doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.09.006

自适应噪声谱估计抵消技术及其应用

张兰勇,周俊成,李 冰,孙 蓉

(哈尔滨工程大学 自动化学院,150001 哈尔滨)

摘 要: 为扩大虚拟暗室EMI(electromagnetic interference,电磁干扰)测试系统的应用范围,提高系统测量精度,改善其在复杂环境下的测试效果,借助自适应滤波及维纳滤波理论对基于传统自适应噪声抵消模型建立的测试系统进行分析,传统测试系统的参考通道存在的设备辐射分量制约了系统应用范围,从而不能实现任意信噪比环境下的高精度测量. 同时,提出基于谱估计的自适应噪声抵消模型,该模型建立的虚拟暗室系统通过对测试系统主通道信号进行谱估计,得到设备辐射信号及噪声信号的功率谱密度,并根据该功率谱密度对参考通道信号进行针对性抑制,以滤除参考通道辐射信号分量,从而提高测试系统的适用性及精度. 仿真实验表明:该方法在高、低信噪比环境下均能准确地提取设备辐射信号并准确复现受试设备的辐射信号,提高了虚拟暗室系统对环境噪声的抑制能力,增强了虚拟暗室系统的环境适应性.

关键词: 电磁干扰;虚拟暗室;自适应滤波;谱估计;噪声抵消

中图分类号: TP274 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2015)09-0031-05

Research on automatic noise spectral estimation suppression technique and its application

ZHANG Lanyong, ZHOU Juncheng, LI Bing, SUN Rong

(College of Automation, Harbin Engineering University, 150001 Harbin, China)

Abstract: In order to expand the application range of the virtual chamber measurement system, improve the measurement precision in actual measurement, a mathematical method of adaptive filtering and wiener filtering is used to analyze the inherent defects of the measurement system based on traditional ANS (automatic noise suppression), and point out the main factor restricted the application range and measurement precision is the existence of source signal component which is detected in the reference channel. According to the analysis result, the measurement system is rebuilt, coming up an ANS based on spectral estimation. Analyzing the mixed signal detected in the main channel, the remodeled system can get the PSD (power spectrum density) of radiation signal and noise signal .According to the frequency of the peak point in the PSD, notch filter has been designed to filter the radiation signal component captured by reference channel, then the system meets its expectation. The simulation and experiment results show that this method shows good performance in the high SNR (signal noise ratio) measurement circumstance as well as low SNR, which means that extracting the radiation signal of equipment under test exactly, high noise suppression ability and environmental adaptability of virtual chamber.

Keywords: EMI; virtual chamber; adaptive filter; spectral estimation; noise suppression

电磁兼容测试通常需要在开阔地或者屏蔽室中进行,以减低或消除环境噪声对测试测量结果的影响. 考虑到自然界电磁环境复杂恶劣、屏蔽室造价昂贵、大型整机设备尺寸过大以致测试受限等因素,业界着眼于普通环境下电磁兼容测试技术的研究. 美国SARA公司率先提出虚拟暗室(virtual chamber)测试理念[1],并基于传统自适应噪声抵消模型开发出用于实际EMI测试的CASSPER系统. 但系统在测试测量中存在诸多缺陷,如噪声强度与设备辐射信号强度相当时,设备辐射信号提取效果不明显;强信号环境中的噪声提取为负值,并对设备辐射信号产生抑制作用,因此CASSPER系统不能满足实际EMI测试要求. 近几年,虚拟暗室EMI测试的研究主要集中在复杂环境下的环境噪声与设备

收稿日期: 2014-01-16.

基金项目: 国家自然科学基金(51279036);
高等学校博士学科点专项科研基金(20132304120015);
中央高校基本科研业务费(HEUCFX41305).

作者简介: 张兰勇(1983—),男,博士,讲师.

通信作者: 张兰勇,zlyalf@sina.com.

辐射信号的成分组成及空间分布,实时性处理及系统模型搭建等方面,用以实现复杂电磁环境下任意信噪比环境下的 EMI 测试.

虚拟暗室测试系统是基于自适应噪声抵消模型建立起来的. 其基本思想是在获取环境噪声和设备辐射信号的混合信号的同时,得到同一时间内的环境噪声,进而借助自适应噪声抵消相关方法滤除环境噪声,从而达到设备 EMI 提取与测试的目的. 虚拟暗室 EMI 测试原理如图 1 所示.

