



·高功率微波技术·

## 多导体传输线串扰实验不确定度的预测\*

邓莉亭<sup>1</sup>, 钟龙权<sup>2</sup>, 刘强<sup>3</sup>, 孙子涵<sup>1</sup>, 闫丽萍<sup>1</sup>, 赵翔<sup>1</sup>

(1. 四川大学电子信息学院, 成都 610065; 2. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川绵阳 621900;  
3. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

**摘要:** 利用随机降阶模型(SROM)对影响线缆串扰的不确定变量进行了敏感性分析, 在此基础上预测了在这些不确定性变量影响下的串扰不确定度。并搭建三导体传输线串扰实验系统, 测量了近端串扰和远端串扰, 根据标准 GB/Z 6113.401—2018/CISPR/TR 16-4-1:2009, 评估了串扰实验的测量不确定度。将基于 SROM 方法的串扰不确定度, 与实际测量获得的不确定度进行对比。结果表明, 二者随频率变化趋势一致, 且实验测试不确定度在预测不确定度范围内。采用 SROM 方法选取样本计算的不确定度可用于预测串扰实际测量结果不确定度。

**关键词:** 串扰实验; 随机降阶模型; 敏感性; 不确定度

中图分类号: O441.4

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210066

## Uncertainty prediction of crosstalk measurement for multi-conductor transmission lines

Deng Liting<sup>1</sup>, Zhong Longquan<sup>2</sup>, Liu Qiang<sup>3</sup>, Sun Zihan<sup>1</sup>, Yan Liping<sup>1</sup>, Zhao Xiang<sup>1</sup>

(1. Department of Electronic and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;  
2. Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;  
3. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

**Abstract:** Sensitivity analysis of cable crosstalk to uncertain parameters is studied using stochastic reduced order model (SROM), and then the uncertainty of cable crosstalk is predicted. To verify the prediction, a three-conductor transmission line (TL) experiment system is established. Both near end and far end crosstalk (NEXT and FEXT) are tested. Then the measurement uncertainty is deduced according to the standard GB/Z 6113.401—2018/CISPR/TR 16-4-1:2009. Comparing the predicted uncertainty to the measured one, it is found that they have the same variation trends with frequency. Moreover, the measured uncertainty is within the range of the prediction. Therefore, the uncertainty prediction using SROM can be applied to predict the test uncertainty, which is instructive to the crosstalk measurement for both analysis model verification and experimental investigation.

**Key words:** crosstalk experiment; stochastic reduced order model (SROM); sensitivity; uncertainty

大型复杂系统如飞机、汽车通常使用数量众多的电子/电气设备, 需敷设大量线缆进行能量和信号的传输, 这些相互邻近的线缆很容易因串扰而产生干扰。与此同时, 高速集成电路技术的飞速发展使得电子/电气设备变得更加敏感, 因此线缆串扰易导致与受扰传输线连接的电子设备或子系统性能下降甚至无法工作<sup>[1]</sup>。有数据表明, 90% 的电磁兼容问题是由线缆导致的: 线缆是高效的电磁波接收天线和辐射天线, 同时也是干扰传导的良好通道<sup>[2]</sup>, 因此多导体传输线的串扰分析具有重要意义。目前围绕多导体传输线串扰分析的研究已有很多, 例如基于多导体传输线理论的求解方法<sup>[3-10]</sup>和基于全波分析的数值方法<sup>[11-13]</sup>等。为了验证分析方法的有效性, 这些研究常常搭建实验测试系统对计算结果进行验证。然而理论模型计算结果与实验测试结果普遍存在一定偏差, 并且偏差的程度也因实验系统各不相同, 因此基于二者之间的差值难以判定分析方法的准确性, 还须借助其他分析结果进行对比

\* 收稿日期: 2021-03-05; 修订日期: 2021-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(61877041); 成都市科技项目(2020-GH02-00061-Hz)

作者简介: 邓莉亭(1996—), 女, 硕士, 主要从事电磁兼容方面的研究。

通信作者: 闫丽萍(1972—), 女, 教授, 主要从事电磁兼容建模分析和电磁环境效应评估方面的研究。

验证,另外,在电缆串扰测量的实验研究中,若要表征实验研究结果的可靠性,也必须要给出实验不确定度,这通常需要大量的测试样本和测试时间。若能在实验之前对多导体传输线串扰的不确定性因素进行敏感性分析,确定哪些参量对实验测试结果影响更大,就能指导实验系统搭建,并尽可能控制这些因素。在此基础上通过多个不确定变量对实验进行不确定性分析,从而实现实验测试结果不确定度的预测。这无论对于串扰的实验研究,还是串扰建模分析方法的实验验证都具有重要意义。

因此,本文以平行多导体传输线为例,首先采用随机降阶模型(SROM)法对不确定性变量,如,导线半径、高度、间距和负载对串扰结果的影响进行了分析,获得了串扰结果在 20 MHz~1 GHz 范围内对这四个不确定变量的敏感程度。在此基础上,基于 SROM 方法计算获得了三导体传输线系统的串扰不确定度。然后搭建串扰测量系统,实际测量三导体传输线的近端串扰和远端串扰,获得测量不确定度,并与基于 SROM 方法预测的不确定度进行对比。

