

# 基于离散数学模型的时域 EMI 接收机 检波器建模研究

祝志博<sup>1,2</sup>, 赵 阳<sup>1,2</sup>, 颜 伟<sup>1,2</sup>, 李世锦<sup>1,2</sup>

(1.南京师范大学南瑞电气与自动化学院,江苏 南京 210023)

(2.南京师范大学江苏省电气装备电磁兼容工程实验室,江苏 南京 210023)

[摘要] 针对接收机电磁传导干扰问题,分析了中频滤波器的带通特性,选用汉宁窗函数,便于选取任意频率间隔的中频特性,其次通过快速傅里叶变换得到频域特性,再将此信号进行快速傅里叶逆变换得到时域最大值;最后对通过快速傅里叶变换得到的离散频域信号进行最大值和平均值检测。仿真结果表明,所提方法可以有效实现 EMI 接收机检波器模型的搭建。

[关键词] 中频滤波器,带通特性,最大值检测,平均值检测

[中图分类号] TM93 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2018)04-0001-08

## Modeling of EMI Receiver Geophone in Time Domain Based on Discrete Mathematical Model

Zhu Zhibo<sup>1,2</sup>, Zhao Yang<sup>1,2</sup>, Yan Wei<sup>1,2</sup>, Li Shijin<sup>1,2</sup>

(1.School of NARI Electrical and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2.Jiangsu Electrical Equipment EMC Engineering Laboratory, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** In this paper, the band-pass characteristics of IF filters are analyzed for EMI problems in receivers. With Hanning window function, it is easy to select the intermediate frequency characteristic of any frequency interval. Then the frequency domain characteristics are obtained by fast Fourier transform, and then the fast Fourier inverse transform is used to obtain the maximum value in time domain. Finally, the maximum and average values of the discrete frequency domain signals obtained by fast Fourier transform are detected. Simulation results show that the proposed method can effectively build the EMI receiver geophone model.

**Key words:** intermediate frequency filter, band-pass characteristics, maximum detection, mean value detection

考虑到经济性、可靠性和安全性等因素,我国各行业逐渐提高电磁兼容技术方面的标准。电磁兼容测试接收机是电磁兼容技术中非常重要的内容之一,是电磁传导干扰测试系统的重要组成部分。电磁干扰(electromagnetic interference, EMI)接收机是电磁干扰测试的主要工具,以点频法为基础,应用本振调谐的原理测试相应频点的电平值,接收机的扫描模式是步进点频调谐的方式<sup>[1]</sup>。EMI 接收机分为模拟式和数字式两大类,都包含中频滤波器设计和峰值、平均值测试等核心技术测试。

目前应用广泛的接收机基于 CISPR16-1-1 标准,采用实时分析技术平台,利用计算机对宽带信号进行实时高速的快速傅里叶变换计算。传统的逐点扫描接收机测量速率较慢,测量时间长,实时测量带宽较窄,对于带宽较长的信号需要进行分段处理,不仅增加了测量难度,而且测量结果精确性会降低,导致误差增大<sup>[2]</sup>。

直接对产品进行电磁兼容测试,不但增加成本,而且实施难度大,测试过程相对不够安全;而对电磁兼容测试接收机进行数学建模和仿真预测可以有效避免这些问题的出现。因此,本文提出了基于离散数模

收稿日期:2018-10-24.

基金项目:江苏省自然科学基金(BK20161019)。

通讯联系人:赵阳,博士,教授,研究方向:电磁兼容技术与应用。E-mail: zhaoyang2@njnu.edu.cn

型的时域 EMI 接收机峰值和平均值的检波器研究,可以在新产品研发初期就把可能出现的问题加以解决,费用降低且效果好. 此 EMI 接收机模型首先分析中频滤波器的带通特性,通过加窗函数对中频带通滤波器进行设计,其次通过快速傅里叶变换得到频域特性,最后对峰值检波器和平均值检波器进行建模,实现对频域信号的峰值和平均值的准确提取<sup>[3]</sup>. 因而对接收机进行数学建模逐渐成为电磁兼容技术领域的热点问题,对于推动电磁兼容技术发展有着重要意义.

