

使用TBCPx射频电流监控探头 如何外推辐射电场强度

（使用射频电流监测探头 - 测量辐射电场强度）

1. 介绍

携带传导噪声的信号和电源电缆充当天线，从而导致辐射发射。

亨利·奥夫特（Henry Ott）和克莱顿·保罗（Clayton Paul）提出了一种将射频电流探头测量值转换为由携带射频电流的电缆辐射电场强度的方法。它是对“天线理论-分析和设计”（C.Balanis）中所概述的全部处理方法的推导和简化。

本应用说明基于 EMC FASTPASS 的 AndyEadie 网站上的一篇文章。应用说明，说明了如何使用 Tekbox EMCview 软件应用此方法。它自动创建辐射发射图，转换使用射频电流探头和频谱分析仪进行的共模电流传导噪声测量。

// 引用文章：电流探头一致性预测试指南 //

在将其发送到 EMC 测试实验室之前。它快速、简单，并且与完全合规的辐射发射测量具有很强的相关性。

它可以高度准确地告诉您产品是否可能通过或失败。那你为什么不使用这个呢？

在本文中，我们将学习：

- 什么是电流探头？
- 什么是共模电流？
- 电流探头的电场外推有多准确？
- 所需的测试设备
- 如何进行测量
- 如何推断电场强度
- 快速确定通过/失败电子表格工具

什么是电流探头？



电流探头本质上是射频电流互感器。如果您想象一个具有隔离的初级和次级绕组的标准变压器，则电流探头相当于其中一个绕组侧。

当探头夹在电缆上时，导体可以被认为初级绕组（单匝），而探头的绕组是次级绕组。电流探头通过互耦合电感拾取的是电缆中变化的射频电流产生的磁通量。

电流测量是通过让载流导体穿过探头的孔径进行的，探头的输出电压是使用频谱分析仪（或场强计）测量的。

然后可以使用传输阻抗数据（随任何特征化探头提供）将分析仪的读数转换为电流，如下所示：

$$\text{dB}\mu\text{A} = \text{dB}\mu\text{V} - \text{传输阻抗 (dB}\Omega\text{)}$$

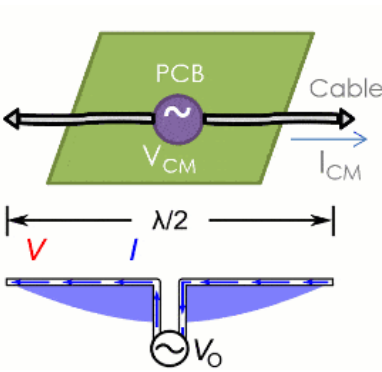
您可以使用环形铁氧体、一些电线和 BNC 连接器制作您自己的探头，但现在 TekBox 等低成本供应商以低于传统价格 50% 的价格提供这些探头，变得更难证明制作和表征探头的时间是合理的。我们将很快介绍如何将其转换为远场电场强度测量

电流探头为什么如此有用？

在您可能进行的所有各种类型的 EMC 测量中，共模电流测量是最有用的。

要使预合规工具有用，理想情况下它需要与最终合规测量密切相关。电流探头是我们拥有的为数不多的可用于准确预测最终测量值的工具之一。

原因是辐射发射测试（高达几百 MHz）的主要故障是外部电缆上的共模电流。



像 Henry Ott 的“电磁兼容性工程”这样的巨著经常引用大约 5-15uA 的测量电流等同于辐射发射故障的指导方针。但这在很大程度上取决于发射频率、您使用的测试标准的限制以及电缆的长度。我们将在本文后面查看这些变量。

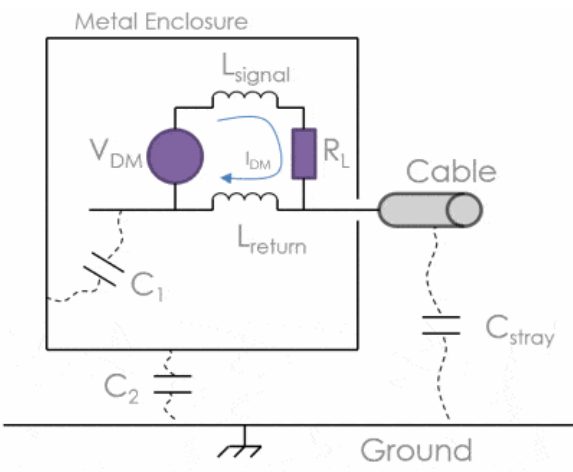
电缆是非常好的辐射器，因为它们通常是给定设备中最长的导电结构，这使得它们在辐射无线电波方面相对更有效。

