

编者按：这是关于电磁波暗室设计的两集系列之二。第一部分发表于2016年3/4月刊，讨论了吸波器对矩形、远场区域的要求。第二部分讨论紧凑区域和近场测量。

电磁波暗室设计基本准则（二）： 紧凑区域和近场测量

Basic Rules for Anechoic Chamber Design, Part Two: Compact Ranges and Near Field Measurements

作者：Vince Rodriguez, MI Technologies 公司；译者：车延博

既要全面地确定室内电磁波暗室的性能，又要避免不必要的花费或制定出矛盾的指标，对于这个任务要求的洞察力，规范的制定者并不总是具备。虽然有一些文章和书籍¹⁻³讨论了电磁波暗室的设计，但是如果有一份简明扼要的参考信息和设计经验准则就更好了。本系列的第二部分将专注于近场系统、紧凑区域和暗室的规模确定。正如第一部分所做，对吸波器性能进行简单近似，从而得到了一系列有助于指定性能和设施规模的等式。

本系列的第一部分确定了使用远场暗室的限制，主要与天线的可测电气尺寸相关。如前所示，流行的卫星电视服务所用18英寸碟形天线将几乎不可能在一个远场暗室中进行测试。卫星服务工作于18.55 GHz，碟形天线的尺寸为28.29波长(λ)，因此远场约为1600 λ 或25.9米(84.8英尺)。显然对于这样一个电动的大型天线，室内的远场照射在经济上是不可行的。对于这种天线，一个紧凑区域或近场测量则更为合适。

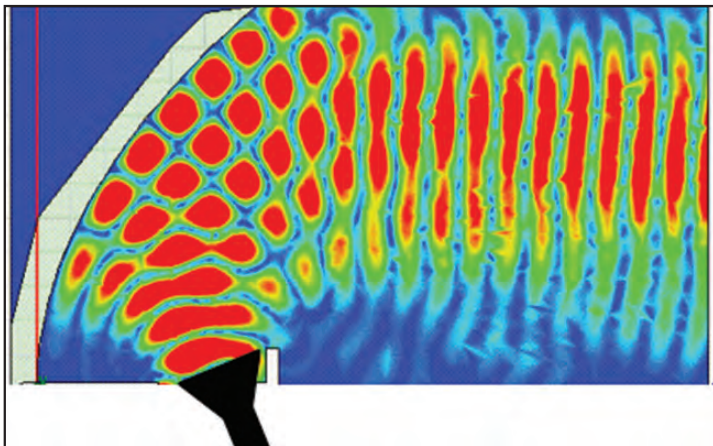


图1. 抛物柱面反射器的仿真结果，表现为右侧的平面波行为。

紧凑区域

虽然在天线的IEEE标准测试程序⁴中几乎没有提及，但是紧凑区域(CR)已成为大型天线电气测量的重要工具。CR使用抛物面反射器在被测天线(AUT)的位置形成平面波照射。这个平面波模拟天线在远场中的场分布。图1所示为一个抛物面反射器由位于抛物面焦点的发射源照射。从反射器可以在一个短距离内看到平面波的行为。反射器系统是调节范围的控制因素。反射器必须足够大，以便提供一个平面波来照射整个被测天线，并且反射器应适当地终结。终结的目的是减少终结抛物面的照射效果。终结反射器的两种最常用方法是锯齿和卷边⁶。在锯齿状边缘反射器的情况下，锯齿可以在最低工作频率的3 λ 和5 λ 之间。表1提供了一个反射器的典型列表，给出它们的整体尺寸和频率范围。请注意，随着频率的增加，反射器变得更加高效。虽然一些反射器可以在毫米波范围内运行良好，在制造和表面处理时应特别小心，这是由于表面缺陷将会影响性能。

