



使用 4200A-SCS 参数分析仪内置 FFT 函数计算频谱密度、1/F 噪声、交流阻抗等参数

应用指南



概述

傅立叶分析可以将时域信号与频域信号进行转换。快速傅立叶变换 (FFT) 计算在获取时间相关的直流信号 (如电流、电压) 并将其转换为频率和基于交流的参数, 如电流谱密度、1/f 噪声、热噪声和交流阻抗) 时非常有用。源测量单元 (SMU) 和脉冲测量单元 (PMU) 是 4200A-SCS 参数分析仪的模块, 用于在时域测量和加载输出电流或电压。仪器对这些基于时间的测量可以通过 FFT 计算转换为频域的参数。

从 Clarius+ V1.9 软件发布开始, 4200A-SCS 参数分析仪加载了 FFT 分析功能, 能够自动对时域测量进行基于频率的计算, 而无需下载数据并在单独的工具中

执行分析。并且能够更快地获得重要的测试结果。本文给出了这些功能的说明以及 FFT 参数提取的一些典型案例, 包括使用 SMU 和 PMU 进行电流谱密度测量, 电阻热噪声测量以及 RC 电路的交流阻抗计算。

Clarius 公式编辑器中的 FFT 相关功能

Clarius 软件有一个内置的公式编辑器, 能够对测试数据和其他计算结果进行数据计算。公式编辑器提供了各种计算函数、常用数学运算符和常用常量。从 Clarius V1.9 版本开始, FFT 公式已添加到编辑器中。

图 1 显示了带有 FFT 的函数编辑器的截图。

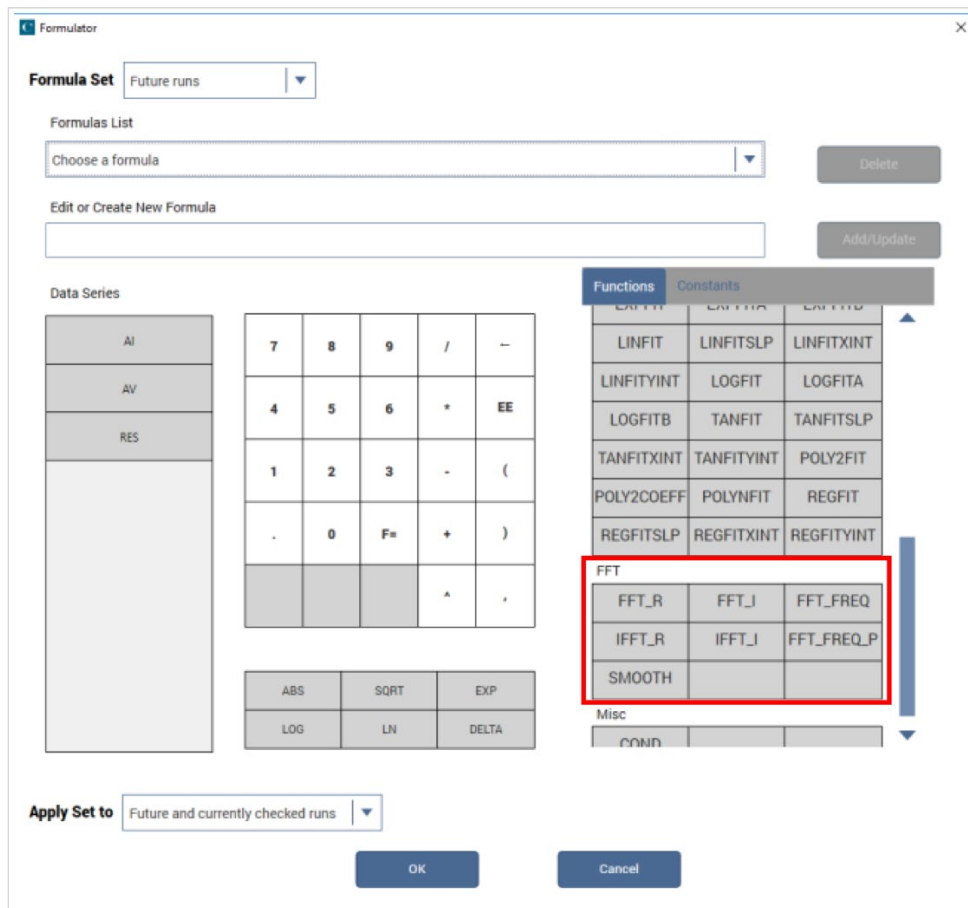


图 1. 在 Clarius 软件的函数编辑器中的 FFT 功能

表 1 列出了内置的 FFT 函数及其描述。这些方程对输入数组的实部和虚部行 FFT 变换或 FFT 逆变换，然后获得对应的输出实部或虚部分量。其中两个公式从输入时间数组返回频率数组。平滑函数通过将高频分量归零，对输入数组进行数字滤波。

Formula	Description
FFT_R(Real, Imag)	Performs an FFT on the provided real and imaginary input arrays and then outputs the real components of the calculated FFT.
FFT_I(Real, Imag)	Performs an FFT on the provided real and imaginary input arrays and then outputs the imaginary components of the calculated FFT.
IFFT_R(Real, Imag)	Performs an inverse FFT on the provided input arrays and then returns the real parts scaled by 1/N where N is the number of samples.
IFFT_I(Real, Imag)	Performs an inverse FFT on the provided input arrays and then returns the imaginary parts scaled by 1/N where N is the number of samples.
FFT_FREQ(Time, Tolerance)	From an input time array, returns an array of frequencies that correspond to the frequencies of the FFT output
FFT_FREQ_P(Time, Tolerance)	From an input time array, returns an array of positive only frequencies that correspond to the frequencies of the FFT output
Smooth(X, Percent)	Performs digital filtering on an input array by zeroing out high frequency components.