## 1 EMI 接收机基本原理

电磁兼容测试接收机作为电磁传导干扰系统的重要组成部分,在生产和生活中被广泛应用,对 EMI 接收机进行准确建模极为重要. 本文提出的电磁兼容测试接收机是基于离散数学时域模型,通过中频滤波器及快速傅里叶变换得到频域信号以便于峰值和平均值检测<sup>[4]</sup>.

电磁传导干扰系统如图 1(a)所示,暗室天线接收到被测信号,50 Ω 阻抗将被测信号送给放大器,被测信号经过放大器送给接收机检测,EMI 接收机内部由中频带通滤波器进行滤波处理,然后进行快速傅里叶变换得到频域信号进行峰值和平均值处理;通过快速傅里叶逆变换可以获得时域信号的最大值,最后由计算机显示输出.

3m 法半波暗室如图 1(b)所示,半波暗室是一个经过屏蔽设计的六面箱体,除了使用导电地板外,其余五面覆盖电磁波吸波材料. 由于场地具有一个无限大的导电地平面,故半波暗室科研模拟理想的开阔场. 图 1(c)给出了 R&S 型号接收机,测量频带范围为 9 kHz~3 GHz<sup>[5]</sup>.

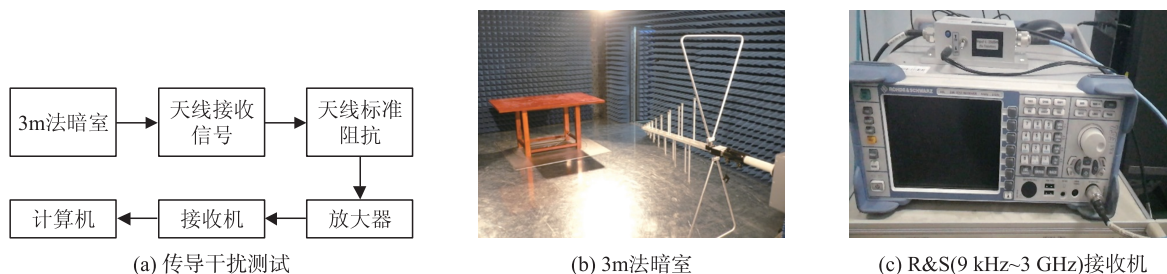


图 1 电磁传导干扰系统

Fig. 1 Electromagnetic interference system

在 EMI 接收机内部主要由中频滤波器、快速傅里叶变换及其逆变换、峰值和平均值检测构成,中频滤波器得到预处理的频段,经过快速傅里叶变换及其逆变换处理,由峰值和平均值检波器进行测试<sup>[6]</sup>. EMI 接收机工作流程图如图 2 所示.

## 2 EMI 接收机检波器建模研究

### 2.1 中频滤波器分析

天线接收到的被测信号,作为输入信号送给 EMI 接收机,EMI 接收机首先要对此被测信号进行中频滤波,去掉噪声信号,保留所需的有用信号<sup>[7]</sup>.

设天线接收到的信号为

$$x = A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \theta). \quad (1)$$

式中, $x$  是被测信号; $A$  是被测信号的幅值; $f$  是信号频率; $t$  是采样时间; $\theta$  是相位.

中频滤波器滤波处理的过程中,为了选取任意频率间隔的中频滤波器带通特性,需要对滤波器的中心频率进行设置,使之能够在指定频带内连续变化.

设中频滤波器的中心频率为

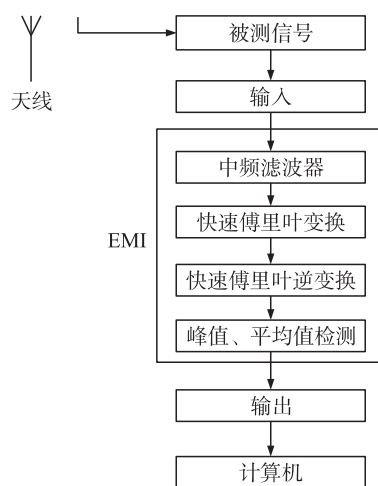


图 2 EMI 接收机工作流程图

Fig. 2 Working flow chart of EMI receiver

$$\begin{aligned} i &= ((f_2) - (f_1)) / \text{step}, \\ f_c &= (f_1) \cdot (1 + i \cdot \text{step}), \\ f_c &< (f_2) \cdot (1 + \text{step}). \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $f_c$  是滤波器的中心频率;  $f_1$  是滤波器中心频率的起始值;  $f_2$  滤波器中心频率变化的终止值;  $i$  是滤波器中心频率的个数;  $\text{step}$  是滤波器中心频率变化的步长.

$$\begin{aligned} F_{c1} &= f_c(i) - 0.1 \cdot \text{step}, \\ F_{c2} &= f_c(i) + 0.1 \cdot \text{step}. \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $F_{c1}$  是中频滤波器的第一截止频率;  $F_{c2}$  是中频滤波器的第二截止频率.

