

基于快速S变换时频空间模型的电磁干扰复杂度评估方法

尹柏强^{*①②} 王署东^① 何怡刚^{①②} 佐磊^① 李兵^① 程珍^①

^①(合肥工业大学电气与自动化工程学院 合肥 230009)

^②(武汉大学电气工程学院 武汉 430072)

摘要: 针对复杂电磁环境电磁干扰复杂度定性定量评估问题, 该文提出一种基于快速S变换时频空间模型的复杂度评估方法。利用快速S变换方法同步提取时域占用度、频域占用度和能量占用度等评估指标, 给出了具体计算方法。在此基础上建立快速S变换时频空间评估模型, 将时域、频域和能量域3维向量的F范数和均方根作为电磁环境主观复杂度和客观复杂度评估指标, 克服了传统电磁干扰复杂度评估独立参数定级不能全面反映电磁干扰整体特性的局限性。仿真结果表明, 采用该模型能有效同步提取时频及能量评估特征参数, 时频空间评估模型能精确反映整体电磁干扰特征; 实验测试结果验证了本文所提评估方法的正确性。

关键词: 快速S变换; 时频空间模型; 复杂电磁环境; 复杂度评估

中图分类号: TN97

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)01-0195-07

DOI: 10.11999/JEIT180256

Electromagnetic Environment Complex Evaluation Algorithm Based on Fast S-transform and Time-frequency Space Model

YIN Baiqiang^{①②} WANG Shudong^① HE Yigang^{①②} ZUO Lei^①

LI Bing^① CHENG Zhen^①

^①(School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

^②(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: For qualitative and quantitative complex evaluation problem of electromagnetic environment. This paper proposes a novel electromagnetic environment complex evaluation algorithm based on fast S-transform and time-frequency space model, which can count time-complex, frequency-complex and energy-complex simultaneously. Meanwhile, the computation methods and concept of qualitative and quantitative evaluation degree are introduced. To overcome the limitations of the traditional methods, F-norm and root-mean-square are selected as two important evaluation indicators, which have the advantage in accurate evaluation. Simulation results show that the proposed method is accurate and effective to reflect the intensity degree of electromagnetic interference; Meanwhile, the interference experiment of bus card confirms the correctness of the time-frequency space model. The experimental test results verify the correctness of the mentioned evaluators.

Key words: Fast S-transform; Time-frequency space; Complexity electromagnetic environment; Complex evaluation

收稿日期: 2018-03-21; 改回日期: 2018-08-13; 网络出版: 2018-09-04

*通信作者: 尹柏强 yinbaiqiang123@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61501162, 51577046), 无损检测技术教育部重点实验室(南昌航空大学)开放基金(JZ2015SJSY0018), 国家自然科学基金重点项目(51637004), 国家重点研发计划项目(2016YFF0102200)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61501162, 51577046), The Key Laboratory of Nondestructive Testing (Nanchang Hang Kong University) Opening Foundation, Ministry of Education (JZ2015SJSY0018), The State Key Program of National Natural Science Foundation of China (51637004), The National Key Research and Development Plan (2016YFF0102200)

1 引言

电磁环境是指存在于给定场所的所有电磁现象的总和^[1]。随着现代通信技术的不断进步和发展,电磁信号变得日益密集,可利用的频谱资源越来越少。信息化战争中,电磁信号密集,强度动态交叠,对抗特征突出,对电子信息系统、信息化装备和信息化作战产生严重影响。电磁干扰造成的热效应和强电场效应可使电子设备产生误动作,严重时可使部分电子设备功能失效,设备意外起火,造成恶性事故^[2]。面对日益复杂的电磁干扰环境,如何正确评估电子设备所处电磁环境复杂程度,有效防护电磁干扰问题成为当前研究的热点之一。