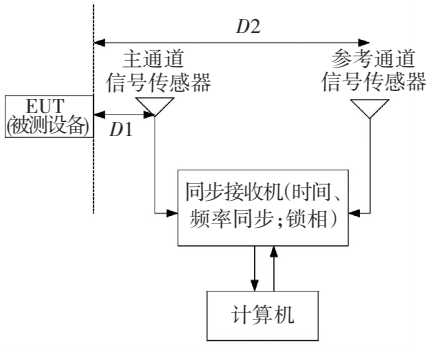


图 1 虚拟暗室 EMI 系统测试原理图

系统接收机存在主通道、参考通道两类信号传感器,主通道信号传感器距离被测设备(equipment under test, EUT)的距离为 $D1$, 接收环境噪声与 EUT 辐射信号的混合信号,参考通道信号传感器距离 EUT 的距离 $D2$, 测量同一时刻的环境噪声. 两组信号传感器同时测量两个地方的电磁辐射信号,并同时到达接收机进行同步预处理,进而利用计算机完成最终信号处理实现环境噪声滤除,以实现 EUT 辐射信号提取的目的. 为达到良好的测试效果,其在测量方法上要有一定约束,从测试距离的角度上讲,建议 $D2 \geqslant 10D1$(10 倍距离电磁场衰减至微弱);从测试位置的角度上看,两类传感器需尽量在一条直线上,天线方向也需保持一致.

另外,从信号分析及统计学理论上看,虚拟暗室测试技术的可靠性程度依赖于以下两个条件的先验程度:1)获得环境噪声及 EUT 辐射信号的空间/时间分布,确定信号传感器测量位置的环境噪声及 EUT 辐射信号自相关程度;2)分析环境噪声与 EUT 辐射信号的成分组成及二者的耦合程度,确定环境噪声与 EUT 辐射信号互相关程度.

为适应复杂电磁环境下的 EMI 测试,上述两个方面的信息获取是十分重要的,这两类问题可以利用盲源分离相关理论去探究[2-3],在此不作详述. 在本论文的建模与分析中,将假定已知环境噪声和 EUT 辐射信号的统计特性,对二者的自相关性及互相关性作定性设置,并依此建立系统结构模型,予以分析.

1 传统自适应噪声抵消模型研究

自适应噪声抵消技术的基本原理是将被噪声污染的信号与参考信号进行抵消运算,从而消除带噪信号中的噪声[4]. 其实质上是一种能够自动调整本身参数的特殊维纳滤波器. 在设计时不需要事先知道关于输入信号和噪声的统计特性的知识,它能在自己工作过程中逐渐了解或估计出所需的统计特性,并以此为依据自动调整自己的参数以达到最佳滤波效果. 基于传统自适应噪声抵消模型建立的虚拟暗室测试系统不对主通道及参考通道捕获的信号进行特殊处理,仅在测量方法上建议 $D2 \geqslant 10D1$, 借助辐射信号的空间散射衰减以降低参考通道对 EUT 辐射信号的捕获[5]. 该模型框图如图 2 所示.

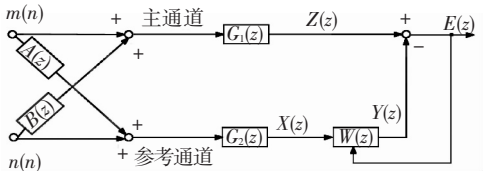


图 2 传统自适应噪声抵消模型原理图

其中 $m(n)$ 为 EUT 辐射信号, $n(n)$ 为环境噪声, $Z(z)$、$X(z)$、$E(z)$ 分别为主通道信号 $z(n)$、参考通道信号 $x(n)$ 及系统输出 $e(n)$ 的 z 变换; $A(z)$、$B(z)$ 分别为辐射信号、噪声信号串扰信道(即衰减信道)的传递函数, $G_1(z)$、$G_2(z)$ 分别为主通道、参考通道传递函数, $W(z)$ 为自适应滤波器传递函数. 根据系统模型,可以得到

$$E(z) = [G_1(z) - A(z)G_2(z)\hat{W}(z)]M(z) + [B(z)G_1(z) - \hat{W}(z)G_2(z)]N(z). \quad (1)$$

其中 $\hat{W}(z)$ 为自适应滤波器更新的抽头权值 $w(n)$ 的 z 变换.

