



·电磁防护与应用·

电磁干扰多通道时域快速测量与信号计算方法^{*}

李建轩¹, 朱倪瑶¹, 金祖升¹, 陈锐¹, 张晓², 施佳林¹

(1. 海军研究院, 北京 100161; 2. 海军工程大学 电磁能技术全国重点实验室, 武汉 430033)

摘 要: 针对复杂电磁环境和复杂大型系统电磁干扰测量参数、测量点位及测量工况多的特点, 采用传统扫频式频域测量方法具有代价高、耗时长等现实问题, 提出了一种低频电磁干扰的多通道时域快速测量与信号计算方法, 并研制出低频电磁干扰多通道时域快速测量系统, 实验验证表明提出的测量、计算方法和研制出的测量系统可以准确得到复杂电磁环境和大型系统的低频电磁干扰特性, 且测量速度快、成本低。

关键词: 复杂电磁环境; 时域测量; 频谱计算; 多通道; 电磁干扰

中图分类号: TM933.13

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230246

Multi-channel time-domain rapid measurement and signal calculation method for electromagnetic interference

Li Jianxuan¹, Zhu Niyao¹, Jin Zusheng¹, Chen Rui¹, Zhang Xiao², Shi Jialin¹

(1. Naval Research Institute, Beijing 100161, China;

2. National Key Laboratory of electromagnetic Energy Technology, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In view of the characteristics of many electromagnetic interference measurement parameters, measurement points and measurement conditions in complex electromagnetic environment and large-scale systems, the traditional sweeping frequency-domain measurement method has practical problems such as high cost and being time-consuming. This paper proposes a multi-channel time-domain rapid measurement and signal calculation method for low-frequency electromagnetic interference, and a multi-channel time-domain rapid measurement system for low-frequency electromagnetic interference is developed. The experimental results show that the proposed measurement, calculation method and the developed measurement system can accurately obtain the low frequency electromagnetic interference characteristics of complex electromagnetic environment and large-scale system, and the measurement speed is fast and the cost is low.

Key words: complex electromagnetic environment, time-domain measurement, spectrum calculation, multi-channel, electromagnetic interference

武器平台上配置了大量各种类型的电子、电气设备和系统, 这些系统提高了武器平台的通信、导航、电子对抗、武器控制和作战指挥能力, 同时也使得武器平台的电磁环境变得十分复杂, 在实际使用中已反映出武器平台存在着受电磁能量的影响问题。且武器平台空间有限, 装备密集度大, 频谱占用宽, 随着装备信息化进程的加快, 武器平台自身的电磁环境和面临的电磁环境将更加复杂, 已成为制约武器平台作战效能充分发挥的关键因素^[1-6]。

武器平台的复杂电磁环境主要是指由各种电磁场在武器平台特定时间和空间内构成的环境, 通常包括平台外部和内部电磁环境。目前, 武器平台大功率发射源发射产生的电磁环境, 即平台内部的电磁环境是造成武器平台电磁干扰(EMI)和电磁安全性问题最主要和最直接的原因, 已成为制约武器平台作战性能发挥的瓶颈。因此, 需要对复杂武器平台内部的电磁环境进行掌握和控制, 由于武器平台的复杂性、电磁环境分布的多样性, 以及复杂系统器件分布参数精准建模难等因素影响, 测量仍是当前准确获取系统电磁干扰最直接和最准确的手段。通过对武器装备电磁环境的测量, 掌握复杂电磁环境值, 找出影响装备电磁兼容性和电磁安全性的因素, 对提高武器平台

* 收稿日期: 2023-06-14; 修订日期: 2024-02-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(92166205)

联系方式: 李建轩, ljx0500507@163.com。

通信作者: 朱倪瑶, 3837245437@qq.com。

在复杂电磁环境下的生存能力和作战能力具有重要意义^[7-9]。

1 电磁干扰测量方法

1.1 频域测量

目前国内外电磁兼容领域标准中 EMI 测量主要采用接收机扫频式的频域测量方法,实质上 EMI 接收机是可调谐的、有频率选择的、具有精密振幅响应的电压计,测量接收机基本原理如图 1 所示。

