

基于 S 变换与 PNN 的电磁环境复杂度评估*

李燕^{1†}, 何怡刚^{1,2}, 尹柏强²

(1.湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082;2.合肥工业大学 电气与自动化工程学院,安徽 合肥 230009)

摘要:针对复杂电磁环境定性分析和定量分级问题,提出基于广义 S 变换与 PNN(概率神经网络)的电磁环境复杂度评估方法.应用广义 S 变换对电磁环境中受干扰的样本信号进行时频分析,同步提取时频域时域占用度,频域占用度和能量占用度评估参数,分析了各参数的物理意义,并给出了各评估参数的计算公式.同时增加频率重合度、调制格式相似度和背景噪声强度等评估参数,利用获取的参数训练 PNN,并进行分类.仿真实验证明基于广义 S 变换与 PNN 的电磁环境复杂度评估方法在背景噪声大、训练样本数少的条件下能有效提取评估参数,并对电磁环境复杂度进行有效合理评估.

关键词:电磁环境;复杂度;评估;S 变换;PNN

中图分类号: TM937

文献标志码: A

Electromagnetic Environment Complex Evaluation Based on S-transform and PNN

LI Yan^{1†}, HE Yigang^{1,2}, YIN Baiqiang²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;)

Abstract: For electromagnetic environment complex evaluation, a novel evaluation method was proposed based on S-transform and probabilistic neural network (PNN). S-transform was applied to perform time-frequency analysis on the electromagnetic environment disturbance samples, the evaluation parameters such as time occupation, frequency occupation and energy occupation of the samples were extracted synchronously, physical interpretation of each parameter was analyzed, and the calculation formulas of them were shown. At the same time, frequency coincidence, modulation similarity and background noise intensity were selected as important evaluation indicators. These parameters were then used to train a PNN which was adopted to evaluate environmental complexity. The simulation results show that the proposed method has integrity of parameter extraction and relatively high evaluation accuracy, and it can also give excellent evaluation for high level noises background and small training set.

Key words: electromagnetic environment; complexity; evaluation; S-transform; probability neural network

* 收稿日期:2016-09-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577046, 51637004), National Natural Science Foundation of China(51577046, 51637004); 国家重点研发计划“重大科学仪器设备开发”资助项目(2016YFF0102200); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(61501162); 中国博士后科学基金资助项目(2015M571926)

作者简介:李燕(1975-),女,湖南双峰人,湖南大学博士研究生
通讯联系人, E-mail:LY785@126.com

电磁环境复杂度是指在一定时间、一定空间内,电磁信号交集的复杂程度.电磁环境复杂度定性和定量分级是有效应对电磁杂波干扰、正确指挥决策、信息化战争的基础.美国学者 Tetley 等人首次提出了基于数学模型的电磁环境分析预测方法,从数学分析角度给出了电磁环境的基本模型^[1].目前,国内对电磁环境复杂度研究主要以“四域法”为基础.文献[2]提出用于描述战场电磁环境“四域”特征指标,并给出具体指标计算方法.文献[3]提出了一种基于层次分析方法(AHP)的电磁环境复杂度评估方法,细化了评估指标,明确了评估标准参数,确定标度准则.文献[4]提出一种基于 D-S 证据的评估方法,采用模糊数学法将定性的参数问题转为定量描述.文献[5]引入多元联系数,构建了电磁环境复杂度综合评估方法,权值的设定根据均分原则.文献[6]在四域法的基础上增加了异动信号率作为评估指标,采用模糊推理系统对其进行评估.上述评估法存在以下不足:首先,特征参数时间占用度、频率占用度和能量占用度作为三个独立的参数分别进行计算,独立的参数测量计算对系统的评估会造成较大的误差^[6].其次,采用专家系统及模糊规则对经验知识的依赖性强,具有一定的主观性且自适应性较差^[7].第三,忽略了评估对象,评估对象执行效能的好坏才是评价电磁环境复杂度的最终指标^[8].

针对这些问题,本文提出基于广义 S 变换^[9]和概率神经网络^[10]的电磁环境评估方法.利用广义 S 变换在时频域内同步提取时域占用度、频域占用度和能量占用度指标,同时,增加频率重合度、调制方式和背景噪声强度等对系统影响较大的评估指标,采用自适应 PNN 方法,对电磁环境复杂度进行评估.