## 1 多导体传输线串扰的敏感因素分析

### 1.1 串扰分析模型

如图 1 所示,两根半径为  $r$  的平行导线置于理想公共地面上方  $h$  处,间距为  $d$ 。接有信号源的线称为发射线,受到干扰的线称为接收线,  $V_S$  为电源电压,  $R_S$  为电源电阻,  $R_L$  为发射线终端负载,  $R_{NE}$  和  $R_{FE}$  分别为接收线近端和远端终端负载。根据传输线理论可计算获得接收线上的近端串扰和远端串扰电压<sup>[14]</sup>,求解中所需分布电感和分布电容,可根据下式进行计算<sup>[15]</sup>

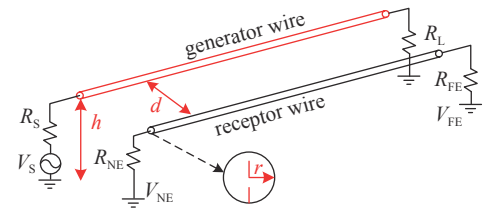


Fig. 1 The model of three-conductor transmission line

图 1 三导体传输线模型图

$$L_{ii} = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{2h_i}{r}\right) \quad (1)$$

$$L_{ij} = L_{ji} = \frac{\mu}{4\pi} \ln\left(1 + \frac{4h_i h_j}{d_{ij}^2}\right) \quad (2)$$

$$C = \mu\epsilon L^{-1} \quad (3)$$

式中:  $\mu$  和  $\epsilon$  为导线周围介质的磁导率和介电常数,  $h_i$  和  $h_j$  分别为第  $i$  和  $j$  号导线在地面上的架设高度,  $r$  为导线半径,  $d_{ij}$  则为第  $i$  和  $j$  号导线间的距离。由此可见,影响传输线间串扰的主要因素包括每根导线的架设高度  $h$ 、导线半径  $r$ 、导线间距  $d$  以及导线两端的负载  $R$ 。

### 1.2 串扰敏感性分析

在传输线串扰实验测试中,系统搭建和操作过程中的人为因素和器件的长期使用均会对实验结果引入一定的不确定性。例如导线因随机弯曲导致导线高度和间距与设定值不符,终端负载因长期使用导致阻值偏离 50  $\Omega$  等。因此,在实验前分析这些因素给实验测量结果带来的不确定性,确定串扰结果对这些不确定变量的敏感程度,将有助于在实验中获得可靠的测试数据。

参数的不确定性分析方法有蒙特卡罗方法(MC)、随机配点法(SC)、随机伽辽金法(SG)和随机降阶法(SROM)等。传统的 MC 应用简单,但需要重复执行确定性求解,收敛速度较慢,且样本数量过多导致计算成本急剧增加<sup>[16]</sup>。其他三种方法均为基于小样本量的高效随机方法,其中 SC 和 SG 方法都基于广义多项式混沌。SG 方法精度更高,但属于侵入式方法,即需对确定性求解器进行修改,在推导和实现方面比较困难。因此 SC 方法应用更为广泛,但容易受到维数影响,需通过引入 Smolyak 稀疏网络来解决多元问题<sup>[17]</sup>,这使得研究者需要具备良好的数学功底和代码实现能力。相比之下, SROM 方法同样作为非侵入方法,在不影响结果精度前提下,更易于实现。本质上, SROM 可视为一个样本量更小、效率更高的 MC 方法,它可应用于任何分布类型的不确定变量中,因此本文选取 SROM 进行多导体传输线串扰的敏感性分析。

SROM 使用较少的样本来最大程度地反映输入不确定参数的分布规律<sup>[18]</sup>,并用以量化系统中的传播不确定性。已知  $\mathbf{X} \in \Omega \subset \mathbb{R}^n$  是一个具有已知概率的  $n$  维随机向量,即它的统计量是已知的。SROM 模型为了准确表示不确定变量  $\mathbf{X}$  的统计量,选择了具有指定概率  $(p_1, \dots, p_m)$  ( $m$  表示  $\bar{\mathbf{X}}$  的样本数量) 的样本  $\bar{\mathbf{X}} = \{X_1, \dots, X_m\}$ ,  $\bar{\mathbf{X}}$  中每个

$X_i (i = 1, \dots, m)$ 描述了一个不确定变量的变化。不同的 $\bar{X}$ 有不同的SROM模型,需选择最优的SROM模型进行敏感度分析,即最大限度减小 $X$ 与统计量 $\bar{X}$ 的差异。一旦SROM模型的最优 $\bar{X}$ 选定后,使用确定性求解器便可获得基于SROM的输出统计数据 $Y$ ,并以此来近似实际响应的统计特性。本文选取基于经典传输线理论的线缆模型作为确定性求解器,为了描述变量的敏感性,定义方差系数为<sup>[9]</sup>

$$COV(A) = \frac{\sigma(A)}{\text{Mean}(A)} \quad (4)$$

式中:  $\sigma(A)$  为标准差,  $\text{Mean}(A)$  为随机变量  $A$  的均值。

以图1中架设在理想地面上相同高度的平行双线为例进行分析,计算发射线和接收线高度为 $h_i = h_j = h$ ,半径为 $r_i = r_j = r$ ,负载 $R_S = R_L = R_{NE} = R_{FE} = R$ ,导线长度 $L = 331 \text{ mm}$ 。分别对 $h$ 、 $d$ 、 $r$ 、 $R$ 四个输入变量在20 MHz~1 GHz频率范围内进行敏感性分析。假设每个变量呈高斯分布,且其方差系数均为0.1,则四个不确定参数的统计量如表1所示。在对某个输入变量进行敏感性分析时,只考虑该变量的不确定性,其余变量均使用平均值,由此计算获得相同频率下近端感应电压和远端感应电压,并进行统计分析得到方差系数如图2所示。