反射器尺寸是暗室宽度和高度的决定因素。暗室的长度将受反射器的焦距影响。从

反射器的顶点到静默区域 (QZ) 的距离由下式给出：

$$r = \frac{5}{3} f_1$$

其中 f_1 为反射器的焦距。参照卫星电视天线，需要测试 25 米的远场距离，可能希望用长暗室和长距离进行 CR 测试。然而，表 1 及公式 1 表明，61 厘米 QZ 的测试距离为 3 米。这对测试卫星电视天线是足够的。

作为一条规则，一个 CR 暗室的长度由以下公式给出：

$$L = R_{\text{clr}} + \frac{5}{3} f_1 + \frac{1}{2} QZ + (2+t)\lambda \quad (2)$$

其中 R_{clr} 为反射器间隙。这包括支持该反射器的机械结构，其区域从 60 厘米到 2 米，取决于反射器的整体尺寸。在一般情况下，在反射器背后的墙上有一个小的吸波器，厚度通常为 $\lambda/2$ ，仅覆盖墙壁的周长。参数 t 为端壁 (end wall) 吸波器的厚度。

QZ尺寸 (长度和直径) (cm)	反射器整体尺寸 (包含齿部) (cm)	齿部长度 (cm)	工作频率 (GHz)	焦距 f_1 (cm)
61	216 × 188	38	4 to 200	182
122	432 × 335	76	2 to 200	366
182	488 × 416	76	2 to 200	366
244	864 × 670	152	1 to 200	732
366	975 × 833	152	1 to 200	732

对于 CR，这是最关键的墙壁，应具有最低的反射率； t 的建议值不低于 3 至 4。

暗室的宽度计算采用公式 (3)

$$W = CR_w + (4 + 2t)\lambda \quad (3)$$

其中 CR_w 是反射器的整体宽度。在反射器的每一侧从锯齿尖端到吸波器尖端还有一个额外的 2λ ，虽然在某些情况下，每一侧上的间距可能仅小到为一个波长。确定区域宽度的最后一项是该吸波器的厚度。

已被叠加在暗室图上。图中的反射器提供了一个 3.66 米 × 1.82 米的椭圆形 QZ。QZ 的深度为 3.66 米，CR 重要的一面是，它有一个定向性很强的模式，具有超过 25 dBi 的指向性。如图 2 所示，侧壁吸波器上的能量入射已经在直接路径以下 40 分贝。在 60 度入射时 1λ 厚的吸波器将提供 10 dB 的吸收 (见第一部分的图 4，发表在 2016 年 3/4 月)。综合反射率与直射线和反射线之间的幅值差异，得到的反射能量水平约为 -50 分贝。

