

暗室中天线的仿真

Simulating Antenna Measurements in an Anechoic Chamber

作者：Derek Campbell, Gopinath Gampala, Martin Vogel, C.J.Reddy
Altair Engineering 公司

在测量界，越来越多人开始对计算电磁学 (CEM) 仿真工具感兴趣，这些仿真工具可以在没有性能损失的情况下，把原本需要设计定制暗室的费用降到最低。传统上，由于可用资源所限，工程师们通常使用类似“射线跟踪”的方法来分析暗室的设计。然而，最近技术的发展使得计算资源和数值求解器成为一种分析暗室的强有力的工具，通过在虚拟环境中模拟天线测量非常容易识别系统误差源。对结果的分析将促进测量和仿真数据的融合，对最终特征描述的准确性提供依据。

本文描述了暗室^[1]和天线测量技术^[2]的一个连续的特征过程，这个过程涉及到很多方面，并面临着截然不同的挑战。利用全表征典型天线的模拟测量技术可以识别暗室设计中的误差，在随后的天线测量模拟中亦考虑了静区干扰。

此外，测量技术中可能对静区行为产生不良影响的部分可被验证。包括 (a) 客户要求超出常规操作模式的测量 (例如：超过静区尺寸的结构体)，(b) 对暗室环境进行修改的操作。最后，将更加精确地评估性能提升和采购或翻新测量设备成本之间的关系。

测量技术

测量界有多种工具和相应的技术来表征被测天线 (AUT)，常用的测量工具包括被用

来抑制天线测量中周围环境影响的自由空间天线区域。暗室即是一种特定类型的自由空间天线区域，提供对天气、人为损伤以及电磁干扰的保护。更进一步，矩形暗室被用来模拟自由空间条件和最大限度提升静区空间。

尽管矩形暗室有利于多种测量，但是测量天线增益的能力至关重要。通过增加源和接收天线的间隔距离而获得的均匀平面波，可被理想地用于天线增益测量。当间隔距离增加时，一个源天线产生的球面相位波前的曲率半径相对于天线孔径来说变得小的可以忽略。一种均匀波前近似技术促进了包括增益传输法在内的多种天线测量技术^[3]。

增益传输法为测量天线增益提供了一个简单而准确的方案，此方法采用被大家广为接受的性能特性作为增益标准，连同下述方程来确定 AUT 的增益：

$$G_{AUT} = G_{cal} \frac{P_{AUT}}{P_{cal}} \frac{1}{1 - |S_{11,AUT}|^2} \quad (1)$$

G_{AUT} , P_{AUT} 和 S_{11} , AUT 是被测天线 AUT 的增益、接收功率和反射系数； G_{cal} 和 P_{cal} 是已知增益和接收功率，分别与增益标准相关。锥形喇叭天线是被普遍接受和广泛使用的增益标准。源和接收天线位于如图 1 所示的暗室中^[3]。

如图 1 所示，接收天线被放置在源天线

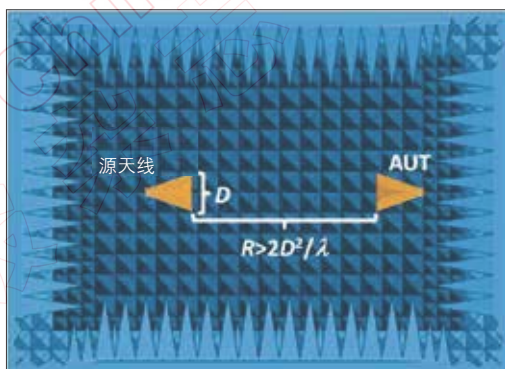


图 1. 暗室内部采用增益传输法测量的示意图。

表 1. 并联馈电倾斜 V 型偶极子的天线增益		
	MoM	GTM
Co-Pol	2.55	2.37
X-Pol	-22.94	-23.22

的远场，R 表示间隔距离，D 表示天线的最大尺寸， λ 表示工作波长。这样，增益传输法即可被增益标准的接收功率测量所校正。当更换增益标准时，AUT 在主平面旋转，接收功率被转化为每一个角度的天线增益。注意在所有的测量中，源天线发送恒定功率。