为了考虑测量带宽的影响, 通过 FIR 滤波器设计理论, 选取合适的窗函数, 然后对理想中频滤波器加窗获得实际中频滤波器的带通特性. 对于窗函数的选择, 汉宁窗和 EMI 接收机中频滤波器具有相似的带通特性, 因此加窗滤波环节选择汉宁窗<sup>[8]</sup>.

设  $Y$  的频率间隔为  $\Delta f$ , 对公式(1)进行快速傅里叶变换后可以得到

$$X(m) = \frac{N_1 A e^{j\theta}}{2}, m = 0, 1, \dots, \frac{N_1}{2}. \quad (4)$$

式中,  $A = 2|X(m)|/N_1$ ,  $\theta = \arctan X(m)$ ,  $N_1$  为采样点数.

由中频滤波器得到离散频域信号, 采用快速傅里叶逆变换可以还原出对应的离散时域信号

$$y(n) = \sum_{m=(fX-B/2)/\Delta f}^{(fX+B/2)/\Delta f} \text{Re} \left[ \frac{X(m)}{N} e^{j(k\Delta f/f_s)(n/f_s)} \right] H(m - (fX - B/2)/\Delta f), n = 0, 1, \dots, f_s \cdot T. \quad (5)$$

式中,  $B$  为滤波器带宽;  $H$  为频率  $f$  衰减  $1-h(m\Delta f)$  时的数组;  $h$  为正整数,  $m=n$ ,  $T$  为采样时间.

## 2.2 时域 EMI 接收机检波器建模研究

天线接收到被测信号送给预选器, 预选器和放大器仅用于提升 EMI 接收机的动态性能, 对噪声无影响, 然后通过中频滤波器获得所需的宽带进行峰值和平均值检测. EMI 接收机的测试过程如图 3 所示<sup>[9]</sup>.

### 2.2.1 峰值检波器模型

峰值检波器是一个能记忆信号峰值的电路, 其输出电压的大小, 一直追随输入信号的峰值, 而且保持在输入信号的最大峰值. 峰值检波器即使是很窄的单个脉冲也能很快达到峰值, 当中频信号消失之后, 由于电路的放电时间常数很大, 检波输出的电压可在一定时间内保持在峰值上<sup>[10]</sup>. 峰值检波器的检波流程如图 4 所示.

峰值检波法构建的交直流转换电路对交流信号进行全波整流, 再用充电电容保持整流输出的脉动直流信号的峰值, 得到平缓的直流信号, 直流信号的幅值即是被测交流信号的峰值<sup>[11]</sup>. 峰值检波器电路如图 5 所示. 电源通过二极管给电感和电容充电, 输出电压为电容两端的电压. 当  $V_{in}$  为连续信号时,  $V_{out}$  即为  $V_{in}$  的峰值.

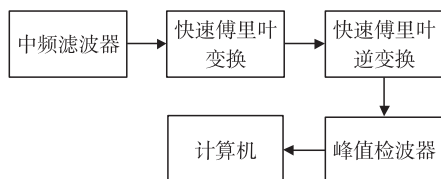


图 4 峰值检波器 MATLAB 仿真流程

Fig. 4 Peak detector MATLAB simulation process

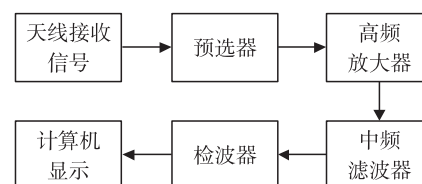


图 3 EMI 接收机测试过程

Fig. 3 EMI receiver test process

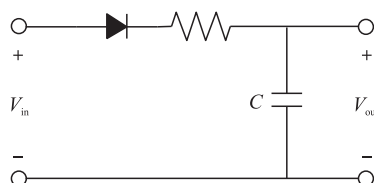


图 5 峰值检波器电路

Fig. 5 Peak detector circuit

当输入信号为正弦信号时如图 6(a) 所示, 图 6(b) 输出为输入信号的峰值, 即

$$V_{in} = V_0 \sin t, V_{out} = V_0. \quad (6)$$

峰值检波器的特点是充电时间常数很小, 放电时间常数很大, 检波输出电压可在较长时间内保持最大值输出, 它只取决于信号的幅度, 和信号的宽度和重复频率无关<sup>[12]</sup>.