表 1. FFT 公式和描述

在使用 FFT 公式时，最好以均匀间隔的时间间隔获取数据。当将时间数组转换为频率数组时，FFT_Freq 函数允许用户输入一个容差参数，以确定连续间隔的时间数据是否均匀间隔。如果输入时间数组中两点之间的差值（以百分比表示）大于容差值，则会将“#REF”返回到 Sheet。

计算出的实部和虚部数据数组的输出数据量将是 2 的幂次方。因此，理想的采集数据点数应该是 2 的幂次方，比如 64、128、256、512、1024 等。如果数据点的数量不是 2 的幂次方，则返回的点数将被减少，使其等于 2 的幂次方。

使用 FFT 测试示例

Clarius 库中的多个测试，包含了使用 FFT 公式将基于时间的电流或电压测量转换为频率相关参数的示例。这些例子包括 SMU 电流谱密度、电阻器的热噪声、PMU 电流谱密度和 RC 电路的交流阻抗。

SMU 电流谱密度与频率测量

Clarius 库中的 SMU 电流谱密度 (smu-isd) 测试，使用 SMU 进行的随时间变化的直流电流测量，从中得出电流谱密度与频率的相关函数。根据设备和应用的不同，该测试可能能够用于导出包括设备的电流噪声，1/f 噪声。

使用 4200A-SCS 参数分析仪内置 FFT 函数计算频谱密度、 1/F 噪声、交流阻抗等参数

在本测试中，4201-SMU 使用 Normal 速度模式，在三个不同的电流范围 (1mA, 1μA 和 1nA) 下，测试开路的直流电流与时间关系。SMU 的 Force HI 和 Sense HI 端子上需要加盖金属帽。FFT 函数将会导出电流、功率、频率、带宽和电流谱密度的实分量和虚分量，如图 2 所示。

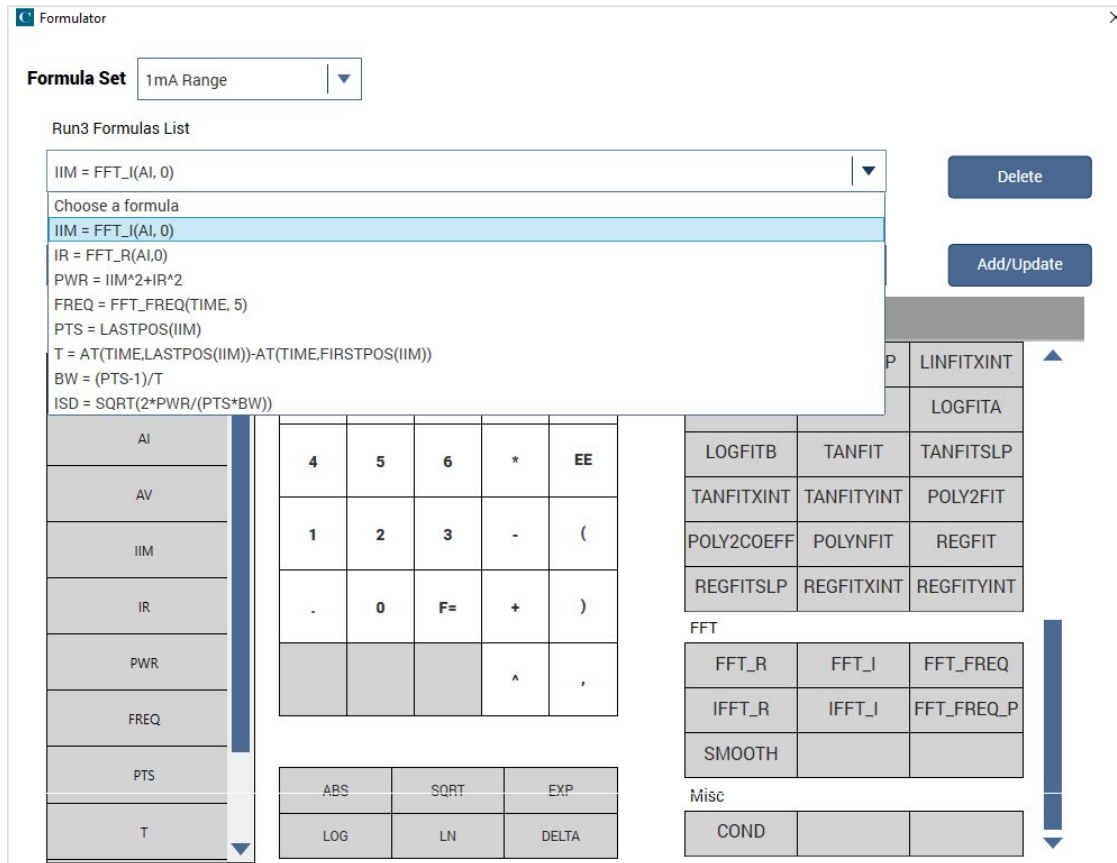


图 2. smu-isd 测试公式

使用 4200A-SCS 参数分析仪内置 FFT 函数计算频谱密度、 1/F 噪声、交流阻抗等参数

三次测试运行得到的电流谱密度与频率曲线如图 3 所示。因为测量的是用开路的电流，所以基本上是推导出来的是 SMU 的本底噪声。频率会根据定时设置而发生变化。

这些图表显示的是电流噪声谱密度，以 A/sqrt(Hz) 为单位，而不是以单次，安培为单位，直流测量的噪声。从快速傅立叶变换的数学表达式来看，电流频谱密度在这里定义为：

