ICS 13.280
CCS C 71

YD

中 华 人 民 共 和 国 通 信 行 业 标 准

YD/T XXXX.2—202X

人体暴露于来自靠近人体头部和身体使用的无线设备的射频场的功率密度评估 第2部分：计算规程（频率范围6GHz～300GHz）

Assessment of power density of human exposure to radio frequency fields from wireless devices in close proximity to the head and body (frequency range of 6 GHz to 300 GHz) - Part 2: Computational procedure

(IEC/IEEE 63195.2：2022，IDT)

（报批稿）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX－XX－XX 发布　　XXXX－XX－XX 实施

中华人民共和国工业和信息化部　　发 布

前　言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则　第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件是YD/T XXXX《人体暴露于来自靠近人体头部和身体使用的无线设备的射频场的功率密度评估》的第2部分，YD/T XXXX已经发布了以下部分：

——第1部分：测量规程（频率范围6GHz～300GHz）；

——第2部分：计算规程（频率范围6GHz～300GHz）。

本文件等同采用了IEC/IEEE 63195-2：2022《靠近人体使用的无线通信设备对人体的电磁照射功率密度的评估规程　第2部分：数值计算（频率范围6GHz～300GHz）》。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国通信标准化协会提出并归口。

本文件起草单位：中国信息通信研究院、博泰车联网科技（上海）股份有限公司、联想（北京）有限公司、华为技术有限公司、北京三星通信技术研究有限公司、OPPO 广东移动通信有限公司、维沃移动通信有限公司、荣耀终端有限公司、中兴通讯股份有限公司、博鼎实华（北京）技术有限公司、重庆信息通信研究院、上海同耀通信技术有限公司。

本文件主要起草人：齐殿元、孙绍滨、邹方竹、陆洋、夏瞻、魏寰斌、赵竞、刘骁、董加锐、汤润森、蓝江鹏、李国庆、杨磊、康岛、马文化、王瑞鑫、戴星、邓照、范广畅、郭鹏、徐海俊。

引　言

本文件提供了一种使用计算方法来评估人体暴露于无线设备的方法。制定本文件的目的是为此类无线设备的数值建模和评估提供程序。本文件的制定为此类无线设备的数值建模和评估提供了测试方案。这里的通信设备包括与其他射频发射或非发射设备及附件（例如皮带夹）结合使用的情况，以及嵌入衣服内的情况，适用于单个发射器以及与其他发射器同时工作的发射器。计算技术（也就是FDTD或FEM）都是可选的，但会受到应用的影响。计算方法的优势包括能够提供可重复、非侵入式的方法来确定物体内部或附近的暴露情况，且无需昂贵的硬件设备。本文件适用的工作频率范围是6GHz到300GHz。

本文件规定了：

——　对数值软件的要求（第5章）；

——　模型开发和验证（第7章）；

——　功率密度计算和平均（第8章）；

——　不确定度评估（第9章）；

——　报告要求（第10章）。

人体暴露于来自靠近人体头部和身体使用的无线设备的射频场的功率密度评估 第2部分：计算规程（频率范围6GHz～300GHz）

1 范围

本文件规定了由射频（RF）电磁场（EMF）发射装置入射到人体头部或身体的功率密度（PD）保守和可复现的计算规程。计算规程包括时域有限差分法（FDTD）和有限元法（FEM），这两种计算技术可通过在特定计算不确定度内求解麦克斯韦方程组确定电磁量。本文件中的规程适用于手持式和穿戴式射频发射通信设备对显著多数人群的暴露评估。这些设备可以具有单个/多个发射器或天线，设备工作时其辐射结构距离人体头部和身体不超过200mm。

本文件中相关的方案可用于确定在头部和身体附近使用的不同类型的射频发射通信设备与相应最大功率密度要求的符合性，这里的通信设备包括与其他射频发射或非发射设备及附件（例如皮带夹）结合使用的情况，以及嵌入衣服内的情况。本文件适用的工作频率范围是6GHz到300GHz。

本文件中包含的射频发射通信设备包括但不限于移动电话、个人计算机、台式机和笔记本电脑设备中的无线电发射器，以及多频段多天线设备。

本文件的程序不适用于拟置入体内的设备或物体发射的或被其改变的电磁场的PD评估。

注：需要评估6GHz以下频段的同时发射器的合成暴露时，SAR计算的相关标准为SAR计算的相关标准为IEC/IEEE 62704-1:2017和IEC/IEEE 62704-4:2020。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

IEC/IEEE 62704-1:2017 确定30 MHz-6 GHz无线通信设备在人体内的峰值空间平均比吸收率(SAR)-第1部分：使用时域有限差分法(FDTD)计算SAR的一般要求(Determining the peak spatial-average specific absorption rate (SAR) in the human body from wireless communications devices, 30 MHz to 6 GHz - Part 1: General requirements for using the finite difference time-domain (FDTD) method for SAR calculations)

IEC/IEEE 62704-4:2020 确定30 MHz-6 GHz无线通信设备在人体内的峰值空间平均比吸收率(SAR)-第4部分：使用有限元法计算SAR的一般要求（Determining the peak spatial-average specific absorption rate (SAR) in the human body from wireless communications devices, 30 MHz to 6 GHz - Part 4: General requirements for using the finite element method for SAR calculations）

YD/T XXXX.1 人体暴露于来自靠近人体头部和身体使用的无线设备的射频场的功率密度评估（频率范围6GHz～300GHz） 第1部分：测量规程

IEEE std.145 天线术语的定义（Standard for Definitions of Terms for Antennas）

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 暴露度量标准和参数

3.1.1

功率密度 power density (PD)

局部功率密度 local power density

复坡印亭矢量S在位置r处的函数，其在此位置所处表面通过积分计算sPD。

注1：8.5给出的公式4、公式5和公式8提供了功率密度的积分函数表达。附录F也提供了8.5中功率密度的原理。

注2：用于计算功率密度的公式还需要考虑所适用的暴露指南或国家法规。
注3：功率密度也被称为功率通量密度。
注4：相关术语“入射功率密度”是指照射在身体表面上的每单位面积的功率量级。在一些地区，6GHz以上的频段使用恰在体表外的入射功率密度作为局部暴露的导出限值。

3.1.2

空间平均功率密度 spatial-average power density（*sPD*）

在表面区域A_{av}上的平均功率密度（3.1.1）。
注1：*sPD*是位置矢量*r*的函数。这个函数定义在评估表面上，不包含不能构造平均区域的边缘。
注2：暴露限值中规定的示例平均面积为1cm^{2}和/或4cm^2。

3.1.3

峰值空间平均功率密度 peak spatial-average power density（*psPD*）

评估表面（3.2.3）上定义的所有*sPD*数值（3.1.2）的全局最大值。
注1：*psPD*是通过公式1得到的，其中*r*为评估表面上的点

$$psPD = \max_{\boldsymbol{r}} \left\{ sPD(\boldsymbol{r}) \right\} \quad \cdots\cdots (1)$$

注2：可以存在其他的局部最大（也就是次级峰值空间平均功率密度值），具体请见3.1.4。

3.1.4

最大化峰值空间平均功率密度 maximized peak spatial-average power density (*mpsPD*)

激励矢量（3.3.5）的*psPD*（*3.1.3*）使其值最大。

3.1.5

坡印亭矢量 Poynting vector (*S*)

电磁场中给定点的电场强度*E*和磁场强度*H*的矢量积。
注1：坡印亭矢量通过闭合表面的通量等于穿过该表面的电磁功率。
注2：对于周期电磁场，坡印亭矢量的周期平均是一个矢量，该矢量的方向在一定预设条件下，可以被认为是电磁能量的传播方向，幅值可以认为是平均功率通量密度。
注3：对于角频率ω的正弦波，复坡印亭矢量通过公式2得到，其中*E*和*H*是相量，*表示复共轭

$$\boldsymbol{S} = \frac{1}{2} \boldsymbol{E} \times \boldsymbol{H}^* \quad \cdots\cdots (2)$$

注4：坡印亭矢量的单位是瓦特每平方米（W/m^2）。

3.1.6

暴露的保守估计（保守暴露） conservative estimate <of exposure> (conservative exposure)

暴露的保守评估，包含本文件中定义的不确定度，其结果等于或者略高于显著多数人群在预期使用无线发射设备时头部或身体的实际暴露。

3.2 与暴露度量标准相关的空间、物理和几何参数

3.2.1

平均面积 averaging area (A_{av})

用于计算*sPD*（3.1.2）的区域的标称尺寸。
注1：在一个平坦的评估表面上，*sPD*的计算是功率密度（3.1.1）在平均区域上对A_{av}进行积分的比值。在一个非平坦的评估表面上，平面区域表示功率密度的积分面积投影到平面上的尺寸。
注2：具体信息请见8.4。

3.2.2

评估表面 evaluation surface

用于评估DUT发射的空间平均功率密度(*sPD*)的虚拟表面。

注1：适用于本文件的典型评估表面可以是具有耳廓的SAM模型的内壳，或者是具有有限或无限延伸的平坦表面。
注2：评估表面上进行峰值空间平均功率密度（*psPD*）评估，得到的暴露值应足够保守。
注3：在实际应用中，评估表面可以不同于测量表面或区域。

3.2.3

近场 near field

反应近场和辐射近场包含区域。
注：反应近场和辐射近场的定义分别见3.2.5和3.2.4。

3.2.4

辐射近场 radiative near field

反应近场和远场之间的空间区域，其中电磁场的主要分量是代表能量传播的分量，其中场的角分布取决于到天线的距离。
注：在辐射近场中，电磁场的异相位（也就是渐逝分量）会衰减，而电磁场的同相（也就是传播分量）会涌现。

3.2.5

反应近场 reactive near field

紧密环绕天线周围的空间区域，其中电场和磁场主要分量是天线和周围介质之间的反应能量的交换部分，这里电场和磁场相位差是90°。

3.2.6

远场 far field

天线的电磁场区域，其中电磁场的主要分量是能量的传播的部分，场的角分布与到天线几何中心的距离基本上没有关系，主要的电场和磁场分量之比定义为常数，等于波阻抗377Ω。
注：为了遵守本文件的要求，近场和远场的边界请见7.2.4.1。

3.3 测试设备技术配置和天线参数

3.3.1

信道（射频信道/频道） channel, RF channel, frequency channel

计划用于信号传输的一部分频谱，可以通过确定频率的上下限，或中心频率和相关带宽，或其他等效方式来定义。
注：射频信道的数量和相应的信道带宽可能因无线技术不同而不同，其会受国家频率分配的限制。在本文件中，功率密度的测试在一个特定的信道，例如发射频段的高、中和低信道，下进行。

3.3.2

天线子阵列 antenna sub-array

阵源中可工作的辐射单元的子集。
注：天线元件可被两个或多个子阵列单独使用。

3.3.3

阵列（天线）array (antenna)

天线由多个基本相同的辐射元件组成，通过排列、定向和激励来获得预期的辐射方向图。

3.3.4

码本 codebook

所有可能激励矢量的集合。

3.3.5

激励矢量 excitation vector

表示天线阵列或子阵列输入信号的所有相量的矢量。

注：码本的条目是激励矢量。

3.3.6

模块或子组件 module or sub-assembly

独立的射频收发机，只需要电源和通过连接器、球栅阵列或引脚就能与主机通信，设计为集成到最终产品中。

3.4 计算参数

3.4.1

计算域 computational domain

通过数学方程或计算算法计算得到电场或磁场的所有空间位置的集合。

3.4.2

集总源 lumped source

具有内阻的源，应用于计算网格边缘上的电场分量。

3.4.3

理想导电体 perfect electric conductor(PEC)