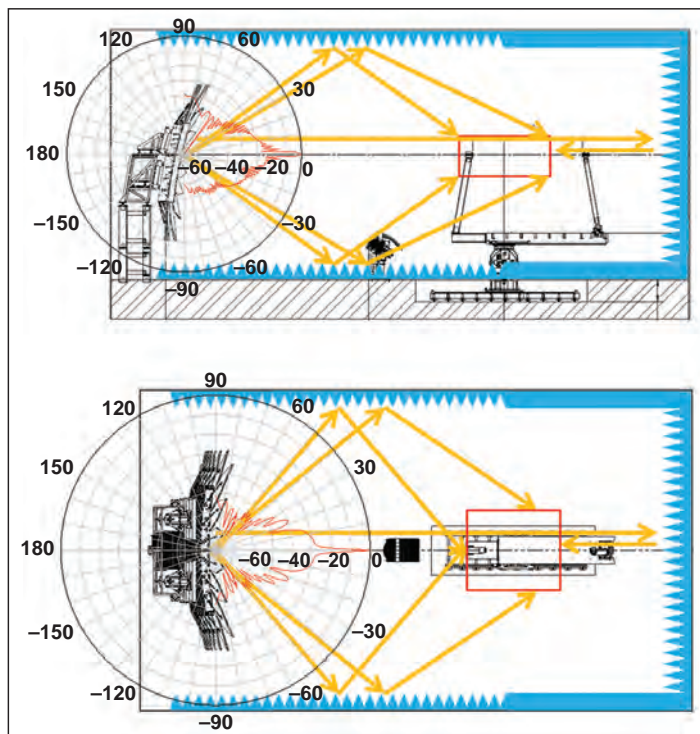


图 2. 反映射器模式的典型紧凑区域布局图，(a) 侧视和 (b) 顶视。在 2 GHz，侧壁、地面和顶面的能量入射衰减超过 40 分贝。

而对于远场区域，顶面、地面和侧壁上的吸波器，应厚到足够在倾斜有限角度时提供良好的收发分置的反射性，在 CR 内侧壁的吸波器则不需要这么厚。图 2 给出了一个典型的 CR 暗室。CR 反射器的辐射模式

计算暗室高度的大小具有类似的等式：

$$H = CR_h + (2 + K + 2t)\lambda \quad (4)$$

其中 CR_h 是反射器的总高度。反射器尖端与顶面吸波器尖端之间的距离为 2λ 。参数 K 为反映地面和反射器之间的距离的一个因子。对于地面吸波器，我们需要在反射器边缘和地板吸波器尖端之间有一个更大的分离。这就降低了反射器馈送器与反射器之间镜像点的入射角度，以减少

