

# 微波暗室静区性能评测及不确定度分析



刘潇, 赵兴, 洪力, 李昱瑶, 班浩

中国计量科学研究院, 北京 100029

**【摘要】** 微波暗室广泛用于天线、目标散射特性测量、雷达成像等领域, 是微波频段最重要的测试场地之一。微波暗室建设投入较高, 其静区性能取决于其内壁铺设的吸波材料特性及其布置, 静区指标直接影响使用该暗室测试的设备测量结果准确度。因此如何测量得到准确的微波暗室静区指标是微波暗室验收中必不可少的环节, 也是微波暗室环境对测量结果贡献评估的基础。针对微波暗室静区的关键指标——静区反射率电平的测量方法进行研究, 针对中大型微波暗室, 建立最大行程 4 m 的基于三维扫描架的静区测量系统, 覆盖频率范围 1~40 GHz。利用其开展微波暗室静区的测量, 给出静区反射率电平的测量结果, 并进行了测量系统影响量的全面分析和测量结果不确定度评定。结果表明, 以 1.1 GHz 为例, 该系统静区反射率电平在 -33 dB 的情况下, 测量不确定度为 1.72 dB ( $k=2$ )。

**【关键词】** 微波暗室; 静区; 反射率电平; 测量不确定度

**DOI:** 10.12338/j.issn.2096-9015.2021.0589

**【引用本文】** 刘潇, 赵兴, 洪力, 等. 微波暗室静区性能评测及不确定度分析 [J]. 计量科学与技术, 2022, 66(4): 89-94.

## The Quiet Zone Performance Evaluation of the Microwave Anechoic Chamber and the Uncertainty Estimation

LIU Xiao, ZHAO Xing, HONG Li, LI Yuyao, BAN Hao

National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

**【Abstract】** Microwave anechoic chamber is one of the most important test sites in the microwave band, which is widely used in antenna measurements, target scattering parameter measurements and radar imaging. The investment construction of the microwave anechoic chamber is relatively high, and the quiet zone performance of the chamber depends on the characteristics and layout of the absorbing materials laid on its inner wall, while the quiet zone parameter of the chamber is closely related to the measurement accuracy of the devices measured in the chamber. Therefore, acquiring the accurate anechoic chamber quiet zone parameter through measurements not only is an essential step for the site validation, but also the basis for estimating the contribution of the anechoic chamber environment to the measurement results. The method to measuring the quiet zone reflectivity level of the chamber, which is the key parameter of the quiet zone, is discussed in this article, and a quiet zone measuring system based on a three-dimensional scanner with a maximum travel of 4 m is established for medium-to-large microwave chamber covering the frequency range of 1 to 40 GHz. An example of reflectivity level measurement for an anechoic chamber is presented, the measured results are shown, and the uncertainties component which effect the results are discussed, and the total uncertainty for the quiet zone reflectivity level is estimated for the first time. The results show that the expanded uncertainty is 1.72 dB ( $k=2$ ) at 1.1 GHz for reflectivity level of -33dB.

**【Key words】** microwave anechoic chamber, quiet zone, reflectivity level, measurement uncertainty

## 0 引言

理想的微波暗室是微波无反射室, 在一个空间中内壁铺设吸波材料, 理想情况下可以创造一个无微波反射的空间环境, 原理图如图 1 所示。微波暗室是利用电磁波工作的设备与整机系统的理想测试

场地, 广泛用于天线测量、目标散射特性测量、雷达成像等领域<sup>[1-2]</sup>。微波暗室的应用频率主要取决于吸波材料的性能, 最低工作频率通常为几百兆赫兹, 可以全天候工作。天线测量的远场法、近场法、紧缩场法、目标特性测量等都需要在微波暗室中进行, 可以说微波暗室是空间电磁场技术最重要的测

基金项目: 国家市场监督管理总局能力提升项目 (ANL1906); 中国计量科学研究院基本科研业务费项目 (27-AKYZD2016)。

作者简介: 刘潇 (1983-), 中国计量科学研究院副研究员, 研究方向: 天线、场强计量, 邮箱: liuxiao@nim.ac.cn。

试场地之一。微波暗室造价昂贵,一间暗室建造费根据其尺寸耗资在几百万到上千万甚至上亿元不等。然而即便如此,达到理想性能的微波暗室并不存在,实际应用中,由于暗室中的吸波材料无法完全吸收电磁波,电磁波经过吸波材料,在暗室中仍然会有少许反射信号存在,这些反射信号进入测试区域,各个角度的反射信号叠加,会对测量结果造成影响。因此微波暗室建成后需要对微波暗室的性能进行评估,这就是微波暗室的场地性能验证<sup>[3-5]</sup>。微波暗室场地性能验证的结果关系到微波暗室性能优劣,并直接影响使用微波暗室的测量结果的准确度。