具有无限导电性且不耗散任何能量的材料。

3.4.4

表面等效原理 surface equivalence principle

一个定理，说明封闭区域内的源可以被区域表面上的替代源代替，从而在封闭区域外产生相同的场。

注：详情见[1]。

3.5 不确定度参量

3.5.1

不确定度 uncertainty

评估值的置信区间。

3.5.2

标准不确定度 standard uncertainty

测量或仿真结果的标准差的估计值，等于估计方差的正平方根。

3.5.3

合成不确定度 combined uncertainty

测量或仿真结果的标准差的估计值，通过对A类和B类评估的每个独立的标准不确定度使用“方和根”法合成得到。

3.5.4

扩展不确定度 expanded uncertainty

定义测量或仿真结果区间的量，该区间预期包含可合理归因于被测对象的指定置信区间内的值分布。

3.5.5

不确定度评估 uncertainty evaluation

通过一系列观测数据的统计分析（A类）或其他方法（B类）评估不确定度。

4 符号与缩略语

下列符合和缩略语适用于本文件。

4.1 物理量

本文件采用国际公认的国际单位制。

符号	物理量	单位	单位
α	衰减系数	米的倒数	1/m
P	功率	瓦特	W
J	电流密度	安培每平方米	A/m^2
σ	电导率	西门子每米	S/m
E	电场强度	伏特/米	V/m
f	频率	赫兹	Hz
S	坡印亭矢量	瓦特/平方米	W/m^2
H	磁场强度	安培每米	A/m
ρ	质量密度	千克每立方米	kg/m^3
δ	穿透深度	米	m
μ	磁导率	亨利每米	H/m
PD	功率密度	瓦特每平方米	W/ m^2
sPD	空间平均功率密度	瓦特/平方米	W/m^2
sPD_{n+}	表面法向传播方向的空间平均功率密度	瓦特/平方米	W/m^2
sPD_{tot+}	总传播空间平均功率密度	瓦特/平方米	W/m^2
sPD_{mod+}	考虑感应近场效应的总空间平均功率密度	瓦特/平方米	W/m^2
$psPD$	峰值空间平均功率密度	瓦特/平方米	W/m^2
$mpsPD$	最大峰值空间平均功率密度	瓦特/平方米	W/m^2
c_h	比热容	焦耳每千克每开尔文	J/(kg K)
ε	介电常数	法拉每米	F/m
SAR	比吸收率	瓦特每千克	W/kg
T	温度	开尔文	K
λ	波长	米	m

注：在本文件中，温度以摄氏度为单位进行量化，定义为：T(℃)=T(K)-273.15。

4.2 常量

符号	物理常量	大小
c	真空中的光速	2.998×10^8 m/s
η_0	自由空间特性阻抗	376.73 Ω
ε_0	自由空间介电常数	8.854×10^{-12} F/m
μ_0	自由空间磁导率	$4\pi \times 10^{-7}$ H/m

4.3 缩略语

ABC	吸收边界条件	absorbing boundary condition
CAD	计算机辅助设计	Computer aided design
DFT	离散傅里叶变换	Discrete Fourier transform
DUT	被测设备	device under test
EIRP	等效各向同性辐射功率	equivalent isotropically radiated power
FDTD	时域有限差分法	finite-difference time-domain
FEM	有限元法	finite element method
HDF5	分层数据格式版本 5	hierarchical data format Version 5
ICNIRP	国际非电离辐射防护委员会	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
IF	中频	Intermediate frequency
MEE	最大暴露评估（技术）	maximum exposure evaluation (technique)
P_A	发生器提供的可用功率	power available from the generator
P_M	匹配传输线功率	power to matched transmission line
P_O	天线接收功率	power accepted by the antenna
P_R	天线辐射功率	power radiated by the antenna
PD	功率密度	power density
PEC	理想导电体	perfect electric conductor
RF	射频	radio frequency
SAM	特定拟人模型	specific anthropomorphic mannequin
SAR	比吸收率	specific absorption rate
SI	国际单位制	système international
STL	光固化成型	stereolithography

5 概述和本文件的应用

5.1 数值评估概述

本文规定了使用时域有限差分法（FDTD）或有限元法（FEM）的计算方法，评估在 6GHz~300GHz 频率下无线通信设备空间平均电磁功率密度的程序。功率密度评估分不同步骤进行，具体如下：

a）确定所需的评估项；

b）方法和适用的、经验证的计算软件包的选择；

c）待执行测试的定义；

d）数值 DUT 模型的建模和验证；

e）功率密度的评估；

f）不确定度的量化。

图 1 给出了这些步骤的高度概括以及详细介绍这些步骤的子章节。

本文件正文介绍了DUT功率密度数值评估所需的程序。评估应使用经验证的软件进行，以确保本文件的技术实施正确。附录中给出了描述数值仿真软件验证以及主要与软件制造商相关的补充程序。软件验证也可由本文件的使用者根据这些方法执行，例如作为DUT功率密度评估的一部分。

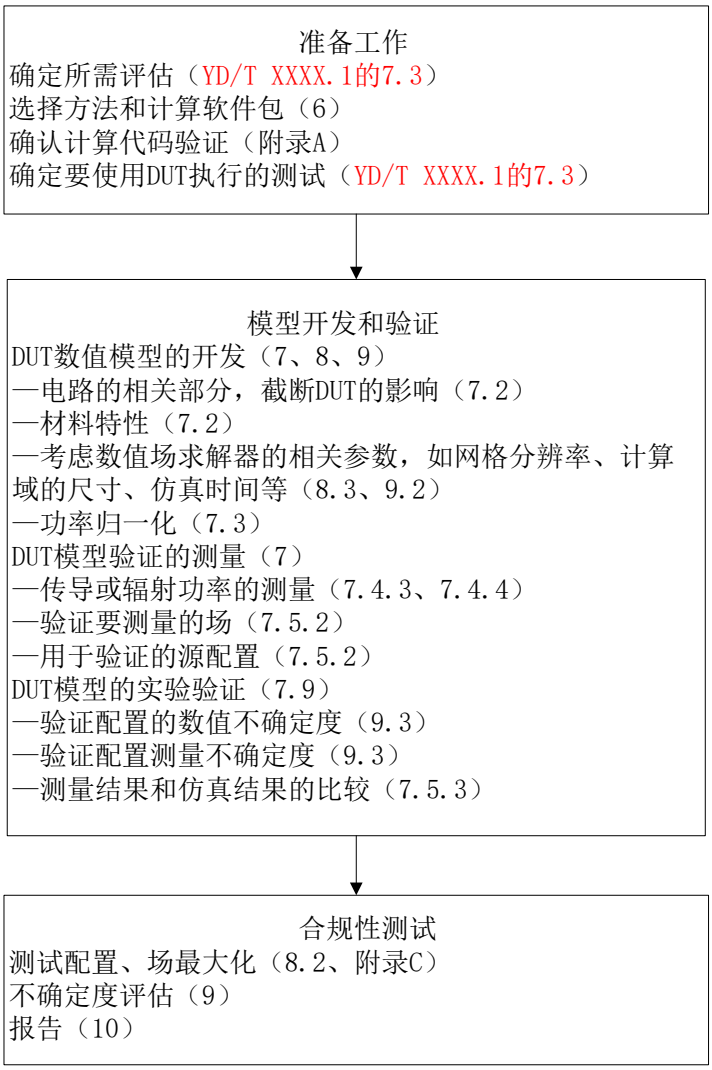


图1 功率密度数值仿真评估程序概述

5.2 本文件的应用

本文件和人体暴露于来自靠近人体头部和身体使用的无线设备的射频场的功率密度评估（频率范围 6GHz～300GHz） 第 1 部分：测量规程是同时制定的，为在 6GHz 至 300GHz 频率范围内使用的 5G

无线设备，对这类设备的入射功率密度相对暴露限值的符合性评估提供方案指导。本文件规定了数值仿真计算评估规程，人体暴露于来自靠近人体头部和身体使用的无线设备的射频场的功率密度评估（频率范围 6GHz～300GHz） 第 1 部分：测量规程规定了测量评估规程。

在技术报告 IEC TR 63170:2018[2]中记录了 10GHz 以上频率符合性评估测量程序的基础工作。同时，ICNIRP[2]和 IEEE ICES 的 TC95 修订了暴露指南，包括 6GHz 及以上频率范围的新的基本限值和参考限值。它们分别基于吸收（表皮）功率密度或入射功率密度，在 1 cm^2 或 4 cm^2 的面积上平均。

人体暴露于来自靠近人体头部和身体使用的无线设备的射频场的功率密度评估（频率范围 6GHz～300GHz） 第 1 部分：测量规程包含符合性评估测量方案应用的所有相关规范。虽然它可以独立于本文件应用，但它参考了功率密度平均和功率密度最大化的后处理方法，这些方法在本文件和人体暴露于来自靠近人体头部和身体使用的无线设备的射频场的功率密度评估（频率范围 6GHz～300GHz） 第 1 部分：测量规程中是通用的，并且仅在本文件中规定。同样，本文件也描述了计算仿真符合性评估。为了通过测量验证数值模型，需要使用人体暴露于来自靠近人体头部和身体使用的无线设备的射频场的功率密度评估（频率范围 6GHz～300GHz） 第 1 部分：测量规程的方法。

5.3 规定

由于制定本文件和人体暴露于来自靠近人体头部和身体使用的无线设备的射频场的功率密度评估（频率范围 6GHz～300GHz） 第 1 部分：测量规程的周期紧张，同时需要找到有关解释新暴露指南的实用选项，以评估是否符合新的限值。这些涉及平均区域的构造和该平均区域上的空间平均功率密度的计算。关于空间平均功率密度的计算，规定了不同的方法，以保证与根据 IEC TR 63170:2018[10]获得的暴露评估的兼容性，并考虑远场区域垂直入射以外的暴露条件。附件 F 讨论了各种选择及其理由。

这些选择不会损害本文件和人体暴露于来自靠近人体头部和身体使用的无线设备的射频场的功率密度评估（频率范围 6GHz～300GHz） 第 1 部分：测量规程中规定的方法对使用暴露导则规定的参考限值的符合性评估的适用性。

