

辐射环境保护管理导则-电磁辐射监测仪器和方法

Guidline on Management of Radioactive Environmental Protection
Electromagnetic Radiation Monitoring Instruments and Methods

1 电磁辐射测量仪器

本导则所称电磁辐射限于非电离辐射。

电磁辐射的测量按测量场所分为作业环境、特定公众暴露环境、一般公众暴露环境测量。按测量参数分为电场强度、磁场强度和电磁场功率通量密度等的测量。对于不同的测量应选用不同类型的仪器，以期获取最佳的测量结果。测量仪器根据测量目的分为非选频式宽带辐射测量仪和选频式辐射测量仪。

1.1 非选频式宽带辐射测量仪

1.1.1 工作原理

偶极子和检波二极管组成探头

这类仪器由三个正交的 2~10cm 长的偶极子天线，端接肖特基检波二极管、RC 滤波器组成。检波后的直流电流经高阻传输线或光缆送入数据处理和显示电路。当 $D \gg h$ 时 (D 偶极子直径, h 偶极子长度) 偶极子互耦可忽略不计，由于偶极子相互正交，将不依赖场的极化方向。探头尺寸很小，对场的扰动也小，能分辨场的细微变化。偶极子等效电容 C_A 、电感 L_A 根据双锥天线理论求得：

$$C_A = \left(\frac{2\pi \epsilon_0 L}{\ln(L/a) + S/2L - 1} \right) \dots\dots\dots (1.1)$$

$$L_A = \mu \left(\ln \frac{L}{a} - \frac{S}{2L} \right) \dots\dots\dots (1.2)$$

式中：a --天线半径；
S --偶极子截面积；
L --偶极子实际长度。

由于偶极子天线阻抗呈容性，输出电压是频率的函数：

$$V = \dots\dots\dots (1.3)$$

式中： ω --角频率， $\omega = 2\pi \cdot f$ ，f 频率；
CL--天线缝隙电容和负载电容；
RL--负载电阻。

国家环境保护局 1996-05-10 批准 1996-05-10 实施

由于 C_A 、 C_L 基本不变，只要提高 R_L 就可使频响大为改善，使输出电压不受场源频率影响，因此必须采用高阻传输线。

当三副正交偶极子组成探头时，它可以分别接收 x、y、z 三个方向场分量，经理论分析得出：

$$U_{dc} = C \cdot |K_e|^2 \cdot [|E_x(r \cdot \quad) |^2 + |E_y(r \cdot \quad) |^2 + |E_z(r \cdot \quad) |^2]$$

$$= C \cdot |K_e|^2 \cdot |E(r \cdot \quad) |^2 \dots \dots \dots (1.4)$$

式中：C --检波器引入的常数；
 K_e --偶极子与高频感应电压间比例系数；
 E_x 、 E_y 、 E_z --分别对应于 x、y、z 方向的电场分量；
 E --待测场的电场矢量。

(1.4) 式为待测场的厄米特幅度 (Hermitian) 可见用端接平方律特性二极管的三维正交偶极子天线总的直流输出正比于待测场的平方,而功率密度亦正比于待测场的平方,因此经过校准后, U_{dc} 的值就等于待测电场的功率密度。如果电路引入开平方电路,那么 U_{dc} 值就等于待测电场强度值。偶极子的长度应远小于被测频率的半波长,以避免在被测频率下谐振。这一特性决定了这类仪器只能在低于几吉赫频率范围使用。

热电偶型探头

采取三条相互垂直的热电偶结点阵作电场测量探头,提供了和热电偶元件切线方向场强平方成正比的直流输出。待测场强为：

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \dots \dots \dots (1.5)$$

与极化无关。沿热电偶元件直线方向分布的热电偶结点阵,保证了探头有极宽的频带。沿 x、y、z 三个方向分布的热电偶元件的最大尺寸应小于最高工作频率波长的 1/4,以避免产生谐振。整个探头像一组串联的低阻抗偶极子或像一个低 Q 值的谐振电路。

磁场探头

由三个相互正交环天线和二极管、RC 滤波元件、高阻线组成,从而保证其全向性和频率响应。环天线感应电势为：

$$= \mu_0 \cdot N \cdot \quad \cdot b^2 \cdot \quad \cdot H$$

式中：N --环匝数；
b --环半径；
H --待测场的磁场强度。

1.1.2 对电性能的要求

使用非选频式宽带辐射测量仪实施环境监测时,为了确保环境监测的质量,应对这类仪器电性能提出基本要求：

- 各向同性误差 $\pm 1\text{dB}$
- 系统频率响应不均匀度 $\pm 3\text{dB}$
- 灵敏度：0.5V/m
- 校准精度： $\pm 0.5\text{dB}$