1 广义 S 变换域时频参数的提取

1.1 广义 S 变换

设一维连续信号 $x(t)$ 的小波变换如式(1)所示.

$$WT_x(\tau, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi_{a,\tau} \left(\frac{t-\tau}{a} \right) dt \quad (1)$$

式中: $\psi_{a,\tau} \left(\frac{t-\tau}{a} \right)$ 为小波基函数; τ 为时移因子; a 为尺度因子.当小波变换基函数选高斯窗函数 $\psi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}$ 时,对应的小波变换如式(2)所示.

$$WT_x(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2}{2a^2}} dt \quad (2)$$

对式(2)两边同时乘以相位修正因子 $e^{-2\pi i t}$,取 $a=1/f$,并对其幅值进行 \sqrt{f} 修正可得 S 变换^[11-12]如式(3)所示.

$$S_T(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \times \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \times e^{-\frac{f^2(\tau-t)^2}{2}} \times e^{-i2\pi f t} dt \quad (3)$$

为了有效利用快速傅里叶变换算法,将式(3)变换可得 S 变换快速算法如式(4)所示.

$$S_F(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(\varphi + f) e^{-\frac{2\pi^2 \varphi^2}{f^2}} e^{i2\pi \varphi \tau} d\varphi \quad (4)$$

在离散情况下,采用快速傅里叶变换算法计算 S 变换 $S_F[m, n]$ 如式(5)所示.

$$S_F[m, n] = \sum_{l=0}^{N-1} X[l+n] e^{-2\pi^2 l^2 / n^2} e^{i2\pi m l / N} \quad (5)$$

式中: $m, n=0, 1, 2, \dots, N-1$; $x[l]$ 为 $x(m)$ 的离散傅里叶变换.

为了提高对电磁信号时频分辨率,更有效地提取信号,在 S 变换中引入时频调节因子 α, β ,得到广义 S 变换的定义^[9]如式(6)所示.

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \times \frac{\alpha |f|^\beta}{\sqrt{2\pi}} \times e^{-\frac{\alpha^2 f^{2\beta} (\tau-t)^2}{2}} \times e^{-i2\pi f t} dt \quad (6)$$

式中: α 为高斯窗幅度拉伸因子; β 为频率尺度拉伸因子.当 $\alpha=1$, 且 $\beta=1$ 时,广义 S 变换为 Stockwell 所提出的 S 变换^[11].当 $\alpha < 1$ 或 $\beta < 1$ 时,频率分辨率提高,时间分辨率下降,当 $\alpha > 1$ 或 $\beta > 1$ 时,时间分辨率提高,频率分辨率下降.

1.2 时频参数的提取

特定时间、特定频率及电磁环境能量关系在 S 域内如图 1 所示.

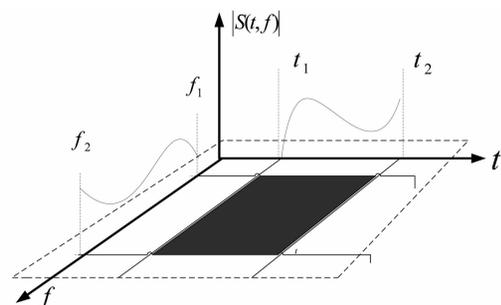


图1 电磁信号时域、频域和能量域之间的关系
Fig.1 The relation between time-domain, frequency-domain and energy-domain of electromagnetic signals

广义 S 变换后的时频矩阵能准确地反应信号的时域和频域特征,时频矩阵的大小表示信号在该

时间对应频率下信号的能量大小,因此,当评估对象的时间和频段范围确定后,采集信号经广义 S 变换后,二维时频特征能准确同步的计算系统的时域占用度,频域占用度和能量占用度三个评估指标。

1.2.1 频率占用度

频率占用度是评估频带 $[f_1, f_2]$ 内,超过电平门限 S_0 的干扰信号频点所占带宽之和 B_P 与评估带宽 $f_2 - f_1$ 之比,它反映干扰信号与评估对象之间的频率交集程度,频率占用度越大,电子设备在该频段内的可用频谱资源越窄,超电平门限频点所占带宽和的广义 S 变换计算如式(7)所示。

$$B_P = \int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{S(t, f) - S_0}{f_2 - f_1} \right] dt, (S(t, f) \geq S_0) \quad (7)$$

