

军械上电磁环境影响的智能和可靠的评估变得容易

在4步内怎样成为一个成功的HERO测试员

欧普申光电科技有限公司

www.opsensing.com

摘要

电磁辐射到军械上是危险的，潜在的电磁辐射对军工品或电子爆炸装置有不利影响，自从50年代以来这就是众所周知的问题。为了避免不必要的爆炸或电起爆装置（EID）从发射电磁能量增殖，这对于所有的防卫机构来说是必不可少的。伴随着功率输出和发射设备频率范围的持续增加，减小此威胁变得至关重要。

为了确保大炮和军火系统保持安全，在适当维护条件下，测量电子爆炸装置（EED）上电磁能量影响的测试设备有很大发展。几年后基于光纤技术的新一代仪器取代了使用热电偶或红外探测的系统。光纤传感器（FOS）具有高精度和高准确性，非常灵敏，提供的响应时间可满足高效的EED。由于电绝缘的特性，光纤传感器对电磁干扰（EMI）完全免疫，在感应环境中可表现出来。由于此有利的参数，基于光纤技术的传感器现已成为 HERO/RADHAZ 测试的标准。然而，什么是该技术必要的条件以提供EED装置可靠的辐射评估仍然没有明确，怎样去完全发挥此技术优势以完全获益呢？

1. 精确和灵巧的传感器

1.1 技术

HERO/RADHAZ 测试方法在此节会描述，它基于一个非常灵敏和精确的光纤感应技术SCBG（半导体能带隙）技术。基于SCBG的光纤传感器设计于测量EED桥线丝或类似装置的电磁诱导温度上升。SCBG是一个成熟的技术，使用简单而耐用的光谱测量技术。技术原理是温度依靠于光传输到GaAs晶体。简单的说，对于低于一个特殊波长过渡区域（叫能带隙）的所有光波长，GaAs晶体是一个不透明的材料；相反的，对于高于此能带隙的所有波长，GaAs晶体是一个可透过的材料。波长过渡区域，也就是能带隙光谱位置是温度的函数。为了监控温度而测量能带隙光谱位置的改变就是SCBG技术的原理。

SCBG 技术的原理图如图 1 所示。光纤温度传感器由黏在光纤顶部的微小 GaAs 晶体组成。光从信号解调器注射到光纤，导向 GaAs 晶体。随后低于能带隙光谱位置的光波被吸收，而那些高于能带隙的波长则反射回信号解调器。反射回信号解调器的光进入到一个小型的光谱分析仪（OSA），把光空间分解成波长成份。一个光学探测器的线性 CCD 阵列测量这些波长的光强度，CCD 阵列的每一个像素相当于一个特殊的校准波长。因此，整个探测器阵列提供反射回 GaAs 晶体的光谱强度分布。一个典型的光谱强度分布曲线如图 1 所示：

