0, 1, \dots, M-1)$  为第  $i$  个多径的幅度因子,  $M$  是路径总数。  $S = [\bar{s}_0; \bar{s}_1; \dots; \bar{s}_{M-1}]$ ,  $\bar{s}_i = \bar{s}(t - d_i)$  为第  $i$  路多径信号,  $d_i$  为第  $i$  个多径的时延。  $\bar{v}$  是均值为 0, 方差为  $\sigma_v^2$  的高斯白噪声。

考虑到雷达信号的调制方式,对于特定时刻  $t$ , 多径信号模型又可表示为

$$x(t) = \sum_{i=0}^{M-1} a_i b(t - d_i) \exp\{j(\omega_0(t - d_i) + \varphi(t - d_i) + \phi_0)\} + v(t) \quad (2)$$

其中,  $b(t)$  表示脉冲信号的包络调制,  $\varphi(t)$  表示脉冲信号的相位调制,  $\omega_0$  为信号的中心频率,  $\phi_0$  是初始相位。

假设时延满足:  $d_{M-1} > d_{M-2} > \dots > d_0$ , 对于源信号,即直接路径,可以设  $d_0 = 0$  和  $a_0 = 1$ 。由于信道衰减,一般幅度因子满足  $a_{M-1} < a_{M-2} < \dots < a_0$ 。从多径信号表达式(2)可以看出,当时刻  $t \leq d_1$  时信号  $\bar{X}$  仅包含源信号  $\bar{s}$ ; 在脉冲尾部,  $\bar{X}$  包含多个多径分量。因此,多径信号  $\bar{X}$  的脉冲宽度大于源信号  $\bar{s}$ , 导致脉冲宽度增加。

模糊函数对于雷达信号分析和波形设计起着非常重要的作用。模糊函数与时频分布有着直接的关系,模糊函数的二维傅立叶变换为 Wigner-Ville 分布(WVD)。高阶模糊函数又称局部模糊函数,可以看作一类典型的高阶时频分布形式。采用局部模糊函数,可以得到信号任意频率点、窗口宽度的模糊函数,得到更为全面的信号特征参数分析结果。

对于信号  $x(t)$ , 其瞬时自相关可表示

$$r_1(t, \tau) = x(t - \tau/2)x^*(t + \tau/2) \quad (3)$$

模糊函数和 WVD 分别表示为

$$A_1(\tau, \xi) = \int r(t, \tau) e^{j2\pi\xi t} dt \quad (4)$$

$$W_1(t, \omega) = \int r(t, \tau) e^{-j2\pi\omega\tau} d\tau \quad (5)$$

假设  $X(f)$  为信号  $x(t)$  频谱, 频率自相关和由频域定义的模糊函数分别可表示为

$$R_1(f, \xi) = X(f - \xi/2)X^*(f + \xi/2) \quad (6)$$

$$A_1(\tau, \xi) = \int R_1(f, \xi) e^{-j2\pi f\tau} df \quad (7)$$

在此基础上,定义二阶时域自相关函数

$$r_2(t_1, \tau_1, t_2, \tau_2) = r_1\left(t_1 - \frac{t_2}{2}, \tau_1 - \frac{\tau_2}{2}\right) r_1^*\left(t_1 + \frac{t_2}{2}, \tau_1 + \frac{\tau_2}{2}\right) \quad (8)$$

二阶模糊函数可表示为

$$A_2(t_2, \omega, \tau_2, \xi) = \iint r_2(t_1, \tau_1, t_2, \tau_2) e^{-j2\pi(\tau_1\omega + t_1\xi)} d\tau_1 dt_1 \quad (9)$$

根据傅立叶变换的性质及能量守恒定理,可得局部模糊函数的简化计算公式,称为 O'Neill-Flandrin 公式<sup>[12]</sup>

$$A_2(t, \omega, \tau, \xi) = A_1\left(\tau - \frac{t}{2}, \xi - \frac{\omega}{2}\right) A_1^*\left(\tau + \frac{t}{2}, \xi + \frac{\omega}{2}\right) \quad (10)$$