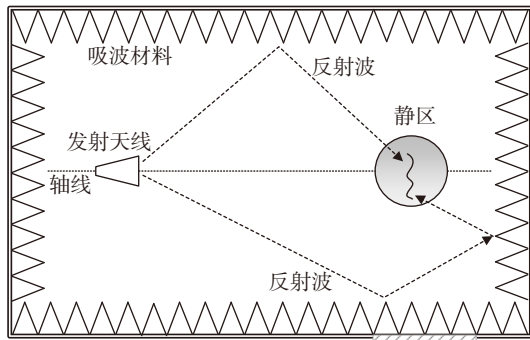


图1 微波暗室原理图  
Fig.1 Schematic diagram of anechoic chamber

### 1 静区指标

微波暗室中电磁波的反射被控制到设计水平的区域称之为静区<sup>[6]</sup>。静区是具有一定空间体积的区域,尺寸应至少等于被测设备所占据的空间范围。

#### 1.1 静区反射率电平

静区反射率电平是评价暗室静区的关键参数<sup>[6]</sup>,其定义为微波暗室静区内等效反射信号和直射信号之比,用 dB 表示,见图 2 所示。静区中的等效反射信号通常远小于直射信号,因此静区反射率电平的量值通常相比天线间直达信号小很多,测量难度大。静区反射率电平的测试可以采用两种方法:自由空间驻波比法和方向图比较法<sup>[7]</sup>,如果二者结果存在差异时,以自由空间驻波比法为准。

静区反射率电平可以通过仿真计算得到<sup>[8-10]</sup>,仿真计算可以用来指导暗室设计,在仿真技术中,几何光学法(也称射线追踪法)是一类直观的方法,可以用来评估暗室性能,并评估暗室内的反射对测量结果的影响<sup>[11]</sup>。微波暗室建成后,通常通过测量的手段获取静区反射率电平值,以进行微波暗室的场地性能验证。

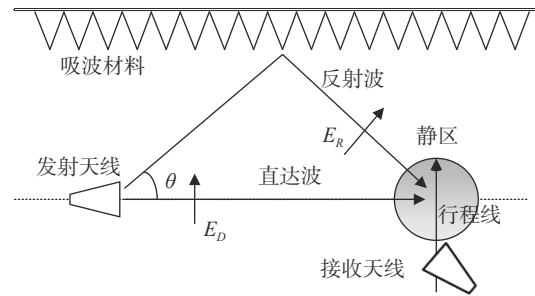


图2 到达暗室静区的直达波信号和反射波信号示意图  
Fig.2 Schematic diagram of direct wave signal and reflected wave signal arriving in quiet zone of chamber

#### 1.2 自由空间驻波比法

自由空间驻波比法是基于微波暗室中存在直达波信号和反射波信号,静区内空间任意点的场强是直达波信号和反射波信号的矢量和,在空间形成驻波,驻波的数值大小即反映了微波暗室内反射率电平的大小,可通过测量空间驻波来确定静区内的反射电平。

考虑一般情况,接收天线的朝向与反射天线存在夹角为 $\theta$ ,接收天线在方向 $\theta$ 上的天线图接收电平为 $A$ ( $A$ 指接收天线的接收能力,包含了空间衰减, dB),那么接收天线接收到直达波入射场幅度为:

$$E'_D = E_D 10^{A/20} \quad (1)$$

测量来自边墙的反射,此时:

$$R = 20 \lg \frac{E_R}{E_D} = A + 20 \lg \frac{E_R}{E'_D} \quad (2)$$

式中,  $E_D$  为直达波电场强度, V/m;  $E_R$  为反射波电场强度, V/m;  $R$  为静区反射率电平, dB。

接收天线处接收场强最大值为入射波和反射波的同相叠加,其 dB 值用  $B$  表示,最小值为反相叠加,其 dB 值用  $C$  表示,  $B-C=D$  为接收曲线波纹峰峰值。因此式(2)可以写成:

$$\begin{aligned} R &= A + 20 \lg \frac{E_R}{E'_D} \\ &= A + 20 \lg \frac{(E'_D + E_R)/E_D - (E'_D - E_R)/E_D}{(E'_D + E_R)/E_D + (E'_D - E_R)/E_D} \end{aligned} \quad (3)$$

