

基于矢量网络分析仪的混波室测量可重复性研究

何 鹏, 蒋全兴, 周 香, 赵才军

(东南大学 电磁兼容研究室, 江苏 南京 210089)

摘要:实验验证了混波室内场的统计特性,给出了基于矢量网络分析仪的测量混波室可重复性的试验方法与配置。用矢量网络分析仪的方法对不同的发射天线方向进行了测试与比较。设计并制造了 Schroeder 散射体,测试了加入散射体前后混波室测量可重复性,测试结果表明 Schroeder 散射体对混波室测量可重复性有一定的改善。

关键词:混波室;可重复性;Schroeder 散射体

中图分类号: TN03 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8829(2008)12-0077-03

Research on the Reverberation Chamber Measurement Repeatability Based on VNA

HE Peng, JIANG Quan-xing, ZHOU Xiang, ZHAO Cai-jun

(Electromagnetic Compatibility Lab., Southeast University, Nanjing 210089, China)

Abstract: The statistics characteristic of the field in reverberation chamber is tested. The test method and the arrangement of measurement repeatability of reverberation chamber based on vector network analyser (VNA) are given, the repeatability of different position of transmit antenna is test. A type of Schroeder diffuser is design to improve the performance of the reverberation chamber, the result of the measurement proves that the Schroeder diffuser can increase the measurement repeatability of the reverberation chamber.

Key words: reverberation chamber; repeatability; Schroeder diffuser

混波室是一种变边界条件、高 Q 值的、电大的谐振腔,一般装有一个或者两个搅拌器改变其内部的场的边界从而产生各向同性统计均匀的场。混波室与半波或全波暗室、开阔场(OATS)、GTEM 小室一起成为一种重要的电磁兼容测试场地。由于混波室具有测试空间大、测试时间短、输入较小功率可得到较高的测试场强、测试中不需旋转受试设备等优点,因此在最近的十余年越来越被广泛地应用到军事与商业电磁兼容测试中^[1-3]。

一个性能良好的混波室在电磁兼容测量中有着良好的可重复性^[4]。测试可重复性是用来衡量受试设备(EUT)任意两次试验结果的一致程度。一个符合文献[6]中要求的混波室,由于在搅拌器的作用下会产生统计均匀的场强,因此其在电磁兼容中有着良好的测量可重复性。在测试中可以将 EUT 放置在测试区域的任何位置,测试的结果有很好的 consistency。本研究通过矢量网络分析仪(VNA)将接收天线作为 EUT,通过测量其传输系数 S_{21} 来确定由东南大学电磁兼容研究室自行研制的大小为 $1.5\text{ m} \times 1.38\text{ m} \times 2.34\text{ m}$ 装有两个搅拌器的混波室的测量可重复性。

1 混波室的场分布特性与实验验证

由于混波室工作于过模状态,其中存在大量的模式,转动搅拌器改变场的边界条件,从而改变各模式的场的能量分布。混波室中的场一个直角分量都要用两个变量来描述,即混波室空

间某点的场要用 6 个分量来描述。由于每个分量都是大量模式的相应分量的和,即是大量随机变量的和,根据中心极限定理大量具有正方差的独立同分布的随机变量的和服从正态分布,即得场的各个分量均服从正态分布。因此,一维场分量服从瑞利分布^[5]

$$f(E) = \frac{E}{\sigma^2} e^{-\frac{E^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

将电场值对均值归一化,并取 dB 值,得一维场归一化的以 dB 值表示的电场和功率的概率密度函数

$$f(E) = \frac{\ln(10) \cdot \bar{E}^2 \cdot 10^{\frac{E}{10}}}{20\sigma^2} \cdot e^{-\frac{E^2}{2\sigma^2} \cdot 10^{\frac{E}{10}}} \quad (2)$$

按照文献[6]的校准步骤测得 1 GHz 时 120 个搅拌器位置电场概率密度的柱形图(见图 1,连续线为对应的理论统计函数曲线)。对测试数据进行 χ^2 拟合度测试,置信水平 α 取 0.05, $\chi^2_{(12)0.95} = 21.0$ 。从图 1 的数据算得

$$\chi^2_{(12)0.95} = \sum_{i=1}^{14} \frac{(k_i - n_i)^2}{n_i} = 16.81 \quad (3)$$

