

# 脉冲雷达电磁辐射的宽带场强仪测量方法

Measurement EMF of Pulse Radar with Broadband Field Meter

<sup>1</sup>北京森馥科技股份有限公司 <sup>2</sup>广州广电计量检测股份有限公司 <sup>3</sup>广州供电局有限公司

陆德坚<sup>1</sup> 薛欢<sup>1</sup> 崔保玉<sup>2</sup> 王毅<sup>3</sup>

## 摘要

针对脉冲雷达的电磁辐射特点及标准测试要求，分析了宽带场强仪在测试脉冲雷达信号时的响应特性，提出使用宽带场强仪测量脉冲雷达电磁辐射应进行测量示值误差修正，对于旋转雷达还应进行照射时间修正。总结了脉冲雷达电磁辐射的宽带场强仪测量方法，给出了宽带场强仪脉冲测量示值误差修正方法以及雷达照射时间修正方法。

## 关键词

脉冲雷达；电磁辐射测量；宽带场强仪

## Abstract

Base on the EMF feature of pulse radar and the EMF measurement requirement of related standard, the response characteristic of broadband field meter to the pulse radar signal is analyzed. The display value error should be corrected when measure EMF of pulse radar with broadband field meter, illumination time of a rotating radar should be taken into account too. The method of measurement EMF of pulse radar with broadband field meter is proposed, including display value error corrected and illumination time corrected. Finally, an example shows the way of the broadband field meter measured EMF of pulse radar.

## Keywords

pulse radar; EMF measurement; broadband field meter

## 1 概述

雷达设备广泛应用于国防及国民经济领域。按照雷达发射信号的波形，可分为：脉冲雷达和连续波雷达。其中，雷达脉冲电磁波具有较低的平均功率和极高的峰值功率。

GB 8702-2014《电磁环境控制限值》<sup>[1]</sup>规定了电磁环境中控制公众曝露的电磁场限值。对于脉冲电磁波，除了任意连续6分钟内均方根值（RMS值）满足公众曝露控制限值要求，其功率密度瞬时峰值不应超过均方根值控制限值的1 000倍，或场强的瞬时峰值不应超过公众曝露控制限值的32倍。因此，脉冲雷达电磁辐射监测，需要测量其RMS值及脉冲峰值。依据HJ 10.2-1996《辐射环境管理导则电磁辐射监测仪器和方法》<sup>[2]</sup>，测量其电磁辐射可采用两种方法：1) 频谱分析仪/接收机+天线；2) 宽带场强仪。

使用频谱分析仪或接收机+天线，或使用频谱仪和三轴全向天线一体的选频分析仪测量脉冲雷达，可以测量频谱、脉冲峰值及RMS值。该方法的缺点是成本高，且在6 GHz以上没有三轴全向天线，量程上限小，因此在脉冲雷达电磁辐射监测领域没有广泛应用。

宽带场强仪具有测量频率范围宽（频率范围覆盖60

GHz以下）、量程高（连续波量程可达400 V/m、脉冲波量程可达1 000 V/m）、可直接测量全向场强值、操作简便、价格便宜等优点。但宽带场强仪无法进行频谱分析、不能直接测量峰值。

## 2 脉冲雷达电磁辐射测量方法

### 2.1 静止脉冲雷达的测量及评估方法

静止雷达天线发射方向固定，发射周期性脉冲电磁波。使用宽带场强仪测量时，设置其为最大值保持模式，读取稳定状态时的测量值。

第一步：使用宽带场强仪测量脉冲信号，采用最大值保持方式，得到 $E_{\text{display}}$ 值。

第二步：对测量示值进行修正得到 $E_{\text{rms}}$ 。

第三步：峰值评估，如果占空比小于1:1 000，根据占空比，推算出 $E_{\text{peak}}$ 。

第四步：安全评估。

静止脉冲雷达电场强度的脉冲峰值及均方根值的关系仅与雷达占空比有关。

### 2.2 旋转脉冲雷达的测量及评估方法

脉冲雷达以旋转扫描方式工作时，在一次旋转扫描中，测试点位受到雷达脉冲照射的时间很短，因此除

了需要进行测量示值偏差的修正外，还需要进行照射时间修正，以得到脉冲信号的幅度。

第一步：使用宽带场强仪，调整架设方向，使其中的某个轴向测量值最大。一般宽带场强仪的X、Y、Z三轴是顺序测量的，由于在旋转雷达的照射时间无法保证三个轴向同时完成测量，即使使用最大值保持模式，也是不同时间的测量值。操作方法为：使用最大值保持模式，如果宽带场强仪具有单轴测量功能，则选择最大测量值的轴向进行连续测量。

