

中华人民共和国通信行业标准

YD/T 1644.1-2007

手持和身体佩戴使用的无线通信设备对人体的电磁照射——人体模型、仪器和规程 第 1 部分：靠近耳边使用的手持式无线通信设备的 SAR 评估规程（频率范围 300MHz~3GHz）

Human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices—

Human models, instrumentation, and procedures

Part 1: Procedure to determine the specific absorption rate (SAR) for hand-held devices used in close proximity to the ear (frequency range of 300 MHz~3 GHz)

(IEC 62209-1: 2005, Human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices – Human models, instrumentation, and procedures –Part 1: Procedure to determine the specific absorption rate (SAR) for hand-held devices used in close proximity to the ear (frequency range of 300 MHz~3 GHz), IDT)

2007-07-20 发布

2007-12-01 实施

中华人民共和国信息产业部 发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号和缩略语	8
5 测量系统规格	9
6 SAR评估规程	13
7 不确定度评估	20
8 测量报告的要求	31
附录A (规范性附录) 模型规格	32
附录B (规范性附录) 测量仪器的校准和不确定度评估	36
附录C (规范性附录) 后处理技术和不确定度评估	47
附录D (规范性附录) SAR测量系统的系统验证	51
附录E (资料性附录) 实验室间比对	56
附录F (资料性附录) 模型坐标系和被测设备坐标系的定义	58
附录G (资料性附录) 校准偶极子	59
附录H (资料性附录) 平坦模型	61
附录I (资料性附录) 头部组织模拟液的推荐配方	63
附录J (资料性附录) 液体介电特性的测量和不确定度的评估	65
参考文献	72

前 言

本部分是《手持和身体佩戴使用的无线通信设备对人体的电磁照射》的部分标准之一，该部分标准的名称及结构如下：

1. 手持和身体佩戴使用的无线通信设备对人体的电磁照射——人体模型、仪器和规程 第1部分：靠近耳边使用的手持式无线通信设备的 SAR 评估规程（频率范围 300MHz~3GHz）；

2. 手持和身体佩戴使用的无线通信设备对人体的电磁照射——人体模型、仪器和规程 第2部分：手持和身体佩戴设备在人体头部和身体内的 SAR 评估规程（频率范围 300MHz~6GHz）。

本部分等同采用了国际电工委员会 IEC 62209-1（第一版，2005年2月）：手持和身体佩戴使用的无线通信设备对人体的电磁照射——人体模型、仪器和规程——第一部分，靠近耳边使用的手持式无线通信设备的 SAR 评估规程（频率范围 300MHz~3GHz）。

本部分为部分标准的第1部分。

本部分的附录 A、B、C、D 为规范性附录，附录 E、F、G、H、I、J 为资料性附录。

本部分由中国通信标准化协会提出并归口。

本部分起草单位：信息产业部电信研究院

本部分主要起草人：王洪博、王 南、齐殿元、巫彤宁、孙 倩

手持和身体佩戴使用的无线通信设备对人体的电磁照射

——人体模型、仪器和规程

第 1 部分：靠近耳边使用的手持式无线通信设备的 SAR 评估规程（频率范围 300MHz~3GHz）

1 范围

本部分规定了使用时发射部分靠近耳边使用的手持无线通信设备的比吸收率的评估规程。

本部分适用于工作频率范围在 300MHz~3GHz 的任意电磁场发射设备，如：移动电话，无绳电话等。

本部分的目的是示范如何根据相应的安全限值测量被测设备的 SAR 值，本部分只是一项关于电磁照射测量方法的标准，而不是关于安全限值的标准。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本部分的引用而成为本部分的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本部分。然而，鼓励根据本部分达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本部分。

ISO 导则-1995：测量不确定度评定与表示

ISO/IEC 17025-1999：测量和校准实验室能力的通用要求

3 术语和定义

本部分中将会用到下列术语和定义。

3.1

衰减系数 attenuation coefficient

这是一个数学因子，用于表明在场源和特定点之间的受人体头部或身体组织的影响而产生的衰减。

3.2

短时平均功率 average (temporal) absorbed power

按照时间平均的能量转换定义为：

$$\bar{P}_{\text{avg}} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt \quad (3-1)$$

式中：

\bar{P}_{avg} ——平均功率，单位为 W；

t_1 ——电磁照射的初始时刻，单位为 s；

t_2 ——电磁照射的截止时刻，单位为 s；

$t_2 - t_1$ ——电磁照射的时间，单位为 s；

$P(t)$ ——即时吸收功率，单位为 W。

3.3

轴向各向同性 axial isotropic

当探头暴露在来自于沿探头主轴方向的参考波下时，围绕探头外壳/密封盒的主轴旋转探头的过程中 SAR 的最大偏差。

3.4

基本限值 basic restriction

基于已知的健康影响而制定的人体暴露于时变电场、磁场、电磁场的限值。

注：在本部分的频率范围内，作为基本限值的物理量是 SAR。

3.5

边界效应（探头） boundary effect (probe)

当探头接近（小于探头尖端直径）介质边界时，电场探头灵敏度的改变。

3.6

复合介电常数 complex permittivity

介电常数定义为介质中某点的电通量密度和电场强度之比。生物组织的介电常数跟频率有关。

$$\vec{\epsilon} = \frac{\vec{D}}{\vec{E}} = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (3-2)$$

式中：

\vec{D} ——电通量密度，单位为 C/m²；

\vec{E} ——电场强度，单位为 V/m；

ϵ_0 ——自由空间介电常数，值为 8.854×10^{-12} F/m；

ϵ_r ——复数相对介电常数， $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = \epsilon_r' + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0}$

注：对于各向同性介质，介电常数是标量，对于非各向同性介质，介电常数是矢量。

3.7

传导出功率 conducted output power

在一段与正常操作状态调制评估下的最低频率周期相比为足够长的时间内，由发射器提供的到达天线传输线的平均功率。

3.8

导电率 conductivity

介质中的传导电流密度与电场强度的比值：

$$\vec{\sigma} = \frac{\vec{J}}{\vec{E}} \quad (3-3)$$

式中：

\vec{E} ——电场强度，单位是 V/m；

\vec{J} ——电流密度，单位是 A/m；

δ ——介质导电率，单位是 S/m。

注：对于各向同性介质，导电率是标量；对于非各向同性介质，是矢量，这意味着 δ 和 \vec{E} 的叉积也是矢量。

3.9

检出限 detected limits

最低（最高）的检出限定义为测量仪器的最小（最大）可量化灵敏度响应。

3.10

占空比 duty factor

脉冲持续时间与周期脉冲序列的脉冲周期之比。

3.11

电导率 electric conductivity

见导电率。

3.12

电场 electric field

电场是矢量场量 \vec{E} ，它对任何静止的带电粒子都有一个力 \vec{F} ，它等于 \vec{E} 和粒子 q 的电量的乘积：

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (3-4)$$

式中：

\vec{F} ——作用于粒子上的矢量力，单位为 N；

q ——粒子的电荷，单位为 C；

\vec{E} ——电场强度，单位为 V/m。

3.13

电通量密度（置换） electric flux density (displacement)

给定点的电场强度 \vec{E} 和介电常数 ϵ_0 的乘积加上电极化值 \vec{P} 而得到的矢量：

$$\vec{D} = \epsilon_0\vec{E} + \vec{P} \quad (3-5)$$

式中：

\vec{D} ——电通量密度，单位为 C/m²；

ϵ_0 ——自由空间介电常数，为 8.854×10^{-12} F/m；

\vec{E} ——电场强度，单位为 V/m；

\vec{P} ——介质电极化强度，单位为 C/m²。

注：在本部分中，所有点的电通量密度都等于电场强度和介电常数之积： $\vec{D} = \epsilon_r \vec{E}$ 。

3.14

手持设备 handset

手持式设备可以在靠近人体头部的一侧使用，它包括声学输出设备（或耳机）和麦克风，也包含了无线电发射器和接收器。

注：本部分下文中，“手机”即“手持设备”

3.15

球向各向同性 hemispherical isotropy

将暴露于参考波下的探头绕其主轴进行旋转时 SAR 的最大偏差（这时来自于探头前方半空间的入射

波相对于探头的主轴有着不同的入射角)。

3.16

各向同性 isotropy

见轴向各向同性, 球向各向同性和探头各向同性。

3.17

线性误差 linearity error

测量范围内的测量值与在给定区域内所定义的最近参考线之间的最大偏差。

3.18

损耗正切 loss tangent

介质的复数相对介电常数的虚部和实部之比:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_r' \epsilon_0} \quad (3-6)$$

式中:

$\tan \delta$ ——损失正切 (无量纲);

ϵ_r'' ——复相对介电常数的虚部;

ϵ_r' ——复相对介电常数的实部;

ϵ_0 ——自由空间介电常数, 为 $8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$;

ω ——角频率 ($\omega = 2\pi f$), 单位是 Rad/s;

δ ——介质导电率, 单位是 S/m。

3.19

磁场 magnetic field

磁场是给定点的磁通量密度 \vec{B} 除以磁场常数 (磁导率) μ 再减去磁化强度 \vec{M} 而得到的矢量:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} - \vec{M} \quad (3-7)$$

式中:

\vec{H} ——磁场强度, 单位是 A/m;

\vec{B} ——磁通密度, 单位是 T;

μ ——真空中的磁场常数 (磁导率), 单位是 H/m;

\vec{M} ——磁化强度, 单位是 A/m。

注: 本部分中, 在所有点 $\vec{M} = 0$ 。

3.20

磁通密度 magnetic flux density

矢量 \vec{B} 可在任意的速度为 \vec{v} 的带电粒子上施加一个力 \vec{F} , 它等于矢量 \vec{v} 和 \vec{B} 的乘积再乘以电荷 q :

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (3-8)$$

式中:

\vec{F} ——作用于粒子上的矢量力, 单位是 N;

q ——带电粒子，单位是 C；

\vec{v} ——粒子的速度，单位是 m/s；

\vec{B} ——磁通密度，单位是 T。

3.21

磁导率 magnetic permeability

磁导率 μ 与介质中的磁场强度 \vec{H} 的乘积就等于磁通密度 \vec{B} ：

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3-9)$$

式中：

\vec{H} ——磁场强度，单位是 A/m；

μ ——真空中的磁场常数（磁导率），单位是 H/m；

\vec{B} ——磁通密度，单位是 T。

注：对于各向同性介质，磁导率是标量；对于非各向同性介质是张量。

3.22

测量范围 measurement range

测量范围是测量系统的工作区间，由检出限的上下限值来确定。

3.23

移动（无线）设备 mobile（wireless）device

在本部分中，无线通信设备是指使用时靠近人体头部、贴在耳边的设备。

注：术语“移动”和“便携式”在IEC 60050[21]-“移动：能够在移动的时候使用”（IEV 121-12-03）和“便携式：能被人携带使用”（IEV 151-16-47）中有着明确的但是很普通的定义。术语“便携式”通常暗指携带中的可操作性。这些定义在很多无线规则和工业标准中可互换使用，有时它们指的是无线设备的类型，有时指的是欲采用的使用方式。

3.24

多频段（无线设备） multi-band（wireless device）

能够在多于一个频段下使用的无线设备。

3.25

多模式（无线设备） multi-mode（wireless device）

能够在多于一个信号传输模式（如：模拟模式，TDMA 和 CDMA）下使用的无线设备。

3.26

峰值空间平均SAR peak spatial-average SAR

一定体积内的平均 SAR 的最大值。

3.27

介电常数 permittivity

见复数介电常数和相对介电常数。

3.28

模型（头部） phantom（head）

在本文中，是指与人体解剖学特征外形相似的一个简化模型，模型中装有介电特性与人体组织相似的模拟液。

3.29

耳廓 pinna

耳朵外部最大的软骨突出部分，包括耳轮、小叶和反耳轮，也叫做外耳。

3.30

功率 power

见平均（瞬时）吸收功率和传导输出功率。

3.31

探头各向同性 probe isotropy

电场探头或者磁场探头的响应跟入射波的极化方向和传播方向无关的程度。

3.32

相对介电常数 relative permittivity

复数介电常数与自由空间介电常数的比值。各向同性、线性损耗电介质的复数相对介电常数 $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$

是由下面的公式得到的：

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = \epsilon_r' + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0} = \epsilon_r' (1 - j\frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}) = \epsilon_r' (1 - j\tan\delta) \quad (3-10)$$

式中：

ϵ_0 ——自由空间介电常数 ($8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$)，单位是法拉每米；

ϵ ——复数介电常数，单位是 F/m；

ϵ_r ——复数相对介电常数；

ϵ_r' ——数相对介电常数的实部，也就是电介质常数；

ϵ_r'' ——复数相对介电常数的虚部（电介质损耗指数），它表征了电介质的损耗；

σ ——导电率，单位是 S/m；

ω ——角频率，单位是 Rad/s；

$\tan\delta$ ——损耗正切。

3.33

响应时间 response time

输入信号阶跃变化之后，测量仪器达到其最终测量值的 90%所需的时间。

3.34

扫描系统 scanning system

扫描系统是一个自动定位系统，它能够将测量探头放置在某一特定位置。

3.35

（测量系统的）灵敏度 sensitivity (of a measurement system)

系统响应值（如，电压）的大小与测量值（如，电场强度平方）大小的比值。

3.36

趋肤深度 skin depth

从介质边界到介质内场强（或者是感应电流密度）衰减为其原值 $1/e$ 的点之间的距离。

介质趋肤深度 δ 取决于电磁波沿传播方向的传播常数 γ ^{[56]1}。传播常数是介质的介电特性和传播模式的特征有关的。趋肤深度定义为：

$$\delta = \frac{1}{\operatorname{Re}\{\gamma\}} \quad (3-11)$$

$\gamma = \alpha + j\beta$ ， α 是衰减常数， β 是传播波的相位常数，并且 $\gamma^2 = -\omega^2 \mu \epsilon + k_c^2$

其中 μ 和 ϵ 分别是磁导率和介质的复数相对介电常数， k_c^2 是传输模式的横向传播常数，因此

$$\delta = \frac{1}{\operatorname{Re}\{\sqrt{-\omega^2 \mu \epsilon + k_c^2}\}} \quad (3-12)$$

在自由空间传播的状态下， $k_c^2 = 0$ ，则趋肤深度的方程式就是：

$$\delta = \frac{1}{\omega} \left[\left(\frac{\mu_0 \epsilon_r \epsilon_0}{2} \right) \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon_r \epsilon_0} \right)^2} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-13)$$

式中：

δ ——趋肤深度，单位为 m；

ω ——角频率，单位为 Rad/s；

ϵ_r ——相对复数介电常数的实部；

ϵ_0 ——自由空间介电常数，单位是 F/m；

μ_0 ——自由空间的磁导率，单位是 H/m；

σ ——介质导电率，单位是 S/m。

注：在 TE_{10} 模式的矩形波导中，其最大横截面为 a ： $k_c^2 = \left(\frac{\pi}{a}\right)^2$ 。

3.37

比吸收率 (SAR) specific absorption rate (SAR)

给定密度 (ρ) 的体积微元 (dV) 内质量微元 (dm) 所吸收 (消散) 的能量微元 (dW) 对时间的微分就是 SAR：

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{\rho dV} \right) \quad (3-14)$$

SAR 也可以用下面任意一个式子得到：

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho} \quad (3-15)$$

$$SAR = c_h \left. \frac{dT}{dt} \right|_{t=0} \quad (3-16)$$

式中：

SAR——比吸收率，单位为 W/kg；

E ——组织内电场强度的 Rms 值，单位为 V/m；

¹ 方括号内的数值相应于参考书目

σ ——介质导电率，单位为 S/m；

ρ ——组织密度，单位为 kg/m³；

c_h ——组织的比热容，单位是 J/kg 和 K；

$\frac{dT}{dt}|_{t=0}$ ——组织内初始时刻温度对时间的微分，单位为 K/s。

3.38

合成不确定度 uncertainty (combined)

当测量结果是由若干个其他量的值求得时，按其他各量的方差和协方差算得的标准不确定度就是合成不确定度。

注：它是测量结果标准差的估计值。

3.39

扩展不确定度 uncertainty (expanded)

扩展不确定度是一个确定测量结果区间的量，并合理赋予被测量之值分布的大部分都包含于此区间内。

3.40

标准不确定度 uncertainty (standard)

以标准差表示的测量不确定度。

3.41

波长 wavelength

在波的传播方向上，两个相邻周波的两个相同相位之间的距离就是波长。波长 λ 与相速度的大小 v_p 以及频率 f 有关，关系如下：

$$\lambda = \frac{v_p}{f} \quad (3-17)$$

电磁波的波长 λ 与频率和介质中光的传播速度均有关：

$$c = \lambda f \quad (3-18)$$

式中：

f ——频率，单位为 Hz；

c ——光速，单位为 M/s；

v_p ——相速度的大小；

λ ——波长，单位为 m。

注：在自由空间，电磁波的速度等于光速。

4 符号和缩略语

下列符号和缩略语适用于本部分。

4.1 物理量

本部分使用的是国际通用的 SI 单位制。

符 号	物 理 量	单 位	量 纲
a	衰减系数	米的倒数	1/m
B	磁通密度	特斯拉	T, Vs/m ²
D	电通量密度	库伦每平方米	C/m ²
c_h	比热容	焦耳每千克开尔文	J/(kg K)
E	电场强度	伏特每米	V/m
f	频率	赫兹	Hz
H	磁场强度	安培每米	A/m
J	电流密度	安培每平方米	A/m ²
\bar{P}_{av}	平均吸收功率	瓦特	W
SAR	比吸收率	瓦特每千克	W/kg
T	温度	开尔文	K
ϵ	介电常数	法拉每米	F/m
λ	波长	米	m
μ	磁导率	亨利每米	H/m
ρ	密度	千克每立方米	Kg/m ³
σ	电导率	西门子每米	S/m

注：在本部分中，温度单位是摄氏度，此定义为： $T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.16$

4.2 常数

符 号	物 理 量	数 值
c	真空中的光速	$2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$
η	自由空间阻抗	120π 或约 377Ω
ϵ_0	自由空间介电常数	$8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$
μ_0	自由空间磁导率	$4 \pi \times 10^{-7}$

4.3 缩略语

CAD——计算机辅助设计。通常使用的文件格式为 IGES 和 DXF

DXF——数字化交互文件。

ERP——耳参考点。

DUT——被测设备。

IGES——国际图式化交互文件。

RF——射频。

RSS——和方根。

SAM——特定人体模型。

5 测量系统规格

5.1 一般要求

SAR 测量系统如图 1 的上半部分所示，主要由人体模型、电子测量仪器、扫描定位系统和被测设备夹具等组成。测量应通过自动定位的迷你小型场强探头测量模型内部的电场分布来进行。根据测得的场强值可以计算出 SAR 的分布以及峰值空间平均 SAR。

进行测量的实验室应该满足以下环境条件：

- (1) 环境温度在 18°C~25°C 之间，测量过程中液体温度变化不能超过 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ；

- (2) 环境电磁噪声不能超过 0.012 W/kg (下检出限 0.4W/kg 的 3%);
- (3) 被测无线通信设备不能连接到本地公众通信网;
- (4) 反射、辅助射频发射机等的影响应该小于测得 SAR 值的 3%。

测量设备的制造商必须声明其产品符合标准。当新系统投入使用或者对系统作出任何修改时(例如,新的软件版本、使用了不同的数据采集器、或者使用了不同的探头等等),至少一年要执行一次按照标准的附录 D 进行的系统验证。

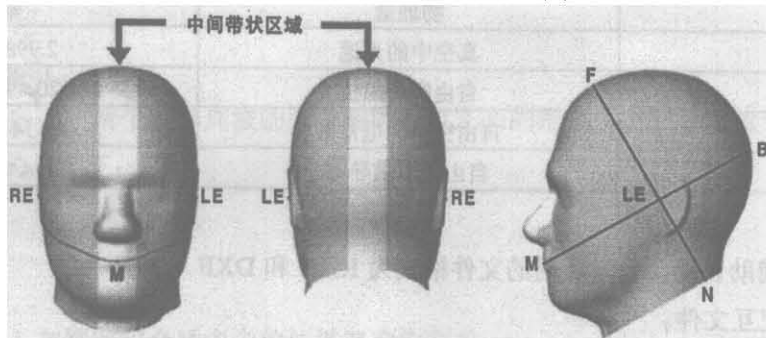
5.2 模型规格(外壳和液体)

5.2.1 一般要求

电场探头的扫描是在分成两半的模型内或者是在顶部有开口的完整头部模型内进行的。测量手持式无线通信设备的模型的物理特性(尺寸和形状)是模拟使用者的头部,这是因为对于电磁照射测量,头部形状是一个起主要作用的参数。头部模型应该使用与头部组织介电特性相似的材料来制作。为保证能在模型内部进行扫描,需在头部模型内装入人体组织模拟液。外壳的材料应该尽可能对电磁照射透明。为了把扫描定位系统与模型关联起来,模型制造商至少要在模型上定出三个参考点,这些点必须能让使用者看得见,并且间隔不小于 10cm。握被测设备的手不应模型化(见标准的附录 A)。

5.2.2 标准的模型形状和大小

标准的模型形状是根据人体学研究^[1]中 90%成年男子头部的研究报告而制定的,模型的耳朵模拟人使用手持设备时耳朵的扁平状态(见附录 A)。这些要求如图 1 所示。



- 注: (1) RE——右耳参考点(ERP);
 LE——左耳参考点(ERP);
 M——嘴部参考点;
 F——N-F线的前端点(仅是说明,不用标在模型上);
 N——N-F线的后端点(仅是说明,不用标在模型上)。

- (2) 完整头部模型仅用于图式说明——本部分中的测量程序主要是按照图2的模型设置而制定的。包含鼻子的中间带状区域有一个很大的厚度公差。

图1 画出了耳朵参考点 RE 和 LE、嘴部参考点 M、N-F 参考线以及中间带状区的头部模型

图 2 所示的 SAM(特定的类人模型)标准模型应该用于 IEC 62209-1 标准适用的手持式无线通信设备的 SAR 测量。相关的 CAD 文件是公开可获取的(IGES 和 DXF 格式)。模型制造商必须声明其产品的形状和厚度符合标准。

5.2.3 模型外壳

模型的外壳材料应该对于组织模拟液配方中用到的化学成分具有抵抗力。包括耳朵间隔在内的人体

模型的外壳应该由低介电常数、低损耗材料制成 ($\epsilon_r \leq 5$, $\tan(\delta) \leq 0.05$)。与 SAM 标准模型的 CAD 文件相比, 人体模型的形状制造公差应小于 $\pm 0.2\text{mm}$ 。除了耳朵及其延伸部分外, 在手机投影内的任何区域, 壳体的厚度为 $(2 \pm 0.2)\text{mm}$ (见图 2)。低损耗的耳朵间隔器 (与头部模型相同的材料) 应该在 ERP 和组织模拟液边界之间提供 6mm 的间隔, 且公差为 $\pm 0.2\text{mm}$ 。在头部正中间从前到后平面的 $\pm 1.0\text{cm}$ 带状区, 制作公差应该是 $\pm 1.0\text{mm}$ 。

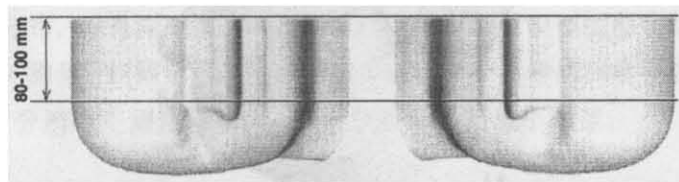


图2 具有延长周边的纵向对分模型 (侧放用于设备的 SAR 测量)

图 1 中的点 M 是嘴部参考点, LE 是左耳参考点 (ERP), RE 是右耳参考点 (ERP)。这些必须标注在模型的外表面上便于根据模型进行无线设备的重复定位。由两耳和嘴部参考点构成的平面称为参考平面, 它包括了 B-M (Back-Mouth) 线。参考面横截面的 CAD 文件如图 3 所示。这副图是把实际尺寸为 $26\text{cm} \times 18\text{cm}$ 的图以 1.3 倍的比例缩小。为了便于被测设备的放置, N-F (Neck-Front) 线应该在两侧沿着耳朵前截面的边缘画成穿过每个 ERP 的直线。为了便于被测设备的定位, 应该在模型外表面上画出 B-M 线和 N-F 线的投影 (见图 4)。手机扬声器的中心位置应该贴在模型的 ERP 上。所有参考点的位置都在 CAD 文件中有明确说明。

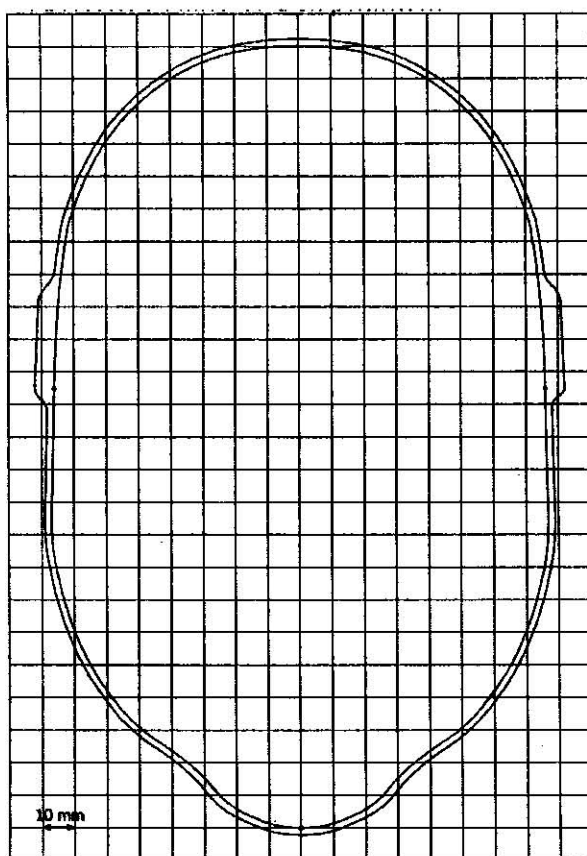
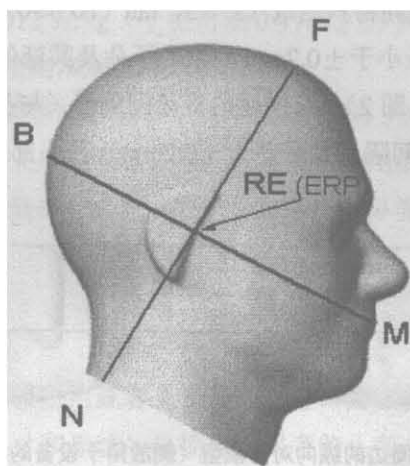