自适应噪声抵消系统的目的是使 $e(n)$ 尽量保留 $m(n)$ 的同时不包含 $n(n)$ 的分量. 从上式可知, $\hat{W}(z)$ 的选取对 $m(n)$、$n(n)$ 在 $e(n)$ 的保留程度都有影响. 为评估这种影响,从均方最小准则出发,构造其代价函数

$$J(n) = E[e(n)]^2. \quad (2)$$

易知代价函数 $J(n)$ 是关于 $\hat{W}(n)$ 的一簇二次函数,工程上称之为误差性能曲面,其最佳值 $w_{opt}(n)$ 为维纳解,即最优解. 自适应滤波的实质是对维纳-霍夫方程的求解,考虑到其自身结构特点,存在梯度噪声,依靠自适应算法得到的终值 $w_\infty(n)$ 不会终止于为维纳解 $w_{opt}(n)$, 而会在误差性能曲面极小点随机移动. 此时经 $w_\infty(n)$ 求得的最终解

$J(\infty)$ 与维纳解所获得的 J_{opt} 存在一定的误差，这种误差度量称之为失调. 由于失调可控，在满足误差最小而不考虑收敛时间的条件下，最终解 $J(\infty)$ 与维纳解 J_{opt} 可以同等考虑. 因此，可以借助一般意义上的维纳-霍夫方程对 $\hat{w}(n)$ 进行分析. 通常情况下，解维纳-霍夫方程非常繁琐，不易实现，但如只考虑在 $n \in [0, +\infty]$ 实现的条件下，求解维纳-霍夫方程则比较简单，且这一实现条件满足实际测试要求，则

$$W_{\text{opt}}(z) = \frac{S_{zx}(z)}{S_{xx}(z)}. \tag{3}$$

其中：$S_{zx}(z)$ 为 $z(n)$ 与 $x(n)$ 互功率谱密度；$S_{xx}(z)$ 为 $x(n)$ 自功率谱密度.

在 $m(n)$ 与 $n(n)$ 不相关的条件下，得

$$W_{\text{opt}}(z) = \frac{G_1(z)}{G_2(z)} \frac{A(z)S_{mm}(z) + B(z)S_{nn}(z)}{A^2(z)S_{mm}(z) + S_{nn}(z)}. \tag{4}$$

其中：$S_{mm}(z)$ 为信号源的自功率谱密度；$S_{nn}(z)$ 为噪声源的自功率谱密度.

进而，可求得系统输出端信号源分量为

$$M_{\text{o}}(z) = G_1(z)S(z) \frac{[1 - A(z)B(z)]S_{nn}(z)}{A^2(z)S_{mm}(z) + S_{nn}(z)}. \tag{5}$$

系统输出端噪声源分量为

$$N_{\text{o}}(z) = G_1(z)N(z) \frac{A(z)[A(z)B(z) - 1]S_{mm}(z)}{A^2(z)S_{mm}(z) + S_{nn}(z)}. \tag{6}$$

则可得到系统输出端的信噪比

$$\rho_{\text{out}} = \frac{1}{A(z)} \frac{S_{nn}(z)}{S_{mm}(z)}. \tag{7}$$

而系统输入端的信噪比

$$\rho_{\text{in}} = \frac{S_{nn}(z)}{S_{mm}(z)}. \tag{8}$$

由式(7)、(8)可得

$$\rho_{\text{out}} = \frac{1}{A(z)} \frac{1}{\rho_{\text{in}}}. \tag{9}$$

即基于传统自适应噪声抵消模型建立的系统在测试当中，其输出端的信噪比与 EUT 辐射串扰信道(即衰减信道)传递函数成反比，与系统输入端的信噪比成反比. 也就是说，在 EUT 辐射信号被环境噪声淹没的低信噪比环境当中，测试系统能够较好地提取辐射信号，而在强辐射信号的高信噪比环境当中，信号提取能力将被大大削弱，可能使环境噪声滤除失效. 参考通道 EUT 辐射信号相对于主通道信号量的衰减量可以作为系统测试输出补偿，由于空间信道短距离衰减程度有限，以致其对整体测试效果的改善十分有限. 因此，基于传统自适应噪声抵消模型建立的系统存在固有缺陷，在实际测试环境中的运用是有限的.