目前,针对电磁环境复杂度定性定量评估问题,国内外学者主要从评估指标选取和评价方法两个方面开展了大量的研究工作。在评估指标选取方面,美国学者Tetley^[3]提出了以频率重合度为主要评估指标的电磁环境复杂度评估方法,采用数学解析方法对电磁环境复杂度进行了预测性评估;Jaekel^[4]提出了以信号频率重合度和功率比值大小为主要评估指标的电磁环境分类评估方法,给出了常见电磁信号分类评估标准。尹成友等人^[5,6]提出了以时域、频域、能量域和空域为基础的“四域法”,选取时间占用度、频谱占用度、平均功率密度谱和空间覆盖率作为复杂度评估指标,并以此划定电磁环境复杂度等级。文献^[7]在“四域法”基础上增加了电磁信号密度和频率重合度作为复杂度评估指标。文献^[8]针对特定区域内的电台信号干扰评估问题,在“四域法”的基础上增加了异动信号率作为评估指标。尽管影响电磁环境复杂度的评估指标很多,且难以从时域、频域、能量域和空域进行准确表征,但上述文献研究结果表明电磁环境的复杂度与时频特征及能量分布密切相关。现有独立参数提取能为评估提供有效参数,但忽略了评价参数整体性与非同步提取问题^[9]。

在评估方法方面,目前采用的主要方法有层次分析法(Antalytic Hierarchy Process, AHP)、D-S证据理论、多元联系数法、神经网络等评估方法。文献^[10]提出了基于层次分析法的人为电磁环境复杂度评估方法,AHP建立了评估人为电磁环境的递阶层次结构,细化了评估指标。但AHP标度准则是通过咨询专家意见建立的,因此受人为因素影响较大,不利于算法的稳定实现。文献^[11]提出了一种基于D-S证据理论的电磁环境复杂度定量分析方法。D-S证据理论采用模糊数学方法对电磁环境进行了新的复杂等级划分,弥补了专家打分法的不足,提供了一种电磁环境复杂度评估新途径。但

模糊算法有自身的缺点:首先,模糊控制规则是根据经验设定的,具有一定的主观性;其次,控制规则一旦制定就不能根据外界条件变化进行调整,自适应性能差。文献^[12]引入多元联系数,构建了战场电磁环境复杂性综合评估的多元联系数模型。多元联系数法与AHP法类似,需要人为设定权值因子。目前的研究文献侧重于不同指标系数的确定,缺乏相应的数学评估模型,不能确切描述干扰对象指标与评估对象在时间、频率和功率上的相互关系。

针对传统电磁干扰复杂度评估独立参数定级的局限性,本文在文献^[5]的基础上,采用广义S变换方法同步计算时间占用度、频率占用度和能量占用度,实现评估指标的同步提取。推导出基于广义S变换的评估参数计算解析式;建立基于时频空间的电磁环境复杂度评估模型;通过计算时频区域内,评估对象与干扰信号之间的时频空间距离,确定电磁环境客观复杂度和主观复杂度,并给出定性和定量结果。在文章的最后,结合时频空间评估模型,以射频公交卡为例,验证了本文方法的正确性和有效性。

2 快速S变换

设1维连续电磁信号 $x(t)$ 的小波变换定义为^[13]

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

其中, $\psi_{a,\tau} \left(\frac{t-\tau}{a} \right)$ 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用高斯窗函数 $\psi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{t^2}{2} \right)$ 时, 其对应的小波变换为

$$\text{WT}_x(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{(t-\tau)^2}{2a^2} \right) dt \quad (2)$$

对式(2)两边同时乘以相位修正因子 $\exp(-2\pi at)$, 取 $a = 1/f$, 并对其幅值进行 $\sqrt{f}$ 修正可得S变换 $S(\tau, f)$ 为

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{f^2(\tau-t)^2}{2} \right] \cdot \exp(-i2\pi ft) dt \quad (3)$$

电磁信号 $x(t)$ 经S变换后可得2维时频矩阵 $S(\tau, f)$, 其中 τ 轴反映了信号的时域特性, f 轴反映信号的频域特性, $S(\tau, f)$ 幅值的大小反映了信号在该时间和频率点上的能量大小。

由于电磁信号所涉及信号频带范围宽, 信号采样点数多, 在评估参数提取时, 需要大量的计算。为了提高电磁信号S变换效率, 减小参数提取时间, 本文采用文献^[14]所提的快速S变换算法对实时

电磁信号进行时频参数提取。假设 $G(f')$ 为信号 $x(t)$ 的傅里叶变换, $W(f', f)$ 为高斯窗函数 $\psi_{a, \tau}(t)$ 的傅里叶变换, 则有

$$G(f') = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \exp(-i2\pi f' t) dt \quad (4)$$

$$W(f', f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{f^2(\tau - t)^2}{2} \right] \cdot \exp(-i2\pi f' t) dt \quad (5)$$