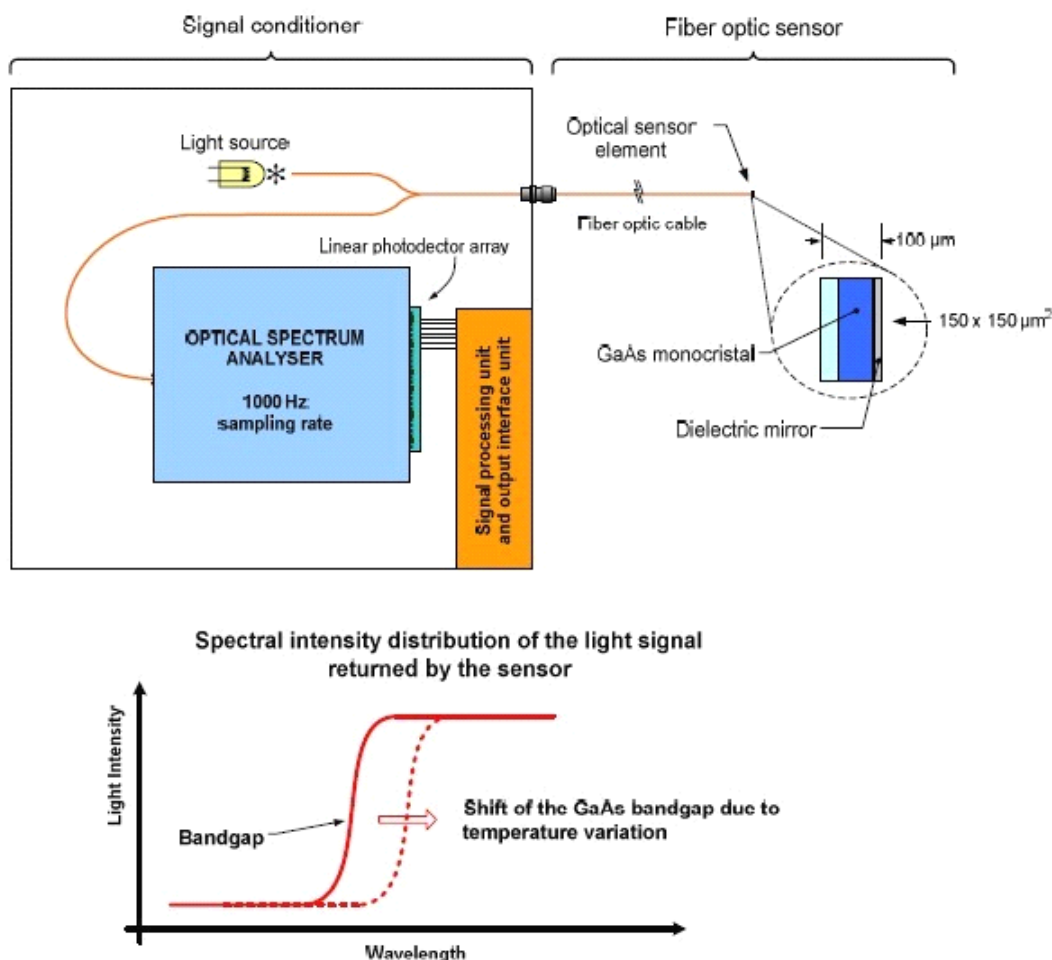


图 1: SCBG 技术示意图

能带隙光谱位置从光谱强度分布可计算出来，转换成绝对温度的读取。相对于类似应用中所用的干涉测量技术，SCBG 光谱测量技术对机械震动和光纤移动不敏感，是HERO和RADHAZ应用所必须的。

不需要校准因数的绝对和相对测量

SCBG技术提供绝对和相对温度测量，在使用传感器之前不需要在测量系统中输入校准因数。传感器可以混合和匹配系统所有的测量通道而不需要对特定通道做校准。这些特点的好处有很多：

- 消除手动进入系统，因此减少了人工相关错误的风险
- 在测试过程中，避免了由于校准因数与传感器不匹配而引起的不正确结果
- 传感器到传感器的一致性
- 使用一个简单的连接和测量特点大大提高了系统构建时间和效率

使用者很容易从绝对和相对温度测量之间转换，实际温度和参考温度点是不相同的。

1.2 必备的条件

对EMI完全免疫

由于HERO/RADHAZ的特性要求和应用，比如EED电磁兼容测试和评估。传感器必须对EMI完全免疫，而SCBG技术提供了完全的EMI免疫。

对光缆移动，震动和操控的抵抗力

为了提供可靠和精确的结果，传感器必须表现出非测量影响或光纤移动的敏感性。同样的，传感器不应该对机械震动敏感，对光纤弯曲和光纤连接/断开也是如此。这些性能支持超过一个连接头而传感器的灵敏度和精度没有任何降低。外部干扰会产生重大输出读取误差和无用的测量结果，比如使用光纤干涉测量技术为例。SCBG技术的光谱测量原理提供

了对此影响的完全免疫。例如，可使用多个连接头而对测量精度没有任何影响。此外，传感器可在高震动环境下使用，比如战斗机的建立。

适应性

传感器应该很容易装配到基于EED所有类型的桥线电阻丝上。SCBG技术提供了一个微小的传感器（ $150 \times 150 \times 100 \text{ um}^3$ 或更小），以适合非常小的空间或EEDs紧凑设计。为了达到最小的阻碍，传感器裸露部分和光缆封装材料应该很容易适用于测试环境。

2. 可靠的EED装配方法

成功的HERO/RADHAZ测试依靠于总体的装配质量。光纤传感器如果没有正确的安装在EED的桥线电阻丝上是毫无用处的。

2.1 构建

在比头发丝还细的脆弱桥线电阻丝上安装传感器，这个桥线丝有时候隐藏在一个非常小的EED底部，这就要求有适当的工具和正确的装配方法。使用一个包括简单微调仪，放大镜和支撑物的安装台是坚固的装配所必须的。一个适合的装配台避免操作时间的浪费，大大减少了传感器错误安装到EED上的机率。但最重要的是，使用一个正确设计的EED支撑物装配（叫EED适配器）是必需的，它能让EED与传感器能固定在一起。安装台允许放入传感器的感应部分，也就是GaAs晶体，与EED的桥线丝进行热量联系。传感器被固定着以便维持作用于桥线丝上的微小压力（请看下面的装配细节）。

2.2 装配

为了最大化的敏感性，传感器顶部（也就是晶体）必须与桥线丝有热量联系（传导）。砷化镓晶体可以直接放到桥线丝上，而不会改变其固有的电和磁特性。然而，在桥线丝上提供一个适当的拉力是很重要的。过度的拉力会损坏晶体（例如晶体从光纤顶部脱离），如果桥线丝接触到EED外罩，还有产生热库效应。下面的图片阐明了一个典型EED装配台所需的最少设备：

