文章编号: 2095-4980(2019)06-1027-05

基于平面波叠加模型的混响室莱斯场环境模拟

李 欢¹, 刘晓东², 刘 强², 赵 翔¹, 闫丽萍¹

(1.四川大学 电子信息学院,四川 成都 610065; 2.北京应用物理与计算数学研究所,北京 100088)

摘 要: 从经典混响室的平面波叠加模型出发,针对已有的概率统计模型不能模拟莱斯分布 场环境的情况,建立了改进型的平面波叠加模型。为了验证该模型的有效性,用蒙特卡洛方法仿 真了不同K因子下的各场量的概率密度函数(PDF),并用理想PDF进行拟合。并进一步验证了当莱斯 K因子为零时,莱斯分布场模型退化为经典混响室的场模型。最后考虑了模型的抽样参数(平面波 叠加数和搅拌器位置数)对仿真结果的影响,确定最佳的抽样样本,从而获得稳定的PDF曲线。 关键词: 混响室; 平面波叠加;蒙特卡洛方法;瑞利分布;莱斯分布

中图分类号:TN957 文献标志码:A **doi**:10.11805/TKYDA201906.1027

Rician electromagnetic environment modeling in reverberation chamber based on plane waves superposition model

LI Huan¹, LIU Xiaodong², LIU Qiang², ZHAO Xiang¹, YAN Liping¹

(1.School of Electronic and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China;
 2.Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract: Based on the plane wave superposition model of the classical reverberation chamber, an improved plane wave superposition model is established in view of the fact that the existing probabilistic statistical model cannot simulate the environment of electromagnetic field with Rician distribution. In order to verify the validity of the model, the Probability Density Function(PDF) of the related electric field under different K factors is simulated by Monte Carlo method and fitted with ideal PDF. It is further verified that when the Rician K factor equals 0, the Rician distribution electromagnetic field model degenerates into a classical reverberation chamber field model. Finally, the influence of the sampling parameters(plane wave superposition number and agitator position number) on the simulation results is considered, and the best sample is determined to obtain stable PDF curve.

Keywords: reverberation chamber; plane wave superposition; Monte Carlo method; Rayleigh distribution; Rician distribution

混响室是一个电大多模、高 Q 值的金属腔体,由金属屏蔽外壳和内置搅拌器组成。搅拌器转动使边界条件 不断改变,从而在混响室内产生随机变化的电磁环境。混响室可作为一种新兴的电磁兼容测试环境,用于辐射发 射、辐射抗扰度、屏蔽特性(线缆、材料、外壳等)、散射截面的测试测量等^[1-3]。处于这些经典应用场景中的混 响室(后文简称经典混响室)电磁环境的理想状态是场量具有空间(统计)均匀性、各向同性和随机极化的特点,这 也导致了所谓的瑞利分布场环境,即电场单个直角分量的大小如|E_x|满足瑞利分布^[4]。另一方面,由于混响室内 电磁环境由大量反射波(经腔壁和搅拌器反射)叠加而成,这与无线通信中电波的多径传输/衰落环境极为相似,因 此混响室也可用于对无线通信信道的模拟^[5-7],此时混响室的根本目标是"重现"实际存在的各种随机电磁环境。 其中,经典混响室天然地可以模拟瑞利衰落环境,瑞利衰落常见于建筑物密集的城市环境中发射机与接收机之间 不存在直射信号的情况。但是实际存在的其他随机电磁环境,如在大部分的郊区、山地和高速车载无线通信等场 景中,电波的散射是非各向同性的,其衰落统计模型复杂多变,各种非瑞利衰落十分常见^[8-9]。为此,有研究者 通过对混响室进行重新配置扩展其应用,重现了非各向同性的莱斯、瑞利和超瑞利(hyper-Rayleigh)衰落环境^[10-11]。