如果我们想有意辐射能量，我们会使用天线，而非常标准的天线配置是半波偶极子。当偶极子元件恰好是波长的 1/2 时，会出现最大辐射效率（以及其他标准），因为这允许尖端与尖端之间存在最大电压差。

我们的外部电缆开始看起来很像天线，驱动源是位于中心的电路。驱动源可能是连接到两条电缆上的电缆屏蔽层的嘈杂接地层。

什么是共模电流？

与硬件设计相关的共模电流可以被认为是“流过”存在于产品和外部世界导电结构之间的寄生电容的不需要的电流。



DM 差模 到 CM 共模转换（电流驱动模型）

为了避免违反基尔霍夫电流定律，电流环路仍然存在，只是电流环路包括外部结构（例如建筑物导管、地平面、金属柜等）和寄生电容。

如左图所示，对共模电流建模的一种方法是采用有意驱动的差模电压源（例如 CMOS 栅极驱动器）并将其转换为等效的共模电流。该模型称为电流驱动源模型，共模电流的近似值可使用等式计算：

$$I_{CM} = -\frac{\omega^2 c L_{return} V_{DM}}{R}$$

CM 电流近似

增加电路板上“Lreturn /L 回路”系数的最常见方法之一是在相邻层的参考平面中的切口上运行数字开关信号。根据定义，增加返回电流的路径长度和环路面积会增加返回路径中的局部电感。

将测量值外推到电场强度的准确度如何？

首先要记住的是，即使在两个经认可的 EMC 测试机构之间，辐射发射测量的差异也可能非常大。例如，FCC 规定的最大 NSA（标准化站点衰减调查）偏差为 +/- 4dB（因此测试站点之间的结果可能相差 8 dB）。实际上，它可能比这更高。

如果一种方法可以在经过认可的测试站点进行的测量中达到 +/- 4dB 以内，那么该方法与另一个经过认可的测试站点一样好。

3 种不同的外推法

M. Aschenberg 和 C. Grasso 的论文“[共模电流辐射 - 超过 1 GHz](#)”探讨了 3 种外推方法，并将它们与辐射发射测量的相关性进行了比较。

方法#1：标准方法

这是 H. Ott 和 C. Paul 在他们的教科书中概述的方法。它是“天线理论 – 分析与设计”（C. Balanis）中概述的完整处理的推导/简化。

$$E = \frac{4\pi \times 10^{-7} (f \times I \times L) \sin\theta}{r}$$

电场强度计算 (*)

虽然它的使用和应用非常简单，但这种方法的局限性在于它假设所涉及的电缆在电气上很小，也就是说它们的长度不是波长的重要部分。

随着发射频率的增加，波长变得更小，并且电缆成为该波长的更重要部分。这使得 100MHz - 200MHz 以上的相关性越来越不准确。

不能说随着电缆长度增加到无穷大，辐射会不断恶化。实际上，当电缆长度接近噪声频率的 1/2 波长时，电缆“峰值”上的共模电流引起的发射。

(*)

f = 频率 (Hz)

I = 共模电流 (A)

L = 电缆长度 (m)

r = 测量距离 (m)

$\theta = \pi/2$

使用 1m 电缆时，此方法在大约 200 MHz 之前都非常准确。

方法 #2: Balanis – 细线偶极子

Constantine Balanis 在“天线理论 – 分析与设计”中描述了一种更准确的方法，它不包括近似值，例如上面方法 #1 中使用的那些。

不幸的是，这种方法引入了复杂性，例如地平面和电缆角度的影响，使其在现实生活中不切实际。

这种方法在超过 1 GHz 的频率范围内是准确的，但缺点是复杂性相当高，无法实现。

方法#3: 高原

M.Aschenberg 和 C.Grasso 在 [“共模电流辐射-超过 1 GHz”](#) 中描述了方法 #1 和方法 #2 的混合，它基本上截断了最大电缆长度 $\lambda/2$ 处的转换因子。此时，电缆长度的任何增加都不会增加计算出的电场强度。