安装台如右图所示，它提供了把传感器有效地安装到EED桥线丝上所必需的控制部分。双目镜，支架，和显微操作器都是需要的。

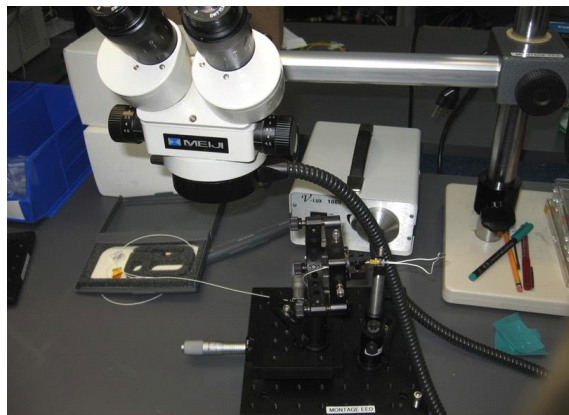


图 2 EED 安装台概况

把裸露着桥线电阻丝的EED固定到安装台上。通过使用适当的固定支架来安装EED，在安装过程中避免任何的移动。



图 3 裸露桥线电阻丝的 EED

温度传感器安装在EED旁边。传感器被固定以避免多余的侧面移动。

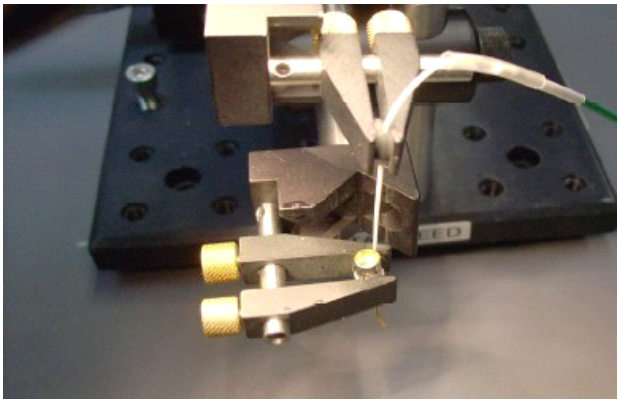


图 4 传感器安装

通过使用显微镜，传感器被放置于桥线电阻丝上。

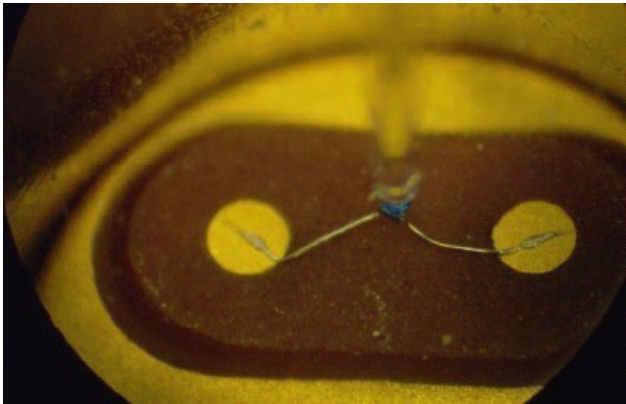


图5 与桥线电阻连接

通过固定光纤到EED适配器，安装完成。

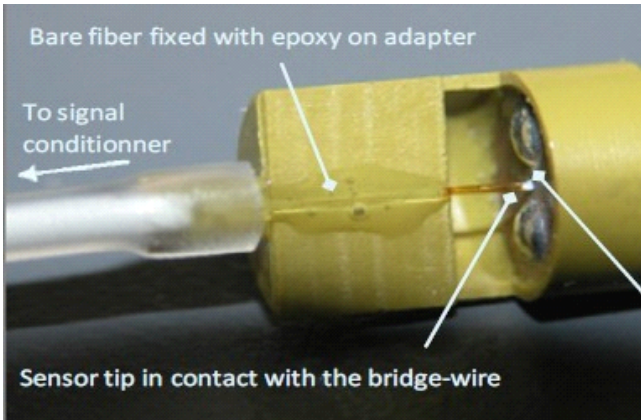


图6 特殊的适配器设计以使传感器固定到EED中

2.3 适应性

电子爆炸装置有各种形状和模型。从标准的MK1到精密的客户化的EED，传感器必须适应EED装置而不改变其电特性和电磁敏感性。

传感器应该很容易装到标准和普通的EED上，像MK1和PR-2。右边的图示为一个正确设计的适配器，用于保持光纤和EED装置，提供必须的装配坚固性。

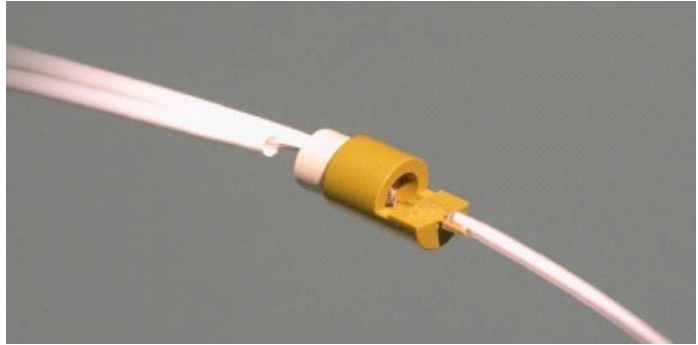


图7 PR-2 EED装配

传感器的几何形状需要适应不同的EED桥线电阻丝设计，达到最小的阻碍。例如，图8a 所示一个桥线丝绕着圆柱体形成线圈，使用人员遇到的障碍就是必须把光纤平行放置到圆柱体上。一个专门设计的传感器是用它的晶体安装到光纤的侧边上。图8b就是使用此应用。