第 17 卷

其中莱斯分布常见于多径传输时直射信号明显占优或虽然不存在直射信号但存在某反射波相对其他反射波明显 占优的情形。

对混响室电磁环境的建模分析研究中,概率统计方法成为热点方向,因为这类方法具有建模方便、计算高效、 不依赖于结构和可克服高频响应敏感性^[12-13]等优点。1998 年,Hill 建立了经典混响室的角谱随机平面波积分模 型,并在此基础上推导出一系列场量的概率密度函数(PDF),开创了混响室概率统计模型研究的先河^[14]。在此基 础上,2011 年张华彬等从经典混响室的离散概率模型出发,提出一种蒙特卡洛方法来模拟混响室的电场统计特 性^[15]。这些模型和方法可以模拟瑞利分布的电磁环境,但不能模拟莱斯分布。本文从经典混响室的平面波叠加 模型出发,根据莱斯分布特征对其进行改进,建立了混响室的莱斯分布场概率统计模型,使其可以模拟不同 *K* 因子的莱斯分布场环境。

1 经典混响室的平面波叠加模型

1028

在图 1 所示的球坐标系下, Hill 提出经典混响室的平面波积分表达式^[14], 如式(1)所示:

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r}) = \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{\pi} \boldsymbol{F}(\alpha, \beta) \exp\left[i\boldsymbol{k}(\alpha, \beta)\boldsymbol{r}\right] \sin\alpha \,\mathrm{d}\alpha \,\mathrm{d}\beta \tag{1}$$

式中: α 为仰角,区间为[0,π]; β 为方位角,区间为[0,2π]; i 为虚数单位; k 为矢量波数; F(α,β)为平面波电场的角谱,混响室内电场的随机性体现在 角谱是随搅拌器转动而随机变化的复矢量。

对式(1)进行离散化,将空间 4π 角 N等分,空间无源区域 r 处的电场 可以近似为 N 列入射角度均匀分布于 4π 的平面波电场的叠加^[15]:

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r}) = \sum_{n=1}^{N} \frac{4\pi}{N} \boldsymbol{F}(\alpha_n, \beta_n) \exp\left[i\boldsymbol{k}(\alpha_n, \beta_n)\boldsymbol{r}\right]$$
(2)

式中 n 表示第 n 列平面波, 角谱可表示为分量的形式:

 $F(\alpha_{n},\beta_{n}) = \hat{\alpha}F_{\alpha}(\alpha_{n},\beta_{n}) + \hat{\beta}F_{\beta}(\alpha_{n},\beta_{n}) = \hat{\alpha}\left[F_{\alpha r}(\alpha_{n},\beta_{n}) + jF_{\alpha i}(\alpha_{n},\beta_{n})\right] + \hat{\beta}\left[F_{\beta r}(\alpha_{n},\beta_{n}) + jF_{\beta i}(\alpha_{n},\beta_{n})\right]$ (3) 式中下标r、i分别表示实部、虚部。

经典混响室内的电场具有各向同性和随机相位,因此角谱分量独立同分布且均值为 0。根据中心极限定理^[16] 可知,大量独立同分布的电场分量实部 E_{xr}, E_{zr}, E_{yr} 和虚部 E_{xi}, E_{yi}, E_{zi} 叠加后将服从正态分布 $N(0, \sigma_0^2)$ 。电场各直角 分量的模值 $|E_{xi}|, |E_{y}|, |E_{z}|$ 服从瑞利分布,如式(4)所示,其中 c 为电场 x, y, z 分量的统称。

$$f\left(\left|E_{c}\right|\right) = \frac{\left|E_{c}\right|}{\sigma_{0}^{2}} \exp\left(-\frac{\left|E_{c}\right|^{2}}{2\sigma_{0}^{2}}\right)$$
(4)

2 混响室莱斯场模型的建立与仿真

2.1 模型建立

经典混响室内的电场经搅拌器和室壁的反射作用形成了多条反射路径,每条路径上的反射波称为"搅拌量 (Stirred Component)"。当利用混响室进行莱斯衰落环境的模拟时,需要在原本经典混响室瑞利场环境中考虑发射 天线和接收天线之间存在直接耦合分量,即"未搅拌量(Unstirred Component)"^[17],因此混响室工作区域内的总 电场 *E* 可视为反射波电场 *E*_s和直射波电场 *E*_d的叠加,

