

国 际 电 信 联 盟

ITU-R

国际电联无线电通信部门

ITU-R SM.2452-0 报告
(06/2019)

人体暴露于电磁场的测量

SM 系列
频谱管理



国际电信联盟

前言

无线电通信部门的职责是确保卫星业务等所有无线电通信业务合理、平等、有效、经济地使用无线电频谱，不受频率范围限制地开展研究并在此基础上通过建议书。

无线电通信部门的规则和政策职能由世界和区域无线电通信大会以及无线电通信全会在研究组的支持下履行。

知识产权政策（IPR）

ITU-R的IPR政策述于ITU-R第1号决议的附件1中所参引的《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策》。专利持有人用于提交专利声明和许可声明的表格可从<http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>获得，在此处也可获取《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策实施指南》和ITU-R专利信息数据库。

ITU-R 系列报告

（也可在线查询<http://www.itu.int/publ/R-REP/en>）

系列	标题
BO	卫星传送
BR	用于制作、存档和播出的录制；电视电影
BS	广播业务（声音）
BT	广播业务（电视）
F	固定业务
M	移动、无线电定位、业余和相关卫星业务
P	无线电波传播
RA	射电天文
RS	遥感系统
S	卫星固定业务
SA	空间应用和气象
SF	卫星固定业务和固定业务系统间的频率共用和协调
SM	频谱管理

注：该ITU-R报告的英文版本根据ITU-R第1号决议详述的程序予以批准。

电子出版
2020年，日内瓦

© 国际电联 2020

版权所有。未经国际电联书面许可，不得以任何手段复制本出版物的任何部分。

ITU-R SM.2452-0 报告
人体暴露于电磁场的测量

(2019年)

目录

页码

1	引言	2
2	监管框架	2
2.1	ICNIRP关于发射机周边辐射限值的导则（1998年版）：参考电平	2
2.2	发射机附近计算场强的展示图	4
3	人体暴露于电磁场的测量的实用导则	6
3.1	成功的电磁场评估测量流程基本知识	6
3.2	用于电磁场评估的带有特定功能的测量仪器	8
3.3	减少空间中测试点的数量	11
3.4	减少观察时间和对于最大暴露的外推	12
3.5	如何评估特定业务造成的暴露	13
4	参考文献	15
5	词汇表和缩略语	16

1 引言

各类无线装置在世界范围内的扩散需要被细致测量。ITU-R第239/1号课题标题为“人体暴露于电磁场的测量”。国际电联全权代表大会第176号决议（2018年，迪拜，修订版）标题为“关于与人体暴露于电磁场有关的测量和评估问题”。国际电联《频谱监测手册》（2011年版本）第5.6节详细介绍了非电离辐射测量。在国家层面实施了电磁场（EMF）暴露限值。公众与进入无线设施附近地区的工人的暴露限值不同。国际非电离辐射防护委员会（ICNIRP）和电气电子工程师学会（IEEE）是设定安全暴露电平的专家小组；鼓励主管部门遵守这些专家小组设定的指导方针或各自专家设定的限值。考虑到功率密度和场强是不同来源的聚合，须对EMF限值的遵守情况进行评估。靠近无线设施的暴露电平可能出现在近场。还须对人们（工人或公众，视乎情况而定）可能进入的区域的暴露电平进行测量。无线装置在测量时可能不会使用最大理论功率进行发射，因此在确定合规时应按比例调整，以反映最大功率。可能有必要分别测量E和H场，特别是在与远场表现不同的近场地域。测量结果以使用的目标和潜在的用户为基准，利用各种形式加以展示。靠近头部和身体的便携式用户装置是否合规不在本报告的讨论范围之内。

虽然已经规定了ICNIRP限值以保护公众，但是对于EMF效应的担忧促使一些国家进行测量，以监测和控制发射的功率密度和场强。有必要分享可指导主管部门对于ICNIRP规定的限值的合规情况检查的EMF监测的良好实践。

2 监管框架

2.1 ICNIRP关于发射机周边辐射限值的导则（1998年版¹）：参考电平

引用ICNIRP 1998年版导则第495页“如果测量得到的或计算得到的值超过参考电平，并不意味着将超过基本限值。可是，当超过参考电平时，需要测试是否符合相关的基本限值，并确定是否需要额外的防护措施。”

ICNIRP 1998年版导则和IEEE C95.1-2005²参考电平得到多个国家的认可，并将国家的阈值与这些参考电平进行比较。

ICNIRP 1998年版导则表6和7确定了暴露阈值。以下图表规定了不同频率的参考ICNIRP电平；图中的暴露值为公众和职业暴露。导则规定了一个平均时间为6分钟的时间段。在10 MHz（波长30米）以下的暴露主要由于近场条件产生；使用的参考电平主要用于电子场强（V/m）。在10 MHz和300 GHz之间亦基于功率密度（W/m²）提供了基本限制。公众暴露的功率密度限值比职业暴露度限值低5倍。

¹ ICNIRP和IEEE正在修改它们的EMF限值。可应用其他暴露限值，取决于各国家监管机构规定的政策和流程。

² IEEE C95.1-2005表9中的暴露值与ICNIRP 1998年版导则的水平（ $f_{\text{MHz}}/200 \text{ W/m}^2$ ）类似；在10-400 MHz，IEEE电场（E）和FCC为27.5（V/m），与此相比，ICNIRP 1998年版导则的规定是28（V/m）。IEEE为100 GHz以上提供了附加方程式： $\{(90 \times f_{\text{GHz}} - 7,000)\} / 200 \text{ W/m}^2$ 。

