

地震电磁扰动观测仪 校准规范

(测量不确定度评定报告)

归口单位：全国地震专用计量测试技术委员会

主要起草单位：中国地震局地震预测研究所

参加起草单位：江苏省地震局

甘肃省地震局

上海市地震局

目 录

1 概述	1
2 电压测量误差校准不确定性评定	1
2.1 校准方法	1
2.2 测量模型	1
2.3 不确定度来源分析	2
2.4 标准不确定度	2
2.5 合成标准不确定度	3
2.6 扩展不确定度	4
2.7 测量不确定度最后陈述	4
3 电压分辨力校准不确定度评定	5
3.1 校准方法	5
3.2 测量模型	5
3.3 不确定度来源分析	5
3.4 标准不确定度	5
3.5 合成标准不确定度	7
3.6 扩展不确定度	7
3.7 电压分辨力测量不确定度最后陈述	7
4 磁场灵敏度校准不确定度评定	7
4.1 校准方法	7
4.2 测量模型	8
4.3 不确定度来源分析	8
4.4 标准不确定度	8
4.5 合成相对不确定度	10
4.6 扩展相对不确定度	11
4.7 测量不确定度最后陈述	11
5 磁场噪声校准不确定度评定	11
5.1 校准方法	11
5.2 测量模型	12
5.3 不确定度来源分析	12
5.4 标准不确定度	12
5.5 合成标准不确定度	13
5.6 扩展不确定度	13
5.7 测量不确定度最后陈述	13

地震电磁扰动观测仪校准不确定度评定

1 概述

被校仪器以中国地震局地震预测研究所生产的 DCRD-II 型电磁扰动仪为例。该机数据采集器为 6 通道，采用 32 位 ADC，频率范围 DC~20Hz，测量范围为 -1200mV~+1200mV，配备磁传感器为应急部国家自然灾害防治研究院生产的 EMDS-1 型感应式磁传感器，频率范围 0.1Hz~20Hz。

测试环境的温度在 18℃-23℃，相对湿度均≤75%。电磁扰动观测仪数据采集器的测量标准采用多功能校准源；磁传感器的测量标准包括磁屏蔽装置、交变磁场复现系统、交流稳流电源、动态信号分析仪与交流电压表等；交变磁场复现系统在 100nT 量程复现磁场的扩展不确定度为 0.15%($k=2$)，工作区的最大干扰磁场不超过 0.3pT，动态信号分析仪的测量误差为±5%，磁屏蔽装置噪声小于 1pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @0.1Hz。

2 电压测量误差校准不确定性评定

2.1 校准方法

依据本校准规范中电压测量误差的校准方法，采用标准源法进行直接测量。以多功能校准源输出直流电压 1000mV 电磁扰动仪数据采集器 1 个通道的测量数据为例说明电压测量误差不确定度评定的程序，其他电压校准点的评定方法相同。

2.2 测量模型

设 V_N 为标准电压值，被校仪器对标准电压多次测量值的算术平均值 \bar{V} 为电压最终的测得值。根据使用说明书可知，对于多功能校准源和电磁扰动观测仪数据采集器，在标准条件下，温度、湿度等带来的影响可忽略，由此可得到：

$$\Delta V = \bar{V} - V_N \quad (1)$$

式中：

ΔV —被校仪器的电压测量误差，mV；

\bar{V} —被校仪器多次电压测量值的算术平均值；mV；

V_N —多功能校准源输出的直流电压标准值，mV。

考虑到被校仪器的电压测量分辨力对测量数据的影响，则最终的测量模型为：

$$\Delta V = \bar{V} - V_N + \delta V \quad (2)$$

式中：

ΔV —被校仪器的电压测量误差，mV；

\bar{V} —被校仪器多次电压测量值的算术平均值；mV；

V_N —多功能校准源输出的直流电压标准值，mV；

δV —被校仪器的电压测量分辨力对测量结果的影响，mV。

2.3 不确定度来源分析

电压测量误差的校准不确定度来源主要包括：

- a) 电压测量重复性引入的标准不确定度 $u_1(\bar{V})$ ；
- b) 多功能校准源引入的标准不确定度 $u_2(V_N)$ ；
- c) 被校仪器的电压测量分辨力引入的标准不确定度 $u_3(\delta V)$ ；