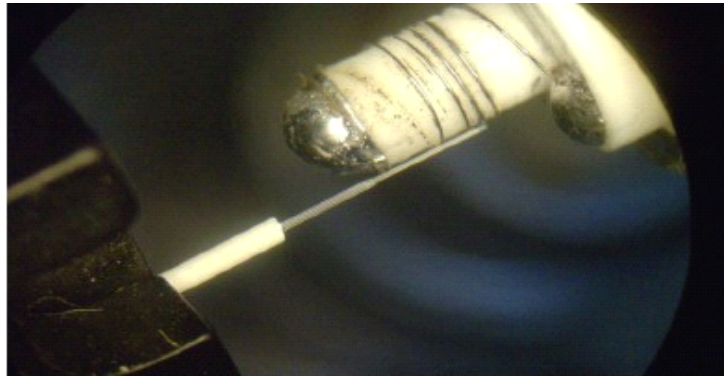


图8a 缠绕的桥线丝

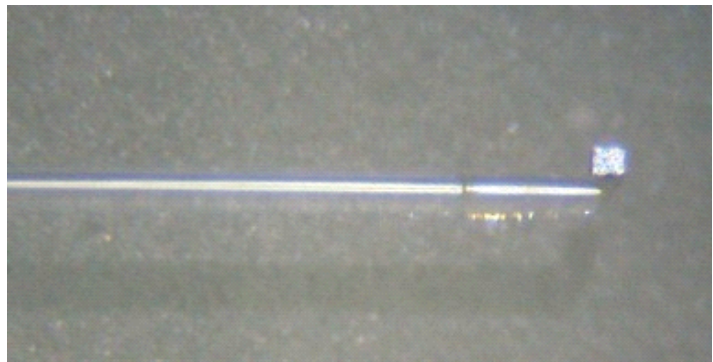


图8b 晶体安装在光纤的边上

3. 精确的EED感应电流响应测量

3.1 很容易进行精确校准

当遇到电磁辐射时，一个EED仪器（也就是EED/传感器装配）不得不在提供感应电流响应测量之前做校准。校准曲线建立了EED桥线电阻的注入电流与通过温度传感器所测出的桥线电阻温度增加之间的关系。表9显示了数字校准数据，曲线图则显示了一个MK1 EED仪器的校准曲线。这些图表清楚的说明了校准曲线有非常好的理论平方法则精度伴随着EED装置的响应，桥线电阻丝温度的增加与通过它的电流成二次方比例。这个比例是恒定不变的，叫电流的平方敏感度 S_c ， S_c 从曲线很容易校准，在特定案例中等于 $0.004758^{\circ}\text{C}/\text{mA}^2$ 。

I (mA)	ΔT (°C)
0	0
3	0.042
4	0.088
5	0.157
10	0.466
20	1.930
30	4.284
40	7.598

Table 1

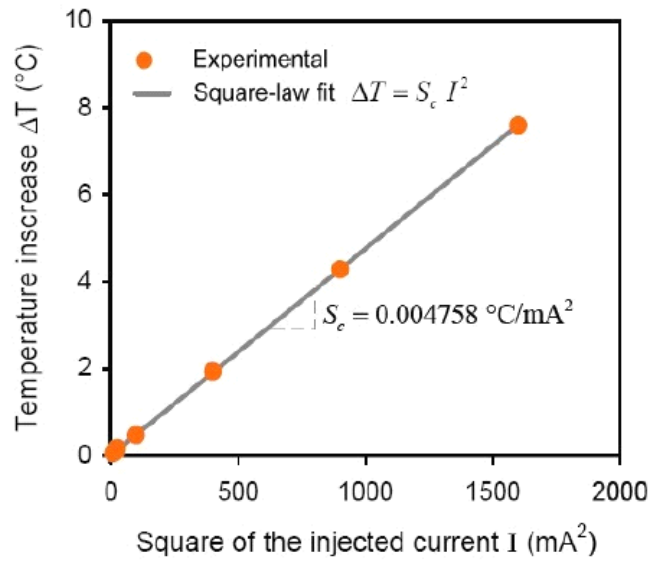


图9 校准结果

一个特定的EED一旦确定了 S_c ，就很容易建立控制和读取仪器（RadSens信号解调器）以输出不同的单位，比如毫安，低于无火阈值（No Fire Threshold)的分贝和微瓦，增加标准温度单位（绝对或相对温度）。请看以下所示。

3.2 EED注入电流在不同单位下的响应 (mA, dB, uW)

以下是EED注入电流响应的例子。使用一个OTG-R光纤温度传感器（为EED测试而设计）装配到一个Mark-1(MK1)电子爆炸装置（EED）上。MK-1 EED有一个300mA的无火阈值和1.2欧的电阻。MK1/OTG-R装配被连接到RadSens信号解调器的一个PSR-100测量模块。校准曲线提供电流平方敏感度 S_c ，在此案例中 S_c 等于 $0.004758 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{mA}^2$ 。通过RadSens仪器的Ethernet/LAN接口，数据被真实收集，采样频率1KHz