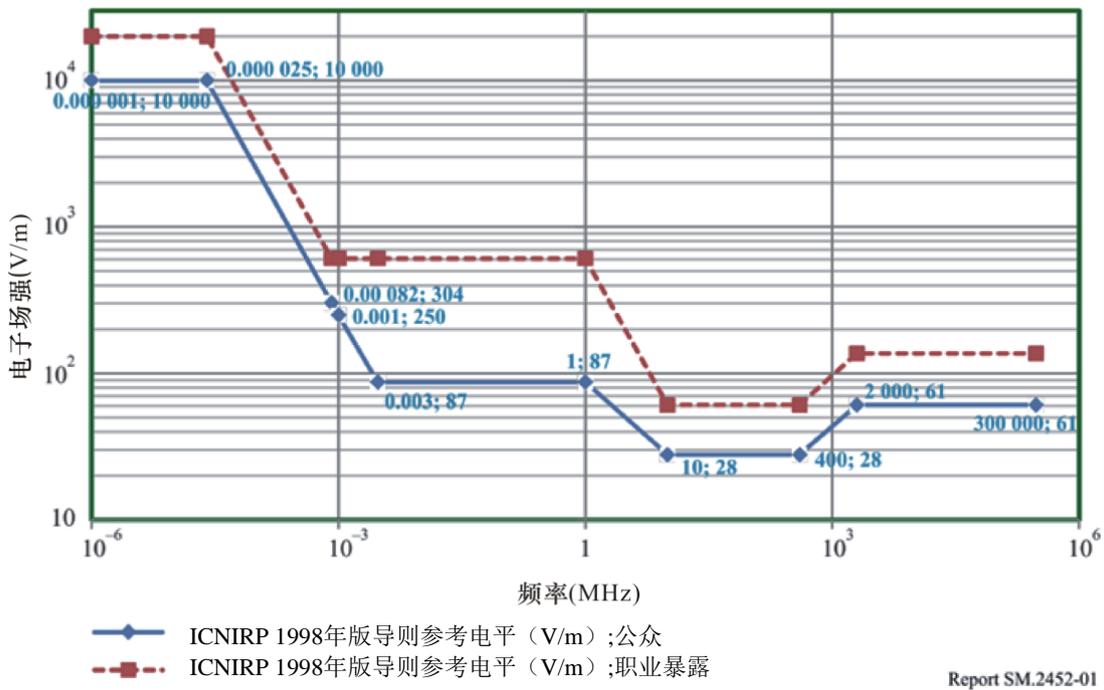
表1

ICNIRP 1998年版导则职业和公众暴露参考电平

频率范围	电子场强 (V/m) <i>f</i> : 频率		等效平面波功率密度 <i>S</i> _{eq} (W/m ²)	
	公众	职业	公众	职业
1-25 Hz	10 000	20 000	没有关于功率密度的数据	
0.025-0.82 kHz	250/ <i>f</i> (kHz)	500/ <i>f</i> (kHz)		
0.82-3 kHz	250/ <i>f</i> (kHz)	610		
3-1 000 kHz	87	610		
1-10 MHz	87/ <i>f</i> ^{1/2} (MHz)	610/ <i>f</i> (MHz)		
10-400 MHz	28	61	2	10
400-2 000 MHz	1.375/ <i>f</i> ^{1/2} (MHz)	3/ <i>f</i> ^{1/2} (MHz)	<i>f</i> /200	<i>f</i> /40
2-300 GHz	61	137	10	50

图1³

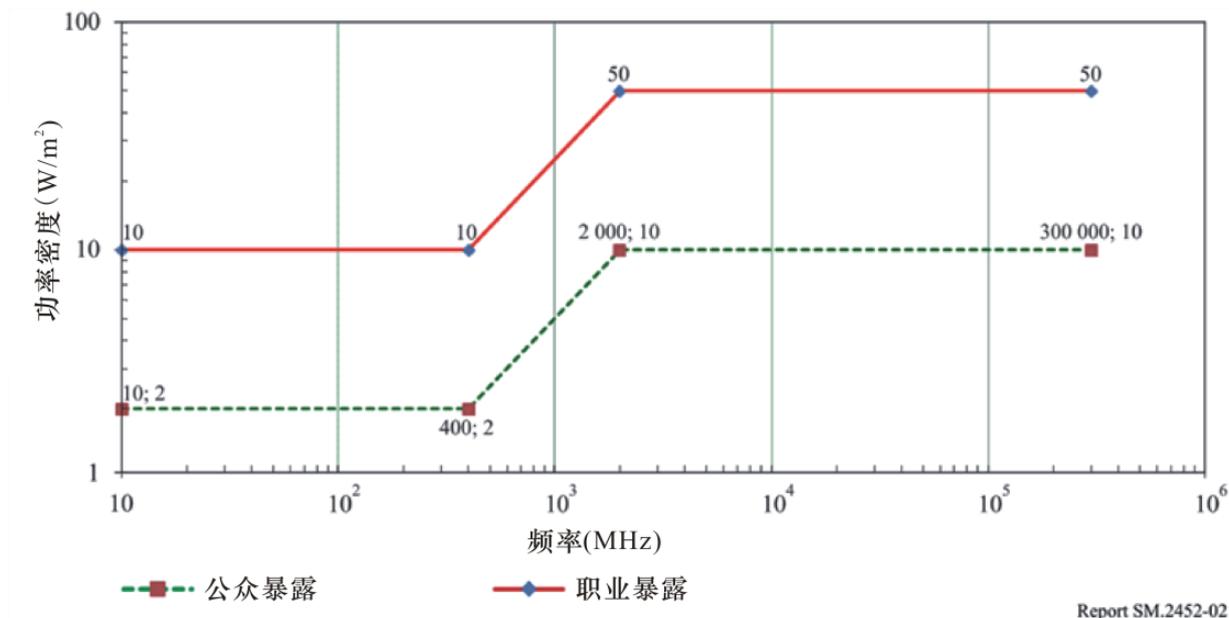
ICNIRP 1998年版导则职业和公众电子场强暴露



³ 见《无线电频谱管理：政策、规则和技术》第9章，Mazar, H. (http://mazar.atwebpages.com/Downloads/Chapter9RF-EMF_HumanHazards_Mazar2019.pdf).

