混响室内模拟多径衰落场环境的概率统计模型

Probabilistic Statistical Model for Simulating Multipath Fading Electromagnetic Environments in Reverberation Chamber

四川大学电子信息学院　陈佳豪　赵翔 *　闫丽萍　刘长军

摘　要：已有混响室概率统计模型不能同时模拟多种多径衰落场环境。通过扩展经典混响室平面波叠加模型，建立了更具普适性的混响室内模拟多径衰落场环境的概率统计模型。推导了电场直角分量模值的概率密度函数（PDF），在理论上验证了新模型能同时模拟瑞利分布、莱斯分布及更多多径衰落场环境。通过蒙特卡洛模拟仿真了电场直角分量模值的 PDF，并与理论 PDF 对比，进一步验证了新模型同时模拟多种多径衰落场环境的能力。

关键词：混响室；平面波叠加；多径衰落；概率密度函数；蒙特卡洛模拟

引用格式： 陈佳豪，赵翔 *，闫丽萍，等．混响室内模拟多径衰落场环境的概率统计模型 [J]. 安全与电磁兼容，2024(1): 66-71.

Chen Jiahao, Zhao Xiang*, Yan Liping, et al. Probabilistic Statistical Model for Simulating Multipath Fading Electromagnetic Environments in Reverberation Chamber[J]. SAFETY & EMC, 2024(1): 66-71. (in Chinese)

Abstract：The existing probabilistic statistical model of reverberation chamber cannot simulate multiple multipath fading electromagnetic environments at the same time. In this paper, the classical reverberation chamber plane-wave superposition model is extended to establish a more generalized probabilistic statistical model for simulating multipath fading field environments in reverberation chambers. By deriving the probability density function (PDF) of the magnitude of the rectangular component of the electric field, it is theoretically verified that the new model can simultaneously simulate the Rayleigh distribution, Rician distribution and more multipath fading electromagnetic environments. The PDF of the magnitude of the rectangular component of the electric field is simulated by Monte Carlo simulation and compared with the theoretical PDF, which further verifies the ability of the new model to simulate multiple multipath fading electromagnetic environments simultaneously.

Keywords：reverberation chamber; plane-wave superposition; multipath fading; probability density function (PDF); Monte Carlo simulation

1　概述

随着无线通信设备的广泛应用，人们对无线通信设备的性能要求也在不断提高。无线通信设备在信号传输过程中会面临诸多挑战，其中之一就是多径衰落问题。为此，需要对无线设备在不同多径衰落环境下的性能进行测试和评估。

混响室是一个电大多模、高 Q 值（品质因数）的金属腔体，通常由金属屏蔽外壳和内置搅拌器构成。混响室已作为电磁兼容测试场地得到广泛应用[1]，可测量电子设备的电磁辐射抗扰度和电磁辐射发射[2-3]。混响室内电磁环境由大量经外壳和搅拌器反射的反射波（也可包含直射波）叠加而成，这与无线通信中电波的多径衰落环境极为相似，因此混响室也可用于对无线通信信道进行模拟，为无线通信设备的测试提供环境[4-6]。

混响室内场环境建模的方法主要包括全波分析和概率统计两种。采用概率统计方法不仅能够有效模拟混响室内的场环境，而且无需精确考虑混响室的形状、尺寸和工作频率，从而显著减少了计算的时间和空间需求。因此，利