1.1.3 常用的非选频式辐射测量仪

附录 A1 为常用的非选频式宽带辐射测量仪的有关数据。实施环境电磁辐射监测时,可根据具体需要选用其中仪器。

1.2 选频式辐射测量仪

这类仪器用于环境中低电平电场强度、电磁兼容、电磁干扰测量。除场强仪(或称干扰场强仪)外,可用接收天线和频谱仪或测试接收机组成的测量系统经校准后,用于环境电磁辐射测量。

工作原理

场强仪(干扰场强仪)

待测场的场强值：

$$E \text{ (dB } \mu\text{V/m)} = K \text{ (dB)} + V_r \text{ (dB } \mu\text{V)} + L \text{ (dB)} \dots\dots\dots (2.1)$$

式中 K 是天线校正系数，它是频率的函数，可由场强仪的附表中查得。场强仪的读数 V_r 必须加上对应 K 值和电缆损耗 L 才能得出场强值。但近期生产的场强仪所附天线校正系数曲线所示 K 值已包括测量天线的电缆损耗 L 值。

当被测场是脉冲信号时，不同带宽 V_r 值不同。此时需要归一化于 1MHz 带宽的场强值，即：

$$E \text{ (dB } \mu\text{V/m)} = K \text{ (dB)} + V_r \text{ (dB } \mu\text{V)} + 20 \lg BW + L \text{ (dB)} \dots\dots\dots (2.2)$$

BW 为选用带宽，单位 MHz。测量宽带信号环境辐射峰值场强时，要选用尽量宽的带宽。相应平均功率密度为：

$$P_d \text{ (} \mu\text{W/cm}^2\text{)} = \dots\dots\dots (2.3)$$

上式中 q 为脉冲信号占空比，K、L 值查表可得， V_r 为场强值读数，于是 E 和 P_d 可以方便地计算出来。

频谱仪测量系统

这种测量系统工作原理和场强仪一致，只是用频谱仪作接收机，此外频谱仪的 dBm 读数须换算

dB μ V。对 50 Ω 系统，场强值为：

$$E \text{ (dB } \mu\text{V/m)} = K \text{ (dB)} + A \text{ (dBm)} + 107 \text{ (dB } \mu\text{V)} + L \text{ (dB)} \dots\dots\dots (2.4)$$

频谱仪的类型不受限制，频谱仪天线系统必须校准。

微波测试接收机

用微波接收机、接收天线也可以组成环境监测系统。扣除电缆损耗，功率密度 P_d 按下式计算：

$$P_d = \dots\dots\dots (2.5)$$

式中：G -- 天线增益（倍数）；

-- 工作波长（cm）；

A -- 数字幅度计读数（dBm）；

B -- 0dB 输入功率（dBm）。

由上述测试接收机组成的监测装置的灵敏度取决于接收机灵敏度。天线系统应校准。

用于环境电磁辐射测量的仪器种类较多，凡是用于 EMC（电磁兼容）、EMI（电磁干扰）目的的测试接收机都可用于环境电磁辐射监测。专用的环境电磁辐射监测仪器，也可用上面介绍的方法组成测量装置实施环境监测。