图2

ICNIRP 1998年版导则功率密度参考电平（仅用于10 MHz以上）



Report SM.2452-02

2.2 发射机附近计算场强的展示图

2.2.1 定义、自由空间计算和一些假设

p_t : 发射机功率 (W)

g_t : 发射机天线增益 (数值)

e.i.r.p.⁴: 等效全向辐射功率 (W)

d : 与发射机的距离 (米)

e : 电场强 (FS) 伏特/米 (V/M)。

对于自由空间传播损耗：
$$e = \frac{\sqrt{30 eirp}}{d} \quad \text{和} \quad d = \frac{\sqrt{30 eirp}}{e}$$

举例说明：在自由空间传播情况下，忽略建筑物和其他障碍物，e.i.r.p. 60 kW的安全距离，安全轮廓线30 V/m为45 m（482 MHz的公众暴露参考电平），66 V/m为20 m（职业暴露参考电平）。考虑到地形图和建筑物、非自由空间传播损失，计算的安全距离更低。

在以下模拟中，传播模型将建筑物造成的衰减考虑在内。

⁴ 国际电联《无线电规则》第1卷第1.161款规定“供给天线的功率与给定方向上相对于全向天线的增益的乘积，e.i.r.p.不一定是最大功率和最大增益的乘积，而是向调查点辐射的功率。蜂窝发射机是功率控制的，并不是全部时间都使用最大电平发射。在蜂窝天线附近，在其之下，e.i.r.p.很低，因为相对于天线主波束，高程旁瓣的衰减要大得多。

除了点到点链接以外，接收机地平面以上（AGL）的高度被假定为1.5 m。该数字描述了场强值（V/m）；例如，在482 MHz：5、15、30（ICNIR公众参考电平）、45和66（职业参考电平）V/m。

进行的计算如下：

- 3D：接收天线的高度从1 m到屋顶，在建筑物立面上进行三维覆盖。每座建筑物接收的最高功率被用于为整座建筑物提供场强颜色。
- 2D：二维与三维类似，但以二维顶层视图形式显示。

2.2.2 数字电视（DTV）发射机附近的计算场强

以下分析指的是超高频（UHF）信道22（1区）：

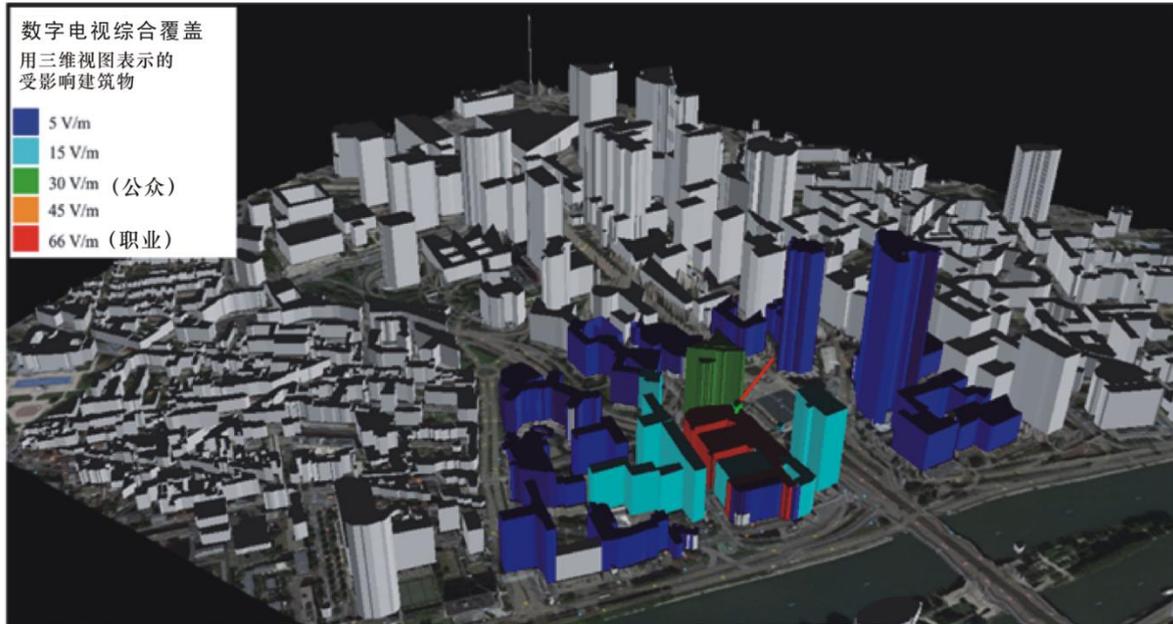
- 478-486 MHz（中心射频482 MHz），
- 60 000 We.i.r.p.发射机，
- 地平面以上60 m。

在482 MHz，电子场强（FS）ICNIRP公众暴露参考电平（见表1）等于30 V/m： $1.375f^{1/2}$ (MHz) = $1.375 \times 482^{1/2}$ 。FS（V/m）ICNIRP职业暴露参考电平为66 V/m： $3f^{1/2}$ (MHz) = $3 \times 482^{1/2}$ 。