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_{s} + \boldsymbol{E}_{d} \tag{5}$$

式中 E_d 用幅值 E_{d0} 和相位 θ 表示为:

$$\boldsymbol{E}_{d} = \boldsymbol{E}_{d0} \left(\cos\theta + j\sin\theta \right) \tag{6}$$

将莱斯分布的特点与经典混响室的平面波叠加模型相结合,将 N 列平面波中的 1 列表示为直射波,其余 N-1 列表示为反射波,因此可得式(7):

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r}) = \frac{4\pi}{N} \left\{ \sum_{n=1}^{N-1} \boldsymbol{F}_{s}(\alpha_{n},\beta_{n}) \exp\left[i\boldsymbol{k}(\alpha_{n},\beta_{n})\boldsymbol{r}\right] + \boldsymbol{F}_{d}(\alpha_{N},\beta_{N}) \exp\left[i\boldsymbol{k}(\alpha_{N},\beta_{N})\boldsymbol{r}\right] \right\}$$
(7)

式中:反射波的角谱 $F_s = (\alpha_n, \beta_n)$ 、直射波的角谱 $F_d = (\alpha_N, \beta_N)$ 表示成分量的形式:



Fig.1 Angular spectrum diagram of electric field in reverberation chamber^[15] 图 1 混响室内电场角谱示意图^[15]

1

$$\boldsymbol{F}_{s}(\boldsymbol{\alpha}_{n},\boldsymbol{\beta}_{n}) = \hat{\boldsymbol{\alpha}} \Big[F_{s_{-}\boldsymbol{\alpha}r}(\boldsymbol{\alpha}_{n},\boldsymbol{\beta}_{n}) + jF_{s_{-}\boldsymbol{\alpha}i}(\boldsymbol{\alpha}_{n},\boldsymbol{\beta}_{n}) \Big] + \hat{\boldsymbol{\beta}} \Big[F_{s_{-}\boldsymbol{\beta}r}(\boldsymbol{\alpha}_{n},\boldsymbol{\beta}_{n}) + jF_{s_{-}\boldsymbol{\beta}i}(\boldsymbol{\alpha}_{n},\boldsymbol{\beta}_{n}) \Big]$$
(8)

$$F_{d}(\alpha_{N},\beta_{N}) = \hat{\alpha} \Big[F_{d_{\alpha}\alpha}(\alpha_{N},\beta_{N}) + jF_{d_{\alpha}\alpha}(\alpha_{N},\beta_{N}) \Big] + \hat{\beta} \Big[F_{d_{\alpha}\beta}(\alpha_{N},\beta_{N}) + jF_{d_{\alpha}\beta}(\alpha_{N},\beta_{N}) \Big]$$
(9)

由于直射波为未搅拌分量,所以直射波角谱的特性不会随搅拌器位置的变化而变化。

接下来通过理论推导证明式(7)中模型在给定条件下能有效模拟莱斯分布。由经典混响室的平面波叠加模型 可知, *N*-1 列反射波叠加而成的电场各直角分量的实部和虚部服从方差为 σ²₀的标准正态分布:

$$E_{\rm s\ cr},\ E_{\rm s\ ci} \sim N\big(0,\sigma_0^2\big) \tag{10}$$

根据式(6)可知,直射波电场各直角分量的实部和虚部分别为:

$$E_{\rm d\ cr} = E_{\rm dc0} \cos\theta, \ E_{\rm d\ ci} = E_{\rm dc0} \sin\theta \tag{11}$$

根据式(5),将式(10)和式(11)中混响室内反射波和直射波的电场相对应的直角分量的实部和虚部进行叠加, 叠加之后的场量 $E_{\alpha}=E_{s,\alpha}+E_{d,\alpha}, E_{ci}=E_{s,ci}+E_{d,ci}$ 将服从非零均值的正态分布,即

$$E_{cr} \sim N \left(E_{dc0} \cos \theta, \sigma_0^2 \right), \quad E_{ci} \sim N \left(E_{dc0} \sin \theta, \sigma_0^2 \right)$$
(12)