电磁信号 $x(t)$ 的快速S变换则可表示为

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[G(f + f') W(f', \sigma) \right] \cdot \exp(i2\pi f' \tau) df' \quad (6)$$

由于 $G(f')$ 和 $W(f', f)$ 均可由快速FFT算法来实现, 因此, 上述快速S变换方法可实现电磁信号的快速计算, 减少信号参数提取时间, 实现在线实时评估。

3 基于快速S变换评估参数计算方法

电磁信号经快速S变换后的时频矩阵能准确地反映信号的时域特征和频域特征, 快速S变换后的时频矩阵的大小代表着信号在该时间点对应频率点信号的能量大小^[15,16], 因此, 当评估对象的作战时间和频段范围确定后, 就能同步准确地计算系统的时域占用度、频域占用度和能量占用度3个评估指标。具体参数计算方法如下:

假设评估对象位于某一特定空间 Ω 范围, 所处的有效时间段为 $[t_1, t_2]$, 所处的频率范围为 $[f_1, f_2]$, 根据环境电磁主要干扰信号的时频分布情况, 计算评估时间范围 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 $t_2 - t_1$ 之比即可得干扰信号的时域占用度, 因此, 时域占用度S变换域计算表达式为

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

其中, $0 \leq S_0 \leq \max[S(\tau, f)]$ 。 T_P 反映了干扰信号与评估对象在该时间段内的重叠程度。 T_P 越大, 对评估对象干扰的可能性就越大。

同理, 在评估频带范围 f_1, f_2 内, 计算超过电平门限 S_0 的干扰信号频点所占带宽之和 B_P 与评估带宽 $f_2 - f_1$ 之比即可得干扰信号的频域占用度计算表达式为

$$F_P = \int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{S(t, f) - S_0}{(t_2 - t_1)(f_2 - f_1)} \right] dt \quad (8)$$

能量占用度则可通过计算时间段为 $[t_1, t_1]$ 和频率段为 $[f_1, f_2]$ 内的电磁干扰信号S变换幅值与评估

对象幅值之比, 即可得干扰电磁信号的能量占用度为

$$E_P = \frac{S(t, f) - S_0}{\max[S(t, f)] - S_0} \quad (9)$$

4 时频空间评估模型

4.1 客观复杂度评估模型

由于电磁环境客观复杂度描述的是干扰对象与评估区域间的关系, 因此, 可以采用干扰信号在区域内的时间占用度、频率占用度和能量占用度三者的乘积来描述干扰信号对区域的影响力。假设区域内时间占用度、频率占用度和能量占用度的最大值为100%, 则干扰信号在该区域内的占用度可用如图1所示的模型来表示。假设评估客观复杂度用 C 表示, 则

$$C = T_P \cdot F_P \cdot E_P \quad (10)$$

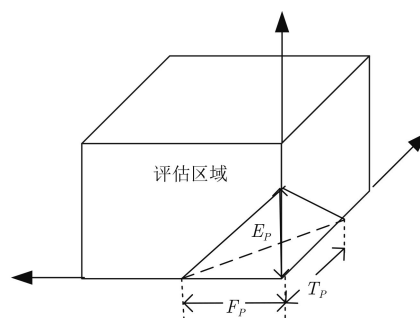


图1 时频空间模型

4.2 主观复杂度时空评估模型

由于电磁环境主观复杂度反映的是干扰信号与评估信号之间在时间、频率和能量3个方面的关系, 在快速S变换3维时频域内可描述为如图2所示的时频能量空间。理想情况下, 单一电磁信号干扰信号电磁环境复杂度参数集可表示为 $\{t_{P1}, f_{P1}, S_{P1}\}$, 当干扰信号参数集与评估对象电磁环境复杂度参数集 $\{t_{P2}, f_{P2}, S_{P2}\}$ 在空间内距离越近且时频空间参数重合度越高时, 干扰信号对评估对象的干扰效果越明显, 所得电磁环境复杂度评估值越大。因此, 基于快速S变换的时频空间距离电磁环境主观复杂度