B_P 表示的为超过电平门限信号在时域内的能量平均值,频率占用度 S 域内的计算如式(8)所示。

$$F_P = \frac{B_P}{f_2 - f_1} \quad (8)$$

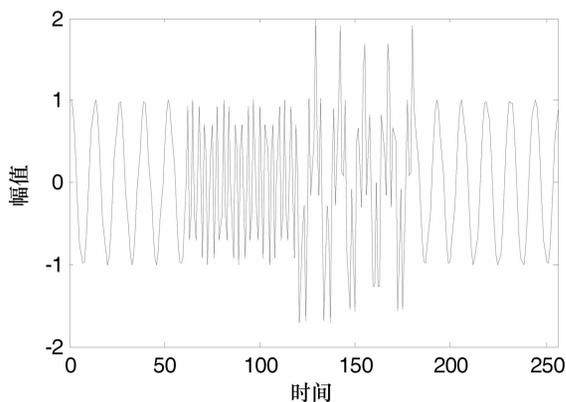
1.2.2 时间占用度

时间占用度是在评估时间 $[t_1, t_2]$ 内,超过电平门限 S_0 的干扰信号持续时间之和 K_P 与评估持续时间 $t_2 - t_1$ 之比,它反映干扰信号与评估对象在该时间段内的重叠程度,时间占用度越大,对评估对象干扰的可能性就越大,超过电平门限 S_0 的干扰信号持续时间之和 K_P 在 S 域内计算如式(9)所示。

$$K_P = \int_{f_1}^{f_2} \left[\frac{S(t, f) - S_0}{f_2 - f_1} \right] df, (S(t, f) \geq S_0) \quad (9)$$

则时间占用度 S 域内计算式如(10)所示。

$$T_P = \frac{K_P}{t_2 - t_1} \quad (10)$$



(a)带干扰的跳频信号源

1.2.3 能量占用度

能量占用度是指在一定空间、时间段和频率范围内,单一频点在一定带宽内能量积分和与所有超电平门限频点能量积分和之比,它反映电磁环境能量干扰的强弱程度,能量占用度 E_P 如式(11)所示。

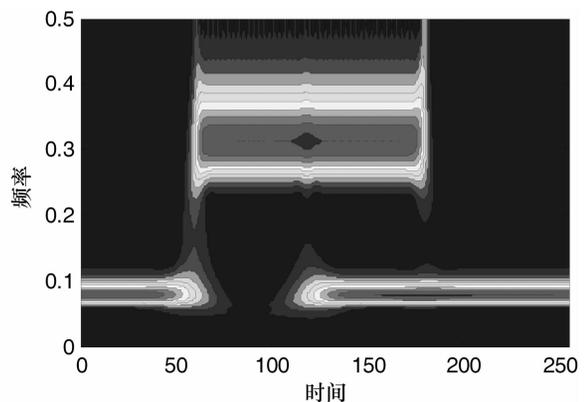
$$E_P = \frac{\int_{\Omega} \int_{f_3}^{f_4} S_t df d\Omega}{\int_{\Omega} \int_{f_1}^{f_2} S_t df d\Omega} \quad (11)$$

式中: f_3, f_4 为单监测点的起始频率和终止频率,且 $f_1 \leq f_3 < f_4 \leq f_2$ 。

为了更好地理解 S 变换域内干扰信号在某一区域内时间占用度、频率占用度和能量占用度的计算方法,取一跳频信号为仿真信号源,在相对频率为 20 Hz 和 80 Hz 两频点跳变,在时间 120~180 这段时间内受到 80 Hz 同频干扰,其时域波形如图 2(a)所示,信号源对应的广义 S 变换二维时频图如图 2(b)所示,从图 2(b)可以清晰地看出信号的时频分布,图 2(c)为时频功率分布图,幅值的大小代表着信号功率的强弱,图 2(d)为干扰信号的时频功率图,根据式(8),(10)和(11),取参考电噪声电平为 0,则计算出时间占用度为 $60/256 = 23.4\%$,频率占用度为 $0.25/0.5 = 50\%$,能量占用度为图 2(d)功率积分与图 2(c)功率积分之比,得能量占用度为 36.4% 。

1.2.4 频率重合度

频率重合度是指在频带 $[f_1, f_2]$ 内,干扰信号的上下限频率 f_3, f_4 与评估测试对象的上下限频率 f_5, f_6 之间的交集与自身频带的带宽之比,它是衡量其它频段信号与测试对象信号在频域的重叠程度,频率重合度越高,说明干扰信号对测试信号的干扰机率越大,反之,干扰机率越小,频率重合度的计算如式(12)所示。