由于 $16.81 \leq 21.0$,所以电场测试值服从对应的统计函数,即电场的一维分量服从瑞利分布。

以实验给出的都是 1 GHz 的情况,通过对不同频率分析,得所构造的混波室在 500 MHz 以上混波室有着良好的性能。

2 测量原理与试验配置

以上在文献[6]中混波室在测量中的可重复性是通过对比混波室中的测试空间电场的均匀性进行校准确认是否满足要求。对于可重复性的确认是在通过校准的混波室的工作空间内将

收稿日期:2008-05-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50607001)

作者简介:何鹏(1979—),男,安徽桐城人,在读博士生,主要从事电磁兼容设计与测量技术的研究;蒋全兴(1942—),男,江苏人,教授,博士生导师,长期从事电磁兼容教学和科研工作。

EUT 放置在两个不同的位置比较两次测量的差异得到的。这样测试比较麻烦,需要的仪器较多,本研究通过将矢量网络分析仪 AGLIENT 8753ES 分别测量当接收天线位置不同时的传输参数 S_{21} 来确定混波室的测量可重复性。通过计算机并口控制混波室两个搅拌器的电机,通过 IEEE488.2 协议来控制 VNA,软件为 LabVIEW 8.2 GPIB 接口函数对 VNA 进行读写操作,步进电机的控制是通过 LabVIEW 8.2 中 VISA 接口函数控制并口发出脉冲信号经过步进电机控制器实现电机的转动操作,VNA 的端口 1,2 分别与发射天线和接收天线相连。配置如图 2 所示。

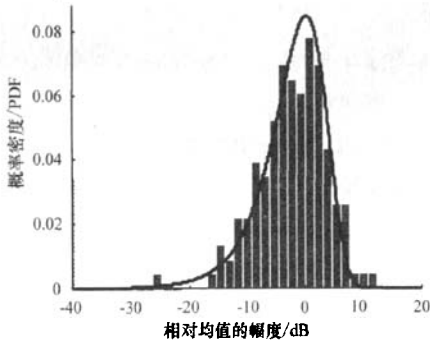


图1 电场概率密度测试值柱形图与理论统计函数曲线

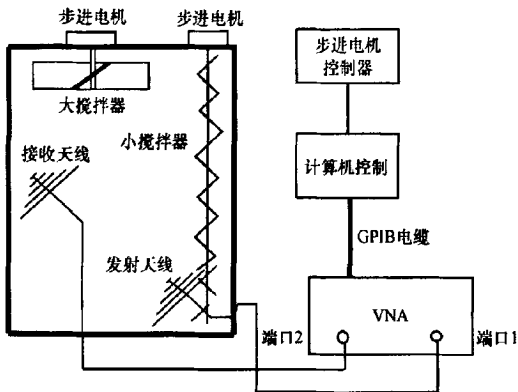


图2 测试仪器配置

本研究的混波室采用调谐模式,分别记录每个搅拌器位置的 S_{21} 并计算其平均值,按照公式(4)进行计算得到天线两个位置的测量可重复性

$$R = 20 \times \log(S_{21,1}/S_{21,2}) \quad (4)$$

式中, $S_{21,1}$ 与 $S_{21,2}$ 为天线在测试空间两个不同位置的传输参数的平均值。

3 发射天线不同位置对可重复性研究

在文献[6]中指出,为了确保实验的不确定度,发射天线不能直接照射测试空间或者接收天线与场强探头,发射天线对准混波室一个角落是一个最适宜的位置。本研究将发射天线对准混波室的角落与对准其他位置分别进行试验测试其测量的可重复性(采用的天线为东南大学电磁兼容实验室自行研制的对数周期天线其使用的频率范围为 300 MHz ~ 2 GHz,天线的极化方式一律为水平极化的方式)。

笔者研究了发射天线在不同位置时即发射天线分别对准混波室腔体的角落、搅拌器、测试空间与腔体的壁情况下分别测量其对混波室测量可重复性得影响。测试的结果如图 3 所示,从测试结果可以看出发射天线的方向对准测试区域其测量可重复性最差在 ± 10 dB 以内,对准腔体的壁次之在 ± 8 dB 以内,而对准混波室得角落与搅拌器则有较好的可重复性在 ± 2 dB。这主要是因为当发射天线对准测试区域时,发射天线与接收天线之间信号直接耦合,接收天线在不同位置耦合的差异较大,因此测量的可重复性就较差;当发射天线对准腔体的壁时,边界与对准腔体角落和搅拌器相比较为简单,激发模式较少,因此测试区域场的均匀性也就较差,测量的可重复性也就较差。因此在做测试和校准时应该注意发射天线位置与方向,以减小测量的不确定度,从而提高测量的可重复性。