图3 包含 B-M 线的 SAM 模型参考面的横截面图式



- 注：(1) B——B-M 线的端点（仅是说明，不用标在模型上）；
 F——N-F 线的端点（仅是说明，不用标在模型上）；
 N——N-F 线的颈部端点（仅是说明，不用标在模型上）；
 M——嘴部参考点；
 RE——右耳参考点（ERP）。

(2) 完整头部模型仅用于图式说明——本部分中的测量程序主要是按照图2的模型设置而制定的。

图4 作出相应标记的模型侧视图

5.2.4 组织模拟液特性

盛放于人体模型内的组织模拟液的电介质特性如表 1 所示（头部液体）。在频率范围内的其它未给出的频点，特性参数可通过内部插值得到。满足表 1 参数的液体配方见标准的附录 A。

表1 组织模拟液介电特性

频率 (MHz)	相对介电常数 (ϵ_r)	导电率 (σ) S/m
300	45.3	0.87
450	43.5	0.87
835	41.5	0.90
900	41.5	0.97
1450	40.5	1.20
1800	40.0	1.40
1900	40.0	1.40
1950	40.0	1.40
2000	40.0	1.40
2450	39.2	1.80
3000	38.5	2.40

5.3 SAR 测量设备规格

测量设备作为一个完整的系统进行校准。探头与相同的或技术上相当的放大器、测量设备和数据采集器一起校准。测量设备根据附录 B 的方法在适当的频率和温度下在每种组织模拟液中校准。倘若在探头连接器上的荷载条件已作了规定并且在测量中得以实现的话，探头可以和系统分开进行校准。

最小检出限应低于 0.02W/kg，最大检出限应高于 100W/kg。在 0.01~100W/kg 的 SAR 范围内，线性度应该在 ± 0.5 dB 以内。灵敏度和各向同性应在组织模拟液中确定。应给出响应时间的指标。建议在探头的偶极子单元附近其封装套的外直径不要超过 8mm。

5.4 扫描系统规格

5.4.1 一般要求

为了评估三维 SAR 分布，装有探头的扫描定位系统应可以扫描模型的整个暴露体积。扫描定位系统的机械结构不应干扰 SAR 测量。扫描定位系统应该至少通过 3 个参考点和模型相关联，这些点由使用者或系统制造商定义。定位分辨率是测量系统能在其上执行测量的最小增量。

5.4.2 技术要求

5.4.2.1 定位准确度

探头尖端在测量区域内的定位准确度应优于 ± 0.2 mm。

5.4.2.2 定位分辨率

定位分辨率是每一个测量系统能在其上执行测量的增量。定位分辨率应该是 1mm 或者更小。

5.5 设备夹具规格

必须特别注意避免环境（例如地板、设备夹具、液体表面）的反射和吸收对于 SAR 测量所造成的重大影响。

设备夹具必须保证设备能够根据 6.1.4 中的定义进行定位，并保证在倾斜位置下角度公差在 $\pm 1^\circ$ 。夹具必须由低损耗和低介电常数的材料制成：损耗正切 ≤ 0.05 ，相对介电常数 ≤ 5 。定位不确定度根据 7.2.2.4.2 中描述的方法进行评估。

为保证夹具不会干扰探头，可以使用低相对介电常数和低损耗的泡沫塑料块代替夹具进行一次替代试验，或者使用胶带或胶线把手机粘到模型上进行试验，参见 7.2.2.4.1。

5.6 测量液体介电特性

必须在相应的温度和频率下测量组织模拟液的介电特性。采用线性内插法将测得的介电特性参数跟表 1 中给出的值比较，进行评估。计算 SAR 值时必须使用测量值，而不是表 1 中的值。可以按照附录 J 中描述的步骤和仪器进行上述测量。

注：参见本部分 6.1.1 中关于测量值与表 1 中的值之间的允许差异范围

6 SAR 评估规程

6.1 测量准备

6.1.1 基本准备

在 SAR 测量前 24h 内必须对组织模拟液的电介质特性进行测量，除非试验室能够提供采用更长时间周期（例如每周一次）的符合性证明。测量电介质特性时，组织模拟液的温度应与 SAR 测量过程中相同，且温度变化不能超过 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。

在可以获得经过验证的 2~3GHz 之间的组织模拟液配方（能够保证测得的两项电介质参数都在表 1 目标值的 $\pm 5\%$ 以内）之前，推荐以下做法。

(1) 对于 300MHz~2GHz 之间的频率，测得的导电率和介电常数应在表 1 目标值的 $\pm 5\%$ 以内。

(2) 对于 2~3GHz 之间的频率，测得的导电率应在表 1 目标值的 $\pm 5\%$ 以内，对测得的相对介电常数的允许公差可放宽至不超过表 1 目标值的 $\pm 10\%$ ，但是必须采用可获得的配方尽可能地接近表 1 目标值。介电常数与目标值的偏差对 SAR 的影响应包含在不确定度评定中。

对于水平布置的人体模型，装入其中的组织模拟液深度至少应在 ERP 之上 15cm。测量前应仔细搅拌液体，并保证没有气泡。应注意避免液体表面的反射，在 300MHz~3GHz 频率范围内这是靠 15cm 的液体深度来实现的。液体的粘性不应妨碍探头的移动。

6.1.2 系统检查

在 SAR 测量前必须根据附录 D 中规定的步骤对系统进行检查。系统检查的目的在于确保系统工作时满足其规格要求。系统检查是一项可再现的测量，以保证系统在进行符合性测量时可以正常工作。执行系统检查旨在用于检查短期内可能存在的漂移和系统其它的不确定度，例如：

- 液体参数的变化，例如：因液体水分蒸发或温度变化而引起的改变；
- 组件故障；
- 组件漂移；
- 设置中的操作失误或软件参数的错误；
- 系统中的不利条件，例如射频干扰。

系统检查是一项完整的 1g 或 10g 平均 SAR 测量。将 1g 或 10g 平均 SAR 测量值归一化至标准场源的输入功率目标值，并和相应测量频率、标准场源以及特定的平坦模型下的 1g 或 10g 平均 SAR 目标值进行比较。确定各次系统检查的误差，必须在系统检查目标值的 $\pm 10\%$ 之内。进行系统检查时测量频率应该在被测设备中间频率的 $\pm 10\%$ 之内。

注：术语“系统验证”和“系统检查”以斜体字标出，因为它们涉及到了本部分所制定的测量协议。

6.1.3 待测无线设备的准备

应该使用被测无线设备自身内部的发射机。天线、电池和附件都应是制造商指定的。测量前电池应充满电，测量过程中不应有其他外部电缆连接。

使用内部测试程序或适当的测试设备（接着天线的基站模拟器）来控制设备的输出功率和工作频率（频道）。对靠近耳边使用的情况，无线设备应被设置在最大功率电平发射。电磁照射测试应基于被测设备的功能和照射特性来进行。例如：工作模式、天线配置等。

对于最终商业版本的产品应在所有的正常工作配置（没有连接任何电缆）下进行测试。在产品上连接线缆很有可能改变产品上的金属和导电部分的射频电流分布。此外，如果使用原型样机进行测试，那么必须证实其商业版本有完全相同的机械和电特性。如果这一点得不到保证，就必须重新对未修改的商业版产品进行抽样测试。

如果被测设备不能在最高的时间平均功率电平上工作，那么可以在较低的功率上进行测试，然后把测试结果按比例换算到最大输出功率对应的值，前提条件是被测设备的 SAR 响应是线性的。

6.1.4 无线设备相对于模型的定位

6.1.4.1 基本要求

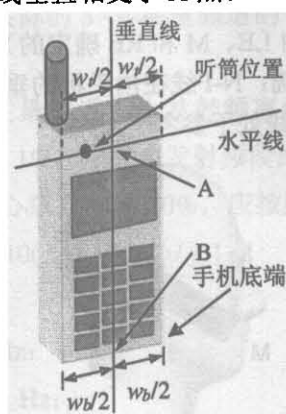
标准规定了手机在头部模型上的两种测试位置“贴脸”和“倾斜”。手机应在这两种位置下分别在 SAM 模型的左侧和右侧进行测试。如果手机结构特殊，按照标准描述的正常使用位置不能实现，比如不对称的手机，应当将手机定位于代表手机正常使用状态的位置，并在报告中对此进行详细记录。

6.1.4.2 贴脸状态的定义

贴脸位置应按照如下步骤建立：

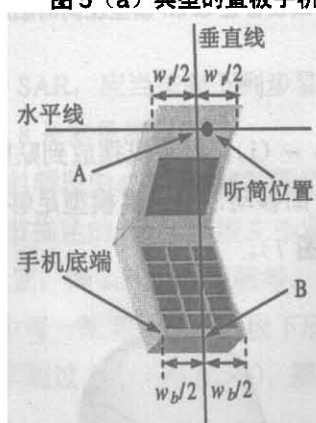
(a) 对于翻盖手机，打开盖，准备好手机，使其处于通话状态。如果合着盖也能使用，则两种配置都应该测试。

(b) 如图 5 (a) 和 5 (b) 所示，给手机定义两条假想的线：垂直中心线（过 A 点和 B 点）和水平线。水平线过扬声器中心并与垂直中心线垂直相交于 A 点。



- 注： w_i ——话筒水平线上的手机宽度；
 w_b ——手机的底部宽度；
 A——话筒水平线上的手机宽度 w_i 的中点；
 B——手机的底部宽度 w_b 的中点

图 5 (a) 典型的直板手机



- 注： w_i ——话筒水平线上的手机宽度；
 w_b ——手机的底部宽度；
 A——话筒水平线上的手机宽度 w_i 的中点；
 B——手机的底部宽度 w_b 的中点

图 5 (b) 典型的翻盖手机

图5 两类手机示例的垂直、水平参考线和参考点 A, B

(c) 把手机靠近模型表面，使 A 点处于 LE-RE 线上（见图 6），且由手机垂直中心线和水平线确定的平面平行于模型正中心从前到后的剖面。

(d) 沿着 LE-RE 线平移手机，直到与模型的耳朵接触。

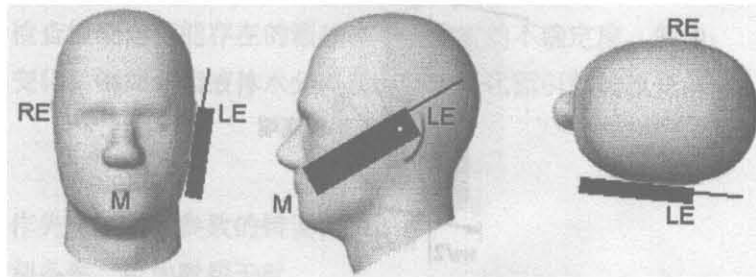
(e) 绕着 LE-RE 线旋转手机，直到手机的垂直中心线处于参考平面（由 LE、M 和 RE 确定的）内。

(f) 绕着手机的垂直中心线旋转，直到由手机的垂直中心线和水平线确定的平面平行于 N-F 线，然后沿着 LE-RE 线平移手机，直到 A 点与耳朵在 ERP 接触。

(g) 保持手机的 A 点在 LE-RE 线上且与耳廓接触，绕着 N-F 线旋转手机，直到任一点与耳廓下的模型（脸颊）接触（见图 6），应记录旋转的角度。

(h) 保持手机的 A 点接触 ERP，绕着由手机的垂直中心线和水平线确定的平面过 A 点的垂线旋转，直到手机的垂直中心线处于参考平面（由 LE、M 和 RE 确定的）内。

(i) 按照以下标准确认贴脸位置正确：N-F 线在由手机的垂直中心线和水平线确定的平面内；手机的 A 点在 ERP 接触耳廓；手机的垂直中心线处于参考平面内。



注：(1) M——嘴部参考点；

LE——左耳参考点（ERP）；

RE——右耳参考点（ERP）。

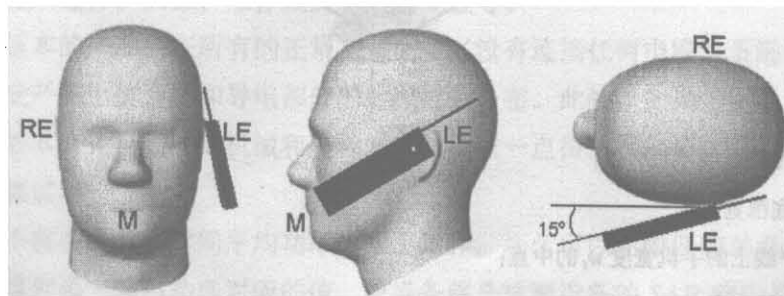
(2) ——设备的位置必须按照图 2 所示的模型设置来维持。

图6 无线设备在 SAM 模型左侧的贴脸位置

6.1.4.3 倾斜位置的定义

倾斜位置是通过下述步骤建立的：

- 重复贴脸位置的定义中步骤 (a) ~ (i)，把手机摆放到贴脸位置（见图 6）。
- 保持手机方向不变，平行于参考面移动，使它离模型足够远，以便能够旋转 15°。
- 绕着手机的水平线旋转 15°（见图 7）。



注：(1) M——嘴部参考点；

LE——左耳参考点（ERP）；

RE——右耳参考点（ERP）。

(2) 设备的位置必须按照图 2 所示的模型设置来维持。

图7 无线设备在 SAM 模型左侧的倾斜位置

d) 保持手机方向不变, 沿着LE-RE线向模型移动手机, 直到手机的任意部分接触耳朵。当接触点在耳廓上时就得到了倾斜位置。如果接触点不在耳廓上, 例如天线接触模型头部的后面, 应该减小手机的倾斜角度。在这种情形下, 如果手机的任何部分与耳廓接触, 而且手机的第二个部分与模型接触 (例如天线接触模型头部的后面), 就得到了倾斜位置。

6.1.5 测量频率

被测设备应当在所有的发射频道都符合照射标准的要求。但是, 在每一频道下进行测试不切实际也没有必要。本节的目的是规定一个切合实际的 SAR 测量频道的子集。选择这个测量子集可以使得手机满足任何适用照射标准的要求。

对于手机的每一工作模式, 应当在最靠近中心发射频率的频道进行测试。如果发射频段的带宽 ($\Delta f = f_{\text{high}} - f_{\text{low}}$) 超过了其中心频率 f_c 的 1%, 那么在发射频段的低端频率和高端频率的频道也应当进行测试。另外, 如果发射带宽超过了其中心频率 f_c 的 10%, 应按照下述公式确定测试频道的数目 N_c 。

$$N_c = 2\text{roundup}[10(f_{\text{high}} - f_{\text{low}})/f_c] + 1 \quad (6-1)$$

式中:

f_c ——发射频段中心频率, 单位是 Hz;

f_{high} ——发射频段高端频率, 单位是 Hz;

f_{low} ——发射频段低端频率, 单位是 Hz;

N_c ——信道数;

Δf ——发射带宽, 单位是 Hz;

注: 函数 $\text{roundup}(x)$ 将参数 x 进位为较大的整数。这样, N_c 将总是奇数。测量信道尽可能等频率间隔分布, 并且要包含低端频道和高端频道。

6.2 要执行的测量

为了确定手机最大的峰值空间平均 SAR, 应当按照下列步骤 1~3 在每一频段、每一被测设备位置、配置和工作模式下对手机进行测量。图 8 是测量流程图。

步骤 1: 在下列情况下, 在靠近发射频段中心频率 (f_c) 的信道上按照 6.3 节的要求进行测量:

- (a) 所有的被测设备位置 (6.1.4 节描述的 SAM 模型左侧和右侧的贴脸和倾斜位置)。
- (b) 在 (a) 中每一位置的所有配置, 例如天线的伸缩等。
- (c) 在 (a) 中每一位置和 (b) 中每一配置和每一频段下所有的工作模式, 例如模拟或数字等等。

如果根据 6.1.5 节的算法, 测量频率超过 3 个 (即 $N_c > 3$), 那么应在所有频率下按照上述配置进行测量。

步骤 2: 按照步骤 1 确定的最大峰值空间平均 SAR 的状态, 在其他的测量频率进行 6.3 节描述的测量, 比如最低频率和最高频率 (参见 6.1.5 节)。另外, 对于步骤 1 确定的其他状态 (被测设备位置、配置和操作模式), 如果其空间峰值 SAR 在限值要求 3dB 以内, 建议也在其他测量频率下进行测量。

步骤 3: 考查所有数据, 确定步骤 1 到步骤 2 中所找到的峰值空间平均 SAR 最大值。

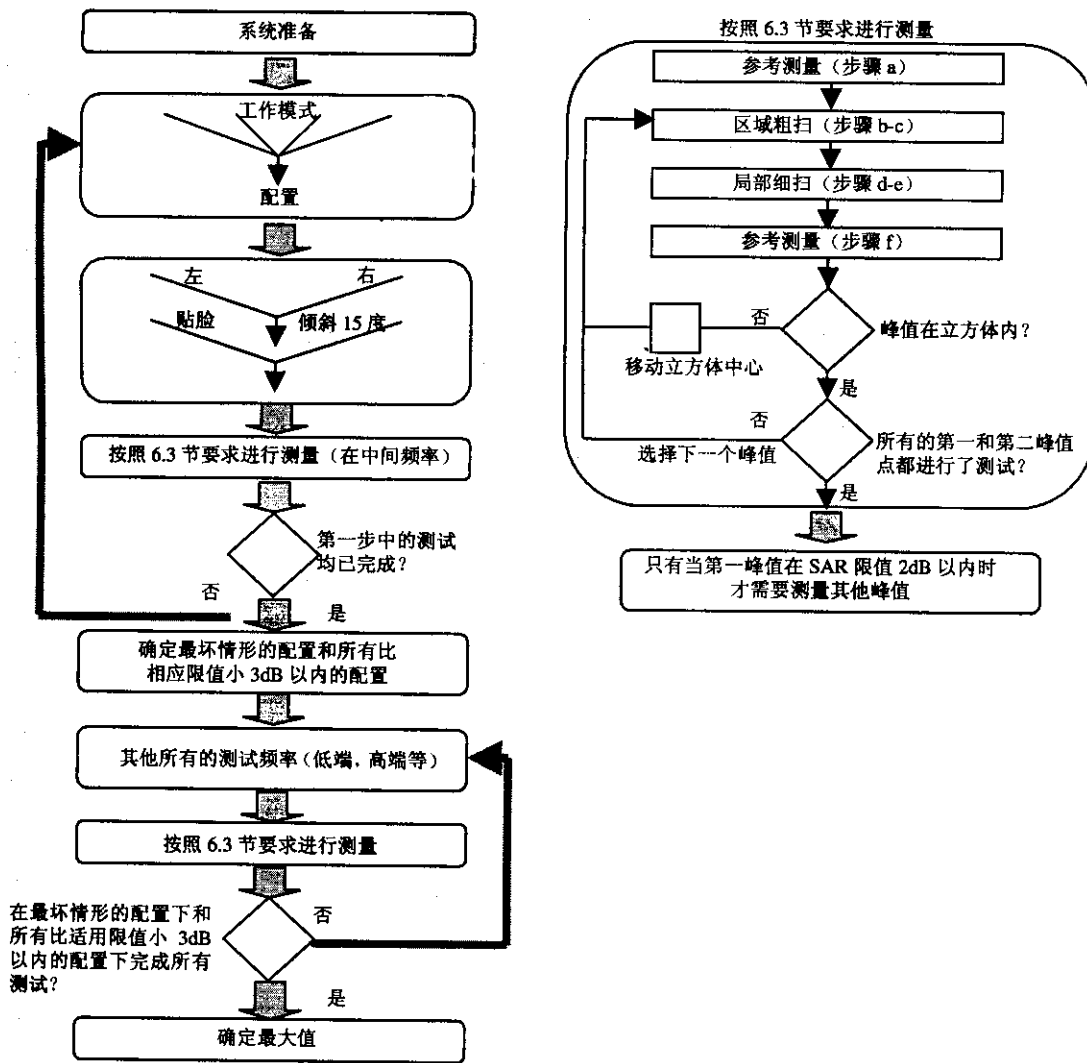


图8 执行测量的框图

6.3 测量步骤

在 6.2 节给定的每一测量条件下（见图 8），都必须执行下列步骤：

(a) 从模型内表面起在其法线方向上 10mm 或更小范围之内测量局部 SAR。测量点可以贴近耳朵；
 (b) 在模型内（区域粗扫阶段）测量 SAR 的分布。SAR 的分布是沿着模型一侧的内表面进行扫描的，至少在比手机和天线的发射区更大的区域内进行扫描。空间网格步长应该小于 20mm。如果使用表面扫描，那么探头偶极子的几何中心和模型内表面之间的距离应该是 8mm ($\pm 1.0\text{mm}$) 或更小。在所有测试点上，建议（但不是必须的）探头与表面法线的夹角小于 30° 。如果夹角大于 30° 并且测量距离接近一个探头尖端直径，那么边界效应就会变得很大且与极化有关，因此需要考虑这个附加的不确定度。

(c) 从所扫描的 SAR 的分布中，确定 SAR 最大值的位置，同时也要确定在 SAR 最大值 2dB 以内的区域粗扫的局部最大值。仅当主要峰值在 SAR 限值 2dB 之内时（对于 1g 平均的 1.6W/kg 的限值是 1W/kg，对于 10g 平均的 2.0W/kg 的限值是 1.26W/kg），才需要测量其他峰值点。

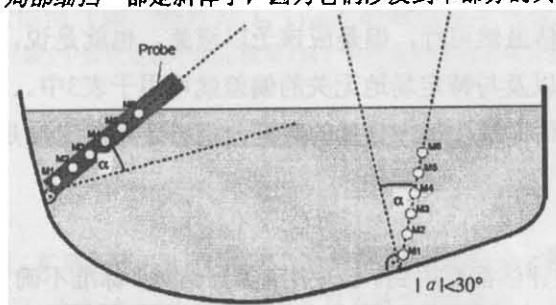
(d) 在最小体积为 $30\text{mm} \times 30\text{mm} \times 30\text{mm}$ （局部细扫阶段）内以 8mm 或更小的网格步长测量 SAR 值。垂直方向上的网格步长应该是 5mm 或更小。独立的网格应把中心定在 (c) 步中所找到的每个局部 SAR 最大点。如果模型表面和探头尖端的距离大于探头尖端直径的一半，由液体介质边界和探头封装套

之间场的扭曲所导致的不确定度就可以减到最小。其他方法也许可以对这些边界效应采取修正步骤，这使得探头与模型表面的距离即使小于半个探头直径也能达到高精度测量。在所有的测量点，建议（但不是必须的）探头与表面法线的夹角小于 30° 。

(e) 可使用附录 C 中定义的内插和外推法来推算由质量平均所需的空间分辨率下的局部 SAR 值。

(f) 在与 (a) 步完全一样的位置再次测量局部 SAR。应将测量漂移的绝对值（如：(f) 和 (a) 中 SAR 测量值之差）记入不确定度（表 3）。建议漂移不要超过 $\pm 5\%$ 。如果这一要求即使重复测试也达不到，额外的信息（例如局部 SAR 对时间的一些数据）应该用来证明测试过程中的输出功率对于设备的测试是合适的。如果需要进行不止一次的局部细扫的话，可在每次局部细扫之后进行功率参考的测量。然而，应以设备充满电的初始状态和所有使用电池的后续测量之间的差值来记录漂移。

注：术语“区域粗扫”和“局部细扫”都是斜体字，因为它们涉及到本部分的具体的测量协议。



注：M1, ..., M6——用于表面外推法的示例测量点；

α ——探头与表面法线的夹角。

图9 探头与表面法线之间的方向性关系示意图——在两个不同的位置

6.4 SAR 测量数据的后处理

6.4.1 内插法

如果测量网格的分辨率达不到用于计算给定质量内的平均 SAR 值所需的要求，就要在测量点之间进行内插。内插法的例子见附录 C。

6.4.2 外推法

用于测量 SAR 的电场探头通常包括 3 个非常接近的、相互正交的偶极子，并且封装在保护套中。测量（校准）点位于离探头尖端几毫米的地方，并且当需要明确 SAR 测量点的位置时，我们就要考虑这个偏移。外推法的例子请见附录 C。

6.4.3 平均体积的定义

平均体积应该在一个能构建 1g 或 10g 质量的立方体。1000kg/m³ 的密度可表示头部组织的密度（不用模型中液体的实际密度）。1g 立方体的边长应该是 10mm，10g 的应该是 21.5mm。

如果立方体与模型相交，应使它朝向接触模型表面的 3 个至高点（见附录 C2.2.1），或表面中心正切的一个正面（见附录 C2.2.2）。应修正立方体最接近于模型表面的一个面，使其与表面相吻合，并且所增加的体积要从立方体的相对面减去。立方体的平均法会在附录 C 中给出。之前所定义的某一质量平均 SAR 的估测方法也可参见附录 C。

6.4.4 找寻最大值

为了寻找最大值，平均立方体应该在局部最大 SAR 值附近靠近模型内表面的局部细扫体积内移动（遵循附录 C 的建议）。有最高的局部最大 SAR 值的立方体不应该在局部细扫体积的边缘/周边。如果发生这种

情况，必须移动局部细扫体积并且重新测量。

7 不确定度评估

7.1 总体考虑

7.1.1 不确定度评估基本原则

无线设备SAR值测量不确定度的评估原则基于ISO/IEC的《测量不确定度表述导则》^[25]所提供的基本规则。然而，对复杂测量的不确定度评估依然是一个难题并需要高水平的、专业化的工程知识。便利起见，本章中给出了一些指导方针和近似的公式，从而能够对每一不确定度分量进行独立的评估。基本原则是为300MHz~3GHz整个频率范围内的任意被测设备提供系统不确定度。这样做的弊端在于可能高估了某些情况下的不确定度。其优点是可由第三方执行不确定度的评估，例如，表3可在系统安装后由制造商提供。特定频段不确定度的评估虽然可行，但是应该予以避免。也就是说，如果标准允许对某些影响量有X%的偏差，那么最大的X%以及与特定场地无关的偏差就可用于表3中。值得注意的是，仅提供表3而没有关于每个影响量（包括评估方法、每一分量的数据分析以及不确定度是如何从一组数据中得来的）评估的详细说明是不够的。

7.1.2 A类和B类评估

标准不确定度的A类和B类评估都要用到。当使用A类评估时，标准不确定度 u_i 可通过统计分析采用评估标准偏差来得到。使用B类时， u_i 可用待测量的上限 a_+ 和下限 a_- 并根据概率分布方程定义 $a = (a_+ - a_-) / 2$ 来计算，并有：

- 矩形分布： $u_i = a / \sqrt{3}$
- 三角形分布： $u_i = a / \sqrt{6}$
- 正态分布： $u_i = a / k$
- U形（非对称）分布： $u_i = a / \sqrt{2}$