下图用三维视图描绘了的受影响建筑物。

图3

三维DTV公众和职业暴露轮廓线



Report SM.2452-03

2.2.3 陆地移动发射机附近的计算场强

下图仅指下行链路信号：从基站到移动设备。一般说来，蜂窝结构在方位角或扇区（例如三个120°扇区）可能是非定向的。

2.2.3.1 蜂窝发射机附近的场强

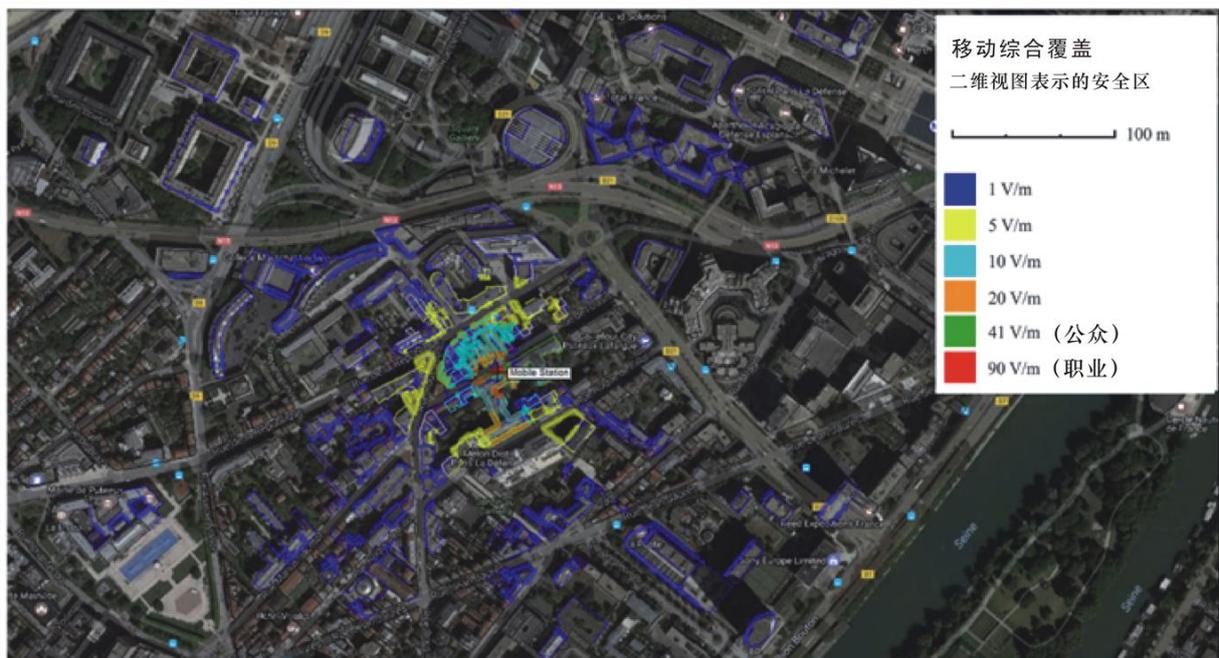
在900 MHz，屋顶上方30米，对于100 W最大下行链路功率和天线增益（包括损耗）17 dBi，e.i.r.p.为5 kW，接收机为地平面以上1.5 m。

ICNIRP公众参考电平是41 ($1.375f^{1/2} = 1.375 \times 30$) V/m，职业参考电平是90 V/M: $3f^{1/2}$ (MHz)；场强标度为1、5、10、20、41（公众）和90（职业）V/m。

图4描绘了受影响的建筑物。

图4

蜂窝暴露距离的二维卫星视图



Report SM.2452-04

3 人体暴露于电磁场的测量的实用导则

3.1 成功的电磁场评估测量流程基本知识

当前的导则提供了电刺激和热熔性效应的限值。在100 kHz以下频率，主要效应由感应定律和拉皮克（Lapicque）的电刺激定律描述。在10 MHz以上频率，主要效应为热效应。在100 kHz和10 MHz频率范围内，两种效应都可发生。注意，两种效应必须分别评估，因为它们并不会聚合，并且评估方法也完全不同。

电刺激效应的适用评估方法被称为加权峰值法，在ICNIRP 2010年版导则中对此进行了描述。不过只有高度专业化的电磁场测量系统才执行这一评估。常见的频谱分析仪不适合用于电刺激效应的评估。注意：只有在关于电刺激效应方面，1998年版的ICNIRP导则才由2010年版的ICNIRP导则取代。

ICNIRP 1998年版导则的方程(9)和(10)描述了外部电磁场的热效应造成的暴露的评估方法。这些方程指的是加权外部电磁场强的RMS（均方根）的平方值。得出的结果是归一化的暴露值。允许最大暴露值达到1。加权滤波器的频率响应是参考电平的倒数，随频率而

变化。对于10 GHz以下频率，均方根检测器的集总时间可高达6分钟。对于更高频率，最大可允许集总时间随着频率升高而降低。注意，可使用更短的集总时间，但可能导致对实际暴露度的过高估计。如果评估的场的电平波动与实际集总时间相比很快，则不会发生过高估计。

注意，高于10 MHz的话，电场和磁场的参考电平之间的比例恒定，并与自由空间场阻抗的值相同。两个参考电平都对功率密度的参考电平。然而，在10 MHz以下，功率密度的参考电平不存在，电场与磁场参考电平之间的比例小于公众参考电平的自由空间场阻抗。