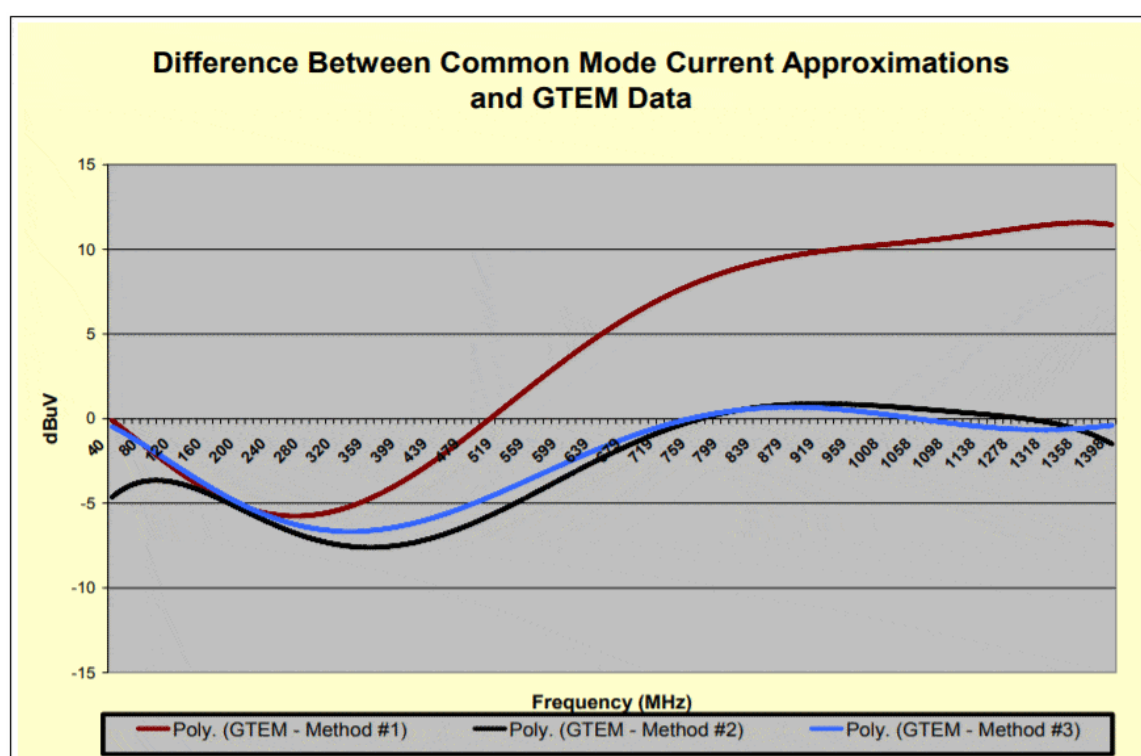
观察我增加下面的电缆长度，看看测量的电场强度如何增加直到电缆长度超过 $\lambda/2$ 。请注意，当电缆长度从 1m -> 2m 增加时，只有较低频率的发射增加，然后从 2m -> 3m 时发射都不会增加。