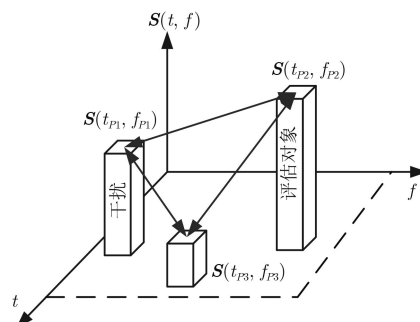


图2 快速S变换时频空间

评估模型可描述为

$$C_m = \|S(t_{P1}, f_{P1}) - S(t_{P2}, f_{P2})\|_F$$

$$= \sqrt{\frac{(t_{P1} - t_{P2})^2}{t_{P1}^2} + \frac{(f_{P1} - f_{P2})^2}{f_{P1}^2} + \frac{(S_{P1} - S_{P2})^2}{S_{P1}^2}} \quad (11)$$

其中, $\|\bullet\|_F$ 为3维向量的F范数, $S(t_{P1}, f_{P1})$ 表示干扰信号在快速S变换域内的幅值大小, $S(t_{P2}, f_{P2})$ 为评估对象在快速S变换域内的幅值大小。

4.3 多目标时频空间整体评估模型

电磁环境客观复杂性是指外界综合电磁环境干扰信号对评估对象的干扰程度^[17]。在实际应用中, 由于背景噪声和多种干扰源的存在, 评估区域内大于电平阈值的电磁信号可能存在多条干扰信号, 如图2所示。当评估对象所处电磁环境信号数量较多且时频空间距离较近时, 外界电磁环境对评估对象的干扰的能力就越强; 当干扰信号离评估对象相对较远时, 其对电磁环境内的评估对象干扰的可能性就越小。因此, 根据干扰源的统计概率分布, 可用随机干扰源变量和评估对象之间的偏离空间距离来描述客观电磁环境的复杂程度, 假设评估区域内所含大于阈值 S_0 的干扰信号有 N 条, 每一干扰源与评估对象之间的时频空间评估距离为 C_m , 如图2所示。因此, 电磁环境客观复杂度评估模型可表示为

$$C = \sqrt{\frac{(C_1^2 + C_2^2 + \dots + C_m^2 + \dots + C_N^2)}{N}} \quad (12)$$

5 评估指标与定级标准

传统电磁环境客观复杂度评估方法采用分离指标来划分电磁环境复杂度等级^[18], 采用10级评价模式, 将不同时间占用度、频率占用度、空域占用度和背景噪声等指标定性分为一般复杂度、轻度复杂度、中度复杂度和重度复杂度4个复杂度等级, 如表1所示。传统电磁环境复杂度评估方法量化了单个评估指标, 但忽略了不同指标存在交叉时该方法无法对电磁环境做出客观正确的评估。例如时间占用5%, 频率占用30%, 传统方法无法对其进行评估。因此, 采用本文所提的时频空间整体评估模型, 能有效解决参数交叉时的评估问题。采用时频空间模型评估时, 根据测试对象效能下降程度, 参数定义如表2所示。定义客观复杂度和主观复杂度评估指标, 并将信号工作带宽 B 作为主观复杂度评价的重要性能指标。干扰信号处于评估信号的有效带宽内时, 该信号才能实现对目标的有效干扰。

6 数值模拟仿真

假设仿真评估信号的频率为13.56 MHz, 干扰

表 1 传统电磁环境复杂度的定级标准(%)

定性等级	定量等级	时间	频率	空域
一般复杂	1	0~10	0~10	0~10
	2	10~20	10~20	10~20
	3	20~30	20~30	20~30
轻度复杂	4	30~40	30~40	30~40
	5	40~50	40~50	40~50
中度复杂	6	50~60	50~60	50~60
	7	60~70	60~70	60~70
	8	70~80	70~80	70~80
重度复杂	9	80~90	80~90	80~90
	10	90~100	90~100	90~100

表 2 本文电磁环境复杂度的定级标准(%)

定性等级	定量等级	客观复杂度 C	主观复杂度 C_m
一般复杂	1	$0 < C \leq 0.1$	$C_m \geq 2.7$
	2	$0.1 < C \leq 0.8$	$2.7 > C_m \geq 2.4$
	3	$0.8 < C \leq 2.7$	$2.4 > C_m \geq 2.1$
轻度复杂	4	$2.7 < C \leq 6.4$	$2.1 > C_m \geq 1.8$
	5	$6.4 < C \leq 12.5$	$1.8 > C_m \geq 1.5$
中度复杂	6	$12.5 < C \leq 21.6$	$1.5 > C_m \geq 1.2$
	7	$21.6 < C \leq 34.3$	$1.2 > C_m \geq 0.9$
	8	$34.3 < C \leq 51.2$	$0.9 > C_m \geq 0.6$
重度复杂	9	$51.2 < C \leq 72.9$	$0.6 > C_m \geq 0.3$
	10	$72.9 < C \leq 100$	$0.3 > C_m$

