

## 一种辐射噪声源快速重构与机理描述方法

居荣<sup>1</sup> 邱晓晖<sup>2,3</sup> 赵阳<sup>1,3</sup> 颜伟<sup>1</sup> 董颖华<sup>1</sup> 王恩荣<sup>1</sup>

(1. 南京师范大学电气与自动化学院, 南京, 210042; 2. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 南京, 210003;  
3. 东南大学毫米波国家重点实验室, 南京, 210096)

**摘要:**针对现有辐射电磁兼容标准测试方法仅能得到辐射总噪声, 而无法诊断辐射噪声机理, 利用盲源信号分离算法进行辐射噪声源分析与定位, 并结合近场波阻抗理论实现辐射噪声机理诊断。理论与实验结果表明, 采用文中方法可提取辐射噪声源特性, 抑制辐射噪声, 并通过 GB 9254 Class B 标准, 从而验证方法的有效性。

**关键词:**电磁兼容; 盲源信号分离; 辐射噪声; 机理诊断; 噪声抑制

**中图分类号:** TM461; TN03      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2012)02-0217-05

### Fast Reconstruction of Radiated Noise Source and Mechanism Description Method

Ju Rong<sup>1</sup>, Qiu Xiaohui<sup>2,3</sup>, Zhao Yang<sup>1,3</sup>, Yan Wei<sup>1</sup>, Dong Yinghua<sup>1</sup>, Wang Enrong<sup>1</sup>

(1. School of Electrical & Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing, 210042, China;

2. School of Information and Communication Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, 210003, China; 3. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing, 210096, China)

**Abstract:** Since the total radiated noise is obtained by employing the standard electro-magnetic interference (EMI) measurement, and the radiated noise mechanism cannot be diagnosed, a radiated source reconstruction is implemented based on blind source separation (BSS) algorithm. Furthermore, the radiated noise mechanism is analyzed according to the near-field wave impedance measurement. Theoretical and experimental results show that radiated source characteristic is extracted. It can meet GB 9254 Class B and has good validity.

**Key words:** electromagnetic compatibility; blind source separation; radiated noise; mechanism diagnosis; noise reduction

随着电力电子产品的广泛使用, 高频数字印刷电路产生的辐射噪声严重影响其他设备的正常运行, 因此需要根据不同的辐射噪声机理设计有效的噪声抑制方案。然而, 现有方法大多基于电波暗室等标准电磁环境<sup>[1-3]</sup>, 这些方法虽然能够迅速获知辐射场强的大小并可以据此判断其是否满足电磁兼容标准, 但当检测结果不满足时, 就需要进行辐射噪声源的快速重构及其干扰机理的快速描述, 以便完成对高频辐射电磁干扰噪声问题的诊断与噪声抑制策略的确定, 从而有效解决辐射问题。与此同时, 在辐射

噪声源重构方面, 中国的 Zhang 利用小波变换分析了变换器不同脉宽调制所引起的传导电磁干扰现象<sup>[4]</sup>; 西班牙的 Gonzalez 利用小波变换分析了开关电源产生的传导电磁干扰并利用开关频率调制技术抑制传导干扰噪声<sup>[5]</sup>; 意大利的 Antonini 利用小波包分解技术研究了电磁干扰噪声时域信号<sup>[6]</sup>; 美国的 Pommerenke 利用短时傅里叶算法 (Short-time fast Fourier transform, STFFT) 对辐射干扰噪声中的尖峰信号做超分辨分析<sup>[7]</sup>。此外, 在辐射噪声诊断方面, 法国学者 Aouine 通过分析近场区域辐射磁