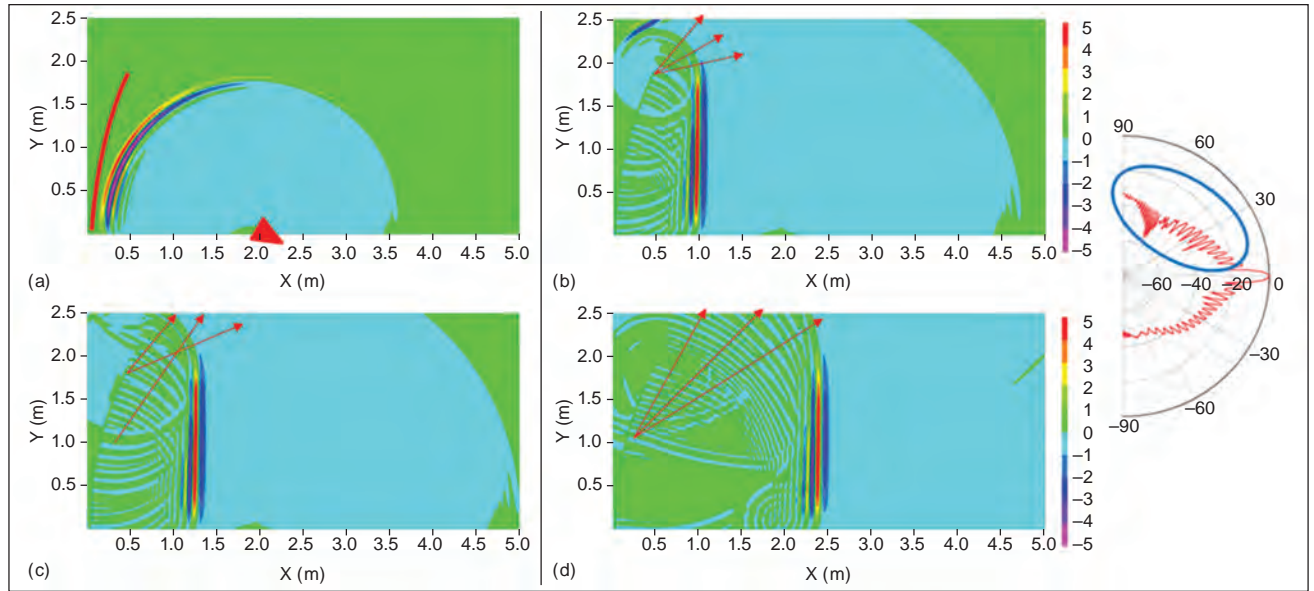


图3. 从喇叭相对时间的波传播 - (a) 6.6 纳秒 (b) 10.4 纳秒 (c) 11.3 纳秒 (d) 15.1 纳秒 - 相比远场模式。

地板反射对反射波的影响 (见图 4)。等式 4 包括地面吸波器尖端与锯齿尖端之间的 K 波长的空间。馈送定位器支撑着馈送天线照射反射器, K 应该足够大, 为其提供足够的空间。正如侧壁的情形一样, 地面和顶面的吸波器厚度可达 1λ 。必须要特别考虑馈送器和反射器之间的地面吸波器, 其厚度可能达 2λ 。一般情况下, 吸波器在最低频率下的电厚度, 对于侧壁和顶面位置, 可以分别按 $t \leq 1.2$ 、 $t \geq 0.75$ 进行处理。

近场区域

近场测量已有不同的技术, 它们与所测量的天线的类型一致。所有的方法都是在一个表面测量从 AUT 辐射的场 (幅值和相位), 然后对测量结果经数学推导得出远场特性。三种不同的近场技术——平面 (PNF)、圆柱 (CNF) 和球面 (SNF) ——代表了进行数据测量的表面⁷⁻⁹。最基本的近场测量方法是平面扫描, 来自天线的辐射在一个单独的平面进行扫描。对高增益天线来说这是一个很好

的技术, 因为仅有非常少量的能量辐射到天线的背面。圆柱扫描是指场的测量是在圆柱体的表面进行的, 不包括顶部和底部表面。这对长天线是理想的, 这种天线是全方位的, 或在主平面之一的波束宽, 而在垂直平面的波束窄。球面扫描是一种更为通用的测量方法。此时场的测量是在包含整个天线的球面进行的。总的来说, PNF 测量的测试距离在 3λ 和 10λ 之间。对于 SNF, 探头可以更远。

除了测试距离外, 为远场暗室开发的相同等式可用于 SNF。在一般情况下, 给出等式:

$$L = d_{pp} + (n + 6 + 2t_e)\lambda \quad (5)$$

其中 d_{pp} 是探头 (测量天线) 及其定位器的深度。变量 n 是包含 AUT 的最小球面的直径, 用波长表示。在两个端壁的吸波器厚度为 $T_e\lambda$, 其中 t_e 为端壁吸波器的厚度, 用波长表示。按照惯例, 在最小球面和吸波器尖端之间增加 2λ 。最后, 4λ 是探头与含天线的球之间的估计距离。

SNF 暗室的宽度由下式给出:

$$W = (n + 4 + 2t_s)\lambda \quad (6)$$

在这种情况下, t_s 为侧壁吸波器的厚度, 用波长表示。这是一个粗略的近似。对于两个等式 (5) 和 (6), 应增加至少 1 米来防止定位设备在它旋转被测天线时击中探针。暗室还应在室内工作的人们设置测量装置提供空间。这对更高频率 (2 GHz 以上) 尤为重要, 其中 4λ 间隔可能不足以使定位器跳过探针。

入射到侧壁吸波器的角度为:

$$\theta = \arctan\left(\frac{4n + 16}{2n + 16}\right) \quad (7)$$

取极限, 当 $N \rightarrow \infty$ 时, $\theta < 63.4$ 度。采用本系列文章第一部分的吸波器近似, 我们可以估计出 $t_s \approx 2t_e$ 。要做到这一点, 我们检查在正常入射时端壁吸波器的反射率, 选择吸波器的厚度使其提供的反射率类似于 63.4 度入射角时的情况。顶面和地面将与侧壁有相同的吸波器。

暗室高度可以用下式来估计:

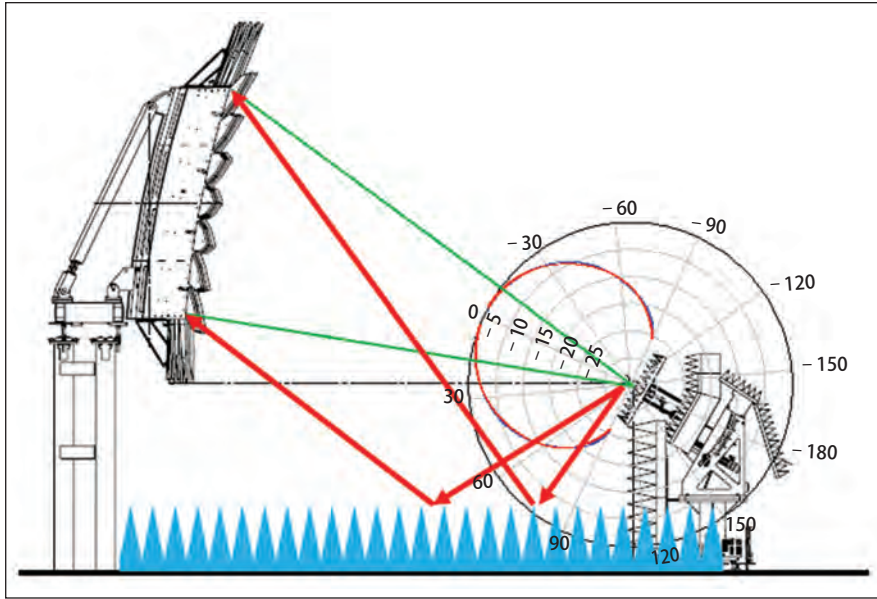


图 4. 在馈送定位器和反射器之间地面上的吸波器对减少反射能量照射反射器至关重要。

$$H = h_p + (n + 4 + t_s)\lambda \quad (8)$$

其中变量 h_p 为定位设备的高度。在一个典型的用于 SNF 测量的翻转方位定位器中, h_p 应该包括地面升降 (floor slide)、方位定位器以及升降补偿 (offset slide) 的高度。在远场暗室等式或 CR 等式 (除了馈送定位) 中, 定位设备不是一个问题, 因为其他尺寸在这些区域 (即远场测试距离或反射器大小) 是如此具有优势。

PNF 系统使用一个平面扫描仪来测量高定向度的天线 (即增益 > 20 分贝)。AUT 的高增益有助于区域的设计, 由于区域的一些边界不需要经过吸波器处理, 比如 AUT 背后。如上所述, 测试距离在 3λ 和 10λ 之间。确定 PNF 范围大小的主导因素是扫描仪, 其扫描尺寸由下式给出:

$$L_x = (n + 2k \tan(\theta_s))\lambda \quad (9)$$

θ_s 是精确远场的最大角度, $n\lambda$ 是被测天线的电尺寸 (见图 5)。变量 k 是用波长表示的测试距离; 因此, $3 < k < 10$ 。物理扫描仪通常会略大于

扫描平面。通常情况下, 到吸波器尖端的间隔为 2λ 。

区域宽度变成:

$$W = (n + 2k \tan(\theta_s) + 4 + 2t_s)\lambda + \Delta_{scn} \quad (10)$$

这可以写成:

$$W = L_x + (4 + 2t_s)\lambda + \Delta_{scn} \quad (11)$$

其中 Δ_{scn} 是扫描仪结构所需的额外空间, t_s 为吸波器的厚度。

区域长度由以下公式给出:

$$L = S_{clr} + A_d + (4 + k + t)\lambda \quad (12)$$

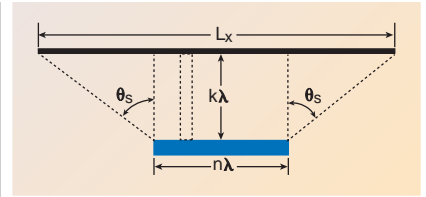


图 5. 近场测量平面的几何图形。

其中 S_{clr} 是扫描仪的深度, 其中应包括到吸波器的间隔 (如果有的话, 扫描仪可以被放置得离尖端非常靠近) 和探针的长度。 A_d 是 AUT 和支撑结构的深度, 后者使天线对准扫描仪。公式 (12) 中的 4λ 是 AUT 背部和区域墙之间的空间。对于增益非常高的天线, 这个墙壁不需要吸波器处理。如果希望有吸波器, 吸波器的厚度可以小到 $\lambda/4$ 。扫描仪上背后墙壁上吸波器的厚度利用了用于扫描平面的探针的方向性。因此, $t \geq 2$ 。