基金项目：国家自然科学基金面上项目（61877041）

用概率统计方法对混响室内场环境进行建模是国内外相关学者研究的热点问题。1998 年，Hill[7] 从平面波积分表达式出发，首次建立了经典混响室的角谱随机平面波积分模型，并结合若干对角谱随机性的假设，推导出一系列场量的概率密度函数（PDF）。2009 年，Hill[8] 系统介绍了该模型。2010 年，Primiani 等进一步研究了这种方法，结果表明，随着平面波数目的增加，场统计特性将被描述得更准确[9]。2011 年，张华彬等[10] 将理想混响室平面波积分表达式离散化，建立了混响室内的平面波叠加模型，并采用蒙特卡洛（MC）模拟来获得相关场量的概率统计特性。2012 年，West 等[11] 将平面波叠加模型和矩量法相结合，提出新的混响室内随机环境数值模拟方法，更好地模拟了场统计特性，同时缩短了计算时间。2013 年，沈远茂等[12] 用最大熵法推导出在平面波叠加模型下理想混响室内电场 PDF。同年，罗庆春等[13] 基于模式理论提出了对位置存在依赖性的混响室模式叠加概率统计模型。2016 年，张红燕等[14] 提出将混响室的模式叠加概率统计模型用于场线耦合分析。2019 年，李欢等[15] 结合莱斯分布的物理特征，在经典混响室平面波叠加模型的基础上建立了莱斯分布场概率统计模型。2022 年，Francesco 等[16] 提出了一种混响室内高效平面波叠加法，该方法产生的随机电磁场分布在某些情况下比其他方法更接近场的空间相关性。

目前，已有的概率统计模型通常只能单一模拟瑞利分布或莱斯分布场环境，不能同时模拟多种多径衰落场环境。为此，对 Hill 提出的混响室平面波叠加模型进行拓展，将电场表示为 M 项幅值较强的电场和 N-M 项幅值较弱的电场的叠加，建立了混响室内多种多径衰落场环境概率统计模型，使该模型能同时模拟瑞利分布场环境、莱斯分布场环境及更多衰落场环境。

2 混响室多径衰落场环境模型建立与仿真

2.1 混响室平面波叠加模型回顾

在球坐标系下，如图 1 所示，Hill 提出理想混响室中无源区域 $\boldsymbol{r}$ 处的电场表达式如式（1）所示[7]，它表示无源区域 $\boldsymbol{r}$ 处的电场是空间立体角上不同入射方向平面波的积分。

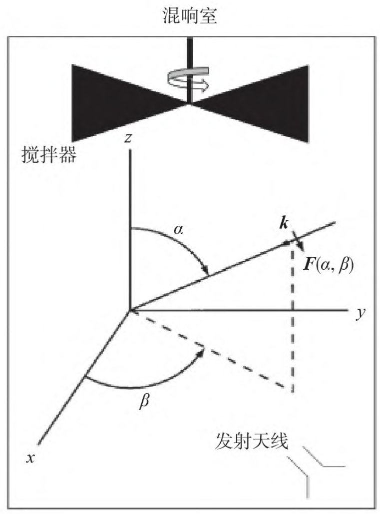


图 1 混响室内电场角谱矢量示意图

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r})=\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi}\boldsymbol{F}(\alpha,\beta)\exp\left[\mathrm{j}\boldsymbol{k}(\alpha,\beta)\cdot\boldsymbol{r}\right]\sin\alpha\,\mathrm{d}\alpha\,\mathrm{d}\beta \quad (1)$$

式（1）中，$\boldsymbol{F}(\alpha,\beta)$ 表示平面波对应的电场角谱，是随着搅拌器位置变化而变化的复矢量；$\boldsymbol{k}$ 表示矢量波数；α 为入射角，取值区间为 $[0, \pi]$；β 为方位角，取值区间为 $[0, 2\pi]$。

对式（1）进行离散化，将空间立体角 N 等分，无源区域 $\boldsymbol{r}$ 处的电场可以表示为 N 列入射方向均匀分布的平面波的叠加[10]：

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

式（2）中 $n(n=1, 2, \cdots, N)$ 对应第 n 列平面波，电场角谱 $\boldsymbol{F}(\alpha_n, \beta_n)$ 又可表示成分量形式：

$$\begin{aligned}\boldsymbol{F}(\alpha_n,\beta_n)&=\hat{\boldsymbol{\alpha}}F_{\alpha}(\alpha_n,\beta_n)+\hat{\boldsymbol{\beta}}F_{\beta}(\alpha_n,\beta_n)\\&=\hat{\boldsymbol{\alpha}}\left[F_{\alpha\mathrm{r}}(\alpha_n,\beta_n)+\mathrm{j}F_{\alpha\mathrm{i}}(\alpha_n,\beta_n)\right]+\\&\quad\hat{\boldsymbol{\beta}}\left[F_{\beta\mathrm{r}}(\alpha_n,\beta_n)+\mathrm{j}F_{\beta\mathrm{i}}(\alpha_n,\beta_n)\right]\end{aligned} \quad (3)$$

