

doi: 10.7690/bgzdh.2020.08.010

## 基于 IF 特性的雷达辐射信号脉内调制特性识别

李宝鹏, 李淑华, 夏 栋

(海军航空大学青岛校区航空电子工程与指挥系, 山东 青岛 266041)

**摘要:** 为解决雷达侦察中雷达脉内调制类型识别问题, 研究 NS、LFM、PSK、FSK 4 种类型调制信号的高效识别问题。通过改进瞬时自相关算法在抑制相位模糊和噪声干扰的前提下得到雷达辐射信号自相关函数, 进行滑动平均采样处理得到信号的瞬时频率。分析 4 种不同调制类型信号频率图特征, 提取频率图的自相关系数、突跳峰次数和二级均值差特性作为识别特征向量, 构建一种高效的脉内调制识别算法。仿真实验表明: 该算法可在信噪比较低的条件下, 有效地区分 4 种调制类型, 当信噪比高于 9 dB 时, 识别概率可达到 97% 以上。

**关键词:** 脉内调制识别; 瞬时频率; 瞬时自相关法; 雷达信号

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A

## Intra-pulse Modulation Characteristics Recognition of Radar Radiation Signals Based on IF Characteristics

Li Baopeng, Li Shuhua, Xia Dong

(Department of Avionics Engineering & Command, Qingdao Branch, Navy Aviation University, Qingdao 266041, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of intra pulse modulation type recognition in radar reconnaissance, the efficient recognition of NS, LFM, PSK and FSK modulation signals is studied. By improving the instantaneous autocorrelation algorithm, the autocorrelation function of radar radiated signal is obtained on the premise of suppressing phase ambiguity and noise interference, and the instantaneous frequency of signal is obtained by moving average sampling. Four different modulation types of signal frequency graph characteristics are analyzed. The self-correlation coefficient, the number of peak jumps and the second-order mean difference characteristics of frequency graph are extracted as recognition feature vectors, and an efficient intra-pulse modulation recognition algorithm is constructed. The simulation results show that the algorithm can distinguish 4 modulation types effectively under the condition of low signal-to-noise ratio. When the signal-to-noise ratio is higher than 9 dB, the recognition probability can reach more than 97%.

**Keywords:** intra-pulse modulation recognition; instantaneous frequency; instantaneous autocorrelation method; radar signal

### 0 引言

雷达侦察是雷达对抗的重要前提, 雷达信号识别又是雷达侦察的关键技术, 通过对雷达辐射信号的接收、处理、分析、识别, 确定雷达的型号、用途、平台和威胁等级等信息, 为下一步的雷达对抗奠定坚实基础。雷达信号脉内调制信息包含了雷达信号的重要参数数据, 为现代电子对抗系统在单脉冲分析下实现信号识别打下了基础, 使雷达信号的准确、快速分选成为可能<sup>[1-3]</sup>。

常用的雷达辐射源信号脉内特征分析的方法有时域自相关法、调制域分析法、时域倒谱法、谱相关法和数字中频处理法等<sup>[4-6]</sup>。这些方法都遵循着通过某种变换使信号之间特征区分明显, 从而得到信号分类识别的目的。笔者在对频率采样小区间进行

滑动平均处理的基础上, 改进了瞬时频率计算方法, 提高了小信噪比低条件的频率提取精度, 并抑制了频率模糊问题。

### 1 瞬时频率计算方法

现代雷达信号一般采用频率调制及相位编码调制, 相位调制特征也可以体现在瞬时频率变化上。瞬时频率 (instantaneous frequency, IF) 可以较好地描述不同类型雷达调制信号的特征。通过对 IF 的特征进行分析提取, 可识别不同调制类型的雷达信号。

#### 1.1 1 阶相位差法

雷达射频信号经下变频后得到的中频信号  $s(t)$  可表示为:

$$s(t) = A(t) \cos[2\pi f_0 t + \varphi(t)]. \quad (1)$$

其中:  $A(t)$  为信号幅度;  $f_0$  为信号载频;  $\varphi(t)$  为相位

收稿日期: 2020-04-14; 修回日期: 2020-05-17

作者简介: 李宝鹏(1986—), 男, 山东人, 硕士, 讲师, 从事航空雷达对抗研究。E-mail: 843901165@qq.com。

函数。

将  $s(t)$  变换为解析信号形式为

$$s(t) = A(t) \exp\{j[2\pi f_0 t + \varphi(t)]\} \quad (2)$$

$s(t)$  经过量化采样后为

$$s(n) = A(n) \exp\{j[2\pi f_0 / f_s n + \varphi(n)]\} \quad (3)$$

其中  $f_s$  为采样频率。

信号的瞬时幅度为

$$|A(n)| = \sqrt{\text{Re}[s(n)]^2 + \text{Im}[s(n)]^2} \quad (4)$$

信号的瞬时相位为

$$\arctan \left\{ \frac{\text{Im}[s(t)]}{\text{Re}[s(t)]} \right\} = \arctan \left\{ \tan \left[ 2\pi \frac{f_0}{f_s} n + \varphi(n) \right] \right\} \quad (5)$$