根据  $E_R$  和  $E'_D$  的关系,可以得到:

$$\begin{aligned} R &= A + 20 \lg \frac{10^{\frac{B}{20}} - 10^{\frac{C}{20}}}{10^{\frac{B}{20}} + 10^{\frac{C}{20}}} = A + 20 \lg \frac{10^{\frac{B}{20}} - 1}{10^{\frac{B}{20}} + 1} & E_R < E'_D \\ R &= A & E_R = E'_D \\ R &= A + 20 \lg \frac{10^{\frac{B}{20}} + 10^{\frac{C}{20}}}{10^{\frac{B}{20}} - 10^{\frac{C}{20}}} = A + 20 \lg \frac{10^{\frac{B}{20}} + 1}{10^{\frac{B}{20}} - 1} & E_R > E'_D \end{aligned} \quad (4)$$

接收天线在静区中作横向水平运动时,测量结果主要反映了后墙的反光情况;作横向上下运动时,结果反映了天棚和地板的反光情况;作前后的纵向移动时,反映了边墙的反光情况。因此要全面测量静区反射情况,接收天线需要在三个维度上进行移动。

根据测量结果判断 $E_R$ 和 $E_D$ 的关系是数据处理的关键。在某一取向角上如果实测空间驻波曲线的平均值出现无规律的变化,或者在这个角度上,实测空间驻波曲线的平均电平比在这个角度上方向图的电平高,可以认为 $E_R > E_D$ 。对于收发天线的选取,发射天线应选取低方向性的天线,以保证有足够的电磁能量照射到墙面、顶面和地面。在测量时发射天线的安装位置应尽量与实际使用时相同。接收天线选择中高增益的标准增益喇叭天线,需要得到其 $E$ 面和 $H$ 面方向图信息。

## 2 测量系统

针对自由空间驻波比法,建立基于三维行程扫描架的微波暗室静区性能测量系统。其中关键核心部件为三维行程扫描架,可拆卸重组,便于运输,可以沿 $X$ 、 $Y$ 和 $Z$ 三个方向上在最大4m的行程内移动,三维扫描架的坐标定义如图3所示。接收天线采用中高增益标准增益喇叭天线,覆盖频率范围1~40GHz。系统可以采用信号源发射信号,频谱仪接收信号的方式,如图4所示,这种方式适合几乎所有场景,尤其是微波暗室较大、测试距离较远的情况。信号源结合频谱仪的方式需要二者之间做好同步,在18~40GHz频段,接收端可考虑配套预放大器,适用于暗室较大、收发天线距离较远的情况。