其中：

a ——影响量上下限值差值的一半；

k ——包含因子；

u_i ——标准不确定度。

在同一测量配置下对相同特定设备或特定量进行 n 次重复测量，平均值的标准偏差（ $= s / \sqrt{n}$ ）可以用于计算标准不确定度，其中 s 是根据同一测量条件下的一系列测量数据得出的标准偏差。如果某一特定设备的测量系统、方法、配置和条件等等具有典型性，那么在大量重复测量的基础上得到的预先确定的标准偏差就能够用于评估不确定度分量^[63]。预先确定并不包括特殊EUT的分量。对某一特定设备，用于平均值的标准偏差的测量次数 n 是使用这个特定设备的测量次数，而不是在预先确定的过程中进行测量的次数。

7.1.3 自由度和包含因子

当自由度小于30时，包含因子2就不是适合达到95%置信区间的乘数^[2]。一个简化的近似方法是使用 t 来代替包含因子 k （这里的 t 是 t 因子）。 t 分布的标准偏差比正态（高斯）分布的要窄，但是自由度很大时其曲线近似于高斯分布。基于B类评估的大多数标准不确定度，其自由度可假设为无穷大^[3]。那么合成不确定度 u_c 的有效自由度将很大程度上取决于A类分布的自由度和它们相应于B类分布的大小。

对于小数量的采样的包含因子 (k_p) 可这样得到:

$$k_p = t_p(v_{\text{eff}}) \quad (7-1)$$

式中:

k_p ——对于给定概率 p 的包含因子;

$t_p(v_{\text{eff}})$ ——t 分布;

v_{eff} ——使用韦尔奇-萨特思韦特式 (Welch-Satterthwaite formula) 得到的自由度:

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^m \frac{c_i^4 u_i^4}{v_i}} \quad (7-2)$$

下角标 p 代表置信度的近似值 (如: 95%)。 $t_p(v_{\text{eff}})$ 的表列值是公开获取的, 如 NIST 1297^[4]。

注: 举例而言, 假设根据表3 (表3中假设定位不确定度是7%) 中所有的影响量而计算的复合标准不确定度是 $v_c=14.5\%$ 。

假设测量采样数等于5, 所以 $v_i=4$ 。其他所有分量的自由度是 $v_i=\infty$ 。根据式 $v_{\text{eff}} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^m \frac{c_i^4 u_i^4}{v_i}}$, 合成标准不确定度的有效自

由度是 $v_{\text{eff}}=74$, 所以此时 $k=2$ 适用, 扩展不确定度是 $U=29\%$ 。如果定位变化的标准不确定度达到9%, 并且测量次数减小到4 ($v_i=3$), 那么 $v_c=15.6\%$, $v_{\text{eff}}=27$, $k=k_p=k_{95}=t_{95}=2.11$, 则扩展不确定度就变成了 $U=2.11 \times 15.6=32.9\%$ 。

7.2 不确定度分量的分布

7.2.1 测量系统的分布

7.2.1.1 测量设备的校准

附录 B 中给出了灵敏度 (校准) 的评估协议, 包括了不确定度评估方法。灵敏度的不确定度假定其符合正态概率分布。

7.2.1.2 探头各向同性

探头的各向同性应该根据附录 B 中定义的协议进行测量。各向同性的不确定度假定其符合矩形概率分布。

$$\text{全部的各向同性不确定度} = \sqrt{(1-w_i) \times [\text{轴各向同性}]^2 + w_i \times [\text{球各向同性}]^2}$$

其中: w_i 是表征围绕探头尖端所伸入的虚拟半球的场入射角的权重因子。

如果探头的方向在整个测量中都垂直于模型表面 (在 $\pm 30^\circ$ 之内), 那么 $w_i=0.5$, 否则 $w_i=1$ 。

7.2.1.3 探头线性度

根据附录 B, 通过测得的电场强度的平方评估探头的线性度, 然后通过修正达到线性度。修正后需要考虑其不确定度。由于二极管传感器在脉冲场中可作为峰值探测器, 线性度应该通过两种信号来评估——一种是连续波信号 (CW), 一种是占空比 10%、重复率为 500Hz (比使用 11Hz 和 217Hz 更能得到较保守的不确定度评估) 的脉冲信号。应该以不大于 3dB 的步长在 0.4W/kg~100W/kg 的范围内进行评估。SAR 的不确定度为整个范围内测量场强值平方和实际场强值平方的最大偏差。假定不确定度符合矩形概率分布。

7.2.1.4 检出限

根据附录 B 评估检出限。7.2.1.3 节中的线性度测量给出了评估下检出限 0.4W/kg 和上检出限 100W/kg 的不确定度, 并得出占空因子在 10% 到 100% 之间。如果在这个范围之外进行测量, 就要进行相应地进

行扩展并按照 7.2.1.3 的描述做出相同的评估。假定不确定度符合矩形概率分布。

7.2.1.5 边界效应

探头的边界效应是指在模型壳体表面，由于探头和介质边界之间的耦合效应而产生的测量误差。根据附录 B 使用波导装置可对边界效应特性进行评估。探头边界效应不确定度可由表征边界效应的指数衰减和线性方程的一阶近似值来推得，并按下式计算：

$$SAR_{\text{uncertainty}}[\%] = \delta SAR_{\text{be}} \frac{(d_{\text{be}} + d_{\text{step}})^2}{2d_{\text{step}}} \frac{(e^{-d_{\text{be}}/(\delta/2)})}{\delta/2} \quad (\text{对于 } (d_{\text{be}} + d_{\text{step}}) < 10\text{mm}) \quad (7-3)$$

式中：

$SAR_{\text{uncertainty}}$ ——表示为百分比形式的探头边界效应不确定度；

d_{be} ——模型表面和最近的局部扫描点之间的距离，单位是 mm；

d_{step} ——最靠近模型表面的第一和第二测量点之间的距离，单位是 mm；假设边界效应在第二点可忽略；

δ ——本部分中给出的头部组织模拟液的最小趋肤深度（例如在 3GHz， $\delta \approx 14\text{mm}$ ），单位是 mm；

δSAR_{be} ——距离边缘 d_{be} 处的 SAR 测量值和理论值之间的偏差（表示为百分比的形式）。

假定探头边界效应不确定度符合矩形概率分布。

7.2.1.6 电子读数设备

必须在最坏情况下对探头电子读数设备的不确定度（包括探头放大器、线性度、探头负载和评估算法的不确定度）进行评估。如果电子读数设备的各器件有相同大小的制造公差，那么每个公差都应按照正态概率分布转换为标准不确定度。然后再根据这些不确定度的和方根值得出整个电子读数设备的不确定度。

7.2.1.7 响应时间

将探头照射于在组织模拟液内、模型边界处产生最小为 2.0W/kg 且恒定的电场中。信号响应时间定义为在阶跃变化或电源开关之后，测量设备（探头及电子读数装置）到达期望值的 90% 处所需要的时间。测量 SAR 值时如果探头在测量点上稳定的时间大于响应时间的两倍，那么由响应时间所导致的不确定度是可以忽略的。此时在表 3 的第三列中填入 0 即可。否则填入实际的不确定度。

7.2.1.8 积分时间

如果手机发射的不是连续波（CW）或读数系统与信号不同步，由于离散性在某一特定点上利用积分时间测量电场时可能会引入额外的不确定度。这种不确定度与信号特性有关，必须在进行所有的 SAR 测量前予以预估。如果使用非连续波，那么由积分时间不确定度引起的不确定度也必须在总不确定度评估中予以考虑。假设积分时间不确定度符合矩形概率分布。

注：对于 TDMA 信号（ t_{frame} = 帧的周期），在已知积分时间（ t_{int} ）内的最大不确定度是：

$$SAR_{\text{uncertainty}}[\%] = 100 \times \sum_{\text{所有的子帧}} \frac{t_{\text{frame}}}{t_{\text{int}}} \frac{\text{slot}_{\text{idle}}}{\text{slot}_{\text{total}}} \quad (7-4)$$

当 $t_{\text{int}} > t_{\text{frame}}$ 时：

$SAR_{\text{uncertainty}}$ ——以百分数表示的积分时间不确定度；

t_{frame} ——帧周期；

$\text{slot}_{\text{idle}}$ ——一个帧中的空闲时隙数；

$slot_{total}$ ——总时隙数。

7.2.2 机械约束的分量

7.2.2.1 扫描系统

电场探头定位仪的机械约束可在探头定位的精度和可重复性上产生偏差，从而增加了SAR测量的不确定度。不确定度可根据与电场探头传感器的几何中心所决定的实际测量位置有关的探头定位仪的规格来评估，并且表示成最大偏差 d_{ss} 。假设其符合矩形概率分布，由探头定位仪的机械约束引起的最大峰值空间平均SAR的不确定度 d_{ss} 可使用一阶误差来近似计算：

$$SAR_{uncertainty}[\%] = \frac{d_{ss}}{\delta/2} \times 100 \quad (7-5)$$

式中：

$SAR_{uncertainty}$ ——不确定度，以百分数形式表示；

d_{ss} ——计算出来的探头传感器中心的位置和参照系统制造商所定参考点的实际位置之间的最大位置不确定度；

δ ——本部分中给出的头部组织模拟液的最小趋肤深度（例如在3GHz， $\delta \approx 14\text{mm}$ ），单位是mm；

如果制造商并未指明探头定位仪的机械约束，则必须通过评估确定其不确定度分量。一个简化方法是，评估在区域粗扫范围内探头移动的相对精度，然后将软件指定位置 and 实际到达位置之间的差异转化成不确定度。假定该不确定度符合矩形概率分布。

7.2.2.2 模型外壳

模型不确定度的定义为源于模型制造公差感应峰值空间平均SAR的不确定度，以及模型内组织模拟液介电参数的不确定度（见7.2.3.3，7.2.3.4）。模型的制造公差包括：

- 模型内外壁的形状与本部分CAD文件中所定义的形状之间的偏差；
- 模型外壳的厚度与CAD文件中所定义的厚度之间的偏差。

不确定度是根据SAR值与信号源的距离的相关性的最坏情况进行评估的，也就是说，取决于距离的平方。假设头部组织模拟液和源等效丝状物电流密度（等效物电流密度并不是相应于最近的电流源，而是相应于近似与局部磁场分布的电流密度）的位置之间的距离是 $a=10\text{mm}$ 。

$$SAR_{uncertainty}[\%] = 100 \times \left(\frac{(a+d)^2}{a^2} - 1 \right)$$

$$SAR_{uncertainty}[\%] = 100 \times \frac{2d}{a} \quad (\text{如果 } d \ll a) \quad (7-6)$$

式中：

$SAR_{uncertainty}$ ——不确定度，以百分数形式表示；

d ——模型外壳厚度和模型形状的最大公差；

a ——头部组织模拟液和源等效丝状物电流密度的位置之间的距离。

把该不确定度值填入表3的第三列中，并假设其符合矩形概率分布。

7.2.2.3 探头相对于模型外壳表面的定位

必须评估探头定位仪相对于模型外壳的不确定度 d_{ph} 。假设其符合矩形概率分布，峰值空间平均SAR的不确定度分量分布可通过一阶误差来近似计算：

$$SAR_{\text{uncertainty}}[\%] = \frac{d_{\text{ph}}}{\delta/2} \times 100 \quad (7-7)$$

式中:

$SAR_{\text{uncertainty}}$ ——不确定度, 以百分数形式表示;

d_{ph} ——在确定探头尖端与模型外壳之间距离时产生的不确定度。也就是在确定模型相对于探头尖端定位时的不确定度;

δ ——本部分中给出的头部组织模拟液的最小趋肤深度(例如在3GHz, $\delta \approx 14\text{mm}$), 单位是mm。

把该不确定度值填入表3的第三列中, 并假设其符合矩形概率分布。

7.2.2.4 设备定位和夹具的不确定度

设备的夹具是在SAR实验过程中用于保持手机处于贴住模型的固定位置的。因为设备夹具可能影响到待测手机的特性, 由设备夹具扰动产生的SAR测量不确定度应当使用7.2.2.4.1中的过程进行评估。由于设备夹具的机械公差而产生的定位变化的SAR不确定度在7.2.2.4.2中讨论。这两节都包含了使用特定设备和预估不确定度两种情况下的步骤。如果使用预估不确定度, 在多数情况下对特定设备进行多次重复测试可以进一步减小预估不确定度的标准偏差。

7.2.2.4.1 设备夹具扰动不确定度

设备夹具必须用低损耗介电特性材料, 其相对介电常数不得大于5, 损耗正切不得超过0.05(这些材料参数可通过多种方法, 如同轴接触探头法测得)。不过, 某些夹具可能仍然会影响到发射源, 此时应该评估夹具产生的不确定度(即: 与不使用夹具的系统配置之间的偏差)。对于特定测量设备不确定度的评估应根据7.2.2.4.1.1中的B类不确定度方法来进行。7.2.2.4.1.2中给出了评估一组具有相似特征的多个手机在同一夹具上测量的A类不确定度的方法。

7.2.2.4.1.1 对于特定测量设备的设备夹具扰度的不确定度: B类不确定度

必须通过使用平坦模型按照如下两步来评估对于某一特定手机在某一特定配置状态下的不确定度。

1) 按照在模型头部测量的要求使用夹具固定手机, 然后将手机紧贴在平坦模型的正下方(手机的水平和垂直中心线与平坦模型底部平行), 评估峰值空间平均 SAR 值 ($SAR_{w/\text{holder}}$);

2) 使用泡沫聚苯乙烯或类似的低损耗、非反射材料(介电常数不超过 1.2, 损耗正切不超过 10^{-5}) 在同一位置固定手机评估峰值空间平均 SAR 值 ($SAR_{w/o \text{ holder}}$)。

表 3 中使用的 SAR 的容限是:

$$SAR_{\text{uncertainty}}[\%] = \left(\frac{SAR_{w/\text{holder}} - SAR_{w/o \text{ holder}}}{SAR_{w/o \text{ holder}}} \right) \times 100 \quad (7-8)$$

式中:

$SAR_{\text{uncertainty}}$ ——不确定度, 以百分数表示;

$SAR_{w/\text{holder}}$ ——使用设备夹具的 SAR, 单位是 W/kg;

$SAR_{w/o \text{ holder}}$ ——不使用设备夹具的 SAR, 单位是 W/kg。

假定不确定度符合矩形概率分布, 自由度 $\nu_i = \infty$ 。

7.2.2.4.1.2 对于特定测量设备的设备夹具扰度的不确定度: A类

A类不确定度分析适用于具有相似形状和 SAR 分布的一组手机。源于这种分析的不确定度也可适用于其他具有相似 SAR 特征并且使用相同设备夹具的手机, 这样可不必进行 7.2.2.4.1.1 中的特定测试。设

备夹具对于不同配置下的 N 个不同手机模型在其各种配置下的影响可分别按照 7.2.2.4.1.1 中的步骤对每个模型进行评估 (N 至少是 6)。

$$SAR_{\text{uncertainty}} [\%] = \left(\frac{SAR_{w/\text{holder}} - SAR_{w/\text{holder}}}{SAR_{w/\text{holder}}} \right) \times 100 \quad (7-9)$$

式中:

$SAR_{\text{uncertainty}}$ ——不确定度, 以百分数表示;

$SAR_{w/\text{holder}}$ ——使用设备夹具的 SAR, 单位是 W/kg;

$SAR_{w/o \text{ holder}}$ ——不使用设备夹具的 SAR, 单位是 W/kg。

使用各个不确定度的均方根值来评估表 3 中相应的不确定度, 自由度 $\nu_i = N - 1$ 。考虑手机设计的改变, 建议每年评估一次。

7.2.2.4.2 使用特定被测设备夹具的手机定位不确定度: A 类不确定度

实际测量过程中手机的定位与本部分中的定义之间的差异, 取决于手机定位仪的精确度以及测试员对于标准的理解和使用。这种差异造成的对峰值空间平均 SAR 的影响则取决于手机的设计。由于这些参数是密不可分的, 因此必须执行下列 A 类不确定度测量。

7.2.2.4.2.1 使用特定夹具定位特定手机的不确定度

按照本部分的方法在需要评估峰值空间平均 SAR 值的设备配置和定位状态下, 重复至少 4 次以上评估 (对于 N 的总数 ≥ 5)。计算平均值的标准偏差 (百分比形式), 自由度 $\nu_i = N - 1$ 。

7.2.2.4.2.2 使用特定夹具定位特定类型手机的不确定度

A 类不确定度分析适用于一组具有相似形状和 SAR 分布的手机。 M 的值至少应该是 6, M 组测量中的每一组都应按照 7.2.2.4.2.1 进行 (N 次)。 M 组测量中的一半应位于贴脸位置, 另一半位于倾斜位置。相应的不确定度应该是 M 个独立的标准偏差的均方根值。填入不确定度表中的值应该是相应于 68% 置信度的 $k=1$ 的标准不确定度。自由度是 $\nu_i = (N \times M) - 1$ 。如果使用本方法来确定不确定度, 那么就没必要对每部手机使用 7.2.2.4.2.1 中的步骤。考虑手机设计的改变, 建议每年评估一次。

7.2.3 物理参数的分量

7.2.3.1 简介

介电参数的测量方法详见附录 J, 不确定度评估方法见 J.7。

注: 为了与通用的计量方法相一致, 建议每一个介电参数的测量不确定度应小于或等于介电参数相对于目标值的容限。

7.2.3.2 液体密度

组织模拟液的密度假定为 1000 kg/m^3 。SAR 评估中必须使用该密度值。

7.2.3.3 液体导电率

液体导电率的不确定度有两种来源。其一是表 1 目标值的 $\pm 5\%$ 的容限, 其二是评估导电率的测量步骤。假定不确定度符合矩形概率分布 (附录 J.7)。

7.2.3.4 液体介电常数

液体介电常数不确定度有两种来源。其一是表 1 目标值的 $\pm 5\%$ 的容限, 其二是评估介电常数的测量步骤。假定不确定度符合矩形概率分布 (附录 J.7)。

7.2.3.5 被测设备输出功率、探头、温度、湿度的漂移

6.3 的测量步骤的第一步和最后一步给出了被测设备和测量系统电子仪器、温度和湿度的变化和漂移，其允许变化范围小于 $\pm 5\%$ 。假定不确定度符合矩形概率分布。

7.2.3.6 环境的扰度

环境的扰度源于下列因素：

- 试验室中波的反射；
- 模型外壳和无线设备夹具的电磁特性的影响；
- 电磁场的本底噪声。

容限应该小于 $\pm 3\%$ ，假定不确定度符合矩形概率分布。

7.2.4 后处理的分量

7.2.4.1 简介

本节将要介绍对决定 1g 和 10g 峰值空间平均 SAR 值使用的离散测量数据进行后处理所导致的不确定度，也就是内插算法、外推算法、平均算法和寻找最大值算法的合成不确定度。这些算法基于对场特性的一般假设，因此对于某一特定手机并不能非常准确的预测其在组织模拟液中的电场分布，从而将会增加一定的不确定度。算法的不确定度是测量分辨率和区域粗扫和局部细扫中所使用的后处理方法的函数。

实际峰值处的 SAR 分布与工作频率、手机的设计、测量位置以及跟组织模拟液的贴近程度紧密相关。低频且远距离工作的信号源其 SAR 分布梯度相对平缓，而紧贴组织模拟液的高频源（例如螺旋天线）其 SAR 分布梯度会很陡峭。很多情况下由于磁场的抵消，最大的 SAR 值不一定在模型表面^[5]。

下文中的 SAR 分布分析函数意在尽量模拟这些条件，并用于评估不确定度。用这些根据经验得出的参考函数产生一系列虚拟 SAR 数据，来评估测量系统软件的后处理子程序。使用与实际测量相同的粗扫和细扫网格间距，计算网格点得到参考函数值，并将该值输入到 SAR 系统软件中。按照 7.2.4.2 给出的三个 SAR 分布函数来计算与实际区域粗扫和局部细扫测量网格相应的网格点上的 SAR 值，然后通过系统的内插、外推和积分运算处理这些数据。将 1g 和 10g 的 SAR 结果与 7.2.4.2 中所列的参考 SAR 值进行比较。7.2.4.3 中给出了区域粗扫和局部细扫后处理算法不确定度的评估过程。该测量函数假设组织模拟液和模型的分界面是平坦的。当分界面是曲面时在 7.2.4.4 中讨论了测量函数的适用性。后处理程序的不确定度分析假设解析分布函数能准确无误地计算网格点的位置，并且不包括探头定位和测量的不确定度。

7.2.4.2 评估测量函数

根据本部分所定的步骤测量手机 SAR 值时， f_1 、 f_2 和 f_3 这三个解析函数代表了 SAR 可能的分布范围。空间平滑分布函数 f_1 和空间陡峭分布函数 f_3 用于覆盖手机 SAR 测量中期望的场梯度范围。函数 f_2 用于说明模型/组织模拟液分界面上伴有磁场抵消情况的电磁照射条件。分布函数定义在模型表面 $z=0$ ，组织模拟液均处于 $z>0$ 的位置。

$$f_1(x, y, z) = Ae^{-\frac{z}{2a}} \cos^2\left(\frac{\pi \sqrt{x^2 + y^2}}{2 \cdot 5a}\right);$$

$$f_2(x, y, z) = Ae^{-\frac{z}{a}} \frac{a^2}{a^2 + x^2} (3 - e^{-\frac{2z}{a}}) \cos^2\left(\frac{\pi y}{2 \cdot 3a}\right)$$

$$f_3(x, y, z) = A \frac{a^2}{\frac{a^2}{4} + x'^2 + y'^2} \left(e^{-\frac{2z}{a}} + \frac{a^2}{2(a+2z)^2} \right) \quad (7-10)$$

式中：

x' —— $x+d$ mm；

y' —— $y+d$ mm；

d ——偏移参数；

a ——是20 mm；

A ——是1W/kg。

上式中参数 a 和 A 除了用于形成适当的SAR分布之外，没有任何特殊的物理意义。举例来说，当 $d=2.5$ mm时SAR分布就产生横向移动，这样一来，峰值的位置和间距增量为5mm的测量网格就不再对齐了。这种偏移量是用来测试软件的峰值搜寻子程序和不确定度的。在与 (x, y, z) 坐标轴准直的1g和10g立方体内，使用分布函数 f_1, f_2, f_3 计算得到的参考SAR值在表2中给出。在后面的章节中，这些参考值将用来测试其他数据处理函数。

表2 用于评估后处理程序不确定度的 SAR 参考值 (W/kg)

函数	SAR 参考值 (W/kg)	
	1g 立方体	10g 立方体
f_1	0.881	0.759
f_2	1.796	1.375
f_3	3.049	1.385

7.2.4.3 数据后处理算法的不确定度评估

7.2.4.3.1 区域粗扫不确定度评估

对给定不确定度的峰值空间平均SAR进行评估的前提条件是最大照射位置可以通过区域粗扫的数据精确定位，并且保证峰值空间平均SAR值完全包含在局部细扫的体积内。换言之，区域粗扫的内插算法应该可以以 $\pm L_z/2$ 或者更好的精确度定位峰值SAR (L_z 是局部细扫体积的边长)。如果根据本节中的程序进行测试后可以满足这个前提条件，区域粗扫的评估就不计入总的确定度。

将在通常进行区域粗扫的网格点上计算所得的参考函数值输入到系统软件中。运用内插算法处理这些数据完成区域粗扫并且确定SAR的峰值点位置 (x_{eval}, y_{eval}) 。当 $d=2.5$ mm时，通过解析函数在 $(x_{ref}, y_{ref}) = (-2.5, -2.5)$ mm处确定峰值位置。比较这两个位置。下脚标“eval”和“ref”分别指评估值位置和参考值位置。比较结果必须满足下列两个不等式：

$$|x_{ref} - x_{eval}| \leq L_z/2 \text{ mm}$$

$$|y_{ref} - y_{eval}| \leq L_z/2 \text{ mm}$$

二维区域粗扫准确定位SAR峰值的能力依赖于区域粗扫网格的空间分辨率 $(\Delta x, \Delta y)$ ，内插值空间分辨率 $(\Delta x_i, \Delta y_i)$ 和使用的内插函数 $[g_i(x), g_i(y)]$ 的类型。准确度也与相对于真实峰值位置 (x_{ref}, y_{ref}) 的评估网格的位置和使用的评估点数 (N_x, N_y) 有关。

以下是用于评估区域粗扫SAR峰值定位内插算法不确定度的步骤：

- (a) 选择测量分辨率 $(\Delta x, \Delta y)$ 和评估（相应于测量）点的个数

(N_x, N_y) 。区域粗扫的中心应该位于 $(x_0, y_0) = (0, 0)$ 处:

(b) 在下列范围内的区域粗扫的评估网格点处, 使用函数 f_1, f_2 和 f_3 计算 SAR 值:

$$x_0 - \Delta x \times [(N_x - 1) / 2] \leq x \leq x_0 + \Delta x \times [(N_x - 1) / 2],$$

$$y_0 - \Delta y \times [(N_y - 1) / 2] \leq y \leq y_0 + \Delta y \times [(N_y - 1) / 2],$$

其中假设 N_x 和 N_y 为奇整数; 并假设 $Z=0$, 因为对于这 3 个函数, 峰值的位置和 z 值没有关系。

(c) 由 3 个分布函数计算求得的 SAR 值再用 SAR 测量系统以空间分辨率 $(\Delta x_i, \Delta y_i)$ 按照内插函数 $[g_i(x), g_i(y)]$ 进行内插计算, 最后确定峰值 SAR 的位置 (x_{eval}, y_{eval}) 。如果测量系统不允许导入 SAR 值进行评估, 那么应该使用其他的方法来执行相同的算法以确定内插法和寻找峰值的不确定度。

(d) 通过内插算法确定的 SAR 峰值的位置应该满足下列方程:

$$|x_{ref} - x_{eval}| \leq L_z / 2 \text{ mm}$$

$$|y_{ref} - y_{eval}| \leq L_z / 2 \text{ mm}$$

否则, 数据处理和测量系统应该选用一个更好的网格分辨率和/或更多的内插点数来重复步骤 b) 到步骤 d)。

(e) 在 $0 < x_0 \leq \Delta x / 2$ 和 $0 < y_0 \leq \Delta y / 2$ 的范围内, 区域粗扫的中心 (x_0, y_0) 应当以 1mm 步长进行移动, 并在每一 (x_0, y_0) 点上重复步骤 b) 到步骤 d)。

7.2.4.3.2 局部细扫不确定度评估

将 1g 或 10g 的 SAR 最大值与 7.2.4.2 的参考 SAR 值相比较, 以评估局部细扫的不确定度。通过 7.2.4.3.1 的区域粗扫的步骤, 真实峰值的位置 (x_{ref}, y_{ref}) 将被 (x_{eval}, y_{eval}) 根据下列不等式的值所代替:

$$|x_{ref} - x_{eval}| \leq L_z / 2 \text{ mm}$$

$$|y_{ref} - y_{eval}| \leq L_z / 2 \text{ mm}$$

这个替换是由 7.2.4.2 中的参考方程 f_1, f_2, f_3 结合距离 d 来表示的。因为实际使用时这个替换会变化, 所以 d 的值可在下列范围内变化:

$$|d| \leq (L_z - L_c) / 2$$

其中 L_c 是立方体边长 (1g 是 1cm, 10g 是 2.15cm)。对于每一个距离 d , 记录由 3 个函数中任何一个产生的最大不确定度。几个距离 d 下的最大不确定度的均方根值会被作为由外推、内插和积分运算产生的合成不确定度。