常用的常用辐射测量仪器见附录 A2。

2 电磁辐射污染源监测方法

2.1 环境条件

应符合行业标准和仪器标准中规定的使用条件。测量记录表应注明环境温度、相对湿度。

2.2 测量仪器

可使用各向同性响应或有方向性电场探头或磁场探头的宽带辐射测量仪。采用有方向性探头时，应在测量点调整探头方向以测出测量点最大辐射电平。

测量仪器工作频带应满足待测场要求，仪器应经计量标准定期鉴定。

2.3 测量时间

在辐射体正常工作时间内进行测量，每个测点连续测 5 次，每次测量时间不应小于 15 秒，并读取稳定状态的最大值。若测量读数起伏较大时，应适当延长测量时间。

2.4 测量位置

2.4.1 测量位置取作业人员操作位置，距地面 0.5、1、1.7m 三个部位。

2.4.2 辐射体各辅助设施（计算机房、供电室等）作业人员经常操作的位置，测量部位距地面 0.5、1、1.7m。

2.4.3 辐射体附近的固定哨位、值班位置等。

2.5 数据处理

求出每个测量部位平均场强值（若有几次读数）。

2.6 评价

根据各操作位置的 E 值（H、Pd）按国家标准《电磁辐射防护规定》（GB 8702-88）或其它部委制定的“安全限值”作出分析评价。

3 一般环境电磁辐射测量方法

3.1 测量条件

3.1.1 气候条件

气候条件应符合行业标准和仪器标准中规定的使用条件。测量记录表应注明环境温度、相对湿度。

3.1.2 测量高度

取离地面 1.7m~2m 高度。也可根据不同目的，选择测量高度。

3.1.3 测量频率

取电场强度测量值 $> 50\text{dB } \mu\text{V/m}$ 的频率作为测量频率。

3.1.4 测量时间

基本测量时间为 5:00~9:00，11:00~14:00，18:00~23:00 城市环境电磁辐射的高峰期。

若 24 小时昼夜测量，昼夜测量点不应少于 10 点。

测量间隔时间为 1h，每次测量观察时间不应小于 15s，若指针摆动过大，应适当延长观察时间。

3.2 布点方法

3.2.1 典型辐射体环境测量布点

对典型辐射体，比如某个电视发射塔周围环境实施监测时，则以辐射体为中心，按间隔 45° 的八个方位为测量线，每条测量线上选取距场源分别 30、50、100m 等不同距离定点测量，测量范围根据实际情况确定。

3.2.2 一般环境测量布点

对整个城市电磁辐射测量时，根据城市测绘地图，将全区划分为 $1 \times 1\text{km}^2$ 或 $2 \times 2\text{km}^2$ 小方格，取方格中心为测量位置。

3.2.3 按上述方法在地图上布点后，应对实际测点进行考察。考虑地形地物影响，实际测点应避开高层建筑物、树木、高压线以及金属结构等，尽量选择空旷地方测试。允许对规定测点调整，测点调整最大为方格边长的 $1/4$ ，对特殊地区方格允许不进行测量。需要对高层建筑测量时，应在各层阳台或室内选点测量。

3.3 测量仪器

3.3.1 非选频式辐射测量仪

具有各向同性响应或有方向性探头的宽带辐射测量仪属于非选频式辐射测量仪。

用有方向性探头时，应调整探头方向以测出最大辐射电平。

3.3.2 选频式辐射测量仪

各种专门用于 EMI 测量的场强仪，干扰测试接收机，以及用频谱仪、接收机、天线自行组成测量系统经标准场校准后可用于此目的。测量误差应小于 $\pm 3\text{dB}$ ，频率误差应小于被测频率的 10^{-3} 数量级。该测量系统经模/数转换与微机联接后，通过编制专用测量软件可组成自动测试系统，达到数据自动采集和统计。

自动测试系统中，测量仪可设置于平均值（适用于较平稳的辐射测量）或准峰值（适用于脉冲辐射测量）检波方式。每次测试时间为 8~10min，数据采集取样率为 2 次/s，进行连续取样。

3.4 数据处理

3.4.1 如果测量仪器读出的场强瞬时值的单位为分贝（ $\text{dB } \mu\text{V/m}$ ），则先按下列公式换算成以 V/m 为单位的场强：

$$E_i = 10^{(x_i - 120)/20} \quad (3.1)$$

x_i --场强仪读数（ $\text{dB } \mu\text{V/m}$ ），然后依次按下列各公式计算：

$$E = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i^2} \quad (3.2)$$

$$E_s = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M E_i^2} \quad (3.3)$$

$$E_G = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M E_s^2} \quad (3.4)$$

上述各式中： E_i --在某测量位、某频段中被测频率 i 的测量场强瞬时值（ V/m ）；

n -- E_i 值的读数个数；

E --在某测量位、某频段中各被测频率 i 的场强平均值（ V/m ）；

E_s --在某测量位、某频段中各被测频率的综合场强（ V/m ）；

E_G --在某测量位、在 24h（或一定时间内）内测量某频段后的总的平均综合场强（ V/m ）；

M --在 24h（或一定时间内）内测量某频段的测量次数。

测量的标准误差仍用通常公式计算。

如果测量仪器的是非选频式的，不用（3.3）式。

3.4.2 对于自动测量系统的实测数据，可编制数据处理软件，分别统计每次测量中测值的最大值 E_{max} 、最小值 E_{min} 、中值、95%和 80%时间概率的不超过场强值 $E(95\%)$ 、 $E(80\%)$ ，上述统计值均以（ $\text{dB } \mu\text{V/m}$ ）表示。还应给出标准差值（以 dB 表示）。