表1 输入变量的统计特性

Table 1 Statistical properties of the input variables

mean( $h$ )	$\sigma(h)$	COV( $h$ )	mean( $d$ )	$\sigma(d)$	COV( $d$ )	mean( $r$ )	$\sigma(r)$	COV( $r$ )	mean( $R$ )	$\sigma(R)$	COV( $R$ )
10	1	0.1	20	2	0.1	0.4	0.04	0.1	50	5	0.1

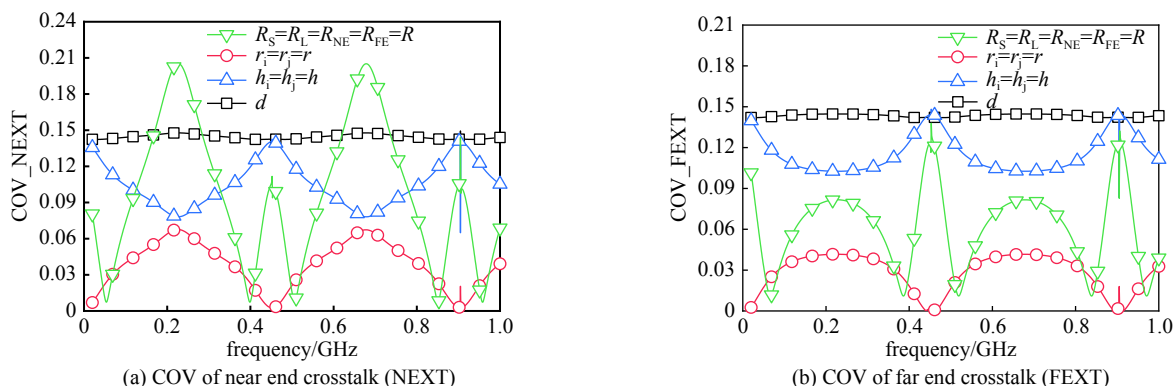


Fig. 2 Three-conductor crosstalk sensitivity analysis results

图2 三导体串扰敏感性分析结果

从图2可以看出,导线间距 $d$ 在整个频率范围内对近端串扰(NEXT)、远端串扰(FEXT)影响基本恒定,而导线半径 $r$ 、高度 $h$ 和负载电阻 $R$ 对串扰的影响则随频率呈现出震荡变化,尤其是负载电阻 $R$ 的震荡最为剧烈。此外,在导线半径 $r$ 、高度 $h$ 和间距 $d$ 三个变量中,间距 $d$ 对串扰的影响最大,且随频率变化起伏不大,而半径 $r$ 的影响最小。值得注意的是,导线间距 $d$ 在几乎整个频带范围内对FEXT影响最大,即为FEXT的强敏感变量,而负载阻抗 $R$ 对NEXT的影响在部分频段范围内高于导线间距 $d$ 的影响成为最敏感的变量,如在170~280 MHz和620~736 MHz频段内。总体而言,导线间的串扰对线缆间距 $d$ 非常敏感,对线缆半径 $r$ 不敏感,而对负载电阻 $R$ 的敏感性因频段而不同。因此,在实验中进行线缆搭建时严格控制导线间距和高度将有助于提高实验测试结果的可靠性,同时可以考虑通过忽视弱变量的影响,降低随机的维度,以简化不确定性问题的分析复杂度。

考虑到导线间距和高度为影响串扰的强敏感变量,本文进一步探究了导线高度 $h$ 和间距 $d$ 变化时对线缆串扰的影响,二者统计量如表2所示,其他变量取值见表1中均值,计算得到的串扰方差系数如图3所示。从图3(a)可以看出,当导线间距不变时,随着导线高度的增加,线缆串扰对线缆高度敏感性降低;而当导线高度不变时,随着线缆间距的增加,线缆串扰对线缆间距的敏感性增加,如图3(b)所示。由此可见,实验测试中增加导线间距将会进一步提高串扰对间距 $d$ 的敏感性。

表2 输入变量的统计特性

Table 2 Statistical properties of the input variables

	$h/\text{mm}$			$d/\text{mm}$		
Mean	5	10	15	15	20	25
$\sigma$	0.5	1	1.5	1.5	2	2.5
COV	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