注: 尽管区域粗扫的要求是 SAR 峰值位于 $|d| \leq L_z / 2$ 范围内, 这里使用更小的范围 $|d| \leq (L_z - L_c) / 2$ 以确保粗扫之后即可计算 1g 或者 10g 的立方体。对于 $(L_z - L_c) / 2 \leq |d| \leq L_z / 2$ 的情况, 测量软件应该给出警告说明没有得到 1g 或者 10g 的立方体并且重新进行测量。这不会影响不确定度, 所以此处不必考虑这个问题。

(a) 为函数 f_1, f_2, f_3 选取一个替换值 d 。 d 在 $-(L_z - L_c) / 2$ 到 $+(L_z - L_c) / 2$ 范围内应该以极小的步长 (例如 1mm) 改变。替换应该沿 x 轴和 y 轴方向分别进行。

(b) 在与被测局部细扫体积点对应的网格点上, 根据函数 f_1, f_2, f_3 计算 SAR 值。局部细扫体积的中心点在:

$$(x, y, z) = (0, 0, L_h / 2 + d_{be})$$

式中: L_h 是局部细扫体积的高度;

d_{be} 是测量点与内表面之间的最小距离。

(c) 计算出来的 SAR 值由系统软件外推至 $z=0$ 处的模型表面，以此获得局部扫描中，由于探头限制而无法测得的点。然后再由系统软件对计算所得的和外插所得的点进行内插以得到一个更好的分辨率，接下来系统软件会使用积分算法和在局部扫描的体积内找寻峰值空间平均 SAR 的算法来决定 1g 或者 10g 的 SAR 最大值。如果测量系统不允许导入 SAR 值进行评估，那么应该使用其他的方法来执行相同的算法以确定外推、内插和积分算法的不确定度。

(d) 由测量系统或者数据处理软件得到的 1g 或者 10g SAR 值 (SAR_{eval}) 与 7.2.4.2 的参考 SAR 值相比较。每一个分布函数的 SAR 不确定度可通过下式计算：

$$SAR_{uncertainty}[\%]=100 \times \left| \frac{SAR_{eval} - SAR_{ref}}{SAR_{ref}} \right| \quad (7-11)$$

(e) 记录由 3 个分布函数中任何一个所评估的 SAR 不确定度的最大值。

(f) 对不同的 d ，重复步骤 (b) ~ (d)。

(g) 计算每一 d 下步骤 (d) 所得不确定度的均方根值。该均方根值将作为外推、内插和积分算法的总不确定度。

(h) 记录下列用于确定局部扫描不确定度的参数：

(1) 用于采样参考函数的网格尺寸，包括采样点个数和 3 个方向的步长；

(2) 内插点的个数，包括 3 个方向上两个测量点之间或者内插点之间的分辨率；

(3) 外推区域的维度 d_{bc} ，也就是在第一测量点处探头传感器到模型表面的距离（测量点在探头尖端的后面）；

(4) 所用的内插、外推和平均算法。

对于 3 个函数来说，计算条件（例如，网格点数、网格步长和 3 个方向上的内插点数）必须保持一致。

7.2.4.4 曲面不确定度评估

7.2.4.3 中的步骤假设组织模拟液和模型分界面是平面。但是，当组织模拟液和模型分界面是光滑曲面时，用这些函数所评估的不确定度同样有效。当网格与表面之间的距离相同时，函数基于分界面是平面的事实并不限制其在曲面条件下的适用性。图 10 展示了确定平均体积的过程。当然，组织模拟液和模型边缘分界面是平面时用这些函数所进行不确定度评估对于光滑平滑曲面模型来说也同样适用。图 10 描绘了在 SAR 后处理阶段构造立方体的可行方法。立方体朝向模型/液体分界面的前表面与曲面边缘吻合，以确保能够捕获所有的 SAR 峰值。后表面则进行相应的变形以保持正确的平均质量。4 个侧面的曲度和朝向都不变。

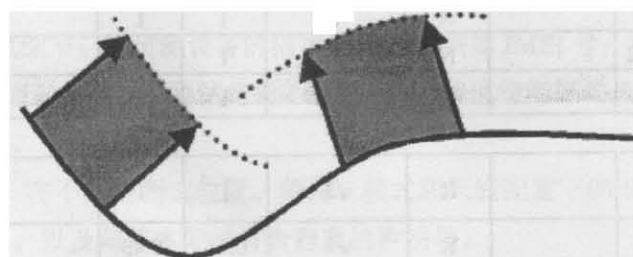


图 10 与模型表面相关的平均体积的表面和朝向

7.3 不确定度评估

7.3.1 合成与扩展不确定度

记录每一不确定度分量的说明、概率分布、灵敏系数和不确定度值。表格形式如表3所示。合成不确定度 u_c 应根据下式计算：

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^m c_i^2 \cdot u_i^2} \quad (7-12)$$

其中 c_i 是灵敏系数， u_i 是标准不确定度。扩展不确定度 U 应使用95%的置信度进行评估。

7.3.2 最大扩展不确定度

峰值空间平均SAR值在0.4~10W/kg范围内是，95%置信度的扩展不确定度不能超过30%。如果不确定度大于30%，那么报告的数据需要计入实际不确定度和目标值30%之间的百分比差值。

表3 手机 SAR 测量不确定度评估模板

A	b	c	d	$e=f(d, k)$	f	g	$h=c \times fle$	$i=c \times gle$	k
不确定度来源	描述	公差/不确定度±%	概率分布	Div.	c_f (1g)	c_g (10g)	标准不确定度±%, (1g)	标准不确定度±%, (10g)	v_i 或 v_{eff}
测量系统									
探头校准	7.2.1		N	1	1	1			∞
各向同性	7.2.1.2		R	$\sqrt{3}$	1	1			∞
边界效应	7.2.1.5		R	$\sqrt{3}$	1	1			∞
线性度	7.2.1.3		R	$\sqrt{3}$	1	1			∞
检出限	7.2.1.4		R	$\sqrt{3}$	1	1			∞
电子读数设备	7.2.1.6		N	1	1	1			∞
响应时间	7.2.1.7		R	$\sqrt{3}$	1	1			∞
积分时间	7.2.1.8		R	$\sqrt{3}$	1	1			∞
射频环境条件：噪音	7.2.3.6		R	$\sqrt{3}$	1	1			∞
射频环境条件：反射	7.2.3.6		R	$\sqrt{3}$	1	1			∞
探头定位器械限制	7.2.2.1		R	$\sqrt{3}$	1	1			∞
探头相对于模型外壳的定位	7.2.2.3		R	$\sqrt{3}$	1	1			∞
后处理	7.2.4		R	$\sqrt{3}$	1	1			∞
测量样品相关									
测量样品定位	7.2.2.4		N	1	1	1			M-1
设备夹具不确定度	7.2.2.4.2		N	1	1	1			M-1
输出功率的漂移	7.2.3.5		R	$\sqrt{3}$	1	1			∞
模型和配置									
模型不确定度（形状和厚度的制造公差）	7.2.2.2		R	$\sqrt{3}$	1	1			∞
液体导电率（目标值）	7.2.3.3		R	$\sqrt{3}$	0.64	0.43			∞
液体导电率（测量值）	7.2.3.3		N	1	0.64	0.43			M
液体介电常数（目标值）	7.2.3.4		R	$\sqrt{3}$	0.6	0.49			∞
液体介电常数（测量值）	7.2.3.4		N	1	0.6	0.49			M
合成标准不确定度			RSS						
扩展不确定度（95%置信度）									

注1: a-k列仅供参考。

注2: 表中所用的缩写:

RSS—和方根

N, R, U—正态, 矩形, U形概率分布

Div.—用于得到标准不确定度的除数

注3: 本表中的不确定度分量基于本部分的测量程序和协议。如果测量协议和程序发生变化, 例如模型配置和被测设备定位参数发生变化, 就会产生不同的不确定度分量。

注4: 除数是概率分布和自由度 (ν_i , ν_{eff}) 的函数。

注5: c_i 是灵敏系数, 用于将不确定度分量的变化度转换为SAR的变化度。

注6: 关于标准不确定度的自由度 (ν_i) 和扩展不确定度的有效自由度 (ν_{eff}), 参见7.1.3。

注7: ν_i 列中的M是测量次数。

注8: 对于频率为2GHz以上的基于乙二醇的组织模拟液, 暂定介电常数的公差为10%。

注9: 一些不确定度的影响量可以通过设备生产商提供的性能说明书进行评估; 如果某一分量的不确定度在每次测量中都不同, 那么就要对每次测量都进行评估。

注10: 除了要把测量模型相关组替换为偶极子组 (包含两个影响量: 偶极子轴到液体的距离, 输入功率和SAR漂移) 之外, 本模板中的所有其他影响量对于系统验证测量都是适用的。

8 测量报告的要求

8.1 概述

测量结果通常要记录在测量报告中, 并且应该包括对测量或校准结果作解释的必要信息以及所用的方法需要的所有信息。

关于测量报告的更详细的导则请参见ISO/IEC 17025的5.10节。

8.2 测量报告中应该记录的内容

执行重复测量、计算或在给定的校准和不确定度限值之内得出结果的测量所需的全部信息都要记录在报告中。测量报告应该包括:

(1) 一般信息: 被测设备的参考跟踪、测量要求、使用的标准。

(2) 测量系统: 人体模型、电子测量仪器、扫描定位系统和被测设备夹具、内插/外推法的描述。

(3) 不确定度评定。

(4) 被测设备及测试细节: 对被测设备的描述/序列号, 例如IMEI号; 测试条件(温度、湿度等); 所用液体及特性; 系统检查验证结果; 测试结果(每次测试的峰值空间平均SAR值和每一模式下的SAR最大值处的图式化结果)。

(5) 测试结果汇总: 在不同的测试位置、频段、模式和天线配置下的SAR值; 如果合适的话, 可加入有关的基本限值信息, 以及与基本限值符合程度的声明等。

附录 A
(规范性附录)
模型规格

A.1 模型形状的基本原理

模型的身体部分是电磁场放射剂量测定的重要组成部分。虽然理想情况下模型最好可以模拟其所表征的人身体部分的解剖学细节，但是这样做并不切合实际。因此必须定义和标准化能够影响SAR测量的相关特性、尺寸和材质特性。

将人群测量学得到的人体解剖的形状和尺寸的数据进行统计分析，用来指导建立理想的模型形状。1988年一份关于美国军人的人体测量学报告提供了一组对于不同年龄、民族、种族的人的采样数据^[1]。头部的形状是由许多直线和曲线构成的，如图A.1所示。

剂量学研究指出：与较小的头部（妇女和儿童）相比，较大的头部（成年男性）会吸收更多的能量，这就构成了一个最坏情况下的电磁照射^[5-7]。使用具有90%百分位的成年男子的大头尺寸作为模型，这样可以保证所有使用者中有超过90%的人具有比其小的头部，同时也遭受更低的电磁照射。

后耳的突出部分直接决定着移动设备及其天线贴近人体头部的程度，同时也是确定SAR的一个重要参数。需要对耳朵的突出进行调整来模拟被测设备贴紧耳朵时耳朵受挤压的状态。耳朵的形状是定位被测设备的一个重要因子，设计时必须保证其能行准确和可重复的定位被测设备。

对手部进行模拟时，实际的困难是如何规定一个单一的手部握持位置，使其适用于所有的被测设备。此外，剂量学研究指出不使用手部模型头部内的SAR值更加保守^[31]。出于这些原因，按照本部分对被测设备进行SAR评估时不使用手部模型。

A.2 SAM模型的规格

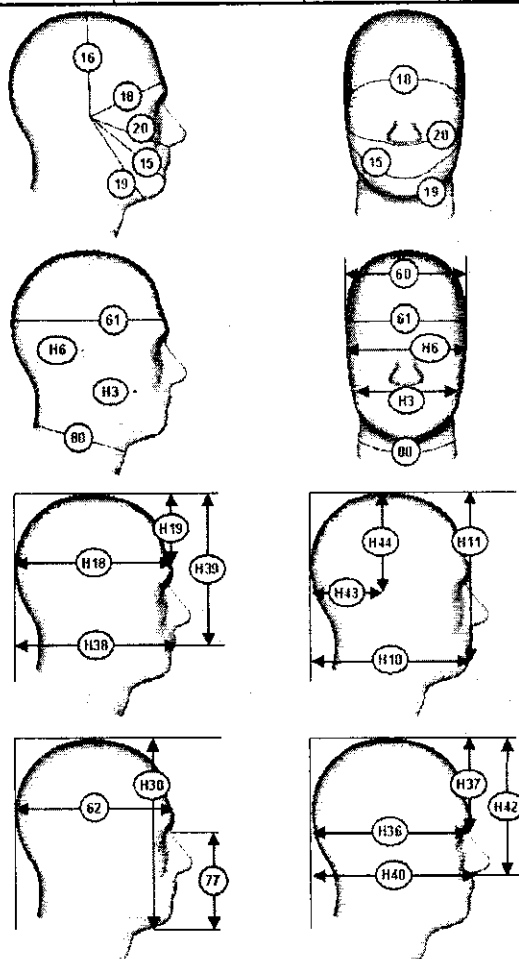
尺寸数据源自Gordon的报告^[1]，如表A.1和图A.1所示。优先采用表A.1中的数据。如表A.2所示，一些使用被测设备贴近耳朵和脸颊时的特殊情况也考虑在内了。特殊的，在耳朵参考点（ERP），用一个6mm（包含2mm厚的模型外壳）的厚度来模拟外耳（耳廓）。这个薄的耳朵间隔模型同时也模拟了使用者耳朵非常小的情形，给出了一个更保守的SAR值。可用一个具有参考点、线的系统来修正手机在模型上的定位（图A.2）。点M是嘴部参考点，LE是左耳参考点（ERP），RE是右耳参考点(ERP)。左、右耳参考点沿B-M(Back-Mouth)线位于耳道入口点（EEC）后方15mm处（图A.2）。

表A.1 模型的头部尺寸：SAM的尺寸与Gordon的报告^[1]中90%大头成年男子头部尺寸比较表

参考号	解剖位置	Gordon的报告 (mm)			SAM (mm)	偏差 %
		平均值	标准偏差	百分之九十		
H3	下颌角间宽	118.9	7.9	129.2	130.0	0.6
H6	左、右耳屏点之间的直线距离	144.8	6	152.3	152.7	0.2
H10	下颚—头背部	194.2	10.3	207.3	206.5	-0.4
H11	下颚—头顶部	216.8	8.9	228.3	220.4	-3.5
H18	眉心—头背部	199.7	7.2	208.5	209.2	0.3
H19	眉心—头顶部	96.2	7.3	105.6	104.4	-1.1
H30	下颚—头顶部	232.0	8.8	243.3	246.7	1.4
H36	鼻梁点—头背部	197	7.1	205.9	205.3	-0.3
H37	鼻梁点—头顶部	112	6.9	120.9	121.7	0.7

表A.1 (续)

参考号	解剖位置	Gordon的报告 (mm)			SAM (mm)	偏差 %
		平均值	标准偏差	百分之九十		
H38	口—头背部	199.4	9.6	211.9	211.4	-0.2
H39	口—头顶部	186.3	7.8	196.3	196.3	0.0
H40	鼻下点—头背部	203.5	8.3	213.6	213.0	-0.3
H42	鼻下点—头顶部	161.9	7.7	171.8	177.6	3.4
H43	耳屏点—头背部	98.9	8.5	106.4	106.4	0.0
H44	耳屏点—头顶部	131	5.7	138.2	138.2	0.0
15	耳屏点间下颏弧长	325.8	13.4	343.1	329.3	-4.0
16	耳屏点间颅弧长	353.3	12.9	369.7	367.3	-0.6
18	耳屏点间额弧长	304.3	10.6	318.2	314.1	-1.3
19	耳屏点间颌下弧长	304.2	14.5	323.2	333.5	3.2
20	耳屏点间鼻下弧长	292	11.1	306.3	305.3	-0.3
60	头部宽度	151.7	5.4	158.6	158.4	-0.1
61	头部周长	567.7	15.4	587.3	594.8	1.3
62	头部长度	197.1	7.1	206	206.0	0.0
77	下颏—鼻凹处	121.9	6.5	130.4	125.0	-4.1
80	颈部周长	379.6	19.7	405.3	395.4	-2.5

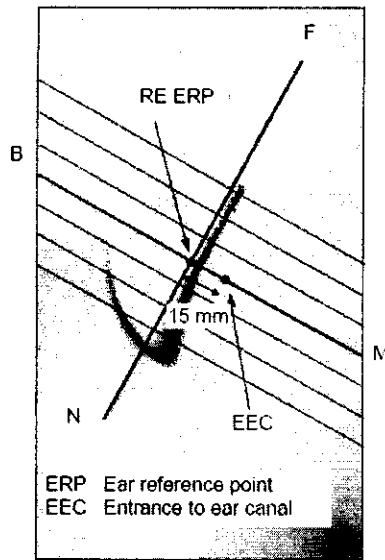


注: Hx, xX是表A.1中的参考距离。

图A.1 表A.1中尺寸示意图

表A.2 SAM模型设计的特殊导则和CAD文件

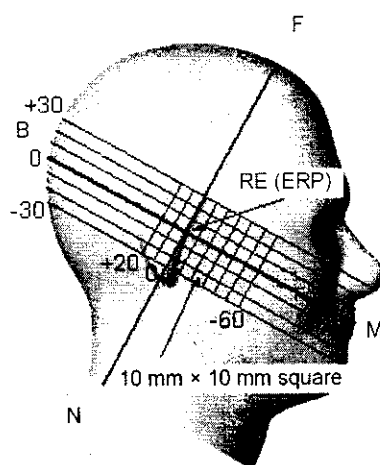
编号	SAM导则
SG1	由左右耳屏点和嘴定义的参考面
SG2	位于距耳屏点15mm的参考面上的耳朵参考点
SG3	ERP处模型外壳的厚度是6mm
SG4	外表面上的N-F线是60mm的直线，位于与参考面垂直的平面内
SG5	在参考面垂直面内倾斜外表面上的N-F线，这样一来在贴脸位置处平坦被测设备和外表面之间的接触点就在参考线上
SG6	外表面上的B-M线从ERP到耳朵上部是直线，沿着这条线的模型外壳的厚度小于6mm
SG7	耳朵的外表面是平的，并且由NN-F线和B-MMB线所定义的整体模型厚度是2mm（耳朵区域除外）
SG8	在从H-30mm到H+30mm的与参考面平行的对切平面的贴脸区域中一定没有S形
SG9	到内表面的垂线距离就是模型的厚度



注:

- B——B-M线后方端点
- F——N-F线前端点
- N——N-F线在颈部的端点
- M——嘴参考点
- RE——右耳参考点 (ERP)

图A.2 模型耳部放大侧视图



注:

- B——B-M线后端点（仅供参考，不用标在模型上）
- F——N-F线前端点（仅供参考，不用标在模型上）
- N——N-F线在颈部的端点（仅供参考，不用标在模型上）
- M——N-F线的前端点（仅供参考，不用标在模型上）
- RE——右耳参考点（ERP）

图A.3 模型侧视图—标注相关标记

注：完全头部模型仅用于图式，本部分中使用的步骤都是根据图2所示的模型配置。

穿过两耳参考点和点M的平面定义为参考平面。N-F线（颈部—前方），也称为参考旋转法线，穿过扁平耳部模型的前方。N-F线和B-M线都应该标注在模型外壳上，以便于手机的定位。在N-F线的后面，带有耳朵形状模型外壳是一个平坦的表面，并且在ERP点处的厚度为6mm。在N-F线前面，耳部的扁平形状如A.2所示。选用该形状是为了保证耳垂不干扰手机的倾斜位置，否则将会导致在脸颊处定位的不准确。

参考线B-M和N-F的投影必须画在模型上。为了方便起见，其他的线也可画在模型上。在不影响模型规格的情况下，图A.3中所标的这些线可以画在模型外表面上。

A.3 组织模拟液

为了得到均质液体的适当参数，使用照射于平面波下的无限半空间多层组织模型作为一个简单理论模型来研究阻抗匹配、驻波等对峰值空间平均SAR的影响^[8]。组织层的结构和厚度是变化的，以此表征头部照射区域的结构变化，使得结果能够覆盖10%至90%的大部分使用人群（包括成人和儿童）。基于每一频率下吸收的最坏情况下的组织层的结构，所得到的均质模型的头部组织模拟液的介电参数可以产生相同的（或稍高的）峰值空间吸收。这里使用了Cole-Cole分析方法得到的介电特性的数据，参见参考文献[9]。这种方法对于近场电磁照射的有效性是通过在最靠近多层结构模型的位置上，使用半波偶极子和四分之一波长单极子代替平面波，然后将结果跟文献中以核磁共振图像（MRI）为基础的非均质（成人和儿童）人体头部模型的结果进行比较后实现的。

5.2.4的表1所示的头部组织模拟液的介电常数和导电率也可参见参考文献[8]。对于头部组织模拟液在频率范围内其他频率下的介电特性可通过线性内插来得到。附录I中列出了建议使用的公式。

附录 B

(规范性附录)

测量仪器的校准和不确定度评估

B.1 简介

测量设备是由探头、放大器和测量装置组成的。现在通用的探头均基于肖特基检波二极管。被测信号，也就是探头的输出，是一个取决于射频照射等级与 E 或 E^2 成正比的电压值。

多数各向同性探头是由三个彼此正交的小偶极子传感器组成的，在传感器的空隙中有检波二极管。总电场可通过三个电场分量的和方根值来表示。在二极管响应的平方律区域内，传感器的输出电压正比于相应场分量的均方值。在这范围之外，输出电压将被压缩，因此就需要对动态范围进行线性化。传感器和二极管之间的制造公差会使每个传感器具有不同的灵敏度。

B.2 偶极子传感器灵敏度的评估

灵敏度因子可通过采用“一步”或“两步”校准法来获得。

B.2.1 两步校准法

总电场可通过下式来计算：

$$|E|^2 = \sum_{i=1}^3 |E_i|^2 = \sum_{i=1}^3 \frac{f_i(V_i)}{\eta_i \gamma_i} \quad (\text{B-1})$$

式中：

$f_i(V_i)$ ——待校准传感器信号 V_i 的线性化方程；

η_i ——自由空间中偶极子传感器的绝对灵敏度 [$\mu\text{V}/(\text{v/m})^2$];

γ_i ——偶极子传感器在介质中的灵敏度和在自由空间中的灵敏度的比值。

将探头灵敏度分成两个因子 η_i 和 γ_i 来看，这样就可以用一些标准的“空气中的探头”的校准程序，同时也可提供一些额外的探头性能和校准配置的验证。校准仅在探头距离任何介质边缘都足够远时才是有效的。因为在很近的距离时，灵敏度可能会改变。这就是边界效应，跟各向同性一样需要单独进行评估。

B.2.1.1 空气中的灵敏度（第一步）

探头校准中用于产生理想的标准场并模拟自由空间条件的最精确的装置是波导。这是因为：

- 和远场校准设备相比，波导的设置功率适当，所需空间更小；
- 可产生可溯源至功率的读数的精确电场；
- 当波导的尺寸远大于探头尺寸时，由于探头插入所引起的场扰度而产生的不确定度对于小的近场探头是可以忽略的；
- 非常便于将探头的轴垂直或平行于场极化的方向；
- 通过使用一套可以涵盖整个频率范围的波导就可以进行总场强的交叉验证。

在低频处（小于 750MHz），可以使用 TEM 小室。然而，TEM 小室内的场并不十分理想，也就是说，跟所预期的均质场分布存在着非常大的偏差^[10]。举例而言，当沿着中心轴从屏蔽隔板移动到外壁时，在一些商用的 TEM 小室中，场会变化 $\pm 6\%$ 。然而，将探头在 TEM 小室和波导中的响应进行比较后，在 TEM

小室中的特定测量位置上可以进行探头的传递校准。

探头基本上都是通过小孔插入到各校准设备中去，并定位在中心（该处的场在整个探头尺寸上基本都是均质的）。每一个传感器都是根据与其平行的场分量进行评估的。

只要阻抗电缆上没有载入偶极子二极管传感器，并且探头相比于波长是很小的，那么灵敏度就与频率无关。这提供了一种校准设置的附加验证方法，并且可以检查探头对场扰动造成的最终影响。如果使用高质量的波导耦合器和匹配源的话，探头插入所造成的影响是可以忽略的。波导设置中的另外一个附加不确定度源于终端负载的反射，这将导致在设置中产生驻波模式。如果使用高质量的波导负载，那么反射可保持在1%以下。另外，不确定度可通过以一个 $\lambda/4$ 的可变负载进行追加测量并取两次测量平均值的方法进行补偿。

B.2.1.2 介质中的灵敏度（第二步）

介质中的灵敏度是通过在介质中产生局部已知的场值而决定的。可以使用下列两种方法：

- 用温度探头进行传递校准；
- 用分析场进行校准。

B.2.1.2.1 温度探头进行传递校准

在有损耗液体中的 SAR 是与液体中的电场（E）和温度梯度（ dT/dr ）都有关的。因此，根据下式：

$$SAR = \sigma \frac{E^2}{\rho} = c_h \frac{dT}{dt} \Big|_{r=0} \quad (\text{B-2})$$

在有损耗液体中就可以通过测量液体中的温度梯度间接测量其电场。可以使用具有高空间分辨率（小于 1mm~2mm）和快速响应时间（小于 1s）的非扰动温度探头（光学探头或具有阻抗电缆的热敏电阻探头），而且它也很容易进行高精度的校准^[11]。设置以及激励源不会影响校准；只要考虑标准温度探头和待校准的电场探头的相对定位不确定度就可以了。然而，还有许多问题限制了用温度探头进行探头校准的准确性：

- 温度梯度不能直接测量，而必须通过不同时间段的温度测量进行评估。应该采用特殊的预防措施避免由液体中的能量补偿效应或转化电流所引起的温度梯度所导致的测量不确定度。这些效应是不能完全避免的，因为待测场本身就会干扰液体中的热平衡。通过采用仔细的设置，可使这些不确定度保持最小；
- 温度探头周围的测量体积是不理想的。很难计算从温度梯度场传递到探头内部的能量。这些影响是必须要考虑到的，这是因为温度探头是以均质温度在液体中进行校准的；
- 校准有赖于对介质密度、比热容和导电率的评估。尽管密度和比热可以通过标准的步骤（对于 c_h 来说是 $\pm 2\%$ ，对于 ρ 来说要更好）进行精确的测量，但是却没有测量热导电率的标准。根据所用的方法和液体的不同，不确定度可能会超过 $\pm 5\%$ ；
- 温升测量是不敏感的，因此通常要在比电场测量更高的功率等级上执行。此时必须考虑到系统的非线性（如：功率测量、不同的场分量等）。