如系多次重复测量，则将每次测量值统计后，再按 4.4.1 进行数据处理。

3.5 绘制污染图

3.5.1 绘制：频率-场强、时间-场强、时间-频率、测量位-总场强值等各组对应曲线。

3.5.2 典型辐射体环境污染图

以典型辐射体为圆心，标注等场强值线图（参见附录 B1），或以典型辐射体为圆心，标注根据（4.5）式或（4.6）式得出的计算值的等值线图。

3.5.3 居民区环境污染图

在有比例的测绘地图上标注等场强值线图，或标注根据（4.5）式或（4.6）式得出的计算值的等值线图。根据需要亦可在各地区地图上做好方格，用颜色或各种形状图线表示不同的场强值（参见附录 B2），或根据（4.5）式或（4.6）式得出

的计算值。

3.6 质量保证

3.6.1 测量方案必须严格审议。

3.6.2 充分考虑测量的代表性。

3.6.3 测量结果准确可靠、有比对性。

3.6.4 数据处理方法正确。

3.7 环境质量评价

3.7.1 用非选频宽带辐射测量仪时,由于测量位测得的场强(功率密度)值,是所有频率的综合场强值,24h内每次测量综合场强值的平均值即总场强值亦是所有频率的总场强值。由于环境中辐射体频率主要在超短波频段(30~300MHz),测量值和超短波频段安全限值的比值 L_1 ,基本上对居民无影响,如果评价典型辐射体,则测量结果应和辐射体工作频率对应的安全限值比较。

$$L_1 = \frac{E}{L} \quad (3.5)$$

式中:EG--某测量位置总场强值(V/m);

L--典型辐射体工作频率对应的安全限值或超短波频段安全限值(V/m)。

3.7.2 用选频式场强仪时:

$$L_1 = \frac{E_{Gi}}{L_i} \quad (3.6)$$

式中:EGi--测量位置某频段总的平均综合场强值(V/m);

Li--对应频段的安全限值(V/m)。

4 环境质量预测的场强计算

为了估算辐射体对环境的影响,对于典型的中波、短波、超短波发射台站的发射天线在环境中辐射

场强按(4.1)式至(4.6)式计算。对正方形、圆口面微波天线在环境中辐射场功率密度按(4.7)式和(4.8)式计算:

4.1 中波(垂直极化波)

理论公式:

$$E = P \cdot G \cdot F(h) \cdot F(\theta, \phi) \cdot A \quad (4.1)$$

近似公式:

$$E = P \cdot G \cdot A \quad (mV/m) \quad (4.2)$$

式中:

$$A = 1.41 \quad (4.3)$$

$$X = \frac{d}{h} \quad (4.4)$$

上述各式中:d--被测位置与发射天线水平距离(km);

P--发射机标称功率(kW);

--天线效率(%);

G--相对于接地基本振子(点源天线G=1)的天线增益(倍数);

F(h)--发射天线高度因子,

$$F(h) = 1 \sim 1.43;$$

F(θ, φ)--发射天线垂直面(仰角)、水平面(方位角)方向性函数, max=0;

A--地面衰减因子；
 X--数量距离；
 --波长(m)；
 --大地的介电常数(无量纲)；
 --大地的导电系数，1/(·m)。

(4.2)近似公式是： $F(h) = 1.2 \cdot F(\sqrt{h}) = 1$ 得出的，即舒来依金-范德波尔公式。

4.2 短波(水平极化波)

短波(水平极化波)场强计算公式同(4.2)、(4.3)，但水平极化波的X按(4.5)计算。各量纲同前。

$$X = \dots \dots \dots (4.5)$$

4.3 超短波(电视、调频)

$$E = F(\dots) (mW/cm^2) \dots \dots \dots (4.6)$$

式中：P --发射机标称功率(kW)；
 G --相对于半波偶极子($G_{0.5} = 1.64$)天线增益(倍数)；
 r --测量位置与天线水平距离(km)；
 F(·) --天线垂直面方向性函数(视天线型式和层数而异)。