当  $2f_0/f_s n$  取整数时, 式(5)可变为

$$\arctan \left\{ \frac{\text{Im}[s(t)]}{\text{Re}[s(t)]} \right\} = \tan \left[ 2\pi \frac{f_0}{f_s} n + \varphi(n) \right] = \tan[\varphi(n)] \quad (6)$$

此时瞬时频率可以表示为

$$f(n) = f_s [\varphi(n+1) - \varphi(n-1)] / 2\pi \quad (7)$$

需要注意的是:  $\arctan()$  函数的取值范围在  $[-\pi/2 \sim \pi/2]$ , 当信号的瞬时相位超过这个范围时就会产生频率模糊。

### 1.2 瞬时自相关分析法

瞬时自相关分析通过对信号取共轭并与延迟信号相乘后对自身信号进行运算分析, 以自身信号为模板, 没有对时间进行积分, 能很好地保持信号的瞬时特性<sup>[7-8]</sup>。

雷达中频信号  $s(t)$  的瞬时自相关函数可表示为:

$$B(t, \tau) = s^*(t) s(t + \tau) \quad (8)$$

其中:  $s^*(t)$  为信号共轭信号;  $s(t+\tau)$  为信号延迟  $\tau$  后的信号。

$B(t, \tau)$  对应的数字化形式  $B(n, m)$  可表示为:

$$B(n, m) = s^*(n) s(n+m) = A^2 \exp \left\{ j \left[ 2\pi \frac{f_0}{f_s} m + \varphi(n+m) - \varphi(n) \right] \right\} \quad (9)$$

其中  $m$  为延迟时间, 且  $m > 0$ 。可见, 瞬时自相关函数与  $m$  和频率调制造成的相位差有关。信号的瞬时相位可表示为

$$\theta(n, m) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[s(n, m)]}{\text{Re}[s(n, m)]} \right\} \quad (10)$$

信号瞬时频率可表示为

$$f(n, m) = \frac{1}{2\pi} \frac{\theta(n, m)}{m / f_s} = \frac{\theta(n, m) f_s}{2\pi m} \quad (11)$$

由式(10)、式(11)可见: 采用瞬时自相关法可以计算出信号的调制参数, 但是同样  $\arctan()$  函数存在相位模糊。几种常见调制类型雷达信号的瞬时自相关函数<sup>[8]</sup>如下:

1) 常规信号 (normal signal, NS) 信号:

$$B(t, \tau) = A^2 e^{j2\pi f_0 \tau} \quad (12)$$

2) 线性调频 (linear frequency modulation, LFM) 信号:

$$B(t, \tau) = A^2 e^{j2\pi(f_0 \tau + 0.5 u \tau^2 + u \tau t)} \quad (13)$$

3) 相移键控 (phase shift keying, PSK) 信号:

$$B(t, \tau) = A^2 e^{j2\pi f_0 \tau}, t \in [k\Delta T + \tau, (k+1)\Delta T] \quad (14)$$

$$B(t, \tau) = A^2 e^{j2\pi(f_0 \tau - \phi_{k+1} + \phi_k)}, t \in [(k+1)\Delta T, (k+1)\Delta T + \tau]$$

子码内的相关为直流, 子码间相关产生相位跃变为  $\varphi_{k+1} - \varphi_k$ 。

4) 频移键控 (frequency shift keying, FSK) 信号: 以二进制编码 BFSK 为例, FSK 信号的自相关函数为:

$$R(t, \tau) = \begin{cases} A^2 \exp[j(2\pi f_1 \tau)] & 0 \\ A^2 \exp[j(2\pi f_2 \tau)] & 0 \\ A^2 \exp\{j[(2\pi(f_2 - f_1)\tau + \tau f_2]t\} & 0 \rightarrow 1 \\ A^2 \exp\{j[(2\pi(f_1 - f_2)\tau + \tau f_1]t\} & 1 \rightarrow 0 \end{cases} \quad (15)$$