第二步：测量旋转雷达脉冲信号 $E_{\text{display}}$ 。

第三步：经过测量示值误差修正得到 $E_{\text{rms}}$ 。

第四步：经过雷达照射时间修正得到 $E_{\text{cw}}$ 。

第五步：如果占空比小于1:1000，根据占空比，推算出 $E_{\text{peak}}$ 。

第六步：安全评估。

### 3 宽带场强仪测量脉冲雷达

#### 3.1 测量示值误差的修正

宽带场强仪在测量脉冲信号时，仪器测量示值与实际值之间存在差异，需要进行修正。

这个修正系数通常和脉冲占空比以及脉冲重复频率相关。对于常见的1:1000占空比脉冲，图1和图2分别给出了EMR Type9.2型探头和PMM8053B的EP183探头的测量示值与实际值之间的修正曲线， $E$ 是 $E_{\text{rms}}$ 与 $E_{\text{display}}$ 的偏差值。

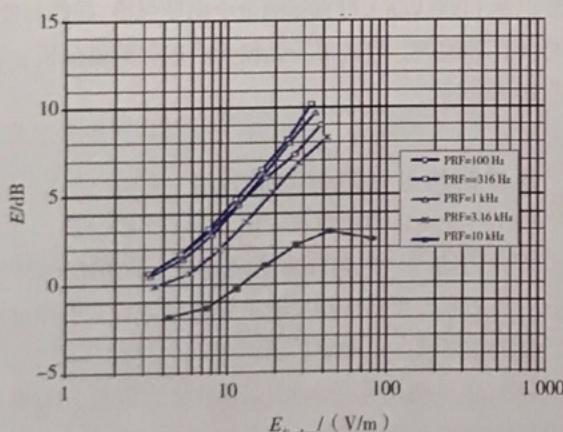


图1 Type9.2型探头典型的雷达信号测量示值偏差

对于市面上常见的SEM-600搭配RF-06探头、以及NBM550搭配EF0691，厂家没有给出相应的参数。笔者搭建了图3所示的测试装置，通过实验室测定其典型雷达脉冲测量示值偏差见图4。