数值方法

现代的全波和低频近似 CEM 方法，在类似 FEKO 的商业软件中即可实现，为精确计算或者近似计算电磁场和电流的关系提供了多种选择。全波 CEM 方法精确求解麦克斯韦方程，不采用任何近似；高频近似 CEM 方法提供基于假设和使用有限资源实现的解决方案。

用户在使用这些近似方法建模时需要小心处理，幸运的是，电尺寸的增加进一步验证了高频近似 CEM 方法的假设，提升了最终结果的准确度。

FEKO 软件推出了高频近似方法（例如物理光学 PO），和全波有限元法（FEM）以及矩量法（MoM）的混合算法来解决大型和复杂的问题。此外，还有一些功能特性可以使建模过程更加高效。例如矩量法中固有的细线近似，可将细圆柱形离散成直线段而不是表面网格，为线型结构体提供了最节省资源的解决方案。

FEKO 软件中的区域分解技术可通过计算隔离环境中任意天线的远场模式使计算资源消耗降到最低，此远场可以作为后续仿真中的输入源。理想接收天线的建模过程亦与此类似。

采用 MoM/FEM4 和 MoM/PO^[5-7] 这两种 CEM 混合算法，加之有效的建模实践，可以促进暗室特性和天线测试技术。

暗室建模

按照体积要求建模一个自定义矩形横截面（即 $W \times H$ ）的暗室，尺寸为 17' H \times 24' W \times 32.5' L，蓝色代表吸波材料，如图 2 所示。静区中心位于接收壁 10' 处，尺寸为 6' H \times 6' W \times 6' L。源天线位于接收壁 20' 处，在图 2 左中位置。

这即是一个包含两个侧壁、接收

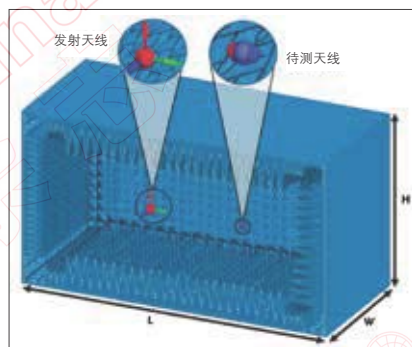


图 2. 暗室尺寸模型的仿真结构示意图。

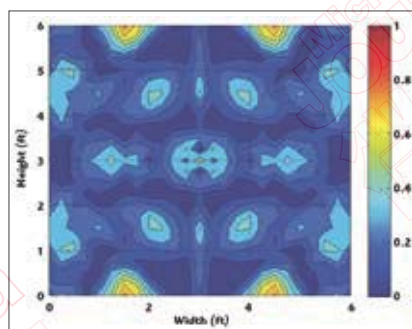


图 3. 工作频率 500MHz 时暗室静区误差分析图。

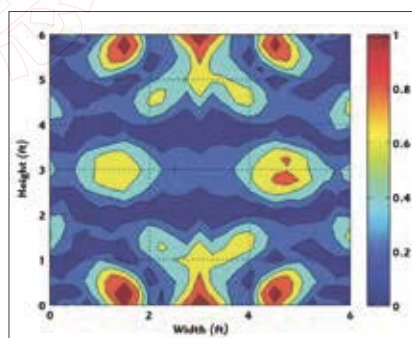


图 4. 工作频率 500MHz 时 MoM/PO 静区误差分析图。

壁、地板和天花板的空间建模，其中布满了大小锥体状的吸波材料，如图 1 所示。吸波材料使用介电常数和损耗因子的经验值建模¹。

暗室特性

暗室静区内部的干扰使用全波和低频近似的 CEM 方法计算。计算中使用自定义低增益源天线来增加周围墙壁的反射，以代表最坏的情况。静区电场先被计算在内，随后被暗室吸收，这两项结果的比值所产生的系统误差项即表示暗室的静区干扰。