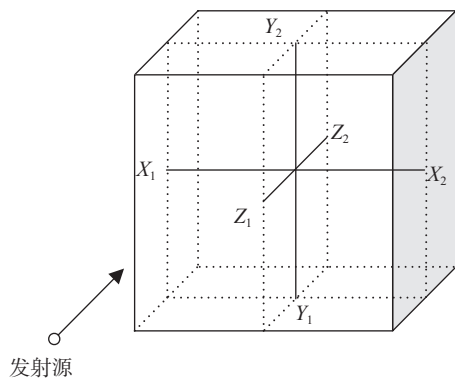


图3 三维扫描架的坐标定义  
Fig.3 Coordinates of the 3D scanning frame

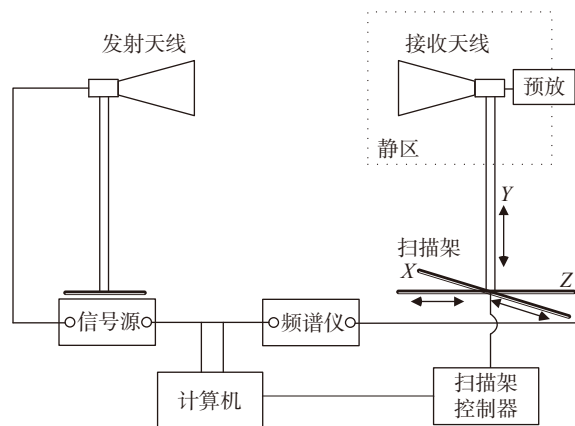


图4 静区反射率电平测量系统  
Fig.4 Quiet zone reflectance level measurement system

三维扫描架是系统中的核心定位装置,其定位精度决定了静区反射率电平的测量结果不确定度。因此利用激光跟踪仪进行天线定位精度的测量。间隔200mm的实测数据结果见表1,其中 $X$ 轴和 $Z$ 轴定位偏差优于0.1mm, $Y$ 轴定位偏差优于0.3mm,可拆卸组装的最大行程4m扫描架,能满足最高频率40GHz对应波长最小的八分之一移动步长的定位精度要求。

表1 扫描架定位精度测量结果  
Tab.1 Scanning frame positioning accuracy measurement results

位置 (mm)	定位实测值(mm)					
	$X$ 轴	差值	$Y$ 轴	差值	$Z$ 轴	差值
200	199.99	-0.01	200.21	0.21	199.99	-0.01
400	399.98	-0.02	399.70	-0.30	399.95	-0.05
600	599.99	-0.01	600.17	0.17	599.92	-0.08
800	799.99	-0.01	799.71	-0.29	799.92	-0.08
1000	1000.00	0.00	1000.27	0.27	999.93	-0.07
1200	1199.99	-0.01	1199.78	-0.22	1199.93	-0.07
1400	1400.00	0.00	1400.21	0.21	1399.90	-0.10
1600	1600.03	0.03	1599.88	-0.12	1600.00	0.00
1800	1800.07	0.07	1800.14	0.14	1800.01	0.01
2000	2000.10	0.10	1999.92	-0.08	2000.06	0.06
2200	2200.00	0.00	2200.11	0.11	2200.03	0.03
2400	2400.07	0.07	2399.92	-0.08	2400.04	0.04
2600	2600.04	0.04	2600.10	0.10	2600.05	0.05
2800	2800.04	0.04	2799.99	-0.01	2800.04	0.04
3000	3000.04	0.04	2999.96	-0.04	3000.03	0.03
3200	3200.07	0.07	3199.99	-0.01	3200.02	0.02
3400	3400.09	0.09	3400.04	0.04	3400.07	0.07
3600	3600.06	0.06	3599.98	-0.02	3600.07	0.07
3800	3800.06	0.06	3800.03	0.03	3800.00	0.00
4000	4000.04	0.04	3999.99	-0.01	4000.09	0.09

### 3 测量结果及不确定度分析

#### 3.1 测量结果

针对微波暗室,利用建立的测量系统在频率 1 ~ 40 GHz 频段进行其静区反射率电平测量。沿 X 和 Z 方向的移动需要考虑接收天线方位轴的旋转,角度间隔为 30°,Z 方向俯仰±45°。截取一条典型的测量原始数据见图 5,要注意的是,实际进行场地验证时,需要分别测量天线水平极化和垂直极化下的结果。

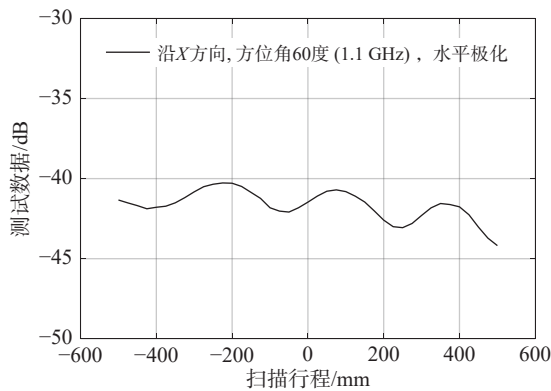


图 5 反射率电平的测量原始数据

Fig.5 Measurement raw data of the reflectivity level

#### 3.2 不确定度分析

静区反射率电平的测试基础是不同行程线上的场地插入损耗的测量,其测量结果的不确定度由场地插入损耗测量不确定度、接收天线方向图以及计算过程中波纹选取等的不确定度分量组成。频率低时,测量结果受环境影响大;频率高时,测量结果受扫描架定位精度影响大。因此在扫描架定位精度完全满足测量要求的前提下,本文以低频 1.1 GHz 天线水平极化下的静区反射率电平测试为例进行测量结果的不确定度的全面分析和评估,结果如表 2 所示。