#### 3.2 照射时间误差的修正

在测量旋转雷达时，在测量点上雷达脉冲照射时间短。远场测量时，照射时间通常小于宽带场强仪的积分时间常数，宽带场强仪的探头通常在偶极子天线端接

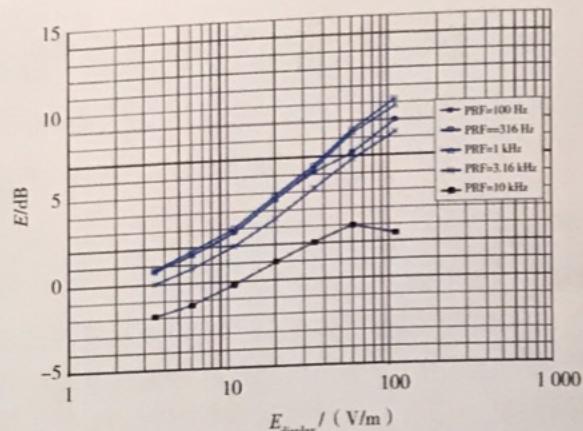


图2 EP183探头典型的雷达信号测量示值偏差

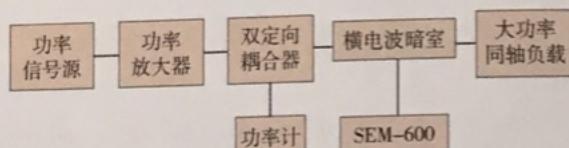


图3 电磁场探头典型脉冲信号测量示值偏差测试装置

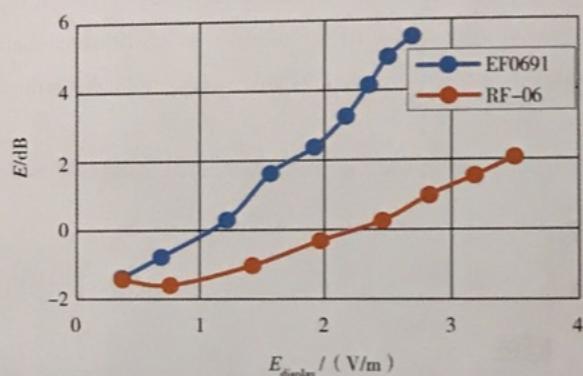


图4 EF0691探头及RF-06探头典型脉冲信号测量示值偏差 (PRF=125 Hz)

肖特基检波二极管，在积分时间常数内对测量信号进行积分累积，因此测量值与脉冲的照射时间相关，照射时间短于积分时间常数时，测量值小于信号的幅度。要评估信号的幅度，需要对测量值进行修正。

测试时，启动宽带场强仪的最大值或最大保持测量模式，雷达波束的经过几次扫描，测量扫描雷达均方根值的最大值作为测量结果。

IEEE 1309-2013<sup>[3]</sup>附录D给出突发雷达脉冲信号的照射时间修正系数公式：

$$K = \frac{E_{\text{hold}}}{E_{\text{cw}}} = 1 - e^{(-t/T)} \quad (1)$$

式(1)中，

$t$ 是照射时长 (s)；

$T$ 是探头及电路的积分时间常数 (s)；

$K$ 是最大保持比；

$E_{\text{hold}}$ 是宽带场强仪使用最大保持测量的值；

$E_{\text{cw}}$ 是连续波的测量值平均值。

使用公式(1)的限制条件是两次照射之间的时间要小于积分时间常数 $T$ 。这在旋转雷达中通常能够满足。依据 IEEE 1309-2013 的附录 D, 许多用于电磁场测量的偶极子探头都有特定的时间常数, 这个常数通常约为 0.25 s。探头的传感器时间常数是整个时间常数的主要部分, 减小电路响应时间不会使总的时间常数明显减小。EMC300 的 Type9.2 探头时间常数为 0.307 s, EP183 的时间常数为 0.291 s。市面上常见的仪器, NBM550 探头 EF0691 的时间常数为 0.27 s, SEM600 探头 RF-06 的时间常数 0.3 s。

### 3.3 脉冲峰值评估

GB 8702-2014 规定, 脉冲电磁波需同时满足瞬时峰值限值与任意连续 6 分钟内均方根值限值要求。功率密度的脉冲峰值限值为均方根值限值的 1 000 倍, 场强的脉冲峰值限值为均方根值限值的 32 倍。脉冲雷达安全性评估, 应按照占空比(Duty cycle)与 1:1 000 的大小关系分情况考虑。

当占空比 < 小于 1:1 000 场强方均根值满足标准规定的同时, 需要保证  $E_{\text{peak}}/32$  不超出均方根值限值。

若已知占空比, 可由均方根值  $E_{\text{rms}}$  计算得到峰值  $E_{\text{peak}}$ , 即由  $E_{\text{rms}}$  乘以下因子可得到  $E_{\text{peak}}/32$ , 与均方根值限值比较, 评价电磁环境的安全性。

$$\frac{E_{\text{peak}}/32}{E_{\text{rms}}} = \sqrt{\frac{S_{\text{peak}}/1000}{S_{\text{rms}}}} = \frac{1}{\sqrt{\text{Duty cycle} \cdot 1000}} \quad (2)$$