先通过 MoM/FEM 来精确计算暗室的特性。当工作频率为 500MHz 时低增益天线源引入了可以忽略的干扰（即小于 1 分贝），如图 3 所示，这已在暗室性能和其各自特性过程中被确认^[1]。同样当工作频率为 500MHz 时，再通过 MoM/PO 计算暗室特性。全波法和低频近似 CEM 算法之间的差别在图 4 中显示^[1]。

采用高频近似法的误差可以忽略（即小于 1 分贝），这证实了 MoM/PO 是一个有效的暗室特性分析工具。此外，基础性假设在工作频率增加时变得更加有效，使得这种近似算法更加准确，误差进一步降低。由此，工程师们可以放心使用高频近似法代替精确的全波法，并可在有限资源范围内提升工作频率。

测量仿真

高频近似 CEM 方法为模拟暗室中的天线测量技术提供了机会。具体来说，增益传输法分别在对八木天线和并联馈电倾斜 V 型偶极子进行主极化（Co-Pol）和交叉极化（X-Pol）天线增益测量中得到了验证。

双脊锥形喇叭天线，如图 5 所示，代表任意源天线和普遍特性的校

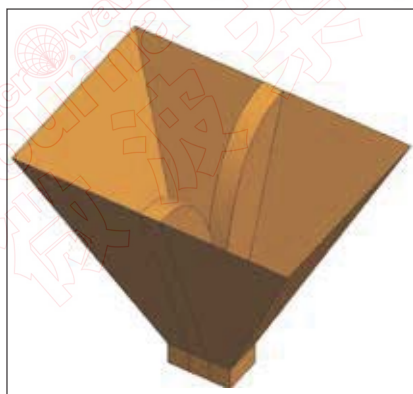


图 5. 源天线和校准标准增益使用的双喇叭天线模型。

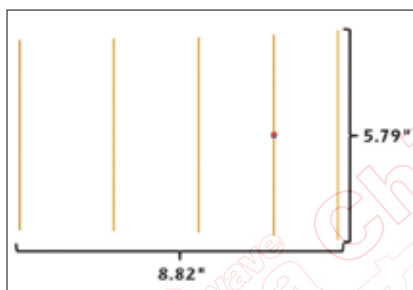


图 6. 用于主极化天线测量的八木天线模型示意图。

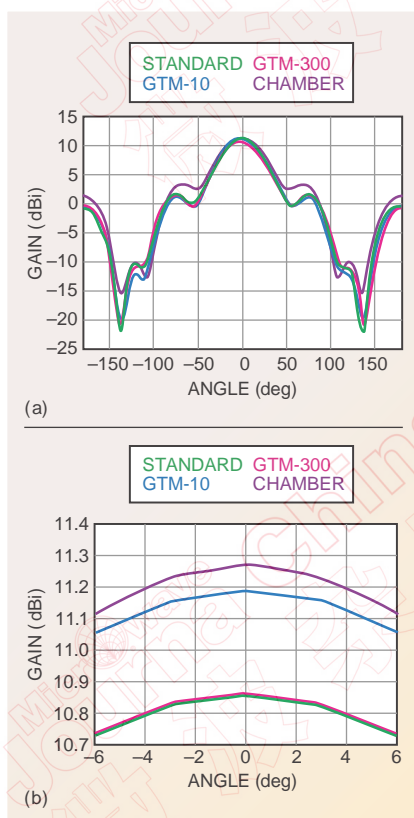


图 7. 八木天线分别在各角度 (a) 和辐射方向 (b) 的 H 面增益示意图。

准增益标准(即主方向增益 6.618dB)。源天线在仿真过程中工作频率为 1000MHz, 发射功率 10mW。计算机硬件资源的最新发展使得现代化的工作站成为高性价比的仿真平台。

实现以下仿真过程的工作站配置是: 256G 共享内存, 2 个英特尔 Xeon E5-2650 处理器 (CPU), 每 CPU 支持 8 核, 工作频率 2.0GHz。暗室中每个角度的仿真都由共 16 核参与计算, 计算时间为 45 分钟, 消耗内存 220GB。