$$ISD = \sqrt{2 * PWR / (PTS * BW)}$$

其中，

PWR 是电流幅度的平方，或者 $PWR = \text{Im}(I)^2 + \text{Re}(I)^2$

BW 是时间采样的带宽

PTS 是点数，它应该是 2 的幂次方

带宽 (BW) 定义为 $1/dt$ ，其中 dt 为两次测量之间的时间间隔，假设所有测量之间的时间间隔为恒定值。

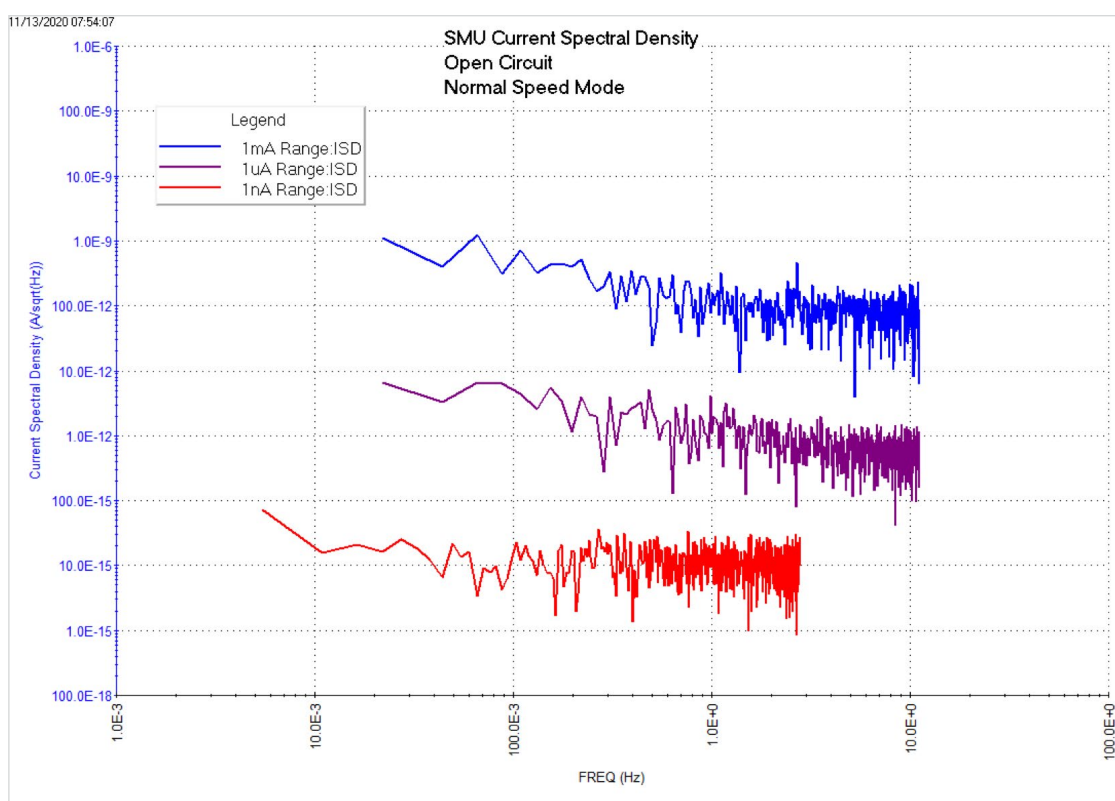


图 3. SMU 不同档位的电流谱密度与频率

使用 4200A-SCS 参数分析仪内置 FFT 函数计算频谱密度、1/F 噪声、交流阻抗等参数

测量速度在测试设置窗口中配置。虽然不能直接设置测量时间间隔，但测量时间、带宽和测试频率都是已知的，并会返回到列表中。在设置 speed 模式时，通常需要在每个单次直流测量的速度和噪声之间进行权衡。测量速度越快，噪声就越大。对于总测试时间较长的测量，带宽较小，因此噪声也较小。

本测试中的测量是在固定的电流量程上进行的。使用固定量程，而不是自动量程，这对于保持每个读数的测量时间恒定是非常重要的，这是 FFT 计算所需要的。

之所以使用 sampling 测试模式，是因为加载了一个恒定的偏置。在该模式下，必须输入读数的个数。尽管在使用 FFT 计算时需要大量的读数，但这并不实用。

在这个测试中，读取了 1024 个读数，因为 1024 是 2 的幂次方。表 2 列出了 SMU 电流谱密度测试的公式。

Formula	Description
IIM	Imaginary current array: $IIM=FFT_I(AI,0)$
IR	Real current array: $IR=FFT_R(AI,0)$
PWR	Power: $PWR=IIM^2 + IR^2$
FREQ	Frequency array: $FREQ=FFT_FREQ(TIME, 5)$
PTS	Total number of points (of FFT calculated data): $PTS=LASTPOS(IIM)$
T	Total test time (of FFT calculated data): $T=AT(TIME, LASTPOS(IIM))-AT(TIME, FIRSTPOS(IIM))$
BW	Bandwidth: $BW=(PTS-1)/T$
ISD	Current spectral density: $ISD=SQRT(2*PWR/(PTS*BW))$

表 2. SMU 电流谱密度测试公式

电阻的热噪声

电阻的热噪声或约翰逊噪声可以通过电阻上的直流电压与时间的测量来计算。测试库中的 *resistor-noise* 测试项测量 0A 的直流电压与时间的函数，并计算在 1GΩ 电阻上的实部和虚部的电压数组、功率、频率、带宽和电压谱密度。电阻于 SMU1 和 GNDU 之间。一旦执行测试，热噪声 (VSD) 被绘制为频率的函数，如图 4 所示。