(b)信号源 S 变换时频图

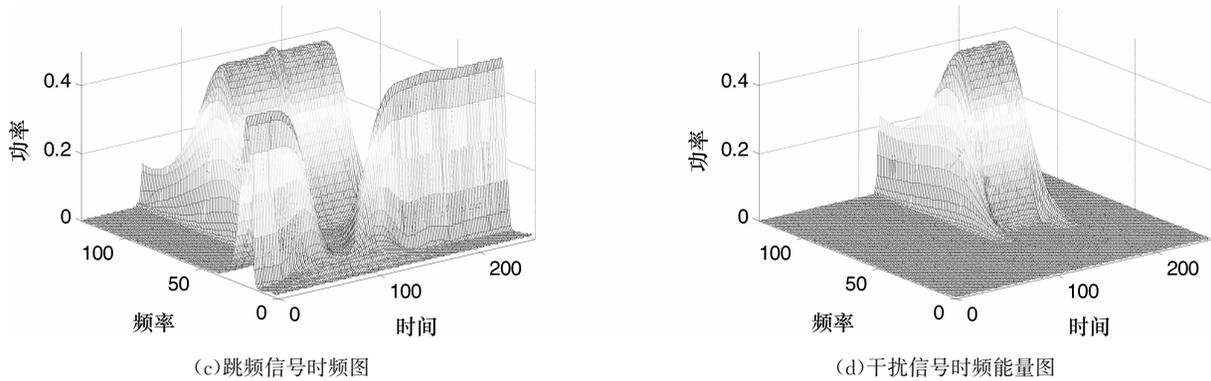


图2 跳频干扰信号S变换占用度时频仿真

Fig.2 S-transform occupancy rate simulation diagram of frequency hopping and interference signal

$$S_P = \begin{cases} \frac{f_4 - f_5}{f_4 - f_3}, & f_3 \leq f_5 \leq f_4 \leq f_6; \\ 100, & f_3 \leq f_5 \leq f_6 \leq f_4; \\ \frac{f_6 - f_3}{f_4 - f_3}, & f_5 \leq f_3 \leq f_6 \leq f_4; \\ 0, & \text{其它.} \end{cases} \quad (12)$$

2 基于 PNN 复杂度评估

基于S变换与PNN复杂度评估具体流程如图3所示.该方法能有效解决传统方法中时频参数缺乏整体性、对经验知识具有依赖性、对未知的复杂电磁环境缺乏自适应性的不足.

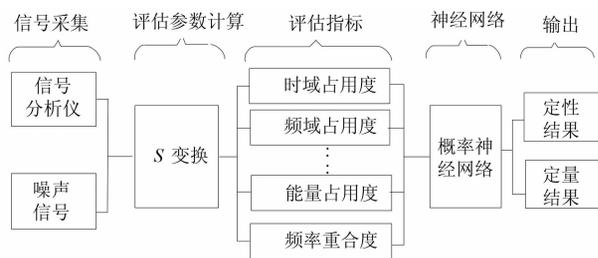


图3 电磁环境复杂度评估流程

Fig.3 Electromagnetic environment complexity evaluation flow

且采用PNN网络可在寻找最优评估的同时,减小网络训练次数,当样本增加时,无需重新进行长时间的训练^[12].

2.1 PNN 网络结构

PNN层次模型是Specht根据贝叶斯分类规则与Parzen的概率密度函数提出的一种人工神经网络,它吸收了径向基神经网络与经典的概率密度估计的优点^[10].相对于模糊推理及层次分析法来说,概率神经网络具有强大的非线性分类能力,且自适应能力强,训练时间短.

概率神经网络以最小错误率贝叶斯决策计算如式(13)所示:

$$P(\omega_i | x) = \frac{P(x | \omega_i)P(\omega_i)}{\sum_{k=1}^n P(x | \omega_k)P(\omega_k)} \quad (13)$$

决策规则如下:

$$P(x | \omega_i)P(\omega_i) > P(x | \omega_j)P(\omega_j)$$

$$\forall i \neq j \Rightarrow x \in \omega_i$$

以Parzen为窗函数的概率密度计算公式如式(14)所示:

$$\hat{P}(x) = \frac{k}{nV} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k \frac{1}{V} \varphi\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (14)$$

式中: n 为总的样本个数; k 为落入选择范围内的样本个数; V 表示以 x 为中心棱长为 h 的 d 维超立方体的体积.