2.4 标准不确定度

2.4.1 由电压测量重复性引入的标准不确定度 $u_1(\bar{V})$

由电压测量重复性引入的标准不确定度（实验标准差）采用 A 类方法评定。多功能校准源输出直流电压 $V_N = 1000\text{mV}$ ，在相同环境条件下，重复测量 10 次，电磁扰动观测仪数据采集器第 1 通道获得测量数据见表 1。

表 1 通道 1 电压重复测量数据

测量次数	测量值 V_i/mV
1	999.972
2	999.971
3	999.971
4	999.972
5	999.972
6	999.972
7	999.973
8	999.972
9	999.972
10	999.973
平均值	999.972

根据贝塞尔公式计算多次测量数据的标准偏差：

$$s(V) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}{n-1}} = 0.001 \text{ mV} \quad (3)$$

式中：

$s(V)$ —被校仪器单次电压测量值的标准偏差，mV

V_i —被校仪器第 i 次的电压测量值，mV；

\bar{V} —被校仪器多次电压测量值的算术平均值，mV；

n —重复测量的次数，此处 $n=10$ 。

2.4.2 由多功能校准源引入的标准不确定度 $u_2(V_N)$

由多功能校准源引入的标准不确定度用 B 类方法评定。校准中使用的 FULKE5730 多功能校准源，查阅其校准证书，在输出直流电压为 1000mV 时的扩展测量不确定度 $U_N=3\mu\text{V}$ ($k=2$)，因此，由多功能校准源引入的标准不确定度为：

$$u_2(V_N) = \frac{U_N}{k} = 0.002 \text{ mV} \quad (45)$$

2.4.3 由被校仪器的电压测量分辨力引入的标准不确定度 $u_3(\delta V)$

由被校仪器的电压测量分辨力引入的标准不确定度用 B 类方法评定。根据说明书已知被校仪器的电压测量分辨力 $\delta=0.01\text{mV}$ 。

记 e_δ 为电压测量分辨力的区间半宽度，则 $e_\delta = \frac{\delta V}{2} = 0.005\text{mV}$ ，在区间范围内认为其服从均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。因此，由电压测量分辨力引入的标准不确定度为：

$$u_3(\delta V) = \frac{e_\delta}{k} \approx 0.003 \text{ mV} \quad (5)$$

2.5 合成标准不确定度

2.5.1 不确定度分量汇总表

不确定度分量汇总见表 2。

表 2 电压测量误差校准不确定度分量表

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	分布类型	标准不确定度值/mV
$u_1(\bar{V})$	电压测量重复性引入	A 类	正态分布	0.001
$u_2(V_N)$	多功能校准源引入	B 类	均匀分布	0.002
$u_3(\delta V)$	电压测量分辨力引入	B 类	均匀分布	0.003

2.5.2 合成标准不确定度

各输入量之间都是相互独立的，因此可以直接按照方和根的方法计算合成标准不确定度。但是由于在计算测量重复性引入的不确定度时所用的每一个测量数据都已受到了电压分辨力的影响，从而在 $u_1(\bar{V})$ 中已包含了电压测量分辨力效应导致的结果，即重复性和分辨力引入的不确定度存在重复，这种情况下，在合成时一般取 $u_1(\bar{V})$ 、 $u_3(\delta V)$ 二者中较大的值与由多功能校准源引入的标准不确定度 $u_2(V_N)$ 进行计算。因此，合成标准不确定度为：

$$u_c(\Delta V) = \sqrt{[u_2(V_N)]^2 + [u_3(\delta V)]^2} = \sqrt{(0.002)^2 + (0.003)^2} \approx 0.004 \text{ mV} \quad (6)$$

2.6 扩展不确定度

选取包含因子 $k=2$ ，则当标准电压 $V_N=1000\text{mV}$ 时，被校仪器电压测量误差的扩展不确定度为：

$$U(\Delta V) = k \times u_c(\Delta V) \approx 2 \times 0.004 = 0.008 \text{ mV} \quad (7)$$