毫安下的电流响应

通过设置RadSens仪器的输出为mA,

电流响应为毫安被测量出来。

右图显示了MK1电流响应为mA和预期的一样，响应是非常线性的。

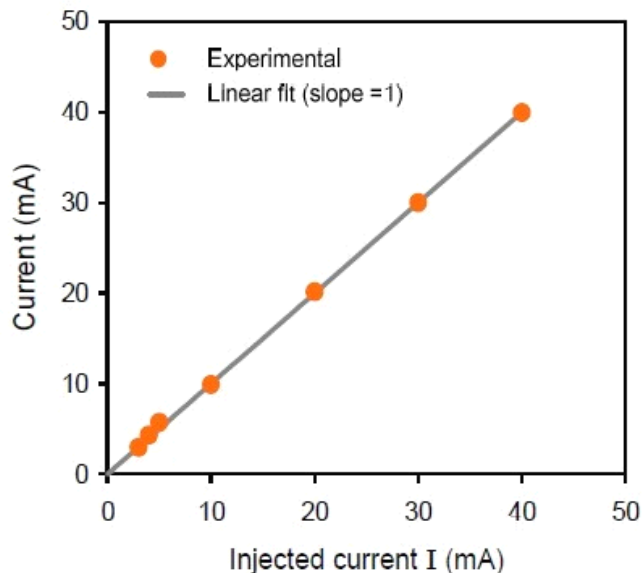


图10 电流响应 mA

低于无火阈值分贝下的电流响应

通过设置RadSens仪器的输出为dB, 电流响应为低于无火阈值分贝被测量出来。右图显示了响应曲线。和预期的一样, 响应遵循对数曲线。

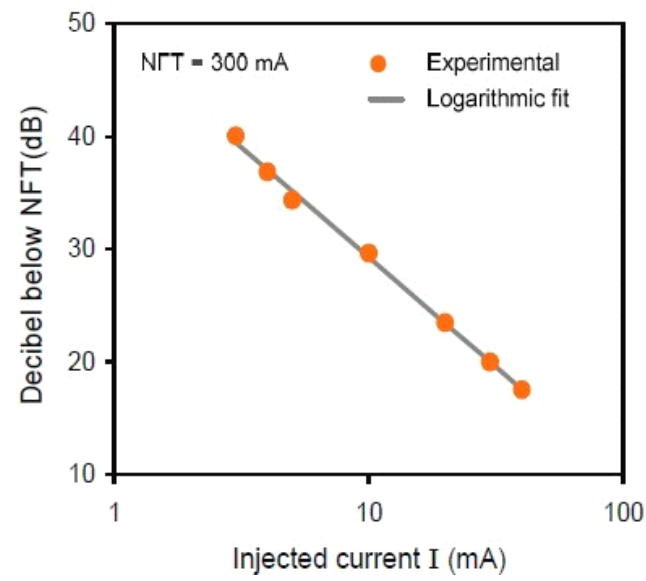


图11 电流响应 dB

微瓦电流响应

通过设置RadSens仪器的输出为uW, 电流响应为微瓦被测量出来。右图显示了响应曲线。和预期的一样, 响应遵循功率法则曲线。

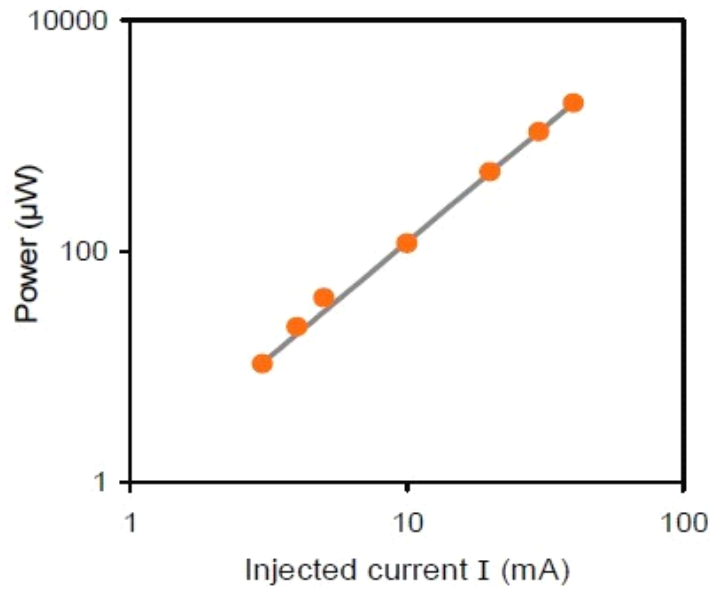


图12 电流响应 uW

3.3 最终的电流灵敏度和响应时间

图13显示了在一个MK1仪器上所探测出的最小电流。 RadSens的输出设置为低于无火阈值的dB。最小的电流1.6mA被清楚的探测出。此电流符合MK1 EED 低于无火阈值的45 dB 点 (注解: 由于实际原因, 所有读取高于99dB 的都为强迫限定值).