在IEC 62232中定义了发射天线附近的三个源区：I、II和III。源区I被定为感应近场和无功功率分量仍不可忽略的辐射近场部分。源区II是无功功率分量已被忽略的辐射近场。源区III是远场区。对于区域I和II之间的边界距离 d_1 ，IEC 62232的表A.2描述了三个保守限值： λ 、 D 和 $D^2/4\lambda$ 。其中， λ 是发射场的波长， D 是发射天线的最大尺寸。三个值中最高的是 d_1 的相关值，这是可忽略感应功率分量的最短距离的保守估计。换句话说，对于高于 d_1 的距离，在空间中相同点测量的电场强度大小对磁场强度大小的比率可假设为自由空间场阻抗。

在源区II或III，只有电场分量需要被评估，因为由磁场分量造成的暴露在10 MHz以上的频率范围内是相同的。只有当使用公众参考电平和在10 MHz以下的频率范围中，磁场造成的暴露才不同，即更低。然而，在源区I，两个场的分量都需要被评估。两个暴露值中较高的一个是相关的。在1 GHz以上，在实际操作中，只有电场分量被评估，因为在这一频率范围，磁场分量的探头或天线几乎不可用，并且也不必要，因为在大部分情况下，源区II或III可被假定。

注意，ICNIRP 1998年版导则的表6和7中的参考电平描述了从DC到300 GHz的完整频率范围。只有低至1 MHz，这些参考电平才与热效应相关。ICNIRP导则中的方程式(9)和(10)明确表明，在100 kHz和1 MHz之间，参考电平必须被参数 c 或 d 替代。在1 MHz以下使用ICNIRP导则表6和7的参考电平来评估由热效应造成的暴露会导致对实际暴露的过高估计。在最先进的电磁场测量系统中，ICNIRP导则中的参考电平曲线提供了“仅非电刺激效应”版本，可被用于评估合规性，也不会过高估计。

ICNIRP导则假设了外场到被暴露个体的最大耦合。这意味着空间中一个特定点的暴露评估必须与极化和外场传播方向无关。在实际操作中，这通过测量三个并置正向传感器或天线元件的均方根值，并从这三个均方根值中计算各向同性的RSS（平方和的根）值。各向同性探头最高可用于90 GHz频率。各向同性天线可用于最高6 GHz的频率。

ICNIRP导则假设在与参考电平比较之前，无扰动外部场强被暴露个体的全身平均，但有个重要限制条件，即不得超过对本地化暴露的基本限值。这就意味着原则上允许人体体积的平均值，但可能导致在一些情况下的低估。因此，在实际操作中，经常使用以下保守做法：

测量无人在场的整个相关区域的本地暴露值，在每个测量点周围只使用中等或不使用空间平均。使用最大暴露度作为相关区域的相关暴露度。这是一个很好的做法，以排除距离导电物体不到0.5 m的任何测量点。这样做意味着由于测量天线和物体之间的耦合效应以及物体的再辐射而导致过高估计可被避免。

总结来说，对于相关区域中外部电磁场的非电刺激效应造成的暴露的理想评估方法已经可以明确地表述为：

- 测量相关/区域人体可能受到暴露的任何位置电场和/或者磁场场强的平方、同位素和加权均方根的值。
- 在每个位置只使用中等或不使用空间平均。
- 确保要被暴露的人体在测量期间不在场。
- 排除距离导电物体不到0.5 m的任何测量位置。
- 使用均方根集总时间，不得长于允许的最长集总时间。
- 在一个时间段内测量，时间要足够长，确保最大暴露在这一时间段内产生。
- 使用所有位置的最大暴露值和完整观测时间作为最终暴露结果。如果这个结果小于1，相关区域的暴露是可被允许的。

当然，这一“理想”评估方法无法被用于实际操作中，因为空间和时间内有太多点需要被评估，但是这也明确显示真正评估方法的目标。

还存在另一个效应，ICNIRP规定了具有限值的微波听觉效应，可在频率高于100 kHz时产生。这一效应只有当电磁信号出现极高峰值系数时才显现。在这种情况下，射频信号的包络可以被人听见。这是为什么ICNIRP 1998年版导则为该频率范围的峰值提供了附加参考电平。在实际操作中，这一效应只与雷达系统生成的信号相关。

下一节将专注于对非电刺激效应的合规性进行评估，只是因为对其他ICNIRP限值的评估与热效应的评估非常不同，而且与大多数无线发射机无关。下一节将展示如何确信、准确且有效地对此类暴露进行评估。

3.2 用于电磁场评估的带有特定功能的测量仪器

3.2.1 个人监测器

个人电磁场监测器设计目的是让可能暴露于高电磁场的人员佩戴在身上。监测器在实际暴露超过某一阈值时会触发声音、视觉或震动警报。在测量电磁场暴露期间，执行测量的人员也很可能暴露在高电磁场环境中。因此，在测量期间携带个人监测器是一种好方法。图5描绘了在天线附近工作人员使用的个人监测设备。

图5

职业暴露个人监测器



Report SM.2452-05

3.2.2 宽带测试仪

具有“异型探头”的宽带测试仪直接测量电磁场暴露，因为它们显示电场强度的平方、同位素和加权RMS值。RMS的集总时间可设置为大约100 ms至约10分钟。异型探头可用于高达50 GHz的频率以及若干标准，包括ICNIRP 1998和IEEE C95.1-2005。

用于电磁场测量的宽带测试仪能够测量比1大得多的暴露值。这意味着其电子器件必须对该高场强电平免疫。这还意味着执行测量的人员必须能够从安全的距离读取测量结果。因此，用于电磁场测量的宽带测试仪通常配有光链路，可在作为控制器的第二个仪表或普通计算机设备上显示结果。