**基金项目:** 国家自然科学基金 (51075215) 资助项目; 江苏省自然科学基金 (BK2008429) 资助项目; 毫米波国家重点实验室开放基金 (K200903, K201106) 资助项目。

**收稿日期:** 2011-03-07; **修订日期:** 2011-05-04

**通讯作者:** 居荣, 男, 副教授, 1964 年生, E-mail: xjw272594@163.com。

场分量获取电路辐射干扰噪声,建立了电流环路模型<sup>[8]</sup>;英国 Thomas 也提出一种用于分析印刷电路板辐射干扰噪声的等效偶极子模型<sup>[9]</sup>;意大利的 Capizzi 利用 Okumura-Hata 电磁场经验传播公式和独立分量分析(Independent component correlation algorithm, ICA)算法研究辐射噪声源信号特征与位置信息<sup>[10]</sup>。

上述方法虽然取得了一定成果,但仍然无法实现辐射噪声源重构与机理诊断。鉴于此,在前期研究基础上<sup>[11-13]</sup>,本文利用盲源信号分离算法完成辐射噪声源重构,并结合近场波阻理论实现辐射噪声机理诊断,从而为辐射噪声有效抑制提供理论依据。

## 1 辐射噪声源重构及其机理

辐射噪声通常由多个未知独立辐射噪声源在空间叠加产生,而现有方法一般难以同时提取不同辐射噪声源的信号特征。因此,本文提出一种基于盲源信号分离算法(Blind source separation, BSS)的辐射噪声源重构方法,即通过对不同干扰目标的模型匹配实现辐射噪声源分析与定位。然而,BSS 算法要求不同辐射噪声源产生的信号不相关,因此需进行辐射噪声源可分离性分析。

### 1.1 辐射噪声源可分离性分析

为了验证不同辐射噪声源产生的信号相关性,不失一般性,设计两个辐射噪声测试场点 a, b 以及 3 个辐射噪声源  $E_{1CM}$ ,  $E_{2CM}$ ,  $E_{DM}$ , 其中,  $E_{1CM}$ ,  $E_{2CM}$  为共模辐射噪声源,  $E_{DM}$  为差模噪声源。此外,每个辐射噪声源在测试场点 a, b 产生的辐射噪声如图 1 所示。

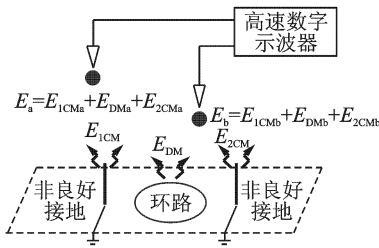


图 1 辐射噪声源可分离性分析

共模辐射噪声源产生共模电流,共模电流将引起共模辐射场;同样的,差模辐射噪声源产生差模电流,差模噪声源将引起差模辐射场。设  $Z_0$  为自由空间波阻抗,则带电导线在远场中产生的辐射场可表示为

$$E_{\theta} \approx j \frac{IZ_0\beta_0 L \sin\theta}{4\pi r} e^{-j\beta_0 r} \quad (1)$$

式中:  $I$  为共模/差模电流;  $Z_0$  为自由空间(远场)波阻抗,即  $377 \Omega$ ;  $\beta_0 = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为相关频率信号波长;  $\theta$  为测试角度;  $r$  为测试距离;  $L$  为辐射线缆长度。

为了确定 3 个辐射噪声源的相关性,两个测试

场点总场强  $E_a$  和  $E_b$  与 3 个辐射噪声源  $E_{1CM}$ ,  $E_{2CM}$  和  $E_{DM}$  之间的相关性。测试过程中,被测物摆放距离,测试角度,辐射线缆长度  $L_1$ ,  $L_2$  和  $L_3$  能够通过实际测量得到,  $Z_0$  和  $\beta_0$  为常量,由式(1)便可得

$$\begin{pmatrix} E_a(t) \\ E_b(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{1CMa}(t) + E_{DMa}(t) + E_{2CMa}(t) \\ E_{1CMb}(t) + E_{DMb}(t) + E_{2CMb}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_1 & K_2 & K_3 \\ K_4 & K_5 & K_6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{1CM}(t) \\ I_{DM}(t) \\ I_{2CM}(t) \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中:  $I_{1CM}(t)$ ,  $I_{DM}(t)$ ,  $I_{2CM}(t)$  分别为辐射噪声源产生共模/差模电流;  $K_i$  为常量,其值为 ( $i$  代表不同的测试点以及共模/差模噪声测试模态)

$$K_i = j \frac{Z_0\beta_0 L_i \sin\theta_i}{4\pi r_i} e^{-j\beta_0 r_i} \quad (3)$$