在时域 EMI 接收机模型中, 峰值检波器要检测的是时域信号的最大值, 该最大值也是中频滤波器输

出时域信号的最大值,可以使用 MATLAB 的取最大值功能来实现,

$$yy1 = \max(y(n)), n = 0, 1, \dots, f_s \cdot T. \quad (7)$$

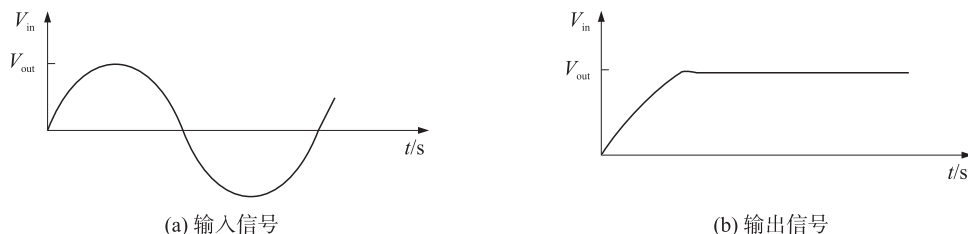


图 6 峰值检波器测试波形

Fig. 6 Peak detector waveform

### 2.2.2 平均值检波器模型

平均值检波器是对信号的平均值检测,在 EMI 接收机中是对采样时间进行平均检测. 平均值检波器的输出总体上正比于信号的包络线的平均值. 平均值检波器的检波流程如图 7 所示.

平均值检波法构建的交直流转换电路对交流信号进行全波整流,再对整流输出的脉动直流信号采用积分电路得到较平缓的直流信号,直流信号的幅值即是被测信号的全波整流平均值. 全波均值整流电路输出的是被测信号绝对值的平均值<sup>[13]</sup>. 平均值检波电路如图 8 所示. 当  $V_{in}$  处于正半周时,二极管  $D$  导通,  $V_{in}$  通过  $R_2$  给电容  $C$  充电;当  $V_{in}$  处于负半周时,二极管  $D$  截止,电容  $C$  给电阻  $R$  充电.

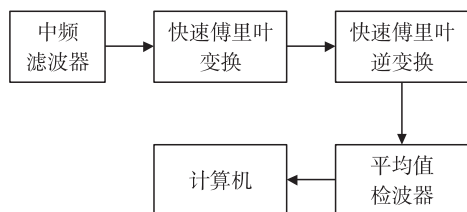


图 7 平均值检波器 MATLAB 仿真流程

Fig. 7 Mean value geophone MATLAB simulation process

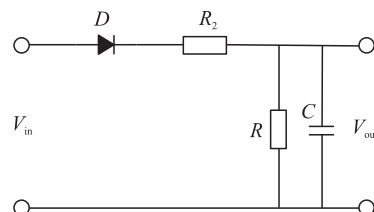


图 8 平均值检波器电路

Fig. 8 Averaging geophone circuit

当输入信号如图 9(a) 所示,经过平均值检波器的结果如图 9(b) 所示,即

$$R = 1/(2 \cdot \pi) \cdot \int_0^{2 \cdot \pi} V_{out} dt. \quad (8)$$



图 9 平均值检波器测试波形

Fig. 9 Average detector waveform

平均值检波器的特点是充电时间常数和放电时间常数相同,对于连续波信号平均值基本上与峰值相等,但是对脉冲信号而言,平均值与峰值相差比较大,其值正比于脉冲幅度和重复频率.