信号分别为25 MHz, 13 MHz, 5 MHz, 仿真信号经快速S变换后的2维时频等高图如图3所示。图中B, C, D分别代表频率为5 MHz, 13 MHz, 25 MHz干扰信号, 其中频率为5 MHz的干扰信号虽然在时间上与评估信号同处于20~40时间段内, 从主观复杂度角度分析, 其时间占用度为100%, 但频率占用度为0; 相反, 干扰信号D在频率占用度上为100%, 但在时间占用度上为0。因此, B、D两干扰信号对信号A没有干扰, 其客观复杂度为 $C=0$ 。干扰信号C与信号A在时频上均有部分重叠, 如图4所示。因此, 在实际评估过程中, 只有C处的信号对评估对象存在电磁干扰, 在存在时频及能量交叉时该评估结果有效。

7 实验验证及分析

实验采用任意波形发生器产生不同复杂程度的电磁干扰信号对射频公交卡进行模拟欺骗式电磁干扰和环境噪声电磁干扰, 测试其在两种电磁干扰情况下射频公交卡的实时工作性能。实验采用集成了快速S变换Labview程序RFID测试系统和实时频谱

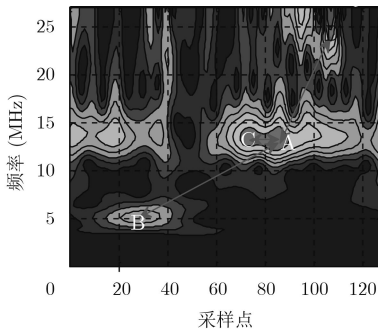


图 3 仿真信号S变换2维时频等高图

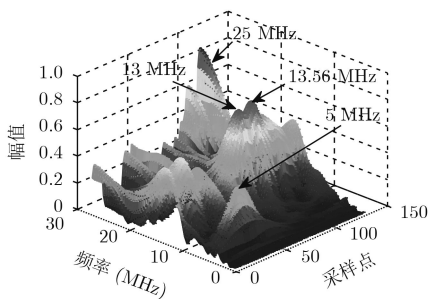


图 4 仿真信号3维时频等高图

分析仪作为监测设备，对实时采集信号采用快速S变换进行时频参数、功率参数及带宽参数监测，实验测试场景如图5所示。公交卡及电磁干扰测试收发天线如图6所示。

实验监测干扰信号1作用下的公交卡测试结果如图7所示，监测干扰信号2作用下所得结果如图8所示。根据图7、图8所示的时频参数计算结果，可得表3所示的评估参数。其中干扰信号1为同频欺骗干扰监测结果，干扰信号2为信号源模拟环境噪声