其中:  $f_1$  代表着码字“0”;  $f_2$  代表着码字“1”。在不同子码内, BFSK 信号瞬时频率对应不同的频率, 且该频率为常数, 而在码元跳变处, 受 BFSK 频率差调制原因, 会产生频率跳变。

### 1.3 瞬时自相关分析法改进

为避免出现相位模糊, 选择适当的  $m$ 、 $f_s$ , 使得  $\theta(n, m)$  满足:

$$(2\pi \frac{f_0}{f_s} m + \varphi(n+m) - \varphi(n)) < \frac{\pi}{2} \quad (16)$$

若信号的最高频率为  $f_{\max}$ , 为满足上述条件, 则需  $m$ 、 $f_s$  满足如下关系:

$$f_s \geq 4mf_{\max} \quad (17)$$

受实际中设备器件影响,  $f_s$  的取值不宜太高, 通常为 5~10 倍的  $f_{\max}$ ; 因此, 对应的  $m$  的取值通常很小, 为 1~2。如图 1 所示,  $m$  太小会导致采样点过于接近, 此时噪声的自相关性会明显增强, 造成信噪比较低时算法的性能会急剧下降<sup>[9]</sup>。

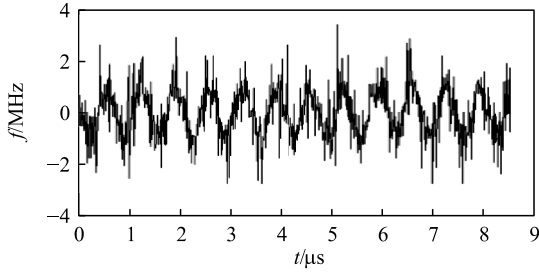


图 1 SNR=5 dB,  $m=2$  时 LFM 信号瞬时自相关函数

需特意对相位模糊区间进行无模糊扩展, 可以采用将  $\arctan()$  函数取值范围扩大到  $(0 \sim 2\pi)$  方式来扩展相位不模糊区间, 以扩大  $m$  的取值范围。

$$\theta(n,m) = \begin{cases} \theta(n,m) & \text{Im} \geq 0, \text{Re} \geq 0 \\ \theta(n,m) + \pi & \text{Im} \geq 0, \text{Re} < 0 \\ \theta(n,m) + \pi & \text{Im} < 0, \text{Re} < 0 \\ \theta(n,m) + 2\pi & \text{Im} < 0, \text{Re} \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

经过  $\arctan()$  函数取值范围扩展后, 则要求  $m$ 、 $f_s$  满足:

$$f_s \geq m f_{\max} \quad (19)$$

为进一步抑制低信噪比下噪声干扰对瞬时频率提取的影响, 在第  $n$  个采样点和第  $n+m$  个采样点之间进行滑动平均处理, 将小段  $m$  个采样点的瞬时平均频率作为第  $n$  点的瞬时频率, 计算方式如下:

$$\bar{f}(n,m) = \frac{1}{m} \sum_{i=n}^{n+m-1} f(i,m) \quad (20)$$

利用改进后的瞬时自相关算法, 经过相位模糊与噪声干扰抑制后, 对 NS、LFM、PSK、FSK 信号进行瞬时频率提取仿真, 当信噪比 SNR=10 dB, 采样频率  $f_s=300$  MHz 时, 4 种信号的瞬时频率如图 2—5 所示。常规单载频 NS 信号瞬时频率图为水平直线, 在噪声的影响下, 以载频  $f_0=40$  MHz 为中心上下小幅波动。线性调频 LFM 信号瞬时频率图为斜直线, 在起始频率 40 MHz 与终止频率 50 MHz 之间程线性变化。相位编码 PSK 信号的瞬时频率图在相位跳变点出现突跳峰, 跳峰个数较多数值相近。频率编码 FSK 信号瞬时频率图呈现阶梯状, 台阶内平坦, 台阶间在 40 与 50 MHz 2 个载频之间跳变。