在时域 EMI 接收机模型中,平均值检波器要检测的是时域信号的最大值,该最大值也是中频滤波器输出时域信号的平均值,可以使用 MATLAB 的取平均值功能来实现,

$$yy2 = \text{mean}(y(n)), n = 0, 1, \dots, f_s \cdot T. \quad (9)$$

## 3 EMI 接收机峰值和平均值检波器特性仿真分析

### 3.1 EMI 接收机峰值检波器特性分析

#### 3.1.1 不同频率信号特性结果分析

经上述分析,分别使用单一频率的信号和多个频率信号叠加来验证模型的准确性<sup>[14]</sup>.

$$x = \sum_{i=1}^r A_i \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_i \cdot n_1 / f_s + \theta), \quad n_1 = 0, 1, \dots, N. \quad (10)$$

式中,  $A$  是信号幅值;  $r$  是不同频率的个数;  $f_i$  是信号频率;  $N$  是采样点;  $n_1$  从 0 变化到  $N$ ;  $f_s$  是采样频率;  $\theta$  是相位。

(1) 仿真结果一: 单频率信号仿真, 取  $r=1$ ,  $A_1=2$  V,  $f_1=100$  MHz,  $N=3\,000$ ,  $f_s=1$  GHz,  $\theta=0$ 。

图 10(a) 和图 10(b) 分别给出了频率为 100 MHz 时的时域和频域波形; 图 10(b) 中频域结果只在 100 MHz 处有值且值为原始信号的幅值。

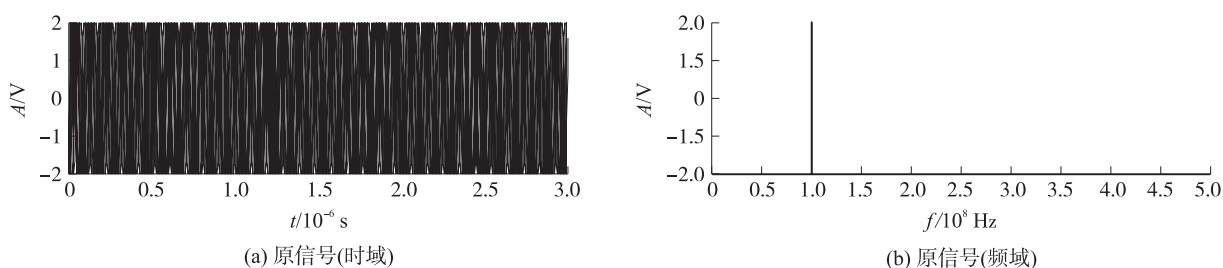


图 10 原始信号波形

Fig. 10 Original signal waveform

图 11 中时域信号的最大值幅值也和原始信号的 2 V 幅值相等。图 12 给出了中频滤波器滤波结果波形。图 13 为峰值检波结果。

(2) 仿真结果二: 多频率信号仿真, 取  $r=5$ ,  $A_1=1$  V,  $A_2=2$  V,  $A_3=3$  V,  $A_4=4$  V,  $A_5=5$  V,  $f_1=50$  MHz,  $f_2=80$  MHz,  $f_3=105.5$  MHz,  $f_4=135.7$  MHz,  $f_5=137$  MHz,  $N=40\,000$ ,  $f_s=2$  GHz,  $\theta=0$ 。

图 14 给出了多个频率分别为 50 MHz, 80 MHz, 105.5 MHz, 135.7 MHz 和 137 MHz 的信号的叠加, 其频率对应的幅值分别为 1 V, 2 V, 3 V, 4 V 和 5 V; 由频域波形可以看出在此 5 个频率点有值与之一一对应。如图 15 所示, 起始频率为 30 MHz, 终止频率为 150 MHz, 步长为 0.05 MHz, 中心频率带宽为 0.12 MHz 的滤波后频域波形。图 16 为峰值检波结果。