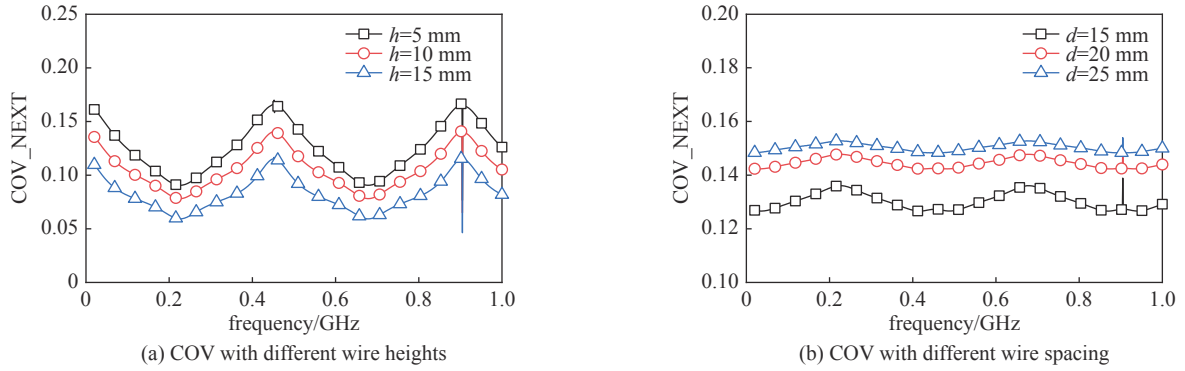


Fig. 3 Effects of spacing and height on the sensitivity of NEXT

图 3 不同导线间距和高度对近端串扰敏感性的影响

### 1.3 基于 SROM 方法的串扰不确定度分析

在敏感性分析基础上,同时考虑多个不确定源,采用 SROM 预测串扰的不确定度。其思想是将每个变量视为一维变量,再将其集成为多维变量,通过全局逼近整个不确定变量的参数空间,在少数样本量的基础上计算获得串扰的不确定度。由图 2 可知,线缆半径  $r$  对串扰影响最小,同时,在多导体传输线串扰实验中,导线半径  $r$  基本不会受到人为因素影响,所以这里选择忽略弱变量线缆半径  $r$ ,将线缆间距  $d$ 、高度  $h$  和负载  $R$  视为串扰实验的不确定性源,构建三维变量,即  $\bar{X} = \{h, d, R\}$ ,  $\bar{x}$  是一个三元变量,  $\bar{x}$  的每个样本代表以  $h$ 、 $d$ 、 $R$  为坐标的空间中一点,包含一组用于计算串扰的  $(h, d, R)$  可能值。设置导线高度  $h$  在  $(10 \pm 1)$  mm 区间,线缆间距  $d$  在  $(20 \pm 2)$  mm 区间,负载  $R$  阻值范围为  $48 \sim 50 \Omega$ 。利用 SROM 样本选取方法<sup>[20]</sup>在 125 000 样本组合中选取 50 个最佳样本,如图 4 所示。利用聚类分析方法 K-means 将 125 000 样本点按照距离划分为 50 个 Voronoi 区域,每个区域内存在一个最佳样本,该样本点距该区域内其余点有最小欧式距离。图 4(a)和 4(b)分别为均匀分布和高斯分布样本选取,从图中可知,基于 SROM 方法选取的少量优化样本可代表整个采样空间。基于两种分布的 50 个最优样本计算获得近端串扰和远端串扰结果如图 5 所示。从图 5 可以看出这些串扰结果分布在有限区域内,由此可获得最大和最小串扰值。