频域测量法具有测量结果准确、灵敏度高、动态范围大、一致性好等优点,但不足是频域方法是采用逐频点的扫频式测量模式,因此该方法测量耗时,特别是针对运行成本高的复杂大型系统和武器平台复杂电磁环境,因其测量参数、测量点位及测量工况等更多,如果采用标准规定的逐频点扫频式频域测量法将会面临代价大、周期长等实际难以接受的问题^[10]。

1.2 时域测量

时域和频域是分析信号的不同方式和维度,两者可以通过傅里叶变换一一对应,因此理论上电磁干扰获取除频域测量方法外也可以通过时域测量然后进行傅里叶变换得到。且与频域测量相比,时域测量具有响应速度快、能够快速捕捉瞬时信号等优点^[11-15]。

目前时域测量方法之所以没有得到广泛应用有硬件、软件及国内外标准规定三个方面原因。硬件方面是由于时域测量设备一般噪声相对较高且动态范围低,不适用于微弱信号的频谱测量。软件处理方面,在对信号进行采样、截断与周期延拓时,由于混叠现象、栅栏效应和截断效应必然会引起频谱分析的误差,同时依据乃奎斯特采样定律,时域采样率必须大于最高分析频率的 2 倍,最好 2.5 倍以上,因此过高的采样率会导致时域测量数据过大,因此高频信号难应用^[16-17],结合目前国内外采集板卡采样率、示波器的存储深度等硬件限制和软件分析能力(数据量过大和后处理要求过高,测量方法不可行),因此时域测量方法目前主要适用于频率 100 MHz 以下。国内外标准中普遍规定对电磁干扰测量采用频域扫频法,限值要求和评估均以频域结果为基准,且接收机测量时,相当于将测量带宽内的频率分量在测量频率上按照一定关系进行了叠加,因此,测量结果受测量带宽的影响,时域直接快速傅里叶变换(FFT)没有考虑上述影响,应用时域测量方法时与频域结果不一致。

1.3 测量方法分析

时域上任何时间长度为 T 的有限长信号 $y(t)$,只要满足狄利克雷条件,都可用无数个余弦函数之和表示为

$$y(t) = \sum_{f_k=0}^{\infty} A(f_k) \cos[2\pi f_k t + \varphi(f_k)], \quad 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

式中: $f_k = kf_1$ 为频率,频率间隔为 $\Delta f = 1/T$; $A(f_k)$ 为幅值; $\varphi(f_k)$ 为相位。通常称 $A(f_k)$ 随 f_k 的变化曲线为 $y(t)$ 的频谱特性, $\varphi(f_k)$ 随 f_k 的变化曲线为 $y(t)$ 的相频特性。

基于 FFT 获取时域波形 $y(t)$ 频谱特性的基本过程如下:

第 1 步,对 $y(t)$ 采样获得 N 点离散信号 $y(n)$ 。

第 2 步,根据式(2)对 $y(n)$ 进行离散快速傅里叶变换。

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n) W_N^{nk}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

式中 $W_N = e^{-j2\pi/N}$ 。

第 3 步,记 $Y(k)$ 的实部为 $\text{Re}(Y(k))$,虚部为 $\text{Im}(Y(k))$,因电磁干扰测量不考虑相位影响,则可得频率 f_k 处对应的幅值为

$$A(f_k) = \begin{cases} \frac{1}{N} \text{Re}(Y(k)), & k = 0 \\ \frac{2}{N} \sqrt{[\text{Re}(Y(k))]^2 + [\text{Im}(Y(k))]^2}, & k \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)即为基于 FFT 获取的时域干扰信号频谱特性,可以理解为测量带宽为 $1/T$ 条件下 $y(t)$ 的频谱特性。