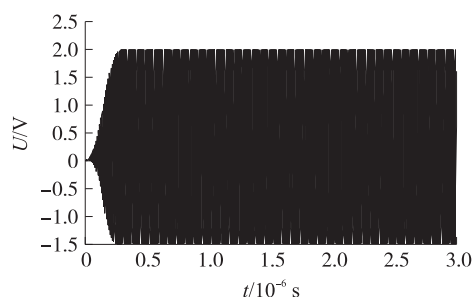


图 11 时域最大值

Fig. 11 Maximum in time domain

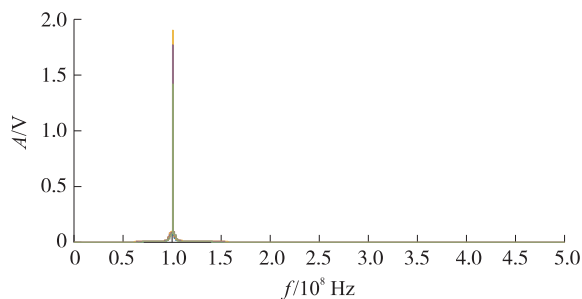


图 12 滤波后频域波形

Fig. 12 Filtered frequency domain waveform

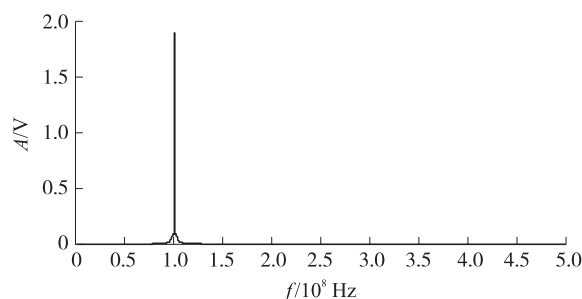
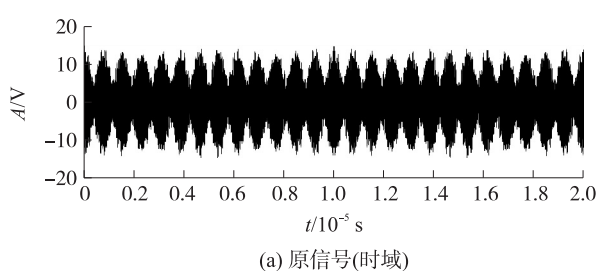
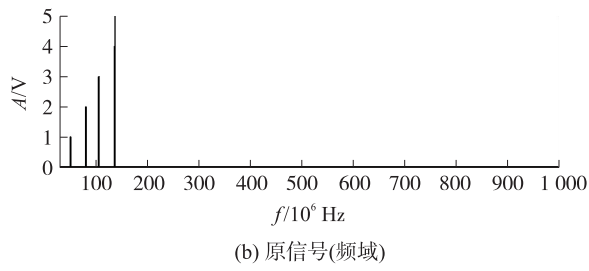


图 13 峰值检波

Fig. 13 Peak detection



(a) 原信号(时域)



(b) 原信号(频域)

图 14 多频率叠加原始波形

Fig. 14 Multi frequency overlay original waveform



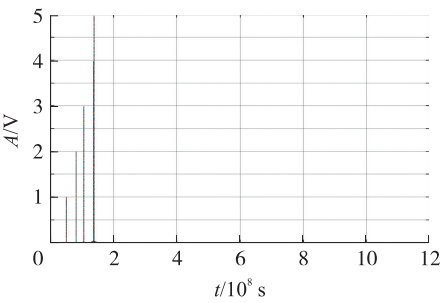


图 15 频域波形

Fig. 15 Frequency domain waveform

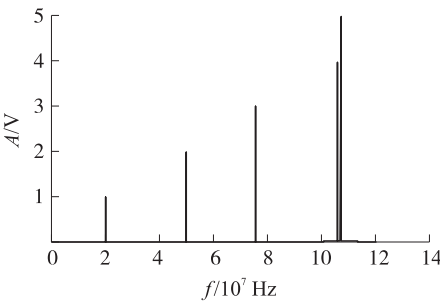


图 16 峰值检波

Fig. 16 Peak detection

3.1.2 峰值特性误差分析

按照上述方法再做三组参数如表 1 所示输入信号仿真,将峰值仿真结果和理论值作对比,误差如表 2 所示.

表 1 峰值检波器输入信号

Table 1 Peak detector input signal

仿真参数	$r$	$A_1/\text{V}$	$A_2/\text{V}$	$A_3/\text{V}$	$f_1/\text{GHz}$	$f_2/\text{GHz}$	$f_3/\text{GHz}$	$N$	$f_s/\text{GHz}$	$\theta/(\circ)$
第一组	1	10	0	0	1	0	0	4 000	1	0
第二组	2	2	6	0	0.05	0.08	0	5 000	2	0
第三组	3	1	2	8	0.05	0.08	0.1	6 000	1	0

由表 2 可知,将本文设计的峰值检波器仿真结果和理论值进行对比,无论是单一频率的被测信号还是多频率叠加的被测信号,峰值检波器的仿真结果的误差都比较小,最大误差是 2%,实现了对峰值的准确检测<sup>[15]</sup>.