4 散射体对测量可重复性的影响

4.1 散射体的基本原理与结构

由于混波室在低频情况下受到模式数的影响其性能收到了限制,因此国内外的研究者在搅拌器的基础上提出了以散射体^[7]改变形状^[8]等方法来优化混波室的性能。Schroeder 在 1984 年提出了声学上应用的原根剩余序列散射体 (PRD, primitive-root residue difusor)^[9]。散射体与相位反射栅的原理很是相似,如图 4 所示。不同的阱深(d_n)导致反射波与入射波的相位差异为

$$\phi_n = 2 \times \frac{2\pi d_n}{\lambda} \quad (5)$$

式中, λ 为自由空间的波长。入射波经反射栅的反射场幅值可

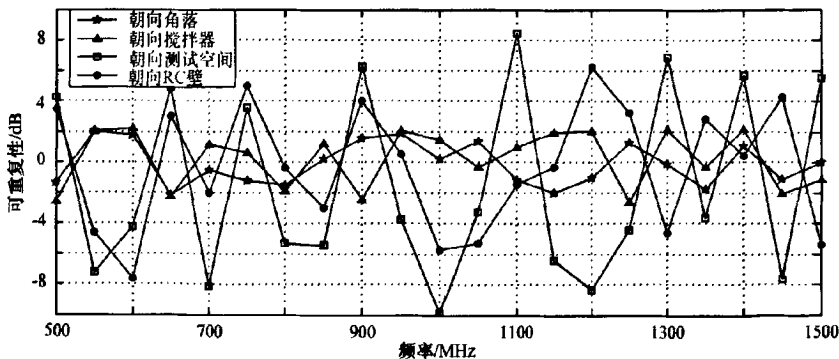


图3 发射天线不同方向的测量可重复性

表达为

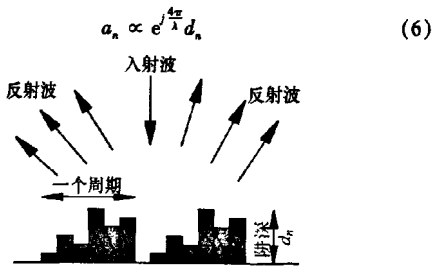


图4 散射体的原理示意图

由式(5)、(6)可以知道,不同的阱深 d_n 和波长 λ 是散射体工作的重要参数,因此在设计散射体时要充分考虑频率范围和

不同的阱深。

文献[9]介绍了Schroeder 散射体结构设计。如图5所示,在散射体中主要的参数有阱深 d_n 、阱宽 w ,以及每个周期的反射阱的个数 N 。本研究中的散射体的频率范围为300 MHz~2 GHz,因此其每个参数可由式(7)、(8)给出。

PRD的阱宽为

$$w = 0.5\lambda_{\max} = 0.5 \times 15 \text{ cm} = 7.5 \text{ cm} \tag{7}$$

式中, λ_{\max} 是散射体使用的上限频率的波长。

每个周期的反射阱的个数 N 为

$$N = \frac{2m f_{\max}}{f_{\min}} \quad m = 1, 2, 3, \dots \tag{8}$$

式中, f_{\max} 、 f_{\min} 分别为散射体使用的上限频率和下限频率, N 应

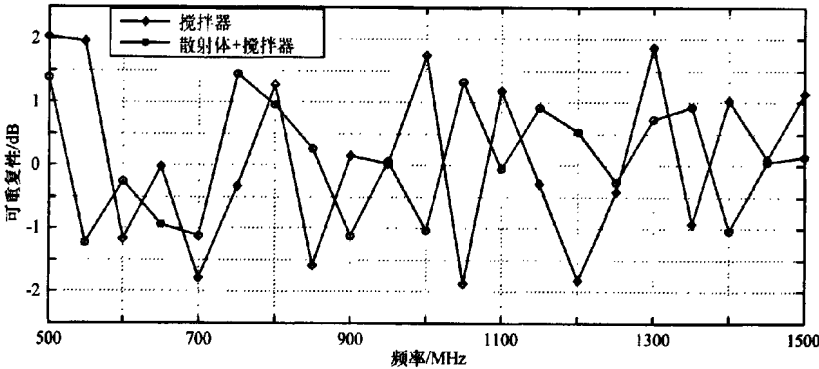


图5 加入散射体前后混波室测量可重复性

为素数。本研究考虑到混波室的尺寸选择 $N=7$ 。由于7的素根是3,则其素根剩余序列如表1所示。

表1 素数7的素根列表

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$S_n = 3^i \bmod 7$	3	2	6	4	5	1	3	2	6