其余需要定义的变量是侧壁上的吸波器。这依赖于角度 θ_s 和因子 K 。宽度近似为:

$$W \approx (n + 2k \tan(\theta_s) + 4 + 2t_s)\lambda \quad (13)$$

利用以下近似

$$(n + 2k \tan(\theta_s) + 4 + 2t_s)\lambda > \Delta_{scn} \quad (14)$$

得到侧壁上的入射角:

$$\theta = \arctan\left(\frac{k}{kn + k \tan(\theta_s) + 4}\right) \quad (15)$$

注意入射角只取决于 AUT 的大小、精确远场的最大角度以及以波长表示的测试距离。图 6 表明, 即使在 10λ 的测试距离, 最大入射角度接近 20 度。根据第一部分所提出的吸波器近似, 某些电厚度的吸波器, 其在一个给定瓣的反射率在入射角的区域内不会恶化太多。如果 AUT 是一个简单的无源天线, 高增益可能有益。由于天线不会向侧壁辐射太多的能量, 可以使用一个较小的吸波器 ($t <$

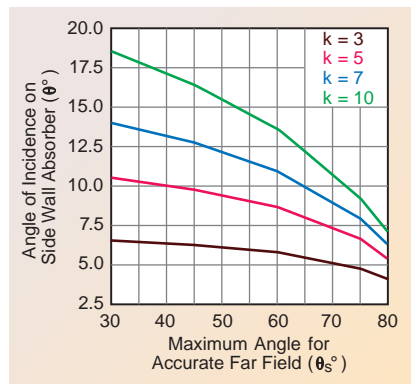


图 6. 若干测试距离下侧壁吸波器的入射角与精确远场模式最大角度的关系, 天线孔径为 20λ 。

MEDs Technologies focuses on creating values for our partners. With our professional technical sales team and in-house design team, we will be a valuable resources to your company. Our aim is to provide the best value added services in the industry we served.

Processes provided through MEDs

2016 GaAs MPW Fabrication Schedule

Scheduled multi-project wafer fabrication runs

Process	January	February	March
0.15μm LNA	15 th		15 th
0.15μm PA		15 th	
0.10μm PA	20 th		20 th
0.25μm PA		20 th	

Process	April	May	June
0.15μm LNA		15 th	
0.15μm PA	15 th		15 th
0.10μm PA		20 th	
0.25μm PA	20 th		20 th

Process	July	August	September
0.15μm LNA	15 th		15 th
0.15μm PA		15 th	
0.10μm PA	20 th		20 th
0.25μm PA		20 th	

Process	October	November	December
0.15μm LNA		15 th	
0.15μm PA	15 th	15 th	
0.10μm PA		20 th	
0.25μm PA	20 th	20 th	

1. MPW size is 4 x 5 mm, 20 tiles will be supplied.
2. If singular die is needed, layout in the 4x5mm area should be in grid form. Additional cost may apply for Pick & Place into gelpak.
3. The date shown is the Tapeout date and GDSII needs to be submitted 1 week ahead.
4. Interested customers need to book the space one month in advance. Term and conditions apply.