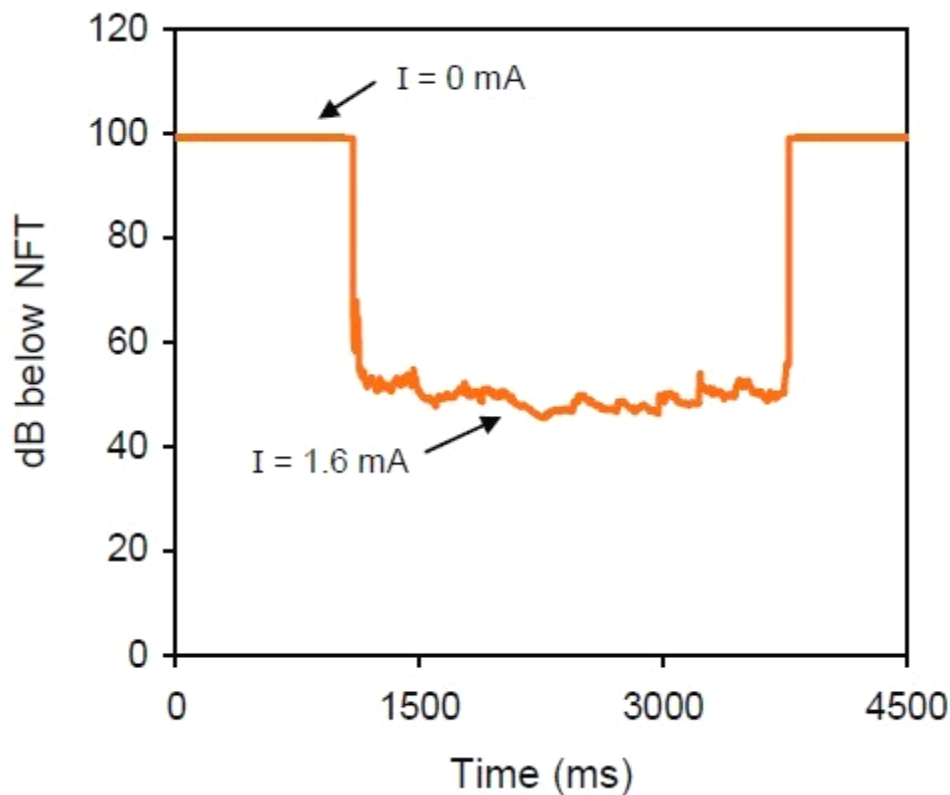


图13 最终的电流灵敏度

EEDS所用的OTG-R传感器响应时间为10ms或更小。EED/OTG-R装配的典型响应时间为375ms或更小。

3.4 自适应噪声去除过滤器

从可观察的物理量比如温度的信号获取，这总是与一些噪声相联系。通过进行电子模拟到数字滤波，噪声的强度会很大地减小。

如今，数字滤波器可以不通过模拟滤波而获得特征，它是信号处理应用的首选。信号解调器100%的数字电路和数字处理能力可以执行几乎所有类型的数字滤波器。

大多数普通的数字滤波器是运行平均滤波的，以去除测量信号的噪声成份。此数字滤波器的输出为平均值 N ， N 越大意味着噪声消除越好。平均滤波器是去除噪声的最好滤波器，然而此滤波器会伴随两个主要的缺点。第一个是此滤波器不是基于因果关系的，因此它总是产生信号延时（相当于 $N/2$ 采样时间）。所以更高的噪声消除性能伴随着更长的延时。第二个缺点是滤波器减弱了信号的高频部分；换言之滤波器跟踪不到快速的信号变化。如下解释，选择自适应滤波器可以消除这些缺点。

高性能数字噪声去除的自适应滤波器可以大大改善信号解调器的分辨率，没有折衷响应时间。自适应期间意味着滤波器能实时自我适应到各种信号解调器，选择最佳的滤波参数。自适应滤波器在此表现出一个真正的因果关系滤波器，在信号里不会引入额外的延时。同时此滤波器通过重要命令能够减少噪声，它仍然能响应信号高频部分最小衰减的快速信号变化。对于那些常见的数字滤波器，一个自适应滤波器被认为与一个分离的一阶低通滤波器一样，能连续地自我调整滤波时间。

图 14 清楚的说明了一个自适应滤波器相对于运行平均滤波器的杰出性能。蓝色曲线表现为原始的测量数据，即未滤过的。红色和暗蓝色分别表现运行平均和自适应滤波数据。从左边的温度没有很大变化的测量值（<2000ms），可以看出两种类型的滤波结果非常好，有相同的噪声移除功能。然而当信号快速变化的时候，这些滤波器的性能却完全不同。从左边第一个信号的峰值可以看出，平均滤波器不能跟踪信号的快速变化。