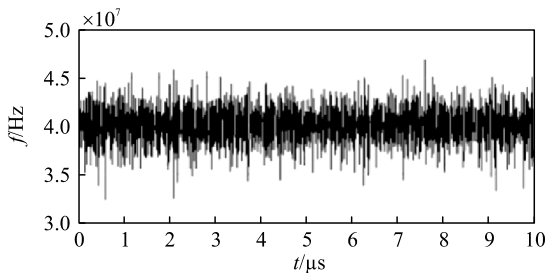


图 2 SNR=10 dB 时 NS 信号的瞬时频率

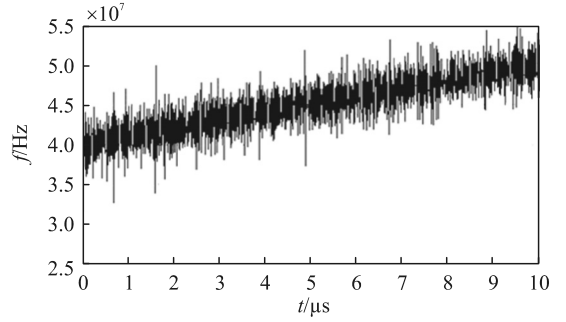


图 3 SNR=10 dB 时 LFM 信号的瞬时频率

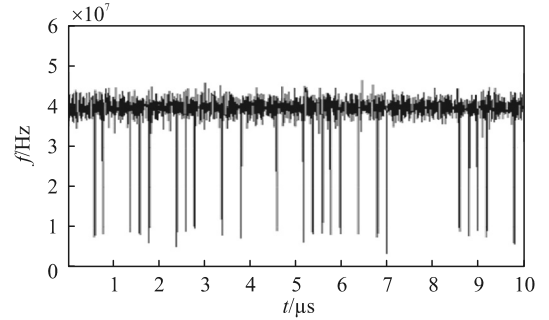


图 4 SNR=10 dB 时 PSK 信号的瞬时频率

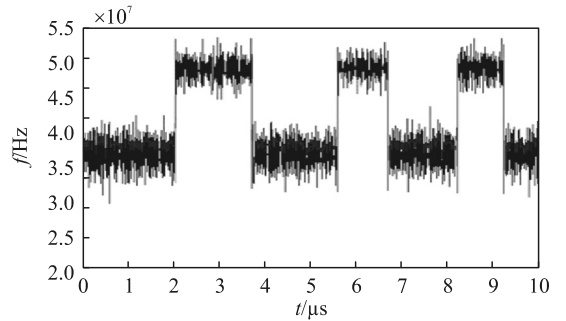


图 5 SNR=10 dB 时 FSK 信号的瞬时频率

## 2 瞬时频率识别特征提取

### 2.1 自相关系数

从图 3 可以看出: LFM 信号瞬时频率与采样时间呈现出较好的线性相关, 而另外 3 种类型信号的线性相关性较差; 因此, 可以将相关系数  $R$  作为 LFM 信号的识别特征。

瞬时频率与采样时间的自相关系数可表示为:

$$R = \text{cov}(f, nT_s) / (\text{std}(f)\text{std}(nT_s)) \quad (21)$$

式中:  $f$  为瞬时频率序列,  $T_s=1/f_s$ ;  $\text{cov}()$  为协方差函数;  $\text{std}()$  为标准差函数。

为了减少噪声对采样频率的影响, 在计算信号自相关系数时作如下改进:

将采样频率区间分  $M$  个小段, 每个小段包含  $L$  个采样点, 然后剔除计算第  $k$  个小段首末采样点后, 计算的该小段 IF 均值  $\bar{f}(k)$ , 将自相关系数计算方式改为:

$$\bar{f}(k) = \frac{1}{L} \sum_{i=k+2}^{(k+1)L-1} f(i) \quad (k=0,1,2,\dots, M-1); \quad (22)$$

$$R(\bar{f}(k), k) = \frac{(\text{cov}[\bar{f}(k)], k)}{\text{std}[\bar{f}(k)]\text{std}(k)}. \quad (23)$$

图 6 是 4 种信号的自相关系数随信噪比变化的曲线(100 次平均)。可见, LFM 的瞬时频率和采样时间之间表现出较好的线性相关性, 可以 0.5 为界限, 把 LFM 从 4 种信号中提取出来。

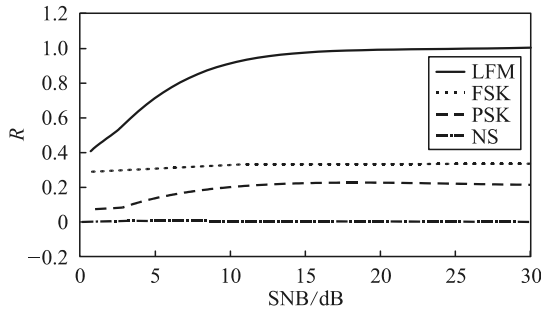


图 6 4 种信号自相关系数随信噪比

### 2.2 突跳峰次数

从图 4 可以看出, PSK 信号与其他 3 类信号的主要区别仅在于 IF 突跳峰个数的多少; 因此, 将突调峰个数作为 PSK 信号识别特征。跳峰个数统计按照如下步骤进行计算:

1) 除 PSK 外其他 3 类信号的  $\sigma$  较大, 以  $|E-3\sigma|$  门限值剔除其他 3 类信号跳峰, 将信号的 IF 序列映射为 0~1 序列  $g(n)$ 。

2) 为了抑制噪声引起的虚假跳峰影响, 将设置两跳峰最小距离间隔  $d_{\min}=0.02L$ ,  $L$  为序列长度。当  $g(n)=1$  且  $g(n-1)=0$ , 该跳峰距离相邻跳峰间距大于  $d_{\min}$  时, 则判断为 1 个跳峰存在。

图 7 为信噪比 SNB=5 dB, PSK 的码元宽度为 1  $\mu\text{s}$ ,  $f_s=20$  MHz 时, PSK 相位编码信号突变峰个数统计值, PSK 信号的跳峰个数取值集中在 3~8 之间; 因此, 可将跳峰个数 4 作为 PSK 信号识别的门限值。

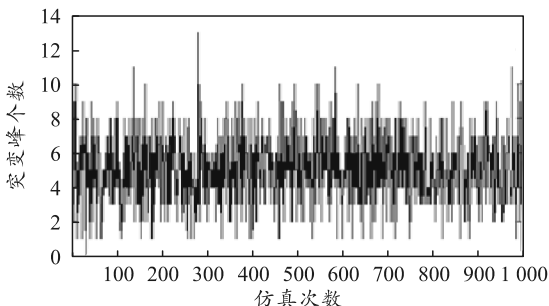


图 7 SNB=5 dB 时相位编码信号突变峰个数

### 2.3 两级均值差

4 种不同信号具有不同的分布中心及偏离分布中心特征, 均值  $E$  和方差  $\sigma$  是反应这一特征的统计量。假如直接计算信号的均值与方差特征, 可能由于信号调制参数的不同导致不同信号的特征差异不明显。为了体现 FSK 瞬时频率梯形分布特征, 需提取频率数据两级均值差特征, 具体过程如下:

1) 计算归一化均值  $E_1$ : 首先对信号原始瞬时频率序列  $IF_0(n)$  进行归一化处理得到频率空间为  $[0,1]$  序列  $IF_1(n)$ , 使其变化到瞬时空间, 然后计算  $IF_1(n)$  的均值  $E_1$ 。

2) 计算去中心归一化均值  $E_2$ : 首先通过  $IF_1(n)-E_1$  去中心化, 然后提取剩下的正值序列得到  $IF_2(n)$ , 再对  $IF_2(n)$  进行归一化得到  $IF_3(n)$ , 计算  $IF_3(n)$  均值得到  $E_3$ 。

3) 计算  $\Delta E=E_1-E_3$ 。

如表 1 所示, 考虑到低信噪比条件下 NS 信号与 FSK 信号瞬时频率图最相近, 重点分析 NS 信号与 FSK 信号  $E_1-E_2$  在不同信噪比下的特值。

表 1 2 种信号的均值差取值

信号类型	SNB/dB			
	0	5	10	15
NS- $\Delta E$	0.68	0.59	0.51	0.43
FSK- $\Delta E$	-0.26	-0.24	-0.11	-0.07

可见, 不同信噪比为 0~15 dB 时, NS 信号的  $\Delta E$  取值范围是 0.43~0.68, 而 FSK 信号  $\Delta E$  取值范围是 -0.26~-0.07, 两者差别较大。因此, 通过  $E_1-E_3$  为负值这一特性可将 NS 信号与 FSK 信号区分开。

### 3 识别算法及仿真分析

综合以上分析, 笔者利用以下的算法流程对 4 种类型的雷达辐射源信号进行脉内调制特性的分类识别:

1) 接收某一雷达辐射源信号进行下变频预处理, 得到中频信号;

2) 对中频信号进行瞬时自相关运算, 得到瞬时自相关函数, 并计算自相关系数  $R$ , 如果  $R \geq 0.5$  则判断为 LFM 调制信号;

3) 采用滑动平均算法对瞬时频率进行采样, 得到 IF 序列;

4) 计算 IF 序列频率跳峰个数  $P$ , 如果  $P \geq 4$ , 则判断为 PSK 信号;