考虑到上述问题，使用仔细设计的配置，利用温度梯度测量对电场探头进行校准的精度大约是 $\pm 10\%$ （合成不确定度）^[12]。结合波导技术和热测量技术的配置请参见参考文献[13]。当使用相同的液体进行校准和实际测量时，这种配置的预估合成不确定度是 $\pm 5\%$ ，否则就会是 $\pm 7\%$ 到 $\pm 9\%$ （这很好的吻合了参考文献[12]中所给的评估）。当使用温度探头进行传递校准时，不确定度分析至少应该考虑到表 B.1 中的各

项参数:

表B.1 使用温度探头进行传递校准的不确定度分析

不确定度源	不确定度的值±%	概率分布	除数	c_i	标准不确定度 u_i ±%	ν_i 或 ν_{eff}
电场探头的定位		N	1	1		∞
温度探头的定位		N	1	1		∞
电场探头的线性度		R	$\sqrt{3}$	1		∞
温度探头的漂移和噪声		R	$\sqrt{3}$	1		∞
温度探头的线性度		R	$\sqrt{3}$	1		∞
液体导电率		R	$\sqrt{3}$	1		∞
液体比热		R	$\sqrt{3}$	1		∞
液体密度		R	$\sqrt{3}$	1		∞
温度探头的精确性		R	$\sqrt{3}$	1		∞
合成不确定度		RSS				

注1: c_i 是灵敏度系数;
 注2: 对于预估输入值 (x_i) 而言, ν_i 是标准不确定度 $u(x_i)$ 的自由度; ν_{eff} 是合成不确定度 $u_c(x_i)$ 的有效自由度, 可用 ν_{eff} 来得到 $t_p(\nu_{eff})$

B.2.1.2.2 用分析场（波导）进行校准

这种方法所使用的配置, 可通过测量其他物理量值 (如: 输入功率) 对其场进行理论计算。这就相当于是空气中探头校准的标准场法; 然而, 对于有损耗液体中的场并没有标准定义。

当使用有损耗液体中的可计算场进行探头校准时, 在不确定度评估过程中必须考虑到以下几点:

- 系统配置要保证能够精确测定入射功率;
- 场强计算的准确性取决于液体介电参数的评估;
- 由于在高介电常数的液体中电磁波的波长很短, 即使是使用很小尺寸的配置都可能超过共振模式的截止频率。必须要对配置中的场分布进行仔细的检查, 以确保符合理论的场分布。

矩形波导是自洽式 (self-contained) 独立系统, 在该系统中横截面上的场分布与反射无关。可使用这种波导在组织模拟液内部产生一个理论上已知的场, 如参考文献[14]中提到的配置。在该配置中 (见图 B.1), 直立的两端开放的波导的上部充满了液体。在距离反馈耦合器大于 λ 处的一层绝缘平板可以提供空气和液体之间的阻抗匹配 (大于 10dB 的回波损耗)。尽管高阶模式在理论上是可能存在的, 但结构的对称和液体中的高损耗确保了组织模拟液内部的场分布满足 TE_{10} 的波导模式。在参考文献[15]中, 通过在液体中进行完全的体积扫描, 已经验证确实不存在高阶模式, 并且显示该场偏离理论 TE_{10} 模式的差值仅为 $\pm 1\%$ 到 2% 。

在液体内部, 场基本上按 TEM 波进行传播, 这是受低截止频率所致。液体的深度 (大于三倍的趋肤深度) 的选取使得在液体上表面的反射是可以忽略的。通过测量波导内的入射和反射功率来计算液体吸收的功率:

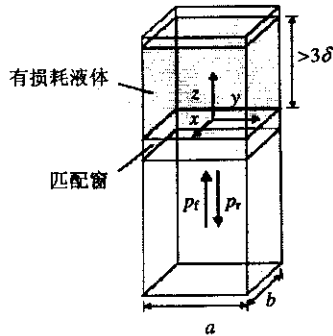
$$SAR(z) = \frac{4(P_f - P_r)}{\rho ab \delta} e^{-2z/\delta} \tag{B.3}$$

式中:

ab ——波导横截面的面积;

- P_i ——进入波导的入射功率；
- P_r ——从波导绝缘层和液体中出来的反射功率；
- z ——探头位置处偶极子中心的对数坐标；
- ρ ——液体密度；
- δ ——有损耗液体 ρ 内部的趋肤深度。

注：在本部分中密度 ρ 定义为 1000kg/m^3 。



注：

- x, y, z ——笛卡儿坐标系的坐标轴；
- 3δ ——液体的深度（大于3倍的趋肤深度）；
- a ——波导横截面的宽；
- b ——波导横截面的长；
- P_i ——入射功率；
- P_r ——反射功率。

图B.1 使用直立矩形波导进行灵敏度（转换因子）评估的试验配置

使用这种技术可以得到很高的精确度，根据所用的频率和液体，合成不确定度会小于 $\pm 3.6\%$ 。这样一来校准本身也变成了可溯源到标准校准步骤的功率测量。因为波导的实际尺寸所带来的限制在符合性测量中并不严重，这是因为大部分移动通信系统的工作频率都已经包含在 800~2500MHz 这个范围内了。当频率低于 800MHz 时，使用温度探头进行传递校准仍然是取得较低不确定度的实用方法。当通过理论场进行校准时，不确定度分析至少要考虑表 B.2 中的参数：

表B.2 使用波导内部理论场进行校准的不确定度分析

不确定度源	不确定度的值 $\pm\%$	概率分布	除数	c_i	标准不确定度, $u_i\pm\%$	v_i 或 v_{eff}
入射功率		R	$\sqrt{3}$	1		∞
反射功率		R	$\sqrt{3}$	1		∞
液体导电率		R	$\sqrt{3}$	1		∞
液体介电常数		R	$\sqrt{3}$	1		∞
场均质性		R	$\sqrt{3}$	1		∞
场探头定位		R	$\sqrt{3}$	1		∞
场探头线性度		R	$\sqrt{3}$	1		∞
合成不确定度		RSS				

B.2.2 一步校准程序

B.2.1 中的程序可通过使用参考天线而合并成一个一步的程序，如下。

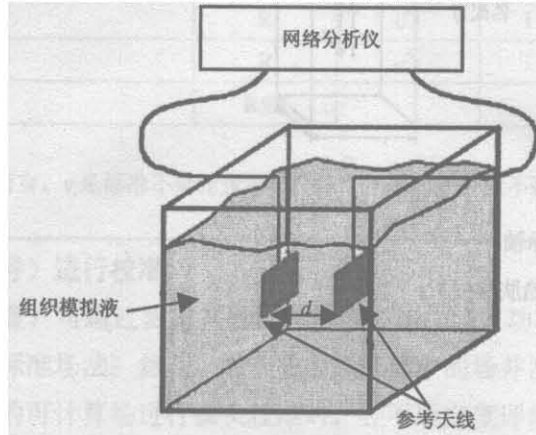
总场强可这样来评估：

$$|E|^2 = \sum_{i=1}^3 |E_i|^2 = \sum_{i=1}^3 \frac{V_i}{K_i}$$

(B.4)

其中， K_i 是液体中偶极子传感器的绝对灵敏度。

参考天线很小，可在相应的组织模拟液中使用。在参考文献[16]，[17]中介绍了 900MHz 和 1800MHz 天线的例子。至少需要用两个相同的天线来评估用于探头校准的主瓣增益。



图B.2 天线增益评估配置

参考天线增益的评估按照下列协议进行：

- a) 将天线定位于液体中，使其主轴互相平行，距离为 d ，其中 $d \geq 2D^2/\lambda_{\text{liquid}}$ ， D 是参考天线的最大尺寸， λ_{liquid} 是液体中的波长。天线应该至少远离液体容器的任一内壁 10cm；
- b) 在每个天线的输入端口测量反射系数 ρ_1 ， ρ_2 ；
- c) 在同一端口测量两个天线之间的传输系数 S_{21} ；
- d) 增益是：

$$G = |S_{21}(d)| \times e^{\alpha d} \left(\frac{4\pi d}{\lambda_{\text{liquid}}} \right) \times \frac{1}{\sqrt{(1-|\rho_1|^2)(1-|\rho_2|^2)}}$$

其中衰减系数是：

$$\alpha = \frac{2\pi f}{c} \times (\epsilon_r''^2 + \epsilon_r'^2)^{1/4} \times \sin\left[\frac{1}{2} \arctan\left(\frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}\right)\right]$$

当确定参考天线增益时，其不确定度分析至少应该考虑表 B.3 中的参数：

表B.3 评估参考天线增益的不确定度分析

不确定度源	不确定度的值±%	概率分布	除数	c_i	标准不确定度, u_i ±%	ν_i 或 ν_{eff}
入射功率		R	$\sqrt{3}$	1		∞
反射系数		R	$\sqrt{3}$	1		∞
距离		R	$\sqrt{3}$	1		∞
液体导电率		R	$\sqrt{3}$	1		∞
液体介电常数		R	$\sqrt{3}$	1		∞
合成不确定度		RSS				

应当使用下面的协议来评估探头的灵敏度系数:

- 将一个天线定位在组织模拟液中。天线应该在距离液体容器内壁至少 10cm 处;
- 在参考天线的输入端连接功率源。距离天线 d 处的理论电场强度 E_{th} 是:

$$E_{\text{th}} = \left[\left(\frac{P_{\text{in}}(1-|\rho|^2)Ge^{-2ad}}{4\pi d^2} \right) \times \left(\frac{120\pi}{\text{Re}\sqrt{\epsilon_r}} \right) \right]^{1/2} \quad (\text{B-5})$$

式中:

d ——到天线的距离, 且 $d \geq 2D^2/\lambda_{\text{liquid}}$;

G ——天线增益;

D ——参考天线的最大尺寸;

P_{in} ——输入功率;

ρ ——天线的反射系数;

λ_{liquid} ——液体中的波长。

这里建议接入一个双定向耦合器来控制输入功率。调节输入功率, 以保证 E_{th} 约为 30V/m。

- 将探头定位在液体中, 保证探测器的中心位于距离天线 d 处了;
- 调节探头的方向, 使偶极子的方向和参考天线的极化方向一致;
- 测量探头端口处与被照射偶极子有关的电压信号 $V_{1,\text{meas}}$;

f) 偶极子的灵敏度系数 K_1 是 $K_1 = \frac{V_{1,\text{meas}}}{E_{\text{th}}^2}$;

g) 重复 d) 到 f) 来评估另外两个偶极子的 K_2, K_3 。

根据探头的灵敏度系数, SAR 可通过下式得到:

$$\text{SAR} = \frac{\sigma}{\rho} \left(\frac{V_1}{K_1} + \frac{V_2}{K_2} + \frac{V_3}{K_3} \right) \quad (\text{B.6})$$

其中, ρ 是密度 (1000kg/m^3)。

当用参考天线来进行探头校准时, 不确定度评估至少应该考虑表 B.4 中的参数:

表B.4 使用参考天线进行校准的不确定度分析

不确定度源	不确定度的值±%	概率分布	除数	c_i	标准不确定度, u_i ±%	ν_i 或 ν_{eff}
入射功率		R	$\sqrt{3}$	1		∞
反射系数		R	$\sqrt{3}$	1		∞
天线增益		N	1或 k	1		∞
液体导电率		R	$\sqrt{3}$	1		∞
液体介电常数		R	$\sqrt{3}$	1		∞
探头定位		R	$\sqrt{3}$	1		∞
合成不确定度		RSS				

B.3 各向同性

轴向各向同性

探头应该照射在沿探头主轴法线方向入射的参考波下。通过沿着轴线以 15°或者更小的步长旋转探头 360°确定轴向各向同性。

全球和半球各向同性

探头应该照射于沿不同角度入射的参考波中。通过旋转探头或者参考波的极化方向来确定半球各向同性应该。入射角度应该从90°（轴向）到0°（法向）旋转，旋转的步进应该等于或者小于30°。在每一个入射角度下，探头应该以15°或者更小的步长旋转360°。

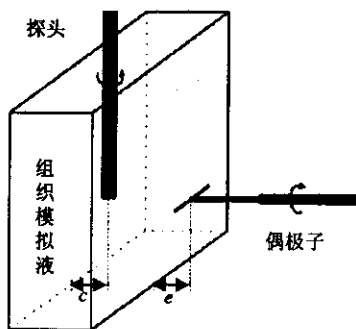
下面的3种方法可用于确定半球各向同性，而且各自产生的结果也是相似的：

- 偶极子位于侧面的平坦模型；
- 偶极子位于正下方的平坦模型；
- 带有偶极子的球形模型。

B.3.1 使用偶极子位于侧面的平坦模型确定各向同性

这种配置是由一个盛满组织模拟液的薄塑料盒子组成的，液体照射在相应测量频率的半波共振偶极子下。应该使用下列协议来评估探头的球向各向同性：

a) 将偶极子天线放置于转台上，并且使其与平坦模型平行（见图B.3）。天线应该定位在距离附近的平坦模型内壁的 $e = \lambda/10$ 的最远位置处；



注：

c ——探头到后壁的距离；

e ——到邻近的模型壁的最大距离。

注：首先要在驻波最主要的场梯度 c 处进行评估。 e 的大小就是偶极子轴的馈入点和液体表面之间的距离。

图B.3 在组织模拟液中评估球向各向同性偏差的配置

b) 将探头竖直插入液体中，并保证探头的3个传感器的中心位于偶极子轴的延长线上。

c) 不论何时，探头的水平放置位置必须是在靠近模型后侧的驻波最大值处，且距离模型/液体界面为d，因为在这个地方电场是局部均质的且磁场是最小的。同样也可在梯度场中执行测量（电场最大值可通过在x轴方向上进行线性扫描而得到）。

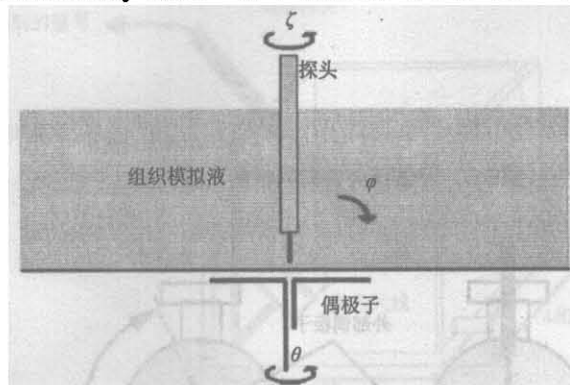
d) 偶极子应该以小于或等于15°的步长绕其自身的轴至少旋转0°~90°。

e) 在每一步，探头都是通过探头定位器绕其自身的轴，从0°~360°进行旋转，并且测量步长小于或等于15°。

f) 球向各向同性的偏差表示为在所有探头测量位置上SAR测量值与平均值的最大偏差（±xxdB）。

B3.2 使用偶极子位于正下方的平坦模型确定各向同性

另一种用于各向同性的评估装置参见图 B.4。一个用夹具固定的半波偶极子天线平行并且定位在平坦模型的正下方，模型中盛满组织模拟液。探头定位于偶极子馈入点的正上方。探头插入并且定位于在偶极子馈入点上方的同一测量位置。所有的探头旋转工作是通过一个高精度的定位装置来进行控制和操作的。探头围绕本身的轴进行旋转（角度 ϕ 在 0°~360°范围旋转），伴随着偶极子的旋转（角度 θ 在 0°~180°范围旋转），以及探头轴倾斜角度 ζ （从 0°~75°）的变化，共同生成一个对半球接收模式的三维评估。



注：

ζ ——探头轴的倾斜角；

θ ——偶极子轴的旋转角；

ϕ ——探头轴的旋转角。

图B.4 在组织模拟液中评估球向各向同性偏差的另一种配置

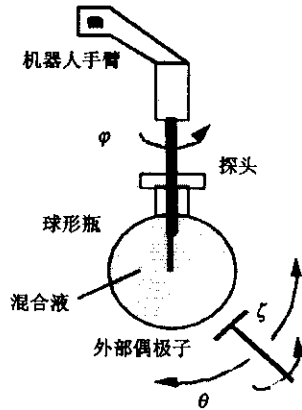
B.3.3 使用偶极子和球形模型确定各向同性

可在整个半球区域内，通过由盛有组织模拟液的球形模型和外部偶极子组成的配置来评估探头接收模式的各向同性^[18]。将探头传感器定位于模型的几何中心处，在由外部偶极子天线所产生的许多不同的激励条件（波的入射角和极化方向）下将探头绕其轴做完全的旋转即可得到探头的接收模式。在这种装置中，并不需要在旋转探头的同时倾斜探头。

图 B.5 所示的测量配置是由充满组织模拟液的球形模型所构成的。探头和其传感器被竖直定位在球的体积中心。激励是由调谐在期望频率下的外部半波偶极子所产生的。偶极子与过离球最近的点的正切面平行。

注：应当首选小的球形模型，这是因为随组织模拟液导电率或工作频率的上升，发射信号的路径损耗也会增大。较大的模型会在局部形成更平坦的表面（更长的曲率半径），这就产生了一个射到探头尖端的局部更加平坦的波前，同时也放宽了对偶极子定位的误差限制。

天线位置和极化方向一般如图 B.6 所示。当把外部偶极子定位在 $0^\circ \leq \zeta \leq 360^\circ$ 时，探头接收模式的三维半球测量是通过将探头绕其轴 (φ) 旋转 360° 来实现的。通过将偶极子绕其轴旋转 $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ 就可得到入射波的每一极化方向。当 $\zeta=0^\circ$ 时，就不需要多个 θ 位置了。尽管使用这种配置可以得到更多的测量点，通常只要把 ζ 的步长定为 30° ， θ 的定为 15° 就足够了。



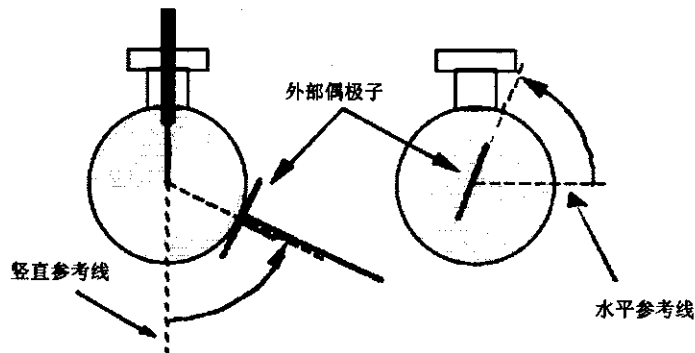
注：

ζ ——偶极子轴的仰角；

θ ——偶极子旋转角；

φ ——探头轴的旋转角。

图B.5 评估球向各向同性的实验装置



注：

ζ ——偶极子的仰角；

θ ——偶极子旋转角。

图B.6 偶极子的位置 (ζ) 和极化方向 (θ)^[10]

对于由偶极子所发出的给定功率，预测试应确保传感器二极管工作在平方律区域内。完整的测量包括在偶极子的各位置和极化方向 (ζ, θ) 下将探头旋转 360° 。在探头的每一个 φ 位置，监测并记录发射功率，并将 SAR 值归一化到统一的功率等级下。尽管这不是一条优先排除的原则，但是也没有特殊的原因能够说明在除了本部分所考虑的位置之外的其他外部偶极子的位置和极化条件下会产生更差的各向同性偏差。然而，如果需要测量可扩展至在任何感兴趣的特殊条件下进行，如：与探头中的传感器的朝向相匹配的极化条件等。

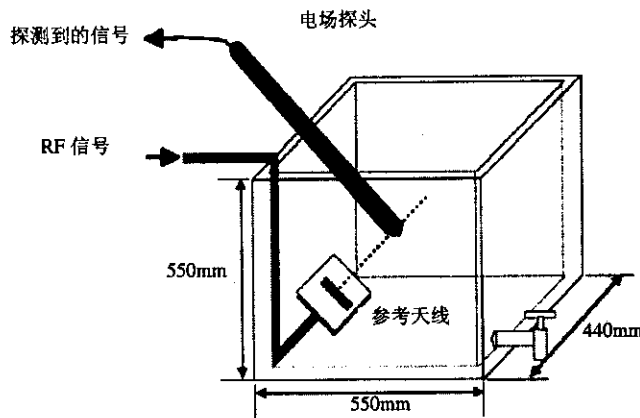
与使用平坦模型评估各向同性一样，假设其不确定度分布满足矩形不确定度分布。然而选取合适的

测量步骤可以极大的减小这种不确定度。例如在特定的极化和入射波方向下进行探头校准，随后在实际 SAR 测量的时候也保持相同的状态。

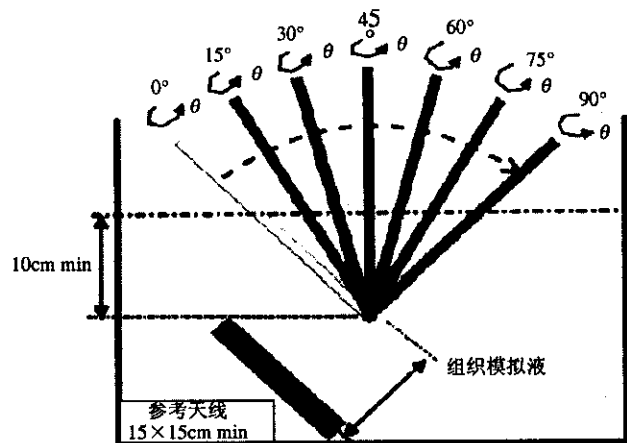
B.3.4 使用参考天线确定各向同性

使用参考天线确定探头的各向同性时必须遵循下述协议：

- a) 将一个天线定位在组织模拟液中。天线与模型内壁的最小距离为10cm；
- b) 将探头定位在液体中，保持探测器的中心位于距离天线 d 处，其中且 $d \geq 2D^2/\lambda_{\text{liquid}}$ ， D 是参考天线的最大尺寸， λ_{liquid} 是液体中的波长。这里建议将该处的SAR值设在0.5~1W/kg之间；
- c) 调整探头轴的方向，确保其主轴垂直于天线的入射方向（见图B.7）；
- d) 使探头绕其主轴以小于或等于15°的步长从0°旋转至360°，记录SAR值。轴向各向同性定义为SAR测量值与rms值的最大偏差；
- e) 以15°或30°的步长旋转参考天线或探头的轴，使参考场的入射角从0°变到90°；
- f) 对于每一个入射角，使探头绕其主轴以小于或等于15°的步长从0°旋转至360°，记录SAR值；
- g) 半球各向同性定义为在探头非垂直入射照射下的SAR测量值与rms的最大偏差。



图B.7 使用参考天线确定轴向各向同性



注：

- θ ——探头轴的旋转角；
- φ ——探头轴的倾斜角。

图B.8 使用参考天线确定半球各向同性

B.4 线性度

由于探头的非线性响应仅取决于二极管的特征，所以可在自由空间或组织模拟液中对线性化方程进行评估。这是通过在所需的探测覆盖区域内进行功率扫描而实现的。可以使用小的 TEM 小室、波导或参考天线，因为使用中等的功放就可产生很大的场强。

线性误差定义为，在 0.01~100W/kg 区间内，测量值与最近的线性参考曲线之间的最大偏差。可通过 B.2 节或图 D.1 中描述的某一种配置来进行评估。在 0.01~100W/kg 区间内，功率增加的步长不应该大于 1dB。

B.5 下检出限

下检出限限值与测量系统的噪声等级、偏移和对称性息息相关。饱和以及其他非线性效应确定了上检出限。上、下检出限可由不同的配置进行评估，如：B.2 节，图 D.1 等所介绍的测量配置。下检出限定义为探头响应偏离线性 0.5dB 的等级（见 B.4）。在测量系统的实际操作中，背景电磁场环境可影响下检出限。

B.6 边界效应

在模型外壳内表面的附近，灵敏度会偏离正常校准条件下的值。这种偏差应该使用近似于平面波照射的平坦模型内部的场分布来进行评估。为了判定这种效应，可使用一种与图 D.1 相似的设置。边界效应定义为当探头垂直于界面时 SAR 测量值与液体中期望的指数衰减之间的偏差。这种效应可以按照参考文献[15]、[19]中的描述进行补偿。同时可根据 7.2.1.5 进行不确定度评估。

B.7 响应时间

探头应该照射在参考波下。响应时间是在发生阶跃变化或电源接通/断开之后，测量设备达到最终测量值的 90%所需的时间。这里所说的阶跃是指至少能够产生 0.4W/kg 局部 SAR 值的变化。

附录 C

(规范性附录)

后处理技术和不确定度评估

C.1 外推和内插算法

C.1.1 简介

模型内部的局部 SAR 值是通过封装在探头内的小偶极子传感器件测得的。因此进行探头校准和电场测量时通常是以内部偶极子组的几何中心为基准点的。当定义测量位置时, 需要考虑这样一个事实: 偶极子距离探头的物理尖端有几毫米的间隔。尽管最高的局部 SAR 值通常出现在模型的表面处, 但是为了降低测量不确定度, 探头尖端必须不能接触模型表面。最高局部 SAR 值是得出峰值空间平均 SAR 的关键数据, 因此必须通过对距离模型外壳一定间隔处得到的测量值进行外推而得到。精确评估峰值空间平均 SAR 值需要三维扫描数据阵列有非常精细的分辨率。因为考虑到电池的使用时间等原因测量必须在一段有限的时间内完成, 所以就对测量的数据进行内插来得到具有足够分辨率的数据阵列。评估由内插、外推、积分以及平均等过程所导致的不确定度时, 假设在测量点测得的数据上不存在不确定度。

C.1.2 内插法

可以使用多种数学运算方法进行内插, 例如: 统计学^[20], 基本曲线方程^[21], 傅立叶分析^[22]以及小波分析^[23]或者是多项式或样条函数曲线^[24]。有很多数值分析教材, 如参考文献[25], 都介绍了如何使用这些方法。

C.1.3 外推法

外推是通过使用样条函数、双调和样条函数、小波、多项式或有理函数等来实现的。许多计算法数学书都介绍了如何使用这些方法。因为外推算法的准确性取决于距离和有待外推的场分布, 需要仔细评估与外推有关的不确定度。