2.7 测量不确定度最后陈述

用标准源法对 DCRD-II 型电磁扰动仪进行直流电压测量误差的校准，在标准电压为 1000mV 时其校准结果的测量扩展不确定度为 $U=0.008\text{mV}$ ($k=2$)。

DCRD-II 电磁扰动仪的电压测量最大允许误差 $E_{\max} = |0.5\% \text{ 读数} + 0.1\% \text{ 满度值}| = 6 \text{ mV}$ 。可知，上述评定的电磁扰动仪电压测量误差的测量不确定度远小于其电压测量最大允许误差的三分之一，结果表明规范中给出的电磁扰动仪电压测量误差的校准方法正确可行。

3 电压分辨力校准不确定度评定

3.1 校准方法

依据本校准规范 7.2.3 中电压分辨力的校准方法，设校准点为 100mV，记录多功能校准源输出校准点电压时的 10 次示值 V_i 。以被校仪器电压分辨力 10 μ V 为步进量，多功能校准源输出标准值 100mV+10 μ V，实际标准增量为 10 μ V，记录 10 次测量被校地电场仪示值 V_i' 。

3.2 测量模型

设校准点 10 次测量值的算术平均值作为测得值 \bar{V} ，校准点增加 10 μ V 后 10 次测量值的算术平均值作为测得值 \bar{V}' 。查阅多功能校准源校准证书和电磁扰动观测仪的使用说明书可知，在标准条件下，温度、湿度等带来的影响可忽略，由此可得到电压测量分辨力的测量模型为：

$$\Delta V = \bar{V}' - \bar{V} \quad (8)$$

式中：

\bar{V} —校准点10次电压测量平均值，mV；

\bar{V}' —增加10 μ V后10次电压测量平均值，mV；

ΔV —实测电压增量值，mV。

3.3 不确定度来源分析

电压分辨力的校准不确定度来源主要包括：

- a) 两次电压测量重复性引入的标准不确定度 $u_1(\bar{V})$ ；
- b) 两次测量多功能校准源引入的标准不确定度 $u_2(V_N)$ ；

3.4 标准不确定度

3.4.1 由两次测量重复性引入的标准不确定度 u_1

在相同环境条件下，重复测量 10 次，将由测量重复性引入不确定度，测量结果见表 3。

表 3 重复测量数据

测量次数	校准点测量值	校准点+10 μ V 测量值
1	99.992	100.000

2	99.991	100.001
3	99.991	100.000
4	99.991	100.001
5	99.991	100.000
6	99.992	100.002
7	99.992	100.000
8	99.992	100.001
9	99.993	100.002
10	99.992	100.001
平均值	99.992	100.001

单次测量时，测量结果的实验标准偏差：

$$s(V) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (V_i - \bar{V})^2}{n-1}} = 0.74 \mu V \quad (9)$$

$$s(V_1) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (V_i - \bar{V})^2}{n-1}} = 0.82 \mu V \quad (10)$$

两次测量相互独立的，因此可以直接按照方和根的方法计算测量重复性引入的标准不确定度 u_1 。合成标准不确定度为：

$$u_1(\Delta V) = \sqrt{[s(V)]^2 + [s(V_1)]^2} = \sqrt{(0.74 \mu V)^2 + (0.82 \mu V)^2} \approx 1.1 \mu V \quad (11)$$

3.4.2 由多功能校准源引入的标准不确定度 u_2

多功能校准源的校准证书中给出 100mV 校准点的不确定度为 $0.7 \mu V$ 。

校准证书中提供的测量不确定度（扩展不确定度）除以其包含因子（k 值为 2），得到多功能校准源引入的标准不确定度：

$$u_2(V) = \frac{0.7 \times 10^{-3} mV}{2} \approx 0.35 \mu V \quad (12)$$

两次测量均使用同一多功能校准源，各次测量是相互独立的，因此可以直接按照方和根的方法计算多功能校准源引入的标准不确定度 u_2 。合成标准不确定度为：

$$u_2(\Delta V) = \sqrt{[u_2(V)]^2 + [u_2(V_1)]^2} = \sqrt{(0.35 \mu V)^2 + (0.35 \mu V)^2} \approx 0.49 \mu V \quad (13)$$