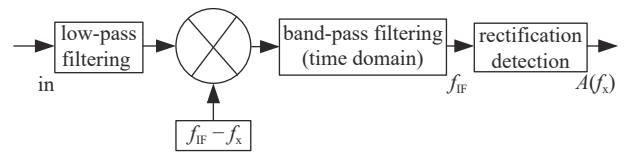


Fig. 1 Basic principle diagram of measuring receiver

图 1 测量接收机基本原理图

从傅里叶变换可以看出, 采用时域测量并结合 FFT 也可以获得系统的电磁干扰频谱。但对比频域测量方法, 时域结果与标准接收机的频域测量方法会产生以下差异: (1) 频域法接收机测量时, 相当于将测量带宽内的频率分量在测量频率上按照一定关系进行了叠加, 得到一个标准规定的相对基准值, 且不同的频段测量带宽一般不同, 因此, 测量结果受测量带宽的影响, 但时域结果直接 FFT 得到的为测量带宽为 $1/T$ 条件下 $y(t)$ 的频谱特性, 两者之间差异必须进行修正; (2) 时域 FFT 后得到的幅值为 $A(f_x)$, 而接收机采用的是均方根值定标, 因此时域直接 FFT 结果的均方根值 $A(f_x)/\sqrt{2}$ 与标准频域方法才一致, 应进行数学处理; (3) 从时域结果要想得到准确的频域结果必须采样率大于最高分析频率的 2 倍, 最好 2.5 倍以上, 因此针对现有仪器指标和后处理能力, 高频电磁环境测量不适合采用时域测量方法; (4) FFT 过程中的混叠等现象, 必然会引起频谱计算的误差, 应采取低通滤波等措施。(5) 由于时域测量设备一般噪声相对较高且动态范围低, 不适用于微弱信号频谱测量, 仅适用于强干扰信号测量。

基于上述对比分析本文提出了一种复杂电磁环境低频电磁干扰的多通道时域快速测量系统与信号计算方法, 采用多通道同步测量和时域测量相结合, 避免复杂大系统电磁干扰的频域方法需要多次测量, 可以大大降低频域测量方法耗时长和代价高的问题。主要解决复杂电磁环境和复杂大系统的低频电磁干扰信号快速测量问题。

2 时域测量信号频谱特性计算方法

2.1 防混叠失真影响分析与解决

由信号变换理论可知, 时域测量时的采样频率设置为 f_s , 则频率为 $f_a > 0.5f_s$ 的干扰信号会混叠到 $0 \sim 0.5f_s$ 频段内的某一频率 f_x 上^[16], 从而导致频率 f_x 上的计算或测量结果出现误差, 其中

$$f_x = |f_a - kf_s|, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

因此, 为了防止出现混叠失真, 在示波器采样频率设置为 f_s 的情况下, 则应在测量传感器和时域测量设备之间加入低通滤波器, 其中, 低通滤波器的截止频率 f_{stop} 按照式(5)选取。

$$0.5f_s > f_{\text{stop}} > f_{\text{max}} \quad (5)$$

式中: f_{max} 为需要计算的最高频率。

2.2 考虑测量带宽影响的频谱计算方法

在电磁兼容标准中, 要求以接收机测量结果为基准值进行考核评估, 受测量带宽的影响, 时域直接 FFT 所得频谱和接收机测量结果会有较大的差异, 因此不能将时域信号直接 FFT 结果用于干扰信号的频谱评估。基于测量带宽对干扰信号频谱分析结果的影响, 并结果反复的试验和仿真验证, 提出如图 2 所示的考虑测量带宽影响的频谱特性计算方法^[13-14]。

对 $Y(k)$ 加窗滤波。所选窗函数应与干扰接收机中频带通滤波器具有接近的带通特性(海明窗), 窗的中心频率选为分析的目标频率 f_x 。设加窗滤波后 $Y(k)$ 变为 $X(k)$, 则有

$$X(k) = \begin{cases} c(|f_k - f_x|)Y(k), & f_x - \frac{B}{2} \leq f_k \leq f_x + \frac{B}{2} \\ 0, & f_k < f_x - \frac{B}{2} \text{ or } f_k > f_x + \frac{B}{2} \end{cases} \quad (6)$$