$A_2$  是一种高阶时频分布的表示方式, 有 4 个变量, 分别为时间, 频率, 时延和频偏。当给定时间和频率时, 可以得到信号局部模糊函数, 从而对信号特征进行更为精细的描述。

## 2 基于局部模糊函数的多径信号调制分类

假设只有一个多径信道存在, 那么接收到的信号可以表示成如下形式

$$x(t) = s(t) + a_1 s(t - d_1) + v(t) = s(t) + s_1(t) + v(t) \quad (11)$$

其中,  $a_1 < 1$ ,  $v(t)$  为高斯白噪声, 与信号不相关。其模糊函数为

$$A_{xx}(\tau, \xi) = A_{ss}(\tau, \xi) + A_{s_1 s_1}(\tau, \xi) + A_{s_1 s}(\tau, \xi) + A_{ss_1}(\tau, \xi) + \delta(\tau, \xi) \quad (12)$$

式中, 因信号长度为有限长, 高斯白噪声的模糊函数可用冲击函数近似。

对于多径分量  $s_1(t)$ , 其模糊函数为

$$A_{s_1 s_1}(\tau, \xi) = a_1^2 e^{j2\pi\xi d_1} A_{ss}(\tau, \xi) \quad (13)$$

经推导, 交叉项的模糊函数  $A_{s_1 s}(\tau, \xi)$  和  $A_{ss_1}(\tau, \xi)$  可以表示为

$$A_{s_1 s}(\tau, \xi) = a_1 e^{j\pi\xi d_1} A_{ss}(\tau + d_1, \xi) \quad (14)$$

$$A_{ss_1}(\tau, \xi) = a_1 e^{\pi\xi d_1} A_{ss}(\tau - d_1, \xi) \quad (15)$$

因此, 信号  $x(t)$  的模糊函数如下

$$A_{xx}(\tau, \xi) = (1 + a_1^2 e^{j2\pi\xi d_1}) A_{ss}(\tau, \xi) + a_1 e^{j\pi\xi d_1} A_{ss}(\tau + d_1, \xi) + a_1 e^{j\pi\xi d_1} A_{ss}(\tau - d_1, \xi) + \delta(\tau, \xi) \quad (16)$$

假设存在两个多径信道, 则接收的信号为

$$x(t) = s(t) + a_1 s(t - d_1) + a_2 s(t - d_2) + v(t) = s(t) + s_1(t) + s_2(t) + v(t) \quad (17)$$

同上推导, 并考虑到多径分量幅度因子远小于远信号, 多径分量之间的交叉项能量较小, 可将其忽略, 其模糊函数可以近似为

$$A_{xx}(\tau, \xi) \approx (1 + a_1^2 e^{j2\pi\xi d_1} + a_2^2 e^{j2\pi\xi d_2}) A_{ss}(\tau, \xi) + a_1 e^{j\pi\xi d_1} A_{ss}(\tau - d_1, \xi) + a_2 e^{j\pi\xi d_2} A_{ss}(\tau - d_2, \xi) + a_1 e^{j\pi\xi d_1} A_{ss}(\tau + d_1, \xi) + a_2 e^{j\pi\xi d_2} A_{ss}(\tau + d_2, \xi) + \delta(\tau, \xi) \quad (18)$$

从多径信号模糊函数的分析可以看出, 源信号和各多径信号分量的模糊函数具有相似的分布形式, 模糊图形状相同, 能量都集中在原点  $(0, 0)$  附近。而交叉项的模糊函数能量集中于坐标  $(d_i, 0)$  和坐标  $(-d_i, 0)$  ( $i = 1, 2, \dots, M - 1$ ) 附近。

为了进一步抑制多径分量干扰, 对于式(11)的多径信号形式, 我们研究其局部模糊函数。利用简化公式(10), 并令  $t = d_1, \omega = 0$ , 并将  $A_2$  的坐标中心向右平移  $d_1/2$ , 可得

$$A_2(d_1, 0, \tau, \xi) = a_1 |A_{ss}(\tau, \xi)|^2 + Y(\tau, \xi) \quad (19)$$

其中:  $a_1 |A_{ss}(\tau, \xi)|^2$  为信号自项;  $Y(\tau, \xi)$  为剩余项, 包含噪声及其他交叉项。虽然自项能量较式(16)有所减弱, 但局部模糊函数较好地抑制了交叉项。