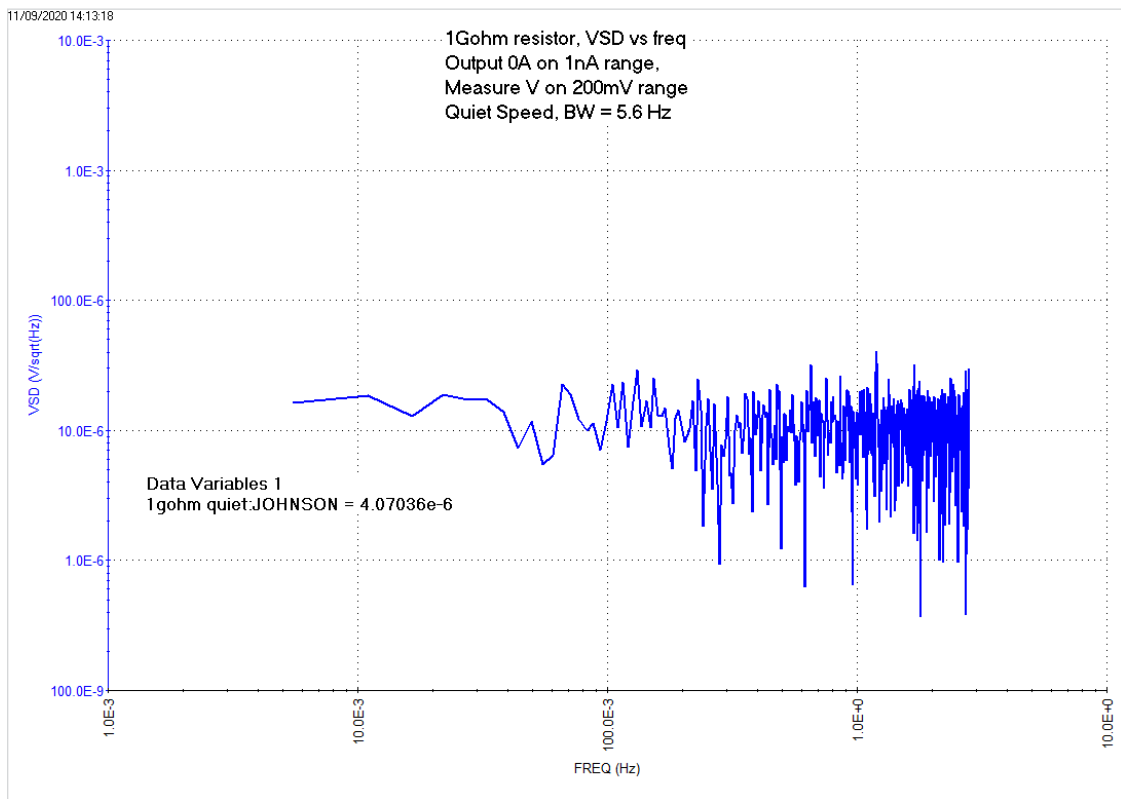


图 4. 1GΩ 电阻的热噪声

在这个测试中，直流电压测量是在 200mV 量程上进行的，在 1nA 量程上施加 0A。计算 1GΩ 电阻的噪声电流和约翰逊噪声。1GΩ 电阻的热噪声理论计算值约为 4E-6 Vrms，使用公式： $v_n = \sqrt{4 * k * TEMP * 1e9}$ 。

电阻器热功率噪声的实际公式为：

$$P = 4 * k * TEMP * BW$$

其中，

k 为玻尔兹曼常数，1.38 E-23 J/K

TEMP 为环境温度 (K)

BW 为带宽 (Hz)

表 3 列出了 resistor-noise 测试的公式描述。时间、量程、点数和其他设置的信息与导出 SMU 电流谱密度的描述类似。

Formula	Description
DELTAT	Time per reading: DELTAT=DELTA(TIME)
VR	Real voltage array: VR=FFT_R(AV,0)
VIM	Imaginary voltage array: VIM=FFT_I(AV,0)
PWR	Power: PWR=VR^2 + VIM^2
FREQ	Frequency array: FREQ=FFT_FREQ(TIME, 5)
PTS	Total number of points: PTS=LASTPOS(VR)
JOHNSON	Thermal noise for 1E9 resistor: SQRT(4*K*300*1E9)
T	Total test time: T=AT(TIME, LASTPOS(VR))-AT(TIME, FIRSTPOS(VR))
BW	Bandwidth: BW=(PTS-1)/T
VSD	Voltage spectral density: VSD=SQRT(2*PWR/(PTS*BW))
IRMS	Current noise (for 1E9 resistor) IRMS=VSD/1E9

表 3. 电阻热噪声测试相关公式

使用 PMU 获取电流谱密度

和 SMU 一样，4225-PMU 的电流谱密度也可以通过电流和时间的测量以及 FFT 计算得出。在测试库中可以找到 *pmu-isd*，在 100 μA 和 100 nA 范围内测试计算 PMU 开路的电流谱密度。这个测试是通过使用 *PMU_freq_time_ulib* 用户库中的 *PMU_sampleRate* 用户模块生成的。使用 PMU 测试，我们可以在 CH1 和 CH2 上加载电压偏置，选择 CH2 的电流范围，并指定总测试时间和采样率。*pmu-isd* 测试的配置如图 5 所示。