6 数值仿真软件的要求

本章描述了用于计算峰值空间平均功率密度（*psPD*）的数值软件的特性，第7，8，9章描述了软件的应用，附录A给出了软件正确执行的验证方法。这些特征包括：

a） 基于分别根据 IEC/IEEE 62704-1:2017 和 IEC/IEEE 62704-4:2020 中定义的 FDTD 或 FEM 方法的频域上的麦克斯韦方程组求解器。
b） 用于表示 DUT 电气相关部分和附近物体的建模环境和网格生成器，电场和磁场在指定的几何分辨率下呈现，仅受计算机可用内存限制。
c） 各向同性理想导体的表述。
d） 各向同性介质材料的表述，相对介电常数$\varepsilon_r \geq 1$，电导率$\sigma \geq 0$。
e） 单轴各向异性介电材料的表述，相对介电常数$\varepsilon_r \geq 1$，电导率$\sigma \geq 0$。
f） 金属导体中的各向同性电损耗$\sigma < \infty$，以金属薄片或细丝为代表。
g） 将频域仿真结果插值到计算域内的指定点。
h） 频域内针对指定数量的仿真结果，使用指定的复杂比例因子，对电场矢量和磁场矢量进行叠加，例如用于相控阵列天线波束控制的评估。
i） 在指定网格上指定数量的叠加仿真结果中，考虑电介质和金属导体损耗的耗散功率计算。
j） 使用可指定的复杂比例因子（包括 P_R 的评估）叠加可指定数量的仿真结果的远场方向图，例如用于相控阵列天线波束控制的评估。
k） 根据 8.5 计算 *sPD* 和 *psPD*。
l） 根据附录 C 计算 *mpsPD*。

也可以应用满足上述 a）至 l）的特性要求但同时提供额外的特性的扩展 FDTD 或 FEM，前提是这些扩展特性已经过充分验证，并且它们的实现已经过确认。这些替代方法应至少提供与 IEC/IEEE 62704-1:2017 和 IEC/IEEE 62704 4:2020 中规定的 FDTD 或 FEM 方法相同的精度。本文件中时域有限积分技术（FIT）可被视为 FDTD 的扩展。

注1：IEC/IEEE 62704-1:2017和IEC/IEEE 62704-4:2020规定了使用计算方法确定人体内峰值空间比吸收率的程序。

注2：IEC/IEEE 62704-1:2017和IEC/IEEE 62704-4:2020涵盖了FDTD和FEM在30 MHz到6 GHz频率范围内的应用。除

了两个标准中描述的代码验证外，还有大量科学文献验证了使用这两种数值方法在该频率范围内进行暴露评估的适用性。对于本文件所涉及的高达300GHz的扩展频率范围，很少有文献证明这两种方法的有效性。该频率范围的应用示例可在[3]中找到。通常，FDTD和FEM可以被认为是和固有频率无关的。如果计算域的离散化和要仿真的几何结构适当地考虑传统的离散化准则，则可以预期该方法与在已经进行实验验证的频率范围内具有相同的精度。计算域和几何体的适当离散化由不确定度评估（第9章）确定。

如果 DUT 的所有源和部件都包含在计算域中，则数值软件可以使用表面等效原理计算计算域外的电场和磁场（8.3）。如果软件使用表面等效原理进行场计算，则应根据 A.7 节进行验证

7 模型建立和验证

7.1 概述

在功率密度实验评估中，根据标准化规程使用已知不确定度的测量设备评估未修改的DUT。无线设备的数值仿真相较于测试配置或实际操作条件的建模更灵活，甚至当实验评估过于繁琐或在相关技术不可能实现的情况下，数值仿真尤为必要。应用数值方法评估功率密度相对于暴露限值的符合性的关键要求是使用实验方法验证DUT的数值模型。实验验证可以在比人体暴露于来自靠近人体头部和身体使用的无线设备的射频场的功率密度评估（频率范围6GHz～300GHz） 第1部分：测量规程的完整实验评估更简单的配置中进行。因此，在具有大量测试配置的情形下，可以使用数值方法对已经适当验证过的DUT模型进行评估，从而减少符合性验证的时间。在7.2、7.3、7.4和7.5中，规定了DUT建模和验证、测试设备和待执行测试的要求和建议。第9章描述了所用的不确定度评估方法。

7.2 DUT 数值模型的建立

用于功率密度评估的DUT数值模型的建立，需要根据在计算域中表达的细节的程度做出大量决策。由于现有设备数量众多，且该领域的技术创新水平较高，因此无法给出模型建立的通用指南。以下仅提供DUT模型的建立步骤：

a） DUT 的模型宜基于其原始 CAD 数据，以避免在对电介质或导体建模时出现错误或不准确。

注1：根据其CAD数据建立的DUT的数值模型可能需要对可用数据进行单独简化或扩展，因此此处无法对CAD数据和数据导入程序提出具体要求。根据7.5对数值模型的确认被视为用于本文件的模型与原始DUT一致的充分证明。

b） 所有导电部件应集成到 CAD 模型中，因为即使远离天线的导体也可能寄生耦合并充当辐射元。如果使用设备截断（见步骤 g）和 9.2.5），则应特别注意。

c） 考虑到频率依赖性，辐射元和射频传输线环境中所有主要部件的介电特性宜正确建模。宜尽可能记录有关介电特性的参考文献。

d） 如果各向异性电介质与其射频特性相关，则宜将其包括在 DUT 模型中。

e） 如果金属损耗与其射频特性或功率归一化相关，则宜将其包括在 DUT 模型中。

f） 如果馈电或匹配网络的场不限于封闭环境，则需要对其进行建模。否则，集总源可以直接放置在天线馈电点。对带有集成多频段天线的手持设备的仿真表明，对馈点匹配阻抗的仿真和测量数据通常很难获得良好的一致性。然而，将暴露评估结果归一化为 P_R 会产生令人满意的准确性[4]。

g） 计算机系统宜具有足够的计算资源（工作内存、处理器、存储器），以模拟整个 DUT 模型和评估表面。在某些情况下，DUT 模型可能会被截断。但宜注意不要截断模型的感应场。这应通过比较天线或天线阵列元件的输入反射系数或识别存储 DUT 无功能量的体积来证明。后者可通过比较局部 E 场和 H 场振幅之比与自由空间波阻抗来确定。截断模型的影响应在不确定度预算中说明。

h） 关于计算域尺寸的指南见 8.3。评估表面无需包含在计算域中，因为评估表面上的场可使用表面等效原理（8.3）进行计算。

i） 测试报告（第 10 章）应总结在 DUT 建模时是如何考虑以上建议的。

注2：关于DUT模型建立的其他指南参见[5]中的5.4。虽然[5]指的是使用FDTD方法仿真频率到6 GHz的手持设备，但[5]中的5.4可被视为具有足够的通用性，以提供超出其原始范围的指导，即在本文件考虑的频率范围内操作的设备以及将CAD模型导入仿真软件使用FEM的指导。

7.3 功率归一化

图 2 显示了 DUT 中的不同功率参考准面及其数值模型。源 P_A 处的可用功率经由传输线和/或匹配电路被引到天线，该匹配电路由于电路中的阻抗失配和可用功率在电路中的耗散而导致损耗（P_M），从而输出天线可接收到的输出功率 P_O。天线本身可能会发生额外损耗，因此 DUT 发出的功率称为辐射功率 P_R。所有功率相关量在 IEEE Std 145 中定义。

通常，DUT的数值模型具有简化的馈电或匹配网络，这可能导致：

a） 天线馈电点阻抗的特定偏差，

b） 交叉耦合表示的不准确，或

c） 在介质或传导传输损耗的差异。

虽然这些量在数值模型中始终可用，但它们不一定是实际DUT的精确表示。此外，DUT的馈电或天线端口可能无法用于传导功率测量。在一般情况下，只有DUT的EIRP或P_R可通过实验进行评估，以量化P_R（附录B）。

注：许多文件将P_R称为总辐射功率或TRP。

所有的量（坡印亭矢量、*PD*、*sPD*、*psPD*和*mpsPD*）均应归一化到辐射功率P_R 等级，以根据8.2评估数值功率密度，并验证7.2中所述的数值DUT模型。如果DUT的馈电或天线端口可用于传导功率测量，则辐射功率P_R可通过P_A或P_M计算，前提是DUT中的所有损耗均具有确定的不确定度。

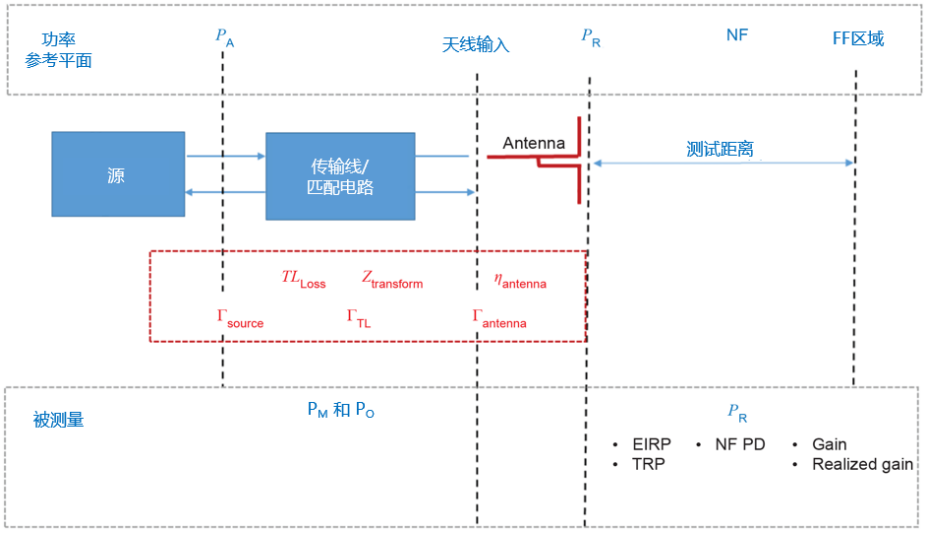


图2中关键点：

P_A	源处的可用功率
P_M	匹配传输线的功率
P_O	天线接收的输出功率
P_R	辐射功率
Γ_{source}	源的反射系数
Γ_{TL}	传输线或匹配电路的反射系数
$\Gamma_{antenna}$	天线的反射系数
$\eta_{antenna}$	天线效率
TL_{loss}	传输线中的功率损耗
$Z_{transform}$	传输线或匹配电路的传输矩阵
FF	远场
NF	近场

注：术语和符号遵循IEEE Std 145和第3章的定义。

图2 功率参考准面

7.4 模型验证的实验测试设备要求

7.4.1 概述

本文件仅规定了用于模型验证的测量设备的一般要求，目的是允许应用不同的测试仪器。测试仪器应符合人体暴露于来自靠近人体头部和身体使用的无线设备的射频场的功率密度评估（频率范围

6GHz～300GHz） 第1部分：测量规程第6章中与数值DUT模型验证相关的要求。人体暴露于来自靠近人体头部和身体使用的无线设备的射频场的功率密度评估（频率范围6GHz～300GHz） 第1部分：测量规程第6章规定了以下要求：

——实验室内的环境噪声和温度以及实验室墙壁的反射；
——场探头的动态范围、交叉耦合、物理尺寸和校准；
——校准从探头接收信号并准备由计算机系统进一步处理的测量仪器；
——单探头扫描系统的空间分辨率、精度和重复性；
——关于多探头系统空间分辨率的额外要求，如最小间隔距离；
——确定测量网格的算法的报告要求
——设备支架的材料特性和反射；
——根据本文件 8.5 的规范进行后处理。

为了进行模型验证，对DUT进行实验评估时，所用设备应能实现以下功能：

a） 直接评估 DUT 近场中的坡印亭矢量，无需应用任何空间平均；
b） 基于测量的 P_A、P_M 或 P_R 得到坡印亭矢量与 DUT 的 P_R 的相关性；
c） 评估整个实验评估链的不确定度预算。