图 5 电磁干扰评估实验场景

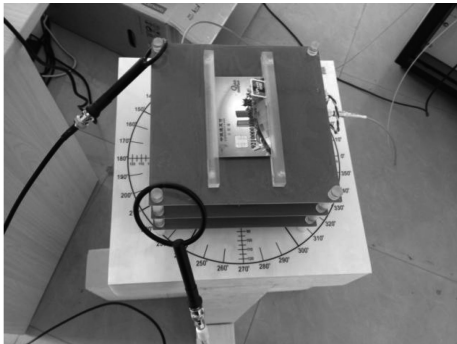


图 6 公交卡干扰实验收发天线及卡测试实验装置

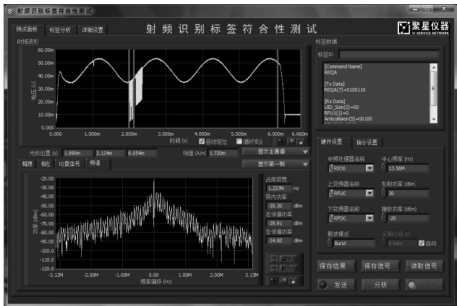


图 7 干扰信号1作用下的S变换时频参数测试结果

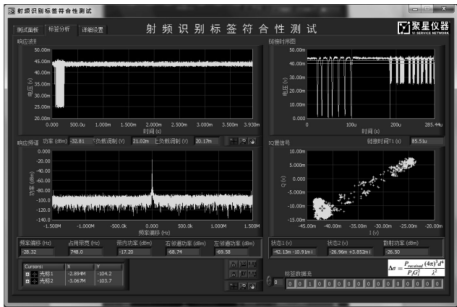


图 8 干扰信号2作用下的S变换时频参数测试结果

表 3 公交卡及电磁干扰信号参数表

信号样式	信号时频能量参数			
	中心频率(MHz)	持续时间(s)	带宽(MHz)	接收功率(dB)
公交卡信号	13.56	60	1.25	-20
干扰信号1	13.56	60	0.70	-30
干扰信号2	高斯噪声(0~400)	60	0~400	-70

表 4 客观复杂度评估参数及定量评价结果

信号样式	信号时频能量占用度(%)			C (%)
	T_P	F_P	E_P	
干扰1	100	56	30	16.8
干扰2	100	100	<0.01	<0.01

表 5 主观复杂度评估参数及定量评价结果

信号样式	S变换时频模型评估参数						C_m
	t_{P1} (s)	t_{P2} (s)	f_{P1} (MHz)	f_{P2} (MHz)	S_{P1} (dBm)	S_{P2} (dBm)	
干扰1	0~60	0~60	13.56	13.56	-20	-30	0.90
干扰2	0~60	0~60	13.56	0~400	-20	-70	0.01

准, 可知其干扰电磁复杂度等级为中度复杂, 根据国军标电磁环境复杂度定义可知, 在该复杂度干扰信号作用下, 装备的性能将受到一定的影响, 图7所示的测试波形及解码存在少量误码的测试结果验证了本文所提方法的正确性。由表4所示的干扰信号2所得测试结果为<0.01%可知, 该环境噪声干扰下, 系统的波形及解码结果均未受到影响, 如图8所示。对照表1和表2可知其电磁干扰复杂度为一般复杂度。

8 结论

本文提出了一种基于快速S变换时频空间模型的复杂度评估方法, 给出了时域占用度、频域占用度和能量占用度等评估指标快速S变换计算公式; 建立了基于快速S变换的时频空间评估模型; 分析了主观复杂度和客观复杂度定性定量标准。通过采用整体参数计算方法, 将时频3维向量的F范数和均方根作为主观复杂度和客观复杂度整体评估参数, 克服了传统电磁干扰复杂度评估独立参数定级的局限性, 为复杂度电磁环境参数整体评估提供了一种新的思路。仿真与实验结果表明, 采用该模型能有效提取时频评估特征参数, 整体评估参数能精确反映电磁干扰强度, 评估实验验证了该评估模型及分级标准的正确性。

参 考 文 献

- [1] 陈琛, 黄学良, 谭林林, 等. 电动汽车无线充电时的电磁环境及安全评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(19): 61-67. doi: 10.3969/j.issn.1000-6753.2015.19.010.
CHEN Chen, HUANG Xueliang, TAN Linlin, *et al.* Electromagnetic environment and security evaluation for wireless charging of electric vehicles[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(19): 61-67. doi: 10.3969/j.issn.1000-6753.2015.19.010.
- [2] 李伟, 魏光辉, 潘晓东, 等. 复杂电磁环境下通信装备干扰预测方法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(11): 2782-2789. doi: 10.11999/JEIT170107.
- [3] TETLEY W. Analytical prediction of electromagnetic environments[J]. *IRE Transactions on Communications Systems*, 1961, 9(2): 175-185. doi: 10.1109/TCOM.1961.1097669.
- [4] JAEKEL B W. Description and classification of electromagnetic environments - revision of IEC 61000-2-5[C]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Detroit, USA, 2008: 1-4.
- [5] 尹成友. 战场电磁环境分类与复杂性评估研究[J]. 信息对抗学术, 2007, 25(4): 4-6.
YIN Chengyou. The battlefield electromagnetic environment complexity of classification and evaluation research[J]. *Information Against Academic*, 2007, 25(4): 4-6.
- [6] 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. doi: 10.3969/j.issn.1009-086x.2010.03.005.
WANG Zhigang, WANG Fang, and ZHAO Zhiqiang. The battlefield electromagnetic environment complexity of objective analysis and evaluation[J]. *Modern Defence Technology*, 2010, 38(3): 19-25. doi: 10.3969/j.issn.1009-086x.2010.03.005.
- [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.
- [8] 王伦文, 孙伟, 潘高峰. 一种电磁环境复杂度快速评估方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2942-2947.
WANG Lunwen, SUN Wei, and PAN Gaofeng. An evaluating quickly method for electromagnetic environment