C.2 平均算法和寻找最大值

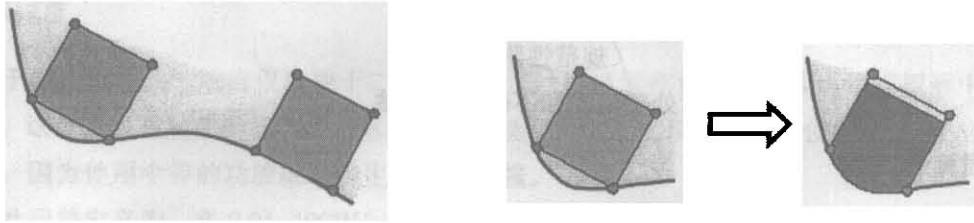
C.2.1 简介

使用外推和内插算法之后得到的用于评估局部平均 SAR 值的立方体体积必须尽可能的贴近模型的表面, 以包含局部 SAR 的最大值。因此在后处理中, 要通过旋转和移动平均立方体体积使其与模型表面相一致。

C.2.2 立方体的选取

C.2.2.1 三点法

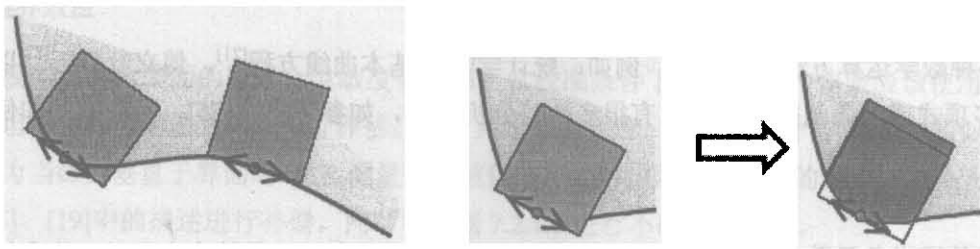
通过旋转使立方体使其有 3 个顶点与模型表面重合, 这样一来它的一个面就与模型表面相一致了。随后就可以确定立方体其余的 5 个顶点。立方体和模型表面之间的空间必须包含在平均体积内, 这是因为这个区域很可能是较大局部 SAR 值的分布区。可以通过扭曲立方体的表面来使其与模型内表面的凹曲相一致, 随后再以同样的方法扭曲立方体另一个对面, 以保持 1g 或 10g 的平均质量不变。为了评估任一 1g 或 10g 立方体内的 SAR 最大值, 应该通过在整个模型表面进行扫描来确定三点的位置。图 C.1 是此法的图示:



图C.1 三点法

C.2.2.2 切面法

另一种方法是在模型表面上选一个点，然后将此点定为立方体其中一个面的中心。然后就可确定两个正切矢量，并用这两个矢量保证立方体的这个面与模型表面相切。为了评估峰值空间平均 SAR 值，要先确定立方体的其他面，并将立方体围绕一个垂直模型表面的矢量旋转。与前一个方法一样，与模型外壳接触的立方体的面要与模型内表面的凹曲相一致以确保能够完全涵盖局部 SAR 的最大值。同样为了保持 1g 或 10g 的平均质量不变，可以扩大或缩小立方体的相对面。为了在任一 1g 或 10g 立方体内找到最大的 SAR 值，沿模型表面扫描并旋转立方体。图 C.2 是此法的图示。

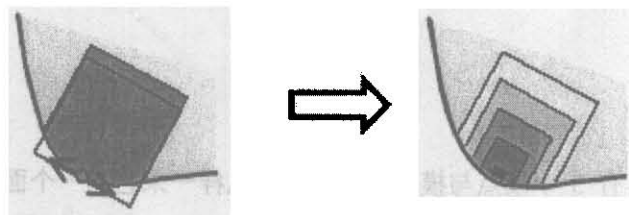


图C.2 切面法

C.2.2.3 平均法

此法的目的是获得 1g 或 10g 的平均质量。基于此，可以通过一层一层的增加 SAR 点来增大立方体直至其体积超过 1g 或 10g。然后，通过线性内插来推算相应的吸收功率。图 C.3 是此法的图示：

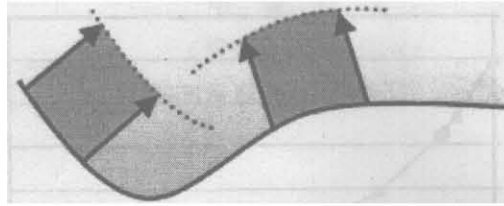
注：通常，平均立方体是以阶梯的形式表示的，因为网格是通过测量点内插形成的。尽管可以对立方体进行内插，但是这种方法是很耗时的，因为对每一个平均立方体的内插都是不同的。



图C.3 平均法

C.2.3 平均的延展法

平均法在本质上是简单的，因为立方体基本上包含在测量网格之内，或者至少与使用外推和内插算法后得到的数据网格相一致。峰值空间平均 SAR 值是通过在选定区域，如经过判断具有最大局部 SAR 值的区域，内移动平均立方体而得到的。图 C.4 示例了这种平均的延展法。可以在与模型表面平行的平面内进行扫描。这就保证了延展后的体积接近于立方体的形状，并与模型表面重合。



图C.4 平均的延展法

C.2.4 平均法与寻找最大值法的不确定度评估

局部 SAR 峰值出现在模型内表面，所以峰值空间平均 SAR 就会出现在模型表面处的立方体组织的体积内。因此应当在对模型内表面进行扫描确定局部峰值 SAR 后，再围绕该峰值进行高分辨率的测量扫描。扫描的表面应该在所有方向上都至少要比用于质量平均的组织立方体的尺寸大 1.5 倍以上。根据质量平均立方体内的局部 SAR 的梯度，可以使用计算机控制的算法来求得最大的 SAR 值。平均算法和寻找最大值方法所导致的不确定度已经包括在 7.2.4 的评估方法里面，因为该评估方法不仅仅是内插和外推的基准，也是平均算法与寻找最大值方法的基准。

C.3 用于扫描和数据评估的参数的执行示例

C.3.1 简介

以下将会介绍用于执行 SAR 扫描和数据评估过程的示例参数。这里仅示例一种特殊的执行方法，其他的方法也是可行的。

C.3.2 找寻最大值的区域粗扫

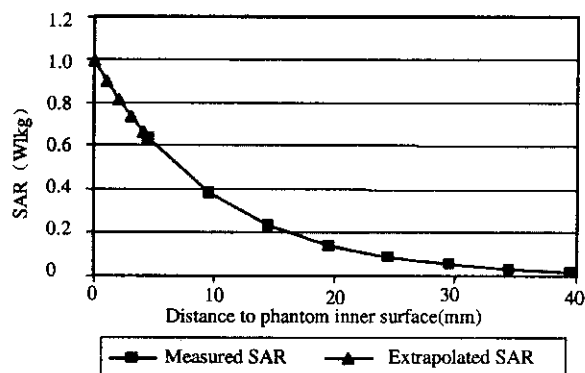
对于工作频率在 300MHz 以上、使用均质的头部模型进行评估的手机，在距离模型外壳表面不到 8mm 的固定间距处的二维粗略网格中测量 SAR 值的分布。扫描区域应该覆盖整个被手机发射所照射和包围的区域。根据测量协议，为了保持到模型表面小于 8mm 的固定距离其误差在 $\pm 1\text{mm}$ 之内，模型内表面的准确形状和尺寸都必须是已知的、预先校准过的或是在 SAR 测量过程中使用满足探头定位需求的机械或光学的表面探测技术预先探测过的。这种评估技术决定了网格点之间的最大间隔，例如：如果使用两个交错的一维三次样条函数来定位最大 SAR 值的位置，那么 $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ 的网格通常就足以满足所需的精度了。

C.3.3 局部细扫

局部 SAR 最大值是在局部细扫过程中以 1~2mm 的分辨率在内插网格中进行评估的。局部细扫可以选用中心位于区域粗扫过程中的峰值 SAR 处、由 $5 \times 5 \times 7$ 个点组成的 $32\text{mm} \times 32\text{mm} \times 30\text{mm}$ 的体积。尽管在平行于模型表面的方向上 8mm 的分辨率是足够的，但是为了达到外推的精确性，需要在垂直模型表面的方向上选用 5mm 的分辨率。

C.3.4 外推法

因为场探头的实际测量位置与偶极子传感器的几何中心重合，而传感器并不位于探头的顶端，所以在模型表面和最近测量点之间的用于计算 1g 或 10g SAR 的值必须由外推得到。尽管一个基本的指数式可能并不适合手机评估过程中的多数典型的 SAR 分布的外推，测量数据的一个四阶最小二次方的多项式通常可以得到令人满意的结果。图 C.5 中的三角形点表示以 1mm 的步长进行外推而在那些靠近模型表面无法测量的点上得到的 SAR 值。



注：三角形点表示1mm间隔的外推值。

图C.5 基于测量数据（平方）的最小二次方多项式在模型内表面得到的SAR外推值

C.3.5 内插法

将局部扫描过程中的测量和外推的SAR值内插得到1mm的网格来确定1g或10g峰值空间平均SAR值，例如：可以使用三个交错的一维三次样条函数^[25]。

C.3.6 积分法

在1g或10g立方体内进行积分的一种方法是使用基本的梯形算法。可通过对局部扫描内所有可能的1g或10g立方体进行数值积分评估最大峰值空间平均SAR值，也可以使用更复杂的搜寻算法。如果1g或10g立方体的表面接触到了局部扫描体积的边缘，那么在由先前的1g或10g空间峰值测量所表示的最大SAR值的位置处就要以一个新的中心点来重复整个局部扫描测量。

附录 D

(规范性附录)

SAR测量系统的系统验证

D.1 简介

本附录将要介绍如下两个级别的 SAR 测量系统的系统验证:

- a) 系统检查
- b) 系统验证

这两种验证程序的目的是应用如下:

系统检查是一种快速可靠的测量方法,可以在每日或每次 SAR 测量前执行。其目的在于明确配置中的各组件,包括漂移效应仍在实验室校准限值内。该检查需要一个平坦模型和一个标准源,如半波偶极子。

系统验证是一种系统级的验证方法。验证的配置包括一个平坦模型和一个参考偶极子(见附录 G)。因此,系统验证并不包括由于使用人体模型而导致的不确定度,也不包括由于被测设备定位变化所导致的不确定度。除了在实验室间比对(见附录 E)之前,以及系统每次进行修改,比如软件版本的更新、更换不同的电子读数设备或更换不同的探头等,之后,系统验证可以每年执行一次(如在探头校准之后)。

注:通过使用参考手机(E.3节)和标准人体模型进行实验室间比对,可保证实验室的质量。这种验证方法包括了人体模型和设备定位影响所导致的数据分散。这种比对是用来比较不同实验室的准确性和精确性的。

D.2 系统检查

D.2.1 目的

系统检查的目的是为了确认系统工作在其特性要求范围之内。**系统检查**是一种用来确认系统在符合性测量过程中可正常工作的可重复性检查。它并不是用来验证系统是否符合某一外部标准的。**系统检查**能够检测到短期漂移和系统不确定因素,比如:

- a) 液体参数的改变(如:因为水的蒸发或者温度改变);
- b) 组件失效;
- c) 组件漂移;
- d) 测量配置或软件参数设置的人为失误;
- e) 其他不利的系统配置条件(如:射频干扰等)。

系统检查是使用一个标准信号源在简化的测量系统中进行的完整的 1g 或者 10g 平均的 SAR 测量(参见 D.2.3)。**系统检查**与符合性测量使用的是相同的仪器和程序。**系统检查**必须使用与符合性测量相同的组织模拟液,并且在选定的频率下进行,该频率跟符合性测量选用的中间频率之间的差异应在 $\pm 10\%$ 以内。**系统检查**应当在符合性测量之前进行,其结果与相应的测量频率和信号源下的目标值之差应在 $\pm 10\%$ 以内。目标值是在任一按照如图 D.1 所示的**系统检查**配置进行了**系统验证**的系统测得的 1g 或 10g 平均 SAR 值。可以使用受控标准信号源来确定这些目标值。

D.2.2 模型设置

系统检查和**系统验证**中都必须使用平坦模型和推荐的组织模拟液(见第 7 章)。模型最小的横截面积(长、宽)不能对 SAR 测量造成超过 1%的影响。平坦模型底部面的最小面积是由主轴为 a 副轴为 b 的椭圆所确定的,其厚度为 d ,而且这些参数应该符合下列各式:

$a \geq 0.6\lambda$; $b \geq 0.4\lambda$; $6.0\text{mm} \leq d \leq 6.3\text{mm}$ ($f < 800\text{MHz}$ 时);

$a \geq 225\text{mm}$; $b \geq 150\text{mm}$; $d = 2\text{mm}$ ($f \geq 800\text{MHz}$ 时)。

其中, λ 是自由空间中的波长, 厚度 d 的制造公差必须不大于 $\pm 0.2\text{mm}$ 。对于偶极子信号源来说, 其馈入点必须位于椭圆的中心, 偶极子的臂必须与椭圆主轴准齐(偶极子规格见附录 G)^[26]。模型外壳塑料材质的相对介电常数必须小于 5, 且损耗正切小于 0.05。这种材质必须不与组织模拟液中的化学材料发生反应。当盛入最小深度为 15cm 的液体时, 在信号源(如: 偶极子)正上方的模型内表面部分的弯曲程度, 频率在 800~3000MHz 之间时必须小于自由空间波长的 1%, 频率在 800MHz 以下时必须小于自由空间波长的 0.5%。

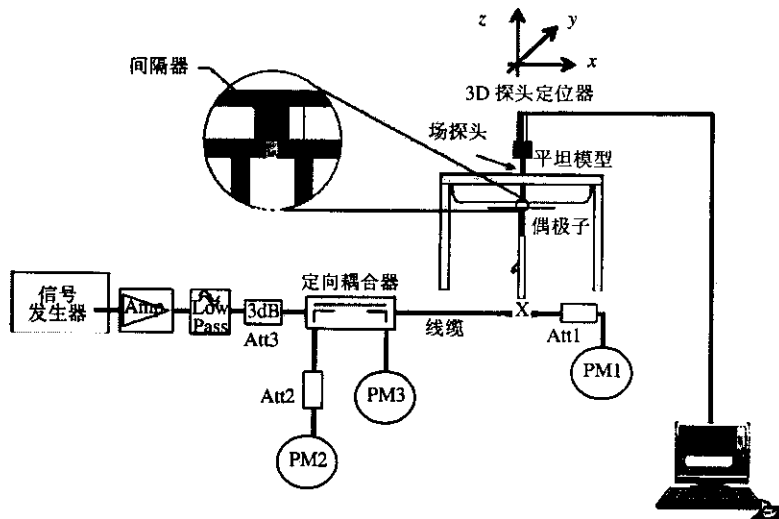
D.2.3 标准信号源

在所需频率下, 必须使用标准信号源(如半波偶极子或接线天线)来照射模型。用于系统验证的参考偶极子(见附录 G)也可用于系统检查。标准信号源应该具备良好的定位可重复性、机械稳定性和阻抗匹配。在下面的定位指导中, 假设使用半波偶极子作为标准信号源。

半波偶极子必须定位于模型底部下方中心处, 其轴线平行于模型的长轴。盛有液体的模型内表面与偶极子中心之间的距离 s , (参见图 D.1 和表 H.1) 对于每一测量频率都应该是明确的。应当使用一个低损耗(损耗正切 < 0.5)、低介电常数(相对介电常数 < 5)的分隔器保持偶极子顶端和模型底部之间的正确距离。偶极子还应在(配置过程中测得的)共振频率处具备低于 -20dB 的回波损耗, 以减少功率测量的不确定度。距离 s 的可接受误差在 $\pm 0.2\text{mm}$ 以内。

D.2.4 标准信号源输入功率的测量

信号源输入功率的不确定度应当越小越好。因此要求系统检查时使用定向耦合器和功率计。推荐的配置如图 D.1 所示(图中使用了一个半波偶极子作为标准信号源)。



图D.1 系统检查的配置

首先功率计 PM1 (包括衰减器 Att1) 与线缆连接测量偶极子连接点 (X) 处的前向功率。调节信号发生器, 使在偶极子连接点处 (X) 产生预期的前向功率 (计入 Att1 的衰减), 并通过功率计 PM1 读取数据。将线缆跟偶极子连接后, 重新信号调节发生器使得功率计 PM2 得到相同的读数。如果信号发生器不能够以 0.01dB 的步长进行调节, 则应当考虑 PM2 存在的差异。使用网络分析仪检查偶极子的匹配性 (如: 在每年的性能特性检查期内), 以保证反射功率比前向功率低 20dB 以上。

需要的组件和仪器如下：

a) 信号发生器与放大器的数值变化（在预热后）必须非常稳定。馈入偶极子的前向功率必须足够高以至于产生的 SAR 值超过探头系统的下检出限（参见 B.5）。如果信号发生器可以发射 15dBm 甚至更高的功率，通常不需要功率放大器。有些高功率放大器不能够工作在远低于其最大输出功率的等级下，比如，一个 100W 的功率放大器，如果输出功率仅为 250mW，则噪声会很大。为了保护放大器输入端，建议在信号发生器和放大器输入端之间使用一个衰减器。

b) 放大器后面连接的低通滤波器减小了放大器谐波和噪声的影响。对大多数正常工作的放大器，不需要使用滤波器。

c) 放大器后连接的衰减器提高了信号源的匹配性和功率探头的准确性（请参阅功率计手册）。

d) 定向耦合器（推荐耦合系数为 -20dB）用于监控前向功率并且保证信号发生器产生恒定的前向功率。如果负载（偶极子和功率头）匹配良好，一个中等质量的耦合器即可满足要求。

e) 功率计 PM2 和 PM3 必须具备很小的漂移和 0.01dBm 的分辨率，而其精度对功率设定的影响可以忽略不计（无需进行绝对校准）。

f) 功率计 PM1 和衰减器 Att1 必须是高质量的元件。两者必须经过校准，最好是一起校准。衰减器（-10dB）提高了功率读数的准确度（某些高功率表头内置了已校准的衰减器）。必须知道衰减器在测量频率下准确的损耗因子，许多衰减器在特定值上会存在高达 0.2dB 的变化。

g) 对于 PM1 的测量要使用与实际测量时相同的功率等级，以避免功率计 PM2 和 PM3 产生线性度和范围切换的不确定度。如果功率等级发生变化，要重复进行功率等级的设置程序。

h) 偶极子必须在位置“X”处跟线缆直接连接。如果功率计有不同类型的连接器，那么必须使用高质量的适配器。

D.2.5 系统检查的程序

系统检查是一次完整的 1g 和/或 10g 平均 SAR 测量。测得的 1g 和/或 10g 平均 SAR 值要归一化于标准信号源的目标输入功率，而且还要根据测量频率和标准信号源，与以前记录的 1g 和/或 10g 目标值进行比较。必须确定每一次系统检查的可接受误差，并且与以前记录的系统检查目标值之间的误差必须在 $\pm 10\%$ 以内。

D.3 系统验证

D.3.1 目的

系统验证程序是根据参考 SAR 值来测量系统，以及探头、电子读数装置和软件的性能。它是根据外部标准所进行的系统验证。测量系统使用平坦模型和参考偶极子。因此，系统验证并不包括由于使用人体模型而导致的不确定度，也不包括由于被测设备定位变化所导致的不确定度。

系统验证应每年一次，如果有新的系统投入使用，或者是对系统做了修改，比如使用了新的软件、不同的电子读数装置或者不同类型的探头等，也要进行系统验证。系统验证过程中必须使用已校准的探头。

本节的目的是提供一种 SAR 测量系统的系统验证方法。因为 SAR 测量设备、校准技术、模型和头部组织模拟液在不同的实验室之间差别很大，所以需要规定一套验证系统以保证各实验室的测量结果均在可接受的测量不确定度范围内。用于系统验证的数值计算参考 SAR 值列在表 D.1 中。

注：系统验证的程序既不是探头校准的替代方法也不是第7章中的不确定度评估方法。探头和电子读数设备应该根据附录B中的程序进行经常的校准。在系统验证中不考虑探头的半球各向同性。

D.3.2 模型设置

系统检查中使用的平坦模型（见图 D.1）也用于系统验证测量中。系统验证必须使用具有表 1 中介电特性的头部组织模拟液。

D.3.3 参考偶极子源

必须使用附录 G 中介绍的参考偶极子在特定的频率下照射模型。半波偶极子必须定位于模型底部下方中心处，其轴线平行于模型的长轴。应当使用一个低损耗、低介电常数的分隔器保持偶极子顶端和模型底部之间的正确距离。盛有液体的模型内表面与偶极子中心之间的距离 s ，对于每一测量频率都应该是明确的，其可接受误差在 ± 0.2 mm 以内。偶极子还应在（配置过程中测得的）共振频率处具备低于 -20 dB 的回波损耗，以减少功率测量的不确定度。

对附录 G 描述的参考偶极子，间距 s 如下：

- a) 频率 $300 \text{ MHz} \leq f \leq 1000 \text{ MHz}$ 时， $s = 15 \text{ mm} \pm 0.2 \text{ mm}$ 。
- b) 频率 $1000 \text{ MHz} < f \leq 3000 \text{ MHz}$ 时， $s = 10 \text{ mm} \pm 0.2 \text{ mm}$ 。

参考偶极子臂应当平行于模型的平坦表面，误差在 $\pm 2^\circ$ 以内或更少（见图 D.1）。

D.3.4 参考偶极子输入功率的测量

在系统检查（D.2.4）中所介绍的输入功率测量的配置同样适用于系统验证测试。

D.3.5 系统验证的步骤

系统验证用于确定整个测量系统的准确性以及软件的性能。因此并不考虑被测设备定位和头部模型形状等引起的不确定度。系统验证程序包括 6 步。步骤 a) 是系统验证程序最重要的部分，必须每次都要进行。步骤 b) ~f) 提供了一种快速和简便的验证探头性能、电子读数设备和软件的方法，推荐使用。当系统组件改变时（比如使用新的软件版本，新的电子读数装置，新的探头等等），需要进行这些附加的测量，但是这仅是针对相同的系统版本由某一实验室来执行（如：校准实验室或 SAR 测量系统终端用户实验室）。系统验证程序如下所示：

a) SAR 评估：需要进行一次完整的 1g 或者 10g 平均 SAR 测量。调节参考偶极子输入功率，使产生的 1g 或 10g 平均 SAR 值在 $0.4 \sim 10 \text{ W/kg}$ 的范围内。在表 D.1 列出的频率下，在符合性测量使用的频率范围内测量 1g 或者 10g 平均 SAR 值。将结果归一化为 1W 前向输入功率下的 SAR 值，并且将其跟表 D.1 的第 2 列和第 3 列中的参考偶极子和平面模型的参考 SAR 值进行比较。与参考值之间的差异应当小于生产商或设计者规定的 SAR 测量系统的误差，换言之，该差异要在使用表 3（见表 3 的注释 10）介绍的步骤评定的系统验证的扩展不确定度范围之内。

b) 外推程序：使用与峰值空间平均 SAR 评估过程中使用的相同的点间距在参考偶极子馈入点正上方的纵轴上测量局部 SAR 值。然后在距离参考偶极子馈入点平移 2cm 处沿另一纵轴方向（y 轴方向—见图 D.1）重复进行此项测量。模型表面的 SAR 值要通过外推得到，并要与表 D.1 中第 4 和第 5 列中给出的值进行比较，其差值应该小于生产商或设计者规定的 SAR 测量系统的误差。换言之，该差异要在使用表 3（见表 3 的注释 10）介绍的步骤评定的系统验证的扩展不确定度范围之内。

c) 探头线性度：使用不同的参考偶极子输入功率等级，重复步骤 a) 中的测量。在每一频率下，选择功率等级使其产生的 1g 和/或 10g 平均 SAR 值接近 10 W/kg 或 8 W/kg ， 2 W/kg 或 1.6 W/kg ，和 0.4 W/kg 。测得的 SAR 值归一化为 1W 的前向输入功率下的 SAR 值，并且跟步骤 a) 得到的 1W 归一化 SAR 值进行比较。其差值应当小于生产商或设计者规定的 SAR 测量系统的误差。换言之，该差异要在使用表 3 和

7.2.1.3 介绍的步骤确定的线性组件的扩展不确定度范围之内。

d) 调制响应：使用占空比为 0.1，脉冲重复率为 10Hz 的脉冲调制信号重复步骤 a) 中的测量。调节功率，以产生相对于 CW 信号接近 8W/kg 的 1g 或 10g 平均 SAR 值或接近 80W/kg 的峰值功率。测得的 SAR 值归一化于占空比为 1、1W 的前向输入功率下的 SAR 值，并且跟步骤 a) 得到的 1W 归一化值进行比较。其差值应当小于生产商或设计者规定的 SAR 测量系统的误差。换言之，该差异要在使用表 3 和 7.2.1.3 介绍的步骤确定的线性组件的扩展不确定度范围之内。

e) 系统偏移：使用可以产生接近 0.05 W/kg 的 1g 或 10g 平均 SAR 值的参考偶极子前向输入功率重复步骤 a) 中的测量。测得的 SAR 值归一化为 1W 的前向输入功率下的 SAR 值，并且跟步骤 a) 得到的 1W 归一化 SAR 值进行比较。其差值应当小于生产商或设计者规定的 SAR 测量系统的误差。换言之，该差异要在使用表 3 和 7.2.1.3 介绍的步骤确定的线性组件的扩展不确定度范围之内。

f) 探头轴向各向同性：探头定位于参考偶极子中心的正上方，与模型内表面之间的测量距离为 5mm。探头（或参考偶极子）要至少沿其轴线旋转 180°，步长不大于 15°。记录 SAR 读数的最大值和最小值。其差值应当小于生产商或设计者规定的 SAR 测量系统的误差。换言之，该差异要在使用表 3 和 7.2.1.2 介绍的步骤确定的各向同性的扩展不确定度范围之内。

D.3.6 参考 SAR 值

在系统验证测量过程中，频率 f_i 下的参考偶极子（如附录 G 所示）应当产生一个如表 D.1 的第 2 列和第 3 列所示的参考峰值空间平均 SAR 值，并且在系统验证的不确定度范围内（见表 3 的注释 10）。表 D.1 的第 4 列和第 5 列用于校准系统的外推程序。参考 SAR 值已经根据表 H.1 中的平面模型的参数，通过有限时域差分法计算出来。800~3000MHz 之间的频率下的值已经使用四次多项式外推法进行了经验性验证。频率在 300~450MHz 之间的数值将会在本部分的下一版中进行经验性验证。仿真过程中使用的无损模型的参数（尺寸、外壳厚度和介电常数），以及参考偶极子和液体之间的距离 s 都已在表 H.1 中给出了。液体的介电特性已在表 1 中介绍过了，参考偶极子的尺寸请参见表 G.1。