PNN网络结构如图4所示.由输入层、模式层、求和层和输出层构成.在训练网络时,将S变换提取的特征参数存储为训练样本,由输入层送入模式层,在模式层中进行向量的点积,完成非线性处理.

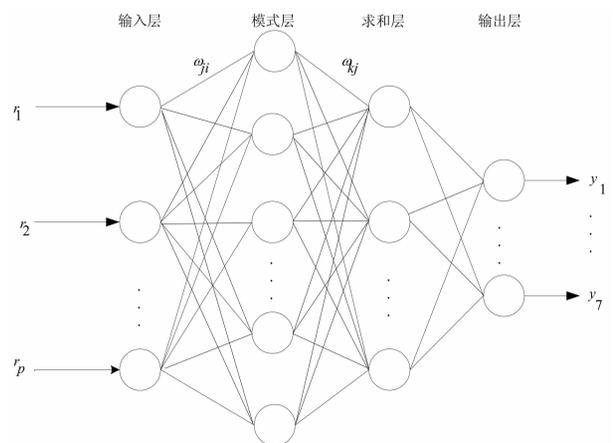


图4 PNN结构图

Fig.4 Structure chart of PNN

处理结果送入求和层与相应类别的模式单元相连,根据 Parzen 方法估计各类的概率,在决策层中根据输入向量的概率估计,按贝叶斯分类规则将输入特征向量分到具有最大概率值的类别中去,实现正确评估。

2.2 评估指标的选取

影响电磁环境复杂度的参数较多,除上述时域占用度 T_P ,频域占用度 F_P ,能量占用度 E_P 和频率重合度 S_P ,背景噪声强度 N_P 外,信号的调制格式 M_P ^[13]和信道占用度 C_P (信号超门限值的持续时间

与测试时间的比值)对电磁环境复杂度评估也有比较大的影响.因此选取的评估指标包括 S 变换计算特定时间和频域范围内信号的时域占用度、频域占用度和能量占用度,频率重合度、信号调制格式、信道占用度及背景噪声强度,共 7 项.根据《战场电磁环境分类与分级国家军用标准》、《复杂战场电磁环境研究》及 GJB 6520—2008《战场电磁环境分类与分级方法》,复杂电磁环境复杂度定级参数标准如表 1 所示。

表 1 电磁环境复杂度的定级参数标准

Tab.1 Parameter standard of electromagnetic environment complexity

定量等级	$T_P/\%$	$F_P/\%$	$E_P/\%$	$S_P/\%$	$M_P/\%$	$C_P/\%$	$N_P/\%$	定性等级	效能下降/ $\%$
1	0-10	0-10	0-10				$N_P \leq 0.2S_0$		
2	10-20	10-20	10-20	$0 \leq S_P < 20$	$0 \leq M_P < 10$	$0 \leq C_P < 20$	$0.2S_0 < N_P \leq 0.4S_0$	一般复杂	0-10
3	20-30	20-30	20-30				$0.4S_0 < N_P \leq 0.6S_0$		
$0 \leq T_P \times F_P \times E_P \leq 10$									
4	30-40	30-40	30-40	$20 \leq S_P < 40$	$10 \leq M_P < 40$	$20 \leq C_P < 40$	$0.6S_0 < N_P \leq 0.8S_0$	轻度复杂	10-40
5	40-50	40-50	40-50				$0.8S_0 < N_P \leq S_0$		
$10 \leq T_P \times F_P \times E_P \leq 30$									
6	50-60	50-60	50-60	$40 \leq S_P < 80$	$40 \leq M_P < 80$	$40 \leq C_P < 80$	$S_0 < N_P \leq 1.2S_0$	中度复杂	40-80
7	60-70	60-70	60-70				$1.2S_0 < N_P \leq 1.4S_0$		
$30 \leq T_P \times F_P \times E_P \leq 50$									
8	70-80	70-80	70-80	$S_P \geq 80$	$M_P \geq 80$	$C_P \geq 80$	$1.4S_0 < N_P \leq 1.6S_0$	重度复杂	> 80
9	80-90	80-90	80-90				$1.8S_0 < N_P \leq 1.8S_0$		
10	90-100	90-100	90-100				$N_P > 2S_0$		
$T_P \times F_P \times E_P > 50$									