场地插入损耗的测试主要受以下因素影响:

- 1) 天线间对准的影响量  $\delta A_U$

由于暗室中收发天线间对准不理想引入,考虑实际情况,发射天线在对准状态下沿 X、Y 方向平移 5 cm,取静区反射率电平的最大变化量 0.5 dB 作为该影响量的标准不确定度的估计值。假定该影响量服从正态分布,包含因子  $k = 2$ ,由天线间对准引入的标准不确定度分量为  $0.5 \text{ dB}/2 \approx 0.25 \text{ dB}$ 。

- 2) 扫描架自身反射引入的影响量  $\delta S_R$

扫描架主体 X、Z 轴为金属,可以采用吸波材料

覆盖,以降低反射,将导轨采用吸波材料覆盖和未采用吸波材料覆盖的两组数据结果之差 0.3dB 作为影响量的误差界。该影响量服从矩形分布,包含因子  $k = \sqrt{3}$ 。因此扫描架发射引入的标准不确定度分量为  $0.3\text{dB}/\sqrt{3} \approx 0.17 \text{ dB}$ 。

表 2 静区反射率电平  
Tab.2 Quiet zone reflectivity level

(a) 1.1 GHz			
行程线	方位角(°)	反射率电平值(dB)	
		水平极化	垂直极化
$X_1X_2$	60	-33.4	-40.6
	90	-32.0	-33.6
	120	-40.9	-33.4
$Z_1Z_2$	150	-42.5	-40.4
	180	-46.1	-37.4
	210	-49.7	-44.7
$Y_1Y_2$	45	-40.2	-46.9
	-45	-15.6	-20.8
(b) 26.5 GHz			
行程线	方位角(°)	反射率电平值(dB)	
		水平极化	垂直极化
$X_1X_2$	60	-56.3	-56.7
	90	-58.1	-57.5
	120	-63.1	-65.5
$Z_1Z_2$	150	-48.3	-52.3
	180	-58.9	-54.6
	210	-52.0	-61.3
$Y_1Y_2$	45	-58.6	-56.2
	-45	-39.0	-45.7
(c) 40 GHz			
行程线	方位角(°)	反射率电平值(dB)	
		水平极化	垂直极化
$X_1X_2$	60	-52.3	-52.5
	90	-60.6	-60.5
	120	-58.4	-68.8
$Z_1Z_2$	150	-43.9	-59.1
	180	-51.9	-62.3
	210	-53.2	-68.7
$Y_1Y_2$	45	-46.1	-48.4
	-45	-47.4	-41.2

- 3) 扫描架移动范围内的反射影响量  $\delta R_R$

扫描架在移动范围内尤其是  $Z_1Z_2$  行程上,有时无法及时铺设吸波材料,导致测量结果受地面反射



影响。若地面为金属,即在地面引入最大的反射,由于地面反射造成的测量值偏差随移动距离变化曲线见图 6。行程越远,受地面影响越大,4 m 行程上取地面覆盖和无覆盖吸波材料的两组数据之差 0.98 dB 作为影响量的误差界。该影响量服从矩形分布,包含因子  $k = \sqrt{3}$ 。因此由地面反射引入的标准不确定度分量为  $0.98 \text{ dB} / \sqrt{3} \approx 0.57 \text{ dB}$ 。

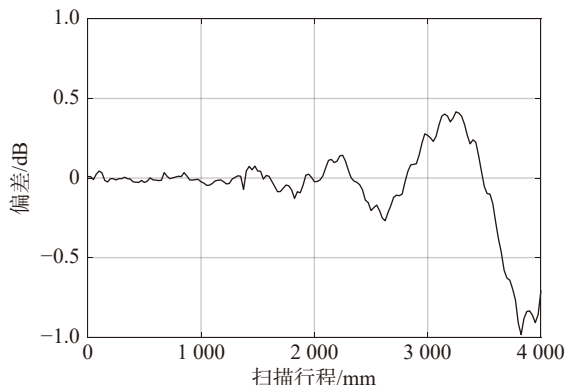


图 6 扫描架移动范围内地面反射的影响  
Fig.6 Influence of ground reflection in the moving range of the scanning frame