主极化

模拟增益传输法最早通过八木天线验证, 如图 6 所示。垂直极化天线可通过一个电对称平面以使计算资源降到最低。仿真角度为 -180° 到 180° , 间隔 3° 。首先, AUT 的 H 面增益由标准矩量法进行仿真计算。

接下来, 使用增益传输法以 300 英尺 (电大尺寸) 的间隔距离计算主极化天线增益。之后, 再以 10 英尺间隔距离用增益传递法计算。最后, 保持 10 英尺间隔距离用增益传输法模拟暗室。结果在图 7 显示, 图中 GTM 表示增益传输法。

在源天线和 AUT 之间的电大尺寸距离提供了一个非常好的均匀平面波近似, 因此, 标准矩量法和 “GTM-300” 出现了近乎完美的吻合, 这验证了增益传输法可以作为一种天线测量技术。尽管 AUT 仍然在公认的远场区域, 在 10 公尺间隔距离下, 增益传输法对均匀平面波近似和最终天线增益的估算影响极小。

“GTM-300” 和 “GTM-10” 之间的差异, 量化了较小间隔距离所带来的误差。所以, 当使用增益传输法仿真暗室时, 最终天线增益估算中引入了一个可量化的误差项。

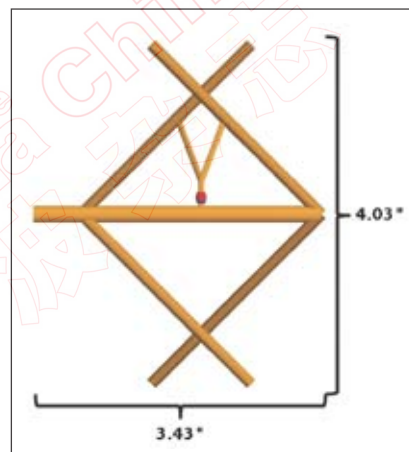


图 8. 用于交叉极化天线测量的并联馈电倾斜 V 型偶极子模型示意图。

交叉极化

计算暗室中的交叉极化 (X-Pol) 天线增益为识别额外的系统误差项提供了必要依据。如图 8 所示的并联馈电倾斜 V 型偶极子, 被分别放置在垂直和水平方向, 以分别计算主极化和交叉极化天线增益。与之相反, 源天线和校准天线在整个测量仿真过程中保持垂直方向。表 1 对计算出的天线增益与在自由空间使用矩量法仿真的结果进行了比较。

并联馈电倾斜 V 型偶极子与八木天线相比尺寸较小, 方向图更加均匀。由此可见, 有限的间隔距离引入了更小的系统误差。结果显示, 在相对较低水平的交叉极化测量中获得了显著的精确度, 这更加印证了增益传递方法的有效性。

结论

全波法和高频近似法已被用于多种工程应用中。本文结果显示工程师可以对暗室静区的特性进行计算, 从而为暗室设计提供关键的依据。在天线特性测量过程中, 天线工程师可以确定静区干扰的影响。测量工程师可以验证天线测量技术, 预估在非理想操作条件下的性能。管理人员则可以

下转第 52 页

试, 对比结果如图 7 所示。测试结果显示出两个通带的中心频率分别在 1.6GHz、3.56GHz 和 5.2GHz, 相对带宽分别是 6.3%, 3.7% 和 4.3%, 三个通带内的最小插入损耗分别是 1.4dB, 1.25dB 和 1.28dB。同时, 在 1.04 GHz, 1.69 GHz, 1.84 GHz 和 5.65 GHz 处产生了四个传输零点, 提高了滤波器的选择性并提供了更好的阻带抑制效果。实物图如图 7 所示。该款滤波器电路的尺寸仅为 $0.092\lambda_g \times 0.091\lambda_g$, λ_g 为第一通带中心频率处的导波波长。■

致谢

该工作由国家自然科学基金(课题编号: 61061001) 和江西省国际合作基金和科学技术创新团队项目(课题编号: 20121BDH80015, 20122BCB24025) 资助。