3.5 合成标准不确定度

表 4 电压分辨力不确定度分量表

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	分布类型	标准不确定度值/ μV
$u_1(\Delta V)$	电压测量重复性引入	A 类	正态分布	1.1
$u_2(\Delta V)$	多功能校准源引入	B 类	正态分布	0.49

合成标准不确定度为：

$$u_c(\Delta V) = \sqrt{[u_1(\Delta V)]^2 + [u_2(\Delta V)]^2} = \sqrt{(1.1 \mu V)^2 + (0.49 \mu V)^2} \approx 1.2 \mu V \quad (14)$$

3.6 扩展不确定度

选取包含因子 $k=2$ ，则当校准点为 100mV 时，被校仪器电压分辨力的扩展不确定度为：

$$U(\Delta V) = k \times u_c(\Delta V) = 2 \times 1.2 \mu V \approx 2.4 \mu V \quad (15)$$

3.7 电压分辨力测量不确定度最后陈述

采用标准源法对 DCRD-II 型电磁扰动仪数据采集器进行电压分辨力的校准，在标准电压为 100mV 时其 ΔV 的校准结果为 $9 \pm 2.4 \mu V$ ，测量扩展不确定度为 $U(\Delta V)=2.4 \mu V$ ($k=2$)。

DCRD-II 电磁扰动仪电压分辨力在 $\Delta V = 10 \pm 5 \mu V$ 内变化，说明该校准方法合理。

4 磁场灵敏度校准不确定度评定

4.1 校准方法

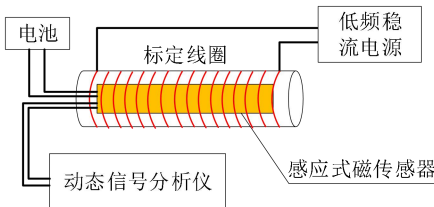


图 1 磁场灵敏度校准系统

依据本校准规范 7.2.4 中磁场灵敏度的校准方法,校准系统连接示意图如图 1 所示,测试频点以 0.1Hz 为例,标定线圈与低频稳流电源共同构成交变磁场复现系统,磁场校准点为 93.2nT,交变磁场复现系统在 100nT 量程复现磁场的扩展不确定度为 0.15%($k=2$),交变磁场复现系统工作区的最大干扰磁场不超过 0.3pT,动态信号分析仪的测量误差为 $\pm 5\%$ 。

4.2 测量模型

磁场灵敏度的测量模型为:

$$C_{Bx} = \frac{U_x}{B_0} \cos\theta \quad (16)$$

各输入量的不确定度之间不相关,磁场灵敏度校准的相对不确定度为:

$$u_{cr}(C_{Bx}) = \sqrt{u_r^2(U_x) + u_r^2(B_0) + u_r^2(\theta)} \quad (17)$$

4.3 不确定度来源分析

- a) 电压测量不准引入的不确定度分量 $u_r(U_x)$:
 - 1) 由被校感应式磁传感器测量重复性引入的不确定度分量 $u_{r,1}(U_x)$;
 - 2) 动态信号分析仪电压测量引入的不确定度分量 $u_{r,2}(U_x)$;
- b) 磁场测量不准引入的不确定度分量 $u_r(B_0)$
 - 1) 由交变磁场复现系统引入的不确定度分量 $u_{r,1}(B_0)$;
 - 2) 由工作区干扰磁场引入的不确定度分量 $u_{r,2}(B_0)$;
- c) 磁轴对不齐引入的测量不确定度分量 $u_r(\theta)$ 。

4.4 标准不确定度

4.4.1 电压测量不准引入的测量不确定度分量 $u_r(U_x)$

4.4.1.1 由被校感应式磁传感器测量重复性引入的不确定度分量 $u_{r,1}(U_x)$

磁场灵敏度的测量重复性用实验标准偏差表示,重复测量 10 次,采用 A 类评定方法,重复性测量数据见表 5 所示。

表 5 重复性测量数据

测量次数	输出电压 U_x/mV
1	883.211
2	883.681
3	883.781
4	883.726
5	883.808
6	883.938
7	883.927
8	884.088
9	884.185
10	884.037
平均值	883.838