式（3）中下标 r、i 分别表示实部、虚部，$\hat{\boldsymbol{\alpha}}$、$\hat{\boldsymbol{\beta}}$ 分别是 α、β 方向上的单位矢量，$F_{\alpha}(\alpha_n, \beta_n)$、$F_{\beta}(\alpha_n, \beta_n)$ 分别是 $\boldsymbol{F}(\alpha_n, \beta_n)$ 在 $\hat{\boldsymbol{\alpha}}$、$\hat{\boldsymbol{\beta}}$ 方向上的分量。

在模型式（3）中，Hill 假设各角谱分量 $F_{\alpha\mathrm{r}}(\alpha_n, \beta_n)$、$F_{\alpha\mathrm{i}}(\alpha_n, \beta_n)$、$F_{\beta\mathrm{r}}(\alpha_n, \beta_n)$、$F_{\beta\mathrm{i}}(\alpha_n, \beta_n)$ 为随机变量，但对它们服从的概率分布形式没

有要求，只对均值和方差做了要求。各角谱分量被假设具有以下统计特性：① 各角谱分量的均值均为 0；② 不同入射方向的角谱分量不相关，相同入射方向但具有正交相位或者正交极化的角谱分量不相关；③ 各角谱分量具有相同方差 σ^2。在此假设条件下，Hill 推导出该模型下电场直角分量（以 x 分量为例）的实部 E_{xr} 虚部 E_{xi} 不相关，且都满足高斯分布 $N(0, 6\sigma^2/16\pi)$，其模值 $|E_x|$ 则满足瑞利分布 [7]。

2.2 混响室平面波叠加模型扩展

2002 年，Durgin 等通过将信号表示为强分量和弱分量叠加的方法，建立了无线信道衰落模型 [17]。借鉴 Durgin 等使用的方法，在混响室平面波叠加模型的基础上进行扩展，将 N 列平面波中的 M 列平面波表示为电场幅值较强的平面波（通常为直射波或电场幅值较强的反射波），其余 $N-M$ 列平面波表示为电场幅值较弱的平面波（通常为反射波）。模型如式（4），总共 N 列平面波入射方向均匀地分布在空间立体角 4π 上，每列平面波各自独立。

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r})=\frac{4\pi}{N}\left\{\sum_{m=1}^{M}\boldsymbol{F}_{\mathrm{s}}(\alpha_m,\beta_m)\exp\left[\mathrm{j}\boldsymbol{k}(\alpha_m,\beta_m)\cdot\boldsymbol{r}\right]+\sum_{n=M+1}^{N}\boldsymbol{F}_{\mathrm{w}}(\alpha_n,\beta_n)\exp\left[\mathrm{j}\boldsymbol{k}(\alpha_n,\beta_n)\cdot\boldsymbol{r}\right]\right\} \tag{4}$$

式（4）表示混响室中无源区域 $\boldsymbol{r}$ 处的电场。式中 m（m=1, 2, ⋯, M）对应第 m 列电场幅值较强的平面波，$\boldsymbol{F}_{\mathrm{s}}(\alpha_m, \beta_m)$ 表示对应的电场角谱；n（n=M+1, ⋯, N）对应第 $n-M$ 列电场幅值较弱的平面波，$\boldsymbol{F}_{\mathrm{w}}(\alpha_n, \beta_n)$ 表示对应的电场角谱；$\boldsymbol{k}$ 表示矢量波数。

考虑观测点位于球坐标系原点处（即 $\boldsymbol{r}$=0），模型式（4）可简化为：

$$\boldsymbol{E}=\frac{4\pi}{N}\left\{\sum_{m=1}^{M}\boldsymbol{F}_{\mathrm{s}}(\alpha_m,\beta_m)+\sum_{n=M+1}^{N}\boldsymbol{F}_{\mathrm{w}}(\alpha_n,\beta_n)\right\} \tag{5}$$

其中 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{s}}(\alpha_m, \beta_m)$、$\boldsymbol{F}_{\mathrm{w}}(\alpha_n, \beta_n)$ 均可以用分量的形式表示为：