占空比可由脉冲宽度  $\tau$  和脉冲重复频率 PRF 计算得到:

$$\text{Duty cycle} = \tau \cdot \text{PRF} \quad (3)$$

当占空比大于 1:1 000, 脉冲雷达均方根值若不超过限值, 脉冲峰值同样不超出其限值, 可仅测量均方根值。

## 4 旋转脉冲雷达测试修正示例

以陕西延安某气象雷达测量为例, 该气象雷达为脉冲工作模式, 工作频率 5.33 GHz, 雷达转速 2.5 r/min, 距离雷达 150 m 的测量点位处波束宽度为 3°, 天线直径 8.5 m, 脉冲宽度  $\tau=1.57 \mu\text{s}$ , 脉冲重复频率 PRF=340 Hz。

使用宽带场强仪(宽带场强仪 NBM550 配 EF0691 探头), 在距离雷达 150 米处测量, 选择最大值保持模式, 测量结果  $E_{\text{display}}=0.52 \text{ V/m}$ 。

进行测量示值修正, 从图 4 中可见修正值  $E_{\text{rms}}/E_{\text{display}}=-1 \text{ dB}$ , 则

$$E_{\text{rms}} = E_{\text{display}} \times 10^{\frac{-1}{20}} = 0.47 \text{ V/m}$$

进行雷达照射时间修正, 计算出假设雷达静止情

况下的连续脉冲照射时的场强  $E_{\text{cw}}$ (平均值), 其中照射时间  $t=60/2.5 \times 3/360=0.20 \text{ s}$ , 宽带场强仪积分时间常数  $T=0.27 \text{ s}$ 。

$$K = 1 - e^{-\frac{t}{T}} = 0.89$$

$$E_{\text{cw}} = \frac{E_{\text{rms}}}{K} = 0.89 \text{ V/m}$$

根据式(2)、式(3), 计算脉冲峰值:

$$\frac{E_{\text{peak}}}{32} = \frac{E_{\text{cw}}}{\sqrt{\text{Duty cycle} \cdot 1000}} = 1.22 \text{ V/m}$$

$$E_{\text{peak}} = 1.22 \times 32 = 39.01 \text{ V/m}$$

使用选频分析仪 SRM3006, 配 420 MHz~6 GHz 三轴全向天线, 在同一位置测量该雷达脉冲峰值为 36.93 V/m, 该雷达脉冲均方根值为 0.53 V/m, 见图 5。

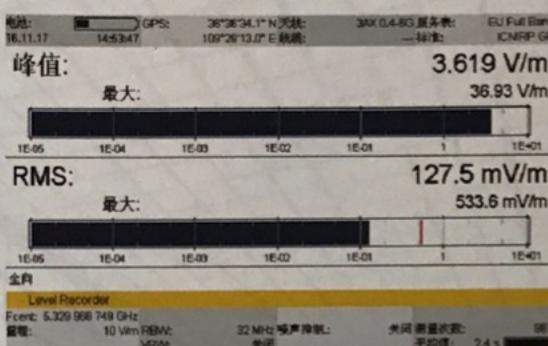


图 5 使用选频分析仪测量脉冲雷达

由图 5 可见, 使用宽带场强仪测量的雷达脉冲场强均方根值, 经过修正后的峰值场强与用选频分析仪直接测量得到的雷达脉冲峰值有很好的吻合。

对于该脉冲雷达, 测量点位处的电场均方根值  $E_{\text{rms}}$  小于 GB 8702-2014 的公众电磁曝露限值 12 V/m, 且雷达脉冲的峰值小于该限值的 32 倍。

## 5 结语

使用宽带场强仪测量脉冲雷达电磁辐射简便易行, 扩展了宽带电磁辐射测量仪的测试能力, 拓宽了其适用范围。需要注意, 本文给出的方法存在局限性, 对参数未知的脉冲雷达无法用宽带场强仪进行测量及修正。

## 参考文献

- [1] 环境保护部辐射环境监测技术中心. GB 8702-2014 电磁环境控制限值 [S]. 北京: 中国标准化出版社, 2014.
- [2] 国家环境保护局. HJ 10.2-1996 辐射环境管理导则电磁辐射监测仪器和方法 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [3] IEEE std 1309:2013 standard for calibration of electromagnetic field sensors and probes (Excluding antennas) from 9 kHz to 40 GHz [S]. 2013.

编辑:毛羽 E-mail:maoyu@cesi.cn