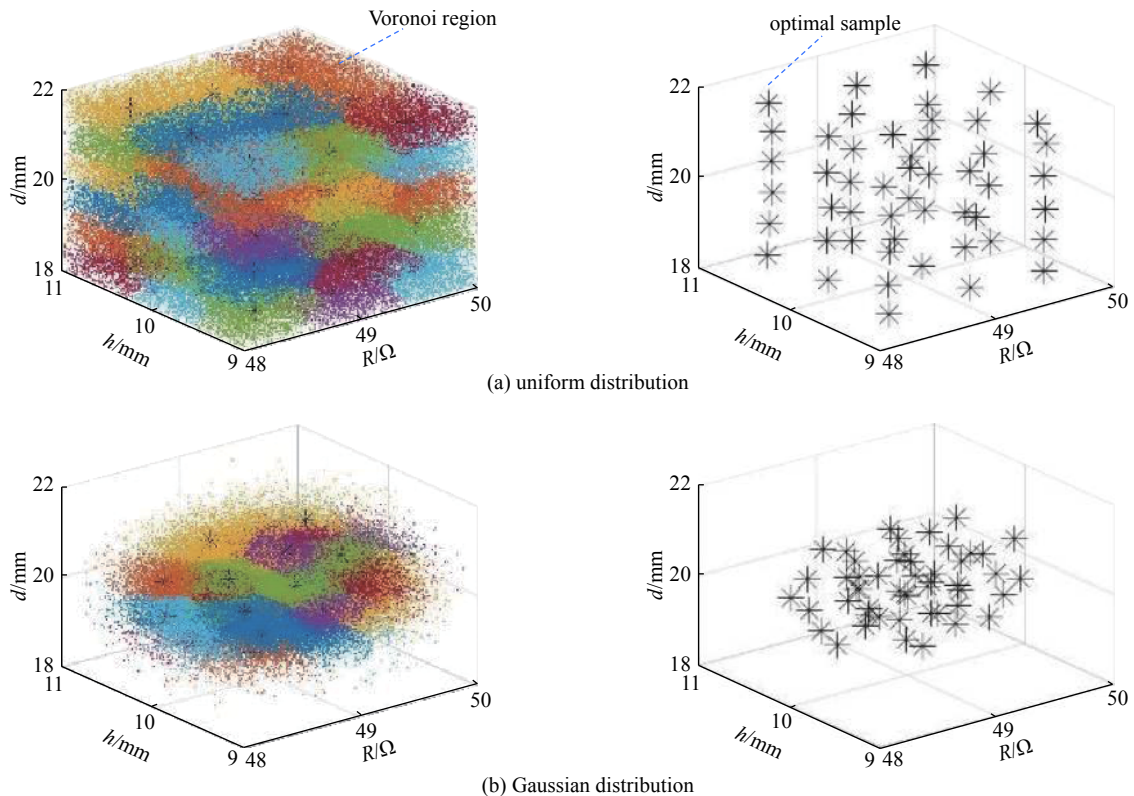


Fig. 4 Sample selection

图 4 样本选取



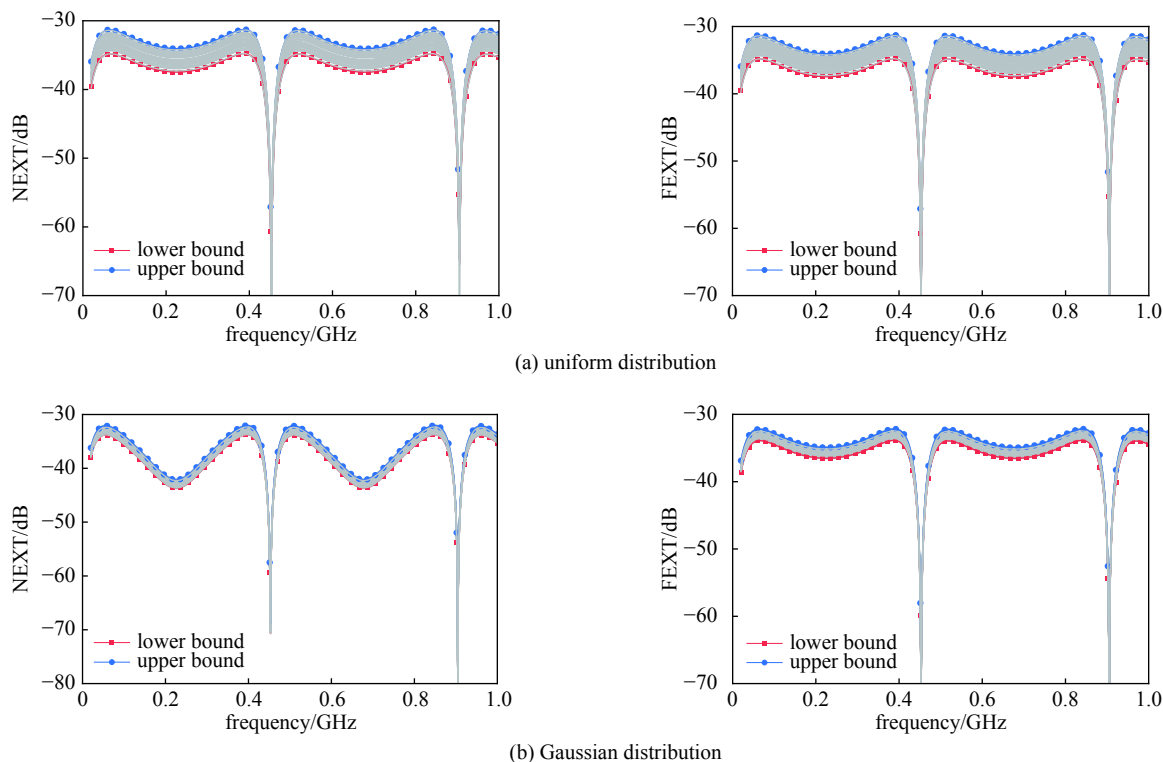


Fig. 5 Upper and lower bound obtained using the SRQM method

图 5 基于 SRQM 方法的串扰结果图

## 2 实验测试

### 2.1 实验系统搭建及一致性测试

线缆串扰实验常使用矢量网络分析仪(VNA),通过测试发射线和接收线不同端口的 $S$ 参数,获取接收线近端和远端串扰响应。这里使用两端焊接有SMA接头的铜导线作为发射线和接收线,采用铝板作为发射线与接收线的固定件和接地金属板,其中接地板尺寸为 $120\text{ cm}\times 80\text{ cm}$ ,导线半径 $r=0.4\text{ mm}$ ,如图6所示。实验中,发射线缆一端和接收线缆的一个端口通过射频电缆连接至VNA,其他两个端口接 $50\ \Omega$ 负载。首先对VNA及射频线缆进行校准,然后再进行串扰测试。

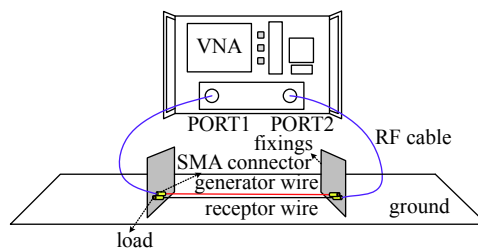


Fig. 6 Experimental system of cable crosstalk

图 6 线缆串扰实验测试系统图

在实际测试系统中,除了上述提到的不确定性因素外,还可能会引入一些无法进行确定性分析的辅助性器件,如SMA转接头、用于固定导线的垂直铝板和充当理想金属地的铝板等。为了将实验测试不确定度与基于SRQM方法预测的不确定度进行对比,应评估并尽可能控制这些无法进行不确定分析的因素对串扰测试带来的影响,因此对这些因素进行了一致性测试。

使用Agilent E8363C首先对8个 $50\ \Omega$  SMA型负载进行阻值一致性测试,频率测试范围为 $20\text{ MHz}\sim 2\text{ GHz}$ 。对VNA和射频线缆校准后,分别将这8个负载连接在射频线缆终端测量其输入阻抗,测试结果如表3所示。从表中可以看出,负载阻值各有差异,但都接近 $50\ \Omega$ 。然后制作10根长度均为 $331\text{ mm}$ 的铜导线,并从200个相同型号的SMA接头中随机抽取20个,焊接到铜导线两端。将每根导线分别接入串扰测试系统,通过测试 $S$ 参数观察焊接了SMA接头导线的一致性。图7给出了10根导线的 $|S_{11}|$ 测试结果,可以看出,测试结果在 $20\text{ MHz}\sim 1\text{ GHz}$ 范围内