对方法 #1 的这种简单修改极大地提高了 200 MHz 以上的相关性，并将其与更复杂的 Balanis 方法相差几个 dB 以内。

该方法基于 EMCview 软件完成。

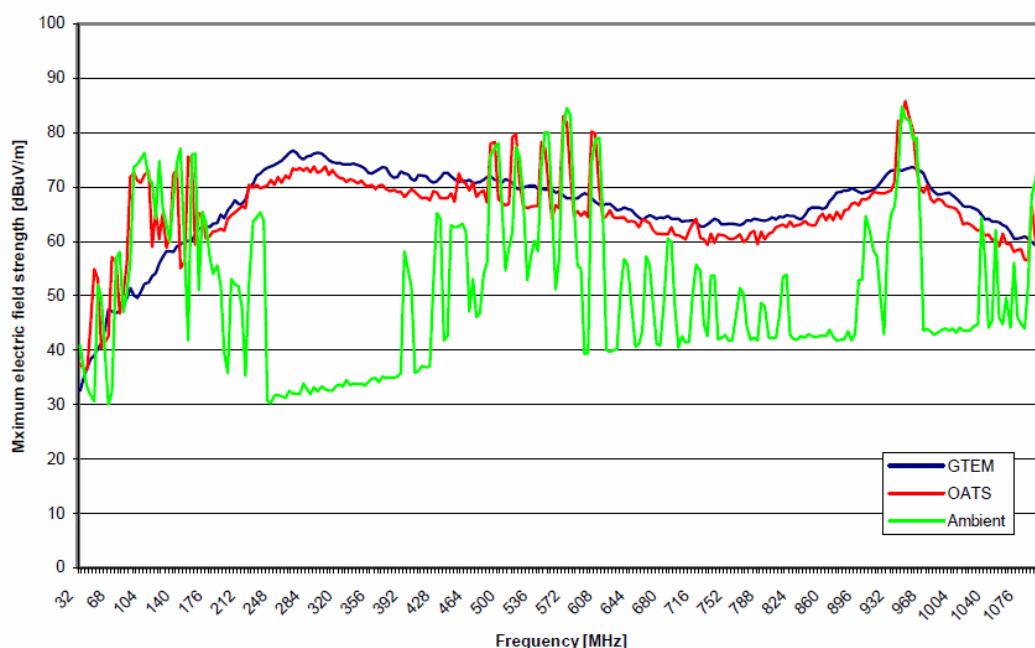
3 种方法的比较

使用噪声源和 GTEM 测量进行比较，我们可以看到方法 #3 与 GTEM 辐射测量具有极好的相关性。在大多数情况下，方法 #3 和 GTEM 测量之间的偏差在 +2dB/-7dB 以内！当您回想起经认可的实验室 NSA 偏差为 +/- 4dB 时，还算不错。



值得注意的是，GTEM 测量与 OATS 或腔室测量有其自身的相关性。下图摘自 National Physical Laboratory 和 York EMC Services Ltd 的 GTEM 室在电磁兼容测量中的应用。

如果使用得当，GTEM 可以提供与 OATS 或腔室非常好的相关性，因此上面的比较可以被视为有效。



使用 CNEIII 噪声源的 GTEM 与 10M OATS 比较 (来源)

随着频率的增加有用

随着噪声频率的增加，它们的波长会减小。例如，在 1 GHz 时， $\lambda/2 = 15 \text{ cm}$ 。在这些波长下，电路板上的外壳和导电结构本身可以成为非常高效的天线。因此我们可以说，随着频率的增加，外部布线上的共模电流在整体故障模式中所占的比例变小。

$$E = \frac{131.6 \times 10^{-16} (f^2 \times A \times I) \sin \theta}{r}$$

差模电流源的电场外推

随着频率的增加，电流探头预一致性方法变得不太有用的另一个原因是，所需的差模电流源开始在几百 MHz 及以上的区域中充当更高效的天线。原因是在左侧显示的外推方程中有一个

“f 平方”项。当频率达到大约 500-700 MHz 时，“f 平方”项胜过共模外推法的线性“f”项，具体取决于环路面积和所涉及的电流。

这并不是说如果您在 1 GHz 下测量电缆上的共模电流并且推断的电场强度大于限制，您就不会通过辐射发射测试。你可能会。这只是意味着您将捕获到几百 MHz 以上的较低百分比的故障，因为这些故障中的更多与外部电缆上的共模电流无关。

最终，电流探头方法的频率上限可能由您选择的探头的传输阻抗决定。大多数探头的灵敏度高达几百 MHz，尽管有些探头可扩展到 1 GHz 甚至更高。但是，如果灵敏度太低，那么在某些时候测量值会下降到分析仪的本底噪声以下。

作为一般准则，我建议使用电流探头测量 30 MHz 至 ~500 MHz 之间的共模电流。

如何使用电流探头进行精确测量

以下是测试程序和计算的摘要：

1. 将您选择的探头夹在电缆上。
2. 使用气泡膜或其他非导电材料将电缆居中放置在探测孔中。
3. 沿着电缆来回移动探头以找到最大读数。
4. 以 dBuV 为单位读取分析仪屏幕。
5. 使用以下公式计算 dBμA: **$\text{dB}\mu\text{A} = \text{dB}\mu\text{V} - \text{传输阻抗 (dB}\Omega\text{)}$** 。
6. 使用以下公式将 dBμA 转换为 A: **$10^{((\text{dB}\mu\text{A}-120)/20)}$** 。这给你 I(cm)。
7. 将 I(cm) 代入此等式 (上面的方法 #1) 以获得以 V/m 为单位的电场:
8.
$$E = \frac{4\pi \times 10^{-7}(f \times I \times L)\sin\theta}{r}$$
9. **使用 $20 \cdot \log(I(\text{cm}))+120$ 将 V/m 转换为 dBuV/m 。**
10. 与标准中噪声频率的场强限制进行比较。例如, FCC 15.109 中定义的那些。

如果您设置电子表格, 计算就很容易完成, 但我发现考虑每个特定噪声频率下的探头传输阻抗和发射限制需要时间并导致一些错误。这就是为什么我开发了一个更复杂的电子表格工具, 允许您输入频率范围内的探头特性, 以及选择外推方法和相关的测量距离和限制。

我们的射频电流监测探头和 EMCview 可配合完成外推辐射电场强度.