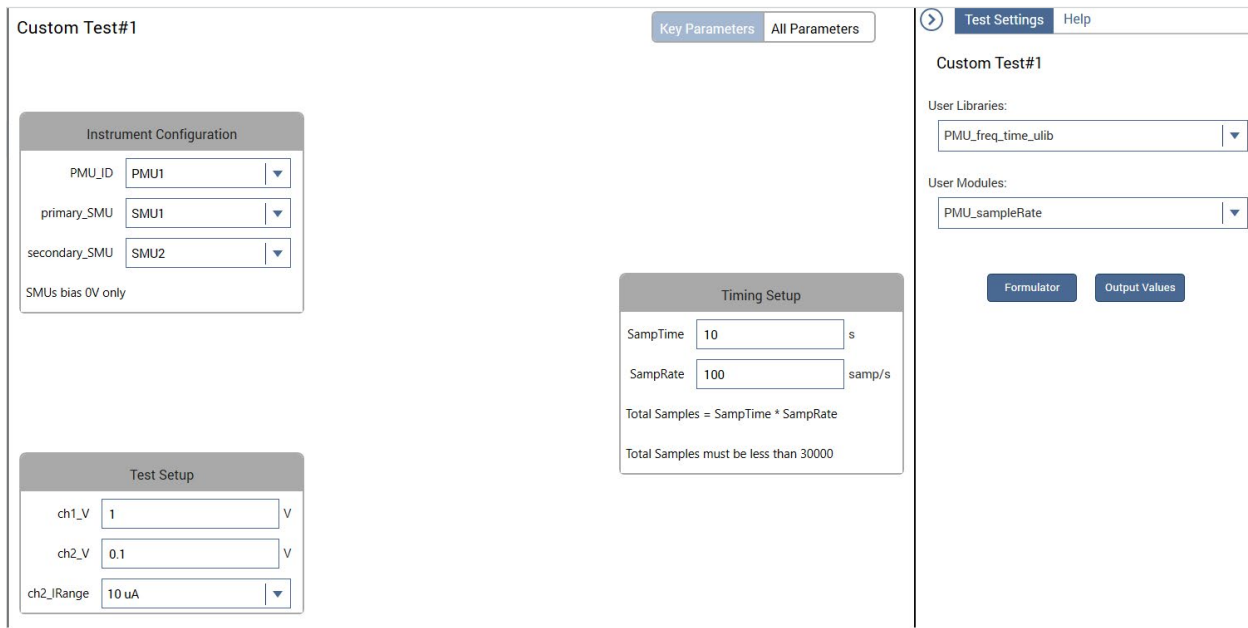


图 5. *pmu-isd* 测试配置视图

与 SMU 电流谱密度测试一样，公式编辑器有几个公式可以推导出测试电流的带宽、实部分量和虚部分量、功率、频率和电流谱密度。图 6 显示了 100μA 和 100 nA 档位下电流谱密度与频率的函数曲线。由于数据是用开路采集的，因此这些是在固定电流量程上以可选采样率测量到的 PMU 本底噪声。

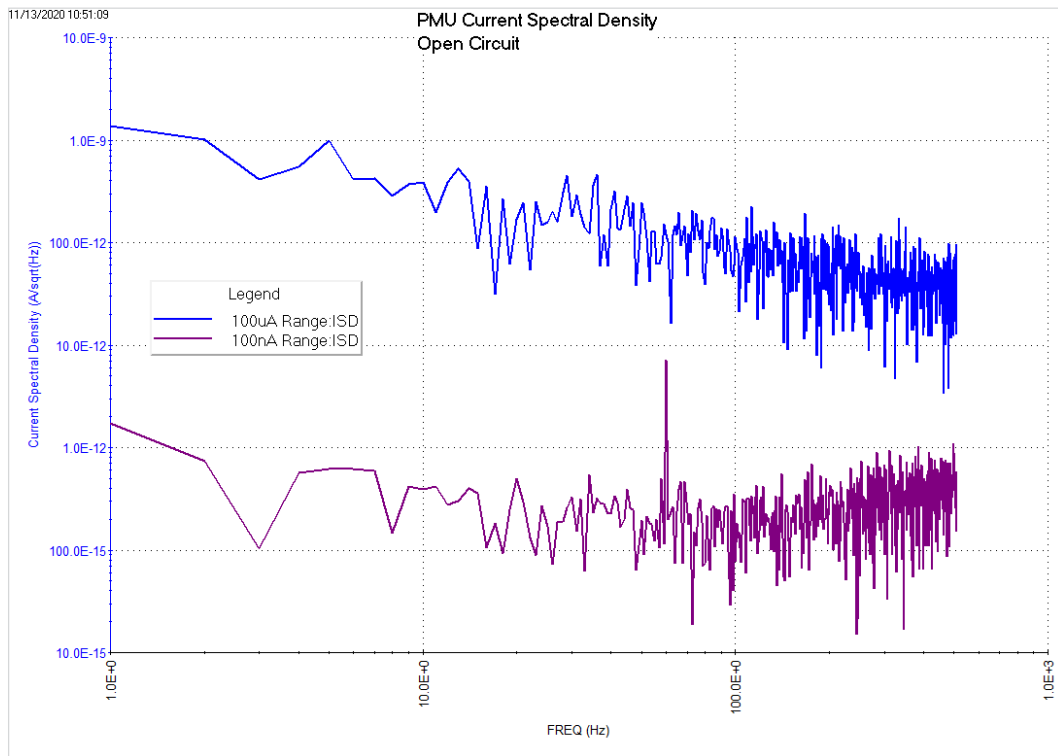


图 6. PMU 电流谱密度

在 configure 视图中，输入总测试时间和采样率。点数等于总测试时间乘以采样率。选择输入参数，由于将对数据执行 FFT 计算，使点数总数为 2 的幂次方。为了获得最佳的结果，至少应该使用 20 个点或更多。对于本次测试，带宽设置为 1024Hz。