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{s}}(\alpha_m,\beta_m)=\hat{\boldsymbol{\alpha}}\left[F_{\mathrm{s}\_\alpha\mathrm{r}}(\alpha_m,\beta_m)+\mathrm{j}F_{\mathrm{s}\_\alpha\mathrm{i}}(\alpha_m,\beta_m)\right]+\hat{\boldsymbol{\beta}}\left[F_{\mathrm{s}\_\beta\mathrm{r}}(\alpha_m,\beta_m)+\mathrm{j}F_{\mathrm{s}\_\beta\mathrm{i}}(\alpha_m,\beta_m)\right] \tag{6}$$

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{w}}(\alpha_n,\beta_n)=\hat{\boldsymbol{\alpha}}\left[F_{\mathrm{w}\_\alpha\mathrm{r}}(\alpha_n,\beta_n)+\mathrm{j}F_{\mathrm{w}\_\alpha\mathrm{i}}(\alpha_n,\beta_n)\right]+\hat{\boldsymbol{\beta}}\left[F_{\mathrm{w}\_\beta\mathrm{r}}(\alpha_n,\beta_n)+\mathrm{j}F_{\mathrm{w}\_\beta\mathrm{i}}(\alpha_n,\beta_n)\right] \tag{7}$$

将模型式（6）中的 $F_{\mathrm{s}\_\alpha\mathrm{r}}(\alpha_m, \beta_m)$、$F_{\mathrm{s}\_\beta\mathrm{r}}(\alpha_m, \beta_m)$ 设为 $A_m\cos\theta_m$，$F_{\mathrm{s}\_\alpha\mathrm{i}}(\alpha_m, \beta_m)$、$F_{\mathrm{s}\_\beta\mathrm{i}}(\alpha_m, \beta_m)$ 设为 $A_m\cos\theta_m$（A_m 是决定第 m 列电场幅值较强的平面波电场幅值的参数；θ_m 是对应的相位，在 [0,2π）上满足均匀分布）,式（7）中 $F_{\mathrm{w}\_\alpha\mathrm{r}}(\alpha_n, \beta_n)$、$F_{\mathrm{w}\_\alpha\mathrm{i}}(\alpha_n, \beta_n)$、$F_{\mathrm{w}\_\beta\mathrm{r}}(\alpha_n, \beta_n)$、$F_{\mathrm{w}\_\beta\mathrm{i}}(\alpha_n, \beta_n)$ 将服从高斯分布 $N(0, \sigma_n^2)$（不同列平面波的方差可以不同）。

根据式（6）和式（7），式（5）中混响室内电场 $\boldsymbol{E}$ 可表示为强分量电场 $\boldsymbol{E}_{\mathrm{s}}$ 和弱分量电场 $\boldsymbol{E}_{\mathrm{w}}$ 的叠加：

$$\boldsymbol{E}=\boldsymbol{E}_{\mathrm{s}}+\boldsymbol{E}_{\mathrm{w}}=\boldsymbol{E}_{\mathrm{s\_r}}+\mathrm{j}\boldsymbol{E}_{\mathrm{s\_i}}+\boldsymbol{E}_{\mathrm{w\_r}}+\mathrm{j}\boldsymbol{E}_{\mathrm{w\_i}} \tag{8}$$

式（8）中，$\boldsymbol{E}_{\mathrm{s}}$ 对应式（5）中前半部分 M 列平面波的电场，$\boldsymbol{E}_{\mathrm{s\_r}}$、$\boldsymbol{E}_{\mathrm{s\_i}}$ 分别表示强分量电场的实部和虚部，$\boldsymbol{E}_{\mathrm{s}}$ 具体可表示为式（9）的形式；$\boldsymbol{E}_{\mathrm{w}}$ 对应式（5）中后半部分 $N-M$ 列平面波的电场。总电场由 N 项电场的和组成，每项各自独立。

$$\boldsymbol{E}_{\mathrm{s}}=\sum_{m=1}^{M}E_{\mathrm{s}\_m}\exp\left(\mathrm{j}\theta_m\right) \tag{9}$$