单次测量时，由被校感应式磁传感器测量重复性引入的不确定度分量为

$$u_{r,1}(U_x) = \frac{s(U_x)}{\bar{U}_x} \times 100\% = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_{xi} - \bar{U}_x)^2}{n-1}} \frac{1}{\bar{U}_x} \approx 0.03\% \quad (18)$$

4.4.1.2 由动态信号分析仪电压测量引入的不确定度分量 $u_{r,2}(U_x)$

动态信号分析仪的测量误差为 $\pm 5\%$ ，按均匀分布，取 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_{r,2}(U_x) = \frac{5\%}{\sqrt{3}} \approx 2.89\% \quad (19)$$

4.4.1.3 电压测量不准引入的测量不确定度分量 $u_r(U_x)$

被校感应式磁传感器的测量重复性和动态信号分析仪的频谱幅度示值误差引入的不确定度分量，各分量不相关，则电压测量不准引入的不确定度分量为：

$$u_r(U_x) = \sqrt{u_{r,1}^2(U_x) + u_{r,2}^2(U_x)} \approx 2.89\% \quad (20)$$

4.4.2 由标准磁场不准引入的测量不确定度分量 $u_r(B_0)$

4.4.2.1 由交变磁场复现系统复现磁场不准引入的不确定度分量 $u_{r,1}(B_0)$

交变磁场复现系统复现 93.2nT 磁场的不确定度为 0.15%($k=2$), 则:

$$u_{r,1}(B_0) = \frac{0.15\%}{2} \approx 0.08\% \quad (21)$$

4.4.2.2 由工作区干扰磁场引入的不确定度分量 $u_{r,2}(B_0)$

交变磁场复现系统工作区的最大干扰磁场不超过 0.3pT, 按均匀分布考虑, 取 $k = \sqrt{3}$, 则:

$$u_{r,1}(B_0) = \frac{\delta B}{\sqrt{3}B_0} \times 100\% = \frac{0.3pT}{\sqrt{3} \times 100nT} \times 100\% \approx 0.00017\% \quad (22)$$

4.4.2.3 由标准磁场不准引入的测量不确定度分量 $u_r(B_0)$

交变磁场复现系统复现磁场和工作区干扰磁场作为标准磁场不准引入的不确定度分量, 各分量不相关, 但由于干扰磁场在 93.2nT 磁场点所引起的不确定度分量可忽略不计, 故由标准磁场不准引入的测量不确定度分量值为:

$$u_r(B_0) \approx u_{r,1}(B_0) = 0.08\% \quad (23)$$

4.4.3 由磁轴对不齐引入的测量不确定度 $u_r(\theta)$

被校磁传感器探头与交变磁场复现系统的磁轴对齐不准一般不会超过 1 度, θ 按均匀分布考虑, $1-\cos \theta$ 服从投影分布, $k=10/3$, 则:

$$U_r(\theta) = \frac{1-\cos(\theta)}{10/3} \times 100\% = \frac{1-\cos(1^\circ)}{10/3} \times 100\% \approx 0.005\% \quad (24)$$

4.5 合成相对不确定度

4.5.1 不确定度分量汇总表

不确定度分量汇总见表 6。

表 6 磁传感器灵敏度测量不确定度分量表

不确定度分量	不确定度来源	不确定度分量值
$u_r(U_x)$	电压测量不准	2.89%
$u_r(B_0)$	标准磁场不准	0.08%
$u_r(\theta)$	磁轴对齐不准	0.005%

4.5.2 合成相对测量不确定度

各不确定度分量间不相关，则感应式磁传感器的灵敏度校准的相对合成标准不确定度为：

$$u_{cr}(C_{Bx}) = \sqrt{[u_r(U_x)]^2 + [u_r(B_0)]^2 + [u_r(\theta)]^2} \\ = \sqrt{(0.29\%)^2 + (0.08\%)^2 + (0.005\%)^2} \approx 2.89\% \quad (25)$$