// 引用结束

2. 数学知识 (电流场转换电压场-转换公式)

公式:
$$E = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}(f \cdot I \cdot L)\sin\theta}{r}$$

E = 电场强度【V/m】

f = 频率【MHz】

I = 电流【A】

L = 电缆长度【米】

r = 测量距离【m】

$\Theta = \pi/2$

根据 Andy Eadie 的文章, 这个公式可以在 1 米电缆的情况下提供非常精确的结果, 直到大约 200 MHz。由于我们的辐射限值以 dBμV/m 为单位, 并使用频谱分析仪测量射频电流, 因此我们必须将公式转换

为更实用的形式。

用其对数当量代替场强和射频电流：

$$E [V/m] = 10^{(E [dB\mu V/m] - 120)/20}$$

$$I [A] = 10^{(I [dB\mu A] - 120)/20}$$

将其插入公式：

$$10^{(E [dB\mu V/m] - 120)/20} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} (f \cdot L) \cdot 1}{r} \cdot 10^{(I [dB\mu A] - 120)/20}$$

将对数应用于公式：

$$\log(10^{(E [dB\mu V/m] - 120)/20}) = \log\left(\frac{4\pi \cdot 10^{-7} (f \cdot L) \cdot 1}{r}\right) + \log(10^{(I [dB\mu A] - 120)/20})$$

应用对数规则：

$$E [dB\mu V/m] = I [dB\mu A] + 20 \log\left(\frac{4\pi \cdot 10^{-7} (f \cdot L)}{r}\right)$$

用 U 代替 I，U 是 RF 电流探针的输出电压，Z 是电流探针的跨阻：

$$E [dB\mu V/m] = U [dB\mu V] - Z [dB\Omega] + 20 \log\left(\frac{4\pi \cdot 10^{-7} (f \cdot L)}{r}\right)$$

3. 使用 EMCview 测量电缆电流并显示辐射发射

该公式被转换为三个对数项的总和，现在可以通过 EMCview 轻松处理：

U[dBμV]是由频谱分析仪测量的射频电流探头输出电压

Z[dBΩ]是电流探头的跨阻（传输阻抗）与频率的关系文件

$20 \log\left(\frac{4\pi \cdot 10^{-7} (f \cdot L)}{r}\right)$ 是“电缆电流与辐射场强的转换系数”

使用 Excel 计算一系列频率点以及电缆长度和测量距离的所需值。接下来，将其转换为文本格式的电缆电流到辐射发射转换文件，与 EMCview 使用的任何其他转换/校正文件相同。

跨阻文件和电缆电流-辐射发射转换文件可以作为 LISN 文件，振幅校正文件或电缆校正文件加载，因为这些文件中都只包含频率和系数，这些系数将被添加或减去从频谱分析仪读取的测量值。

4. 例子

电缆长度为 1m，测量距离为 3m 时，应计算转换系数。频率范围为 150 kHz 至 200 MHz。下表显示了 Excel 计算的结果：

共模传导噪声电流到辐射发射的转换

Common Mode Conducted Noise Current to Radiated Emissions Conversion				
Cable length [m]	Measurement distance [m]	Frequency [MHz]	Wavelength/2 [m]	Conversion coefficient [dB]
1.00	3.00	0.15	999.33	-24.04
		0.25	599.60	-19.60
		0.50	299.80	-13.58
		0.75	199.87	-10.06
		1.00	149.90	-7.56
		1.50	99.93	-4.04
		2.00	74.95	-1.54
		2.50	59.96	0.40
		3.00	49.97	1.98
		4.00	37.48	4.48
		5.00	29.98	6.42
		7.50	19.99	9.94
		10.00	14.99	12.44
		12.50	11.99	14.38
		15.00	9.99	15.96
		17.50	8.57	17.30
		20.00	7.50	18.46
		30.00	5.00	21.98
		40.00	3.75	24.48
		50.00	3.00	26.42
		75.00	2.00	29.94
		100.00	1.50	32.44
		125.00	1.20	34.38
		150.00	1.00	35.96
		175.00	0.86	37.30
		200.00	0.75	38.46