式（9）中的 E_{s_m} 和 θ_m 分别表示第 m 项强分量电场的幅值和相位。E_{s_m} 由平面波电场幅值参数 A_m 决定。

2.3 概率密度函数推导

接下来推导电场直角分量（以 x 分量为例）模值的 PDF，以验证该模型能模拟多种多径衰落场环境。

对于一般的复随机变量 Z=X+jY，其模值 R 的概率密度函数 $f_R(r)$ 与联合特征函数 $\Phi_{XY}(v)$ 之间有如下关系式 [17]：

$$\begin{cases}\Phi_{XY}(v)=\Phi_{XY}(v,\phi_0)=\int_0^{\infty}f_R(r)\cdot J_0(vr)\mathrm{d}r\\ f_R(r)=r\int_0^{\infty}\Phi_{XY}(v)\cdot J_0(vr)v\mathrm{d}v\end{cases} \tag{10}$$

其中 $\Phi_{XY}(v, \phi_0)$ 由 $\Phi_{XY}(v_x, v_y)$ 变换而来（$v=\sqrt{v_x^2+v_y^2}$，$\tan\phi_0=v_y/v_x$），$J_0(vr)$ 为第一类零阶贝塞尔函数。由于 $\Phi_{XY}(v, \phi_0)$ 与 ϕ_0 无关 [17]，

所以式中 Φ_{XY}（v，ϕ_0）可简洁表达为 Φ_{XY}（v）。

在模型式（8）中，电场的 x 分量为复随机变量，可用实部分量和虚部分量表示为：

$$\begin{aligned} E_x &= E_{xs} + E_{xw} \\ &= \sum_{m=1}^{M} E_{xs\_m} \exp\left(\mathrm{j}\theta_m\right) + E_{xw} \\ &= \left(E_{xs\_r} + \mathrm{j}E_{xs\_i}\right) + \left(E_{xw\_r} + \mathrm{j}E_{xw\_i}\right) \end{aligned} \tag{11}$$

式（11）中的各项互不相关，且 E_{xw_r}、E_{xw_i} 满足正态分布 N（0，σ_x^2），σ_x^2 待定。

由式（10）中第一个式子可得联合特征函数 $\Phi_{Exs\_rExs\_i}$（v）、$\Phi_{Exw\_rExw\_i}$（v）分别为：

$$\Phi_{E_{xs\_r}E_{xs\_i}}\left(v\right) = \prod_{m=1}^{M} J_0\left(E_{xs\_m} v\right) \tag{12}$$

$$\Phi_{E_{xw\_r}E_{xw\_i}}\left(v\right) = \exp\left(\frac{-v^2\sigma_x^{\ 2}}{2}\right) \tag{13}$$

由于 E_{xs} 与 E_{xw} 相互独立，所以联合特征函数 Φ_{ExsExw}（v）可看作 $\Phi_{Exs\_rExs\_i}$（v）与 $\Phi_{Exw\_rExw\_i}$（v）的乘积，由此代入到式（10）中第二个式子可得电场 x 分量的模值的 PDF 为：

$$f_R\left(\left|E_x\right|\right) = \left|E_x\right| \int_0^{\infty} J_0\left(v\left|E_x\right|\right) \exp\left(\frac{-v^2\sigma_x^{\ 2}}{2}\right) \times \left[\prod_{m=1}^{M} J_0\left(E_{xs\_m} v\right)\right] v\mathrm{d}v \tag{14}$$

当 M=0 时，借助积分表工具 [18]，对式（14）进行积分计算后结果为：

$$\begin{aligned} f_R\left(\left|E_x\right|\right) &= \left|E_x\right| \int_0^{\infty} J_0\left(v\left|E_x\right|\right) \exp\left(\frac{-v^2\sigma_x^{\ 2}}{2}\right) v dv \\ &= \frac{\left|E_x\right|}{\sigma_x^{\ 2}} \exp\left(\frac{-\left|E_x\right|^2}{2\sigma_x^{\ 2}}\right) \end{aligned} \tag{15}$$