参考文献:

1. B.J. Chen, T.M. Shen, and R.B. Wu,

上接第 36 页

更加精确地预测设备的性能水平和采购及升级测量设备的投入花销。总之, 多种仿真结果的完美吻合, 使得多个工程师角色都能基于可量化的误差项做出更加明智的决定。■

参考文献:

1. D. Campbell, G. Gampala, C.J. Reddy, M. Winebrand and J. Aubin, "Modeling and Analysis of Anechoic Chamber Using CEM Tools," Applied Computational Electromagnetics Society (ACES) Journal, Vol. 28, No. 9, September 2013, pp 755-762.
2. D. Campbell, G. Gampala, C.J. Reddy and J. Aubin, "Simulating Antenna Measurements in an Anechoic

Design of tri-band filters with improved band allocation, IEEE Trans Microwave Theory Tech 57 (2009), 1790-1797.

2. R. Moussa, V.K. Palukuru, A.K. Sowpati, M. Essaaidi, H. Jantunen, and M. Aghoutane, Tri-bandpass filter based on two stepped impedance resonators, Microwave Opt Technol Lett 54 (2012), 1765-1768.
3. R.H. Geschke, B. Jokanovic, and P. Meyer, Filter parameter extraction for triple-band composite split-ring resonators and filters, IEEE Trans Microwave Theory Tech 59 (2011), 1500-1508.
4. X.Y. Zhang, Q. Xue, and B.J. Hu, Planar tri-band bandpass filter with compact size, IEEE Microwave Wireless Comp Lett 20 (2010), 262-264.
5. C.I.G. Hsu, C.H. Lee, and Y.H. Hsieh, Tri-band bandpass filter with sharp passband skirts designed using tri-section SIRs, IEEE Microwave Wireless Comp Lett 18 (2008), 19-21.

Chamber", 35th Annual Meeting & Symposium of the Antenna Measurements Techniques Association, October 2013, pp 265-268.

3. C. Balanis, "Antenna Theory: Analysis and Design," 3rd ed., John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, 2005.
4. M. Bingle, J. Tonder and U. Jakobus, "Acceleration of the Hybrid FEM/MoM Technology in FEKO With the Multilevel Fast Multipole Method," 10th International Workshop on Finite Elements for Microwave Engineering, October 2010.
5. U. Jakobus and F.M. Landstorfer, "Improved PO-MM Hybrid Formulation for Scattering From Three-Dimensional

6. Q.X. Chu, and X.M. Lin, Advanced triple-band bandpass filter using tri-section SIR, Electron Lett 44 (2008), 295-296.

7. X. Lai, C.H. Liang, H. Di, and B. Wu, Design of tri-band filter based on stub loaded resonator and DGS resonator, IEEE Microwave Wireless Comp Lett 20 (2010), 265-267.
8. J.-Z. Chen, N. Wang, Y. He, and C.-H. Liang, Fourth-order tri-band bandpass filter using square ring loaded resonators, Electron Lett 47 (2011), 858-859.
9. M.T. Doan, W.Q. Che, and W.J. Feng, Tri-band bandpass filter using square ring short stub loaded resonators, Electron Lett 48 (2012), 106-107.
10. Q.-X. Chu, X.-H. Wu, and F.-C. Chen, Novel compact tri-band bandpass filter with controllable bandwidths, IEEE Microwave Wireless Comp Lett 21 (2011), 655-657.

Perfectly Conducting Bodies of Arbitrary Shape," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 43, No. 2, February 1995, pp. 162-169.

6. I.P. Theron, D.B. Davidson and U. Jakobus, "Hybridization of the Method of Moments With a UTD Treatment of a Conducting Cylinder," Proceedings of the 8th Biennial IEEE Conference on Electromagnetics Field Computation, June 1998, p.107.
7. U. Jakobus, "Overview of hybrid methods in FEKO: Theory and Applications," 2010 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), September 2010, pp. 434-437.