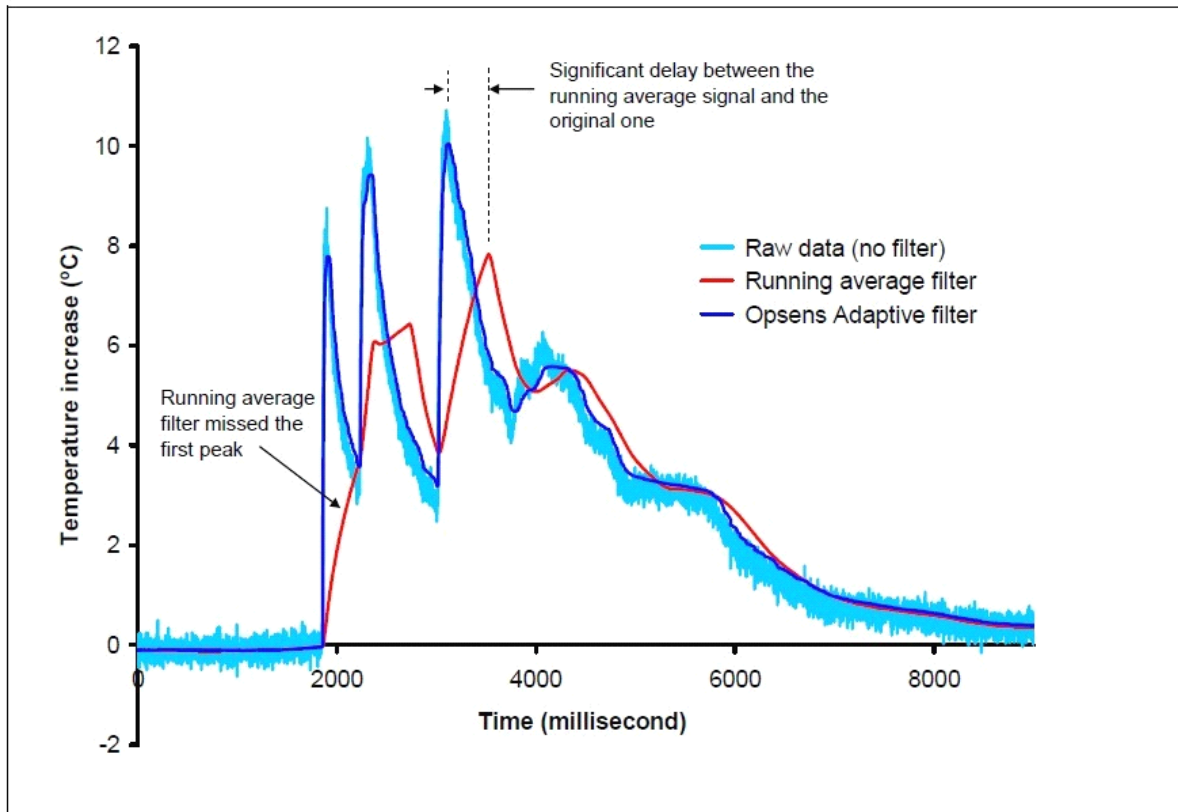


图14 噪声去除滤波器的性能

平均滤波器减弱了输入信号的高频部分，因此它输出正确原始信号的能力很差。同样值得诠释的是此滤波器输出信号的延时，从左边的第三个信号峰值中可看出，平均滤波器的输出信号峰值比原始信号峰值发生了数百毫秒的延时。另一方面，自适应滤波器跟踪快速的信号变化是没有问题的。这些测量显示了在输入原始数据和输出适当滤波信号之间没有重大延时和衰减。

3.5 嵌入式电流源和自动校准软件

在做任何测量之前，校准EEDs设备是强制执行的。当处理高质量的EED装置时，校准会是一个长时间和费劲的任务。一个嵌入式电流源与自动校准软件的组合提供了测试技巧，它是非常有效的EED校准工具。用此方法每个EED仪器可以始终如一的校准，只需很小的努力和错误风险。

一旦使用者确定了所需电流校准点的数量，特别设计的software就可以进行校准和自动校准电流平方敏感度 S_c ，像3.1章所描述的一样。校准结果将会被显示为数字或图表形式，并通过excel或其它格式保存。

4. 所有功能于一身的仪器

如今，当涉及到复杂的监测和测量应用时，一个真正的趋势是朝着所有功能于一身的仪器而发展。HERO/RADHAZ测试所需要最小数量的仪器是每一个关注此领域的人所渴望得到的。

每一步测量都使用不同的仪器（信号解调器，数据获取，数据处理，分析和管理等）会增加错误风险和结果的不一致。一个所有功能于一身的仪器应该提供以下特点：

- 在采样频率高达 1000 Hz下的数字信号处理和条件
- 车载电脑以实时获取和转移数据
- 友好的用户界面以便为重要的结果显示成数字和图形
- 整体的校准工具和软件
- 内部的数据过滤和分析
- 整体的数据存储以便本地数据管理
- PC 以太网接口实时数据下载和远程控制