此时电场 x 分量的模值满足瑞利分布。

当 M=1 时，借助积分表工具 [18]，对式（14）进行积分计算后结果为：

$$f_R\left(\left|E_x\right|\right) = \frac{\left|E_x\right|}{\sigma_x^{\ 2}} \exp\left(-\frac{\left|E_x\right|^2 + E_{xs\_1}^{\ \ 2}}{2\sigma_x^{\ 2}}\right) I_0\left(\frac{\left|E_x\right| E_{xs\_1}}{\sigma_x^{\ 2}}\right) \tag{16}$$

此时电场 x 分量的模值满足莱斯分布，其中莱斯 K 因子定义为：

$$K = \frac{E_{xs\_1}^2}{2\sigma_x^2} \tag{17}$$

当 M=2 时，模型式（5）还可以支持对双射线分布和超瑞利分布的模拟。其中，双射线分布是没有弱分量电场的情况，而超瑞利分布是一种介于瑞利分布和双射线分布之间的情况 [19]。

以此类推，得到任意 M 值时，$|E_x|$ 的 PDF 通解结果如式（18）：

$$f_R\left(\left|E_x\right|\right) = \begin{cases} \dfrac{\left|E_x\right|}{\sigma_x^{\ 2}} \exp\left(\dfrac{-\left|E_x\right|^2}{2\sigma_x^{\ 2}}\right), M = 0 \\ \dfrac{\left|E_x\right|}{\sigma_x^{\ 2}\pi^{M-1}} \int_0^{\pi} \cdots \int_0^{\pi}\int_0^{\pi} \exp\left(-\dfrac{\left|E_x\right|^2 + t_M}{2\sigma_x^{\ 2}}\right) \times I_0\left(\dfrac{\left|E_x\right|\sqrt{t_M}}{\sigma_x^{\ 2}}\right) \mathrm{d}\theta_1 \mathrm{d}\theta_2 \ldots \mathrm{d}\theta_{M-1}, M > 0 \end{cases} \tag{18}$$

其中

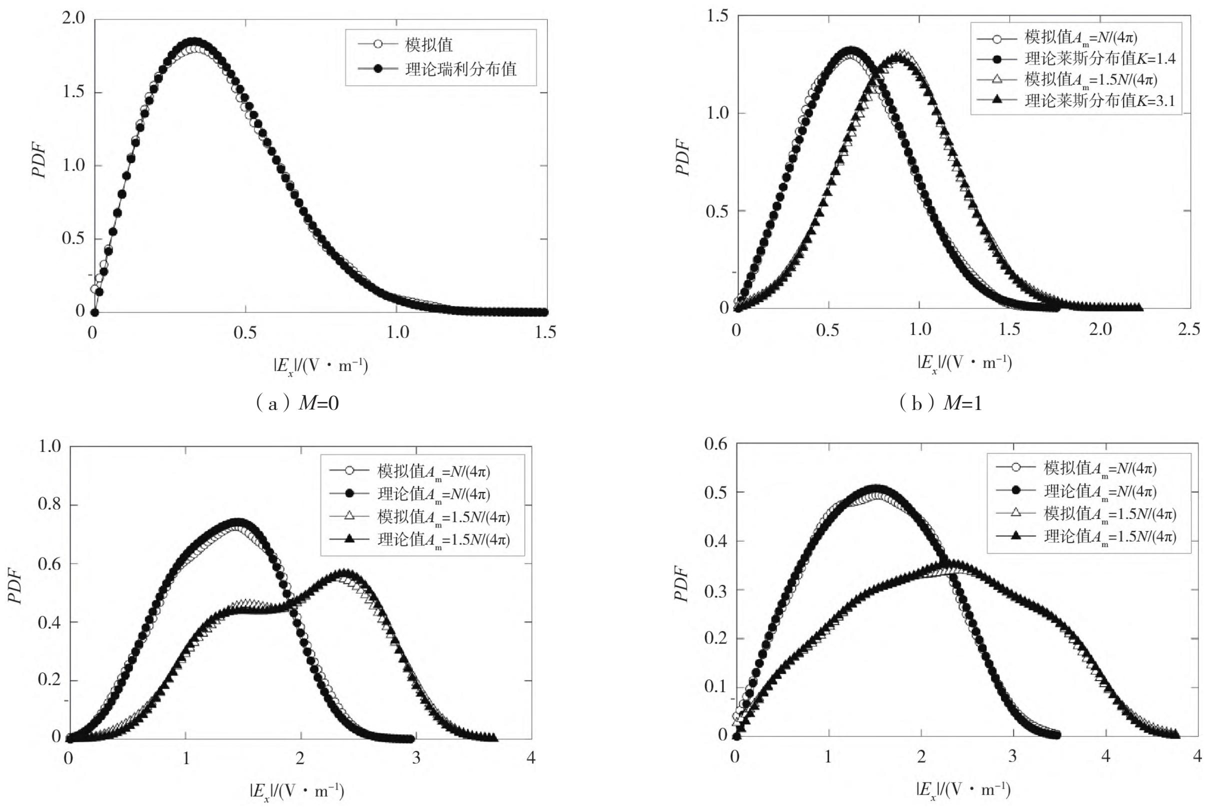
$$t_M = \begin{cases} 0, M = 0 \\ \sum_{m=1}^{M} E_{xs\_m}^2 - \sum_{m=1}^{M} 2E_{xs\_m}\sqrt{t_{m-1}} \cos\theta_{m-1}, M > 0 \end{cases} \tag{19}$$