5) 计算 IF 序列频率两级均值差  $\Delta E=E_1-E_3$ , 如果  $\Delta E < 0$ , 则判断为 FSK 信号, 否则为 NS 信号。

总体算法流程如图 8 所示。

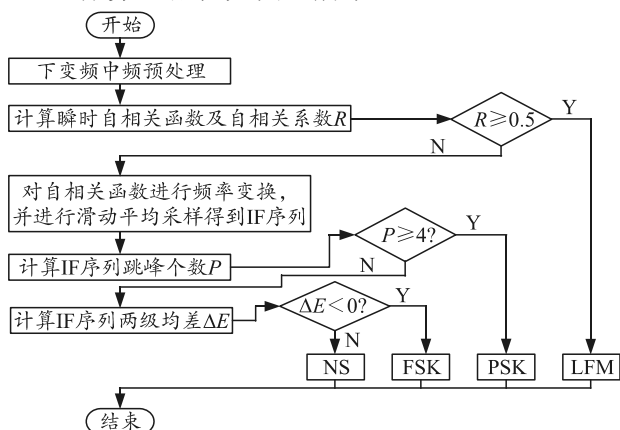


图 8 调制类型识别算法总体流程

选取 4 种信号在不同信噪比下进行 100 次 MonteCarlo 仿真。参数设置：采样频率  $f_s = 100$  MHz，脉宽  $10 \mu\text{s}$ ；PSK 载频取 20、30 MHz，频率码组为 5 位随机码，每段子码上采用 7 位 Bark 码的二相编码；FSK 载频取 20、30 MHz；LFM 调频带宽  $B = 10$  MHz。图 9 为 4 种信号在不同信噪比下的识别概率，可见笔者所选取的特征参数以及采用的识别算法可以成功地识别出 4 种调制类型，当信噪比大于 9 dB 时，4 种信号的识别概率高于 97%，识别效率较为理想。

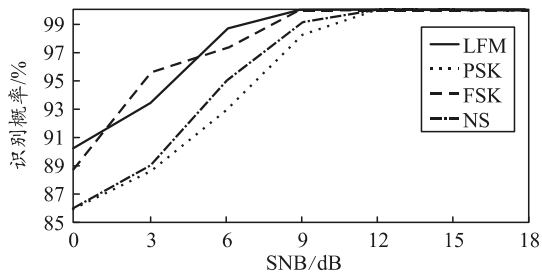


图 9 不同信噪比下 4 种调制信号的识别概率

## 4 结束语

笔者改进了瞬时自相关算法和瞬时频率采样量化方法，抑制了频率模糊问题并提高了算法在低信噪比时的适应能力，在此基础上对射频信号瞬时频率特征进行了分析，提取了自相关系数、突跳峰数和两级均值差 3 种参数，组成了具有较好类间分离能力和一定抗噪性能的分类特征向量，并构建了识别算法。仿真结果表明：该方法流程简单，运算量小，识别概率高。

## 参考文献：

- [1] 路征, 龚燕. 雷达辐射源识别技术面临的主要挑战及对策[J]. 国防科技, 2017, 38(2): 24-27.
- [2] 余巍, 朱岩, 王博琦, 等. 防空雷达和雷达干扰装备协同方法[J]. 兵工自动化, 2019, 38(3): 6-9.
- [3] CHEN X J, LI D, YANG X B, et al. Radar Emitter Signals Identification with a Optimal Recurrent type 2 Wavelet Fuzzy Neural Network[J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2018, 9(3): 685-693.
- [4] 康乃馨, 何明浩, 韩俊, 等. 时频域综合分析的雷达信号识别方法[J]. 现代防御技术, 2017, 45(5): 162-169.
- [5] 孟凡杰, 唐宏, 王义哲. 基于多特征融合的雷达辐射源信号识别[J]. 计算机仿真, 2016, 33(3): 18-22.
- [6] 董志杰, 王晓峰, 田润澜. 雷达信号脉内调制识别新方法[J]. 航天电子对抗, 2018, 34(2): 33-37.
- [7] 王建军. 雷达辐射源信号无源侦收脉内调制方式识别技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015: 30-50.
- [8] 吴昊, 曹俊纺, 王谦诚. 一种复杂脉内调制信号的识别算法[J]. 雷达与对抗, 2017, 37(3): 27-30.
- [9] 刘峰, 黄宇, 王泽众, 等. 复杂调制信号截获、分选与识别[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 50-60.