表D.1 参考偶极子和平坦模型的数值计算参考SAR值

频率 (MHz)	1gSAR 值 (W/kg)	10gSAR 值 (W/kg)	表面局部 SAR 值 (在馈入点正上方) W/kg	表面局部 SAR 值 (在偏离馈入点 $y=2\text{cm}$ 处) (W/kg)
1	2	3	4	5
300	3.0	2.0	4.4	2.1
450	4.9	3.3	7.2	3.2
835	9.5	6.2	14.1	4.9
900	10.8	6.9	16.4	5.4
1450	29.0	16.0	50.2	6.5
1800	38.1	19.8	69.5	6.8
1900	39.7	20.5	72.1	6.6
1950	40.5	20.9	72.7	6.6
2000	41.1	21.1	74.6	6.5
2450	52.4	24.0	104.2	7.7
3000	63.8	25.7	140.2	9.5

所有值均归一化至 1W 前向输入功率下的值

注：必须使用D.2.2中给定的模型尺寸

附录 E

(资料性附录)

实验室间比对

E.1 目的

实验室间比对的目的是通过比较不同实验室所测的数据，来验证不同的 SAR 测量系统。基本原则就是使用参考手机和盛有头部组织模拟液（液体参数如 5.2 节）的 SAM 人体模型，并使用第 6 章所介绍的 SAR 评估方法。

对不同实验室所测得的数据进行比较。同时，也应该比较测量不确定度的分析。如果测量数据之间的差异和矛盾能够归结为测量不确定度之间的差异，那么可认为实验室间比对是成功的。否则，所有的不确定度源都要根据第 7 章，一步步地进行调查评估。同时也要考虑不同于第 7 章的其他可能的不确定度源。

注：完成实验室间比对的通用原则请参见参考文献[27]和参考文献[28]中的例子。

E.2 模型设置

使用第 5 章和附录 A 所定义的均质模型。模型应该安装在低介电常数（小于 5）、低损耗正切（小于 0.05）的坚固材料制成的固定结构上。应当避免在距离固定结构 50cm 以内存在金属材料。模型应该照射在参考手机的辐射下，且手机要按照 6.1 节描述的测量位置摆放。

E.3 参考无线手机

参考手机是商用的无线手机，且它们是根据参考文献[28]进行维修和经营的。要根据参与比对的各成员之间的共识来指定手机的供应商。

E.4 功率设置

手机功率的设置取决于进行实验室间比对的参考设备的输出功率的测量精度。参与实验室应分别检查每一台参考设备，以确保每一台设备的输出功率与参考值在 $\pm 0.3\text{dB}$ 的误差范围之内。测得的输出功率应该上报监控实验室。设备的输出功率应该通过测量软件进行调整，以达到预先设定的值。而且被测设备必须完全充满电。

必须细心确保输出功率测量的精度。一些设备可能允许在天线端口进行简单而精确的输出功率测量。当指定比对测量中所使用的参考手机时，要考虑输出功率测量的难易程度。如果认为有必要，在比对过程中参考手机可以周期性地交回监控实验室进行输出功率和频率验证。监控实验室同时必须使用具有良好可重复性的测量方法来验证参考手机的辐射功率。同时，监控实验室还要检查电池的状况，以确保在所有的实验室都有相同的输出功率。

E.5 实验室间比对程序

用于实验室间比对的 SAR 评估测量步骤与第 6 章中符合性测量所用的步骤是一样的。实验室间比对应该使用校准过的探头和验证过的系统。每个实验室都要提供一份满足第 7 章和第 8 章要求的完整的测

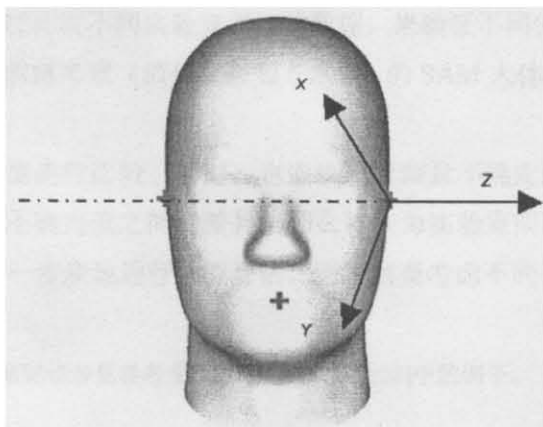
量报告，要包括系统验证、液体测量、系统不确定度数据和测量的输出功率数据。实验室间比对的结果应该落在第 7 章的电磁照射评估的扩展不确定度中。最后要由指定的监控实验室对不同实验室的报告进行评估和比较。

附录 F

(资料性附录)

模型坐标系和被测设备坐标系的定义

在各种任选参考坐标系之间偏移和旋转可以明确描述被测设备相对于模型的定位位置。模型坐标系的定义如图 F.1 所示：



注：x, y, z 相对于模型的坐标轴。

图F.1 SAM模型的参考坐标系示例

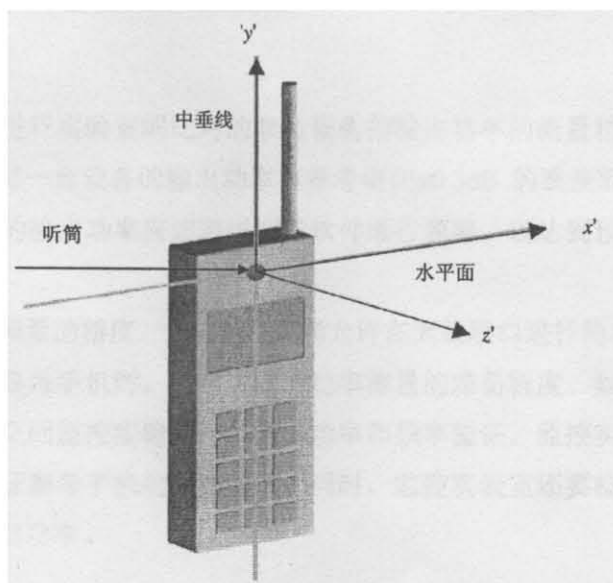
x-, y-, z-轴都是针对右手系坐标系而言的，且定义如下：

z-轴是左右耳参考点之间的直连线，且从左指向右。原点 $z=0$ 是左耳参考点。

y-轴是参考面，且垂直于 z-轴。

x-轴是参考面的法线，且与参考面相切于耳朵参考点。

被测设备坐标系的定义如下图 F.2 所示：



注：x', y', z' 是相对于手机的坐标轴。

图F.2 被测设备坐标系示例

附 录 G
(资料性附录)
校准偶极子

如附录 D 中所描述的, 在所需频率下, 应当使用参考偶极子来照射平坦模型。如表 G.1 所示, 参考偶极子是根据模型外壳的介电参数和厚度而定的。参考偶极子应该安放在模型底部正下方的中心位置且其轴要与模型长轴平行。使用一个低损耗、低介电常数的间隔器来建立参考偶极子上表面和模型下表面之间的正确距离。间隔器对 1g 和 10g 的平均 SAR 值的影响不能超过 1%。盛有液体的模型内表面与偶极子中心之间的距离 s , 对于每一测量频率都应该是明确的, 其可接受误差在 ± 0.2 mm 以内。偶极子还应在 (配置过程中测得的) 共振频率处具备低于 -20 dB 的回波损耗, 以减少功率测量的不确定度。为了满足这些要求, 在偶极子的末端可采用低损耗的绝缘体或金属协调元件微调参考偶极子 (见图 D.1)

表G.1 参考偶极子的机械尺寸

频率 (MHz)	L (mm)	h (mm)	d (mm)
300	396.0	250.0	6.35
450	270.0	166.7	6.35
835	161.0	89.8	3.6
900	149.0	83.3	3.6
1450	89.1	51.7	3.6
1800	72.0	41.7	3.6
1900	68.0	39.5	3.6
1950	66.3	38.5	3.6
2000	64.5	37.5	3.6
2450	51.5	30.4	3.6
3000	41.5	25.0	3.6

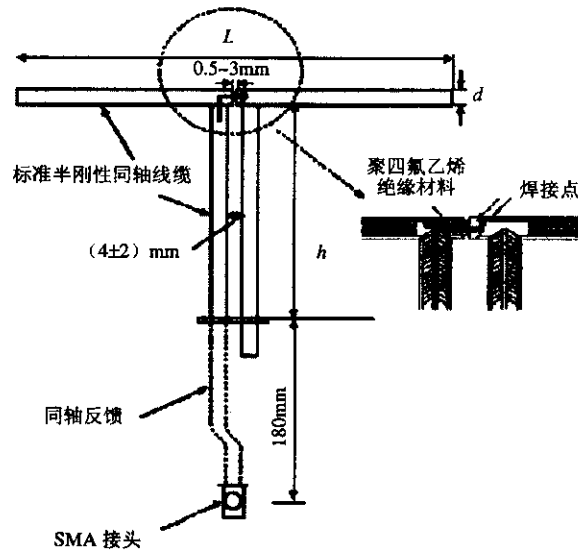
注: 300MHz和450MHz的值适用于6.3mm厚的模型; 835MHz~3000MHz的值适用于2mm厚的模型。长、宽、高的制作公差要优于 $\pm 2\%$

对于附录 D 中的偶极子, 间隔距离 s 如下:

a) 对于 $300\text{MHz} \leq f \leq 1000\text{MHz}$, $s = 15\text{mm} \pm 0.2\text{mm}$;

b) 对于 $1000\text{MHz} < f \leq 3000\text{MHz}$, $s = 10\text{mm} \pm 0.2\text{mm}$ 。

参考偶极子臂应平行于模型平坦的表面, 误差为 $\pm 2^\circ$ 或更少 (见图 D.1)。如果能够对空的模型进行仔细定位并且使用水平仪确保参考偶极子平行于水平面, 那么这个要求就是可以满足的。



注:

L ——偶极子的长

d ——偶极子的直径

h ——平衡非平衡转换器的长度

图G.1 参考偶极子的机械明细图

附录 H

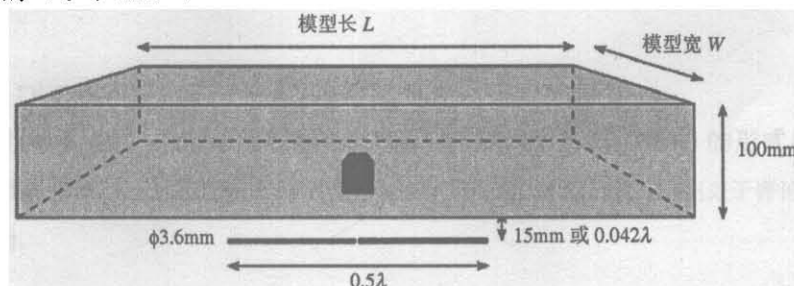
(资料性附录)

平坦模型

平坦模型尺寸 (参见图H.1) 对于在仅充满液体 (没有盒子) 的模型中10g体积内吸收的能量的影响是通过商用的FDTD方法进行数值评估的。使用一个距离模型15mm (对于840MHz, 相当于 0.042λ) 的匹配偶极子照射模型。模型的尺寸 (宽度 W 和长度 L) 可以在 $0.4\lambda \sim 0.3\lambda$ 之间变化。在立方体内吸收的能量被归一到馈入点电流为1安培或者馈入点功率为1瓦的情形下。尽管无论将立方体内吸收能量归一化至馈入点功率还是馈入点电流时都会产生偏差, 两种归一方法均可以确定保持不确定度小于1%的最小尺寸。长度大于 0.6λ , 宽度大于 0.4λ 的平坦模型就可以满足上述条件, 如图H.2所示。模型宽度的影响并不大。但是, 必须保证模型宽度大于 0.4λ , 这样才能确保吸收功率的偏差在1%的限值内。模型装置可以依照比例用自由空间的波长来表示。只要液体是相对有损的, 对于液体特性的依赖性就不会很显著。

注: 10g平均立方体由于尺寸较大, 因此它对于模型尺寸的变化就更加敏感, 也就是说, 1g体积平均的不确定度要比10g体积平均的小。

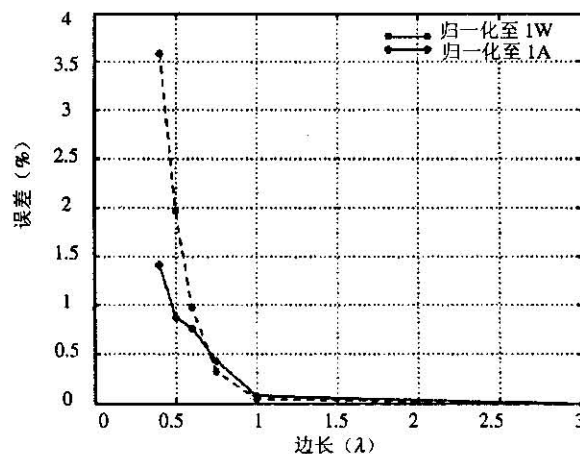
由尺寸差异所导致的影响取决于偶极子电流幅值和空间分布的扰动。因为偶极子尺寸相对于SAR平均体积来说比较大, 所以随着体积的增加扰动也会增加。尽管研究中使用的液体深度为10cm, 而不是附录D中模型所需的15cm, 但是对于840MHz的情况来说, 深度也是趋肤深度的2.57倍了, 从而在液体表面的能量反射是可以忽略的 (小于1%)。



注: λ 是自由空间的波长;

平坦模型底部所示的是1个10g立方体。

图H.1 用于得出 W 和 L 最小尺寸的平坦模型



图H.2 与无穷大平坦模型相比, FDTD指出10g峰值空间平均SAR的不确定度是平坦模型尺寸的函数

表H.1 用于计算表D.1中参考SAR值的参数

频率 (MHz)	模型外壳厚度 (mm)	模型外壳 介电常数	用于FDTD的模型尺寸 (mm) x, y, z	参考偶极子距离液体表面的距离 s (mm)
300	6.3	3.7	1000 800 170	15
450	6.3	3.7	700 600 170	15
835	2.0	3.7	360 300 150	15
900	2.0	3.7	360 300 150	15
1450	2.0	3.7	240 200 150	10
1800	2.0	3.7	220 160 150	10
1900	2.0	3.7	220 160 150	10
1950	2.0	3.7	220 160 150	10
2000	2.0	3.7	160 140 150	10
2450	2.0	3.7	180 120 150	10
3000	2.0	3.7	220 160 150	10

注：表中的参数用于数值计算FDTD模型中

附录 I
(资料性附录)
头部组织模拟液的推荐配方

1.1 简介

模型中液体的介电常数已列在表 1 中了。对于频率范围内其他频率处的头部组织模拟液的介电常数，可通过线性内插法得到。表 I.1 给出了具有表 1 所定义参数的液体配方。

警告

为了确保人身安全，必须按照原料安全数据单 (MSDS) 和/或适用的地方性法规中的指导进行操作。

1.2 成分

调配头部组织模拟液需要下列成分：

- a) 蔗糖（糖）（纯度大于 98%）。
- b) 氯化钠（食盐）（纯度大于 99%）。
- c) 去离子水（最小阻抗 16MΩ）。
- d) 羟乙基纤维素（HEC）。
- e) 防腐剂。
- f) 二甘醇丁醚（DGBE）（纯度大于 99%）。
- g) 乙二醇单丁醚[4-(1, 1, 3, 3-四甲基丁基)-苯基醚]有时也以 Triton X-100 的形式出现。Triton X-100 的质量需要特别纯以便与氯化钠的用量相适应（注：包含 Triton X-100 的公式目前正处于评论和确认阶段）。
- h) 二乙酸甘油酯。
- i) 1, 2-丙二醇。

注 1：基于 HEC 的组织模拟液的粘度需要足够低，以免影响电场探头的移动。

注 2：首先加入氯化钠形成盐溶液，然后加入 Triton X-100。

注 3：实际的结果和混合物的百分比可能会根据使用组件的等级以及种类而变化。

1.3 组织模拟液配方 (介电常数/导电率)

表1.1 满足目标介电参数的组织模拟液的推荐配方

频率 (MHz)	300			450			835			900			1 450			1 800			1 900			1950			2000			2 100			2 450			3000		
配方 #	1	1	3	1	1	2	3	1	1	2	3	1	1	2	2	3	1	2	4	1	1	2	1	1	2	1	1	2	2	3	2					
成分 (按重量%)																																				
1, 2-丙二 醇						64.81																														
二乙酸甘 油酯			48.9				49.2								49.43															49.75						
防腐剂	0.19	0.19	0.5	0.10	0.10		0.5								0.50															0.50						
DGBE								45.51	47.00	13.84	44.92					44.92	13.84	45.0	50.0	50.0	50.0	7.99	7.99							7.99						
HEC	0.98	0.98		1.00	1.00																															
食盐	5.95	3.95	1.7	1.45	1.48	0.79	1.1	0.67	0.36	0.35	0.18	0.64	0.18	0.35													0.16	0.16		0.16						
蔗糖	55.32	56.32		57.00	56.50																															
Triton X-100												30.45						30.45										19.97	19.97		19.97					
去离子水	37.56	38.56	48.9	40.45	40.92	34.40	49.2	53.82	52.64	55.36	54.90	49.43	54.90	55.36	55.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	71.88	71.88	49.75	71.88												
测量的介电参数																																				
ϵ_r'	46.0	43.4	44.3	41.6	41.2	41.8	42.7	40.9	39.3	41.0	40.4	39.2	39.9	41.0	40.1	37.0	36.8	41.1	40.3	39.2	37.9															
σ (S/m)	0.86	0.85	0.90	0.90	0.98	0.97	0.99	1.21	1.39	1.38	1.40	1.40	1.42	1.38	1.41	1.40	1.51	1.55	1.88	1.82	2.46															
温度(°C)	22	22	20	22	22	22	20	22	22	21	22	20	21	21	20	22	22	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20				
目标值 (来自于表 1)																																				
ϵ_r'	45.3	43.5	41.5	41.5	40.5									40.0						39.8	39.2	38.5														
σ (S/m)	0.87	0.87	0.90	0.97	1.20									1.40						1.49	1.80	2.40														

注 1: 同一频率下的多列表示多种可选配方。

注 2: 配方号的参考文献为 1 [30]、2 [64]、3 [50]、4 [15]。

附录 J

(资料性附录)

液体介电特性的测量和不确定度的评估

J.1 简介

J.2 描述了作为 SAR 特征过程之一的组织模拟液介电常数的测量。目的在于为使用者在简便和可靠的基础上选择测量的方法提供足够的信息。J.6 中给出了一些参考液体的介电特性，以便用来评定测量过程的可靠性。J.7 中介绍了评估介电参数测量不确定度的基本步骤。

J.2 测量技术

介电参数是在特定测量频率和温度下的组织模拟液的复数相对介电参数 $\epsilon_r = \epsilon_r - j\sigma/\omega\epsilon_0$ 。一些已经确立的技术可以用来对组织模拟液进行介电性质的测定。下面就是需要的仪器：

- 1) 矢量网络分析仪和 S 参数测量设备；
- 2) 样品测量器，也称为介电参数测量单元和介电探头；
- 3) 用于从 S 参数的测量中获得样品介电常数的测量步骤和应用软件。

在 J.3 到 J.5 中，对三种样品测量器以及相关的测量方法进行了描述。所能达到的精确度有赖于测量单元（测量单元的尺寸与测量频率的范围有关）的制造精度。测量过程必须通过对参考液体的测量进行验证。

下面就是用于所有测量步骤的一些基本原则：

- 1) 确保样品测量器是完全干净的；
- 2) 确保所有的单元、探头、缆缆和连接器没有受损；
- 3) 确保为在向样品测量器中灌注组织模拟液的过程中液体完全充满整个体积且没有产生气泡；
- 4) 确保已记录下样品的温度，并要指出样品的特性只在该温度下才有效；
- 5) 确保测量人员熟悉测量的各种情况以及每一步结果的含义；
- 6) 确保在校准之后，使用一种参考液体在测量样品之前来验证系统。几种推荐的参考液体的数据参见 J.6；
- 7) 确保用于相对复杂反射系数和复介电常数的数据推导方法是准确的，并且适用于使用过程中的样品测量器的几何特性。

J.3 开槽线法

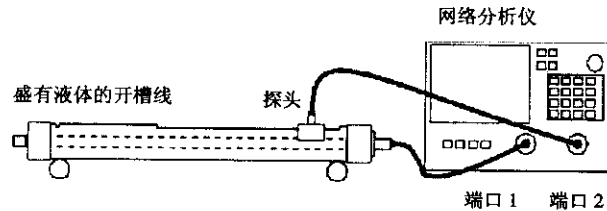
一个带有可移动探头的终端开槽的同轴线可用作样品测量器^[29]。网络分析仪在开槽线的输入端提供射频信号，使得输入信号的幅度和相位成为沿开槽方向的可移动探头的位置的函数。

这种方法需要确定网络分析仪在所需频段内的校准和设置，起测点的位置，沿着开槽线方向移动探头的步长，以及后续测量位置的总数也都需要进行说明。应用软件应该可以根据测量数据得出样品的介电特性。下面将给出一个样例步骤。

J.3.1 设备设置

测量设备是由一个探头连接到矢量网络分析仪的开槽同轴传输线组成的，如图 J.1 所示。 S_{21} 的对数幅值和相位应该被同时显示。功率源应该被设为足够高以得到良好的信噪比。应该周期性地（一年或只

要与线长度相关的测量比例改变的时候)对参考液体进行测量来校准系统。因为测量量是随着距离变化的幅度和相位,所以比例的准确性是十分重要的。



注: 尽管对监控设备的要求没有标出来,但是建议使用样品温度的监控设备。

图J.1 开槽线的设置

网络分析仪从开槽同轴传输线的一端输入信号。探头插入槽内组织模拟液中来检测沿线的每一个测量位置上的射频信号的幅度和相位。网络分析仪应该在被连接到样品测量器之前进行完全的两端口校准。下面几点一定要注意:

- a) 小心地向开槽同轴线中注入组织模拟液以避免产生气泡。这个操作应该在开槽同轴传输线处于水平状态时进行。
- b) 探头应该在靠近开槽线输入接头最近的一端插入槽中,确保组织模拟液充满线的内表面,并且在开槽线的距离比例上进行位置的对准。
- c) 探头应该被垂直插入到开槽纵向轴中,直到得到稳定和足够的幅度响应。不要将探头插入同轴线太深,因为这样会过度影响场的分布。

J.3.2 测量步骤

- a) 配置和校准网络分析仪。
- b) 沿着开槽线测量 10~20 个对数—幅度和相位的数据,前后相应的幅度变化为 30dB 左右。
- c) 画出 S_{21} 的相应于测量距离的对数—幅度和相位曲线。
- d) 使用校正系数或者相似的统计数据测量来确定图中的点是否近似于直线。数据应该有良好的线性曲线符合度(对于有损材料来说,我们所期望的相关系数 $r^2 > 0.99$)。如果不能达到这个标准,需要重新测量液体,通过增加测量点来扩大幅度变化(从 30dB 扩大到 40dB)。

注: 对于低损耗的材料,确保开槽线足够长以避免来自负载终端的反射。

- e) 使用下列方程式(参见参考文献[30]、[31])来计算组织模拟液的导电率和相对介电常数:

$$\begin{aligned} \bar{\alpha} &= \frac{m_m \ln(10)}{20} && \text{Np/cm} \\ \bar{\beta} &= \frac{m_p \pi}{180} && \text{rad/cm} \\ \epsilon'_r &= \frac{(\bar{\beta})^2 - (\bar{\alpha})^2}{\omega^2 \mu_0 \epsilon_0} && \text{(J-1)} \\ \sigma &= \frac{2\bar{\alpha}\bar{\beta}}{\omega\epsilon_0} \left(\frac{100 \text{ cm}}{\text{m}} \right) && \text{S/m} \end{aligned}$$

式中:

m_m 和 m_p ——分别是对数幅值和相位曲线的最小平方线性符合度的斜率;

$\bar{\alpha}$ 和 $\bar{\beta}$ ——是沿开槽线的平均衰减和传播系数。

J.4 接触探头法

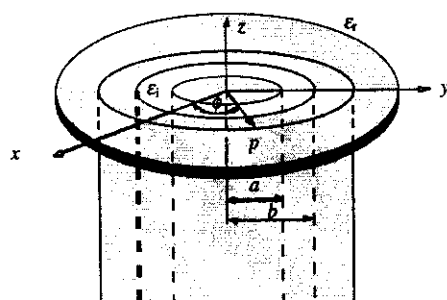
接触探头法是一个末端开口的同轴传输线部分，通常带有作为散射场的地平面的末端边缘。放置探头使其与样品相接触，然后使用网络分析仪或者其他等效的仪器测量在开路电路末端的吸收或反射系数^{[32]-[34]}。同轴探头也可以用来检测固体介电质，例如，用来制造仪器夹具或者模型的大块材料的样品。为了减小接触探头的误差，固体表面应该进行高度的抛光^[35]。

测量过程应该详细说明网络分析仪的校准和在所需频率下的设定。应用软件应该可以根据测量数据得出样品随频率变化的介电特性。为了使用这种技术，必须开发用于网络分析仪的探头和软件包，或者使用商用的探头和软件包。这种方法需要详细说明探头的尺寸和适用的频率范围。在下节中列出了一个这样的例子。

J.4.1 设备的设置

设备是由连接到矢量网络分析仪一个端口的探头所组成的。探头是一个末端开路的同轴电缆，如图 J.2 所示。一般使用圆柱坐标系(ρ , ϕ , z)，其中 ρ 表示离开轴的半径距离， ϕ 是沿着轴得到的角位移， z 是沿着轴的位移。 a 是内导体的半径， b 是外导体的内径。

样品测量器是一个非金属的容器，其尺寸相对于将要浸入其内部的探头来说是足够大的。一个外部直径达到 2~4mm 的探头适合于 300MHz~3GHz 频率范围内的组织模拟液的测量。这种探头的尺寸大约需要 50ml 或者更多的样品与之相匹配。外部直径达到 7mm 的探头可用于更大体积的样品的测量。探头经常有一个大边沿，以便在吸收计算过程中更好地模拟对无限大圆平面的假设。



注：

a ——内导体的半径；

z ——沿着轴的位移；

b ——外导体的内径 ϵ_2 ；

ρ ——离开轴的半径距离；

ϕ ——沿着轴的角位移；

x, y, z ——笛卡儿坐标。

图 J.2 内、外径分别为 a 、 b 的末端开放的同轴探头

在所需频点上进行每一次校准时都要验证短路测量的精确性。可以通过在开放端轻轻压上一片铝箔来得到短路电流。为了得到最好的电气接触，探头末端应该是平坦的而且没有氧化^[36]。比较大的传感器一般来说有比较好的箔短路可重复性。通过使用工具箱中的金属板短路器就有可能得到与商业化的 4.6mm 探头之间的良好接触性。为了得到良好的重复性，可能需要用手压住金属板。

当边缘直径约等于介电质半波长的时候，就会出现由于“边缘共振”而产生的很大的测量误差^[33]。这种现象在损耗正切小于0.25的高介电常数的液体中就更加显著（在移动电话频率中，这类液体有水，甲醇和二甲基亚砷等）。因此，对于大的传感器，我们强烈推荐使用高损耗正切的液体（例如乙醇）进行校准。在某些频率下，使用水校准7mm的探头可能会遇到困难。损耗正切大约为0.5的组织模拟液，可以保证其相对于任何尺寸探头的共振效应是可以忽略的。