表 2 峰值检波器仿真结果与理论值对比

Table 2 Comparison between simulation results and theoretical values of peak detector

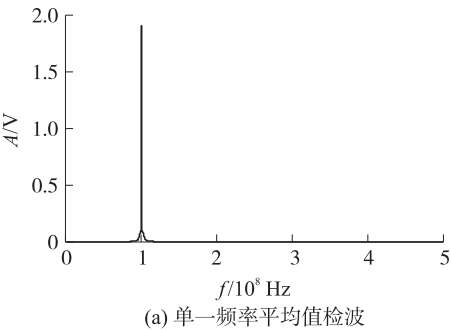
仿真次数	1	2	3	4	5
仿真结果/V	1.96	4.90	9.85	5.89	7.86
理论值/V	2	5	10	6	8
误差/%	2	2	1.5	1.8	1.7

3.2 EMI 接收机平均值检波器特性分析

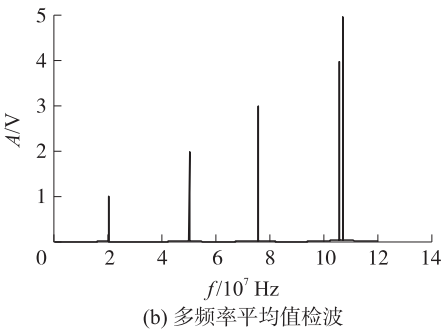
3.2.1 不同频率信号特性结果分析

(1) 仿真结果一:单频率信号仿真,取  $r=1, A_1=2\text{ V}, f_1=100\text{ MHz}, N=3\text{ 000}, f_s=1\text{ GHz}, \theta=0$ . 平均值检测结果如图 17(a) 所示.

(2) 仿真结果二:多频率信号仿真,取  $r=5, A_1=1\text{ V}, A_2=2\text{ V}, A_3=3\text{ V}, A_4=4\text{ V}, A_5=5\text{ V}, f_1=50\text{ MHz}, f_2=80\text{ MHz}, f_3=105.5\text{ MHz}, f_4=135.7\text{ MHz}, f_5=137\text{ MHz}, N=40\text{ 000}, f_s=2\text{ GHz}, \theta=0$ . 平均值检测结果如图 17(b) 所示.



(a) 单一频率平均值检波



(b) 多频率平均值检波

图 17 平均值检波结果

Fig. 17 Average detection result

3.2.2 平均值特性误差分析

按照上述方法再做三组参数如表 3 所示输入信号仿真,将峰值仿真结果和理论值作对比,误差如表 4 所示.

表 3 平均值检波器输入信号  
Table 3 Average geophone input signal

仿真参数	$r$	$A_1/V$	$A_2/V$	$A_3/V$	$f_1/\text{GHz}$	$f_2/\text{GHz}$	$f_3/\text{GHz}$	$N$	$f_s/\text{GHz}$	$\theta/(\circ)$
第一组	1	10	0	0	1	0	0	4 000	1	0
第二组	2	2	6	0	0.05	0.07	0	5 000	2	0
第三组	3	1	5	8	0.06	0.08	0.1	6 000	1	0

由表 4 可知,将本文设计的平均值检波器仿真结果和理论值进行对比,无论是单一频率的被测信号还是多频率叠加的被测信号,平均值检波器的仿真结果的误差都较小,最大误差是 4.5%,实现了对平均值的准确检测。

4 结语

本文针对电磁传导干扰测试系统中电磁兼容测试接收机问题,深入分析了 EMI 接收机的基本原理与工作环境,在离散数学的基础上对中频滤波器进行分析,成功设计出带宽和中心频率都可改变的中频带通滤波器,能够对原始信号进行快速准确的滤波处理;其次根据快速傅里叶变换原理对滤波后信号进行频域处理;最后通过搭建峰值和平均值检波器模型进行信号提取。

本文后半部分对峰值检波器和平均值检波器的基本原理进行深入研究,分别设计出简单可靠的峰值检波器和平均值检波器模型。仿真结果表明,本文设计的 EMI 接收机模型中峰值检波器的仿真值和理论值最大误差不超过 2%;平均值检波器的仿真值和理论值最大误差不超过 4.5%;可以实现对电磁兼容接收机的准确建模。