可以看到，不同的 M 导致了不同概率统计特征的场环境。

3 蒙特卡洛模拟结果

首先在单位球面上产生均匀分布的 N 个点，N 个点各自到球心的矢量方向视为各平面波的入射方向，依次将这 N 个入射方向分配给 M 列电场幅值较强的平面波和 N–M 列电场幅值较弱的平面波。为此，生成这 N 个点的仰角 α 应满足 cosα 服从 U（–1，1）均匀分布，方位角 β 应服从 U（0，2π）均匀分布 [20]。其次，根据模型描述设置各角谱分量。最后，设置搅拌器旋转位置数 P，并利用式（7）计算得到电场量，得到容量为 P 的数据样本并对其进行概率统计推断。

在 M=0，1，2，3 的条件下进行蒙特卡洛模拟，设置 P=5 000，N=1 000，σ_n^2 =1。在每个 $M\neq 0$ 的取值条件下，分别仿真了 A_m=N/（4π）、A_m=1.5N/（4π）对应的 $|E_x|$ 的 PDF。结果如图 2 所示，可以看出 MC 模拟得到的 $|E_x|$ 的 PDF 和由式 15 ～式 17 给出的理论 PDF 相符，且不同的 M 导致了不同的 PDF。其中 M=0 和 M=1 时，$|E_x|$ 分别满足瑞利分布和莱斯分布。当 M=2，$\sigma_n^2=\sqrt{10}$时，在 A_m<2N/（4π）的条件下，可以实现介于双射线分布和瑞利分布之间的超瑞利分布，如图 3 所示。这意味着模型式（5）可以模拟多种衰落场环境。需要指出的是，由于还未得到σ_x^2与σ_n^2、M 的明确关系式，所以计算理论 PDF 时，σ_x^2是由 MC 模拟得到的结果。



（a）M=0　（b）M=1　（c）M=2　（d）M=3

图 2　蒙特卡洛模拟结果

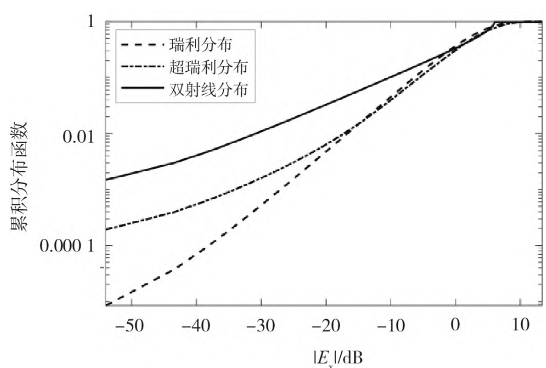


图 3　超瑞利分布的模拟

4　结语

对 Hill 提出的混响室平面波叠加模型拓展后提出的混响室内多种多径衰落场环境概率统计模型，可以模拟多种衰落场环境，更具有普适性。并利用特征函数求概率密度函数的方法，以 x 分量为例，从理论上推导出了该模型中 $|E_x|$ 的 PDF 通解。结合蒙特卡洛方法，仿真出混响室内 $|E_x|$ 的 PDF，并与理论 PDF 结果进行对比，验证了该模型能有效模拟混响室内瑞利分布场环境、莱斯分布场环境及更多多径衰落场环境。但电场直角分量模值的 PDF 通解结果式（18），在 M 较大时多重积分计算复杂，难以得到闭式表达式，因此还需要简化式（18）在 M 较大时的表达式，这将是下一步的研究工作。

参考文献

[1] 熊蒙，叶琼瑜，焦琳，等．电磁混响室场地性能参数确认方法 [J]. 安全与电磁兼容，2019(5): 47–50.