表 3  $50\ \Omega$  SMA 负载阻值

Table 3  $50\ \Omega$  SMA load resistance

$R_1/\Omega$	$R_2/\Omega$	$R_3/\Omega$	$R_4/\Omega$	$R_5/\Omega$	$R_6/\Omega$	$R_7/\Omega$	$R_8/\Omega$
49.0	48.0	48.0	48.0	49.0	48.0	48.0	48.5

具有良好的一致性,说明 SMA 接头及焊接的一致性较好,其不确定性对串扰结果影响不大。

### 2.2 实验系统可靠性验证

为了进一步验证实验测试系统的可靠性,测量了导线半径  $r=0.4\text{ mm}$ , 高度  $h=10\text{ mm}$ , 间距  $d=20\text{ mm}$  的平行双导线在  $20\text{ MHz}\sim 1\text{ GHz}$  频率范围内的串扰,并与基于全波分析方法的仿真结果进行对比。分别采用平均绝对差值  $\Delta$  和曲线相关系数  $\rho$ <sup>[21]</sup> 定量评估实验测试结果与全波仿真结果之间的差别,见公式(5)和(6)。平均绝对差值  $\Delta$  越小,说明两种结果的数值越接近,而曲线相关系数  $\rho$  越接近 1,则两条曲线的变化趋势越一致。

$$\Delta = \frac{\sum_{i=1}^n |C_{\text{MEAS.}}(i) - C_{\text{Full-wave analysis}}(i)|}{n} \quad (5)$$

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n |C_{\text{MEAS.}}(i)| |C_{\text{Full-wave analysis}}(i)|}{\sqrt{\sum_{i=1}^n C_{\text{MEAS.}}^2(i) \sum_{i=1}^n C_{\text{Full-wave analysis}}^2(i)}} \quad (6)$$

金属地上平行双导线 NEXT 和 FEXT 测试与仿真结果对比如图 8 所示,可以看出,两种结果曲线吻合较好。从表 4 中的数据: NEXT 测试结果与仿真结果的曲线相关系数  $\rho=0.9354$ , 平均绝对差值  $\Delta=1.108\text{ dB}$ ; FEXT 曲线相关系数  $\rho=0.9219$ , 平均绝对差值  $\Delta=0.7679\text{ dB}$ , 进一步证明了测试与仿真结果相吻合,因此该实验系统可以用于串扰测试。

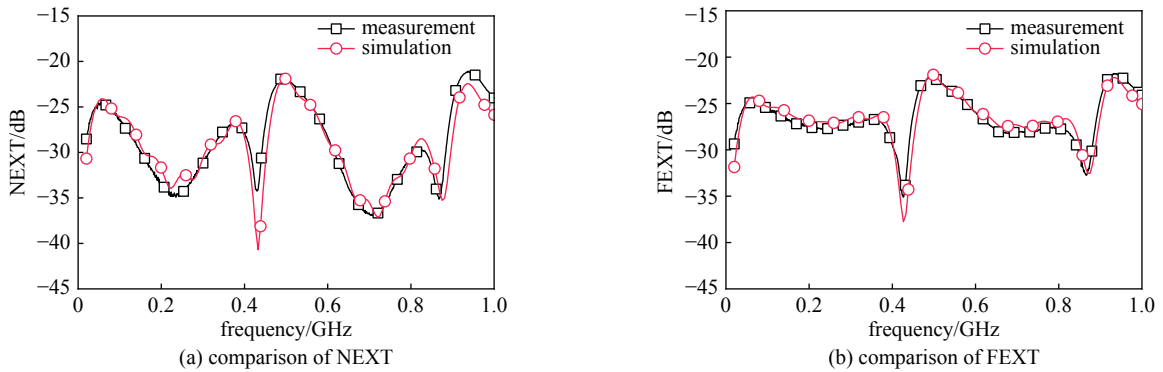


Fig. 8 Comparison between measured and simulated results

图 8 测试结果与仿真结果对比

此外,从图 8 中还可以看出,串扰测试与仿真结果在 450 MHz 和 900 MHz 附近偏差稍大,这与图 2 中串扰不确定性分析结果是一致的。由图 2 可知,在这些频率处,高度  $h$  和负载  $R$  的 COV 均为峰值,即这些变量的不确定性传递到串扰时带来的不确定性增强,超过变量自身的不确定性,因此导致串扰测试结果不确定性增大,从而与基于确定解的仿真结果偏离更大。

### 3 串扰测试的不确定度分析

基于可靠的实验测试系统,从 10 根焊接有 SMA 的铜导线中随机选取两根铜导线共进行 10 组平行双导线串扰测试实验,测试频率范围为  $20\text{ MHz}\sim 1\text{ GHz}$ 。每次测试时随机选取负载器件,其  $R$  阻值变化范围为  $48\sim 50\ \Omega$ ,且控制导线高度  $h$  在  $(10\pm 1)\text{ mm}$  区间、间距  $d$  在  $(20\pm 2)\text{ mm}$  区间变化,实验测试结果如图 9 所示。

