

文章编号: 1671-0576(2020)03-0018-07

# 一种基于 STFT 的脉内调制识别方法优化与分析

王 璐, 张学辉

(北京华航无线电测量研究所, 北京 100010)

**摘 要:** 针对频率调制信号识别概率低的问题, 提出了一种基于改进的短时傅里叶变换 (Short-Time Fourier Transform, STFT) 的雷达信号脉内调制特征识别方法。通过增加新的信号特征参数, 改进信号识别流程, 提高了对频率调制信号的脉内调制识别概率。仿真结果表明, 改进后的 STFT 算法对非线性调频信号与频移键控信号的识别效果明显优于 Wigner-Ville 分布和相位差分算法。

**关键词:** 识别; 脉内调制; 短时傅里叶变换; 相位差分; Wigner-Ville 分布

**中图分类号:** TN957.51

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1671-0576.2020.03.003

## Optimization and Analysis of an Intrapulse Modulation Recognition Method Based on STFT

WANG Lu, ZHANG Xue-hui

(Beijing Huahang Radio Measurement Institute, Beijing 100010, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of low recognition probability of FM signal, an improved radar signal intrapulse modulation recognition method based on short-time Fourier transform (STFT) is proposed. Through the improvement of signal feature parameter extraction and recognition process, the probability of intrapulse modulation recognition of the frequency modulation (FM) signal is improved. The results show that the improved algorithm is better than the algorithm of Wigner-Ville distribution (WVD) and phase difference in recognition of nonlinear frequency modulation (NLFM) signals and frequency shift keying (FSK) signals.

**Key words:** identification; intrapulse modulation; STFT; phase difference; WVD

## 0 引言

现代电子对抗的电磁环境日益复杂, 信号分

布愈加密集, 辐射源数量也持续增长, 多个信号同时到达的情况也随之出现。为了满足抗干扰、反侦察等需要, 现代雷达会对发射信号进行复杂的脉内调制, 并使用可变参数的发射信号, 这对雷达辐射源信号的分选识别带来极大的挑战<sup>[1-2]</sup>。雷达信号脉内分选和识别是电子侦察系统进行目标

收稿日期: 2019-09-11

作者简介: 王 璐 (1995—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事通信与信息系统技术研究。E-mail: 635764739@qq.com

识别的重要手段<sup>[3]</sup>。自20世纪80年代末期开展雷达辐射源信号脉内特征提取的研究以来<sup>[4]</sup>,该领域的研究就从未停止。文献[2]提出了一种基于线性正则变换与短时傅里叶变换联合的时频分析方法,避免交叉项问题的同时又实现了线性调频信号的干扰抑制和多分量时频信号分离。文献[5]提出的基于信号能量聚焦效率检验的识别算法,解决了低信噪比条件下信号调制的盲识别问题。与雷达信号处理技术结合,文献[6]采用模糊函数完成了辐射源信号的脉内特征识别。文献[7]研究了一种神经网络与脉内分析结合的信号调制识别方法,并验证了算法的正确性。

针对线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)、非线性调频(Nonlinear Frequency Modulation, NLFM)和频率步进等信号的精细分类,传统方法以信号瞬时频率曲线的线性度作为特征识别参数,但传统方法存在对三次曲线调制NLFM信号识别概率偏低的问题。为了解决这一问题,本文提出一种新的特征识别参数,对识别流程进行调整,并通过仿真验证改进算法对提高频率调制信号精细分类识别概率的有效性。

## 1 典型辐射源信号脉内调制识别算法

### 1.1 短时傅里叶变换算法

短时傅里叶变换的基本原理是在待分析的辐射源信号上加一个随时间移动的窗,使用该窗函数对源信号进行截取。假设在窗函数截取范围内信号是平稳的,对截取后的信号进行傅里叶变换,即可得到源信号在不同时刻的频率域信息。