[2] 朱赛，马岚，李焕然，等．电磁混响室的辐射发射快速校准法 [J]. 安全与电磁兼容，2020(2): 51–53.

[3] 张云蕾，吕炎，张旭，等．ISO 11451–5 标准草案解读 [J]. 安全与电磁兼容，2022(6): 86–90.

[4] Frolik J. On appropriate models for characterizing hyper–rayleigh fading[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(12): 5202–5207.

[5] 徐千，张旭，范岩，等．基于峰均比的混响室独立样本数估计 [J]. 安全与电磁兼容，2023(5): 38–41.

[6] 唐毓隆，肖疆，程少阳，等．混响室在无线测试中的应用 [J]. 安全与电磁兼容，2014(4): 90–94.

[7] Hill D A. Plane wave integral representation for fields in reverberation chambers[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1998, 40(3): 209–217.

[8] Hill D A. Electromagnetic Fields in Cavities: Deterministic and Statistical Theories[M]. New Jersey: Wiley–IEEE Press, 2009.

[9] Primiani V M, Moglie F. Numerical simulation of LOS and NLOS conditions for an antenna inside a reverberation chamber[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2010, 24: 2319–2331.

[10] 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.

[11] West J C, Bunting C F, Rajamani V. Accurate and efficient numerical simulation of the random environment within an ideal reverberation chamber[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2012, 54(1): 164–173.

[12] 沈远茂，石丹，高攸纲，等．混响室内电磁场统计特性的理论分析 [J]. 安全与电磁兼容，2013(2): 15–17.

[13] 罗庆春，赵翔，闫丽萍，等．基于模式理论的混响室概率统计模型及其蒙特卡罗模拟 [J]. 四川大学学报 (自然科学版), 2013, 50(4): 770–774.

[14] 张红燕，赵翔，罗庆春，等．基于模式理论的混响室概率统计模型在场线耦合分析中的应用 [J]. 四川大学学报 (自然科学版), 2016, 53(3): 567–571.

[15] 李欢，刘晓东，刘强，等．基于平面波叠加模型的混响室莱斯场环境模拟 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报，2019, 17(6): 1027–1031.

[16] Francesco A D, De Santis V, Bit–Babik G, et al. An efficient plane–waves superposition method for improved spatial correlation in simulated reverberation chambers[J]. IEEE Access, 2022, 10: 119641–119648.

[17] Durgin G D, Rappaport T S, Wolf D A de. New analytical models and probability density functions for fading in wireless communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(6): 1005–1015.

[18] Gradshteyn I S, Ryzhik I M. Table of Integrals, Series, and Products[M]. 7th ed. New York: Academic, 1994.

[19] Frolik J, Weller T M, DiStasi S, et al. A compact reverberation chamber for hyper–Rayleigh channel emulation[J]. IEEE Transactions on Antennas and propagation, 2009, 57(12): 3962–3968.

[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.

编辑：刘新霞

(上接第 65 页)

电磁安全态势评估及防护方法研究 [D]. 石家庄：陆军工程大学，2019.

[15] Zhang D, Cheng E, Wan H, et al. Prediction of Electromagnetic Compatibility for Dynamic Datalink of UAV[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 61(5): 1474–1482.

[16] 冯博伦，孟萃，吴平．克朗方法在电磁兼容研究中的应用 [J]. 安全与电磁兼容，2023(5): 9–15.

[17] 卢新福．同轴线缆互联系统强场电磁辐射敏感度等效试验技术 [D]. 石家庄：军械工程学院，2016.

编辑：田宁　E–mail:tianning@cesi.cn