4) 两天线间互耦引入的影响量  $\delta M_R$

两天线间的互耦会造成空间驻波<sup>[12]</sup>,对测量结果造成干扰,如图 7 所示,在 1.1 GHz 频段,空间驻波的典型值为 0.3 ~ 0.5 dB。以  $Z_1Z_2$  行程上扫描范围内空间驻波最大值 0.43 dB 作为该影响量的误差界。该影响量服从矩形分布,包含因子  $k = \sqrt{3}$ 。两天线间互耦引起的空间驻波引入的标准不确定度分量为  $0.43 \text{ dB} / \sqrt{3} \approx 0.25 \text{ dB}$ 。

5) 系统漂移影响量  $\delta S_D$

由于测量过程中需要测量不同角度的多个行程,场地插入损耗测量过程时间较长,测量系统的漂移引入的不确定度分量由测试开始时的参考位置数值和测试结束时的参考位置数值之差 0.1 dB 作为误差界。该影响量服从矩形分布,包含因子  $k = \sqrt{3}$ 。因此系统漂移引入的标准不确定度分量为  $0.1 \text{ dB} / \sqrt{3} \approx 0.06 \text{ dB}$ 。

6) 步长设置引入的影响量  $\delta M_S$

测量的步进要求是步长不小于空间驻波波长的八分之一进行扫描,以最大程度还原反射信号引起的波纹,从而准确计算反射率电平。但测试步长和测试时间相关,在 1.1 GHz 频段,选取满足条件的不同步长测量结果作比较,最大差值 0.2dB 为误差界。该影响量服从矩形分布,包含因子  $k = \sqrt{3}$ 。因

此由测试步长设置引入的标准不确定度分量为  $0.2 \text{ dB} / \sqrt{3} \approx 0.12 \text{ dB}$ 。

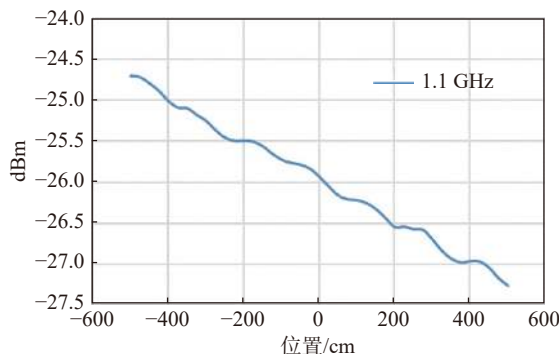


图 7 天线互耦的影响  
Fig.7 Effect of mutual coupling between antennas

7) 天线方向图的影响量  $\delta R_p$

在静区反射率电平计算时,需要使用接收天线在该角度上的方向图数值。中国计量科学研院校准天线方向图的不确定度(不含吸波材料遮挡),在 -10 dB 电平不确定度为 0.84 dB( $k=2$ );在 -20 dB 电平为 0.9 dB( $k=2$ );-30 dB 电平为 1 dB( $k=2$ )。该影响量服从正态分布,包含因子  $k = 2$ 。因此 1.1 GHz 频段,60 度角度水平极化天线方向图测量引入的标准测量不确定度分量为  $0.9 \text{ dB} / 2 = 0.45 \text{ dB}$ 。

8) 测量重复性  $\delta C_R$

将系统断开后重新连接,测量 10 次,计算得到

$$\text{实验标准差 } s = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.18 \text{ dB}.$$

静区反射率电平测量结果的合成标准不确定度汇总表见表 3。由于不确定度分量大部分为均匀分布,其他为正态分布,这些均匀分布分量合成后近似为正态分布,与其他正态分布分量合成后,可以认为是正态分布。其中,移动行程内的地面反射是较大影响量,但是可以通过在地面放置吸波材料降低该项不确定度分量;待测天线方向图测量结果不确定度也是较大贡献量,该部分不确定度分量可以从天线校准证书上获取。天线对准对于低频段的场地评估影响较小,频率升高后,尤其接近 40 GHz 时,扫描架定位精度、位置对准都会成为较明显的影响量。