转换系数需要输入到 EMCview 的转换文件中。Andy Edie 的文章引用了一篇论文，该论文建议在最大电缆长度 $\lambda/2$ 时截断转换系数，以提高转换的准确性。因此，当创建 EMCview 转换文件时，转换值将被截断为高于 150MHz 的 35.96dB 的值。

转换系数现在使用纯文本编辑器输入到 EMCview 的增益文件中，并保存为 L1m_R3m_current_to_radiated_conversion.amp

由于总是从测量结果中减去增益，因此需要反转转换因子的符号才能相加。

【应用程序】

软件名称：Tekbox RP-W32-D7

版本=发布

时间：2020 年 6 月 23 日 17:55:55

[General]

Name=L1m_R3m_current_to_radiated_conversion

Freq_Interplot_Mode=log

Level_Interplot_Mode=log

[Data]

Freq1=150000

Lev1=24.04

Freq2=250000

Lev2=19.6

Freq3=500000

Lev3=13.58

Freq4=750000

Lev4=10.06

Freq5=1000000

Lev5=7.56

Freq6=1500000

Lev6=4.04

Freq7=2000000

Lev7=1.54

Freq8=2500000

Lev8=-0.4

Freq9=3000000

Lev9=-1.98

Freq10=4000000

Lev10=-4.48

Freq11=5000000

Lev11=-6.42

Freq12=7500000

Lev12=-9.94

Freq13=10000000

Lev13=-12.44

Freq14=12500000

Lev14=-14.38

Freq15=15000000

Lev15=-15.96

Freq16=17500000

Lev16=-17.3

Freq17=20000000

Lev17=-18.46

Freq18=30000000

Lev18=-21.98

Freq19=40000000

Lev19=-24.48

Freq20=50000000

Lev20=-26.42

Freq21=75000000

Lev21=-29.94

Freq22=100000000

Lev22=-32.44

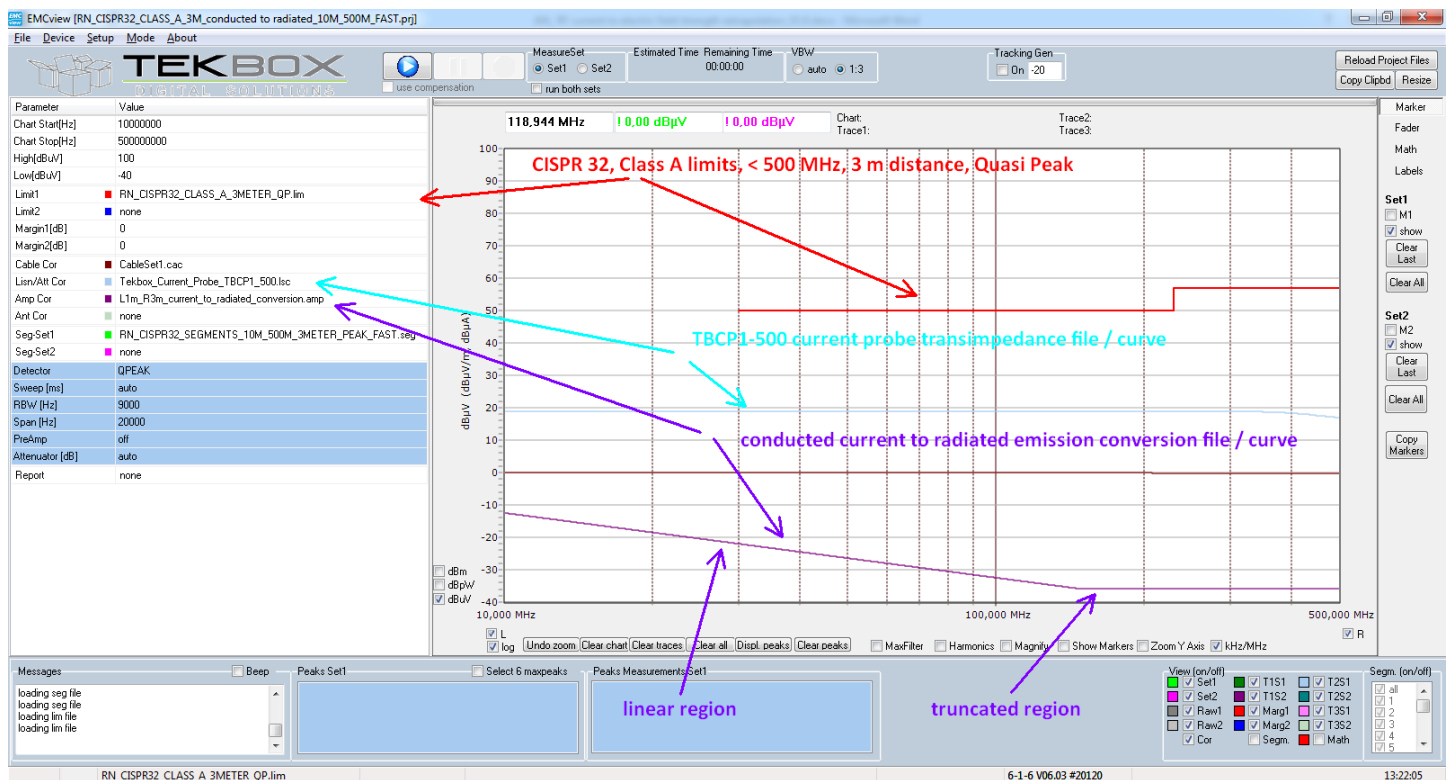
Freq23=125000000

Lev23=-34.38

Freq24=150000000
Lev24=-35.96
Freq25=175000000
Lev25=-35.96
Freq26=200000000
Lev26=-35.96
Freq27=500000000
Lev27=-35.96

转换文件扩展到 500 MHz，以便将其用于 CISPR 32 辐射噪声测试的快速预测试项目，使用峰值检测器从 10 MHz 快速扫描到 500 MHz。然后使用准峰值检测器重新测量任何具有高电平的杂散。转换项是线性的，并且以其对数形式也会在对数网格内产生一条直线。因此，不需要涉及这么多频率点。事实上，具有 3 个频点的转换文件就足够了，如下所示。