2　谱估计自适应噪声抵消模型

谱估计作为信号分析的主要工具，在最优线性滤波器设计、噪声频谱测量及在噪声环境中提取有用信号等方面有着重要应用[6]. 谱估计根据信号模型的不同，可分为基于确定信号的频谱估计和基于统计信号的功率谱估计. 在实际测试环境中，信号多为随机信号，不存在精确的数学表达式，只能用其各种统计平均量进行表征，因此，运用功率谱估计进行信号分析具有更广泛的实际意义[7]. 功率谱估计的方法很多，但缺少一种被一致认可的谱估计质量评价标准，来认定估计谱的最佳性，这种最佳一般认为是估计谱与真实谱之间的误差最小. 需要指出的是，功率谱估计最优性的争论主要集中在分辨率大小及幅值强度复现的准确度上，而对于信号频谱主瓣频率点的计算总可以得到可信的结果[8]，据此，利用谱估计器可以得到噪声信号的主瓣频率点，并以此设计窄带陷波器，滤除环境噪声.

基于传统自适应噪声抵消模型建立的虚拟暗室系统由于对主通道或参考通道不作任何前端信号抑制处理[9]，使参考通道存在的 EUT 辐射信号分量参与后端的自适应滤波过程，导致系统运用场合受限，测量精度降低. 因此，可以在系统信号调理端削弱或者消除参考通道 EUT 辐射信号，以提高系统对目标信号的提取能力. 需要指出的是，在此过程中需要尽可能保留参考通道环境噪声分量. 在实际测试中，环境噪声的总和普遍认为是白噪声或白噪声经过某一模型(如 AR、ARMA 等)的实现，而 EUT 辐射信号被看作是周期性信号和热噪声的叠加[4]. 基于此，利用功率谱估计相关方法对混合信号进行分析，得到 EUT 辐射信号突出峰值的频点或频段，再根据所得频率及频段设计若干陷波器，以实现参考通道 EUT 辐射信号分量的抑制[10]，其原理如图 3 所示.

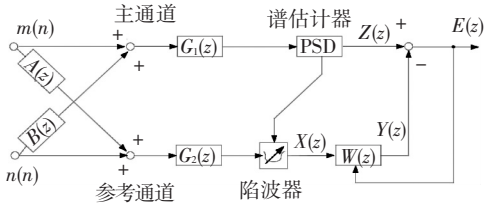


图 3　谱估计自适应噪声抵消模型原理图

设经过陷波器的参考通道 EUT 辐射信号的残留量为 $\varphi A(z)M(z)$ (φ 为残留因子)，则

$$X(z) = G_2[N(z) + \varphi A(z)M(z)], \tag{10}$$

$$E(z) = [G_1(z) - \varphi A(z)G_2(z)\hat{W}(z)]M(z) +$$

$$[B(z)G_1(z) - \hat{W}(z)G_2(z)]N(z). \quad (11)$$

可得,系统输出中 EUT 辐射信号分量为

$$M'_o(z) = G_1(z)M(z)\frac{[1 - A(z)B(z)]S_{nn}(z)}{\varphi^2 A^2(z)S_{mm}(z) + S_{nn}(z)}. \quad (12)$$

系统输出中噪声信号分量为

$$N'_o(z) = G_1(z)N(z)\frac{\varphi A(z)[A(z)B(z) - 1]S_{mm}(z)}{\varphi^2 A^2(z)S_{mm}(z) + S_{nn}(z)}. \quad (13)$$

由式(12)、(13)可知,当 $\varphi \to 0$,$M'_o(z) \to G_1(z)M(z)$,$N'_o(z) \to 0$. 即参考通道 EUT 辐射信号残余量越少,系统输出越能复原 EUT 辐射信号,同时对环境噪声的抑制能力就越强,从而提高系统测试精度[11]. 另外,无论是高信噪比环境还是低信噪比环境,该系统能实现自适应滤波器输入信号成分的一致,有利于复杂信号环境下的自适应滤波处理,扩大系统的适用范围.

3 虚拟暗室测试系统仿真试验验证

仿真试验主要考量传统 EMI 虚拟暗室测试系统模型与改进系统模型在高信噪比及低信噪比环境中的性能表现,以定性说明基于该两种模型建立的虚拟暗室测试系统适应任意信噪比测试环境的能力. 实际测试环境中,EUT 辐射信号多以周期性信号及热噪声构成,且热噪声强度一般较低,负载于周期性信号之上[4,12];另一方面,环境噪声虽成分复杂,但其信号叠加结果可认为是高斯白噪声[8].