对 $X(k)$ 进行 IFFT, 重构出窗内(即接收机测量带宽 B 内)所有 FFT 频率分量带相位叠加对应的时域波形

$$x(t) = \sum_{f_k=f_x-B/2}^{f_x+B/2} c(|f_k - f_x|)A(f_k) \cos[2\pi f_k t + \varphi(f_k)] \quad (7)$$

取式(7)时域波形包络线的最大值并除以 $\sqrt{2}$, 则得到频率 f_x 上的均方根值 $R(f_x)$ 。由于式(7)和接收机测量结果具有相同的包络线, 可以保证 $R(f_x)$ 和接收机峰值检波器输出的均方根值相等, 实现时域测量结果计算后结果与标准频域测量方法结果一致。

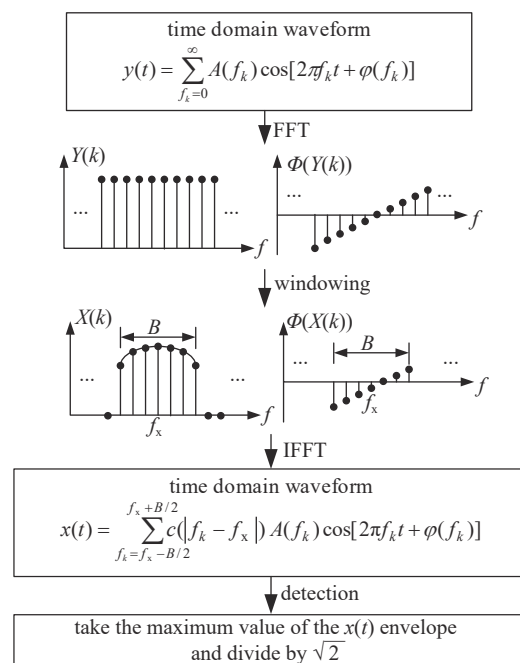


图 2 Flow chart of spectrum calculation method considering measurement bandwidth

图 2 考虑测量带宽的频谱计算方法流程图

3 多通道时域测量系统

复杂电磁环境低频电磁干扰的多通道时域快速测量系统基本组成如图3所示,包括测量传感器、低通滤波器、多通道时域采集板卡和数据处理分析平台等四部分。基本原理是利用测量传感器提取复杂电磁环境和大型系统中低频电磁干扰信号,经低通滤波后,再经多通道时域采集板卡转换为数字信号并进行FFT计算,然后传输至计算机进行数据再处理。该方案可以多通道同时测量,且采用时域方法,测量效率高,但受时域采集板卡采样率和数据后处理能力等限制,该系统目前仅能进行100 MHz以内电流、电压、磁场、电场等的低频电磁干扰测量,尤其适用于复杂电磁环境和复杂大型系统的低频电磁干扰的快速测量。