配置网络分析仪测量吸收信号的幅度和相位。放置参考液体，使其与探头接触，在探头平面执行单端口的反射校准。校准通常需要三种标准物质：即采用短路器、空气和温度精确控制的去离子水（其他的参考液体，例如甲醇或者乙醇也可以用于校准）。校准是测量程序中的关键步骤，所以必须确保校准的正确。可以通过重新测量短路器来确保前后得到的反射系数 $\Gamma = -1.0$ （线性单位）。

J.4.2 测量步骤

- a) 设置和校准网络分析仪和探头系统。
- b) 把样品装入非金属容器中，并且将探头没入。推荐使用定位器或者夹子来稳定探头。安装探头时，应使其表面与液体表面呈一定的夹角，以减少边沿盘下面产生的气泡。
- c) 测量相对于探头孔径的复数入射参数。
- d) 计算复数相对介电常数 $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\sigma\omega\epsilon$ ，例如使用公式^[34]：

$$Y = \frac{j2\omega\epsilon_r'\epsilon_0}{[\ln(b/a)]^2} \int_a^b \int_a^b \int_0^\pi \cos\phi \frac{\exp[-j\omega(\mu_0\epsilon_r'\epsilon_0)^{1/2}r]}{r} d\phi'd\rho'd\rho \tag{J-2}$$

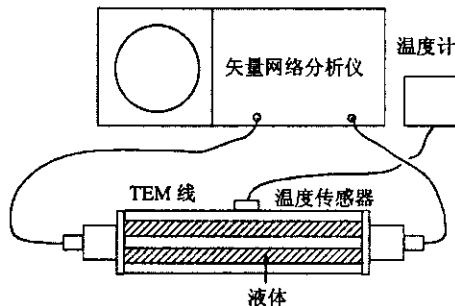
最后的这个表达式可进行数值化计算或被扩展成简单的级数^[37-40]。该方程首先求解出采样波的数目 k ，然后使用Newton-Raphson或其他迭代近似法求解采样复数介电常数。也可使用其他的数学方法，如参考文献[41]，[42]，由这些方法所开发的应用软件都已经通过测量参考液体而被彻底的测量和检查了。商用末端开放式同轴探头的工具箱通常都是使用这个理论和方法的版本。

K.1 TEM传输线法

这种方法基于测量充满待测液体的TEM模式同轴传输线的复数传输系数^[43]。使用矢量网络分析仪测量散射系数 S_{21} 的幅值和相位，进而计算出复数介电常数。测量过程应该详细说明网络分析仪的校准和在所需频率下的设定。应用软件应该可以根据测量数据得出样品随频率变化的介电特性。

J.5.1 设备设置

设备的设置如图J.3所示。样品测量器是一个开放壁的带状线，它包括了一个圆形的中心导体，两个盘状垂直（两侧）的接地导体，一个光学透明的塑料底面的管壁和一个开放的顶端，以及温度传感器。长度 d 通过给定的频率进行选取，这样在传感器内的多路反射效应就会很小，并且总的衰减不会超过网络分析仪的动态范围。例如，两个有不同长度的传感器可以覆盖800~2000MHz的频率范围。应该小心地将样品装入测量器，并且通过观察看是否有气泡出现。



图J.3 TEM线介电特性测量设备的配置

J.5.2 测量步骤

- a) 设置和校准网络分析仪。
- b) 在所需频率下记录空小室 S_{21}^0 的幅度和相位。
- c) 将样品液体充满小室，反复测量以得到样品 S_{21}^s 的传输系数。
- d) 从TEM线中移除液体，用清水完全清洗内壁并且仔细的擦干。
- e) 重新把同轴线连接到网络分析仪，确保 S_{21}^0 的幅度和相位不变（幅度偏差小于0.1dB，相位偏差小于 0.5° ）。这个步骤只有在测量多种样品的时候才用到。
- f) 根据 S_{21}^s/S_{21}^0 的幅度和相位来计算液体的复介电常数：

$$\frac{S_{21}^s}{S_{21}^0} = \frac{(1-\Gamma^2)\exp(-j(k-k_0)d)}{1-\Gamma^2\exp(-j2kd)}$$

$$\Gamma = \frac{1-\sqrt{\epsilon_r}}{1+\sqrt{\epsilon_r}}$$

$$k = \frac{2\pi f}{c_0} \sqrt{\epsilon_r}$$

$$k_0 = \text{自由空间传播因子} \tag{J-4}$$

式中：

Γ ——TEM线任一端的反射系数；

k ——液体中的波数；

k_0 ——自由空间的波数；

d ——样品测量器（TEM线）的长度；

f ——频率；

c_0 ——自由空间的光速；

$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\sigma/\omega\epsilon_0$ ——样品的复数相对介电常数。

K.2 参考液体的介电特性

J.2节中推荐了使用介电特性良好的参考材料验证系统的测量步骤。需要两种参考液体——一种用于校准，另一种用于检查校准。用于计算随频率而变化的介电参数的通用方程是：

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{(1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha})^\beta} + \frac{\sigma_i}{j\omega\epsilon_0} \tag{J-5}$$

这个方程相应于 $\alpha=0$ ， $\beta=1$ 的Debye方程， $\beta=1$ ， $0<\alpha<1$ 的Cole-Cole方程，以及 $\alpha=0$ ， $0<\beta<1$ 的Cole-Davidson方程^[20]。

式中：

ϵ_s ——静态或低频介电常数；

ϵ_∞ ——渐进高频的介电常数；

τ ——缓和时间；

σ_i ——离子导电率。

表J.1中给出了用这个方程计算多种参考液体特性的参数。这些液体是二甲基亚砷、甲醇、乙二醇和

去离子水。对于表J.1中的所有液体，参数 α 和 σ 都是零。模型参数是通过文献中提到的多种测量方法而得到的。总的说来，由两端口闭合的传输线小室所测的结果通常是最准确的，但是表中所列各项的结果相对来说也较好。表J.2包括20°C的目标相对介电常数和导电率。如果使用其他的参考液体，就需要在报告后面说明目标值和相应的参考文献。

选用和组织模拟液有相似介电特性的参考液体是一种很好的方法。必须严格遵守任何参考液体的混合配方，也必须在特定的温度测量介电特性。为了避免污染和挥发，混合物不能暴露在空气中。参考材料必须是高纯度等级的，也就是说，必须是解析级或更高。在打开后，反应物瓶子必须要根据制造商的建议在保存期内储存。

注：对于每一种特定液体，所有的工作人员都应该熟悉并且能够根据材料安全数据单（MSDS）进行一些特殊的处理方法。

表J.1 用于计算多种参考液体介电特性的参数

参考液体	温度°C	参考文献	模型	ϵ_s	ϵ_∞	τ (ps)	β
去离子水	20	[46]	Debye	80.21	5.6	9.36	1
去离子水	25	[46]	Debye	78.36	5.2	8.27	1
二甲基亚砒	20	[45]*	Debye	47.13	7.13	21.27	1
二甲基亚砒	25	[45]*	Debye	46.48	6.63	19.18	1
二甲基亚砒	25	[58]	Cole-Davidson	47.0	3.9	21.1	0.878
乙二醇	20	[47]	Cole-Davidson	41.4	3.7	164	0.8
甲醇	20	[38]	Debye	33.7	4.8	53.8	0
甲醇	20	[45]*	Debye	33.64	5.68	56.6	0
甲醇	25	[45]*	Debye	32.67	5.58	50.8	0

*测量所得的数据仅到5GHz

表J.2 20°C时参考液体的介电特性

频率	甲醇 ^[37]		二甲基亚砒 ^[45]		去离子水 ^[46]		乙二醇 ^[47]	
	ϵ_r'	σ	ϵ_r'	σ	ϵ_r'	σ	ϵ_r'	σ
MHz								
300	33.33	0.05	47.07	0.03	80.19	0.02	39.01	0.14
450	32.94	0.11	46.99	0.06	80.16	0.05	34.49	0.30
835	31.37	0.35	46.64	0.20	80.03	0.17	29.15	0.75
900	31.04	0.41	46.56	0.24	80.00	0.20	28.00	0.83
1 450	27.77	0.92	45.68	0.60	79.67	0.51	20.38	1.34
1 800	25.51	1.27	44.94	0.91	79.38	0.78	17.23	1.58
1 900	24.88	1.37	44.71	1.01	79.29	0.87	16.51	1.63
2 000	24.25	1.47	44.46	1.11	79.19	0.96	15.85	1.69
2 450	21.57	1.89	43.25	1.61	78.69	1.44	13.49	1.89
3 000	18.76	2.33	41.59	2.31	77.96	2.13	11.56	2.07

K.3 液体介电参数测量的不确定度评估

使用矢量网络分析仪对组织液介电特性的测量过程在附录中已有描述。为了确认和消除内在损耗和反射，网络分析仪需要进行校准。电介质测量的不确定度来源于校准数据的不准确度、网络分析仪的漂移和随机误差。其他可能的误差源主要是支架硬件产品的容限值、指定频率下与优化尺寸的偏差值以及样品的特性。这些与支架的类型和所测的材料散射参数无关。由于开槽线法的直线深度产生的不确定度可以通过最小平方分析法测定^[48]。

表J.3中给出了一个不确定度评估的模板。对于某一特定的测量装置或者测量程序，这些影响量可能并不适用，也可能有其他因素并未列于表中。表J.3也包括了数值样例。由于测量的配置不同，实际的不确定度评估也可能与这里所列的数值不相同。可通过对特性良好的参考液体的测量来评估介电特性测量的不确定度^[49-52]，步骤如下：

a) 以目标频率为中心在足够大的频率跨度内配置和校准网络分析仪，例如在 $835 \pm 100\text{MHz}$ 频率范围内，设备传输频段内的5个或更多频点上进行配置和校准。

b) 在每个设备的中心频段和邻近频率上，至少测量参考材料 n 次以获得相对介电常数和电导率的平均值和标准偏差。

c) 对从步骤b开始的每次确认频率—校准有效性的测量，在设备传输频段的5个甚至更多的频点处使用下列方程计算测量值和相关参考数据（参见J.6节的表J.1）之间的差值：

$$\varepsilon'_{\text{tolerance}} [\%] = 100 \times \left| \frac{\varepsilon'_{\text{measured}} - \varepsilon'_{\text{ref}}}{\varepsilon'_{\text{ref}}} \right|$$

$$\sigma_{\text{tolerance}} [\%] = 100 \times \left| \frac{\sigma_{\text{measured}} - \sigma_{\text{ref}}}{\sigma_{\text{ref}}} \right|$$

d) 如果预计的介电常数和电导率的标准偏差（见7.1.2）可知，那么就要用对c)中 n 个介电常数和电导率的容限而言的，与频率相关的最大值来计算平均标准偏差（ s/\sqrt{n} ），例如参考文献[61]；或者是使用表J.3第a行的当前测量序列的标准方差。

e) 在指定频率范围内，评估表E.3的其他成分（或者其他必要的相关成分）的B类不确定度。

f) 表3中填入 ε' 和 σ 的合成标准不确定度。在实验报告中插入完整的表J.3，并且给出采用或者忽略每一影响量的基本原理。

g) 测量第二种参考材料来验证相对校准的有效性，确定测量值与步骤c)的参考值（见J.6）一致。如果怀疑设备有漂移，返回步骤b)重新测量参考液体。

表J.3 介电常数 ε' 和电导率 σ 测量的不确定度示例

	a		b	c	$u_i = (a/b) \times (c)$	
不确定度分量	容限/不确定度值(±%)	概率分布	除数	c_i	标准不确定度(±%)	v_i 或 v_{eff}
可重复性（重复 n 次，中间频段）		N	1	1		$n-1$
参考液体 ε' 或 σ		R	$\sqrt{3}$	1		∞
网络分析仪的漂移、线性等.		R	$\sqrt{3}$	1		∞
测量端口的线缆变化		U	$\sqrt{2}$	1		∞
合成不确定度						

注：列标a, b, c仅作参考。对于每个 ε' 和 σ 通常都需要单独的表

参 考 文 献

- [1] GORDON,C.C.,CHURCHILL,T.,CLAUSER,C.E.,BRADTMILLER,B.,McCONVILLE,J.T.,TEBBETTS I.and WALKER,R.A.,1988 Anthropometric Survey of U.S. Army Personnel: Methods and Summary Statistics. Technical Report NATICK/TR-89/044,U.S.Army Natick Research,Development and Engineering Center,Massachusetts: Natick,Sep. 1989
- [2] DIECK,R.H.,Measurement Uncertainty: Methods and Applications. North Carolina,Research Triangle Park: Instrument Society of America,1992
- [3] UKAS M3003,The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement. Feltham,Middlesex,England: United Kingdom Accreditation Service,1997
- [4] NIST TN1297,Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results. Gaithersburg,MD: National Institute of Standards and Technology,1994
- [5] LEISTEN,O.,VARDAXAGLOU,Y.,SCHMID,T.,ROSENBERGER,B.,AGBORAW,E.,KUSTER,N.,and NICOLAIDIS,G.,Miniature dielectric-loaded personal telephone antennas with low user exposure. Electron. Lett.,Aug. 20,1998,vol. 34,no. 17,pp. 1628-1629
- [6] LEE,A.K.,and PACK,J.K.,Effect of head size for cellular telephone exposure on EM absorption. IEICE Trans. Commun.,Mar. 2002,vol. E85-B,no. 3,pp. 698-701
- [7] LEE,A.K.,CHOI,H.D.,LEE,H.S.,and PACK,J.K.,Human head size and SAR characteristics for handset exposure. ETRI J.,Apr. 2002,vol. 24,no. 2,pp. 176-179
- [8] DROSSOS,A.,SANTOMAA,V. and KUSTER,N.,The dependence of electromagnetic energy absorption upon human head tissue composition in the frequency range of 300-3000 MHz. IEEE Trans. Microwave Theory Tech.,Nov. 2000,vol. 48,no. 11,pp. 1988-1995
- [9] GABRIEL,S.,LAU,R.W. and GABRIEL,C.,The dielectric properties of biological tissues: 3. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues. Phys. Med. Bio.,1996,vol. 41,no. 11,pp. 2271-2293
- [10] NAHMAN,N.S.,KANDA,M.,LARSEN,E.B. and CRAWFORD,M.L.,Methodology for standard electromagnetic field measurements. IEEE Trans. Instrumen. Meas.,Dec.1985,vol. IM-34,no. 4,pp. 490-503
- [11] KUSTER,N.,BALZANO,Q. and LIN,J.C.,Eds.,Mobile Communications Safety.London: Chapman & Hall,1997
- [12] MEIER,K.,BURKHARDT,M.,SCHMID,T. and KUSTER,N.,Broadband calibration of Efield probes in lossy media. IEEE Trans. Microwave Theory Tech.,Oct. 1996,vol. 44,no. 10,pp. 1954-1962
- [13] JOKELA,K.,HYYSALO,P. and PURANEN,L.,Calibration of specific absorption rate (SAR) probes in waveguide at 900 MHz. IEEE Trans. Instrumen. Meas.,Apr. 1998,vol.47,no. 2,pp. 432-438
- [14] POKOVIC,K.,SCHMID,T. and KUSTER,N.,Robust setup for precise calibration of Efield probes in tissue simulating liquids at mobile communication frequencies. In Proceedings ICECOM'97. Dubrovnik,Croatia,Oct. 12-17,1997,pp. 120-124
- [15] POKOVIC,K.,Advanced Electromagnetic Probes for Near Field Evaluation. Doc. Tech.Sci. Diss. ETH

Nr. 13334. Switzerland,Zurich: Swiss Federal Institute of Technology,1999

- [16] PERSON C.,AHLONSOUL.N. and GRANGEAT,C.,New test bench for the characterization of SAR measurement probes used in tissue equivalent liquids,Bioelectromagnetics Society 22nd Annual Meeting,Munich Germany,June 11-16,2000
- [17] PERSON,C.,TANNE,G.,AHLONSOUL.N.,NGOUNOU,C. and GRANGEAT C.,New reference antennas for SAR probe calibration in tissue equivalent liquid. Millennium Conference on Antennas and Propagation,AP2000,Davos,Switzerland: April 9-14,2000
- [18] FARAONE,A.,McCOY,D. O.,CHOU,C. K.,and BALZANO,Q.,Characterization of miniaturized E-field probes for SAR measurements. IEEE Intl. Symp. Electromag.Compat.,Washington,DC,2000,pp. 749-754
- [19] POKOVIC,K.,SCHMID,T.,CHRIST,A. and KUSTER,N.,Design and characterization of E-field probes for lossy media. submitted to IEEE Trans. Microwave Theory Tech.,1999
- [20] FIEGUTH,P.W.,KARL,W.C.,WILLSKY,A.S. and WUNSCH,C.,Multi-resolution optimal interpolation and statistical analysis of TOPEX/POSEIDON satellite altimetry
- [21] LANCASTER,P. and SALKAUSKA,K.,Curve and Surface Fitting: An Introduction. New York: Academic Press,1986
- [22] FERREIRA P.J.S.G.,Non iterative and fast iterative methods for interpolation and extrapolation. IEEE Trans. Sig. Proc.,Nov 1994,vol. 41,pp. 3278-3282
- [23] FORD,C and ETTER,D.M.,Wavelet basis reconstruction of non uniform sampled data.IEEE Trans. Circuits Sys. II: Analog Dig. Sig. Proc.,Aug. 1998,vol. 45,no. 8,pp. 1165-1168
- [24] USTUNER,K.F. and FERRAIL,A.,Discrete splines and spline filters. IEEE Trans.Circuits Sys.,July 1991,vol. 39,no. 7,pp 417-422
- [25] PRESS,W.H.,FLANNERY,B.P.,TEUKOLSKY,S.A. and VETTERLING,W.T.,Numerical Recipes in FORTRAN 77: The Art of Scientific Computing. New York: Cambridge University Press,1992
- [26] CHRIST,A.,CHAVANNES,N.,POKOVIC,K,GERBER,H.U.and Kuster,N.,Numerical and Experimental Comparison of Human Head Models for SAR Assessment. Proceedings of Millennium Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields,Heraklion,Kreta,Greece,Oct. 2000,pp. 234-240
- [27] EA-2/07 (rev.01) EAL Strategy to Achieve Comparability of Results in Calibration and Testing,Mar. 1997
- [28] ISO/IEC Guide 43-1:1997,Proficiency testing by interlaboratory comparisons—Part 1:Development and operation of proficiency testing schemes. Geneva: International Organization for Standardization
- [29] CHOU,C.K.,CHEN,G.W.,GUY,A.W.,and LUK,K.H.,Formulas for preparing phantom muscle tissue at various radiofrequencies. Bioelectromag.,1984,vol.5,pp. 435-441
- [30] RAMO,S.,WHINNERY,J.R. and VAN DUZER,T.,Fields and Waves in Communication Electronics. New York,Wiley,1993
- [31] VON HIPPEL,A. Dielectric Materials and Applications. Cambridge: MA: MIT Press,1954
- [32] BLACKHAM,D.V. and POLLARD,R.D.,An improved technique for permittivity measurements using a coaxial probe. IEEE Trans. Instrumen. Meas.,Oct. 1997,vol. 46,no. 5,pp. 1093-1099

- [33] CLARKE,R.N.,GREGORY,A.P.,HODGETTS,T.E.,and SYMM,G.T.,Improvements in coaxial sensor dielectric measurement: relevance to aqueous dielectrics and biological tissue. in *Microwave Aquametry: Electromagnetic Wave Interaction With Watercontaining Materials*,A. Kraszewski,ed.,New York: IEEE Press,1996,pp. 279-297
- [34] POURNAROPOULOS,C.L. and MISRA,D.K.,The co-axial aperture electromagnetic sensor and its application in material characterization. *Meas. Sci. Tech.*,1997,vol. 8,pp. 1191-1202
- [35] ARAI,M.J.,BINNER,G.P.,and CROSS,T.E.,Estimating errors due to sample surface roughness in microwave complex permittivity measurements obtained using a coaxial probe. *Electron. Lett.*,Jan. 19,1995,vol. 32,no. 2,pp. 115-117
- [36] BAO,J.Z.,SWICORD,M.L.,and DAVIS,C.C.,Microwave dielectric characterization of binary mixtures of water,ethanol,and ethanol. *J. Chem. Phys.*,Mar. 12,1996,vol. 104,no. 12,pp. 4441-4450.
- [37] GABRIEL,C.,CHAN,T.Y.A.,and GRANT,E.H.,Admittance models for open ended coaxial probes and their place in dielectric spectroscopy. *Phys. Med. Biol.*,1994. vol.39,no.12,pp. 2183-2200
- [38] MISRA,D.,A quasi-static analysis of open-ended coaxial lines. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*,Oct. 1987,vol. 35,no. 10,pp. 925-928
- [39] MISRA,D.,CHABBRA,M.,EPSTEIN,B.R.,MIROTZNIK,M.,and FOSTER,K.R.,Noninvasive electrical characterization of materials at microwave frequencies using an open-ended coaxial line: test of an improved calibration technique. *IEEE Trans.Microwave Theory Tech.*,Jan. 1990,vol. 38,no. 1,pp. 8-14
- [40] MISRA,D.,On the measurement of the complex permittivity of materials by an openended coaxial probe. *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*,May 1995,vol. 5,no. 5,pp.161-163
- [41] MOSIG,J.R,BESSON,J.C.E,GEX-FABRY,M. and GARDIOL,F.E.,Reflection of an open-ended coaxial line and application to non-destructive measurement of materials.*IEEE Trans. Instrumen. Meas.*,1981,IM-30,pp 46-51
- [42] NEVELS,R.D.,BUTLER,C.M. and YABLON,W.,The annular slot antenna in a lossy biological medium. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*,1985,MTT-30,pp 314-319
- [43] TOROPAINEN,A.,VAINIKAINEN,P.,and DROSSOS,A.,Method for accurate measurement of complex permittivity of tissue equivalent liquids. *Electron. Lett.*,2000,vol. 36,no. 1,pp. 32-34
- [44] HILL,N.E.,VAUGHAN,W.E.,PRICE,A.H.,and DAVIES,M.,*Dielectric Properties and Molecular Behaviour*. London: Van Nostrand Reinhold,1969
- [45] GREGORY,A.P. and CLARKE,R.N.,*Tables of the Complex Permittivity of Dielectric Reference Liquids at Frequencies up to 5 GHz*. NPL Report CETM 33,Centre for Electromagnetic and Time Metrology. Teddington,England: National Physical Laboratory,2001
- [46] KAATZE,U.,Complex permittivity of water as function of frequency and temperature. *J.Chem. Engin. Data*,1989,vol. 34,no. 4,pp. 371-374
- [47] LEVIN,V.V. and PODLOVCHENKO,T.L.,Dispersion of the dielectric permittivity of ethylene glycol. *Zhurnal Strukturnoi Khimii*,1970,vol. 11,pp. 766-767
- [48] TAYLOR,J.R.,*An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties In Physical Measurements*.

2nd ed. Sausalito,CA: University Science Books,1997

- [49] EVANS,S. and MICHELSON,S.C.,Intercomparison of dielectric reference materials available for the calibration of an open-ended probe at different temperatures. *Meas.Sci. Tech.*,Dec. 1995,vol. 6,no. 12,pp. 1721-1732
- [50] JENKINS,S.,HODGETTS,T.E.,CLARKE,R.N.,and PREECE,A.W.,Dielectric measurements on reference liquids using automatic network analysers and calculable geometries. *Meas. Sci. Tech.*,July 1990,vol. 1,no. 7,pp. 691-702
- [51] MIGLIORE,M.D.,Partial self-calibration method for permittivity measurement using truncated coaxial cable. *Electron. Lett.*,July 20,2000,vol. 36,no. 15,pp. 1275-1277
- [52] NYSHADHAM,A.,SIBBALD,C.L.,and STUCHLY,S.S.,Permittivity measurements using open-ended sensors and reference liquid calibration – an uncertainty analysis.*IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*,Feb. 1992,vol. 40,no. 2,pp. 305-314
- [53] FUKUNAGA,K.,WATANABE,S.,WAKE,K.,and YAMANAKA,Y.,Time dependence of tissue-equivalent dielectric liquid materials and its effect on SAR. *EMC Europe Symp.*,Sorrento,Italy,Sep. 2002
- [54] IEC 60050. International Electrotechnical Vocabulary
- [55] IEEE Std 1528. Recommended Practice for Determining the Peak Spatial-Average Specific Absorption Rate (SAR) in the Human Head from Wireless Communications Devices: Measurement Techniques,New York: Institute Electrical and Electronics Engineers,Dec. 2003
- [56] ISO/IEC DIR-2 (2001-7),IEC Directives – Part 2: Rules for the structure and drafting of International Standards. Geneva: International Electrotechnical Commission
- [57] ISO/IEC Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Geneva: International Organization for Standardization
- [58] KAATZE,U.,POTTEL R.,and SCHAFFER M.,Dielectric spectrum of dimethyl sulfoxide/water mixtures as a function of composition. *J. Phys. Chem.*,1989,vol. 93,pp. 5623-5627
- [59] KANDA,M.Y.,BALLEN,M.,CHOU,C.K.,Formulation and characterization of tissue simulating liquids used for SAR measurement (500-2000 MHz). *Asia-Pacific Radio Science Conference*,Tokyo,Japan,Aug. 1-4,2001,pp. 274
- [60] KUSTER N.,KÄSTLE,R.,and SCHMID,T.,Dosimetric evaluation of mobile communications equipment with known precision (invited paper). *IEICE Trans. Commun.*,May 1997,vol. E80-B,no. 5,pp. 645-652
- [61] PEYMAN,A. and GABRIEL,C.,Tissue equivalent liquids for SAR measurement at microwave frequencies. *Bioelectromagnetics Society 24th Annual Meeting*,Quebec,Canada,June 2002,poster P-53.
- [62] SCHMID,T.,EGGER O. and KUSTER,N.,Automated E-field scanning system for dosimetric assessments. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*,Jan. 1996,vol. 44,no.1,pp. 105-113
- [63] SCHÖNBORN,F.,BURKHARDT,M. and KUSTER,N.,The difference of EM energy absorption between adults and children. *Health Phys.*,Feb. 1998,vol. 74,no. 2,pp
- [64] UKAS LAB34,The Expression of Uncertainty in EMC Testing. Feltham,Middlesex,England: United Kingdom Accreditation Service,2002

YD/T 1644.1-2007

[65] VIGNERAS,V.,Elaboration and characterization of biological tissues equivalent liquids in the frequency range 0.9-3 GHz,final report. France: PIOM Laboratory,University of Bordeaux,Nov. 2001