由此可见,两个测试场点总场强与辐射噪声源产生共模/差模电流有关,且 3 个辐射噪声源引起辐射场强仅与其共模/差模电流有关。因此,3 个辐射噪声源产生的信号不相关,可采用 BSS 算法。

### 1.2 基于 BSS 的辐射噪声源重构

盲源信号分离是指对源信号完全未知的情况下,仅根据从多个传感器测得的混合信号,从其中分离出各源信号。对于被测设备而言,其辐射总噪声是由多个辐射噪声源产生的,此外,每个辐射噪声源的信号也无法获知,因此可采用 BSS 算法实现辐射噪声源重构。设  $x(t)$  为  $p$  个测试场点的辐射噪声信号,  $s(t)$  为由  $m$  个独立的未知辐射噪声源信号,且  $p \geq m$ 。根据 BSS 算法,可得

$$x(t) = As(t) \quad t = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

式中  $A$  为一未知的  $p \times m$  混合矩阵。盲信号分离的目标是仅由传感器测量信号  $x(t)$  重构源信号  $s(t)$ 。由于盲源信号算法较多,本文将利用一种性能比较稳定的自适应类算法,即快速独立分量分析(Fast independent component correlation algorithm, Fast ICA)算法实现辐射噪声源重构。在 Fast ICA 算法中,  $s(t)$  的估计为

$$\hat{s}(t) = [\hat{s}_1(t), \hat{s}_2(t), \hat{s}_3(t), \dots, \hat{s}_m(t)]^T = Wx(t) = WAs(t) \quad (5)$$

式中,  $W$  为一个  $m \times p$  盲分离矩阵,使  $s(t)$  的估计  $\hat{s}(t)$  为  $s(t)$  的线性组合。根据大数定理,当  $WA$  中有 2 个或以上非零元素时,相对于相互独立的辐射噪声源信号  $s(t)$ ,其估计信号  $\hat{s}(t)$  更接近高斯分布,所以盲信号分离的代价函数可以取为使  $\hat{s}(t)$  的非高斯性更大。此外,易证明,该代价函数与  $\hat{s}(t)$  的负熵最大、 $\hat{s}(t)$  的互信息最小以及  $W$  的最大似然估计等准则都是等价的。只是在实现过程中,虽然峭度可以用来衡量信号的高斯性,但不易获得稳定的峭度估计;

互信息涉及概率分布估计,也不易实现。因此,一般常将 $\hat{s}(t)$ 的负熵最大作为 $\hat{s}(t)$ 估计准则,负熵估计具有较好的鲁棒性。Fast ICA 具体实现过程如下:

(1) $x(t)$ 的中心化。中心化的目的是使 $x(t)$ 成为零均值向量,即进行 $x(t) - E[x(t)]$ 处理,其中 $E[x(t)]$ 表示 $x(t)$ 的均值。

(2) $x(t)$ 的预白化。为简化盲分离过程,需要对零均值的 $x(t)$ 进行白化处理,即

$$\tilde{x}(t) = ED^{-1/2}E^T x(t) \quad (6)$$

式中: $D = \text{diag}[d_1, d_2, \dots, d_p]$ ,是由 $x(t)$ 的协方差矩阵特征根构成的对角阵; $E$ 为对应的正交归一特征向量构成的特征矩阵。预白化后, $\tilde{x}(t)$ 的协方差矩阵为单位阵。