EMCview 的屏幕截图显示了相应的项目，该项目旨在进行如上所述的快速峰值扫描。



对于笔记本电脑电源电缆辐射发射的测量示例，使用了以下文件，可以从我们的网站下载：

EMCview 配置文件：

Project file: *RN_CISPR32_CLASS_A_3M_conducted_to_radiated_10M_500M_FAST.prj*

Segment file: *RN_CISPR32_SEGMENTS_10M_500M_3METER_PEAK_FAST.seg*

Limit file: *RN_CISPR32_CLASS_A_3METER_QP.lim*

测量设备特定文件：

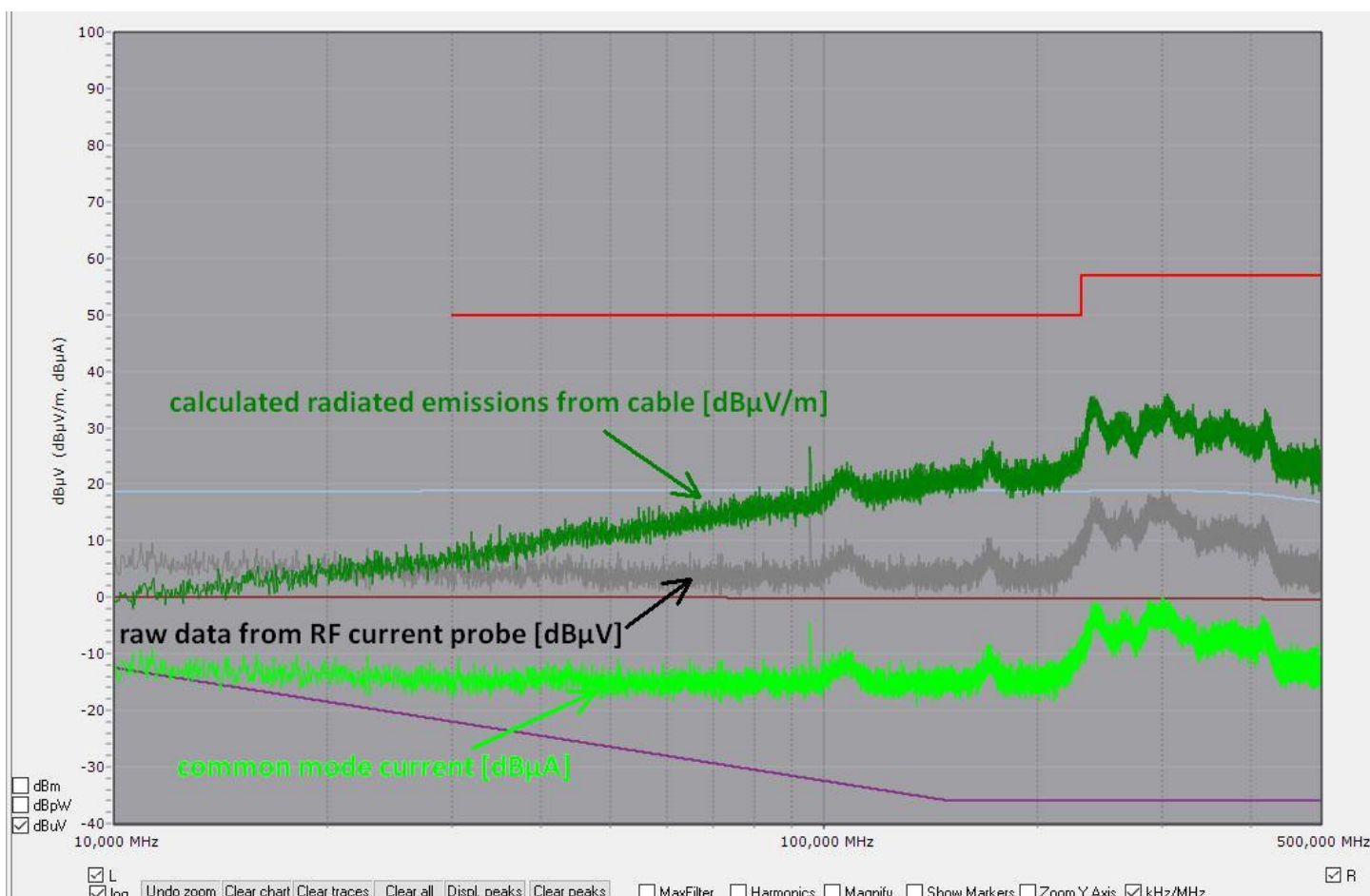
TBCP1-500 传输阻抗文件: *Tekbox_Current_Probe_TBCP1_500.lsc*

同轴电缆损耗文件: *CableSet1.cac*

共模电流到辐射发射转换文件：

1 米电缆长度/3m 测量距离：L1m_R3m_current_to_radiated_conversion.amp

用于计算转换系数的 Excel 文件：CM_current_to_radiated_emission_conversion.xlsx



5. EMCview REV 6.07 引入了简化的解决方案

使用 SW REV 6.07, 计算直接在 EMCview 中实现。为了使用该功能, 需要修改电流探头传输阻抗文件。

将以下文本粘贴到电流探针的传输阻抗文件中, 如下图红色所示:

```