由上述分析可知, 利用局部模糊函数来抑制多径干扰, 需要已知时延  $d_1$ 。由式(1)和(2)中信号模型, 信号可能包含多个多径分量, 但由于  $a_{M-1} < a_{M-2} < \dots < a_0$ , 我们仅考虑第一多径分量的时延, 其它多径分量及多径分量之间的交叉项干扰能量较低, 可以忽略。

雷达信号的时延估计方法较多, 由于本文仅考虑单接受通道、单个样本信号的特殊情况, 很多现有方法无法适用。时延估计的典型方法是采用相关法, 考虑到时域受噪声影响较大, 文献[11]提出了时频域的滤波方法, 通过时频域的匹配滤波完成多径时延估计。本文中, 我们搜索最具能量聚集性的局部模糊函数图作为信号特征, 也可作为一种时延估计的新方法。由上文分析可知, 只有当  $t = d_1$  时,  $A_2(d_1, 0, \tau, \xi)$  具有最优的能量聚集性。对多径线性调频信号, 信噪比为 5dB 时, 采用不同方法得到的时延估计如图 1 所示。

实验中仿真信号包含一个多径分量, 时延为  $0.5 \mu s$ , 幅度因子为 0.8。图 1(a)为信号的时域自相关, 见式(20), 由于噪声影响, 无法估计多径时延。图 1(b)为时频域匹配滤波结果, 采用模糊函数估计, 见式(21), 交叉项干扰较严重, 能量已超过多径分量。图 1(c)为局部模糊函数的估计结果, 见式(22), 用模糊函数原点的取值描述能量聚集性。可见提出的方法可以得到正确的估计结果, 且具有较高分辨

率。需要指出,由于噪声影响,上述方法均不能估计多径分量的幅度因子。

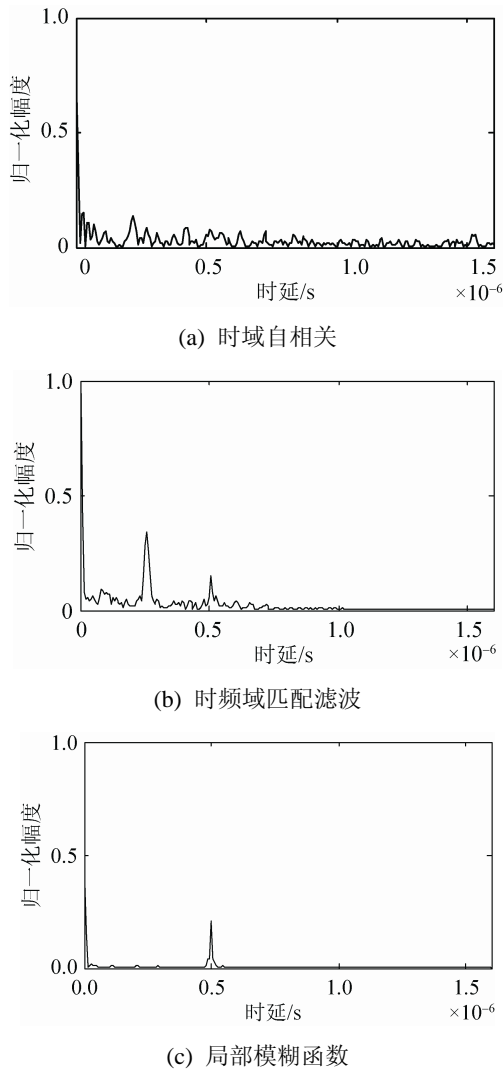


图 1 多径信号的时延估计

$$\hat{h}_1(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)x^*(t+\tau)dt \quad (20)$$

$$\hat{h}_2(\tau) = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_{xx}(\tau_1, \xi) A_{xx}^*(\tau_1 - \tau, \xi) d\tau_1 d\xi} \quad (21)$$

$$\hat{h}_3(\tau) = A_2(\tau, 0, 0, 0) \quad (22)$$

综上所述,提出一种基于局部模糊函数的多径信号特征提取及分类方法,其处理流程图见图 2。

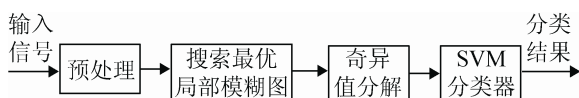


图 2 多径环境下雷达信号调制分类流程图

具体步骤如下:

(1) 对输入信号进行预处理,包括数据分割和归一化。对侦察接收机连续截获的数据进行分割并编号,得到脉冲串序列。

(2) 搜索多径第一多径分量的时延  $\hat{d}_1$ , 并得到最优的局部模糊图。由(22)估计多径时延  $\hat{d}_1$ , 计算局部模糊函数  $A_2(\hat{d}_1, 0, \tau, \xi)$ 。

(3) 提取模糊图的奇异值向量作为特征向量。对于模糊函数矩阵  $A \in \mathbf{R}^{m \times n}$ , 存在正交矩阵  $U = [u_1, u_2, \dots, u_m] \in \mathbf{R}^{m \times m}$  和  $V = [v_1, v_2, \dots, v_n] \in \mathbf{R}^{n \times n}$  使得  $A = UDV^T$  成立<sup>[13]</sup>。提取对角阵  $D$  中的前  $q$  个奇异值  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_q > 0$ , 构成特征向量。

(4) 设计多类 SVM 分类器<sup>[14]</sup>。先利用多种雷达信号的特征向量对分类器进行训练和参数优化,再利用训练好的分类器进行测试实验。

### 3 仿真实验与分析

为验证算法的有效性和可靠性,研究多种调制类型的雷达信号,包括线性调频信号(LFM)、正弦频率调制(SFM)、三角波频率调制(TFM)和锯齿波频率调制(STFM)、相位编码信号(PSK)、频率跳变信号(FH)和多相编码信号(PC)。其中,相位编码包括二相编码和四相编码,多相编码包括 P1, P2, P3, P4 和 Frank 码。为了验证算法的稳定性,仿真实验中设置各种调制信号的脉冲参数在时域和频域均存在混叠,参数随机可变,并叠加不同信噪比的独立高斯白噪声。具体参数如下(所有随机参数均满足均匀分布):

(1) 各种脉冲信号的不同参数如下:

- 信号采样频率: 160 MHz。
- 脉冲宽度: 3.2  $\mu$ s(512 个采样点)。
- 多径参数: 对于模型(2)中的多径信号的离散形式,假设每个脉冲信号最多叠加两个多径分量,离散化时延  $d_1$  和  $d_2$  分别在区间[50, 90]和[100, 180]内随机取值,幅度因子  $a_1$  和  $a_2$  分别在区间[0.4, 0.8]和区间[0.1, 0.3]内随机取值。

(2) 不同调制类型的脉冲参数如表 1 所示。

表 1 脉冲信号参数

| 信号类型    | 载频/<br>MHz | 中心频率/<br>MHz | 跳频间隔/<br>MHz | 信号带宽/<br>MHz | 码元宽度/<br>$\mu\text{s}$ | 相位数    | 调制周期/<br>$\mu\text{s}$ |
|---------|------------|--------------|--------------|--------------|------------------------|--------|------------------------|
| LFM 信号  | —          | 14-18        | —            | 2-8          | —                      | —      | —                      |
| SFM 信号  | —          | 14-18        | —            | 2-8          | —                      | —      | 0.5-0.8                |
| TFM 信号  | —          | 14-18        | —            | 2-8          | —                      | —      | 0.5-0.8                |
| STFM 信号 | —          | 14-18        | —            | 2-8          | —                      | —      | 0.5-0.8                |
| PSK 信号  | 14-18      | —            | —            | —            | 0.3-0.5                | 2, 4   | —                      |
| FH 信号   | —          | 14-18        | 1, 2, 3      | —            | 0.3-0.5                | —      | —                      |
| PC 信号   | 14-18      | —            | —            | —            | —                      | 16, 64 | —                      |