2.3 试验参数的确定

以表 1 中所示 7 个指标为输入变量,以该复杂电磁环境下武器效能下降值作为输出变量,采用 10 个训练样本,每个样本有 7 个分量,并取各等级占用度均值为训练样本值,调制方式样本随着复杂度等级的增加由 10 至 100 递增.最终确定输入矩阵 P 以及目标矩阵 T 如下所示。

$$P = \begin{bmatrix} 5 & 5 & 5 & 10 & 10 & 10 & 10 \\ 15 & 15 & 15 & 30 & 10 & 10 & 20 \\ 25 & 25 & 25 & 50 & 10 & 10 & 30 \\ 35 & 35 & 35 & 70 & 30 & 30 & 40 \\ 45 & 45 & 45 & 90 & 30 & 30 & 50 \\ 55 & 55 & 55 & 110 & 60 & 60 & 60 \\ 65 & 65 & 65 & 130 & 60 & 60 & 70 \\ 75 & 75 & 75 & 150 & 90 & 90 & 80 \\ 85 & 85 & 85 & 170 & 90 & 90 & 90 \\ 95 & 95 & 95 & 190 & 90 & 90 & 100 \end{bmatrix}$$

$$T = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10]$$

式中:输入矩阵 P 的每行由输入特征 $[r_1, r_2, \dots, r_7]$ 构成.输出代表评估对象效能下降的 10 个等

级,与表 1 中的等级值相对应.通过计算输入特征与模式层的权值欧氏距离,采用高斯函数作为激活函数,可得模式层的输出 h 如式(15)所示。

$$h = \exp\left(\frac{-\|r - w_{ij}\|^2}{2\sigma^2}\right) \tag{15}$$

式中: σ 为高斯平滑因子; w_{ij} 为第一层与第二层网络连接的权值.求和层将模式中同一模式的输出求和,并乘以代价权值因子 w_{jk} ,计算概率密度.在决策输出层则选择求和层中输出最大者作为评估系统网络的输出.当输出结果为 1 时,则样本模式实现正确分类,否则重新训练调整权值,即:

$$net = \frac{1}{E} \sum w_{ij}h, E = \sum w_{jk} \tag{16}$$

且 $If \ net = \max_p(net) \ then \ y = 1, \ else \ y = 0,$ 其中, w_{jk} 为模式层与求和层之间的连接权值。

3 实验结果与分析

实验 1 采用信号发生器产生中心频率为 915 MHz,带宽为 100 MHz,调制格式为 FM,受 10 dB

高斯噪声干扰的信号源,在实测背景噪声强度为一80 dB情况下,设置电平阈值为-60 dB.通过实时监测S变换时频数据,当前频段内超过电平门限的频率点、占用带宽、持续时间和能量幅值如图5所示.

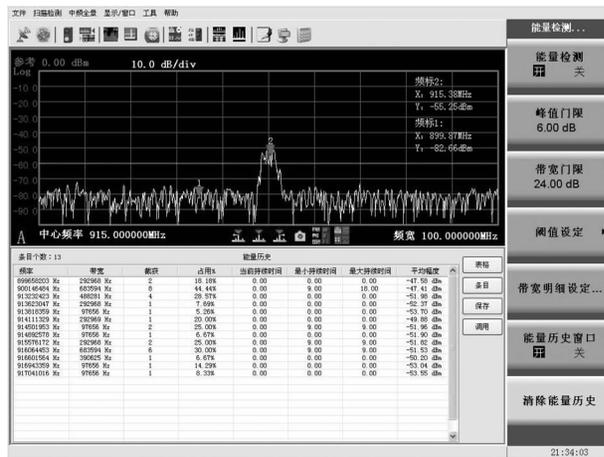


图5 监测带宽内超电平门限频点统计结果

Fig.5 Statistics result of super level threshold in monitoring bandwidth

由图5可知,位于895~905 MHz段的监测频点有两个,分别为899.65 MHz和900.14 MHz

两个频点.当前信号调制格式识别统计结果如图6所示.根据图5和图6的测试结果,可得出信号的时间占用度、频率占用度、能量占用度、频率重合度、调制格式相似度、信道占用度和背景噪声强度等关键评估参数,频率为899.65 MHz和900.14 MHz两个监测频点对应的评估参数如表2所示.利用上面训练好的PNN网络对其进行复杂度等级识别,网络的输出分别为2和7,所对应的电磁环境复杂度定性结果为一般复杂和中度复杂.通过与表1中的基本参数对比可知,该评价结果是正确的.