连续信号 $r(t)$ 时域短时傅里叶变换的数学表达式为

$$R(f) = \text{STFT}[r(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} r(\tau) \omega^*(\tau - t) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \quad (1)$$

式中: $\omega(t)$ 为窗函数;“\*”表示复共轭; $f$ 为信号频率。 $\omega(t)$ 宽度决定了STFT的时域定位性与频率分辨率,是利用STFT实现辐射源信号脉内分析的重要参数之一。

STFT可以反映信号的局部特征,并且算法

计算量相对较小,在信号分析上具有一定的优势,是一种十分有效的时频分析法。然而,STFT本身也存在缺陷:由于不确定性原理的限制,STFT的时间分辨率和频率分辨率始终是一对矛盾,即不能在加长时间窗改善频率分辨率的同时提高变换的时间分辨率。此外,时间窗的长度越长,假设的信号平稳性就越不能保证。

### 1.2 Wigner-Ville 变换

Wigner-Ville 分布(Wigner-Ville Distribution, WVD)是由Wigner提出的一种具有双线性形式的时频分布函数,它在一定程度上解决了STFT存在的问题。它具有明确的物理意义,能够反映信号能量随时间和频率变化的分布。

对于连续信号 $r(t)$ ,其WVD时域变换公式为

$$W_r(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} r\left(t + \frac{\tau}{2}\right) r^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \times \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \quad (2)$$

需要说明的是,如将信号离散化并对其进行加窗处理,时间窗的存在必然会导致信号频率分辨率的下降。但是这种处理会降低WVD变换的运算量,使得信号处理的实时性有所提高,适合实际工程应用。

### 1.3 相位差分算法

基于相位差分的脉内调制识别算法以最小二乘多项式拟合和直方图统计为主,非线性拟合和峰值检测为辅,通过最小二乘拟合、自适应阶数直方图统计和谱峰搜索等处理,完成输入源信号的分选识别。实际处理过程中,为了提高算法对低信噪比情况的适应能力,通常采用 $N$ 阶相位差分运算,其计算公式为

$$f^N(n) = \frac{1}{2\pi N} \left( \sum_{j=1}^N \varphi'(n+j) - \sum_{j=0}^{N-1} \varphi'(n-j) \right) f_s \quad (3)$$

式中: $\varphi'(n)$ 表示信号 $n$ 时刻的瞬时相位; $f_s$ 为采样频率。

$N$ 阶相位差分运算实际上是一种平滑过程,可以有效地提高算法在低信噪比情况下的处理能力。但它不能有效地压制旁瓣,为此本次实验加入了有限冲激响应(Finite Impulse Response,

FIR)滤波器。当信号经过低通滤波后,为了得到正确的瞬时频率值,必须进行拟合修正。

对相位编码信号的精细分类以及与频率编码信号的区分,需要利用自适应阶数统计直方图。当直方图宽度  $B$  确定后,直方图阶数  $M_{\text{step}}$  的计算公式为

$$M_{\text{step}} = [\text{INT}(f_{\text{max}} - f_{\text{min}})]/B + 1 \quad (4)$$

式中: $\text{INT}(\cdot)$ 表示趋近 0 取整; $f_{\text{max}}$ 和 $f_{\text{min}}$ 分别为相位编码信号瞬时频率的最大和最小值。确定阶数后,即可完成频点统计。直接计算得出的统计信息并不能方便地提取频点个数,需要将结果进行低通滤波。

基于相位差分的脉内调制识别算法将固定门限与自适应门限相结合,可以精确描述信号的宏观个体差异。由于使用了自适应阶数直方图统计等方法,可以利用回波信号的全部信息,提高了算法在低信噪比情况下的适应能力。