综上所述,仿真试验中 EUT 辐射信号 $S(n)$ 可由频率不同的两种正弦信号与白噪声线性叠加生成,噪声信号 $N(n)$ 为高斯白噪声. 此外,参考通道 EUT 辐射串扰信号强度设为 $S(n)$ 的 1/10,主通道噪声串扰信号通过 $N(n)$ 作相关性处理得到.

在系统结构模型中,自适应滤波器基于 RLS 算法搭建,滤波器阶数设为 32 阶,遗忘因子设为 0.99,输入信号确定性相关函数矩阵的逆初始化为单位阵,以保证自适应噪声抵消模型运行的稳定性及滤波的高效性. 谱估计器则基于 Welch 法进行构建,其输出的估计谱为陷波器滤波中心频率、3 dB 带宽以及截至频带衰减量的设置提供实时性参考. 为模拟低信噪比测试环境,令

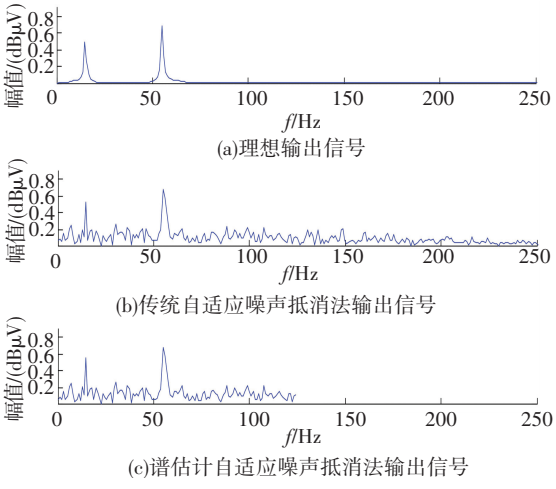
$$S(n) = 0.8\sin(0.1\pi n + \varphi_1) + 0.6\sin(0.3\pi n + \varphi_2) + N(n). \quad (14)$$

其中:φ_1,φ_2 为独立随机变量;$N(n)$ 为负载白噪声,$N(n)$ 的电平幅值设为 3.5,此时系统输入端信噪比 SNR 约为−10.14 dB. 在高信噪比测试环境中,令

$$S(n) = 6.5\sin(0.1\pi n + \varphi_1) + 5.5\sin(0.3\pi n + \varphi_2) + N(n). \quad (15)$$

其中:φ_1,φ_2 为独立随机变量;$N(n)$ 为负载白噪声,$N(n)$ 的电平幅值为 1.0,此时系统输入端信噪比约为 15.56 dB.

图 4 为低信噪比条件下理想系统、传统自适应噪声抵消模型系统及谱估计自适应噪声抵消模型系统的输出信号频谱图,图 5 为高信噪比环境下系统的输出信号频谱图.

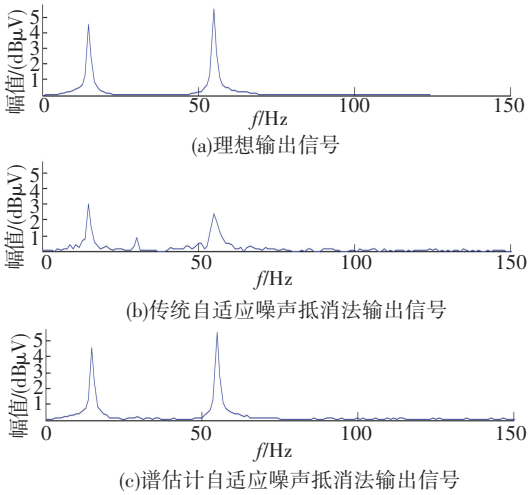


(a)理想输出信号

(b)传统自适应噪声抵消法输出信号

(c)谱估计自适应噪声抵消法输出信号

图 4 低信噪比条件下系统输出仿真结果



(a)理想输出信号

(b)传统自适应噪声抵消法输出信号

(c)谱估计自适应噪声抵消法输出信号

图 5 高信噪比条件下系统输出仿真结果

从图 4、5 可以看出,在低信噪比测试条件下,两者的滤波输出频谱曲线非常相似,谱估计虚拟暗室测试系统模型的性能表现与传统结构模型相当,对环境噪声的抑制及 EUT 辐射信号的提取效果均较为明显,传统虚拟暗室测试系统模型的输出信噪比为 17.13 dB,谱估计系统模型的输出信噪比为 17.16 dB,二者没有明显区别;在高信噪比测试条件下,传统虚拟暗室测试系统模型不能准确有效地提