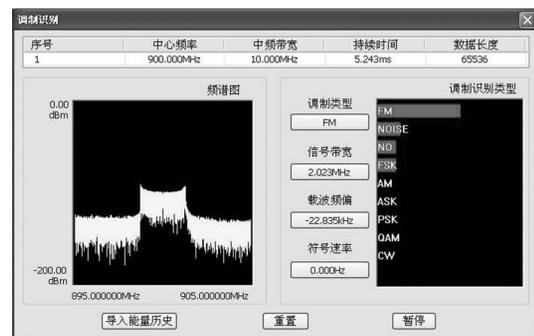


图6 监测带宽内信号调制格式识别

Fig.6 Recognition of modulation format in monitoring bandwidth

表2 评估指标与评估结果

Tab.2 Evaluation index and result

监测点	时间占用度/%	频率占用度/%	能量占用度/%	频率重合度/%	调制格式相似度/%	信道占用度/%	背景噪声强度/dB	PNN网络输出	PNN评价结果
1	18.18	29.29	29.18	83.33	11	20	-80	2	一般复杂
2	44.44	68.35	70.82	35.71	65	80	-80	7	中度复杂

实验2采用仿真导引头信号作为实验测试对象,信号中心频率为11 GHz,带宽为2 MHz,脉冲宽度为1 μs的制导脉冲信号,通过第三方信号发生器施加同一频率且满足表1国军标电磁环境复杂度定级参数标准的4种不同复杂度等级的干扰信号.在相同测试数据情况下,分别利用多元联系数法、四域法及本文提出的方法对数据进行评估,测试数据及评估结果如表3所示.

通过对比模拟信号的复杂度与评估结果的复

杂度可知,多元系数法在一定程度上能实现电磁复杂度的分类,但结果存在一定的偏差,例如表3中环境2和环境3,参数有较明显的差异,而多元联系数法却得到相同的复杂度评估结果.本文所提评估方法能精确实现电磁环境定性与定量评估.为了测试评估对象在电磁环境中的执行效能,选用信号的误码率作为效能测试指标,实验二中4种不同环境下信号的误码率如表3中所示.不同复杂度环境下的误码率的结果与表1中效能下降程度相符合.

表3 不同的评估方法及其评估结果

Tab.3 Evaluation result of different evaluation methods

环境	模拟复杂度	电磁环境复杂度评估指标	多元联系数法			四域法		本文方法	
			输出	综合等级	综合等级	输出	综合等级	误码率	
1	一般复杂	$F_p = 20\%, T_p = 40\%, E_p = 50\%, S_p = 20\%, C_p = 20\%, M_p = 20\%$	0.5	一般复杂	无法评价	2	一般复杂	0%	
2	轻度复杂	$F_p = 50\%, T_p = 40\%, E_p = 50\%, S_p = 20\%, C_p = 40\%, M_p = 30\%$	-0.4	较复杂	无法评价	4	轻度复杂	20%	
3	中度复杂	$F_p = 60\%, T_p = 80\%, E_p = 50\%, S_p = 50\%, C_p = 70\%, M_p = 60\%$	-0.5	较复杂	无法评价	6	中度复杂	53%	
4	重度复杂	$F_p = 80\%, T_p = 80\%, E_p = 50\%, S_p = 80\%, C_p = 90\%, M_p = 70\%$	-0.7	重度复杂	无法评价	8	重度复杂	92%	

4 结 论

本文提出的基于 S 变换和 PNN 的电磁环境复杂度评估方法,通过对信号进行 S 变换,使得时域占用度、频域占用度和能量占用度 3 个参数作为一个整体来考虑,减少了由于参数的独立性给评估带来的误差;增加了频率重合度、调制格式相似度和背景噪声、信道占用度等评估指标,使得对具体环境的评估更加精准全面;采用 PNN 对电磁环境等级进行定量分类,避免了传统方法对经验知识的依赖性及自适应性较差的缺点.仿真实验与计算结果证明,该方法能在训练样本少、背景噪声大并且有干扰信号的情况下仍能有效提取评估特征参数,实现对复杂电磁环境下电子设备的效能正确评估.