## 2 基于 STFT 的脉内调制识别算法改进

对 LFM、NLFM 和频率步进等三种频率调制信号进行脉内调制识别,传统方法是对调制信号进行 STFT,提取辐射源信号瞬时频率曲线的线性度  $L$  和信号频谱包络中心频率点与其相邻频点间对应包络值的差  $\delta_{\text{center}}$ ,即

$$L = \left| |f_{\text{start}} - f_{\text{stop}}| - B_s \right| \quad (5)$$

$$\delta_{\text{center}} = |X(f_c) - X(f_c + \Delta f)| \quad (6)$$

式中: $f_{\text{start}}$ 与 $f_{\text{stop}}$ 分别表示瞬时频率的起始和截止频率; $B_s$ 为信号带宽,是用于辐射源信号脉内调制识别的特征参数之一; $X(\cdot)$ 表示信号频谱

包络; $f_c$ 为信号频谱包络中心频率; $\Delta f$ 为相邻频点间隔。基于 STFT 算法的三种频率调制信号的识别流程如图 1 所示。

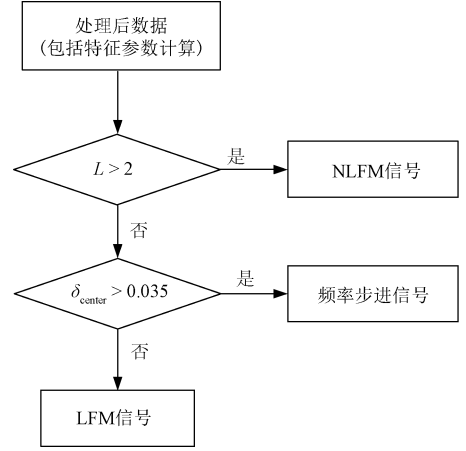


图 1 基于 STFT 算法的频率调制信号脉内调制识别流程

信噪比 10 dB 条件下,三种频率调制辐射源信号经过 STFT 变换后的时频分布情况如图 2 所示。STFT 算法对三种频率调制信号的识别概率偏低,尤其对 NLFM 信号。

从三种信号的时频分布图可以直观地看出,三者的时频特性极为相似。当对信号进行非线性频率调制时,若采用三次曲线调制且调制系数不大,则 NLFM 信号与 LFM 信号在瞬时频率的线性度指标方面过于接近甚至相同,二者识别容易混淆。同样频率步进信号与 LFM 信号的调制识别也会遇到困难。图 2 所示的信号时频分布结果是在信噪比 10 dB 条件下获得的,若信噪比降低,则传统方法对不同调制类型辐射源信号的识别概率必然降低。