宽带测试仪的一些非常有用的特点是可显示随时间变化的暴露值的图像、支持空间平均和峰值保持功能。

如果由所有相关发射机造成的暴露都必须被评估，在大多数情况下，带有异型探头的宽带测试仪足以执行所有必要测量。如果是用二极管而不是热电偶作为探头的探测器，必须注意具有高峰值系数的信号可能导致明显的测量不确定性，如果测量的RMS值高于真正的探头RMS范围，即便由于若干发射机造成的暴露必须分别评估，宽带测试仪对于总暴露值的时空机构的快速概览极为有用。在已知本地热点和热点的瞬时结构之后，可更加有效地设置选择性测量程序。

宽带测试仪也可以使用带有平频响应的各向同性宽带探头：最高达1 GHz的磁场和最高达90 GHz的电场。

图6

带有各向同性探头的宽带测试仪



Report SM.2452-06

3.2.3 频率选择仪

如果若干发射机造成的暴露需要分别评估，就有必要进行频率选择测量。电磁场的选择仪表为常规的频谱分析仪或者没有普通频谱分析仪的补充特征的专用选择仪表。电磁场测量的有用特征为：

- 手持和电池供电；
- 对高场强电平免疫；
- 远程控制（电子或光学）；
- 各向同性天线的直接支持；
- 所有测量模式带有可配置集总时间和峰值保持功能的均方根检测器；
- 自动RSS值计算；
- 场强和暴露单元结果；
- 使用专用设置对每个业务进行测量；
- UMTS和LTE调解器；
- 信道功率选项；
- 仪表和天线的可跟踪校准；
- 频率范围从至少9 kHz到6 GHz，最好是在9 kHz到18 GHz或40 GHz，以覆盖新的无线通信频段。外部混波器的进一步拓展对无线系统，像60到66 GHz的短距离设备、无线千兆比特（WiGig）设备、自动雷达和扫描仪有用。

图7描述了使用各向同性天线的频率选择监测仪。

图7

用于电磁场的频率选择仪



3.3 减少空间中测试点的数量

由于电磁场造成的人体暴露在空间中不同点之间可能非常不同。即便是在自由空间的条件下，距离发射机天线的位置和方向图对于暴露水平会产生巨大影响。在真实情境中，障碍物和反射物体对空间中不同点的暴露水平会产生额外的巨大影响。在启动测量活动前了解所有潜在相关发射机和电磁环境的概况非常有帮助。

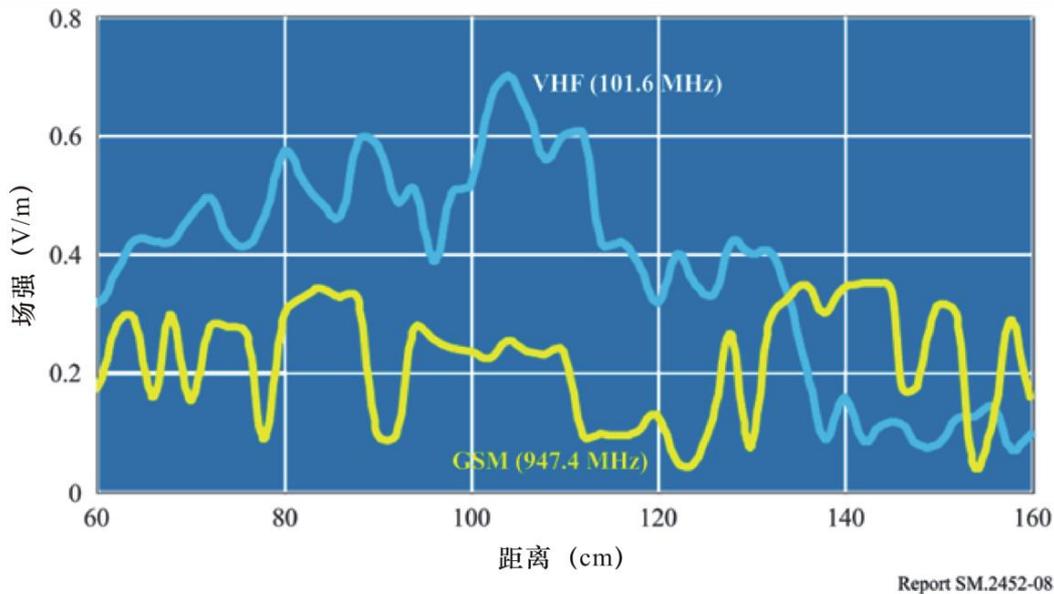
获取期望的概况的一个方法是对相关区域进行光学检测。至少应发现所有可见的发射机天线，并通过预估其发射功率和方位图来评估其潜在相关性。还应识别出最相关的障碍物和反射器。有了这些信息，就可以识别出更小区域 — 这些区域很可能包含最大暴露的位置。尤其是视线在发射机天线的方向图的主瓣范围内的区域，很可能是这类热点区域的候选。对于室内测量来说，很重要的是要注意到窗户可使电磁场极大衰减。因此，如果可以，在室内测量中须让窗户保持开启。

获取期望的概况的第二个方法是使用带有异型探头宽带测试仪进行快速的暴露概况测量。如果平频探头被用于此目的，必须注意空间场强最大值确实与空间暴露最大值强烈关联，但并非完全一致。如果只要测量单一发射机造成的暴露，并且如果这一发射机在总体暴露中并不明确占主导地位，那么频率选择仪对于快速概况测量是强制性的。只有高暴露值区域需要在第二步中进行更详细地评估。将宽带测试仪的探头以恒速在确认的热点地区直线移动，观察图表上记录的随时间变化暴露值显示需要哪种空间分辨率以便在第二步中找出该热点区域的本地最大值。