(3)基于负熵最大准则的分离矩阵 $W$ 的盲估计,将 $W$ 表示为 $W = [W_1, W_2, \dots, W_p]$ ,按如下步骤对 $W_1, W_2, \dots, W_p$ 逐一进行估计:

- ①选择一个初始权向量 $W_i$ ;
- ②令 $W_i^+ = E [x(t) g(W_i^T x(t))] - E[g'(W_i^T x(t))]W_i$ ;
- ③令 $W_i = W_i^+ / \|W_i^+\|$ ;
- ④如果没有收敛,回到第②步重复执行。

根据上述快速独立分量分析算法即可实现辐射噪声源重构。

### 1.3 辐射噪声机理诊断方法

PCB 上的辐射噪声一般包括共模辐射噪声和差模辐射噪声,通常共模噪声由非良好接地或接地地点电位反射电压引起,而差模噪声则由信号环路即走线产生,如图 2 所示。由于不同的干扰噪声机理需要有不同的辐射 EMI 滤波方案做应对,又由于 PCB 电路上的辐射噪声源多种多样如功率器件所附属的驱动电路和一些数字器件上的控制电路等各种信号电路。通过上述 BSS 算法可以实现辐射噪声源重构,但仍无法诊断辐射噪声机理。

对于电路辐射干扰而言,根据测试距离和波长之间的大小关系,将辐射干扰分为近场辐射和远场辐射。当测试距离小于 $\lambda/(2\pi)$ 时称为近场辐射,反之则为远场辐射。另一方面,定义波阻抗 $Z_w$ 为辐射电场 $E$

与辐射磁场 $H$ 的比值,远场波阻抗约等于 $377 \Omega$ ,而近场共模波阻抗且与距离成反比,且呈高阻抗场

$$Z_w = \frac{E}{H} \propto \frac{1}{r} \quad (7)$$

近场差模波阻抗与测试距离成正比,且呈低阻抗场

$$Z_w = \frac{E}{H} \propto r \quad (8)$$

由式(7,8)发现,通过分析近场中波阻抗与测试距离的关系,可以诊断辐射噪声机理,并据此进一步确定辐射抑制方案。

## 2 理论仿真

为了验证上述辐射噪声源重构方法的有效性,本文建立两组辐射噪声源信号样本,分别包括 10 个共模辐射噪声源信号和 10 个差模辐射噪声源信号。利用本文方法提取每一组样本中的辐射噪声源信号特征,组成样本集,其中每个样本集由 20 个 32 维的特征向量组成。与此同时,测试场点信号集由 20 个辐射噪声信号组成,其中 1~8 和 15~17 为共模辐射噪声信号,9~14 和 18~20 为差模辐射噪声信号,分别提取上述 20 个辐射噪声信号的特征向量,并分别用平均距离法、平均样本法和进行 K 近邻分类法分类,如图 3 所示。其中,共模信号用 1 表

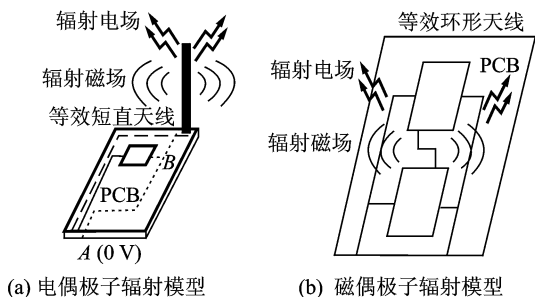
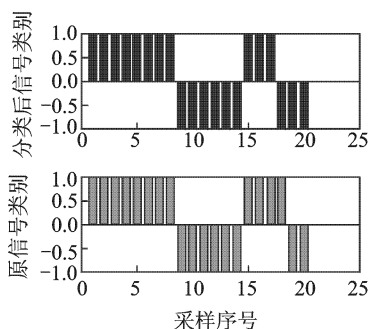
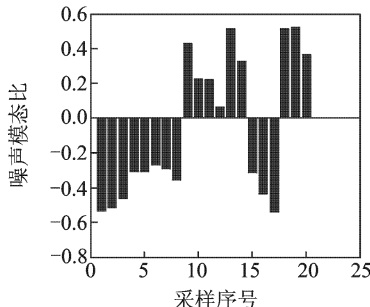