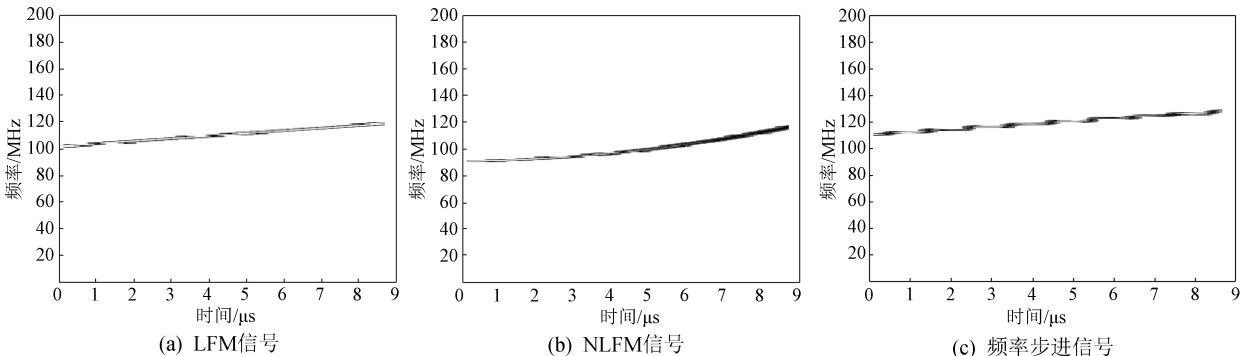


图 2 辐射源信号 STFT 变换结果

为了解决上述问题,对三种信号的特征进行进一步分析。在频谱包络区域,三者有非常明显的区别,图 3(a)~图 3(c)分别为 10 dB 与 -2 dB 条件下,LFM 信号、NLFM 信号与频率步进信号的频谱包络。可以发现,LFM 信号频谱包络的顶部区域比较平坦,NLFM 信号频谱包络的顶部区域呈单调下降趋势,而频率步进信号频谱包络的顶部区域抖动极其明显。同时,在 -2 dB 低信噪比条件下,辐射源频谱包络虽有畸变,但是三者之间的差异依旧明显。由此可见,利用信号频谱包络提取特征参数的方法可行。

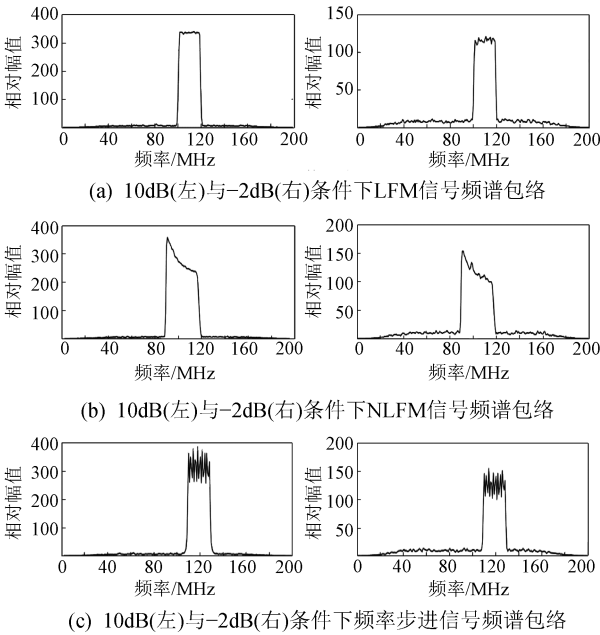


图 3 辐射源信号频谱包络

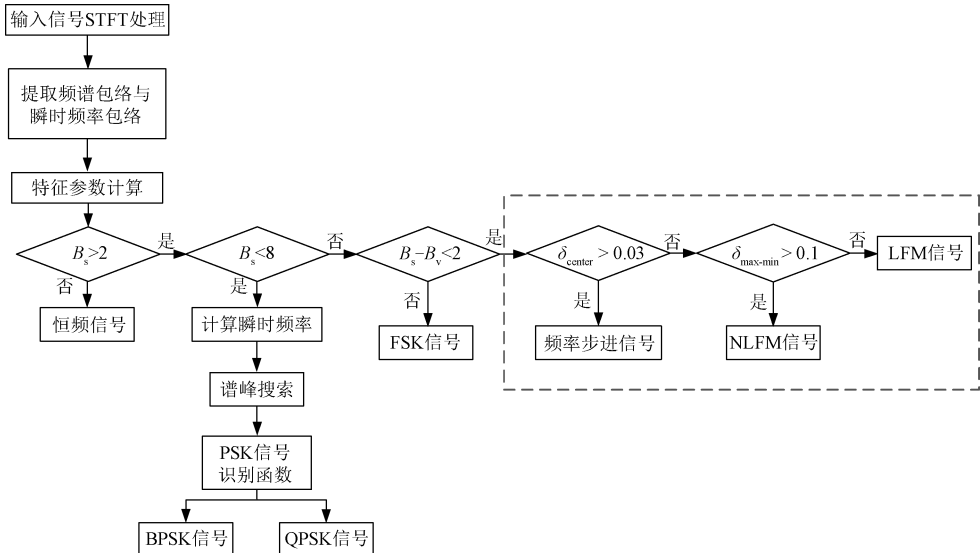


图 5 辐射源信号脉内调制识别流程图

为表征不同调制信号频谱包络间的区别,结合多次实验调整,除用  $\delta_{center}$  表征包络顶部区域的抖动程度外,新增一个特征参数  $\delta_{max-min}$ 。  $\delta_{max-min}$  表示频谱上大于门限的最小频率  $f_{min}$  与大于门限的最大频率  $f_{max}$  对应包络值之间的差,表达式为