友好的用户绘图界面可以在不同的数字和绘图形式下实时显示测量结果，顺着测量统计资料，测试人员可以马上确认继续测试，问题反馈还是有意外的结果（看下列图形）。

波形图显示

测量结果可以显示成线性的图形格式，
就像一个心电图(EKG display)，
每一个EED监控器用不同颜色标出
以做更好的数据比较。

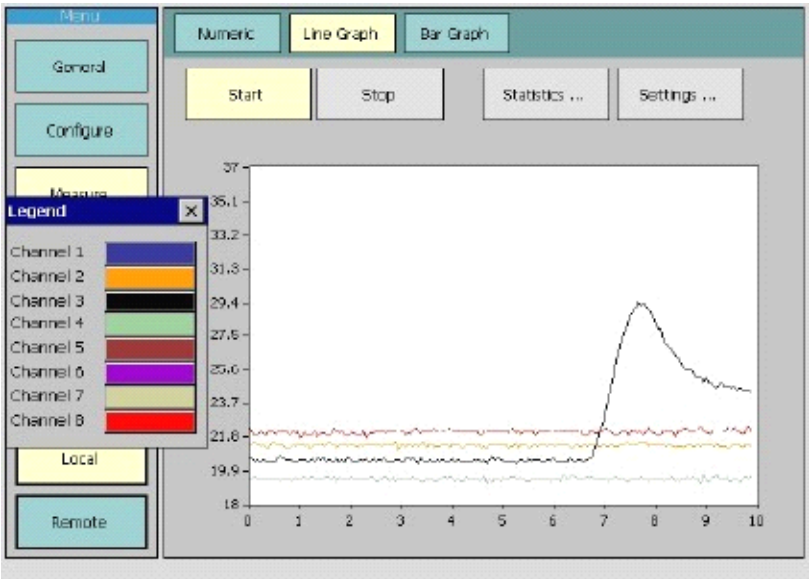


图15 波形图显示

条形图显示

测量结果可显示成柱形以表现峰值水平，
识别有问题的装配，使用者调整警告
水平标志。

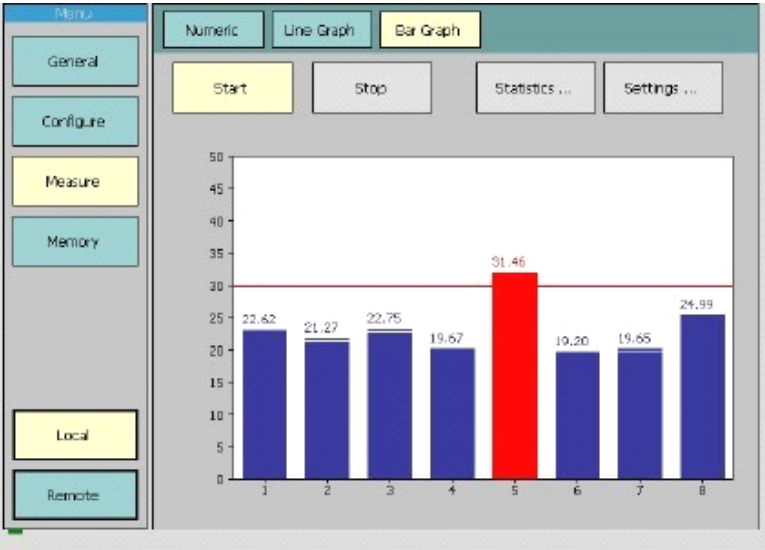


图16 条形图显示

测量统计

测量结果的统计资料被计算出和实时显示。
无信号的情况也可以跟踪。

Statistics							
#	Minimum	Position (s)	Maximum	Position (s)	Average	Deviation	NoSig?
1	18.1501	12	18.252	0.6	18.188	0.0286	No
2	19.9449	1.5	19.9615	9.6	19.953	0.0129	No
3	29.2735	9.6	29.3924	5.4	29.341	0.0301	No
4	-0.0047	5.7	0.0544	6.6	0.01	0.0137	No
5	25.1628	6.3	25.38	0	25.237	0.036	No
6	-0.02	0.3	-0.02	0	-0.02	0	No
7	-0.02	0.3	-0.02	0	-0.02	0	No
8	-	-	-	-	-	-	No

图17 测量统计

结论

成为一个成功的HERO测试员要求遵守明确的章程。如果不遵循灵敏和可靠的结果所需的基本要素，即使是最新的光纤感应技术解决方案也不能帮助您太多。这个解决方案要求精确和灵巧的传感器，容易安装到任何类型的EED。适应于军事级别的材料，感应方案应该提供精确的校准特性和不同单位的测量结果。

它必须能提供灵活的数据处理，实时读取和提供高效的噪声过滤特性以得到最佳结果。有内置的数据管理功能，一个随时准备使用的解决方案应该提供友好的用户界面而不需要增加模/数转换器，软件编程或计算机系统。

掌控所有这些步骤是HERO/RADHAZ测试灵活和可靠的结果所必需的。由于这种符合性验证，要求它不仅仅是一个测量工具，它需要确认毫无疑问，不会发生电子爆炸装置不想要的爆炸或故障。

参考

Duplain G., 2006, *Fiber Optic Sensor for assessment of bridge-wire electro-explosive devices (EED)*, Opsens presentation, UK revision

D. Mark Johnson, DoD Logistics AIT IPT 2005, *Hazards of electromagnetic radiation to ordnance concerns for wireless technologies*, Presentation NSWC, Dahlgren Division