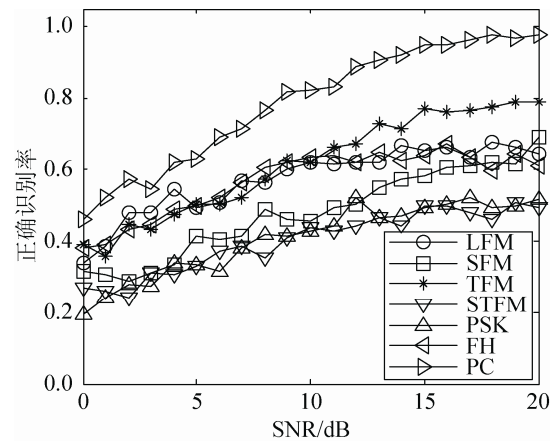
注: 表中“x-y”表示该参数在区间[x, y]内随机取值, 满足均匀分布; “—”表示参数不存在。

不考虑多径干扰, 分别采用本文方法和小波包分解算法<sup>[8]</sup>。根据上述参数, 对每类调制信号随机产生 120 个具有不同初始相位和调制参数的样本。由于不含多径干扰, 理论上最优的局部模糊函数应取  $t=0, \omega=0$ , 即为模糊函数的模平方。对得到的局部模糊函数进行奇异值分解, 提取奇异值向量作为信号特征向量。对于小波包分解算法, 我们选用的基函数为 Symlets 小波 sym8 并设定小波包分解的层数为 4 层, 取 16 个末节点系数的能量构成特征向量。设计线性 SVM 分类器, 惩罚参数为  $C=10$ 。

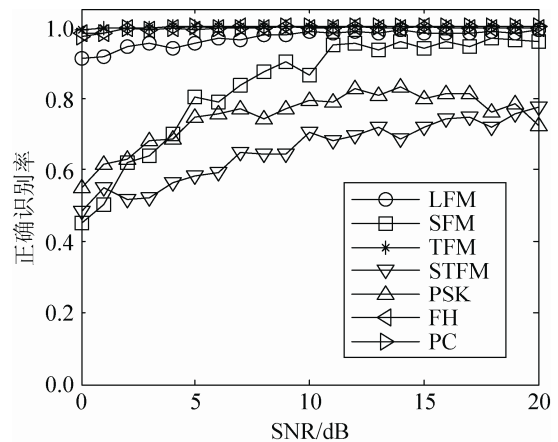
得到的各类雷达调制信号在不同信噪比 (SNR) 下的识别结果如图 3 所示。随机选择 1/2 样本进行训练, 即每类 60 个样本, 剩余样本进行测试。在每一信噪比条件下, 重复进行实验 100 次。图 3(a) 为小波包能量特征的识别结果, 可以看出各类信号的识别率随信噪比变化较大, 识别率整体不高。图 3(b) 为局部模糊函数的识别结果, 其正确识别率要明显优于小波包能量, 特别是对 PC, FH, TFM 和 LFM 在 0 dB 时也有较好的识别结果。

分析多径环境下雷达信号调制分类结果。对于每类信号, 按照上文中的多径模型参数, 叠加两个多径分量。每类产生 240 个包含多径分量的数据, 对该数据进行截断, 连同源信号合计 360 个样本构成新的样本子集。实验方法同上, 随机选择 1/2 样本进行训练, 即每类 180 个样本, 剩下样本进行测试。在每一信噪比条件下, 重复进行 100 次实验, 得到的平均识别结果如图 4(b) 所示。其中, 图 4(a) 为不含多径干扰下的平均识别结果, 与图 3 相对应。

可以看出, 在不含和包含多径干扰 2 种情况, 基于局部模糊函数的信号特征的识别结果都要优于小波包能量。当存在多径干扰时, 局部模糊函数的识别性能有一定下降, 但变化不大, 而小波包能量的识别性能出现较大下滑, 说明本文提出的局部模糊函数特征提取方法对多径干扰具有较好的抑制作用。