图 2 电路辐射等效模型



(a) 平均距离法分类



(b) 平均样本法分类

```

cnum =
  1 2 3 4 5 6 7 8 15 16 17 0 0 0 0 0 0 0 0 0
>>dnum
dnum =
  9 10 11 12 13 14 18 19 20 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
    
```

(c) K近邻方法分类

图 3 辐射噪声源重构方法理论仿真结果

示,差模信号用 $-1$ 表示。

图3(a)为平均距离法分类结果,图中上半部分为分类后结果,下半部分为原信号类别。由此可知,除信号18有误判外(原信号为共模,判断为差模),其余信号均判断准确。图3(b)为平均样本法分类结果,对于每个测试场点信号,通过求解其特征向量与两个样本集的均值特征向量的欧式距离,并用与共模样本的欧式距离减去与差模样本的欧氏距离。根据平均样本法原理,可知当差值小于0时,判断为差模,大于0时,判断为共模。由图3(b)可以看出,判断结果较为准确。图3(c)为K近邻分类法分类结果,cnum为共模信号序号向量,dnum为差模信号序号向量。由图可知,该方法可以较好地重现原辐射噪声信号中的模态信息。

### 3 实验结果分析

为验证上述辐射噪声源重构与机理描述方法的有效性,本文进行了如下实验。

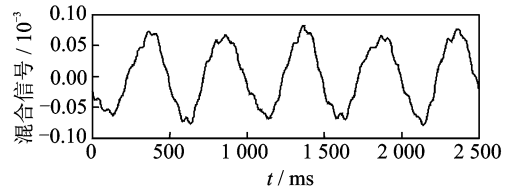
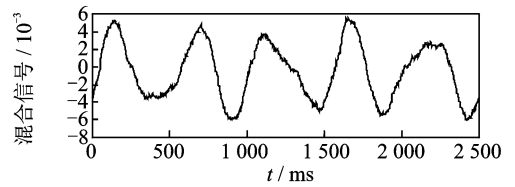
#### 3.1 辐射噪声源重构的验证实验

建立如图1所示的实验系统,利用射频信号发生器PA-103在 $E_{1CM}$ 处产生共模噪声信号(16 MHz正弦波),同时在 $E_{DM}$ 处产生差模噪声信号(10 MHz正弦波)。在测试点a,b同时测试上述噪声信号在空间产生的辐射噪声,如图4(a)所示。通过对混合噪声信号进行时域补偿并通过相关系数法和时间延迟来确定延迟信号的最小相关系数,从而得到两辐射噪声源分离波形如图4(b)所示,其中,分离后信号的最大相关系数与延时时间的采样关系如图4(c)所示。由图4可见,由于测试环境背景噪声与随机噪声影响,本文通过对辐射噪声信号进行时域补偿和频域补偿可以实现辐射噪声源重构。

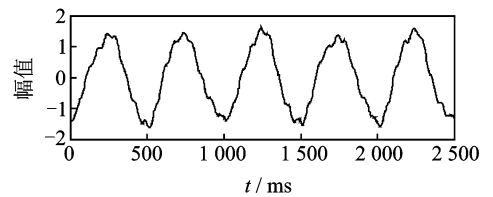
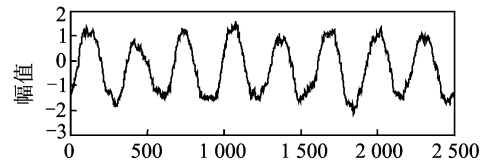
#### 3.2 应用案例