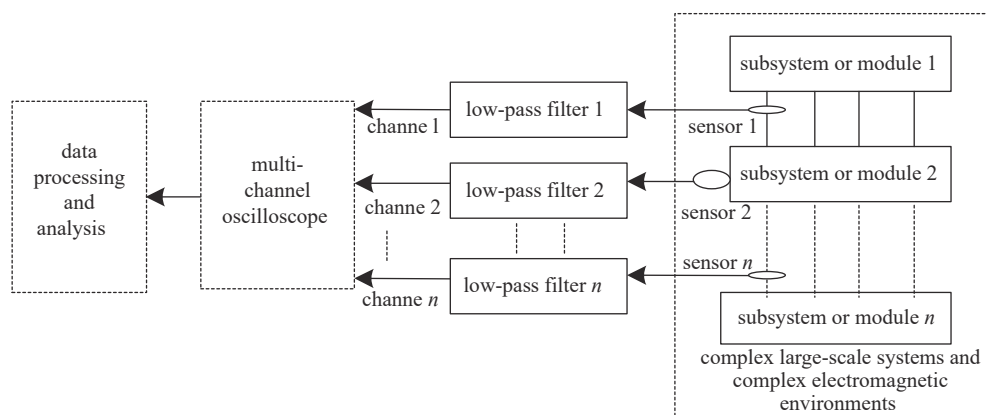


Fig. 3 Electromagnetic interference multi-channel time domain rapid measurement system

图3 电磁干扰多通道时域快速测量系统组成

3.1 系统硬件设计

硬件采用模块化仪器构建低频电磁干扰多通道时域快速测量系统,核心包括7931控制器和5671示波器采集模块。7931控制器具有可编程的FPGA和嵌入式处理器,通过在FPGA可实现电磁信号的频谱实时FFT计算。5671采集模块具有4个同步触发和同步采样的14位通道、500 MHz模拟带宽和250 MS/s采样率,14位采集模块可以提高测量动态范围和灵敏度。工作过程是将传感器输出的模拟电压信号通过高速示波器采集模块转换为数字信号,然后数字信号在FPGA中实现频谱实时FFT计算,然后将结果通过计算机进行二次数据处理与显示。其中4个同步触发和采样的14位通道可以4路同时采集不同点位、不同类型等电磁干扰,测试效率大大提高,且采用时域测量方法,与频域逐频点扫频方法相比效率大大提高。

3.2 系统软件实现

系统软件开发基于LabVIEW软件平台进行,软件处理流程主要包括信号采样与提取、信号实时FFT计算、信号修正运算(加窗)及结果评估,软件处理过程如图3所示。详细过程如下:软件数据处理过程包括采用5671时域采集模块对经低通滤波后的模拟信号进行高速数字化采样,再通过7931控制器中FPGA进行实时离散傅立叶变换,将时域数字信号转换为频域信号。然后采用计算机数据处理计算系统进行加窗测量带宽修正,并经多次测量结果平均的方式提高信噪比,然后与标准限值比较进行判定,科学评价复杂电磁环境和大型系统的低频电磁干扰性能。

4 实验验证

4.1 多通道同步测量验证

为了验证研制的测量系统的准确性和多通道并行快速测量功能,使用四通道标准信号源同时输出幅值固定频率可变的信号,模拟实际使用环境中的低频电磁干扰信号。利用多通道时域测量系统的四个测量通道进行并行测量,利用系统软件读取测量值并与标准信号源输出的信号幅值进行比较,确认测量系统的准确性,系统测量验证结果如图4所示。

依据图4可以看出,标准信号源输出106.98 dB μ V的信号,利用多通道时域低频电磁干扰测量系统,可以同时完成四个通道的电磁信号测量,且四个通道中全频段误差最大仅为0.38 dB(通道3在20 MHz频率点处),与传统频域方法精度相当,但测量效率远高于传统频域测量方法,且四个通道特性基本相同,测量结果规律更一致,便于

科学评价复杂大型系统和复杂电磁环境不同点位、不同参数、不同工况等的电磁干扰信号特性,因此多通道时域系统尤其适用于低频电磁干扰测量。

4.2 瞬态信号测量验证

为验证低频电磁干扰多通道时域测量系统瞬态信号的快速捕获能力,在实验室采用信号源编程输出跳变信号(信号源输出固定 -30 dBm 幅值信号,从 6 MHz 频点信号开始,步进 1.2 MHz ,到 30 MHz 频点信号结束)。采用低频电磁干扰系统与传统频域法的峰值保持模式进行比较,测量结果表明,研发的测量系统,可以与信号源同步,一次测量得到各个频点的峰值,而传统的频谱仪峰值保持模式,因采用扫频模式,需经过无数次的信号源输出才能得到各个点的最大峰值,且研制系统误差最大也在 1.0 dB 以内,测量结果对比如图5所示。