$$\delta_{max-min} = |X(f_{min} + 2\Delta f) - X(f_{max} - 2\Delta f)| \tag{8}$$

改进前后的信号识别流程如图 4 所示。

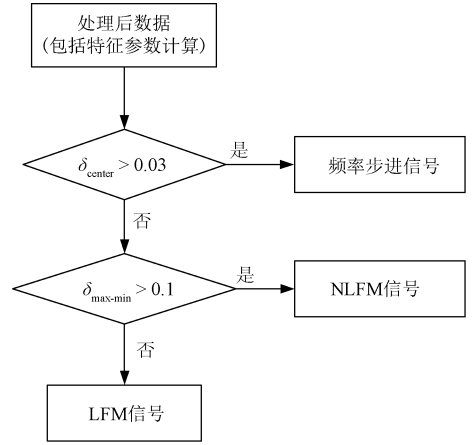


图 4 改进后 STFT 算法频率调制信号脉内调制识别流程

利用信号带宽  $B_s$ 、信号有效带宽  $B_s'$  等脉内调制识别的特征参数,将算法适用范围拓展到恒频、LFM、NLFM、频率步进、二进制相移键控(BPSK)、正交相移键控(QPSK)、频移键控(FSK)等七种信号的脉内调制识别,流程如图 5 所示。其中所有参数判别门限均为经验值,应根据具体使用范围及仿真情况进行调整。

### 3 仿真实验

#### 3.1 识别概率仿真

以 LFM、NLFM、频率步进三种频率调制信号为例,在信噪比为 $-5, 2, 10$  dB 条件下,分别进行 100 次蒙特卡罗实验。对改进前后 STFT 算法的识别率进行仿真对比,结果见表 1。

表 1 改进前后 STFT 算法蒙特卡罗实验识别概率统计 %

信噪比/ dB	识别概率					
	改进前 STFT 算法			改进后 STFT 算法		
	LFM	NLFM	频率步进	LFM	NLFM	频率步进
-5	0	0	0	0	92	0
2	83	5	97	91	99	98
10	100	5	99	100	99	99

由表 1 可知,算法改进后,对 NLFM 信号的识别概率大幅提高,尤其在 $-5$  dB 低信噪比条件下识别概率提升最为显著。对 LFM 信号与频率步进信号的识别概率在低信噪比条件下也有小幅提高。当信噪比达到 2 dB 时,改进后算法对三种频率调制信号的识别概率均达到 90% 以上,实验结果表明算法改进有效。

#### 3.2 算法抗噪性验证

设输入源信号为某单一类型辐射源,共七种类型,采样频率 3.2 GHz,信道化部分共 32 个信道,信噪比范围( $-5 \sim +15$ ) dB。每隔 0.5 dB 选定信噪比进行 100 次蒙特卡罗实验。

##### (1) 点频信号

输入点频信号,信道化处理后进行脉内调制类型识别与脉内参数估计,蒙特卡罗仿真实验结果见图 6。当信噪比为 0 dB 时,基于改进的 STFT 的脉内识别算法的识别率达到 100%,WVD 和相位差分算法的识别率均在 97% 左右。可见,针对点频输入信号,STFT 算法的抗噪性略优于其余两种算法。