4.6 扩展相对不确定度

选取包含因子 $k=2$ ，则频率在 0.1Hz，磁场在 93.2nT 点时，被测磁传感器灵敏度的相对扩展不确定度为：

$$U_r(C_{Bx}) = k \times u_{cr}(C_{Bx}) \approx 5.78\% \quad (26)$$

4.7 测量不确定度最后陈述

在 0.1Hz、93.2nT 的磁场强度下被测感应式磁传感器的磁场灵敏度为：

$$C_{Bx} = \frac{883.838}{93.2} \approx 9.48 \text{ mV/nT} \quad (27)$$

相对扩展不确定度为：

$$U_r(C_{Bx}) = 5.78\% \quad (k = 2) \quad (28)$$

5 磁场噪声校准不确定度评定

5.1 校准方法

依据本校准规范7.2.5中磁场噪声的校准方法，校准频点以0.1Hz为例，将感应式磁传感器置于磁屏蔽空间的工作区中，用电池供电，动态信号分析仪分析模式测量误差为5%，设置工作模式为功率谱分析，分析频率范围设为0.1Hz~20Hz，分析时长不少于60s，窗函数选择汉宁窗，平均次数10，计量单位 V_{rms}/\sqrt{Hz} ，已知感应式磁传感器在0.1Hz处的磁场灵敏度为9.48mV/nT，扩展不确定度为0.6% ($k=2$)。

5.2 测量模型

感应式磁传感器的磁场噪声测试模型为：

$$S_B = \frac{S_U}{C} \quad (29)$$

式中：

S_U 为0.1Hz处的电压噪声功率谱密度， C 为磁传感器在0.1Hz频点处的磁场灵敏度系数。

5.3 不确定度来源分析

感应式磁传感器噪声测量不确定度主要来自：

- a) 动态信号分析仪测量不准引入的测量不确定度；
- b) 磁屏蔽装置噪声引入的测量不确定度；
- c) 磁传感器灵敏度系数不准引入的测量不确定度。

5.4 标准不确定度

5.4.1 动态信号分析仪测量结果引入的测量不确定度 $u(U)$

动态信号分析仪的测量误差为5%，按均匀分布考虑，则由动态信号分析仪引入的相对不确定度为 $u_r = 5\% / \sqrt{3} = 2.89\%$ ，该频点处的电压噪声功率谱密度取10次结果的算术平均值。

表7 磁场噪声重复测量结果

测量次数	电压噪声 $S(U_x)/\text{mV}/\sqrt{\text{Hz}}$
1	0.0958
2	0.1081
3	0.036
4	0.053
5	0.114
6	0.2704
7	0.2033

8	0.0892
9	0.0717
10	0.1159
平均值	0.1157

该频点处的噪声为：

$$S = 115.7 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}} / 9.48 \text{mV/nT} \approx 12.2 \text{pT}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (30)$$

因此由动态信号分析仪引入的不确定度为 $u(U) = 12.2 \times 2.89\% = 0.35 \text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

5.4.2 磁屏蔽空间噪声引入的测量不确定度 $u(B)$

磁屏蔽空间在 0.1Hz 处的噪声大小为 $1 \text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 则：

$$u(B) = 1/\sqrt{3} = 0.577 \text{pT}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (31)$$

5.4.3 磁传感器灵敏度系数的误差引入的测量不确定度 $u(C)$

磁传感器在 0.1Hz 频率处的磁场灵敏度取 9.48mV/nT ，扩展不确定度 5.78% ($k=2$)，由于磁场噪声与磁场灵敏度成反比，由灵敏度不确定度引起的磁场噪声不确定度同为 5.78% ($k=2$)，则：

$$u(C) = 12.2 \times 5.78\% / 2 = 0.35 \text{pT}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (32)$$

5.5 合成标准不确定度

各不确定度分量不相关，则磁场噪声校准的合成标准不确定度为：

$$u_c(S) = \sqrt{u^2(U) + u^2(B) + u^2(C)} \approx 0.76 \text{pT}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (33)$$

5.6 扩展不确定度

取 $k=2$ ，则感应式磁传感器磁场噪声的扩展不确定度为：

$$U(S) = k u_c(S) \approx 1.52 \text{pT}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (34)$$

5.7 测量不确定度最后陈述

被测感应式磁传感器在 0.1Hz 频率处的磁场噪声扩展不确定度为：

$$U(S) = 1.52pT/\sqrt{Hz} \quad (k=2)。$$
(35)