[Application]
Software=TekBox RP-W32-D7
Version=Demo
Date=18.01.2017 10:05:55
```

```
[General]
Name=Tekbox_Current_Probe TBCP1_500_I2E.lsc
Freq_Interplot_Mode=lin
Level_Interplot_Mode=lin
```

[Option I2E]

Length=1

Distance=3

```
[Data]
```

Freq1=30.000
Lev1=-2.34
Freq2=40.000
Lev2=0.07
Freq3=50.000
Lev3=1.93
.....

其中，Length 是以[m]为单位的电缆长度，Distance 是以[m 为单位的测量距离。EMCview 将显示电
缆的计算辐射发射量，而不是射频电流。您可以将文本块永久保留在跨阻抗文件中。为了取消激活计算
并照常显示射频电流，请将“长度”和“距离”参数设置为 0。

6. 历史版本

版本	时间	作者	说明
V1.0	2020.6.23	Mayerhofer	创建文档
V1.1	2020.7.10	Mayerhofer	补充第五章



深圳市国测电子有限公司

深圳市龙华新区梅龙路粤通综合楼E208

电话：0755-85261178 E-mail:ocetest@126.com URL:www.ocetest.com

实时频谱仪 EMC/EMI电磁兼容测试 通用基础测试 音视频测试 电力测试 天线 电磁辐射测量 核辐射测量 辐射防护
求实创新 探索未知 服务未来