##### (2) 频率调制信号

分别输入 LFM、NLFM 及频率步进三种频率调制信号,仿真验证了采用不同识别算法时不同频率调制信号的识别概率。仿真结果如图 7 所示。

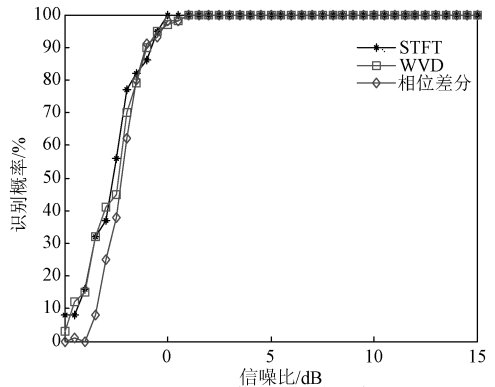
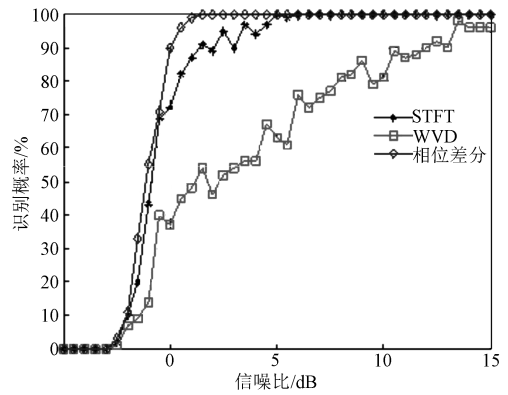
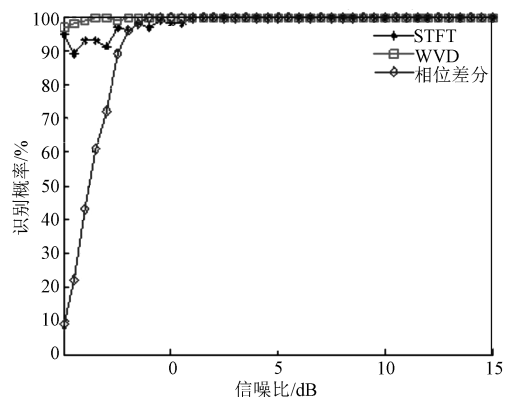


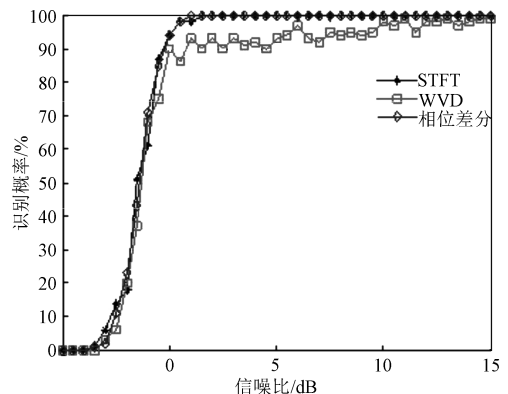
图 6 点频信号识别概率



(a) LFM 信号



(b) NLFM 信号



(c) 频率步进信号

图 7 频率调制信号识别概率

LFM信号的识别概率如图7(a)所示。当信噪比达到1.5 dB时,相位差分算法识别概率达到100%;信噪比达到5 dB时,STFT算法识别概率也达到100%;信噪比达到15 dB时,WVD算法识别概率达到97%以上,但仍有波动。由此可见,针对LFM信号,相位差分算法的抗噪性明显优于其余两种算法。

NLFM信号的识别概率如图7(b)所示。当信噪比大于1 dB时,三种算法均能稳定识别输入信号的脉内调制特征;在低信噪比范围内基于WVD的脉内调制识别算法抗噪性最佳,识别概率高达97%以上;改进后的STFT脉内识别算法在0 dB以下低信噪比环境下的识别概率接近90%,且计算量小,易于硬件实现。

频率步进信号的识别概率如图7(c)所示。除WVD算法外,其余两种算法在信噪比大于1.5 dB时已能准确完成脉内调制识别。

### (3) 相位编码信号

分别输入BPSK和QPSK信号,三种算法识别概率的仿真结果如图8所示。三种算法对两种相位编码信号的识别能力相仿,当信噪比大于1.5 dB时,均能够准确识别信号调制类型。由此可见,针对这两种相位编码信号,三种算法的抗噪性无显著差异,在工程应用上,可以根据实际情况选择合适的分析算法。