参考文献

- [1] TETLEY W H. Analytical prediction of electromagnetic environments[J]. IEEE Transactions on Communications Systems, 1961, 9(2): 175—185.
- [2] 王志刚,王芳,赵志强.战场电磁环境客观复杂性分析与评估[J].现代防御技术,2010,38(3):19—25.
WANG Zhigang, WANG Fang, ZHAO Zhiqiang. The battlefield electromagnetic environment complexity of objective analysis and evaluation[J]. Modern Defence Technology, 2010, 38(3): 19—25. (In Chinese)
- [3] 董志勇,栗强.基于层次分析法的人为电磁环境复杂程度评估[J].指挥控制与仿真,2008,30(5): 106—110.
DONG Zhiyong, LI Qiang. Complexity evaluation of artificial electromagnetic environment based on AHP[J]. Command Control & Simulation, 2008, 30(5): 106—110. (In Chinese)
- [4] 代合鹏,苏东林.电磁环境复杂度定量分析方法研究[J].微波学报,2009,25(3):25—27.
DAI Hepeng, SU Donglin. Study of the complexity evaluation on electromagnetism environment[J]. Journal of Microwaves, 2009, 25(3): 25—27. (In Chinese)
- [5] 王志刚,何俊.战场电磁环境复杂性定量评估方法研究[J].电子信息对抗技术,2008,23(2):50—53.
WANG Zhigang, HE Jun. The research of battlefield electromagnetic environment complexity quantitative evaluation method[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2008, 23(2): 50—53. (In Chinese)
- [6] 连世伟,李修和,沈阳,等.基于 GM(1,1)模型的电磁环境复杂度预测方法[J].火力与指挥控制,2012,37(11):33—36.
LIAN Shiwei, LI Xiuhe, SHEN Yang, *et al.* Study on complexity prediction of electromagnetic environment based on GM(1,1) [J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(11): 33—36. (In Chinese)
- [7] 顾有林,张志,王伟,等.电磁环境复杂度评估算法研究与仿真实现[J].系统仿真学报,2012,24(2):394—397.
GU Youlin, ZHANG Zhi, WANG Wei, *et al.* Research and simulation implementation of electromagnetic environment complex evaluation algorithm [J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(2): 394—397. (In Chinese)
- [8] 刘义,赵晶,刘佳楠,等.基于作战效能的战场电磁环境分级描述方法[J].系统工程与电子技术,2011,33(5):1059—1062.
LIU Yi, ZHAO Jin, LIU Jianan, *et al.* Novel battlefield electromagnetic environment classification method based on combat efficacy of weapon systems [J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(5): 1059—1062. (In Chinese)
- [9] 尹柏强,何怡刚,吴先明.心磁信号广义 S 变换域奇异值分解滤波方法[J].物理学报,2013,62(14):148702.
YIN Baiqiang, HE Yigang, WU Xianmin. A method for magnetocardiograms filtering based on singular value decomposition and generalized S-transform [J]. Acta Phys Sin, 2013, 62(14): 148702. (In Chinese)
- [10] 于生宝,何建龙,王睿家,等.基于小波包分析和概率神经网络的电磁法三电平逆变器故障诊断方法[J].电工技术学报,2016,31(17):102—112.
YU Shengbao, HE Jianlong, WANG Ruijia, *et al.* Fault diagnosis of electromagnetic three-level inverter based on wavelet packet analysis and probabilistic neural networks [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 102—112. (In Chinese)
- [11] STOCKWEL R G, MANSINHA L, LOWE R P. Localization of the complex spectrum: The S - transform [J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2002, 44(4): 998—1001.
- [12] 唐求,王耀南,郭斯羽,等.基于 S 变换与傅里叶变换的电能质量多扰动分类识别[J].湖南大学学报:自然科学版,2009,36(4):38—42.
TANG Qiu, WANG Yaonan, GUO Siyu, *et al.* Power quality disturbance classification based on S transform and Fourier transform [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009, 36(4): 38—42. (In Chinese)
- [13] 王月清,王健,王凡,等.一种电磁环境量化描述方法[J].电波科学学报,2013,28(4): 744—748.
WANG Yueqing, WANG Jian, WANG Fan, *et al.* A method for quantificational analysis for complex electromagnetic environment [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2013, 28(4): 744—748. (In Chinese)