取出 EUT 辐射信号，其衰减抑制明显，且环境噪声滤除效果欠佳，其系统输出信噪比为 9.21 dB. 相比之下，改进的测试系统模型能够很好地复现 EUT 辐射信号，且对环境噪声的抑制能力也较之突出，其系统输出信噪比为 21.93 dB.

鉴于实际电磁兼容性测试环境的复杂性和不确定性[13-14]，高信噪比与低信噪比测试条件都是存在的，且不能事先预知. 改进的系统模型在两类测试环境中都表现出了良好的测试性能，其具有更广泛的适用场合和更实际的应用价值.

4　结　论

1）在测试测量领域，测试结果的准确度和精度主要依赖于系统模型的准确性、算法的完备性及测试方法的合理性. 通过数学分析阐述了基于传统自适应噪声抵消模型建立的虚拟暗室测试系统的固有缺陷与性能不足，并结合谱估计相关方法，提出了谱估计自适应噪声抵消模型，基于该模型建立的系统更符合复杂环境中 EMI 测试要求.

2）考虑到虚拟暗室测试技术的实用性要求高，下一阶段将设计实测实验以验证谱估计自适应噪声抵消模型的实用性.

参考文献

[1] MARINO J. System and method for measuring RF radiated emissions in the presence of strong ambient signals: us, 6980611[P]. 2005-10-11.

[2] 张兰勇，刘胜，李冰. 一种改进的自适应干扰对消技术研究及在电磁辐射测量中的应用[J]. 电子学报，2011，39(6)：1394-1398.

[3] 汤辉，王殊. 基于去噪盲分离的多个直扩信号参数估计[J]. 系统工程与电子技术，2011，33(8)：1722-1726.

[4] ARUNA P，PREMALATHA L. Investigation of EMI reduction in buck converter by using external chaos generator[C]// IEEE 2011 International Conference on Recent Advancements in Electrical，Electronics and Control Engineering. London：IEEE，2011：520-525.

[5] 汪大宝，刘上乾，张峰. 一种新的红外复杂背景自适应抑制算法[J]. 西安电子科技大学学报，2010，37(5)：927-933.

[6] 崔伟亮，江桦，李剑强，等. 改进的循环谱估计快速算法与性能分析[J]. 电子与信息学报，2011，33(7)：1594-1599.

[7] HOFFMANN C，RUSSER P. A Time-domain system for EMI measurements above 1 GHz with high sensitivity [C]//IEEE Proceeding of the 6th German Microwave Conference. Berlin：IEEE，2011：1-4.

[8] PAYANDEHJOO K，ABHARI R. Suppression of unwanted harmonics using integrated complementary split-ring resonators in nonlinear transmission line frequency multipliers[J]. Microwave Theory and Techniques，2008，56 (4)：931-941.

[9] 刘胜，张兰勇，张利军. 基于小波分析的电磁干扰测量技术研究[J]. 电子与信息学报，2010，32(5)：1229-1233.

[10] 崔艳鹏，胡建伟，杨绍全，等. 一种低信噪比下 MPSK 信号频率估计方法[J]. 西安电子科技大学学报，2011，38(5)：90-94.

[11] FRECH A，ZAKARIA A，BRAUN S，et al. Ambient noise cancellation with a time-domain EMI measurement system using adaptive filtering[C]//2008 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility & 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. Singapore：IEEE，2008：534-537.

[12] 文静，文玉梅，李平. 基于噪声白化准则的自适应噪声抵消方法[J]. 仪器仪表学报，2010，31(8)：1693-1699.

[13] KWANG M J，NAM I P，HONG K K. Mechanical noise suppression based on non-negative matrix factorization and multi-band Spectral subtraction for digital cameras[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics，2013，59 (2)：296-302.

[14] MOSAYYEB P. Single-microphone early and late reverberation suppression in noisy speech [J]. IEEE Transactions on Audio，Speech，and Language Processing，2013，21(2)：322-335.

（编辑　魏希柱）