7.4.2 环境条件和设备支架

测试场地的射频环境条件和设备支架的要求应分别遵循人体暴露于来自靠近人体头部和身体使用的无线设备的射频场的功率密度评估（频率范围6GHz～300GHz） 第1部分：测量规程的6.2和6.6，其中规定了环境噪声、实验室墙壁反射、室温限制和材料特性以及设备支架允许的反射要求。

7.4.3 功率测量

7.4.3.1 传导功率测量

如果方法可用，可根据传导功率评估辐射功率，传导功率可以基于源（放大器）输出（P_A）或传输线输出（P_M）或连接到天线的匹配电路的输出（P_O）的测量（详见图 2）。为了计算辐射功率，在这些测量过程中匹配电路、天线中的介质或传导的损耗无法量化，应基于最坏情况假设或第三方数据将其归为一体。在这种情况下，应给出适当的理由和参考。

所使用的测量设备应满足以下要求：

a） 评估 P_O、P_M 和连接器的反射系数以及 DUT 的传输线阻抗；
b） P_O、P_M，以及 DUT 被测信号频率和调制的反射系数测量的可溯源校准（B.2 节）；
c） 不确定度预算。

7.4.3.2 辐射功率测量

辐射功率测量可基于P_R或EIRP测量，并应满足以下要求[6]：

a） 评估自由空间中的 P_R 或 EIRP；
b） 针对 DUT 被测信号的频率和调制进行 P_R 测量的可溯源的校准；
c） 针对 DUT 被测信号的频率和调制进行 EIRP 测量的可溯源校准；
d） 根据 EIRP 计算 P_R 的天线增益的可溯源评估（B.3 节）；

注：天线增益信息可以通过仿真获得。

e） 不确定度评估。

当测量 P_R 时，直接获得 P_R 以及三维 EIRP 分布。当仅测量 EIRP 时，例如在发射波束的峰值方向，仅当天线增益及其不确定度已知时，才能计算 P_R。

7.5 DUT 模型验证的测试配置

7.5.1 概述

在7.5.2和7.5.3中，描述了验证DUT模型所需的试验以及仿真和实验结果的比较。在试验中，通过选择8.2中规定的配置，在一个表面上评估DUT近场中的电场或磁场。应根据模型验证所用测量系统的规范，通过坡印亭矢量或电场或磁场计算PD。所有结果应归一化到P_R等级。为了比较测量和仿真结果，应考虑对实验测试设备的要求（7.4），并验证DUT模型（7.5.3），应按照9.3评估仿真和测量不确定度。

7.5.2 待进行的试验

7.5.2.1 频段和天线配置

需在DUT可工作的每个频段的中心频率，对DUT的近场进行仿真和实验评估。对于每个可单独工作或控制的天线、天线阵列或子阵列，应在每个适用频段内进行一次验证仿真和测量。

7.5.2.2 近场评估

应按照以下步骤在矩形验证测量表面上的直线网格上测量和仿真 DUT 的功率密度：

a) 验证测量表面与 DUT 之间的距离应小于等于 8.3 中 DUT 与评估表面之间的最小距离。如果无法在该距离处进行测量，则应在考虑所用测量系统的限制和 DUT 的特殊特性的情况下，在最小可能距离处测量电场或磁场。应给出所选距离的原理。
b) 验证测量表面的横截面应完全包括计算域的横截面。
c) 应在测量点的位置，即测量网格上，评估坡印亭矢量。如果需要，可以使用插值方法确定所需位置的仿真结果，前提是在数值仿真不确定度 U_{sim} 中考虑了这些插值方法的不确定度。
d) 应将测量和仿真的 PD 归一化到 P_{R}，并计入天线的介质和传导损耗（7.4.3）。
e) 应根据第 9 章评估近场测量和仿真的不确定度。

7.5.3 确定 DUT 模型的有效性

应按照以下步骤对 DUT 的数值模型进行验证：

a) 将实验 *sPD* 归一化到测量的 P_{R} 等级上，记为 $\nu_{\text{ref},n}$。
b) 根据人体暴露于来自靠近人体头部和身体使用的无线设备的射频场的功率密度评估（频率范围 6GHz～300GHz） 第 1 部分：测量规程第 8 章表 3 确定近场评估的测量不确定度 U_{ref}。人体暴露于来自靠近人体头部和身体使用的无线设备的射频场的功率密度评估（频率范围 6GHz～300GHz） 第 1 部分：测量规程第 8 章表 3 总结了测量系统、DUT 和环境因素的不确定度分量。根据选定的功率基准面进行功率归一化的不确定度（见 7.3，附录 B）应视为人体暴露于来自靠近人体头部和身体使用的无线设备的射频场的功率密度评估（频率范围 6GHz～300GHz） 第 1 部分：测量规程第 8 章表 3 U_{ref} 评估中的附加条目。合成标准不确定度应在 95% 置信区间（k=2）评估。
c) 将仿真的 *sPD* 归一化到仿真 P_{R} 等级上，记为 $\nu_{\text{sim},n}$。
d) 根据 9.2 确定 PD 评估的数值不确定度 U_{sim}。
e) 在每个点 n，如果其 $\nu_{\text{ref},n}$ 或 $\nu_{\text{sim},n}$ 大于最大测量值或仿真值 $\max_n\left(\nu_{\text{ref},n},\ \nu_{\text{sim},n}\right)$ 的 5%，通过评估公式（3）验证该点处的测量值 $\nu_{\text{ref},n}$ 和仿真值 $\nu_{\text{sim},n}$ 之间的偏差是否在 U_{ref} 和 U_{sim} 的合成不确定度范围内

$$E_n = \sqrt{\frac{\left(\nu_{\text{sim},n}-\nu_{\text{ref},n}\right)^2}{\left(\nu_{\text{sim},n}\times U_{\text{sim},k=2}\right)^2+\left(\nu_{\text{ref},n}\times U_{\text{ref},k=2}\right)^2}} \le 1 \quad \cdots\cdots (3)$$

式中下标 ref 为实验参考结果。

如果偏差在合成不确定度范围内，即对于每个需要考虑的点都满足$E_n \le 1$，则DUT模型应视为有效。如果偏差不在预期不确定度范围内，则DUT模型无效，应进行修正。

7.5.4 附加 DUT 的试验简化

一系列类似的 DUT 可以简化模型验证，仅要求一部分 DUT 通过 7.5.2 中规定的全系列试验，前提是适用的国家法规可接受。某些模块或子组件可单独测试。此类验证结果可能适用于类似类型的其他 DUT。举例而言类似 DUT 的模型具有以下共同内容：

a) 相同的射频电路（发射机、天线馈电点、匹配器件等）；
b) 具有等效介电特性的类似介电材料；
c) 相同的天线和天线接地。

如果类似DUT的模型通过减少试验次数或共享验证结果进行验证，则应给出试验适用于各模块或子组件的理由，并应单独记录。对验证不确定度的任何影响应通过附加试验进行量化，并记录在不确定度评估中（第9章）。

8 功率密度计算和平均

8.1 评估表面

对于 6 GHz 以上的频率，人体暴露于电磁场的指南规定了特定区域平均面积 A_{av} 的空间平均功率密度的限值[7][8]。下文提到的表面指平均区域，该平均区域是评估表面的一部分。根据人体暴露于来自靠近人体头部和身体使用的无线设备的射频场的功率密度评估（频率范围 6GHz～300GHz） 第 1 部分：测量规程的 7.2.4，规定了以下不同的评估表面：

a) YD/T 1644.5[9]（人体暴露于来自靠近人体头部和身体使用的无线设备的射频场的功率密度评估（频率范围 6GHz～300GHz） 第 1 部分：测量规程的 7.2.4.2）中所述椭圆模型的平坦内表面；

注1：YD/T 1644.5第7.2.4.2节还规定了DUT与平面评估表面之间的距离。

b) 如果可以证明应用较小表面是合理的，则平面可以小于椭圆模型的内表面；

注2：如果DUT或其辐射元件小于椭圆模型，则可以证明应用小于椭圆模型内表面的表面。

c) 靠近耳部使用设备的特定拟人模型（SAM）内壳的修改版本表面[9]（人体暴露于来自靠近人体头部和身体使用的无线设备的射频场的功率密度评估（频率范围 6GHz～300GHz） 第 1 部分：测量规程的 7.2.4.3）；

注3：关于DUT相对于评估表面或模型的定位示例，见[9]的7.2.4。

d) 在身体其他区域或除耳部以外的头部区域工作的设备适用的特定评估表面，对于这些区域，应用上述平均区域之一可能会产生不适当的暴露评估（人体暴露于来自靠近人体头部和身体使用的无线设备的射频场的功率密度评估（频率范围 6GHz～300GHz） 第 1 部分：测量规程的 7.2.4.4 和 7.2.4.5）；

对于开放的评估表面，如[9]中所述的椭圆模型表面，表面法向矢量指向远离 DUT 的方向。对于闭合的评估表面，例如 SAM 模型内壳的修改版本，曲面法向矢量指向由曲面包围的体积内部。

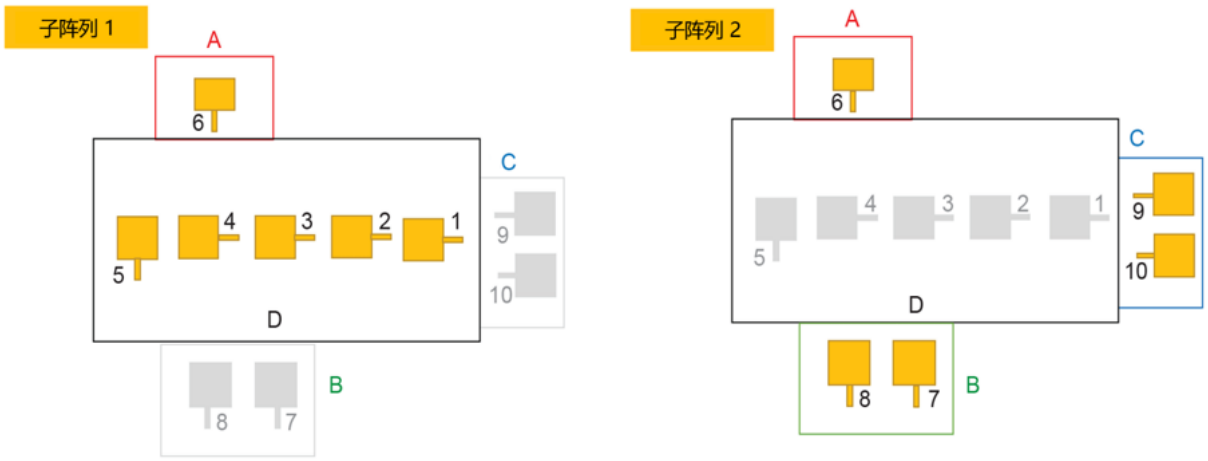
带有修改耳部的SAM模型内壳的坐标及其表面法线作为补充文件提供，见附录I。应对8.2中描述的所有测试配置的空间平均功率密度*sPD*进行评估。根据8.3、8.4、8.5、8.6计算*psPD*通常由数值软件自动执行。软件应符合8.6中规定的方法，并应根据附录A进行验证。