2016 TSMC CyberShuttle Service Plan

Processes: RF HPC Plus (0.9/1.8V, 0.9/2.5V); RF HPC (0.9/1.8V, 0.9/2.5V); RF LP (1.05V/1.8V); RF HPL (1.0/1.8V, 1.0/2.5V)
 Schedule: Jan-20/Feb-17/Mar-16/Apr-20/May-18/June-15

2016 AMS MPW Shuttle Service

Process	Technology	Schedule	Schedule
H18	0.18 μm HV-CMOS	Feb-29	May-30
C18	0.18 μm CMOS	Feb-29	May-30
H35	0.35 μm HV-CMOS	Feb-22	May-9
C35	0.35 μm CMOS	Feb-1	Jun-20
C35	0.35 μm CMOS Fraunhofer IIS	Apr-18	Aug-1
S35	0.35 μm SiGe-BiCMOS	Mar-7	Jun-13

Process	Technology	Schedule	Schedule
H18	0.18 μm HV-CMOS	Aug-29	Dec-5
C18	0.18 μm CMOS	Aug-29	Dec-5
H35	0.35 μm HV-CMOS	Aug-22	Nov-7
C35	0.35 μm CMOS	Oct-3	
C35	0.35 μm CMOS Fraunhofer IIS	Nov-21	
S35	0.35 μm SiGe-BiCMOS	Sep-19	Dec-19

Other Available Processes

GlobalFoundries 0.13μm / 0.18μm 7SW SOI processes are available upon request.

上海励仕电子有限公司 (MEDs上海辦事處)
 Website: <http://www.meds-tech.com>
 Email: Zhangxh.cn@meds-tech.com
 Tel: +86-21-5674-8687 | Mobile: +86-137-0189-7519

1)。然而，如果 AUT 是一个带有波束的复杂天线，则侧壁的厚度应该更大 ($t \geq 2$)。

暗室高度的计算应按与宽度计算相同的方式。在某些情况下，垂直和水平的扫描距离不同；这对于非正方形横截面的暗室是不少见的。高度的等式是：

$$H = L_y + y_o + (2 + t_s)\lambda \quad (16)$$

这里 y_o 是探针的最小高度，即在垂直运动底部的探针位置。这包括水平轴移动扫描仪所在的导轨，也应足够大到包括地面吸波器；至少 $y_o > t_s \lambda$ 。

上述关于 SNF 和 PNF 区域的规则可以结合得到一个 CNF 系统的范围大小。

结论

本系列文章的第二部分提供了一些规则概述和物理机理，对用于紧凑区域和近场扫描测量的室内暗室，指导其选择和确定大小。所有等式都是近似的。长度在大多数情况下是一个最小值；对于加载和卸载 AUT、改变馈送和区域天线以及连接其他设备，可能需要更多的空间。这一系列文章的两个部分都提供了概述和等式，对于采用当前最常见的天线测量方法的暗室，用于确定其大小。■

参考文献

1. L. Hemming, "Electromagnetic Anechoic Chambers: A Fundamental Design and Specification Guide," IEEE Press/Wiley Interscience: Piscataway, N.J., 2002.
2. G. Sanchez and P. Connor, "How Much is a dB Worth?," 23rd Annual Symposium of the Antenna Measurement Techniques Association (AMTA), Denver, Colo., October 2001.
3. J. Hansen and V. Rodriguez, "Evaluate Antenna Measurement Methods," Microwaves and RF, October 2010, pp. 62267.
4. ANSI/IEEE STD 149-1979 -IEEE Standard Test Procedures for Antennas, 1979, reaffirmed 2008.
5. J.R.J. Gau, D. Burnside and M. Gilreath "Chebyshev Multilevel Absorber Design Concept," IEEE Transactions On Antennas Propagat., Vol. 45, No. 8, pp. 128621293, 1997.
6. T.H. Lee and W. Burnside, "Performance Trade-Off Between Serrated Edge and Blended Rolled Edge Compact Range Reflectors," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 44, No. 1, January 1996, pp. 87296.
7. D. Hess, "Near-Field Measurement Experience at Scientific Atlanta," White Paper, www.mitechnologies.com/papers/91/Near-Field%20Measurement%20Experience%20at%20Scientific-Atlanta.pdf.
8. Yaghjian, "An Overview of Near-Field Antenna Measurements," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-34, No. 1, January 1986, pp. 30245.
9. J. E. Hansen ed., "Spherical Near-Field Antenna Measurements," IEEE Peter Peregrinus Ltd.: London, UK, 1988.