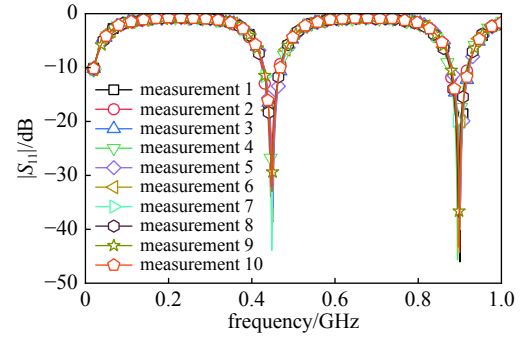


Fig. 7 Consistency measurement result of single wire

图 7 单导线一致性测试结果

表 4 金属地上双导线串扰测试结果与仿真结果对比

Table 4 Comparison of crosstalk between measured and simulated results

	$\rho$	$\Delta/\text{dB}$
NEXT	0.9354	1.108
FEXT	0.9219	0.7679

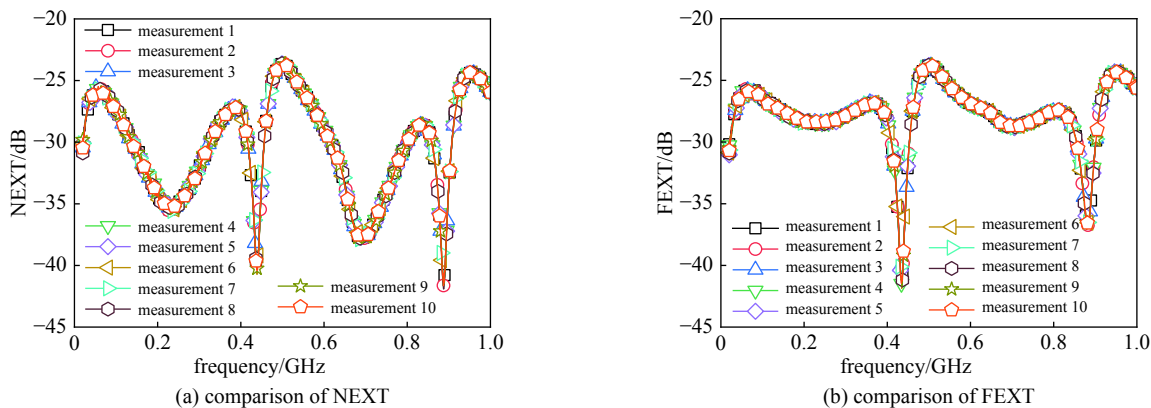


Fig. 9 Diagram of three-conductor transmission line test results

图 9 三导体传输线测试结果图

实验的测试不确定度根据标准 GB/Z 6113.401—2018/CISPR/TR 16-4-1:2009<sup>[22]</sup> 提出的评定指导来确定, 采用 A 类不确定度计算方法对测试数据进行统计分析。值得注意的是串扰实验的测量值  $S$  参数为 dB 形式, 是一个比值。在进行数据处理时, 首先将其转换为线性值, 再计算电压均值  $\bar{v}$  和标准偏差  $s(v_k)$ , 即

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (7)$$

$$s(v_k) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}{n-1}} \quad (8)$$

由此可以得到其标准不确定度  $u(v) = s(v_k) / \sqrt{n}$ , 串扰测试实验中通常用相对标准不确定度来表示, 均值已知, 可以得到相对标准不确定度为

$$a = u(v) / \bar{v} \times 100\% \quad (9)$$

图 10 给出了利用前文中均匀分布和高斯分布优化样本预测的不确定度与实验测试不确定度的对比。从图中可以看出, 在 20 MHz~1 GHz 范围内, 均匀分布优化样本 NEXT 和 FEXT 预测不确定度不超过 1.6%, 高斯分布优化样本 NEXT 和 FEXT 预测不确定度不超过 0.9%, 除谐振点外 NEXT 和 FEXT 测试不确定度不超过 0.8%, 实验测试不确定度位于预测不确定度范围内, 且相较于均匀分布优化样本预测不确定度, 高斯分布优化样本预测不确定度更接近实验测试不确定度。从图 10 还可以看出, 预测与测试不确定度随频率的变化趋势基本一致, 均在 450 MHz 和 900 MHz 附近出现最大值。尽管在谐振点处实验测试不确定度略高于预测不确定度, 但基于随机方法 SRM 计算的不确定度仍可用于串扰实验不确定度的预测。

图 10 中利用前文均匀分布和高斯分布优化样本预测的不确定度大于实验测试的不确定度, 这是由于从实验耗材到实验系统搭建均以敏感性分析结果为指导进行了严格控制, 尽可能减小人为因素的影响, 导致实验中各不确定变量的数值较为集中, 仅出现了部分可能值, 而基于 SRM 方法挑选的样本则代表了整个不确定参数空间。因此, 利用 SRM 方法对有限个主要因素进行不确定度预测的结果可以合理表征串扰实验系统的不确定度。

## 4 结论

针对多导体传输线串扰实验中的不确定度预测问题鲜有讨论, 本文以三导体传输线模型为例, 首先利用 SRM 方法对线缆间距、高度、导线半径以及终端负载进行串扰敏感性分析, 将各不确定变量对串扰的孤立影响进行了排序, 结果发现, 线缆半径对串扰的影响最小。在忽略弱变量影响前提下, 得到多个不确定源影响下的串扰

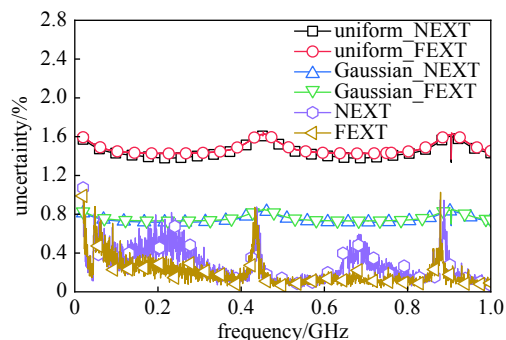


Fig. 10 Test uncertainty of three-conductor transmission lines

图 10 三导体传输线测试不确定度

统计量,并以此预测了模型的串扰不确定度。然后通过搭建串扰测试系统进行了实际串扰测试,评估了串扰实验的测量不确定度。对比基于 SROM 得到的串扰不确定度与实际测量获得不确定度发现,两者变化趋势一致,且除谐振点外实验测试不确定度在预测不确定度范围内,所以采用 SROM 方法选取样本获得的不确定度可以用于预测串扰测量结果的不确定度。