8.2 待执行的测试和 DUT 配置

8.2.1 概述

应根据人体暴露于来自靠近人体头部和身体使用的无线设备的射频场的功率密度评估（频率范围 6GHz～300GHz） 第 1 部分：测量规程的 7.3.1 和 7.3.2 选择要执行的测试，并适当建模。人体暴露于来自靠近人体头部和身体使用的无线设备的射频场的功率密度评估（频率范围 6GHz～300GHz） 第 1 部分：测量规程第 7.3.1 节规定了频段、评估表面和待评估天线配置。

8.2.2中规定了评估单个辐射元件或不同时工作的天线阵列或子阵列（多个辐射元件）设备*psPD*的具体指南。通常，对于具有多个辐射元件或天线阵列或子阵列的设备，8.2.3和8.2.4中规定了*mpsPD*的评估。图3显示了不同天线子阵列配置中辐射原件的示例配置。



子阵列名称	元件数量	辐射元件[数量][位置][编号][极化]
子阵列1	6	[1][A][6][1V]+[5][D][1-5][4H+1V]
子阵列2	5	[1][A][6][1V]+[2][B][7-8][2V]+[2][C][9-10][2H]

图3　同一 DUT 上不同天线子阵列的辐射元件配置示例

8.2.2　具有单辐射元件或不同时工作的多辐射元件的设备

对于具有单个辐射元件或不同时工作的天线阵列或子阵列（多个辐射元件）的 DUT，特定测试配置的 *psPD* 应按如下方式评估：

a）　仿真 DUT 的场分布，并根据 8.3、8.4、8.5、8.6 分别计算每个激活辐射元件的 *psPD*；

b）　将每个 *psPD* 归一化至其 P_R 功率等级（7.3）；

c）　报告所有评估元件的 *psPD*。

8.2.3　具有天线阵列或子阵列的设备

具有天线阵列或子阵列的设备的*mpsPD*评估如图4所示。应分别仿真每个信道和每个天线的*sPD*。然后，应采用附录C所述的最大化技术，通过叠加n_e个仿真场来确定*mpsPD*。

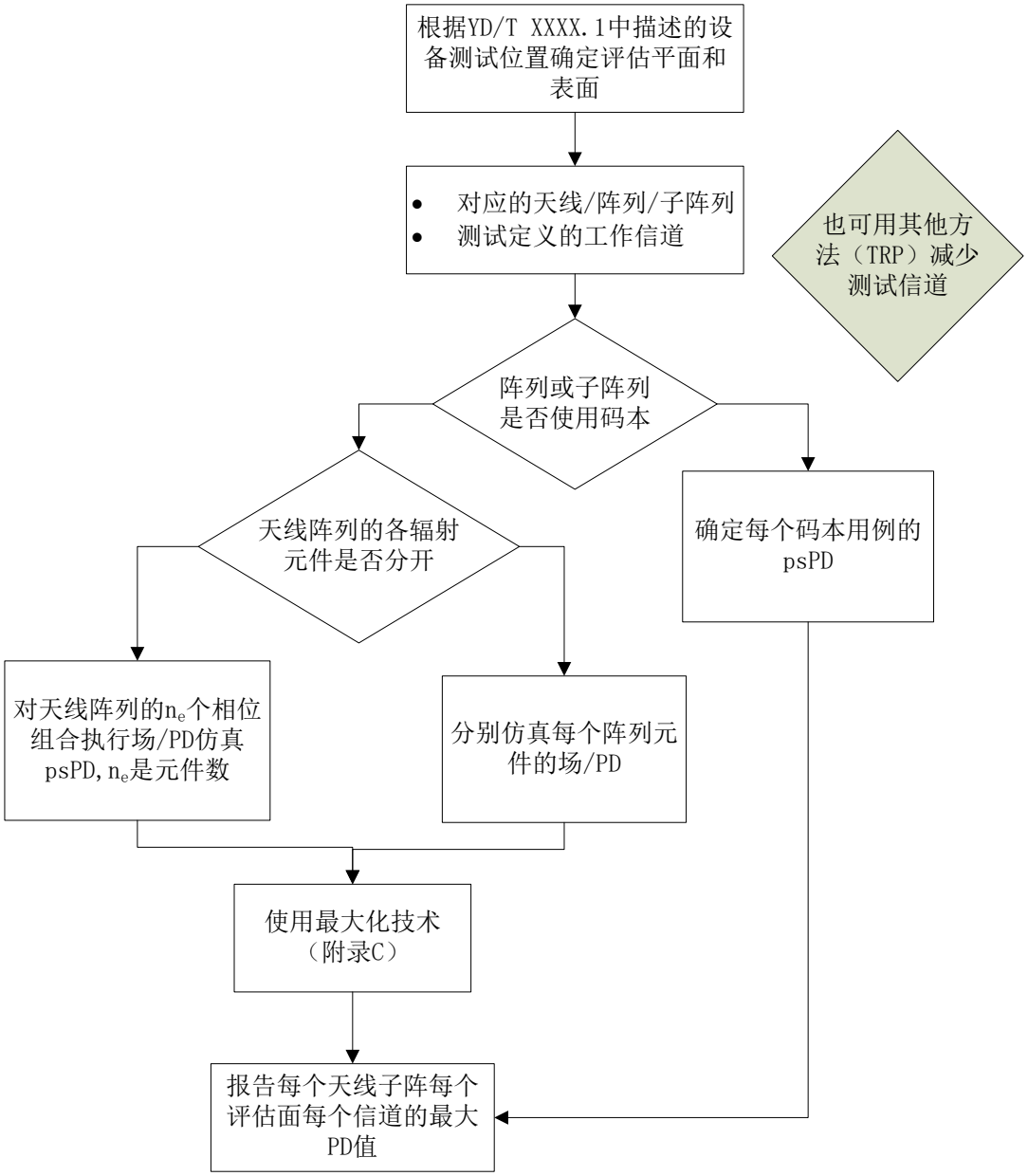


图4　8.2.3 中所述具有天线阵列或子阵列的 DUT 功率密度评估流程图

8.2.4　具有多天线或多发射器的设备

具有多个不相关天线或多个可在不同频率范围内独立工作的发射器或源的设备应额外考虑以下要求。应根据人体暴露于来自靠近人体头部和身体使用的无线设备的射频场的功率密度评估（频率范围6GHz～300GHz） 第1部分：测量规程的7.5的定义合成暴露并报告总暴露比。如果计算总暴露比时需要进行SAR评估，则可采用数值或实验SAR结果。数值仿真SAR评估应遵循IEC/IEEE 62704-1:2017或IEC/IEEE 62704-4:2020的程序，SAR测量应遵循[9]的程序。

8.3　计算域的评估表面和尺寸的考虑

对于 *psPD* 的计算，评估表面不需要完全包含在计算域中。评估表面上的场分量直接通过计算方法或应用表面等效原理的展开技术进行计算。应根据人体暴露于来自靠近人体头部和身体使用的无线设备的射频场的功率密度评估（频率范围 6GHz～300GHz） 第 1 部分：测量规程的 7.2.4 对 DUT 的评估表面进行定位。详见 8.1。

在 DUT 的远场中，*psPD* 可能出现在主波束方向。在近场中，它可能位于 DUT 表面上方的任何位

置。根据场分布、场模式的动态范围和计算域的尺寸，吸收边界条件可能会为 *psPD* 的评估引入显著的不确定度，这些不确定度在数值不确定度预算（9.2.3）中予以考虑。应用表面等效原理确定的计算域以外的场也受到相同的数值不确定度来源的影响。

如果评估表面未完全包括在计算域中，且使用表面等效原理评估E场和H场，则选择计算域时应确保DUT的反应近场不会被吸收边界条件截断。反应近场的扩展事先是未知的。因此，计算域的尺寸应由一系列增加计算域尺寸的仿真确定。通过比较局部E场和H场振幅之比与自由空间波阻抗，可以确定近场的尺寸。

8.4 评估表面上功率密度的平均

8.4.1 概述

psPD 被评估为 *sPD* 的绝对最大值，该值是在给定尺寸和形状的平均面积的评估表面上计算。8.1 中规定了评估表面。对于 *sPD* 的计算，通过一个表面的功率由平均面积 A_{av} 内表面 $\hat{A}$ 上功率密度 PD 的数值积分计算。平均面积 A_{av} 的大小在暴露指南[7]、[8]中分别规定为 1 cm^2 或 4 cm^2，具体取决于 DUT 的工作频率。根据评估表面的形状，应用两种不同的方法来构建平均区域：

a) 如果评估表面完全是平面的，则平均区域的形状为边长为 $a_{av} = \sqrt{A_{av}}$ 的正方形。方形平均面积应完全包含在评估表面中。详见 8.4.2.1。

b) 如果评估表面不完全是平面，则将平均区域构造为评估表面与具有半径为 $r_{av} = \sqrt{A_{av}/\pi}$ 的球体的交集。球体的中心点是评估表面上的一个点，面积 $\hat{A}$ 是球体中包含的评估表面区域。$\hat{A}$ 的面积与平均面积 A_{av} 可能不同。

注1：通常，方形平均面积应用于由平坦模型定义的表面上。与球体的交集会应用在如SAM头部的内壳上平均时。

注2：本文件中使用正方形平均的平面评估表面平均算法规定与暴露指南[7] [8]中定义的平均区域形状定义一致。虽然指南预见了在非平面评估表面上应用正方形平均面积，但需要注意的是，非平面评估表面用球体构造平均面积形状能使算法更简单。预计在本文件的后续修定版中会规定基于旋转立方体的非平面评估表面的平均算法。这种算法将产生近似于非平面评估表面上正方形形状的平均面积。附录G中给出了规范建议。

整个或部分评估表面可能包含在计算域中。计算域外评估表面上的电场和磁场应使用表面等效原理计算。

8.4.2 在评估表面上构造平均区域

8.4.2.1 平面评估表面

对于平面评估表面上的 *sPD* 评估，平均面积应为围绕每个中心点的正方形，边长为 $a_{av} = \sqrt{A_{av}}$ 。中心点是三角化评估表面的顶点，正方形应完全包含在评估表面中。

注：IEC TR 63170:2018[2]指定了与球体或圆的交集。

应对评估表面进行三角化剖分。三角形的边长不得超过 d_T，d_T 应为 1mm 或 $\lambda/10$（取较小者）。应以不大于 5°的步长围绕其中心点旋转正方形，以便找到使穿过正方形的功率最大化的方向。如果任一旋转角度下正方形的任何顶点位于评估表面之外，则不得计算正方形中心点的 *sPD*，即使在一个或多个旋转角度下正方形完全包含在评估表面中。

三角剖分点可能与笛卡尔网格的节点重合。作为三角剖分的替代方法，可将评估表面细分为具有最大边长 d_T 的矩形。

D.1给出了在平面评估表面上构建平均面积的示例算法。应根据A.6.2中规定的功率密度平均算法的基准对算法应用进行确认。

8.4.2.2 非平面评估表面

对于非平面评估表面上的 *sPD* 评估，可以使用任意三角剖分算法对评估表面进行三角剖分。三角形的边缘长度不得超过 d_T，d_T 应为 1mm 或 $\lambda/10$（取较小者）。应借助固定尺寸和半径为 $r_{av} = \sqrt{A_{av}/\pi}$ 的球体，围绕评估表面上的每个中心点构建平均区域。中心点是三角评估表面的顶点。