根据上述辐射噪声源重构与机理描述方法,本文分析研究了某型重力计量电子设备产生的辐射噪声。如图5(a)所示,该设备未通过GB 9254 Class B标准,其主要超标频点为36,85,100,110,120,130,140,150和160 MHz。

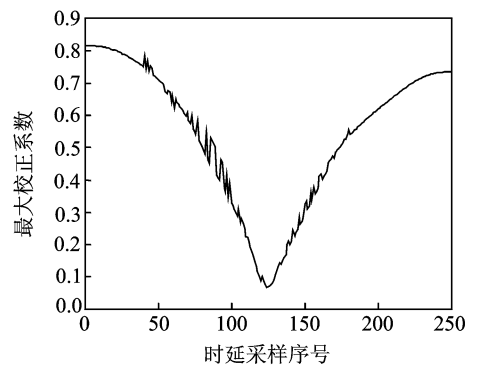
针对上述问题,首先利用BSS算法进行辐射噪声源重构,结果发现其辐射噪声是由10和12 MHz的辐射噪声源产生;再采用德国R&S公司近场探头组HZ-11测试近场辐射噪声,包括磁场探头(Loop 3 cm)和电场探头(Stab 6 mm),频率范围为10 kHz~2 GHz。结果表明,10 MHz的辐射噪声源为共模源,而12 MHz的辐射噪声源为差模源。据此,本文设计了由10,22,68和82 pF电容组成的



(a) 测试场点a噪声信号(上)与测试场点b噪声信号(下)



(b) 16 MHz共模噪声信号与10 MHz差模噪声信号分离后波形



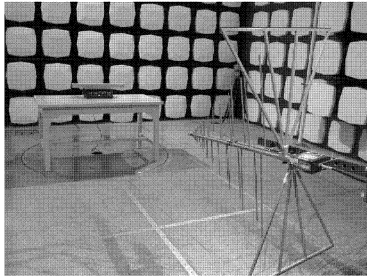
(c) 分离后信号的最大相关系数与时延的关系

图4 辐射噪声源重构的验证实验结果

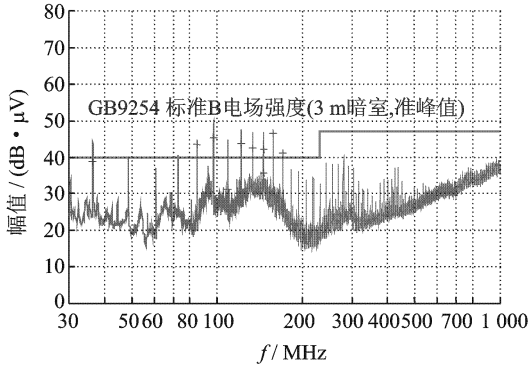
全电容EMI滤波器以抑制12 MHz的差模辐射噪声;并利用Ferrite Core及双绞线布线方式降低了10 MHz的共模辐射噪声。如表1和图5所示,辐射噪声降低23 dB,并通过GB 9254 Class B标准,从而验证了方法的有效性。

表1 噪声抑制前后,某型重力计量电子设备辐射噪声对比

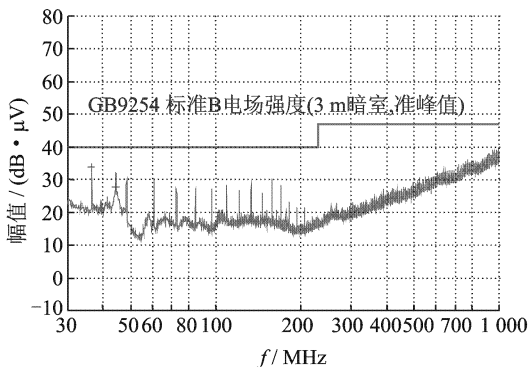
| 频点/<br>MHz | 抑制前/<br>(dB· $\mu$ V·m $^{-1}$ ) | 抑制后/<br>(dB· $\mu$ V·m $^{-1}$ ) | 降幅/<br>(dB· $\mu$ V·m $^{-1}$ ) | 安全裕量/<br>(dB· $\mu$ V·m $^{-1}$ ) |
|------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| 36         | 44.213                           | 35.012                           | 9.201                           | 4.988                             |
| 85         | 44.992                           | 27.235                           | 17.757                          | 12.765                            |
| 100        | 49.976                           | 26.103                           | 23.873                          | 13.897                            |
| 160        | 48.102                           | 30.001                           | 18.101                          | 9.999                             |