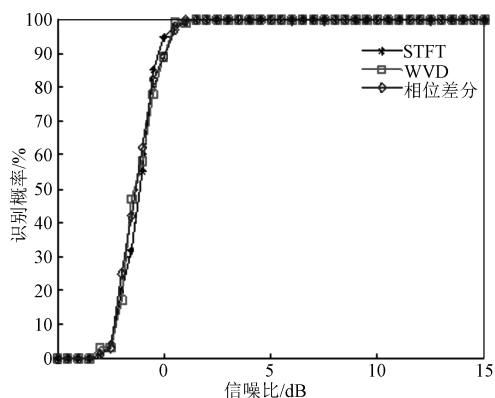
### (4) 频率编码信号

输入两个中心频率分别为900 MHz和910 MHz的FSK信号,三种算法识别概率的仿真结果见图9。在(-5~0) dB低信噪比条件下,改进的STFT算法的识别概率不低于60%。随着信噪比的增高,三种算法的识别概率均增高,当信噪比增高至1 dB时,STFT和相位差分两种算法均能准确完成脉内调制识别,WVD算法的识别概率也达到90%以上。可见,STFT脉内调制识别算法的抗噪性明显优于其他算法,在低信噪比条件下就可以达到不错的识别效果。

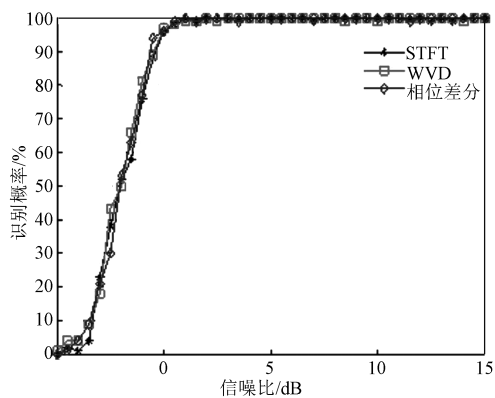
## 3.3 时域重叠多信号识别仿真

将七种信号叠加形成一组输入信号,仿真测试三种算法对多信号的识别能力。

设信噪比为10 dB,其他参数设置不变。在该信噪比条件下,叠加信号已经分离,不同类型的



(a) BPSK信号



(b) QPSK信号

图8 相位编码信号识别概率

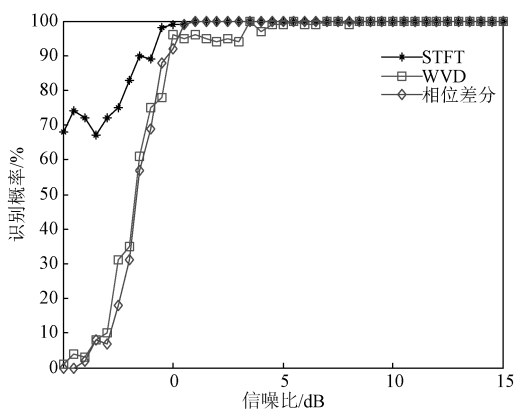


图9 FSK信号识别概率

信号分布在不同信道中。对每一种脉内调制识别算法进行1000次的蒙特卡罗实验。仿真结果如表2所示。

由表2可知,在10 dB信噪比条件下,基于相位差分的脉内调制识别算法的多信号处理能力最佳,对七种调制类型的辐射源信号的识别概率均高于99%。基于STFT的脉内调制识别算法,除LFM信号外,其余信号的识别概率也达到99%

表 2 多信号输入蒙特卡罗实验识别概率统计 %

辐射源信号类型	识别概率		
	STFT	WVD	相位差分
点频	99.7	99.7	99.7
LFM	98.4	47.2	99.9
BPSK	99.8	99.8	99.9
QPSK	99.5	99.6	99.7
FSK	99.7	97.2	99.8
NLFM	99.4	99.9	99.7
频率步进	99.8	73.0	99.9