包含中心点的球体横截面面积的大小为 A_{av}。然后，应通过确定球体中包含的评估表面面积来评估 *sPD*（图 5）。只有通过完全位于球体内部的其他三角形连接到包含中心点的三角形时，才应考虑这些三角形的平均值。如果三角形共享一个顶点，则认为它们是连通的。

注：通过球体中包含的三角形将平均区域的所有三角形连接到包含中心点的三角形，可防止在其他情况下出现不相交的平均区域（例如，在相邻指状区域）。

D.2给出了在非平面表面上构建评估区域的示例算法。应根据A.6.3中规定的功率密度平均算法的基准对算法进行确认。

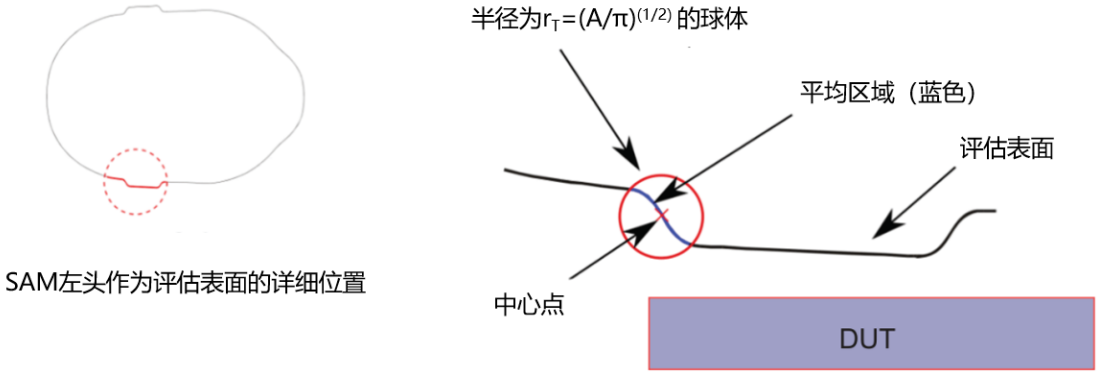


图5　根据 8.4 在具有固定半径的球体内构造平均面积的示例

8.5　通过坡印亭矢量积分计算 *sPD*

8.5.1　概述

sPD 是在位置 *r* 作为复坡印亭矢量 *S* 的函数进行评估。根据电磁场的极化和主要的入射方向，或者 DUT 暴露于近场的情况，8.5.2、8.5.3 和 8.5.4 基于功率密度的不同规范制定了 *sPD* 的计算公式。8.5.2、8.5.3 和 8.5.4 表达式的被积函数中的加权函数通过将这些区域的被积函数按比例缩小到零，来避免评估表面上功率密度向外分布的区域的贡献，或者由于与坡印亭矢量方向几乎平行的表面的数值不准确而产生的贡献。

注1：积分通过加权函数按比例缩小或设置为零的三角形（8.4.2）区域完全贡献给平均区域。

注2：IEC TR 63170:2018[2]不考虑坡印亭矢量相对于评估表面的方向。这相当于将8.5.2和8.5.3中表达式的加权函数设置为1。

注3：用于计算PD的表达式取决于适用的暴露指南或国家法规。

8.5.2　评估表面沿表面法线传播方向的入射功率密度 - sPD_{n+}

应根据公式（4）计算评估表面沿表面法线传播方向的入射功率密度sPD_{n+}。

$$sPD(\boldsymbol{r}_0)=\frac{1}{\hat{A}(\boldsymbol{r}_0)}\int_{A(\boldsymbol{r}_0)}\Re\{\boldsymbol{S}(\boldsymbol{r})\}\cdot\boldsymbol{n}_A(\boldsymbol{r})\cdot\Theta\left[\Re\{\boldsymbol{S}(\boldsymbol{r})\}\cdot\boldsymbol{n}_A(\boldsymbol{r})\right]d\hat{A}(\boldsymbol{r}) \quad \cdots\cdots (4)$$

式中：

$\Re\{\boldsymbol{S}(\boldsymbol{r})\}$　是在位置 *r* 的复坡印亭矢量 *S* 的实部，

$\boldsymbol{n}_A(\boldsymbol{r})$　是在位置 *r* 评估表面的法向量，其指向评估表面同时$\|n_A(r)\|=1$，

$\Theta(x)$　是 x 的亥维赛（heaviside，单位阶跃）函数，

$\hat{A}(\boldsymbol{r}_0)$　是直接连接到位置 *r* 的正方形或球体和评估表面的横截面；即用于计算位置 *r* 处 *sPD* 的球体内三角形面积之和，

$\boldsymbol{r}_0$　是中心点的位置。

注1：在IEC TR 63170:2018[10]中定义的评估表面的表面法线传播的功率密度，对应$\Theta(x)=1$时的sPD_{n+}。

注2：公式（4）相当于通过表面*A*的功率密度，也就是通过面积A_{av}表面的单位时间和单位面积的能量。

8.5.3　评估表面总入射功率密度 - sPD_{tot+}

在评估表面的总入射功率密度（sPD_{tot+}）应使用公式（5）连同公式（6）、公式（7）来计算。

$$sPD(\boldsymbol{r}_0)=\frac{1}{\hat{A}(\boldsymbol{r}_0)}\int_{A(\boldsymbol{r}_0)}\left\|\Re\{\boldsymbol{S}(\boldsymbol{r})\}\right\|\cdot\Xi\left\{\cos^{-1}\left[\boldsymbol{n}_R(\boldsymbol{r})\cdot\boldsymbol{n}_A(\boldsymbol{r})\right]\right\}d\hat{A}(\boldsymbol{r}) \quad \cdots\cdots (5)$$

$$\boldsymbol{n}_R(\boldsymbol{r})=\Re\{\boldsymbol{S}(\boldsymbol{r})\}/\left\|\Re\{\boldsymbol{S}(\boldsymbol{r})\}\right\| \quad \cdots\cdots (6)$$

$$\Xi(\theta)=\begin{cases}1, & 0\le\theta<85^\circ\\ 1-(\theta-85^\circ)/5^\circ, & 85^\circ\le\theta<90^\circ\\ 0, & \theta\ge 90^\circ\end{cases} \quad\cdots\cdots(7)$$

$\left\|\Re\{\boldsymbol{S}(\boldsymbol{r})\}\right\|$是复波印亭矢量 S 在位置 r 处的实部幅值，其他符号如 8.5.2 所述。

注1：在IEC TR 63170:2018[10]中定义的评估表面的总传播功率密度，对应Ξ(x) = 1时的sPD_{tot+}。

注2：公式(5)相当于表面A坡印亭矢量实部的大小，即对公式(4)结果的高估。

8.5.4 考虑感应近场效应的评估表面总入射功率密度 – sPD_{mod+}

sPD_{mod+}基于总功率密度，同时还考虑了坡印亭矢量的虚部以计入在感应近场区域的非传播能量。其应按公式8计算。

$$sPD(\boldsymbol{r}_0)=\frac{1}{\hat{A}(\boldsymbol{r}_0)}\int_{A(\boldsymbol{r}_0)}\left[\left(\left\|\Re\{\boldsymbol{S}(\boldsymbol{r})\}\right\|\cdot\Xi\left\{\cos^{-1}\left[\boldsymbol{n}_R(\boldsymbol{r})\cdot\boldsymbol{n}_A(\boldsymbol{r})\right]\right\}\right)^2+\left(\left\|\Im\{\boldsymbol{S}(\boldsymbol{r})\}\right\|\right)^2\right]^{1/2}d\hat{A}(\boldsymbol{r})\quad\cdots\cdots(8)$$

式中：$\left\|\Im\{\boldsymbol{S}(\boldsymbol{r})\}\right\|$是复波印亭矢量 S 在位置 r 处的虚部幅值，其他符号如 8.5.2 和 8.5.3 所述。

注：公式(8)相当于表面A坡印亭矢量(实部和虚部)的大小，即对公式(4)和公式(5)结果的高估。

8.6 软件

根据 8.4 实现功率密度平均的软件应参考本文件[7] [8]，如果适用，还应参考[10]。在其图形用户界面或命令行界面中，软件应提供以下平均选项：

a) 平均面积的构造基于：
   - “sq”：用于平面评估表面的旋转正方形（8.4.2.1）
   - “circ”：用于非平面评估表面的球体（8.4.2.2）

b) *sPD*的计算基于：
   - sPD_{n+}(“area” / “circ” 或者“sq”)：评估表面沿表面法线传播方向的入射功率密度，平均“面积”单位为cm^2（例如1 cm^2或4 cm^2），通过与球体（circ）或立方体（sq）交集获得（8.5.2）
   - sPD_{tot+}(“area” / “circ” 或者“sq”)：直接进入模型的总传播功率密度，平均“面积”单位为cm^2（例如1 cm^2或4 cm^2），通过与球体（circ）或立方体（sq）交集获得（8.5.3）
   - sPD_{mod+}(“area” / “circ” 或者“sq”)：平均 “面积”单位为cm^2（例如1cm^2或4cm^2），通过与球体（circ）或立方体（sq）交集获得（8.5.4）

软件图形用户界面中的选项应根据上述列表进行标示。命令行界面中的功能应参考本文件各章节进行记录。

如果平均面积A_{av}的选定尺寸不符合[7]、[8]或本文件定义的1 cm^2或4 cm^2，或评估频率不符合，或在非平面表面上应用了平面平均，或者在平面表面上应用了非平面平均，则软件应显示警告消息。附录D给出相应示例。

9 不确定度评估

9.1 概述

数值仿真不确定度评估程序基于 IEC/IEEE 62704-1:2017 和 IEC/IEEE 62704-4:2020 的程序，并根据本文件的特殊要求进行了调整，同时考虑了 FDTD 和 FEM。具体包括仿真数值参数的不确定度评估（9.2）、DUT 数值表征的不确定度评估（9.3）和 *psPD* 最大化的不确定度评估（9.4）。

在a）根据7.5.3进行数值模型验证和b）评估*mpsPD*的整体不确定度时，需要评估因为9.2中给出的仿真参数而带来的DUT数值表征的不确定度。因此，9.2中的程序同时适用于*sPD*和*mpsPD*的评估。

9.2 仿真参数引入的 *sPD* 和 *mpsPD* 的不确定度

9.2.1 仿真参数的不确定度贡献

表1规定了仿真参数对验证设置或测试设置结果贡献的不确定度概算。9.2.2、9.2.3、9.2.4、9.2.5、9.2.6、9.2.7和9.2.8中描述了如何量化不确定度分量的详细信息。

表1　验证设置或测试设置仿真算法的不确定度贡献概算

a	b	c	d	e	f	g	h
不确定度分量	章节	公差 %	分布类型	除数	c_i	不确定度 %	v_i 或 v_{eff}
网格分辨率	9.2.2		N	1	1		
吸收边界条件	9.2.3		N	1	1		
功率预算	9.2.4		N	1	1		
模型截断	9.2.5						
收敛	9.2.6		R	1,73	1		
DUT 介电特性	9.2.7		N	1	1		
有损导体	9.2.8		R	1,73	1		
合成标准不确定度							
应根据 DUT 的仿真结果填写 c、g 和 h 列。 注 1：列标题 a 至 h 仅供参考。 注 2：表 1 中使用的缩写：N、R－正态分布、矩形分布 注 3：除数是概率分布（d）和自由度（v_i 和 v_{eff}）（h）的函数。 注 4：c_i 是用于将不确定度分量的方差转换为 *sPD* 或 *mpsPD* 方差的灵敏度系数。							