最后,根据文献[18]中有关莱斯分布的拟合可知, $|E_c| = \sqrt{E_{cr}^2 + E_{ci}^2}$ 将服从参数为 $(|E_{dc0}|, \sigma_0^2)$ 的莱斯分布,其概率密度函数表达式为:

$$f(|E_{c}|) = \frac{|E_{c}|}{\sigma_{0}^{2}} \exp\left(-\frac{|E_{c}|^{2} + |E_{dc0}|^{2}}{2\sigma_{0}^{2}}\right) I_{0}\left(\frac{|E_{c}||E_{dc0}|}{\sigma_{0}^{2}}\right)$$
(13)

式中 I₀为修正的 0 阶第一类贝塞尔函数。莱斯 K 因子定义为:

$$K = \frac{\left|E_{dc0}\right|^2}{2\sigma_0^2} \tag{14}$$

当 $K \rightarrow 0$ 时,莱斯分布退化为瑞利分布; $K \gg 1$ 时,莱斯分布将趋于正态分布^[19]。从以上分析可知,通过控制直射波的电场各直角分量的幅值 E_{dc0} 和反射波电场的方差 σ_0^2 可获得不同 K 因子的莱斯分布。

对所建模型进行理论分析的同时,进一步采用蒙特卡洛模拟来验证其有效性。

首先:在单位球面上随机生成 N-1 个点均匀分布于球面上, N-1 点到球坐标原点 O 的矢量方向视为各列平面波的入射方向。为此,入射方向的仰角应满足 cos α 服从 U(-1,1)的均匀分布,方位角 β 服从 $U(0,2\pi)$ 的均匀分 $\pi^{[20]}$ 。Matlab 仿真时可设定 u 服从 U(0,1)的均匀分布, α =arccos(1-2u),

 $\beta=2\pi u$,结果如图 2 所示。再生成一个固定位置(α_N, β_N)的点表示一列固定入射方向的直射波。 其次: 假设反射波的角谱 $F_{s ar}(\alpha_n, \beta_n), F_{s ai}(\alpha_n, \beta_n), F_{s βi}(\alpha_n, \beta_n),$

兵 伏 : 假 医 反 剂 扳 的 用 宙 $F_{s_ar}(\alpha_n,\rho_n), F_{s_ai}(\alpha_n,\rho_n), F_{s_fi}(\alpha_n,\rho_n), F_{s_fi}(\alpha_n,\rho_n), F_{s_fi}(\alpha_n,\rho_n), F_{s_fi}(\alpha_n,\rho_n), F_{s_fi}(\alpha_n,\rho_n), F_{d_ai}(\alpha_n,\beta_n)$ 服从 正态分布 $N(0,\sigma^2)$; 直射波角谱实部 $F_{d_ar}(\alpha_N,\beta_N), F_{d_fi}(\alpha_N,\beta_N)$ 为 $A\sin\theta(A$ 是决定直 射波电场幅值 E_{dc0} 的参数)。