以上。基于 WVD 的脉内调制识别算法,除 LFM 信号与频率步进信号外,识别概率也高于 97%。

## 4 结论

将基于 STFT 的脉内调制识别算法进行改进,改进后的算法对 LFM、NLFM、频率步进三种频率调制信号的识别概率较改进前有很大提升。当信噪比大于 2 dB 时,对三种辐射源信号的识别概率均达到 90%,对 NLFM 信号在同一信噪比条件下的识别概率提升超过 90%。当信噪比达到 5 dB 时,识别概率达到 99%。

将改进后的 STFT 算法与 WVD 和相位差分两种脉内调制识别算法通过仿真实验进行性能的对比分析。基于相位差分的脉内调制识别算法的

多信号处理能力最佳,但是该算法计算量相对较大,判断逻辑相对复杂,不利于在 FPGA 中完成算法实现。WVD 算法和改进后的 STFT 算法是非平稳信号分析的重要手段。三种算法各有优势,可以根据具体需求进行选择。

## 参考文献

- [1] 王飞,王喜鹏.基于时频分析的脉内特征分析[J].舰船电子对抗,2012,35(3):27-30.
- [2] 向强,秦开宇.基于线性正则变换与短时傅里叶变换联合的时频分析方法[J].电子学报,2011,39(7):1508-1513.
- [3] 洪先成,张国毅,李冬梅,等.多特征融合的雷达信号脉内调制识别[J].信息与电子工程,2011,9(5):551-555.
- [4] 张政超,李应升,王磊,等.雷达辐射源信号识别研究综述[J].舰船电子工程,2009,29(4):10-14.
- [5] 胡国兵,徐立中,徐淑芳,等.基于能量聚焦效率检验的信号脉内调制识别[J].通信学报,2013,34(6):136-145.
- [6] 楼康威,田曦,张朋辉.基于模糊函数的雷达信号脉内特征提取[J].数字技术与应用,2016(11):33-34,38.
- [7] 陈金城.雷达信号调制方式识别与参数估计算法研究[D].厦门:厦门大学,2016.
- [22] 卢玉斌,程永生,孙远程.侵彻混凝土类目标过载数据的处理原则研究[J].西南科技大学学报,2015,30(1):75-79.
- [23] 张海涛,张康,李朝阳,等.降低加速度信号粘连的传感器二次封装材料[J].兵器装备工程学报,2016,37(7):37-41,73.
- [24] 董灵飞,戴黎红,李蓉.基于应力波衰减材料的目标层特征凸现方法[J].探测与控制学报,2018,40(2):52-55,60.
- [25] 于润祥,石庚辰,隋丽,等.一种新型压电加速度传感器研究[J].北京理工大学学报,2014,34(3):273-276.
- [26] 黄珏.侵彻用新型压电加速度传感器研究[D].北京:北京理工大学,2018.
- [27] 苏怀维,石庚辰,贺磊,等.侵彻引信用状态传感器设计与实验研究[C]//中国兵工学会第二十一届引信学术年会论文集,惠州.[出版地不详]:中国兵工学会引信专业委员会,2019:173-176.
- [28] 李长龙,高世桥,牛少华,等.高冲击下引信用固态钽电容的参数变化[J].爆炸与冲击,2018,38(2):419-425.
- [29] 戴可人.电化学电容器的高过载冲击敏感特性研究[D].北京:清华大学,2018.
- [30] 黄用,崔敏解.解决侵彻信号粘连的新型传感技术[J].自动化与仪表,2018,33(11):61-66.
- [31] 张兵.硬目标传感与识别技术[D].北京:北京理工大学,2010.
- [32] 张雄星,邹金龙,王伟,等.新型磁敏感侵彻计层方法研究[J].兵工学报,2019,40(11):2204-2211.

(上接第 10 页)