表 4 平均值检波器仿真结果与理论值对比  
Table 4 Comparison between simulation results and theoretical values of average geophone

仿真次数	1	2	3	4	5
仿真结果/V	1.91	4.86	9.2	5.88	7.81
理论值/V	2	5	10	6	8
误差/%	4.5	2.8	4.1	1.8	2.3

[参考文献] (References)

[1] 赵阳,封志明,黄学军. 电磁兼容测试方法与工程应用[M]. 北京:电子工业出版社,2010:1-12.  
ZHAO Y,FENG Z M,HUANG X J. EMC test methods and engineering applications[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2010:1-12.(in Chinese)

[2] SEE K Y,ZHAO Y. Fundamental of electromagnetic compatibility and application[M]. Beijing:China Machine Press,2006:1-20.

[3] 孟进,马伟明,张磊,等. 开关电源变换器传导干扰分析及建模方法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(5):49-54.  
MENG J,MA W M,ZHANG L,et al. Method for analysis and modeling of conducted EMI in switching power converters[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(5):49-54.(in Chinese)

[4] 和军平,姜建国. 离线式 PWM 开关电源传导电磁干扰的分析研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(6):91-95.  
HE J P,JIANG J G. Research on conducted EMI of an off-line PWM switched mode power supply[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(6):91-95.(in Chinese)

[5] 颜伟,赵阳,王恩荣,等. 复杂电子系统传导 EMI 噪声机理分析与处理[J]. 中国电机工程学报,2012,32(30):156-162.  
YAN W,ZHAO Y,WANG E R,et al. Investigation and reduction on conducted electromagnetic interference noise mechanism for complex power electronics systems[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(30):156-162.(in Chinese)

[6] 曹德安. 电磁兼容与 EMI 接收机设计的研究[D]. 广州:华南师范大学,2005:21-25.  
CAO D A. Electromagnetic comparability and design of EMI receiver[D]. Guangzhou:South China Normal University,2005:21-25.(in Chinese)

[7] MENG J,MA W M. A new technique for modeling and analysis of mixed-mode conducted EMI noise[J]. IEEE transactions on power electronics,2004,19(6):1679-1687.

[8] 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 X M,ZHAO Z H,MENG J,et al. EMI Spectrum analysis based on FFT with consideration of measurement bandwidth effect[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(36):117-122.(in Chinese)

- [9] 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):466-471.  
ZHAO Y,LUO Y C,YAN W,et al. Fast analysis and estimation approach applied in radiated EMI for high-frequency circuit[J]. Chinese journal of radio science,2010,25(3):466-471.(in Chinese)
- [10] 和军平,陈为,姜建国.开关电源共模传导干扰模型的研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(8):50-55.  
HE J P,CHEN W,JIANG J G. Research on common mode conducted interference model of switching power supply[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(8):50-55.(in Chinese)
- [11] MENG J,MA W M. Power converter EMI analysis including IGBT nonlinear switching transient model[J]. IEEE transactions on industrial electronics,2006,54(5):1577-1583.
- [12] HENRY W O. Electromagnetic compatibility engineering[M]. Hoboken:John Wiley & Sons,2009:273-278.
- [13] 袁义生,钱照明. 功率变换器传导 EMI 的精确建模[J]. 电力电子技术,2003,37(1):12-15.  
YUAN Y S,QIAN Z M. Accurate modeling of conducted EMI of power converters[J]. Power electronics,2003,37(1):12-15.(in Chinese)
- [14] 宋百通,赵阳,夏欢,等. 基于医疗设备的辐射 EMI 噪声诊断与抑制技术研究[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2014,14(4):1-5.  
SONG B T,ZHAO Y,XIA H,et al. The technology of diagnosis and inhibition research on radiated EMI noise based on medical equipment[J]. Journal of Nanjing normal university(engineering and technology edition),2014,14(4):1-5.(in Chinese)
- [15] MENG J,MA W M,PAN Q J,et al. Identification of essential coupling path models for conducted EMI prediction in switching power converters[J]. IEEE transactions on power electronics,2006,21(6):1795-1803.

[责任编辑:陈 庆]