信号特征提取参考论文：

时域：

1. 时域矩峰度：

2.2.2.7 时域矩峰度系数

$$a_4 = \frac{E\left(|X-\mu|^4\right)}{\sigma^4} \tag{2-16}$$

其中，X 为信号的时域离散值，μ 为其均值，σ 为其标准差。在不同 JNR 下各种干扰信号的特征参数 a_4 如下图所示：

2. 时域距偏度：

1、时域矩偏度系数

偏度系数用以描述信号的分布偏离中心的程度，当信号左右对称分布时，偏度系数为0，当信号在右侧的部分多于左侧时，偏度系数大于0，反之则偏度系数小于0。可知矩偏度系数描述了信号整体上的分布规律。实际应用中多采用分布的三阶中心距来定量描述信号整体的偏斜程度。设 X 为接收到的离散化时间序列，则信号 X 的矩偏度系数定义为：

$$a_1 = \frac{E(X-\mu)^3}{\sigma^3} \tag{3-1}$$

其中 μ 为 X 的均值，σ 为 X 的标准差。

3. 时域包络起伏度：

3.2.2 时域包络起伏度

时域包络起伏度用以描述信号时域波形包络的起伏程度，定义为信号时域幅度的方差与均值平方的比值，可表达为

$$R = \frac{\sigma^2}{\mu^2} \tag{3-6}$$

其中，σ^2 表示接收信号时域幅度的方差；μ 表示接收信号时域的幅度均值。

频域：

1. 单频能量聚集度：

2.2.2.1 单频能量聚集度

首先对功率归一化后的干扰信号做 FFT 变换，得其频谱幅值 $F(n), n=1,2,\cdots,N$，找出最大的频谱值对应的索引 m，定义 C：

$$C=\frac{\sum_{i=m-k}^{m+k}F^2(i)}{\sum_{i=1}^{N}F^2(i)} \tag{2-7}$$

其中，k可以设置为一个很小的整数，仿真中设置k=1。C 可以用来识别出单音信号。在不同干噪比（Jamming-to-Noise Ratio, JNR）下各种干扰信号的特征参数C 的平均值如下图所示：

2. 平均频谱平坦系数：

5. 平均频谱平坦系数

平均频谱平坦系数 F_c 定义为：

$$F_c=\sqrt{\frac{1}{K}\sum_{k=0}^{K-1}\left[X_c(k)-\tilde{X}_c(k)\right]^2} \tag{4-12}$$

其中，$X_c(k)=X(k)-\frac{1}{2L+1}\sum_{i=-L}^{L}X(k+i)$。 $\tilde{X}_c(k)$ 为 $X_c(k)$ 的统计均值。L 为平均滑动窗口宽度，取 $L=0.03K$， K 为信号傅里叶变换点数。

3. 频域矩峰度系数：

2.2.2.4 频域矩峰度系数

定义频域矩峰度系数为：

$$b_4=\frac{E\left(F(n)-\mu\right)^4}{\sigma^4} \tag{2-13}$$

式中，$E(\bullet)$表示为求平均，$F(n)$是信号频谱的幅度，μ 是 $F(n)$ 的均值，σ 是 $F(n)$ 的标准差。矩峰度系数 b_4 表征的是 $F(n)$ 的陡峭程度。在不同 JNR 下各种干扰信号的特征参数 b_4 如下图所示：

4. 频域矩偏度系数：

2.2.2.5 频域矩偏度系数

$$b_3=\frac{E\left(F(n)-\mu\right)^3}{\sigma^3} \tag{2-14}$$

上式中，$F(n)$ 是信号频谱的幅度，其中 μ 是 $F(n)$ 的均值，σ 是 $F(n)$ 的标准差。矩偏度系数 b_3 反应的是 $F(n)$ 对正态分布的偏离程度。在不同 JNR 下各种干扰信号的特征参数 b_3 如下图所示：

5. 频谱峰度：

3.3.2 频谱峰度

频谱峰度定义为信号频谱的最大值与频谱均值的比值[54,66,68,69]，描述的是信号频谱的陡峭程度，频谱峰度 K 的计算公式为

$$K = \frac{Y_{\max}}{Y_{mean}} \tag{3-21}$$

其中，$Y_{\max}$ 为信号频谱的最大值；Y_{mean} 为信号频谱的平均值。

对于能量较为集中的信号，其频谱峰度较大，因此，该特征主要针对频域能量较为集中且频谱具有脉冲性质的信号，可通过频谱峰度将其与其他能量相对分散的信号分离。

时频域---分数阶傅里叶域最大值：

信号的特征除了时域特征和频域特征，时频域的特征从另一个维度反应了信号的特性，在时频域中，提出分数阶傅里叶域最大值，以描述信号在时频域中的能量分布特性。首先，当信号到达接收端时，对其离散分数阶傅立叶变换（discrete fractional fourier transform，DFRFT）。

$$X(u_k, p) = F^p[y(n)] \tag{3-27}$$

其中，u_k 为分数阶傅里叶变换的离散值；p 为 DFRFT 的阶数，且 $p \in [0,2]$；$y(n)$ 为接收信号。

然后，计算接收信号不同阶数的 DFRFT 幅度谱的最大值 $R_{fr}(p)$

$$R_{fr}(p) = \max\left|X(u_k, p)\right| \tag{3-28}$$

最后，将 $[0,2]$ 区间内 $R_{fr}(p)$ 的最大值定义为分数阶傅里叶域最大值 R_{fr}，R_{fr} 可表达为

$$R_{fr} = \max\left[R_{fr}(p)\right], p \in [0,2] \tag{3-29}$$

对于 STI、MTI、LFSI、PI 和 NBI 等不同干扰信号的接收信号求解分数阶傅里叶域最大值，仿真其在不同干信比时的变化情况见图 3-10。

波形域----盒维数：

为便于理论分析和计算方便，本文将盒维数定义如下：

设接受的信号时间序列为 $s(t_1), s(t_2), \cdots s(t_N), s(t_{N+1})$，$N$ 为序列长度，且为偶数，定义：

$$\begin{aligned} d(\Delta) &= \sum_{i=1}^{N}\left|s(t_i) - s(t_{i+1})\right| \\ d(2\Delta) &= \sum_{i=1}^{N/2}\left(\max\left\{s(t_{2i-1}), s(t_{2i}), s(t_{2i+1})\right\} - \min\left\{s(t_{2i-1}), s(t_{2i}), s(t_{2i+1})\right\}\right) \end{aligned} \tag{3-12}$$

则信号 $s(t)$ 的盒维数定义为：$D_B(f) = 1 + \log_2\left(d(\Delta)/d(2\Delta)\right)$

可知盒维数的计算量主要取决于时间序列的长度，序列长度越大，计算量越大。不同干扰的盒维数随干噪比分布规律如图 3-11 所示：

仿真可知噪声调幅干扰的盒维数始终大于其他类型干扰，且随着干噪比增大而基本不变，其它干扰盒维数随干噪比增大而增大，且最终增大至 2.1 左右，不同干扰的盒维数分布曲线不重叠，因此可将盒维数作为识别干扰的特征之一。