取  $k=2$ ,扩展不确定度为:  $U = ku_c = 1.72 \text{ dB}(k=2)$ 。

在微波暗室的使用中,尤其在测量天线的方向图电平及微弱的散射信号时,需要特别关注其测量电平,考虑静区反射率电平对测量结果的影响。

表 3 静区反射率电平不确定度汇总表

Tab.3 Summary of uncertainty of reflectance level in quiet zone

不确定度来源或输入量 $x_i$	最大允许误差MPE或不确定度 $U$ /dB	概率分布	包含因子 $k$	灵敏系数 $c_i$	影响量 $u(x_i)$ 的标准不确定度/dB
天线对准 $\delta A_U$	0.5	正态	2	1	0.25
扫描架自身反射 $\delta S_R$	0.3	均匀	$\sqrt{3}$	1	0.17
移动行程内的地面反射 $\delta R_R$	0.98	均匀	$\sqrt{3}$	1	0.57
两天线间互耦 $\delta M_R$	0.43	均匀	$\sqrt{3}$	1	0.25
系统漂移 $\delta S_D$	0.1	均匀	$\sqrt{3}$	1	0.06
步长设置 $\delta M_S$	0.2	均匀	$\sqrt{3}$	1	0.12
接收天线方向图 $\delta R_P$	0.9	正态	2	1	0.45
测量重复性 $\delta C_R$	0.18	正态		1	0.18
合成标准不确定度 $u_c$					0.86
扩展不确定度 $U$					1.72

### 4 结论

本文针对 1 ~ 40 GHz 频段的微波暗室场地性能验证, 建立最大 4 m 行程静区反射率电平测量系统, 针对静区发反射率电平的测量, 进行全面系统的不确定度影响量的分析, 以 1.1 GHz 频段为例给出了静区反射率电平的评定结果。该研究对于微波暗室验收起技术支撑作用, 对于建立微波暗室静区指标和微波暗室内待测设备测量结果的关系具有重要意义。

### 参考文献

[1] Antennas and Propagation Standards Committee of the IEEE Antennas and Propagation Society. IEEE Standard Test Procedures for Antennas: IEEE Std 149™-2021 [S]. US: IEEE-SA Standards Board, 2021.

[2] 侯颖妮, 李道京, 洪文, 等. 稀疏阵列微波暗室成像实验研究 [J]. 电子与信息学报, 2010, 32(9): 2258-2262.

[3] Suganthi S, Patil D D, Chand E. Integration of 0.1 GHz to 40 GHz RF and Microwave Anechoic Chamber and the Intricacies[J]. Progress In Electromagnetics Research C, 2020, 101:29-42.

[4] Coq L L, Fuchs B, Kozan T, et al. IETR millimeter-wave Compact Antenna Test Range implementation and validation[C]. IEEE. 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2015.

[5] Mandaris, Dwi Moonen, Niek Van De Beek, et al. Validation of a Fully Anechoic Chamber[C]. 2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2016: 865-868.

[6] J APPEL-HANSEN. Reflectivity level of radio anechoic chambers[J]. IEEE transaction on antennas and propagation, 1973(AP-21): 490-498.

[7] 中国航天科工集团第二研究院二〇三所.微波暗室性能测试方法: GJB 6780-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[8] 师建龙, 全厚德, 甘连仓, 等. 微波暗室静区反射率电平计算方法研究 [J]. 舰船电子工程, 2010(10): 92-94.

[9] 赵雷. 微波暗室静区反射率电平的设计仿真 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.

[10] 杨媛媛. 微波暗室的性能评估系统 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.

[11] 刘潇, David Gentle. 外推法天线增益测量系统的暗室反射影响评估 [J]. 电波科学学报, 2016, 31(5): 1004-1008.

[12] LIU X, HUANG P, SONG Z F. The Antenna Measurements using the Three-antenna Extrapolation Range[C]. ISAP, 2019: 1-3.

[13] 秦瑶, 吴艳丽, 刘潇. 三天线法环天线校准系统建立及测量结果不确定度评定 [J]. 计量学报, 2021, 42(10): 1367-1371.

[14] 刘潇, 吴艳丽, 秦瑶, 等. TEM 室法环天线校准系统建立及测量结果不确定度评定 [J]. 计量学报, 2021, 42(8): 1061-1067.

[15] 茹宁, 刘小赤, 蒋志远, 等. 基于原子拉比共振的自由空间微波磁场探测研究 [J]. 计量技术, 2020(5): 19-24.

[16] 孙思扬, 陈晓晨, 戴巡, 等. 多探头球面近场测试系统校准方法及对准角度误差分析 [J]. 计量技术, 2018(12): 78-81.

本文编辑: 霍伟炜