- complexity[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(12): 2942–2947.
- [9] ZEDDAM A, AVRIL G, and TLICH M. Electromagnetic environment and telecommunications: Towards a cognitive electromagnetic compatibility[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2009, 10(1): 4–12. doi: [10.1016/j.crhy.2009.02.001](https://doi.org/10.1016/j.crhy.2009.02.001).
- [10] 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): 106–112. doi: [10.3969/j.issn.1673-3819.2008.05.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-3819.2008.05.030).
- DONG Zhiyong and LI Qiang. Complexity evaluation of artificial electromagnetism environment based on AHP[J]. *Command Control & Simulation*, 2008, 30(5): 106–112. doi: [10.3969/j.issn.1673-3819.2008.05.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-3819.2008.05.030).
- [11] 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 and SU Donglin. Study of the complexity evaluationon electromagnetism environment[J]. *Journal of Microwaves*, 2009, 25(3): 25–27.
- [12] 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, 25(2): 50–53. doi: [10.3969/j.issn.1674-2230.2008.02.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2230.2008.02.013).
- WANG Zhigang and HE Jun. The research of battlefield electromagnetic environment complexity quantitative evaluation method[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2008, 25(2): 50–53. doi: [10.3969/j.issn.1674-2230.2008.02.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2230.2008.02.013).
- [13] YIN Baiqiang, HE Yigang, LI Bing, *et al.* An adaptive SVD method for solving the pass-region problem in S-transform time-frequency filters[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2015, 24(1): 115–123. doi: [10.1049/cje.2015.01.019](https://doi.org/10.1049/cje.2015.01.019).
- [14] YAO Wenxuan, TANG Qiu, TENG Zhaosheng, *et al.* Fast S-transform for time-varying voltage flicker analysis[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2014, 63(1): 72–79.
- [15] 尹柏强, 何怡刚, 朱彦卿. 一种广义S变换及模糊SOM网络的电能质量多扰动检测和识别方法[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(4): 866–872.
- YIN Baiqiang, HE Yigang, and ZHU Yanqing. Detection and classification of power quality multi-disturbances based on generalized S-transform and fuzzy SOM neural network[J]. *Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*, 2015, 35(4): 866–872.
- [16] 朱明哲, 姬红兵, 董青峰. 广义S变换及其在复杂辐射源信号分析中的应用[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(10): 2432–2436. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.01311](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.01311).
- ZHU Mingzhe, JI Hongbing, and DONG Qingfeng. Generalized S-transform and its application to analysis of complex emitter signals[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(10): 2432–2436. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.01311](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.01311).
- [17] 李文臣, 张政超, 陆静, 等. 电磁环境复杂度等级评估模型[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2012, 7(4): 427–430. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2012.04.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2012.04.023).
- LI Wenchen, ZHANG Zhengchao, LU Jing, *et al.* Evaluation model of electromagnetic environment complexity classification[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2012, 7(4): 427–430. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2012.04.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2012.04.023).
- [18] 王健, 张江明, 王瑞, 等. 论电磁环境的相对性与“接地气”的复杂度评估[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(5): 1249–1255. doi: [10.11999/JEIT150947](https://doi.org/10.11999/JEIT150947).
- WANG Jian, ZHANG Jiangming, WANG Rui, *et al.* Relativity of electromagnetic environment and down-to-earth complexity evaluation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(5): 1249–1255. doi: [10.11999/JEIT150947](https://doi.org/10.11999/JEIT150947).
- 尹柏强: 男, 1983年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为复杂电磁环境模拟、分析与评估。
- 王署东: 男, 1992年生, 硕士生, 研究方向为复杂信号分析与处理。
- 何怡刚: 男, 1966年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为复杂电磁环境分析与评估、智能电网技术、射频识别技术等。
- 佐磊: 男, 1982年生, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为设备状态监测与评估、智能感知技术及应用等。
- 李兵: 男, 1973年生, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为可靠性预测、物联网技术应用等。
- 程珍: 女, 1988年生, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为复杂信号分析与处理。