9.2.2　网格分辨率

9.2.2.1　FEM 网格

网格密度对结果的准确性有重大影响；因此，需要将使用特定初始网格 M 生成的 *sPD* 和 *mpsPD* 结果与使用更密集网格 *M′* 生成的结果进行比较。根据 FEM 代码是否采用自适应网格细化，应采用下列两种策略之一进行评估：

a) 如果应用的 FEM 代码未采用自适应网格细化，考虑到电介质中的相应波长，用于初始网格 M 的每个波长的网格数量应至少增加 50%。

b) 如果应用的 FEM 代码采用自适应网格细化，则应执行额外的自适应过程，直到第二或第三阶低的网格数量增加至少 20%，最低阶的网格数量增加至少 50%。

在这两种情况下，应在预期*sPD*或*mpsPD*最大值的区域记录PD。密集网格*M'*在该区域以及天线周围区域的最小和最大边缘长度应小于等于相应*M*网格边缘长度的50%。网格*M'*区域内*sPD*或*mpsPD*最大值的位置与网格*M*相应区域内E场最大值位置的偏差不得超过最小网格边缘长度。最大*sPD*或*mpsPD*偏差应记录在表1中，假设其为矩形概率分布。

9.2.2.2　FDTD 网格

网格分辨率的影响应通过将网格单元的数量增加到原始仿真的两倍来确定。应在 *sPD* 或 *mpsPD* 最大值的区域应用网格数量增加的网格细化。密集网格 *M'*在该区域以及天线周围区域的最小和最大边缘长度应小于等于相应 *M* 网格边缘长度的 50%。网格 *M'*区域内 *sPD* 或 *mpsPD* 最大值的位置与网格 *M* 相应区域内 E 场最大值位置的偏差不得超过最小网格边缘长度。

最大*sPD*或*mpsPD*偏差应记录在表1中，假设其为正态概率分布。

9.2.3　吸收边界条件

吸收边界条件的影响应通过在所有方向上将边界向外移动 λ/4来确定。最大*sPD*或*mpsPD*偏差应记录在表1中，假设其为矩形概率分布。

注：边界上最大电场或磁场的位置可以对应于辐射结构的主波束或其感应场。

9.2.4　功率预算

馈入计算域的功率应在源（P_{M}或P_{O}）处记录。应记录计算域中有耗电介质、有耗导体和无源元器件吸收的和辐射到吸收边界的总功率，并与P_{M}或P_{O}进行比较。最大偏差应记录在表1中，假设其为正态概率分布。

当仿真多个源同时工作的设备时，建议分别激励每个端口，同时使用参考阻抗加载没有激活的端口，以便计算多端口系统的完整S矩阵。因此，给定激励矢量的psPD和功率预算可以通过叠加任何激励矢量和负载的场来计算。详细信息参见例[10]。

9.2.5 模型截断

模型截断对*sPD*或*mpsPD*的影响应通过与非截断模型的适当比较进行评估。参见7.2中的步骤g）。

9.2.6 收敛

9.2.6.1 频域 FEM 求解器

对于FEM网格，收敛不确定度已经包含在网格分辨率不确定度中（9.2.2）。不应计算额外的不确定度贡献。

9.2.6.2 谐波激励下的 FDTD 仿真

应在最大*sPD*或*mpsPD*所在区域记录时域上的电场矢量分量。应在每个时间步长计算矢量的绝对值。对于充分收敛的仿真，电场平方绝对值的最后三个局部最大值（时域信号）与其平均值的偏差不得大于2%，且应在相同体素中找到最大值。如果仿真无法运行足够长的时间以达到小于2%的偏差，则应在试验报告中说明原因，解释为什么在测试的特定应用中使用宽松公差，以排除仿真的错误配置，即收敛对目标量的贡献程度。

9.2.6.3 宽带激励下的 FDTD 仿真

对于通过傅里叶变换评估*sPD*或*mpsPD*的宽带仿真，使用具有脉冲形状包络的信号进行激励。应按照9.2.6.2所述，在时域中记录电场分量。如果在多个频率下评估*sPD*或*mpsPD*，则应考虑目标量位置处的频率相关变化。为了评估不确定度，应通过增加窗口长度t_w计算时域信号的离散傅里叶变换（DFT），t_w从t_0=0开始，到t_w=1.25×n×T结束。T是评估频率的周期，n是一个整数，增加该整数，直到t_w达到仿真结束时间或达到收敛极限为止。对于充分收敛的仿真，在评估频率下的DFT结果的最后两个平方绝对值与其平均值的偏差不得大于2%。如果仿真无法运行足够长的时间以达到小于2%的偏差，则应在测试报告中说明原因，解释为什么在测试的特定应用中使用宽松公差，以排除仿真的错误配置。

9.2.6.4 报告收敛不确定度

偏差应在表1中记录为矩形概率分布的不确定度。

由于*sPD*或*mpsPD*的位置通常事先未知，建议选择足够大的相关区域，以避免重复仿真。使用更粗的网格或简化的几何体进行仿真有助于节省在识别用于记录信号的相关区域时的计算消耗。

9.2.7 介电特性

DUT模型的介电特性通常受其规格不确定度的影响。这些不确定度对*sPD*或*mpsPD*的影响应通过应用最小和最大电导率和介电常数（四种不同的组合）进行评估。应根据介电特性参考文件（如数据表、出版物）中报告的不确定度选择最小值和最大值。为了避免对具有大量不同电介质的结构进行过多的仿真，可将电导率和介电常数的变化限制在大部分电磁能量被限制或吸收的区域，或可采用先进的统计方法对不确定度进行量化。在这种情况下，应给出适当的理由。偏差应在表1中记录为正态概率分布的不确定度。

9.2.8 有损导体

DUT导体的有限导电率应根据其规格而变化。应通过应用DUT所有导体的最小和最大导电率（两次仿真）来评估这些不确定度的影响。最小值和最大值应根据导体参考文件（如数据表、出版物）中宣称的不确定度进行选择。偏差应在表1中记录为矩形概率分布的不确定度。

9.3 DUT 模型数值表征的不确定度贡献

DUT模型的数值表征的不确定度贡献应通过在近场中验证测量平面（7.5.2.2）的距离上的平面内的PD分布的实验和仿真评估来确定，平面的横截面与评估表面大小相同，至少评估100个点，直线网格上的步长不大于 λ/4。根据公式（9）评估不确定度。

$$U_{\mathrm{d}}[\%]=100\times\max_{n}\left\{\frac{\left|\nu^2_{\mathrm{meas},n}-\nu^2_{\mathrm{sim},n}\right|}{\max\left(\max_{n}\left|\nu^2_{\mathrm{meas},n}\right|,\max_{n}\left|\nu^2_{\mathrm{sim},n}\right|\right)}\right\} \quad (9)$$

式中：

$v^2_{meas,n}$ 是位置 *n* 处通过实验测定的 PD 或其准确的参考解；

$v^2_{sim,n}$ 是位置 *n* 处仿真确定的 PD。

注：本节所述的网格步长是指测量网格。对于仿真评估，通常需要更细的网格。

描述此通用方法具体应用的仪器和/或适当测量标准的参考文件宜提供足够的详细信息，以帮助确保参考配置设置的正确性。其不确定度应在表2中报告。

表2 DUT 建模的不确定度预算

a	b	c	d	e	f	g	h
不确定度分量	章节	公差%	分布类型	除数	c_i	不确定度	v_i 或 v_{eff}
DUT 模型（近场分布）	9.3		N	1	1		
测量设备和程序	根据制造商规格和/或应用的方法（包括传导或辐射功率测量）（7.4.3）		N	1	1		
合成标准不确定度（*k*=1）							
应根据 DUT 仿真结果填写 c、g 和 h 列。 注 1：列标题 a 至 h 仅供参考。 注 2：表 2 中使用的缩写：N－正态概率分布 注 3：除数是概率分布（d）和自由度（v_i 和 v_{eff}）（h）的函数。 注 4：c_i 是用于将不确定度分量的方差转换为 *sPD* 或 *mpsPD* 方差的灵敏度系数。							

9.4 最大暴露评估的不确定度

对于相对较小的码本，此时应使用穷举法，最大暴露评估的不确定度为零。

对于太大而不宜使用穷举法的码本，使用附录C中描述的混合优化方法。优化应在随机初始条件下重复十次。每次应记录*mpsPD*。然后，应使用公式（10）计算场最大化的评估不确定度。

$$U_{\mathrm{m}}[\%]=100\times\left\{\frac{\max\limits_{i=[1,10]}\{mpsPD_i\}-\min\limits_{i=[1,10]}\{mpsPD_i\}}{\max\limits_{i=[1,10]}\{mpsPD_i\}}\right\} \quad (10)$$

式中 $mpsPD_{\mathrm{i}}$ 是优化器在第 *i* 次运行时发现的最大 *psPD*。

9.5 不确定度列表

总数值仿真不确定度概算应根据表1和表2的贡献进行计算，并应如表3所示进行汇总。可达到的最小不确定度取决于特定暴露情况可建模计算的精细程度。例如，DUT的介电特性或导体损耗可能会产生相对较高的不确定度。

注：编制本文件时可用的应用示例表明，预期的不确定度水平与IEC/IEEE 62704-1:2017第7.4条注释中所示的不确定度水平相似，即在20%（*k*=2）量级。可接受的不确定度水平取决于应用。本文件的修订版本将根据应用案例和公布的数据提供可接受不确定度更可靠的值。

表3 数值仿真不确定度概算

a	b	c	d	e	f	g	h
不确定度分量	章节	公差%	分布类型	除数	c_i	不确定度	v_i 或 v_{eff}
关于仿真参数的测试设置	9.2		N	1	1		
测试设置的数值模型	9.3		N	1	1		
场最大化	附录 C		N	1	1		
合成标准不确定度（k=1）							
扩展不确定度（k=2）							

z根据表 1 和表 2 的结果填写 c、g 和 h 列。
注 1：列标题 a 至 h 仅供参考。
注 2：表 3 中使用的缩写：N－正态概率分布。
注 3：除数是概率分布（d）和自由度（ ν_i 和 ν_{eff}）（h）的函数。
注 4：c_i 是用于将不确定度分量的方差转换为 *mpsPD* 方差的灵敏度系数。