#### 参考文献:

- [1] Yuan K, Grassi F, Spadacini G, et al. Reproducing field-to-wire coupling effects in twisted-wire pairs by crosstalk[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2018, 60(4): 991-1000.
- [2] 郑军奇. EMC电磁兼容设计与测试案例分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010. (Zheng Junqi. Electromagnetic compatibility design and test case analysis[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010)
- [3] Dong X, Weng H, Beetner D G, et al. Approximation of worst case crosstalk at high frequencies[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2011, 53(1): 202-208.
- [4] 单秦. 高速动车组电磁兼容性关键技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013: 93-148. (Shan Qin. Research on key technologies of electromagnetic compatibility for China railway high-speed[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013: 93-148)
- [5] Grassi F, Abdollahi H, Spadacini G, et al. Radiated immunity test involving crosstalk and enforcing equivalence with field-to-wire coupling[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, 58(1): 66-74.
- [6] Chabane S, Besnier P, Klingler M. A modified enhanced transmission line theory applied to multiconductor transmission lines[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2017, 59(2): 1-11.
- [7] Rotgerink J L, Schippers H, Leferink F. Low-frequency analysis of multiconductor transmission lines for crosstalk design rules[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2018, 61(5): 1-9.
- [8] 杨清熙, 王庆国, 周星, 等. 有耗地面上架空线缆串扰等效电路模型[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 083203. (Yang Qingxi, Wang Qingguo, Zhou Xing, et al. Equivalent circuit for crosstalk of overhead cables on lossy ground[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 083203)
- [9] 赵翔, 晏奇林, 闫丽萍. 多导体传输线高频场线耦合模型的研究综述[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 120201. (Zhao Xiang, Yan Qilin, Yan Liping. Review of high-frequency field-to-line coupling model of multi-conductor transmission line[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 120201)
- [10] 叶志红, 廖成, 张敏, 等. 基于时域BLT的多导体传输线串扰响应分析[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 073212. (Ye Zhihong, Liao Cheng, Zhang Min, et al. Analysis of crosstalk responses of multi-conductor transmission lines based on time domain BLT equation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 073212)
- [11] 石立华, 张琦, 周颖慧, 等. 线束干扰响应的精简计算模型[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25: 531-536. (Shi Lihua, Zhang Qi, Zhou Yinghui, et al. Reduced model for disturbance analysis of cable bundles[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25: 531-536)
- [12] 张丹. 高速动车组电磁兼容预测建模方法及其应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017: 35-54. (Zhang Dan. Research on the predicting modeling method of electromagnetic compatibility and its application for EMUs[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017: 35-54)
- [13] 张泉啸. 机载线束串扰及场线耦合计算研究[D]. 南京: 东南大学, 2017: 23-48. (Zhang Xiaoxiao. Research on calculation of crosstalk and field-to-wire[D]. Nanjing: Southeast University, 2017: 23-48)
- [14] Paul C R. Solution of the transmission-line equations for three-conductor lines in homogeneous media[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1978, 20(1): 216-222.
- [15] 肖培. 机电设备互连线缆电磁干扰建模及计算方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019: 40-41. (Xiao Pei. Study on modeling and calculation method for the electromagnetic interference of interconnection cable in electromechanical equipment[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019: 40-41)
- [16] Xiu D. Efficient collocation approach for parametric uncertainty analysis[J]. *Communications in Computational Physics*, 2007, 2(2): 293-309.
- [17] Field R V J, Grigoriu M, Emery J M. On the efficacy of stochastic collocation, stochastic Galerkin, and stochastic reduced order models for solving stochastic problems[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2015, 41: 60-72.
- [18] 刘青, 王晨东, 李湛宇, 等. 埋地管道HEMP响应的不确定度量化[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(9): 1789-1797. (Liu Qing, Wang Chendong, Li Zhanyu, et al. Uncertainty quantification of response of buried pipeline to high-altitude electromagnetic pulse[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(9): 1789-1797)
- [19] Fei Z, Huang Y, Zhou J, et al. Sensitivity analysis of cable crosstalk to uncertain parameters using stochastic reduced order models[C]//*IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2016: 385-389.
- [20] Fei Z, Huang Y, Zhou J, et al. Uncertainty quantification of crosstalk using stochastic reduced order models[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, 59(1): 228-239.
- [21] 李俊辛, 刘强, 闫丽萍, 等. 基于JASMIN的并行CP-FDTD建模与屏蔽效能评估应用[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 053202. (Li Junxin, Liu Qiang, Yan Liping, et al. JASMIN-based parallel CP-FDTD modeling and application to shielding effectiveness prediction[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 053202)
- [22] GB/Z 6113.401-2018, 无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范(第4-1部分): 不确定度、统计学和限值建模 标准化EMC试验的不确定度[S]. (GB/Z 6113.401-2018, Specification for radio disturbance and immunity measurement equipment and measurement methods —Part 4-1: Uncertainty, statistics and limit modeling — Uncertainty in standardized EMC tests[S])