图8显示了在101.6 MHz上测量到的和在947.4 MHz测量到的GSM下行链路射频信号。

图8

房间内的场强分布



Report SM.2452-08

一旦确认了热点区域，就必须找到这些区域本地暴露最大值。注意，中等体积的空间平均是允许的，参考ICNIRP。完全避免空间平均可能导致对于实际暴露的显著高估。使用各向同性探头或天线找到本地最大值很容易。最快的方法是使用探头或天线在热点区域随意移动来扫描，在扫描期间使用峰值保持功能。可采用同样程序进行适度的空间平均，只要设定一个适合期望的集总体积和移动的实际速度的均方根集总时间。第二个方法被称为网格法：使用足够的空间分辨率定义热点区域内的网格点，测量网格中的每个点的暴露值。网格法也可以与适当的空间平均结合。对于由3-6个点构成的小网格，这是一个有用的替代方法，避免了进行测量的人员的影响。对于大网格，这一方法相当耗时。

对于超过6 GHz的频率，各向同性天线尚无法使用。因此，带有各向同性探头的宽带测试仪、带有双锥或方向性天线的频谱分析仪被用于这一频率范围。使用双锥或方向性天线相比各向同性探头或天线要花费更多时间找到本地暴露最大值。在实际操作中，搅拌法最经常与此类天线搭配使用：天线位置、方向和极化通过用手移动天线，在相关的体积内随机变更。本地最大值通过在搅拌过程中使用选择仪或频谱分析仪的峰值保持功能来探测。使用带有方向性天线的网格法非常耗时，因为对于网格中的每个点，天线的极化和方向都需要变更多次，以便确定为每个点捕获场与天线的最大耦合的暴露值。

3.4 减少观察时间和对于最大暴露的外推

一些发射机的辐射功率可能随时间推移发生巨大变化。尤其对于蜂窝移动业务的基站来说，发射功率高度取决于实际的流量负载和用户行为。即便是在24小时的观察时间内，也可能不会达到最大功率，因为流量负载也可能取决于星期几甚至季节。在实际操作中，将观测时间减少至合理的值是十分重要的。因此，通常的做法是测量由使用不取决于流量负载或用户行为的功率发射的一些信号分量造成的暴露。第二步，暴露被外推至使用最大发射机功率可能产生的暴露。但是，如果发射机功率随时间变化或多或少是恒定的，则无需外推。在这种情况下，即使很短的观察时间也足以评估最大暴露值。

3.5 如何评估特定业务造成的暴露

使用宽带测试仪和异型探头，很容易可以评估当前总暴露。然而，如果由不同发射机造成的暴露需要被分别评估，选择测量技术是必要的。以下各小节描述了如何使用选择测量技术来评估特定业务造成的暴露。外推法流程在适当的地方进行描述。

3.5.1 不需要外推法的业务的一般方法

或多或少使用恒定功率进行传输的系统不需要使用外推法。此类业务的例子是调频广播、数字广播和数字地面电视。可以非常容易地对此类发射机进行评估。频率选择仪可被用于此类评估。此外，如果发射的平均e.i.r.p.不恒定，可实施以下测量方式，但只会得到实际暴露，而非最大暴露。

第一步是选择一个合适的选择滤波器，以捕捉相关信道的接近100%的功率和尽可能少的相邻信道功率。

在频谱模式使用高斯选择滤波器会导致巨大的测量不确定性 — 如果测量窄信道间隔的系统的话。可通过使用信道功率选项或合适的信道滤波器接收机模式来避免附加不确定性。

下一步要处理适当的均方根检测器的集总时间。必须选择足够长度的集总时间，以便将被测功率的波动减少至可忽略值，但不得太长，从而加快测量进度。时间还必须短于相关暴露限值的最长可允许集总时间。最后，集总时间必须长得足够包含至少100份样本。

3.5.2 特定业务的方法

3.5.2.1 GSM基站

GSM蜂窝网络是传输功率高度取决于流量负载和用户行为的业务之一。和其他业务一样，实际暴露可使用前几节中描述的一般方法来评估。但是基站造成的最大可能暴露常常还必须由监管机构或运营商判断。

一个GSM帧的八个时隙中至少有一个时隙要在一个GSM小区的广播控制信道（BCCH）上以最大功率发射。其他时隙也可以传输同样或较低的功率。一些时隙可使用高斯最小频移键控（GMSK）调制和一些GSM演进（EDGE）的增强型数据速率调制。EDGE时隙的功率在时隙平均功率上下波动，因为这一调制类型会生成噪声类信号。BCCH测量的均方根集总时间必须短于时隙长度（577 μ s），以确保单个时隙的最大功率可以在没有衰减的情况下被捕捉到。集总时间不得过短，因为EDGE调制造成的功率波动必须被减少至可忽略的值。随时间变化的均方根最大值则对应BCCH的最大发射功率。一个单元也以不同的频率在通信信道（TCH）上传输。现在可以外推所有GSM小区信道造成的最大可能暴露，这是BCCH造成的最大可能暴露值乘以可以同时操作的小区频率信道的总数。在相关的位置可接收到的所有小区的暴露是所有小区各自暴露值相加得到的。