10 报告

试验报告应包含 DUT 建模及模型验证、进行的试验及其相对于适用的暴露标准的结果以及不确定度预算的所有步骤的说明。应详细描述这些步骤以至于能够独立再现 DUT 建模和数值仿真评估。具体而言，测试报告应包含以下部分：

a）概述
1）测试实验室的名称；
2）符合性要求：如测试标准、暴露指南等；
3）适用暴露限值：如 ICNIRP、IEEE/ICES[7]、[8]等；
4）用于 *mpsPD* 评估的评估平面和 *sPD* 公式（见 8.3、8.4、8.5、8.6）；
5）用于测试的仿真软件的标识，包括版本号和符合本文件的声明；
6）*mpsPD* 仿真算法的标识。

b）DUT 的描述
1）DUT 的标识，包括硬件和软件版本号、序列号；
2）DUT 的形状说明及其预期功能的简要说明；
3）DUT 工作模式的说明，如频段、功率、波束赋形选项、码本（如适用）等；
4）用于 DUT 建模的技术文件，如 CAD、数据、电路图、数据表等的说明。

c）DUT 建模
1）需建模和不需建模的 DUT 部件概述，不需建模的部件的原因说明；
2）描述源的建模、阻抗匹配、射频信号路径和天线；
3）应用的介电材料特性列表以及参考文件或其值的基本原理（如果没有合适的参考文件）；
4）仿真设置，例如网格分辨率、收敛判据、计算域的尺寸、边界条件等。

d）DUT 模型的验证
1）所执行测试的说明以及选择测试的理由；
2）测量仪器；
3）测量设置和协议；
4）测量和仿真结果的表格和图形比较，包括 DUT 模型在 *sPD* 评估中的适用性说明；
5）为 DUT P_{R} 选择的功率参考面，选择的基本原理和计算 P_{R} 所需的假设；
6）根据 7.5.4 减少相似 DUT 验证试验次数的说明和理由；
7）DUT 模型验证的实验和仿真不确定度预算。

e）执行的测试和结果
1）根据 8.2 执行的测试的说明（位置、评估表面等）；
2）评估 *mpsPD* 的适用方法（场最大化技术、优化、码本等）；
3）将计算结果归一化到 DUT 输出的功率等级；
4）测试的所有频段和波束方向列表；
5）测试位置、频段、工作模式和设备配置上的 *mpsPD*，包括

i）测量（实验评估）期间 DUT 的总辐射功率 P_R（数值评估）；

ii）激励矢量；

iii）在评估软件图形用户界面的评估表面上突出显示 *mpsPD* 平均面积的位置和形状；

iv）根据 8.6 采用的平均算法。

f）*mpsPD*总体评估的数值仿真不确定度概算。

附 录 A
（规范性）
代码验证

A.1 概述

应根据IEC/IEEE 62704-1:2017（FDTD）或IEC/IEEE 62704-4:2020（FEM）验证用于计算无线设备功率密度*psPD*的数值软件。根据本文件计算*psPD*时，应进行额外评估，以验证插值和叠加算法（A.2和A.3）、金属损耗（A.4）和各向异性电介质（A.5）的正确实施。这些是在本文件的频率范围内对相控阵系统进行有效数值评估所必需的。此外，应验证根据第7章计算*psPD*算法的实施情况（A.6）。本文件规定的这些验证基准可同时适用于基于FDTD和FEM的软件。

A.2 矢量场分量的插值和叠加

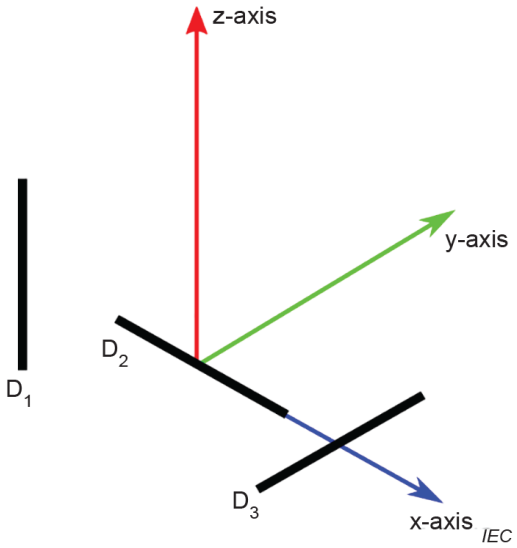
应通过评估三个半波偶极子（D1、D2 和 D3）的场来验证矢量场分量插值和叠加的正确实施，这三个偶极子以 24 GHz 的频率同时工作在不同的振幅和相位偏移。偶极子的长度应为 6.2mm。第一个偶极子的轴应与坐标系的 *z* 轴对齐，第二个偶极子的轴应与坐标系的 *x* 轴对齐，以其原点上的馈电点为中心，第三个偶极子的轴应与坐标系的 *y* 轴对齐。馈电点应位于偶极子的中心。应将其建模为具有有限内阻的硬件源或电压源。馈电点中心之间的距离应为 7.0 mm。配置如图 A.1 所示。在 FDTD 仿真中，*x* 轴与偶极子 D1 和 D3 中心的馈电点相交。为了避免这种交叉，可以由两个具有相同信号的系列源对馈电点进行建模。偶极子 D2 的馈电点也可以由两个系列源模拟。

注：这种天线配置的离散化可能需要使用非均匀网格（不同的网格步长）。

偶极子应建模为完全导电的细丝；即其轴线上的电场应为零，因此可以假设其直径明显小于其横截面中网格边缘的长度。或者，可以采用 0.05 mm 的直径。网格边或顶点的长度可由软件或用户选择。

应使用表 A.1 中给出的不同源、振幅和相位配置激励偶极子。三个偶极子应连续激励。应使用被测软件的内置后处理功能叠加电场和磁场。

应在两个立方体表面上评估电场和磁场的*x*、*y*和*z*矢量分量，边缘长度分别为10.0 mm和16.0 mm，以原点为中心。在立方体的表面上，评估点定义在间距为0.5 mm的直线网格上。应将使用被测软件计算的所有电场和磁场矢量场分量与立方体六个直线网格上的参考结果进行比较。参考结果作为补充文件提供；见附录I。参考结果是使用根据IEC/IEEE 62704-1:2017或IEC/IEEE 62704-4:2020验证的矩量法代码获得的仿真结果。电场和磁场振幅与最大参考结果的最大偏差大于等于10%的应在表A.1中评估和报告。与参考结果的最大允许偏差为10.0%。



图A.1 用于评估电场和磁场分量的插值和叠加的三个半波偶极子 D1、D2、D3 的配置

表A.1 矢量场分量的插值和叠加；与参考结果的最大允许偏差为 10%

振幅和相位	与 10 mm 立方体上 参考值的最大偏差		与 16 mm 立方体上 参考值的最大偏差	
	电场振幅	磁场振幅	电场振幅	磁场振幅
配置 1 D1: A = 1 V, φ=0 D2: A = 0.5 V, φ=90° D3: A = 2 V, φ=180°				
配置 2 D1: A = 2 V, φ=0 D2: A = 2 V, φ=90° D3: A = 2 V, φ=0°				
配置 3 D1: A = 1 V, φ=180 D2: A = 0.5 V, φ=90° D3: A = 2 V, φ=180°				

A.3 远场模式和辐射功率的计算

对于表A.1中规定的连续和同时激励的所有偶极子配置，应计算远场模式和辐射功率P_R。对于连续激励，在计算P_R之前，应使用被测软件的内置功能叠加场。对于 φ 和 θ，应以整个立体角上的电场为单位，以10°为步长，从0°开始计算整个立体角上的远场模式。参考结果作为补充文件提供；见附录I。参考结果基于使用矩量法获得的仿真结果的平均值。场振幅和总辐射功率与参考结果的最大允许偏差为10%，最大偏差大于10%的应在表A.2中评估和记录。

表A.2 P_R 的计算；辐射功率和远场模式的电场振幅与参考结果的最大允许偏差为 10%

激励	振幅和相位	计算功率 （W）	参考功率 （W）	远场模式电场振幅与参考值的最大偏差
连续波	D1: A = 1 V, φ=0 D2: A = 0.5 V, φ=90° D3: A = 2 V, φ=180°		0.0230	
	D1: A = 2 V/m, φ=0 D2: A = 2 V/m, φ=90° D3: A = 2 V/m, φ=0°		0.0527	
	D1:A = 1 V/m, φ=180 D2:A=0.5V/m, φ=90° D3:A =2V/m, φ=180°		0.0230	

A.4 有损导体的实现

应通过对复传播常数为 k_z、在矩形波导中 TE_{10} 模的传播振幅衰减进行建模评估具有有限导电性的金属导体的实现。k_z 的评估遵循 IEC/IEEE 62704-1:2017 和 IEC/IEEE 62704-4:2020 中规定的程序。

应在内部横截面为 7.112mm × 3.556mm，频率范围为 25 GHz 至 40 GHz 的 R320 波导的数值模型中评估复传播常数。对于 FDTD 方法，应使用宽带信号，衰减常数 $Im\{k_z\}=\alpha$应作为频率的函数进行评估。对于 FEM，应评估步长为 250 MHz 的离散频率。所有方向和尺寸对应于图 A.2 中规定的坐标系。激励垂直于波导的方向放置。从源到记录场的距离应为 1.778 mm。波导长度的选择应确保由计算域截断引起的杂散场不会到达记录场的区域。

波导壁应建模为导电率 σ 为 10^5 S/m、10^6 S/m 和 10^7 S/m 的导体。波导应填充相对介电常数 ε_r 为 1 和 2 的无损介电材料。对于每种配置，波导应使用粗细均匀或非均匀网格进行网格划分，至少具有表 A.3 中规定的最小网格步长。

源位置（图A.3）处的E_y分量应使用TE_{10}模式的分析解激励。可通过将源位置（图A.3）处的E_y分量设置为根据公式（A.1）计算的值来激发模式：

$$E_y = E_0 \sin\frac{x\pi}{w} \quad \text{(A.1)}$$

式中：

E_0 是电场矢量的指定振幅，

x 是电场矢量的 x 分量的位置，

w 是波导管的宽度（7.112 mm）。

可使用场激励的替代方法，例如特定求解器来确定波导或预配置源中的传播模式（如果软件支持）。在任何情况下，应断言只有基本传播模式存在于场记录的位置（图A.3），因为高阶模式或伪模式的存在会阻碍传播常数的评估。应在图A.3中规定的位置记录E_y分量。复传播常数k_z可使用公式（A.2）从图A.3中位置记录的场分量计算得出：

$$\alpha = \mathrm{Im}\left[-\frac{\mathrm{j}}{\Delta s}\ln\frac{E_{10}+E_{12}-\sqrt{-4E_{11}^2+\left(E_{10}+E_{12}\right)^2}}{2E_{11}}\right] \quad \text{(A.2)}$$

式中 Δs 是分量记录位置之间的距离（1.778 mm）。

对于 FDTD，应评估和报告波导轴线沿坐标系三个轴定向的所有结果，对于围绕波导轴的两个不同方向需要将波导旋转 90°。α 应仅评估沿正轴方向的传播。

对于表 A.4 中的每个波导配置，衰减常数 α 与其参考值的最大偏差应作为频率的函数进行评估。参考值根据公式（A.3）得出：

$$\alpha = 8{,}686\frac{1}{b\eta}\sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}}\frac{\left[1+\frac{2b}{a}\left(\frac{f_c}{f}\right)^2\right]}{\sqrt{1-\left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}\ [\mathrm{dB/m}] \quad \text{(A.3)}$$

式中：

ω 是角频率

μ0 是自由空间磁导率

σ 是波导壁的电导率

a 是波导宽度（也称为 w）

b 是波导高度

η 是波导中电介质的波阻抗

f 是频率

f_c 是波导的截止频率

常数 8.686 将衰减系数计算结果的单位从 Np 转换为 dB。更多细节详见[12]。

表A.4中的参考解在单独的文件（附录I）中给出。α 与其参考结果的偏差应小于等于表A.4中给出的公差。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：https://d.book118.com/158043067134006051