Formula	Description
IIM	Imaginary current array on CH2: $IIM=FFT_I(MEASI_CH2,0)$
IR	Real current array on CH2: $IR=FFT_R(MEASI_CH2,0)$
PWR	Power: $PWR=IIM^2 + IR^2$
FREQ	Frequency array: $FREQ=FFT_FREQ(TIMEOUTPUT, 20)$
PTS	Total number of points (on FFT calculated data): $PTS=LASTPOS(IIM)$
T	Total test time (on FFT calculated data): $T=AT(TIMEOUTPUT, LASTPOS(IIM)) - AT(TIMEOUTPUT, FIRSTPOS(IIM))$
BW	Bandwidth: $BW=(PTS-1)/T$
ISD	Current spectral density: $ISD=SQRT(2*PWR/(PTS*BW))$

表 4. PMU 谱密度测试相关公式

测定 RC 串联电路的交流阻抗

使用双通道 4225-PMU 结合内置的 FFT 计算公式，可以提取 RC 电路的 AC 阻抗参数。PMU 在时域测量电流和电压，Clarius 公式编辑器中的 FFT 通过计算将这些测试结果转换为频域的相关参数。

例如，可以在 PMU 的 CH1 和 CH2 之间连接串联 RC 电路，如图 7 所示。CH1 输出周期性脉冲波形 (ACV)，CH2 测量产生的电流 (imeas)。通过 FFT 计算得到测试电路的 AC 阻抗参数，如串联电阻 (R_s) 和电抗 (X_s)，以及阻抗的实部和虚部。电容 (C_s) 和耗散因子 (D) 可以用 R_s 和 X_s 推导出来。

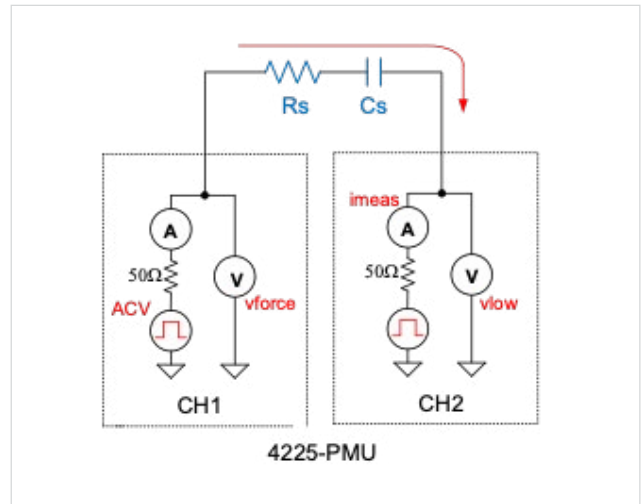


图 7. 用于测量串联 RC 电路 AC 阻抗的 PMU 连接

R-C Circuit AC Impedance Calculations (rs-cs-ac-impedance) 测试项，包含 RC 串联电路的 AC 参数。

在这个测试示例中，PMU 的 CH1 输出一个具有指定幅度和测试频率的脉冲波形。还指定了周期数和每个周期上的测试点数。在公式编辑器中配置计算，以提取 100 kΩ，10 nF，R-C 串联电路的 AC 阻抗参数。此测试的配置如图 8 所示。

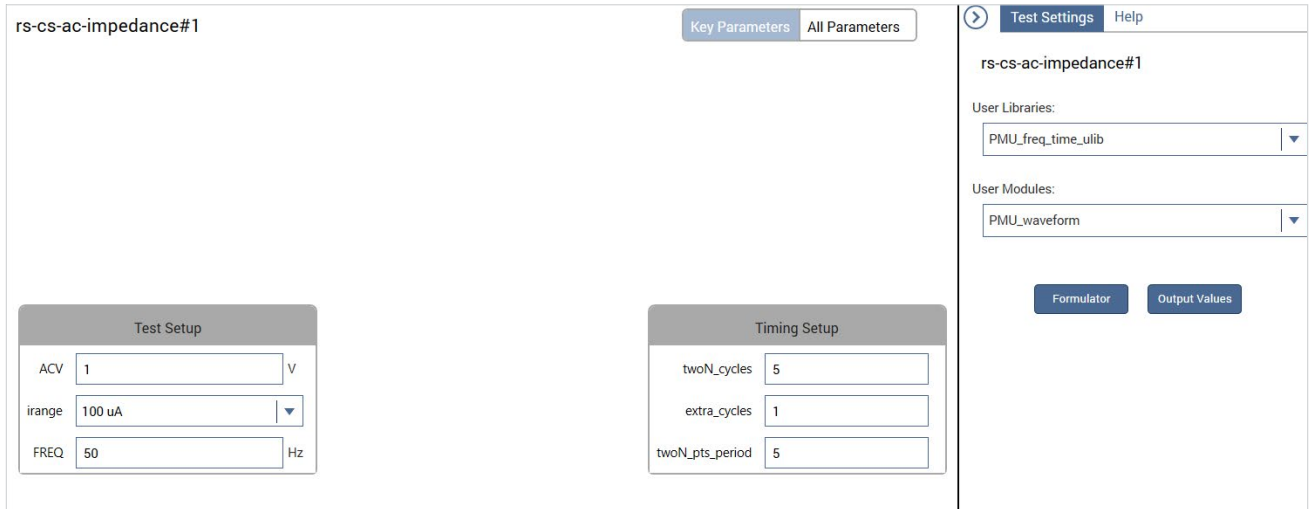


图 8. *rs-cs-ac-impedance* 测试的配置视图

使用 4200A-SCS 参数分析仪内置 FFT 函数计算频谱密度、 1/F 噪声、交流阻抗等参数

在此测试中，在配置视图输入 CH1 的电压脉冲幅值 (ACV)、CH2 的电流测量范围 (irange)、测试频率 (FREQ)、 2^n 个周期和 2^n 个点。表 5 列出了本次测试的输入参数。基于这些输入参数，PMU 构建具有电流测量值的电压段波形。