4.4 微波

近场最大功率密度 Pdmax：

$$Pdmax = (mW/cm^2) \dots \dots \dots (4.7)$$

式中：PT --送入天线净功率(mW)；
 S --天线实际几何面积(cm²)。

(4.7)式给出的预测值，是对于具有正方形口面和圆锥形口面天线的情况(其精度 < ±3dB)下天线近场区内最大功率密度值。

远场轴向功率密度 Pd：

$$Pd = (mW/cm^2) \dots \dots \dots (4.8)$$

式中：P --雷达发射机平均功率(mW)；
 G --天线增益(倍数)；
 r --测量位置与天线轴向距离(cm)。

附录 A1 常用非选频式辐射测量仪

名称	频带	量程	各向同性	探头类型
微波漏能仪	0.915~12.4GHz	0.005~30mW/cm ²	无	热偶结点阵
微波辐射测量仪	1~10GHz	0.2~20mW/cm ²	有	肖特基二极管偶极子
电磁辐射监测仪	0.5~1000MHz	1~1000V/m	有	偶极子
全向宽带近区场强仪	0.2~1000MHz	1~1000V/m	有	偶极子
宽带电磁场强计	E: 0.1~3000MHz H: 0.5~30MHz	E: 0.5~1000V/m H: 1~2000A/m	有	偶极子环天线
宽带电磁场强计	E: 20~105Hz H: 50~60Hz	E: 1~20000V/m H: 1~2000A/m	有	偶极

子环天线

辐射危害计 0.3~18GHz 0.1~200 mW/cm² 有热偶结点阵

辐射危害计 200kHz~26GHz 0.001~20 mW/cm² 有热偶结点阵

宽带全向辐射监测仪 0.3~26GHz 8621B 探头: 0.005~20 mW/cm² 8623 探头: 0.05~100 mW/cm² 有热偶结点阵

宽带全向辐射监测仪 10~300MHz 8631: 0.005~200 mW/cm² 8633: 0.05~100 mW/cm² 有热偶结点阵

宽带全向辐射监测仪 0.3~26GHz 10~300MHz 8621B: 0.005~20 mW/cm² 8631: 0.05~100 mW/cm² 有热偶结点阵

宽带全向辐射监测仪 8635、8633 10~3000MHz 8644 10~3000MHz 8633: 0.05~100 mW/cm² 8644: 0.0005~2W/cm² 8635: 0.0025~10W/cm² 有热偶结点阵环天线

宽带全向辐射监测仪 由决定选用探头 由决定选用探头 有热偶结点阵环天线

全向宽带场强仪 E: 5×10^{-4} ~6GHz H: 0.3~3000MHz E: 0.1~30V/m H: 0.1~1000A/m² 有偶极子磁环天线

附录 A2 常用选频式辐射测量仪

名称 频带 量程 注

干扰场强测量仪 10~150KHz 24~124dB 交直流两用

干扰场强测量仪 0.15~30MHz 28~132dB 交直流两用

干扰场强测量仪 28~500MHz 9~110dB 交直流两用

干扰场强测量仪 0.47~1GHz 27~120dB 交直流两用

干扰场强测量仪 0.5~30MHz 10~115dB 交直流两用

场强仪 2×10^{-8} ~18GHz 1×10^{-8} ~1V NM-67 只能用交流

EMI 测试接收机 9KHz~30MHz 20MHz~1GHz 5Hz~5GHz 20Hz~26.5GHz <1000V/m 交流供电、显示被测场频谱

电视场强计 1~56 频道 灵敏度: 10 μ V 交直流两用

电视信号场强计 40~890MHz 20 dB μ ~120 dB μ 交直流两用

场强仪 40~860MHz 20 dB μ ~120 dB μ 交直流两用

附录 B1 典型辐射体环境辐射等场强值线图(示意图)

附录 B2 居民区环境辐射电平标准

种类 场强值(mV/m)

> 300

200~300

130~200

80~130

50~80

< 50

附录 C 单位换算(自由空间条件)

转换公式 量的单位 量的名称

$\text{mW/cm}^2 \times 10 \text{ W/m}^2$ 功率密度

$\text{mW/cm}^2 \times 3763.6 \text{ (V/m)}^2$ 电场强度平方

$\text{mW/cm}^2 \div 37.636 \text{ (A/m)}^2$ 磁场强度平方

$\text{mW/cm}^2 \times 0.03333 \text{ PJ/cm}^3$ 能量密度

$\text{mW/cm}^2 \times 3763.6 \text{ V/m}$ 电场强度

$\text{mW/cm}^2 \div 37.636 \text{ A/m}$ 磁场强度