(a) 抑制前辐射噪声



(b) 抑制前辐射噪声



(c) 抑制后辐射噪声

图5 单片机重力计量系统辐射噪声

## 4 结束语

本文提出了一种基于盲源信号分离算法,并结合近场波阻抗测试的辐射噪声源重构与机理描述方法。实验结果表明,辐射噪声源重构方法能够实现辐射噪声源个数与特性分析,从而为辐射噪声分析与抑制提供理论依据。

### 参考文献:

[1] Paul C R. Introduction to electromagnetic compatibility[M]. 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons, 2006:414-426.  
 [2] Pocai M, Dotto I, Festa D, et al. Improving the performances of a reverberation chamber: a real case, electromagnetic compatibility[C]// 2009 20th International Zurich Symposium. Zurich: [s. n.], 2009:53-56.

[3] Kim Ki Hyeon, Yu Jihun, Lee Sang-Bok, et al. RF conduction in line noise suppression effects for Fe and NiFe magnetic nanocomposite[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008,44(11):3805-3808.  
 [4] Yang Ru, Zhang Bo, Qiu Dongyuan, et al. Time-frequency and wavelet transforms of EMI dynamic spectrum in chaotic converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009,24(4):1875-1880.  
 [5] Gonzalez D, Bialasiewicz J T, Balcells J, et al. Wavelet-based performance evaluation of power converters operating with modulated switching frequency[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008,55(8):3167-3176.  
 [6] Antonini G, Orlandi A. Wavelet packet-based EMI signal processing and source identification[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2001,43(2):140-148.  
 [7] Li Zhe, Pommerenke D. EMI-debugging of complex systems using different time, modulation, STFFT and frequency domain signal analysis techniques [C]// International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Chicago: [s. n.], 2005,2:607-611.  
 [8] Aouine O, Labarre C, Costa F. Measurement and modeling of the magnetic near field radiated by a buck chopper[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2008,50(2):445-449.  
 [9] Xin Tong, Thomas D W P, Nothofer A, et al. Modeling electromagnetic emissions from printed circuit boards in closed environments using equivalent dipoles[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2010,52(2):462-470.  
 [10] Capizzi G, Coco S, Laudani A. A new tool for the identification and localization of electromagnetic sources by using independent component analysis[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007,43(4):1625-1628.  
 [11] 赵阳, SEE K Y. 电磁兼容基础与应用(英文版)[M]. 北京:机械工业出版社,2007:165-174.  
 Zhao Yang, See K Y. Fundamental of electromagnetic compatibility and application[M]. Beijing: China Machine Press, 2007:165-174.  
 [12] 赵阳,颜伟,赵波,等. 电路辐射电磁干扰机理快速诊断与特性估计研究[J]. 电工技术学报,2010,25(10):6-13.  
 Zhao Yang, Yan Wei, Zhao Bo, et al. Investigation on radiated EMI noise diagnosis and estimation for HF circuits[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010,25(10):6-13.  
 [13] 赵阳,罗永超,颜伟,等. 高频电路辐射干扰快速分析与预估方法[J]. 电波科学学报,2010,25(3):466-470.  
 Zhao Yang, Luo Yongchao, Yan Wei, et al. Fast analysis and estimation approach applied in radiated EMI for high-frequency circuit[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010,25(3):466-470.