Name	Values	Description
ACV	0.02V to 5V (0.1V default)	Magnitude of voltage pulses from CH1
irange	All current ranges (for 10V range)	Current measurement range of CH2
FREQ	1e-2 to 1e3	Test frequency
twoN_cycles	N = 3 to 6 (default 5)	2^n number of cycles
extra_cycles	1-5	Additional cycles that occur before the actual test to exclude data transients and to allow for measurements to settle. These measurements are not returned to the Sheet.
twoN_pts_period	N = 3 to 6 (default 5)	2^n points per period

表 5. *rs-cs-ac-impedance* 测试输入参数

在对周期信号进行 FFT 计算时，通常需要大量的周期，然而，获取大量数据通常是不现实的。为了确保足够的精度，至少需要测试 $32(2^5)$ 个周期，每个周期有 $32(2^5)$ 个数据点。在 *rs-cs-ac-impedance* 测试中，周期数和每个周期的点数都是 32。

如果想同时提取串联电阻 (Rs) 和电容 (Cs)，最好选择近似为： $F = 1/RC$ 的测试频率。不过，这可能有些实验。通常在测量电容或电阻之间需要进行权衡。更精确的电容测量需要更小的系数 D， $D < 0.1$ ，而更精确的电阻测量需要更高的系数 D， $D > 1$ 。当需要足够的精度提取同时获取 Rs 和 Cs 时，选择 $F=1/RC$ 提供了一个权衡方案。

一旦执行测试，返回到 Sheet 相等的点数可以通过以下公式计算：

$$\text{每次测试的总点数} = \text{循环次数} \times \text{每个循环的点数}$$

对于本次测试，总点数 = $32 \times 32 = 1024$ 。CH1 上的测量脉冲电压 (vforce)，CH2 的电压 (vlow)，时间和 CH2 上的测量电流 (imeas) 的数组返回到表中。输出参数的描述参考在表 6。

Name	Description
vforce	Array of measured voltages (CH1)
vlow	Array of measured voltages (CH2)
time	Array of time measurements
imeas	Array of resulting current (CH2)
usedFreq	Test frequency

表 6. *rs-cs-ac-impedance* 测试输出参数

使用 4200A-SCS 参数分析仪内置 FFT 函数计算频谱密度、 1/F 噪声、交流阻抗等参数

从返回值中，可以提取许多 AC 参数。对于本次测试，RC 串联电路的所有计算参数如表 7 所示。

Formula Name	Description
IREAL	The real part of the FFT of the measured current: $IREAL = FFT_R(IMEAS, 0)$
IIMAG	The imaginary part of the FFT of the measured current: $IIMAG = FFT_I(IMEAS, 0)$
VREAL	The real part of the FFT of the forced voltage: $VREAL = FFT_R(VFORCE, 0)$
VIMG	The imaginary part of the FFT of the forced voltage: $VIMG = FFT_I(VFORCE, 0)$
FREQS	The array of frequencies calculated from the time array: $FREQS = FFT_FREQ(TIME, 20)$
VPW	The array of the square of the amplitude of the FFT voltage $VPW = (VREAL^2 + VIMG^2)$
MAXPS	Position of the main voltage harmonic $MAXPS = MAXPOS(VPW)$
IPWR	The array of the square of the amplitude of the FFT current $IPWR = (IREAL^2 + IIMAG^2)$
RS	Series Resistance: $RS = -(VREAL * IREAL + VIMG * IIMAG) / IPWR$
XS	Reactance: $XS = -(VIMG * IREAL - VREAL * IIMAG) / IPWR$
D	Dissipation factor: $D = RS / XS$
CS	Series capacitance $CS = -1 / (6.28 * XS * FREQS)$
CS_AT_FRQ	Series capacitance at main harmonic frequency $CS_AT_FRQ = AT(CS, MAXPS)$
RS_AT_FRQ	Series resistance at main harmonic frequency $RS_AT_FRQ = AT(RS, MAXPS)$
D_AT_FRQ	Dissipation factor at main harmonic frequency $D_AT_FRQ = AT(D, MAXPS)$

表 7. 计算参数

使用 4200A-SCS 参数分析仪内置 FFT 函数计算频谱密度、 1/F 噪声、交流阻抗等参数

所有输出和计算参数也返回到列表中,并在 Analyze 视图中绘制图形,如图 9 所示。数据可以在时域和频域上绘制。左图为电压和电流随时间变化的函数曲线。右图为电压 (VPWR) 和电流 (IPWR) 幅值的平方的数组与频率的函数曲线。导出主谐波频率处的 Cs、Rs 和 D,并出现在表格的最后三列中。