(a) 小波包能量



(b) 局部模糊函数

图 3 不同雷达信号调制的识别结果



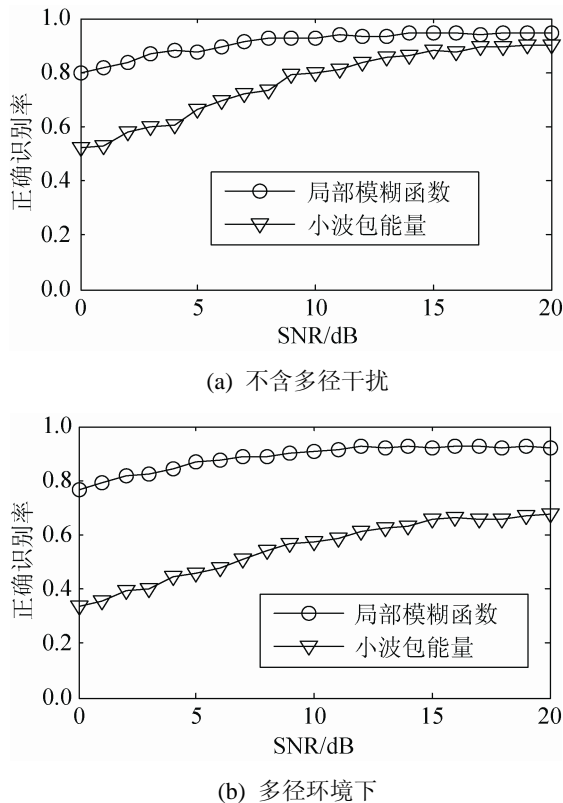


图4 七类雷达信号的平均识别结果

## 4 结论

雷达信号调制识别是电子侦察中一个非常重要的课题。本文提出了一种基于局部模糊函数的特征提取方法,对多径干扰具有较好的抑制作用。并使用不同调制类型的仿真信号对算法进行实验分析。仿真实验结果表明,与小波包能量法相比,提出算法对多径干扰具有较好的抑制作用,算法可靠性和鲁棒性较高。

## 参考文献:

- [1] Tahbaz Tavakoli E, Falahati A. Radar signal recognition by CWD picture Features [J]. *International Journal of Communications, Network and System Sciences* (S1913-3723), 2012, 5(4): 238-242.
- [2] 王晓峰, 张国毅, 芮国胜. 低信噪比下多相码信号检测与参数估计方法 [J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(1): 189-196.
- [3] Zeng X, Cheng H, Tang B. Automatic modulation classification of radar signals using the Rihaczek distribution and Hough transform [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation* (S1751-8784), 2012, 6(5): 322-331.
- [4] Shermeh A E. Recognition of communication signal types using genetic algorithm and support vector machines based on the higher order statistics [J]. *Digital Signal Processing* (S1051-2004), 2010, 20(6): 1748-1757.
- [5] Wong M L D, Nandi A K. Automatic digital modulation recognition using artificial neural network and genetic algorithm[J]. *Signal Processing* (S0165-1684), 2004, 84(2): 351-365.
- [6] 刘沛, 水鹏朗, 郭永明, 等. 用于调制识别的二维累积量特征统计模型 [J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 41(2): 44-50.
- [7] Geroleo F G. Detection and estimation of LFM CW radar signals [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* (S0018-9251), 2012, 48(1): 405-418.
- [8] Avci E, Avci D. A novel approach for digital radio signal classification: Wavelet packet energy-multiclass support vector machine (WPE-MSVM) [J]. *Expert Systems with Applications* (S0957-4174), 2008, 34(3): 2140-2147.
- [9] 王大磊, 王秀秀, 韩啸. 基于半正定规划的SIMO信道盲均衡方法 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(12): 91-95.
- [10] 李少根, 李文元, 冯兴乐. 恒模多用户检测算法在WCDMA中的应用及仿真 [J]. *系统仿真学报*, 2011, 23(5): 973-983.
- [11] 李林, 姬红兵. 基于L-Wigner分布的多径ESM信号估计 [J]. *系统工程与电子技术*, 2009, 31(11): 2618-2621.
- [12] Saad A Q, Lampros K S. Higher order nested Wigner distribution: properties and applications [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing* (S1053-587X), 2006, 54(12): 4662-4674.
- [13] 段向阳, 王永生, 苏永生. 基于奇异值分解的信号特征提取方法研究 [J]. *振动与冲击*, 2009, 28(11): 30-33.
- [14] Shawe-Taylor J. A review of optimization in support vector machines [J]. *Neurocomputing* (S0925-2312), 2011, 74(17): 3609-3618.