由最高使用频率确定的反射阱的高度为

$$d_n = \frac{S_n \lambda_{\min}}{2N} \tag{9}$$

式中, λ_{\min} 为上限使用频率的波长。

考虑到混波室本身的几何尺寸及其内部结构,设计了两个分别为1.03 m×0.45 m和1.10 m×0.25 m散射体,由1.5 mm软铝板折弯制成。考虑到对测试区域的大小的影响,将其安装在相邻的壁上与底板相接。

4.2 散射体对测量可重复性的影响

按照图2的布置,对加入散射体前后混波室的测量可重复性进行了测量,加入散射体后混波室的测量可重复性有一定的改善,其测量值在±1.5 dB以内。这是因为散射体的加入改变了混波室中场的边界条件,测试区域场更为均匀,因此有了较好的测量可重复性和较小的测量不确定度。

5 结束语

通过实验验证自主研发的混波室的场的统计特性,用矢量网络分析仪通过测量传输参数对混波室的测量可重复性进行了测量。通过对不同的发射天线方向测试可知对准混波室角落与对准搅拌器有较好的可重复性,当加入散射体后能有效地改善

混波室的测量可重复性。

参考文献:

[1] Hill D A, Camell D G, Cavcoy K H, et al. Radiated emissions and immunity of microstrip transmission line; theory and reverberation chamber measurements[J]. IEEE Transactions on EMC, 1996, 38(2).

[2] Hagen M, Johnson D M, Slocum M B. High-power radiated susceptibility testing of FADEC systems in reverberation chambers[A]. 18th Digital Avionics Systems Conference[C]. 1999-02.

[3] Rosengren K, Kildal P S. Radiation efficiency, correlation, diversity gain and capacity of a six-monopole antenna array for a MIMO system; theory, simulation and measurement in reverberation chamber[A]. Proceedings on Microwaves, Antennas and Propagation[C]. 2005.

[4] 周香. 混波室设计及其在电磁兼容测试中的应用[D]. 东南大学, 2005.

[5] Koetas J G, Boverie B. Statistical model for a mode-stirred chamber[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1991, 33(4): 366-370.

[6] IEC61000-4-21. Reverberation Chamber Test Methods[S]. 2002.

[7] Petirch M, Schwab A. Improving a mode-stirred chamber utilizing a-acoustic diffuser[A]. IEEE International Symposium on EMC, 1998.

[8] Chung S Y, Rhee J G, Rhee H J, et al. Field uniformity characteristics of an asymmetric structure reverberation chamber by FDTD method[A]. Asia-Pacific Proceeding on Environmental Electromagnetics[C]. 2003-04: 426-429.

[9] Schroeder M R. Progress in architectural acoustics and artificial reverberation; concert hall a cousticsand number theory[J]. J. Audio Eng. Soc., 1984, 32(4): 94-203. □

微波射频测试仪器使用操作培训

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,推出多套微波射频以及天线设计培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>

微波射频测量仪器操作培训课程合集



搞硬件、做射频,不会仪器操作怎么行!对于射频工程师和硬件工程师来说,日常电路设计调试工作中,经常需要使用各种测试仪器测量各种电信号来发现问题、解决问题。因此,熟悉各种测量仪器原理,正确地使用这些测试仪器,是微波射频工程师和硬件工程师必须具备和掌握的工作技能,该套射频仪器操作培训课程合集就可以帮助您快速熟练掌握矢量网络分析仪、频谱仪、示波器等各种仪器的原理和使用操作...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rftest/vna/67.html>

矢量网络分析仪使用操作培训课程套装

矢量网络分析仪是最常用的测试仪器是射频工程师和天线设计工程师最常用的测试仪器;该套培训课程套装是国内最专业、实用和全面的矢量网络分析仪培训教程套装,包括安捷伦科技和罗德施瓦茨公司矢量网络分析仪的 5 套视频培训课程和一本矢网应用指南教材,能够帮助微波、射频工程师快速地熟练掌握矢量网络分析仪使用操作...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rftest/vna/34.html>



示波器使用操作培训课程套装



示波器是硬件和射频工程师几乎在每天的工作中都会用到仪器,因此掌握示波器的原理并能够正确使用示波器是所有从事电子硬件电路设计和调试的工程师必须具备的最基本的技能。本站推出的示波器视频培训课程套装既有示波器的基本原理以及示波器性能参数对测量结果影响的讲解,也有安捷伦和泰克多种常用示波器的实际操作讲解,能够帮助您更加深入地理解手边常用的示波器从而更加正确地使用示波器...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rftest/osc/49.html>