最后:设定搅拌器转动的位置数 *M*,利用式(7)计算每个位置上的 电场量,获得容量为 *M* 的数据样本并对其进行概率统计推断。



Fig.2 1 000 points evenly distributed on a sphere 图 2 均匀分布在球面上的 1 000 个点

2.2 仿真结果

假设直射波沿-z 方向入射,即 $a_N=0^\circ, \beta_N=90^\circ$,电场极化方向与 x 轴为 45°夹角方向;相位 θ 可为[0,2π]任意 角度,不失一般性,设置为 $\theta=45^\circ$;设置抽样参数 M=5~000, N=1~000,角谱 F_s 服从正态分布 N(0,1)。首先讨论直 射波幅值对仿真结果的影响,如图 3 所示。算例分别仿真了 $A=0, A=0.5N/4\pi, A=N/4\pi, A=2N/4\pi$ 对应的相关电场量 的 PDF。在图 3(a)中,分别对不同的 A 值仿真出的 PDF 曲线进行拟合,结果表明 E_{xr} 为服从不同均值(用 u 表示) 的正态分布。同样的,图 3(b)中曲线的拟合结果表明 $|E_x|$ 服从莱斯分布,通过控制 A 值,可以得到任意的莱斯 K 因子。如图 3 各子图中 A=0 对应的曲线拟合结果所示,当 $K \rightarrow 0(A=0)$ 时,即混响室内不存在直射波,混响室内相 关电场量的统计特性与经典混响室内的电场统计特性是一致的,即 E_{xr} 服从标准正态分布, $|E_x|$ 服从瑞利分布, $|E_x|^2$ 服从指数分布,|E|服从 χ_6 分布, $|E|^2$ 服从 χ_6^2 分布。随着 A 值不断增加,各电场量的 PDF 值最高点不断右移,最 终趋于正态分布。图 3 各子图中 $A=2N/4\pi$ 时对应曲线的拟合表明直射波占优明显。由于直射波沿-z 方向入射, 即直射波电场没有 z 分量,A 值不会影响 $|E_z|$ 值,其 PDF 同 $|E_x|$ 在 A=0的情况,始终服从瑞利分布;由于上述极化 方向的设置, $|E_y|$ 的 PDF 曲线变化趋势同 $|E_x|$,不再重复给出。

1029



 Fig.3 Monte Carlo simulation based on improved plane wave superposition model

 图 3 基于改进的平面波叠加模型的蒙特卡洛模拟结果

分别讨论在 $A=0.5N/4\pi$ 、角谱方差 $\sigma^2=1$ 时,搅拌器位置数 M、平面波数 N 对模型仿真结果的影响。取 N=1 000, 如图 4(a)所示,当 M 大于 5 000 时,混响室内电场 x 分量的幅值 $|E_x|$ 的 PDF 曲线不断趋近于理论值,说明采样样本数足够多,满足获得稳定 PDF 的要求;取 M=5 000,如图 4(b)所示,不同的平面波数 N 仿真出的 PDF 曲线几乎重合,因此,为了节省计算资源,一般 N取 100 就足够。



Fig.4 Effect of parameter *M*,*N* on simulation results of Probability Density Function of electric field in reverberation chamber 图 4 参数 *M*,*N* 对混响室内电场的概率密度函数仿真结果的影响

3 结论

本文考虑混响室内存在"未搅拌量"(即存在直射分量)时,建立了混响室莱斯分布概率统计模型,并结合蒙 特卡洛方法,仿真出混响室内各场量的 PDF。验证了莱斯 K 因子为 0 时,模型变为经典混响室概率统计模型, 电场各直角分量的幅值服从瑞利分布;当 K 值增加到一定值时,各场量接近于正态分布,表明直射波占优明显。 相较于平面波叠加数 N,搅拌器的位置数 M 对仿真结果的影响更大。当 M 值足够大时,能获得足够多的样本数, 使仿真结果更接近于理论值。本文的研究对使用混响室来模拟实际多径传播场环境具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] REHAMMAR R,SKARBRATT A. Antenna measurements in reverberation chambers and their relation to Monte Carlo integration methods[C]// International Symposium on Antennas & Propagation. Hobart,TAS,Australia:IEEE, 2015:1-3.
- [2] SCHIPPER H, LEFERINK F. Shielding effectiveness measurements of materials and enclosures using a dual vibrating

intrinsic reverberation chamber[C]// IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Dresden,Germany: IEEE, 2015:23-28.