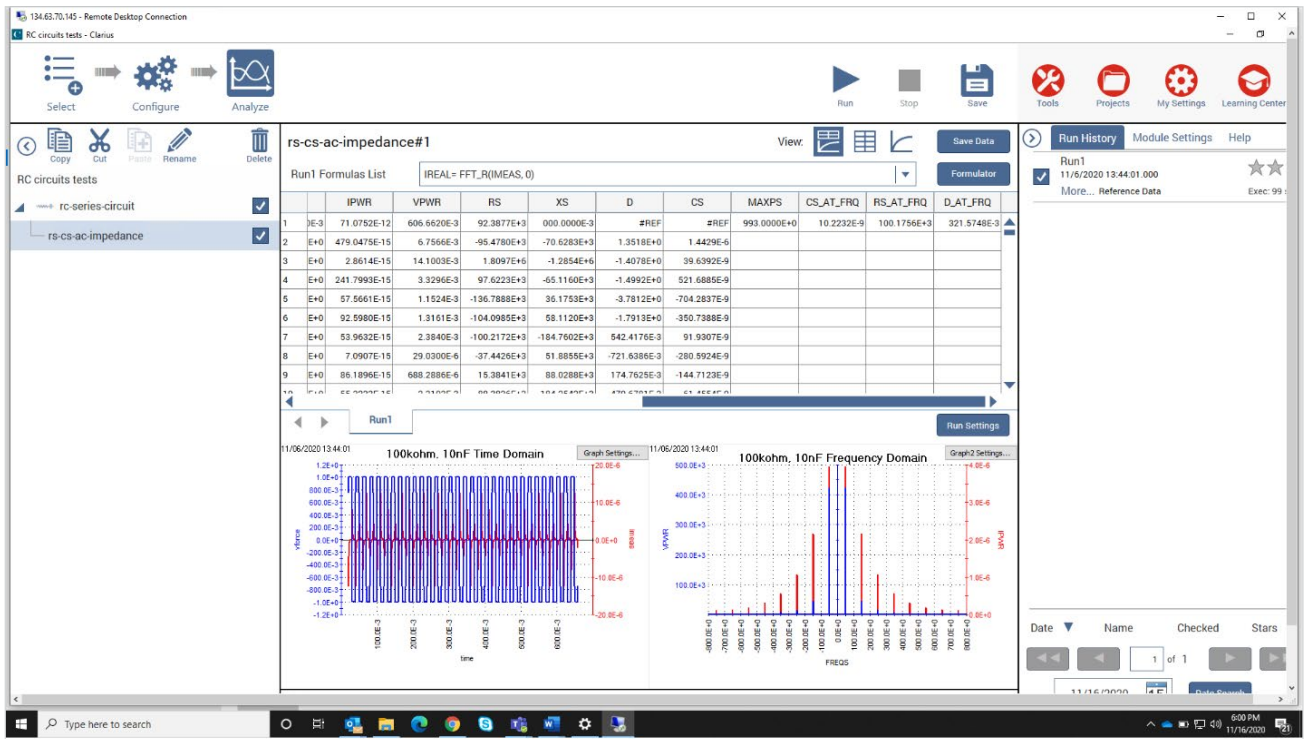


图 9. 将数据在时域和频域进行绘制

rs-cs-ac-impedance 测试项使用 *PMU_freq_time_ulib* 用户库中的 *pmu_waveform* 用户模块。此用户模块还可用于执行其他需要的特定测试频率脉冲波形的测试。

结论

4200A-SCS 参数分析仪对直流电流和电压测量执行 FFT 计算的能力使许多 AC 参数的提取成为可能,包括电流谱密度、热噪声和 AC 阻抗。这使得我们能够更快地获得测试结果,因为不再需要单独的工具来执行 FFT 分析。



泰克官方微信

如需所有最新配套资料，请立即与泰克本地代表联系！

或登录泰克公司中文网站：www.tek.com.cn

泰克中国客户服务中心全国热线：400-820-5835

泰克科技(中国)有限公司
上海市浦东新区川桥路1227号
邮编：201206
电话：(86 21) 5031 2000
传真：(86 21) 5899 3156

泰克北京办事处
北京市朝阳区酒仙桥路6号院
电子城·国际电子总部二期
七号楼2层203单元
邮编：100015
电话：(86 10) 5795 0700
传真：(86 10) 6235 1236

泰克上海办事处
上海市长宁区福泉北路518号
9座5楼
邮编：200335
电话：(86 21) 3397 0800
传真：(86 21) 6289 7267

泰克深圳办事处
深圳市深南东路5002号
信兴广场地王商业大厦3001-3002室
邮编：518008
电话：(86 755) 8246 0909
传真：(86 755) 8246 1539

泰克成都办事处
成都市锦江区三色路38号
博瑞创意成都B座1604
邮编：610063
电话：(86 28) 8620 3028
传真：(86 28) 8527 0053

泰克西安办事处
西安市二环南路西段88号
老三届世纪星大厦26层L座
邮编：710065
电话：(86 29) 8836 0984
传真：(86 29) 8721 8549

泰克武汉办事处
武汉市洪山区珞喻路726号
华美达大酒店718室
邮编：430074
电话：(86 27) 8781 2760

泰克香港办事处
香港九龙尖沙咀弥敦道132号
美丽华大厦808-809室
电话：(852) 3168 6695
传真：(852) 2598 6260

KEITHLEY
A Tektronix Company

更多宝贵资源，敬请登录：WWW.TEK.COM.CN

©泰克公司版权所有，侵权必究。泰克产品受到已经签发及正在申请的美国专利和外国专利保护。本文中的信息代替所有以前出版的材料中的信息。本文中的技术数据和价格如有变更，恕不另行通告。TEKTRONIX 和 TEK 是泰克公司的注册商标。本文中提到的所有其它商号均为各自公司的服务标志、商标或注册商标。

112420 SBG 1KC-73767-0