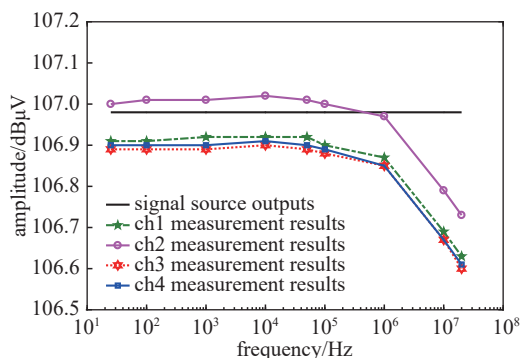


Fig. 4 Verification results of electromagnetic interference measurement system

图4 测量系统验证结果

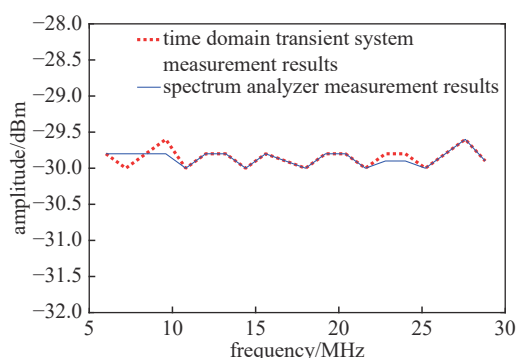


Fig. 5 Comparison of test results

图5 测量结果对比图

基于上述实验结果可以看出,复杂电磁环境低频电磁干扰测量系统不仅可以多通道同时测量,同时也可以快速捕获瞬态信号,因此与传统频域测量方法相比,测量效率可以大大提高,且修正后的计算结果与标准频域测量方法结果误差 1.0 dB 以内,但受目前信号计算方法和硬件限制,该方法和系统无法适用于高频和弱小信号的快速测量。

5 结论

针对复杂电磁环境和复杂大型系统低频电磁干扰测量参数、测量点位及测量工况多的特点,采用传统扫频式频域测量方法具有成本高、周期长等实际问题,提出了一种复杂电磁环境低频电磁干扰的多通道时域快速测量与信号计算方法,并研制出多通道时域低频电磁干扰快速测量系统,经实验验证可以得到以下结论:

(1)时域低频电磁干扰测量方法效率高,且多个特性相同通道测量结果规律更一致,便于科学评价和比较不同点位、不同参数、不同工况下的电磁干扰信号特性,尤其适用于复杂电磁环境和复杂大型系统的低频强电磁干扰快速测量;

(2)针对瞬态变频信号测量满足快速测量需求,时域低频电磁干扰测量方法针对瞬态信号优点更突出;

(3)时域低频电磁干扰测量方法应用必须进行防混叠滤波和测量带宽影响的结果修正,直接FFT结果无法与标准频域方法结果一致;

(4)时域方法受当前示波器采样率、数据后处理、示波器灵敏度等影响限制,目前仅适用于低频强电磁干扰测量领域(目前主要应用于 100 MHz 以下),后续需进一步优化。

参考文献:

- [1] 胡小锋, 张建平, 许滨. 航天器空间静电效应研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31: 103202. (Hu Xiaofeng, Zhang Jianping, Xu Bin, et al. Progress of the research of space electrostatic effect of spacecraft[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31: 103202)
- [2] 胡小锋, 刘卫东, 王雷, 等. 广义互相关电晕放电辐射信号时延估计方法[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 013201. (Hu Xiaofeng, Liu Weidong, Wang Lei, et al. Time-delay estimation of corona discharge radiation signal based on generalized cross correlation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30: 013201)
- [3] 胡小锋, 刘卫东, 张悦, 等. 空间放电辐射脉冲的探测与定位[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 103226. (Hu Xiaofeng, Liu Weidong, Zhang Yue, et al. Detection and location of space discharge transient electromagnetic pulse source[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27: 103226)
- [4] 郝建红, 范杰清. 电磁脉冲耦合效应的等效源建模及应用[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26: 063024. (Hao Jianhong, Fan Jieqing. Modeling and application of equivalent source of electromagnetic pulse coupling effects[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26: 063024)