- [3] LIU J,KE L,XIN B,et al. Absorption cross section measurements of absorbing materials in a reverberation chamber[C]// 2017 International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition. London, UK:[s.n.], 2017:157-159.
- [4] KOSTAS J G,BOVERIE B. Statistical model for a mode-stirred chamber[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1991,33(4):366-370.
- [5] FIELITZ H,REMLEY K A,HOLLOWAY C L,et al. Reverberation-chamber test environment for outdoor urban wireless propagation studies[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2010,9(1):52-56.
- [6] GENENDER E, HOLLOWAY C L, REMLEY K A, et al. Simulating the multipath channel with a reverberation chamber: application to Bit Error Rate measurements[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2010,52(4):766-777.
- [7] NGUYEN T M,CHUNG J Y,KWON J H. Optimal test set-up for generating Rayleigh fading channel in reverberation chamber[C]// International Symposium on Antennas and Propagation(ISAP). Okinawa,Japan:IEEE, 2017:736-737.
- [8] SEN I,MATOLAK D W,XIONG W. Wireless channels that exhibit worse than Rayleigh fading:analytical and measurement results[C]// IEEE Military Communications Conference. Washington,DC,USA:IEEE, 2006:1-7.
- [9] RACHED N B,KAMMOUN A,ALOUINI M S,et al. On the efficient simulation of outage probability in a log-normal fading environment[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017,65(6):2583-2593.
- [10] CHOI J H,PARK S O,YANG T S,et al. Generation of Rayleigh/Rician fading channels with variable RMS delay by changing boundary conditions of the reverberation chamber[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2010,9(1):510-513.
- [11] COOPER J,WELLER T,DISTASI S,et al. An electronically reconfigurable reverberation chamber for the emulation of severe multipath channels[C]// IEEE Wireless & Microwave Technology Conference. Clearwater,FL,USA:IEEE,2009:1-4.
- [12] 赵远,赵翔,闫丽萍,等.开有不同矩形孔缝的电大腔中场分布的统计分析[J].四川大学学报(自然科学版), 2014,51(4): 738-744. (ZHAO Yuan,ZHAO Xiang,YAN Liping, et al. Statistical analysis of EM field distribution in the electrically large enclosure with different rectangle aperture[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2014,51(4):738-744.)
- [13] CORONA P,FERRARA G,MIGLIACCIO M. Reverberating chamber electromagnetic field in presence of an unstirred component[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2000,42(2):111-115.
- [14] HILL D A. Plane wave integral representation for fields in reverberation chambers[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1998,40(3):209-217.
- [15] 张华彬,赵翔,周海京,等. 混响室的概率统计分析方法及其蒙特卡罗模拟[J]. 强激光与粒子束, 2011,23(9):2475-2480.
 (ZHANG Huabin,ZHAO Xiang,ZHOU Haijing, et al. Probabilistic and statistical analysis method of reverberation chamber and its Monte Carlo simulation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011,23(9):2475-2480.)
- [16] 龙永红. 概率论与数理统计[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社, 2004. (LONG Yonghong. Probability theory and mathematical statistics[M]. 2nd ed. Beijing:Higher Education Press, 2004.)
- [17] HOLLOWAY C L,HILL D A,LADBURY J M,et al. On the use of reverberation chambers to simulate a Rician radio environment for the testing of wireless devices[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2006,54(11):3167-3177.
- [18] LEMOINE C,BESNIER P,DRISSI M. Advanced method for estimating direct-to-scattered ratio of Rician channel in reverberation chamber[J]. Electronics Letters, 2009,45(4):194-196.
- [19] DURGIN G. Space-time wireless channels[M]. New Jersey:Prentice Hall, 2003.
- [20] 刘逸飞,陈永光,程二威. 基于平面波叠加的混响室场环境模拟与测试仿真[J]. 高电压技术, 2017(9):267-273. (LIU Yifei, CHEN Yongguang, CHEN Erwei. Electromagnetic environment modeling and test simulation in reverberation chamber based on plane waves superposition[J]. High Voltage Engineering, 2017(9):267-273.)

作者简介:

第6期



李 欢(1993-), 女, 江西省吉安市人, 在 读硕士研究生, 主要研究方向为电磁兼容. email:1679384607@qq.com.

赵 翔(1973-), 女, 四川省雅安市人, 博士, 教授, 主要研究方向为电磁兼容分析与电磁效应评估.

刘晓东(1976-),男,辽宁省昌图县人,硕士, 主要研究方向为航空电子.

刘 强(1987-),男,重庆市人,助理研究员, 主要研究方向为系统级电磁环境效应分析.

闫丽萍(1972-), 女, 河北省张家口市人, 博士, 教授, 主要研究方向为电磁兼容与电磁效应评估.