3.5.2.2 UMTS基站

UMTS蜂窝网络也是发射功率高度取决于流量负载和用户行为的业务之一。如果需要外推最大可能暴露度，以下是最新流程：

UMTS是码分多址（CDMA）系统。每个小区可传输多达512个数据信道。不同的相对较低数据速率信道通过不同信道化码在UMTS频率信道的较高带宽上进行传播。因为不同小区使用不同扰码，使用相同频率信道的不同小区的信号也可以被分开。每个小区都有一个用恒定功率传输的P-CPICH（主公共导频信道）。服务提供商可设置最大小区功率与P-CPICH功率之间的比率。通常这一功率比率范围在8至15之间。因此，测量一个特定小区的P-CPICH造成的暴露，将其乘以这一小区的功率比，可以得到这一小区的最大可能暴露。总小区的暴露为每个小区单独暴露值的总和。

3.5.2.3 LTE基站

LTE蜂窝网络也是发射功率高度取决于流量负载和用户行为的业务之一。如果需要外推最大可能暴露，以下是最新流程：

LTE是正交频分复用（OFDM）系统。可以使用频分双工（FDD）或时分双工（TDD）模式。在一个LTE帧的资源网格中嵌有一、二或四个小区特定参考信号。参考信号的数量与发射天线的数量相同。每个参考信号至在其相关天线上使用恒定功率传输。注意，与流量相关的符号的发射功率在使用中的所有天线上平均分配。

第一步，为每个天线和小区分别测量发射小区特定参考信号的单一资源要素造成的暴露的平均值。第二步，计算一个特定小区使用的所有天线的总数。第三步，将这一总数乘以造成该特定小区最大可能暴露的外推因子。所有小区的暴露为所有小区具体暴露值的相加总和。

根据IEC 62232，采用FDD模式的小区的外推因子是副载波除以“提升系数”得到的数。副载波数目仅取决于小区的带宽（1、4、3、5、10、15或20 MHz带宽的副载波为72、180、300、600、900或1 200个）。“提升系数”可取决于小区设置，如有疑问必须向服务提供商请求。从IEC 62232的意义上来说，正确的“提升系数”在许多其情况下与天线数目一致。

对于TDD模式下的一个小区来说，外推系数与FDD模式下的小区相同，但要乘以一个校正系数。校正系数为帧内下行链路所用时间与帧长之比。实际比率可通过选择仪的“范围”模式来大致测量，或者，如果知道上行链路一下行链路配置、特殊子帧配置和特定小区的循环前缀长度的话，可以精确地计算出实际比率。校正系数可能范围是34/140一直到106/120。如果有疑问，或者服务提供商不保证不会更改上行链路一下行链路配置，应使用最大校正系数。

3.5.2.4 Wi-Fi接入点

Wi-Fi网络是发射功率高度取决于流量负载和用户行为的应用。OFDM射频信号以脉冲发射，因此所有的信道载波在某些时候都是活跃的，取决于流量。结果，最难评估的场景是空闲模式。在此模式下，大约每几十毫秒都只传输0.5 ms的信标持续序列。采用以下测量流程，可外推出最大暴露度。

使用不到0.5 ms的均方根集成时间来持续测量Wi-Fi信号的信道功率。确定随时间变化的最大信道功率。这一最大信道功率应被转化为对应场强。该场强可用于与暴露限值进行比较。如果Wi-Fi系统的占空比被限制为低于100%的值，则必须根据占空比调整最大暴露度。

4 参考文献

国际电联《频谱监测手册》第5.6章

ITU-D第7/2号课题 - 与人体暴露于电磁场相关的战略和政策

ITU-T建议书

- K.52: 有关符合人体暴露于电磁场限值的指南。
- K.61: 电磁场测量和数值预测导则。
- K.70: 限制人体暴露于附近台站电磁场的缓解技术
- K.83: 电磁场场强监测
- K.90: 符合网络暴露限值的评估技术和工作程序
- K.91: 人体暴露于射频的评估、评定和监测导则
- K Suppl.1: ITU-T K.91 – 电磁场与健康导则
- K Suppl.4: ITU-T K.91 – 智慧可持续城市中电磁场考虑事项
- K.100: 测量射频电磁场以确定是否符合人体要求
- K.113: 射频电磁场电平图的生成
- K.122: 无线电通信天线附近的暴露水平
- K Suppl.9: 5G技术与人体暴露于射频电磁场 (RF-EMF)
- K Suppl.13: 移动设备的射频电磁场 (RF-EMF) 暴露水平
- K Suppl.14: 比ICNIRP或IEEE导则更严格的射频电磁场暴露限值的影响
- K Suppl.16: 5G无线网络的电磁场 (EMF) 合规性评估

国际非电离辐射委员会 (ICNIRP)

ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), ICNIRP Guidelines, Health Physics, vol.74, pp. 494-522, 1998

ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz), ICNIRP Guidelines, Health Physics, vol.99, pp. 818-836, 2010

IEEE

IEEE Std C95.1-2005: IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz

国际电工技术委员会 (IEC)

IEC 62232:2017: Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure

5 词汇表和缩略语

2D	二维
3D	三维
AGL	地平面以上
BCCH	广播控制信道
DTM	数字地面测绘
DTV	数字电视
e.i.r.p.	等效全向辐射功率
EMF	电磁场
FDD	频分双工
FS	场强
ICNIRP	国际非电离辐射防护委员会
IEC	国际电工委员会
IEEE	电子电气工程师学会
IMT	国际移动通信
LTE	长期演进
OFDM	正交频分复用
P-CPICH	主公共导频信道
RF	射频
RMS	均方根
RSS	平方和的根
TDD	时分双工
UMTS	通用移动通信系统
WiGig	无线千兆比特
WHO	世界卫生组织