- [5] 张怀坤, 苑红晓, 娄世平. 微波站电磁环境测试与分析[J]. 微波学报, 2010, 26(S1): 595-597. (Zhang Huaikun, Yuan Hongxiao, Lou Shipin. Test and analysis of electromagnetism environment around microwave station[J]. Journal of Microwaves, 2010, 26(S1): 595-597)
- [6] 金祖升, 李建轩, 施佳林, 等. 高功率微波照射下阿基米德螺旋天线响应特性[J]. 微波学报, 2017, 33(2): 1-5. (Jin Zusheng, Li Jianxuan, Shi Jialin, et al. The response of an Archimedean spiral antenna to the irradiation of the high power microwave[J]. Journal of Microwaves, 2017, 33(2): 1-5)
- [7] 汤仕平, 蔡明娟, 李建轩. 基于时频组合的强脉冲电磁场测试方法研究[J]. 高电压技术, 2013, 39(10): 2471-2476. (Tang Shiping, Cai Mingjuan, Li Jianxuan. Research on strong pulsed electromagnetic field test method by time-frequency combination[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(10): 2471-2476)
- [8] GJB151A-97, 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求[S]. (GJB151A-97, Electromagnetic emission and susceptibility requirements for military equipment and subsystems[S])
- [9] GJB 152A-97, 军用设备和分系统电磁发射和敏感度测量[S]. (GJB 152A-97, Measurement of electromagnetic emission and susceptibility for military equipment and subsystems[S])
- [10] 张向明, 赵治华, 孟进, 等. 大功率电磁装置短时变频磁场辐射测试系统[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 8-13. (Zhang Xiangming, Zhao Zhihua, Meng Jin, et al. Measurement system for short-time and frequency-conversion magnetic field radiated by high-power electromagnetic equipment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 8-13)
- [11] 张向明, 李建轩, 赵治华, 等. 基于时-频变换的电磁干扰频谱测试方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(s2): 16-20. (Zhang Xiangming, Li Jianxuan, Zhao Zhihua, et al. Electromagnetic interference spectrum measurement method base on time-frequency domain transformation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(s2): 16-20)
- [12] 周忠元, 陈贝贝. 脉冲调制辐射场的场强测量[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(6): 1186-1191. (Zhou Zhongyuan, Chen Beibei. Measurement of pulse-modulated radiation field strength[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(6): 1186-1191)
- [13] Paris D, Leach W, Joy E. Basic theory of probe-compensated near-field measurements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1978, 26(3): 373-379.
- [14] 张向明, 赵治华, 孟进, 等. 考虑测量带宽影响的电磁干扰频谱 FFT 计算[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(36): 117-122. (Zhang Xiangming, Zhao Zhihua, Meng Jin, et al. EMI spectrum analysis based on FFT with consideration of measurement bandwidth effect[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(36): 117-122)
- [15] 王刘旺, 黄建才, 孙建新, 等. 基于加汉窗的 FFT 高精度谐波检测改进算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 28-33. (Wang Liuwang, Huang Jiancai, Sun Jianxin, et al. An improved precise algorithm for harmonic analysis based on Hanning-windowed FFT[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 28-33)
- [16] 马伟明, 张磊, 孟进. 独立电力系统及其电力电子装置的电磁兼容[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (Ma Weiming, Zhang Lei, Meng Jin. Electromagnetic compatibility of independent power system and power electronic devices[M]. Beijing: Science Press, 2007)
- [17] 郑君里, 应启珩, 杨为理. 信号与系统[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2000. (Zheng Junli, Ying Qiheng, Yang Weili. Signals and systems[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2000)